

論文 再生骨材を使用したコンクリートの性能評価と活用に関する研究

棚野 博之^{*1}・鹿毛 忠継^{*2}・濱崎 仁^{*3}・西浦 範昭^{*4}

要旨：本研究は，JIS A 5021 や技調通達 1 種に規定される高品質の再生骨材，および技調通達 2 種や JIS 化作業で検討中の“コンクリート用再生骨材 M”等の中品質の再生骨材とそれらを使用した再生骨材コンクリートを活用するための技術的支援を目標に，1)再生骨材の用途別品質基準(案)，2)再生骨材コンクリートの用途区分(案)，3)再生骨材コンクリートの調合設計方法，に関する技術的検討と提案を目的とする。本報告では，高品質再生骨材ならびにそれらを使用した再生骨材コンクリートのフレッシュ性状および材齢 1 年までの各種試験結果について報告する。

キーワード：再生骨材コンクリート，骨材物性，乾燥収縮，圧縮強度，実大暴露

1. はじめに

再生骨材コンクリートの建築分野での利用は，建築基準関係法令の規制や技術基準等の未整備により極めて少ないのが現状である。しかし，2003 年より再生骨材および再生骨材を使用したコンクリートの JIS 化作業が開始され，2005 年 3 月には JIS A 5021 として既存の普通骨材と同等の性能・品質を想定した“コンクリート用再生骨材 H”が公示された。更には，JIS A 5308(レディーミクストコンクリート)への再生骨材の導入なども検討が始まろうとしている。

再生骨材は原骨材の種類や付着するモルタルやペーストの性能が異なるため，技調通達 1 種や JIS A 5021 に規定される再生骨材 H など，現状において，最も品質が高いと考えられているこれら再生骨材においても品質のバラツキが既存普通骨材の数倍あり，測定方法によっては基準値を満たさない事が予想される。また，品質のバラツキが大きい骨材を使用した場合，コンクリートとしての所要の性能を得るための調合設計や施工管理は，普通骨材を使用する場合よりも過大設計・管理となる可能性があり，実用性に乏しいものとなる恐れもある。

本研究は，JIS A 5021 や旧建設省技術調査室通達(第 88 号：以下，技調通達)1 種に規定される高品質の再生骨材，および技調通達 2 種や JIS 化検討中の“コンクリート用再生骨材 M”等の中品質の再生骨材とそれらを使用した再生骨材コンクリートを活用するための技術的支援を目的に，次の 3 項目に関する技術的検討と提案を目的としている。1)再生骨材の用途別品質基準，2)再生骨材コンクリートの用途区分，3)再生骨材コンクリートの調合設計方法。

本報告では，高品質の再生骨材とそれらを使用した再生骨材コンクリートの材齢 1 年までの試験結果について報告する。

2. 実験の概要

JIS A 5021 の規格品に相当する製造方法の異なる 4 種類の高品質再生粗骨材(表 - 2)を入手し，それら再生粗骨材の基本物性(密度，吸水率，他)を確認する試験，ならびにそれらを使用した再生骨材コンクリートのフレッシュ時の物性，硬化後の特性等を確認するための試験(ラボ試験，実大暴露試験)を行った。表 - 1 に各試験の要因と水準を，表 - 3 に実施した各試験方法

*1 独立行政法人建築研究所 材料研究グループ上席研究員 工博 (正会員)

*2 独立行政法人建築研究所 建築生産研究グループ上席研究員 工博 (正会員)

*3 独立行政法人建築研究所 材料研究グループ主任研究員 博士(工学) (正会員)

*4 西松建設(株) 技術研究所研究員 工博 (正会員)

の規格を示した。

使用した材料は混練水を除いて実大暴露試験、ラボ試験とも同様で、比較用の普通骨材(A)は岩瀬産硬質砂岩砕石5号,6号を同量混合したものの(表-4の骨材種類Aを参照)、細骨材は大井川産川砂(表乾密度:2.58g/cm³,吸水率:1.81%,粗粒率:2.97),セメントは普通ポルトランドセメント(密度:3.16g/cm³)を使用した。化学混和剤(Ad1,Ad2)はリグニンスルホン酸系標準型のAE減水剤と空気量調整剤を標準量使用した。混練水は、JIS表示認定工場で実機製造を行った実大暴露試験では同工場内の回収水(JIS A 5308 附属書9 規定)を、ラボ試験では上水道水を使用した。

