

論文 混和材を高含有したコンクリートの性能改善に関する実験的検討

溝渕 麻子*1・小林 利充*2・近松 竜一*3・一瀬 賢一*4

要旨：本研究は、CO₂ 排出量を大幅に削減した低炭素型のコンクリートを対象とし、高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の混和材を高含有したコンクリートについて、セメント種類の違いや膨張材、スラッジ微粉末等の使用材料が強度発現および中性化抑制に与える影響を実験的に検討した。その結果、高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の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やスラッジ微粉末等を外割（細骨材の一部と置換）で混合することで、強度の増進および中性化速度係数が低減できることを確認した。

キーワード：低炭素，圧縮強度，中性化，混和材，膨張材，スラッジ微粉末

1. はじめに

京都議定書の「第 1 約束期間」が 2008 年度に始まり 2012 年度で終了となり、2013 年度から京都議定書の「第 2 約束期間」が始まる¹⁾。我が国は 2011 年 3 月 11 日の東日本大震災より、火力発電による電力供給が増加しており、CO₂ 排出量の削減は厳しい情勢となっている。このような情勢のなか、建設業界において、低炭素化社会へ貢献出来ることとして、コンクリートの構成材料での CO₂ 排出量の削減が挙げられ、これに関する研究^{2) たとえば}が行われている。

コンクリートの構成材料のうち、結合材として使用されるセメントの CO₂ 排出量原単位は 757.9kg-CO₂/t と高い³⁾。筆者らは、結合材のうちセメントを CO₂ 排出量原単位の少ない混和材である高炉スラグ微粉末 (24.1kg-CO₂/t)³⁾およびフライアッシュ (17.9kg-CO₂/t)³⁾等で多量に置換したコンクリートの研究^{4),5)}を進めている。高炉スラグ微粉末やフライアッシュを用いたコンクリートは、ワーカビリティの改善や長期強度の増進、水和熱の減少、水密性の向上などの利点がある。しかし、初期強度の発現が小さく、中性化の進行が速いことが課題となっている。

本研究では、筆者らの既往の研究結果⁶⁾より、強度と中性化の関係に相関があることが分かっている。これを受け、(1) 強度増進を図る目的で早強ポルトランドセメントを使用、(2) 中性化抑制効果のあった早強性膨張材を外割添加使用、(3) 中性化抑制対策としてのアルカリ性付与を目的としてスラッジ等を外割添加使用とする 3 つの実験を行い、圧縮強度および中性化抑制に及ぼす影響について実験的に検討を行った。

2. 実験概要

本実験は、3 つの実験に分けて実施した。実験 1 (早強セメントの影響) では、結合材中のセメントの混合割合を 20%とした 3 成分のコンクリートとした。早強ポルトランドセメントと、普通ポルトランドセメントを比較用とした 2 種類のセメントを用い、水結合材比を 3 水準とした。セメントの種類および水結合材比をパラメータとした全 6 種類のコンクリートについて、フレッシュ性状、強度性状および中性化に及ぼす影響について検討した。

実験 2 (早強性膨張材の影響) では、結合材中のセメ

表-1 使用材料 (実験 1~3)

分類	種類	記号	品質
結合材 (B)	普通ポルトランドセメント	N	密度 3.16g/cm ³ 比表面積 3320cm ² /g
	早強ポルトランドセメント	H	密度 3.14g/cm ³ 比表面積 4510cm ² /g
	高炉スラグ微粉末	BS	密度 2.87g/cm ³ [注]石膏内添加 比表面積 4320cm ² /g
	フライアッシュ II 種	FA	密度 2.30g/cm ³ 比表面積 3900 cm ² /g
水	上水道水	W	東京都清瀬市
細骨材	陸砂	S	表乾密度 2.60g/cm ³ , 2.63g/cm ³ * 吸水率 1.63%, 1.52%* 粗粒率 2.62, 2.63*
粗骨材	碎石 2005	G	最大寸法 20mm 表乾密度 2.65g/cm ³ 吸水率 0.73%, 実積率 59.7%
混和材	早強性膨張材	SI	①Type-A:密度 3.17g/cm ³ ②Type-B:密度 3.08g/cm ³ ③Type-C:密度 3.10g/cm ³
	スラッジ微粉末	DS	密度 2.61g/cm ³ 比表面積 7990cm ² /g
混和剤	再生微粉	RP	密度 2.50g/cm ³
	高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤
	AE 剤	AE	ロジンのカリウム塩

