

論文 低度処理再生骨材およびフライアッシュを使用したコンクリートの
施工性能および初期強度発現性状に関する実験的検討

岡 友貴*1・橋本 親典*2・渡邊 健*3・石丸 啓輔*4

要旨：再生骨材 H, M, L の JIS 規格制定以降、再生骨材コンクリートに関して様々な研究がなされてきた。しかしながら再生骨材 L を用いた施工性能に関する研究報告はほとんどない。本研究では、低度処理再生骨材およびフライアッシュを用いたコンクリートに対し、施工性能に関する実験的検討を行った。その結果、粗骨材の一部あるいは全量を再生粗骨材に置換することにより施工性能の向上が確認できた。また、FA 混和による施工性向上も確認することができた。また、初期強度性状に関しては、FA 無混和よりも FA 混和の配合の圧縮強度の方が大きかった。

キーワード：加振ボックス充填試験, タンピング試験, 間隙通過速度, 再生骨材, フライアッシュ

1. はじめに

地球温暖化や環境保全および資源の枯渇化に対応するために、今日の社会では循環型社会の形成が望まれている。コンクリート分野ではそれらに対応するために、産業副産物を利用したコンクリートの開発が積極的に行われている。産業副産物の中には、再生骨材やフライアッシュ（以降、FA と称す）などが挙げられる。

JIS では、再生骨材は物理的性質や処理方法ごとに L, M, H の 3 つに区分されている¹⁾。H については、使用用途が多く、実施工に用いられた実績もあるが、L については処理方法が簡便なことから低品質であるため、使用用途が制限されており、使用実績も少ないことが現状として挙げられる。

FA に関しては、再生細骨材モルタルに FA をセメントに対して外割（以降、外割と称す）で混和した場合、FA のフィラー効果により FA 無混和の場合と比べて初期材齢から圧縮強度が増進することが確認されている²⁾。

コンクリート用骨材として再生骨材を使用した場合、再生骨材は反応性骨材の有無の判定が困難なことから FA と併用し、ASR を抑制することが一般的であることなどから、再生骨材と FA を併用したコンクリートは相性が良く、硬化コンクリートの強度性状および耐久性に関する研究報告は数多くなされている^{3,4,5)}。しかしながら、フレッシュコンクリートにおける施工性能に関する検討はほとんどなされていない。

本研究では、廃品コンクリートポールを破砕・洗浄し、粒度調整を行った低度処理再生骨材を用いたコンクリートおよびそれに FA を混和したコンクリートの施工性能

について、実験的検討を行った。また、初期強度増進に着目したコンクリートの初期強度性状に関する基礎的検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料およびコンクリートの配合

使用材料を表-1 に示す。セメントは密度 3.16g/cm³、比表面積 3340cm²/g の普通ポルトランドセメントを用いた。骨材は普通細骨材・粗骨材として、それぞれ徳島県産の骨材を用いた。再生骨材に関しては、廃品コンクリートポールを破砕・洗浄・乾燥・分級した低度処理のものをを用いた。本研究で用いた再生骨材は、製造方法としては低度処理であるが、物理的性質上、再生粗骨材 M に区分される。しかしながら、これは原コンクリートである廃品コンクリートポールが高強度コンクリートであったた

表-1 使用材料

材料名		記号	物理的性質	
細骨材	普通砕砂	NS	密度2.57g/cm ³ 粗粒率2.63	吸水率1.77% 実積率66.60%
	再生細骨材	RS	密度2.32g/cm ³ 粗粒率3.50	吸水率9.59% 実積率56.54%
粗骨材	普通碎石 (5-10mm)	NG 1005	密度2.57g/cm ³ 粗粒率6.37	吸水率1.60% 実積率55.40%
	普通碎石 (10-20mm)	NG 2010	密度2.57g/cm ³ 粗粒率7.08	吸水率1.62% 実積率57.60%
	再生粗骨材	RG 2005	密度2.52g/cm ³ 粗粒率6.66	吸水率4.66% 実積率57.82%
混和材	フライアッシュⅡ種	FA	密度2.25g/cm ³ 比表面積4080cm ² /g	

