

論文 混和材を高含有したコンクリートの強度発現および促進中性化に関する実験的検討

小林 利充^{*1}・溝渕 麻子^{*2}・近松 竜一^{*3}・一瀬 賢一^{*4}

要旨：環境負荷低減の観点から、混和材を高含有したコンクリートの積極的利用を図ることを目的に、二酸化炭素排出量原単位の少ない高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材を結合材に使用し、各種結合材の組合せおよび混合割合が強度発現および促進中性化に及ぼす影響について検討した。併せて、混和材を高含有したコンクリートの中性化抑制対策について検討している。その結果、混和材を高含有したコンクリートにおいて、中性化速度係数は圧縮強度と高い相関があること、早強セメントの使用あるいは膨張材を外割(細骨材の一部と置換)で混合することで、強度の増進と、中性化速度係数を低減できることを確認した。

キーワード：高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、混和材、圧縮強度、中性化

1. はじめに

近年、コンクリート分野においても、環境負荷を低減する取組みが各種行われている。なかでも、地球温暖化の抑制対策の一環としての二酸化炭素排出量の削減と副産物の有効利用を両立させた低炭素型のコンクリートに関する研究が多数報告されている¹⁾⁶⁾。これらの報告は、ポルトランドセメントよりも二酸化炭素排出量が少ない高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材を高置換させた事例が多く、筆者らもこれまでに環境配慮型コンクリートの開発を行っている¹⁾⁶⁾。

一般に、高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材を使用した場合、コンシステンシーの改善、長期強度の増進、水和熱の低減、アルカリシリカ反応の抑制などに有効であるとされている。一方で、これらの混和材を高含有したコンクリートは、強度発現性の低下や中性化の進行が課題として挙げられる。

本研究では、混和材の混合割合および水結合材比がコンクリートの強度および中性化に及ぼす影響について実験的に検討を行った。また、混和材を高含有したコンクリートの中性化抑制対策についても併せて検討した。

2. 実験概要

本実験は、2つのフェーズに分けて実施した。フェーズ1では、各種結合材の組合せおよび結合材の混合割合が標準養生強度および中性化速度係数に及ぼす影響について検討した。また、現行の促進中性化試験は、測定が約8カ月にわたり、最終的な結果が得られるまでには長い時間を要する。このため、中性化の促進期間の違いが試験結果に及ぼす影響についても検討した。

フェーズ2では、混和材を高含有したコンクリートの中性化抑制対策として、セメントの種類および早強性膨張材の適用が標準養生強度および中性化速度係数に及ぼす影響について検討した。

フェーズ1で使用したコンクリートの使用材料を表-1に示す。結合材は、普通ポルトランドセメント(OPC)をベースとして、その一部を高炉スラグ微粉末(BS)、フライアッシュ(FA)、ジルコニア起源のシリカフェーム(SFG)で置き換えた。なお、使用材料として、SFG 以外は JIS に規定されるものを使用した。また、フェーズ2で使用したコンクリートの使用材料を表-2に示す。結合材は、普通ポルトランドセメント(OPC)または早強ポルトランドセメント(HC)をベースとして、その一部を高炉スラグ微粉末(BS)に置き換えた。また、混和材として石灰系の早強性膨張材を使用した。

表-1 使用材料 (フェーズ1)

分類		種類	
結合材(B)	セメント	普通ポルトランドセメント(OPC)	(3.16g/cm ³)*
	混和材	①高炉スラグ微粉末(BS)	(2.89g/cm ³)
		②フライアッシュII種(FA)	(2.17g/cm ³)
		③シリカフェーム(SFG)	(2.23g/cm ³)
水(W)		上水道水	
細骨材(S)		木更津産陸砂 (2.62g/cm ³)	
粗骨材(G)		青梅産硬質砂岩砕石 (2.64g/cm ³)	
混和剤(Ad)		①高性能 AE 減水剤(SP)(ホリカホソ酸系) ②AE 助剤(ロジンのカリウム塩)	

[注] () * : 密度 (骨材は表乾密度) を示す

比表面積 (cm²/g) : OPC(3,160), BS(4,360),
FA(4,180), SFG(87,000)