[注] *: 実験 2

*1 (株)大林組技術研究所 生産技術研究部 主任 (正会員)
 *2 (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)
 *3 (株)大林組技術研究所 生産技術研究部 副部長 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)

表-2 実験組合せ

実験	セメントの種類	成分	W/B (%)	外割添加混和材*		CO ₂ 排出量 (kg/m ³)
				種類	添加量 (kg/m ³)	
1	普通 PC	3	30	-	-	58~84
	早強 PC		37			
2	普通 PC	2	44	セメント	20	65~73
				Type-A		62~68
				Type-B		62~68
				Type-C		62~68
3	普通 PC	2	44	スラッジ微粉末	10	49
					17	
				再生微粉	34	

[注] PC:ポルトランドセメント

*: 外割添加混和材の CO₂ 排出量のインベントリーデータは、材料供給元の情報による

表-3 設定条件 (共通)

項目	設定条件
スランブフロー	W/B 30% : 60±10cm W/B 37% : 50±7.5cm
スランブ	W/B 44% : 21±2.0cm
空気量	W/B 30% : 3.0±1.5% W/B 37%・44% : 4.5±1.5%
粗骨材かさ容積	W/B 30% : 0.56m ³ /m ³ W/B 37% : 0.57m ³ /m ³ W/B 44% : 0.58m ³ /m ³

[注]実験 2 および実験 3 は W/B 44%のみ

ントの混合割合を15%とした2成分のコンクリートとした。混和材として膨張率の異なる3種類の早強性膨張材およびこの添加量を3水準設定し、細骨材置換(外割)とした。比較用として無添加の基準ケースおよび普通ポルトランドセメントを結合材とは別に細骨材置換(外割)としたケースの全13種類のコンクリートについて、フレッシュ性状、強度性状および促進中性化に及ぼす影響について検討した。

実験3で(スラッジ微粉末および再生微粉の影響)は、結合材中のセメントの混合割合を実験2と同様に15%とした2成分のコンクリートとした。混和材として生コンスラッジを乾燥粉碎処理した微粉末⁷⁾(以下、スラッジ微粉末と称す)および再生微粉の2種類を用い、添加量を3水準設定した全7種類のコンクリートについて、フレッシュ性状、強度性状および中性化に及ぼす影響について検討した。

ここで、2成分とは結合材中のセメントの一部を高炉スラッジ微粉末(BS)で置換した場合とし、3成分とは2成分にさらにフライアッシュ(FA)を混合した組合せとする。

本研究で使用したコンクリートの使用材料および品質を表-1に、実験組合せを表-2に示す。各実験におけるCO₂排出量も併せて掲載する。参考までに、結合材

表-4 練混ぜ方法 (共通)

ミキサ形式	強制二軸練りミキサ (公称容量 60L)
練混ぜ量	実験1: 50L/バッチ 実験2: 40L/バッチ 実験3: 30L/バッチ
練混ぜ方法	W/B 30% : 空練り 10秒+(W+SP)投入 120秒 W/B 37,44% : 空練り 10秒+(W+SP)投入 90秒

[注]実験 2 および実験 3 は W/B 44%のみ

表-5 試験項目および試験方法 (共通)

項目		試験方法
フレッシュ性状	スランブ (スランブフロー)	JIS A 1101(1150)
	空気量	JIS A 1128
	室温・コンクリート温度	JIS A 1156
	単位容積質量	JIS A 1116
硬化性状	圧縮強度	JIS A 1108
耐久性	促進中性化試験	JIS A 1153

表-6 調合条件 (実験1)

No.	セメント種類	結合材の混合割合(%)				W/B (%)	W (kg/m ³)
		N	H	BS	FA		
1-N30	普通	20	0	65	15	30	141
1-N37						37	
1-N44						44	
1-H30	早強	0	20	65	15	30	143
1-H37						37	
1-H44						44	

表-7 調合条件 (実験2)

No.	混和材種類	結合材の混合割合(%)		W/B (%)	混和材添加量 (kg/m ³)	W (kg/m ³)
		N	BS			
2-0	基準	15	85	44	0	150
2-N20	セメント	15	85	44	20	150
2-N25					25	
2-N30					30	
2-A20	Type-A	15	85	44	20	150
2-A25					25	
2-A30					30	
2-B20	Type-B	15	85	44	20	150
2-B25					25	
2-B30					30	
2-C20	Type-C	15	85	44	20	150
2-C25					25	
2-C30					30	

