

論文 再生モルタルの強度および空隙構造に及ぼす再生骨材の水分の影響

村上 英明*1・佐川 康貴*2・川端 雄一郎*3・松下 博通*4

要旨: 本研究は再生モルタルにおける強度および空隙構造に及ぼす再生骨材中の水分の影響を評価するため、水分供給の異なる条件において養生した再生モルタルの強度発現性および空隙構造の形成挙動を検討した。封緘養生を行った場合、高吸水率の再生骨材は自己養生効果を示し、水中養生と同様の強度発現を示した。一方、再生骨材を使用することで脱型時には強度低下および空隙の粗大化が生じていた。これは、再生骨材表面に存在する凹凸部が捕捉した水分による影響と考えられた。すなわち、再生骨材中の水分には強度低下に寄与する表面凹凸部の水分と長期的な強度増進に寄与する水分があることを明らかにした。

キーワード: 再生骨材, 細孔容積, 吸水率, 養生, 自己養生

1. はじめに

近年、再生骨材のコンクリート構造物への有効利用に関する取り組みが積極的に行われている。2005年3月にはJIS A 5021「コンクリート用再生骨材H」が制定された。高品質な再生骨材を製造するためには、コストの増加や製造の際の微粉の発生等の問題があり、LCAや経済性の観点からは課題が残されている。また、JIS A 5023「再生骨材Lを用いたコンクリート」では再生骨材Lを用いたコンクリートの用途範囲として、高い品質を要求されない構造物あるいは部位に限定しており、呼び強度の上限は18と設定している。しかし、高品質な再生骨材でなく、低品質な再生骨材であっても適材適所に有効利用し、その要求性能に応じた改善方法を考慮すべきである。再生骨材の用途範囲を明確にするためには、再生骨材およびそれを用いたコンクリート（再生コンクリート）の特性を評価する必要がある。

再生骨材およびそれを使用したコンクリートに関する研究は数多くある。麓らは、再生コンクリートの強度および耐久性は再生骨材中の水量を加味した総水量TWによって一義的に評価できることが明らかにしている¹⁾。すなわち、再生骨材の吸水率がコンクリートの特性に大きな影響を及ぼすと考える考え方である。著者らも再生コンクリートの強度および物質透過抵抗性についてTWと良い相関があることを示している²⁾。また、再生骨材を使用したモルタル（再生モルタル）の強度および物質透過抵抗性は新セメントペースト部の50nm~2 μ mの細孔容積(V_{ic})と良好な相関があり、高い吸水率の再生骨材を使用した場合には新セメントペースト部の空隙が粗大化するため、強度が低下することを示した³⁾。これらの結果を基に空隙の粗大化の機構として、再生骨材中の水分が新セメントペースト部に滲出するというモデルを

提案した。 V_{ic} による評価は、原コンクリートの異なる再生骨材および破砕方法の異なる再生骨材に対しても適用できることを示し⁴⁾、さらに、モルタルの強度が頭打ちになる領域を再生骨材自身の空隙量を用いて評価できることを示した⁵⁾。

上述した通り、再生骨材中の水分がコンクリートの強度および空隙構造に影響を及ぼしていることは明らかである。しかしながら、TWは簡易的であるものの、その適用限界など、詳細については検討されていない。実際に、TWでは一義的に整理できないことを示唆する報告もある⁶⁾。よって再生骨材の水分が強度および空隙構造に及ぼす影響を評価する必要がある。

そこで本研究では、再生骨材中の水分に着目し、養生条件を変化させることで再生骨材中の細孔容積の変化、強度発現性の検討を行った結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

(1) 再生骨材

再生細骨材RPは遠心締固めにより製造した二次製品（水セメント比30~35%程度）を原コンクリートとし、破砕重機により一次破砕した後、インパクトクラッシャで二次破砕し、粒度調整をしたものである。また、再生細骨材RC、RJは材齢6ヶ月のPC舗装版（水セメント比41%、圧縮強度42.4N/mm²、静弾性係数30.3kN/mm²）をブレーカで一次破砕した後、それぞれコーンクラッシャ、ジョークラッシャで二次破砕したものであり、5mmふるい通過分を全量使用した³⁾。

