

論文 実機で製造した再生骨材コンクリートの強度および耐久性状

山崎 順二^{*1}・立松 和彦^{*2}

要旨：再生骨材コンクリートの実用化を目指し、レディミクストコンクリート工場の実機練りミキサを用いて製造した計5種類の再生骨材コンクリートを用いて、強度および耐久性に関する検討を行った。使用した再生骨材は、吸水率2.9%および5.3%の再生粗骨材、吸水率5.6%の再生細骨材である。実験の結果、実機で製造した再生骨材コンクリートの強度発現は、水セメント比50～30%の範囲で30～48N/mm²であった。乾燥収縮率は砕石コンクリートと同等以下、促進中性化深さは全て25mm以下であり、高い耐久性を有するコンクリートであった。水銀圧入法による細孔構造は再生細骨材を用いた場合に変化が認められた。

キーワード：再生骨材、実機、強度、乾燥収縮、中性化深さ、簡易透気速度、総細孔量

1. はじめに

近年まで、再生骨材コンクリートの有効利用を目指して数多くの調査・研究が行われ、さまざまな品質の再生骨材を用いたコンクリートの性能や問題点がほぼ明らかになってきている。これらの研究結果に基づき、再生骨材コンクリートを有効に利用してゆくことは、今後の我が国における循環型社会の形成、地球環境保護、資源の有効利用などの観点から極めて重要なことである。

再生骨材コンクリートの実用化のためには、これまで多数行われている室内試験練りでの実験結果に加えて、工場の実機練りミキサで製造したコンクリートの性能を評価しておくことも必要であると考え。そこで本報では、レディミクストコンクリート工場の実機練りミキサで製造した5種類の再生骨材コンクリートを用いて、強度および耐久性状に関する検討を行った結果について述べる。

2. 実験概要

2.1 使用材料および調査

実機試験練りに使用した材料とそれらの品質を表-1に示す。骨材は、再生細・粗骨材に加

表-1 実験に使用した材料と品質

	種 類 ・ 産 地	密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
セメント	普通ポルトランドセメント(宇部三菱製)	3.16	—
細骨材	NS : 山砂(枚方市穂谷産)	2.55	2.15
	RS : 再生細骨材(京星製)	2.32	5.64
粗骨材	NG : 砕石(大阪府高槻産)	2.64	0.64
	RG1 : 再生粗骨材1種(京星製)	2.55	2.95
	RG2 : 再生粗骨材2種(竹石産業製)	2.46	5.31

(骨材は表乾密度)

え、比較用として普通骨材(山砂および砕石)を使用した。再生骨材はいずれも、実稼働している再生骨材製造工場において不特定多数のコンクリート塊から製造したものである。なお再生粗骨材(RG1)および再生細骨材(RS)は、湿式の比重選別¹⁾により作製されたものであり、RG1は旧建設省暫定基準(案)²⁾の1種相当、RSは2種相当の品質を有するものである。

コンクリートの調査は、再生粗骨材の品質による影響、再生細骨材による影響および水セメント比による影響を評価するために、表-2に示す水セメント比(3水準)と骨材(4水準)の組合せで、合計7種類を計画した。再生骨材コンクリートの調査については、同一W/Cの普通骨材

*1 (株)浅沼組 技術研究所 建築研究グループ 工修 (正会員)

*2 (株)浅沼組 技術研究所 建築研究グループ 工博 (正会員)

表－２ 供試体の種類とコンクリートの調合概要

供試体 記号	W/C (%)	s/a (%)	細骨材	粗骨材	単位量 (kg/m ³)				骨材等価 吸水率(%) ³⁾
					W	C	S	G	
50NR2	50.0	41.5	山砂	再生2種	177	354	705	958	4.00
50NR1	50.0	45.8	山砂	再生1種	185	370	762	903	2.58
50RR1	50.0	44.7	再生2種	再生1種	177	354	691	939	4.13
40NR1	40.0	46.0	山砂	再生1種	180	450	742	871	2.58
30NR1	30.0	44.6	山砂	再生1種	175	583	677	841	2.59
50NN	50.0	47.4	山砂	碎石	180	360	799	918	1.36
30NN	30.0	49.8	山砂	碎石	175	545	784	805	1.34

