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

実機プラントによる再生骨材の製造およびそれを用いたコンクリートの品質

道正泰弘 —*1 成川匡文 —*2
中込 昭 —*3 寺西浩司 —*4
菊池雅史 —*5

キーワード：
リサイクル, コンクリート塊, 再生骨材, 再生コンクリート, 火力発電所, 実機プラント

Keywords:
Recycle, Concrete waste, Recycled aggregate, Recycled aggregate concrete, Thermal power plant, Real-scale Plant

1. はじめに

近年、環境汚染や資源枯渇の問題が地球規模で論ぜられるようになり、それに伴って廃材の再利用技術、再資源化技術が今後の重要課題として提起されている。膨大な資源の消費と多量の廃材を発生する建設産業にとって、建築系廃棄物の中でも最も発生量が多く、流通システム、基・規準類の整備がまだ不十分なコンクリート塊の適切な処理・処分、再利用・再資源化は今後の建設活動の成立条件である。筆者らは、このような背景から、今後増加が予測される火力発電所等、大規模な電力建物の解体に伴い発生する建築系廃棄物のリサイクルシステムの構築を目的として、再生コンクリートとしての建築構造物への利用技術について検討を行っている^{1) 2) 3) 4) 5)}。

本検討は、これら一連の研究の一環をなすもので、再生コンクリートの品質に関する基礎的研究^{1) 2) 3) 4)}および実用化に関するシミュレーション⁵⁾の結果を踏まえ、構造用コンクリートとして所要の品質を得ることが可能で、かつ、環境保全性および経済性の観点から有効性が認められた再生骨材および再生コンクリートの製造方法の確立を目的に、実大の骨材製造プラントを用い、実際の火力発電所の解体に伴い発生したコンクリート塊から再生骨材を製造し、それを用いた再生コンクリートの品質および評価等について検討を行い、適用のための基礎資料を得ようとするものである。

2. 原コンクリートの諸元および性質

2.1 解体建物の調査概要

(1) 対象建物

対象建物は、36～37年経過した解体予定の既設火力発電所本館（タービン建屋）である。その概要を表-1に示す。なお、対象建

RECYCLING SYSTEM OF CONCRETE WASTE INCURRED FROM BUILDING DEMOLITION

Production of recycled aggregate by real-scale plant and quality of recycled aggregate concrete

Yasuhiro DOSHO —*1 Masafumi NARIKAWA —*2
Akira NAKAGOME —*3 Kohji TERANISHI —*4
Masafumi KIKUCHI —*5

The real-scale experiment to establish the definite method producing recycled aggregate and recycled aggregate concrete based on LCA was carried out, and this paper describes the various quality of recycled aggregate and recycled aggregate concrete produced by each real-scale plant. Specifically, the production efficiency, quality of recycled aggregate generated by real-scale plant, and the basic performance of recycled aggregate concrete using that aggregate, such as property of strength, durability, mechanical property, fire resistance, performance for construction work, etc. were confirmed. Results confirmed the concept for mix proportioning and quality control of recycled aggregate concrete corresponding to that quality.

物は、既報⁵⁾にてコンクリート塊のリサイクルシステムに関するシミュレーションの検討対象としたものである。

(2) 調査項目および方法

表-2に調査項目、方法および調査位置を示す。火力発電所本館は鉄骨造であるが、床スラブ、隔壁等の上部躯体(US)、タービン架台(T/G)、床スラブ、地中梁、耐圧板等の地下躯体(BS)等それぞれの部位において、それぞれ比較的多量のコンクリートが打設されており、本検討では、打設工区の異なる3ユニット（タービン1機が設置されて

表-1 対象建物の概要

建物概要	場 所	都市近郊, 海岸隣接地域(海岸より約200m)
	建物用途	火力発電所タービン建屋
	敷地面積	約104,000m ²
	延床面積	約18,000m ²
	最高高さ	約45m
	構 造	鉄骨造; 地上10階
経 年	37年(1・2号機), 36年(3号機)	

表-2 原コンクリートの調査項目、方法および調査位置

原コンクリート記号	コンクリートの打設箇所		コンクリート量(m ³)	資料*調査	コア抜き試験による調査		
					圧縮強度・弾性係数	中性化深さ	塩分量
					JIS A 1107・ASTM C 469	フェノールフタレイン法	JCI-SC4
US	上部躯体	床スラブ	5,000	●		●	
		外部隔壁			●	●	●
T/G	タービン架台	上層	2,000	●	●	●	
		下層			●	●	
BS	地下躯体	床スラブ	19,000		●	●	
		地中梁			●		
		耐圧板			●		

* 工事施工記録によるコンクリートの調査・使用材料の調査(BSは資料なし)

*1 東京電力㈱電力技術研究所 主任研究員・工博
(〒230-8510 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町4-1
東京電力㈱技術開発センター)

*2 東京電力㈱電力技術研究所 建築グループマネージャー

*3 前田建設工業㈱技術研究所 課長・工修

*4 前田建設工業㈱技術研究所 主任・工博

*5 明治大学理工学部建築学科 助教授・工博

*1 Research Engineer, Architecture Group, Power R&D Center, TEPCO, Dr. Eng.