*1 徳島大学大学院 先端技術科学教育部 知的力学システム工学専攻 博士前期課程（学生会員）

*2 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部 教授 工博（正会員）

*3 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部 准教授 博（工）（正会員）

*4 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部総合技術センター 技術専門職員（正会員）

表-2 コンクリートの配合

配合名	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							混和剤 (P × %)			Slump (cm)	Air (%)	
			W	C	FA	S		G			SP	AEA			AEA (FA)
						NS	RS	NG		RG					
								2010	1005	2005					
N	47	45.5	165	350	-	788	-	378	567	-	0.8	0.005	-	9.0	5.3
RG50								189	283	463	0.8	0.005	-	11	5.0
RG100								-	-	926	0.7	0.005	-	11	5.8
R		47.5	150	318	-	770	-	-	926	0.5	0.005	-	9.5	4.4	
NF							378	567	-	1.1	-	0.008	9.0	4.4	
RG50F		41.5	165	350	104	670	-	189	283	463	0.9	-	0.010	9.5	4.4
RG100F								-	-	926	0.9	-	0.010	10.5	5.0
RF		43.4	150	318	112	-	654	-	-	926	0.7	-	0.050	9.0	6.0

めと考えられる。よって本稿では、本研究で用いた再生骨材は、コンクリート塊を低度処理して得た再生骨材であるため、再生粗骨材・細骨材ともに再生骨材 L と定義する。

2.2 コンクリートの配合

コンクリートの配合を表-2 に示す。コンクリートの配合は、柱部材における鉄筋の最小あきが 50mm 未満、締固め作業高さが 3m 未満を想定し、既往の報告⁶⁾より普通コンクリートにおいて充填不良のリスクおよび材料分離のリスクがない単位セメント量とスランブの最適範囲として、単位セメント量を 350kg/m³ とし、目標スランブを 10±1.0cm、目標空気量を 5.0±1.0% とした。また単位水量を 165kg/m³ に設定した。同一のスランブおよび空気量を得るために、混和剤として、全ての配合に対してポリカルボン酸エーテル系高性能 AE 減水剤を、FA 無混和の配合に対してアルキルエーテル系 AE 剤を、FA 混和の配合に対して高アルキルカルボン酸系 AE 剤を用いた。N は普通コンクリート、RG は再生粗骨材コンクリート、F は FA 混和を示している。FA 混和の配合は FA を外割で 15%、体積置換した。R は細骨材、粗骨材ともに普通骨材を再生骨材に全量置換した。また R に関しては、高性能 AE 減水剤によるスランブの調整が困難であり、目標スランブを得ることが出来なかったため、単位水量を 165kg/m³ よりも小さく設定したが、W/C は全ての配合で同一になるように配合設計した。s/a は、単位粗骨材量が一定になる

るようにそれぞれ調整した。普通粗骨材は、土木学会が推奨する標準粒度分布の範囲内に納まるように NG2010 と NG1005 を 4 : 6 の割合で用いた。

2.3 試験方法

(1) フレッシュ性状試験

各配合に対し、コンクリートのフレッシュ性状試験としてスランブ試験を JIS A 1011 に従い、空気量試験を JIS A 1128 に従い、ブリーディング試験を JIS A 1123 に従って行った。それぞれ目標スランブ、目標空気量を満たしたことを確認し、施工性能評価試験としてタンピング試験および加振ボックス充填試験を行った。各配合の空気量およびスランブ実測値は表-2 に示す。

