

論文 副産物系無機粉体を外割混合したコンクリートの強度発現性状

陶山裕樹^{*1}・小山智幸^{*2}・伊藤是清^{*3}・松藤泰典^{*4}

要旨: 本研究は、各種の副産物系無機粉体をコンクリートに有効に大量混合することを目的とし、セメントに対して外割混合を行った場合の強度発現性状について検討を行った。モルタル実験によりフライアッシュ、砕石粉、石灰石粉等、結合材としての反応性の低い粉体であっても混和材として外割混合することで、初期材齢から圧縮強度が増加することを確認した。この強度増加には、混和材の外割混合により硬化体中の細孔空隙構造が細分化することによる影響がみられた。また、圧縮時の応力ひずみ関係においては、単位混和材量の増加に伴い、静弾性係数が一定のままで最大応力時の圧縮軸ひずみが増大する傾向がみられた。

キーワード: フライアッシュ、砕石粉、石灰石粉、セメント外割、強度性状、細孔空隙構造

1. はじめに

フライアッシュ、砕石粉等の無機粉体をはじめとする種々の副産物は、発生量が増大しているにも関わらず、有効な利用方法が必ずしも確立されていないものが多い。環境保全、また最終処分場が逼迫している等の状況を考慮すると、安易な埋め立ては最早許されず、早急な利用技術の確立が望まれる。副産物系無機粉体のコンクリートへの混合は有効な処理方法であると考えられるが、粉体の反応性が低い場合、セメント代替とする内割調合ではコンクリートの性能低下が懸念される。これに対し、単位セメント量を一定、即ちセメントに対して外割で粉体を混合した場合、コンクリートの性能向上を期待することができる。山崎は、鉱物質の各種粉体をセメント外割で混合することにより、例えその粉体が化学反応を起こさないものであってもコンクリートの強度が増加することを示し、その要因として粉体の物理的な作用によるセメントの水和反応の程度の増加、およびそれに伴うペースト部分の単位固相容積の変化を挙げてい

る¹⁾。平田らは、石灰石粉を増量材としての外割混合することでコンクリートの強度が増加することを示している²⁾。

筆者らは、既報³⁾においてフライアッシュを中心とした粉体をコンクリートへ大量に外割混合し、水セメント比 65% の条件において単位混和材量が 271ℓ/m³ の領域までコンクリートの強度が増加することを示している。本研究では、既報³⁾のような大量混合の領域までのコンクリートの強度増加には、粉体によるセメントの水和反応の促進よりも細孔空隙構造の細分化による影響が大きいと考え、検討を行ったものである。なお、本論文では既報³⁾の実験結果をふまえ、想定するコンクリートから粗骨材部分を除いたモルタル部分を試験対象とした。

2. 実験概要

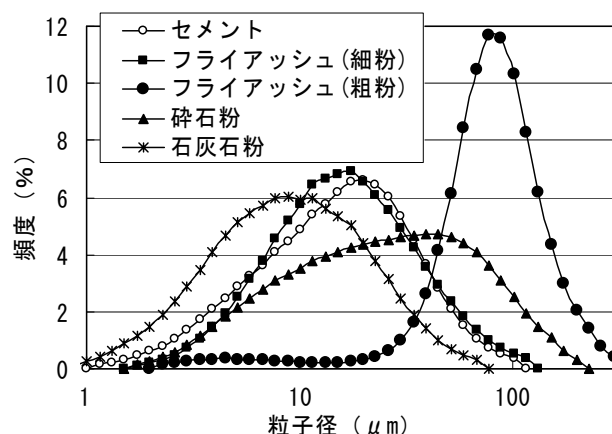
2.1 使用材料および調合

実験に使用した材料を表-1 に示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。混和材には、一般に結合材として反応性が低いま

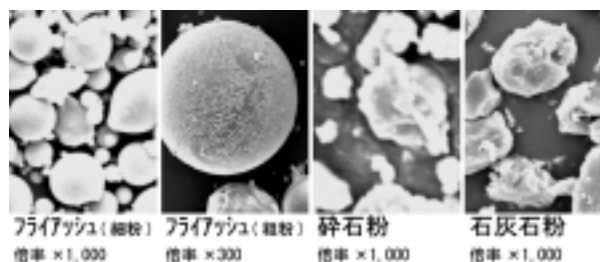
*1	九州大学大学院 人間環境学府空間システム専攻	博士課程	工修 (正会員)
*2	九州大学大学院 人間環境学研究院都市・建築学部門	助教授	工博 (正会員)
*3	九州東海大学 工学部建築学科	講師	工博 (正会員)
*4	北九州市立大学 国際環境工学部環境空間デザイン学科	教授	工博 (正会員)

