

気泡モルタルの安定性と応用に関する研究

1998年 3月

後 藤 年 芳

目 次

第1章 序 論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究目的と方法	2
1.3 論文の構成	4
第1章の参考文献	4
第2章 気泡モルタルに関連する既往の研究	6
2.1 概 論	6
2.2 気泡ミルクおよび気泡モルタルの概要	6
2.2.1 使用材料	6
2.2.2 気泡ミルクおよび気泡モルタルの製造	8
2.2.3 気泡モルタルの特徴と用途	8
2.3 気泡ミルクおよび気泡モルタルに関する研究	9
2.3.1 起泡剤特性	10
2.3.2 配合と強度特性	10
2.3.3 耐久性	16
2.3.4 動的特性	17
2.3.5 三軸圧縮特性	18
2.3.6 曲げ強度と補強	20
2.3.7 引張強度	22
2.3.8 その他の特性	22
2.3.9 現場施工による知見	23
2.4 セメントミルクおよびコンクリートの レオロジー特性と材料分離に関する研究	24
2.4.1 セメントミルクのレオロジー特性に関する研究	24
2.4.2 コンクリートの材料分離に関する研究	27
2.5 まとめと検討課題	32
第2章の参考文献	33
第3章 セメントミルクおよび気泡モルタルのレオロジー特性と材料分離	37
3.1 概 論	37
3.2 セメントミルクおよび気泡モルタルのレオロジー特性	37
3.2.1 実験概要	37
3.2.2 塑性粘度	40
3.2.3 降伏値	43
3.2.4 フロー値	43
3.2.5 降伏値と塑性粘度の関係	47
3.2.6 気泡と砂粒子の分離抵抗性	48
3.2.7 まとめ	51

3. 3	セメントミルクおよび気泡ミルクの ブリーディング特性	52
3. 3. 1	実験概要	52
3. 3. 2	水セメント比とファンネル粘度	54
3. 3. 3	水セメント比とブリーディング	54
3. 3. 4	硬化体の水セメント比	56
3. 3. 5	圧縮強度	57
3. 3. 6	まとめ	60
3. 4	気泡モルタルの材料分離	62
3. 4. 1	実験概要	62
3. 4. 2	静置時の材料分離	64
3. 4. 3	加圧、減圧繰返し時の材料分離	65
3. 4. 4	振動下での材料分離	67
3. 4. 5	大型円柱供試体打設時の材料分離	68
3. 4. 6	まとめ	69
3. 5	第3章の結論	70
	第3章の参考文献	72
第4章	気泡ミルクおよび気泡モルタルの各種物性に関する研究	74
4. 1	概 論	74
4. 1	気泡ミルクの硬化体の強度特性	74
4. 1. 1	実験概要	74
4. 1. 2	配合条件と圧縮強度の関係	75
4. 2	鋳物質微粉末を用いた気泡モルタルの強度特性	79
4. 2. 1	実験概要	79
4. 2. 2	碎石粉による砂の粒度改善	81
4. 2. 3	微粉末を添加による強度調整	82
4. 2. 4	まとめ	85
4. 3	気泡モルタルの各種物性試験	86
4. 3. 1	実験概要	86
4. 3. 2	フレッシュ気泡モルタルの性状	91
4. 3. 3	気泡モルタル中の気泡径の分布	91
4. 3. 4	養生条件と強度発現	95
4. 3. 5	せん断特性	100
4. 3. 6	吸水特性	101
4. 3. 7	繰返し载荷特性	103
4. 3. 8	乾湿繰返し抵抗性	105
4. 3. 9	凍結融解抵抗性	106
4. 3. 10	透水性	107
4. 3. 11	熱特性	108

4.3.12 乾燥収縮	111
4.3.13 まとめ	113
4.4 第4章の結論	116
4章の参考文献	118
第5章 配合設計法の提案	120
5.1 概論	120
5.2 気泡ミルクおよび気泡モルタルの フロー値の範囲設定と分離抵抗性	120
5.3 気泡ミルクおよび気泡モルタルの配合設計	122
5.3.1 気泡ミルクの配合設計	123
5.3.2 気泡モルタルの配合設計	125
第6章 施工時の気泡ミルクおよび気泡モルタルの品質と挙動	130
6.1 概論	130
6.2 気泡モルタルの圧送性に関する検討	130
6.2.1 実験概要	130
6.2.2 圧送時の気泡モルタルの品質	133
6.2.3 気泡モルタルの圧送時の管内圧力	134
6.3 気泡ミルク施工時の品質変動と施工後の挙動	137
6.3.1 調査概要	137
6.3.2 施工時の品質変動	138
6.3.3 硬化した盛土の品質	141
6.3.4 硬化時の盛土内温度	143
6.4 気泡モルタル盛土路体の挙動	145
6.4.1 盛土の概要	145
6.4.2 調査概要	146
6.4.3 打設時の挙動	148
6.4.4 計測値の経時変化	150
6.4.5 列車走行時の挙動	154
6.4.6 課題	155
6.5 第6章の結論	156
第6章参考文献	158
第7章 結論	159
発表論文リスト	164
謝辞	166

第1章 序 論

1. 1	研究の背景	1
1. 2	研究目的と方法	2
1. 3	論文の構成	4
	第1章の参考文献		

第1章 序 論

1. 1 研究の背景

最近、我が国の緊迫した財政状況や、諸外国における建設コストと我が国におけるそれとを対比すると建設工事の計画から施工、維持管理にわたる全般においてコスト低減が強く要求されてきている。この要求を実現するためには新材料や新工法の開発や導入が一段と重要になってくる。このような社会情勢を背景に各方面でコスト低減の努力がなされている。気泡モルタルを土工事の材料として用いることは、施工性を改善し、かつ関連構造物の簡略化を図ることができるため、トータルコストの低減を実現する有力な手段の一つと考えられる。

気泡を混合したセメントまたは石灰系の硬化物には気泡コンクリートがありその歴史は古くHofman（ドイツ）が1889年に塩酸と炭酸ナトリウムを反応させて発生するガスを用いて製造する方法の特許を取得したのが最初である¹⁻¹⁾。アルミ粉末に代表される発泡剤を用いた発泡コンクリートと起泡剤によってあらかじめ製造した気泡を混入する気泡コンクリートとが開発されその後この種の硬化体の実用化に至った。オートクレーブ養生した気泡コンクリート（Autoclaved Light-weight Concrete）は1920年代から1930年代にかけてスウェーデンで開発され、我が国には1962年頃から技術導入され二次製品として普及してきた¹⁻¹⁾。場所打ちの発泡コンクリートとしては1954年に米国から技術導入されたのサーモコンがあり、50～70kgf/cm²の強度を有するコンクリートとして4階以下の建築物に用いられた¹⁻²⁾。

一方、気泡モルタルは先述の起泡コンクリートの一種で、あらかじめ製造した気泡とセメントモルタルやセメントミルクを混合した軽量の硬化体で、米国で1930年代にマール社が起泡剤を開発して以来その実用化が始まっている¹⁻³⁾。我が国には1961年頃に米国から導入され、当初は建築物の防水下地や床の嵩上げなどに使用されていたが¹⁻⁴⁾、東海道新幹線の建設時にはトンネルの裏込め材料として使われ、その後空洞の充填や埋め戻しなどの用途にも使われてきた。やや遅れて国産の起泡剤（合成樹脂系界面活性剤：フォーミックス）も開発された¹⁻⁵⁾。

気泡モルタルは、1987年には横浜市内の道路橋架換工事において仮設道路盛土に使用され¹⁻⁶⁾ 1-7)、翌1988年には岩国市で工事用道路の盛土材として用いられている¹⁻⁸⁾。このような実績により、軽量であるため地盤や土留め壁への負担が小さいこと、ポンプ圧送による打設が可能で施工性がよいことなどが確認された。そのほかに軽量性を生かした地すべり地での盛土工法、道路トンネル坑口盛土に用いられるなどの事例もある¹⁻⁹⁾。このような実績をふまえ、軽量盛土工法としての実用化を目指した本格的な研究が開始されている。

一方、埋立て地や軟弱地盤上の盛土地盤における杭基礎構造物では、地盤の沈下によって基礎下部に空洞が生じる現象が明らかになってきている。このような場合に用いる空洞充填材料においても流動性および軽量性が必要であること、さらに沈下が生じた際に杭に充填材の荷重が加わる恐れがあるので杭に付着しないよう低強度の材料が必要とされ開発され利用されてきている¹⁻¹⁰⁾ 1-11)。

さらに、気泡を多量に含み熱伝導率が低いことから断熱材として温室土間基礎に用いられた事例¹⁻¹²⁾や充腹アーチ橋の中詰め材として用いられ、従来の土の締固めに比べて施工性の点で大幅な改善ができた事例も報告されている¹⁻¹³⁾。

また、米国のボストン港では松杭により支持された栈橋上の建築物を保存利用する工事においては沈下を抑制するために埋立て土砂を取り除いて気泡ミルクを打設する工事¹⁻¹⁴⁾や、下水管の再生のためトンネルの背面充填にフライアッシュを利用するなどして気泡量を80%まで高めた気泡ミルクを用いる工事¹⁻¹⁵⁾など軽量性や充填性が生かされる用途に利用されている。

このように、気泡モルタルの製造、打設技術の信頼性が確認され、さらに気泡モルタルの利用による効果が確認されたことによって、新しい建設材料としての利用が進み、1990年から施工実績も徐々に増加して、1995年までの累計は約35万m³を超え¹⁻¹⁶⁾、さらに増加する傾向にある。

実用化研究や施工実績が増加している一方で、安定した品質の気泡モルタルを製造するに当たって最も重要な配合の決定方法は未だに経験的なものが多く、配合設計に関する基礎的な研究結果は極めて少ないのが現状である。また、施工された気泡ミルクや気泡モルタルの品質に関して公表されたデータも少なく、利用をする側への情報提供が十分であるとはいえない状態である。

今後、材料の特性や品質が明らかにされることによって、この種の材料の優れた特性を生かした用途への応用がさらに進むものと考えられ、ひいては施工の合理化やコスト低減にも寄与するものと考えられる。

本研究では、気泡ミルクや気泡モルタルの配合と安定性に関する基礎的な実験的検討を実施するとともに、硬化体の各種物性を調べた。その結果を基に、気泡ミルクおよび気泡モルタルの配合設計法を提案した。さらに、施工レベルでの品質ならびに打設後の挙動についても調査し、建設材料としての気泡ミルクや気泡モルタルの評価を試みるものである。

1. 2 研究の目的と方法

気泡ミルクや気泡モルタルはセメント、砂、水および気泡など比重が大幅に異なる材料の混合物であり、本来分離しやすい材料であるといえる。そのため、材料分離が生ずることなく、混合および打設を可能にする配合条件の選定や施工上の配慮に関する基礎的な研究が必要である。

そこで材料の安定性と物性に注目し、以下の各項目について検討する。

1) セメントミルクの配合と分離

セメントと水を混合したセメントミルクはその配合により静置した状態でも硬化するまでに均一性を失う現象、すなわち、セメント粒子の沈降や水の上昇するいわゆるブリーディング現象を生じる。気泡を混合する前のセメントミルクの分離状況を把握するために、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種を用いて作成したセメントミルクをビニールチューブ中に入れ、静置して養生したときの分離の状況をW/Cが45~100%の範囲で検討するとともに、硬化体の水セメント比および強度についても検討する。

2) 気泡ミルクおよび気泡モルタル中の気泡および砂の安定性

気泡ミルクや気泡モルタルの安定性を考える際には、セメントミルクという流体中に気泡や砂粒子が存在し、これが移動しない状態にあるときを安定した状態であると考えることができる。すなわち、気泡は浮力によって上昇しようとし、砂粒子は重力によって沈降しようとするのであるが、ビンガム流体と考えることができるセメントミルクのレオロジー特性により気泡や砂の移動が阻止されている状態であるといえる。この状態はアンスレーらの流体中の粒子の運動の考え方¹⁻¹⁷⁾を参考にすると、移動の開始には降伏値が関係し、移動速度には塑性粘度が関係することからセメントミルクのレオロジー特性として降伏値と塑性粘度を知ることによって混合物の安定性が評価できることになる。

この考えに立って、水セメント比の異なるセメントミルクのレオロジー特性値を調査することとした。試験法としては、比較的低い降伏値や塑性粘度の測定が可能で、粘性の判明している流体を用いた測定でほぼ信頼のおける値の得られている¹⁻¹⁸⁾球引上げ式の粘度計を用いることとした。先に述べた気泡や砂粒子の安定性は気泡ミルクや気泡モルタルそのもののレオロジー特性とも直接関係することから、気泡ミルクおよび気泡モルタルについてもレオロジー特性値を求めることとした。

3) 気泡ミルク、気泡モルタルの配合と安定性

従来の研究では供試体を作成する際に気泡ミルクや気泡モルタルの状態を観察することによって安定性が評価されてきた¹⁻¹⁹⁾が材料分離の程度を定量的に把握することが困難である。

本研究では、長尺のビニールチューブ中に気泡ミルクを打設したときの分離の評価、施工時の圧送を考慮して加圧および除圧を繰り返したときの分離の程度、さらには振動を与えた場合の分離の程度などを把握し、配合や材料特性と安定性との関係についても検討する。

4) 気泡ミルクおよび気泡モルタルの施工時の安定性

気泡ミルクおよび気泡モルタルの施工においては、練混ぜ後の圧送および打設時の排出、流動の段階を経ることとなる。このことから、気泡モルタルの圧送実験によって、圧送条件と材料分離の関係を把握するとともに施工計画の参考となる圧力損失を調査した。また、気泡ミルクを打設する工事現場においては、圧送前後の気泡ミルクを連続して採取することによって品質変動や圧送による影響を調査する。

5) 気泡モルタルの諸物性の把握

気泡モルタルの物性については、従来から実用化に関連した研究に必要とされていた項目のほか、試験データが少なかった乾燥収縮特性や熱特性に関する各種の物性試験を実施した。物性試験は各種の試験基準に準じたが、耐久性試験の中の凍結融解試験については極寒冷地域を除く国内での使用を想定して凍結条件を変更して試験した。

また、使用する砂の粒度が粗い場合には分離しやすいとされていることから使いこなす技術が必要であると考えられる。また、 1 kgf/cm^2 程度の低強度が要求される場合にはセメント量を減らすだけでは安定な配合が得られない状況である。こうした際に鉱物質

微粉末を使用することによって砂の粒度改善効果や幅広い強度調整の可能性が考えられ、その確認実験も実施した。

6) 気泡ミルクおよび気泡ミルクの配合設計法の提案

先述したように、現状では一般的に適用可能な配合設計方法は提案されていない。そこで、第3章のレオロジー特性に関する検討や第4章の物性試験結果を基に材料の安定性を考慮した配合設計方法を提案する。

7) 施工時の気泡ミルクと気泡モルタルの品質と挙動の把握

埋立て地盤上での軽量盛土工事において打設された気泡ミルクの品質を評価した。また、鉄道の路体盛土として用いられた気泡モルタルの打設から半年にかけて挙動を計測したデータの解析を行う。

以上述べてきたように本研究では、比重の大幅に異なる混合物である気泡ミルクおよび気泡モルタルの安定性に関する要因と配合条件および諸物性の把握を実施し、その結果を基に現在のところ合理的な方法の示されていない配合設計方法を提案した。さらには実際に施工された材料の品質や挙動を検討することによって建設材料としての安定性や物性の評価を実施する。

1. 3 論文の構成

本論文では、2章で気泡モルタルに関する既往の研究を整理し、検討課題を抽出する。

3章では気泡ミルク、気泡モルタルの配合設計において材料の安定性に関する要因のうち、レオロジー特性をセメントミルクおよび気泡ミルク、気泡モルタルについて調査し、材料分離についてもブリーディングや施工時を想定した圧力変動や振動を与えた場合について検討する。

4章では、気泡ミルク、気泡モルタルおよび鉱物質微粉末を混合した気泡モルタルの強度特性と利用例の多い気泡モルタルの配合を選定し各種物性試験を実施した結果を示す。

5章では、4章までの各種試験結果を基に、気泡ミルクおよび気泡モルタルの配合設計方法を示した。

6章では、施工レベルでの気泡ミルクや気泡モルタルの品質や諸特性を把握するために気泡モルタルの圧送実験を実施した結果を示すとともに、気泡ミルクによる盛土の施工と品質に関する調査および気泡モルタルを用いた鉄道の路体盛土の挙動に関する調査結果を示し、これらの結果を基に実用化における所見を整理する。

7章では全体の研究成果を整理するとともに今後の課題を整理しまとめとする。

第1章の参考文献

1-1) 岡田清, 六車熙編: コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店, pp708-710.

- 1-2) 田中 積：現場打ちコンクリートとその施工について、コンクリート工学, Vol. 13, No. 5, 1975.
- 1-3) Technical Bulletin of MEARL GEOCELL, THE MEARL CORPORATION, pp3, 1986. 6
- 1-4) 麻生フォームクリートパンフレット
- 1-5) 新材料新工法委員会：フォーミックス -セメント起泡剤, コンクリートジャーナル, Vol. 7, No. 7, 1969.
- 1-6) 都築敏樹, 若槻良行, 永田孝夫, 川井田実: エアーミルクを用いた軽量盛土の強度特性、第25回土質工学会研究発表会、pp2099~2100, 1990. 6.
- 1-7) 都築敏樹：エアーミルクの道路盛土への適用例, 基礎工、pp102~109, Vol. 18, No. 12, 1990.
- 1-8) FCB気泡セメント盛土工法：FCB材料の基本特性に関する共同研究グループ, 1992.
- 1-9) 杵山務, 星野克之, 木下康秀：気泡混合軽量土を用いた地すべり対策ほか事例、基礎工、pp76~80, Vol. 22, No. 10, 1994.
- 1-10) 木寺謙爾, 中川茂, 田村徹, 轟丈詩, 森山紀夫：杭基礎における地盤沈下対策、建築技術、No. 351、pp155~168、1980. 11.
- 1-11) エスフォーム工法技術資料、株式会社エステック, 1992.
- 1-12) 古谷俊明: 軽量盛土材としての気泡モルタル, 土と基礎, Vol. 37, No. 2, pp73~77, 1989.
- 1-13) 野口晃臣：気泡混合軽量土を用いた充腹アーチ橋中詰め施工、基礎工 pp86~90, Vol. 22, No. 10, 1994.
- 1-14) Tunnel grouting record pumped up in Loss Angels : Civil Engineering, Feb. 1992.
- 1-15) Taking a load off an aging pier : Engineering News-Record, May 16, 1985.
- 1-16) 三木五三郎：軽量盛土工法とEPS工法、基礎工、pp107~111, Vol. 25, No. 1, 1997.
- 1-17) Ralph W. Ansley and Terence N. Smith : Motion of Spherical Particle in a Bingham Plastic, ACI Journal, Vol. 13, No. 6, pp1193-1196, 1967.
- 1-18) 吉野公：流動性コンクリートのワーカビリティ評価に関する研究、名古屋大学学位論文、pp32-34, 1994. 5.
- 1-19) 日本道路公団試験研究所土工試験研究室, 麻生フォームクリート(株), エースコン工業(株), 大阪セメント(株), 奥多摩工業(株), 小野田セメント(株), 住友セメント(株), 第一セメント(株), 秩父セメント(株), 日本イトン工業(株)：平成3年度FCB工法 (Foamed Cement Banking Method) FCB材料の基本特性に関する共同研究報告書 (Aグループその1)、pp72, 平成4年4月.

第2章 気泡モルタルに関連する従来の研究

2. 1 概 論	6
2. 2 気泡ミルクおよび気泡モルタルの概要	6
2.2.1 使用材料	6
2.2.2 気泡ミルクおよび気泡モルタルの製造	8
2.2.3 気泡モルタルの特徴と用途	8
2. 3 気泡ミルクおよび気泡モルタルに関する研究	9
2.3.1 起泡剤特性	10
2.3.2 配合と強度特性	10
2.3.3 耐久性	16
2.3.4 動的特性	17
2.3.5 三軸圧縮特性	18
2.3.6 曲げ強度と補強	20
2.3.7 引張強度	22
2.3.8 その他の特性	22
2.3.9 現場施工による知見	23
2. 4 セメントミルクおよびコンクリートの レオロジー特性と材料分離に関する研究	24
2.4.1 セメントミルクのレオロジー特性に関する研究	24
2.4.2 コンクリートの材料分離に関する研究	27
2. 5 まとめと検討課題	32
第2章の参考文献	33

第2章 気泡モルタルに関連する既往の研究

2.1 概 論

我が国では、気泡ミルクおよび気泡モルタルは土木の分野では主にトンネルの裏込め材料や管路の充填材料として使われてきた。この材料は、流動性が良く自由な形状に仕上げることができ、軽量で強度の調整も比較的自由であるなどの特性を有することから、土工の材料として用いることが考えられ、日本道路公団²⁻¹⁾や東日本旅客鉄道株式会社²⁻²⁾などにより検討が進められてきた。特に軟弱地盤上での盛土や傾斜地での盛土など気泡モルタルが軽量であるために、抗土圧構造物の基礎工事の簡略化や盛土自身の沈下量の低減、安定性の確保などの面で有効に用いられてきた。このように気泡モルタルは閉鎖空間への充填から盛土等の大気中に解放され、面的にも広がりのある空間に打設する必要性や、大量打設、長距離圧送の必要性も増加し、気泡混合材料の安定性がより重要になってきている。

気泡モルタルは我が国に導入直後の1960年代から建築物の防水下地、床の嵩上げさらにはトンネルの裏込め材として用いられてきているが、研究の対象として取り上げられたのは最近で、充填以外の用途に用いられるようになってからである。研究の方向も実用化するための物性や力学特性に関するものが多く、フレッシュな状態に関するものはほとんどない。一方、気泡モルタルや気泡ミルクのベースとなるセメントミルク（ペースト）やモルタルの流動性や施工性に関しては、レオロジー特性に注目した研究が実施されてきている。

本章では、気泡モルタル、気泡ミルクの概要について述べ、配合、物性さらには力学特性に関する研究および安定性に関する研究の成果を整理するとともに、参考となるセメントペーストやコンクリートのレオロジー特性と材料分離に関する研究成果もとりまとめ、今後の研究課題を明らかにする。

2.2 気泡モルタル、気泡ミルクの概要

起泡を混合したセメント硬化体は、気泡コンクリート (aerated concrete, cellular concrete) と称され開発や技術導入の経緯については第1章で触れた。我が国でも1934年に減圧によってモルタルを膨張させて製造するケイクリートの発明があり実用化もされたが、構造材としての使用が難しいなどのために広く用いられるには至らなかった。気泡コンクリートの中で起泡剤を用いるものは起泡コンクリート (foam concrete, foamed concrete) と呼ばれている。気泡ミルクや気泡モルタルも広義の気泡コンクリートに含まれるものでありその名称の通りの材料であるが以下に材料の概要を示す。

2.2.1 使用材料

気泡モルタルや気泡ミルクは、フレッシュなモルタルやセメントミルク（セメントペースト、セメントスラリー）に事前に発泡させた気泡を混合して製造される。

使用される材料は以下の通りである。

1) セメント

コンクリートに用いられる各種ポルトランドセメントや混合セメントの中で、普通

ポルトランドセメント、高炉セメントB種が多く用いられる。

2) 水

水道水の他、用途によっては海水、河川水などセメントの硬化や耐久性に悪影響を与えないと考えられる水が利用できる。起泡剤の希釈水については、海水の使用が適当でない場合があるので水道水を用いるのが望ましい。

3) 砂

コンクリート用細骨材の他、山砂など多少の細粒分を含む砂も利用可能である。

4) 起泡剤

泡の製造方法には、事前に気泡を作るプレフォーム方式とモルタルに混合後発泡させるポストフォーム方式があるが、気泡モルタル工法では気泡量の調整の容易なプレフォーム方式が用いられている。この気泡の製造の際に用いられる起泡剤は主に3種類に分類され、それぞれの特徴とともに表2.2.1に示す。

表2.2.1 起泡剤の種類と特徴²⁻³⁾

種	類	特 徴	
合 成 界 面 活 性 剤	ア ニ オン 系	高級アルキルエーテル 硫酸エステル	・起泡性大 ・シャンプーなどの基材として用いられる
		アルキルベンゼン スルホン酸ナトリウム	・微細な起泡を得るが粘性が低く消泡し易い ・混合使用
		α-オレイン スルホン酸塩	・Ca塩が存在しても界面活性剤の能力が低下しない
		カチオン系	・骨材表面の電荷の中和、疎水化により凝集作用を生ずるなど作業性、セメント接着性低下の恐れあり ・Cl ⁻ イオン等の酸基を付加しているため鉄筋の発錆が考えられる
		両性系	・酸性・アルカリ性の両者に対して界面活性作用を示し、優れた性能を示す
	ノニオン系	・イオン性に影響されず幅広い起泡性を示すが、多少起泡力が弱く、起泡の安定性も良くなくアニオン系界面活性剤などと併用使用される	
	樹脂石鹼系起泡剤	・粘性によりスラリーの流動性を阻害する傾向にあるが、骨材を用いる軽量気泡コンクリートでは砂の間隙に微細な気泡が入り全体の流動性は高くなる	
	タンパク系起泡剤	・安定した気泡を形成し、かなり実用化されている ・ポリビニールアルコール、メチルセルロース等の水溶性増粘剤の併用で安定化した製品がある ・他の起泡剤に比しセメントの凝結を遅延する場合がある	

2. 2. 2 気泡モルタル・気泡ミルクの製造

気泡モルタル、気泡ミルクの製造方法のフローを図-2.2.1に示す。

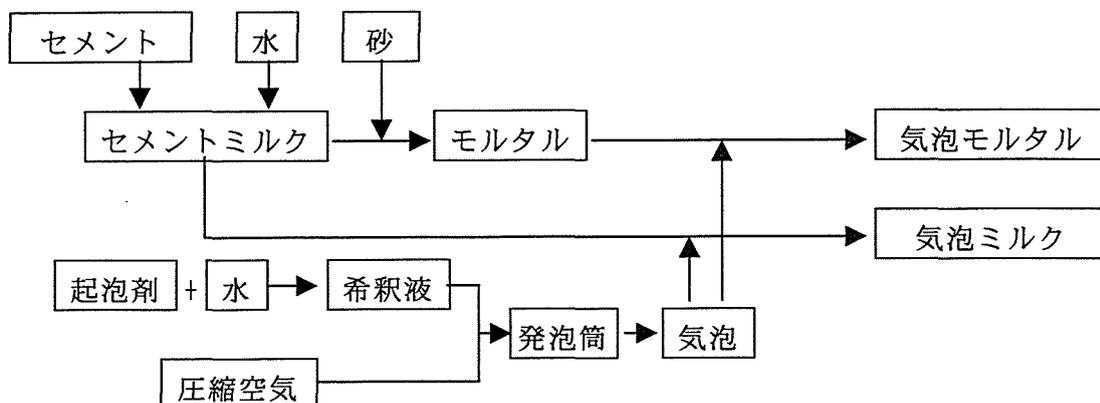


図-2.2.1 気泡モルタルの製造フロー

実工事で用いられる製造方式には数種類があり、各方式の特徴を表-2.2.2に示す。

表-2.2.2 気泡モルタルの製造方式と特徴

方式	ミルク、モルタルの製造	気泡の混合	現場 専有面積	製造能力 (m ³ /h)
現場プラント方式	現場プラント	ブレンダ、ミキサ	大	20~100
アジテータ方式	生コン工場	アジテータ	小	10~20
		ブレンダ、ミキサ	中	30~100

2. 2. 3 気泡モルタルの特徴と用途

気泡モルタル、気泡ミルクはその配合により性質が異なるが、一般に用いられる範囲の配合における一般的な特徴を示す。

- ① 気泡の混合量を変化させることにより、単位容積質量を0.5t/m³~2t/m³の間で自由に変えることができる。
- ② 軽量であることから盛土や埋戻しに用いた場合に、地盤や構造物への荷重や土圧を軽減することができる。
- ③ 流動性が良く締め固めが不要であることから、狭小部の埋め戻し、各種の空隙充填などに用いることができる。
- ④ 気泡を多く含む配合では、吸水することから遮水する必要がある。
- ⑤ 空隙充填や盛土として利用する場合は15kgf/cm²程度以下の強度に設定されることから、撤去も比較的容易で仮設構造物としても利用しやすい。

このように気泡モルタルは、軽量性、圧送性などの特徴を有しているため、軟弱地盤上

や急傾斜地での盛土、構造物背面盛土、狭小部の埋め戻しなどに用いられている。構造物の規模が大きい場合には軽量であることにより関連構造物の規模を縮小できるなど構造物全体では経済的にも有利になるとの試算もある²⁻¹⁾。このような気泡モルタルの用途を表-2.2.3に示し、軽量盛土に利用する場合の概念図を図-2.2.2に示す。

表-2.2.3 気泡モルタルの用途

用途分類	用 途
軽量盛土	道路の拡幅盛土、橋台背面盛土、急傾斜地盛土 軟弱地盤上の盛土、人工地山、トンネル坑口盛土
埋 戻 し	管の埋戻し、ボックスカルバートの埋戻し
充 填	基礎下・床下充填、管内充填、地下空洞(防空壕等)充填
裏 込 め	擁壁裏込め、護岸裏込め
そ の 他	充腹アーチ橋中詰め、断熱床、人工山

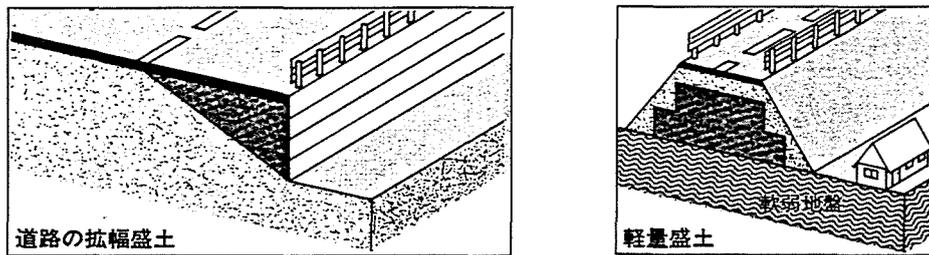


図-2.2.2 気泡ミルクおよび気泡モルタルの軽量盛土への利用概念²⁻⁴⁾

2.3 気泡ミルクおよび気泡モルタルに関する研究

本章概論で述べたように気泡モルタルが研究対象として取り上げられたのは比較的新しく、論文としては1988年の古谷ら²⁻⁵⁾、山之内ら²⁻⁶⁾、佐々木ら²⁻⁷⁾の気泡を80~90%含む気泡ミルクの力学特性、変形、強度特性ならびに三軸圧縮特性に関するものが最初と考えられる。その後、先に示した日本道路公団および東日本旅客鉄道株式会社による研究報告等が急増している。

日本道路公団では平成2年度から、軟岩程度の強度を有し、かつ軽量で施工時に流動性を有する気泡混合材料(圧縮強さ:10kgf/cm²(0.98MPa)、フロー値:200mm)を用いた気泡セメント盛土工法(FCB工法: Foamed Cement Banking Method)を実用化するための一連の研究を実施しており、平成3年度からはセメントメーカーおよび專業施工会社の参加による共同研究が実施され²⁻³⁾、さらに平成5年度からは建設会社の参加による設計に係わる共同研究が行われた。平成8年には、これらの成果をとりまとめて「気泡混合軽量土を用いた軽量盛土工法の設計・施工に関する指針原案²⁻⁸⁾」が作成され、平成9年には「気泡混合軽量土を用いた軽量盛土工法の設計・施工指針²⁻⁹⁾」が出版され普及が図られてきている。このような一連の研究成果を中心に既往の研究の概要を以下に示す。

2. 3. 1 起泡剤特性

三嶋ら²⁻¹⁰⁾はタンパク系6種類、界面活性剤系3種類の起泡剤を用い6種類の配合の気泡モルタルを作成し、フロー値、空気量、一軸圧縮強さを測定して起泡剤の影響を調べた。フロー値や空気量はいずれの気泡剤の場合も目標範囲に入った。圧縮強度は空気量の変動を反映してばらつきが見られたが大部分の気泡剤で目標値を満足する結果が得られた。このことからセメント（普通ポルトランドセメント）と細骨材（豊浦標準砂）を一定とした配合においては気泡剤の影響は少ないと判断された。

星野ら²⁻¹¹⁾は起泡剤の特性を調査するために界面活性剤系5種類、蛋白系7種類を用い、希釈倍率、発泡倍率を変化させて作成した気泡を静置し、1時間後および2時間後の消泡率を調べた（図-2.3.1）。希釈倍率が大きいと発泡倍率が小さくなり消泡率も大きくなった。希釈倍率が小さくなると、発泡倍率は大きく消泡率は小さくなるが気泡の均一性が無くなった。フロー値や強度への影響を調べた結果、希釈倍率、発泡倍率によっては、大幅な消泡が生じる場合があるが安定な気泡モルタルが得られる希釈倍率、発泡倍率は各起泡剤メーカーの指定する範囲と一致することが確認された。

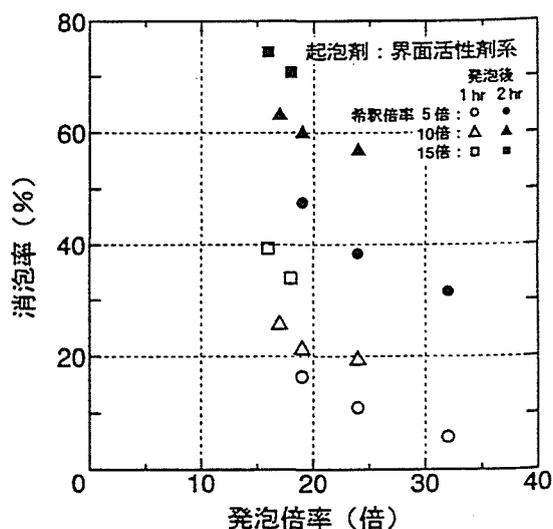


図-2.3.1 発泡倍率と消泡率の関係²⁻¹¹⁾

2. 3. 2 配合と強度特性

(1) 配合例

三嶋ら²⁻¹²⁾は練上がり直後の流動性を一定（フロー値：180±20mm）とし、セメント砂比を変化（S/C：0, 1, 2, 5）させ目標強度（材令28日：3, 5, 10kgf/cm²）が得られる12種類の配合を検討した結果、供試体作成時の材料分離に対する安定性と強度を考慮した9種類の配合が決定された。使用材料は普通ポルトランドセメント、千葉県君津市産山砂、蛋白系気泡剤で、決定された配合を表-2.3.1に示す。

表-2.3.1 配合例²⁻¹²⁾

砂セメント比 (S/C)	配合記号	目標強度 (kgf/cm ²)	単 位 量 (kg/m ³)				空気量 (%)	単位容積質量 (g/cm ³)	フロー値 (mm)
			セメント C	砂 S	水 W	起泡剤			
0	P0-C	10	390	0	237	1.48	64	0.627	160
1	P1-A	3	208	208	185	1.54	66	0.590	185
	P1-C	10	312	312	212	1.30	56	0.836	183
2	P2-A	3	180	360	190	1.40	61	0.773	189
	P2-B	5	195	390	207	1.32	57	0.813	194
	P2-C	10	256	512	215	1.15	50	0.990	174
5	P5-A	3	150	750	247	0.93	40	1.148	171
	P5-B	5	160	800	248	0.85	37	1.211	176
	P5-C	10	190	950	287	0.67	27	1.419	163

また、三嶋ら²⁻¹³⁾は高炉セメントB種、豊浦標準砂、界面活性剤系気泡剤を用い、空気量を4水準(30~70%)、水セメント比(W/C)を4水準(60~190%)、セメント砂比(S/C)を6水準(0, 1, 2, 3, 4, 5)の試験条件をそれぞれ組み合わせた96種類の配合について、フロー値、空気量および一軸圧縮強度を測定した。試験結果を各砂セメント比ごとにフロー値と一軸圧縮強度、空気量と一軸圧縮強度、フロー値と水セメント比および空気量と水セメント比の関係で整理し、任意の条件の配合を求めることができるようにした。その一例としてS/C=3の場合を図-2.3.2~2.3.5に示し、決定した配合を表-2.3.2に示した。

これらの結果は豊浦標準砂を用いた結果であるため、目安にはなるが実際に用いる砂を用いた試験を実施して確認する必要がある。

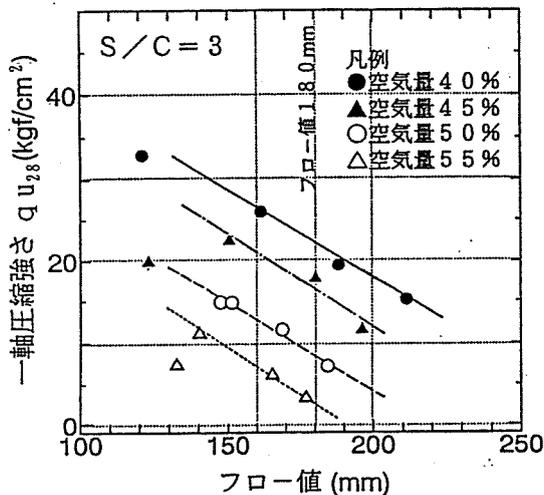


図-2.3.2 フロー値と q_{u28} の関係²⁻¹³⁾

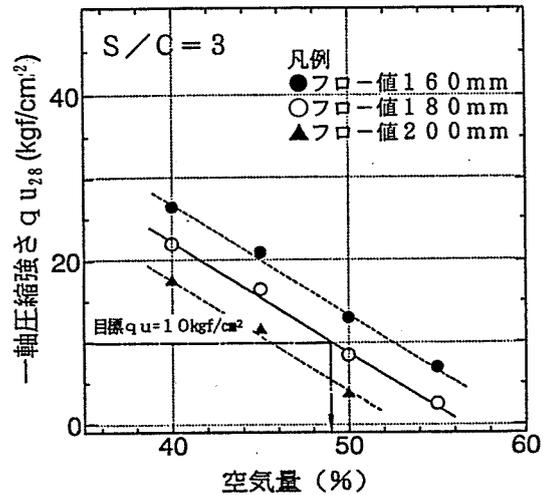


図-2.3.3 空気量と q_{u28} との関係²⁻¹³⁾

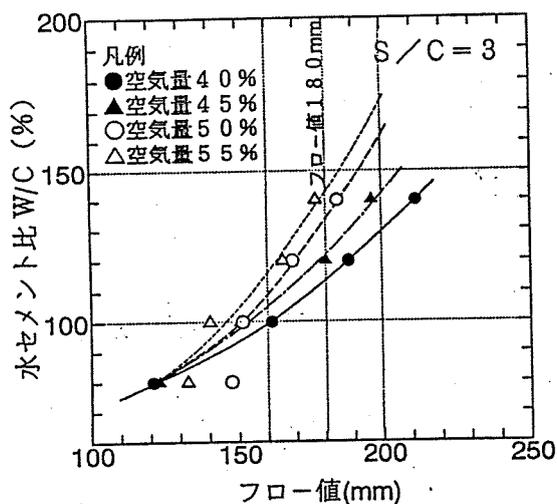


図-2.3.4 フロー値とW/Cの関係²⁻¹³⁾

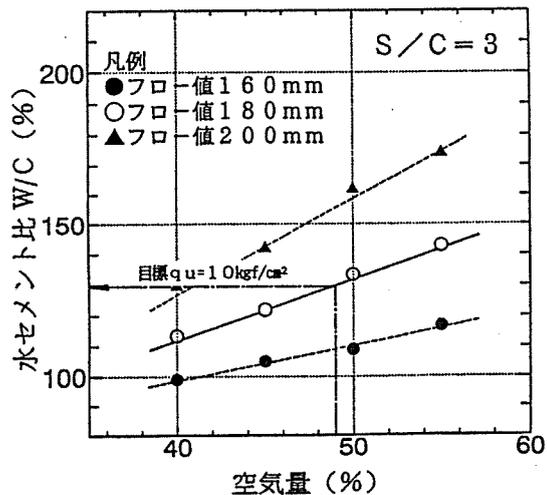


図-2.3.5 空気量とW/Cの関係²⁻¹³⁾

これらの試験結果を基に「気泡混合軽量土を用いた軽量盛土工法の設計・施工指針²⁻⁹⁾」に配合試験方法を定めた。

フロー値については、データは示されていないがポンプ圧送による配管で材料分離せずに500m程度の圧送が可能な流動性を確保するため180mmを中心値とするとしている。高炉セメントB種、界面活性剤系起泡剤および豊浦標準砂を用いた結果から所要の単位容積質量(生比重と呼んでいる)や一軸圧縮強さが得られるようセメント量、空気量、水セメ

ント比を設定し、表-2.3.2に示す暫定配合を定めた。この暫定配合を用いた配合選定のフローを図-2.3.6に示した。

実際の工事で用いる材料が決定したらその試験を実施し、以下の手順で配合選定を行う。

- ① 設計値を満足する配合を暫定配合から選びセメント量 (C : kg/m³) を読み取る。
- ② 砂量 (S : kg/m³) をセメント量、砂セメント比および砂粒子の密度 (ρ_s : g/cm³)、含水比 (w : %) から算出する。

$$S = C \times (S/C) \times (\rho / 2.643) \times (1 + w/100) \quad \dots\dots (2.3.1)$$

- ③ 水量 (m_w : kg/m³) をセメント量、水セメント比、砂量、砂の含水比、吸水率 (Q : %) から算出する。

$$m_w = C \times (W/C) / 100 - S (w - Q) / 8 (1 + w/100) / 100 \quad \dots\dots (2.3.2)$$

- ④ 起泡剤量 (m₁ : kg/m³) を空気量 (a : %)、起泡剤密度 (ρ_k : g/cm³)、希釈倍率 (K : 倍) および発泡倍率 (H : 倍) より算定する。

$$m_1 = 1,000 \times (a/100) \times (\rho_k / K (H - 1)) \quad \dots\dots (2.3.3)$$

- ⑤ 希釈水量 (m₂ : kg/m³) を算定する。

$$m_2 = m_1 \times (K - 1) \times \rho_w / \rho_k \quad \dots\dots (2.3.4)$$

- ⑥ 混練水量 (m₃ : kg/m³) を算定する。

$$m_3 = m_w - m_1 - m_2 \quad \dots\dots (2.3.5)$$

- ⑦ 湿潤密度 (ρ_f : g/cm³) を算定する。

$$\rho_f = (C + S + m_w) \quad \dots\dots (2.3.6)$$

- ⑧ 試し練りを実施し、フロー値が180±20mmに入ることを確認する。入らない場合は配合を修正してフロー値を合わせ、湿潤密度が設計値よりも小さいことを確認して供試体を作成し、所定材令まで養生して一軸圧縮試験を実施する。

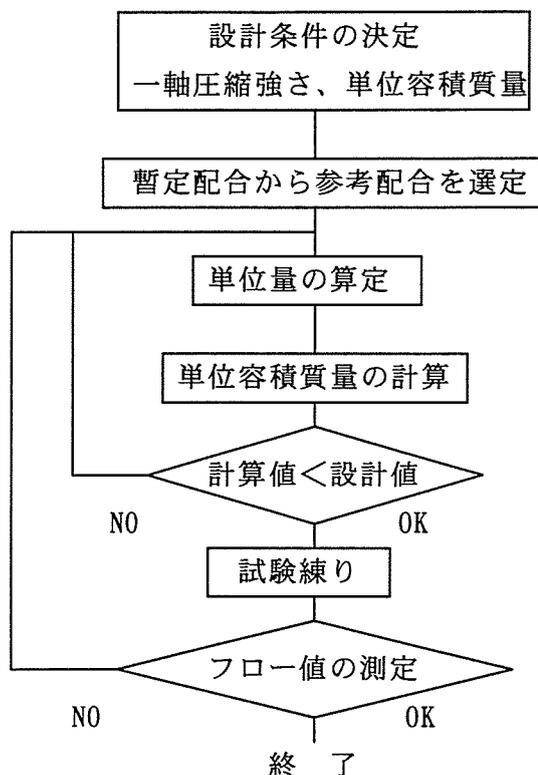


図-2.3.6 配合選定のフロー

こように、暫定配合の中から設計条件に合うものを選び、使用材料に合わせて単位量の修正を実施する方法が示されている。暫定配合が豊浦標準砂を用いて決められているため、実際に使用する砂を用いて試し練りを実施すると、フロー値が大きくなりすぎるが多い。また、材料分離しないことを確認する方法や配合修正については詳細は示されていないなどの問題がある。

表-2.3.2 暫定配合表²⁻⁹⁾

フロー値(180mm)

種別 配合	一軸圧縮強さ qu (kN/m ²)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	※セメント C (kg/m ³)	砂セメント比 容積比 (質量比)	砂 S (kg/m ³)	起泡剤 ml (kg/m ³)	希釈水 m ² (kg/m ³)	混練水 m ² (kg/m ³)	水量 W (m ¹ +m ² +m ³) (kg/m ³)	湿潤密度 (生比重) (g/cm ³)	単位体積 重 量 (kN/m ³)
K0-3	300 (3)	66.5	92.0	268	0 (0)	0	1.15	26.45	219	247	0.52	5.1
K0-5	500 (5)	64.0	88.0	298		0	1.11	25.53	235	262	0.56	5.5
K0-8	800 (8)	61.0	84.0	334		0	1.06	24.38	256	281	0.62	6.1
K0-10	1,000(10)	59.5	82.0	353		0	1.03	23.69	264	289	0.64	6.3
K1-3	300 (3)	62.5	105.0	214	1.154 (1)	214	1.09	25.07	199	225	0.65	6.4
K1-5	500 (5)	60.0	101.0	233		233	1.04	23.92	210	235	0.70	6.9
K1-8	800 (8)	56.5	96.0	261		261	0.98	22.54	227	251	0.77	7.5
K1-10	1,000(10)	54.5	93.0	278		278	0.95	21.85	236	259	0.82	8.0
K2-3	300 (3)	58.5	118.0	183	2.308 (2)	366	1.02	23.46	192	216	0.77	7.5
K2-5	500 (5)	56.0	115.0	197		394	0.97	22.31	204	227	0.82	8.0
K2-8	800 (8)	53.0	111.0	214		428	0.92	21.16	216	238	0.88	8.6
K2-10	1,000(10)	51.0	108.0	226		452	0.89	20.47	223	244	0.92	9.0
K3-3	300 (3)	56.0	133.5	157	3.462 (3)	471	0.97	22.31	187	210	0.84	8.2
K3-5	500 (5)	53.0	130.0	170		510	0.92	21.16	199	221	0.90	8.8
K3-8	800 (8)	49.0	126.0	187		561	0.85	19.55	216	236	0.98	9.6
K3-10	1,000(10)	46.5	123.0	199		597	0.81	18.63	226	245	1.04	10.2
K4-3	300 (3)	52.5	151.5	142	4.616 (4)	568	0.91	20.93	193	215	0.93	9.1
K4-5	500 (5)	50.0	149.5	150		600	0.87	20.01	203	224	0.97	9.5
K4-8	800 (8)	46.5	146.5	162		648	0.81	18.63	218	237	1.05	10.3
K4-10	1,000(10)	44.0	144.5	170		680	0.76	17.48	228	246	1.10	10.8
K5-3	300 (3)	50.0	172.0	127	5.770 (5)	635	0.87	20.01	197	218	0.98	9.6
K5-5	500 (5)	47.0	170.0	135		675	0.82	18.86	210	230	1.04	10.2
K5-8	800 (8)	43.0	167.5	146		730	0.75	17.25	227	245	1.12	11.0
K5-10	1,000(10)	40.5	166.0	153		765	0.70	16.10	237	254	1.17	11.5

※配合記号の説明：Ka-b Kは高炉のイニシャル、aはS/C、bは目標一軸圧縮強さをそれぞれ意味する。

※一軸圧縮強さの()内の数字は、kgf/cm²を意味する。

※この暫定配合は、現場での材料や施工のばらつきを考慮して、室内配合試験結果から得られた配合より200kN/m²(2kgf/cm²)の強度割り増しを考慮した配合となっている。

※セメント：高炉セメントB種
セメントの密度(ρ_c)：3.05 g/cm³

土粒子の密度(ρ_s)：2.643 g/cm³
水の密度(ρ_w)：1.00 g/cm³
起泡剤の密度(ρ_i)：1.00 g/cm³

希釈倍率；2.4倍 発泡倍率；2.5倍

(2) 養生条件と強度発現特性

1) 暴露条件の影響

標準養生 (20℃湿空養生) と水浸養生 (20℃水中養生) の場合の材令と各配合の目標強度に対する強度発現率 (測定値/目標強度) との関係²⁻¹²⁾ を図-2.3.7に示す。材令28日までの強度増加が大きく、その後6ヶ月にかけても若干の伸びを示すが、その後1年までの変化は小さく、普通ポルトランドセメントの特性が反映された結果となった。水浸養生では湿空養生に比べてやや強度が低くなった。

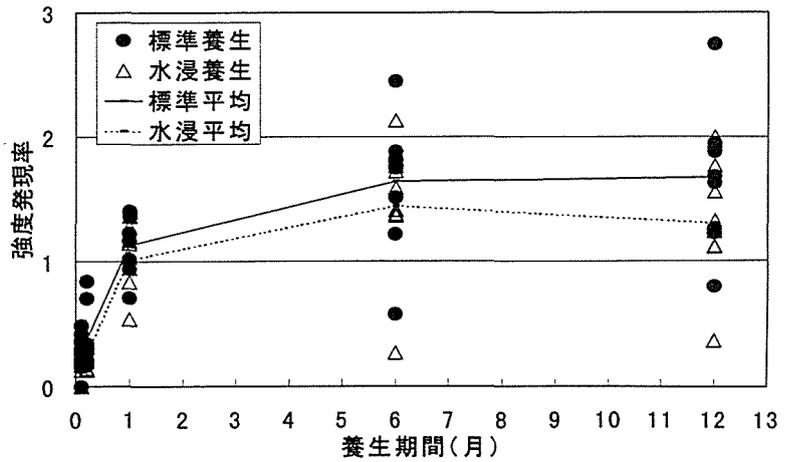


図-2.3.7 気泡モルタルの強度発現特性^{2-12) 2-14)}

また、標準養生、水浸養生のほかに脱型後屋外に放置する屋外養生の3種類の方法で養生した場合の材令6ヶ月における養生条件と一軸圧縮強度、単位容積質量の関係を図-2.3.8および図-2.3.9に、また、空気量と単位容積質量の増加量との関係を図-2.3.10に示す。一軸圧縮強度の全配合の平均値を標準養生を基準として比較すると、水浸養生の場合に14.1%低下し、屋外養生で25.7%低下している。単位容積質量は水浸養生で24.9%増加し、屋外養生では2.1%減少し、水浸養生における単位容積質量の増加量は、空気量の多い配合のものほど大きくなった。これは吸水量によると考えられる。

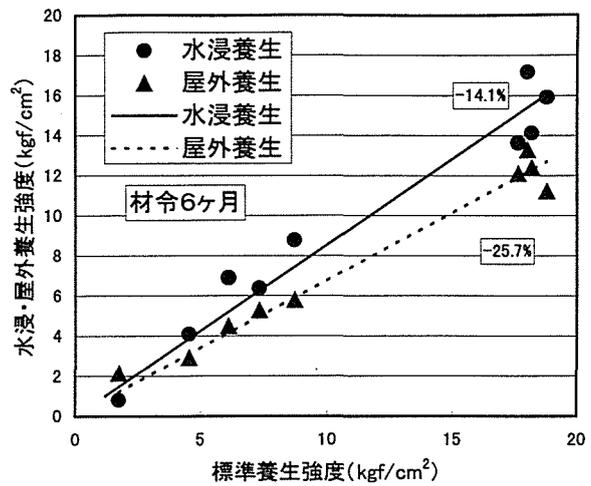


図-2.3.8 養生条件と一軸圧縮強度²⁻¹²⁾

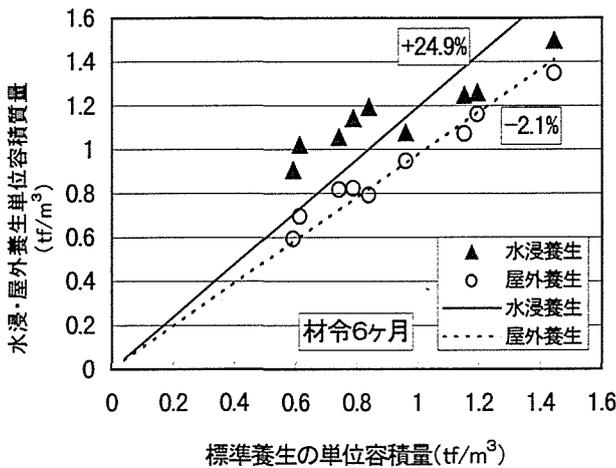


図-2.3.9 養生条件と単位容積質量²⁻¹²⁾

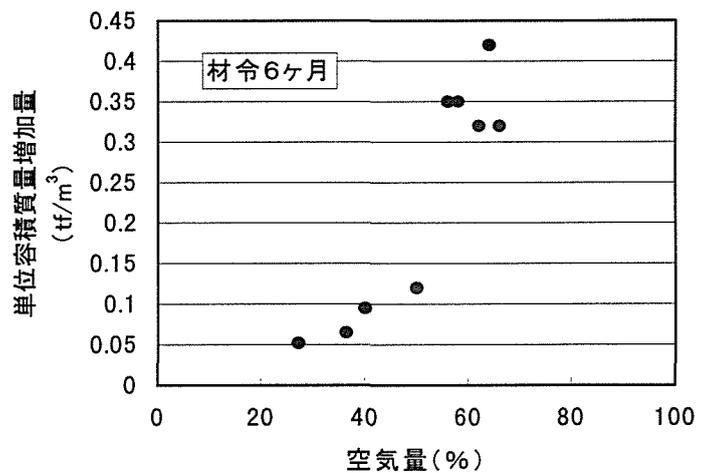


図-2.3.10 空気量と単位容積質量の増加量²⁻¹²⁾

白地ら²⁻¹⁵⁾は気泡量が82%,乾燥単位容積質量 $\gamma_d=0.44\text{gf/cm}^3$ で水浸前強度約 17kgf/cm^2 の気泡ミルクのブロックから切り出した $\phi 5 \times 10\text{cm}$ の円柱供試体を水道水と海水に浸漬させて浸漬水の影響を検討した。いずれの場合も浸漬により強度低下が認められるが海水の場合は浸漬期間とともに低下する傾向が認められた。30日後の強度の低下率は水道水、海水でそれぞれ31%、42%で変形係数も大幅に低下した。水道水の場合は3日以降の低下がほとんどないことから問題にならないこともあるが、吸水により重量が増加するため対策が必要となると考えられる。

新舎ら²⁻¹⁶⁾は $W/C=55, 60, 65\%$ 、湿潤単位容積質量 $\gamma_i=0.4\sim 0.5\text{gf/cm}^3$ の気泡ミルク供試体($\phi 10 \times 20\text{cm}$)を 20°C 湿度100%養生、封かん養生および水中養生の3種類で養生の影響を検討した。水中養生の場合に30%程度強度低下する結果を得た。

別井ら²⁻¹⁷⁾も S/C や気泡量の異なる $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 供試体を材令1年間まで湿空および水中養生し、 S/C が小さく気泡量の多い配合ほど吸水率が高い結果を得た。ただし、3ヶ月以降の吸水率の増加は小さいことも確認した。

2) 養生温度の影響

養生温度の影響を調べるために $20, 10, 0^\circ\text{C}$ の3条件で養生した場合の材令28日における圧縮強度、単位容積質量を求めた結果を図-2.3.11および2.3.12に示す。養生温度が低いほど強度が低くなっており温度の影響は顕著であるが、単位容積質量はほとんど温度の影響を受けなかった^{2-12) 2-18)}。

図-2.3.13は、各配合の目標強度に対する強度発現率の平均値と材令との関係を示したものである。材令28日で各養生の供試体とも標準養生の50~60%の強度が得られほぼ目標強度に達した。

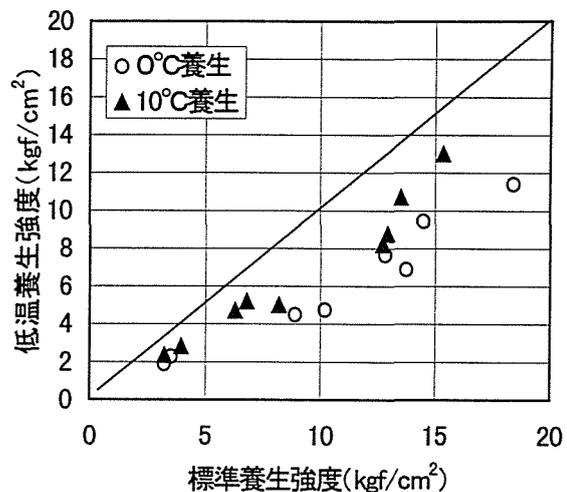


図-2.3.11 養生温度と圧縮強度²⁻¹²⁾

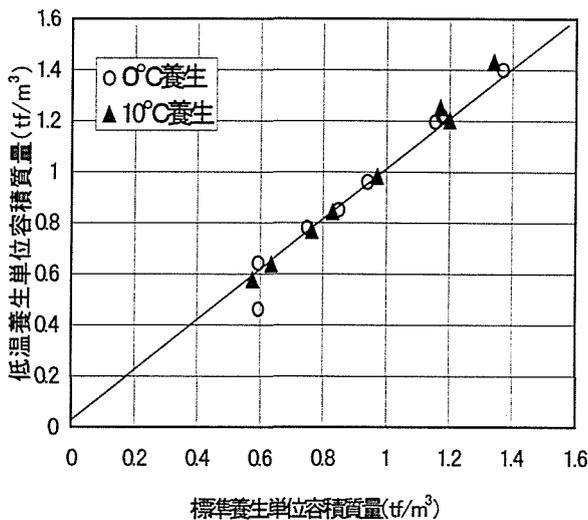


図-2.3.12 養生温度と単位容積重量²⁻¹²⁾

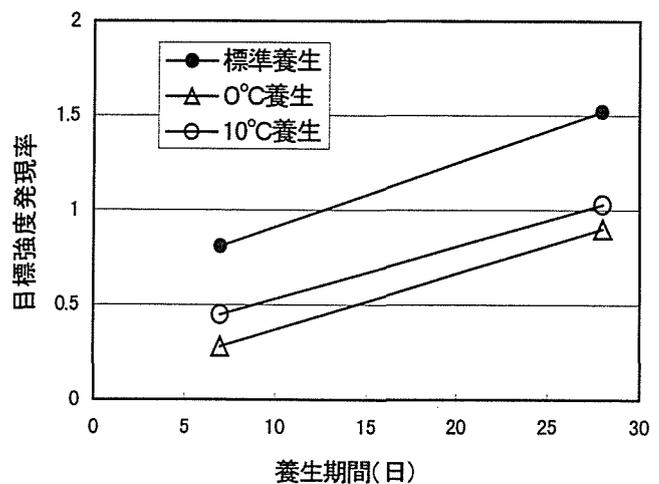


図-2.3.13 養生温度と強度発現率²⁻¹²⁾

(2) 間隙比の影響

山之内ら²⁻¹⁹⁾は、軽量盛土への利用を想定して気泡モルタルの物性に関する一連の実験を実施している。実験にはW/C=50%の早強セメントスラリーと起泡剤（高級アルコールスルホン酸とトリエタノールアミン塩の混合液）を用いた。気泡の混合量を変えて湿潤密度が0.199~0.478gf/cm³の供試体を作成して一軸圧縮試験を実施し、間隙比（e₀）と一軸圧縮強度との関係として整理し（図-2.3.14）、関係式（2.3.7）を得た。

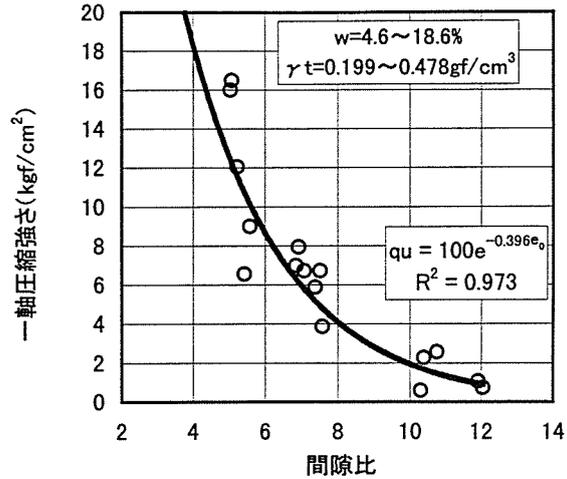


図-2.3.14 間隙比と一軸圧縮強度の関係²⁻¹⁹⁾

$$q_u = 100 \exp(-0.396 e_0) \quad \dots \dots \dots (2.3.7)$$

また、初期接線弾性係数（E）を間隙比との関係で整理し、式（2.3.8）を得た。

$$E = 20910 \exp(-0.431 e_0) \quad \dots \dots \dots (2.3.8)$$

2.3.3 耐久性

星野ら²⁻²⁰⁾は気泡モルタルの耐久性を調査するために、S/Cを0, 3, 5、目標強度3, 5, 8, 10kgf/cm²の配合の材令28日まで標準養生した供試体について乾湿繰返し試験、凍結融解試験および凍上試験を実施した。

(1) 乾湿繰返し試験

φ10×20cmの円柱供試体を用いて JHS 214「突き固めたセメント安定処理混合物の乾湿繰返し試験方法」に準じて乾湿繰返し（水浸6時間、71℃炉乾燥42時間）を12サイクルまで実施し、乾湿繰返しが4, 8, 12サイクルの時に3本ずつの供試体を用い一軸圧縮試験を実施した。目標強度3kgf/cm²の配合の経過日数と一軸圧縮強度の関係を標準養生のデータ（白抜き）とともに図-3.2.15示す。一軸圧縮強度は何れの場合も低下しておらず強度増加が見られた。他の配合についても同様に強度低下は認められなかった。

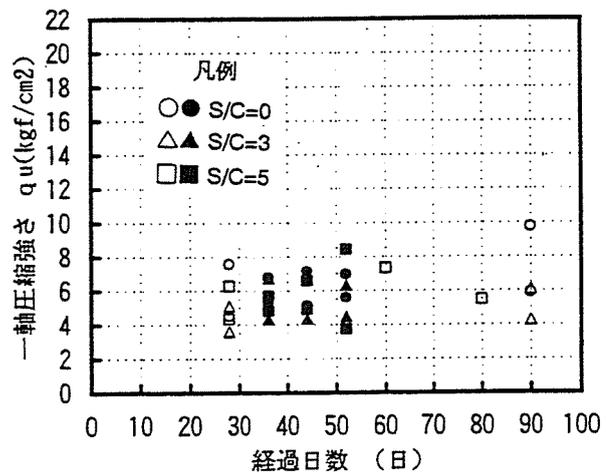


図-3.2.15 乾湿繰返し試験結果²⁻²⁰⁾

(2) 凍結融解試験

同様の供試体を用いJHS 215「突き固めたセメント安定処理混合物の凍結融解試験方法」に準じて試験を実施した²⁻²⁰⁾。試験条件は、 -24°C 24時間、 21°C 恒温恒湿室24時間を1サイクルとし12サイクルまで実施し、4、8、12サイクルで一軸圧縮試験を実施した。目標強度 $10\text{kgf}/\text{cm}^2$ の場合の結果を標準養生のデータ（白抜き）とともに図-3.2.16に示す。試験開始直後は強度低下が認められたが、その後は養生日数の増加とともに強度が増加するため、強度低下は認められずむしろ増加傾向であった。

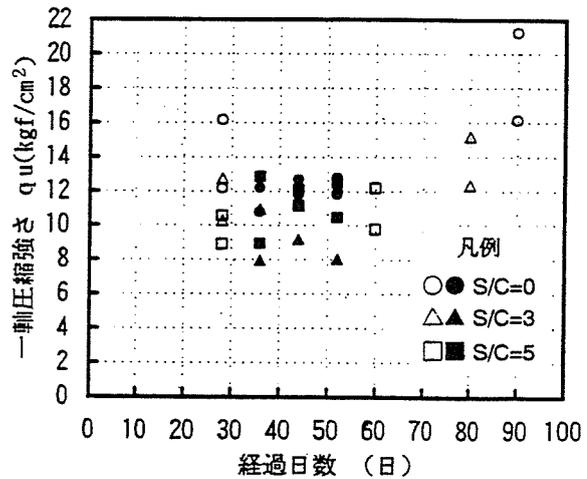


図-3.2.16 凍結融解試験結果²⁻²⁰⁾

(3) 凍上試験

直径 15cm 、高さ 12.5cm の供試体を8日間養生した後、JHS 215に準じて凍上試験を実施した²⁻²⁰⁾。凍上率は配合による差は認められず、最大でも 0.5% であったことから、非凍上材料であると考えられた。標準養生の一軸圧縮強度と凍上試験前後のCBR値の関係を既往のデータとともに図-3.2.17に示す。凍上試験後のCBR値も一軸圧縮強度と比例関係にあるが凍上試験前に比べて 10% 程度低下した。

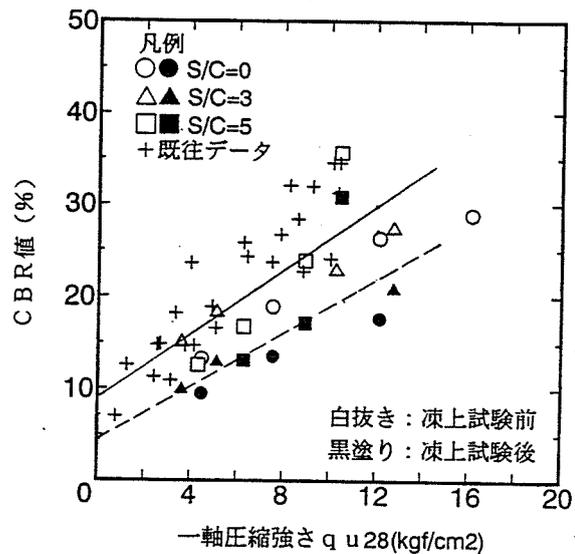


図-3.2.17 一軸圧縮強度と凍上試験前後のCBR²⁻²⁰⁾

以上の結果から、土木材料として十分な耐久性を有し、非凍上性の材料であることから路床にも利用できると考えられた。

2.3.4 動的特性

三嶋ら²⁻²¹⁾は、配合および強度の異なる6種類の気泡モルタルの繰返し載荷試験を実施し、載荷は初期応力を目標圧縮強度の $1/3$ 、 $1/2$ および $3/4$ 、応力振幅を 0.5 と $1.0\text{kgf}/\text{cm}^2$ とし、周波数は 5Hz で繰返し回数を10万回までとした。なお、供試体は $\phi 5 \times 10\text{cm}$ 、試験材令28日である。繰返し回数と軸ひずみの関係の一例を図-3.2.18に示す。繰返し回数が1万回あたりからひずみが増加しているものもあるが、いずれも破壊に至らなかった。試験後の供試体の一軸圧縮試験結果と試験前の関係を図-3.2.19に示す。いずれも繰返し載荷前と同等以上の強度となり、試験の範囲内では繰返し載荷による疲労に対する抵抗性も

十分であると考えられた。

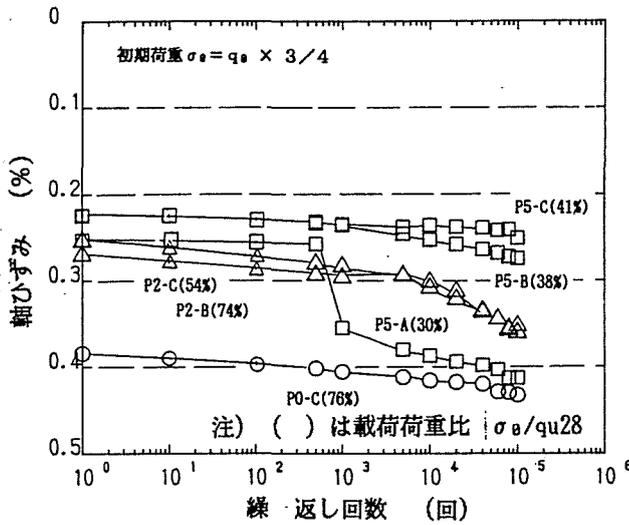


図-3. 2. 18 繰返し回数と軸ひずみの関係²⁻²¹⁾

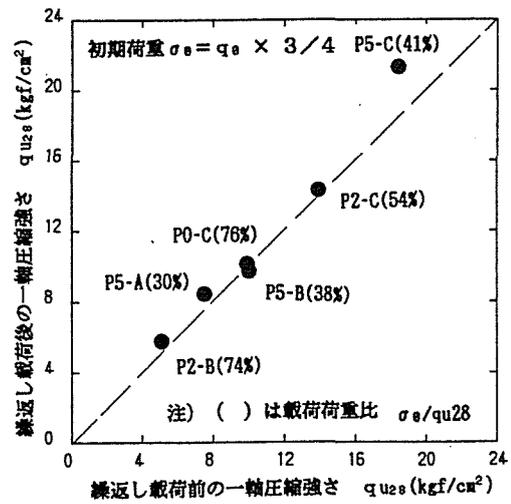


図-3. 2. 19 繰返し試験後の圧縮強度²⁻²¹⁾

山之内ら²⁻¹⁹⁾は、間隙率 $n = 88\%$ の供試体を3日間水浸した後繰返し一軸圧縮試験を実施した。供試体の一軸圧縮強度は 2.29 kgf/cm^2 で圧縮応力の初期値 (σ_0) と応力振幅 ($\Delta\sigma$) の組合わせを $0.5 \pm 0.2 \text{ kgf/cm}^2$ (最大応力比 0.31) および $1.0 \pm 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ (最大応力比 0.66) の2種類とし、载荷速度は 5 Hz とした。図-2. 3. 20に示す結果を得ており、最大応力比 0.31 では10万回まで载荷しても軸ひずみの増加はほとんどないが、最大応力比 0.66 では200回付近で軸ひずみが急増し降伏状態になり、限界値と考えられた。

