

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

Strength and Durability of Recycled Aggregate Concrete Produced at Ready-Mixed Concrete Plant

山崎 順二* 立松 和彦*

要 旨

再生骨材コンクリートの実用化を目指し、レディー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5種類の再生骨材コンクリートについて、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%の再生粗骨材と、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であり、普通骨材を用いたコンクリートよりもやや小さくなった。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。

キーワード：再生骨材コンクリート／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

再生骨材コンクリートについては、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いくことは、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。しかし、再生骨材コンクリートを実用化するためには、これまでに多数行われてきた室内試験練り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が必要である。

そこで本報では、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 使用材料および調合

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、再生細骨材・再生粗骨材に加え、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。なお、再生骨材はいずれも、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

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 (K社製)	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 (K社製)	2.55	2.95
	RG2 : 再生粗骨材 2 種 (T社製)	2.46	5.31

(骨材は表乾密度)

ト塊から製造したものである。

コンクリートの調合は、再生骨材コンクリートの性能に及ぼす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合については、再生粗骨材は砕石よりも粒形が良く実積率が大きいため、同一W/Cの普通骨材コンクリートに対して単位粗骨材量の増大や単位水量の低減に配慮して計画した。

2.2 コンクリートの製造および試験項目

実機試験では、練混ぜ量を1調合につき2.5m³とした。再生骨材は普通骨材と同じよう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、製造性には問題がなく、普通骨材を用いた

*建築研究グループ

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

コンクリートと全く同じ手法で製造することができた。

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。

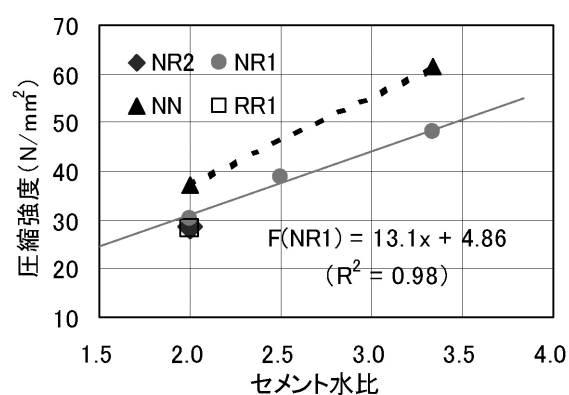
試験項目は、圧縮強度、静弾性係数、長さ変化率、促進中性化試験、簡易透気試験および細孔径分布測定とした。簡易透気試験はドリル削孔による方法⁴⁾を採用し、400×400×225mmの供試体の400×400mmの面に削孔して測定した。細孔径分布の測定は、10×10×40cm供試体の断面中央部から取り出した一辺が3～5mmのモルタル立方体を用いて試料を作製し、半径1nm～70,000nmまでの範囲の細孔を水銀圧入法により測定した。その他の試験はそれぞれ該当するJIS規格に準じて行った。

3. 実験結果および考察

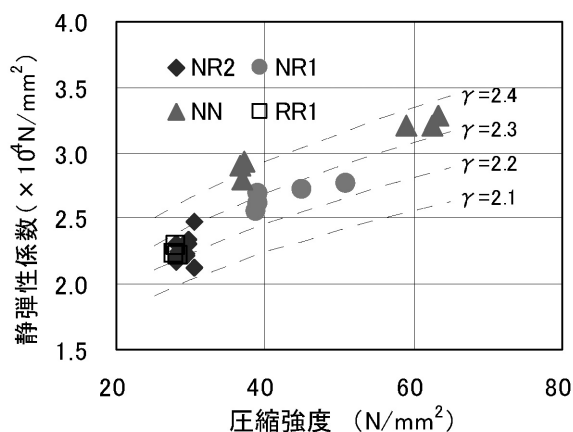
3.1 圧縮強度および静弾性係数

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）と再生粗骨材１種（RG1）を用いたW/Cの異なるNR1シリーズ供試体の回帰線である。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シリーズ、再生細骨材（RS）とRG1を用いたRR1は、NR1シリーズ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が得られている。これより、本実験の範囲内では、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異は、顕著には認められなかった。



