

論文 再生細骨材コンクリートの強度及び変形性状

新井 暢^{*1}・中村成春^{*2}・梶田佳寛^{*3}・阿部道彦^{*4}

要旨：本研究は、再生細骨材コンクリートの利用可能性を評価するために、コンクリートの強度及び変形性状に及ぼす再生細骨材の影響と、再生細・粗骨材の組み合わせの影響を検討したものである。その結果、圧縮強度は、長期になると骨材条件による発現率の違いが現れ、骨材種類による強度差も顕著になった。また、細骨材種類の違いに着目すると、骨材吸水率が高くなるにつれ強度は低下するが、圧縮強度 20MPa 程度ではその影響は小さかった。ヤング係数は吸水率が高くなると低下した。乾燥収縮率は、細骨材の吸水率よりむしろ粗骨材の吸水率に影響を受けた。

キーワード：再生細骨材、再生骨材コンクリート、圧縮強度、ヤング係数、乾燥収縮

1. はじめに

近年、資源の枯渇化や環境汚染が社会問題となり、建設産業は、建材資源の採取と建設廃材の処分による環境への影響が大きいと、解体物の再利用システムが模索されている。コンクリートは、容積の約 70% が骨材であり、解体材を破碎し、再骨材化を図ることは有効な省資源・リサイクルの手段となり、粗骨材については実際の構造物へ試行的に再利用されつつある[1]。しかしながら、再骨材化された骨材の品質は、セメントペーストやモルタル粒子の付着及び破碎処理時に発生する異物混入の影響を受け、吸水率も高い値を示す[2]。再生粗骨材を高い吸水率のまま使用すると、再生骨材コンクリートの力学特性及び耐久性が低下する[3]ため、破碎処理回数を増加させ、付着不純物を減じる必要があるが、同時に粒径 5mm 以下の再生細骨材や粉体が多量に発生する。現行のシステムでは、高次破碎処理を行い、再生粗骨材の吸水率を 3% 程度にすると、再生粗骨材の生産比率が約 20% に減少し、残り約 80% が再生細骨材及び粉体となる[4]。したがって、再骨材化のシステムをより合理的にするには、多量に発生する再生細骨材及び粉体の再利用[5]も考慮する必要がある。

本研究は、粒径 0.15 ～ 5mm の再生細骨材をコンクリート用細骨材として使用した再生骨材コンクリートの強度及び変形性状を実験的に検討し、再生細骨材コンクリートの利用可能性を評価することを目的とする。

2. 実験概要

2.1 実験項目及び方法

表 1 に実験項目及び方法を示す。関連 JIS により、使用骨材の品質、使用コンクリートのフレッシュ性状、強度性状及び変形性状を調べた。強度性状の評価は圧縮強度と引張強度について、変形性状の評価はヤング係数、動弾性係数及び長さ変化について行った。

*1 佐田建設(株)、(正会員)

*2 宇都宮大学助手 工学部建設学科、工博(正会員)

*3 宇都宮大学教授 工学部建設学科、工博(正会員)

*4 建設省建築研究所 第2研究部無機材料研究室室長、工博(正会員)

2.2 使用骨材の品質

再生粗骨材は製造プラント及び破砕処理が異なる *GA*, *GB*, *GC* の 3 種類を使用し, 再生細骨材は再生粗骨材の製造処理過程で発生した *SA*, *SB*, *SG* の 3 種類を使用した。*GA* が高次処理, *GB* が比重選別, *GC* が通常処理したものであり, 再生 *A* と再生 *C* の原料は同一で 44 年経過した建物のコンクリート塊であり, 再生 *B* は 37 年経過したものである。基準とした普通骨材は, 鬼怒川産川砂と岩瀬産硬質砂岩砕石 (各々 *S0*, *G0* と表記) を使用した。表-2 に骨材の品質を示す。

2.3 実験の要因と水準

実験は, 水セメント比 *W/C* を 40, 50, 60% (各々 *H*, *M*, *L* と表記) の 3 段階に変化させ, 再生細骨材が及ぼす影響 (シリーズ 1) と, 同一原料の再生細・粗骨材を組合せた再生骨材が及ぼす影響 (シリーズ 2) の 2 シリーズを, 普通骨材を使用したコンクリート (以下, 普通骨材コンクリート) と比較した。

