〈一般研究課題〉　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

助 成 研 究 者　名城大学　　道正　泰弘

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

道正　泰弘
（名城大学）

Study on recycling of concrete waste for recycled aggregate Class L

Dosho Yasuhiro
(Meijo university)

Abstract：

Concrete is the second most consumed material after water and is the basis for the urban environment. And, concrete is extremely durable and can last for hundreds of years in many applications. However, the construction waste such as demolished concrete structure is generated by change of human needs.

It is essential to reuse such construction waste from a Life Cycle Assessment (LCA) perspective and for effective recycling of construction resources.

Three concepts must be achieved to promote reuse:

1) Assured safety and quality, 2) Reduced environmental impact, and 3) Improved cost-effectiveness of construction.

The target is appropriate use of recycled aggregate Class L produced by the aggregate replacement method, effectively reducing both environmental impact and cost from an LCA viewpoint regarding concrete waste.

This study showed the material design, quality assessment and safety of concrete that used recycled aggregate Class L can acquired.

Result of this study showed that concrete using recycled aggregate Class L can acquire the quality and safety as structural concrete. Namely, concrete made with recycled aggregate Class L

using the aggregate replacement method can achieve sufficient quality as structural concrete, by suitable mix design, selection of materials and quality assessment. And, leaching of cesium in concrete waste would be decreased much by mixing of admixture such as Fly Ash.

1．はじめに

持続可能なリサイクルシステムを構築するためには，構造物のライフサイクルアセスメントの観点から，①安全性と品質の確保，②環境影響の低減，③コスト削減の3つの目標を達成する必要がある。

国土交通省の調査結果(2014年3月)では，2012年度のコンクリート塊発生量は約30,917千tであり，道路路盤材等に約99％が再資源化されている[1)]。コンクリート塊は，セメント分にCr(Ⅵ)等の重金属が含有されており，その溶出による土壌汚染等への影響[2)]や東日本大震災により大量に発生したがれき処理，特に，低レベル放射性物質を含んだがれきの発生は膨大かつ継続的であるが，当面は一定の敷地内処理で対応せざるを得ない状況にある[3)]。このため，処理対策として，道路路盤材等以外の用途を開発する必要がある。最も有望な用途として，コンクリート用骨材(再生骨材)があげられる。これは，量的な面と有害物質の封じ込めの可能性から期待できる。

再生骨材は，図1に示すように，原コンクリート中の粗骨材(原骨材)とそれに付着したモルタル(付着モルタル)やセメントペースト(付着ペースト)によって構成されている。原骨材の課題としては，1986年に旧建設省から「アルカリ骨材反応対策に関する暫定指針」[4)]が示され，推奨される以前の建築物では，多くの骨材がアルカリシリカ反応(ASR)の評価をされずに使われており，ASRを生じる骨材が使用されている可能性がある。再生骨材は，付着モルタルや付着ペーストの増加に伴い低密度になる等，骨材としての品質が低下する[5)]。また，これらに含まれる微量成分が溶出する可能性があることから，再生細骨材，微粉のように付着モルタル分等の含有が多く，粒径が小さい状態の発生物の量が多くなることを避ける必要がある。さらに，原コンクリートには，土，木くず，仕上げ材等の不純物が混入・付着している[5)]。このような課題に対し，筆者らが開発した骨材置換法は，汎用的で簡便な方法で製造された概ねJIS A 5023(再生骨材Lを用いたコンクリート)に相当する再生骨材を，要求性能に応じて一般骨材に一定の割合で置換することで所要品質を担保したコンクリートを製造する方法である。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)」(再生骨材コンクリート指針)[5)]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。特徴としては，再生骨材の製造にかかる環境負荷の低減やコスト削減は可能となるが，適切な設計と厳密な品質管理が必要となる[6)]。

本研究では，低品質再生骨材を用いたコンクリートについて安定的に所要品質を確保することで，用途拡大を実現することを目的に，セメント種類，再生粗骨材置換率を変化させた場合の再生骨材コンクリートの性能評価ならびに低レベル放射性物質を含んだがれきの処理を想定し，混和材による有害物質(放射性物質)の溶出

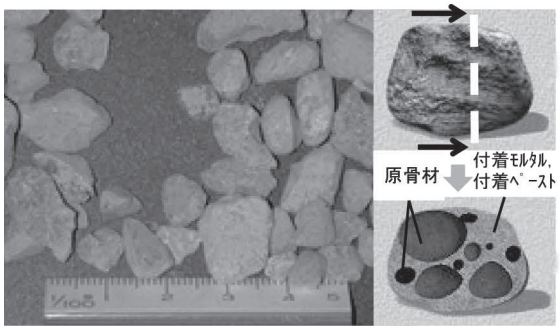


図1 再生骨材の外観と断面のイメージ[7)]