3. 骨材に関する試験結果

今回使用した再生骨材の起源は、B~Dは全量砂利であるが、Eは一部砕石を含むものである。また、B~Dは2種類のコンクリート塊から製造されており、各試験に供する前に標準粒度に収まるよう粒度調整を行った。表-4に、粒度調整後の各粗骨材の物性を示した。絶対乾密度、吸水率ともJIS A 5021の規定を満足するものであった。また、不純物量やすりへり減量、アルカリシリカ反応性等その他の物性については、コンクリート塊採取時の事前調査で確認されている。

4. 実験室内でのコンクリートに関する試験結果

4.1 調合

スランプ18±2.5cm,空気量4.5±1.5%を目標に、単位水量を180kg/m³一定とし、試験練りにより調合を定めた。表-5に基本となる調合を示した。なお、粗骨材量は、普通コンクリート(W/C65%)の粗骨材絶対容積(356L/m³)を基準に全て統一した。

4.2 フレッシュコンクリートの結果および考察

スランプならびに空気量の試験結果を表-5に示した。スランプおよび空気量は全てのコンクリートで目標値が得られた

表-1 実験の要因と水準

	要因	水準
	骨材試験	コンクリート塊の種類 再生骨材の製造方法
ラボ試験	再生骨材の製造方法	同上
実大暴露試験	W/C 再生骨材の製造方法	3水準:45%、55%、65% 同上

表-2 使用した骨材の種類と品質

記号	骨材種類	品質
A	普通	JIS A 5308 附属書1
B	再生	JIS A 5021 に相当
C		
D		
E		

表-3 試験および測定方法の一覧

	試験項目	試験方法・規格
骨材試験	密度	JIS A 1110(粗骨材の密度及び吸水率試験方法)
	吸水率	同上
	粗粒率	JIS A 1102(骨材のふるい分け試験方法)
	単位容積質量	JIS A 1104(骨材の単位容積質量及び実積率試験方法)
	実積率	同上
コンクリート試験	スランプ	JIS A 1101(コンクリートのスランプ試験方法)
	スランプフロー	JIS A 1150(コンクリートのスランプ加試験方法)
	空気量	JIS A 1116(フレッシュコンクリートの単位容積質量試験方法)
	ブリーディング	JIS A 1123(コンクリートのブリーディング試験方法)
	圧縮強度	JIS A 1108(コンクリートの圧縮強度試験方法)
	静弾性係数	JIS A 1149(コンクリートの静弾性係数試験方法)
	長さ変化率	JIS A 1129-1(珪砂及びコンクリートの長さ変化試験方法)
	質量変化	同上
	凍結融解抵抗性	JIS A 1148(コンクリートの凍結融解試験方法: A法)
	ひび割れ抵抗性	実大壁試験体による目視観察(JASS5.13に準拠)
	促進中性化	JIS A 1153(コンクリートの促進中性化試験方法)

表-4 粒度調整後の骨材物性の一覧

骨材種類	密度(g/cm ³)		吸水率(%)	粗粒率	単位容積質量(kg/L)	実積率	骨材補正係数(%)
	絶対	表乾					
A	2.65	2.64	0.68	6.71	-	0.584	0.0
B	2.57	2.61	2.16	6.85	1.72	0.674	0.2
C	2.56	2.61	2.18	6.17	1.67	0.654	0.6
D	2.51	2.57	2.57	6.80	1.69	0.673	0.5
E	2.50	2.57	2.86	6.77	1.58	0.646	0.4