*1 (株)大林組 技術研究所 生産技術研究部 副課長 博士(工学) (正会員)
 *2 (株)大林組 技術研究所 生産技術研究部 主任(正会員)
 *3 (株)大林組 技術研究所 生産技術研究部 担当課長 博士(工学) (正会員)
 *4 (株)大林組 技術研究所 生産技術研究部長 博士(工学) (正会員)

フェーズ1の設定条件および調合条件を表-3および表-4に示す。ここで、1成分とはOPCを100%使用した場合とする。また、2成分とはOPCの一部をBSで置換した場合とし、3成分とは2成分にさらにFAを混合したものを示し、4成分とは3成分にSFGを混合した組合せとする。また、フェーズ2の調合条件を表-5に示す。フェーズ2は、普通ポルトランドセメントまたは早強ポルトランドセメントをベースとし、いずれもセメントを15%、高炉スラグ微粉末を85%とした混合割合としている。また、早強性膨張材は外割りで、細骨材の一部と置換した。また、水結合材比は44%とした。

コンクリートの練混ぜは、20℃の試験室で行い、容量600の水平強制練りミキサを用いて、1バッチの練混ぜ量を400とした。練混ぜ手順としては、結合材および骨材を10秒間空練りした後、水と混和剤を加えて90から150秒間練り混ぜた。

試験項目としては、標準養生による圧縮強度試験(JIS A 1108)および促進中性化試験(JIS A 1153)を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 フェーズ1

(1) 圧縮強度

結合材の混合割合と28日標準養生強度の関係を図-1に示す。BSを用いた場合は、その混合割合の増加に伴って標準養生強度が低下した(図中の2成分を参照)。特に、BSの混合割合を85%とした場合は、C100%の50~60%となった。また、FAを用いた場合は、BSと同様に、水結合材比にかかわらず、その混合割合の増加に伴って標準養生強度は低下する傾向にある(図中の3成分を参照)。特に、FAの混合割合を20%とした場合は、FAを用いない場合の80~90%になった。一方、SFGを用いた場合は、その混合割合による標準養生強度に大きな差異は認められなかった(図中の4成分を参照)。これは、混合割合が少ないこともあるが、高強度領域と異なり、微粒子を混合しても、一般的なマイクロファイラー効果による顕著な強度増進は得られ難いものと推察される。

結合材水比と28日標準養生強度の関係を調合ごとに整理し、図-2および図-3に示す。結合材の混合割合にかかわらず、いずれの場合も結合材水比の増加に伴い、28日標準養生強度は増加する結果となった。2成分(OPCとBSの組合せ)では、BSの混合割合の増加に伴い、傾きは小さくなった。また、3成分(CとBSとFAの組合せ)は、OPCの混合割合にかかわらず、FAの混合割合が10%および20%では、両者の傾きはほぼ同程度であるが、FAの混合割合が30%になると、若干傾きが小さくなった。参考までに、表-6には、図-2および図-3から求めた一次式($Y=aX+b$)による回帰分析結果を示す。

表-2 使用材料 (フェーズ2)

分類		種類
結合材	セメント	①普通ポルトランドセメント(OPC) (3.16g/cm ³) ②早強ポルトランドセメント(HC) (3.16g/cm ³)
	混和材	高炉スラグ微粉末(BS) (2.89g/cm ³)
水		表-1と同じ
骨材		表-1と同じ
混和材		石灰系早強性膨張材(SI) (CaO:65%, SO ₃ :15%, SiO ₂ :12.5%)
混和剤		表-1と同じ

[注] HCの比表面積 (cm²/g) : 4,580

表-3 設定条件 (フェーズ1)

項目	設定条件
スランブまたはスランブプロ(cm)	W/B30% : 60±10 W/B37% : 50±7.5 W/B44% : 21±2
空気量(%)	4.5±1.5
粗骨材かさ容積(m ³ /m ³)	W/B30% : 0.56 W/B37% : 0.57 W/B44% : 0.58
SP添加率(%)	0.7から1.3

表-4 調合条件 (フェーズ1)

No.	成分	結合材の混合割合(%)				単位水量*
		OPC	BS	FA	SFG	
1	1	100	0	0	0	160
2	2	50	50	0	0	152
3		25	75	0	0	149
4		15	85	0	0	147
5		10	90	0	0	147
6	3	25	65	10	0	144
7		25	55	20	0	137
8		15	75	10	0	144
9		15	65	20	0	137
10		15	55	30	0	132
11		4	15	65	17.5	2.5
12	15		65	15	5	135