抑制効果について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 再生骨材コンクリートの性能評価

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に調合概要を示す。また，試験項目および試験方法を表4に示す。なお，中品質の再生粗骨材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。

(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/cm^3)，高炉セメントB種(BB,密度:3.04g/cm^3)，普通エコセメント(E,密度:3.15g/cm^3)および普通ポルトランドセメント(N,密度:3.16g/cm^3)の4種類，一般細骨材には川砂(NS1,NS2)，一般粗骨材には硬質砂岩砕石2005(NG1, NG2，NG3)および石灰岩砕石2005(NG4)，再生粗骨材には再生粗骨材L 2005(RLG1,RLG2)および再生粗骨材M2005(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。

RLG1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砕・分級等により製造されたものである。RLG1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(コンクリート用再生骨材L)の規定を満足する。RLG2は，建築物(詳細は不明)の基礎の解体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砕・分級等により製造されたものである。RLG2の品質は，吸水率6.48%，微粒分量1.56%，不純物量の合計は1.32wt%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砕・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/cm^3，吸水率3.63%，微粒分量

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	RLG1	建築物	破砕・分級等
	RLG2	建築物基礎	破砕・分級等
再生粗骨材 M	RMG	病院(経年 65 年)	比重選別式[5)]

※マニフェスト，製造工場へのヒヤリングにより確認

表2　使用した骨材の品質

品質項目		試験方法	川砂※1		硬質砂岩砕石 2005※2			石灰岩砕石 2005※3 :NG4	再生粗骨材 L 2005		再生粗骨材 M 2005：RMG
			NS1	NS2	NG1	NG2	NG3		RLG1	RLG2	
絶乾密度 (g/cm^3)		JIS A 1109	2.55	2.59	2.64	2.68	2.54	2.69	2.30	2.21	2.40
吸水率 (%)		JIS A 1110	1.57	1.72	0.76	0.43	1.48	0.41	6.42	6.48	3.63
粗粒率 (F.M.)		JIS A 1102	2.50	2.57	6.65	6.79	6.87	6.77	6.77	6.54	6.92
微粒分量 (%)		JIS A 1103	-※4	-※4	-※4	-※4	-※4	-※4	1.35	1.56	1.76
実積率 (%)		JIS A 1104	63.7	64.8	58.7	60.3	64.2	61.5	60.1	61.2	63.6
粒形判定実積率 (%)		JIS A 5005			58.4	59.6	-※4	61.2	59.8	60.9	61.8
不純※5 物量 (wt/%)	A	JIS A 5022 JIS A 5023							0.16	1.17	0.03
	B								0.09	0.08	0.05
	C								0.02	0.05	0
	D								0	0	0
	E								0	0	0.02
	F								0.04	0.02	0
	G								0	0.01	0.03
	合計								0.31	1.32	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：藤原鉱山産石灰岩砕石 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	NS1	NS2	NG1	NG2	NG3	NG4	RLG1	RLG2	RMG
BNS1NG1-45	FB	0	45	43.7	176	391	733	-	968	-	-	-	-	-	-
BNS1NG1RLG150-45		50							484	-	-	-	446	-	-
BNS1RLG1100-45		100							-	-	-	-	892	-	-
BNS1NG1-55		0	55	46.4	171	311	816	-	968	-	-	-	-	-	-
BNS1NG1RLG150-55		50							484	-	-	-	446	-	-
BNS1RLG1100-55		100							-	-	-	-	892	-	-
BNS2NG2-55		0		44.9			-	803	-	1006	-	-	-	-	-
BNS2NG2RLG250-55		50							-	503	-	-	-	440	-
BNS1NG1-65		0	65	48.7	169	260	881	-	952	-	-	-	-	-	-
BNS1NG1RLG150-65		50							476	-	-	-	439	-	-
BNS1RLG1100-65		100							-	-	-	-	877	-	-
BNS1NG1-55	BB	0	55	46.3	173	315	813	-	968	-	-	-	-	-	-
BNS1NG1RLG150-55		50							484	-	-	-	446	-	-
BNS1RLG1100-55		100							-	-	-	-	892	-	-
BNS2NG2-55		0		44.9			-	801	-	1006	-	-	-	-	-
BNS2NG2RLG250-55		50							-	503	-	-	-	440	-
NS1NG1-55	E	0		45.8	180	327	795	-	968	-	-	-	-	-	-
NS1NG1RLG150-55		50							484	-	-	-	446	-	-
NS1NG1-45	N	0	45	43.1	185	411	715	-	968	-	-	-	-	-	-
NS1NG1RLG150-45		50							484	-	-	-	446	-	-
NS1NG1-55		0	55	45.8	180	327	798	-	968	-	-	-	-	-	-
NS1NG1RLG150-55		50							484	-	-	-	446	-	-
NS1RLG1100-55		100							-	-	-	-	892	-	-
NS2NG2-55		0		44.3			-	782	-	1006	-	-	-	-	-
NS2NG2RLG250-55		50							-	503	-	-	-	440	-
NS2RLG2100-55		100							-		-	-	-	879	-
NS1NG1-65		0	65	48.3	176	271	868	-	952	-	-	-	-	-	-
NS1NG1RLG150-65		50							476	-	-	-	439	-	-
NS1NG4-45		0	45	41.1	181	402	689	-	-	-	-	1030	-	-	-
NS1NG4RLG150-45		50							-	-	-	514	467	-	-
NS1NG4-55		0	55	43.3	180	327	754	-	-	-	-	1030	-	-	-
NS1NG4RLG150-55		50							-	-	-	514	467	-	-
NS1NG4-65		0	65	45.9	176	271	824	-	-	-	-	1013	-	-	-
NS1NG4RLG150-65		50							-	-	-	506	459	-	-
NS1NG3-45		0	45	38.8	185	441	642	-	-	-	1010	-	-	-	-
NS1NG3RMG50-45		50							-	-	506	-	-	-	486
NS1NG3-55		0	55	39.7	180	327	692	-	-	-	1044	-	-	-	-
NS1NG3RMG50-55		50							-	-	522	-	-	-	502
NS1RMG100-55		100							-	-	-	-	-	-	1004
NS1NG3-65		0	65	43.4	176	271	780	-	-	-	1010	-	-	-	-
NS1NG3RMG50-65		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。

