

論文 再生砂置換低水セメント比モルタルにおける水分移動特性

木ノ村幸士*¹・岸利治*²

要旨: 軽量骨材コンクリートにおいて見られる骨材から周囲セメントペーストマトリックスへの水分補給特性¹⁾と同様の現象を, 再生砂置換低水セメント比モルタルで意図的に発現させることにより, 再生砂モルタルに発生する乾燥収縮を大幅に低減するとともに圧縮強度の経時的な増加を期待できる機構の解明を目指し実験を行った。本手法を用いることによって再生砂の保有する水分を活用し, 低水粉体比下において問題となる自己収縮の低減が成され, あわせて乾燥収縮の大幅な低減も可能となることから, 低水セメント比モルタルにおける全収縮量を普通砂モルタルと同程度にまで抑制できることが確認できた。

キーワード: 再生砂, 低水セメント比, 水分補給特性, 収縮ひずみ量, 圧縮強度

1. はじめに

近年, 建設産業においては, 良質な天然骨材資源が枯渇化してきており, また建設廃棄物最終処分場の不足もより深刻度を増している。このような背景を受け, 現在, 再生骨材を再度コンクリート用骨材としてコンクリート構造物へ適用し, 積極的再利用を図る技術の開発が早急に求められている。すでに現状として, 再生骨材コンクリートでは再生骨材の骨材周りに付着している原コンクリート成分に起因して乾燥収縮が増大し, また強度特性も低下するといった報告が多数なされていることを受けて, 高品質な再生骨材を得るための手段として加熱すりもみ法²⁾や偏心ローター式すりもみ法³⁾といった高次破砕処理技術が開発されてきた。しかしその一方で, 高次破砕処理を行うと, 再生粗骨材の品質が改善される反面, それに伴って排出される再生細骨材および微粒ペースト成分の量は必然的に多くなる。したがって, 循環型社会において骨材のリサイクルシステムをより合理的に機能させるためには, 今後ますます多量に発生するであろう再生細骨材および微粒ペースト成分の再利用技術を確立する必要があるものと考えられる。現状技術においては, 再生細骨

材を高品質化するためには, 再生粗骨材を高品質化する以上に, 時間, 経費ならびにエネルギーを要する。このような状況が続く限り, 再生細骨材が実施工において使用される可能性は極めて低い。このような視点に基づき, 本研究では, 再生細骨材を市販されている状態でそのまま使用しながらも, 再生細骨材の弱点を克服し, 十分な性能品質を有するまでに再生モルタルの品質を改善する技術の開発を試みることにした。そこで着目したのが, 軽量骨材において見られる骨材・ペーストマトリックス間の水分補給特性¹⁾である。軽量骨材コンクリートでは, 軽量骨材自身が内包する空隙径と周囲ペーストマトリックス中の空隙径とが大きく乖離していることから, 乾燥環境下において両者間が熱力学的平衡に達するためには, 軽量骨材が周囲ペーストマトリックスに対し水分を放出する必要がある。結果として, この特性によって外部に逸散する水量は補われる。この特性を水分補給特性と称する。本研究では, この水分補給特性を軽量骨材同様に吸水率の高い再生細骨材に適用することを目指し, さらに低水セメント比という条件を付加することで, 骨材から供給される水分を用いて骨材周囲に存在する未反応セメント

*1 東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤工学専攻 修(工) (正会員)

*2 東京大学 生産技術研究所 助教授 博(工) (正会員)

粒子に対し継続的な水和反応を誘発させ、ペーストマトリックスのさらなる緻密化に基づく収縮量の低減ならびに圧縮強度の継続的な増加を期待できないかと考えた。そこで、再生砂置換モルタルを用いた実験を行い、その機能性を検討することにした。

2. 実験概要

2.1 実験方法ならびに測定項目

水セメント比が 25%ならびに 50%であるモルタル供試体を用いて以下に示す実験を行った。使用骨材は普通砂および再生砂であり、再生砂を使用する場合は、飽水表面乾燥状態で混練し、普通砂との置換率は 100%とした。

(1) 収縮ひずみ量

測定には、4×4×16(cm)の角柱モルタル供試体を作成し、材齢 1 日で脱型後、両側面に基長 10cm としてコンタクトチップを直接打ち込む方法(図-1)を取った。各材齢において、供試体側面に埋め込んだチップから、精度 1/1000(mm)のコンタクトゲージを用いてチップ間長さを 3 回測定してその平均値を求め、得られた平均値から各面での長さ変化量を算出、基長で除して収縮ひずみに変換した。こうして供試体両側面からそれぞれの収縮ひずみ量を求め、その平均をとった。さらに各条件につき供試体を 3 本作成し、3 本の収縮ひずみ量を平均して、最終的に用いる収縮ひずみ量とした。

