

平成 27 年度 修士論文

エコセメントを用いた超硬練りコンクリートの
スケーリング抵抗性の向上に関する研究

首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 都市基盤環境学域

学修番号 14885429 飯塚 亮太

指導教授 上野 敦 准教授

エコセメントを用いた超硬練りコンクリートのスケーリング抵抗性の向上に関する研究

目次

第1章 序論	1
1.1 はじめに	2
1.2 エコセメントの現況.....	2
1.3 超硬練りコンクリートのエコセメントに対する有効性.....	2
1.4 エコセメントを用いた超硬練りコンクリートの現況.....	3
1.5 研究の目的	4
1.6 本論分の構成	4
第2章 既往の研究	7
2.1 エコセメント	8
2.1.1 エコセメントの化学的性質.....	8
2.1.2 エコセメントを用いたコンクリートの機械的性質.....	9
2.1.3 エコセメント硬化体の微細構造.....	10
2.1.4 エコセメントを用いたコンクリートの凍結融解抵抗性.....	11
2.1.5 混和材置換によるエコセメントコンクリートの特性に及ぼす影響.....	12
(1) C_3A と石灰石微粉末の反応.....	12
(2) 高炉スラグ微粉末, 石灰石微粉末の混和	16
2.2 超硬練りコンクリート.....	18
2.2.1 超硬練りコンクリートの特徴.....	18
2.2.2 超硬練りコンクリートの配合設計.....	19
2.2.3 超硬練りコンクリートの締固め.....	23
2.2.4 締固め性試験.....	23
(1) 試験概要.....	23
(2) 締固めエネルギー	23
(3) 締固め曲線.....	25
(4) 締固め曲線の4種類の締固め係数.....	26
a) 初期充填率: C_i	26
b) 達成可能充填率: C_f	26

c) 締固め効率 : C_e	26
d) 締固め完了エネルギー : E_{98}	26
(5) 配合条件による締固め係数の変化	27
a) 細骨材率	28
b) 単位水量	28
c) 水セメント比	28
(6) K_m および K_p による締固め性への影響	29
2.2.5 超硬練りコンクリートの凍結融解抵抗性	29
2.3 凍結防止剤と凍結融解抵抗性	30
2.4 エコセメントを用いた超硬練りコンクリート	32
2.4.1 エコセメントを用いた超硬練りコンクリートの基礎特性	32
2.4.2 エコセメントを用いた超硬練りコンクリートの凍結融解抵抗性	34
参考文献	37
 第 3 章 エコセメント超硬練りコンクリートのスケーリング抵抗性向上に関する基礎検討	 41
3.1 水セメント比を変化させたエコセメント超硬練りコンクリートのスケーリング抵抗性	42
3.1.1 はじめに	42
3.1.2 実験方法	42
(1) 使用材料	42
(2) コンクリートの配合	43
(3) 練混ぜ方法	44
(4) 供試体の作製方法	44
a) 円柱供試体の作製方法	44
b) 角柱供試体の作製方法	44
3.1.3 試験方法	45
(1) 超硬練りコンクリートの空気量測定	45
(2) 締固め性試験	46
(3) 機械的性質	47
a) 圧縮強度, 静弾性係数および曲げ強度の測定	47
b) セメント空隙比による圧縮強度の整理	47
(4) 凍結融解試験	48
3.1.4 結果および考察	49
(1) 締固め性	49

(2) 機械的性質	51
(3) 凍結融解抵抗性	53
3.1.5 水セメント比を変化させた場合のまとめ	54
3.2 混和材を用いたエコセメント超硬練りコンクリートのスケーリング抵抗性	55
3.2.1 はじめに	55
3.2.2 実験方法	55
(1) 使用材料	55
(2) コンクリートの配合	56
(3) 練混ぜおよび供試体の作製方法	57
3.2.3 試験方法	58
(1) 超硬練りコンクリートの空気量測定	58
(2) 締固め性試験	58
(3) 機械的性質	58
(4) 凍結融解試験	58
3.2.4 結果および考察	59
(1) 締固め性	59
(2) 機械的性質	61
(3) 凍結融解抵抗性	63
3.2.5 混和材を使用した場合のまとめ	64
3.3 BET 比表面積試験による平均細孔径	65
3.3.1 はじめに	65
3.3.2 試験方法概要	65
3.3.3 結果および考察	66
3.4 3 章のまとめ	67
参考文献	67
 第 4 章 エコセメントと混和材の混合粉体を結合材とした硬化体の基礎特性	70
4.1 粉体粒子の充填構造に関する基礎検討	71
4.1.1 はじめに	71
4.1.2 実験方法	72
(1) 使用材料	72
(2) エコセメントの高炉スラグ微粉末による置換率	72
4.1.3 試験方法	73
(1) タッピング試験	73
(2) 液相利用試験	73

(3) セメントペーストの単位容積質量による試験	74
4.1.4 結果および考察.....	75
(1) タッピング試験.....	75
(2) 液相利用試験.....	76
(3) セメントペーストの単位容積質量による試験	77
4.1.5 粉体粒子の充填構造のまとめ.....	79
4.2 硬化モルタルの基礎特性.....	80
4.2.1 はじめに	80
4.2.2 実験方法	80
(1) 使用材料.....	80
(2) モルタルの配合	81
(3) 供試体の作製方法.....	81
4.2.3 試験方法	82
(1) 機械的性質	82
(2) 細孔径分布	82
4.2.4 結果および考察.....	83
(1) 機械的性質	83
a) 圧縮強度	83
b) 静弾性係数	84
c) 曲げ強度	84
d) まとめ	85
(2) 細孔径分布	85
4.3 4章のまとめ	86
参考文献	86
 第5章 密充填粉体を用いたエコセメント超硬練りコンクリートのスケーリング抵抗性	88
5.1 密充填粉体の作製.....	89
5.1.1 はじめに	89
5.1.2 実験方法	89
(1) 使用材料.....	89
(2) 混合粉体の構成.....	90
5.1.3 試験方法	90
5.1.4 結果および考察.....	91
(1) エコセメントのシリカフェームによる置換	91
(2) エコセメントとシリカフェームの混合粉体の高炉スラグ微粉末による置換	92

5.1.5	密充填粉体に関する検討のまとめ	93
5.2	密充填粉体を用いたモルタルの基礎特性	94
5.2.1	はじめに	94
5.2.2	実験方法	94
(1)	使用材料	94
(2)	モルタルの配合	95
(3)	供試体の作製方法	95
5.2.3	試験方法	95
(1)	機械的性質	95
(2)	細孔径分布	95
5.2.4	結果および考察	96
(1)	機械的性質	96
(2)	細孔径分布	97
5.2.5	モルタルに関する検討のまとめ	98
5.3	密充填粉体を用いたモルタルの再試験	99
5.3.1	はじめに	99
5.3.2	実験方法	99
5.3.3	結果および考察	99
5.3.4	モルタルの再試験に関するまとめ	100
5.4	密充填粉体を用いたエコセメント超硬練りコンクリートの特性	101
5.4.1	はじめに	101
5.4.2	実験方法	101
(1)	使用材料	101
(2)	コンクリートの配合	102
(3)	練混ぜおよび供試体の作製方法	102
5.4.3	試験方法	103
(1)	超硬練りコンクリートの空気量測定	103
(2)	締固め性試験	103
(3)	機械的性質	103
(4)	凍結融解試験	103
5.4.4	結果および考察	104
(1)	締固め性	104
(2)	機械的性質	106
(3)	凍結融解抵抗性	109
5.4.5	超硬練りコンクリートに関する検討のまとめ	111
5.4	5章のまとめ	112

参考文献	112
第 6 章 結論	114
謝辭	119

第 1 章

序論

第1章 序論

第1章では、研究の背景として普通エコセメントの現状を概説するとともに、エコセメントの適用先としての舗装用超硬練りコンクリートの有効性、および本研究の目的を示す。

1.1 はじめに

「持続可能な社会」の実現が要求されるなかで、建設分野においてはコンクリート構造物の建設に伴う環境負荷の低減や資源循環型社会の形成を推進していくことが望ましい。そのためには、各種の資源循環型材料や環境配慮型材料を積極的に利用していくことが望まれている。このような材料として、普通エコセメント（以下、エコセメント）が挙げられる。

1.2 エコセメントの現況

エコセメントとは、一般廃棄物（都市ごみ）の焼却灰を主原料とし、必要に応じて下水汚泥等の廃棄物を副原料として製造される資源循環型のセメントである。セメントクリンカー1トンにつきこれらの廃棄物を500kg以上使用して製造されることから、最終処分場の延命化に大きく貢献するとされている。エコセメントは、2002年にJIS R 5214として規格化され、2003年にJIS A 5308「レディーミクストコンクリート」に追加された。また、2004年にグリーン購入法の特典調達品目に指定されたことから、今後の使用量の増大が望まれている。これを受けて、エコセメントの特性に関して様々な研究データも蓄積してきており、実用化の段階を迎えているといえる。しかし、都市ごみ焼却灰を主原料とすることから、普通ポルトランドセメントと比較して、アルカリ金属や塩化物イオンの含有量が多いことや凝結が遅延するという、配合構成によっては短所となりうる特徴を有しており、エコセメントの使用の妨げとなっている。そのため、現在のエコセメントの使用は、主に小型のプレキャストコンクリート製品等にとどまっており、利用の拡大には至っていない。従って、エコセメントを今後積極的に使用していくためには、先に述べた場合によっては短所となりうる特徴に影響を受けないコンクリート構造物もしくは配合構成を提案することが有効であると考えられる。

1.3 超硬練りコンクリートのエコセメントに対する有効性

超硬練りコンクリートとは、単位水量が120kg/m³程度でスランプがゼロ（すなわち、自重では流動しない）のコンクリートであり、即時脱型方式によって製造されるコンクリートブロックや、ダムにおけるRoller Compacted Dam（以下、RCD）および舗装におけるRoller Compacted Concrete Pavement（以下、RCCP）工法において使用されている。超硬練りコンクリートは、粗骨材の占める割合が高く密なセメントペーストを少量含む、という特徴的な材

料構成となっている。

エコセメントのもつ短所となりうる特徴は、アルカリ含有量が多い点、塩化物イオンの含有量が多い点、凝結が遅延する点、といった3点が主に挙げられる。

これに対し、超硬練りコンクリートは水セメント比が0.35程度であるものの、単位水量が 120kg/m^3 程度と少なく、単位セメント量は 400kg/m^3 を下回る。JIS A 5308に規定されているアルカリ金属総量の算出方式においては、セメントおよび骨材のアルカリ金属含有量の和がアルカリ総量と定められており、一般的に使用されている粗骨材に関しては、アルカリ金属含有量がほぼ0である。また、エコセメントに関しては、JIS R 5214においてアルカリ金属含有量が0.75%以下になるように規定されており、エコセメントを用いた場合であってもアルカリ金属総量の規定値である 3.0kg/m^3 を満たすことができる。以上のことから、アルカリ金属含有量に関しては、超硬練りコンクリートという配合構成とすることで解決できると考えられる。

また、単位セメント量の観点からみて、塩化物イオン総量の規定値である 0.3kg/m^3 を十分に満たすことができる。さらに、超硬練りコンクリートは、一般に補強鋼材を含めない構造であるため、塩化物イオン含有率に関しても、超硬練りコンクリートという配合構成とすることで解決できると考えられる。

そして、凝結遅延の問題に関しては、フレッシュコンクリートの凝結試験が、極初期材齢におけるモルタル層の強度発現試験となっていることを考慮すると、水セメント比が小さいこと、単位粗骨材量が大きいことにより、改善の方向に向かうと考えられる。本質的な凝結は、セメントの化合物組成に依存する。しかし、モルタルの極初期の強度発現に着目すると、超硬練りコンクリートでは水セメント比が小さく、固体粒子が密に配置されているため、強度発現としては早い方向に向かうと考えられる。また、舗装用超硬練りコンクリートの特徴として、粒状体のかみ合わせ効果により、交通荷重に対して早期解放が可能である点からも、凝結遅延は特に問題にならないと考えられる。

以上のことから、上述した3点（アルカリ金属含有量、塩化物イオン含有量、凝結遅延）に関しては、エコセメントを用いた場合であっても、超硬練りコンクリートという配合構成とすることで解決できると考えられる。

1.4 エコセメントを用いた超硬練りコンクリートの現況

これまで、エコセメントを用いた転圧コンクリート舗装の実用化を目指して、2009年度よりエコセメントを使用した超硬練りコンクリートの性能評価を行ってきた。この結果、エコセメントを用いた超硬練りコンクリートの基礎特性（締固め性、強度、静弾性係数、および乾燥収縮ひずみ）は、舗装用途に十分適用可能であることを示した。

また、東京都でのエコセメントの製造は、多摩地域での最終処分所の延命と、リサイクルの促進を目的に、日の出町で行われている。地産地消を考慮すると、エコセメントを多摩地域で使用することも意義深い。気候的な特性として、多摩地域でのコンクリートは、冬季に

比較的強い凍結融解作用を受ける。さらに、近年は凍結防止剤（塩化カルシウムや塩化ナトリウム）の大量散布による凍害も問題となっている。このため、エコセメントを用いた舗装用超硬練りコンクリートに関しても、凍結防止剤環境下での凍結融解抵抗性の検討が必要だと考えられる。

このような背景から、エコセメントを用いた超硬練りコンクリートの凍結融解抵抗性について検討を行った。この結果、通常の真水での凍結融解試験では、AE コンクリートとすることで、十分な耐久性を有することが明らかとなった。しかし、凍結防止剤の散布環境下を想定し、NaCl3%溶液を試験溶液として使用した凍結融解試験では、相対動弾性係数は問題とならないが、質量減少率が増大する傾向を示した。質量減少率はスケーリング（表層部の剥離劣化）の度合いを示しており、質量減少率すなわちスケーリングが増大すると、舗装としての機能（走行性、平坦性）に支障をきたす可能性がある。凍結防止剤環境下でのスケーリング低減のためには、表層強度の向上、飽水度の低下が効果的であることがわかっているが、根本的な解決には至っていないのが現状である。

1.5 研究の目的

1.2 節では、エコセメントのコンクリート構造物への使用が望まれる背景について述べた。1.3 節では、超硬練りコンクリートという配合構成にすることで、エコセメントの短所となりうる面を解決できる可能性について述べた。1.4 節では、エコセメントを用いた超硬練りコンクリートのこれまでの研究によって得られた特性について述べた。

本研究は、資源循環型材料であるエコセメントを用いた転圧コンクリート舗装の実環境への適用促進の観点から、エコセメントを用いた超硬練りコンクリートの唯一の課題とも言える凍結防止剤環境下でのスケーリング抵抗性の向上を目的としたものである。

はじめに、スケーリング抵抗性の向上を目的とし、エコセメントを用いた超硬練りコンクリートにおいて、水セメント比の減少および混和材の使用が特性に及ぼす影響について検討した。ここで、特性として検討した項目は、締固め性、機械的性質（圧縮強度、静弾性係数、曲げ強度）、凍結融解抵抗性（NaCl3%溶液下）である。

次に、スケーリング抵抗性が特に向上した混和材を用いた場合について、粉体粒子を対象とした充填構造試験、およびモルタルを対象とした媒体相の基礎特性試験を行った。ここで、基礎特性として検討した項目は、機械的性質および細孔径分布である。

さらに、エコセメントを用いた超硬練りコンクリートに、粉体の充填構造試験の結果得られた密充填粉体を適用した場合の特性に関して検討を行った。

1.6 本論分の構成

本論文は、全 6 章で構成されている。

「第 1 章 序論」は、本研究の背景および目的を示している。

「第 2 章 既往の研究」では、本研究に関連する既往の研究をとりまとめ、本研究の方向

性を示した。

「第 3 章 エコセメント超硬練りコンクリートのスケーリング抵抗性向上に関する基礎検討」では、エコセメントのみを用いた超硬練りコンクリートを基準に、水セメント比を低減した場合および混和材を使用した場合の基礎特性について検討を行った。この結果、水セメント比を低減した場合、スケーリング抵抗性が向上するものの、十分な締固めを考慮すると、水セメント比 0.30 程度までの低減に留める必要があるとわかった。一方、混和材として高炉スラグ微粉末（粉末度：6000cm²/g）および石灰石微粉末（粉末度：7000cm²/g）を使用した場合、締固め性も良好で、同一圧縮強度における曲げ強度および静弾性係数が高いことが明らかとなった。また、スケーリング抵抗性は、高炉スラグ微粉末の置換率が 0～60% の範囲では置換率が高いほど、そして少量の石灰石微粉末を併用することで、より向上することが明らかとなった。さらに、スケーリング抵抗性と BET 比表面積試験による平均細孔径に相関があることを示した。

「第 4 章 エコセメントと混和材の混合粉体を結合材とした硬化体の基礎特性」では、凍結防止剤環境下でのスケーリングが顕著とならないような材料構成に関して基礎的に検討を行った。はじめに、結合材粒子の実積率に着目し、粉体粒子の充填構造試験を行った。この結果、エコセメントを基材とし、高炉スラグ微粉末（6000 および 8000cm²/g）を混和した混合粉体では、実積率が最大となる高炉スラグ微粉末の置換率は得られなかった。このため、第 3 章の検討でスケーリング抵抗性が高かった高炉スラグ微粉末および石灰石微粉末を添加した水準について、モルタルを対象とした媒体相の基礎特性試験を行った。この結果、圧縮強度、静弾性係数および曲げ強度について、エコセメントを高炉スラグ微粉末で置換した場合、エコセメントのみを用いた場合より低下するが、これに石灰石微粉末を少量添加することにより、顕著に増加することが明らかとなった。

「第 5 章 密充填粉体を用いたエコセメント超硬練りコンクリートのスケーリング抵抗性」では、はじめに第 4 章の粉体粒子の充填構造試験を、より粉末度が高いシリカフューム（粉末度：15.0m²/g）を用いて行った。この結果、エコセメントを基材とし、シリカフュームを 5%体積置換した場合（E-S5）、および E-S5 を基材とし、高炉スラグ微粉末（粉末度：6000cm²/g）を 10%体積置換した場合（ES5-B10）において、粉体粒子の充填構造が密となった。これを受け、密充填粉体 E-S5 および ES5-B10 を用いた超硬練りコンクリートの基礎特性について検討を行った。この結果、超硬練りコンクリートに適用した場合、エコセメントのみを用いた場合と比較して、締固め性が同等以上となり、圧縮強度、静弾性係数および曲げ強度が増加した。また、凍結融解試験を実施し、スケーリング抵抗性についても検討を行った。この結果、密充填粉体を用いることでスケーリング抵抗性は向上するものの、普通ポルトランドセメントのみを用いたときより質量減少率が大きくなった。このことから、スケーリング抵抗性向上のためには、粉体粒子の充填構造を密とするだけでなく、結合材の材質に起因する要因も考慮する必要があることが示唆された。

「第 6 章 結論」は、本研究で得られた知見をとりまとめたものである。

第 2 章

既往の研究

第2章 既往の研究

第2章は、エコセメントを用いたコンクリート、超硬練りコンクリート、凍結融解抵抗性、およびエコセメントを用いた超硬練りコンクリートに関する既往の研究を取りまとめたものである。現在に至るまでの多数の研究成果をもとに、現状と課題を整理した。

2.1 エコセメント

2.1.1 エコセメントの化学的性質

表2-1¹⁾に、セメントの化学成分および鉱物組成の一例を示す。エコセメント（EC）の鉱物組成は、普通ポルトランドセメント（NC）と同様であるが、その組成はカルシウムシリケート鉱物（C₂S, C₃S）がやや少なく、カルシウムアルミネート鉱物（C₃A, C₄FA）が多いため、アルミネート相・フェライト相の間隙質相がやや多い。アルカリ金属は主にアルミン酸三カルシウム C₃A に固溶しているため、アルミネート相がやや多いエコセメントのアルカリ量は、普通ポルトランドセメントよりも多くなっている。また、エコセメントは都市ごみ焼却灰を主原料とするため、廃棄物に由来する塩化物イオン量が多く、製造工程で除去するものの、エコセメントの塩化物イオン含有量は、普通ポルトランドセメントの含有量よりも多くなっている。また、エコセメントのブレーン比表面積は 4220cm²/g と普通ポルトランドセメントの 3300cm²/g と比較して大きく、レーザ回折式粒度分布計にて測定したセメントの粒度分布では、約 10μm 以下の微粉が多く、約 25μm 以上の粗粉が少ないといった特徴を有している¹⁾。

表 2-1 セメントの化学成分例および鉱物組成例¹⁾

Sample	Blaine (cm ² /g)	Chemical Composition(%)											Mineral Composition(%)			
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Cl	C ₂ S	C ₃ S	C ₃ A	C ₄ AF
EC	4220	17.07	6.98	3.79	61.98	1.92	3.93	0.47	0.02	0.74	1.04	0.03	59	4.5	12.1	11.5
NC	3300	20.23	5.39	3.04	64.64	0.92	1.91	0.3	0.31	0.29	0.24	0.025	63.3	10.3	9.1	9.2

また、エコセメントは普通ポルトランドセメントと比較して、凝結が遅延することが明らかになっている。棚野ら^{2), 3)}は、エコセメントを用いた場合の凝結時間は、普通ポルトランドセメントを用いた場合よりも、始発で1~2時間程度、終結で2~3時間程度遅れると報告している。また渡辺ら⁴⁾も同様に、エコセメントを用いた場合のほうが、始発・凝結ともに3時間程度遅れると報告している。エコセメントを用いた場合に凝結時間が始発・終結ともに遅れる傾向にある原因としては、エコセメントのカルシウムシリケート相が少ないこと、SO₃が多いことなどが影響していると考えられる^{2), 3)}。

2.1.2 エコセメントを用いたコンクリートの機械的性質

図 2-1⁵⁾ に、異なるセメントを使用したコンクリートのセメント水比と圧縮強度の関係を示す。エコセメントを用いたコンクリートの圧縮強度は、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと比較すると、若干低下する。また、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと同様に、圧縮強度がセメント水比と直線関係にあることから、配合設計は一般のコンクリートと同様の方法で行うことが可能であるとされている。

図 2-2⁵⁾ に、圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。エコセメントを用いたコンクリートの圧縮強度と性弾性係数の関係は、一般のコンクリートと同等である。

図 2-3⁶⁾ に、圧縮強度と曲げ強度の関係を示す。エコセメントを用いた場合（図中：EC）であっても、コンクリートの圧縮強度と曲げ強度の関係は、普通ポルトランドセメント（図中：OPC）を用いた場合と同様の傾向となることが分かる。

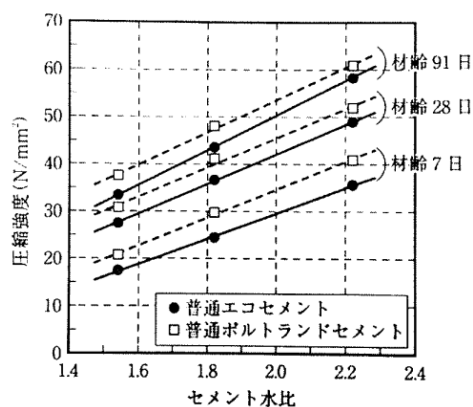


図 2-1 セメント水比と圧縮強度の関係⁵⁾

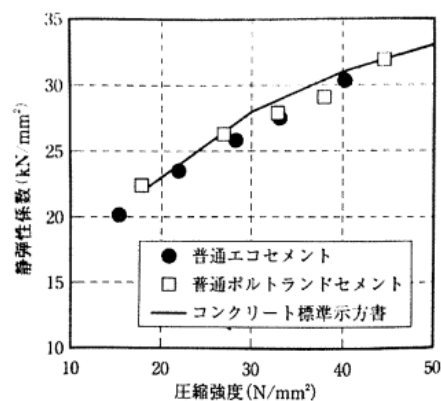


図 2-2 圧縮強度と静弾性係数の関係⁵⁾

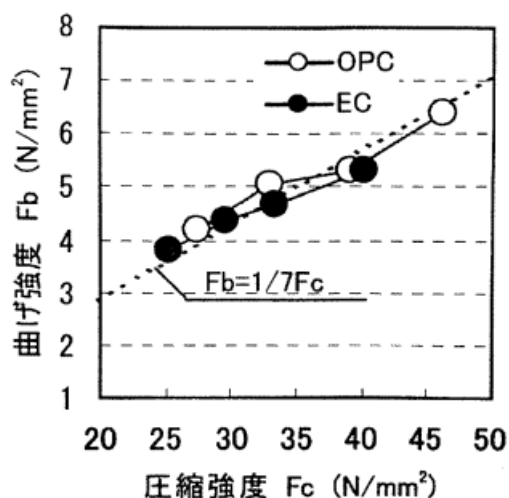


図 2-3 圧縮強度と曲げ強度の関係⁶⁾

2.1.3 エコセメント硬化体の微細構造

名和，胡桃澤ら^{7), 8)}は，エコセメント硬化体の水銀圧入法による細孔径分布の測定，反射電子像観察およびEPMA（電子線マイクロアナライザ）による元素分析での微細構造の検討を行った。この結果，エコセメント硬化体の場合，普通ポルトランドセメント硬化体と比較してC-S-Hの組成は同様であるが水和物の凝集形態が異なり，密実なC-S-Hの生成が少ないことが示唆されたと報告している。しかし，低水セメント比（40%）においては，普通ポルトランドセメントを用いた場合と同様に密実な水和物の生成が確認されているとも述べている。

また，反射電子像観察において，エコセメントは高い空隙率を有する低輝度部および空隙が多く，疎な構造を形成していることを確認している。元素分布図から，低輝度の部分にPが濃集していること，Ca，Siの分布が低輝度の部分において低濃度であることを報告している。図2-4⁷⁾は，材齢7日のエコセメントの反射電子像で，図中の①～③は，EPMAによって元素濃度を定量した点を示している。定量対象は，①：未反応C₃S，②：低輝度部，③：C-S-Hゲルであり，表2-2⁷⁾はその定量結果である。名和らの考察によると，Pを多く含むエコセメントにおいては，リン酸イオンが溶解したC₃Sが表面に吸着し，C-S-Hの生成が阻害される。C-S-Hの形成に用いられなかった溶解したCa，Siイオンが外部に溶出し，C₃S粒子①，②の外部にはC-S-Hゲル③を生成し，内部はC-S-Hが生成されず空隙率の高い低輝度部②が生成すると推論している。

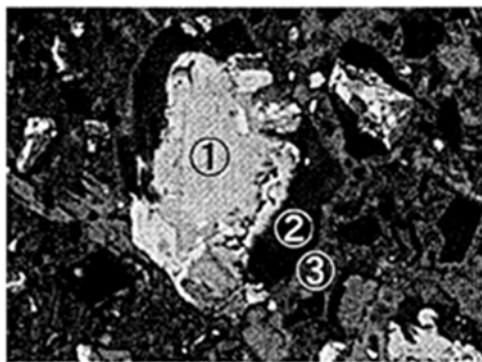


図 2-4 材齢 7 日のエコセメントの反射電子像⁷⁾

表 2-2 元素濃度の定量結果⁷⁾

	Si	P	Ca
① (Alite)	11.1	0.5	53.6
② (Porous part)	6.58	0.6	25.4
③ (C-S-H)	10.4	0.27	31

2.1.4 エコセメントを用いたコンクリートの凍結融解抵抗性

棚野ら^{9), 10)}は、エコセメントを用いたコンクリートの凍結融解抵抗性に関して検討を行った。その結果、エコセメントを用いた場合の凍結融解抵抗性は、同一配合においては、普通ポルトランドセメントを用いた場合よりも若干低下する傾向が認められるものの、300 サイクル時点における相対動弾性係数が 80%を上回っていることから十分な凍結融解抵抗性を有していると考察した。しかし、エコセメントを用いたコンクリートの質量減少率に関しては、普通ポルトランドセメントを用いた場合と比較して劣る結果となった。図 2-5 および図 2-6^{9), 10)}に、試験結果の一例を示す。ここで、図中の凡例の数字は、水セメント比と目標空気量を示している。

また、棚野ら^{9), 10)}は、使用する混和剤の種類がエコセメントの対凍害性に与える影響についても検討しており、ナフタリン系を用いた場合に相対動弾性係数が顕著に低下したことから、エコセメントにはポリカルボン酸系の混和剤を用いるのが良いと報告している。

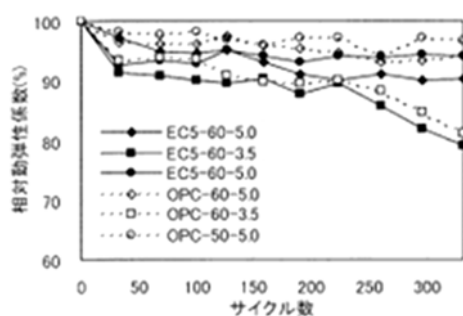


図 2-5 凍結融解サイクルに伴う
相対弾性係数の変化^{10), 11)}

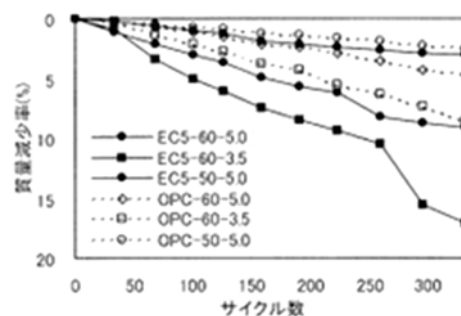


図 2-6 凍結融解サイクルに伴う
質量減少率の変化^{10), 11)}

2.1.5 混和材置換によるエコセメントコンクリートの特性に及ぼす影響

(1) C_3A と石灰石微粉末の反応

2.1.1 節で述べたように、エコセメントは、都市ごみ焼却灰を主原料とすることから、間隙質相（特に C_3A ）の割合が多い。また、石灰石微粉末を添加したセメントでは、 C_3A と反応してモノカーボネートやヘミカーボネートなど、カルシウムーカーボアルミネート水和物が生成されることが多数報告されている²⁻¹¹⁻²⁻¹⁶⁾。

平尾ら²⁻¹¹⁾は、 C_3A 量の多いエコセメントに石灰石微粉末を添加すると、圧縮強度が高くなることを報告している。この効果について、Hoshino ら²⁻¹²⁾は、基材としてアルミナ量が異なるセメントに高炉スラグ微粉末を混合した系において、定量的に水和解析を行い、系内の反応性アルミナがより多い場合に、石灰石微粉末が、カルシウムーカーボアルミネート水和物を生成し空隙率を少なくする効果を示すことで、石灰石微粉末の強度への寄与が高まると考察している。

丸屋ら²⁻¹³⁾は、 C_3A 量を増やしたセメントに高炉スラグ微粉末と石灰石微粉末を最大 15% 置換した試料を対象に、混合材の配合を変えた場合の水和挙動を検討した。表 2-3 に試料の水準を示す。

試料 No.1～5 について、反応速度測定装置²⁻¹⁴⁾を使用して求めた練混ぜから 5 分後までの発熱速度を図 2-7 に示す。発熱速度は試料ごとに異なり、混合材中の石灰石微粉末の割合が増加するほど発熱速度は減少した。また、 C_3A 量が 12%の試料に石灰石微粉末を 10%以上置換した No.4, 5 では、 C_3A 量が 9%の試料よりも発熱速度の最大値は低下した。これは、石灰石微粉末から生じた炭酸イオンにより、 C_3A が多いセメントの初期水和が効果的に抑制されたことによると推察している。

混合材の配合が異なる No.2～5 の試料について、材齢 7 日および 28 日におけるペースト硬化体の XRD 結果を図 2-8 に示す。高炉スラグ微粉末を 15%置換した No.2 の試料では、 C_3A の水和生成物としてモノサルフェートが同定された。これに対し、石灰石微粉末を置換した No.3～5 の試料では、エトリンガイトの回折ピークが増大したほか、モノサルフェートの回折ピークが消失し、ヘミカーボネートやモノカーボネートが生成した。また、No.3～5 の試料間の相違に着目すると、石灰石微粉末を 5%置換した場合はヘミカーボネート、10%以上置換した場合はモノカーボネートの回折ピークが大きく、混合材の配合によってカルシウムーカーボアルミネート水和物の生成挙動が相違したと報告している。

表 2-3 試料の構成

No	Mineral Composition (Bogue, %)				SO ₃ (%)	Admixture (%)	
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF		BFS	LSP
1	55	24	9	9	2	0	0
2	55	22	12	9	2	15	0
3						10	5
4						5	10
5						0	15
6					3	15	0
7						10	5
8						5	10
9						0	15

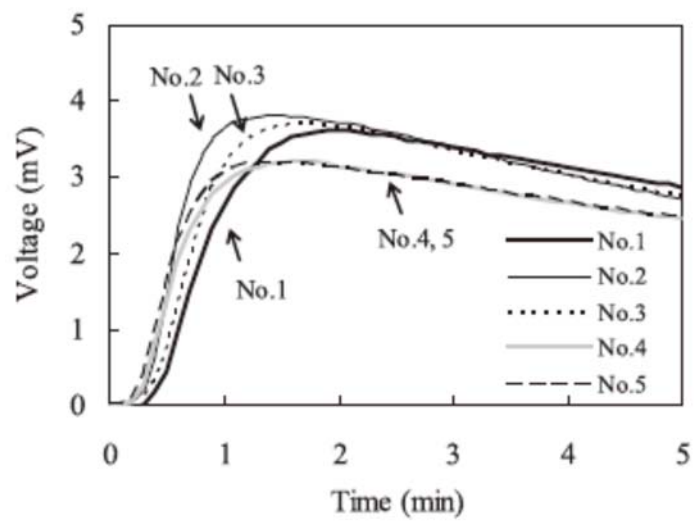


図 2-7 練混ぜから 5 分後までの発熱速度

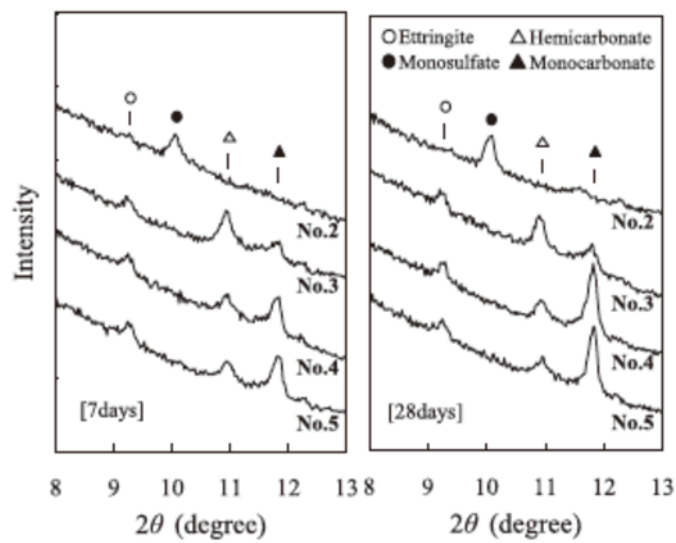


図 2-8 ペースト硬化体の XRD 結果

三隅ら²⁻¹⁵⁾は、石灰石微粉末の置換率を変化させた普通ポルトランドセメントをベースセメントとして使用し、各種高炉セメントを試製することで、コンクリートとしての耐久性を総合的に検討した。その結果、高炉スラグ微粉末と石灰石微粉末の合計添加率が10%の範囲では、 C_3A の量(9.1%~11.7%)によらずほぼ同程度の耐久性を維持することを報告している。

