再生骨材モルタルの初期から長期材齢までの強度発現に影響を及ぼす 鉱物質微粉末のフィラー効果に関する一考察

青井 洋視* 永野 哲平* 橋本 親典**
渡邊 健** 石丸 啓輔***

Study on the Influence of Filler Effect of Mineral Fine Powder on Strength Development of Mortar with Recycled Aggregate at the Age from 3 Days to 180 Days

by

Hiromi Aoi*, Teppei NAGANO*, Chikanori HASHIMOTO**

Takeshi WATANABE** and Keisuke ISHIMARU***

There has been a great demand of using the recycled aggregate and fly ash in the concrete structure. It is known that the compressive strength will increase in the early age when the mineral fine powder, such as fly ash, is mixed into the concrete with a part of the fine aggregate, under the condition of constant unit cement content. However, its mechanism has not been clearly understood until now. In this paper, we made experiments to explain the mechanism of the early strength development by using recycled aggregate mortar. In addition, we examined the influence of the mineral fine powder, which is mixed into the mortar, which extended the strength development of the recycled aggregate mortar from 3 days to 180 days.

From the results obtained, we found that in response to the influence of calcium hydroxide in the adhesion cement paste of recycled aggregate, the fly ash had brought forward the early pozzolanic reaction for 28 days. However unlike the pozzolanic reaction of the usual fly ash, the early pozzolanic reaction did not contribute to strength development. By mixing the mineral fine powder, the early strength development had strongly influenced the filler effect of physical action. The mixture of the recycled aggregate mortar using the mineral fine powder as a part of the fine aggregate had brought much larger strength increment ratio than the normal aggregate mortar. The results indicate that the combination of fly ash and recycled aggregate would have a good affinity.

Key words:

Mortar, Recycled aggregate, Mineral fine powder, Fly ash, Filler effect, Pozzolanic reaction

1 緒 言

現在、高度経済成長期に建設されたコンクリート構造物の更新に伴い、大量のコンクリート塊の発生が予想されている。そこで、コンクリート材料としての再生骨材の利用用途拡大が急務となっている。

これまでの著者ら¹⁾の研究において、再生骨材モルタルの細骨材の一部にフライアッシュ（以降、FAと称す）を置換することによって、FA無置換のモルタルと比較して、材齢3日や7日程度で強度増加が確認された。

再生骨材コンクリートにFAを外割置換することによって、材齢3日や7日程度で、FA無置換のコンクリートよりも強度が増加するという研究論文は、松坂ら²⁾、松下ら³⁾やKouら⁴⁾が発表している。松坂らは、強度増進の機構を、再生骨材に付着する旧セメントペースト中の水酸化カルシウム（以後、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と称す）とFAのポズラン反応が早期に発生していると考察している²⁾。松下らは、

FA等の置換により初期材齢から大幅に細孔構造の緻密化が起これと考察している³⁾。Kouらは、FA置換の有無により、材齢28日以降の強度増進に対してFAのポズラン反応が主たる原因であると論じている⁴⁾。

普通骨材コンクリートにおけるFAのポズラン反応は、材齢28日以降の長期材齢において起こる⁵⁾。セメントの水和反応による $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の生成量に依存するためである。しかしながら、再生骨材コンクリートでは、再生骨材の付着ペースト中に $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が存在する。したがって、著者らは、FAを置換した再生骨材モルタルでは、材齢3日程度の初期材齢からポズラン反応が起こると想定した。本論文では、材齢28日以前に起こるFAのポズラン反応を早期ポズラン反応と定義する。

一方、普通骨材を用いた研究で、遠藤ら⁶⁾は、「硬化活性のない鉱物質微粉末でもセメントと水から成る相においてセメント粒子間に鉱物質微粉末が入り込むと強

† 原稿受理 平成27年10月31日 Received Oct. 31, 2015 ©2016 The Society of Materials Science, Japan

* 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 〒770-8506 徳島市南常三島町
Graduate school of Advanced Technology and Science, Tokushima Univ., Minami-josanjima-cho, Tokushima, 770-8506.

** 正 会 員 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門 〒770-8506 徳島市南常三島町
Circulatory Engineering, Ecosystem design, Institute of technology and science, Tokushima Univ., Minami-josanjima-cho, Tokushima, 770-8506.

*** 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 〒770-8506 徳島市南常三島町
Circulatory Engineering, Ecosystem design, Institute of technology and science, Tokushima Univ., Minami-josanjima-cho, Tokushima, 770-8506.

Table 1 Properties of powder used.