*2 Group Manager, Architecture Group, Power R&D Center, TEPCO

*3 Manager, Technical Research Institute, Maeda Corporation, M. Eng.

*4 Senior Research Engineer, Technical Research Institute, Maeda Corporation, Dr. Eng.

*5 Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Science & Technology, Meiji Univ., Dr. Eng.

いる建物の区切りの単位)の各部位ごとにコア供試体を採取した。

2.2 調査結果および検討

(1) 原コンクリートの仕様

コンクリートの調合条件について、建設当時の施工記録等をもとに行った調査結果を表-3に示す。これによると、発電所本館のコンクリートは、USとT/Gで設計基準強度が異なっている。

(2) 原コンクリートの性質

a. コア供試体の圧縮強度：図-1にコア供試体による圧縮強度および弾性係数の分布を示す。US、T/Gにおける圧縮強度の平均値は、いずれも設計基準強度を満足している。一方、BSは、資料は得られなかったものの、打設当時の一般的な値：18N/mm²に対して、コア供試体強度はそれを大きく上回っている。弾性係数の平均値はUS、T/GおよびBSで、それぞれ 2.74×10^4 N/mm²、 2.37×10^4 N/mm²および 2.82×10^4 N/mm²であった。図中に日本建築学会の鉄筋コンクリート構造計算規準式による推定値を示すが、原コンクリートの弾性係数の平均値は、この推定値に近い値であった。

b. 中性化深さおよび塩分含有量：中性化深さの実測値と、岸谷式による推定値を図-2に示す。実測値は、T/Gにおいて推定値を上回る傾向がみられたが他は下回る。図-3は、塩分含有量を全塩化物イオン量として、その実測値および海岸より200m程度の地点の推定値⁶⁾を示したものである。これによると、測定箇所によるばらつきはあるものの、ほぼ全ての箇所で実測値は推定値を下回っている。

3. 再生骨材

(1) 再生骨材の製造

a. 製造に供した実機プラント：本研究で設定した製造方法は、経済性および環境保全性に及ぼす影響の程度が大きい再生粗骨材の収率を高めることを目的として破碎工程を粒度調整程度までとしている。再生骨材の製造に使用した実機プラントは、図-4および写真-1に示すように、仮設の再生路盤材製造プラントを準備し、破碎機の破碎寸法、ふるいの大きさをコンクリート骨材用とする等、若干の調整・改良を加えたものである。

b. 実機プラントの製造効率：再生粗骨材の収率は、おおそ60～77%程度の範囲にあり、ジョークラッシャーのみで一次破碎した場合¹⁾と比べると、全体的にはやや小さいものの、プラントの機器構成の違いにもかかわらず比較的良好な収率が得られた。従って、既報⁵⁾のシミュレーションで仮定した値の70%はほぼ妥当な値であり、本検討で設定している方法で製造した再生コンクリートを場内建替えの新設建物等に適用した場合、環境保全性および経済性において、既報⁵⁾で示した程度の有効性を得ることが可能である。

(2) 再生骨材の品質

実機製造プラントを用いて製造した再生骨材(再生粗骨材、再生細骨材)および本検討に使用した市販の普通骨材(粗骨材：硬質砂岩碎石、細骨材：川砂、陸砂、砕砂)の品質試験結果を表-4に示す。

a. 外観：本検討で製造した再生粗骨材の外観は、おおそ碎石状ではあるが、原骨材に川砂利が使用されていたことからやや丸みを帯びている傾向が観察された。

b. 粒度：再生粗骨材の粗粒率は、硬質砂岩碎石の6.11～6.85に比べて6.18～6.61とほぼ同等の範囲にある。再生細骨材は、2.72～3.31と普通細骨材の2.64～2.89に比べて若干大きめとなった。

c. 比重：再生粗骨材の絶対比重は、硬質砂岩碎石の2.66～2.70に比べて、2.21～2.31と0.4～0.5程度小さい。一方、再生細骨材は、普通細骨材の2.50～2.59に比べて2.06～2.08と、0.5程度小さい。

表-3 資料調査による原コンクリートの調合条件、使用材料

原コンクリート記号	コンクリートの種別	使用材料		設計基準強度(N/mm ²)	スラブ厚(cm)	水セメント比(%)	粗骨材の最大寸法(mm)	単位水量(kg/m ³)
		セメントの種類	粗骨材の種類					
US	普通コンクリート	普通ポルトランドセメント	川砂利	18	22	60	25	198
T/G	普通コンクリート	普通ポルトランドセメント	川砂利	22	15	51	40	161