表－1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント 密度：3.15g/cm ³ ，比表面積：3,720cm ² /g
水	上水道水
混和材	フライアッシュ（細粉） 密度：2.25g/cm ³ ，比表面積：3,640cm ² /g 強熱減量：1.4% フライアッシュ（粗粉） 密度：1.92g/cm ³ ，比表面積：990cm ² /g 強熱減量：1.3% 砕石粉 密度：2.75g/cm ³ ，比表面積：2,790cm ² /g 石灰石粉 密度：2.71g/cm ³ ，比表面積：3,700cm ² /g
細骨材	セメント強さ試験用標準砂 表乾密度：2.61 g/cm ³ ，吸水率：1.69%
粗骨材	（安山岩砕石，表乾密度：2.75 g/cm ³ ）
化学混和剤	高性能 AE 減水剤 標準型（I 種），ポリカルボン酸系 補助 AE 剤 （I 種），変性アルキルカルボン酸系 空気量調整剤



図－1 セメントおよび混和材の粒度分布



写真－1 混和材粒子の SEM 画像

たは反応性が無いと言われるフライアッシュ、石灰石粉および砕石粉を使用した。フライアッシュは、粉末度が異なる 2 種類のものを使用した。一方は JIS A 6201（コンクリート用フライアッシュ）に規定される II 種に適合する細粉であり、もう一方は JIS 規格外の粗粉である。砕石粉は、長崎県産の安山岩を原料とし、砕砂を乾式製造する過程で風力分級により砕砂から分離されたものを使用した。石灰石粉は、JIS A 5008（舗装用石灰石粉）に適合するものを使用した。セメントと 4 種類の混和材の粒度分布について、レーザー回折式粒度分布計により測定した結果を図－1 に示す。また、混和材粒子の SEM 画像を写真－1 に示す。フライアッシュが球形の粒子であるのに対し、砕石粉および石灰石粉は粒形が不均一で角を有していた。細骨材は、JIS R 5201 におけるセメント強さ試験に用いる標準砂を使用した。化学混和剤は高性能 AE 減水剤，補助 AE 剤および空気量調整剤（消

泡剤）を使用した。

調合は、表－2 に示すように単位セメント量を 285kg/m³，単位水量を 185kg/m³（よって水セメント比 65%）に統一し，混和材の種類および混合量を変化させた。混和材は，既報³⁾に混合量に対応させるため，フライアッシュ（細粉）を混合した場合の水粉体比が 55，35，30，25% になるように，絶対容積に 4 段階の水準を設け，大量利用の目的から練混ぜが可能な水準まで混合した。空気量はコンクリート換算で 4.5 ±1.5% とした。なお，粗骨材には既報³⁾で用いた安山岩砕石を想定し，試験体はこれを除いたモルタル部分とした。

表－2 調合

水セメント比 (%)	単位水量 (kg/m ³)	絶対容積 (ℓ/m ³)				混和材/セメント (Vol. %)	空気量 (%)
		セメント	混和材	細骨材	粗骨材		
65	185	90	0	326	(354)	0	4.5 ±1.5
			38	288		42	
			108	217		120	
			148	178		163	
			202	123		224	

2.2 練混ぜおよび養生方法

練混ぜには公称容量約 10ℓの一軸式縦型ミキサを使用した。セメント、混和材および細骨材を空練した後に注水し、5 分間の攪拌を行った。1 調合あたりの練混ぜ量は 5ℓとした。試練りにより化学混和剤の添加量を決定し、フローおよび空気量の調整を行った。高性能 AE 減水剤の添加量を図-2、15 打フロー値を図-3 に示す。フライアッシュ(粗粉)は、単位混和材量 202ℓ/m³において練混ぜが不可能であった。図-3 に示すフローの範囲内において材料分離は発生せず、モルタルを型枠内に密実に充填することが可能であった。供試体の寸法はφ50×100mm とし、所定材齢まで 20℃の環境下で封かん養生を行った。

