

# 論文 再生細骨材と混和材を複合混合したコンクリートの力学性状および収縮性状

村上 優斗\*1・高巢 幸二\*2・小山田 英弘\*3・陶山 裕樹\*3

**要旨：**品質の異なる再生細骨材と各種混和材との組み合わせ、各混和材の混入率の違いによるモルタル性状への影響を検討した。再生細骨材の品質の低下による収縮率の増大は、混和材混入率の違いによる変動より大きくなり、再生細骨材の品質毎にある程度の集団を形成することが窺えた。再生細骨材の場合でも総水量を利用した C/TW および B/TW で圧縮強度を同等に評価できる可能性が示された。細孔量と圧縮強度および乾燥収縮率の関係において、2 $\mu$ m 以下の細孔量で評価すると圧縮強度および乾燥収縮率ともに良好な線形関係が確認でき、再生細骨材と混和材を複合混合しても 2 $\mu$ m 以下の細孔量で評価できることが示唆された。

**キーワード：**再生細骨材, フライアッシュ, 高炉スラグ微粉末, 圧縮強度, 静弾性係数, 乾燥収縮

## 1. はじめに

近年の社会情勢においては、持続的発展を可能とする建築・都市・社会の構築の基礎として再生資源の有効利用と非生産資源の 3R の徹底化によるリサイクルの再構成が重要な状況にある。特に建設業界においては、高度経済成長期に建設された各種構造物の供用期間が終了し、今後多大な建設廃材の排出が予想される。

再生骨材は路盤材として比較的多く使用されている状況であるが、構造物としての利用は極めて少ない。再生骨材は JIS により H, M, L 規格に分類されているが、普通骨材と同等な性質を示す高品質な再生骨材 H は、高度な処理を必要とするためコストが多くかかり、容易に使用することができない。そのため、再生骨材 M や再生骨材 L といった低品質な再生骨材の使用が現実的であるが、吸水率増大や絶乾密度の低下からコンクリートの強度や乾燥収縮に悪影響を及ぼすこと<sup>1)</sup>や再生骨材の品質のばらつきにより強度もばらつくことが指摘されている<sup>2)</sup>。筆者らは、再生細骨材は再生粗骨材に比べてコンクリートの力学・耐久性状に及ぼす影響が大きいことを示している<sup>3)</sup>。また、再生骨材 M や L は粗粒率が比較的大きくなるため、微粒分を補った方がフレッシュ性状を安定させることができると考えられるが、再生骨材と混和材を複合混合した研究報告はそれほど多くない。さらに、フライアッシュや高炉スラグ微粉末を混入することで、フライアッシュによるポゾラン反応、高炉スラグ微粉末の潜在水硬性によって強度増進が期待できるので、再生骨材と混和材を複合混合したコンクリートの諸特性を改善できる可能性がある。

本研究では、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末の混和材と再生細骨材を複合混合したときの力学性状および

耐久性状を検討した。再生骨材を用いて高強度、高耐久の実現と混和材を比較的大量に混入した時の効果を検証するために W/B=30% に設定し、品質の異なる再生細骨材と各種混和材との組み合わせ、各混和材の混入率の違いによる影響も検討した。

## 2. 実験概要

表-1 に使用材料を示す。セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材として標準砂と再生細骨材 M 種 (JIS A 5022)、再生細骨材 L 種 (JIS A 5023) を使用した。フライアッシュは JIS A 6201 「コンクリート用フライアッシュ」II 種に適合するものを使用し、高炉スラグ微粉末

表-1 使用材料

項目	種類	物性	記号
セメント	普通ポルトランドセメント	密度 3.16g/cm <sup>3</sup>	C
水	上水道水	—	W
細骨材	標準砂	絶乾密度 2.57g/cm <sup>3</sup>	NS
		吸水率 1.26%	
		実積率 62.4%	
		粗粒率 2.60	
	再生細骨材 M (JIS A 5022)	絶乾密度 2.21g/cm <sup>3</sup>	MS
		吸水率 6.55%	
		実積率 63.8%	
		粗粒率 3.03	
	再生細骨材 L (JIS A 5023)	絶乾密度 1.96g/cm <sup>3</sup>	LS
		吸水率 11.1%	
		実積率 73.7%	
		粗粒率 3.21	
混和材	高炉スラグ微粉末 (JIS II 種適合品)	密度 2.95g/cm <sup>3</sup>	BS
		比表面積 3970cm <sup>2</sup> /g	
	フライアッシュ (JIS II 種適合品)	密度 2.25g/cm <sup>3</sup>	FA
		強熱減量 2.25%	
混和剤	高性能減水剤	ポリカルボン酸エーテル系	AD1
	AE剤	アルキルエーテル系	AD2

