

論文 不連続粒度の再生骨材を用いたコンクリートの性状

柏木 隆男*1・寺嶋 明彦*2・福井 弘満*3・大橋 正治*4

要旨：再生骨材の連続粒度を不連続粒度にすることにより，スランプが大きくなることを明らかにした。さらに，再生粗骨材と再生細骨材や高炉スラグ細骨材を用いた不連続粒度のコンクリートの実験を行い，ペースト量一定条件において，ペースト膜厚が厚くなるほど，水セメント比が大きくなるほど，スランプが大きくなることを示した。また，再生粗骨材を用いた不連続粒度コンクリートにおいて，再生細骨材を粒度の細かい高炉スラグ細骨材に置換することにより，乾燥収縮量や強度発現を改善できることを示した。

キーワード：再生骨材，付着モルタル，強度特性，高炉スラグ細骨材，ペースト膜厚

1. はじめに

現在，コンクリートの再生骨材は，ほとんどが路盤材や埋め戻しに使用されている。今後，1960 年以降高度成長期のコンクリート構造物の老朽化に伴い，多くの建替えが予想され，再生骨材をコンクリート構造物へ適用していく必要がある。

構造物に適用するにあたって，再生骨材製造方法により骨材品質を向上させたもの¹⁾²⁾や，コンクリートを減圧することにより品質改善したもの³⁾などが実用化されようとしている。

筆者らは，骨材粒度を不連続粒度にすることにより，単位水量を少なく，粗骨材量を多くするコンクリートの研究⁴⁾を行っており，骨材粒度を適切に調整することにより，高品質なコンクリートが製造できると考えている。

本研究は，天然骨材より骨材粒度を意図的に調整しやすい人工骨材（再生骨材、高炉スラグ細骨材）に着目し，再生骨材を用いた不連続粒度コンクリートの特性を検討した。実験では，まず，再生骨材の連続粒度と不連続粒度のコンクリート性状の違い，および付着ペースト量や粒度の異なる再生細骨材を用いた時のコンクリート物性を確認した。次に，再生粗骨材・再生

細骨材と再生粗骨材・高炉スラグ細骨材を用い，コンクリートのペースト膜厚を算定し，ペースト膜厚とスランプの関係を検討し，水セメント比や細骨材種類の違いによるコンクリートの強度特性と収縮特性を確認した。

2. 実験概要

2.1 再生骨材の製造

再生骨材は，解体建物(昭和 33 年築 解体時圧縮強度：平均 27.9N/mm^2)からコンクリート塊を入手し，ジョークラッシャ等を用いて破碎したあと，図-1 に示す再生骨材の製造フローにしたがって再生骨材を作製した。再生細骨材は，衝撃磨砕装置，集塵機によって，付着ペースト量や粒度の異なるものを 4 種類作製した。

2.2 使用材料および実験方法

(1) 再生粗骨材モルタル付着率

作製した再生粗骨材を分級した結果を図-2 に，10%希塩酸を使用した塩酸溶解法⁵⁾によりモルタル付着率を測定した結果を図-3 に示す。再生粗骨材の総モルタル付着率は 20%，全体の 58%を占める粒度 5~11mm のモルタル付着率は 25%，骨材径が大きくなるほどモルタルの付着量は少なくなり，粒度 15~20mm では 1%より少なくなった。

*1 (株)松村組 技術研究所 材料研究課 (正会員)

*2 (株)住若 (正会員)

*3 リサイクル協同組合

*4 財)日本建築総合試験所 材料部 中央試験室 (正会員)