2.3 試験項目および試験方法

材齢 3, 7, 28 日において圧縮強度および細孔空隙径分布の測定を行った。圧縮強度試験には JIS A 1108 を準用し、併せて、ひずみゲージを使用して 2 秒おきのひずみおよび静弾性係数を測定した。圧縮強度試験の後に供試体を破碎し、2.5~5mm の粒を細孔空隙径分布の測定用試料として採取した。試料は、前処理としてアセトンで自由水を抽出し、105℃に調整した電気炉で 24 時間加熱し、デシケーター中で放冷した。測定には水銀圧入式ポロシメータを用い、6nm~90μm の空隙容積を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 強度性状におよぼす混和材の影響

(1) 圧縮強度

図-4 に示すように、外割混合を行ったモルタル硬化体の圧縮強度は無混合の場合と比較して大きく、単位混和材量が増加するに従って増加した。この圧縮強度の増加は材齢 3 日においておよそ直線的であったのに対し、材齢 28 日では混和材の種類によって単位混和材量が 108ℓ/m³ の付近で増加量が低下する傾向が見られた。材齢 28 日の試験体におけるフライアッシュ(細粉)の SEM 画像を写真-2 に示す。フラ

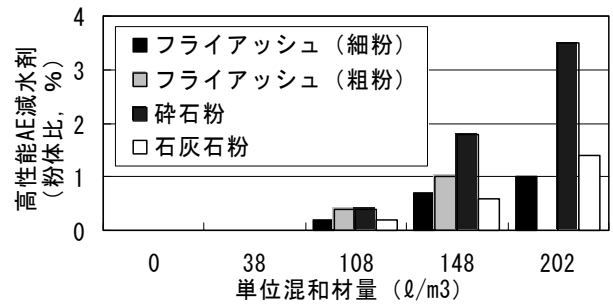


図-2 高性能 AE 減水剤の添加量

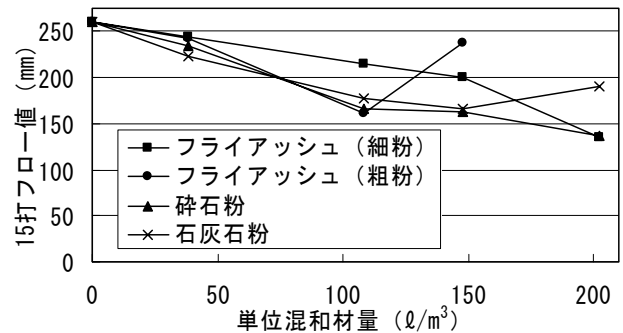


図-3 15 打フロー値

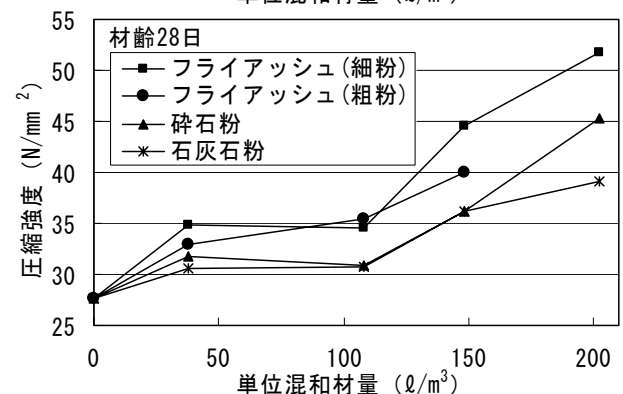
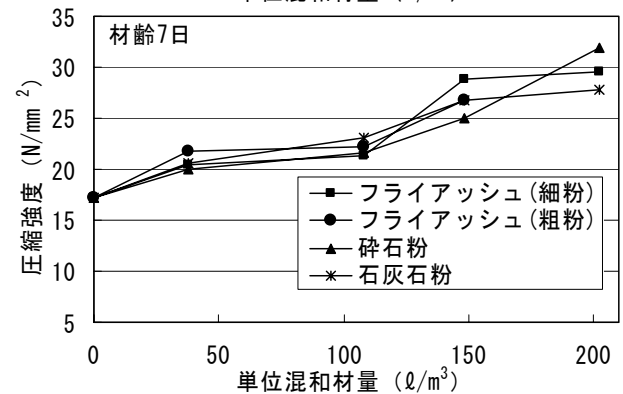
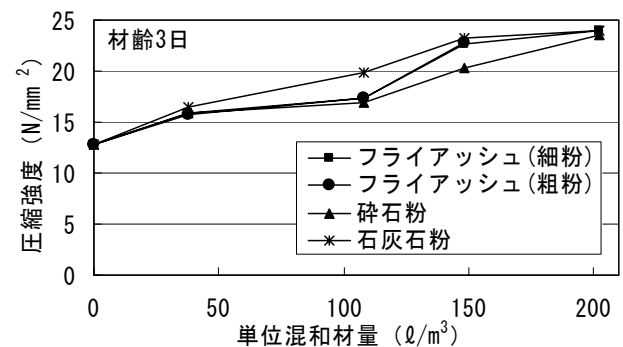