(2) 逸散水量

使用する供試体は収縮ひずみ量測定に用いた供試体と同一のものである。まず、供試体打設時に単位体積質量を求め、脱型直後の供試体質量から供試体初期体積を算出する。次に精度 0.1(g)のはかりを用いて供試体の質量を材齢ごとに測定し、脱型時質量からの質量減少量を求める。そして、その値を単位モルタル体積あたりの質量変化量に換算し、それをもって単位モルタル体積あたりの逸散水量(kg/m^3)とした。さらに、さきほどと同様に 3

本の値の平均し、それを最終的に用いる逸散水量とした。

(3) 圧縮強度

圧縮試験に用いる供試体は直径 5cm、高さ 10cm の円柱供試体である。圧縮試験方法はコンクリート標準示方書規準編に準ずるものとし、各条件につき各 3 本の圧縮試験を行い、その平均値を試験実施材齢における圧縮強度とした。圧縮試験は各条件につき基本的に材齢 7 日、28 日、49 日、91 日の 4 度実施した。

2.2 使用材料

本実験で使用した再生細骨材の粒度分布を図-2 に、使用した骨材の物性値を表-1 に示す。尚、使用したセメントはすべて中庸熱セメントである(比重 3.20)。

2.3 モルタルの配合ならびに養生条件

本実験で使用したモルタルの配合を表-2 に、また各角柱・円柱供試体に対する養生条件の設定および各養生条件の名称の定義を表-3、表-4 に示す。尚、W/C=25%についてはポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤を使用し、W/C=50%については分離低減剤を使用した。

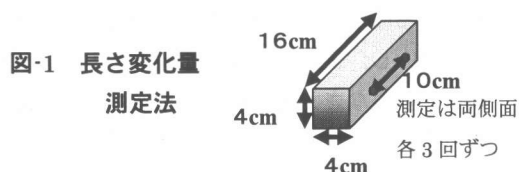


図-1 長さ変化量測定法

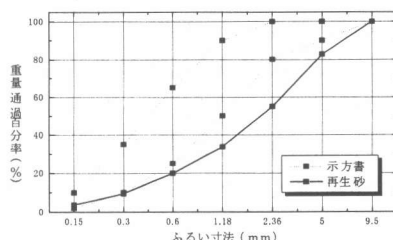


図-2 使用した再生細骨材の粒度分布

表-1 骨材の物性値

使用骨材	表乾比重 (g/cm^3)	吸水率 (%)	粗粒率 (%)
再生砂 RS	2.26	9.25	3.96
普通砂 NS	2.49	1.92	-----

表-2 実験に使用したモルタルの配合

W/C(%)	使用骨材	V _s /V _{mor} (Vol%)	W(kg)	C(kg)	S(kg)	SP/分離低減剤
50	再生砂 RS	40	369	738	904	0.554 (0.15%W)
	普通砂 NS	40	369	738	996	0.369 (0.10%W)
25	再生砂 RS	40	267	1067	904	19.21 (1.8% C)
	普通砂 NS	40	267	1067	996	12.80 (1.2% C)

表-3 収縮ひずみ量・逸散水量測定用
角柱供試体の養生条件

(材齢) 0	1	7	8	28
A	20℃封緘	20℃, RH60%		
B	20℃封緘			
Hw	20℃ 封緘	8 5℃水中	20℃, RH60%	
V		8 5℃ RH100%	20℃, RH60%	
W	20℃水中			

3. 実験結果ならびに考察

3.1 普通 W/C 再生砂モルタルの収縮挙動

W/C=50%である再生砂・普通砂モルタル供試体より得られた実験結果を次に示す。図-3 は収縮ひずみ量の経時変化を、図-4 は逸散水量と収縮ひずみ量の関係を表すグラフである。尚、図-4 中に記された数字はそれぞれ、測定時点における乾燥日数を意味している。

(1) 封緘期間の延長 (養生条件 A, B)

図-3 に着目すると、養生条件 A, B の全収縮ひずみ量は非常に漸近しており、普通 W/C 再生砂モルタルではたとえ封緘期間を延長しても、内部に存在する水分を保持するために必要な緻密なペーストマトリックスを形成することができないということが確認できる。

(2) 高温促進養生 (養生条件 Hw, V)

図-4 において、養生条件 Hw, V に着目すると、これらの養生条件では水分が逸散しても収縮が現れない状態がしばらく継続する傾向が見られる。この傾向は常温養生においては見られない傾向であり、材齢初期において高温促進養生を行ったことによる空隙構造の形成と深い相関があると考えられる。しかし、