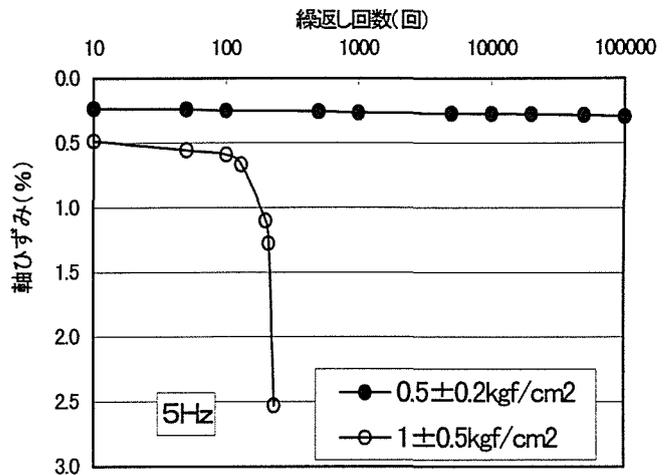


図-2. 3. 20 繰返し一軸圧縮試験結果²⁻¹⁹⁾

新舎ら²⁻¹⁶⁾は $\gamma_1 = 0.42 \text{ g/cm}^3$ で圧縮強度が 5.7 kgf/cm^2 の気泡ミルク供試体 ($\phi 5 \times 10 \text{ cm}$) を用い、最大応力比 0.26 と 0.7 として 2 Hz で10万回の繰返し载荷を行った。最大応力比 0.7 では1万回付近でひずみが急増して破壊した。最大応力比 0.26 では軸ひずみの増加も少なかった。

2. 3. 5 三軸圧縮特性

佐々木ら²⁻⁷⁾は、気泡の混合率が 88% の気泡ミルク供試体 ($\phi 5 \times 10 \text{ cm}$) を用い、

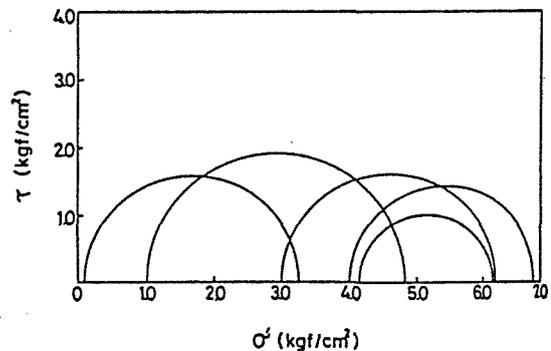


図-2. 3. 20 モールの応力円²⁻⁷⁾

側圧をバックプレッシャー1.0kgf/cm²、有効拘束圧を0.1, 1.0, 3.0, 4.0, 4.14kgf/cm²の5段階として等方圧密、排水圧縮試験(CD)および等方圧密非排水試験(CU)の2種類の方法で三軸圧縮試験を実施した。図-2.3.21にモールの応力円を示すが、拘束圧を増加させるとせん断強度が低下し、モールクーロンの破壊基準には従わないことを確認した。

また、山之内ら²⁻⁷⁾は同じ実験結果を排水条件での試験の圧縮強度と拘束圧とを圧縮強度で正規化した関係(図-2.3.22)から、非排水降伏強度は静水圧降伏点までは式(2.3.9)によることを示した。

$$q_y = q_u - R \cdot \sigma_c' \quad (2.3.9)$$

ここに、 q_y : 非排水降伏強度

q_u : 一軸圧縮強度

σ_c' : 有効拘束圧

R : 有効拘束圧の増加に対する強度の低下率

非排水降伏応力は $\sigma_c' / q_u < 0.5$ で q_u にほぼ等しく、それ以降はほぼ $R = 1.0$ となる(図-2.3.23)ことを確認した。

赤井²⁻¹⁾もS/Cの異なる気泡モルタルの三軸圧縮試験を実施した結果を示し、拘束圧が増加しても最大荷重が増加せず粘着力のみを有する材料と同様の傾向を示すことを報告した。

三嶋ら²⁻²²⁾は砂セメント比(S/C)0~5、目標強度3,5,8,10kgf/cm²の配合の気泡モルタルを20±3℃の恒温恒湿室で材令28日まで養生した供試体(φ10×20cm)についてJFS T 521-1990「土の非圧密非排水(UU)三軸圧縮試験法」に準じて三軸圧縮試験を実施した。S/C=0,3,5の3条件で、目標強度8kgf/cm²の供試体を用いた場合の側圧と主応力差の関係を図-2.3.24に、側圧と破壊ひずみの関係を図-2.3.25に示す。図-2.3.24に示すように砂を含まないS/C=0の配合では側圧が4kgf/cm²までは主応力差が増加するがそれ以降は減少し、S/C=3,5の配合では側圧の増加とともに主応力差が減少した。S/C=5の配合では側圧が圧縮強度を上回ると主応力差が増加する減少が見られた。破壊ひずみは側圧が4kgf/cm²まではいずれの配合でも3%以下であるが、それ以上では急激に増加し、S/C=3,5の配合では圧縮強度以上の側圧で15%に達した。

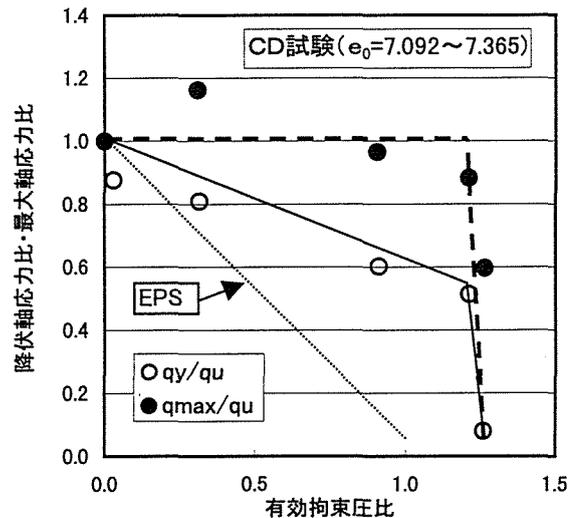


図-2.3.22 CD条件での破壊基準²⁻¹⁹⁾

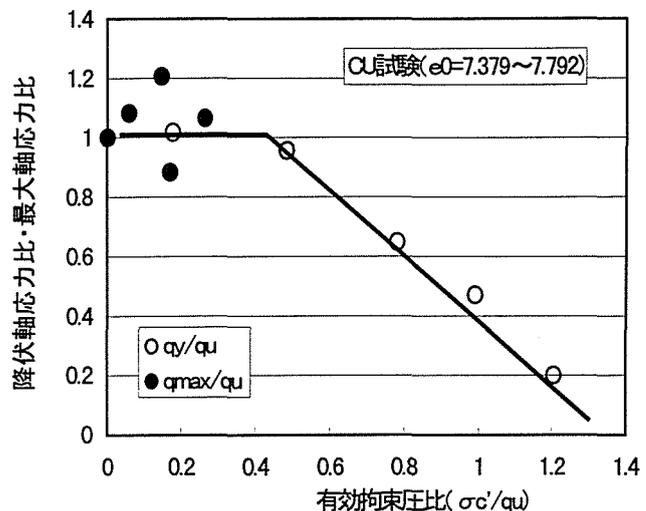


図-2.3.23 CU条件における破壊基準²⁻¹⁹⁾

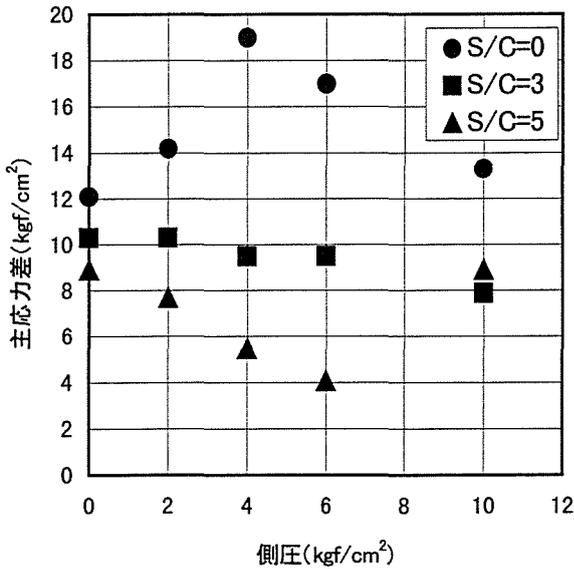


図-2.3.24 側圧と主応力差の関係²⁻²²⁾

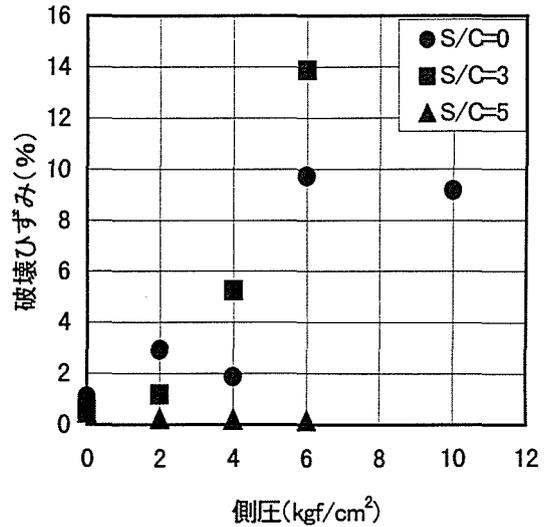


図-2.3.25 側圧と破壊ひずみの関係²⁻²²⁾

2.3.6 曲げ強度と補強

海野ら²⁻²³⁾は、表-2.3.4に示す3種類の配合の気泡モルタルを用い、屋外、室内、湿空および水中の4条件で養生した場合の圧縮強度および曲げ強度を測定した。

表-2.3.4 気泡モルタルの配合²⁻²³⁾

種別	S/C	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				生比重	空気量 (%)	フロー値 (mm)	目標強度 (kgf/cm ²)
			セメント	砂	水	起泡剤 (L)				
A	1	68	250	250	170	1.41	0.71	62	180	10
B	2	76	250	500	190	1.21	0.98	50	180	15
C	2	62	350	700	217	0.95	1.29	38	180	40

材令28日における圧縮強度と曲げ強度の関係を図-2.3.26に示す。圧縮強度は湿空養生や水中養生で高くなる傾向にあり、曲げ強度も同様の傾向にある。曲げ強度は圧縮強度に対して0.35~0.6の割合で全体ではおおよそ1/3であった。

また、軟弱地盤上で盛土材として使用する際には、底の部分では引張力が作用することが考えられるため、気泡モルタルの補強に関する実験を実施した。図-2.3.27に示す高密度ポリエチレンネット、溶接金網、異形鉄筋など6種類の補強をした梁の曲げ試験を実施し補強効果を検

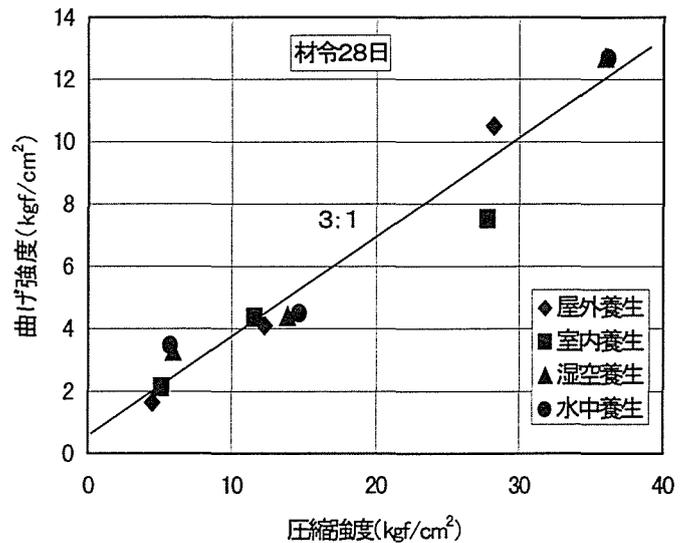


図-2.3.26 圧縮強度と曲げ強度の関係²⁻²³⁾

討した。スパンを1 mとし中央に15cm間隔の2点载荷とした試験時の荷重-たわみの関係を図-2.3.28に示す。弾性係数の低い高密度ポリエチレン以外のケースはいずれも補強効果が現れ、最大荷重は無補強に比べて8倍以上になることを確認した。なお、無補強の曲げ強度は圧縮強度の約10%であった。

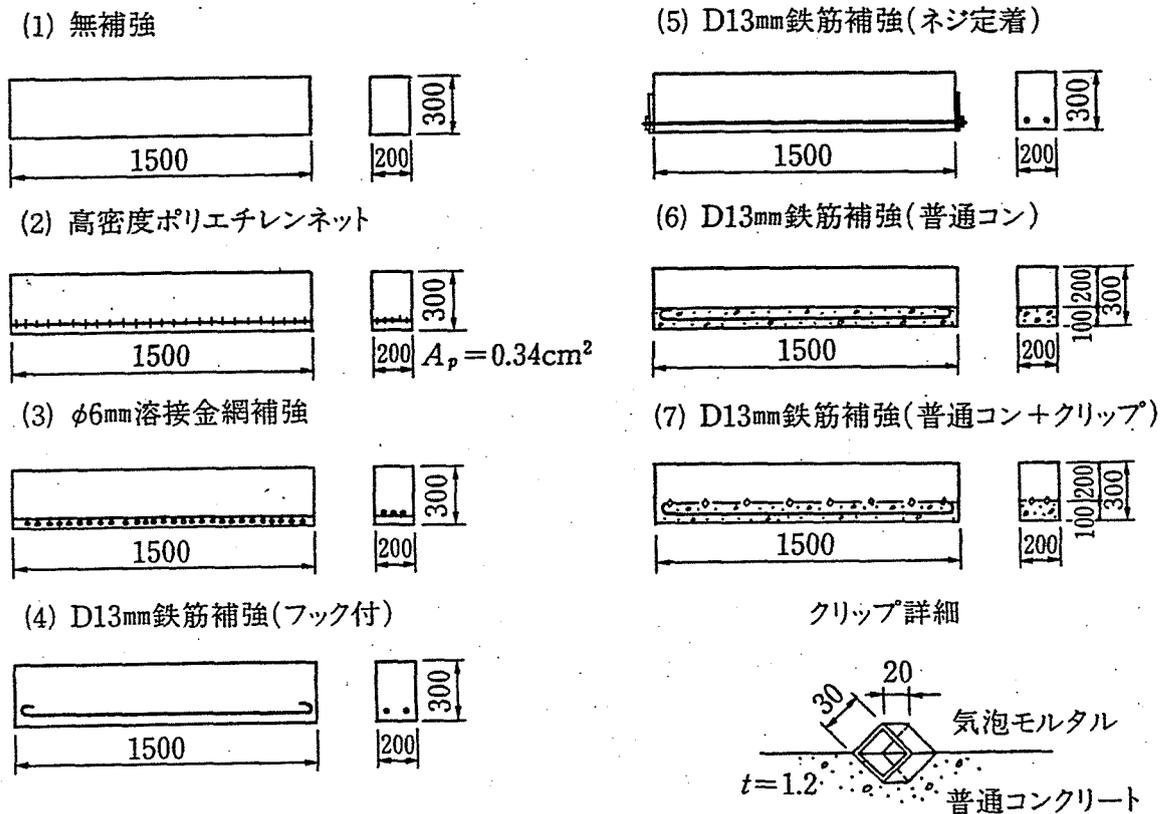


図-2.3.27 試験梁の形状寸法²⁻²³⁾

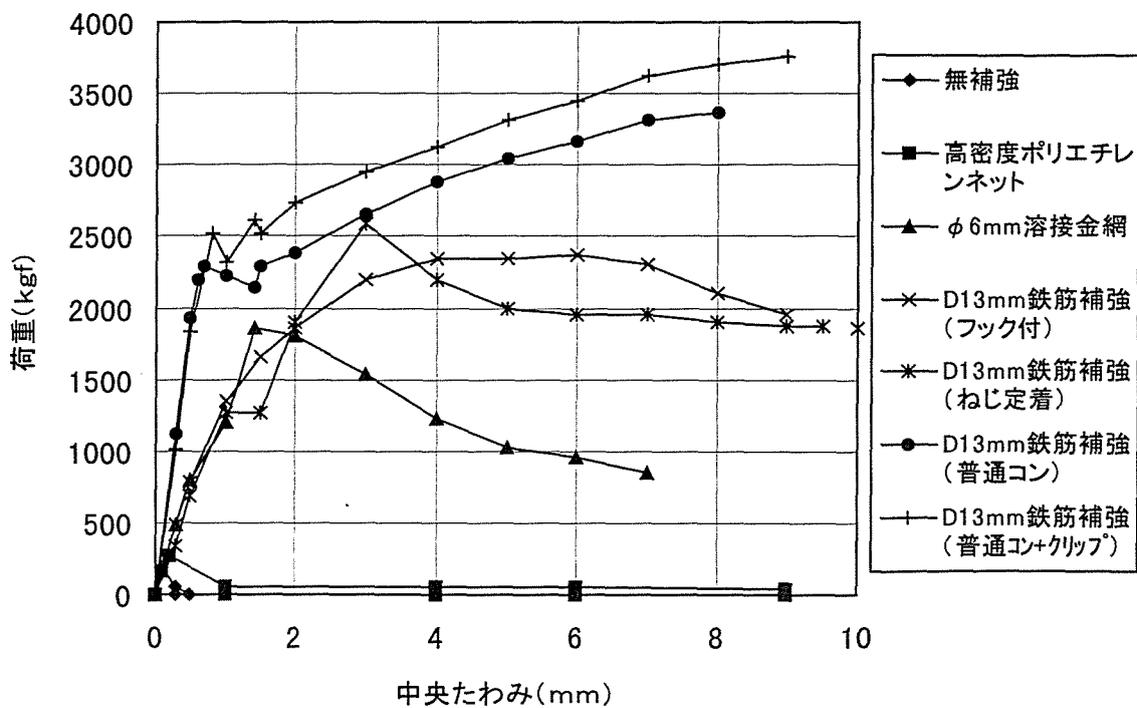


図-2.3.28 荷重とスパン中央たわみの関係²⁻²³⁾

2. 3. 6 引張強度

新舎ら²⁻¹⁶⁾は圧縮強度が4 kgf/cm²程度の気泡ミルクの直接引張試験を実施し引張強度が圧縮強度の20%程度であることを確認した。

2. 3. 7 その他の特性

盛土等に用いる場合の安定性の検討などに必要な摩擦係数や滑り抑止杭などの水平荷重負担効果に関する実験が実施された。

(1) 摩擦係数

三嶋ら²⁻²⁴⁾は気泡ミルクと気泡モルタル（一軸圧縮強度：13kgf/cm²）を用い、コンクリート、防水シート、山砂および関東ロームの4種類の材料との摩擦係数を垂直応力をかえて測定した。図-2.3.29に示すように垂直応力が0.42kgf/cm²（盛土高：3～6m）以下では材料の種類にかかわらずほぼ一定の静止摩擦係数（0.6以上）を示した。

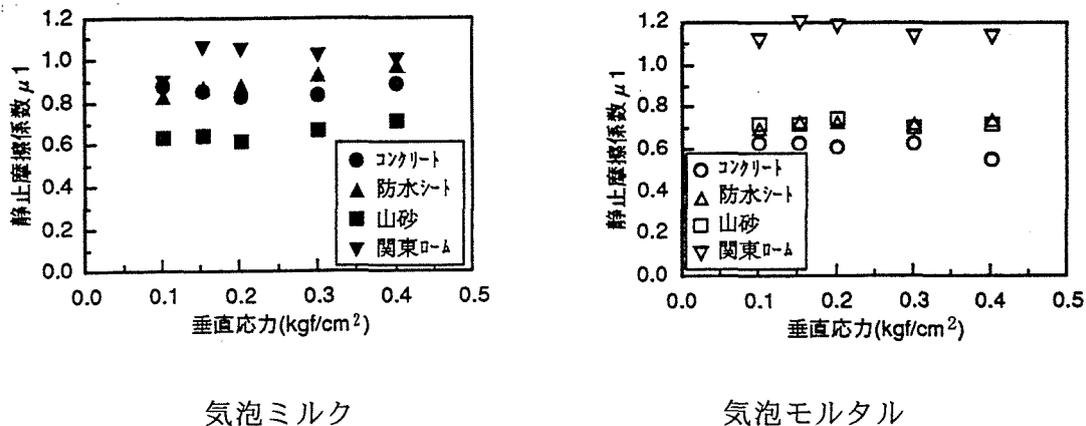


図-3.2.29 垂直応力と静止摩擦係数²⁻²⁴⁾

また、各材料の上に気泡モルタルを打設した場合の摩擦係数から求めた限界勾配は、関東ローム、防水シートの場合で45～50度、山砂の場合で33度となった。

(2) 滑り抑止杭の抵抗力

長尾ら²⁻²⁵⁾は、急な斜面に盛り土を施工する場合で限界勾配を越える場合には、滑りに対する対策を講じる必要がある。その1つとして地山に直径60.5mmの鋼管を打ち込んで滑り抑止杭とする場合について実験的に検討した。実験では圧

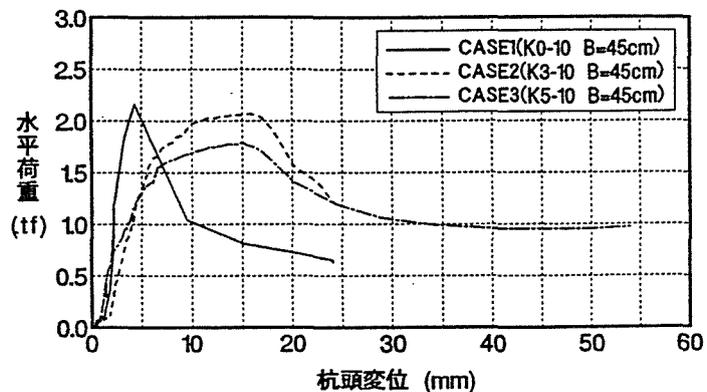


図-2.3.30 水平変位と水平荷重の関係²⁻²⁵⁾

縮強度が 10kgf/cm²程度の気泡モルタル中に50cm埋め込んだ鋼管の頭部に水平方向載荷してすべり抵抗性を調べた。図-2.3.30に水平変位と水平荷重の関係を示すがいずれも最大値は2tf程度であった。

2. 3. 8 現場施工による知見

気泡ミルクおよび気泡モルタルを現場で施工した場合の測定や観察でいくつかの知見が得られた。初期の気泡ミルクの施工では、以下のような点が報告された²⁻²⁷⁾。

- ① 盛土の深さ方向に含水比が高くなっており、強度のばらつきも大きい。
- ② 硬化体の乾燥密度が小さい。
- ③ 硬化体中に直径が1～2cmと大きな気泡が見られた。
- ④ 道路横断方向に5mピッチでひび割れが発生した。
- ⑤ 長期間存置された気泡ミルク表面に亀甲状のひび割れが発生した。

これらは打設方法や養生方法などの影響が大きいと考えられており、一部は施工中に改善されたとされている。

その後の施工では、排水処理工の施工、遮水シートの採用、補強金網の敷設などにより水の影響を排除し、ひび割れに対する補強が採用されるとともに打設時に空気を巻き込まないように工夫する、長距離の流動を避け吐出口を移動させるなどして良好な施工ができたと報告された²⁻²⁷⁾。

軟弱地盤上の橋台背面盛土として、気泡ミルクの施工の際に内部温度や壁面土圧および沈下量が計測され、内部温度は80℃近くまで上昇し、中心部と側面では20度の温度差が生じているのが観測された。また、壁面に取り付けた土圧計は、一時的に気泡ミルクの液圧を出力した後負圧を検出し、通常の盛土で発生する土圧の1/10程度の値で落ちついていることも報告された²⁻²⁸⁾。

以上のように、実用的な配合の選定と物性についての一連の検討は実施されている。日本道路公団の「気泡混合軽量土を用いた軽量盛土工法の設計・施工指針²⁻⁹⁾」では本文でも示した配合設計法や盛土の設計に用いる物性値、安定計算の方法および構造細目などをとりまとめて設計および積算ができるようにしている。しかし、フレッシュな状態での気泡モルタルの安定性に関する研究はほとんど見られず、日本道路公団の指針にも配合と安定性に関する細かい記述はない。また、乾燥収縮特性や熱特性に関する研究も少ない。施工に関しては、どの程度の品質変動があるかのデータも示されたものがない。

このため、気泡ミルクや気泡モルタルの材料分離に対する抵抗性を考慮した汎用的な配合設計法の確率が望まれる。

2. 4 セメント・コンクリートのレオロジー特性と材料分離に関する研究

理想的な気泡モルタルには流動性があり、なおかつ気泡や砂の分離に対する抵抗性の高いことが要求される。そのためには、使用材料の選定とともに適切な配合を選定することが極めて重要である。第1章でも述べたように気泡ミルクや気泡モルタルの安定性を検討する際にセメントミルクの気泡や砂粒子の保持能力を検討することが重要であると考えられる。そのためにはモルタルやコンクリートの流動体としての特性の研究であるレオロジー特性に関する研究や材料分離に関する研究の手法や成果を理解しておく必要がある。

本節では、気泡ミルク、気泡モルタルの安定性の検討の参考になると考えられるレオロジー特性の研究および材料分離の研究について整理することとする。

2. 4. 1 セメントミルクのレオロジー特性に関する研究

懸濁液のレオロジー特性に関する研究は古くから行われ、1906年にEinsteinが希薄サスペンションの相対粘度式²⁻²⁹⁾を発表したものにさかのぼる。セメントペーストは懸濁液の1種であるがその粘度式に関する研究は、角田ら²⁻³⁰⁾、Vom Berg²⁻³¹⁾の研究が最初である。

角田ら²⁻³⁰⁾は、森・乙竹の高濃度懸濁液に対する粘度式²⁻³²⁾のセメントペーストへの適応性を検討した。普通ポルトランドセメントの固体容積濃度が0.1~0.5(普通セメントでW/C=32~286%)の範囲で、分散剤をセメント重量の0.25%添加したペーストの回転粘度計および球引き上げ粘度計による測定結果を用い、セメント粒子の団粒を考慮することでセメントペーストに粘度式が適用できるとし次式を得た。

$$\tau = \eta_0 \left\{ 1 + \frac{3}{1/X_v + 1/0.52} \right\} \gamma + \tau_y \quad \dots \dots (2.4.1)$$

ここに、 η_0 : 塑性粘度

X_v : 団粒容積濃度

γ : ずり速度

τ_y : 降伏値

また、固体容積濃度が0.1以下ではニュートン流体、0.1以上ではビンガム流体として挙動するとしている。

岸谷・岡²⁻³³⁾は、普通ポルトランドセメント、川砂、AE剤(C×0.03%)、AE減水剤(C×0.25%)を使用したセメントペーストとモルタルのレオロジー特性値を球引き上げ粘度計により測定した。流動モデルを擬塑性流動モデルとビンガム流動モデルを検討し、ビンガム流動モデルの適用性がよいことを確認した。球引き上げ試験における粘度式を以下のように与えた。

$$\frac{f}{7/2 \cdot \pi^2 \cdot r^2} = \frac{12U \eta_{pl}}{7 \pi r} + \tau_f \quad \dots \dots (2.4.2)$$

ここに、 f : 引き上げ力
 U : 移動速度
 η_{pl} : 塑性粘度
 τ_f : 降伏値
 r : 球の半径

また、塑性粘度と降伏値をセメントの体積濃度から求める実験式を提案した。

$$\tau_f = 0.3537 \exp(0.9044 V_c / V_w) \quad \dots \dots (2.4.3)$$

$$\eta_{pl} = 0.2653 \exp(0.7617 V_c / V_w) \quad \dots \dots (2.4.4)$$

ここに、 V_c : セメントの容積
 V_w : 水の容積

さらに、既存の研究の結果(回転粘度計: Ish-Shalom²⁻³⁴⁾, K. Wesche²⁻³⁵⁾、平行板プラ
 ストメータ: 水口²⁻³⁶⁾)をセメントの容積/水の容積と降伏値、塑性粘度の関係で整理し、
 降伏値はほぼ同様であるが塑性粘度は岸谷らの測定値に対して K. Wescheのデータが1/10
 のオーダーで、Ish-Shalomのデータは2 オーダー程度低く、試験方法により大幅に異なるこ
 とがあることを指摘した。

気泡に関連する混和剤の影響については、以下の知見を得た。

- ① A E 剤の添加により降伏値、塑性粘度ともに大きくなる
- ② A E 減水剤の添加により降伏値は増加するが塑性粘度は低下する

モルタルでは、以下の知見を得た。

- ① 水セメント比が小さくなると降伏値、塑性粘度とも増加する
- ② 砂の体積比が増加すると降伏値、塑性粘度とも増加する
- ③ フロー値と降伏値の相関が高い

村田・菊川ら²⁻³⁷⁾は自動化された回転粘度計(オートビスコメータ)を用い、普通ポル
 トランドセメントおよび3種類の砂を用いたプレーンペーストとモルタルのレオロジー特
 性値を測定しコンシステンシーのレオロジー的考察を行った。セメントペーストについ
 ては W/C が 30% ~ 100% 範囲の 11 点で測定しており、モルタルでは W/C を 50, 65, 80% の
 3 種類とし S/C を 1 ~ 3 の間で変化させた配合について測定した。測定結果からセメン
 トペーストの相対粘度は以下の式で表せるとした。

$$\eta_{re} = (1 - C_v / C)^{-(-K_1 C_v + K_2)} \quad \dots \dots (2.4.5)$$

ここに、 η_{re} : 相対粘度
 C_v : セメントの体積濃度
 C : セメント粒子の団粒化による有効濃度係数
 細密充填 : $1/C = 1.35$ 、立方格子配列 : $1/C = 1.92$
 K_1 : 実験定数 (-16.3)
 K_2 : 実験定数 (13.6)

また、村田・菊川²⁻³⁸⁾は、各種のポルトランドセメントペーストの粘度式を検討した。普通セメント3銘柄、早強セメント、超早強セメント、中庸熱セメント各1銘柄、保水剤（プレーンペースト用）、各種混和剤16種類を用い、大型回転粘度計（内筒外形7cm、外筒内径9cm）によりレオロジー定数を測定している。測定に当たっては、ペーストの移動速度を記録し、レオロジー定数算定に用い、水セメント比が40～100%の各セメントを用いたプレーンペースト（セルローズ系保水剤：c×0.25%添加）の塑性粘度、降伏値を求めた。

粘度式の決定においては基礎式としては、Roscoreの式を用い20℃の実験値を用いて実験定数を決定し、次式を得た。

$$\eta_{re} = (1 - V/C)^{-(-17.5V+12.0)} \dots\dots (2.4.6)$$

ここに、 η_{re} : 相対粘度
 V : セメントの体積濃度
 C : セメントの実績率

また、塑性粘度と降伏値の関係を求め次式を得ている。

$$\tau_f = a \eta_{pl} + b = 1.21 \times 10^{-5} \eta_{pl} + 1.2 \times 10^{-2} \dots\dots (2.4.7)$$

ここに、 η_{pl} : 塑性粘度
 τ_f : 降伏値

普通セメントの水セメント比40%のセメントペーストで温度の影響を調べ、5℃～30℃の範囲で各温度（T）での塑性粘度、降伏値を η_t 、 τ_t とすると次式で表せるとした。

$$\eta_t = 0.79 T + 5.6 \dots\dots (2.4.8)$$

$$\tau_t = 0.13 T + 0.16 \dots\dots (2.4.9)$$

また、練混ぜ後の経過時間の影響を水セメント比40%の普通セメントペーストで調べた。塑性粘度が練混ぜ直後から直線的に増加する時間帯があり、10℃で120分、20℃で90分、30℃で60分であるとし、これらの時間内での塑性粘度の増加量は、それぞれ1.4poise/h、1.5poise/hおよび8.3poise/hであるとした。

混和剤の影響を調べた結果は、以下のようであった。

a) 陰イオン系AE剤ではその使用量の増加に伴って、塑性粘度は増加傾向を示すが、使用量がセメントの重量に対する固形分比で約0.012%を越えると、エントレインドエアの影響が卓越し塑性粘度は減少傾向を示した。これに対し、非陰イオン系AE剤は使用量による影響は認められなかった。

b) リグニンスルホン酸塩系およびオキシカルボン酸塩系の通常の減水剤は、その使用量の増加に伴ってセメントペーストのレオロジー定数は減少した。高性能減水剤を使用した場合は、使用量に伴うレオロジー定数の低下が顕著であって、剤の銘柄に関わらず使用量がセメント重量に対する固形分比で約0.5%においてレオロジー量は

最小値に達した。この場合、降伏値は $0.04\sim 0.12\text{gf/cm}^2$ となり、高性能減水剤の使用によって、セメントペーストをニュートン体に近似させ得ることを示した。

c) 起泡剤、接着剤、グラウト剤および脱型剤は、それぞれの添加量の増加に伴って塑性粘度は減少した。しかし、この中で脱型剤を除く他の混和剤は、添加量をさらに増加した場合、塑性粘度が増大傾向に転じた。降伏値については、これらの混和剤中には剤の添加量の増大の影響を全く受けないもの、あるいは添加量の増加に伴って増大するものが多かった。

d) 促進剤は剤の添加によって塑性粘度および降伏値とも大きくなった。一方、無機系遅延剤は剤に添加による影響は少なかった。凝集剤はセメント粒子がフロック状となるため、見掛けの体積濃度が増大し塑性粘度は大となったが降伏値は減少した。

以上のようにセメントペーストのレオロジー特性値は平行板プラストメータ、回転粘度計あるいは球引上げ式粘度計により測定され、いくつかの測定値が得られている。しかしながら岸谷らが指摘したように得られた降伏値や塑性粘度はかなり差があり再度確認する必要があると考えられた。また、混和剤の影響を調べた研究においては、タンパク系起泡剤を用いたデータも示されているが、水セメント比が40%のみであることや気泡としてどの程度の量になっているかが不明である。いずれにしても気泡を多量に混合したセメントペーストやモルタルの研究はほとんどないため実験により求める必要があることが判明した。

2. 4. 2 コンクリートの材料分離に関する研究

気泡モルタルの安定性の評価に関連するコンクリート材料分離に関する研究としては、コンクリート中の骨材とモルタルとの付着性に着目した研究やコンクリート中の骨材の沈降や気泡の上昇などの挙動に関する研究が挙げられる。また、振動下における分離の重要性から振動下でのレオロジー特性を検討した研究も多い。

木村ら²⁻³⁹⁾はコンクリート中の骨材とモルタルの付着性に注目し、7リットルのコンクリートを5mmふるいに乗せ60秒間振動をかけたときの落下したモルタル量をコンクリート中のモルタル量で除し百分率で表した材料分離度(SI値)を用いた評価を行った。その結果SI値が60%以上で分離(Wet segregation)が生じることや配合から分離の可能性を推定できることを示した。

寺西²⁻⁴⁰⁾は、静置時の粗骨材の沈下挙動を説明する基礎として次のような考察を行った。マトリックス中を沈下する粗骨材の挙動は、粘塑性流体中の剛体の運動であると見なすことができ、それを単純化するために次の条件を設定した。

- 1) 無限大境界流体中のを1個の粗骨材が沈下する状況を想定する。したがって、実際のフレッシュコンクリート中において生ずると予想される粗骨材どうしの相互作用の影響は考慮しない。
- 2) 計算を容易にするために、粗骨材は近似的に球形であると仮定し、沈下挙動に及ぼす粗骨材形状の影響は考えない。
- 3) マトリックスモルタルは均質な流体であると仮定し、また、その流動挙動はビン

ガムモデルに従うものとする。したがって、セメントペーストと粗骨材の分離あるいはブリージングなどの影響は考慮しない。

- 4) 粗骨材とマトリックスモルタルの界面において、すべりは生じないものと仮定する。

これらの仮定から、粗骨材がビンガム流体中を移動するために必要な外力 F とモルタル中のせん断応力 τ 、また、粗骨材の移動速度 v とモルタルのひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の関係に対しては、粗骨材の半径を r として次のAnsleyの式による表現を用いた。

$$\tau = F / 12 \pi r^2 \quad (2.4.10)$$

$$\dot{\gamma} = v / 2 r \quad (2.4.11)$$

また、ビンガムモデルの構成則は次式で表される。

$$\tau = \eta \dot{\gamma} + \tau_y \quad (2.4.12)$$

ここで、 η は塑性粘度、 $\dot{\gamma}$ はひずみ速度、 τ_y は降伏値である。

$\tau < \tau_y$ のとき $\dot{\gamma} = 0$ である。

したがって、外力 F と移動速度 v の関係は、式 (2.4.12) に、式 (2.4.10) および式 (2.4.11) を代入して次式が導かれる。

$$F = 6 \pi \dot{\gamma} \eta v + 12 \pi r^2 \tau_y \quad (2.4.13)$$

ただし、 $F < 12 \pi r^2 \tau_y$ のとき $v = 0$ となる。

図-2.4.1は、ビンガム流体中を移動する球体に関する外力と移動速度の関係を図示したものである。

一方、粗骨材がモルタル表面より下方に位置し、また、静的な釣合い関係が成立するのに十分なほど緩やかに移動するとき、粗骨材に働く外力には重力と浮力が考えられ、その状況は図-2.4.2に示すようになる。したがって、粗骨材に加わる外力 F は次のように表せる。

$$F = (\rho_s - \rho_m) V_s g = 4 (\rho_s - \rho_m) \pi r^3 g / 3 \quad (2.4.14)$$

ここで、 ρ_s 、 ρ_m は粗骨材とモルタルの密度、 V_s は粗骨材の体積 ($(4/3) \pi r^3$) である。

式 (2.4.13) と (2.4.14) を整理して粗骨材の沈下速度 v は次のように表せる。

$$v = 2 r \{ r g (\rho_s - \rho_p) - 9 \tau_y \} / 9 \eta \quad (2.4.15)$$

また、粗骨材の沈下限界は、式 (2.4.15) において $v = 0$ のときであるから、粗骨材とモルタルの密度差 $(\rho_s - \rho_m)$ が式 (2.4.16) を満たすときには粗骨材の沈下が生じないことになる。

$$\tau_y > r g (\rho_s - \rho_p) / 9 \quad (2.4.16)$$

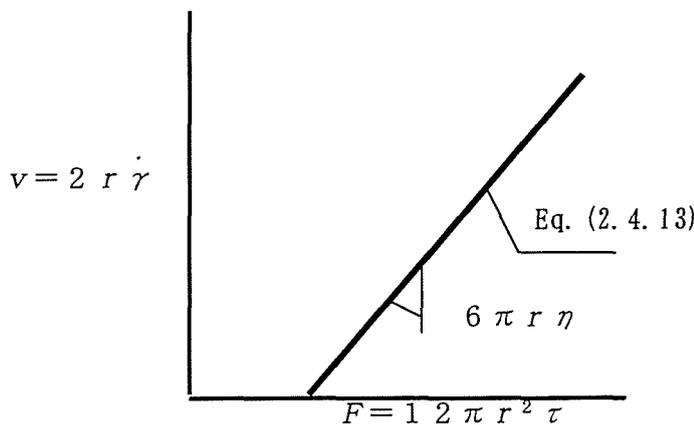


図-2.4.1 球体の移動速度と外力の関係

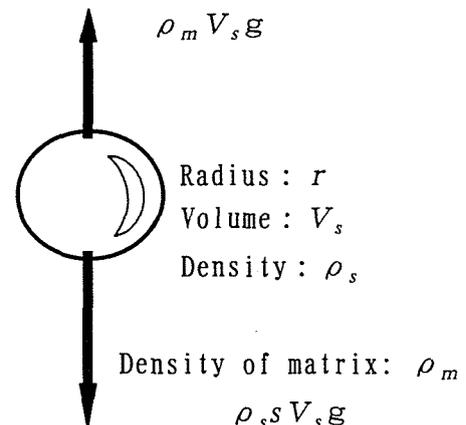


図-2.4.2 球体に働く外力状況

式 (2.4.16) から明らかなように粗骨材の沈下が起こる密度差の限界値は、粗骨材の半径とマトリックスの降伏値のみに支配され、粗骨材の半径が大きいくほど、また、モルタルの降伏値が小さいほどその値は小さくなり、密度差が小さくても分離が生じるようになる。また、粗骨材の沈下速度は、式 (2.4.15) から明らかなように粗骨材半径が大きくなると相乗的に大きくなり、モルタルの塑性粘度の増加に反比例して小さくなる。

また、振動下でも同様の手法により、振動下のマトリックスモルタル中を沈降する粗骨材の挙動を以下のように示している。強制変位による振動を受けるビンガムモデルの構成則は、振動によるひずみ速度の振幅を $\dot{\gamma}_{vib}$ として、以下のように表記される。なお、粗骨材の沈下挙動は、下向きへの一方向運動であるから、コンシステンシー座標の第1象限 ($\tau \geq 0, \dot{\gamma} \geq 0$) のみを取り扱う。

$$\dot{\gamma} \geq \dot{\gamma}_{vib} \text{ の場合} \quad \tau = \eta \dot{\gamma} + \tau_y \quad (2.4.17a)$$

$$\dot{\gamma} < \dot{\gamma}_{vib} \text{ の場合} \quad \tau = \eta \dot{\gamma} + \tau_y (1 - 2/\pi \arccos (\dot{\gamma} / \dot{\gamma}_{vib})) \quad (2.4.17b)$$

振動コンシステンシー曲線の変化部分を表す式 (2.4.17b) は、一般に、比較的直線に近い軌跡を描く。したがって、計算を単純化するために、図-2.4.3に示すような、バイ

リニアの関係に近似しても、理論結果に及ぼす影響は小さいものと考えられる。

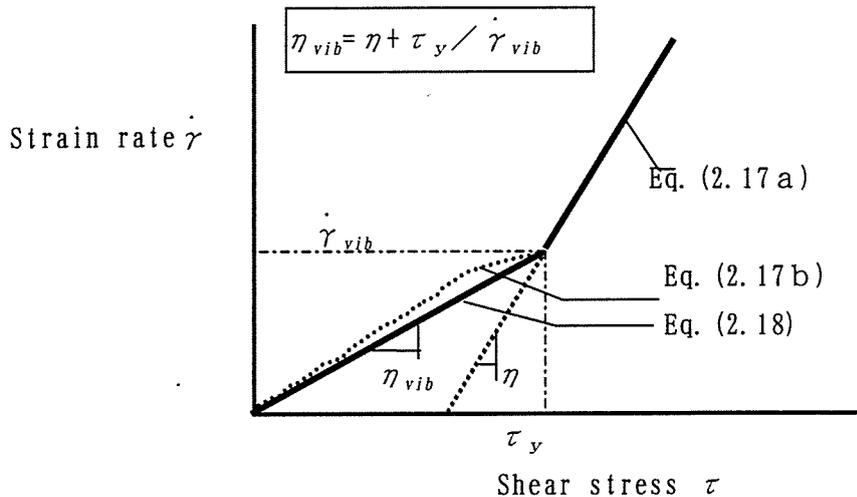


図-2.4.3 バイリニア型の振動コンシステンシー曲線

式 (2.4.17 b) を原点と $(\eta \dot{\gamma}_{vib} + \tau_y, \dot{\gamma}_{vib})$ を通る直線に置換すると以下の式に示すようになり、加振によるビンガム流体の流動化効果を直線の初期勾配 η_{vib} によって一元的に表すことができるようになる。

$$\tau = (\eta + \tau_y / \dot{\gamma}_{vib}) \dot{\gamma} = \eta_{vib} \dot{\gamma} \quad (2.4.18)$$

ここに、 η_{vib} : 振動塑性粘度 ($= \eta + \tau_y / \dot{\gamma}_{vib}$)

式 (3.4.18) に、式 (2.4.10) および式 (2.4.11) を代入して、振動下のビンガム流体中の球に働く外力 F と移動速度 v の関係を整理すると、以下のようになる。

$$F = 6 \pi r \eta_{vib} \cdot v \quad (2.4.19)$$

さらに、式 (2.4.19) に式 (2.4.14) の球体に働く外力の関係を導入すると、 $\dot{\gamma} < \dot{\gamma}_{vib}$ の場合の振動下におけるビンガム流体中における粗骨材の沈下速度は式 (3.4.20 b) に示すように導かれる。

また、 $\dot{\gamma} \geq \dot{\gamma}_{vib}$ の場合の沈下速度は、無振動の場合と同様である。

$$\dot{\gamma} \geq \dot{\gamma}_{vib} \text{ の場合} \quad v = 2 r \{ r g (\rho_s - \rho_m) - 9 \tau_y \} / 9 \eta \quad (2.4.20 a)$$

$$\dot{\gamma} < \dot{\gamma}_{vib} \text{ の場合} \quad v = 2 r^2 g (\rho_s - \rho_m) / 9 \eta_{vib} \quad (2.4.20 b)$$

振動下ではマトリックスモルタルの降伏値が消失するため、式 (3.4.20) から明らかなように、モルタルと粗骨材間に密度差があれば粗骨材は必ず沈下することになる。また、振動による変位速度 v_{max} と振動によるひずみ速度の振幅 $\dot{\gamma}_{vib}$ を直接関係づけることはで

きないが、振動力が増大して v_{max} が大きくなると、振動塑性粘度 η_{vib} が減少することは明らかであり、粗骨材の沈下速度 v は大きくなるものと考えられる。

このように、理想的な条件設定はあるが骨材の沈降をマトリックスのレオロジー特性で表現した。

また、振動下のモルタルやコンクリートのレオロジー特性を検討した研究には以下のようなものがある。

明石ら²⁻⁴²⁾はモルタルとコンクリートの振動下における見かけの粘性を振動台と球引上げ粘度計を用いて測定した。試験に用いた試料は W/C が 40, 50, 60% のモルタルおよびコンクリートで加速度を 2, 4, 6, 8, 10 g と変化させ、各々 6,000, 9,000, 12,000 cycle/min に変化させて粘性を測定した。実験には振動台と球引上げ式粘度計を用い、見かけ粘性は球が粘性流体中をゆっくり移動する際の抵抗をストークスの法則で計算できるとして次式により求めた。

$$\eta = F / (6 \pi r v) \quad (2.4.21)$$

ここに、 η は粘性係数 (poise)、 F は金属球を引き上げるのに要する力 (dyne)、 r は球の半径 (cm)、 v は金属球の上昇速度 (cm/sec) である。

モルタルの試験結果によると、粘性は加速度が増加するのに伴い直線的に低下し、その割合は水セメント比が小さいほど大きくなる傾向であった。静止したときの測定値が得られていないが粘性は振動を加えることにより急激に低下すると考えられる。

角田ら^{2-42) 2-43)}は振動台上に固定した回転翼型レオメータによって、フレッシュコンクリートのレオロジー定数に関連する値を測定し、回転トルク～回転数曲線 (流動曲線) を求めている。その結果によれば振動を加えることにより降伏値が消滅し、無振動下では直線であった流動曲線が低回転数域でビンガムモデルとは異なる形状を示し、準粘性流動に近い挙動を示す結果を得た。

水口ら²⁻⁴⁴⁾は、直径 6 cm の大きな球を用いた球沈下試験を振動台上で行いフレッシュコンクリートの塑性粘度が振動加速度の増大とともに減少し、スランプの小さいコンクリートほど減少量が大きくなる結果を得た。

吉野ら^{2-45) - 2-47)}は、モルタルを用い振動台上で球引上げ試験を行った結果を用い、振動下の流動挙動に線形のひずみ速度-せん断応力関係を仮定して見かけのレオロジーを計算により求めた。振動加速度の増加に伴い塑性粘度は増加し、降伏値が減少する結果を得た。

寺西²⁻⁴⁸⁾は、配合の異なるコンクリートのウェットスクリーニングモルタルとアルミ製球 (直径 3 cm、比重 2.69) 振動下における球沈下試験およびコンクリートを用いた振動下での骨材の沈下を調査した。検討の結果、静置時においてはマトリックスモルタルと粗骨材の密度差では骨材の沈下は生じないこと、振動を加えると骨材の沈下は必ず発生すること、振動下での骨材の沈下挙動はマトリックスモルタルのレオロジー特性により基本的に決定されること、そしてコンクリート中の粗骨材の量は粗骨材の沈下挙動に大きな影響を及ぼし、通常量の粗骨材が混合されているコンクリートでは粗骨材の沈下速度は 1 個の粗骨材が沈下する場合の 4% 以下に低下することを確認した。また、コンクリート中の粗骨材量が粗骨材の沈下速度に影響する原因としてはマトリックスモルタルの減少によるせ

ん断変形領域の減少が支配的であるためと推測した。

2. 5 まとめと検討課題

以上述べたように、過去に行われた一連の研究で材料の配合、設計、施工に関する基礎データが得られ、指針として実用上の標準が示された。しかしながら、気泡を極めて多く含む材料の配合設計時の安定性に関する検討や硬化体の破壊基準などに関する研究はわずかにある程度である。気泡ミルクや気泡モルタルの安定性を考える際に気泡や砂粒子がいかに均一に分散し、練混ぜ、圧送および打設の過程で安定して保持されるかを評価することが必要である。これは流体中における粒子の移動の問題であると考えられるため、レオロジー特性値すなわち降伏値と塑性粘度を把握する必要がある。ここでは、流体はセメントミルクや気泡ミルクであり気泡モルタル自身であると考えられ、粒子は気泡であり砂粒子であると考えられる。このことからセメントミルク、気泡ミルクおよび気泡モルタルの配合とレオロジー特性の関係を把握しておくことにより現在多く用いられている配合の安定性の評価や安定性の改善のための方法が検討できるものと考えられる。

セメントペーストやモルタルおよびコンクリートのレオロジー特性、流動性や材料分離に関する研究は約20年の歴史を持ち、最近でも各種の化学混和剤により様々な流動特性を有するコンクリートが登場していることから研究が続けられている²⁻⁴⁹⁾。これらの既往の研究は非常に有用で利用可能であると考えられるが、レオロジー特性値は測定方法により大きな差があることも判明した。また材料分離に関しては流体中の球の移動に関する考え方の応用は本研究においても参考にすべきものである。

物性面では乾燥収縮特性や熱特性の研究が少ない点や硬化時に内部の温度が高温になる点については特に問題にされていないが検討の必要があると考えられる。また、一般の気泡モルタルでは実現困難な低強度の気泡モルタルや特殊な特性の必要な用途への対応については、ほとんど検討されていない。

このような観点から研究課題と本研究での検討概要を以下に列挙する。

1) 気泡ミルクおよび気泡モルタルの配合とレオロジー特性の把握

気泡混合材料のレオロジー特性に関する研究はほとんどないため配合との関連を明らかにする必要がある。本研究では第3章で室内試験を実施した結果を基に検討した。

2) 気泡ミルクおよび気泡モルタルの配合と安定性の検討

気泡混合材料の安定性の実態や影響要因の検討と安定性を高める方策の検討が必要である。本研究では、レオロジー特性値からの検討、室内試験および打設実験により第3章、第6章で検討する。

3) 気泡モルタルの配合と強度に関する検討（低強度安定材料）

気泡モルタルの用途によっては、土程度（1kgf/cm²）の強度とする必要がある場合がある。単にセメント量を減らすだけでは安定性が得られないことから対策が必要である。反応性のない微粉末を用いて低強度の配合を第4章で検討する。

4) 気泡モルタルの各種物性の検討

既往の研究でも一連の成果が得られているが、より多くの検討が必要なことや実施されていない項目もあることから特定の配合ではあるが第4章で検討する。

5) 気泡モルタルおよび気泡ミルクの配合設計法の提案

第3章および第4章の検討結果を基に気泡混合材料の分離抵抗性を考慮した配合設計の方法を第5章で検討し提案する。

6) 施工された気泡モルタルの品質と挙動

3章で検討した気泡ミルクの安定性に関連して安定な範囲にある配合の気泡ミルクを現場で施工した場合の品質について調査を実施した結果を基に現場レベルでの安定性を第6章で論じた。また、施工された気泡モルタルの挙動の計測結果から4章で検討した物性値との関連を検討し、設計に関連した知見を示す。

第2章の参考文献

- 2-1) 例えば 赤井公昭：エアーミルクの道路盛土への適用、基礎工、pp40～49, Vol. 18, No. 12. 1990
- 2-2) 海野隆哉・八巻一幸・古谷時春：気泡モルタルの鉄道盛土への利用、基礎工、pp50～58, Vol. 18, No. 12, 1990
- 2-3) 日本道路公団試験研究所土工試験研究室, 麻生フォームクリート(株), エースコン工業(株), 大阪セメント(株), 奥多摩工業(株), 小野田セメント(株), 住友セメント(株), 第一セメント(株), 秩父セメント(株), 日本イトン工業(株)：平成3年度FCB工法 (Foamed Cement Banking Method) FCB材料の基本特性に関する共同研究報告書 (Aグループその1)、pp72, 平成4年4月
- 2-4) (株)エステック：エスフォーム工法パンフレット, 1994
- 2-5) 古谷俊明・山之内豊聡・浜田英治：気泡セメントモルタルの力学的特性, 昭和62年度土木学会西部支部研究発表会講演集, 1988. 3
- 2-6) 山之内豊聡・佐々木典哉・浜田英治・水谷勝輝：気泡セメントモルタルの変形・強度特性, 第23回土質工学研究発表会, pp1993-1994, 1988. 6
- 2-7) 佐々木典哉・山之内豊聡・浜田英治：軽量盛土材としての気泡セメントの三軸圧縮特性、土木学会第47回年次学術講演会概要集, pp136-137, 1988. 9
- 2-8) 日本道路公団試験研究所土工試験研究室：気泡混合軽量土を用いた軽量盛土工法の設計・施工に関する指針原案」、平成8年3月
- 2-9) 日本道路公団：「気泡混合軽量土を用いた軽量盛土工法の設計・施工指針」、平成8年9月
- 2-10) 三嶋信雄・殿垣内正人・杵山努・水本博公・小林 一：気泡セメント盛土材 (FCB) の起泡剤に関する配合試験, 第28回土質工学研究発表会概要集, pp2627-2628, 1993
- 2-11) 星野克之・横田聖哉・今吉英明・水本博公：気泡混合軽量土の起泡剤の材料特性、第30回土質工学研究発表会概要集, pp2519-2520, 1995

- 2-12) 三嶋信雄・外山正人・川井田実・佐藤嘉広：気泡セメント盛土材の強度特性、第27回土質工学研究発表会概要集, pp2497-2500, 1992
- 2-13) 三嶋信雄・星野克之・池田利昭・水本博公・小林一：気泡混合軽量土の基本配合試験、第29回土質工学研究発表会概要集, pp2407-2408, 1994
- 2-14) 外山正人・川井田実・佐藤嘉広：気泡セメント盛土材（FCB）の長期養生特性、土木学会 第47回年次学術講演会概要集, pp1056, 1057, 1992
- 2-15) 白地哲也・山之内豊聡：軽量盛土材としての気泡セメントの水浸時における強度特性、第26回土質工学研究発表会概要集, pp2199-2200, 1991
- 2-16) 新舎 博・浜崎勝利・車田佳範：軽量盛土材として利用する気泡セメントの材料特性、第27回土質工学研究発表会概要集, pp2491-2494, 1992
- 2-17) 別井智行・殿垣内正人・以内徹：気泡混合軽量土の吸水特性、第31回土質工学研究発表会概要集, pp2497-2498, 1996
- 2-18) 外山正人・川井田実・佐藤嘉広：気泡セメント盛土材（FCB）の養生温度特性、土木学会 第47回年次学術講演会概要集, pp1058, 1059, 1992
- 2-19) 山之内豊聡・浜田英治：軽量盛土材としての気泡セメントの力学特性と降伏基準に関する一考察、土木学会論文集, 第406号／Ⅲ-11, pp283-290, 1989. 6
- 2-20) 星野克之・今吉英明・深沢明雄・三嶋信裕：気泡混合軽量土の耐久性、第30回土質工学研究発表会概要集, pp2533-2534, 1995
- 2-21) 三嶋信雄・殿垣内正人・杵山努・以内徹：気泡セメント盛土材（FCB）の配合別による動的強度特性、第28回土質工学研究発表会概要集, pp2635-2636, 1993
- 2-22) 三嶋信雄・森本美樹・横田聖哉・以内徹：気泡混合軽量土の強度特性、第30回土質工学研究発表会概要集, pp2531-2532, 1995
- 2-23) 海野隆哉・八巻一幸・古谷時春：気泡モルタルの鉄道盛土への利用、基礎工、pp50～58, Vol. 18, No. 12, 1990
- 2-24) 三嶋信雄・別井智行・新舎博・白上勝章・井上茂：気泡混合軽量土の摩擦特性、第30回土質工学研究発表会概要集, pp2535-2536, 1995
- 2-25) 長尾和之・別井智行・黒島一郎・石田義博：気泡混合軽量土におけるすべり抵抗杭の効果、第30回土質工学研究発表会概要集, pp2537-2538, 1995
- 2-26) 都築敏樹・若槻良行・永田孝夫・川井田実：エアミルクを用いた軽量盛土の強度特性、第25回土質工学研究発表会概要集, pp2099-2100, 1990
- 2-27) 長尾和之・三嶋信雄・福岡一幸：気泡混合軽量土を用いた東名高速道路の拡幅工事、基礎工、pp76～80, Vol. 22, No. 10, 1994
- 2-28) 長尾和之・杵山努・国分健一：気泡混合軽量土を用いた橋台背面の土圧軽減工法、基礎工、pp71～75, Vol. 22, No. 10, 1994

- 2-29) Einstein, A. : Ann. Physik, Vol. 19, p289, 1906, Vol. 34, p591, 1911
- 2-30) 角田忍・明石外世樹：セメントペーストの粘度式について、セメント技術年報
XXXII, pp88-91, 1978
- 2-31) Vom Berg, W. :Influence of specific surface and concentration of solid upon
flow behaviour of cement paste, Magazine of Concrete Research, Vol. 31, No. 109, 1979.
- 2-32) 森芳郎・乙竹直：懸濁液の粘度について、化学工学, Vol. 20, No. 9, pp. 488-493, 1956.
- 2-33) 岸谷孝一・岡誠一：フレッシュセメントペーストおよびモルタルのレオロジー定数
測定、日本建築学会論文報告集、第305号、pp1-7、1981
- 2-34) Ish-Shalom, M. and Greenberg, S. E. :The Rheology of Fresh Portland Cement
Paste, Proc. 4th Inter. Sympo. Chemistry of Cement, Washington, pp731-743, 1960
- 2-35) Wesche, K. :On the Influence of Separations on the Rheological Investigation
of Cement Mortar in the Rotation Rheometer, Proc. Fresh Concrete, RILEM SEMINAR,
Leeds, Vol. 1, No. 2, 1973. 10
- 2-36) 水口裕之・安永正三：フレッシュモルタルのレオロジー定数測定法、セメント技術年
報, No. 30, pp186-191, 1973
- 2-37) 村田二郎・菊川浩治・大塚茂雄：セメントペーストおよびモルタルにおけるコンシ
ステンシーのレオロジー的考察、セメント技術年報XXVI, pp268-271, 1972
- 2-38) 村田二郎・菊川浩治：ポルトランドセメントペーストの粘度式の研究、土木学会論
文集, 第354号/V-2, pp109-118, 1985. 2
- 2-39) 木村昌博・梅原秀哲・吉田弥智：コンクリートの材料分離の定量化に関する基礎的研
究、セメント・コンクリート論文集, No. 44, pp306-311, 1990
- 2-40) 寺西浩司：フレッシュコンクリートの間隙通過率および振動下の挙動に関する研
究：名古屋大学学位論文、pp. 104-107, 1995
- 2-41) 明石外世樹・葛目和宏：フレッシュコンクリートの振動時の粘性について、セメン
ト技術年報、XXVI, pp272-274, 1972
- 2-42) S. Kakuta, T. Kojima : Effect of Admixtures on the Rheology of Fresh Concrete
During Vibration, 3rd Inter. Conf. on Superplasticizers and Other Chemical
Admixtures in Concrete, pp189-208, 1989
- 2-43) 角田 忍：フレッシュコンクリートの振動時における性質、フレッシュコンクリー
トの挙動とその施工への応用に関するシンポジウム論文集、日本コンクリート工学協
会、pp13-18, 1989. 4
- 2-44) 水口裕之・田中淳一・田中伸幸：振動がコンクリートのレオロジー定数に与える影響、
セメント技術大会論文集、Vol. 46, pp388-393, 1992

- 2-45) 吉野 公・西林新蔵・矢村 潔・井上正一：振動下におけるフレッシュコンクリートの挙動に関する基礎的研究（単純な細粒傾注の素粒子の分離）、材料, Vol. 29, No. 318, pp247-252, 1980. 3
- 2-46) 吉野 公・西林新蔵・前田正敏・井上正一：骨材の振動下における挙動について、土木学会第34回年次学術講演会講演概要集、第5部門、pp77-78, 1979. 10
- 2-47) 吉野 公・前田正敏：振動下におけるフレッシュペーストとモルタルの挙動に関する一考察、土木学会第35回年次学術講演会講演概要集、第5部門、pp308-309, 1980. 10
- 2-48) 前出2-41) pp109-118
- 2-49) 西林新蔵・吉野 公・糸永和明・後藤年芳・平田英樹：増粘剤系高流動コンクリートの配合に関する研究, 第48回平成8年度土木学会中国支部研究発表会発表概要集、pp513 -514, 1996. 5

第3章 セメントミルクおよび気泡モルタルの レオロジー特性と材料分離

3. 1 概 論	37
3. 2 セメントミルクおよび気泡モルタルのレオロジー特性	37
3.2.1 実験概要	37
3.2.2 塑性粘度	40
3.2.3 降伏値	43
3.2.4 フロー値	45
3.2.5 降伏値と塑性粘度の関係	47
3.2.6 気泡と砂粒子の分離抵抗性	48
3.2.7 まとめ	51
3. 3 セメントミルクおよび気泡ミルクの ブリーディング特性	52
3.3.1 実験概要	52
3.3.2 水セメント比とファンネル粘度	54
3.3.3 水セメント比とブリーディング	54
3.3.4 硬化体の水セメント比	56
3.3.5 圧縮強度	57
3.3.5 まとめ	60
3. 4 気泡モルタルの材料分離	62
3.4.1 実験概要	62
3.4.2 静置時の材料分離	64
3.4.3 加圧、減圧繰返し時の材料分離	65
3.4.4 振動下での材料分離	67
3.4.5 大型円柱供試体打設時の材料分離	68
3.4.6 まとめ	69
3. 5 第3章の結論	70
第3章の参考文献	72

第3章 気泡ミルクおよび気泡モルタルのレオロジー特性と材料分離

3.1 概 論

気泡ミルクや気泡モルタルの材料の比重は気泡の 0.03からセメントの 3.15の範囲で大きく異なるために、練混ぜ時、ポンプ圧送時および打設時に分離が生じる可能性がある。材料分離は、気泡の浮き上がりや消泡、砂粒子、セメント粒子の沈降およびブリーディング現象として現れる。このような気泡混合材料の配合設計は非常に重要であるが通常は経験によって決められており、古谷³⁻¹⁾は、良好な状態の気泡ミルクが得られる水セメント比の範囲は50~70%程度であるとしているが、定量的な根拠が示されていない。そこで、配合設計の基礎となるフレッシュなセメントミルク、モルタルおよび気泡ミルク、気泡モルタルのレオロジー特性について調査し、レオロジー定数と気泡混合材料の特性との関係や有効な配合について検討するとともに、材料の分離に関する検討も実施した。なお、セメントと水の混合物はセメントペーストあるいはセメントミルクなどと呼ばれているが、気泡を混合する場合は気泡ミルク（エアミルク）が一般的であるため以後、セメントミルクおよび気泡ミルクと呼ぶことにする。

3.2 気泡セメントミルクおよび気泡モルタルのレオロジー特性

3.2.1 実験概要

セメントミルクのレオロジー特性については、2章で示したように多くの研究があり、粘度式も提案されているが、測定方法による差も大きいことから一連の研究ではセメントミルクのレオロジー特性を把握しておく必要がある。また、気泡を多量に混合した気泡ミルクや気泡モルタルのレオロジー特性を検討した研究は見あたらない。配合設計の基本である材料の流動性ならびに安定性を検討する上でレオロジー特性を知ることはきわめて重要である。そこで、本研究では、気泡を混合する前のセメントミルクのレオロジー特性と気泡ミルクおよび気泡モルタルのレオロジー特性を調べることにより、両者の関係やレオロジー特性値間の関係などを明らかにすることを目的とする。

(1) 使用材料

1) セメント

実験に用いたセメントは、普通ポルトランドセメント（S0社製）および高炉セメントB種（S0社製）であり、その物理的性質を表-3.2.1に化学成分を表-3.2.2に示す。

表-3.2.1 使用セメントの物理的性質

セメントの種類	比重	比表面積 (cm ² /g)	凝結時間 (h-m)		圧縮強さ (kgf/cm ²)		
			始 発	終 結	3日	7日	28日
普通ポルトランドセメント	3.15	3,209	1-48	3-07	160	251	380
高炉セメントB種	3.05	3,709	2-56	4-10	129	210	436

表-3.2.2 使用セメントの化学成分

セメントの種類	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Insol.	Total
普通ポルトランドセメント	22.0	5.7	2.6	63.7	1.4	2.0	0.1	97.5
高炉セメントB種	25.4	8.1	1.9	57.2	2.8	1.7	-	97.1

2) 起泡剤

起泡剤は、使用例の多いタンパク系と界面活性剤系の中から各1種類を選んで用い、それらの性質を表-3.2.3に示す。

表-3.2.3 起泡剤の性質

起泡剤の種類	比重	色	希釈倍率(倍)	発泡倍率(倍)	単位容積質量(g/cm ³)	製品名：メーカー
動物タンパク系	1.18	茶褐色	10	33	0.03	フロフォーム:N商会製
界面活性剤系	1.09	無色	10	33	0.03	エマジットAF:D製薬製

3) 骨材(細骨材)

実験に用いた細骨材は、土木学会の標準粒度に入るように細砂と陸砂を3:7の比率で混合したもので、粒度分布および物理特性を表-3.2.4に示す。

表-3.2.4 細骨材の粒度分布および物理特性

比重	F.M.	粒度分布(残留率累計：%)					
		5mm	2.5mm	1.2mm	0.6mm	0.3mm	0.15mm
2.67	2.16	7.0	16	25	69	97	99.9

4) 練混ぜ水

練混ぜ水は水道水を用い、練上がり温度が20度前後になるよう適宜加熱して用いた。

(2) 実験条件

気泡混合材料の配合がそのレオロジー定数に与える影響を把握するために、配合要因として水セメント比、気泡量、細骨材量を取り上げ、以下の水準とした。

1) セメントミルク

セメントミルクの水セメント比は、45, 50, 55, 60, 65%の5水準とし、2種類のセメントそれぞれについて試験を行った。

2) 気泡ミルク

気泡ミルクはセメントミルクと同様に2種類のセメントを用い、5水準の水セメント比と10~80%の気泡量との組み合わせとし、表-3.2.5に示す配合条件を選定し、試験を行った。

3) 気泡モルタル

気泡モルタルは2種類のセメントを用い、5水準の水セメント比と2種類の起泡剤を用いた20～60%の気泡量の組み合わせとし、表-3.2.5に示す配合条件を選定し、試験を行った。細骨材は砂：セメントミルクの容積比を38：62して試験した。

表-3.2.5 気泡ミルク・気泡モルタルの配合条件

	W/C (%)	気泡混合率 (vol. %)								
		0	10	20	30	40	50	60	70	80
気泡 ミ ル ク	45	○		△		△		○		
	50	○		△		△		○		
	55	○		△		△		○		
	60	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	65	○		△		△		○		
気泡 モ ル タ ル	50	○						○		
	55	○						○		
	60	○		○		○		○		

△：普通セメントとタンパク系起泡剤の組み合わせについてのみ実施

(3) 試験方法

1) フロー試験

フロー値はJHS-117に準じて内径 8cm高さ 8cmの円筒コーンと平板を用い、平板上に置いたコーン中に練上がった気泡混合材料を流し込み、表面を平らに仕上げた後コーンを引き上げ、1分後に広がった材料の最大直径および直交する直径を測定して平均値をフロー値とした。

2) 単位体積質量

混合物の単位体積質量は1リットル容器中の材料の重量を測定して求めた。

3) レオロジー特性値

流動性を有するセメントミルクやモルタルはビンガム流体であると考えられ、そのレオロジー特性値である降伏値および塑性粘度を知ればその流体の特性が把握できる。モルタルやコンクリートのレオロジー特性値の試験方法としては、回転粘度計、球引き上げ試験および平行板プラストメータなどがあるが、今回の測定対象は特性値の値が小さい領域にあることから、このような場合の適用性がよいとされている球引き上げ式粘度計により試験した。装置の概要を図-3.2.1に示す。本装置は、容器内の試料中にある一定速度で動く球の移動速度および引上げ力を測定することによって、間接的に試料のレオロジー一定

数を求めることのできるものである。

試験は、混合物を直径15cm高さ30cmの容器に入れ所定の位置のセットし、容器の底の中央に直径3.17cmの鋼球に取り付けたワイヤーとともに沈める。次にこの球に取り付けたワイヤーを定速モータで6段階程度の異なった速度で引き上げ、引き上げ時の荷重と変位量をXYレコーダにより記録した。変位速度 ($\dot{\gamma}$) とせん断力 (τ_r) を計算し、 $\dot{\gamma} \sim \tau_r$ 曲線より降伏値、塑性粘度を求めた (図-3.2.1参照)。