\*1 北九州市立大学 国際環境工学部建築デザイン学科 大学院生 (学生会員)

\*2 北九州市立大学 国際環境工学部建築デザイン学科 教授 工博 (正会員)

\*3 北九州市立大学 国際環境工学部建築デザイン学科 准教授 工博 (正会員)

は、JIS A 6206「コンクリート用高炉スラグ微粉末」に規定される 4000 級に適合するものを使用した。表-2 に配 (調) 合を示す。配 (調) 記号は混和材無混入のものは細骨材の品質によって N(標準砂), M(再生細骨材 M 種), L(再生細骨材 L 種)と明記した (以降標準砂を用いた調合を N シリーズ, 再生細骨材 M 種を用いた調合を M シリーズ, 再生細骨材 L 種を用いた調合を L シリーズとする)。この 3 シリーズに対してフライアッシュを内割で 10%, 20%, 30%混入した配 (調) 合を FA10, FA20, FA30 (以降 FA シリーズとする) とし, 高炉スラグ微粉末を内割で 10%, 20%, 30%混入したものを BS10, BS20, BS30 (以降 BS シリーズとする) とした。本研究は計 21 配 (調) 合で実験を行った。単位水量は 170kg/m<sup>3</sup>, 単位セメント量は混和材無混合で 567kg/m<sup>3</sup>とした。なお, 実験はコンクリートから粗骨材を除いたモルタルで行った。目標モルタルフローは 18±2cm, 目標空気量は 6.2±1.5%とし, 測定項目は圧縮強度, 乾燥収縮率, 細孔容積とした。圧縮強度はφ50×100mm の円形供試体を用い, 脱型は材齢 1 日に行い, その後 20±1℃の環境下で水中養生とした。材齢 28, 91 日に JIS A 1108 に準じ圧縮強度試験を実施した。また, 乾燥収縮率は JIS R 5021 に規定する 40×40×160mm の供試体用角柱型枠を使用し, JIS A 1129-3 の「モルタルおよびコンクリートの長さ変化測定方法—第 3 部: ダイアルゲージ方法」に準じて材齢 91 日まで測定した。材齢 1 日で脱型した後, 20±1.0℃で水中養生を 7 日間行い, 水揚げ後両端をシールし基長を測定した。基長の測定後は温度 20±1.0℃, 相対湿度 60±5.0% の恒温室で養生し, 所定の材齢で長さ変化を測定した。また, 細孔容積測定は材齢 28 日の圧縮試験後の供試体を破砕して, アセトンを用いて水和を停止した後に D-dry 乾燥を行い, 水銀圧入ポロシメータによって 6nm~90μm までの細孔容積を測定した。

表-2 配 (調) 合

調合記号	W/C	W/B	単位質量 (kg/m <sup>3</sup> )							
	(%)	(%)	W	C	FA	BS	S	G		
N	30.0	30	170	567	0	0	700	(945)*		
M							643			
L							630			
N+FA10	33.3			170	510		57	0	692	(934)*
M+FA10									623	
L+FA10									580	
N+FA20	37.5			170	453		113	0	683	(923)*
M+FA20									628	
L+FA20									615	
N+FA30	42.9			170	397		170	0	675	(912)*
M+FA30									621	
L+FA30									608	
N+BS10	33.3	30	170	510	0	57	698	(943)*		
M+BS10							628			
L+BS10							585			
N+BS20	37.5			170	453	0	113	0	696	(940)*
M+BS20									640	
L+BS20									627	
N+BS30	42.9			170	397	0	170	0	694	(938)*
M+BS30									638	
L+BS30									625	

\*) 粗骨材の想定量

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 フレッシュ性状

図-1 に混和材混入率と目標スランプフローを得るための高性能減水剤の添加量の関係を示す。FA シリーズにおいては細骨材の品質に関わらず全配 (調) 合において, フライアッシュの混入量の増加とともに薬剤添加量も増加した。また, BS シリーズでは標準砂を用いたものは N+BS10 で一度低下し, N+BS20 および N+BS30 で増加した。一方, 再生細骨材を用いたものでは M, L ともに BS10, BS20 において無混入より増加し, BS30 では無混入よりも低い添加量を示した。従って, フライアッシュを混入することで薬剤添加量は増加し, 高炉スラグ微

