

導電性・電磁波遮蔽性を有する
コンクリート構造物の開発に関する基礎的研究

2013 年 7 月

高井 伸一郎

目 次

第1章 序論

1.1 本研究の背景および目的	1
1.2 本論文の構成	4
参考文献	5

第2章 既往の研究

2.1 コンクリートの電氣的性質に関する研究	6
2.1.1 電気抵抗率の測定方法	6
2.1.2 二電極法の測定条件が電気抵抗率に及ぼす影響	8
2.1.3 コンクリートの各種物性が電気抵抗率に及ぼす影響	8
2.2 導電材料を添加したコンクリートの導電性改善に関する研究	9
2.3 コンクリートの電磁波遮蔽性に関する研究	10
2.3.1 普通コンクリートの電磁波遮蔽性	10
2.3.2 導電材料を添加したコンクリートの電磁波遮蔽性	10
参考文献	10

第3章 炭素粉末を添加したモルタルのフレッシュ性状および力学的性質

3.1 概説	12
3.2 コンクリート用混和材料としての炭素粉末の概要	12
3.3 モルタルの配合要因に関する検討	16
3.3.1 実験計画	16
3.3.2 使用材料	16
3.3.3 示方配合	17
3.3.4 実験方法	17
3.3.5 炭素粉末を添加したモルタルのフレッシュ性状	19
3.3.6 モルタルの力学的性質	25
3.4 一般的なモルタル配合に関する検討	32

3.4.1	実験計画	32
3.4.2	使用材料	32
3.4.3	示方配合	33
3.4.4	実験方法	33
3.4.5	モルタルのフレッシュ性状	34
3.4.6	モルタルの力学的性質	37
3.5	結論	41
	参考文献	42

第4章 炭素粉末を添加したモルタルの導電性

4.1	概説	43
4.2	モルタルの配合および含水率が電気抵抗率に及ぼす影響	43
4.2.1	実験計画	43
4.2.2	使用材料および示方配合	44
4.2.3	実験方法	44
4.2.4	実験結果および考察	46
4.3	一般的なモルタル配合の導電性に関する検討	55
4.3.1	実験計画	55
4.3.2	使用材料および示方配合	56
4.3.3	実験方法	56
4.3.4	実験結果および考察	56
4.4	炭素粉末を添加した導電性モルタルの適用性	60
4.5	結論	61
	参考文献	61

第5章 炭素粉末を添加したモルタルの電磁波遮蔽性

5.1	概説	63
5.2	各試験の概要	64

5.2.1 簡易試験	64
5.2.2 自由空間法	66
5.2.3 透過試験	69
5.3 簡易試験の実験結果と考察	71
5.4 自由空間法の実験結果と考察	75
5.5 透過試験の実験結果と考察	81
5.6 炭素粉末を添加した電磁波遮蔽モルタルの適用性	84
5.7 結論	85
参考文献	87

第6章 炭素粉末を添加したモルタルの電磁波遮蔽性の予測手法

6.1 概説	88
6.2 複素比誘電率による試験方法の評価	88
6.2.1 透過試験による複素比誘電率の算出	88
6.2.2 複素比誘電率による透過試験の評価	92
6.2.3 複素比誘電率による自由空間法の評価	95
6.3 複素比誘電率に影響を及ぼす要因	97
6.4 炭素粉末を添加したモルタルの電磁波遮蔽性を予測する式の提案とその設計への適用	99
6.5 電磁波吸収材としての適用性	102
6.6 結論	104
参考文献	105

第7章 結論

7.1 結論	106
7.2 今後の課題	108
謝辞	110

第 1 章

序 論

第1章 序論

1.1 本研究の背景および目的

コンクリートが構造材料として人類に供された歴史は古く、エジプト・ローマ時代に遡るといわれている。古代ローマ人にとってコンクリートは革新的な材料であり、この時期に築造された「コロッセウム」や「パンテオン神殿」などは、コンクリートを使った歴史的建造物として現存している。コンクリートの製造方法および施工方法は当時と異なるものの、コンクリートは今もなお、社会基盤を構築する上で欠かすことのできない優れた構造材料として人類の繁栄に寄与している。

コンクリートに要請または要求されてきた性能は、古代ローマ時代から現代まで一貫して、強度、施工性、耐久性であり、これらの性能を改善するために継続的な研究開発が進められてきた。最近の研究では、コンクリートの強度を大幅に向上させることが可能となり、建築分野では実用化レベルで300MPaのコンクリートが実現している¹⁾。また、土木分野においても特殊短繊維を混入し、圧縮強度200MPa、引張強度10MPaを超える超高強度で、かつ高靱性、高耐久を付与した繊維補強コンクリートが開発され、コンクリート橋梁において、鉄筋不用の無筋コンクリート構造物を実現した²⁾。施工性については、スランプフローが60cmを超える高流動コンクリートの実用化により、打込み時の振動締固め作業の省力化が可能となった。一方で、ダム堤体構築時に振動ローラーで締固めを行うスランプゼロの超硬練りコンクリートがダムコンクリートに供用されている³⁾。耐久性向上に関しては、新しい混和材料や表面保護材の開発、新しい補修・補強工法が精力的に開発されて効果を上げている反面、アルカリ骨材反応や骨材の品質に起因する過度の乾燥収縮の対策など、未だ確立されていない面もある。

一方、近年の経済、社会システムの変化や価値観の多様化に伴い、コンクリートには従来からの要求性能である強度、施工性、耐久性に加えて、新たな性能として機能性が求められている。機能性とは、コンクリートに求められるニーズの多様化に対応して、様々な付加価値をコンクリートに持たせることである。例えば、ポーラスコンクリートは、これまでコンクリートに求められてきた高い水密性を保持するという性能とは全く正反対の性能が求められ、単位細骨材量を極端に減らし、多孔質のコンクリートとすることで透水性を高めることが評価され、その結果、植物の育成や微生物の生息を可能とした緑化コンクリートや吸音、排水性能に優れた舗装コンクリートの実用化をもたらした⁴⁾。さらに、近年では環境問題が重視され、環境負荷低減の観点から、コンクリートの構成材料として再生素材を有効活用することが求められている。例えば、石炭火力発電所から排出されるフライアッシュはコンクリート混和材料として流動性の改善、水和熱の低減、アルカリ骨材反応の抑制のために使用されている。

コンクリートに新たな機能性を持たせるためには、従来のコンクリートとは、発想が異なる機能ごとに配慮し、それを利用した新しい分野への用途開発が必要と考える。そこで、これまでコンクリートの機能として、ほとんど注目されてこなかった電氣的性質に着目し、将来的には導電

性や電磁波遮蔽を必要とする電気、電子分野での構造材料として利用していくことを視野に置き、導電性に優れたコンクリートや電磁波遮蔽の機能を有するコンクリートの開発を目指すものである。

なお、これまでにコンクリートの導電性を向上させる研究やコンクリートの電磁波遮蔽性を評価する研究についてはわずかながらもあるが、系統的に行った研究はなく、さらに、導電性および電磁波遮蔽性を有するコンクリートを実用化するための試験・評価方法、設計手法に関しては未だに確立されていないのが現状である。以下に現状のコンクリートの電氣的性質および電磁波遮蔽性について記す。

1) コンクリートの電氣的性質

コンクリートは完全乾燥状態では絶縁体であるが、水分を含むと電気抵抗を有する導電体となる。そのため、コンクリートは高い抵抗を有する導電材料として認識されてきたが、導電性をより高めることで新しい分野での利用の可能性がある。

コンクリートの導電特性を利用して開発・実用化されているものに電気化学的防食工法がある。電気化学的防食工法はコンクリート構造物の劣化を電気化学的な方法によって防止する工法で、電気防食工法、再アルカリ化工法、脱塩工法、電着工法が実用化されている。これらの工法はともにコンクリート表面または外部に陽極を設置し、コンクリートを介して内部の鉄筋に電流を流すことで、鉄筋腐食の防止、コンクリート中に水酸化物イオンを注入する再アルカリ化、塩化物イオンの陽極側への電気泳動を利用した脱塩、海水中のカルシウムイオンやマグネシウムイオンの析出によるひび割れ閉塞によって鉄筋コンクリートの耐久性を改善するものである。なお、電気化学的防食工法では、 $10\text{mA/m}^2 \sim 1\text{A/m}^2$ の電流密度で通電を行うが、コンクリートの導電性が向上すれば、低電圧で所定の電流密度を得ることができ、負荷エネルギーの低減やコストダウンにもつながり、陽極材としての適用も可能となる。また、コンクリートの導電性を高めることで通電による発熱を利用した道路床版の融雪、融氷パネル、さらには、構造物、機器、設備等を導体によって大地と電氣的に接続する接地電極として導電性の高いコンクリートを利用することも可能である。これまでの接地工法においては、連結式接地棒等を地表から打込む方法や裸電線を浅く水平に埋設する埋設地線が一般的であった。しかし、構造物の基礎コンクリートに導電性の高いコンクリートを接地電極として使用することで、大地と広い面で接触するため、大地に対する静電容量が大きくなり、インテリジェントビルの耐雷対策用の構造体接地として効果的である。また、導電性の高いコンクリート基礎を接地電極とすることで、近年増加しているオール電化住宅の漏電および感電防止に対応した複数接地極として利用も可能である。

2) コンクリートの電磁波遮蔽性

近年、携帯電話や無線 LAN の爆発的普及に伴って社会生活における電磁波環境は悪化の一途をたどり、外部から侵入する各種電磁波によって医療機器のトラブル、電子機器の誤作動といった

想定外の事例が頻発している。また、不特定多数の人が集まる劇場、映画館、コンサートホール等においても、携帯電話の着信音が原因のマナー違反は解消することがなく、施設管理者の最終的対応として、携帯電話の発着信を完全に防止する対策が考えられている。実際に工場では、ロボットや精密機械の誤作動対策として電磁波遮蔽を積極的に採用しているところもあり、建築物の必要な箇所に多額の費用と手間をかけて電磁波対策を施している。しかし、表-1.1.1に示すようにコンクリートに限れば、現状においてコンクリートは他の構造材料に比べて電磁波遮蔽能力に乏しいことがわかる⁵⁾。

表-1.1.1 各構造材料の携帯電話電波（800MHz/1.5GHz）に対する遮蔽性能⁵⁾

材 質	減衰量 (dB)
コンクリート壁 (厚さ: 12cm)	-2 ~ -7
コンクリートブロック (厚さ 12cm+両面 25mm のモルタル)	-4 ~ -8
鋼製ドア (厚さ 1mm の鋼板を折り曲げて加工した製品)	-19 ~ -27
スチールパーティション (簡易間仕切り+両面に厚さ 0.5mm の鋼板)	-20 ~ -39

注) 減衰量は実構造物における電磁波遮蔽試験の実測値

このようなコンクリートに対して、本来の耐荷力を担う能力に加えて、より高い電磁波遮蔽性を付与することができれば、コンクリートそのものによって直接的に電磁波を遮蔽することも可能となり、既存の電磁波対策工に比べて施工性の改善とともにコストダウンも図れる。

各産業分野においては、母体としては絶縁体であるゴムやプラスチック等を用い、これに導電性を付与する材料として、炭素や金属粒子（フィラー）等を添加する方法がある。これは、導電性に加えて、電磁波遮蔽性の改善も図る場合に用いられている方法である。炭素は非金属元素であり、単体および化合物の両方において極めて多様な形状をとることができる。また、炭素（黒鉛）の電気抵抗率は、 $13.75 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$ ⁶⁾で金や鉄等の金属材料のそれに比べると大きい。炭素の形状を変化させ、加工した炭素繊維やカーボンブラック、カーボンナノチューブ等は、導電性材料として幅広い分野で使用されている。これらの炭素系導電材料をコンクリートに添加することで、コンクリートの導電性や電磁波遮蔽性は改善できると考えられているが、導電性材料は非常に高価で、コンクリートにおいても多量に添加する必要があるならば、不経済になることや、炭素系導電材料をコンクリートに添加するといった発想の研究や開発事例がないことから実用化には至っていない。

以上の観点から本研究は、導電性および電磁波遮蔽性を有するモルタル、究極的にはコンクリートを開発するために、電気的性質を改善できる材料として石油精製時の副産物である炭素粉末を用いることに着目した。そこで、炭素粉末を添加したモルタルのフレッシュ性状および力学的性質について検討を行い、コンクリートにした場合に混和材料として適用できるか否かも含めてその影響を評価することにした。次に、モルタルの導電性と電磁波遮蔽性について、その性能を

評価するための試験法および評価手法について考察・検討を行い、炭素粉末を添加したモルタルの導電性、電磁波遮蔽性の評価を行った。

1.2 本論文の構成

本論文は全7章から構成される。

第1章「序論」では本研究の背景および目的と本論文の構成を示す。

第2章「既往の研究」では、モルタルおよびコンクリートの導電性に関して、これまでに行われてきた個々の試験法、評価方法を整理し、含水率、配合、温度等の要因がモルタルおよびコンクリートの導電性に及ぼす影響をまとめた。また、各種の導電材料を混入したモルタル、コンクリートの導電性および電磁波遮蔽性の改善効果について既往の研究をまとめた。

第3章「炭素粉末を添加したモルタルのフレッシュ性状および力学的性質」では、炭素系導電材料として選定した炭素粉末の製造方法および材料特性について述べ、炭素粉末を添加したモルタルのフレッシュ性状および力学的性質を評価し、普通モルタルとの類似点や相違点を明らかにするとともに、導電性、電磁波遮蔽性を有する材料として炭素粉末をモルタルに適用していくための配合設計について検討した。

第4章「炭素粉末を添加したモルタルの導電性」では、供試体に直流電圧を印加できる測定回路を試作し、モルタルの電気抵抗率を算出した。この電気抵抗率によってモルタルの配合、炭素粉末の添加率、含水率が導電性におよぼす影響を明らかにし、炭素粉末を添加したモルタルの電気抵抗率を指標とした照査によって配合設計を決定する手法を提案した。

第5章「炭素粉末を添加したモルタルの電磁波遮蔽性」では、炭素粉末を混入したモルタルの電磁波遮蔽性について、電磁波を熱エネルギーに変換できる電磁波吸収性および電磁波の透過を極端に小さくできる電磁波反射性を評価指標として検討を行った。

電磁波吸収性に関する評価は、第一段階として、電子レンジを用いた簡易試験を提案し、試験方法の評価を行い、炭素粉末の添加による効果を検討した。次に、第二段階として電磁波吸収性を定量的に評価するために、電磁気学的試験である自由空間法による試験を行い、簡易試験と電磁波吸収性評価の結果を比較し、炭素粉末の添加量、配合、含水率が電磁波吸収性に及ぼす影響を検討した。

電磁波反射性については、電磁波の透過率を簡易に測定できる測定装置を試作し、炭素粉末の添加量、配合、含水率などのモルタルの内的要因が透過率に及ぼす影響を分析した。

第6章「炭素粉末を添加したモルタルの電磁波遮蔽性の予測手法」では、透過試験を通して得られた結果より算出される複素比誘電率から自由空間法および透過試験の妥当性を検証し、その複素比誘電率を用いて炭素粉末を添加したモルタルの電磁波遮蔽性の予測式を提案した。

第7章「結論」では、本研究で得られた結論を総括するとともに、各章で得られた知見から導電性や電磁波遮蔽性の機能を有するモルタル、コンクリートの開発における評価、設計手法の提言を行い、本研究のまとめとした。

[第1章 参考文献]

- 1) 山本佳城, 黒岩秀介, 並木哲, 道城真太郎, 辰濃達, 河本慎一郎: 設計基準強度 250N/mm² 超高強度コンクリートの開発と適用, 大成建設技術センター報, 第45号, pp.18-1-18-4, 2012
- 2) 武者浩透, 大竹明朗, 関文夫, 大熊光, 児玉明彦, 小林忠司: 無機系複合材料 (RPC) を用いた酒田みらい橋の設計と施工, 橋梁と基礎, Vol.36, No.11, pp.2-11, 2002
- 3) 国府勝郎, 牛島栄, 森博嗣: 委員会報告「超硬練りコンクリート研究委員会報告」, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.1, pp.29-38, 1998
- 4) 玉井元治, 水口裕之, 畑中重光, 片平博, 国枝稔, 中澤隆雄, 柳橋邦生: 委員会報告 ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会の活動, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.13-22, 2003
- 5) 花田英輔, 安德恭彰, 権丈裕子, 奴田原ひとみ, 古賀美鈴, 沼尾吉裕, 小川健二, 野瀬善明: 携帯電話電波に対する病院建物壁の遮蔽能力, 第18回医療情報学連合大会 18th JCMJ, NOV.1998
- 6) 日本化学会編: 化学便覧 基礎編 改訂4版 丸善出版株式会社, 1993

第2章

既往の研究

第2章 既往の研究

2.1 コンクリートの電気的性質に関する研究

モルタルないしはコンクリートの電気的性質を直接的に評価した研究は皆無で、間接的に電気的性質を取り扱った研究としては、電気防食工法として実用化されている工法における断面修復材の電気抵抗率を測定すること、電気抵抗率の測定によってコンクリートの品質を評価する、あるいはコンクリート構造物の健全度診断手法を開発することを目的として行われていた。

電気防食工法は、コンクリート構造物の表面に陽極を設置し、コンクリート内部の鉄筋やPC鋼材などを陰極として直流電流を供給することで鋼材の腐食反応を抑制する方法である。電気防食による鋼材の腐食抑制は、鋼材が防食電流により適正量に分極することにより達成される。この防食電流による鋼材の分極は、鋼材自身の分極抵抗に影響し、分極抵抗が大きいほど所用の分極量を得るのに必要な防食電流は小さくなる。ただし、これは陽極と鋼材の間に存在するコンクリートの抵抗が均一であると仮定した場合である。コンクリートの抵抗に局部的な大小が存在すると、分極量に過不足が生じる。電気防食工法において、抵抗が変化するものとして、劣化したコンクリートの断面欠損部に使用した補修材料が挙げられる。補修材料である断面修復材が躯体コンクリートに混在すると、電流分布が不均一となり、防食効果が不完全となる。したがって、断面修復材の電気抵抗率を正確に測定することは防食電流の均一性確保の点から非常に重要となる。断面修復材の電気抵抗率測定方法は「電気化学的防食工法設計施工指針(案)」¹⁾に参考として示されている。しかし、測定方法によって電気抵抗率の測定値が異なることから、統一した測定方法が望まれ、その後、土木学会基準として「四電極法による断面修復材の体積抵抗率測定方法(案)(JSCE-K562-2008)」²⁾が制定された。

コンクリートの品質評価や健全度診断の手法として電気抵抗率を用いた研究は、これまで数多く報告されており、電気抵抗率の測定から含水量を推定することによって、コンクリートの中性化、鉄筋の発錆状況、アルカリ骨材反応の進行などコンクリートの健全度診断に関する情報を得ることが可能である。また、コンクリートの塩害に対する耐久性を照査するためには、塩化物イオンの拡散係数は不可欠な物性値であり、電気抵抗率を用いることによってコンクリート構造物における塩化物イオン拡散係数を予測する手法が検討されている³⁾。以下に、本研究の内容と密接に関係する電気抵抗率の測定方法および電気抵抗率に影響を及ぼす各種因子について、既往の研究の概要を示す。

2.1.1 電気抵抗率の測定方法

電気抵抗率の測定は、主に二電極法(図-2.1.1 参照)⁴⁾または四電極法(図-2.1.2 参照)⁴⁾が用いられている。四電極法の測定に関する基準は「四電極法による断面修復材の体積抵抗率測定方法(案)(JSCE-K562-2008)」²⁾に示されおり、実構造物の断面修復材およびコンクリートに対しても準用でき、コンクリートの体積抵抗率の測定方法に関する記述もされている。しかしながら、実構造物におけるコンクリートや断面修復材の体積抵抗率を同規準(案)により測定する場合は、

試験方法の都合上コア試料を採取する必要がある。そのため、同基準(案)の適用は、非破壊かつ多点の測定を必要とするような調査には適切ではないといえる。このことは、二電極法でも同様のことがいえる。実構造物のコンクリートや断面修復材の体積抵抗率を非破壊かつ多点で測定する方法としては、等間隔に並んだ四つの電極を測定対象面に押し当て、外側の電流電極から交流電流を印加し、測定対象に流した交流電流と電位差電極間の電位差を測定して評価する方法(以下、四プローブ法)がある(図-2.1.3 参照)⁵⁾。四プローブ法は測定方法が簡便であるため、広く使用されている。

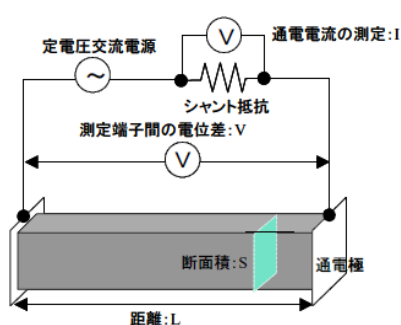


図-2.1.1 二電極法の測定概要⁴⁾

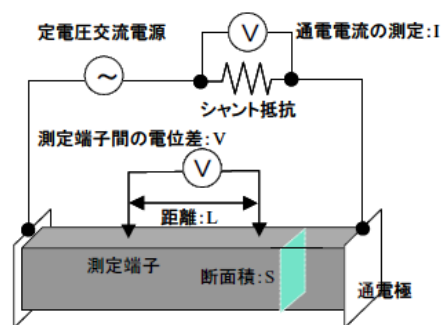


図-2.1.2 四電極法の測定概念⁴⁾

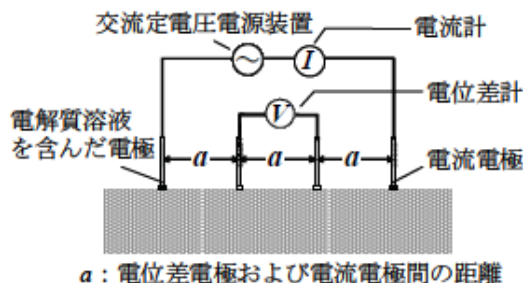


図-2.1.3 四プローブ法の測定概要⁵⁾

これらの電気抵抗率を測定する方法について、川俣らは、気中養生の同一供試体を用いて二電極法と四電極法から得られた電気抵抗率を比較している⁴⁾。その結果、四電極法は電極を接触させた直後からほぼ安定した測定値が得られたのに対して、二電極法では電極接触後からかなり大きな値を示し、約10分程度で四電極法と同等の値に収束している。四電極法は通電極間の中央で測定端子を用いて電位差を測定するため、通電極の接触抵抗が測定値に及ぼす影響は小さいが、二電極法では通電極間の電位差から抵抗率を求めるため、通電極の接触抵抗が影響するとしている。光本らは、高温条件下における二端子法と四端子法によって得られる電気抵抗率の値を比較し、電気抵抗率は簡便な試験法である二電極法によって測定可能であることを示した⁶⁾。

2.1.2 二電極法の測定条件が電気抵抗率に及ぼす影響

コンクリートの品質評価や耐久性診断の一手法として電気抵抗率の測定を行った研究では、四電極法に比べて測定が容易な二電極法を用いたものが多い。しかし、二電極法は四電極法とは異なり、明確な測定基準がないため、各研究間で電流の種類(直流, 交流)、電極の種類、測定端子の間隔、通電電極の接触方法、周波数、印加電圧等の測定条件が異なっている。そこで、二電極法について、測定条件の相違が電気抵抗率に及ぼす影響に関する研究が行われている。

鹿島らは、二電極法を用いてコンクリート供試体の抵抗計測を交流と直流で行い、その結果、電気抵抗率は交流では計測開始後すぐにほぼ一定値に収束するのに対し、直流では収束するまでの時間が遅いこと、さらに直流で計測した電気抵抗率は交流で測定したものより大きいことを明らかにしている⁷⁾。北峯らは、電極付近の電極反応に伴う分極による影響が加わるため、直流で測定した電気抵抗率は交流で測定したものよりも大きくなるという同様の結果を得ている⁸⁾。

野田らは、周波数を1MHz～5MHzの間で変化させた試験を行い、周波数が大きくなるほど比導電率(電気抵抗率の逆数)は大きくなるとしている⁹⁾。福上らは、「四電極法による断面修復材の体積抵抗率測定方法(案)(JSCE-K562-2008)」に記載されている周波数帯(60～100Hz)を含む5MHzまでの電気抵抗率を測定した結果、高周波になるほど電気抵抗率は小さくなり、そのばらつきは低周波数領域で大きく、高周波数領域で小さくなるとしている¹⁰⁾。

2.1.3 コンクリートの各種物性が電気抵抗率に及ぼす影響

モルタルないしはコンクリートの電気抵抗率は、含水率等の外的要因、配合、混和材の種類等の内的要因によって変化することが既往の研究で明らかにされている。モルタルおよびコンクリート中の水分量が電気抵抗率に及ぼす影響について、親本らは、四電極法を用いて電気抵抗率を測定し、電気抵抗率は式(2.1.3)で定義される相対含水率が小さいほど大きく、相対含水率が40～50%付近で急激に増大するとしている¹¹⁾。

$$w(\%) = \frac{m - m_s}{m_t - m_s} \times 100 \quad (2.1.1)$$

w : 相対含水率 (%)

m : 試験時の試験体質量

m_s : 試験体の絶乾質量

m_t : 浸漬終了直後に表面をウェスで軽く拭いた状態の質量 (相対含水率 100%)

生田らは、直流で計測した電気抵抗率と含水率との関係を3つの領域に分類し、含水率5～7%では含水率の増加に伴って電気抵抗率は直線的に減少し、含水率が電気抵抗率に与える影響が大きい領域、含水率7%以上では一定値を示し、含水率が電気抵抗率に与える影響は小さくなる領域、含水率5%以下では、わずかな含水率によって電気抵抗率が大きく変化する領域としている¹²⁾。

水セメント比が電気抵抗率に及ぼす影響について、榎原らは、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの飽水状態における電気抵抗率を測定し、電気抵抗率は水結合材比の増加に伴って減少することを明らかにしている¹³⁾。

細骨材、粗骨材が電気抵抗率に及ぼす影響について、北峯らは、20°Cで水中に浸漬したセメントペースト、モルタル、コンクリートの電気抵抗率を比較し、セメントペーストよりもモルタルで、モルタルよりもコンクリートで電気抵抗率が大きくなるとしている¹⁴⁾。また、福上らは、周波数 5MHz における電気抵抗率に着目し、電気抵抗率はセメントペーストよりもモルタルで、モルタルよりもコンクリートで大きく、細骨材、粗骨材の混入によって大きく影響を受けるとしている¹⁰⁾。

結合材の種類が電気抵抗率に及ぼす影響について、榎原らは、普通ポルトランドセメントの一部を混和材料で置換（ここでは50%置換）することによって電気抵抗率は増加し、普通ポルトランドセメント単身<フライアッシュ(50%置換)<高炉スラグ微粉末(50%置換)<シリカヒューム(50%置換)の順に電気抵抗率が大きくなるという結果を得ている¹³⁾。

2.2 導電材料を添加したコンクリートの導電性改善に関する研究

コンクリートに導電材料を添加して導電性を高める試みは、一般的なコンクリートよりも電気抵抗率の低いものを開発し、導線の被覆材や接地電極として利用する試みと、コンクリート自体の発熱特性を高め、その発熱特性を様々な用途に利用しようとする試みに大別できる。

接地電極として利用する研究は、三田らによる戸建て住宅の鉄筋コンクリート基礎を接地電極として利用することを目的とするもので、モルタルに砕石粉、廃瓦、廃土管等の産業廃棄物、石炭火力発電所で発生するEP灰（Electron Particle）等を混入し、電気抵抗率の低減効果を検討している。その結果、砕石粉を混入したモルタルの導電性は改善されるとしている。EP灰も電気抵抗率を小さくするが、モルタルの圧縮、曲げ強度が小さく、住宅基礎として利用するには改善が必要であるとしている¹⁵⁾。

発熱材料としての研究は、山崎らによって行われており、コンクリート自身が発熱すれば、冬季における歩道や橋面の凍結防止や融雪などがより合理的に行えるとして、導電材料にピッチ系炭素繊維を混入したセメントペーストの試験を行い、導電性は炭素繊維を混入することにより著しく高まり、炭素繊維を容積比で2%混入することによって発熱機能を期待できること、導電性は繊維径や繊維長に依存して変化するが、最も効率が良い炭素繊維のアスペクト比が存在することを明らかにしている。通電による発熱性状は、温度は通電開始直後から上昇し始め、通電30分後には約15°C上昇するが、この間、電圧、電流は一定値を保ち、安定した発熱性能を有していることを示した¹⁶⁾。牧角らは、面的な広がりがある場合にも通電性が確保され発熱効果が得られるか否かを検証するため、ピッチ系炭素繊維（径13μm、糸長10mm）を容積比で3%混入したモルタルの平板による通電試験を行い、平板においても消費電力が効率よく温度上昇に転換され、発熱部材として適用できる可能性がある¹⁷⁾としている。

2.3 コンクリートの電磁波遮蔽性に関する研究

2.3.1 普通コンクリートの電磁波遮蔽性

コンクリートの電磁波遮蔽性に関する既往の研究は、低周波数帯を対象とした高層建築物によるテレビ電波の反射によって発生する受信障害¹⁸⁾や、2GHz以上の高周波数帯を対象とした大型橋梁の下部工コンクリートに起因するレーダー電波障害を対象としたもの¹⁹⁾があるが、配合等が異なる種々のコンクリートの電磁波遮蔽性について、配合を含めた要因との関連で統計的かつ正確に把握・分析した研究例は皆無である。これは、コンクリートが複合材料であることにより、その電磁波遮蔽性がセメントや骨材などの使用材料、配合、さらにはコンクリートの含水量などによって変化することの一因している。また、電磁波遮蔽性を定量的に評価する試験方法がシート等の薄肉断面を対象とするものが一般的であるため、コンクリートのような厚肉断面には適用できないことも原因となっている。

2.3.2 導電材料を添加したコンクリートの電磁波遮蔽性

モルタルやコンクリートの電磁波遮蔽性を改善して、電磁波制御の機能を付与するための研究はほとんどおこなわれておらず、白川らは、水素製造時に副次的に生成されるカーボンナノチューブを添加したモルタルに家庭用電子レンジを用いてマイクロ波を照射し、その結果、カーボンナノチューブの添加による電磁波吸収効果を確認している²⁰⁾。

三木らは、モルタルに備長炭粉末を混入し、その添加量および供試体厚さが電磁波吸収特性に及ぼす影響を検討している²¹⁾。その結果、備長炭粉末の増加とともに電磁波吸収量が増大することより、備長炭粉末を混入したモルタルは電磁波吸収体として利用できる可能性があることを示している。これらのカーボンや炭素繊維を混入したモルタルの電磁波特性に関する研究は、ほとんどが材料の研究開発の段階であり、配合や試験体の含水状態に関する情報がほとんどないこと、さらには従来の試験方法で測定する場合、モルタルの試験体としては極めて薄い断面を採用しているため、実施工時に使用される際の厚みを有するモルタルやコンクリートを用いても同様の試験方法が適用可能か、また、同一の結果を得ることができるかどうかの確認・検証が必要である。

[第2章 参考文献]

- 1) 土木学会：電気化学的防食工法設計施工指針（案），コンクリートライブラリー107，2001
- 2) 土木学会基準：四電極法による断面修復材の体積抵抗率測定方法(案)(JSCE-K562-2008)，2010年制定 コンクリート標準示方書[基準編]土木学会基準および関連基準，pp.406-411
- 3) 榎原彩野，齋藤祐貴，皆川浩，久田真：乾湿に伴う含水状態の変化がモルタルの電気抵抗率の測定値に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.701-706，2010
- 4) 皆川浩，榎原彩野，久田真：電気抵抗率によるモルタルの塩化物イオン拡散係数の推定手法に関する基礎的研究，セメント技術大会講演要旨，No.62，pp.232-235
- 5) 川俣孝治，守屋進，内藤英晴，皆川浩：セメント系材料の電気抵抗率測定方法に関する基

- 礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1107-1112, 2004
- 6) 光本真一, 山崎雄也, 福岡眞澄, 高田龍一: 2端子法を用いたコンクリートの電気計測, 宇部工業高等専門学校研究報告, 第49号, pp.5-8, 平成15年3月
 - 7) 鹿島孝之, 河野広隆, 渡辺博史, 田中良樹: コンクリートの電気抵抗による耐久性評価の基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp895-900, 1999
 - 8) 北峯博司, 関博, 金子雄一: コンクリートの含水比と抵抗率に関する実験的研究, 土木学会第45回年次学術講演会, V-374, pp774-775, 1990
 - 9) 野田一弘, 河野広隆, 久田真, 森濱和正: 交流作用時の硬化コンクリートの電氣的性質に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.1, pp575-580, 2003
 - 10) 福上大貴, 水越睦視, 太良尾浩生, 上松航星: コンクリートの電気抵抗率の測定方法およびその影響因子に関する検討, 土木学会第67回年次学術講演会, V-037, pp73-74, 2012
 - 11) 親本俊憲, 横関康祐, 平石剛紀, 宮里心一: モルタルの電気抵抗特性に関する電気化学的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.27, No.1, pp907-912, 2005
 - 12) 生田周志, 山本貴志, 服部篤史, 宮川豊章: 各種要因がコンクリートの比抵抗に与える影響に関する実験的研究, 土木学会第59回年次学術講演会, V-095, pp187-188, 2004
 - 13) 榎原彩野, 皆川浩, 久田真: モルタルの電気抵抗率と塩化物イオン拡散係数との関係に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.30, No.1, pp789-794, 2008
 - 14) 北峯博司, 関博, 金子雄一: コンクリートの含水比と抵抗率に関する実験的研究, 土木学会第46回年次学術講演会, V-89, pp194-195, 1991
 - 15) 三田紀之, 山崎尚志, 渡辺信公: 接地効果のある戸建住宅用コンクリート基礎に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1013, pp25-26, 2006
 - 16) 山崎陽一, 牧角龍憲, 横田明典: 炭素繊維混入モルタルの発熱機能に関する基礎的実験, 土木学会西部支部研究発表会 V-61, pp530-531, 2004
 - 17) 牧角龍憲: ピッチ系炭素繊維混入によるコンクリートの発熱機能の付加, 土木学会第60回年次学術講演会, V-334, pp667-668, 2005
 - 18) 秋田慶一: コンクリートの電気定数とテレビ電波反射特性, 電子通信学会技術報告, EMCJ78-38, pp47-53, 1978
 - 19) 清水康敬: Xバンドにおけるコンクリートの誘電率と電波吸収特性, 電子通信学会技術報告, EMCJ82-71, pp47-53, 1983
 - 20) 白川龍生, 岡田包儀, 狩野平三郎, 岡崎分保, 多田旭男, 小島直人: 副次産物として得られる高性能ナノカーボンを用いたモルタル供試体の開発, 土木学会第65回年次学術講演会, V-475, pp949-950, 2010
 - 21) 三木雅道, 小濱田卓, 岡室智行, 菊池丈幸, 畠山賢一: 備長炭粉末を含むセメントモルタル板の電磁波吸収特性, 粉体および粉末冶金52(8), pp635-639, 2005

第3章

炭素粉末を添加したモルタルの フレッシュ性状および力学的性質

第3章 炭素粉末を添加したモルタルのフレッシュ性状および力学的性質

3.1 概説

第2章の既往の研究において、モルタルないしはコンクリートの電気的性質を改善するために混和材として炭素系の導電材料が使用されている試みのあることを示した。この場合、炭素系の導電材料として、炭素短繊維を使用したものが多いが、炭素繊維は高価でもあり、コンクリートに大量に添加するとなると経済的に成り立たない。そこで、本研究では、炭素繊維にかわるものとして「炭素粉末」に着目し、これを混和材として用いることを試みた。すなわち、炭素粉末をコンクリート混和材料として利用できれば、比較的低価格でもってコンクリートに導電性や電磁波遮蔽性を付与した材料の開発が期待できる。

そこで、本章では、まず、コンクリート用混和材料としてこれまで利用実績がなかった炭素粉末をコンクリート混和材料としてモルタルに用い、そのフレッシュ性状と力学的性質を通常の(普通)モルタルのそれらと比較検討し、これら物性の類似点や相違点を明らかにするとともに、導電性、電磁波遮蔽性を有する材料として炭素粉末をモルタルに適用していくための配合設計について検討した。

3.2 コンクリート用混和材料としての炭素粉末の概要

炭素粉末の原料はコークスである。図-3.2.1にコークスの製造における化学構造変化の概念を示す¹⁾。コークスは石油から様々な製品を抽出した後の残さ物である。工業的には高温、低圧下で触媒を使用せずに重質油を熱分解し、得られるのが生コークスである。この生コークスは揮発分と水分を含んでいるため、800~1700℃で焼成することによって化学構造が変化し、結晶質になっていく。焼成時間が長いほど強固な結晶となり、高温で焼成したものがピッチ系炭素繊維の原料となる。一方、1200~1400℃程度の比較的低温で焼成されたもので炭素繊維ほど高い強度を発揮しないものがニードルコークスとなる(写真-3.2.1参照)。このニードルコークスは容易に粉砕することが可能で、粉状に粉砕・加工したものが炭素粉末である(写真-3.2.2参照)。これまで、ニードルコークスの一部は電炉製鋼用のスパーク電極や蓄電材料として利用されてきたが、大部分は未利用資源となっている。

以上のように、炭素粉末は高品質な結晶構造をもつ炭素繊維と異なり、コンクリート中に添加しても力学的性質の改善を期待することは難しいが、コンクリートへの導電性や電磁波遮蔽性といった機能に限定すれば炭素繊維と比較して低コストで要求性能を満足できる可能性がある。

1) 製造方法¹⁾

図-3.2.2に炭素粉末の製造プロセス概念図を示す。一般的に重質油の処理は、水素添加分解型、熱分解型、ガス化型の3つのタイプに分類されるが、ディレードコーキングプロセスは典型的な熱分解型であり、世界の重質油処理の3割程度を占めている。ディレードコーキングプロセスは高温、

低圧下で触媒を使用せずに重質油を熱分解し、分解ガス、分解油、コークスを製造するプロセスであるが、不純物が少なく芳香族性の高い原料油を厳選し、製造条件を最適化すれば、軽質油やガスを得ながら、付加価値の高い炭素材であるニードルコークスが得られる。

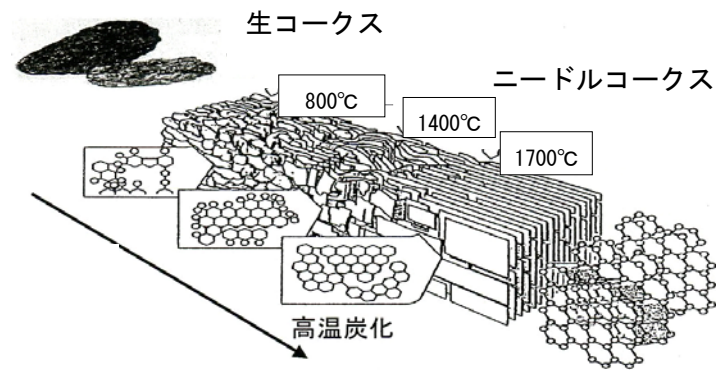


図-3.2.1 コークスの化学構造変化¹⁾

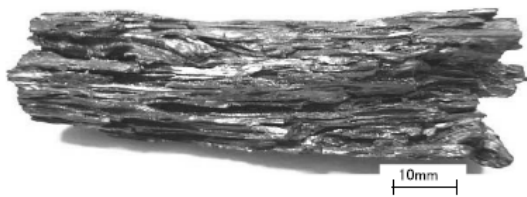


写真-3.2.1 ニードルコークスの外観¹⁾



写真-3.2.2 粉末炭素

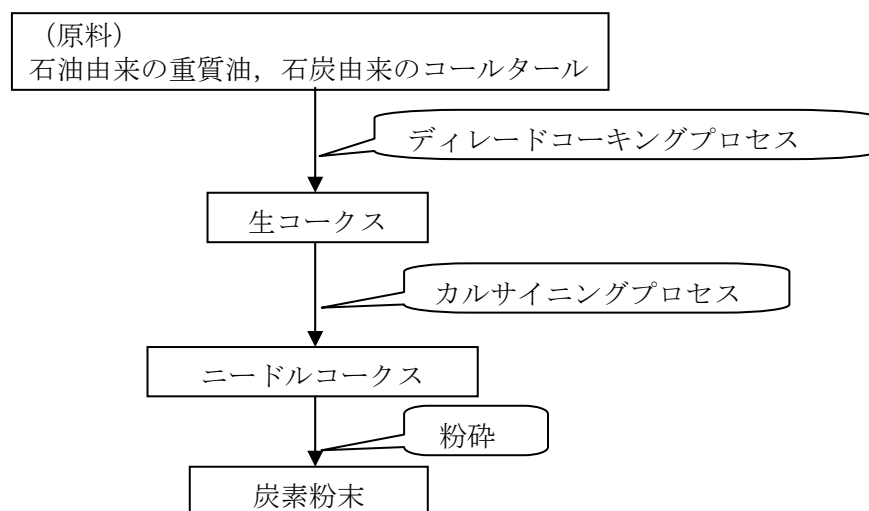


図-3.2.2 粉末炭素の製造プロセス概念図

2) 炭素粉末の物理・化学的性質

本研究で使用した炭素粉末および普通ポルトランドセメントの物理試験結果を表-3.2.1に示す。実験年度によって製造ロットが異なる炭素粉末を使用した。炭素粉末の密度および比表面積には差異がないといえる。また、普通ポルトランドセメントと比較すると、炭素粉末は密度および比表面積ともに普通ポルトランドセメントのそれよりも小さく、このことより、炭素粉末はセメントよりも軽かつ粒子は粗いものであるといえる。

表-3.2.1 炭素粉末の物理的性質

名称	製造ロット	密度 (g/cm ³)	比表面積 ^{※)} (cm ² /g)	格子定数 (nm)	結晶子サイズ (nm)
炭素粉末	I	2.12	1310	0.3440～	5
	II	2.13	1310	0.3442	
普通ポルトランドセメント		3.15	3380	—	—

※)炭素粉末の比表面積はブレーン法によって測定を行った。

炭素粉末の元素分析結果を表-3.2.2に示す。表より、炭素粉末は99%以上が炭素で、水素・硫黄・窒素・灰分等の他の成分はごく微量であるといえる。

表-3.2.2 炭素粉末の元素分析結果

成分	測定方法	検出量 (mass%)
炭素	JIS M 8819	99.4～99.6
水素		0.04～0.05
硫黄		0.2～0.3
窒素		0.2～0.3
灰分	JIS M 8812	0.01～0.02

3) 特定有害物質

炭素粉末は本来石油精製時の残さ物であり、炭素粉末中に水銀や鉛といった重金属が含まれている可能性がある。そこで、土壌汚染分析で用いられている溶出量試験および含有量試験を用いて特定有害物質に関する定量分析を行った。その結果を表-3.2.3に示す。表より、いずれの測定値も基準値を下回っており、炭素粉末中に含まれる有害物質は無視できるほど極微量で、混和材として使用しても環境的にも人的にも問題はないといえる。

表-3.2.3 特定有害物質に関する溶出量試験および含有量試験結果

試験名	測定の対象	単位	測定の結果	基準値	判定
溶出量試験	カドミウム及びその化合物	mg/L	0.001 未満	0.01 以下	○
	六価クロム化合物		0.005 未満	0.05 以下	○
	シアン化合物		検出せず ^{*1}	検出されないこと	○
	水銀およびその化合物		0.00006	0.0005 以下	○
	アルキル水銀 ^{*2}		検出せず ^{*1}	検出されないこと	○
	セレン及びその化合物		0.005 未満	0.01 以下	○
	鉛及びその化合物		0.002	0.01 以下	○
	砒素及びその化合物		0.005 未満	0.01 以下	○
	ふっ素及びその化合物		0.08 未満	0.8 以下	○
	ほう素及びその化合物		0.2 未満	1 以下	○
含有量試験	カドミウム及びその化合物	0.001 未満	150 以下	○	
	六価クロム化合物	0.005 未満	250 以下	○	
	シアン化合物	検出せず ^{*1}	50 以下	○	
	水銀およびその化合物	0.00006	15 以下	○	
	セレン及びその化合物	0.005 未満	150 以下	○	
	鉛及びその化合物	0.002	150 以下	○	
	砒素及びその化合物	0.005 未満	150 以下	○	
	ふっ素及びその化合物	0.08 未満	4,000 以下	○	
	ほう素及びその化合物	0.2 未満	4,000 以下	○	

