

水利施設に用いるフライアッシュコンクリートの
耐凍害性に関する研究
A Study on Frost Damage Resistance of Fly Ash Concrete using
Water Use Facilities

坂 田 昇
Noboru SAKATA

2014

目 次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.1.1 寒冷地に構築されるコンクリートの耐凍害性について	4
1.1.2 コンクリートの耐凍害性に及ぼす要因とその影響	5
1.2 既往の研究	7
1.2.1 気泡による凍害抑制のメカニズム	7
1.2.2 フレッシュコンクリートと硬化コンクリートの空気量	12
1.2.3 使用材料が気泡の性状に及ぼす影響	14
1.2.4 コンクリートの凍結融解抵抗性を確保するための空気量と骨材品質	21
1.2.5 フライアッシュコンクリートの空気連行性および耐凍害性	27
1.2.6 ブリーディングと耐凍害性の関係	29
1.3 本研究の目的	30
1.4 本論文の構成	30
第1章の参考文献	32
第2章 耐凍害性に及ぼす凝結過程の空気量変化の影響	37
2.1 概要	37
2.2 フレッシュおよび硬化コンクリートの空気量が凍結融解抵抗性に及ぼす影響	37
2.2.1 使用材料および配合	37
2.2.2 試験方法	40
2.2.3 試験結果および考察	41
2.3 凝結過程における空気量の変化	47
2.3.1 使用材料および配合	47
2.3.2 試験方法	48
2.3.3 試験結果および考察	49
2.4 ブリーディング量の違いが気泡組織に及ぼす影響	51
2.4.1 使用材料	51
2.4.2 試験方法	52
2.4.3 試験結果および考察	52
2.5 第2章の結論	57
第2章の参考文献	58

第3章 コンクリートの気泡組織と耐凍害性の関係	59
3.1 概要	59
3.2 気泡組織測定および凍結融解試験の方法	59
3.2.1 使用材料および配合	59
3.2.2 試験方法	61
3.3 気泡組織測定および凍結融解試験の結果	62
3.3.1 フレッシュ時および硬化後の空気量	62
3.3.2 気泡組織と凍結融解試験結果の相関	63
3.4 気泡径の分布と気泡間隔係数および耐久性指数の関係	67
3.4.1 気泡径の分布と耐久性指数の関係	67
3.4.2 気泡間隔係数に関するパラメータスタディ	70
3.5 気泡径ごとの空気量と耐久性指数の関係	72
3.5.1 気泡径ごとの空気量と気泡間隔係数および耐久性指数の関係	72
3.5.2 径0.15mm未満の空気量と耐久性指数の関係	74
3.6 第3章の結論	76
第3章の参考文献	76
第4章 コンクリートの耐凍害性に及ぼすブリーディングの影響	78
4.1 概要	78
4.2 AE剤による気泡の安定性	78
4.3 石灰石微粉末で細骨材置換した場合のブリーディングと凍結融解抵抗性の関係	79
4.3.1 使用材料および配合	79
4.3.2 試験方法	81
4.3.3 試験結果および考察	81
4.4 細骨材の種類と混合比率の違いによるブリーディングと凍結融解抵抗性の関係	86
4.4.1 使用材料および配合	86
4.4.2 試験方法	87
4.4.3 試験結果および考察	91
4.5 各環境温度で遅延剤を使用した場合のブリーディングと凍結融解抵抗性の関係	97
4.5.1 使用材料および配合	97
4.5.2 試験方法	98
4.5.3 試験結果および考察	98
4.6 第4章の結論	102
第4章の参考文献	102

第5章 耐凍害性に及ぼす各種 AE 剤の空気安定性	104
5.1 概要	104
5.2 各種 AE 剤の空気安定性に関する試験の内容	104
5.2.1 使用材料および配合	104
5.2.2 試験項目	106
5.3 各種 AE 剤の空気安定性に関する試験の結果	107
5.3.1 各種 AE 剤の使用量	108
5.3.2 ブリーディング量	108
5.3.3 強度発現性	109
5.3.4 凍結融解抵抗性	109
5.3.5 気泡組織と凍結融解抵抗性	112
5.4 第5章の結論	116
第5章の参考文献	117
第6章 結論	119
謝辞	125
摘要 [Abstract]	126
学会誌公表論文リスト	130

第 1 章

序 論

第 1 章 序論

1.1 研究の背景

我が国の農業を支える農業水利施設は表-1.1 に示すとおり、基幹的なものだけでも貯水池 1,237 箇所、頭首工 1,949 箇所、用排水機場（以下、機場）2,801 箇所、用排水路（以下、水路）48,509km ある（2008 年 3 月 31 日時点の推計値）[1]。これらの施設は、それぞれの地域の水利ネットワークの維持に貢献するために各施設に要求される機能を発揮する必要があり、もし変状が生じている場合はその原因を明らかにするとともに、機能保全のために適切な対策を施す必要がある。

多くの水利施設では、建設材料としてコンクリートが用いられている。コンクリートは、セメント、水、細骨材、粗骨材、混和材料により製造され、その配合は施設の構造寸法・形式、あるいは供用環境を考慮して設計される。利水・治水施設であるコンクリートダムでは、マッシュなコンクリート（以下、マスコンクリート）になることから、コンクリート打設後の水和熱に伴う温度ひび割れを抑制するために、フライアッシュを混合した低発熱型のセメントによるコンクリートを用いることがある。例えば、(財)日本農業土木総合研究所の「ダム技術検討委員会データベース(昭和 53 年度～平成 14 年度)」[2]によると、S ダムや H ダムではダム堤体の外部コンクリート、内部コンクリート、監査廊などの構造用コンクリートに用いられており、M ダムでは嵩上げのための外部コンクリート、N ダムや S 調整池では構造用コンクリートとして監査廊や洪水吐に用いられている。

フライアッシュの混合セメントは、マスコンクリートの温度ひび割れの抑制に貢献するが、一方で普通ポルトランドセメントよりも緻密性が低いために、ひび割れが生じていないコンクリート面においてもエフロレッセンスの発生が見られ、中性化抵抗性が低い[3,4]ことから、鉄筋コンクリート構造となる監査廊、洪水吐、導水路においては鉄筋腐食が生じやすくなることが懸念されている。また、山間部に構築されるダムは、冬期において氷点下になる気象環境下にあるため、コンクリート内部の空隙に存在する水が凍結融解を繰り返すことでコンクリート組織の緩みや微細ひび割れが生じやすく、その結果として物質移動抵抗性を更に低下させることから中性化抵抗性も低下し、鉄筋コンクリート構造の洪水吐や導水路において鉄筋腐食が生じやすくなることが懸念されている。利水目的のコンクリートダムの新設および嵩上げの計画は今後ないが、現在あるコンクリートダムの監査廊、洪水吐、導水路などフライアッシュコンクリートで建造された鉄筋コンクリート構造物を適切に処置するためにも、その劣化メカニズムを把握することが重要になっている。

表-1.1 基幹的農業水利施設の施設数、水路延長（平成20年）[1]

	貯水池 (箇所)	頭首工 (箇所)	水門工 (箇所)	管理施設 (箇所)	機場*1 (ポンプ場) (箇所)	水路*2 (km)	集水渠 (km)	合 計	
								点施設 (箇所)	線施設 (km)
北海道	105	213	31	4	260	11,576		613	11,576
青森県	38	80	9	5	89	1,254		221	1,254
岩手県	36	58	11	5	44	1,342		154	1,342
宮城県	42	60	40	2	178	1,672		322	1,672
秋田県	76	95	42	2	65	1,489	1	280	1,490
山形県	47	77	24	16	143	1,676	0	307	1,676
福島県	53	123	17	16	50	1,155		259	1,155
茨城県	11	36	71	5	172	1,518	0	295	1,518
栃木県	17	86	6	1	30	1,120	13	140	1,133
群馬県	14	58	19		21	693		112	693
埼玉県	8	44	48	6	61	1,384		167	1,384
千葉県	29	27	121	8	235	1,557		420	1,557
東京都		2				25		2	25
神奈川県		6	4			100		10	100
新潟県	37	89	137	30	290	2,695		583	2,695
富山県	15	33	7	7	9	1,186	1	71	1,187
石川県	17	19	10	2	49	315		97	315
福井県	4	26	8	5	44	625	11	87	636
山梨県	8	8	7	1	16	186	15	40	201
長野県	43	92	39	6	28	1,992		208	1,992
岐阜県	23	31	23	2	75	818	1	154	819
静岡県	20	26	50	2	50	1,117	0	148	1,117
愛知県	31	20	31	10	188	2,467		280	2,467
三重県	30	56	26		67	756	0	179	756
滋賀県	14	27	9	12	44	781	1	106	783
京都府	6	14	9	1	13	150	0	43	150
大阪府	6	4	2		3	116		15	116
兵庫県	37	43	10	6	18	628	1	114	628
奈良県	12	11	3		10	261		36	261
和歌山県	6	12			26	333		44	333
鳥取県	15	31	6	2	9	295	3	63	298
島根県	8	7	15	2	35	324		67	324
岡山県	47	33	16	10	90	864		196	864
広島県	25	6	4		15	111	1	50	112
山口県	16	14	5		17	131		52	131
徳島県	6	8	35	3	35	300	1	87	301
香川県	79	24	2		15	434		120	434
愛媛県	35	23	7	3	8	588	0	76	588
高知県	6	11	3	1	8	156		29	156
福岡県	57	90	10	7	32	598		196	598
佐賀県	47	23	13	2	43	477	1	128	478
長崎県	22	4	4	4	26	154		60	154
熊本県	19	56	66	2	97	811		240	811
大分県	25	46	10	10	16	595	10	107	605
宮崎県	9	48	37	9	12	531	0	115	531
鹿児島県	26	46	15	9	50	906		149	906
沖縄県	10	3		1	15	249		29	249
全国	1,237	1,949	1,062	219	2,801	48,509	61	7,268	48,570

基幹的農業水利施設：農業用排水のための利用に供される施設であってその受益面積が100ha以上の施設

*1 電動又は発動機による用排水機を備えた恒久施設で、附帯する調整池及び樋管を含む。なお、移動式ポンプ及び水路に附帯するパイプライン加圧ポンプ（「水路・集水渠」として整理）は除く。

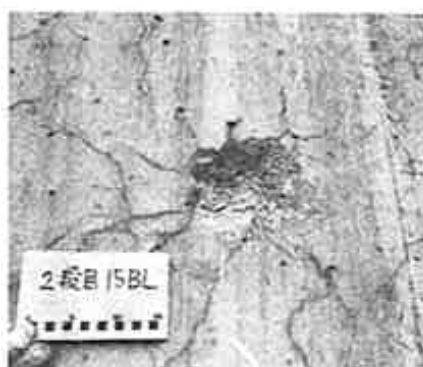
*2 支配面積を1つとする1条の農業用排水路を指す。

一方、経済産業省委託事業である平成 20 年度中小企業支援調査「セメント産業における非エネルギー起源二酸化炭素対策に関する調査－混合セメントの普及拡大方策に関する検討－」の報告書 [5] では、混合セメントの利用拡大を図ることで非エネルギー起源二酸化炭素の削減に寄与する方針を示している。農林水産省における平成 19 年度の公共事業の特定調達品目実績では、高炉スラグや石炭灰（フライアッシュ）等を多量に混合させる混合セメントの調達割合がセメントで 63%、生コンクリートで 95%であり、今後の中長期的な地球温暖化対策に貢献するためにも、混合セメントの調達はさらに拡充されることが予想される。ただし、生コンクリートにおいて、農林水産省における実績は、高炉セメントの調達量は 185,648m³ であるのに対してフライアッシュは 1,084m³ と著しく少ない [5]。加えて、フライアッシュの混合セメントは、前述したように、ダムコンクリートにおいて温度上昇を抑制する目的で使用されることがあるものの、フライアッシュを用いたコンクリートは普通コンクリートよりも耐凍害性が劣るとされているために、寒冷地における農業水利施設への適用拡大がなかなか図られていない。

寒冷地に構築される水利施設では、ダムにおいて**写真－1.1**、**写真－1.2**に示すような凍害劣化、開水路において**写真－1.3**、**写真－1.4**に示すような凍害劣化 [6] が、コンクリートに凍結融解の繰返し作用を生じさせる寒冷地特有の環境条件に基づいて発生する。



写真－1.1 ダム堤体表面のスケーリングの事例



写真－1.2 ダム堤体表面のポップアウトの事例



写真-1.3 開水路のスケーリングの事例



写真-1.4 開水路の目地付近の劣化事例

凍害は、劣化機構の断定を行う場合に、凍害は中性化、塩害、アルカリシリカ反応などの化学的変化を伴う劣化機構とは異なり、水の凍結に伴う体積膨張に起因する物理的劣化であるため、劣化の原因を特定する手段がなく、変状のパターンから、状況証拠的に凍害劣化と特定する場合はほとんどであると述べており [7]、凍害の劣化メカニズムを把握することは現在でも課題となっている。このことから、寒冷地における水利施設へのフライアッシュコンクリートの適用拡大を図るためには、普通コンクリートよりも耐凍害性が劣る原因を明らかにするとともに、フライアッシュコンクリートの耐凍害性を向上させる方法を明らかにすることが重要になる。

そこで、本論文では、フライアッシュコンクリートの物質移動抵抗性を低下させる原因となる凍害劣化メカニズムを解明し、フライアッシュコンクリートの耐凍害性を向上させる方法について提案することを目的として、特にフライアッシュコンクリートの利用実績が多いダムコンクリートを対象に気泡特性の観点から検討を行う。また、本論文では、寒冷地における水利施設へのフライアッシュコンクリートの適用拡大に資することも目的としていることから、耐凍害性を確保するためのフライアッシュコンクリートの配合設計の条件について提案する。

1.1.1 寒冷地に構築されるコンクリートの耐凍害性について

ダムコンクリートでは、一般的に温度上昇を抑制する目的で、フライアッシュをセメントの質量比で 20～30% 置換している。しかしながら、フライアッシュを用いたコンクリートは、普通コンクリートに比べて耐凍害性に劣るという報告 [8] がされている。フライアッシュを用いたコンクリートの耐凍害性が普通コンクリートよりも劣るメカニズムとしては、フライアッシュに含まれる未燃炭素が AE 剤を吸着するために、AE 剤の効果が得られにくく、さらに、連行した空気が経時に伴って減少しやすい [9] ことが考えられる。

また、コンクリートの耐凍害性については、ブリーディングと高い相関があり、ブリー

ディングが多いコンクリートほど、耐凍害性が低下する傾向にあることが報告されている [10]. ブリーディングが多いコンクリートの耐凍害性が低下する原因として、阿波らは、ブリーディング中において上昇した気泡の集合、合体などの現象を挙げている [11]. フライアッシュを用いたコンクリートの場合、凝結が遅れるためブリーディングが増加する傾向にあり [12], このことも、耐凍害性に影響を及ぼしている可能性がある.

いずれの場合においても、コンクリートの凝結過程において、凍結融解に伴う圧力を緩和する役割を果たす気泡の量が減少するために、耐凍害性が低下するという機構が推察される. しかし、これまでに、コンクリートの凝結過程における気泡組織の変化に着眼した研究は、ほとんどされておらず、耐凍害性に及ぼす影響についても明らかにされていない. したがって、これらのことを明らかにすることは、耐凍害性に優れたフライアッシュコンクリートの適切な配合設計に寄与できるものと考えられる.

1.1.2 コンクリートの耐凍害性に及ぼす要因とその影響

コンクリートの耐凍害性を確保するためには、適切な気泡の連行が必要とされる. 多孔質であるコンクリート中において、水は微細な連続性のある空隙から充填され、球状の独立空隙である気泡には空気が存在する. 空気は圧力による体積変化が容易であることから、コンクリート中の水が凍結する際の圧力を緩和するとともに、不凍結水の逃げ場にもなる. このとき、コンクリート中の気泡の量すなわち空気量が同一であれば、個々の気泡間の距離が短いほど、その効果が大きくなる. そのため、コンクリートの耐凍害性を評価するために、気泡の平均間隔を表す気泡間隔係数が用いられる [13].

コンクリートの気泡間隔係数は、セメントペースト中において、 N 個の同じ寸法の球体の気泡を単純立方格子に配置したとき、立方体の対角の長さの $1/2$ から気泡半径を引いた距離として定義され、式-1.1 によって算出される [13].

$$\bar{L} = \frac{3}{a} \left[1.4 \left(\frac{p}{A} + 1 \right)^{1/3} - 1 \right] \quad \text{式-1.1}$$

ここに \bar{L} : 気泡間隔係数(mm)
 a : 気泡比表面積(mm^2/mm^3)
 p : ペースト容積比
 A : 硬化コンクリートの空気量(%)

コンクリートの気泡間隔係数と耐凍害性の相関については、多数の研究結果が報告されており、気泡間隔係数が大きいほど、凍結融解試験結果の耐久性指数が低くなる傾向が確

認められている [14,15,16,17].

また、コンクリート中の気泡のうち、直径が 0.3mm よりも小さい気泡の量が重要であるとする考え方もあり、コンクリートの耐凍害性を確保するためには、直径が 0.3mm より小さい気泡の量を、コンクリートの体積に対して 1.8%以上確保することが必要であることが示されている [18].

コンクリートの凍害のうち凍結融解による劣化は、コンクリート中の水分が凍結と融解を繰り返すことによって、スケーリング、内部劣化およびポップアウトなどを生じる現象である。毛細管空隙に存在する自由水の凍結による体積増加は未凍結水の移動を促し、その際に生じる水圧が内部組織を破壊するために劣化が生じるとする水圧説と、ゲル空隙中の未凍結水が毛細管空隙に移動することで氷晶の成長を促し、結果的に膨張圧が増大することでコンクリートが劣化する浸透圧説が基本メカニズムとして挙げられている [19].

このような劣化からコンクリートを保護するには、AE 剤による独立微細な気泡の連行が有効であることが広く認識されている。AE 剤で連行された気泡は直径数が 10~500 μm 程度の範囲に分布し、自由水が凍結した際に発生する圧力をこれらの気泡が緩和することで凍害劣化が抑制でき、一般に 250 μm 以下であれば良好な耐凍害性を得るとされている [20]. ただし、微細な気泡の連行以前に、単位水量の少ない密実なコンクリートであることおよび吸水率の小さい堅硬な骨材を使用すること等が前提である。

また、近年の天然骨材の枯渇に伴い、粗骨材の砂利から砕石への転換のみならず、細骨材においても砕砂を全量 (100%) 使用するケースが、ダムコンクリートはもとより、一般の生コンクリートにおいても見られるようになってきている [21]. 細骨材の全量を砕砂にした場合、粒形の角張りに起因する、フレッシュコンクリートのワーカビリティの低下や単位水量の増加によるブリーディングの増大が注意点として挙げられ、コンクリートの凍結融解抵抗性の低下に繋がる可能性がある。凍結融解抵抗性に大きく関わる AE 剤により連行された気泡にブリーディング量が無視できないほど影響することが明らかになれば、対象はダムコンクリートのみならず、一般的なコンクリートに対しても有用な知見であると考えられる。

コンクリートの耐久性に及ぼすブリーディングの影響について庄谷らは、フェロニッケルスラグ細骨材を使用したコンクリートの凍結融解抵抗性が極めて劣る要因が、天然骨材より粒径が悪く密度が大きいこと結果的にブリーディングが増大し、コンクリートの内部欠陥が助長されることにあるとしている [22]. また、阿波らは銅スラグ細骨材を用いたブリーディングが発生しやすい条件において、気泡組織や細孔構造および粗骨材界面に対するブリーディングの影響を検討し、ブリーディングの過多は粗骨材界面の脆弱層生成の助長に加えて、気泡間隔係数を大きくさせると指摘している [23]. いずれの場合においても、鉱物質微粉末の外割り添加でブリーディングを抑制することで、凍結融解抵抗性を著しく

改善できると報告されている。

1.2 既往の研究

1.2.1 気泡による凍害抑制のメカニズム

(1) セメントペースト中の空隙

セメントペースト中に形成される空隙は、図-1.1 に示されるように、直径数 nm 程度のゲル空隙、数 nm～数 μm の毛細管空隙、数 μm ～数 mm の気泡に大別される。一般に毛細管空隙は、フレッシュセメントペースト中の間隙水が水和の進行に伴い消費され、水和物によって充填されなかった部分である。このことから、比較的連続した空隙となり、水などの物質の移動経路となる。さらに、毛細管空隙中に存在する水分は自然環境下において十分に凍結可能な状態にあり、凍害を引き起こす原因となる氷晶の生成と、それに伴う不凍結水の移動の起点ともなる。そのような凍害からコンクリートを保護するためには、独立した微細な気泡をセメントペースト中に形成することによって、不凍結水の移動圧を緩和するような機構を作ることが必要である。

AE 剤によって連行される気泡は、形成時の表面張力により球形で、寸法が小さく、それぞれ独立して分布している。また、内部は空気で満たされた文字どおりの気泡であって水が浸入していない。このような AE 剤によりセメントペースト中に連行された気泡はエントレインドエアと呼ばれ、その直径は数十～500 μm 程度の微小な範囲の分布となる(図-1.2) [24]。一方、コンクリートの練混ぜ過程で混入されるエントラップトエアは、直径500 μm 程度以上と肉眼で確認できるほど大きく、不規則な形状の空隙を形成する。しかし、エントレインドエアとエントラップトエアは定性的な概念であり、気泡分布から両者を定量的に評価し、凍害劣化メカニズムと関連付けて検討することは難しいとされている。

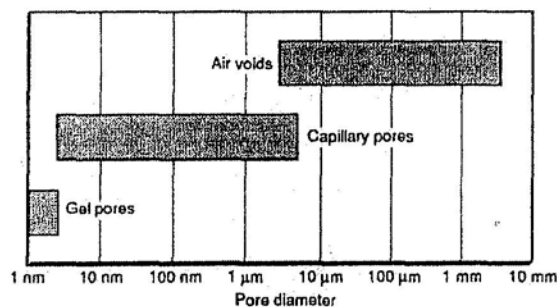


図-1.1 セメントペースト中の空隙

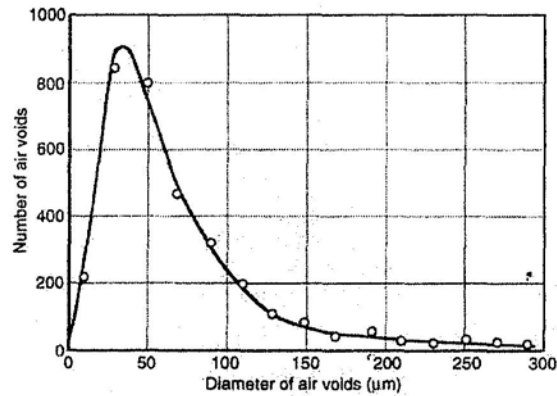


図-1.2 エントレインドエアの径の分布 (一例) [24]

(2) 凍害メカニズムにおける気泡の役割

1) Powers の水圧説

Powers は、気泡の間隔をペーストの特性や凍結速度と関連させた理論式(式-1.2)を提案した [25]。この式は比較的単純なメカニズムに基づくものであり、温度が 0°C より下がると、毛細管空隙中で水は凍り始めるが、それが体積増をもたらすことになる。また、飽和した毛細管空隙内で氷晶が生成されることにより、ある量の不凍結水は強制的に押し出される。この不凍結水がペーストに損傷を与えずに凍るためには、気泡に向かって移動しなければならないとするものである。その際、ある透水係数をもつポーラスな組織で

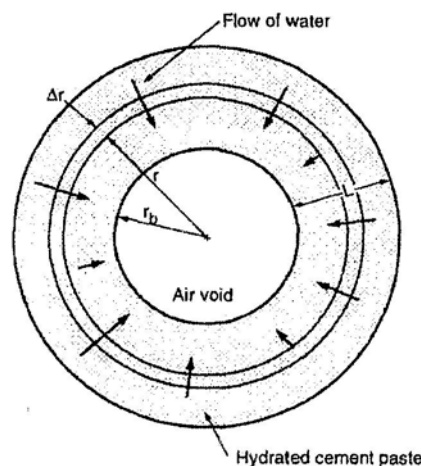


図-1.3 Powers の影響球 [25]

あるセメントペーストを通り移動しなければならないことになる。Powers は図-1.3 に示される気泡の「影響球」と呼ばれる厚さ L のペースト殻に囲まれた半径 r_b の単一気泡モデルにより、水がペースト中を移動しなければならない最大距離 L_{max} を算出している。

$$\frac{L_{max}^3}{r_b} + \frac{3L_{max}^3}{2} = \frac{KT}{UR} \times (CONSTANT) \quad \text{式-1.2}$$

ここに、 L_{max} : 水がペースト中を移動しなければならない最大距離

K : ペーストの透水係数

r_b : L のペースト殻に囲まれた半径

T : ペーストの引張強度

U : セメント 1g 当り，温度低下 1°C 当りの凍結水量

R : 凍結時の冷却速度

式-1.2 は気泡の回りの影響球の最大厚さが，凍結速度が増加すると減少し，また，引張強度と透水係数が増加するにつれ増大することを示している．つまり，発生した不凍水圧を緩和するためには，小さい気泡間隔を有するペーストが必要であることを示唆している．しかし，気泡の影響球の最大厚さ L_{max} には，凍結時に到達する最低温度(融点効果)の影響は考慮されておらず，凍結水量は温度低下に伴い比例増加すると仮定している．

2) 不凍水圧の発生を解析するための球状モデル

セメントペーストの凍結過程において空隙中に存在する水には凝固点降下が生じ，さらに過冷却状態となる．その過冷却水が凍結する際の急速な氷晶の成長に伴う急激な体積膨張により不凍水が大きな流速で移動し，その結果生じる不凍水圧によって組織が破壊され凍害が生じるとした凍害機構が，桂らによって提唱されている[26]．この凍害機構は，Powersの水圧説，鎌田[27]の理論に過冷却を考慮した凍害理論といえる．

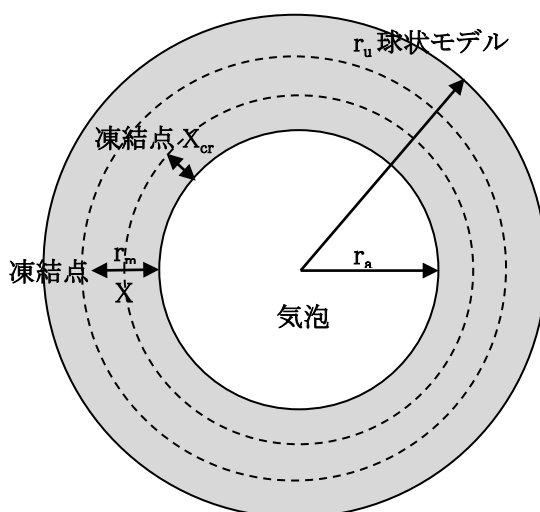


図-1.4 球状モデル [28]

さらに、桂らは過冷却水の凍結に起因した急速な不凍結水の移動と圧力発生、組織破壊と変形の機構を記述するため、図-1.4 に示すように 1 気泡を中心とする球状セルにより気泡組織をモデル化している [28]。このモデルでは、水が氷へと相変化する際の体積増分に相当する不凍結水の移動により生じる不凍水圧は、凍結点と気泡の距離に依存するとしている。球状モデル半径 r_u は次式(式-1.3)により与えられる。

$$r_u = \left[\frac{p}{(100nl)} \right]^{1/3} r_a \quad \text{式-1.3}$$

ここに、 r_u : 球状モデル半径(mm)

p : 気泡を含むペースト率(%)

n : 単位長さ当りの気泡数(個/mm) $n = N/T$

l : 気泡の平均弦長(mm) $l = L/N$

r_a : 平均気泡半径(mm) $r_a = 3l/4$

N : 総気泡数(個)

T : 総測線長(mm)

L : 気泡総弦長(mm)

セメント硬化体組織を破壊しうる不凍水圧を生じさせる気泡と凍結点との距離を限界距離 X_{cr} とする。限界距離 X_{cr} は、凍結点から排出される不凍水の流速 ${}_f Q_m$ と不凍水圧が破壊強度 P_f に達した際の不凍水の流速 Q が等しいとして次式(式-1.4) により求められるとしている。

$$\begin{aligned} {}_f Q_m &= Q \\ \frac{0.0826 \cdot 4\pi r_i^2 \cdot v_i}{4\pi r_m^2} &= \frac{K_p P_f}{X_{cr}} \\ X_{cr} &= \frac{K_p P_f r_m^2}{0.0826 v_i (r_m - t_{af})^2} \end{aligned} \quad \text{式-1.4}$$

ここに、 r_i : 氷晶半径(m)

v_i : 氷晶の成長速さ(m/s)

r_m : 融点に対応する半径(m)

t_{af} : 不凍水層厚さ(m)

そして、凍結点と気泡との距離 X が限界距離 X_{cr} より小さい場合には不凍水圧 P は常に破壊強度 P_f を下回ることとなる。また、限界距離は凍結点の細孔半径、不凍水層厚さ、氷晶の成長速さに依存する。このモデルによって、Powers の水圧説に基礎をおき、過冷却を考慮した不凍水圧によるセメント硬化体組織の破壊と気泡パラメータとを関連付けることが可能となるといえる。

3) 微視的な凍害メカニズム

Powers は Helmhuth とともに、セメントペースト中の間隙水は弱アルカリ性溶液であること、空隙径に依存し未凍結水の融点が低下することを指摘し、熱力学的考察に基づき理論を修正し、「Osmotic pressure theory-浸透圧理論」を発表した [29, 30]。この理論は、まず水(溶液)で満たされている比較的大きな毛細管空隙中に氷晶が形成されると、その空隙中に存在する不凍結水の溶液の濃度が增大する。そして、その比較的大きな空隙に存在する濃縮された水溶液と、氷が形成されておらず濃度も増加していないゲル空隙を含めた微小空隙中の溶液の間の熱力学的平衡状態は崩れることになる。半透膜の現象によって微小空隙中の水は、濃度間の平衡を再構築するために氷が形成されている大きな空隙の水に引き寄せられることになる。このため、浸透圧による拡散で移動した微小空隙中の水が毛細管空隙に達すると氷晶はその寸法を増し、水圧を増大させるとする説である(図-1.5)。凍結防止剤などの塩化物が作用する環境下でのスケーリングの発生メカニズムは、この浸透圧説の拡張により説明されている。

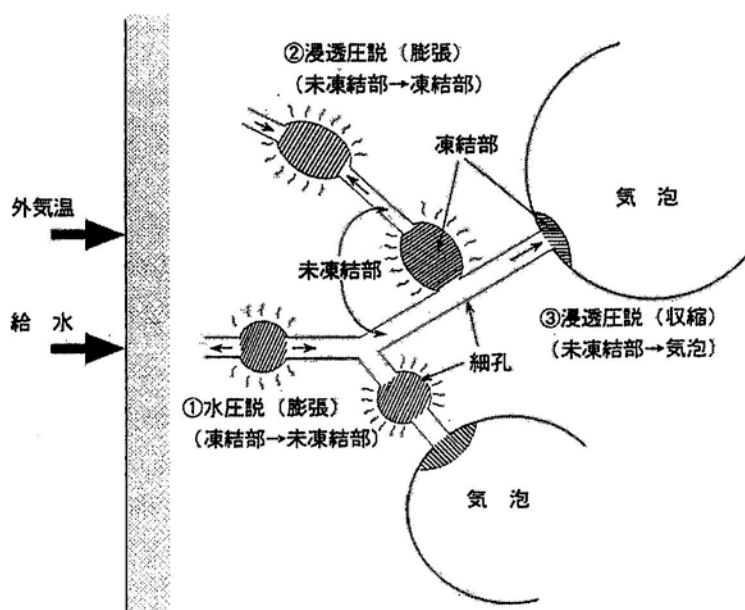


図-1.5 水圧説と浸透圧説の概要 [31]

Setzer は、熱力学的考察から導かれた「マイクロアイスレンズ理論」を発表し、コンクリートを飽水状態に導くメカニズムを提案した [32]。この理論では、常温でゲル空隙と比較的大きな毛細管空隙が部分的に水で飽和した状態を示し、ゲル空隙が凍結時に収縮することにより、ゲル水が毛細管空隙中の氷へ移動するメカニズムを説明している。

また三橋らは、ある温度における凍結圧の下では、同一空隙内に存在する水蒸気、水、氷の状態を示す化学ポテンシャルは等しくなるとし、熱力学平衡条件に基づいた凍結圧を求める理論式を提案した。そして、凍結過程の膨張収縮挙動を適切に表現可能なモデルの構築を試みている [33]。

以上の凍害メカニズムは、いずれもより科学的な根拠に基礎を置くものであり、高度な数理モデルの構築に有効な知見を示している。しかし、これらの理論は微視的な凍害メカニズムを表現するモデルであることから、巨視的な気泡による水圧の緩和機構については不明確となり、余剰水の排出(不凍水の移動)メカニズムを説明することは難しい。一方、微視的メカニズムは、微小空隙からの浸透圧や水と氷の化学ポテンシャルの差による凍結圧、ゲル空隙の収縮を駆動力として、凍結した毛細管空隙(凍結点)への不凍結水の供給メカニズムとして作用すると考えられる。つまり、セメント硬化体における比較的大きな気泡(エントラップトエア)の存在は、氷晶が形成された比較的大きな毛細管空隙への不凍結水の移動防止に寄与することになる。

今後は、熱力学平衡条件に基づく種々の微視的メカニズムと、空隙内での氷晶の生成に伴う不凍水圧の発生として特徴付けられる巨視的メカニズムを統合したモデルの構築が望まれる。これにより、微視的メカニズムを考慮し、凍害機構への気泡の役割をより厳密に記述できるものと考えられる。

1.2.2 フレッシュコンクリートと硬化コンクリートの空気量

フレッシュコンクリートと硬化コンクリートの空気量の関係の一例を図-1.6 に示す [34]。一般的に、空気量が2~8%程度の普通コンクリートであれば、硬化コンクリートの空気量は、フレッシュコンクリートのそれとほぼ同レベルになると考えられている。しかし、使用する化学混和材の種類や粉体量の多いコンクリートによっては、硬化後の空気量が1~2%程度低下するとの報告がある [35,36]。使用材料が気泡の性状に及ぼす影響については1.2.3 で後述する。

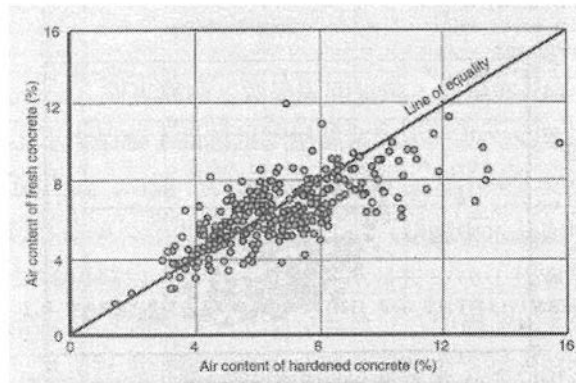


図-1.6 フレッシュコンクリートと硬化コンクリートの空気量の関係 [34]

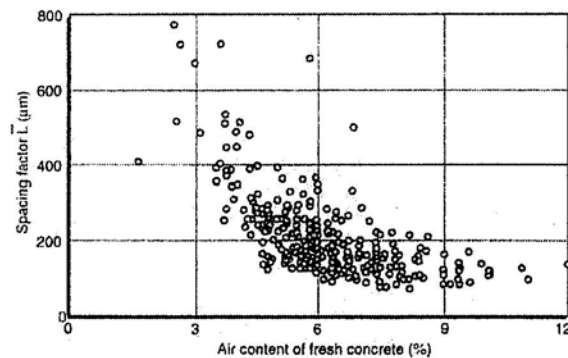


図-1.7 空気量と気泡間隔係数の関係 [37]

フレッシュコンクリートの空気量と凍結融解抵抗性を検討する上で重要なパラメータとなる気泡間隔係数との関係の一例を図-1.7に示す [37]。これより、フレッシュコンクリートの空気量と気泡間隔係数はばらつきがあるものの相関関係にあることが分かる。フレッシュコンクリートの空気量が6%程度では、気泡間隔係数が100~400 μm の範囲にあるが、空気量4%程度以下では、コンクリートの気泡間隔係数は急激な増加傾向を示す。

浜らは、フレッシュコンクリートを用いてコンクリート中に含まれる空気泡の気泡径分布、空気量、比表面積、気泡間隔係数を浮力法により測定し、ASTM C 457のリニアトラバース法による硬化コンクリート中の気泡組織の測定結果と比較検討を行っている [38]。その結果、浮力法で得られる空気量は圧力法、リニアトラバース法よりも小さめの値となること、浮力法の気泡間隔係数はリニアトラバース法による値よりやや大きめの値になることを示している(図-1.8)。

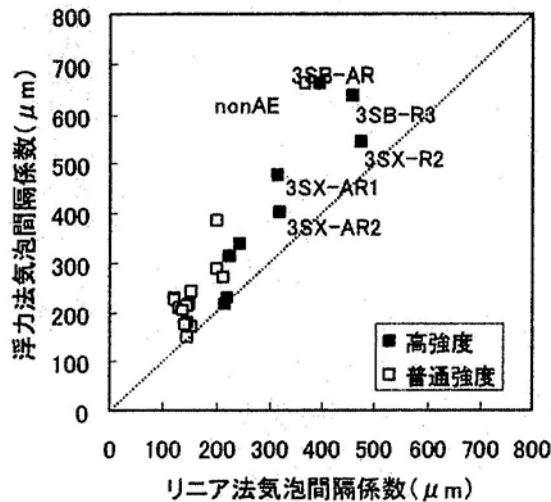


図-1.8 空気量と気泡間隔係数の関係 [38]

1.2.3 使用材料が気泡の性状に及ぼす影響

コンクリートが凍結融解作用を受けた場合の劣化作用は非常に複雑であり、統一的な機構が確立されていないが、多くの既往の研究からコンクリートの配(調)合や使用した骨材の種類が影響因子となることは間違いないことである。コンクリート中に微細気泡(Entrained Air)を人為的に導入することは、氷晶形成に伴う未凍結水の移動圧(内圧)を緩和し、著しく耐凍害性を向上させる一般的な対策といえる。

フレッシュコンクリートの気泡は、AE 剤の種類等によって気泡の大きさ、分布および安定性が異なり、ワーカビリティ、ブリーディング、スランプロス等、コンクリートに及ぼす影響が大きい。AE 剤を用いないコンクリートの気泡、すなわち、エントラップトエアは気泡の径が比較的大きく、周囲にある骨材の状態によってさまざまな形状をなして、不規則に分布している。したがって、エントラップトエアはワーカビリティの改善には大きく寄与しない。一方、良質のAE 剤を用いた場合には30~250 μm の微細気泡を導入することが可能である。AE 剤の主成分である界面活性剤は親水基と親油基とに二極化された分子構造を持ち、一分子中で極性を分けて存在している。AE 剤は空気-水界面へ吸着し、濃度が高くなるにつれ界面のAE 剤吸着量が高くなり単分子膜を形成する。さらに濃度が高くなると単分子膜は飽和し水溶液(バルク)中にミセルを形成する。このような水溶液は表面張力が低下しており、コンクリート練混ぜ時における機械的せん断力を受けてはじめて空気泡(単分子膜気泡)が混入される。混入された空気泡は細かく破壊されてコンクリート中に分散する。機械的せん断力を高めれば空気泡はさらに微細になるはずであるが、実際には細かすぎると空気泡内の内圧は高まり溶けてしまう。この現象は気泡直径が10 μm 以下の気泡が確認できない理由として考えられる。微細な空気泡が内圧のため溶け、安定

した径の空気泡に拡散し、より大きな空気泡を形成することが知られている。また、コンクリート中に混入された空気泡は、外部からの力が作用し、空気泡が変形した場合に単分子膜の AE 剤濃度が薄くなる。このことによって界面張力が高くなり、内圧の高まりに応じて空気泡表面が破れてしまう。空気泡は、周囲の水溶液中から AE 剤を移動させ濃度の低下を防ぐことで安定する。ここではコンクリートの空気泡は単分子膜気泡として捉えているが、実際には空気泡界面には疎水化されたセメント等の混和材料が吸着し複雑な形態をとっていると考えられる。以下に使用材料が気泡の性状に及ぼす影響を示す。

(1) 骨材

1) 粗骨材

コンクリート中に連行された空気泡はモルタル中に存在している。したがって、粗骨材の最大寸法に応じて単位モルタル量が少なくなり、空気量は少なくてよい。また、粗骨材の最大寸法が小さいコンクリートは単位モルタル量が多いので、空気量を多く連行する必要がある。言い換えれば、凍結時に生成される凍結水量はコンクリート中のセメントペースト量および水セメント比の影響を受けるため、コンクリート全体量としての空気量を確保しても耐凍害性を満たしているとは限らない。一般にコンクリート中に連行する適切な空気量の目安は表-1.2 に示すとおりとされている[39]。

表-1.2 厳しい気象条件下の適切な空気量[39]

粗骨材最大寸法(mm)	15	20	25	40	50	80	150
コンクリート中の空気量(%)	7.0	6.0	5.0	4.5	4.0	3.5	3.0
おおよそのエン トラップトエア (%)	2.5	2.0	1.2	1.2	1.0	0.5	0.3

2) 細骨材

コンクリートに連行される空気量は、細骨材の粒度に大きく影響され、特に 0.15~0.6mm の粒の影響がきわめて大きい。細骨材をいくつかの粒度区分に分け、それぞれの粒径の空気連行性を測定した結果によると、1.2mm 以上と 0.15mm 以下の粒径の砂の空気連行作用はきわめて小さく、表-1.3 に示すとおり、ほとんどの空気は 0.15mm~0.6mm の細粒によって得られる [40]。また、細骨材率が小さく、単位細骨材量が小さくなると空気が入りにくい傾向がある。逆に空気が入りやすいコンクリートでは、気泡径の大きいエントラップトエアの占める割合が多くなるため、ワーカビリティの改善や耐凍害性の面からは、あまり好ましくない。

表-1.3 砂の粒度に対する空気量 [40]

砂の粒径(mm)	コンクリート全体の空気量に対する割合(%)
1.17~0.59	15~20
0.59~0.30	30~35
0.30~0.15	45~50
0.15 以下	0~1

注) セメントを用いずに単一粒径の砂に AE 剤を加え、空気量を測定

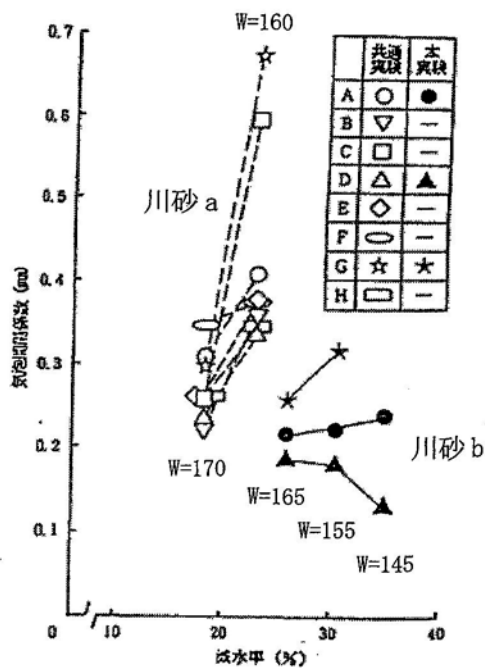


図-1.9 減水率と気泡間隔係数 [44]

A から H の 8 種類の高性能 AE 減水剤を使用したコンクリート(水セメント比 40%)の減水率と気泡間隔係数の関係を図-1.9 に示す [44]。これより、川砂 b を用いたケースを除いて、減水率が大きくなると気泡間隔係数が大きくなる傾向にある。これは、コンクリート中のペースト量が減少し、気泡径が増大したためと考えられる。また、同程度の減水率に対する気泡間隔係数は、川砂 b より川砂 a を使用したコンクリートの方が明らかに大きい。0.3mm 以下の微粒分の多い川砂 b を用いた方が、気泡の比表面積が大きく、気泡間隔係数は小さくなり、さらに、減水率を変化させた時の比表面積の変化の割合も小さいことによるものと考えられる。