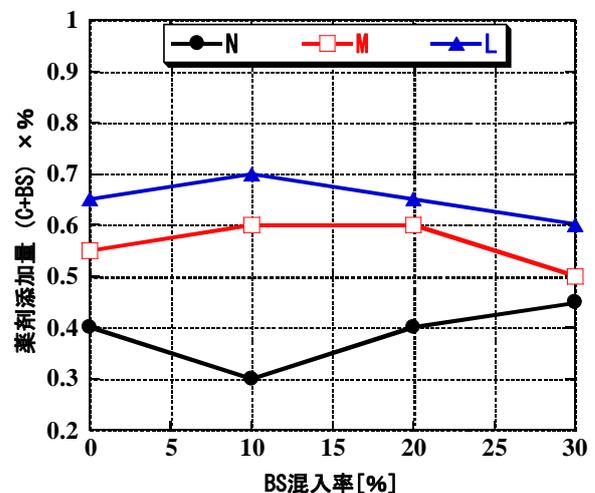
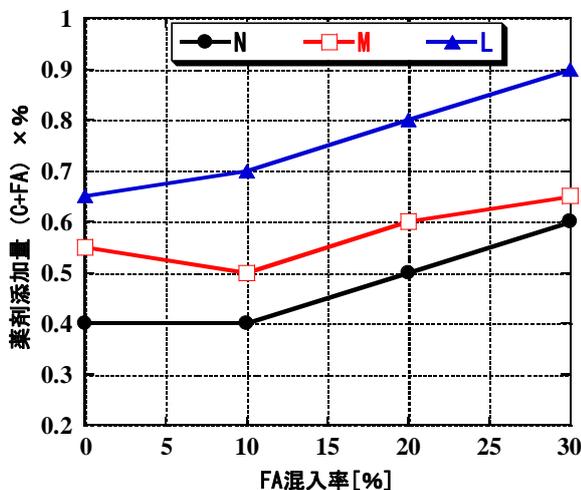


図-1 混和材混入率と薬剤添加量の関係

粉末を混入することで薬剤添加量を削減できる可能性が示された。

### 3.2 圧縮強度

図-2に材齢28日および91日における混和材混入率と圧縮強度の関係を示す。FAシリーズにおいて、標準砂を用いたもので比較すると材齢28日および材齢91日ともに混入率10%で強度が増進し、その後混入率の増加とともに圧縮強度は低下した。その減少率は材齢28日より材齢91日のほうが小さかった。再生骨材を用いたもので比較すると材齢28日ではフライアッシュを混入することで強度が低下した。しかし、材齢91日では無混入のものと同程度の強度を示した。これはフライアッシュ混入によるポズラン反応によって強度が増進した結果と考えられる。従って、W/C=42.9以下のときフライアッシュを内割混入してもポズラン反応に必要なセメント量が確保でき圧縮強度が改善できた。BSシリーズにおいて、標準砂を用いた調合で比較すると材齢28日および91日で高炉スラグ微粉末の混入率の増加とともに圧縮強度は増加した。再生骨材M種を使った調合では混入率10%および20%で強度が増進し、混入率30%で低下した。しかし、どの混入率でも無混入のものより高い圧縮強度を示す結

果となった。Fシリーズ、BSシリーズともに0~30%までの混入率の変化よりも細骨材の品質の違いによる圧縮強度の低減の方が大きかった。特にM種とL種の差が大きくなることが確認された。

### 3.3 静弾性係数

図-3に混和材混入率と静弾性係数の関係を示す。NシリーズはM、Lシリーズよりも高い静弾性係数を示した。一般的に単位容積重量が大きいほど静弾性係数は高い値を示すとされており、本実験の結果は、再生細骨材を用いることで単位容積重量が低くなりこのような結果が得られたと考えられる。また、本実験ではN、M、Lシリーズで比較すると若干の大小はあるものの混和材の種類、添加率に関係なく無混入と同程度の値を示す結果となった。静弾性係数も圧縮強度と同様に混和材混入率の変化よりも細骨材の品質の違いの方が大きかった。圧縮強度ではMシリーズとLシリーズの間で大きな差が確認されたが、静弾性係数はNシリーズとMシリーズで若干大きな差があるように見受けられたが圧縮強度より概ね均等に差が生じた。静弾性係数は圧縮強度より単位容積重量の影響を受ける可能性がある。