表-8 調合条件 (実験3)

No.	混和材種類	結合材の混合割合(%)		W/B (%)	混和材添加率 (B×%)	W (kg/m ³)
		N	BS			
3-0	基準	15	85	44	0	150
3-DS3	スラッジ微粉末	15	85	44	3	150
3-DS5					5	
3-DS10					10	
3-RP3	再生微粉	15	85	44	3	150
3-RP5					5	
3-RP10					10	

にポルトランドセメントを 100% 使用する場合のコンクリートの CO₂ 排出量は 300kg/m³ 程度であり、本実験に用いた低炭素型のコンクリートは 70~80% 程度の低減となっている。設定条件を表-3 に、練混ぜ方法を表-4 に、試験項目および試験方法を表-5 にそれぞれ示す。

実験 1 では、単位水量は、普通ポルトランドセメントのケースが 141kg/m³、早強ポルトランドセメントのケースが 143kg/m³ とし、水結合材比は 30%、37% および 44% とした。設定値のスランプまたはスランプフローおよび空気量を満足するように、混和剤の添加量を調整した。

実験 2 および実験 3 では、水結合材比を 44% とし、単位水量を 150kg/m³ とした。調合条件を表-6 から表-8 に実験ごとに示す。

3. 実験結果および考察

3.1 実験 1：早強ポルトランドセメントの影響

(1) フレッシュ性状

フレッシュ性状の試験結果を表-9 に示す。セメントの種類によらず、混和剤の添加量を調整することにより、設定条件を満足する結果となっている。高性能 AE 減水剤の添加量は、水結合材比によらず、早強ポルトランドセメントの方が普通ポルトランドセメントと比較して、若干多い傾向がある。また、AE 助剤についても同様の傾向が見られる。

(2) 圧縮強度

調合別の圧縮強度を図-1 に示す。材齢 91 日の標準養生強度は、普通ポルトランドセメントで 34.7N/mm²~60.0N/mm²、早強ポルトランドセメントで 42.6N/mm²~67.7N/mm² である。いずれの調合でも、水結合材比の増大に伴って圧縮強度は減少する傾向が見られる。

同一水結合材比においてセメント種類別に比較すると、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圧縮強度は大きくなっている。これは、初期強度のみならず、材齢 91 日でも同じ結果である。なお、各材齢でのセメント種類の違いによる圧縮強度は、早強ポルトランドセメントのケースが普通ポルトランドセメントのケースの 1.1 から 1.2 倍程度大きくなっている。

以上のことから、早強ポルトランドセメントを用いることにより、長期的にも圧縮強度増進を図ることができていることを確認した。

(3) 中性化

調合別に促進中性化材齢 91 日の中性化速度係数を図-2 に示す。中性化速度係数は、普通ポルトランドセメントで 3.4mm/√週~8.1mm/√週、早強ポルトランドセメントで 1.8mm/√週~5.1mm/√週である。セメントの種類に関係なく、水結合材比の増大に伴い、中性化速度係数

表-9 フレッシュ試験結果 (実験 1)

No	セメント種類	W/B (%)	混和剤添加量 (B×%)		スランプ (cm)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/m ³)
			SP	AE				
1-N30	N (普通)	30	1.30	10A	-	64.5	2.3	2376
1-N37		37	1.10	5.5A	-	44.5	3.8	2330
1-N44		44	1.15	5A	19.0	-	4.7	2309
1-H30	H (早強)	30	1.40	15A	-	68.0	2.7	2357
1-H37		37	1.20	7A	-	49.0	4.8	2309
1-H44		44	1.30	5A	22.5	-	5.2	2293

[注] A=0.001

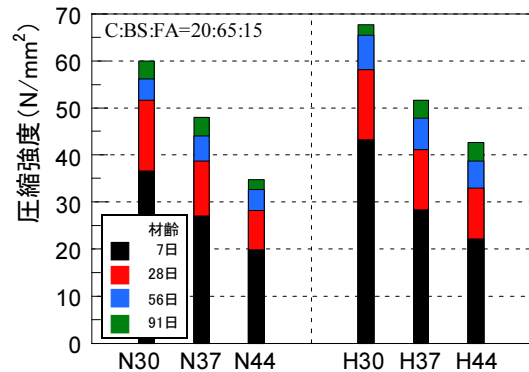


図-1 圧縮強度 (実験 1)

