

論文 低品質再生粗骨材を用いたコンクリートの品質改善

道正 泰弘*

要旨: 低品質再生粗骨材（再生粗骨材 L）を用いたコンクリートの品質改善を目的に、再生粗骨材置換率の調整に加え、汎用的な材料の利用に着目し、各種セメントの効果、混合使用する一般粗骨材の種類がコンクリート性能に及ぼす影響について実験的検討を行った。その結果、再生粗骨材 L を用いたコンクリートの性能は、一般的な調合設計上の配慮に加え、置換率の調整ならびに混合使用する一般粗骨材の選定により、品質改善が可能であることが判明した。なお、セメント種類の影響は、普通コンクリートと同様の効果が得られることが確認できた。

キーワード: 再生骨材コンクリート, 低品質再生粗骨材, 骨材置換法, 各種セメント, 品質改善

1. はじめに

骨材置換法は、JIS A 5308（レディーミクストコンクリート）を満足するコンクリートの品質を確保することを目的に、概ね JIS A 5023（再生骨材 L を用いたコンクリート）に相当する低品質な再生骨材を、要求性能に応じて砕石・砕砂、砂利・砂などの一般骨材に一定の割合で置換し、材料設計（相対品質値法）により所定の品質を担保して再生骨材コンクリートを製造する方法である¹⁾。この方法は、日本建築学会において 2014 年 10 月に刊行された「再生骨材を用いるコンクリートの設計・製造・施工指針（案）」²⁾（再生骨材コンクリート指針）のうち、「11 章 鉄筋コンクリート部材に用いる再生骨材コンクリート L」に具体的な利用方法が示された。一方、再生骨材コンクリート M については、乾燥の影響を受ける構造部材への利用については、再生骨材コンクリート指針のうち、「10 章 乾燥の影響を受ける構造部材に用いる再生骨材コンクリート M」³⁾において特殊配慮品として扱われている。低品質再生粗骨材（再生粗骨材 L）の利用においては、品質低下の改善方法として、一般粗骨材への再生粗骨材置換率の調整が最も有効な手段としてあげられる。その他、用途に応じたセメントの適切な使用や混合使用する一般粗骨材の選定が有効とされている⁴⁾。このことは、中品質再生粗骨材（再生粗骨材 M）を乾燥の影響を受ける構造部材に利用する場合も同様である。

本論文は、再生粗骨材 L を用いたコンクリートの品質改善を目的に、置換率の調整に加えて、汎用的な材料の利用に着目し、各種セメントの効果ならびに混合使用する一般粗骨材の種類がコンクリート性能に及ぼす影響について検討を行った結果を示す。なお、再生粗骨材 M については、再生粗骨材 L と同様に骨材置換法でコンクリートを製造し、置換率の影響を比較した。

2. 実験概要

表-1 に本検討で使用した再生粗骨材の概要を、表-2 に使用した骨材の品質を、表-3 に調査概要を示す。また、試験項目および試験方法を表-4 に示す

(1) 使用材料

セメントは、フライアッシュセメント B 種 (FB, 密度:2.97g/cm³), 高炉セメント B 種 (BB, 密度:3.04g/cm³), 普通エコセメント (E, 密度:3.15g/cm³) および普通ポルトランドセメント (N, 密度:3.16g/cm³) の 4 種類、一般細骨材には川砂 (NS), 一般粗骨材には硬質砂岩砕石 2005 (NG1, NG2) および石灰岩砕石 2005 (NG3), 再生粗骨材には再生粗骨材 L 2005 (RLG) および再生粗骨材 M 2005 (RMG) を使用した。化学混和剤には AE 減水剤 (高機能タイプ) を用いた。

RLG は、建築物（詳細は不明）の解体からの発生物を原コンクリートとして、再生骨材製造工場において破碎・分級等により製造されたものである。RLG の品質は、吸水率 6.42%, 微粒分量 1.35%, 不純物量の合計は 0.31wt% であり、JIS A 5023 附属書 A の規定を満足する。一方、RMG は経年 65 年の病院の解体コンクリート塊を原コンクリートとして、再生骨材製造工場にて破碎・磨砕処理後、湿式比重選別機⁵⁾により製造したものである。RMG の品質は、絶乾密度 2.40g/cm³, 吸水率 3.63%, 微粒分量 1.76%, 不純物量の合計は 0.13wt% であり、JIS A 5022 附属書 A の規定を満足する。なお、いずれもアルカリシリカ反応性の区分は B である。