*1 検出せずとは本測定方法における定量下限値未満の値である。

*2 アルキル水銀については水銀及びその化合物の測定結果より判断している。含有量試験の結果は、乾燥試料あたりの濃度として表示。

4) 表面観察

炭素粉末表面の SEM 画像を写真-3.2.3 に示す。写真より、炭素粉末は多孔質で積層構造になっており、積層部分は層状はく離を生じる可能性がある。また、炭素粉末の粒子形状および大きさは均一ではなく、角張りが多いこともわかる。

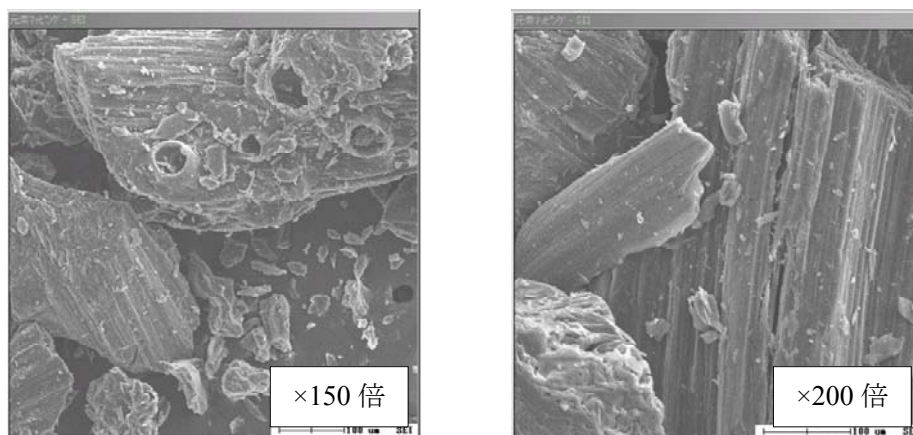


写真-3.2.3 炭素粉末表面の SEM 画像

3.3 モルタルの配合要因に関する検討

3.3.1 実験計画

実験計画を表-3.3.1に示す。本研究では、モルタルに本来の強度に加えて導電性や電磁波遮蔽性を持たせ、さらに将来はコンクリートにも展開していくことを目的とし、最も広く用いられているモルタル配合（砂セメント質量比 S/C=2.0）に対して、実験要因として水セメント比と炭素粉末添加率を選定した。すなわち、S/C=2.0とした炭素粉末無添加の通常モルタルに対して、15打フロー値が200mmになるように単位水量を決定したモルタルを基準モルタルとし、このモルタルに対しては細骨材の一部として炭素粉末を添加し、炭素粉末の添加率を変化させた配合のモルタルを対象として試験を行った。なお、W/C=50, 60, 70%における単位水量はいずれも $W=316\text{kg/m}^3$ で、炭素粉末の添加率はモルタルの容積比で0, 5, 10, 15, 20%とした。

表-3.3.1 実験計画

W/m ³ (kg)	W/C (%)	炭素粉末添加率 (%)
316	50	0, 5, 10, 15, 20
	60	
	70	

実験項目と測定方法を表-3.3.2に示す。モルタルはフレッシュ性状として、フロー値、空気量、ブリーディング、凝結時間を、硬化後の力学的性質として、圧縮、曲げの各強度および弾性係数を測定した。

表-3.3.2 実験項目及び測定方法

実験項目	測定方法
フレッシュ性状	モルタルフロー試験 (JIS R 5201-1997)
	空気量試験質量法 (JIA A 1116)
	ブリーディング試験 (JSCE-F532-1999)
	プロクター貫入試験 (JIS A 1147)
力学的性質	圧縮強度 (JSCE-G505-1999)
	静弾性係数 (JSCE-G505-1999)
	曲げ強度 (JIS R 5201)

3.3.2 使用材料

表-3.3.3に使用材料とその物理的性質を一括して示す。本実験においては、セメントには普通

ポルトランドセメントを、細骨材には湖底砂を使用した。なお、モルタルにおいては練混ぜ時にエントラップドエアが取込まれやすく、これがモルタルのフレッシュおよび硬化性状に及ぼす影響を少なくするために、消泡剤を使用し、モルタルの空気量は1%以下になるようにした。

表-3.3.3 使用材料の一覧

セメント	普通ポルトランドセメント 密度：3.15g/cm ³ ，比表面積：3380cm ² /g
細骨材	湖底砂 表乾密度：2.62g/cm ³ ，絶乾密度：2.60g/cm ³ 粗粒率：2.43，吸水率：0.67%
消泡剤	ポリアルキレングリコール誘導体 密度：0.98～1.02g/cm ³
炭素粉末	粒径：0.3mm 以下 密度：2.12，2.13g/cm ³ 比表面積：1310cm ² /g

3.3.3 示方配合

モルタルには炭素粉末を添加しない普通モルタルに対して最も広く使用されている配合の砂セメント比 S/C=2.0 を採用し、さらに普通モルタルに対してフロー値 15 打における目標値を 200mm として試し練りに基づいて決定された単位水量はいずれの W/C においても W=316kg であったのでこれを基準配合とし、この基準配合に対して炭素粉末を砂の一部として使用することにし、その添加率はモルタルの容積比で 0，5，10，15，20%とした。したがって、モルタルとしては、①同一炭素粉末添加率においては、水セメント比が小さいほどセメントペーストが多く、②同一水セメント比においては、炭素粉末添加率が大きいほど細骨材が少ない、モルタルとなる。また、いずれのモルタルにおいても空気量がフレッシュ性状や硬化性状に及ぼす影響をなくすために消泡剤を添加し、空気量が1%以下となるように調整した。なお、消泡剤をセメント量の0.06%まで添加しても、空気量が1%以下にならない場合には、消泡剤を0.06%まで添加した状態のままのモルタルを使用して試験を行うことにした。

モルタルの示方配合を表-3.3.4に示す。

3.3.4 実験方法

1) 骨材の物理的性質を把握する試験

骨材の物理的性質を把握するための骨材試験として、密度試験（JIS A 1109：1999），吸水率試験（JIS A 1109:1999），ふるい分け試験（JIS A 1102:1999）を行った。

2) 炭素粉末の物理的性質を把握する試験

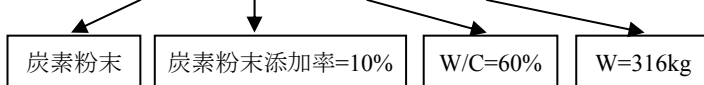
炭素粉末の物理的性質として、密度と比表面積を測定することにし、密度はセメントの密度試験（JIS R 5201）に準じて、比表面積試験はセメントの比表面積試験（JIS R 5201）であるブレン法に基づいて測定した。

表-3.3.4 示方配合

配合名 ¹⁾	W/C (%)	炭素粉末添加率 (%)	単位量(kg/m ³)					
			水	セメント	細骨材	炭素粉末	消泡剤	
CP-0-50-316	50	0	316	632	1266	0	0.379	
CP-5-50-316		5			1135	106	0	
CP-10-50-316		10			1004	212	0	
CP-15-50-316		15			873	318	0.379	
CP-20-50-316		20			742	424	0.379	
CP-0-60-316	60	0		316	527	1354	0	0.316
CP-5-60-316		5				1222	106	0.0
CP-10-60-316		10				1092	212	0.0
CP-15-60-316		15				960	318	0.316
CP-20-60-316		20				830	424	0.316
CP-0-70-316	70	0	316		451	1417	0	0.271
CP-5-70-316		5				1285	106	0.0
CP-10-70-316		10				1155	212	0.0
CP-15-70-316		15				1023	318	0.271
CP-20-70-316		20				893	424	0.271

1) 配合名：CP（Carbon Powder 炭素粉末）－炭素粉末添加率－水セメント比（W/C）－単位水量（W）

例えば、CP - 10 - 60 - 316



3) モルタルの練混ぜ

フレッシュモルタルの練混ぜは5ℓの可変式モルタルミキサーを用いて行った。練混ぜに際しては、予めセメントと炭素粉末を混合しておき、練り鉢に投入後、練混ぜ水を注水して30秒間低速で練り混ぜる。その後、30秒間で細骨材を投入し、30秒間高速で練り混ぜる。その後、90秒間練混ぜを休止し、パドルや練り鉢に付着したモルタルをかき落とす。再び高速で60秒間練り混ぜる。練混ぜ時間は休止時間を含めて4分である。練混ぜが終わったら練り鉢を取り外し、さじでよくかき混ぜる。このようにして、均一になったモルタルを用いて各試験に供した。

4) モルタルのフレッシュ性状とその試験方法

モルタルのフレッシュ性状として、フロー試験によってフロー値を、空気量試験（JIS A 1116）によって空気量を、プロクター貫入試験（JIS A 1147）によって始発と終結時間を測定した。また、モルタルのブリーディングと初期（打設から 24 時間）の収縮率の測定も行った。

5) 供試体の作製方法

モルタル供試体は圧縮強度および静弾性係数測定用の円柱供試体と、曲げ強度測定用の角柱供試体である。円柱供試体（ $\phi 50 \times 100\text{mm}$ ）の作製に際しては、モルタルを 2 層に分けて打設し、先端が半円状の突き棒で一層毎に 25 回突き固めた後、木槌で型枠の側面をたたいて作製した。一方、角柱供試体の作製に際しては、鋼製の型枠に 2 層に分けて詰め、各層はフロー値に相応して規定されている所定の突き数（表-3.3.5 参照）だけ角形の突き棒でモルタルを突いた。

表-3.3.5 フロー値範囲と突き数

	フロー値範囲 (mm)			
	169 以下	170~199	200~209	210 以上
突き数 (回)	20	15	10	5

6) 硬化モルタルの力学的性質を把握する試験

硬化モルタルの力学的性質として、円柱供試体を用いて圧縮強度、静弾性係数を、角柱供試体を用いて曲げ強度を測定した。

3.3.5 炭素粉末を添加したモルタルのフレッシュ性状

1) モルタルフロー

表-3.3.6 にモルタルの空気量およびフロー試験における打撃回数 0 打(初期状態)と 15 打におけるフロー値を示す。全ての配合において単位水量を一定としているため、炭素粉末無添加の普通モルタルにおいては、W/C の値によらず、0 打、15 打それぞれのフロー値はほぼ等しい値を示すが、一方、炭素粉末を添加したモルタルの 0 打および 15 打フローとも無添加のモルタルに比べて小さく、炭素粉末の添加量の増加に伴ってさらに小さくなる。なお、炭素粉末を添加したモルタルは、炭素繊維等の短繊維を多量に添加した場合に生じるフロック⁴⁾の発生はなかった。

各モルタルにおける打撃回数 0 打フロー値と 15 打フロー値との関係を図-3.3.1 に示す。図より、炭素粉末添加率が 5~20% に増加しても 0 打フロー値は 40mm 程度の差であるが、15 打フロー値においては 90mm 程度の差が生じており、炭素粉末の添加によるコンシステンシーの変化は 15 打フロー値においてより顕著に表れている。したがって、以下のモルタルの流動性評価には、

より鋭敏な 15 打フロー値によって考察することにする。

炭素粉末添加率と 15 打フロー値との関係を図-3.3.2 に示す。図より、いずれの水セメント比においても炭素粉末の添加により 15 打フロー値は無添加の場合よりも小さくなり、さらに炭素粉末の添加率の増加に伴って減少することがわかる。これは、炭素粉末の形状の悪さと炭素粉末がモルタル中の自由水を拘束することによって、流動性が低下したと考えられる。

以上の結果を総括すると、ここで設定した水セメント比の範囲であれば、水セメント比の大小が流動性に及ぼす影響は小さく、炭素粉末を添加したモルタルの流動性は炭素粉末の添加率に支配されるといえる。

表-3.3.6 モルタルフローおよび空気量の結果

配合名	フロー (mm)		空気量 (%)
	0 打	15 打	
CP- 0 -50-316	111	192	1.1
CP- 5 -50-316	108	187	0.0
CP-10-50-316	102	171	0.7
CP-15-50-316	102	171	3.1
CP-20-50-316	98	126	3.9
CP- 0 -60-316	128	207	1.1
CP- 5 -60-316	106	177	0.5
CP-10-60-316	102	166	0.7
CP-15-60-316	102	133	2.2
CP-20-60-316	94	121	5.5
CP- 0 -70-316	125	211	1.3
CP- 5 -70-316	115	196	1.1
CP-10-70-316	107	169	3.9
CP-15-70-316	105	151	3.4
CP-20-70-316	113	129	6.0

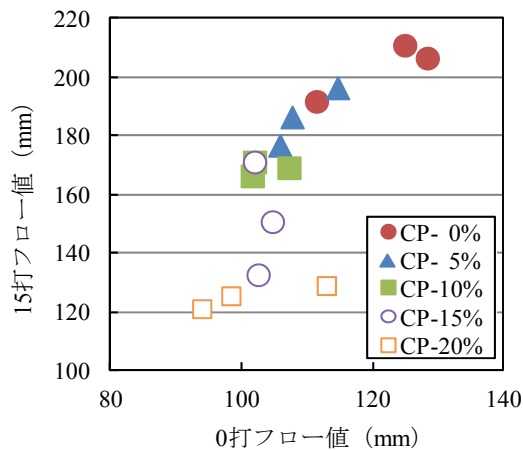


図-3.3.1 0打と15打フロー値との関係

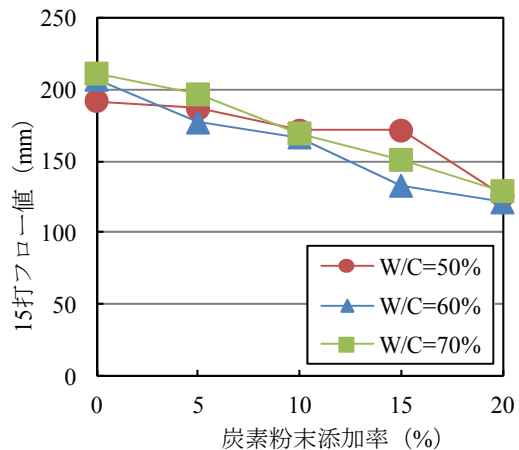


図-3.3.2 炭素粉末添加率と15打フロー値の関係

2) 空気量

炭素粉末添加率と空気量との関係を図-3.3.3に示す。図より、空気量は、水セメント比 (W/C) が同一の場合、炭素粉末の添加率が増加するに伴って増加し、同一炭素粉末の添加率においては水セメント比 (W/C) が大きくなるに伴って多くなることがわかる。特に、W/C=70%においては炭素粉末の置換率が10%以上のモルタル、W/Cが60%以下においては炭素粉末の置換率が15%以上のモルタルにおいてはエントラップドエアが4%程度混入した。このことは、炭素粉末の添加がフレッシュモルタルおよび硬化モルタルに及ぼす影響を検討する際に、空気量の影響を少なくするために消泡剤を使用したが、消泡剤をかなり多量に添加しても空気量を1%程度まで減少させることができなかったことを示している。

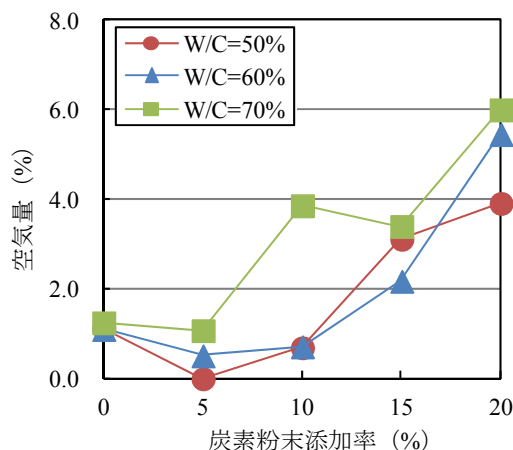


図-3.3.3 炭素粉末添加率と空気量の関係

空気量と15打フロー値との関係を図-3.3.4に示す。この図および図-3.3.3より総合的に判断すると、炭素粉末添加率が増加すると、15打フロー値は小さくなり、同時に空気量が増加する傾向がある。これは炭素粉末の添加により、モルタルが流動しにくくなって練混ぜ時に多量のエン

トラップドエアが連行されたこと、空気量測定のためのモルタルの締め固めが悪くなったこと、さらには細骨材に置換した炭素粉末の粒形が細骨材に比べて角張りが多いこと、に起因して生じた挙動であるとも考えられる。

以上の結果より、空気量が多かったモルタルについては、フロー値の大きなモルタルを用いることも含め、今後、過大な空気を取り込まれないように適切な対策を講じる必要がある。

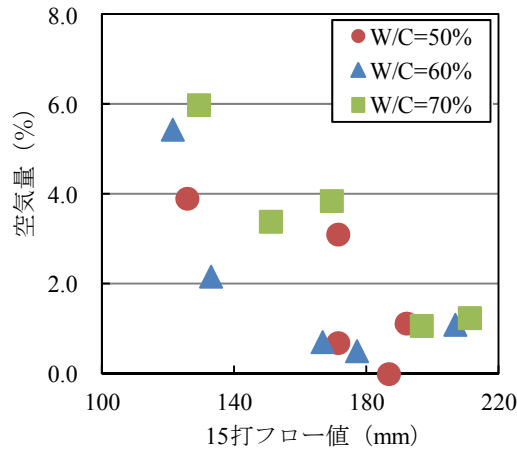


図-3.3.4 15打フロー値と空気量の関係

3) ブリーディング

炭素粉末添加率と3, 24時間後のブリーディング率との関係を図-3.3.5に示す。ここで、ブリーディング率とは、式(3.3.1)に示すモルタルの練り混ぜから3時間および24時間後のブリーディング量とモルタル容積の比を百分率で表したものである。

$$3, 24 \text{ 時間後のブリーディング率}(\%) = \frac{B}{V} \times 100 \quad (3.3.1)$$

B : 3, 24時間後のブリーディング量(ml)

V : 試験開始時のモルタルの容積(ml)

図より、3時間後のブリーディング率は、W/C=70%における添加率5%の一点を除けば、①同一水セメント比においては炭素粉末の添加率が大きくなるに伴って小さくなること、②同一炭素粉末添加率においては、水セメント比が小さいほど小さくなること、がわかる。これは、水セメント比の増加によって、モルタル中の自由水が増加したことによって生じた挙動であると考えられる。すなわち、炭素粉末の添加がブリーディング率に及ぼす影響は、炭素粉末がモルタル中の自由水を拘束することで、炭素粉末の添加率が増加するに伴ってブリーディング率は減少する。なお、24時間後のブリーディング率は、W/C=70%、添加率10%の配合を除けば、炭素粉末の添加率が5%以上であれば、ほぼ0%となる。

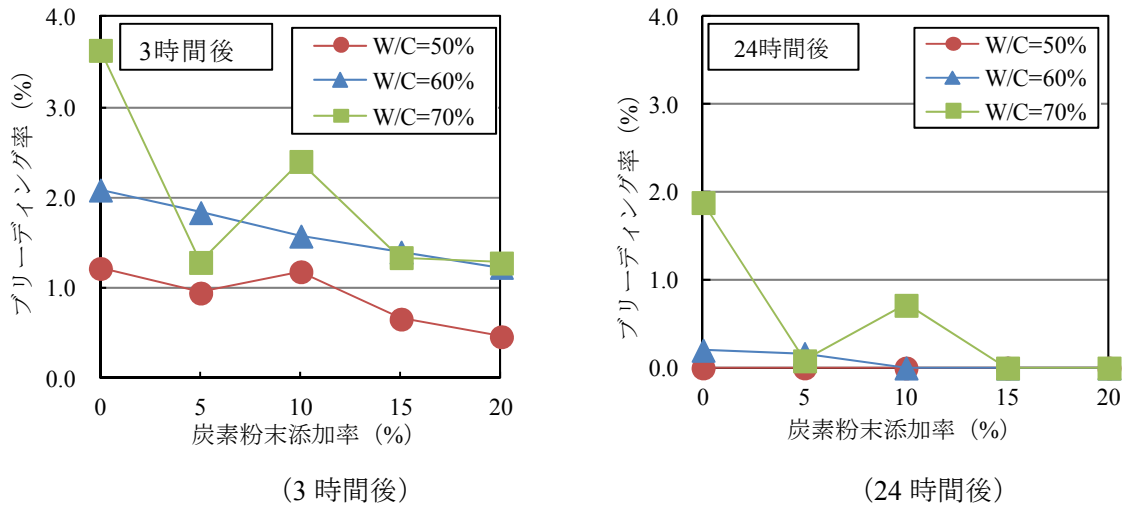


図-3.3.5 炭素粉末添加率とブリーディング率の関係

炭素粉末添加率と収縮率との関係を図-3.3.6に示す。ここで、収縮率とは、式(3.3.2)から求めた練混ぜ後、3時間と24時間におけるモルタルの容積およびブリーディングによる水量より算定される。

$$\text{収縮率}(\%) = -\frac{(V' + B') - V}{V} \times 100 \quad (3.3.2)$$

B' : 24時間経過したブリーディングによる水量(ml)

V : 試験開始時のモルタルの容積(ml)

V' : 24時間経過したモルタルの容積(ml)

図より、W/C=70%、炭素粉末添加率15%における特異な挙動をしている点を除くと、炭素粉末を添加したモルタルの収縮率は、水セメント比が大きくなるとやや大きくなるが、同一水セメント比においては炭素粉末無添加の普通モルタルの収縮率と同等で、炭素粉末の添加量の多少はモルタルの収縮率に影響を及ぼさないことがわかる。

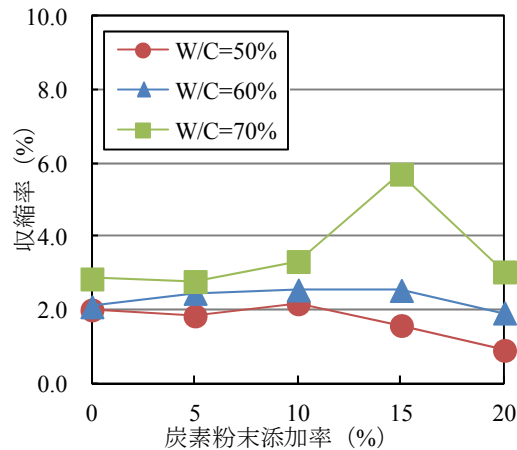


図-3.3.6 炭素粉末添加率と収縮率の関係

4) 凝結

W/C=60%におけるプロクター貫入試験の結果を図-3.3.7に示す。図より、貫入抵抗値の経時変化は、炭素粉末添加率の多少にかかわらず、下に凸な形状を示し、ほぼ同一の挙動をすることがわかる。

図-3.3.7に基づいて凝結の始発、終結時間と炭素粉末添加率との関係を図-3.3.8~3.3.9示す。なお、始発、終結時間は、それぞれ貫入抵抗値が 3.5 N/mm^2 と 28 N/mm^2 に達する時間でもって定義されている。図より、始発、終結時間は W/C=60, 70%では差がないが、W/C=50%のみが 100 分程度短く、一般的なコンクリートにおける、水セメント比の増加とともに遅延する傾向⁵⁾と一致する。水セメント比が同一の場合、始発時間は炭素粉末の添加率の大小による影響を受けていないが、終結時間は炭素粉末添加率の増加とともにやや増加する傾向を示し、特に W/C=50%では炭素粉末添加率 20%の終結時間は無添加のそれに比べて 90 分程度長くなっているが、全体的には炭素粉末の添加量の大小が凝結に及ぼす影響は小さいといえる。

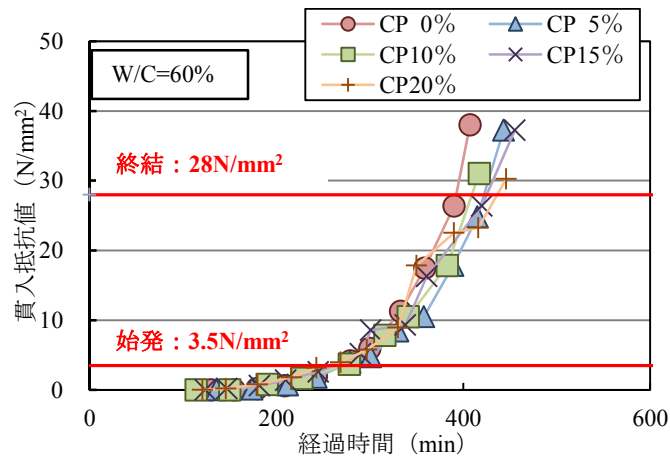


図-3.3.7 経過時間と貫入抵抗値の関係

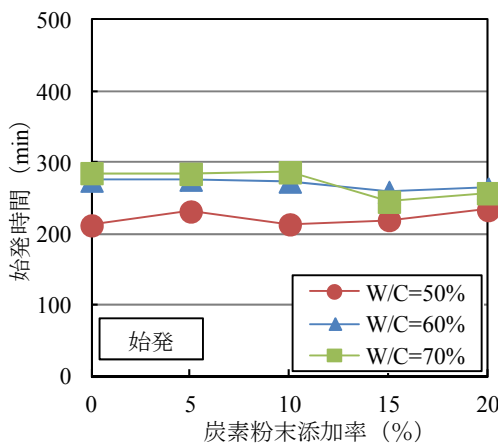


図-3.3.8 炭素粉末添加率と始発時間の関係

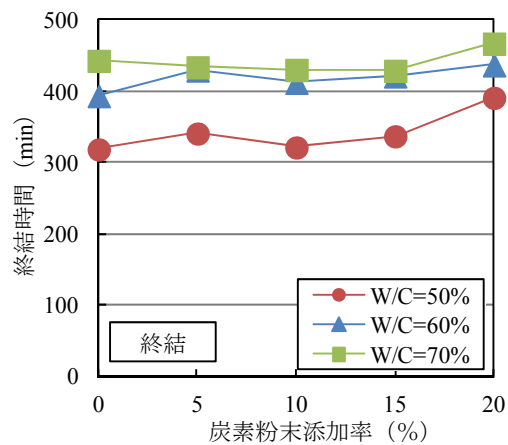


図-3.3.9 炭素粉末添加率と終結時間の関係

3.3.6 モルタルの力学的性質

モルタルが硬化した後の圧縮強度、曲げ強度、弾性係数を測定した結果を一括して表-3.3.7に示す。なお、これらの物性値は3本の供試体から得られた結果の平均値を示したものである。

表-3.3.7 硬化モルタルの強度試験結果

配合名	角柱供試体 (40×40×160mm)		円柱供試体 (φ50×100mm)			
	曲げ強度 (N/mm ²)		圧縮強度 (N/mm ²)		静弾性係数 (kN/mm ²)	
	材齢 7日	材齢 28日	材齢 7日	材齢 28日	材齢 7日	材齢 28日
CP-0-50-316	10.3	14.0	41.9	54.9	26.8	27.5
CP-5-50-316	11.6	12.4	40.6	50.7	26.5	28.0
CP-10-50-316	10.1	12.1	39.8	52.7	25.5	29.5
CP-15-50-316	11.3	12.1	36.4	46.0	17.5	24.0
CP-20-50-316	10.8	12.1	34.6	40.7	17.5	22.8
CP-0-60-316	10.1	11.3	31.9	44.7	21.6	26.9
CP-5-60-316	9.6	11.8	33.2	41.5	24.6	27.0
CP-10-60-316	8.7	12.5	31.2	36.4	21.4	25.7
CP-15-60-316	9.6	11.0	26.7	35.5	21.1	21.2
CP-20-60-316	7.7	10.0	23.5	33.3	17.7	20.7
CP-0-70-316	6.6	9.7	20.5	32.9	23.3	28.8
CP-5-70-316	5.8	9.3	20.7	31.2	19.1	24.8
CP-10-70-316	7.7	7.6	20.1	27.7	19.5	18.9
CP-15-70-316	7.2	8.6	21.3	26.4	18.8	20.5
CP-20-70-316	6.9	8.4	12.8	19.3	13.6	18.8

1) 圧縮強度

φ50mm×100mm 円柱供試体による材齢7日と28日における圧縮強度と炭素粉末添加率との関係を図-3.3.10に示す。W/Cが同一の場合、材齢7日における圧縮強度は、炭素粉末の添加率が10%以下であれば炭素粉末無添加の普通モルタルのそれと同等であるが、10%を超えると炭素粉末の添加率の増加に伴ってやや低下する傾向にある。材齢28日における圧縮強度についても同様のことがいえるが、7日圧縮強度との相違は、炭素粉末添加率の増加に伴う強度低下が炭素粉末添加率の小さい段階から生じることである。

前述のフレッシュ性状において、炭素粉末の添加率が増加すると空気量も増加することを指摘したが、コンクリートにおいては空気量1%の増加に対して圧縮強度は4~6%低下するといわれ

ている⁶⁾。そこで、空気量の増加がモルタルの圧縮強度の低下に及ぼす影響について検討する。

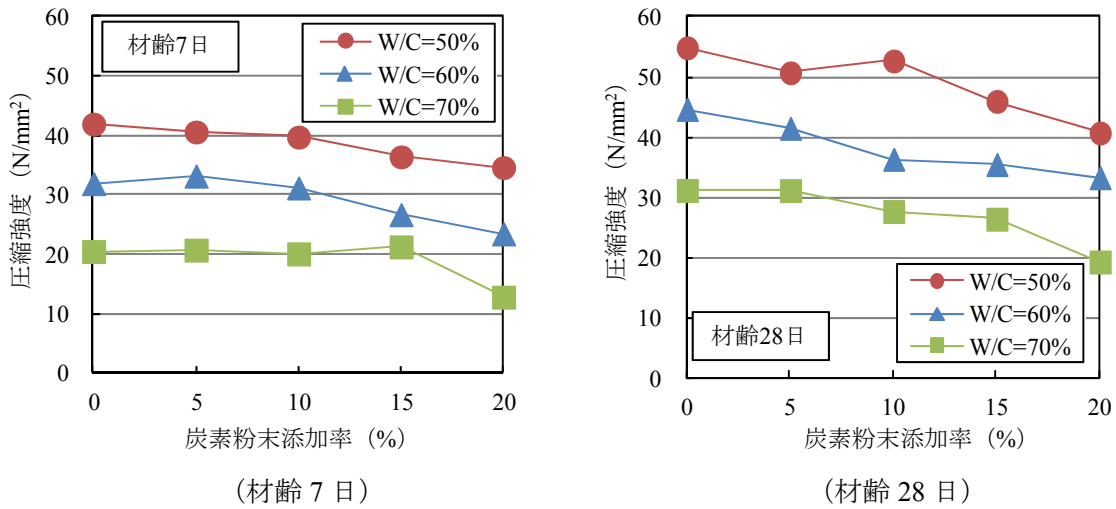


図-3.3.10 炭素粉末添加率と圧縮強度の関係

図-3.3.11~3.3.12に材齢7, 28日における炭素粉末の添加による空気量の差と強度比との関係を示す。ここで空気量の差とは、同一W/Cにおいて、炭素粉末を添加したモルタルの空気量と炭素粉末無添加モルタルとの空気量の差を、強度比とは、同一W/Cにおけるモルタルの圧縮強度と炭素粉末無添加の強度との比である。図中の点線は、空気量1%の増加に対して強度比が6%低下した場合の強度比を表している。図より、炭素粉末添加率が増加すると空気量の差も大きくなり、強度比も低下している。炭素粉末添加率が15, 20%の場合、強度比が6%の範囲を超えて低下しているものもあり、炭素粉末の添加による圧縮強度の低下原因は空気量だけではない。炭素粉末の添加により圧縮強度が低下した他の原因としては、細骨材の一部として置換した炭素粉末の結晶とセメントペーストとの接着力が骨材との接着力に比べて小さいこと、また、薄い板状結晶の積層構造を有する炭素粉末自身の強度が細骨材に比べて小さく、局所的な破壊をしたことなどが強度低下に影響していると考えられるが、現時点においては圧縮強度の低下の明確な原因を把握できないでいる。

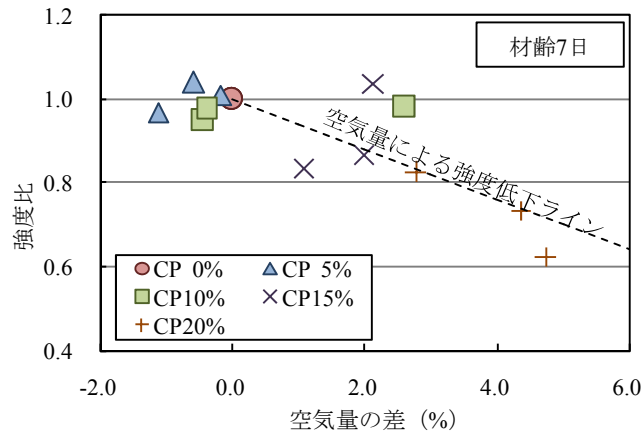


図-3.3.11 空気量の差と強度比の関係(材齢7日)

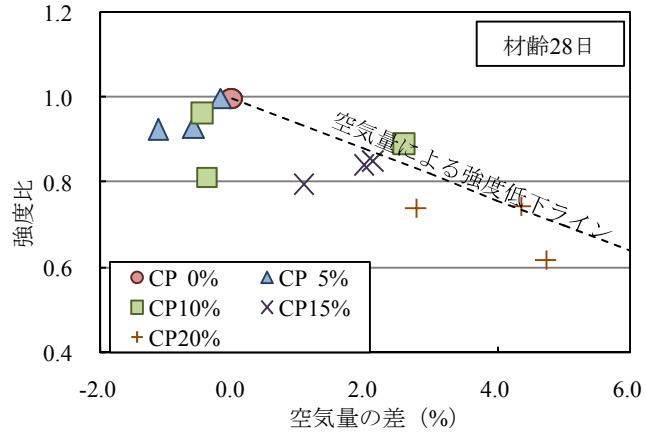


図-3.3.12 空気量の差と強度比の関係(材齢28日)

材齢28日における圧縮強度とセメント水比(C/W)との関係を図-3.3.13に示す。図より、同一C/Wにおける28日圧縮強度は炭素粉末の添加率が大きくなるに伴って小さくなること、C/Wの増加に伴う圧縮強度の増加割合(直線の傾き)は炭素粉末の添加率の大小によらず概ね等しいこと、もわかる。また、炭素粉末の添加率が同一の場合、モルタルの圧縮強度はC/Wの増加に伴って増加し、28日圧縮強度とC/Wの間には線形関係が存在することがわかる。表-3.3.8に最小二乗法によって求めた28日圧縮強度とC/Wとの関係を示す。

以上の結果より、炭素粉末を添加したモルタルの圧縮強度は通常のコンクリートやモルタルと同様に炭素粉末添加率に応じて決定されるC/Wと圧縮強度との関係(表-3.3.8参照)から所定の強度を有するモルタルの製造が可能である。

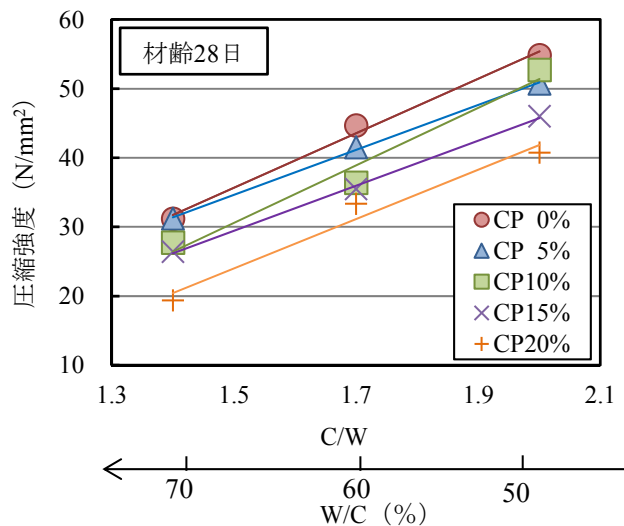


図-3.3.13 セメント水比と圧縮強度の関係

表-3.3.8 C/W と 28 日圧縮強度の関係式

炭素粉末添加率 (%)	C/W と圧縮強度の関係式 f_{c28} : 28 日圧縮強度, C/W : セメント水比	相関係数
0	$f_{c28}=39.45C/W-23.49$	0.994
5	$f_{c28}=32.56C/W-14.21$	0.999
10	$f_{c28}=41.53C/W-31.84$	0.970
15	$f_{c28}=32.60C/W-19.45$	0.998
20	$f_{c28}=35.67C/W-29.52$	0.970

2) 任意の炭素粉末添加率とセメント水比におけるモルタルの 28 日圧縮強度の予測式の提案
炭素粉末を添加したコンクリートあるいはモルタルの実際の設計においては、まず、力学面から圧縮強度が与えられ、次に電氣的機能要件から炭素粉末の添加率を決定し、これらの結果より炭素粉末添加率を添加したコンクリートあるいはモルタルの水セメント比をいくらにすればよいかということになる。このような観点から、炭素粉末添加率と C/W と 28 日圧縮強度の相互関係式が必要となる。

そこで、炭素粉末添加率と C/W と 28 日圧縮強度との相互関係を予測する式を以下に提案する。

上記において、同一 C/W における 28 日圧縮強度は炭素粉末の添加率が大きくなるに伴って小さくなる、という事実に基づき、ここでは炭素粉末無添加のモルタルの C/W と 28 日圧縮強度の関係 (式 (3.3.3) で図-3.3.14 に図示) を基準として、任意の炭素粉末添加率, C/W におけるモルタルの 28 日圧縮強度を予測することを試みる。

すなわち、基準とする炭素粉末無添加のモルタルにおける C/W と 28 日圧縮強度の関係を式 (3.3.3) に示す。

$$f_{c28}=39.45 \times C/W - 23.49 \tag{3.3.3}$$

ここに、 f_{c28} : 炭素粉末無添加モルタルの 28 日圧縮強度 (N/mm²)

C/W : セメント水比

図-3.3.15 は、横軸に炭素粉末添加率を、縦軸に強度比を示したもので、強度比とは同一 C/W において、炭素粉末を添加したモルタルの圧縮強度の実測値と式 (3.3.3) より算出される炭素粉末無添加の圧縮強度の比を示している。図より、いずれの C/W においても強度比は炭素粉末添加率の増加に伴って低下し、ほぼ直線的に低下していることがわかる。図中の式は一次回帰式を示したもので、直線の傾きは炭素粉末の添加による圧縮強度低減係数を示している。

以上の結果より、炭素粉末添加率と C/W と 28 日圧縮強度との相互関係は式 (3.3.4) で表すことができ、所定の 28 日圧縮強度と炭素粉末添加率を設定した場合のモルタルの圧縮強度が予測できることになる。

$$f_{c28,CP} = (1 - 0.013 \times CP) \times f_{c28}$$

$$= (1 - 0.013 \times CP) \times (39.45 \times C/W - 23.49) \quad (3.3.4)$$

ここに、 $f_{c28,CP}$ ：炭素粉末を添加したモルタルの 28 日圧縮強度 (N/mm²)

CP ：炭素粉末添加率 (%)

f_{c28} ：炭素粉末無添加モルタルの 28 日圧縮強度 (N/mm²)

C/W ：セメント水比

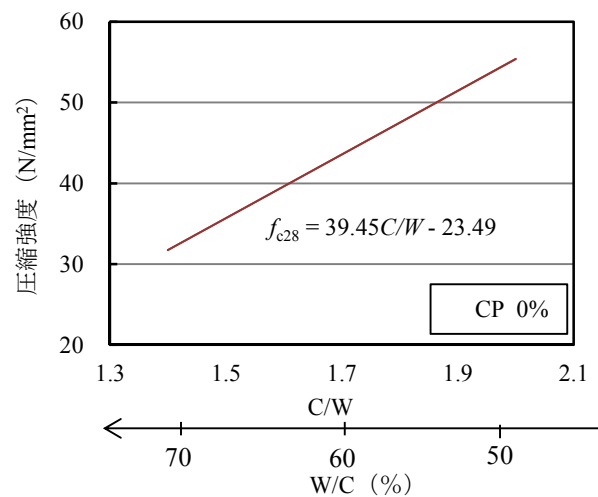


図-3.3.14 セメント水比と圧縮強度の関係 (炭素粉末無添加)

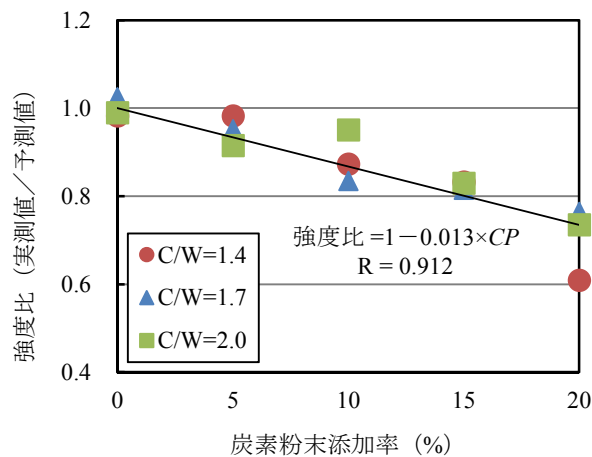


図-3.3.15 炭素粉末添加率と強度比の関係

式 (3.3.4) から算出した圧縮強度の計算値と実測値の関係を図-3.3.16 に示す。図より計算値と実測値は、ほぼ 1 対 1 の直線上にあり、式 (3.3.4) によって精度良く圧縮強度を推定できるといえる。

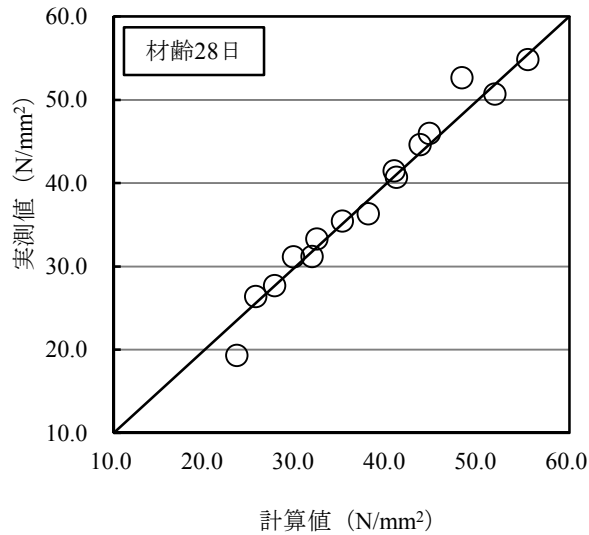


図-3.3.16 圧縮強度の計算値と実測値の関係

3) 曲げ強度

炭素粉末添加率と材齢7日と28日における曲げ強度の関係を図-3.3.17に示す。いずれの配合においても炭素粉末を添加することによる曲げ強度の変化は見られない。既往の研究では、炭素短繊維を混入したモルタルにおいては、混入率の増加に伴って曲げ強度は増大することが報告されている⁷⁾が、炭素粉末を添加したモルタルにおいては、炭素繊維を添加したような曲げ強度を増加する効果がないことがわかる。

材齢28日における圧縮強度と曲げ強度の関係を図-3.3.18に示す。図より、曲げ強度と圧縮強度の関係は、炭素粉末添加率の多少によらず一つの曲線状にプロットでき、一般的なコンクリートおよびモルタルと同様の関係となっている。

