

報告 骨材置換法による再生粗骨材コンクリートの建築構造物への適用

道正 泰弘^{*1}・植 友宏^{*2}・金子 雄一^{*3}・小田部 裕一^{*4}

要旨：レディーミクストコンクリート工場を対象としたアンケート調査から再生骨材コンクリートの普及にむけた課題を整理した。また、骨材置換法による再生粗骨材コンクリートの建築構造物への適用事例に基づき、相対品質値法による材料設計手法の概要およびコンクリートの品質管理結果について報告する。更に、実機製造によるコンクリートの性状を明確にすることが必要となる国土交通大臣認定において、室内試験結果を有効に活用し、材料設計への反映を行うことを目的に、実機試験と室内試験による圧縮強度差の確認を行った。

キーワード：再生粗骨材コンクリート，骨材置換法，相対品質値法，品質管理

1. はじめに

コンクリート構造物の解体に伴い発生する解体コンクリート塊の有効利用については、近年その重要性が高まってきている。解体コンクリート塊のリサイクルは、現状では道路用路盤材としての利用が主体であるが、今後、解体コンクリート塊の発生量増加に対し、路盤材の需要はそれほど増加しないことが予想され、他の有効な用途の開発が急務となっている。その一つにコンクリート用骨材としての利用が挙げられており、高品質再生骨材Hが2005年3月にJIS化された。更に、中品質、低品質の再生骨材についても近い将来でのJIS化が検討されている¹⁾。

再生骨材の利用方法は、大別すると、高度処理によりその品質を高めて利用する方法(骨材精製法)と、比較的簡便な処理により製造した中・低品質の再生骨材を普通骨材と混合・置換して利用する方法(骨材置換法)がある。

筆者らは、リサイクル促進のための課題である再生骨材製造時のコストおよび環境負荷の低減が可能な方法として、かねてより骨材置換法について検討を行ってきている^{2),3)}。この骨材置換法により再生粗骨材コンクリートを製造する場合、性能評価指標として相対品質値法により材料設計を行うことが必要となる^{2),3)}。

本報告では、レディーミクストコンクリート工場(生コン工場)を対象としたアンケート調査から再生骨材コンクリートの普及にむけた課題を整理した。また、骨材置換法による再生粗骨材コンクリートの建築構造物への適用事例に基づき、相対品質値法による材料設計手法の概要およびコンクリートの品質管理結果について報告する。更に、実機製造によるコンクリートの性状を明確にすることが必要となる国土交通大臣認定において、室内試験結果を有効に活用し、材料設計への反映を行うことを目的に、実機試験と室内試験による圧縮強度差の確認を行った。

2. 再生骨材コンクリート製造の現状と課題

2.1 既往のアンケート調査結果

再生骨材コンクリート製造への対応については、1992年の建設省総合技術開発プロジェクト(総プロ)で実施されたアンケート調査によると⁴⁾、「既存設備で十分対応可能」との回答が全体の7%(12社/161社)であった。1996年には筆者らが同様の調査を京浜地区の生コン工場を対象に実施した結果⁵⁾、「無条件で対応可能」との回答は全体の42.3%(11社/26社)にまで達した。更に、「貯蔵設備等の条件さえ整えば対応可能」との回答(全体の42.3%)も合わせると、「製造可能」

*1 東京電力(株) 建設部 土木・建築技術センター スペシャリスト 博士(工学) (正会員)

*2 東京電力(株) 西火力事業所 保修部 土木建築グループ

*3 東電設計(株) 第二土木本部 火力・原子力土木部 工修 (正会員)

*4 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 博士(工学) (正会員)