2.4 コンクリートの調合及びフレッシュ性状

表-3 にコンクリートの調合及びフレッシュ性状実測結果を示す。セメントは, 3 社等量混合した普通ポルトランドセメントを使用した。混和剤は, AE 減水剤 (リグニンスルホン酸系) を使用し, セメント量に対する添加量を一定とした。調合は, ワークブルでスランプが $18 \pm 1.5\text{cm}$ になるよう単位粗骨材かさ容積と単位水量を調整し, 空気量が $4.5 \pm 1\%$ になるよう空気量調整剤 (アルキルアリルスルホン酸化合物系) により調整した。単位水量は, すべての *W/C* 条件において, 普通骨材コンクリートと比較して増加する傾向にあり, また, 再生細骨材の吸水率が高いほど増加している。

3. 実験結果及び考察

3.1 圧縮強度

表-3 中に各材齢毎の圧縮強度試験結果を示す。また, 図-1 に材齢 91 日強度に対する各材齢の圧縮強度比を示す。水セメント比が 40% では, 骨材の違いによるコンクリートの強度発現比に大きな差はないが, 水セメント比が 60% では, 材齢 91 日に対する材齢 7 日及び 28 日の強度発現比は, 普通骨材を用いたもの, 再生細骨材を用いたもの, 再生細・粗骨材を用いたものの順に小さくなっている。

表-1 試験項目及び方法

項 目	試験方法
ふるい分け 単位容積質量及び実積率 比重及び吸水率 *1	JIS A 1102 JIS A 1104 JIS A 1109, JIS A 1110
スランプ 空気量	JIS A 1101 JIS A 1128
圧縮強度 引張強度	JIS A 1108 *2 JIS A 1113 *3
ヤング係数 動弾性係数 長さ変化	JIS 原案, 1/3 割線 *3 JIS A 1127 縦振動 *3 JIS A 1129 コンパレータ *4

表-2 骨材の品質

種類	記号	比 重		吸水率 %	単位容積質量 kg/l	実積率 %	粗粒率 F.M.
		表乾	絶乾				
普通	<i>S0</i>	2.60	2.55	2.02	—	—	2.61
	<i>G0</i>	2.66	2.64	0.65	1.58	60.2	6.67
再生 <i>A</i>	<i>SA</i>	2.44	2.28	6.37	—	—	2.67
	<i>GA</i>	2.54	2.45	3.51	1.47	60.1	6.23
再生 <i>B</i>	<i>SB</i>	2.41	2.24	6.85	—	—	2.80
	<i>GB</i>	2.59	2.52	2.76	1.56	63.2	6.43
再生 <i>C</i>	<i>SC</i>	2.25	1.97	12.40	—	—	2.92
	<i>GC</i>	2.44	2.31	5.54	1.38	59.6	6.52

*1 5mm 以上の試料について試験, *2 標準養生, 材齢 7, 28, 91 日に試験, *3 標準養生, 材齢 28 日に試験, *4 材齢 7 日標準養生後, 20℃・60%RH 気中保存し乾燥期間 7, 14, 28, 56, 91, 182 日に測定

