

再生細骨材の使用がコンクリートの性状に及ぼす影響とその原因について

麓 隆行¹・山田 優²

¹正会員 修(工) 大阪市立大学大学院助手 工学研究科 (〒558-8585 大阪府大阪市住吉区杉本3-3-138)

E-mail : fumoto@civil.eng.osaka-cu.ac.jp

²正会員 工博 大阪市立大学大学院教授 工学研究科 (〒558-8585 大阪府大阪市住吉区杉本3-3-138)

本研究では、再生細骨材を用いたコンクリートのフレッシュ性状および硬化後の性状が、普通細骨材使用の場合と異なる原因について検討した。その結果、再生細骨材を用いた場合、付着したセメント水和物の影響で、同一粒度の普通細骨材に比べて細粒分の体積割合が大きいため、その表面積が増加し、スランプが小さくなること、また硬化後の強度、中性化深さおよびセメントの単位体積あたりの長さ変化率は、単位セメント量と骨材の吸水量を含む総水量との比(C/TW)と相関関係があることがわかった。骨材の表面積とスランプの関係は、余剰ペースト理論から説明でき、また骨材に吸収されていた水がペースト部に移動することは、硬化後のペースト中の毛細管空隙分布から推測できた。

Key Words : recycled fine aggregate, concrete, slump, strength, carbonation, drying shrinkage

1. はじめに

コンクリート塊を破碎して製造される再生骨材には、セメント水和物が付着するため、普通骨材に比べて吸水率が高く、粒子強度が低い。このような再生骨材を用いた場合、同配合の普通コンクリートに比べ、スランプが減少し、強度が低下し、中性化深さおよび長さ変化率は増加する¹⁾。再生粗骨材の場合、付着したセメント水和物を取り除く高品質化処理は容易で、それを行えば、普通粗骨材と同様に使用することが可能となる^{2),3),4)}。しかし、再生細骨材の粒径は小さく、セメント水和物の付着量も多いため、十分な高品質化処理が難しく、コンクリートへの適用が難しいとされている。

西日本では、自然破壊などの理由から天然の細骨材の供給が難しく⁵⁾、碎砂などの人工細骨材の増産のほか、再生細骨材を使用する技術の確立が急務である。コンクリート塊のリサイクルの必要性は建設リサイクル法の施行により増大し、リサイクル率は

高まっているが、その用途のほとんどが路盤材である。それゆえ、再生細骨材の品質が普通細骨材に比べて低いとしても、それをコンクリートに使用する方法を検討する必要がある。

本研究では、再生細骨材を用いたコンクリートのフレッシュ性状および硬化後の性状が、普通細骨材使用の場合と異なる原因を解明して、その対応策を検討することを目的に、以下の実験を行った。まず、再生細骨材の物理的性質を、軽量細骨材を含めた普通細骨材の性質と比較した。次に、再生細骨材を使用したフレッシュコンクリートの流動性をスランプ試験により評価し、その結果を余剰ペースト理論により考察した。また、AE減水剤の添加効果についても考察した。さらに、コンクリートのW/Cを25~60%まで変化させて、硬化後の強度、中性化および乾燥収縮性状を試験した。そして、硬化後のコンクリートの細孔径分布を調べ、再生細骨材中の水の動きを考察した。

2. 再生細骨材と普通細骨材の物理的性質の比較

(1) 比較に用いた細骨材

再生細骨材の使用がコンクリートに及ぼす影響を検討するにあたり、まず再生細骨材と普通細骨材の物理的性質を比較した。比較に用いた細骨材の種類を表-1に示す。普通細骨材として川砂(NR), 砕砂(NC), 中国産川砂(NRC)および石灰石碎砂(NL), また膨張貞岩系非造粒型人工軽量細骨材(LS)の5種類を用意した。次に再生細骨材として、昭和7年建設(解体時平均圧縮強度28.2N/mm²), 昭和32年建設(同32.9N/mm²)および昭和33年建設(同25.9N/mm²)の建築物の解体現場から入手したコンクリート塊をジョークラッシャおよびコーンクラッシャを用いて粒径20mm以下に破碎後, 0.15~2.5mmの粒径範囲の粒子を回収して得た再生細骨材RF1, RF2およびRF3と, 再生骨材製造プラントでジョークラッシャ, インパクトクラッシャーおよび改良型ロッドミルにより処理した再生細骨材(RFP)の計4種類を用意した。

(2) 試験項目と試験方法

細骨材の物理的性質として、密度、吸水率、粗粒率、実積率および粒形判定実積率を、JIS A 1109, JIS A 1102, JIS A 1104 および JIS A 5005 に準拠して試験した。また、水銀圧入法により細骨材中の直径0.0055~7μmの範囲の細孔径分布を測定した。さらに、再生細骨材の場合、各粒径により粒子に付着するセメント水和物の質量割合(以下、セメント水和物付着率)が異なるため、粒子の密度が異なる。そのため、従来の全骨材質量に占める各粒径の質量割合で示した質量基準の粒径分布と、骨材の全体積に占める各粒径の体積割合で示した体積基準の粒径分布は、異なると考えられる。そこで、RF1 および RF2 について、各粒径のセメント水和物付着率を求

め、それに基づき体積基準での粒径分布および比表面積を求めた。

各粒径のセメント水和物付着率の測定方法は、以下のとおりである。まず、再生細骨材を JIS A 1102 に準じてふるい分け、粒径ごとに 5%濃度の塩酸水溶液に浸漬した。その後、反応が停止するまでの約1ヶ月間、1日置きに溶液を交換し、細骨材全体および各粒径でのセメント水和物付着率 a および a_r を、浸漬前の質量と浸漬処理後の質量との差から求めた。ここで、 r はふるい目の呼び寸法(mm)を表す。次に、JIS A 1202 により塩酸処理後の細骨材粒子の密度を測定し、その平均値を原細骨材の絶乾密度 ρ_{os} とした。以上の値を用い、原細骨材および付着したセメント水和物の絶乾密度を粒径に関係なく一定と仮定し、式(1)~(4)から各粒径の密度 ρ を求めた。

$$\rho = (1 - V_s) \rho_p + V_s \rho_{os} \quad (1)$$

$$(1 - a/100) \rho = V_s \rho_{os} \quad (2)$$

$$\rho_r = (1 - V_{sr}) \rho_p + V_{sr} \rho_{os} \quad (3)$$

$$(1 - a_r/100) \rho_r = V_{sr} \rho_{os} \quad (4)$$

ここで、 V_s : 再生骨材全体に占める原骨材の体積割合、 a : 再生骨材全質量に対するセメント水和物付着率(%)、 ρ : 再生骨材全体の絶乾密度(g/cm³)、 V_{sr} : 呼び寸法 r mm のふるいにとどまる粒子に占める原骨材の体積割合、 ρ_{os} : 原骨材の絶乾密度(g/cm³)、 ρ_p : 付着したセメント水和物の絶乾密度(g/cm³)、 ρ_r : 呼び寸法 r mm のふるいにとどまる粒子の絶乾密度(g/cm³)、 a_r : 呼び寸法 r mm のふるいにとどまる粒子の質量に対するセメント水和物付着率(%)である。