1.76%，不純物量の合計は0.13wt%であり，JIS A 5022(再生骨材Mを用いたコンクリート)附属書A(コンクリート用再生骨材M)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。

(2) 調合

セメントを4種類，一般粗骨材を3種類(硬質砂岩砕石3種類，石灰岩砕石1種類)，再生粗骨材を3種類とし，水セメント比を45%，

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
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	JIS A 1129-3	
	促進中性化	JIS A 1153	
	凍結融解	JIS A 1148	A 法

※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。

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41種類の試料コンクリートを用意した。再生粗骨材は，同一調合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[5]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「コンクリートの調合設計指針・同解説」[8]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，促進中性化深さおよび相対動弾性係数を測定した。

2.2　有害物質(放射性物質)の溶出抑制対策

(1) 使用材料

普通ポルトランドセメント(N)，混和材にフライアッシュⅡ種(JIS A 6201,ブレーン値:3,740 cm^2/g,密度:2.30g/cm^3, SiO_2:59.7%)および高炉スラグ微粉末4000(JIS A 6206，比表面積:3,950 cm^2/g, 密度:2.91g/cm^3, MgO:5.75%, SO_3:2.07%)を用いた。セシウム源として特級試薬の塩化セシウム(CaCl，比重:3.988)を練混ぜ水に溶解させ，練混ぜの過程でセメントペースト試料中に均一に分布するように調整した。なお，練混ぜ水には，水道水を粗ろ過，逆浸透膜，イオン交換，254nmUV照射で処理した純水を用いた(比抵抗値 5MΩ・cm以上)。

(2) 配合

配合は表5に示すように，セメント単味(N)，混和材をセメント質量に対し，フライアッシュを15%および25%置換した試料(FA15，FA25)，高炉スラグ微粉末を20%および40%置換した試料(BRS20，BRS40)の合計5種類の試料を用意した。試料の水結合材比(W/B)は，練混ぜ後のブリーディングの発生を避けるために0.3とした。

(3) 試料の作製および養生

セメントペーストの練混ぜは，5L練りモルタルミキサ(JIS R 5201 9.2.3)を使用し，低速で150秒間練り混ぜ，30秒休止後，再び低速で150秒間練り混ぜた。練混ぜ後は，4cm×4cm×16cmのモルタル供試体成形用型(JIS R 5201 11.2.2)に流し込み，直ちにテーブルバイブレータ(JIS R 5201 11.2.3)で120秒振動させ成形した。その後，湿気箱(20±1.0℃，RH 90%以上)にて24時間養生後に脱型し，セメント上澄み液で満たした50℃の恒温水槽にて，28日および91日間の養生を行った。養生

表5　各試料の配合(質量比：%)

	N	FA15	FA25	BRS20	BRS40
N	100	85	75	80	60
FAⅡ	0	15	25	-	-
BRS	0	-	-	20	40
W	30	30	30	30	30
CsCl*	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3