これに関連して、平本ら²⁻¹⁶⁾は、高炉スラグ微粉末および石灰石微粉末の添加率の範囲を拡大して耐久性について検討を行った。まず圧縮強度について、普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を置換した場合、石灰石微粉末の置換率として最適な値が存在したことを報告している。次に、塩分浸漬抵抗性について検討した。表面塩化物イオン濃度(C_0)及び見掛けの拡散係数(D_{ap})の算出結果を図2-9に示す。高炉スラグ微粉末置換率の増加に伴い、 D_{ap} が小さくなり、 C_0 が大きくなった。高炉セメントは普通ポルトランドセメントと比較して細孔構造が緻密なため物質の拡散を抑制しやすい。加えて、モノサルフェートの生成量が多いため、塩化物イオンを固定しフリーデル氏塩を生成しやすいことから、塩分浸透抑制効果が大きくなったと考察している。また、石灰石微粉末を添加することでカルシウムカーボアルミネート水和物が生成しやすくなるが、浸漬試験の結果から、石灰石微粉末置換率が増加することによる塩分浸漬抵抗性の低下は認められなかった。従って、カルシウムカーボアルミネート水和物もモノサルフェートと同様な固定能力を有していると推察している。しかし、XRDによって水和物の同定を行った結果、普通ポルトランドセメントを高炉スラグ微粉末で50%、石灰石微粉末で15%置換した水準であるN35LP15は、他の水準と比較してモノサルフェートやカーボアルミネート系水和物の生成量が概ね少ない傾向であったが、塩分浸透抵抗性に優れていた。このことから、塩分浸透抵抗性はカルシウムカーボアルミネート水和物の塩化物イオンの固定能力だけでなく、他の要因も複合的に関わっていると考察している。

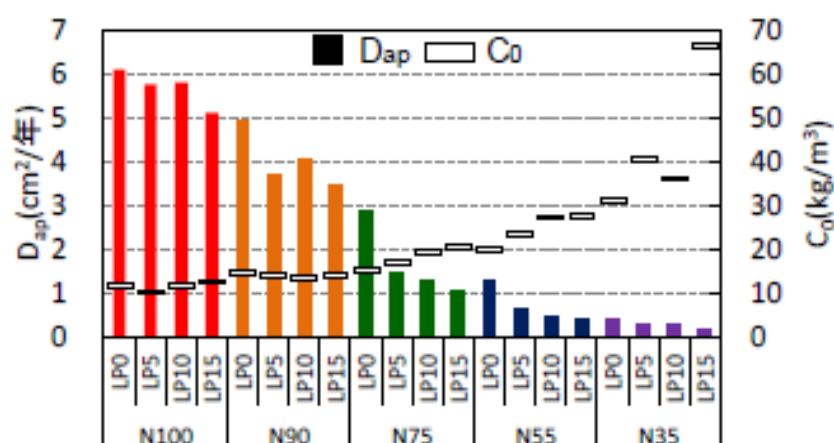


図 2-9 D_{ap} , C_0 の算出結果

三隅ら²⁻¹⁵⁾、平本ら²⁻¹⁶⁾は、空隙特性についても検討を行った。三隅ら²⁻¹⁵⁾の検討では、高炉スラグ微粉末および石灰石微粉末を併用した水準において、 C_3A 量の増加に伴い細孔径分布は小さいほうに移動し、特に20nm以下の空隙が多くなった。これにはヘミカーボネートの生成が関係していると考察している。平本ら²⁻¹⁶⁾の検討では、普通ポルトランドセメントに対する石灰石微粉末置換率の増大に伴い、高炉スラグ微粉末を20%以上置換した水準において、20～50nmの空隙が増加した。しかし、図2-10に示す平均細孔直径に関しては、高炉スラグ微粉末置換率の増加に伴い緻密化するが、石灰石微粉末置換率の増加に伴い粗大化する傾向が見受けられた。このことから、耐久性におよぼす空隙特性の関係の評価は今後の課題であると報告している。

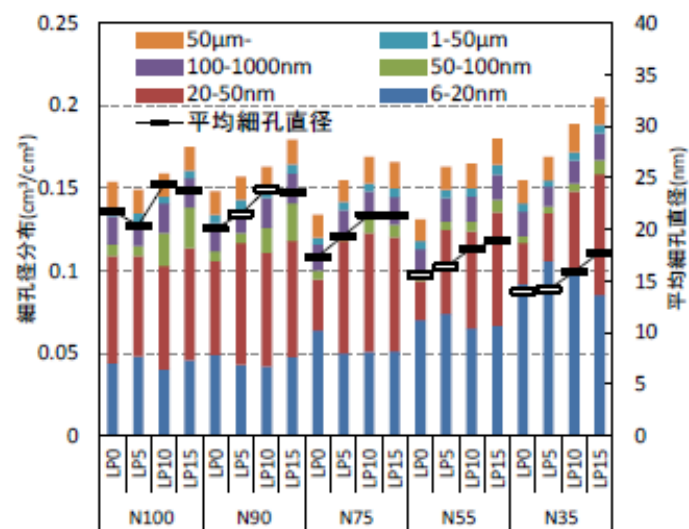


図2-10 細孔径分布（水中養生28日）

(2) 高炉スラグ微粉末、石灰石微粉末の混和

平尾ら²⁻¹⁷⁾は、エコセメントの混合セメントへの適用性を検討した。その結果、エコセメントに高炉スラグ微粉末を単独で混合すると、初期強度において低下する傾向があるものの、長期強度はほぼ同程度であることを示した。また、そこに石灰石微粉末を内割で5%混合することにより、初期材齢での圧縮強度が著しく改善したと報告している。

久我ら²⁻¹⁸⁾は、エコセメント（以下、E）に混和材として高炉スラグ微粉末（以下、BFS）と石灰石微粉末（以下、LSP）を組み合わせることで添加し、それらの添加率を変化させたモルタルの強度発現性に与える影響について検討を行った。BFS および LSP は全てセメントに対して内割で添加し、その添加率は BFS が 0～60%、LSP が 0～30%（質量ベース）とし、セメント量を確保すべく両者の和が 70%以下となる組合せとした。また、比較用として普通ポルトランドセメント（以下、N）を用いた水準も作成した。

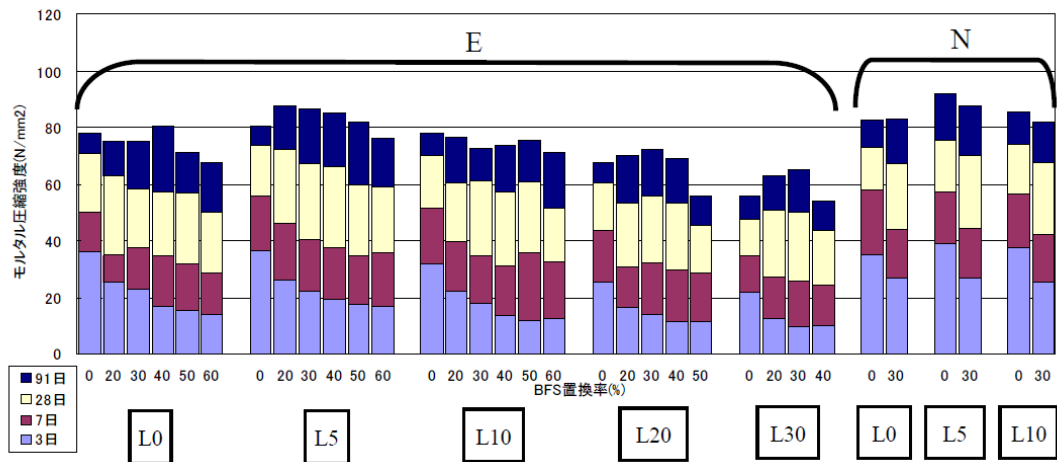
E および N を用いたモルタルの圧縮強度を図 2-11 に示す。BFS 添加率の違いに着目すると（図 2-11 (a)）、材齢 7 日までの初期の圧縮強度は、BFS 無添加の場合が最高で、BFS 添加率の増加に伴って減少している。しかし、材齢 28 日以降では BFS の強度への寄与が大きくなり、BFS 添加率が 50%以上と高い場合を除いて、BFS 無添加と同等の強度になる。また、BFS の添加による強度発現性は LSP の存在により変化し、LSP が多く存在する方が BFS の強度発現性はより高まる傾向にあった。一方、基材セメント（E と N）の違いによる影響は不明確であった。この一因として、市販の N には既に数%の石灰石微粉末が混合していると予想され、LSP の添加効果が明確になっていないと推察している。

次に、LSP 添加率の違いに着目する（図 2-11 (b)）。BFS 添加率に関わらず、LSP 無添加よりも 5%添加した水準において強度が高くなった。LSP 添加率を 10%に増やしても 0%と同程度の強度を保持するが、それ以降は添加率を増やすと強度は減少した。これは、LSP は単なる増量材としての影響が増え、実質的な W/C が増加するためであると考察している。

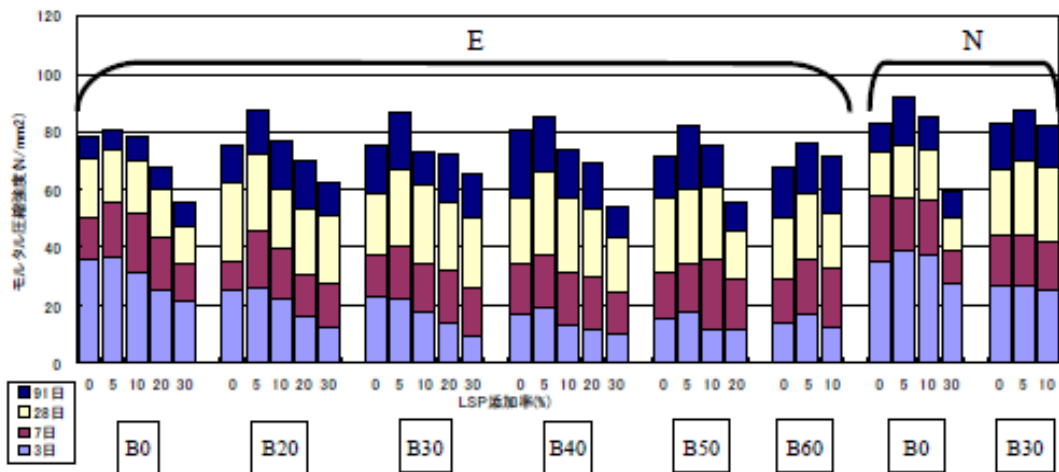
さらに、基材セメントの違いに着目すると、E の方が N よりも LSP 添加による強度増加が早期に現れる傾向が見受けられる。

久我ら²⁻¹⁸⁾は、空隙径分布についても検討を行った。図 2-12 に、材齢ごとの空隙径分布を示す。積算空隙量に大きな差は認められなかったものの、材齢 7 日での空隙径分布において、BFS および LSP を添加した水準における数 10nm 以下の微細な空隙の量が多くなっており、LSP の添加による空隙径への影響があるとしている。

LSP の添加効果には、C-S-H の析出場所となり、C₃S 表面に生成する C-S-H を減少させることで、C-S-H を通したイオン拡散が経時的に増加することによる C₃S の水和速度の減少を抑制する微粉末効果^{2-19), 2-20)}と、前述したカルシウム-カーボアルミネート水和物の生成による空隙の減少効果があると考えられているが、材齢によりどちらの効果がより顕著に現れているか明らかにするには水和反応解析が必要であると報告している。



(a) BFS 添加による影響



(b) LSP 添加による影響

図 2-11 モルタルの圧縮強度

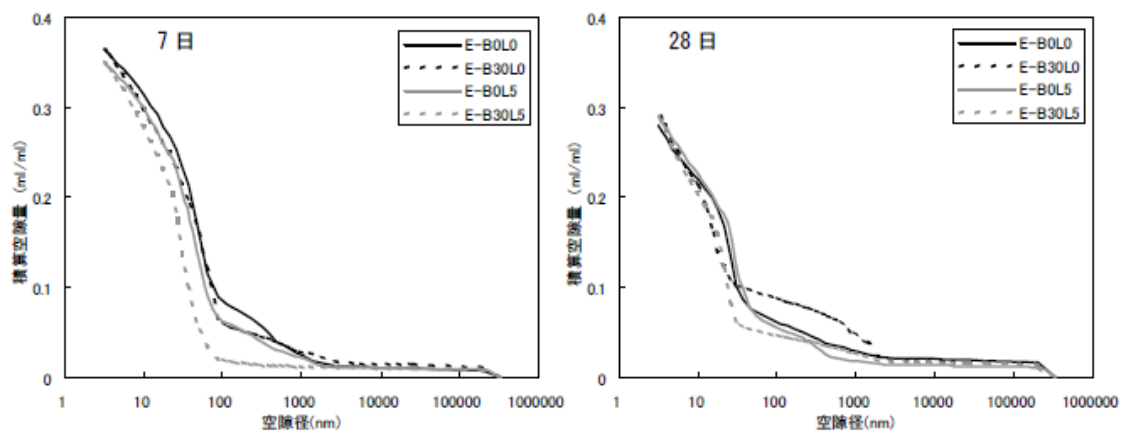


図 2-12 モルタルの空隙径分布

2.2 超硬練りコンクリート

2.2.1 超硬練りコンクリートの特徴

超硬練りコンクリートとは、単位水量が 120kg/m^3 程度でスランプが 0cm（すなわち、自重では流動しない）のコンクリートのことで、即時脱型方式によって製造されるコンクリートブロック、ダム工事における RCD（Roller Compacted Dam Concrete）工法および舗装工事における RCCP（Roller Compacted Concrete Pavement）工法といった用途がある。コンシステンシーが著しく大きい超硬練りコンクリートの場合、振動棒の挿入孔にコンクリートが流動して埋めるような変形をしないので、振動ローラなどの表面振動機によってコンクリートの締固めが行われる。このため、RCD および RCCP 工法に用いられる超硬練りコンクリートを転圧コンクリートと呼ぶ。超硬練りコンクリートを用いた道路舗装は、主に重交通の道路や明色性が要求されるトンネル内の舗装に用いられている。RCCP に用いる材料は、特に通常の舗装用コンクリートの場合と変わるところはないが、補強鋼材を含むことができない構造となる。そのため、塩化物イオン量や中性化などの問題点を考慮する必要のないコンクリートとなる。

本研究で扱う RCCP 工法の主な特徴を以下に示す。

- i) 一般的なコンクリート舗装に対し、施工速度が速く、早期供用が可能である
- ii) コンクリート中に占める粗骨材量が多いため、疲労破壊、塑性変形、摩耗、すべりに対する高い抵抗性を有する高耐久な舗装になる
- iii) 汎用性の高いアスファルト舗装用の機械が使用可能である
- iv) 型枠を必ずしも必要とはしない
- v) 乾燥収縮が小さいため、収縮目地間隔を長くとることができる
- vi) 舗装版は長くて薄い板状であるため、設計基準強度は曲げ強度で規定されている

2.2.2 超硬練りコンクリートの配合設計

超硬練りコンクリートは、その品質が締固め後に残存する空隙量に大きく影響され、また、通常のコンクリートと比較して単位ペースト量が少ない。そのため、ペースト量の不足によって不完全なコンクリートとならないように、骨材の空隙をもとにした配合設計が行われる。

従って、超硬練りコンクリートの配合は、細骨材粒子間の空隙と充填するセメントペースト体積の関係を示す K_p （ペースト細骨材空隙比、式 [2-1]）、および粗骨材粒子間の空隙と充填するモルタル体積の関係を示す K_m （モルタル粗骨材空隙比、式 [2-2]）に基づいた配合設計を行うことが適当である。²⁻²¹⁾

$$K_p = \frac{\text{コンクリート } 1\text{m}^3 \text{中のセメントペーストの体積}}{\text{コンクリート } 1\text{m}^3 \text{中の細骨材のつくる空隙の容積}} = \frac{V_{\text{paste}}}{v_s \cdot S} \quad \text{式 [2-1]}$$

$$K_m = \frac{\text{コンクリート } 1\text{m}^3 \text{中のモルタルの体積}}{\text{コンクリート } 1\text{m}^3 \text{中の粗骨材のつくる空隙の容積}} = \frac{V_{\text{mortar}}}{v_g \cdot G} \quad \text{式 [2-2]}$$

ここで、 K_p ：細骨材の作る空隙体積に対するセメントペースト体積の割合

K_m ：粗骨材の作る空隙体積に対するモルタル体積の割合

V_{paste} ：セメントペーストの単位量（L/m³）

V_{mortar} ：モルタルの単位量（L/m³）

v_s ：細骨材の単位質量あたりの空隙体積（L/kg）

v_g ：粗骨材の単位質量あたりの空隙体積（L/kg）

S ：細骨材の単位量（L/m³）

G ：粗骨材の単位量（L/m³）

式 [2-1] の v_s および式 [2-2] の v_g は、細骨材あるいは粗骨材の単位質量あたりの空隙体積を表し、以下の式 [2-3] および式 [2-4] で算出できる。

なお、式 [2-3] 中の T'_s および式 [2-4] 中の T'_g は、表乾状態での骨材の単位容積質量を表しており、式 [2-5] および式 [2-6] で求められる。

$$v_s = \frac{1}{T'_s} - \frac{1}{\rho_s} \quad \text{式 [2-3]}$$

$$v_g = \frac{1}{T'_g} - \frac{1}{\rho_g} \quad \text{式 [2-4]}$$

$$T'_s = T_s \times \left(1 + \frac{q_s}{100}\right) \quad \text{式 [2-5]}$$

$$T'_g = T_g \times \left(1 + \frac{q_g}{100}\right) \quad \text{式 [2-6]}$$

ここで、 v_s ：細骨材の単位質量あたりの空隙体積（表乾状態）（L/kg）

v_g ：粗骨材の単位質量あたりの空隙体積（表乾状態）（L/kg）

T'_s ：表乾状態での細骨材の単位容積質量（kg/L）

T'_g ：表乾状態での粗骨材の単位容積質量（kg/L）

ρ_s ：細骨材の表乾密度（g/cm³）

ρ_g ：粗骨材の表乾密度（g/cm³）

T_s ：細骨材の単位容積質量（絶乾状態）（kg/L）

T_g ：粗骨材の単位容積質量（絶乾状態）（kg/L）

q_s ：細骨材の吸水率（%）

q_g ：粗骨材の吸水率（%）

高い充填率のコンクリートを得るためには、細骨材の形成する空隙をセメントペーストが、粗骨材の形成する空隙をモルタルが完全に満たすこと、すなわち**Kp**および**Km**が1以上である必要がある。また、これらの値が1のとき、骨材粒子は相互に接触している状態を、1より大きな値になるほど骨材粒子間距離が離れていることを意味している。従って、効率よく締固めが行えるよう骨材粒子の相互摩擦抵抗を小さくするためには、**Kp**、**Km**が1よりある程度大きな値である必要がある。このような観点から、超硬練りコンクリートの配合設計は、**Kp**、**Km**に基づいた方法が優れているといえる。

超硬練りコンクリートの配合設計において与えられる式は、式 [2-7]、式 [2-8] および式 [2-9] の3式である。未知数が**Km**、**Kp**、**W**、**C**、**S**、**G**および連行空気量**A**の7つなので、このうち4つを決定することで配合設計を行うことができる。実務的には、**Km**、**W**、**A**を設定し、**W/C**を仮定することで**C**を設定する。

配合計算手順は以下のとおりである。なお、連行空気体積はセメントペースト体積の一部として計算を行っている。

1. あらかじめKmを設定し、Gを求める。

$$Km = \frac{V_{mortar}}{v_g \cdot G} = \frac{\frac{W}{\rho_w} + \frac{C}{\rho_c} + \frac{S}{\rho_s} + \frac{A}{100} \times 1000}{v_g \cdot G} = \frac{1000 - \frac{G}{\rho_g}}{v_g \cdot G} \quad \text{式 [2-7]}$$

$$\therefore 1000 = \frac{W}{\rho_w} + \frac{C}{\rho_c} + \frac{S}{\rho_s} + \frac{G}{\rho_g} + \frac{A}{100} \times 1000 \quad \text{式 [2-8]}$$

$$G = \frac{100 \cdot \rho_g}{v_g \cdot \rho_g \cdot Km + 1} \quad \text{式 [2-9]}$$

ここで、A：連行空気量（%）

2. ここで、先程の式 [2-4] を変形し、式 [2-6] を代入する。

$$v_g \cdot \rho_g = \frac{\rho_g}{T'_g} - 1 = \frac{\rho_g}{T_g \cdot \left(1 + \frac{q_g}{100}\right)} - 1 \quad \text{式 [2-10]}$$

3. 式 [2-9] に式 [2-10] を代入することで、一般的な骨材物性のみで単位粗骨材量を決定できる式 [2-11] が求められる。

$$G = \frac{1000 \cdot \rho_g}{Km \cdot \left\{ \frac{\rho_g}{T_g \cdot \left(1 + \frac{q_g}{100}\right)} - 1 \right\} + 1} \quad \text{式 [2-11]}$$

4. あらかじめ設定しておいた W および W/C から、C を求める。

$$C = \frac{W}{W/C} \quad \text{式 [2-12]}$$

5. あらかじめ設定しておいた W および A と、これまでで求めた G および C から、 S を求める。

$$S = \left[1000 - \left(\frac{W}{\rho_w} + \frac{C}{\rho_c} + \frac{G}{\rho_g} + \frac{A}{100} \times 1000 \right) \right] \cdot \rho_s \quad \text{式 [2-13]}$$

6. Kp を求め、その値が 1 以上であるか確認する。

$$Kp = \frac{\frac{W}{\rho_w} + \frac{C}{\rho_c} + \frac{A}{100} \times 1000}{v_s \cdot S} = \frac{\frac{W}{\rho_w} + \frac{C}{\rho_c} + \frac{A}{100} \times 1000}{\frac{100 \cdot \rho_s - T_s \cdot (100 + q_s)}{\rho_s \cdot T_s \cdot (100 + q_s)} \cdot S} \quad \text{式 [2-14]}$$

7. 細骨材率 s/a は、以下のように求められる。

$$\begin{aligned} s/a &= \frac{Km \cdot v_g \cdot \rho_g}{Km \cdot v_g \cdot \rho_g + Kp \cdot v_s \cdot \rho_s + 1} \\ &= \frac{Km \cdot \left\{ \frac{\rho_g}{T_g \cdot \left(1 + \frac{q_g}{100} \right)} - 1 \right\}}{Km \cdot \left\{ \frac{\rho_g}{T_g \cdot \left(1 + \frac{q_g}{100} \right)} - 1 \right\} + Kp \cdot \left\{ \frac{\rho_s}{T_s \cdot \left(1 + \frac{q_s}{100} \right)} - 1 \right\} + 1} \quad \text{式 [2-15]} \end{aligned}$$

2.2.3 超硬練りコンクリートの締固め

超硬練りコンクリートは、スランブ試験の結果がゼロとなり（すなわち、スランブ試験では評価できない）、自重では流動しない高いコンシステンシーを有している。

超硬練りコンクリートの配合は、強力な締固め（転圧）を行うことによって密実なコンクリートとすることを前提としているため、施工性の面からはローラ転圧に耐えられる高いコンシステンシーが要求される。一方で、コンシステンシーが高くなるにつれ、コンクリート中に空隙が残存しやすくなる傾向があり、強度と耐久性に悪影響を及ぼすこととなる。このように超硬練りコンクリートのコンシステンシーには相反する側面があり、これを適切に評価する必要がある。従って、粘性流体（一般のコンクリート）としてではなく、粒状体（超硬練りコンクリート）としてのコンシステンシー評価法が必要となる。従来、転圧コンクリートのコンシステンシー評価は、マーシャル突固め試験や VC 試験等の試験が考案されているが、本研究では、締固めエネルギーと充填率の関係に着目し、締固め性状を定量的に評価できる締固め性試験によってコンシステンシーの評価を行う。以下の 2.1.4 項は、國府らの研究^{2-21), 2-22), 2-23)}を参考にまとめたものである。

2.2.4 締固め性試験

(1) 試験概要

締固め性試験は、ゼロ空隙の計画配合から算出される単位容積質量に基づいて、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の型枠に充填率 100%に相当する量のコンクリートを投入し、加速度 5G、振動数 75Hz の振動台上で 3 分間振動締固めを行い、振動開始からのレーザ変位計で計測したコンクリートの沈下量を充填率に換算し、締固め曲線を得るものである。締固め曲線を関数として近似して、誘導される 4 つの指標をもとに締固め性を定量的に評価する。使用材料と配合が同じコンクリートで、振動加速度が一定値 (2.5G) 以上であれば、振動条件に関わらず、締固め関数は変化しないことが分かっている²⁻²²⁾。締固めエネルギーに着目した締固め過程の評価方法は、締固めのしやすさ、必要な締固め作業の程度、転圧施工の管理などの応用^{2-24), 2-25)}が可能である。すなわち、締固め性試験は、空隙のない高品質の転圧コンクリートを施工するための使用材料及び配合の評価、転圧施工条件の設定と照査、施工管理のための試験方法として活用することができる。

(2) 締固めエネルギー

コンクリートの振動締固めにおいては、振動機からコンクリートに振動が伝播し、加速度 α を生じるときに、単位容積質量 ρ のコンクリートに慣性力 ($= \rho\alpha$) が働く。この慣性力によって、コンクリートの組成成分が変位を生じ、空隙を充填する。振動によるコンクリートの締固めにおける力学的挙動を、図 2-13 に模式的に示す。振動 1 サイクルの締固めでコンクリートの充填率が增大して仕事としての効果が出るのは、運動エネルギーが減少して位置エネルギーが増加する最初の 1/4 サイクルと、位相が変化する 3/4 サイクルの 2 区間であ

る。この2区間で限界加速度を超えた時に、はじめて粒子が移動し充填率が増大する。混合物中の粒子を移動させるためには、質量と加速度の積である作用力が粒子の内部摩擦抵抗に打ち勝つ必要があり、従って限界加速度（2.5G）が存在すると考えられる²⁻²²⁾。振動エネルギーの作用の累積が締固めエネルギーとなる。締固め時間 t_i における全締固めエネルギーは式 [2-16] によって表すことができる。

$$E_i = \rho_i \frac{\alpha_{max}^2}{4\pi^2 f} t_i \quad \text{式 [2-16]}$$

ここで、 E_i ：時間 t_i における締固めエネルギー（J/L）

ρ_i ：時間 t_i における試料の密度（kg/L）

α_{max} ：最大加速度（m/s²）

f ：振動数（s⁻¹）

t_i ：締固め時間（s）

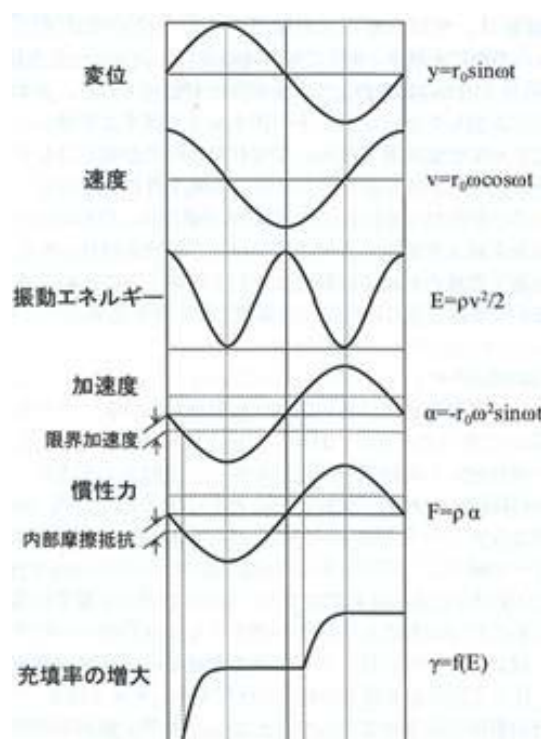


図 2-13 振動によるコンクリートの締固めの力学的挙動

(3) 締固め曲線

コンクリートの締固めの程度は，単位容積あたりのコンクリートに作用したエネルギーに支配され，使用材料と配合が同じであれば，一定の締固め曲線を描くことが確認されている。締固め曲線は，締固めに伴う充填率の増大過程を表したものであり，式 [2-17] で良好に近似することができる。締固め性試験の結果得られる締固め曲線と 4 種類の締固め係数は，図 2-14 のように模式的に表される。

$$\gamma_i = C_i + (C_f - C_i)\{1 - \exp(-bE_i^d)\} \quad \text{式 [2-17]}$$

ここで， γ_i : E_i における充填率 (%)

C_i : 初期充填率 (%)

C_f : 達成可能充填率 (%)

b および d : 実験定数

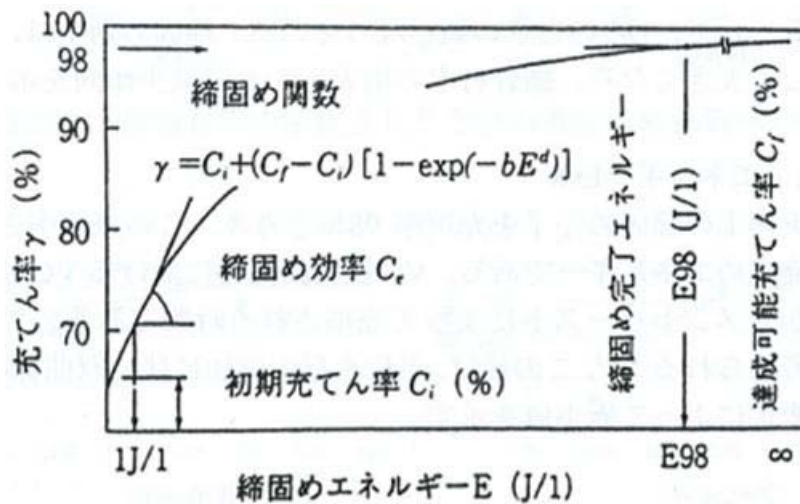


図 2-14 締固め曲線と締固め係数の模式図

(4) 締固め曲線の 4 種類の締固め係数

a) 初期充填率 : C_i

初期充填率は、振動締固めを開始する前の充填率、すなわち敷均した時の充填性を表す。一般に、モルタル分の増大によってこの値は大きくなる。

b) 達成可能充填率 : C_f

達成可能充填率は、無限大の締固めエネルギーにおける推定充填率を表し、入念な締固めを行った際に達成される充填率とほぼ同等である。この値が 100% を下回る場合は、締固めで排除できない空隙があることを意味する。また、値が 100% を超えることがあるが、これは試料上面のプレートと容器の壁との間にモルタル分が出てくるためである²⁻²²⁾。

c) 締固め効率 : C_e

締固め効率は、締固めエネルギーが 1J/L のときの締固め曲線の勾配である。1J/L の時点としているのは、締固め曲線の勾配が安定するとされているからである。この値が大きいほど所定のエネルギーで高い充填率が得られることを表す指標であり、すなわち締固めの効率を表している。また、この値は、単位水量の増大に比例して大きくなり、細骨材率の増大とともに減少傾向を示す。

締固め効率 : C_e は、式 [2-17] を微分して得られる式 [2-18] により算出できる。

$$C_e = bd(C_f - C_i)E_i^{(d-1)} \exp(-bE_i^d) \quad \text{式 [2-18]}$$

d) 締固め完了エネルギー : E_{98}

E_{98} は、実務上の締固め完了充填率を 98% と考え、この充填率を得るのに必要とされる締固めエネルギーである。VC 振動締固めにおける VC 値は、骨材粒子間の空隙がセメントペーストによって充填される時間であるので、 E_{98} に対応した値と考えられる²⁻²²⁾。この値は、単位水量の増加に伴い双曲線的に減少し、細骨材率の変化によって極小値を示す。

E_{98} は、式 [2-17] を変形して得られる式 [2-19] により算出することができる。

$$E_{98} = \left\{ \left(-\frac{1}{b} \right) \log \left(\frac{C_f - 98}{C_f - C_i} \right) \right\}^{\frac{1}{d}} \quad \text{式 [2-19]}$$

(5) 配合条件による締固め係数の変化

図 2-15～図 2-17 に、各配合条件を変化させたときの各締固め係数への影響を示し、以下に項目ごとに詳細を示す。この結果は國府らの論文²⁻²¹⁾の一部である。