との回答が全体の 84.6%となり、再生骨材コンクリート製造に対するコンクリート製造側の考えは大きく変化してきている。

2.2 アンケート調査結果

(1)調査概要

本調査は、関東地区(東京、神奈川、千葉、群馬、栃木)の生コン工場 28 社を対象に行った。

内容は主として、「既存の製造設備・実績」、「再生骨材コンクリート製造に関する方針」、「製造に対する課題」とした。

(2)調査結果

本調査結果は、図 - 1 に示す通り 67.9%の工場が「製造可能」と回答した。一方、平均月出荷量が比較的少ない工場では、「再生骨材コンクリートの製造は困難」との回答が多かった。

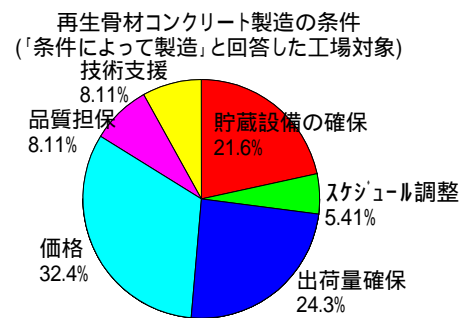
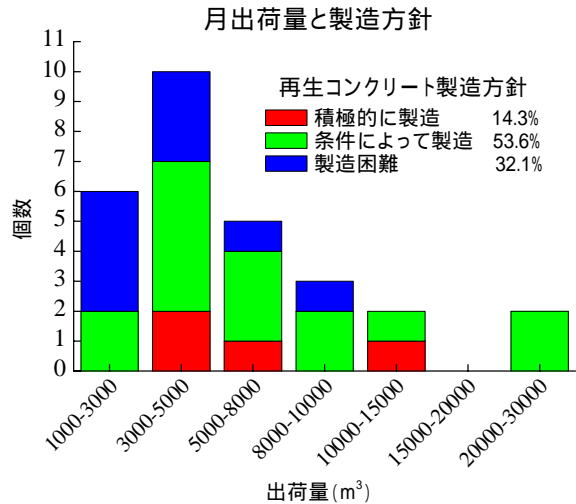
再生骨材コンクリートの製造方針は、53.6%が「条件によって製造」と回答しており、その課題として、価格、出荷量確保、貯蔵設備確保が挙げられている。再生骨材コンクリートの製造に際しては、再生骨材専用のサイロもしくはストックヤードが必要となるが、予備の設備を所有している工場は 42.9%であり、この条件を満足することが再生骨材コンクリートを製造する上での必要条件となる。一方、「再生骨材コンクリートの製造が困難」と回答した工場では、「貯蔵設備がない」という回答が多く、この結果からみても貯蔵設備の確保が課題となる。

既往の調査結果^{4),5)}と本調査の主な相違点は、生コン製造業界における需給ギャップ問題による生産集約化や設備削減が反映された結果になった。この対応としては、再生粗骨材の現場投入方式⁵⁾のように、現場内で再生粗骨材を貯蔵し、アジテータ車に投入する方式等が考えられる。

3. 建築構造物への適用

3.1 再生粗骨材コンクリートの概要

骨材置換法による再生粗骨材コンクリートは、表 - 1、表 - 2 に示す 2 件の国土交通大臣認定(大臣認定)を取得し、建築構造物に適用されている。再生粗骨材は、コストおよび環境負荷低減



骨材貯蔵設備の予備(全工場対象)

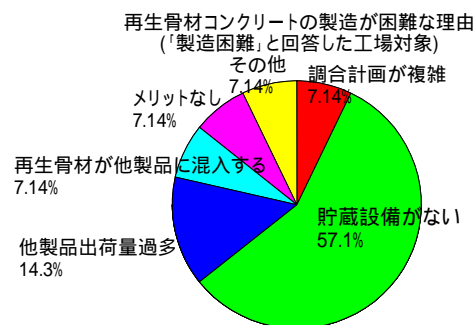
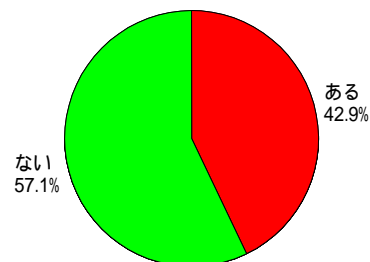


