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

骨材置換法による再生粗骨材コンクリートの長期性状

近藤 学 —*1 貫井 泰 —*2
道正泰弘 —*3

キーワード：
リサイクル, コンクリート塊, 再生粗骨材, 再生粗骨材コンクリート, 火力発電所, 長期性状

Keywords:
Recycle, Concrete waste, Recycled coarse aggregate, Recycled coarse aggregate concrete, Thermal power plant, Long-term properties of concrete

RECYCLING SYSTEM OF CONCRETE WASTE INCURRED FROM BUILDING DEMOLITION

Long-term properties of recycled coarse aggregate concrete produced by means of the aggregate replacing method

Manabu KONDO —*1 Yasushi NUKUI —*2
Yasuhiro DOSHO —*3

The recycled aggregate concrete produced by the aggregate replacing method was applied to the actual structure. This paper describes various properties of recycled coarse aggregate and recycled aggregate concrete produced by the actual concrete plant. Specifically, long-term properties of recycled aggregate concrete and normal aggregate concrete, such as strength, elasticity, and durability, was confirmed in duration of two years. As a result it is confirmed that recycled aggregate concrete has the performance equivalent to regular concrete made of normal aggregates, at in situ condition during two years.

1. はじめに

現在、建設廃棄物の中で、コンクリート塊はリサイクル率が高く、平成 12 年度には 95% 以上にも達しているが¹⁾、そのほとんどは路盤材として利用されている。今後、新規の道路工事等は減少すると考えられ、建設業界では再生骨材をコンクリート用骨材として利用する技術に関して様々な取り組みがなされてきており、その結果として 2003 年版 JASS5 において、砂利・砂と同等の品質を満たしていれば、再生骨材も普通骨材として扱われる等、構造用コンクリート骨材への利用に関わる基・規準類の整備は進んできている。

このような背景から、筆者らは、今後増加が予想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、再生骨材コンクリートとして建築構造物へ利用する技術について検討を行っている^{2)~4)}。

筆者らの考案した再生骨材コンクリートの製造では、骨材製造工程において品質低下の要因となる原モルタルの処理を行わず、相対品質値法³⁾に基づき普通骨材を再生骨材に置換する方法(骨材置換法)により、所要の品質のコンクリートを製造する。この方法は、これまでの研究によると、環境負荷および経済性に対して有効性が認められているとともに²⁾、コンクリートの品質および施工性からも実用化が可能であることが判明している³⁾。これらの成果をもとに、火力発電所本館(タービン建屋)の解体に伴い発生したコンクリート塊を用い、骨材置換法による再生粗骨材コンクリート(以下、再生コンクリート)を製造して実構造物へ適用した^{注1)}。

本検討では、再生粗骨材とそれを用いたコンクリート(再生粗骨材コンクリート)の基礎性状および、構造体コンクリート(モニタリング用試験体)の材齢 2 年(104 週)までの長期性状について、強度・弾性、長さ変化および耐久性状に関する品質試験を実施した結果を示す^{注2)}。

表1 解体建物の概要

場 所	都市近郊、海岸隣接地域(海岸より約100m)
建 物 用 途	火力発電所タービン建屋
構 造	鉄骨造
経 年	約40年

図1 再生粗骨材製造の機器構成概要

表2 原コンクリートの品質

コア採取位置	コア試験本数	設計基準強度 (N/mm^2)	圧縮強度 ^{※1} (N/mm^2)	原骨材等 ^{※2}
1階柱	48	20.6	30.3 (15.8)	セメント: 不明 細骨材: 川砂 粗骨材: 川砂利
2階柱	31		31.2 (18.2)	
2階壁	6		23.8 (9.1)	
3階床	17		38.5 (29.3)	
外壁	3		24.7 (21.0)	

※1 平均値を示し括弧内は変動係数(%) ※2 工事記録や当時の状況等から推測

*1 東京電力㈱技術開発研究所設備基盤技術グループ 副主任
(〒230-8510 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町4-1)

*2 東京電力㈱建設部土木・建築技術センター建築構造技術グループ
マネージャー

*3 東京電力㈱建設部土木・建築技術センター建築構造技術グループ
スペシャリスト・博士(工学)

*1 Researcher, Civil Engineering & Architecture Technology Group, R&D Center, TEPCO

*2 Group Manager, Structural Engineering Group, Construction Engineering Center, Construction Department, TEPCO

*3 Specialist, Structural Engineering Group, Construction Engineering Center, Construction Department, TEPCO, Dr. Eng.