* BSは資料なし

図-1 圧縮強度および弾性係数の分布

図-2 中性化深さ

図-3 塩分含有量の分布

図-4 再生骨材プラントの製造フロー

写真-1 再生骨材プラントの全景

d. 吸水率：再生粗骨材は、硬質砂岩砕石の0.53～0.86%に比べて6.22～7.60%と12倍程度大きい。なお、1997年に建設省総合技術開発プロジェクト（第2次総プロ）により提案された「建築物への適用を考慮したコンクリート用再生骨材の暫定品質基準（案）」（見直し案）⁷⁾に示されている、構造用コンクリートで土に接する基礎等への適用が可能な再生粗骨材2種の範囲（5%以下）はいずれも上回るが、無筋の非構造体への適用が可能な範囲（再生粗骨材3種：5%を越え7%以下）に対しては適合するものもみられた。一方、再生細骨材は普通細骨材の1.06～2.84%に比べて、10.7～11.0%と5～6倍程度大きく、いずれも見直し（案）の範囲（10%以下）を越えている。

e. 実積率：再生粗骨材の実積率は、硬質砂岩砕石の57.5～58.6%に比べて、58.2%～59.3%とほぼ同等もしくは若干上回る傾向がみられた。一方、再生細骨材は、普通細骨材の62.0～68.1%に比べて、59.8～66.5%とほぼ同等の範囲にある。

f. 安定性：再生粗骨材は、硬質砂岩砕石の1.3%に比べて、32.5～39.7%と30倍程度、再生細骨材は普通細骨材の2.7～6.7%に比べて、7.5%～21.2%と1.5～8倍程度大きく、両者とも変動が大きい。

g. 洗い損失量：再生粗骨材の洗い損失量は、硬質砂岩砕石の0.6～1.1%に比べて1.15～2.09%と、やや大きくなるが、見直し（案）に示されている1.5%を下回るものもみられた。一方、再生細骨材は、普通細骨材の1.6～7.7%に比べて、3.91～6.35%と同等の範囲にある。なお、見直し（案）に示されている7%以下に対してはいずれも下回る。洗い損失量が比較的小さかった要因としては、使用した実機プラントは、製造過程において粉塵の発生防止を目的に、プラント内部に散水設備（2箇所）を設けていることがあげられる。

h. 骨材強度：実機プラントにより製造した再生粗骨材の骨材強度は、400kN破砕値でみると、硬質砂岩砕石の10.8～17.5%に比べて、22.2～28.4%とやや大きくなり、低下する傾向がみられる。

（3）再生粗骨材の不純物量

再生粗骨材（サンプル約50l）に含まれる不純物を目視により選別し、その種類および含有量を測定した。これらの結果を表-5に示す。一般に火力発電所の主要RC部分は、大部分が打放しコンクリート仕様で仕上材等は殆ど使用されていないことから、一般の建物⁸⁾に比べて不純物量は少ない。

4. 再生コンクリート

4.1 実験概要

（1）使用材料

- セメント：セメントは普通ポルトランドセメント（ $K_{sc}=42N/mm^2$ ）を用いた。
- 骨材：再生骨材は、US,T/G,BSから得られた3種類の原コンクリートを用いた再生粗骨材および再生細骨材、各々3種類を使用した。普通骨材は、粗骨材には硬質砂岩砕石(NG1,NG2)を用い、一方、細骨材には川砂(NS1)および陸砂・砕砂の混合砂(NS2)を用いた。これら骨材の種類、記号および主要物性は表-4に示したとおりである。
- 混和剤：いずれのコンクリートもリグニンスルホン酸系AE減水剤、アルキルアリルスルホン化合物系空気連行補助剤を用いた。

（2）試料コンクリート

試料コンクリートの種類および調合の概要を表-6に示す。

- 種類：粗骨材として再生骨材3種類および普通骨材2種類、細骨材として再生骨材3種類および普通骨材2種類を用い、再生骨材の置換率、水セメント比および単位水量を変化させた再生コンクリート44種類、比較用に水セメント比および単位水量を変化させた普通コンクリート9種類の合計53種類の試料コンクリートを用意した。
- 調合：水セメント比は、汎用的なコンクリートの利用形態にあ

表-4 本検討で使用した骨材の品質

試験項目	試験方法	粗骨材						細骨材					
		普通			再生			普通			再生		
		NG1*1	NG2	RG	RG	RG		NS1	NS2**		RS	RS	RS
		5号砕石	6号砕石	砕石	(US)	(T/G)	(BS)	川砂	陸砂	砕砂	(US)	(T/G)	(BS)
再生粗骨材の収率(%)	—	—	—	—	60.8	76.9	71.2	—	—	—	—	—	—
最大骨材寸法(mm)	—	20	13	20	20	20	20	5	5	5	5	5	5
粗粒率	JIS A1102	6.77	6.11	6.85	6.18	6.42	6.60	2.73	2.89	2.64	3.31	2.72	3.06
比重	絶対	粗骨材：2.70	2.68	2.66	2.23	2.21	2.31	2.59	2.53	2.50	2.06	2.08	2.06
	表乾	JIS A1110	2.71	2.70	2.68	2.40	2.38	2.62	2.58	2.57	2.28	2.30	2.29
吸水率(%)	JIS A1109	0.53	0.72	0.86	7.30	7.66	6.22	1.06	2.03	2.84	11.0	10.8	10.8
単位容積質量(kg/l)	JIS A1104	1.58	1.50	1.53	1.31	1.28	1.37	1.77	1.63	1.55	1.26	1.24	1.37
実積率(%)		58.6	56.1	57.5	58.7	58.2	59.3	68.1	64.3	62.0	61.3	59.8	66.5
安定性(%)	JIS A1122	—	—	1.36	39.7	32.5	36.5	—	6.72	2.76	21.2	8.1	7.5
洗い損失量(%)	JIS A1103	0.62	0.89	1.10	1.15	2.09	1.03	1.62	3.00	7.68	3.91	6.35	3.77
骨材強度	400kN破砕値(%)	B.S.812		10.8	17.5	25.7	28.4	22.2					
	10%破砕力(kN)			380	244	118	93	152					