コンクリートに対して単位水量の低減や単位粗骨材量の増大を考慮して計画した。

2.2 コンクリートの製造および試験項目

工場実機での練混ぜ量は1調合につき2.5m³とした。再生骨材は普通骨材と同様に湿潤状態に調整されたものを、表面水率を補正して使用した。実機実験を行った工場は日常的に再生骨材コンクリートを製造出荷しているため、製造性には全く問題がなく、普通骨材を用いたコンクリートと全く同じ手法で製造できた。

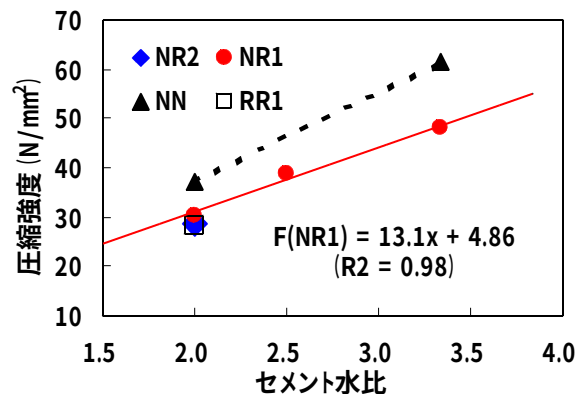
フレッシュコンクリートの目標値は、スランプ15cm、空気量4.5%とし、荷卸し時に試験を行って分離などの不具合が無いことを確認した後に、各種試験のための供試体を作製した。

試験項目は、圧縮強度、静弾性係数、長さ変化率、促進中性化試験、簡易透気試験、細孔径分布とした。簡易透気試験はドリル削孔による方法⁴⁾を採用し、400×400×225mmの供試体の400×400mmの面に削孔して測定した。細孔径分布は、一辺が3～5mmの立方体を10×10×40cm供試体の断面中央部から取り出したモルタル部分を用いて作製し、半径1nm～70,000nmまでの範囲の細孔を水銀圧入法により測定した。これら以外の試験はそれぞれ該当するJIS規格に準じて行った。

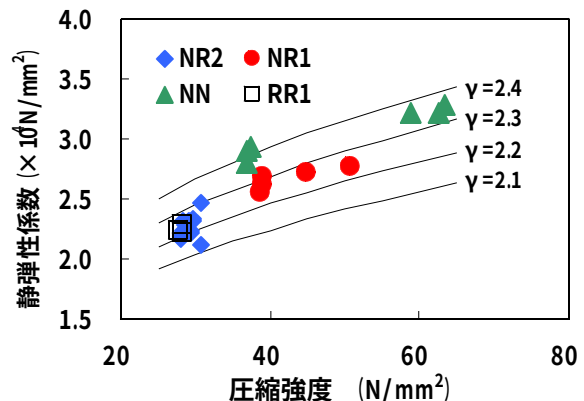
3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度および静弾性係数

材齢28日におけるセメント水比と圧縮強度の関係を図－1に示す。図中の実線は、山砂(NS)



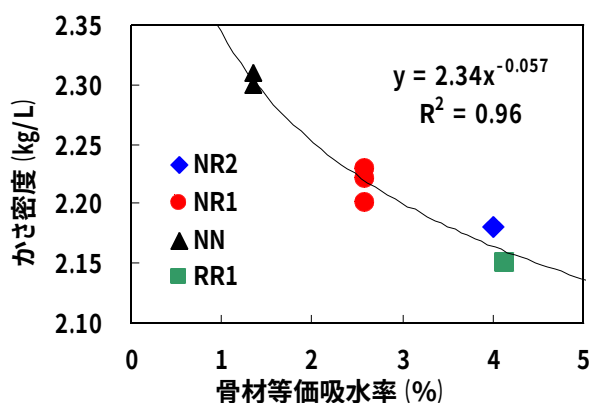
図－1 セメント水比と圧縮強度



図－2 静弾性係数と圧縮強度

と再生粗骨材1種(RG1)を用いたW/Cの異なる供試体(NR1)の回帰線である。普通コンクリートの場合や既往の実験結果⁵⁾と同様に、セメント水比と圧縮強度の間には高い相関が得られた。