表-5 室内試験での調合と試験結果

骨材種類	W/C(%)	かさ容積	単位量(kg/m ³)						SL(cm)	Air(%)
			W	C	S	G	Ad1	Ad2		
A	65	0.61	180	270	854	941	2.8	0.4	19.5	4.2
	55			328	797	956	3.3	0.5	17.5	3.6
	45			400	738	956	4.0	0.8	19.0	3.8
B	65	0.53		277	854	915	2.8	0.4	20.5	4.0
	55			328	813	915	3.3	0.7	20.5	4.3
	45			400	753	915	4.0	1.0	20.0	4.5
C	65	0.55		277	854	911	2.8	0.4	18.0	4.8
	55			328	813	911	3.3	0.7	19.0	4.7
	45			400	753	911	4.0	1.0	18.0	4.6
D	65	0.53	277	854	893	2.8	0.4	19.5	4.3	
	55		328	813	893	3.3	0.7	20.0	4.2	
	45		400	753	893	4.0	1.0	19.0	4.2	
E	65	0.55	277	854	889	2.8	0.6	20.0	4.1	
	55		328	813	889	3.3	0.8	20.0	4.2	
	45		400	753	889	4.0	1.2	19.5	4.7	

が、総じて、普通コンクリートよりも再生骨材コンクリートの方が、スランプや粘性の点で良好なワーカビリティが得られた。

ブリーディング試験の結果を図-1に示した。再生粗骨材を使用したコンクリートのブリーディング量は、何れも普通コンクリートと同程度あるいはそれ以下であり、水セメント比の低下に伴い、概ね減少する傾向にあった。単位水量やモルタル量がほぼ同一であるにもかかわらず粗骨材の種類によってブリーディング量が異なっているが、これは再生粗骨材の吸水量の影響によるものと考えられる。なお、日本建築学会「高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工(案)・同解説」規定の $0.3\text{cm}^3/\text{cm}^2$ を目安にした場合、下回るのは再生粗骨材(D)の水セメント比45%の場合のみであった。

4.3 硬化コンクリートの結果および考察

(1) 圧縮強度とヤング係数

水セメント比ごとの材齢4, 13, 26週時の圧縮強度(標準水中養生)を図-2に示した。何れの水セメント比の場合でも、再生骨材コンクリートは普通コンクリートに比べ圧縮強度が小さく、低水セメント比のものほどこの傾向は顕著に認められた。ただし、その差は骨材の種類によって異なっており、今回の実験では5~20%の差が認められた。また、封緘養生した場合の普通コンクリートに対する再生骨材コンクリートの圧縮強度比は材齢26週の段階で最も小さいもので約70%で、骨材の種類による差がより顕著に認められた。

圧縮強度とヤング係数の関係を骨材種別、養生種別ごとに図-3に示した。大凡、水中養生した場合は“NewRC式”より上部に、封緘養生した場合は下部に分布していた。この傾向は普通コンクリートよりも再生骨材コンクリートの方がより明確に認められ、上記圧縮強度の場合も含め、再生骨材コンクリートの強度発現とその管理については、普通コンクリートの場合よりも養生方法による影響を十分に考慮する必要があると思われる。なお、再生骨材の種類による