*1 5号砕石と6号砕石を重量比7:3で使用、*2 陸砂と砕砂を重量比5:5で使用

表-5 再生粗骨材の不純物含有量

再生粗骨材記号	不純物の重量比率(%)							
	建設廃材	ガラス陶器くず	廃木材	金属くず	紙布くず	廃プラスチック	廃油	合計
RG(US)	0.045	0.007	0.006	0.017	0.002	0.005	0	0.082
RG(T/G)	0.117	0.039	0.008	0.019	0.004	0.041	0	0.228
RG(BS)	0.005	0.001	0.006	0.060	0	0.010	0	0.082

わけて40%,50%および60%の3水準に設定した。再生骨材の置換率は、これまで筆者らが実施した再生コンクリートの品質に関する研究^{1) 2) 3)}の成果に基づき、再生粗骨材においては15%～100%、一方、再生細骨材では15%～30%の範囲で、それぞれ単独で用いた場合および両者を使用した場合を設定した。単位水量は、現行のJASS5で規定されている185kg/m³を上限とし、165kg/m³までの範囲で変化させた。細骨材率は、単位粗骨材かさ容積を一定とさせるよう設定した。混和剤の量は、普通コンクリートにおいてスランプ18±2.5cm、空気量4.5±1.5%が得られるように調整し、それと同量を水セメント比および単位水量ごとに対応した再生コンクリートに各々混入した。

（3）試験項目および試験方法

フレッシュコンクリートでは、スランプおよび空気量を、硬化したコンクリートでは、圧縮強度、圧縮弾性、乾燥収縮、促進中性化、凍結融解および耐火性の諸試験を行った。試験体および試験方法の概要を表-7に示す。

4.2 実験結果および検討

表-6に各種コンクリートの品質試験結果を示す。

（1）フレッシュ性状

再生コンクリートのスランプは、8.5～20.1cmの範囲にあり、再生骨材の置換率の影響をうける。中でも、再生粗骨材を50%以上置換したものや、再生細骨材および再生粗骨材の両者を置換したもので、目標値の範囲を下回る傾向がみられた。従って、これらについては、化学混和剤の量の調整等による対応が必要になる。一方、空気量は、3.4～6.9%の範囲にあり、おおそ目標値の範囲内にあり、置換率等の影響は明確にはみられなかった。

（2）硬化性状

a. 圧縮強度：再生コンクリートの4週圧縮強度は、普通コンクリートの33.7～62.6N/mm²に比べて、26.4～58.8N/mm²と全体的に置換率の増加に伴いやや低下する傾向がみられた。この傾向は、水セメント比40%の高強度域のコンクリートで最大おおそ15%程度の低下がみられたが、水セメント比50%以上のコンクリートでは、その低下の割合は再生粗骨材を全量置換した場合、あるいは再生細骨材および再生粗骨材の両者を30%置換した場合でも10%程度であった。