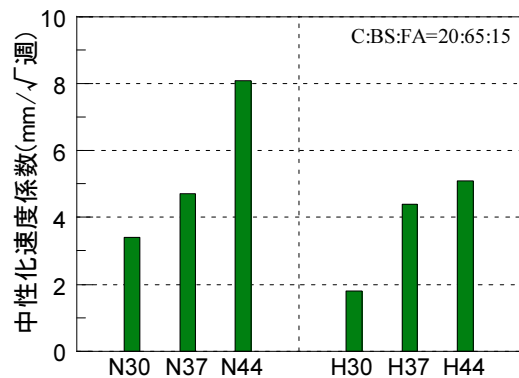


図-2 中性化速度係数 (実験 1)

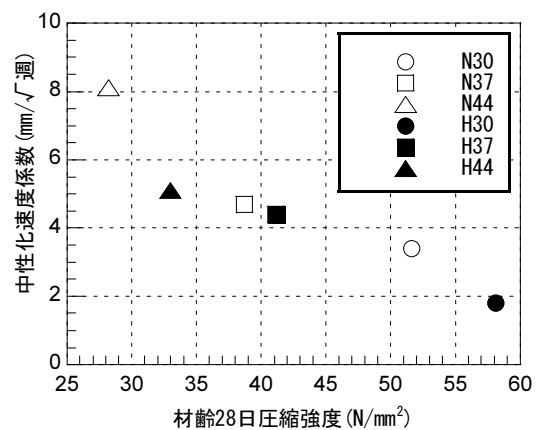


図-3 圧縮強度と中性化速度係数の関係 (実験 1)

も増加する傾向が見られる。

同一水結合材比においてセメントの種類別に比較すると、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小さく、W/B37%では大きな差が見られないが、W/B30%および44%では、早強ポルトランドセメントのケースは普通ポルトランドセメントのケースの0.53倍および0.63倍である。

次に、材齢28日標準養生強度と促進材齢91日の中性化速度係数の関係を図-3に示す。いずれも、圧縮強度の増加に伴い、中性化速度係数は減少する傾向が見られる。これは、既往の研究結果^{6),8)}とも一致しており、圧縮強度と中性化速度係数は相関があると考えられる。また、図-4に筆者らの既往の研究結果⁹⁾に、本実験結果を重ねてプロットする。既往の研究は結合材中の普通ポルトランドセメントの混合割合ごとにプロットしており、普通ポルトランドセメントの混合割合20%の本実験結果は、既往の研究結果の結合材中のセメントの混合割合が15%と25%の中間部にプロットされており、結合材中のセメントの混合割合における、圧縮強度と中性化速度係数で整理することができると思われる。

以上より、早強ポルトランドセメントを用いた場合、圧縮強度増進および中性化抑制に対して、効果的であることが推察される。

3.2 実験2：早強性膨張材の影響

(1) フレッシュ性状

フレッシュ性状の試験結果を表-10に示す。基準ケース(No.2-0)を除いて、混和剤添加量を一定としている中で、スランブは20.0~23.0cm、空気量は3.5~5.0%であり、いずれも設定条件を満足する結果となっている。なお、混和剤添加量は調査上、粉体(結合材+混和材)に対する割合で設定している。ここで、混和剤添加量を絶対量で比較してみても、No.2-0が多く、混和材を外割添加することにより、混和剤添加量を下げることとなる。特に、早強性膨張材を用いることによりフレッシュ性状は良好となる。

(2) 圧縮強度

調合別の圧縮強度を図-5に示す。材齢28日の標準養生強度は、混和材無添加の基準ケースは28.9N/mm²であり、混和材を添加したケースは、セメントの外割添加(No.2-N20~2-N30)が35.1~38.1N/mm²、Type-Aが33.8~35.8N/mm²、Type-Bが33.1~35.9N/mm²、Type-Cが31.9~37.4N/mm²である。いずれの材料においても、添加量の増加に伴い圧縮強度も増加する傾向が見られる。また、基準ケースと比較し、各種混和材を添加した全てのケースで1.1~1.3倍程度の強度増進がみられる。特に、セメントの外割添加およびType-Aが概ね大きい傾向がある。