*Wに対しての質量比で外割とした。

試料と浸漬容器　　グローブボックス

写真1　浸漬状況

後は，4cm×4cm×16cm供試体の中心部近傍から2cm×2cm×2cmの立方体を切り出し，浸漬試験用試料を準備した。

(4) 浸漬試験方法

浸漬液には，純水に185nmUV照射，活性炭フィルター，イオン交換フィルター，最終フィルター(0.22 μm)で処理した超純水(比抵抗値18.2MΩ・cm)を用いた。試料は，写真1に示すように，2cm角の試料を500mlの超純水に浸漬し，恒温恒湿室(20℃，湿度60%)に設置した窒素ガスを充填したグローブボックス内で保管した。保管中は定期的に容器内の浸漬液を撹拌した。そして，28日に1度の割合で浸漬液を全量交換し，浸漬液を誘導結合プラズマ質量分析法(ICP-MS)にて分析した。分析項目は，CsClである。さらに，ICP-MSの分析に先立ち，pHならびに電気伝導度(EC)を測定した。なお，養生期間28日の試料は浸漬期間91日，分析回数3回とし，一方，養生期間91日の試料は浸漬期間28日，分析回数1回とした。

3. 実験結果

3.1再生骨材コンクリートの性能評価

3.1.1 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6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FBNS1RLG1100-65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，置換率50%で0.4～0.7%，置換率100%では0.6～0.7%，再生粗骨材Mを用いた場合，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，付着モルタルあるいは付着ペーストの影響に

表6　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/m³)	温度 (℃)	塩化物含有量 (kg/m³)
FBNS1NG1-45	20.0	3.6	2377	28.2	0.03
FBNS1NG1RLG150-45	20.0	4.5 (0.4)	2274	21.1	0.02
FBNS1RLG1100-45	18.0	3.7 (0.6)	2289	20.5	0.09
FBNS1NG1-55※2	17.0	3.3	2300	24.9	0.03
	18.0	5.8	2376	24.9	0.03
FBNS1NG1RLG150-55	16.0	3.3 (0.4)	2310	22.1	0.03
FBNS1RLG1100-55	18.5	3.8 (0.6)	2243	22.3	0.05
FBNS2NG2-55	20.5	5.2	2371	25.3	0.02
FBNS2NG2RLG250-55	20.5	4.6(0.6)	2310	19.2	0.09
FBNS1NG1-65	18.5	4.0	2351	19.3	0.03
FBNS1NG1RLG150-65	16.5	4.2 (0.4)	2279	20.8	0.03
FBNS1RLG1100-65	10.5	4.4 (0.6)	2223	19.7	0.03
BBNS1NG1-55※2	18.0	5.9	2281	26.1	0.04
	19.0	6.0	2289	26.7	0.04
BBNS1NG1RLG150-55	18.0	4.5 (0.4)	2243	20.4	0.11
BBNS1RLG1100-55	17.0	5.1 (0.6)	2244	22.3	0.14
BBNS2NG2-55	19.5	4.4	2340	25.4	0.04
BBNS2NG2RLG250-55	20.5	5.2(0.4)	2350	24.8	0.08
ENS1NG1-55※2.	18.5	5.8	2200	27.1	0.09※3
	19.5	5.9	2287	27.1	0.10※3
ENS1NG1RLG150-55	19.5	4.8 (0.4)	2236	14.1	0.19※3
NNS1NG1-45	20.5	5.6	2263	18.0	0.07
NNS1NG1RLG150-45	19.0	5.0 (0.4)	2230	17.4	0.26
NNS1NG1-55	20.0	5.4	2244	18.6	0.05
NNS1NG1RLG150-55	20.5	4.9 (0.5)	2260	18.8	0.22
NNS1RLG1100-55	20.0	4.5 (0.6)	2180	18.2	0.24
NNS2NG2-55	20.5	5.5	2397	25.9	0.03
NNS2NG2RLG150-55	20.5	4.3(0.7)	2299	22.6	0.19
NNS2RLG2100-55	19.5	5.3(0.7)	2173	22.8	0.22
NNS1NG1-65	20.0	4.4	2261	18.7	0.03
NNS1NG1RLG150-65	17.5	5.2 (0.4)	2180	18.6	0.13
NNS1NG4-45	20.5	4.0	2214	12.5	0.03
NNS1NG4RLG150-45	20.5	5.1 (0.4)	2199	12.7	0.02
NNS1NG4-55	20.5	4.4	2343	20.0	0.05
NNS1NG43RLG150-55	20.0	4.9 (0.5)	2261	20.2	0.23
NNS1NG4-65	20.0	5.3	2306	18.5	0.04
NNS1NG4RLG150-65	20.0	4.9 (0.5)	2273	14.2	0.10
NNS1NG3-45	20.5	5.6	2286	23.8	0.08
NNS1NG3RMG50-45	19.5	4.4 (0.3)	2290	24.2	0.29
NNS1NG3-55	20.5	5.9	2274	26.6	0.03
NNS1NG3RMG50-55※2	20.0	5.6 (0.3)	2240	23.0	0.20
	20.0	5.2 (0.3)	2225	23.3	0.18
NNS1RMG100-55※2	19.5	4.0 (0.5)	2280	24.9	0.08
	19.0	5.3 (0.5)	2254	24.4	0.18
NNS1NG3-65	20.0	5.8	2230	23.7	0.04
NNS1NG3RMG50-65※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 塩化物イオン残存比 α :0.24（最大値）