(2) 化学混和剤

1) AE 剤

AE 剤の分類を表-1.4 に示す。AE 剤に用いられる界面活性剤には、アニオン、カチオン、非イオン、両性の4種類があり、いずれもコンクリート中に空気泡を導入することができる。種別による特徴としては、カチオンは過大に使用したときに、骨材や鉄筋、型枠を疎水化もしくは荷電中和するために、コンクリートとの付着力の低下、ワーカビリティの低下が懸念される。なお、一般的にはアニオン系がよく使用されている。

表-1.4 AE 剤の分類

大分類	中分類	小分類	主な化学成分
陰イオン系 AE 剤 (アニオン)	カルボン酸塩	脂肪族化合物	脂肪酸石けん
		環式化合物	樹脂酸石けん(アビエチン酸)
	スルホン酸塩	脂肪族化合物	オレフィンスルホン酸塩
		環式化合物	アルキルベンゼンスルホン酸塩
	硫酸エステル塩	脂肪族化合物	高級アルコール硫酸エステル塩 ポリオキシエチレンアルキルエーテル硫酸エステル塩
		環式化合物	ポリオキシエチレンアルキルフェニルエーテル硫酸エステル塩
	リン酸エステル塩	脂肪族化合物	ポリオキシエチレンアルキルエーテルリン酸エステル塩
		環式化合物	ポリオキシエチレンアルキルフェニルエーテルリン酸エステル塩
陽イオン系 AE 剤 (カチオン)			使用されている例が少ない。
両性系 AE 剤	カルボキシベタイン系		N,N-ジメチル-N-アルキル-N-カルボキシアルキレンアンモニウムベタイン
	イミダゾリン系		2-アルキル-1-ヒドロキシエチル-1-カルボキシメチルイミダゾリニウム塩
非イオン系 AE 剤 (ノニオン)	エーテル系	脂肪族化合物	ポリオキシエチレンアルキルエーテル
		環式化合物	ポリオキシエチレンアルキルフェニルエーテル
	エステルエーテル系	ポリオキシエチレン化多価アルコール脂肪酸エステル	ポリオキシエチレンソルビタン脂肪酸部分エステル
			ポリエチレングリコール脂肪酸エステル

JIS A 0203-1993「コンクリート便覧，第2版 (社)日本コンクリート工学協会編」

北海道地区の生コンクリート工場におけるコンクリートの AE 剤添加量を調査した結果を図-1.10 に示す [42]。なお、AE 剤添加量 0.002%は空気量の約 1%を連行させる量に相当する。これより、AE 剤の添加量は 0~0.02%の範囲にあり、0.002%未満の工場は全体の約 10%であり、80%以上が 0.004%以上の工場である。なお、0.016%以上の工場はフライアッシュを使用している工場である。全体として各工場で出荷されたコンクリートは、耐凍害性に配慮した配合であると言え、その気泡組織は AE 剤によって連行された健全なエントレインドエアが多く含まれていると考えられる。

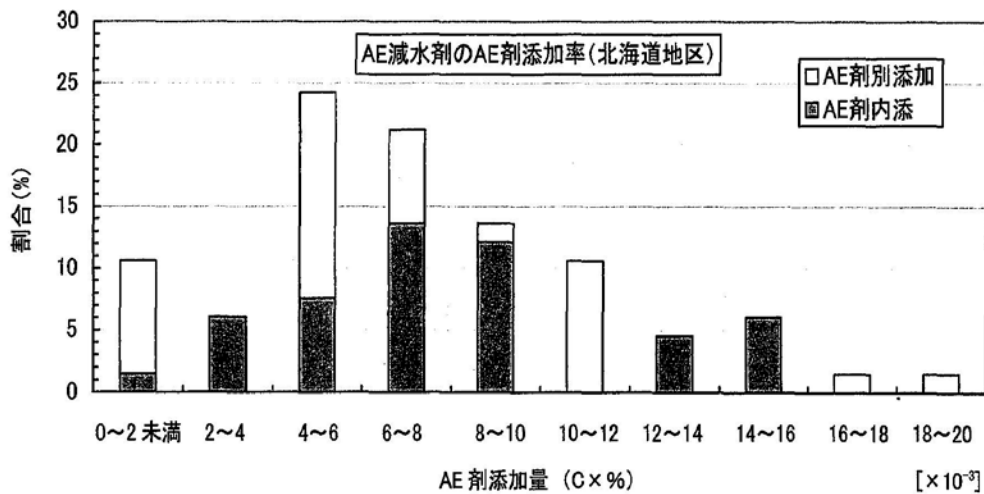


図-1.10 生コンクリート工場における AE 剤添加量 [42]

各種 AE 剤を用いた硬化コンクリート中の気泡間隔係数は、表-1.5 に示すように、レジン系、アルキルベンゾール系 AE 剤を用いた場合はほとんど同じで 200~240 μm 程度と小さく、非イオン系 AE 剤を用いた場合は 400 μm 程度であり、AE 剤を用いない場合は最も大きくなる [43]。また、図-1.11 に示すように、その気泡径分布を見ると、レジン系、アルキルベンゾール系 AE 剤を用いた場合には 50 μm 以下の粒径のものがきわめて多く、非イオン系 AE 剤を用いた場合および AE 剤を用いない場合には小さな粒径のものが少ないことが分かる [44]。ACI(American Concrete Institute)では、厳しい気象条件にさらされるコンクリート構造物を凍結融解作用から十分に保護するために、コンクリート中の気泡間隔係数を 200 μm 以下とすることを推奨しているが、我が国では AE 剤、減水剤が良質であること、また、日本の気象作用が米国に比べて緩やかなため、気泡間隔係数が 250 μm 以下でも耐凍害性があるとされている。

表-1.5 各種 AE 剤を用いたコンクリートの気泡性状 [43]

AE 剤の種類	空気量 (%)	気泡の比表面積 (cm ² /cm ³)	気泡間隔係数 (μm)	1cm ³ 中の気泡数 (個/cm ³)	練上がりのコンクリートの空気量 (%)	凍結融解試験(動弾性係数百分率%)						
						サイクル数						
						0	15	30	60	90	120	150
用いない	1.1	143	659	2840	1.8	100	12	8	—	—	—	—
レジン系	4.2	207	239	28040	4.3	100	95	92	91	91	91	92
アルキルベンゾール系	4.0	254	200	15220	3.7	100	94	94	92	92	93	91
非イオン系	4.6	122	413	6430	4.1	100	24	18	—	—	—	—

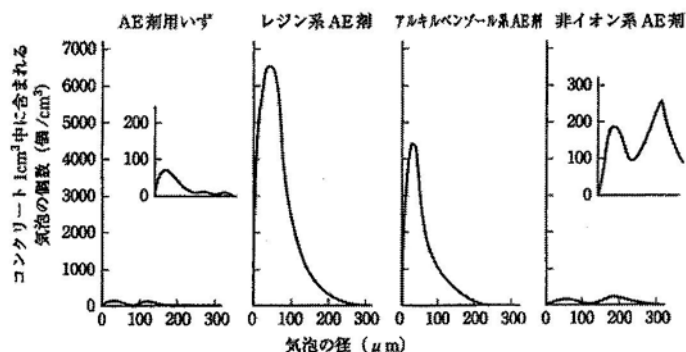


図-1.11 各種 AE 剤を用いたコンクリートの気泡径の分布 [44]

表-1.6 および図-1.12 に示すように、市販の 3 銘柄の AE 剤を用い、空気量を変化させて試験をした結果、空気量が 5%以上あれば気泡間隔係数は 200 μm 以下となることが確認されている [45]。また、気泡間隔係数が 250 μm 程度であっても凍結融解試験における相対動弾性係数は 80%以上であった。

表-1.6 AE 剤の気泡間隔係数と凍結融解抵抗性 [45]

会社	No.	コンクリートの種類	単位水量 (kg/m ³)	スランプ (mm)	空気量(%)		気泡間隔係数 mm	圧縮強度比%	相対動弾性係数(%)	
					フレッシュ	硬化			200 サイクル	300 サイクル
B	1	基準コンクリート	195	45	1.7	—	—	100	—	—
	2	空気量中心	185	45	4.9	3.8	0.185	88	97	—
	3	空気量+1.5%	185	50	6.2	5.0	0.134	73	95	—
	4	空気量-1.5%	185	40	3.6	3.4	0.226	87	95	—
C	1	基準コンクリート	193	50	1.8	—	—	100	—	—
	2	空気量中心	189	50	5.0	4.4	0.199	85	93	90
	3	空気量+1.5%	189	55	6.3	5.9	0.165	81	94	91
	4	空気量-1.5%	193	60	3.3	3.0	0.240	89	90	86
F	1	基準コンクリート	200	45	1.9	—	—	100	—	—
	2	空気量中心	196	45	5.4	4.2	0.180	81	98	97
	3	空気量+1.5%	194	50	6.9	5.8	0.131	69	99	98
	4	空気量-1.5%	198	45	4.0	3.3	0.245	89	98	97

注) 圧縮強度比は材齢 28 日の値。

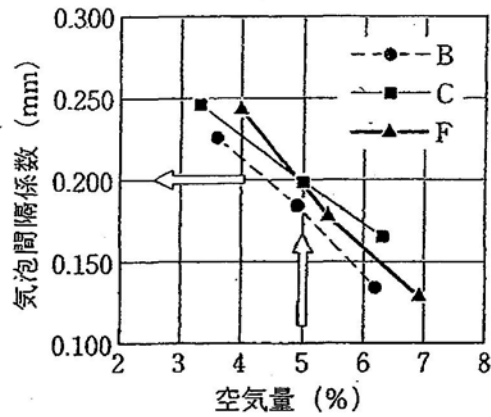


図-1.12 各空気量と気泡間隔係数 [45]

高強度コンクリートの水セメント比と気泡間隔係数および凍結融解試験の結果を図-1.13 に示す [46]。AE 剤を使用した場合の気泡間隔係数は、AE 剤を使用しない場合と比較して、著しく小さくなる。その時の AE 剤を使用した硬化コンクリートの空気量は 2.5%～3%程度であり、普通コンクリートの場合の 4%～5%に比べ、少ない空気量で小さい気泡間隔係数が得られる。また、水セメント比が 30%程度以下の高強度コンクリートであっても、気泡間隔係数が 800 μ m 程度以上(non AE)となる場合には、凍結融解 300 サイクル時の相対動弾性係数が 80%未満の値を示す。

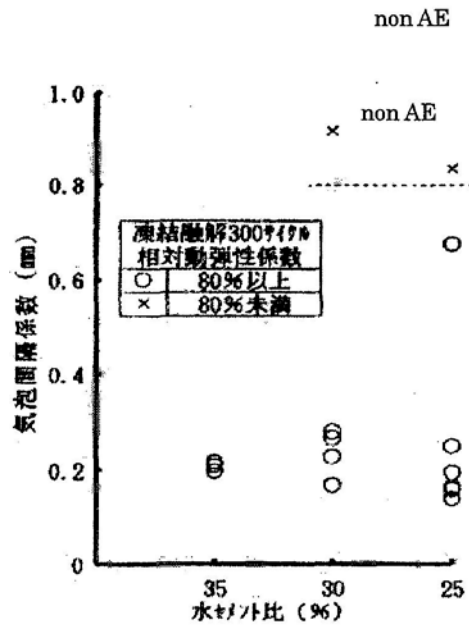


図-1.13 水セメント比と気泡間隔係数 [46]

1.2.4 コンクリートの凍結融解抵抗性を確保するための空気量と骨材品質

(1) 概説

コンクリートの凍結融解抵抗性を確保するためには、適切な品質を持つ骨材を選定し、十分な空気泡を連行する必要がある。JCI (Japan Concrete Institute) 「骨材の品質と有効利用に関する研究委員会」では、コンクリートの凍結融解抵抗性を確保するための空気量と骨材品質との関係を検討する目的で、コンクリートの凍結融解抵抗性に関するデータベースを構築している [21]。

作成されたデータベースは、コンクリートの材料情報(示方配合, 空気量, 気泡間隔係数等), 評価情報(試験方法, 評価指標等), 性能情報(相対動弾性係数, 耐久性指数, 長さ変化, スケーリング量等)から構成されている。表-1.7 は、既往の文献より収集した論文数とデータ数を示したものである。

このデータベースから表-1.8 に示す情報項目とそのデータ範囲を有する 224 データを抽出し、コンクリートが所要の耐久性指数を確保するために必要とされる粗骨材の吸水率と空気量(気泡間隔係数)の組合せについて水セメント比毎に整理し検討した結果を示す。骨材情報としては、特にコンクリートの凍結融解抵抗性に大きな影響を及ぼす粗骨材の吸水率、気泡組織の情報としては空気量(フレッシュコンクリート)と気泡間隔係数、評価情報は一般的な凍結融解試験による耐久性指数を対象とした。

なお、耐久性指数 85 および 60 は、凍結融解作用による劣化がコンクリート性能(材料的な品質)に与える影響が顕在化する、一つの変曲点(限界値)として考え得ることが可能である。そこで、検討にあたって要求されるコンクリートの耐久性指数は、それらの値を採用した。

表-1.7 収集データ数

論文誌名	論文数	データ数
土木学会年次学術講演概要集	13	121
コンクリート工学年次論文集	15	233
土木学会論文集	1	4
コンクリート工学論文集	3	26
合計	32	384

表-1.8 抽出データの範囲

情報	データ範囲
セメント種類	普通ポルトランドセメント
水セメント比	28%~65%
気泡	フレッシュコンクリートの空気量：1%~9% 気泡間隔係数：111 μm~636 μm
粗骨材	吸水率 0.2%~6.98%[最大寸法 15mm~25mm]
細骨材	JIS 規格を満足するもの
試験方法	ASTM C 666 A 法, JSCE G-501 A 法, JIS A 1148 A 法
評価指標	相対動弾性係数(耐久性指数)[凍結融解 300 サイクル]
試験開始材齢	14 日

※骨材の種類は天然骨材および砕砂・砕石

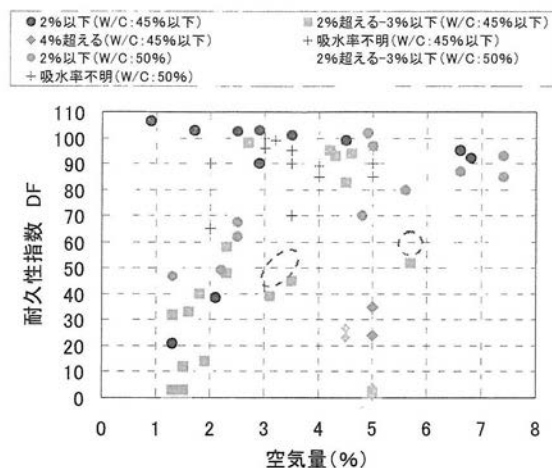


図-1.14 耐久性指数と空気量 (W/C45%以下, 50%)

(2) 水セメント比 45%以下および 50%のケース

図-1.14 は、水セメント比が 45%以下および 50%のコンクリートの耐久性指数と空気量との関係を粗骨材の吸水率により分類したものである。水セメント比が 45%以下で、使用した粗骨材の吸水率が 2%以下のコンクリートの場合、空気量が 3%程度と低い条件であっても、耐久性指数は 85 以上と極めて高い値を示し、凍結融解抵抗性に優れた結果が得られている。一方、粗骨材の吸水率が JIS 規格(2%超える-3%以下)を満足している粗骨材であっても耐久性指数が 60 を下回るケースが一部確認された(丸破線)。これは、低水セメント比において吸水率が 1%近い粗骨材を使用したケースでは、比較的凍結水量が多い骨材を著

しく緻密なペースト部が覆うことになるため、凍結による骨材中での氷晶の生成に伴う周囲のペースト部への未凍結水の移動が拘束され、結果として骨材内部で水圧が高まり骨材自身が劣化の起点となることに起因したものと考えられる。よって、水セメント比が低く設定されている設計では、粗骨材の吸水率がなるべく小さな骨材を選択する等、使用する骨材の選定には特段の配慮が必要と考えられる。しかし、これらの粗骨材を除けば、水セメント比 45% 以下、粗骨材の吸水率が 1% を超えて 3% 以下のコンクリートの場合、空気量 3% 程度を目安とすることにより耐久性指数 60 のレベルを確保できるものと思われる。なお、吸水率が 4% を超える粗骨材を用いたコンクリートでは、目標空気量を 5% 程度とした場合でも凍結融解抵抗性に劣る結果となった。また、水セメント比 50%、使用した粗骨材の吸水率が 2% 以下のコンクリートの場合、耐久性指数が 85 を確保するための空気量の目安は 4% 程度以上となり、水セメント比 45% 以下の場合と比べて 1% 程度増加している。

耐久性指数と気泡間隔係数との関係を図-1.15 に示す。この図より、水セメント比 45% 以下で粗骨材の吸水率 2% 以下の場合、300 μm 程度以下の気泡間隔係数を目標とすることにより、耐久性指数が 85 以上の高い凍結融解抵抗性を確保できるものと思われる。さらに、粗骨材の吸水率が 1% を超えて 3% 以下の粗骨材を用いたコンクリートでは、気泡間隔係数 250 μm 程度以下で耐久性指数が 60 程度となる。なお、吸水率が 4% を超える粗骨材を使用したコンクリートでは、気泡間隔係数が 200 μm 以下であっても耐久性指数はきわめて低い値である。

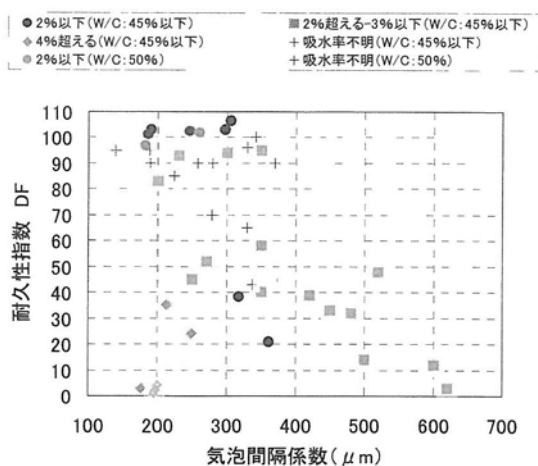


図-1.15 耐久性指数と気泡間隔係数 (W/C45%以下, 50%)

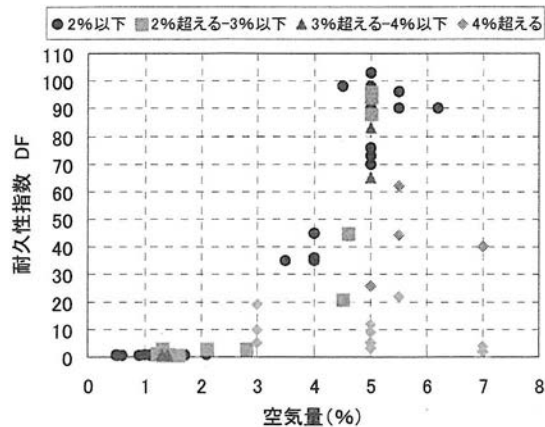


図-1.16 耐久性指数と空気量 (W/C55%)

(3) 水セメント比 55%のケース

図-1.16 は、水セメント比が 55%のコンクリートの耐久性指数と空気量との関係を示したものである。この図より、耐久性指数 60 を確保するための空気量の目安は、吸水率が 2%以下の粗骨材で 4.5%以上、2%を超えて 3%以下の粗骨材で 5%程度と考えられる。また、吸水率が 3%を超えて 4%以下の JIS 規格を外れる低品質な粗骨材であっても、5%程度の空気を連行することにより耐久性指数が 60 を確保できる骨材が存在する。したがって、粗骨材の吸水率が 4%以下であれば、空気量を適切に設定することにより利用の可能性があると考えられる。しかし、吸水率が 4%を超える粗骨材の場合、空気量を 7%まで増加させても耐久性指数の大きな改善は確認されていない。

耐久性指数と気泡間隔係数との関係を図-1.17 に示す。吸水率が 2%以下の粗骨材のデータ数は少なく詳細は確認できないが、吸水率が 2%を超えて 3%以下の粗骨材では、気泡間隔係数を 200 μ m 以下とすることにより耐久性指数が 85 以上の高い凍結融解抵抗性が得られるものと思われる。さらに、吸水率が 3%を超えて 4%以下の JIS 規格を外れる粗骨材でも、気泡間隔係数を適切に設定することにより、耐久性指数 60 程度以上が得られる骨材が確認されている。

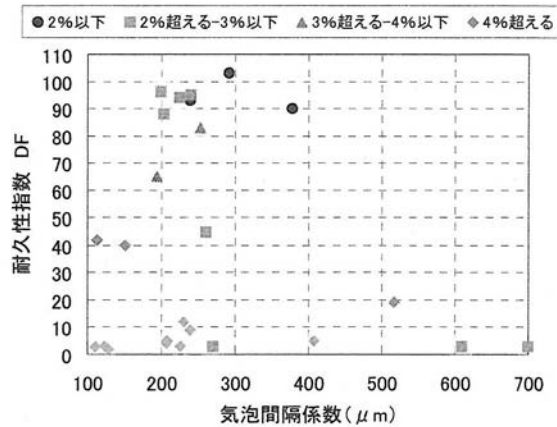


図-1.17 耐久性指数と気泡間隔係数 (W/C55%)

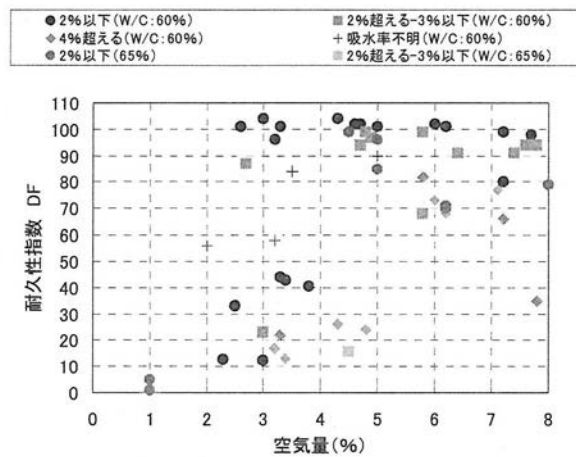


図-1.18 耐久性指数と空気量 (W/C60%, 65%)

(4) 水セメント比 60%および 65%のケース

水セメント比 60%および 65%のコンクリートの場合，耐久性指数と空気量との関係は，よりばらつきが大きくなる傾向にあり，粗骨材の吸水率による影響を詳しく確認することは困難である(図-1.18)．これは，コンクリートの品質変動の影響を大きく反映しているのではないかと思われる．水セメント比 60%のコンクリートにおいて，吸水率 3%以下の JIS 規格を満足する粗骨材を用いた場合，耐久性指数 60 および 85 を確保するためには，おおよそ空気量をそれぞれ 5%以上および 5.5%以上に設定する必要があると考えられる．また，吸水率が 4%を超える粗骨材であっても，5.5%~7%程度の空気量を確保することにより 60 程度の耐久性指数が得られる可能性が確認される．これは，水セメント比が増加することにより，粗骨材周囲のベース部の密実性が低下し，凍結に伴う粗骨材内での水圧の増大が緩和されること等によるものと考えられる．一方，水セメント比 65%のコンクリー

トの場合、空気量 5%付近を目安とすることにより、耐久性指数が 60 以上を確保できるケースもある。

なお、水セメント比 60%および 65%のコンクリートについては、気泡間隔係数の十分なデータが得られていない。

(5) 所要の耐久性指数を確保するための空気量と粗骨材の吸水率

これまでの水セメント比毎の検討結果をまとめると表-1.9 のようになる。要求される耐久性指数が同一であれば、基本的に粗骨材の吸水率が大きく、かつ水セメント比が大きいコンクリートほど空気量を増加させる必要がある。そして、この表を参考として使用する粗骨材の吸水率とコンクリートの水セメント比を指標として、所要の耐久性指数を確保するための空気量を検討することができる。なお、吸水率が JIS 規格を外れる骨材を用いた条件については、安全側とするため空気量を若干多めに設定している。

表-1.9 所要の耐久性指数を確保するために必要な空気量の目安*1 (参考例)

耐久性指数	粗骨材の吸水率(%)	水セメント比(%)				
		45 以下	50	55	60	65
85	2 以下	3.0	4.0	5.0	5.0	5.5
	2 超える～3 以下	4.0	(4.5)	5.0	5.5	(6.0)
	3 超える～4 以下	—	—	—	—	—
	4 超える	×	×	×	×	×
60	2 以下	2.5	3.0	4.5	4.5	5.0
	2 超える～3 以下	3.0	(3.5)	5.0	5.0	(5.5)
	3 超える～4 以下	—	—	5.5	(5.5)	—
	4 超える	×	×	×	6.0	×

— : 十分なデータがない × : 凍結融解抵抗性の確保が困難(安全側) () : 前後の項目より検討した参考値

*1 : 粗骨材の吸収率と水セメント比のみを指標として(他の要因は考慮しないで)必要な空気量を検討した場合の標準的な値であり、骨材によっては凍結融解抵抗性(耐久性指数)の確保が困難なケースもある。また、検討に用いたデータベースの空気量の範囲は 1.0%~1.9%(フレッシュコンクリートの空気量)、粗骨材の最大寸法の範囲は 15mm~25mm である。

しかしながら、本表はあくまで粗骨材の吸水率と水セメント比のみを指標として(他の要因は考慮しないで)、必要な空気量を検討した場合の標準的な値であり、骨材によっては凍結融解抵抗性(耐久性指数)の確保が困難なケースもある。したがって、実際のコンクリー

トの性能は試験によって確認することが原則である。なお、今後さらにデータを蓄積しデータベースの信頼性向上を図ることにより、コンクリート構造物の性能設計や維持管理のための基礎資料として利用できるものと思われる。

1.2.5 フライアッシュコンクリートの空気連行性および耐凍害性

一般に、フライアッシュをコンクリート用混和材料として用いた場合、混和剤の AE 剤成分がフライアッシュ中の未燃焼炭素分により吸着され、コンクリートの空気量に大きな影響を与えることが知られている。その場合、AE 剤成分の吸着量はフライアッシュ中の未燃焼炭素含有量に左右され、含有量に比例し吸着量が増大する。このため、フライアッシュの品質によっては、JIS 規格を満足する場合でも、空気量が大きく変動し、製造時の管理が困難となる例がしばしば見受けられる。特に、生コン工場で練り混ぜられたフライアッシュコンクリートの連行空気泡は、**図-1.19**に示すように、アジテータ車による運搬中の AE 剤の吸着作用により、無混入のものとは比べ減少量が大きくなる傾向が認められる [47]。この傾向は混和するフライアッシュのメチレンブルー吸着量および強熱減量によって左右され、それらの値が大きいほど、減少傾向が大きくなる。また、**図-1.20**に示すように、アジテートしたものは静置したものと比較して、空気減少量が大きくなる傾向が認められた [48]。

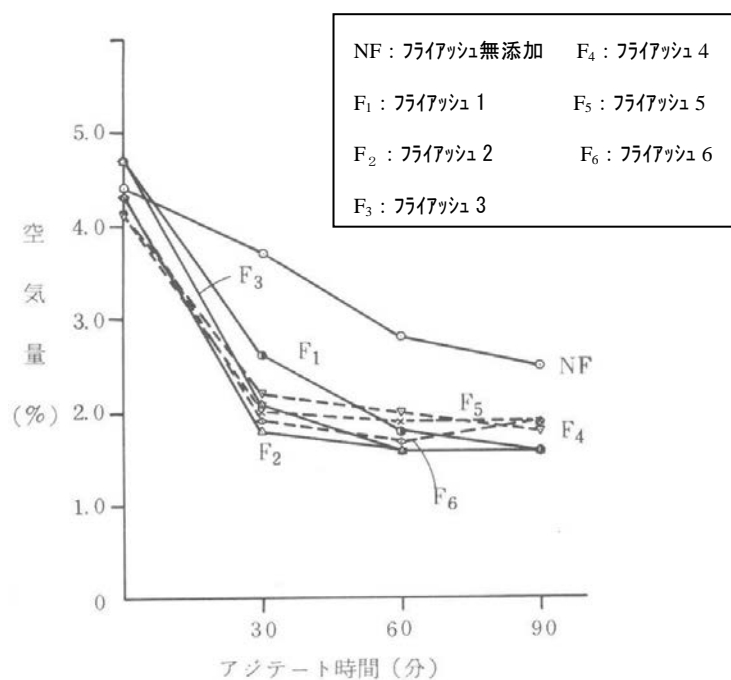


図-1.19 空気量の経時変化 [47]

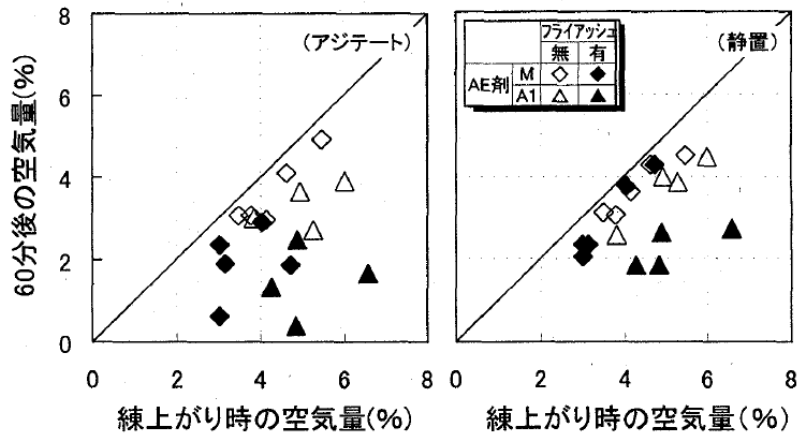


図-1.20 経時変化による空気減少量の比較 [48]

上記のように、混和材としてフライアッシュを用いた場合に空気量が減少する傾向にあり、気泡間隔係数が大きくなる傾向が認められる。つまり、フライアッシュを用いることで気泡の安定性が低く、また気泡組織が変化しやすくなるものと考察されている [49]。一方で、気泡間隔係数が小さいものでも耐凍害性に劣るものもあると報告されている [50]。また、耐凍害性についても図-1.21 に示すように、フライアッシュを混入しないものと比較して、劣る傾向が認められている。フライアッシュの混入によりスケージングが多くなるという報告もなされている [50]。

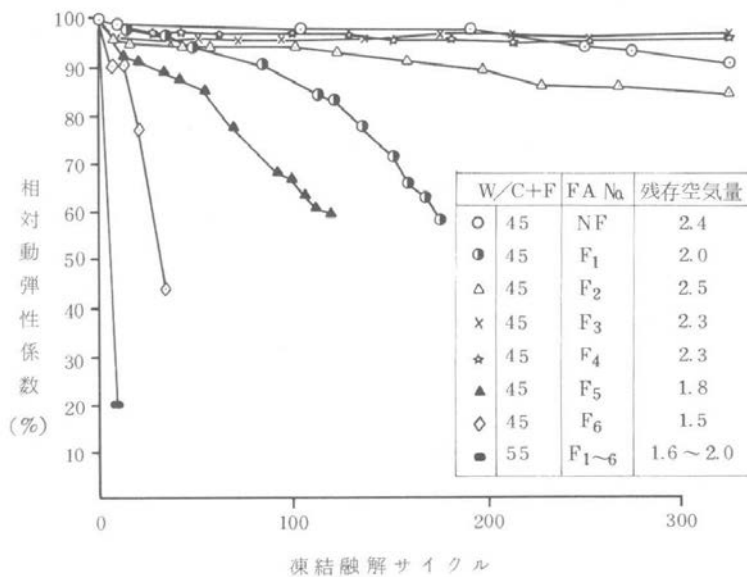


図-1.21 凍結試験結果 [50]

ただし、AE 剤を選定することで気泡間隔係数を小さくすることができ、耐凍害性についても改善できることが報告されている。

1.2.6 ブリーディングと耐凍害性の関係

過度にブリーディングが生じると、コンクリート中のブリーディング水が上昇し、水みちを形成するとともに、骨材下面に水の層を作る。また、打設上面の水セメント比を増加させるなど、コンクリートにさまざまな欠陥を生み出すことになるため、耐凍害性を損なわせる要因となると考えられる。

庄谷ら [51] および秋山ら [52] によって、フェロニッケルスラグ細骨材を使用し、ブリーディング量をパラメータとした凍結融解試験が行われ、その結果、図-1.22 および図-1.23 に示すように、ブリーディング量の増加とともに耐凍害性が低下する結果が確認されている。また、混和材にフライアッシュを用いた場合に、ブリーディング量が多くなる傾向が認められている [53]。

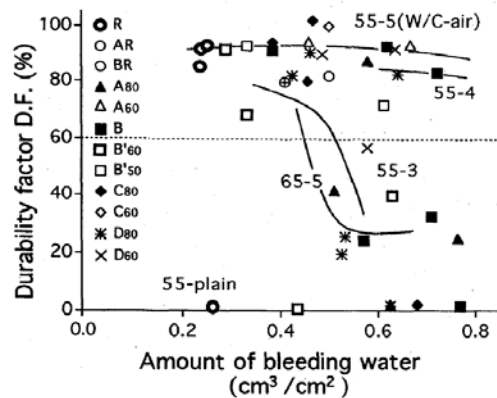


図-1.22 ブリーディング量と耐久性指数の関係 [51]

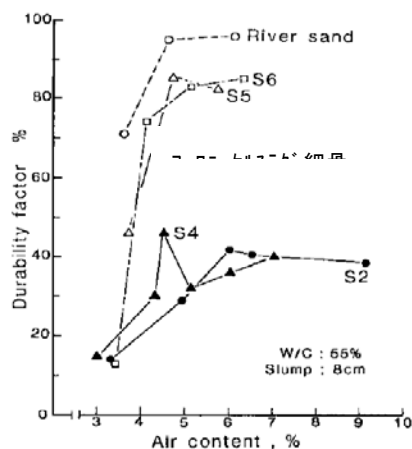


図-1.23 空気量と耐久性指数の関係 [52]

1.3 本研究の目的

寒冷地にあるフライアッシュコンクリートを材料として構築された水利施設においては、フライアッシュコンクリートの耐凍害性が普通コンクリートよりも劣るために、凍結融解の繰返し作用による凍害劣化が生じやすい。凍害劣化が生じた水利施設では、その結果として物質移動抵抗性が低下することになり中性化抵抗性も低下することから、鉄筋腐食が生じやすくなることが懸念されている。ただし、現状において凍害劣化の原因を特定する手段がなく、変状のパターンから、状況証拠的に凍害劣化と特定する場合はほとんどであり、凍害の劣化メカニズムを把握することは現在でも極めて重要な課題となっている。

そこで、本論文では、フライアッシュコンクリートの物質移動抵抗性を低下させる原因となる凍害劣化メカニズムを解明し、フライアッシュコンクリートの耐凍害性を向上させる方法について提案することを目的として、特にフライアッシュコンクリートの利用実績が多いダムコンクリートを対象に気泡特性の観点から検討を行う。また、本論文では、寒冷地における水利施設へのフライアッシュコンクリートの適用拡大に資することも目的としていることから、耐凍害性を確保するためのフライアッシュコンクリートの配合設計の条件について提案する。具体的には、次の4項目について取り組む。

- ① 耐凍害性に及ぼす凝結過程の空気量変化の影響
- ② コンクリートの気泡組織と耐凍害性の関係
- ③ コンクリートの耐凍害性に及ぼすブリーディングの影響
- ④ 耐凍害性に及ぼす各種 AE 剤の空気安定性

①、③については、ダムコンクリートが一般に温度上昇を抑制する目的で、フライアッシュ混入の中庸熱セメントを用いており、フライアッシュ混入によって空気が混入しにくく安定しにくいこと、凝結遅延によるブリーディングが多くなることに着目して検討を行う。②、④については、フライアッシュコンクリートの耐凍害性を向上させる方法について検討する。具体的には、②については、気泡間隔係数だけでなく、詳細な気泡組織について検討することにより劣化メカニズムを解明する。さらに、④については、劣化メカニズムを明確にした上で、フライアッシュコンクリートの耐凍害性を向上させる AE 剤についての検討を行い、寒冷地における水利施設へのフライアッシュコンクリートの適用拡大に資する。

1.4 本論文の構成

本論文は、次の6章から構成されており、各章の関係は図-1.24に示すとおりである。

第1章 序論

第2章 耐凍害性に及ぼす凝結過程の空気量変化の影響 [54]

第3章 コンクリートの気泡組織と耐凍害性の関係 [55], [56]

第4章 コンクリートの耐凍害性に及ぼすブリーディングの影響 [57]

第5章 耐凍害性に及ぼす各種 AE 剤の空気安定性 [58]

第6章 結論

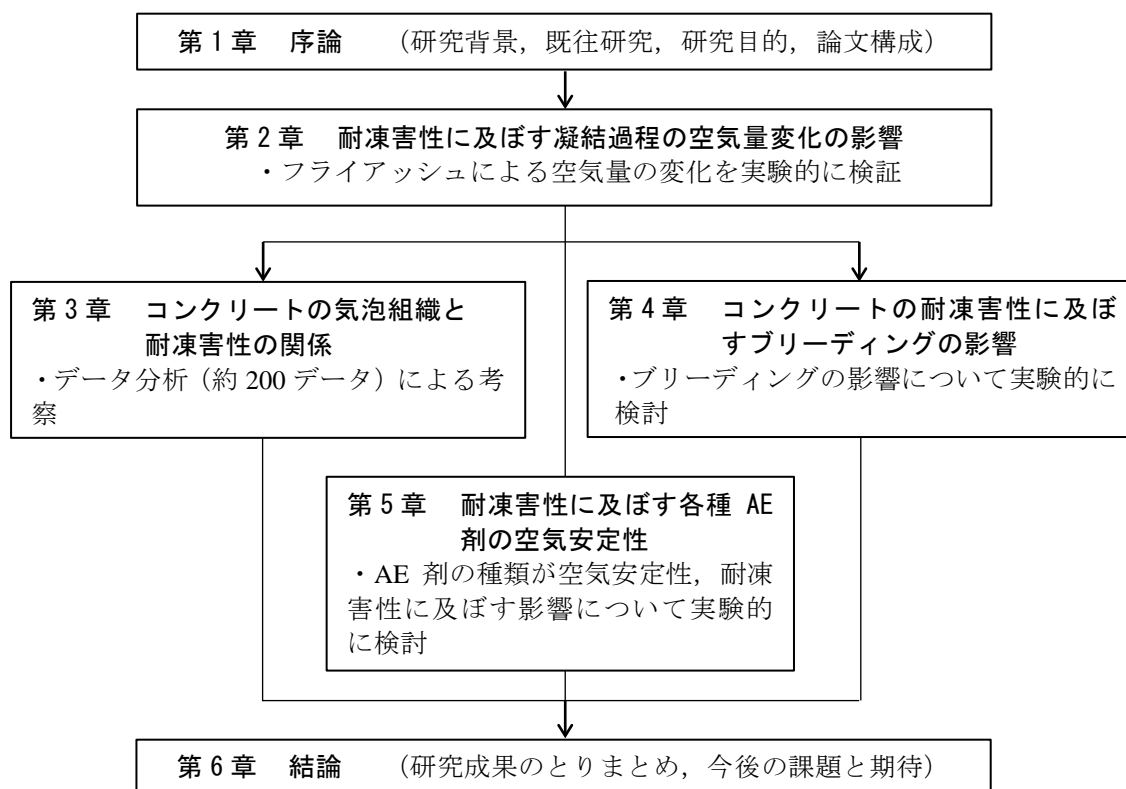


図-1.24 本論文の各章の関係

各章の主な内容を以下に示す。

第1章 序論

本研究の背景について述べ、既往の研究成果を踏まえたうえで課題を整理し、本研究の目的を示した。

第2章 耐凍害性に及ぼす凝結過程の空気量変化の影響

凝結過程の空気量の変化を把握するため、普通ポルトランドセメントとフライアッシュ30%混入中庸熱ポルトランドセメントをそれぞれ用いたモルタルおよびコンクリートについて、フレッシュコンクリートの空気量等を要因として実験を行い、各種要因の影響について検討した。

第3章 コンクリートの気泡組織と耐凍害性の関係

普通ポルトランドセメントあるいはフライアッシュ 30%混入中庸熟ポルトランドセメントを用いたコンクリートを対象に、フレッシュコンクリートの空気量、硬化コンクリートの空気量、気泡間隔係数(気泡分布を含む)および耐久性指数(凍結融解抵抗試験結果)の4項目が揃ったデータを合計 193 データ収集し、このデータを用いて、セメントの違いによる空気量の変化、気泡間隔係数や気泡径の分布と耐久性指数との関係について検討した。

第4章 コンクリートの耐凍害性に及ぼすブリーディングの影響

石灰石微粉末の混入(混入量)、細骨材の種類(陸砂の砕砂の混合比率)および遅延剤の添加などを要因として、かつ温度を変化させることによるブリーディングの変化を把握するとともに、ブリーディングの変化に伴う気泡径の分布や耐凍害性への影響について検討した。

第5章 耐凍害性に及ぼす各種 AE 剤の空気安定性

一般に用いられる AE 剤 2 種類と、フライアッシュ用として開発された AE 剤 1 種類について、空気量および細骨材の種類(陸砂の砕砂の混合比率)を要因としてコンクリート試験を行い、空気量とブリーディングの関係、ブリーディング量と気泡間隔係数の関係および気泡間隔係数、気泡分布と耐久性指数との関係について検討した。

第6章 結論

本研究から得られた知見を整理するとともに、残された課題と今後の研究への期待を述べた。

第1章の参考文献

- [1] 農林水産省：農地・基幹的農業水利施設の整備状況，基幹的農業水利施設の施設数、水路延長，農林水産省 HP，
http://www.maff.go.jp/j/nousin/sekkei/suidoju/s_zyokyo/pdf/02_sisetu.pdf
- [2] (財)日本農業土木総合研究所：ダム委員会検討結果データベース，2004.
- [3] 長瀧重義：フライアッシュを混和したコンクリートの中性化に関する研究，セメント技術年報，40，pp.419-422，1986.
- [4] 梶田佳寛，棚野博之：コンクリートの中性化進行予測モデル，コンクリート工学論文集，Vol. 2，No.1，pp.125-134，1991.
- [5] 経済産業省製造産業局住宅産業窯業建材課：平成20年度中小企業支援調査セメント産業における非エネルギー起源二酸化炭素対策に関する調査－混合セメントの普及拡大方策に関する検討－報告書，2009.

- [6] 緒方英彦, 鈴木哲也, 山崎大輔, 濱幸雄: 壁状構造物であるコンクリート製開水路の側壁内部の凍害劣化, コンクリート工学論文集, Vol.32, No.1, pp.833-838, 2010.
- [7] 濱幸雄: 凍害の診断方法の現状と課題, コンクリート工学, Vol.48, No.5, pp.66-69, 2010.
- [8] 長瀧重義, 大賀宏行, 嶋田久俊: フライアッシュを混和したコンクリートの耐凍害性評価, セメント技術年報, No.41, pp.371-374, 1987.
- [9] 千歩修, 劉宏涛: フライアッシュコンクリートの静置による気泡組織・耐凍害性の変化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.963-964, 2004.8.
- [10] 庄谷征美, 杉田修一, 月永洋一: フェロニッケルスラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性に関する研究, 材料, Vol.43, No.491, pp.976-982, 1994.8.
- [11] 阿波稔, 庄谷征美, 杉田修一, 後藤努: コンクリートの組織構造に及ぼすブリーディングの影響に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.54, pp.195-201, 2000.
- [12] 山本隆信, 杉山隆文, 辻幸和: フライアッシュコンクリートの空気連行性およびブリーディングに影響を及ぼす各種要因, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.97-102, 1998.
- [13] (社)日本コンクリート工学協会: コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関する研究委員会報告書, 2008.8.
- [14] Backstrom, J. E., Burrows, R W., Mielenz, R.C., and Wolkodoff, V. E. Origin : Evolution and effects of the air void system in concrete. Part 2-Influence of type and amount of air-entraining agent., Journal of the American Concrete Institute, 55, pp.261-272, 1958.
- [15] Powers, T. C : The air requirement frost-resistant concrete., Proceedings of the Highway Research Board, 29, pp.184-211, 1949.
- [16] U. S. Bureau of Reclamation : The air-void systems of Highway Research Board co-operative concretes, Concrete Laboratory Report, No.C-824, 1956.
- [17] 小林正凡: 各種 AE 剤ならびに減水剤がコンクリートの諸性質に及ぼす影響について, セメント・コンクリート, No.249, 1967.
- [18] J. Stark, B. Wicht, (訳) 太田利隆・佐伯昇: コンクリートの耐久性 [第 2 版], (社)セメント協会, p.192, 2003.
- [19] S.Mindess, J.F Young, and D. Darwin : Concrete, 2nd Edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N L, 2002.
- [20] Powers, T. C. : The air requirement frost-resistant concrete., Proceedings of the Highway Research Board, 29, pp.184-211, 1949.