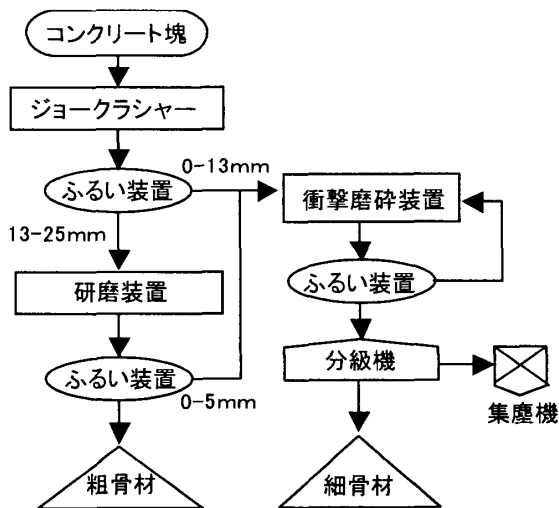


図-1 再生骨材の製造

表-1 粗骨材品質

	再生粗骨材		普通
	2005	1510	1510
吸水率(%)	2.9	2.21	1.03
絶乾密度(g/cm ³)	2.45	2.47	2.61
破碎値(%)	1.6	-	-
実積率(%)	63.7	63.0	58.9

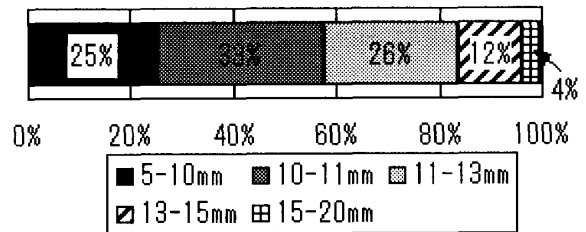


図-2 再生粗骨材の粒度構成

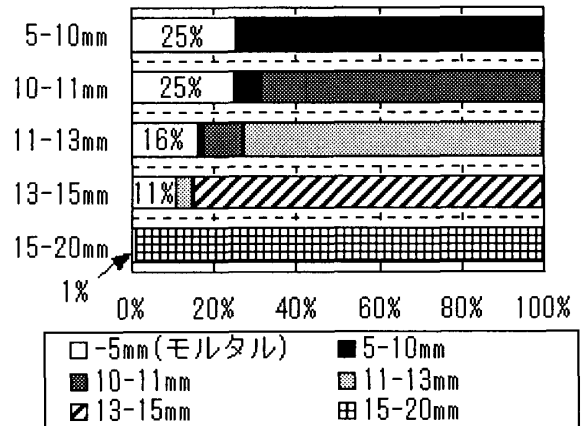


図-3 再生粗骨材のモルタル付着率

表-2 細骨材の粒度および品質

細骨材 種類	粒径別百分率 粒径 (mm)							比表面積 (cm ² /cm ³)	実積率 (%)	吸水率 (%)	絶乾密度 (g/cm ³)
	0.075 以下	0.075 ~0.15	0.15~ 0.3	0.3~ 0.6	0.6~ 1.2	1.2~ 2.5	2.5~5				
普通	1.0%	2.8%	22.4%	22.2%	25.4%	24.0%	2.0%	145.3	64.5	1.23	1.14
再生①	1.6%	3.6%	15.8%	28.4%	32.6%	17.4%	0.7%	151.6	65.9	5.45	2.33
再生②	1.3%	2.5%	11.5%	22.8%	33.4%	25.9%	2.5%	126.6	66.0	5.64	2.32
再生③	1.7%	4.5%	17.2%	26.9%	30.3%	18.6%	0.9%	158.8	66.1	5.01	2.36
再生④	2.3%	1.9%	7.4%	23.6%	33.9%	27.0%	4.0%	129.6	65.9	5.01	2.36
高炉スラグ	5.1%	6.7%	12.7%	27.9%	42.8%	4.7%	0.1%	218.9	58.2	0.88	2.69