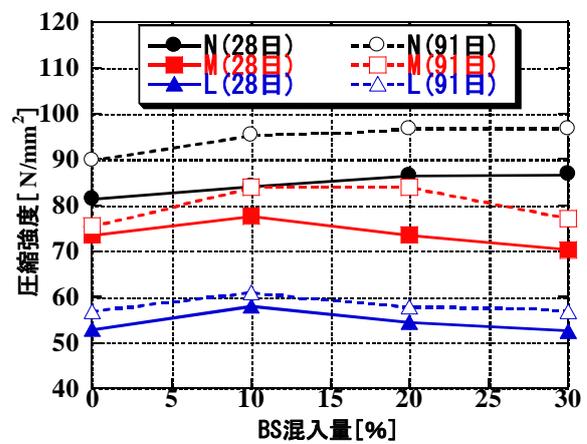
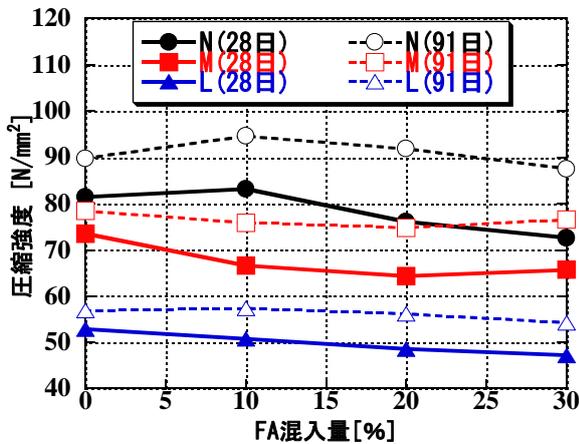


図-2 混和材混入率と圧縮強度の関係

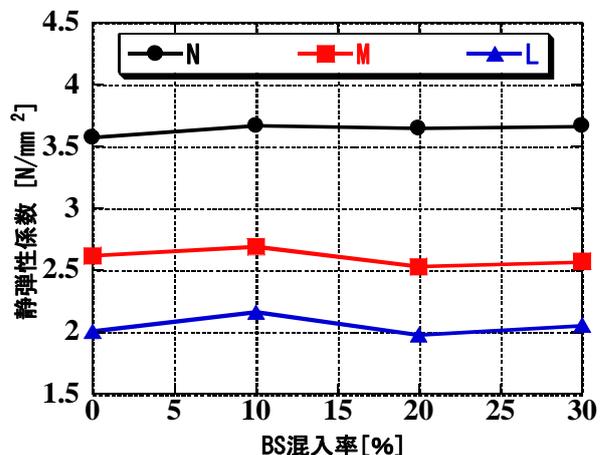
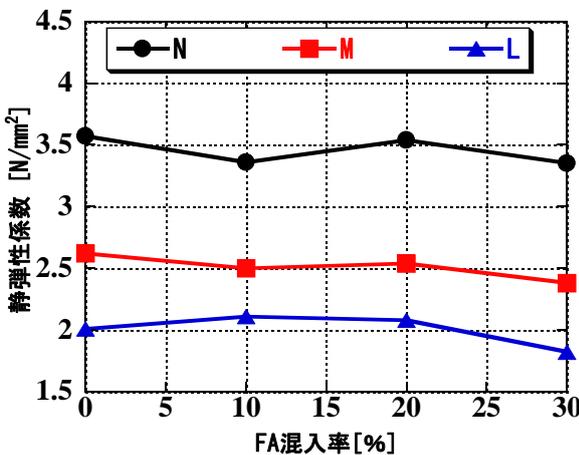