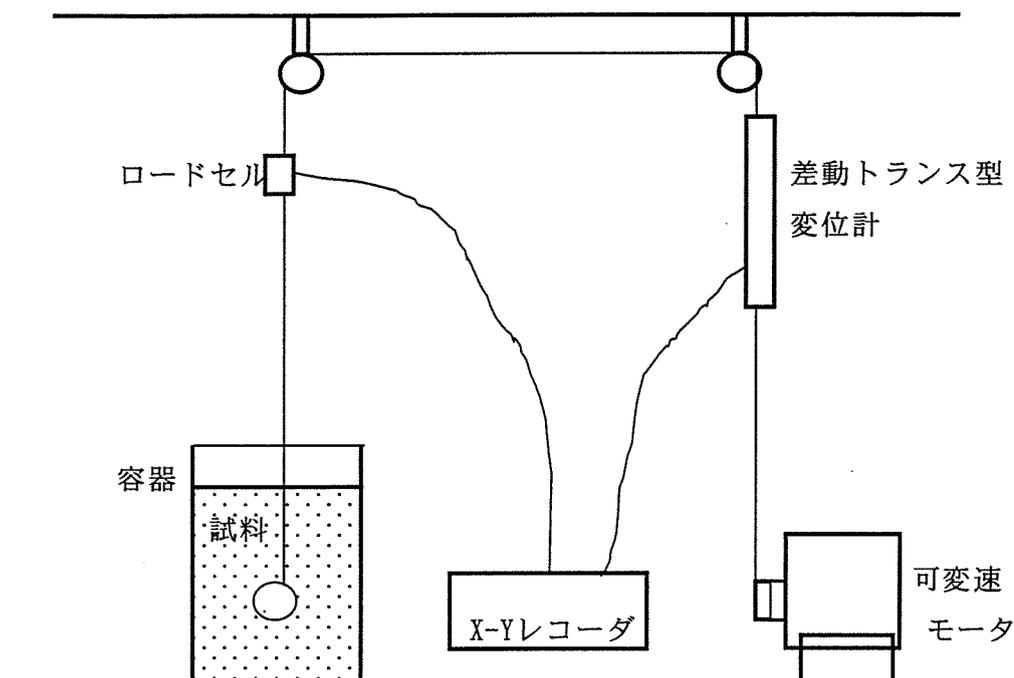


図-3.2.1 球引き上げ粘度試験の概要

3. 2. 2 塑性粘度

レオロジー特性値はコンクリートのワーカビリティを物理量で説明するために用いる試みは古くから行われており多くの研究がある。レオロジー特性値の中の降伏値はスランプ値との関連が深いことや塑性粘度は流動特性と関連が深いことが知られている。また、普通コンクリートでは降伏値と塑性粘度は比例関係にあるとされているが最近の高流動コンクリートなどでは普通コンクリートと異なり混和剤の選定などにより様々な特性値を得ることができるようになってきている。

気泡ミルク、気泡モルタルについてもスランプ値に対応するフロー値や流動性を考える上でレオロジー特性値が重要であるとともにコンクリートに比べると柔らかい範囲で使用する、比重が大きく異なる気泡や砂粒子の混合物であることから特に材料分離についても考慮する必要がある。この際に、流体中の粒子の移動の考え方が参考になり2章で述べたように降伏値と粒子の移動の関係や塑性粘度と粒子の移動速度の関係が重要となる。

セメントミルクの水セメント比と塑性粘度の関係を図-3.2.2に示す。各セメントを用いたセメントミルクの塑性粘度は水セメント比が大きくなるとともに低下した。高炉セメントミルクの塑性粘度は普通セメントミルクよりやや大きく、比表面積の差が現れたものと考えられる。何れのセメントミルクにおいても塑性粘度の時間による変化は明確でない。

図-3.2.3に既往の研究で得られている普通セメントを用いたプレーンミルクのW/Cと塑性粘度との関係を示した。岸谷ら³⁻²⁾が指摘したように測定方法の違いによる測定値の差が大きい。著者らの結果は他に比べて高い値となっている。なお、村田、菊川³⁻³⁾³⁻⁴⁾は回転粘度計、岸谷・岡³⁻²⁾、吉野³⁻⁵⁾は球引上げ式粘度計による試験結果である。吉野の結果とは同一の試験装置を用いたが、本研究では粘度の低い範囲での測定が中心であったため球の移動速度を大きくして測定している。セメントミルクは完全なピンガム流体でないためにせん断応力とせん断ひずみの関係は直線とはならないことが知られている。本研究ではせん断ひずみが小さい範囲の測定値であるため、降伏値が小さくなり塑性粘度が高くなる傾向になると考えられる。W/Cが0.45の場合には吉野の測定値と著者の測定値があり(図-3.2.11参照)、まさに先述した関係にあり測定条件の影響が大きくなった結果であると考えられる。

図-3.2.4、3.2.5はW/Cと気泡ミルクの塑性粘度の関係を示す。図中の記号Pはタンパク系起泡剤、Aは界面活性剤系起泡剤を表し、数字は気泡量

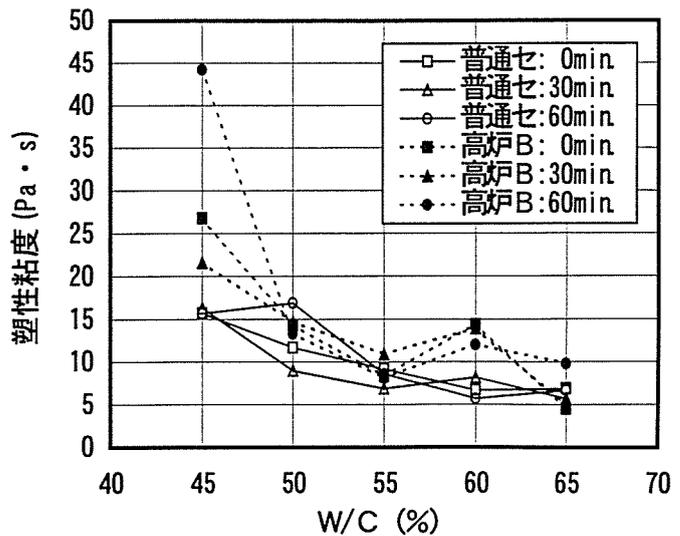


図-3.2.2 水セメント比と塑性粘度の関係

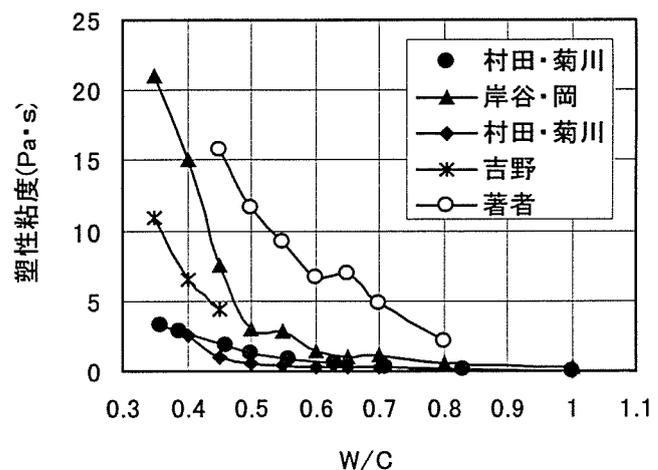


図-3.2.3 W/Cと塑性粘度の関係

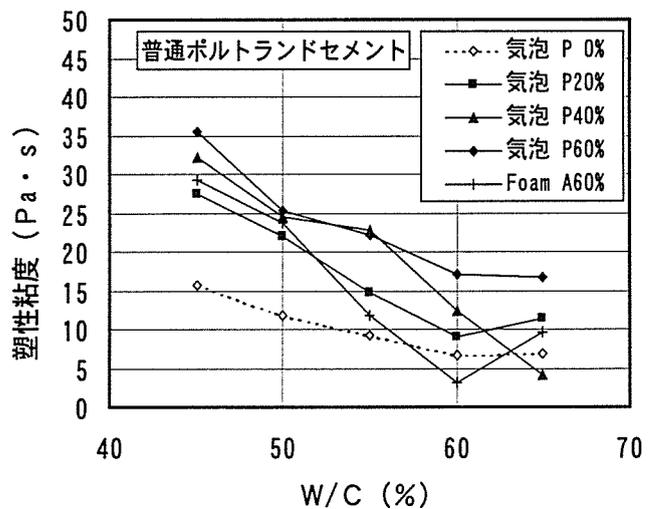


図-3.2.4 W/Cと塑性粘度の関係 (普通セメント)

を示す。

普通ポルトランドセメントでは気泡の添加により全般に塑性粘度が大きくなっている。一方、高炉セメントを用いた場合は気泡混合量が60%のデータのみであるが気泡を混合することによる影響は明確でない。起泡剤の種類の違いによる影響は明確でない。これは気泡がある粘性を有しているためセメントミルクの粘度が高い高炉セメントでは同等かやや低下する傾向にあるが、セメントミルク単味の粘度が高炉セメントの1/2程度の普通セメントでは粘度が上昇する結果になったものと考えられる。普通セメントについては、岸谷ら³⁻¹⁾がAE剤の添加により降伏値、塑性粘度とも大きくなるとの結果の延長上にあると考えられる。図-3.2.6にW/Cが60%で一定のときの気泡混合量と塑性粘度の関係を示す。普通セメントおよび高炉セメントミルクの塑性粘度は、それぞれ7 Pa·s および15 Pa·s で高炉セメントは普通セメントの2倍の値である。気泡を混合した場合の塑性粘度はデータがばらついてはいるが、高炉セメントの場合はやや低下する傾向にあり、逆に普通セメントでは同等かタンパク系起泡剤の場合はやや上昇する傾向にあるが気泡量の影響は小さい。

図-3.2.7はW/Cが60%の気泡モルタルの気泡量と塑性粘度との関係で、気泡モルタルの塑性粘度は気泡量が20%以上では大きくなる傾向にある。

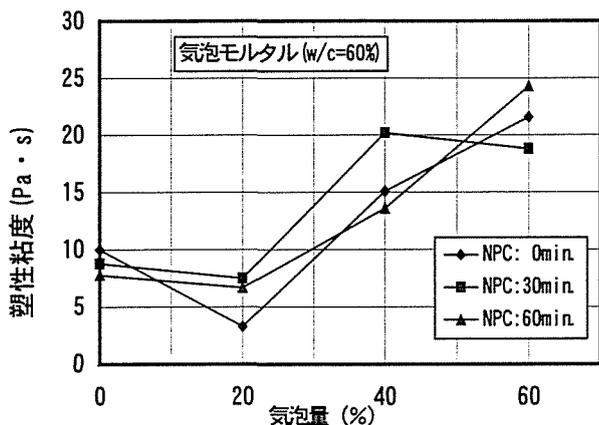


図-3.2.7 気泡モルタルの気泡量と塑性粘度の関係 (W/C=60%)

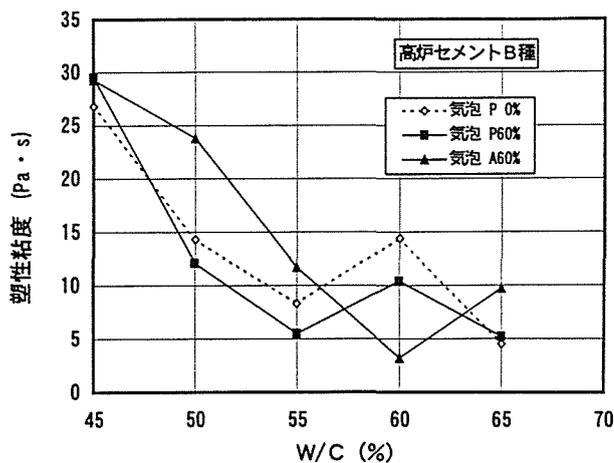


図-3.2.5 W/Cと塑性粘度の関係

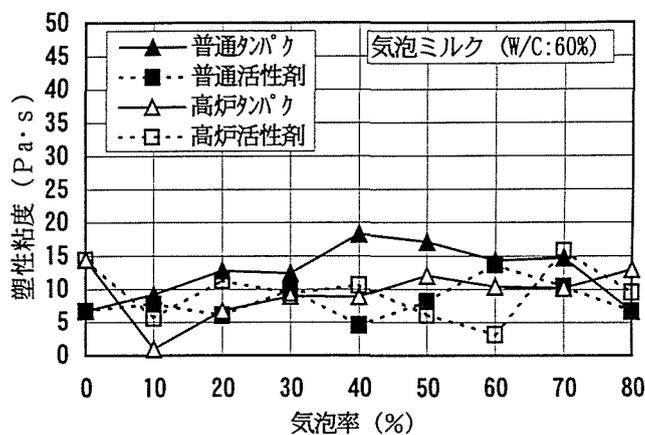


図-3.2.6 気泡混合量と塑性粘度の関係

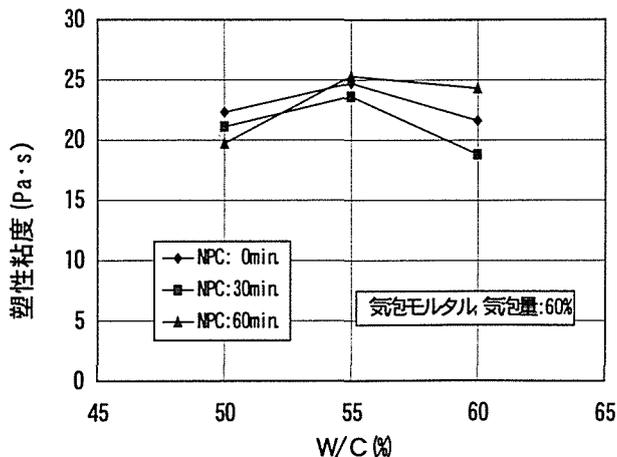


図-3.2.8 気泡モルタルのW/Cと塑性粘度の関係

図-3.2.8は気泡モルタルのW/Cと練上がり後の時間毎の塑性粘度の関係である。気泡モルタルの場合、W/Cや時間の影響は小さかった。

3.2.3 降伏値

コンクリートやモルタルでは降伏値とスランプ値やフロー値との関連が深いとされており、気泡ミルクや気泡モルタルにおいても降伏値はフロー値と関係付けられることが考えられる。また、気泡や砂粒子の移動の可能性を検討する点からも降伏値を把握することが必要である。

気泡ミルクのW/Cと降伏値の関係を図-3.2.9、3.2.10に示す。何れの場合も降伏値はW/Cの増加とともに小さくなる傾向を示す。セメントミルクのW/Cが大きくなり、降伏値の小さい範囲では気泡の混合量が60%と多くなると降伏値が大きくなる傾向が認められる。

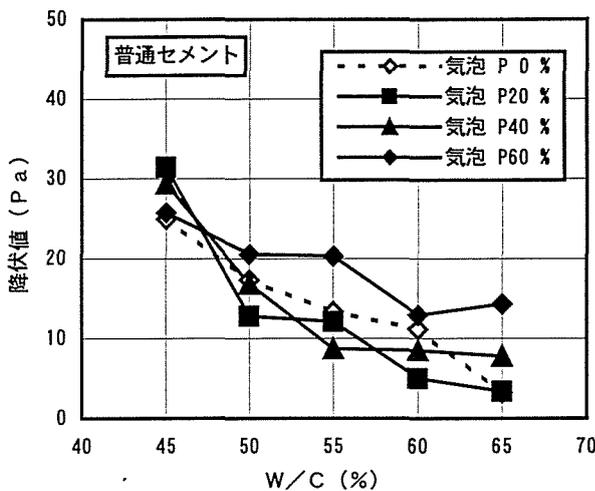


図-3.2.9 気泡ミルクのW/Cと降伏値の関係 (普通セメント)

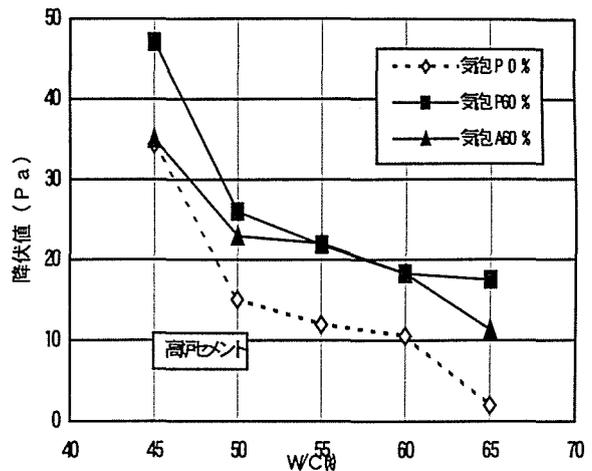


図-3.2.10 気泡ミルクのW/Cと降伏値の関係 (高炉セメントB種)

図-3.2.11に既往の研究におけるプレーンミルクの降伏値の測定結果をW/Cとの関係として示したものである。本研究におけるデータは練混ぜ直後のものを用いた。本研究における結果も既往の研究結果と同様の傾向を示すが、やや高い値を示しており球引き上げ粘度計を用いた岸谷ら³⁻²⁾の結果に近く、同じ装置を用いた吉野の結果³⁻⁵⁾の延長上にある。本研究のデータとしてW/C=70%、100%データも示したが、W/C=100%では0.2Paまで低下した。

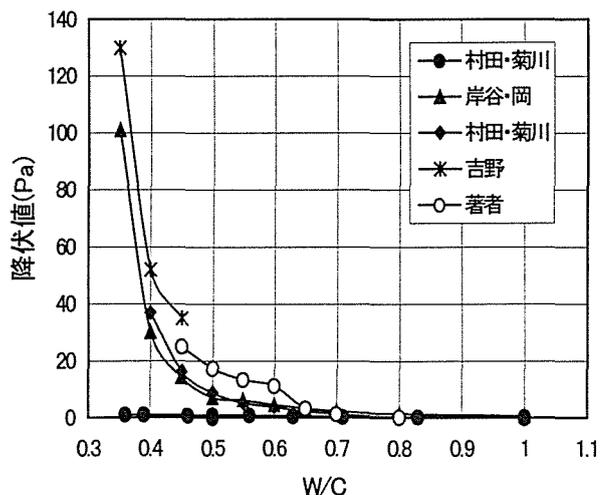


図-3.2.11 セメントミルクの降伏値

図-3.2.12はセメントミルクのW/Cと練上がり後の時間毎の降伏値の関係である。いずれのセメントを用いた場合も降伏値はW/Cの増加とともに低下する傾向にあるが、セメントの種類や経過時間の影響は明確でない。

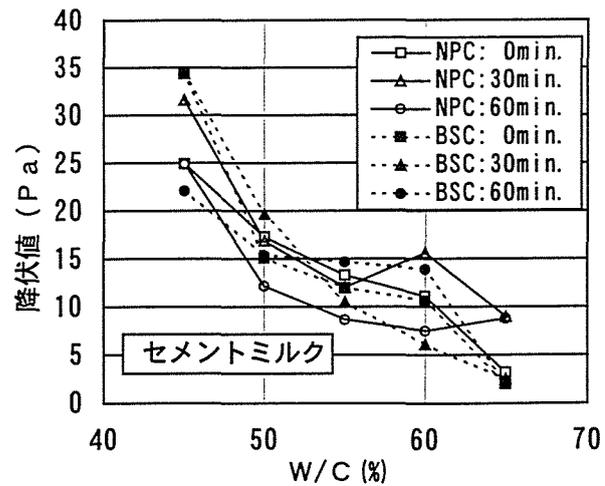


図-3.2.12 セメントミルクの降伏値の変化

また、W/Cが60%の気泡ミルクの気泡量と降伏値の関係を図-3.2.13に示す。ここでも、降伏値は気泡量が30%まではやや低下するが気泡量が40%以上では増加する傾向が確認できる。

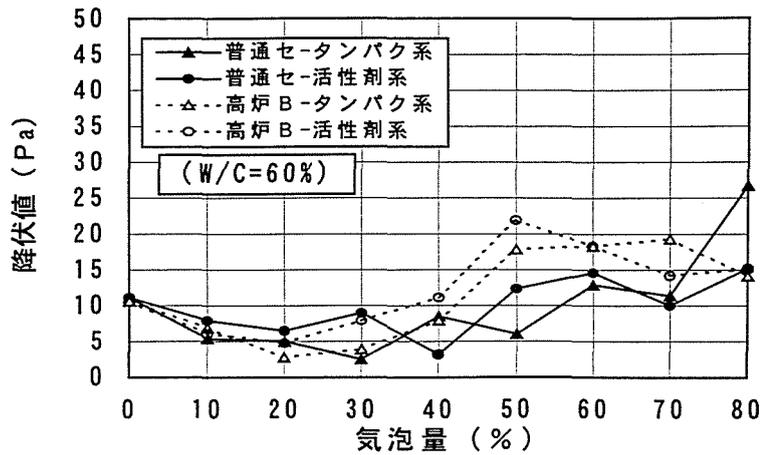


図-3.2.13 気泡ミルクの気泡量と降伏値の関係

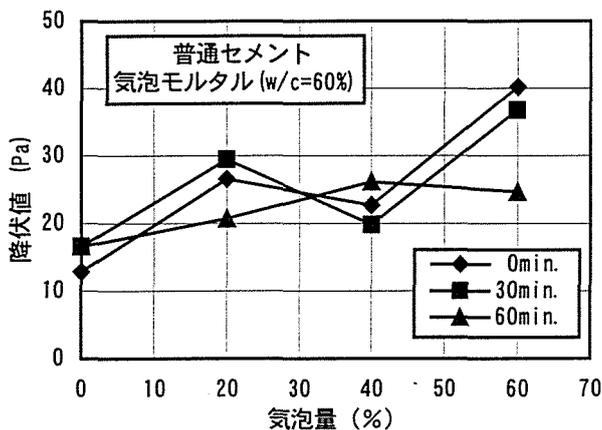


図-3.2.14 気泡モルタルの気泡量と降伏値の関係

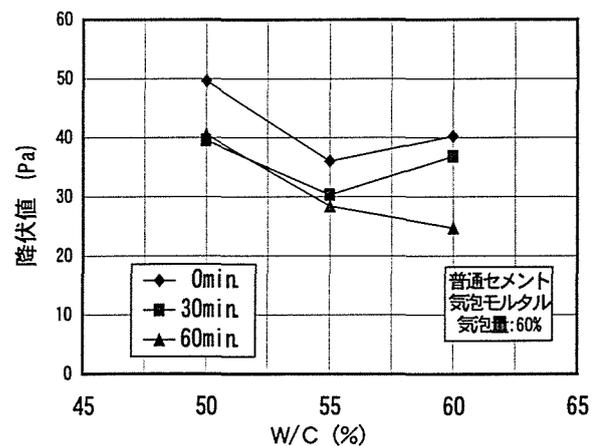


図-3.2.15 気泡モルタルのW/Cと降伏値の関係

3. 2. 4 フロー値

気泡ミルクのW/Cとフロー値との関係を図-3. 2. 16に示す。フロー値はW/Cの増加とともに大きくなる傾向を示し、気泡量が多くなるとフロー値は小さくなる傾向がある。気泡ミルクの気泡量とフロー値との関係を図-3. 2. 17に示す。気泡ミルクでは先に示した降伏値の変化と同様に、多量の気泡を混入することによる単位容積質量の変化がある。これらの影響があると考えられフロー値は気泡量の増加とともに小さくなる傾向を示す。

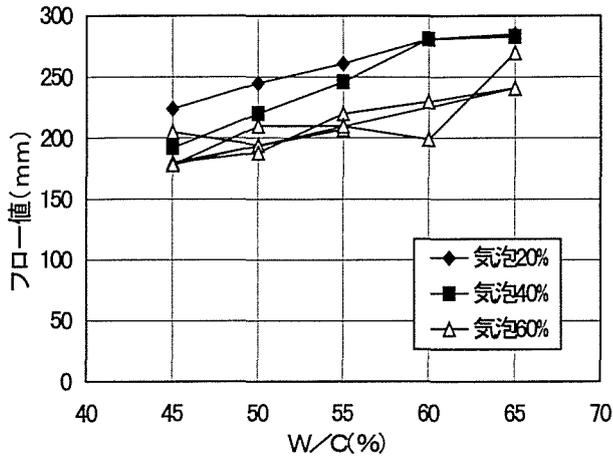


図-3. 2. 16 気泡ミルクのW/Cとフロー値の関係

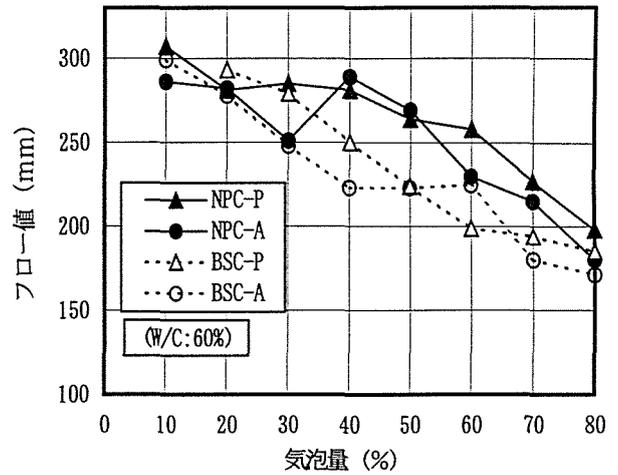


図-3. 2. 17 気泡ミルクの気泡量とフロー値の関係

コンクリートのスランプやモルタルのフロー値は降伏値と密接な関係のあることは良く知られている。降伏値とフロー値の関係を図-3. 2. 18に示す。全体的に降伏値の増加とともにフロー値が低下する傾向が認められ、気泡ミルク、気泡モルタルにおいてもフロー値が降伏値の影響を強く受けることがわかる。データに幅があるのは単位体積質量の差があることによると考えられる。

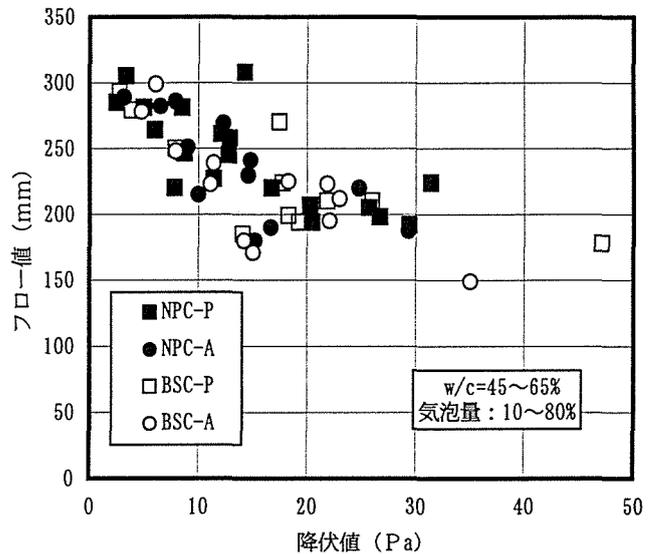


図-3. 2. 18 降伏値とフロー値の関係

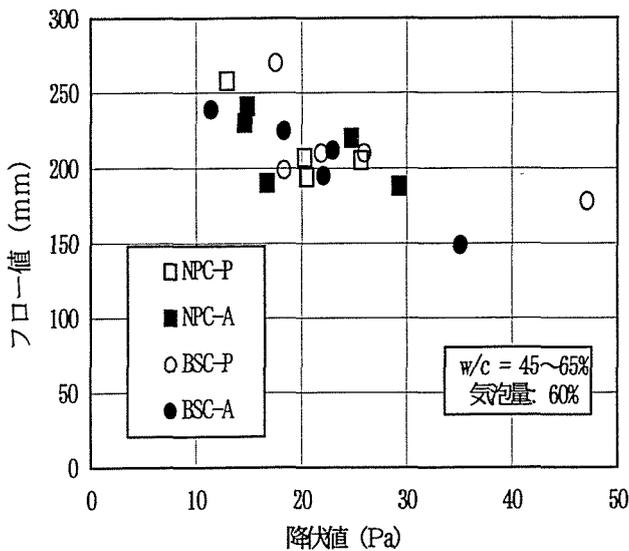


図-3.2.19 降伏値とフロー値の関係
(気泡量一定)

図-3.2.19には気泡量が一定の場合の関係を示す。この場合は単位容積質量がほぼ同様であるためフロー値と降伏値にはほぼ直線関係が認められる。図-3.2.20には単位体積質量とフロー値の関係を示す。単位体積質量とフロー値の間には相関関係が認められ、普通セメントと高炉セメントを用いた場合とで差があるのは降伏値の差であると考えられる。図-3.2.21に気泡モルタルの場合の降伏値とフロー値の関係を示す。気泡ミルクの場合と同様に降伏値が小さいとフロー値が大きくなる傾向を示す。図-3.2.22に単位容積質量とフロー値の関係を示す。泡ミルクと同様の傾向を示すが、気泡モルタルの場合にはより直線的な関係となっており、単位容積質量の 0.1 g/cm^3 の変化でフロー値は約 8 mm 変化する結果となっている。

このように、気泡を多く含む気泡モルタルのフロー値は降伏値のみならず単位体積質量の影響も強く受けることがわかる。

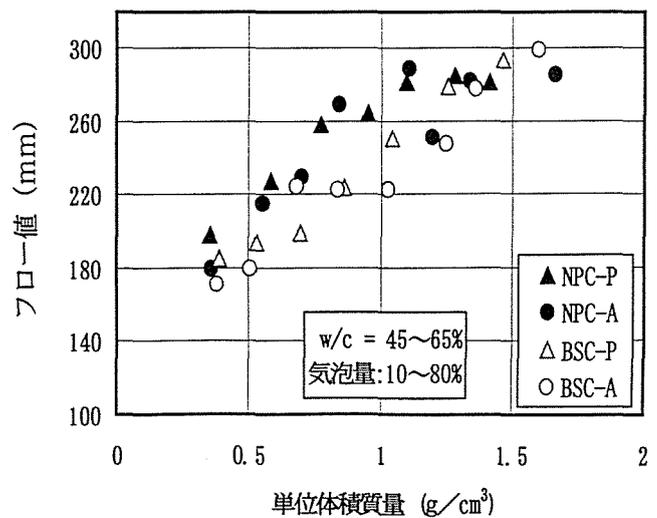


図-3.2.20 単位体積質量とフロー値の関係

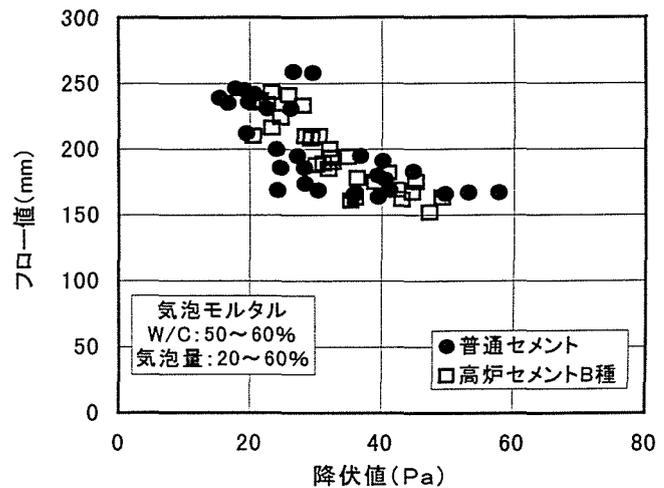


図-3.2.21 降伏値とフロー値の関係

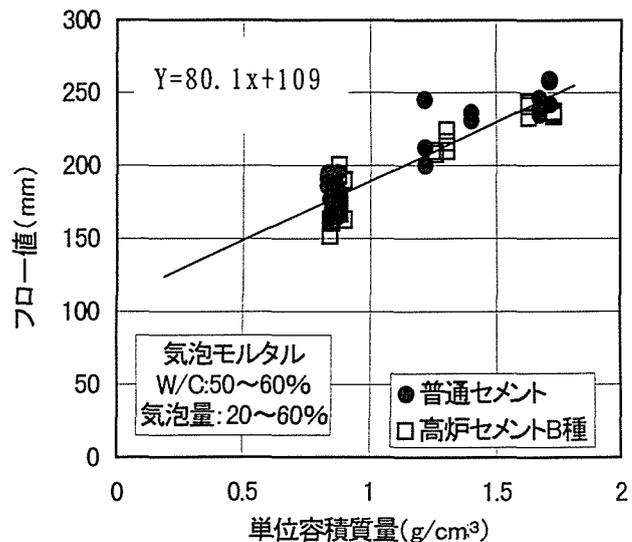


図-3.2.22 単位容積質量とフロー値の関係

3. 2. 5 降伏値と塑性粘度の関係

コンクリートの降伏値と塑性粘度は最近の化学混和剤の発達により独立に制御することができるようになってきている。しかしながら普通コンクリートではこれらの値は比例関係にあるとされている。

村田・菊川³⁻²⁾は、各種のセメントミルクの降伏値と塑性粘度の間を調べ、両者には直線関係があることを報告しており、この関係は式 (3. 2. 1) で表されるとしている。

$$\tau_f = 1.2 \eta_{pl} \quad (3. 2. 1)$$

ここに、 τ_f : 降伏値 (Pa)

η_{pl} : 塑性粘度 (Pa·s)

図-3. 2. 23にセメントミルクの降伏値と塑性粘度の関係を示す。データに幾分のばらつきがあるものの正の相関があり、降伏値の塑性粘度に対する比は普通セメントで1.29、高炉セメントで0.91と村田らの結果とほぼ同様の結果が得られている。

気泡ミルクの場合の降伏値と塑性粘度の関係を図-3. 2. 24に示す。気泡ミルクの場合も基本的には同様の関係があり、降伏値の塑性粘度に対する比は普通セメントで1.25、高炉セメントで0.87とセメントミルクの場合とほぼ同様の結果が得られている。

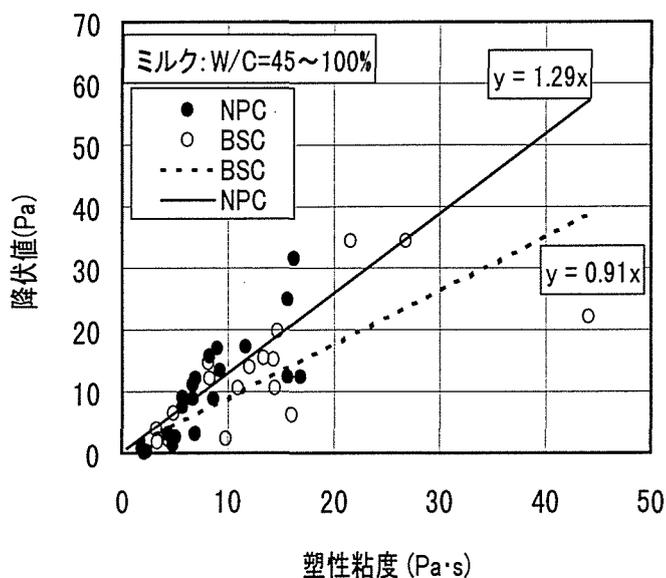


図-3. 2. 23 セメントミルクの降伏値と塑性粘度の関係

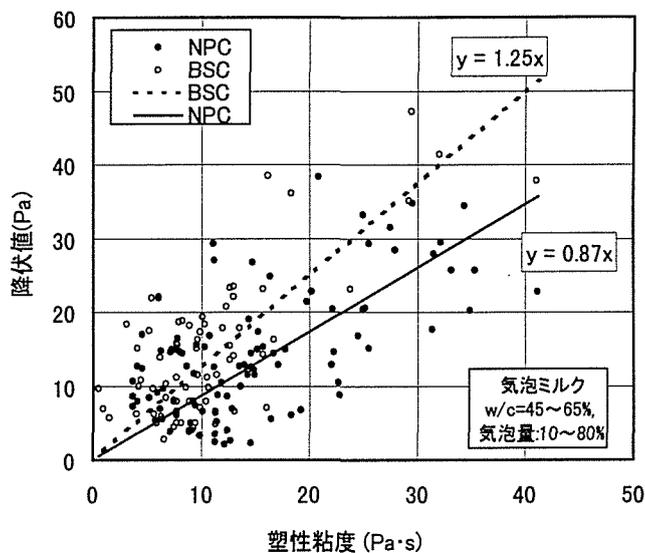


図-3. 2. 24 気泡ミルクの降伏値と塑性粘度の関係

3. 2. 6 気泡と砂粒子の分離抵抗性

気泡ミルクや気泡モルタルの分離は、浮力による気泡の上昇や砂粒子の沈降およびブリーディングにより生ずる。気泡や砂粒子の移動の可能性はビンガム流体中の鋼球の運動が参考になると考えられる。ビンガム流体中の鋼球の運動はAnsleyの式³⁻⁶⁾を用いてコンクリートの分離を検討した高山の考察³⁻⁷⁾を気泡混合材料に適用すると以下のようなになる。

$$\tau = F / 12 \pi r^2 \quad (3.2.2)$$

$$\gamma = v / 2 r \quad (3.2.3)$$

ここで、 τ はせん断応力、 F は作用力、 r は球の半径、 v は移動速度である。
また、ビンガムモデルは次式で表される。

$$\tau = \eta \gamma + \tau_y \quad (3.2.4)$$

ここで、 η は塑性粘度、 γ はひずみ速度、 τ_y は降伏値である。
この関係から、 $\tau < \tau_y$ のとき $\gamma = 0$ である。

式 (3.2.2) , (3.2.3) および (3.2.4) から次式が導かれる。

$$F = 6 \pi r \eta v + 12 \pi r^2 \tau_y \quad (3.2.5)$$

この関係から、 $F < 12 \pi r^2 \tau_y$ のとき $v = 0$ となる。

ここで、球を気泡や砂粒子と考え、球に働く力を浮力あるいは重力と考えると F は次のように表せる。

$$F = (\rho_s - \rho_p) V_s g = (\rho_s - \rho_p) \pi r^3 g / 3 \quad (3.2.6)$$

ここで、 ρ_s 、 ρ_p はそれぞれ球（気泡または砂）とミルク密度、
 V_s は球の体積 ($4/3 \pi r^3$) である。

式 (3.2.5) と (3.2.6) より球の速度 (v) は次のように表せる。

$$v = 2 r \{ r g (\rho_s - \rho_p) - 9 \tau_y \} / 9 \eta \quad (3.2.7)$$

球が運動するための限界状態は、 $v = 0$ であるから球が浮き上がったり沈降しないで静止している条件は次のように表せる。

$$\tau_y > r g (\rho_s - \rho_p) / 9 \quad (3.2.8)$$

この式は球の安定性すなわち気泡や砂粒子の安定は、気泡や砂粒子の大きさ、密度差およびミルクの降伏値により支配されることを示している。

ミルク中での気泡や砂粒子の安定性を調べるために、式(3.2.8)を用いた計算を実施した。計算においては表-3.2.5に示す値を用いた。結果は図-3.2.25および図-3.2.26に示した。

表-3.2.5 計算に用いた物性値

材 料	比 重	直 径 (mm)
気 泡	0.03	0.1, 0.5, 1.0, 2.0
砂 粒 子	2.6	0.5, 1.0, 2.0, 5.0
ミルク、モルタル	0.5~2.0	—

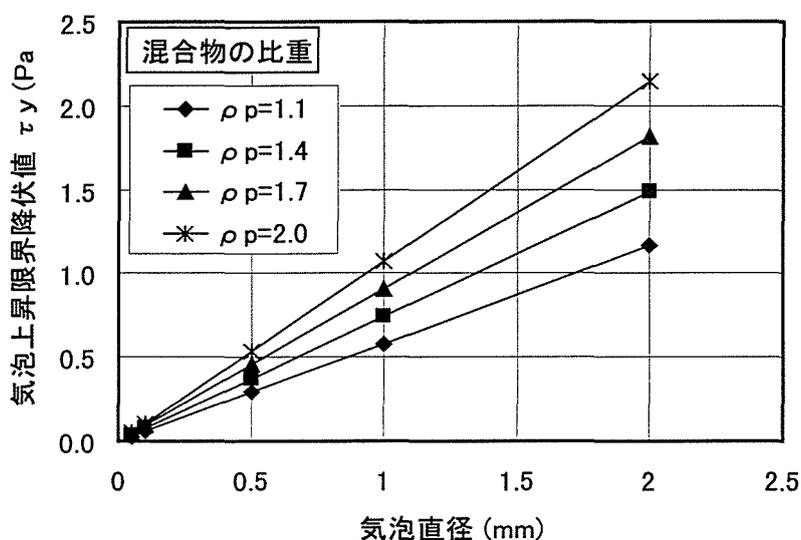


図-3.2.25 気泡の径と浮き上がり限界降伏値

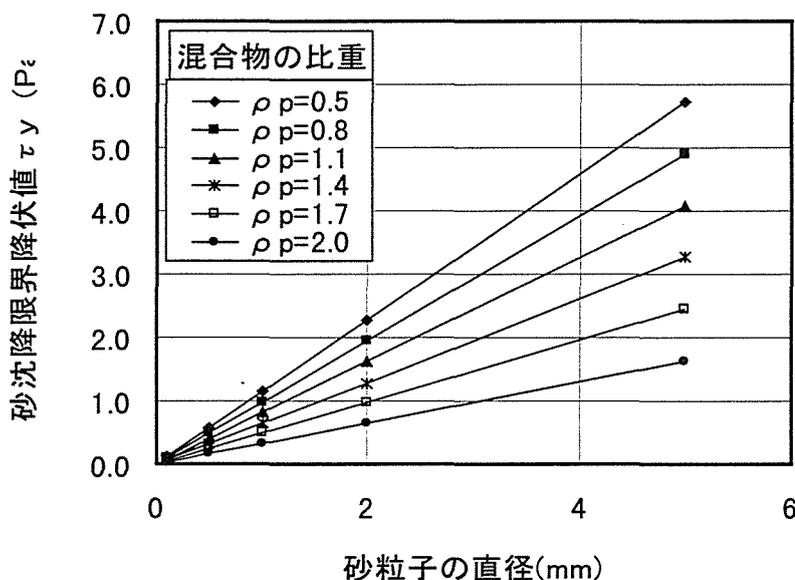


図-3.2.26 砂の粒子径と沈降限界降伏値

のちに第4章で示すように、気泡ミルク硬化体の破断面の観察によれば気泡の直径は1mm以下で平均値は0.2～0.3mmであった。この図より気泡が移動しない条件は降伏値が1Pa以上の場合となる。試験範囲で測定された降伏値の最低値は高炉セメントミルクのW/C=65%の場合で2.02 Pa、普通セメントミルクのW/C=65%の場合で1.17 Paであった。これらのデータからは静置時の気泡の浮上がりに対しては安定であると考えられる降伏値を有していることを示している。しかし、W/Cが100%になると降伏値は0.2Paまで低下することから平均値程度の径の気泡も浮き上がる可能性が出ることになる。

図-3.2.26からは気泡ミルクの降伏値が3Pa程度の配合もあることから粗い砂粒子は沈降する可能性があることが伺える。また、気泡の場合と同様に水セメント比が100%まで増加すると静置した状態でも砂粒子の沈降の可能性が出てくることになる。

圧縮試験用供試体の状態の観察結果を使用した起泡剤別に表-3.2.6、表-3.2.7に示す。W/Cが55%以上のセメントミルクではブリーディングが認められ、気泡量が10%と

表-3.2.6 圧縮試験用供試体の状態の観察結果 (タンパク系起泡剤)

	W/C (%)	気泡混合率 (vol. %)								
		0	10	20	30	40	50	60	70	80
気泡 ミ ル ク	45	○		○		○		○		
	50	○		○		○		○		
	55	◇		○		○		○		
	60	◇	◇	○	○	○	○	○	△	×
	65	◇		○		○		×		
気泡 モ ル タル	50	○						○		
	55	○						○		
	60	◇		◇		○		○		

○：良好 △：ばらつき大 ◇ブリーディング5%以上 ×：分離著しく使用不可

表-3.2.6 圧縮試験用供試体の状態の観察結果 (界面活性剤起泡剤)

	W/C (%)	気泡混合率 (vol. %)								
		0	10	20	30	40	50	60	70	80
気泡 ミ ル ク	45	○		○		○		○		
	50							○		
	55							○		
	60	◇	○	○	○	○	○	○	△	×
	65							△		
気泡 モ ル タル	50	○						○		
	55	○						○		
	60	◇		○		○		△		

○：良好 △：ばらつき大 ◇ブリーディング5%以上 ×：分離著しく使用不可

少ない場合も同様である。気泡量が増えてくるとセメントミルク自体ではブリーディングする場合もブリーディングが認められなくなる。これは、気泡もその周囲に幾分の水を固定する役割を果たしていると考えられる。さらに、気泡量が増加して単位容積重量が 1.0 g/cm^3 以下になり降伏値や塑性粘度の低い配合ではブリーディングが下向きに発生することになる。表中の×◇を付けた配合では、先に示した不安定な状態が確認されている。すなわち、極端にブリーディングが多い場合や気泡、水、セメントペーストの分離現象が $W/C=60\%$ 、気泡量が70%以上の場合に確認されている。

起泡剤の種類では、10%混合時のブリーディングに差が認められるが、全体としては差は明らかでない。

3. 2. 7 まとめ

気泡ミルクおよび気泡モルタルのレオロジー特性を調べた結果を示した。配合（水セメント比、気泡量）と降伏値、塑性粘度の関係およびフロー値と単位体積質量の関係について検討した。得られた結果は以下の通りである。

(1) レオロジー特性値

1) 気泡ミルクおよび気泡モルタルの降伏値および塑性粘度は、セメントミルクやモルタルの場合と同様、水セメント比の増加とともに低下し、気泡量の増加により変化しないかやや増加する傾向にある。この関係を図示するとに示す通りである。

表-3. 2. 8 配合要因とレオロジー特性値

配合要因	降伏値	塑性粘度
W/Cの増加	↓	↓
気泡量の増加	→ ↗	→ ↗

2) 気泡量が一定の場合、フロー値は水セメント比の増加および降伏値の減少とともに大きくなる。水セメント比が同一のときには気泡量の増加に伴いフロー値は小さくなる。この場合には、フロー値は降伏値とともに単位体積質量の影響を大きく受けたと考えられる。フロー値への影響要因を整理すると表-3. 2. 9の通りである。

表-3. 2. 9 配合要因、レオロジー特性値とフロー値

配合要因	フロー値
降伏値の増加	↓
W/Cの増加	↗
単位容積質量の増加	↗

3) 混和剤を使用しない気泡ミルクの塑性粘度と降伏値の関係はばらつきはあるものの直線関係にあり、気泡を加えないセメントミルクの場合とほぼ同様な関係にある。

(2) 材料分離

- 1) 型枠に成形した供試体の観察によると、気泡ミルクは水セメント比が0.6以下気泡量が70%以下の場合に安定している。
- 2) 気泡混合材料中の気泡や砂粒子の移動に関する検討の結果、気泡や粗い砂粒子の安定のために必要な降伏値は気泡に対して1 Pa、粗い砂粒子に対して5 Paであった。この結果から気泡の保持できる降伏値が得られるセメントミルクの水セメント比は80%程度となる。
- 3) 1)、2)より配合選定に当たってはブリーディングを含めて安定な範囲の水セメント比、気泡混合量を選定するのが重要である。

3.3 セメントミルクおよび気泡ミルクのブリーディング特性

気泡モルタルの安定性を検討する際に気泡や砂の分離ともにブリーディングの発生も考慮する必要がある。気泡モルタルは、単位容積質量が 1.0t/m^3 以下の配合として用いることも多くあり、ブリーディング水は気泡モルタル表面のみならず底にも溜まる場合がある。本節では、気泡ミルクや気泡モルタルのブリーディングによる分離を検討するために、まず、セメントミルク自身およびブリーディングの発生の可能性のある数種類の配合の気泡ミルクのブリーディング特性について検討し、あわせて流動特性や強度も調査した。

3.3.1 実験概要

(1) 使用材料

試験には、2.2節で用いた普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種を用い、練混ぜ水としては水道水を用い、起泡剤はタンパク系を用いた。

(2) 試験項目と方法

水セメント比の異なるセメントミルクのブリーディング率の測定と硬化体の水セメント比の測定を以下の方法により実施した。なお、流動性を知るためにファンネル粘度計による流下時間の測定および硬化体の圧縮強度を測定した。気泡ミルクはフロー値も測定した。試験条件と測定項目を表-3.3.1に示した。

表-3.3.1 試験項目と試験条件

試験項目	W/C (%)	試験条件
ファンネル粘度	45, 50, 55, 60	練り上がり直後に各配合につき2回測定
フロー値	65, 70, 80, 84	
ブリーディング率	92, 100	各条件1本
硬化体強度		上中下3本について試験
硬化体の水セメント比		上中下と上端、下端の5試料について実施

気泡ミルクには高炉セメントB種のみを用い、配合の組合せを表-3.3.2に示す。

表-3.3.2 気泡ミルクの配合の組合せ

W/C (%)	気泡量 (%)							
	10	20	30	40	50	60	70	80
55	○	○				○		
60		○	○	○	○	○	○	○
65			○			○		
70				○		○	○	
80						○		
84						○(61)		
88						○(64)		
92						○(66)		
100						○		

以下に試験方法を示す。各試験は、20℃恒温室内で実施した。

1) セメントミルクの練混ぜ

各配合で練上がりが2リットルとなるように計量したセメントと水を容器中でプロペラ型攪拌機を用い3分間混合した。気泡ミルクとする場合はセメントミルク練混ぜ後気泡を所定量計取り混合した。

2) ファンネル粘度の測定

練り上がったセメントミルクの流動性をグラウトの試験に用いられるファンネル粘度計を用いて測定した。所定の容器(500cc)に計り取ったセメントミルクを、円錐状のロートに下部を指で押さえた状態で流し込み、計量容器をロート下部におきロート内のセメントミルクが全量流下する時間をストップウォッチで計測した(図-3.3.1参照)。

3) フロー値の測定

気泡ミルクの練上がり後直ちにフロー値を測定した。

4) ブリーディング率の測定

ブリーディング率の測定は土木学会基準「プレキャストコンクリート用モルタルのブリーディング測定方法」を参考にし、内径約6.4cmのビニー

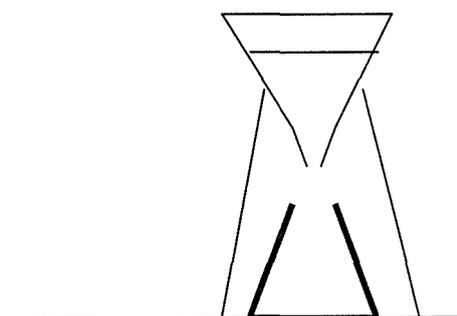


図-3.3.1 ファンネル粘度測定概要

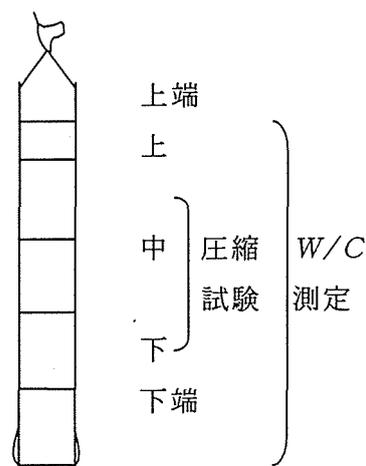


図-3.3.2 硬化体部位と試験

ルチューブにファンネル粘度測定後のセメントミルクを流し込み上端を閉じた後吊した状態で静置し、一定時間ごとにセメントミルクの上面の位置を記録した。なお、セメントミルクおよび気泡ミルクの充填長さは約60cmとした。

4) 圧縮強度試験

静置したまま材令7日まで養生し、硬化体の中央部で直径の2倍の長さに切断して3本の供試体を作成し、圧縮試験を実施した(図-3.3.2参照)。

5) 硬化体の水セメント比の測定

圧縮試験後の供試体および上下端の硬化体を粉砕し、縮分した試料を約6g計り取り、電気炉内で3時間750℃加熱し、余剰水と結合水を分解、蒸発させたのち重量を測定する。硬化体の水セメント比を次式で算出した。加熱温度は、高炉セメン中のスラグの分解がないように設定した。

$$\text{硬化体の水セメント比 (\%)} = (W_p - W_c) / W_c \times 100 \quad (3.3.1)$$

ここに、 W_p : 計り取試料の重量

W_c : 加熱後の試料の重量

3.3.2 水セメント比とファンネル粘度

セメントミルクの水セメント比とファンネル粘度の関係を図-3.3.3に示す。ファンネル粘度は水セメント比が45%~55%程度までは水セメント比増加とともに急激に低下し、この範囲では高炉セメントの方が高い値を示した。これは高炉セメントの方が比重が小さく比表面積も大きいことにより体積濃度が高くなる影響が低水セメント比で顕著であるためであると考えられ、塑性粘度が高くなっている結果と対応する。また、ファンネル粘度は水セメント比が55%以上ではセメントの種類の影響もほとんどなく水セメント比の増加とともに緩やかに低下した。

ファンネル粘度と球引上げ式粘度計で測定した塑性粘度との関係を図-3.3.4に示す。ファンネル粘度(T_f)と塑性粘度(η_{pl})との間には、

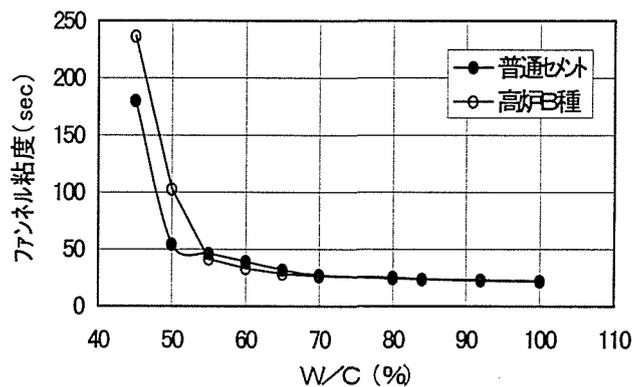


図-3.3.3 水セメント比とファンネル粘度の関係

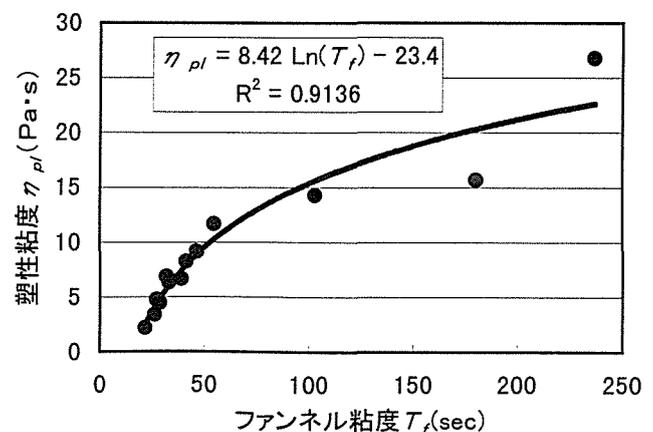


図-3.3.4 ファンネル粘度と塑性粘度の関係

$$\eta_{p1} = 8.42 \ln(T_p) - 23.4$$

(3.3.2)

の関係が認められ、ファンネル粘度から塑性粘度が推定できると考えられる。ファンネル粘度が100 s以下では特に良い対応を示すが、100 s以上ではセメントミルクのロートへの付着量が多くなり終点が明確でなくなり、データもばらつくことからファンネル粘度が100 s以下で用いるのが適当であると考えられる。

3.3.3 水セメント比とブリーディング

各々のセメントの20℃における水セメント比とブリーディング率（ブリージング水の容積／セメントミルクの総容積）の関係を図-3.3.5に示す。セメントミルクのブリーディング率は水セメント比45%ではいずれのセメントでも0%であるが、水セメント比の増加にほぼ比例して増加し、水セメント比100%では20%に達する。セメントの種類の違いは明確ではないが、高炉セメントB種の場合は水セメント比50%でもブリーディング率がほとんどゼロであり、W/Cの大きい範囲でやや小さくなっている。これはファンネル粘度の項で示したように比重が小さく、ブレン比表面積が高いためであると考えられる。

経過時間とブリーディング率の関係を図-3.3.6に示す。水セメント比が大きくブリーディング率の大きいセメントミルクほどブリーディング速度も大きい傾向にある。水セメント比が70%程度以下では3時間までにブリーディングは

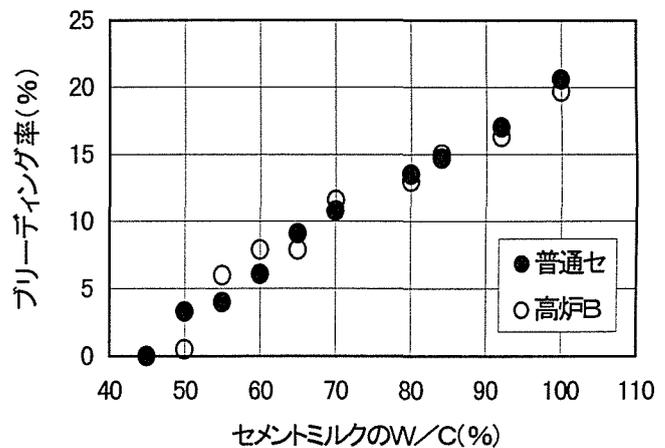


図-3.3.5 水セメント比とブリーディング率の関係

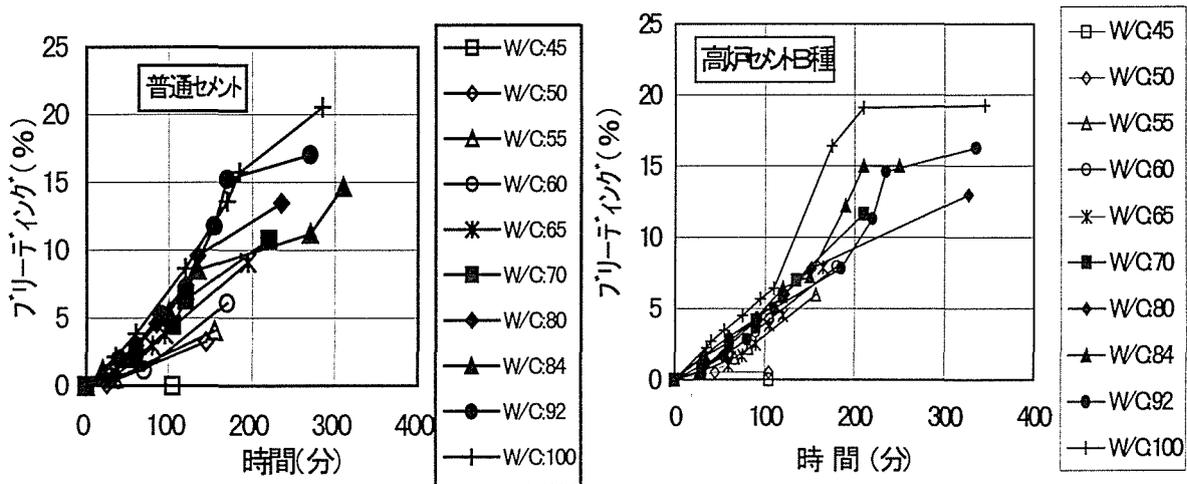


図-3.3.6 経過時間とブリーディング

終了するが、それ以上の水セメント比では 5時間以上にわたってブリーディングが発生する。

これは20℃における結果であり温度が高いときにはブリーディングは減少すると考えられるが、逆に温度が低い場合には増加する可能性がある。また、気泡や砂の混合によりブリーディングは減少する傾向にある。

気泡ミルクのブリーディング率を表-3.3.3に示す。表には気泡量0%のセメントミルクのブリーディング率も同時に示した。ビニールチューブの底にブリーディング水が溜まった場合は数値の後に↓を付けて表した。

表-3.3.3 セメントミルクおよび気泡ミルクのブリーディング率 (単位:%)

W/C (%)	気 泡 量 (%)								
	0	10	20	30	40	50	60	70	80
55	6.0	1.2	0.6	—	—	—	0	—	—
60	7.9	—	1.1	0	0	0	0	—	3.4↓
65	7.9	—	—	3.5	—	—	0	—	—
70	11.6	—	—	—	0	—	0	0.9↓	—
80	13.0	—	—	—	—	—	1.1↓	—	—
84	15.0	—	—	—	—	—	1.4↓	—	—
88	—	—	—	—	—	—	1.6↓	—	—
92	16.3	—	—	—	—	—	2.0↓	—	—
100	19.7	—	—	—	—	—	4.6↓	—	—

表から明らかなようにブリーディング率が0%となる範囲は太線で囲んだ範囲となる。これは、高炉セメントB種およびタンパク系起泡剤を用いた結果であるが、他のセメントと起泡剤の組み合わせでも参考にすることができると考えられる。

このように、配合検討の際にブリーディングについても確認することが必要である。

3.3.4 硬化体の水セメント比

練混ぜ時の水セメント比と硬化体の水セメント比の平均値(図-3.3.2の上端、上、中、下、下端の平均)および各供試体の水セメント比の最大差(図-3.3.2の5個の最大差)を図-3.3.7、3.3.8に示す。硬化体の水セメント比の平均値は配合時の水セメント比が大きいほど大きくなり、配合時の水セメント比との差も大きくなる。また、硬化体の上下の位置による水セメント比の差も、配合時の水セメント比が大きいほど大きくなり配合時のW/Cが100%の時には40~50%にも達する。

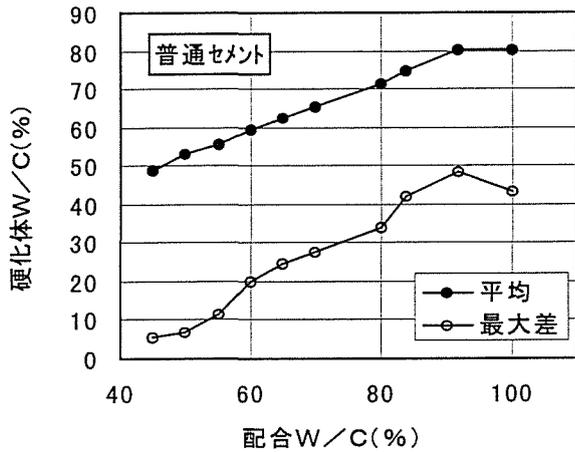


図-3.3.7 硬化体の水セメント比

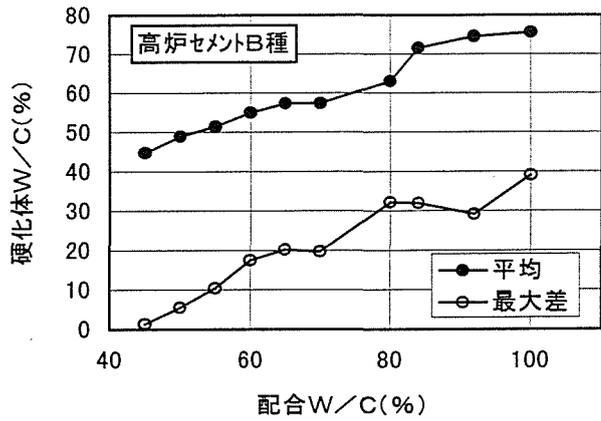


図-3.3.8 硬化体の水セメント比

このように、セメントミルク中の水の上昇、セメント粒子の沈降によるセメントミルク自身の分離も配合時の水セメント比の増加とともに著しくなる。セメントミルク単身でブリーディングもほとんどなく、硬化体の位置によるW/Cの差が5%程度以内と小さく安定していると考えられるのは配合時のW/Cが50%以下の場合である。このことは、安定性の高い気泡ミルクや気泡モルタルの配合選定時にも考慮する必要があると考えられる。

また、セメントの種類別では比重が小さく体積濃度の高い高炉セメントの方が分離の程度はやや小さい。

3.3.5 圧縮強度

セメントミルク硬化体の配合時の水セメント比と材令7日における圧縮強度の関係を図-3.3.9、3.3.10に示す。いずれのセメントも配合時の水セメント比が大きくなるとともに圧縮強度の平均値は低下する傾向を示した。硬化体の上部と下部における強度差は30~60kgf/cm²の範囲で圧縮強度の変化に比べて変化が少ないが、配合時の水セメント比が小

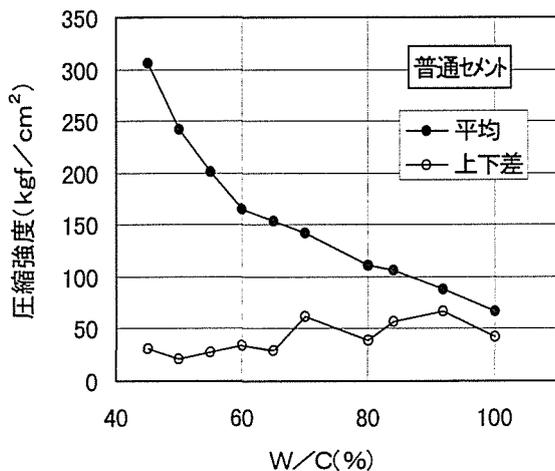


図-3.3.9 硬化体の圧縮強度

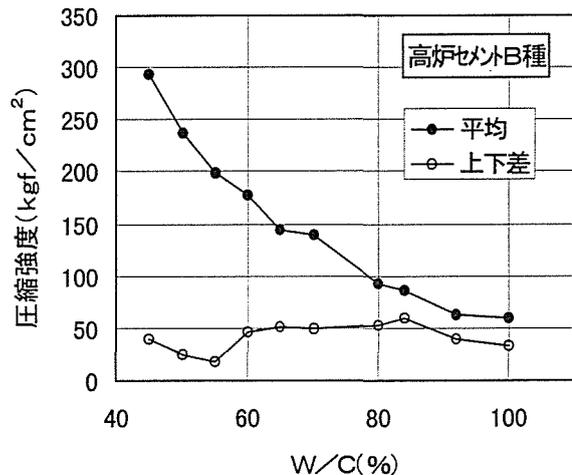


図-3.3.10 硬化体の圧縮強度

さくなるとやや小さくなる。

このことは、配合時の水セメント比が大きい場合はブリーディングが生じた結果、硬化体の上中下の位置（図-3.3.2参照）の強度差も非常に大きくなることを示している。図-3.3.11は硬化体の強度の上下の位置による差を平均値で除し変動率として表したものである。水セメント比の大きい配合で変動率が極めて大きく分離が大きいことが明らかである。

各供試体の圧縮強度と実測した水セメント比とを用い、セメント水比と強度の関係を示したものが図-3.3.12である。

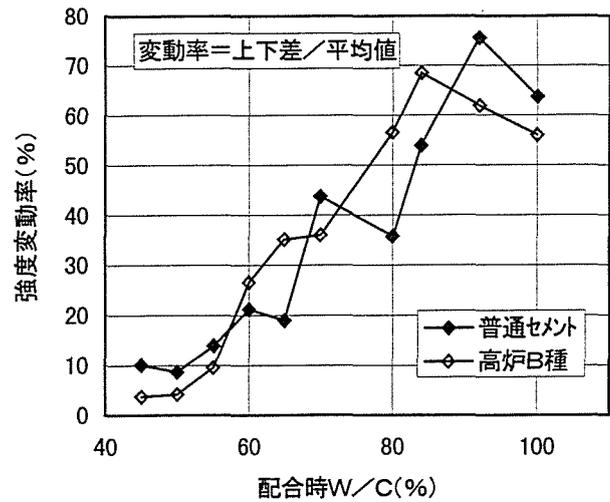


図-3.3.11 配合時 W/C と強度変動率

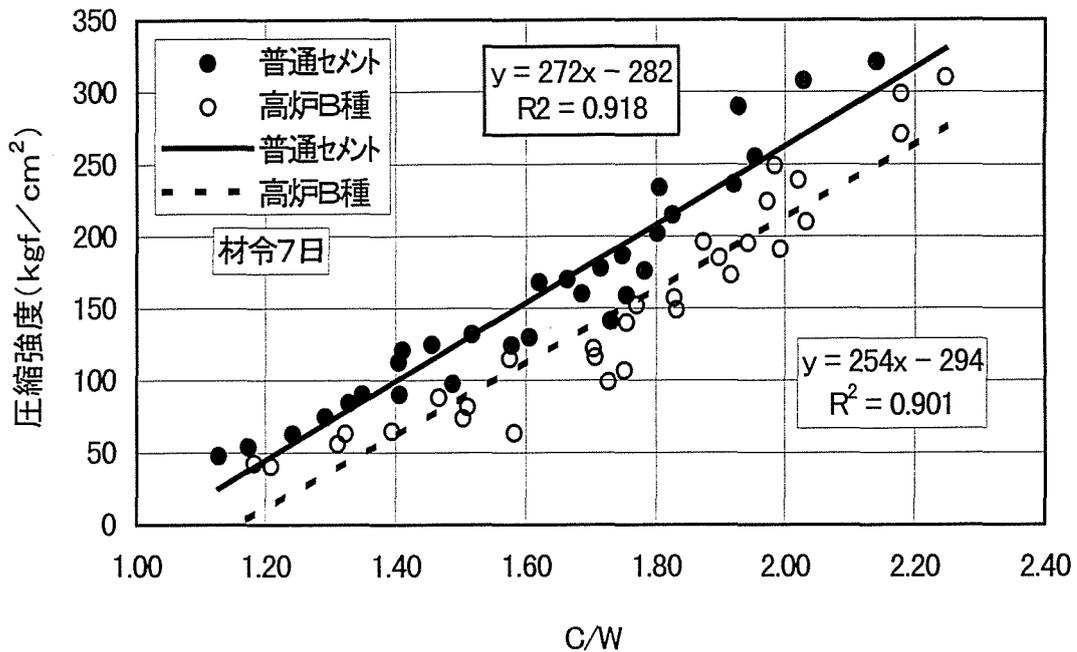


図-3.3.12 セメントミルク硬化体の実測セメント水比と圧縮強度の関係

各供試体のセメント水比と圧縮強度は比例関係にありセメント水比から圧縮強度の推定が可能である。材令7日の圧縮強度の推定式は以下の通りである。

$$\text{普通ポルトランドセメントミルク} : f_{c7d} = 272(C/W) - 282 \quad (3.3.3)$$

$$\text{高炉セメントB種ミルク} : f_{c7d} = 254(C/W) - 294 \quad (3.3.4)$$

ただし、C/Wは1.2～2.2

ビニールチューブ中で硬化させた気泡ミルクを切断して作成した5本の供試体の単位容積質量および圧縮強度の最大値と最小値を図-3.3.13および図-3.3.14に示す。気泡ミルクの種類は（水セメント比-気泡量）として表示している。