図-4 単位混和材量と圧縮強度の関係

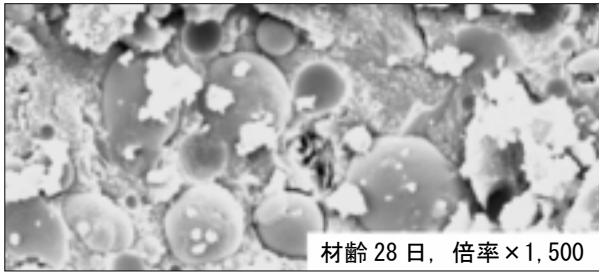


写真-2 硬化体中のフライアッシュ（細粉）

イアッシュのポズラン反応の開始時期は、養生温度 20℃で 28 日以降といわれており⁴⁾、SEM 観察においても大きな変化はみられなかったが、フライアッシュ以外の粉体を用いた試験体よりも材齢 28 日で高い圧縮強度を示した。今回検討した比表面積 1,000~4,000cm²/g 程度の範囲の粉体を混和材として外割混合することにより、反応性や、形状に無関係に、強度増加を期待できることが確認された。勿論、混合する粉体がポズラン反応性を有する場合には、長期材齢において更なる強度増加が期待できる。

(2) 静弾性係数および応力ひずみ関係

静弾性係数は、図-5 に示すように材齢に従って大きくなったが、混和材の種類および単位混和材量に関わらずほぼ一定の値となった。静弾性係数は、最大応力の 1/3 と 50μひずみの割線から求めている。一方、最大応力時の圧縮軸ひずみは、図-6 に示すように単位混和材量の増加に従って大きくなった。これらの傾向は、石灰石粉を外割混合したコンクリートの強度特性に関する報告²⁾においてもみられる。フライアッシュ（細粉）を混合した試験体の応力ひずみ関係を図-7 に示す。反応性の低い混和材を外割混合することによる圧縮強度の増加は、最大応力時の圧縮軸ひずみの増加、すなわち変形能力の向上と対応していることが明らかである。応力ひずみ関係の変化の理由として、外割調合の性質上、単位混和材量の増加に従って単位細骨材量が減少することに起因する剛性低下等の理由が推察できるが、ペースト部材による実験等で今後検証する必要がある。