表-1に本研究で使用した細骨材の密度および吸水率試験結果を示す。本研究で使用した再生細骨材を密度および吸水率のみでJIS規格により区分すると、RPは再

*1 九州大学 工学部 地球環境工学科 建設都市工学コース (正会員)

*2 九州大学大学院 工学研究院 建設デザイン部門 助教 博士(工学) (正会員)

*3 九州大学大学院 工学研究院 日本学術振興会特別研究員PD 博士(工学) (正会員)

*4 九州大学大学院 工学研究院 建設デザイン部門 教授 工博 (正会員)

生細骨材 M に、RC, RJ は再生細骨材 L に該当する。また、図-1 に使用した再生再骨材の粒度分布を示す。

(2) 配合および供試体の作製

セメントには普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³，比表面積 3220cm²/g）を使用した。再生骨材および海砂(SS)は表乾状態でそれぞれ全量使用した。表乾状態はフローコーンを用いて判定した。

モルタルの配合は水セメント比 W/C= 40, 50, 60% とし、砂セメント比 S/C=3.0 で一定とした。

供試体は 40×40×160mm の角柱供試体とした。供試体は打設後 24 時間で脱型し、強度試験の材齢まで温度 20℃ にて水中養生もしくは封緘養生を行った。

2.2 試験項目

(1) 曲げ強度および圧縮強度試験

モルタルは材齢 1, 7, 28, 91 日において曲げ強度試験および圧縮強度試験を行った。

(2) 細孔径分布測定及びデータの処理方法

強度試験の材齢において、供試体からコンクリートカッターにより中心部を切り出し、一辺の長さが約 5mm の立方体状のモルタル片を採取して試料とした。試料は大量のアセトンにより水和を停止させた後、真空乾燥し水銀圧入式ポロシメータにより細孔径分布を測定した。

新セメントペースト部の細孔容積のうち、本研究では強度に支配的であるとされる 50nm~2μm の細孔容積を用いて評価した。しかしながら、再生モルタルは原骨材に旧モルタルが付着した状態の再生細骨材を新セメントペーストが取り巻く形で構成されている。すなわち、上述した 50nm 以上の空隙が旧モルタル部と新セメントペースト部に含まれていると考えられる。そこで、本研究では、下記の式(1)に従い、モルタルの細孔容積から細骨材の細孔容積を配合により求めた質量割合に換算したものを差し引いて、新たに付着する新セメントペースト部分の 50nm~2μm の細孔量で評価を行った。

$$V_{itz} = V_m - V_a \times s \tag{1}$$

ここに、 V_{itz} : 新セメントペースト部の細孔容積 (ml/g)

V_m : モルタルの細孔容積 (ml/g)

V_a : 細骨材中の細孔容積 (ml/g)

s : 単位細骨材体積 (m³/m³)

なお、以下の細孔径分布の測定結果は全てこのデータ処理を行っている。また、細骨材の細孔容積は 2.5~5mm の粒度の粒子を用い水銀圧入式ポロシメータにより測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 水分供給が再生モルタルの強度に及ぼす影響

図-2 に水中養生を行った各供試体の圧縮強度を示す。W/C の増加とともに圧縮強度が低下するのに加え、

表-1 細骨材の物理的性質

記号	細骨材種類	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
SS	海砂	2.55	2.70
RP	再生骨材	2.47	6.05
RC		2.26	13.40
RJ		2.23	15.20