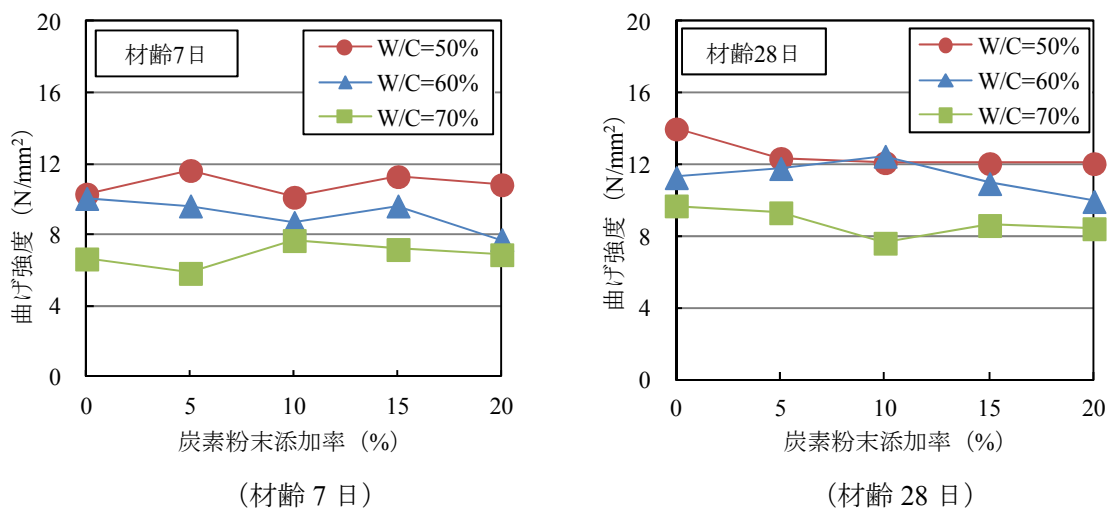


図-3.3.17 炭素粉末添加率と曲げ強度の関係

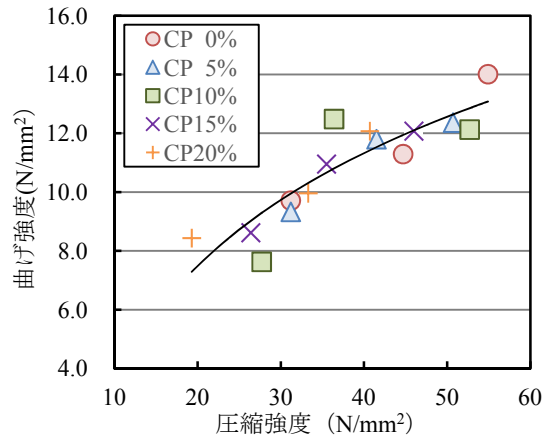


図-3.3.18 圧縮強度と曲げ強度の関係

4) 静弾性係数

φ 50mm×100mm 円柱供試体で測定した材齢 7 日と 28 日における静弾性係数と圧縮強度の関係を図-3.3.19 に示す。材齢 7 日における静弾性係数と圧縮強度の関係は、図中の破線で囲んだ 2 点を除くと、炭素粉末添加率の多少によらずほぼ一つの曲線上にプロットされ、炭素粉末の添加量の多少は静弾性係数の値にほとんど影響を及ぼさないのに対して、材齢 28 日における静弾性係数と圧縮強度の関係は、炭素粉末添加率が 10% を超えた場合とそれ以下の場合の 2 本の曲線上にプロットされ、炭素粉末添加率が静弾性係数に影響を及ぼすことがわかる。すなわち、炭素粉末の添加率が 10% を超えると同じ圧縮強度でも静弾性係数は小さくなることがわかる。同一の圧縮強度において、炭素粉末を添加したモルタルの静弾性係数がやや小さくなるのは、フライアッシュや高炉スラグのような粉体を用いたコンクリートにおいて、粉体量の増加に伴って弾性係数が小さくなる挙動と同様の挙動が現れたものと考えられる。

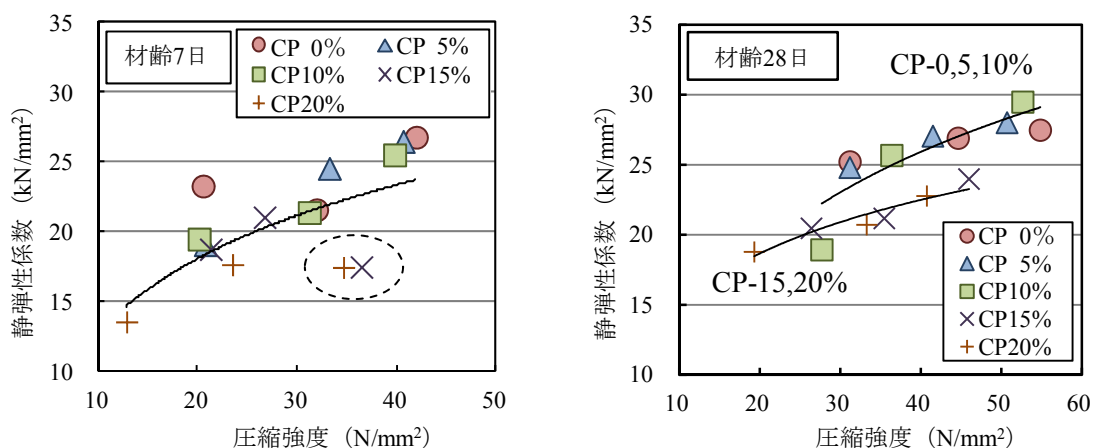


図-3.3.19 圧縮強度と静弾性係数の関係

3.4 一般的なモルタル配合に関する検討

3.4.1 実験計画

前節においては砂とセメントの質量比が $S/C=2$ の普通モルタルに対して水セメント比と炭素粉末の添加率を変化させたモルタルの試験を行った。しかしながら、一般に用いられる普通モルタルにおける S/C は、 $S/C=2.0\sim 3.0$ の範囲で用いられることが多い。そこで、本節では、水セメント比を $W/C=60\%$ 一定とし、炭素粉末無添加の普通モルタルに対して S/C を 2.0, 2.6, 3.0 と変化させた基本配合に対して、炭素粉末を砂の一部として用いることにし、炭素粉末の添加率をモルタル容積の 0~20% の間で変化させた試験を行い、モルタルのフレッシュ性状と硬化後の力学的性質を検討するとともに炭素粉末の添加率がどの程度までであればモルタルの製造が可能であるかの検討も行った。なお、普通モルタルにおける S/C と砂の一部として炭素粉末を添加したモルタルにおける $(S+CP)/C$: CP は炭素粉末の添加量) の値はほぼ等しい。モルタルの単位水量は、 $S/C=2.6$ 、炭素粉末無添加のモルタルに対してフロー値が 200mm になるように $W=316\text{kg}$ と決定し、 $S/C=2.0$ および 3.0 の配合については、 $W/C=60\%$ となるように単位水量を変化させた。

実験計画を表-3.4.1 に示し、実験項目と測定項目を表-3.4.2 に示す。

表-3.4.1 実験計画

W/C (%)	W (kg)	S/C or (S+CP) /C	炭素粉末添加率 (%)
60	290	2.0	0, 5, 10, 15, 20
	316	2.6	
	356	3.0	

表-3.4.2 実験項目及び測定方法

実験項目	測定方法
フレッシュ性状	モルタルフロー試験 (JIS R 5201-1997)
	空気量試験質量法 (JIA A 1116)
	ブリーディング試験 (JSCE-F532-1999)
	プロクター貫入試験 (JIS A 1147)
力学的性質	圧縮強度 (JSCE-G505-1999)
	静弾性係数 (JSCE-G505-1999)
	曲げ強度 (JIS R 5201)

3.4.2 使用材料

使用材料の物理的性質を表-3.4.3 に示す。試験が複数年にまたがり同一の細骨材が入手できなかったため、モルタルに用いた細骨材は配合によって異なり、 $W=316\text{kg}$ の配合では湖底砂を、

W=290kg, 356kg の配合では野洲川産の砂をそれぞれ用いた。また、消泡剤を使用し、各モルタルの空気量を 1%以下に設定した。なお、消泡剤をセメント量の 0.06%まで添加しても、空気量が 1%以下にならない場合には、消泡剤を 0.06%まで添加した状態のままのモルタルを使用して試験を行うことにした。

表-3.4.3 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント 密度：3.15g/cm ³ ，比表面積：3380cm ² /g
細骨材	湖底砂 表乾密度：2.62g/cm ³ ，絶乾密度：2.60g/cm ³ 粗粒率：2.43，吸水率：0.67%
	野洲川産 表乾密度：2.61g/cm ³ ，絶乾密度：2.59g/cm ³ 粗粒率：2.17，吸水率：0.85%
消泡剤	ポリアルキレングリコール誘導体 密度：0.98～1.02g/cm ³
炭素粉末	粒径：0.3mm 以下，密度：2.12，2.13g/cm ³ 比表面積：1310cm ² /g

3.4.3 示方配合

モルタルの配合は前節で用いた普通モルタルにおける W/C=60%の基準配合に対して細骨材の一部を炭素粉末で置換することとし、炭素粉体の添加率はモルタル容積の 0, 5, 10, 15, 20%とした。表-3.4.4 にモルタルの示方配合を示す。なお、普通モルタルにおける S/C と、炭素粉末を添加したモルタルにおける (S+CP) /C の値はほぼ等しいので、表-3.4.4 中の (S+CP) /C は S/C の値を記している。

3.4.4 実験方法

1) モルタルの練混ぜ

モルタルの練混ぜは、3.3.4 3) と同様にして行った。

2) フレッシュモルタルの試験

フレッシュモルタルの試験は、フロー試験，質量法による空気量試験 (JIS A 1116)，プロクター貫入試験 (JIS A 1147)，ブリーディング試験 (ポリエチレン袋方法，JSCE-F 532) を行った。

3) 供試体の作製方法

供試体の作製は、3.3.4 5) と同様にして行った。

4) 硬化モルタルの力学的性質を把握する試験

硬化モルタルの力学的性質として圧縮強度，曲げ強度，静弾性係数を測定した。

表-3.4.4 示方配合

配合名 ¹⁾	W/C (%)	S/C or (S+CP)/C	炭素粉末添加率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
				水	セメント	細骨材	炭素粉末	消泡剤
CP-0-60-290	60	3.0	0	290	483	1449	0	0.290
CP-5-60-290			5			1322	107	
CP-10-60-290			10			1192	213	
CP-15-60-290			15			1061	320	
CP-20-60-290			20			931	426	
CP-0-60-316		2.6	0	316	527	1354	0	0.316
CP-5-60-316			5			1222	106	
CP-10-60-316			10			1092	212	
CP-15-60-316			15			960	318	
CP-20-60-316			20			830	424	
CP-0-60-356		2.0	0	356	593	1186	0	0.356
CP-5-60-356			5			1059	107	
CP-10-60-356			10			928	213	
CP-15-60-356			15			798	320	
CP-20-60-356			20			667	426	

1) 配合名：CP（炭素粉末）－炭素粉末添加率－水セメント比（W/C）－単位水量（W）

3.4.5 モルタルのフレッシュ性状

1) モルタルフロー

モルタルのフロー試験における打撃回数0打（初期状態）と15打におけるフロー値を一括して表-3.4.5に示す。炭素粉末を添加したモルタルでは，単位水量を変化させたことでフロー値は異なり，同一の炭素粉末添加率では，(S+CP)/Cが大きいほど15打フロー値は小さくなる。炭素粉末を添加したモルタルにおける15打フロー値と炭素粉末添加率との関係を図-3.4.1に示す。図より，S/Cすなわち，(S+CP)/Cの値が同一の場合，15打フロー値は炭素粉末の添加率の増加に伴って低下することがわかる。なお，(S+CP)/C=3.0のモルタルの15打フロー値は，炭素粉末の添加率が増加してもほとんど変わらないことがわかる。(S+CP)/C=3.0のモルタルは流動変形がしにくい非常に硬練りのモルタルであり，炭素粉末を添加した場合のさらなる流動性低下を考慮すると，

実施工ではこのようなモルタルのフロー値の適用は困難であると判断される。

表-3.4.5 モルタルフローおよび空気量の結果

配合名	S/C or (S+CP)/C	フロー (mm)		空気量 (%)
		0 打	15 打	
CP-0-60-290	3.0	101	142	4.0
CP-5-60-290		108	138	3.9
CP-10-60-290		108	123	5.4
CP-15-60-290		100	125	6.5
CP-0-60-316	2.6	128	207	1.1
CP-5-60-316		106	177	0.5
CP-10-60-316		102	166	0.7
CP-15-60-316		102	133	2.2
CP-20-60-316		94	121	5.5
CP-0-60-356	2.0	147	214	0.0
CP-5-60-356		131	214	0.3
CP-10-60-356		118	204	0.4
CP-15-60-356		111	188	2.5
CP-20-60-356		108	172	2.2

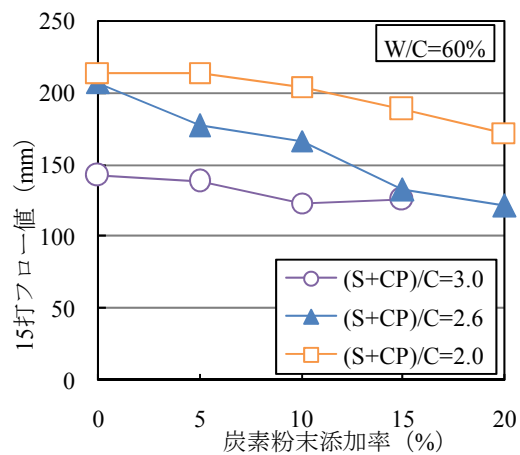


図-3.4.1 炭素粉末添加率と15打フロー値の関係

2) 空気量

空気量と炭素粉末添加率との関係を図-3.4.2に示す。前節において水セメント比を変化させた場合の結果と同様に、空気量は炭素粉末の添加率が増加すると増加する傾向にあり、とりわけ(S+CP)/Cが2.6以下では炭素粉末の添加率が10%を超えると、(S+CP)/Cが3.0においては、炭素粉末の添加率が5%を超えると急激に増加する。なお、同一の炭素粉末添加率で比較すると、(S+CP)/Cが大きいほど空気量は増加し、特に(S+CP)/Cが2.6を超えると炭素粉末の添加率の大小によらず、空気量が大きくなるのがわかる。

空気量と15打フロー値との関係を図-3.4.3に示す。図からも明らかなように、(S+CP)/C=3.0のモルタルのフロー値は140mm以下で、フレッシュ時において流動性がない状態であり、モルタル練混ぜ時に多量のエントラップドエアが連行されて空気量が大きくなったと考える。

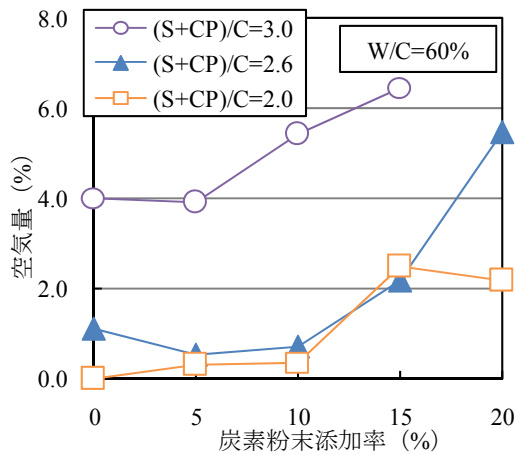


図-3.4.2 炭素粉末添加率と空気量の関係

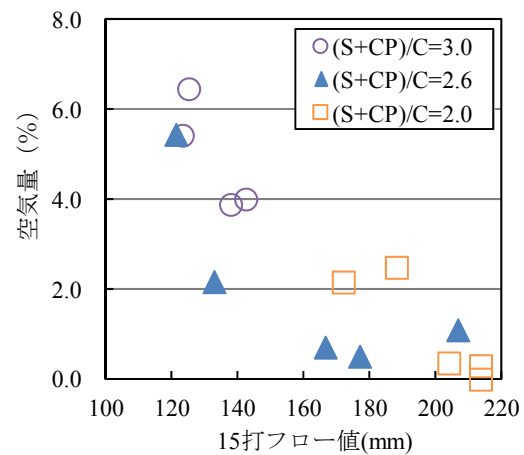


図-3.4.3 空気量と15打フロー値の関係

3) ブリーディング率

ブリーディング率と炭素粉末添加率の関係を図-3.4.4に示す。練り混ぜ3および24時間後のブリーディング率は(S+CP)/Cが大きいほど、小さくなっている。ブリーディング率は粉体量および単位水量に影響を受けるが、(S+CP)/C=2.0の配合は最も単位水量が多いため、ブリーディング率が大きくなったと考えられる。(S+CP)/C=2.0のモルタルにおいては、いずれの炭素粉末添加率においても24時間後もブリーディングが残存しており、仕上げ時期が遅くなる傾向にあることが伺える。

炭素粉末添加率と収縮率との関係を図-3.4.5に示す。(S+CP)/Cや炭素粉末添加率の大小によらず炭素粉末を添加したモルタルの収縮率は無添加のモルタルのそれと同等で、(S+CP)/Cや炭素粉末の添加率はモルタルの収縮に影響しないことがわかる。

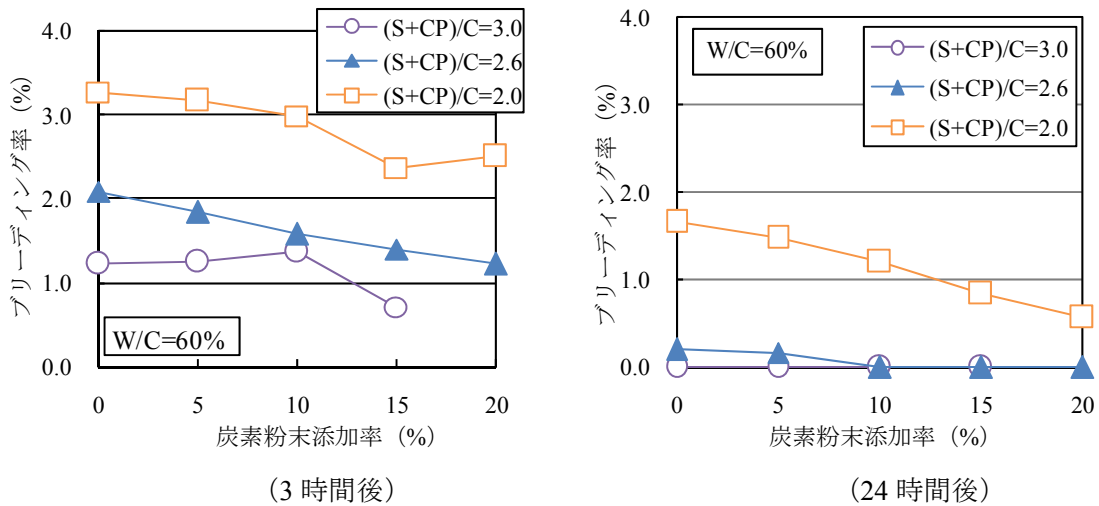


図-3.4.4 炭素粉末添加率とブリーディング率の関係

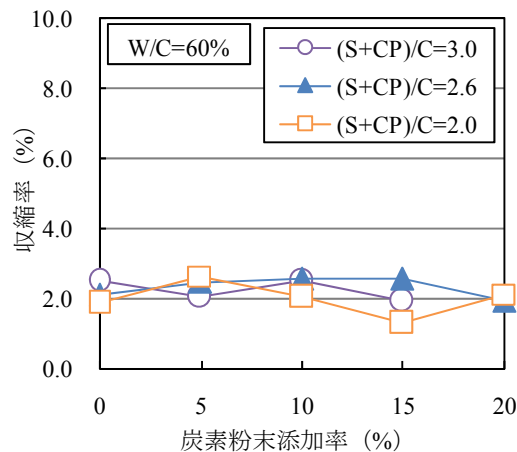


図-3.4.5 炭素粉末添加率と収縮率の関係

3.4.6 モルタルの力学的性質

1) 圧縮強度

硬化したモルタルの圧縮強度，曲げ強度，静弾性係数を一括して表-3.4.6に示す。なお，表中の強度，静弾性係数の値は配合ごとに3体のモルタル供試体を試験して得られた平均値を示している。

円柱供試体における材齢7日と28日の圧縮強度と炭素粉末添加率との関係を図-3.4.6に示す。W/C=60%と一定としているため，(S+CP)/C=2.0と2.6のモルタルの圧縮強度はほぼ等しい値を示すが，(S+CP)/C=3.0のモルタルの圧縮強度は，炭素粉末の添加率が同一の場合，いずれの添加率においても(S+CP)/C=2.0および2.6のモルタルの圧縮強度よりも小さいことがわかる。なお，材齢7，28日における(S+CP)/C=2.0と2.6のモルタルの圧縮強度は，炭素粉末の添加率が10%までは普通モルタルのそれとほぼ等しいが，炭素粉末の添加率が10%を超えると添加率の増加に伴って低下し，炭素粉末の添加率が20%の場合の圧縮強度は普通モルタルのその75%程度まで低下

するといえる。

表-3.4.6 硬化モルタルの強度試験結果

配合名	S/C or (S+CP)/C	角柱供試体 (40×40×160mm)		円柱供試体 (φ50×100mm)			
		曲げ強度 (N/mm ²)		圧縮強度 (N/mm ²)		静弾性係数 (kN/mm ²)	
		材齢 7日	材齢 28日	材齢 7日	材齢 28日	材齢 7日	材齢 28日
CP-0-60-290	3.0	7.4	8.7	25.7	32.6	23.7	25.0
CP-5-60-290		7.7	9.0	24.9	30.0	22.1	23.7
CP-10-60-290		5.8	7.8	20.5	25.7	16.5	20.5
CP-15-60-290		7.8	9.8	20.5	26.8	16.0	21.2
CP-0-60-316	2.6	10.1	11.3	31.9	44.7	21.6	26.9
CP-5-60-316		9.6	11.8	33.2	41.5	24.6	27.0
CP-10-60-316		8.7	12.5	31.2	36.4	21.4	25.7
CP-15-60-316		9.6	11.0	26.7	35.5	21.1	21.2
CP-20-60-316		7.7	10.0	23.5	33.3	17.7	20.7
CP-0-60-356	2.0	9.2	10.2	31.5	40.1	21.1	25.1
CP-5-60-356		9.0	9.6	30.4	39.4	21.3	22.8
CP-10-60-356		9.8	9.5	32.6	43.3	19.7	22.4
CP-15-60-356		8.1	10.1	29.1	38.6	18.5	21.2
CP-20-60-356		8.8	10.2	27.8	34.0	16.5	20.7

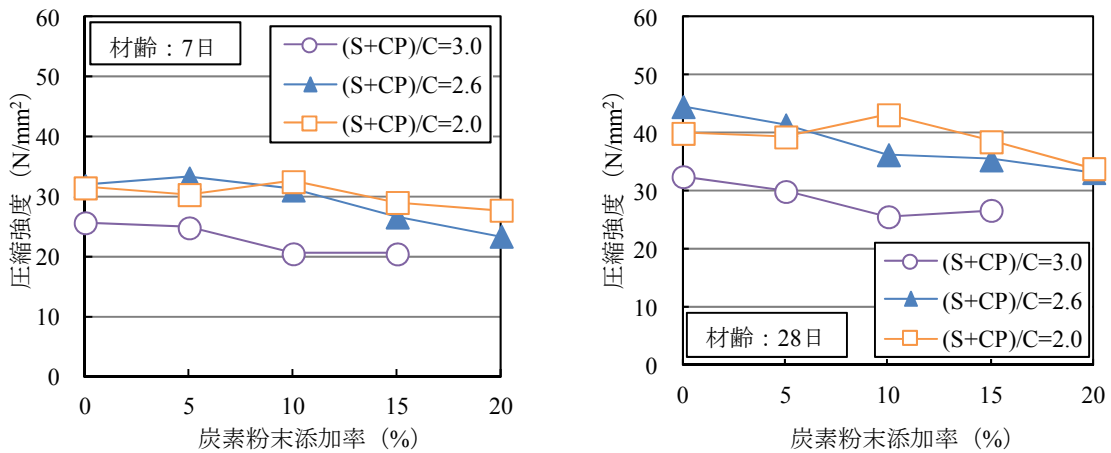


図-3.4.6 炭素粉末添加率と圧縮強度の関係

W/C=60%モルタルの28日圧縮強度と(S+CP)/Cとの関係を図-3.4.7に示す。図より、(S+CP)/Cを変化させた場合の圧縮強度は、(S+CP)/Cが2.0~2.6の間ではほぼ等しい値を示すが、(S+CP)/C=3.0では圧縮強度が小さくなっている。これは(S+CP)/C=3.0のモルタルは流動性に乏しく、練混ぜの際にエントラップドエアが多量に混入し、強度低下が生じたためと考えられる。

以上の結果より、(S+CP)/C=2.0~2.6の範囲内であれば、(S+CP)/Cの大小が圧縮強度に及ぼす影響はなく、圧縮強度はセメント水比の関係から推定できる。

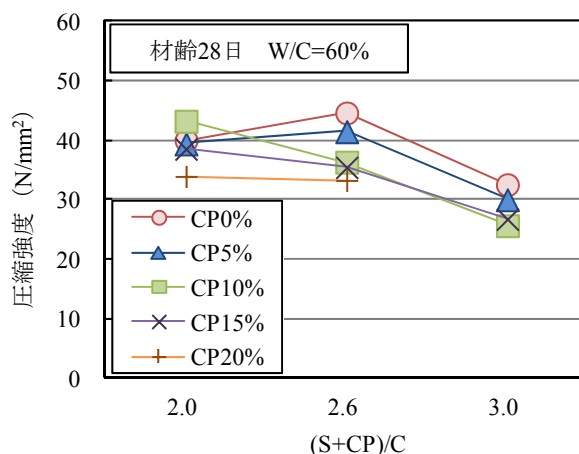


図-3.4.7 (S+CP)/C と圧縮強度の関係

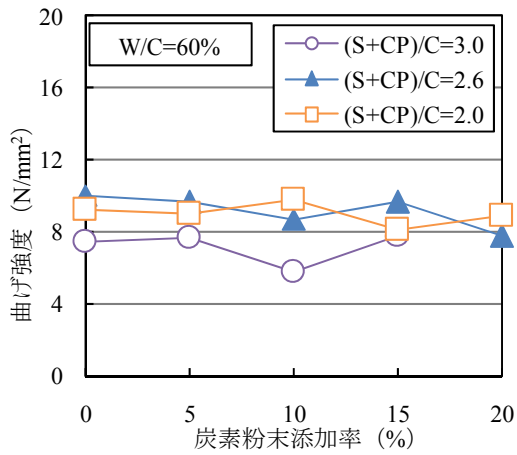
2) 曲げ強度

材齢7日ないしは28日における曲げ強度と炭素粉末の添加率との関係を図-3.4.8に示す。材齢7日および28日における曲げ強度は、炭素粉末添加率が変化してもほぼ一定で、炭素粉末の添加は曲げ強度に影響を及ぼさず、普通モルタルと同等の強度が得られることがわかる。

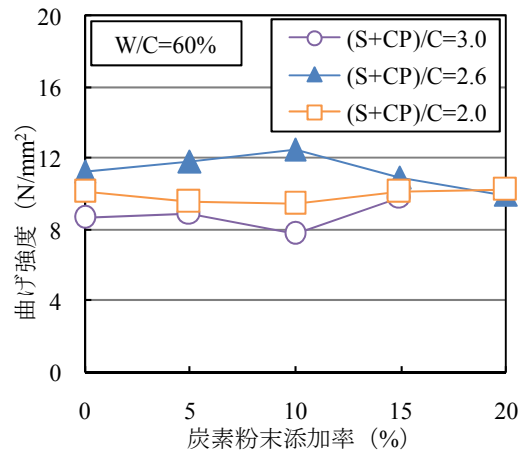
図-3.4.9に曲げ強度と(S+CP)/Cとの関係を示す。圧縮強度の結果と同様に(S+CP)/C=3.0のモルタルの曲げ強度は、他の配合のモルタルのそれに比べて小さい。なお、(S+CP)/C=2.0~2.6の範囲においては、モルタルの曲げ強度はほぼ等しく、(S+CP)/Cの大小はモルタルの曲げ強度に影響を及ぼさないことがわかる。

3) 静弾性係数

圧縮強度と静弾性係数との関係を図-3.4.10に示す。材齢7日および28日における弾性係数は、いずれも炭素粉末の添加率が10%以下であれば圧縮強度の増加に伴って増加するが、炭素粉末添加率が15%以上になると圧縮強度が増加してもほぼ一定値を示し、増加しないことがわかる。なお、材齢28日における弾性係数は、炭素粉末添加率10%以下と15%以上で圧縮強度と静弾性係数の関係が異なり、炭素粉末添加率が15%を超えると同じ圧縮強度でも静弾性係数は小さくなることがわかる。



(材齢 7 日)



(材齢 28 日)

図-3.4.8 炭素粉末添加率と曲げ強度の関係

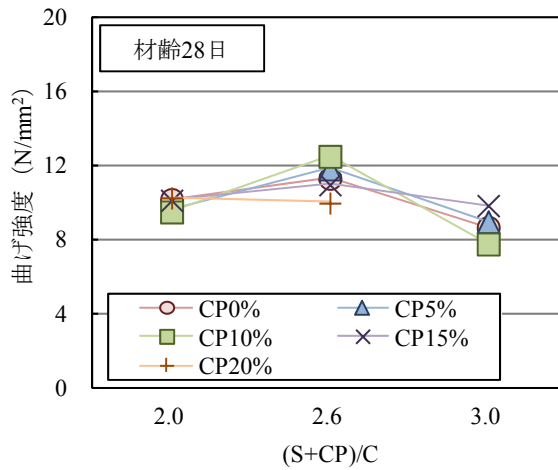


図-3.4.9 (S+CP)/C と曲げ強度の関係

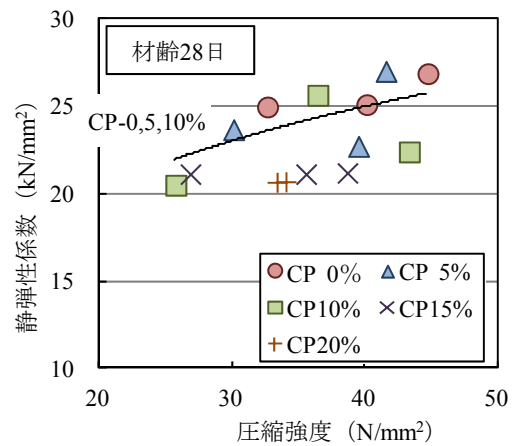
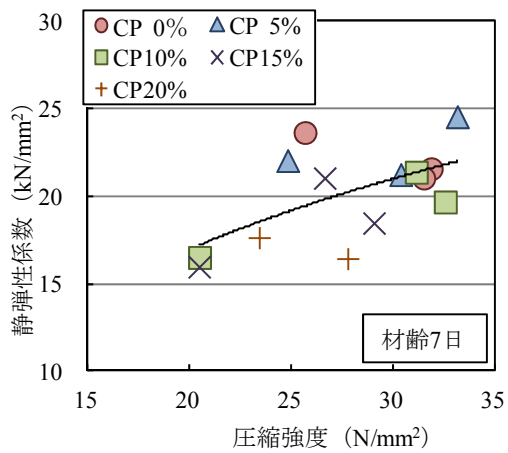


図-3.4.10 圧縮強度と静弾性係数の関係

3.5 結論

本章は従来からコンクリートに要求されていた強度に加え、新たな機能として導電性、電磁波遮蔽性を付与したコンクリートを開発することを目的として行ったもので、導電性を改善するためにコンクリートに混和する材料として炭素粉末を選定し、炭素粉末をモルタルに添加した場合にモルタルの製造が可能であるかの評価と、そのモルタルの強度性状を明確にすることを試みたものである。すなわち、炭素粉末を添加したモルタルのフレッシュ性状ならびにモルタルが硬化した後の強度性状を検討し、併せて普通モルタルの配合あるいは物性との類似点や相違点を明らかにした。得られた主な知見を以下にまとめる。

- 1) 炭素粉末の成分は99%以上が炭素で、他の成分はごく微量である。物理的特性を普通ポルトランドセメントと比較すると密度および比表面積は小さく、角張りが多い。また、特定有害物質の含有量および溶出量とも基準値以下で混和材として使用しても問題はない。
- 2) 炭素粉末を添加したモルタルのフレッシュ性状は、炭素粉末添加率が増加するに伴って、15打フロー値は小さくなり、同時に空気量が増加する傾向がある。
- 3) 3時間後および24時間後のブリーディング率は、炭素粉末添加率の増加によって減少し、収縮率は水セメント比が大きくなるとやや大きくなるが、同一水セメント比においては炭素粉末無添加の普通モルタルのそれと同等で、炭素粉末の添加率はモルタルの収縮に影響しない。
- 4) 炭素粉末を添加したモルタルの凝結時間として、始発時間は炭素粉末の添加による影響は小さいが、終結時間は炭素粉末を20%添加した場合、無添加に比べてやや遅延する程度で、炭素粉末の添加が凝結時間に及ぼす影響は小さい。
- 5) 炭素粉末を添加したモルタルの圧縮強度は、炭素粉末の添加率が増加すると低下するが、炭素粉末の添加率の多少が曲げ強度に及ぼす影響は小さい。
- 6) 同一セメント水比における28日圧縮強度は炭素粉末の添加率が大きくなるに伴って小さくなる。また、セメント水比の増加に伴う圧縮強度の増加割合（直線の傾き）は炭素粉末の添加率の大小によらず概ね等しい。
- 7) 任意の炭素粉末添加率とセメント水比におけるモルタルの28日圧縮強度の予測式を提案し、計算値と実測値を比較することで精度良く圧縮強度を推定できることを確認した。
- 8) 材齢28日における静弾性係数と圧縮強度の関係は、炭素粉末添加率が10%を超えた場合とそれ以下の場合の2本の曲線上にプロットされ、炭素粉末添加率が静弾性係数に影響を及ぼす。
- 9) 砂と炭素粉末の質量和とセメントの質量比 $(S+CP)/C$ を変化させた場合、 $(S+CP)/C=3.0$ の流動性は著しく低下し、実施工での適用が困難である。

本章における今後の課題を以下に示す。

- 1) 炭素粉末を多量に添加した場合のエントラップドエア混入がモルタルの流動性，圧縮強度におよぼす影響は大きく，今後，炭素粉末を添加したモルタルの細孔径分布および細孔容積の測定を行い，炭素粉末の添加による微細構造への影響について検討する必要がある。
- 2) 圧縮強度の低下原因と考えられる炭素粉末の強度特性，炭素粉末とセメントペースト水和物との接着力について，破壊特性を明らかにし，強度におよぼす影響を定量的に評価する必要がある。

[3章 参考文献]

- 1) 田野保，中西和久，大山隆：ニードルコークス，炭素，No.239，pp.180-183，2009
- 2) 大岸佐吉，小野博宣，文堅：コンクリートの電気抵抗に及ぼすセメントの種別，調合及び空気量の影響，コンクリート工学年次論文報告集 Vol.13，No.1，pp.435-440
- 3) 小泉徹，榎場重正，高桑信一：繊維補強コンクリートの練混ぜと強度特性，コンクリート工学年次論文報告集，10-2，pp641-646，1988
- 4) 西林新蔵，小柳治，渡邊史夫，宮川豊章：コンクリート工学ハンドブック，朝倉書店，2009
- 5) 白川潔，中川憲一：炭素繊維補強セメントの曲げ強度におよぼす諸因子，コンクリート工学年次論文報告集，4，pp153-156，1982

第4章

炭素粉末を添加したモルタルの導電性

第4章 炭素粉末を添加したモルタルの導電性に関する検討

4.1 概説

モルタル、コンクリートの電氣的性質を取り扱った研究は、電気防食工法における補修用モルタル¹⁾ や普通コンクリートにおける健全度の診断技術²⁾として電気抵抗率を測定したものであり、コンクリートに導電性を付与したコンクリートを開発するといった観点から電氣的性質を検討した研究は行われていないのが現状である。そこで、本章では、モルタルの電氣的性質の改善効果が期待できる導電性材料に炭素粉末を選定し、炭素粉末を混入したモルタルの導電性について検討を行った。試験は試作した測定回路を用いてモルタルの電気抵抗率を測定し、炭素粉末の添加率、試験時におけるモルタルの含水率等の要因がモルタルの電気抵抗率におよぼす影響を明らかにするとともに、炭素粉末を添加したモルタルの電気抵抗率の照査から配合設計法を構築するための検討を行った。

4.2 モルタルの配合および含水率が電気抵抗率に及ぼす影響

4.2.1 実験計画

表-4.2.1に実験計画を示す。実験要因として、炭素粉末添加率、水セメント比を選定し、それぞれの配合について供試体を作製した。

表-4.2.1 実験計画

W/m ³ (kg)	W/C (%)	炭素粉末添加率 (%)
316	50	0, 5, 10, 15, 20
	60	
	70	

図-4.2.1に通電試験の試験フローを示す。モルタルの電氣的性質を評価する指標として電気抵抗率を用いるが、電気抵抗率は供試体中の含水状態に影響を受けることが予想される。そこで、電気抵抗率の測定と併行して供試体の質量を測定し、含水率を算出した。試験には40×40×160mmの角柱供試体を用いて、供試体作製後、翌日に脱枠し、その直後から材齢28日目まで水中養生を施した後、温度20±2℃、湿度60±10%の恒温恒湿室で乾燥させながら電気抵抗率の測定を行った。また、恒温恒湿室にて質量が収束した後に、110℃の炉乾燥にて供試体中の質量が収束する絶乾状態まで電気抵抗率の測定を継続して行った。供試体の含水状態における区別は、水中養生直後を湿潤状態、恒温恒湿室で質量変化が収束した時点を目乾状態、炉乾燥で質量変化が収束した時点を目乾状態と定義して以下の議論を行う。

4.2.2 使用材料および示方配合

使用材料およびモルタルの配合は 3.3 と同一のものを用いた。

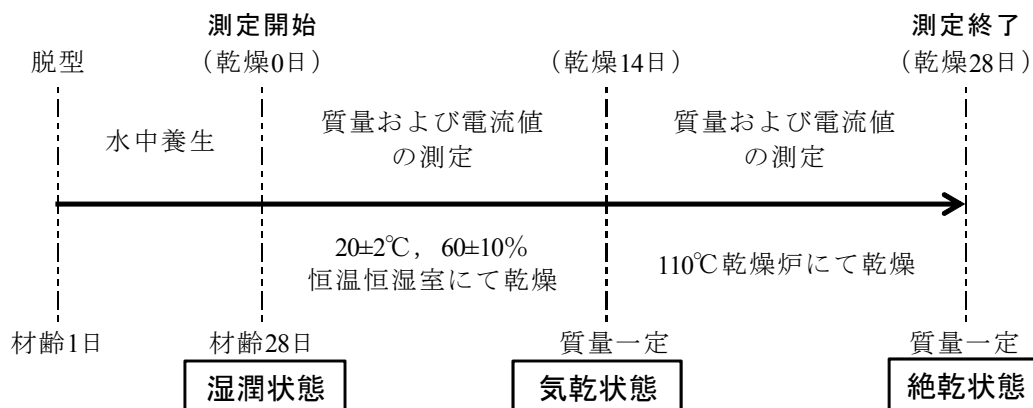


図-4.2.1 通電試験の試験フロー

4.2.3 実験方法

1) モルタルの練混ぜ

モルタルの練混ぜは、3.3.4 3) と同様に行なった。

2) 供試体作製方法

供試体の作製は、3.3.4 5) と同様に行なった。

3) 通電試験

通電試験の測定回路を図-4.2.2に、測定状況を写真-4.2.1に示す。測定回路は定電圧装置、電流計、電極、モルタル供試体で構成される。銅板電極とモルタル供試体の接着強さが異なった場合、測定した電流値の読みに差が生じたため、電極とモルタル供試体を固定する締付金具の締め付け時のトルクを同一とすることで接着強さを一定とした。なお、モルタルと電極間に微小な隙間があった場合、正確な電気抵抗率が測定できないことが報告されている³⁾ので、電極には銅板電極を用い、電極とモルタルの接触部分には、亜鉛粉末を混入した導電性グリス(写真-4.2.2)を塗布し、接触抵抗を極力除去した。なお、導電性グリスの抵抗は交流電流で測定した場合、グリス厚さ(0.35~1.05mm)で $0.1\sim 0.3\times 10^3\text{ k}\Omega\cdot\text{m}$ であり、モルタルに比べて極めて微小であることを確認したので、グリスの抵抗は無視した。

試験は定電圧装置により、測定回路に30Vの直流電流を印加し、回路内に設置した電流計で電流値を測定し、電気抵抗率は式(4.2.1)より算出した。なお、電流値は同一配合で3本の供試体を用いて測定を行い、それぞれの測定値はほぼ同値を示したので、1配合につき1本の測定値を用いて電気抵抗率を算出した。

$$D = \frac{V}{I} \times \frac{A}{L} \quad (4.2.1)$$

ここに、 D ：電気抵抗率 ($\text{k}\Omega \cdot \text{m}$)

V ：電圧 (V) I ：電流 (A)

A ：モルタルの断面積 (m^2) L ：供試体の長さ (m)

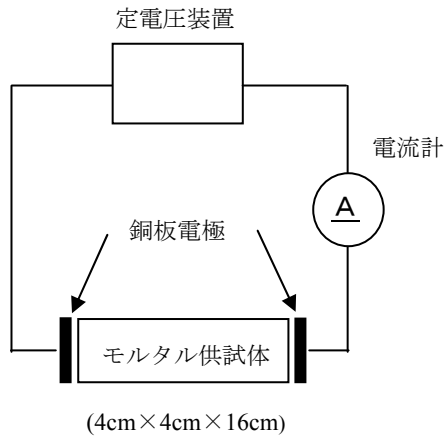


図-4.2.2 測定回路



写真-4.2.1 測定状況



写真-4.2.2 導電性グリス

図-4.2.3 に、 $W/C=60\%$ におけるモルタル供試体の乾燥期間と供試体質量の関係を示す。恒温恒湿室での乾燥開始後 14 日で質量はほぼ収束し、乾燥炉での乾燥開始から 14 日(乾燥開始から延べ 28 日)で供試体の質量は平衡状態となった。したがって、含水率算出時の絶乾質量は乾燥開始から 28 日後の質量とし、モルタルの含水率は式(4.2.2)から算出した。

$$W = \frac{(m - m_s)}{m_s} \times 100 \quad (4.2.2)$$

ここに、 W ：含水率 (%)

m ：電気抵抗率測定時の供試体の質量 (g)

m_s ：絶乾状態の質量 (乾燥開始から 28 日後の供試体質量) (g)

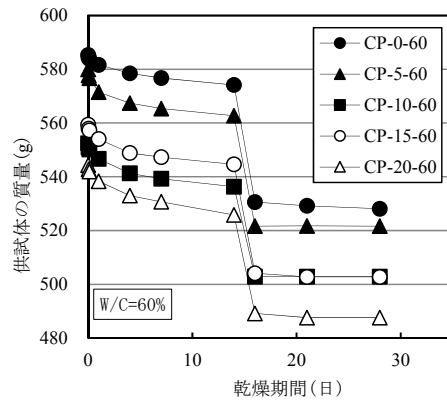


図-4. 2. 3 乾燥期間と含水率の関係 (W/C=60%)

4. 2. 4 実験結果および考察

1) モルタルの含水率が導電性に与える影響

表-4. 2. 2~4 に各配合の電気抵抗率測定結果を示す。表中の電流値に示されている「-」の記号は 30V の電圧を印加しても電流値が振れず、読み取りができないことを示す。したがって、電気抵抗率は「∞」と表示した。

図-4. 2. 4~6 に各水セメント比における含水率と電気抵抗率の関係を示す。図中の左は、測定した各含水率における電気抵抗率を示し、右は電流値が測定可能な範囲について、含水率と電気抵抗率の関係を拡大したものである。図より、いずれの水セメント比においても、含水率のわずかな変化に対して急激に電気抵抗率が増加し、電流値の読み取りができなくなる含水率が 8~10% の範囲に存在した。一般的に水(水道水)の電気抵抗率は 0.04~0.15kΩ・m であり⁴⁾、含水率 8~10% を超えた供試体は、コンクリート内部の空隙が水で十分に満たされ、水の電気抵抗率に近い値になったと考えられる。炭素粉末を添加した場合、同じ含水率で電気抵抗率を比較すると、炭素粉末の添加率が大きいほど電気抵抗率は小さくなり、飽和状態において、炭素粉末の添加でモルタルの導電性が向上している。また、炭素粉末添加率 20%、W/C=60、70%の供試体だけが水分を含まない絶乾状態においても、通電性を有している。