- [21] 日本コンクリート工学協会骨材の品質と有効利用に関する研究委員会：骨材の品質と有効利用に関する研究委員会報告書， pp.21-54， 2007.
- [22] 庄谷征美， 杉田修一， 月永洋一：フェロニッケルスラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性に関する研究， 材料， Vol.43， No.491， pp.976-982， 1994.8.
- [23] 阿波稔， 庄谷征美， 杉田修一， 後藤努：コンクリートの組織構造に及ぼすブリーディングの影響に関する研究， セメント・コンクリート論文集， No.54， pp.195-201， 2000.
- [24] Pleau, R., Pigeon, M., Faure, R.M and Sedran, T. Micro : AirVoid in Concrete : A Study of the Influences of Superplasticizers by Means of Optical Microscopy and Scanning Electron Microscopy, Paul Klieger Symposium on Performance of Concrete, ACI Special Publication SP-122, American Concrete Institute, pp.105-124, 1990.
- [25] Powers, T. C : The air requirement frost-resistant concrete., Proceedings of the Highway Research Board, 29, pp.184-211, 1949
- [26] 桂修， 吉野利幸， 鎌田英治：過冷却水の凍結を考慮したセメント硬化体の凍害機構， コンクリート工学論文集， 第 10 巻， 第 2 号， pp.51-63， 1999.
- [27] 鎌田英治：コンクリートの凍害と細孔構造， コンクリート工学年次論文報告集， Vol.10, No.1, pp.51-60, 1976.
- [28] 桂修， 吉野利幸， 鎌田英治：セメント硬化体の凍害機構モデル， コンクリート工学論文集， 第 11 巻， 第 2 号， pp.49-62， 2000.
- [29] Powers, T. C and Helmuth, R. A : Theory of volume changes in hardened portland cement pastes during freezing. Proceedings of the Highway Research Board, 32, pp.285-297, 1953.
- [30] Powers, T. C : Freezing Effects of Concrete, ACI Special Publication SP-47, American Concrete Institute, Detroit, MI, pp.1-11, 1975.
- [31] 日本コンクリート工学会：融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会報告書， 1999.
- [32] Max J. Setzer : Micro-Ice-Lens Formation in Porous Solid, Journal of Colloid and Interface Science 243, pp.193-201, 2001.
- [33] 三橋博三， 周志云， 多田農作：微視的メカニズムを考慮したコンクリートの凍結作用による変形挙動の数理モデル， コンクリート工学論文集， 第 14 巻， 第 3 号， pp.33-44, 2003.
- [34] Saucier, F., Pigion, M. and Cameron, G : Air void stability, Part V : Temperature, general analysis, and performance index. ACI Materials Journal, 88(1), pp.25-36, 1991.
- [35] 灌寧進， 千歩修， 鎌田英治：微粉末系の高流動コンクリートの気泡組織と耐凍害性に関する研究， コンクリート工学年次論文報告集， Vol.16, No.1, pp.207-212, 1994.

- [36] 近松竜一, 入矢桂史郎, 十河成幸: 各種減水剤を用いた AE コンクリートの凍結融解抵抗性, 日本コンクリート工学協会, コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関するシンポジウム論文集, pp.37-42, 2006.
- [37] Backstrom, J. E., Burrows, R W., Mielenz, R.C., and Wolkodoff, V. E. : Origin, evolution and effects of the air void system in concrete. Part 2-Influence of type and amount of air-entraining agent., Journal of the American Concrete Institute, 55, pp.261-272, 1958.
- [38] 浜幸雄, 太田宏平: フレッシュコンクリートによる気泡組織の測定方法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.669-674, 2004.
- [39] 山宗化学(株): AE 剤ヴィンソルについて (続), pp.4, 1978.
- [40] 山宗化学(株): AE 剤ヴィンソルについて (続), pp.14, 1978.
- [41] 高減水性混和剤の改良と高減水性混和剤コンクリートの諸性質に関する検討, 建設省建築研究所, コンクリート混和剤協会, pp.1-57, 1993.
- [42] (株)フローリック: 社内調査データ, 2006.
- [43] 小林正凡: 各種 AE 剤ならびに減水剤がコンクリートの諸性質に及ぼす影響について, セメント・コンクリート, No.249, 1967.
- [44] 左右田孝男ほか: AE コンクリートの気泡に関する研究, セメント技術年報, No.13, pp.323-331, 1959.
- [45] 高田誠, 平石信也, 戸田和敏: コンクリート用化学混和剤の JIS と欧州規格(EN)の比較と今後の課題, コンクリート工学, Vol.38, No.7, pp.22-33, 2000.7.
- [46] 橋爪進, 榎田佳寛, 阿部道彦: 気泡組織が高強度コンクリートの耐凍害性におよぼす影響, 日本建築学会材料施工委員会, 凍結融解作用を受けるコンクリート小委員会シンポジウム論文集, pp.27-32, 1992.
- [47] 長瀧重義, 大賀宏行, 増田和機, 内田 明: フライアッシュコンクリートの空気連行性と耐凍害性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.9, No.1, pp.199-204, 1987.
- [48] 千歩修, 浜幸雄: フライアッシュコンクリートの空気連行性・気泡組織と耐凍害性, 日本建築学会構造系論文集, 第 588 号, pp.1-6, 2002.
- [49] 千歩修, 劉宏涛: フライアッシュコンクリートの静置による気泡組織・耐凍害性の変化, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), pp.963-964, 2004.
- [50] 千歩修, 須藤由美子, 鎌田英治: フライアッシュコンクリートの空気量・気泡組織の経時変化と耐凍害性, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp.47-48, 1997.
- [51] 庄谷征美, 杉田修一, 月永洋一: フェロニッケルスラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性に関する研究, 材料, Vol.43, No.491, pp.976-982, 1994.8.

- [52] 秋山 淳, 山本泰彦: コンクリート用細骨材としてフェロニッケルスラグの利用, 土木学会論文集, 第 366 号, V-4, pp.103-112, 1986.
- [53] 山本隆信, 杉山隆文, 辻幸和: フライアッシュコンクリートの空気連行性およびブリーディングに影響を及ぼす各種要因, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.97-102, 1988.
- [54] 坂田昇, 菅侯匠, 林大介, 橋本学: 中庸熱フライアッシュセメントを用いたコンクリートの耐凍害性に及ぼす凝結過程の空気量変化の影響, コンクリート工学論文集, Vol.22, No.3, pp.47-57, 2011.
- [55] 坂田昇, 菅侯匠, 林大介, 橋本学: コンクリートの気泡組織と耐凍害性の関係に関する考察, コンクリート工学論文集, Vol.23, No.1, pp.35-47, 2012.
- [56] 坂田昇, 橋本学, 菅侯匠, 緒方英彦: 中庸熱フライアッシュセメントを用いたコンクリートの耐凍害性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.35, No.1, pp.895-900, 2013.
- [57] 坂田昇, 菅侯匠, 林大介, 作榮二郎: コンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼすブリーディングの影響に関する一考察, コンクリート工学論文集, Vol.23, No.2, pp.59-69, 2012.
- [58] 坂田昇, 菅侯匠, 林大介, 作榮二郎: 中庸熱フライアッシュセメントを用いたコンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼす各種 AE 剤の空気安定性の検討, コンクリート工学論文集, Vol.24, No.3, pp.149-159, 2013.

第 2 章

耐凍害性に及ぼす

凝結過程の空気量変化の影響

第2章 耐凍害性に及ぼす凝結過程の空気量変化の影響

2.1 概要

フライアッシュを用いたコンクリートの中でも、中庸熱フライアッシュセメントを用いたダムコンクリートに着目し、コンクリートの凝結過程における空気量の変化が、気泡組織と耐凍害性に及ぼす影響を明らかにすることを目的に検討を行った。中庸熱フライアッシュセメントを用いたコンクリートは、普通ポルトランドセメントを用いた場合に比べてフレッシュ時よりも硬化後の空気量が大幅に低下する傾向にあり、これにより耐凍害性が劣ると考えられた。フレッシュ時の空気量を従来よりも大きく設定することにより、硬化後の空気量の低下を抑制し、耐凍害性を確保することが可能となった。硬化後の空気量が低下する理由としては、普通ポルトランドセメントを用いる場合に比べて中庸熱フライアッシュセメントを用いたコンクリート中の気泡がブリーディング水の流れによって破泡、合泡する可能性が示唆され、ブリーディングが多い場合にその傾向が顕著になることを実験的に確認した。

2.2 フレッシュおよび硬化コンクリートの空気量が凍結融解抵抗性に及ぼす影響

2.2.1 使用材料および配合

使用材料を表-2.1 に示す。本実験では、セメントにフライアッシュ 30%混入中庸熱ポルトランドセメント(以下、MF30)を用いた。使用したセメントの物理化学試験結果を表-2.2 に示す。細・粗骨材には河床砂礫を用い、粗骨材の最大骨材寸法は 150mm とした。実験に用いた化学混和剤は、リグニンスルホン酸化合物を主成分とする AE 減水剤および変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤を主成分とする AE 助剤である。なお、練混ぜ水には JIS A 5308 の規格を満足する河川水を用いた。

表-2.1 使用材料

種類	記号	摘要
フライアッシュ30%混入 中庸熱ポルトランドセメント	MF30	密度：2.89g/cm ³ 比表面積 3,730cm ² /g
細骨材	S	密度：2.58g/cm ³ (表乾) 吸水率：1.89%
粗骨材 1 (150~80mm)	G1	密度：2.65g/cm ³ (表乾) 吸水率：0.76%
粗骨材 2 (80~40mm)	G2	密度：2.66g/cm ³ (表乾) 吸水率：0.83%
粗骨材 3 (40~20mm)	G3	密度：2.66g/cm ³ (表乾) 吸水率：0.82%
粗骨材 4 (20~5mm)	G4	密度：2.64g/cm ³ (表乾) 吸水率：1.20%
AE 減水剤	Ad1	リグニンスルホン酸化 化合物
AE 助剤	Ad2	変性ロジン酸化合物系 陰イオン界面活性剤
水	W	河川水

表-2.2 使用したセメント(MF30)の物理化学試験結果

項目		規格値*1)	試験成績
密度	g/cm ³	—	2.89
比表面積	cm ² /g	2,500 以上	3,730
凝結	水量	%	—
	始発	h-min	1-00 以上
	終結	h-min	10-00 以下
安定度(パット法)		—	良
圧縮強さ	3d	N/mm ²	7.0 以上
	7d	N/mm ²	13.5 以上
	28d	N/mm ²	29.5 以上
酸化マグネシウム		%	5.0 以下
三酸化硫黄		%	3.0 以下
フライアッシュの強熱減量		%	5.0 以下

*1) JIS R 5210 のフライアッシュセメント C 種に準拠

骨材の物性値を表-2.3に示す。使用した細・粗骨材はすべての物性値が JIS A 5308 の規格値を満足したものである。特に、硫酸ナトリウムによる安定試験結果については、細骨材は規格値の 10.0%に対して 1.40%で、粗骨材については、規格値の 12.0%に対し、粗骨材径が 40mm から 150mm のもので 0.00%、20mm から 40mm のもので 1.10%であることから十分に耐凍害性を有する骨材であると判断できる。

表-2.3 骨材の物性値

項目	単位	細骨材 S	規格値 (JIS A 5308)	粗骨材				規格値 (JIS A 5308)
				150-80 G1	80-40 G2	40-20 G3	20-05 G4	
表乾密度	kg/m ³	2.58	2.50以上	2.65	2.66	2.66	2.64	2.50以上
吸水率	%	1.79	3.50以下	0.64	0.66	0.87	1.02	3.00以下
単位容積質量	kg/m ³	—	—	1.60	1.64	1.65	1.64	—
粗粒率	—	—	—	8.69				—
実積率	%	—	—	60.5	61.9	62.9	62.8	—
粘土塊量	%	0.50	1.00以下	0.20	0.20	0.20	0.20	0.25以下
すりへり減量	%	—	—	—	20.2	23.6		40.0以下
微粒分量	%	2.54	9.00以下	0.20	0.18	0.19	0.15	1.00以下
安定性試験	%	1.40	10.0以下	0.00		1.10		12.0以下
アルカリシカ反応性	—	無害	—	無害				—
有機不純物	—	淡い	—	—				—
密度 1.95 の液体に浮くもの	%	0.30	0.5以下	0.00				—

表-2.4 に粗骨材の最大寸法 150mm のコンクリートの配合を示す。配合 No.1, No.2, No.3 および No.4 では、それぞれ目標空気量を 3.0%、3.5%、4.0%および 5.0%とした。空気量の増減は、表-2.1 に示す AE 助剤の添加量によって調整した。その他の配合条件はすべて同じとした。なお、表-2.4 に示す目標スランプ 3.0cm は 40mm ふるいでウェットスクリーニングしたコンクリートについてのものである。表-2.5 および表-2.6 に、40mm ふるいおよび 20mm ふるいでウェットスクリーニングしたコンクリートの配合をそれぞれ示す。

表-2.4 コンクリートの配合（粗骨材最大寸法 150mm）

配合 No.	セメント種類	粗骨材最大寸法 (mm)	W/C (%)	s/a (%)	目標空気量 (%)	目標スランプ*1) (cm)	単位量(kg/m ³)								
							水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G				Ad1 (C×%)	Ad2*2) (A)
										150~80 G1	80~40 G2	40~20 G3	20~05 G4		
No.1	MF30	150	45.2	23.0	3.0	3.0	95	210	475	410	410	411	408	1.0	33
No.2							95	210	472	407	407	409	405	1.0	55
No.3							95	210	470	404	404	406	403	1.0	70
No.4							95	210	465	399	399	401	398	1.0	100

*1)40mm ふるいでウェットスクリーニングしたコンクリートの目標スランプ

*2)Ad2 はセメント質量に対して 0.001%を基本量 1A とした。

表-2.5 粗骨材最大寸法 40mm 換算時のコンクリートの配合

配合条件							単位量(kg/m ³)						
配合 No.	セメント種類	粗骨材最大寸法 (mm)	W/C (%)	s/a (%)	換算空気量 (%)	目標スランプ (cm)	水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G		Ad1 (C×%)	Ad2*1) (A)
										40~20 G3	20~05 G4		
No.1	MF30	40	45.2	-	4.3	3.0	137.5	303.8	687	595	590	1.0	33
No.2					5.0		137.0	302.9	681	590	584	1.0	55
No.3					5.7		136.6	301.9	676	584	579	1.0	70
No.4					7.1		135.8	300.2	665	573	569	1.0	100

*1)Ad2 はセメント質量に対して 0.001%を基本量 1A とした。

表-2.6 粗骨材最大寸法 20mm 換算時のコンクリートの配合

配合条件							単位量(kg/m ³)					
配合 No.	セメント種類	粗骨材最大寸法 (mm)	W/C (%)	s/a (%)	換算空気量 (%)	目標スランプ (cm)	水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 20~05 G4	Ad1 (C×%)	Ad2*1) (A)
No.2	6.5	176.0	389.1	875	750	1.0	55					
No.3	7.4	174.9	386.7	866	742	1.0	70					
No.4	9.1	173.1	382.7	847	725	1.0	100					

*1)Ad2 はセメント質量に対して 0.001%を基本量 1A とした。

2.2.2 試験方法

フレッシュコンクリートのスランプ試験では、JIS A 1101 に従い、練上がり後のコンクリートを 40mm ふるいにてウェットスクリーニングを行ったものを試料とした。また、フレッシュコンクリートの空気量については、JIS A 1128 に従い、練上がり後のコンクリートを 40mm および 20mm ふるいにて、ウェットスクリーニングを行ったものをそれぞれ試験に供した。

凍結融解試験は、JIS A 1148-A 法(水中凍結水中融解法)に従い、凍結融解サイクル 300 サイクルまで実施した。供試体は 100×100×400mm の角柱を用い、20mm ふるいでウェットスクリーニングをしたコンクリートを用いて作製した。コンクリートの凍結融解抵抗性は、たわみ振動の一次共鳴振動数より算出した相対動弾性係数および供試体の質量により評価した。また、供試体の本数は 3 本とし、3 本の平均値の相対動弾性係数および質量を算出した。試験開始材齢は 28 日とし、その間、20℃一定のもと、水中養生を行った。なお、試験開始材齢の影響を把握する試験では、開始材齢 91 日においても試験を行った。

気泡間隔係数の測定は、20mm ふるいでウェットスクリーニングしたコンクリートを対象とし、φ150×300mm の円柱供試体の中心部を厚さ 20mm で切断した試験片を用いて行った。なお、供試体の本数は 1 本、測定回数は 1 回とした。測定方法は、ASTM C 457 (リニアトラバース法)に従い、硬化コンクリートの空気量および気泡間隔係数を算出した。

圧縮強度試験は JIS A 1108 に従い、材齢 7 日、28 日および 91 日で実施した。試験は、40mm ふるいでウェットスクリーニングしたコンクリートで作製した φ150×300mm の円

柱供試体を用いて行った。なお、供試体はいずれも、試験開始材齢まで 20℃一定のもと、水中養生を行った。

2.2.3 試験結果および考察

表-2.7 に、各配合の 20mm ふるいでウェットスクリーニングしたコンクリートのフレッシュ時の空気量、硬化の空気量および気泡間隔係数をそれぞれ示す。また、図-2.1 にフレッシュ時の空気量と硬化後の空気量の減少量の関係を示す。

表-2.7 空気量および気泡間隔係数

配合 No.	粗骨材最大寸法 (mm)	①フレッシュ時空気量 (%)	②硬化後空気量 (%)	空気減少量 ①-② (%)	気泡間隔係数 (μm)
No.1	20	4.9	2.4	2.5	303
No.2		6.6	4.1	2.5	265
No.3		7.4	6.9	0.5	211
No.4		9.8	9.2	0.6	144

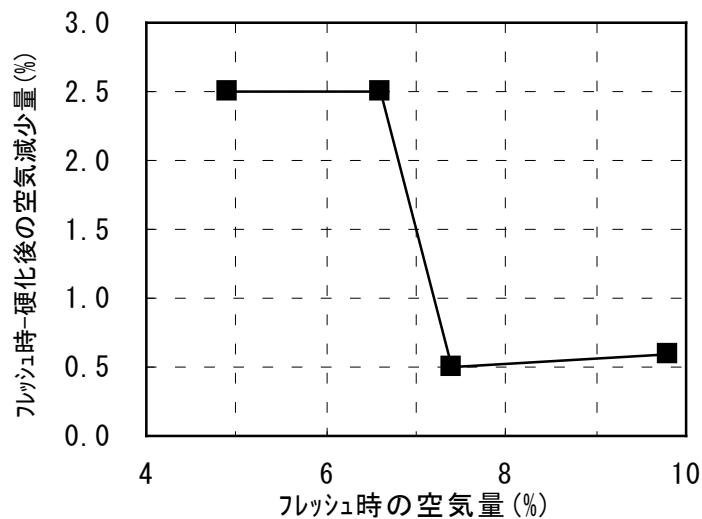


図-2.1 フレッシュ時の空気量と硬化後の空気減少量の関係

図表より、フレッシュ時の空気量が 6.6%以下の場合、硬化後の空気量の減少量が 2.5%と非常に大きいことが分かる。これに対して、フレッシュ時の空気量が 7.4%以上の場合には、硬化後の空気量の減少量が 0.5%程度と比較的小さい。奥野らは、フライアッシュ中に含まれる未燃炭素量が多く含まれる場合、AE 剤の使用量が増加し、フレッシュコンクリートの経時変化による空気量の減少も大きくなる傾向にあることを示している[1]。また、千歩らは、60分静置を行ったフライアッシュを用いたコンクリートは普通コンクリートに比べ、空気量の低下が大きく、気泡間隔係数についても変化が大きいと報告している[2]。今回の実験で、硬化後の空気量が大きく減少した理由としては、これらの既往の研究と同様に、フライアッシュを用いたコンクリートによる特性があると考えられる。一方、フライアッシュを用いたコンクリートであっても、中庸熱フライアッシュセメントを用いた場合、ある一定量以上、フレッシュ時に空気量を確保すれば、硬化後の空気量の減少は少なくなることが今回の実験で明らかとなった。その理由については定かではないが、フレッシュ時の空気量を多くすることで、ブリーディングが抑制されたことが一要因であると考えられる。

図-2.2 にフレッシュ時および硬化後の空気量と気泡間隔係数の関係を示す。図に示すように、フレッシュ時、硬化後ともに空気量と気泡間隔係数に相関があり、特に硬化後の空気量と高い相関(相関係数：0.996)があることが分かる。

各配合の凍結融解試験結果として、図-2.3 に凍結融解サイクル数と相対動弾性係数の関係を、図-2.4 に凍結融解サイクル数と質量減少率の関係を、それぞれ示す。図に示すように、硬化後の空気量が大幅に減少した配合 No.1 および配合 No.2 は、ともに 300 サイクルで相対動弾性係数が 60%を下回った。これに対して、フレッシュ時の空気量を 7.4%以上として硬化後の空気量の減少量が少なかった配合 No.3 および配合 No.4 は、300 サイクルまで相対動弾性係数がほぼ 100%を維持し、高い凍結融解抵抗性を示した。

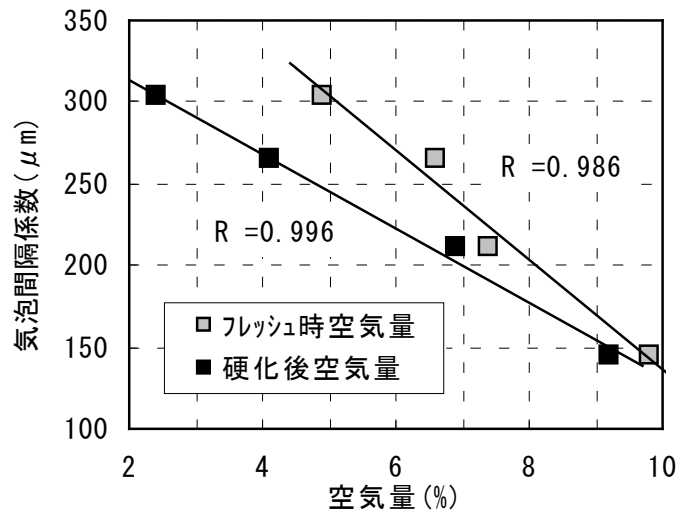


図-2.2 空気量と気泡間隔係数の関係

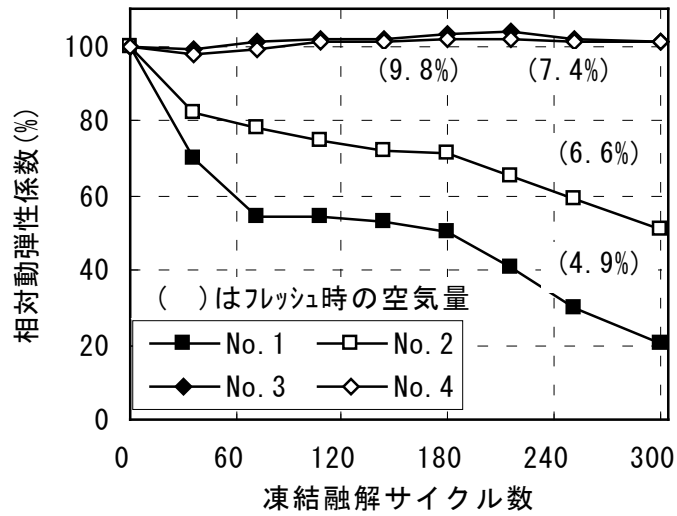


図-2.3 凍結融解サイクル数と相対動弾性係数の関係

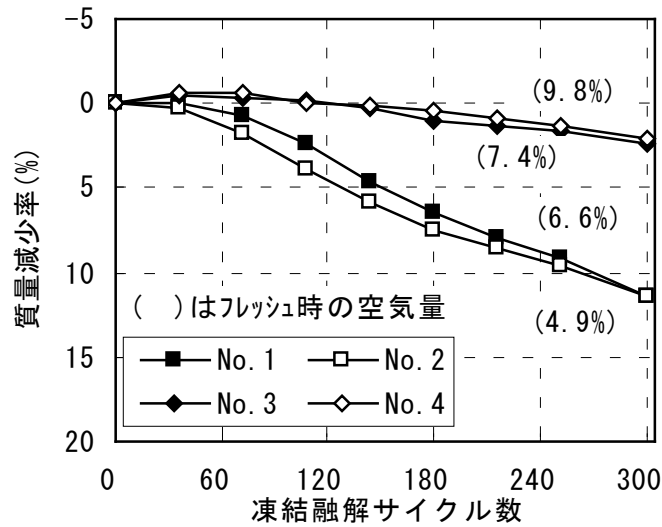


図-2.4 凍結融解サイクル数と質量減少率の関係

このように、中庸熱フライアッシュセメントを用いたコンクリートの場合でも、空気量を多くして硬化後の空気量を所定量以上確保することによって、凍結融解抵抗性が得られるものと考えられる。図-2.5 に各配合の気泡の分布を示す。図に示すように、凍結融解抵抗性に優れる配合 No.3 および配合 No.4 では、気泡径 0.10 mm 以上 0.15 mm 未満(以下、代表値である気泡径 0.125 mm と標記)の空気量が多くなっている。図-2.6 に気泡径 0.125 mm の空気量とコンクリートの空気量の関係を、図-2.7 に気泡径 0.125 mm の空気量と気泡間隔係数の関係をそれぞれ示す。図に示すように、気泡径 0.125 mm の空気量は、コンクリートの空気量、気泡間隔係数と高い相関にあり、凍結融解抵抗性に大きく影響するものと考えられる。

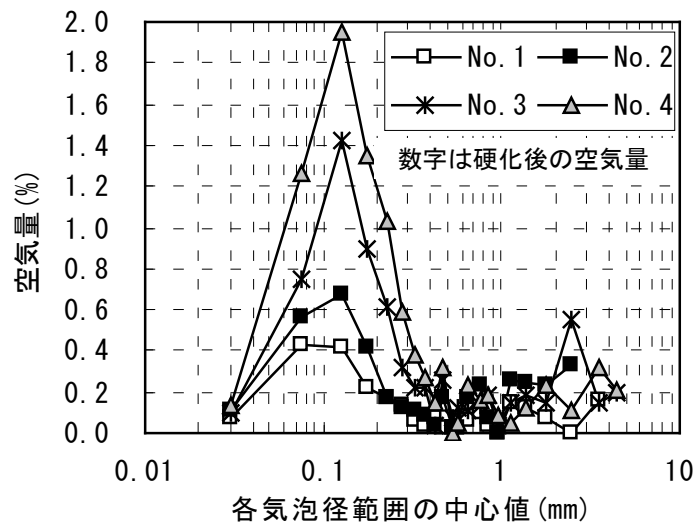


図-2.5 各配合における気泡の分布

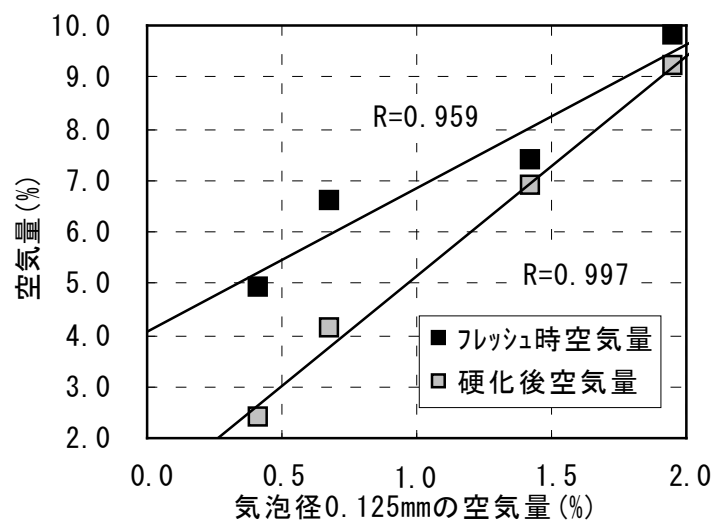


図-2.6 気泡径 0.125mm の空気量とフレッシュ時および硬化後空気量の関係

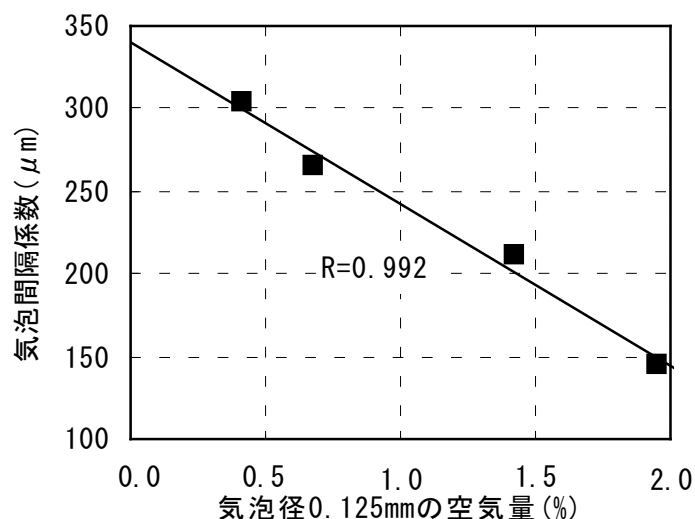


図-2.7 気泡径 0.125mm の気泡量と気泡間隔係数の関係

図-2.8 に硬化後の空気量と圧縮強度の関係を示す。ただし、空気量、圧縮強度ともに、40mm ふるいでウェットスクリーニングしたコンクリートについてのものである。図に示すように、材齢7日、28日では空気量の増加とともに圧縮強度が小さくなる傾向にあるが、材齢91日では、配合 No.1～配合 No.3，空気量 1.9%～5.4% (粗骨材の最大寸法 20mm 換算時のフレッシュ時の空気量 2.4%～6.9%) まで圧縮強度はほぼ同じであった。ダムコンクリートの場合、粗骨材の最大寸法が 150mm であり、この場合、空気量を増やした配合 No.3 でも目標空気量は 4.0% である。したがって、ダムコンクリートにおいて、骨材の品質が良好であれば、中庸熱フライアッシュセメントを用いる場合でもフルサイズのコンクリート

の目標空気量を 4.0%程度にすることによって、十分な凍結融解抵抗性が得られ、かつ所定の圧縮強度が得られるものと考えられる。

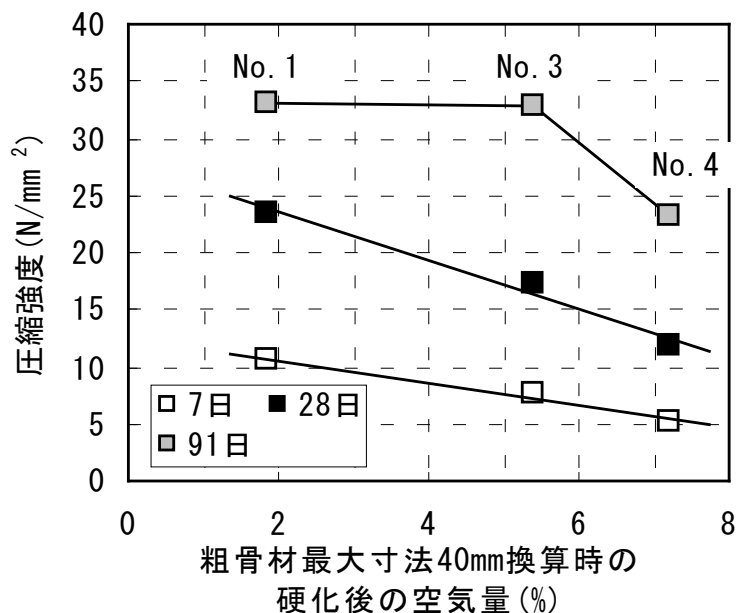


図-2.8 硬化後の空気量と圧縮強度の関係

図-2.9 に、配合 No.1 および No.2 について試験開始材齢が異なる凍結融解試験結果を示す。配合 No.1 および No.2 は、前述の試験開始材齢 28 日において、300 サイクルで相対動弾性係数が 60%を下回ったものであるが、試験開始材齢を 91 日とした場合、さらに相対動弾性係数の低下が大きくなった。ダムコンクリートでは、保証材齢が 91 日であることから、2007 年制定コンクリート標準示方書ダムコンクリート編において、「凍結融解抵抗性試験の開始材齢は 91 日を標準とする」とされている。これは、ダムコンクリートでは強度発現が遅いセメントを使用するため、材齢 28 日から凍結融解試験を行った場合、コンクリートが十分な強度を発現しない状態で凍結融解試験を開始すると相対動弾性係数が低下すると考えられているからである。しかし、既往の論文 [3] においても、凍結融解試験の開始材齢が 14 日より 28 日の方が、相対動弾性係数が小さくなることが示されている。このように、今回の 28 日から 91 日の材齢経過による耐凍害性の低下についても、細孔構造との関係から透水性が低下し、発生内圧力が増加するためと考えられる。凍結融解作用を受ける実際のダムコンクリートの表面部は、91 日もの長きに亘って連続して水中に養生されることはなく、実現象を考えても凍結融解試験の開始材齢は、28 日程度とすることが望ましいと考えられる。

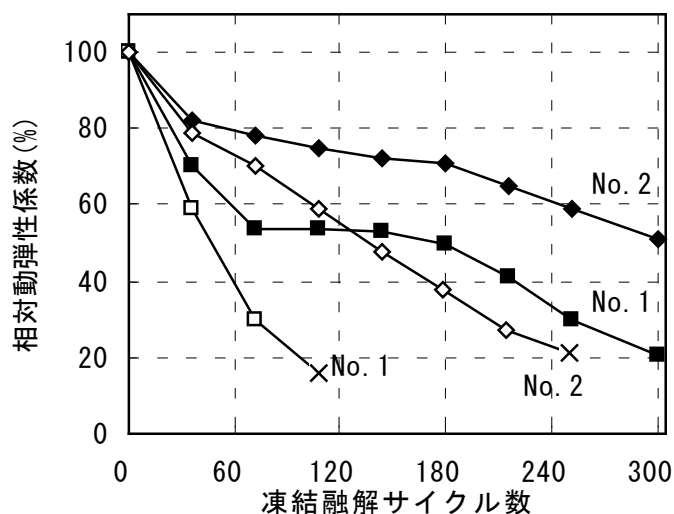


図-2.9 試験開始材齢の異なる凍結融解試験結果

2.3 凝結過程における空気量の変化

2.3.1 使用材料および配合

使用材料を表-2.8に示す。普通ポルトランドセメント(OPC)とフライアッシュ30%混入中庸熟ポルトランドセメント(MF30)を用い、細骨材には砕砂を用いた。実験に用いた化学混和剤は、リグニンスルホン酸化合物を主成分とするAE減水剤および、変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤を主成分とするAE助剤である。なお、練混ぜ水には水道水を用いた。

表-2.8 使用材料

種類	記号	摘要
普通ポルトランドセメント	OPC	密度：3.16g/cm ³ 比表面積：3,310cm ² /g
フライアッシュ30%混入中庸熟ポルトランドセメント	MF30	密度：2.85g/cm ³ 比表面積：3,750cm ² /g
細骨材	S	密度：2.65g/cm ³ (表乾) 吸水率：1.01%
AE減水剤	Ad1	リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体
AE助剤	Ad2	変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤
練混ぜ水	W	水道水

MF30 のモルタルの配合は、水セメント比が 55.0% の MF30 のコンクリートの配合を基準とし、粗骨材を取り除いたものとした。OPC のモルタルの配合は MF30 のコンクリートの配合と水粉体容積比($V_w/V_p=157.0\%$) が一定となるように OPC のコンクリートの配合を定め、粗骨材を取り除いたものとした。表-2.9 にモルタル配合の基準となるコンクリートの配合を、表-2.10 にモルタルの配合をそれぞれ示す。

表-2.9 モルタル配合の基準となるコンクリートの配合

配合条件							単位数(kg/m ³)					
セメント種類	粗骨材最大寸法(mm)	W/C (%)	V _w /V _p (%)	s/a (%)	目標空気量 (%)	目標スランプ (cm)	水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 20~05 G	Ad1 (C×%)	Ad2 ^{*1)} (A)
OPC	20	49.6	157.0	44.0	4.5	12.0	175	353	779	992	0.25	3
MF30		55.0					175	318	779	992	0.25	15

*1)Ad2 はセメント質量に対して 0.001% を基本量 1A とした。

表-2.10 モルタルの配合

配合条件							単位数(kg/m ³)					
セメント種類	粗骨材最大寸法 (mm)	W/C (%)	V _w /V _p (%)	s/a (%)	目標空気量 (%)	目標スランプ (cm)	水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 20~05 G	Ad1 (C×%)	Ad2 ^{*1)} (A)
OPC	-	49.6	157.0	-	7.2	-	280	564	1245	-	0.25	3
MF30		55.0					280	508	1245	-	0.25	43

*1)Ad2 はセメント質量に対して 0.001% を基本量 1A とした。

2.3.2 試験方法

まずフレッシュモルタルの空気量を JIS A 1128 に従い、モルタルエアメータを用いて測定した。続いてモルタルのブリーディングに伴う体積変化を確認するために次の実験を行った。写真-2.1 に示すような φ45×500mm の円柱の亚克力製の試験容器に高さ 400mm の位置までモルタルを詰め、モルタル上面およびブリーディング水上面の目盛りを、ブリーディングが終了するまで 1 時間間隔で測定した。その際、試験室内の温度は 20℃ 一定とした。

モルタル硬化後は水中養生を行い、材齢 14 日以降に、写真-2.1 に示す中央部および中央部から上下方向に 50mm の位置の 3 カ所を厚さ 20mm 程度で切断し、ASTM C 457 (リニアトラバース法) に準じて、硬化後の空気量を測定した。なお、測定回数は各箇所 1 回とし、3 箇所の平均値を硬化後の空気量とした。

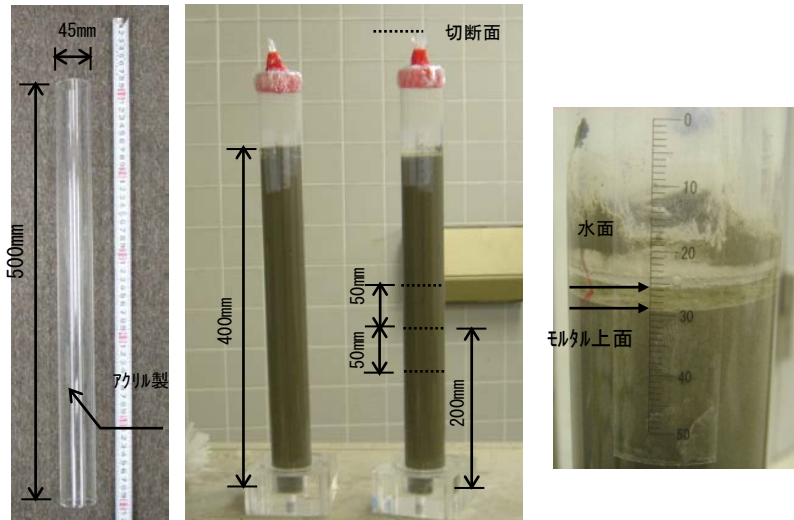


写真-2.1 試験器具および試験方法

2.3.3 試験結果および考察

図-2.10 に、練上がり後の経過時間と目盛りの読み値を示す。図において、目盛り 0 は打込み直後のモルタル上面であり、▲印はブリーディング水面を示しており、0 から▲印までの下がりがモルタルの体積減少量である。また、□印は経過時間後のモルタル上面であり、▲印から□印までがブリーディング水量になる。図に示すように、ブリーディングが終了する時間は、OPC が 3 時間に対して MF30 は 4 時間と 1 時間遅くなったが、ブリーディング量は、OPC および MF30 ともに、ほぼ同じであった。それに対して、体積減少量は、OPC が 1.5mm に対して、MF30 は 4.0mm となっていることが分かる。

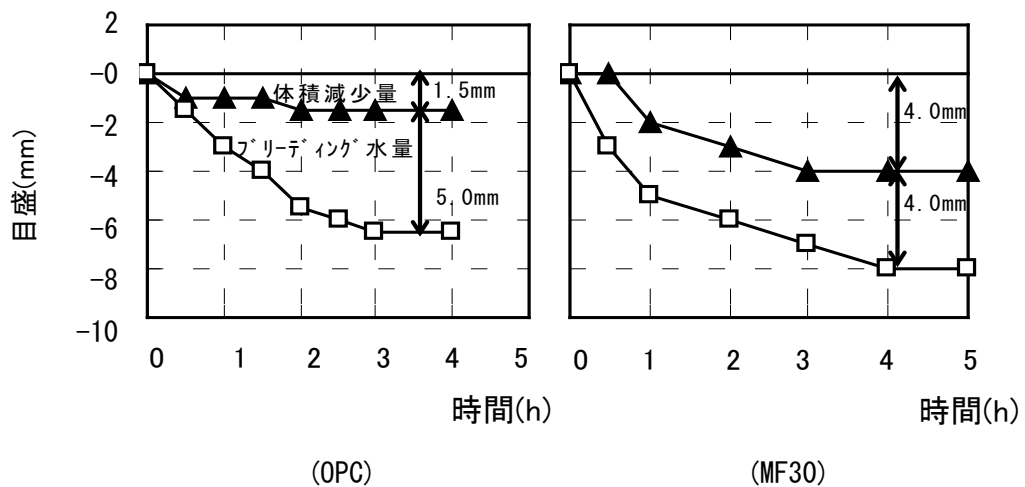


図-2.10 モルタルの経時による体積変化

写真-2.2 および写真-2.3 に、OPC および MF30 を用いたモルタルの上面の状況をそれぞれ示す。写真に示すように、OPC ではブリーディング水上面に空気泡がわずかに観察される程度であったのに対して、MF30 では空気泡が数多く観察された。大きな径の気泡ほど速く浮き上がるという現象を踏まえると、MF30 の方が大きな径の気泡が多くなっているものと考えられる。フレッシュ時に導入された気泡がもともと大きい、あるいは、凝結過程において微細な独立した気泡径同士が破泡や合泡することで結合し、より大きな径の気泡が形成されたために、上面の気泡の浮きが OPC よりも多くなったことが要因として考えられた。

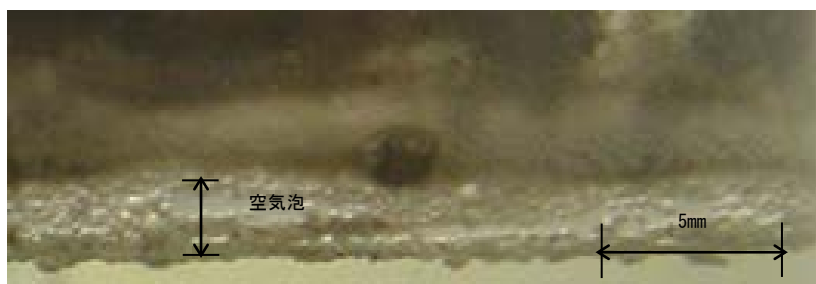


写真-2.2 モルタル上面の状況 (OPC)

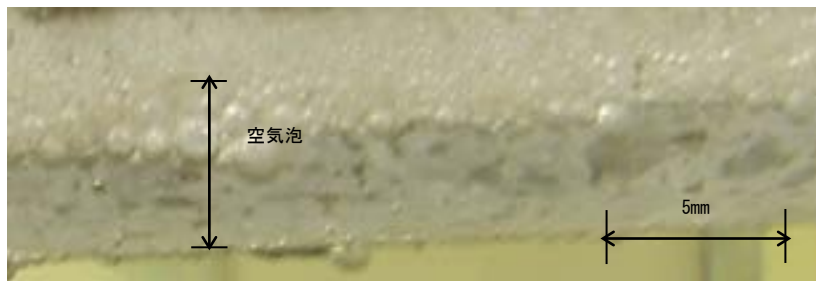


写真-2.3 モルタル上面の状況 (MF30)

また表-2.11 に示すように、フレッシュモルタルの空気量と硬化モルタルの3カ所の平均の空気量を比較すると、OPC が 0.2% 低下したのに対して、MF30 は 2.2% 低下した。このことから、MF30 を用いたモルタルでは、打込み後、凝結過程でモルタル中の空気が空気泡として抜けたものと考えられる。千歩らは、フライアッシュを使用した場合、AE 剤によって連行された気泡は、静置によってその組織が変化しやすく、気泡の安定性が低くなるとしている [2]。本研究においても同様に、フライアッシュを使用した場合、OPC に比べて気泡の安定性が低くなる結果となった。その理由として、凝結過程において発生するブリーディングの流れが気泡の安定性を低下させ、破泡や合泡を生じさせている可能性が推察された。

表-2.11 フレッシュ時および硬化後の空気量の比較

セメント 種類	①フレッシュ時空気量(%)	②硬化後 平均 空気量(%)	①-② (%)
OPC	7.0	6.8	0.2
MF30	7.2	5.0	2.2

2.4 ブリーディング量の違いが気泡組織に及ぼす影響

2.4.1 使用材料

使用材料を表-2.12 に示す。セメントには OPC と MF30 を用い、細骨材および粗骨材には砕砂、砕石を使用した。なお、粗骨材の最大寸法は 20mm とした。実験に使用した化学混和剤は、AE 減水剤および AE 助剤である。AE 減水剤はリグニンスルホン酸化合物を主成分とするものを使用し、AE 助剤については、変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤を主成分とするものを用いた。また、練混ぜ水には水道水を使用した。

コンクリートの配合を表-2.13 に示す。単位水量は 175kg/m^3 で一定とし、MF30 の配合については水セメント比 55.0%、OPC の配合は MF30 の配合と同一の水粉体容積比 ($V_w/V_p=157.0\%$) となるように定めた。コンクリートの練上がり温度および養生温度は、 5°C 、 20°C および 30°C の 3 水準とし、目標空気量 $4.5\pm 0.5\%$ となるように AE 助剤の添加量で調整を行った。

表-2.12 使用材料

種 類	記 号	摘 要
普通 ポルトランドセメント	OPC	密度： 3.16g/cm^3 比表面積： $3,310\text{cm}^2/\text{g}$
フライッシュ 30% 混入 中庸熟ポルトランドセメント	MF30	密度： 2.85g/cm^3 比表面積： $3,750\text{cm}^2/\text{g}$
細骨材	S	密度： 2.65g/cm^3 (表乾) 吸水率：1.01%
粗骨材 (20~5mm)	G	密度： 2.65g/cm^3 (表乾) 吸水率：0.60%
AE 減水剤	Ad1	リグニンスルホン酸化合物と ポリオール複合体
AE 助剤	Ad2	変性ロジン酸化合物系 陰イオン界面活性剤
練混ぜ水	W	水道水

表-2.13 コンクリートの配合

配合条件								単位量(kg/m ³)					
配合名	コンクリート温度(°C)	粗骨材最大寸法(mm)	W/C (%)	V _w /V _p (%)	s/a (%)	目標スランブ(cm) ^{*1)}	目標空気量(%)	水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 20~05 G	Ad1 (C×%)	Ad2 ^{*2)} (A)
OPC-5	5	20	49.6	157.0	44.0	12.0	4.5	175	353	779	992	0.25	3
MF30-5			55.0					175	318	779	992	0.25	16
OPC-20	20		49.6					175	353	779	992	0.25	3
MF30-20			55.0					175	318	779	992	0.25	19
OPC-30	30		49.6					175	353	779	992	0.25	5
MF30-30			55.0					175	318	779	992	0.25	26

*1)コンクリート温度 20°Cの目標スランブ

*2)Ad2 はセメント質量に対して 0.001%を基本量 1A とした.