表-1 本検討で用いた再生粗骨材の概要

種類	原コンクリート※	製造方法
再生粗骨材 L:RLG	建築物(詳細不明)	破碎・分級
再生粗骨材 M:RMG	病院(経年 65 年)	破碎・磨砕;湿式比重選別

※マニユフェストおよび製造工場へのヒヤリングにより確認

*名城大学 理工学部環境創造学科教授 博士 (工学) (正会員)

表-2 使用した骨材の品質

品質項目	試験方法	川砂 NS ^{※1}	硬質砂岩砕石 2005 ^{※2}		石灰岩砕石 2005 ^{※3}	再生粗骨材 L 2005	再生粗骨材 M 2005
			NG1	NG2	NG3	RLG	RMG
絶乾密度 (g/cm ³)	JIS A 1109	2.55	2.64	2.54	2.69	2.30	2.40
吸水率 (%)	JIS A 1110	1.57	0.76	1.48	0.41	6.42	3.63
粗粒率 (F.M.)	JIS A 1102	2.50	6.65	6.87	6.77	6.77	6.92
微粒分量 (%)	JIS A 1103	_{※4}	_{※4}	_{※4}	_{※4}	1.35	1.76
実積率 (%)	JIS A 1104	63.7	58.7	64.2	61.5	60.1	63.6
粒形判定実積率 (%)	JIS A 5005		58.4	_{※4}	61.2	60.3	61.8
不純 ^{※5} 物量 (wt%)	A	JIS A 5022 JIS A 5023				0.16	0.03
	B					0.09	0.05
	C					0.02	0
	D					0	0
	E					0	0.02
	F					0.04	0
	G					0	0.03
合計					0.31	0.13	

※1：揖斐川産川砂 ※2：いずれも春日井産硬質砂岩砕石 2005。ただし、ロットが異なる。 ※3：藤原鉦山産石灰岩砕石 2005
 ※4：実施していない。 ※5：A～G の分類は、再生粗骨材 L については、JIS A 5023 附属書 A に、再生粗骨材 M については JIS A 5022 附属書 A による。

表-3 各種コンクリートの調合概要

種類	調合条件				単位量(kg/m ³) [※]							
	セメント 種類	再生粗骨材 置換率(%)	W/C (%)	s/a (%)	W	C	NS	NG1	NG2	NG3	RLG	RMG
FBNSNG1-45	FB	0	45	43.7	176	391	733	968	-	-	-	-
FBNSNG1RLG50-45		50						484	-	-	446	-
FBNSRLG100-45		100						-	-	-	892	-
FBNSNG1-55		0	55	46.4	171	311	816	968	-	-	-	-
FBNSNG1RLG50-55		50						484	-	-	446	-
FBNSRLG100-55		100						-	-	-	892	-
FBNSNG1-65		0	65	48.7	169	260	881	952	-	-	-	-
FBNSNG1RLG50-65		50						476	-	-	439	-
FBNSRLG100-65		100						-	-	-	877	-
BBNSNG1-55	BB	0	55	46.3	173	315	813	968	-	-	-	-
BBNSNG1RLG50-55		50						484	-	-	446	-
BBNSRLG100-55		100						-	-	-	892	-
ENNSNG1-55	E	0	55	45.8	180	327	795	968	-	-	-	-
ENNSNG1RLG50-55		50						484	-	-	446	-
NNSNG1-45		0						45	43.1	185	411	715
NNSNG1RLG50-45	50	484	-	-	446	-						
NNSNG1-55	0	55	45.8	180	327	798	968					
NNSNG1RLG50-55	50						484	-	-	446	-	
NNSRLG100-55	100						-	-	-	892	-	
NNSNG1-65	0	65	48.3	176	271	868	952	-	-	-	-	
NNSNG1RLG50-65	50						476	-	-	439	-	
NNSNG3-45	0						45	41.1	181	402	689	-
NNSNG3RLG50-45	50	-	-	514	467	-						
NNSNG3-55	0	55	43.3	180	327	754						-
NNSNG3RLG50-55	50						-	-	514	467	-	
NNSNG3-65	0						65	45.9	176	271	824	-
NNSNG3RLG50-65	50	-	-	506	459	-						
NNSNG2-45	0	45	38.8	185	441	642						-
NNSNG2RMG50-45	50						-	506	-	-	486	
NNSNG2-55	0						55	39.7	180	327	692	-
NNSNG2RMG50-55	50	-	522	-	-	502						
NNSRMG100-55	100	-	-	-	-	1004						
NNSNG2-65	0	65	43.4	176	271	780	-	1010	-	-	-	
NNSNG2RMG50-65	50						-	506	-	-	486	