(尚、材齢 28 日以降は、養生条件 S 以外のすべて
の供試体を 20℃, RH60% 下で気中乾燥させた)

表-4 圧縮試験用、円柱供試体の養生条件

(材齢) 0	1	7	8	28
W	20℃水中			
Hw	20℃ 封緘	8 5℃水中	20℃, RH60%	
V		8 5℃ RH100%	20℃, RH60%	
S	20℃封緘継続			

(圧縮試験実施) 材齢: 7 日, 28 日, 49 日, 91 日

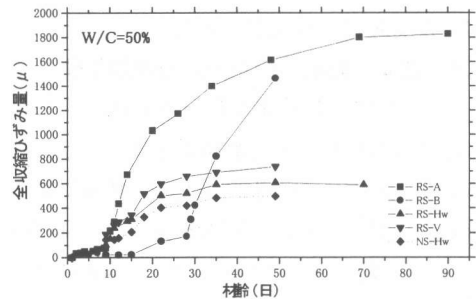


図-3 収縮ひずみ量の経時変化(W/C=50%)

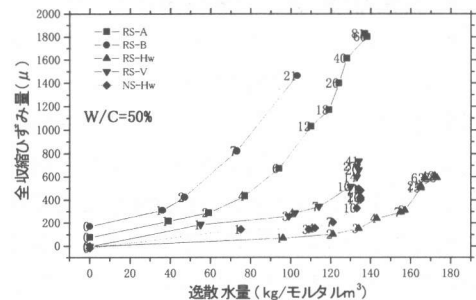


図-4 逸散水量と収縮ひずみ量の関係(W/C=50%)

そのような傾向もしばらくは継続するのであるが、やがて水分の逸散が進行するとともに、収縮ひずみを発生する段階へと移行し、両者

の関係を示す曲線は勾配を持ち始める。しかも、この傾向は、普通砂モルタル、再生砂モルタルに関わらず確認できる。このことより、普通 W/C モルタルでは、内部に存在する水分を乾燥環境下においてペーストマトリックス中の毛細管空隙内で保持しうるほど微細な空隙構造を、養生条件によって創出することは不可能であると考えられることができる。したがって、内部に存在する水分はいずれ外部へ逸散することとなり、再生砂を使用した場合内部水分量が吸水率分だけ必然的に増加する、つまり逸散水量が増える分だけ、同一配合の普通砂モルタルに比べ乾燥収縮が増大する結果となるのである(図-3)。ただし、高温促進養生を行うことにより、材齢初期において、従来は外部に逸散してしまう水分を事前に水和で消費し、またそれに伴いマトリックスを緻密化することができるので、発生する乾燥収縮は常温養生よりも大幅に低減できることが、本実験により確認できた。

3.2 低 W/C 再生砂モルタルの収縮挙動

W/C=25%である再生砂・普通砂モルタル供試体より得られた実験結果を次に示す。図-5 は収縮ひずみ量の経時変化を、図-6 は逸散水量と収縮ひずみ量の関係を表すグラフである。尚、図-6 中に記された数字は測定時点における乾燥日数をそれぞれ意味している。

(1) 封緘期間の延長(養生条件 A, B)

図-6 において養生条件 A と B を比較すると、低水セメント比再生砂モルタルでは、封緘期間を延長することによって、乾燥収縮を低減できることが確認される。再生砂を飽水させた状態で混練すると、供試体中に含まれる水分量は吸水率分だけ普通砂を用いた場合より多くなる。低水セメント比モルタルでは、骨材の周りに未反応セメント粒子が多数残存しており、未水和セメント粒子との水和に寄与する自由水の絶対量が不足している状態にある。そこで、再生骨材を使用することによってもたらされる吸水率分だけの水分増加は、

未水和セメント粒子との継続的な水和反応に貢献できる。道正ら⁴⁾の研究によれば、吸水率が 4~6%の再生粗骨材を用いた水セメント比が 35%以上の再生コンクリートでは、乾燥収縮は材齢 26 週以降も引き続き進行すると報告されている。しかし、W/C=25%という低水セメント比では、図-6 の養生条件 B において、乾燥収縮がほぼ収束していることが確認できた。この相違は、ペーストマトリックスが緻密化されたことにより、長期に及んで乾燥環境下に曝されたとしても内部に水分を維持しうるだけの非常に緻密な空隙構造を有するにいたった結果であると考えられる。ただし、養生条件 A のように、ペーストマトリックスが十分に緻密化していない時点で乾燥環境下に曝されてしまうと、普通水セメント比再生砂モルタルの場合と同様に、空隙構造が十分に緻密ではないために、ペーストマトリックス中で保持され未水和セメント粒子との後発的な水和に寄与できる水分量が減り、相対的に外部に逸散する量が増える。その結果、乾燥収縮の増大が生じるのである。以上