2.4.2 試験方法

まずフレッシュコンクリートのスランブおよび空気量を、それぞれ、JIS A 1101 および JIS A 1128 に従い測定した。さらに、フレッシュコンクリートの性質に関する試験として、ブリーディング試験および凝結試験を行った。ブリーディング試験は JIS A 1123 に準じて実施し、ブリーディング率を算出した。凝結試験には、練上がり直後のコンクリートを 5mm ふるいでウェットスクリーニングしたモルタルの試料を用いた。そして、JIS A 1147 に従い貫入抵抗試験装置を使用し、貫入抵抗値が 3.5N/mm² になるまでの時間をコンクリートの始発時間、貫入抵抗値が 28.0N/mm² になるまでの時間をコンクリートの終結時間とした。

硬化コンクリートについては、気泡間隔係数測定を行った。気泡間隔係数測定では、φ150×300mm の円柱供試体の中心部を厚さ 20mm で切断し、ASTM C 457 (リニアトラパース法)により硬化コンクリートの空気量および気泡間隔係数を測定した。なお、供試体の本数は 1 本、測定回数は 1 回とした。

2.4.3 試験結果および考察

図-2.11 にブリーディング試験結果を、図-2.12 に凝結試験結果を示す。図-2.11 に示すように、ブリーディング率は各温度で OPC よりも MF30 の方が大きくなった。しかし、その程度は、コンクリート温度 20°C、30°C では、OPC および MF30 のブリーディング率はほとんど変わらなかったのに対し、コンクリート温度 5°C では MF30 の方が OPC に比べ 2 倍程度であった。図-2.12 に示すように、コンクリート温度が低い方が凝結時間は長くなり、MF30 の方が OPC よりも長くなった。特に、MF30 では、コンクリート温度 5°C の条件で凝結時間が大幅に長くなった。

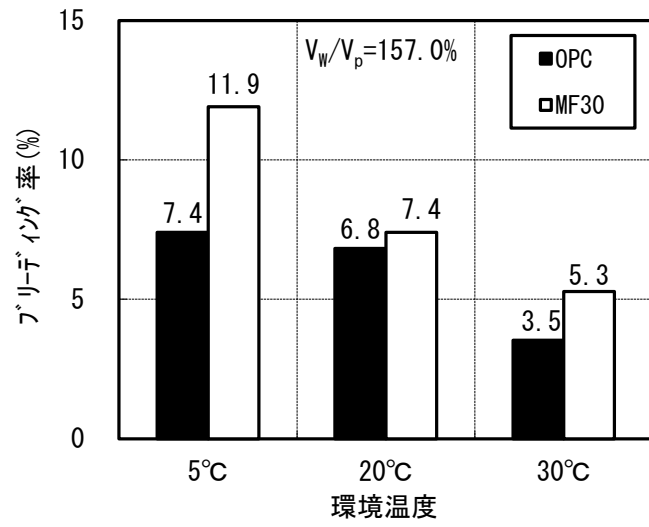


図-2.11 ブリーディング試験結果

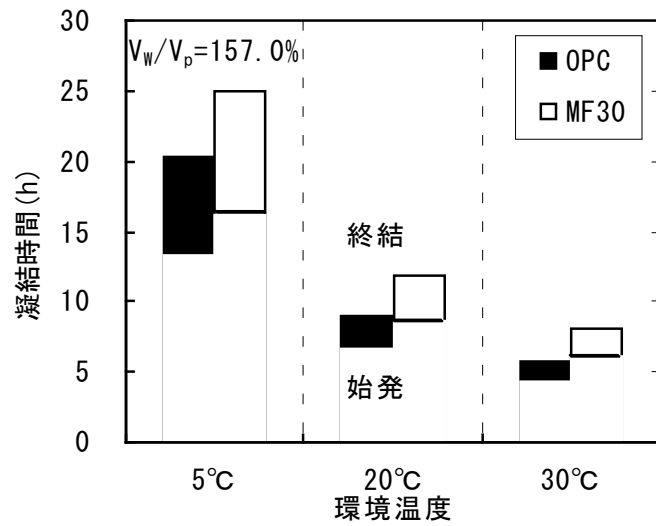


図-2.12 凝結試験結果

表-2.14 に各ケースのフレッシュ時の空気量，硬化後の空気量および気泡間隔係数を示す．図-2.13 にフレッシュ時の空気量と硬化後の空気減少量の関係を示す．OPC では硬化後の空気減少量が 0.1~0.7%であったのに対して，MF30 では 1.2~2.2% と大きくなっていることが分かる．また，セメントごとに見ると，コンクリート温度が低いほど硬化後の空気減少量が大きくなっており，この傾向は MF30 を用いたコンクリートでより顕著であった．

表-2.14 空気量および気泡間隔係数

配合名	①フレッシュ空気量 (%)	②硬化後空気量 (%)	①-②空気減少量 (%)	気泡間隔係数 (μm)
OPC-5	4.3	3.6	0.7	361
MF30-5	4.3	2.1	2.2	423
OPC-20	4.4	3.8	0.6	314
MF30-20	4.3	3.0	1.3	322
OPC-30	4.6	4.5	0.1	300
MF30-30	4.6	3.4	1.2	350

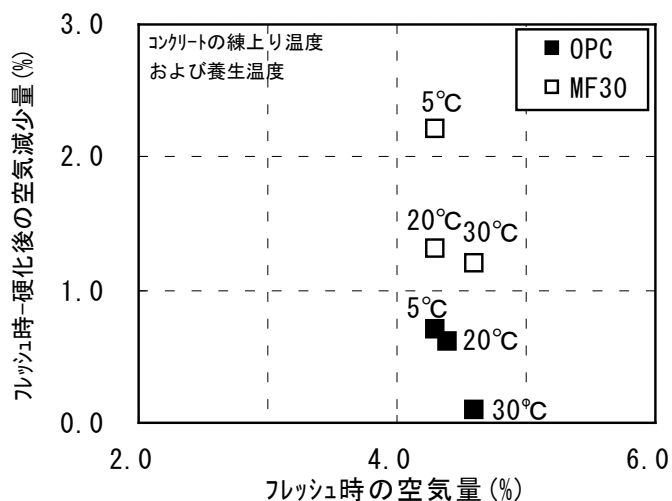


図-2.13 フレッシュ時の空気量と硬化後の空気減少量の関係

図-2.14 にブリーディング率と硬化後の空気減少量の関係を，図-2.15 にブリーディング率と硬化後の空気量の関係をそれぞれ示す．今回の実験では，フレッシュ時の目標空気量を $4.5 \pm 0.5\%$ として，実際には各ケースで 4.3~4.6% となったことから，図-2.14 と図

図-2.15 はほぼ同じ関係となっている。図に示すように、ブリーディング率が大きいほど、凝結過程での空気減少量が大きくなり、硬化後の空気量が小さくなる。また、同じブリーディング率の場合、MF30の方がOPCよりも硬化後の空気減少量が大きくなった。このことは、3章でのモルタルによる検討と一致するものであり、フライアッシュを用いたコンクリートの方が、ブリーディングの流れによってコンクリート中の気泡の安定性が低下しやすく、破泡や合泡したためであると考えられる。

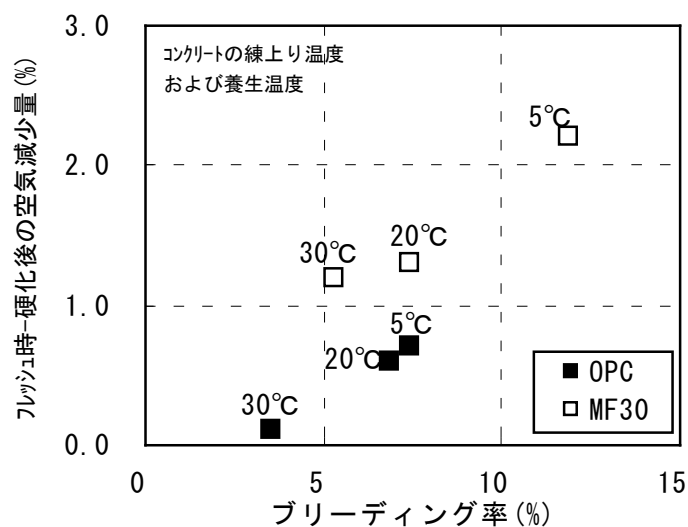


図-2.14 ブリーディング率と凝結過程の空気減少量の関係

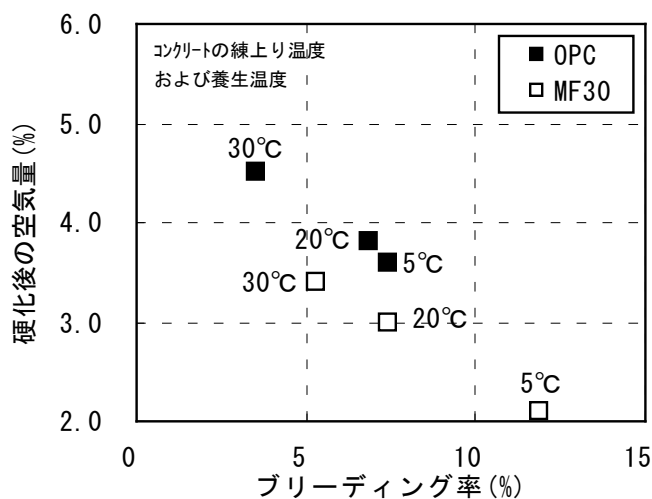


図-2.15 ブリーディング率と硬化後の空気量の関係

図-2.16 に硬化後の空気量と気泡間隔係数の関係を、図-2.17 にブリーディング率と気泡間隔係数の関係をそれぞれ示す。図に示すように、硬化後の空気量と気泡間隔係数には高い相関があるとともに、ブリーディング率と気泡間隔係数にも高い相関があることが分かる。図-2.18 に各セメントの気泡の分布を示す。図に示すように、各ケースともに0.125mmの気泡の量に差が認められ、硬化後の空気量が大きいほど、また OPCの方が0.125mmの気泡が多くなっていることが分かる。

以上から、ブリーディングが多いほどフレッシュ時から硬化後の空気減少量が大きくなり、その程度は、OPCを用いたコンクリートよりもMF30を用いたコンクリートの方が顕著であることが分かった。

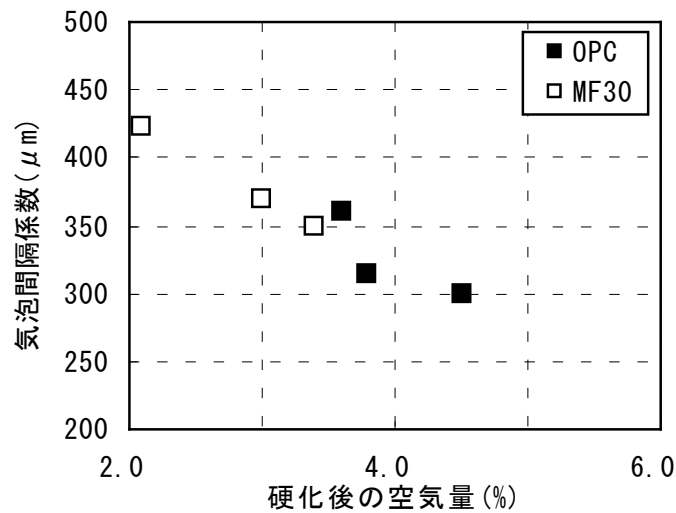


図-2.16 硬化後の空気量と気泡間隔係数の関係

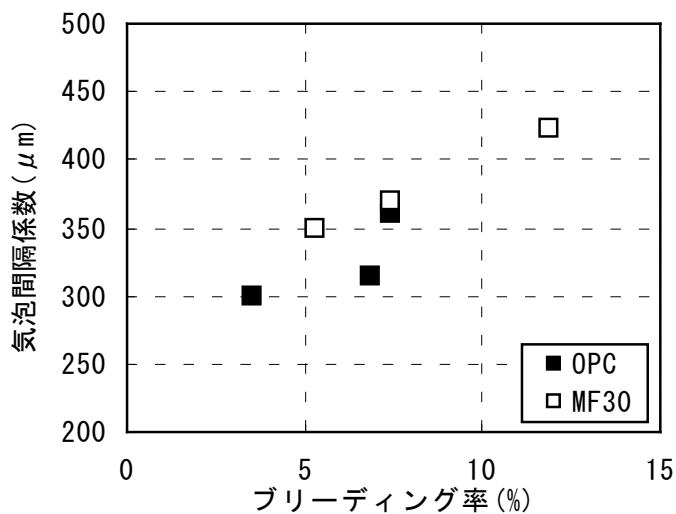
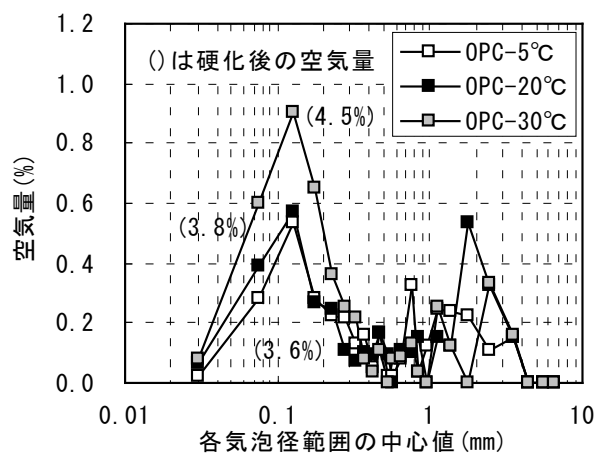
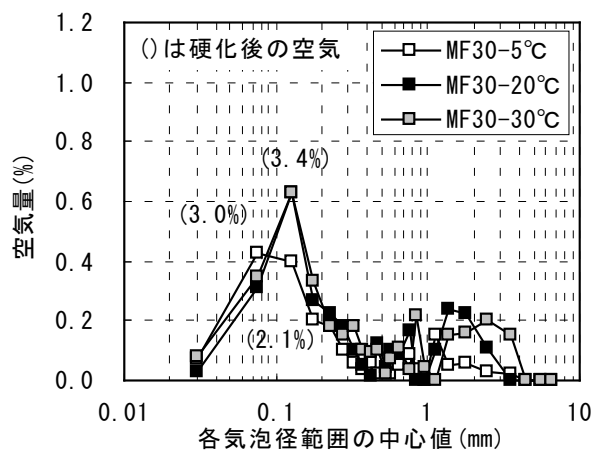


図-2.17 ブリーディング率と気泡間隔係数の関係



(a) OPC



(b) MF30

図-2.18 気泡分布

2.5 第2章の結論

本研究では、フライアッシュを用いたコンクリートの中でも、ダムコンクリートで一般に用いられている中庸熱フライアッシュセメントに着目し、コンクリートの凝結過程における空気量の変化を把握し、気泡組織と耐凍害性との関係を明らかにすることを目的として、実験的に検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 中庸熱フライアッシュセメントを用いた場合、一般に設定されている空気量(ダムコンクリートの粗骨材フルサイズコンクリートの目標空気量3.0~3.5%)では、フレッシュコンクリートの空気量が硬化後に大幅に減少する。また、この空気量の減少によって、凍結融解抵抗性が著しく低下する。
- 2) 中庸熱フライアッシュセメントを用いた場合で、粗骨材フルサイズコンクリートの目標空気量を4.0%以上に設定することで、凝結過程の空気量の減少を抑制でき、硬化

後の空気量を確保できることから、所定の凍結融解抵抗性を有するコンクリートが得られる。また、粗骨材フルサイズコンクリートの目標空気量を 4.0% とすれば、91 日圧縮強度の低下も小さい。よって、ダムコンクリートにおいて中庸熱フライアッシュセメントを用いる場合には、目標空気量の設定値を適切に定める必要がある。

- 3) 同じブリーディング率のコンクリートであっても、中庸熱フライアッシュセメントを用いた方が、普通ポルトランドセメントを用いるよりも、硬化後の空気減少量が大きくなる。この理由として、フライアッシュ混入により、コンクリート中の気泡の安定性が低下すること、さらにブリーディングの流れによって破泡や合泡の現象が生じることが考えられる。
- 4) 同一セメントを用いる場合、ブリーディングが多いほどフレッシュ時から硬化後の空気減少量が大きくなる。また、その傾向は中庸熱フライアッシュセメントの方が顕著である。

第 2 章の参考文献

- [1] 奥野亨, 浅野研一, 大浦鉄男: フライアッシュコンクリートの空気連行性について, セメント技術年報, No.38, pp.150-153, 1984.
- [2] 千歩修, 劉宏涛: フライアッシュコンクリートの静置による気泡組織・耐凍害性の変化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.963-964, 2004.8.
- [3] 堺孝司, 熊谷守晃, 吉田行, 若杉伸一: ビーライト系セメントを用いたコンクリートの凍結融解抵抗性, 土木学会論文集, No.718/V-57, pp.33-44, 2002.11.

第 3 章

コンクリートの気泡組織と耐凍害性の関係

第3章 コンクリートの気泡組織と耐凍害性の関係

3.1 概要

コンクリートの気泡組織と耐久性指数の相関について約 200 データを基に分析した。その結果、フレッシュから硬化にかけてコンクリートの空気量は減少し、この傾向は中庸熱フライアッシュセメントの場合に、より顕著であることが確認された。また、コンクリートの気泡間隔係数は、空気量と気泡比表面積のいずれの影響も受けるため、気泡間隔係数の値が同程度であっても気泡径の分布が大きく異なることがあり、径 0.15mm 未満の気泡量が多いコンクリートほど耐凍害性が高い傾向にあることが明らかとなった。さらに、本研究のケーススタディの範囲では、径 0.03~0.125mm の気泡の増加に伴って気泡間隔係数は小さくなり、径 1.125mm の気泡の増加に伴って気泡間隔係数が大きくなることを示した。

3.2 気泡組織測定および凍結融解試験の方法

3.2.1 使用材料および配合

使用材料を表-3.1 に示す。使用したセメントとデータ数については、普通ポルトランドセメント(以下、OPC と表記)が 126 データと、中庸熱フライアッシュセメント(以下、MFC と表記)が 67 データである。

表-3.1 使用材料

種類	記号	摘要
普通ポルトランドセメント	OPC	密度:3.16g/cm ³ 比表面積:3300cm ² /g
中庸熱フライアッシュセメント	MFC	密度:2.84~2.89g/cm ³ 比表面積:3540~3840cm ² /g
細骨材	S	表乾密度:2.53~2.73g/cm ³ 吸水率:1.40~2.65%
粗骨材 (20~5mm)	G	表乾密度:2.54~2.79g/cm ³ 吸水率:0.82~2.54%
AE 減水剤	Ad1	リグニンスルホン酸化合物
高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系化合物
AE 助剤	Ad2	変性ソルホン酸化合物系陰イオン界面活性剤 高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤
水	W	河川水, 水道水

MFC およびフライアッシュの物性値は、それぞれ表-3.2 および表-3.3 に示すとおりであり、フライアッシュの混入率は30%である。使用した細骨材および粗骨材の物性値は、表-3.4 に示すとおりである。AE 助剤については、セメントの種類によって使い分けてお

り、OPC の場合には、変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤を使用し、MFC の場合には、主として高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤を使用して、いくつかのコンクリートには変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤を使用した。また、コンクリートの配合条件を表-3.5 に示す。同表に示すように、水セメント比は 44.3%から 60%の範囲であり、空気量については、 $4.5 \pm 1.5\%$ を目標とし、中庸熟フライアッシュセメントの 6 データのみ、6.0%から 10.5%の範囲内で設定した。

表-3.2 MFC の物理化学試験結果

項目		単位	規格値	試験成績
密度 ^{*1)}		g/cm ³	—	2.84～2.89
比表面積 ^{*1)}		cm ² /g	2500 以上	3540～3840
凝結 ^{*1)}	水量	%	—	29.4
	始発	min	60 以上	215～298
	終結	h	10 以下	4.58～6.30
安定度(パット法) ^{*1)}			良	良
酸化マグネシウム ^{*1)}		%	5.0 以下	0.59～0.92
三酸化硫黄 ^{*1)}		%	3.0 以下	1.42～1.89

*1) JIS R 5213 のフライアッシュセメント C 種に準拠

表-3.3 フライアッシュの物理化学試験結果

項目	単位	規格値 ^{*1)}	試験成績
二酸化けい素	%	45.0 以上	57.0～64.7
湿分	%	1.0 以下	0.1～0.2
強熱減量	%	5.0 以下	1.0～1.8
密度	g/cm ³	1.95 以上	2.25～2.34
粉末度	cm ² /g	2500 以上	3870～4830
フロー値比	%	95 以上	104～105
活性度指数 28 日	%	80 以上	84～87
活性度指数 91 日	%	90 以上	101～105
メレンブル吸着量	mg/g	—	0.27～0.38

*1) JIS A 6201 のフライアッシュ II 種に準拠

表-3.4 細骨材および粗骨材の物性

項目	単位	細骨材		粗骨材	
		規格値*1)	試験成績	規格値*1)	試験成績
絶乾密度	g/cm ³	2.5 以上	2.51~2.72	2.5 以上	2.52~2.77
吸水率	%	3.0 以下	1.40~2.65	3.0 以下	0.82~2.54
単位容積質量	kg/m ³	—	1.59~1.66	—	1.64~1.68
粗粒率	—	—	—	—	6.52~6.53
実積率	%	—	60.6~66.2	—	57.2~65.2
粘土塊量	%	1.0 以下	0.00~0.50	0.25 以下	0.00~0.20
すりへり減量	%	—	—	40.0 以下	
微粒分量	%	9.0 以下	0.00~4.20	3.0 以下	0.00~0.15
安定性試験	%	10 以下	1.40~3.60	12 以下	0.30~7.00
アルカリ反応性	—	—	無害	—	
有機不純物	—	—	淡い	—	
密度 1.95g/cm ³ の液体に浮くもの	%	0.5 以下	0.00~0.30	0.5 以下	

*1) JIS A 5308 および JIS A 5005 に準拠

表-3.5 コンクリートの配合条件

セメント種類	粗骨材最大寸法(mm)	W/C (%)	s/a (%)	スランプ (cm)	単位水量 W (kg/m ³)	単位セメント量 C (kg/m ³)
OPC	20	45.0~60.0	31.3~50.8	5.0~21.5	160~194	267~554
MFC	20	44.3~57.0	44.7~54.4	3.0~12.0	151~177	338~391

分析にあたっては、取得したデータを、セメントについて2種類に分類し、さらに水セメント比について、44.3%以上 50.0%未満、50.0%以上 55.0%未満および 55.0%以上 60.0%以下の各範囲に分類した。

3.2.2 試験方法

(1)フレッシュコンクリートの空気量測定方法

JIS A 1128-2005「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法—空気室圧力方法」に準じた。

(2)気泡組織測定方法

ASTM C457-2006「顕微鏡による硬化コンクリートの気泡システムのパラメータと空気量の測定方法」に示されるリニアトラバース法に準じ、硬化後の空気量および気泡間隔係数を算出した。

(3)凍結融解試験方法

JIS A 1148-2001「コンクリートの凍結融解試験方法」に準じて、供試体を材齢 28 日まで 20±2℃の水槽中で養生した後、試験を開始した。

3.3 気泡組織測定および凍結融解試験の結果

3.3.1 フレッシュ時および硬化後の空気量

OPC および MFC のフレッシュ時と硬化後の空気量の相対度数分布を図-3.1 に示す。同図より、MFC については、耐凍害性を確保するために、空気を多量に連行したコンクリートが含まれているため、OPC よりも広い範囲でデータが分布している。また、OPC および MFC とともに、フレッシュ時よりも硬化後の方が、空気量が少ない傾向が認められており、これは、凝結過程における気泡の消失などによるもの [1] と考えられる。

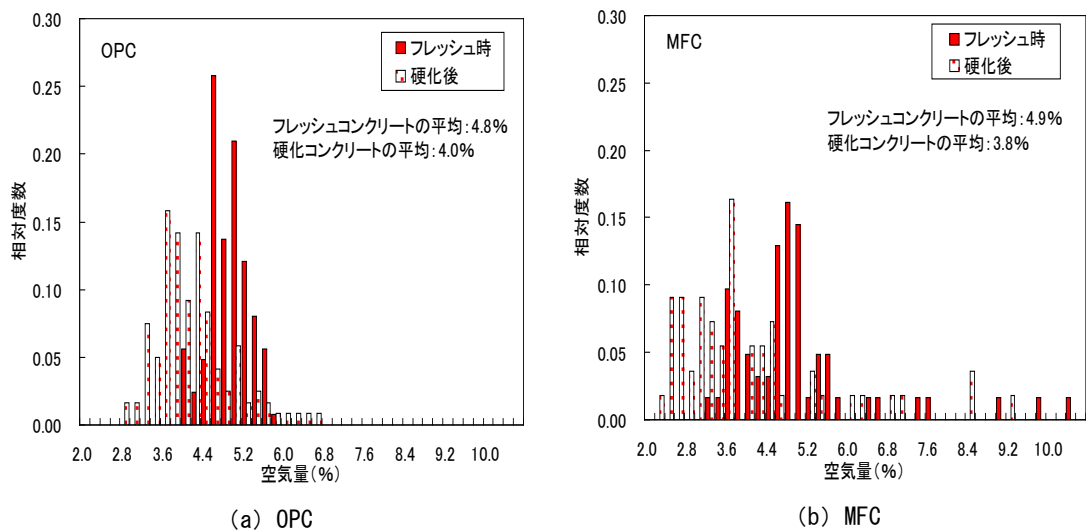
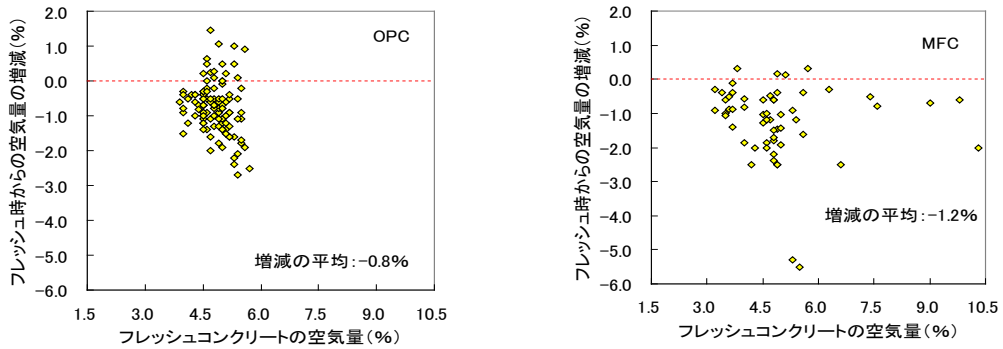


図-3.1 フレッシュ時と硬化後の空気量の相対度数分布

フレッシュ時と硬化後の空気量の増減について、フレッシュコンクリートの空気量との関係を図-3.2 に示す。同図より、いずれのセメントについても、フレッシュコンクリートの空気量と、フレッシュ時と硬化後の空気量の増減の間に、明確な相関は認められない。また、OPC については、全体的に、フレッシュ時から硬化後にかけて空気量が減少する傾向にあるものの、1.0%程度増加するデータもかなりの割合で存在している。それに対して MFC では、若干、空気量が増加しているデータもあるが、大部分のデータの空気量が減少している。この理由として、前述のとおり、MFC を用いたコンクリートがブリーディングが多いこと、および MFC に含まれるフライアッシュの未燃炭素が AE 剤を吸着することの影響が考えられる。



(a) OPC (b) MFC
 図-3.2 フレッシュコンクリートの空気量とフレッシュ時から硬化後の空気量の増減の関係

3.3.2 気泡組織と凍結融解試験結果の相関

(1) 空気量と耐久性指数の関係

フレッシュコンクリートの空気量と耐久性指数の関係を図-3.3に示す. 同図より, OPCの場合, データが4.5%付近に集中していることもあり, 耐久性指数との相関は認められないが, 水セメント比が低いデータの方が, 耐久性指数が大きくなる傾向が確認される. MFCの場合, 空気量7.0%以上のデータもあり, これらの耐久性指数はすべて100程度を保持しているが, 空気量4.5%前後のデータには明確な相関が認められない. また, 水セメント比が低いデータであっても耐久性指数が60未満のデータが存在しており, これはOPCと異なる傾向となっている.

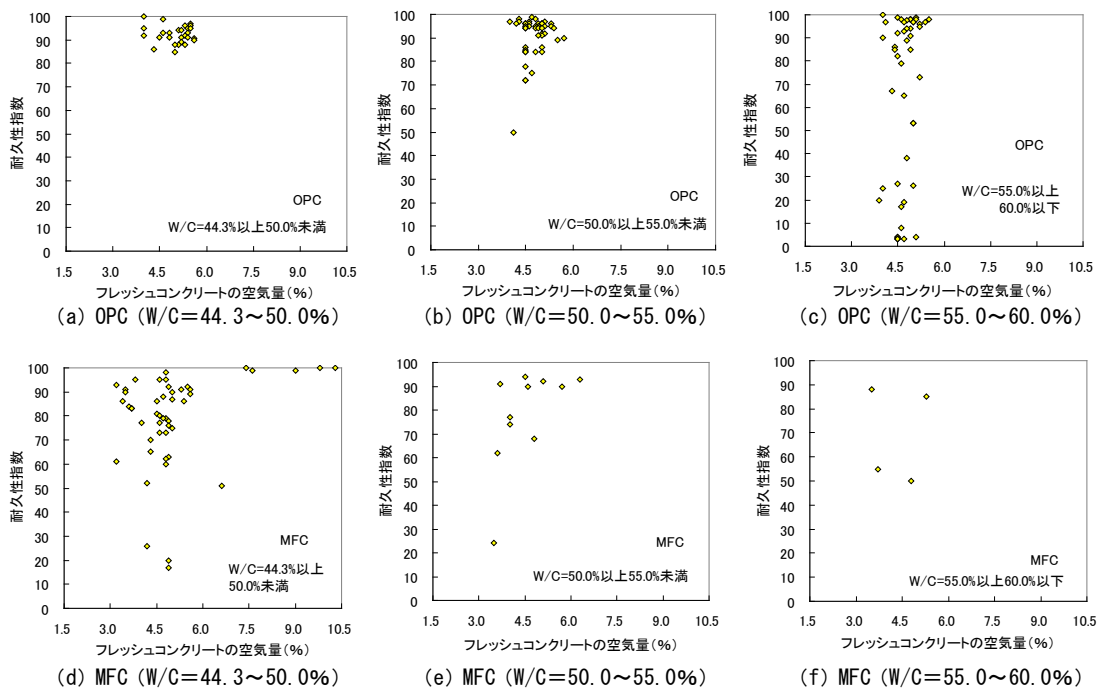


図-3.3 フレッシュコンクリートの空気量と耐久性指数の関係

硬化コンクリートの空気量と耐久性指数の関係を図-3.4に示す。同図より、OPCの場合、水セメント比が44.3%以上50.0%未満では、耐久性指数が80未満のデータがなく、水セメント比が50.0%以上55.0%未満では、空気量が3.5%程度以下の範囲において耐久性指数が70未満のデータが存在している。水セメント比が55.0%以上60.0%以下では、耐久性指数が5未満から100まで分布しているが、明確な傾向が認められない。MFCの場合、いずれの水セメント比の範囲においても、空気量が3.5%程度よりも少ない範囲に、耐久性指数が70未満のデータが存在する傾向が認められる。

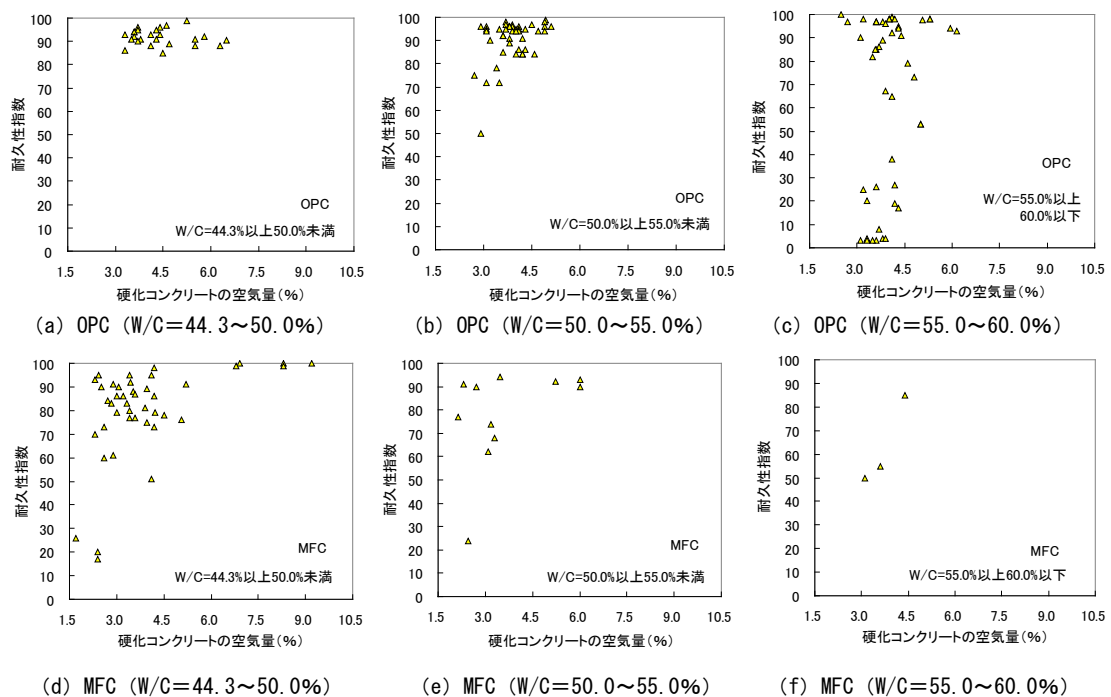


図-3.4 硬化コンクリートの空気量と耐久性指数の関係

以上の結果より、フレッシュコンクリートの空気量については、ほとんどのデータが4.5%前後であるために耐久性指数との相関が確認されにくいのに対し、硬化コンクリートの空気量については、3.5%以下のデータも存在しており、その範囲に耐久性指数が小さいデータが確認されることから、コンクリートの耐凍害性を検討する上では、フレッシュ時よりも硬化後の空気量に着眼することが有効であることが示唆される。

(2)気泡間隔係数と耐久性指数の関係

気泡間隔係数と耐久性指数の関係を図-3.5に示す。同図より、OPCの場合、水セメント比が44.3%以上50.0%未満では、耐久性指数が80未満のデータがなく、水セメント比が50.0%以上55.0%未満と、55.0%以上60.0%以下では、気泡間隔係数が大きいほど耐久性指

数が小さくなるという既往の知見 [2,3,4,5] と一致する傾向が確認される。

一方、MFC の場合、すべてのデータが気泡間隔係数 $400\mu\text{m}$ 程度以下であるが、気泡間隔係数が $300\mu\text{m}$ 程度よりも小さい範囲においても耐久性指数が 60 未満のデータがあるという既往の知見 [2,3,4,5] と合致しない傾向が確認される。

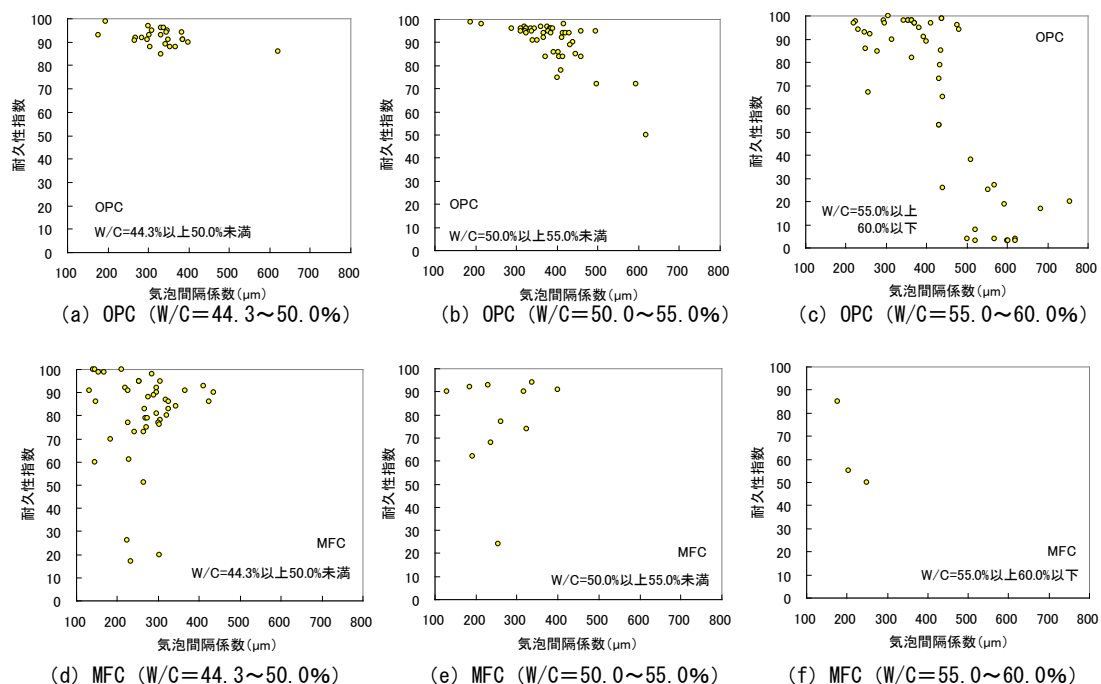


図-3.5 気泡間隔係数と耐久性指数の関係

(3)空気量と気泡間隔係数および耐久性指数の関係

硬化コンクリートの空気量と気泡間隔係数の関係を、耐久性指数ごとに分類して図-3.6 に示す。同図より、OPC および MFC とともに、ばらつきが大きくなっているものの、全体的に、硬化コンクリートの空気量が多いほど気泡間隔係数が小さくなる傾向が認められる。また、耐久性指数との相関に着目すると、OPC の場合、気泡間隔係数が大きい方が、耐久性指数が小さくなる傾向が確認され、特に、水セメント比が 55.0%以上 60.0%未満では、気泡間隔係数が $400\mu\text{m}$ 程度以上のデータの耐久性指数が 60 未満となっている。

一方、MFC の場合、気泡間隔係数が $400\mu\text{m}$ 程度以上のデータがほとんどないため、明確な傾向が把握しにくいものの、空気量が 4.5%よりも少ない範囲に着目すると、気泡間隔係数が $300\mu\text{m}$ 程度未満の範囲に耐久性指数が 70 未満となるデータが多い傾向が確認される。この理由として、例えば、フライアッシュによって AE 剤の気泡安定性が低下したことの影響が推察されるところであるが、より詳細に分析を進めるために、空気量や気泡間隔係数という代表値のみでなく、気泡径の分布も確認しつつ分析を進めることが必要と考えられる。