また、W/C50% (C/W=2.0) において、山砂(NS)と再生粗骨材2種(RG2)を用いたNR2、再生細骨材(RS)とRG1を用いたRR1は、NR1よりも圧縮強度が若干低くなる程度であり、ほぼ同等の強度発現性であると考えられる。これより、本実



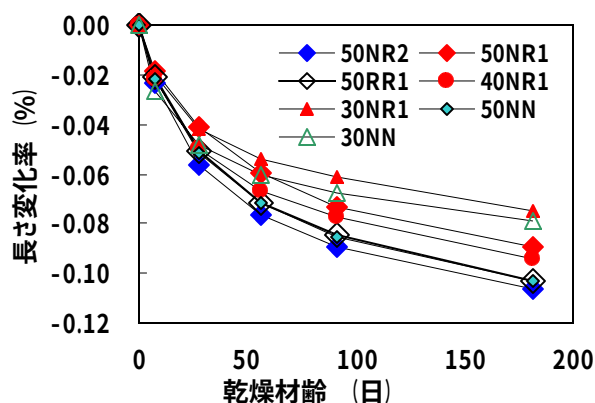
図－３ かさ密度と骨材等価吸水率

験の結果からは、再生粗骨材の品質の違いおよび細骨材の違いによる強度発現性の差は、顕著には認められなかった。

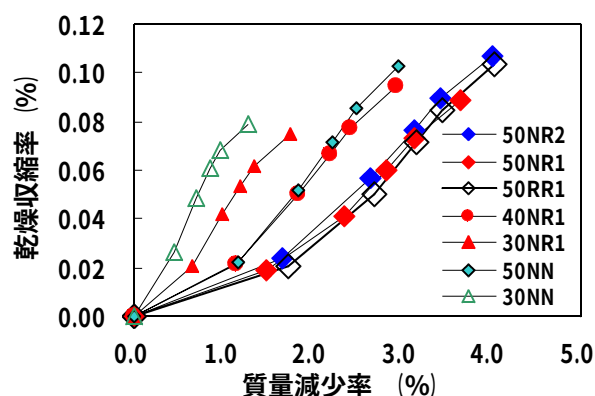
一方、NSと砕石(NG)を用いた比較用の普通コンクリート(NN)に比べ、NR1の圧縮強度は約7～12N/mm²低く、W/Cが小さくなるほどこの傾向が顕著となった。これより、再生骨材コンクリートの場合は、吸水率3%程度のRGを用いた場合でも、付着モルタルの影響によってNGよりも強度発現性が低くなることが認められた。

図－２に、材齢28日圧縮強度試験と同時に測定した静弾性係数と圧縮強度の関係を示す。図中の曲線は、RC規準式により計算で求めたものである。再生骨材コンクリートの静弾性係数は、骨材密度が小さく付着モルタルが存在するために、NNよりも小さくなり、NR1、NR2およびRR1とも、RC規準式の $\gamma=2.3\sim2.1$ の間に散布した。NR2およびRR1は、粗骨材の密度が小さく吸水率が大きいため静弾性係数が小さくなるが、吸水率3%程度(RG1)の高品質再生粗骨材を用いたコンクリートであれば、 $\gamma=2.2\text{t/m}^3$ としてRC規準式により計算すれば、計算値が実測値を上回ることはいないと考えられる。