[注] * : 単位(kg/m³)

表-5 調合条件 (フェーズ2)

No.	結合材の混合割合(%)			SI*	W*	W/P
	OPC	HC	BS			
1	15	0	85	0	150	44.0
2	15	0	85	20	150	41.6
3	15	0	85	25	150	41.0
4	15	0	85	30	150	40.4
5	0	15	85	0	152	44.0
6	0	15	85	20	152	41.6
7	0	15	85	25	152	41.0
8	0	15	85	30	152	40.5

W/B : 44%, スランブ : 21±2cm, W/P : 水粉体比(%)
空気量 : 4.5±1.5%, 粗骨材かさ容積 : 0.58m³/m³

[注] * : 単位(kg/m³)

(2) 中性化

結合材の混合割合と促進中性化試験による中性化速度係数(26週)の関係を図-4に示す。混和材の種類に着目すると、中性化速度係数はBSの混合割合の増加に伴い増大し、特に、水結合材比が大きいものほど顕著である(図中の2成分を参照)。また、BSの一部をFAに置換した場合、一部を除き、FAの混合割合の増加に伴い、中性化速度係数は増大する傾向を示す。一方、FAの一部をSFGに置換しても、中性化速度係数は同程度の値を示した。ただし、いずれの結合材の組合せにおいても、水結合材比の低下に伴い中性化速度係数は低減する。

ここで、前述したデータを28日標準養生強度と中性化速度係数(26週)の間に整理した結果を図-5に、28日標準養生強度の逆数と中性化速度係数(26週)の間に整理した結果を図-6に示す。全体的な傾向としては、中性化速度係数と強度の間には高い相関が認められ、水結合材比を低減させ、緻密な組織を形成することで、一般のコンクリートと同様に中性化の進行を抑制できるといえる。また、中性化速度係数は、混和材の組合せにかかわらず、セメントの混合割合を指標として整理できる。ただし、限られたデータではあるが、本実験の結果からは、同一の強度でも、セメントの混合割合が小さいものほど、中性化速度は速くなる傾向にある。

一般に、コンクリートの中性化の進行は、材齢の平方根および炭酸ガス濃度の平方根に比例するとされており⁷⁾、式(1)で表される。

$$C = A\sqrt{(CO_2/5)} \times \sqrt{t} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、C：中性化深さ(mm)
 CO₂：炭酸ガス濃度(%)
 A：促進中性化試験における
 中性化速度係数(mm/√週)
 t：材齢(週)

表-6 回帰分析結果

No.	成分	結合材の混合割合(%)			定数	
		OPC	BS	FA	a	b
1	1	100	0	0	30.8	-22.4
2	2	50	50	0	28.7	-24.8
3		25	75	0	20.9	-11.2
4		15	85	0	21.9	-25.0
5		10	90	0	12.0	-7.2
6	3	25	65	10	25.7	-31.3
7		25	55	20	23.5	-24.8
8		15	75	10	18.5	-16.7
9	3	15	65	20	20.6	-24.8
10		15	55	30	14.5	-11.1