60-80の供試体は完全に分離し消泡したためデータを示していない。

単位容積質量の変動は小さいように見えるが最大で0.2g/cm³異なるものがあり変動係数は約7%となる。

圧縮強度は絶対値で30kgf/cm²の差があるものがあり、変動係数は約11%となる。低強度の

配合では絶対値の差は小さいが、変動係数が20%を超えるものもある。

図-3.3.15に単位容積質量と圧縮強度変動係数の関係を示す。ばらつきが大きいと単位容積質量の変動係数が大きくなると強度の変動係数も大きくなる傾向が認められる。このデータでは単位容積質量の変動係数が2%以下であれば強度の変動係数は10%以下となっている。

また、ブリーディング率と圧縮強度の変動係数の関係を図-3.3.16示す。ブリーディング率が0%の配合の場合でも圧縮強度の変動係数が17%を超える結果が得られている。ブリーディング率が1%以下であれば圧縮強度の変動係数が1データを除いて12%以下となる。

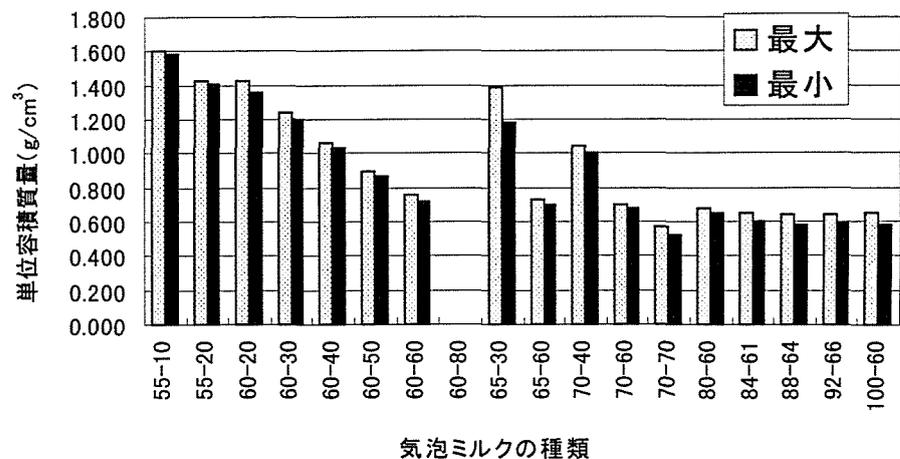


図-3.3.13 気泡ミルク硬化体の単位容積質量のばらつき

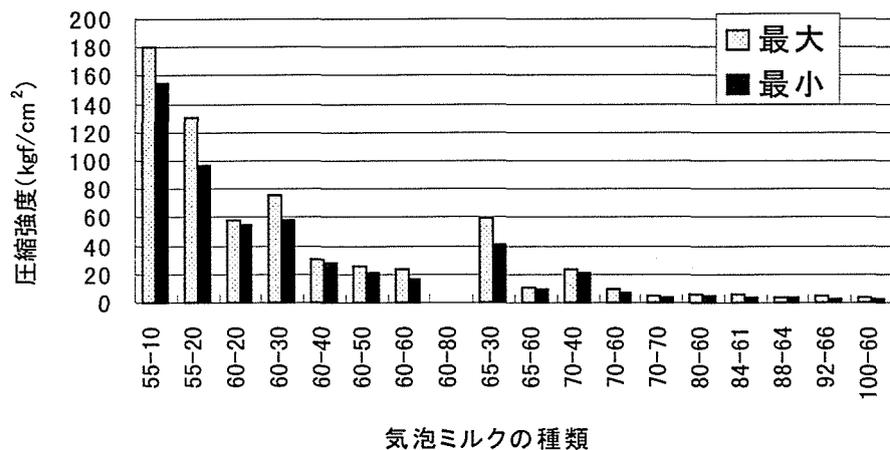


図-3.3.14 気泡ミルク硬化体の圧縮強度のばらつき

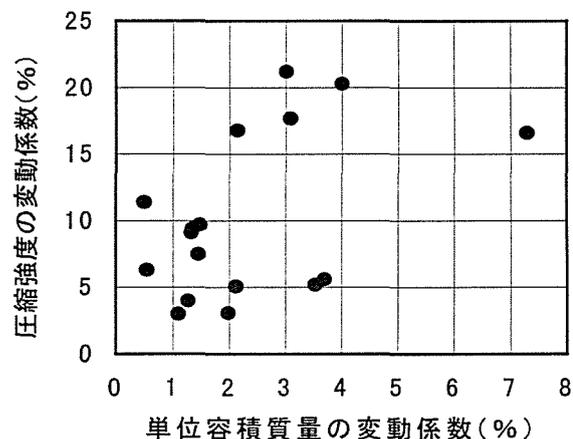


図-3.3.15 単位容積質量と圧縮強度の変動率の関係

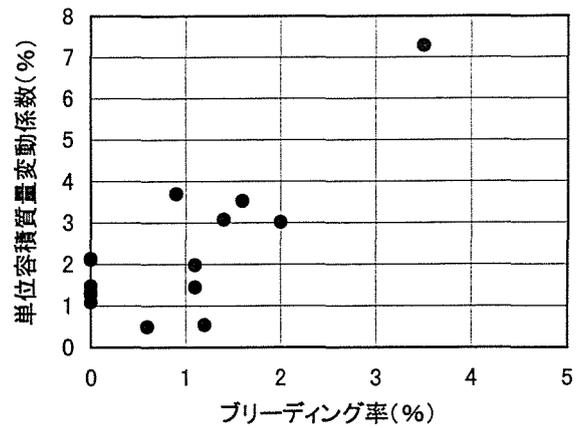
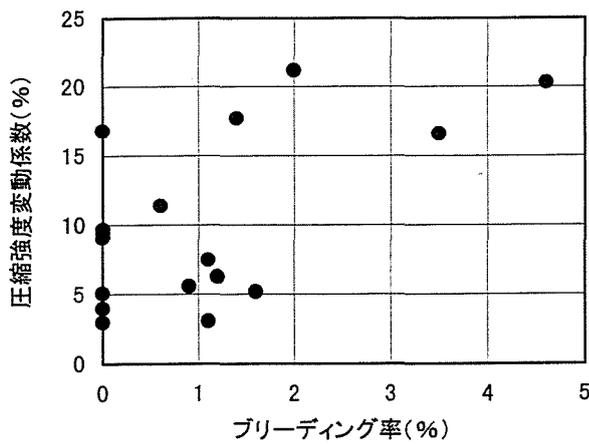


図-3.3.17 ブリーディング率と圧縮強度 図-3.3.17 ブリーディング率と単位容積質量の変動率の関係

また、図-3.3.18にブリーディング率と単位容積質量の変動係数の関係を示す。ブリーディング率の増加に伴い単位容積質量の変動係数が増加する傾向にある。単位容積質量の変動係数は、ブリーディング率が2%以下で10%以下に、1%程度以下で6%以下となる。

以上の結果をブリーディング率および単位容積質量の変動係数の気泡ミルクの品質変動への影響として整理すると表-3.3.5のようになる。

表-3.3.5 気泡ミルクの品質変動要因と品質変動

変動要因	変動範囲	圧縮強度の変動	単位容積質量の変動
ブリーディング率	1%以下	1 2%以下	2%以下
	2%以下	2 2%以下	4%以下
単位容積質量	2%以下	1 2%以下	-
	5%以下	2 2%以下	-

3.3.5 まとめ

セメントミルクの流動性、ブリーディング特性とブリーディングした後の硬化体の水セメント比を調査したが、以下の点が明らかになった。

- 1) セメントミルクの流下時間の想定法の一つであるファンネル粘度計による測定値と塑性粘度の間には対応が見られ、流下時間から塑性粘度の推定ができると考えられる。
- 2) 水セメント比が50%以上のセメントミルクではブリーディングが見られ、水セメント比の増加とともにブリーディング率が上昇する。気泡ミルクの配合の検討においてもこの現象考慮するとともに、気泡ミルクとした時にもブリーディングが過大とならないように配合試験時に確認をする必要がある。
- 3) セメントミルク硬化体の水セメント比は、ブリーディングが生じる配合では配合時の水セメント比よりも小さくなるが、配合時の水セメント比に比例している。

また、硬化体部位（上中下）による水セメント比の差も配合水セメント比が大きくな

るほど大きくなり、その差が5%以内と小さいのは、配合時の水セメント比が50%以下のときである。

4) 圧縮強度もブリーディングの大きい配合では硬化体の上下で大きな差が生じた。個々の供試体の圧縮強度とセメント水比はセメントの種類ごとに直線関係にありばらつきも小さかった。セメント水比から圧縮強度の推定が可能である。

5) 気泡ミルクの品質変動に与えるブリーディング率や単位容積質量の変動の試験結果から、ブリーディング率は1~2%以下に抑える必要があると考えられた。単位容積質量も圧縮強度へ大きく影響することから打設高さを考慮した長尺の供試体を作成し、上下の位置による強度変動の確認を実施する必要があると考えられた。この際の単位容積質量の変動係数が5%以下であれば圧縮強度の変動は20%程度以下となり、2%以下であれば10%程度以下となる。

以上のことから、気泡セメントミルクの配合決定においても通常の円柱供試体の作成だけでなく、プレキャストコンクリート用モルタルのブリーディング測定方法に準じた試験によりブリーディング率の確認と硬化体の部位ごとの強度を確認し、均一な硬化体の得られる配合を選定する必要があると考えられる。

3. 4 気泡モルタルの材料分離抵抗性

気泡モルタルは、比重が 0.03 程度の気泡から 2.6 程度の砂および 3.15 程度のセメントにいたるまで比重の大きく異なる材料の混合物である。このため、混合や施工時の圧送、打設時などに分離する可能性がある。そこで、施工時を想定した実験を行い分離の程度を把握することを試みた。実験は、圧送を想定した加圧、減圧繰返し試験と振動試験および流動試験である。

3. 4. 1 実験概要

(1) 使用材料

実験に用いた材料は、普通ポルトランドセメント、海砂、砕砂、海砂（細砂）、石灰質微粉末、碎石粉、増粘剤、水道水、起泡剤でそれらの主な物性を表-3.4.1 に示した。

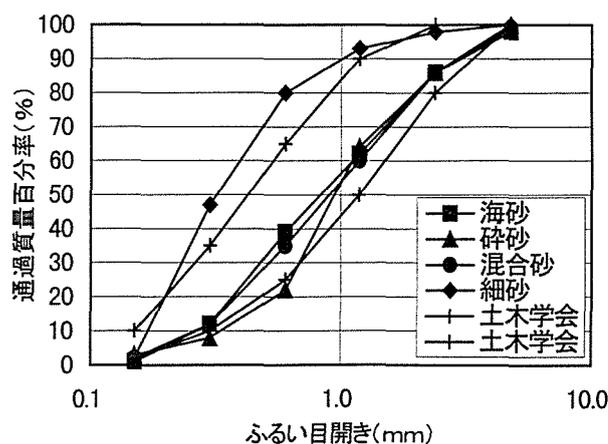
表-3.4.1 使用材料の主要物性

材料名	比重	比表面積 (cm ² /g)	F M	備 考
セメント	3.15	3270		普通ポルトランドセメント (S O 社製)
海砂	2.54		2.98	
砕砂	2.52		3.27	
混合砂	2.53		3.06	海砂 : 砕砂 = 7 : 3
細砂	2.57		1.79	
石灰質微粉末	2.73			F セラム (S O 社製)
碎石粉	2.73			O 碎石社製
増粘剤				S C M 9 0 (S 化学工業製)
練り混ぜ				水道水
起泡剤	1.13			タンパク系起泡剤プロフォーム (N 商会製)

また、砂の粒度曲線を図-3.4.1 に示した。海砂は 0.15mm 以下が少なく、砕砂は 0.6~0.15mm が少ない砂で、混合することにより土木学会の標準粒度をほぼ満足しており、細砂は粗い部分が少ない。

(2) 試験方法

分離抵抗性を調べるために、空気圧による加圧、減圧繰返し試験と振動試験を実施した。



1) 加圧、減圧繰返し試験

練上がった気泡モルタルを直径 5 cm、長さ 60 cm の塩ビパイプに流し込む。ふたに取付けた吸気バルブをコンプレッサーに接続しコックを操作して加圧、減圧を繰返した(図-3.4.2 参照)。繰返す圧力は、ポンプ圧送時の圧力を参考にし 2.5~4.5 kgf/cm² とし、繰

返し回数は 40 回および 60 回とした。分離の程度は、硬化後上中下の 3 個に切断しそれぞれの単位体積質量を測定し、比較することにより評価した。

2) 振動試験

練上がった気泡モルタルを直径 7.5cm、長さ 45cm の塩ビパイプに流し込み、振動台に取付けた固定用持具に金属製バンドで固定した(図-3.4.3 参照)。振幅 1mm、振動数 3000 cpm の振動を 1 分および 2 分与えたのち取り外して静置して硬化させた。硬化後上中下に切断し、単位体積質量を測定した。

また、振動試験用に練混ぜた気泡モルタルを内径 5cm のビニールチューブに流込み吊り下げて静置して硬化させ上中下の 3 つに切断し、単位体積質量を測定した。

加圧、減圧繰返し試験および振動試験に用いた気泡モルタルの配合を表-3.4.2 に示した。

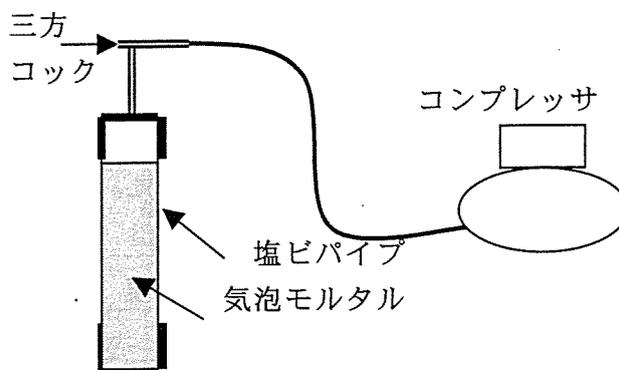


図-3.4.2 加圧・減圧試験概要

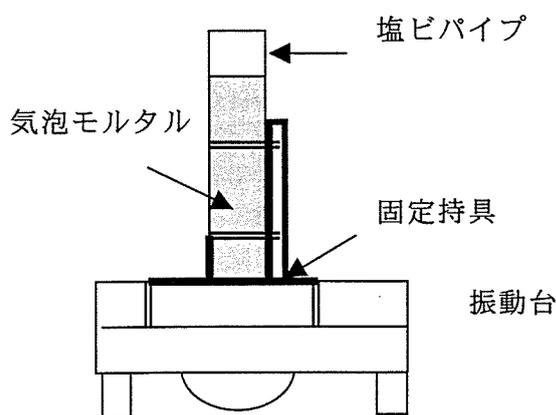


図-3.4.3 振動試験概要

表-3.4.2 気泡モルタルの配合

種類	S/C	W/C	単位量 (kg/m ³)				気泡量 (%)	フロー値 (mm)	単位体積質量 (t/m ³)
			C	W	S	混和材混和剤			
気泡モルタル (混合砂)	3.5	1.05	220	231	770	-	40	205	1.22
気泡モルタル (細砂)	2.9	1.00	245	245	709	-	40	190	1.20
気泡モルタル (砕砂)	3.15	0.90	245	221	772	-	40	184	1.24
気泡モルタル (増粘剤)	3.5	1.17	220	231	770	増粘剤	40	202	1.22
気泡モルタル (石灰質微粉 40)	3.34	1.17	197	230	658	石灰粉 132	40	192	1.18
気泡モルタル (石灰質微粉 35)	3.3	1.07	230	247	758	石灰粉 99	35	206	1.33
気泡モルタル (石灰質微粉 30)	3.86	1.07	230	247	887	石灰粉 99	30	207	1.46
気泡モルタル (碎石粉)	3.86	1.07	230	247	624	碎石粉 99	40	188	1.20

3) 大型円柱供試体打設実験

気泡モルタルの施工時には砂の沈降や気泡の浮き上がり、ブリーディングの他に気泡を多量に含んでいることから打設する高さが高いと自重による気泡の圧縮のために体積が減少するとともに単位体積質量も目標値を超えてしまうことが考えられる。このような現象がどの程度影響するかを把握しておく必要がある。そこで、大型の円柱供試体（φ1m×h5m）に気泡モルタルを打設して調査した。

試験に用いた配合を表—3.4.3に示した。

表—3.4.3 気泡モルタルの配合

種類	S/C	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)			気泡量 (%)	フロー値 (mm)	単位体積質量 (t/m ³)
			C	W	S			
気泡モルタル (砕砂)	4.0	100	170	170	680	50	155	1.035

気泡モルタルは、気泡の入らないベースモルタルを購入し打設現場で気泡を混合して製造し、モルタルポンプで連続的に打設した。材令28日まで養生後50cmごとに切断し、切断面から3～5本のコアを抜き取り単位体積質量を測定後圧縮試験を実施した。

3.4.2 静置時の材料分離

分離の状況を数量化して示すために分離抵抗指数（R_s）を以下のように定義して各配合の安定性を検討した。

$$R_s = (\rho_m - (\rho_d - \rho_u)) / \rho_m$$

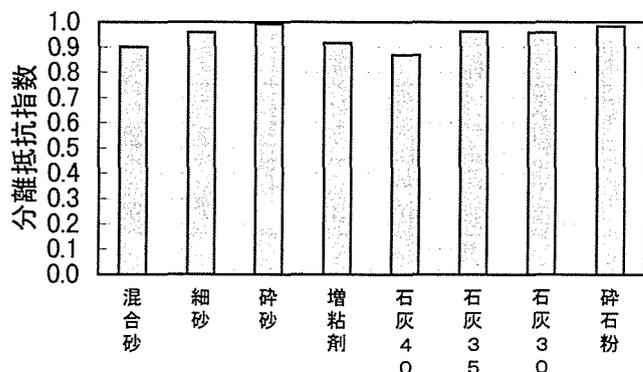
ここに、 ρ_m ：練り上がり後の単位体積質量 (g/cm³)

ρ_d ：下部（最大）の単位体積質量 (g/cm³)

ρ_u ：上部（最小）の単位体積質量 (g/cm³)

R_sは、1に近いほど上下の単位体積質量に差がなく分離抵抗性が大きいことを示す。

ビニールチューブに流し込み静置した場合の各配合の分離抵抗指数を図—3.4.4に示す。全般にほぼ0.9を上回り上下の単位体積質量差が練り上がり時の10%程度以内である。図—3.3.5～3.4.8に気泡量が同じ配合のフロー値、練り上がり時の単位体積質量、1m³中の2mm以上の砂の重量および1.2mm以上の砂の重量と分離抵抗指数の関係を示す。分離抵抗指数がほぼ同じであるため差は認められなかった。



図—3.4.4 静置時の分離抵抗指数

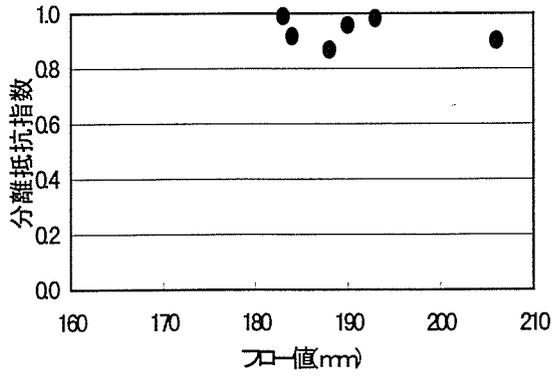


図-3.4.5 フロー値と分離抵抗指数

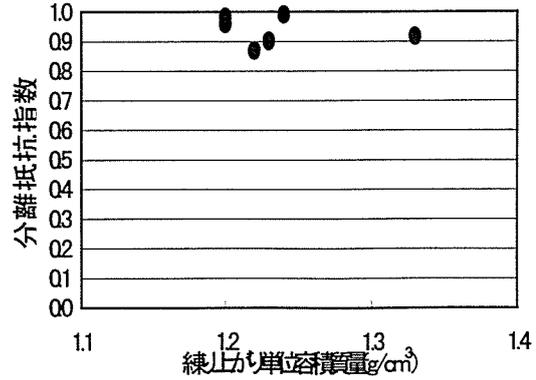


図-3.4.6 練り上がり単位体積質量と分離抵抗指数の関係

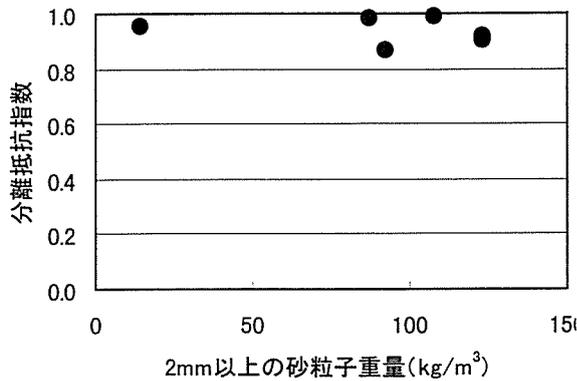


図-3.4.7 2mm 超砂粒子重量と分離抵抗指数

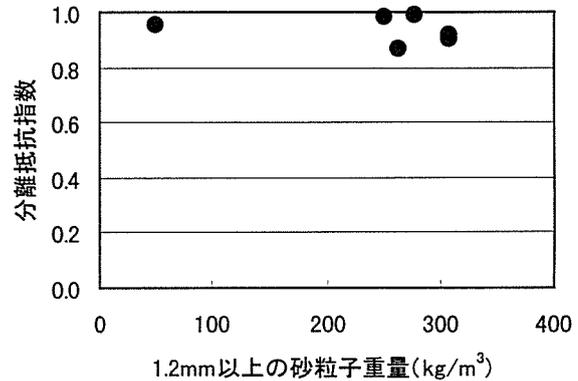


図-3.4.8 1.2mm 超砂粒子重量と分離抵抗指数

3. 4. 3 加圧、減圧繰返し時の材料分離

ポンプ圧送時を想定した 4.5kgf/cm^2 まで加圧したのち 2.54kgf/cm^2 まで減圧する操作を 40 回および 60 回繰返した場合の上中下の位置による単位体積質量の差から算出した分離抵抗指数を図-3.4.9 に、繰返し回数と分離抵抗指数の関係を図-3.4.10 に示した。繰返し回数が増えると分離抵抗指数が低下する場合が多かった。配合の中では土木学会基準粒度内でやや粗い側である混合砂を用いた配合および増粘剤を用いた配合が静置した場合に比べて低い値を示し、砕砂を用いた配合もやや低い値を示した。

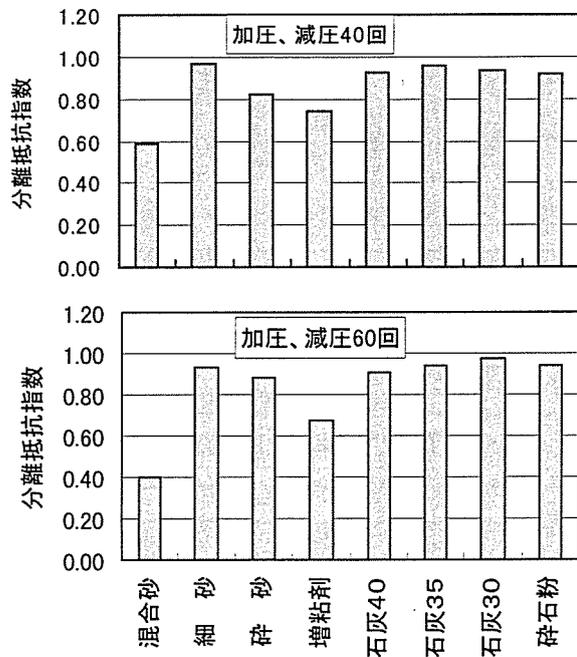


図-3.4.9 加圧・減圧時の分離抵抗指数

他の配合は、静置の場合と大きな差はなかった。静置の場合と同様に空気量の同じ配合のフロー値、練上がり時の単位体積質量、 1m^3 中の 2mm 以上および 1.2mm 以上の砂の重量と分離抵抗指数の関係を図-3.4.11~3.4.14に示した。

静置した場合とは異なり、フロー値が大きくなると分離抵抗指数が低下する傾向が認められたが、練上がり単位体積質量については明確な傾向が認められなかった。これは、加圧、減圧の繰り返しにより気泡モルタル内の変形が生じ、レオロジー特性値に影響が現れたためであると考えられる。

図-3.4.13 および図-3.4.14からは、砂の粗い粒分が多い配合は分離抵抗指数が低下する傾向が読みとれる。これは、レオロジー特性と分離の項で示したように降伏値が小さく粒子径が大きいほど粒子の移動が起こりやすいとの試算結果と対応すると考えられる。

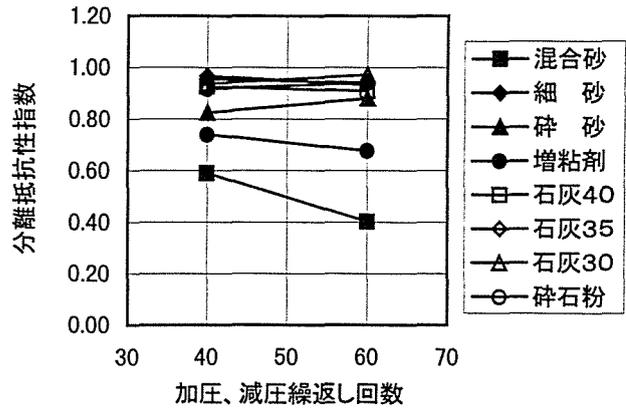


図-3.4.10 加圧・減圧回数と分離抵抗指数

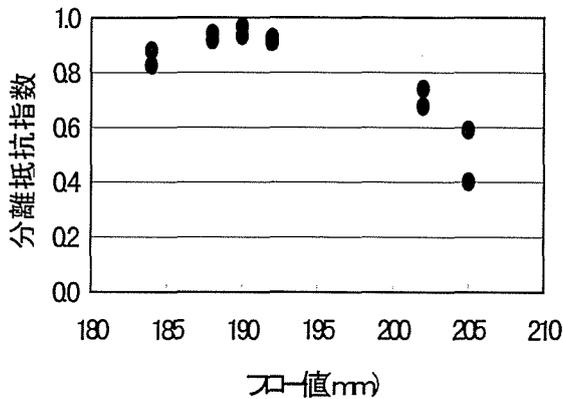


図-3.4.11 フロー値と分離抵抗指数

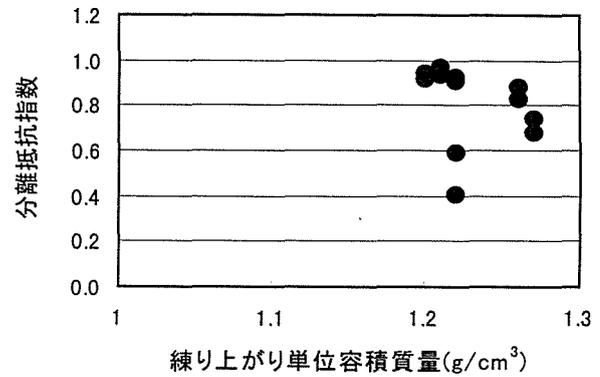


図-3.4.12 練り上がり単位体積質量と分離抵抗指数

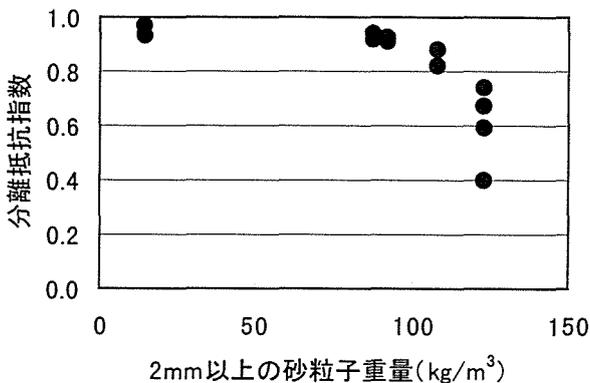


図-3.4.13 2mm超砂粒子重量と分離抵抗指数

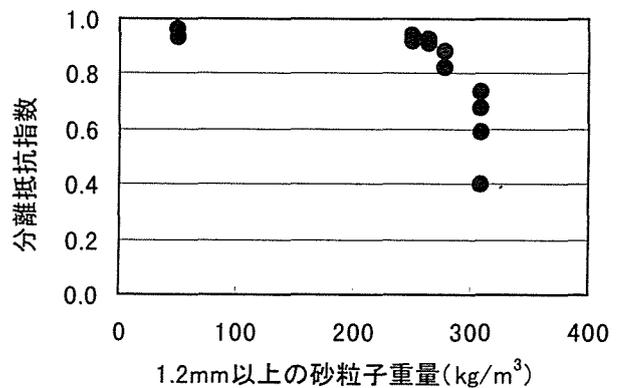


図-3.4.14 1.2mm超砂粒子重量と分離抵抗指数

3. 4. 4 振動下での材料分離

振動を加えた場合の各配合の分離抵抗指数を図-3.4.15に、振動時間と分離抵抗指数の関係を図-3.4.16に示した。

いずれの配合でも振動を加えることにより分離が生じ、振動時間が長くなると分離が急激に進んだ。負の値は分離が激しく練上がり時の単位体積質量を上回る差が生じていることを示している。振動時間1分では細砂、増粘剤添加、砕砂、石灰質微粉末40などで分離抵抗指数が相対的に高い値を示した。加圧、減圧繰返し試験で分離抵抗指数の低かった混合砂は本試験でも分離抵抗指数が低い結果となった。

加えた振動加速度 ($a : g$) は、周波数 ($f : Hz$)、振幅 ($d : cm$) より次式で求められる。

$$a = (2\pi f)^2 d / 980$$

本実験では、振動数 3000cpm、振幅 1mm であるため、

$$a = (2\pi \times 50)^2 \times 0.05 / 980 = 5g$$

となる。西林ら³⁻⁸⁾の研究では混和剤を添加したモルタルの場合であるが 4

gの振動加速度で降伏値が 1/3 に低下している例や角田ら³⁻⁹⁾のコンクリートでの実験では 2~3 gの加速度で回転翼型レオメータの抵抗が消失する結果もあることから振動により降伏値は著しく小さくなったと考えられる。塑性粘度については振動を加えることにより低下する結果^{3-10) 3-11)}と、増加するとの結果³⁻¹²⁾があるが、本実験では振動の継続とともに分離が急激に低下したことからいくぶん低下した可能性が考えられる。

細砂の配合では 1 mm 以上の砂粒子が 10%程度で他の砂に比べて大幅に少ないため、本章のレオロジー特性の項で示したように沈降しようとする力が小さいことがすべての条件で分離抵抗性が大きくなった原因であると考えられる。

また、増粘剤添加の配合は加圧、減圧繰返し試験でも分離抵抗指数が 2 番目に低かったが、振動を加えた場合は 2 番目に高い値を示し、他の配合条件が等しい混合砂の配合に比べると増粘剤の添加により分離抵抗性が改善できていることがわかる。これは、振動下のモルタルやコンクリートのレオロジー特性の研究に見られるように、降伏値が著しく低下

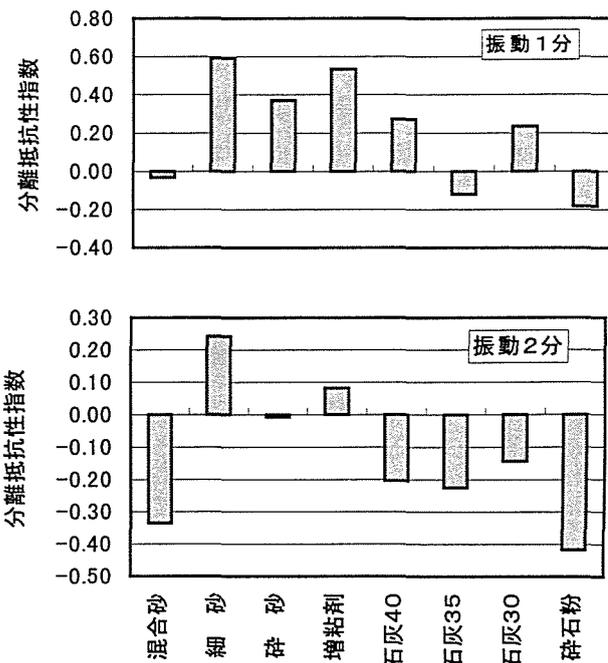


図-3.4.15 各配合の分離抵抗指数 (振動)

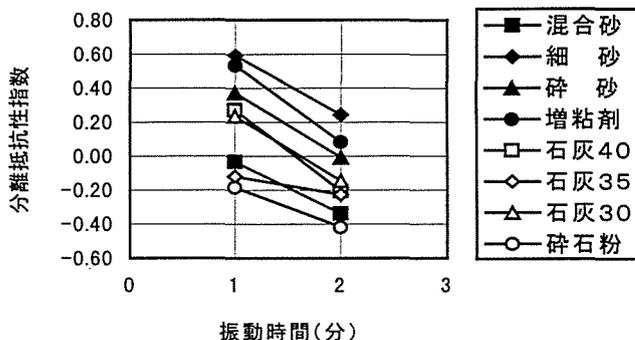


図-3.4.16 振動時間と分離抵抗指数の関係

して気泡や砂粒子の移動が始まるが増粘剤を添加した配合では粘性が寄与し移動速度が小さくなったために分離の程度が低くなったものと推察される。

各配合の要因と分離抵抗指数の関係を図-3.4.17~3.4.20 に示した。フロー値や単位体積質量と分離抵抗指数には明確な傾向はないが、粗い砂粒子の量が多いと分離抵抗指数が低下する傾向となった。こうした結果は第2章で示したように振動を加えることにより

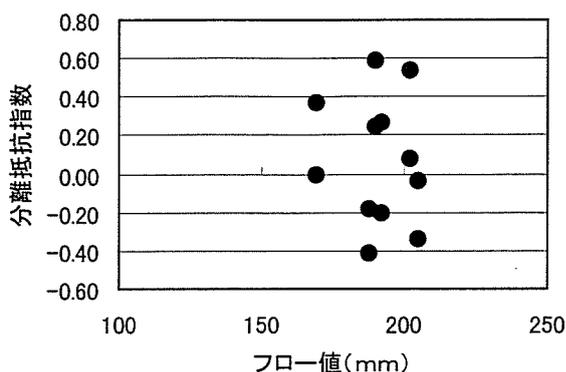


図-3.4.17 フロー値と分離抵抗指数

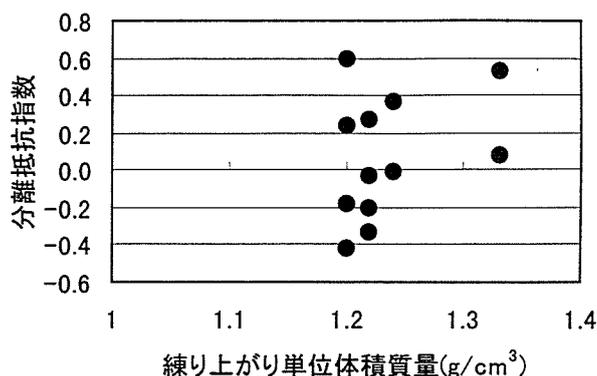


図-3.4.18 単位容積質量と分離抵抗指数

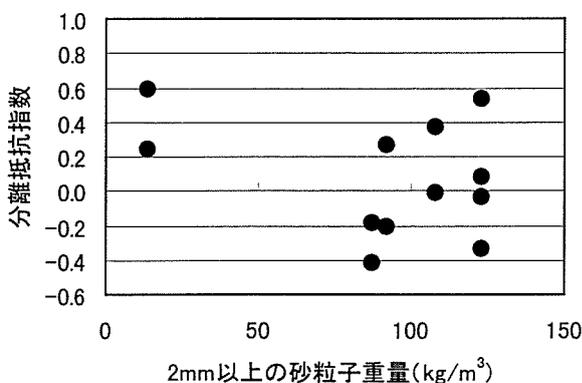


図-3.4.19 2mm 超砂粒子重量と分離抵抗指数

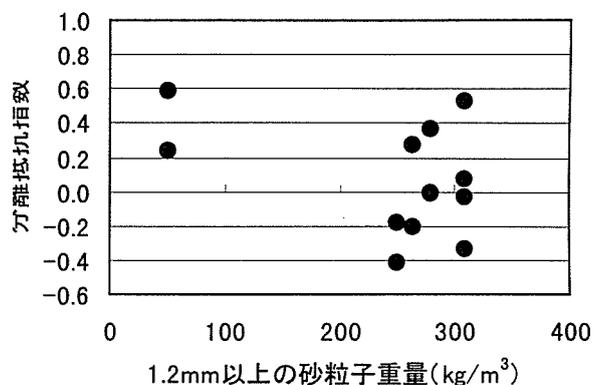


図-3.4.20 1.2mm 超砂粒子重量と分離抵抗指数

降伏値が著しく低下し、砂粒子の沈降と気泡の浮き上がりが始まり、塑性粘度も低下することから容易に移動したためと考えられる。

3.4.5 大型円柱供試体打設

直径 1m、高さ 5m の円柱供試体に打設した気泡モルタルの硬化後の単位体積重量、圧縮強度の試験結果を図-3.4.21 に示す。単位体積質量は表面部では分離のためか設定値よりも低い

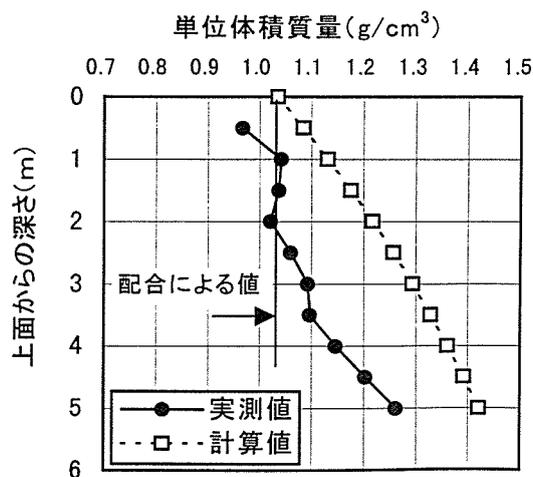


図-3.4.21 深さと単位体積質量

以深では深さとともに増加した。図中の破線は内部の気泡が自重により圧縮され、ボイルの法則により体積変化するとしたときの単位容積質量の計算値である。計算値と一致しないのは、上部が軽いこと、気泡内の空気は起泡剤の希釈液の表面張力と釣り合う圧力を有していること、型枠側面の付着の影響があることなどが考えられるがさらに詳細な検討を要する。

また、浚渫土をセメント系固化材と気泡を混合した軽量混合土打設実験では単位容積質量がボイルの法則で説明できる例³⁻¹³⁾や気泡混合軽量土を加圧養生したときの供試体の単位容積質量がボイルの法則で説明できる例³⁻¹⁴⁾もあることから、打設高さが大きい場合には上下の単位容積質量の差が許容値以内となるように、一回当たりの打設高さに制限を設ける必要があることがわかる。

3. 4. 6 まとめ

気泡モルタルの静置時および施工時に想定される加圧減圧の繰返しや振動時の分離特性を検討した結果以下の点が明らかになった。

- 1) 配合の範囲が限定されていたこともあり静置時の分離傾向の差は小さく、配合要因との関連も明らかでなかった。
- 2) 加圧、減圧を繰返す条件では分離傾向に配合間の差が生じ、フロー値が大きく粗い砂粒子の多い配合ほど分離傾向が著しい結果となった。このことは、砂粒子や気泡の移動と降伏値の関係で示したように降伏値が小さく、砂粒子径が大きいほど沈降しやすいことと対応している。
- 3) 振動を加える条件では各配合とも分離傾向が著しくなった。振動下でのレオロジー特性値が低下することにより気泡の上昇、砂粒子の沈降が顕著になったためと考えられる。中でも分離傾向のやや良好な配合は細砂を用いたものと増粘剤を添加したものであった。配合要因との関連では粗い砂粒子の量との関連が認められた。
このことから、同程度のフロー値で降伏値が同じであっても塑性粘度が大きく砂粒子や気泡の移動速度の小さくなる配合が分離抵抗性が高いといえる。
- 4) 大型円柱供試体の打設実験から打設高さが大きい場合には自重により気泡が圧縮されて単位容積質量が大きくなることが確認され、一回当たりの打設高さに制限を設ける必要があることが確認された。気泡量が50%で1m打設による単位容積質量の変化は $0.08\text{g}/\text{cm}^3$ 程度であることから1m以下に制限する必要があると考えられる。

以上のことから、気泡モルタルの材料分離は圧送や打設時など外力が作用したときに生じやすいことが明らかである。また、気泡モルタルに用いる材料特性や配合要因のうち砂の粒度と気泡モルタルのレオロジー特性の分離抵抗性に与える影響が大きいと考えられ、気泡モルタルのレオロジー特性の節で述べたように特に粗い砂粒子が沈降しやすく、降伏値や塑性粘度が低い配合では分離が生じやすい事が確認された。このことから例えば2mm以上の粒径の少ない砂を選定して用いることや施工上フロー値の制限があることから限界があるが降伏値や塑性粘度が高くなるように微粒分をある程度(10%程度)含んだ砂を用いること、また、粉体を添加することも分離抵抗性を高める方策である。しかしながら、

これらは同じフロー値を得るのに必要な水量を増加させることにもなるため、必要な強度が得られることを確認する必要がある。

3. 5 3章の結論

本章では、セメントミルクや気泡ミルク気泡モルタルのレオロジー特性を調査し、気泡混合材料の特性を検討した。また、セメントミルク自身の材料分離特性や気泡モルタルが施工時に受けるであろう加圧減圧の繰返しおよび振動を受けた場合などについても調査した。得られた結果は以下の通りである。

(1) 気泡ミルク、気泡モルタルのレオロジー特性

- 1) 気泡ミルクや気泡モルタルについても塑性粘度と降伏値の関係は、セメントミルクやモルタルの場合と同様の関係にある。
- 2) 塑性粘度や降伏値は、気泡の添加量が少ない場合にはやや低下し、40%以上では増大する傾向にある。
- 3) 静止状態では、試験範囲のミルクやモルタルは気泡を保持できる降伏値を有している。しかし、配合によっては粗い砂粒子を保持するには降伏値が不足する場合がある。

(2) 材料分離特性

- 1) セメントミルク自身の分離も顕著で、静置時の水セメント比の上下差が5%以下と小さい範囲であるのはW/Cが50%以下のミルクの場合である。
- 2) 加圧、減圧繰返しによると、気泡モルタルの分離は促進され、粗い砂粒子の多い配合では分離しやすい。
- 3) 特に振動下では、レオロジー特性値が低下することから分離が極めて顕著である。
- 4) 一度に大量に打設すると自重により気泡が圧縮され下部の単位容積質量が大きくなる。
- 5) 気泡ミルクの分離の試験結果からブリーディングが1~2%以下、ビニールチューブ中の単位容積質量の変動係数が5%程度以下であれば圧縮強度の変動係数が20%以下であった。

(3) 配合設計

配合設計上考慮すべき点として気泡ミルクのもととなるセメントミルクの試験で、

- ① プレーンのセメントミルク(20℃)でブリーディングの生じないW/Cは50%である。
- ② プレーンのセメントミルク(20℃)の気泡保持能力に関与する降伏値の十分な値が得られるW/Cは70%程度であり、W/C=100%では明らかに不足する結果が得られ、安定性を考慮すると気泡セメントミルクのW/Cは70%以下、できれば60%以下にすることが望ましい。

気泡モルタルに用いる砂の安定性に関しては、気泡ミルク中での砂粒子の移動が生じず砂粒子を保持できる気泡ミルクの降伏値があることと、砂粒子が移動しにくい粒径であることを考慮する必要がある。この点から最大粒径の小さい砂を用いることが有効である。また、W/Cは流動性が得られる範囲で小さくする事が有効である。

気泡モルタルにおける材料分離は、ブリーディング、砂の沈降、気泡の浮き上がりに

より発生するため単位容積質量が $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ 付近の配合の安定性が高い。

また第4章で触れるが、鉱物質微粉末を砂やセメントの一部として利用することも安定性の確保に有効である。

実験を進める中でセメントミルクのみではブリーディングは発生するが、気泡の混入によってブリーディングが発生しなくなる現象が認められた。これは気泡も砂やセメント粒子と同様にそれらの周辺に水の膜を形成して水の移動を抑制していると考えられるが、この点の解明は今後の課題である。

配合に関する要点をまとめると表-3.5.1に示すようになる。

表-3.5.1 安定な配合を得るための検討項目と条件

材料分離要因	検 討 項 目	条 件
ブリーディング	セメントミルクの分離がない	$W/C \leq 50\%$
	混合物として安定	密度が $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ に近い
気泡の浮き上がり	セメントミルクの降伏値が高い	$W/C \leq 60\%, < 70\%$
砂の沈降	砂粒子径が小さい	$D < 1.2\text{mm}$
	セメントミルクの降伏値が高い	$W/C \leq 60\%, < 70\%$

また、配合検討時の気泡ミルクの品質の安定性の判断の方法としてブリーディング率や単位容積質量の変動係数が考えられ、ブリーディング率測定用のビニールチューブを 60~80cm と長くし、ブリーディング測定後に切断し単位容積質量を測定する方法が簡便である。その際の管理値として表-3.5.2の値が適当であると考えられる。

表-3.5.2 管理値

管理項目	管理値
ブリーディング率	1%以下
単位容積質量変動係数	5%以下

3章の参考文献

- 3-1) 古谷俊明：軽量盛土としての気泡モルタル、土と基礎、Vol.37,No.2,pp73-77,1989
- 3-2) 岸谷孝一・岡誠一：フレッシュセメントペーストおよびモルタルのレオロジー定数測定、日本建築学会論文報告集、題 305 号、pp1-7,1981
- 3-3) 村田二郎・菊川：ポルトランドセメントミルクの粘度式に関する研究、土木学会論文集 V-2, No.354,pp109-118,1985
- 3-4) 村田二郎・菊川浩司・大塚茂雄：フレッシュセメントペーストおよびモルタルにおけるコンシステンシーのレオロジー的考察、セメント技術年報 XXVI、pp268-289,1972
- 3-5) 吉野 公：流動性コンクリートのワーカビリティ評価に関する研究、名古屋大学学位論文、pp40,1994.5
- 3-6) Ralph W. Ansley and Terence N. Smith, Motion of Spherical Particles in a Bingham Plastic; AIChE Journal, Vol. 13, No. 6, 1967, pp1193-1196.
- 3-7) 寺西浩司：フレッシュコンクリートの間隙通過時および振動下の挙動に関する研究、名古屋大学学位論文、pp104-107, 1995
- 3-8) Nishibayashi S., Yamura K., Inoue S.: Rheological Properties of Superplasticized Concrete, Developments in the Use of Superplasticizer, ACI SP-68, pp441-466, 1981
- 3-9) S. Kakuta, T. Kojima : Effect of Admixtures on the Rheology of Fresh Concrete During Vibration, 3rd Inter. Conf. on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, pp189-208, 1989
- 3-10) 角田 忍：フレッシュコンクリートの振動時における性質、フレッシュコンクリートの挙動とその施工への応用に関するシンポジウム論文集、日本コンクリート工学協会、pp13-18, 1989.4
- 3-11) 水口裕之・田中淳一・田中伸幸：振動がコンクリートのレオロジー定数に与える影響、セメント技術大会論文集、Vol.46, pp388-393, 1992
- 3-12) 吉野 公・前田正敏：振動下におけるフレッシュペーストとモルタルの挙動に関する一考察、土木学会第 35 回年次学術講演会講演概要集、第 5 部門、pp308-309, 1980.10
- 3-13) 清水和也・土田孝・後藤年芳：浚渫土を使用した軽量埋め立て材料施工実験、土木学会第 47 回年次学術講演会講演概要集、pp1082-1083, 1992.9
- 3-14) 笠井寿太郎・土田孝・水上純一・横山裕司・植田和徳・後藤年芳：軽量盛土・埋立材料に及ぼす養生条件の影響について、第 28 回土質工学研究発表会、pp2669-2672, 1993.6

第4章 気泡ミルクおよび気泡モルタルの 各種物性に関する研究

4. 1	概 論	73
4. 2	気泡ミルクの硬化体の強度特性	74
4.2.1	実験概要	74
4.2.2	配合条件と圧縮強度の関係	75
4. 3	鉱物質微粉末を用いた気泡モルタルの強度特性	79
4.3.1	実験概要	79
4.3.2	碎石粉による砂の粒度改善	81
4.3.3	微粉末を添加による強度調整	82
4.3.4	まとめ	85
4. 4	気泡モルタルの各種物性試験	86
4.4.1	実験概要	86
4.4.2	フレッシュ気泡モルタルの性状	91
4.4.3	気泡モルタル中の気泡径の分布	91
4.4.4	養生条件と強度発現	95
4.4.5	せん断特性	100
4.4.6	吸水特性	101
4.4.7	繰返し載荷特性	103
4.4.8	乾湿繰返し抵抗性	105
4.4.9	凍結融解抵抗性	106
4.4.10	透水性	107
4.4.11	熱特性	108
4.4.12	乾燥収縮	111
4.4.13	まとめ	113
4. 5	第4章の結論	116
	4章の参考文献	118

第4章 気泡ミルクおよびモルタルの各種物性に関する研究

4.1 概 論

気泡コンクリートは1950年代から1960年代に我が国に導入され、現場打ちの発泡コンクリートであるサーモコンや起泡コンクリートであるフォームクリートが建築の分野で用いられた。それに続いてオートクレーブ養生により硬化させた軽量コンクリート（ALC）が技術導入され、工場製品として製造される軽量気泡コンクリートとして構造材料や断熱用材料として主に建築の分野で多く利用されてきた⁴⁻¹⁾。ALCについては1962年に日本建築学会に「ALC研究会」が組織されて材料の研究が行われ物性値等も明らかにされ、1972年にJIS A 5416「オートクレーブ養生した軽量気泡コンクリート製品」が制定されるに至った。最近でも高層建築物用外壁材などの用途に対応するために高強度の軽量コンクリートが開発されその中でも気泡の混合は軽量化の手段として使われた⁴⁻²⁾。

一方、気泡ミルクや気泡モルタルという呼称は気泡コンクリートと構成材料は同様であるが、空洞充填や埋戻しなど土質材料的な性能を要求される用途に用いる場合に使われているようである。最近では気泡モルタルに用いる細骨材は現地で発生する砂質土も対象としており気泡混合軽量土という言葉も用いられている。

気泡コンクリートと呼ばれる範疇の材料については物性値も明らかにされている⁴⁻³⁾が、先に述べたように気泡ミルクや気泡モルタルについての研究は最近になってからであり、これらの材料を利用するに当たって物性値を明らかにしておく必要がある。

これらの材料の最大の特徴の一つである気泡を混合することにより軽量性を得ることについては安定した配合であればほぼ計算値と同等の硬化体を得られることは容易に想像できる。しかしながら気泡を多量に含む場合は吸水により単位容積質量が変化することも考えられる。また、圧縮強度と気泡の量との関係についてはコンクリートにおいて多くの研究成果があり、気泡の混合により強度が低下することはTalbotのセメント空隙比説⁴⁻⁴⁾ ⁴⁻⁵⁾が有名であり、AEコンクリートで気泡量の1%の増加により4~6%強度が低下することもよく知られているが、気泡ミルクや気泡モルタルの場合の関係についても明らかにしておく必要がある。吸水性があることは先に述べたが、養生条件が強度発現に及ぼす影響や耐久性との関連で暴露条件の影響の把握も重要である。2章で示したように、軽量盛土材として実用化するための研究では一連のデータが得られているが、材料の特性を把握する上ではさらに多くの実験データを収集し評価していく必要があることから、すでにいくつかのデータが得られている項目についても検討することとした。

また、乾燥収縮はセメントのみの気泡コンクリート（気泡ミルク）では0.2~0.5%に達し、普通コンクリートの10倍程度である⁴⁻⁶⁾とされているが、本研究の対象である気泡モルタルの場合のデータの少ないため乾燥収縮特性を把握しておく必要がある。さらに、気泡を含むことにより熱特性が変化することも重要な点である。建築の分野で用いられる気泡コンクリートについてはデータがあるが⁴⁻³⁾、気泡モルタルについても同様の扱いができるかどうかを明らかにしておく必要がある。

本章では、配合の異なる気泡ミルク、気泡モルタルの強度特性と代表的な配合の気泡モルタルの諸物性を調査した結果を示し土木材料としての評価を行うことにする。

4. 2 気泡ミルク硬化体の強度特性

気泡ミルクは、単位容積重量が小さな配合とすることが可能なことから、特に軽量性が要求される場所に用いられてきた。通常の場合は、単位容積質量が 0.5g/cm^3 程度までの配合が可能で、特殊な条件下では 0.3g/cm^3 の配合も可能である⁴⁻⁷⁾ ⁴⁻⁸⁾。また、水セメント比や気泡量の組合わせで強度レベルも広い範囲で選択できる。一方、セメント量が多くなる場合には硬化時の温度が高くなる点に注意する必要がある。

本節では、気泡ミルクの配合と得られる強度、単位容積質量の関係を明らかにすることを目的とした。

4. 2. 1 実験概要

(1) 使用材料

実験に用いたセメントはJ I Sの普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種である。起泡剤は、タンパク系と界面活性剤系の各1種類を用いた。使用材料の性質は3章で示したものと同様で表3.1.1および2に示す。練りませ水には水道水を用いた。

(2) 配合の種類

気泡ミルクの配合は、水セメント比と気泡量の組合わせで表-4.2.1に示す配合とした。

表-4.2.1 気泡ミルクの配合の組合わせ

W/C (%)	気泡量 (Vol. %)								
	0	10	20	30	40	50	60	70	80
45	○		○		○		○		
50	○		○		○		○		
55	○		○		○		○		
60	○	○	○	○	○	○	○	○	○
65	○		○		○		○		

(3) 試験項目および方法

1) 試験項目

試験項目は、圧縮強度、単位体積重量である。

2) 気泡ミルクの製造

気泡ミルクの製造方法は、3章の方法と同様とした。

3) 供試体の作成

練混ぜ後60分までフロー値、レオロジー特性値を測定したのち、余盛ができるようにガムテープで上へ伸ばした $\phi 5 \times 10\text{cm}$ の簡易にモールドに流し込み軽く振動せて大きな気泡が残らないように詰めた。翌日、表面を水平に仕上げ 20°C の水中で試験材令まで養生した。

4) 圧縮試験

材令7日および28日で脱型後、圧縮試験を実施した。

4. 2. 2 配合条件と圧縮強度の関係

(1) セメントミルク

セメントミルクの水セメント比と圧縮強度の関係を図-4.2.1に示す。材令7日の圧縮強度は水セメント比の増加とともに小さくなるが、55%以上の強度変化が小さい。これは3章で示したように水セメント比60%以上では、ブリージングが生じ硬化した部分の水セメント比が低下しているためであると考えられる。また、セメントの種類の違いは明確ではない。材令28日では、水セメント比の変化と強度の変化の傾向は材令7日と同様であるが、セメントの種類の違いは明確で、高炉セメントB種の方が普通セメントよりも2割程度高い値となっており、長期の強度発現性の高い高炉セメントの特性が現れている。

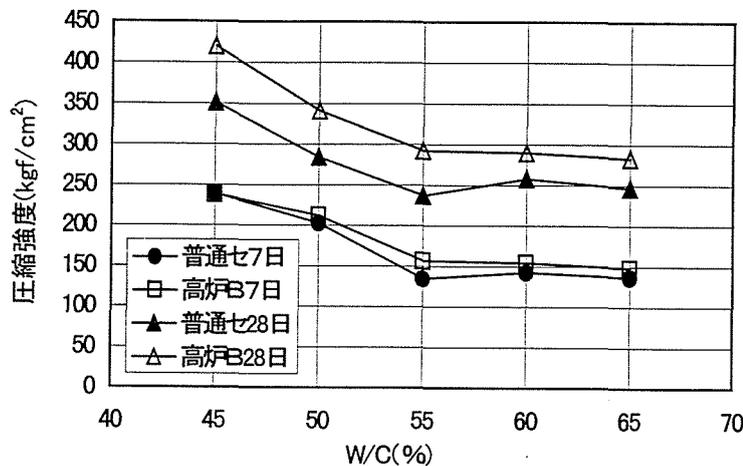


図-4.2.1 水セメント比と圧縮強度の関係

図-4.2.2には、材令7日と材令28日の圧縮強度の関係を示す。材令7日から材令28日までの圧縮強度の伸びは、普通ポルトランドセメントで1.57倍、高炉セメントB種で1.77倍であった。これらは、JISモルタル試験結果の強度比に比較するとやや低い値である。

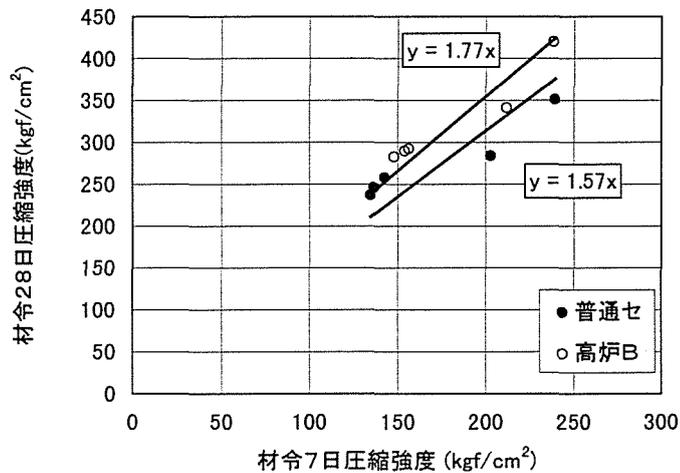
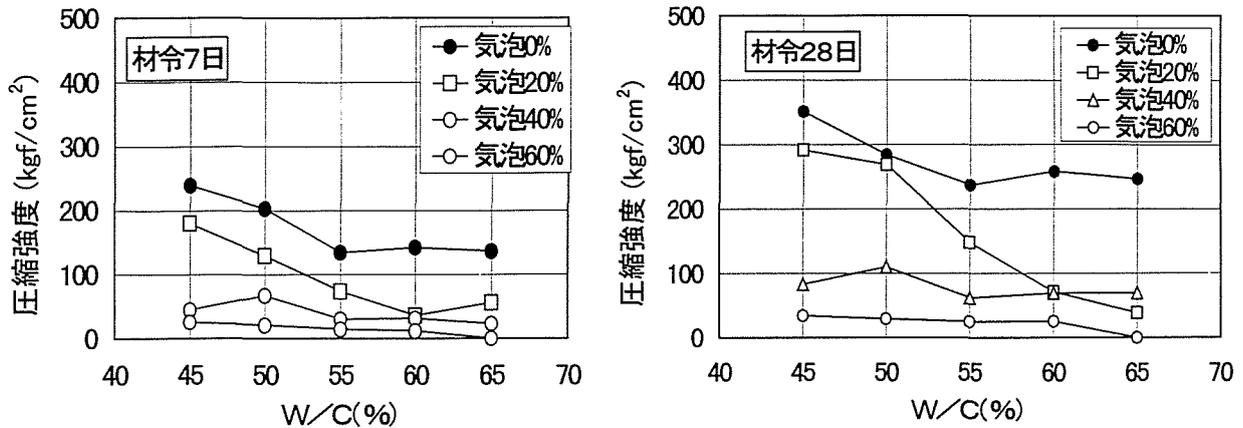


図-4.2.2 材令7日と材令28日の圧縮強度の関係

(2) 気泡ミルク

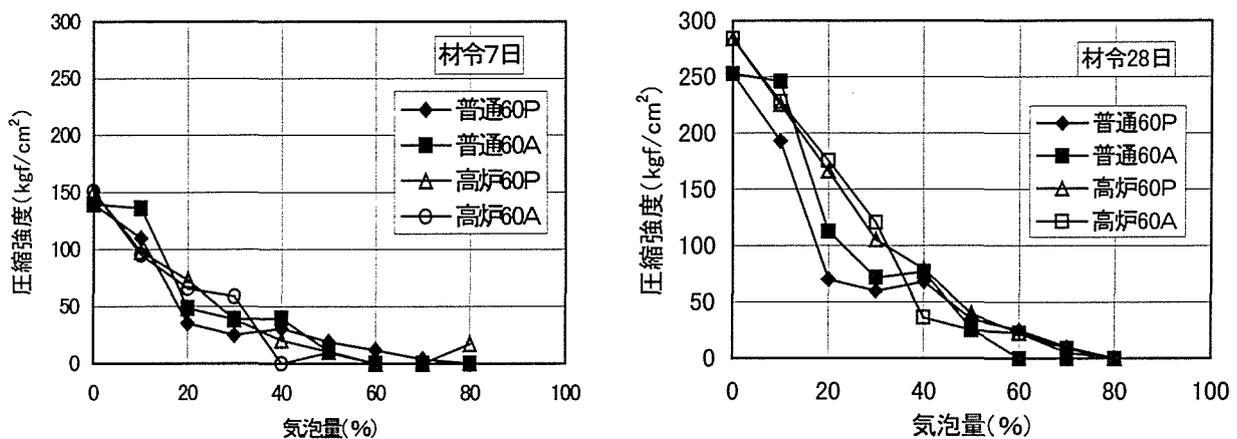
1) 気泡量と圧縮強度

気泡混合量の異なる気泡ミルク（普通セメントとタンパク系起泡剤を用いた場合）の水セメント比と圧縮強度の関係を図—4. 2. 3に示す。気泡量が20%の場合はセメントミルクの場合より水セメントの増加による圧縮強度の低下が大きくなっており、気泡の混合によりブリージングが抑制される傾向があったと考えられる。また、気泡量が40%、60%と多くなると水セメント比の増加とともに圧縮強度は低下するが水セメント比の影響が小さくなった。



図—4. 2. 3 気泡ミルクの水セメント比と圧縮強度の関係

水セメント比が60%の気泡ミルクの気泡量と圧縮強度の関係を図—4. 2. 4に示した。ややばらつきはあるものの気泡量の増加とともに圧縮強度は双曲線的に低下する傾向を示した。



図—4. 2. 4 気泡ミルクの気泡量と圧縮強度の関係

図—4. 2. 5に気泡添加量と気泡を添加しない場合の材令28日の圧縮強度に対する気泡を混合した場合の圧縮強度の比を4種類の気泡ミルクについて平均した値との関係を示した。気泡量30%程度まではほぼ直線的に強度が低下し、気泡量1%の増加に対する低下率は2.2%であった。同一水セメント比のコンクリートの場合には気泡量が1%増加することによる強度低下が4～6%であるとされているのに対して小さな値となった。

これは、図中では気泡を添加しない場合を気泡量0%としているが、実際にはエントラップトエアが5%程度は入っていると考えられることから気泡量の少ない場合の強度低下

率はさらに大きくなりコンクリートに近い値となると考えられる。

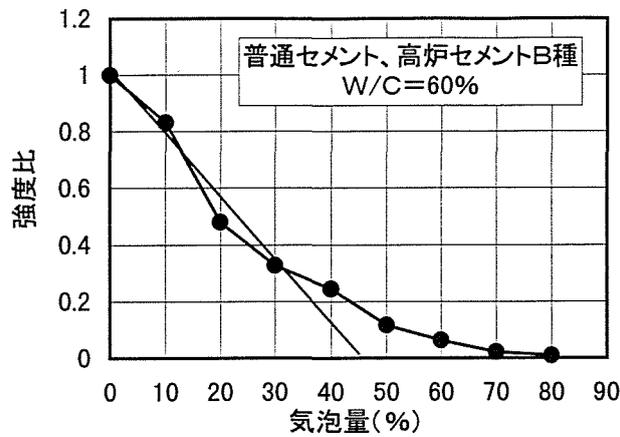


図-4.2.5 気泡量と圧縮強度比の関係

同じデータを横軸を間隙比として図-4.2.6に表した。

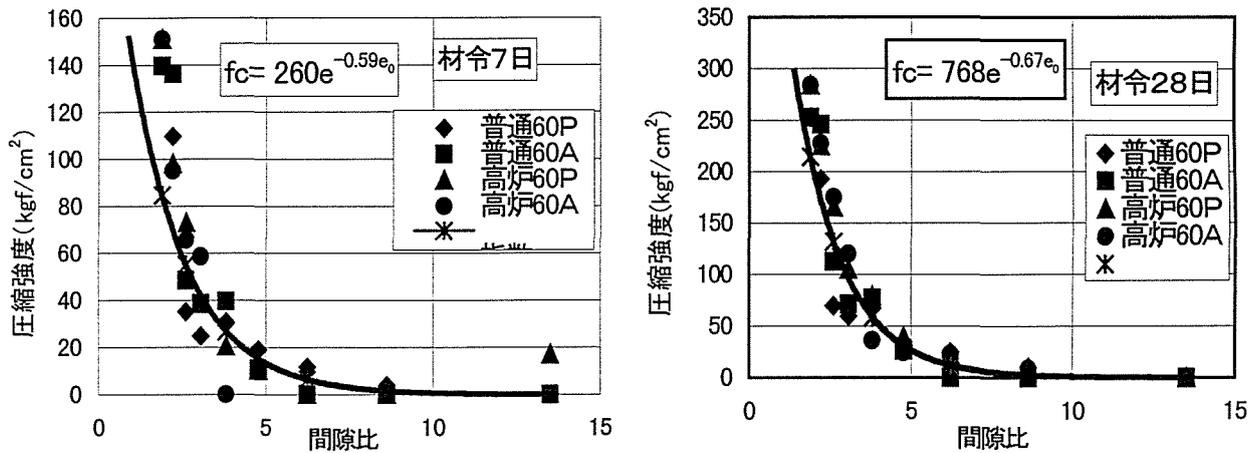


図-4.2.6 間隙比と圧縮強度の関係

間隙比と圧縮強度の間には指数関数的な関係が存在し、山の内らが示した結果⁴⁻⁹⁾と対応した。各材令で以下の近似式が得られた。

$$\text{材令7日: } f_c = 260 e^{-0.59 e_0} \quad (4.1)$$

$$\text{材令28日: } f_c = 768 e^{-0.67 e_0} \quad (4.2)$$

ここで、 f_c : 各材令での気泡ミルクの圧縮強度 (kgf/cm²)

e_0 : 気泡ミルクの間隙比

$$\begin{aligned} e_0 &= (1 - W_c (1 - V_a) / \rho) / (W_c (1 - V_a) / \rho) \\ &= (\rho - W_c (1 - V_a)) / (W_c (1 - V_a)) \end{aligned}$$

W_c : 単位セメント量 (kg/m³)

ρ : セメントの比重

V_a : 気泡混合量 (m³/m³)

普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種を用いた気泡ミルを20℃養生した場合の圧縮強度はこの結果を用いて推定可能である。

2) 単位容積質量と圧縮強度

気泡ミルクは軽量性が得られることが特徴であるが単位容積質量と圧縮強度の関係を図-4.2.7に示した。

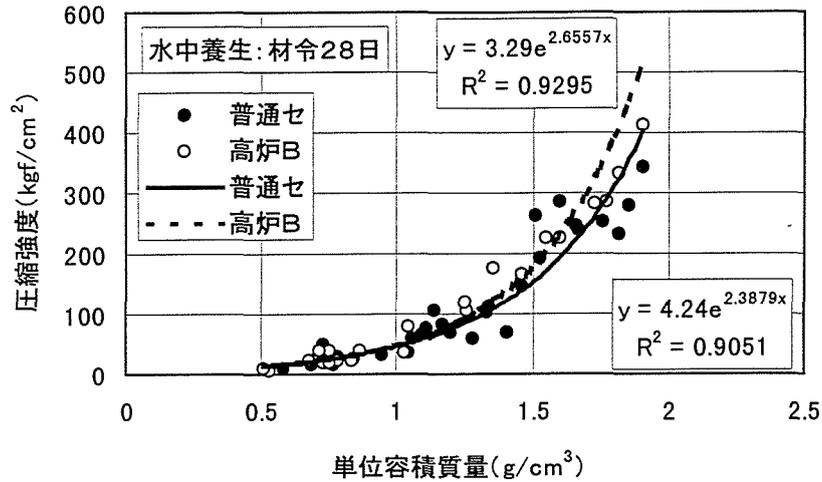


図-4.2.7 気泡ミルクの単位容積質量と圧縮強度の関係

普通ポルトランドセメントと高炉セメントB種ともほぼ同じであるが気泡ミルクの場合の単位容積質量と得ることのできる圧縮強度の関係をj知ることができる。この関係は、図-4.2.8に示すように従来から示されている気泡コンクリートのかさ比重と圧縮強度の関係⁴⁻¹⁰⁾と一致する。なお、図中の太い実線および破線は図-4.2.7の回帰曲線である。