(2) 使用材料

本実験で使用した粗骨材を表-1に、細骨材を表-2に示す。再生粗骨材 1510 は、図-2での粒度 2015, 1005 を取り除いたものである。

粗骨材 1510 と表-2に示す細骨材を組み合わせると骨材粒径 5~10mm が全くない不連続粒度となる。

再生細骨材①③④は、衝撃磨砕装置を2回通したものの、②③④は、集塵機の性能を上げたものの、④はふるい目を大きくしたものである。

普通粗骨材としては、姫路産碎石、普通細骨材としては、唐津産海砂を使用した。

骨材の比表面積 ϕ は、骨材群の粒子の形状を

球と見なし、各粒度の密度も一定であると仮定した。各粒度が、ふるいの公称径の相加平均値を直径とする球で構成されていると見なし⁶⁾、(1)式にて求めた。

$$\phi \text{ (cm}^2\text{/cm}^3\text{)} = 533.3 \times (3 \times P_1 + P_2 + P_3/2 + P_4/4 + P_5/8 + P_6/16.4 + P_7/33.3 + P_8/66.7 + P_9/111.1 + P_{10}/155.6 + P_{11}/200) \quad (1)$$

ここで、 P_1 :0.075mm以下のwt, P_2 :0.075mm-0.1mmのwt, $\dots$ P_7 :2.5mm-5mmのwt, P_8 :5mm-10mmのwt, P_9 :10mm-15mmのwt, P_{10} :15mm-20mmのwt, P_{11} :20mm-25mmのwt(wtは質量百分率を示す)

表－３ コンクリートの調合

実験	粗骨材	細骨材	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤
					C	W	S	G	
Ⅰ	普通1510	普通	38	39	434	165	670	1071	高性能 AE減水剤 C×0.9%
	再生1510	再生①					645	1036	AE減水剤 C×1.0%
		再生②					642		
		再生③					647		
	再生2005	再生④					647		
Ⅱ	再生1510	再生③	38	37	408	155	632	1096	高性能 AE減水剤 C×0.6%
			43		379	163			
			50		348	174			
		高炉 スラグ	38	36	408	155	675	1114	
			43		379	163			
			50		348	174			

セメントには、普通ポルトランドセメントを使用し、混和剤としては、ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤およびリグニンスルホン酸系 AE 減水剤を用いた。

(3) コンクリート実験方法

調合一覧を表－３に示す。実験Ⅰでは、水セメント比、細骨材率、単位水量を一定にし、再生骨材の連続粒度と不連続粒度のコンクリート性状の違い、付着ペースト量や粒度の異なる再生細骨材を用いた場合のコンクリートに及ぼす影響を検討した。実験Ⅱでは、再生粗骨材と再生細骨材、再生粗骨材と高炉スラグ細骨材を用い、混合実積率試験結果から、細骨材率を決定

し、総骨材体積を一定にして、調合を行い、コンクリートの骨材粒度とフレッシュ性状の関係、強度特性、収縮特性について検討した。

試験項目一覧を表－４に、コンクリートの試験結果を表－５に示す。

表－４ 試験項目一覧

試験項目	試験規格
混合実積率	JIS A 1104
スランプ	JIS A 1101
空気量	JIS A 1128
圧縮強度	JIS A 1108
静弾性係数	JIS A 1149
乾燥収縮	JIS A 1129-1993

表－５ コンクリート試験結果一覧

実験	粗骨材	細骨材	W/C (%)	s/a (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (℃)	混合実積率 (%)	28d 圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	26w 乾燥収縮 (×10 ⁻⁴)
I	普通1510	普通	38	39	18.5	1.9	21.0	-	64.7	37.3	4.891
	再生1510	再生①			12.5	2.5	21.8		52.1	33.9	7.418
		再生②			14.5	2.2	21.8		53.4	32.8	6.639
		再生③			16.0	2.3	22.0		54.9	33.9	7.036
	再生2005	再生④			10.0	2.0	21.9		55.1	35.0	7.564
II	再生1510	再生③	38	37	12.0	1.9	21.0	77.3	51.5	32.8	7.169
			43		21.0	3.4	21.0		46.7	30.8	7.450
			50		24.5	2.6	21.0		40.4	29.1	7.875
		高炉 スラグ	38	36	2.5	3.4	21.0	75.8	62.1	37.8	4.894
			43		7.0	3.9	21.0		56.1	35.6	5.863
			50		18.0	4.2	20.0		45.9	32.9	6.244