表-4. 2. 2 電気抵抗率測定結果 (W/C=50%)

乾燥 期間 (日)	CP-0-50			CP-5-50			CP-10-50		
	含水率 (%)	電流 (mA)	電気抵抗率 (kΩ・m)	含水率 (%)	電流 (mA)	電気抵抗率 (kΩ・m)	含水率 (%)	電流 (mA)	電気抵抗率 (kΩ・m)
0	10.8	1.0	0.32	10.7	6.0	0.05	10.7	2.5	0.13
(1h)	10.6	0.1	3.21	10.4	1.0	0.32	10.5	2.0	0.16
(3h)	10.6	0.1	3.23	10.3	1.0	0.32	10.4	2.0	0.16
1	10.1	0.1	3.23	9.9	0.1	3.23	10.0	1.0	0.32
4	9.5	—	∞	9.4	0.1	3.23	9.4	1.0	0.32
7	9.2	—	∞	8.9	0.1	3.23	9.1	0.1	3.23
14	8.7	—	∞	8.6	—	∞	8.7	—	∞
15	0.5	—	∞	0.6	—	∞	0.4	—	∞
21	0.2	—	∞	0.0	—	∞	0.0	—	∞
28	0.0	—	∞	0.0	—	∞	0.0	—	∞

乾燥 期間 (日)	CP-15-50			CP-20-50		
	含水率 (%)	電流 (mA)	電気抵抗率 (kΩ·m)	含水率 (%)	電流 (mA)	電気抵抗率 (kΩ·m)
0	11.2	5.5	0.06	11.5	6.5	0.05
(1h)	11.0	2.5	0.13	11.2	5.0	0.06
(3h)	10.9	3.0	0.11	11.1	5.0	0.06
1	10.5	2.6	0.12	10.4	3.5	0.09
4	9.9	1.8	0.18	9.6	4.0	0.08
7	9.7	1.8	0.18	9.3	3.0	0.11
14	9.2	—	∞	8.9	3.0	0.10
15	0.4	—	∞	0.3	—	∞
21	0.0	—	∞	0.1	—	∞
28	0.0	—	∞	0.0	—	∞

表-4.2.3 電気抵抗率測定結果 (W/C=60%)

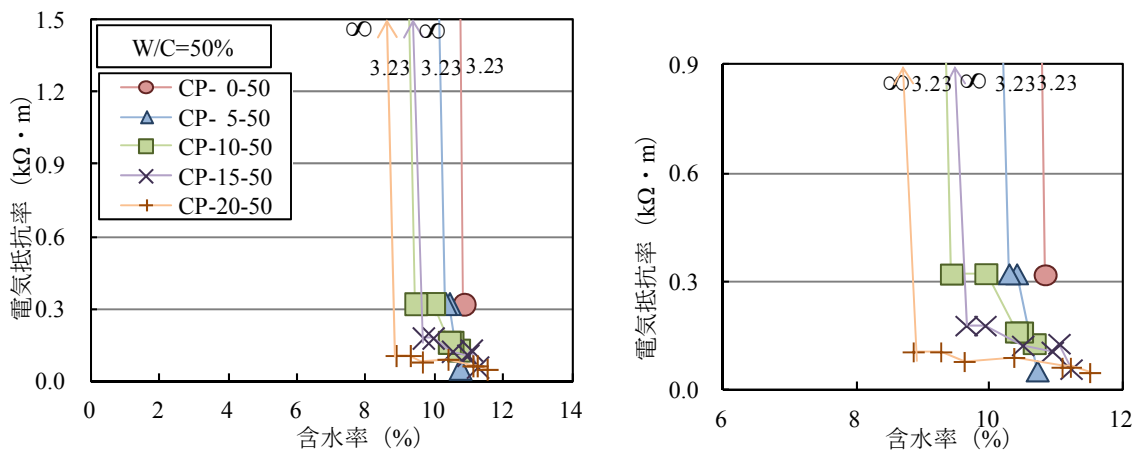
乾燥 期間 (日)	CP-0-60			CP-5-60			CP-10-60		
	含水率 (%)	電流 (mA)	電気抵抗率 (kΩ·m)	含水率 (%)	電流 (mA)	電気抵抗率 (kΩ·m)	含水率 (%)	電流 (mA)	電気抵抗率 (kΩ·m)
0	10.8	1.5	0.21	11.2	2.7	0.12	9.9	2.7	0.12
(1h)	10.6	0.5	0.64	10.8	0.5	0.64	9.6	1.5	0.21
(3h)	10.6	0.5	0.64	10.6	0.5	0.64	9.4	1.1	0.29
1	10.1	—	∞	9.6	—	∞	8.7	1.5	0.21
4	9.5	—	∞	8.8	—	∞	7.7	1.5	0.21
7	9.2	—	∞	8.4	—	∞	7.3	1.0	0.32
14	8.7	—	∞	7.9	—	∞	6.7	1.0	0.32
15	0.5	—	∞	0.0	—	∞	—	—	—
21	0.2	—	∞	0.0	—	∞	—	—	—
28	0.0	—	∞	0.0	—	∞	—	—	—

乾燥 期間 (日)	CP-15-60			CP-20-60		
	含水率 (%)	電流 (mA)	電気抵抗率 (kΩ·m)	含水率 (%)	電流 (mA)	電気抵抗率 (kΩ·m)
0	11.3	4.7	0.07	11.6	6.5	0.05
(1h)	11.0	2.0	0.16	11.3	2.2	0.15
(3h)	10.8	3.0	0.11	11.1	2.5	0.13
1	10.2	2.5	0.13	10.4	2.5	0.13
4	9.2	0.7	0.46	9.3	2.0	0.16
7	8.9	1.2	0.27	8.8	3.0	0.11
14	8.3	1.0	0.32	7.8	3.0	0.11
15	0.3	—	∞	0.3	1.0	0.32
21	0.0	—	∞	0.0	0.5	0.64
28	0.0	—	∞	0.0	0.5	0.64

表-4.2.4 電気抵抗率測定結果 (W/C=70%)

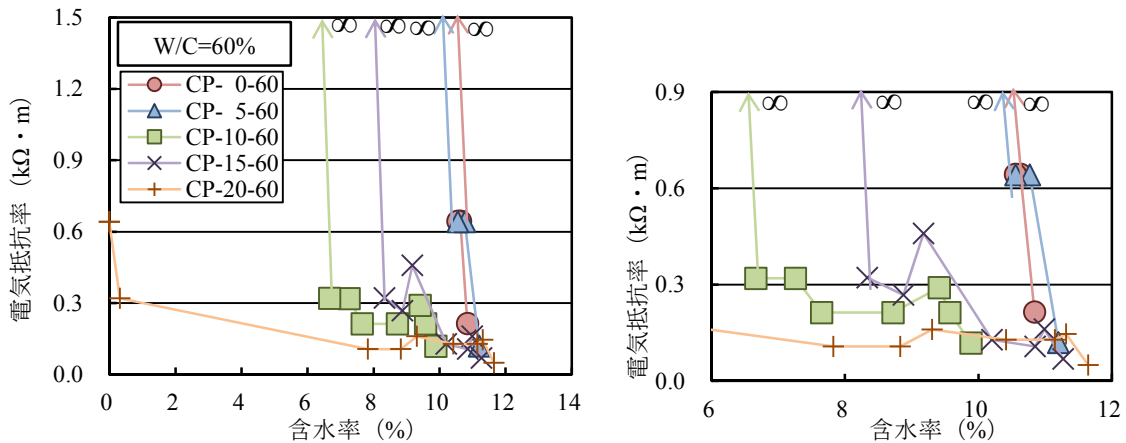
乾燥 期間 (日)	CP-0-70			CP-5-70			CP-10-70		
	含水率 (%)	電流 (mA)	電気抵抗率 (kΩ・m)	含水率 (%)	電流 (mA)	電気抵抗率 (kΩ・m)	含水率 (%)	電流 (mA)	電気抵抗率 (kΩ・m)
0	10.0	—	∞	10.6	2.0	0.16	10.9	1.1	0.30
(1h)	9.8	—	∞	10.3	0.4	0.81	10.6	2.5	0.13
(3h)	9.7	—	∞	10.2	1.1	0.30	10.5	3.4	0.10
1	9.3	—	∞	9.7	1.1	0.30	10.0	3.5	0.09
4	8.5	—	∞	8.8	2.1	0.15	9.3	2.5	0.13
7	8.2	—	∞	8.4	1.2	0.27	8.9	2.0	0.16
14	7.8	—	∞	8.0	1.2	0.27	8.5	1.9	0.17
15	7.7	—	∞	7.9	1.1	0.30	8.4	2.0	0.16
21	0.4	—	∞	0.4	—	∞	0.4	—	∞
28	0.0	—	∞	0.0	—	∞	0.0	—	∞

乾燥 期間 (日)	CP-15-70			CP-20-70		
	含水率 (%)	電流 (mA)	電気抵抗率 (kΩ・m)	含水率 (%)	電流 (mA)	電気抵抗率 (kΩ・m)
0	11.4	6.0	0.05	10.7	35.8	0.009
(1h)	11.1	6.0	0.05	10.4	33.0	0.010
(3h)	11.0	6.0	0.05	10.3	32.8	0.010
1	10.5	5.6	0.06	9.6	35.0	0.009
4	9.8	5.5	0.06	9.2	39.1	0.008
7	9.3	5.5	0.06	8.7	46.0	0.007
14	8.7	4.6	0.07	8.1	54.0	0.006
15	8.6	4.6	0.07	0.0	32.0	0.010
21	0.4	—	∞	0.0	36.0	0.009
28	0.0	—	∞	0.0	32.0	0.010



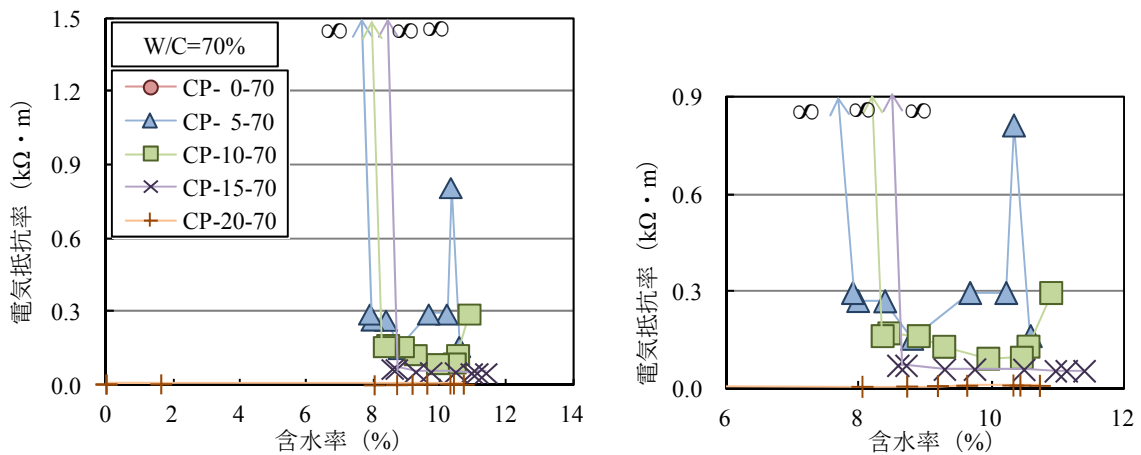
(∞ : 電流値の読み取り不可)

図-4.2.4 含水率と電気抵抗率の関係 (W/C=50%)



(∞ : 電流値の読み取り不可)

図-4.2.5 含水率と電気抵抗率の関係 (W/C=60%)



(∞ : 電流値の読み取り不可)

図-4.2.6 含水率と電気抵抗率の関係 (W/C=70%)

2) 水セメント比が導電性に与える影響

図-4.2.7 に炭素粉末添加率 0, 10, 20%の各水セメント比における含水率と電気抵抗率の関係を示す。水セメント比がモルタルの電気抵抗率に及ぼす影響は、炭素を含まない普通モルタルの場合、水セメント比が小さいほど電気抵抗率は大きくなるとの報告がある⁵⁾。これは水セメント比が小さくなることでモルタル内部の組織が緻密化されることが原因であるが、今回の試験範囲では、炭素粉末無添加の配合において、最も水セメント比の大きい W/C=70%の供試体で電流値を測定できておらず、水セメント比が電気抵抗率に及ぼす影響は明確ではない。しかし、炭素粉末を添加した配合においては、いずれの含水率でも W/C=70%の配合が最も電気抵抗率が小さく、添加率 20%の配合では、同一含水率で比較すると、他の W/C より 1/5~1/50 程度まで電気抵抗率が低下した。

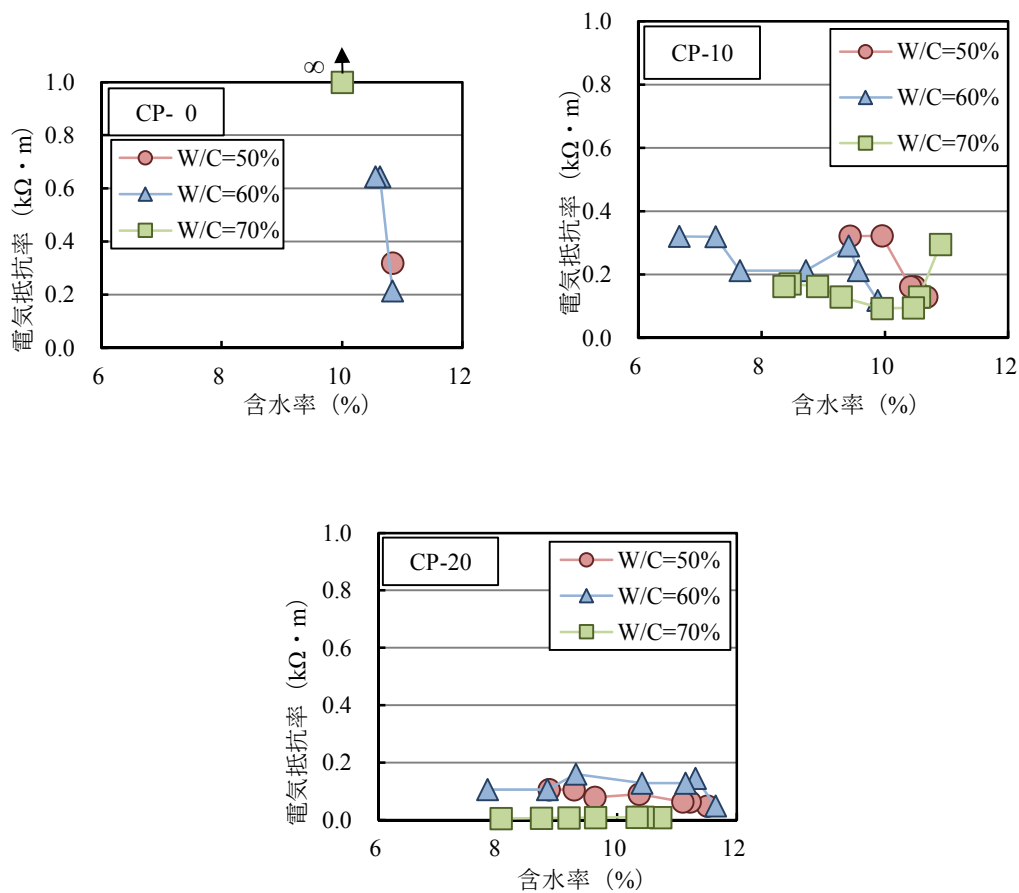


図-4.2.7 含水率と電気抵抗率の関係(炭素粉末添加率0, 10, 20%)

3) モルタルの配合要因が導電性に与える影響

モルタルの電気抵抗率は、モルタルを構成する骨材の電気抵抗率がセメントペーストに比べて大きい⁶⁾ため、砂セメント比 (S/C) に影響を受けると考えられる。そこで、W/C を変化させた配合について、S/C が電気抵抗率に及ぼす影響について検討を行った。図-4.2.8 は湿潤状態から気乾状態の期間で測定した電気抵抗率と S/C の関係を示す。図より、いずれの水セメント比においても S/C が増加すると電気抵抗率も増加傾向にある。炭素粉末を添加した配合は、無添加の配合とセメント量が同じで炭素粉末の添加量をセメントに対して外割りとしているため、炭素粉末の添加率が増加すると細骨材量は減少する。つまり、炭素粉末の添加率が減少すると細骨材量が増加し、S/C が増加することになる。したがって、純粹に細骨材量と電気抵抗率との関係を明らかにするためには、炭素粉末の添加率を固定した配合で検討を行う必要がある。そこで、以下に炭素粉末添加率を一定とした場合の S/C と電気抵抗率について考察した。

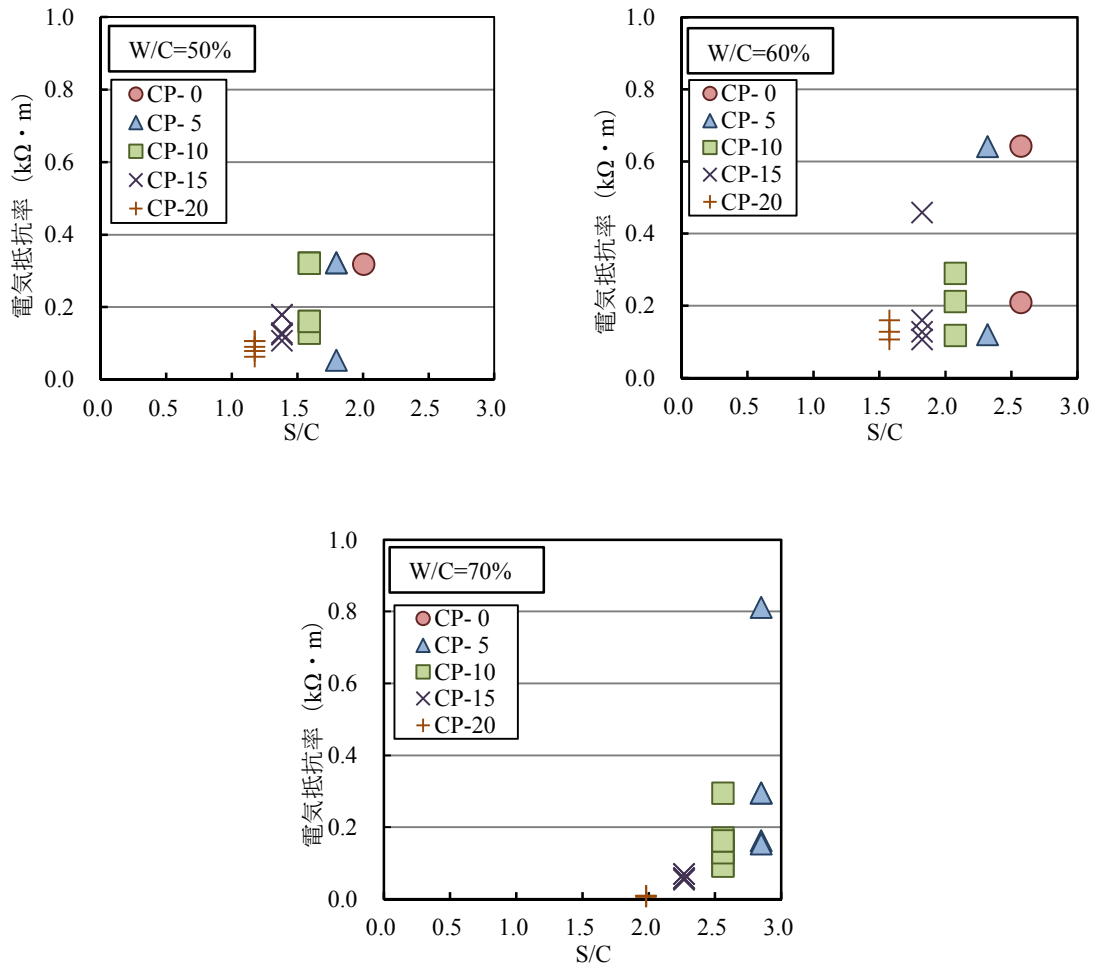
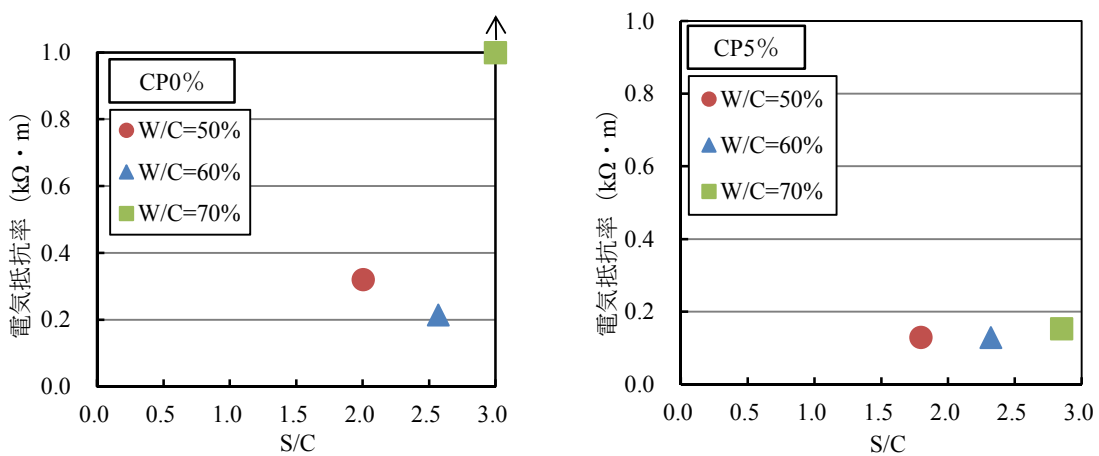


図-4.2.8 S/C と電気抵抗率の関係 (湿潤～気乾状態)

図-4.2.9 に湿潤状態の S/C と電気抵抗率との関係を炭素粉末添加率ごとに示す。炭素粉末を添加していない場合、S/C が大きくなると電気抵抗率も増加する傾向を示しており、細骨材量によって電気抵抗率が変化している。一方、炭素粉末を添加したモルタルの電気抵抗率はいずれの添



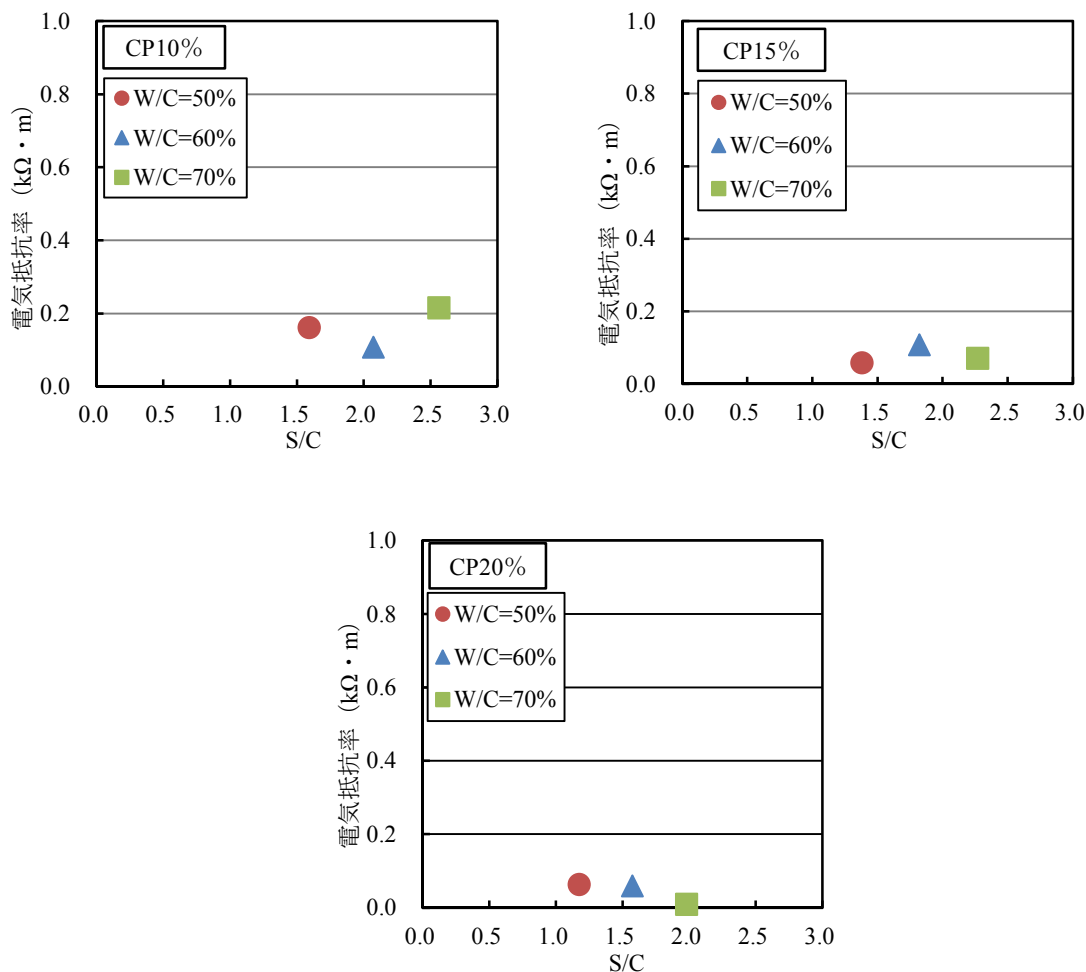


図-4.2.9 S/C と電気抵抗率の関係(湿潤状態)

加率においても S/C が増加しても電気抵抗率に変化はない。炭素粉末をモルタルに添加することで水と炭素粉末の回路が構成され、その間に介在するモルタルの品質に影響を受けないのではないかと考える。したがって、炭素粉末を添加した湿潤状態のモルタルは、今回の細骨材量およびセメント量の範囲内であれば、S/C にかかわらず炭素粉末の添加率毎にほぼ一定の電気抵抗率を得ることができる。

図-4.2.10 に湿潤状態から気乾状態の間に測定した電気抵抗率と S/C の関係を炭素粉末添加率ごとに示す。炭素粉末無添加および炭素粉末添加率 5% の場合、S/C の増加とともに電気抵抗率も増加する傾向にある。一方、炭素粉末添加率が 10% 以上では湿潤状態と同様に、S/C が変化しても電気抵抗率に変化はなく、炭素粉末の添加率毎にほぼ一定の電気抵抗率を得ることができる。

以上の結果より、湿潤状態から気乾状態においては、炭素粉末を添加したモルタルの電気抵抗率は S/C にほとんど影響を受けていないことが明らかとなった。モルタルの配合では、細骨材とセメントが抵抗材料となるが、炭素粉末を添加すると砂とセメントの比率は、電気抵抗率に影響しないといえる。電気抵抗率に影響をおよぼす別の因子として、S+C を除いた残りの構成材料で

ある水，炭素粉末の質量和があげられ，これらが電気抵抗率の直接的な要因になっていると考えられる。

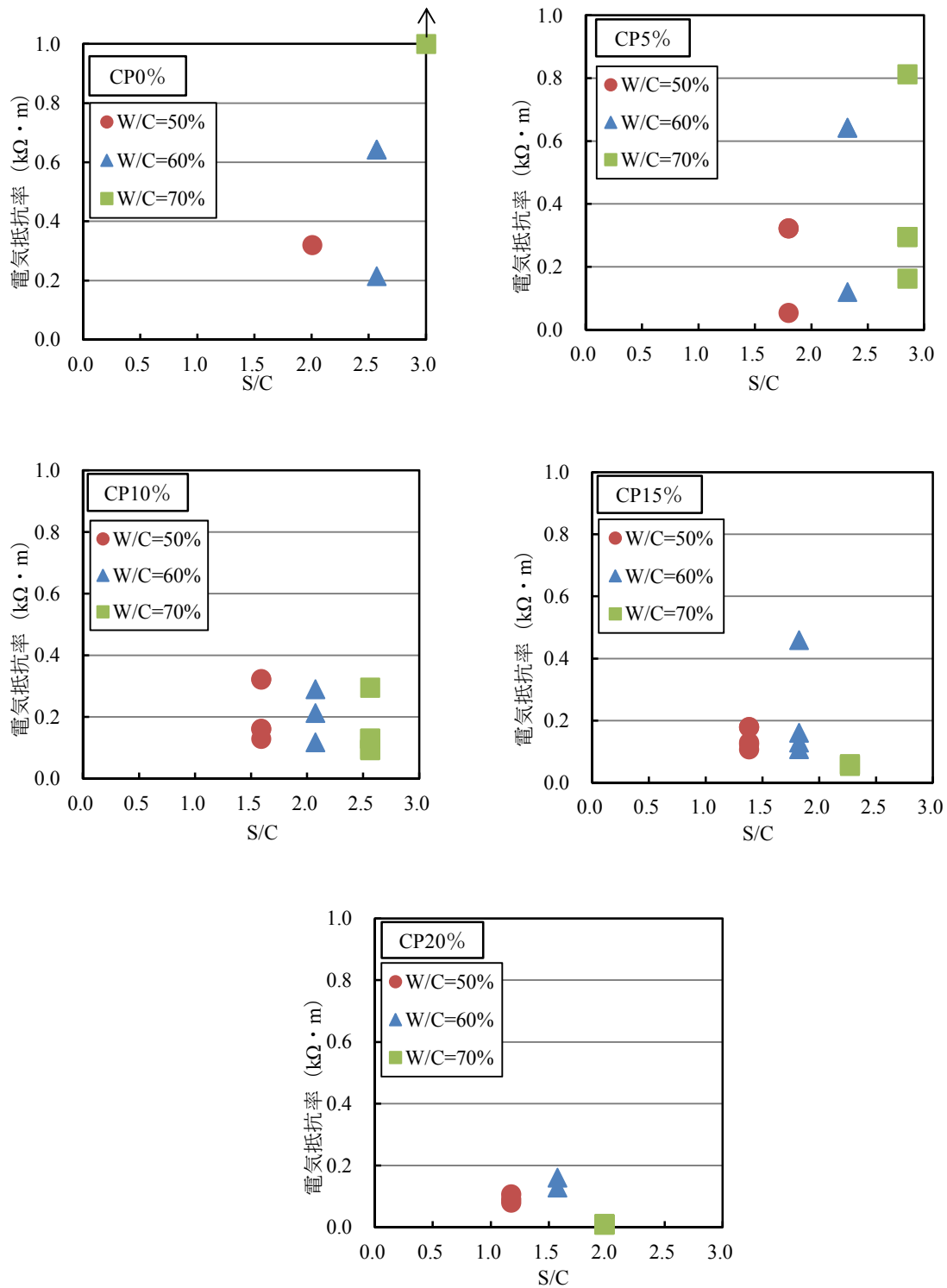


図-4.2.10 S/C と電気抵抗率の関係 (湿潤～気乾状態)

図-4.2.11 に水と炭素粉末添加量の質量和(以下，W+CP)と電気抵抗率の関係を示す。図より W+CP が増加すると電気抵抗率は減少し，W+CP からモルタルの電気抵抗率を推定することが可

能となる。しかし、W+CPで電気抵抗率の推定を試みた場合、炭素粉末の各製造ロットによる密度変化や今後予想される他の導電性材料の使用、各導電性材料の混合使用にも対応できるようにするには問題がある。そこで、配合設計の段階において、配合条件から容易に電気抵抗率を推定できるように、本研究では水と炭素粉末の容積(V_W+V_{CP})を基準とした。

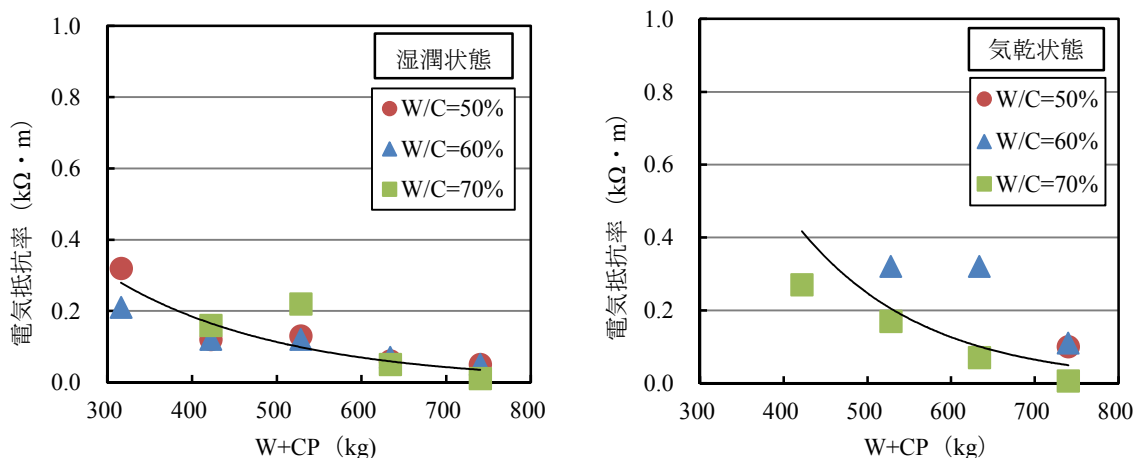


図-4.2.11 水と炭素粉末添加量の総量(W+CP)と電気抵抗率の関係

図-4.2.12に湿潤および気乾状態における V_W+V_{CP} と電気抵抗率の関係を示す。なお、 V_W+V_{CP} の算出には空気量の実測値を考慮している。図より V_W+V_{CP} が大きくなると、電気抵抗率が小さくなる傾向が見いだせる。ただし、気乾状態は、炭素粉末無添加および添加率の低い配合で電圧30Vを印加してもほとんど電流が流れず、電気抵抗率を算出できていないため、 V_W+V_{CP} と電気抵抗率を関係付けることはできなかった。今後、印加電圧を大きくした場合の測定や交流電流による電気抵抗率を測定する等、各配合における電気抵抗率のデータを蓄積することによって推定精度を高める必要があると考えられる。

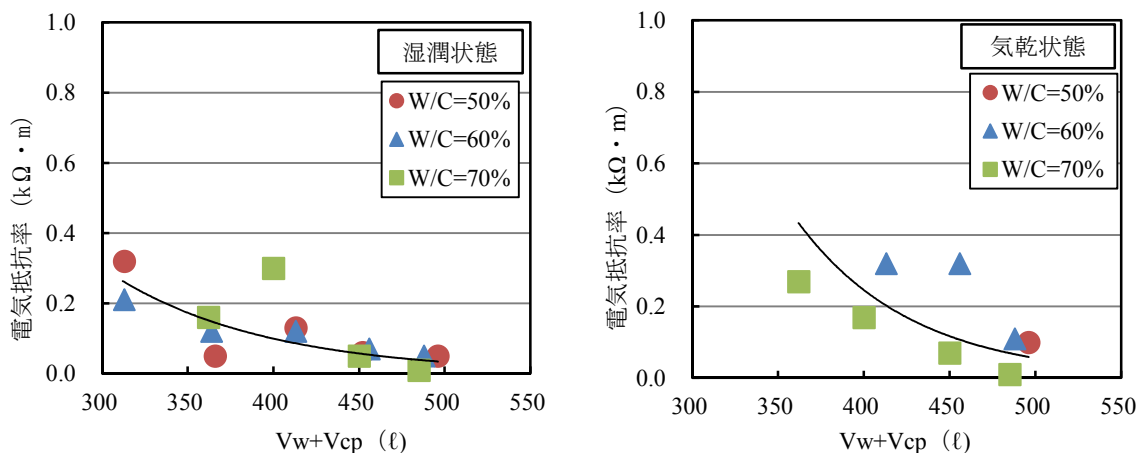


図-4.2.12 水と炭素粉末の体積(V_W+V_{CP})と電気抵抗率の関係

本研究において、炭素粉末を添加したモルタルの電気抵抗率は、概ね $V_W + V_{CP}$ で推定できることが明らかとなった。導電性の良好なモルタルを接地材料として利用する場合、設置場所は土中となるため、モルタルは常時、湿潤状態にあると考えてよい。したがって、**図-4.2.12**の湿潤状態における $V_W + V_{CP}$ と電気抵抗率の関係から任意の配合におけるモルタルの電気抵抗率の推定が可能であると考えられる。

4) 限界含水率

図-4.2.4~6に示した含水率と電気抵抗率の関係において、含水率のわずかな変化に対して急激に電気抵抗率が増加し、絶縁体に近くなる含水率が存在することが明らかになった。本研究では、このように電気抵抗率が急激に変化する含水率を限界含水率と称することにし、各配合要因と限界含水率との関係を検討した。**図-4.2.13**に $V_W + V_{CP}$ と限界含水率の関係を示す。単位水量が一定の場合、ばらつきはあるものの、 $V_W + V_{CP}$ が増加すると限界含水率は小さくなる傾向にある。ただし、水セメント比の影響は明確でない。したがって、限界含水率は $V_W + V_{CP}$ に影響を受け、 $V_W + V_{CP}$ が 500 l 以上になると限界含水率が 0%、すなわち、全く水分を含まない状態でもモルタル中の炭素粉末で回路を構築し、導電性を保持できるモルタルの製造が可能となる。

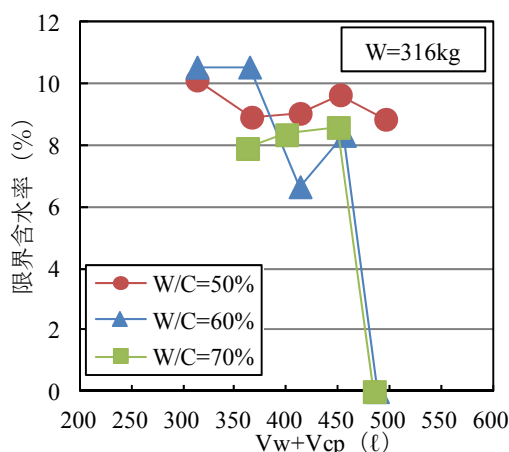


図-4.2.13 水と炭素粉末の体積 ($V_W + V_{CP}$) と限界含水率の関係

4.3 一般的なモルタル配合の導電性に関する検討

4.3.1 実験計画

前節では、炭素粉末無添加におけるモルタルの砂セメント比 $S/C=2.0$ を基準として、水セメント比および炭素粉末添加率が電気抵抗率に及ぼす影響を検討したが、一般的に使用されているモルタル配合の S/C は 2.0~3.0 の範囲を採用するケースが多い。そこで、本節では、 $S/C=2.0\sim3.0$ の範囲における導電性を把握するために、 $W/C=60\%$ に固定し、 $(S+CP)/C=2.0, 2.6, 3.0$ と変化させた供試体を作製し、電気抵抗率を測定した。実験計画を**表-4.3.1**に示す。実験項目は前節と同一とした。

表-4.3.1 実験計画

W/C (%)	W/m ³ (kg)	(S+CP) /C	炭素粉末添加率 (%)
60	290	2.0	0, 5, 10, 15, 20
	316	2.6	
	356	3.0	

4.3.2 使用材料および示方配合

使用材料およびモルタルの配合は3.4と同一とした。

4.3.3 実験方法

実験方法は4.2と同一の方法を用いた。

4.3.4 実験結果および考察

表-4.3.2~4に(S+CP)/Cを変化させた配合の電気抵抗率測定結果を示す。また、図-4.3.1~3に含水率と電気抵抗率の関係を示す。図より、含水率のわずかな変化に対して急激に電気抵抗率が増加すること、また、同一含水率では炭素粉末添加率が高いほど電気抵抗率は小さくなることを示しており、(S+CP)/Cの比率にかかわらず同じ傾向を示している。(S+CP)/C=3.0の配合では、他の配合に比べてフレッシュ時の流動性が悪く、フレッシュ性状および圧縮強度、曲げ強度が低下する傾向にあったが、電気抵抗率は他の配合との違いはなく、モルタルの(S+CP)/Cが2.0~3.0の範囲で変化しても、電気抵抗率への影響は小さく、同様の導電性を確保できると考えられる。

表-4.3.2 電気抵抗率測定結果 (S+CP)/C=2.0

乾燥 期間 (日)	(S+CP)/C=2.0 CP-0			(S+CP)/C=2.0 CP-5			(S+CP)/C=2.0 CP-10		
	含水率 (%)	電流 (mA)	電気抵抗率 (kΩ·m)	含水率 (%)	電流 (mA)	電気抵抗率 (kΩ·m)	含水率 (%)	電流 (mA)	電気抵抗率 (kΩ·m)
0	13.2	2.0	0.16	12.7	2.0	0.16	13.2	5.2	0.06
(1h)	13.1	2.2	0.15	12.4	3.0	0.11	13.0	5.0	0.06
(3h)	13.0	1.7	0.19	12.2	2.9	0.11	12.9	4.2	0.08
1	12.4	0.3	1.23	11.4	1.4	0.23	12.0	1.6	0.20
4	11.2	0.0	1.45	10.4	1.2	0.27	10.8	2.0	0.16
7	10.5	0.1	∞	9.8	1.0	0.32	10.2	2.0	0.16
14	9.7	—	∞	9.3	0.4	0.74	9.6	1.9	0.17
21	0.4	—	∞	0.4	0.0	∞	0.3	0.0	∞
28	0.0	—	∞	0.2	0.0	∞	0.2	0.0	∞

乾燥 期間 (日)	(S+CP)/C=2.0 CP-15			(S+CP)/C=2.0 CP-20		
	含水率 (%)	電流 (mA)	電気抵抗率 (kΩ·m)	含水率 (%)	電流 (mA)	電気抵抗率 (kΩ·m)
0	13.9	3.0	0.11	14.2	6.8	0.05
(1h)	13.6	4.0	0.08	13.9	6.8	0.05
(3h)	13.5	4.0	0.08	13.8	6.2	0.05
1	12.4	3.7	0.09	12.9	6.6	0.05
4	11.1	3.2	0.10	11.6	4.8	0.07
7	10.5	2.4	0.13	10.9	4.0	0.08
14	9.8	1.8	0.18	10.1	2.8	0.12
21	0.3	0.0	∞	0.3	0.0	∞
28	0.0	0.0	∞	0.0	0.0	∞

表-4.3.3 電気抵抗率測定結果 (S+CP)/C=2.6

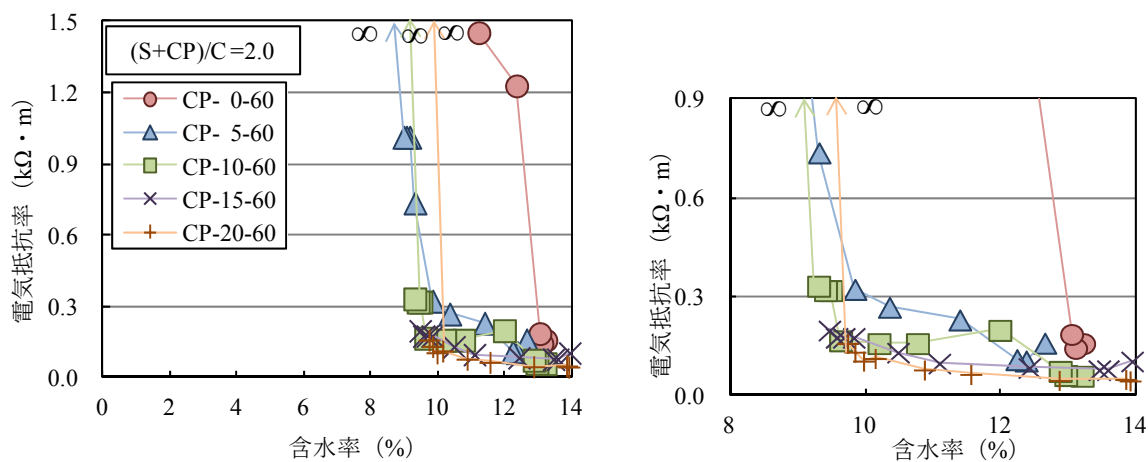
乾燥 期間 (日)	(S+CP)/C=2.6 CP-0			(S+CP)/C=2.6 CP-5			(S+CP)/C=2.6 CP-10		
	含水率 (%)	電流 (mA)	電気抵抗率 (kΩ·m)	含水率 (%)	電流 (mA)	電気抵抗率 (kΩ·m)	含水率 (%)	電流 (mA)	電気抵抗率 (kΩ·m)
0	10.8	1.5	0.21	11.2	2.7	0.12	9.9	2.7	0.12
(1h)	10.6	0.5	0.64	10.8	0.5	0.64	9.6	1.5	0.21
(3h)	10.6	0.5	0.64	10.6	0.5	0.64	9.4	1.1	0.29
1	10.1	—	∞	9.6	—	∞	8.7	1.5	0.21
4	9.5	—	∞	8.8	—	∞	7.7	1.5	0.21
7	9.2	—	∞	8.4	—	∞	7.3	1.0	0.32
14	8.7	—	∞	7.9	—	∞	6.7	0.5	0.32
21	0.2	—	∞	0.0	—	∞	—	—	—
28	0.0	—	∞	0.0	—	∞	—	—	—