※AE 減水剤（高機能タイプ）として変性リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸系化合物の複合体をセメント質量の 1%添加した。なお、補助剤として空気量調整剤をセメント質量の 0.05～0.1%添加した。

(2) 調査

セメントを4種類、一般粗骨材を3種類（硬質砂岩砕石2種類、石灰岩砕石1種類）、再生粗骨材を2種類とし、水セメント比を45%、55%および65%の3水準、置換率を0%、50%および100%の3水準に変化させた合計34種類の試料コンクリートを用意した。再生粗骨材は、同一調査の普通コンクリートに対し、容積比で置換した。

置換率は、再生骨材コンクリート指針¹⁾において、再生粗骨材Lを鉄筋コンクリート部材に用いる場合の再生粗骨材単独利用の上限値は50%と規定されている。一方、再生粗骨材Mは、乾燥の影響を受ける構造部材に用いる場合においても全量（100%）使用が前提である。これらから、本検討では、50%を基準として、0%（普通コンクリート）および100%を設定した。なお、いずれのコンクリートも目標スランプは18±2.5cm、目標空気量は4.5±1.5%とした。

FBおよびBBの単位水量は、日本建築学会「コンクリートの調査設計指針・解説」³⁾に基づき、それぞれNに対して5%減および4%減の補正を行った。

(3) 試験項目および試験方法

フレッシュ性状は、スランプ、空気量、単位容積質量、コンクリート温度および塩化物含有量の測定を、硬化性状では、圧縮強度、静弾性係数、長さ変化率および促進中性化深さを測定した。

3. 試験結果

3.1 フレッシュ性状

各種コンクリートのフレッシュ性状を表-5に示す。

(1) スランプおよび空気量

いずれのコンクリートもAE減水剤は、セメント質量の1%とし、空気量調整剤は0.05~0.1%の範囲で使用した。スランプは、置換率が100%で単位水量が最も少ないFBを用いた水セメント比65%のFBNSRLG100-65で10.5cmと目標値を大幅に下回ったが、それ以外は目標値を満足した。空気量はすべての試験体で目標値を満足した。骨材修正係数は、再生粗骨材Lを用いた場合で、置換率50%で0.4~0.5%、置換率100%では0.6%、再生粗骨材Mを用いた場合で、置換率50%で0.3%、置換率100%では0.5%であった。

(2) 単位容積質量

再生骨材コンクリートの単位容積質量は、原モルタルあるいは原セメントペーストの付着により密度の小さい再生粗骨材の置換率が大きくなるのに伴い増加する傾向がみられる。

(3) コンクリート温度

試料コンクリートは7月中旬から12月中旬に打ち込んだが、いずれの試験体も35℃を下回った。

表-4 試験項目および試験方法

試験項目		試験方法	備考
フレッシュ性状	スランプ	JIS A 1101	
	空気量	JIS A 1128	
	単位容積質量	JIS A 1116	
	コンクリート温度	JIS A 1156	
	塩化物含有量	JIS A 5022 JIS A 5023	イオン電極法による
硬化性状	圧縮強度	JIS A 1107	材齢4週, 13週 [※]
	静弾性係数	JIS A 1149	材齢4週, 13週 [※]
	長さ変化率	JIS A 1129-3	
	促進中性化深さ	JIS A 1153	