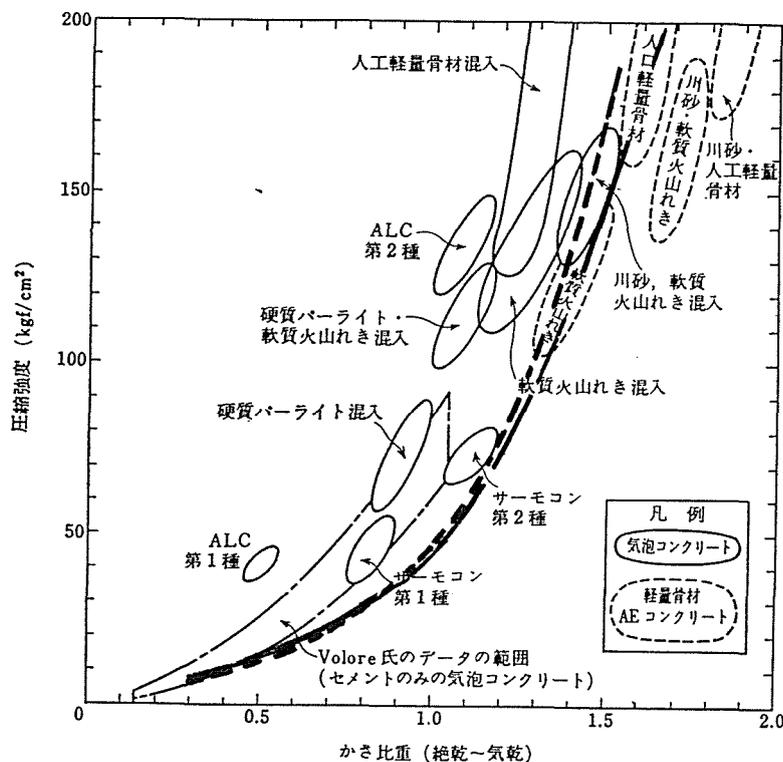


図-4.2.8 気泡コンクリートのかさ比重と圧縮強度の関係⁴⁻¹⁰⁾に加筆

4. 3 鉱物質微粉末を用いた気泡モルタルの強度特性

気泡モルタルを考える際に使用する細骨材の影響があることが考えられる。分離抵抗性を高くするためにも粘性が高くなるようにすることは分離抵抗性の検討結果からも有効であると考えられる。西日本で使用量が増加している海砂は微粒分が少なく本工法には必ずしも良い材料とは言えない。一方、コンクリート骨材や路盤材などとして用いられる碎石の生産の際に発生する副産物に碎石粉がある。この碎石粉は、集塵機で捕集される乾燥粉と洗いによって流出するスラッジ状のものがあるが、最近ではコンクリートの混和材として利用することも検討されているが⁴⁻¹¹⁾、多くは有効な利用先がなく処分されていた。この碎石粉を細骨材の一部として用いる場合の気泡モルタルの強度特性を検討した。

また、気泡モルタルは充填材として用いる場合など、土と同程度の強度の方が望ましい場合がある。例えば杭基礎構造物の下部に生じた空隙の充填の際には地盤と同程度の横方向地盤反力係数が得られ、できるだけ軽くさらに杭に付着せずに地盤が沈下した場合には地盤とともに沈下するような低強度が要求される。この目的では気泡モルタルを用いた例⁴⁻¹²⁾の他に土をベースにした気泡混合軽量材料⁴⁻¹³⁾も充填に用いられている。入手の容易さでは現在のところ気泡モルタルが優位である。気泡モルタルを用いる場合、セメント量を減ずるだけでは分離が著しくなり使用に耐えない材料となる。このような場合に碎石微粉末や石灰質微粉末を不活性材料としてセメントと置換して強度調整材料として用いることが考えられるため、この場合の性能についても検討した。

4. 3. 1 実験概要

(1) 使用材料

実験に用いた材料は、普通ポルトランドセメント、石灰質微粉末（石灰石を微粉碎したのもでセメントに近い粒度分布を有する微粉末）、碎石微粉末（碎石の製造の際に発生する微粒分を乾燥させたもの）、海砂およびタンパク系起泡剤を用い、主な物性を表-4. 3. 1に、粒度加積曲線を図-4. 3. 1に示す。

表-4. 3. 1 使用材料の主な物性

材 料 名	比 重	F. M.	備 考
普通ポルトランドセメント	3. 15		S O社製
石灰質微粉末	2. 73		S O社製
碎石微粉末	2. 65		N社製
細 骨 材	2. 54	1. 8	瀬戸内海産海砂
起 泡 剤	1. 16		プロフォーム：N商会製

(1) 実験方法

砂の一部として使用する条件では目標強度を 3, 5, 10kgf/cm² の3段階を設定し、砂の置換率は最大 20%とした。また、強度調整のためにセメントと置換する場合の置換率は 20~80%とした。

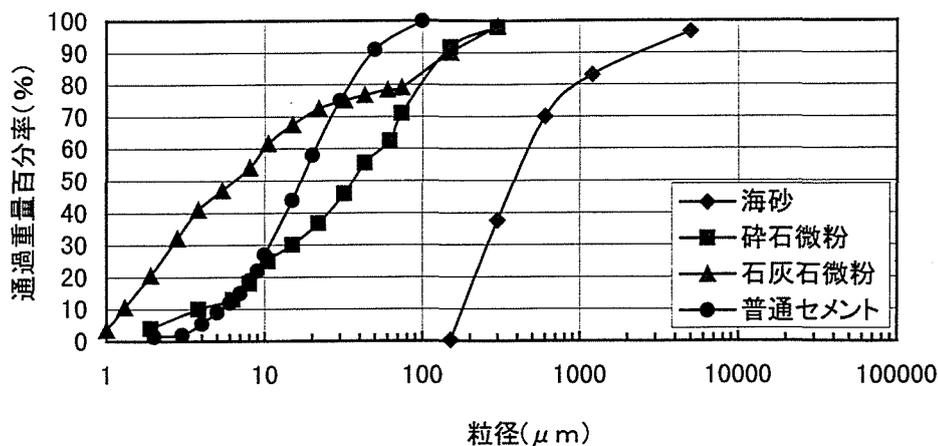


図-4.3.1 使用材料の粒度分布

表-4.3.2 に示す配合に基づき、表面乾燥飽和状態に調整した細骨材および各材料を計り取り、手練りで3分間混合した。練り上がったモルタルに所定容積の気泡を混合し気泡モルタルを作成し、フロー試験 (KODAN 305 φ8×h8cm シリンダ法) および単位体積質量 (1リットルますによる重量測定) を実施した。

試験を実施後、ビニールチューブ (φ5×50cm) に流し込み上部を閉じ、20℃恒温室内で吊したまま養生した。材令7日および材令28日で硬化体を10cmの長さに切断し、上中下の3本の供試体を作成した。寸法および供試体重量を測定後、JIS A 1108 に準じて圧縮試験を実施した。

表-4.3.2 試験水準と配合

S/C	目標強度 (kgf/cm ²)	置換率 (%)		単位量 (kg/m ³)					気泡量 (%)
		砕石粉	石灰粉	セメント	水	海砂	砕石粉	石灰粉	
2	3	0	-	180	169	360	0	-	610
		10	-	180	169	324	36	-	610
		20	-	180	169	288	72	-	610
	5	0	-	195	187	390	0	-	580
		10	-	195	187	351	39	-	580
		20	-	195	187	312	78	-	580
	10	0	-	256	197	510	0	-	500
		10	-	256	197	459	51	-	500
		20	-	256	197	408	102	-	500
	-	20	-	205	197	512	51	-	500
		40	-	154	197	512	102	-	500
		60	-	102	197	512	154	-	500
80		-	51	197	512	205	-	500	
-		20	205	197	512	-	51	500	
-		40	154	197	512	-	102	500	
-		60	102	197	512	-	154	500	
-	80	51	197	512	-	205	500		

4. 3. 2 碎石粉による砂の粒度改善

(1) フロー値への影響

碎石粉の置換率とフロー値の関係を図-4.3.2に示す。いずれの場合も置換率の増加とともにフロー値が低下している。これは微粉分の増加により自由水が吸着され流動性が低下したものと考えられる。

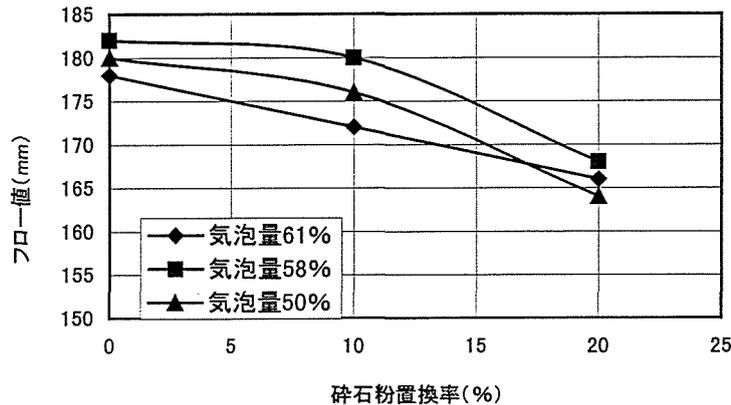


図-4.3.2 碎石粉の置換率とフロー値の変化

(2) 単位体積質量と圧縮強度

供試体の位置と単位体積質量の関係を図-4.2.3に示す。単位体積質量は下部ほど高くなる傾向を示し、置換率0%では位置による差が大きく置換率の増加とともに差が小さくなる傾向にあり、分離傾向の差が見られる。この傾向は目標強度が低いほど明確である。これは先に示したフロー値の低下により降伏値が増大し粒子移動がしにくくなったことによると考えられる。

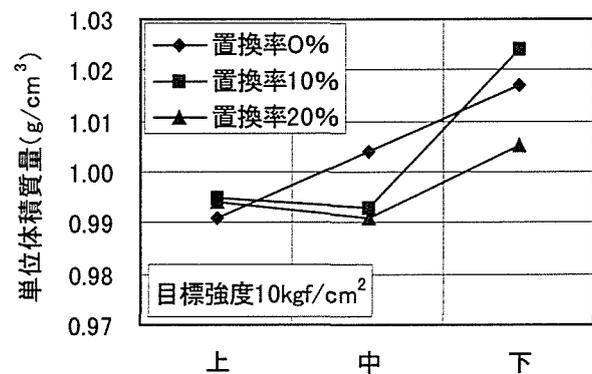
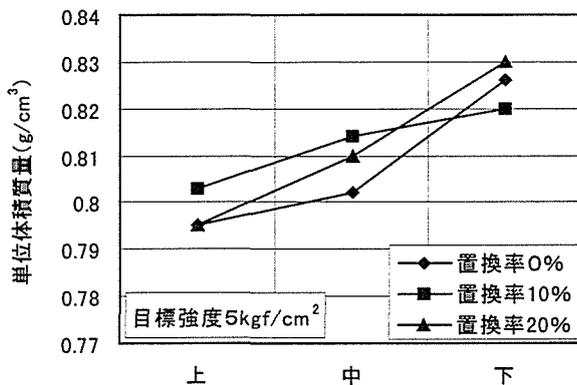
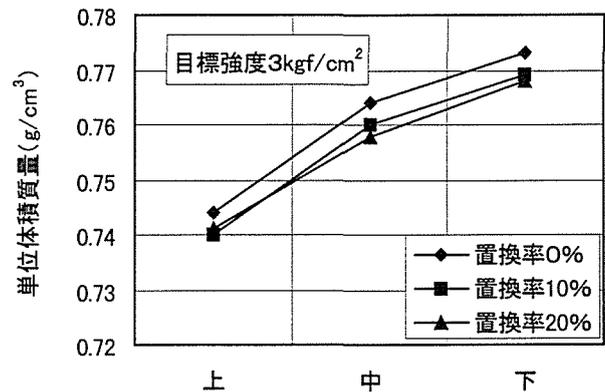


図-4.3.3 供試体採取位置と単位容積質量

供試体の採取位置と圧縮強度の関係を図-4.3.4に示す。目標強度 3kgf/cm^2 では置換率10%までは下部の方が強度が低くなる傾向を示した。これは単位容積質量が 1g/cm^3 以下であるためブリーディングが下向きに生ずることによると考えられる。置換率20%では位置による差がなくなった。目標強度5、 10kgf/cm^2 では単位容積質量の差はあるものの位置による強度差が小さくなった。これは単位容積質量が 1g/cm^3 に近いことからブリーディングが生じにくくなっていること、粉体量が多くなっていることなどにより分離が少なくなっていることによると考えられる。

以上のように、砂の一部を碎石微粉末に置き換えた気泡モルタルの試験の結果以下の点が明らかになった。

- 1) 碎石微粉末を置換することによりフロー値は低下する傾向にあった。
- 2) 碎石微粉末の添加により単位容積質量の上下差が小さくなるとともに強度の位置による差も小さくなり安定する傾向であった。また、強度低下は認められなかった。

本試験で用いた海砂はFMが1.84と細かい砂ではあるが細粒がほとんどないためセメント量の少ない配合では分離しやすいことがあるが、微粉末を添加することにより安定性を増すことが可能であると考えられる。なお、碎石微粉末の添加によりフロー値が低下することから影響の少ない範囲で用いる必要がある。

4.3.3 微粉末添加による強度調整

(1) フロー値

2種類の鉱物質微粉末をセメントと置換した場合の置換率とフロー値の関係を図-4.3.5に示す。微粉末をセメントと置換することによるフロー値への影響は微粉末の種類により幾分の差が認められた。すなわち、石灰質微粉末はセメントと置換してもフロー値の低下は小さく20%以上添加してもほとんど変化がない結果となった。

一方、碎石微粉末は砂と置換した場合と同様に置換率が増加するとともにフロー値が低下する傾向となった。碎石微粉末はセメントよりやや粗いがよく似た粒度分布を有しているにもかかわらずフロー値が低下するのは破碎方法が異なることによる形状の差があるこ

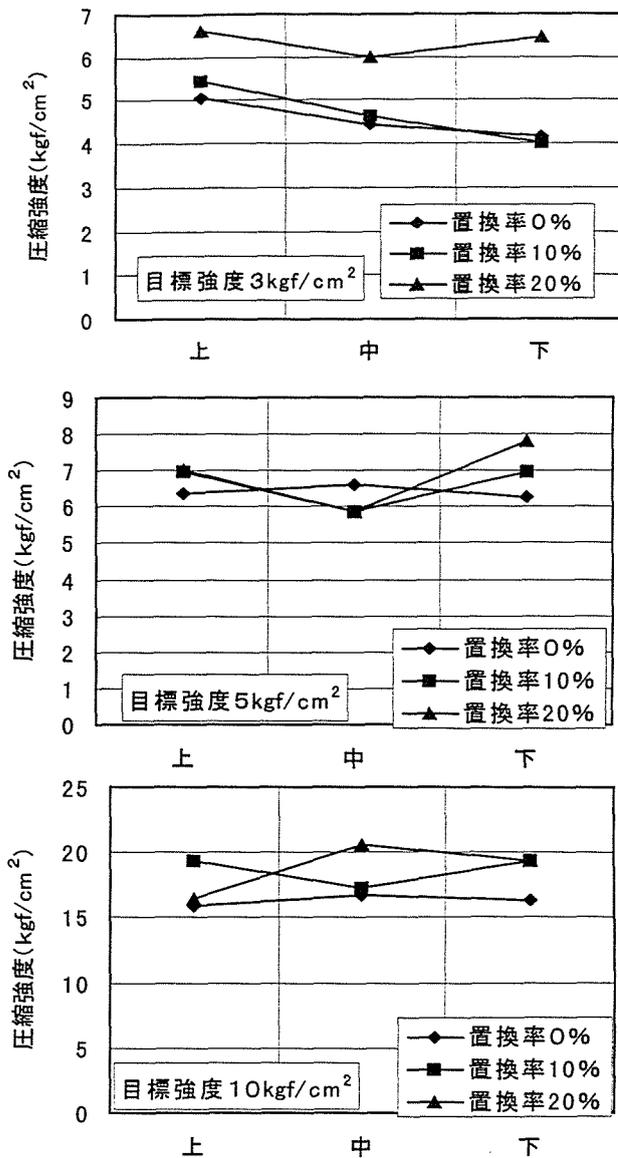


図-4.3.4 供試体の位置と圧縮強度の関係

とが考えられる。石灰質微粉末は、セメントよりも粗い粒子もあるが細かい粒子も多いにもかかわらずフロー値の低下は少ない。これは粉碎方法がボールミルによるためセメントに近い形状で碎石微粉末よりも丸みを帯びた形状となっているためであると推察される。

こうした傾向は、初期のフロー値が異なる場合でもほぼ同様であった。

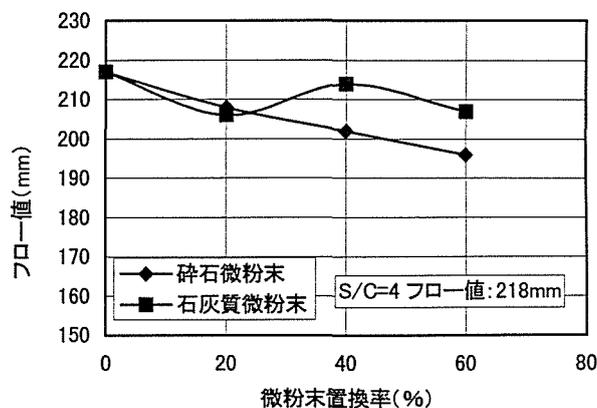
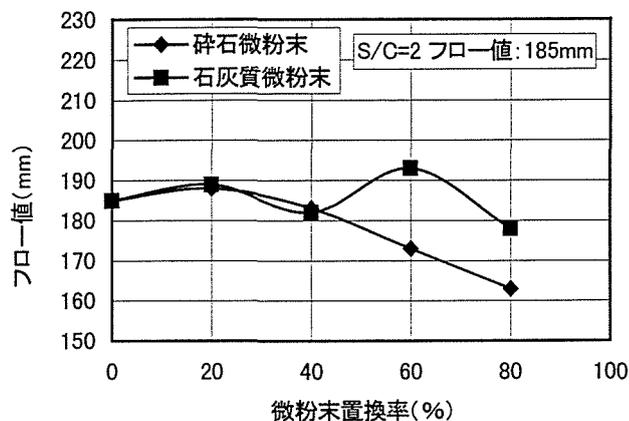
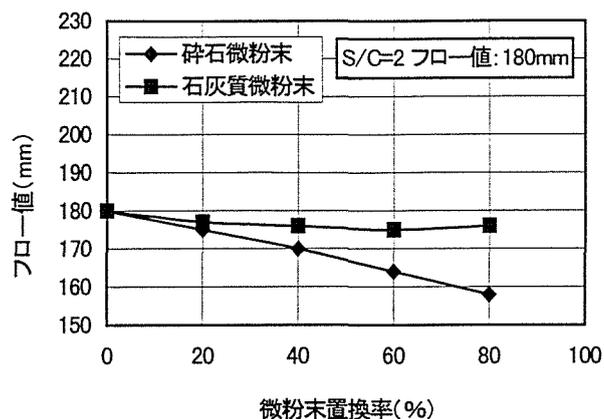


図-4.3.5 微粉末のセメント置換率とフロー値の関係

(2) 単位容積質量

微粉末のセメント置換率と圧縮強度および単位容積質量の関係を図-4.3.6に示す。いずれの微粉末も置換率が大きくなるとやや単位容積質量が増加する傾向にあり気泡が入りにくくなる傾向にあった。碎石微粉末の場合はフロー値が低下する事もあり供試体の上下における単位容積質量差はほとんど変わらなかった。一方、石灰質微粉末の場合はフロー値が低下が小さいことから置換率が大きくセメント量が少なくなるほど単位容積質量差が増加する傾向であった。これはセメントの反応による硬化が遅れる傾向にあるためと考えられる。

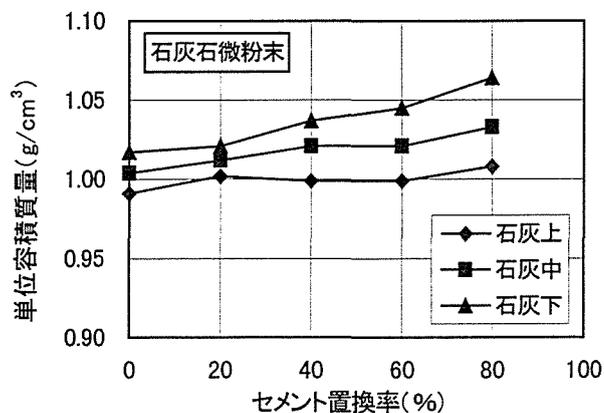
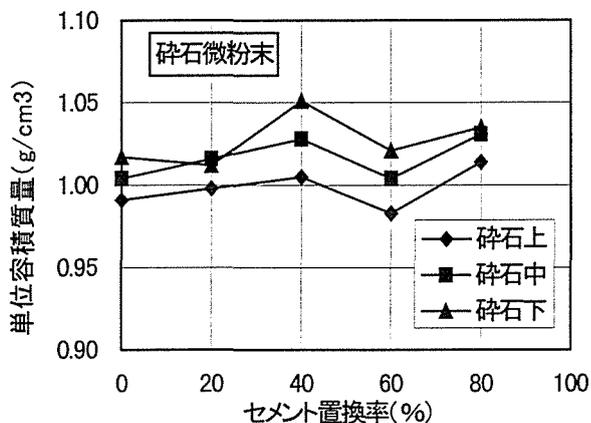


図-4.3.6 セメント置換率と単位容積質量の関係

(3) 圧縮強度

各微粉末のセメント置換率と圧縮強度の関係を図-4.3.7に示す。

配合の異なる場合においても微粉末によるセメント置換率の増加とともに圧縮強度はほぼ比例して低下する結果が得られた。微粉末による差は石灰質微粉末を用いた方がすべての配合でやや高い強度が得られた。石灰質微粉末が一部反応するとの考えもあるが今回の試験からは明確にできなかった。

以上の結果から気泡モルタル中のセメントを反応性がほとんどない鉱物質微粉末に置き換えていくことで気泡モルタルの材料分離抵抗性を持たせたまま強度調整できることが明らかになった。特に、石灰質微粉末はフロー値への影響が小さくセメントと置換するだけで配合修正をほとんどせずに強度調整できると考えられ有効な材料である。また、砕石微粉末もフロー値への影響があるものの配合修正すれば十分利用できると考えられる。

図-4.3.8はセメント置換率とセメントを100%使用したときの強度に対する強度比の関係である。

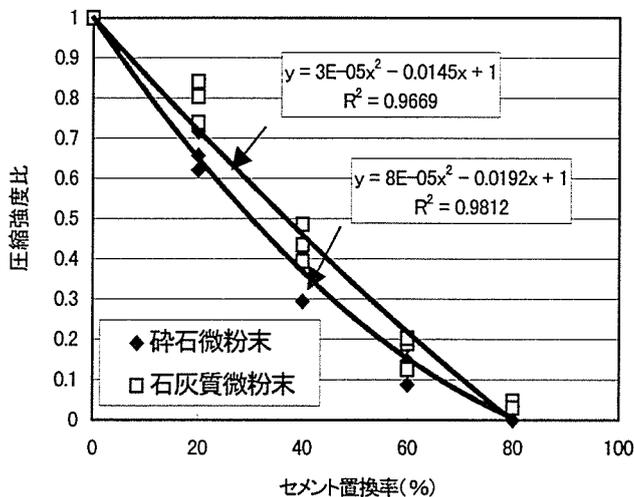


図-4.3.8 セメント置換率と強度比

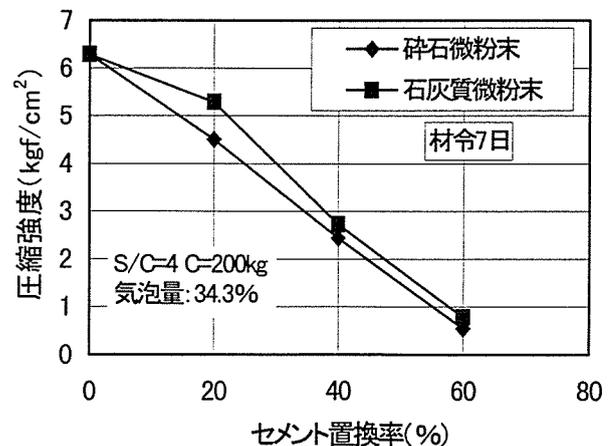
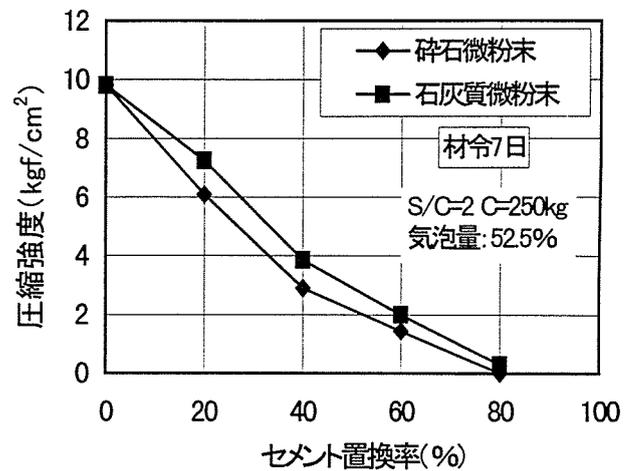
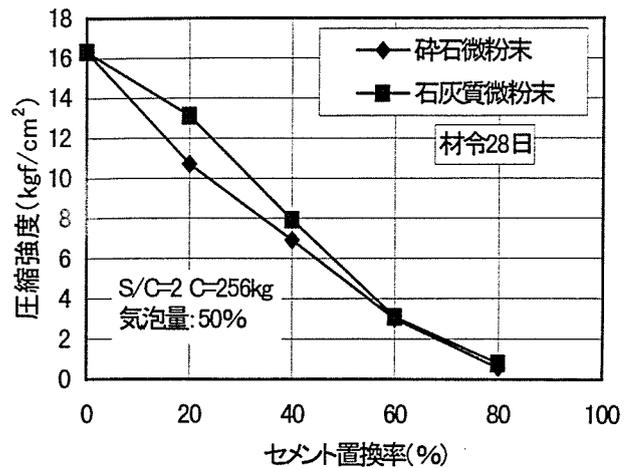


図-4.3.7セメント置換率と圧縮強度の関係

微粉末によるセメント置換率 (X%) とした場合の圧縮強度 f は置換率 0% の圧縮強度 f_0 を用いて次のように表せる。

碎石微粉末の場合： $f = f_0 (1 - 0.0192X + 0.00008X^2)$

石灰石微粉末の場合： $f = f_0 (1 - 0.0145X + 0.00003X^2)$

4. 3. 4 まとめ

気泡モルタルの安定性を確保するために砂の粒度改善のために砂の一部を鉱物質微粉末で置換する場合および広範囲の強度に対応した気泡モルタルを得るために鉱物質微粉末でセメントを置換した場合について検討した結果以下のような点が明らかになった。

(1) 砂の粒度改善

- 1) 碎石微粉末で砂の一部を置換することによりフロー値は低下する傾向にあった。
- 2) 碎石微粉末の添加により単位容積質量の上下差が小さくなるともに強度の位置による差も小さくなり品質は安定する傾向であった。また、強度低下は認められなかった。
- 3) この結果から、気泡モルタルの安定性上有効な細かい砂であっても細粒がほとんどないような砂の場合セメント量の少ない配合では分離しやすいことがあるが、微粉末を添加することにより安定性を増すことが可能であると考えられた。なお、碎石微粉末の添加によりフロー値が低下することから影響の少ない範囲で用いる必要がある。

(2) 強度調整

- 1) 微粉末によるセメントの置換によるフロー値への影響は、微粉末の種類により差があり以下のものであった。

① 碎石微粉末の場合は置換率にほぼ比例してフロー値が低下した。

② 石灰石微粉末の場合は20%の置換でやや低下するがそれ以降はほとんど低下しなかった。

- 2) 微粉末の置換率が大きくなると気泡が入りにくくなり単位容積質量がわずかに大きくなる傾向にあった。

- 3) 圧縮強度は微粉末のセメント置換率の増加にほぼ比例して低下した。微粉末の種類の影響では、石灰石微粉末の方がやや高い強度が得られた。この結果から、微粉末を用いない気泡モルタルの強度がわかれば置換率を定めた場合の圧縮強度を推定できると考えられた。

よって、目標強度に応じた気泡モルタルの配合設計が可能となる。

4. 4 気泡モルタルの各種物性試験

各種配合の気泡モルタルの強度試験の結果、実際に得ることのできる単位容積質量や強度の範囲を把握することができた。しかし気泡モルタルの建設材料としての評価をするためには、その他の水中養生時の安定性や乾湿繰返し、凍結融解などの耐久性等の各種物性を把握しておく必要がある。本節に述べた試験は、代表的な配合について各種の物性試験を実施し、特性を明らかにすることを目的とした。

4. 4. 1 実験概要

(1) 使用材料

使用材料を表-4.4.1、使用した細骨材の性状および粒度分布を表-4.4.2、4.4.3に示した。起泡剤は3章の実験で用いたものと同様である。

表-4.4.1 使用材料

記号	材 料	種 類	記 事
W	水	水道水	
C	セメント	高炉セメントB種	SO社製、T社製
S	細 骨 材	海砂、砕砂、山砂	
	起 泡 剤	プロフォーム(タンパク質系) エマジットAF(界面活性剤系)	10%水溶液で使用

表-4.4.2 細骨材の性状

	表乾比重	吸水率(%)	F. M	備 考
海 砂	2.55	1.70	2.58	
砕 砂	2.57	1.63	2.58	
混合砂A	2.56	1.68	2.58	海砂：砕砂=7：3
海 砂	2.58	1.6%	2.42	
山 砂	2.56	1.9%	2.88	
混合砂B	2.57	1.8%	2.70	海砂：山砂=4：6

表-4.4.3 粒 度 分 布

ふるいの寸法 (mm)	混合砂A (通過重量%)	混合砂B (通過重量%)	標準粒度 (土木学会RC示方書)
10	100	100	100
5	99	100	90~100
2.5	91	89	80~100
1.2	70	73	50~90
0.6	49	48	25~65
0.3	24	17	10~35
0.15	10	3	2~10

(2) 気泡モルタルの配合

試験に用いる気泡モルタルは、道路や鉄道の盛土に用いられた実績のある代表的な物性値（表-4.4.4）が得られる表-4.4.5に示す配合のもので、使用材料の組合わせが異なる2種類のモルタルにより各種試験を実施した。使用材料の組合わせを表-4.4.6に示した。

表-4.4.4 気泡モルタルの目標物性値

生比重 (t/m ³)	フロー値 (mm)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	備考
1.00 ± 0.1	200 ± 20	15以上	材令28日強度

表-4.4.5 気泡モルタルの示方配合

単 位 量 (kg/m ³)				空気量 (%)	生比重 (t/m ³)
セメント	細骨材	水	起泡剤		
270	505	210	1.52	48.8	1.002

表-4.4.6 気泡モルタルの種類と使用材料の組合わせ

気泡モルタルの種類	高炉セメントB種	細骨材	起泡剤
気泡モルタルA	S O社製	混合砂A	プロフォーム (タンパク系)
気泡モルタルB	T社製	混合砂B	エマジットAF (界面活性剤系)

(3) 気泡モルタルの作製

気泡モルタルの材料は、あらかじめ20℃恒温室内で保管しておき、練上がり温度が変動しないようにした。また、細骨材は表乾状態に調節したものを用了。

起泡剤は10%水溶液にして用い、発泡倍率がおおよそ33倍になるように空気圧力をレギュレーターにより調節した。

気泡モルタルは、まずセメントと水を混練りしてセメントスラリーを作製し、可傾式ミキサー内で細骨材と混合してモルタルを作製し、練上がったモルタルに所定量の気泡を添加し、モルタル内に気泡が均一になるまで混合して気泡モルタルを作製した。

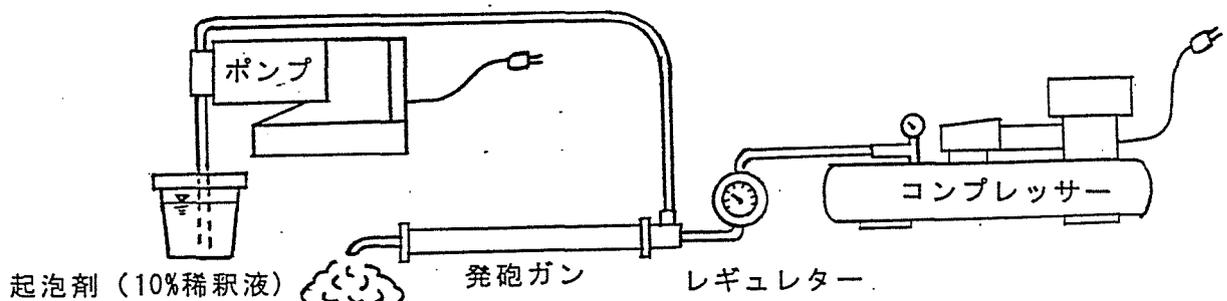


図-4.4.1 気泡モルタル作製概略図

(4) 気泡モルタルの種類と試験項目

同一配合ではあるが使用材料の異なる2種類の気泡モルタルについて表-4.4.7に示す各試験を実施した。

表-4.4.7 気泡モルタルの種類と試験項目

試験項目	気泡モルタルA	気泡モルタルB
気泡径の測定	○	○
圧縮強度試験	○ (材令1年まで)	○ (材令16週まで)
一面せん断試験		○
浸水強度試験	○ (酸性水、水道水)	○ (水道水)
繰返し載荷試験		○
鉛直吸水試験	○ (48週まで)	○ (12週まで)
乾湿くり返し試験	○ (50℃乾燥, 20℃水浸)	
凍結融解試験		○ (-4℃~+5℃)
透水試験	○	○
熱特性試験	○	
乾燥収縮試験	(○他の配合)	

(5) 試験方法

1) 気泡径と気泡数の測定

材令28日の一軸圧縮試験後の供試体を曲げもしくは割裂引張破壊させ、その破断面を実体顕微鏡カメラで撮影し、モニタ上の一定視野内の気泡を選択し、画像解析ソフトにより処理して気泡径と気泡数を測定した。

2) 圧縮試験

圧縮試験は、日本工業規格に準拠し、材令1、3、7、28日、2、4、7、13ヶ月（気泡モルタルBは4ヶ月まで）で実施した。供試体の寸法は、内径5cm高さ10cmの円柱形とした。供試体は打設1日後に端面成形後に試験に供し、脱型質量を測定した。材令3日以降の供試体はポリエチレンラップで包み、所定材令まで20℃恒温室内で密封養生した。密封養生は日本道路公団規格のエアモルタルエアミルクの試験方法⁴⁻¹⁴⁾の飽和湿気中養生に準じたものである。

3) 一面せん断試験

φ10×20cmの円柱供試体を4本作製して材令28日まで密封養生した。その後、各供試体をコンクリートカッタにて厚さ2cmに切断し、直径が6cmとなるようにトリマー成形を行い、一面せん断試験用の供試体を作製した。供試体をせん断箱内にセットし、垂直応力を0.5、1.0、1.5、2.0kgf/cm²の4段階に変化させ、一面せん断試験を実施した。残留摩擦抵抗は、最大せん断力 τ_{max} 以降のせん断力で評価することとした。

4) 水浸強度試験

一軸圧縮試験と同様に作製した供試体を材令28日まで密封養生後、20℃恒温室内に酸性雨の影響を考慮して作成したpH4の水溶液(SO₄²⁻:NO₃⁻=2:1)を満たした水槽に供試体を浸漬させ、吸水状態および圧縮強度を材令1、3、7、14日、1、3、6、12ヶ月で確認した。

5) 繰返し載荷試験

一軸圧縮試験と同様にして作製した供試体を20℃恒温室内で28日間密封養生後、一軸状態で初期荷重0.5kgf/cm²を与え、応力振幅0.25kgf/cm²となる荷重を5HzのSin波として繰返し載荷した。繰返し回数は、200万、400万、600万の3水準とし、試験後の供試体は材令16週で圧縮試験を実施した。

6) 鉛直吸水試験

直径7cm、高さ50cmのポリエチレンチューブ内に気泡モルタルを充填し、20℃恒温室内で28日間密封養生した。その後、供試体を50cmに切断し、その下端部1cmほどを水浸させ、材令7、28日、8週(気泡モルタルA)材令1、3、6、12ヶ月(気泡モルタルB)にて水の浸透域を測定する。浸透域の測定は、供試体を1~5cmごとに輪切りして含水比を求め、同様な操作で密封養生のみのものと相対比較することで浸透域を判定した。

図-4.4.2は、供試体の下端部浸漬状況を示したのである。

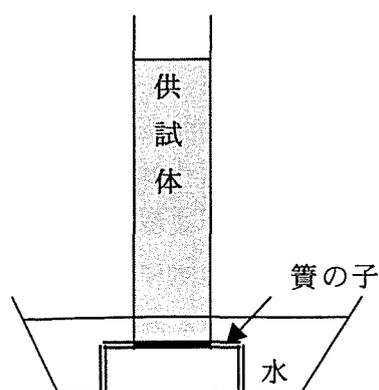


図-4.4.2 下端部浸漬状況

7) 乾湿繰返し試験

圧縮試験と同様にして作製した供試体を20℃恒温室内で28日間密封養生後、1サイクル(50℃炉乾燥:2日間、水中浸漬:1日間)ごとに、質量計量および圧縮試験を実施した。

8) 凍結融解試験

10×10×40cmの供試体を作製し、材令28日まで密封養生する。JIS法を参考に、1サイクルを3.5時間とした。供試体は密封状態とし、冷媒温度を+13~-15℃とすることで供試体の中心温度を+5~-4℃の範囲で空中凍結、空中融解を100サイクル実施した。

供試体質量及び動弾性係数の測定は10サイクル毎に実施し、同時に供試体の外観を写真撮影した。また、強度試験用の円柱供試体についても同様の凍結融解環境下で養生し、10サイクル毎に一軸圧縮試験を実施した。

9) 透水試験

内径10cm、高さ12.7cmの円筒形モールド内に気泡モルタルを充填後、28日間密封養生した。透水試験は変水位法とし、地盤工学会基準に準拠して実施した。

10) 熱伝導率試験

底面の鉄板上に厚さ7.5cmの発泡スチロールを張付けて作った7.5×27×27cmの型枠内で供試体を作製し、翌日供試体質量を測定する。供試体作製時に型枠中央底面に温度ゲージを張付けた。

水分の影響が大きいと考えられるため、養生条件を密封の他に室内で片面を解放した気中養生および水中養生の3種類とし材令28日まで養生した。養生した供試体表面に水滴等がある場合はふき取った後に表面にも温度ゲージを添付して試験を実施した。供試体を加熱装置上にセットして表面に熱流計センサを取付け、下面を50℃程度の定温に保ち、定常状態となったところで上下面の温度および熱流量を読みとる。測定値を用い、式(4.5.1)により熱抵抗を求めた。

$$\text{熱伝導率 } h = (\text{熱流量}) / (\text{厚さ}) / (\text{温度差}) \quad \dots\dots\text{式(4.4.1)}$$

11) 熱拡散率試験

φ10×20cmの円柱供試体の中心部に熱電対を埋め込み、密封、気中および水中養生の3種類で各2本ずつ材令28日まで養生する。供試体は試験時の水の移動をなくすため、ポリエチレン袋で被覆して温水中に浸漬し、温水と等しくなるまで漬けておく。次に速やかに供試体を冷水中に移し、一定時刻毎に供試体中心温度(θ_i)と冷水温度(θ_w)を測定し、ほぼ冷水温度と同じになるまで測定を続けた。

試験終了後、供試体の初期温度と冷水初期温度との差をθ₀とし、各時刻における供試体温度変化の相対値(θ_i - θ_w) / θ₀を計算する。この相対値に対する無次元時間t'の理論解を求め、熱拡散率h²を式(4.5.2)より求めた。

$$\text{熱拡散率 } h^2 = D^2 \cdot t' / t \quad \dots\dots\text{式(4.4.2)}$$

12) 断熱温度上昇

気泡モルタルの硬化時の温度上昇を測定するために、表-4.4.8に示す配合の気泡モルタルの断熱温度上昇を測定した。

表-4.4.8 断熱温度上昇用気泡モルタルの配合

S/C	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)					気泡量 (リットル)	単位容積質量	フロー値 (mm)
		セメント	水	砂	起泡剤	希釈水			
4	86.3	182	157	728	1.51	13.6	485	1.08	173

13) 乾燥収縮試験

気泡モルタルの乾燥収縮特性を把握するために、本シリーズとは別の表-4.4.9に示す6種類の配合により乾燥収縮の測定を実施した。供試体はコンクリートの乾燥収縮測定法に準じ10×10×40cmの角柱供試体を2本作成し、20℃、RH60±3%の恒温恒湿室内に貯蔵しコンパレータにより長さ変化を測定した。

表-4.4.9 乾燥収縮用気泡モルタルの配合

S/C (%)	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)					気泡量 (リットル)	単位容積質量	フロー値 (mm)
		セメント	水	砂	起泡剤	希釈水			
2	99	200	180	400	2.0	18.0	583	0.83	198
	85.8	259	207	518	1.7	15.3	494	1.03	204
	79	316	237	632	1.39	12.5	405	1.17	209
	67.7	381	248	762	1.12	10.1	326	1.40	199
3	95.3	242	218	726	1.41	12.7	411	1.22	211
4	96.7	201	181	803	1.47	13.3	430	1.18	195

4.4.2 フレッシュ気泡モルタルの性状

表-4.4.10にフレッシュ気泡モルタルの性状を示す。

表-4.4.10 フレッシュ気泡モルタルの性状

気泡モルタルの種類	フロー値 (mm)		単位容積質量 (t/m ³)	
気泡モルタル A	200		0.982	
	199	(平均)	1.020	(平均)
	198	200	1.020	1.002
	202		1.004	
気泡モルタル B	189	(平均)	0.995	(平均)
	188	189	0.968	0.982

練上がった気泡モルタルの性状は、フロー値、生比重とともに目標性状値（フロー値 200±20mm、単位容積質量1.00±0.1t/m³）を満足しており、本示方配合が所定のフレッシュ気泡モルタルの性状を得る配合であることが確認された。

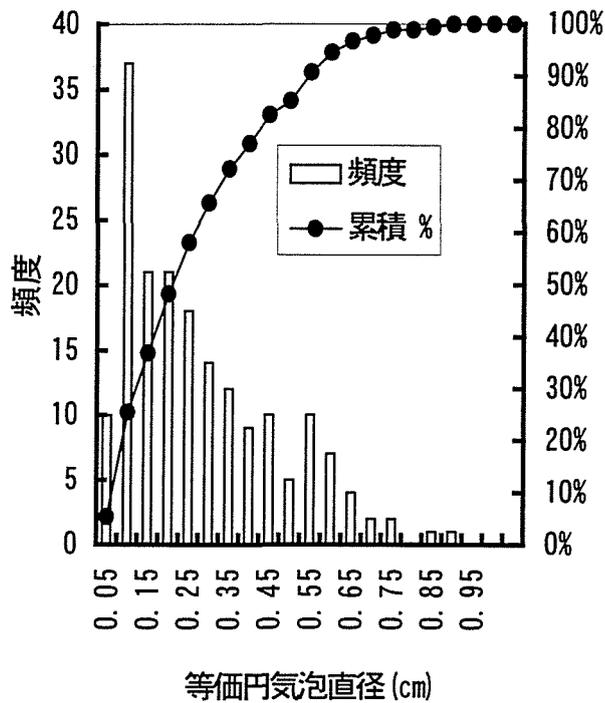
4.4.3 気泡モルタル中の気泡径の分布

気泡径の測定結果を表-4.4.11に、気泡径のヒストグラムを図-4.4.3に示す。気泡モルタル内の気泡は、気泡モルタルAで等価円直径の平均で0.26mm、最小のもので0.04mm、最大のもので0.86mmであり、0.5mmまでのもので全体数約の90%を占めている。気泡モルタルBでは、等価円直径の平均で0.19mm、最小のもので0.04mm、最大のもので0.66mmであり、0.3mmまでのもので全体数の約90%を占めている。この結果、界面活性剤系起泡剤を用いた方がやや細かい結果となった。

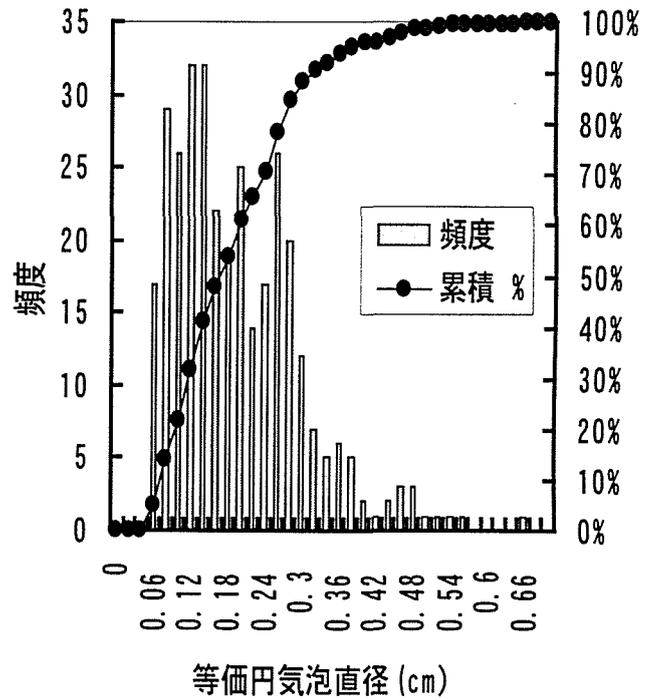
図-4.4.4に、8倍に拡大した気泡モルタルの写真を、図-4.4.5に、16倍に拡大した写真を示す。

表-4.4.11 気泡径の測定結果

気泡モルタルの種類	対象面積 (mm ²)	気泡個数 (個)	気泡占有面積 (mm ²)	気泡占有割合 (%)	等価円気泡直径 (mm)		
					平均	最大	最小
A	35.62	185	14.67	41.2	0.26	0.86	0.04
B	35.62	330	11.87	33.3	0.19	0.66	0.04

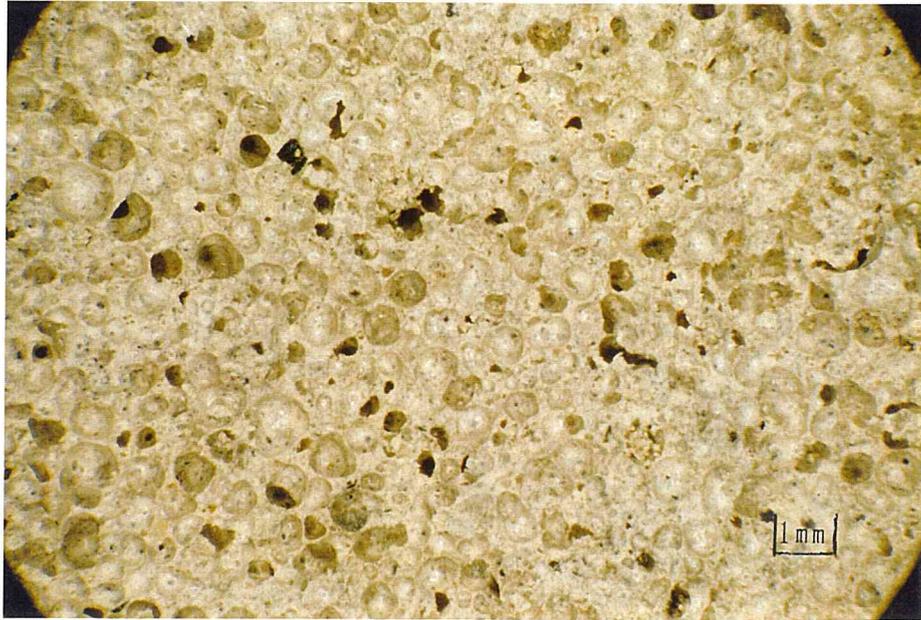


【気泡モルタルA】



【気泡モルタルB】

図-4.4.3 気泡径（等価円直径）のヒストグラム

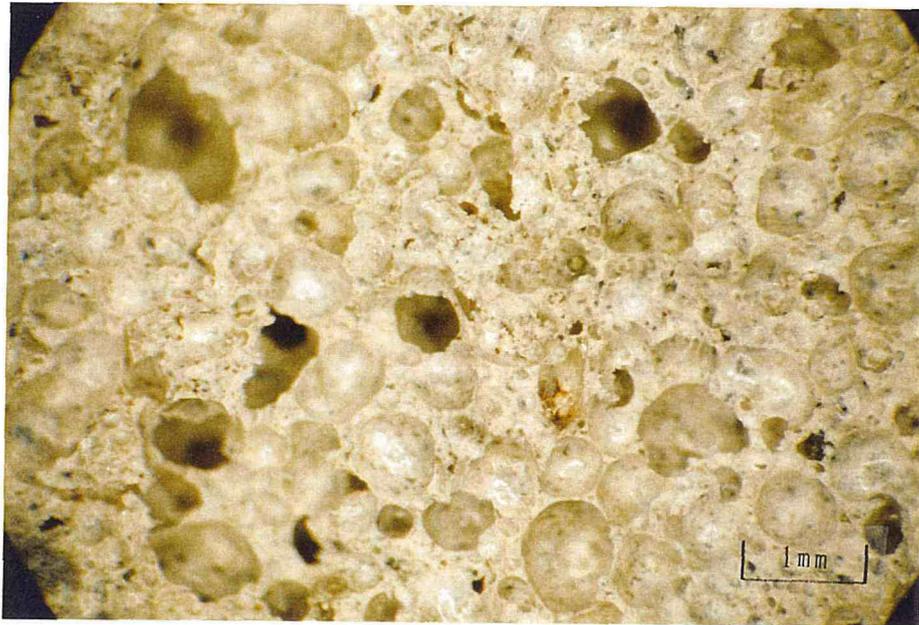


【気泡モルタルA】

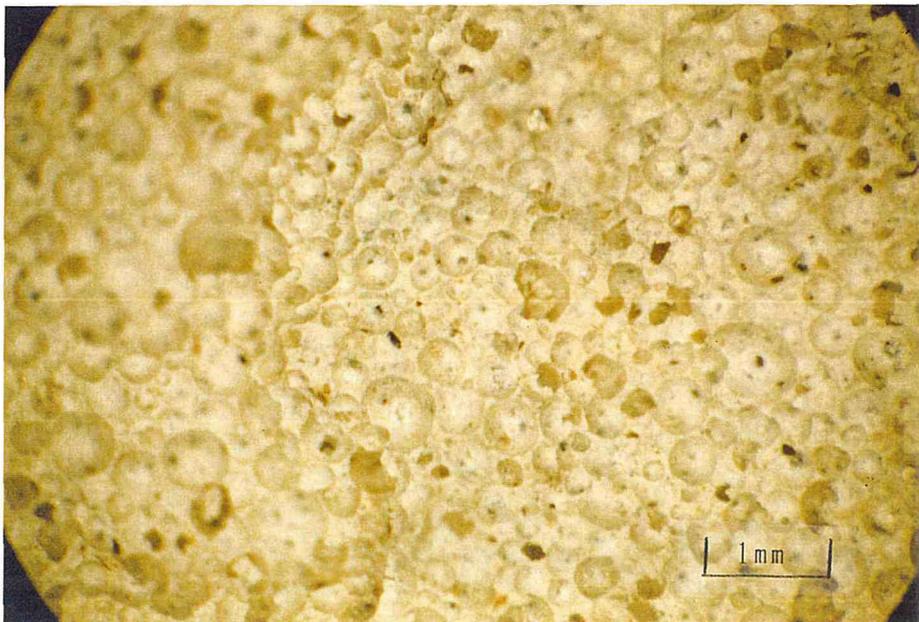


【気泡モルタルB】

図-4.4.4 気泡モルタルの拡大写真（8倍）



【気泡モルタルA】



【気泡モルタルB】

図-4.4.5 気泡モルタルの拡大写真（16倍）

4. 4. 4 養生条件と強度発現

(1) 密封養生時の圧縮強度の経時変化

各材令における圧縮強度を表-4.4.12および図-4.4.6に示した。また、表中には材令28日を100とした強度比を併記した。

表-4.4.12 一軸圧縮試験結果

種類	材 令	1日	3日	7日	28日	8週	16週	28週	52週
気泡モルタルA	圧縮強度 (kgf/cm ²)	1.95	4.86	8.77	18.4	26.7	28.3	32.0	33.0
	強度比% ($q_{un}/q_{u,28}$)	11	26	48	100	145	154	174	179
気泡モルタルB	圧縮強度 (kgf/cm ²)	1.39	3.18	5.35	15.9	20.8	25.3	—	—
	強度比% ($q_{un}/q_{u,28}$)	9	20	34	100	131	159	—	—

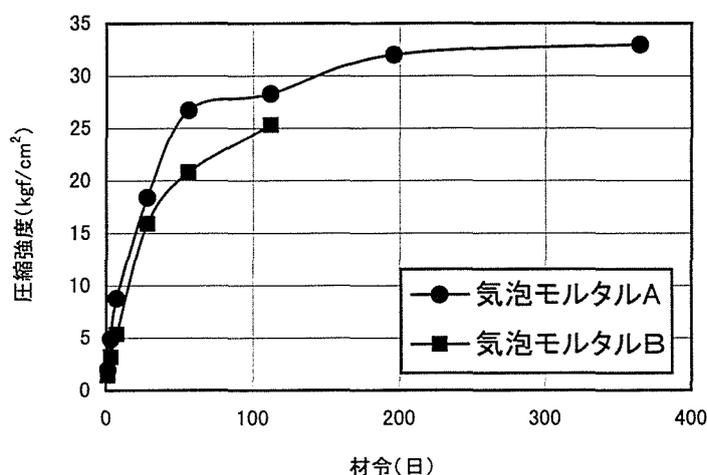


図-4.3.6 圧縮強度の経時変化 (密封養生)

材令28日における一軸圧縮強さは、気泡モルタルAで18.4kgf/cm²、気泡モルタルBで15.9kgf/cm²といずれも目標強度である15kgf/cm²を満足しており、試験した配合で所定の目標強度が得られることが確認できた。しかし、同一配合であっても20%程度の強度差が現れている。また、材令7日から28日への強度増加は気泡モルタルAで2.1倍、気泡モルタルBで3倍と幅がある結果となっている。高炉セメントB種を用いた気泡モルタルの材令7日から28日への強度増加は2倍程度であるとの調査結果があるが⁴⁻¹⁵⁾、セメントの種類や配合条件によってはもう少し幅を考慮する必要があると考えられる。これは高炉セメント中のスラグの配合量(30~60%の範囲)の違いやスラグそのものの特性の影響であると考えられる。

材令28日以降の強度発現においては、材令8週で28日強度の1.31~1.45倍、材令16週で1.54~1.59倍、さらに材令1年にかけては約1.8倍と材令28日以降も強度増加が見られた。しかし、材令28週(約半年)以降の強度の伸びは小さくなる。

(2) 変形係数 (弾性係数)

代表的な応-力ひずみ曲線を図-4.4.7に、圧縮強度と変形係数の関係を図-4.4.8に示

す。応力ひずみ曲線において特徴的なことは、圧縮応力がピークに達してから、ピークを超えない範囲でかなりの塑性変形が見られることである。

気泡モルタルの圧縮応力による破壊形態は、明確なせん断面が現れることはまれで、供試体上端部分もしくは下端部分のみで破壊に達するものがほとんどであった。また、今回の強度範囲(約1~25 kgf/cm²)では、ひずみが1%に達しない範囲で破壊が生じており、強度レベルと破壊ひずみとの間に特徴的な傾向は見られなかった。

圧縮強さ (q_u) と変形係数 (E_{50} : 1/2割線弾性係数) との間には、

$E_{50} = 200 \sim 60 q_u$ の範囲で比例関係が認められ、最小2乗法により

$$E_{50} = 379 q_u, E_{50} = 400 q_u$$

の関係が得られた。 $E_{50} = 400 q_u$ という関係は、土にセメント等を混合して固めた安定処理土の圧縮強さと変形係数の関係⁴⁻¹⁶⁾

$$E_{50} = 50 \sim 200 q_u$$

と、コンクリートの場合の関係⁴⁻¹⁷⁾

$$E = 1000 \sigma$$

(E : 静弾性係数(ヤング係数)、 σ : 圧縮強さ) の中間に位置している。従って、気泡モルタルは、安定処理土とコンクリートの中間的な変形特性を有する材料であると考えられる。

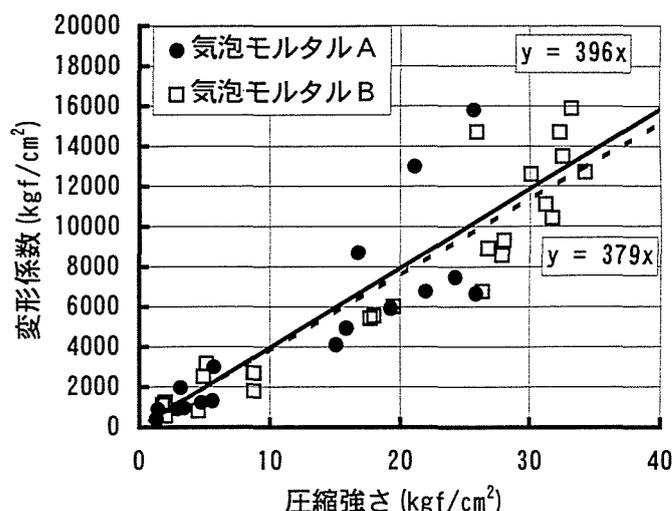
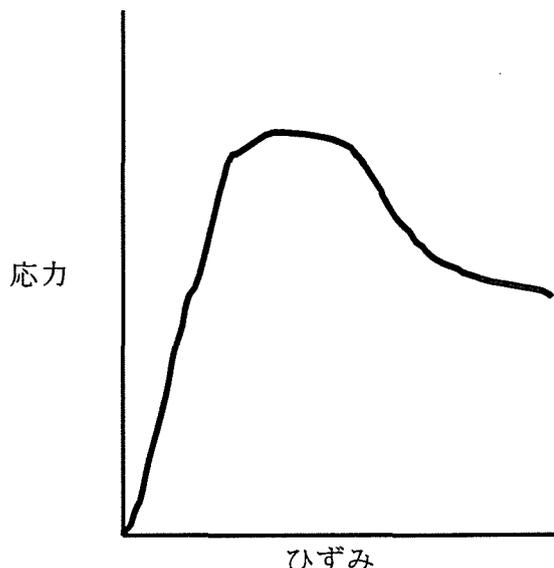


図-4.4.8 圧縮強度と変形係数との関係

(3) 浸水養生強度

1) 吸水量

水道水に浸漬した場合の吸水量の経時変化を図-4.4.9に、供試体含水比および飽和度を表-4.4.13に示す。

いずれの気泡モルタルにおいても吸水量は、浸漬材令とともに増加しているものの、浸漬材令84日以降の増加は小さい。

表-5.3.13 供試体含水比および飽和度（水道水）

種類	浸漬材令	1日	3日	7日	14日	28日	12週	24週	48週
気泡モルタルA	平均吸水量(g)	5.7	7.6	12.0	18.9	25.5	29.9	30.8	33.0
	供試体含水比(%)	24.3	25.3	27.4	31.2	35.4	40.3	45.3	47.6
	飽和度(%)	37.6	39.3	43.4	49.7	55.0	58.1	64.7	69.9
気泡モルタルB	平均吸水量(g)	6.0	9.5	12.2	18.9	25.8	33.3	—	—
	供試体含水比(%)	23.9	26.1	28.4	31.9	35.1	41.2	—	—
	飽和度(%)	34.7	37.8	40.9	46.3	51.2	58.5	—	—

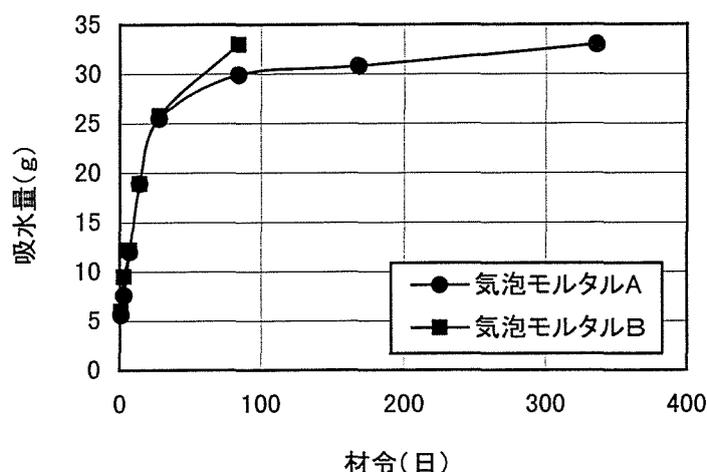


図-4.3.9 吸水量の経時変化

なお、表中気泡モルタルAの浸漬材令1日～14日の含水比および飽和度は、材令28日の測定値(含水比)と吸水量より求めた吸水前の供試体含水比20.9%をもとに理論的に計算で求めた。また気泡モルタルBについては、材令7日、28日および12週で含水比を測定し。他の材令については、実際に測定した材令の含水比と吸水量より求めた吸水前の供試体含水比20.3%（平均値）をもとに計算で求めた。

飽和度は以下の手順で求めた。

$$Sr = \frac{V_w}{V_v} \times 100 = \frac{w}{e} \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (\%)$$

ここに、 Sr ：飽和度（%）

w ：含水比（%）

e ：間隙比（ $e = (\rho_s / \rho_d) - 1$ ）

ρ_s ：土粒子の密度（モルタル部の比重：1.93）

ρ_w ：水の密度

図-4.3.10は、供試体の飽和度と浸漬材令の関係を示したものである。この図より、浸漬材令12週時点において飽和度は60%に達していないが、浸漬材令1年では飽和度は約70%に達した。小さな供試体をこのような浸漬条件下においた場合でも、気泡モルタルが飽和状態となるまでに長期間を要することが伺われ、このことから実際の構造物では吸水による重量増加の影響は小さいものと考えられる。

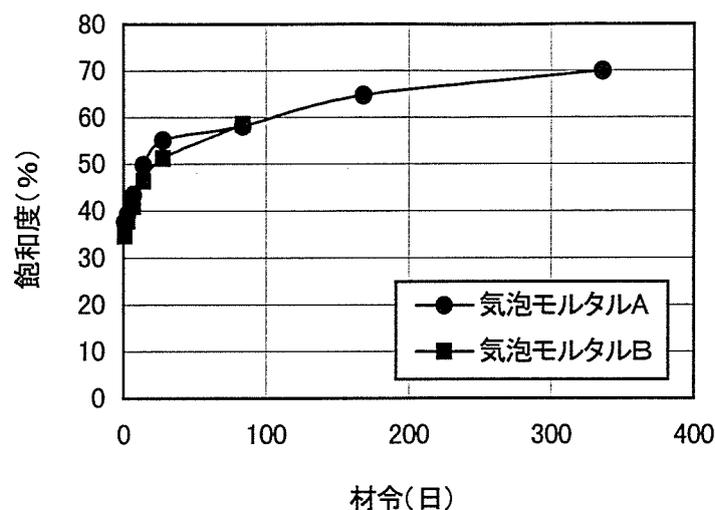


図-4.3.10 供試体の飽和度と浸漬材令の関係

表-4.4.14に酸性雨を考慮した酸性水に浸漬した場合の供試体含水比および飽和度を、図-4.4.11に吸水量の経時変化を示す。

表-4.4.14 供試体含水比および飽和度(酸性水)

浸漬材令	1日	3日	7日	14日	28日	12週	24週	48週
平均吸水量(g)	5.7	7.4	11.0	17.4	25.7	41.5	47.5	52.2
供試体含水比(%)	23.8	24.4	26.9	32.1	35.7	45.5	50.4	50.8
飽和度(%) ^{*2}	36.2	36.9	40.1	45.9	53.3	70.4	74.5	79.4

浸漬水(pH=4)は、供試体を浸漬して数時間後からpHの上昇(アルカリ側へ移行)がみられ、浸漬材令7日に行なったpH測定値では12.4を示した。このことを踏まえ、浸漬水は1~2週間ごとに交換した。

吸水量は、浸漬材令の経過とともに増加するものの、浸漬材令48週においても飽和度は80%程度と完全に飽和されていない状態にあり、水道水に浸漬した場合と比べて飽和度は10%高い値となった。このことは供試体表面付近で浸漬液との反応が生じ吸水しやすくなった可能性がある。

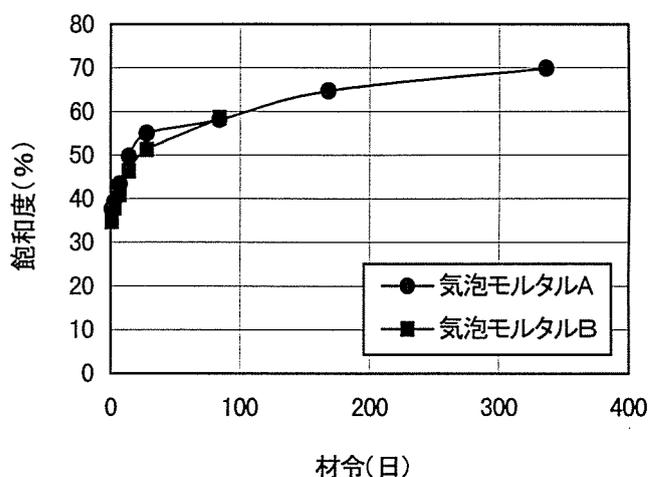


図-4.3.11 吸水量の経時変化(酸性水:pH4)

2) 浸漬供試体の圧縮強度

水中浸漬後の一軸圧縮試験結果を表-4.4.15に、圧縮強度の経時変化を図-4.4.12に示す。水中浸漬した場合も材令とともに圧縮強度の増加が見られるが、密封養生した供試体と比較すると強度は小さく、強度増加の傾向も異なる。同材令における水中浸漬さ

せたもの強度は、密封養生したものの強度の80～90%程度の強度発現にとどまっている。

表-4.4.15 水中浸漬後の一軸圧縮強さ（水道水）

種類	浸漬材令	7日	28日	12週	24週	48週
気泡モルタルA	一軸圧縮強さkgf/cm ²	17.3	17.3	22.5	—	—
	密封養生との強度比	—	0.83	0.89	—	—
気泡モルタルB	一軸圧縮強さkgf/cm ²	—	24.4	27.2	26.8	25.6
	密封養生との強度比	—	0.91	0.96	0.84	0.78

しかし、材令の進行に伴いその強度比は、若干ではあるが大きくなっており、密封養生したものの強度に追いつく傾向にある。したがって、さらに長期にわたって水中浸漬させたとしても気泡モルタルの強度は、密封養生したものに比べ著しく強度が低下する傾向にないことが推察される。

酸性水中に浸漬した供試体の圧縮試験結果を密封養生した場合の強度との比とともに表-4.4.16に、圧縮強度の経時変化を図-4.4.13に示す。

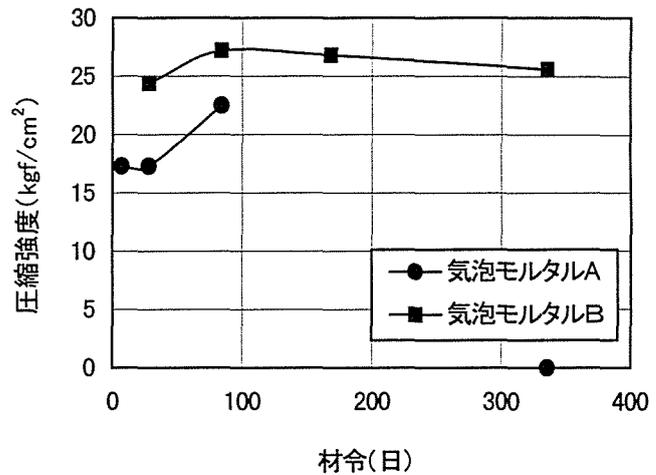


図-4.4.12 圧縮強度の経時変化

表-4.4.16 酸性水中浸漬後の一軸圧縮強さ

浸漬材令	1日	3日	7日	14日	28日	12週	24週	48週
のべ養生材令	29日	31日	35日	42日	8週	16週	28週	52週
一軸圧縮強さkgf/cm ²	18.3	18.9	20.4	19.6	22.3	25.0	24.9	26.0
密封強度との強度比	—	—	—	—	0.84	0.88	0.78	0.79

酸性水に浸漬させた供試体の一軸圧縮強さは、同材令の密封養生のものに比べると約80%の強度発現にとどまっているものの、経時的な強度増加はみられている。また、水道水浸漬と比較してもほとんど差がないと考えられる。したがって、気泡モルタルは、このような浸漬条件下において、密封養生のものに比較して顕著に強度低下する傾向にないことから、このような環境下における耐久性は有していると考えられる。

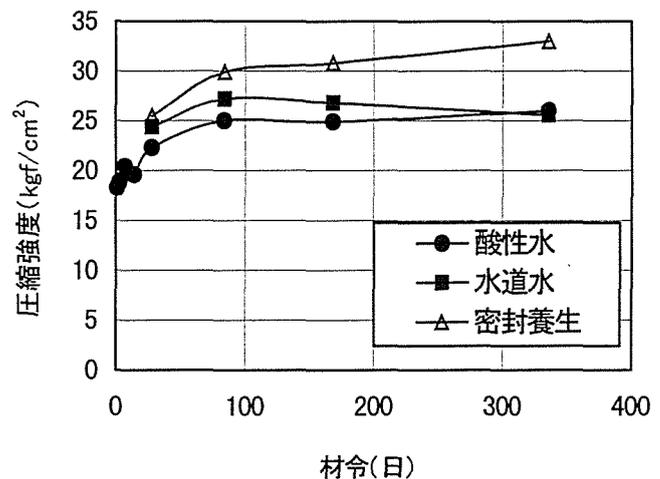


図-4.4.13 一軸圧縮強さの経時変化
(酸性水：pH4)

4. 4. 5 せん断特性

1) せん断強度

各垂直応力時におけるせん断力-水平変位曲線を図-4. 4. 14~4. 4. 17に、各垂直応力時における最大せん断応力を表-4. 4. 17に示す。何れの垂直応力においても、せん断力は水平変位とともに増加し、最大値に達した後も急激に低下することなく一定のレベルを保ったのち徐々に低下する傾向を示す。