乾燥 期間 (日)	(S+CP)/C=2.6 CP-15			(S+CP)/C=2.6 CP-20		
	含水率 (%)	電流 (mA)	電気抵抗率 (kΩ·m)	含水率 (%)	電流 (mA)	電気抵抗率 (kΩ·m)
0	11.3	4.7	0.07	11.6	6.5	0.05
(1h)	11.0	2.0	0.16	11.3	2.2	0.15
(3h)	10.8	3.0	0.11	11.1	2.5	0.13
1	10.2	2.5	0.13	10.4	2.5	0.13
4	9.2	0.7	0.46	9.3	2.0	0.16
7	8.9	1.2	0.27	8.8	3.0	0.11
14	8.3	1.0	0.32	7.8	3.0	0.11
21	0.0	—	∞	0.0	0.5	0.64
28	0.0	—	∞	0.0	0.5	0.64

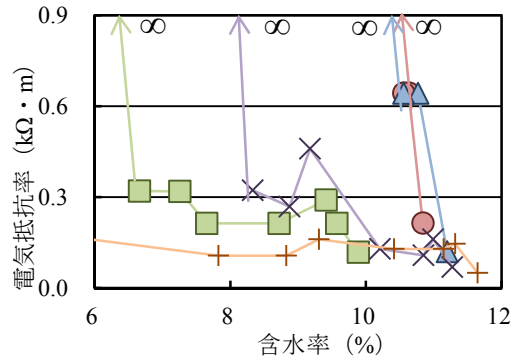
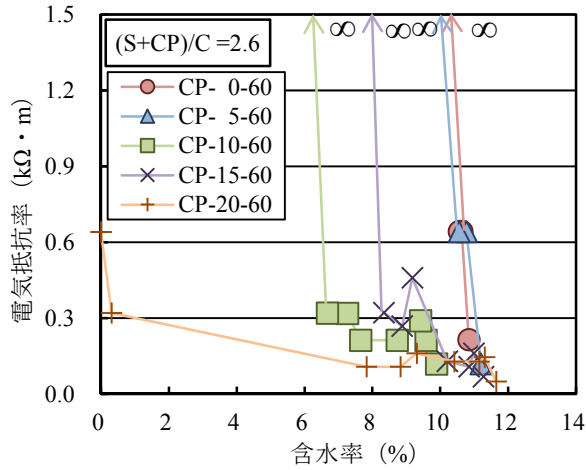
表-4.3.4 電気抵抗率測定結果 (S+CP)/C=3.0

乾燥 期間 (日)	(S+CP)/C=3.0 CP-0			(S+CP)/C=3.0 CP-5			(S+CP)/C=3.0 CP-10		
	含水率 (%)	電流 (mA)	電気抵抗率 (kΩ·m)	含水率 (%)	電流 (mA)	電気抵抗率 (kΩ·m)	含水率 (%)	電流 (mA)	電気抵抗率 (kΩ·m)
0	10.9	0.5	0.65	10.5	1.4	0.23	10.9	6.0	0.05
(1h)	10.8	0.5	0.60	10.2	2.4	0.13	10.2	4.2	0.08
(3h)	10.6	0.4	0.74	10.0	3.2	0.10	10.0	4.0	0.08
1	9.8	0.1	2.31	9.2	1.8	0.18	9.2	3.7	0.09
4	8.9	—	∞	8.2	1.6	0.20	8.6	3.0	0.11
7	8.0	—	∞	7.5	1.4	0.23	8.0	2.4	0.14
14	7.7	—	∞	7.3	1.4	0.23	7.6	2.0	0.16
21	0.3	—	∞	0.5	0.0	∞	0.1	0.0	∞
28	0.0	—	∞	0.0	0.0	∞	0.0	0.0	∞

乾燥 期間 (日)	(S+CP)/C=3.0 CP-15		
	含水率 (%)	電流 (mA)	電気抵抗率 (kΩ·m)
0	11.0	6.4	0.05
(1h)	10.8	7.4	0.04
(3h)	10.6	6.8	0.05
1	9.8	6.0	0.05
4	8.9	4.6	0.07
7	8.0	3.6	0.09
14	7.8	2.9	0.11
21	0.3	0.0	∞
28	0.1	0.0	∞

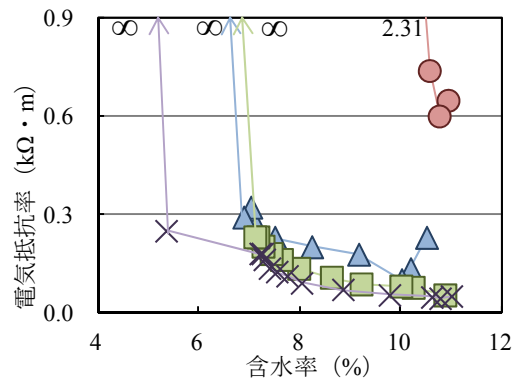
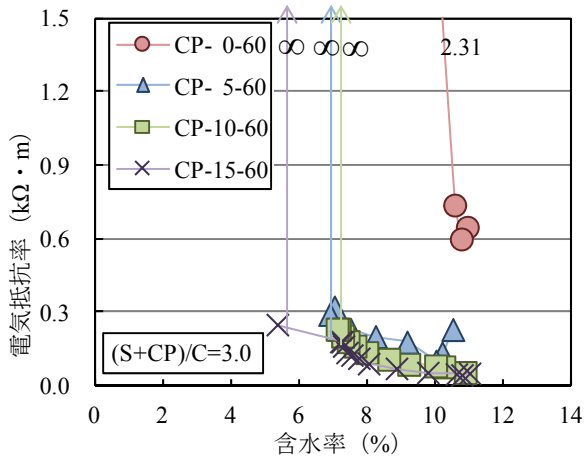


(∞ : 電流値の読み取り不可)
図-4.3.1 含水率と電気抵抗率の関係 (S+CP)/C=2.0



(∞ : 電流値の読み取り不可)

図-4.3.2 含水率と電気抵抗率の関係 (S+CP)/C=2.6



(∞ : 電流値の読み取り不可)

図-4.3.3 含水率と電気抵抗率の関係 (S+CP)/C=3.0

(S+CP)/C を変化させた場合、配合要因が電気抵抗率に及ぼす影響について検討を行った。前節より、炭素粉末を添加したモルタルの電気抵抗率は水と炭素粉末の体積和が直接的に影響するため、(S+CP)/C を変化させた配合についても $V_w + V_{CP}$ と電気抵抗率の関係で表すことにした。図-4.3.4 に $V_w + V_{CP}$ と電気抵抗率の関係を示す。図中には参考として、水セメント比を要因とした測定結果もプロットしている。(S+CP)/C を変化させた配合も湿潤状態においては、水セメント比を要因とした配合と同様に、電気抵抗率と $V_w + V_{CP}$ の関係はほぼ同一の曲線上にプロットすることができる。したがって、(S+CP)/C が 2.0~3.0 の範囲にあるモルタルの電気抵抗率は、概ね $V_w + V_{CP}$ から推定することが可能である。

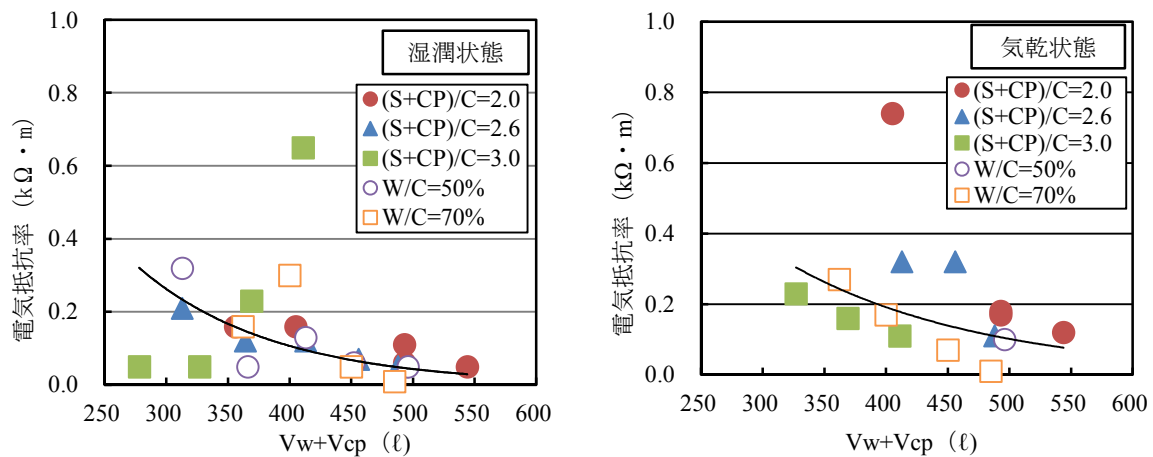


図-4.3.4 V_w+V_{CP} と電気抵抗率の関係

4.4 炭素粉末を添加した導電性モルタルの適用性

普通モルタルに炭素粉末を添加することで導電性の向上を確認したが、炭素粉末を添加したモルタルが有する現状の導電性能と、導電モルタル開発後の用途として要求される導電性能を比較することで、炭素粉末を添加したモルタルの適用性について検証する。要求される導電性能の比較値は、電気防食の陽極材用モルタルと、近年、接地工事に用いられることが多く、多種多様な原料を用いた製品が多く開発されている接地低減電極材の電気抵抗率とした。表-4.4.1に各材料の電気抵抗率と炭素粉末を添加したモルタルの電気抵抗率の比較を示す。これらの電気抵抗率の測定方法は明らかにされていないが、電気抵抗率のみで比較すると、本研究の中で最も電気抵抗率が小さい配合(W/C=70%、炭素粉末添加率20%)においても電気防食の陽極材用モルタルや接地低減電極材に比べると電気抵抗率は4~10倍以上と高い値を示しており、これらの分野で導電モルタルの用途開発を行う場合、電気抵抗率のさらなる低減対策が必要となる。ただし、炭素粉末添加モルタルを接地電極材として構造物の基礎部材に利用する場合は、既存の接地抵抗低減材に比べて電流の流出面積を広くできるため、既存の接地低減電極材と同等の性能を有することは可能である。

今後、炭素粉末を添加したモルタルの電気抵抗率をさらに低減するには、導電性材料間の距離を短くする方法が考えられ、炭素粉末の粒度分布の改善、他の導電性材料との混合等の検討を行う必要がある。

表-4.4.1 導電性を要求される各種材料の電気抵抗率

名称・用途	電気抵抗率 ($\Omega \cdot m$)	備考
電気防食用陽極材	1.4	セメント系材料
接地低減電極材	0.1~1.0	強度を必要としない粉体材料
炭素粉末 炭素粉末添加率 CP-10%	160	W/C=70% 気乾状態
炭素粉末 炭素粉末添加率 CP-20%	6.0	W/C=70% 気乾状態

4.5 結論

本章は炭素粉末を添加したモルタルに直流電流を印加した際の電気抵抗率を算出することで、含水率およびモルタルの各種配合要因が導電性に及ぼす影響について検討を行った。本研究の範囲内で得られた結果を以下にまとめて示す。

- 1) モルタルの含水率が8~10%を超えると、含水率にかかわらず電気抵抗率はほぼ一定の値となるが、同一含水率で比較すると炭素粉末を添加したモルタルの電気抵抗率は小さくなり、飽和状態においても炭素粉末の添加によってモルタルの導電性が向上する。含水率8%以下では、一部の高添加率の配合において導電性を確保できた。
- 2) 炭素粉末を添加したモルタルの電気抵抗率は、単位細骨材量と単位セメント量の比による影響は小さく、配合から電気抵抗率を推定する場合は、水と炭素粉末添加量の体積($V_w + V_{CP}$)をパラメータとすることが最も合理的である。
- 3) 含水率のわずかな変化に対して急激に電気抵抗率が増加し、絶縁体に近くなる含水率を限界含水率と定義した。限界含水率は $V_w + V_{CP}$ が増加すると小さくなる傾向にあり、 $V_w + V_{CP}$ が500 l以上になると、全く水分を含まない状態でも導電性を保持できるモルタルの製造が可能となる。
- 4) モルタルの $(S+CP)/C$ が2.0~3.0の範囲で変化しても、 $(S+CP)/C$ の比率が電気抵抗率に及ぼす影響は小さく、電気抵抗率は $V_w + V_{CP}$ から推定することが可能である。
- 5) 炭素粉末を添加したモルタルが有する現状の導電性能と、導電モルタル開発後の用途として要求される導電性能を電気抵抗率で比較した結果、本研究の中で最も電気抵抗率が小さい配合(W/C=70%, 炭素粉末添加率20%)でも電気防食の陽極材用モルタルや接地低減電極材に比べると電気抵抗率は高い値を示しており、電気抵抗率のさらなる低減対策が必要となる。

本章における今後の課題を以下に示す。

- 1) 導電性コンクリートの開発に向けて、導電性モルタルに粗骨材を混入した場合のモルタルと粗骨材の回路構成を明らかにし、粗骨材がモルタルの導電性に及ぼす影響について検証する必要がある。
- 2) 今後、炭素粉末を添加したモルタルの電気抵抗率をさらに低減するには、導電性材料間の距離を短くする方法が考えられ、炭素粉末の粒度分布の改善、他の導電性材料との混合等の検討を行う必要がある。

[4章 参考文献]

- 1) 例えば、川俣孝治, 守屋進, 内藤英晴, 皆川浩: セメント系材料の電気抵抗率測定方法に関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1107-1112, 2004

- 2) 例えば，榎原彩野，齋藤祐貴，皆川浩，久田真：乾湿に伴う含水状態の変化がモルタルの電気抵抗率の測定値に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.701-706，2010
- 3) 光本真一，山崎雄也，福間眞澄，高田龍一：2 端子法を用いたコンクリートの電気計測，宇部工業高等専門学校研究報告 第 49 号，平成 15 年 3 月
- 4) 自然科学研究機構 国立天文台：理科年表，丸善出版株式会社，2012
- 5) 榎原彩野，皆川浩，久田真：モルタルの電気抵抗率と塩化物イオン拡散係数との関係に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.30，No.1，pp789-794，2008
- 6) 北峯博司，関博，金子雄一：コンクリートの含水比と抵抗率に関する実験的研究，土木学会第 46 回年次学術講演会，V-89，pp194-195，1991

第5章

炭素粉末を添加したモルタルの電磁波遮蔽性

第5章 炭素粉末を添加したモルタルの電磁波遮蔽性

5.1 概説

第4章では炭素粉末の添加によってモルタルの電気抵抗率が低下し、導電性を改善する効果があることを確認した。物質の導電性は電磁波の吸収と密接な関係があり、炭素系導電材料はゴムやプラスチックなどの絶縁体に混合することで優れた電磁波吸収性を有する誘電性吸収材料として広く利用されている¹⁾。構造物施工の際にコンクリートに炭素系導電材料を添加することによってコンクリートの電磁波遮蔽性が改善できれば、電磁波制御が可能な構造材料が実現でき、従来のコンクリートに電磁波遮蔽材を接着ないしは塗布する工法に比べて、安価で施工性に優れた新しい発想の工法となる。

そこで、本章においては、炭素粉末を添加したモルタルの電磁波制御は、電磁波を遮蔽する性能を定量化することができると考え、電磁波遮蔽性としてとらえ、電磁波遮蔽性を以下のように定義した。

すなわち、ここでは、電磁波遮蔽性のうち、モルタル内部で電磁波を熱エネルギーに変換できる性質を電磁波吸収性、モルタル表面で電磁波を反射させ電磁波の透過を極端に小さくできる性質を電磁波反射性と定義し、それぞれの性能を評価することでモルタルの電磁波遮蔽性を評価した。

電磁波遮蔽性に関する試験は、電気、電子分野では種々の試験法が提案されているが²⁾、モルタルやコンクリートにも適用できるような断面の大きな材料を対象とした試験は少なく、また、未だ確立された試験法もない。そこで、図-5.1.1に示すような電磁波遮蔽性評価フローを提案し、電磁波遮蔽性を評価する既存の試験方法の改良、新しい試験装置の試作を行い、それらの試験を組み合わせることでモルタルの電磁波遮蔽性を評価した。すなわち、電磁波吸収性に関する評価は、第1ステップとして、電子レンジを用いた簡易試験³⁾を用い、簡易試験の適用性の検証と炭

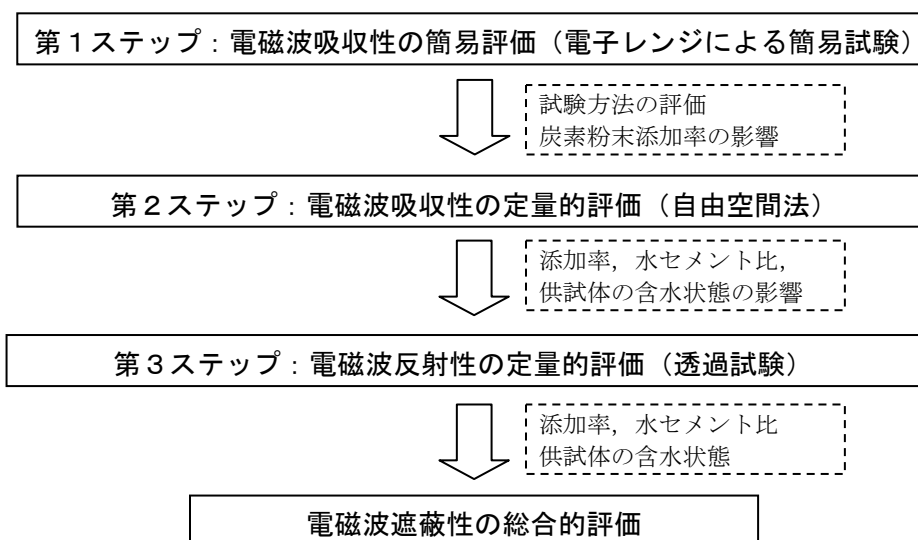


図-5.1.1 電磁波遮蔽性の評価フロー

素粉末の添加による電磁波吸収効果について検討を行った。第2ステップでは、電磁波吸収性を定量的に評価するために、電磁気学的試験である自由空間法⁴⁾を用い、電磁波の入射角・反射角および供試体の厚さを変化させることで試験の適用性を検証した。また、炭素粉末の添加率、水セメント比、供試体の含水状態が電磁波吸収性に及ぼす影響を自由空間法で測定した反射率を用いて評価するとともに、簡易試験によって得られた結果と比較した。第3ステップにおいては、断面の大きな材料の測定も可能な透過試験装置を試作し、この装置を用いて電磁波反射性を評価し、炭素粉末の添加率、水セメント比、供試体の含水状態が電磁波反射性に及ぼす影響を透過率で評価した。

5.2 各試験の概要

5.2.1 簡易試験

1) 実験概要

モルタルの電磁波吸収性を簡易に測定する方法として家庭用電子レンジを用いた試験が提案されている²⁾。この試験は家庭用電子レンジで周波数 2.45GHz の電磁波をモルタルに照射後、供試体の表面温度を測定し、電磁波照射前後の温度上昇量から電磁波吸収性を評価するものである。すなわち、物体に電磁波が吸収されると熱エネルギーに変換されるため、供試体の表面温度が上昇していれば電磁波を吸収したことを意味する。本研究では、この試験方法を採用し、家庭用電子レンジを用いた簡易試験による電磁波吸収性について実験的検討を行った。また、表面温度の分布を視覚的にとらえるために赤外線サーモグラフィによってモルタルの温度分布を撮影した。簡易試験の実験計画を表-5.2.1 に示す。実験要因は炭素粉末添加率、水セメント比を選定した。なお、炭素粉末の添加率はモルタル体積比で 0, 5, 10, 15, 20%とした。

表-5.2.1 実験計画

W/m ³ (kg)	W/C (%)	炭素粉末添加率 (%)
316	50	0, 5, 10, 15, 20
	60	
	70	

図-5.2.1 に簡易試験に用いる供試体の試験手順のフローを示す。一般的に電子レンジによる加熱の原理は、物質の分子が高い周波数で大電力の電磁波によって振動を起こし、熱エネルギーに変換されることによる。したがって、簡易試験では供試体中の含水状態が電磁波吸収による温度上昇量に影響すると予想されたため、供試体の含水率を算出した。試験には 40×40×160mm の角柱供試体を用いて、供試体作製後、翌日に脱枠し、温度 20±2℃、湿度 60±10%の恒温恒湿室で乾燥させ、質量が収束した 14 日後に、110℃の炉乾燥にて供試体中の質量が収束するまで乾燥さ

せ、乾燥開始から延べ 28 日後を絶乾状態とした。供試体を炉乾燥から取り出した後、恒温恒湿室で表面温度が一定となるまで約 24 時間静置し、簡易試験を開始した。その後、温度 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $60\pm 10\%$ の恒温恒湿室で保存し、測定開始から 42 日後まで継続的に質量の測定とともに簡易試験を行った。

2) 使用材料および示方配合

使用材料およびモルタルの示方配合は 3.3.4 2) と同一とした。

3) モルタルの練混ぜ

モルタルの練混ぜは、3.3.4 3) と同様にして行った。

4) 供試体作製方法

供試体の作製は、3.3.4 5) と同様にして行った。

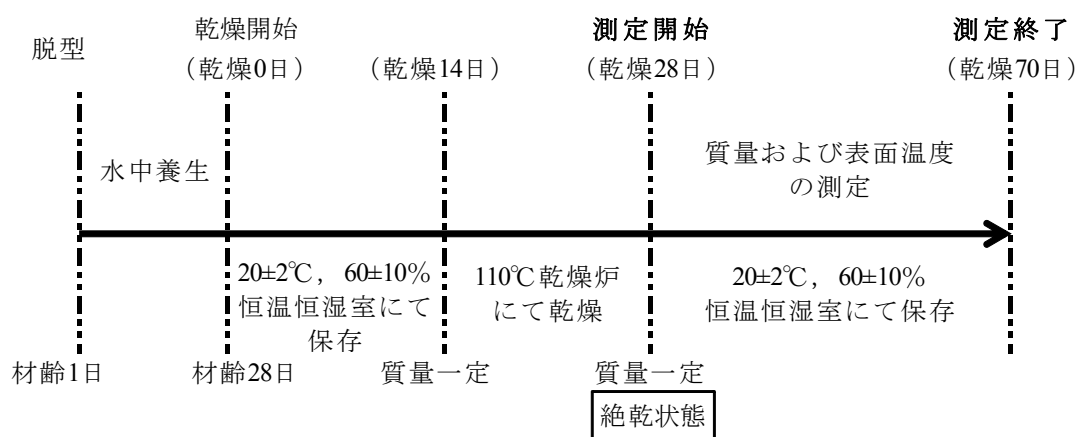


図-5.2.1 簡易試験の試験フロー

5) 試験器具

簡易試験に用いた試験器具を以下に示す。

- ・家庭用電子レンジ (周波数 : 2.45GHz , 電力 : 700W) 写真-5.2.1
- ・放射温度計 写真-5.2.2



写真-5.2.1 家庭用電子レンジ(700W)



写真-5.2.2 放射温度計

・赤外線サーモグラフィー 写真-5.2.3, 表-5.2.2



写真-5.2.3 赤外線サーモグラフィー

表-5.2.2 赤外線サーモグラフィーの性能⁵⁾

項 目	寸法・性能
検 出 方 式	非冷却マイクロボロメータ
最小温度分解能	0.04°C (@30°C)
検 出 波 長	7.5~13μm
有 効 画 素 数	640 (H) ×480 (V) ピクセル
空 間 分 解 能	0.65mrad
視 野 角	24°×18

6) 測定方法

試験は供試体の質量を測定した後，供試体の両端部からそれぞれ 20mm 離れた 2 点の表面温度を放射温度計にて測定する。その後，電子レンジに供試体を静置し，1 分間の電磁波照射を行う。直後に供試体を電子レンジから取り出し，同一の 2 点の表面温度を測定する。この電磁波照射前後の 2 点の表面温度を平均し，電磁波照射前後の温度差を温度上昇量とした。また，電磁波照射後の供試体を赤外線サーモグラフィーにて撮影し，温度分布を計測した。供試体の含水率は式(4.2.2)より算出した。

5.2.2 自由空間法

1) 実験概要

簡易試験に用いた電子レンジの周波数は 2.45GHz で，携帯電話や無線 LAN に近いものの，一つの周波数のみの実験結果であること，さらには電子レンジの出力は 700W で，携帯電話の出力(1W 程度)と比較すると非常に大きく，一般的に使用されている電子機器の電磁波吸収性を評価するには適性上の問題が残る。そこで，一般的な電子機器の電磁波を対象とした電磁波吸収性として，電磁気学的試験方法である自由空間法を用い，広範囲周波数帯におけるモルタルの電磁波吸収性を定量的に評価することを試みる。

自由空間法に用いた供試体は縦 300×幅 300mm の平板形状で、厚さの異なる 3 種類の供試体を作製した。通常、自由空間法で使用される電磁波吸収試験体はシート状の試料で、厚さ 10mm 以下のものが多く、自由空間法によるモルタルの電磁波吸収試験を行った供試体も厚さは 10mm を超える報告例はない。供試体の厚さは電磁波吸収性に影響を及ぼすと予想されるので、ここでは供試体厚さは製作可能な $t=10, 25, 50\text{mm}$ の 3 水準とした。また、自由空間法では電磁波の入射角度によって吸収特性に違いが出ることを予想されるので、供試体に対する電磁波入射角度を 0 度（垂直入射）と 15 度の 2 水準を設定した。

モルタルに選定した試験要因は、水セメント比、炭素粉末添加率で、簡易試験と同様に水セメント比は 3 水準（ $W/C=50, 60, 70\%$ ），炭素粉末添加率は 5 水準（ $0, 5, 10, 15, 20\%$ ）とした。図-5.2.2 に自由空間法に用いる供試体の試験フローを示す。電磁波吸収性は供試体中の含水状態によってその結果が異なることが予想される。そこで、自由空間法においても供試体の含水状態をパラメータとし、材齢 28 日まで水中養生を施した供試体を水中から取り出した状態を湿潤状態として 1 回目の測定を行い、その後、恒温恒湿室で乾燥させ、質量変化が収束した時点（乾燥開始から 14 日後）を気乾状態として 2 回目の測定を行った。その後、 110°C の炉乾燥による乾燥を開始し、質量変化が収束した時点（乾燥開始から 28 日後）を絶乾状態として 3 回目の測定を行った。なお、供試体は試験条件ごとに 1 体を供した。

2) 使用材料および示方配合

使用材料およびモルタルの示方配合は 3.3.4 2) と同一である。

3) モルタルの練混ぜ

モルタルの練混ぜは、3.3.4 3) と同様にして行った。

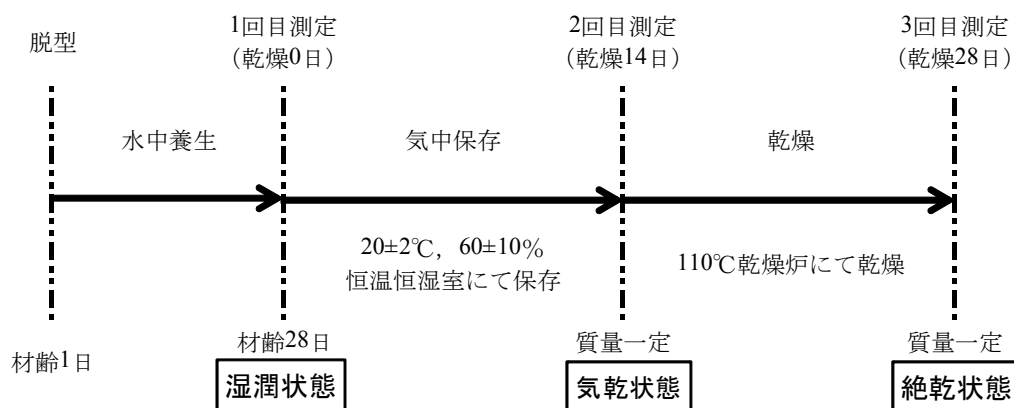


図-5.2.2 試験フロー（自由空間法）

4) 供試体作製方法

自由空間法に使用した供試体は、各配合で縦 300×幅 300mm×厚さ 10, 25, 50mm の平板で、その概略を写真-5.2.4 に示す。

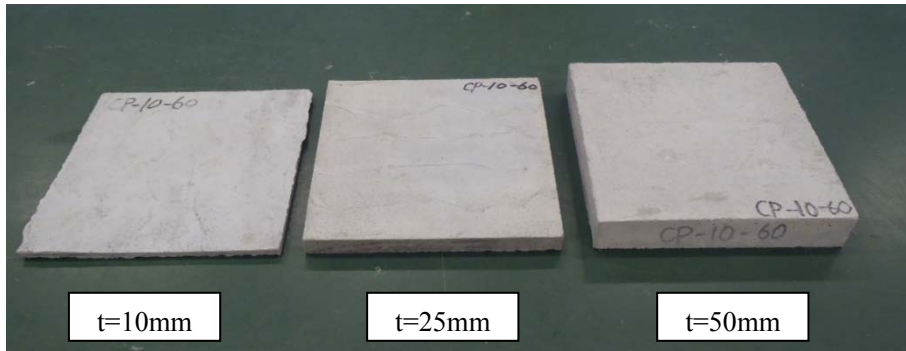


写真-5.2.4 自由空間法測定供試体

5) 自由空間法

図-5.2.3 に自由空間法の概要を、写真-5.2.5 に自由空間法の測定環境を示す。自由空間法は送信アンテナ、受信アンテナ、ベクトルネットワークアナライザで構成され、試験装置付近には

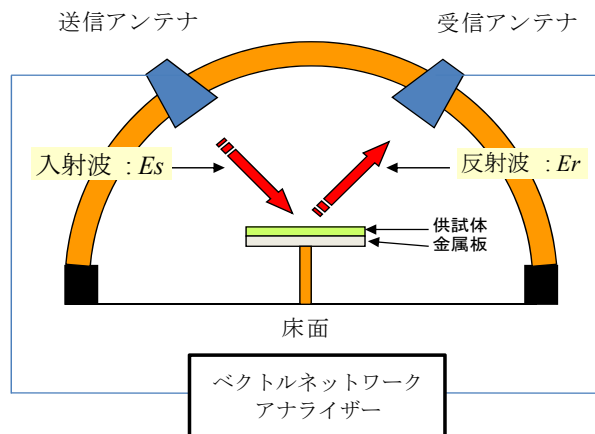
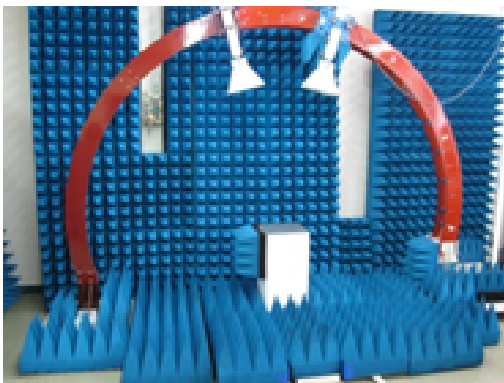
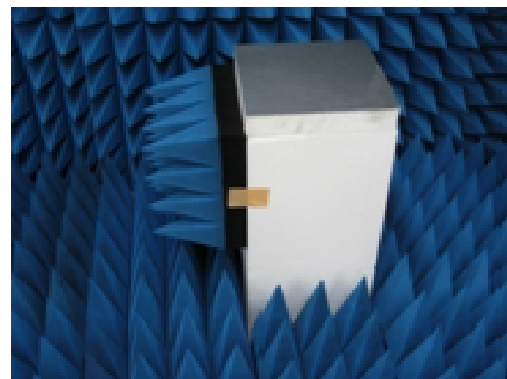


図-5.2.3 自由空間法の概要



(測定環境全景)



(供試体設置台)

写真-5.2.5 自由空間法測定環境

電磁波の回折による影響をなくするために電磁波吸収材を設置している。供試体は空気の比誘電率に近い発泡スチロール（比誘電率=1.1）の台座を使用し、台座の上に電磁波を完全反射させるために供試体と同様の寸法（縦300×幅300mm）の金属板を置き、その上に供試体を設置した。試験は、供試体表面から約1.4m離れた円周上の1点に設置された送信アンテナより電磁波を照射し、受信アンテナで供試体および金属板から反射される電磁波の強さ（電界）を

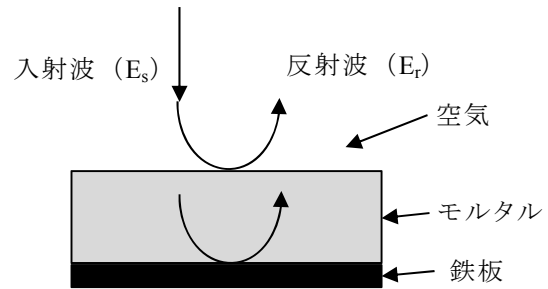


図-5.2.4 自由空間法の反射概念

測定して反射率（反射減衰量） R_s を算出するものである。図-5.2.4に自由空間法の反射概念図を示す。なお、反射率 R_s とは、式(5.2.1)で示されるように反射波の電界と入射波の電界の比をデシベル値で表示したものである。したがって、反射率の値が-20dBの場合、 $E_r/E_s=0.1$ であり、入射電磁波エネルギーの90%が試料に吸収されていることを示している。

$$R_s = 20 \log_{10} \left| \frac{E_r}{E_s} \right| \quad (5.2.1)$$

R_s : 反射率 (dB)

E_r : 反射電界（裏面に金属板を設置した供試体から反射される電界）

E_s : 入射電界（金属板のみから反射される電界）

5.2.3 透過試験

1) 実験概要

電磁波遮蔽効果は、材料表面の反射性を示す電磁波反射性または、材料中の電磁波エネルギーの吸収を示す電磁波吸収性によって得られる。電磁波吸収材は、吸収材の中で電磁波のエネルギー吸収が卓越した材料であり、前方へ戻る反射係数（入射波に対する反射波の電界比）をいかに小さくするかが問題であるが、材料表面での反射が大きい電磁波反射材は、反射係数を問題にせず透過係数（入射波に対する透過波の電界比）のみが問題となる。透過試験ではモルタルの広範囲周波数帯における電磁波遮蔽効果を定量的に評価することを試みた。

材料の電磁波に対する透過率を測定し、電磁波遮蔽効果を評価する方法は、送受信アンテナを左右に対向させ、その途中で被測定材料を設置し、材料の有無による電磁界強度の差を遮蔽効果として測定する手法が用いられている。現在、測定方法として公的に規格化され、最も用いられているのは、MIL-STD-285（米国軍規格、1956年制定、1997年廃止）⁶⁾であるが、この方法は電波暗室を使用した大規模測定であるため、性能評価に時間を要することが問題であった。そこで本研究では、簡易に透過率を測定できる測定装置を試作した。

透過試験に用いた供試体は、自由空間法と同一の縦 300×幅 300mm の平板形状で、 $t=10, 25, 50\text{mm}$ の 3 種類の厚さの供試体を用いた。ただし、今回の透過試験で用いた電磁波の出力条件においては、 $t=50\text{mm}$ の供試体でほとんど電磁波が透過せず、測定不能となったため、 $t=10, 25\text{mm}$ の 2 種類の供試体厚さで考察を行った。供試体は自由空間法で使用した供試体と同一である。

2) 透過試験

図-5.2.5 に試作した透過試験装置の概要を、写真-5.2.6 に透過試験の測定環境を示す。透過試験は送信アンテナ、受信アンテナ、ベクトルネットワークアナライザーで構成され、ベクトルネットワークアナライザーで発信した電磁波を送信アンテナから送信し、供試体を透過させて透過波を受信アンテナで受信する。供試体から透過した電磁波のみを受信するように、受信アンテナは鉄板 ($t=1\text{mm}$) で遮蔽した箱内に設置し、供試体からの透過波以外の送信波を遮断している。試験装置付近および箱内は電磁波の回折による影響をなくするために電磁波吸収材を設置している。

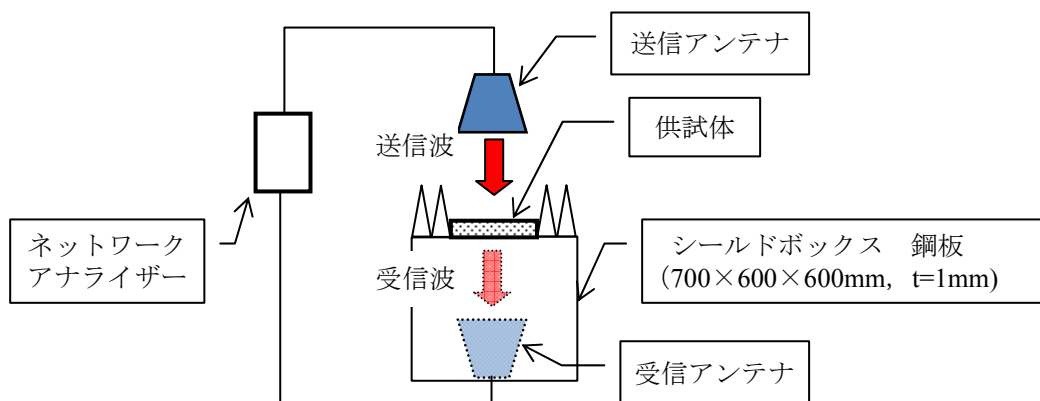


図-5.2.5 透過試験の概要



(測定環境全景)



(受信アンテナ)

写真-5.2.6 透過試験測定環境

測定は供試体表面から約 1.4m 離れた円周上の 1 点に設置された送信アンテナより電磁波を入射し、受信アンテナでモルタルを透過した透過電磁波の電界と位相差を測定して電磁波遮蔽効果を示す透過率 T_s を算出する。図-5.2.6 に透過試験の反射、透過概念図を示す。透過率 T_s とは、式 (5.2.2) で示すように透過電磁波の電界と入射電磁波の電界の比をデシベル値で表示したものである。したがって、透過率の値が -20dB の場合、 E_t/E_i の値が 0.1 であり、入射電磁波の 10% が透過したことを示している。

$$T_s = 20 \log_{10} \left| \frac{E_t}{E_i} \right| \quad (5.2.2)$$

T_s : 透過率 (dB)

E_t : 透過電磁波の電界 (供試体を透過し、受信アンテナで受信された電界)

E_i : 入射電磁波の電界 (送信アンテナから送信された電界)

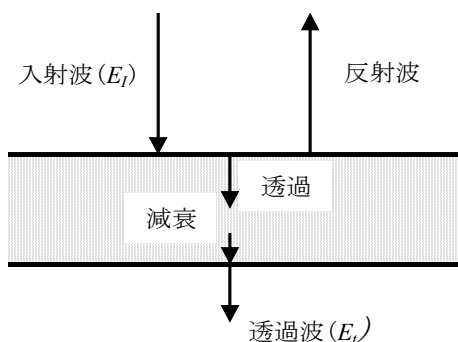


図-5.2.6 透過試験の反射，透過概念

5.3 簡易試験の実験結果と考察

簡易試験の測定に先立ち、電子レンジの電磁波照射特性を確認するために予備試験を行った。写真-5.3.1 に電子レンジの中心に縦置きおよび横置きした供試体に電磁波を照射した際の温度分布画像を示す。縦置きでは上部に比べて下部の温度が上昇しており、横置きでは供試体の中心に比べて端部の表面温度が上昇している。これは、使用した電子レンジの電磁波照射特性が影響しており、電磁波が下部へと集中し、かつ横から中心に向けて電磁波が照射した結果である。すなわち、本実験で用いた電子レンジでは図-5.3.1 に示すような電磁波照射特性があると考えられる。したがって、本研究では、供試体を電子レンジの中心に横置きし、電磁波の吸収による温度上昇を評価する表面温度測定点を供試体の両端から 20mm とし、2 点の平均値を測定値とした。

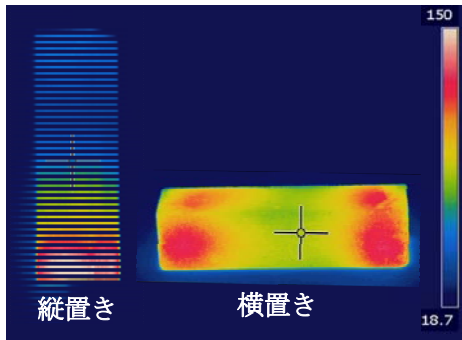


写真-5.3.1 電子レンジ照射後の温度分布

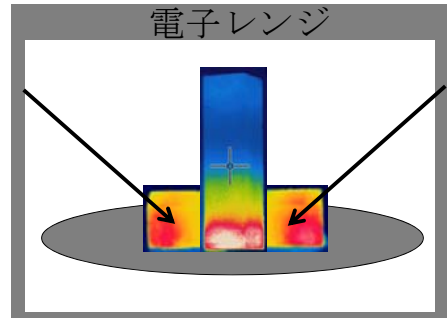


図-5.3.1 電子レンジの電磁波照射特性

図-5.3.2に、炉乾燥終了から24時間後（いずれの供試体も含水率0.2~0.3%）に測定した炭素粉末添加率と温度上昇量（電磁波照射前後の表面温度上昇量）の関係を示す。単位水量一定で水セメント比を変化させた場合、いずれの水セメント比においても炭素粉末添加率が15%までの範囲においては、添加率の増加に伴って温度上昇量も直線的に増加した。W/C=50, 60%の配合では添加率15%で温度上昇量のピークを示し、炭素粉末無添加のものに比べて約40℃温度上昇量が増加したが、それ以上炭素粉末を添加しても、温度上昇量はほぼ一定ないしは低下した。写真-5.3.2に電磁波照射直後の温度分布画像を示す。電磁波照射後の温度分布は、予備試験の結果と同様に、いずれの添加率においても電子レンジの電磁波照射特性によって供試体両端部で表面温度が上昇しており、赤外線サーモグラフィと放射温度計による温度測定結果とは概ね一致している。

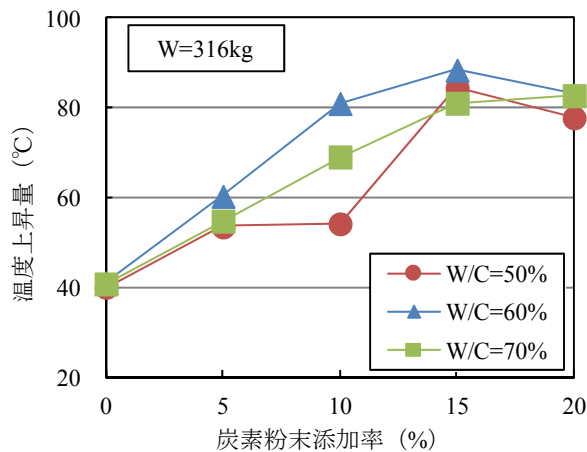


図-5.3.2 炭素粉末添加率と温度上昇量の関係

図-5.3.3に水セメント比と温度上昇量の関係を示す。炭素粉末添加率10%、W/C=60%の1点を除くと温度上昇量は、炭素粉末添加率が同一であればほぼ同一の値を示すこと、同一水セメント比においては炭素粉末の添加率が大きいほど大きいこと、がわかる。このことから、温度上昇量に影響を与える要因は炭素粉末添加率であり、水セメント比は影響を及ぼさないといえる。