図 - 1 アンケート調査結果

等のため、現場内で汎用の可動式破砕機によって製造した。この場合、粒度調整の管理および品質低下の要因となる土、仕上げ材等の不純物混入防止が課題となるため、破砕機の回転速度を調整することにより粒度調整の管理を行い、更に、水洗いおよびふるいを十分かけると共に、不純物を除去するための作業員を最終工程に配

表 - 1 再生粗骨材コンクリートの適用建物

記号	大臣認定取得日 (認定番号)	大臣認定種別	適用部位	打設量 (m ³)
P1	2002.1.18 (MCON-0171)	個別 (建物, 部位限定)	基礎, 地中梁	約 200
P2	2004.9.15 (MCON-0979)	一般	基礎, 地中梁, 壁	約 1,000

表 - 2 再生粗骨材コンクリートの種類

適用	セメント 種類	G _{max} (mm)	再生粗骨材 置換率 (%)	混和剤 種類	ス ラ ッ ク (cm)	設計基準強度 (N/mm ²)				
						21	24	27	30	33
P1	N	20	30	AE減水剤	18	-	-	-	-	-
P2	N	20	30	AE減水剤	15					
					18					
			50	AE減水剤	15					
					18					
			30	高性能 AE減水剤	15	-				
					18	-				
50	高性能 AE減水剤	15	-							
		18	-							
L			30	AE減水剤	15			-	-	
				AE減水剤	15			-	-	

N ; 普通ホトランドセメント, L ; 低熱ホトランドセメント

表 - 3 原コンクリートおよび再生粗骨材の品質

種別	項目および諸元	基準値	P1	P2 (RG1)	試験用* (RG2)
原 コ ン ク リ ー ト	経年(年)		約 40	約 40	約 40
	構造物種類		火力発電所 機械架台	火力発電所 機械基礎	事務所 建物壁
	設計基準強度 (N/mm ²)		21	不明	18
	コアの圧縮強度 (N/mm ²)	18 以上	18.7~54.5	27.0~46.9	19.2
再 生 粗 骨 材	骨材最大寸法(mm)		20	20	20, 25
	粗粒率(F.M.)	6.60±0.20	6.89	6.52	6.44, 6.63
	絶対密度(g/cm ³)	2.20 以上	2.28	2.30	2.25, 2.23
	吸水率(%)	8.0 以下	6.59	6.22	6.02, 7.15
	実積率(%)	55 以上	60.2	60.5	59.8, -
	安定性(%)	37 以下	35.9	36.0	31.1, 34.9
	微粒分量(%)	3.0 以下	0.3	2.1	1.3, 2.2
すり減り減量(%)	40 以下	32.3	28.9	24.7, 33.6	

*後述の実機試験に使用

置した³⁾。これら再生粗骨材の品質, 再生粗骨材コンクリートの調合は表 - 3, 表 - 4 に示す通りであり, 表 - 4 中のT1 は, P2 の近傍で施工と同時に打設した長期性状確認用の試験体に用いたコンクリートの調合である。なお, 表 - 5 に再生粗骨材中に含まれる不純物量を示すが, コンクリート用再生骨材H(JIS A 5021)で許容される不純物量に比べて 1/10 ~ 1/100 程度であった。

3.2 相対品質値法による材料設計

相対品質値法による材料設計では, まず使用する各種骨材の物性値, 表 - 6 に示した調合上の絶対容積から式(1)に示す相対品質値 Q_i を算出する(本報告では再生細骨材に対応するものは除く)。物性値には, 再生骨材コンクリートの設計