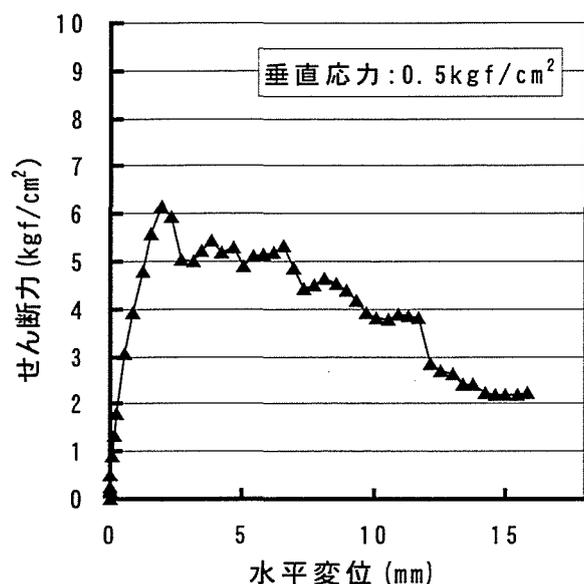


図-4. 4. 14 せん断力-水平変位曲線

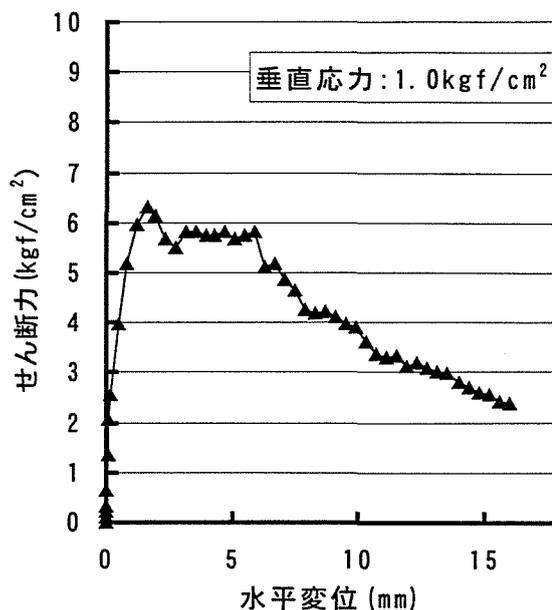


図-4. 4. 15 せん断力-水平変位曲線

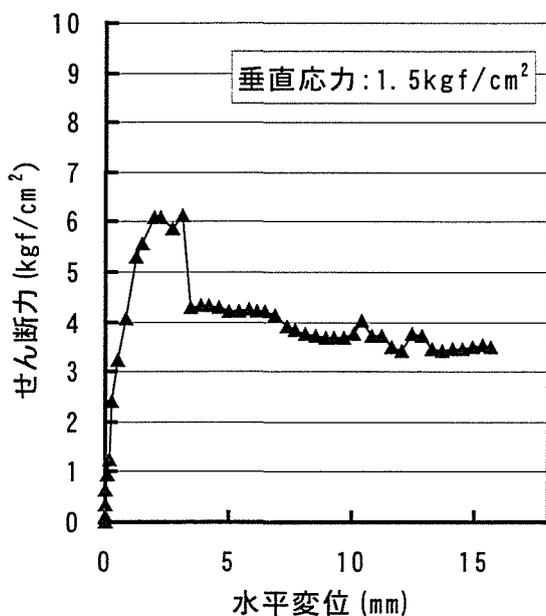


図-4. 4. 16 せん断力-水平変位曲線

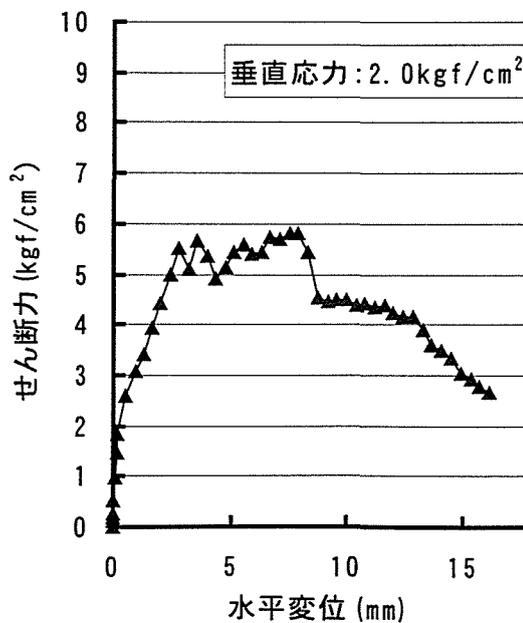


図-4. 4. 17 せん断力-水平変位曲線

表-4.4.17 一面せん断試験結果

	垂直応力 (kgf/cm ²)			
	0.5	1.0	1.5	2.0
最大せん断応力 τ_{max} kgf/cm ²	6.15	6.31	6.14	5.82
τ_{max} 時の 水平変位 (mm)	1.90	1.57	3.09	7.54

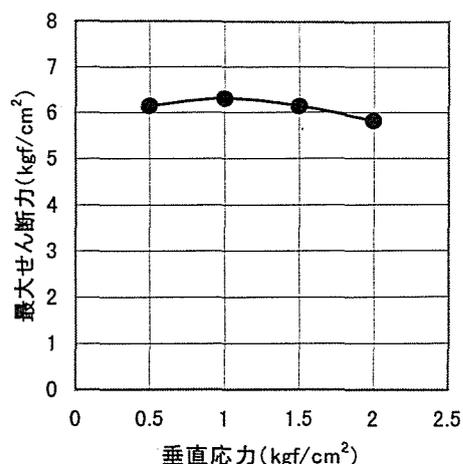


図-4.4.18 垂直応力と最大せん断力

図-4.4.18に垂直応力と最大せん断力の関係を示した。垂直応力を0.5~2.0kgf/cm²の範囲で増大させたときの気泡モルタルの最大せん断力は、いずれの垂直応力のもとでも6kgf/cm²程度とほとんど変化がなく、垂直応力増大に伴うせん断力の増大は認められなかった。したがって、この試

験から求まる強度定数である粘着力Cおよび内部摩擦角 ϕ のうち、内部摩擦角が0であることがわかる。は、山之内ら⁴⁻¹⁸⁾や三嶋ら⁴⁻¹⁹⁾の三軸圧縮試験で得られている結果と同様である。また、一般にこのような現象は、飽和度の高い粘性土において頻繁に見受けられ、粘着力Cと圧縮強度 q_u の間には $2C=q_u$ の関係が認められる。一方、気泡モルタルの圧縮強度は、先に示したように材令28日で18.4kgf/cm²であり、先の関係から粘着力を求めると $C=9.2$ kgf/cm²となる。しかし、破壊包絡線より求められるCは6kgf/cm²程度と圧縮強度の1/3となっており、粘性土とは異なる結果となっている。

なお、強度レベルが同程度の安定処理土では、三軸圧縮試験によれば処理前の土質を反映した内部摩擦角が得られる⁴⁻²⁰⁾。

2) 残留摩擦抵抗

せん断応力が最大値に達し、せん断面が生じた後のせん断応力を残留摩擦抵抗力とし、最大せん断応力が現れた水平変位の2倍程度までの値で評価すると表-4.4.18のとおりとなる。

表-4.4.18 残留摩擦抵抗力

	垂直応力 (kgf/cm ²)			
	0.5	1.0	1.5	2.0
残留摩擦抵抗力 (kgf/cm ²)	5.0	5.8	4.2	4.5
水平変位の範囲 (mm)	~7.0	~5.5	~6.5	~10.0
τ_{max} との比 (%)	81	92	68	77

水平変位が約10mmまでの範囲における残留摩擦抵抗力は、最大せん断力の70%程度であった。このことから、ひび割れが発生した際にも垂直応力が作用しておればせん断強度の70%程度の摩擦抵抗力が期待でき急激な変形に至らないと考えられる。

4.3.6 吸水特性

各浸漬材令ごとの供試体重量の測定から求められる吸水量を表-4.4.19に示す。

表-4. 4. 19 下端部浸漬材令と吸水量

種類	下端部浸漬材令	0日 (密封)	7日	28日	12週	24週	48週
A	吸水量 (g)	-	-	+6.8	+5.7	-3.0	-18.9
B	吸水量 (g)	-	+10.6	+8.1	+7.4	-	-

吸水量は浸漬材令28日から48週の間で大きな変動はなく、浸漬期間の経過に伴う吸水量の増大する傾向は認められず、逆に上端の乾燥によって考えられる重量減少が生じている。

図-4. 4. 19、4. 4. 20は、気泡モルタルA、Bの供試体を所定の位置にて切断して求めた含水比とその位置関係を示したものである。

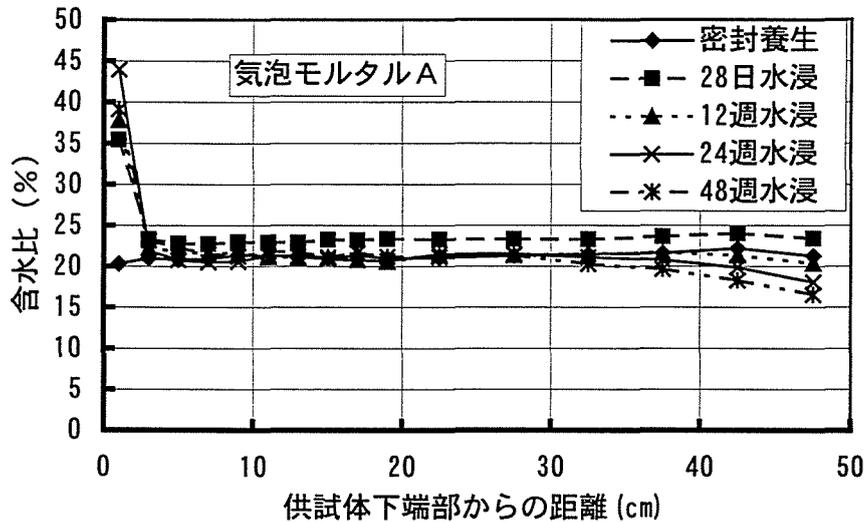


図-4. 4. 19 供試体下端部からの距離と含水比の関係

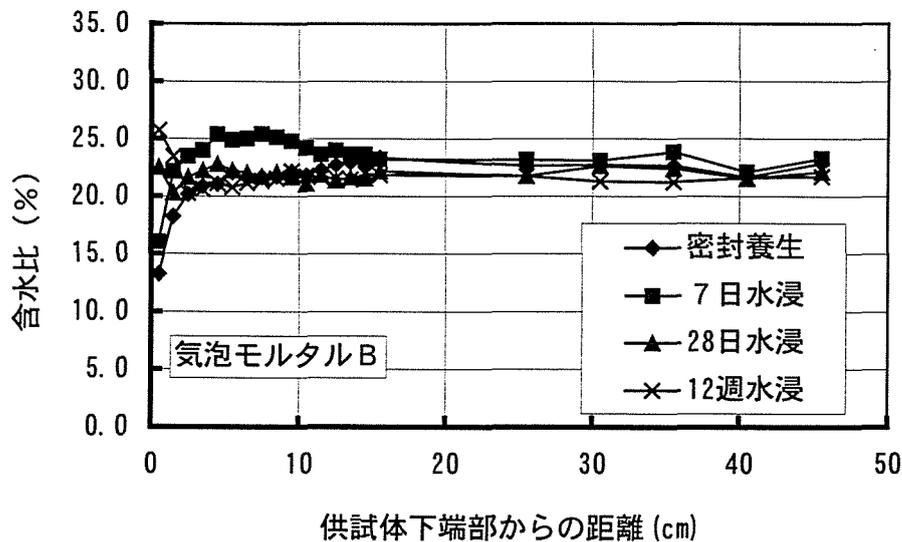


図-4. 4. 20 供試体下端部からの距離と含水比の関係

何れの場合も端部の浸漬により顕著な含水比の増大がみられた範囲は、水浸させた部分のみであり、浸漬水位以上まで吸水するような毛細管現象は認められなかった。このことは、気泡が独立していることによるものと考えられる。

4. 4. 7 繰返し载荷特性

1) 繰返し载荷回数と変形特性

繰返し载荷回数と変形特性を表-4. 4. 20に示す。

表-4. 4. 20 繰返し载荷回数と変形特性

最大繰返し回数	σ_0 での ε_0 (%)	E_0 (kg/cm ²)	項目	繰返し载荷回数 (万回)					
				1	10	100	200	400	600
200万回	0.154	325	E _{max}	0.0730	0.0845	0.0979	0.1104	—	—
			E _{min}	0.0125	0.0245	0.0360	0.0514	—	—
			E	772	788	806	847	—	—
400万回	0.200	250	E _{max}	0.1488	0.1608	0.1809	0.1919	0.2120	—
			E _{min}	0.1144	0.1316	0.1488	0.1641	0.1818	—
			E	1651	1938	1729	2000	1828	—
600万回	0.225	222	E _{max}	0.0836	0.0970	—	0.1441	0.1700	0.1931
			E _{min}	-0.017	0.0134	—	0.0538	0.0855	0.1105
			E	587	667	—	676	675	691

注) ε_{max} 、 ε_{min} の単位は(%)、Eは動的変形係数(kgf/cm²)

図-4. 4. 21(a)、(b)、(c)に、200万回、400万回、600万回载荷試験におけるの各载荷回数での軸応力と軸ひずみの関係を示した。

いずれも同一配合で同時に作成した供試体で、载荷条件も同一であるが、試験期間の関係で試験時材令が2週間程度異なった。軸応力-ひずみ曲線の形状が異なり特に400万回载荷した供試体は低応力にもかかわらずヒステリシスループが現れているが原因は不明である。200万回と600万回の供試体は同様の形状をしており、ひずみの幅は初期载荷時の弾性係数に対応する結果となった。

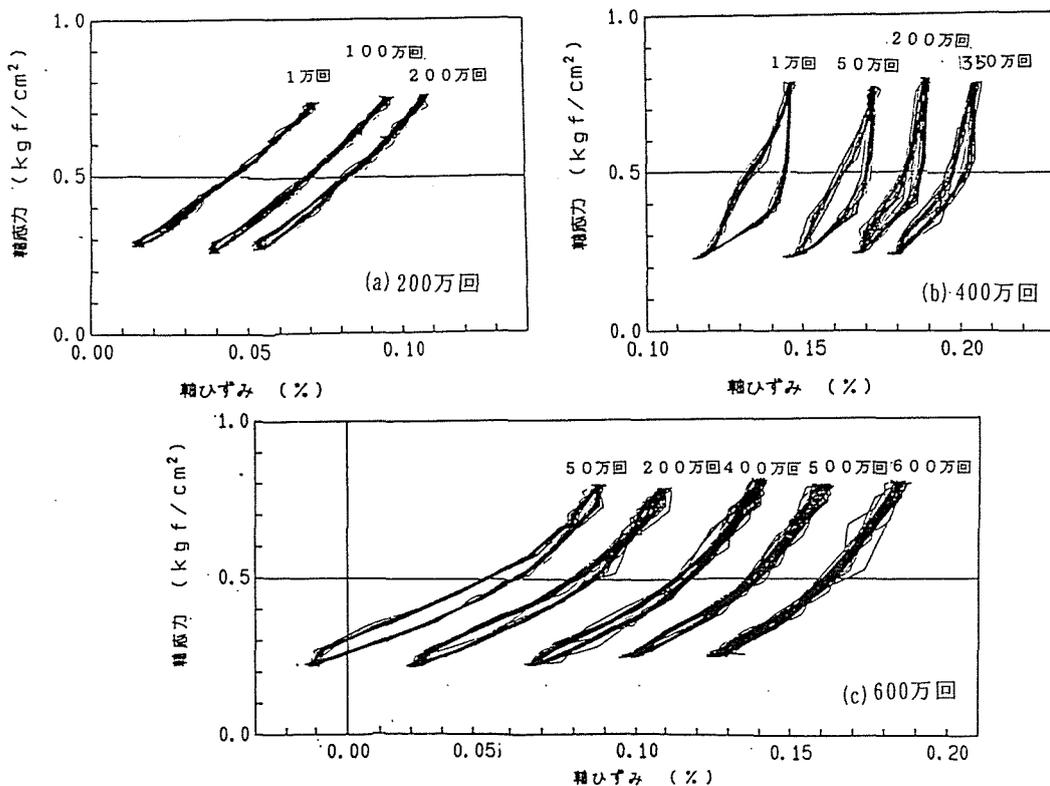


図-4. 4. 21 载荷の軸応力と軸ひずみの関係

図-4.4.22 (a)、(b)、(c)、に各繰返し载荷水準の繰返し载荷回数と軸ひずみの関係を示した。

各繰返し水準ともに軸ひずみは、繰返し回数の増加に伴い圧縮側へと若干シフトしていく傾向にあった。

図-4.4.22 (a)、(b)、(c)より、繰返し回数の増加に伴う軸ひずみの累積変位は若干見られるものの、著しく軸ひずみが増加するような降伏状態は、载荷回数が600万回においても認められなかった。

動的変形係数が後に示す圧縮試験で求めた変形係数(静弾性係数)と比べて著しく小さいのは、今回の応力レベルが「応力-ひずみ」曲線の初期の部分で見られる変曲点付近で繰返されていたことがその理由と考えられる。このことは、初期圧縮応力 σ_0 時の弾性係数 E_0 (222~325kgf/cm²)が圧縮試験時の変形係数(6600~13000kgf/cm²)と比べ著しく小さいことから裏付けられると考えられる。

2) 繰返し载荷後の一軸圧縮試験

表-4.4.21に繰返し载荷後の一軸圧縮試験結果を示した。

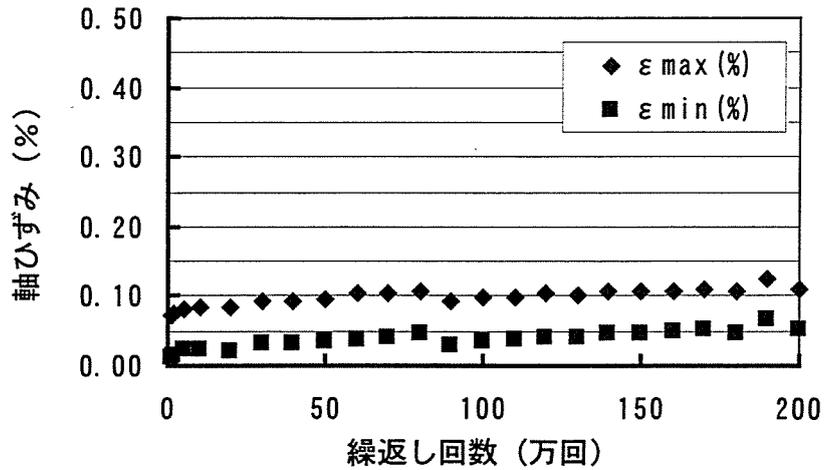


図-4.3.22 (a) 繰返し载荷回数と軸ひずみの関係

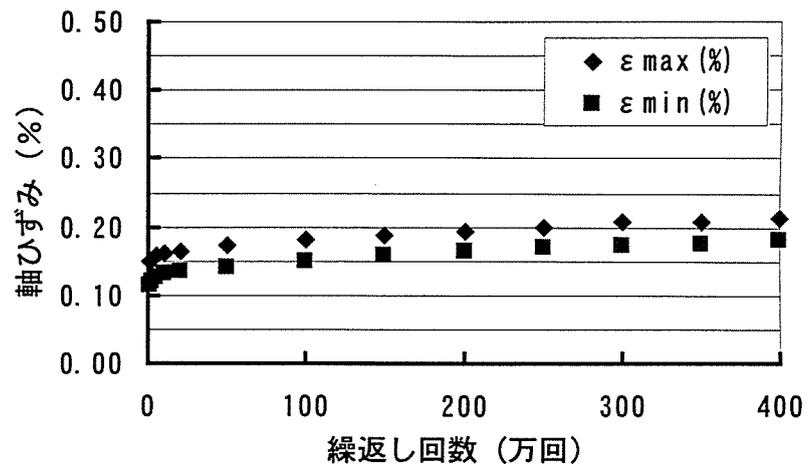


図-4.3.22 (b) 繰返し载荷回数と軸ひずみの関係

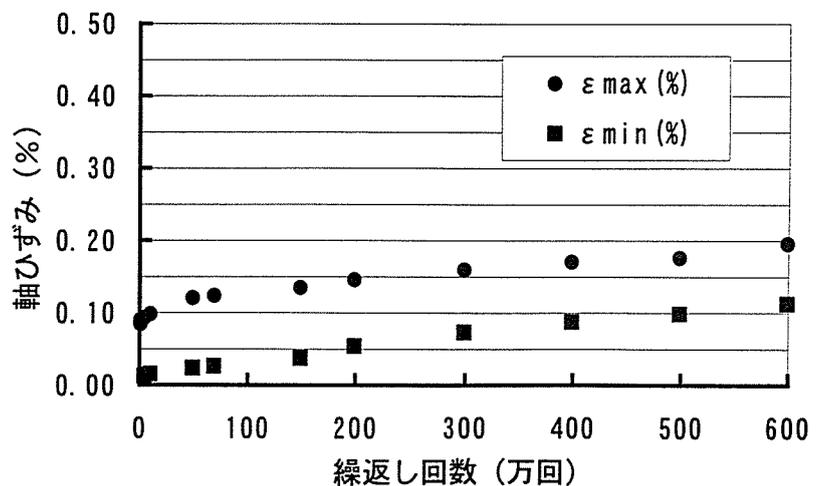


図-4.3.22 (c) 繰返し载荷回数と軸ひずみの関係

表-4.4.21 繰返し載荷後の圧縮強度

	繰返し載荷回数 (万回)			密封養生 材令16週
	200	400	600	
圧縮強度 (kgf/cm ²)	26.4	25.9	27.1	25.3
変形係数 (kgf/cm ²)	6600	13000	8330	9970
破壊ひずみ (%)	0.29	0.40	0.34	0.29
密封養生強度との強度比	104	102	107	100

繰返し載荷後の供試体の圧縮強度（材令16週）は、同材令の密封養生のみの供試体の圧縮強度と比較して、強度比で102～107とほぼ同等となっており、繰返し載荷回数の増加に伴い、著しく強度が変動するような現象は見られなかった。したがって、今回の荷重レベル、繰返し回数の範囲においては、繰返し載荷履歴が圧縮強度にほとんど影響を及ぼさないと考えられた。

4.4.8 乾湿繰返し抵抗性

1サイクルごとの圧縮試験結果を表-4.4.22に、乾湿繰返し回数と圧縮強度の相対強度（密封養生強度）との関係を図-4.4.23に示した。

表-4.4.22 1サイクルごとの圧縮試験結果

	乾湿繰返し回数				
	1	2	3	4	5
圧縮強度	12.8	13.0	13.9	15.8	14.7
変形係数	5370	5090	5820	4690	4360
破壊ひずみ (%)	0.51	0.33	0.38	0.54	0.67
σ_{28} 強度との比	0.70	0.71	0.76	0.86	0.80

注) 圧縮強度および変形係数の単位は (kgf/cm²)、
 σ_{28} 強度とは密封養生した供試体の材令28日強度 (18.4kgf/cm²)

乾湿繰返し (1サイクル：50℃炉乾燥2日間、水中浸漬1日間) 後の圧縮強さは、密封養生のみの強度 ($\sigma_{28}=18.4\text{kgf/cm}^2$) と比較して20～30%の強度低下はみられるものの、繰返し回数5回までの範囲において、著しく強度低下するような状態は見受けられなかった。また、乾湿繰返し後の供試体強度は2回目以降に繰返し回数に伴い、若干ではあるが増加する傾向がみられている。星野らが配合の異なる気泡モルタルでも強度の低下がほとんどないとの結果もあり、気泡モルタルには、このような乾湿繰返し環境下における耐久性は有しているものと推察される。

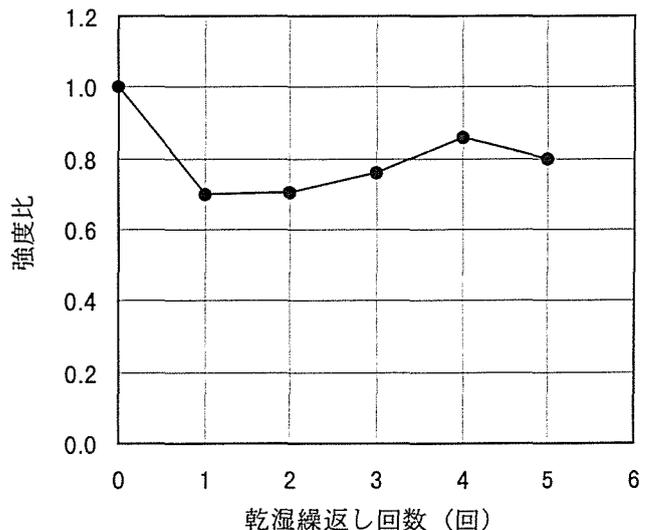


図-4.4.23 乾湿繰返し回数と強度比

4. 4. 9 凍結融解抵抗性

凍結融解試験を実施した際の冷媒温度、供試体中心温度の実測値を図-4. 4. 24に示す。
10×10×40cmの供試体の中心温度を-4℃にするためには冷媒の温度を-16℃にする必要があった。

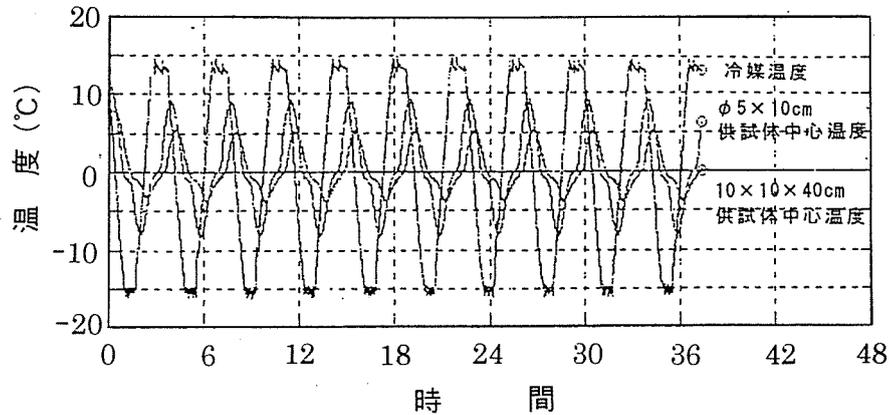


図- 4. 4. 24 冷媒温度、供試体中心温度の実測値

1) 相対動弾性係数

凍結融解サイクルごとの相対動弾性係数(0サイクル時を100%)を図-4. 4. 25に示す。

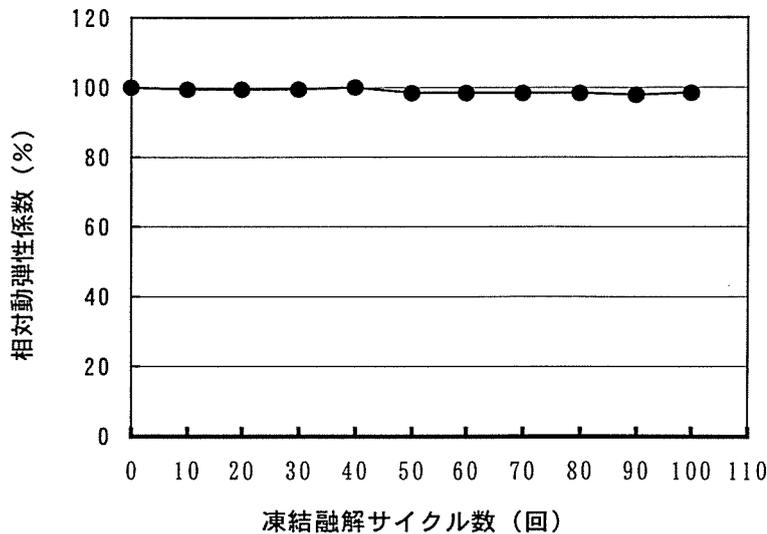


図-4. 4. 25 凍結融解サイクル数と相対動弾性係数

今回の試験においては、一次共鳴振動数を求める際、JIS法で指定されている方法のたわみ振動以外に縦振動についても測定を行った。これは、たわみ振動の場合、ピックアップの設置位置を多少ずらすことで、得られる一次共鳴振動数が変動する疑似ピークの測定値が多分に見られたため、比較的一次共鳴数のピークが安定して現れた縦振動の測定も同時に行った。気泡モルタルの一次共鳴振動数の測定に当たっては、JIS法のたわみ振動よりも明確で安定した共鳴振動数が得られる縦振動の方が有効と思われる。

0サイクル時の動弾性係数は、27,000~28,000kgf/cm²と同時期の一軸圧縮試験から求めた変形係数(静弾性係数)の約2~3倍の値を示している。

凍結融解試験後の供試体の表面は、100サイクルの時点においても、膨張クラック等は観察されず、相対動弾性係数も100サイクルの時点で98.2%とほとんど低下しなかった。

2) 圧縮強度

10サイクルごとの一軸圧縮試験結果を表-4.4.23に示す。

表-4.4.23 10サイクルごとの一軸圧縮試験結果

	凍結融解サイクル数 (回)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
圧縮強度 (kgf/cm ²)	13.6	12.8	11.9	11.1	12.3	13.2	11.8	11.9	13.9	13.4
変形係数 (kgf/cm ²)	5170	6510	3850	3200	7540	6720	4520	4180	7150	6780
破壊ひずみ (%)	0.6	0.6	0.6	0.9	0.3	0.6	1.1	1.4	0.2	0.4
σ_{28} 強度との比	0.86	0.81	0.75	0.70	0.77	0.83	0.74	0.75	0.87	0.84

注) σ_{28} 強度とは密封養生した供試体の材令28日強度 (15.9 kgf/cm²)

圧縮強度は、密封養生した供試体の28日強度と比較して20~30%程度低下するものの、100サイクルまでは強度が著しく低下する現象は認められなかった。

相対動弾性係数においてはほとんど低下が認められなかったにも関わらず、圧縮強度が20~30%低下した原因として考えられる事は、供試体寸法および形状の相違による凍結融解温度の違い (動弾性係数測定用供試体：寸法10×10×40cm (角柱)、凍結融解温度：+5℃~-4℃。圧縮試験用供試体：寸法φ5×10cm (円柱)、凍結融解温度：+9℃~-8℃。) が主な因子と考えられる。したがって、今回の試験条件においては相対動弾性係数と圧縮強度において相関性を考察するのは難しいと考えられ、今後、これらのことを厳密に検討するためには同一条件下での調査を要すると思われる。

凍結融解作用を受けた供試体の表面は、動弾性係数測定用供試体の時と同様、凍結融解作用によるクラック等は観察されなかった。

したがって、相対動弾性係数の結果を基に評価すると、気泡モルタルは凍結融解に対して抵抗性の高い材料であることが伺える。

4.4.10 透水性

変水位透水試験結果を表-4.4.24に示す。

表-4.4.24 変水位透水試験結果

供試体 番号	単位体積質量 (g/cm ³)		飽和後 含水比 (%)	透水係数 k ₁₅ (cm/s)	
	試験前	飽和後		平均	
A 1	0.954	1.414	75.7	1.94×10 ⁻⁴	1.91×10 ⁻⁴
A 2	0.949	1.409	74.0	1.88×10 ⁻⁴	
B 1	0.954	1.418	71.5	3.66×11 ⁻³	3.06×10 ⁻³
B 2	0.949	1.430	75.6	2.47×10 ⁻³	

注) 間隙比および飽和度はモルタル部分の比重を1.93 (示方配合表より求めた値) として求めた

得られた透水係数 k₁₅=2.47×10⁻³~1.91×10⁻⁴ (cm/s) は、土質の分野では、「透水

性が低い」に区別され、対応する土質材料としては、微細砂、シルト、砂-シルト-粘土混合土があげられる。ただし、気泡モルタルの吸水特性は、先に示したとおり、おおよそ3ヶ月間の水中浸漬においても飽和度が60%にも満たない材料であり、得られた透水係数は、試験の目的上、強制的に飽和状態にさせた時のものなので常圧下での透水係数はさらに低い可能性もあり注意を要する。

4. 4. 11 熱特性

1) 熱伝導率試験

各養生条件における熱伝導率及び熱抵抗値（熱伝導率の逆数）を表-4. 4. 25に示す。また、熱抵抗と供試体含水比との関係を図-4. 4. 27に示した。参考値として表-4. 4. 26にコンクリートの熱伝導率を示した。

表-4. 4. 25 各養生条件における熱伝導率及び熱抵抗値

		水中養生	密封養生	気中養生
熱伝導率	(W/°C·cm)	0.00727	0.00592	0.00443
	(kcal/mh°C)	0.625	0.509	0.381
熱抵抗値(°C·cm/W)		138	169	226
含水比(%)		37.5	16.3	11.8

熱伝導率は、材料の固体骨組が最も高く、さらに空隙の壁の間の熱移動は空隙が水で満たされていると比較的よくなることが知られている。本試験においても供試体が湿潤状態（水中養生）のものほど熱伝導率が高い結果が得られている。

また、当然のことながら熱伝導率の逆数である熱抵抗値は含水比の低下に伴い、大きくなる傾向がみられている（図-4. 3. 26参照）。

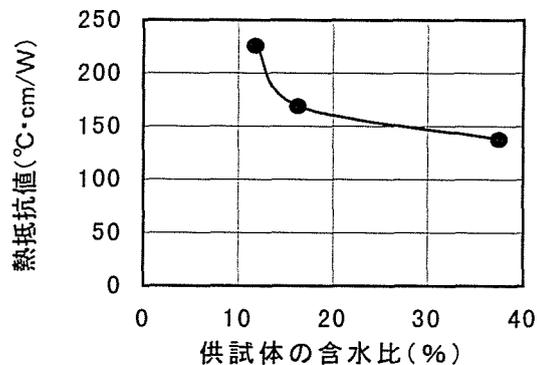


表-4. 4. 26 コンクリートの熱伝導率

粗骨材の種類	熱伝導率(kcal/mh°C)
玄武岩	1.61
石灰岩	2.20
砂岩	2.54
安山岩	1.95
人工軽骨	0.73

図-4. 4. 26 熱抵抗値と含水比の関係

2) 熱拡散率試験

図-4. 4. 27は、供試体の冷却曲線実測値を示したものである（養生条件：密封養生）。各養生条件における熱拡散率を表-4. 4. 27に、熱拡散率と供試体含水比との関係を図-4. 4. 28に示した。また参考値として表-4. 4. 28にコンクリートの熱拡散率を示した。

試験した気泡モルタルの熱拡散率は供試体の含水状態により異なるが0.00093~0.00117 m²/h²の範囲で内部に気泡を含む人工軽量骨材と同程度である。供試体の含水状態の影響は認められ、含水比が高い方が熱拡散係数も大きくなっている。これは、水中養生により気泡の一部が水で満たされることにより供試体内部の空気の量が減少したことより熱伝導率が大きくなることと対応している。

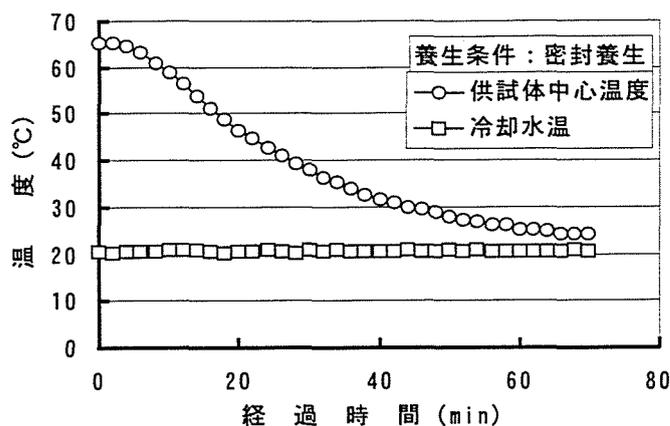


図-4.4.27 供試体の冷却曲線（実測値）

表-4.4.27 各養生条件における熱拡散率

	水中養生	密封養生	気中養生
熱拡散率 (m ² /h ²)	0.00113	0.00117	0.00093
含水比 (%)	36.6	19.4	7.1

注) 測定開始時刻30分~60分の平均値とした

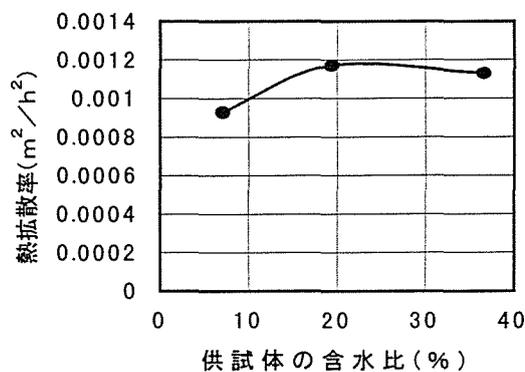


図-4.4.28 熱拡散率と含水比の関係

表-4.3.28 コンクリート用骨材の熱拡散率

粗骨材の種類	熱拡散率 (m ² /h)
玄武岩	0.0027
石灰岩	0.0038
砂岩	0.0046
安山岩	0.0033
人工軽骨	0.0013

3) 比熱

比熱Cは、熱伝導率、熱拡散率および密度ρから、式(4.4.3)より求めた。算出した比熱を表-4.4.29に示す。参考値として主な物質の比熱を表-4.4.30に示した。

$$C = \lambda / \alpha \rho \quad \dots\dots \text{式 (4.4.3)}$$

- ここに、C : 比熱 (kcal/kg°C)
- λ : 熱伝導率 (kcal/mh°C)
- α : 熱拡散率 (m²/h)
- ρ : 密度 (kg/m³)

気泡モルタルの比熱は、含水状態が乾燥側となることで若干小さくなる傾向が認められるものの、今回の含水状態の範囲においては、顕著な差は見られなかった。

表-4.4.29 比 熱

供試体 条 件	平均単位 体積質量 Kg/m ³	熱伝導率		熱拡散率 m ² /h	比 熱	
		W/°C·cm	kcal/mh°C		kcal/kg°C	J*/gK
水 中	1140	0.00727	0.625	0.00113	0.49	2.03
密 封	1020	0.00592	0.509	0.00117	0.43	1.78
気 中	940	0.00443	0.381	0.00093	0.44	1.82

*1: 1 cal=4.184J

今回用いた気泡モルタルの比熱はコンクリートの2倍程度であった。気泡モルタルの配合に基づき構成材料の比熱を用いて気泡モルタルの比熱を算出すると以下ようになる。

なお、各材料の比熱は次のように設定した。

セメント：0.2、砂：0.21、水：0.999

空気：0.24（単位：cal/g°C）

$$\text{比熱} = 0.2 \times 270 + 0.21 \times 505 + 0.999 \times (210 + 15.2) + 0.24 \times (0.00129 \times (488 - 15.2)) / 1002 = 0.39$$

となり、実測値と10%程度異なるが概略値が推定できる。

表-4.3.30 各種物質の比熱

物 質	比 熱 (cal/g°C)
水	0.999
砂 岩	0.212
レ ン ガ	0.19 ~ 0.21
コ ン ク リ ー ト	約 0.20
空 気	0.24 (20°C)

4) 温度上昇

単位セメント量182kg、空気量約50%の配合の気泡モルタルについて断熱温度上昇装置を用いた試験を実施した結果を、図-4.4.29に示す。上昇温度は46.9°Cとなった。

セメントの水和熱 (H) から温度上昇 (T₀) を次式により推定する。

$$T_0 = W_c H / \rho C$$

ここで、ρ：気泡モルタルの単位容積質量、C：比熱である。

用いた気泡モルタルの配合から

W_c = 182 kg、ρ = 1100kg、とし、比熱を前項と同様に配合を基に算出した C = 0.36 kcal/kgを用い、水和熱は一般的な普通セメントの値として H = 90 kcal/kg°C、を用いると温度上昇量は、

$$T_0 = W_c H / \rho C = 182 \times 90 / 1100 / 0.36 = 45.4^\circ\text{C}$$

となり、温度上昇の実測値46.9°Cとほぼ等しい値が得られ、気泡モルタルの配合および使用するセメントの水和熱がわかれば、温度上昇の概略値を推定できる。さらに打込み時の温度を想定すれば、気泡モルタル内部の最高温度が予測できると考えられる。

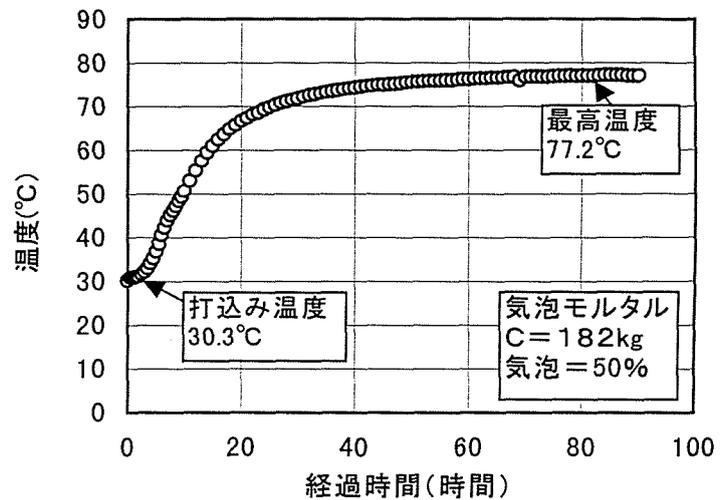


図-4.4.29 断熱温度上昇試験結果

4. 4. 1 2 乾燥収縮特性

気泡モルタル乾燥収縮の測定結果を図-4. 4. 30に示す。図中のS/Cは砂セメント比、 ρ は単位容積質量を示す。気泡量が30%~60%程度の気泡モルタルの乾燥収縮ひずみは、18週では大部分の収縮が終了し約2年後の収縮ひずみは $1500\sim300\times 10^{-6}$ の範囲であった。これはセメントのみの気泡コンクリート（気泡ミルク）の場合に0.2~0.5%の範囲であるとの結果⁴⁻¹³⁾とほぼ同様の結果となった。

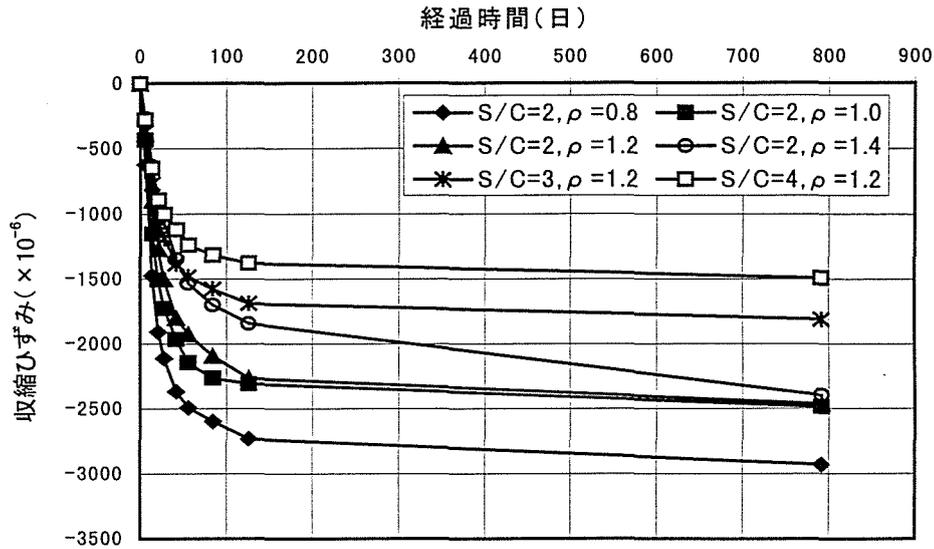


図-4. 4. 30 乾燥収縮ひずみの経時変化

配合との関係では、S/Cの大きい配合で小さな値が得られ、S/Cが小さく単位容積質量の小さい配合で最も大きな値が得られた。

また、重量変化を図-4. 4. 31に示す。一方、供試体重量は材令が4~8週を過ぎる頃から収縮は進んでいるにもかかわらず増加に転じた。これは、気泡モルタルは水分の発散による重量減少が生じた後、中性化が進みやすいことから炭酸化が進むことにより重量増加が生じたものと考えられる。

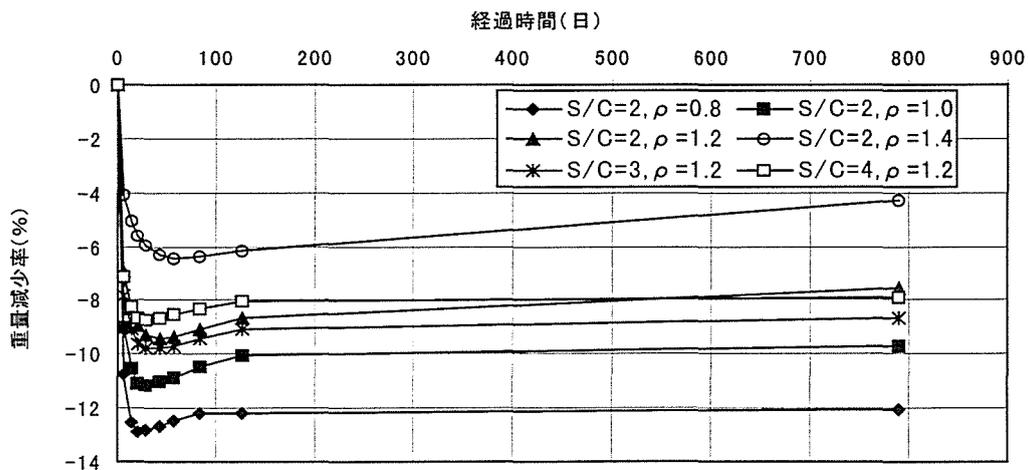


図-4. 4. 31 供試体重量の経時変化

図-4.4.32は配合要因と乾燥収縮量の関係である。単位水量、単位セメント量および単位ペースト量はほぼ同様の傾向を示し、目標単位容積質量が1.2g/cm³と等しくS/Cの異なる配合では単位水量の多い配合ほど乾燥収縮量が増加する傾向にあるが、S/Cが等しく目標単位容積質量が異なる配合間では、各値が増えるほど乾燥収縮量が減少する傾向にある。また、単位骨材量（容積）が多くなるほど乾燥収縮量が減少する傾向が全配合にわたって認められる。以上のことから気泡モルタルにおいては、収縮を拘束する役割をする骨材量の影響が非常に大きいことがわかる。

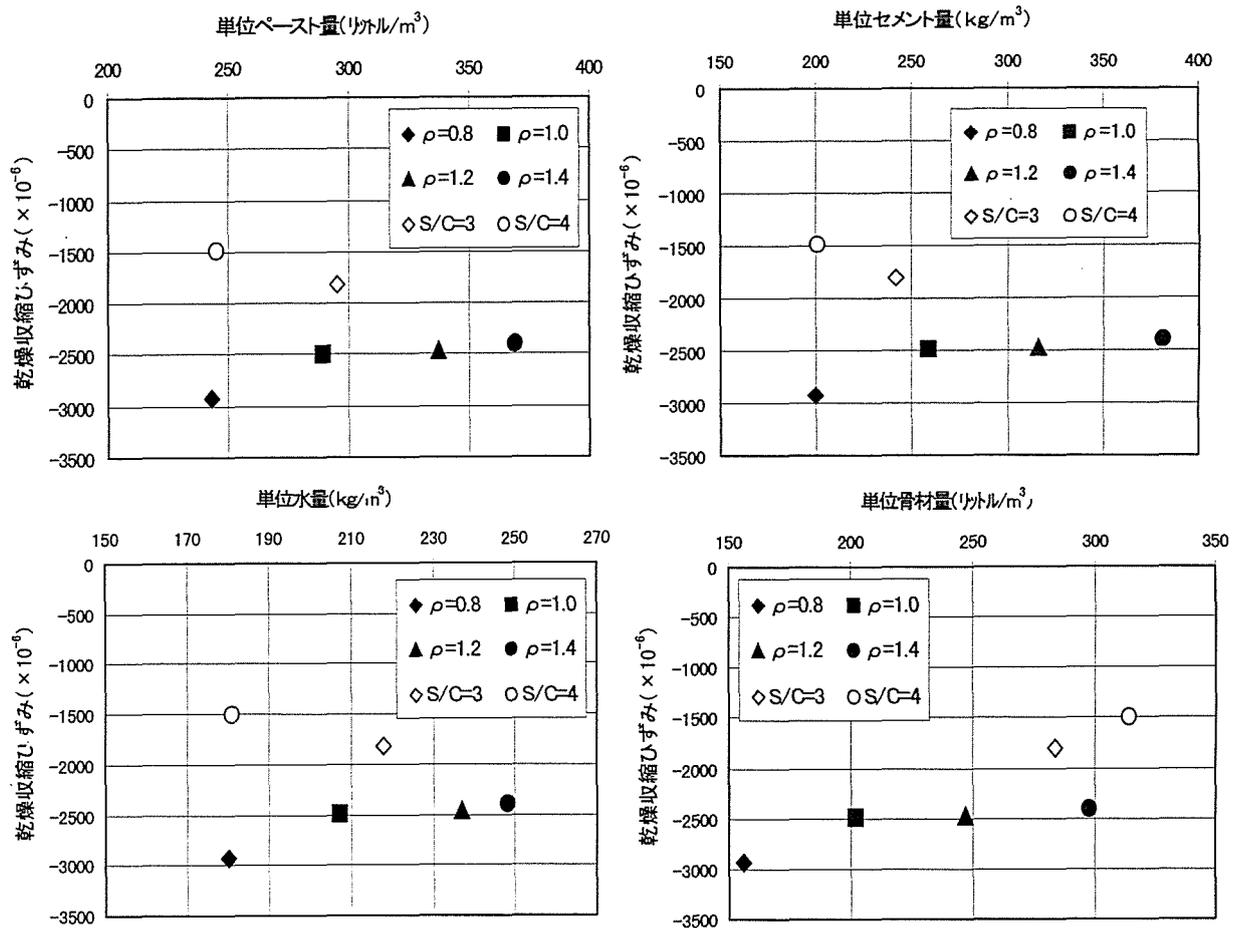


図-4.4.32 配合要因と乾燥収縮量の関係

4. 4. 1 3 まとめ

単位容積質量 $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ 、圧縮強度 $15\text{kgf}/\text{cm}^2$ 程度の気泡モルタルの室内試験を実施し、物性および耐久性に関する調査を行った。その結果明らかになった点を以下に示す。

(1) 気泡モルタル中の気泡径分布

- 1) 界面活性剤系起泡剤を用いた気泡モルタルの気泡は、対象面積内 35.62cm^2 に330個存在し、気泡の占有割合は33.3%であった。気泡の等価円直径の範囲は $0.04\sim 0.66\text{mm}$ で、平均値は 0.19mm であった。
- 2) タンパク系起泡剤を用いた気泡モルタルの気泡は、 1mm^2 あたり5.2個（対象面積内 35.62cm^2 に185個）存在し、気泡の占有割合は41.2%であった。気泡の等価円直径の範囲は $0.04\sim 0.86\text{mm}$ にあり、平均値は 0.26mm であり界面活性剤系起泡剤を用いた場合より大きくなった。

(2) 圧縮強度、変形特性

- 1) 単位セメント量 270kg 、気泡量約50%の気泡モルタルの材令28日における圧縮強度は $15.9\sim 18.4\text{kgf}/\text{cm}^2$ であった。圧縮強度の経時的変化は、材令7日から28日にかけて約2倍から3倍に強度増加する特徴が見られた。一方、材令28日以降の強度増加は小さい傾向にあった。
- 2) 圧縮試験時の破壊形態は、供試体上端部分もしくは下端部分のみで破壊するものが多く見られ、応力-ひずみ曲線においては、圧縮応力がピークに達した後に塑性変形的な変形が見られた。また、圧縮強さと変形係数との間には、 $E_{50}=390\sim 400\text{qu}$ の関係が認められた。
- 3) 水中浸漬させた供試体の圧縮強度は、同材令の密封養生した供試体強度の80%以上を有しており、著しく強度低下する傾向にないことが推察された。

(3) せん断強度

- 1) 垂直応力を変えて実施した一面せん断試験では、いずれの垂直応力のもとでも得られた最大せん断力 (τ_{max}) が概ね $6\text{kgf}/\text{cm}^2$ と変化がなかった。
- 2) 水平変位が概ね 10mm までの範囲における残留摩擦抵抗力としては、最大せん断力の概ね70%のせん断力を発揮した。

(4) 繰返し载荷抵抗性

- 1) 一軸状態で初期値 $\sigma_0=0.5\text{kgf}/\text{cm}^2$ を与え、 5Hz のSin波のもとで $\Delta\sigma=0.25\text{kgf}/\text{cm}^2$ の応力振幅を600万回まで繰返した結果、繰返し回数の増加に伴い軸ひずみが圧縮側へとシフトしていくものの、顕著な累積変位は生じず、列車走行や車両等の繰返し荷重による劣化はないものと思われた。
- 2) 繰返し载荷後の圧縮強度は、同材令の密封養生の供試体強度とほぼ同等で、繰返し履歴の圧縮強度への影響はみとめられなかった。

(5) 吸水性

- 1) $\phi 5 \times 10 \text{cm}$ の円柱供試体を12週間水中浸漬させた気泡モルタルの飽和度は60%以下で、気泡モルタルが飽和状態となりにくい材料であった。
- 2) 鉛直方向吸水試験において、明確に吸水領域と判断されたのは、供試体下端部の水中浸漬させた深さ程度で、毛細管現象による水の吸い上げ現象は見られず気泡が独立していることが伺えた。

(6) 透水性

飽和状態における透水係数は、界面活性剤系起泡剤を用いた気泡モルタルで $2.47 \times 10^{-3} \text{ (cm/s)}$ で、タンパク系起泡剤を用いた気泡モルタル $1.91 \times 10^{-4} \text{ (cm/s)}$ であった。気泡径との関連は認められなかった。

(7) 耐久性

1) 凍結融解抵抗性

- ① 空中凍結融解温度 $+5^\circ\text{C} \sim -4^\circ\text{C}$ (供試体中心温度)のもとで100サイクル繰返した角柱供試体 ($10 \times 10 \times 40 \text{cm}$) の相対動弾性係数は98.2%となり、気泡モルタルが凍結融解に対して抵抗性の高い材料であることが伺われた。また、供試体表面においては、凍結融解作用によるクラック等は観察されなかった。
- ② 動弾性係数測定用供試体よりも苛酷な供試体中心温度 $+9^\circ\text{C} \sim -8^\circ\text{C}$ の範囲で凍結融解させた円柱供試体 ($\phi 5 \times 10 \text{cm}$) の10サイクルごとの圧縮強度は、密封養生の材令28日強度と比べ、20~3%低下するものの、あるサイクル数で強度が急激に低下するような現象は見られなかった。

従って、冬期の低温下に伴う劣化は生じないと考えられた。

2) 乾湿繰返し抵抗性

- ① 1サイクルの条件を 50°C 炉乾燥2日、水中浸漬1日とした乾湿繰返し試験において、1サイクルごとに実施した圧縮強度は、1サイクル目で密封養生28日強度と比べ、20~30%低下するものの、それ以後はわずかずつ増加する傾向にあり実施した5サイクルの範囲では急激な強度低下現象はみられなかった。

3) 酸性水浸漬

- ① 48週間、酸性水 ($\text{pH} = 4$) 中に浸漬させた気泡モルタルの飽和度は80%程度、水道水 ($\text{pH} = 7$) 中に浸漬させたものの飽和度は70%程度と気泡モルタルが飽和状態となりにくい材料であることが伺われた。
- ② 浸漬水の相違による飽和度の差が生じているが、縮強度の差が顕著でないことから酸性水浸漬時の NO_3^- と供試体表面のセメント水和物との反応による組織の変化も考えられるもののその影響はわずかであると考えられた。
- ③ 酸性水に浸漬させた供試体の圧縮強度は、水道水に浸漬した場合とほとんど差がなかった。また、その強度は同材令の密封養生における固化強度の概ね8割以上を有しており、このような環境下で著しく強度低下する傾向にないことが確認できた。

(8) 熱特性

各養生条件下における気泡モルタルの熱特性値は、一般のコンクリートの値も比べ熱伝導率および熱拡散率が約1/4、比熱が約2倍である。比熱は、配合を基に構成材料の比熱を用い概略値が推定可能である。

また、断熱温度上昇量も通常のコンクリートと同様に用いるセメントの水和熱、比熱の推定値を利用して推定が可能である。

(9) 乾燥収縮特性

気泡量が30%～60%程度の気泡モルタルの乾燥収縮ひずみは、18週では大部分の収縮が終了し約2年後の収縮ひずみは $1500\sim 3000\times 10^{-6}$ の範囲であった。これはセメントのみの気泡コンクリート（気泡ミルク）の場合に0.2～0.5%の範囲であるとの結果⁴⁻¹³⁾とほぼ同様の結果となった。骨材容積の影響が大きかった。

以上のように気泡を50%程度含む気泡モルタルは、強度特性耐久性の面でも土木材料として十分な性能を有していると考えられた。また、軽量性、断熱性を有することから、その特長を生かし、現在利用されている以外の用途への応用も考えられる。

一方、問題点としては吸水性があること、乾燥収縮が大きいこと、大量に打設され、熱伝導率や熱拡散率が低いことから内部温度が高くなりやすいことが挙げられる。使用条件に合わせた材料の選定や配合設計のほか構造物全体として材料特性が生かされるような設計をすること等で解決する必要があると考える。

また、気泡を多量に含んでいることから局部圧縮力が作用する場合には押しつぶされるような破壊形態をとることが予想され、衝撃吸収材としても機能する可能性があり評価をしていく必要があると考えられる。

4. 5 第4章の結論

気泡を混合した材料の各種物性試験を実施し土木材料としての有効性の検討をおこなった。得られた結論は以下の通りである。

1. 気泡ミルクの配合と強度特性

- (1) 気泡ミルクの強度は水セメント比と気泡量に直接支配され、水セメント比の等しいセメントミルクに気泡の混合量を増加させて行くに従い圧縮強度は低下し、間隙比で整理すると指数関数的な関係が得られた。水セメント比が大きい場合や気泡量が少ない場合ブリーディングを生じた。
- (2) 気泡ミルクの安定な配合の指標としてはプレパクトコンクリート注入モルタルのブリーディング試験に準じたビニールチューブによる試験でブリーディング率1%以下、供試体上下の単位容積質量の差5%以下を目安とできる。

2. 気泡モルタルの配合と強度特性

気泡モルタルに用いる砂の粒度改善や低強度での安定性の確保のために鉱物質微粉末の利用に関する検討を行った結果以下の点が明らかになった。

(1) 砂の粒度改善

碎石微粉末で砂の一部を置換した場合フロー値は低下する傾向にあるが、供試体上下の位置による単位容積質量の差が小さくなるとともに圧縮強度の差も小さくなり品質は安定する傾向にあった。強度低下も生じなかったことから、細粒のない粗い砂を使用する場合に碎石微粉末を添加して気泡モルタルの安定性を高めることが可能である。

(2) 強度調整

鉱物質微粉末によりセメントの一部を置換する場合、碎石微粉末は置換率にほぼ比例してフロー値が低下し、石灰質微粉末では20%の置換でやや低下するが、それ以上置換してもフロー値の低下はなかった。

圧縮強度は微粉末によるセメント置換率の増加にほぼ比例して低下し、石灰質微粉末の方が碎石微粉末を用いた場合よりやや高い強度が得られた。微粉を用いない気泡モルタルの強度がわかれば置換率ごとの強度が予測できることがわかった。

3. 気泡モルタルの諸物性

気泡モルタルの代表的な配合として単位容積質量が 1.0g/cm^3 、圧縮強度 15kgf/cm^2 程度の気泡モルタルの室内試験を実施し、物性および耐久性に関する調査を行った結果以下の点が明らかになった。

(1) 気泡モルタル中の気泡径分布

気泡モルタルの気泡の等価円直径の平均値は、界面活性剤系起泡剤を用いたモルタルで 0.19mm 、タンパク系起泡剤を用いた気泡モルタルでは 0.26mm でありタンパク系起泡剤を用いた場合の方が大きかった。

(2) 圧縮強度、変形特性

- 1) 単位セメント量 270kg 、気泡量約50%の気泡モルタルの材令28日の圧縮強度は $15.9\sim 18.4\text{kgf/cm}^2$ であり、それ以降も強度が増加し、材令1年では 33kgf/cm^2 であった。

水中浸漬させた場合の圧縮強度は、同材令の密封養生した供試体強度の80%以上を有しており、著しく強度低下する傾向にないことが推察された。

2) 圧縮試験時の破壊形態は、圧縮応力がピークに達した後に塑性変形的な変形が見られた。また、圧縮強さと変形係数の関係は、 $E_{s0} = 390 \sim 400 q_u$ であった。

(3) せん断強度

垂直応力を変化させたせん断試験では、いずれの垂直応力のもとでも得られた最大せん断力(τ_{max})が概ね 6 kgf/cm^2 と変化がなく、圧縮強度の1/3であった。最大せん断応力に達した後の残留強度(摩擦抵抗力)は、水平変位が概ね10mmまでの範囲にで最大せん断力の概ね70%であった。

(4) 繰返し载荷抵抗性

1) 一軸状態で初期値 $\sigma_0 = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ を与え、5 HzのSin波のもとで $\Delta\sigma = 0.25 \text{ kgf/cm}^2$ の応力振幅を600万回まで繰返した結果、繰返し回数の増加に伴い軸ひずみが圧縮側へとシフトしていくものの、顕著な累積変位は生じず、繰返し载荷後の圧縮強度は、同材令の密封養生の供試体強度とほぼ同等で、繰返し载荷の影響は認められなかった。この程度の列車走行や車両等の繰返し荷重による劣化はないものと思われた。

(5) 吸水性

1) $\phi 5 \times 10 \text{ cm}$ の円柱供試体を12週間水中浸漬させた気泡モルタルの飽和度は60%以下であり、鉛直方向吸水試験においても毛細管現象による水の吸い上げ現象は見られなく、気泡モルタルが飽和状態となりにくい材料であった。

(6) 透水性

飽和状態における透水係数は、界面活性剤系起泡剤を用いた気泡モルタルでは $2.47 \times 10^{-3} \text{ (cm/s)}$ で、タンパク系起泡剤を用いた気泡モルタルで $1.91 \times 10^{-4} \text{ (cm/s)}$ であり、気泡径との関連は認められなかった。

(7) 耐久性

空中凍結融解温度 $+5^\circ\text{C} \sim -4^\circ\text{C}$ (供試体中心温度)のもとで100サイクル繰返した凍結融解試験や1サイクルの条件を 50°C 炉乾燥2日、水中浸漬1日とした乾湿繰返し試験の結果、密封養生28日強度に比べ20~3%低下するものの大幅に低下することはなく、耐久性のある材料であると考えられた。

また、酸性雨を想定した酸性水($\text{pH} = 4$)中に48週間浸漬させる試験でも、圧縮強度は水道水に浸漬した場合とほとんど差がなく、酸性雨に対する抵抗性が確認できた。

(8) 熱特性

気泡モルタルの熱伝導率および熱拡散率は、コンクリートに比べ約1/4であり、比熱は約1/2であった。比熱や断熱温度上昇量は通常のコンクリートと同様に配合と構成材料の比熱、使用セメントの水和熱を利用して推定が可能であると考えられた。

(9) 乾燥収縮特性

気泡量が30%～60%程度の気泡モルタルの乾燥収縮ひずみは、18週では大部分の収縮が終了し約2年後の収縮ひずみは $1500\sim 3000\times 10^{-6}$ の範囲で、セメントのみの気泡コンクリート（気泡ミルク）の場合に0.2～0.5%の範囲であるとの結果⁴⁻¹³⁾とほぼ同様の結果となった。

以上のように、気泡ミルクや気泡モルタルを構成するセメントミルクおよび気泡ミルクの強度特性や鉱物質微粉末を添加した気泡モルタルの強度特性の検討を実施し、得られる強度の範囲や低強度で安定した気泡モルタルの製造が可能であることを示した。また、気泡モルタルの代表的な配合である気泡を50%程度含む気泡モルタルの各種物性試験の結果、強度特性、耐久性の面でも土木材料として十分な性能を有していると考えられた。また、軽量性、自立性、断熱性を有することから、その特長を生かし、現在利用されている以外の用途への応用も考えられる。

一方、問題点としては吸水性があること、乾燥収縮が大きいこと、大量に打設され、熱伝導率や熱拡散率が低いことから内部温度が高くなりやすいことが挙げられる。使用条件に合わせて材料の選定や配合設計のほか構造物全体として材料特性が生かされるような設計をすること等で解決する必要があると考える。

さらに、ここで実施したのは室内レベルの検討であることから、現場規模での安定性や品質ならびに盛土構造物としての挙動などについても検討する必要がある。

第4章の参考文献

- 4-1) 岡田清・六車熙編：コンクリート工学ハンドブック、朝倉書店、pp708-710, 1981
- 4-2) 友沢史紀・梶田佳寛・安田正雪：高強度軽量コンクリートの基礎的物性－超高層RC建築物への適用、コンクリート工学, Vol. 24, pp14-21, 1986. 4
- 4-3) 白山和久・上村克郎：気泡コンクリート、オーム社,
- 4-4) A. N. Talbot: A Proposed Method of Estimating the Density and Strength of Concrete and Proportioning the Materials by the Experimental and Analytical Consideration of Voids in Mortar and Concrete, Proc. ASTM, 1921

- 4-5) A. N. Talbot: Proportioning Concrete by the Voids in Mortar, Eng. Experimental Station of Univ. of Illinois, Bulletin No. 137, 1923
- 4-6) 岡田清・六車熙編：コンクリート工学ハンドブック、朝倉書店、pp718-719
- 4-7) 古谷俊明：軽量盛土材としての気泡モルタル, 土と基礎, Vol. 37, No. 2, pp73~77, 1989
- 4-8) Tunnel grouting record pumped up in Loss Angels : Civil Engineering, Feb. 1992
- 4-9) 山之内豊聡・浜田英治：軽量盛土材としての気泡セメントの力学特性と降伏基準に関する一考察、土木学会論文集, 第406号/Ⅲ-11, pp283-290, 1989. 6
- 4-10) 岡田清・六車熙編：コンクリート工学ハンドブック、朝倉書店、pp717
- 4-11) C S F C研究会報告書：砕石粉使用高流動コンクリートの技術の現状および調合施工ガイドライン、1997. 8
- 4-12) 後藤年芳・松尾豊弘・笠井寿太郎：地震により生じた杭周辺の空隙に気泡モルタルを充填して復旧、建築技術、No. 545, pp90-91, 1995
- 4-13) 久野悟郎・松下正憲・中角均・今井俊雄・吉原正博：軽量充填材を用いた建築物基礎下充填工事施工報告、第23回土質工学研究発表会概要集、pp2319-2322, 1988. 6
- 4-14) 日本道路公団：日本道路公団試験方法、JHS A 313 エアモルタルおよびエアミルクの試験方法、pp3-181~3-185, 1992
- 4-15) 日本道路公団：気泡混合軽量土を用いた軽量盛土設計・施工指針、pp58, 1996
- 4-16) 社団法人セメント協会：セメント系固化材による地盤改良マニュアル[第2版]、pp139-140, 1994
- 4-17) 岡田清・六車熙編：コンクリート工学ハンドブック、朝倉書店、pp465, 1981
- 4-18) 前出4-9)
- 4-19) 三嶋信雄・森本美樹・横田聖哉・以内徹：気泡混合軽量土の強度特性、第30回土質工学研究発表会概要集、pp2531-2532, 1995
- 4-20) 片岡宏治・後藤年芳・万仲茂：セメント系材料を用いた固化処理土の三軸圧縮特性、セメント技術年報、36, pp516-519, 1982. 7
- 4-21) 星野克之・今吉英明・深沢明雄・三嶋信裕：気泡混合軽量土の耐久性、第30回土質工学研究発表会概要集、pp2533-2534, 1995

第5章 配合設計法の提案

5.1 概 論

気泡ミルクおよび気泡モルタルの配合の設計方法には以下に示すような問題点があり、的確な配合設計方法は今のところ提案されていない。

- (1) フロー値が 180mm であれば材料分離はないとされているが、設定理由が明確にされていない。
- (2) フロー値の目標を 180mm とした場合、練上がり後における安定性の確認がなされていない。また、フロー値が 180mm でも材料分離が著しいこともある。
- (3) 気泡ミルクの場合、発熱による温度上昇を考慮してセメント量の上限（360kg 程度）を定めると選定できる配合に限られる。
- (4) 気泡ミルクおよび気泡モルタルにおいて 5kgf/cm^2 程度以下の低い強度設定が困難である。
- (5) 配合の決定に際しては、試験練りに基づいて配合修正を行うが、その修正の目安が示されていない。

そこで、第3章のレオロジー特性や材料分離の検討結果ならびに第4章の硬化体の強度、耐久性ならびに鉱物質微粉末の利用に関する検討結果を考慮した配合設計の手法を示す。

5.2 気泡ミルクおよび気泡モルタルのフロー値の範囲設定と分離抵抗性の確認

気泡ミルクや気泡モルタルの安定性のうち、気泡の上昇および砂粒子の沈降を考える際のマトリックスは、気泡に対してはセメントミルクであり砂に対しては気泡ミルクであるといえる。この場合、各々の粒子（気泡と砂）が移動しないために必要な降伏値については第3章で論じた。最も分離しやすい条件を、図-3.2.3, 3.2.4 から読取ると以下のようなになる。

セメントミルクの単位容積質量と降伏値は水セメント比の増加とともに低下する。実用的に限界に近いと考えられる水セメント比 100% の場合を考えると、

セメントミルクの密度： 1.5 g/cm^3
気泡の密度： 0.03 g/cm^3
気泡径（比較的大きなもの）： 0.5 mm
限界降伏値： 0.4 Pa

となる。従って、配合設計において目標とする降伏値の下限を混合時のばらつきや外力の作用による低下を見込んで、安全率を3倍として 1.2 Pa を目安として設定する。この数値から判断すると、普通セメントではW/Cが100%の場合 0.3 Pa で不足し、W/Cが70%では 2.3 Pa で余裕があることから、80%を上限の水セメント比とする。高炉セメントの場合W/Cが70%で 4 Pa 程度であり、普通セメントに比べるとやや広い範囲で安定性が確保できると考えられる。従って、普通セメントの上限の水セメント比80%における降伏値を管理値とする。

セメントミルクの降伏値を測定する簡易な方法は今のところないが、プレーンのセメントミルクでは図-3.2.21 に示すように塑性粘度と線形関係があることから、塑性粘度と関連のあるファンネル粘度の測定によって安定性の判断が可能となると考えられる。この場合の管理値は、普通セメントのW/C80%におけるセメントミルクの降伏値に対