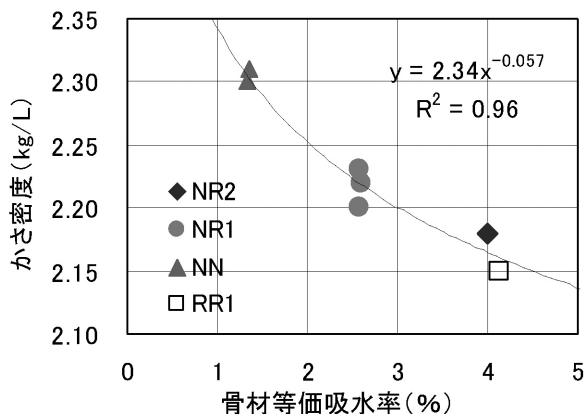
図－１ セメント水比と圧縮強度



図－２ 静弾性係数と圧縮強度

一方、山砂（NS）と碎石（NG）を用いた比較用の普通コンクリート（NNシリーズ）に比べて、NR1シリーズの圧縮強度は約7～12N/mm²低く、W/Cが小さくなるほど圧縮強度の低下が大きくなった。これより、吸水率3%程度の再生粗骨材を用いたコンクリートにおいても、粗骨材表面の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、静弾性係数と圧縮強度の関係を示す。静弾性係数は材齢28日圧縮強度試験と同時に測定した。図中



図－3 かさ密度と骨材等価吸水率

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、粗骨材表面に存在する付着モルタルによって骨材密度が小さくなることから、NNシリーズよりも小さくなる。NR1シリーズ、NR2およびRR1とも、単位体積重量を $\gamma = 2.3 \sim 2.1 \text{ t/m}^3$ とした場合のRC規準式による曲線の間に散布した。これより、NR2およびRR1は、粗骨材密度が小さく吸水率が大きいことなどから静弾性係数が小さくなるが、吸水率3%程度の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⁾であり、下式によって求められる値である。

$$Q_e = \{(Q_s \times S_v) + (Q_g \times G_v)\} / (S_v + G_v)$$

ここに、 Q_e ：骨材等価吸水率 (%)

Q_s ：細骨材吸水率 (%)

Q_g ：粗骨材吸水率 (%)

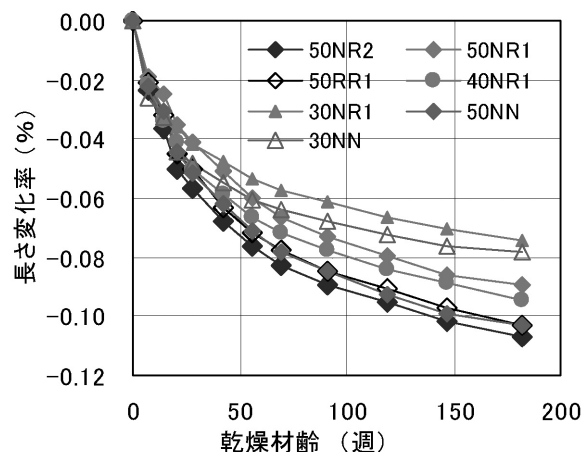
S_v ：細骨材の絶対容積 (l/m^3)

G_v ：粗骨材の絶対容積 (l/m^3)