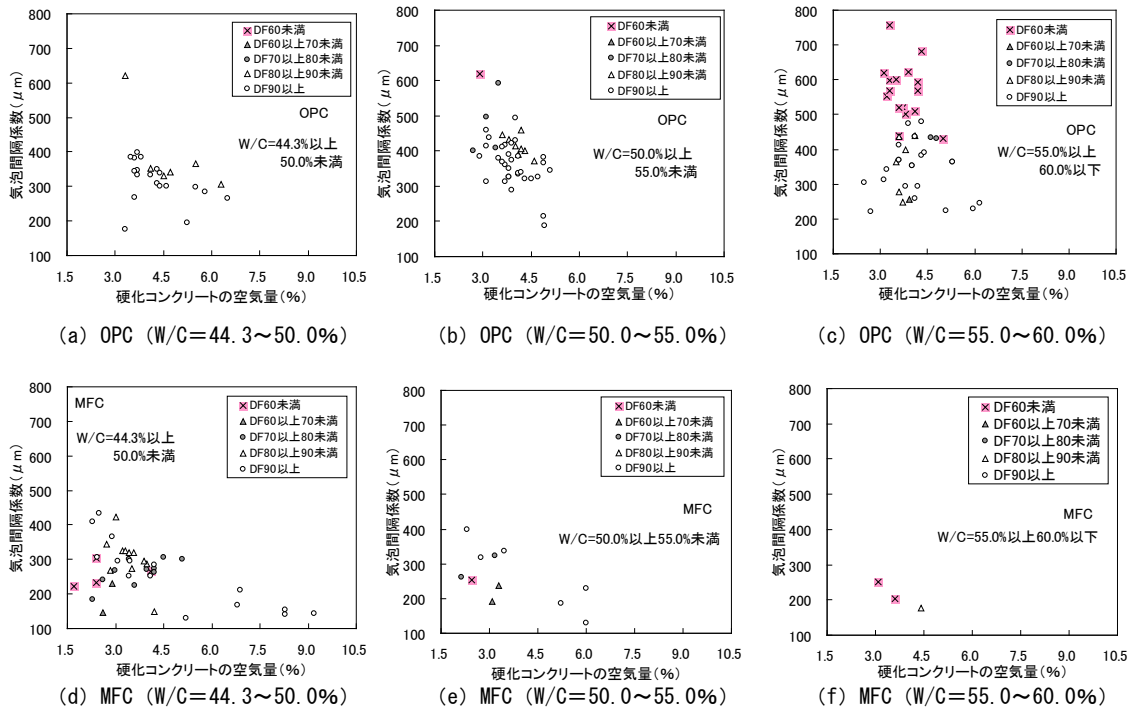


図-3.6 硬化コンクリートの空気量と気泡間隔係数の関係

(4)水セメント比と硬化コンクリートの空気量の関係

水セメント比と硬化コンクリートの空気量の関係を耐久性ごとに分類して図-3.7 に示す。コンクリートの耐凍害性はコンクリートの細孔構造に依存しており、水セメント比が大きくなるに従い細孔中に含まれる凍結水が多くなるため、耐凍害性が低下すると考えられている [6]。同図より、耐久性指数 60 未満のデータについて着目したときに OPC および MF30 とともに水セメント比 35~60%の範囲においては、水セメント比との明確な相関は認められなかった。

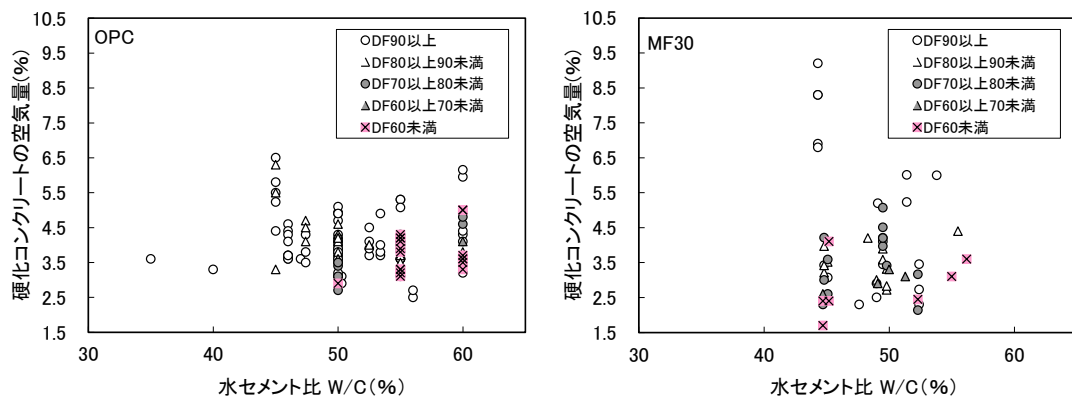


図-3.7 水セメント比と硬化コンクリートの空気量の関係

3.4 気泡径の分布と気泡間隔係数および耐久性指数の関係

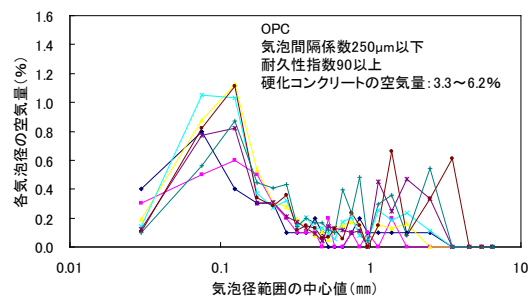
3.4.1 気泡径の分布と耐久性指数の関係

(1) OPC の気泡径の分布

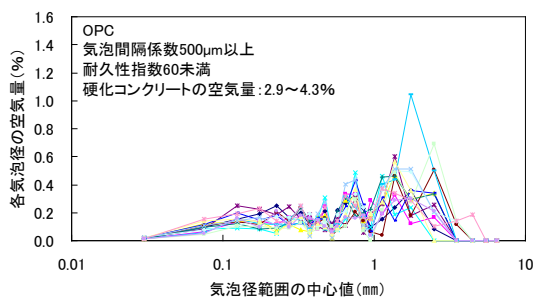
OPC のデータの中から、気泡間隔係数が $250\mu\text{m}$ 以下で耐久性指数が 90 以上のデータと、気泡間隔係数が $500\mu\text{m}$ 以上で耐久性指数が 60 未満のデータを抽出し、これらの気泡径の分布を比較して図-3.8 に示す。図-3.8 は、気泡分布の全体的な傾向の把握を意図したものであり、該当するデータをすべてプロットして示した。

図-3.8 より、気泡間隔係数が $250\mu\text{m}$ 以下で耐久性指数 90 以上のコンクリートの気泡径の分布から、気泡径 0.10mm 前後および気泡径 1.0mm 前後の空気量が多いことが確認される。それに比べて、気泡間隔係数が $500\mu\text{m}$ 以上で耐久性指数が 60 未満のコンクリートの気泡分布は、気泡径 0.10mm 前後の空気量が少ないことが確認される。また、気泡径 1.0mm 以上の空気量については、ほぼ同程度となっている。

このことより、コンクリートの耐凍害性を確保するためには、気泡径 1.0mm 以上の空気量よりも、気泡径 0.10mm 前後の微細な気泡の量を確保することが必要であることが考えられる。



(a) 気泡間隔係数 $250\mu\text{m}$ 以下，耐久性指数 90 以上

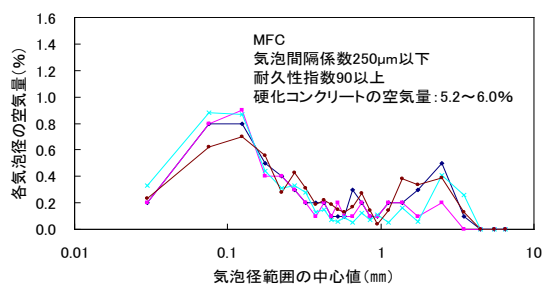


(b) 気泡間隔係数 $500\mu\text{m}$ 以上，耐久性指数 60 未満

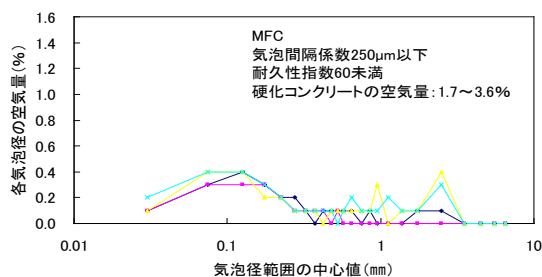
図-3.8 OPC の気泡分布

(2) MFC の気泡分布

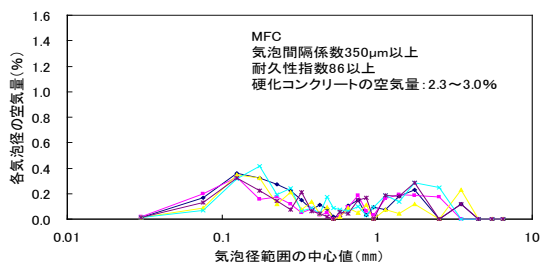
MFC については、先述の分析において、気泡間隔係数と耐久性指数の相関が認められず、既往の研究 [2,3,4,5] と合致しない結果が得られている。そこで、耐凍害性を確保するための目安とされる気泡間隔係数 $250\mu\text{m}$ 以下 [3] のデータを取り出し、耐久性指数 90 以上と 60 未満の気泡分布の比較を行った。これらの気泡分布を図-3.9 に示す。ここで、硬化コンクリートの空気量 3.0% 以下で、かつ気泡間隔係数 $350\mu\text{m}$ 以上でも、耐久性指数 86 以上となるデータが存在していたため、これらについても、参考として気泡分布を示した。



(a) 気泡間隔係数 $250\mu\text{m}$ 以下，耐久性指数 90 以上



(b) 気泡間隔係数 $500\mu\text{m}$ 以上，耐久性指数 60 未満



(c) 気泡間隔係数 $350\mu\text{m}$ 以上，耐久性指数 86 以上

図-3.9 MFC の気泡分布

同図より、気泡間隔係数 $250\mu\text{m}$ 以下で、耐久性指数 90 以上と 60 未満の気泡分布を比較すると、耐久性指数が大きなデータには、気泡径 0.1mm 前後の空気量と、気泡径 1.0mm 以上の空気量が、いずれも多い傾向が認められる。

このように、気泡分布が大きく異なるにも関わらず、気泡間隔係数が同程度となることは、**図-3.10** および **表-3.6** に示すケーススタディによって説明することができる。まず、前掲の **図-3.9(b)** に示すような耐久性指数 60 未満の気泡分布を参考にし、**図-3.10** において気泡間隔係数 $225\mu\text{m}$ となる(a)の気泡分布を仮定する。次に、この分布のうち、気泡径 $0.85\sim 0.95\text{mm}$ の空気量が 0.8% 程度まで増加して(b)のような分布になると、空気量が増加するにも関わらず、気泡比表面積も小さくなるため、結果として気泡間隔係数が $250\mu\text{m}$ まで大きくなる。一方、気泡径 0.125mm の空気量が 0.9% 程度まで増加して(c)のような分布になる場合、気泡比表面積も大きくなるため、気泡間隔係数が $204\mu\text{m}$ まで小さくなる。さらに、気泡径 0.125mm および $0.85\sim 0.95\text{mm}$ の空気量が、いずれも増加して(d)のような分布になった場合には、空気量の増加と、気泡比表面積が小さくなることによる影響が同程度となり、結果として気泡間隔係数が(a)の気泡分布と同じ $225\mu\text{m}$ となる。

すなわち、例えばフライアッシュによる空気連行性の低下の影響などによって気泡径 0.10mm 前後および 1.0mm 以上の空気量がいずれも減少する場合、気泡間隔係数には変化がないが、気泡径の分布には変化があり、このことが耐凍害性に影響を及ぼす可能性がある。

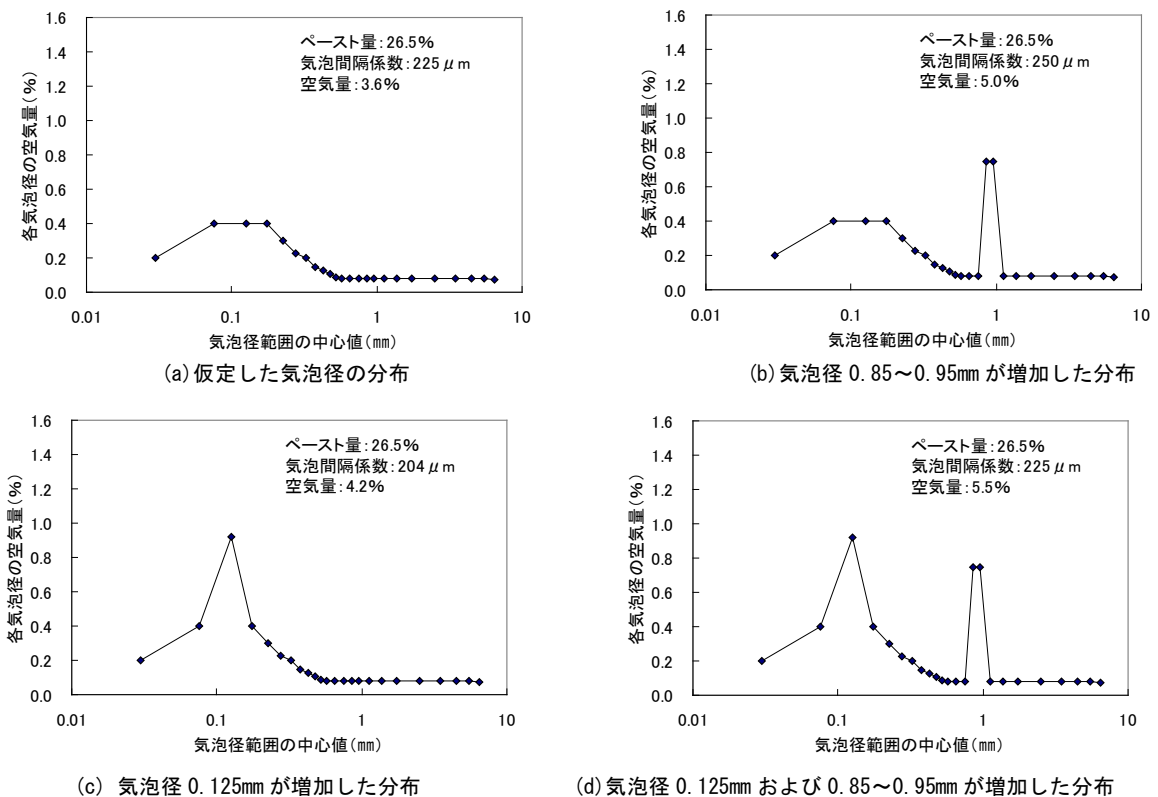


図-3.10 気泡間隔係数のケーススタディ

表-3.6 ケーススタディ結果

図-9の 図の記号	ペースト 容積比	気泡比表面積 (mm ² /mm ³)	気泡間隔係数 (μm)
(a)	7.28	24.4	225
(b)	5.32	19.0	250
(c)	6.37	25.3	204
(d)	4.82	20.3	225

一方, 気泡間隔係数 500μm 以上で耐久性指数 60 未満となる図-3.9 (b) の気泡分布と, 気泡間隔係数 350μm 以上であるにもかかわらず耐久性指数 86 以上であった図-3.9 (c) の気泡分布を比較すると, 耐久性指数 86 以上の方が気泡径 0.10mm 前後の空気量が若干少ないものの, 大きな違いは認められない. この理由として, 気泡組織のみでなく, 骨材の密度や吸水率などが耐久性指数に影響を及ぼした可能性があり, 今後の検討が必要と考えられる. 例えば, 既往の研究 [7] では, 粗骨材の密度が小さいほど, また, 吸水率が高いほど耐久性指数が小さな値になることが示されている.

以上のことより, 本研究のデータの範囲では, 同一の気泡間隔係数であっても, 気泡径 0.10mm 前後の空気量および気泡径 1.0mm 以上の空気量が, いずれも多い方が, 耐久性指数が高くなる傾向があることが明らかとなった. ただし, この範囲の空気量が少なくても, 耐久性指数が低くならない場合があることも確認された.

3.4.2 気泡間隔係数に関するパラメータスタディ

コンクリートの気泡分布はさまざまであり, 先述のように, 気泡分布が大きく異なるにもかかわらず, 代表値である気泡間隔係数が同程度の値を示すことが径のあり得る. この傾向は, 特に MFC のようにフライアッシュの影響によって気泡安定性が低下する場合に顕著となる. このことを踏まえ, 図-3.11 に示すような, 気泡間隔係数が 216μm となる気泡分布を仮定し, 気泡径 0.03mm, 0.075mm, 0.125mm, 0.375mm および 1.125mm の各径の空気量を, 図中の点線の範囲で増減させて気泡分布を変化させたときの気泡間隔係数の変化を算出した. ここで, 各気泡径の空気量を増減させる範囲については, 本研究で取得したデータの上限および下限を参考に, コンクリートとして存在し得る範囲を設定したものである.

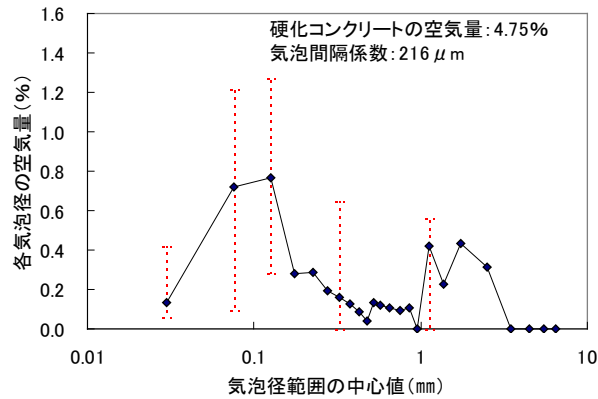


図-3.11 気泡分布（気泡間隔係数 216 μ m）

パラメータスタディの結果を図-3.12 に示す。同図に示すように、仮定した気泡分布では、気泡径 0.03mm, 0.075mm および 0.125mm の小さな径の空気量が増加するに従って気泡間隔係数が小さくなった。また、気泡径 0.375mm の空気量の増減は、気泡間隔係数に変化を及ぼさず、気泡径 1.125mm の大きな径の空気量が増加するに従って気泡間隔係数が大きくなった。その中でも、気泡径 0.03mm および 0.075mm の空気量の増減の影響が大きく、それぞれ、気泡間隔係数が 165~236 μ m および 183~291 μ m の範囲で変化する結果となった。

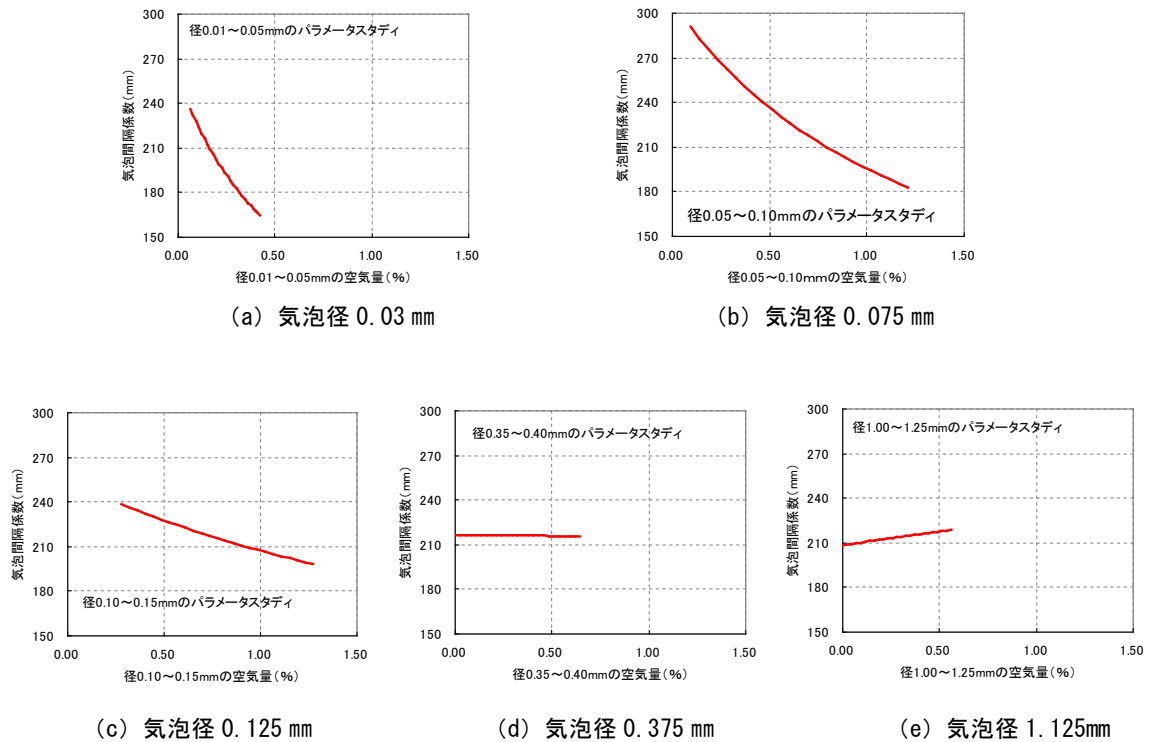


図-3.12 パラメータスタディ結果

3.5 気泡径ごとの空気量と耐久性指数の関係

3.5.1 気泡径ごとの空気量と気泡間隔係数および耐久性指数の関係

これまでの検討により、特に MFC のようにフライアッシュによる気泡安定性の低下がある場合、水セメント比、空気量および気泡間隔係数の各指標と耐久性指数の相関が得られにくいことが明らかとなったため、気泡径の分布に着目した結果、気泡径 0.10mm 前後の空気量と耐久性指数に相関があることが推察された。このため、気泡径 0.10mm 前後の空気量に着眼した分析を行った。

気泡間隔係数と、気泡径 0.01mm 以上 0.05mm 未満、0.05mm 以上 0.10mm 未満、0.10mm 以上 0.15mm 未満、0.15mm 以上 0.20mm 未満、0.20mm 以上 0.25mm 未満および 0.25mm 以上 0.30mm 未満の各径の空気量の関係を、OPC および MFC について、それぞれ図-3.13 および図-3.14 に示す。これらの図では、耐久性指数についてデータを分類して示した。

OPC について示した図-3.13 より、気泡径 0.01mm 以上 0.05mm 未満、0.05mm 以上 0.10mm 未満および 0.10mm 以上 0.15mm 未満の各図には、気泡間隔係数と各気泡径の空気量の相関が認められ、気泡間隔係数が小さいほど各気泡径の空気量が多く、耐久性指数が高い値となる傾向が認められる。0.15mm 以上 0.20mm 未満、0.20mm 以上 0.25mm 未満および 0.25mm 以上 0.30mm 未満の各図についても、同様の傾向があるようにも見えるが、明確な相関は読み取り難い。

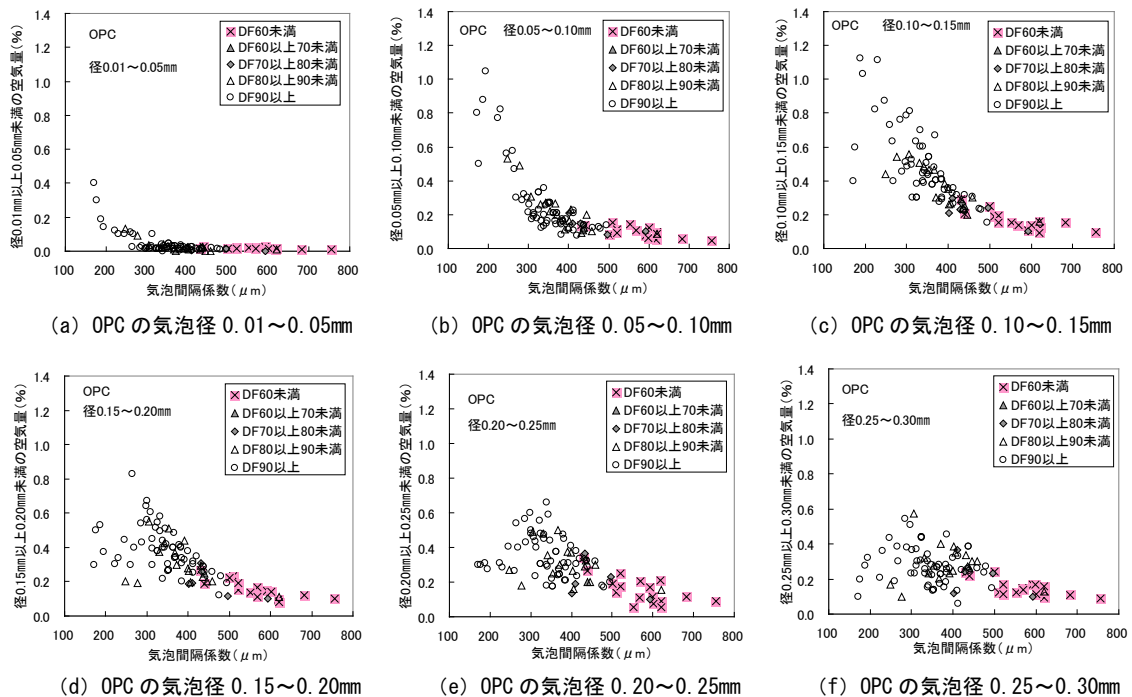


図-3.13 OPC の気泡間隔係数と各気泡径の空気量の関係

また、MFCについて示した図-3.14より、MFCについては、全体的にOPCよりもばらつきが大きく、特に0.10mm以上0.15mm未満の図(c)の相関性が低いものの、概ね同様の傾向が確認される。

以上の結果より、既往の知見[8]では、気泡径0.30mm未満の範囲に着眼してコンクリートの耐凍害性を評価することが提案されているが、本研究のデータからは、より微細な気泡径0.15mm未満の範囲に着眼することによって、評価の精度を高められる可能性が示唆される。このことを踏まえ、図-3.15に、気泡径0.15mm未満と0.30mm未満の各空気量について、それぞれ耐久性指数との関係を比較して示す。なお、これらの図では、データのばらつきを明確にするために、空気量の軸(X軸)の範囲を変えて示した。

同図より、いずれのセメントおよび気泡径についても、空気量の増加に伴って耐久性指数が増加する傾向が認められる。また、OPCについては、気泡径0.15mm未満の範囲に着眼することによって、データのばらつきが小さくなり、より明確に耐凍害性を評価できることが確認される。MFCについては、気泡径0.15mm未満および0.30mm未満のいずれの場合でも、ばらつきの程度に大きな違いが認められない。

以上のことより、気泡径0.30mm未満の空気量より気泡径0.15mm未満の空気量に着眼する方が、コンクリートの耐凍害性をより高い精度で評価できることが示唆される。

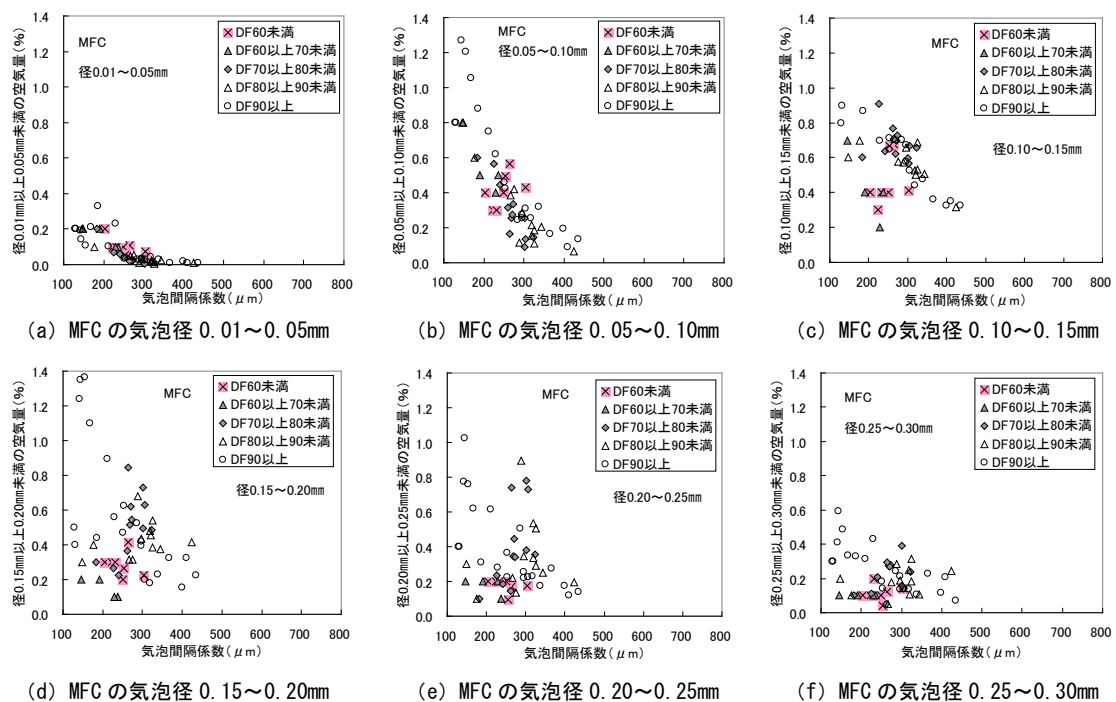


図-3.14 MFCの気泡間隔係数と各気泡径の空気量の関係

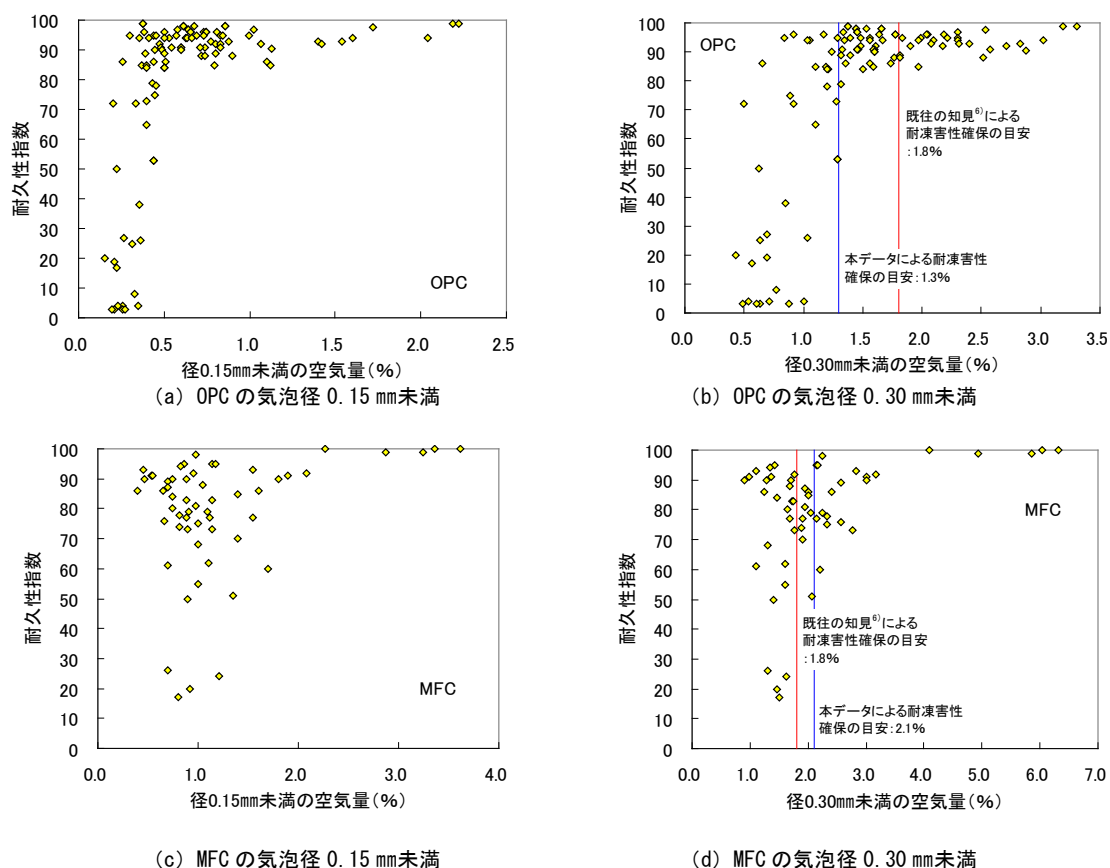


図-3.15 気泡径 0.15 mm未満および 0.30 mm未満の空気量と耐久性指数の関係

一方、前述のとおり、既往の知見 [6] では、気泡径 0.30mm 未満の空気量を 1.8%確保することが耐凍害性の確保に有効であることが示されている。このことを踏まえ、図中に、気泡径 0.30mm 以上の空気量 1.8%を示して比較したところ、本研究のデータにおいて、OPC については、空気量を 1.3%以上とすれば、耐久性指数が 60%以上になることから、既往の知見 [6] は今回の結果に比べて若干、安全側の評価となることが確認される。一方、MFC については、空気量を 2.1%以上としなければ、耐久性指数が 60%以上にならないことから、既往の知見 [6] は今回の結果に比べて危険側の評価になると言え、セメントの種類によって異なることが分かった。

3.5.2 径 0.15mm 未満の空気量と耐久性指数の関係

気泡径 0.15mm 未満の空気量の総和と気泡間隔係数の関係を図-3.16 に示す。これらの図では、図-3.13 および図-3.14 と同様、耐久性指数についてデータを分類してプロットした。

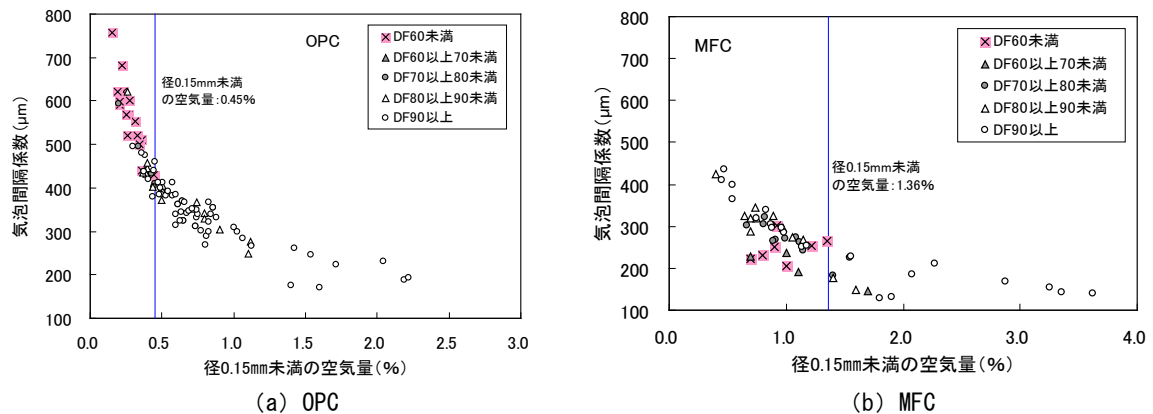


図-3.16 気泡径 0.15mm 未満の空気量の総和と気泡間隔係数の関係

同図より、OPC の場合、気泡径 0.15mm 未満の気泡を 0.45% 以上連行することによって、耐久性指数 60 以上の耐凍害性を確保することができることが確認される。一方、MFC の場合には、気泡径 0.15mm 未満の気泡を 1.36% 以上連行する必要があることが確認される。このことより、フライアッシュを使用する場合には、OPC よりも、気泡径 0.15mm 未満の気泡の量を増やさなければ、耐凍害性を確保できないことが推察される。

気泡径 0.15mm 未満の空気量と、フレッシュコンクリートの空気量の関係を図-3.17 に示す。同図より、OPC については、フレッシュコンクリートの空気量が $4.5 \pm 1.5\%$ の範囲にあることもあり、明確な傾向を確認することができない。それに対し、MFC については、径 0.15mm 未満の空気量が多くなるほど、フレッシュコンクリートの空気量が多くなるのが分かる。本研究の範囲では、径 0.15mm 未満の空気量を 1.36% 以上として耐凍害性を確保しようとする場合、フレッシュコンクリートの空気量を、最低でも 4.3% 以上とする必要があり、さらに確実に確保するためには 6.6% 以上とすることが必要であることが確認される。

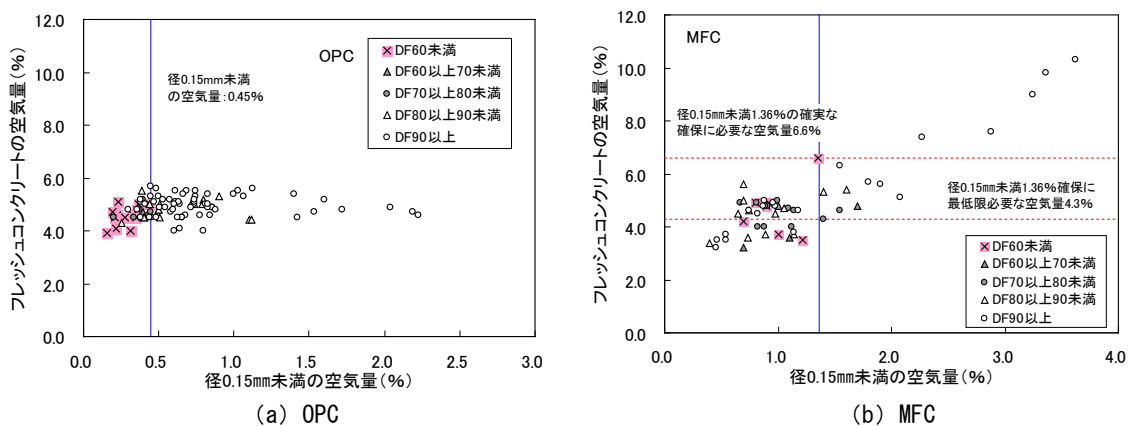


図-3.17 気泡径 0.15mm 未満の空気量の総和とフレッシュコンクリートの空気量の関係

3.6 第3章の結論

OPCおよびMFCを使用したコンクリートの気泡組織と耐久性指数の関係について、193データを基に分析した結果、以下の知見が得られた。

- 1) OPC および MFC とも、フレッシュ時より硬化後の方が、空気量が少なくなり、この傾向は、MFC の場合に、より顕著である。
- 2) OPC の場合、気泡間隔係数が大きいほど耐久性指数が小さくなる。
- 3) MFC の場合、気泡間隔係数と耐久性指数の相関は得られない。これは、前述のとおり、AE 剤の空気連行性の低下の影響により、多様な気泡分布となることによるものと考えられる。
- 4) 同一の気泡間隔係数であっても、気泡径の分布が大きく異なることがある。これは、気泡間隔係数が空気量と気泡比表面積のいずれの影響も受けるためであり、本研究の範囲では、径 0.10mm 前後の気泡と径 1.0mm 以上の気泡が、いずれも多い場合と、いずれも少ない場合の気泡間隔係数が同程度となった。
- 5) 本研究のデータを基に、気泡間隔係数が 216 μ m となる気泡分布を仮定し、径 0.03mm, 0.075mm, 0.125mm, 0.375mm および 1.125mm の各径の気泡量を増減させて気泡間隔係数の変化を算出した結果、径 0.03mm, 0.075mm および 0.125mm の気泡が増加するに従って気泡間隔係数が小さくなり、径 0.375mm の気泡の増減は気泡間隔係数に変化を与えず、径 1.125mm の気泡が増加するに従って気泡間隔係数が大きくなった。
- 6) 径 0.15mm 未満の気泡が多いコンクリートは、耐久性指数が大きくなる。本研究の範囲において、耐凍害性を確保しようとする場合、OPC については径 0.15mm 未満の気泡を 0.45%以上連行することが必要である。また、MFC については、径 0.15mm 未満の気泡を 1.36%以上連行することが必要である。
- 7) 本研究の範囲において MFC のコンクリートに径 0.15mm 未満の気泡を 1.36%以上連行するためには、フレッシュコンクリートの空気量を 6.6%以上とすることが必要であるという結果が得られた。

第3章の参考文献

- [1] 坂田昇, 菅俣匠, 林大介, 橋本学: 中庸熱フライアッシュセメントを用いたコンクリートの耐凍害性に及ぼす凝結過程の空気量の変化および耐凍害性への影響, コンクリート工学論文集, vol.22, No.3, pp.47-57, 2011.9
- [2] Backstrom, J. E., Burrows, R.W., Mielenz, R.C., and Wolkodoff, V. E. Origin : Evolution and effects of the air void system in concrete. Part 2-Influence of type and amount of

- air-entraining agent, *Journal of the American Concrete Institute*, 55, pp.261-272, 1958.
- [3] Powers, T.C. : The air requirement frost-resistant concrete., *Proceedings of the Highway Research Board*, 29, pp.184-211, 1949.
- [4] U. S. Bureau of Reclamation : The air-void systems of Highway Research Board co-operative concretes, *Concrete Laboratory Report*, No.C-824, 1956.
- [5] 小林正九 : 各種 AE 剤ならびに減水剤がコンクリートの諸性質に及ぼす影響について, *セメント・コンクリート*, No.249, 1967.
- [6] 山下英俊, 堺孝司, 佐伯昇 : コンクリート構造物の凍害発生要因に関する研究, *土木学会論文集*, No.602/V-40, pp.93-105, 1998.
- [7] 阿波稔, 庄谷征美, 月永洋一 : 細孔構造特性に着目した粗骨材の品質とコンクリートの凍結融解抵抗性, *コンクリートの耐久性データベースフォーマットに関するシンポジウム論文集*, *コンクリート技術シリーズ* 46, pp.41-46, 2002.12.
- [8] J. Stark, B. Wicht, (訳)太田利隆・佐伯昇 : *コンクリートの耐久性*, [第2版], (社)セメント協会, pp.192, 2003.