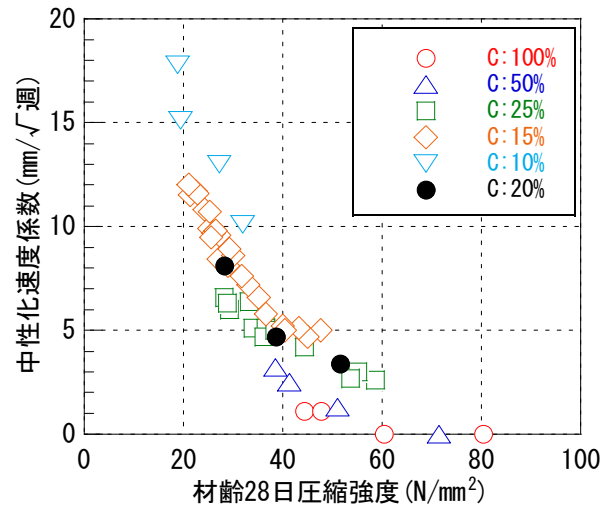


図-4 圧縮強度と中性化速度係数の関係 (実験1)

表-10 フレッシュ試験結果 (実験2)

No	混和材添加量 (kg/m ³)				混和剤添加量 (P×%)		スランブ (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/m ³)
	セメント	早強性膨張材種類			SP	AE			
		A	B	C					
2-0	0	0	0	0	1.10	0.5A	22.0	4.2	2329
2-N20	20	0	0	0	0.85	0	20.0	3.5	2349
2-N25	25	0	0	0	0.85	0.5A	20.5	4.2	2330
2-N30	30	0	0	0	0.85	0.5A	21.5	3.6	2346
2-A20	0	20	0	0	0.85	0.5A	22.0	4.6	2318
2-A25	0	25	0	0	0.85	0.5A	23.0	4.7	2318
2-A30	0	30	0	0	0.85	0.5A	22.5	4.4	2326
2-B20	0	0	20	0	0.85	0.5A	21.5	4.6	2318
2-B25	0	0	25	0	0.85	0.5A	22.5	4.4	2326
2-B30	0	0	30	0	0.85	0.5A	22.0	4.1	2332
2-C20	0	0	0	20	0.85	0.5A	21.0	5.0	2305
2-C25	0	0	0	25	0.85	0.5A	21.5	4.9	2313
2-C30	0	0	0	30	0.85	0.5A	22.0	4.4	2328

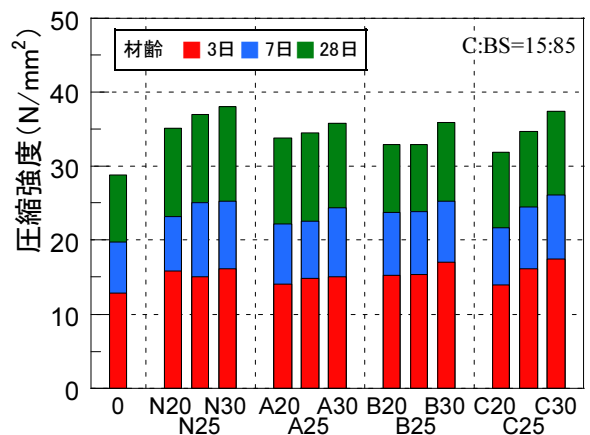


図-5 圧縮強度 (実験2)

(3) 中性化

調合別に、促進中性化材齢 91 日の中性化速度係数を図-6 に示す。中性化速度係数が一番大きいのは、基準ケースで 8.7mm/√週である。混和材を添加したケースは、Type-B が 5.8mm/√週、Type-C が 4.9mm/√週から 5.4mm/√週、Type-A が 4.1mm/√週から 4.6mm/√週である。

Type-A を添加したケースが、中性化速度係数が最も低い。

次に、材齢 28 日圧縮強度と促進材齢 91 日の中性化速度係数の関係を図-7 に示す。全体的には圧縮強度が高くなると中性化速度係数が低くなる傾向である。これは実験 1 の結果や既往の研究例とも一致している。

以上より、中性化抑制には Type-A を添加したケースが最も有効であると推察できる。

3.3 実験 3：スラッジ微粉末および再生微粉の影響

(1) フレッシュ性状

フレッシュ性状の試験結果を表-11 に示す。スランブおよび空気量は、いずれも設定条件を満足する結果となっている。スラッジ微粉末を添加したケースは、若干、高性能 AE 減水剤の添加量が多くなっている。