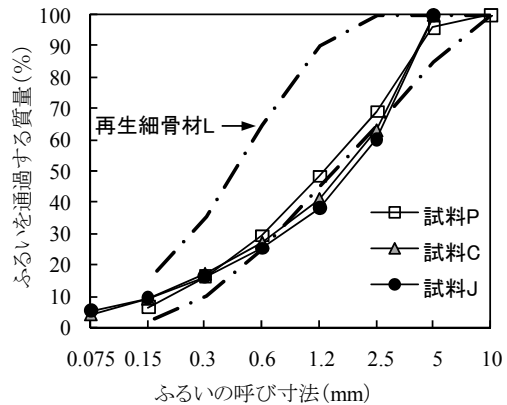


図-1 使用再生再骨材の粒度分布

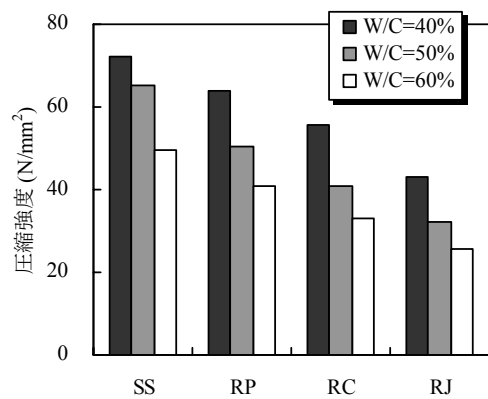


図-2 材齢 91 日における圧縮強度 (水中養生)

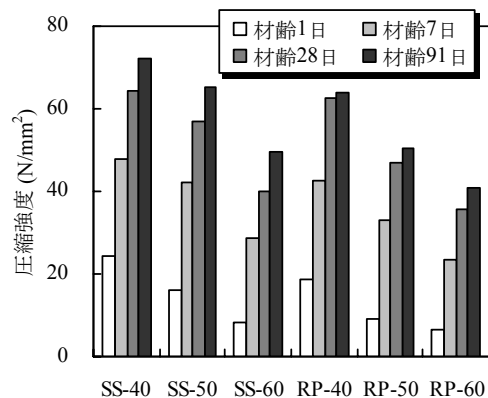


図-3 各材齢における圧縮強度 (水中養生)

再生骨材の種類によって圧縮強度は大きく異なっている。高吸水率の再生骨材ほど圧縮強度が低くなっており、再生骨材の吸水率が強度に及ぼす影響が大きいことが分かる。図-3 に水中養生における SS と RP を使用した

モルタルの各材齢の圧縮強度を示す。なお、図中の凡例は(骨材種類)－(水セメント比)として記載している。いずれの水セメント比においても、脱型直後の材齢1日におけるRPの圧縮強度はSSよりも既に低い。すなわち、養生条件に関係なく、再生骨材を使用することで硬化過程初期において強度低下が生じている。

図-4に水中養生および封緘養生を行った W/C=50%のモルタルの91日における圧縮強度を示す。封緘養生を行う場合、セメントの水和に伴う自己乾燥が生じるため、強度の伸びが小さくなることが考えられ、SS使用モルタルはそのような傾向を示していることが分かる。一方で、再生モルタルの圧縮強度に着目すると、水中養生よりも封緘養生を行った要因の方が高い圧縮強度を示した。養生条件の違いに伴って生じる、モルタル中の含水量による圧縮強度への影響を無視できないが、封緘養生が水中養生と同等もしくはそれ以上の強度に達することは既往の知見と異なる結果である。

3.2 セメント総水量比 C/TW による評価

圧縮強度は再生骨材中の水分量を加味したセメント総水量比 C/TW によって評価できることが麓ら¹⁾によって提案されている。TW は以下の式(2)によって求めた。

$$TW = W + s \times \gamma_{ds} \times w_s / 100 \quad (2)$$

ここに、TW：総水量 (kg/m³)

W：単位水量 (kg/m³)

s：単位細骨材体積 (l/m³)

γ_{ds} ：細骨材絶乾密度 (g/cm³)

w_s ：細骨材の吸水率 (%)

図-5に水中養生を行ったモルタルの C/TW と圧縮強度の関係を示す。各材齢におけるモルタルの圧縮強度は再生骨材中の吸水量を考慮した C/TW と相関があるが、同一 C/TW でも強度が異なる傾向が認められ、C/TW では一義的に評価できない可能性があることを示唆している。特に、C/TW=1.2よりも小さい領域の C/TW と強度の関係の傾きは C/TW=1.2よりも大きい領域と異なっている。