表-6 コンクリートの調合条件および品質試験結果

試料コンクリート		使用骨材の記号		調合条件					試験結果												
区分	試験体記号	粗骨材	細骨材	水セメント比 (%)	単位水量 (kg/m³)	置換率 (%)		細骨材率 (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm²)	弾性係数 (×10⁴ N/mm²)	材齢28日乾燥収縮率 (×10⁻⁴)	促進中性化深さ (mm)	耐久性指数 D F	耐火性能試験					
						粗骨材	細骨材									含水率 (%)	爆裂の有無	圧縮強度残存率 (%)			
普通	60-185N2	NG2	NS2	60	185	0	0	48.0	19.0	4.2	35.0	2.69	9.72	14.0	93.6						
	60-180N1	NG1	NS1		180			50.3	18.9	4.3	35.1	3.09	8.33								
	60-180N2	NG2	NS2		180			48.5	17.0	4.9	33.7	2.67	9.72								
	60-165N2	NG2	NS2		165			50.2	17.6	4.9	35.5	2.71	10.19								
	50-185N2	NG2	NS2	50	185	46.4	17.0	4.7	44.6	2.85	10.00			4.7	無	14.5					
	50-175N2				175	47.7	17.8	5.5	42.7	2.73	9.91										
	50-165N2				165	49.0	18.1	4.4	49.2	3.03	9.35										
	40-185N2				185	43.8	18.0	3.7	56.5	2.97	9.17										
	40-165N2	40	165	46.9	18.6	4.0	62.6	3.31	10.19												
再生	60-185RG(BS)-30	RG(BS)+NG2	NS2	60	185	30	0	48.0	20.0	4.2	33.8	2.47	10.37								
	60-185RG(BS)-50	RG(BS)+NG2			50	50		18.0	5.4	32.9	2.47	11.02									
	60-185RG(BS)-100	RG(BS)			100	100		18.0	4.5	32.2	2.29	11.57									
	60-180RG(US)-30	RG(US)+NG1		60	180	30	0	50.3	19.6	3.4	30.0	2.82	9.72	16.1	94.5						
	60-180RG(T/G)-30	RG(T/G)+NG1	NS1			50.3		20.1	3.9	30.3	2.68	10.37	14.6	96.0							
	60-180RG(BS)-30	RG(BS)+NG2	NS2			48.5		18.5	5.0	33.7	2.61	10.28									
	60-180RG(US)-100	RG(US)	NS1			50.3		19.1	4.7	28.2	2.34	11.20	18.2	86.8							
	60-180RG(T/G)-100	RG(T/G)	NS1			50.3		19.3	4.7	26.4	2.30	11.85	20.1	70.6							
	60-180RG(BS)-100	RG(BS)	NS2			48.5		17.5	5.8	32.2	2.31	12.04									
	60-165RG(BS)-30	RG(BS)+NG2	NS2	60	165	30	0	50.2	18.0	5.9	33.0	2.55	11.02								
	60-165RG(BS)-50	RG(BS)+NG2				50		18.0	4.8	33.5	2.55	11.94									
	60-165RG(BS)-100	RG(BS)				100		17.0	5.2	34.1	2.38	12.78									
	50-185RS(BS)-15	NG2	RS(BS)+NS2	60	185	0	15	17.7	5.5	41.7	2.75	9.26									
	50-185RS(BS)-30					0		17.9	5.1	41.1	2.58	9.72									
	50-185RG(BS)-15					NS2		15	18.7	3.9	43.7	2.83							9.81		
	50-185RGS(BS)-15・15	RG(BS)+NG2	RS(BS)+NS2			15		15.8	5.5	42.7	2.64	9.54									
	50-185RGS(BS)-15・30	RG(BS)+NG2	RS(BS)+NS2	60	185	0	15	14.7	5.8	40.7	2.61	9.81									
	50-185RG(BS)-30		NS2			30		17.8	5.3	42.6	2.69	10.09									
	50-185RGS(BS)-30・15		RS(BS)+NS2			30		13.4	5.6	40.8	2.67	9.63									
	50-185RGS(BS)-30・30		RS(BS)+NS2			30		15.3	6.0	39.3	2.46	10.09									
	50-185RG(BS)-50	RG(BS)+NG2	NS2	60	185	50	0	17.5	5.4	40.3	2.60	10.93									
	50-185RG(BS)-100	RG(BS)				100		17.3	6.9	37.5	2.38	12.50									
	50-175RS(BS)-30	NG2	RS(BS)+NS2			0		15.5	5.9	41.4	2.72	9.91							5.7	無	12.8
	50-175RG(BS)-15	RG(BS)+NG2	NS2			15		16.2	6.0	42.3	2.72	9.91									
	50-175RG(BS)-30	RG(BS)+NG2	NS2	60	175	0	30	16.8	6.2	40.4	2.63	10.46				5.2	無	12.2			
	50-175RGS(BS)-30・30		RS(BS)+NS2			30		12.8	5.9	42.7	2.56	11.11				6.2		13.0			
	50-175RG(BS)-50		RG(BS)+NG2			NS2		30	13.0	5.3	39.7	2.56				11.11		7.1		13.5	
	50-175RG(BS)-100		RG(BS)			NS2		100	12.1	5.0	39.6	2.53				12.31					
	50-165RS(BS)-15	NG2	RS(BS)+NS2			0	14.5	3.8	49.4	2.85	10.00	7.1		13.1							
	50-165RS(BS)-30					0	11.5	4.8	46.0	2.76	10.37										
	50-165RG(BS)-15					0	17.4	4.7	48.8	2.95	9.91										
	50-165RGS(BS)-15・15	RG(BS)+NG2	RS(BS)+NS2	60	165	15	15	14.5	4.0	43.7	2.65	10.46									
	50-165RGS(BS)-15・30		RS(BS)+NS2			30		10.0	3.9	45.8	2.77	11.57									
	50-165RG(BS)-30		NS2			0		13.2	5.1	47.2	2.90	10.37									
	50-165RGS(BS)-30・15		RS(BS)+NS2			30		10.3	3.5	44.1	2.67	10.56									
	50-165RGS(BS)-30・30	RG(BS)+NG2	RS(BS)+NS2	60	165	30	15	8.5	3.8	44.9	2.76	11.39									
	50-165RG(BS)-50	RG(BS)+NG2	NS2			50		13.5	4.8	46.6	2.74	10.93									
	50-165RG(BS)-100	RG(BS)	NS2			100		9.8	5.3	44.1	2.76	11.94									
	40-185RG(BS)-30	RG(BS)+NG2	NS2	60	185	30	0	17.8	4.5	53.6	2.88	9.91									
	40-185RG(BS)-50	RG(BS)+NG2				50		17.5	4.9	53.8	2.91	9.81									
	40-185RG(BS)-100	RG(BS)				100		14.4	3.8	51.1	2.77	11.02									
	40-165RG(BS)-30	RG(BS)+NG2		60	165	30	0	17.0	4.4	57.7	3.04	10.37									
	40-165RG(BS)-50	RG(BS)+NG2	NS2			50		13.3	3.5	58.8	3.14	10.83									
	40-165RG(BS)-100	RG(BS)	NS2			100		11.0	3.4	53.9	2.90	11.57									