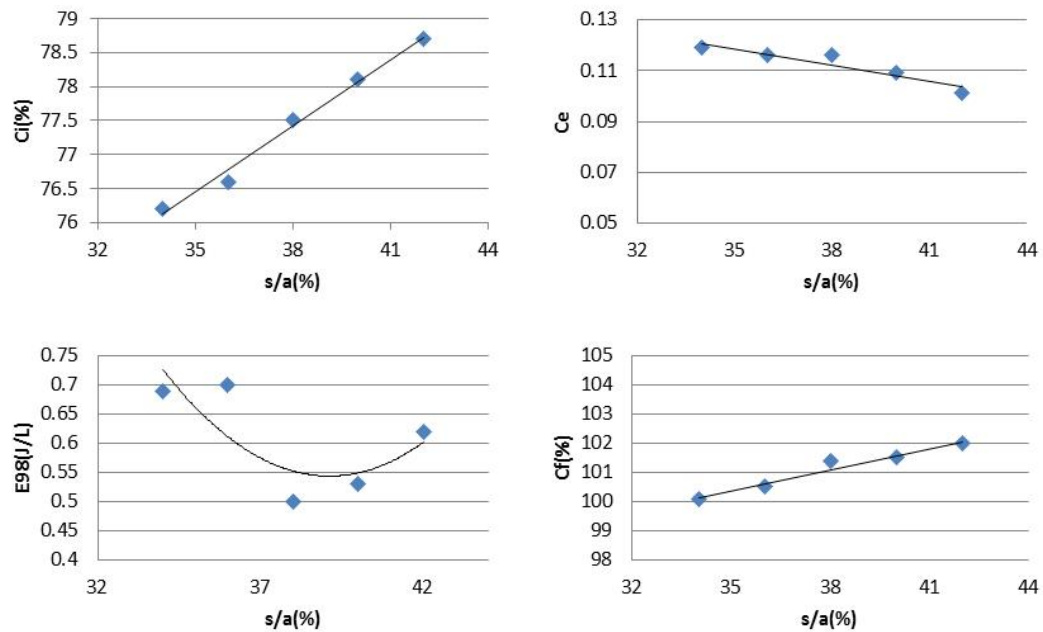


図 2-15 細骨材率を変化させたときの各締固め係数への影響

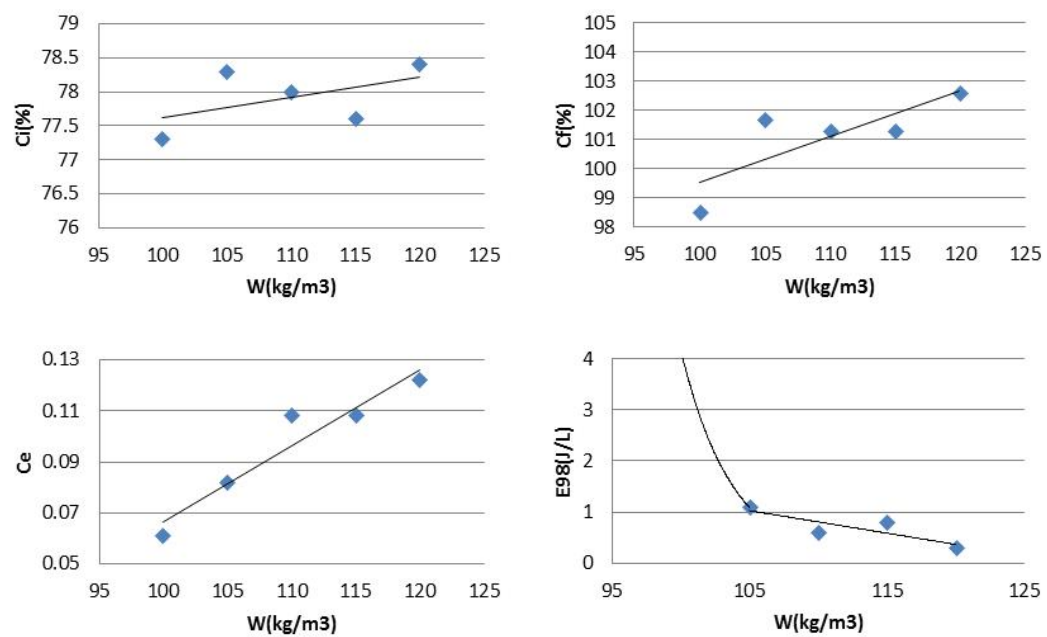


図 2-16 単位水量を変化させたときの各締固め係数への影響

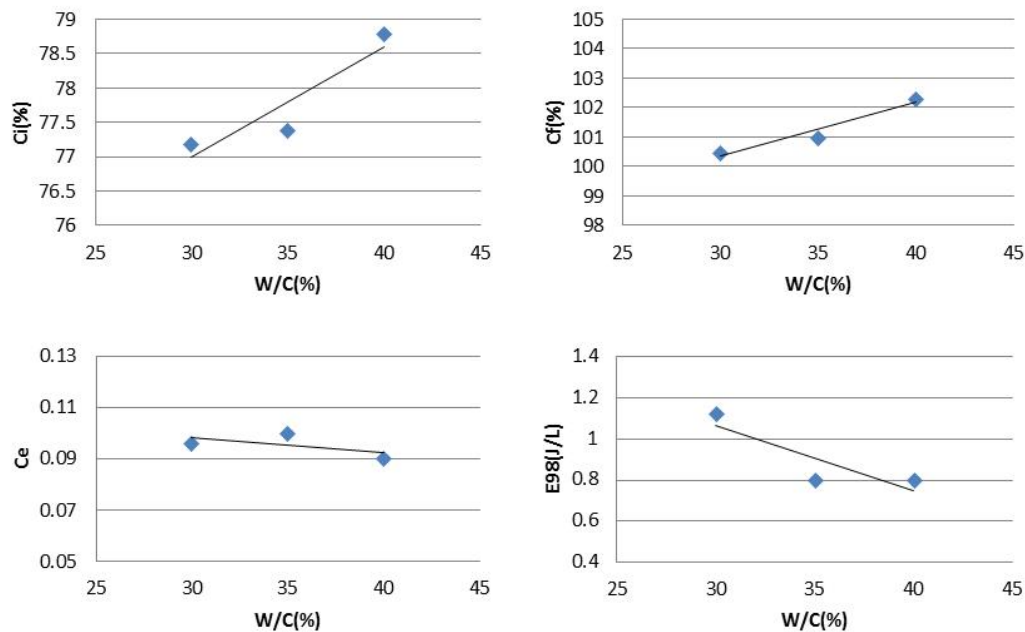


図 2-17 水セメント比を変化させたときの各締固め係数への影響

a) 細骨材率

細骨材率を増加させると、 C_i は単調増加し、 C_e は減少する傾向がみられる。また、 E_{98} の変化には極小値が現れ、 E_{98} によって最適細骨材率が決定できる。これは、細骨材率を小さくすると粗骨材粒子がつくる粗大空隙が増加し、細骨材率を大きくすると細骨材粒子がつくる微細空隙が増加するといった、相反する側面があるためと考えられる。また、細骨材粒子間の微細空隙は振動によって排除しにくい傾向がみられるため、必要以上に大きな細骨材率とすることには注意が必要である。

b) 単位水量

単位水量の増大による影響として、 C_i の変化は小さいが、 C_e は直線的に増加の傾向を示し、 E_{98} は指数的に急激に減少する。

c) 水セメント比

水セメント比が大きいほど E_{98} が減少する傾向にある。このことは、セメントペーストの粘性の低下もしくは微粉末量（単位セメント量）の減少によって締固めしやすくなる傾向があることを示している。しかし、この影響は単位水量の変化に比較すれば極めて小さいといえる。

(6) K_m および K_p による締固め性への影響

単位水量および単位セメント量が一定の場合、 K_m が増加するということは粗骨材量が減少しモルタル体積が増加するということなので、粗骨材粒子間距離が離れ、粗骨材粒子の相互摩擦抵抗が小さくなり、締固めしやすくなると言える。しかし、モルタル体積が増加するということは、細骨材量が増加するため K_p が減少する。すなわち、細骨材の観点からすると締固めしにくくなると言える。従って、超硬練りコンクリートの配合設計を行う上では、良好な締固め性状を得るために適切な K_m および K_p を設定することが重要である。原田ら²⁻²⁶⁾ は、 K_m が 1.6 程度のとき最も良好な締固め性状が得られると報告している。また國府²⁻²¹⁾ らは、 K_p が 1.20~1.35 の範囲で粒子形状の影響が表れにくくなっているものの、良好な締固め性状を得るためには K_p を少なくとも 1.4 程度以上にすることが望ましいと報告している。

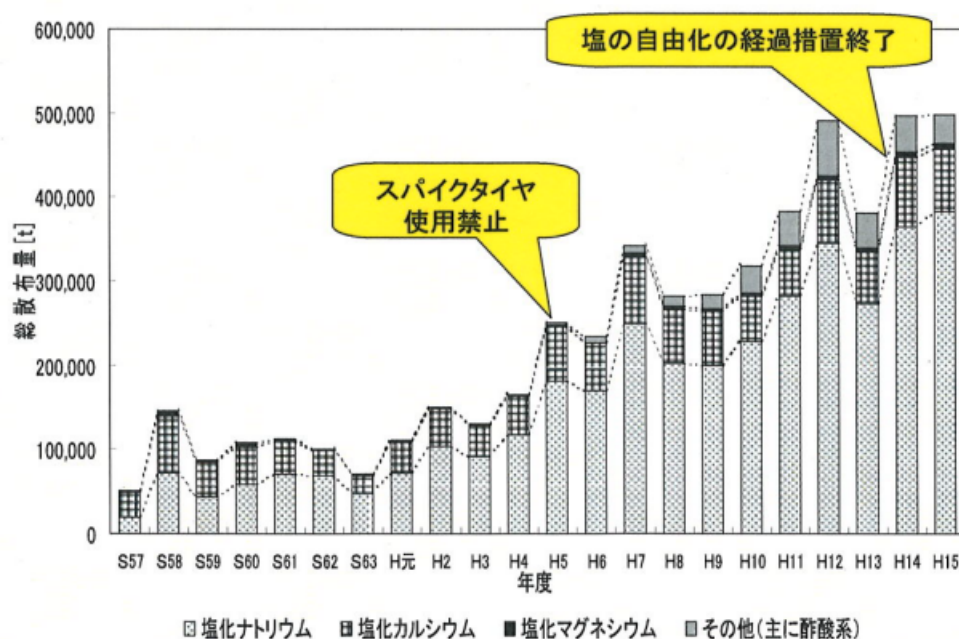
2.2.5 超硬練りコンクリートの凍結融解抵抗性

寒冷地に用いる転圧コンクリート舗装版は、凍結融解抵抗性を確保するため、使用する超硬練りコンクリートに空気連行を行うことが奨励されている。

加賀谷ら²⁻²⁷⁾ は、連行空気量が 2%かつ締固め率 97%以上とすることで、超硬練りコンクリートにおいて耐久性指数 60%以上を確保することができると報告している。また、超硬練りコンクリートの耐久性指数が 60%以上となる気泡間隔係数はおよそ 300 μm 以下となり、普通コンクリートで示される 200~250 μm 以下より大きい値になると報告している。これは、締固め空隙が連行空気泡と同種の空気泡として測定されていることによるものと考察しており、凍結融解抵抗性を正確に論じるためには、より正確な気泡間隔係数の測定手法の確立が望まれると述べられている。

2.3 凍結防止剤と凍結融解抵抗性

1991 年のスパイクタイヤ製造販売の禁止を受け、スタッドレスタイヤの使用が拡大した。しかし、スタッドレスタイヤに磨かれた路面は、滑りやすい鏡面状の冰雪路面となり、スリップ事故の発生に繋がる危険性が高まった。この対策として、主に塩化物系の凍結防止剤を散布するという対策がとられてきた。日本国内で使用されている凍結防止剤の種類としては塩化物系と酢酸系の 2 種に大別され、主に塩基物系の使用が多い。中でも塩化ナトリウムの使用が最も多く、平成 15 年度には使用量全体の 7 割に達している。²⁻²⁸⁾



出典：平成 16 年 「凍結防止剤散布実態調査(8)」報告書

図 2-28 近年の凍結防止剤散布量の経年変化

本格的に凍結防止剤の散布が行われ始めてから 20 年が経過した現在、散布地域の道路橋においてコンクリートの表面が剥げ落ちるスケーリングの被害が顕在化している²⁻²⁹⁾。スケーリングは凍害の代表的劣化症状であり、すなわち、冰雪地帯や寒冷地では同期に凍結融解と塩化物の複合作用を受け、劣化が進行しているといえる。

塩化物による凍結融解作用の促進メカニズムに関しては、浸透圧説、塩化物イオンの濃度勾配に起因する凍結挙動の変化、層間凍結、希釈による飽水度の上昇、科学的浸食による組織の多孔化など、多くの理論が提唱されており、塩化物に起因する凍結融解作用のメカニズムは極めて複雑だといえる²⁻³⁰⁾。

また、塩化物水溶液の濃度が3%の場合にコンクリートの凍結融解による劣化が最も顕著に発生することが Verbeck ら^{2-31), 2-32)}の研究などで明らかになっている。日本国内でもこの試験結果を受け、塩化物イオン作用下の凍結融解作用試験は NaCl3%溶液を用いて行うことが一般的である。

遠藤ら²⁻³²⁾は、スケーリングの危険性とコンクリート中に蓄積される塩化物イオン量の関係の定量化を目的とした実験を行っている。この実験では、練混ぜ時塩化物イオンを混入したコンクリートの、真水における吸水挙動とスケーリングに及ぼす影響を検討している。

塩化物イオン量が多い供試体は、吸水率は小さい一方で、高周波水分計で計測した深さ1cmの含水率は大きい傾向にあったと報告している。このことを、供給された水の多くは供試体の内部には移動せず、表層にとどまりやすいと考察している。また、高炉セメントB種(図:B)を用いた場合、普通ポルトランドセメント(図:N)を用いた場合と比較して、その傾向が強いと報告している。また、スケーリングに及ぼす塩化物イオン量の影響は、セメントの種類によって異なったため、表層での水の流動挙動にセメントの種類による影響も強く表れると報告している。図2-18に試験結果の一例を示す。(例N8:普通ポルトランドセメント, NaCl8kg/m³)

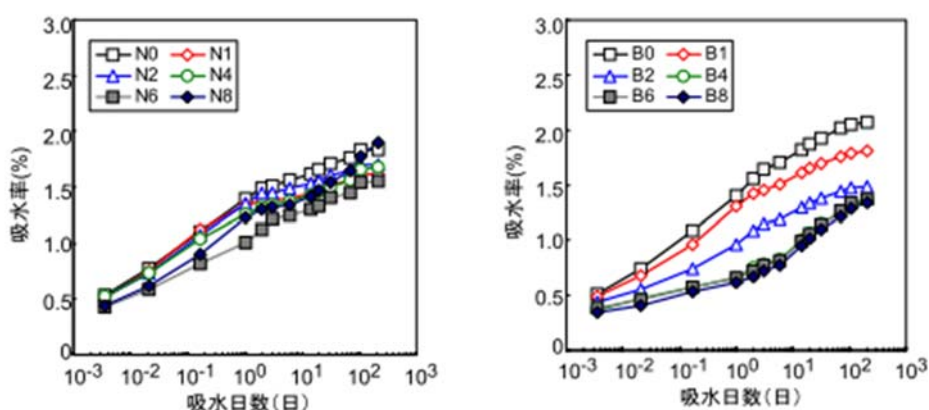


図 2-18 吸水試験結果

2.4 エコセメントを用いた超硬練りコンクリート

2.4.1 エコセメントを用いた超硬練りコンクリートの基礎特性

木村ら²⁻³³⁾は、舗装用超硬練りコンクリートへのエコセメントへの適用性評価を目的として、エコセメントを用いた超硬練りコンクリートの基礎特性について検討した。配合条件として、 K_m を1.60、単位水量を 125kg/m^3 とし、 W/C を0.30~0.40の3水準に変化させた。この条件のもと、普通セメントを用いたもの(Ex-NN)およびエコセメントを用いたもの(Ex-EN)を作製した。また、乾燥収縮ひずみの比較のため、一般的な舗装用有スランブコンクリート(PN)についても試験を行った。

図2-19に、各配合の E_{98} を示す。Ex-NNと比較すると、Ex-ENの E_{98} は若干小さいことがわかる。すなわち、エコセメントを用いた場合、超硬練りコンクリートの締固め性は、普通セメントを用いた場合と同等以上であるとわかる。これは、エコセメントの密度が、普通セメントの密度より若干小さいため、同一 W/C ではペースト体積が若干大きくなっていることによる影響とも考えられるが、セメントの種類によるペーストの体積差は極めて小さいことから、セメントの種類による影響だと推察している。

図2-20に、セメント空隙比と圧縮強度の関係を示す。Ex-ENの圧縮強度は、Ex-NNの約9割となり、有スランブコンクリートを対象とした既往の研究⁵⁾と同等の傾向となっている。

図2-21に、圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。Ex-ENの場合、同一圧縮強度での静弾性係数は、Ex-NNと比較して若干高い傾向を示すが、全配合でコンクリート標準示方書での圧縮強度と静弾性係数の関係とほぼ同等といえる。

図2-22に、圧縮強度と曲げ強度の関係を示す。Ex-ENの曲げ強度は、Ex-NNの曲げ強度と同等となっている。また、圧縮強度と曲げ強度の関係においては、概ねコンクリート標準示方書舗装編での両強度の関係の延長上に打点されていることが分かる。そして、転圧コンクリート舗装用途の超硬練りコンクリートの設計基準曲げ強度(4.5N/mm^2)を十分に満足できることが分かる。

すなわち、エコセメントを用いた超硬練りコンクリートは、普通セメントを用いたものと同等の特性を有しており、示方書等、設計図書に示される既存の関係によって、圧縮強度を基準とした静弾性係数などの導出が可能であると報告している。

図2-23および図2-24に、質量変化率および長さ変化率の経時変化を示す。Ex-NN35とEx-EN35(数値は水セメント比)を比較すると、両変化率とも同等となっており、超硬練りコンクリートの場合、セメント種類による両変化率に対する影響は小さいことがわかる。このことは、有スランブコンクリートを対象とした既往の研究⁵⁾と同様の傾向となっている。

図2-24のとおり、ExシリーズとPNを比較すると、超硬練りコンクリートの長さ変化率は顕著に小さく、乾燥収縮低減面での超硬練りコンクリートの有効性が明らかとなったと考察している。

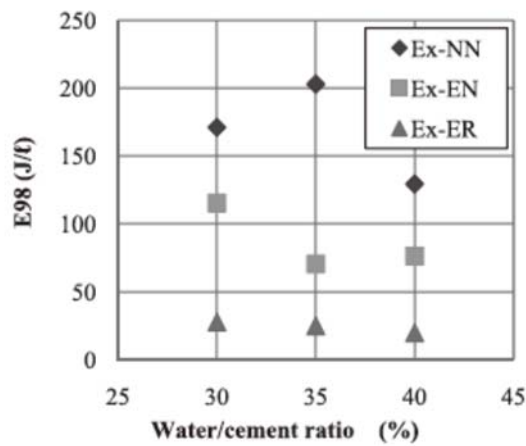


図 2-19 各配合の E_{98}

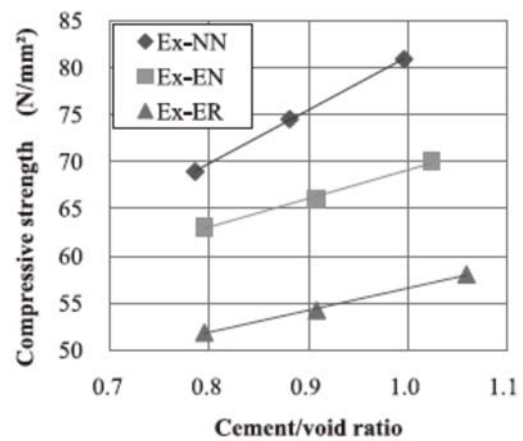


図 2-20 セメント空隙比と圧縮強度

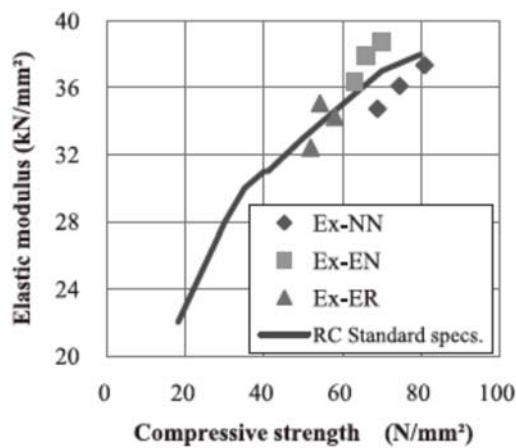


図 2-21 圧縮強度と静弾性係数

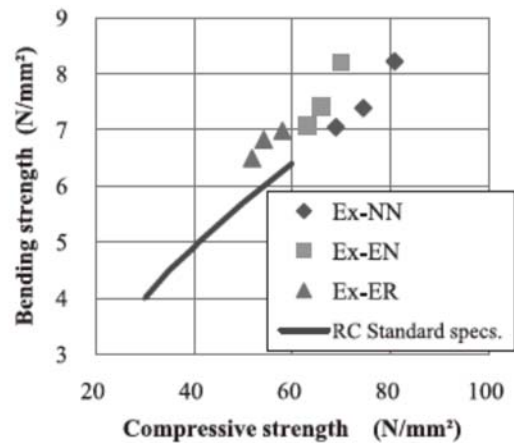


図 2-22 圧縮強度と曲げ強度

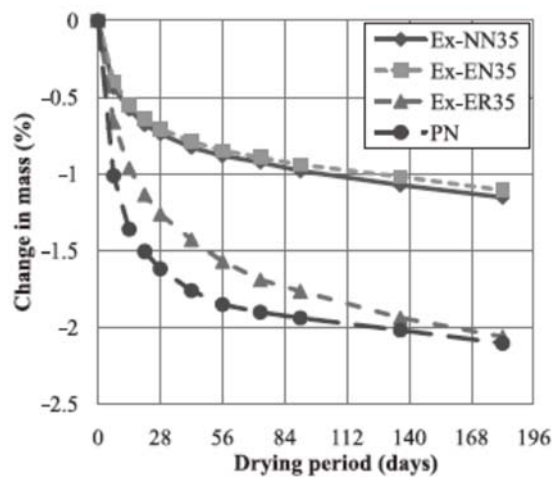


図 2-23 質量減少率の経時変化

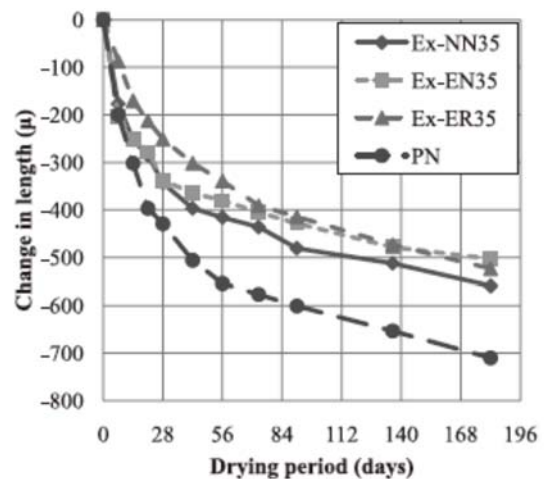


図 2-2 長さ変化率の経時変化

2.4.2 エコセメントを用いた超硬練りコンクリートの凍結融解抵抗性

木村ら²⁻³⁴⁾は、エコセメントを用いた舗装用超硬練りコンクリートの凍結融解抵抗性に関して、細孔構造の観点から検討を行った。また、フライアッシュを混和した場合についても検討を行った。配合条件として、 K_m を1.50、単位水量を 110kg/m^3 、 W/B を0.35、目標空気量を2.5%とした。この条件の下、結合材を普通セメントとしたもの(N)、エコセメントとしたもの(E)、エコセメントの一部をフライアッシュで15%質量置換したもの(EFA)を作製した。

図2-24に、各コンクリートの細孔径分布の測定結果を示す。Eの細孔径分布は、Nとほぼ同程度となっており、総細孔量も 0.07ml/g を下回り、非常に少ない。すなわち、水セメント比が0.35と低い舗装用超硬練りコンクリートの場合、エコセメントを用いた場合と同等の組織構造を持ったコンクリートであると考察している。

EFAの細孔径分布は、Eと比較して、特に $0.05\sim 0.1\mu\text{m}$ 付近の細孔量が多く、総細孔量も多くなっている。この要因として、材齢28日までの水中養生ではフライアッシュのポズラン反応が十分に進行していない可能性を挙げ、超硬練りコンクリートにエコセメントとフライアッシュを用いた場合であっても、長期材齢とすることで、より緻密な組織構造を持ったコンクリートになると推察している。

図2-25に、凍結融解サイクルに伴う相対弾性係数の変化を示す。300サイクル時点での耐久性指数が最も低いE-NaClであっても、その値は81%程度となっており、相対動弾性係数の面では十分な凍結融解抵抗性を有したコンクリートになっていると考察している。

図2-26に、凍結融解サイクルに伴う質量減少率の変化を示す。真水下の試験において、E-H₂Oの質量減少率は、相対動弾性係数の推移と同様に、N-H₂Oと同等の傾向を示している。このことから、通常環境下での凍結融解においては、エコセメントを用いた場合であっても、普通セメントを用いた場合と同等の十分なスケーリング抵抗性を有していると考察している。

NaCl3%溶液での質量減少率は、EFA-NaCl、E-NaCl、N-NaClの順に小さくなっている。EFA-NaClは最も質量減少率が大きくなったが、細孔径分布の結果と同様に、フライアッシュのポズラン反応が十分に進行していないことに起因するものと考えられる。しかし、NとEの細孔構造はほぼ同程度であり、EFAは若干疎であるものの、全ての配合で 0.07ml/g 以下と顕著に少ない。このことを考慮すると、結合材種類による質量減少率の相違に対して、細孔構造による影響は、それほど大きくない可能性を報告している。

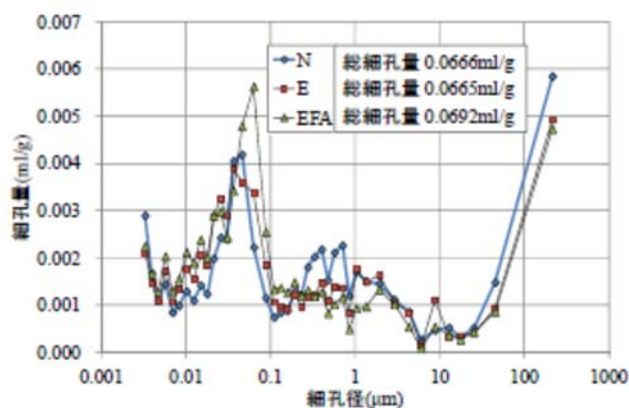


図 2-24 細孔径分布

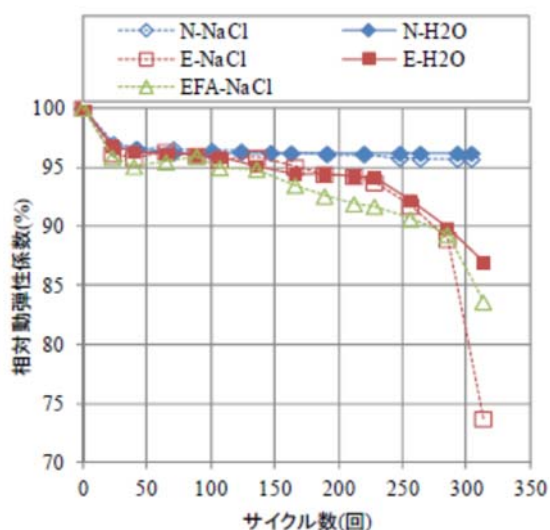


図 2-25 相対動弾性係数の変化

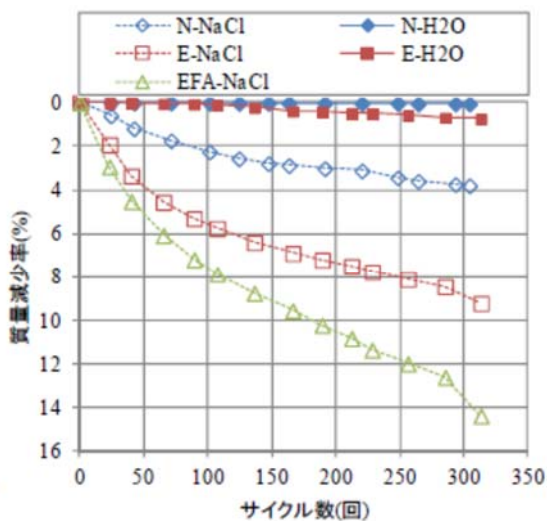


図 2-26 質量減少率の変化

藤野ら²⁻³⁵⁾は、エコセメントを用いた舗装用超硬練りコンクリートのスケーリング抵抗性に関して、気泡構造の観点から検討を行った。配合条件として、 K_m を1.60、単位水量を 110kg/m^3 、 W/B を0.35、目標空気量を2.5%とした。検討は、AE助剤量を増加させ、連行空気量を増加させたシリーズ(A)および細骨材の粒度を細粒側へ変化させ、連行空気泡の径を小さくすることを念頭に置いたシリーズ(F.S)に大別される。また、粗大な空気泡を減らすことを目的とした消泡剤併用シリーズ(T)、空気連行が困難な超硬練りコンクリートに対する空気連行性の検討のための、AE助剤の種類を変化させたものについても検討した。

表 2-4 に、各配合の空気量測定結果一覧を示す。気泡間隔係数は $300\mu\text{m}$ より十分に小さいことから、いずれも十分な耐凍害性を有することを予想した。

図 2-27 に、凍結融解サイクルに伴うコンクリートの質量減少率の変化を示す。N-A2.5 と E-A2.5 を比較すると、気泡構造に明確な差は見られなかったが、エコセメントを用いたことによりスケーリングは増大している。このことから、エコセメントを用いたときのスケー

リング増大の要因が気泡構造以外にも存在する可能性を述べている。

図 2-28 に、300 サイクル近傍の質量減少率と耐凍害性に寄与する寸法範囲の 50～500 μm に相当する気泡径 75～475 μm の空気量の関係を、図 2-29 に、300 サイクル近傍の質量減少率と気泡径 525 μm 以上の関係を示す。

図 2-28 から、一般に、微細な径の気泡の空気量の増加によってコンクリートの質量減少率が小さくなると分かるが、E-A6.0 ではスケーリングが増大している。これは、微細な気泡の増加よりも粗大な気泡の増加による質量減少率への影響が卓越したためだと考察している。同様に、商法材を加えた配合や AE 助剤を変えた配合、細骨材粒度を細粒側へ変化した配合に関しても、E-A2.5 と比較して微細な空気量は同程度であるが、粗大な気泡の空気量が増加したためスケーリングも増大する結果であったと報告している。

図 2-29 から、概ね、粗大な気泡の空気量の増加に伴い、コンクリートの質量減少率も増大する傾向にある。すなわち、エコセメントを用いたときのコンクリートのスケーリングの抑制には、微細な気泡の増加と同時に、粗大な気泡の低減が重要だと述べている。

表 2-4 空気量測定結果一覧

配合記号	空気量 (%)		気泡間隔係数 (μm)
	硬化前	硬化後	
N-A2.5	2.7	2.6	170
E-A2.5	2.5	2.2	139
E-A4.0	3.7	3.5	118
E-A6.0	5.7	4.9	117
E-A2.5-4T	2.4	2.8	146
E-A2.5-10T	2.8	2.7	155
E-A2.5-F.S20	2.4	2.3	195
E-A2.5-F.S40	2.7	2.2	209
E-A2.5-F.S60	2.5	2.5	209
E-A'2.5	2.5	2.3	181

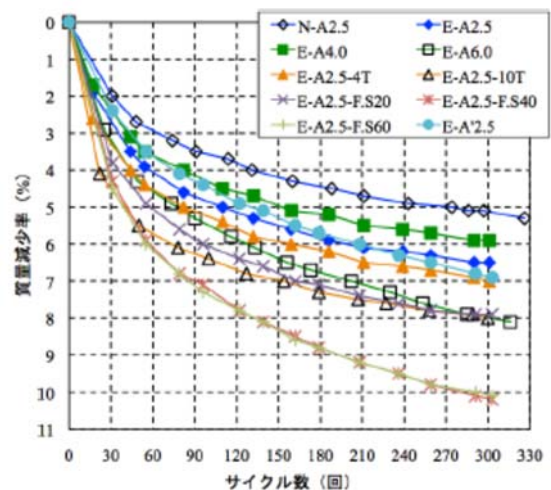


図 2-27 質量減少率の変化

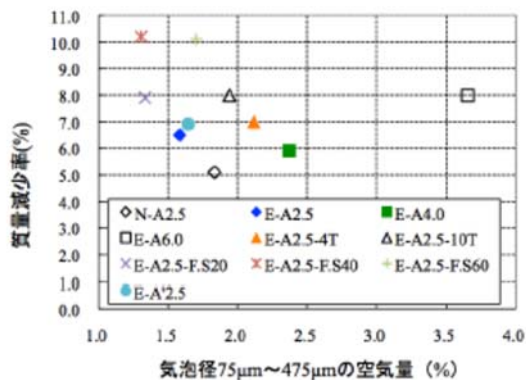


図 2-28 微細な気泡の空気量と質量減少率

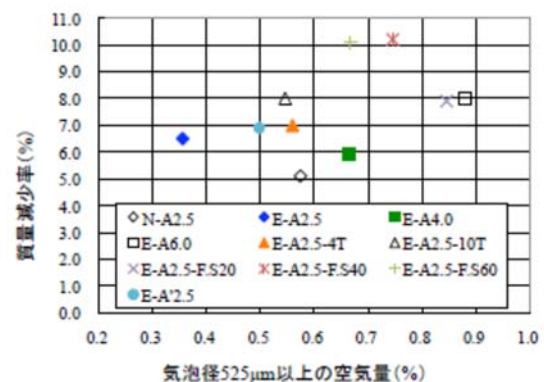


図 2-29 粗大な気泡の空気量と質量減少率

参考文献

- 2-1) 松下哲郎, 丸山一平, 野口貴文, 棚木隆: エコセメントの水和反応の温度依存性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, 2006
- 2-2) 棚野博之, 鹿毛忠継, 濱崎仁, 横山滋, 田中敏嗣, 長塩靖祐, 木村正尚, 椎野宏明: エコセメントを使用したコンクリートの物理・力学特性ならびに, 調合設計・施工技術に関する研究, 建築研究報告, 2005
- 2-3) 社団法人日本建築学会: エコセメントを使用するコンクリートの調合設計・施工指針(案)・同解説, p.97, 2007.10
- 2-4) 渡辺創一郎, 金子樹, 守屋健一, 嵩英雄: エコセメントを用いたコンクリートのフレッシュ性状に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東) A-1 材料施工, pp.253-254, 2006
- 2-5) 独立行政法人土木研究所: エコセメントコンクリート利用技術マニュアル, pp.5-9, pp.15-20, pp.37-40, 2003
- 2-6) Park Kwangmin, 三島直生, 畑中重光: エコセメントを用いたコンクリートの強度特性に関する基礎実験, 日本建築学会東海支部研究報告集, No.45, 2007
- 2-7) 石森正俊, 田村幸保, 名和豊春, 胡桃澤清文: エコセメント硬化体の強度発現に関する一考察, セメント・コンクリート論文集, No.62, pp47-53, 2008
- 2-8) 胡桃澤清文, 蛭川泰卓, 湊大輔, 名和豊春: エコセメントペーストの微細構造と長期強度発現, セメント・コンクリート論文集, No.61, pp100-107, 2007
- 2-9) 棚野博之, 鹿毛忠継, 濱崎仁, 横山滋, 田中敏嗣, 長塩靖祐, 木村正尚, 椎野宏明: エコセメントを使用したコンクリートの物理・力学特性ならびに調合設計技術に関する研究, 建築研究報告, No.144, 2005
- 2-10) 社団法人日本建築学会: エコセメントを使用するコンクリートの調合設計・施工指針(案)・同解説, pp137-138, 2007
- 2-11) 平尾宙, 横山滋: エコセメントの流動性および強度発現性に及ぼす石灰石微粉末の影響, セメント・コンクリート論文集, No.55, pp.97-102, 2001
- 2-12) Seiichi Hoshino, Kazuo Yamada, Hiroshi Hirao: XRD/Rietveld Analysis of the Hydration and Strength Development of Slag and Limestone Blended Cement, Journal of Advanced Concrete Technology, No.4, Vol.3, pp.357-367, 2006
- 2-13) 丸屋英二, 一瀬龍太郎, 坂井悦郎: 混合材を添加したアルミネート高含有セメントの流動性と水和特性, Cement Science and Concrete Technology, No.64, pp.54-59, 2010
- 2-14) 一瀬龍太郎ほか: 石灰石微粉末を置換したアルミネート高含有セメントの流動性, セメント・コンクリート論文集, No.62, pp.54-59, 2008
- 2-15) 三隅英俊, 丸屋英二, 高橋俊之: 高 C3A 型混合セメントのコンクリート物性, Cement Science and Concrete Technology, Vol.66, pp.353-358, 2012
- 2-16) 平尾真也, 植木康知, 大塚勇介: ポルトランドセメント中の石灰石微粉末置換率を増