※Eを用いたものは測定していない。石灰岩砕石を用いたものでは、水セメント比55%のコンクリートのみ測定した。

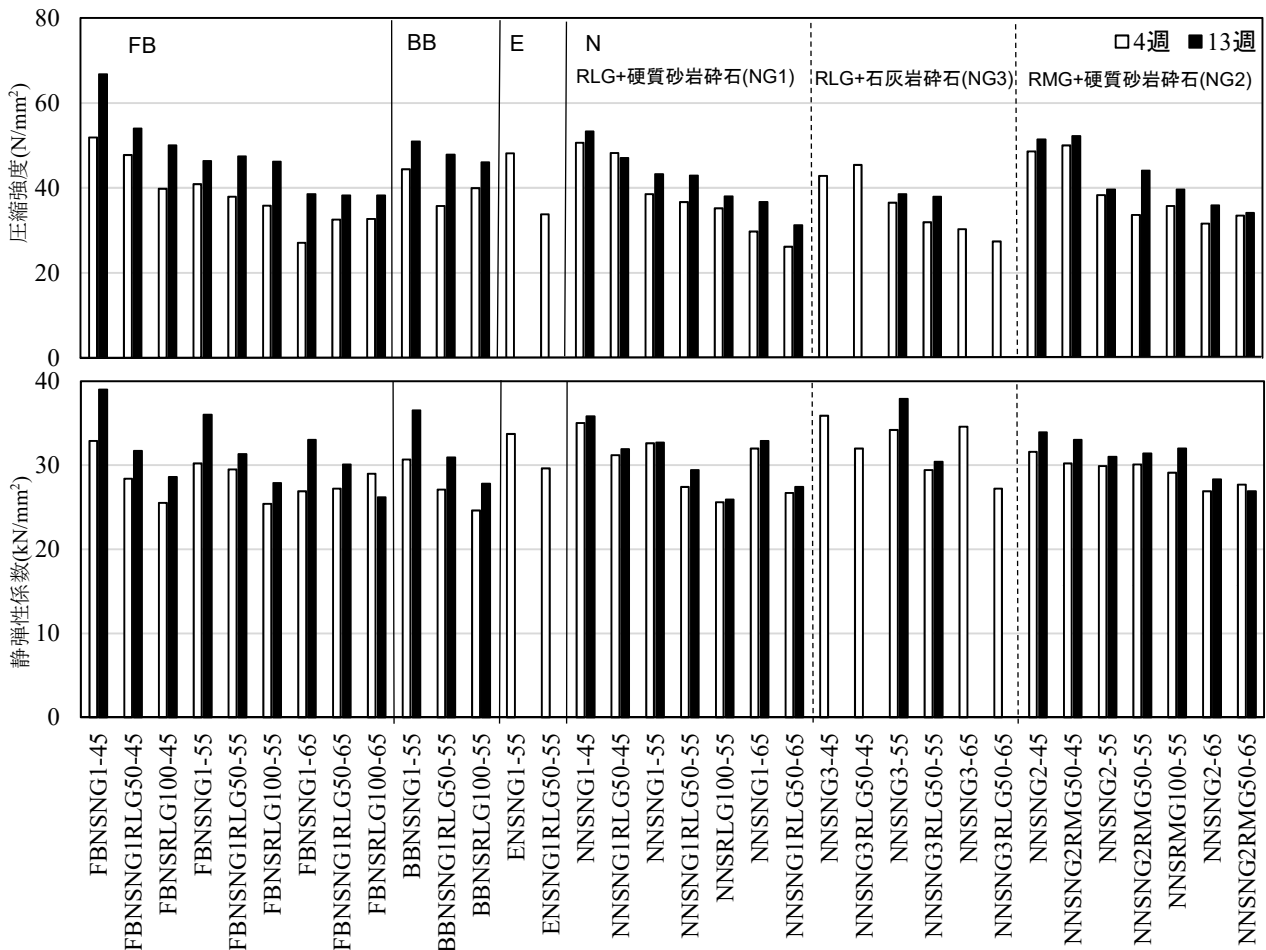
表-5 各種コンクリートのフレッシュ性状

種類	スランプ (cm)	空気量 (%) ^{※1}	単位容積質量 (kg/m ³)	温度 (°C)	塩化物含有量 (kg/m ³)
FBNSNG1-45	20.0	3.6	2377	28.2	0.03
FBNSNG1RLG50-45	20.0	4.5 (0.4)	2274	21.1	0.02
FBNSRLG100-45	18.0	3.7 (0.6)	2289	20.5	0.09
FBNSNG1-55 ^{※2}	17.0	3.3	2300	24.9	0.03
	18.0	5.8	2376	24.9	0.03
FBNSNG1RLG50-55	16.0	3.3 (0.4)	2310	22.1	0.03
FBNSRLG100-55	18.5	3.8 (0.6)	2243	22.3	0.05
FBNSNG1-65	18.5	4.0	2351	19.3	0.03
FBNSNG1RLG50-65	16.5	4.2 (0.4)	2279	20.8	0.03
FBNSRLG100-65	10.5	4.4 (0.6)	2223	19.7	0.03
BBNSNG1-55 ^{※2}	18.0	5.9	2281	26.1	0.04
	19.0	6.0	2289	26.7	0.04
BBNSNG1RLG50-55	18.0	4.5 (0.4)	2243	20.4	0.11
BBNSRLG100-55	17.0	5.1 (0.6)	2244	22.3	0.14
ENSNG1-55 ^{※2}	18.5	5.8	2200	27.1	0.09 ^{※3}
	19.5	5.9	2287	27.1	0.10 ^{※3}
ENSNG1RLG50-55	19.5	4.8 (0.4)	2236	14.1	0.19 ^{※3}
NNSNG1-45	20.5	5.6	2263	18.0	0.07
NNSNG1RLG50-45	19.0	5.0 (0.4)	2230	17.4	0.26
NNSNG1-55	20.0	5.4	2244	18.6	0.05
NNSNG1RLG50-55	20.5	4.9 (0.5)	2260	18.8	0.22
NNSRLG100-55	20.0	4.5 (0.6)	2180	18.2	0.24
NNSNG1-65	20.0	4.4	2261	18.7	0.03
NNSNG1RLG50-65	17.5	5.2 (0.4)	2180	18.6	0.13
NNSNG3-45	20.5	4.0	2214	12.5	0.03