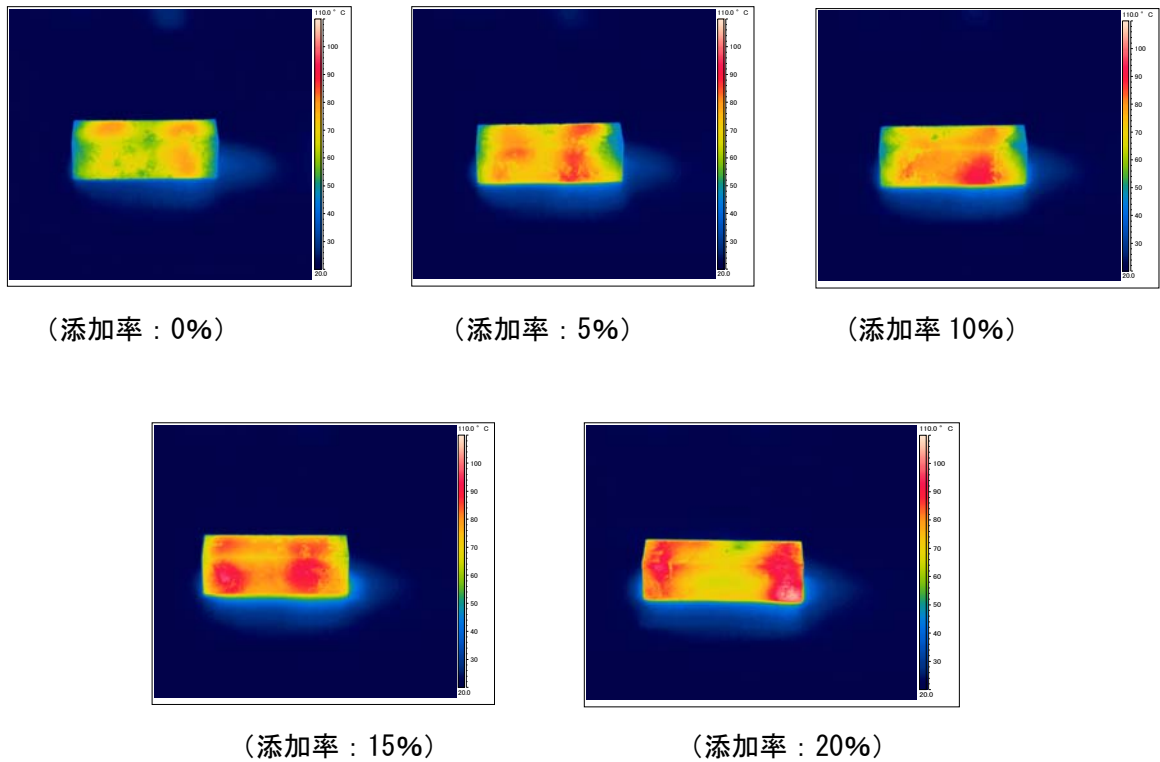


写真-5.3.2 簡易試験による電磁波照射直後の温度画像分布(W/C=50%)

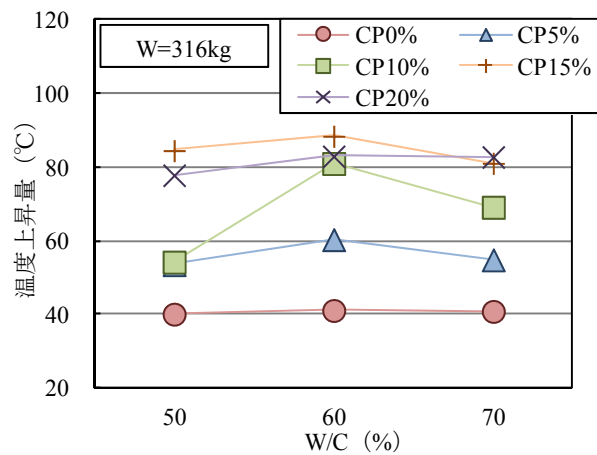


図-5.3.3 水セメント比と温度上昇量の関係

簡易試験における温度上昇量は、第4章で検討した電気抵抗率の場合と同様に水と炭素粉末の体積($V_W + V_{CP}$)に影響を受けると考えられる。そこで、図-5.3.4に $V_W + V_{CP}$ と温度上昇量の関係を示す。図より、 $V_W + V_{CP}$ の増加に伴って温度上昇量は直線的に増加し、 $V_W + V_{CP} = 450 \text{ l}$ 付近で最も大きくなる。供試体の表面温度の上昇が電磁波を吸収し、熱エネルギーに変換した結果であると考え、温度上昇量が大きいほど電磁波を多く吸収したことになる。本研究においては、 $W=316\text{kg}$ 、炭素粉末添加率15%で最も電磁波吸収量が多くなった。

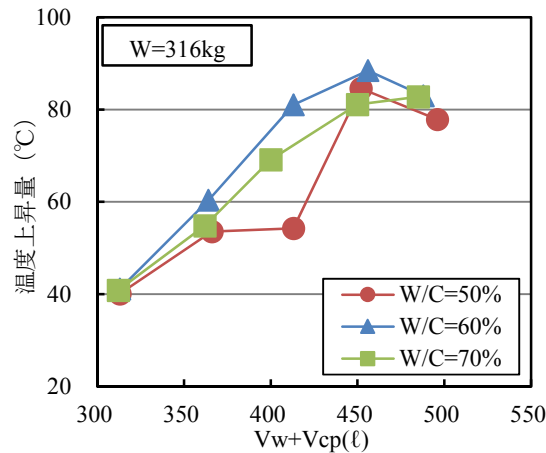


図-5.3.4 $V_w + V_{CP}$ と温度上昇量の関係

次に簡易試験による温度上昇量が電磁波吸収以外の要因，特に試験体中の水分の影響を検討するために，各含水率における温度上昇量を測定した。試験は炉乾燥による乾燥終了の24時間後の温度上昇量を測定した後，試験体を恒温恒湿室に保存し，試験体の含水率が增加する状況下で，各含水率の表面温度上昇量を測定した。

含水率と温度上昇量の関係を図-5.3.5に示す。図より温度上昇量は炭素粉末添加率0，5%では含水率の増加とともにやや上昇ないしはほぼ一定値を保つが，炭素粉末の添加率が10%以上では，含水率の増加に伴って温度上昇量が減少する傾向を示した。電子レンジによる加熱の原理は，物体の分子が電磁波による影響で振動し，熱エネルギーに変換されることによる。そのため，炭素粉末添加率の小さい供試体では含水率の増加，すなわち水分子が増加することにより，表面温度が上昇したと考えられる。一方，添加率の大きい供試体では水分子の挙動だけでなく，供試体中の炭素粉末の存在が電磁波吸収性に影響を及ぼしていると考えられる。

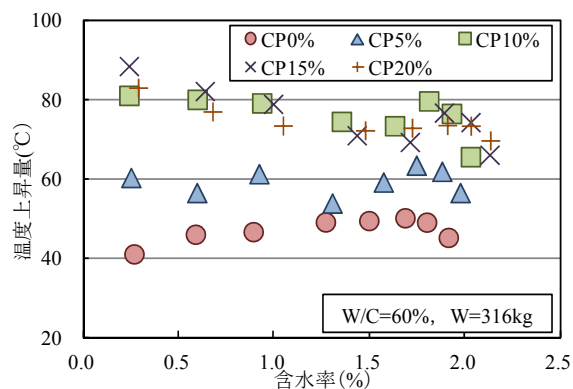


図-5.3.5 含水率と温度上昇量の関係

炭素粉末を添加したモルタルの発熱原理は、誘電体であるモルタル中に炭素粉末が分散しており、この材料の等価回路を考えた場合、図-5.3.6に示すような炭素粉末の抵抗と炭素粉末間(モルタル)の静電容量が複雑に連成した形とされていると考えることができる。この材料に電界を加えても、低い周波数ではほとんど電流が流れないため、抵抗による熱の発生はほとんど生じないが、周波数が高くなると、周波数に反比例してコンデンサーのインピーダンス ($1/j\omega C$) が小さくなるため、抵抗にも電流が流れ、抵抗体で熱が発生する誘電加熱⁶⁾の現象が生じる。モルタルの炭素粉末添加率が増加すると温度上昇量が増加するのはこのような誘電加熱による現象と考える。

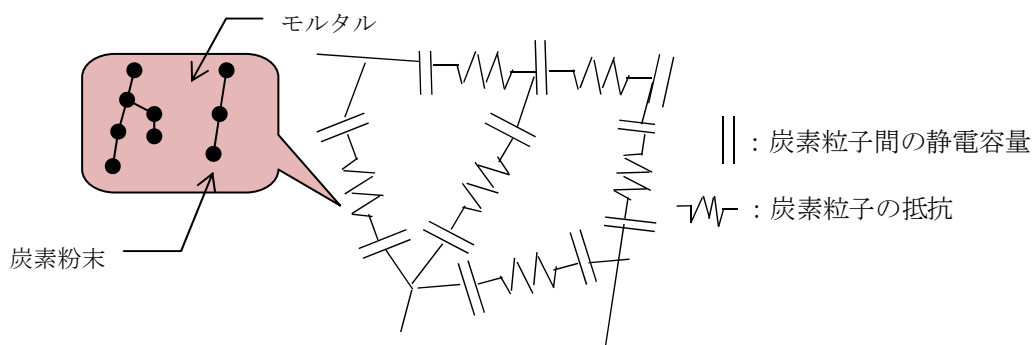


図-5.3.6 モルタル中の電氣的な等価回路⁷⁾

5.4 自由空間法の実験結果と考察

1) 電磁波の入射角，反射角が反射率に及ぼす影響

図-5.4.1~3に各入射角における炭素粉末添加率5%および15%の平板供試体で得られた周波数と反射率との関係を含水状態別に示す。湿潤状態においては、入射角が異なっても反射率の周波数特性は一致しているが、反射率の極大値および極小値は入射角で異なる。一方、気乾状態および絶乾状態においては、周波数と反射率との関係を表す曲線はほぼ一致しており、入射角の違いによる反射率への影響は見られない。この結果は炭素粉末の添加率、水セメント比に係わらず同じであった。湿潤状態で斜入射の極大値が大きくなったのは、供試体表面に存在する水分の影響を受けたと考えられる。自由空間法は送信アンテナと受信アンテナを別々に用いるので、本来の測定は斜入射で測定されており、垂直入射 ($\theta=0^\circ$) に比べて反射波による干渉等のノイズの影響を受けにくい。しかし、気乾状態および絶乾状態では、入射角の影響は少なく、絶乾状態でも垂直入射の極大値は異なるが、反射率は同一の周波数特性を示しているため、解析的な検討の容易性を考慮し、以後の検討は入射角 0° で進めることにした。

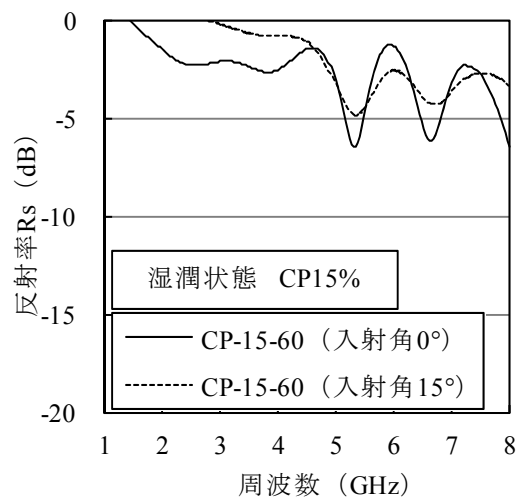
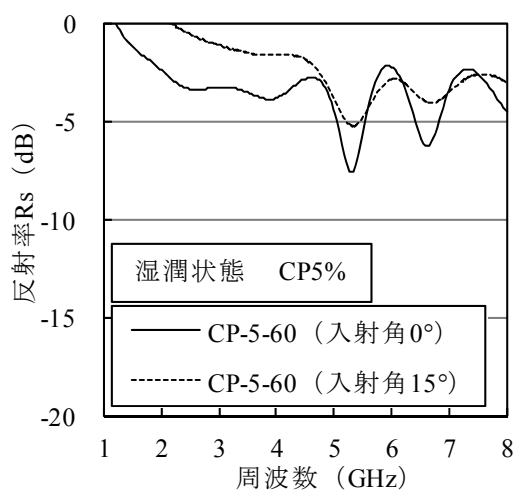


図-5.4.1 周波数と反射率の関係 (湿潤状態, $t=50\text{mm}$)

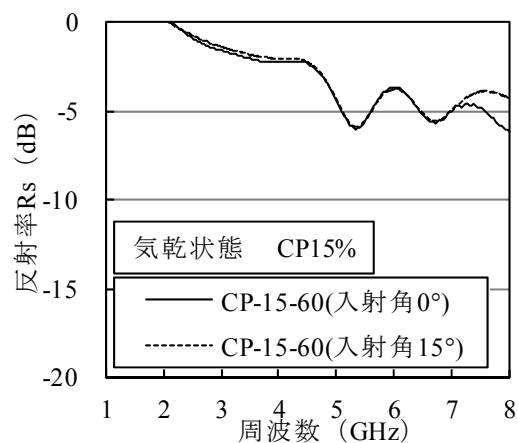
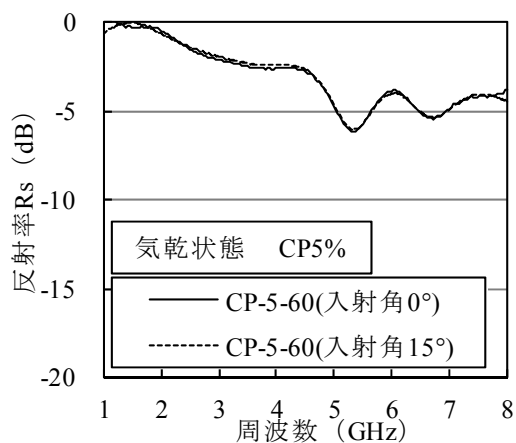


図-5.4.2 周波数と反射率の関係 (気乾状態, $t=50\text{mm}$)

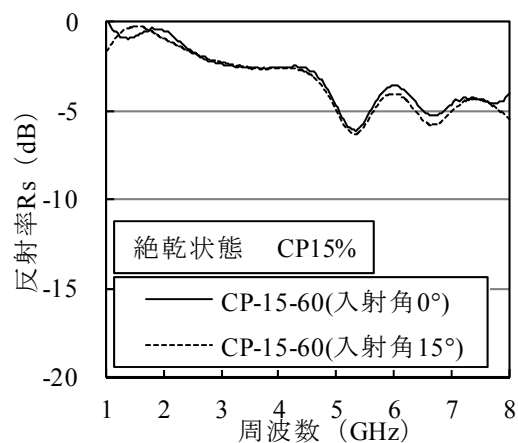
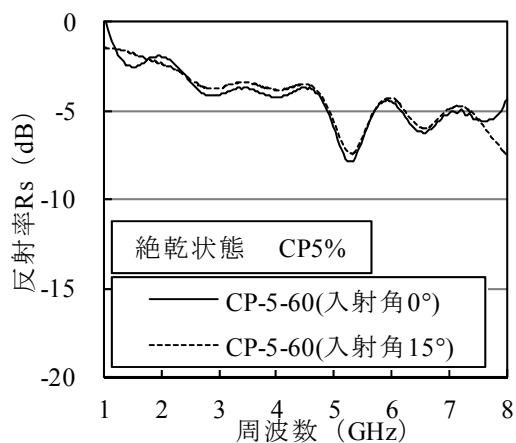


図-5.4.3 周波数と反射率の関係 (絶乾状態, $t=50\text{mm}$)

2) 供試体の厚さが反射率に及ぼす影響

送信アンテナから送信された電磁波は、供試体表面で反射される電磁波、供試体を透過して金属板で反射された後にさらに供試体を透過し受信される電磁波がある。電磁波の強さに対して供試体が厚い場合、供試体を透過し、金属板から反射される電磁波が弱くなり、供試体による電磁波の減衰を正確に測定することができない。そこで $t=50, 25, 10\text{mm}$ の供試体に対して、同じ強さの電磁波を送信し、金属板の有無による周波数特性および極大値、極小値の比較をすることで、供試体の厚さによる減衰の違いを比較した。すなわち、金属板の有無にかかわらず周波数特性、反射率の極大値、極小値に変化がなければ、供試体表面の反射による電磁波の評価のみで、供試体内部での減衰が表せていないことになる。

図-5.4.4 に $W/C=60\%$ 、普通モルタルについて、気乾状態で測定した各供試体の厚さにおける周波数と反射率との関係を示す。凡例は供試体裏面の金属板の有無を示す。 $t=50\text{mm}$ の供試体では、金属板のない方が反射率の極小値は若干小さいが、反射率の周波数特性は金属板の有無にかかわらずほぼ同様の傾向を示し、金属板の反射によるモルタル内部での減衰を評価できていない。一方、 $t=25, 10\text{mm}$ と供試体が薄くなるほど、金属板の有無によって周波数特性と反射率の極大値および極小値は異なる。したがって、供試体が薄いほどモルタルの電磁波吸収性を電磁波の周波数と反射率の関係から評価することができる。ただし、モルタルを薄くすれば、モルタルとしての特性より、モルタルの構成材料であるペースト、砂の特性が顕著になると考えられる。したがって、本研究では自由空間法によるモルタルの電磁波吸収性を評価できる厚さを 10mm に設定した。

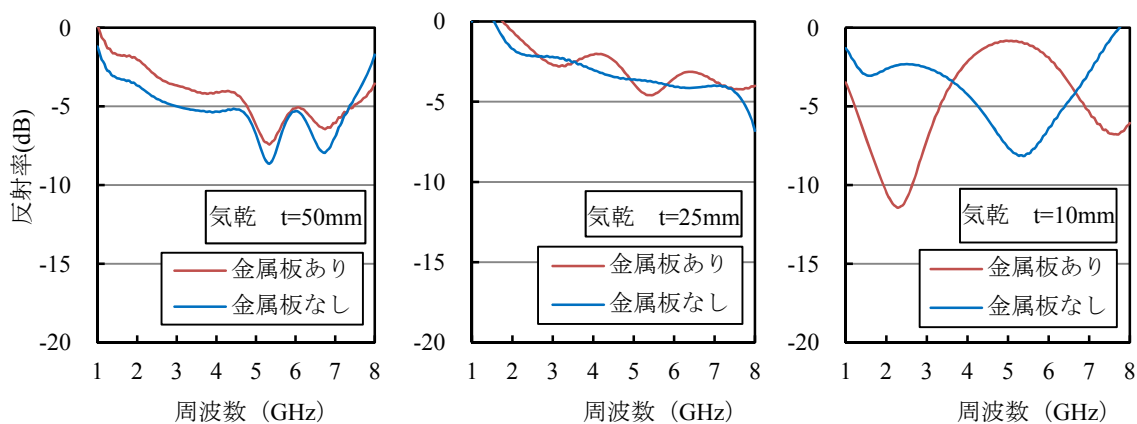


図-5.4.4 周波数と反射率の関係(気乾状態)

3) 含水状態および炭素粉末添加率が反射率に及ぼす影響

含水状態および炭素粉末添加率が反射率に及ぼす影響を供試体厚さ $t=10\text{mm}$ で検討を行った。図-5.4.5~7 に各水セメント比における周波数と反射率の関係を示す。いずれの水セメント比においても、水分を含まない絶乾状態における反射率の極小値が最も小さく、含水率が大きいほど供試体による電磁波の反射率が大きくなった。いいかえれば、含水率が大きいほど電磁波吸収性

は小さくなり、供試体中の水分によって電磁波の反射が大きくなると考えられる。同様に炭素粉末の添加率を増加すると反射率は0に近づき、炭素粉末無添加の配合が最も電磁波を吸収する結果となった。

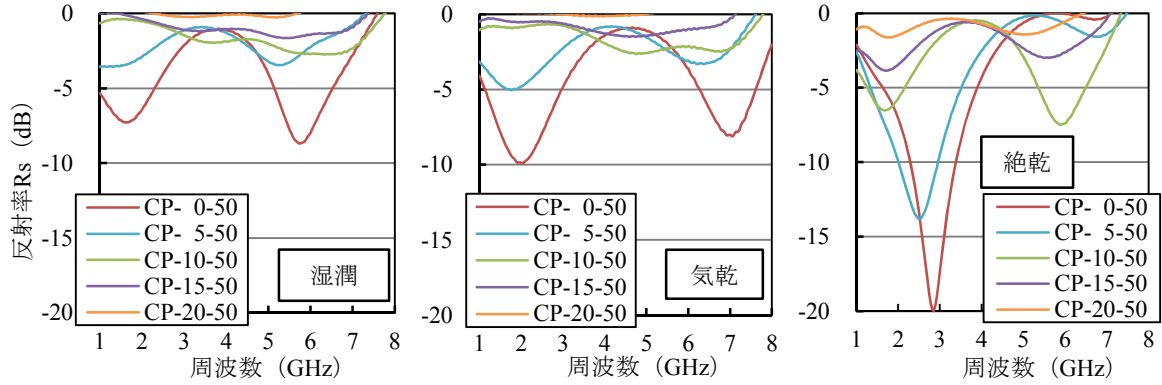


図-5.4.5 周波数と反射率の関係 (W/C=50%)

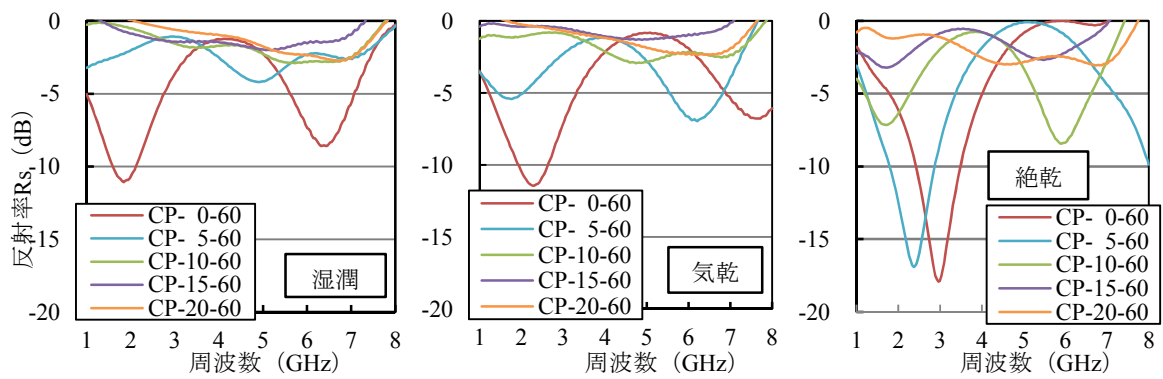


図-5.4.6 周波数と反射率の関係 (W/C=60%)

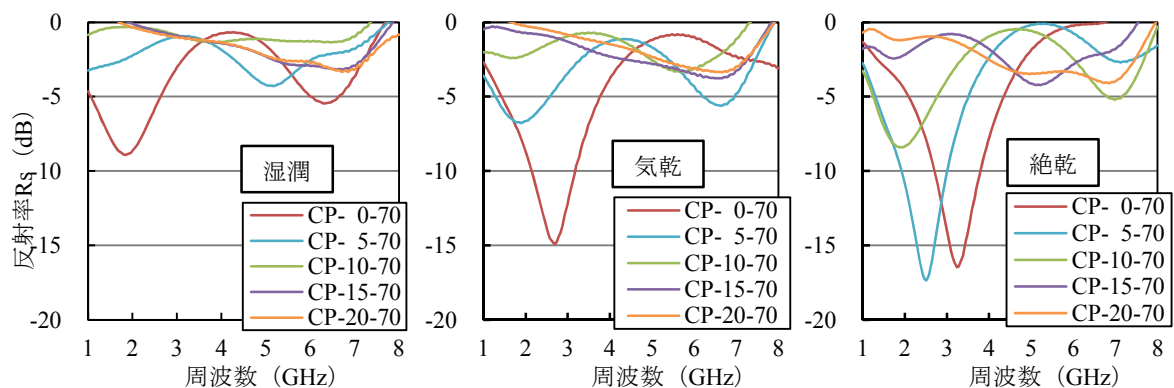


図-5.4.7 周波数と反射率の関係 (W/C=70%)

図-5.4.8に W/C=60%，炭素粉末添加率 20%の供試体について，金属板の有無による周波数と反射率の関係の比較を行った。図より絶乾状態では周波数特性に若干の違いがあるが，湿潤，気乾状態では周波数特性はほぼ一致している。これは，炭素粉末の添加によって電磁波がほぼ供試体表面で反射され，供試体内部に透過していないことを示している。

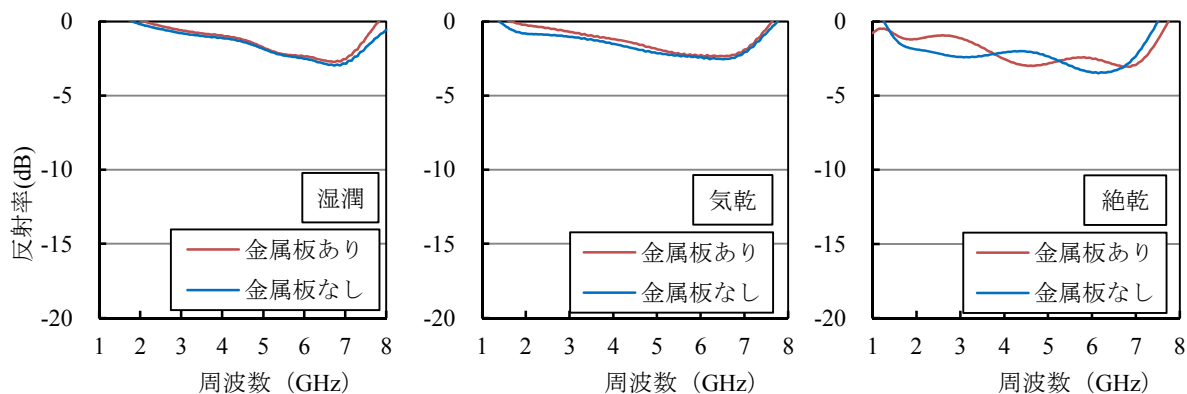


図-5.4.8 周波数と反射率の関係 (W/C=60% CP-20)

4) 水セメント比が反射率におよぼす影響

水セメント比が反射率に及ぼす影響について，炭素粉末添加率毎に検討を行った。図-5.4.9～11に，各含水状態における周波数と反射率の関係を示す。炭素粉末無添加，すなわち普通モルタルの場合，湿潤，気乾状態では，吸収を示す反射率の極小値は水セメント比によって異なるが，吸収の最大を示す周波数はほぼ同じ値を示す。普通モルタルでは，水セメント比が電磁波吸収に及ぼす影響は，モルタルの内部構造の緻密さによって電磁波の透過量が異なり，水セメント比が大きいほど電磁波吸収も大きくなると考えられたが，各含水状態において水セメント比が反射率に及ぼす影響は異なっている。炭素粉末を添加した場合，水セメント比にかかわらず反射率は0に近づき，吸収に比べて反射が支配的となる。炭素粉末添加率 10%では，水セメント比が変化してもそれぞれの周波数特性と極大，極小値の差はほぼ同一であり，水セメント比の影響は表れていない。また，炭素粉末添加率 20%では，いずれの含水状態においても反射率が大きくなるが，特に W/C=50%では反射率がほぼ0となり，他の W/C に比べて大きい値を示した。

一般的に電磁波吸収材に求められる反射率は-15～-20dB（反射率-20dBは，入射波に対して反射波が90%低減されたことになる）以上⁸⁾といわれており，炭素粉末を含まない通常のモルタルでも絶乾状態であれば，特定の周波数帯において電磁波吸収体として利用できる可能性がある。しかし，一般の使用環境で絶乾状態を保つことは困難であり，モルタルで電磁波吸収体を設計する場合，吸収体内に水を含まない空隙を維持することが重要となる。今後，炭素粉末を添加したモルタルの電磁波吸収性を高めるためには，モルタル表面での反射を弱めて内部への電磁波透過を許容し，モルタル中に存在する適量の炭素粉末によって内部での電磁波吸収性を向上させる必要

がある。したがって、電磁波をモルタル内部まで透過させる配合と材料の選定および電磁波吸収を生じさせるための適切な炭素粉末添加率の選定が必要となる。

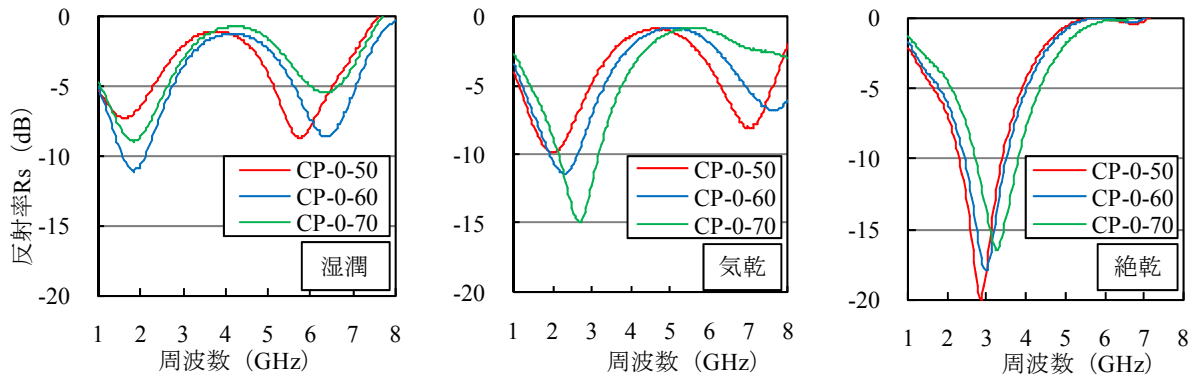


図-5.4.9 周波数と反射率の関係 (CP-0%)

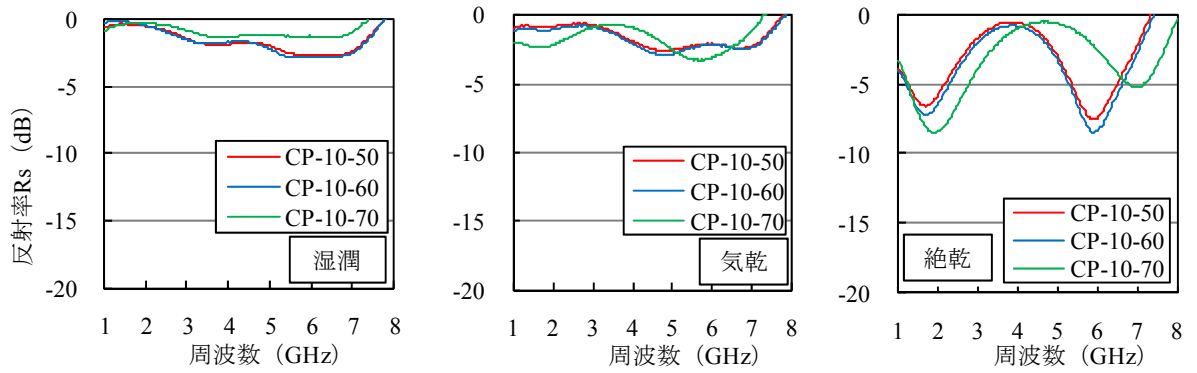


図-5.4.10 周波数と反射率の関係 (CP-10%)

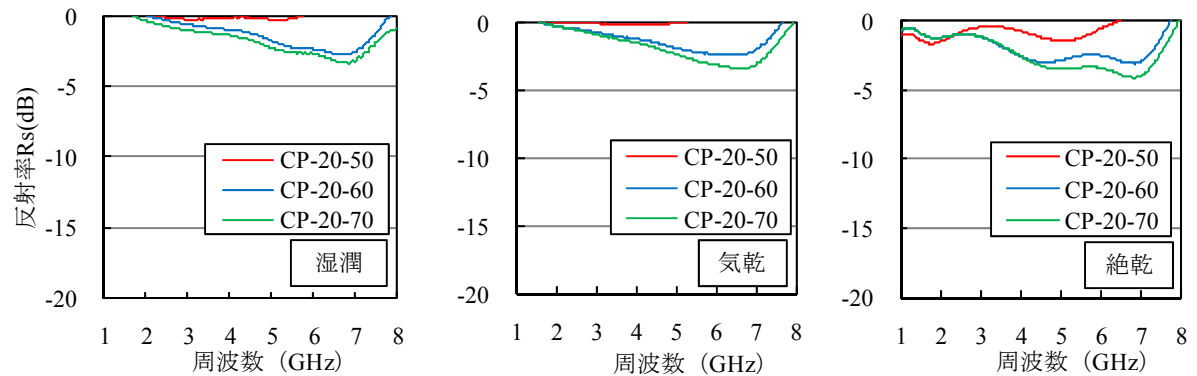


図-5.4.11 周波数と反射率の関係 (CP-20%)

5) 簡易試験と自由空間法による電磁波吸収性の評価

簡易試験の結果、炭素粉末の添加により表面温度上昇量が増加し、炭素粉末添加率の増加によって電磁波吸収性が向上すると評価したが、自由空間法では炭素粉末無添加の配合が最も電磁波を吸収し、炭素粉末を添加したモルタルは電磁波吸収性に劣る評価となった。簡易試験および自由空間法による電磁波吸収性の評価は異なる結果となったが、両試験で生じた現象は同じである。すなわち、簡易試験では電子レンジによって高周波・高出力の電磁波が照射されると、炭素粉末を添加したモルタルは表面でのみ吸収が生じ、表面温度上昇量が増加した(図-5.4.11(a)参照)。一方、自由空間法では炭素粉末を添加したモルタルは表面でのみ電磁波を吸収するため、モルタル表面で電気が流れやすくなり、電磁波の反射が大きくなった(図-5.4.11(b)参照)と考えられる。電磁波吸収性を評価する試験は電磁波吸収材内部で電磁波を減衰させる性能を評価できることが求められる。しかし、簡易試験は吸収材表面の評価であり、吸収材内部における電磁波吸収性を評価することは困難であることが明らかとなった。

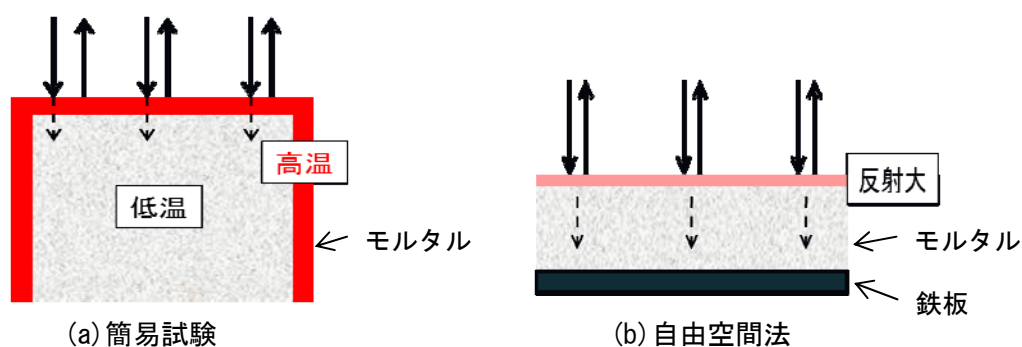


図-5.4.12 各試験の電磁波吸収イメージ

5.5 透過試験の実験結果と考察

1) 供試体の厚さが透過率に及ぼす影響

自由空間法の結果、炭素粉末の添加により供試体表面での反射を大きくできることが明らかとなった。そこで、透過試験から透過率を算出し、炭素粉末を添加したモルタルの電磁波反射性について検討を行った。図-5.5.1~2に各含水状態における厚さの異なる供試体の周波数と透過率との関係を示す。供試体の厚さによらず、透過率は周波数が高くなると減少し、湿潤状態ほどその傾向は顕著である。また、供試体厚さの影響を比較した場合、炭素粉末無添加の配合では供試体が厚くなると各周波数において、透過率は若干小さくなる。一方、炭素粉末を添加した配合は供試体が厚くなると透過率は減少するが、厚さの違いによる透過率の差は無添加の場合に比べて大きくなった。配合、含水状態が同一であれば、供試体厚さによらず表面反射は同じであり、透過率の差は供試体厚さによる透過減衰の差となる。炭素粉末を添加したモルタルにおいては、添

加率の増加とともに透過率の差が大きくなっており、炭素粉末は電磁波の表面反射を大きくするだけでなく、モルタル内部の透過減衰にも影響を及ぼしていると考えられる。

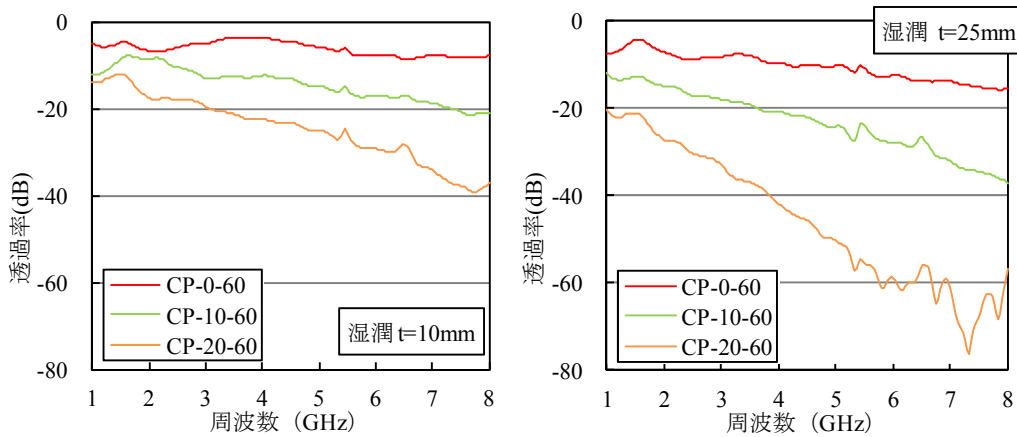


図-5.5.1 周波数と透過率の関係（湿潤状態）

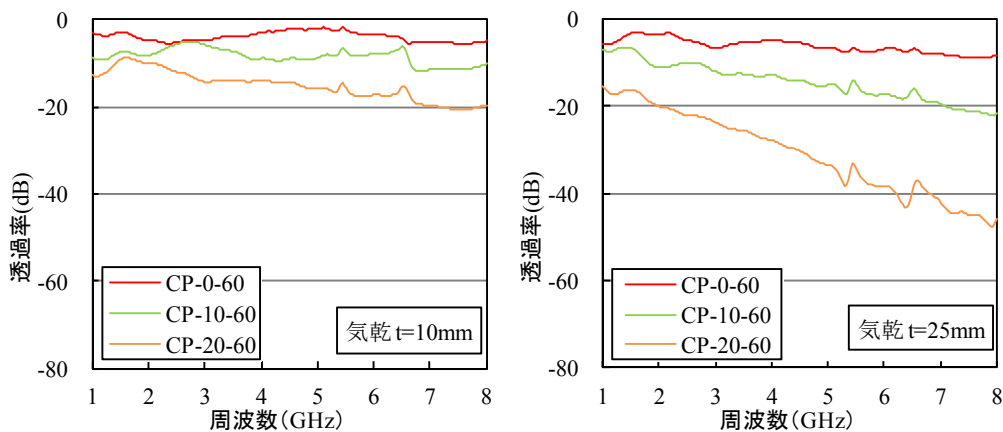


図-5.5.2 周波数と透過率の関係（気乾状態）

2) 含水状態および炭素粉末添加率が透過率に及ぼす影響

図-5.5.3 に W/C=60%の配合について、各含水状態における周波数と透過率との関係を示す。図より、透過率は高周波数帯になるほど、水分を多く含むほど、小さくなる傾向を示した。自由空間法の結果から明らかなように、供試体の水分量が多いほど表面反射が大きくなったことと、モルタル内部の空隙が水で満たされたことで透過率が低下したと考えられる。また、炭素粉末添加率が増加すると、いずれの周波数においても透過率は減少し、高周波数帯になるほど透過率の減少割合は大きく、表面反射と透過減衰による電磁波遮蔽効果は高い。これらの結果は、水セメント比を変化させた配合でも同じ傾向を示した。

一般的に反射特性を生かした電磁波反射材は高い周波数の電磁波をシールドする。この場合、反射材料の表面には高周波電流が流れる。高い周波数の電磁波が入射した場合には、電流は反射

材料の表面付近だけに集中して流れることで反射による遮蔽効果が大きくなる。モルタルに炭素粉末を添加することで、高周波の電磁波が入射した場合、モルタルの表面付近に電流が流れやすくなり反射が大きくなったと考えられる。このモルタル表面に電流が流れやすくなる現象は、簡易試験による高出力の電磁波照射によって、モルタルの表面温度が上昇したことから確認できる。

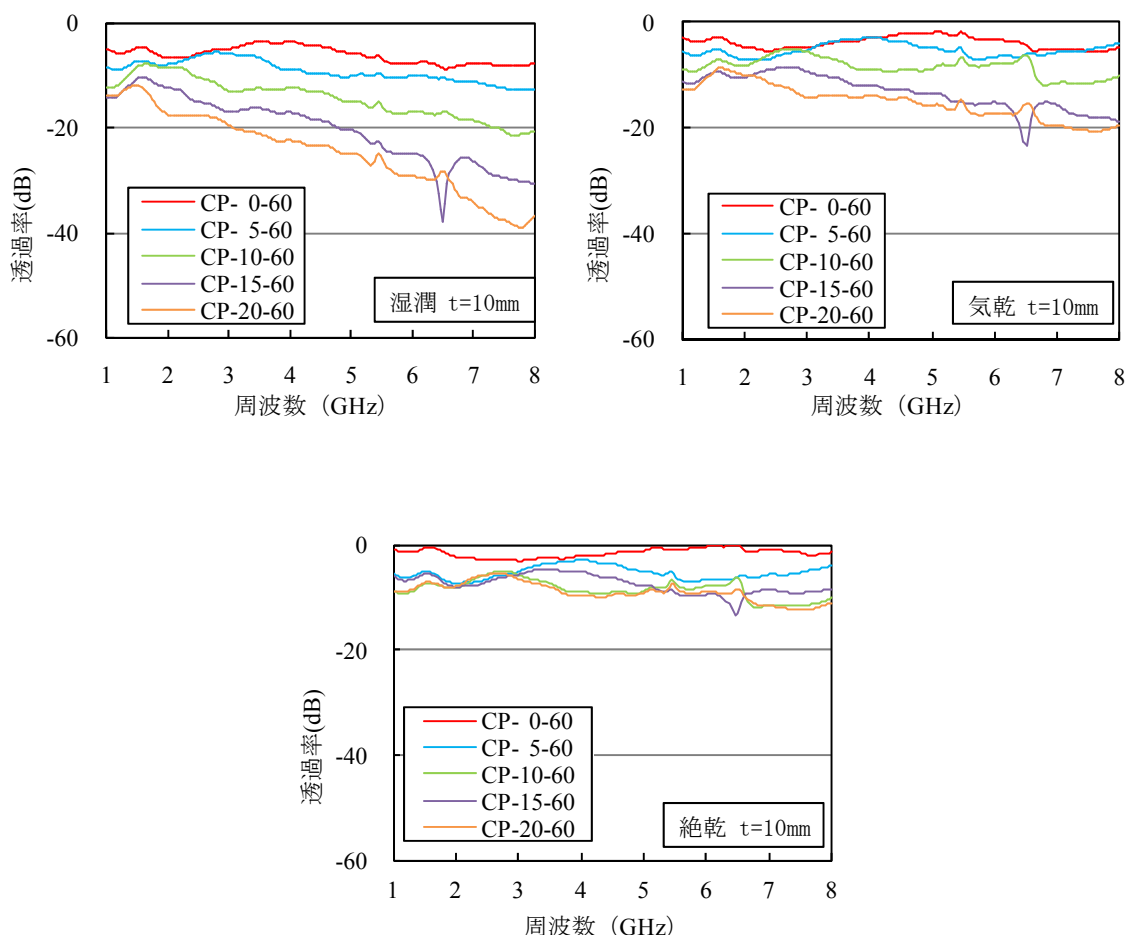


図-5.5.3 周波数と透過率の関係(W/C=60%)

3) 水セメント比が透過率におよぼす影響

図-5.5.4~5に、水セメント比と炭素粉末添加率をパラメータとした各含水状態における周波数と透過率の関係を示す。供試体厚さ $t=10\text{mm}$ では、含水状態にかかわらず、炭素粉末の添加率が同一の場合には、水セメント比が透過率に及ぼす影響は小さい。