以上から求めた各粒径の密度を用いて、体積基準の粒径分布を求めた。

次に、その粒径分布を用い、粒子形状を考慮した比表面積 S_s (cm²/cm³)を求めた。算出式として、直径

表-1 実験に用いた細骨材の種類と物理的性質

| 分類 | 記号 | 絶乾密度 (g/cm ³) | 吸水率 (%) | 実積率 (%) | 粒形判定 実積率(%) | 粗粒率 | 比表面積 S_s (cm ² /cm ³) | セメント 水和物 付着率(%) | 備考 |
|-----------|-----|------------------------------|------------|------------|----------------|------|---|-----------------------|-------------|
| 普通 細骨材 | NR | 2.52 | 2.74 | 66.3 | 60.7 | 2.88 | 131.8 | — | 揖斐川産川砂 |
| | NC | 2.59 | 2.07 | 64.2 | 58.0 | 2.85 | 146.6 | — | 高槻産碎砂 |
| | NRC | 2.55 | 1.65 | 62.7 | 59.7 | 2.61 | — | — | 中国福建省産川砂 |
| | NL | 2.64 | 1.24 | 63.5 | 55.3 | 2.57 | — | — | 伊吹町産石灰石碎砂 |
| | LS | 1.74 | 9.83 | 63.4 | — | 2.50 | — | — | 膨張貞岩系軽量細骨材 |
| 再生 細骨材 | RF1 | 1.99 | 11.39 | 65.6 | 59.2 | 2.61 | 163.5 | 27.0 | 昭和 32 年の建築物 |
| | RF2 | 2.17 | 7.51 | 64.4 | 57.3 | 2.24 | 224.3 | 31.5 | 昭和 33 年の建築物 |
| | RF3 | 2.13 | 8.97 | 67.8 | 55.8 | 2.32 | — | — | 昭和 7 年の建築物 |
| | RFP | 2.18 | 8.10 | 67.3 | 56.8 | 3.09 | — | — | 再生骨材プラント製造 |

ただし、 S_s は式(1)および式(2)から算出した比表面積

0.074~0.15mmの球体の比表面積を $558 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$ と仮定して比表面積を求めるPowersの考え方⁶⁾にもとづいた式(5), および沼田ら⁷⁾が実験により求めた角張り係数である式(6)を用いた。なお、角張り係数 $1/\phi$ は各粒径で一定とした。

$$S_s = 558 \sum \left(\frac{1}{\phi} \frac{1}{2^r} \frac{P_r}{100} \right) \quad (5)$$

$$\frac{1}{\phi} = 1 + 4.0 \left(0.64 - \frac{G}{100} \right) \quad (6)$$

ここで, i : 呼び寸法 $r \text{ mm}$ のふるいにとどまる粒子の単一粒度での粗粒率, P_r : 呼び寸法 $r \text{ mm}$ のふるいにとどまる粒子が骨材に占める体積百分率(%), $1/\phi$: 角張り係数, G : 粒形判定実積率(%)である。

(3) 試験結果と考察

表-1に各細骨材の物理的性質の試験結果を示す。図-1は吸水率と絶乾密度との関係である。既往の研究⁸⁾から、普通細骨材および再生細骨材の絶乾密度と吸水率との関係は、ほぼ直線となることがわかっている。本研究でも、普通細骨材および再生細骨材にかかわらず、吸水率と絶乾密度との間には、直線関係がみられた。ただし、軽量細骨材では、独立空隙を多く含み、岩質も異なるため、同じ吸水率で

も密度が低く、他の細骨材とは異なる関係を示した。

次に、水銀圧入法により測定した直径 $0.0055 \sim 7 \mu\text{m}$ の細孔径分布から求めた空隙率と吸水率から算出した吸水体積率を比較した。その結果、図-2のとおり、普通細骨材では、両者はほぼ等しいか、吸水体積率のほうが若干大きくなる傾向にある。軽量細骨材では、細孔径分布から求めた空隙率のほうが大きい。人工軽量細骨材の空隙率は約 $20 \sim 40 \text{ vol.\%}$ といわれ⁹⁾、細孔径分布から求めた空隙率とほぼ一致する。既往の研究¹⁰⁾では、軽量骨材では、直径 $10 \mu\text{m}$ 以下の空隙が主に存在し、24時間での吸水量は骨材空隙中の $20 \sim 30 \text{ vol.\%}$ 程度であるとの報告がある。本研究での表乾状態でも、水が十分に軽量細骨材中の空隙を満たしていない。これに対し、再生細骨材の試験結果では、吸水率から求めた吸水体積率の方が大きくなる傾向がみられた。硬化したセメントペースト中には、直径 $3 \text{ nm} \sim 30 \mu\text{m}$ 程度の毛細管空隙や直径 $30 \mu\text{m} \sim 1 \text{ mm}$ 程度のエントレンドエアなどが存在する¹¹⁾。再生細骨材の空隙は主に付着するセメント水和物に由来するが、表乾状態では、直径 $7 \mu\text{m}$ 以上の空隙にも水が吸収されていると考えられる。

次に、RF1およびRF2における、粒径ごとのセメント水和物付着率と絶乾密度を図-3に示す。再生細骨材では、小さい粒径の粒子ほどセメント水和物付着率が高く、絶乾密度は低い。このため、図-4

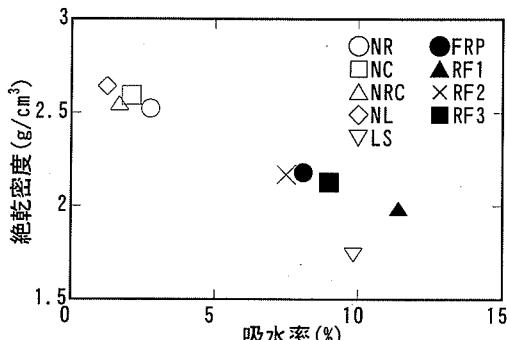


図-1 細骨材の絶乾密度と吸水率との関係

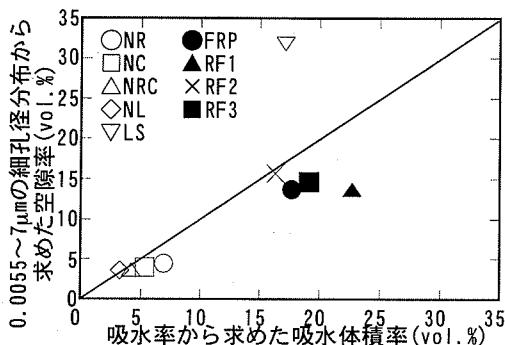


図-2 細骨材の空隙率と吸水体積率との関係

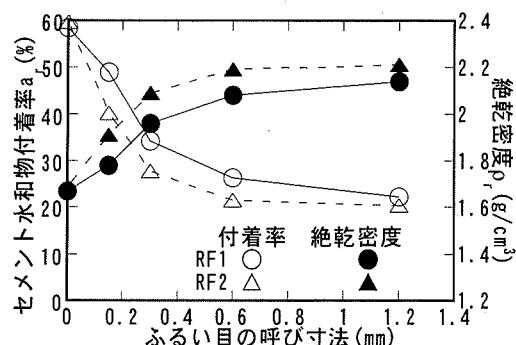


図-3 各粒径のセメント水和物付着率および絶乾密度

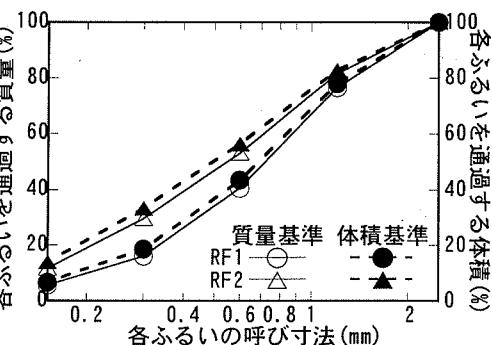


図-4 評価基準の違いによる粒径分布の変化

表-2 質量基準で同じ粒径分布に調整した細骨材の物理的性質

| 記号 | 絶乾密度 (g/cm ³) | 吸水率 (%) | 粗粒率 | 比表面積 S _s (cm ² /cm ³) |
|------|------------------------------|------------|------|--|
| NR' | 2.55 | 2.46 | 2.70 | 141.3 |
| NC' | 2.62 | 1.77 | 2.69 | 156.2 |
| RF1' | 2.00 | 12.4 | 2.68 | 168.7 |
| RF2' | 2.10 | 9.77 | 2.69 | 164.4 |