Name	Mark	Properties
Cement	C	Ordinary portland cement
		Density : 3.16g/cm ³
		Specific surface area : 3340cm ² /g
FA II		Fly ash (JIS A 6201, Type II)
		Density : 2.29g/cm ³
		Specific surface area : 3890cm ² /g
		Ignition loss : 1.7%
		Residue on sieve with a mesh size of 45μm : 4.8%
Mineral admixture	RMP	Micro powder of crushed recycled aggregate
		Passing through the 100 μm sieve
		Residue on sieve with a mesh size of 45μm : 51.0%
	Ca	Residue on sieve with a mesh size of 75μm : 20.0%
		Calcium hydroxide (JIS K 8575)
		Special grade chemical purity is more than 96%
		Residue on sieve with a mesh size of 45μm : 42.0%
		Residue on sieve with a mesh size of 75μm : 16.8%

度が増大する。」と報告している。陶山ら⁷⁾は、「水硬性が無視できる粉体を外割混合したモルタルは、材齢初期から OPC 単味のものより圧縮強度が高い。これは細孔組織が細分化することで説明できる。」と報告している。両者の強度増加メカニズムは異なるが、鉱物質微粉末の物理的作用によって圧縮強度が増加するという点においては、同様の機構であるといえる。本論文では、微粉末の物理的作用によって細孔組織が緻密になる効果をフィラー効果と称し、再生骨材 FA モルタルの初期材齢時の強度発現に、早期ボゾラン反応とともに、このフィラー効果も寄与していると想定した。

上述した通り、FA を外割置換したコンクリートの強度発現機構は、種々の報告があるものの不明な点が多く、未解明である。そこで、本論文では、モルタル供試体を用いて、想定した二つの仮説の妥当性を検討した。

第一に、再生骨材の付着ペースト中の Ca(OH)₂ と FA のボゾラン反応について検討した。具体的には、普通骨材モルタルに対して、FA と再生骨材微粉末を混合し、強度発現に与える影響を検討した（第 2 章）。

次に、4 種類の FA に加えて 2 種類の不活性な鉱物質微粉末を使用し、外割置換した鉱物質微粉末が再生骨材モルタルの初期材齢から長期材齢にわたる強度発現性状に与える影響を検討した（第 3 章）。なお、第 3 章の実験の一部（4 種類 FA を使用した実験）は、永野がすでに論文⁸⁾として発表している。本論文では、FA 以外の鉱物質微粉末 2 種類の実験データを追加し、新たな知見を論じた。

2 再生骨材微粉末を用いた実験

本章では、再生骨材微粉末（以降、RMP と称す）と試薬特級 Ca(OH)₂（以降、試薬 Ca と称す）を混合した普通骨材モルタルを作製した。RMP には旧セメント硬化体の Ca(OH)₂ が存在する。FA を置換した再生骨材モルタルにおいて、RMP や試薬 Ca と FA が初期材齢から早期ボゾラン反応を起こすと想定した。すなわち、本章では、外割置換した FA による強度発現機構に対するボゾラン反応とフィラー効果の寄与の程度について検討した。

Table 2 Weight of 1 mixing batch (Series 1).

Name of Mix.	W/C (%)	W/P (%)	Weight of 1 mixing batch (g)				
			W	C	RMP	LS	FA II
N	50		180		0		
RMP5	53	50	189	360	18	1080	0
RMP10	55		198		36		

Table 3 Weight of 1 mixing batch (Series 2).

Name of Mix.	W/C (%)	W/P (%)	Weight of 1 mixing batch (g)					
			W	C	RMP	Ca	LS	FA II
N	50		180		0			
-FA								
RMP3	52		185		10.8			
-FA								
RMP5	53		189		18			
-FA		25		360			720	360
RMP10	55		198		36			
-FA								
Ca3	52		185			10.8		
-FA					0			
Ca5	53		189			18		
-FA								

2・1 使用材料

Table 1 に使用した各種粉体（記号：P）の物理的性質を示す。セメントは、普通ポルトランドセメントを使用した。FA は、JIS A 6201 に適合する II 種を使用した。再生骨材微粉末（RMP）は、単位セメント量が 500kg/m³ 程度の廃品コンクリートボールを破碎・洗浄したのみの低度処理再生粗骨材を一度だけジョークラッシャーに掛け、100μm ふるい通過分を絶乾状態で使用した。また、RMP の比較として、JIS K 8575 に適合する純度 96% 以上の試薬特級 Ca(OH)₂（試薬 Ca）を使用した。表中に示した 45μm ふるい残分の試験は、JIS A 6201（附属書 1）に従い行った。なお、本来は FA に対する試験方法であるが、FA と粉末度の比較を行うため、RMP および試薬 Ca に対しても同様に行った。また、同様の試験方法で 75μm ふるい残分の試験も実施した。その結果、RMP および試薬 Ca は、FA と比べて粉末度が小さく、粗粉であった。