3. 再生骨材の物性がコンクリートに与える影響

再生粗骨材と再生細骨材の種類ごとのスランプを図-4に、圧縮強度を図-5に示す。また乾燥収縮率を図-6に示す。

再生粗骨材 2005+再生細骨材④の組み合わせたの連続粒度のコンクリートと、再生粗骨材 1510+再生細骨材③と組み合わせた不連続粒度のコンクリートと比較すると、不連続粒度のコンクリートの方が、スランプは大きく、乾燥収縮率は小さくなった。圧縮強度はほぼ同じ値となった。

一方、再生細骨材の違いによる影響は、吸水率が低い再生細骨材③は、スランプが大きく、圧縮強度も大きい。乾燥収縮は、吸水率が高いが、粗い粒度の再生細骨材②が小さい値となった。

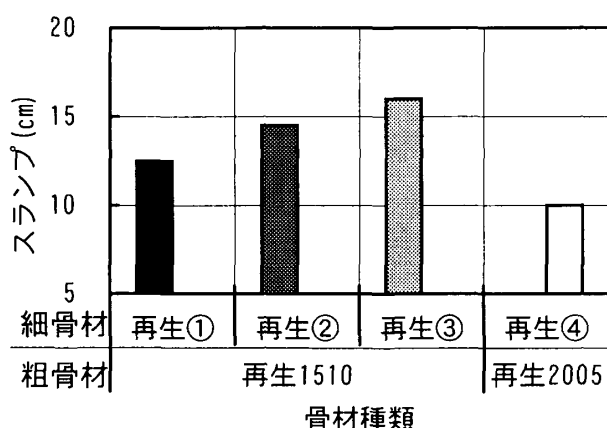


図-4 再生骨材種類とスランプ

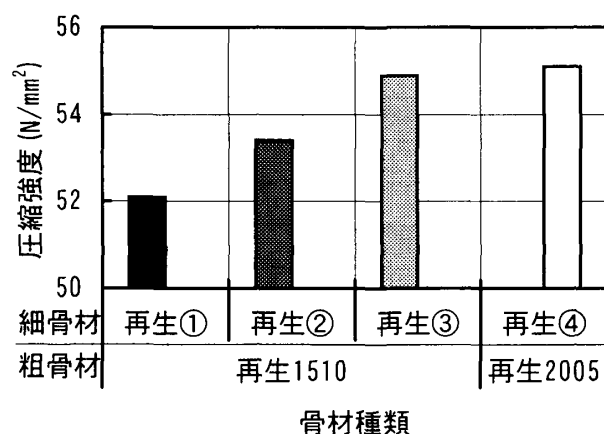


図-5 再生骨材種類と圧縮強度

4. 細骨材の種類がコンクリートに与える影響

4.1 ペースト膜厚とスランプ

ワーカブルなコンクリートのペースト（水+セメント+空気）は、骨材粒子間隙（以下、空隙）を埋めるものと骨材粒子の廻りに均等に被膜しているものから構成される⁷⁾。また、骨材と空隙の割合は、混合実積率にて表わされる。

細粗骨材を混合して充填したときの空隙が、最小となる細骨材率を見出すため、再生粗骨材と再生細骨材、再生粗骨材と高炉スラグ細骨材を用い、細骨材率と混合実積率の関係を求め、図-7に示す結果となった。

ペースト量一定の場合、混合実積率が最大となる細骨材率で空隙を埋めるペースト量が最小となり、骨材粒子の廻りに均等に被膜するペースト膜厚 t が最大となると考えられる。