NR': NR の粒径範囲 0-2.5mm の粒子を使用

表-3 コンクリートの基本配合(体積で表示)

| W/C (%) | s/a (%) | 単位量(l/m ³) | | | |
|------------|------------|------------------------|------|------|------|
| | | W | C | S | G |
| 50 | 42.3 | 165 | 105 | 300 | 410 |
| | | 175 | 111 | 294 | 400 |
| | | 185 | 117 | 287 | 391 |
| | | 195 | 124 | 280 | 382 |
| | | 200* | 127* | 276* | 377* |
| | | 205* | 130* | 273* | 372* |

*の配合は、 NC, RF1, RF2 を用いた場合のみに使用

のとおり、体積基準で表した場合、再生細骨材の細粒分の含有割合が大きくなつた。そこで、 NR, NC, RF1 および RF2 を質量基準で NR と同じ粒径分布に調整した NC', RF1' および RF2' を作製し、その S_s を求めた。その結果、表-2 に示すとおり、 NC' では、 NR' に比べて粒子形状が扁平であるために S_s が増加した。また、再生細骨材では、形状だけでなく体積基準での細粒分の割合が大きくなるため、普通細骨材に比べ、 S_s が 15~20% 程度増加した。

3. 再生細骨材の使用がプレーンコンクリートのフレッシュ性状に及ぼす影響

(1) 実験概要

再生細骨材の使用によりコンクリートの流動性が低下する原因を検討するため、まずプレーンコンクリートを用いた実験を行つた。細骨材として、表-1 に示した普通細骨材 NR, NC および再生細骨材 RF1, RF2 を用いた。また、セメントおよび粗骨材に、普通ポルトランドセメント(密度 3.15g/cm³) および高櫻産硬質砂岩碎石(絶乾密度 2.66g/cm³、吸水率 1.07% および実積率 60.3%) を用いた。なお、コンクリートの作製には、24 時間水浸後、自然乾燥により表面水率 4% 程度の状態とした再生細骨材を用いた。

ここでは、骨材とセメントペーストとの容積比がコンクリートの流動性に及ぼす影響を考察するため、表-3 に示すとおり、 W/C=50%, s/a=42.3% に固定し、

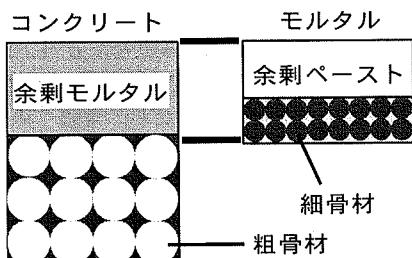


図-5 余剰ペースト量算出方法の概念図

単位水量を 4~6 水準とした配合を用いた。細骨材の種類を換える場合は体積置換とした。また、 NC, RF1 および RF2 を用いた場合は、単位水量 200 および 205kg/m³ の配合も検討した。また、 NR と各再生細骨材を質量比 1:1 に混合した場合も検討した。以下、骨材 A と B を混合した場合を A+B と表す。可傾式ミキサを使用し、セメント、細骨材および粗骨材を 30 秒間攪拌後、練混ぜ水を投入し、3 分間練り混ぜてコンクリートを作製した。練混ぜ直後にスランプおよび空気量を測定した。また、練混ぜ後 30 および 60 分経過したときに、スコップにて 10 秒程度練り直し、スランプの経時変化も検討した。

(2) 余剰ペースト理論

流動性の考察には、余剰ペースト理論⁶⁾を用いた。これは、コンクリートをセメントペーストと骨材の 2 相材料と仮定し、骨材が形成する空隙体積以上にセメントペーストを加えた際に、コンクリートが流動しはじめるとする考え方である。その流動性に関するセメントペーストを余剰ペースト、その骨材単位表面積あたりの容積を余剰ペースト膜厚と呼び、この膜厚とスランプとの相関は高い⁷⁾。

本研究では、過去の文献¹³⁾を参考に、図-5 に示した概念により余剰ペースト量を求めた。まず、粗骨材が形成する空隙を満たした残りのモルタルを余剰モルタルとした。次に、この余剰モルタル中の細骨材が形成する空隙を満たした残りのペーストを余剰ペーストとした。なお、各骨材が形成する空隙量の算出には、実積率を用いた。また、骨材の全表面積を前述の比表面積 S_s と単位骨材容積との積から求め、余剰ペースト量を細・粗骨材の全表面積で除して余剰ペースト膜厚 T(μm) を求めた。

(3) 実験結果および考察

空気量試験の結果を、図-6 に示す。再生細骨材を用いたコンクリートの空気量は、細粒分の体積割合が大きいため、普通細骨材に比べて 0.5% 程度増加する傾向にあった。しかし、単位水量や骨材の種

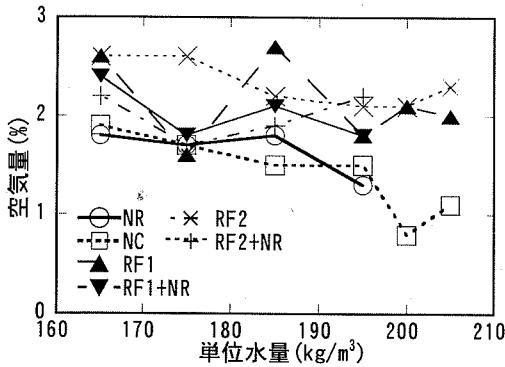


図-6 単位水量と空気量との関係

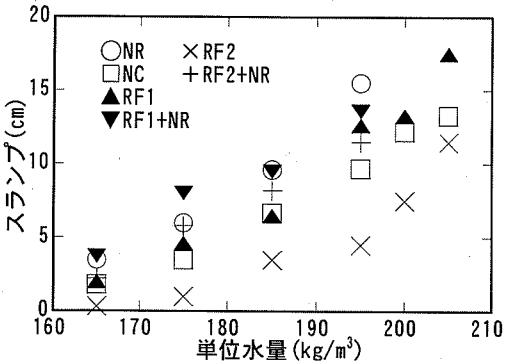


図-7 単位水量とスランプとの関係

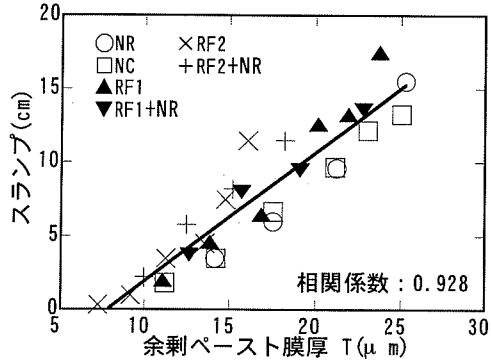


図-8 余剰ペースト膜厚 T とスランプとの関係

類による影響は小さく、 $2\pm1\%$ 程度とほぼ一定であり、流動性への影響は小さいと考えられる。

スランプ試験の結果では、図-7に示すとおり、各細骨材で単位水量の増加に比例して、スランプは増加した。骨材の種類に関係なく、その増加割合は一定であり、セメントペースト量の増加によるスランプの増加は、普通細骨材か再生細骨材かに關係なく同じ傾向にあった。しかし、前章での結果から、体積基準での粒径分布が異なるため、スランプ値に差が生じたと考えられる。そこで、体積基準での粒径分布から求めた骨材の表面積 S_s を用いて余剰ペ