2. 再生粗骨材と再生粗骨材コンクリートの基礎性状

再生粗骨材は、表1に示す火力発電所の解体で発生したコンクリート塊を原コンクリートとし、粒径調整程度の簡便な製造設備を用いて製造した。再生粗骨材コンクリートは、この再生粗骨材を市中のレディーミクストコンクリート工場（生コン工場）に運び、常時使用されている普通粗骨材に容積比率で30%置換して製造した。

2.1 原コンクリート

原コンクリートの品質を表2に示す。圧縮強度は23.8～38.5N/mm²の範囲にあり、設計基準強度の20.6N/mm²を上回っている。このことから、建設時、コンクリートは計画通りに打設され、解体されるまでその強度が確保されていたものと考えられる。

2.2 再生粗骨材の製造

図1に再生粗骨材製造の機器構成概要（1次破碎以降）を示す。製造手順は、自走式ジョークラッシャーにより40-0mmに1次破碎し、1次破碎塊を2段式振動ふるいとロールクラッシャーにより、20-5mmの再生粗骨材に2次破碎・分別する方法とした。なお、一般的に火力発電所タービン建屋は打放しコンクリート仕様で、仕上げ材が使われていない²⁾。本検討の解体建物も同様で、かつ解体もスラブ上で行われたため、不純物の混入はほとんど無かった。

2.3 再生粗骨材および混合粗骨材の品質

表3に、再生粗骨材、普通粗骨材および混合粗骨材（再生粗骨材で30%置換したもの）の試験値を示す。

再生粗骨材は、汎用機器を用いた破碎および粒径調整程度で製造し、原モルタルが付着しているため、吸水率は6.59%、安定性は35.9%であり、JIS A 5005（碎石2005）の規格値を大きく上回っている。一方、普通粗骨材は石灰岩碎石で、吸水率は0.35%、安定性は0.7%であった。再生粗骨材の粒度分布は10mmで標準粒度分布から僅かに外れている程度で、比較的良好な分布を示している。相対品質値法に基づく、例えば相対吸水率は置換率40%でJIS A 5005（碎石2005）の3.0%以下を満たす^{3) 5)}が、初の実構造物での施工という点を考慮し、これまで多くの検討を行っている置換率30%を採用した。その結果、混合粗骨材はJIS A 5005の品質を満足した。

2.4 再生粗骨材コンクリートの調査

表4及び表5にモニタリング用試験体を使用した材料とコンクリートの調査を示す。これは実構造物（同規模建物2棟で構成され、それぞれ普通コンクリートと再生粗骨材コンクリートを使用）のコンクリートと同様の調査である。再生粗骨材コンクリートの28日圧縮強度は、置換率の増加に伴いやや低下する傾向がある³⁾ことから、室内試練によりその傾向を確認し、生コン工場が普通コンクリートで設定しているセメント水比と強度の関係式を修正した。加えて、再生粗骨材コンクリートの28日圧縮強度はばらつきが大きく、同じ調査でも置換率100%で35～45N/mm²の範囲でばらついた例もある⁶⁾。そこで、本適用の実構造物では、当初 $F_c=21\text{ N/mm}^2$ のところ安全をみて、3N/mm²割増し24N/mm²とした。コンクリートの標準偏差は、JASS5では実績がない場合に該当し2.7 N/mm² (0.1F_c)となるが、前述と同じく初施工という点を考慮し、1991年版JASS5「工事現場練りコンクリート」の標準偏差3.5N/mm²を採用した。

2.5 再生粗骨材コンクリートの基礎性状

表6に再生粗骨材コンクリート（以下、R）と普通コンクリート

表3 本検討で用いた粗骨材の品質

項目	試験方法	粗骨材の種類		
		再生	普通	混合
粗粒率 F.M.	JIS A 1102	6.89	6.71	6.76
絶乾密度(g/cm ³)	JIS A 1110	2.28	2.69	2.57
表乾密度(g/cm ³)		2.43	2.70	2.62
吸水率(%)		6.59	0.35	2.03
実積率(%)	JIS A 1104	60.2	61.0	62.0
安定性(%)	JIS A 1122	35.9	0.7	10.1
微粒分量(%)	JIS A 1103	0.30	0.50	0.45
すり減り減量(%)	JIS A 1121	32.3	22.8	25.3
アルカリシリカ反応性	JIS A 1146	モルタルバー法 6ヶ月膨張量		
		0.035%	0.016%	