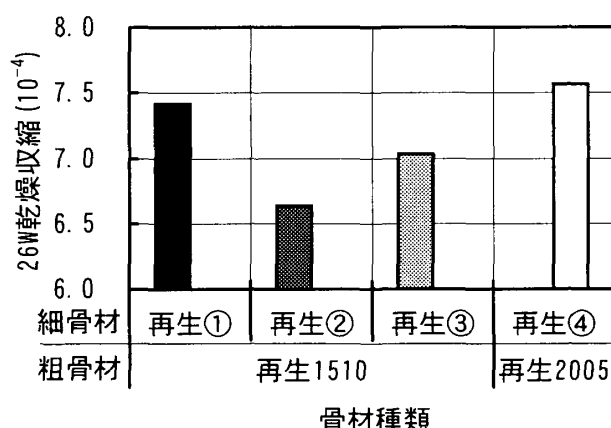


図-6 再生骨材種類と乾燥収縮率

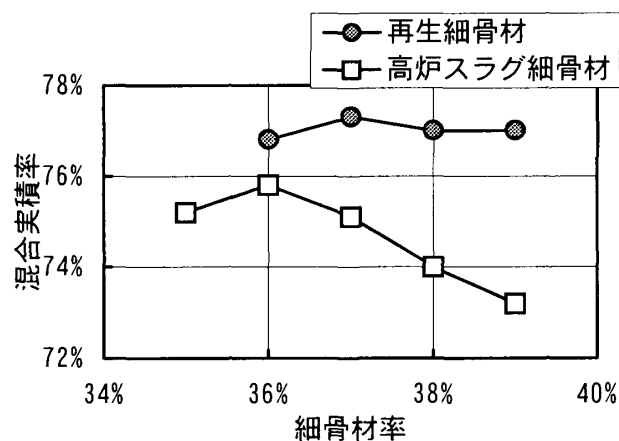


図-7 細骨材率と混合実積率

ペースト膜厚は、ペーストで空隙を充填してもなお余る余剰ペーストを骨材表面積で除したものとし、(2)式と仮定して求めた。

$$t = (P - (1-D) \times (S+G)) / F \times 1000 \quad (2)$$

ここで、 $F = \phi f \cdot S + \phi c \cdot G$

t : ペースト膜厚(mm), P : コンクリート 1m^3 中のペースト量(m^3), S, G : 細骨材, 粗骨材のコンクリート 1m^3 中の体積(m^3), F : 細粗混合骨材の表面積(m^2/m^3), D : 細粗混合実積率(%), $\phi f, \phi c$: 細骨材, 粗骨材の比表面積

本実験では、混合実積率の最大となった細骨材率、再生粗骨材と再生細骨材の組み合わせでは 37%, 再生粗骨材と高炉スラグ細骨材では 36%を固定し、骨材量とペースト量を一定にし、水セメント比 38, 43, 50%の3種類について実験を行った。

図-8にペースト膜厚とスランプの関係を示す。同一水セメント比では、ペースト膜厚が厚くなるほど、同じ厚みのペースト膜厚では、水セメント比が大きくなるほど、スランプが大きくなった。

ペースト量を一定としたため、水セメント比が高くなるにつれて単位水量が多くなり、ペーストの粘性に大きな差が生じ、スランプに影響したと考えられる。

4.2 コンクリートの強度特性

セメント水比と圧縮強度の関係を図-9に、圧縮強度と静弾性係数の関係を図-10に示す。

再生細骨材を用いたものは、水セメント比 50%で $40\text{N}/\text{mm}^2$ を上回る圧縮強度となり、高炉スラグ細骨材を用いたものは、再生細骨材を用いたものの 1.14~1.2 倍の圧縮強度となった。

