

論文 各種混和材を用いたコンクリートのPC構造物への適用性と耐久性向上効果について

吉田 行^{*1}・名和 豊春^{*2}・田口 史雄^{*3}・渡辺 宏^{*4}

要旨：本研究では、コンクリート構造物の新規あるいは更新時の耐久性向上手法の一つとして、早強ポルトランドセメントと各種混和材を組み合わせたコンクリートの物性および耐久性について試験を実施して、PC 構造物への適用性について検討を行った。その結果、強度発現や乾燥収縮ひずみは結合材の種類により異なるものの、実構造物への適用は十分可能であることが明らかとなった。また、耐久性試験の結果から、混和材の種類を適切に選定することにより、コンクリートの高耐久化が可能であることが明らかとなった。

キーワード：早強ポルトランドセメント、混和材、圧縮強度、乾燥収縮、耐久性

1. はじめに

コンクリート構造物の凍害および凍害と塩害の複合劣化に対する耐久性を向上する手法は種々存在する。例えば、凍害や塩害を引き起こす水分や塩分等の劣化因子がコンクリート内部に侵入することを防ぐためにコンクリート表面を被覆する方法や、劣化因子が侵入した場合でもコンクリート内部の鋼材の腐食を防止するためにエポキシ樹脂塗装鉄筋等を使用する方法が挙げられる。他方、コンクリートの緻密化等によりコンクリート自体の耐久性を向上することは最も基本的な対策であり、コンクリートの長期的な耐久性が確保できれば効率的にライフサイクルコストを削減できる可能性がある。

このような背景から、著者らはこれまで、長期耐久性を有するコンクリートの開発を目的として、ビーライト系セメントと高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの物性および耐久性について広汎な検討を行ってきた。その結果、ビーライト系セメントの高微粉末化およびその一部を高炉スラグ微粉末で置換することにより、強度・発熱特性、耐凍害性および塩分浸透抵抗性などの物性や耐久性が向上し、コンクリートの高耐久化が可能であることを明らかにしてきた^{1),2),3),4)}。このような結合材を用いたコンクリートは、長期耐久性に加えて、低発熱性や長期的な強度発現が期待できることから、特に、橋脚や橋台、擁壁などの比較的大型の構造物において極めて有用と思われる。一方、PC 構造物は材齢初期にプレストレスを導入する必要があるため、耐久性とともに初期の強度発現が重要となり、要求される強度レベルにもよるが、上述した結合材では必ずしも初期強度を満足できないことが考えられる。

以上から、本研究では、PC 構造物にも適用が可能な高耐久コンクリートの実用化を目的として、早強セメン

トと各種混和材を用いたコンクリートの物性および耐久性を調査し、その適用性について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1 に使用材料を示す。ベースセメントは、材齢初期の強度発現を考慮して PC で一般的な早強ポルトランドセメント（以下早強セメントと表記）を用いた。混和材には、汎用性を高めるために高炉スラグ微粉末だけでなく、それぞれの JIS 規格値を満足する、フライアッシュ I 種および II 種、およびシリカフェームを用いた。なお、高炉スラグ微粉末（以下スラグと表記）は耐久性向上効果と汎用性を考慮し、高炉 B 種セメントに通常用いられているものよりも細かい比表面積 6000 クラスのものを用いた。また、初期の強度発現を高めるために、二水石膏を SO₃ 量として JIS 規格の範囲内である 4% 混入したものをを用いた。高性能 AE 減水剤は、結合材の分散性に応じて 2 種類使い、空気量を調節するため消泡剤を併せて用いた。

表-1 使用材料

セメント	早強ポルトランドセメント(HP) 4770 [*] , 密度 3.15 g/cm ³
混和材	高炉スラグ微粉末(BS) 6020 [*] , 密度 2.89 g/cm ³ フライアッシュ I 種(FI) 5270 [*] , 密度 2.40 g/cm ³ フライアッシュ II 種(FII) 3710 [*] , 密度 2.11 g/cm ³ シリカフェーム(SF) 130000 [*] , 密度 2.20 g/cm ³
細骨材	登別産陸砂 表乾密度 2.70g/cm ³ , 吸水率 1.50%
粗骨材	白老産碎石 2505 表乾密度 2.68g/cm ³ , 吸水率 1.91%
高性能 AE 減水剤	末端スルホン基を有するポリカルボン酸系
消泡剤	ポリエーテル系