表4 使用材料

材料種別	使用材料	仕様
セメント	普通ポルトランドセメント	密度3.16g/cm ³ 、ブレン値3280cm ² /g
細骨材	山砂	富津 表乾密度2.60g/cm ³ 、FM 2.58
粗骨材	石灰岩碎石	伊佐 表乾密度2.70g/cm ³ 、FM 6.71
	再生粗骨材	火力発電所 表乾密度2.43g/cm ³ 、FM 6.89
混和剤	AE減水剤	リグニンスルホン酸化合物

表5 本検討で用いたコンクリートの調査

種別	設計基準強度(N/mm ²)	置換率(%)	W/C(%)	s/a(%)	単位重量(kg/m ³)					
					W	C	S	G	RG*	混和剤
N*	21	0	57.3	46.1	181	316	809	976	0	1.26
R*	24	30	49.4	42.9	183	370	720	713	273	1.48

* N: 普通コンクリート、R: 再生コンクリート、RG: 再生粗骨材

表6 本検討で用いたコンクリートの基礎性状

性状	項目	試験方法	試験結果 ^{*1}			養生条件
			平均	R 試験回数 ^{*2}	N ^{*3}	
フレッシュ	スランプ(cm)	JIS A 1101	18.0 (4.81)	18.5 18.5 17.0	18.0 (0.0)	
	空気量(%)	JIS A 1128	4.4 (5.29)	4.1 4.5 4.5	4.2 (6.73)	
	塩化物量(kg/m ³)	JASS5T-502他	0.05	— 0.05 —	—	
硬	圧縮強度(28日)(N/mm ²)	JIS A 1108	34.3 (7.24)	31.7(1.74) 34.0(1.56) 37.3(1.62)	30.2 (2.33)	標準養生
	ヤング係数(28日)(kN/mm ²)	JIS A 1149	33.7 (8.07)	31.5(2.35) 32.8(5.21) 36.8(5.49)		現場水中養生
	促進中性化深さ(26週)(mm)	JIS A 1153	28.8 (7.41)	26.7(7.10) 28.8(2.60) 31.0(0.56)		
化	乾燥収縮率(26週)($\times 10^{-4}$)	JIS A 1129	16.7	4週標準養生+4週恒温恒湿養生(温度20℃、相対湿度60%)後、促進中性化(温度20℃、相対湿度60%、CO ₂ 5%)		
			6.76	1週標準養生後、恒温恒湿養生(温度20℃、相対湿度60%)		

*1 括弧内は変動係数(%) *2 上から1, 2, 3回 *3 2回の平均値

表7 本検討で実施した試験の概要

試験及び調査項目	試験方法	試験時期
表面ひびわれ発生状況の調査	目視観察	4,13,26,52,104週
圧縮強度試験(地中のみ)	JIS A 1108	
静弾性係数試験(地中のみ)	ASTM C 469	
中性化試験	フェノールフタレイン法	地中: 4,13,26,52,104週
全塩分濃度の測定	JCI-SC4	地上: 52,104週

(以下、N)の試験結果を示す。

(1) フレッシュ性状

RとNのスランプ・空気量は、所要の品質を確保しており、試験ごとのばらつきも少なかった。フレッシュコンクリートの塩化物量は、JASS5T-502に定められている塩化物量測定計を用いて測定した。なお、再生粗骨材は原モルタルにより塩化物を含んでいる可能性があり、本検討ではその塩化物量を把握するため、解体前にコア抜きを行い、原コンクリート中の塩化物量を測定した(0.25kg/m³)。更に原モルタル中の塩化物含有率に換算(0.02%)し、原モルタル混入率(41%：既往の研究結果⁷⁾による)と調査から再生粗骨材の塩化物量を算出(0.03kg/m³)した。これを荷卸し時の測定値0.02kg/m³に加えた値0.05kg/m³を再生粗骨材コンクリートの塩化物量と判断した。この値はJIS A 5308の0.30 kg/m³以下を十分満たしている。

(2) 硬化性状

Rの圧縮強度の平均値は標準養生、現場水中養生共に、調合強度(33.1N/mm²：Fq+T+1.73σ、Fq=27、T=0、σ=3.5)とほぼ同等であり、妥当な強度発現と考えられる。Nも同じく、調合強度(29.5N/mm²：Fq+T+2.5σ、Fq=24、T=0、σ=2.2)とほぼ同等である。しかしながら、Rの方がばらつきは大きくなっている。