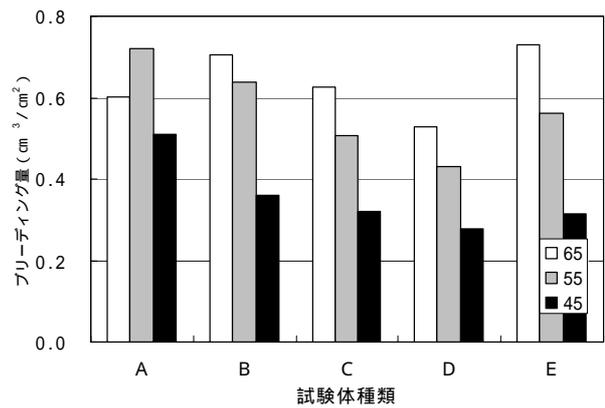


図-1 ブリーディング量

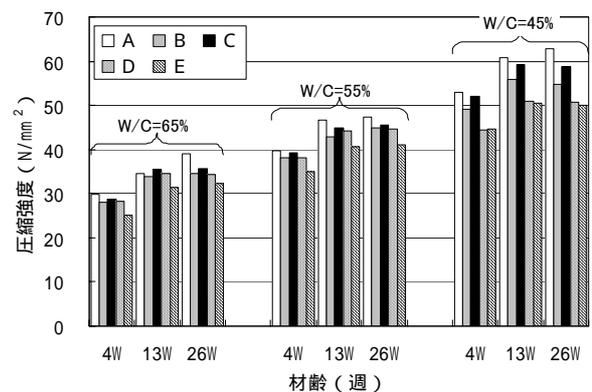


図-2 材齢ごとの圧縮強度

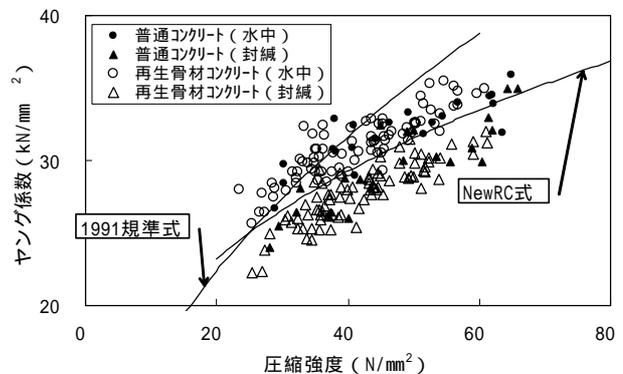


図-3 圧縮強度とヤング係数の関係

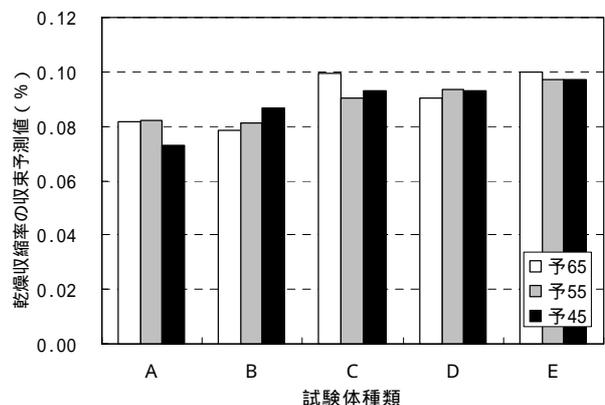


図-4 長さ変化率の予測値

差は今回の実験では明確には認められなかった。

(2) 乾燥収縮

図 - 4 と図 - 5 に、材齢 1 年までのデータを基に直線回帰式 (t : 時間, y : 測定値とも逆数) から求めた乾燥収縮と質量減少率の収束予測値を、使用骨材の種類別および水セメント比に示した。表 - 5 に示したように本実験では単位水量 $180\text{kg}/\text{m}^3$ 一定で調合しており、長さ変化率は大凡 $0.09 \sim 0.1\%$ で、再生骨材コンクリートは普通コンクリートよりも $5 \sim 25\%$ 大きくなった。しかし、吸水率や密度など骨材物性と長さ変化率との間に直線的な相関関係を確認するまでには至らなかった。一方、質量変化率は大凡 $2.5 \sim 4.5\%$ で、水セメント比による明確な差異が認められた。なお、骨材種類間での差が比較的小さかったのは、今回の実験で粗骨材の絶対容積を同一にしたことが影響しているものと考えられる。

(3) 促進中性化

図 - 6 に、促進中性化試験における材齢 26 週時の中性化深さを、水セメント比別に示した。普通コンクリートに比べ再生骨材コンクリートの中性化深さは何れも大きくなっており、その割合は水セメント比 65% のもので約 5% であったが、55% と 45% では何れも中性化深さの増加率は $25 \sim 30\%$ で、55% 以下では水セメント比による違いは認められなかった。

(4) 凍結融解抵抗性

図 - 7 に、凍結融解抵抗性試験による 300 サイクル経過時の各試験体の相対動弾性係数を水セメント比ごとに示した。水セメント比 45% の場合には何れも 95% 以上で骨材種類による違いは認められなかった。しかし、水セメント比 55% の場合には骨材 A と C を使用したコンクリートは 93% で、水セメント比 45% との差は僅かであったが、B, D, E は大きく低下し、特に B では指標である相対動弾性係数 60% を下回った。B と C の相違の原因としては、表 - 4 に示すように両骨材の基本物性はほぼ同等であるが、混練直後のコンクリート中の空気量は C の場合 $4.6 \sim 4.8\%$ で、他のコンクリート試料より 0.5 程度