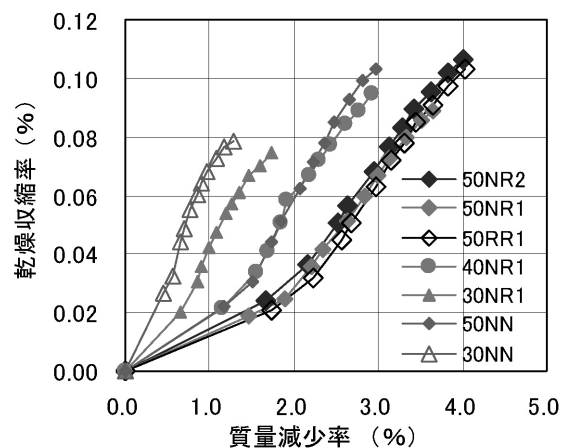
両者の間には骨材の種類に無関係に高い相関が認められ、骨材等価吸水率の増大に伴ってコンクリートのかさ密度が小さくなることが認められた。

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、再生粗骨材の付着モルタルや再生細骨材に含まれるセメント微粉の影響で、RG1、RG2またはRSを用いること



図－4 長さ変化率（材齢26週）



図－5 乾燥収縮率と質量減少率の関係

によって骨材等価吸水率がNNシリーズよりも大きくなるため、質量減少率がNNシリーズと比較してW/C50%では約1%、W/C30%では約0.5%大きくなった。しかし、乾燥収縮率は、同一W/CにおいてはNR1シリーズの方がNNシリーズ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である50NR2と50RR1では、同程度の乾燥収縮性状を示した。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合せであれば、単位粗骨材量の増大や単位水量の低減など、調合上の配慮³⁾を施すことによって、乾燥収縮率を普通コンクリートと同等以下に低減できることが分かった。

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 A 1152に準じ、温度20℃、相対湿度60%、CO₂濃度5%とした。

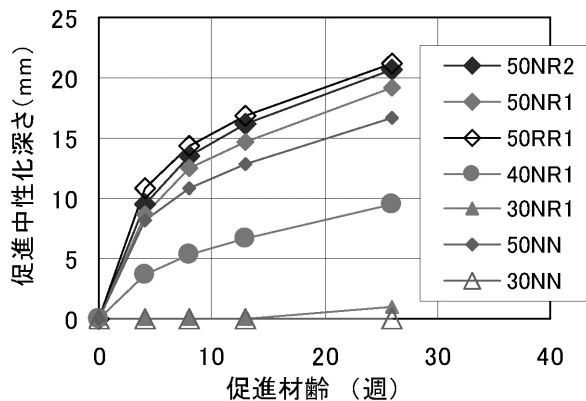


図-6 促進中性化深さ試験結果

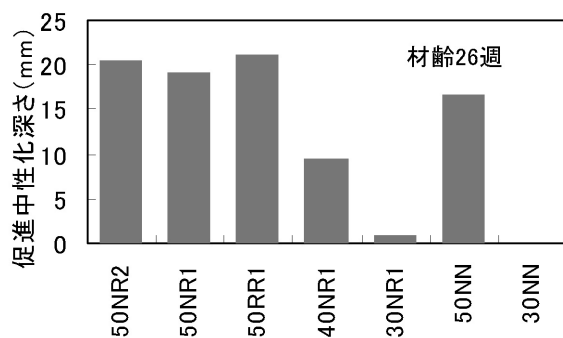


図-7 促進中性化深さ試験結果

促進材齢26週での中性化深さは、W/C50%においてRR1が最も大きく、次いで、NR2、NR1、NNの順となり、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。また一般に、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、普通コンクリートのW/C40%のもの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いくらか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以下であり、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。