細骨材は、大分県津久見産石灰石砕砂（記号：LS、表乾密度：2.68g/cm³、吸水率：0.87%、粗粒率：2.78、微粒分量：4.7%）を使用した。

2・2 配合

Table 2 にシリーズ 1（FA 無置換モルタル）のモルタルの 1 回の練り混ぜに使用した材料の質量を示す。水粉体比 W/P を 50%、砂セメント比 S/C を 3.0 とした。RMP は、セメント質量の 5%、10% の 2 水準で混合した。

Table 3 にシリーズ 2（FA 置換モルタル）のモルタルの 1 回の練り混ぜに使用した材料の質量を示す。シリーズ 2 の配合は、FA 無置換のシリーズ 1 と比較を行うため、一部対応させた（N と N-FA、RMP5 と RMP5-FA、RMP10 と RMP10-FA）。FA 量はシリーズ 1 における細骨材質量の 1/3 の量で一定とし、細骨材代替で置換した。RMP は、セメント質量の 3%、5%、10% の 3 水準で混合した。また、試薬 Ca は、セメント質量の 3% および 5% の 2 水準で混合した。

Fig. 1 Compressive strength of Series 1.

両シリーズとも比較用として、FAやRMPおよび試薬Caを混合しない基準モルタル (NおよびN-FA) を作製した。

なお、Table 2およびTable 3に示した配合は、練り混ぜ容積は異なる。1バッチあたり供試体 ($\phi 50 \times 100 \text{mm}$) 3本を作製するために使用した材料の量である。

2・3 モルタルの練り混ぜおよび供試体の作製

モルタルの練り混ぜはJSCE-F 505に従い以下の手順で行った。

モルタルミキサーは、容量30の機械練り用練混ぜ機を使用した。まず、練り鉢に水を入れてからセメントおよび各種粉体を投入し、低速 (自転速度: $140 \pm 5 \text{rpm}$) で30秒間練り混ぜる。次の30秒間に細骨材を投入し、ミキサの回転数を高速 (自転速度: $285 \pm 10 \text{rpm}$) に変えさらに30秒間練り混ぜた後、90秒間休止する。休止の最初の15秒間に練り鉢およびパドルに付着したモルタルをかき落とす。休止が終わった後、高速で60秒間練り混ぜる。練り混ぜ時間は、休止時間も含めて4分である。

本実験では、Table 2およびTable 3に示した材料の量で各配合3回の練り混ぜを行い、計9本の供試体 ($\phi 50 \times 100 \text{mm}$) をJSCE-F 506に準拠して作製した。作製した供試体は、材齢1日で脱型し、所定の材齢まで20℃水中養生を行った。

2・4 試験項目

(1) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、 $\phi 50 \times 100 \text{mm}$ の円柱供試体を使用し、JSCE-G 505に従い行った。試験材齢は、材齢3, 7, 28日の3水準とし、養生条件は20℃水中養生である。ただし、各材齢で異なるバッチから作製した供試体3本の圧縮強度試験を実施し、その平均値を試験値とした。

(2) 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 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率の測定を行った。分析用試料は、圧縮強度試験後の供試体中心部をコンクリートカッターで切り出し、粗粉碎した後、真空下で大量のアセトンに浸漬した。その後、0.15mm以下に微粉碎し、40℃炉乾燥を行ったものを分析用試料とした。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℃から500℃とした。試験材齢は、材齢3日、28日の2水準とした。

Fig. 2 Compressive strength of Series 2.

Fig. 3 Reduction ratio of compressive strength. (Series 2)

2・5 実験結果および考察

(1) 圧縮強度試験

Fig. 1とFig. 2にシリーズ1とシリーズ2の圧縮強度試験結果をそれぞれ示す。FA無置換のシリーズ1と比較して、細骨材質量の1/3をFAに置換したシリーズ2は、材齢3日から28日のすべての材齢で高い強度となった。一例として、NとN-FAの場合、材齢3日で 12N/mm^2 、材齢28日で 25N/mm^2 以上の強度増加である。同一W/Cに関わらず、これほどの強度増加があった理由としては、細骨材に微粒子であるFAを置換したことで、細孔が充填され、緻密化したことに起因するフィラー効果^{6), 7)}によるものであると考えられる。