図-6に封緘養生を行ったモルタルの C/TW と圧縮強度の関係を示す。水中養生の場合と同様に、C/TW=1.2をしきい値として C/TW と強度の関係の傾きに若干の相違が認められ、特に初期強度においてばらつきが大きい。水中養生のケースと同一 C/TW で比較すると、低 C/TW ではいずれの材齢においても封緘養生の圧縮強度の方が水中養生よりも大きい結果となり、高 C/TW では若材齢時ではさほど強度に差がないものの長期的な圧縮強度は封緘養生の方が低い傾向となった。

3.3 新セメントペースト部の細孔容積 V_{iz} の変化

図-7に養生条件、使用細骨材の異なる W/C=50%のモルタルの50nm~2 μ mの細孔量 V_{iz} を示す。水中養生に

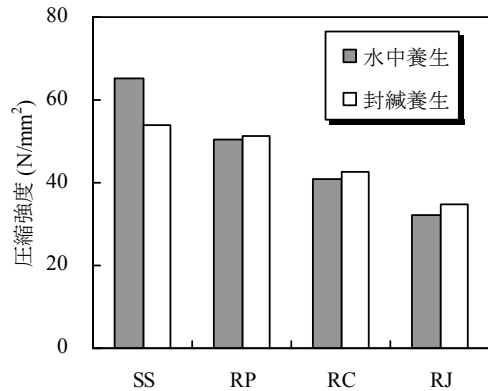


図-4 養生条件の違いと圧縮強度 (材齢91日)

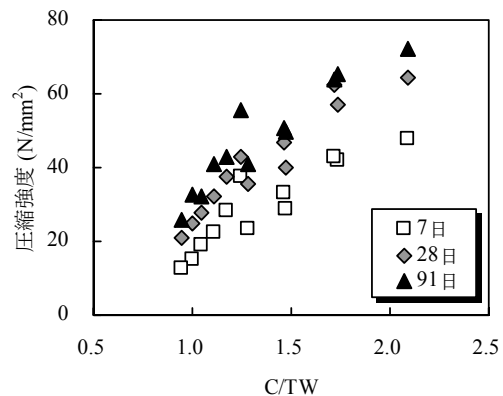


図-5 C/TW と圧縮強度の関係 (水中養生)

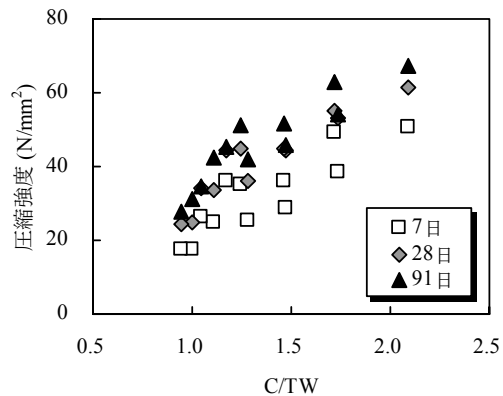


図-6 C/TW と圧縮強度の関係 (封緘養生)

着目すると、いずれの材齢においても吸水率が大きくなるに従って V_{iz} が大きくなる傾向が認められる。材齢91日においてもRC、RJを用いたモルタルの V_{iz} はSSの3~4倍大きな値を示している。本データは、再生骨材中の空隙量を差し引いているので、新セメントペースト部の空隙構造が粗大化したと考えることができる。すなわち、水中養生では硬化過程の空隙構造の粗大化によって強度が低下している。