図-3 混和材混入率と静弾性係数の関係

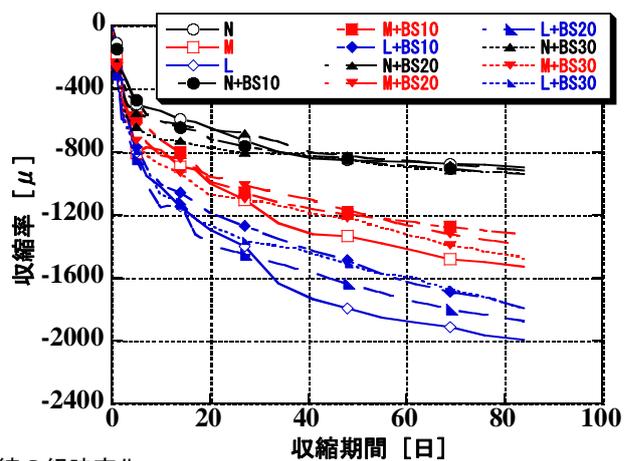
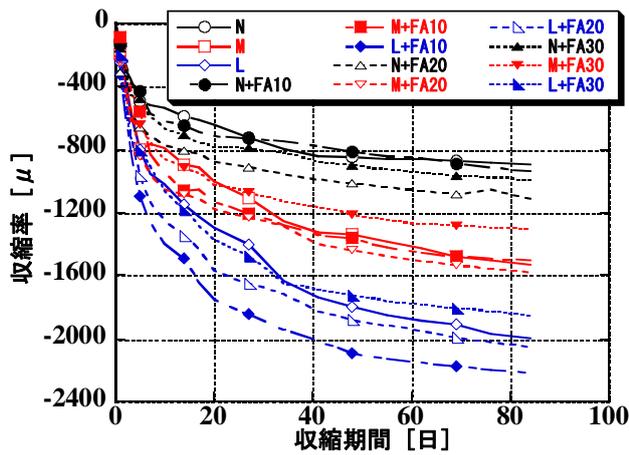


図-4 乾燥収縮の経時変化

### 3.4 乾燥収縮

図-4にFAシリーズ、BSシリーズにおける乾燥収縮率の経時変化を示す。FAシリーズにおいて、標準砂を用いたもので比較するとN+FA10はNと同様な収縮率を示したが、以降混入率が増加すると収縮率は増加した。再生細骨材M種を用いたもので比較すると混入率10%、20%では無混入と同等の収縮率を示したが、M+FA30では無混入よりも収縮率が低減した。LシリーズもMシリーズ同様にL+FA10で無混入より収縮率が増進し、L+FA30は無混入より収縮率が抑制された。BSシリーズにおいて標準砂を用いたもので比較すると高炉スラグ微粉末の混入率に関わらず無混入の調査と同等の収縮率を示した。しかし、Mシリーズ、Lシリーズでは高炉スラグ微粉末を混入することで乾燥収縮が低減された。この結果より、再生細骨材を用いたモルタルにおいてフライアッシュ30%内割、または高炉スラグ微粉末の内割によって乾燥収縮を抑制する可能性が示された。FAシリーズ、BSシリーズともに再生細骨材の品質の低下による収縮率の変動は、混和材混入率の違いによる変動より大きくなり、再生細骨材の品質毎にある程度の集団を形成することが窺えた。FAシリーズよりBSシリーズの方が収縮率は小さくなったが、無混合より大きな収縮率の改善は確認されなかった。

### 3.5 モルタル中の総水量と圧縮強度及び乾燥収縮の関係

麓ら<sup>4)</sup>は、再生骨材を用いた再生コンクリートにおいて圧縮強度は、単位セメント量(C)と骨材の全含水量を考慮したコンクリート中の総水量(TW)の比であるC/TWと相関が高いことを明らかにしている。ここで、TWは単位細骨材体積と細骨材吸水率および細骨材絶乾密度の積による細骨材中の水量と単位水量の和によって求めている。また、C/TWの考えの延長として、セメント、混和材全てを含めた単位結合材量Bを求め、その単位結合材量Bと単位総水量TWの比を計算しこれを結合材総水量比(B/TW)と呼ぶことにした。図-5に材齢28日における混和材混入率と各混和材混入率でのC/TWおよび