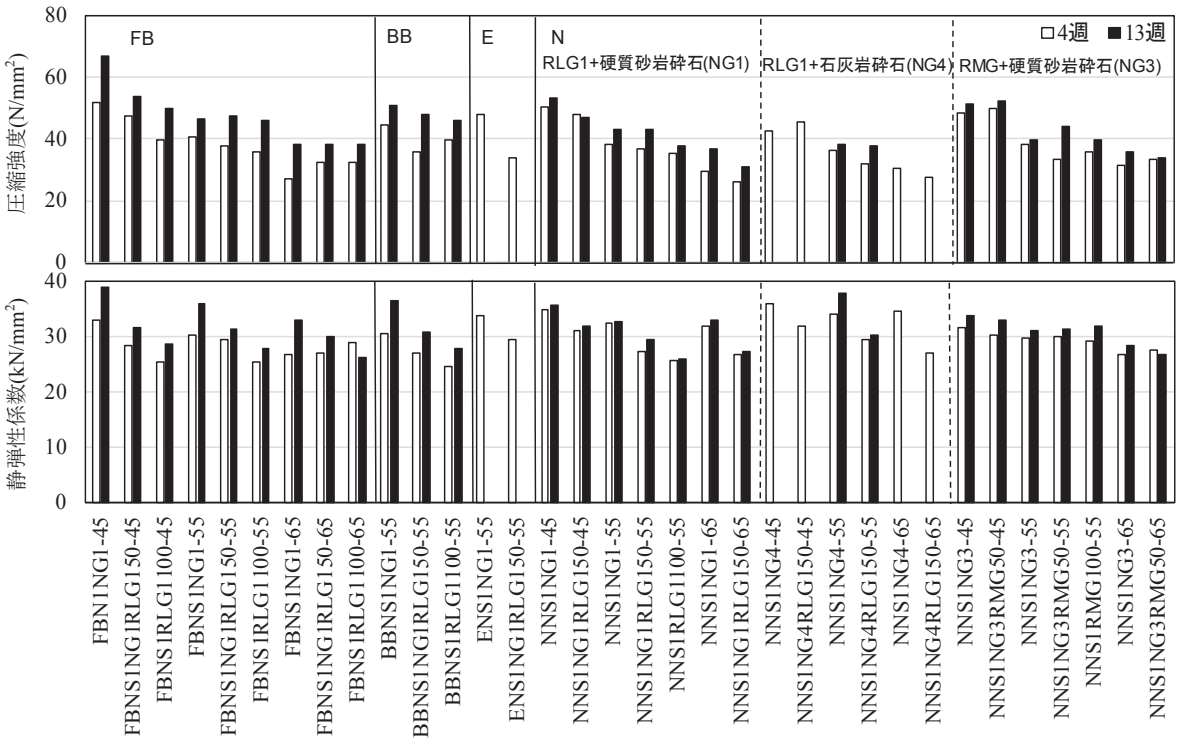


図2　各種コンクリートの圧縮強度および静弾性係数

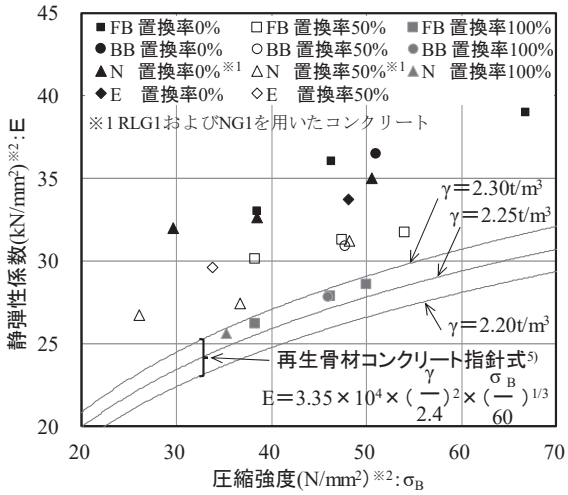
より密度の小さい再生粗骨材の置換率が大きくなるのに伴い増加する傾向がみられる。

(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。

(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(レディーミクストコンクリート)の規制値である0.30kg/m³以下を満足した。