(2) タンピング試験

タンピング試験の試験状況を写真-1 に示す。タンピング試験は既往の研究⁷⁾を参考とし、以下の手順で行った。厚さが 1~2cm になるように表面乾燥状態の砂を敷き詰め、その上にスランブ板を置き、スランブ試験を行う。スランブおよびスランブフローを測定後、目標スランブを満たしたことを確認し、質量 1.2kg の木製棒をスランブコーンの中心から 30cm の四隅に 1 回ずつ順次落下させる。四隅に 1 回ずつ落下させる動作を 1 サイクルとし、2 サイクル、合計 8 回落下させる動作を行った後、再度スランブおよびスランブフローを測定する。この手順を木製棒の合計落下数が 48 回となるまで繰り返し行い、48 回の時点で試験終了とする。またスランブおよびスランブフロー変形量を測定する際、コンクリートが材料分離していないかを目視確認により行う。この目視確認は、コンクリートの粗骨材とモルタルが分離していないかを確認することである。

木製棒の落下回数 1 回当たりのスランブ増加量をスランブ変形係数（以降、Ksl と称す）、木製棒の落下回数 1 回当たりのスランブフロー増加量をスランブフロー変形係数（以降、Ksf と称す）とする。

(3) 加振ボックス充填試験

本実験で用いるボックス形試験器を写真-2 に示す。加

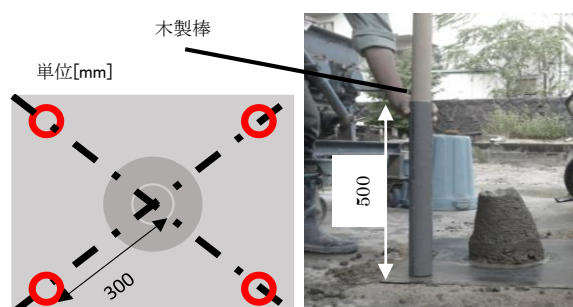


写真-1 タンピング試験

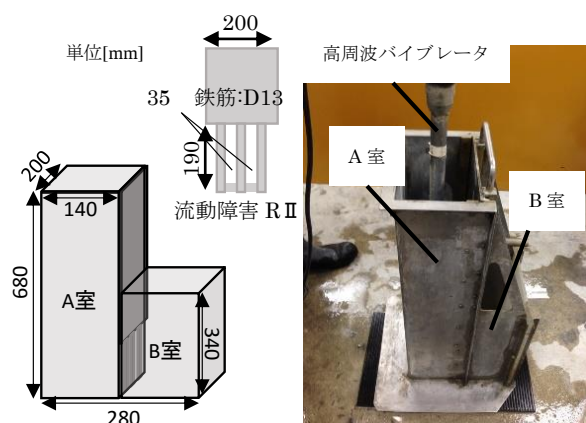


写真-2 ボックス形試験器

振ボックス充填試験は既往の研究⁷⁾を参考とし、以下の手順で行った。試験器具は JSCE-F 511 高流動コンクリートの充填性試験方法（案）に記載されているボックス形容器（以降、充填装置と称す）、高周波棒状パイプレータ（周波数：220~270Hz 程度、直径：28mm 程度）（以降、パイプレータと称す）を用いた。

まず充填装置を防振用ゴムマットの上に水平になるように設置し、充填装置に仕切りゲートおよび流動障害 R II（D13×3 本）を取り付けた仕切り板を取り付ける。なお、充填装置の内面および仕切りゲート、流動障害は十分に湿らせておく。仕切りゲートを閉じた状態で A 室にコンクリートを 3 層に分けて詰める。この時、1 層ごとに充填装置を左右に 1 往復程度揺らし、大きな空隙を作らないようにする。上面をこてでならし、上面の中央にパイプレータを底面から 100mm の位置まで静かに挿入する。次に仕切り板を引き上げる。このとき、コンクリートの流動状態を目視により確認し、B 室へのコンクリートの流入がないこと、または流入が停止したことを確認し、パイプレータを加振する。パイプレータの加振と同時に時間の計測を開始する。B 室の底面から 190mm および 300mm 高さに到達するまでの時間を記録し、コンクリートの充填高さが 300mm に到達した時点で加振を停止し、試験終了とする。