高炉スラグ細骨材を用いた水セメント比 38%のものは、砕石粗骨材と海砂を用いたものとほぼ同じ圧縮強度となった。

図-10 中に'99RC 規準式⁸⁾による近似曲線も示した。本実験では、'99RC 規準式のように高強度域において静弾性係数が低くなることなく、静弾性係数と圧縮強度が比例関係となった。

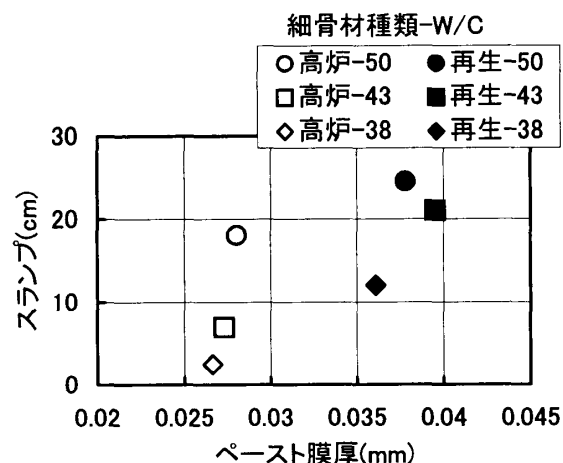


図-8 ペースト膜厚とスランプ

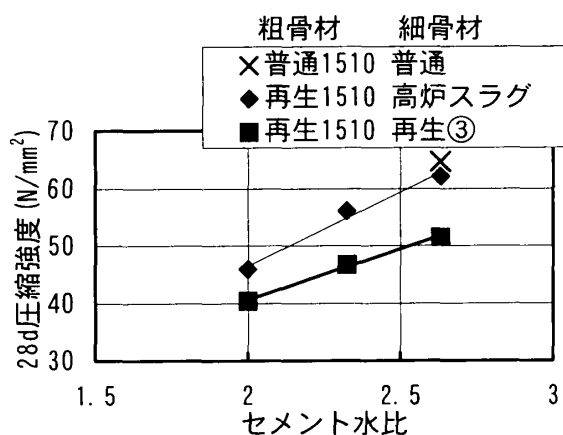


図-9 セメント水比と圧縮強度

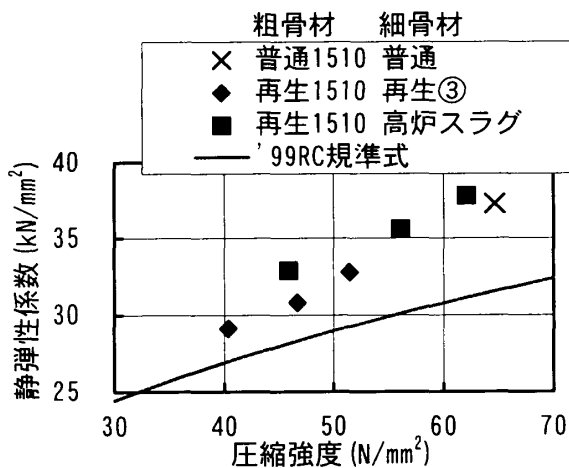


図-10 圧縮強度と静弾性係数

4.3 コンクリートの収縮特性

材齢と 26W 乾燥収縮率の関係を図-11に示す。

本実験では、水セメント比が大きいものほど、単位水量が多い調合としているので、水セメント比が大きくなるほど乾燥収縮率は大きくなった。

しかし、水セメント比の違いより、再生細骨材と細かい粒度の高炉スラグ細骨材という骨材種類および粒度の差の方が乾燥収縮率に及ぼす影響は顕著であり、材齢における乾燥収縮率を比較すると、高炉スラグ細骨材を用いたものは、再生細骨材を用いたものの66~76%となり、