※比表面積 (cm²/g)

*1 土木研究所寒地土木研究所 耐寒材料チーム研究員 工修 (正会員)

*2 北海道大学教授 大学院工学研究科 工博 (正会員)

*3 土木研究所寒地土木研究所 耐寒材料チーム上席研究員 (正会員)

*4 日鐵セメント(株) 研究開発部次長研究員 (正会員)

2.2 コンクリートの配合

コンクリートの配合を表-2 に示す。水結合材比 (W/B) は、一般的な PC の水セメント比がプレキャストを含めると 35~45%程度であることから、本研究では 40%の一種類とした。各混和材の置換はセメントの内割りとし、置換率は、コンクリートの強度発現および耐久性への影響を考慮して、スラグおよびフライア

ッシュに関しては高炉セメントおよびフライアッシュセメントの B 種相当置換率の上限値とし、それぞれ 60%および 20%とした。また、シリカフェームの置換率は一般に 5~15%が採用されており、本研究では国内外での使用実績が多い 10%とした⁵⁾。なお、コンクリートの目標スランプは 8±2.5cm とし、目標空気量は 4.5±1%とした。

2.3 実験項目

本研究で行った各実験概要を以下に示す。なお、供試体は、作製後相対湿度 90%以上の試験室に静置し、翌日脱型の後、各試験に応じた養生を行った。

(1) 力学試験

力学試験として、圧縮強度試験および引張強度試験を行った。試験は、JIS A 1108 および JIS A 1113 に準拠して、材齢 1, 3, 7, 28 および 91 日の 5 材齢で行った。供試体は各試験材齢まで 20°C 水中養生を行った。また、圧縮試験時には、JIS A 1149 に準拠して、コンプレッソメータによる静弾性係数の測定も行った。

(2) 収縮試験

収縮特性を調べるために、乾燥収縮試験を行った。乾燥収縮ひずみの測定は、供試体作製時に供試体中央に設置した埋め込み型のひずみゲージにより行った。供試体は、10×10×40cm の角柱供試体を使用し、供試体の養生は材齢 7 日まで温度 20°C で水中養生を行い、その後温度 20±2°C、相対湿度 60±5%の恒温恒湿室に静置してデータロガーを用いてひずみの計測を開始した。測定項目は、収縮ひずみと供試体の質量変化とした。

(3) 耐久性試験

耐久性試験として、塩分浸透抵抗性と凍結融解抵抗性に関する試験を行った。

塩分浸透抵抗性は、電気泳動によるコンクリート中の実効拡散係数試験方法 (案) (JSCE-G571-2003)⁶⁾ に準拠して塩化物イオンの実効拡散係数を求め、評価を行った。なお、供試体は、養生による影響を考慮して材齢 91 日まで水中養生した φ10×20cm の円柱供試体の中央部を、厚さ 5cm の円盤状になるように切断したものをを用いた。

凍結融解抵抗性は、JIS A 1148 の A 法に準拠して材齢 28 日より試験を開始し、凍結融解サイクルの進行に伴う相対動弾性係数と質量変化により評価を行った。なお本

表-2 コンクリートの配合

記号	セメントの種類	混和材の種類	混和材置換率 (%)	W/B (%)	空気量 (%)	S P の種類	S P 添加量 (B*) (%)	s/a (%)	コンクリート単位量 (kg/m ³)							
									W		B		S	G	SP	AE剤 (B*) (%)
									C	Ad.	C	Ad.				
HP		—	—			A	0.65		139	348	—	877	1022	2.26	0.0007	
HFI(20)	HP	FI	20	40	4.5	A	0.60	46	128	256	64	890	1041	1.92	0.0005	
HFII(20)		FII	20			A	0.60		128	256	64	890	1041	1.92	0.0005	
HSF(10)		SF	10			B	0.70		136	306	34	876	1025	2.38	0.0030	
HBS(60)		BS	60			A	0.60		128	128	192	891	1042	1.92	0.0020	