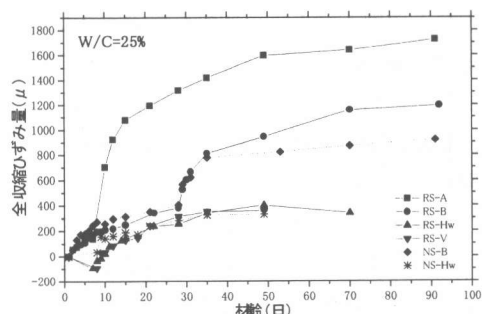


図-5 収縮ひずみ量の経時変化(W/C=25%)

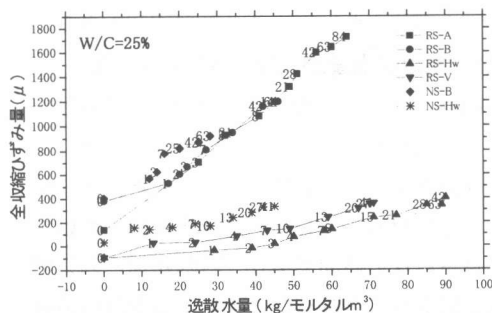


図-6 逸散水量と収縮ひずみ量の関係(W/C=25%)

より、低水セメント比再生砂モルタルでは、封緘期間を長くすることは、乾燥収縮を低減する効果があることが実証された。これは普通 W/C 再生砂モルタルでは見られない傾向である。

(2) 高温促進養生（養生条件 Hw, V）

高温促進養生である Hw, V では、乾燥環境下において水分が逸散しても乾燥収縮がほとんど現れない状態が継続している。これは普通水セメント比の場合と同様、常温養生では見られない傾向であり、材齢初期において高温促進養生を行ったことによる空隙構造の形成と深い相関があると考えられるが、高温促進養生した場合に低水セメント比モルタルと普通水セメント比モルタルが決定的に違う点は、低水セメント比モルタルでは収縮ひずみが現れない状態が、乾燥日数を経過しても継続しているという点である。これは、材齢初期において高温促進養生することによって形成される空隙構造が有する空隙径の分布状況がおそらく大小 2 極化しており、乾燥開始直後においては比較的径の大きな毛細管空隙からの水分逸散を比較的容易に許すのであるが、その一方で、とりわけ低水セメント比モルタルの場合、径の大きな空隙以外の部分は極めて小さな空隙径以下の緻密なペーストマトリックスから構成されているために供試体全体の剛性が非常に高く、その高い剛性により水分逸散に伴う毛細管張力に対し抵抗し続けることによって乾燥収縮が発生しないのではないかと解釈することができる。

さらに、低水セメント比再生砂モルタルにおいては、再生砂から自己乾燥状態にあるペーストマトリックスに対し水分の補給が成され、その水分を緻密なペーストマトリックス中で保持することによって、供試体内部に残存している未水和セメント粒子との後発的な水和反応を誘発する。このような後発的な水和反応が継続して誘発されると、ペーストマトリックスは経時的にさらに緻密化され、や

がては外環境との熱力学的平衡によって決定される水分移動に対して抵抗できるだけの水分保持能力を有する非常に緻密な空隙構造に移行する。この様子は、図-6 の養生条件 Hw, V において、乾燥日数の経過とともに水分の逸散が収束していることより確認される。

3.3 水和の進行と水分保持特性との関係

以上を踏まえ、マトリックスの水分保持能力という観点から、W/C の相違ならびに水和の進行状況に起因する水分保持特性の関係を図-7 に整理した。水和に寄与できる水分が存在している限り、緻密化サイクルは機能する。

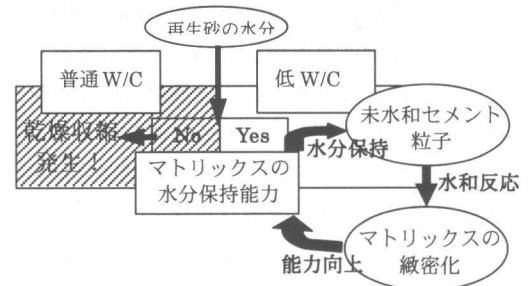


図-7 緻密化サイクルの概念図

3.4 圧縮強度

水セメント比がそれぞれ 50%, 25% である再生砂モルタル円柱供試体を用いて圧縮強度試験を行った。W/C=50% 供試体の結果を図-8 に、W/C=25% 供試体の結果を図-9 にそれぞれ示す。尚、養生条件によっては材齢 91 日での圧縮試験を実施していない場合もある。図-8 より普通 W/C 再生砂モルタルでは圧縮強度が約 30(N/mm²)で頭打ちとなっているのが確認できる。また、図-9 において、養生条件 Hw, V では高温で水和を促進させたに