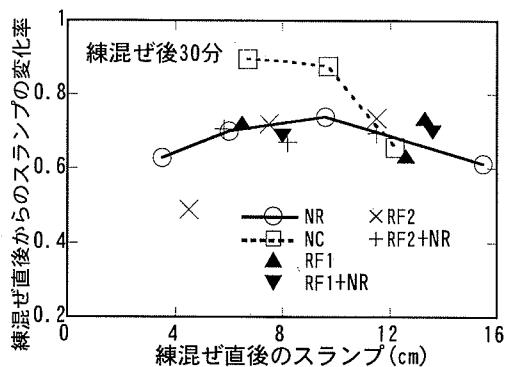


図-9 練混ぜ後30分間のスランプ変化

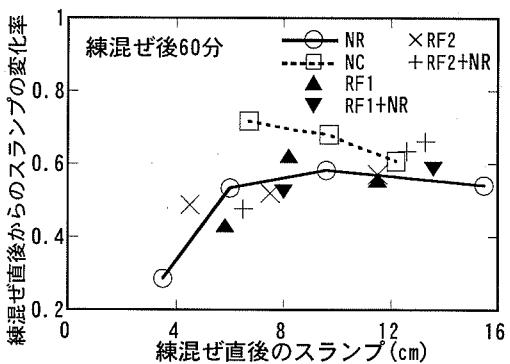


図-10 練混ぜ後60分間のスランプ変化

スト膜厚を算出した。余剰ペースト膜厚とスランプとの関係を図-8に示す。細骨材の種類に関係なく、余剰ペースト膜厚とスランプとの間には直線関係があり、その相関係数は $R=0.928$ であった。このことから、再生細骨材を使用した場合の流動性低下には、体積基準の粒径分布から求めた骨材の表面積が、大きく影響することが確認された。

図-9および図-10に練混ぜ後30分および60分におけるスランプの変化を示す。練混ぜ直後のスランプが6cm以下の場合に、スランプのばらつきが大きい。しかし、スランプが6cm以上の場合、再生細骨材の種類によらず、スランプは、30分経過後には60~70%，また60分経過後には45~60%と川砂を用いた場合とほぼ同程度に減少した。スランプの経時変化は、水和反応等によるセメントペーストの性状の変化に起因するため、余剰ペースト膜厚が同じ場合、再生細骨材を用いたコンクリートの流動性的経時変化が、川砂を用いたコンクリートとほぼ同じになったと考えられる。

以上より、再生細骨材の場合、普通細骨材に比べて、粒径によりセメント水和物付着率が異なるため、表面積が大きくなる。このため、W/C=50%程度で同一配合の普通細骨材コンクリートの場合より余剰

ペースト膜厚が小さく、スランプが低下すると考えられる。すなわち、プレーンコンクリートでは、普通細骨材コンクリートと同程度の流動性を得るために、再生細骨材の表面積を考慮して、単位水量を増加、またはs/aを減少させる必要がある。なお、練混ぜ直後のスランプを6cm以上とした再生細骨材コンクリートの場合、60分後までのスランプの経時変化は、同じスランプの川砂を用いたコンクリートと大差はない。

4. 再生細骨材コンクリートにおけるAE減水剤の添加効果

(1) 実験概要

既往の研究^{13),14)}では、再生細骨材を用いた場合、普通細骨材コンクリートに比べ、同一スランプを得るために必要なAE減水剤の添加量が増加するとの報告がある。そこで、再生細骨材を使用した場合のAE減水剤の添加効果を前述の余剰ペースト理論を応用して検討した。単位水量を165kg/m³とした表-3に示す配合を用いて、リグニンスルホン酸系AE減水剤をC×0~0.9%の範囲で添加した。なお、空気量の変動による流動性への影響を取り除くため、空気量調整剤の添加により、すべてのコンクリート中の空気量を5±1%に調整した。セメントおよび粗骨材は前章と同じとし、細骨材には表-1に示したNR、RF1およびRF2を使用した。また、NRとRF2を質量比で1:1に混合した細骨材についても検討した。練混ぜ方法は、3章(1)と同じとした。

(2) 実験結果および考察

AE減水剤の添加率とスランプとの関係を図-11に示す。添加率の増加とともにスランプは増加

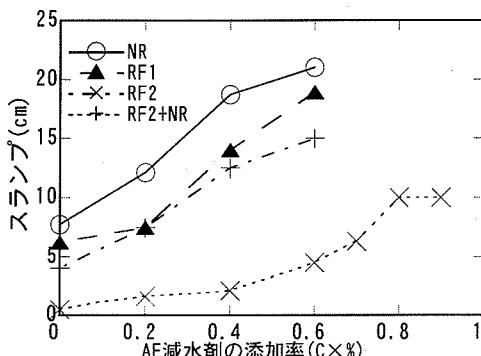


図-11 AE減水剤の添加率とスランプとの関係

し、骨材の種類によらず、その増加傾向は同程度であった。また、再生細骨材の場合、同じ添加率の普通骨材コンクリートに比べ、スランプ値が小さく、その差は添加前の差と同程度であった。すなわち、同一の材料および配合のコンクリートの場合、AE減水剤の添加によりコンクリート中のセメント粒子が分散し、セメントペーストの流動性が向上するため、コンクリートの流動性が増す。また、骨材が異なる場合、コンクリートの流動性は余剰ペースト膜厚の影響を受けることがわかる。したがって、再生細骨材を使用した場合、AE減水剤の添加により流動性は増加するが、余剰ペースト膜厚が小さいため、同一配合の普通コンクリートに比べ、スランプが小さくなつたと考えられる。このメカニズムを考慮し、AE減水剤添加後の流動性を表す指標の導入を試みた。AE減水剤の添加量とスランプ値が比例するため、AE減水剤の添加によるセメントペーストの性状の変化がコンクリートの流動性に及ぼす影響度を f_p と表し、AE減水剤を添加しないW/C=50%のペーストの場合を1、およびAE減水剤の添加率 A_d を変数として式(7)で定義した。次に、この f_p と配合から求めた余剰ペースト膜厚 T との積を、コンクリートの流動性指標 f_{SL} とし、式(8)のとおり定義した。

$$f_p = 1 + kA_d \quad (7)$$

$$f_{SL} = T \times f_p \quad (8)$$

ここで、 f_p ：セメントペーストの性状がコンクリートのスランプに及ぼす影響度を示す指標、 f_{SL} ：コンクリートの流動性指標、 T ：余剰ペースト膜厚(μm)、 A_d ：セメント質量に対するAE減水剤の添加率(%)、 k ：AE減水剤の性質によって異なる係数で、AE減水剤の添加による f_p の割増率を意味する。

図-12は、 $k=1.2$ としたときのコンクリートの流

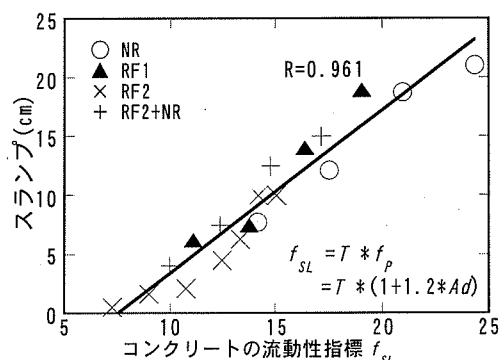


図-12 コンクリートの流動性指標 f_{SL} とスランプとの関係

動性指標 f_{LS} とスランプとの関係である。骨材の種類によらず、 f_{LS} とスランプとの間には直線関係が認められ、相関係数R=0.961が得られた。

以上から、次のことがわかった。同じAE減水剤の添加率でも、再生細骨材を用いたコンクリートのスランプ値は、普通細骨材の場合に比べて小さい。これは、AEコンクリートの流動性においても、余剰ペースト理論が成り立つからである。また、W/Cが同じ場合、余剰ペースト膜厚とAE減水剤の添加によるセメントペーストの性状の変化がコンクリートの流動性に及ぼす影響度を用いて、AE減水剤を添加後のコンクリートの流動性に関する指標を算出できることが示された。すなわち、再生細骨材を用いたAEコンクリートで、普通細骨材コンクリートと同一スランプを得るには、普通細骨材の場合に比べて、AE減水剤の添加率を増すか、またはより分散効果の高いAE減水剤を用いる必要がある。なお、既往の研究^{13),14)}のとおり、再生細骨材への混和剤の吸着も考えられるが、その影響は小さいと推測される。また、AE減水剤が同じ場合、使用骨材の種類によらず、 f_p の割増率kは一定であると考えられる。