- 加させた場合における高炉セメント・コンクリートの耐久性について，コンクリート工学年次論文集，Vol.36， No.1， pp.208-213， 2014
- 2-17) 平尾宙，山田一夫：エコセメントの流動性および強度発現性に及ぼす高炉スラグ微粉末の影響，Cement Science and Concrete Technology， No.57， pp.97-104， 2003
- 2-18) 久我龍一郎，河野克哉，野崎隆人，山田一夫：高炉スラグ微粉末と石灰石微粉末を添加したエコセメントモルタルの強度発現性ならびに乾燥収縮特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.31， No.1， pp.55-60， 2009
- 2-19) V.S.Ramachandran： Admixture and addition interactions in the cement-water system， il Cemento， pp.13-38， 1986
- 2-20) 坂井悦郎，中川晃次，三原俊夫，大門正機：フィラーセメント，わかりやすいセメント化学，(社)セメント協会， 1993
- 2-21) 國府勝郎，上野敦：締固め仕事量の評価に基づく超硬練りコンクリートの配合設計，土木学会論文集，No.532/V-30， pp.109-118， 1996
- 2-22) 國府勝郎，近藤拓也，上野敦：RCCP 用コンクリートの締固め性試験方法に関する研究，セメント・コンクリート論文集，Vol.46， pp.964-969， 1992
- 2-23) 梁俊，國府勝郎，宇治公隆，上野敦：フレッシュコンクリートの締固め性試験方法に関する研究，土木学会論文集 E ， Vol.62， No.2， pp.416-427， 2006
- 2-24) 杉森誠志，國府勝郎，三栖幸彦，上野敦，早川健司：転圧コンクリートの配合設計，転圧設計および施工管理に対する締固め性試験の応用，土木学会・フレッシュコンクリートのコンシステンシー評価に関する技術の現状と課題，コンクリート技術シリーズ No.37， pp.1-8， 2000
- 2-25) 松木真也，國府勝郎，宇治公隆，上野敦：超硬練りコンクリートの締固めシミュレーションプログラムの開発，土木学会大 61 回年次学術講演会講演概要集第 5 部， pp.383-384， 2006
- 2-26) 原田駿平，上野敦，宇治公隆：再生粗骨材を用いた超硬練りコンクリートの締固め性に関する検討，土木学会第 64 回年次学術講演会， 第 5 部， pp.891-892， 2009
- 2-27) 加賀谷誠，西原康夫，城門義嗣：超硬練りコンクリートの空気連行特性と凍結融解抵抗性に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.20, No.3, pp.21-31, 2009
- 2-28) 国土交通省，国土技術政策総合研究所：凍結防止剤散布と沿道環境，国土技術政策総合研究所， 第 412 号， pp.10， 2007
- 2-29) 田口 史雄，小尾稔，遠藤 裕丈：コンクリートの凍害および塩害による複合劣化に関する調査，コンクリート工学年次論文集，Vol.28， No.1， 2006
- 2-30) 草間祥吾，田口史雄，林田宏，遠藤裕丈：コンクリート構造物の凍害劣化要因の検討，完治土木研究所月報，No.659 ， pp.27-31， 2008
- 2-31) Verbeck George and Klieger Paul： Studies of Salt Scaling of Concrete， Highway Research Board， Bulletin 150， pp.1-13， 1957

- 2-32) 遠藤裕丈, 田口史雄, 名和豊春: スケーリングに及ぼすコンクリート中の塩化物イオン量の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, 2008
- 2-33) 木村順哉, 上野敦, 宇治公隆, 梶尾聡: 普通エコセメントおよび再生粗骨材の舗装用超硬練りコンクリートへの適用性, セメント・コンクリート論文集, No.64, pp.251-256, 2011
- 2-34) 木村順哉, 上野敦, 石田征男, 宇治公隆: エコセメントを用いた舗装用超硬練りコンクリートの凍結融解抵抗性に関する基礎検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, 2012
- 2-35) 藤野祐樹, 上野敦, 石田征男, 宇治公隆: エコセメントを用いた舗装用超硬練りコンクリートの気泡構造に関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, 2013

第 3 章

エコセメント超硬練りコンクリートの スケーリング抵抗性向上に関する基礎検討

第 3 章 エコセメント超硬練りコンクリートのスケーリング抵抗性向上に関する基礎検討

第 3 章では、エコセメントを用いた舗装用超硬練りコンクリートの凍結防止剤環境下でのスケーリング抵抗性の向上を目的に、水セメント比を減少した場合および混和材を使用した場合の基礎的な特性について検討を行った。さらに、スケーリング抵抗性と BET 比表面積試験からの平均細孔径との関係を示し、考察を行った。

3.1 水セメント比を変化させたエコセメント超硬練りコンクリートのスケーリング抵抗性

3.1.1 はじめに

凍結防止剤環境下での、エコセメント超硬練りコンクリートのスケーリング抵抗性向上に対しては、表層強度の向上が有効であると考えられる。

本節では、水セメント比を変化させた場合の検討を行った。エコセメントを用いた超硬練りコンクリートにおいて、水セメント比 25, 30, 35, 40%の 4 水準を作製し、締固め性、機械的性質および NaCl3%溶液下での凍結融解抵抗性について考察を行った。

3.1.2 実験方法

(1) 使用材料

セメントは、表 3-1 に示す普通エコセメント (EC) を使用した。骨材は、表 3-2 に示すと通りの性質を持つ山砂 (S) および碎石 (G) を使用した。碎石 2005 は、碎石 2013 と碎石 1305 を質量比 32 : 68 で混合したものである。混和剤は、表 3-3 に示すものを使用した。

表 3-1 普通エコセメントの性質

密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	凝結			安定性 (パット法)	圧縮強度 (N/mm ²)			化学成分 (%)	
		水量 (%)	始発 (h-min)	終結 (h-min)		3d	7d	28d	全アルカリ	塩化物イオン
3.15	4020	27.5	2-37	4-24	良	31.2	46.8	61.1	0.50	0.028

表 3-2 骨材の性質

種類	産地	記号	密度(g/cm ³)		吸水率 (%)	単位容積 質量(kg/L)	実積率 (%)	F.M.	微粒分量 (%)
			表乾	絶乾					
山砂	静岡県掛川市	S	2.59	2.55	1.50	1.70	66.7	2.43	0.6
碎石2013	—	G _小	2.65	2.64	0.56	—	—	7.02	0.2
碎石1305	—	G _大	2.64	2.62	0.71	—	—	6.46	0.1
碎石2005	茨城県桜川市	G	2.64	2.63	0.65	1.58	60.1	6.63	—

表 3-3 混和剤の性質

種類	主成分	外観	密度 (g/cm ³)	全アルカリ量 (%)	塩化物イオン量 (%)
AE減水剤	リグニンスルホン酸 化合物	淡褐色 粉末	1.08～1.12	0.3	0.09
AE助剤	変性ロジン酸化合物系 陰イオン界面活性剤	茶褐色 液体	1.02～1.06	1.7	0.01

(2) コンクリートの配合

表 3-4 にコンクリートの計画配合を示す。配合記号のアルファベットは結合材種類を表し (E : エコセメント), 続く数値が水セメント比 (%) をあらわす。

超硬練りコンクリートでは、締固め後の残存空隙が、品質の低下に致命的な影響を及ぼすため、配合条件は、十分な締固めが行える配合を想定し、Km (粗骨材の粒子間空隙に対するモルタル体積の割合) を 1.60, 単位水量を 110kg/m³とした。また、目標空気量は 2.5%とし、AE 助剤の使用量を調整することで空気量を調整した。水セメント比は、25, 30, 35 および 40%の 4 水準として作製した。

表 3-5 に実測空気量に基づいて再計算したコンクリートの配合を示す。表 3-4 に示した配合と比較すると、目標空気量に対する実測空気量の増加 (減少) に伴って、材料全体の単位量は減少 (増加) する。なお、本研究では、連行空気体積をセメントペースト体積の一部としているため、連行空気の導入によって細骨材量が少なくなり、Kp (細骨材の粒子間空隙体積に対するペースト体積の割合) が大きくなることもある。

表 3-4 コンクリートの計画配合

配合 記号	W/C (%)	Km	Kp	目標 Air (%)	単位量(kg/m ³)				AE減水剤 (C×%)	AE助剤 (C×%)
					W	EC	S	G		
E25	25	1.60	2.29	2.5	110	440	619	1284	0.125	0.027
E30	30	1.60	1.91	2.5	110	367	679	1284	0.125	0.027
E35	35	1.60	1.68	2.5	110	314	722	1284	0.125	0.027
E40	40	1.60	1.52	2.5	110	275	755	1284	0.125	0.018

表 3-5 実測空気量に基づいて再計算したコンクリートの配合

配合 記号	W/C (%)	Km	Kp	目標 Air (%)	単位量(kg/m ³)				AE減水剤 (C×%)	AE助剤 (C×%)
					W	EC	S	G		
E25	25	1.60	2.30	2.6	110	440	619	1283	0.125	0.027
E30	30	1.60	1.90	2.4	110	367	680	1285	0.125	0.027
E35	35	1.62	1.72	3.0	109	313	718	1277	0.125	0.027
E40	40	1.61	1.54	2.7	110	274	753	1281	0.125	0.018

(3) 練混ぜ方法

公称容量 55L の強制式パン型ミキサを用い、練混ぜを行った。一回あたりの練量は 35L とした。以下、練混ぜの手順を示す。

セメントおよび細骨材をミキサ内へ投入（このとき、セメントを細骨材で挟むようにする）→空練り 20 秒→練混ぜ中に混和剤を混ぜた水を 30 秒間で注入→練混ぜ 60 秒→ミキサ OFF→材料かきおとし→粗骨材（G_小）をミキサ内へ投入→練混ぜ 10 秒→粗骨材（G_大）をミキサ内へ投入→練混ぜ 60 秒→練り板上に排出

(4) 供試体の作製方法

供試体の作製方法について以下に記述する。各配合について、円柱（φ100×200mm）および角柱（100×100×400mm）の供試体を作製した。

a) 円柱供試体の作製方法

φ100×200mm の型枠中に、充填率 100%になるように計量した試料を充填した。試料の型枠への投入は、振動台（50Hz）上で振動を加えながら行うことで、材料分離しないように配慮した。試料を投入後、上部に錘（4kg）を乗せ、充填率 100%を目標として振動締固めを行った。最後に、振動台から型枠を降ろし、振動機（140～180Hz）をコンクリート表面に押し当て、表面を仕上げた。

b) 角柱供試体の作製方法

100×100×400mm の型枠中に、充填率 100%になるように計量した試料を充填した。試料の型枠への投入は、円柱供試体の場合と同様の手順で行った。試料を投入後、振動台から型枠を降ろし、振動タンパ（BOSH 製、50Hz）をコンクリート表面に押し当てて、所定の体積になるまで締固めを行った。締固め終了後、振動機とコテを用いて上面を仕上げた。

3.1.3 試験方法

(1) 超硬練りコンクリートの空気量測定

超硬練りコンクリートの空気量は、公益社団法人全国土木コンクリートブロック協会が規定する CBA-2「超硬練りコンクリートの空気量試験方法」に従って測定した。ワシントンエアメータ（JIS A 1128）に、あらかじめ 2L 程度の水を入れておき、練混ぜ直後の試料 10kg を投入した。試料投入時には、容器側面を木槌でたたきながら、空隙を水で置換した。試料投入後、容器上面まで水を満たし、注入法によって見かけの空気量を測定した。測定した見かけの空気量、空気量測定容器の容積、空気がないものとして計算したコンクリートの単位容積質量から、式 [3-1] によって空気量を計算した。

$$A = \frac{V \cdot T_0 \frac{a}{100}}{10 + V \cdot T_0 \frac{a}{100}} \quad \text{式 [3 - 1]}$$

ここに、A：空気量（%）

V：測定容器の容積（L）（本実験では 6.980L）

T₀：空気がないものとして計算したコンクリートの単位容積質量（kg/L）

a：10kg の試料で測定した見かけの空気量（%）

実測の空気量に基づいて再計算したコンクリートの配合は、表 3-5（3.1.2（1））に示したとおりである。充填率 100%に相当する試料質量の算出には、表 3-5 の配合から得られる単位容積質量を使用した。

(2) 締固め性試験

締固め性試験は、JSCE-F 508「超硬練りコンクリートの締固め性試験方法（案）」に従った。この試験は、加速度 5G、振動数 75Hz の振動台上で 3 分間振動締固めを行い、締固めエネルギーと充填率の関係を近似式として得るものである。締固め性試験で得られた近似式から初期充填率：Ci，締固め効率：Ce，達成可能充填率：Cf，締固め完了エネルギー：E98 を算出し、締固め性の評価を行う。

この試験の手順を以下に示す。

- ① 実測空気量に基づいて再計算した配合から得られる単位容積質量に基づいて、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の型枠に充填率 100% に相当する量のコンクリートを計量する。このとき、粒径に偏りが生じないように注意しながら採取する。
- ② 型枠にホッパを取り付け、計量したコンクリートを 3 層に分けて投入し、各層突き棒で 15 回突く。このときも、粒径に偏りが生じないように注意しながら試料を投入する。
- ③ コンクリートを投入した型枠を振動台に固定し、試料上面に上載板をセットして振動締固めを開始する。振動開始から終了までの 3 分間、0.5 秒ごとにコンクリートの沈下量をレーザ変位計で計測する。
- ④ 締固めエネルギーおよび充填率を式 [3-2] および式 [3-3] を用いて算出する。

$$E_i = \rho \frac{\alpha_{\max}^2}{4\pi^2 f} t_i \quad \text{式 [3-2]}$$

$$\gamma_i = \frac{H + h}{H} \times 100 \quad \text{式 [3-3]}$$

ここに、 E_i ：時間 t_i における締固めエネルギー（J/L）

ρ ：実測空気量での試料の単位容積質量（kg/L）

α_{\max} ：最大加速度（m/s²）=5G=5×9.80665

f ：振動数（s⁻¹）=75Hz

t_i ：締固め時間（s）

γ_i ：時間 t_i における充填率（%）

H ：型枠の高さ（mm）=200mm

h ：型枠上面とコンクリート上面の高さの差（mm）

- ⑤ 締固めエネルギーと充填率の関係をグラフにプロットし、近似計算により、締固め曲線を得る。

本研究では、各配合に対して 2 本試験を行い、その平均値を結果として用いた。なお、E30 および E35 に関しては 1 本測定不可能となったため、1 本の結果を用いている。

(3) 機械的性質

a) 圧縮強度、静弾性係数および曲げ強度の測定

圧縮強度試験は、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」、静弾性係数は、JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」にそれぞれ従った。本実験では、3.1.2 (4) a) に示した手順で作製した $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体を打込み翌日に脱型し、28 日間水中養生した後に端面を研磨して、各配合 3 本試験に供した。また、載荷時の縦ひずみの測定は、コンプレッソメータを用いて行った。

曲げ強度試験は、JIS A 1106「コンクリートの曲げ強度試験方法」に従った。円柱供試体同様に、打設翌日に脱型した $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の供試体を、28 日間水中養生を行った後に、各配合 3 本試験に供した。

b) セメント空隙比による圧縮強度の整理

一般に超硬練りコンクリートは、締固め後も空隙が残存するので、その圧縮強度はセメント空隙比に支配されると考えられている³⁻¹⁾。このため、セメント空隙比説に基づいた圧縮強度の整理を行った。セメント空隙比は、セメントの体積を空隙と水の体積の和で除した値であり、空隙量の算出が必要になる。

空隙量の算出において、本研究では締固め性試験の結果を利用した。これは、各供試体の締固め性試験の結果から、各々の振動締固め終了後の充填率を知ることができるためである。なお、連行空気体積は空隙体積に含めて整理した。また、3 分間の振動締固めによって供試体の充填率が 100%を超える場合、供試体の充填率は 100%とし、空隙率は 0%として評価した。充填率が 100%をわずかに超えるという現象が起きるのは、試験装置の上載板と型枠壁面との隙間からセメントペーストが滲み出ることがあるためである。

セメント空隙比の算出手順を以下に示す。

- ① 締固め性試験によって得られた締固め曲線から、180 秒間の振動エネルギーによって得られる充填率 γ_{180} (%) 算出する。(式 [3-4])

$$\gamma_{180} = C_i + (C_f - C_i)\{1 - \exp(-bE_{180}^d)\} \quad \text{式 [3-4]}$$

- ② 充填率 γ_{180} (%) を 100%から減じたものを空隙率とし、空隙率からコンクリート 1m^3 中に残存する空隙体積を算出する。(式 [3-5]) また、実測空気量からコンクリート 1m^3 中に含まれる連行空気体積を算出する。(式 [3-6])

$$V_v = \frac{100 - \gamma_{180}}{100} \times 1 \quad \text{式 [3-5]}$$

$$V_a = \frac{A}{100} \times 1 \quad \text{式 [3-6]}$$

- ③ 実測空気量に基づくコンクリートの配合の単位量から水およびセメントの単位体積を計算し、各配合のセメント空隙比を計算する。(式 [3-7])

$$\text{CVR} = \frac{V_c}{V_w + V_v + V_a} \quad \text{式 [3-7]}$$

ここに、 γ_{180} ：180 秒間の締固めエネルギーによって得られる充填率 (%)

E_{180} ：180 秒間の締固めエネルギー (J/L)

V_v ：単位空隙体積 (m^3)

V_a ：実測連行空気体積 (m^3)

A：実測空気量 (%)

CVR：セメント空隙比 (Cement Voids Ratio)

V_c ：単位セメント体積 (m^3)

V_w ：単位水体積 (m^3)

(4) 凍結融解試験

凍結融解試験は、JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験」における水中凍結水中融解法 (A 法) に準拠して行い、材齢 28 日まで 20℃の水中で養生を行った $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体を用いた。試験溶液には、寒冷地における凍結防止剤散布を想定して NaCl3%溶液を用いた。

測定項目は相対動弾性係数および質量減少率とし、3 本の供試体を試験に供し得られた値を平均した。

3.1.4 結果および考察

(1) 締固め性

表 3-6 に締固め性試験によって得られた指標の一覧を、表 3-7 に締固め曲線を形成する各係数の一覧を、図 3-1 に締固め曲線を示す。

表 3-6 締固め性試験の各指標

配合 記号	Ci (%)	Cf (%)	E98 (J/L)	Ce
E25	80.2	99.1	400.7	1.019
E30	80.6	99.6	189.6	1.369
E35	85.7	100.1	77.1	0.942
E40	86.5	99.4	71.1	0.879

表 3-7 締固め曲線の各係数

配合 記号	c	a	b	d	単位容積 質量(kg/L)
E25	80.20	18.7949	0.1106	0.5463	2.451
E30	80.60	19.0414	0.1645	0.5232	2.443
E35	85.70	14.3861	0.1115	0.6563	2.417
E40	86.45	12.9815	0.1052	0.7142	2.419

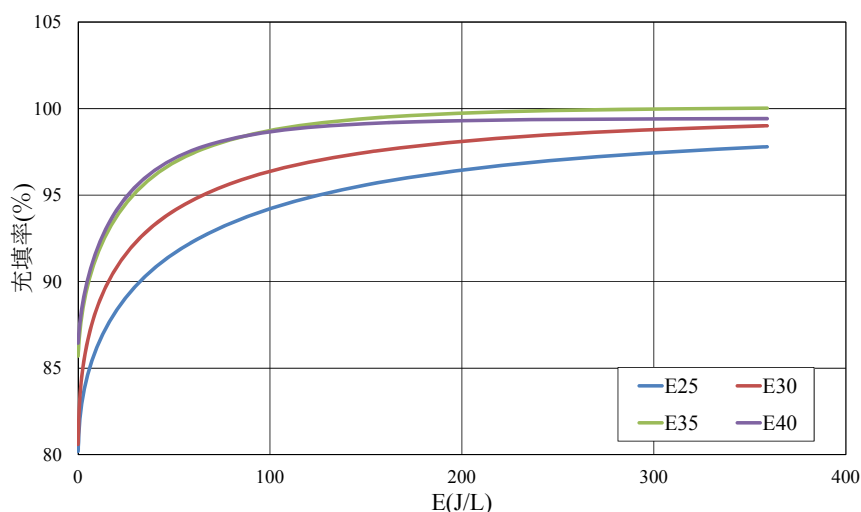


図 3-1 各配合の締固め曲線

Ci は締固め前の締固め性，すなわち試料投入直後充填率を示す指標であり，Cf は非常に大きな締固めエネルギーを与えたときの最終的な充填率を示す指標となっている。

E98 はコンクリートが充填率 98%に達するまでに必要なエネルギーを示している。すなわち，ほぼ完全充填状態に達するまでに必要な締固めエネルギーを示しており，締固めの容易性を評価できる指標である。

Ce は締固め開始直後の締固め曲線の勾配を示しており，この値が大きいほど所定のエネルギーで高い充填率を得られることを示す指標であり，言い換えれば締固めの効率を示している。

図 3-2 に各配合の E98 を示す。水セメント比 30～40%の範囲では、水セメント比の減少に伴って E98 が若干増加する傾向にある。これは、水セメント比の減少に伴ってセメントペーストの粘性が高まったためと考えられる。しかし、E30 の E98 でも 200J/L 以下であり、比較的高い締固め性を有している。また、E35 および E40 の E98 はほぼ同程度であることから、水セメント比の変化による締固め性への影響は顕著ではなく、粉体量に対してある程度の水量が存在することが締固め上重要な要素となっていることが推察される。一方、E25 の E98 は顕著に高く、締固めに必要な水量が不足しているためと考えられる。

図 3-3 に各配合の Ci, Cf および Ce を示す。水セメント比 30～40%の範囲では、水セメント比の減少に従い Ci が減少するが、その影響で Ce が大きくなる傾向にある。しかし、E25 を E30 と比較すると、Ci が同程度なのに対して Ce が顕著に小さい。このことから、E25 が他の配合と比較して締固め性が顕著に低いことが推察される。

ここで、E35 の Cf が 100%をわずかに超えている。これは、試験装置の上載板と型枠壁面との隙間からペーストが滲み出ることがあるためと考えられる。この現象が顕著に起こる場合は、過度に軟なコンクリートとなってしまっているため、舗装用途に適した締固め性とは言い難いので、このことにも留意する必要がある。

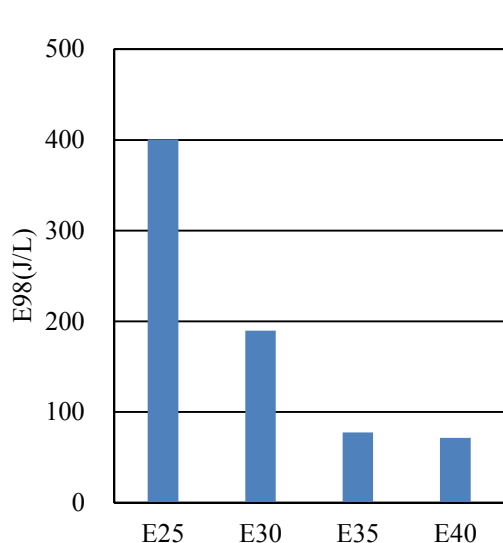


図 3-2 各配合の E98

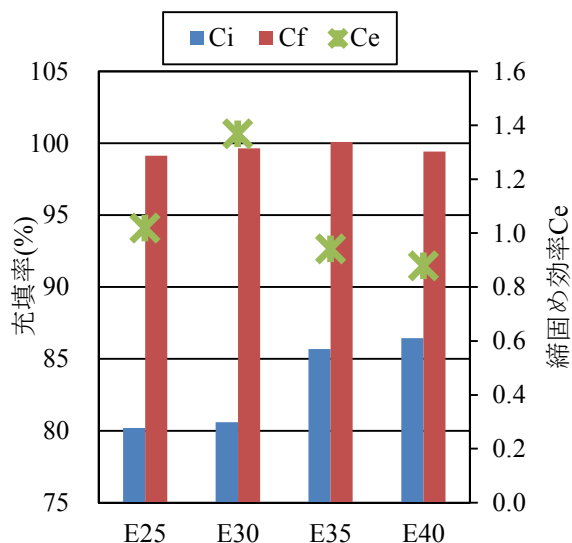


図 3-3 各配合の Ci, Cf および Ce

(2) 機械的性質

表 3-8 に圧機械的性質の試験結果一覧を示す。

表 3-8 機械的性質の試験結果

配合 記号	空隙率($100-\gamma_{180}$) (%)	セメント 空隙比	圧縮強度 (N/mm^2)	静弾性係数 (kN/mm^2)	曲げ強度 (N/mm^2)
E25	2.36	0.875	47.03	32.29	9.58
E30	0.44	0.842	62.84	35.97	7.97
E35	0.39	0.696	67.31	38.10	7.25
E40	0	0.635	58.29	37.09	7.23

図 3-4 に、各配合の圧縮強度、供試体の寸法と質量から算出した見かけの充填率および γ_{180} を示す。 γ_{180} および見かけ充填率は概ね同様の傾向を示している。また、E25 の圧縮強度は、他の配合と比べて顕著に低い。これは、前述のとおり、E25 の締固め性が他と比べ顕著に低いこと、この結果、 γ_{180} および見かけ充填率が顕著に低いことから、供試体の締固めが不十分であることによると考えられる。

γ_{180} は締固め性試験の際に算出されるため、フレッシュコンクリートのときの充填率である。一方、見かけ充填率は養生後の供試体の寸法および質量を用いて算出する。コンクリートの水和が進み質量が増加すると見かけ充填率が増加する。このため、 γ_{180} より見かけ充填率の方が高い傾向となるものと考えられる。

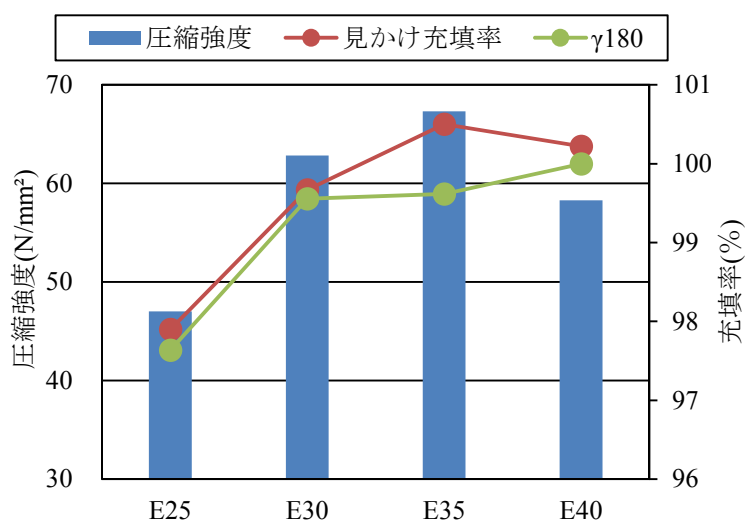


図 3-4 圧縮強度と充填率

以降、各機械的性質の関係を整理する。今後の各試験結果を整理したグラフでは、今年度の検討で得られた結果を塗りつぶしのプロット（E および E25）で、過去の検討で得られた結果（E1, E2 および E3）^{3-2) ~ 3-4)} を白抜きのプロットで示す。なお、各凡例の配合条件は表 3-9 に示すとおりである。

表 3-9 各凡例の配合条件

凡例	Km	W(kg)	目標Air(%)
E	1.60	110	2.5
E1	1.60	125	0
E2	1.60	125	2.5
E3	1.50	110	2.5

図 3-5 にセメント空隙比と圧縮強度の関係を示す。セメント空隙比が大きくなると、圧縮強度が増加することがわかる。また、配合条件が若干異なっても、同じ結合材を用いている場合、この配合条件の範囲内では、セメント空隙比説に基づく圧縮強度の整理が可能であると考えられる。

図 3-6 に圧縮強度と静弾性係数の関係を、図 3-7 に圧縮強度と曲げ強度の関係をそれぞれ示す。圧縮強度と静弾性係数の関係は標準示方書に示される関係の延長線上と比較して、圧縮強度と曲げ強度の関係は標準示方書舗装編に示される関係と比較して、それぞれやや上方に打点されているが、概ね同等に扱えるといえる。また、各配合とも転圧コンクリート舗装用途の超硬練りコンクリートの設計曲げ強度（4.5N/mm²）を十分に満足しており、強度面での問題はないと考えられる。

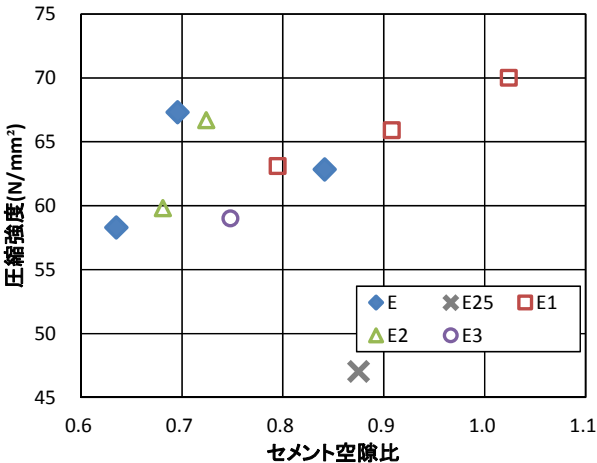


図 3-5 セメント空隙比と圧縮強度の関係

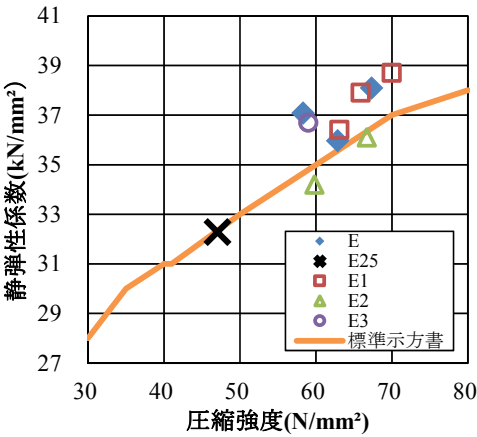


図 3-6 圧縮強度と静弾性係数の関係

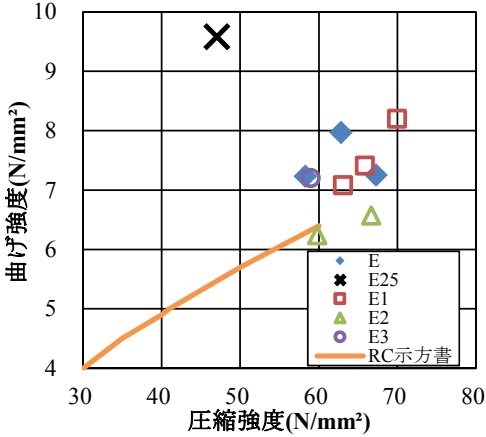


図 3-7 圧縮強度と曲げ強度の関係

(3) 凍結融解抵抗性

表 3-10 に 300 サイクル時の相対動弾性係数を示す。300 サイクル時の相対動弾性係数は、最も低い配合である E25 でも 92%であり、非常に高い値である。このことから、過去の検討結果と同様に、NaCl3%溶液中という極めて厳しい凍結融解試験においても、2.5%程度の連行空気を導入することによって、高い対凍害性を確保することができると考えられる。非常に高い水準での比較だということを前提に、詳細に相対動弾性係数を比較する。供試体の充填が不十分であると、相対動弾性係数の減少の程度が大きくなると考えられ、E25 はこれに該当すると推察される。しかし、同程度の締固め性を有する E35 と E40 の水準で比較すると、E35 の方が相対動弾性係数の減少の経過が穏やかである。これらのことから、供試体の充填が十分にできるなら、水セメント比を減少させることで、対凍害性を高めることができると考えられる。