一方、FAを置換したシリーズ2では、RMPや試薬Caを混合することで、W/Cが大きくなるに従い、N-FAに比べて圧縮強度が低下した。すなわち、RMPに含まれる旧セメント硬化体中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ とFAが早期ポズラン反応を起こすことによる強度発現は確認されなかった。Fig. 3にシリーズ2におけるN-FAの圧縮強度を基準として、RMPおよび試薬Caを混合したモルタルの圧縮強度低下率を示す。材齢に関係なく、混合率が増加するに従って強度低下率が大きくなった。

(2) 示差熱重量分析

Fig. 4とFig. 5にシリーズ1とシリーズ2の示差熱重量分析によるモルタルの $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含有率と材齢の関係を示す。なお、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、置換した微粉末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

Fig. 4 Ca(OH)₂ content of Series 1.

対量は比較することができない。しかしながら、各種配合で材齢の進行に伴うCa(OH)₂含有率の増減の傾向を比較するには有効であるといえる。

一般に、FAのようなポズラン活性を有する混和材を使用していない場合、セメントの水和反応の進行に伴いCa(OH)₂含有率は増加する。Fig. 4に示したシリーズ1は、FAを使用していないため、材齢の進行に伴い増加傾向であった。一例として、Nの場合、材齢3日で5.7%、材齢28日で7.2%であり、1.5%の増加である。

一方、Fig. 5に示したFAを置換したシリーズ2では、FAがポズラン反応を起こすとCa(OH)₂を消費する。N-FAの場合、材齢3日で4.0%、材齢28日で4.3%であり、0.3%の増加に留まった。すなわち、Fig. 4に示したNと比較して、増加の割合が小さかった。このことから、FAを外割置換したことで、普通骨材モルタルにおいても、材齢28日以前からFAの早期ポズラン反応が起こり、材齢3日程度の強度発現に寄与している可能性が考えられる。これに関しては、次章において、FA以外の鉱物質微粉末を加えて、フィラー効果とポズラン反応について検討する。

また、FAに加えて試薬Caを混合した2配合（Ca3-FAおよびCa5-FA）は、材齢3日から28日にかけて減少傾向を示した。これは、試薬CaとFAが早期ポズラン反応を起こしたことを意味する。しかし、前節の結果より、圧縮強度の増加はなかった。

FAに加えてRMPを混合した3配合（RMP3-FA、RMP5-FAおよびRMP10-FA）は、FA無置換のシリーズ1の2配合（RMP5およびRMP10）と増加の傾向が同様であり、RMPがFAの早期ポズラン反応に与える影響が小さいと考えられる。

以上の考察により、FAを外割置換した再生骨材モルタルにおける材齢3日程度の強度発現は、FAの物理的作用であるフィラー効果の影響が強く、RMPや試薬Caの影響は小さいと考えられる。しかし、普通骨材モルタルにおいてもFAの早期ポズラン反応が起こる可能性が示唆された。そこで、次章において、FA以外の鉱物質微粉末を加えて、詳細に検討を行う。

3 6種類の鉱物質微粉末を用いた実験

前章において、FAと再生骨材の早期ポズラン反応による圧縮強度の増加は確認されなかった。すなわち、FAを

Fig. 5 Ca(OH)₂ content of Series 2.

外割置換した再生骨材モルタルの材齢28日以前の強度増加は、FAの物理的作用であるフィラー効果であることが明らかとなった。

本章では、FAを含む計6種類の鉱物質微粉末を外割置換したモルタル供試体を作製し、鉱物質微粉末のフィラー効果が再生骨材モルタルの材齢3日から180日までの強度性状に与える影響を検討した。

3・1 使用材料

(1) セメントおよび鉱物質微粉末

Table 4に使用した各種粉体（記号：P）の物理的性質を示す。セメントは、普通ポルトランドセメントを使用した。鉱物質微粉末は、ポズラン活性を有するものとしてFA、ポズラン活性および水硬性がないものとして試薬特級炭酸カルシウム微粉末（以後、CaCO₃と称す）および試薬特級二酸化ケイ素微粉末（以後、SiO₂と称す）を使用した。FAは、JIS A 6201に適合するⅠ種、Ⅱ種、Ⅳ種および熱熱減量を1%以下に改質したFA（以降、CFAと称す）の4種類を使用した。

(2) 細骨材

Table 5に使用した細骨材の物理的性質を示す。再生細骨材は、前章と同様の単位セメント量が500kg/m³程度の廃品コンクリートポールを破砕・洗浄したのみの低度処理再生細骨材である。表中に示した物理的性質をJISで区分するとJIS A 5023に該当する再生細骨材L相当である。また、表中のペースト付着率は、濃度約5%の塩酸に再生細骨材を浸漬した後、水洗いの際に0.075mmふるいを通したものの割合である。なお、再生骨材の原コンクリートである廃品コンクリートポールは、材齢数十年のものから比較的新しいものまで含まれているが、試験に用いた再生細骨材は同一時期に採取したものである。