※2 FB,BB は材齢 13 週，N,E は材齢 4 週の値を用いた。

図3　圧縮強度と静弾性係数の関係

3.1.2 硬化性状

圧縮強度，静弾性係数，長さ変化，促進中性化および凍結融解の試験結果を図2から図6に示す。

(1) 圧縮強度

図2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，概ね一般的な傾向[9]である。

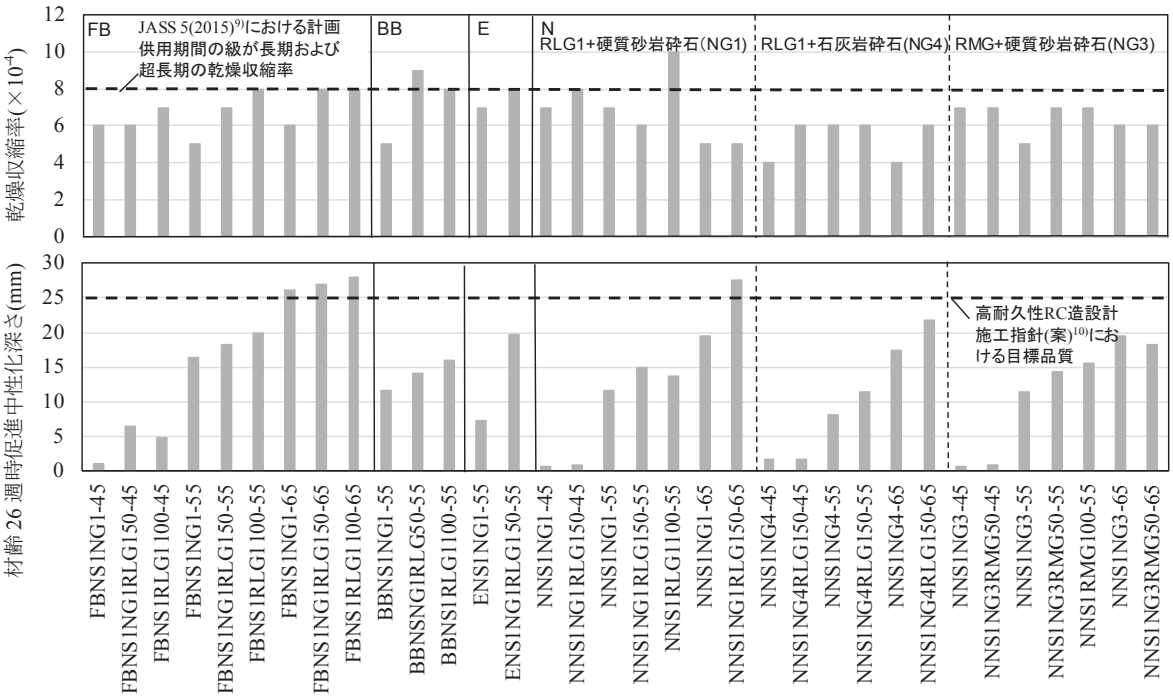


図4　各種コンクリートの乾燥収縮率および促進中性化深さ

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リートも50N/mm^{2}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についても材齢4週時で同様の傾向がみられた。石灰岩砕石を用いたものは，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2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[9]と同様に，圧縮強度の大きさに対してNG4を用いたコンクリートが大きくなる傾向かみられた。このことから，静弾性係数の低下に対しては，石灰岩砕石を混合使用することが有効である。

図3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%: γ=2.30 t/m^3，置換率50%: γ=2.25t/m^3，置換率100%: γ=2.20t/m^3)に対応した再生骨材コンクリート指針式[5]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) 長さ変化

図4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BBNS1NG1RLG150-55，Nで置換率100%のNNS1RLG1100-55において，JASS 5 (2015)[9]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に石灰岩砕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NNS1NG1RLG150-45とNNS1NG4RLG150-45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。