SP:高性能AE減水剤(分散性B>A), Ad.:各種混和材

研究では、試験水として真水を用いた場合と、3%の NaCl 水溶液を用いた場合の 2 種類で試験を行った。

スケーリング試験は ASTM C672 に準拠し、22×22×10cm の角柱供試体打設面 (断面 22×22cm) に、幅 25mm 高さ 20mm の土手を設けて試験水を湛水し (約 6mm)、-18°C を 16 時間、23°C を 8 時間の 1 日 1 サイクルで凍結融解作用を与えて (各温度に設定された室内に供試体を移動) スケーリング量を測定した。供試体は、現場での養生条件を考慮して材齢 7 日までは 20°C 環境で湿布養生を行い、その後材齢 28 日まで湿度 60%、温度 20°C の環境で気中養生を行い試験に供した。試験水には、塩害との複合劣化を想定して、3%NaCl 水溶液を使用した。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度と材齢の関係

図-1 に圧縮強度と材齢の関係を示す。材齢 1 日の圧縮強度はシリカフェームを用いた HSF(10)が最も大きく、HP 単味を上回った。フライアッシュを用いた HFI(20)と HFII(20)はほぼ同程度であり、フライアッシュの品質の違いによる差はみられず、早強セメント単味の HP よりも強度が 7.0N/mm² 程度小さかった。また高炉スラグ微粉末を用いた HBS(60)は最も強度が小さく 16.5N/mm² であった。その後、各配合とも材齢の進行に伴い強度は増加し、HSF(10)は HP とほぼ同程度で推移したが、HP は材齢 28 日以降の強度増加が小さかったのに対し、HSF(10)はその後の強度増加が大きかった。一方、材齢初期の強度発現が小さかった HBS(60)は、材齢の進行に伴う強度

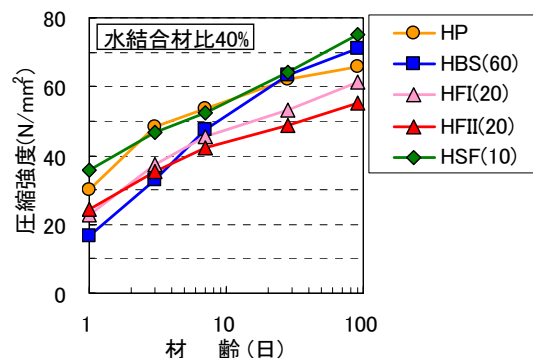


図-1 圧縮強度と材齢の関係

の増加が極めて大きく、材齢7日でフライアッシュを上回り、材齢28日ではHPおよびHSF(10)とほぼ同程度となり、材齢91日ではHSF(10)をわずかに下回ったもののHPよりも強度は大きくなった。また、フライアッシュを用いたケースは、高品質なHFI(20)が材齢3日以降、HFII(20)を上回ったが、その後の強度の増加の程度は両者に差はなく材齢91日までの強度は他の結合材よりも小さい結果であった。

以上から、混和材の種類により強度発現は異なることが明らかとなった。しかし、いずれの配合もPC構造物で一般的に設計基準強度とされる材齢28日の圧縮強度は40N/mm²を上回っており、プレテンション方式で必要とされる30N/mm²以上の強度となる材齢は、HSF(10)およびHPで材齢1日、HFI(20)、HFII(20)およびHBS(60)で材齢3日であることから、強度の観点からはPC構造物への適用は十分可能と考えられる。

3.2 引張強度と圧縮強度の関係

図-2に引張強度と材齢の関係を示す。全体の傾向としては圧縮強度と良く対応しており、材齢7日までの初期の引張強度はHSF(10)およびHPで大きかった。HBS(60)は最も引張強度が小さかったが、その後強度は増加し、材齢7日以降はHSF(10)とほぼ同程度となった。また、フライアッシュを用いたケースでは、フライアッシュの品質の違いによる明確な差はみられなかった。