普通細骨材は、阿波市市場町産砕砂を使用した。

3・2 配合

Table 6にモルタルの1回の練り混ぜに使用した材料の質量を示す。なお、Table 6に示した材料の量は、供試体（φ50×100mm）20本を作製するための量である。配合名の頭文字（R, N）は再生骨材（R）と普通骨材（N）を意味する。また、それに続く記号は、置換した鉱物質微粉末（記号：MP）、数字は置換率を意味する。

再生骨材モルタルの配合は、6種類の鉱物質微粉末を

Table 4 Properties of powder used.

Name	Mark	Properties
Cement	C	Ordinary portland cement
		Density : 3.16g/cm ³
		Specific surface area : 3340cm ² /g
FA I		Fly ash (JIS A 6201, Type I)
		Density : 2.40g/cm ³
		Specific surface area : 5520cm ² /g
		Ignition loss : 1.7%
FA II		Fly ash (JIS A 6201, Type II)
		Density : 2.29g/cm ³
		Specific surface area : 3890cm ² /g
		Ignition loss : 1.9%
FA IV		Fly ash (JIS A 6201, Type IV)
		Density : 2.20g/cm ³
		Specific surface area : 1900cm ² /g
		Ignition loss : 1.9%
Mineral admixture		High-quality fly ash
		Density : 2.25g/cm ³
		Specific surface area : 3342cm ² /g
		Ignition loss : 0.6%
CC		Calcium carbonate of reagent grade
		Density : 2.72g/cm ³
		Specific surface area : 3420cm ² /g
Si		Silicon dioxide of reagent grade
		Density : 2.65g/cm ³
		Specific surface area : 1000cm ² /g

置換率 10%, 20%, 30% (細骨材質量比) で外割置換した。また、各種鉱物質微粉末の置換率の増加に伴い、水粉体比 W/P を 50% に一定にするために水量を増加させた。したがって、鉱物質微粉末の置換率の増加に伴い水セメント比 W/C は大きくなった。なお、一部の配合に対しては試験練りを実施し、高性能 AE 減水剤 (表中では Ad と称す、主成分はリグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体) を添加した。

普通骨材モルタルの配合は、CaCO₃およびSiO₂を除く4種類の鉱物質微粉末を置換率20% (細骨材質量比) で外割置換した。

また、再生細骨材の吸水率は 9.59% と高い吸水率である。そのため、表乾状態の管理が困難であった。したがって、本実験では、再生細骨材および普通細骨材は絶乾状態で使用することで統一した。

3・3 モルタルの練り混ぜおよび供試体の作製

モルタルの練り混ぜおよび供試体の作製は、前章と同様に JSCE-F 505, JSCE-F 506 に従った。なお、モルタルミキサーは、容量20ℓの機械練り用練混ぜ機を使用した。作製した供試体は、材齢1日で脱型し、所定の材齢まで20℃水中養生を行った。

3・4 試験項目

本章では JSCE-G 505 に従い圧縮強度試験を行った。ただし、各材齢で同一バッチから作製した供試体 3 本の圧縮強度試験を実施し、その平均値を試験値とした。また、圧縮強度試験には鋼製キャップ (φ 50mm) を使用した。試験材齢は、材齢 3, 7, 28, 56, 91, 180 日の 6 水

Table 5 Properties of fine aggregate used.

Properties	Recycled fine aggregate	Specification of JIS of recycled fine aggregate class L	Normal fine aggregate
Density in saturated surface-dry condition (g/cm ³)	2.32	-	2.57
Content of materials finer than 75μm sieve (%)	6.5	under 10	2.5
Absorption (%)	9.59	under 13	1.77
Adhered paste (%)	37.2	-	-

Table 6 Weight of 1 mixing batch.