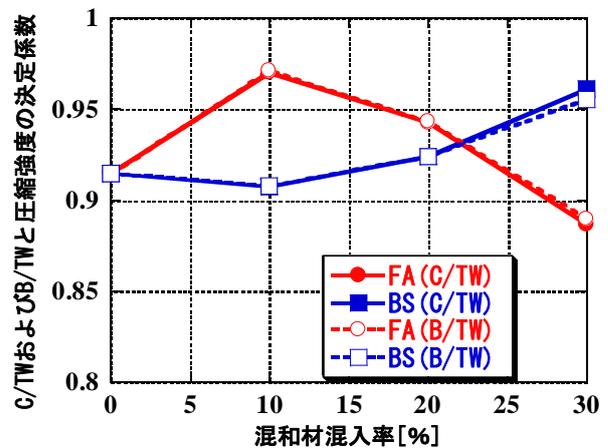


図-5 混和材混入率と圧縮強度の決定係数の関係

B/TWと圧縮強度を直線回帰した時の決定係数の関係を示す。FAシリーズにおいて混入率10%および20%で決定係数は無混入のものより高くなり、30%混入で低下した。対照的に、BSシリーズでは混入率10%の時に決定係数が低下し、その後混入率が増加するとともに決定係数は増加した。この傾向はFAシリーズ、BSシリーズともにC/TWとB/TWに相違がなかった。さらに、材齢91日でも同様な結果を示した。従って、再生細骨材を使用した場合、モルタル中の総水量で圧縮強度を予測する際、C/TW、B/TWともに同等に評価できる可能性が示された。図-6に材齢91日におけるC/Wと単位セメント容積あたりの収縮率の関係を示す。C/Wと単位セメント容積あたりの収縮率には細骨材の品質ごとに直線関係を示す傾向があった。その決定係数は標準砂を用いたもので0.94と高く、再生細骨材を用いた場合では0.85を示した。従って、C/Wでは細骨材の品質ごとに収縮率を評価できるものの、すべての品質で統一的に評価できないことが示唆された。図-7および図-8にC/TWおよびB/TWと単位セメント容積あたりの乾燥収縮率の関係を示す。麓ら<sup>4)</sup>は単位セメント容積あたりの乾燥収縮率とC/TWに高い相関があることを明らかにしている。本実験においてもC/TWと単位セメント容積あたりの乾燥収縮率の関係

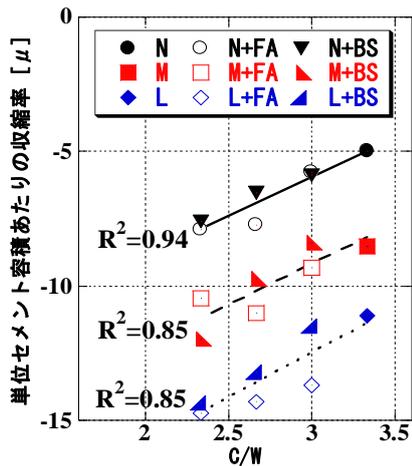


図-6 C/Wと単位セメント容積あたりの収縮率の関係

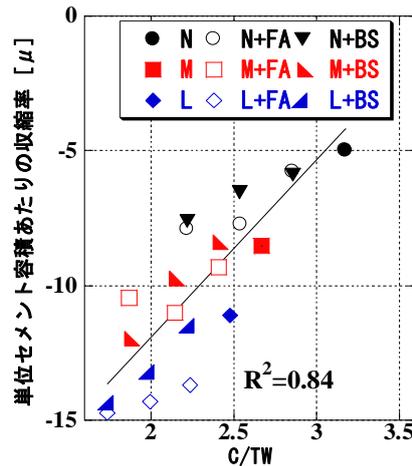


図-7 C/TWと単位セメント容積あたりの収縮率の関係

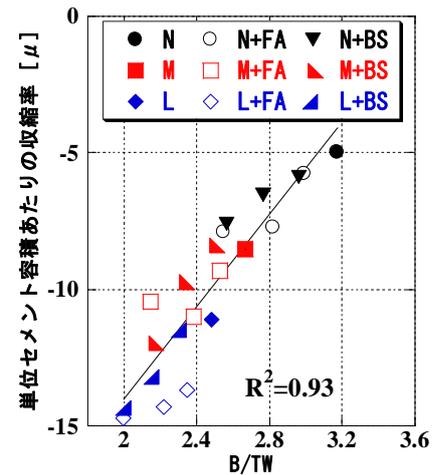


図-8 B/TWと単位セメント容積あたりの収縮率の関係

は既往の研究と同様に C/TW の増加とともに収縮率も増加して直線関係を示し、その決定係数は 0.84 となった。次に、B/TW と単位セメント容積あたりの乾燥収縮率の関係を見ると、C/TW と同様な傾向を示し、その決定係数は 0.93 と C/TW で評価した際よりも高い値を示した。従って、総水量で乾燥収縮率を評価する際、C/TW よりも B/TW で評価することでより良好に評価できることが確認できた。なお、単位結合材容積あたりの収縮率と B/TW の関係においてその決定係数は 0.19 となり直線関係を示さなかった。