Rの静弾性係数は、日本建築学会 RC 規準の静弾性係数算定値(27.3kN/mm²：21×(γ/2.3)^{1.5}×(F/20)^{0.5}、γ=2.3t/m³、F=33.7N/mm²)とほぼ同等な値であることから、圧縮強度に応じた静弾性係数であると考えられる。

Rの促進中性化深さと乾燥収縮率は、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年版)」で設定されている目標品質の25mm以下と7.0×10⁻⁴以下をそれぞれ満たしており、必要な耐久性能を有していると考えられる。

3. 再生粗骨材コンクリートの長期性状

3.1 実験概要

(1) モニタリング用試験体

試験体は、実構造物と同じ火力発電所構内に暴露して設置した。鉄筋コンクリート構造(D10@200)の梁ブロック(1.8×0.6×0.6m)2本とスラブブロック(1.8×0.6×0.15m)を地中に設置し、その上に地上ブロック(0.5×0.6×0.3m)を乗せたもので、RとNで1体ずつ、計2体作製した。試験体の形状・寸法を図2に示す。なお、地中部表面は敷き砂利で覆った。

(2) 試験項目

本検討で実施した試験項目、試験方法およびその実施時期を表7に示す。一般的に火力発電所は海岸隣接地域に立地し、飛来する海砂粒子の影響が懸念されるため²⁾、塩分濃度測定を行った。

3.2 実験結果

(1) 表面ひびわれ発生状況等

目視により確認した結果、RとNの表面ひびわれ状況に明確な差異は見られなかった。また、再生粗骨材の安定性は高かったが、試験体表面およびコア供試体には部分的な劣化も見られなかった。

(2) 圧縮強度

試験体から採取したコア供試体の材齢104週までの圧縮強度試験結果を図3に示す。縦軸は圧縮強度を設計基準強度で除した比(圧

図2 モニタリング用試験体の形状・寸法

図3 モニタリング用試験体における圧縮強度比(圧縮強度/設計基準強度)の経時変化

図4 モニタリング用試験体における圧縮強度と静弾性係数の関係

図5 モニタリング用試験体における打設部位毎の中性化深さ

縮強度比)で示す。これによると、Rの圧縮強度発現の傾向はNとほぼ同等である。一方、表6から標準養生及び現場水中養生供試体の圧縮強度比を算定すると約1.4となり、これらはコア供試体の材齢13週以降の圧縮強度比にほぼ対応している。これにより、再生粗骨材コンクリートにおいても構造体コンクリート強度の検査方法については、JASS5に示される品質検査の適用が可能であるといえる。

(3) 静弾性係数

圧縮強度と静弾性係数の関係を図4に示す。前述した日本建築学会RC規準式を合わせて示しているが、材齢26週を除くと、経年によらずR、N共に規準式とよく合っている。

(4) 中性化深さ

中性化深さの試験結果を図5に示す。最も深いもので材齢104週のNの2.0mmと僅かで明確な差異は見られない。仮にNとRをW/Cの違いで論じられるとすると、岸谷式⁸⁾によれば材齢104週の段階でN:4.6mmとR:2.7mmの差は約2.0mmとなり、試験結果の差はW/Cによるもので、W/Cが同じであれば同程度となる可能性がある。なお、既往の促進中性化試験³⁾では、再生粗骨材コンクリートの中性化深さは、同じW/Cで置換率30%では普通コンクリートとほぼ同等となっている。

(5) 塩分浸透性

コンクリート内部の全塩分濃度の経年変化(表面から15mmまでの深さ)を図6に示す。R、N共にほぼ材齢に従った増加を示しており、試験場所は塩害を考慮すべき地域であることが分かる。また、地上部を見るとR、N共に材齢104週で 0.30kg/m^3 を超えているが、通常の設計かぶり厚さ40~50mmより内側の部分ではR、N共に 0.10kg/m^3 を下回っていた。Rは前述の通り再生粗骨材の算定塩分量 0.03kg/m^3 を内在しているが、Nとの差はおおむね 0.02kg/m^3 程度で、材齢による変化もほとんどないことから、浸透する塩分量はRとNで差がないと言える。また、地上部と地中部で比較すると、地中部の方が低くなっている。海との間に遮蔽物がある場合、その反対の面などにおいては、塩分の付着量が半分程度になることがある⁹⁾。このことから、地中部表面を覆った敷き砂利或いは地上部自体が遮蔽物となって、塩分付着が抑制された可能性がある。