NNSNG3RLG50-45	20.5	5.1 (0.4)	2199	12.7	0.02
NNSNG3-55	20.5	4.4	2343	20.0	0.05
NNSNG3RLG50-55	20.0	4.9 (0.5)	2261	20.2	0.23
NNSNG3-65	20.0	5.3	2306	18.5	0.04
NNSNG3RLG50-65	20.0	4.9 (0.5)	2273	14.2	0.10
NNSNG2-45	20.5	5.6	2286	23.8	0.08
NNSNG2RMG50-45	19.5	4.4 (0.3)	2290	24.2	0.29
NNSNG2-55	20.5	5.9	2274	26.6	0.03
NNSNG2RMG50-55 ^{※2}	20.0	5.6 (0.3)	2240	23.0	0.20
	20.0	5.2 (0.3)	2225	23.3	0.18
NNSRMG100-55 ^{※2}	19.5	4.0 (0.5)	2280	24.9	0.08
	19.0	5.3 (0.5)	2254	24.4	0.18
NNSNG2-65	20.0	5.8	2230	23.7	0.04
NNSNG2RMG50-65 ^{※2}	18.0	5.2 (0.3)	2247	23.5	0.22
	18.0	5.1 (0.3)	2307	23.6	0.24

※1 ()内は骨材修正係数を示す。なお、普通コンクリートの骨材修正係数は、いずれも0.1%未満であった。

※2 2バッチに分けて連続して打ち込んだ。

※3 普通エコセメントの塩化物イオン残存比 α :0.24 (最大値)



図一 各種コンクリートの圧縮強度および静弾性係数

(4) 塩化物含有量

JIS A 5022 および JIS A 5023 より、フレッシュコンクリート中の水には、セメントの全塩化物イオン量に加えて再生粗骨材 M および再生粗骨材 L の全塩化物イオン量の 1/4 が溶出すると仮定し、塩化物含有量を算定した。

その結果、置換率の増加に伴い大きくなるものの、すべての試験体で JIS A 5308 の規制値である 0.30kg/m³ 以下を満足した。

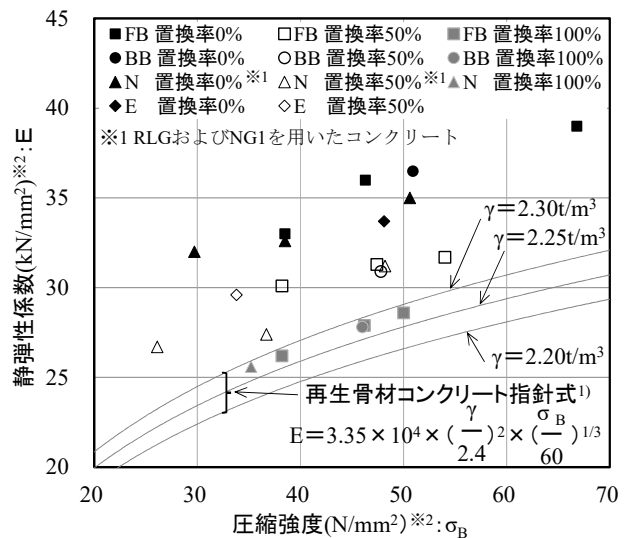
3.2 硬化性状

圧縮強度、静弾性係数、長さ変化率および促進中性化深さの試験結果を図一から図四に示す。

(1) 圧縮強度

図一より圧縮強度は、再生粗骨材 L を用いた場合、50N/mm² 以上の高強度域では、置換率の影響が明確にみられ、置換率の増加に伴い圧縮強度は低下する傾向がみられた。強度の発現傾向は、セメント種類の影響がみられ、N に対して FB, BB は長期強度の発現が大きく、E はほぼ同等であり、概ね一般的傾向²⁾である。