第 4 章

コンクリートの耐凍害性に及ぼす
ブリーディングの影響

第4章 コンクリートの耐凍害性に及ぼすブリーディングの影響

4.1 概要

コンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼすブリーディングの影響について検討を行った。石灰石微粉末の細骨材置換および異種細骨材の混合によってブリーディング量を変化させた場合、ブリーディング量が多いほど凍結融解抵抗性は低下した。水銀圧入法による細孔径分布やピッカース硬さによる粗骨材まわりの脆弱層は、 $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ の供試体ではブリーディング量によって変化しにくい一方で、気泡間隔係数はブリーディング量の増加に伴い大きくなる傾向にあった。この要因として、ブリーディングの流れが AE 剤によって連行された空気の破泡および合一を促すためと推測し、浮力法によるフレッシュコンクリートの気泡間隔係数の経時変化から、ブリーディング量が多いほど経時 1～3 時間で気泡間隔係数が大きくなる傾向にあることを明らかにした。

4.2 AE 剤による気泡の安定性

液中に発生した液体薄膜で構成される気泡は、浮上するとともに気-液界面で個々が集まって泡沫と呼ばれる気泡の集合体を形成する(図-4.1(a)参照)。気泡の接している点 P はプラトーボーダーと呼ばれ(図-4.1(b)参照)、曲率の大きな領域を形成し、曲面部分には負の毛管圧力が働く。このとき、泡膜両平面が平行になっている AB および A'B' から泡膜中の液体が曲面部分に流れ出し、この作用によって泡膜は自然に薄くなるうとすることから、気泡の膜を維持する力が減少して、やがて細かいものが合わさる「合一」あるいは消滅する「破泡」に至る [1]。AE 剤溶液においても同様に、泡膜の両表面に配列した AE 剤層によって形成した電気二重層による静電反発力で AE 剤無使用の場合と比べて安定した気泡を形成するが、AE 剤は水に溶けやすい性質であるため、気泡が水に触れると AE 剤の分子が水に容易に溶けて拡散する。AE 剤の分子が拡散すれば泡膜を維持する分子が減少して合一あるいは破泡に至り気泡は消えることになる。これをコンクリート中の挙動に置き換えると、コンクリート中の自由水が AE 剤による気泡の表面を移動すれば、AE 剤の分子が溶け出して静電反発力が小さくなる(泡膜を維持する分子が減少する)ために、合一や破泡が生じることになると考えることができる。経時的な破泡はフレッシュ時から硬化にかけてのコンクリート中の空気量の減少および気泡間隔係数の粗大化を生じさせる。一方、経時的な合一は仮に空気量の変化が生じなくても気泡径分布は粗大な側に移行するため、結果的に気泡間隔係数は大きくなる。したがって、AE 剤による気泡の破泡および合一のいずれも、凍結融解抵抗性に大きな影響を及ぼす現象であると考えられる。そこで、フレッシュ時から硬化にかけての空気量並びに気泡組織の変化がどれだけ安定的であるか

を気泡の安定性と定義し、ブリーディングの多少による凍結融解抵抗性への影響について、コンクリートの密実性と気泡組織の違いがそれぞれどの程度作用しているか、種々の条件を設けて検討を行った。

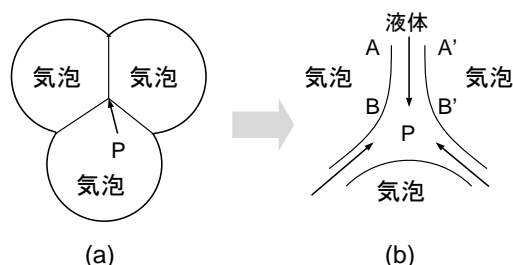


図-4.1 (a) 三つの気泡の接触 (b) 前図(a)に示した点 P [1]

4.3 石灰石微粉末で細骨材置換した場合のブリーディングと凍結融解抵抗性の関係

4.3.1 使用材料および配合

使用材料を表-4.1に示す。セメントはフライアッシュセメント B 種，細・粗骨材は石灰砕砂および石灰砕石，混和剤はリグニンスルホン酸化合物を主成分とする AE 減水剤および変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤を主成分とする AE 剤を使用した。なお、

表-4.1 使用材料

材料	記号	種類および物性値
セメント	FB	フライアッシュセメント B 種 (密度:2.95g/cm ³ , 比表面積:3420 g/cm ³)
	OPC	普通ポルトランドセメント (密度:3.16g/cm ³ , 比表面積:3300 g/cm ³)
石灰石微粉末	LP	石灰石微粉末 (密度:2.70 g/cm ³ , 比表面積:5390 g/cm ³)
細骨材 1	S1	石灰砕砂 (表乾密度:2.68g/cm ³ , 吸水率:1.06%, 損失質量分率:0.8%, 粗粒率:2.87)
粗骨材 1	G1	石灰砕石 (表乾密度:2.70g/cm ³ , 損失質量分率:0.3%, 最大寸法:20mm)
AE 減水剤	Ad1	AE 減水剤 (リグニンスルホン酸化合物とポリオールの複合体)
AE 助剤	Ad2	AE 剤 (変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤)
練混ぜ水	W	水道水

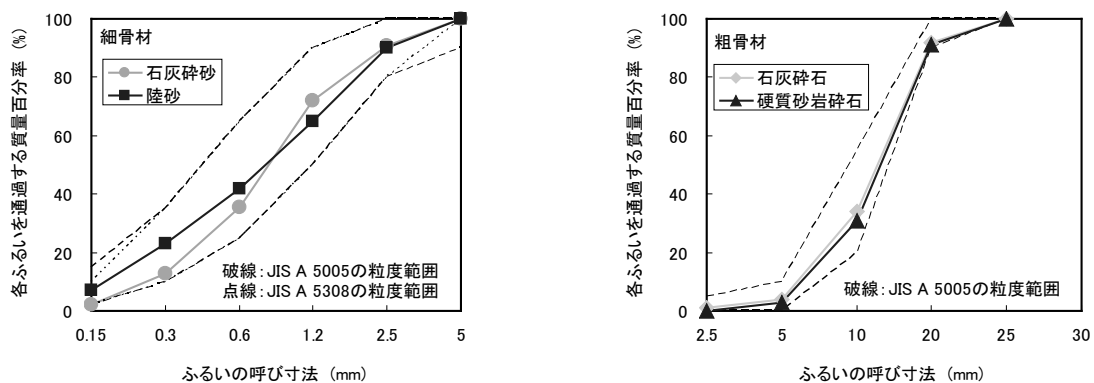


図-4.2 骨材の粒度分布

本試験で使用した骨材は、図-4.2に示すとおり JIS A 5005「コンクリート用砕石及び砕砂」の粒の大きさによる区分である砕石 2005 および砕砂、JIS A 5308「付属書 1(規定)レディミクストコンクリート用骨材」の砂の標準粒度をそれぞれ満足するものである。

試験に供したコンクリートの配合を表-4.2に示す。比較的ブリーディングの生じ易い配合条件として、水セメント比 55%，単位水量 175kg/m³，目標スランプ 21.0±1.5cm，目標空気量 4.5±1.0%を基本配合とし，ブリーディング量を減じるべく石灰石微粉末を細骨材に対して容積で 3，6 および 9%置換した。

表-4.2 コンクリートの配合

セメント種類	環境温度	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	水 W	セメント C	単位数 (kg/m ³)			Ad1 (C×%)	Ad2 (C×%)
						混和材 LP	細骨材 1 S1	粗骨材 1 G1		
FB	20℃	55.0	51.0	175	318	-	919	888	1.30	0.0070
						30	889	888	1.30	0.0080
						55	864	888	1.25	0.0085
						85	834	888	1.25	0.0090

4.3.2 試験方法

試験項目は表-4.3 に示すとおり、フレッシュコンクリートについてはスランプ、空気量およびブリーディングとし、硬化コンクリートについては凍結融解 300 サイクルまでの相対動弾性係数およびリニアトラバース法による硬化コンクリートの空気量と気泡間隔係数について試験を行った。

表-4.3 試験項目と方法

試験項目	試験方法
スランプ	JIS A 1101:2005 「コンクリートのスランプ 試験方法」
空気量	JIS A 1128:2005 「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法 -空気室圧力方法-」
ブリーディング	JIS A 1123:2003 「コンクリートのブリーディング 試験方法」
凍結融解	JIS A 1148:2001 「コンクリートの凍結融解試験方法」(水中凍結融解試験方法) 試験開始材齢 28 日 (標準養生)
気泡間隔係数	ASTM C 457-71 「顕微鏡による硬化コンクリートの気泡システムのパラメータと空気量の測定方法」(リニアトラバース法) $\phi 150 \times 300\text{mm}$, 試験開始材齢 28 日 (標準養生), 高さ 150mm で測定

4.3.3 試験結果および考察

試験結果の一覧を表-4.4 に示す。石灰石微粉末の置換率とブリーディング量の関係を図-4.4 に示す。基本配合である石灰砕砂単独のブリーディング量 $0.68\text{cm}^3/\text{cm}^2$ に対して石灰石微粉末の置換率の増加に伴いブリーディング量は低減され、置換率 9% では $0.36\text{cm}^3/\text{cm}^2$ であった。

表-4.4 コンクリートの試験結果

LP 置換率 (%)	スランプ (cm)	フレッシュ時の空気量 (%)	ブリーディング量 (cm^3/cm^2)	ブリーディング率 (%)	耐久性指数 (%)	硬化後の空気量 (%)	気泡間隔係数 (μm)
0	19.0	4.3	0.68	15.4	5	3.8	601
3	20.0	4.3	0.60	13.4	15	3.7	509
6	19.5	4.4	0.48	10.6	40	2.9	489
9	20.0	4.9	0.36	8.1	90	4.4	410

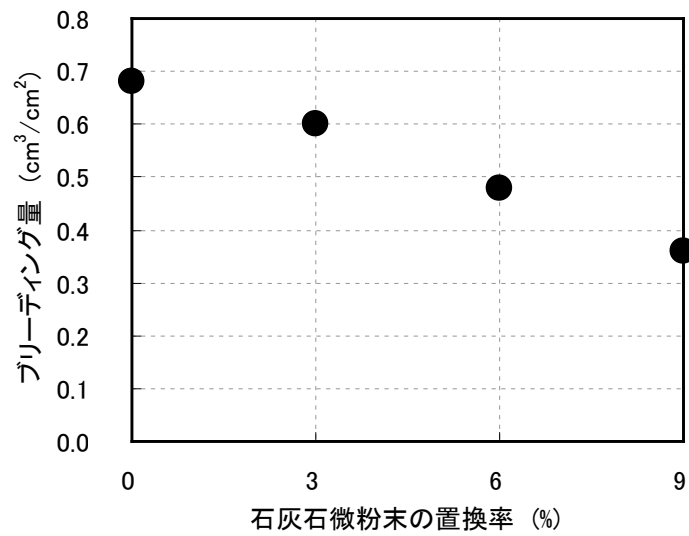


図-4.4 石灰石微粉末の置換率とブリーディング量の関係

石灰石微粉末の置換率を変化させた場合の相対動弾性係数を図-4.5に示す。石灰砕砂単独では30サイクル時点で相対動弾性係数が60%を下回ったのに対して、置換率の増加に伴い凍結融解抵抗性は向上する傾向にあり、置換率9%では300サイクルまでの相対動弾性係数が90%以上の高い凍結融解抵抗性が得られた。

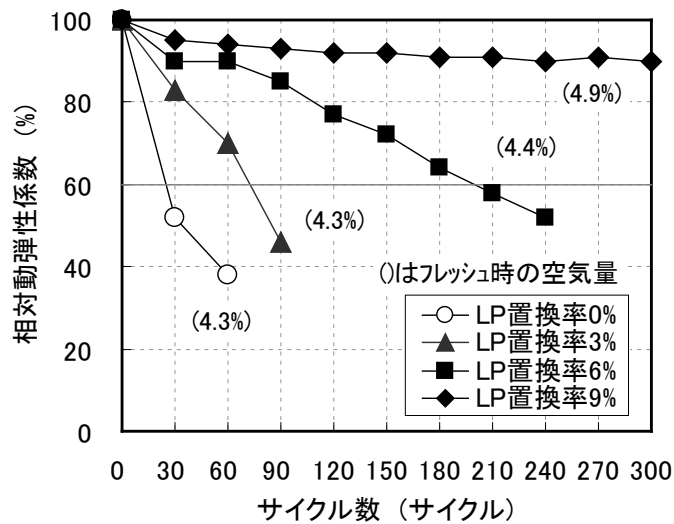


図-4.5 石灰石微粉末の置換率と相対動弾性係数の関係

ブリーディング量と耐久性指数の関係を図-4.6 に示す。これより、石灰石微粉末の置換率を増やすことによるブリーディング量の低減は、凍結融解抵抗性の向上に対応することが認められ、ブリーディング量が約 $0.40\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下では耐久性指数 60 以上の十分な凍結融解抵抗性が得られる傾向にあった。また、この要因としてブリーディング量と気泡間隔係数との関係で整理すると、図-4.7 に示すように、ブリーディング量が多いほど気泡間隔係数は大きくなる傾向を示し、ブリーディングの増加によって気泡の安定性が低下し、結果的に図-4.8 に示すように凍結融解抵抗性を低下させている可能性が考えられた。

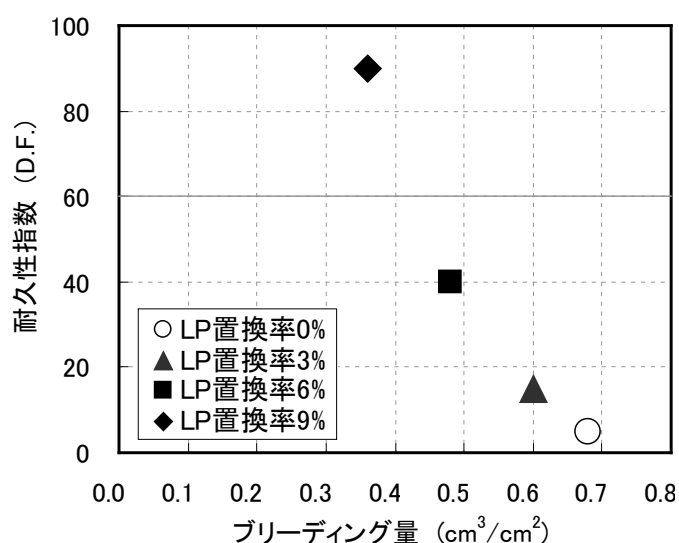


図-4.6 ブリーディング量と耐久性指数の関係

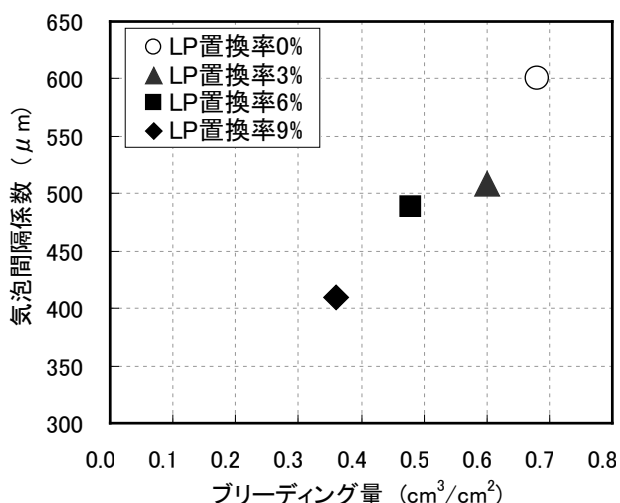


図-4.7 ブリーディング量と気泡間隔係数の関係

ブリーディング量と凝結過程の空気減少量の関係を図-4.9に示す。図のy軸は、フレッシュコンクリートと硬化コンクリートにおける空気量の差を示しており、いずれの置換率においてもフレッシュコンクリートに比べて空気量が減少する傾向にあったが、置換率6%における空気減少量が最も大きく、ブリーディング量との対応は認められなかった。各置換率の気泡径の分布は図-4.10に示すように、ブリーディング量が $0.60\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以上である石灰砕砂単独および石灰石微粉末の置換率3%では、気泡径1mm以上の粗大な空気量が多い傾向にあった。

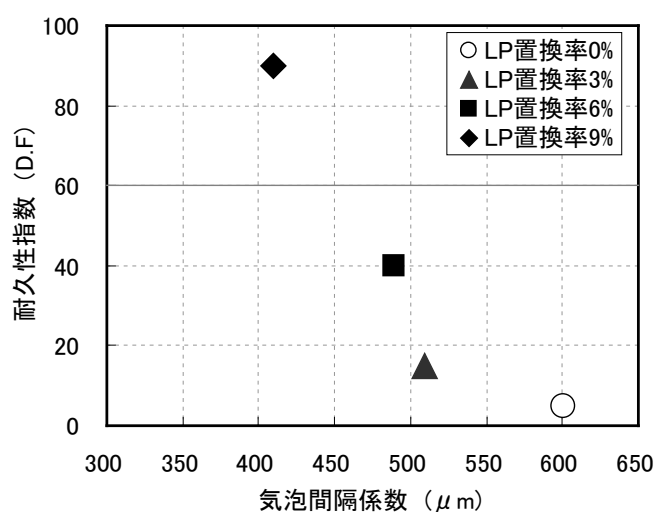


図-4.8 気泡間隔係数と耐久性指数の関係

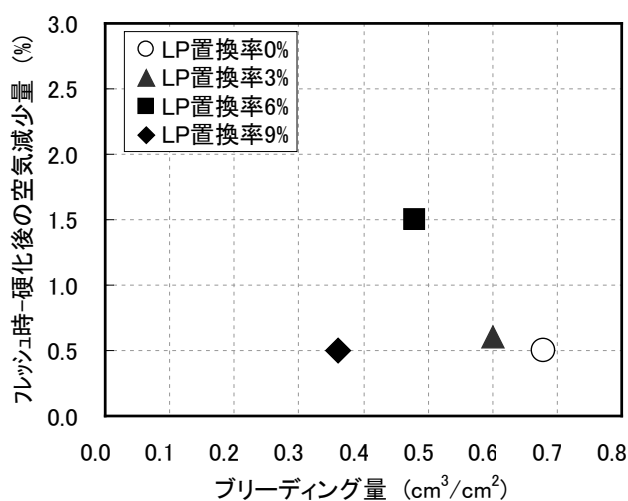


図-4.9 ブリーディング量と凝結過程の空気減少量の関係

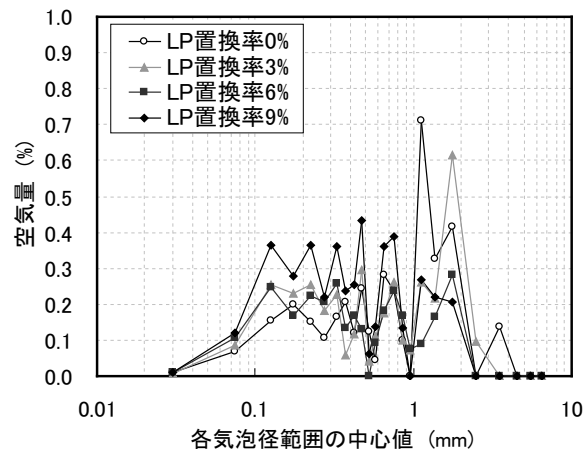


図-4.10 各配合の気泡径の分布

第3章において、既にコンクリートの気泡組織と凍結融解抵抗性の関係について約200データを基にして分析した結果、硬化コンクリートで気泡径0.15mm未満の空気量が普通ポルトランドセメントでは0.45%以上、中庸熟フライアッシュセメントでは1.36%以上確保できれば、十分な凍結融解抵抗性を有することを明らかにしている[2]。フライアッシュセメントB種を使用した本結果を気泡径0.15mm未満の空気量と耐久性指数の関係で表すと、図-4.11に示すように、気泡径0.15mm未満の空気量と耐久性指数は対応することが認められた。さらに、置換率6%以下と9%における凍結融解抵抗性の差は、気泡径0.15mm未満の空気量が0.45%以上を確保しているか否かで識別され、硬化後の空気減少量よりも硬化後の気泡径0.15mm未満の空気量が凍結融解抵抗性に重要であることが示された。なお、良好な凍結融解抵抗性を得るには気泡間隔係数が小さいことが望ましく、一般に250 μ m以下とすることが知られているが[3]、本実験では結果的に400~450 μ mが耐久性指数60以上を得る閾値となった。本実験結果でこのような大きな気泡間隔係数を示した要因は、第3章で明らかとした気泡分布と気泡間隔係数の関係のケーススタディーの結果[2]より、図-4.10に示した気泡分布中の気泡径1~2mmの空気量が多かったことに起因する。通常、このような比較的大きな気泡は、微細な気泡の経時的な合一により発生したと考えれば、微細な気泡径の空気量は少なく、凍結融解抵抗性の低下に繋がるが、本実験では大きな径の気泡は存在しつつも、第3章で明らかにした良好な凍結融解抵抗性が得られる気泡径0.15mm未満の所要空気量(0.45%)以上が確保されたため、400 μ mの比較的大きな気泡間隔係数でも凍結融解抵抗性が得られたと考えられた。

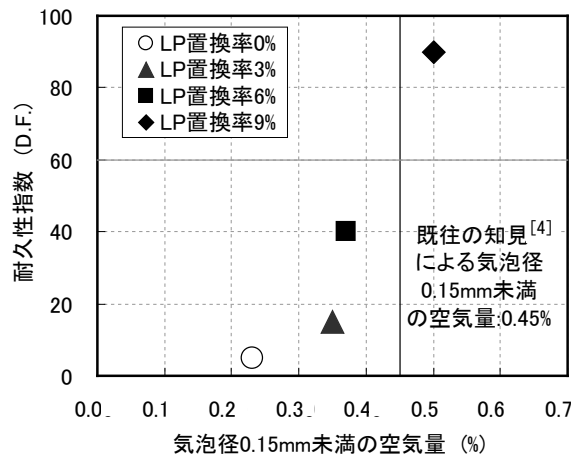


図-4.11 気泡径 0.15mm 未満の空気量と耐久性指数の関係

4.4 細骨材の種類と混合比率の違いによるブリーディングと凍結融解抵抗性の関係

4.4.1 使用材料および配合

4.3 節で使用した石灰砕砂に対して、ブリーディング量を減らすために陸砂を混合した場合のブリーディングと凍結融解抵抗性の関係について、細孔構造や粗骨材界面の脆弱層といったコンクリート内部の欠陥を含めて試験を行った。

使用材料を表-4.5 に示す。セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は石灰砕砂および陸砂、粗骨材は硬質砂岩砕石、混和剤は 4.3 節と同じ AE 減水剤および AE 剤を使用した。

試験に供したコンクリートの配合を表-4.6 に示す。水セメント比を 55% に固定してブリーディングの量を単位水量 165kg/m³ (目標スランプ 10.0±2.5cm) と単位水量 180kg/m³ (目標スランプ 18.0±2.5cm) の 2 水準設けて確認した。目標空気量はいずれも 4.5±1.0% とし、細骨材の混合比率は、それぞれ容積で石灰砕砂:50, 75, 100% および陸砂:100% とした。

表-4.5 使用材料

材料	記号	種類および物性値
セメント	OPC	普通ポルトランドセメント (密度:3.16g/cm ³ , 比表面積:3300 g/cm ³)
細骨材 1	S1	石灰砕砂 (表乾密度:2.68g/cm ³ , 吸水率:1.06%, 損失質量分率:0.8%, 粗粒率:2.87)
細骨材 2	S2	陸砂 (表乾密度:2.59g/cm ³ , 吸水率:2.06%, 損失質量分率:1.0%, 粗粒率:2.73)
粗骨材 2	G2	硬質砂岩砕石 (表乾密度:2.66g/cm ³ , 損失質量分率:1.3%, 最大寸法:20mm)
AE 減水剤	Ad1	AE 減水剤 (リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体)
AE 助剤	Ad2	AE 剤 (変性リン酸化合物系陰イオン界面活性剤)
練混ぜ水	W	水道水

表-4.6 コンクリートの配合

セメント種類	環境温度	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					Ad1 (C×%)	Ad2 (C×%)
				水 W	セメント C	細骨材 1 S1	細骨材 2 S2	粗骨材 2 G2		
OPC	20℃	55.0	44.0	165	300	820	-	1035	0.60	0.0020
			44.5	165	300	621	200	1027	0.70	0.0020
			45.0	165	300	419	405	1016	0.80	0.0025
			46.0	165	300	-	829	998	1.00	0.0030
			45.0	180	327	809	-	984	0.60	0.0020
			45.5	180	327	615	198	974	0.70	0.0020
			46.0	180	327	414	400	966	0.80	0.0025
			47.0	180	327	-	818	947	1.00	0.0030

4.4.2 試験方法

試験は、表-4.7 に示すように、4.3 節で行った 5 項目の試験に加えてフレッシュコンクリートの気泡間隔係数の測定が可能である浮力法 [4] による測定、ブリーディングによる内部欠陥の影響を確認する目的で水銀圧入式ポロシメータによる細孔径分布およびビッカース硬さによる粗骨材界面の脆弱性について試験を行った。

表-4.7 試験項目と方法

試験項目	試験方法
スランプ	JIS A 1101:2005 「コンクリートのスランプ 試験方法」
空気量	JIS A 1128:2005 「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法 - 空気室圧力方法 -」
ブリーディング	JIS A 1123:2003 「コンクリートのブリーディング 試験方法」
凍結融解	JIS A 1148:2001 「コンクリートの凍結融解試験方法」(水中凍結融解試験方法) 試験開始材齢 28 日 (標準養生)
気泡間隔係数	ASTM C 457-71 「顕微鏡による硬化コンクリートの気泡システムのパラメータと空気量の測定方法」(リアトラハース法) φ 150×300mm, 試験開始材齢 28 日 (標準養生), 高さ 150mm で測定
	フレッシュコンクリートの気泡間隔係数の測定 (AVA 法による)
細孔径分布	水銀圧入ポロシメータによる φ 100×200mm より 20mm を切り出し試料を採取, 試験開始材齢 14 日
ビッカース硬さ	JIS B 7753 「ビッカース硬さ試験」

(1) フレッシュコンクリートの気泡間隔係数

フレッシュコンクリートの気泡間隔係数の測定は、GERMANN INSTRUMENTS A/S 社製の AirVoid Analyzer(以下、AVA と称す)を用いて測定を行った。AVA は、ウェットスクリーニングしたモルタルの気泡の浮力について、経時変化を測定することにより、ストークスの法則を適用してフレッシュコンクリートの気泡間隔係数が解析されるものである [4] (写真-4.1)。

①測定装置

約 2000ml の水で満たされた円柱容器の底面を 200ml のグリセリン水溶液で満たし、そこへウェットスクリーニングしたモルタルを 20ml 注入し、マグネットスターラーで 30 秒間の攪拌を行うことで水が懸濁することなくモルタル中の気泡のみが水中に放出される。浮上した気泡をペトリ皿で捕捉して浮力の経時変化を測定することで、上述したとおりフレッシュコンクリートの気泡間隔係数が解析される。

気泡間隔係数の測定は、練上がり直後に寸法が $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の軽量型枠にコンクリートを打ち込み、練上がり直後から 1 時間ごとに供試体 1 本の打込み面から約 20mm 分のコンクリートを網の目 5mm のふるいでウェットスクリーニングを行い、モルタルを 20ml 採取して測定を行った。なお、測定はウェットスクリーニングが可能な練上がりから 3 時間後まで行った。

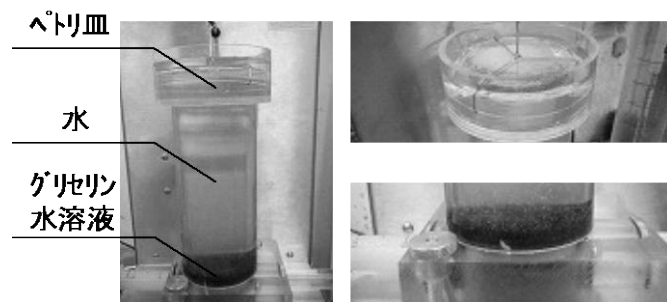


写真-4.1 AVA による気泡間隔係数の測定

②気泡パラメータの算出

浮力法によって測定された浮力の経時変化の一例を図-4.12 に示す。水中を上昇する気泡は径の大きなものほどその上昇速度は早く、気泡径と上昇速度はストークスの法則により式-4.1 で関連付けられる [5]。

$$v = \frac{g(\rho_a - \rho)}{18\mu} \cdot D_a^2 \quad \text{式-4.1}$$

ここに、 v ：気泡の上昇速度 (m/sec)

g ：重力加速度 (m/sec²)

ρ_a ：気泡の密度 (kg/m³)

ρ ：媒質の密度 (kg/m³)

μ ：媒質の粘性係数 (Pa・sec)

D_a ：気泡径 (m)

したがって、ある気泡径 D_i に対応する気泡量 Va_i は図-4.12 の結果から浮力の経時変化として式-4.2 で求めることができる。

$$Va_i = \sum_{t=t_{i-1}}^{t_i} t \Delta \left(\frac{dB}{dt} \right) \quad \text{式-4.2}$$

ここに、 Va_i ：直径 D_i の気泡の容積 (cc)

t ：時間 (min)

B ：浮力 (g)

Σ さらに、試料中の全気泡量 Va はそれぞれの径の気泡量の合計で式-4.3 となり、気泡組織の比表面積は式-4.4 で、コンクリート全体の空気量 A は式-4.5 で算出され、これらの結果から ASTM C457 で定義される気泡間隔係数を算出することができる。

$$Va = \sum Va_i \quad \text{式-4.3}$$

$$\alpha = \frac{\sum \alpha_i Va_i}{Va} \quad \text{式-4.4}$$

ここに、 Va ：全気泡の容積 (cc)

Va_i ：直径 D_i の気泡の容積 (cc)

α ：比表面積 (mm⁻¹)

α_i ：直径 D_i の気泡の比表面積 (mm⁻¹)

$$A = \frac{Mo \frac{Va}{Vo}}{Mo \frac{Va}{Vo} + 100} \quad \text{式-4.5}$$

ただし、 $Mo = M / (100 - Ae) \times 100$ (%)

$Vo = Vs - Va$

ここに、 A ：空気量 (%)

M ：コンクリート中のモルタルの容積率 (%)

Ae ：目標空気量 (%)

Vs ：試料の容積 (cc)

図-4.13 に浮力法による気泡径分布の測定結果の一例を示す。リニアトラバース法で得られる結果は測線を横断した気泡の弦長の分布であるのに対して、浮力法では気泡径自体の分布が得られることに特徴がある。

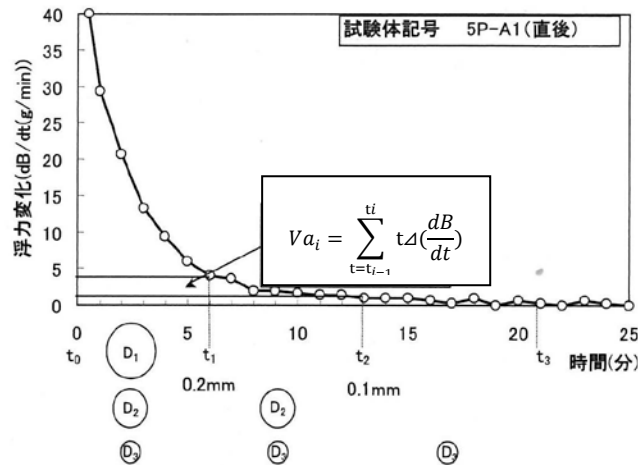


図-4.12 浮力法による浮力の継時変化

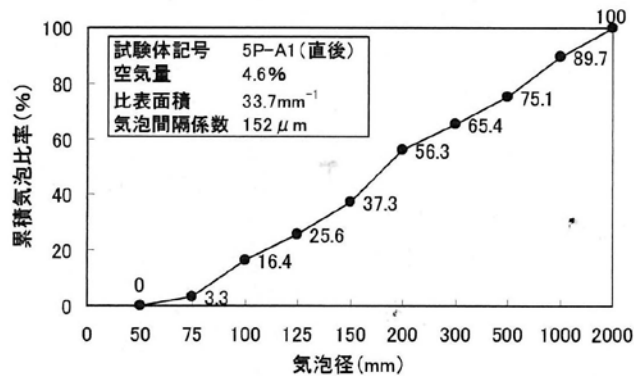


図-4.13 浮力法による測定結果の一例

(2) 細孔径分布

材齢 14 日まで標準養生した φ100×200mm の供試体を高さ方向 100mm の位置で厚さ 20mm 切り出して鉄乳鉢で粗粉碎し、粗骨材を取り除いたモルタル部分を網ふるいで 5～2.5mm に粒度調整した。その後アセトンに浸して水和を停止させて真空乾燥を行い、QUANTACHROME 社製水銀圧入式ポロシメータ PoreMaster60 を用いて 3nm~100μm の範囲で測定を行った。

4.4.3 試験結果および考察

試験結果の一覧を表-4.8に示す。細骨材中の陸砂の混合比率とブリーディング量の関係を図-4.14に示す。単位水量 165kg/m^3 において細骨材に石灰砕砂を単独で使用した場合のブリーディング量は $0.28\text{cm}^3/\text{cm}^2$ であったのに対して、陸砂単独では $0.13\text{cm}^3/\text{cm}^2$ であった。また、単位水量 180kg/m^3 において、石灰砕砂単独のブリーディング量は $0.56\text{cm}^3/\text{cm}^2$ であったのに対して、陸砂単独では $0.23\text{cm}^3/\text{cm}^2$ であり、いずれの配合においても陸砂の混合比率が増加するにつれてブリーディング量は低減する傾向にあった。

細骨材の混合比率を変化させた場合の相対動弾性係数を図-4.15に示す。単位水量 165kg/m^3 においては、いずれも耐久性指数（300サイクル時点の相対動弾性係数）は60%以上を満足しているが、ブリーディング量が最も多い石灰砕砂を単独で使用した場合には、耐久性指数（300サイクル時点の相対動弾性係数）は約75%と低くなる傾向にあった。また単位水量 180kg/m^3 においてもブリーディング量が多いほど相対動弾性係数は小さくなる傾向にあり、ブリーディング量が最も多い石灰砕砂を単独で使用した場合には210サイクルにおいて相対動弾性係数が60%を下回った。

表-4.8 コンクリートの試験結果

単位水量 (kg/m^3)	陸砂の 混合比率 (%)	スランプ (cm)	フレッシュ時 の空気量 (%)	ブリーデ ィング量 (cm^3/cm^2)	ブリーデ ィング率 (%)	耐久性 指数 (%)	硬化後の 空気量 (%)	気泡間隔 係数 (μm)
165	0	9.5	4.9	0.28	6.9	74	4.2	463
	25	10.5	5.1	0.25	6.1	89	4.8	419
	50	11.0	5.2	0.21	5.0	94	4.8	361
	100	10.5	4.6	0.13	3.3	95	3.9	351
180	0	20.0	5.1	0.56	12.6	—	4.2	504
	25	20.0	4.7	0.40	9.0	83	3.5	463
	50	19.5	4.7	0.32	7.2	62	3.6	483
	100	20.0	4.8	0.23	5.0	92	3.5	364

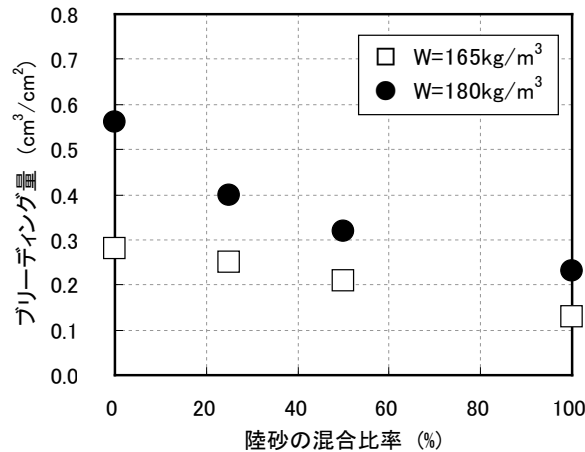


図-4.14 陸砂の混合比率とブリーディング量の関係

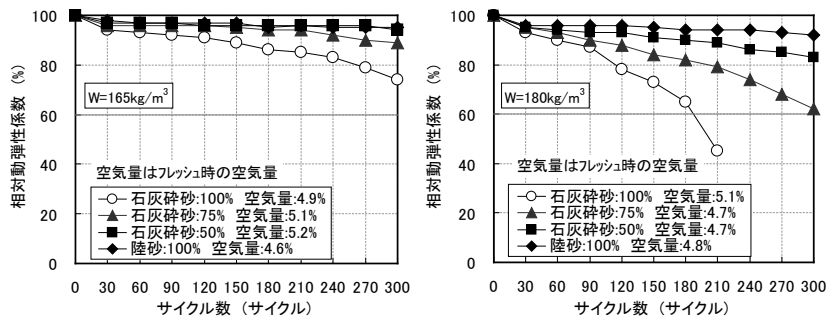


図-4.15 細骨材の混合比率と相対動弾性係数の関係

ブリーディング量と耐久性指数の関係を図-4.16に示す。4.3節と同様に、ブリーディング量を低減させることで凍結融解抵抗性が向上する傾向にあり、ブリーディング量が約 $0.40\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下では耐久性指数が 60 以上となる傾向にあった。また、図-4.17に示すように気泡間隔係数はブリーディング量が多いほど大きくなる傾向にあり、ブリーディング量が多くなることで気泡の安定性が低下し、図-4.18に示すように凍結融解抵抗性が低下するものと推察された。ブリーディング量と硬化後の空気減少量の関係を図-4.19に示す。単位水量 $165\text{kg}/\text{m}^3$ では約 0.5%、単位水量 $180\text{kg}/\text{m}^3$ では約 1.0%それぞれ空気量が減少したが、いずれの配合においても、ブリーディングの過多によって空気減少量が多くなる傾向は4.3節と同様に認められなかった。第2章では、同一配合で環境温度を変えた場合、低温環境ほどブリーディング量が多くなり、その量に応じて硬化後の空気減少量も多いことを示した [6]。同一配合で環境温度を変えることによるブリーディング量の違いと、細骨材の混合比率および石灰石微粉末の置換率を変えた場合では、ブリーディングの発生が空気の減少量に及ぼす影響が異なることが認められた。

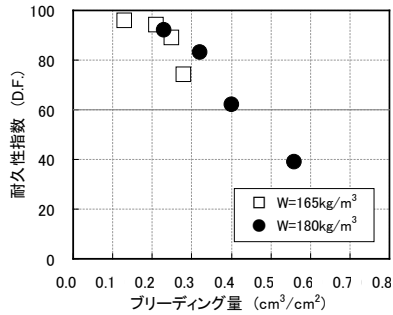


図-4.16 ブリーディング量と
耐久性指数の関係

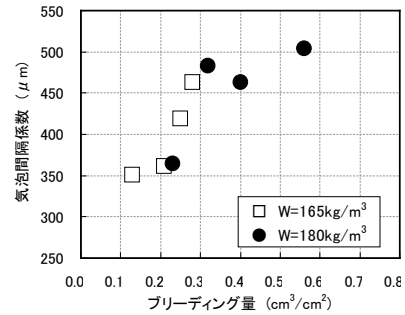


図-4.17 ブリーディング量と
気泡間隔係数の関係

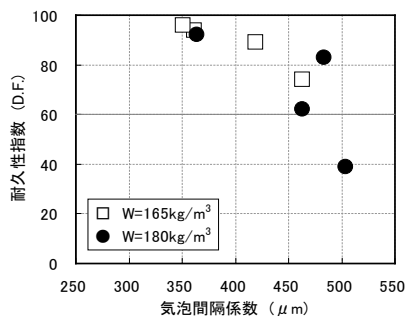


図-4.18 気泡間隔係数と
耐久性指数の関係

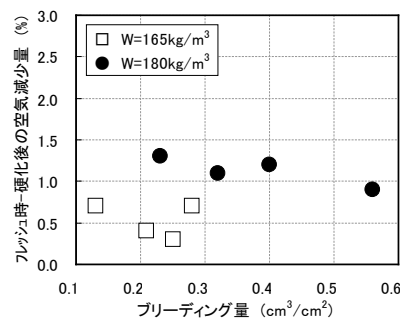


図-4.19 ブリーディング量と硬化
空気減少量の関係

一方、各配合の気泡径の分布は、図-4.20 に示すように、ブリーディング量が多いほど気泡径 1mm 以上の粗大な空気量が多く、逆に陸砂の混合比率を増やしてブリーディング量を低減させたコンクリートでは、気泡径 0.10~0.15mm の範囲の空気量が多くなる傾向にあった。さらに気泡径 0.15mm 未満の空気量と耐久性指数の関係は、図-4.21 に示すように、第3章で明らかとした気泡径 0.15mm 未満の空気量が概ね 0.45%以上を確保しているか否かで、凍結融解抵抗性が識別されることが 4.3 節と同様に確認された。

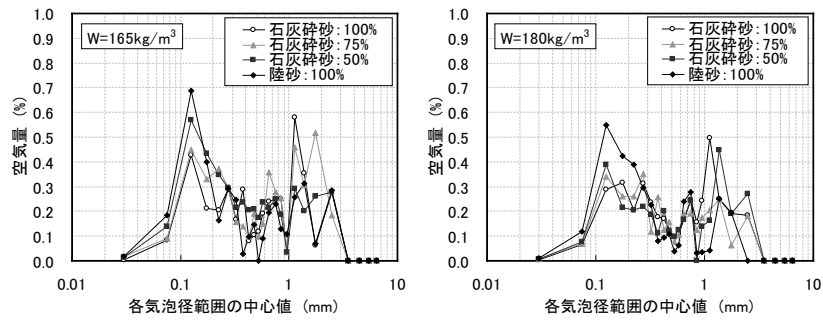


図-4.20 各配合の気泡分布

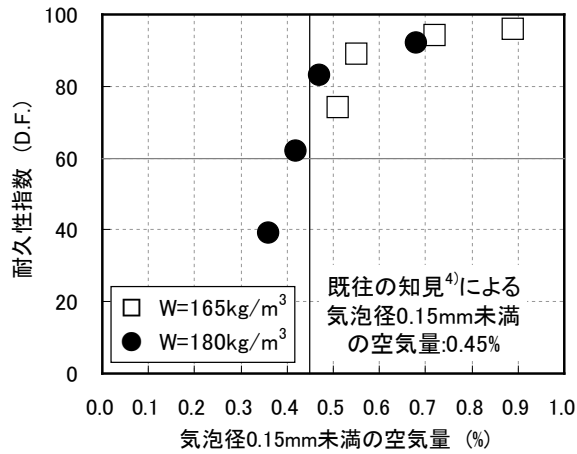


図-4.21 気泡径 0.15mm 未満の空気量と耐久性指数の関係

ブリーディング量が多いほど気泡径 0.15mm 未満の空気量が少なく、凍結融解抵抗性が低下する現象は、ブリーディングの流れによって AE 剤で連行された気泡が合一あるいは破泡し、結果的に凍結融解抵抗性を低下させていることが考えられた。そこで、浮力法によるフレッシュコンクリートの気泡間隔係数の経時変化を測定し、ブリーディングの多い方がその流れで気泡の安定性に大きな変化が生じるかを確認するため、単位水量 165kg/m^3 において試験的に検討した。浮力法による気泡間隔係数の経時変化を図-4.22 に示す。

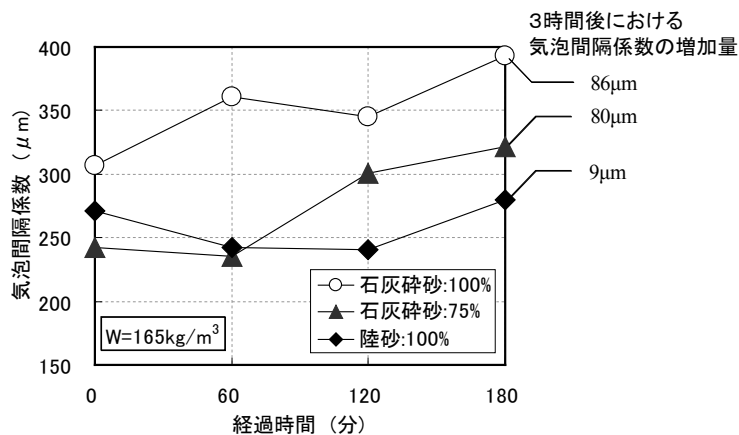


図-4.22 浮力法による気泡間隔係数の経時変化

陸砂単独では、経過3時間で気泡間隔係数が9 μm の増加であったのに対して、石灰砕砂の混合比率が75%と100%ではそれぞれ80 μm および86 μm 増加し、ブリーディング量が多いほど時間の経過に対して気泡間隔係数が大きくなる傾向にあった。すなわち、ブリーディングの流れによって、AE剤により連行された気泡の合一あるいは破泡が生じている可能性が示唆された。

一方で、ブリーディングの過多はコンクリートの内部欠陥に影響を及ぼし、特に粗骨材界面における脆弱層の生成を助長することが推察される。そこで、細孔径分布と粗骨材界面のビッカース硬さを確認した。各配合条件における細孔径分布を図-4.23に示す。ブリーディング量が多い、石灰砕砂の混合比率が多い方が0.1 μm 以下の細孔容積は小さく逆に緻密になる傾向にあり、ブリーディング量と総細孔容積の関係で表しても、図-4.24に示すように、本実験の範囲ではブリーディングの過多が硬化体組織の相違に影響を及ぼす結果は認められなかった。同様に粗骨材界面への影響度合いとして測定したビッカース硬さ試験結果においても、図-4.25に示すように、細骨材の混合比率によらず、粗骨材界面からの距離が遠くなるほどビッカース硬さはやや大きくなる傾向は変わらず、いずれの場合も20N/mm²~35N/mm²程度の範囲に分布し、ブリーディング量の違いによる傾向は認められなかった。ブリーディングの過多は、粗骨材の下側の空隙や水みち等によってコンクリートの水密性の低下をもたらすことが広く認識されている。しかし、本実験でそのような影響が確認できなかった理由としては、供試体寸法が $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ と打込み高さが低いいため、ブリーディング量の違いに対して細孔径分布や骨材下面の脆弱層への影響度合いが小さかったという点が挙げられる。