4. まとめ

実構造物に適用した骨材置換法による再生粗骨材コンクリートの長期性状を把握するために、モニタリング用試験体を用いて検討した。得られた結果は以下の様である。

(1) 骨材置換法による再生粗骨材コンクリートは、置換率30%において、フレッシュ性状、硬化性状共に所要の品質を満足できる。

(2) 再生粗骨材コンクリートの長期性状として、圧縮強度の発現傾向は、普通コンクリートとほぼ同等である。また、目立った低下も見られず、設計基準強度の割り増し 3N/mm^2 は不要であると言える。一方、静弾性係数は、圧縮強度の発現に伴い増加し、その傾向は普通コンクリートと同様にRC規準式に沿ったものである。表面ひびわれ発生状況と中性化深さ、塩分浸透性については、材齢104週までの範囲では普通コンクリートと同等である。ただし、中性化の進行は、普通コンクリート、再生粗骨材コンクリート共遅いため、明確な傾向が把握できておらず、今後も検討が必要である。

図6 モニタリング用試験体におけるコンクリート内部の全塩分濃度の経時変化(深さ0~15mm)

以上のことから、材齢2年までにおける本検討の範囲では、骨材置換法による再生粗骨材コンクリートは、普通コンクリートとほぼ同等の性能を有している。なお、今後も測定は継続する予定である。

【謝 辞】

モニタリング用試験体の作製にあたり、明治大学 小山明男専任講師の御助言を賜りました。また、再生コンクリートの品質確認試験等に際し、前田建設工業(株) 中込 昭氏、岸本 均氏の御協力を賜りました。ここに厚く謝意を表します。

【注 釈】

注1: 本検討の成果については、建築構造物への適用のための建築基準法37条第二号に基づく材料性能評価を行い(性能評価機関: (財)日本建築センター)、国土交通大臣認定を取得した(MCON-0171 国住指第1823号,平成14年1月18日)

注2: 本検討の一部は、2003年度及び2004年度の日本建築学会大会学術講演会において発表した^{10)~12)}。

【参考文献】

- 1) 国土交通省リサイクルホームページ平成12年度建設副産物実態調査結果
- 2) 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(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
- 3) 道正泰弘, 成川匡文, 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塊のリサイクル(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), 日本建築学会技術報告集第7号, p.p.7-12, 1999.2
- 4) 道正泰弘, 成川匡文, 菊池雅史, 増田 彰, 大島 豊, 江口 清, 中込 昭, 寺西浩司: 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(再生粗骨材現場投入方式による再生コンクリートの製造), 日本建築学会技術報告集第9号, p.p.13-18, 1999.12
- 5) 寺西浩司, 道正泰弘, 成川匡文, 大島 豊, 内川祐一郎, 江口 清, 岸本 均, 菊池雅史: 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22 再生コンクリートの調査設計法), 日本建築学会大会学術講演梗概集, No.1069, p.p.137-138, 1999.9
- 6) 大岡督尚, 渡部 憲, 加藤晃敏: 再生粗骨材コンクリートの場所打ち鉄筋コンクリート杭への適用, 日本建築学会大会学術講演梗概集, No.1155, p.p.335-336, 2004.8
- 7) 道正泰弘, 増田 彰, 菊池雅史, 兼目裕之, 小山明男: 再生コンクリートの建築構造物用コンクリートへの適用(その2 原モルタルの混入が再生骨材の品質に及ぼす影響), 第7回廃棄物学会研究発表会講演論文集, p.p.455-457, 1996.10
- 8) 喜多達夫, 和泉意登志, 前田照信: コンクリート構造物の耐久性シリーズ 中性化, 技報堂出版, p.p.36-37, 1986
- 9) 大田信明, 櫻野紀元, 片脇清士, 小林明夫, 宮川豊章: コンクリート構造物の耐久性シリーズ 塩害(1), 技報堂出版, p.10, 1986
- 10) 近藤 学, 江口 清, 中込 昭, 菊池雅史: 再生コンクリートの実構造物への適用(その1 全体概要と再生粗骨材の品質), 日本建築学会大会学術講演梗概集, No.1132, p.p.263-264, 2003.9
- 11) 岸本 均, 近藤 学, 江口 清, 菊池雅史: 再生コンクリートの実構造物への適用(その2 再生コンクリートの品質), 日本建築学会大会学術講演梗概集, No.1133, p.p.265-266, 2003.9
- 12) 近藤 学, 貫井 泰, 今村 晃, 道正泰弘: 再生コンクリートの実構造物への適用(その3 再生コンクリートの長期性状), 日本建築学会大会学術講演梗概集, No.1156, p.p.337-338, 2004.8

[2004年10月20日原稿受理 2005年2月23日採用決定]