図 3-8 に質量減少率の経時変化を示す。水セメント比の減少に伴って質量減少率が小さくなり、スケーリング抵抗性が向上していることがわかる。これは、水セメント比を減少させることによって、コンクリート表層の強度が増加したこと、およびコンクリートに内在する水が少なくなったことによるものと推察される。また、供試体の締固めが十分にできなかった E25 でも同様の傾向であることから、スケーリング抵抗性はコンクリート表層の強度と強い関連性があると推察される。

表 3-10 300 サイクル時の相対動弾性係数

配合名	E25	E30	E35	E40
相対動弾性係数(%)	92	97	98	94

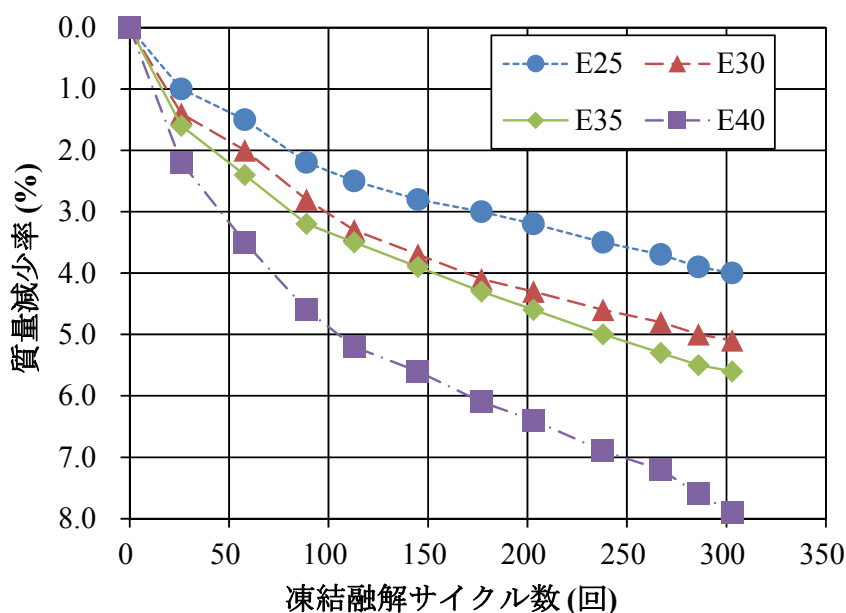


図 3-8 質量減少率の経時変化

3.1.5 水セメント比を変化させた場合のまとめ

3.1 節では、エコセメントを用いた超硬練りコンクリートの水セメント比を変化させ、このことがスケーリング抵抗性に及ぼす影響に関して検討を行った。また、基礎特性として締固め性および機械的性質に関しても検討を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

1. エコセメントを用いた超硬練りコンクリートの締固め性は、水セメント比を減少させることによって若干低下するものの、締固め性に対する水セメント比の影響は顕著ではない。本研究の配合条件においては、水セメント比 30%程度以上に相当する水量があれば、十分に高い締固め性を有したコンクリートになる。
2. エコセメントを用いた超硬練りコンクリートの圧縮強度は、締固めが十分に行われていれば、セメント空隙比によって制御できる。また、既往の関係を用いて、圧縮強度から静弾性係数および曲げ強度の導出が、安全側で可能である。本研究の範囲では、最も低強度であった水セメント比 40%の場合でも、舗装用途として十分に高強度のコンクリートとなる。
3. エコセメントを用いた超硬練りコンクリートに 2.5%程度の連行空気を導入することで、凍結防止剤環境下であっても、十分な耐凍害性を有する。
4. エコセメントを用いた超硬練りコンクリートの水セメント比を減少させることにより、スケーリング抵抗性が向上する。

3.2 混和材を用いたエコセメント超硬練りコンクリートのスケーリング抵抗性

3.2.1 はじめに

3.1 節では、エコセメントを用いた超硬練りコンクリートの水セメント比を減少させた場合の基礎特性について検討を行った。この結果、水セメント比の減少によりスケーリング抵抗性が向上するものの、十分な締固めを考慮すると、水セメント比 30%程度までの減少に留める必要があるとわかった。

そこで本節では、水セメント比を変化させずにスケーリング抵抗性を向上させるため、粉末度の異なる混和材を使用した場合の検討を行った。エコセメントの一部を混和材で置換した超硬練りコンクリートを作製し、締固め性、機械的性質および NaCl3%溶液下での凍結融解抵抗性について考察を行った。

3.2.2 実験方法

(1) 使用材料

混和材は、エコセメントより粒度の細かい高炉スラグ微粉末（粉末度 6000cm²/g, BFS）および石灰石微粉末（粉末度 7000cm²/g, Ls）を用いた。これらの粉体を適切に混合することで、粉体粒子の密充填を達成し、凍結防止剤環境下でのスケーリング抵抗性に影響する表層強度の改善を念頭においた選択である。

高炉スラグ微粉末および石灰石微粉末は、表 3-11 および表 3-12 に示す性質を持つものを使用した。セメントは、前出の 3.1.2 (1) 表 3-1 で示したエコセメントおよび表 3-13 に示す普通ポルトランドセメント（NC）を使用した。骨材および混和剤は、それぞれ前出の 3.1.2 (1) 表 3-2、表 3-3 で示したものと同一である。

表 3-11 高炉スラグ微粉末の性質

密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	活性度指数(%)		フロー値 比(%)	酸化マグネ シウム(%)	三酸化 硫黄(%)	強熱減量 (%)	塩化物 イオン(%)
		材齢7日	材齢28日					
2.91	6480	94	111	100	6.30	0.00	0.05	0.005

表 3-12 石灰石微粉末の性質

密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	粒度			圧縮強度比 (%)		化学成分 (%)				水分 (%)	メチレンブルー 吸着量 (mg/g)
		150μm 通過分	75μm 通過分	45μm 通過分	7d	28d	CaCO ₃	MgO	SO ₃	Al ₂ O ₃		
2.71	7170	100	99.2	95.5	145	124	98.7	0.22	0.00	0.08	0.05	0.08

表 3-13 普通ポルトランドセメントの性質

密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	凝結			安定性 (パット法)	圧縮強度 (N/mm ²)			化学成分 (%)	
		水量 (%)	始発 (h-min)	終結 (h-min)		3d	7d	28d	全アルカリ	塩化物イオン
3.16	3210	27.1	2-10	3-30	良	28.2	44.1	62.1	0.60	0.018

(2) コンクリートの配合

表 3-14 にコンクリートの計画配合を示す。高炉スラグ微粉末および石灰石微粉末は結合材 (Binder) として配合計算に含めている。配合記号のアルファベットは置換する混和材料を表し (B : Blast Furnace Slag 高炉スラグ微粉末, L : Limestone Powder 石灰石微粉末), 付随する数値が, それぞれの混和材料の質量置換率 (%) を表している。

BFS シリーズは, エコセメントの一部を高炉スラグ微粉末で質量置換し, その置換率を 20%, 40%, 60% の 3 水準としたものである。Ls シリーズは, BFS シリーズを基に, さらに結合材質量の 5% を石灰石微粉末で質量置換している。置換する混和材およびその置換率を変えることで, 計 6 水準のコンクリートを作製した。配合条件は 3.1 節と同様 ($K_m = 1.60$, 単位水量 = 110 kg/m^3 , 目標空気量 = 2.5%) とし, AE 助剤の使用量を調整することで空気量を調整した。水結合材比 (W/B) は 35% で一定とした。

表 3-15 に実測空気量に基づいて再計算したコンクリートの配合を示す。3.1 節と同様に, 連行空気体積をセメントペースト体積の一部としている。

なお, 今回用いた混和材はエコセメントよりも密度が小さいため, 混和材の置換率を上げると K_p が増加するはずである。しかし, 本研究では連行空気をセメントペーストの一部としているため, 実測空気量次第で K_p の値が変化することに留意する必要がある。

表 3-14 コンクリートの計画配合

区分	配合記号	W/B (%)	K_m	K_p	目標 Air (%)	単位量 (kg/m^3)						主剤 (B×%)	助剤 (B×%)
						W	EC	BFS	Ls	S	G		
BFS	B20	35	1.60	1.70	2.5	110	251	63	0	718	1284	0.125	0.027
	B40			1.72			189	126		714			0.024
	B60			1.75			126	189		710			0.032
Ls	L5-B20	35	1.60	1.71	2.5	110	236	63	16	716	1284	0.125	0.026
	L5-B40			1.74			173	126		712			0.028
	L5-B60			1.76			110	189		707			0.120

表 3-15 実測空気量に基づいて再計算したコンクリートの配合

区分	配合記号	W/B (%)	K_m	K_p	実測 Air (%)	単位量 (kg/m^3)						主剤 (B×%)	助剤 (B×%)
						W	EC	BFS	Ls	S	G		
BFS	B20	35	1.62	1.74	3.1	109	250	63	0	714	1277	0.125	0.027
	B40		1.59	1.70	2.2	110	189	126	0	716	1288		0.024
	B60		1.59	1.73	2.2	110	126	189	0	712	1288		0.032
Ls	L5-B20	35	1.60	1.72	2.6	110	236	63	16	716	1283	0.125	0.026
	L5-B40		1.59	1.70	2.0	110	174	126	16	715	1290		0.028
	L5-B60		1.59	1.74	2.2	110	110	189	16	709	1288		0.120

また、混和材使用による影響を検討するため、配合条件を同じ（ $K_m=1.60$ ，単位水量＝ 110kg/m^3 ，目標空気量＝ 2.5% ， $W/C=35\%$ ）として，結合材にエコセメントのみを使用したコンクリート（E35）と，普通ポルトランドセメントのみを使用したコンクリート（N35）も作製した。表 3-16 にコンクリートの計画配合を，表 3-17 に実測空気量に基づいて再計算したコンクリートの配合を示す。なお，E35 は 3.1 節で用いた水準の再掲である。

表 3-16 コンクリートの計画配合(比較用)

配合 記号	W/C (%)	K_m	K_p	目標 Air (%)	単位量(kg/m^3)					AE減水剤 ($C\times\%$)	AE助剤 ($C\times\%$)
					W	EC	NC	S	G		
E35	35	1.60	1.68	2.5	110	314	0	722	1284	0.125	0.027
N35	35	1.60	1.68	2.5	110	0	314	723	1284	0.125	0.014

表 3-17 実測空気量に基づいて再計算したコンクリートの配合(比較用)

配合 記号	W/C (%)	K_m	K_p	実測 Air (%)	単位量(kg/m^3)					AE減水剤 ($C\times\%$)	AE助剤 ($C\times\%$)
					W	EC	NC	S	G		
E35	35	1.62	1.72	3.0	109	313	0	718	1277	0.125	0.027
N35	35	1.60	1.67	2.4	110	0	315	724	1285	0.125	0.014

(3) 練混ぜおよび供試体の作製方法

練混ぜおよび供試体の作製方法は，3.1.2 (3) および (4) で示した内容と同一である。結合材の計量は材料ごとに行い，練混ぜ前にあらかじめ混合してからミキサに投入した。

3.2.3 試験方法

(1) 超硬練りコンクリートの空気量測定

超硬練りコンクリートの空気量の測定は、3.1.3 (1) で示した方法と同様に行った。本節における検討で使用したワシントンエアメータの容積は、7.018L である。

実測の空気量に基づいて再計算したコンクリートの配合は、表 3-15 および表 3-17 (3.2.2 (2)) に示したとおりである。充填率 100%に相当する試料質量の算出には、表 3-15 および表 3-17 の配合から得られる単位容積質量を使用した。

(2) 締固め性試験

締固め性試験は、3.1.3 (2) に示したとおりである。 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の型枠に充填率 100%に相当する質量の採取をする際、表 3-15 および表 3-17 の配合から得られる単位容積質量に基づいて、試料の採取を行った。

(3) 機械的性質

圧縮強度、静弾性係数および曲げ強度の測定は、3.1.3 (3) a) に示したとおりである。セメント空隙比の算出は、3.1.3 (3) b) に示したとおりに行った。

(4) 凍結融解試験

凍結融解試験は 3.1.3 (4) で示した方法と同様に行った。すなわち、供試体は、凍結防止環境を想定した NaCl3%溶液中で、JIS A 1148 の凍結融解サイクルを受けることとなる。

3.2.4 結果および考察

(1) 締固め性

表 3-18 に締固め性試験によって得られた指標の一覧を，表 3-19 に締固め曲線を形成する各係数の一覧を，図 3-9 に締固め曲線を示す。

表 3-18 締固め性試験の各指標

配合記号	Ci (%)	Cf (%)	E98 (J/L)	Ce
B20	87.3	100.1	41.3	0.975
B40	86.5	99.9	41.4	1.252
B60	84.1	100.4	46.0	1.250
L5-B20	85.6	99.6	63.8	1.003
L5-B40	84.5	99.8	48.8	1.203
L5-B60	84.4	99.9	45.1	1.149
E35	85.7	100.1	77.1	0.942
N35	85.4	99.5	114.9	0.974

表 3-19 締固め曲線の各係数

配合記号	c	a	b	d	単位容積質量(kg/L)
B20	87.30	12.8236	0.1155	0.7477	2.413
B40	86.45	13.4248	0.1660	0.6658	2.429
B60	84.10	16.3347	0.1176	0.7429	2.425
L5-B20	85.55	14.0290	0.1111	0.7185	2.423
L5-B40	84.45	15.3220	0.1178	0.7497	2.431
L5-B60	84.40	15.4870	0.1062	0.7904	2.423
E35	85.70	14.3861	0.1115	0.6563	2.417
N35	85.35	14.1897	0.1358	0.5957	2.434

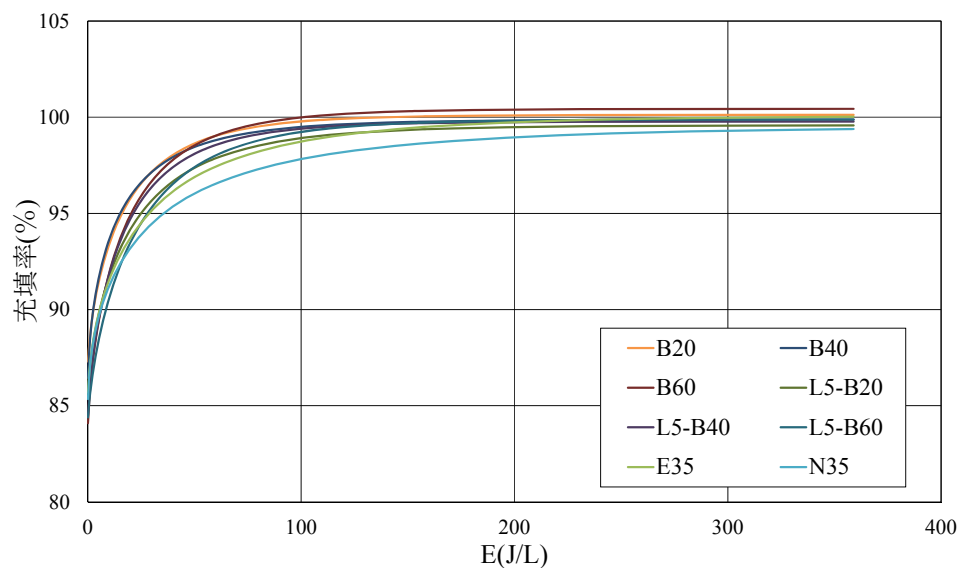


図 3-9 各配合の締固め曲線

図 3-10 に各配合の E98 を示す。N35 以外の配合は E98 が 100J/L 以下となっており、非常に高い締固め性を有している。E35 と比較して BFS シリーズおよび Ls シリーズの E98 はさらに低くなり、締固め性が向上することがわかる。これは、エコセメントの一部を混和材で置換したために K_p が高くなったこと、使用した混和材の粒度が細かいため、粉体の充填率が高くなったことによると考えられる。

図 3-11 に各配合の C_i 、 C_f および C_e を示す。BFS シリーズ、Ls シリーズともに置換率が大きくなると C_i が減少し、 C_e が増加している。これは、セメントペーストの粘性が高まったために振動前は充填しにくいためと考えられる。また、いずれの配合も C_f が 100% 程度となっており、締固めの観点では適切な材料構成となっていることがわかる。

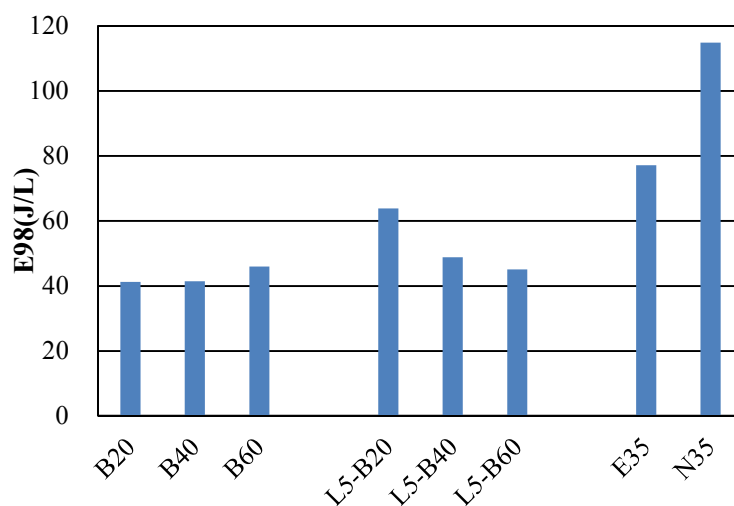


図 3-10 各配合の E98

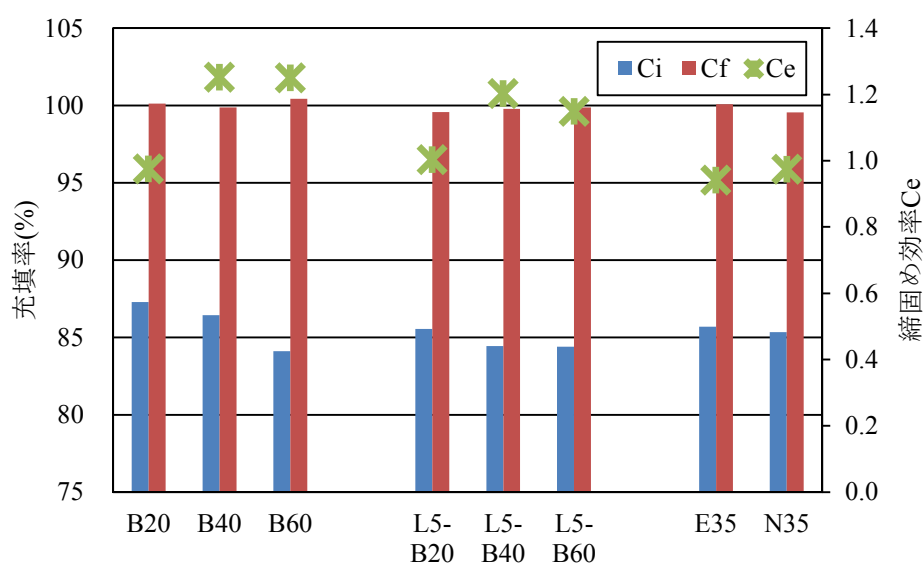


図 3-11 各配合の C_i 、 C_f および C_e

(2) 機械的性質

表 3-20 に機械的性質の試験結果の一覧を示す。

表 3-20 機械的性質の試験結果

区分	配合 記号	空隙率(100- γ_{180}) (%)	結合材 空隙比	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)
BFS	B20	0	0.722	62.43	39.00	7.75
	B40	0.20	0.771	65.11	38.61	8.43
	B60	0.00	0.795	62.50	40.69	8.21
Ls	L5-B20	0.16	0.745	67.66	40.69	8.30
	L5-B40	0	0.803	69.26	40.16	9.29
	L5-B60	0	0.801	67.05	38.91	8.03
-	E35	0.39	0.696	67.31	38.10	7.25
-	N35	0.81	0.702	76.25	38.75	8.12

図 3-12 に圧縮強度、供試体の寸法と質量から算出した見かけ充填率および γ_{180} を示す。BFS シリーズ、Ls シリーズともに見かけ充填率と γ_{180} の値の傾向が概ね一致している。また、普通ポルトランドを用いた N35 と比較して、エコセメントを用いた配合は充填率が向上することがわかる。そして、高炉スラグ微粉末の置換率が高くなると、充填率が高くなる傾向にある。圧縮強度は、高炉スラグ微粉末の置換率が 40%のときに高くなる傾向を示すが、ほぼ同程度の強度水準である。理論的には、エコセメントより粒度の細かい高炉スラグ微粉末および石灰石微粉末の混入は、微粉末効果による水和の促進や固体粒子の密充填による強度増進効果が考えられるが、一方で、初期強度発現が若干遅い高炉スラグ微粉末³⁻⁵⁾

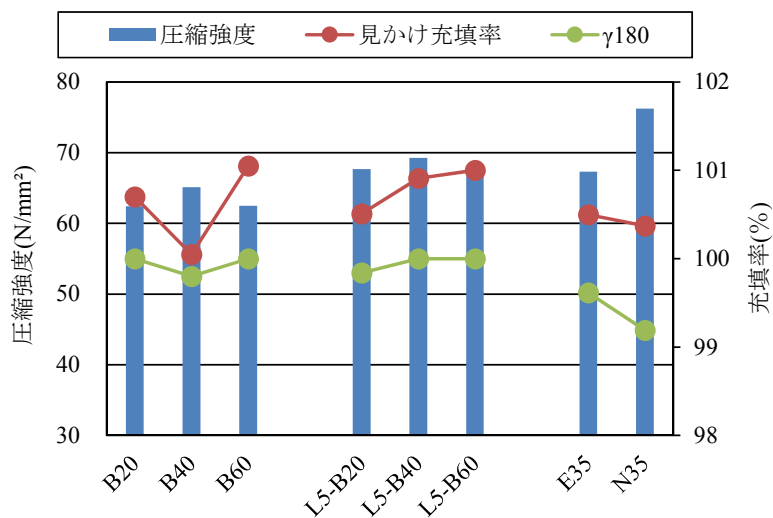


図 3-12 圧縮強度と充填率

の混入量の影響により強度が低下する可能性もある。今回の検討の範囲では、高炉スラグ微粉末の置換率による圧縮強度の最大値は明確ではないが、上記の両影響により、高炉スラグ微粉末の置換率には、圧縮強度を最大とする値がある可能性も高い。

図 3-13 に結合材空隙比と圧縮強度の関係を示す。BFS シリーズ、Ls シリーズともに圧縮強度に対する結合材空隙比の影響が小さい。また、エコセメントを用いた配合は、普通ポルトランドセメントを用いた N35 の約 90% 程度の圧縮強度となった。そして、E35 と比較して Ls シリーズは同程度の圧縮強度であったが、BFS シリーズの圧縮強度が若干劣る結果となった。しかし、最も低強度なものでも 60N/mm^2 程度以上の圧縮強度を有しており、全体的に高い水準での比較となっている。

図 3-14 に圧縮強度と静弾性係数の関係を、図 3-15 に圧縮強度と曲げ強度の関係をそれぞれ示す。エコセメントの一部を、高炉スラグ微粉末、またはこれに石灰石微粉末を加えた結合材で置換することによって、圧縮強度に対する静弾性係数および曲げ強度の値が大きくなる傾向がみられる。また、E35 および BFS シリーズと比較して、Ls シリーズの曲げ強度が若干大きい傾向にある。そして、各配合とも転圧コンクリート舗装用途の超硬練りコンクリートの設計曲げ強度 (4.5N/mm^2) を十分に満足している。

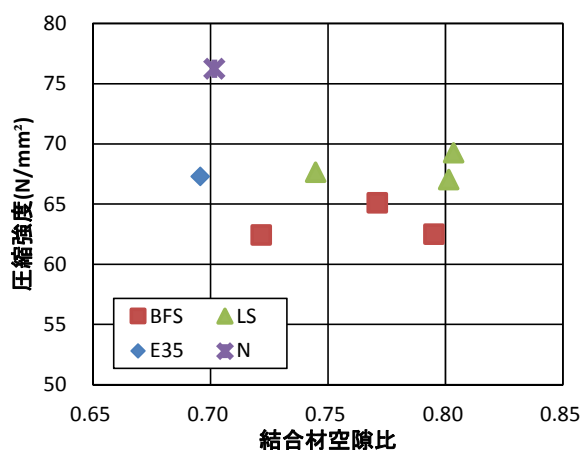


図 3-13 結合材空隙比と圧縮強度の関係

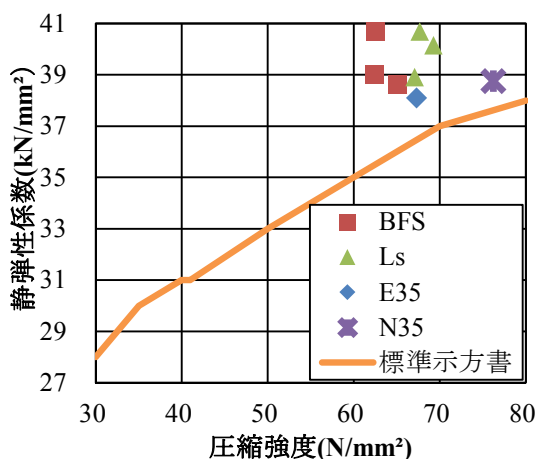


図 3-14 圧縮強度と静弾性係数の関係

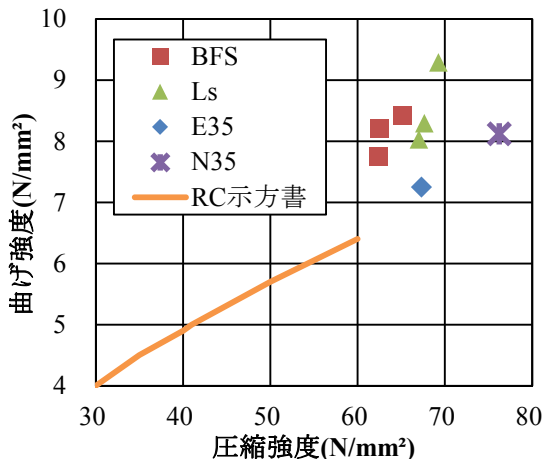


図 3-15 圧縮強度と曲げ強度の関係

(3) 凍結融解抵抗性

表 3-21 に 300 サイクル時の相対動弾性係数を示す。300 サイクル時の相対動弾性係数は、最も低い配合でも 97%であり、NaCl3%溶液中という極めて厳しい凍結融解試験においても、凍結融解に対する高い耐久性を有しているとわかる。また、相対動弾性係数に対して、エコセメントの一部を高炉スラグ微粉末や石灰石微粉末で置換することによる影響はみられないことから、エコセメント単体を用いたときと同様に、2.5%程度の連行空気を導入することで凍害性を向上させることができると考えられる。

図 3-16 に質量減少率の経時変化を示す。エコセメントの一部を高炉スラグ微粉末および石灰石微粉末で置換することによって、質量減少率が小さくなり、スケーリング抵抗性が向上していることがわかる。また、置換率が 0~60%においては、混和材の置換率が高いほどスケーリング抵抗性が向上しており、BFS シリーズ、Ls シリーズの双方において置換率を 40%以上にしたとき、N35 を上回るスケーリング抵抗性を有しているということがわかる。また、BFS シリーズと Ls シリーズを比較して、特に混和材の置換率が低いときに、BFS シリーズの方が質量減少率を抑制できる結果となったことから、高炉スラグ微粉末がスケーリング抵抗性の向上に効果的に作用していることが考えられる。これらの要因としては、高炉スラグ微粉末の水和反応、これを助長する石灰石微粉末の混入などにより、組織が緻密化して表層強度が向上していることが考えられる。また、普通ポルトランドセメント量の質量比 45%を高炉スラグ微粉末で置換したとき、普通ポルトランドセメント単体のときよりスケーリングが促進されるという報告もあることから³⁻⁶⁾、高炉スラグ微粉末の反応のための基材のセメントとしてのエコセメントの優位性が示されているものと考えられる。

表 3-21 300 サイクル時の相対弾性係数

配合名	B20	B40	B60	L5-B20	L5-B40	L5-B60	E35	N35
相対動弾性係数(%)	98	98	98	98	98	97	98	97

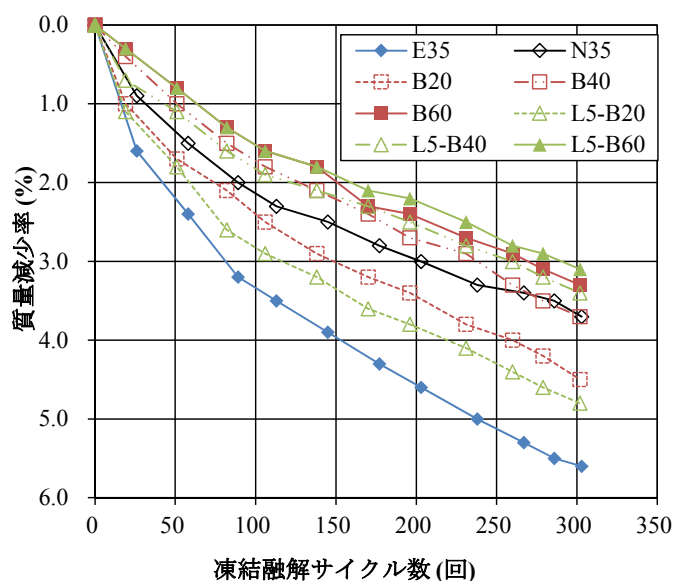


図 3-16 質量減少率の経時変化

3.2.5 混和材を使用した場合のまとめ

3.2節では、エコセメント超硬練りコンクリートにおいて、エコセメントの一部を高炉スラグおよび石灰石微粉末で置換し、このことがスケーリング抵抗性に及ぼす影響についての検討を行った。また、基礎特性として締固め性および機械的性質についても検討を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

1. エコセメントの一部をエコセメントより粒度の細かい高炉スラグ微粉末や石灰石微粉末で置換することで、締固め性はさらに向上する。
2. 結合材空隙比と圧縮強度の間には、顕著な相関はない。また、圧縮強度に対する静弾性係数および曲げ強度の値が、各示方書の関係と比較して大きく、特に Ls シリーズにおいてこの傾向が顕著である。
3. エコセメントの一部を高炉スラグ微粉末や石灰石微粉末で置換し、2.5%程度の連行空気を導入することで、NaCl3%溶液中という極めて厳しい環境下の凍結融解試験においても、高い耐久性を有したコンクリートになる。
4. エコセメントの一部を高炉スラグ微粉末や石灰石微粉末で置換することにより、スケーリング抵抗性が顕著に向上する。この結果には、高炉スラグ微粉末の影響が顕著である。

3.3 BET 比表面積試験による平均細孔径

3.3.1 はじめに

エコセメントを用いた超硬練りコンクリートの凍結防止剤環境下でのスケーリング抵抗性について、3.1 節では、水セメント比を減少させた場合の検討を、3.2 節では、混和材による粉体粒子の密充填効果による改善に着目した検討を、それぞれ行った。この結果、双方の方法において、スケーリング抵抗性は顕著に向上するという結果を得た。

本節では、この要因を定量的に表現するため、BET 比表面積試験による平均細孔径に着目し、考察を行った。

3.3.2 試験方法概要

BET 法は、比表面積測定法の 1 つである。固体壁面に大きさのわかった分子やイオンを吸着させて、その占有面積から試料の比表面積を測定する方法で、Brunauer, Emmett および Teller により導かれた BET 式を用いるためこのように呼ばれている。固体壁面（吸着媒）の表面積は、吸着ガス分子が吸着媒に吸着してその全表面に単分子膜を形成しているとすると、吸着ガス分子 1 個が占めている面積（ cm^2 ）に単分子層を形成している全分子数をかけることにより求めることができる。今回の試験における吸着ガス分子には、窒素分子を用いた。

BET 比表面積が大きいと、細孔壁面の面積が大きいことを表す。しかし、細孔の体積が大きいこと、細孔の数が多いことは明確に表せない。このため、BET 比表面積試験による細孔径の分布が、データの解釈のために必要となる。今回はセメント硬化体について検討していることから、細孔径の分布はそれほど変化しないとし、BJH 法によって平均細孔径を導出した。この平均細孔径によって、組織が疎か密かの判断ができる。

3.3.3 結果および考察

図 3-17 に BET 比表面積試験からの平均細孔径と 300 サイクル時の質量減少率の関係を示す。平均細孔径が小さくなると 300 サイクル時の質量減少率が直線的に小さくなることがわかる。このことから、平均細孔径が小さい、すなわち組織が密になると、スケーリング抵抗性が向上すると考えられる。

E35 の平均細孔径は、N35 と比較して大きく、エコセメントを用いることで組織が若干疎となっていることが推察される。しかし、水セメント比を減少させることによる粉体量の増加、および粉末度の異なる混和材を用いることによる粉体の密充填効果により、平均細孔径は小さくなり、組織が緻密になっていると考えられる。

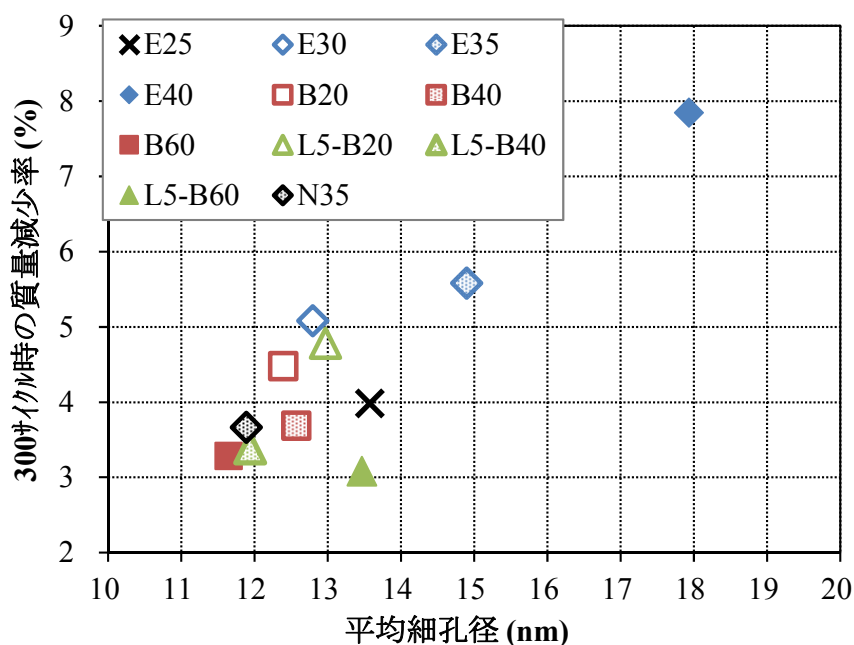


図 3-17 平均細孔径と 300 サイクル時の質量減少率の関係

3.4 3章のまとめ

第3章では、エコセメントを用いた舗装用超硬練りコンクリートの凍結防止剤環境下でのスケーリング抵抗性の向上を目的に、水セメント比を減少した場合および混和材として高炉スラグ微粉末および石灰石微粉末を使用した場合の基礎的な特性について検討を行った。さらに、スケーリング抵抗性と BET 比表面積試験からの平均細孔径との関係を示し、考察を行った。この結果、以下のことが明らかとなった。