充填高さ 190mm から 300mm までのコンクリートの速度を間隙通過速度（以降、 V_{pass} と称す）とする。

(4) 強度性状試験

強度性状試験として、JIS A 1108 に従い、コンクリートの圧縮強度試験を材齢 7 日、28 日の 2 水準で行った。各材齢でそれぞれ 3 本の $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体を作製し、それぞれ平均した値を圧縮強度とした。

また材齢 28 日の供試体については、流動障害通過前後の強度のばらつきを確認するため、A 室側の上層、中層、下層、B 室側の上層、下層から各層毎に 1 本ずつの供試

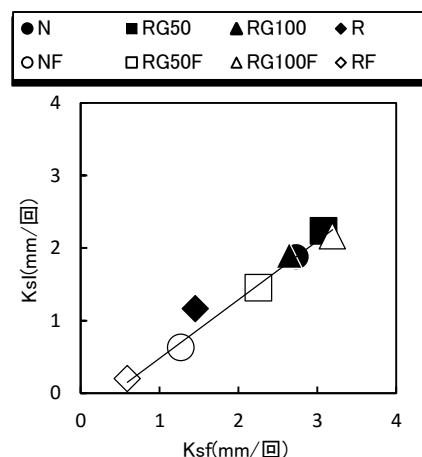


図-1 Ksl および Ksf

体を作製し、圧縮強度試験を行い、ボックス内の圧縮強度分布を評価した。同時に供試体の質量と容積から見かけ密度を算出し、ボックス内の見かけ密度分布を評価した。

(5) 示差熱重量分析

示差熱重量分析（TG-DTA）によって、モルタルの Ca(OH)_2 含有率の測定を行った。対象としたモルタルはコンクリート練混ぜ時にウェットスクリーニングし、 $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の円柱供試体に打設した。モルタル供試体は所定の材齢まで 20°C の環境下で水中養生した。試料はコンクリートカッターを用いてモルタル供試体中心部から切り出した。試料に対し、真空中でアセトンに浸漬させることで水和停止を実施した。その後、試料を $150\mu\text{m}$ 以下に粉砕し、 40°C 炉乾燥させ、未水和水を蒸発させたものに対し、示差熱重量分析を行った。測定条件は N_2 フロー環境下で昇温速度 $10^\circ\text{C}/\text{min.}$ 、温度範囲は 20°C から 500°C である。ここで、 Ca(OH)_2 含有率とは、モルタル硬化体中に占める Ca(OH)_2 の質量割合（%）である。試験材齢は圧縮試験と同様で 7 日、28 日の 2 水準とした。

3. 実験結果および考察

3.1 タンピング試験

図-1 に各配合の Ksl および Ksf の散布図を示す。FA の混和の有無に関係なく、ほぼ同一スランプであるにもかかわらず、変形係数は大きく異なった。特に FA 混和の場合は著しく変化した。

タンピング試験を行う際に材料分離の有無を目視確認により行ったが、全ての配合において材料分離が確認されることはなかった。また、FA 無混和の R 以外は、Ksl と Ksf の関係は一定の直線で近似された。つまり、FA 無混和の R 以外の配合は、Ksl よりも Ksf の方が大きくなるが、FA 無混和の R のみ、Ksl の方が大きくなり、異なる傾向を示した。

FA 無混和の配合に関しては、Ksl、Ksf とともに再生粗骨材の置換率による差はほとんど見られなく、ほぼ同じ値近辺に分布した。R は FA 無混和の配合の中で Ksl、Ksf とともに最も小さい値を示した。他の配合と比較して、s/a が大きいことによる粘性の増加と単位水量を減少させたことにより変形し難くなったことが要因と考えられる。