5. 再生細骨材の使用がコンクリートの硬化後の性状に及ぼす影響

(1) 実験概要

再生細骨材を用いたコンクリートの強度および耐久性は、普通細骨材を用いた場合よりも低下する。その評価指標として、粒子強度¹⁵⁾や骨材の平均吸水率¹⁶⁾など、様々な指標が検討されているが、強度や耐久性が低下する原因は明確ではない。また、再生粗骨材では粒子強度の影響から、適用できる強度に限界があるとの報告¹⁷⁾があるが、再生細骨材を高強度コンクリートに適用した研究はほとんどない。ここでは、W/C=25~60%の再生細骨材を用いたコンクリートについて、強度、中性化深さや長さ変化率

を調べ、普通細骨材を用いた場合と異なる原因を考察した。筆者らは既報¹⁸⁾で、高品質化した再生細骨材を用いたモルタルの強度は、同じ吸水率となるように普通細骨材と再生細骨材とを混合した細骨材の場合と同じであることを報告した。すなわち、コンクリートの硬化後の性状には、吸水率に関係する指標の影響が大きいと考えられる。そこで、細骨材の吸水率に着目した検討を行った。

実験に使用した骨材は、表-1に示した普通細骨材の川砂(NR)、中国産川砂(NRC)および石灰石碎砂(NL)、また再生細骨材のRF1、RF3およびRFPである。セメントおよび粗骨材は前章までと同じとした。NRを用いて表-4に示す配合を決定し、各種細骨材を用いる場合には、細骨材を体積置換した配合を使用した。ただし、フレッシュ性状を、W/C=40、50および60%では、スランプ12±2cm、空気量5±1%に、W/C=35%では、スランプ18±2cm、空気量3±1%に、W/C=25%では、スランプフロー600±50mm、空気量3±1%となるように、ポリカルボン酸系高性能AE減水剤、リグニンスルホン酸系AE減水剤および空気量調整剤の添加により調整した。強制練りミキサを使用し、セメント、細骨材および粗骨材を30秒攪拌後、練混ぜ水とともに3~6分間練混ぜ、コンクリートを作製した。打設後24時間で脱型し、標準養生後、材齢28日でコンクリートの圧縮、引張および曲げ強度試験を行った。また、脱型後、材齢7日まで標準養生した100×100×400mmの供試体3体を、室温20±1°C、相対湿度60±10%の恒温恒湿室に放置し、JIS A 1129に準じて長さ変化率を測定した。さらに、材齢28日まで標準養生後、材齢56日まで恒温恒湿室に放置した100×100×400mmの供試体1体を用いて、促進中性化試験を行った。試験方法は、高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)(建築学会)¹⁹⁾に準拠し、打ち込み面、底面および両端面をエポキシ樹脂系塗料にてシールした供試体を、温度20±2°C、相対湿度60±5%，CO₂濃度5±0.2%に調整した試験装置内に静置した。

表-4 コンクリートの硬化後の性状に関する実験での基本配合 (NRを用いた場合、他の細骨材は体積置換)

| W/C (%) | s/a (%) | 単位量(kg/m ³) | | | | | | 目標スランプ および スランプフロー | 目標 空気量 (%) |
|------------|------------|-------------------------|-----|-----|------|----------------------|------------------------------|--------------------------|------------------|
| | | W | C | S | G | AE 減水剤(%) | 空気量 調整剤 ^{*3} (%) | | |
| 25 | 45.2 | 162 | 648 | 697 | 881 | C×2.8 ^{*2} | C×0.0035 | 600±50mm | 3±1 |
| 35 | 39.3 | 162 | 463 | 665 | 1071 | C×0.7 ^{*2} | C×0.0005 | 18±2cm | 3±1 |
| 40 | 41.2 | 173 | 433 | 680 | 1004 | C×0.25 ^{*1} | C×0.0035 | 12±2cm | 5±1 |
| 50 | 43.2 | 163 | 326 | 762 | 1037 | C×0.25 ^{*1} | C×0.0035 | 12±2cm | 5±1 |
| 60 | 45.2 | 163 | 272 | 817 | 1025 | C×0.25 ^{*1} | C×0.0035 | 12±2cm | 5±1 |

*1 リグニンスルホン酸系AE減水剤、*2 ポリカルボン酸エーテル系高性能AE減水剤、*3 変性アルキルカルボン酸系助剤

(2) 強度試験結果

C/Wまたは吸水率と圧縮強度との関係を図-13～図-14に示す。骨材の種類に関係なく、C/Wが増加すると圧縮強度が増加するが、吸水率の増加とともに圧縮強度は低下した。吸水率11%程度の再生細骨材を用いた場合には、普通細骨材を用いたコンクリートに比べ、 $10N/mm^2$ 程度の強度低下がみられた。W/Cが変化しても、その傾向は同じであった。

現在の配合設計では、細骨材の含水量を単位水量として考慮せず、強度への影響も考えていない。し

かし、RF1のような吸水率11%の細骨材では、コンクリート $1m^3$ あたりの細骨材の全含水量は、配合にもよるが、約 $70kg/m^3$ に達し、無視できない可能性がある。そこで、次の考え方を導入した。

まず、コンクリートの配合から細骨材および粗骨材の含水量を算出し、単位水量に加算してコンクリート中の総水量を求めた。これを単位総水量TWと呼ぶこととし、下記の式(9)のとおり定義した。また単位セメント量と単位総水量との比を計算し、これをセメント総水量比C/TWと呼ぶこととした。

$$TW = W + s \times \gamma_{ds} \times w_s + g \times \gamma_{dg} \times w_g \quad (9)$$

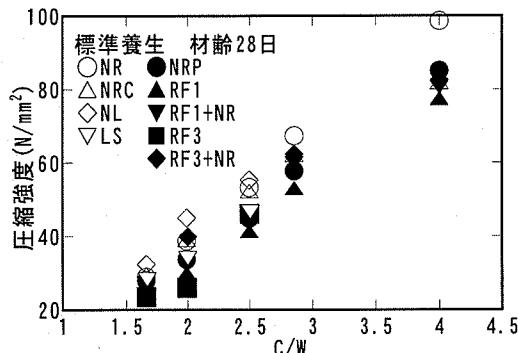


図-13 C/Wと圧縮強度との関係

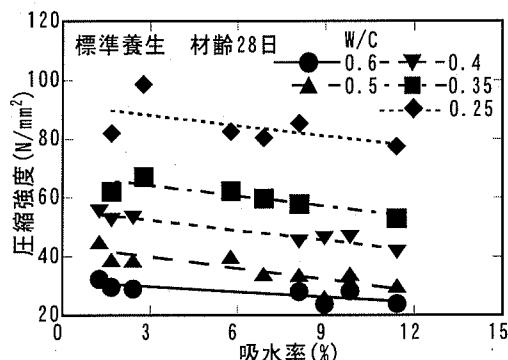


図-14 吸水率と圧縮強度との関係

ここで、 TW ：単位総水量(kg/m^3)、 W ：単位水量(kg/m^3)、 s ：単位細骨材体積(ℓ/m^3)、 γ_{ds} ：細骨材絶乾密度(kg/ℓ)、 w_s ：細骨材の含水率(%)、 g ：単位粗骨材体積(ℓ/m^3)、 γ_{dg} ：粗骨材絶乾密度(kg/ℓ)、 w_g ：粗骨材の含水率(%)である。

C/TW と圧縮強度との関係を図-15に示す。なお、W/Cによって目標空気量が異なるため、空気量ごとに最小二乗法により直線近似し、その相関係数を示した。 C/TW と圧縮強度とは直線関係となり、相関