表－３ コンクリートの調合、フレッシュ及び力学性状試験結果

シリーズ	記号	使用骨材の組合せ	W/C %	単位量 kg/m ³				AE減水剤		スランプ cm	空気量 %	圧縮強度 MPa			引張強度 MPa	ヤング係数 GPa	動弾性係数 GPa
				水	セメント	細骨材	粗骨材	主剤*1	助剤*2			7日	28日	91日			
—	H4	S0+G0	40	185	463	619	1024	2.5	7.0	19.0	3.8	41.8	55.4	56.7	2.90	34.8	41.7
1	H1	S4+G0	40	188	470	598	992	2.5	4.0	18.5	4.0	37.3	44.7	49.0	2.82	28.9	37.8
	H2	SB+G0	40	188	470	605	976	2.5	2.0	16.5	4.8	35.2	43.8	51.3	3.21	27.7	36.4
	H3	SC+G0	40	195	488	565	944	2.5	5.0	16.5	4.1	32.5	40.0	43.0	2.75	26.8	30.3
2	H5	S4+GA	40	185	463	581	978	2.5	4.0	19.0	4.4	39.8	52.7	53.1	2.75	33.4	35.1
	H6	SB+GB	40	188	470	590	966	2.5	2.0	18.5	4.8	33.7	45.9	46.4	2.67	33.3	34.3
	H7	SC+GC	40	195	488	545	888	2.5	0.5	18.5	4.1	32.9	43.4	44.1	2.42	25.4	28.2
—	M4	S0+G0	50	175	350	738	1024	2.5	4.0	19.5	4.8	33.0	35.9	45.6	3.39	28.6	39.6
1	M1	S4+G0	50	175	350	722	992	2.5	2.0	18.5	5.7	28.5	34.5	40.2	2.86	25.9	34.1
	M2	SB+G0	50	178	356	745	944	2.5	0.0	18.0	5.8	25.4	32.8	39.9	2.76	23.5	32.3
	M3	SC+G0	50	185	370	677	936	2.5	1.0	18.5	4.3	25.9	29.7	35.1	2.68	21.0	29.8
2	M5	S4+GA	50	175	350	693	978	2.5	0.0	18.0	4.6	28.0	35.8	41.7	2.71	24.6	31.4
	M6	SB+GB	50	178	356	670	1000	2.5	0.0	18.5	4.8	24.7	33.7	36.2	2.57	24.7	30.9
	M7	SC+GC	50	185	370	650	888	2.5	1.0	19.0	4.6	23.5	30.0	34.0	2.31	19.5	25.3
—	L4	S0+G0	60	175	292	788	1024	2.5	2.0	18.5	4.7	22.5	27.3	33.7	2.23	24.1	38.1
1	L1	S4+G0	60	175	292	769	992	2.5	0.0	16.5	5.8	18.0	22.0	28.2	1.82	20.7	31.7
	L2	SB+G0	60	178	297	762	976	2.5	0.0	19.0	6.0	18.5	21.2	29.2	1.92	19.1	29.7
	L3	SC+G0	60	185	308	716	945	2.5	1.0	18.5	4.8	17.6	20.6	27.8	1.76	16.8	26.5
2	L5	S4+GA	60	175	292	739	978	2.5	0.0	18.5	5.5	17.8	21.3	30.0	1.88	20.6	29.9
	L6	SB+GB	60	178	297	747	966	2.5	0.0	18.5	6.1	16.4	19.0	26.5	1.76	19.4	29.4
	L7	SC+GC	60	185	308	695	888	2.5	0.5	18.5	4.9	16.8	19.4	26.1	1.52	15.2	25.3

*1 セメント質量に対する添加量(ml/kg), *2 セメント質量に対する 0.001% 添加率(C*0.001%)

図－２にセメント水比と材齢 28 日の圧縮強度との関係を示す。セメント水比 C/W が大きくなるほど、シリーズ 1 では普通骨材コンクリートと再生細骨材コンクリートとの強度差が顕著になり、シリーズ 2 では再生骨材の種類が及ぼす強度差が顕著になった。

図－３に骨材吸水率と材齢 28 日の圧縮強度との関係を示す。細・粗骨材が異なるコンクリートの骨材の吸水率を評価するため、細・粗骨材吸水率を等価に置換した骨材等価吸水率を式(1)により定義した。これは、菊池らの提案する相対吸水率[6]と同じものである。

$$\text{骨材等価吸水率} = \frac{\text{細骨材吸水率} \times \text{細骨材容積} + \text{粗骨材吸水率} \times \text{粗骨材容積}}{\text{細骨材容積} + \text{粗骨材容積}} \quad (1)$$

a), b)いずれの場合も W/C が 40% と 50% では、骨材吸水率が高くなると強度が低下する傾向が認められるが、W/C が 60% では、強度の低下はあまり認められなかった。