3.2 加振ボックス充填試験

図-2 に各充填高さまでの到達時間および Vpass を示す。FA 混和の配合は無混和の配合と比較して 190mm 到達時間が短い。FA 混和による流動性の向上の結果、初期充填での鉄筋間の間隙通過が円滑に行われたためと考えられる。R の充填高さ 300mm までの到達時間は著しく長く、R では鉄筋間で粗骨材による閉塞が生じたと考えられる。タンピング試験よりも加振ボックス充填試験の方がコンクリートに与える振動力が大きいと思われる。また、単位水量が小さいことから鉄筋間を円滑に通過するだけの十分な余剰水がなく、流動性が悪くなり、結果として閉塞が生じたと考えられる。なお、FA を混和した RF では、この材料分離による閉塞は生じなかった。

これに対し、細骨材を普通骨材に置換し、粗骨材の一部あるいは全量を再生粗骨材に置換した場合は、FA の有無に関係なく、到達時間が短くなり、Vpass が速くなった。普通粗骨材の実積率よりも再生粗骨材の実積率の方が大きいいため、再生粗骨材を用いた方が流動性に良い影響を与えたためと考えられる。

図-3 に各配合の FA 無混和に対する FA 混和の Vpass の比を示す。4 種類の配合とも FA を混和することで、同一スランプにも関わらず、Vpass が速くなった。FA を混和することで、流動性が向上し、結果として Vpass が速くなったためと考えられる。N と NF、R と RF の Vpass の比較では 3 倍程度速くなった。特に、R は材料分離を生じていたが、FA を混和することによって材料分離を抑制し、施工性能の改善効果が顕著であることが明らかになった。

一方、粗骨材の一部を再生粗骨材に置換した場合の FA の効果は、1.5 倍程度、粗骨材全量を再生粗骨材に置換した場合の FA の効果は、4 倍程度であり、混合率によって効果が異なる結果になった。混合率による効果の違いの理由については今後の検討課題としたい。

図-4 に Vpass と Ksf の関係を示す。既往の報告⁷⁾で、普通コンクリートにおいて、Vpass と Ksf にはある程度の相関性を有することが報告されている。

再生骨材を置換した場合においても、ある程度の相関性を確認できた。しかしながら、その相関性は FA 混和と無混和では異なっていた。FA 無混和の配合では、FA 混和の配合よりも強い相関性を有することが確認できた。