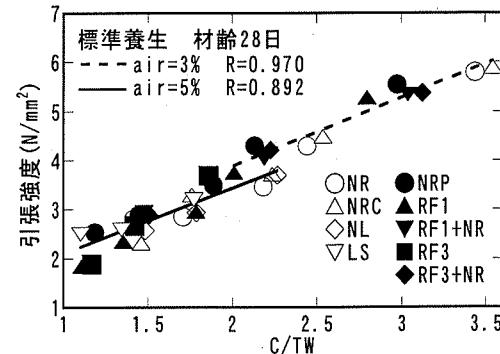


図-16 C/TWと引張強度との関係

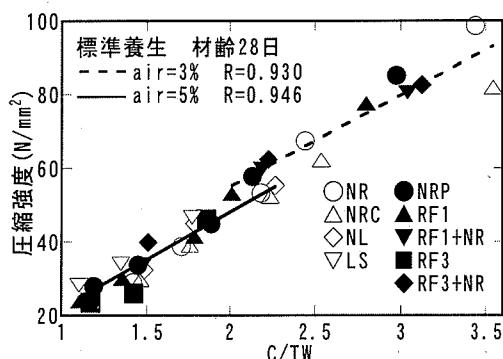


図-15 C/TWと圧縮強度との関係

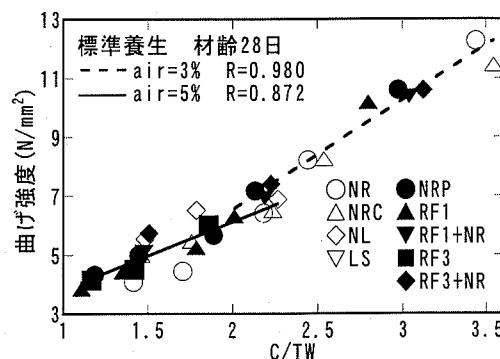


図-17 C/TWと曲げ強度との関係

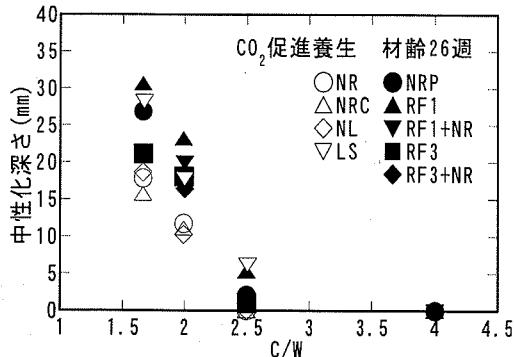


図-18 C/W と中性化深さとの関係

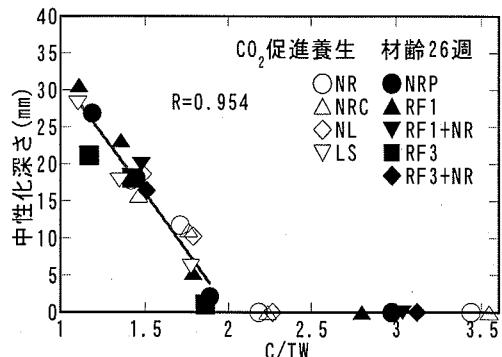


図-20 C/TW と中性化深さとの関係

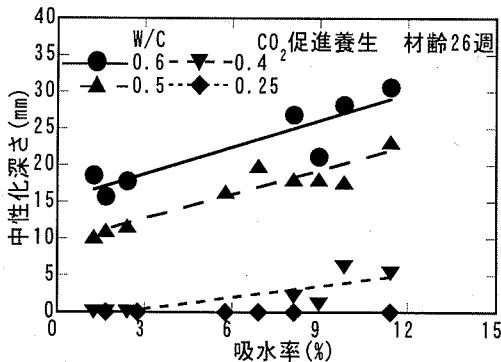


図-19 吸水率と中性化深さとの関係

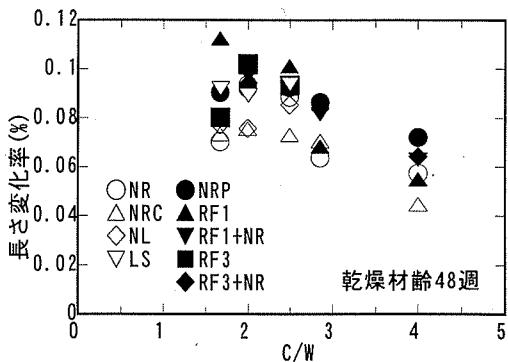


図-21 C/W と長さ変化率との関係

係数も大きい。同様に、C/TWと引張および曲げ強度の関係を図-16および図-17に示す。いずれも直線関係が得られ、相関係数も大きな値となった。

既往の研究^{20),21)}では、吸水率0~6%程度の骨材を用いたコンクリートの各強度と、様々な評価指標との関係について統計分析がなされていた。その結果、セメントとコンクリート中の全水量との比にも強い相関があった。しかし、簡便性や精度を基準とした考察の結果、単位セメント量や単位水量など個別の指標を用いたコンクリート強度の推定式を提案していた。本研究では、さらに高い吸水率の再生細骨材や軽量細骨材を用いた結果、コンクリート強度低下の主な要因として骨材の含水量が考えられた。そこで、骨材中の全含水量を考慮した指標C/TWを導入すると、コンクリート強度を精度良く予測できることがわかった。すなわち、高含水率の細骨材を用いたコンクリート強度の評価には、C/TWが有効な指標となる。さらに、筆者らは既報²²⁾で、W/C=50%の普通細骨材コンクリートの強度は、同じC/TWに調整した再生細骨材コンクリートと同程度になることを報告した。このことからも、C/TWが1~3の範囲において、C/TWと同じにすれば、普通細骨材および再生細骨材に関係なく、同じコンクリート強度

を得ることができると考えられる。また、以上の結果より、今回用いた再生細骨材では、W/C=25% (C/TW=3.0程度)のコンクリートに適用しても、粒子強度の影響による強度低下は確認されなかった。

(3) 中性化促進および乾燥収縮試験結果

次に、再生細骨材を用いたコンクリートの耐久性に関して検討した。促進材齢26週での中性化深さとC/Wまたは吸水率との関係では、図-18および図-19に示すとおり、W/C=40%以下になると、普通細骨材を用いたコンクリートでの中性化は観察されなかつた。また、再生細骨材の場合でもW/C=25%では、中性化した部分を確認できなかつた。同一配合の場合、吸水率の高い再生細骨材を用いると、中性化深さは吸水率に比例して増加し、W/Cに関係なく、その増加割合はほぼ一定であった。そこで、前節と同様に、C/TWと中性化深さとの関係を調べた。図-20に示すとおり、C/TW=2.0までは骨材の種類にかかわらず同じ直線関係となつた。また、それ以上のC/TWでは、今回の促進条件での中性化は起こらなかつた。C/TW=2.0以下の測定値を最小二乗法で直線近似すると、R=0.950と高い相関度を示した。

次に、乾燥材齢48週の長さ変化率とC/Wまたは吸

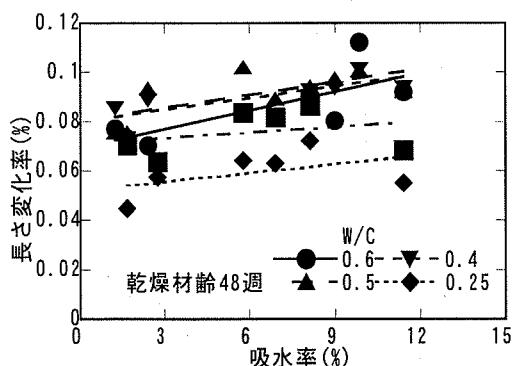


図-22 吸水率と長さ変化率との関係

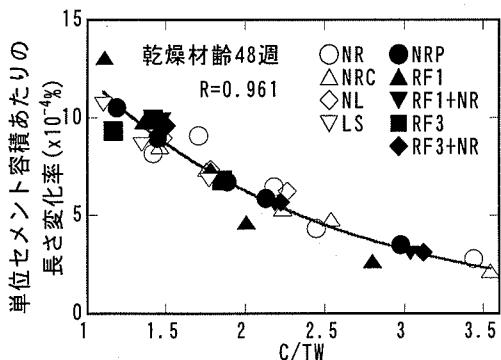


図-23 C/TW とセメントの単位体積あたりの長さ変化率との関係

水率との関係を図-21および図-22に示す。W/C=40～60%において、長さ変化率がほぼ同じであったが、W/C=25および35%になると、W/Cが小さいほどひずみ値が小さくなつた。また、細骨材の吸水率の変化による影響は、明確ではない。従来、長さ変化率には、単位水量やW/Cの影響が大きいと考えられている²³⁾。しかし、その関係は、既往の研究²⁴⁾のとおり単位セメント量により変化する。そこでセメントの単位体積あたりの長さ変化率を算出し、C/TWとの関係を調べた。その結果を図-23に示す。図中に、最小二乗法により指数関数に近似した場合の曲線とその相関係数を示した。両者には強い相関関係がみられた。