表 - 4 再生粗骨材コンクリートの調合

適用	種類	再生粗骨材 置換率* (%)	W/C (%)	単位量(kg/m ³)						
				水	セメント	砂	砕砂	砕石	再生粗骨材	混和剤
P1	27-18-20-N	30	49.4	183	370	720	-	713	273	1.48
	27-18-20-N	30	53.0	176	332	481	336	683	266	3.59
	27-15-20-N	30	53.0	170	321	475	330	707	276	3.47
P2	27-15-20-L	30	58.0	160	276	517	359	707	276	2.98
	36-15-20-L	30	40.0	161	402	455	316	707	276	4.34
	27-18-20-N	30	53.0	176	332	481	336	683	266	3.59
T1		50	53.0	176	332	481	336	489	442	3.59

*調合に定めた粗骨材容積に対する再生粗骨材容積の割合

P1)砂; 富津産山砂(表乾密度 2.60g/cm³, 吸水率 1.80%)
 砕石; 山口県伊佐産砕石(表乾密度 2.69g/cm³, 吸水率 0.35%)
 P2)砂; 市原産山砂(表乾密度 2.57g/cm³, 吸水率 1.85%)
 砕砂; 高知県鳥形山産砕砂(表乾密度 2.68g/cm³, 吸水率 1.35%)
 砕石; 高知県鳥形山産砕石(表乾密度 2.70g/cm³, 吸水率 0.34%)
 混和剤; リグニン系

表 - 5 再生粗骨材中の不純物量

不純物の種類	上限値* (%)	RG1 (%)	RG2 (%)
タイル, レンガ, 陶磁器類, アスファルトコンクリート塊	2.0	0.007	0.107
ガラス片	0.5	0.000	0.000
石こう及び石こうボード片	0.1	0.003	0.100
その他無機系ボード	0.5	0.004	0.000
プラスチック片	0.5	0.005	0.024
木片, 紙くず, アスファルト塊等	0.1	0.004	0.050
その他(参考値)	-	0.007	0.047
不純物量の合計(全不純物量)	3.0	0.03	0.33

* JIS A 5021 に規定される不純物の上限値(質量比)

表 - 6 再生粗骨材コンクリートの調合例

W/C (%)	再生粗骨材 置換率* (%)	単位量(kg/m ³)						
		水	セメント	砂	砕砂	砕石	再生粗骨材	混和剤
40	0	185	463	393	273	994	-	4.63
	30	185	463	393	273	697	268	9.25
	50	185	463	393	273	497	449	9.25
50	0	177	354	463	322	988	-	3.54
	30	177	354	463	322	691	268	3.54
	50	176	352	463	322	494	447	3.52
60	0	175	292	499	346	983	-	2.92
	30	175	292	499	346	689	266	2.92
	50	175	292	499	346	491	444	2.92

*骨材物性値は表 - 3 中の P2 と同様

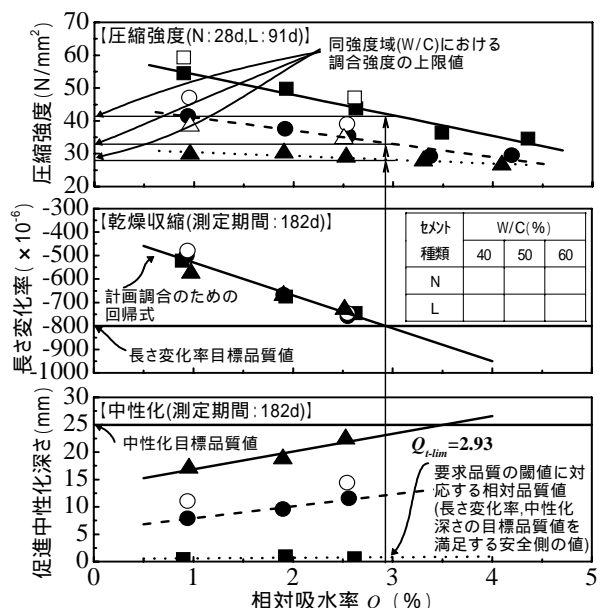


図 - 2 相対品質値法による材料設計の例 (P2 における材料設計結果)