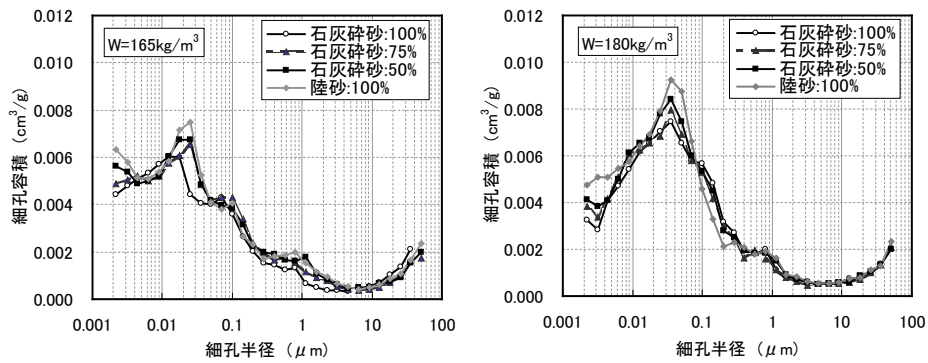


図-4.23 各配合の細孔径分布

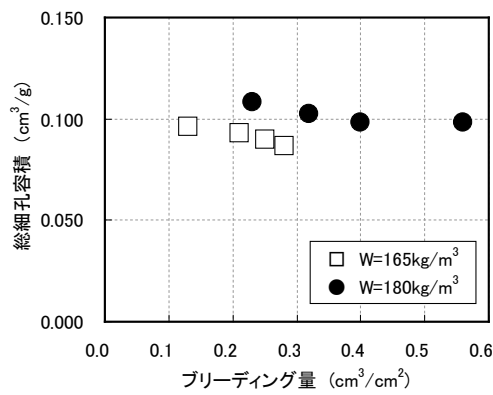


図-4.24 ブリーディング量と総細孔容積の関係

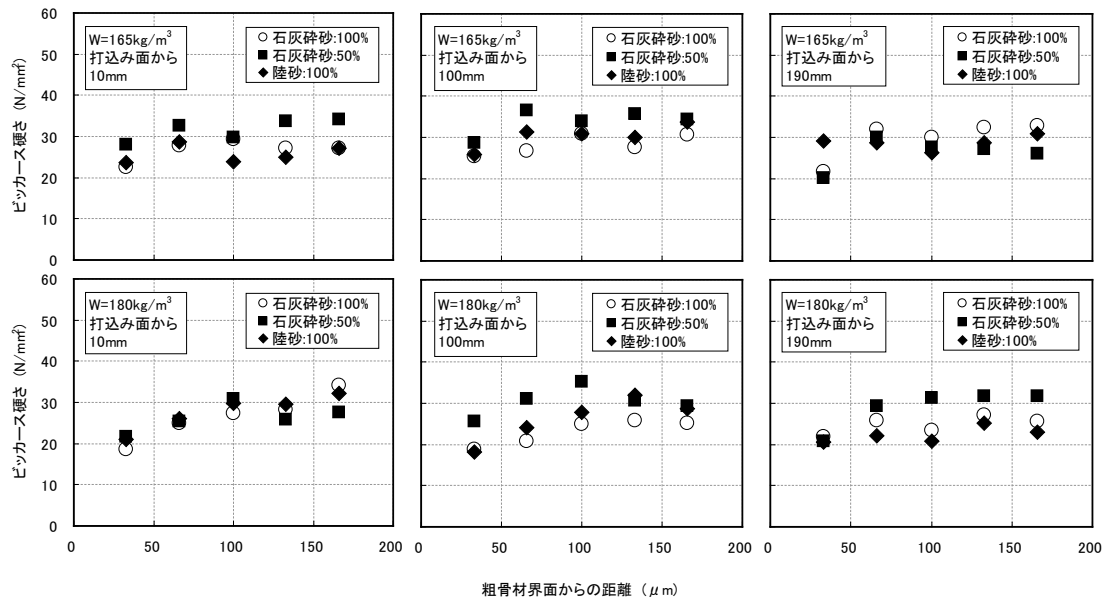


図-4.25 ビッカース硬さ試験結果

4.5 各環境温度で遅延剤を使用した場合のブリーディングと凍結融解抵抗性の関係

4.5.1 使用材料および配合

使用材料を表-4.9に示す。4.4節と同様に普通ポルトランドセメント、陸砂、硬質砂岩碎石、AE減水剤およびAE剤の他に、オキシカルボン酸化合物を主成分とする遅延剤を使用した。

表-4.9 使用材料

材料	記号	種類および物性値
セメント	OPC	普通ポルトランドセメント (密度:3.16g/cm ³ , 比表面積:3300 g/cm ²)
細骨材 2	S2	陸砂 (表乾密度:2.59g/cm ³ , 吸水率:2.06%, 損失質量分率:1.0%, 粗粒率:2.73)
粗骨材 2	G2	硬質砂岩碎石 (表乾密度:2.66g/cm ³ , 損失質量分率:1.3%, 最大寸法:20mm)
AE減水剤	Ad1	AE減水剤 (リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体)
AE助剤	Ad2	AE剤 (変性リン酸化合物系陰イオン界面活性剤)
遅延剤	Ad3	遅延剤 (変性リグニンスルホン酸化合物とオキシカルボン酸系化合物の複合体)
練混ぜ水	W	水道水

試験に供したコンクリートの配合を表-4.10に示す。配合条件は、4.4節の細骨材である陸砂を単独で使用し、単位水量 165kg/m³、目標スランプ 10.0±2.5cm、目標空気量 4.5±1.0%の遅延剤を使用しない基本配合に対して、遅延剤を C×0.45%および0.90%使用した場合の目標空気量は 4.5±1.0%であるが、スランプは遅延剤による減水効果のために目標値を定めず、結果的にスランプ 15.0cm~21.0cmとした。なお、本実験で使用した遅延剤の使用量である C×0.45%および0.90%は、コンクリート温度 20℃における W/C=55~60%で普通ポルトランドセメントを使用したスランプ 18.0cmの一般的なコンクリートの始発時間が6時間程度である場合において、それぞれ2および6時間程度遅延させるものである。したがって、後者の使用量は過大なブリーディングの発生を見込んでその使用量を比較的多くしたものである。

表-4.10 コンクリートの配合

セメント種類	環境温度	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				Ad1 (C×%)	Ad2 (C×%)	Ad3 (C×%)
				水 W	セメント C	細骨材 2 S2	粗骨材 2 G2			
OPC	10℃	55.0	46.0	165	300	829	998	0.80	0.0030	0
	20℃		46.0	165	300	829	998	1.00	0.0030	0.45
	30℃		46.0	165	300	829	998	1.20	0.0030	0.90

4.5.2 試験方法

試験は表-4.11 に示すように 4.3 節で行った 5 項目の試験に加えて、細孔径分布の測定を行った。

表-4.11 試験項目と方法

試験項目	試験方法
スランプ	JIS A 1101:2005 「コンクリートのスランプ試験方法」
空気量	JIS A 1128:2005 「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法 ー空気室圧力方法ー」
ブリーディング	JIS A 1123:2003 「コンクリートのブリーディング試験方法」
凍結融解	JIS A 1148:2001 「コンクリートの凍結融解試験方法」(水中凍結融解試験方法) 試験開始材齢 28 日 (標準養生)
気泡間隔係数	ASTM C 457-71 「顕微鏡による硬化コンクリートの気泡システムのパラメータと空気量の測定方法」(リアトラバース法) φ150×300mm, 試験開始材齢 28 日 (標準養生), 高さ 150mm で測定
細孔径分布	水銀圧入ポロシメータによる φ100×200mm より 20mm を切り出し試料を採取, 試験開始材齢 14 日

4.5.3 試験結果および考察

試験結果の一覧を表-4.12 に示す。各環境温度において遅延剤を使用した場合のブリーディング量を図-4.26 に示す。ブリーディング発生量の少ない陸砂を 100%使用したこともあり、遅延剤無使用では $0.20\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下、C×0.45%使用した場合は $0.30\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下に留まり、比較的多く使用した C×0.90%の場合のみ $0.35\sim 0.50\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 程度のブリーディングが発生した。4.3 節および 4.4 節の結果より、耐久性指数 60 以上を得るためのブリーディング量は、約 $0.40\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下(図-4.6, 4.14 参照)とする必要があると言える。

表-4.12 コンクリートの試験結果

環境温度 (°C)	遅延剤 添加量 (C×%)	スランプ (cm)	フレッシュ時 の空気量 (%)	ブリーディ ング量 (cm ³ /cm ²)	ブリーディ ング率 (%)	耐久性 指数 (%)	硬化後の 空気量 (%)	気泡間隔 係数 (μm)
10	0	11.0	4.6	0.21	5.1	96	4.1	390
	0.45	19.0	4.7	0.29	6.9	96	4.0	360
	0.90	20.5	5.2	0.51	12.3	97	5.0	330
20	0	10.5	4.7	0.14	3.3	95	3.3	378
	0.45	18.0	5.0	0.21	5.0	96	4.1	317
	0.90	19.5	5.1	0.39	9.3	97	5.1	325
30	0	11.0	4.5	0.10	2.3	94	4.0	310
	0.45	17.5	4.9	0.16	3.1	97	5.1	293
	0.90	19.0	5.0	0.37	9.0	94	4.4	330

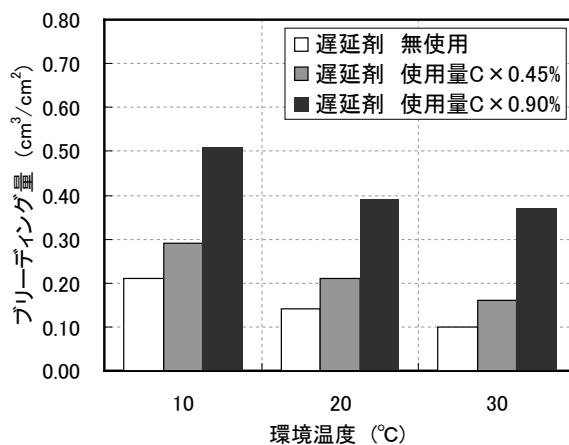


図-4.26 環境温度と遅延剤の使用によるブリーディング量の関係

ブリーディング量と耐久性指数の関係を図-4.27 に示す。ブリーディング量が $0.30\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下であった遅延剤無使用および使用量 $C \times 0.45\%$ の場合には、4.3 節および 4.4 節と同様に耐久性指数が 90 以上となった。一方、遅延剤を $C \times 0.90\%$ 使用した場合においても、 $0.50\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 程度のブリーディングが発生したにもかかわらず、同程度の良好な凍結融解抵抗性が得られた。

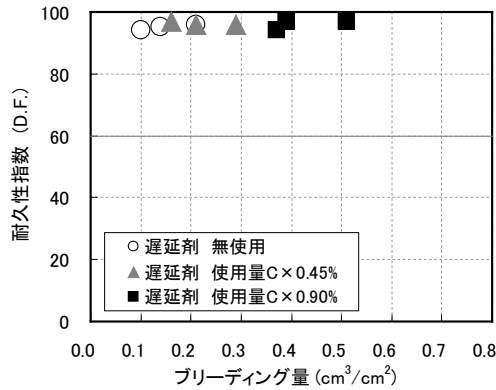


図-4.27 ブリーディング量と耐久性指数の関係

気泡径の分布および 0.15mm 未満の空気量を求めると、図-4.28 に示すように、遅延剤無使用および遅延剤使用量 $C \times 0.45\%$ では、ブリーディング量が多くなる低温環境ほど気泡径 $0.10 \sim 0.15\text{mm}$ の範囲の空気量は少なくなる傾向が認められたものの、すべての場合において凍結融解抵抗性を確保する目安となる気泡径 0.15mm 未満の空気量が 0.45% を上回っており、結果的に 4.3 節および 4.4 節の結果と同様に高い凍結融解抵抗性が得られたものと判断できる。一方、遅延剤を $C \times 0.90\%$ 使用した条件では、ブリーディング量が多くなっても気泡径 $0.10 \sim 0.15\text{mm}$ の範囲の空気量はほとんど変わらない傾向にある。ブリーディング量が $0.50\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 程度であっても、気泡径 0.15mm 未満の空気量が、第 3 章で明らかとした閾値 0.45% 以上を大きく上回ったため、良好な凍結融解抵抗性が得られたものと考えられる。

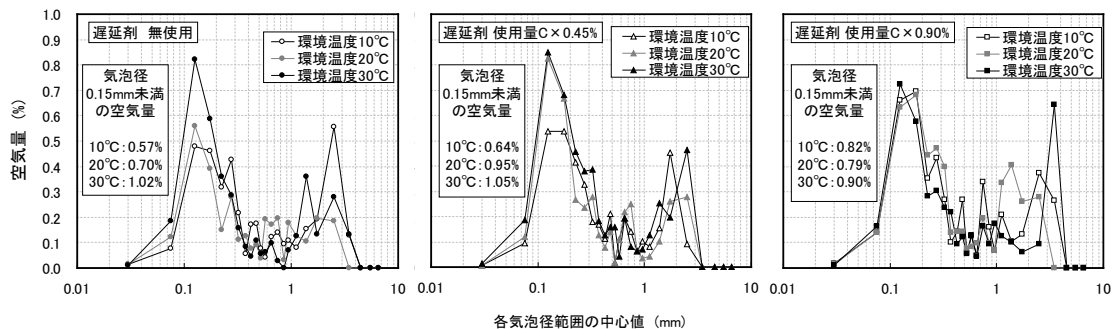


図-4.28 遅延剤の使用量と環境温度による気泡分布

ブリーディング量と気泡間隔係数の関係を図-4.29に示す。遅延剤無使用と遅延剤使用量 $C \times 0.45\%$ においては、ブリーディング量と気泡間隔係数には4.3節および4.4節と同様にブリーディング量が多いほど気泡間隔係数が大きくなる傾向が認められたが、遅延剤使用量を $C \times 0.90\%$ 使用した条件では、ブリーディング量が増加したにもかかわらず気泡間隔係数は同程度であった。

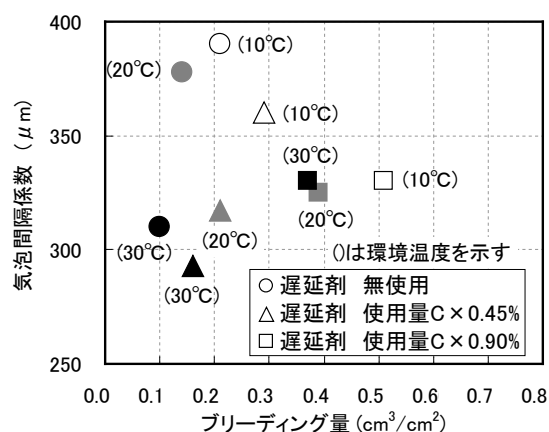


図-4.29 ブリーディング量と気泡間隔係数の関係

このように遅延剤を比較的多く添加した場合、ブリーディング量が大きくなっても、気泡の安定性は損なわれず、十分な凍結融解抵抗性を有したと考えられた。その理由としては、遅延剤特有のキレート作用がブリーディング水の流れを受けた気泡の破泡あるいは合一を抑制する等のメカニズムが考えられるが、詳細については今後さらに確認が必要である。

ブリーディング量と総細孔容積の関係を図-4.30に示す。ブリーディング量によらず概ね同等の傾向であり、4.4節と同様の結果となった。

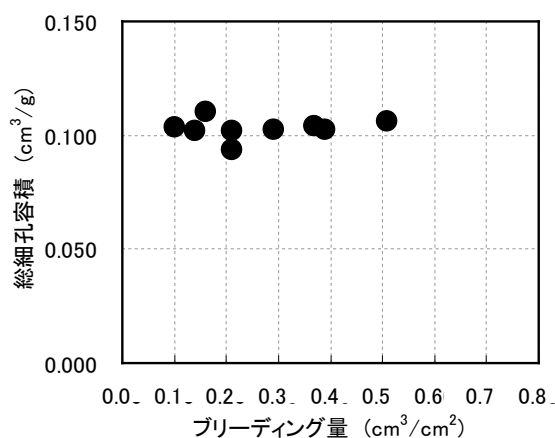


図-4.30 ブリーディング量と総細孔容積の関係

4.6 第4章の結論

コンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼすブリーディングの影響として、ブリーディングの流れが AE 剤により連行された気泡の合一あるいは破泡を促し、結果的に凍結融解抵抗性を低下させる可能性が考えられた。そこで種々の条件でブリーディングの発生量を変えて検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) ブリーディング量が多いほど気泡間隔係数が大きくなり、凍結融解抵抗性は低下する傾向にあった。本実験の範囲ではブリーディング量を約 $0.40\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下とすることで耐久性指数 60 以上を満足する結果となった。
- 2) AE 剤によって連行された気泡の安定性に及ぼすブリーディングの影響は、コンクリート内部を上昇するブリーディング水が AE 剤の気泡の表面を移動することで、AE 剤の分子が拡散し、泡膜を維持する能力が低下して結果的に気泡間隔係数を大きくすることにつながるものと推察された。
- 3) 浮力法による気泡間隔係数の測定により、経時 3 時間までの気泡間隔係数の変化は、ブリーディング量が多いほど大きく、AE 剤の気泡が合一あるいは破泡する可能性を示唆した。逆に本実験の範囲内では、ブリーディング量が細孔構造および骨材界面の脆弱層に与える影響は小さい結果であった。
- 4) ブリーディングによる凍結融解抵抗性の低下は、第 3 章で明らかにした硬化コンクリートにおける気泡径 0.15mm 未満の空気量と大きく関係しており、気泡間隔係数や硬化コンクリートの空気量よりも、硬化コンクリートにおける気泡径 0.15mm 未満の空気量の方が凍結融解抵抗性に影響することを確認した。
- 5) 遅延剤を比較的多く使用した場合は、凝結遅延によりブリーディング量は多く発生するものの、気泡間隔係数が大きくなることはなく、気泡径 0.15mm 未満の空気量も安定して存在した。そしてブリーディング量が $0.40\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以上であっても十分な凍結融解抵抗性が得られる結果となった。遅延剤の使用が気泡の安定性を増したものと考えられる。

第4章の参考文献

- [1] 石井淑夫：泡のエンジニアリング，株式会社テクノシステム，pp.39-43，2005.
- [2] 坂田昇，菅俣匠，林大介，橋本学：.コンクリートの気泡組織と耐凍害性の関係に関する考察，コンクリート工学論文集，Vol.23，No.1，pp.35-47，2012.
- [3] Powers, T.C : The air requirement frost-resistant concrete, Proceedings of the highway Research Board, 29, pp.184-211, 1949.
- [4] 浜幸雄，太田宏平：フレッシュコンクリートによる気泡間隔係数の測定方法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.26., No.1, pp.669-674, 2004.

- [5] 粉体工学研究会編：粒度測定技術，日刊工業新聞社，1975.8.
- [6] 坂田昇，菅俣匠，林大介，橋本学：フライアッシュコンクリートの凝結過程における空気量の変化および耐凍害性への影響，コンクリート工学論文集，Vo1.22，No.3，pp.47-57，2011.

第 5 章

耐凍害性に及ぼす各種 AE 剤の空気安定性

第5章 耐凍害性に及ぼす各種 AE 剤の空気安定性

5.1 概要

主にダムコンクリートで使用される中庸熟フライアッシュセメントを使用したコンクリートの凍結融解抵抗性を向上させる一手法として、AE 剤による空気安定性の影響を検討した。ブリーディング量を異種細骨材の混合によって $0.15\sim 0.50\text{cm}^3/\text{cm}^2$ に変化させ、成分の異なる 3 種類の AE 剤で練上がり時の空気量を $4.5\sim 8.0\%$ の範囲に調整した場合、通常の空気量の調整範囲である 6.0% 未満では、いずれの AE 剤を用いた場合もブリーディング量の増加で気泡間隔係数は大きくなる傾向にあった。ただし、凍結融解抵抗性は AE 剤の成分によって大きく異なり、耐久性指数が 60 を下回る AE 剤では、硬化コンクリート中の気泡径 0.15mm 未満の空気量が少なくなる傾向にあった。ブリーディングの流れによってフレッシュコンクリート中の気泡が合一あるいは破泡し、微細な気泡が減少するために凍結融解抵抗性は低下するが、AE 剤の成分によっては抑制可能なことを確認した。

5.2 各種 AE 剤の空気安定性に関する試験の内容

5.2.1 使用材料および配合

使用材料を表-5.1 に示す。セメントには中庸熟フライアッシュセメント、細骨材には陸砂および石灰砕砂、粗骨材は硬質砂岩碎石をそれぞれ使用した。なお、細骨材および粗骨材は、いずれも JIS A 1122 : 2005 「硫酸ナトリウムによる骨材の安定性試験方法」を満足する骨材である。混和剤はリグニンスルホン酸化合物を主成分とする AE 減水剤を用い、AE 剤は一般土木・建築向けであるアルキルエーテル系陰イオン界面活性剤（以下、AE-1 と称す）および変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤（以下、AE-2 と称す）とフライアッシュ用である高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤の複合体（以下、AE-3 と称す）を使用した。

表-5.1 使用材料

材料	記号	種類および物性値
セメント	C	フライアッシュ30%混入中庸熱ポルトランドセメント (密度:2.85g/cm ³ , 比表面積:3720 g/cm ³ , 強熱減量:1.40%)
細骨材 1	S1	陸砂 (表乾密度:2.57g/cm ³ , 吸水率:2.06%, 損失質量分率:1.0%, 粗粒率:2.73)
細骨材 2	S2	石灰砕砂 (表乾密度:2.68g/cm ³ , 吸水率:1.06%, 損失質量分率:0.8%, 粗粒率:2.87)
粗骨材	G2	硬質砂岩碎石 (表乾密度:2.66g/cm ³ , 吸水率:0.72%, 損失質量分率:1.3%, 最大寸法:20mm)
AE 減水剤	Ad1	リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体
AE 剤	AE-1	一般土木・建築向け AE 剤 (アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤)
	AE-2	一般土木・建築向け AE 剤 (変性ロニン酸化合物系陰イオン界面活性剤)
	AE-3	一般土木・建築およびフライアッシュ向け AE 剤 (高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤の複合体)
練混ぜ水	W	上水道水

試験に供したコンクリートの配合を表-5.2 に示す。水セメント比を 55% とし、単位水量を 155kg/m³、目標スランプを 10.0±2.5cm の条件で、細骨材の混合比率ならびに AE 剤の種類を変えて目標空気量を 4.5±1.0%、6.0±1.0% および 8.0%±1.0% に調整した。なお、目標空気量を 4.5% から増加させた場合の配合設計は、空気量分の容積を骨材に置換する方法とした。また、目標空気量の増加に伴ってスランプも増加する傾向にあったことから、AE 減水剤の使用量で調整した。

表-5.2 コンクリートの配合

目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
				水 W	セメント C	細骨材 1 S1	細骨材 2 S2	粗骨材 G	AE 減水剤 Ad1
10.0	4.5	55.0	45.0	155	282	810	-	1027	2.26
	6.0	55.0	45.0	155	282	794	-	1003	1.41
	8.0	55.0	45.0	155	282	771	-	974	-
10.0	4.5	55.0	45.0	155	282	405	422	1027	2.82
	6.0	55.0	45.0	155	282	397	414	1003	1.55
	8.0	55.0	45.0	155	282	386	402	974	0.28
10.0	4.5	55.0	45.0	155	282	-	844	1027	3.38
	6.0	55.0	45.0	155	282	-	828	1003	1.97
	8.0	55.0	45.0	155	282	-	804	974	0.56

5.2.2 試験項目

試験項目は表-5.3 に示すとおり、フレッシュコンクリートについてはスランプ、空気量およびブリーディング量とし、硬化コンクリートについては圧縮強度（材齢 7, 28, 91 日）、凍結融解 300 サイクルまでの相対動弾性係数およびリニアトラバース法による硬化コンクリートの空気量と気泡間隔係数とした。硬化コンクリートにおける各種供試体の作製は、スランプおよび空気量の測定後、直ちに所定の型枠にコンクリートを打ち込んだ。

表-5.3 試験項目と方法

試験項目	試験方法
スランプ	JIS A 1101:2005 「コンクリートのスランプ 試験方法」
空気量	JIS A 1128:2005 「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法 -空気室圧力方法-」
ブリーディング	JIS A 1123:2003 「コンクリートのブリーディング 試験方法」
圧縮強度	JIS A 1108:2006 「コンクリートの圧縮強度試験方法」 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ ，標準養生，材齢 7, 28, 91 日
凍結融解抵抗性	JIS A 1148:2001 「コンクリートの凍結融解試験方法」（水中凍結融解試験方法）試験開始材齢 28 日（標準養生）
気泡間隔係数	ASTM C 457-71 「顕微鏡による硬化コンクリートの気泡システムのパラメータと空気量の測定方法」（リニアトラバース法） $\phi 150 \times 300\text{mm}$ ，試験開始材齢 28 日（標準養生），高さ 150mm で測定

5.3 各種 AE 剤の空気安定性に関する試験の結果

試験結果の一覧を表-5.4 に示す。

表-5.4 コンクリートの試験結果

石灰砕砂 (S2)混合 比率(%)	AE 剤 種類	スランプ (cm)	フレッシュ時 の空気量 (%)	ブリーデ ィング量 (cm ³ /cm ²)	ブリーデ ィング率 (%)	耐久性 指数 (%)	硬化後の 空気量 (%)	気泡間隔 係数 (μ m)
0	AE1	10.5	4.5	0.15	3.7	71	2.7	297
		11.0	6.1	0.15	3.8	79	3.8	254
		9.5	8.0	0.14	3.5	87	6.7	200
	AE2	11.0	4.9	0.14	3.7	87	4.4	297
		10.5	6.0	0.15	3.8	88	5.3	221
		10.0	8.0	0.14	3.5	94	6.9	216
	AE3	10.0	4.8	0.14	3.6	94	3.9	262
		10.0	6.1	0.14	3.6	90	5.1	213
		9.0	7.6	0.14	3.6	94	6.6	196
50	AE1	10.5	4.8	0.33	8.5	10	2.5	486
		9.5	6.3	0.30	7.6	73	4.3	305
		11.5	8.4	0.26	6.6	91	7.6	171
	AE2	10.0	4.6	0.33	8.5	74	3.1	395
		10.0	6.2	0.30	7.4	91	4.6	306
		12.0	8.4	0.28	7.2	96	7.3	182
	AE3	11.0	4.8	0.35	9.1	89	3.6	319
		10.0	6.3	0.33	8.5	94	4.8	271
		11.0	8.0	0.23	6.0	96	7.0	199
100	AE1	9.5	5.1	0.49	12.8	4	3.2	751
		10.5	6.0	0.40	10.2	7	4.2	580
		9.0	8.6	0.38	9.8	67	5.1	379
	AE2	8.5	5.1	0.49	12.7	57	4.0	465
		9.5	6.2	0.44	11.2	73	4.4	424
		8.5	8.2	0.40	10.4	80	5.9	336
	AE3	9.0	5.0	0.48	12.5	88	4.3	367
		10.0	6.2	0.44	11.3	93	4.9	330
		8.5	7.9	0.38	9.7	88	5.3	345

5.3.1 各種 AE 剤の使用量

細骨材の種類および混合比率において、フレッシュ時の空気量を 4.5~8.0% とするために要する各種 AE 剤の使用量を図-5.1 に示す。細骨材の種類では、陸砂単味において AE 剤の使用量が最も多く、石灰砕砂の混合比率の増加に伴って AE 剤の使用量が少なくなる傾向にあった。AE 剤の種類で比較すると、AE-1 および AE-2 は概ね同等の使用量であった。これに対して、AE-3 は他の AE 剤と比較して使用量が増加する傾向にあり、陸砂単味では、AE-1 および AE-2 と比較して 3.0 倍程度、石灰砕石 50% 混合では 2.0~2.5 倍、石灰砕砂単味では 1.5~2.0 倍、使用量が多くなる傾向にあった。これは、高アルキルカルボン酸系の AE 剤は、フライアッシュに接触後短時間で吸着がほぼ完了し、その後は吸着がほとんど進行しない性質であるため[1]、目標空気量とするために要する AE 剤使用量が増加したものと推察された。

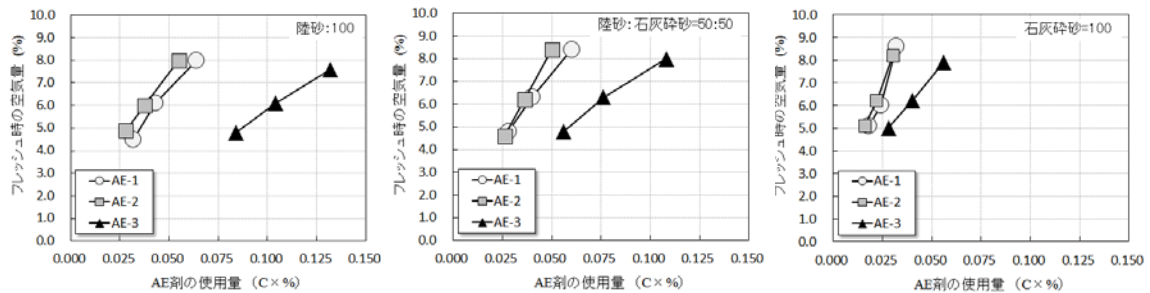


図-5.1 AE 剤の使用量とフレッシュ時の空気量の関係

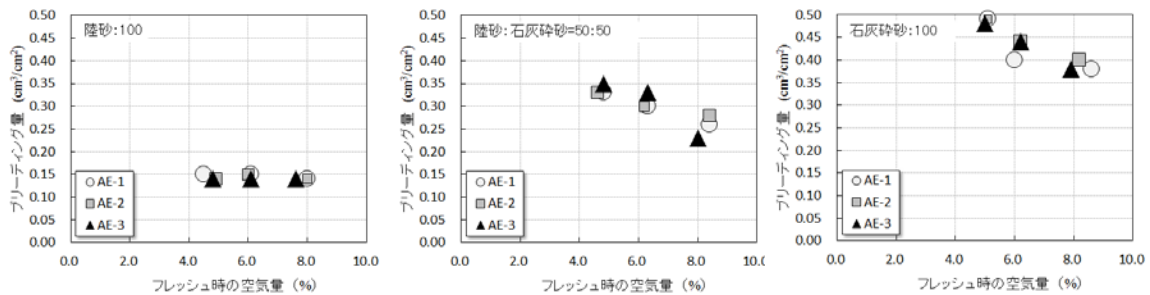


図-5.2 空気量とブリーディング量の関係

5.3.2 ブリーディング量

細骨材の種類および混合比率において、各種 AE 剤を使用した場合のフレッシュ時の空気量とブリーディング量の間関係を図-5.2 に示す。細骨材の種類では、陸砂単味のブリーディング量は $0.15\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 程度と最も少なかったが、石灰砕砂を 50% 混合した場合には $0.20\sim 0.35\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 、石灰砕砂単味では $0.35\sim 0.50\text{cm}^3/\text{cm}^2$ と石灰砕砂の混合比率の増加に伴ってブリーディング量が増加する傾向にあった。また、空気量の違いで比較すると、陸砂単味

ではいずれの空気量においても $0.15\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 程度であったが、石灰砕砂の混合比率を増加させてブリーディング量が $0.20\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以上の条件では、空気量が増加するにつれてブリーディング量は少なくなる傾向にあった。この要因として山本らは、配合条件に伴う比重差による粒子の沈降と AE 剤使用量の増加に伴う練混ぜ水の表面張力と気泡の違いによるものと考えており [2]、本試験についても同様であると推察された。各種 AE 剤の空気量とブリーディング量の関係は、細骨材の種類および混合比率が異なっても同一空気量に対して概ね同等のブリーディング量であり、AE 剤の種類によるブリーディング量への影響は認められなかった。

5.3.3 強度発現性

細骨材の種類および混合比率において、各種 AE 剤のフレッシュ時の空気量と圧縮強度の関係を図-5.3 に示す。圧縮強度は空気量の増加に伴い小さくなる傾向にあり、空気量 4.5% に対する強度比は、空気量が 6.0% では約 90%、空気量が 8.0% では約 70% であった。細骨材の種類および混合比率の違いでは、石灰砕砂の混合比率が増加するにつれて圧縮強度は増加する傾向にあり、石灰砕砂単味では陸砂単味に比べて 20~40% 高くなる傾向にあった。その原因は、細骨材の形状にあると推察された。各種 AE 剤の空気量と圧縮強度の関係は、いずれの条件も同一空気量に対して概ね同等の圧縮強度であり、AE 剤の成分による圧縮強度への影響は認められなかった。

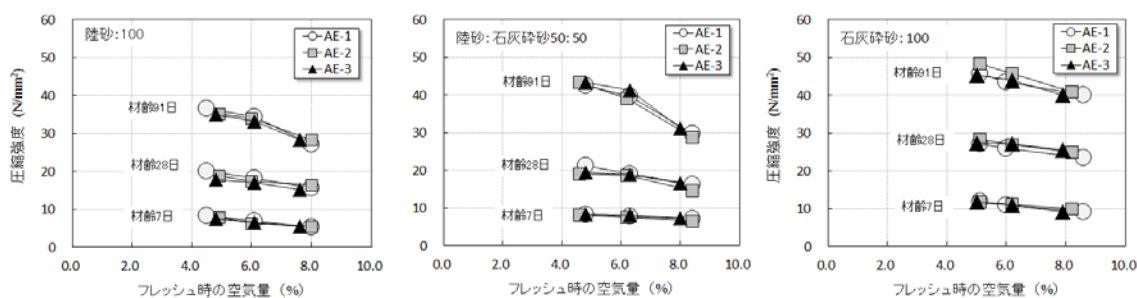


図-5.3 フレッシュ時の空気量と圧縮強度の関係

5.3.4 凍結融解抵抗性

凍結融解サイクル数と相対動弾性係数の関係を図-5.4 に示す。また、凍結融解サイクル数と質量減少率の関係を図-5.5 に、凍結融解 300 サイクルの相対動弾性係数と質量減少率の関係を図-5.6 に示す。

相対動弾性係数の変化は、細骨材の種類および混合比率の違いや、AE 剤の種類および空気量によって大きく異なっている。陸砂単味では、AE-1 を用いた場合、他の AE 剤と比較して相対動弾性係数が小さい傾向にあったが、いずれの条件も凍結融解 300 サイクルに

おける相対動弾性係数は 60%以上であった。一方、石灰砕砂の混合比率 50%では、AE-1 を用いた場合、目標空気量が 4.5%では凍結融解 90 サイクルで相対動弾性係数が 60%を下回ったが、目標空気量が 6.0%では、300 サイクル時の相対動弾性係数が 60%を上回っている。しかし、石灰砕砂単味では、空気量が 6.0%であっても凍結融解 60 サイクルで相対動弾性係数が 60%を下回り、空気量が 8.0%でも凍結融解 300 サイクルの相対動弾性係数は 70%程度であった。AE-2 は AE-1 に比べて凍結融解抵抗性が高いものの、石灰砕砂単味で空気量が 4.5%では、凍結融解 300 サイクルで相対動弾性係数が 60%を下回った。AE-1 および AE-2 は、石灰砕砂の混合比率が増加することで相対動弾性係数が低下する傾向にあるが、空気量を増加させることで凍結融解抵抗性の向上が認められた。これに対して、AE-3 は、石灰砕砂単味で空気量が 4.5%の条件でも、凍結融解 300 サイクルにおける相対動弾性係数は 90%程度であり、同一空気量であっても AE 剤の種類によって凍結融解抵抗性が大きく異なることが認められた。

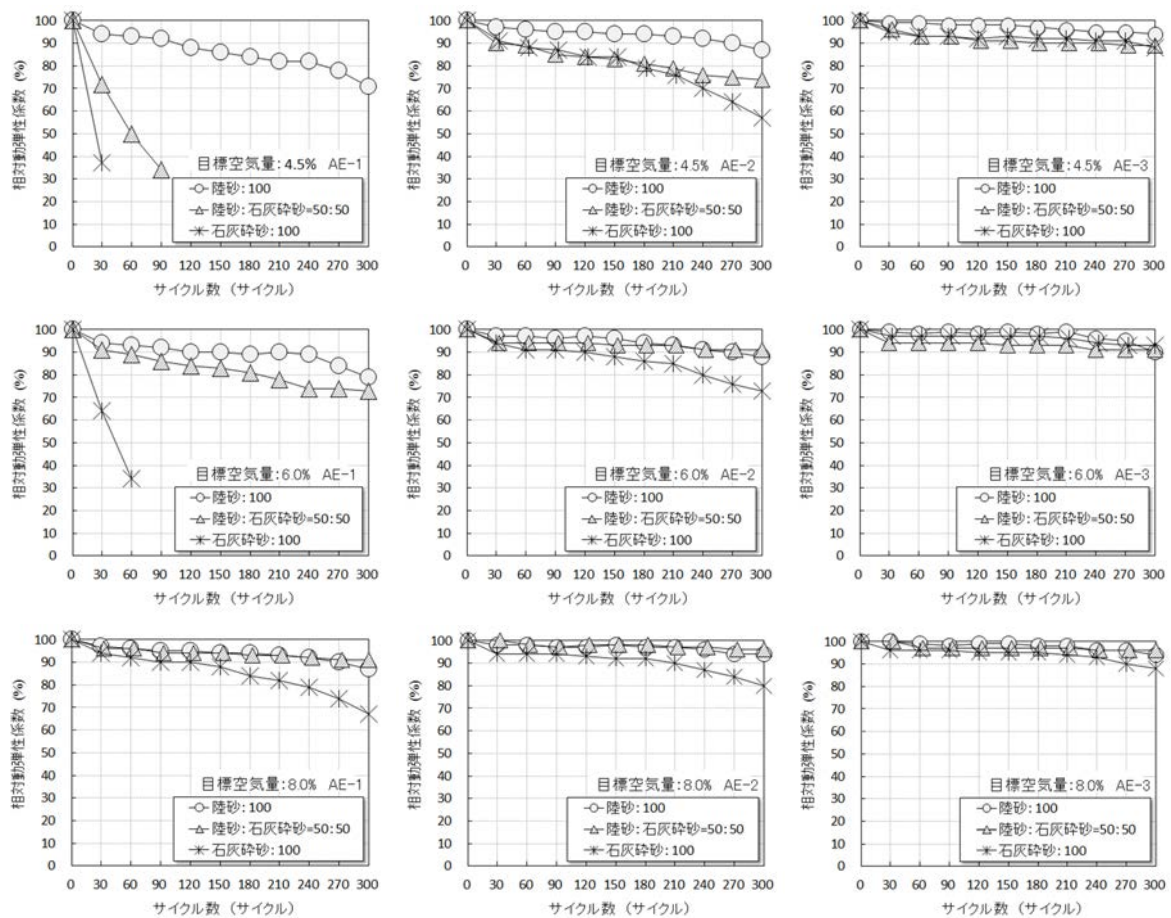


図-5.4 凍結融解サイクル数と相対動弾性係数（耐久性指数）の関係

一方、質量減少率は、陸砂単味ではいずれの条件も 2.0~10% となり、この場合、AE-1 では空気量によらず、AE-2 では通常の空気量の調整範囲である 4.5~6.0% では打込み面に対して粗骨材が露出するほどのスケーリングが認められた。これに対して、石灰砕砂を用いた場合、凍結融解 300 サイクルの相対動弾性係数が 60% 以上を満足した条件では、AE 剤の成分および空気量によらず、質量減少率は 2.0~4.0% の範囲にあり、骨材が露出するほどのスケーリングは認められなかった。スケーリングは供試体表面に限定される劣化で、コンクリート内部組織の劣化を表す指標というよりは、コンクリートの強度が低い場合に生じやすいとの報告 [3] を参考にすると、陸砂単味では石灰砕砂を用いた場合に比べて圧縮強度が低い傾向にあったために、スケーリングが大きくなったものと推察された。ただし、空気量が多いほど、また、AE 剤の成分では、AE-3 を用いた場合にスケーリングが小さくなる傾向にあったことから、空気量および AE 剤の種類によってもスケーリングが異なるものと推察される。

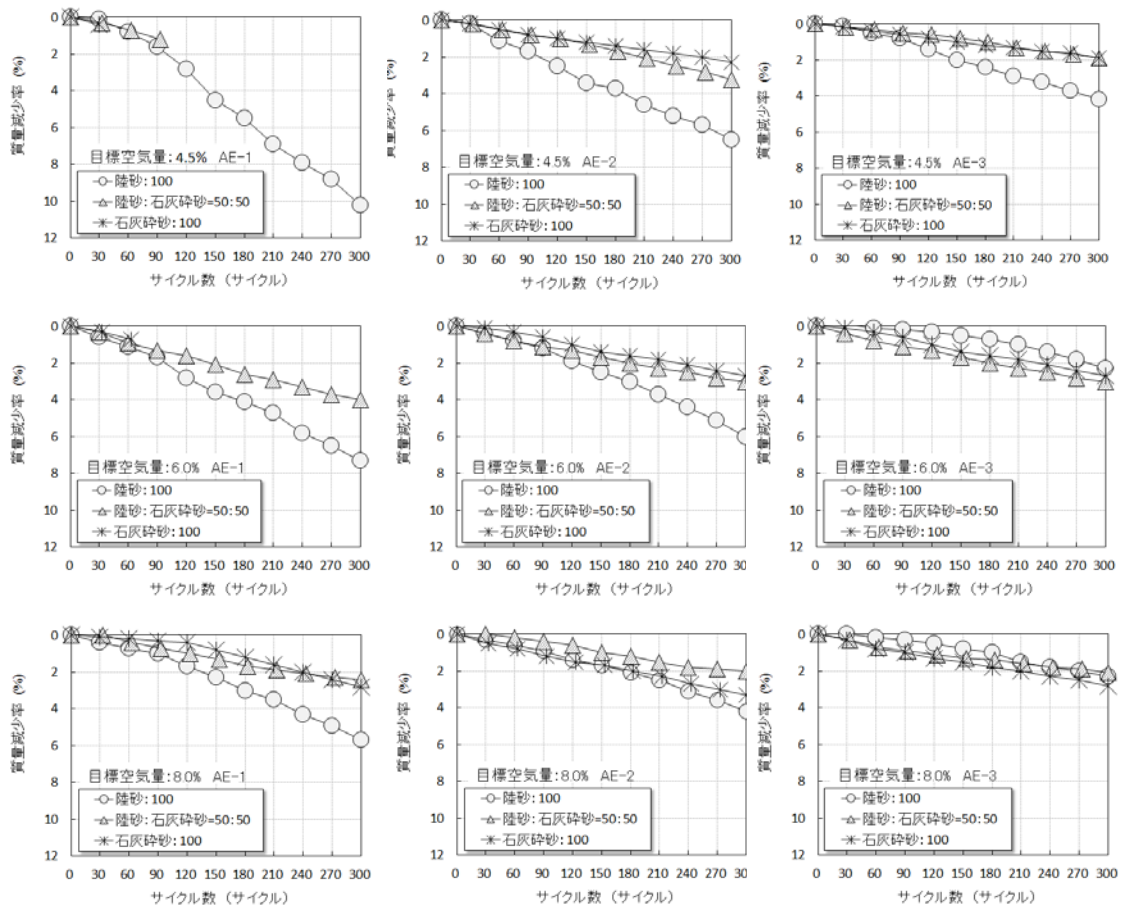


図-5.5 凍結融解サイクル数と質量減少率の関係

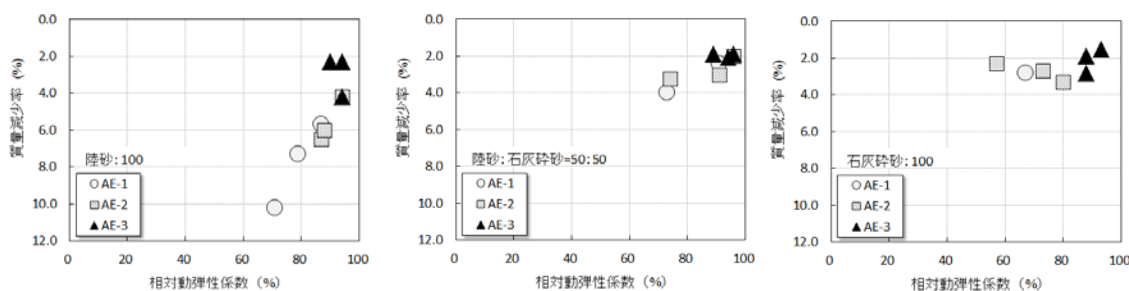


図-5.6 凍結融解 300 サイクルの相対動弾性係数（耐久性指数）と質量減少率の関係

5.3.5 気泡組織と凍結融解抵抗性

ブリーディング量と気泡間隔係数の関係を図-5.7 に示す。同一空気量であれば、いずれの AE 剤もブリーディング量が多いほど気泡間隔係数は大きくなる。この傾向は、目標空気量が少ないほど、すなわち AE 剤の使用量が多いほど顕著であった。ただし、その変化量は AE 剤の成分によって異なっており、AE-1 を用いた場合、ブリーディング量の増加に対して気泡間隔係数が最も大きくなる傾向にある。目標空気量が 4.5% でブリーディング量が $0.50\text{cm}^3/\text{cm}^2$ の気泡間隔係数は $750\mu\text{m}$ 程度であり、これは同一空気量でブリーディング量が最も少ない $0.15\text{m}^3/\text{cm}^2$ の気泡間隔係数と比較して $450\mu\text{m}$ 程度大きくなっている。これに対して、AE-2 ではこの差は $200\mu\text{m}$ 程度、AE-3 では $100\mu\text{m}$ 程度であり、AE-3 はブリーディング量の増加による気泡間隔係数への影響が小さい傾向にあることが認められた。