1. 水セメント比を減少させた場合の締固め性は、若干低下するものの、本研究の配合条件においては、水セメント比 30%程度以上に相当する水量があれば、十分な締固め性を有する。
2. 水セメント比を減少させた場合の圧縮強度は、締固めが十分に行われていれば、セメント空隙比によって制御できる。また、既往の関係を用いて、圧縮強度から静弾性係数および曲げ強度の導出が可能である。本研究の範囲では、最も低い強度であった水セメント比 40%の場合であっても、舗装用途として十分な強度となる。
3. 2.5%程度の連行空気の導入により、十分な耐凍害性を有する。また、水セメント比を減少させることで、スケーリング抵抗性が向上する。
4. 混和材としてエコセメントより粒度の細かい高炉スラグ微粉末および石灰石微粉末を使用することで、締固め性はさらに向上する。
5. エコセメントの一部を高炉スラグ微粉末および石灰石微粉末で置換した場合、圧縮強度に対する静弾性係数および曲げ強度の値が、各示方書の関係と比較して大きく、特に両混和材を併用した場合においてこの傾向が顕著である。
6. 混和材として高炉スラグ微粉末および石灰石微粉末を使用した場合であっても、2.5%程度の連行空気の導入により、高い耐久性を有したコンクリートとなる。また、両混和材の使用により、スケーリング抵抗性が顕著に向上する。この結果には、高炉スラグ微粉末の影響が顕著である。
7. 水セメント比を減少させた場合、および混和材として高炉スラグ微粉末および石灰石微粉末を使用した場合について、BET 比表面積からの平均細孔径が小さくなると、凍結融解 300 サイクル時の質量減少率が直線的に小さくなる。

参考文献

- 3-1) 佐藤憲雄ほか：舗装用転圧コンクリートの配合指標値に関する基礎的実験，セメント・コンクリート論文集，No.46，pp916-921，1992
- 3-2) 木村順哉，上野敦，宇治公隆，梶尾聡：エコセメントおよび再生粗骨材の舗装用超硬練りコンクリートへの適用性，セメント・コンクリート論文集，No.64，pp.251-256，2010
- 3-3) 藤野祐樹，上野敦，宇治公隆，大野健太郎，石田征男：エコセメントと再生粗骨材の超硬練りコンクリートへの適用性に関する検討，土木学会年次学術講演会講演概要集 第 5

部, Vol.66, pp.1199-1200, 2011

3-4) 木村順哉, 上野敦, 石田征男, 宇治公隆: エコセメントを用いた舗装用超硬練りコンクリートの凍結融解抵抗性に関する基礎検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, 2012

3-5) 長塩靖祐, 梶田佳寛: エコセメントを用いたコンクリートの長期強度発現に及ぼす高炉スラグ微粉末混合の影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 74 巻, 第 641 号, pp.117-1193, 2009

3-6) 楠貞則, 池翰相, 添田政司, 大和竹史: 凍結融解作用による各種混和剤を用いたコンクリートのスケーリング特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, 2007

第 4 章

エコセメントと混和材の混合粉体を結合材とした 硬化体の基礎特性

第 4 章 エコセメントと混和材の混合粉体を結合材とした 硬化体の基礎特性

第 4 章では、エコセメントを用いた舗装用超硬練りの凍結防止剤環境下でのスケーリングが顕著とならないような材料構成を基礎的に検討することを目的に、結合材粒子の実積率に着目し、粒径（粉末度）の異なる高炉スラグ微粉末の混和による物理的な充填構造の変化、およびモルタルを対象とした媒体相の基礎特性について検討を行った。

4.1 粉体粒子の充填構造に関する基礎検討

4.1.1 はじめに

3.2 節の検討において、エコセメントを用いた超硬練りコンクリートの凍結防止剤環境下でのスケーリング抵抗性は、エコセメントより粒度の細かい高炉スラグ微粉末（粉末度 $6000\text{cm}^2/\text{g}$ ）および石灰石微粉末（粉末度 $7000\text{cm}^2/\text{g}$ ）を混合することで顕著に向上した。そして、3.3 節において、スケーリング抵抗性が高い水準は、平均細孔径が小さくなり、緻密な組織となった。この一因として、粉体粒子の密充填効果が考えられる。

本質的に、粉体材料の密充填構造による強度増加については、余剰水膜厚さの増加により流動性が向上することから、水量を低減し、これにより粉体粒子間距離を小さくすることにある。しかし、最終的には超硬練りコンクリートを対象とするため、単位水量の低減は締固め性への悪影響を生じる可能性が高い。このため、水量の低減は行わず水結合材比（W/B）を一定とした条件で、粉体粒子の充填構造を変化させることとした。

混合粉体を構成する混和材の密度を、基材となるエコセメントよりも小さなものとすることで、同じ W/B であっても混和材の使用によって粉体の粒子間距離は小さくなる。このことにより、超硬練りコンクリートの締固め性を維持したまま、粉体粒子の密充填構造を作ることができ、強度も増加すると考えられる。

そこで本節では、エコセメントを基材とし、これより粉末度の高い高炉スラグ微粉末で置換した場合の粉体粒子の充填構造変化に関して、基礎的な検討を行った。エコセメントを基材とし、これより粉末度の高い混和材を置換して行くと、基材粒子が生み出す空隙を、細粒の混和材が充填するため、混合粉体の充填率は増加していく。しかし、混和材の置換率がある値を超えると、基材粒子が生じさせる空隙が減少する上、混和材粒子が生成する空隙が増加し、混合粉体の空隙率は増加していく。これは、コンクリートにおける最適 s/a とも共通する考え方である。すなわち、この場合の混和材の置換率には、混合粉体の実積率を最大とする値が存在することとなる。この置換率を実験的に検討するため、タッピング試験、液相利用試験、およびセメントペーストの単位容積質量による試験を行った。

4.1.2 実験方法

(1) 使用材料

ベースセメントは、表 4-1 に示す粉末度 4030 cm²/g の普通エコセメント（EC）を使用した。これを置換する高炉スラグ微粉末には、表 4-2 に示す粉末度 6360 cm²/g（高炉スラグ微粉末 6000，BFS6）および 8440 cm²/g（高炉スラグ微粉末 8000，BFS8）のものを使用した。

表 4-1 普通エコセメントの性質

密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	凝結			安定性 (パット法)	圧縮強度 (N/mm ²)			化学成分 (%)	
		水量 (%)	始発 (h-min)	終結 (h-min)		3d	7d	28d	全アルカリ	塩化物イオン
3.15	4030	27.3	2-38	4-25	良	28.2	43.3	58.6	0.49	0.040

表 4-2 高炉スラグ微粉末の性質

記号	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	活性度指数(%)		フロー値 比(%)	MgO(%)	SO ₃ (%)	ig.loss (%)	Cl(%)
			材齢7日	材齢28日					
BFS6	2.91	6360	94	109	102	6.17	0.00	0.09	0.006
BFS8	2.91	8440	101	111	92	6.06	0.00	0.13	0.005

(2) エコセメントの高炉スラグ微粉末による置換率

本節での高炉スラグ微粉末によるエコセメントの置換は、後述のタッピング試験では質量置換、液相利用試験およびセメントペーストの単位容積質量による試験では体積置換である。

質量もしくは体積置換率は、後述の試験方法ごとに異なるが、0～100%の範囲で 5～10 水準程度となっている。

4.1.3 試験方法

本節では、以下に示す 3 つの試験方法で、粉体粒子の実積率、もしくは粒子間空隙を生めるための水の体積の情報を定量化した。実積率に関する情報を 3 試験方法により得ようとしたのは、乾燥状態での粉体の混合に不安があったこと、試験結果で密充填となる置換率が得られなかったことによるものである。

(1) タッピング試験

タッピング試験は、粉体試料を容器中でタッピングすることで、試料に鉛直衝撃力を作用させ、充填構造を形成させるものである。

試験では、JIS R 1628（ファインセラミックス粉末のかさ密度試験方法）を参考に、容積約 100mL の金属製容器内への充填を行った。初期のタッピング回数を 600 回とし、その後、試料質量の変化が 0.3%以下となるまで 100 回ずつタッピング回数を追加した。

試験に用いる混合粉体は、乾燥状態で混合されている必要があることから、置換率ごとに精秤したエコセメントおよび高炉スラグ微粉末を、V 字混合器を用いて 1 時間程度攪拌し作製した。また、タッピングには JIS R 5201 に規定のモルタル用フローテーブルを使用した。所定の精度でタッピング充填した試料のかさ密度を、混合粉体としての密度で除して実積率を算出した。

(2) 液相利用試験

液相利用試験は、灯油中での粉体粒子の沈降高さから試料の実積率を得る試験方法である。基本的には既往の研究⁴⁾¹⁾に従い行ったが、粉体の混合は、V 字混合器による乾燥状態での混合に不安定要素を含むため、置換率に応じて精秤したエコセメントおよび高炉スラグに粉末を全量灯油に投入し、灯油中で混合した。

試験では、250mL のメスシリンダーに 150mL の灯油を入れ、これに混合粉体 30cm³に相当する各粉体を少量ずつ投入し、混合粉体として扱えると予想される程度まで、また、粒子間の空気の除去のため、灯油中で十分に攪拌した。粒子が沈降するまで静置し、灯油上面高さおよび混合粉体の沈降体積をメスシリンダーの目盛りから読み取り、式 [4-1] により粉体粒子の実積率を算出した。

$$P.R. = \frac{V_p}{V_s} \times 100 \quad \text{式 [4-1]}$$

ここに、P.R.：実積率（%）

V_p ：混合粉体の絶対容積（mL）

V_s ：混合粉体の沈降体積（かさ密度）（mL）

(3) セメントペーストの単位容積質量による試験

セメントペーストの単位容積質量は、締固めが完全であれば、配合どおりとなる。一方、粉体の粒子間空隙を充填するのに必要な水がなければ、単位容積質量は配合どおりとはならず、粒子間に残存する空隙の影響で小さくなる。この関係を利用して、一定作用力の下で水量を順次変化させていき、セメントペーストの空隙率から、空隙率が 0 となる水粉体体積比の情報を得る試験方法である。すなわち、空隙率が 0 となる水粉体体積比が小さいほど、粉体としては密充填であることを示している。

試験では、十分な作用力を持つと考え、JIS R 5201 に規定のモルタル供試体用の振動台を用いた。この振動台上に、容積約 100mL の金属製容器を設置し、振動台を運転させた状態で、同 JIS に規定のモルタルミキサを用い、水粉体体積比を変化させて作製したセメントペーストを少量ずつ投入し、十分な締固めを行った後、試料の単位容積質量を測定した。その後、式 [4-2] に示すとおり、配合上の単位容積質量と実測の単位容積質量の差から空隙率を算出し、水粉体体積比と空隙率の関係から、空隙率が 0 となる水粉体体積比を計算した。

$$v = \{1 - (k/\rho_w + 1/\rho_B) \times (Z/(k + 1))\} \times 100 \quad \text{式 [4 - 2]}$$

ここに、 v ：空隙率（%）

k ：水結合材比

Z ：実測の単位容積質量（ g/cm^3 ）

ρ_w, ρ_B ：水および混合粉体の密度（ g/cm^3 ）

4.1.4 結果および考察

(1) タッピング試験

図 4-1 に、エコセメントを基材とし、高炉スラグ微粉末 6000 (BFS6) で質量置換した混合粉体を用いた場合の、置換率と実積率の関係を示す。BFS6 による置換率の増加に伴い、混合粉体の実積率が直線的に低下していることがわかる。これは、混合粉体を作製するときに使用した V 字混合器では十分なせん断力を与えることができず、乾燥状態での粉体同士の混合が適切に行えなかったためと考えられる。また、測定時に BFS6 の団粒が確認された。このため、タッピング試験はこれ以降の検討には使用しないこととした。

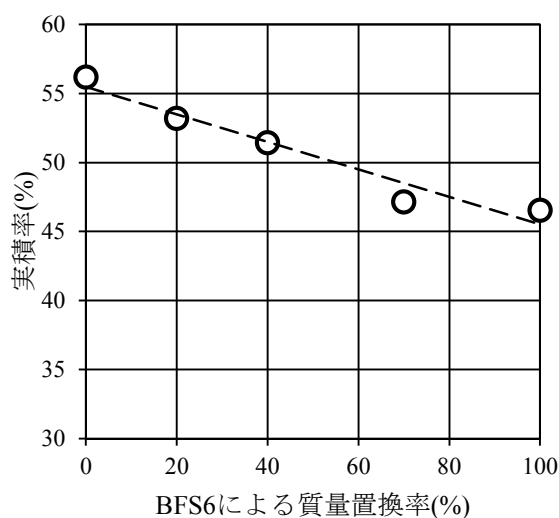


図 4-1 BFS6 による質量置換率と実積率

(2) 液相利用試験

図 4-2 に、エコセメントを基材とし、BFS6 および高炉スラグ微粉末 8000 (BFS8) で体積置換した混合粉体を使用した場合の、置換率と実積率の関係を示す。いずれの BFS を用いた場合でも、体積置換率の増加に伴い、混合粉体の実積率は低下していることがわかる。

本試験では、エコセメントと各 BFS の混合を、液相中で攪拌することにより行っている。このため、乾燥状態での混合と比較して良好な混合状態となっていることが予想されるが、試験結果は、タッピング試験の場合と同様の傾向を示している。ここで、実積率の水準がタッピング試験結果（図 4-1）と液相利用試験結果（図 4-2）で異なっているが、これは気相中と液相中での粉体粒子の堆積機構が異なるためであるので、絶対値の相違は問題とならないと考えられる。

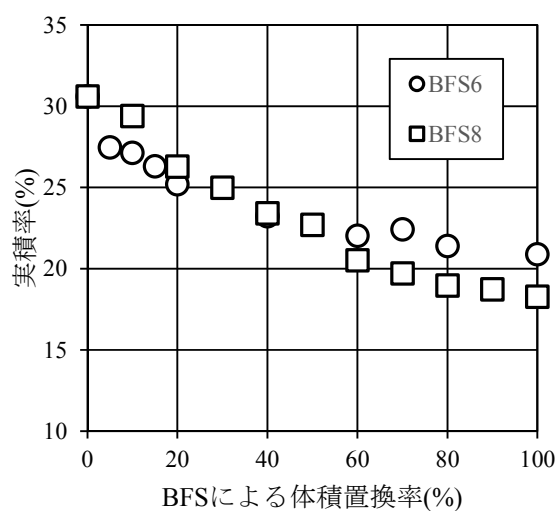


図 4-2 BFS 体積置換率と実積率

(3) セメントペーストの単位容積質量による試験

図 4-3 および図 4-4 に、各 BFS を体積置換率 0～80%の範囲で変化させた混合粉体を用い、水粉体体積比 (V_W/V_B) を変化させたときの、水粉体体積比とセメントペーストの単位容積質量から算出された空隙率の関係を示す。水粉体体積比が大きくなると、空隙率が負となっている。これは、配合上の単位容積質量よりも実測の単位容積質量が大きくなっていることによるもので、水量が粒子間空隙体積よりも顕著に大きいため、粉体粒子が沈降分離することで生じる現象である。そして、水粉体体積比がある値以下となると、空隙率が急激に増大することがわかる。そして、空隙率 0%となる水粉体体積比が、混合粉体ごとに異なることがわかる。従って、各 BFS 体積置換率で空隙率 0%となる水粉体体積比を算出することで、粒子間空隙を満たすのに必要な水粉体体積比の情報が得られることとなる。

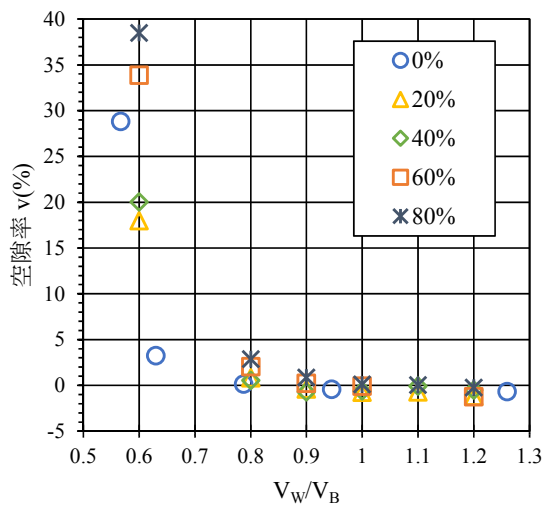


図 4-3 BFS6 における V_W/V_B と空隙率

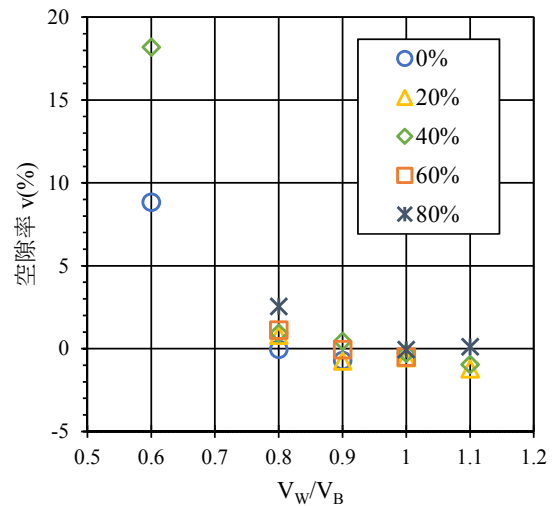


図 4-4 BFS8 における V_W/V_B と空隙率

図 4-5 に、図 4-3 および図 4-4 の関係から、空隙率が 0%となる水粉体体積比を計算（空隙率の正負が入れ替わる 2 つの測定点を直線近似して計算）し、各 BFS の体積置換率との関係で整理したものを示す。いずれの BFS を用いても、体積置換率の増加に伴い、セメントペーストの空隙率を 0%とするための水粉体体積比が増加することがわかる。すなわち、各 BFS でエコセメントを置換することにより、粒子間空隙を埋めるための水の体積が増加していることが示されており、粉体粒子の充填構造としては疎な状態となっていくことがわかる。

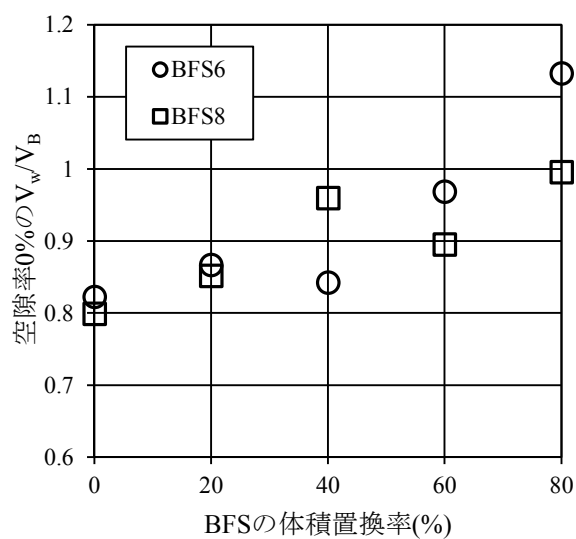


図 4-5 BFS 体積置換率と空隙率 0%の V_w/V_B

4.1.5 粉体粒子の充填構造のまとめ

4.1 節では、3つの試験方法で、エコセメントを2水準の粉末度の高炉スラグ微粉末で置換したときの粉体粒子の実積率に関する検討を行った。

この結果、いずれの試験方法の場合でも、高炉スラグ微粉末の置換率の増大によって密充填の混合粉体とはならない結果となった。これは、図 4-6（レーザ回折式粒度分布測定器（microtrack X100）にて測定）に示すとおり、エコセメントの粒径に対して BFS6 および BFS8 の粒径が比較的近いことによるもの^{4,2)}と考えられる。

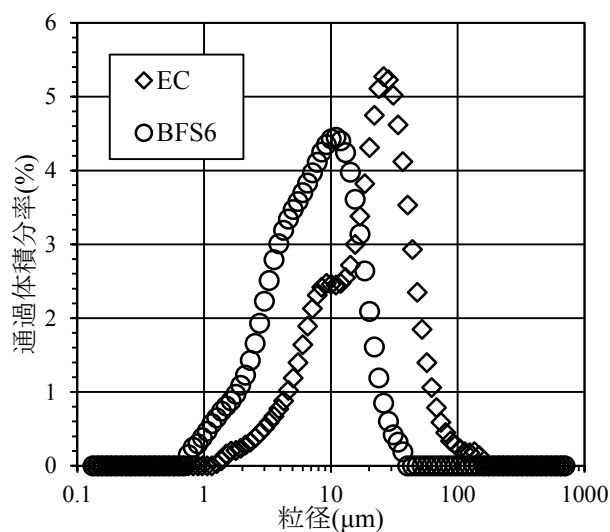


図 4-6 EC と BFS6 の粒度分布

4.2 硬化モルタルの基礎特性

4.2.1 はじめに

4.1 節では、結合材粒子の充填構造に着目し、粉体粒子の充填構造試験を行った。この結果、エコセメントを基材として、高炉スラグ微粉末 6000 および 8000 を混和した混合粉体では、実積率が最大となる高炉スラグ微粉末の置換率が得られなかった。

これを受け、本節では、3.2 節の検討で NaCl3% 溶液中での凍結融解試験においてスケーリング抵抗性が高かった配合について、硬化後の基礎的な検討を行った。モルタルを対象とし、強度および細孔構造について考察を行った。

4.2.2 実験方法

(1) 使用材料

セメントは、前出の 4.1.2 (1) 表 4-1 で示したエコセメントおよび表 4-3 に示す普通ポルトランドセメント (NC) を使用した。これを置換する混和材として、4.1.2 (1) 表 4-2 で示した高炉スラグ微粉末 6000 (BFS6) および表 4-4 に示す粉末度 6970 cm²/g の石灰石微粉末 (Ls) を用いた。細骨材は、JIS R 5201 に規定のセメント強さ試験用標準砂を用いた。

表 4-3 普通ポルトランドセメントの性質

密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	凝結			安定性 (パット法)	圧縮強度 (N/mm ²)			化学成分 (%)	
		水量 (%)	始発 (h-min)	終結 (h-min)		3d	7d	28d	全アルカリ	塩化物イオン
3.16	3300	26.1	2-15	3-15	良	31.6	48.4	66.8	0.55	0.026

表 4-4 石灰石微粉末の性質

密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	粒度			圧縮強度比 (%)		化学成分 (%)				湿分 (%)	メチレンブルー 吸着量 (mg/g)
		150μm 通過分	75μm 通過分	45μm 通過分	7d	28d	CaCO ₃	MgO	SO ₃	Al ₂ O ₃		
2.71	6970	100	99.2	95.1	136	120	98.7	0.22	0.01	0.09	0.06	0.07

(2) モルタルの配合

表 4-5 にモルタルの配合を示す。配合条件は、基本的にはペースト細骨材体積比 (V_{cp}/V_s) を 1.00, 水結合材比 (W/B) を 0.50 とした。配合記号のアルファベットはセメントおよび混和材を表している。(E: エコセメント, B: 高炉スラグ微粉末 (BFS6), L: 石灰石微粉末)

配合記号 E は、エコセメントのみを用いたもので、基準となる配合である。この配合 E のエコセメントを、高炉スラグ微粉末 6000 で 40%質量置換したものを EB40, 60%質量置換したものを EB60 とした。さらに、これらの配合の高炉スラグ微粉末 6000 の単位量を固定し、総結合材量の 5%に相当する石灰石微粉末をエコセメントと置換したものを、それぞれ EB40-L5 および EB60-L5 とした。

EB40 および EB40-L5 については、混和材の置換による効果をより明確にする目的で、水粉体体積比が配合 E と同じ 1.58 となる配合も作製した。これらの配合を、それぞれ EB40-V および EB40-L5-V とした。

また、比較用として、配合 E と同じ条件の普通ポルトランドセメントのみを用いた配合を作製した。この配合を N とした。

表 4-5 モルタルの配合

配合記号	V_{cp}/V_s	W/B	V_w/V_B	単位量(kg/m ³)					
				W	EC	NC	BFS6	Ls	S
E	1.00	50	1.58	306	612	0	0	0	1326
EB40			1.52	302	362	0	242	0	1326
EB60			1.50	300	240	0	360	0	1326
EB40-L5			1.51	301	331	0	241	30	1326
EB60-L5			1.49	299	209	0	359	30	1326
EB40-V		52	1.58	306	355	0	237	0	1326
EB40-L5-V		52	1.58	306	323	0	235	29	1326
N		50	1.58	306	0	612	0	0	1326

(3) 供試体の作製方法

モルタルの練混ぜ、供試体の作製方法は、JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に従って行った。

4.2.3 試験方法

(1) 機械的性質

各配合のモルタルについて、圧縮強度、静弾性係数および曲げ強度を測定した。

圧縮強度試験は、JSCE-G 505-2010「円柱供試体を用いたモルタルまたはセメントペーストの圧縮強度試験方法（案）」、静弾性係数は JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準拠し、 $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の円柱供試体を用いて試験した。また、供試体の縦ひずみは、ゲージ長 30mm のひずみゲージを用いて測定した。

曲げ強度試験は、旧 JIS R 5201 に準拠し、 $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ の角柱供試体を用いて試験した。

供試体は全て打込み翌日に脱型し、材齢 28 日まで 20℃の水中で養生を行った後に、各配合 3 本試験に供した。

(2) 細孔径分布

配合 E、N および EB40-L5 の 3 配合について、水銀圧入法を用いて細孔径分布測定を行った。

曲げ強度試験終了後の供試体の破断面から厚さ約 5mm の平板を切り出し、平板中心部付近のモルタルを切断採取した。採取したモルタル片は、アセトンに 24 時間浸漬して水和を停止後、7 日間真空乾燥を行い、試験に供した。

4.2.4 結果および考察

(1) 機械的性質

a) 圧縮強度

図 4-7 に各モルタルの圧縮強度を示す。エコセメントのみを用いた配合 E の圧縮強度は、普通ポルトランドセメントのみを用いた配合 N と比較して、ほぼ同程度となった。

次に、混和材を使用した配合に着目する。エコセメントを高炉スラグ微粉末 6000 で置換した EB40 および EB60 の圧縮強度は、配合 E とほぼ同程度となるが、配合 EB40 をベースに、水粉体体積比を配合 E と同じにした配合 EB40-V の圧縮強度は、配合 EB40 と比較して顕著に低下していることがわかる。これは、水粉体体積比を一定としているため、エコセメントよりも密度が小さい高炉スラグ微粉末 6000 の質量置換による粉体体積の増加がないためだと考えられる。

また、高炉スラグ微粉末 6000 および石灰石微粉末を併用した配合の圧縮強度は、それぞれ高炉スラグ微粉末 6000 のみを置換使用した配合と比較して、顕著に増加していることがわかる。この傾向は、配合 EB40-L5-V で特に顕著となっている。今回の混和材の置換方法だと、石灰石微粉末の使用によりエコセメント量は減少するが、圧縮強度は明確に増進している結果となった。

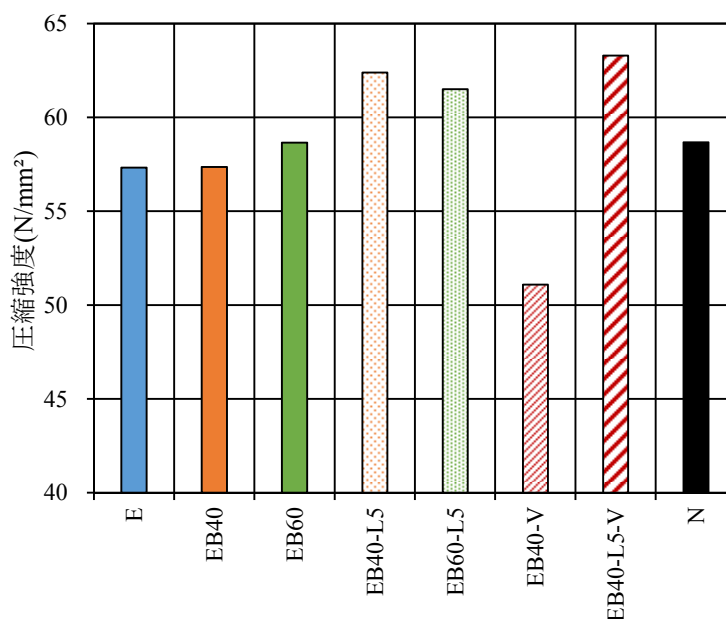


図 4-7 各モルタルの圧縮強度

b) 静弾性係数

図 4-8 に各モルタルの静弾性係数を示す。基本的には、圧縮強度と同様の傾向を示している。そして、石灰石微粉末の少量置換による静弾性係数の増加も顕著となっている。

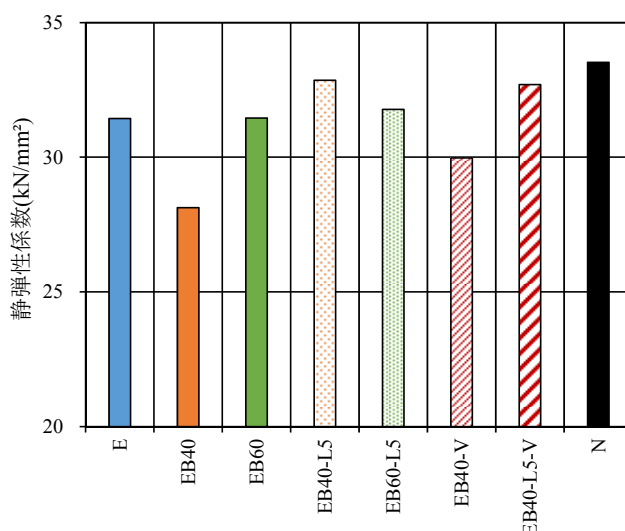


図 4-8 各モルタルの静弾性係数

c) 曲げ強度

図 4-9 に各モルタルの曲げ強度を示す。圧縮強度の場合と同様に、配合 E と配合 N は同程度の曲げ強度となった。また、エコセメントを高炉スラグ微粉末 6000 で質量置換した配合 EB40 および EB60 の曲げ強度は、配合 E と比較して低下していることがわかる。この傾向は、水粉体体積比を配合 E と同じとした配合 EB40-V でも同様となっている。そして、石灰石微粉末を併用することにより曲げ強度が増加していることがわかり、圧縮強度より非常に顕著となった。

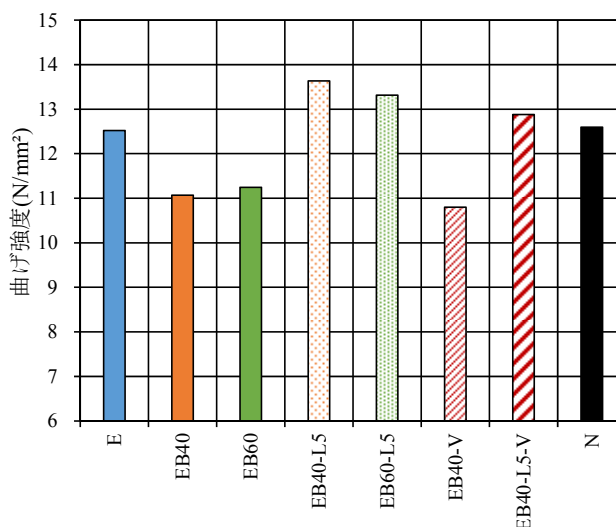


図 4-9 各モルタルの曲げ強度

d) まとめ

a)～c)をまとめると、エコセメントを高炉スラグ微粉末 6000 で置換するときの機械的性質は、同程度もしくは若干低下する傾向にあるが、これに石灰石微粉末を少量併用することにより、顕著に改善することがわかる。石灰石微粉末による機械的性質の向上効果には、微粉末効果による結合材粒子のフロックの分散も考えられる。しかし、強度および静弾性係数の増加が極めて顕著であることから、石灰石微粉末の大きさによるものだけではなく、材質に起因する水和機構としての働き（石灰石微粉末そのものの反応ではなく、エコセメント、高炉スラグ微粉末の反応機構（媒体）としての働き）や、ミクロな固体構造に対する改善効果（水和生成物の付着力の増加など）があるものと推察される。

(2) 細孔径分布

図 4-10 に配合 E, N, EB40-L5 の細孔径分布を示す。各配合の総細孔量は、配合 E で 0.063mL/g、配合 N で 0.062mL/g、配合 EB40-L5 で 0.059mL/g と非常に小さく、かつほぼ同程度となっている。最頻径で比較すると、配合 E で 40nm 程度、N で 30nm 程度、EB40-L5 で 20nm 程度となっており、エコセメントのみを用いた配合 E と比較して、高炉スラグ微粉末 6000 および石灰石微粉末を併用した配合 EB40-L5 の組織が緻密になる傾向が見られた。

図 4-11 に各配合の細孔径ごとの細孔量を示す。緻密化することで凍結融解抵抗性の向上に寄与するとされる細孔径範囲 75～750nm 間⁴⁻³⁾に相当する 80～760nm 間の細孔量に着目すると、配合 EB40-L5 において若干少なくなっていることがわかる。

細孔径分布の配合間の差は非常に小さいと思われるが、この少しの差によっても、モルタルの機械的性質や、3.2 節で検討した NaCl3%溶液中での凍結融解作用によるスケーリングも影響を受けているものと推察される。