表 - 7 P1, P2 における品質管理結果

適用	フレッシュコンクリートの性状								硬化コンクリートの性状								
	項目		試験回数(回)						所要値 (目標値)	項目		養生方法 試験方法	試験値	所要値 (目標値)			
			1	2	3	4	5	6									
P1	採取箇所による変動	出荷時	スランプ(cm)	20.5	20.0	20.0	/			(20 ± 2.5)	圧縮強度(28日) (N/mm ²)	標準	34.3	27 以上			
			空気量(%)	4.6	4.4	4.6				(5.0 ± 1.5)					現場水中	33.7	27 以上
		温度(°C)	28.0	28.5	30.0	(35 以下)				ヤング係数(28日) (kN/mm ²)	現場水中	28.8	(23 以上)				
		塩化物量(kg/m ³)	-	0.08	-	(0.3 以下)								促進中性化深さ (26週)(mm)	JIS A 1153	16.7	(25 以下)
	荷卸時	スランプ(cm)	18.5	18.5	17.0	18 ± 2.5				長さ変化率(26週) (× 10 ⁻⁶)	JIS A 1129	676	(800 以下)				
		空気量(%)	4.1	4.5	4.5	4.5 ± 1.5											
		温度(°C)	30.0	31.0	32.0	35 以下											
		単位水量(kg/m ³)	-	187	-	198 以下											
P2	採取箇所による変動	出荷時	スランプ(cm)	18.5	18.5	19.5	(20 ± 2.5)	圧縮強度 (28日) (N/mm ²)	日変動把握	標準	1	30.4	27 以上				
			空気量(%)	5.2	4.6	4.4	(4.5 ± 1.5)				2	33.6					
			温度(°C)	20.0	20.0	20.0	-				3	32.9					
			スランプ(cm)	18.0	17.5	18.5	18 ± 2.5				4	33.1					
		空気量(%)	4.6	3.8	3.9	4.5 ± 1.5	5				33.6						
		温度(°C)	20.0	20.5	21.0	-	6				32.1						
		筒先	スランプ(cm)	17.0	16.5	18.5	-				ヤング係数 (28日) (kN/mm ²)	日変動把握		標準	1	27.5	27 以上
			空気量(%)	4.0	3.9	4.1	-								2	27.3	
	温度(°C)		20.0	21.0	21.0	-	3	27.1									
	スランプ(cm)		17.0	17.0	17.5	18.0	4	27.7									
	日変動把握	空気量(%)	4.7	4.0	4.5	4.4	4.7	4.4	4.5 ± 1.5	5			27.7				
		単位水量(kg/m ³)	174	181	181	185	180	179	(176)	6			28.5				
		再生粗骨材混入率*(%)	29	33	30	29	28	30	(30)	1			31.3		27 以上		
		不純物量(%)	0.000	0.000	0.002	0.000	0.004	0.000	-	2			31.6				
		T1	再生粗骨材混入率 30%	スランプ(cm)	18.5	/						18 ± 2.5	圧縮強度(28日) (N/mm ²)	現場水中	31.9	27 以上	
				空気量(%)	5.4							4.5 ± 1.5					凍結融解試験の 耐久性指数(D.F.)
温度(°C)				32.5	0.25 以下							圧縮強度(28日) (N/mm ²)	現場水中	32.2	27 以上		
塩化物量(kg/m ³)				0.03	0.25 以下											凍結融解試験の 耐久性指数(D.F.)	JIS A 1148
再生粗骨材混入率 50%	スランプ(cm)		19.0	18 ± 2.5	凍結融解試験の 耐久性指数(D.F.)							JIS A 1148	68.3				
	空気量(%)		4.5	4.5 ± 1.5													
	温度(°C)		33.0	0.25 以下													
	塩化物量(kg/m ³)		0.04	0.25 以下													