### 3.6 細孔容積と圧縮強度および乾燥収縮の関係

図-9 に材齢 28 日における総細孔量を示す。混和材無混入では標準砂、再生細骨材 M 種に対して再生細骨材 L 種を使用すると総細孔量が増加した。N シリーズでは混和材の種類によらず、混和材混入によって総細孔量が 4 割ほど減少した。しかし、M シリーズではフライアッシュ混入により細孔量が増加し、高炉スラグ微粉末を混入すると同等の値となり、L シリーズでは混和材の種類に関わらず減少した。図-10 に材齢 28 日における 50nm~2μm の細孔量と圧縮強度の関係を示す。内川ら<sup>5)</sup>は、普通コンクリートにおいて 50nm 以上の毛細管空隙量が圧縮強度に影響を与えることを報告している。しかし、本実験では 50nm~2μm の細孔量と圧縮強度の決定係数は 0.28 と良好な対応を確認できなかった。図-11 に材齢 28 日における 2μm 以下の細孔量と圧縮強度の関係を示す。羽原ら<sup>6)</sup>は水セメント比 40% 以下の場合、遷移帯がほとんど形成されないためより小径まで含めた細孔空隙量と強度の相関が高いことを報告している。本実験では 2μm 以下の細孔量の増加とともに圧縮強度は低下する傾向を示し、その関係は直線的な対応を示し、決定係数は 0.94 と高い値を示した。従って、再生細骨材を用いたものおよび混和材を内割混入したものでも、再生細骨材の品質、混和材の種類および混入率に関わらず 2μm 以

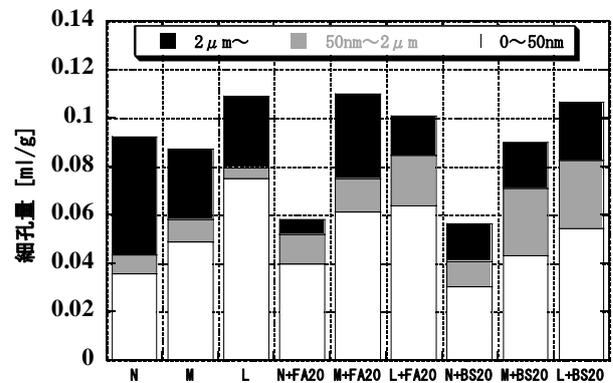


図-9 材齢 28 日における総細孔量

下の細孔量で圧縮強度を評価可能であることが示唆された。図-12 に材齢 28 日における 50nm~2μm の細孔量と乾燥収縮率の関係を示す。乾燥収縮率も圧縮強度と同様に 50nm~2μm の細孔量との決定係数は 0.27 と良好な対応は確認できなかった。図-13 に材齢 28 日における 2μm 以下の細孔量と乾燥収縮率の関係を示す。2μm 以下の細孔量と乾燥収縮率の関係も圧縮強度と同様細孔量の増加とともに収縮率も増加して直線関係を示し、その時の決定係数は 0.93 となった。従って、高強度における再生細骨材および混和材を内割混入したモルタルは 2μm 以下の細孔量で乾燥収縮率を評価できる可能性が示唆された。

## 4. まとめ

(1) 本実験においてフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を混合したものはともに 0~30% までの内割混入率の変化よりも細骨材の品質の違いによる圧縮強度の低減の方が大きかった。特に M 種と L 種の差が大きくなる傾向が確認された。再生細骨材の品質の低下による収縮率の増大は、混和材混入率の違いによる変動より大きくなり、再生細骨材の品質毎にある程度の集団を形成することが窺えた。フライアッ