3.2 引張強度及び弾性係数

表－３中に引張強度、ヤング係数及び動弾性係数の試験結果を示す。また、図－４に材齢 28 日の圧縮強度と引張強度との関係を示す。各図中には、圧縮強度の平方根を説明変数にした骨材組み合わせ条件毎の原点を通る単回帰分析結果も表記した。シリーズ 1 及び 2 とも骨材の吸水率が高くなると、圧縮強度に対する引張強度は低下している。

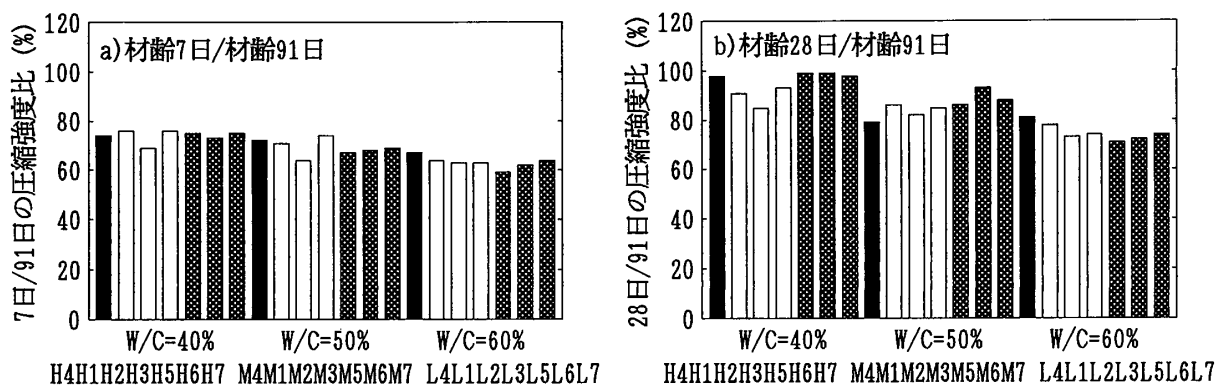


図-1 材齢91日強度に対する各材齢の圧縮強度比

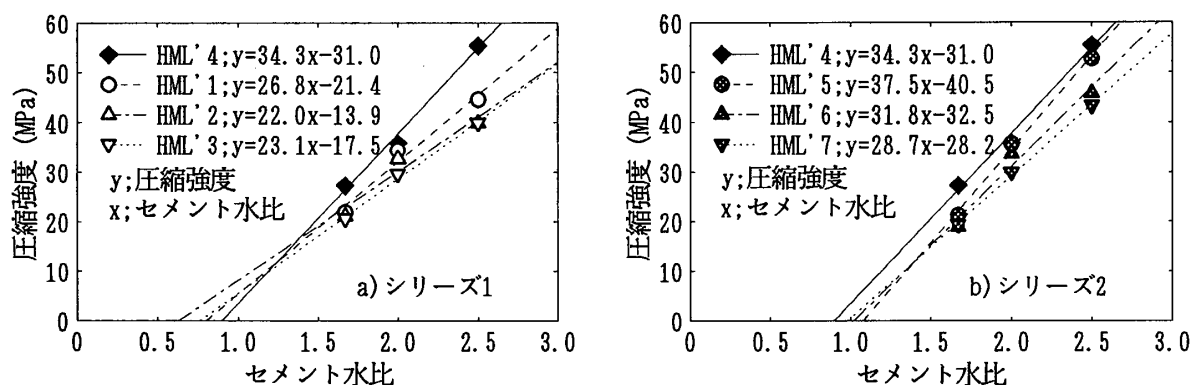


図-2 セメント水比と材齢28日の圧縮強度との関係

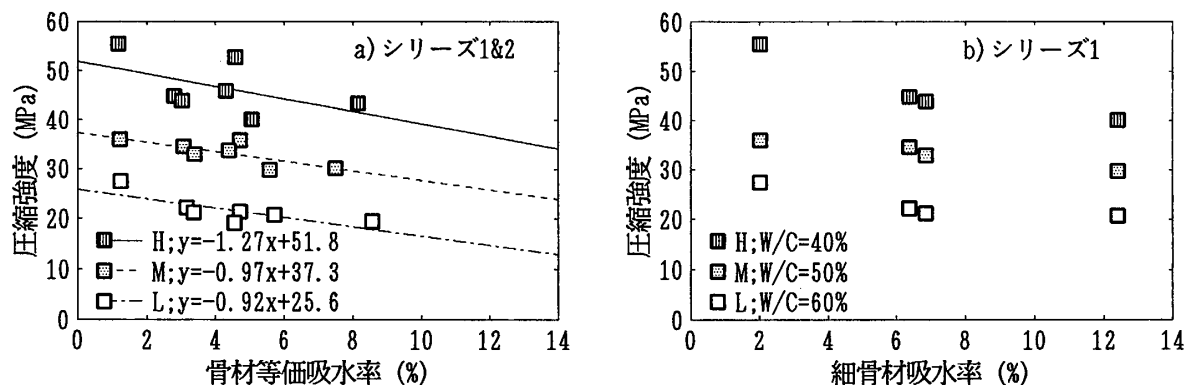


図-3 骨材吸水率と材齢28日の圧縮強度との関係

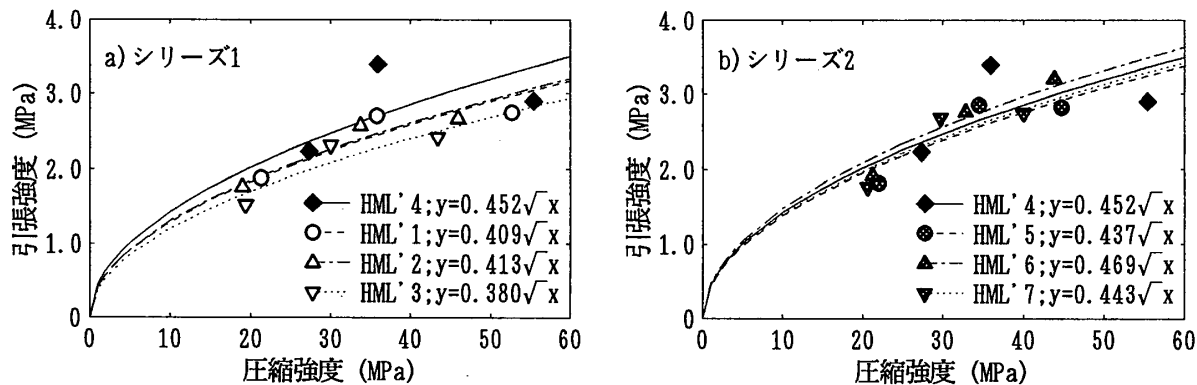


図-4 材齢28日の圧縮強度と引張強度との関係