b. 圧縮弾性：再生コンクリートの圧縮弾性係数は、普通コンクリートの $2.67 \sim 3.31 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ に比べて、 $2.29 \sim 3.14 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ と全体的に置換率の増加に伴い低下する傾向がみられた。この傾向は、コンクリートの強度域に関わらず、再生粗骨材を全量置換した場合、あるいは再生細骨材および再生粗骨材の両者を30%置換した場合で普通コンクリートに比べて10%程度の低下が認められた。

c. 乾燥収縮：再生コンクリートの品質上最も問題となる乾燥収縮は、置換率および単位水量の影響をうけ、単位水量が大きくなるほど、また、置換率が増加するに伴い大きくなる傾向がみられ、特に、再生粗骨材を全量置換した再生コンクリートで顕著であった。

d. 促進中性化：再生粗骨材を置換した再生コンクリートの促進中性化深さは、置換率30%では普通コンクリートとほぼ同等であったが、置換率の増加にともない大きくなる傾向がみられ、全量置換した場合においては、最大で普通コンクリートの1.5倍程度となった。従って、置換率の大きい再生コンクリートを適用する場合は、水セメント比の低減等の対策を講じる²⁾等の配慮をする必要がある。

e. 凍結融解抵抗性：空気量3.4～4.7%の範囲における再生粗骨材を置換した再生コンクリートの耐久性指数は、置換率の増加に伴いやや低下する傾向がみられるものの、全量置換した場合においても300サイクル時で70を超えていることから、適切に空気が連行されている場合の凍結融解抵抗性は、普通コンクリートに比べて劣らない。

f. 耐火性：再生コンクリートの含水率は、約4.0～7.0%の範囲にあり、再生骨材の置換率が高くなるに伴い高くなる。コンクリートの爆裂は、いずれの再生コンクリートにおいてもみられず、また、ひび割れ発生状況も普通コンクリートと比べて差異はみられなかった。圧縮強度残存率は、全体的に普通コンクリートに比べてやや低くなるが、置換率との間に明確な相関性は認められなかった。

表-7 試験項目、試験体および試験方法の概要

試験項目、試験体形状、試験方法および試験体の概要				
試験項目	試験体形状	試験方法	試験体数	養生条件*1
フレッシュ コンクリート	スランブ	JIS A1101	—	—
	空気量	JIS A1128		
	圧縮強度	JIS A1118	各3本	翌日脱型、以降所定 材齢まで水中養生
	弾性係数	ASTM C469		
	促進中性化 (促進期間 ：26週)	「コンクリート促進中性 化試験方法」*2		
	乾燥収縮	JIS A1129		
	凍結融解	ASTM C666 A法 JIS A1127		
硬化した コンクリート	10φ×20			
	10×10×40			
	10×10×40			
	10φ×20			
耐久性	含水性	気中置置時・絶乾 状態の質量測定	各3本	28日封かん養生、以 降所定材齢まで恒温 恒湿養生
	爆裂の有無	JIS A1304 (1時間加熱)	各2本	
	圧縮強度残存率		各3本	

(2) 評価結果

図-5に再生コンクリートの諸性質と相対品質値のうち、吸水率をパラメータとした相対吸水率との関係を示す。また、図中に、第2次総プロの「再生骨材コンクリートの使用規準(案)」に規定される区分Aの再生コンクリート⁷⁾に相当する相対吸水率の値を示す。これによると、再生コンクリートの諸性質と相対吸水率との間に比較的確な相関性が認められる。また、400kN破砕値をパラメータとした相対400kN破砕値との関係においてもほぼ同様な傾向がみられた。このことから、室内試験同様^{1) 2) 3) 4)}、本検討で製造した再生コンクリートについても、相対品質値法による品質の推定・評価が可能であり、要求性能に基づき、適切な置換率を設定することにより、構造用コンクリートとしての適用が可能である。

6. 再生コンクリートの実施工実験および構造体品質

再生コンクリートを構造物に適用する場合の施工性および構造体コンクリートの性状について検討を行った。

6.1 実験概要

(1) 使用材料

- セメント・混和剤:セメントおよび混和剤は、4.と同様である。
- 骨材:再生骨材は地下躯体(BS)から得られた原コンクリートを用い、実機プラントにより製造した再生粗骨材および再生細骨材、各々1種類を使用した。普通骨材は、粗骨材には硬質砂岩砕石(NG2)を用い、一方、細骨材は、陸砂・砕砂の混合砂(NS2)を用いた。これら骨材の種類、記号および主要物性は表-4に示したとおりである。

(2) 試料コンクリート

試料コンクリートの種類および調合の概要を表-8に示す。

- 種類:粗骨材として再生骨材1種類および普通骨材1種類、細骨材として再生骨材1種類および普通骨材1種類を用い、置換率および単位水量を変化させた再生コンクリート4種類、比較用に水セメント比、単位水量を変化させた普通コンクリート2種類(53.5-183Nは、現状のレディミクストコンクリート工場における汎用的な調合として設定)の合計6種類のコンクリートをレディミクストコンクリート工場で製造し、試料コンクリートとして用意した。
- 調合:水セメント比は、50%の1水準に設定した。再生骨材の置換率は、5.の検討結果に基づき、図-5に示すように、見直し(案)における建築構造用コンクリート骨材として適用可能な再生粗骨材1種に相当する相対吸水率を算出し(2.73%)、今回使用した再生コンクリートの基本調合($W=175\text{kg/m}^3$; $W/C=50\%$)に換算した。その結果、得られた再生粗骨材の置換率は、39.9%となったが、さらに安全率をみて30%を基準に設定した。これを軸に単位水量、再生細骨材の混入を含めた再生骨材の置換率を変化させた。混和剤の量は、4.の検討結果をもとに所要のスランプ、空気量($18 \pm 2.5\text{cm}$, 空気量 $4.5 \pm 1.5\%$)が得られるように調整した。