一方、封緘養生に着目すると、材齢1~7日の時点では吸水率の増加に伴って V_{iz} も大きくなる傾向にあるが、

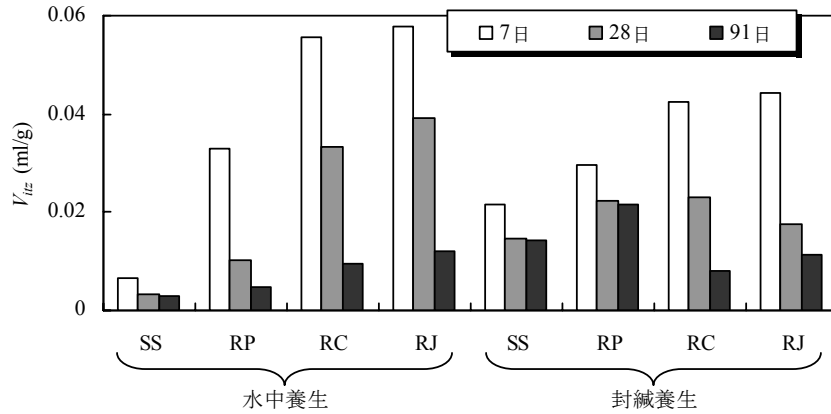


図-7 養生条件, 使用細骨材の異なるモルタルの50nm~2 μ mの空隙量 V_{itz}

材齢28日から吸水率の高いRC, RJの空隙が緻密化し, 材齢91日においてはRC, RJの V_{itz} がSSよりも小さくなるという結果となった。養生条件の違いで比較すると, SSは水中養生の方がいずれの材齢においても V_{itz} が小さくなる傾向であるのに対して, RC, RJは封緘養生の方が V_{itz} の方が小さいという逆の傾向を示した。RPは中間的な挙動を示していることが分かる。このように, 封緘養生の場合, 骨材自身の吸水率の影響によって挙動が異なることが明らかとなった。

図-8に材齢1日におけるSS, RP使用モルタルの新セメントペースト部の細孔容積分布を示す。図より, RP使用モルタルは材齢1日において空隙が粗大化していることが分かる。特に, 図中に赤の点線で示す50nm~2 μ mの領域, すなわち V_{itz} に該当する領域における空隙量が非常に多い。細孔径分布において, しきい細孔径は水セメント比に依存する⁷⁾ことを考慮すると, 脱型直後の材齢1日において既に新セメントペースト部の実質の水セメント比が高くなっていると考えることができる。

3.4 新セメントペースト部の細孔容積 V_{itz} と強度の関係

図-9に水中養生を行ったモルタルの V_{itz} と圧縮強度の関係を示す。図より, V_{itz} と圧縮強度には相関関係が認められる。また, RC, RJについては V_{itz} が小さいにもかかわらず, 強度が頭打ちとなる傾向となった。この原因は再生骨材自身の脆弱さによることを既報⁹⁾で報告している。以上のことから, 再生モルタルの強度低下の原因は初期材齢に生じる新セメントペースト部の空隙構造の粗大化によるものであり, また長期的には再生骨材自身の脆弱さに伴って強度が頭打ちとなるといえる。

図-10に封緘養生を行ったモルタルの V_{itz} と圧縮強度の関係を示す。図より, SS, RPについては V_{itz} が水中養生ほど緻密化していない。封緘養生を行ったSSとRPの V_{itz} と圧縮強度の関係は水中養生よりも V_{itz} に対する圧縮強度が高い傾向にある。この原因の詳細は不明であるが, モルタルの含水量の違い等が関係していると考えら

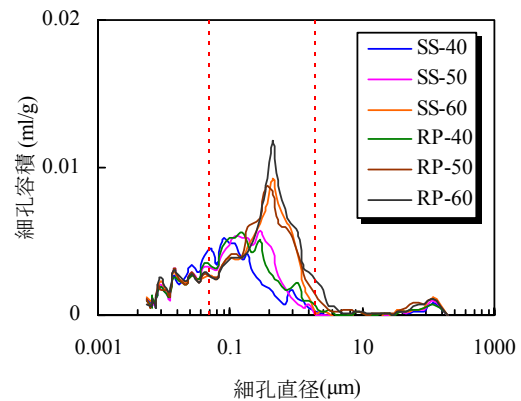


図-8 新セメントペースト部の細孔容積分布 (骨材空隙量補正, 材齢1日)