以上、W/C=25～60%において、AE減水剤および高性能AE減水剤により流動性および空気量を同程度としたコンクリートの硬化後の強度、中性化深さおよび長さ変化率について、再生細骨材を用いた場合の影響を調べた。その結果、再生細骨材の吸水率が高いほど強度は低下し、また中性化深さや長さ変化は増加し、それらの関係はW/C=25～60%において同様の傾向であった。すなわち、骨材の含水量が

コンクリートの硬化後の性状に明らかに影響を及ぼすことがわかった。そこで、指標C/TWを導入したところ、普通細骨材または再生細骨材の違いに関係なく、コンクリートの硬化後の強度、中性化深さおよびセメントの単位体積あたりの長さ変化率と強い相関があり、これらの性状を定量的に予測可能なことがわかった。ただし、今回用いた再生細骨材は、都心部にある建築物の解体ガラを原料としており、塩害や化学的腐食等の影響を受けた構造物等から製造された再生細骨材については、別途検討の必要がある。

6. 再生細骨材使用コンクリート中の細孔径分布測定結果からの考察

(1) 実験概要

コンクリートの硬化後の強度だけでなく、長さ変化率や中性化深さにも、C/TWとの強い相関がみられた。このことから、C/TWとコンクリート中の細孔径分布との間に関係があると考えられる。そこで、NRおよびRF3を用いたW/C = 40, 50および60%のコンクリートの細孔径分布を測定し、それらとC/TWとの関係を検討した。

前章で使用したコンクリートの曲げ試験供試体端部を、室内にて常温で6ヶ月以上保存した後、5mm程度の薄板に切断し、粗骨材部分を取り除いた5×5mm程度のモルタルチップを作製した。これらのチップを絶乾状態にし、水銀圧入法により試料中の直径0.0055～10μmの空隙を2回に分けて測定し、その平均値を各コンクリート中の細孔径分布とした。また、測定値には、細骨材の空隙も含まれている。セメントペースト中の細孔径分布の変化を調べるためにには、細骨材の細孔径分布を差し引き必要がある。そこで、絶乾状態のNRおよびRF3の細孔径分布を測定し、コンクリートの配合から求めたモルタル中の細骨材の含有体積にもとづき、コンクリート中の細孔径分布から細骨材中の細孔径分布を差し引き、セメントペースト中の細孔径分布を求めた。なお、以下の結果には、配合から算出したモルタルおよびコンクリートの密度を用いて、コンクリートの単位体積あたりの空隙量として示した。

(2) 実験結果と考察

コンクリート中には、さまざまな空隙が存在する。その一つに直径0.003～30 μm程度の毛細管空隙があり、その中でも直径0.05～2 μmの空隙は、骨材とセ

メントペーストとの界面（遷移帶）に多く存在し、コンクリートの強度¹¹⁾だけでなく、二酸化炭素²⁵⁾や水分等の物質移動に及ぼす影響も大きい。W/Cが40%以上では、W/Cの増加により、その遷移帶域の空隙体積は増加する。

NRおよびRF3を用いたコンクリート中の細孔径分布を図-24および図-25に示す。NRを用いた場合、W/Cによって直径0.05~10μmの空隙量が変化しており、既往の研究結果とほぼ一致する。RF3を用いたコンクリートでは、骨材中の空隙を含むため、NRの場合に比べて、全体的に空隙量が多く、特に空隙径0.1μm以下で顕著である。しかし、W/Cの増加による細孔径分布の変化は普通細骨材の場合と同様の傾向がみられた。

次に、NRおよびRF3を用いたコンクリート中の直径0.05~10μmの空隙量とC/TWとの関係を調べた。その結果、図-26に示すとおり、C/TWの増加とともに細骨材ごとに空隙量は減少するという関係が得られたが、同じC/TWでは、NRを用いた場合に比べて、RF3の場合に空隙量が多くなった。

2章に示したとおり、骨材の吸水率と骨材中の直

径0.05~7μmの空隙量とは必ずしも比例関係はない。骨材の吸水量を考慮したC/TWと強度との相関関係が強いことから、骨材中の空隙がコンクリート性状に及ぼす影響は小さいと考えられる。そこで、コンクリート内のセメントペースト部分の直径0.05~10μmの細孔径分布を算出し、その空隙量とC/TWとの関係を調べた。その結果、図-27に示すとおり直線となり、R=0.948と強い相関関係がみられた。

以上の結果から、骨材中の水がペースト部に移動し、その細孔径分布に影響を及ぼしたと推測される。すなわち、再生細骨材や軽量細骨材等の高吸水率細骨材の場合、骨材に吸収された水がペースト部に移動し、コンクリートの強度や水分、二酸化炭素の移動に関係するセメントペースト中の直径0.05~10μmの毛細管空隙量に影響を及ぼす。そのため、C/TWが同じ場合、ペースト中の毛細管空隙量が同程度となり、コンクリートの強度、中性化深さおよびセメントの単位体積あたりの長さ変化率がほぼ同じ試験値を示すと考えられる。