応する値とすればよいので、ファンネル粘度の測定値から表-5.2.1 に示すように 24sec と定める。

表-5.2.1 ファンネル粘度の測定値と管理値

セメントの種類	ファンネル粘度(sec)			管理値
	W/C : 70%	W/C : 80%	W/C : 100%	
普通セメント	27.3	24.3	21.8	24
高炉セメントB種	26.3	25.4	22.2	

一方砂粒子の場合は、

気泡ミルクの密度 : 1.5 g/cm^3

砂粒子の密度 : 2.6 g/cm^3

砂粒子径 (最大値) : 5 mm

限界降伏値 : 5.7 Pa

となる。気泡の場合と同様に配合のばらつきや外力の作用による低下を見込んで安全率を2~3倍程度とすると10~17Paを目安として管理するとよいと考えられる。

図-5.2.1 は気泡モルタルの降伏値とフロー値との関係である。降伏値とフロー値には負の相関が認められることは先に示したが、図中には安定であると考えられた配合と、何らかの分離が認められた配合を記号を変えて示してある。両者は混在しており、降伏値あるいはフロー値によって分離を表現するのは困難であると考えられる。

ただし、降伏値が16~17Pa以上においては分離する配合は減少する傾向にある。フロー値が250mmを超える場合は降伏値も10Pa以下となり、気泡や砂粒子の安定性の点でも降伏値の余裕がなくなることから、250mm以下をフロー値の基準とするのがよいと考えられる。また、下限は流動性の点で問題はないと考えられる150mmとする。

図-5.2.2 は図-5.2.1 を単位容積質量別にプロットしたものである。第3章で単位容積質量のフロー値に与える影響が大きいことを示した。すなわち、単位容積質量が 1g/cm^3 小さい場合は、降伏値が同じであってもフロー値は50mm小さくなる可能性がある。このことからフロー値の下限を150mmとする。

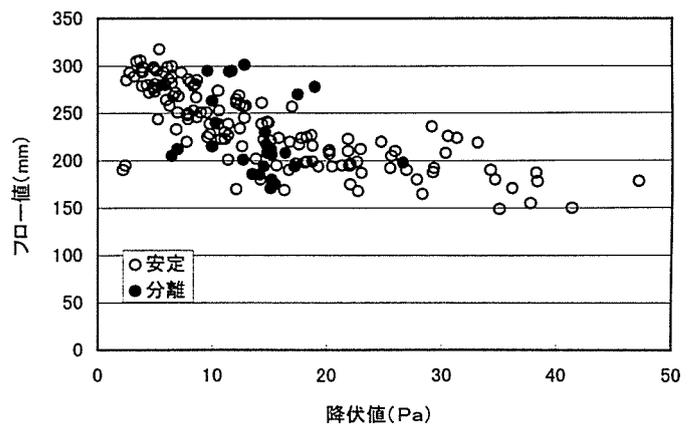


図-5.2.1 気泡ミルクの降伏値とフロー値の関係

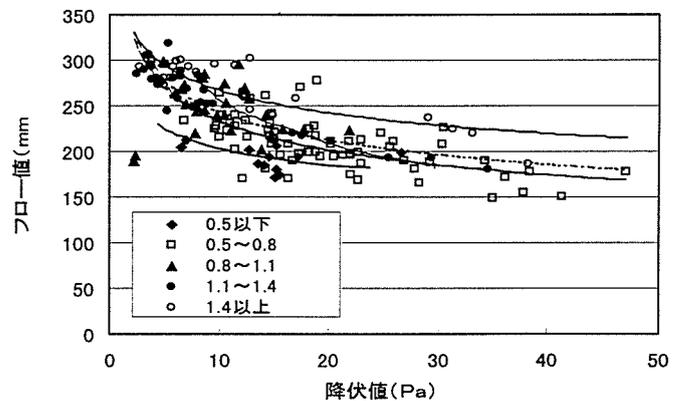


図-5.2.2 気泡ミルクの単位容積質量別降伏値とフロー値の関係

図-5.2.3 は気泡モルタルの降伏値とフロー値との関係で、安定した配合と分離傾向の配合を区分して示した。両者は混在しており、気泡ミルクと同様にフロー値のみでは安定性の管理が困難であり、ブリーディングを含めた安定性の確認が必要である。

フロー値は 150~250mm の範囲に入っており、降伏値も 20Pa 程度以上であるため、この範囲で管理すればよいと考えられる。さらに、気泡量とフロー値の関係を示した図-3.4.17 では、起泡剤の種類によりフロー値に差が現れることが認められた。すなわち、タンパク系起泡剤を使用した場合の方がフロー値が 10~30mm 大きくなる傾向にある。こ

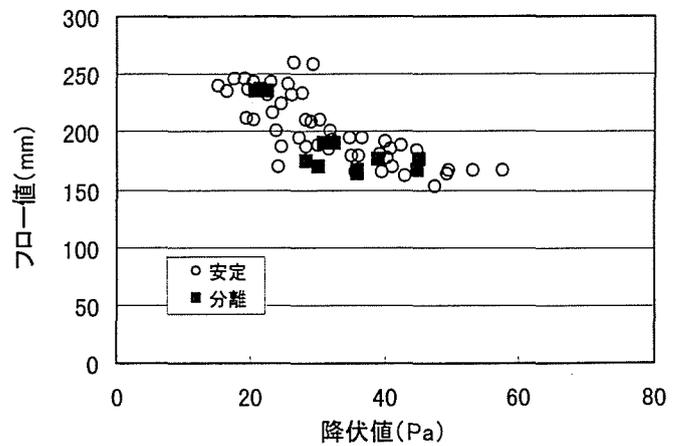


図-5.2.3 気泡モルタルの塑性粘度とフロー値の点も考慮しフロー値の幅を一般に設定されている 180 ± 20 mm よりも大きく設定する。

また、ブリーディングの発生による分離については、施工時の材料ロスになることや単位容積質量が 1g/cm^3 以下の場合、打設した気泡ミルク下部にブリーディング水が溜まることになり、これは表面からの確認ができないため、欠陥として残る可能性もあることから配合試験時に確認しておく必要がある。

また、第4章で気泡ミルクのブリーディング率やブリーディング率測定後の供試体の上下の単位容積質量の差の検討結果から、ブリーディング率は 1% 以下に、単位容積質量の差の変動係数は 5% 以下にする必要があると考えられた。

以上のようにレオロジー特性と安定性を考慮してフロー値の設定を行い、ブリーディングを含めた配合の安定性の確認を配合設計に取り入れることによって適切な配合が選定できると考えられる。

5.3 気泡ミルクおよび気泡モルタルの配合設計

軽量材料を気泡ミルクとするか気泡モルタルとするかは、目標とする単位容積質量および圧縮強度、使用部位（地下水位との関係）、材料の入手の容易さ、現場条件（施工ヤード、打設量）などを考慮して選定する。気泡ミルクは、とくに軽量性が必要な場合に用いられ、気泡モルタルとの使い分けの境界の単位容積質量は図-5.3.1に示すように 0.7g/cm^3 付近である。なお、破線で示した範囲は鋳物質微粉末の併用による場合を示す。

種類	単位容積質量(g/cm^3)										
	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.5	
気泡ミルク	—————										
気泡モルタル		—————									

図-5.3.1 気泡ミルクと気泡モルタル単位容積質量

また、セメント量が多くなると第6章に示すの施工例のように硬化時の内部温度が 90°C を超えることがあるため、大量に打設する場合は単位セメント量を 360kg 程度以下にな

るように配合を選定する。なお、4.4.1.1節に示した方法で推定することができる。

5.3.1 気泡ミルクの配合設計

気泡ミルクとして高炉セメントや普通セメントを用いて安定な配合が得られるのは表-5.3.1に示す配合の場合で、上段に予想強度(材令28日)と単位容積質量、下段に単位セメント量を示した。強度の予想値は高炉セメントB種についての試験結果を基に算定したものであるが、普通セメントの場合は5%程度低い値とすればよい。空欄との境界の配合および気泡量が70%の配合においてはとくに材料分離の有無の確認が必要である。

表-5.3.1 安定な配合が得られる水セメント比と気泡量の範囲と推定物性

W/C (%)	気泡量 (%)						
	10	20	30	40	50	60	70
45	451/1.68 1157	255/1.50 1028	144/1.31 900	81/1.13 771	46/0.95 643	28/0.76 514	15/0.58 386
50	321/1.63	181/1.46 966	102/1.31 846	58/1.10 725	33/0.92 604	18/0.74 483	10/0.57 362
55		133/1.42 911	75/1.31 797	43/1.07 683	24/0.90 570	14/0.72 456	8/0.55 342
60			57/1.31 754	32/1.05 647	18/0.88 539	10/0.71 431	6/0.54 323
65				25/1.02 614	14/0.86 511	8/0.69 409	4/0.53 307
70		強度/密度 セメント量		20/1.00 584	11/0.84 486	6/0.68 389	4/0.52 292
75		圧縮強度 : kgf/cm ² 密度 : g/cm ³ セメント量 : kg/m ³			9/0.83 464	5/0.67 371	3/0.51 278
80						4/0.66 355	2/0.50 266
85						3/0.65 340	2/0.49 255

配合設計のフローを図-5.3.2に示し、配合設計の手順は以下に示すとおりである。

- ① 使用目的、使用部位の設計から定まる単位容積質量および圧縮強度の値を基に表-5.3.2から水セメント比と気泡量を選定する。
- ② 気泡量 (a : %)、水セメント比 (W/C : %) およびセメントの比重 (ρ_c) からセメント量 (C : kg/m³)、水量 (W : kg/m³) を算定する。

$$C = (1 - a/100) / \{(W/C) / 100 - 1/\rho_c\} \quad (5.3.1)$$

$$W = C \cdot (W/C) / 100 \quad (5.3.2)$$

- ③ 気泡量、希釈倍率 (K : 倍)、発泡倍率 (H : 倍) および起泡剤密度 (ρ_k) から起泡剤量 (F : kg) および希釈水量 (W_k : kg/m³) を算定する。

$$F = 1,000 \times (a/100) \times (\rho_k / K (H - 1)) \quad (5.3.3)$$

$$W_k = F \times (K - 1) \times 1/\rho_k \quad (5.3.4)$$

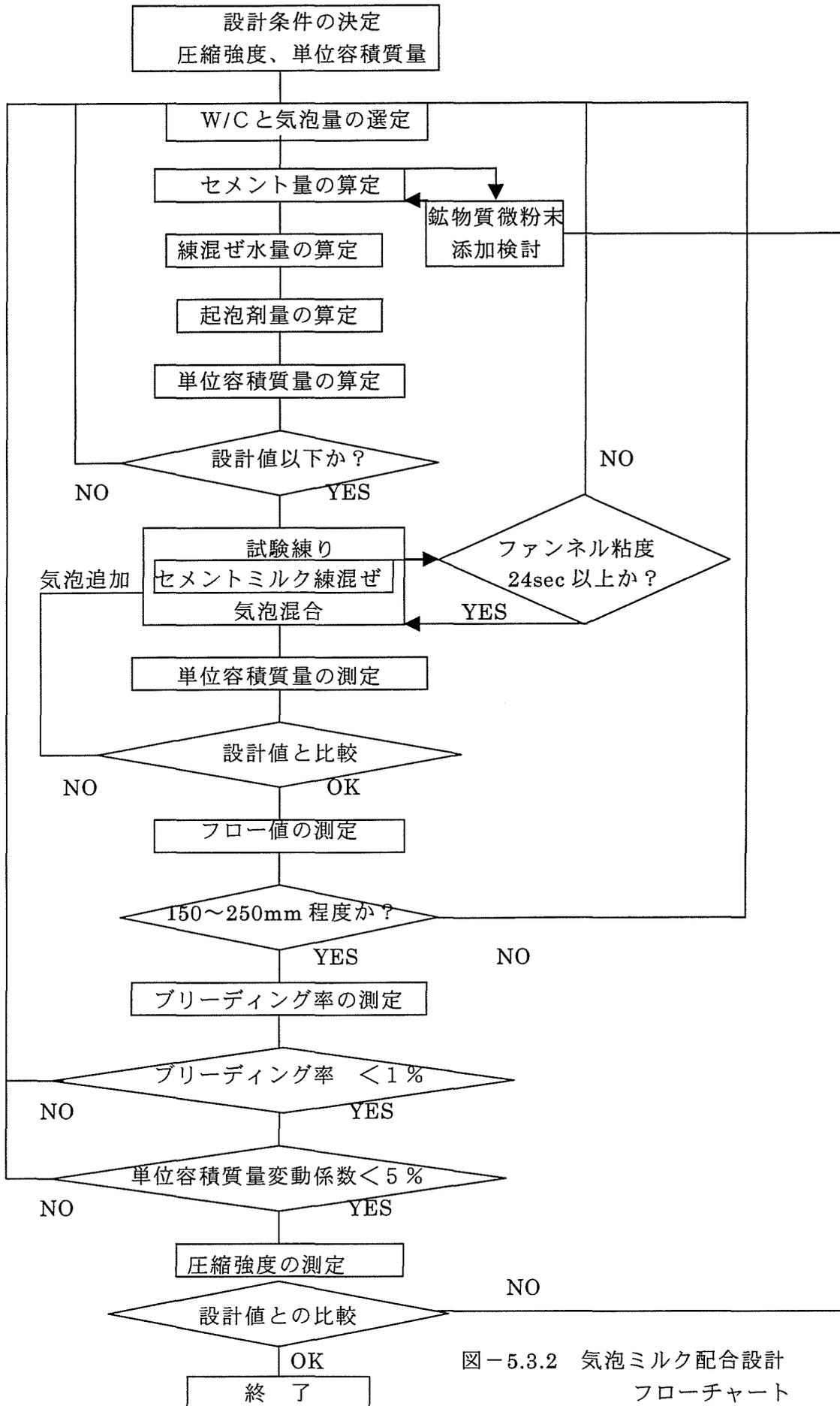


図-5.3.2 気泡ミルク配合設計
フローチャート

④ 単位容積質量 (ρ_k : g/cm³) の算定と設計値との比較

$$\rho_k = C + W + F + W_k \quad (5.3.5)$$

設計値以下であることを確認する。設計値を上回る場合は気泡量またはW/Cを変えて再計算する。

⑤ 試練りによってセメントミルクおよび気泡ミルクを作成する。セメントミルクを練上げた段階でファンネル粘度を測定し 24sec 以上であることを確認する。

気泡ミルクを練混ぜ単位容積質量およびフロー値を測定し、それぞれが目標値を満足していることを確認する。単位容積質量が大きい場合は、消泡している可能性があるので気泡を追加して目標値に合わせる。

次に、土木学会基準「プレパックドコンクリートの注入モルタルのブリーディング率および膨張率試験方法(JSCE-1986)」に準じてビニールチューブ中に気泡ミルクを流込みブリーディングを測定する。

ビニールチューブは直径 6 cm 程度 (折り幅 10cm で直径 6.4cm)、長さ 60~80cm 程度とし、直径の 2 倍の供試体が 5 本とれる長さに縛りしろ 10cm を有するものを用いる。

ブリーディング率が 1 % 以上の場合は W/C を減じて再度試験する。

硬化後の気泡ミルクを上下端を除き直径の 2 倍の長さに切断し 5 本の供試体を作成する。直径および重量を測定し単位容積質量を算定し、変動係数を算出する。変動係数が 5 % 以下を合格とする。

⑥ 圧縮強度試験により目標強度が得られていることを確認する。目標値が得られていない場合は、水セメント比の設定変更あるいは気泡量の変更によって配合を修正する。鉱物質微粉末を使用する場合はセメントとの比を変更して配合を修正する。

5. 3. 2 気泡モルタルの配合設計

気泡モルタルの配合設計に当たっては、3 章のレオロジー特性および 4 章の物性試験結果を考慮して配合を選定する。主な考え方は次の通りである。

(1) 地下水位下に打設する場合で吸水を避けたい場合は、砂率 (S/C) の多い配合を選定する。

(2) 乾燥収縮を考慮する必要がある場合で収縮量を小さくしたい場合は、S/C の大きい配合を選定する。

(3) 粗い砂粒子は分離しやすいので、使用する砂は最大粒径の小さいものを用いる。なお、コンクリート用細骨材の基準を満足している必要はない。

(4) 気泡モルタルの場合、単位容積質量と得られる強度の関係は気泡ミルクの場合と同様であるが、セメント量を少なくすることができるのが特徴である。

気泡モルタルの試験結果から得られた単位容積質量と圧縮強度の関係を表-5.3.2 に示す。表には鉱物質微粉末を用いて低強度を目指す配合も考慮して示した。

表-5.3.2 単位容積質量と圧縮強度の関係

単位容積質量 g/cm ³	圧縮強度 (kgf/cm ²)					
	1	5	10	30	50	100
0.6	◎	○	○	×	×	×
0.8	◎	○	○	○	×	×
1.0	◎	○	○	○	×	×
1.2	◎	○	○	○	○	×
1.4	◎	○	○	○	○	○

◎：鋇物質微粉末使用により可能、○：可能、×：不可能

気泡モルタルは砂を含んでいるために、不安定な配合は早期に砂の沈降が生じると考えられる。このことから分離判定のための簡易な試験の実施を配合設計の流れに組込むこととし、そのフローを図-5.3.3に示し、以下に配合設計手順を示す。

① 砂セメント比の選定

目標単位容積質量 (γ_m) を基に砂セメント比 (S/C) を選定する。選定の目安を表-5.3.3に示す。砂が粗い場合は小さい値を採用する。

表-5.3.3 砂セメント比の選定目安

単位容積質量(g/cm ³)	砂セメント比
1.2~1.5	3~5
1.0~1.2	3~4
0.8~1.0	2~3
0.7~0.8	1
0.7以下	0

② 気泡量の選定

選定した砂セメント比と単位容積質量から気泡を混入しないベースモルタルの単位容積質量を基に空気量 (a : %) を算定する。砂セメント比とベースモルタルの単位容積質量 (γ_{bm}) の目安を表-5.3.4に示す。

表-5.3.4 砂セメント比とベースモルタルの単位容積質量の目安

単位容積質量 γ_{bm} (g/cm ³)	砂セメント比
2.0(1.96~2.04)	5
2.0(1.98~2.04)	4
2.2(2.00~2.05)	3
2.2(1.99~2.05)	2
1.95(1.92~1.99)	1

$$\text{目標気泡量 } a = (\gamma_{bm} - \gamma_m) \gamma_{bm} \times 100 \quad (5.3.6)$$

③ 水セメント比の選定

図-5.3.4 に示す水セメント比と圧縮強度の関係から目標強度が得られるセメント比を選定する。この図はフロー値の管理値の中心値である 200mm とし、普通セメントを用いた試験結果から作成したものである。高炉セメントB種を用いた場合は5%大きい値と考える。

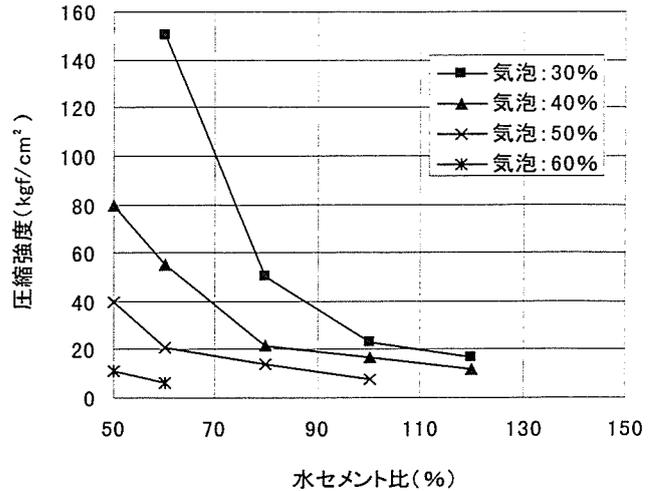


図-5.3.4 水セメント比と強度の関係

④ 配合の計算

気泡量 (a : %)、水セメント比 (W/C : %)、セメントの比重 (ρ_c)、砂セメント比 (S/C) および砂の比重 (ρ_s) からセメント量 (C : kg/m^3)、水量 (W : kg/m^3) および砂量 (S : kg/m^3) を算定する。

$$C = (1 - a/100) / \{(W/C) / 100 + 1/\rho_c + (S/C) / \rho_s\} \quad (5.3.7)$$

$$W = C \cdot (W/C) / 100 \quad (5.3.8)$$

$$S = C \cdot (S/C) \quad (5.3.9)$$

気泡量、希釈倍率 (K : 倍)、発泡倍率 (H : 倍) および起泡剤密度 (ρ_k) から起泡剤量 (F : kg) および希釈水量 (W_k : kg/m^3) を算定する。

$$F = 1,000 \times (a/100) \times (\rho_k / K (H - 1)) \quad (5.3.10)$$

$$W_k = F \times (K - 1) \times 1/\rho_k \quad (5.3.11)$$

⑤ 試練りによりられたフロー値および単位容積質量が所定の範囲に入れば、ブリーディング試験を実施し分離度を確認する。

フロー値および単位容積質量が所定の範囲に入らない場合は表-5.3.5 に従って配合修正する。

表-5.3.5 配合修正方法

品質	修正方法
フロー値が大きい	W/Cを小さくし配合修正する
単位容積質量が大きい	気泡量が足りないので気泡を追加する
強度が低い	W/Cを小さくし配合修正する、気泡量を減らす
ブリーディングが生ずる	W/Cを小さくし配合修正する、気泡量を増やす

⑥ 鉱物質微粉末の利用の検討

配合の修正で気泡モルタルの材料分離を防止できない場合や強度を目標値に合わせるできない場合は、鉱物質微粉末の利用を検討する（第4章4.3節参照）。

砂が粗い場合に材料分離が生じた場合は、砂の一部を鉱物質微粉末で置換する。鉱物質微粉末として碎石微粉末を使用する場合は、フロー値の低下に注意する。

設定した単位容積質量で強度が大きすぎる場合は、セメントの一部を鉱物質微粉末で置換する。この場合石灰質微粉末を用いるとフロー値への影響は小さいが、セメントと鉱物質微粉末の比重差の補正が必要である。

⑦ ブリーディング率および分離度の判定

ブリーディング試験は気泡ミルクの試験で示した方法で行う。ブリーディングは先に示したように欠陥の原因や材料ロスにつながるため、ブリーディング率1%以下となる配合を合格とする。

分離度の判定は、ブリーディング試験を実施した供試体の端部を除いて直径の2倍の長さの供試体を5本作成し、寸法および重量から単位容積質量を算出する。5個のデータを用いた変動係数が5%以下の場合を合格とする。

以上、レオロジー特性や材料分離などを考慮した配合設計法を示した。

本方法の特徴は、以下の通りである。

- ①フロー値は配合の目安として幅広く許容することとした。
- ②フロー値では材料分離の判断が困難であることからブリーディング率と単位容積質量の変動率を材料分離の判断基準とした。
- ③鉱物質微粉末の利用を取り入れたことによって幅広い目標値に対応した配合選定ができるようになった。
- ④決定した配合の気泡ミルクあるいは気泡モルタルを打設する際の最高温度の推定方法を示した。

本配合設計法により、様々な使用目的に合わせた気泡ミルクおよび気泡モルタルの配合設計が可能となると考えられる。

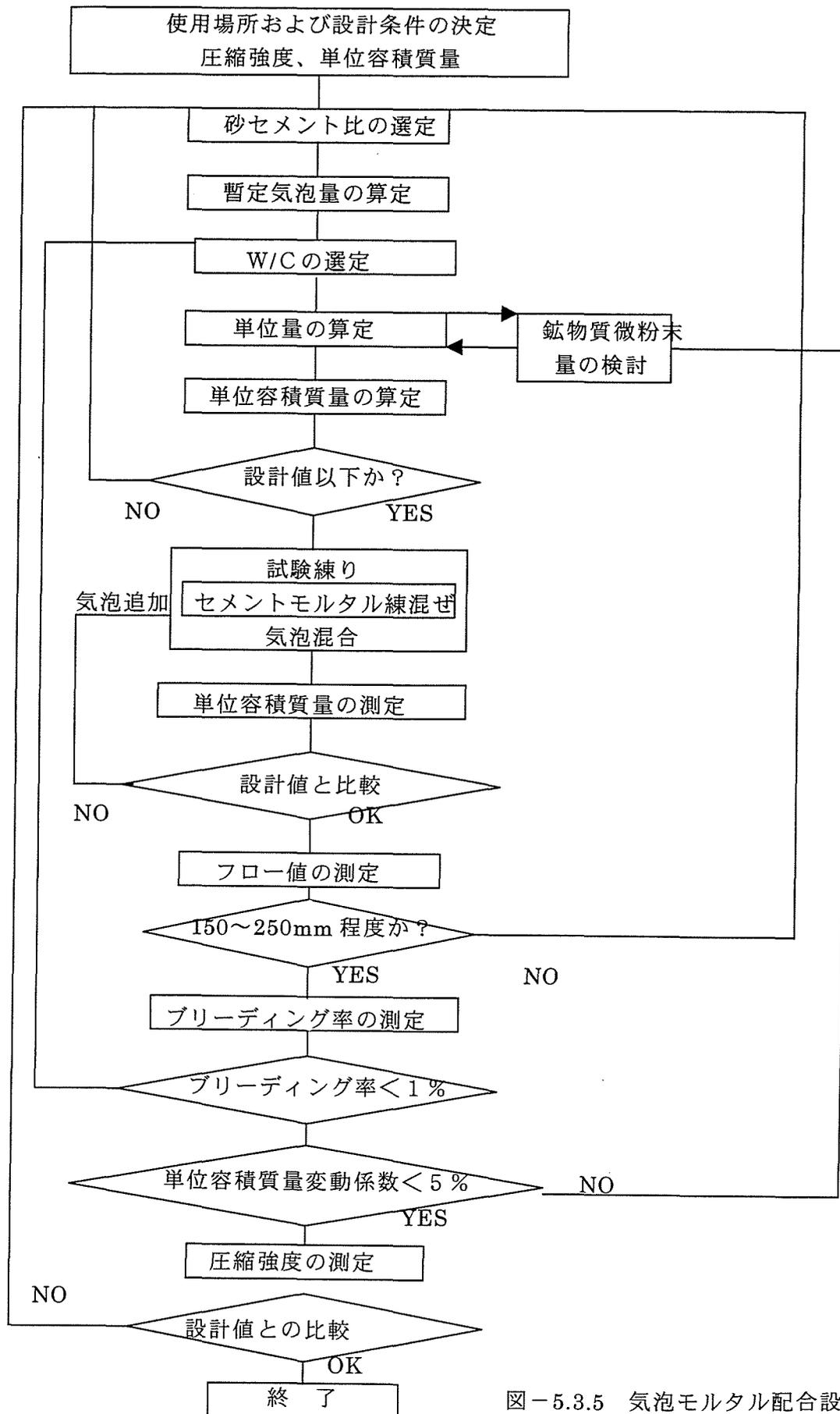


図-5.3.5 気泡モルタル配合設計
フローチャート

第6章 施工時の気泡ミルクおよび気泡モルタルの 品質と挙動

6. 1	概 論	130
6. 2	気泡モルタルの圧送性に関する検討	130
6.2.1	実験概要	130
6.2.2	圧送時の気泡モルタルの品質	133
6.2.3	気泡モルタルの圧送時の管内圧力	134
6. 3	気泡ミルク施工時の品質変動と施工後の挙動	137
6.3.1	調査概要	137
6.3.2	施工時の品質変動	138
6.3.3	硬化した盛土の品質	141
6.3.4	硬化時の盛土内温度	143
6. 4	軌道路体盛土に用いた気泡モルタルの挙動	145
6.4.1	盛土の概要	145
6.4.2	調査概要	146
6.4.3	打設時の挙動	148
6.4.4	計測値の経時変化	150
6.4.5	列車走行時の挙動	154
6.4.6	課 題	155
6. 5	第5章の結論	156
	第5章参考文献	158

第6章 施工時の気泡ミルクおよび気泡モルタルの品質と挙動

6.1 概論

気泡を混合したセメントミルクやモルタルは、その流動性や軽量性を生かし充填材料や軽量盛土材料として使用例が増加しており、最近でも多くの施工事例の報告がなされている。3, 4章では気泡ミルクおよび気泡モルタルのフレッシュな状態での特性や物性を室内試験で検討した結果について述べてきた。5章では室内での検討結果を基に、気泡モルタルおよび気泡ミルクの配合設計法を提案した。さらに、これらの材料の建設材料としての有用性を検討する上では、実際の施工時の品質や物性ならびに硬化過程や硬化後の挙動を把握しておくことが重要である。

本章では、施工時の圧送を想定した室内試験において加圧、減圧の繰返しや振動により気泡モルタルの分離が進む可能性があることが判明した。このため、圧送条件と材料分離の状況や圧送抵抗など施工計画に関連するデータを得るために実機を用いた圧送実験を実施した。また、レオロジー特性値の検討において分離抵抗性の点でも望ましい配合の気泡ミルクの施工時のフレッシュな状態での品質や硬化後の品質変動について調査した。さらに、硬化過程の気泡ミルク内部の温度の測定結果を示し、検討課題を示した。また、鉄道盛土として用いられた気泡モルタルの打設後の計測を実施した結果に基づいて気泡モルタル盛土の挙動を考察し、設計に関する知見を示した。これらの結果を踏まえて気泡ミルク、気泡モルタルの建設材料としての評価を試みた。

6.2 気泡モルタルの圧送性に関する検討

気泡モルタルの特徴の一つは、圧送抵抗が小さく長距離のポンプ圧送が可能な点である。しかしながら、3章で示したように加圧、減圧の繰返しや振動により気泡モルタルが分離することが明らかになったが、実際の圧送でどのような現象が生じるかを把握しておく必要がある。また、気泡モルタルの圧送性に関する試験データは公表されたものがなく実情が把握されていない。そこで、2種類の配合の気泡モルタルを用い径や材質の異なる配管あるいはホース中を圧送する試験を実施し、圧送前後の気泡モルタルの品質や圧送中の配管内の圧力変化を測定しすることにより検討した。

6.2.1 実験概要

1) 使用材料

実験に用いた材料は、普通ポルトランドセメント、海砂、石灰質微粉末、タンパク系起泡剤および水道水で主な性質を表-6.2.1に示す。

表-6.2.1 使用材料の物性

材料名	比重	粒度特性	
普通ポルトランドセメント	3.15		○社製
海砂（瀬戸内産）	2.54	F.M.:2.73	
石灰質微粉末	2.73		○社製
起泡剤（動物タンパク系）	1.18		プロフォーム（N商会製）

2) 使用機材

気泡モルタルの製造および圧送試験に用いた機材を、表-6.2.2 に示す。

表-6.2.2 使用機材の仕様

機 材 名	仕 様	数 量	用 途	備 考
アジテータトラック	4.5 m ³	1	モルタル運搬・気泡混合	
コンクリートポンプ車	Max. 60 m ³	1	4 in.管圧送用	スクイズ式
モルタルポンプ	Max. 6 m ³	1	2 in.管圧送用	スクイズ式
グラウトミキサ	200 リットル×2	1	石灰粉スラリー混合用	
流量計	2 in.圧力補正付	1	流量測定用	気泡モルタル用
グラウトホース	2 in.×10 m	8	配管用	
塩ビパイプ	2 in.×4 m	10	配管用	
鋼製圧送管	4 in.×3 m	25	配管用	
曲がり管	60°、90°	2	配管用	
塩ビパイプ	4 in.×4 m	10	配管用	
圧力計(ひずみゲージ式)	Max.10kgf/cm ²	8	管内圧力検出用	T社製
静ひずみ計	TDS-301	1	管内圧力記録用	T社製

3) 気泡モルタルの製造と圧送方法

気泡モルタルの製造は表-6.2.3 の配合を目標とし以下の方法で製造した。気泡モルタルは、気泡を除いたベースモルタルを、特殊モルタルはグラウトミキサで練り混ぜた石灰質微粉末スラリーと気泡を除いたベースモルタルを生コンクリート工場で製造し、アジテータトラックで試験ヤードに搬入した。試験ヤードでは発泡器を用いて発生させた気泡や石灰質微粉末スラリーを所定量アジテータドラム内に投入し、ドラムを高速回転させて混合して気泡混合材料を製造した。各ベースモルタルと石灰質微粉末スラリーの配合と混合比を表-5.3.4 に示す。

表-6.2.3 気泡モルタル用ベースモルタルの配合

種 類	S / (C+F)	W / (C+F)	単 位 量(kg/m ³)				気 泡 量 (%)	フロ ー値 (mm)	単 位 体 積 重 量 (g/cm ³)
			C	W	S	F			
気泡モルタル	3.5	1.05	219	230	767	-	40	200	1.228
特殊気泡モルタル	2.0	0.7	197	230	658	132	40	± 20	1.229

表-6.2.4 気泡モルタル用ベースモルタルの配合

種類	S/C	W/C	単体量 (kg/m ³)				1m ³ 中の比率
			C	W	S	F	
気泡モルタル用	3.5	1.05	362	380	1268	-	0.6
特殊気泡モルタル用	3.3	0.77	414	317	1382		0.13
石灰質微粉末スラリー	-	0.6		622		1038	0.47

練り上がった気泡モルタルを採取し、フロー値および単位体積重量を測定した。採取位置と時期は、アジテータから排出時、配管筒先（初期、終了前）とした。気泡モルタルの圧送は、スクイズ式モルタルポンプおよびコンクリートポンプ車により実施し、圧送量を変化させて配管内の圧力を測定した。配管は実験棟の周辺に行い状況を図-6.2.1に示す。

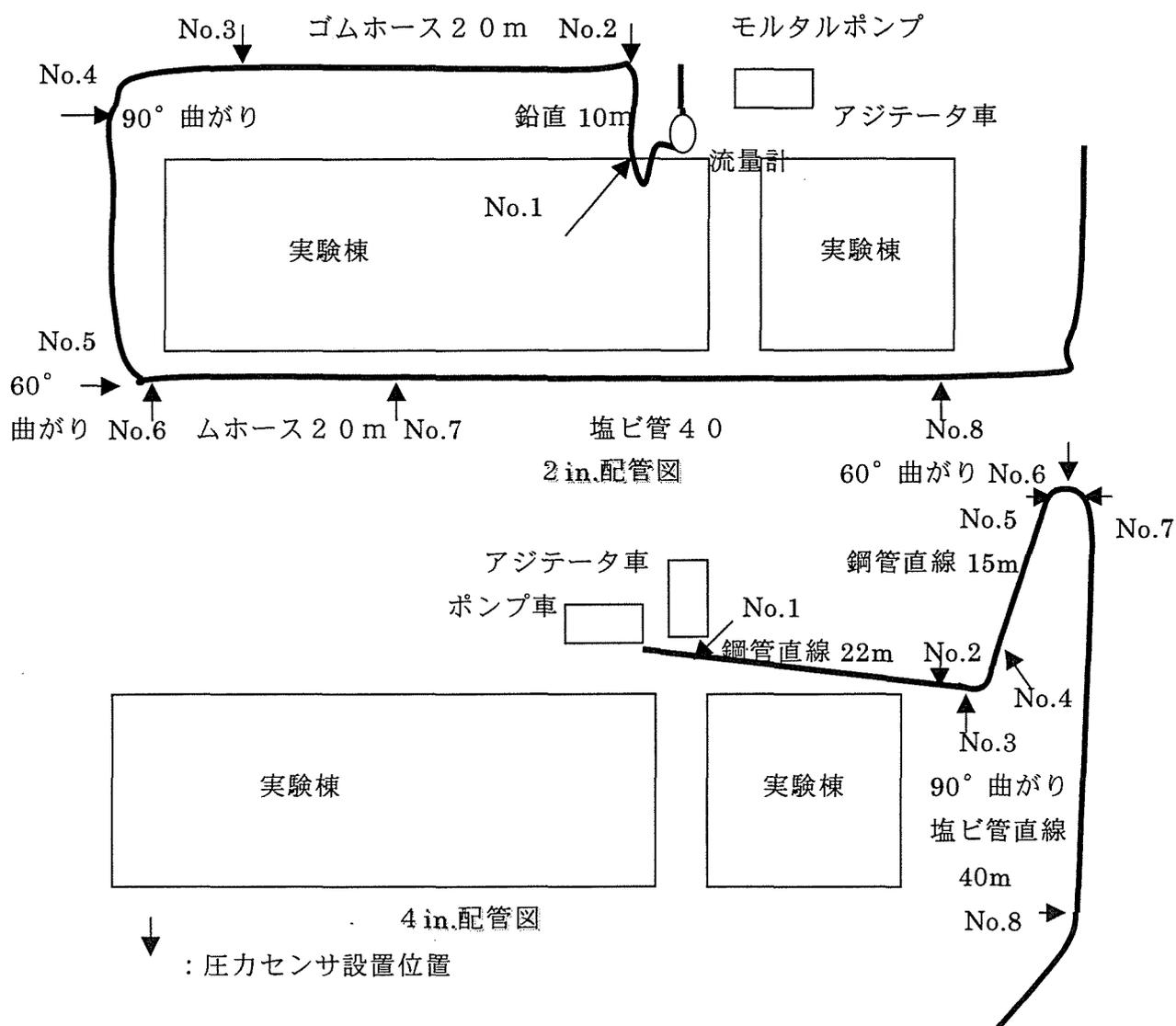


図-6.2.1 配管状況図

6. 2. 2 圧送時の気泡モルタルの品質

実験時に採取した気泡モルタルの性状を表-6.2.5 に示す。

目標値をややはずれた値もあるが、おおむね目標値を満たしている。

表-6.2.5 気泡モルタルの性状

管径 インチ	気泡モルタルの種類	圧送量 (m ³ /h)	アジテータ排出時 (圧送前)		配管筒先 (圧送後)	
			フロー値 (mm)	単位体積重量 (g/m ³)	フロー値 (mm)	単位体積重量 (g/m ³)
2	気泡モルタル (Aタイプ)	21.6	166×170	1.19	172×180	1.11
		31.5	165×161	1.26	164×163	1.15
	特殊気泡 モルタル (Bタイプ)	33.3	159×160	1.26	169×169	1.20
		35.1	169×169	1.25	166×166	1.21
4	気泡モルタル (Aタイプ)	14.1	168×168	1.17	211×218	0.74
		28.2	177×175	1.16	186×183	1.07
		45.1	170×171	1.18	182×178	1.17
	特殊気泡 モルタル (Bタイプ)	14.1	172×172	1.19	213×215	1.09
		29.6	172×171	1.22	194×198	1.24
		46.5	181×181	1.21	168×171	1.27

圧送前後のフロー値、単位容積質量の関係を図-6.2.2 および図-6.2.3 に示す。フロー値は、2インチのホースの場合は比較的变化が少ないが、4インチ配管の場合は圧送後に増加する傾向がある。久野ら⁶⁻¹⁾は気泡混合土で同様の現象を報告している。図中のAタイプは気泡モルタル、Bタイプは特殊気泡モルタルである。凡例は管径、気泡モルタルの種類の順に示してある。

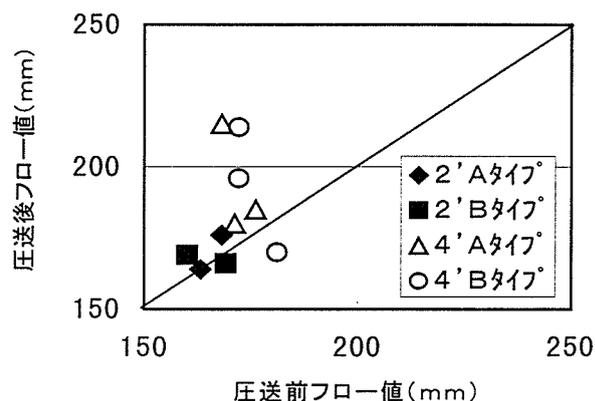


図-6.2.2 圧送前後のフロー値

単位容積質量は、全体としてはやや低下する傾向にあるがBタイプ^oの砂の一部置換した特殊気泡モルタルの方の変化が小さい。

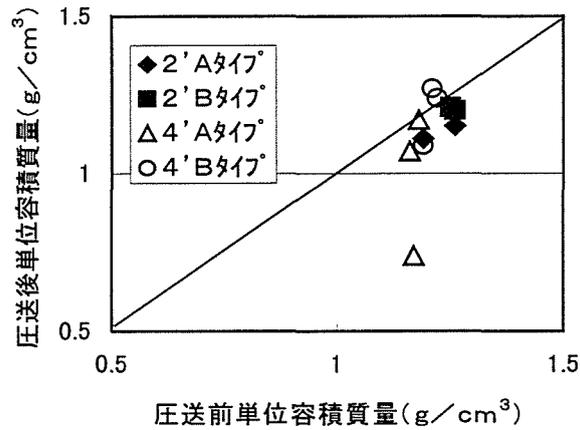


図-6.2.3 圧送前後の単位容積質量

図-6.2.4には管内の流速と特性値の変化の関係を示す。フロー値、単位容積質量とも管内流速が低い範囲では変化が大きく1.5m/sec以上になると変化が小さくなる傾向にあり、流速が小さいと砂を含んだ気泡モルタルでは砂の沈降などが発生している可能性がある。したがって、圧送を計画する際には、流速に配慮してホースやポンプを選定する必要があると考えられる。図中の ρ はフロー値を、 ρ は単位容積質量を示す。

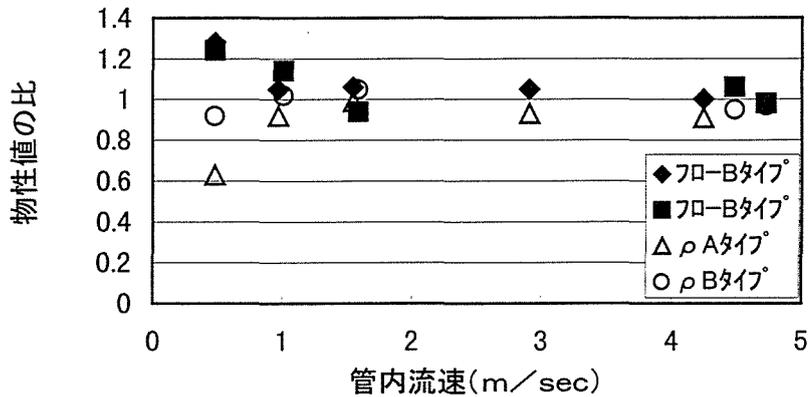


図-6.2.4 管内の流速とフロー値、単位容積質量の変化の関係

6. 2. 3 気泡モルタル圧送時の管内圧力

気泡モルタルを圧送する際の2インチおよび4インチの各配管系の管内圧力は、スクイズポンプのローターの回転に伴い脈動する結果が得られている。最大値と最小値の平均を各地点の圧力として整理した結果を表-6.2.6、6.2.7に示す。

表-6.2.6 2インチ系での管内圧力

気泡モルタルの種類	圧送量 (m³/h)	圧力センサの圧力 (kgf/cm²)							
		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8
気泡モルタル	21.6	8.8	10.1	9.3	8.6	8.2	7.7	6.8	4.9
	31.5	13.0	13.7	12.1	11.2	10.5	9.9	8.8	5.8
特殊気泡モルタル	33.3	12.2	13.4	12.1	11.3	10.2	9.5	8.5	5.7
	35.1	12.8	13.6	12.7	11.9	10.7	10.2	9.1	6.3
センサ間の配管		鉛直下向き 10m	ゴム水平直線 20m	90° 曲げ	ゴム水平 15m	60° 曲げ	ゴム直線 20m	塩ビ直線 40m	

表-6.2.7 4インチ系での管内圧力

気泡モルタルの種類	圧送量 (m³/h)	圧力センサの圧力 (kgf/cm²)							
		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8
気泡モルタル	14.1	3.3	3.1	3.2	3.0	2.4	2.4	2.4	1.3
	28.2	3.3	3.2	3.2	3.0	2.4	2.4	2.4	1.3
	36.7	3.6	3.3	3.4	3.3	2.6	2.6	2.6	1.3
	45.1	3.8	3.4	3.5	3.3	2.6	2.6	2.7	1.4
特殊気泡モルタル	14.1	3.4	3.0	3.1	3.0	2.3	2.3	2.4	1.3
	29.6	3.5	3.0	3.1	3.0	2.3	2.3	2.4	1.3
	33.8	3.7	3.2	3.1	3.0	2.3	2.3	2.4	1.3
	46.5	3.9	3.4	3.5	3.3	2.5	2.5	2.6	1.4
センサ間の配管		鋼管直線 22m		90° 曲げ	鋼管直線 15m	60° 曲げ		塩ビ直線 40m	

以上の結果から算出した各部での圧力損失を表-6.2.8、6.2.9に示す。

表-6.2.8 2インチ管系での圧力損失

気泡モルタルの種類	圧送量 (m³/h)	圧力損失 (kgf/cm²/m)			圧力損失 (kgf/cm²)	
		ゴムホース直線部	ゴムホース降下部	塩ビ管直線部	90° 曲がり部	60° 曲がり部
気泡モルタル	21.6	0.04 0.05		-0.14	0.05	0.34 0.14
	31.5	0.08 0.06	0.07	-0.07	0.08	0.34 0.04
特殊気泡モルタル	33.3	0.07 0.05	0.06	-0.13	0.07	0.32 0.22
	35.1	0.05 0.06	0.06	-0.09	0.07	0.36 0.06

表-6.2.9 4インチ管系での圧力損失

気泡モルタルの種類	圧送量 (m ³ /h)	圧力損失 (kgf/cm ² /m)		圧力損失 (kgf/cm ²)	
		鋼管直線部	塩ビ管直線部	90°曲がり部	60°曲がり部
気泡モルタル	14.1	0.01 0.03	0.02	0.03	0.15 0.0
	28.2	0.01 0.03	0.02	0.03	0.15 0.0
	36.7	0.02 0.03	0.03	0.03	0.15 0.0
	45.1	0.02 0.03	0.03	0.03	0.20 0.00
特殊気泡モルタル	14.1	0.03 0.03	0.03	0.03	0.10 0.0
	29.6	0.03 0.03	0.03	0.03	0.10 0.0
	33.8	0.03 0.03	0.03	0.03	0.10 0.0
	46.5	0.03 0.04	0.04	0.03	0.20 0.0

いずれの気泡モルタルの場合も圧送量が増加するとわずかに圧力損失が増加する傾向も見られるが、変化がわずかであるためはっきりとしたことは言えない。そこで管内平均流速と各管の直線部での圧力損失との関係を図-6.2.6に示す。この図からは気泡モルタルのフロー値がほぼ同じであるためと考えられるが、配合の違いや管材質の影響は明確でなく管内平均流速と線形関係が認められる。これは、森永のコンクリートに関する実験結果⁶⁻²⁾や村田、鈴木グラウトに関する実験結果⁶⁻³⁾と同様の傾向の結果が得られている。

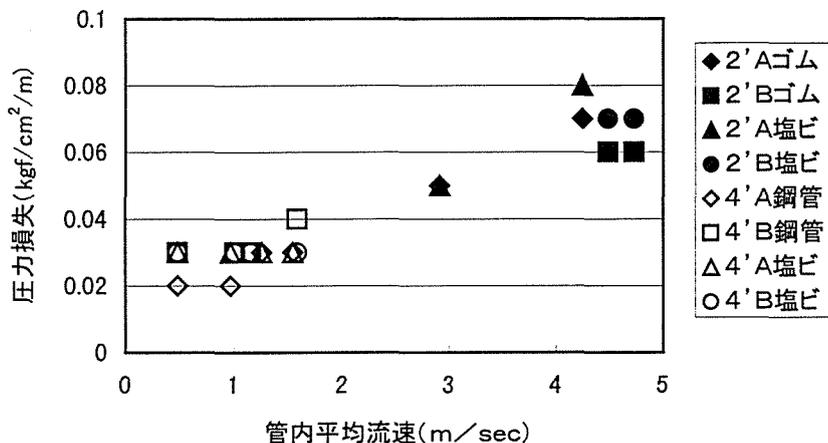


図-6.2.6 管内平均流速と直線部での圧力損失との関係

また、2インチ配管合計長約130mの場合にポンプの最大吐出圧力は13~14kgf/cm²であり、4インチ配管約100mの場合の最大吐出圧力は3.9kgf/cm²であった。いずれもポンプの能力には余裕があり、さらに長距離の圧送が可能であることが伺える。

6. 3 気泡ミルクの施工時の品質変動と施工後の挙動

第3章、では気泡ミルクのレオロジー特性、ブリージング特性を検討し安定な配合としては水セメント比が80%程度（好ましくは60%）以下、気泡量が70%以下であることを示した。この範囲内の配合の気泡ミルクを大量に打設する場合に安定な品質の気泡モルタルが打設できることを確認しておく必要がある。そこで、W/C=58%、気泡量68.5%の気泡ミルクを打設する際の品質を調査し安定性を検証することとした。また、打設後の硬化過程での硬化体内部温度や硬化後の品質についても調査し⁵⁻⁴⁾ ⁵⁻⁵⁾ ⁵⁻⁶⁾、得られた知見を整理した。

6. 3. 1 調査概要

気泡ミルクは関西空港の人工島内の道路の高架部と地上部のすり付け部の盛土のコア部に打設され、規模の大きい断面は最大高さ3.25m、最大幅16.0m、長さ30.9mで気泡ミルク打設量は約1,100m³であった。気泡ミルクは施工現場に設置したセメントミルクプラント、気泡発生装置、気泡混合用連続ミキサにより製造され、スクイズ式ポンプ車で圧送打設された。

1) 使用材料

施工に用いられた材料は、高炉セメントB種砂、動物タンパク系起泡剤、水道水および海水で主な物性を表-6.3.1に示す。

表-6.3.1 使用材料の主要物性

材料名	比重	比表面 (cm ² /g)	備 考
セメント	3.05	3,750	高炉セメントB種（O社製）
起泡剤	1.13	—	タンパク系起泡剤プロフォーム(N商会製)
水道水	1.00	—	気泡剤希釈用
海 水	1.03	—	セメントミルク練り混ぜ用

2) 施工機械

施工には現地プラントを設置し、気泡ミルクの製造および打設を実施した。用いた機械を表-6.3.2に示す。

表-6.3.2 気泡ミルク製造用主要機材

名 称	仕 様	数 量	備 考
セメントサイロ	30トン	1	計量器付縦型
水槽（大、小）	20, 5 m ³	1	海水貯留用,水道水貯留用
スラリープラント	1.5 m ³ 練り	1	半自動式 3 m ³ アジテータ付
気泡製造機	30 m ³ /h	1	コンプレッサ 2 m ³ /hを含む
連続練りミキサ	30 m ³ /h	1	単軸攪拌翼式
ポンプ車	60 m ³ /h	1	スクイズポンプ4トン車
グラウトポンプ	20 m ³ /h	1	インバータ付
発電機	200 KVA	1	ディーゼル
気泡モルタル用流量計	600 l/min	1	圧力補正機構付、2インチ
水中ポンプ	200V	1	海水汲み上げ用
給水車	4トン車	1	起泡剤希釈用水道水運搬用

3) 気泡ミルクの配合と製造および打設

工事に使用した気泡ミルクの配合を表-6.3.3に示す。また、気泡ミルク製造方法は、現地プラント方式で、スラリープラントで混合したセメントミルクと発泡装置で製造した気泡を一定量ずつミキサに供給し連続的に製造する方法とした。練り混ぜた気泡ミルクは直接コンクリートポンプ車のホッパーに排出し4in.鋼管配管を經由して分岐し2本の2in.ホースを通して圧送した。また、施工時の品質管理基準は表-6.3.4に示した。

表-6.3.3 気泡モルタルの配合

W/C (%)	単 位 量 (kg/m ³)			気泡量 (%)	フロー値 (mm)	単位容積質量(t/m ³)
	セメント	水	起泡剤			
58	360	209	2.04	65.3	200±20	0.589

表-6.3.4 品質管理基準

単位容積質量 (t/m ³)	フロー値 (mm)	圧縮強度 (材令 28 日) (kgf/cm ²)
0.6 以下	180±20	10 以上

4) 調査項目および方法

調査項目は工事管理のために一般品質管理試験の他に、製造する気泡ミルクの品質変動、打設された気泡ミルクの硬化過程における温度変化および硬化後の気泡ミルクの強度であった。先に示した品質管理基準とともに各試験方法の概要を表-6.3.4に示す。

表-6.3.4 調査試験方法

試験名	試験項目	試験方法	頻度等
一般品質管理試験	単位容積重量	重量測定法	一日1回以上
	フロー値	JHS-117準拠	
	圧縮強度	JIS A 1126準拠	
品質変動調査	単位容積重量	重量測定法	ミキサ出口 10 分間隔 15 回、ポンプ圧送先 30 分間隔 5 回
	フロー値	JHS-117準拠	
	圧縮強度	JIS A 1126準拠	
硬化体コア試験	圧縮強度	コアカッターによる採取	12本
	単位容積重量	JIS A 1126準拠	
温度調査	温度	熱電対による測定 (盛土内 8 点)	約 2 ヶ月間

6.3.2 施工時の品質変動

(1) 品質管理試験

管理試験として採取した供試体の単位容積質量と圧縮強度の関係を図-6.3.2に示す。単位容積質量と圧縮強度に与える影響は大きく、単位容積質量が小さい場合に圧縮強度が小さくなる傾向が顕著である。このことから、所定の強度を得るためには単位容積質量の下限値も管理する必要があると考えられる。

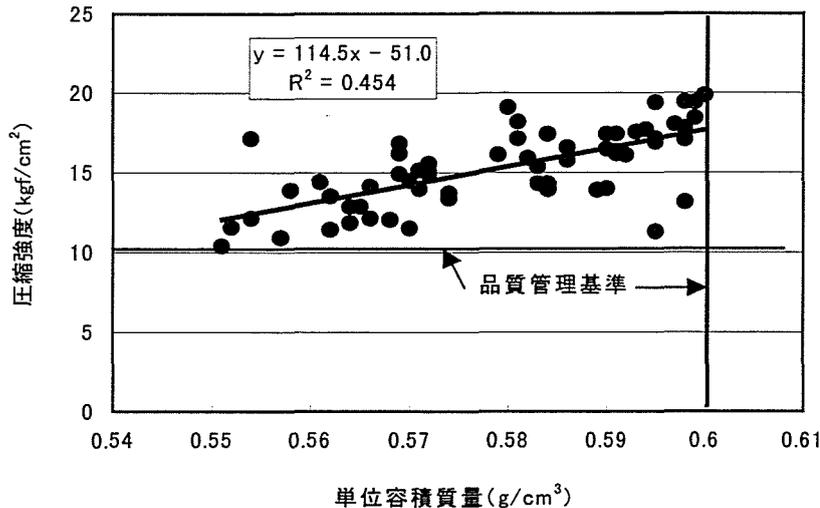


図-6.3.2 単位容積質量と圧縮強度の関係

(2) 混合精度と圧送の影響

1) 試験方法

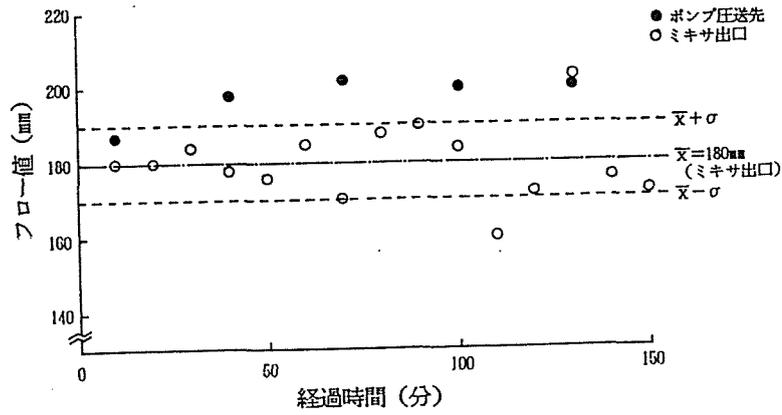
気泡ミルクの製造は、バッチごとに練って作るセメントミルクをグラウトポンプで定量供給するところへ発泡器で連続的に気泡も供給し、それらを連続ミキサで混合して製造した。このような製造方法での精度と圧送による変動を調査するための試験を3時間にわたって実施した。調査方法の詳細は以下のとおりであった。

- ① 連続ミキサの出口において10分間隔で15回のサンプリングを行った試料を用い、フロー値、単位容積質量および圧縮試験用供試体を作成した。
- ② 圧送ホース先端において30分間隔で5回のサンプリングをし同様の試験を実施した。この場合、ミキサ出口で採取した試料がホース先端へ到達すると考えられる時間を考慮して採取した。
- ③ 圧縮試験用供試体は密封状態で室温養生し、材令28日で圧縮試験を実施する。

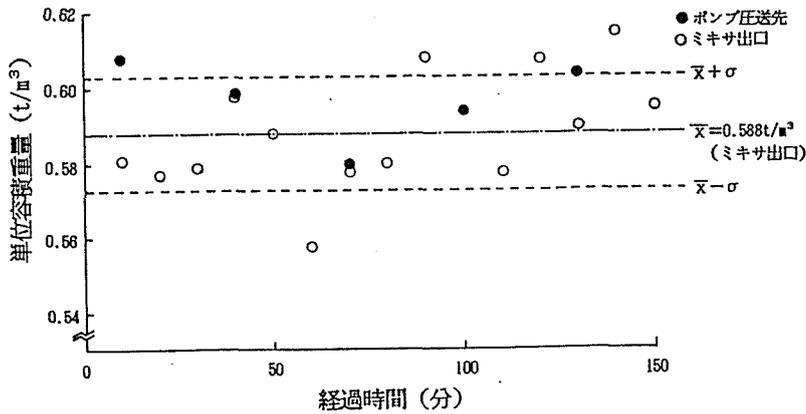
2) ミキサ出口の試料の品質

ミキサ出口で採取したフレッシュな試料のフロー値および単位容積質量の経過時間ごとの変化を図-6.3.3に示した。フロー値は平均180mmと目標値の中心値でばらつきも比較的小さく良好な状態であった。単位容積質量も配合から計算される値とほぼ同じ平均値が得られ変動も比較的小さかった。これらの結果から採用した連続混合方式で安定した気泡ミルクが製造できることが確認された。

フロー値はほとんどの試料でホース先端の方が大きな値を示しており、6.2節の気泡モルタルの圧送試験結果や久野らの結果⁶⁻¹⁾と同様な傾向にあった。この原因は、ポンプの圧送圧力により不安定な気泡が消えるためであるとの考えもあるが、さらに詳細な調査が必要である。単位容積質量はフロー値ほど明確でないが5回のうち4回が増加する傾向にある。これもフロー値増加の要因となっている可能性がある。



a) フロー値の変化



b) 単位容積質量の変化

図-6.3.3 フレッシュな気泡ミルクの経過時間と品質

作成した供試体を 28 日間密封養生したのちの単位容積質量および圧縮強度と採取時間との関係を図-6.3.4、6.3.5 に示した。

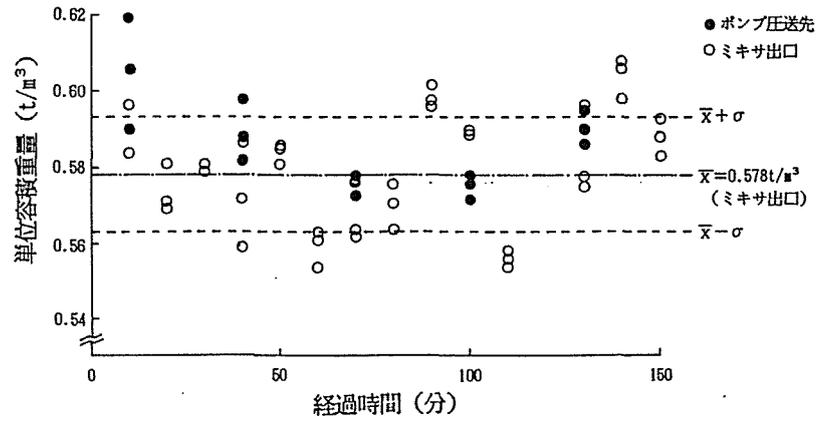


図-6.3.4 硬化後の供試体の単位容積質量の変化

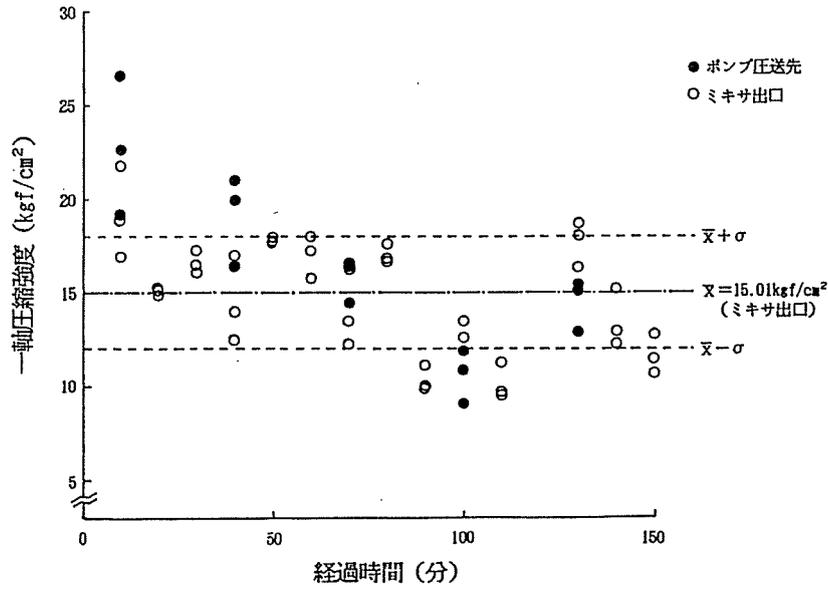


図-6.3.5 硬化後の供試体の圧縮強度の変化

単位容積質量の平均値はフレッシュ時よりもわずかに減少し、一方、圧縮強度は 10～23kgf/cm² の範囲にあり平均値は 15kgf/cm² であった。

6. 3. 3 硬化した盛土の品質

硬化後の気泡ミルクの品質、特に震度方向の品質と打ち継ぎ目での品質を調査する目的で盛り土側面からコアを採取した。コア採取位置を図-6.3.6 に示す。コアは含水比の変化をさけるため水を用いずに採取し、単位容積質量、含水比および圧縮強度を測定した。打設高さごとの各測定値を図-6.3.7 に示した。単位容積質量については、まだ固まらない状態および硬化後の供試体に比べて、全体に大きい値となった。これは気泡ミルクの硬化が終了するまでに自重 (0.03kgf/cm²) により気泡が圧縮されたためであると考えられる。しかし、盛り土高さと単位容積質量が比例的に増加しなかった。これは、1日の打設高さを 50cm にしたことと翌日には人間の歩行が可能になる程度 (0.5～1.0kgf/cm²) に硬化していたことから盛り土高さの影響を直接受けることがなかったと考えられる。

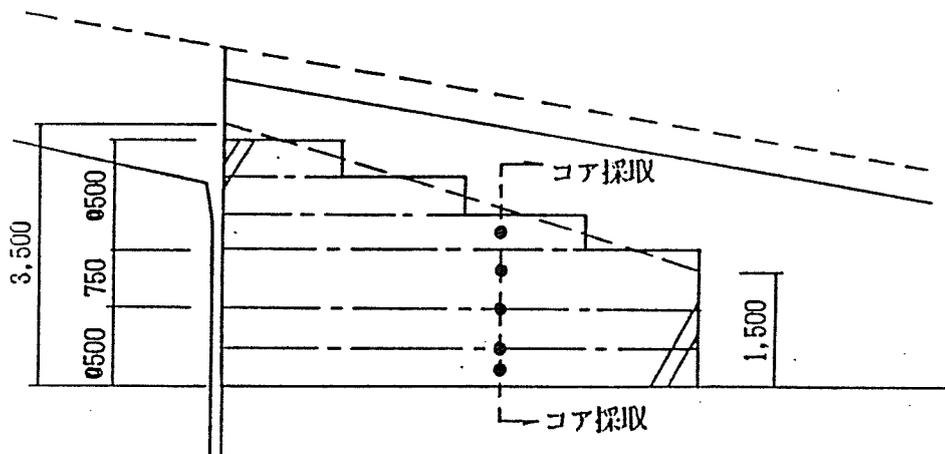
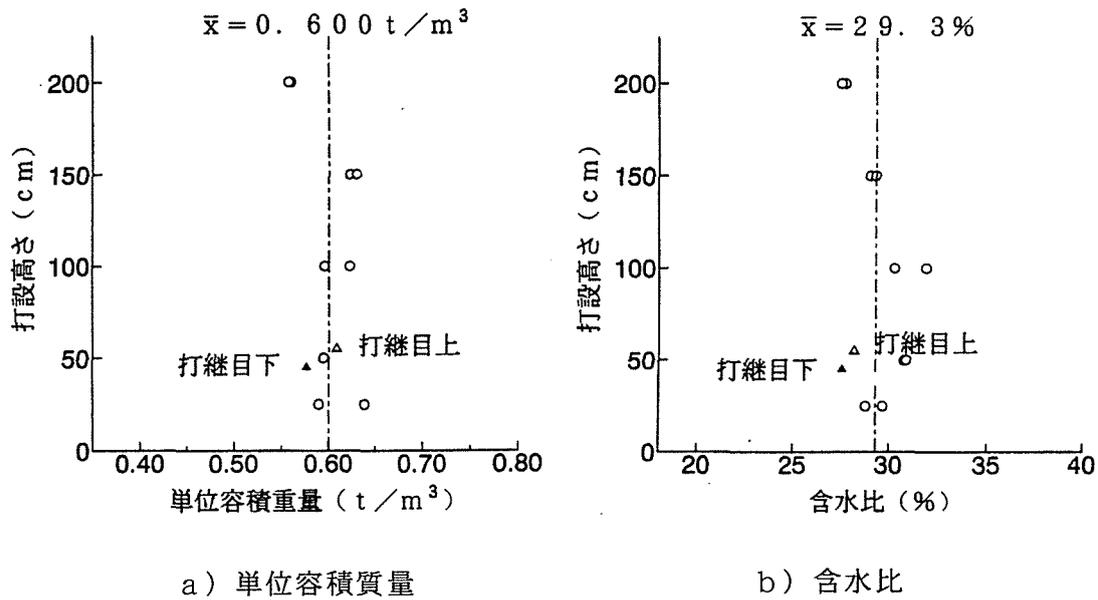
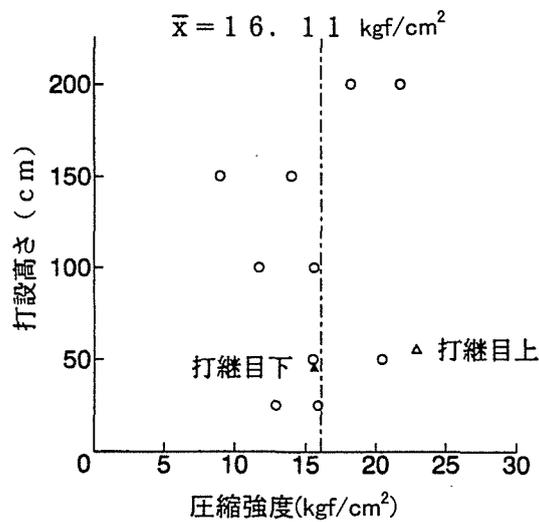


図-6.3.6 コアの採取位置



a) 単位容積質量

b) 含水比



c) 圧縮強度

図-6.3.7 盛り土高さやと気泡モルタルの物性

含水比の盛り土高さ方向の分布についても特に傾向は見られず 27.5~31.9%の間に分布した。

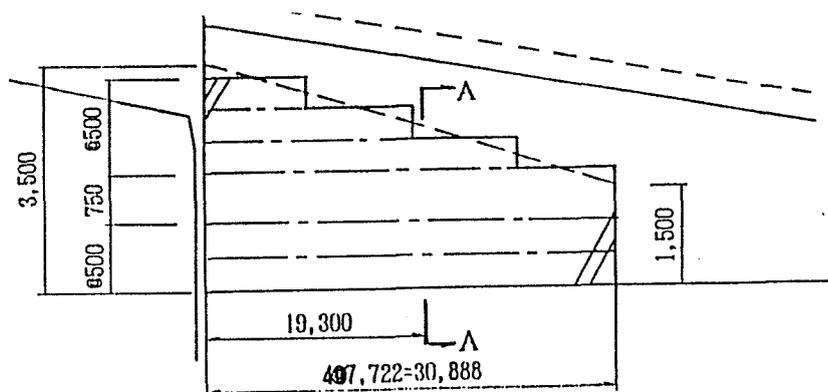
圧縮強度の高さ方向の分布についても特に傾向は見られないが、供試体の強度に比べて平均値で $1 kgf/cm^2$ 程度高くなった。これは、外気温で養生した供試体に比べ盛り土内の温度が高かった可能性が考えられる。

打ち継ぎ面の上下における品質の違いについては、打ち継ぎ目の上のコアの単位容積質量が $0.03 t/m^3$ 程度大きかった。これは先に述べたように打ち継ぎ目の上は打設した気泡ミルクの自重により気泡が圧縮されるが、打ち継ぎ目下ではある程度硬化が進んでから新たな気泡ミルクが打設されるためと考えられる。また、打ち継ぎ目の上下で含水比にはほとんど差がないことから、打ち継ぎ目での水分移動はなかったものと考えられる。

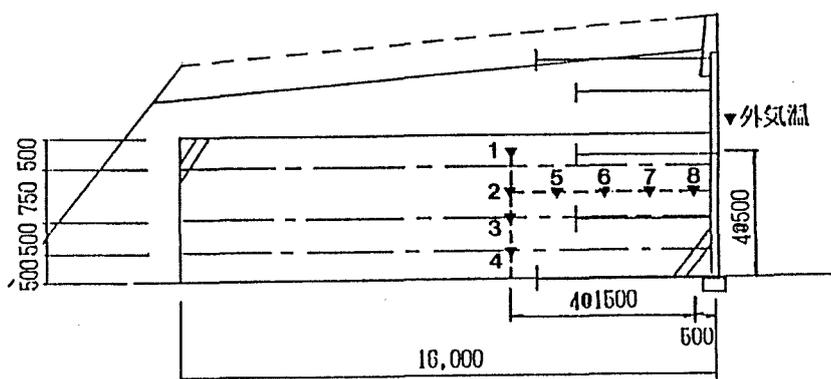
6. 3. 4 硬化時の盛土内温度

1) 測定方法

気泡ミルクは単位セメント量が 360 kg であるうえ気泡を多量に含むことから熱伝導率が小さいため内部温度が上がりやすいことが考えられた。このため施工した盛り土内部の温度がどのような状態にあるかを調査するために断面内に熱電対を配置して打設前から約 2 ヶ月間温度を測定した。熱電対の設置位置を図-6.3.8 に示した。