3.2 細孔空隙構造と強度性状の関係

練混ぜ直後のコンクリートやモルタルにおい

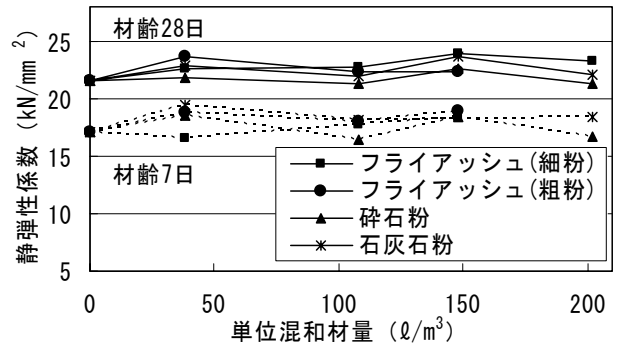


図-5 単位混和材量と静弾性係数の関係

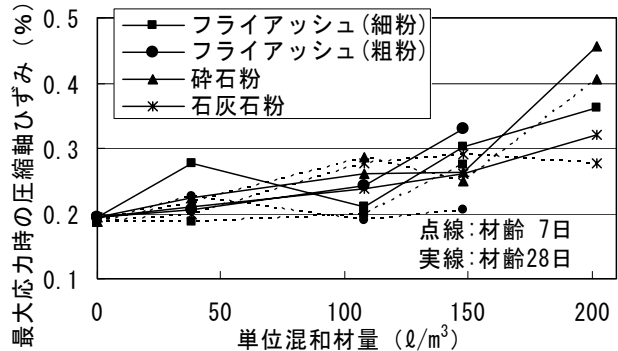


図-6 最大応力時の圧縮ひずみの変化

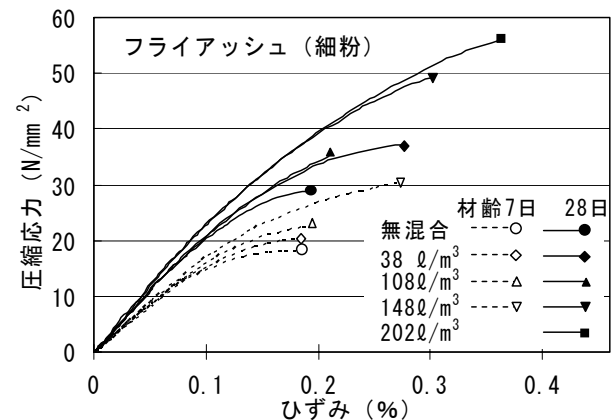


図-7 外割混合による応力ひずみ関係の変化

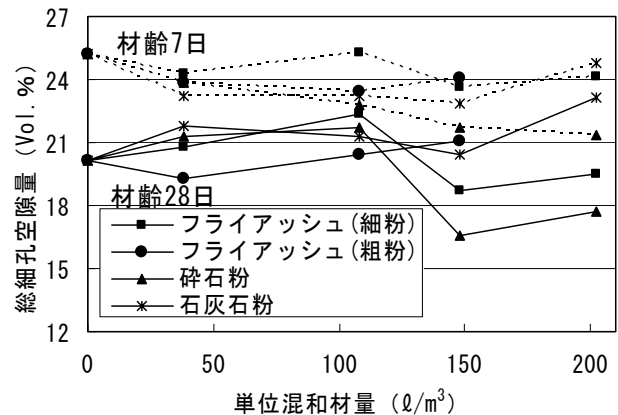


図-8 単位混和材量と総細孔空隙量の関係

て水が占めていた空間は、水和反応などによる生成物が埋めることにより材齢とともに減少する。本実験では、単位水量および単位セメント

量を一定としているので、細孔空隙量の減少が水和反応の程度を示すひとつの尺度となっている。単位混和材量と総細孔空隙量の関係を図-8に示す。材齢7日において、 38l/m^3 の混和材を混合することで総細孔空隙量が減少した。これは、粉体の外割混合によりセメントの水和反応が促進されたことにより、結合水量および材齢7日までの断熱温度上昇が増加した報告¹⁾と対応しているものと推察される。しかし、単位混和材量が 38l/m^3 以上の領域では、碎石粉を除く混和材において総細孔空隙量が減少傾向を示しておらず、一定値を推移している。また、材齢28日においては総細孔空隙量が明瞭な減少傾向を示しておらず、単位混和材の増加に伴いセメントの水和反応が促進しているとはいいがたい。これらの事象から、図-4で示した単位混和材の増加に伴う圧縮強度の増加を、セメントの水和反応の促進だけで説明することは難しい。

単位混和材量が 148l/m^3 の試験体と無混合の試験体の細孔空隙径分布を図-9に示す。材齢3日において、無混合の試験体の細孔空隙は $1\mu\text{m}$ 近辺でピークを示した。一方、混和材を外割混合した試験体は、どの混和材を使用した場合においても 50nm 近辺の空隙群が増加した。材齢が変化しても、無混合と混和材を混合したものの試験体の細孔空隙径分布はプロポーシオンが異なっており、これは平均細孔空隙径により定量的に評価できる。フライアッシュ、碎石粉および石灰石粉等の混和材を外割混合した場合、