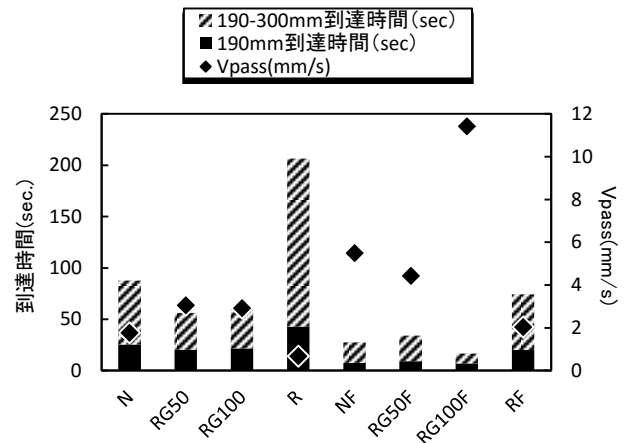


図-2 各充填高さまでの到達時間および Vpass

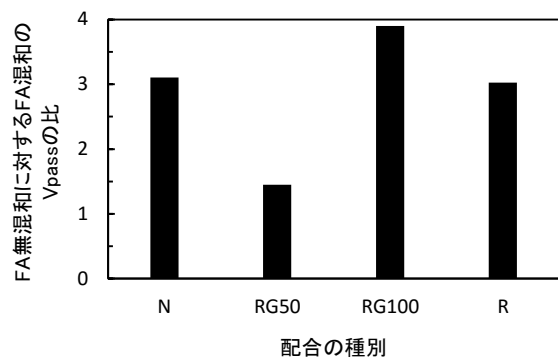


図-3 FA 無混和に対する FA 混和の Vpass の比

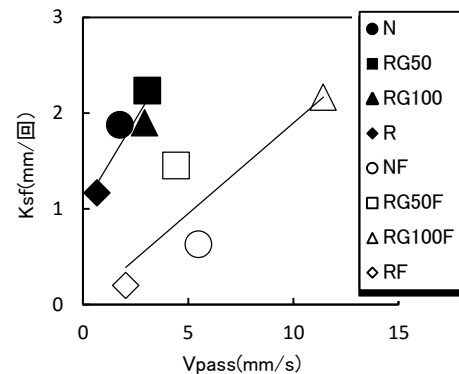


図-4 Vpass と Ksf の関係

3.3 材料分離に関する検討

加振ボックス充填試験における鉄筋通過前後の材料分離を圧縮強度の観点から検討するため、材齢 28 日における、圧縮強度を鉄筋通過前後で最も材料分離が厳しいと予想される A 室下部と B 室上部で圧縮強度の検討を行った。

図-5 にボックス内における A 室下部と B 室上部の圧縮強度分布を示す。ほとんどの配合で、B 室上部の圧縮強度よりも A 室下部の圧縮強度の方が大きくなった。しかしながら、普通コンクリートの場合においても同程度の圧縮強度の偏りが確認されるため、再生粗骨材を置換した場合においても、FA を混和した場合においても材料

分離の程度は N と同程度であると考えられる。R は圧縮強度のばらつきが最も著しかった。R における、B 室上部に対する A 室下部の圧縮強度は 1.1 倍程度であるが、その他の配合は 1.05 倍未満であった。加振ボックス充填試験において閉塞が生じたため、それに伴い材料分離も他の配合よりも顕著に表れたことが考えられる。

図-6 にボックス内における A 室下部と B 室上部の密度分布を示す。圧縮強度分布と同様にコンクリート密度も B 室上部よりも A 室下部の方が大きな値を示す傾向があった。パイプレータの加振によってブリーディング水が浮上し、上部側のブリーディング水が多くなったため、結果的に B 室上部の方のコンクリート密度や圧縮強度は小さな値を示したと考えられる。また R において、A 室下部と B 室上部のコンクリート密度に著しい差がある。この要因として、加振ボックス充填試験において、鉄筋間で閉塞が生じたため、充填高さ 300mm まで到達するまでに他の配合と比べて長時間要したことが考えられる。その結果、充填高さ 300mm までの到達時間が長くかかったため、パイプレータにおける加振時間もそれと同様に長くかかっており、ボックス上部の W/C は高く、下部の W/C は低くなったことが考えられる。よって R は加振時間が著しく長くかかったため、他の配合と比べて、A 室下部と B 室上部のコンクリート密度で著しい差を示したと考えられる。

3.4 ブリーディング試験

図-7 に各配合のブリーディング量を示す。全ての配合で、ブリーディング量は $0.1\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 未満であった。再生骨材の置換によるブリーディング量の差はほとんどなかった。しかしながら FA 混和と無混和の配合では、FA 混和の配合の方が FA 無混和よりもブリーディング量を抑制することができた。FA を外割で混和することで粉体量が増加し、粘性が増大することで、ブリーディング水の浮上の抑制に FA が寄与したためと考えられる。

3.5 圧縮強度試験

図-8 に材齢 7 日、28 日における各配合の圧縮強度を示す。全ての配合で材齢 28 日において、強度増進が見られた。FA 無混和と FA 混和の配合を比較すると、FA 混和の圧縮強度の方が、FA 無混和の圧縮強度に比べて大きかった。FA を外割置換することで粉体量が増大したことによるフィラー効果の可能性が挙げられる。フィラー効果とは、ポーラスなセメントペースト部を微粉末が充填し、緻密化することによって圧縮強度が増加する物理的效果である²⁾。また各材齢において、再生骨材コンクリートの圧縮強度は、普通コンクリートと同程度であった。一般的に、再生骨材を置換した場合のコンクリートの圧縮強度は普通コンクリートの圧縮強度よりも著しく低下することが言われている。本研究で用いた再生骨材コン