一方、供試体厚さ $t=25\text{mm}$ 、湿潤状態では、同一周波数で透過率を比較すると、水セメント比によって透過率は異なる値を示す。特に供試体中の水分量が多く、炭素粉末添加率が大きいほど水セメント比による透過率の違いは大きくなる。供試体厚さ $t=25\text{mm}$ 、炭素粉末添加率 20%の透過率は、透過試験を行った中で最も透過率が小さく、周波数 4GHz 以上の場合、約 -40dB となる。透

過率が-40dB の場合，入射波に対する透過波の電界は 1/100 程度まで減衰し，透過波のわずかな電界の差が透過率に大きく影響する。供試体厚さ $t=10\text{mm}$ の測定結果において，水セメント比が透過率に及ぼす影響を考察した場合，水セメント比が透過率に及ぼす影響は小さいと考えられる。

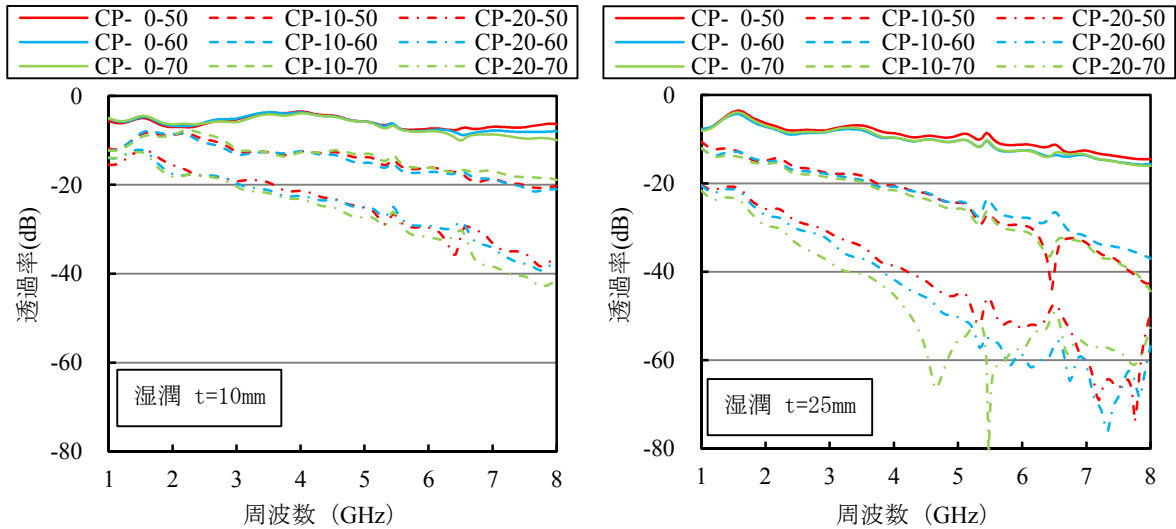


図-5.5.4 周波数と透過率の関係(湿潤状態)

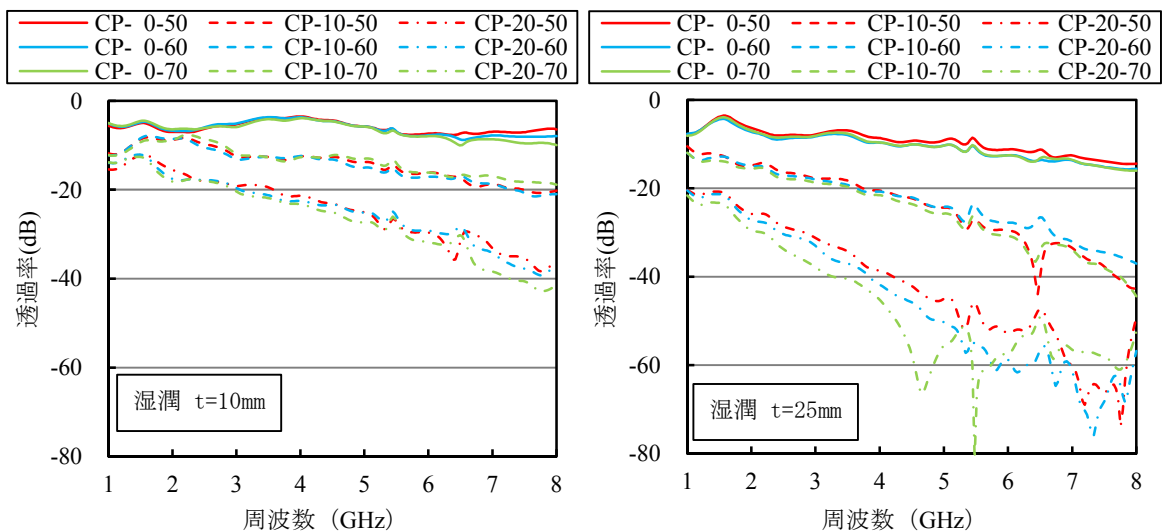


図-5.5.5 周波数と透過率の関係(気乾状態)

5.6 炭素粉末を添加した電磁波遮蔽モルタルの適用性

電磁波遮蔽効果の判断基準は明確ではないが，表-5.6.1 に示すような透過率と電磁波遮蔽材のグレードに関する目安がある¹⁾。周波数帯 1~8GHz，供試体厚さ $t=10\text{mm}$ において，電磁波遮蔽性の評価を行った結果，炭素粉末無添加のモルタルでは気乾状態で-10dB 程度の透過率であり，モルタルのみでは高周波数帯の電磁波遮蔽効果は小さいといえる。一方，炭素粉末を添加したモ

ルタルは炭素粉末添加率の増加とともに透過率も減少し、添加率 20% のモルタルの透過率は、6 ~ 8GHz の周波数帯において、気乾状態で約 -40dB 程度となる。表より -40dB の透過率を有する電磁波遮蔽材のグレードは、平均的な性能を有すると位置づけられる。前述の通り、炭素粉末を添加したモルタルの透過率は、供試体の厚さにも影響を受けることが明らかであり、厚さの増加とともに透過率は減少する。今後、周波数帯を限定すれば、炭素粉末の添加率とモルタルの厚さを調整することによって、透過率 -90dB を超える最高水準の電磁波遮蔽材の製造も可能であり、コンクリートまで発展させることができれば、構造体コンクリートに炭素粉末を添加することで電磁波遮蔽効果をさらに高めることも可能と考える。

表-5.6.1 電磁波遮蔽効果の目安¹⁾

透過率(dB)	電磁波遮蔽材のグレード
-10 以上	ほとんど効果なし
-10 ~ -30	最小限度の遮蔽効果あり
-30 ~ -60	平均
-60 ~ -90	平均以上
-90 以下	最高水準による遮蔽

5.7 結論

本章では、炭素粉末を混入したモルタルの電磁波遮蔽性について、電磁波吸収性と電磁波反射性と定義し、それぞれの性質を評価する試験によってモルタルの電磁波遮蔽性評価を行った。電磁波吸収性の評価は電子レンジによる簡易試験および自由空間法を、電磁波反射性の評価は透過試験を用いた。本研究の範囲内で得られた結果を試験毎にまとめて示す。

(1) 簡易試験

- 1) 単位水量一定で水セメント比を変化させた場合、いずれの水セメント比においても炭素粉末添加率が増加すると温度上昇量も直線的に増加し、添加率 15% 程度で温度上昇量のピークを示した。ただし、水セメント比が温度上昇量に及ぼす影響は小さい。
- 2) 電気抵抗率と同様に、温度上昇量も $V_w + V_{CP}$ の増加に伴って直線的に増加する。本研究の範囲内では、 $W=316\text{kg}$ 、炭素粉末添加率 15% で最も温度上昇量が増加しており、モルタル表面での電磁波吸収量が多くなった。
- 3) 炭素粉末を添加したモルタルの等価回路を考えた場合、炭素粉末の抵抗と炭素粉末間(モルタル)の静電容量が複雑に結合した形として考えることができ、簡易試験では、周波数で高出力の電磁波を照射するため、抵抗にも電流が流れ、抵抗体に熱が発生する誘電加熱の現象が生じた。

(2) 自由空間法

- 1) 垂直入射の場合、反射波の干渉によるノイズを受けやすいが、垂直入射および斜入射とも反射率の周波数特性は同様の傾向を示しており、垂直入射でモルタルの電磁波吸収性を評価できる。
- 2) 自由空間法では、供試体が厚くなると、金属板の反射によるモルタル内部での電磁波吸収を適切に評価できない。したがって、モルタルの電磁波吸収性を自由空間法によって評価する場合、供試体厚さを 10mm に設定した。
- 3) いずれの水セメント比においても、含水率が大きいほど、供試体中の水分が電磁波を反射するために反射率は 0 に近づき、電磁波吸収性は小さくなる。また、炭素粉末の添加率を大きくすると、供試体表面での反射が大きくなり、反射率は 0 に近づく。本研究においては、炭素粉末無添加で供試体中に水分を含まない絶乾状態の供試体が最も電磁波を吸収した。
- 4) 簡易試験と自由空間法では、同じ現象に対してそれぞれの評価が異なる結果となった。簡易試験は吸収材表面の現象を捉えた評価であり、吸収材内部における電磁波吸収性を評価することは困難であることが明らかとなった。
- 5) 炭素粉末の添加率によって水セメント比が反射率に及ぼす影響は異なる。炭素粉末添加率 20% の場合、いずれの含水状態においても水セメント比が小さいほど反射が大きく、電磁波吸収は小さくなった。

(3) 透過試験

- 1) 炭素粉末を添加したモルタルは、供試体が厚くなると透過率も減少し、その減少割合は無添加に比べて大きく、添加率が大きいほど大きくなる。また、炭素粉末の添加により、表面反射だけでなくモルタル内部の減衰にも効果がある。
- 2) 供試体の水分量が多いほど透過率は小さくなる。また、炭素粉末添加率が増加すると、いずれの周波数においても透過率は減少し、高周波数帯になるほど透過率は小さく、反射による電磁波遮蔽効果は高くなる。
- 3) 供試体厚さ $t=25\text{mm}$ 、炭素粉末添加率 20% のモルタルの透過率は、6~8GHz の周波数帯において、気乾状態で約 -40dB を有し、電磁波遮蔽材の目安として、平均的な性能を有している。炭素粉末の添加率とモルタルの厚さを調整することによって透過率 -90dB を超える最高水準の電磁波遮蔽材の製造も可能である。

本章における今後の課題を以下に示す。

炭素粉末を添加したモルタルは、添加率が大きくなるほど表面の反射が大きく、本研究の範囲内では電磁波吸収材としての適用は困難である。しかし、透過試験の結果、炭素粉末の電磁波吸収効果は確認しており、今後、電磁波をモルタル内部まで透過させる配合と材料の選定および電磁波吸収を生じさせるための適切な炭素粉末添加率の選定が必要となる。

[5章 参考文献]

- 1) 清水康敬, 杉浦行, 石野健: 最新 電磁波の吸収と遮蔽, 日経技術図書株式会社, 1999
- 2) 橋本修: 高周波領域における材料定数測定法, 森北出版株式会社, 2003
- 3) 白川龍生, 岡田包儀, 狩野平三郎, 岡崎分保, 多田旭男, 小嶋直人: 副次産物として得られる高性能ナノカーボンを用いたモルタル供試体の開発, 土木学会第 65 回年次学術講演会, V-475, pp949-950, 2010
- 4) Y.Higashida and M.Ando: “Measurement of Electromagnetic Wave Absorption by free-Space Method in High Frequency Range”, Ceramics 37, 99-101, 2002
- 5) FLIR SC 620 仕様書: フリアーシステムズジャパン株式会社, 2009
- 6) MIL-STD-285, “Attenuation Measurements for Enclosures, Electromagnetic Shielding, for Electronic test Purposes, Method of”, Jun. 1956
- 7) 橋本修: 電波吸収体の原理・構造とその利用, RF ワールド, No.7, pp.107-114 CQ 出版株式会社, 2009
- 8) 橋本修: 電波吸収体の話, 日刊工業新聞社, 2001

第6章

炭素粉末を添加したモルタルの 電磁波遮蔽性の予測手法

第6章 炭素粉末を添加したモルタルの電磁波遮蔽性の予測手法

6.1 概説

炭素粉末を添加したモルタルは、炭素粉末の抵抗と炭素粉末に挟まれたモルタル部の静電容量が複雑に連成した形の誘電体であり、その電気的材料定数は誘電率 ε で表される。誘電体は誘電率に比例して静電容量が増加し、誘電率は電磁波の反射性や吸収性に影響する材料定数である。また、誘電体は電磁波に対して損失をもつ材料であるため、誘電率は誘電損失を含む複素数となり、真空中の誘電率の比（複素比誘電率）で表される。モルタルの複素比誘電率と炭素粉末添加率、水セメント比等の各種配合要因およびモルタル中の水分量の関係を明らかにできれば、炭素粉末を添加したモルタルの配合設計段階における電磁波遮蔽性（吸収性および反射性）の評価が可能になると考えられる。

そこで、本章ではまず、透過試験から得られた透過率と位相差によって複素比誘電率を算出し、透過試験および自由空間法で測定した測定値との比較を行い、試験方法の妥当性を検証する。また、複素比誘電率を用いて、炭素粉末を添加したモルタルの電磁波遮蔽性の予測手法を提案する。

6.2 複素比誘電率による試験方法の評価

6.2.1 透過試験による複素比誘電率の算出

電磁波の伝播に関する電気的定数として、誘電率 ε と透磁率 μ があり、一般的にこれらの値は、式(6.2.1)および(6.2.2)に示すように真空の値に対する比誘電率 ε_r 、比透磁率 μ_r で表現される。

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (6.2.1)$$

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (6.2.2)$$

ここに、 ε_r : 比誘電率 ε : 誘電率 ε_0 : 真空中の誘電率 ($\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m)
 μ_r : 比透磁率 μ : 透磁率 μ_0 : 真空中の透磁率 ($\mu_0 = 1.257 \times 10^{-6}$ H/m)

誘電体であるモルタルは、電界が印加されると電気分極現象が起こる物質である。これを電気的的材料定数からみると、透磁率は次式で表される。

$$\mu = \mu_0 \quad , \quad \mu_r = 1$$

また、誘電率は損失が無い場合には実数として扱われるが、電波的に損失を持つ材料では、比誘電率は複素数になり、複素比誘電率と呼ばれ、式(6.2.3)で表わされる。

$$\dot{\epsilon}_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (6.2.3)$$

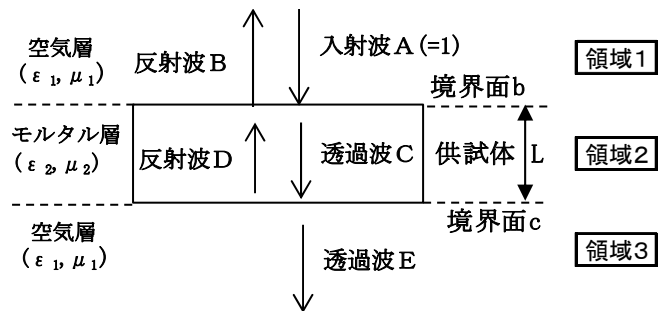
ここに、 $\dot{\epsilon}_r$: 複素比誘電率 ϵ_r' : 実数部 j : 虚数単位 ϵ_r'' : 虚数部

透過試験における透過係数の算出方法を以下に示す¹⁾。

透過試験は図-6.2.1に示すように、境界面bおよび境界面cで接する3つの領域1, 2, 3が存在しており、境界面bおよびcの各面において、式(6.2.4), (6.2.5)で与えられる値の反射と透過が起こり、図中の矢印で示した各方向への進行波は、これら2つの境界面からの反射波および透過波の合成として式(6.2.6)~(6.2.9)のように表される¹⁾。

$$\dot{R} = \frac{\sqrt{\dot{\epsilon}_2} - \sqrt{\dot{\epsilon}_1}}{\sqrt{\dot{\epsilon}_2} + \sqrt{\dot{\epsilon}_1}} \quad (6.2.4)$$

$$\dot{T} = \frac{2\sqrt{\dot{\epsilon}_2}}{\sqrt{\dot{\epsilon}_2} + \sqrt{\dot{\epsilon}_1}} \quad (6.2.5)$$



ここに、 \dot{R} : 反射係数

\dot{T} : 透過係数

$\dot{\epsilon}_1$: 空気層の複素比誘電率

$\dot{\epsilon}_2$: モルタルの複素比誘電率

図-6.2.1 透過試験の概念図¹⁾

$$\dot{C} = \frac{\dot{A}\dot{T}_{12}}{1 - \dot{R}_{21}\dot{R}_{23}e^{-2j\dot{\gamma}_2L}} \quad (6.2.6)$$

\dot{C} : 透過波 C の電界

$$\dot{D} = \dot{R}_{23}e^{-2j\dot{\gamma}_2L}\dot{C} \quad (6.2.7)$$

\dot{D} : 反射波 D の電界

$$\dot{B} = \dot{A}\dot{R}_{12} + \dot{D}\dot{T}_{21} \quad (6.2.8)$$

\dot{B} : 反射波 B の電界

$$\dot{E} = \dot{T}_{23}e^{-2j\dot{\gamma}_2L}\dot{C} \quad (6.2.9)$$

\dot{E} : 透過波 E の電界

ここで、伝搬定数は、以下で与えられる。

$$\gamma_2 = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_2}$$

γ_2 : モルタルの伝搬定数

λ : 波長

これより反射波 \dot{B} と入射波 \dot{A} の比は, $\dot{A} = 1$ とすると

$$\begin{aligned} \dot{S}_{11} &= \frac{\dot{B}}{\dot{A}} = \dot{A}\dot{R}_{12} + \dot{D}\dot{T}_{21} = \dot{R}_{12} + \dot{R}_{23}e^{-2j\gamma_2L}\dot{C}\dot{T}_{21} \\ &= \dot{R}_{12} + \dot{R}_{23}e^{-2j\gamma_2L} \frac{\dot{A}\dot{T}_{12}\dot{T}_{21}}{1 - \dot{R}_{21}\dot{R}_{23}e^{-2j\gamma_2L}} \end{aligned} \quad (6.2.10)$$

\dot{S}_{11} : 境界面 b での透過係数

$\dot{R}_{12}, \dot{R}_{23}$: 境界面 b, c での反射係数

$\dot{T}_{12}, \dot{T}_{21}$: 境界面 b での透過係数

j : 虚数単位

L : モルタル厚さ

となる。一方, 透過波 \dot{E} と入射波 \dot{A} の比である透過係数 \dot{S}_{21} は,

$$\dot{S}_{21} = \frac{\dot{E}}{\dot{A}} = \dot{T}_{23}e^{-2j\gamma_2L}\dot{C} = \frac{\dot{T}_{12}\dot{T}_{23}e^{-2j\gamma_2L}}{1 - \dot{R}_{21}\dot{R}_{23}e^{-2j\gamma_2L}} \quad (6.2.11)$$

\dot{T}_{23} : 境界面 c での透過係数

ここで, $\mu_1 = \mu_2 = 1$ とすると, \dot{R}_{nm} および \dot{T}_{nm} は,

$$\dot{R}_{12} = \frac{\sqrt{\epsilon_2} - \sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_2} + \sqrt{\epsilon_1}}$$

$$\dot{R}_{23} = \dot{R}_{21} = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}}$$

$$\dot{T}_{12} = \frac{2\sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_2} + \sqrt{\epsilon_1}}$$

$$\dot{T}_{23} = \frac{2\sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_2} + \sqrt{\epsilon_1}}$$

と表すことができ、透過試験の両アンテナ間に供試体を挿入した場合の透過係数は式 (6.2.11) により求めることができる。複素比誘電率の算出方法は、各周波数について、複素比誘電率の初期値 (任意) を入力し、式 (6.2.11) から透過係数 \dot{S}_{21} を算出する。この透過係数 \dot{S}_{21} を用いて、透過率 T_S および位相差 θ を式 (6.2.12) および式 (6.2.13) から算出する。計算値と $t=10\text{mm}$ の供試体で測定した透過率 T_S および位相差 θ の残差が設定した値以下になるように 2 次元のニュートン法を用いて複素比誘電率を導出した。図-6.2.2~4 に各周波数で推定した気乾状態の複素比誘電率を示す。炭素粉末添加率が大きいほど、また、周波数が高くなるほど、複素比誘電率を求める解が収束せず、実数部および虚数部の推定が不可能となった。この傾向は含水状態が変化しても同じ傾向を示した。そこで解が求まる周波数の範囲において、実数部と虚数部をそれぞれ導出し、その平均値を各配合の複素比誘電率とした。

$$T_S = 20 \log_{10} |\dot{S}_{21}| \quad (6.2.12)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\text{Im}(\dot{S}_{21})}{\text{Re}(\dot{S}_{21})} \times \frac{180}{\pi} \quad (6.2.13)$$

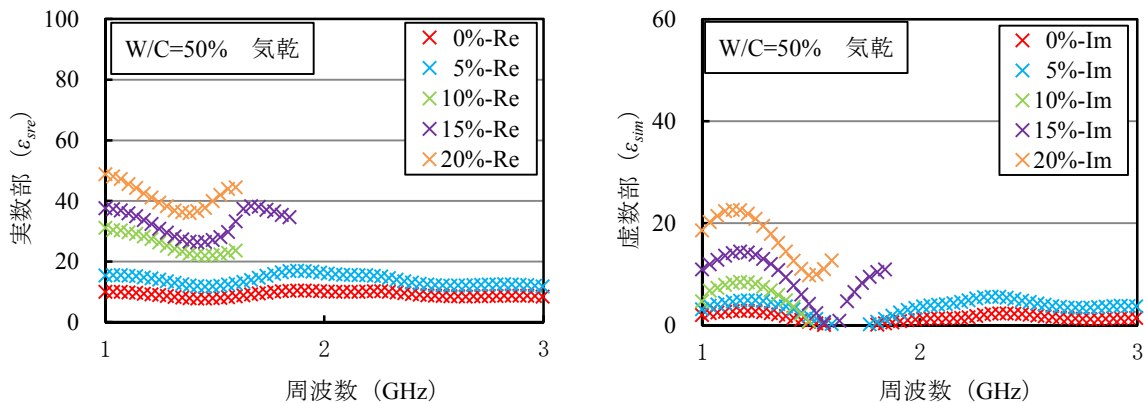


図-6.2.2 各周波数から推定した複素比誘電率 (W/C=50% 気乾状態)

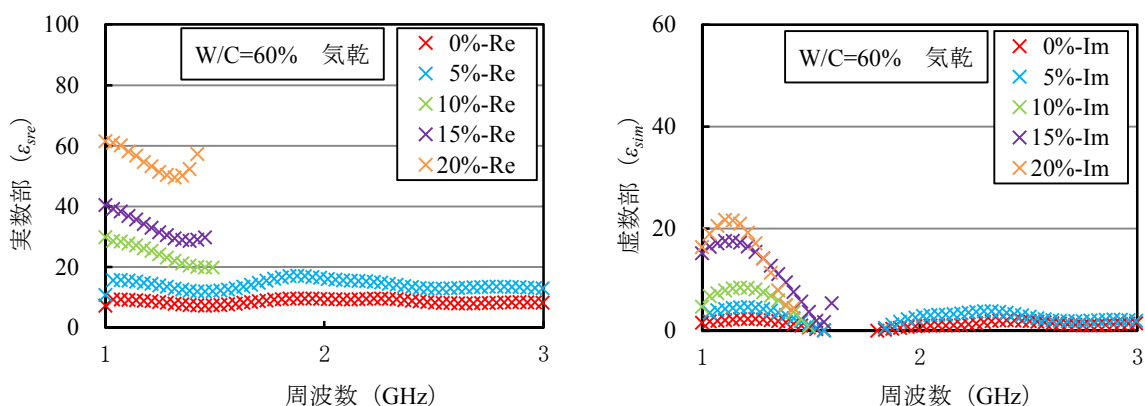


図-6.2.3 各周波数から推定した複素比誘電率 (W/C=60% 気乾状態)

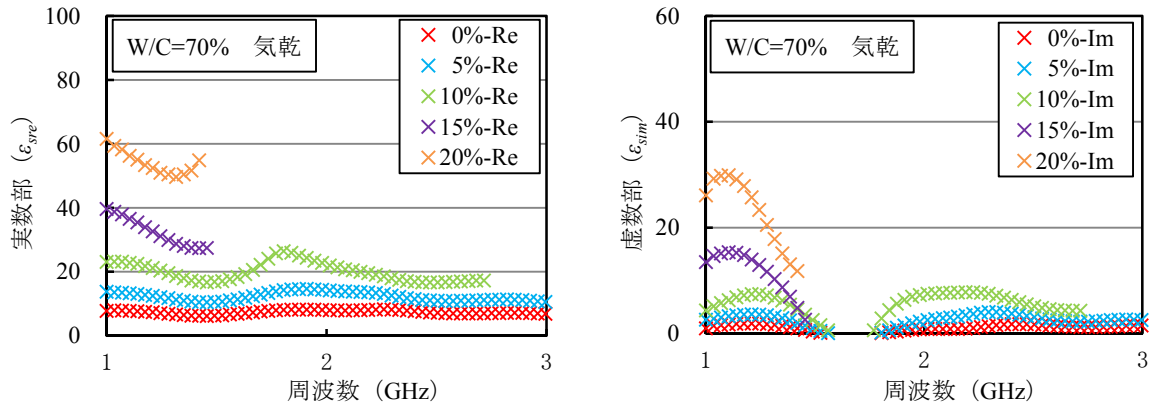


図-6.2.4 各周波数から推定した複素比誘電率 (W/C=70% 気乾状態)

表-6.2.1 に複素比誘電率の実数部 ϵ_{sre} 、虚数部 ϵ_{sim} 、誘電損失 $\tan \theta$ の算出結果を示す。実数部が誘電率、虚数部が損失に対応し、誘電損失は変位電流の大きさに対する導電電流の大きさを表している。

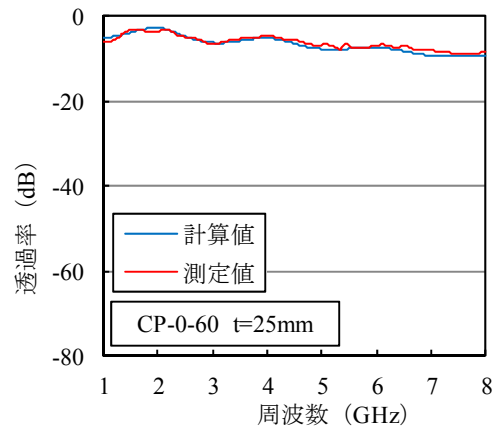
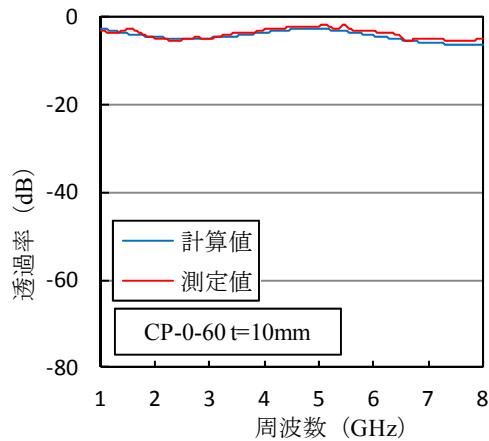
表-6.2.1 透過試験による複素比誘電率の算出結果 (供試体厚さ $t=10\text{mm}$)

含水状態	炭素粉末 添加率 (%)	実数部 ϵ_{sre}			虚数部 ϵ_{sim}			誘電損失 $\tan \theta$		
		W/C (%)			W/C (%)			W/C (%)		
		50	60	70	50	60	70	50	60	70
湿潤状態	0	13.07	12.81	12.00	2.68	2.05	2.30	0.21	0.16	0.19
	5	20.62	23.18	22.37	5.20	4.24	5.87	0.25	0.18	0.26
	10	38.87	42.59	40.35	13.24	13.56	11.87	0.34	0.32	0.29
	15	55.31	65.53	78.94	24.61	32.56	32.13	0.44	0.50	0.41
	20	83.29	—	—	51.57	—	—	0.62	—	—
気乾状態	0	9.16	8.57	7.35	1.98	1.18	1.04	0.22	0.14	0.14
	5	13.85	14.08	12.20	3.38	2.28	2.32	0.24	0.16	0.19
	10	25.70	24.23	19.91	5.70	6.12	5.03	0.22	0.25	0.25
	15	32.76	33.91	32.48	8.87	11.48	11.50	0.27	0.34	0.35
	20	41.57	55.06	54.13	16.96	15.35	23.04	0.41	0.28	0.43

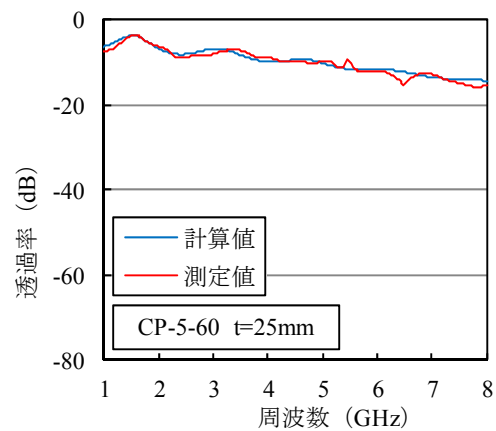
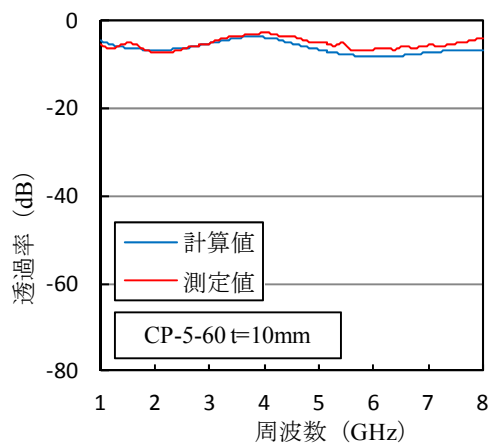
6.2.2 複素比誘電率による透過試験の評価

図-6.2.5 に複素比誘電率から推定した透過率の計算値と測定値の比較を示す。供試体の厚さは $t=10, 25\text{mm}$ の 2 種類、W/C=60%、気乾状態の条件で比較を行った。透過率の計算値には $t=10\text{mm}$

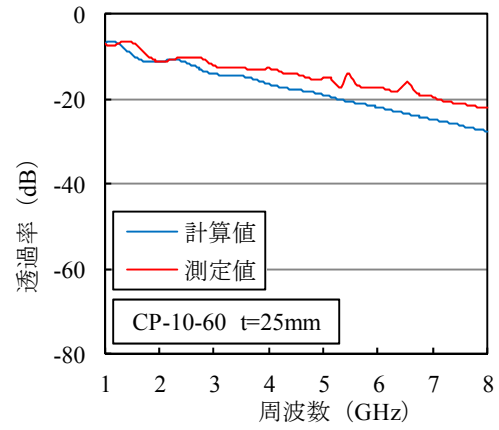
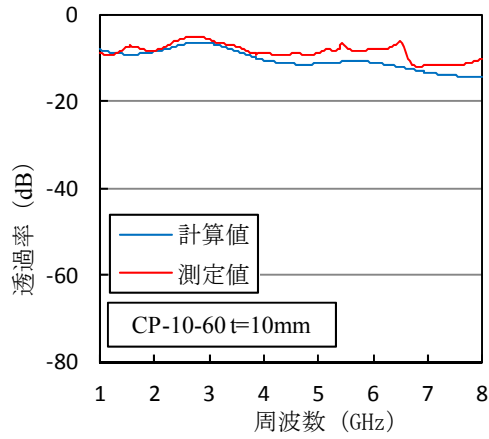
の供試体を用いた透過試験の結果から、解が求まる周波数の範囲において、実数部と虚数部をそれぞれ導出し、その平均値を用いて、1~8GHzの周波数における透過率を算出した。図より、 $t=10\text{mm}$ の供試体では、透過率の測定値と計算値はほぼ一致している。一方、 $t=25\text{mm}$ の供試体では、炭素粉末添加率が5%以下の場合、計算値と測定値は一致しているが、炭素粉末添加率が10%以上になると、理論値と測定値の差が大きくなっている。測定値と計算値の差は、高周波数帯および炭素粉末添加率の大きい配合で複素比誘電率が算出できていないことも影響しているが、透過試験に用いた供試体厚さも測定結果に影響を及ぼしていると考えられる。一般的に透過試験は、厚さ数ミリ程度の非常に薄肉の試験体を使う場合が多く、モルタル供試体も可能な限り薄くすることで測定精度が確保できる。しかし、試験体を薄くすることで、モルタルを構成する個々の構成材料の特性が顕著になり、モルタル自体の電磁波遮蔽性を把握できない可能性がある。したがって、今回の試験条件においては、モルタルの供試体厚さを10mmに設定することが望ましいと考える。



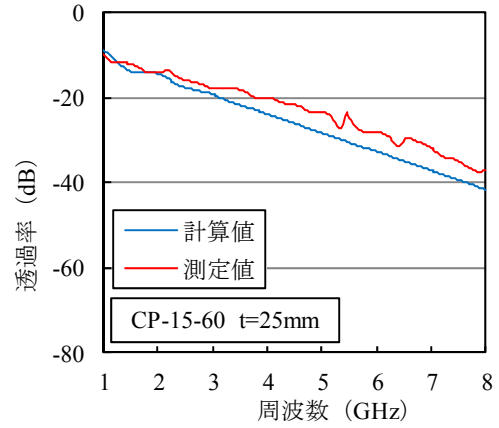
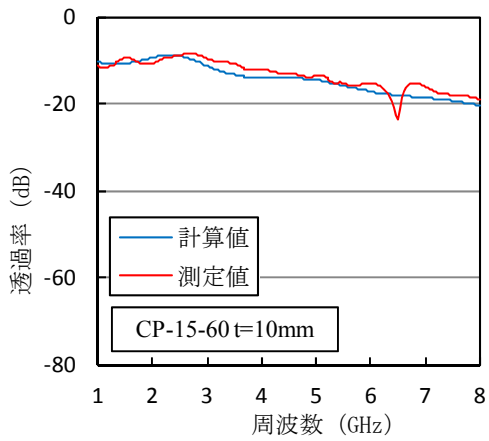
(CP-0-60 $t=10, 25\text{mm}$)



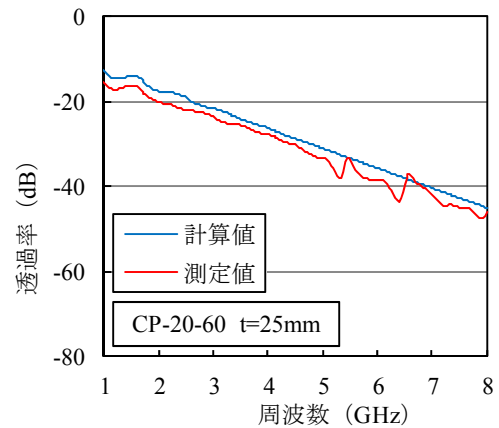
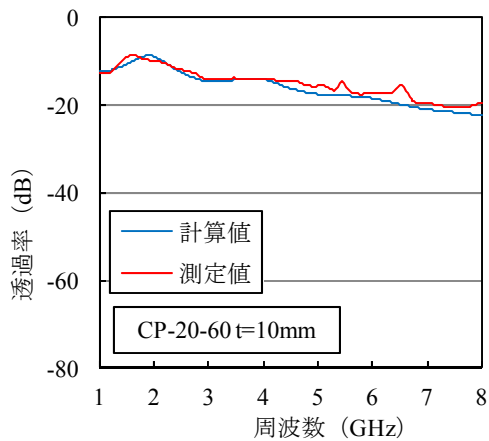
(CP-5-60 $t=10, 25\text{mm}$)



(CP-10-60 t=10, 25mm)



(CP-15-60 t=10, 25mm)



(CP-20-60 t=10, 25mm)

図-6.2.5 複素比誘電率の推定による計算値と測定値の比較(気乾状態 t=10, 25mm)

6.2.3 複素比誘電率による自由空間法の評価

複素比誘電率は誘電体の電気的特性を表す定数であり、複素比誘電率を用いて電磁波吸収性の指標となる反射率を推定することは可能である。そこで、透過試験の結果から推定した複素比誘電率から反射率を算出し、計算値と自由空間法の測定値との比較を行うことで自由空間法の妥当性を検証した。反射率の算出は式(6.2.14)を用いた。式中の小文字の反射係数の量は実数を示しており、各層の厚さや波長に依存する。図-6.2.6に自由空間法による反射概念図を示す。

$$R_s = 20 \log_{10} R_t = 20 \log_{10} \left| \frac{r_{12} + R_{23}}{1 + r_{12} \times R_{23}} \right| \quad (6.2.14)$$

ここに、 R_s : 反射率(dB)

R_t : 反射係数

$$R_t = R_{12} = \frac{E_{r0}}{E_{i0}} = \frac{r_{12} + R_{23}}{1 + r_{12} \times R_{23}}$$

R_{12} : 空気とモルタルの境界の反射係数

E_{r0} : 入射波の電界

E_{i0} : 反射波の電界

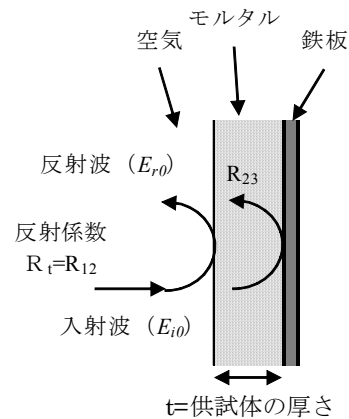


図-6.2.6 自由空間法による
反射概念図

R_{23} : モルタルと鉄板の境界の反射係数

$$R_{23} = r_{23} e^{-j2k_2 h} = -e^{-j2k_2 h}$$

r_{23} : モルタルと鉄板が共に半無限媒質である場合の反射係数

$$r_{23} = -1$$

h : モルタルの厚さ h

j : 虚数単位

r_{12} : 空気とモルタルが共に半無限体媒質である場合の反射係数

$$r_{12} = \frac{k_1 - k_2}{k_1 + k_2}$$

k_1, k_2 : 伝搬定数(k_1 : 空気, k_2 : モルタル)

$$k_1 = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c} = 2.094f \times 10^{-8}$$

λ : 波長(m),

c : 光速 $c = 3.0 \times 10^8$ (m/s)

f : 周波数(Hz)

$$k_2 = \omega \sqrt{\epsilon_s \mu_2} = \omega \sqrt{\epsilon_s} = k_{re} - jk_{im} = k_1 \sqrt{\epsilon_s (1 - j \tan \delta)}$$

μ_2 : モルタルの透磁率 $\mu_2 = 1$

ϵ_s : 実数の比誘電率

$\tan \delta$: 誘電損失

$$\epsilon_{sc} = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} = \epsilon_{sre} - j\epsilon_{sim} = \epsilon_s (1 - j \tan \delta)$$

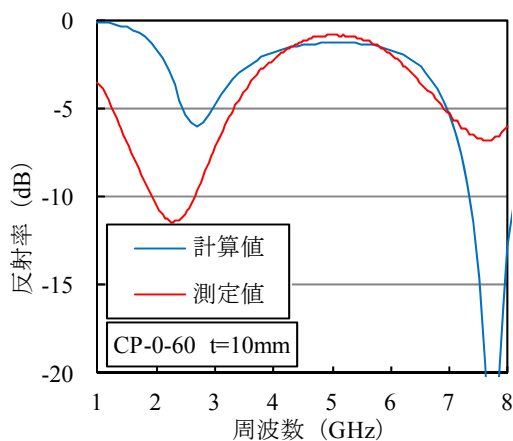
ϵ_{sc} : 複素比誘電率

ϵ_c : 複素誘電率

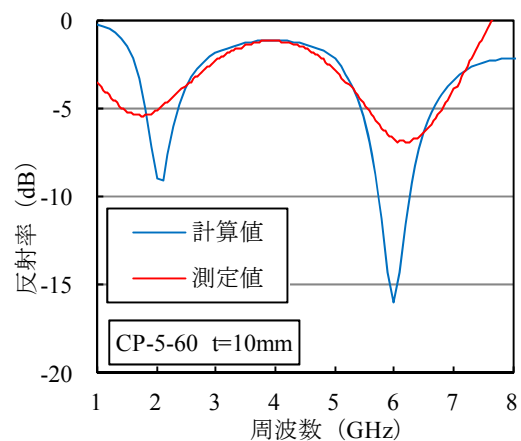
ϵ_0 : 真空中の誘電率 $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ (F/m)

$\epsilon_{sre}, \epsilon_{sim}$: 複素比誘電率の実数部と虚数部

図-6.2.7に推定した複素比誘電率から算出した反射率と自由空間法の測定値のフィッティング結果を示す。供試体厚さ $t=10\text{mm}$, $W/C=60\%$, 炭素添加率 $0\sim 20\%$ の気乾状態において比較検討を行った。フィッティングの判定に際しては、反射率の周波数特性および炭素粉末を添加したモルタルは反射が支配的になるため反射率の極大値に着目して判断した。フィッティングの結果、炭素粉末無添加および添加率 5% までは、電磁波吸収を表す反射率の極小値は異なるものの、反射率の極大値および周波数と反射率の関係を示す波形は計算値および測定値とも一致しており、自由空間法による測定結果が概ね妥当であると判断した。一方、炭素粉末添加率が増加すると、計算値に比べて測定値の反射率は大きく、極大値に差が生じている。また、極小値も測定値と計算値の差が大きく、計算値まで電磁波を吸収できていない。自由空間法で測定した極大値および極小値が複素比誘電率から算出した計算値より大きくなったのは、炭素粉末添加率が大きいモルタルでは、打設後にセメント、細骨材に比べて密度の小さい炭素粉末が浮上、打設面に集中し、硬化後の供試体表面での反射が強くなったことが考えられる。



($W/C=60\%$ CP-0 気乾)



($W/C=60\%$ CP-5 気乾)

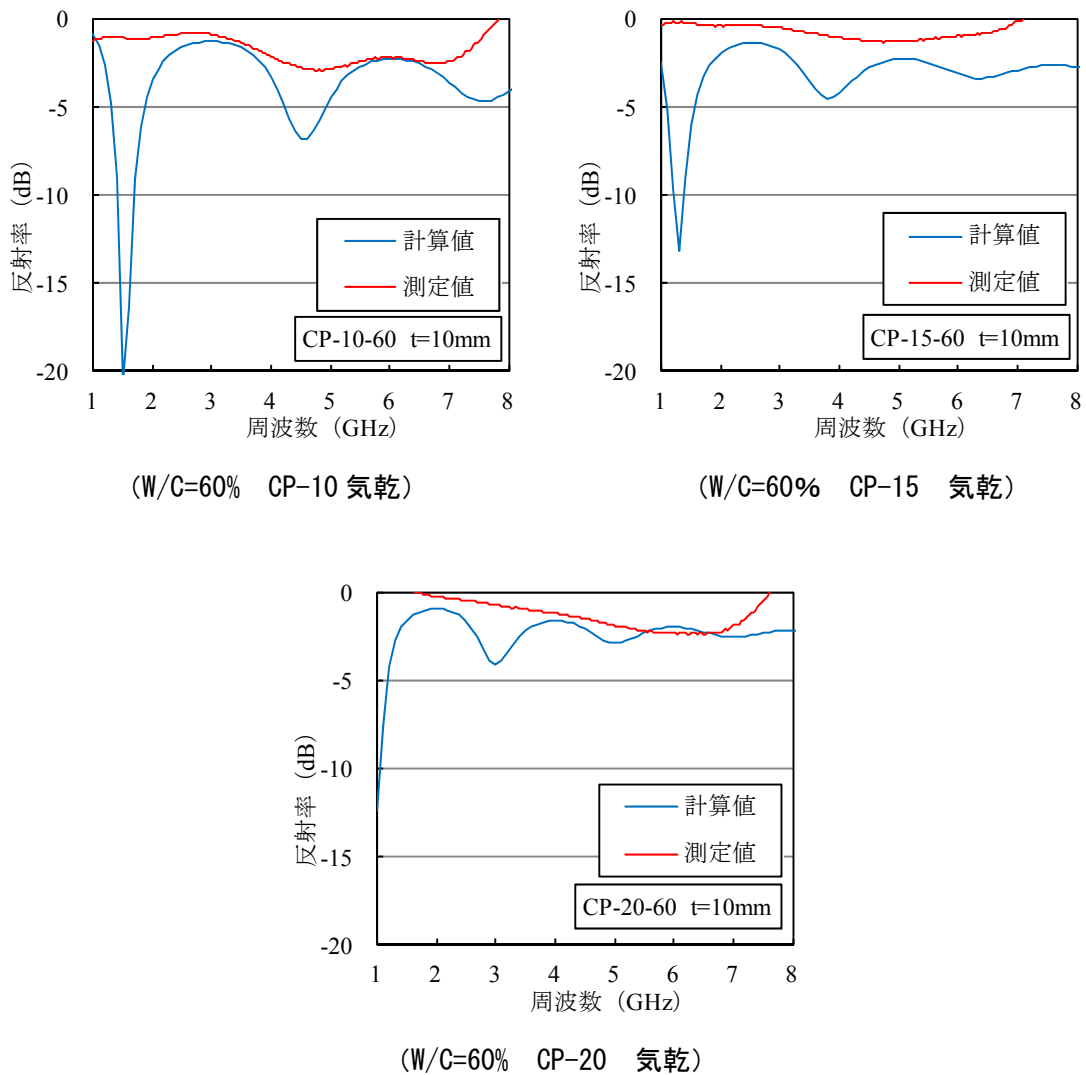


図-6.2.7 反射率の計算値と測定値の比較(自由空間法 気乾状態)