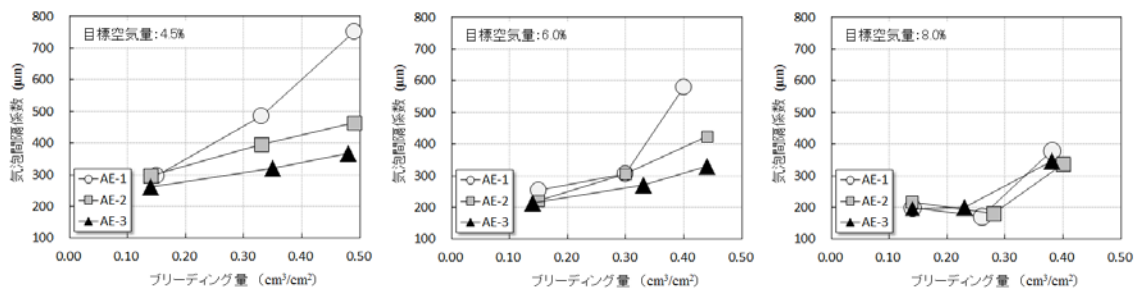


図-5.7 ブリーディング量と気泡間隔係数の関係

気泡間隔係数と耐久性指数の関係を図-5.8 に示す。一般的に知られているとおり、気泡間隔係数が大きいほど耐久性指数は小さくなる傾向にあり、本試験の範囲では気泡間隔係数が $450\mu\text{m}$ 以下であれば耐久性指数が 60 を上回るものと推察された。AE 剤の種類で比較すると、同じ気泡間隔係数であっても耐久性指数は異なっている。AE-2 および AE-3 では気泡間隔係数が $200\sim 350\mu\text{m}$ の範囲であれば耐久性指数は 85 以上を有している。これに対して、AE-1 は気泡間隔係数が $300\mu\text{m}$ であっても耐久性指数は 70 程度となっている。第 3 章で示した気泡間隔係数と気泡径分布のケーススタディーから、気泡間隔係数は、気泡径

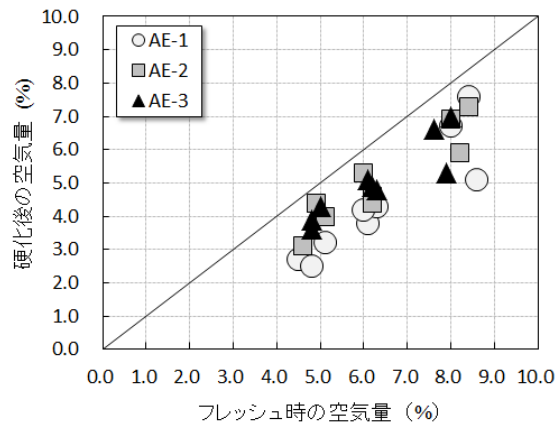


図-5.8 気泡間隔係数と耐久性指数の関係

0.15mm未満の径の空気量が増加するにつれて小さくなり、気泡径1.0mmの大きな径の空気量が増加するにつれて気泡間隔係数が大きくなる。すなわち、気泡径0.15mm未満および1.0mm以上の空気量がいずれも減少する場合、気泡間隔係数には変化がないが、気泡径の分布には当然変化があり、このことが凍結融解抵抗性に影響を及ぼす可能性がある[4]。AE剤の種類を変えた本試験でも、気泡間隔係数は同等であっても耐久性指数が異なっており、気泡径の分布が異なることに起因したものと推察された。そこで、各種AE剤の空気量ごとの気泡径の分布を図-5.9に示す。気泡径の分布はいずれの条件でも気泡径0.10~0.15mmおよび気泡径1.0mm以上の空気量に違いが認められ、気泡径0.10~0.15mmの空気量は、目標空気量が高くブリーディング量が少ない陸砂を使用した方が多い。これに対して、気泡径1.0mm以上の空気量は、ブリーディング量が多い石灰砕砂単味において多くなる傾向にあった。気泡径の分布を陸砂単味で目標空気量が4.5%の条件で比較すると、AE-1およびAE-2の気泡間隔係数は297 μ mであるものの、AE-2の方が気泡径0.10~0.15mmおよび気泡径1.0mm以上の空気量が多い傾向にあり、これは、石灰砕砂の混合比率が50%で目標空気量が6.0%の条件でも同様の傾向にあった。第2章において中庸熱フライアッシュセメントを使用したコンクリートは、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートに比べて硬化後の空気量の低下が大きいことを示しており[5]、本試験ではAE剤の成分によって硬化後の空気量の低下が大きくなることで気泡径の分布に違いが認められたものと推察された。フレッシュ時と硬化後の空気量の関係を図-5.10に示す。硬化後の空気量は、いずれの条件もフレッシュ時に比べて0.5~3.0%低下する傾向にあった。AE剤の種類で比較すると、通常の空気量の範囲である4.5~6.0%においてAE-1では他のAE剤に比

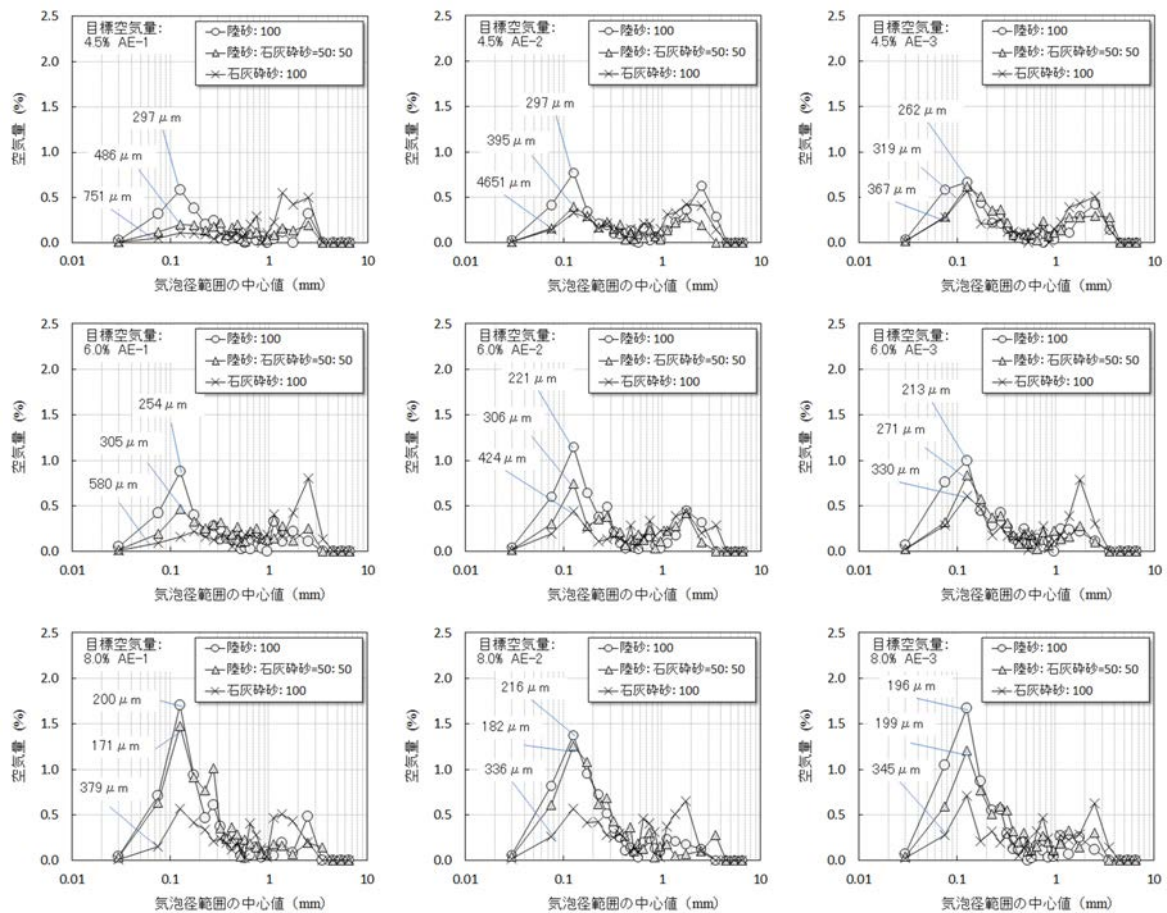


図-5.9 各 AE 剤の空気量ごとの気泡分布

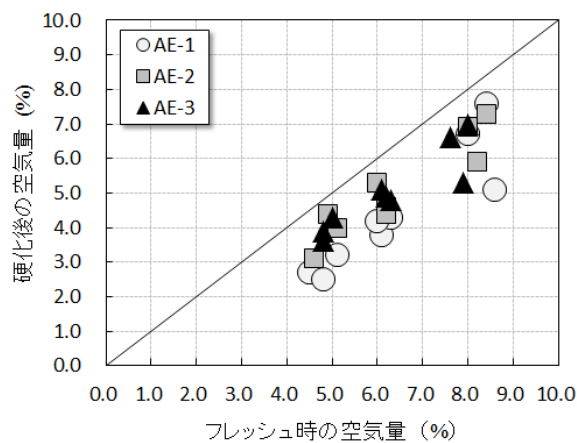


図-5.10 フレッシュ時と硬化時の空気量の関係

べて空気量の低下が大きい傾向にあり、このことが気泡間隔係数を大きくし、結果的に凍結融解抵抗性が低下したものと推察された。

気泡径の分布の違いによる影響として第3章において、気泡径 0.15mm 未満の空気量と凍結融解抵抗性との間に高い相関があること、気泡径 0.15mm 未満の空気量を普通ポルトランドセメントでは 0.45%以上、中庸熱フライアッシュセメントでは 1.36%以上確保できれば、十分な凍結融解抵抗性を有することを示した [4]。中庸熱フライアッシュセメントを使用したコンクリートの本結果について気泡径 0.15mm 未満の空気量と耐久性指数の関係を図-5.11 に示す。気泡径 0.15mm 未満の空気量と凍結融解抵抗性には高い相関が認められ、本試験の範囲では気泡径 0.15mm 未満の空気量が 0.55%以上であれば十分な凍結融解抵抗性が得られる傾向にあった。しかし、これは第3章で明らかとした閾値 1.36% [4] に比べて小さい。その理由として、配合条件あるいは使用材料の違いが考えられる。

AE 剤の種類では、AE-1 を用いた場合、気泡径 0.15mm 未満の空気量が 0.5%以下では耐久性指数が 60 を大きく下回る傾向にあった。AE-2 は AE-1 に比べて気泡径 0.15mm 未満の空気量は多いものの、AE-3 に比べて少ない傾向を示し、AE 剤の種類によっては、気泡径 0.15mm 未満の空気量が少なくなることで凍結融解抵抗性が低下することが示唆された。これを硬化後の空気量と気泡径 0.15mm 未満の空気量の関係で図-5.12 に示す。硬化後の空気量が同等であっても、気泡径 0.15mm 未満の空気量は、ブリーディング量が多い傾向にあった石灰砕砂の混合比率が多いほど少ない。また、硬化コンクリートにおいて、細骨材の種類ごとに、コンクリート中のすべての空気量と気泡径 0.15mm 未満の空気量には高い相関があり、陸砂、陸砂と石灰砕砂、石灰砕砂の順にすべての空気量に占める気泡径 0.15mm 未満の空気量が高い結果となった。このことは、凍結融解抵抗性の観点からも細骨材の選定が重要であることを示唆している。

ブリーディング量が多いほど時間の経過で気泡間隔係数が大きくなるという第4章の結果より [6]、ブリーディングの流れによって AE 剤で連行された気泡が合一あるいは破泡し、結果的に凍結融解抵抗性を低下させていると考えられる。ここではその程度が AE 剤の種類によって異なることが示唆された。

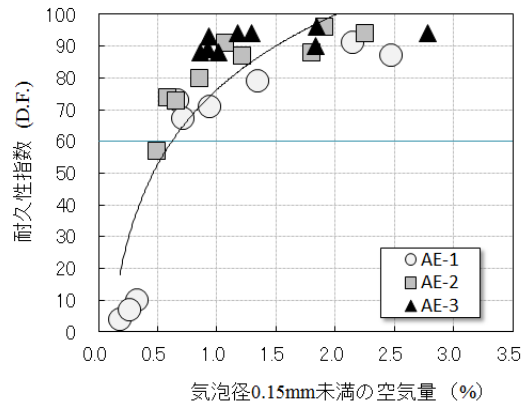


図-5.11 気泡径 0.15mm 未満の空気量と耐久性指数の関係

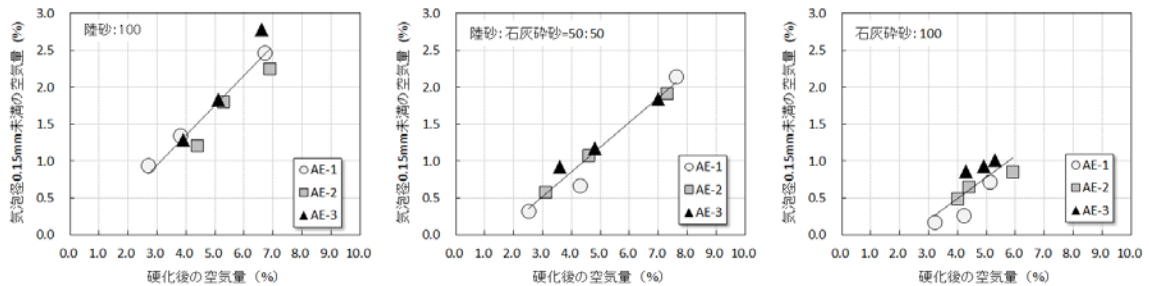


図-5.12 硬化後の空気量と気泡径 0.15mm 未満の空気量の関係

5.4 第5章の結論

中庸熱フライアッシュセメントを使用したコンクリートの凍結融解抵抗性について、異種細骨材の混合によってブリーディング量を $0.15 \sim 0.50 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ に変化させ、成分の異なる3種類のAE剤で練上がり時の空気量を4.5~8.0%の範囲に調整して検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) ブリーディング量と圧縮強度には、細骨材の種類と混合比率を変えた各条件においてAE剤の種類による大きな差は認められなかった。
- 2) 気泡径 0.15mm 未満の空気量は、ブリーディング量が多いほど少なく、またさらに、硬化後の空気量が同等であっても、AE剤の成分によって大きく異なる。フレッシュコンクリート内部を上昇するブリーディング水がAE剤の気泡の表面を移動することで、AE剤の分子が拡散し、泡膜を維持する能力が低下して結果的に気泡間隔係数を大きくすることにつながるものと考えられた。AE剤の種類によっては、過大なブリーディング量が発生するような条件下でも、凍結融解抵抗性の低下がある程度抑制可能なこと

を確認した。

- 3) 硬化コンクリートの空気量は、いずれの条件においてもフレッシュ時に比べて 0.5～3.0%低下する傾向にあり、アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤による AE 剤を用いた場合では大きく低下する傾向にあった。
- 4) いずれの AE 剤でもブリーディング量が多いほど気泡間隔係数が大きくなり、AE 剤の成分ではアルキルエーテル系陰イオン界面活性剤を用いた条件で顕著となり、凍結融解抵抗性の著しい低下が認められた。一方で、高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤の複合体では十分な凍結融解抵抗性が得られた。このことから、フライアッシュを混合したセメントを用いる場合、耐凍害性を確保する上で、AE 剤に高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤の複合体を用いることが有効であると考えられる。
- 5) 第3章および第4章と同様に、硬化コンクリートにおける気泡径 0.15mm 未満の空気量と耐久性指数とに高い相関が認められた。本章の試験では気泡径 0.15mm 未満の空気量が 0.55%以上であれば十分な凍結融解抵抗性が得られる傾向にあり、第3章で明らかとした閾値 1.36%に比べて小さい傾向にあった。これは、配合条件あるいは使用材料の違いによるものと考えられる。
- 6) 硬化コンクリートにおいて、細骨材の種類に関わらず、コンクリート中のすべての空気量と気泡径 0.15mm 未満の空気量には高い相関があり、陸砂、陸砂と石灰砕砂、石灰砕砂の順にすべての空気量に占める気泡径 0.15mm 未満の空気量が高い結果となった。このことから、凍結融解抵抗性の観点からも細骨材の選定が重要であることが示唆された。

第5章の参考文献

- [1] 浅野研一，木村貞雄，村山 守，中川 脩：フライアッシュコンクリート用空気量調整剤 AE-775 について，日曹マスターズビルダーズ（株）研究所報，pp.52-57，1983.
- [2] 山本隆信，杉山隆文，辻幸和：フライアッシュコンクリートの空気連行性およびブリーディングに影響を及ぼす各種要因，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.2，pp.97-102，2005.3.
- [3] 片平 博，渡辺博志：凍結融解作用を受けたコンクリート供試体の力学特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，2008.
- [4] 坂田昇，菅俣匠，林大介，橋本学：コンクリートの気泡組織と耐凍害性の関係に関する考察，コンクリート工学論文集，Vol.23，No.1，pp.35-47，2012.
- [5] 坂田昇，菅俣匠，林大介，橋本学：フライアッシュコンクリートの凝結過程における

空気量の変化および耐凍害性への影響 , コンクリート工学論文集, Vol.22, No.3,
pp.47-57, 2011.

- [6] 坂田昇, 菅俣匠, 林大介, 作榮二郎 : コンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼすブリーディングの影響に関する一考察, コンクリート工学論文集, Vol.23, No.2, pp.59-69,
2012.

第 6 章

結 論

第6章 結論

寒冷地にあるフライアッシュコンクリートを材料として構築された水利施設においては、フライアッシュコンクリートの耐凍害性が普通コンクリートよりも劣るために、凍結融解の繰返し作用による凍害劣化が生じやすい。凍害劣化が生じた水利施設では、その結果として物質移動抵抗性が低下することになり中性化抵抗性も低下することから、鉄筋腐食が生じやすくなることが懸念されている。ただし、現状において凍害劣化の原因を特定する手段がなく、変状のパターンから、状況証拠的に凍害劣化と特定する場合がほとんどであり、凍害の劣化メカニズムを把握することは現在でも極めて重要な課題となっている。

そこで、本論文では、フライアッシュコンクリートの物質移動抵抗性を低下させる原因となる凍害劣化メカニズムを解明し、フライアッシュコンクリートの耐凍害性を向上させる方法について提案することを目的として、特にフライアッシュコンクリートの利用実績が多いダムコンクリートを対象に気泡特性の観点から検討を行った。また、本論文では、寒冷地における水利施設へのフライアッシュコンクリートの適用拡大に資することも目的としていることから、耐凍害性を確保するためのフライアッシュコンクリートの配合設計の条件について提案した。具体的には、次の4項目について取り組んだ。

- ① 凝結過程における空気量変化が耐凍害性に及ぼす影響
- ② コンクリートの気泡組織と耐凍害性の関係
- ③ コンクリートの耐凍害性に及ぼすブリーディングの影響
- ④ 各種 AE 剤の空気安定性とそれが耐凍害性に及ぼす影響

①、③については、ダムコンクリートが一般に温度上昇を抑制する目的で、フライアッシュ混入の中庸熱セメントを用いており、フライアッシュ混入によって空気が混入しにくく安定しにくいこと、同時に凝結遅延が生じてブリーディングが多くなることに着目して検討を行った。また、②、④については、フライアッシュコンクリートの耐凍害性を向上させる方法について検討した。具体的には、②については、気泡間隔係数だけでなく、詳細な気泡組織について検討することにより劣化メカニズムを解明した。さらに、④については、劣化メカニズムを明確にした上で、フライアッシュコンクリートの耐凍害性を向上させる AE 剤についての検討を行った。その結果、本研究において以下の結論が得られた。

第2章では、フライアッシュを用いたコンクリートの中でも、ダムコンクリートで一般に用いられている中庸熱フライアッシュセメントに着目し、コンクリートの凝結過程における空気量の変化を把握し、気泡組織と耐凍害性との関係を明らかにすることを目的として、実験的に検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 中庸熱フライアッシュセメントを用いた場合、一般に設定されている空気量(ダムコン

クリートの粗骨材フルサイズコンクリートの目標空気量 3.0~3.5%)では、フレッシュコンクリートの空気量が硬化後に大幅に減少する。また、この空気量の減少によって、凍結融解抵抗性が著しく低下する。

- 2) 中庸熱フライアッシュセメントを用いた場合、粗骨材フルサイズコンクリートの目標空気量を 4.0%以上に設定すること、硬化後の空気減少量を抑制でき、硬化後の空気量を確保できることから、所定の凍結融解抵抗性を有するコンクリートが得られる。また、粗骨材フルサイズコンクリートの目標空気量 4.0%では、91 日圧縮強度の低下も小さい。よって、ダムコンクリートにおいて中庸熱フライアッシュセメントを用いる場合には、目標空気量の設定値をある程度大きくする必要がある。
- 3) 同じブリーディング率のコンクリートであっても、中庸熱フライアッシュセメントを用いた方が、普通ポルトランドセメントを用いるより、硬化後の空気減少量が大きくなる。この理由として、フライアッシュ混入により、コンクリート中の気泡の安定性が低下し、さらにブリーディングの流れによって破泡や合泡の現象が生じることが挙げられる。
- 4) 同一セメントを用いる場合、ブリーディングが多いほどフレッシュ時から硬化後の空気減少量が大きくなる。また、その傾向は中庸熱フライアッシュセメントの方が顕著である。

第 3 章では、OPC および MFC を使用したコンクリートの気泡組織と耐久性指数の関係について、193 データを基に分析した。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) OPC と MFC の両方において、フレッシュ時より硬化後の方が空気量が少なくなる。この傾向は MFC の場合により顕著である。
- 2) OPC の場合、気泡間隔係数が大きいほど耐久性指数が小さくなる。
- 3) MFC の場合、気泡間隔係数と耐久性指数の間に相関はみられない。これは、AE 剤の空気連行性の低下の影響により、多様な気泡分布となることによるものと考えられる。
- 4) 同一の気泡間隔係数であっても、気泡径の分布が大きく異なることがある。これは、気泡間隔係数が空気量と気泡比表面積のいずれの影響も受けるためである。本研究の範囲では、径 0.10mm 前後の気泡と径 1.0mm 以上の気泡が、いずれも多い場合と、いずれも少ない場合の気泡間隔係数が同程度となった。
- 5) 本研究のデータを基に、気泡間隔係数が 216 μ m となる気泡分布を仮定し、径 0.03mm, 0.075mm, 0.125mm, 0.375mm および 1.125mm の各径の気泡量を増減させて気泡間隔係数の変化を算出した結果、径 0.03mm, 0.075mm および 0.125mm の気泡が増加するに従って気泡間隔係数が小さくなり、径 0.375mm の気泡の増減は気泡間隔係数に変化

を与えず、径 1.125mm の気泡が増加するに従って気泡間隔係数が大きくなった。

- 6) 径 0.15mm 未満の気泡が多いコンクリートは、耐久性指数が大きくなる。本研究の範囲において、耐凍害性を確保しようとする場合、OPC については径 0.15mm 未満の気泡を 0.45%以上連行することが必要である。また、MFC については、径 0.15mm 未満の気泡を 1.36%以上連行することが必要である。
- 7) 本研究の範囲において MFC のコンクリートに径 0.15mm 未満の気泡を 1.36%以上連行するためには、フレッシュコンクリートの空気量を 6.6%以上とすることが必要であるという結果が得られた。

第 4 章では、コンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼすブリーディングの影響として、ブリーディングの流れが AE 剤により連行された気泡の合一あるいは破泡を促し、結果的に凍結融解抵抗性を低下させる可能性について種々の条件でブリーディングの発生量を変えて検討を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) ブリーディング量が多いほど気泡間隔係数が大きくなり、凍結融解抵抗性は低下する傾向にあった。本実験の範囲ではブリーディング量を約 $0.40\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下とすることで耐久性指数 60 以上を満足する結果となった。
- 2) 浮力法による気泡間隔係数の測定により、練り混ぜ後 3 時間までの気泡間隔係数の変化は、ブリーディング量が多いほど大きく、AE 剤の気泡が合一あるいは破泡している可能性を示唆した。逆に本実験の範囲内では、ブリーディング量が細孔構造および骨材界面の脆弱層に与える影響は小さかった。
- 3) ブリーディングによる凍結融解抵抗性の低下は、3 章で明らかとした硬化コンクリートにおける気泡径 0.15mm 未満の空気量と大きく関係しており、気泡間隔係数や硬化コンクリートの空気量よりも、硬化コンクリートにおける気泡径 0.15mm 未満の空気量の方が凍結融解抵抗性に影響することを確認した。
- 4) 遅延剤を多く使用した場合は、凝結遅延によりブリーディング量は多く発生するものの、気泡間隔係数が大きくなることはなく、気泡径 0.15mm 未満の空気量も安定して存在した。そしてブリーディング量が $0.40\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以上であっても十分な凍結融解抵抗性が得られる結果となった。遅延剤の使用により気泡の安定性が増したものと考えられる。

第 5 章では、中庸熱フライアッシュセメントを使用したコンクリートの凍結融解抵抗性について、異種細骨材の混合によってブリーディング量を $0.15\sim 0.50\text{cm}^3/\text{cm}^2$ に変化させ、成分の異なる 3 種類の AE 剤で練上がり時の空気量を 4.5~8.0%の範囲に調整して検討を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) ブリーディング量および圧縮強度では、細骨材の種類および混合比率を変えた各条件

において AE 剤の成分による大きな差は認められなかった。

- 2) 気泡径 0.15mm 未満の空気量は、ブリーディング量が多いほど少ない。さらに、硬化後の空気量が同等であっても、AE 剤の成分によって 0.15mm 未満の空気量が大きく異なった。フレッシュコンクリート内部を上昇するブリーディング水が AE 剤の気泡の表面を移動することで、AE 剤の分子が拡散し、泡膜を維持する能力が低下して結果的に気泡間隔係数を大きくすることにつながるものと考えられた。AE 剤の成分によっては、過大なブリーディング量が発生するような条件下でも、凍結融解抵抗性の低下がある程度抑制可能なことを確認した。
- 3) 硬化コンクリートの空気量は、いずれの条件においてもフレッシュ時に比べて 0.5～3.0% 低下する傾向にあり、アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤による AE 剤を用いた場合には大きく低下する傾向にあった。
- 4) いずれの AE 剤もブリーディング量が多いほど気泡間隔係数が大きくなり、AE 剤の成分ではアルキルエーテル系陰イオン界面活性剤を用いた場合、凍結融解抵抗性の著しい低下が認められた。一方で、高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤の複合体では十分な凍結融解抵抗性が得られた。このことから、フライアッシュを混合したセメントを用いる場合、耐凍害性を確保する上で、AE 剤に高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤の複合体を用いることが有効であると考えられる。
- 5) 第 3 章および第 4 章と同様に、硬化コンクリートにおける気泡径 0.15mm 未満の空気量と耐久性指数に高い相関が認められた。本章の試験では気泡径 0.15mm 未満の空気量が 0.5% 以上であれば十分な凍結融解抵抗性が得られる傾向にあり、第 3 章で明らかとした閾値 1.36% に比べて小さい傾向にあった。これは、配合条件あるいは使用材料の違いによるものと考えられる。
- 6) 硬化コンクリートにおいて、細骨材の種類ごとに、コンクリート中のすべての空気量と気泡径 0.15mm 未満の空気量には高い相関があり、陸砂、陸砂と石灰砕砂、石灰砕砂の順にすべての空気量に占める気泡径 0.15mm 未満の空気量が高い結果となった。このことは、凍結融解抵抗性の観点からも細骨材の選定が重要であることが示唆された。

以上の各章で得られた結論から、本論文によって以下のことを明らかとした。

- (1) ダムコンクリートにおいて、中庸熟フライアッシュセメントを用いた場合で、粗骨材フルサイズコンクリートの目標空気量を 4.0% 以上に設定することで、硬化後の空気減少量を抑制でき、硬化後の空気量を確保できることから、所定の凍結融解抵抗性を有するコンクリートが得られる。また、粗骨材フルサイズコンクリートの目標空気量 4.0%

では、91 日圧縮強度の低下も小さい。よって、ダムコンクリートにおいて中庸熱フライアッシュセメントを用いる場合には、目標空気量の設定値をある程度大きくする必要はある。

- (2) 凍結融解抵抗性は、コンクリートの空気量や気泡間隔係数に高い相関があるものの、使用材料やコンクリート配合によってその関係が異なり、一義的に評価することが困難であった。本論文では、硬化後のコンクリートの空気のうち、気泡径 0.15mm 未満の空気量に着目することにより、普通ポルトランドセメントおよび中庸熱フライアッシュセメントの 2 種類のセメントを用いたコンクリートについて、耐凍害性を確保する条件を示すことができた。具体的には、耐凍害性を確保するための十分条件として、気泡径 0.15mm 未満の空気量の閾値は、普通ポルトランドセメントの場合は 0.45% 以上、中庸熱フライアッシュセメントの場合は 1.36% 以上である。
- (3) 遅延剤を多く使用した場合には、凝結遅延によりブリーディングが多く発生するものの、気泡間隔係数が大きくなることはなく、気泡径 0.15mm 未満の空気量も安定して存在する。これは遅延剤の効果により、ブリーディングによって気泡径 0.15mm 未満の空気量が消失しにくくなったものと推察され、その結果十分な凍結融解抵抗性が得られるものと考えられる。
- (4) いずれの AE 剤もブリーディング量が多いほど気泡間隔係数が大きくなり、AE 剤としてアルキルエーテル系陰イオン界面活性剤を用いた場合に、凍結融解抵抗性の著しい低下が認められた。一方で、高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤の複合体では十分な凍結融解抵抗性が得られた。このことから、フライアッシュを混合したセメントを用いる場合、耐凍害性を確保する上で、AE 剤に高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤の複合体を用いることが有効であると考えられる。
- (5) 硬化コンクリートでは細骨材の種類が重なっても、コンクリート中のすべての空気量と気泡径 0.15mm 未満の空気量には高い相関があり、陸砂、陸砂と石灰砕砂、石灰砕砂の順にすべての空気量に占める気泡径 0.15mm 未満の空気量が高い結果となった。このことは、凍結融解抵抗性の観点からも細骨材の選定が重要であることが示唆された。

これらの成果は、寒冷地に構築される水利施設で用いられるコンクリートの配合設計時およびコンクリート製造・施工時に留意すべき事項を明確にしているものと考えられる。特に、水路を改築する際にはプレキャスト部材が使用されることも少なくない。プレキャスト部材の場合には、特に過振動によってコンクリート中の空気を逸散する傾向にあることから、普通ポルトランドセメントを用いる場合でも、空気量を確保するだけでなく、本研究で得られた気泡径 0.15mm 未満の空気量の閾値(0.45%)以上とするように振動締固めを

行うことが重要であり、その条件を満足することによって、コンクリートに高い耐凍害性を付与できるものと考えられる。加えて、耐凍害性を確保するためのフライアッシュコンクリートの配合設計における留意点も明確にしていることから、寒冷地における水利施設へのフライアッシュコンクリートの利用拡充に資することができる。

以上の本研究で得られた結論を踏まえ、今後の課題と期待を以下に述べる。

本研究によって、凍結融解抵抗性に及ぼす要因を明確にし、耐凍害性を確保するための十分条件を明らかにした。しかし、この結果は、普通ポルトランドセメントと中庸熱フライアッシュセメントの2種類についてだけであり、今後は高炉セメントなど、他のセメントについても検討が必要であると思われる。また、今回見出した閾値は十分条件であり、今後、多くの研究者がこの研究成果を参考にして頂き、必要条件についても研究を進めて頂けることを切に願う。

今回の成果としては、耐凍害性に優れた AE 剤を明らかとしたこと、遅延剤が耐凍害性の向上に寄与していること、細骨材の種類が気泡径 0.15mm 未満の空気量に大きく影響し、結果として耐凍害性に寄与することなどを明らかとしたが、そのメカニズムや理由については十分とは言えず、今後さらに検討が必要である。

最後に、本研究が、寒冷地における水利施設をはじめとしたコンクリート構造物の耐凍害性の向上、フライアッシュコンクリートの凍結融解抵抗性の向上並びに凍害で劣化したコンクリートの補修技術の参考になれば幸いである。

謝 辭

謝 辞

本研究では多くのご指導とご協力を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

本研究は、水利施設のコンクリートの凍害の原因究明についてのものであり、農業土木分野においての学術的な価値や論文の内容について、鳥取大学農学部准教授の緒方英彦先生にご相談させて頂き、さらには島根大学生物資源科学部教授の長東勇先生にもご相談に乗って頂き、学位論文として取りまとめることができました。緒方英彦先生、長東勇先生には、本論文をまとめるにあたり、終始暖かい激励とご指導、ご鞭撻を頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。学位論文審査にあつては、主査として鳥取大学農学部准教授の緒方英彦先生、副査として島根大学生物資源科学部教授の長東勇先生、同准教授の石井将幸先生、鳥取大学農学部教授の北村義信先生、同教授の猪迫耕二先生に快く審査を引き受けて頂き、また貴重なご指導とご助言をいただきました。衷心より感謝申し上げます。

本研究は、小職が水利施設のコンクリートの凍害の原因究明に強い関心を持ち、鹿島技術研究所の林大介氏と橋本学氏、それに BASF ジャパンの山宮浩信氏、菅俣匠氏、作榮二郎氏にも研究に参加頂き、鹿島技術研究所と BASF ジャパンとの共同研究の成果として取りまとめたものです。研究を進めるにあたって、3年に渡り多くの議論や実験の実施等、数多くのご助力を頂きました。本論文の一部が2012年度のコンクリート工学会論文賞に選定され、この研究が高く評価されたことも学位論文の取りまとめに大きく貢献したのと思えます。ここに深く感謝いたします。

また、小職が昨年4月に本社土木管理本部に転勤となり、技術研究所を離れたにもかかわらず、ご理解を頂き、取りまとめに際して事務的な作業を快く承諾いただきました鹿島技術研究所土木材料グループ長の坂井吾郎氏、同主任研究員の橋本学氏に深く感謝いたします。特に、橋本学氏には取りまとめに際して、様々なご協力を頂き、本当に感謝しています。また、その事務的な作業を快く遂行して頂きました河原崎亜矢さん、植松玉衣さんにも感謝の意を表します。

常に良き親友であり、良き研究の同志である鹿島技術研究所建築生産グループ長の閑田徹志氏にも、様々なアイデアを頂き、本当に感謝しています。

新しい部署において、このような取りまとめにご理解を頂きました鹿島土木管理本部長茅野正恭氏、同副本部長高田悦久氏に心から感謝いたします。

最後に、家庭を守り、いつも理解者である妻、由紀子に感謝の意を表する次第です。

摘 要

[Abstract]

摘 要

寒冷地におけるコンクリートダムでは、コンクリート表面部の骨材がポップアウトやスケールリングを起こすなど、凍結融解作用によるものと考えられる劣化現象が多数見受けられる。コンクリートダムに用いられるコンクリートの骨材は、その規格が市販の生コンクリートで用いられる骨材より厳しく、良質なものが使用されている。また、ダムコンクリートの配合は、水セメント比が50%以下であり、かつ所定の空気量を確保したものであるため、一般的には耐凍害性に優れたコンクリートであると考えられている。しかしながら、ダムコンクリートが凍結融解作用によって劣化しやすい理由については明確になっていなかった。

その理由としては、次の二点が考えられた。

- ① 市販の生コンクリートと同様に、フレッシュコンクリートの空気量によって判断していた。すなわち、フレッシュコンクリートの空気量が所定量以上入っていれば、耐凍害性が得られると考えていたこと。
- ② 硬化後のコンクリートの空気量の判定として、気泡間隔係数を用いていたが、実際の気泡分布についての詳細な検討が行われていなかったこと。

そこで、本研究では、上記のことを踏まえて、以下の検討を行うことにより、ダムコンクリートが凍結融解作用によって劣化しやすいメカニズムを解明するとともに、ダムコンクリートの耐凍害性を向上させる方法について提案することを目的とした。

- ① 耐凍害性に及ぼす凝結過程の空気量変化の影響
- ② コンクリートの気泡組織と耐凍害性の関係
- ③ コンクリートの耐凍害性に及ぼすブリーディングの影響
- ④ 耐凍害性に及ぼす各種 AE 剤の空気安定性

本研究によって得られた知見を以下に概括する。

- (1) ダムコンクリートにおいて、中庸熟フライアッシュセメントを用いた場合で、粗骨材フルサイズコンクリートの目標空気量を4.0%以上に設定することで、所定の凍結融解抵抗性を有するコンクリートが得られる。よって、ダムコンクリートにおいて中庸熟フライアッシュセメントを用いる場合には、目標空気量の設定値をある程度大きくする必要がある。
- (2) 凍結融解抵抗性は、コンクリートの空気量や気泡間隔係数に高い相関があるものの、使用材料やコンクリート配合によってその関係が異なり、一義的に評価することが困難であった。本論文では、硬化後のコンクリートの空気のうち、気泡径0.15mm未満の空気量に着目することにより、普通ポルトランドセメントおよび中庸熟フライ

アッシュセメントの2種類のセメントを用いたコンクリートについて、耐凍害性を確保する十分条件として気泡径 0.15mm 未満の空気量の閾値を示すことができた。

- (3) 遅延剤を比較的多く使用した場合は、凝結遅延によりブリーディング量は多く発生するものの、気泡間隔係数が大きくなることはなく、気泡径 0.15mm 未満の空気量も安定して存在することを明らかとした。
- (4) フライアッシュを混合したセメントを用いる場合、耐凍害性を確保する上で、AE 剤に高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤の複合体を用いることが有効であることを明らかとした。
- (5) 硬化コンクリートにおいて、細骨材の種類によって、すべての空気量に占める気泡径 0.15mm 未満の空気量が異なることを明らかとした。

Abstract

There have been serious problems in irrigation and drainage facility concrete structures constructed with fly ash concrete in very cold regions due to freeze and thaw cycles. This is because fly ash concrete has inferior anti-frost resistance to normal concrete. These problems lead to degrading mass transfer resistance and resulting lower anti-carbonation resistance. However, in the current knowledge, mechanism of frost damage is not clearly known, on which we only assume some damage may be due to the freeze and thaw cycles from observation. Therefore this mechanism clarification is very important to adopt appropriate design in repairing, renewing, and performance-improving for the irrigation and drainage facility concrete structures in cold region.

Behind these backgrounds, the scope in this study is to propose methodologies to improve freeze and thaw resistance of fly ash concrete via clarifying its frost damage mechanism. This study focuses on characteristics of entrained-air structures in dam concrete which often involves fly ash. Furthermore, this study aims at contributing to promoting application of fly ash concrete in the irrigation and drainage facility concrete structures in cold region by proposing mix proportion design of the concrete to assure freeze and thaw resistance. Toward this goal, this study investigates next four issues.

- 1) Effects of air content change in fresh concrete during setting process on resistance against frost damage
- 2) Effects of air distribution structures in hardened concrete on the resistance.
- 3) Effects of breeding on the resistance
- 4) Effects of air content stability by selecting various air-entraining agent types on the resistance.

In the above issues 1) and 3), medium heat Portland cement concrete with fly ash is emphasized, whose problems are in air content instability and increasing bleeding. The above issues 2) and 4) are investigated to improve anti-frost resistance in fly ash concrete. Issues 2) specifically leads to stabilizing air bubble structures as well as air-bubble spacing factor. Issue 4) results in selecting air-entrained agent types to effectively improve anti-frost resistance.

As a result of the above investigation, following findings were obtained.

- I) Dam concrete involving moderate heat cement and fly ash require higher air contents higher than 4% to maintain satisfactory anti-frost resistance.
- II) Air content and air-void spacing factor are not only dominant parameters governing concrete's anti-frost resistance while having strong correlation with the resistance. Their effects on the resistance are different depending on constitutive materials and mix proportions. This study found air-void contents with diameter less than 0.15mm (under-0.15mm air contents, hereafter) are important, where required anti-frost resistance are realized by providing the contents more than certain threshold for normal concrete or that involving moderate heat cement and fly ash.
- III) For the case of relatively large amount of retarder is used, under-0.15mm air contents and

air-void spacing factor are stable while bleeding amount increases due to delaying setting time.

- IV) Concrete with fly ash found to be anti-frost resistance when involving a) long-Chain Alkylcarboxylate based Anionic Surface Active Agent or b) Nonionic Surface Active Agent as air entrained agent.
- V) Under-0.15mm air contents in hardened concrete are different influenced by fine aggregate types.

学会誌公表論文リスト

学位論文の基礎となる学会誌公表論文のリスト

－学術論文－

- [1] 坂田昇, 菅俣匠, 林大介, 橋本学: 中庸熱フライアッシュセメントを用いたコンクリートの耐凍害性に及ぼす凝結過程の空気量変化の影響, コンクリート工学論文集, Vol.22, No.3, pp.47-57, 2011. 【本論文; 第2章】
- [2] 坂田昇, 菅俣匠, 林大介, 橋本学: コンクリートの気泡組織と耐凍害性の関係に関する考察, コンクリート工学論文集, Vol.23, No.1, pp.35-47, 2012. 【本論文; 第3章】
- [3] 坂田昇, 橋本学, 菅俣匠, 緒方英彦: 中庸熱フライアッシュセメントを用いたコンクリートの耐凍害性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.35, No.1, pp.895-900, 2013. 【本論文; 第3章】
- [4] 坂田昇, 菅俣匠, 林大介, 作榮二郎: コンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼすブリーディングの影響に関する一考察, コンクリート工学論文集, Vol.23, No.2, pp.59-69, 2012. 【本論文; 第4章】
- [5] 坂田昇, 菅俣匠, 林大介, 作榮二郎: 中庸熱フライアッシュセメントを用いたコンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼす各種 AE 剤の空気安定性の検討, コンクリート工学論文集, Vol.24, No.2, pp.149-159, 2013. 【本論文; 第5章】

—参考論文—

- [1] 橋本学, 坂田昇, 林大介, 菅俣匠, 作榮二郎: フライアッシュコンクリートの耐凍害性向上に関する検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.66, pp.1021-1022, 2011.
- [2] 小川雄一郎, 橋本学, 林大介, 坂田昇, 菅俣匠, 作榮二郎: フライアッシュコンクリートの凝結過程における空気量の変化に関する検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.66, pp.1019-1020, 2011.
- [3] 山元長裕樹, 阿部高, 木村淳二, 大井篤, 柴田勝博, 橋本学, 坂田昇: ダムコンクリートの耐凍害性向上対策について (奥胎内ダム工事報告), 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.68, pp.335-336, 2013.