N については、4 週圧縮強度では、置換率の増加に伴い低下する傾向がみられた。FB については、材齢 13 週時の圧縮強度は、水セメント比 45%ではいずれのコンク

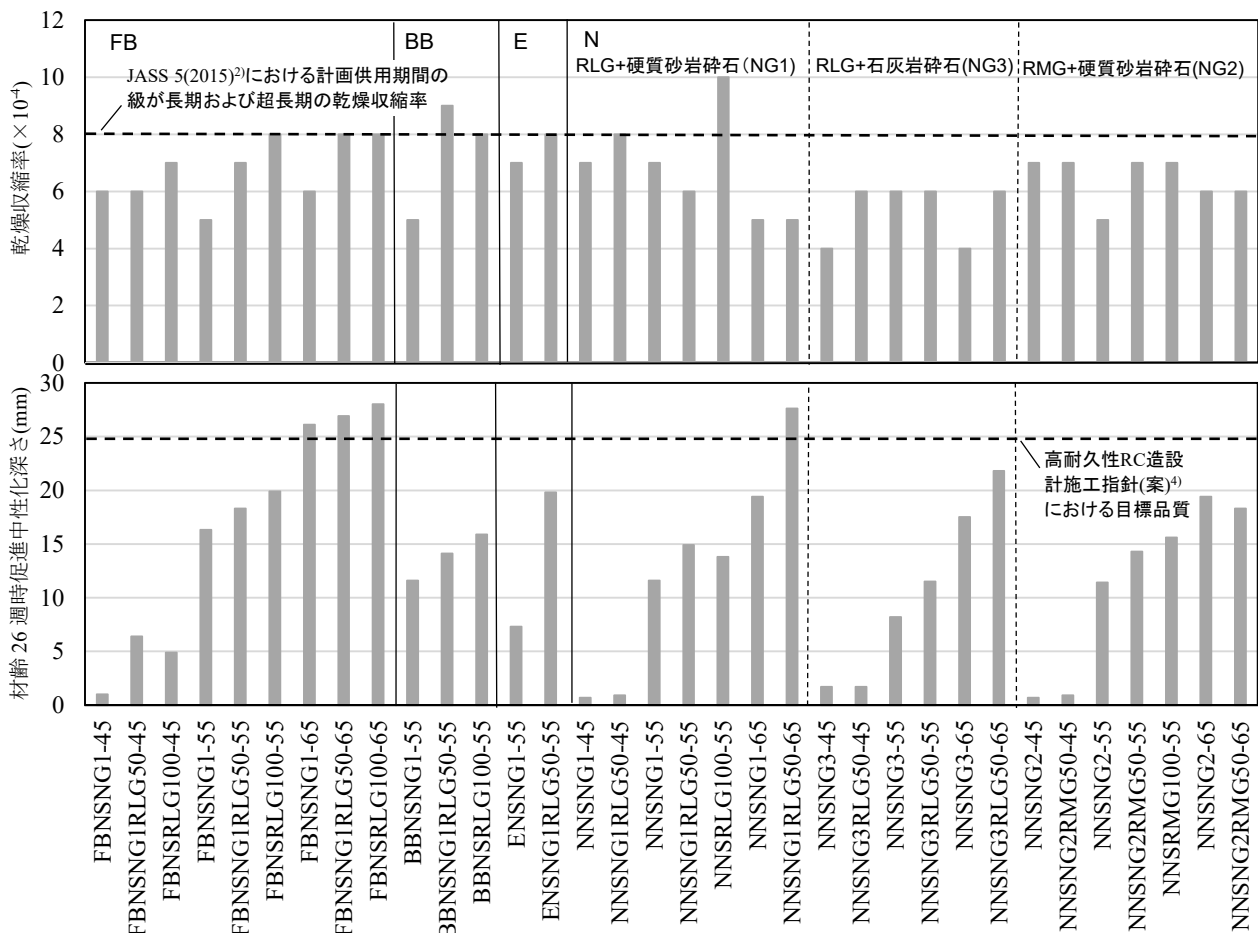


※2 FB, BB は材齢 13 週, N, E は材齢 4 週の値を用いた。

図二 圧縮強度と静弾性係数の関係

リートも 50N/mm² を超えたことから、再生粗骨材 L の置換率の影響が明確にみられたものの、水セメント比 55% 以上では置換率の影響はほとんどみられない。