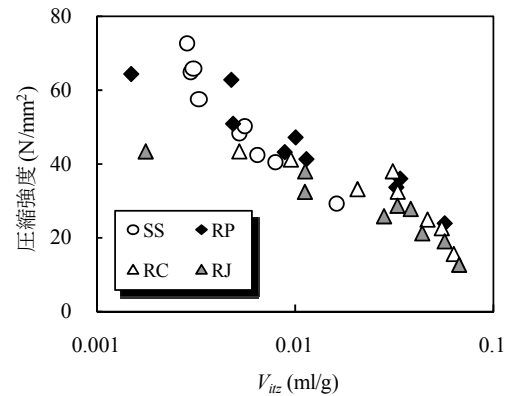


図-9 V_{itz} と圧縮強度の関係 (水中養生)

れ, 今後の検討課題としたい。

注目すべき点は, RC, RJ使用モルタルは水中養生および封緘養生に関わらずほぼ同じ V_{itz} と圧縮強度の関係を示している。これは, 再生骨材自身の水分が水中と同様に自己養生効果を持つことを示唆している。高品質軽量骨材の自己収縮等が小さくなる機構として, 骨材中の水分移動が生じていること⁸⁾, 軽量骨材界面は水和が進行していること⁹⁾といった, 高吸水率の軽量骨材の結果と同様の傾向である。しかしながら, 若材齢時に空隙構

造が粗大化していること、初期材齢においても C/TW と強度にある程度の相関が認められること、再生骨材中の水分が空隙構造に何らかの影響を及ぼしていると推察される。

3.5 新セメントペースト部の硬化過程における空隙構造の粗大化と自己養生効果に関する考察

これまでの結果から、再生骨材の使用により初期の硬化過程において新セメントペースト部の空隙量が増加し、強度が低下することが分かった。この傾向は養生条件に依らず明らかである。しかし、長期的な空隙構造の挙動は養生条件によって異なった。封緘養生の場合、高吸水率の再生骨材の方が緻密化した。

そこで本研究は、硬化過程において空隙構造を粗大化させる水分と、長期的には自己養生効果により空隙を緻密化させる水分の2種類があると推測した。RC, RJ に使用した PC 舗装版から採取したコア ($\phi 10 \times 20\text{cm}$) および, RP に使用した二次製品から採取した切断片 ($4 \times 10 \times 10\text{cm}$) から原コンクリートの吸水率 w_c を求めたところ, それぞれ 7.73%, 2.54% であった。なお原コンクリートの吸水率は, 真空飽和处理によりコンクリート中に水分を十分に満たした状態から, 質量一定となるまで $105 \pm 5^\circ\text{C}$ で炉乾燥させた時の質量差から求めた。再生骨材の吸水率 w_s は原コンクリートの吸水率よりも大きい。原コンクリートの吸水率以上の水分量 $w_{ex} = w_s - w_c$ は再生骨材表面の凹凸や空隙にトラップされた水分と想定し, 本研究では原コンクリートの吸水率以上の水分 w_{ex} が初期の空隙構造の粗大化, 原コンクリートの吸水率 w_c が自己養生効果に寄与すると考えた。そこで, W に $w_{ex} \times s$ を加えた値を補正単位水量として, 自己養生効果が小さいと考えられる材齢 1, 7 日の V_{itz} を評価した。

図-11に補正単位水量 ($W + w_{ex} \times s$) と V_{itz} の関係を示す。図より, ($W + w_{ex} \times s$) と V_{itz} には良好な相関関係が認められる。再生骨材表面の凹凸に捕捉される水分は練混ぜ過程において容易に新セメントペーストと混合し, 実質の水セメント比を上昇させることが推測される。その場合, 硬化過程の新セメントペースト部の空隙構造の粗大化の原因は再生骨材表面の凹凸部に捕捉される水分であると推測できる。

3.6 補正単位水量による強度の整理

以上の結果を基に, 養生条件が異なる場合の再生モルタルの強度発現性および空隙構造の形成挙動について考察する。

養生条件に関わらず, 初期の再生モルタルの強度低下および空隙構造の粗大化は, 再生骨材表面の凹凸部に捕捉された水分量に大きく影響を受ける。水中養生を行った場合, モルタル内部は水分で十分に満たされているため, セメントは長期間にわたって水和が進行する。水中