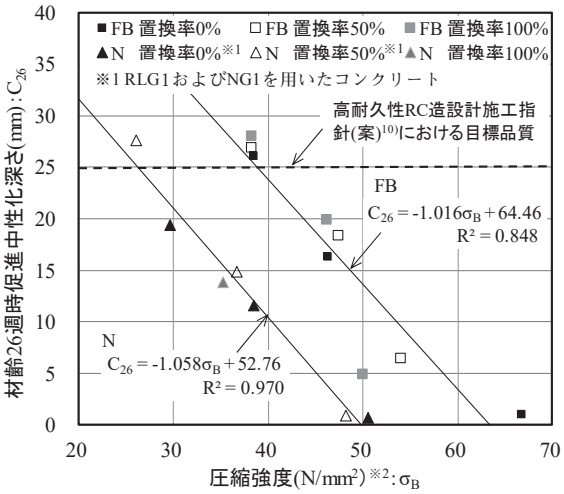


図5　圧縮強度と促進中性化深さの関係深さ

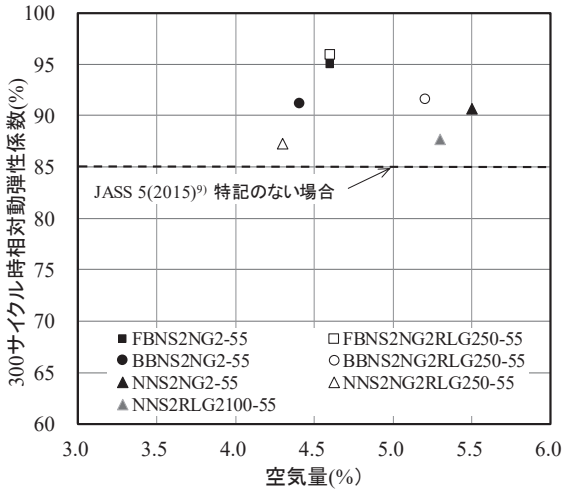


図6 空気量と300サイクル時相対動弾性係数の関係

(4) 促進中性化

図5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(NNS1NG1RLG150-65)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)」[10]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少ない。セメント種類の影響は，一般的な傾向[11]と同様に，FBを用いた場合で速くなる傾向がみられる。

(5) 凍結融解

図6に空気量と300サイクル時相対動弾性係数の関係を示す。これによると，既往の結果[12]と同様，作製時のフレッシュコンクリートで4.0%以上の空気量があれば，セメント種類，置換率に係わらず，300サイクル時の相対動弾性係数は85%以上となっている。このことから，低品質再生粗骨材を用いたコンクリートを寒冷地で使用する場合，普通コンクリート同様[9]，空気量は4.0%以上(目標空気量:5.0±1.0%)とすれば，十分な耐凍害性を確保することが可能である。

3.2　有害物質(放射性物質)の溶出抑制対策

分析結果を図7に示す。なお，各データは3個の試料の平均値を示す(Nの91日間養生した試料は

2個の平均値)。

(1) pH

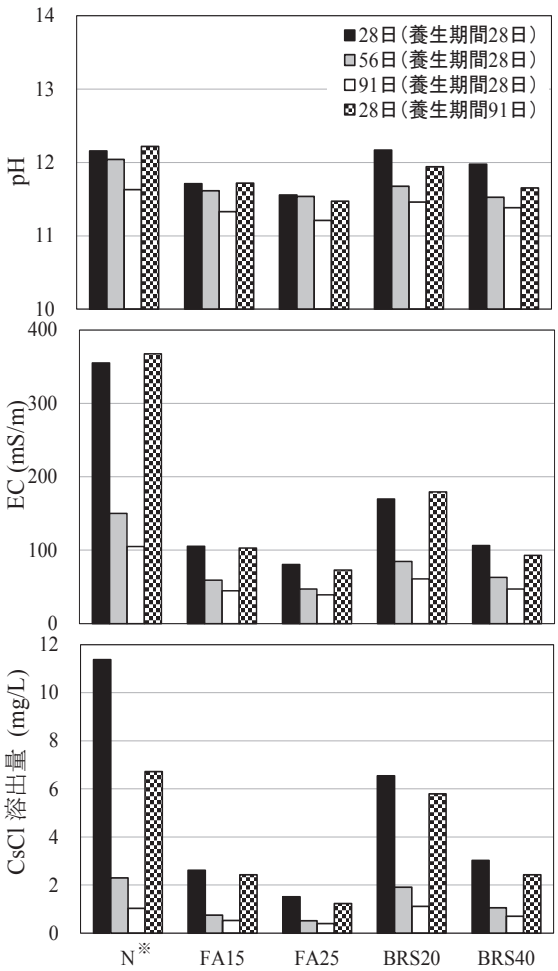
いずれの試料においても経時的にpHは小さくなった。混和材の影響は，N，BRS，FAの順に小さくなり，また，置換率の増加に伴い小さくなる傾向がみられた。

(2) EC

ECは，溶存イオン量をおおまかに示す指標である。いずれの試料においても経時的に小さくなった。混和材の影響は，N，BRS，FAの順に小さくなり，また，置換率の増加に伴い小さくなる傾向がみられた。養生期間の影響は，両者ともほぼ同等で明確な差異は認められない。

(3) CsCl溶出量

いずれの試料においても経時的にCsCl溶出量は減少した。これは，細孔溶液中のイオンが試料表層から浸漬液に溶出する過程で試料内部から表層まで連なる細孔中をイオンが拡散する必要があるが，試料内部から表層にかけての拡散距離が長くなることで試料内部に存在するイオンの溶出量が経時的に減少することが考えられる。