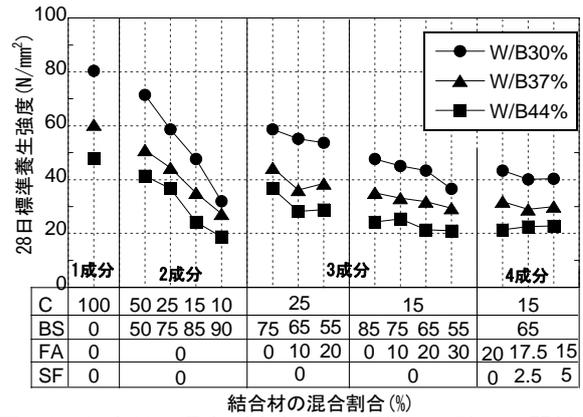


図-1 結合材の混合割合と28日標準養生強度の関係

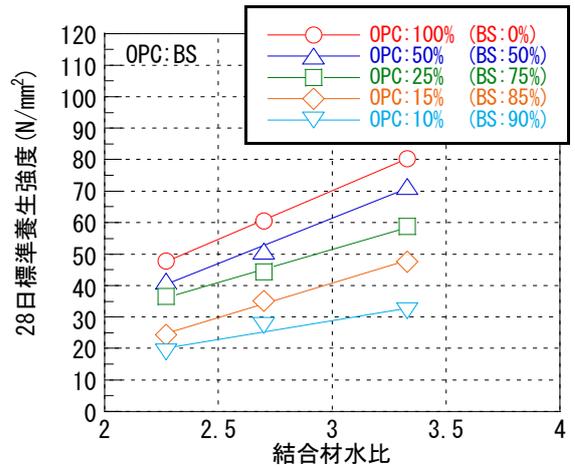


図-2 結合材水比と28日標準養生強度の関係(2成分)

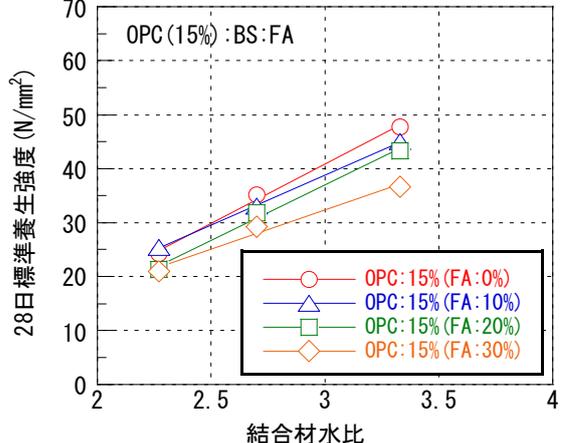
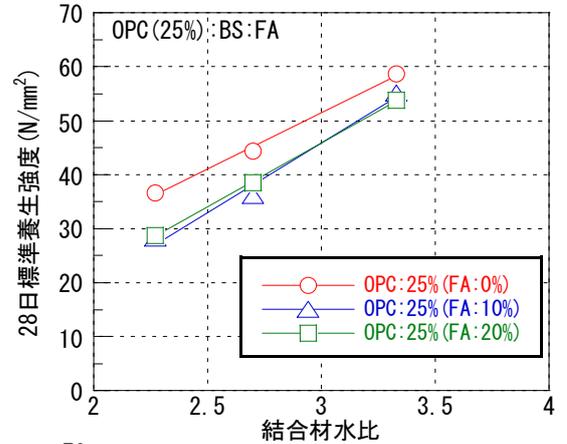


図-3 結合材水比と28日標準養生強度の関係(3成分)

ここで、計画供用期間を 65 年とし、屋内の環境条件 (CO₂ 濃度 : 0.1%⁷⁾) において、所定のかぶり厚さを満足する強度を、セメントの混合割合で整理した結果を表-7 に示す。なお、中性化速度係数と 28 日標準養生強度の関係は、図-6 の結果をもとに算出した。この結果から、かぶり厚さ(中性化深さ)が 40mm の場合、セメントの混合割合を 25%としても、28 日標準養生強度は 37.0N/mm² であり、一般の構造物にも十分に適用可能と考えられる。

JIS A 1153 による促進中性化試験は、前養生として材齢 4 週まで温度 20±2℃の湿潤養生を実施し、その後、温度 20±2℃、相対湿度 60±5%の恒温恒湿室に材齢 8 週まで静置する。この時点から促進試験(温度 20±2℃、相対湿度 60±5%、二酸化炭素濃度 5±0.2%)を開始し、各材齢(1, 4, 8, 13 および 26 週)における中性化深さを測定する。このように、促進中性化試験は、前養生を含めると、34 週間(8 カ月)もの長時間を要する。そこで、中性化の促進期間の違いが試験結果に及ぼす影響について調べた。

短期の促進材齢による促進中性化速度係数と 26 週による中性化速度係数の関係を図-7 に示す。なお、図中に示す回帰式は、混和材を高含有するという観点から、セメントの混合割合が 25%以下のものを対象に算出した。この結果では、促進材齢 1 週、4 週および 8 週と促進材齢 26 週における中性化速度係数の関係を示している。いずれの促進材齢でも非常に高い相関が得られており、促進材齢 1 週においても相関係数が 0.96 である。ただし、促進材齢 1 週<促進材齢 4 週<促進材齢 8 週と促進期間が長いほど、促進材齢 26 週との相関性は高くなる傾向にある。限られたデータ数での評価ではあるが、セメントの混合割合が小さいものほどバラツキが多少大きくなる傾向が認められる。以上の結果によれば、促進材齢 1 週や 4 週においても促進材齢 26 週における中性化速度係数を比較的高い精度で推定することが可能であると考えられる。