水セメント比 38%では、再生粗骨材と普通粗骨材 1510 と普通細骨材を用いたものとほぼ同じ乾燥収縮率となった。

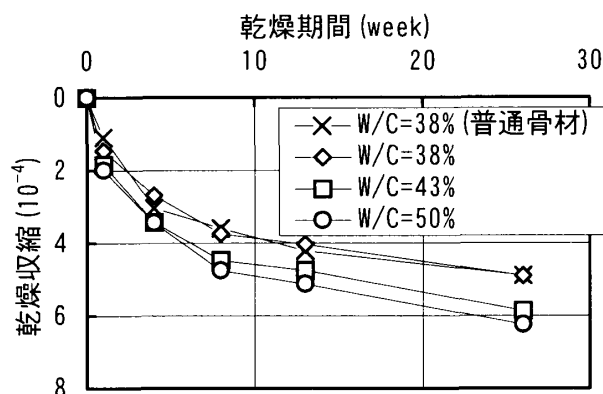
5. まとめ

本実験で得られた結果を以下に示す。

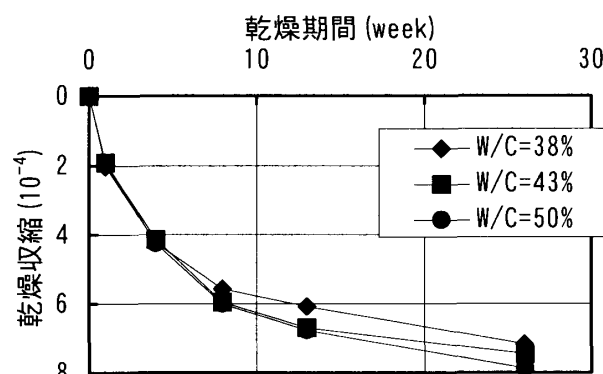
- (1) 再生骨材の連続粒度を不連続粒度にすることにより、スランプが大きくなる。
- (2) 再生骨材の不連続粒度のコンクリートにおいて、同一水セメント比では、ペースト膜厚が厚くなるほど、同ペースト膜厚では、水セメント比が大きくなるほど、スランプが大きくなる。
- (3) 細かい粒度の高炉スラグ細骨材を用いた再生粗骨材使用コンクリートは、再生細骨材を用いたものの1.14~1.2倍の圧縮強度となり、乾燥収縮は、66~76%となる。
- (4) 粗骨材 1510 を使用した本実験のコンクリートの静弾性係数は、圧縮強度が高い範囲でも高い値となる。

参考文献

- 1) 石倉 武, 最首貞典, 助清満昭, 友澤史紀: 高品質再生骨材製造技術の開発, コンクリート工学, Vol.37, No.7, pp.16-23, 1999.7
- 2) 柳橋邦生, 米澤敏男, 神山行男, 井上孝之: 高品質再生骨材の研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.1, pp.205-210, 1999.6
- 3) 今本啓一, 大橋潤一, 西尾篤志, 田村博: 減圧工法による再生骨材コンクリートの品質向上, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.1, pp.175-180, 1999.6



(a) 再生粗骨材1510+高炉スラグ細骨材の場合



(b) 再生粗骨材1510+再生細骨材③の場合

図-11 材齢と乾燥収縮率

- 4) 柏木隆男, 寺嶋明彦, 大橋正治: 骨材粒度がコンクリートの諸物性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.2, pp.865-870, 2001.6
- 5) 嵩英雄, 清水憲一, 工藤貴寛: 再生骨材に及ぼす付着モルタルの影響に関する実験研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A, pp689-690, 1998.9
- 6) 村田二郎, 岩崎訓明, 児玉和巳: コンクリートの科学と技術, 2.1 骨材の粒度特性, 山海堂, pp55-72
- 7) 後藤知以, 松原浩司, 相原秀幸: 骨材粒子表面を被覆するペースト厚さによるコンクリートのスランプ表示, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A, pp115-116, 1978.9
- 8) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準同解説-許容応力度設計法-, 1999

謝辞

本実験を行うにあたり、大阪市立大学工学部建築学科木内龍彦講師にご指導いただき、謝意を表します。