Name of Mix.	W/P (%)	W/C (%)	Weight of 1 mixing batch (g)				Ad P×%
			W	C	S	MP	
R10	65	65	1404	2160	6480	0	-
RFA I 10	50				5832	648	0.25
RFA II 10							
RFA IV 10							
RCFA10							0.5
RCC10							
RSi10							
R20	80	80	1728		6480	0	-
RFA I 20	50				5184	1296	0.25
RFA II 20							-
RFA IV 20							
RCFA20							
RCC20							0.5
RSi20							0.25
R30	95	95	2052		6480	0	-
RFA I 30	50				4536	1944	
RFA II 30							
RFA IV 30							
RCFA30							
RCC30							
RSi30							
N20	80	80	1728		6480	0	-
NFA I 20	50				5184	1296	
NFA II 20							
NFA IV 20							
NCFA20							

準であり、養生条件は、20℃水中養生である。

3・5 圧縮強度試験結果および考察

(1) 再生骨材モルタルの置換率10%

Fig. 6に各種鉱物質微粉末を置換率10%で外割置換した再生骨材モルタルの圧縮強度試験結果を示す。材齢3日や7日では、すべての配合において鉱物質微粉末無置換の基準配合R10と同程度の圧縮強度であり、強度増加は確認されなかった。第2章の実験において、FAを細骨材質量の1/3に置換した場合とは異なり、鉱物質微粉末の置換率が10%と低置換率である場合、強度増加は確認できなかった。

不活性な微粉末であるうえ、比表面積が1000cm²/gと小さいSiO₂は、すべての材齢で基準配合よりも強度が低下した。また、不活性な微粉末であるが比表面積がFAとは

Fig. 6 Compressive strength of recycled aggregate mortar. (Replacement ratio of 10%)

Fig. 7 Compressive strength of recycled aggregate mortar. (Replacement ratio of 20%)

Fig. 8 Compressive strength of recycled aggregate mortar. (Replacement ratio of 30%)

Fig. 9 Compressive strength of normal aggregate mortar. (Replacement ratio of 20%)

ば同等な CaCO_3 は、材齢7日まではFA系の強度とほぼ同等であった。ポズラン活性を有する4種類のFAは、材齢28日以降の長期材齢において、ポズラン反応による強度増進が確認された。特に、比表面積が最も大きいFA I 種は、最も高い圧縮強度を示した。すなわち、置換率10%の低置換率でも、ポズラン反応による強度増進は期待できるといえる。ただし、初期材齢に期待されるフィラー効果はなかった。

(2) 再生骨材モルタルの置換率20%

Fig. 7に各種鉱物質微粉末を置換率20%で外割置換した再生骨材モルタルの圧縮強度試験結果を示す。置換率20%では、W/Cが80%となる。置換率10%と比較して、基準配合R20の圧縮強度は6材齢ともすべて低下した。

比表面積の小さい SiO_2 は、置換率20%においても強度増加はなく、基準配合よりも低い強度であった。

一方、 CaCO_3 やFAを置換した配合は、基準配合に対して強度増加が確認された。特に、不活性な微粉末である CaCO_3 においても強度増加が確認された。 CaCO_3 を置換したことによる強度増加は、ポズラン反応や水硬性では説明できない。したがって、フィラー効果⁶⁾、⁷⁾等の物理的作用が寄与していることが推察される。

4種類のFAは、材齢3日や7日では、 CaCO_3 と同等の強度を示し、材齢28日では4種類のFAが CaCO_3 の強度を大きく上回った。これは、FAのポズラン反応によるものであると考えられる。このことから、一般に材齢28日以降と説明されるFAのポズラン反応⁵⁾が材齢28日

以前にすでに起こっている可能性が示唆される。したがって、FAを外割置換した再生骨材モルタルは、材齢7日以前は CaCO_3 と同様のフィラー効果によって圧縮強度が増加し、その後の材齢では、ポズラン反応によってさらに強度増進するといえる。

(3) 再生骨材モルタルの置換率30%

Fig. 8に各種鉱物質微粉末を置換率30%で外割置換した再生骨材モルタルの圧縮強度試験結果を示す。置換率30%では、W/Cが95%と大きくなり、置換率20%の場合よりもさらに圧縮強度が6材齢とも低下した。置換率30%では、比表面積の小さい SiO_2 においても、基準配合R30に対して強度が増加した。したがって、フィラー効果は、W/Cが大きく、低強度であるコンクリートにおいてより効果が期待できる可能性が示唆される。

(4) 普通骨材モルタルの置換率20%

Fig. 9に4種類のFAを置換率20%で外割置換した普通骨材モルタルの圧縮強度試験結果を示す。一般に、同一W/Cであれば、再生骨材モルタルよりも普通骨材モルタルの方が圧縮強度は高い。しかしながら、同一W/Cの再生骨材モルタルであるFig. 7と比較すると、普通骨材モルタルの強度が低い。これは、普通骨材の5倍以上の吸水率である再生細骨材を絶乾状態で使用したため、配合上のW/Cが同じであっても、骨材の吸水率の違いにより、再生骨材モルタルの見かけのW/Cが低下したためである。

普通骨材モルタルにおいても、材齢3日からFAのフ

Fig. 10 Increasing ratio of compressive strength. (Recycled aggregate mortar)

Fig. 11 Increasing ratio of compressive strength. (Normal aggregate mortar)

Fig. 12 Correlation of increasing ratio of compressive strength from 3 days to 28 days.