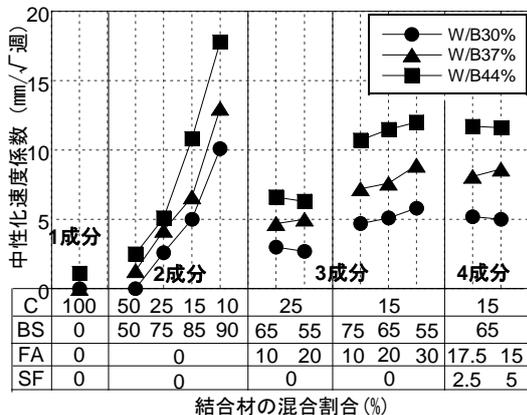


図-4 結合材の混合割合と中性化速度係数の関係

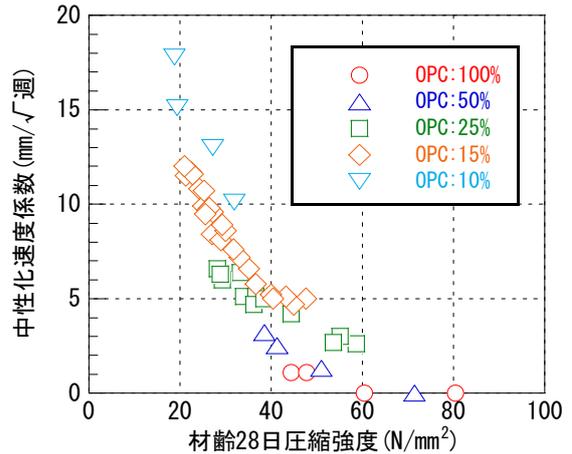


図-5 28 日標準養生強度と中性化速度係数の関係

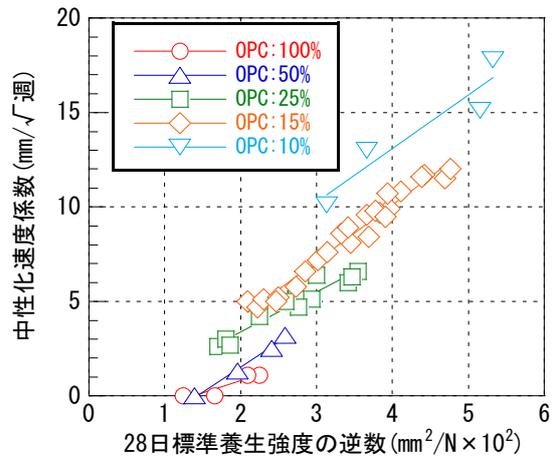
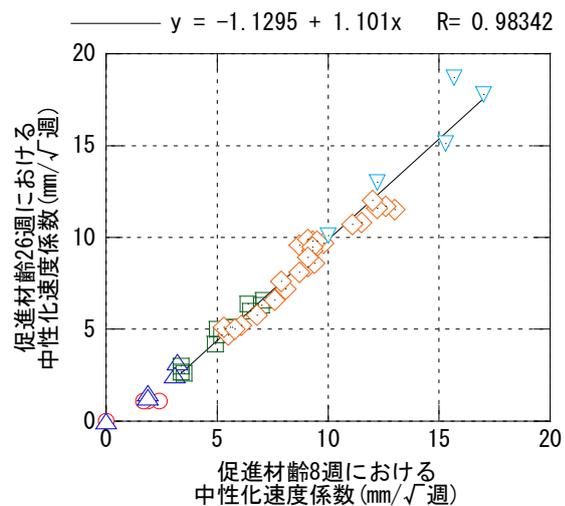
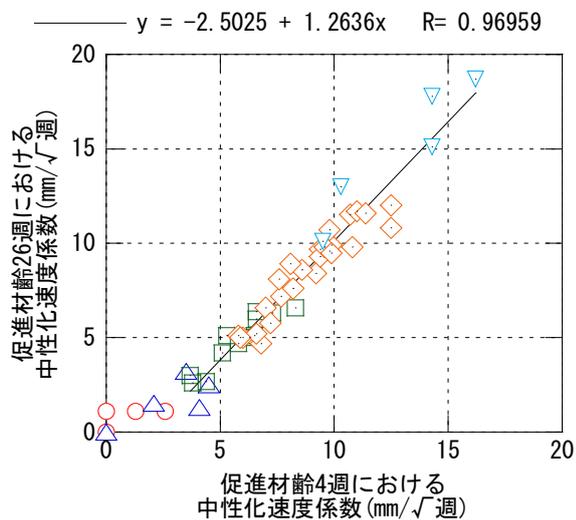
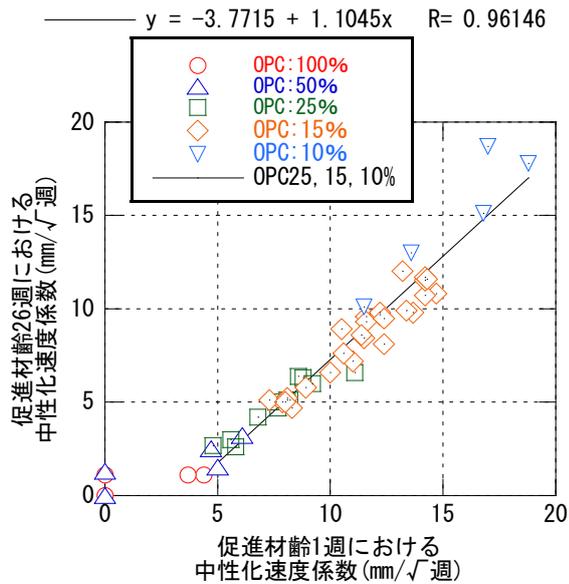