図-3に引張強度と圧縮強度の関係を示す。図には土木学会コンクリート標準示方書[構造性能照査編]⁷⁾に示されている式より算出した引張強度と圧縮強度の関係も併記した。図からフライアッシュを用いた場合、土木学会式よりも引張強度が若干小さい傾向がみられたが、概ね土木学会式と同様の関係であり、引張強度と圧縮強度には良い相関が見られた。

3.3 静弾性係数と圧縮強度の関係

図-4に静弾性係数と材齢の関係を示す。HP単味は材齢3日から28日の静弾性係数が大きく、シリカフュームを用いたHSF(10)とフライアッシュを用いた配合はいずれの材齢もほぼ同程度だった。また、スラグを用いたHBS(60)は材齢7日までの値が小さかったが、圧縮強度と同様にその後大きく増大し、材齢91日では最も大きくなった。

図-5に静弾性係数と圧縮強度の関係を示す。図には土木学会コンクリート標準示方書[構造性能照査編]⁷⁾に示されている静弾性係数と圧縮強度の関係も併記した。全体としては、結合材の種類によらず、静弾性係数と圧縮強度には良い関係がみられたが、一部を除いて示方書の静弾性係数よりも若干小さい傾向がみられた。

3.4 乾燥収縮性状

図-6に乾燥材齢と収縮ひずみの関係を示す。なお、

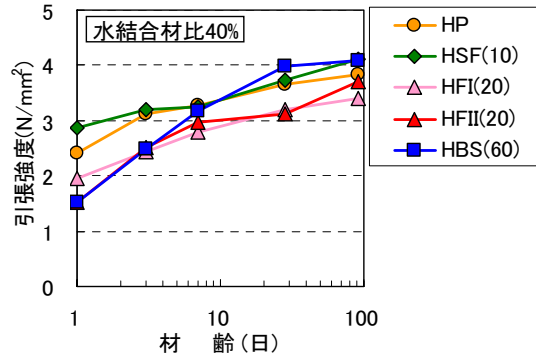


図-2 引張強度と材齢の関係

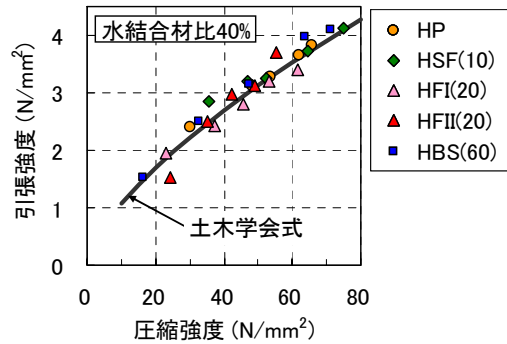


図-3 引張強度と圧縮強度の関係

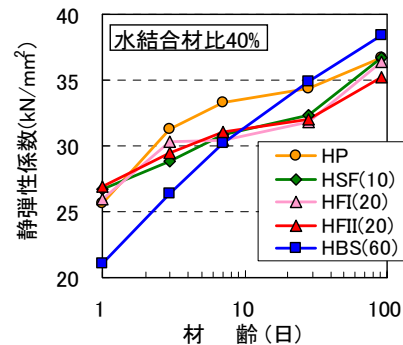


図-4 静弾性係数と材齢の関係

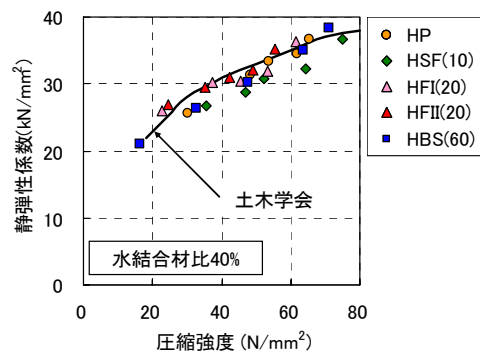


図-5 静弾性係数と圧縮強度の関係

本研究では、早強セメント単味のHPとフライアッシュ1種を用いたHFI(20)の乾燥収縮ひずみ測定を行わなかったため、図には参考として、本研究とは別に実施した一般的なセメントである普通ポルトランドセメント(W/B=40%、単位水量=138kg/m³、以下普通セメントと記