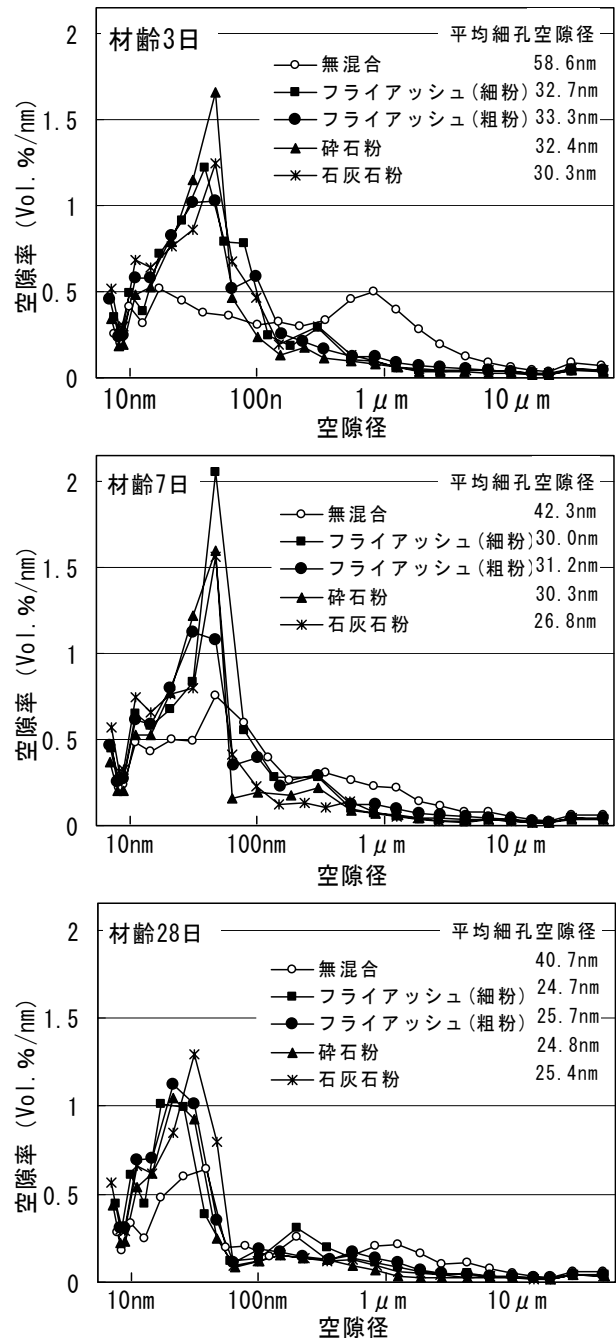


図-9 モルタル硬化体の細孔空隙径分布

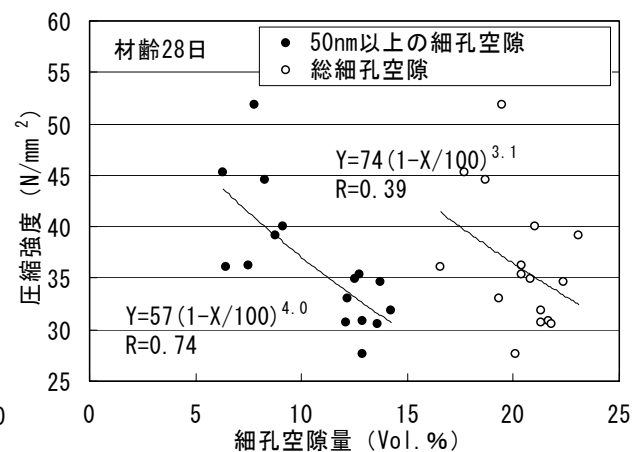
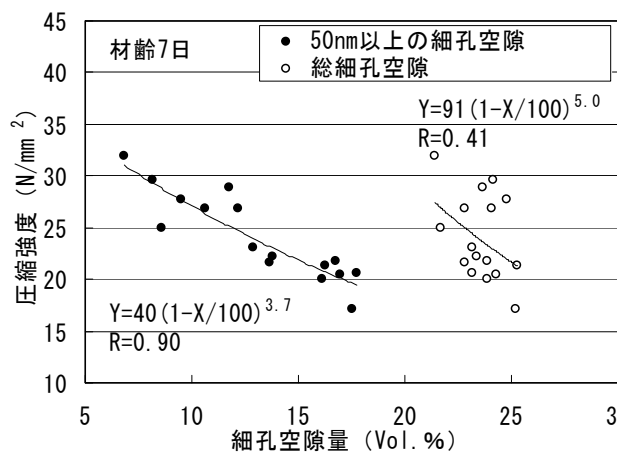