図－３に、かさ密度と骨材等価吸水率³⁾の関係を示す。骨材等価吸水率とは、異なる骨材を用いたコンクリートの骨材吸水率を等価に評価するための指標³⁾である。両者の間には骨材の種類に関係なく高い相関が認められ、骨材等価吸水率の増大に伴ってコンクリートのかさ密度



図－４ 長さ変化率測定結果

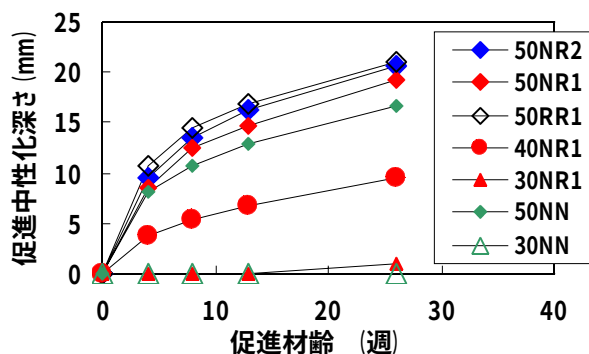


図－５ 乾燥収縮率と質量変化率

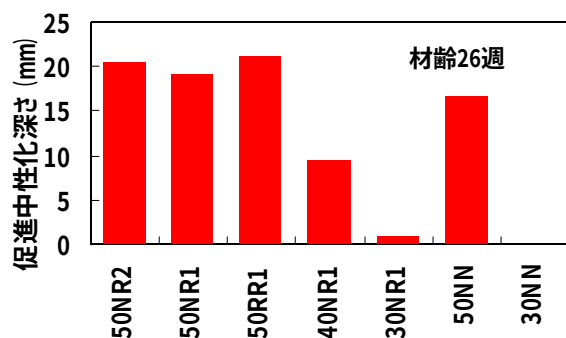
が小さくなることが認められた。

3.2 長さ変化率

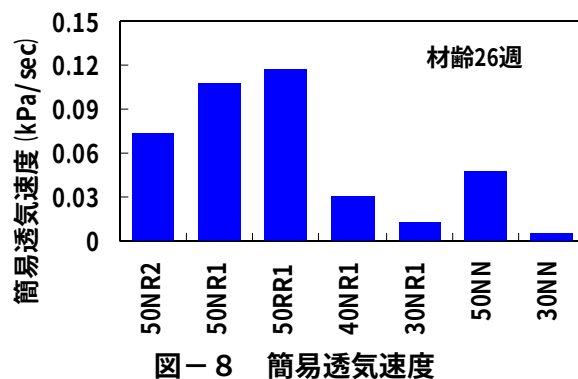
長さ変化率の測定結果を図－４に、乾燥収縮率と質量減少率の関係を図－５に示す。再生骨材コンクリートは、RG1、RG2またはRSを用いることによって骨材等価吸水率がNNよりも大きくなるために、NNと比べて質量減少率がW/C50%では約1%、W/C30%では約0.5%大きくなった。しかし、NR1の乾燥収縮率は、同一W/CのNNよりもやや小さくなった。また、骨材等価吸水率がほぼ同等の50NR2と50RR1が同程度の収縮性状を示した。これより、実機で製造した場合においても、骨材等価吸水率が4%程度までの再生骨材の組み合わせであれば、単位粗骨材量の増大や単位水量の低減などの調合上の配慮⁵⁾を施すことによって、乾燥収縮率を普通骨材コンクリート(NN)と同程度以下に低減できることが分かった。



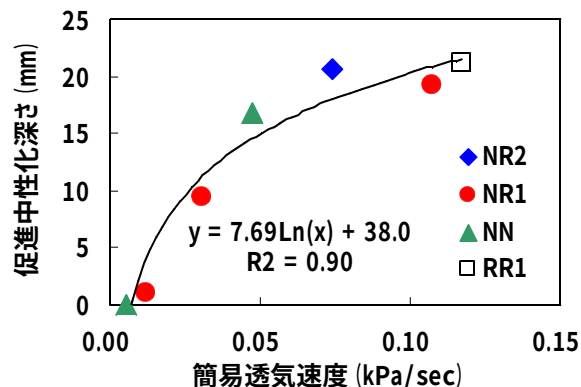
図－6 促進中性化深さ試験結果



図－7 促進材齢26週での中性化深さ



図－8 簡易透気速度



図－9 促進中性化深さと簡易透気速度

3.3 中性化深さ

促進材齢26週までの促進中性化深さの経時変化を図－6に、促進材齢26週での供試体ごとの中性化深さを図－7に示す。促進中性化の試験条件はJIS規格に準じ、温度20℃、相対湿度60%、CO₂濃度5%として行った。