述)と高炉セメントB種(W/B=40%、単位水量=136kg/m³、以下高炉Bと記述)を用いたコンクリートの試験結果も併記している。一般に、乾燥収縮ひずみの限界値は500~700 μ 程度としてよいことが2002年制定土木学会コンクリート標準示方書施工編で示されているが、併記した普通セメントや高炉Bの測定値はこの範囲より若干大きめの値となっている。なお、これらのコンクリートの配合については、既往の研究⁸⁾を参照されたい。

図より、シリカフェームを用いたHSF(10)は、乾燥材齢50日程度までは普通セメントよりも収縮ひずみが大きかったが、その後逆転しフライアッシュII種を用いたHFII(20)と同程度となった。高炉スラグ微粉末を用いたHBS(60)は、いずれの材齢においても最も収縮ひずみが小さかった。既往の研究によると、スラグの比表面積および置換率が大きいほど、乾燥日数3週間程度までの乾燥初期段階における乾燥収縮量はやや増加傾向にあることが報告されているが⁹⁾、本研究の範囲内ではそのような傾向は見られなかった。このように、いずれの混和材を用いた配合においても、一般的なセメントである普通セメントや高炉Bより収縮ひずみは小さい結果であった。

図-7に乾燥材齢と供試体の質量変化率の関係を示す。収縮ひずみが最も小さかったHBS(60)は、質量変化が最も小さく、以下HSF(10)、HFII(20)の順となり、質量変化率は結合材の種類により異なった。

図-8に質量減少率と乾燥収縮ひずみの関係を示す。全体として、質量減少率が高いほど収縮ひずみは大きくなる傾向がみられ、収縮が小さかったHBS(60)は質量減少率が最も小さかった。他方、同一質量減少率当たりのひずみ量は、HBS(60)が最も大きく、以下HSF(10)、HFII(20)の順となった。乾燥収縮のメカニズムには諸説があり一概に説明されないが、比較的良好に用いられている毛細管張力説によると¹⁰⁾、乾燥により細孔内の水が逸散する際に生じる毛細管張力は細孔径が小さいほど大きくなる。このため、細孔が緻密な配合ほど収縮ひずみは大きくなると思われる。しかし、細孔が緻密なほど細孔内の水は逸散しにくくなり強度も増加するため、最終的な収縮ひずみは細孔径の大小による毛細管張力だけでなく、逸散する水の総量や強度も考慮する必要がある。本研究においては、上記のメカニズムを考慮すると、スラグやシリカフェームを用いたコンクリートは細孔が緻密化し、同一質量減少率当たりのひずみ量は大きいものの、水分が逸散しにくくなるため全体の質量減少は小さくなり、その影響により特にスラグを用いたものは全体の収縮ひずみが小さくなったことが考えられる。細孔の緻密化については、図-1に示したように、乾燥開始材齢である材齢7日以降の圧縮強度は、HSF(10)が最も大きく、次いでHBS(60)、HFII(20)の順となっており、特に