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、含水率が5%程度以上にまで

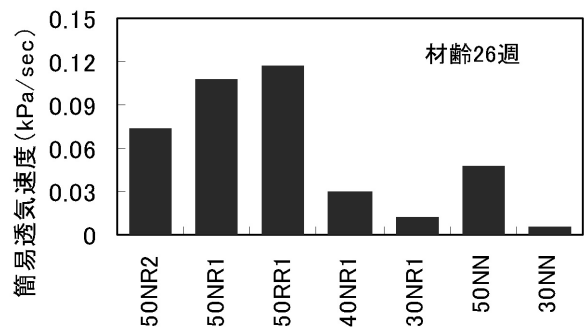


図-8 簡易透気速度

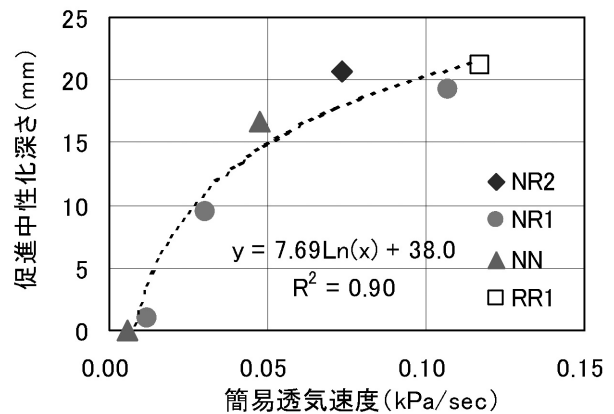


図-9 促進中性化深さと簡易透気速度

高くなると、コンクリートの透気性の評価に影響を与えることになるが、今回の試験時点での供試体の含水率を高周波容量式水分計により測定した結果は、3.2～4.3%であり、含水率の大小が簡易透気性に与える影響はほぼ無いと考えられる。

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シリーズおよびNNシリーズにおいては、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RSに含まれる微少なモルタル塊やセメント微粉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。

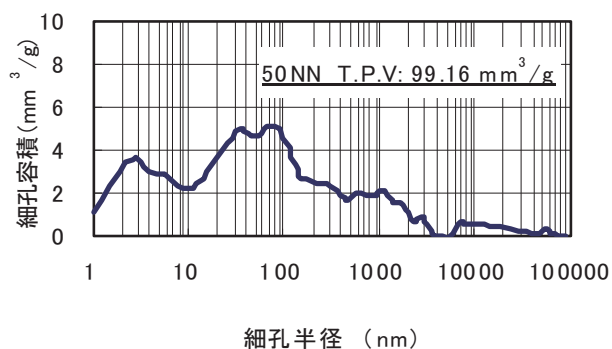
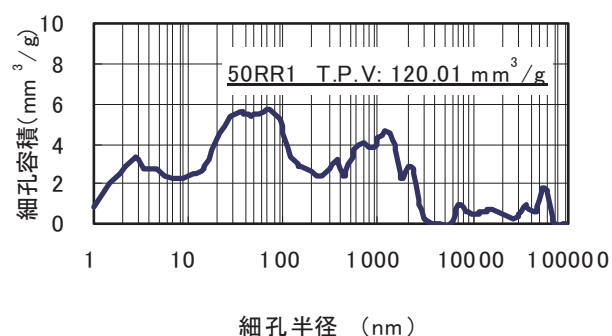
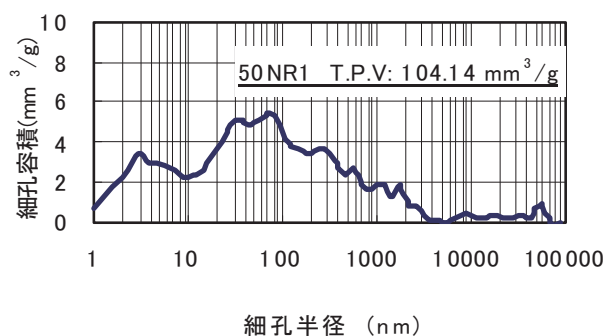
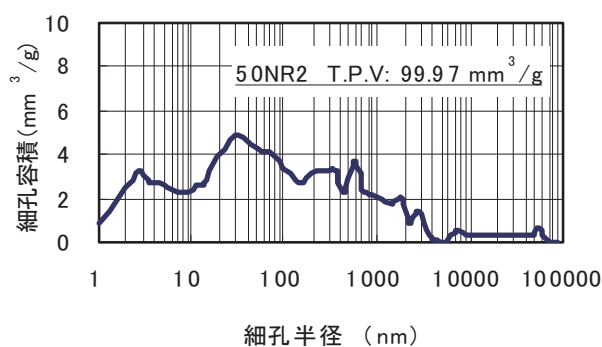