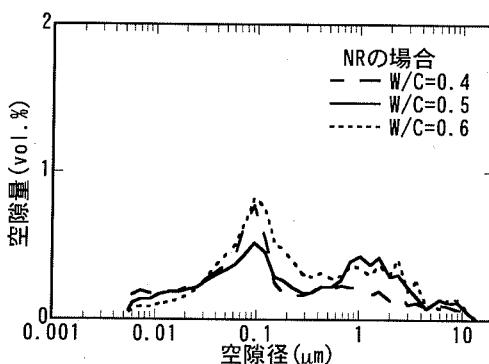


図-24 NRを用いたコンクリートの細孔径分布

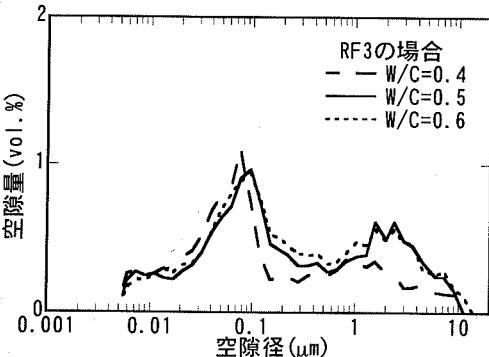


図-25 RF3を用いたコンクリートの細孔径分布

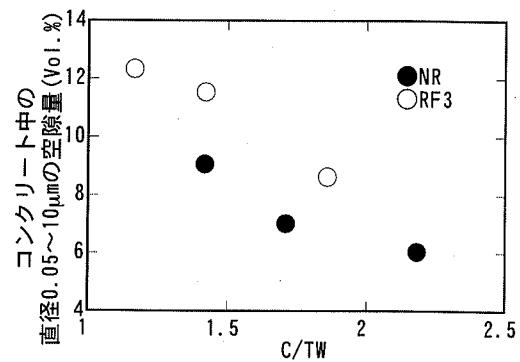


図-26 コンクリート中の空隙量とC/TWとの関係

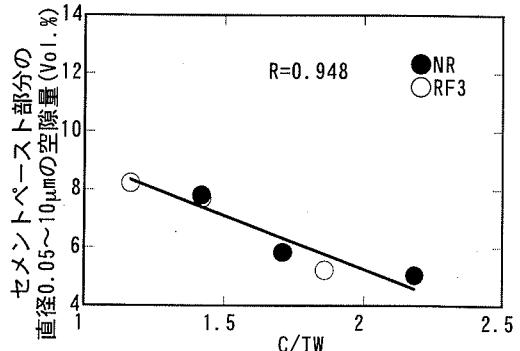


図-27 コンクリート内のセメントペースト部分における空隙量とC/TWとの関係

7. 結論

本研究から得られた知見をまとめると次のとおりである。

- (1) 再生細骨材の場合、粒径ごとの密度が異なり、質量基準で普通細骨材と同じ粒度でも、細粒分の占める体積割合が大きいため、体積基準の粒径分布と粒子形状から算出した骨材の表面積が大きくなる。その影響により、同一配合でも再生細骨材コンクリートのスランプは低下する。これを、余剰ペースト理論により説明することができた。
- (2) 再生細骨材か普通細骨材かに関係なく、AE減水剤の添加により、セメントペーストの性状が変化し、コンクリートの流動性が改善される。しかし、スランプ値は、余剰ペースト膜厚に影響されるため、同じ添加量の普通コンクリートに比べて、再生細骨材を用いた場合のスランプ値が低下する。このため、普通細骨材コンクリートと同配合の再生細骨材の場合、同様のスランプ値を得るためのAE減水剤の添加量は増加する。W/Cが同じ場合、AE減水剤の添加率から求まる指標と余剰ペースト膜厚との積は、AE減水剤添加コンクリートのスランプと相関が強い。
- (3) 再生細骨材や軽量細骨材のような高い吸水率の骨材を用いる場合、コンクリートの強度が低下し、中性化深さが増加し、さらに長さ変化率が増加するのは、骨材の含水量が主要因である。W/C=25~60%のコンクリートにおいて、細骨材の種類にかかわらず、骨材の全含水量を考慮したコンクリート中の総水量と単位セメント量との比C/TWは、強度、中性化深さおよびセメントの単位体積あたりの長さ変化率と相関が強く、それらを予測する指標となる。
- (4) 再生細骨材や軽量細骨材等の高吸水率細骨材の場合、骨材が吸収している水量がセメント硬化体の空隙構造に影響を及ぼし、コンクリートの強度や水分、二酸化炭素の拡散に影響を及ぼす50nm以上の毛細管空隙が増加する。すなわち、骨材の含水量を考慮したC/TWにより、空隙量が支配される。このため、同一のC/TWをもつコンクリートでは、コンクリートの強度、中性化深さおよび長さ変化率がほぼ同じ試験値を示したと考えられる。

以上より、再生細骨材を使用する場合でも、混和剤を用いて、本研究で定義したAEコンクリートの

流動性に関する指標 f_{LS} およびC/TWを普通細骨材を使用した場合と同じできれば、同じ性状のコンクリートを作製できることが分かった。今後、凍結融解抵抗性、疲労破壊抵抗性など、他の性状についても検討を進めたい。

謝辞：本研究の一部の測定を(株)浅沼組技術研究所の施設にて実施しました。ここに深謝いたします。

参考文献

- 1) 国土開発技術研究センター：再生コンクリートの利用技術の開発 平成8年度報告書, 1997.
- 2) 立松和彦、山崎順二、伊藤信孝、柴谷啓一：比重選別による高品質再生骨材の製造とコンクリートの性質、セメント・コンクリート, No.634, pp.8-14, 1999.
- 3) 島裕和、鴻巣一巳、橋本光一、古賀康男：加熱すりもみ法によるコンクリート塊からの高品質骨材回収技術の開発、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.2, pp.1093-1098, 2000.
- 4) 米澤敏男、神山行男、柳橋邦生、小島正朗、荒川和明、山田優：高品質再生粗骨材製造技術の研究、材料, Vol.50, No.8, pp.835-842, 2001.
- 5) 有田正史、細骨材資源論 見える砂から砂でない砂へ、骨材資源、通巻No.103, pp.129-146, 1994.
- 6) Powers, T.C. : *Properties of Fresh Concrete*, John Wiley & Sons, 1968.
- 7) 松下博通、近田孝夫、前田悦孝：コンクリートの配合設計への余剰ペースト理論の適用に関する基礎的研究、土木学会論文集, No.578/V-37, pp.57-70, 1997.
- 8) 高橋泰一、阿部道彦：再生骨材のコンクリートへの適用の現状と将来、コンクリート工学, Vol.33, No.2, 1995.
- 9) 軽量骨材コンクリートハンドブック編集委員会：軽量骨材ハンドブック、日刊工業新聞, pp.62-63, 1969.
- 10) 近藤連一、関口明男、皆川忠昌：人工軽量骨材をの細孔径分布と膨張収縮特性、セメント技術年報, XX, pp.485-492, 1967.
- 11) 笠井芳夫：コンクリート総覧、技術書院, pp.369-373, 1998.
- 12) 西堀忠信、山本修章、田野口耕一：骨材を形成する空隙と流動性に関する研究、セメント技術年報, XXX II, pp.148-151, 1978.
- 13) 戸堀悦雄、細田高明、嵩英雄：再生細骨材を用いた流動化コンクリートの流動化効果、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.1105-1110, 1998.
- 14) 笠井芳夫、阿部道彦、柳啓：再生コンクリートの諸物性に関する実験的研究、セメント・コンクリート論文集, No.50, pp.802-807, 1996.

- 15) 山崎順二, 二村誠二 : 骨材性能評価システムによる再生骨材コンクリートの力学特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.1, pp.253-264, 2001.
- 16) 道正泰弘, 菊池雅史, 増田彰, 小山明男, 三浦隆広 : 再生細骨材を用いたコンクリートの構造用コンクリートへの適用, 日本建築学会構造系論文集, No.502, pp.15-22, 1995.
- 17) 長瀧重義, ライフサイクルを考慮した建設材料の新しいリサイクル方法の開発, セメント・コンクリート, No.644, pp.24-30, 2000.
- 18) 麓隆行, 妹育和彦, 山田優, 再生細骨材の品質がモルタルの性状に及ぼす影響についての検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.1111-1116, 2000.
- 19) 高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案), 建築学会, 1991.
- 20) 豊福俊泰 : データ解析によるコンクリートの品質管理システムに関する研究, 土木学会論文集, 第426号/V-14, 1991.
- 21) 豊福俊泰 : データ解析によるコンクリートの配合, 強度および耐久性の推定方法に関する研究, 土木学会論文集, No.433/V-15, 1991.
- 22) 麓隆行, 船橋康史, 長峰慎, 山田優 : 再生細骨材の物理的性質がコンクリート性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.24, No.1, pp.1233-1238, 2002.
- 23) 岡田清, 六車熙 : コンクリート工学ハンドブック, pp.477-478, 1981.
- 24) 出雲健司 : 各種モルタルの乾燥収縮について, 土木学会第57回年次学術講演会, V-651, pp.1301-1302, 2002.
- 25) 太田利隆, 佐伯昇訳 : コンクリートの耐久性, セメント協会, p.25, 1999.

(2003.7.4 受付)

INFLUENCE OF USING THE RECYCLED FINE AGGREGATE ON PROPERTIES OF CONCRETE AND ITS CAUSE

Takayuki FUMOTO and Masaru YAMADA

The purpose of this study is to investigate influence of using the recycled fine aggregate on properties of concrete and discuss its cause. From experimental results, it was found that the slump of concrete using recycled fine aggregate decreases, because recycled fine aggregate had a bigger volume of fine particles than natural fine aggregate with same grading in weight. There is a correlation between strength, depth of carbonation or shurinkage per unit volume of cement and a ratio of cement to total water. The total water is a sum of water content and total water absorbed in aggregate. This means that water absorbed in aggregate influences porosity of hardened concrete.