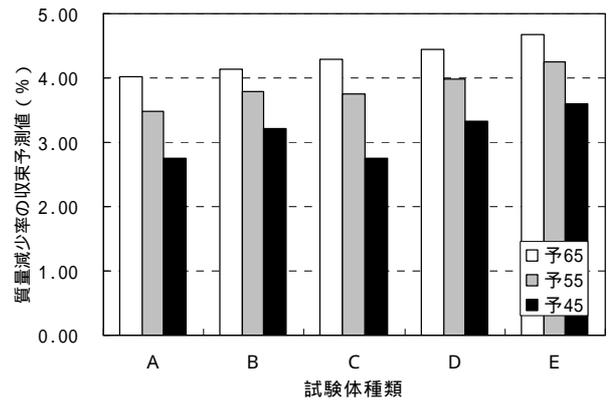


図 - 5 質量減少率の予測値

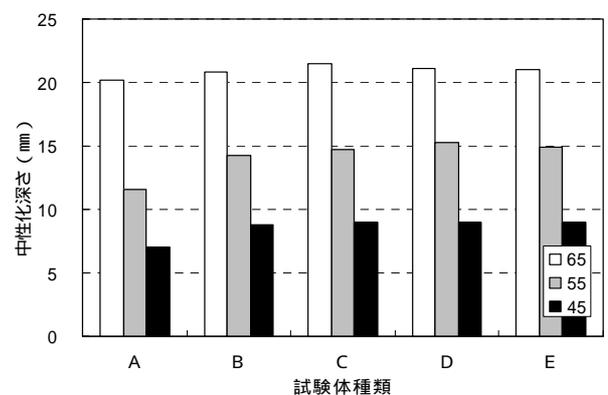


図 - 6 促進中性化試験による中性化深さ

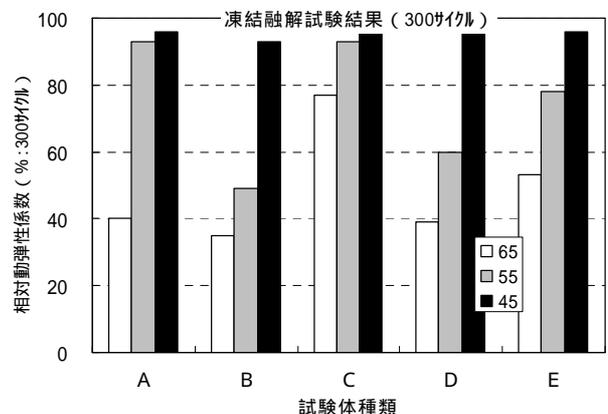


図 - 7 凍結融解試験による相対動弾性係数

多いことが起因しているものと考えられる。詳細については今後さらに検討する予定である。

5. 実機練りでの実大暴露試験結果

5.1 調合と製造

調合は、単位水量 $185\text{kg}/\text{m}^3$ 一定とし、スランプ $18 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ を目標に、実験

室内の試験と同じかさ容積で、下記工場内の試験用強制二軸ミキサー（50 リットル）で普通骨材を用いて試験練りを行って決定した（表 - 6）。再生骨材コンクリートの調合は、この基本調合を基に粗骨材容積が一定となるように決定した。コンクリートの製造はつくば市近郊のJIS表示認定工場で強制二軸型(3m³) ミキサーを用いて行い、当研究所(輸送時間 20~25 分)の約 20 に空調した大型施設でコンクリートの打設を行った。