図-10 細孔径分布測定結果 (W/C50%)

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。

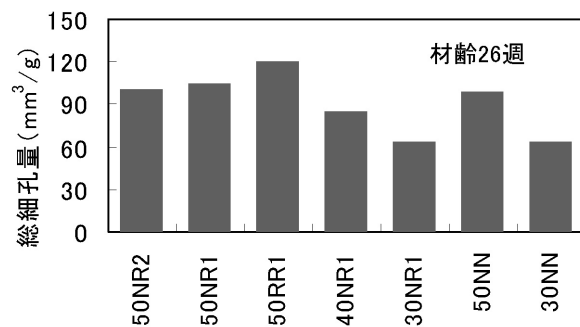


図-11 総細孔量

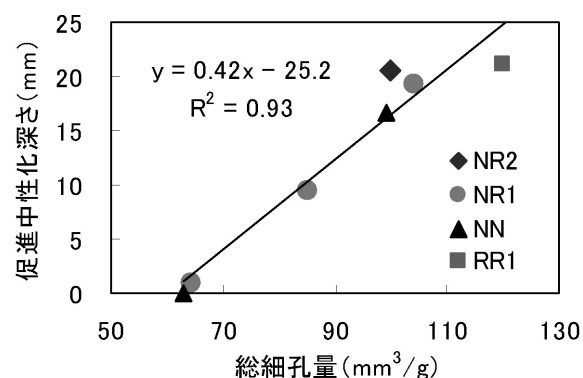


図-12 促進中性化深さと総細孔量

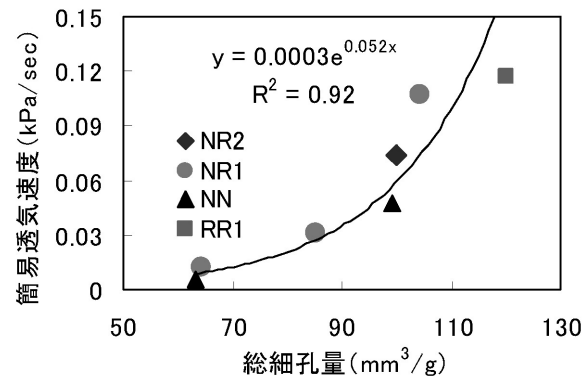


図-13 簡易透気速度と総細孔量

再生骨材コンクリートの細孔構造は、50NN、50NR1および50NR2においては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、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やや困難と思われるが、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、および図-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が小さくなるほど図-11に示した総細孔量が減少し細孔組織が緻密になるのに伴い、図-12および図-13に示した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、促進中性化深さと総細孔量、また、簡易透気速度と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、強度および耐久性状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シリーズ）の圧縮強度は、W/C50～30%の範囲で30～48N/mm²であり、セメント水比と高い相関が認められる。
- (2) 砕石を用いたコンクリート（NNシリーズ）とNR1シリーズとの強度発現の差は7～12N/mm²であり、水セメント比が小さくなるほどその差が大きくなる。
- (3) 本実験の範囲内では、再生骨材の品質（吸水率）の違いによる強度発現の低下は少ない。
- (4) 乾燥収縮率は、単位粗骨材かさ容積の増大および単位水量の低減によってNNシリーズのコンクリートと同等以下にすることができる。
- (5) 再生骨材の品質によって中性化抵抗性は低下するが、本実験に用いた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以下となり、高耐久性のコンクリートであるといえる。
- (6) 総細孔量、促進中性化深さ、簡易透気速度の間には、それぞれ密接な関連性が認められる。
- (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、それに伴い総細孔量も増大する。

以上、再生骨材コンクリートの実用化については、アルカリ骨材反応（ASR）に関する問題が懸念されるが、ASRに対して所要の対策を講じることによって十分に実用化が可能であると考えられる。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啓一講師（工博）、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、pp.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