※N の養生期間 91 日のデータは 2 試料の平均値

図7　分析結果

混和材の影響は，養生期間28日の場合，Nでは浸漬期間91日までの溶出量の累積値が14.7mg/Lであったが，FA15，FA25ではそれぞれ3.89mg/L，2.42mg/Lと大幅に低減した。したがって，フライアッシュの混入によりCsCl溶出量を大幅に抑制でき，さらに置換率を高めることで溶出抑制効果が高まる傾向が認められた。これは，フライアッシュのポゾラン反応によってセメント水和物相中の細孔(毛細管空隙)のうち，約20nm以上の比較的大きな細孔の量が減少するポゾラン反応[13]によると考えられる。一方，高炉スラグ微粉末においては，BRS20，BRS40でそれぞれ6.55mg/L，3.03mg/Lとフライアッシュを混入したものに比べて低い溶出抑制効果であったが，混入量の増加に伴う溶出抑制効果は得られていることから，さらに混入量を増加することにより溶出抑制効果が大きくなることが期待できる。

養生期間の影響は，いずれの試験体も28日に比べて91日の試料の溶出量が小さくなる傾向がみられ，特にNにおいては28日に対し，91日では約半分程度の溶出量であった。NのECはほぼ等しいことから，ナトリウム，カリウム，カルシウムなどセメントペースト硬化体に含まれるセメント起源の他のイオン[14]の溶出が多くなったことが原因の一つとして考えられる。

4. まとめ

低品質再生骨材を用いたコンクリートの用途拡大を実現することを目的に，セメント種類，再生

骨材置換率を変化させた場合の再生骨材コンクリートの性能評価ならびに混和材による放射性物質などの有害物質の溶出抑制効果の検討を行った結果，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調合により所定の品質をほぼ満足する。なお，塩化物含有量は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/m^{3}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，通常の高度域では影響は小さい。静弾性係数は，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，石灰岩砕石を混合使用することが有効である。

(3) 再生粗骨材Lを用いた場合の乾燥収縮は，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砕石を用いることにより低減することが可能である。

(4) 再生粗骨材Lを用いたコンクリートの促進中性化は，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。凍結融解は，再生粗骨材置換率の影響はみられず，適切に空気が連行されていれば，普通コンクリートと同様の配慮で耐凍害性は確保できる。

(5) セシウムが付着したコンクリート塊から製造した再生骨材をコンクリートに使用することを想定した検討を行った結果，フライアッシュや高炉スラグ微粉末を混入することにより，セシウムの溶出量を抑制できた。特に，フライアッシュⅡ種を15％以上置換した場合の溶出抑制効果は顕著であった。

以上のことから，低品質再生粗骨材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，所要品質の確保が可能である。なお，フライアッシュ，高炉スラグ微粉末の利用はコンクリートの性能のみならず有害物質の溶出抑制対策として有効である。

謝辞

本研究の実施において，名城大学大学院理工学研究科　レ ダイ アン氏，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) 国土交通省総合政策局，平成24年度建設副産物実態調査結果，2014.3

2) 道正 泰弘，舘 秀基，村 雄一，坂詰 義幸：再生粗骨材残渣からの六価クロム溶出挙動と溶出抑制対策－建築構造物の解体に伴い発生するコンクリート塊のリサイクルシステム，日本建築学会技術報告集　第17巻第37号，pp.803-808，2011.10

3) 日本原子力学会：「福島第一原子力発電所事故により発生する放射性廃棄物の処理・処分」特別専門委員会，福島第一原子力発電所事故により発生する放射性廃棄物の処理・処分平成25年度報告書～廃棄物情報の整理と課題解決に向けた考慮事項～，平成26年3月

4) 建設省住宅局建築指導課長：コンクリートの耐久性確保に係る措置について，建設省住指発第

142号，昭和61年2月2日
5) 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
6) 道正 泰弘：持続可能なコンクリート塊リサイクルシステム-低品質再生骨材の建築構造用コンクリートへの利用，コンクリートテクノ，第33巻第11号，pp.74-80，2014.11
7) 道正 泰弘：低品質再生骨材を置換したコンクリートの構造体強度補正値，コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1779-1784, 2016
8) 日本建築学会：コンクリートの調合設計指針・同解説，2015
9) 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
10) 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
11) 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・同解説，2007
12) 舘　秀基，溝口 信夫，岡本 英明，道正 泰弘：骨材置換による再生骨材コンクリートの実構造物への適用，コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1463-1468, 2010
13) 山本 武志，金津　努：フライアッシュのポゾラン反応に伴う組織緻密化と強度発現メカニズムの実験的考察，土木学会論文集E，Vol.63 No.1，pp.52-65，2007.1
14) 公開特許公報(A)：特開2015-194436(P2015-194436A)，放射性セシウムの溶出抑制方法及び放射性セシウムの溶出が抑制された固化体，公開日2015.11.5