縦断面



横断面

図-6.3.8 熱電対の設置位置

2) 測定結果

表-6.3.5 に各測点の最高温度を示し、図-6.3.9 に温度の経時変化を示した。測点 No. 4 の最高温度が 68.0℃と低いのは温度のピークが現れると考えられる打設後 30~70 時間の間が発電機の停止によりデータが得られなかったためである。また、No. 1 の最高温度が 68.6℃と低いのは地表面から 25cm の位置であるため地面に熱が吸収されたためであると考えられる。他の測点の最高温度はすべて 80℃以上で中でも測点 No.7,8 は 96.4℃に達している。このため埋設物を事前に設置する場合はこの点を考慮する必要がある。

表-6.3.5 各測点の最高温度

測点 No.	1	2	3	4	5	6	7	8
最高温度 (°C)	68.6	91.9	93.3	68.0	84.6	87.2	96.4	96.4

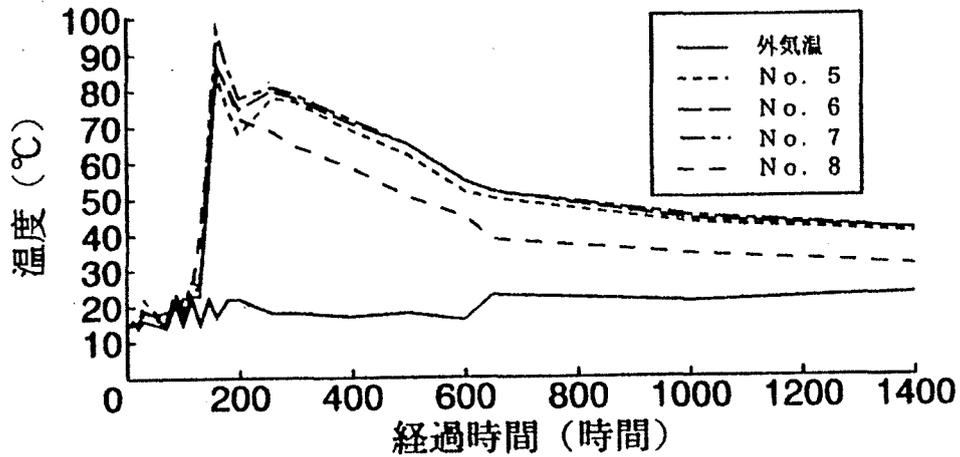
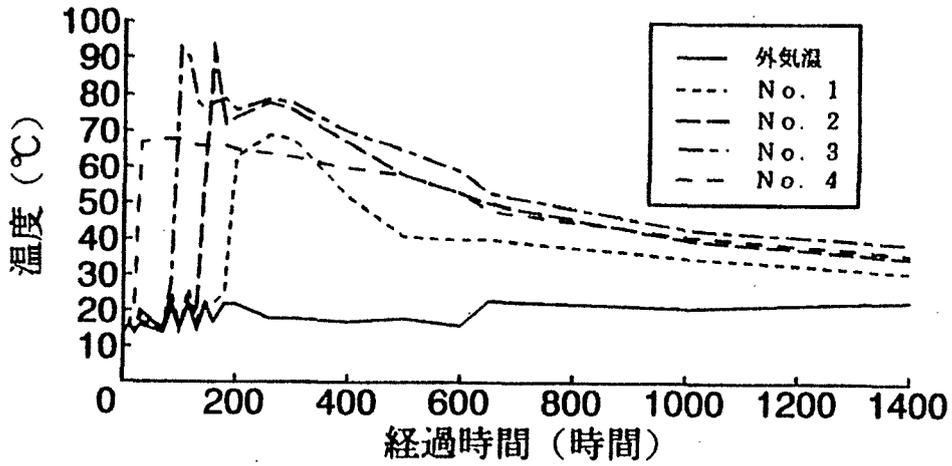


図-6.3.9 盛土内温度の経時変化

(4) 気温と初期強度発現

1月から3月の施工においては、外気温が低いために初期の強度初謙が遅れ型枠脱型までに3, 4日を要した。一方、4月の施工では打設日の翌日には盛り土体上面の歩行が可能であった。このことから気泡モルタルも他のセメント系材料と同様、温度により初期強度発現性が大きく影響を受けることがわかる。

6. 4 軌道路体盛土に用いた気泡モルタルの挙動

市街地では道路等との平面交差をさけるために鉄道線路の高架化が進められているが、高架橋から地上部へ移行する部分では通常盛土が採用される。しかしながら、地盤が軟弱な場合には盛土荷重による盛土自身の継続的な沈下や周辺構造物への影響が懸念される。悪影響を防止するためには、基礎地盤の改良や擁壁などの基礎を荷重に耐えるものにする必要があることから建設費の増大を招くこととなる場合がある。このような場合に、盛土の安定性の確保と建設費の削減を目的に、軽量材料を用いた盛土を採用する事例が出てきている^{6-7) 6-8)}。ここで取り上げた事例もその一つであるが、気泡モルタルが盛土材として採用されている。

本節では、事前に設置した計測機器により打設された気泡モルタルの挙動を計測し、その結果について分析を試みるものである。

6. 4. 1 盛土の概要

河川に近接した車両基地内で高架橋から地上部へ移行する区間約 120 mに単位容積質量が 1.0 t/m³の気泡モルタルを用いた軽量盛土が施工された。盛土は軌道を順次切り替えて供用する計画で3段階に分けて施工されるため、H型鋼を打ち込んだ上に設置された擁壁とH型鋼の間に鉄板を張り付けた仮設土留め壁を2段のタイロッドで連結した間に気泡モルタルを打設して施工された。地盤は、地表から15mまでがN値0～5程度の軟弱な粘土層からなり、その下は砂質土層徐々にN値が高くなる地層構成であった。

現場計測はそのうちの1断面を選定して計測機器を設置し、気泡モルタル打設時から計測を実施した。

打設された気泡モルタルの配合を表-6.4.1に示す。

表-6.4.1 気泡モルタルの配合

単 位 量 (kg/m ³)				空気量 (%)	単 位 容 質 量 (t/m ³)	フロー値 (mm)	圧縮強度 (kgf/cm ²)
セメント	砂	水	起泡剤				
256	512	214.5	1.52	50	1.0	180±20	10

気泡モルタルの打設は8月の初旬に4日間で実施された。気泡モルタルの打設に当たっては、1日の打設量やリフトを考慮し、途中で型枠を設けて延長方向を2ブロックに分けて打設された。気泡モルタルの製造はベースモルタルを生コン工場で練ったものをアジテータ車で現場へ搬入し、連続ミキサ中にモルタル供給機を介して定量供給し、発泡器で製造した気泡と連続的に混合して製造した。打設にはコンクリートポンプ車を用い流動距離が長くならないように筒先を移動させながら打設した。主要機材の仕様と組み合わせを表-6.4.2に示す。

表-6.4.2 気泡モルタル製造用主要機材

名 称	仕 様	数 量	備 考
コンプレッサ	2 m ³ /h	1	発泡機用
発 泡 機	30 m ³ /h	1	
連続練りミキサ	30 m ³ /h	1	単軸攪拌翼式
ポンプ車	60 m ³ /h	1	スクイズポンプ4トン車
発電機	60 KVA	1	ディーゼル
気泡モルタル用流量計	600l/min	1	圧力補正機構付、2インチ
高圧洗浄機		1	洗浄用

6. 4. 2 調査概要

(1) 調査の目的

気泡モルタルを鉄道の盛土に使用した事例は、2, 3例報告されている^{6-9) 6-10)}。これらの中でこのような用途の場合の挙動が明らかになりつつあるが、長期的に擁壁に及ぼす影響やタイロッドの効果、列車走行による荷重がどのように作用するかなど不明な点も多い。

これらの点に関して設計に反映させることができる情報を得ることを目的として計測を計画した。

(2) 調査項目および方法

調査項目は、施工時と長期的なもの、また列車走行時の調査項目があり以下の項目について計測した。

表-6.4.3 計測項目と計測時期

項 目	施 工 時	列 車 走 行 時	経 時 変 化
気泡モルタルの温度	○		
気泡モルタルのひずみ	○	○	○
擁壁・土留め壁傾斜	○		○
壁面および鉛直土圧	○	○	○
タイロッド張力(ひずみ)	○	○	○
気泡モルタル硬化体の状態	○		○
盛土の沈下	○		○
保護コンクリートのひずみ		○	○

計測項目と計測方法の概要を表-6.4.4 に示した。

表-6.4.4 計測方法の概要と測点数

項 目	計 測 方 法	数 量
気泡モルタルの温度	熱電対を埋め込み、計測器で記録する	9 点
気泡モルタルのひずみ	埋込型ひずみ計を埋設し、ひずみを計る	6 点
擁壁・土留め壁の傾斜	壁面の傾斜を下げ振りにより計測する	6 ヶ所
壁面および鉛直土圧	壁面および鉛直土圧計を設置し計測する	9 ヶ所
タイロッド張力	タイロッドにひずみ計を貼り計測する	2 ヶ所
気泡モルタル硬化体の状態	硬化後の気泡モルタルを観察する	2 回
盛土の沈下	擁壁、軌道面等の観測点を水準測量する	6 ヶ所
保護コンクリートのひずみ	保護コンクリート内に埋込型ひずみを設置する	4 ヶ所

測定断面と計測器の配置を図-6.4.1 に示した。

各項目の測定方法を以下に示した。

1) 気泡モルタルの温度

1 断面を選定し図中の 9 箇所に位置決め用鉄筋、番線を組み立てた後熱電対を設置し、気泡モルタル打設後 1 時間ごとに温度を自動測定した。

2) 気泡モルタルのひずみ

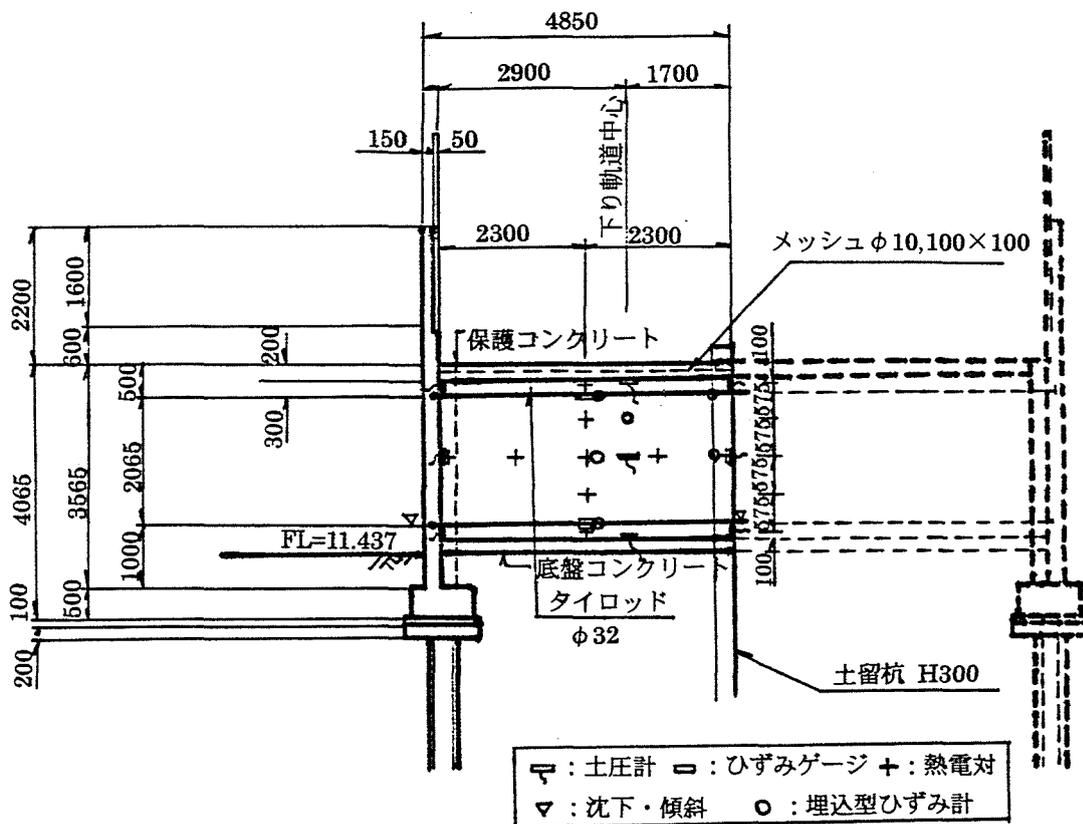
気泡モルタル内に埋込型ひずみ計を埋設し、硬化過程、列車走行時に発生ひずみを測定した。

3) 擁壁・土留め壁傾斜

軌道の延長方向の 3 断面で擁壁および土留め壁の上部に下げ振りの固定持具を設置し、下部の一定位置の壁面からの距離を測定することにより壁面の傾斜角を測定した。測定時期は打設前、高さが 1/2 の時打設完了時、打設完了時、完了後 1、3、6 および 12 ヶ月後とした。

4) 擁壁・土留め壁に作用する土圧および鉛直土圧

擁壁・土留め壁の上中下の各 3 箇所に壁面土圧計を、気泡モルタル下面およびおよび保護コンクリート下面および気泡モルタル中に各 1 個計 3 箇所に鉛直土圧計を設置し、気泡モルタルの打設時および供用後の列車走行時の作用土圧を計測した。土圧計の受圧面は図のように壁面、計測面と一致させるように設置した。



(単位：mm)

図-6.4.1 計測機器の配置

5) タイロッドの張力

計測断面付近の1断面で上段および下段のタイロッド(φ38mm)にひずみゲージを貼り付け、気泡モルタル打設時と供用後の列車走行時のタイロッド張力を測定した。

6) 盛土の沈下

盛土の沈下を測定するため、擁壁の側面の高さをレベルで測定した。測定時期は擁壁傾斜と同様とした。

8) 保護コンクリートのひずみ

保護コンクリート内に埋め込み型ひずみ計を取り付け、列車走行時の保護コンクリートの挙動を把握した。

6.4.3 打設時の挙動

(1) 気泡モルタル打設状況

計測地点における気泡モルタル打設高さの変化を図-6.4.2に示した。第1日に1m、第2日に75cm、第3日および第4日に25cm上昇して計画高さ2.25mに達した。

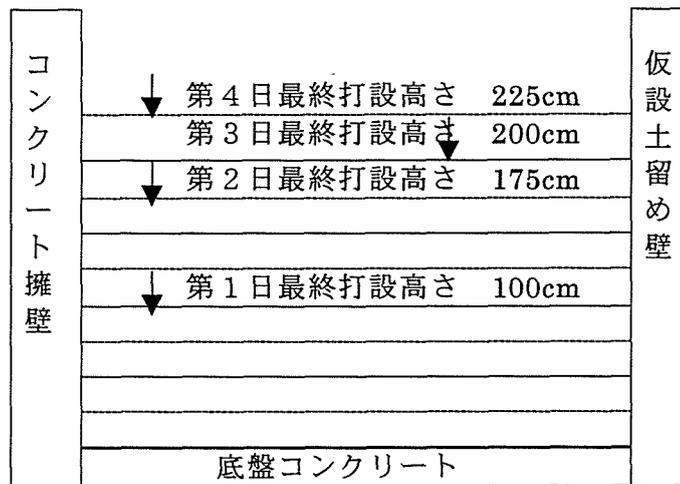


図-6.4.2 計測地点における気泡モルタル打設高さの変化

(2) 土圧およびタイロッド張力

気泡モルタル打設時の挙動としては、擁壁に作用する土圧の変化およびタイロッドの張力変化が注目されるが、ここでは各土圧計（受圧面中心）の上部のモルタル面高さと土圧計の指示値の関係を図-6.4.3に示す。

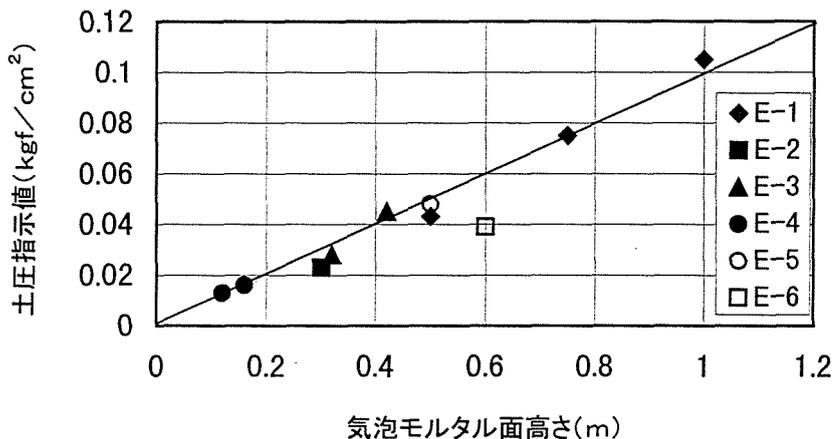


図-5.4.3 モルタル面高さと土圧計の指示値の関係

土圧（ E : kgf/cm^2 ）は、土圧計上の気泡モルタル面高さを h (m) とすると、

$$E = 0.1 h$$

の線上にあり、気泡モルタルの目標単位容積質量が 1.0 t/m^3 であるので液圧として作用していることがわかる。

また、タイロッドのひずみ測定結果から計算される軸力は、第1日目に高さ1mまで打設した時点で図-6.4.4のような状態となり気泡モルタルの液圧が直接タイロッド張力に反映されてはいない結果となった。これは、擁壁基礎の根入れ部の変形拘束効果や擁壁自

重などに比べて液圧が小さい (1tf/2m) ためであると考えられる。

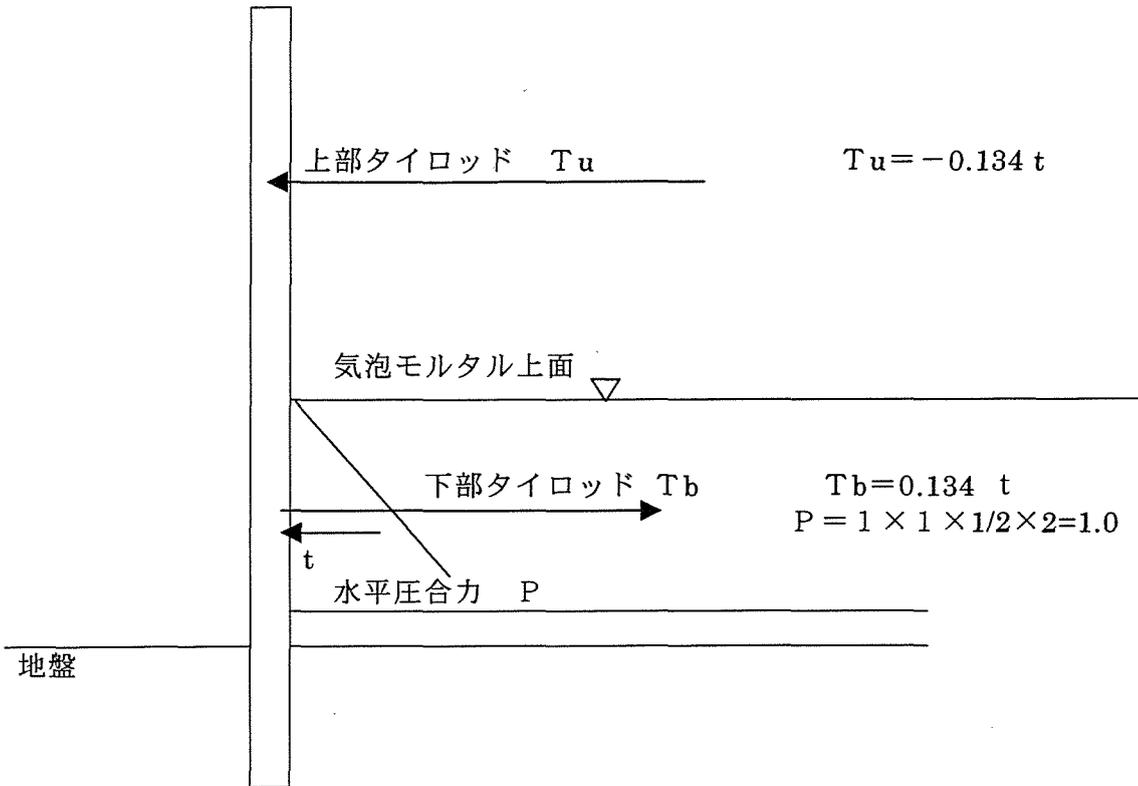


図-6.4.4 第1日打設後の水平力の釣合

6.4.4 計測値の経時変化

(1) 擁壁、土留め壁の変位

コンクリート擁壁と仮設土留め壁の傾斜の経時変化を図-6.4.5に示す。傾斜角は0.005程度以下で問題となる動きも認められなかった。

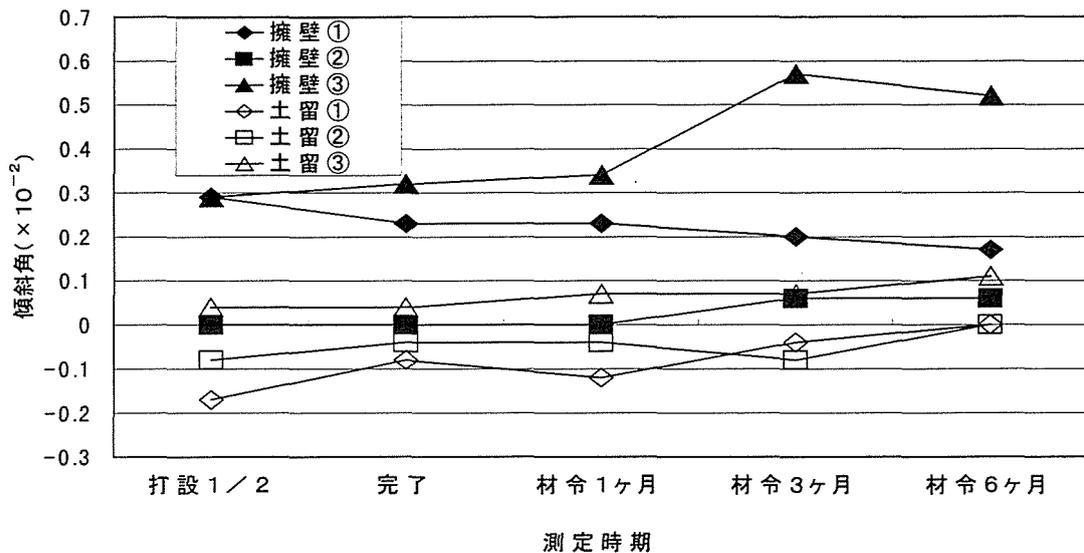


図-6.5.5 擁壁、土留め壁の傾斜の経時変化

2) 土 圧

土圧の経時変化を図-6.4.6、6.4.7 に示す。図-6.4.6 はコンクリート擁壁設置した土圧計による水平土圧の打設後1ヶ月の計測結果で、図-6.4.7 は打設位置底面および中間部に設置した鉛直土圧の計測結果である。

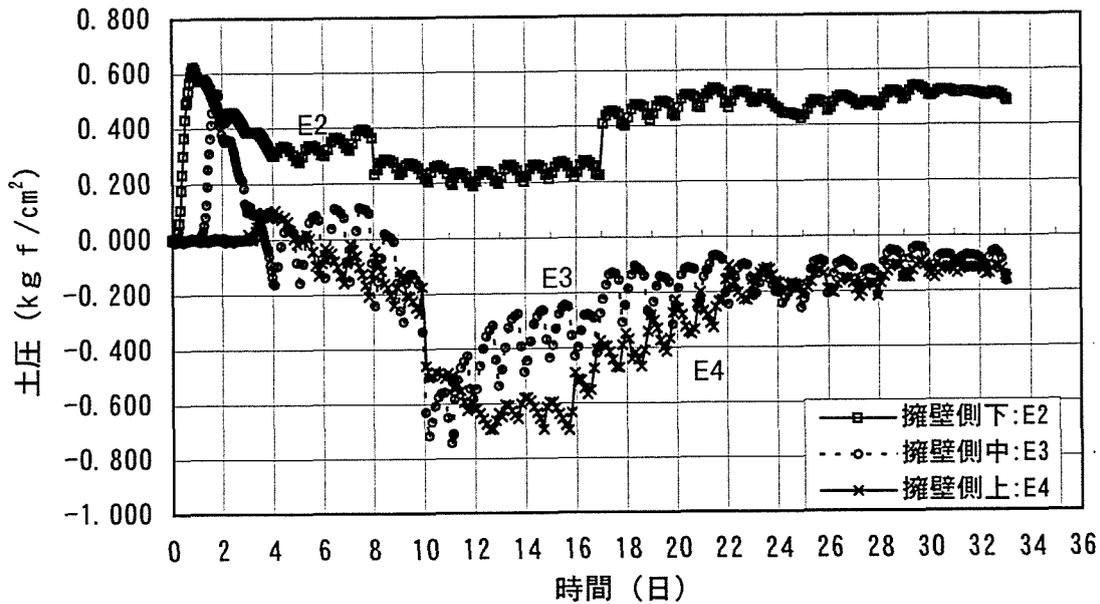


図-6.4.6 水平土圧の計測結果 (打設後1ヶ月)

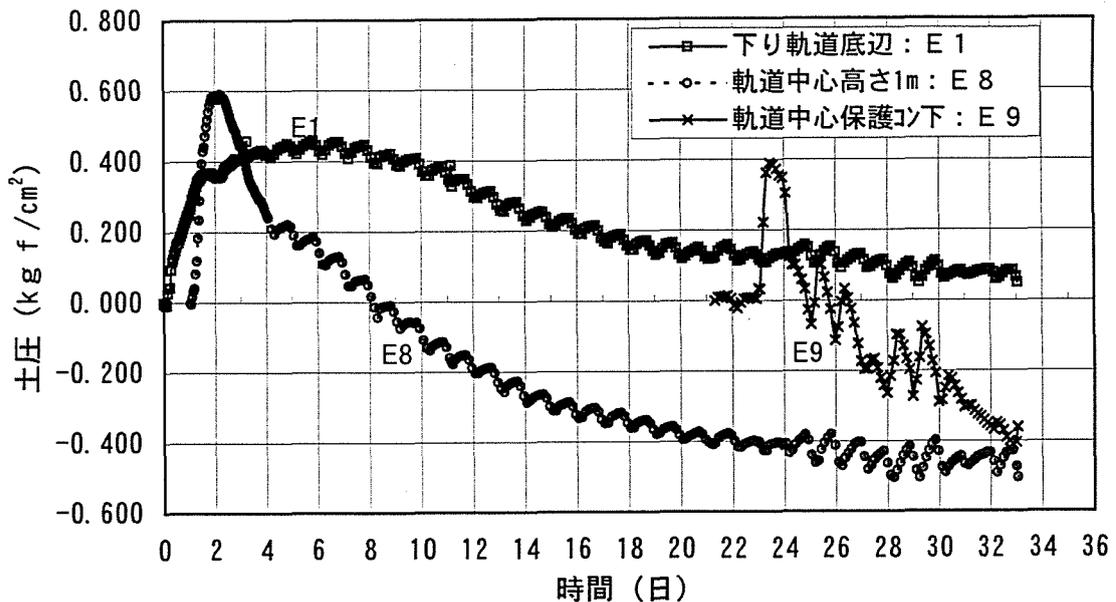


図-6.4.7 鉛直土圧の計測結果 (施工後1ヶ月)

測定データは、1日の中で変動しているが擁壁面は露出していることにより気温の変動の影響を受けた。土圧の計測値は、先に示した硬化前の値は気泡モルタルの流体圧として作用する結果となったが硬化が始まった後は上載荷重よりも大きな計測値を示しており、計測値の温度補正を実施しても自重の2倍程度の土圧を示した。原因は明らかでないがタ

イロッドで拘束された中に気泡モルタルを打設し内部温度の上昇により膨張した圧力を検出した可能性が考えられる。最大値に達した後は低下していくつかの土圧計は負の値を示した。これも内部温度の低下により収縮傾向になり受圧面との間に隙間を生じたためと考えられる。

図-6.4.8 には1ヶ月以降の土圧の変化を示した。3ヶ月以降の変動はほとんどなく、擁壁面下部で 0.2kgf/cm^2 と自重の70%程度の値を示している以外は負の値を示しており自立性を裏付ける結果であると考えられる。

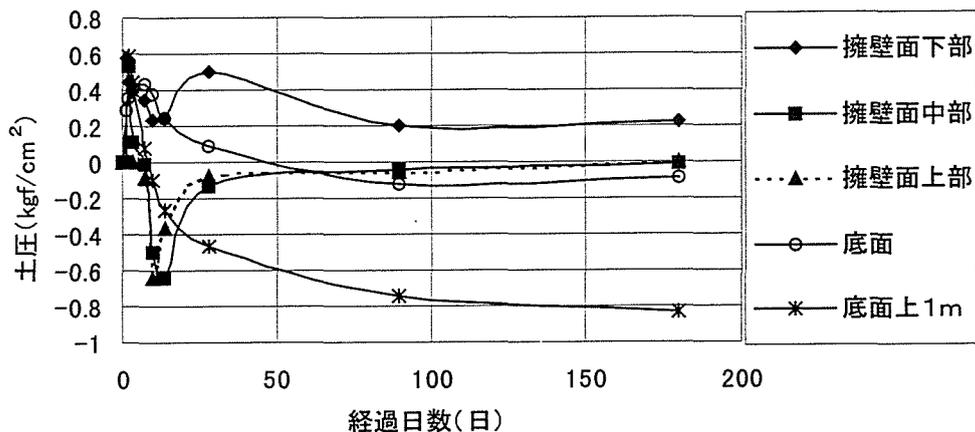


図-6.4.8 土圧の経時変化

2) タイロッド張力

計測されたひずみに鋼材の弾性係数と断面積を乗じて求めたタイロッド張力の経時変化を図-6.4.9 に示した。打設完了時点で下部タイロッドの張力が4 tf、上部タイロッドは圧縮力を受けた状態であり、打設時の挙動で示したとおり擁壁等の剛性で気泡モルタル打設による水平力は作用しないまま硬化するため極めて小さな軸力が作用するのみであったと考えられる。上部タイロッドに圧縮力が作用する可能性としては気泡モルタルの収縮の影響を受けた可能性があるか明らかにできていない。

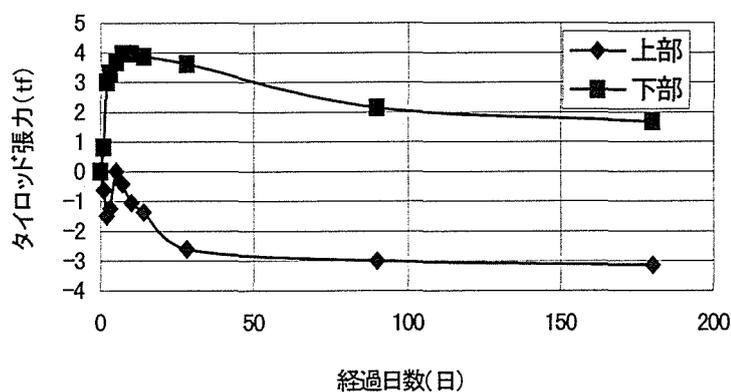


図-6.4.9 タイロッド張力の経時変化

4) 気泡モルタル内部温度

気泡モルタルの内部に設置した熱電対により測定した結果を外気温とともに図-6.4.10、6.4.11 に示した。いずれの場所でも気泡モルタルが打設されると温度の上昇が見られ中心

6.4.11 に示した。いずれの場所でも気泡モルタルが打設されると温度の上昇が見られ中心部では最大 85℃に達した。打設時の気温が 30~35℃であるので 50~55℃のお温度上昇をした。断面が大きく熱伝導率が低いことからほとんど断熱状態であると考えられる。1ヶ月経過後も中心部温度は 50℃であった。

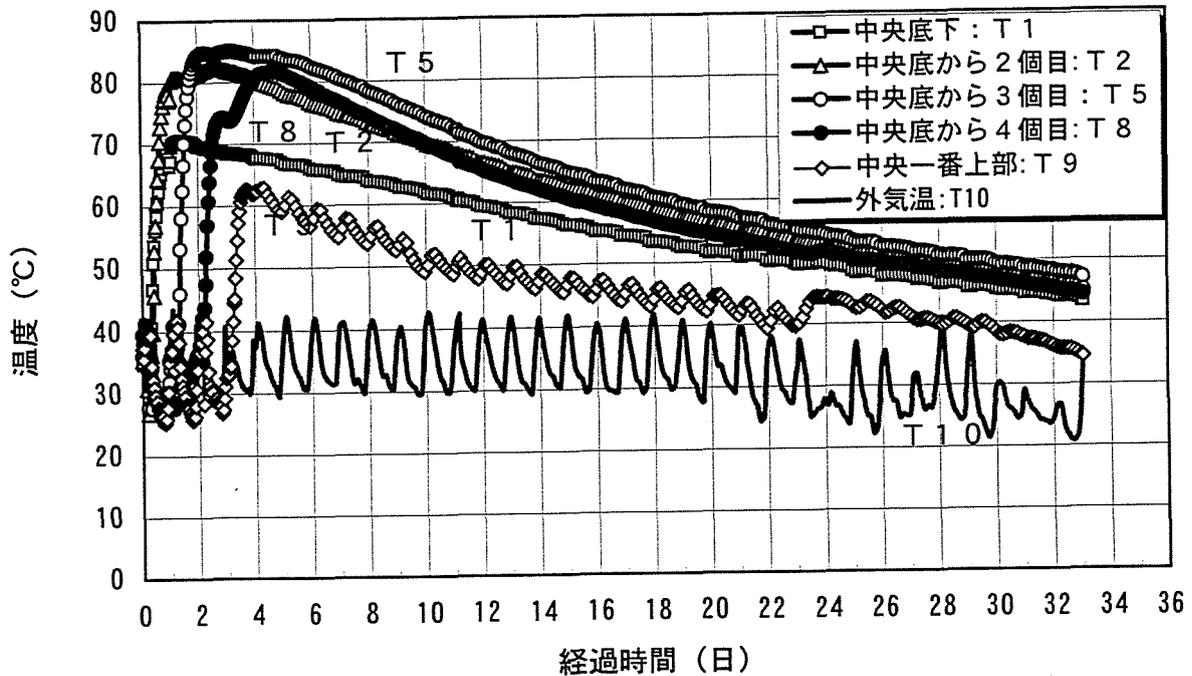


図-6.4.10 気泡モルタル内部の温度変化

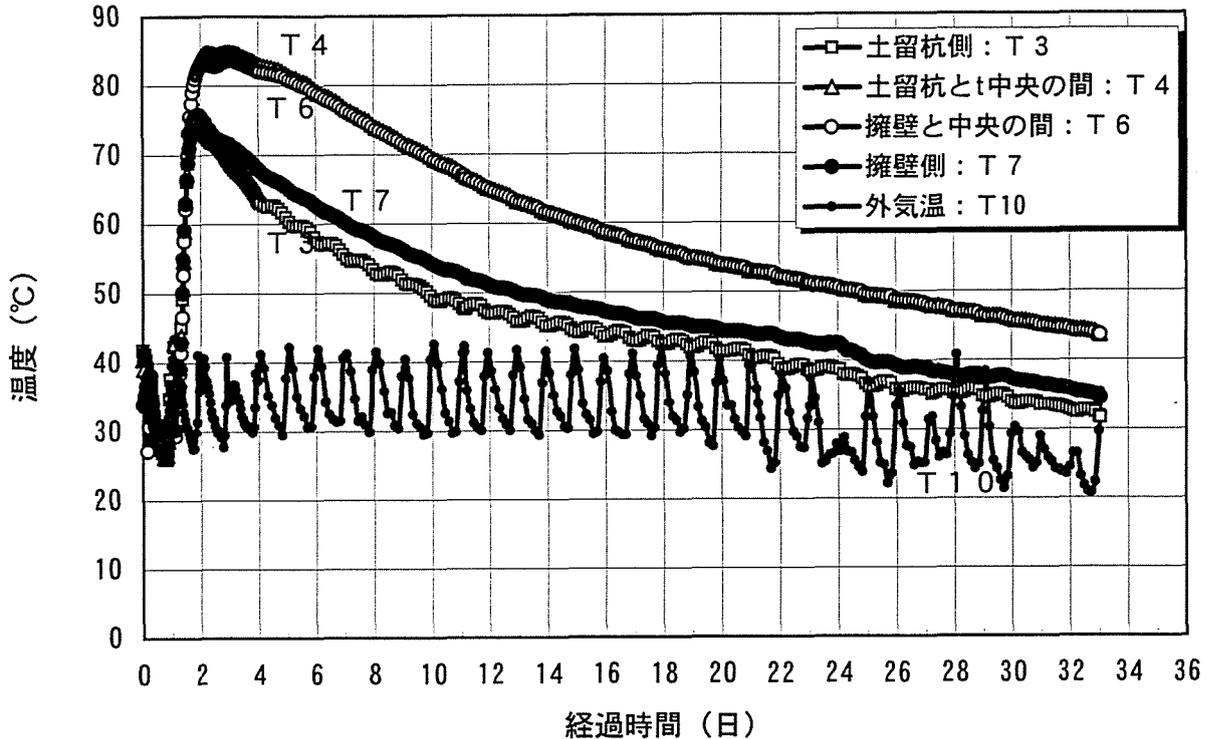


図-6.4.11 気泡モルタル内部の温度変化

図-6.4.12 には中心部が最高温度に達した時点と約1ヶ月後の気泡モルタル断面内の温度分布を示した。中心部最高温度に達した時点で中心部と外気温の差は 34℃であり気泡モルタル内の計測点間でも 23℃の差が生じた。また1ヶ月後においても中心部と外気

温の差は 23℃、気泡モルタル内の温度差は 17℃であった。この場合、中心部の温度変化は 36℃であるのに対して底部では 23℃、上部では 25℃となっており線膨張係数がコンクリートと同様の $1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 出るとすると 10℃の温度差で 100×10^{-6} のひずみ差が発生することになり上部タイロッドの軸力にも影響したと考えられる。

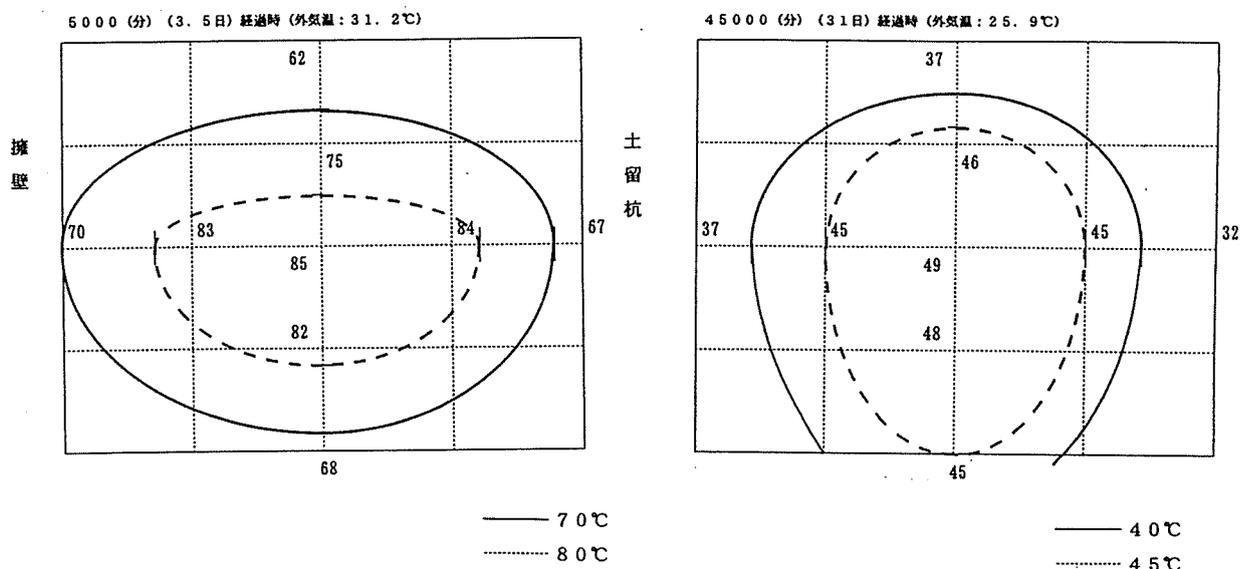


図-6.4.12 気泡モルタル断面内の温度分布

6.4.5 列車走行時の挙動

列車の走行時に気泡モルタル中に埋め込んだ 10 個のひずみ計およびタイロッドに張り付けた 4 枚のひずみゲージに発生するひずみを動ひずみとして測定した。列車は、30km/h の走行速度の場合と 50km/h でラッシュ時との 2 条件で測定した。

測定の結果中心線上の上部に水平方向に設置した（保護コンクリート表面から 50cm 下）ひずみ計と軌道中心下部の鉛直方向に埋込んだ（保護コンクリート表面から 87.5cm 下）ひずみ計の 2 個だけが出力を示した。計測されたひずみを表-6.4.4 および図-6.4.13、図-6.4.14 に示した。

表-6.4.4 列車走行時の計測ひずみ

測 点	計測ひずみ (1×10^{-6})	
	速度 30km/h	速度 50km/h
保護コンクリート下部 50cm : 水平方向	+25 ~ -15	+40 ~ -20
保護コンクリート下部 87.5cm : 鉛直方向	0 ~ -15	0 ~ -25

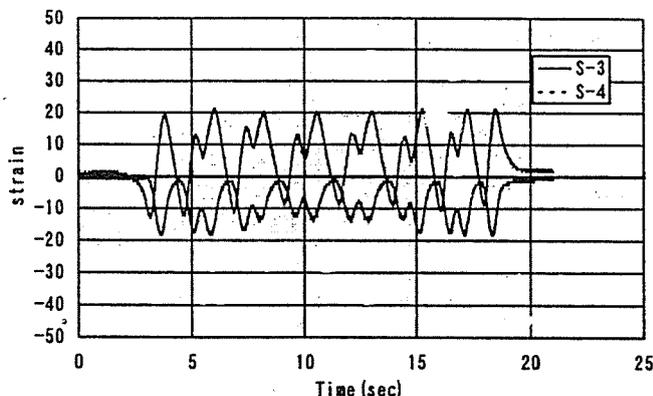


図-6.4.13 列車走行時の気泡モルタルのひずみ（走行速度：30 km/h）

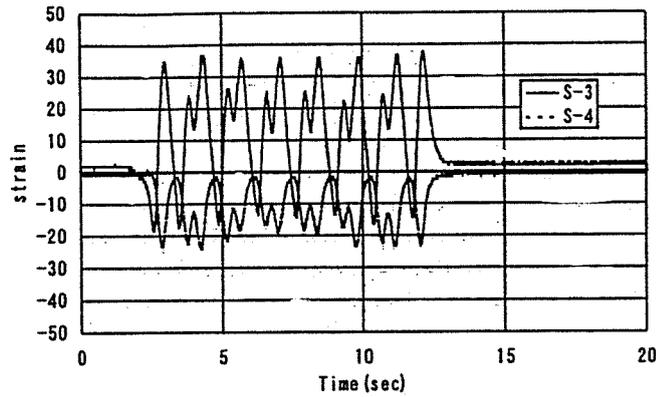


図-6.4.14 列車走行時の気泡モルタルのひずみ（走行速度：50 km/h）

以上のように、列車走行時の気泡モルタルのひずみは軌道下部の上部のみで計測され、保護コンクリート中のひずみは計測されなかった。計測されたひずみは列車編成の軸数に対応しており、その値は圧縮側 25×10^{-6} から引張り側 40×10^{-6} の範囲で極めて小さな範囲で、走行速度が大きいほど大きくなった。

第4章の繰返し載荷試験時のひずみの1オーダー下のレベルであり列車走行による繰返し荷重による影響はないと判断できる。

6.4.5 課題

今後の課題としては以下のものが考えられる。

- 1) 土圧等の挙動を確認するために断面方向のモルタルひずみを計測する。
- 2) 無応力計を設置し、線膨張係数を計測する。
- 3) タイロッド張力をロードセルにより測定する。
- 4) 土圧測定時に受圧面にフィルム等を貼り付け収縮時の影響を取り除く。
- 5) 温度応力解析を実施し、土圧計の挙動やタイロッドに作用する力を解明する。

6. 5 第6章の結論

気泡ミルクや気泡モルタルの打設時および打設後の挙動に関する実験、現場施工レベルでの品質の安定性について検討した結果、以下のような知見が得られた。

(1) 気泡モルタルの圧送実験

1) フロー値

配管出口のフロー値は練上がり直後と同程度か増加する傾向にあり、2インチ配管に比べると4インチ配管の方がフロー値の変化はやや大きい傾向にある。また、モルタルの種類別の差は明確ではない。

2) 単位容積質量

圧送後の単位容積質量は圧送前に比べて同程度か減少する傾向にある。配管径別では2インチの方が、モルタルの種類別では微粉末を添加したBタイプの方がやや単位容積質量の差が小さい。

3) 圧送速度と物性変化

管内流速と圧送前後の物性値の比（フロー値および単位体積質量）から管内流速が1.5m以上であると物性の変化が小さいことが判明した。

4) 圧力損失

フロー値が180mmの気泡モルタルの場合、2インチゴムホース、塩ビ管の圧送時の圧力損失は直線部で0.05～0.08 kgf/cm²/m、曲り部の損失は60度で0.1～0.2 kgf/cm²、90度で0.35 kgf/cm²であった。

4インチ管の場合の圧力損失は、直線部で0.02～0.04 kgf/cm²/m、曲り部では、60度ではほとんどなく、90度では0.1～0.2 kgf/cm²であった。

管内流速が大きいと管内圧力損失も大きくなる傾向を示し、これらはほぼ直線関係にあった。

(2) 気泡ミルクの施工時の品質

気泡ミルクを現場施工した際の品質調査した結果以下の点が明らかになった。

1) 気泡ミルクの単位容積質量が強度に与える影響は大きく、単位容積質量が小さくなると圧縮強度も小さくなる。

2) 連続施工による品質の変動を調査した結果、安定した品質の気泡ミルクが混練されていることが確認できた。

3) ミキサ出口で採取した試料に比べて、ポンプ圧送先で採取した試料の方がフロー値、単位容積質量が若干大きくなり、圧送による変化が認められたが目標品質範囲内であった。

4) 硬化後の軽量盛土から採取したコアの品質を調査した結果、単位容積質量、圧縮強度ともに目標の品質を満足していることを確認した。

5) 気泡ミルクの自重により気泡が圧縮されたため、採取コアの単位容積質量は供試体に比べて全体的に大きい結果となった。しかし、1日の最大打設高さを50cmとしたためその影響は小さかった。

- 6) 気泡ミルクの硬化熱により、盛土内温度は 95℃に達することを確認した。埋設物を事前に設置して工事をする際は注意する必要がある。盛土断面内の温度分布は、地盤面から 25cm の位置では最高温度は他の場所と比べて 30℃程度低く、型枠面から 50 cm の位置では最高温度は変わらないものの温度の低下が早かった。
- 7) 気泡ミルクの初期強度発現は打設時の気温の影響を強く受ける。

(3) 気泡モルタル盛土の挙動

- 1) 擁壁、土留め壁の変位や沈下はほとんど見られず安定していた。
- 2) 気泡モルタルの挙動

気泡モルタルの打設時に作用する土圧は液圧として作用した。硬化過程では土圧の大きな値が観測されたがその原因として気泡モルタルの硬化過程での膨張が考えられた。

タイロッドにはほとんど張力が発生せず気泡モルタルの自立性が確認された。

気泡モルタル内の温度は最大 85℃に達し、温度の低下過程では位置による差が 20℃程度発生した。

- 3) 列車走行時の挙動

列車走行時に保護コンクリート、モルタルおよびタイロッドのひずみを計測したが、気泡モルタル上部の水平ひずみと鉛直ひずみのみが観測されその値は $+40 \sim -25 \times 10^{-6}$ と破壊ひずみの 1%程度と極めて小さかった。周期は、列車の走行速度と対応しピーク数は車輪の軸数(2軸1組)と対応した。

(4) 設計上の知見

室内における安定性や物性値の検討や現場での品質、硬化後の気泡モルタルの挙動の調査の結果から設計上の課題については以下のように考えられる。

- 1) 物性値

単位容積質量に関しては配合条件と同等の硬化体得られることから、設計上の安全率をみる必要はないと考えられる。ただし、水中に浸漬すると吸水が認められることから直接水と接する面を小さくすることと設計値に安全率を考慮しておく必要があると考える。

圧縮強度は平均強度 16kgf/cm^2 でほぼ 10kgf/cm^2 を下回らない結果が得られた。気泡量の変動の影響も大きいことから 20%程度の変動係数を見込んでおく必要がある。

気泡モルタル内部でせん断力を受ける場合は、残留強度が期待できることから残留強度で設計することが安全であると考えられる。試験した気泡モルタルの場合、圧縮強度が 18.4kgf/cm^2 でせん断強度が 6kgf/cm^2 残留強度がその 70%であることから

$$6.0 \times 0.7 / 18.4 = 0.22$$

となり、圧縮強度の 1/4 を用いておけば良いと考えられる。

- 2) 補強の考え方

気泡モルタルは、それ自身で自立するが大量に打設する事から温度の影響や乾燥収縮により微細なひび割れが発生することも考えられる。このため、気泡モルタル自身に引張り応力の発生することが考えられる場合や構造物との一体性が必要な場合は、一体性を確保するための鋼材や高分子系材料による補強が必要であると考えられる。

第6章の参考文献

- 5-1) 久野悟郎・松下正憲・中角均・今井俊雄・吉原正博：軽量充填材を用いた建築物基礎下充填工事報告、第23回土質工学研究発表会講演概要集、pp2319-2322,1986.6
- 5-2) 森永繁：コンクリートポンプの管内圧送圧に関する研究、コンクリートジャーナル、Vol.9, No.7, July, 1971
- 5-3) 村田二郎・鈴木一雄：グラウトの管内流動に関する研究、土木学会論文集, No.354, pp99-109, 1985
- 5-4) 松尾豊弘・笠井寿太郎・森卓司：人工島におけるエアミルクを用いた軽量盛土工事例－施工および施工時の品質－,土木学会第49回年次学術講演会概要集, pp1526-1527, 1994
- 5-5) 笠井寿太郎・松尾豊弘・森卓司：人工島におけるエアミルクを用いた軽量盛土工事例－発熱特性と硬化後の品質－,土木学会第49回年次学術講演会概要集, pp1528-1529, 1994
- 5-6) 松尾豊弘・森卓司・黒田実・会田正彦：エアミルクを用いた軽量盛土工事例について、大阪セメント技報, No.60, pp70-74, 1994.9
- 5-7) 長尾和之・三嶋信雄・福岡一幸：気泡混合軽量土を用いた東名高速道路の拡幅工事、基礎工、Vol.22, No.10 pp16-21, 1994
- 5-8) 長尾和之・杵山務・国分健一：気泡混合軽量土を用いた橋台背面の土圧軽減工法、基礎工、Vol.22, No.10, pp28-36, 1994
- 5-9) 海野隆哉・八巻一幸・古谷時春：気泡モルタルの鉄道盛土への利用、基礎工、Vol.18, No.12, pp50-58, 1990
- 5-10) 今井政人・風間武治・五十川好治：赤羽駅高架気泡モルタル盛土、基礎工、Vol.22, No.10, pp91-95, 1994

第7章 結 論

第7章 結 論

気泡モルタルは、あらかじめ製造した気泡をセメントミルクあるいはセメントモルタルに混合して製造した軽量の硬化体である。この気泡モルタルは本格的に使用されるようになってから日が浅いため、本研究においては配合設計上必要なレオロジー特性値や材料分離特性と硬化体の物性、さらには施工時の特性等の検討を行うことによって、土木材料としての気泡モルタルの評価を試みるために研究計画を立案した。以下にそれらの結果をまとめて結論とする。

本論文では、第1章で研究の背景と目的および研究の方法を示した。

第2章では、気泡モルタルに関する既往の研究の整理をし、若干の概説を加えた。日本道路公団における組織的な研究においては、一連の物性についての検討はなされ指針が作られているものの、気泡モルタルの配合を決定する上で重要なフレッシュ時のレオロジー特性についての検討はされていない。また練混ぜや圧送、打設時における材料分離の現象や、打設時の温度上昇が品質に及ぼす影響の検討も行われていない。既往研究の結果を踏まえて本研究における実施計画を立案した。

第3章ではセメントミルクや気泡ミルクおよび気泡モルタルのレオロジー特性とフロー値などの特性を検討した。また、セメントミルク自体や気泡ミルクの静置時の材料分離特性や気泡モルタルが施工時遭遇する加圧、減圧の繰返しや振動を受けた場合についても検討した。得られた結果は以下の通りである。

(1) 気泡ミルクおよび気泡モルタルのレオロジー特性

気泡ミルクや気泡モルタルのレオロジー特性（塑性粘度と降伏値）の特徴は、セメントミルクやモルタルの場合とほぼ同様である。塑性粘度や降伏値は、気泡の添加量が少ない場合にはやや減少し、気泡量40%以上では増大する傾向にあり、さらに静止状態では気泡を安定的に保持できる降伏値や塑性粘度が存在することも確認した。

フロー値は降伏値とともに単位容積質量の影響も強くを受け、フロー値が180mmの配合としても材料分離が生じる場合があることを確認した。

(2) 材料分離特性

気泡ミルクを静置した状態で、ブリーディングなどにより分離が生じにくい配合の範囲を確認した。また、加圧、減圧の繰返しによって気泡モルタルの分離は促進され、とくに粗い砂粒子の多い配合では分離が生じ易く、さらに振動下ではレオロジー特性値が急激に低下することから分離傾向が極めて顕著であると推定される。また、気泡モルタルを一度に大量に打設すると自重により気泡が圧縮され、下部の単位容積質量が大きくなることから、一度に打設する高さを0.5～1 m程度以下に制限する必要があると考えられる。

(3) 配合要因と安定性

プレーンのセメントミルク（20℃）でブリーディングの生じない配合は、W/Cが50%以下であった。また、気泡の保持力から定まる安定性を考慮すると気泡ミルクのW/Cは60%以下が望ましい。気泡ミルクのW/Cと気泡量の組合わせでブリーディングの生じない範囲があり、その範囲を推奨配合として示した。この場合W/Cが80%でブリーディングの生じない配合が存在した。

最大粒径の小さい砂を用いることが有効で、W/Cは流動性が得られる範囲で小さくするのが有効である。

気泡モルタルの材料分離は、ブリーディング、砂の沈降、気泡の浮上りによって発生するため、単位容積質量が1.0g/cm³付近の配合にすると安定性の高い気泡モルタルが得られる。さらに鉱物質微粉末を砂やセメントの一部と置換して利用することは安定性の確保に有効である。

配合に関する要件をまとめると表-6.1に示すようになる。

表-6.1 安定な配合を得るための検討項目と条件

材料分離要因	検 討 項 目	条 件
ブリーディング	セメントミルクの分離がない	W/C ≤ 50%
	混合物として安定	密度が1.0g/cm ³ に近い
気泡の浮上り	セメントミルクの降伏値が高い	W/C ≤ 70% 望ましくは ≤ 60%
砂の沈降	砂粒子径が小さい	D _{max} < 1.2mm
	セメントミルクの降伏値が高い	W/C ≤ 70% 望ましくは ≤ 60%

第4章では、気泡ミルク、気泡モルタルおよび鉱物質微粉末を混合した気泡モルタルの強度特性や代表的な配合における気泡モルタルの各種物性値に関する研究を実施した。得られた結論は以下の通りである。

(1) 気泡ミルクの配合と強度特性

気泡ミルクの硬化体の強度は、W/C = 50%以上はあまり差が認められず、材令7日に対する材令28日の圧縮強度比は、普通セメントで約1.6、高炉セメントB種で約1.8であった。

W/Cが同一の場合、圧縮強度は気泡量の増加とともに減少し、その関係は指数関数で表せ高い相関がある。配合が異なる場合も単位容積質量と圧縮強度の関係はほぼ一つの指数関数曲線で表せる。

(2) 鉱物質微粉末を用いた気泡モルタルの配合と強度特性

碎石微粉末で砂の一部を置換するとフロー値は低下する傾向にあるが、単位容積質量の差が小さくなるとともに強度の差も小さくなり、品質は安定する傾向であった。

圧縮強度は微粉末のセメント置換率の増加にほぼ比例して低下し、微粉末の種類では石灰石微粉末の方がやや高い強度が得られた。

(3) 気泡モルタルの諸物性

気泡モルタルの気泡等価円直径の平均値は、界面活性剤系起泡剤を用いた場合に0.19mm、タンパク系起泡剤を用いた場合に0.26mmで、タンパク系起泡剤を用いた場合の方がやや大きかった。

単位セメント量270kg、気泡量約50%の気泡モルタルの材令28日における圧縮強度は15.9~18.4kgf/cm²、圧縮強さと変形係数の関係はE_{so} = 390~400quであった。一方、圧縮試験時の破壊形態は、圧縮応力がピークに達した後に塑性的な変形が見られた。

最大せん断力 (τ_{max}) は概ね 6kgf/cm^2 と変化はなく、最大せん断応力に達した後の残留摩擦抵抗力は、水平変位が概ね10mmまでの範囲では最大せん断力の概ね70%であった。

繰返し回数の増加に伴い軸ひずみが圧縮側へとシフトして行くものの、顕著な累積変位は生ぜず、列車走行や車両等の繰返し荷重による劣化はないものと考えられた。

気泡モルタルは吸水するが、飽和度は60%以下で、気泡モルタルが完全に飽和状態となることはないと考えられ、一方、飽和状態における透水係数は、界面活性剤系起泡剤を用いた気泡モルタルでは 2.47×10^{-3} (cm/s) で、タンパク系起泡剤を用いた気泡モルタルで 1.91×10^{-4} (cm/s) であった。

空中凍結融解温度 $+5^\circ\text{C} \sim -4^\circ\text{C}$ (供試体中心温度) のもとで100サイクル繰返した角柱供試体 ($10 \times 10 \times 40\text{cm}$) の相対動弾性係数は98.2%で、今回採用した試験条件では気泡モルタルは極めて良好な凍結融解抵抗性を有する材料であると考えられた。48週間、酸性水 ($\text{pH} = 4$) 中に浸漬させた気泡モルタル供試体の圧縮強度は、水道水に浸漬した場合とほとんど差がなく、このような環境下で著しく強度低下する傾向にないことが確認できた。

気泡モルタルの熱特性値は、一般のコンクリートの値に比べて熱伝導率および熱拡散率が約1/4、比熱が約1/2であった。なお、単位セメント量 360kg の気泡ミルクの硬化熱により、盛土内温度は 95°C に達することを確認した。

気泡量が30%~60%程度の気泡モルタルの乾燥収縮ひずみは、材令約2年で $1500 \sim 3000 \times 10^{-6}$ の範囲であり、骨材容積の影響が大きかった。

第5章では、第3, 4章で得られた結果を基に、材料分離に配慮した配合設計法を提案した。気泡ミルクおよび気泡モルタルの分離の少ない配合の範囲を示すとともに配合手順を示した。また、フロー値は材料分離や施工上支障のない範囲で許容し、材料分離の確認方法と判定基準を示した。気泡モルタルの砂の粒度調整や気泡ミルクも含めた強度調整に、鉱物質微粉末の利用を盛込み幅広い要求品質に合わせた配合設計を可能とした。

第6章では、気泡ミルクや気泡モルタルの打設時および打設後の挙動や現場の施工レベルにおける品質の安定性に関する実験や調査を実施した結果について述べた。

(1) 気泡モルタルの圧送実験

配管出口のフロー値は練上がり直後と同程度かやや増加する傾向にあり、この傾向は2インチ配管よりも4インチ配管の方が顕著であり、また圧送後の単位容積質量は圧送前と同程度か減少する傾向にあった。

フロー値が180mmの気泡モルタルを圧送する時、2インチゴムホース、塩ビ管の圧力損失は直線部で $0.05 \sim 0.08 \text{kgf/cm}^2/\text{m}$ 、曲り部の損失は60度で $0.1 \sim 0.2 \text{kgf/cm}^2$ 、90度で 0.35kgf/cm^2 であり、4インチ管の場合の圧力損失は、直線部で $0.02 \sim 0.04 \text{kgf/cm}^2/\text{m}$ 、曲り部では60度ではほとんどなく、90度では $0.1 \sim 0.2 \text{kgf/cm}^2$ であった。

(2) 気泡ミルクの施工時の品質

気泡ミルクを現場施工した際の品質を試験した結果、単位容積質量の変動幅は平均値の4.3%で強度の変動幅は33%であった。単位容積質量の圧縮強度に与える影響は大きく、上下限を定めて管理する必要性があると考えられた。

硬化後の軽量盛土から採取したコアの品質を試験した結果、単位容積質量、圧縮強度ともに目標の品質を満足していることを確認した。

(3) 気泡モルタル盛土の挙動

傾斜および沈下量は最大で1/100および2mmと僅かであった。気泡モルタルの打設時に作用する土圧は液圧として作用するが、硬化過程では大きな値が観測された。この原因としては気泡モルタルの硬化過程で内部温度が85℃に達することによる膨張が考えられた。

タイロッドにはほとんど張力が発生せず気泡モルタルの自立性が確認された。

列車走行時に保護コンクリート、モルタルおよびタイロッドのひずみを計測したが、気泡モルタル上部の水平ひずみ、50cm下の鉛直ひずみのみが発生した。絶対値は+25～-15×10⁻⁶と破壊ひずみの1%程度と極めて小さかった。第4章の繰返し試験結果からも安全であると考えられた。

以上、本研究で提案した配合設計法を用い材料分離のない安定性の高い配合の気泡ミルクおよび気泡モルタルを打設すれば、物性試験で確認したデータや既往の研究結果からも十分安定した建設材料として使用することが可能であることが確認できた。

最後に、本研究を通して得られた知見を基に、気泡モルタルの設計、施工上の注意事項や今後解明すべき問題点を列挙して本論文を締めくくりにする。

(1) 設計、施工上の注意事項と課題

1) 気泡ミルク、気泡モルタルの配合

一般の用途には普通ポルトランドセメントや高炉セメントB種が適当であるが、分離抵抗性の面からすると比重が小さく降伏値や塑性粘度の高い高炉セメントB種の方が有利であると考えられる。

一般に用いられるコンクリート用細骨材は利用可能であるが、材料分離抵抗性の面では最大粒径の小さい砂が有効で、1.2mm以下であれば分離抵抗性が大幅に改善される。

気泡ミルクの配合では水セメント比70%以下が望ましく80%程度まで分離抵抗性を確認すれば使用できる。配合設計では強度とともにブリーディング率も単位容積質量の変動も配合要因として検討する必要がある。

2) 物性値

気泡モルタルを直接水中に浸漬すると吸水が認められることから、直接水と接する面を小さくすること、防水処理をすることあるいは設計値に単位容積質量の余裕を設定しておく必要がある。

3) 補強

気泡モルタルは大量に打設する事から温度の影響や乾燥収縮により微細なひび割れが発生することも考えられる。このため、気泡モルタル自体に引張応力の発生することが考えられる場合や構造物との一体性が必要な場合は、一体性を確保するための鋼材や高分子系材料による補強が必要であると考えられる。

(2) 未解決の問題と今後の展望

セメントミルクのみではブリーディングが発生しても、気泡の混入によってブリーディングが発生しなくなる現象が観察された。この原因として気泡もセメント粒子や砂粒子と同様にその周辺に水の膜を形成し、水の移動を抑制する可能性があると考えられ、この点を解明しておく必要がある。

気泡ミルクや気泡モルタルは気泡を含んでいることから、ある程度以下の強度であれば破壊は気泡構造の破壊にとどまり、全体の破壊につながらないことが考えられる。すなわち、衝撃力や局部に集中する荷重が作用した場合の緩衝材としての効果が期待できる。このような機能の定量的評価と応用の可能性の検討を実施することが望ましい。

気泡ミルクや気泡モルタル内部は硬化時に95℃にも度達することがある。現状ではコンクリートに比べてはるかに低い強度で用いられていること、用途によっては全体として一体性が確保されればよいとの考えからこの点に関しては特に問題視されていないが、解析等により硬化温度の構造体に及ぼす影響を確認しておく必要がある。

発 表 論 文 リ ス ト

謝 辞

付録 既発表文献リスト

(1) 学術論文

No.	論文題目	発表雑誌名	号、巻、頁	発表年月	共著書
1	Experimental Study on the Rheological Properties of Fresh foamd Cement Paste and Mortar	Proceeding of 5 th Intenational Confernce on the Superplasticizer and Other Chemical Admixtur, ACI/CANMET	pp321-342	1997.10	吉野 公 西林新蔵
2	気泡モルタルの物性と震災復旧工事への適用例	材料学会第2回地盤改良シンポジウム論文集	pp141-148	1997.1	鈴木教泰 矢本拓生 松尾豊弘 笠井寿太郎

(2) 参考論文(学術論文、口頭発表論文)等

No.	論文題目	発表雑誌名	号、巻、頁	発表年月	共著書
1	セメント系材料を用いた固化処理土の三軸圧縮特性	セメント技術年報	3 6 516~519	1982.7	片岡宏治 万仲 茂
2	Properties of the Super low Heat Cement Concrete	7th Intenatinal Congress on the Chemistry of Cemen	Vol.3 ppV119 -V123	1980.6	松原 篤 中野錦一
3	軽量盛土材料に関する現場実験	大阪セメント技報	No.59 97-105	1992.3	土田孝 清水和也 松尾豊弘 笠井寿太郎 会田正彦 石田謙二
4	浚渫土を使用した軽量埋立材料施工実験	土木学会第47回年次学術講演会	Ⅲ部門 pp1082- 1083	1992.9	土田孝 清水和也
5	軽量盛土・埋立材料に及ぼす養生条件の影響について	第28回土質工学研究発表会	2分冊の2 pp2669- 2672	1993.6	笠井寿太郎 土田 孝 水上純一 横山裕司 槌田和徳
6	増粘剤系高流動コンクリートの配合に関する研究	第48回平成8年度土木学会中国支部研究発表会発表概要集	pp513~514	1996.5	吉野 公 西林新蔵 糸永和明 平田英樹
7	地震により生じた杭周辺の空隙に気泡モルタルを充填して復旧	建築技術	No.545 pp90-91	1995.9	松尾豊弘 笠井寿太郎
8	浚渫土を使用した発泡ビーズ混合処理土の材料特性(その2) - 養生条件が及ぼす影響 -	第29回土質工学研究発表会	pp2391- 2392	1996.6	菊池喜昭 梅原靖文 内山正美 緒方広泰

9	エアミルクのレオロジー特性に関する基礎的研究	土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集	V部門 pp244-245	1996.9	塩沢成文 吉野 公 西林新蔵
---	------------------------	------------------------	------------------	--------	----------------------

謝 辞

本論文は著者が鳥取大学大学院工学研究科社会開発工学専攻に入学し、実施した研究ならびに大阪セメント株式会社中央研究所ならびに株式会社中研コンサルタントで実施した研究成果をとりまとめたものです。

著者が鳥取大学工学部土木工学科在学時代、同大学院工学研究科土木工学専攻時代より現在に至るまで公私にわたり御支援、御厚情をいただき、特に本論文をまとめるに当たっては一方ならぬ御指導、御鞭撻をいただきました鳥取大学教授・西林新蔵博士に衷心より御礼申し上げます。

博士課程入学以来ご指導を頂き本論文の審査に当たっても細部にわたるご指導いただきました鳥取大学教授上田茂博士、同教授榎明潔博士に厚く御礼申し上げます。また、井上正一博士には学部学生時代より公私にわたりご指導いただきましたお礼申し上げます。

旧大阪セメント株式会社中央研究所に在職中に大学への入学に際し、ご配慮いただきました辻野昭夫専務取締役ならびに入社以来研究への取り組み方、進め方の基本からご指導いただきました常務取締役中野錦一博士（現(株)中研コンサルタント会長）に心から御礼申し上げます。

本論文のとりまとめにあたりデータの使用等にご配慮いただきました住友大阪セメント株式会社車田則充取締役セメント・コンクリート研究所長、山登英臣専務取締役にお礼申し上げます。

大阪セメント時代より地盤改良関係の研究のご指導を頂き、大学への通学、研究につきご配慮頂きました株式会社中研コンサルタント片岡宏治社長にお礼申し上げます。また、気泡モルタルの研究に取り組んだ初期のころから実験の実施データ整理に協力いただいた黒田実氏（現グリーンスター）、佐藤弘文氏、鈴木教泰氏ほか社員諸氏にお礼申し上げます。

工法の実用化を担当し、現場のデータを提供いただいた株式会社エステック エスフォーム部矢本拓生部長、データの解釈の議論に参加いただいた笠井寿太郎氏、松尾豊弘氏他関係諸氏にお礼申し上げます。また、現場の関係諸氏にお礼申し上げます。

また、鳥取大学講師吉野公博士には実験指導ならびにデータ解析などご協力いただきました厚くお礼申し上げます。塩沢成文氏（現株式会社松村組）には実験を担当していただきました厚くお礼申し上げます。鳥取大学黒田保助手ならびに材料研究室学生諸氏には実験などに協力いただきましたお礼申し上げます。

さらに、日本道路公団、運輸省港湾技術研究所関係などの多くの関連する研究を引用させていただきました。関係各位にお礼申し上げます。

最後に、不規則生活を見守り、励ましてくれた家族に感謝します。

平成10年3月吉日

後 藤 年 芳

END