図-6 28 日標準養生強度(逆数)と中性化速度係数

表-7 かぶり厚さ(中性化深さ)と強度の関係

かぶり厚さ(中性化深さ)(mm)	中性化速度係数 (mm/√週)	セメントの混合割合 (%)	逆数	28 日標準養生強度 (N/mm ²)
30	3.65	100	4.23	23.7
		50	2.81	35.5
		25	2.13	47.0
		15	1.85	54.1
		10	0.66	151.3
40	4.87	100	5.18	19.3
		50	3.28	30.5
		25	2.70	37.0
		15	2.25	44.4
		10	1.09	91.6
50	6.08	100	6.12	16.3
		50	3.74	26.8
		25	3.27	30.6
		15	2.65	37.7
		10	1.52	65.8
60	7.30	100	7.07	14.1
		50	4.20	23.8
		25	3.85	26.0
		15	3.06	32.7
		10	1.95	51.3



図一 短期促進材齢による中性化速度係数と促進材齢 26 週における中性化速度係数の関係

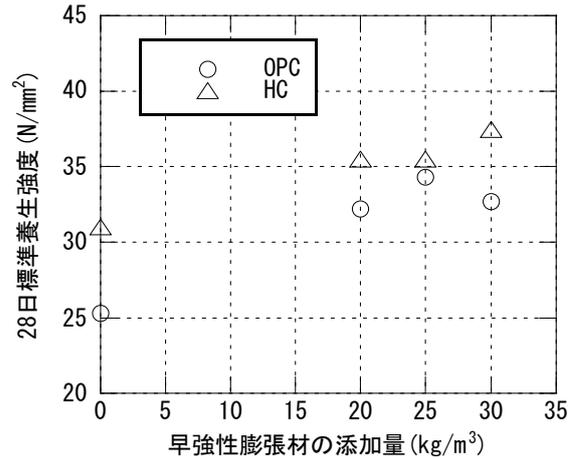


図-8 早強性膨張材添加量と 28 日標準養生強度の関係

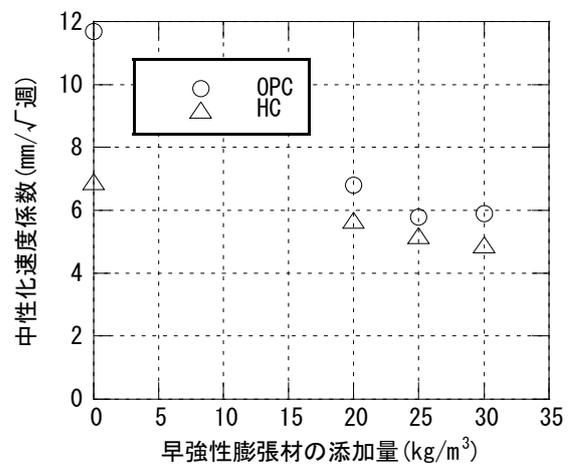


図-9 早強性膨張材添加量と中性化速度係数の関係

3.2 フェーズ 2

(1) 圧縮強度

早強性膨張材の添加量と 28 日標準養生強度の関係を図-8 に示す。ここで、ベースセメントを普通ポルトランドセメント(OPC)と早強ポルトランドセメント(HC)にし、セメントと高炉スラグ微粉末の混合割合を 15 : 85 とした。なお、早強性膨張材は外割り(細骨材置換)とした。この結果から、セメントの種類にかかわらず、早強性膨張材を使用することで標準養生強度は、1.2 から 1.4 倍程度高くなる傾向にある。また、早強性膨張材の添加にかかわらず、ベースセメントとして普通ポルトランドセメントよりも早強ポルトランドセメントを使用した方が標準養生強度は最大で 1.2 倍程度高くなる。

(2) 中性化

早強性膨張材の添加量と中性化速度係数の関係を図-9 に示す。セメントの種類にかかわらず、早強性膨張材を使用することで中性化速度係数は、最大 1/2 程度になり、著しく低減できることがわかる。また、早強性膨張材の添加にかかわらず、ベースセメントとして普通ポルトランドセメントよりも早強ポルトランドセメント

を使用した方が中性化速度係数は低減できる。これは、フェーズ1の結果からも明らかのように、圧縮強度が増進することで、組織が緻密になり、中性化の進行が抑制できたものとする。ただし、詳細な分析については引き続き検討を行う必要があり、今後の課題としたい。

4. まとめ

本実験の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- (1) 高炉スラグ微粉末およびフライアッシュをセメントの一部と高置換して用いた場合、その混合割合の増加に伴い、標準養生強度は低下する傾向にある。