5.2 実大暴露試験体の概要

図 - 8 に、実大暴露試験体の概要を示した。実大暴露試験体の試験部分は、高さ 1,500mm×幅 2,000mm×厚さ 120mm の壁型試験体で、縦・横筋ともにD10@200のシングル配筋とした。また、試験区間周囲の柱、梁、スラブ部分は密配筋(柱主筋：4-D13(Pt=0.81%)、柱せん断補強筋：2-D10@150(Pw=0.38%)、梁主筋：3-D13(Pt=0.76%)、梁せん断補強筋 2-D10@150 (Pw=0.38%))とし、試験部分の拘束効果を高めた配筋とした。打設 2 週間後に脱型し、材齢 13 週まで 15~20 で空調された実験施設内で、それ以降は当研究所内の屋外暴露試験場に移設し、ひび割れ等の観察を行った。

5.3 フレッシュコンクリートの結果および考察

フレッシュ時の物性試験結果を表 - 7 に示した。前述 4.の実験室内での結果と同様、再生骨材コンクリートは、普通コンクリートに比べて、スランプおよびスランプフローとも若干大きくなるが何れもほぼ同様の性状を示した。図 - 9 に、練上がり後 90 分までのスランプの経時変化を示した。普通コンクリートは打設現場到着時(30 分後)に所要スランプを下回っていたため、高性能 AE 減水剤の後添加を行ったが、再生骨材コンクリートでは、練上がり後 90 分までは顕著なスランプロスとは認められなかった。これは、普通粗骨材の実積率(58.4%)に対し、再生骨材の実積率が 64.6~67.4%と比較的大きかったことが原因の一つと考えられる。

5.4 硬化コンクリートの結果および考察



図 - 8 実大暴露試験体の概要

表 - 6 実大暴露試験時の基本調合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
		W	C	S	G	Ad1	Ad2
65	47.5	180	270	854	941	2.77	0.42

表 - 7 実機練り時のコンクリートの物性

粗骨材種類	スランプ (cm)	スランプ フロー (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
A	17.5	27.5×28.5	4.8	17.0
B	21.0	36.0×36.5	4.5	17.0
C	18.0	31.5×31.5	6.6	15.5
D	19.5	34.0×33.5	4.6	15.5
E	20.0	25.5×34.0	5.4	15.5

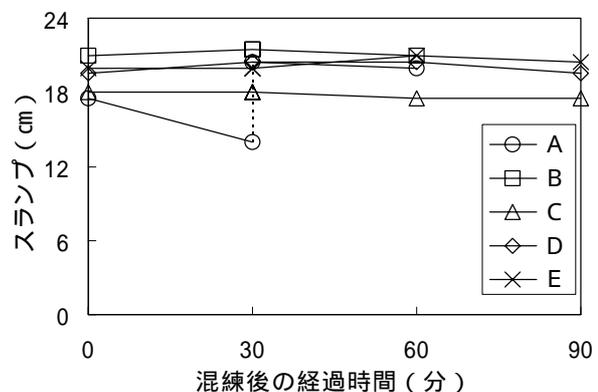


図 - 9 スランプの経時変化

(1) 圧縮強度とヤング係数

図 - 10 および図 - 11 に、材齢 1 週から 52 週までの圧縮強度(標準水中)とヤング係数を骨材種別ごとに示した。材齢に拘わらず、いずれの再生骨材コンクリートも圧縮強度は約 ± 5% の範囲で普通コンクリートと同程度であった。

ヤング係数については、再生骨材(E)を除き、再生骨材コンクリートも普通コンクリートとほ

ば同等であった。前述 4.の実験室内でも再生骨材(E)は他の再生骨材より特性値が低い傾向にあり、原因については今後検討する予定である。

(2) 乾燥収縮

図 - 12 に、材齢 1 年の乾燥収縮の長さ変化率実測値と最終収束量の予測値を、使用骨材の種類ごとに示した。実測値では骨材の種類で差は認められるが、最終収束量の予測値は何れの骨材も約 0.1% であり、現時点では普通コンクリートと再生骨材コンクリートに明確な差は認められないが、今後継続して測定する予定である。