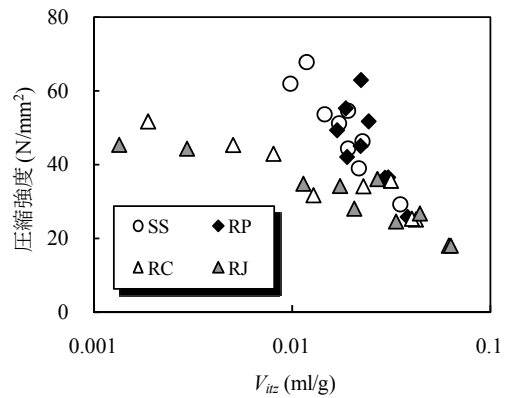


図-10 V_{itz} と圧縮強度の関係 (封緘養生)

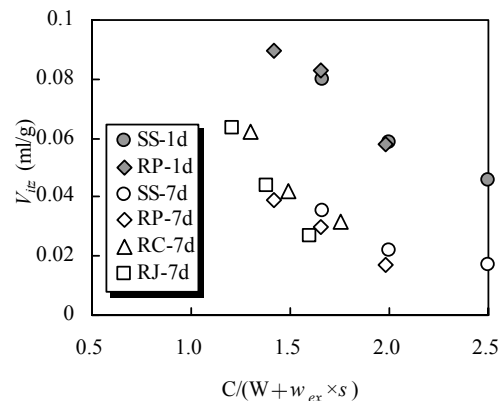


図-11 補正単位水量と V_{itz} の関係 (封緘養生, 材齢 1, 7 日)

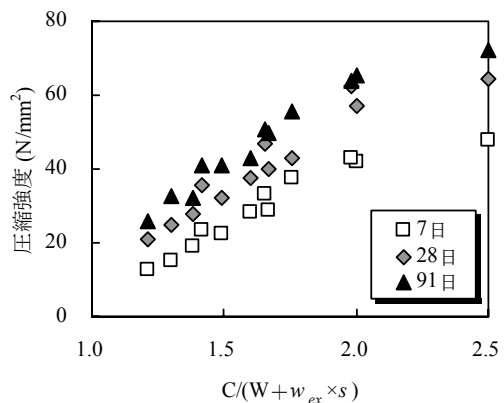


図-12 補正単位水量と圧縮強度の関係 (水中養生)

養生では, 初期の空隙構造の粗大化が再生モルタルの強度低下の原因となり, その後の空隙構造の形成は外部から供給される水分に依存し, 骨材の吸水率の影響は大きく受けにくい。図-12に水中養生における $C/(W + w_{ex} \times s)$ と圧縮強度の関係を示す。両者には良好な相関関係があり, TW よりも良い相関が良くなる結果となった。これは, 初期の空隙構造の粗大化という仮定を裏付けるデータであると考えられる。再生骨材中の全水量が強度低下に寄与するという TW の概念が必ずしも正しいとは限

らないことを示していると推測される。

封緘養生を行った場合、モルタルの強度発現性および空隙構造の形成挙動は骨材自身の吸水率によって変化する。吸水率の小さい骨材を使用したモルタルで封緘養生を行った場合、セメントの水和に伴う自己乾燥によって反応し得る水分量が低下する。自己乾燥の影響を受けて、長期的には強度増進につながらないため、水中養生と比較して封緘養生の強度の方が低い結果となる。一方、高吸水率の再生骨材を使用したモルタルで封緘養生を行うと、初期に空隙構造の粗大化が生じるものの、再生骨材自身の水分によってセメントが十分に水和し得る水分量が存在する。すなわち、再生骨材の自己養生効果を受けて、長期的には水中養生と同等にまで強度が増進する。ただし、再生骨材自身がポーラスなために頭打ちとなる強度が低く、水中養生、封緘養生ともに最終強度に大きな差は認められない。