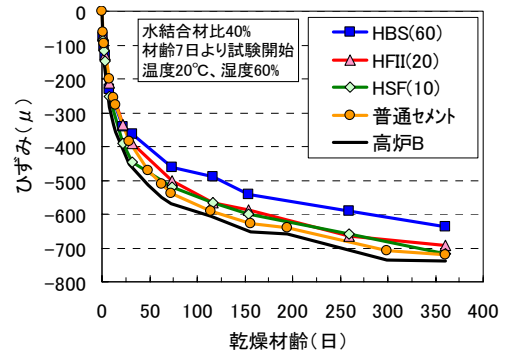


図-6 乾燥材齢と収縮ひずみの関係

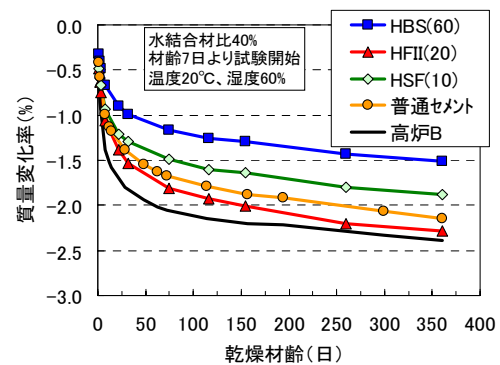


図-7 乾燥材齢と質量変化率の関係

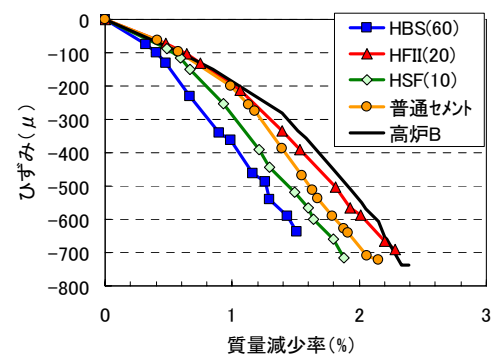


図-8 収縮ひずみと質量減少率の関係

HBS(60)は強度の増加割合が最も大きく、このことから細孔が緻密化していることがわかる。なお、図-1に示した圧縮強度は水中養生後のものであり、材齢7日以降に温度20℃、相対湿度60%の室内で乾燥を受けたコンクリートの強度発現とは異なる。しかし、スラグを用いたコンクリートを7日間標準養生した後に温度20℃、湿度50%の室内で乾燥させてもその後100日程度までは強度が増進し、長期にわたる水和反応により緻密な組織となることが報告されており⁹⁾、本研究においても同様の現象が起こっていると考えられる。

以上のことから、乾燥収縮ひずみは供試体の質量減少に伴い増大するが、収縮の程度は結合材の種類により異なることがわかった。また、いずれの混和材を用いた場合でも、一般的なセメントを用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみと同程度以下であり、実構造物への適用性が

あると考えられる。ただし、これらの傾向は、コンクリートの単位水量や乾燥開始材齢、適用される環境条件などにより異なるものと考えられるため、配合条件や使用条件を考慮して混和材の種類を適切に選択することが重要と考えられる。

3.5 塩分浸透抵抗性

電気泳動法を用いた塩分浸透試験により得られた各コンクリートの実効拡散係数を図-9に示す。なお、図には一般的なセメントである普通セメントおよび高炉Bの試験結果も併記している。図から早強セメント単味のHPに比べて、混和材を用いた配合はいずれも拡散係数が低下しており、特にスラグとシリカフェームを用いたHBS(60)とHSF(10)は、一般に塩分浸透抵抗性に優れるとされている高炉Bよりもさらに拡散係数は小さかった。しかし、フライアッシュを用いた配合は、早強セメントよりは拡散係数が小さくなるものの、普通セメントと同程度であり、本試験においては、期待されたほどの効果はみられなかった。

図-10に実効拡散係数とフィックの拡散方程式を用いて行った100年後の塩化物イオンの浸透予測結果を示す。なお、予測に用いた表面塩化物イオン量は、2002年制定土木学会コンクリート標準示方書施工編¹¹⁾の塩化物イオンに対する照査で示されている汀線付近に相当する 9.0kg/m^3 を用いた。図より、コンクリートのみで100年後の鋼材位置における塩分濃度を鋼材腐食限界値以下に抑制するには、HFII(20)ではかぶり7cm程度必要なのに対し、HBS(60)やHSF(10)では一般的なかぶり7cm程度でも十分な抵抗性を有することとなり、ライフサイクルコストの低減に寄与できる可能性が極めて高いことがわかった。なお、実効拡散係数は通常耐塩害設計で用いられている見かけの拡散係数とは異なりイオンの電気泳動のしやすさを表す係数であるが、通常の拡散による塩分浸透の場合、塩分の固定化や吸着などの影響が含まれることから、実効拡散係数は安全側で評価できると考えられる。

3.6 水中凍結融解抵抗性

図-11に真水および塩水による水中凍結融解試験結果を示す。真水による試験では、スラグを用いたHBS(60)は、相対動弾性係数および質量の変化が最も小さく、HP単味よりも耐久性が向上した。その他の混和材を用いた供試体は、早強単味よりも若干相対動弾性係数が小さくなったが、いずれの結合材も凍結融解300サイクル終了後の相対動弾性係数は85%以上であり、耐凍害性は極めて高い結果となった。