- (2) 高炉スラグ微粉末およびフライアッシュをセメントの一部と高置換して用いた場合、その混合割合の増加に伴い、中性化速度係数は増大する傾向にある。
- (3) 中性化速度係数と強度の間には高い相関が認められ、水結合材比を低減させ、緻密な組織を形成することで中性化の進行を抑制できる。
- (4) 短期の促進材齢における結果から促進材齢 26 週における中性化速度係数を比較的高い精度で推定することができる。
- (5) ベースセメントとして、早強ポルトランドセメントの使用あるいは早強性膨張材を外割(細骨材の一部と置換)で混合することで、標準養生強度が増大し、中性化速度係数が低減する。

謝辞

本実験(フェーズ 1)の実施にあたり、日本シーカ(株)、宇部興産(株)に、ご協力を頂いた。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 溝渕麻子, 小林利充, 近松竜一, 一瀬賢一: 混和材を高置換した各種コンクリートの基礎的性質およびCO₂排出量の削減効果, 混和材を積極的に使用するコンクリートに関するシンポジウム, pp.167-172, 2011.12
- 2) 齋藤尚, 堺孝司, 鈴木康範, 松家武樹: 低水結合材比におけるフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を用いたローカーボンコンクリートの物性, 混和材を積極的に使用するコンクリートに関するシンポジウム, pp.173-180, 2011.12
- 3) 大澤友宏, 平田隆祥, 二戸信和, 人見尚: 種々の混和材を高置換したセメント系混合材料の基礎物性とCO₂削減効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.179-184, 2010.7
- 4) 坂田昇, 林大介, 坂井吾郎, 宮川豊章: 高炉スラグ微粉末を大量に混合したRCDコンクリートに関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.191-196, 2010.7
- 5) 辻大二郎, 和地正浩, 三井健郎, 米澤敏男ほか: 高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの基礎物性(その1からその3), 日本建築学会学術講演梗概集 2011 年度大会(関東) A-1 材料施工, pp.205-210, 2011.8
- 6) 溝渕麻子, 小林利充, 近松竜一, 一瀬賢一: 環境配慮型コンクリートの基礎的性質に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.215-220, 2010.7
- 7) 日本建築学会: 高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説, 丸善, pp.83-88, 1991.7