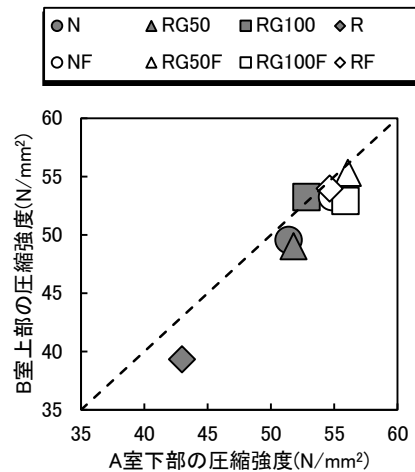


図-5 A 室上部と B 室下部の圧縮強度分布

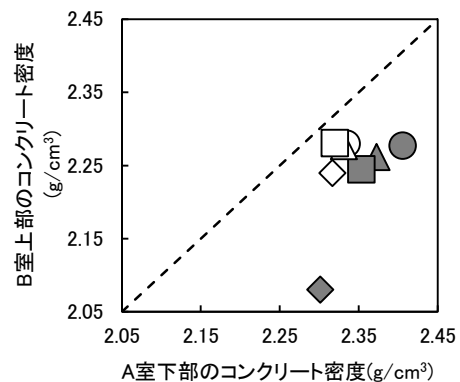


図-6 A 室上部と B 室下部のコンクリート密度分布

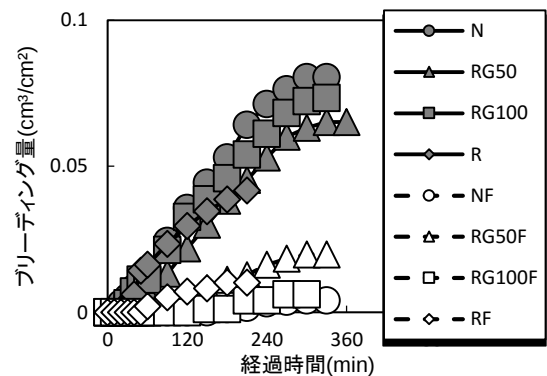


図-7 ブリーディング量

リートに関して、従来の様な顕著な強度低下が見られなかった要因は、本研究で用いた再生骨材の原コンクリートが高強度コンクリートであったためと考えられる⁸⁾。

3.6 示差熱重量分析

既往の報告⁹⁾で、初期の圧縮強度において、FA 無混和よりも FA 混和の配合の圧縮強度の方が大きい要因は、早期に再生骨材の付着モルタル中に含まれる $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の影響を受けて、早期に FA のポズラン反応が生じる可能性が報告されている。そこで、モルタル中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率を示差熱重量分析から測定を行った。

示差熱重量分析による $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率は質量割合である。したがって本実験では、置換した骨材や FA の有無によって単位質量中のセメント量が異なるため含有率の絶対量は比較することができない。しかしながら各配合で材齢の進行に伴う $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率の増減の傾向を比較するには有効である。

図-9 に各材齢における $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率を示す。各配合、材齢 7 日から 28 日の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率を比較すると、ほとんどの配合で $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率の低下は確認できない。このことから、材齢 7 日から 28 日における早期ポズラン反応は生じていないことが推察される。よって、初期の圧縮強度において、FA 無混和よりも FA 混和の配合の圧縮強度の方が大きい要因は、FA を外割で混和することによるフィラー効果の可能性が高いことが示唆される。