(3) 実大暴露試験体のひび割れ性状

屋外暴露場に移設する前の脱型後材齢 13 週目では、使用骨材によるひび割れ性状の違いは少なく、特異なひび割れも発生しなかった。屋外暴露場に移設した後は、普通コンクリート(A)と再生骨材(B)コンクリートでは顕著な変化は認められないが、再生骨材(C, D, E)コンクリートの壁中央部分に微細なひび割れが発生し、材齢約 1 年の段階でひび割れ幅は約 0.1 mm、長さは壁高さ方向の約半分程度に達し、一部貫通も考えられるが、今後も継続して観測する予定である。

6. まとめ

今回の実験結果をまとめると以下のようなものである。

今回使用した再生骨材は JIS A 5021 の規格に相当する良質なものであった。

普通骨材に比べ再生骨材の実積率が約 0.08 大きく、フレッシュ性状で良好な結果が得られた。

室内試験では、再生骨材コンクリートの圧縮強度は普通コンクリートより低下し、この傾向は水中養生よりも封緘養生の方が顕著であった。

長さ変化、中性化深さ、凍結融解抵抗性についても、再生骨材コンクリートは普通コンクリートよりも劣る傾向が認められた。ただし、その差は、再生骨材の種類によって異なり、普通コンクリートとほぼ同程度の性能を有するものもあった。

実機試験では、フレッシュ時の物性、硬化後

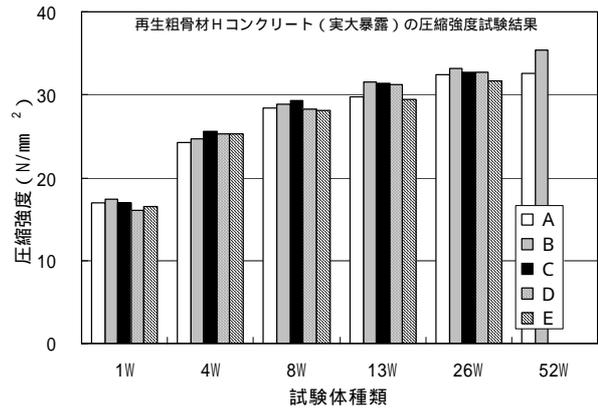


図 - 10 材齢と圧縮強度の関係

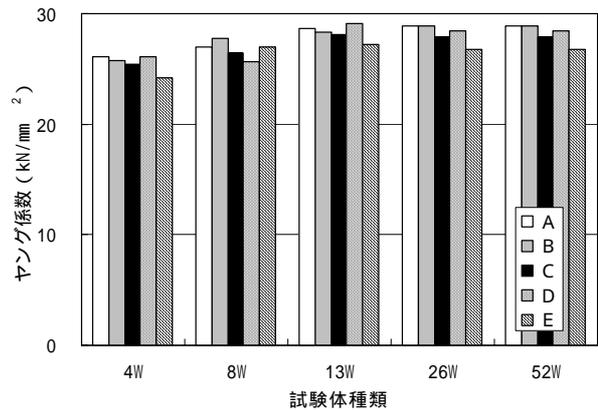


図 - 11 材齢とヤング係数の関係

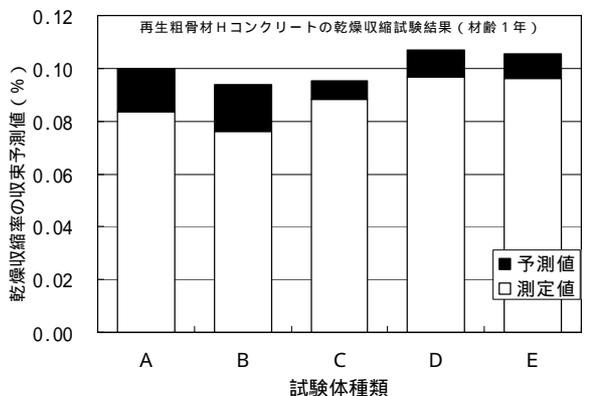


図 - 12 試験体種類別の乾燥収縮率

の特性とも、普通コンクリートと同等であった。

一部の再生骨材コンクリートで実大暴露試験体に微細なひび割れが確認された。

謝辞

本研究を実施するにあたり、日本コンクリート工学協会より JIS 原案作成時の検討に供した各種再生骨材を提供いただきました。ここに、感謝の意を表します。