図-5に材齢28日の圧縮強度と規準化ヤング係数との関係を示す。規準化ヤング係数とは、建築学会[7]の圧縮強度に対するヤング係数の式において、単位容積質量の $3/2$ 乗で除したものである。シリーズ1及び2ともコンクリートの単位容積質量の影響以上に、吸水率の高い骨材条件で小さくなっていることがわかる。

図-6にヤング係数と動弾性係数との関係を示す。図中には、 W/C 条件毎の原点を通る単回帰分析結果も表記した。 W/C が小さくなるほど、ヤング係数は動弾性係数に近づく。また、各 W/C 条件において、両者の関係に骨材の種類の影響は認められなかった。

3.3 乾燥収縮

図-7に $W/C = 50\%$ 条件の質量減少率と乾燥収縮率との関係を示す。普通骨材コンクリートと比較し、シリーズ1及び2とも骨材の組み合わせ条件による違いが顕著である。特に、高吸水率骨材を使用すると乾燥収縮率及び質量減少率ともに大きくなる。

図-8に骨材吸水率と乾燥期間182日の乾燥収縮率との関係を示す。乾燥収縮率は、a)より、 W/C が小さくなるほど小さくなり、細・粗骨材の吸水率がともに高くなると大きくなる。しかしながら、b)より、細骨材の吸水率が及ぼす違いはあまり明確でない。したがって、乾燥収縮率は、特に粗骨材の吸水率に強く影響を受けているという結果となった。