Fig. 13 Correlation of increasing ratio of compressive strength from 56 days to 180 days.

ィラー効果による強度増加が確認できる。また、材齢 28 日以降の長期材齢においては、FA 置換によってポズラン反応による強度増加が確認でき、再生骨材モルタルと同様の強度性状を示した。ただし、Fig. 7 と Fig. 9 を比較すると、FA を置換していない基準配合の強度に対する FA を置換したモルタルの強度の増加割合は、普通骨材モルタルの方が小さいと言える。次節で詳細に検討する。

3・6 強度増加率による考察

本論文では、強度増加率として、以下に示す式(1)を定義した。

$$\text{強度増加率(\%)} = \{(A - B) / B\} \times 100 \quad (1)$$

ここに、A：所定の材齢の微粉末を置換したモルタルの圧縮強度、B：所定の材齢の基準配合の圧縮強度である。本節では、置換率20%で微粉末を置換した再生骨材モルタルと普通骨材モルタルについて、強度増加率によって考察した。

(1) 再生骨材モルタルの置換率20%

Fig. 10に各種鉱物質微粉末を置換率20%で外割置換した再生骨材モルタルの強度増加率を示す。

SiO₂は材齢3日から180日のすべての材齢において負の値であった。これは、SiO₂を置換したことで基準配合 R20に対して強度低下したことを意味する。

材齢3日の強度増加率は、SiO₂を除いた5種類の微粉末すべてが高い値を示し、材齢7日にかけて減少傾向を示

した。これは、遠藤ら⁶⁾が報告した普通骨材コンクリートでのフィラー効果と同様な傾向である。すなわち、フィラー効果は、セメントの水和反応が不十分で、低強度である初期材齢ほど著しく、材齢の進行に伴ってセメントの水和反応による強度が支配的となるといえる。

一方、材齢28日での傾向はFAとCaCO₃では異なった。CaCO₃は材齢7日に続いて減少したが、4種類のFAは材齢28日で上昇した。これは、再生細骨材の付着ペースト中のCa(OH)₂とFAがポズラン反応することによって、材齢28日以前に強度増進したことに起因すると考えられる。なお、絶乾状態で使用した再生細骨材の高い吸水率の影響によって、セメントペースト中のアルカリ濃度が高くなった可能性も考えられるが、表乾状態の再生細骨材を使用した既往の報告⁸⁾においても同様の結果が報告されているため、付着ペースト中のCa(OH)₂の影響が強いと考えられる。

(2) 普通骨材モルタルの置換率20%

Fig. 11に各種鉱物質微粉末を置換率20%で外割置換した普通骨材モルタルの強度増加率を示す。再生骨材モルタル (Fig. 10) と同様に、材齢3日に高い強度増加率を示し、材齢7日にかけて減少傾向を示した。つまり、フィラー効果が初期材齢ほど大きく、材齢に従って低下するという遠藤ら⁶⁾の報告と一致した。一方、材齢28日の強度増加率が FA II 種を除いて最も低い値を示した。この傾向

は再生骨材モルタル (Fig. 10) とは異なる. 普通骨材モルタルにおいては, FAのポズラン反応は材齢28日以降⁵⁾であるため, 材齢28日では強度増加率が減少傾向のままになったと思われる. したがって, 材齢28日以前にポズラン反応による強度増進が期待できるのは, 再生骨材モルタル特有の現象であるといえる.

(3) 強度増加率の相関

4種類のFAを置換率20%で置換した再生骨材モルタルと普通骨材モルタルにおける強度増加率の相関を材齢3日, 7日, 28日の初期材齢 (Fig. 12) と, 材齢56日, 91日, 180日の長期材齢 (Fig. 13) に分けて示す. 図中に示した破線は, 再生骨材モルタルと普通骨材モルタルが同じ強度増加率であることを意味する. したがって, この破線上より上側に位置することは, FA置換による強度増加率が普通骨材モルタルよりも再生骨材モルタルの方が大きいことを意味する.

Fig. 12およびFig. 13において, 材齢に関係なく, 大半のデータが破線上またはそれより上側に位置する. これは, FAを置換したことによる強度増加率が普通骨材モルタルより再生骨材モルタルの方が大きいことを意味する. したがって, 材齢3日や7日におけるFAのフィラー効果およびその後の材齢におけるポズラン反応による強度増加の程度は, 普通骨材モルタルよりも再生骨材モルタルの方が大きいといえる.