促進材齢26週での中性化深さは、W/C50%においてNN, NR1, NR2, RR1の順に大きくなり、骨材等価吸水率が大きいほど中性化の進行が速くなった。また普通骨材を用いたコンクリートでは、W/Cが40%以下になると中性化はほとんど進行しなくなると考えられるが、RG1を用いた40NR1では促進材齢26週の時点で中性化深さが約10mmであり、普通コンクリートよりも中性化深さがやや大きいと推察される。この原因は、再生粗骨材を使用することによって、モルタルマトリックス中に付着モルタルやモルタル塊などのポーラスな部分が存在することになり、その部分で二酸化炭素の浸透が加速されるためと考えられる。しかし、本実験の範囲内の全てのコンクリートは、促進材齢26週において

中性化深さが25mm以下であるので、日本建築学会高耐久性指針⁶⁾に示された中性化の目標品質を満足していると判断できる。

3.4 簡易透気速度

ドリル削孔を用いた簡易透気試験⁴⁾を行って得られた簡易透気速度を図－8に示す。本実験における簡易透気速度は文献⁴⁾に準じて求めたが、圧力の単位のみmmHgからkPaに変更した。なお、高周波容量式水分計により測定した試験時点での供試体の含水率は3.2～4.3%であった。

簡易透気速度は、中性化深さと同様に骨材等価吸水率に比例して大きくなった。NR1およびNNにおいては、W/Cが小さいほど簡易透気速度が遅くなり、W/Cの低減によって細孔構造が緻密化していること、逆に、RR1の簡易透気速度が最も大きいことから、RSの使用によってモルタル部分がポーラスになったものと推察される。文献⁴⁾によると、簡易透気速度が0.31kPa/sec以下であれば、JASS5の耐久性区分が「長期」と判定できる。本実験において実機で製造した再生骨材コンクリートは、簡易透気