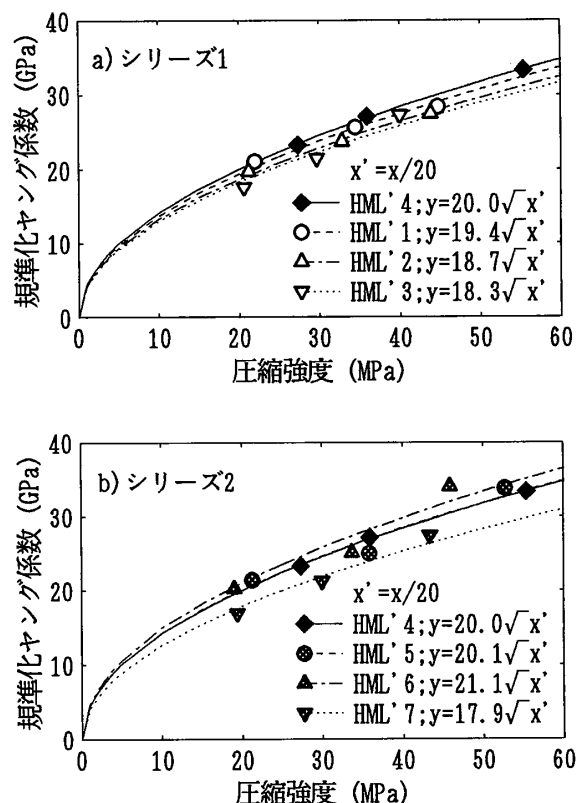


図-5 材齢28日の圧縮強度と規準化ヤング係数との関係

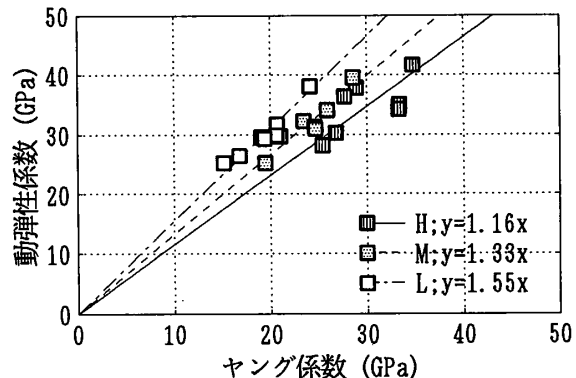


図-6 ヤング係数と動弾性係数との関係

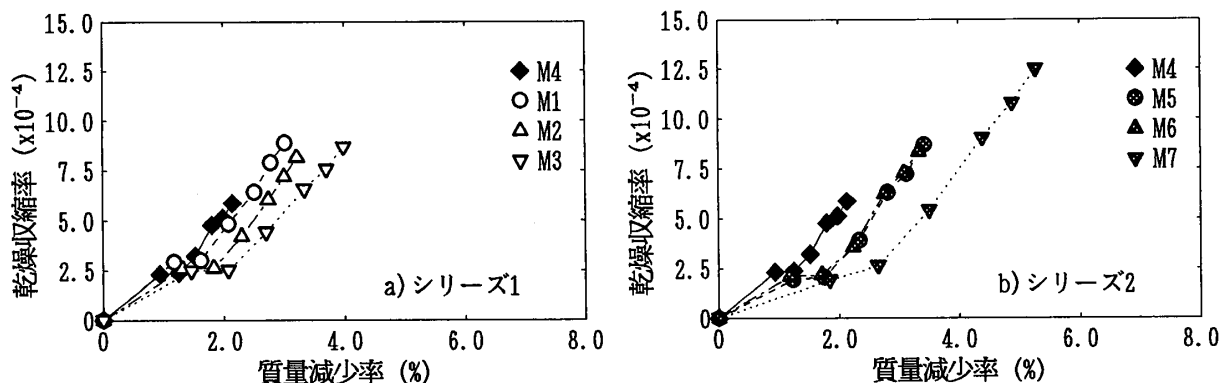
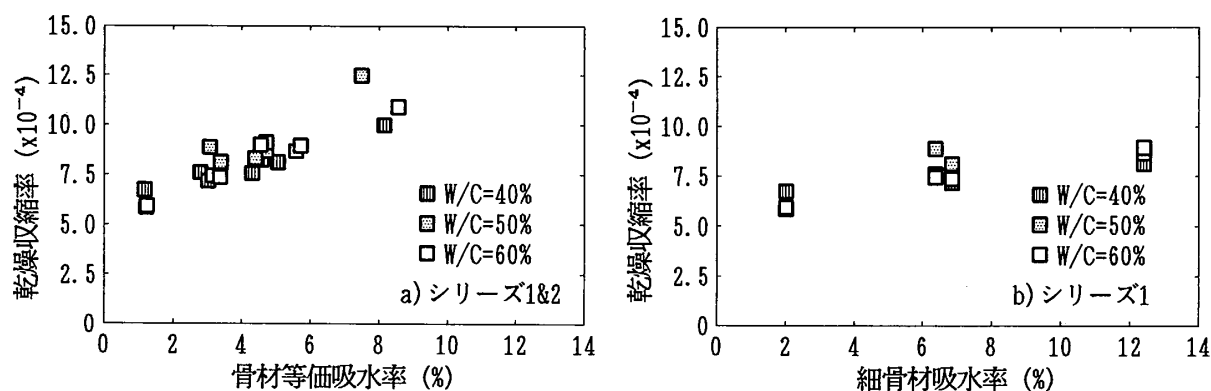