BB は、水セメント比 55%のみであるが、材齢 13 週時で置換率の増加に伴い低下する傾向がみられた。E につ



図一 3 各種コンクリートの乾燥収縮率および促進中性化深さ

いても材齢 4 週時で同様の傾向がみられた。石灰岩碎石を用いたものは、水セメント比 45%でも 50N/mm^2 以下であったことから、置換率の影響は明確にはみられない。

再生粗骨材 M を用いたコンクリートでは、材齢 4 週および 13 週ともに置換率の影響はみられない。

(2) 静弾性係数

図一 1 より静弾性係数については、再生粗骨材 L を用いたコンクリートにおいては、FB および BB においては材齢 13 週時、E および N においては材齢 4 週時でみると、置換率の影響が明確に認められた。一方、再生粗骨材 M を用いたコンクリートでは置換率の影響はほとんどみられない。

混合使用する一般粗骨材の影響は、N において NG1 を用いたコンクリートと比較すると、一般的な傾向²⁾と同様に、圧縮強度の大きさに対して NG3 を用いたコンクリートが大きくなる傾向がみられた。このことから、静弾性係数の低下に対しては、石灰岩碎石を混合使用することが有効である。

図一 2 は、再生粗骨材 L を用いたコンクリート（一般粗骨材は NG1）の圧縮強度と静弾性係数の関係を示したもののだが、いずれのコンクリートも置換率から推定される単位容積質量（置換率 0%: $\gamma=2.30\text{t/m}^3$ 、置換率 50%: γ

$=2.25\text{t/m}^3$ 、置換率 100%: $\gamma=2.20\text{t/m}^3$ ）に対応した再生骨材コンクリート指針式¹⁾からの推定値に比べて置換率 0%で 23%程度、置換率 50%で 15%程度、置換率 100%で 8%程度大きめの値が得られている。

(3) 乾燥収縮

図一 3 より再生粗骨材 L を用いたコンクリートでは、置換率の影響がみられ、BB を用いた置換率 50%の BBNSNG1RLG50-55、N で置換率 100%の NNSRLG100-55 において、JASS 5 (2015)²⁾に示される材齢 26 週時における計画供用期間の級が長期および超長期の品質目標値である 8×10^{-4} を超えた。一方、再生粗骨材 M を用いたコンクリートでは、置換率 100%の場合でも 8×10^{-4} を下回り、置換率の影響はほとんどみられない。

再生粗骨材 L に石灰岩碎石を混合使用する一般粗骨材として用いた場合、置換率が 50%においても最大 6×10^{-4} となっており、N で単位水量の多い水セメント比 45%の NNSNG1RLG50-45 と NNSNG3RLG50-45 を比較すると 2×10^{-4} 程度の低減効果が認められる。なお、セメント種類の影響は、明確にはみられない。

(4) 促進中性化

図一 3 より促進中性化深さは、水セメント比の影響が最も大きく、水セメント比 45%のコンクリートでは、ほ

とんど進んでいないが、水セメント比 65%になると FB および N を用いたコンクリートのうち、置換率 50%の一部 (NNSNG1RLG50-65) で、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)」⁴⁾ に示される目標品質の 25mm を超えるものがみられた。置換率の影響は、水セメント比 55%以上で再生粗骨材 L を用いたコンクリートで明確にみられた。一方、再生粗骨材 M を用いたコンクリートでは、水セメント比の影響はみられるが、置換率の影響は、水セメント比 55%では、置換率の増加に伴い少し速くなる傾向はみられたものの、65%では明確にはみられなかったことから影響は小さい。