(2) 圧縮強度

調合別の圧縮強度を図-8 に示す。材齢 28 日の標準養生強度は、基準ケースで 26.9N/mm²、混和材を添加したケースは、スラッジ微粉末添加で 30.8N/mm²~35.4N/mm²、再生微粉添加で 27.4N/mm²~30.7N/mm² である。材齢ごとに基準との比較をすると、スラッジ添加で 1.1~1.3 倍、再生微粉で 1.0~1.1 倍になっている。

また、各混和材では、添加量の増加に伴い、圧縮強度も増大する傾向が見られた。混和材の種類によらず、いずれの材齢においても、基準よりも高い強度が得られている。特に、スラッジ微粉末には、未水和セメント分が残存しているため、強度増進が得られていると考える。

表-11 フレッシュ試験結果 (実験 3)

No	混和材		混和剤添加量 (B×%)		スランブ (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/m ³)
	種類	添加量 (B×%)	SP	AE			
3-0	基準	-	1.30	1A	22.5	4.7	2330
3-DS3	スラッジ微粉末	3	1.50	1.5A	22.0	3.5	2323
3-DS5		5	1.50	2A	23.0	4.3	2306
3-DS10		10	1.50	2A	22.5	3.8	2319
3-RP3		再生微粉	3	1.30	2A	23.0	4.7
3-RP5	5		1.30	2A	22.0	4.6	2298
3-RP10	10		1.30	2A	20.5	3.9	2312

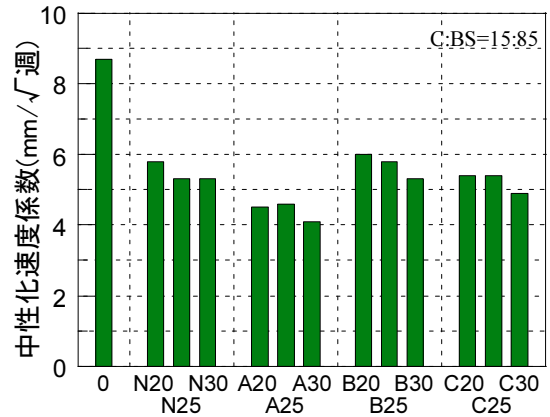


図-6 中性化速度係数 (実験 2)

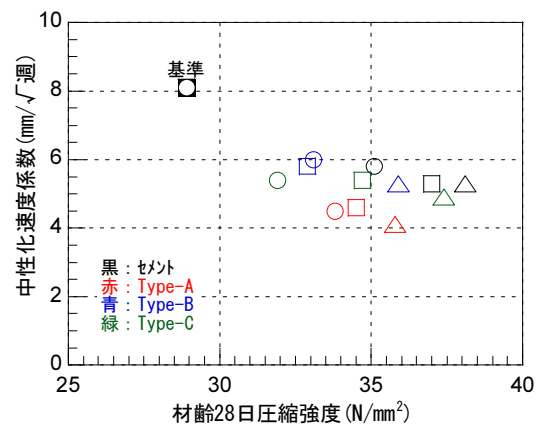


図-7 圧縮強度と中性化速度係数の関係 (実験 2)

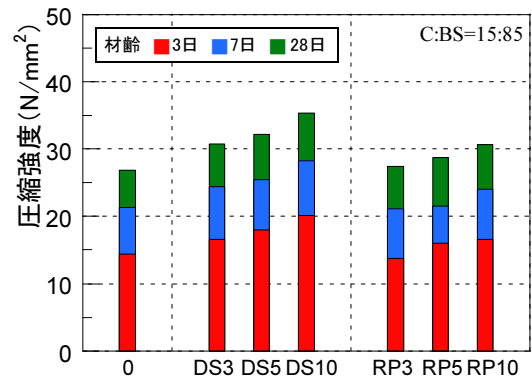


図-8 圧縮強度 (実験 3)

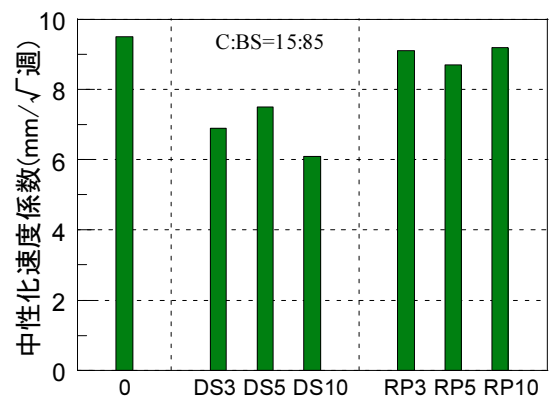


図-9 中性化速度係数 (実験 3)