*再生粗骨材混入率⁸⁾; 粗骨材容積に対する再生粗骨材容積の割合(品質管理用値)

基準強度が 18 ~ 36N/mm²であれば, 原モルタル混入の影響を明確に示す骨材物性値の一つとして, 骨材の吸水率(あるいは絶乾密度)を用いる。なお, 設計基準強度が 36N/mm²を超える場合は, B.S. 400kN破砕値による評価もあわせて行う⁶⁾。

次に, 図 - 2 に示したように Q_t (骨材の吸水率による相対品質値: 相対吸水率)と表 - 7 に示したコンクリートの圧縮強度, 長さ変化率, 促進中性化深さの試験値との相関を求め, 長さ変化率や促進中性化深さとの関係式(回帰式)から要求品質としての閾値(品質上の目標値: 図 - 2 のケースでは長さ変化率 800×10^{-6} , 促進中性化深さ 25mm)に対応する相対吸水率: $Q_{t-lim}(=2.93\%)$ を求める。この Q_{t-lim} の値を用い, 圧縮強度の試験値との関係式から, 同強度域(W/C)に対する調査強度範囲の上限値を求めることで, 所要品質を満足するコンクリートを得ることができる。

$$Q_t = \frac{Q_v G \times a + Q_r G \times b + Q_v N \times c + Q_r N \times d}{a + b + c + d} \quad (1)$$

ここで, Q_t は骨材の相対品質値, $Q_v G$ は普通粗骨材の物性値, $Q_v N$ は普通細骨材の物性値, $Q_r G$ は

再生粗骨材の物性値, $Q_r N$ は再生細骨材の物性値, a, b, c, d は各骨材の絶対容積(l/m³)である。

3.3 品質管理結果

P1 では, 所定の品質管理項目(スランプ, 空気量, コンクリート温度, 塩化物量, 強度)に加え, 高周波加熱乾燥法による単位水量の測定, 乾燥収縮および促進中性化の試験を実施した⁷⁾。

再生粗骨材コンクリートのフレッシュ性状および硬化性状は表 - 7 に示す通りであり, いずれの所要品質も満足する結果が得られた。また, ヤング係数, 促進中性化深さや乾燥収縮による長さ変化率も要求品質を満足しており, 相対品質値法による材料設計の妥当性が確認された。

P2 では, 所定の品質管理項目に加え, 試料採取箇所によるフレッシュ性状の変化を出荷時, 荷卸し時およびポンプ筒先の 3 ヶ所において確認した。更に, 185m³/日の再生粗骨材コンクリート出荷量に対して単位水量, 再生粗骨材の混入率⁸⁾, コンクリート中の不純物量等の変動をコンクリート出荷時に確認した。その結果, P2 においても所定の品質管理値はいずれも所要値を満

足する結果が確認された。その他の試験値も表 - 7 に示す通りであり，表中に示した再生粗骨材混入率は，洗い出し選別法(分別なし)⁸⁾による測定結果である。P2 で使用した再生粗骨材コンクリートは，試料採取箇所における品質変動が小さく，施工性を確保するのに十分なスランプ保持性能が得られた。また，同日打設における品質変動も小さいことが確認された。

4. 室内試験と実機試験の性状比較

国土交通大臣認定では，当該コンクリートの品質，製造，管理について明確にする必要がある。その評価は，生コン工場の実機試験が主体となるが，室内と実機試験の各々から得られた試験結果の関連性を明確にすることで，室内試験データを有効に活用することが可能となる。

4.1 試験概要

実機試験を実施した生コン工場は関東地区の3工場(A, B, C)であり，A工場では表 - 3 に示すRG1, BおよびC工場ではRG2の再生粗骨材を使用した。室内試験では，AE減水剤を使用したケースでW/C=40, 50, 60%の3水準，高性能AE減水剤のケースでW/C=30, 37.5, 45% (A工場では35, 40, 45%)の3水準とし，実機試験では上記範囲の1~3水準の水セメント比とした。