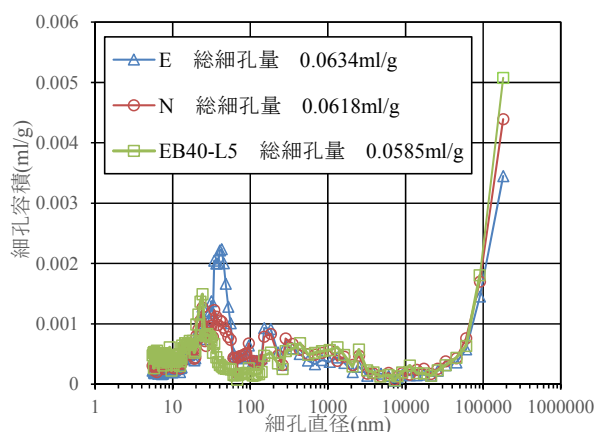


図 4-10 細孔径分布（差分）

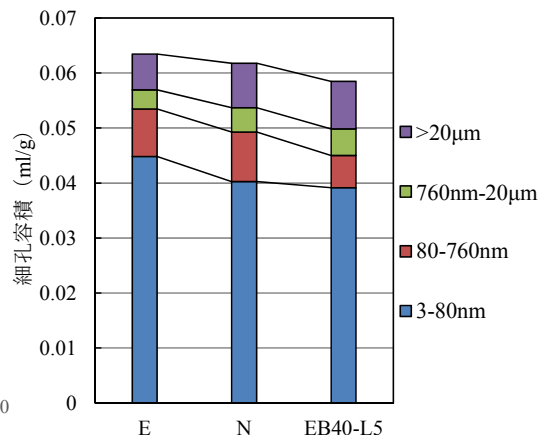


図 4-11 細孔径ごとの細孔量

4.3 4章のまとめ

第4章では、エコセメントを用いた舗装用超硬練りの凍結防止剤環境下でのスケーリングが顕著とならないような材料構成を基礎的に検討することを目的に、結合材粒子の実積率に着目し、エコセメントを基材とし、粒径（粉末度）の異なる高炉スラグ微粉末の混和による物理的な充填構造の変化について、基礎的な検討を行った。また、3.2節の結果を考慮し、NaCl3%溶液中での凍結融解作用後のスケーリング抵抗性の高かった配合について、モルタルを対象に、機械的性質および細孔構造について検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

1. エコセメントを基材として、これを高炉スラグ微粉末 6000 および 8000 で置換した場合、置換率の増加に伴い、混合粉体の実積率が低下した。この結果は、充填機構が異なる3つの試験方法で同様の結果となった。密充填の粉体作製のためには、エコセメントの粒径と比較して顕著に小さな材料の選定が必要と考えられる。
2. エコセメントを基材とし、これを高炉スラグ微粉末 6000 で 40 および 60%質量置換した場合の材齢 28 日における機械的性質は、エコセメントのみを用いた場合と比較して、低下する傾向となる。
3. エコセメントの一部を高炉スラグ微粉末 6000 で 40 および 60%質量置換したとき、少量の石灰石微粉末を併用することで、機械的性質が顕著に増加する。
4. エコセメントのみを用いたもの、普通ポルトランドセメントを用いたもの、およびエコセメントと高炉スラグ微粉末 6000 と少量の石灰石微粉末を併用したものにおいて、これらの細孔構造に若干の違いがある。
5. 少量の石灰石微粉末の併用による顕著な機械的性質の増加は、微粉末効果だけではなく、石灰石微粉末の材質に起因する、他の結合材の水和機構の変化などの要因が可能性として挙げられる。

参考文献

- 4-1) 笠井哲郎, 笠井芳夫: セメントーシリカフェーム混合粉体の最密充填の評価方法に関する研究, 東海大学紀要工学部, Vol.35, No.1, pp.175-179, 1995
- 4-2) 坂井悦郎, 柿沼保夫, 黒川大亮, 相川豊: 粒子の充填性を考慮した高強度コンクリート用セメントの材料設計, セメント・コンクリート論文集, Vol.63, No.1, pp.2-8, 2009
- 4-3) 鎌田英治: コンクリートの凍害と細孔構造, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.1, No.1, pp.51-60, 1988

第 5 章

密充填粉体を用いたエコセメント超硬練りコンクリートの スケーリング抵抗性

第 5 章 密充填粉体を用いたエコセメント超硬練りコンクリートのスケーリング抵抗性

第 5 章では、エコセメントを用いた舗装用超硬練りコンクリートの凍結防止剤環境下でのスケーリング抵抗性の向上を目的に、粉末度の高い粉体（シリカフューム）を用いて粉体粒子の充填構造試験を行い、この結果得られた密充填粉体をエコセメント超硬練りコンクリートに適用したときの基礎的な特性について検討を行った。

5.1 密充填粉体の作製

5.1.1 はじめに

4.1 節の検討において、エコセメントを基材とし、高炉スラグ微粉末（粉末度：6000 および 8000 cm²/g）を混和した混合粉体では、実積率が最大となる高炉スラグ微粉末の置換率は得られなかった。これは、基材のエコセメントの粒径に対して、混合した高炉スラグ微粉末の粒径に近い⁵⁻¹⁾ためだと考えられる。

そこで本節では、エコセメントを基材とし、より粉末度の高い粉体（シリカフューム）で置換した場合の粉体粒子の充填構造に関して検討を行った。さらに、エコセメントとシリカフュームを用いた混合粉体を用いた検討で密充填となった水準に対し、これを基材として、エコセメントとシリカフュームの間の粒径である高炉スラグ微粉末を混和した場合についても、検討を行った。

5.1.2 実験方法

(1) 使用材料

粉末度 4130cm²/g のエコセメント（EC）を基材として使用した。これを置換する混和材として、粉末度 15.0m²/g のシリカフューム（SF）および粉末度 6320cm²/g の高炉スラグ微粉末（BFS）を使用した。表 5-1～表 5-3 に各結合材の性質を示す。

また、分散剤として、ポリカルボン酸エーテル系高性能 AE 減水剤（SP）を使用した。表 5-4 に混和剤の性質を示す。

表 5-1 エコセメントの性質

密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	凝結			安定性 (パット法)	圧縮強度 (N/mm ²)			化学成分 (%)	
		水量 (%)	始発 (h-min)	終結 (h-min)		3d	7d	28d	全アルカリ	塩化物イオン
3.15	4040	27.9	2-48	4-14	良	30.1	43.7	58.7	0.59	0.047

表 5-2 シリカフュームの性質

SiO ₂ (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	CaO (%)	SiO (%)	Cl ⁻ (%)	ig.loss (%)	湿分 (%)	比表面積 (m ² /g)	密度 (g/cm ³)	活性度指数(%)	
										3d	28d
93.81	0.55	0.24	0.25	0.17	0.04	1.81	0.21	15.0	2.25	98	110

表 5-3 高炉スラグ微粉末の性質

密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	活性度指数(%)		フロー値 比(%)	酸化マグネ シウム(%)	三酸化 硫黄(%)	強熱減量 (%)	塩化物 イオン(%)
		材齢7日	材齢28日					
2.91	6320	90	111	99	6.39	0.00	0.14	0.007

表 5-4 混和剤の性質

名称	種類	主成分	外観	密度 (g/cm ³)	全アルカ リ量(%)	塩化物イ オン量(%)
マスターグレ ニウムSP8SV	高性能 AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル 化合物	赤褐色 液状	1.04～1.11	1.4	0.01

(2) 混合粉体の構成

はじめに、エコセメントを基材とし、シリカフュームの置換率を変化させた。シリカフュームの置換率は、0%～20%の範囲とし、エコセメントと体積置換する形で使用した。

次に、エコセメントとシリカフュームを用いた混合粉体の充填構造試験結果から、最も密充填になったシリカフューム体積置換率の混合粉体について、高炉スラグ微粉末を加えた3粉体系での充填構造の検討を行った。エコセメントとシリカフュームの混合粉体を基材とし、高炉スラグ微粉末の置換率を0～40%の範囲で変化させた。高炉スラグ微粉末は、シリカフューム同様、エコセメントとシリカフュームの混合粉体と体積置換する形で使用した。

5.1.3 試験方法

粉体粒子の実積率を定量化するため、4.1.3 (3) に示したセメントペーストの単位容積質量による試験を行った。

ここで、シリカフュームが極めて細粒子であることから、練混ぜ前に水と混合し、懸濁液として用いた。そして、JISR5201 に規定のセメントペーストの練混ぜ時間に加え、高速で90秒間の練混ぜを行った。また、高性能 AE 減水剤を総粉体体積 (V_B) $\times 0.2\%$ で使用した。

5.1.4 結果および考察

(1) エコセメントのシリカフュームによる置換

図 5-1 に、エコセメントを基材としシリカフュームの体積置換率を変化させたときの、水粉体体積比とセメントペーストの単位容積質量から算出された空隙率の関係を示す。

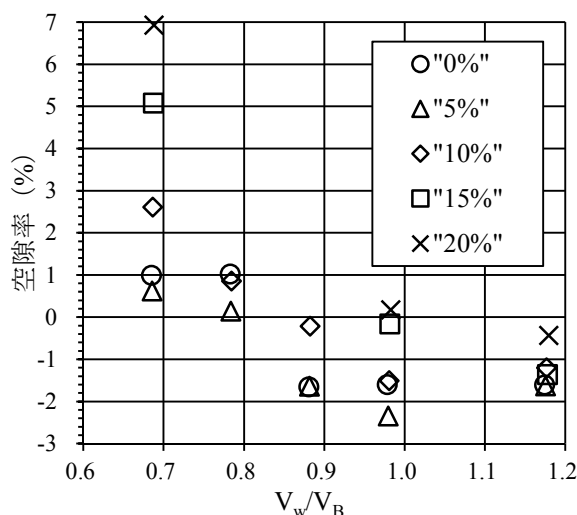


図 5-1 水粉体体積比と空隙率 (SF 置換)

図 5-1 から、空隙率が 0%となる水粉体体積比を空隙率の正負が変化する 2 つの測定点を直線近似して算出した。この水粉体体積比とシリカフュームの体積置換率との関係を整理すると図 5-2 のとおりとなる。シリカフューム体積置換率が 5%のときにセメントペーストの空隙率を 0%とするための水粉体体積比が若干減少し、これ以上の置換率ではゼロ空隙となる水粉体体積比が大きくなるとわかる。すなわち、本研究では、シリカフューム 5%置換のとき、粒子間空隙を充填するための水の体積が最も少なくてもよいことが示されており、粉体粒子の充填構造が密になったことがわかる。以降、エコセメントを基材とし、シリカフュームを 5%体積置換したこの水準を、E-S5 と呼ぶ。

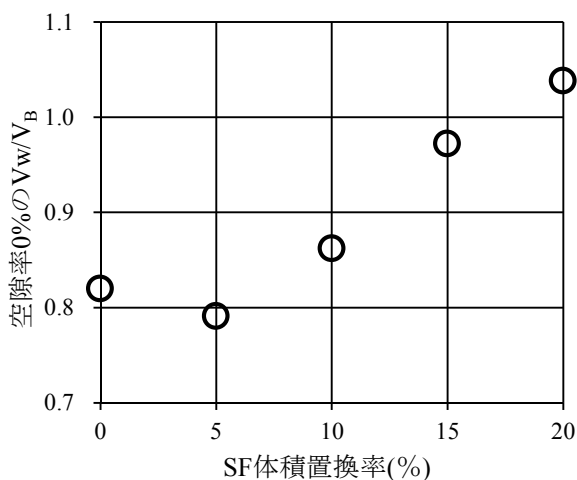


図 5-2 SF の体積置換率と空隙率 0%の V_w/V_B

(2) エコセメントとシリカフュームの混合粉体の高炉スラグ微粉末による置換

図 5-3 に、E-S5 を基材とし高炉スラグ微粉末の体積置換率を変化させたときの、水粉体体積比とセメントペーストの単位容積質量から算出された空隙率の関係を示す。

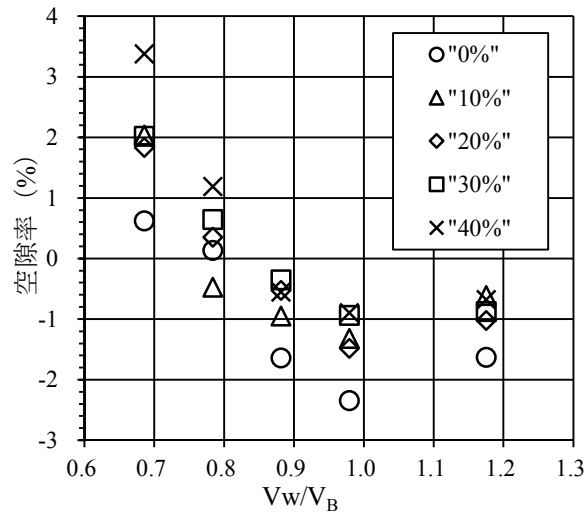


図 5-3 水粉体体積比と空隙率（BFS 置換）

図 5-3 の関係から、5.1.4 (1) と同様の方法で空隙率が 0%となる水粉体体積を算出した。このゼロ空隙となる水粉体体積比と高炉スラグ微粉末の体積置換率との関係を整理すると、図 5-4 のとおりとなる。高炉スラグ微粉末の置換率が 10%のとき、セメントペーストの空隙率を 0%とするための水粉体体積比が減少しており、粉体粒子の充填構造が密になったことがわかる。以降、E-S5 を基材とし、高炉スラグ微粉末を 10%体積置換したこの水準を、ES5-B10 と呼ぶ。

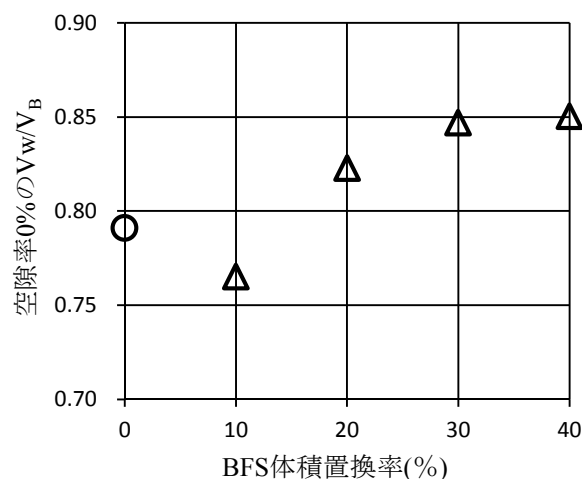


図 5-4 BFS の体積置換率と空隙率 0%の V_w/V_B

5.1.5 密充填粉体に関する検討のまとめ

5.1 節では、4.1 節の結果を考慮し、エコセメントを基材とし、より粉末度の高い粉体で置換した場合の粉体粒子の充填構造について、セメントペーストの単位容積質量による試験で検討を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

1. エコセメントを基材とし、シリカフュームで 5%体積置換することで、粉体粒子の充填構造が密となる。
2. エコセメントをシリカフュームで 5%体積置換した混合粉体を基材とし、エコセメントとシリカフュームの間の粒径である高炉スラグ微粉末を 10%体積置換することで、粉体粒子の充填構造がさらに密となる。

5.2 密充填粉体を用いたモルタルの基礎特性

5.2.1 はじめに

5.1 節では、粉体粒子の充填構造について、基材となるエコセメントと粒径差が大きいシリカフューム、およびエコセメントとシリカフュームの間の粒径である高炉スラグ微粉末を混合した粉体において検討を行った。この結果、エコセメントを基材とし、シリカフュームを 5%体積置換した水準 (E-S5)、および E-S5 を基材とし、高炉スラグ微粉末を 10%体積置換した水準 (ES5-B10) において、粉体粒子の充填構造が密となった。

本節では、これらの密充填粉体 E-S5 および ES5-B10 を用いたモルタルを作製し、硬化後の基礎的な検討 (強度および細孔構造) について検討を行った。

5.2.2 実験方法

(1) 使用材料

セメントは、5.1.2 (1) 表 5-1 で示したエコセメントおよび表 5-5 に示す普通ポルトランドセメント (NC) を使用した。これを置換する混和材は、5.1.2 (1) 表 5-2 および表 5-3 で示したシリカフュームおよび高炉スラグ微粉末を使用した。細骨材は、JIS R 5201 に規定のセメント強さ試験用標準砂を使用した。混和剤は、5.1.2 (1) 表 5-4 で示した高性能 AE 減水剤を使用した。

表 5-5 普通ポルトランドセメントの性質

密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	凝結			安定性 (バット法)	圧縮強度 (N/mm ²)			化学成分 (%)	
		水量 (%)	始発 (h-min)	終結 (h-min)		3d	7d	28d	全アルカリ	塩化物イオン
3.16	3270	26.2	2-18	3-18	良	30.5	46.4	63.9	0.56	0.025

(2) モルタルの配合

表 5-6 にモルタルの配合を示す。配合条件は、基本的に 4.2.2 (2) と同様（ペースト細骨材体積比 (V_{cp}/V_s) = 1.00, 水結合材比 (W/B) = 0.50) とした。また, 5.1 節での検討と同様に, 高性能 AE 減水剤を総粉体体積 (V_B) \times 0.2% で使用した。

検討配合は, ベースセメントであるエコセメントのみを用いた M-E, 5.1 節で得られた密充填粉体を用いたもの (M-E-S5, M-ES5-B10 に, 比較のため普通ポルトランドセメントのみを用いた M-E を加えた全 4 水準である。

表 5-6 モルタルの配合 ($W/B=0.5$)

配合 記号	V_{cp}/V_s	W/B	V_w/V_B	単位量(kg/m ³)						SP ($V_B \times \%$)
				W	EC	NC	SF	BFS	S	
M-E	1.00	0.5	1.58	306	612	0	0	0	1326	0.2
M-ES-5			1.54	303	559	0	22	0	1326	
M-ES5-B10			1.53	303	454	0	20	57	1326	
M-N			1.58	306	0	612	0	0	1326	

(3) 供試体の作製方法

モルタルの練混ぜ, 供試体の作製方法は, JIS R 5201 「セメントの物理試験方法」に従って行った。

5.2.3 試験方法

(1) 機械的性質

各配合のモルタルについて, 圧縮強度, 静弾性係数および曲げ強度を測定した。

圧縮強度, 静弾性係数および曲げ強度の測定は, 4.2.3 (1) に示したとおりに, 材齢 28 日まで水中で養生した供試体を用いて行った。

(2) 細孔径分布

各配合について, 水銀圧入法を用いて細孔径分布測定を行った。

測定方法は, 4.2.3 (2) に示したとおりである。

5.2.4 結果および考察

(1) 機械的性質

図 5-5～5-7 に各モルタルの圧縮強度、静弾性係数および曲げ強度を示す。エコセメントのみを用いた配合 M-E の圧縮強度、静弾性係数および曲げ強度は、普通ポルトランドセメントのみを用いた配合 M-N と同等であった。

密充填粉体を用いた配合 M-E-S5 および M-ES5-B10 に着目すると、M-E と比較して、圧縮強度および静弾性係数はほぼ同程度であるが、曲げ強度は若干低下する傾向にある。坂井らによると、密充填粉体を用いることで、同じ配合条件でも流動性が過度に改善し、材料分離などにより水隙が生じる⁵⁻¹⁾。本研究のモルタルでは、 $W/B=0.5$ とし、高性能 AE 減水剤を使用した⁵⁾が、この配合条件では材料分離が生じ、強度に影響を及ぼしたと考えられる。

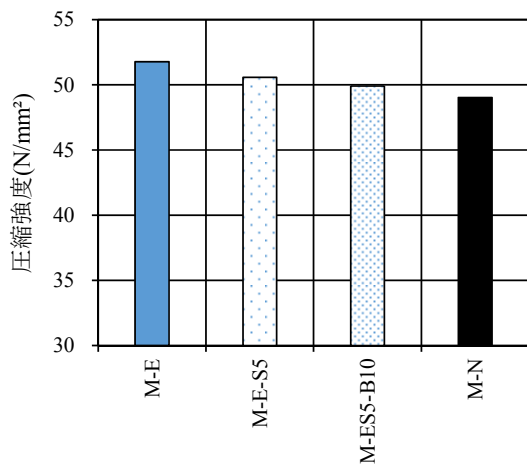


図 5-5 圧縮強度 ($W/B=0.5$)

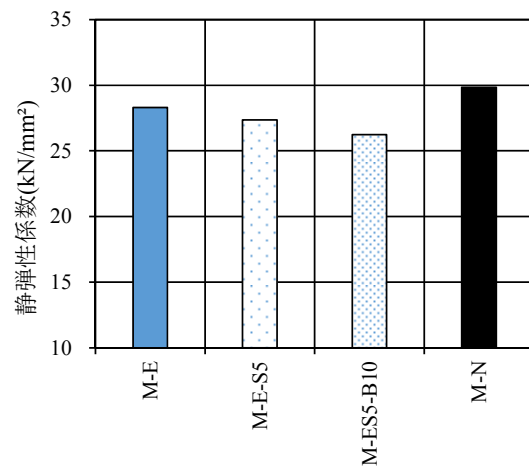


図 5-6 静弾性係数 ($W/B=0.5$)

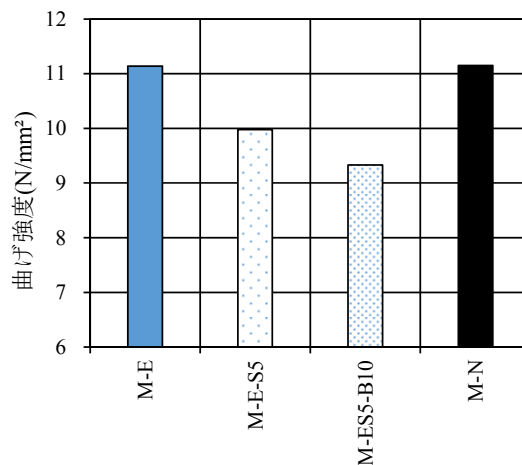


図 5-7 曲げ強度 ($W/B=0.5$)

(2) 細孔径分布

図 5-8 に各モルタルの細孔径分布の測定結果を示す。配合 M-E の細孔径分布は、配合 M-N とほぼ同程度であり、総細孔量も 0.07ml/g 以下で、非常に緻密な構造を持っていることがわかる。

密充填粉体を用いた配合 M-E-S5 および配合 M-ES5-B10 の細孔径分布は、配合 M-E と比較して、10～100nm 付近の細孔量はほぼ同等となっているが、100nm～1000nm 付近の細孔量が多くなっており、総細孔量も 0.08 ml/g 程度である。中沢らの検討では、セメント中の CH とシリカフュームの SiO_2 が反応して C-S-H を生成することにより、40～100nm 程度の径の細孔が減少し、全細孔量も減少している⁵⁻²⁾。今回検討を行った配合において、40～100nm の範囲にある細孔量は、配合 M-E : 0.0155ml/g, 配合 M-E-S5 : 0.0122 ml/g, 配合 M-ES5-B10 : 0.0108 ml/g, 配合 M-N : 0.0105 ml/g となっており、エコセメントを基材とした配合で比較すると、シリカフュームの混和による効果が認められる。しかし、全細孔量に関しては、材料分離により生じた水隙が比較的大きな細孔となったと推察され、この影響でシリカフュームを混和した場合においても、全細孔量としては増加したと考えられる。

図 5-9 に各配合の細孔径ごとの細孔量を示す。密充填粉体を用いた配合 M-E-S5 および配合 M-ES5-B10 は、3～80nm の細孔量が増加しており、組織が緻密化していることも考えられる。しかし、80nm 以上の細孔量も多くなっており、全体としては疎な組織構造だともいえる。すなわち、今回の配合条件では、密充填粉体を用いたことによる細孔径分布に及ぼす影響を判断することができないと考えられる。

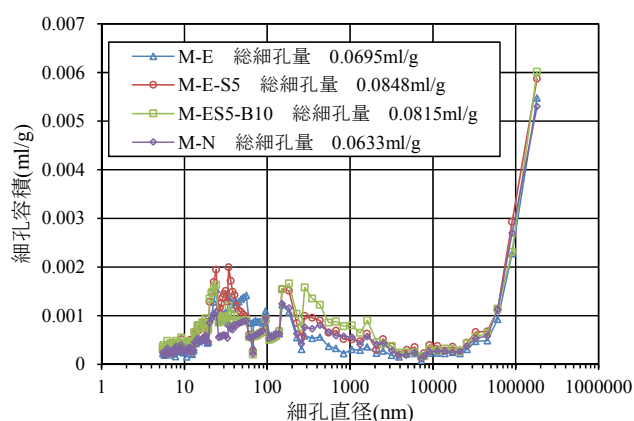


図 5-8 細孔径分布（差分）

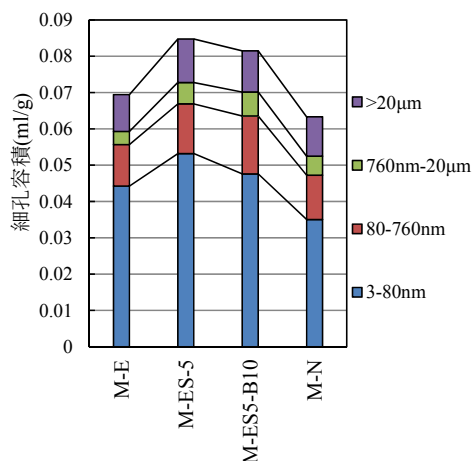


図 5-9 細孔径ごとの細孔量

5.2.5 モルタルに関する検討のまとめ

5.2 節では、5.1 節の結果得られた密充填粉体（エコセメントを基材とし、シリカフェームを 5%体積置換した混合粉体 E-S5，および E-S5 を基材とし、高炉スラグ微粉末を 10%体積置換した混合粉体 ES5-B10）について、モルタルを対象に、機械的性質および細孔構造について検討を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

1. 密充填粉体を用いた場合の機械的性質は、エコセメントのみを用いた場合と比較して、特に曲げ強度が低下する傾向となる。
2. エコセメントのみを用いたものと普通ポルトランドセメントのみを用いたものにおいて、細孔構造に大きな差はみられなかった。しかし、密充填粉体を用いたものは、これらと比較して全細孔量が増加する。
3. 密充填粉体を用いたことによる曲げ強度の低下および全細孔量の増加は、流動性が過度に良好なことによる材料分離によるものと考えられる。

5.3 密充填粉体を用いたモルタルの再試験

5.3.1 はじめに

5.2 節では、5.1 節での検討の結果得られた密充填粉体（エコセメントを基材とし、シリカフュームを 5%体積置換した混合粉体 E-S5、および E-S5 を基材とし、高炉スラグ微粉末を 10%体積置換した混合粉体 ES5-B10）について、モルタルを対象に、機械的性質および細孔構造について検討を行った。この結果、エコセメントのみを用いたものと比較して、密充填粉体を用いた場合の曲げ強度は低下し、全細孔量は増加した。これらの要因として、過度な流動性の改善による材料分離の影響が考えられた。

これを受け、本節では、材料分離低減のため、モルタルの水結合材比（W/B）を低減し、再度、密充填粉体を用いたモルタルの基礎特性について検討を行った。

5.3.2 実験方法

使用材料は、5.2 節で使用したものと同一のものを使用した。

表 5-7 に再試験に用いたモルタルの配合を示す。配合条件は、水結合材比（W/B）を 0.35 とし、その他の条件は、5.2 節と同一にした。

表 5-7 再試験に用いたモルタルの配合（W/B=0.35）

配合 記号	V_{cp}/V_s	W/B (%)	V_w/V_B	単位量(kg/m ³)						SP ($V_B \times \%$)
				W	EC	SF	BFS	NC	S	
M-E	1.00	0.35	1.10	262	749	0	0	0	1326	0.2
M-ES-5			1.08	260	683	27	0	0	1326	
M-ES5-B10			1.07	259	555	24	70	0	1326	
M-N			1.11	263	0	0	0	750	1326	

検討配合、モルタルの練混ぜ、および供試体の作製方法は、5.2 節と同様の方法で行った。

測定項目は、圧縮強度および曲げ強度とした。両強度の測定は、5.2 節と同様の方法である。

5.3.3 結果および考察

図 5-10 および図 5-11 に、再試験に用いたモルタルの圧縮強度および曲げ強度を示す。ここで、モルタルの水結合材比（W/B）を 0.35 としたことで、圧縮強度、曲げ強度ともに非常に高い水準での比較となっていることに留意する必要がある。

ベースセメントの違いに着目すると、配合 M-E と配合 M-N では、特に曲げ強度において、普通ポルトランドセメントのみを用いた配合 M-Nの方が若干高くなったが、概ね同程度の強度だといえる。

配合 M-E と比較して、配合 M-E-S5 の圧縮強度は同等となり、曲げ強度は増加していることがわかる。これは、特に曲げ強度が増加していることから、細粒子を混和材として使用したことによる微粉末効果、シリカフェームのポゾラン反応に加え、密充填な粉体としたことによる表層強度の改善による効果だと考えられる。

配合 M-ES5-B10 においては、配合 M-E や配合 M-E-S5 と比較して圧縮強度が若干低い。しかし、曲げ強度は、配合 M-E-S5 には劣るものの、エコセメントのみを用いた配合 M-E と同程度となった。4.2 節での検討から、エコセメントの一部を高炉スラグ微粉末で置換すると、両強度（特に曲げ強度）が低下する傾向であることを示している。配合 M-ES5-B10 は、高炉スラグ微粉末の体積置換率が 10%と、4.2 節での検討と比較して置換量が少ないが、それでも圧縮強度は低下しており、高炉スラグ微粉末の置換による影響を考慮する必要があると考えられる。従って、配合 M-ES5-B10 の曲げ強度は、高炉スラグ微粉末の置換により配合 M-E より低くなると考えられるが、本検討では同程度となった。このことから、密充填粉体を使用することで、表層強度が向上していると推察される。

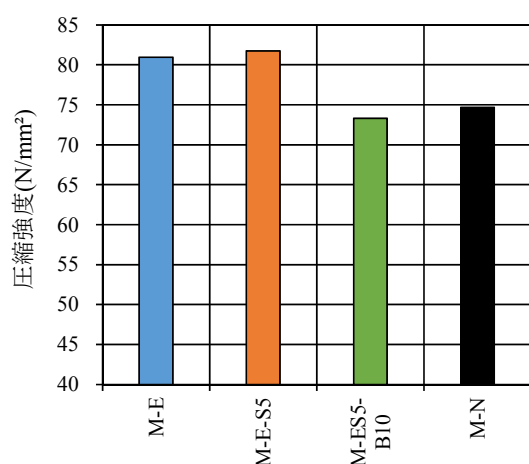


図 5-10 圧縮強度 (W/B=0.35)

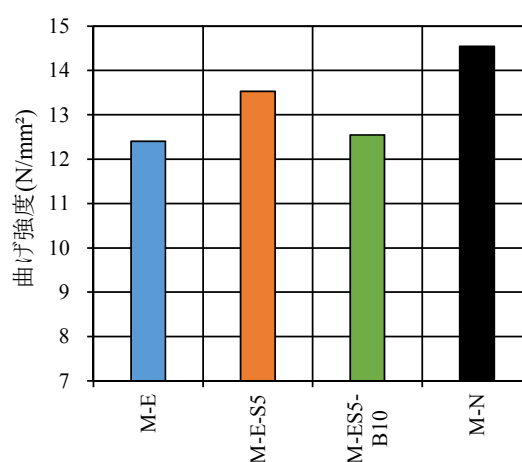


図 5-11 曲げ強度 (W/B=0.35)

5.3.4 モルタルの再試験に関するまとめ

5.3 節では、5.2 節での検討結果を受け、水結合材比 W/B を 0.35 に低減したモルタルにおいて、密充填粉体を適用することによる圧縮強度および曲げ強度に及ぼす影響について検討を行った。この結果、密充填粉体を用いた配合 M-E-S5 および配合 M-ES5-B10 において、特に曲げ強度が向上する傾向となった。このことから、密充填粉体の使用により、表層強度が向上していることが推察される。

5.4 密充填粉体を用いたエコセメント超硬練りコンクリートの特性

5.4.1 はじめに

5.3 節では、5.2 節の結果を考慮し、5.1 節で得られた密充填粉体（エコセメントを基材とし、シリカフュームを 5%体積置換した混合粉体 E-S5、および E-S5 を基材とし、高炉スラグ微粉末を 10%体積置換した混合粉体 ES5-B10）について、水結合材比 0.35 のモルタルを対象に、圧縮強度および曲げ強度の測定を行った。この結果、密充填粉体を用いた場合、エコセメントのみを用いた場合と比較して、曲げ強度が向上しており、このことから表層強度が向上していると推察される。

そこで本節では、エコセメントを用いた超硬練りコンクリートに密充填粉体を適用した場合の検討を行った。密充填粉体を用いたエコセメント超硬練りコンクリートを作製し、締固め性、機械的性質および NaCl3%溶液下での凍結融解抵抗性について考察を行った。

5.4.2 実験方法

(1) 使用材料

セメントは、表 5-8 に示す普通エコセメント（EC）を使用した。これを置換する混和材および比較用の普通ポルトランドセメントは、5.2.2 (1) 表 5-2, 5-3 および 5-5 と同じものを使用した。骨材は、表 5-9 に示す砕砂（S）および砕石 2005（G）を使用した。混和剤は、3.1.2 (1) 表 3-3 に示した AE 減水剤および AE 助剤を使用した。

表 5-8 普通エコセメントの性質

密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	凝結			安定性 (パット法)	圧縮強度 (N/mm ²)			化学成分 (%)	
		水量 (%)	始発 (h-min)	終結 (h-min)		3d	7d	28d	全アルカリ	塩化物イオン
3.15	4040	27.9	2-48	4-14	良	30.1	43.7	58.7	0.59	0.047

表 5-9 骨材の性質

種類		岩質	産地	密度(g/cm ³)		吸水率 (%)	単位容積 質量(kg/L)	実積率 (%)	F.M.
				表乾	絶乾				
砕砂	S	砂岩	相模原	2.59	2.52	2.57	1.59	62.6	2.82
砕石2005	G	砂岩	相模原	2.60	2.55	2.06	1.51	60.2	6.62