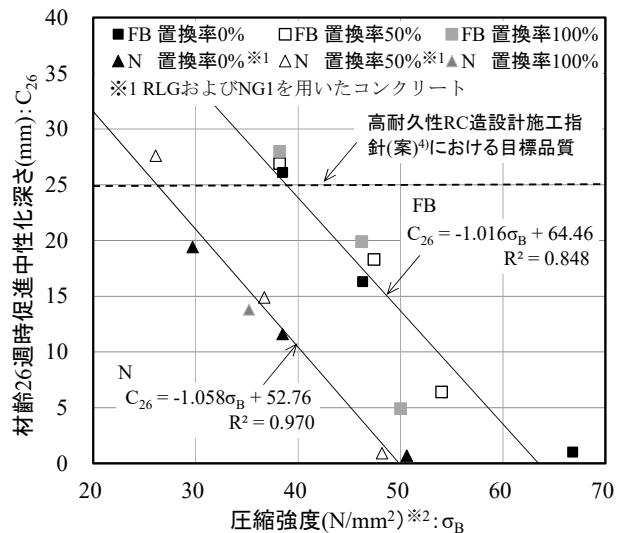
セメント種類の影響は、一般的な傾向⁵⁾と同様に、FB を用いた場合で速くなる傾向がみられる。

図-4 は、FB ならびに N のうち RLG および NG1 を用いたコンクリートの圧縮強度と材齢 26 週時促進中性化深さの関係を示したものである。これによると、FB、N とともに両者の間には高い相関性が得られている。このことから、中性化の抑制には、置換率が大きい場合でも、圧縮強度を増加、すなわち、水セメント比を低減させることにより、目標品質を満足することが可能である。

4. まとめ

低品質再生粗骨材を用いたコンクリートの品質改善を目的に、置換率の調整に加え、セメント種類および混合使用する一般粗骨材の種類が性能に及ぼす影響について検討を行った結果、大要以下のことがいえる。

- (1) 再生粗骨材 L および再生粗骨材 M を用いたコンクリートのスランプおよび空気量は、セメント種類や置換率にかかわらず、普通コンクリートと同様の割合により所定の品質をほぼ満足する。なお、塩化物含有量においても全塩化物イオン量の 1/4 が溶出すると仮定し算定したが、規定値の 0.30kg/m³ を満足する。
- (2) 再生粗骨材 L を用いたコンクリートの圧縮強度は、高強度域では置換率の影響がみられるものの、通常の高強度域では影響は小さい。一方、再生粗骨材 M を用いた場合は置換率の影響はみられない。静弾性係数は、再生粗骨材 L を用いた場合は、強度域にかかわらず置換率の影響がみられる。なお、静弾性係数の低下には、石灰岩碎石を混合使用することが有効である。
- (3) 乾燥収縮は、再生粗骨材 L を用いた場合においては、置換率の影響が大きい。なお、混合使用する一般粗骨材に乾燥収縮率の小さい石灰岩碎石を用いることにより低減することが可能である。
- (4) 促進中性化は、再生粗骨材 L を用いた場合は、置換率の影響は比較的大きい。なお、セメント種類の影響は、FB を用いた場合に速くなる。総体的には、水セメント比の影響が支配的であり、高い置換率で使用した



※2 FB は材齢 13 週、N は材齢 4 週の値を用いた。

図-4 圧縮強度と促進中性化深さの関係

場合でも水セメント比を低減することにより、目標品質を満足することが可能である。

以上のことから、再生粗骨材 L を用いたコンクリートの性能は、一般的な調合設計上の配慮に加え、置換率の調整ならびに混合使用する一般粗骨材の選定により、品質改善が可能である。なお、セメント種類の影響は、普通コンクリートと同様の効果が得られる。

謝辞

本研究の一部は、平成 28 年度科学研究費助成事業 (基盤研究 C)、「コンクリート塊の低品質再生骨材への再資源化に関する研究 (研究代表者: 道正泰弘)」(課題番号: 16K06593) の助成を受けた。

実験においては、ACRAC、太平洋セメント(株)、日立セメント(株)、竹本油脂(株)より材料の提供を受けた。また、2015 年度卒論生 佐藤寛之君、務台和真君、山本健太君、2016 年度卒論生 加藤圭祐君、澁谷和樹君、田中悠嗣君、原田優飛君、平井里穂君、平光恭平君の多大なる協力を得た。ここに厚く謝意を表す。

参考文献

- 1) 日本建築学会: 再生骨材を用いるコンクリートの設計・製造・施工指針 (案), 2014
- 2) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事 2015, 2015
- 3) 日本建築学会: コンクリートの調合設計指針・同解説, 2015
- 4) 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, 1991
- 5) 日本建築学会: フライアッシュを使用するコンクリートの調合設計・施工指針 (案)・同解説, 2007