(3) 試験項目および試験方法

試験項目は、圧送前後の品質変化および輸送管の管内圧力とした。輸送管は、図-6に示すように配管し、コンクリートの計画吐出量を3水準に変化させ、ピストン式のポンプ車により約60m圧送した。表-8中の53.5-183N, 50-175RG(BS)-15、50-175RG(BS)-30については、図-6に示す実大壁部材にコンクリートを打設し、打設状況、構造体コア強度およびひびわれ発生状況の確認を行った。

図-5 コンクリートの諸性質と相対吸水率の関係

表-8 コンクリートの調合

種別	調 合 号	使用骨材の記号		調合条件					
		粗骨材	細骨材	水セメント比 (%)	単位水量 (kg/m³)	置換率 (%)	細骨材率 (%)	混和剤添加量 (kg/m³)	
普通	50-175N	NG2	NS2	50	175	0	0	47.7	5.78
	53.5-183N			53.5	183	0	0	48.0	1.44
再生	50-175RG(BS)-15	RG(BS)+NG2	NS2	50	175	15	0	47.7	6.30
	50-175RG(BS)-30			50	185	30	0	46.4	5.92
	50-185RG(BS)-30			50	185	30	0	46.4	5.92
	50-175RGS(BS)-30・15		RS(BS)+NS2	50	175	30	15	47.7	7.00

図-6 圧送試験配管計画および実大壁部材の概要

6.2 実験結果および検討

(1) 施工性

- ポンプ圧送前後の品質変化: 図-7にコンクリートの圧送前後の品質変化結果を示す。フレッシュコンクリートの圧送前後の品質変化は、やや圧送後のスランプが低下するものの、普通コンクリートと比べると大差ない。空気量および硬化コンクリートについても、圧送前後の品質変化はみられなかった。これらから、本検討の範囲では、再生骨材の混入は、圧送前後の品質変化に影響を及ぼさない。これは、再生骨材のプレソーキングを十分行ったことにより、圧送による圧力吸水等がほとんどなかったことに起因する。
- 輸送管の管内圧力損失: 図-8にコンクリート吐出量と水平および垂直の輸送管1m当たりの管内圧力損失を日本建築学会「コンクリートポンプ工法施工指針・同解説」(ポンプ施工指針)による管内圧力損失の標準値と併せて示す。水平管の管内圧力損失は再生粗骨材を混合することにより若干大きくなり、再生粗骨材に加えて、再生細骨材も混合した場合(50-175RGS(BS)-30・15)は、再生粗骨材のみを混合した場合(50-175RG(BS)-30)に比べて小さくなっ

た。一方、比較用普通コンクリート(NN)の管内圧力損失と再生コンクリートの管内圧力損失を比較すると、前者の管内圧力損失は後者の管内圧力損失のほぼ中央値になっている。さらに、ポンプ施工指針の標準値と比べても大差ない。垂直管の管内圧力損失は水平管の圧力損失にコンクリート1m当たりの自重を加えた値よりも若干大きくなっているもののおおよそ妥当な範囲であった。

以上のことから、相対品質値法により調合設計された再生コンクリートの施工性は普通コンクリートと同等である。

(2) 構造体コンクリートの性状

- a. コア圧縮強度：図-9は、実大壁部材の柱部分から垂直方向にコアを抜きとり、高さ別に行った圧縮強度試験結果を示したものである。コア強度は普通コンクリートと再生コンクリートとも下部の圧密とコンクリートのブリーディングの影響により、試験位置の高さが低いほど若干大きくなる傾向を示した。コア強度の発現状況は、いずれのコンクリートも構造体打設時に同時に採取した強度管理用供試体（標準養生、28日強度）の発現に依拠している。従って、本検討で製造した再生コンクリートは、通常の運搬・打設・締固め方法で普通コンクリートと同等な構造体を構築することが可能である。
- b. ひびわれ発生状況：表-9は打設後3ヶ月における構造体コンクリートのひびわれ発生状況を示したものである。これによると、普通コンクリートに比べて再生コンクリートの置換率が増加するに伴いひびわれ本数が多く、最大ひびわれ幅は大きくなる傾向がみられた。特に、開口部廻りおよび柱・梁の取り合い部における発生が多くみられたことから、補強筋設置等の対策が必要となる。

7. まとめ

資源有効利用、環境保全および建設工事費等のコストダウンが推進されている現在、これに対応する建築材料としての再生コンクリートの構造用コンクリートへの適用性について、総合的な検討を行った。その結果を総括すると、大要以下のである。