再生細骨材表面は, 付着ペーストの存在によって疎な微細構造になっていると考えられる. したがって, 新セメントペーストとの界面に存在する遷移帯は, 普通骨材モルタルよりも脆弱な層となる. 再生細骨材の一部をFA等の鉱物質微粉末に置換することで, 粗な遷移帯を含む細孔組織を緻密にし, 強度増加につながったものと考えられる.

ただし, 本実験で使用した再生細骨材は, 高強度のコンクリートボールが原コンクリートである. セメントリッチなセメントペーストが付着していたと考えられる. 今後は, 異なる再生細骨材を使用したデータの蓄積が必要であると思われる.

4 結 言

本論文は, 第一にFAを外割置換した再生骨材モルタルの早期ポズラン反応について実験的検討を行った. 次に, 4種類のFAを含む計6種類の鉱物質微粉末が再生骨材モルタルの初期材齢から長期材齢にわたる強度性状に与える影響を検討した. 本実験の範囲内で得られた結論を以下に記す.

- (1) 再生骨材微粉末を使用した実験の結果, 再生骨材微粉末中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ がFAのポズラン反応に与える影響は小さかった.
- (2) FAを含む6種類の鉱物質微粉末を用いた実験の結果, FAを外割置換した再生骨材モルタルは, 材齢3日や7日程度の初期材齢では, 微粉末の物理的作用であるフィラー効果によって強度増加することが明らかとなった. さらにその後の材齢では, FAのポ

ズラン反応による強度増進が期待できた.

- (3) 鉱物質微粉末によるフィラー効果は, W/Cが大きい低強度モルタルほど著しく, 初期材齢ほど顕著であった. また, 材齢の進行に伴って, フィラー効果による強度増加は小さくなった. ただし, 比表面積の小さい鉱物質微粉末はフィラー効果がなかった.
- (4) FAを外割置換した再生骨材モルタルでは, 付着ペースト中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の影響を受けて, 普通骨材モルタルよりもポズラン反応による強度発現時期が早かった.
- (5) FAのフィラー効果およびポズラン反応による強度増加率は, 普通骨材モルタルより再生骨材モルタルの方が大きかった.

本研究を遂行するにあたり, 四国電力(株)からFA3種類 (FA I 種, FA II 種およびFAIV種), (株) ゼロテクノ四国から高品質フライアッシュ (CfFA), 大日コンクリート工業(株) 四国工場から再生細骨材の提供を受けました. ここに付記し, 感謝の意を表します.

参 考 文 献

- 1) H. Aoi, C. Hashimoto, T. Watanabe and T. Yamaguchi, "The effect of fly-ash on dry shrinkage and freezing and thawing resistance of concrete having recycled aggregate", Proceedings of the 7th JSMS Shikoku Branch Annual Meeting, Vol.9, pp.33-34 (2011).
- 2) Y. Matsuzaka, K. Miyazaki, K. Yokoi and T. Ueda, "Improvement of performance of recycled concrete using low-level processing recycled aggregate", Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.33, No.1, pp.1565-1569 (2011).
- 3) H. Matsushita, Y. Sagawa and Y. Kawabata, "The effect of microstructure on strength and durability of mortar incorporating recycled fine aggregate", Journals of Japan Society of Civil Engineers E, Vol.62, No.1, pp.230-242 (2006).
- 4) S. C. Kou, C. S. Poon and D. Chan, "Influence of fly ash as a cement addition on the hardened properties of recycled aggregate concrete", Material and Structures (RILEM), Vol.41, pp.1191-1201 (2008).
- 5) M. Kobayakawa, K. R. Hwang, S. Hanehara and F. Tomosawa, "The effect of mix proportions and curing temperature on pozzolanic reaction of fly ash in fly ash blended cement paste", Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.21, No.2 (1999).
- 6) T. Endo and Y. Yamamoto, "Study on effect of mineral fine powder on strength development of mortar", Proceedings of the 69th JSCE Annual Meeting, V-163, pp.325-326 (2003).
- 7) H. Suyama, T. Koyama, K. Ito and Y. Matsufuji, "Study on compressive strength of concrete mixed with various types powder", Concrete Reserch and Technology, Vol.24, No.3, pp.89-100 (2013).
- 8) T. Nagano, C. Hashimoto, T. Watanabe and H. Aoi, "Effect of mineral fine powders on properties of compressive strength of recycled aggregate mortar made from concrete pole used", Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.37, No.1, pp.1405-1410 (2015).