一方、3%NaCl水溶液による試験では、全体としては真水よりも劣化が激しかったが、スラグを用いた供試体は相対動弾性係数および質量減少率ともに真水と同程度

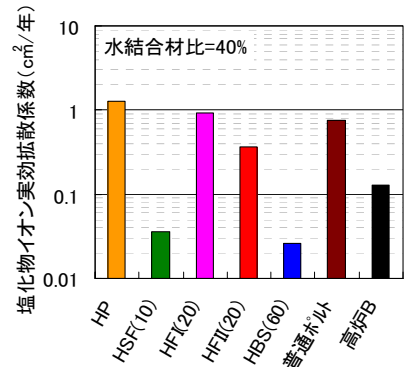


図-9 塩化物イオンの実効拡散係数

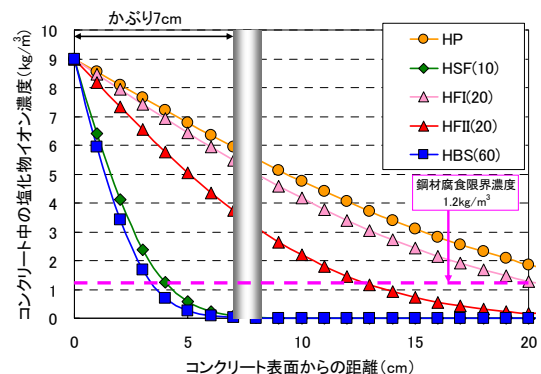


図-10 100年後の塩化物イオンの浸透予測

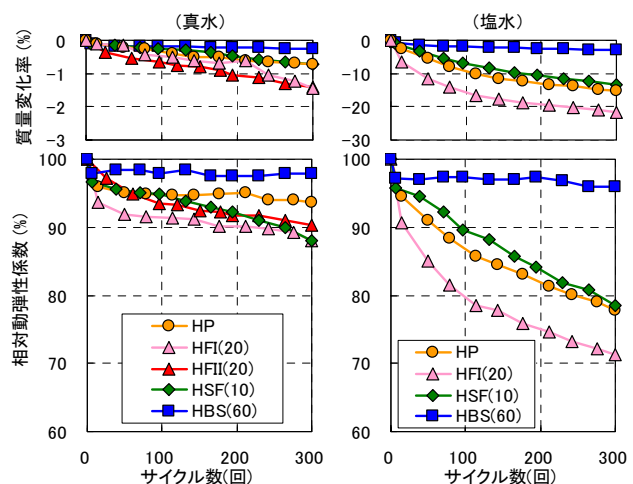


図-11 水中凍結融解試験結果

であり、極めて高い耐久性となった。HP単味とシリカフェームを用いたHSF(10)はほぼ同程度で推移し、300サイクル後の相対動弾性係数は80%を下回り、質量減少率も10%以上と大きくなった。また、フライアッシュI種を用いた供試体は300サイクル後の相対動弾性係数が70%まで低下し、質量減少率も20%と最も大きくなった。

以上のように、試験水により耐凍害性は異なり、真水による試験ではいずれも高い耐凍害性を示したが、塩水による試験では、結合材の種類により耐凍害性に差がみられ、環境に応じて適切に結合材を選定する必要があることが明らかとなった。なお、耐凍害性の低下により、

塩分浸透性能も低下することが予想されるため、複合劣化を考慮した評価が必要となる。しかし、例えば本研究においては、スラグを用いた場合、塩水による凍結融解試験でも凍害劣化は極めて小さいため、塩分浸透を抑制できると考えられることから、過酷環境下においてもコンクリートの高耐久化を実現できる可能性が高いと考えられる。