6.3 複素比誘電率に影響を及ぼす要因

図-6.3.1~3に各水セメント比の供試体における炭素粉末添加率と透過率から算出した複素比誘電率の実数部 ϵ_{sre} および誘電損失 $\tan \theta$ の関係を示す。実数部は湿潤、気乾状態とも炭素添加率の増加とともに直線的に増加している。ただし、炭素粉末無添加の場合は、含水状態が実数部に及ぼす影響は小さいが、炭素粉末添加率が大きくなると、含水状態による実数部の差は大きくなる。複素比誘電率の実数部は誘電率に対応しており、添加率が増加すると誘電率が増加したことになる。水の比誘電率は $\epsilon_s = 80$ であり²⁾、空気、モルタルに比べて大きい。したがって、モルタル中の水分が増加するほど実数部も増加したと考えられる。誘電損失も炭素粉末添加率が大きいほど大きくなり、同一配合でも水の存在によって誘電損失も大きくなる。誘電損失はモルタル内における電磁波の損失であり、炭素粉末の添加によってモルタル内の誘電損失が大きくなることが明らかとなった。

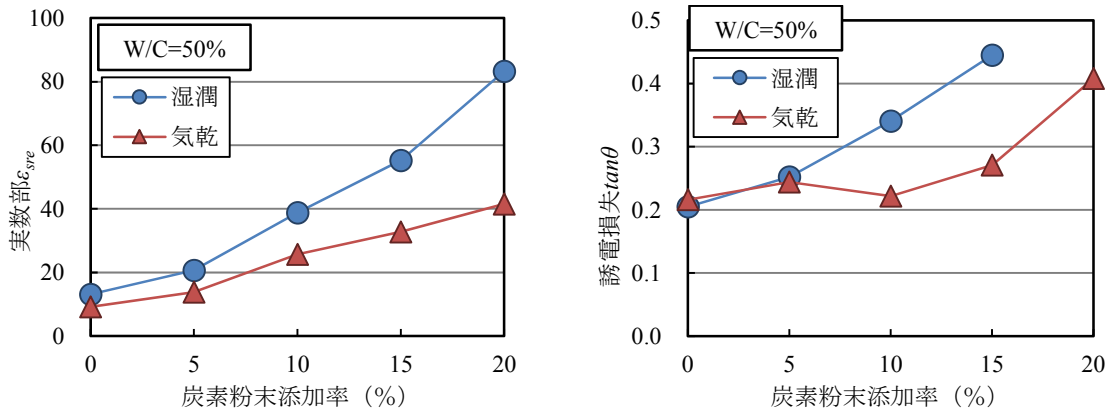


図-6.3.1 炭素粉末添加率と複素比誘電率の関係 (W/C=50%)

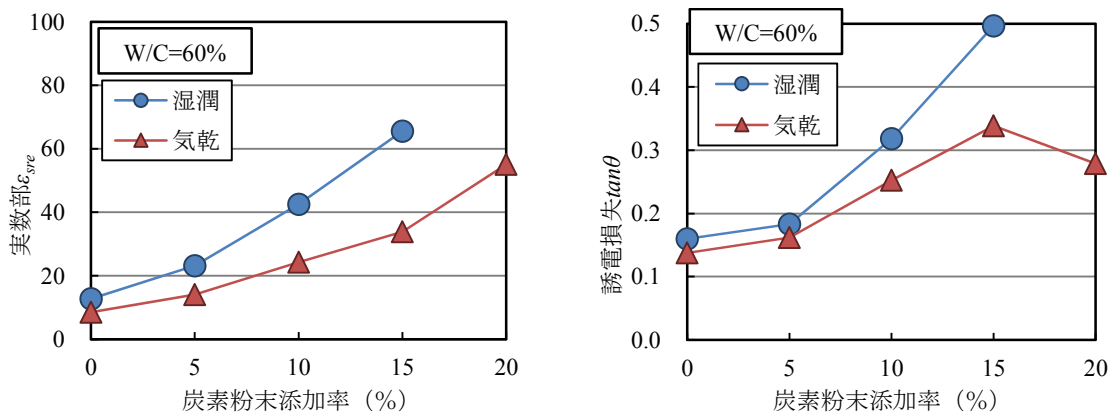


図-6.3.2 炭素粉末添加率と複素比誘電率の関係 (W/C=60%)

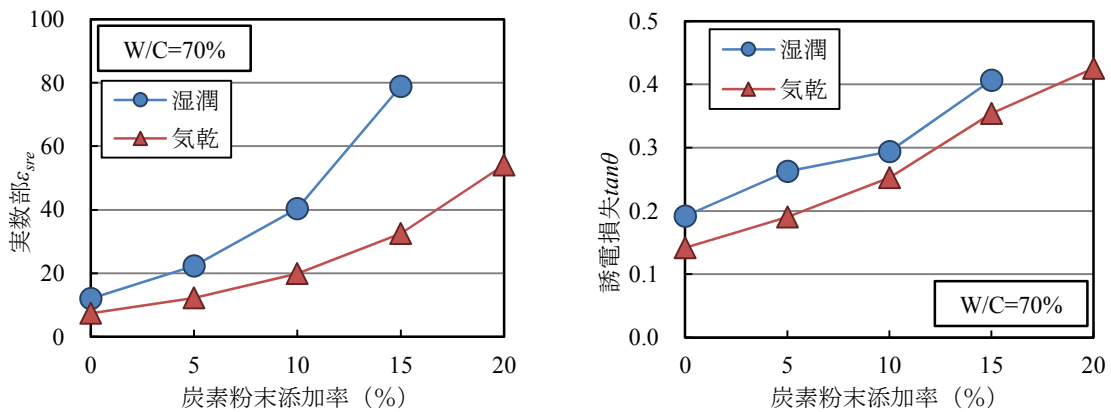


図-6.3.3 炭素粉末添加率と複素比誘電率の関係 (W/C=70%)

図-6.3.4~5に水セメント比と複素比誘電率の実数部および誘電損失の関係を示す。湿潤状態では炭素粉末添加率が10%以下では実数部、誘電損失ともに水セメント比の影響は小さい。一方、添加率が15%では、水セメント比の違いによる実数部の差が大きくなっている。気乾状態でも炭素粉末添加率が20%になると実数部、誘電損失ともに、水セメントの違いによる差が生じている。今回の試験結果だけでは、水セメント比が複素比誘電率に及ぼす影響を明確に判断することは

きないが、第4章では、炭素粉末を添加したモルタルの導電性が水セメント比よりも炭素粉末の体積と水の体積に影響を受けること示した。複素比誘電率に影響する要因についても、水セメント比よりも炭素粉末添加率および含水状態が支配的であると考えられる。

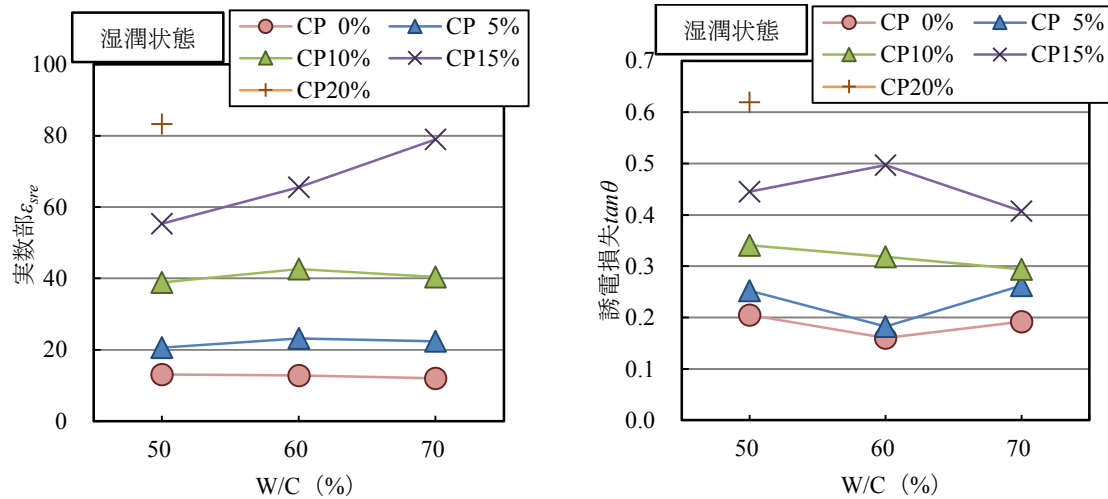


図-6.3.4 水セメント比と複素比誘電率の関係(湿潤状態)

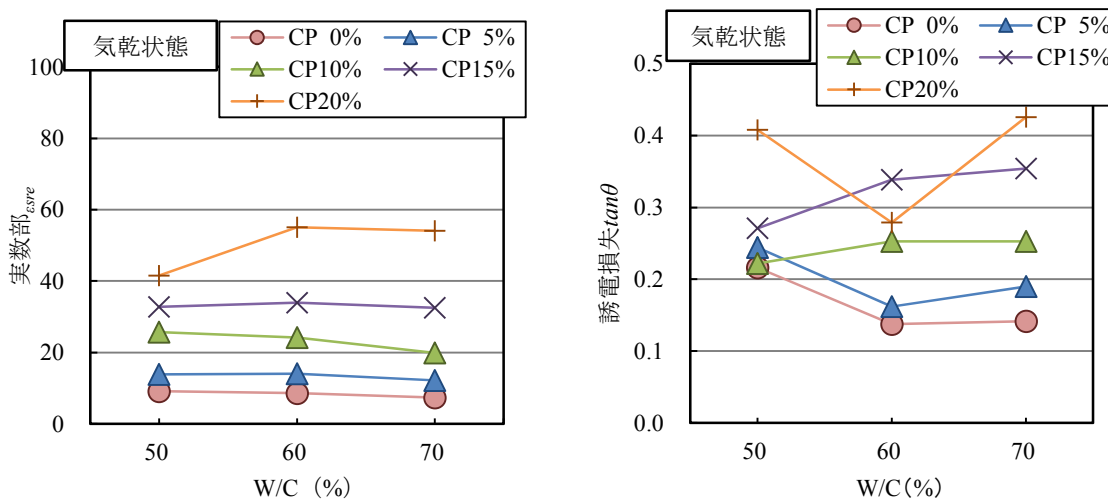


図-6.3.5 水セメント比と複素比誘電率の関係(気乾状態)

6.4 炭素粉末を添加したモルタルの電磁波遮蔽性を予測する式の提案とその設計への適用

複素比誘電率に影響を及ぼす要因は、炭素粉末の添加率およびモルタルの含水状態であることが明らかとなった。そこで、透過試験から得られた結果をもとに、炭素粉末を添加したモルタルの電磁波遮蔽性を予測する式を提案し、電磁波遮蔽材として適用するための設計方法を示す。

炭素粉末添加率と複素比誘電率の実数部および虚数部の関係を図-6.4.1~2に示す。炭素粉末を添加したモルタルの複素比誘電率は、水セメント比の影響が小さいため、すべての配合の複素比誘電率をプロットし、炭素粉末添加率と複素比誘電率の実数部と虚数部の関係を検討した。図

より、実数部および虚数部は炭素粉末添加率を用いて指数関数で表すことができる。表-6.4.1に最小二乗法によって求めた炭素粉末添加率と実数部および虚数部の関係を示す。以上の結果より、配合設計の段階で複素比誘電率が推定でき、遮蔽対象となる電磁波の周波数帯とモルタルの含水状態、モルタル厚さを設定すれば、電磁波遮蔽性の指標である透過率の予測が可能である。

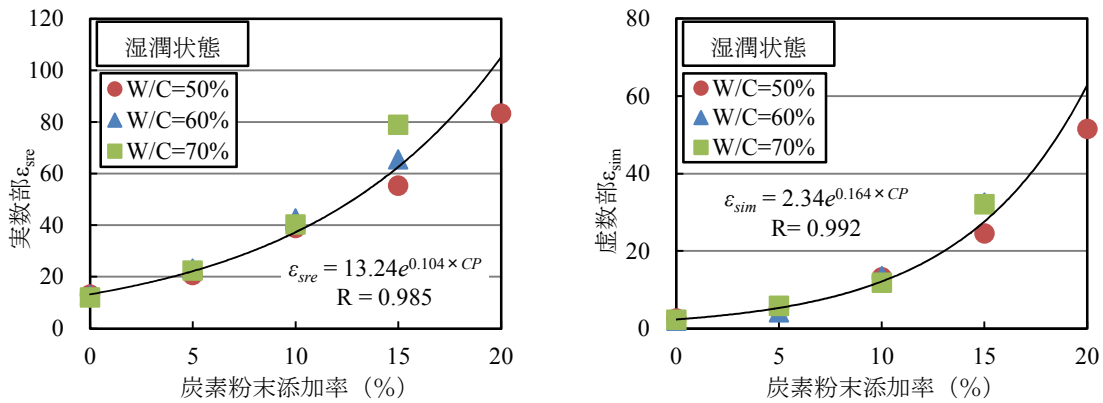


図-6.4.1 炭素粉末添加率と複素比誘電率の関係（湿潤状態）

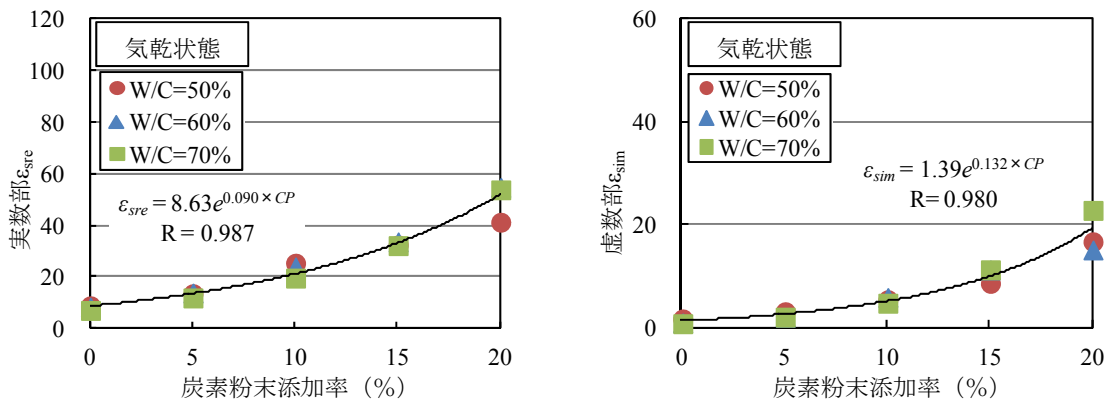


図-6.4.2 炭素粉末添加率と複素比誘電率の関係（気乾状態）

表-6.4.1 炭素粉末添加率と複素比誘電率の関係式

供試体の含水状態	実数部 ϵ_{sre}		虚数部 ϵ_{sim}	
	関係式 CP : 炭素粉末添加率 (%)	相関係数	関係式 CP : 炭素粉末添加率 (%)	相関係数
湿潤状態	$\epsilon_{sre} = 13.24e^{0.104 \times CP}$	0.985	$\epsilon_{sim} = 2.34e^{0.165 \times CP}$	0.992
気乾状態	$\epsilon_{sre} = 8.63e^{0.090 \times CP}$	0.987	$\epsilon_{sim} = 1.39e^{0.132 \times CP}$	0.980

本研究においては、供試体の含水状態は気乾と湿潤状態のみで試験を実施した。そのため、複素比誘電率の予測式において照査できる含水状態は湿潤状態と気乾状態のみであるが、気乾状態は温度 20 ± 2 °C、湿度 60 ± 10 %の恒温恒湿室で乾燥させ、質量変化が収束した時点であり、建築構造物の室内環境と同程度の湿度条件である。したがって、気乾状態の予測式を採用すれば、電磁波遮蔽材の供用期間中の透過率が推定できる。

電磁波遮蔽体の設計フローを図-6.4.3に示す。炭素粉末を添加したモルタルで電磁波遮蔽体を設計する場合、まず、遮蔽対象となる電磁波の周波数と期待する遮蔽効果から目標透過率 T_{S1} を決定する。一方、配合設計の段階で炭素粉末添加率を設定し、表-6.4.1の炭素粉末添加率と複素比誘電率の関係式から実数部、虚数部を算出する。この複素比誘電率と仮定したモルタル厚さから式(6.2.12)を用いて透過率 T_{S2} を算出する。 $T_{S1} > T_{S2}$ を満足すれば、設定した炭素粉末添加率とモルタル厚さで要求された電磁波遮蔽性を満足することとなり、 $T_{S1} < T_{S2}$ となれば、炭素粉末添加率を増やす。または、モルタルを厚くすることで透過率を再度算出し、目標透過率以下になるように設計する。

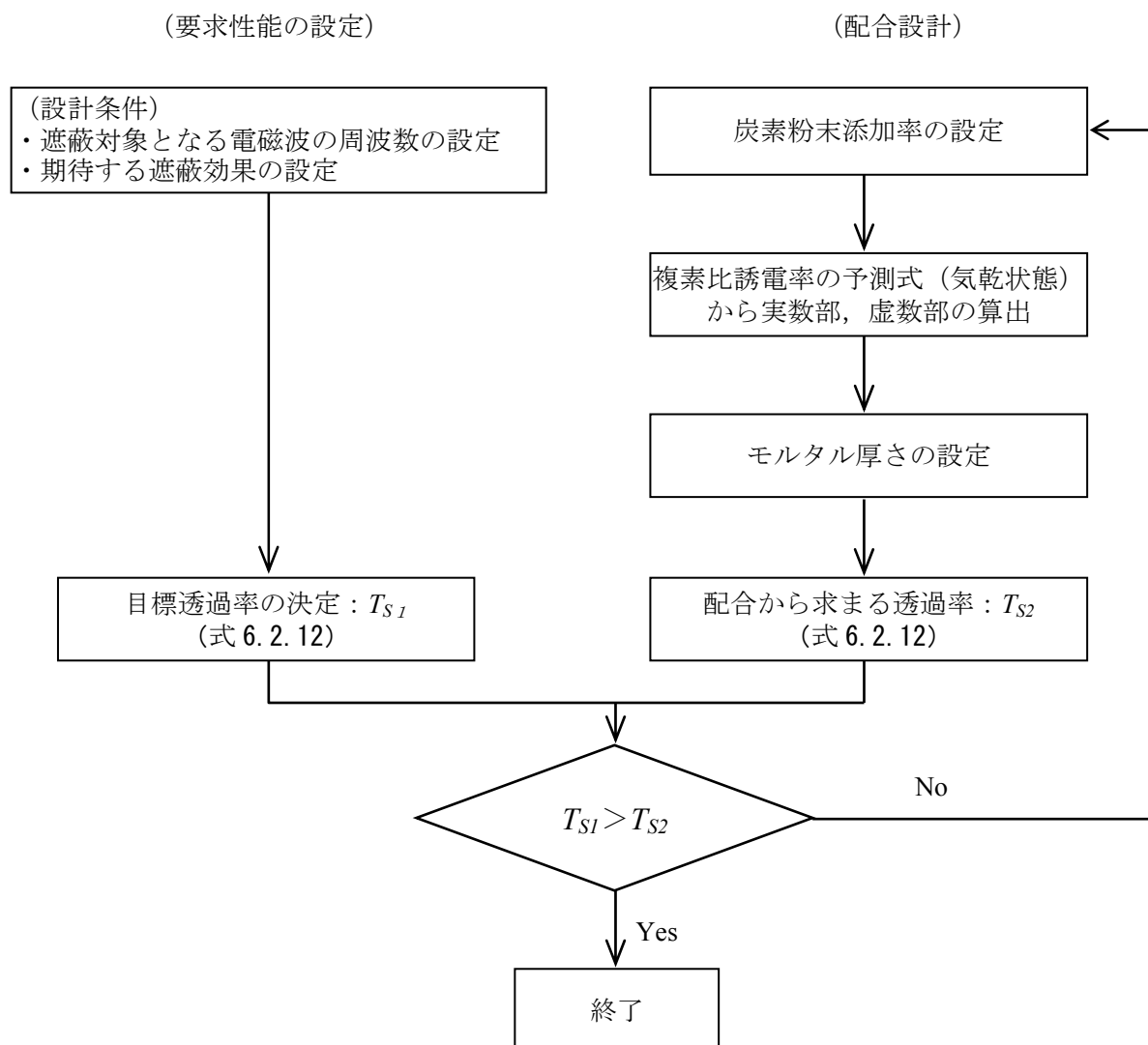


図-6.4.3 電磁波遮蔽体設計フロー

6.5 電磁波吸収材としての適用性

第5章の自由空間法の結果から、今回選定した炭素粉末添加率のモルタルは、表面での反射が大きく、電磁波が内部まで透過できずに電磁波吸収性が低下することが明らかとなった。ここでは、複素比誘電率を用いて、炭素粉末を添加したモルタルの電磁波吸収体としての評価を無反射曲線³⁾を用いて行った。

モルタルと裏面の鉄板で構成される電磁波吸収体は単層形電磁波吸収体として考えることができ、垂直入射電波に対する反射係数 \dot{S} は式(6.5.1)で表される。

$$\dot{S} = \frac{\dot{Z} - Z_0}{\dot{Z} + Z_0} = \frac{\frac{1}{\sqrt{\dot{\epsilon}_r}} \tanh\left(j \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{\dot{\epsilon}_r}\right) - 1}{\frac{1}{\sqrt{\dot{\epsilon}_r}} \tanh\left(j \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{\dot{\epsilon}_r}\right) + 1} \quad (6.5.1)$$

ここに、

\dot{Z} : 電磁波吸収体の表面インピーダンス

$$\dot{Z} = \dot{Z}_c \tanh \dot{\gamma}_c d$$

\dot{Z}_c : 電磁波吸収体の特性インピーダンス

$$\dot{Z}_c = Z_0 \sqrt{\frac{1}{\dot{\epsilon}_r}}$$

$\dot{\gamma}_c$: 電磁波吸収体の伝搬定数

$$\dot{\gamma}_c = j\omega\sqrt{\dot{\epsilon}} = j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\dot{\epsilon}_r}$$

λ : 自由空間（空气中）における電波の波長

$$\dot{\epsilon}_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$$

ϵ_r' : 複素比誘電率の実数部 ϵ_r'' : 複素比誘電率の虚数部 j : 虚数単位

d : 電磁波吸収体の厚さ

Z_0 : 空気の特徴インピーダンス

したがって、複素比誘電率 $\dot{\epsilon}_r$ が与えられれば、電磁波吸収体の反射特性は式(6.5.1)によって算出できる。そこで、この式において、 $\dot{S} = 0$ となる $\dot{\epsilon}_r$ および d を求めれば、反射係数が0の電磁波吸収体の設計が可能となる。図-6.5.1に垂直入射に対する単層形電磁波吸収体の無反射曲線を示す。無反射曲線は電磁波の波長 λ 、電磁波吸収体の厚さ d に対して、式(6.5.1)の $\dot{S} = 0$ を満たす複素比誘電率の実数部と虚数部の組み合わせであり、入射波がすべて吸収されて反射が生じない場合の解を求めてプロットしたものである。電磁波吸収体の複素比誘電率の実数部と虚数部との関係がこの線上にプロットされれば、そのモルタルは反射が生じない理想的な電磁波吸

収体となる。通常、電磁波吸収体の設計においては、吸収体の実数部と虚数部の関係が無反射曲線と交差するように材料の選定や配合修正を行い、無反射曲線の交点における d/λ が決まれば、吸収したい周波数によって電磁波吸収材の厚みが決定する。

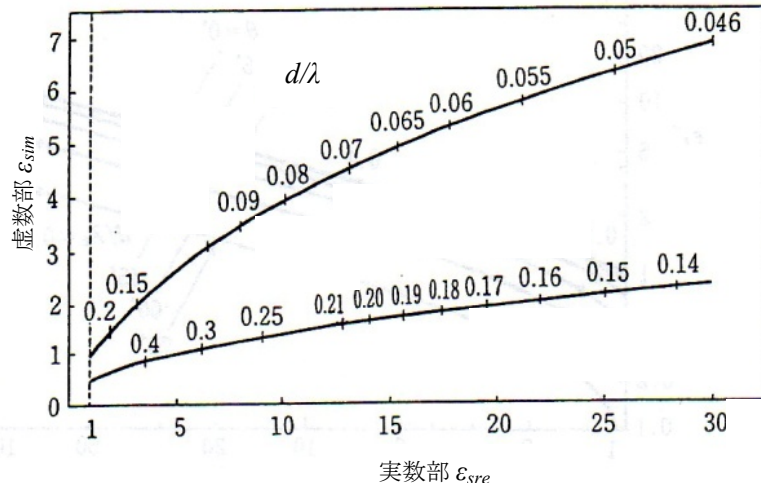


図-6.5.1 垂直入射に対する無反射曲線²⁾

図-6.5.2 に厚さ $t=10\text{mm}$ 、気乾状態の供試体から算出した複素比誘電率の実数部と虚数部の関係を示す。透過試験から複素比誘電率を推定する際、炭素粉末添加率が 10%を超えると、狭い周波数帯だけの解しか求まらなかったため、信頼できる推定値として炭素粉末添加率 10%までの実数部と虚数部の推定値をプロットした。図より、炭素粉末を添加したモルタルは炭素粉末の添加率が増加すると複素比誘電率の実数部および虚数部も比例的に増加しており、無反射曲線に対してほぼ平行に推移している。炭素粉末を添加したモルタルが無反射曲線と交差するか否かについては、今後、炭素粉末添加率 10%を超える配合の複素比誘電率を精度良く推定しなければなら

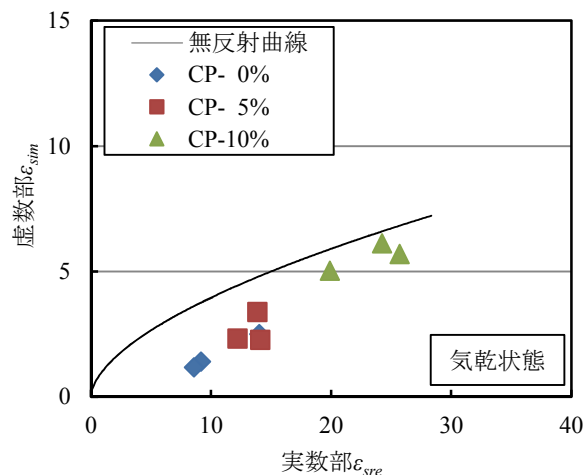


図-6.5.2 モルタルの実数部と虚数部の関係

い。ただし、炭素粉末添加率が15%以上で交差しても、 d/λ が非常に小さく、吸収対象とする周波数が大きくなると、吸収に必要な厚さ d は非常に薄くする必要がある。したがって、今後、炭素粉末を添加したモルタルで電磁波吸収材を開発する場合、現状に比べて実数部のみを小さくし、虚数部を維持または大きくする工夫が必要となる。実際の吸収材料を参考にすると、実数部を小さくする対策として、吸収材に空気泡を混入し、材料の密度を低減する方法がある。今後、モルタルに空気泡を混入する方法（例えば軽量骨材の使用や発泡ビーズの混入）等で実数部を小さくし、炭素粉末の添加により虚数部を維持または大きくすることができれば、炭素粉末による電磁波吸収体の設計も可能になると考えられる。

6.6 結論

本章では透過試験から得られた透過率と位相差によって電气的材料定数の複素比誘電率を算出し、透過試験および自由空間法で測定した測定値との比較を行い、試験方法の妥当性を検証した。また、複素比誘電率を用いて、炭素粉末を添加したモルタルの電磁波遮蔽性を予測し、電磁波遮蔽体の設計方法を提案した。さらに電磁波吸収材としての評価を行い、設計方法に関する考察を加えた。本研究の範囲内で得られた結果を以下にまとめて示す。

- 1) 複素比誘電率から推定した透過率の計算値と測定値を比較した結果、 $t=10\text{mm}$ の供試体の測定値と計算値はほぼ一致している。一方、 $t=25\text{mm}$ の供試体では、炭素粉末添加率が10%以上になると、理論値と測定値の差が大きくなった。したがって、今回の試験結果から、透過試験に用いる供試体厚さは10mmに設定することが望ましい。
- 2) 炭素粉末無添加および添加率10%までは、電磁波吸収を表す反射率の極小値は異なるものの、反射率の周波数特性および極大値は計算値および測定値とも一致しており、自由空間法による測定結果が概ね妥当であることが確認できた。
- 3) 炭素粉末添加率が増加するほど、また、モルタル中の水分が多いほど、複素比誘電率の実数部、誘電損失はともに大きくなる傾向を示す。誘電損失はモルタル中における電磁波の損失であり、炭素粉末の添加および水分量の増加によってモルタル内の電磁波の損失が大きくなることが明らかとなった。
- 4) モルタルの含水状態と炭素粉末添加率から複素比誘電率の実数部および虚数部を予測する式を提案した。この提案式によって、配合設計段階での透過率の予測が可能となり、目標とする透過率を満足する炭素粉末添加率およびモルタル厚さを設定することで電磁波遮蔽材の設計が可能となる。
- 5) 炭素粉末の添加率を増加することによって、理論上の無反射曲線を満足できる可能性はあるが、その場合、モルタルの厚さを非常に薄くする必要がある、現実的な設計といえない。炭素粉末を添加したモルタルで電磁波吸収材を開発する場合、推定した複素比誘電率に比べて、実数部のみを小さくし、虚数部を維持または大きくする工夫が必要となる。

本章における今後の課題を以下に示す。

配合設計の段階で複素比誘電率の実数部および虚数部をさらに精度良く推定するためには、モルタル中の水分を考慮する必要があり、モルタルの水分量または含水率を加えた定式化が必要である。

[6章 参考文献]

- 1) 橋本修：高周波領域における材料定数測定法，森北出版株式会社，2003
- 2) 清水康敬，杉浦行，石野健：最新 電磁波の吸収と遮蔽，日経技術図書株式会社，1999
- 3) 橋本修：電波吸収体の話，日刊工業新聞社，2001

第7章

結 論

第7章 結論

7.1 結論

本研究は、導電性および電磁波遮蔽性の機能を有するモルタル、コンクリートを開発するために、コンクリートの電氣的性質を改善できる材料として炭素粉末に着目した。そこで、炭素粉末を添加したモルタルのフレッシュ性状および力学的特性について検討を行い、コンクリートの混和材料としての適用性を評価した。次に、導電性、電磁波遮蔽性に関する試験、評価手法について検討を行い、炭素粉末を添加したモルタルの導電性、電磁波遮蔽性を評価し、電磁波遮蔽性の予測式を提案した。以下に本研究から得られた結論を総括する。

炭素粉末を添加したモルタルのフレッシュ性状および力学的特性

(フレッシュ性状)

- 1) 炭素粉末の構成元素は99%以上が炭素で占められており、普通ポルトランドセメントに比べて、密度および比表面積は小さい。また、特定有害物質の含有量および溶出量試験の結果、有害物質は含まれておらず、コンクリート混和材料として使用しても問題ないことを確認した。
- 2) 炭素粉末を添加したモルタルのフレッシュ性状としては、炭素粉末添加率が増加するに伴って15打フロー値は小さくなり、同時に空気量が増加する傾向がある。
- 3) 炭素粉末を添加したモルタルの凝結時間は、始発時間は炭素粉末の添加による影響は小さく、終結時間は炭素粉末を20%添加した場合、無添加に比べて遅延が生じたが、炭素粉末の添加が凝結に及ぼす影響は小さいと考えられる。
- 4) 砂と炭素粉末の質量和とセメントの質量比 $(S+CP)/C$ を変化させた場合、 $(S+CP)/C=3.0$ の流動性は著しく低下し、実施工での適用が困難である。

(力学的特性)

- 1) 炭素粉末を添加したモルタルの圧縮強度は炭素粉末の添加率が増加すると低下する。この主な原因は、空気量の増加に起因しているが、その他に炭素粉末とセメントペースト水和物との接着力、炭素粉末自身の強度がモルタルの強度低下に影響していると考えられる。
- 2) 同一セメント水比における28日圧縮強度は炭素粉末の添加率が大きくなるに伴って小さくなる。また、セメント水比の増加に伴う圧縮強度の増加割合（直線の傾き）は炭素粉末の添加率の大小によらず概ね等しい。
- 3) 炭素粉末を添加したモルタルの28日圧縮強度とセメント水比には線形関係が存在し、通常のコンクリートやモルタルと同様に、炭素粉末添加率に応じて決定される圧縮強度とセメント水比の関係から所定の強度を有するモルタルが製造できる。
- 4) 材齢28日における静弾性係数と圧縮強度の関係は炭素粉末添加率が10%を超えた場合とそれ以下の場合の2本の曲線上にプロットされ、炭素粉末添加率は静弾性係数に影響を及ぼす。

炭素粉末を添加したモルタルの導電性

- 1) モルタルの含水率が 8~10%を超えると、含水率にかかわらず電気抵抗率はほぼ一定の値となるが、同一含水率で比較すると炭素粉末を添加したモルタルの電気抵抗率は小さくなり、飽和状態においても炭素粉末の添加によってモルタルの導電性が向上する。含水率 8%以下では、一部の炭素粉末添加率の高い配合において導電性を確保できた。
- 2) 炭素粉末を添加したモルタルの電気抵抗率は、単位細骨材量と単位セメント量の比による影響は小さく、配合から電気抵抗率を推定する場合は、水と炭素粉末添加量の体積(V_w+V_{CP})をパラメータとすることが最も合理的である。
- 3) 含水率のわずかな変化に対して急激に電気抵抗率が増加し、絶縁体に近くなる含水率を限界含水率と定義した。限界含水率は V_w+V_{CP} が増加すると小さくなる傾向にあり、 V_w+V_{CP} がモルタル $1m^3$ 当たり 500 l 以上になると、全く水分を含まない状態でも導電性を保持できるモルタルの製造が可能となる。
- 4) モルタルの $(S+CP)/C$ が 2.0~3.0 の範囲で変化しても、 $(S+CP)/C$ の比率が電気抵抗率に及ぼす影響は小さく、電気抵抗率は V_w+V_{CP} から推定することが可能である。
- 5) 炭素粉末を添加したモルタルが有する現状の導電性能と、導電モルタル開発後の用途として要求される導電性能を電気抵抗率で比較した結果、本研究の中で最も電気抵抗率が小さい配合 ($W/C=70\%$, 炭素粉末添加率20%) においても電気防食の陽極材用モルタルや接地低減電極材に比べると電気抵抗率は高い値を示しており、電気抵抗率のさらなる低減対策が必要となる。

炭素粉末を添加したモルタルの電磁波遮蔽性

- 1) 簡易試験の結果より、単位水量一定で水セメント比を変化させた場合、いずれの水セメント比においても炭素粉末添加率が増加すると温度上昇量も直線的に増加し、添加率 15%程度で温度上昇量のピークを示した。この現象を誘電加熱と考えると炭素粉末添加率が大きいほど電磁波吸収は大きくなる。
- 2) 自由空間法の結果より、湿潤状態の反射率が 0 に近く、含水率が大きいほど供試体による電磁波の反射が大きくなる。また、炭素粉末の添加率を増加すると反射率は 0 に近づき、炭素粉末の添加によって供試体の反射が大きくなり、電磁波吸収量は小さくなった。
- 3) 簡易試験と自由空間法では、同じ現象に対してそれぞれの評価が異なる結果となった。簡易試験は吸収材表面の現象を捉えた評価であり、吸収材内部における電磁波吸収性を評価することは困難であることが明らかとなった。
- 4) 透過試験の結果、炭素粉末を添加したモルタルは、供試体が厚くなると透過率も減少し、その減少割合は無添加に比べて大きく、添加率が大きいほど大きくなる。また、炭素粉末の添加が表面反射だけでなくモルタル内部の減衰にも効果があると考えられる。
- 5) 供試体の水分量が多いほど透過率は低下する。また、炭素粉末添加率が増加すると、いずれ

の周波数においても透過率は減少し、高周波数帯になるほど透過率は小さく、反射による電磁波遮蔽効果は高くなる。

- 6) 供試体厚さ $t = 25\text{mm}$ 、炭素粉末添加率 20% のモルタルの透過率は、気乾状態で約 -40dB を有し、電磁波遮蔽材の目安として、平均的な性能を有している。炭素粉末の添加率とモルタルの厚さを調整することによって透過率 -90dB を超える最高水準の電磁波遮蔽材の製造も可能である。

炭素粉末を添加したモルタルの電磁波遮蔽性の予測手法

- 1) 複素比誘電率から推定した透過率の計算値と測定値を比較した結果、 $t = 10\text{mm}$ の供試体の測定値と計算値はほぼ一致した。一方、 $t = 25\text{mm}$ の供試体では、炭素粉末添加率が 10% 以上になると、計算値と測定値の差が大きくなった。したがって、今回の試験結果から、透過試験に用いる供試体厚さを 10mm に設定することが望ましい。
- 2) 炭素粉末無添加および添加率 5% までは、電磁波吸収を表す反射率の極小値は異なるものの、反射率の周波数特性および極大値は計算値および測定値とも一致しており、自由空間法による測定結果が概ね妥当であることが確認できた。
- 3) 炭素粉末添加率が増加するほど、また、モルタル中の水分が多いほど、複素比誘電率の実数部、誘電損失はともに大きくなる傾向を示す。誘電損失はモルタル中における電磁波の損失であり、炭素粉末の添加および水分量の増加によってモルタル内の電磁波の損失が大きくなることが明らかとなった。
- 4) モルタルの含水状態と炭素粉末添加率から複素比誘電率の実数部および虚数部を予測する式を提案した。この提案式によって、配合設計段階での透過率の予測が可能となり、目標とする透過率を満足する炭素粉末添加率およびモルタル厚さを設定することで電磁波遮蔽材の設計が可能となる。
- 5) 炭素粉末の添加率を増加することによって、理論上の無反射曲線を満足できる可能性はあるが、その場合、モルタルの厚さを非常に薄くする必要があり、現実的な設計といえない。炭素粉末を添加したモルタルで電磁波吸収材を開発する場合、推定した複素比誘電率に比べて、実数部のみを小さくし、虚数部を維持または大きくする工夫が必要となる。

7.2 今後の課題

本研究から得られた結果をもとに、導電性、電磁波遮蔽性モルタルまたはコンクリートの開発に向けて解決すべき課題を示す。

- 1) 炭素粉末を多量に添加した場合のエントラップドエア混入がモルタルの流動性、圧縮強度におよぼす影響は大きく、今後、炭素粉末を添加したモルタルの細孔径分布および細孔容積の測定を行い、炭素粉末の添加による微細構造への影響について検討する必要がある。
- 2) モルタルの電気抵抗率をさらに低減するために、導電性材料間の距離を短くする方法が考え

られ、炭素粉末の粒度分布の改善、他の導電性材料との混合等の検討を行う必要がある。

- 3) 導電性コンクリートの開発に向けて、導電性モルタルに粗骨材を混入した場合のモルタルと粗骨材の回路構成を明らかにし、粗骨材がモルタルの導電性に及ぼす影響について検証する必要がある。
- 4) 電磁波遮蔽コンクリートの開発に向けて、炭素粉末を混和材料として使用したコンクリートの配合設計手法を確立し、硬化コンクリートの電磁波遮蔽効果を確認する。
- 5) 現状では炭素粉末を添加したモルタルで電磁波吸収材を実現することは困難であるが、炭素粉末を添加したモルタルに空気泡を混入（例えば軽量骨材や発泡ビーズの使用等）することによって現状の複素比誘電率に比べて、実数部のみを小さく、虚数部を維持または大きくすることができれば、電磁波吸収材としての適用も可能である。

本研究はこれまでコンクリートの機能として注目されてこなかった電氣的性質に着目し、導電性および電磁波遮蔽性を有するモルタルおよびコンクリートの開発を目指すものであり、炭素粉末を添加したモルタルのフレッシュ性状、力学的特性、導電性、電磁波遮蔽性に関する基礎的な性状について検討を行った。その結果、フレッシュ性状、力学的特性では、一般的に使用されている普通モルタルとほぼ同等の性能を有し、配合設計も普通モルタルと同様に行えることを確認した。

モルタルの導電性、電磁波遮蔽性については、試験および評価方法を提案し、炭素粉末を添加したモルタルの導電性、電磁波遮蔽性を検討した。その結果、導電性および反射による電磁波遮蔽性が向上することを確認し、現時点で導電性および電磁波遮蔽性を有するモルタルの実用化は可能であると考ええる。

今後、炭素粉末を添加したコンクリートの配合設計を確立し、モルタルの導電性および電磁波遮蔽性の結果をコンクリートに展開することで、構造部材として導電性コンクリートおよび電磁波遮蔽性コンクリートの実用化が可能になると考える。

謝 辞

本研究は、筆者が村本建設株式会社に勤務しながら、鳥取大学大学院工学研究科博士後期課程に在籍した3年間に行った研究をとりまとめたものです。

本研究の遂行から論文のとりまとめにいたるまで、終始変わらずご指導、ご鞭撻を賜り、本論文をまとめる機会を与えて頂きました。鳥取大学教授・井上正一博士に心より感謝し深く御礼申し上げます。また、本論文をまとめるにあたり、鳥取大学教授・黒田保博士、鳥取大学教授・谷口朋代博士、鳥取大学教授・岸田悟博士、鳥取大学准教授・吉野公博士には、貴重なご意見とご助言を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。

実験の計画・実施のあらゆる機会を通して、ご指導を頂きました摂南大学教授・熊野知司博士、香川高等専門学校教授・水越睦視博士に厚く御礼申し上げます。

電磁波に関する実験では、奈良県工業技術センター・林達郎研究員に実験方法から解析手法に至るまでご協力とご助言をいただきました。御礼申し上げます。

実験を進めるにあたり鳥取大学土木工学科建設材料研究室の学生諸氏、および研究開始時に大学院生であった陰山恵子氏（現：西松建設株）、現院生の藤原正祐氏をはじめとする摂南大学都市環境工学科建設材料研究室の学生諸氏にも甚大なご協力をいただきました。感謝申し上げます。

筆者の鳥取大学博士後期課程への入学にご理解をいただき、会社に在籍しながらの研究活動にあたって様々なご配慮をいただいた、村本建設株式会社 村本吉弘 社長、久米生泰 取締役をはじめ役員の方々に心より感謝し、御礼申し上げます。また、研究に専念しやすい環境を作ってくれただくとともに絶大な支援をいただきました本社の上司ならびに同僚に感謝申し上げます。

最後になりましたが、研究および論文執筆に専念できる環境を整え、健康管理に気を遣い協力してくれた妻 敦子、長女 美咲、次女 遥希、そして両親に心から感謝し、謝辞とさせていただきます。

2013年7月

著者 高井 伸一郎