(1) 本検討に用いた原コンクリートの強度および弾性係数は、ほぼ調合条件に対応した値であり、経年による品質低下は殆どみられない。また、中性化および塩分含有量は、36~37年経過したコンクリートとしてのおおよそ推定される範囲にある。

(2) 再生路盤材の製造を目的とした実機プラントに若干の改良を行い製造した再生骨材は、品質面では劣るものの、再生粗骨材の収率は、60%を超える値が得られたことから、適用の方法によっては、環境保全性および経済性において有効性を得ることが可能である。

(3) 圧縮強度、圧縮弾性および乾燥収縮は、再生骨材の置換率の増加に伴い低下する。従って、構造用コンクリートとして所要の性能を得るためには、従来の調合設計面での配慮に加えて、相対品質値法により適切な置換率の設定を行うことが必要である。なお、促進中性化についても同様の傾向がみられたことから、置換率の大きい再生コンクリートを適用する場合は、水セメント比の低減等の対策を講じる等の配慮をする必要がある。

凍結融解抵抗性および耐火性については、本検討の範囲では、普通コンクリートに比べて劣る傾向はみられない。

(4) 相対品質値法により調合設計した再生コンクリートの施工性および構造体コンクリートの品質は、乾燥収縮によるひびわれの発生を除き、普通コンクリートとほぼ同等である。従って、調合設計面以外において、適切な補強筋の設置等、構造設計面での配慮も必要となる。

(5) 再生コンクリートの建築構造用コンクリートへの適用は、対

図-7 ポンプ圧送前後のコンクリートの品質変化

* 日本建築学会「コンクリートポンプ工法施工指針・同解説」による推定値

図-8 コンクリートの吐出量と管内圧力損失の関係

図-9 構造体コア強度の分布

表-9 ひびわれの発生状況

種別	調査記号	ひびわれ発生本数(本)	最大ひびわれ幅 (mm)	ひびわれの主な発生位置
普通	53.5-175N	4	0.1	開口部廻り
再生	50-175RG(BS)-15	9	0.15	開口部廻り
	50-175RG(BS)-30	12	0.15	および壁隅角部

象とする構造物の要求性能に応じて、その製造、品質評価等において、適切なプロセスに基づいた対応を行なうことにより、所要品質の確保、経済的成り立ちおよび環境保全性の向上が可能となり、有効かつ持続可能なリサイクル技術が構築できる。

今後は、実用化のための方式の対応に関わる試験方法の確立も含め、適用箇所・部位毎に、それぞれの特性に応じた適切な設計法の確立を目的に詳細検討を行う予定である。

[注記] 本検討の一部は、日本建築学会学術講演会(1997年9月)⁹⁾にて発表した。

[謝辞] 本研究の実施にあたり、東京電力(株)林茂氏、増田彰氏、大島豊氏および前田建設工業(株)江口清氏に御助言を頂きました。また、実験に際し、東京電力(株)和久俊夫氏、内川祐一郎氏、小林靖氏および前田建設工業(株)岸本均氏、篠崎公彦氏に多大の御協力を頂きました。ここにそのことを記し、厚く謝意を表します。

【参考文献】

- 菊池雅史、道正泰弘、安永亮、江原恭二、増田彰「再生骨材の品質が再生コンクリートの品質に及ぼす影響」日本建築学会構造系論文集 第474号 p.11-20, 1995.8
- 道正泰弘、菊池雅史、増田彰、小山明男「原コンクリートの性質が再生コンクリートの品質に及ぼす影響」日本建築学会構造系論文集 第485号 p.1-10, 1996.7
- 道正泰弘、菊池雅史、増田彰、小山明男、三浦隆広「再生細骨材を用いたコンクリートの構造用コンクリートへの適用—原モルタルの性質が再生細骨材および再生コンクリートの品質に及ぼす影響」日本建築学会構造系論文集 第502号 p.15-22, 1997.12
- 菊池雅史、道正泰弘、三浦隆広、秋庭淳二、水谷知裕他「不純物の混入が再生コンクリートの品質に及ぼす影響(その1~4)」日本建築学会大会学術講演梗概集(材料・施工)、p.p.1019-1026, 1997.9
- 増田彰、道正泰弘、中込昭、寺西浩司、菊池雅史「建築構造物の解体に伴い発生するコンクリート廃材のリサイクルシステム—経済性および環境負荷性に関するシミュレーション」日本建築学会技術報告集 第4号、p.p.1-6, 1997.3
- 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(1993年版)」p.p.408-410, 1993.5
- 建設省、(財)国土開発技術研究センター：建設省総合技術開発プロジェクト「建設副産物の発生抑制・再利用技術の開発」概要報告書 平成9年3月
- 阿部道彦：特集「コンクリートのリサイクル」/7.コンクリート用再生骨材の性質「コンクリート用再生骨材」コンクリート工学 Vol.35 No.7 p.p.42-48, 1998.7
- 大島豊、道正泰弘、成川匡文、江口清、中込昭、岸本均、寺西浩司、菊池雅史他「大規模電力建物における再生骨材および再生コンクリートの利用(その4~6)」日本建築学会大会学術講演梗概集(材料・施工) p.p.1027~1032, 1997.9

[1998年6月20日原稿受理 1998年11月4日採用決定]