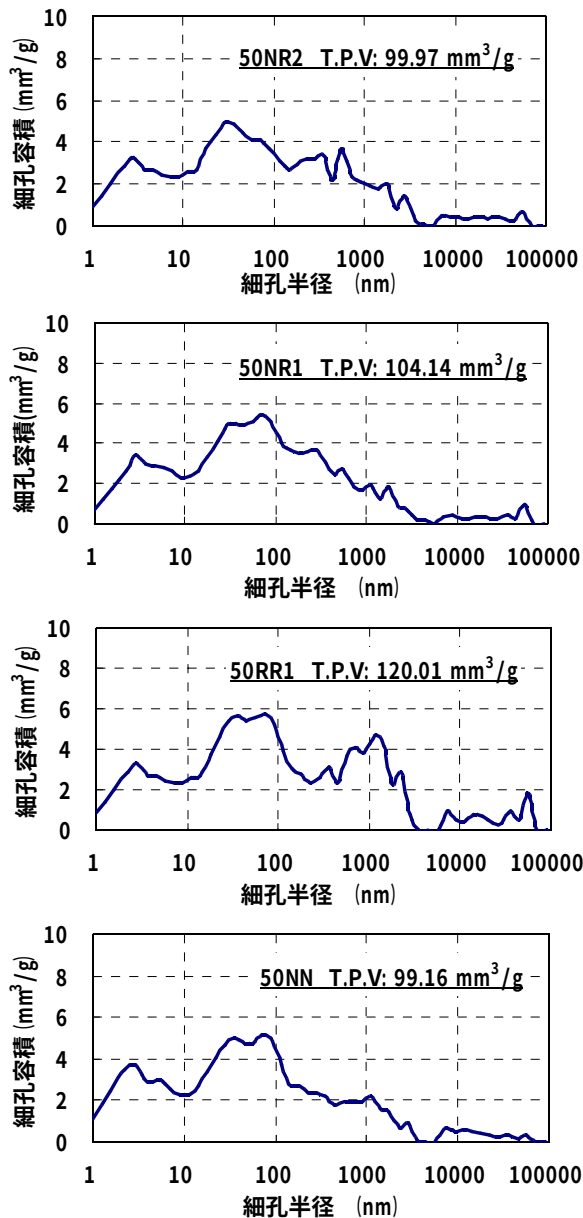


図-10 細孔径分布測定結果 (W/C 50%)

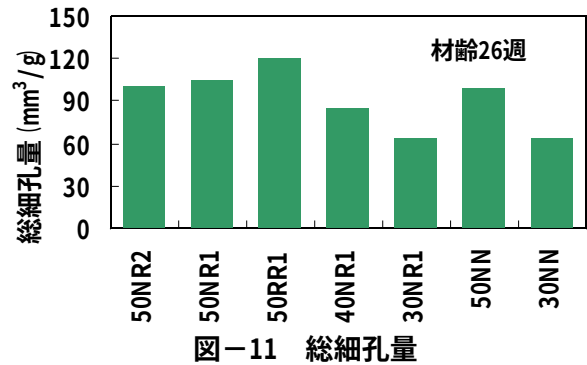


図-11 総細孔量

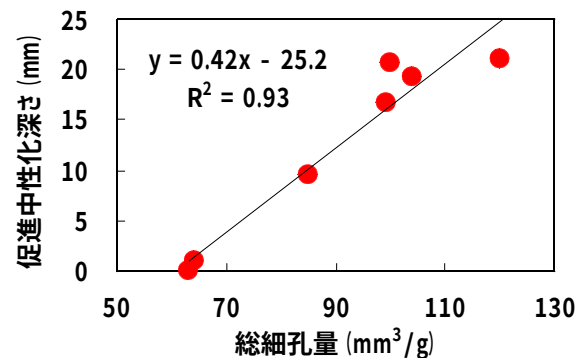


図-12 促進中性化深さと総細孔量

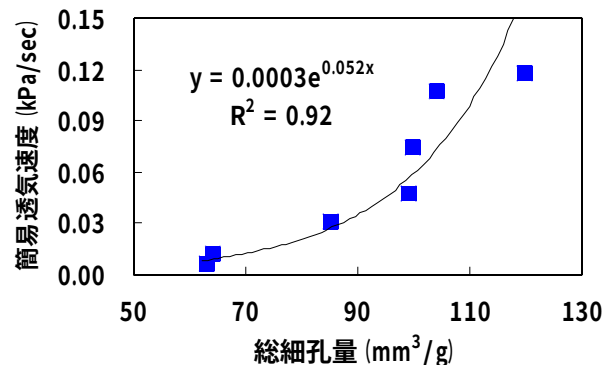


図-13 簡易透気速度と総細孔量

試験の結果から判断すると、全てJASS5の「長期」の区分に相当するものであった。

また、図-8に示した簡易透気速度は図-7の中性化深さとほぼ同様の傾向であり、両者には何らかの関連性があると考えられる。そこで、促進中性化深さとドリル削孔により求めた簡易透気速度の関係を図-9に示す。中性化深さと簡易透気速度の間には、骨材の組合せに関わらず相関係数 $R=0.94$ の高い相関が認められた。