3.7 スケーリング抵抗性

図-12 にスケーリング量と凍結融解サイクル数の関係を示す。早強セメント単味とフライアッシュⅠ種は200サイクルまでの試験結果を示しているが、既に他の結合材よりもスケーリング量が多い傾向がみられた。一方、300サイクルを終了した他の結合材をみると、シリカフェームは75サイクル以降スケーリング量が増加する傾向がみられ大きくなったが、スラグを用いた供試体はスケーリング量が漸増したもののその量は小さかった。他方、フライアッシュⅡ種を用いた供試体は、スケーリングが大きく抑制された。このように、スケーリング量は結合材の種類により異なる傾向がみられた。また、これらの傾向は、図-11 に示した3%NaClを用いた水中凍結融解試験結果と概ね同様の傾向を示していた。しかし、両試験では供試体の養生条件や試験開始材齢が異なっていること、および塩水を用いた場合には、塩水との反応によるCaCl₂の溶出などが考えられるため、今後はこれらの耐久性に及ぼすコンクリートの細孔構造やCa(OH)₂量の影響について詳細に検討する必要がある。

4. まとめ

本研究では、コンクリート構造物の新規建設あるいは更新時の耐久性向上対策として、早強セメントと各種混和材を用いたコンクリートのPC構造物への適用性に関する検討を行った。これらの成果をまとめると以下のようになる。

- (1) 用いる混和材の種類により強度発現特性は異なるものの、強度の観点からはPC構造物への適用は十分可能と判断できる。
- (2) 乾燥収縮ひずみは結合材の種類により異なるが、いずれの混和材を用いた場合でも、一般的なセメントを用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみと同程度以下であり、実構造物への適用性があると考えられる。
- (3) 塩害や凍害に対しても混和材を環境に応じて適切に選定することにより、コンクリートの高耐久化が可能である。

参考文献

- 1) 吉田行, 田口史雄, 嶋田久俊: 改質ビーライト系セメントを用いたコンクリートの強度・発熱特性および

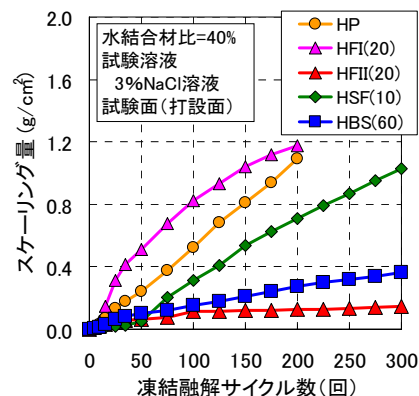


図-12 スケーリング量と凍結融解サイクルの関係

凍結融解抵抗性, 北海道開発土木研究所月報, No.578, pp.4-13, 2001.8

- 2) 吉田行, 田口史雄, 渡辺宏: 高炉スラグ微粉末を用いた改質ビーライト系セメントコンクリートの塩分浸透性, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.639-644, 2002.6
- 3) 吉田行, 田口史雄, 名和豊春, 渡辺宏: 高炉スラグ微粉末を用いた改質ビーライト系セメントコンクリートの塩分浸透性に及ぼす諸要因の影響: コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.777-782, 2004.7
- 4) 吉田行, 田口史雄, 名和豊春, 渡辺宏: 高炉スラグ微粉末を用いた改質ビーライト系セメントコンクリートの中性化, 平成15年度土木学会北海道支部論文報告集, 第60号, V-28, pp.766-767, 2004.1
- 5) 土木学会: シリカフェームを用いたコンクリートの設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー第80号, pp.5-9, 1995.10
- 6) 土木学会: 2005年制定コンクリート標準示方書 [規準編] 土木学会規準および関連規準, pp.267-274, 2005.3
- 7) 土木学会: 2002年制定コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], pp.21-29, 2002.3
- 8) 吉田行, 田口史雄, 名和豊春, 渡辺宏: 各種結合材を用いたコンクリートのスケーリング抵抗性, 第61回土木学会年次学術講演会概要集, V-391, pp.779-780, 2006.9
- 9) 土木学会: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針, コンクリートライブラリー第86号, pp.95-98, 1996.6
- 10) 例えば, 日本コンクリート工学協会: 自己収縮研究委員会報告書, pp.51-54, 1996.11
- 11) 土木学会: 2002年制定コンクリート標準示方書 [施工編], pp.24-28, 2002.3