4. まとめ

本研究では、FA の混和が、低度処理再生骨材を用いたコンクリートの施工性能および強度発現性状に与える影響について実験的検討を行った。

本研究で得られた知見を以下に記す。

- (1) タンピング試験において、FA を混和することで、粘性が大きくなり、スランプフロー変形係数およびスランプ変形係数は小さくなる傾向を示した。
- (2) 加振ボックス充填試験において、FA を混和することで間隙通過速度は速くなる傾向を示した。
- (3) ブリーディング量に関しては、再生骨材置換による違いはあまりみられなかったが、FA を混和することでブリーディング量は抑制された。
- (4) 再生骨材コンクリートの鉄筋間での圧縮強度のばらつきは、普通コンクリートと同程度であり、材料分離の程度も普通コンクリートと同程度であると考えられる。
- (5) 高強度の原コンクリートから製造された再生骨材を使用したコンクリートは、普通コンクリートと同程度の圧縮強度を有する。
- (6) 示差熱重量分析の結果から、FA 混和の配合の早期での圧縮強度発現性は、フィラー効果に起因するものである可能性が示唆された。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書「規準編」，pp.149-158, pp.663-701, 2013.11
- 2) 永野哲平，橋本親典，渡邊健，青井洋視：廃品ポーを原コンクリートとする再生骨材モルタルの強度性状に及ぼす鉱物質微粉末の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.37, No.1, pp.1405-1410, 2015
- 3) 江口正晃，牛尾仁，橋本親典，石井光裕：廃品ポー

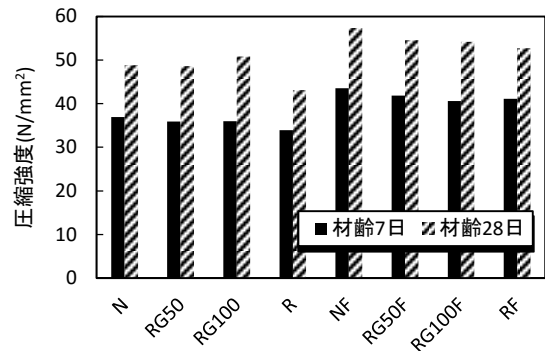


図-8 各材齢における圧縮強度

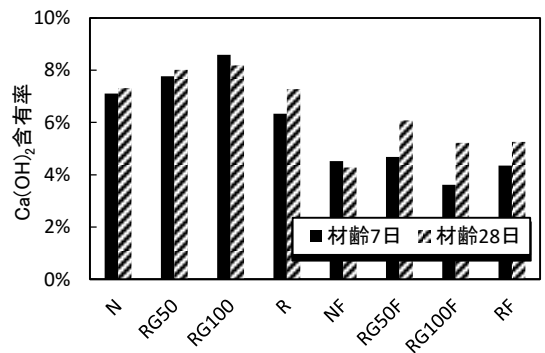


図-9 各材齢における $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率

- ルを原コンクリートとする全量再生骨材コンクリートの硬化特性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31, No.1, pp.1783-1788, 2009
- 4) 山口輝幸，牛尾仁，橋本親典，石井光裕：実機ミキサおよび室内試験練りミキサで製造した全量再生骨材コンクリートのフレッシュ性状と強度特性の比較，コンクリート工学年次論文集，Vol.32, No.1, pp.1451-1456, 2010
 - 5) 青江匡剛，平田大希，橋本親典，渡辺健：ハイポリウムフライアッシュ再生骨材コンクリートの硬化性状に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.37, No.1, pp.145-150, 2015
 - 6) 土木学会：施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施行指針（案）：p34, 2008.3
 - 7) 土木学会：コンクリートの施工性能の照査・検査システム研究小委員会（341 委員会）第 2 期委員会報告書（コンクリート技術シリーズ 102），2013.11
 - 8) 長瀧重義，佐伯竜彦，飯田一彦：再生粗骨材を用いたコンクリートの諸特性，セメント・コンクリート論文集，No.52, pp.462-467, 1998
 - 9) 松坂裕介，宮崎健治，横井克則，上田隆雄：低度処理骨材を用いた再生コンクリートの性能向上に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33, No.1, pp.1565-1570, 2011