(3) 中性化

調合別に、促進中性化材齢 91 日の中性化速度係数を図-9 に示す。中性化速度係数は、基準ケースが 9.5mm/√週、混和材を添加したケースは、スラッジ微粉末添加が 6.9mm/√週～7.5mm/√週、再生微粉添加が 8.1 mm/√週～9.3mm/√週であり、それぞれ基準に対して 0.74～0.81 倍、0.87～0.99 倍である。混和材添加量についてみると、スラッジ微粉末および再生微粉の両ケースにおいて、添加量と中性化速度係数には明確な相関が見られない。種類別にみると、中性化抑制対策としてはスラッジ微粉末の添加が有効と考える。

次に、材齢 28 日圧縮強度と中性化速度係数の関係を図-10 に示す。多少のバラツキはあるが、実験 1 および実験 2 と同様に、圧縮強度の増加に伴い、中性化速度係数が減少する傾向がみられた。

以上より、スラッジ微粉末を添加したケースが中性化抑制には効果的であると推察できる。

4. まとめ

本実験では 3 つの実験に分けて、実験的検討をおこなった。

本実験の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- (1) 実験 1 より、セメントを普通ポルトランドセメントから早強ポルトランドセメントに変えることにより、若材齢時の強度が増進し、中性化抑制に効果がある。
- (2) 実験 2 より、早強性膨張材を外割添加して用いることにより、強度が増進し、中性化抑制に効果がある。特に Type-A の早強性膨張材を用いたケースの中性化抑制は効果が高い。
- (3) 実験 3 より、スラッジ微粉末および再生微粉を外割添加して用いることにより、強度が増進し、中性化抑制に効果がある。特に、スラッジ微粉末を用いたケースは、強度増進および中性化抑制に効果が高い。
- (4) 中性化速度係数と圧縮強度には相関がみられ、圧縮強度が高くなると、中性化速度係数が小さくなる。これは、本研究範囲の全実験で認められた。

参考文献

- 1) 企画 環境省 地球環境局、監修 独立行政法人 国立環境研究所：パンフレット「STOP 温暖化 2008」(追加改訂 2009.04.08.)、pp.21-22, 2009.

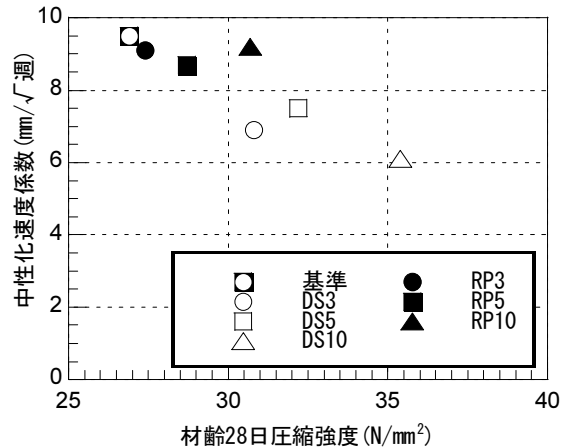


図-10 圧縮強度と中性化速度係数の関係 (実験 3)

- 2) 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論文集, JCI-C81 日本コンクリート工学会 混和材積極利用によるコンクリート性能への影響評価と施工に関する研究委員会, 184P, 2011.
- 3) 土木学会：コンクリートの環境負荷評価, コンクリート技術シリーズ, No.44, I-26P, 87P, 2002.
- 4) 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, 2011.
- 5) 小林利充, 近松竜一, 溝渕麻子, 一瀬賢一：低炭素型のコンクリート「クリーンクリート™」の開発, 大林組技術研究所報, No.75, 2011.
- 6) 小林利充, 溝渕麻子, 近松竜一, 一瀬賢一：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, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.118-123, 2012.
- 7) 大川憲, 川名正嗣, 笠井哲郎：戻りコンクリートから回収したスラッジ微粉末と骨材の再生利用に関する研究, コンクリート工学年次論文集, vol.33, No.1, pp.1571-1576, 2011
- 8) 祝井健志, 松下博通, 近田孝夫, 前田悦孝：高炉スラッジ微粉末の混和が高強度コンクリートの中性化に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.771-776, 2004.