使用材料は，生コン工場で通常使用しているものであり，セメントは，普通ポルトランドセメント(N)，低熱ポルトランドセメント(L)の2種類を使用した。上記3工場における実機試験および室内試験から得られたセメント水比(C/W)と圧縮強度の関係を図 - 3，図 4 に示す。図 - 3 は，製造方法の違いによる変動の程度を確認するためA工場の普通コンクリートについて示したものであり，図 - 4 は，各工場における再生粗骨材コンクリートの結果を示したものである。なお，A工場ではP2への納入実績があるため，この試験値も併記した。

4.2 室内と実機の強度差を考慮した調合検討

実機試験による圧縮強度は，室内試験の場合に比べて，普通コンクリート，再生粗骨材コン

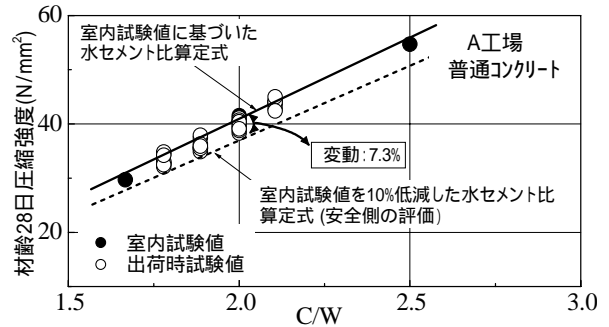


図 - 3 普通コンクリートの室内と実機の強度差

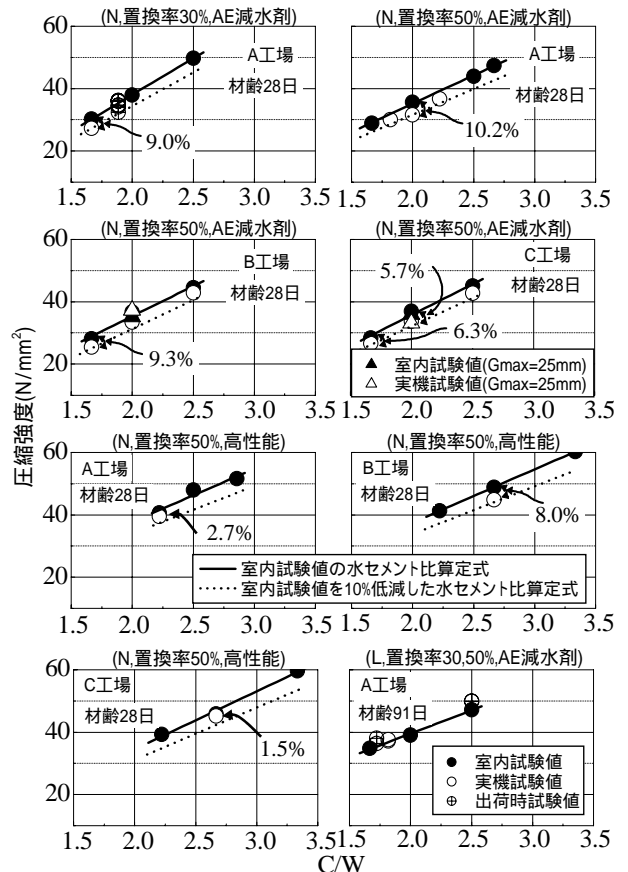


図 - 4 再生粗骨材コンクリートの室内と実機の強度差

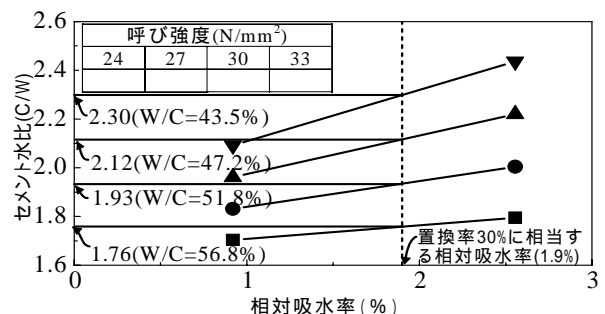


図 - 5 調合設計結果の一例(置換率 30%)