図-10 モルタル硬化体の細孔空隙量と圧縮強度の関係

混和材の化学的活性が低く硬化体中の総細孔空隙量が不変であっても、混和材が物理的に空隙を分割するため、細孔空隙構造が細分化することが考えられる。

一般に、総空隙量が一定であっても、空隙径の小さい材料ほど強度が大きいと言われている⁵⁾。また、普通セメントモルタルおよびコンクリートにおいて、径が 50nm 以上の毛細管空隙が圧縮強度に影響を与えるという報告⁶⁾もある。図-10 に細孔空隙量と圧縮強度の関係を示す。図中の近似曲線は、Balshin 式⁵⁾を準用した一例である。圧縮強度は、総細孔空隙量よりも 50nm 以上の細孔空隙量と高い相関を示した。このことから、混和材の外割混合による圧縮強度の増加が、細孔空隙構造の分割・細分化による 50nm 以上の細孔空隙の減少により生じていることが明らかである。

4. まとめ

本研究では、副産物系無機粉体のコンクリートへの有効利用を目的とし、フライアッシュの細粉および粗粉、碎石粉、石灰石粉を混和材としてセメント外割でコンクリートに混合した場合の強度性状について、モルタル部材による実験により検討を行った。得られた知見を要約して以下に示す。

- (1) いずれの混和材を外割混合した場合においても、モルタル硬化体の圧縮強度は、単位混和材量が増加するに従って増加した。同一材齢で、混和材の体積が同一であれば、またポゾラン反応など混和材自身の反応の影響が無視できる場合、粉体の種類によらず圧縮強度はほぼ同一の値を示した。
- (2) このときのモルタル硬化体の静弾性係数は、無混合の場合と比較して変化がみられず、ほぼ一定の値を示したが、単位混和材量の増加に従って最大応力時の圧縮軸ひずみが増加する傾向がみられた。
- (3) 混和材の外割混合による圧縮強度の増加を水和反応の程度に及ぼす影響だけで説明する

ことは難しく、細孔空隙構造の分割・細分化による 50nm 以上の細孔空隙の減少が、圧縮強度の増加の要因になっている。

謝辞

本研究は、平成 17～18 年度 文部科学省科学研究費補助金 基盤研究 (C)「無機副産粉体をセメント外割で大量混合するコンクリートの用法に関する研究」、および九州大学 21 世紀プログラム「循環型住空間システムの構築」の支援を受けて行った。末尾ながら謝意を表す。

参考文献

- 1) 山崎寛司：鉱物質微粉末がコンクリートの強度に及ぼす効果に関する基礎研究, 土木学会論文集, 第 85 号, pp15-44, 1962.9
- 2) 平田隆祥, 川島宏幸, 十河茂幸：石灰石微粉末を粉体の増量材として使用したコンクリートの強度特性, セメント・コンクリート論文集, No.51, pp352-357, 1997
- 3) 松藤泰典, 小山智幸, 船本憲治, 伊藤是清：石炭灰を外割大量使用するコンクリートの調合に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.12, No.2, pp51-60, 2001.5
- 4) 小早川真, 黄光律, 羽原俊祐, 友澤史紀：水比, 混合率および養生温度がフライアッシュのポゾラン反応に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp121-126, 1999
- 5) 日本コンクリート工学協会：反応モデル解析研究委員会報告書 (I), pp.115,117, 1996.5
- 6) 内川浩・羽原俊祐・沢木大介：混合セメントモルタル及びコンクリートの硬化体構造が強度発現性状におよぼす影響, セメント・コンクリート論文集, No.44, pp.330-335, 1990
- 7) 宮川美穂, 松藤泰典, 小山智幸, 伊藤是清：空隙構造モデルによる石炭灰外割コンクリートの強度発現メカニズムに関する研究, 日本建築学会大会学術梗概集, A-1, pp.205-206, 2001