(2) コンクリートの配合

表 5-10 にコンクリートの計画配合を示す。十分な締固めが行える配合を想定し、粗骨材の粒子間空隙体積に対するモルタル体積の割合 (Km) を 1.60, 単位水量を 115kg/m^3 , 水結合材比を (W/B) を 0.35 とした。十分な耐久性を確保するため, 目標空気量を 2.5%とし, AE 助剤の使用量を調整した。この条件の下, 5.2 節および 5.3 節のモルタルにおける検討と同様の粉体を用いた 4 水準 (Ex-E, Ex-E-S5, Ex-ES5-B10, Ex-N) を作製した。本節でも, 連行空気をセメントペーストの一部としているため, 連行空気の導入によって細骨材量が少なくなり, 細骨材の粒子間空隙に対するペーストの割合 (Kp) が大きくなることとなる。

表 5-11 に実測空気量に基づいて再計算したコンクリートの配合を示す。

表 5-10 コンクリートの計画配合

配合 記号	W/B	Km	Kp	目標空気量 (%)	単位量(kg/m^3)							AE減水剤 (B×%)	AE助剤 (B×%)
					W	NC	EC	BFS	SF	S	G		
Ex-E	0.35	1.60	1.49	2.5	115	0	329	0	0	724	1238	0.125	0.030
Ex-E-S5			1.51	2.5	115	0	318	0	12	718	1238	0.125	0.030
Ex-ES5-B10			1.52	2.5	115	0	288	31	11	716	1238	0.125	0.040
Ex-N			1.48	2.5	115	329	0	0	0	724	1238	0.125	0.015

表 5-11 実測空気量に基づいて再計算したコンクリートの配合

配合 記号	W/B	Km	Kp	実測空気量 (%)	単位量(kg/m^3)							AE減水剤 (B×%)	AE助剤 (B×%)
					W	NC	EC	BFS	SF	S	G		
Ex-E	0.35	1.60	1.48	2.4	115	0	329	0	0	725	1240	0.125	0.030
Ex-E-S5		1.59	1.48	2.0	116	0	320	0	12	722	1244	0.125	0.030
Ex-ES5-B10		1.60	1.51	2.4	115	0	289	31	11	718	1240	0.125	0.040
Ex-N		1.59	1.46	2.2	115	330	0	0	0	727	1242	0.125	0.015

(3) 練混ぜおよび供試体の作製方法

練混ぜおよび供試体の作製方法は, 基本的には 3.1.2 (3) および (4) で示したとおりである。ただし, 練混ぜ前に計量した水にシリカフュームをあらかじめ混合しておくことで, 練混ぜの際に細粒子が消失ないように配慮した。

5.4.3 試験方法

(1) 超硬練りコンクリートの空気量測定

超硬練りコンクリートの空気量の測定は、3.1.3 (1) で示した方法と同じである。本節における検討で使用したワシントンエアメータの容積は、7.018L である。

実測の空気量に基づいて再計算したコンクリートの配合は、5.4.2 (2) 表 5-11 に示したとおりである。充填率 100%に相当する試料質量の算出には、表 5-11 の配合から得られる単位容積質量を使用した。

(2) 締固め性試験

締固め性試験は、3.1.3 (2) に示したとおりである。 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の型枠に充填率 100%に相当する質量の採取をする際、表 5-11 の配合から得られる単位容積質量に基づいて、試料の採取を行った。

試験後の試料は、表面仕上げを施し、円柱供試体として使用した。

(3) 機械的性質

圧縮強度、静弾性係数および曲げ強度の測定は、3.1.3 (3) a) に示した方法と同じである。セメント空隙比の算出は、3.1.3 (3) b) に示したとおりに行った。

(4) 凍結融解試験

凍結融解試験は、3.1.3 (4) で示した方法と同様に行った。

5.3.4 結果および考察

(1) 締固め性

表 5-12 に締固め性試験によって得られた指標の一覧を，表 5-13 に締固め曲線を構成する各係数の一覧を，図 5-12 および図 5-13 に各配合の締固め曲線を，それぞれ示す。

表 5-12 締固め性試験の各指標

配合 記号	Ci (%)	Cf (%)	E98 (J/L)	Ce
Ex-E	79.8	99.1	208.2	1.124
Ex-E-S5	78.0	99.1	185.9	1.367
Ex-ES5-B10	81.5	99.7	100.5	1.010
Ex-N	79.5	99.2	115.0	1.759

表 5-13 締固め曲線の各係数

配合 記号	c	a	b	d	単位容積質 量(kg/L)
Ex-E	79.75	19.3639	0.1019	0.6369	2.409
Ex-E-S5	78.00	21.0861	0.1179	0.6301	2.413
Ex-ES5-B10	81.50	18.2357	0.0815	0.7357	2.404
Ex-N	79.50	19.7010	0.1886	0.5712	2.414

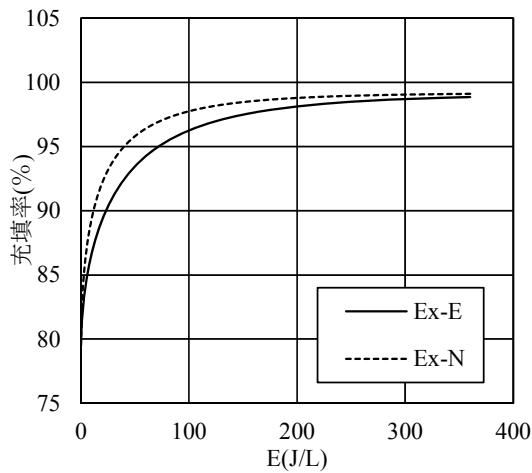


図 5-11 締固め曲線
(ベースセメント比較)

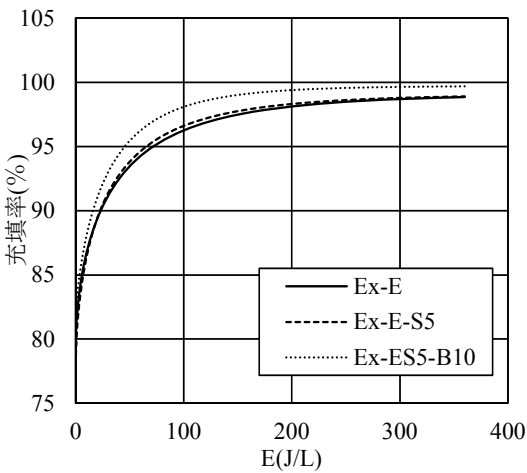


図 5-12 締固め曲線
(密充填粉体比較)

図 5-14 に各配合の E98 および達成可能充填率 Cf を示す。各配合の Cf は全て 99% 以上となり、E98 が最も大きい値となった配合 Ex-E であってもその値は 200J/L 程度であることから、高い締固め性での比較だといえる。その上で、詳細に考察を行う。

配合 Ex-N と比較して、配合 Ex-E の E98 は若干大きく、3.2 節での結果と異なっている。そして、図 5-12 に示すように、配合 Ex-E の締固め曲線は、配合 Ex-N より同一締固めエネルギーでの充填率が低くなっている。この要因として、E98 は充填率 98% に相当するエネルギーであるが、このときグラフの形としてはほぼ収束状態となっており、充填率の値を変化させるのに必要な締固めエネルギーが多くなることが影響していると考えられる。締固め曲線は、締固め試験の結果得られたエネルギーと充填率の関係を締固め関数を用いて曲線近似した結果であり、相関係数が 0.9 以上であることを確認している。しかし、締固め試験では、供試体への試料の投入の際の骨材の偏り、近似計算など、誤差が生じると考えられる工程が多い。このわずかな誤差が締固め曲線に反映され、グラフの形状として収束に近い状態の時点で導出する E98 の値にも影響した結果だと推察する。

密充填粉体を用いた配合 Ex-E-S5 および配合 Ex-ES5-B10 では、配合 Ex-E と比較して同等以上の締固め性となった。これは、単位水量を固定したまま密充填粉体を用いたことによる余剰水膜厚さの増加、およびこれに伴う流動性の向上によるものとも考えられる。しかし、超硬練りコンクリートは、コンクリートに占めるセメントペーストの量が少なく骨材量が多いことから、この影響は大きくないと考えられる。従って、混和材の置換率が本検討の配合で最も多い配合 Ex-ES5-B10 の E98 が特に減少していることから、密度の小さい混和材の置換により K_p が増加したことによる影響が大きいと考えられる。

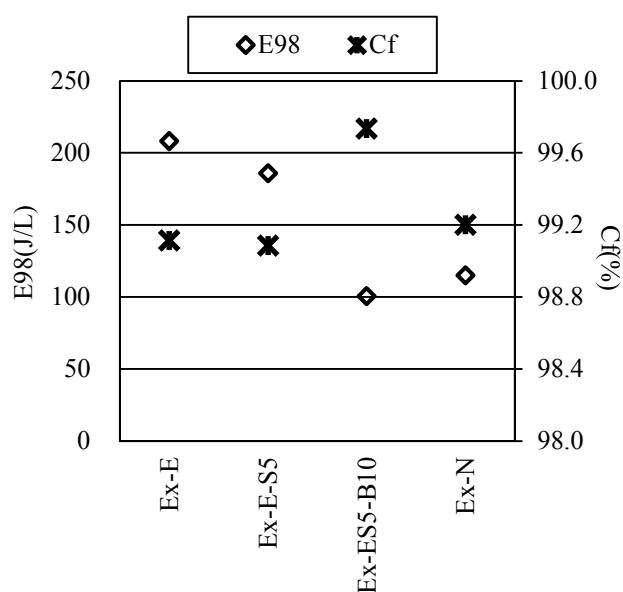


図 5-14 各配合の E98 と Cf

(2) 機械的性質

表 5-14 に機械的性質の試験結果の一覧を示す。

表 5-14 機械的性質の試験結果

配合 記号	空隙率(100- γ_{180}) (%)	結合材 空隙比	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)
Ex-E	1.13	0.695	53.90	31.38	6.74
Ex-E-S5	1.11	0.727	59.60	35.03	7.50
Ex-ES5-B10	0.19	0.762	63.53	32.14	7.36
Ex-N	1	0.721	57.51	29.49	6.95

図 5-15 に圧縮強度，供試体の寸法と質量から算出した見かけ充填率および γ_{180} を示す。全ての配合において，見かけ充填率と γ_{180} の値の傾向が概ね一致している。このことから，供試体の締固めは十分に行われていることがわかる。すなわち，配合間の強度の差は，用いた結合材（粉体）により生じていると考えられる。

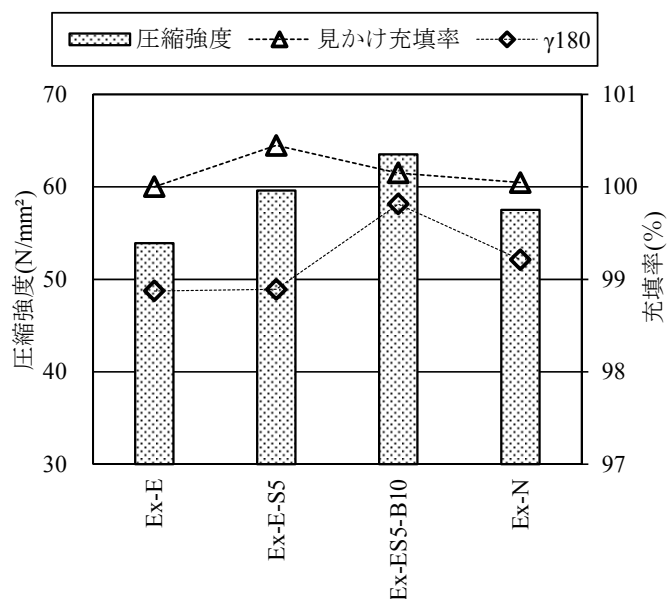


図 5-15 圧縮強度と充填率

以降、各機械的性質の関係を整理する。グラフ中には 3.1 節で検討を行った E シリーズ（締固めが十分に行えなかったと考えられる E25 は除く）および 3.2 節で検討を行った BFS シリーズ、Ls シリーズもプロットしている。（凡例：E, BFS, Ls）

図 5-16 に結合材空隙比と圧縮強度の関係を示す。ここで、混和材を使用した際は、密度の差により、水結合材比 W/B が一定であっても結合材空隙比の値が変化することに留意する必要がある。各結合材ごとに、概ね、結合材空隙比の増加と共に圧縮強度が増加することがわかる。

図 5-17 に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。Ex シリーズに着目すると、密充填粉体を用いることで、エコセメントのみを用いた場合と比較して、圧縮強度に対して静弾性係数が若干大きくなっていることがわかる。BFS シリーズおよび Ls シリーズでも圧縮強度に対して静弾性係数が若干大きくなっており、混和材置換の影響とも考えられる。しかし、後述する曲げ強度の変化の程度に対して、静弾性係数の変化の程度はそれほど小さくなく、全ての配合においてコンクリート示方書での関係と概ね同等の関係であると言える。

図 5-18 に圧縮強度と曲げ強度の関係を示す。混和材を使用することで、エコセメントのみを用いた場合と比較して、同一圧縮強度に対する曲げ強度の値が大きくなる傾向にある。これは、基材であるエコセメントより細かい粒子の混和材を置換することによる微粉末効果の影響が、表層強度と関連性が高いと考えられる曲げ強度において顕著となったためだと考えられる。そして、各配合とも転圧コンクリート舗装用途の超硬練りコンクリートの設計曲げ強度（ 4.5N/mm^2 ）を十分に満足している。

従って、エコセメントを用いた超硬練りコンクリートにおいて、混和材を置換した場合であっても、圧縮強度を基準とした静弾性係数または曲げ強度の導出が安全側で可能であると考えられる。

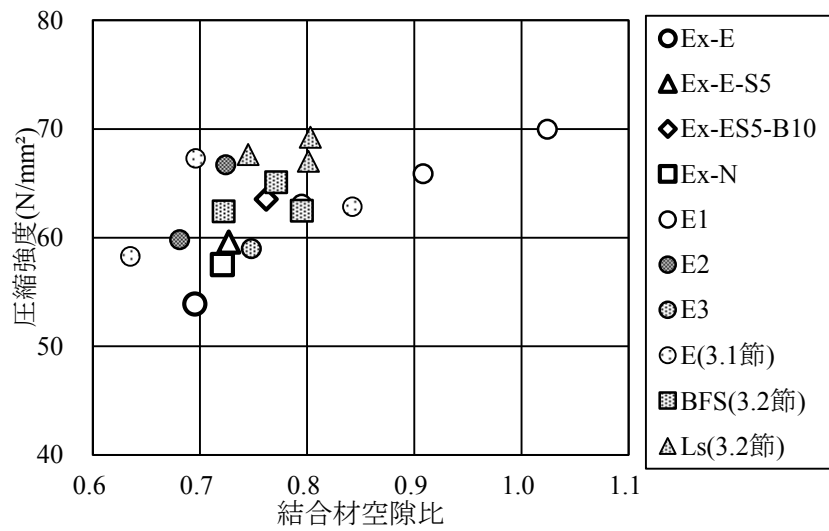


図 5-16 結合材空隙比と圧縮強度

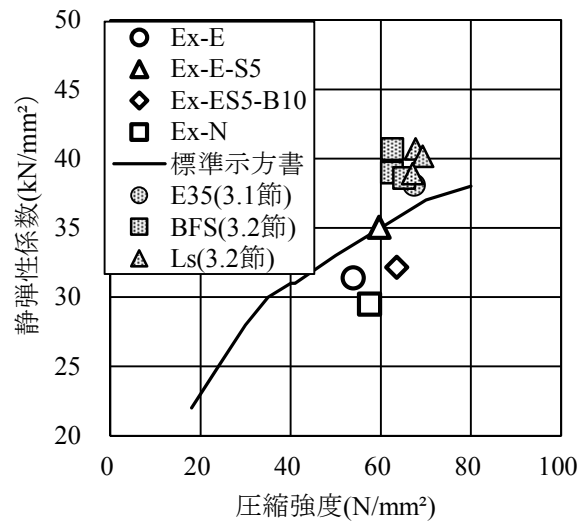


図 5-17 圧縮強度と静弾性係数

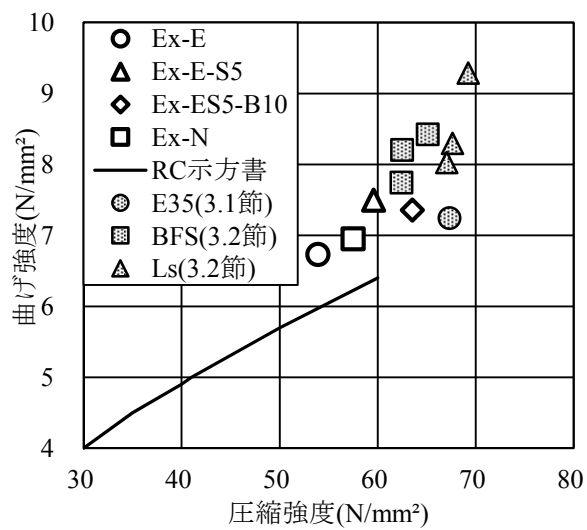


図 5-18 圧縮強度と曲げ強度

(3) 凍結融解抵抗性

表 5-15 に各配合の凍結融解サイクル 137 回時の相対動弾性係数の値を示す。相対動弾性係数の値は、最も低い配合でも 97%であり、いずれの配合も NaCl3%溶液中という極めて厳しい凍結融解試験においても、凍結融解に対する高い耐久性を有しているとわかる。

以降、スケーリング抵抗性について考察を行う。グラフ中には 3.2 節で検討を行った配合についても掲載している。(凡例：B40, L5-B40)

図 5-19 に質量減少率の経時変化を示す。ベースセメントの違いに着目すると、エコセメントのみを用いた場合（配合 Ex-E）は、普通ポルトランドセメントのみを用いた場合（配合 Ex-N）と比較して質量減少率が大きく、これまでの検討結果と同様の傾向となっている。密充填粉体を用いた配合 Ex-E-S5 および配合 Ex-ES5-B10 は、配合 Ex-E と比較して質量減少率が減少し、スケーリング抵抗性が向上していることがわかる。しかし、混和材を使用した場合において比較すると、B40 および L5-B40 と密充填粉体を使用した場合では、スケーリング抵抗性に差が見られた。

図 5-20 に曲げ強度と凍結融解サイクル 140 回近傍時点での質量減少率の関係を示す。ベースセメントをエコセメントとした場合に注目すると、曲げ強度の増加に伴い質量減少率が直線的に減少していることがわかる。この関係は、混和材の使用によりエコセメントを用いた超硬練りコンクリートの表層強度が増加し、これによりスケーリング抵抗性が向上したことを間接的に示唆していると考えられる。しかし、ベースセメントの違いに着目すると、エコセメントのみを用いた場合（配合 Ex-E）と普通ポルトランドセメントのみを用いた場合（Ex-N）において、曲げ強度はほぼ同程度であるものの、質量減少率には大きな差が生じた。このことから、エコセメントを用いた超硬練りコンクリートのスケーリング抵抗性の向上のためには、表層強度の改善だけではなく、各結合材による水和生成物の組成などのミクロな組織についても考慮する必要があると考えられる。

表 5-15 凍結融解サイクル 137 回時の相対動弾性係数

配合名	Ex-E	Ex-E-S5	Ex-ES5-B10	Ex-N
相対動弾性係数(%)	97	97	98	98

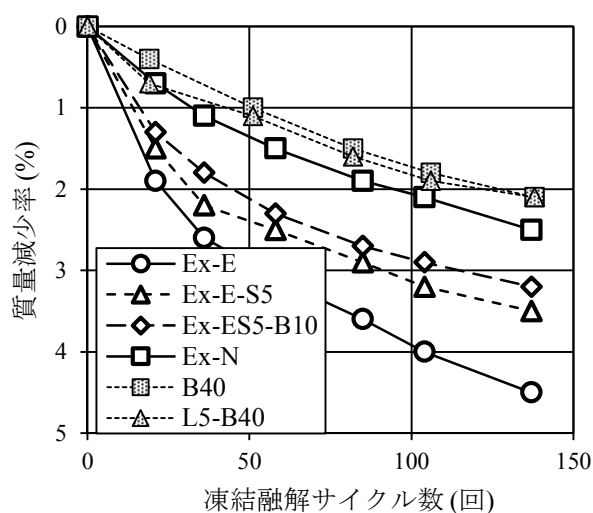


図 5-19 質量減少率の経時変化

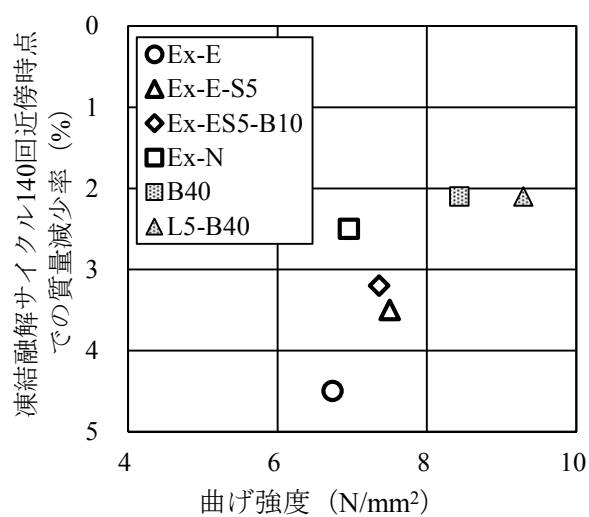


図 5-20 凍結融解サイクル 140 回近傍時点での質量減少率と曲げ強度

5.3.5 超硬練りコンクリートに関する検討のまとめ

5.3節では、エコセメントを用いた超硬練りコンクリートにおいて、粉体粒子の充填構造試験により得られた密充填粉体を使用し、このことがスケーリング抵抗性に及ぼす影響に関して検討を行った。また、基礎特性として締固め性および機械的性質に関しても検討を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

1. 密充填粉体を用いた場合、エコセメントのみを用いた場合と比較して、締固め性および機械的性質は同等以上となる。
2. 密充填粉体を用いた場合であっても、結合材空隙比による圧縮強度の整理や圧縮強度による静弾性係数および曲げ強度の導出が可能である。
3. 密充填粉体を用いることで、スケーリング抵抗性は向上する。また、スケーリング抵抗性と曲げ強度に一定の相関が見られる。しかし、普通ポルトランドセメントを用いた場合と比較して、曲げ強度は同程度であってもスケーリング抵抗性が劣ることから、各結合材の材質も考慮する必要があると考えられる。

5.4 5章のまとめ

第5章では、エコセメントを用いた舗装用超硬練りコンクリートの凍結防止剤環境下でのスケーリング抵抗性の向上を目的に、粉末度の高い粉体（シリカフューム）を用いて粉体粒子の充填構造試験を行い、この結果得られた密充填粉体をエコセメント超硬練りコンクリートに適用したときの基礎的な特性について検討を行った。この結果、以下のことが明らかとなった。

1. エコセメントを基材とし、シリカフュームで5%体積置換することで、粉体粒子の充填構造が密となる。また、この混合粉体を基材とし、高炉スラグ微粉末を10%体積置換することで、さらに密充填な粉体となる。
2. 密充填粉体を用いた場合のモルタルは、余剰水膜厚さの増加により流動性が向上する。しかし、水結合材比0.5においては、エコセメントのみを用いた場合と比較して圧縮強度は同程度であるものの曲げ強度が低下し、全細孔量は増加した。これは、流動性の向上が過度に生じたことで材料分離が起こったためだと考えられる。
3. 密充填粉体を用いた場合のモルタルにおいて、水結合材比を0.35とすると、エコセメントのみを用いた場合と比較して、特に曲げ強度が向上する傾向にある。これは、粉体粒子の充填構造が密となったことにより、表層強度が向上したためだと推察される。
4. 密充填粉体を用いた場合のエコセメント超硬練りコンクリートは、エコセメントのみを用いた場合と比較して、同等以上の締固め性および機械的性質を有する。
5. 密充填粉体を用いた場合であっても、結合材空隙比による圧縮強度の整理や、圧縮強度による静弾性係数および曲げ強度の導出が可能である。
6. 密充填粉体を用いることで、スケーリング抵抗性は向上する。また、スケーリング抵抗性と曲げ強度に一定の相関が見られる。しかし、普通ポルトランドセメントを用いた場合と比較して、曲げ強度は同程度であってもスケーリング抵抗性が劣ることから、各結合材の材質も考慮する必要があると考えられる。

参考文献

- 5-1) 坂井悦郎, 柿沼保夫, 黒川大亮, 相川豊: 粒子の充填性を考慮した高強度コンクリート用セメントの材料設計, セメント・コンクリート論文集, Vol.63, No.1, pp.2-8, 2009
- 5-2) 中沢拓也, 杉山友明, 黒川大亮, 坂井悦郎: 粒度調整セメント-超微粒子系の流動性および水熱反応, セメント・コンクリート論文集, Vol.64, No.1, pp.125-130, 2010

第 6 章

結論

第 6 章 結論

本研究は、資源循環型材料であるエコセメントを用いた転圧コンクリート舗装の実環境への適用に向けて、エコセメントを用いた超硬練りコンクリートの唯一の課題である凍結防止剤環境下でのスケーリング抵抗性の向上を目的としたものである。エコセメントを用いた超硬練りコンクリートの凍結防止剤環境下でのスケーリング抵抗性向上のため、様々な観点から検討を行った。

第 3 章では、エコセメントのみを用いた超硬練りコンクリートを基準に、水セメント比を変化させた場合、および混和材として高炉スラグ微粉末、石灰石微粉末の使用した場合の基礎特性について検討を行った。ここで、基礎特性として検討した性状は、締固め性、機械的性質（強度および静弾性係数）、凍結融解抵抗性（相対動弾性係数、質量減少率）である。この結果、以下のことが明らかとなった。

1. 水セメント比を減少させた場合の締固め性は、若干低下するものの、本研究の配合条件においては、水セメント比 30%程度以上に相当する水量があれば、十分な締固め性を有する。
2. 水セメント比を減少させた場合の圧縮強度は、締固めが十分に行われていれば、セメント空隙比によって制御できる。また、既往の関係を用いて、圧縮強度から静弾性係数および曲げ強度の導出が可能である。本研究の範囲では、最も低い強度であった水セメント比 40%の場合であっても、舗装用途として十分な強度となる。
3. 2.5%程度の連行空気の導入により、十分な耐凍害性を有する。また、水セメント比を減少させることで、スケーリング抵抗性が向上する。
4. 混和材としてエコセメントより粒度の細かい高炉スラグ微粉末および石灰石微粉末を使用することで、締固め性はさらに向上する。
5. エコセメントの一部を高炉スラグ微粉末および石灰石微粉末で置換した場合、圧縮強度に対する静弾性係数および曲げ強度の値が、各示方書の関係と比較して大きく、特に両混和材を併用した場合においてこの傾向が顕著である。
6. 混和材として高炉スラグ微粉末および石灰石微粉末を使用した場合であっても、2.5%程度の連行空気の導入により、高い耐久性を有したコンクリートとなる。また、両混和材の使用により、スケーリング抵抗性が顕著に向上する。この結果には、高炉スラグ微粉末の影響が顕著である。
7. 水セメント比を減少させた場合、および混和材として高炉スラグ微粉末および石灰石微粉末を使用した場合について、BET 比表面積からの平均細孔径が小さくなると、凍結融解 300 サイクル時の質量減少率が直線的に小さくなる。

第4章では、結合材粒子の実積率に着目し、粒径（粉末度）の異なる高炉スラグ微粉末の混和による物理的な充填構造の変化、およびモルタルを対象とした媒体相の基礎特性について検討を行った。この結果、以下のことが明らかとなった。

8. エコセメントを高炉スラグ微粉末 6000 または 8000 で置換した混合粉体を使用した 3 種類の充填構造試験において、いずれの試験方法の場合でも、高炉スラグ微粉末の置換率の増大によって密充填との混合粉体とはならない結果となった。これは、エコセメントの粒径に対して両高炉スラグ微粉末の粒径が近いことによると考えられる。
9. エコセメントを基材とし、これを高炉スラグ微粉末 6000 で質量置換した場合の機械的性質は、エコセメントのみを用いた場合と比較して、低下する傾向となる。しかし、少量の石灰石微粉末を併用することで、機械的性質が顕著に増加する。
10. エコセメントのみを用いたもの、普通ポルトランドセメントのみを用いたもの、およびエコセメントと高炉スラグ微粉末 6000 と少量の石灰石微粉末を併用したものについて、これらの細孔構造に若干の違いがある。
11. 少量の石灰石微粉末の併用による顕著な機械的性質の増加は、微粉末効果だけではなく、石灰石微粉末の材質に起因する、他の結合材の水和機構の変化などの要因が可能性として挙げられる。

第5章では、エコセメントを用いた舗装用超硬練りコンクリートの凍結防止剤環境下でのスケーリング抵抗性の向上を目的に、粉末度の高い粉体（シリカフューム）を用いて粉体粒子の充填構造試験を行い、この結果得られた密充填粉体をエコセメント超硬練りコンクリートに適用したときの基礎的な特性について検討を行った。この結果、以下のことが明らかとなった。

12. エコセメントを基材とし、シリカフュームで 5%体積置換することで、粉体粒子の充填構造が密となる。また、この混合粉体を基材とし、高炉スラグ微粉末 6000 を 10%体積置換することで、さらに密充填な粉体となる。
13. 密充填粉体を用いた場合のモルタルは、余剰水膜厚さの増加により流動性が向上する。しかし、本研究の配合条件においては、この流動性の向上が過度に生じたことで材料分離が起り、エコセメントのみを用いた場合と比較して曲げ強度の低下および全細孔量の増加という結果になったと考えられる。即ち、水セメント比を低減し、材料分離が生じない条件で再度検証を行う必要がある。
14. 密充填粉体を用いた場合のエコセメント超硬練りコンクリートは、エコセメントのみを用いた場合と比較して、同等以上の締固め性および機械的性質を有する。
15. 密充填粉体を用いた場合であっても、結合材空隙比による圧縮強度の整理や、圧縮強度による静弾性係数および曲げ強度の導出が可能である。

16. 密充填粉体を用いることで、スケーリング抵抗性は向上する。また、スケーリング抵抗性と曲げ強度に一定の相関が見られる。しかし、普通ポルトランドセメントを用いた場合と比較して、曲げ強度は同程度であってもスケーリング抵抗性が劣ることから、各結合材の材質も考慮する必要があると考えられる。

本研究により、エコセメントを用いた超硬練りコンクリートの凍結防止剤環境下でのスケーリング抵抗性は、水セメント比の低減、高炉スラグ微粉末および石灰石微粉末の使用、密充填粉体の使用、という3つのアプローチにより、向上させることができることを明らかとした。また、いずれの場合においても、舗装用途のコンクリートとして十分な性能を持ち、強度を既往の関係で制御することができることが明らかとした。

以上のことを考慮すると、これらのスケーリング抵抗性向上のための方法は、実環境においても適用可能であると考えられる。すなわち、適切な材料設計を行うことで、エコセメントを用いた超硬練りコンクリートにおいて唯一の課題であった凍結防止剤環境下でのスケーリング抵抗性も問題とならないといえる。

今後の課題として、表層強度を曲げ強度で表現しているが、より詳細な検討が必要である。そして、水和生成物組成の違いなど、エコセメントと普通ポルトランドセメントの違いを、セメント化学的に考察する必要があると考えられる。

謝辞

本論文は、筆者が平成 25 年度から平成 27 年度までの 3 年間、首都大学東京および首都大学東京大学院の在学中に行った研究をとりまとめたものです。

本論文を作成するにあたりまして、多大なご助言とご指摘を賜り、懇切丁寧なご指導にあってくださいました、首都大学東京大学院都市環境科学研究科都市基盤環境学域准教授、上野敦先生に深く感謝するとともに、心より御礼申し上げます。

本研究を進めるにあたり、ご多忙な中、的確なご助言ご指導を頂き、また、本論文の副査をお引受け頂きました、本大学院教授、宇治公隆先生に厚く御礼申し上げます。

本論文の審査にあたり、ご多忙な中、副査をお引受け頂き、鋭い指摘を頂きました、本大学院准教授、吉嶺充俊先生に深く御礼申し上げます。

本論文作成および進行にあたって、親身に相談に乗ってくださり、多くのご助言を頂きました、本大学院助教、大野健太郎先生に厚く御礼申し上げます。

本研究の実験において、多くの試験を行って頂き、また、的確なご助言を多く頂きました、太平洋セメント株式会社中央研究所第 2 研究部コンクリート舗装技術チーム、梶尾聡様、石田征男様、井坂幸俊様、岸良竜様、井口舞様、瀧田聖史様に深く御礼申し上げます。

本研究の実験進行において、いつも明るくご協力して下さいました、青木薫主事に厚く御礼申し上げます。

授業や研究において共に切磋琢磨し、励ましあいながら研究室生活を過ごしました、修士 2 年の小池悠介君、佐藤凜奈さん、長岡貴紀君、古川凌輔君、間々田憲哉君に深く感謝いたします。

楽しい研究生活を共に過ごしました、博士 2 年の Dung Tran Vu さん、王博さん、王亮さん、文爾肯さん、Vu Ngoc Linh さん、修士 1 年の小倉達也君、永山剛君、菰澤祥平君、張雯さん、張曄さん、学部 4 年の笠井一成君、郡司拓弥君、齋藤孝文君、佐藤勇次君、多田真人君、西村桂一君、福井拓人君、森山崇大君に深く感謝いたします。

昨年度、本研究室を卒業された児玉文彦君と学部 4 年の藪田祥平君には、本研究の一部の実験を共に行っていただき、多大なるご協力を頂きました。深く感謝いたします。

多くのご指導、ご助言を頂き、私の成長を促して頂きました、張軍雷先輩、出口慎太郎先輩、榊原誠樹先輩、朱小燕先輩、市川直樹先輩、尾原弘樹先輩、菊池亮先輩、佐々木優衣先輩、新津祐樹先輩、村田哲先輩、李偉利先輩に深く感謝いたします。

実験や研究を協力し合い、楽しい研究生活を共に過ごし、現在は社会等で活躍されている研究室同期の古川歩さん、当時後輩だった内田早紀さん、坂東真輝君に深く感謝いたします。

おわりに、私の大学生活を支えて下さりました両親、祖父母、また、ここに記すことのできなかった私を支えてくださりました多くの関係者の方々にも感謝の意を表し、本論文の謝辞とさせていただきます。

平成 28 年 3 月