クリートともに若干小さくなる傾向にある。この差は 10%程度であり，両者とも同程度の変動範囲にある。一般的に実機試験に使用するような大型ミキサと室内試験用の小型ミキサとでは，

練混ぜ時間や練混ぜ性能の影響により、上記の差が生じる⁹⁾。これらの結果から、室内試験と実機試験による圧縮強度の差が明確になり、この差を室内試験の圧縮強度に反映させることで、実機製造による再生粗骨材コンクリートの圧縮強度を概ね示すことができる。

本検討の範囲では、室内試験の圧縮強度(室内試験値)を10%低減させた数値が、実機製造の圧縮強度にほぼ相当した。なお、骨材最大寸法25mmの再生粗骨材を使用した場合においても、実機試験と室内試験による圧縮強度の差は5.7%程度であり、上述の考えによって実機による圧縮強度を安全側で評価できる。

P2でA工場から出荷した再生粗骨材コンクリートは、室内試験における標準養生圧縮強度の90%の値を用いて水セメント比算定式を決定し、図-5に示すような再生粗骨材置換率0%と50%について呼び強度毎に相対吸水率とセメント水比の関係を求めた。この関係から任意の置換率(図中:置換率30%の例)に相当する各呼び強度を満足する水セメント比の推定が可能となり、図-2に示した検討結果も踏まえた上で、所要の品質を満足する再生粗骨材コンクリートの材料設計(調合)を行った。

5. まとめ

- 1)再生骨材コンクリートの製造に関する生コン工場の対応は、貯蔵設備や出荷量の確保、生コン単価の明確化といった課題が解消されれば、アンケートの対象とした工場の67.9%が「製造可能」と回答した。
- 2)骨材置換法による再生粗骨材コンクリートの品質は、試料採取箇所および同日打設ロット間の変動が小さく概ね良好であった。また、長さ変化率や促進中性化深さの目標品質値を満足することができた。
- 3)再生粗骨材コンクリートにおいても普通コンクリート同様、室内と実機試験による圧縮強度の差は10%程度であり、この差を考慮した調合を検討することで、実機製造においても室内試

験とほぼ同等の性能を得ることが可能である。

謝辞

本検討の実施において、懇切な御指導を頂いた明治大学菊池雅史教授に対し、ここに厚く謝意を表します。

参考文献

- 1)日本コンクリート工学協会：建設廃棄物コンクリート塊の再資源化物に関する標準化調査研究成果報告書、2003
- 2)道正泰弘：建設解体資材のリサイクルシステム - コンクリート塊の再生骨材コンクリートへの適用 - ，電気評論，pp.66-72，2005
- 3)道正泰弘ほか：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品質管理手法 - ，日本建築学会技術報告集 第21号，pp.15-20，2005
- 4)国土開発技術研究センター：再生コンクリートの利用技術の開発，1993
- 5)道正泰弘ほか：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 - 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，pp.13-18，1999
- 6)菊池雅史ほか：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，pp.11-20，1995
- 7)近藤 学，貫井 泰，道正泰弘：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 - ，日本建築学会技術報告集 第21号，pp.7-10，2005
- 8)中込 昭ほか：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15 再生粗骨材混入率試験方法の考察)，日本建築学会大会学術講演梗概集(九州) pp.751-752，1998
- 9)日本コンクリート工学協会：フレッシュコンクリートの挙動研究委員会報告書，1990