図-7 $W/C = 50\%$ 条件の質量減少率と乾燥収縮率との関係



図－8 骨材吸水率と乾燥期間 182 日の乾燥収縮率との関係

4. 結 論

再生細骨材を使用したコンクリートの強度及び変形性状を実験的に検討した結果、本研究の範囲で以下のことが明らかとなった。

- 1) 圧縮強度は、長期になると細・粗骨材の組み合わせ条件による発現率の違いが現れ、再生骨材の種類による強度差も大きくなる。
- 2) 再生細骨材の種類の違いのみに着目すると、圧縮強度は、吸水率が高くなるほど低下する傾向を示すが、圧縮強度 20MPa 程度では再生細骨材の吸水率による強度差はあまり見られない。
- 3) 圧縮強度に対する引張強度は、細・粗骨材の吸水率が高くなるほど小さくなる。
- 4) ヤング係数は、吸水率の高い細・粗骨材を使用すると低下する。また、動弾性係数は水セメント比毎にヤング係数に対応する傾向を示し、水セメント比が小さくなるほどヤング係数は動弾性係数に近い値を示す。
- 5) 吸水率の高い細・粗骨材を使用すると乾燥収縮率及び質量減少率がともに大きくなる。また、乾燥収縮率は、再生細骨材の吸水率より粗骨材の吸水率の影響を受ける。

謝 辞

本研究は、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」の一環として行ったものである。本研究の実施にあたりまして、建設省建築研究所第2研究部無機材料研究室 前田弘美氏、同 部外研究員の大下昭三氏、藤田克巳氏、宇都宮大学大学院 手島則夫氏、宇都宮大学卒論生 大久保敏彦氏、大野吉昭氏、梶原伸悟氏、高橋祐一氏、深川正浩氏、押谷式子氏に御協力を賜りました。ここに記して厚く謝意を表します。

参考文献

- [1] 河野広隆：コンクリート解体材の再利用の現状と可能性，コンクリート工学，Vol.33，No.10，pp.91-96，1995.10
- [2] 柳 啓，阿部道彦，加賀秀治：共通試験による再生骨材の品質試験方法の検討，セメント・コンクリート論文集，Vol.49，pp.324-329，1995.12
- [3] 阿部道彦：再生骨材を用いたコンクリート，コンクリート工学，Vol.33，No.12，pp.110-116，1995.12
- [4] 阿部道彦，南波篤志：再生骨材の生産比率と品質に及ぼす製造方法の影響，セメント・コンクリート論文集，Vol.49，pp.330-335，1995.12
- [5] 中田善久，毛見虎雄：再生粉体を混入したコンクリートの性状，セメント・コンクリート論文集，Vol.49，pp.354-359，1995.12
- [6] 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，pp.11-20，1995.8
- [7] 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，丸善，1991