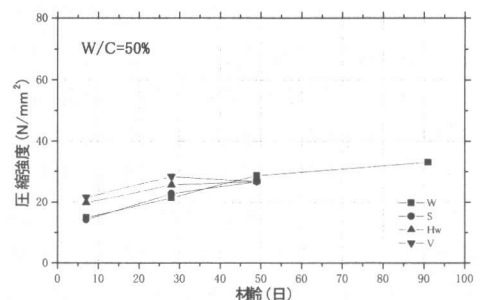


図-8 圧縮強度の経時変化 (W/C=50%)

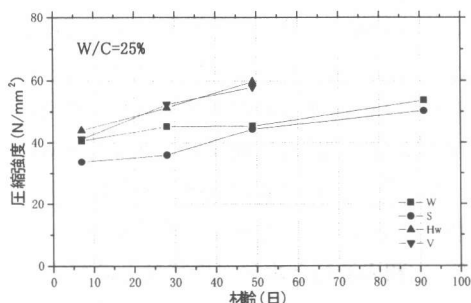


図-9 圧縮強度の経時変化 (W/C=25%)

も関わらず、材齢 7 日における圧縮強度は養生条件 W とほとんど変わらない。これらはすなわち、ペーストマトリックスが水和の進行により緻密化され強固になっているにも関わらず、圧縮強度が増加していないということであり、再生砂モルタルでは骨材の周りに付着している原コンクリートの粗悪なペースト成分ならびにそれらが内包する微細ひび割れが弱点層となって、マトリックスの強度がこの弱点層の強度を上回るようになると、結局はこの弱点層部分を端緒として圧縮破壊に至ると解釈できるのである。つまり、再生砂モルタルではこの弱点層を改質し緻密化しない限り、圧縮強度の増加を期待するのは難しいと考えられる。ここで、図-9 において養生条件 Hw, V の経時変化に着目してみると、圧縮強度が経時的に増加しているのが確認できる。これらの養生条件では、水和促進によってマトリックスが十分に緻密化しており乾燥環境下での水分逸散が大幅に抑制される。すなわち、内部の水分が保持されることで水和への寄与が可能となり、しかも、再生砂から骨材を取り囲むペーストマトリックスに対し水分の補給が成されるので、後発的な水和反応がより継続して誘発されるのである。以上より、養生条件 Hw, V で見られる圧縮強度の経時的な増加は、継続的な水和反応が、再生砂の周りに付着している弱点層内においても幾分生じた結果であると判断できる。高温促進養生に比べマトリックスの構造が粗い養生条件 W, S では、内部に存在する水分のう

ち、逸散せず水和に寄与できる水分量が減少することから、それほどの圧縮強度の増加は見られないが、緩やかに強度が増加する傾向を確認することができる。

4. まとめ

- (1) 普通 W/C 再生砂モルタルでは、封緘期間を長くしても乾燥収縮を低減する効果はない。
- (2) 普通 W/C 再生砂モルタルでは、高温促進養生することで、乾燥収縮を抑制できるが、水分逸散が生じないレベルにまでマトリックスを緻密化することはできない。
- (3) 低 W/C 再生砂モルタルでは、封緘期間を長くすることによって、発生する乾燥収縮を大幅に低減することができる。
- (4) 低 W/C 再生砂モルタルを高温促進養生すると、全体の剛性を飛躍的に高め、収縮発生を抑制できるとともに、骨材からの水分補給による後発的な水和反応の誘発により、水分の逸散を許容しない緻密な空隙構造を実現する。
- (5) 逸散水量の抑制と圧縮強度の増加には大きな相関が認められる。

参考文献

- 1) 国分正胤, 小林正几, 岡村甫, 山本泰彦: 軽量骨材コンクリートにおける問題点について, コンクリートライブラリー, Vol.24, pp.1-13, 1967
- 2) 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
- 3) 柳橋邦生, 米澤敏男, 神山行男, 井上孝之: 高品質再生粗骨材の研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.1, pp.205-210, 1999
- 4) 道正泰弘, 菊池雅史, 増田彰, 小山昭男: 原コンクリートの品質が再生コンクリートの品質に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 474 号, pp.11-20, 1995