以上から、再生骨材中の水分は2種類の作用を持つと考えられる。一つは、材齢初期において新セメントペースト部の空隙構造を粗大化する作用であり、もう一つは再生骨材自身からの水分供給による自己養生効果である。再生コンクリートにおいて、再生粗骨材のコンクリートの強度・物質透過抵抗性に及ぼす影響が再生細骨材よりも小さいとする結果³⁾は、再生粗骨材自身の表面積が小さいためと解釈できる。また、磨砕加工による表面性状を改善する処理⁹⁾が再生骨材の品質改善として有効である可能性が考えられる。以上のことを考えると、表面性状が大きく異なる再生骨材の場合、TWでは必ずしも評価できない可能性がある。今後、再生骨材の表面性状を評価した検討が必要不可欠である。

4. 結論

本研究は、再生骨材中の水分が新セメントペースト部の強度発現性および空隙構造の形成挙動に及ぼす影響を評価するため、水分供給の異なる養生条件によって強度および細孔容積を主とした検討を行った。以下に本研究から得られた知見を示す。

- (1) 養生条件に関わらず、再生骨材を使用したモルタルの強度は再生骨材の吸水率が高いほど低下する。
- (2) 封緘養生を行った場合、低吸水率の骨材は自己乾燥によって強度発現性が水中養生よりも劣るが、高吸水率の骨材は自己養生効果によって強度発現性が水中養生とほぼ同等である。
- (3) 水中養生の場合、再生モルタルの強度は50nm~2 μ mの細孔容積によって一義的に評価できる。一方、封緘養生の場合、高吸水率の再生骨材では自己養生効果が生じ、骨材の吸水率によっては強度を一義的に評価できない。

- (4) 水中養生と封緘養生における強度発現性および空隙構造の形成挙動の比較から、強度および空隙構造に及ぼす再生骨材中の水分の影響には2つの作用があると考えられた。一つは、材齢初期までにおいて新セメントペースト部の空隙構造を粗大化する作用であり、もう一つは再生骨材自身からの水分供給による自己養生効果である。特に、初期の空隙構造を粗大化する作用は再生骨材表面の凹凸部に捕捉される水分による影響の可能性が示唆された。

本研究は、科学研究費補助金若手研究B(研究代表者：九州大学 佐川康貴 No.19760305)の一環として行ったものである。

参考文献

- 1) 麓隆行, 山田優: 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, 土木学会論文集, Vol.767/V-64, pp.61-73, 2004
- 2) 佐川康貴, 松下博通, 川端雄一郎: 再生コンクリートの中性化及び塩分浸透性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1345-1350, 2005
- 3) 松下博通, 佐川康貴, 川端雄一郎: 再生細骨材を用いたモルタルの細孔構造の粗大化と強度及び耐久性の低下, 土木学会論文集, Vol.62, No.1, pp.230-242, 2006
- 4) 石橋昌史, 松下博通, 佐川康貴, 川端雄一郎: 再生細骨材を用いたモルタルの細孔構造および強度・中性化に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, pp.1487-1492, 2006
- 5) 佐川康貴, 松下博通, 川端雄一郎: 再生細骨材の品質が細孔容積と強度の関係に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp.385-390, 2007
- 6) 小川秀夫, 名和豊春, 山本正義: 磨砕処理した再生細骨材の品質がモルタルの諸特性に及ぼす影響, 土木学会論文集E, Vol.63, No.3, pp.503-517, 2007
- 7) 後藤孝治, 魚本健人: ポルトランドセメントの水和反応による硬化体細孔構造発達モデル化, 土木学会論文集, Vol.520/V-28, pp.203-211, 1995
- 8) 河野克哉, 二羽淳一郎, 岡本亨久: 高品質軽量骨材を用いた低水セメント比コンクリートの体積変化機構, 土木学会論文集, Vol.802/V-69, pp.123-136, 2005
- 9) 加藤俊充, 五十嵐心一, 川村満紀: 含水状態の異なる軽量骨材の使用による骨材周囲の組織変化, 土木学会第58回年次学術講演回講演概要集, 第5部, pp.1077-1078, 2003