3.5 細孔径分布

細孔径分布測定結果のうち、W/C50%のものを図-10に、細孔半径1nm～70,000nmの範囲に

おける各供試体の総細孔量を図-11に示す。

再生骨材コンクリートの細孔構造は、50NN、50NR1および50NR2においてほぼ同等の細孔径分布であった。しかし、50RR1の細孔径分布は、RSの使用によって1,000nm付近の細孔容積が増大し、これに伴い総細孔量(T.P.V)も増大していることが分かる。細孔径分布の測定は、各供試体のモルタル部分のみを採取して試料を作製するため、粗骨材の品質の違いによる影響を評価することは困難と思われるが、再生細骨材の使用によってモルタル部分の細孔構造が顕著に変化していることが認められた。

また、図-11に示した各供試体の総細孔量は、図-7に示した中性化深さ、図-8に示した簡易透気速度と同様の傾向であり、総細孔量の増大に伴って中性化深さや簡易透気速度が大きくなることが推察される。

そこで、促進中性化深さと総細孔量の関係を図-12に、図-13に簡易透気速度と総細孔量の関係を示す。W/Cが小さくなるほど細孔組織が緻密になり、促進中性化深さや簡易透気速度が小さくなっていることが分かる。両図から、総細孔量との間には相関係数 $R=0.96$ 以上の高い相関が認められた。これより、再生骨材コンクリートの中性化抵抗性や透気性には、コンクリートの水セメント比や含水量に加えて、モルタルマトリックスの総細孔量や細孔構造も密接に関連していると考えられる。

4. まとめ

レディーミクストコンクリート工場の実機練りミキサで製造した再生骨材コンクリートを用いて、強度および耐久性に関する検討を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 実機で製造した再生粗骨材コンクリート(NR1)の圧縮強度は、W/C50～30%の範囲で $30\sim48\text{N/mm}^2$ であり、セメント水比と高い相関が得られた。
- (2) 碎石を用いたコンクリート(NN)との強度発現の差は、 $7\sim12\text{N/mm}^2$ であり、低水セメント比ほどその差が大きくなった。
- (3) 本実験の範囲内では、再生骨材の品質の違いによる強度発現の低下は少なかった。
- (4) 乾燥収縮率は、調合上の配慮によってNNと同程度以下にすることが可能である。
- (5) 再生骨材の品質によって中性化抵抗性は低下するが、W/C50%までの再生骨材コンクリートの中性化深さは、促進材齢26週において全て25mm以下となった。
- (6) 総細孔量、促進中性化深さ、簡易透気速度の間には、密接な関連性が認められた。

- (7) 再生細骨材の使用によって半径1,000nm付近の細孔量が増加し、総細孔量も増大した。

以上、実機で製造した再生骨材コンクリートを用いて、強度および耐久性に関する検討を行った。再生骨材コンクリートはアルカリ骨材反応問題が懸念されるが、所要の対策を講じれば十分に実用可能であると考ええる。今後も、再生骨材コンクリートの実用化の一助となるべく実験を行いデータを収集したい。

[謝辞]

供試体作製および各種の実験を行うにあたり、(株)京星、足利工業大学工学部建築学科今本先生、日本建築総合試験所をはじめ、HiRAC研究会会員の方々にご協力頂きましたことを、ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 伊藤信孝，柴谷啓一，立松和彦，山崎順二：比重選別による高品質再生骨材の製造および再生骨材コンクリートの物性，日本建築学会近畿支部研究報告集，pp.1-4.1999.7
- 2) 建設省（財）国土開発研究センター：再生コンクリートの利用技術の開発 平成8年度報告書，p.197-205，1997.9
- 3) 新井，中村，梶田，阿部：再生細骨材コンクリートの強度および変形性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，pp.1081-1086，1997
- 4) 笠井芳夫，松井勇，湯浅昇，野中英：ドリル削孔を用いた構造体コンクリートの簡易透気試験方法 その1 簡易透気試験方法(案)の提案，日本建築学会学術講演梗概集（中国）pp.699-700 (1350)，1999
- 5) 山崎順二，立松和彦：骨材品質が異なる再生骨材コンクリートの乾燥収縮ひび割れ性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22，No.2，pp.1159-1164，2000
- 6) 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，p.7，1991