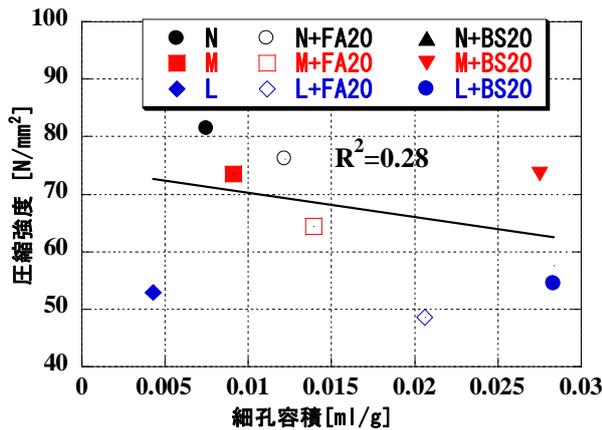


図-10 50nm~2μm以下の細孔量と圧縮強度の関係

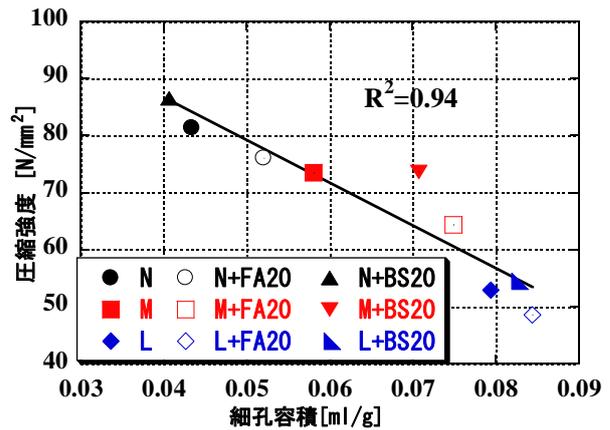


図-11 2μm以下の細孔量と圧縮強度の関係

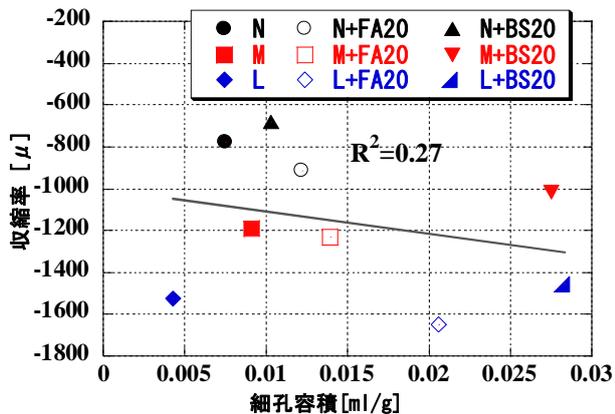


図-12 50nm~2μm以下の細孔量と乾燥収縮の関係

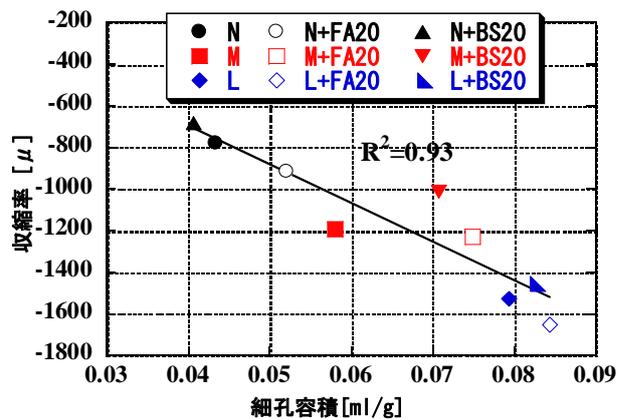


図-13 2μm以下の細孔量と乾燥収縮の関係

シュより高炉スラグ微粉末を混入した方が収縮率は小さくなったが、無混合より大きな収縮率の改善は確認されなかった。

- (2) 再生細骨材を使用した場合でもモルタル中の総水量を利用した C/TW および B/TW で圧縮強度を同等に評価できる可能性が示された。乾燥収縮率は B/TW によって混入率の違いや再生細骨材の品質の違いによらず単位セメント量あたりの収縮率を統一的に評価できることが示唆された。
- (3) 細孔量と圧縮強度および乾燥収縮率の関係において 50nm~2μmの細孔量には明瞭の線形関係は得られなかった。2μm以下の細孔量で評価すると圧縮強度および乾燥収縮率ともに良好な線形関係が確認でき、再生細骨材と混和材を複合混合しても 2μm以下の細孔量で評価できることが示唆された。

#### 謝辞

本研究を遂行するにあたり、平成 26~28 年度科学費補助金基盤研究(C)「異種の副産物粉体と再生骨材を複合混合した低炭素コンクリートの高性能化」(課題番号: 22760424) の支援を受けて行った。また、実験に際して本学 EA・三倉英史氏、修論生・菅祐亮君(現: 西日本高速道路(株))から協力を得た。末尾に記して謝意を示す。

#### 参考文献

- 1) 鹿毛忠継, 棚野博之, 濱崎仁, 杉本琢磨: 中品質再生骨材を用いた再生骨材コンクリートの性能評価と活用に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp.65-70, 2007
- 2) 萩原和也, 伊与田岳史, マイケル・ヘンリー, 加藤佳孝: 再生骨材コンクリートの強度特性に関する基礎的研究, 第 38 回土木学会関東支部技術研究発表会, Vol.42, No.5, 2011
- 3) 竹川翔馬, 高巢幸二, 小山田英弘, 陶山裕樹: 品質の異なる再生骨材を組み合わせて使用したコンクリート力学性状および乾燥性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1803-1808, 2016
- 4) 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.64, No.767, pp.61-73, 2004
- 5) 内川博, 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及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, No.44, pp.330-335, 1999
- 6) 羽原俊祐: コンクリートの構造とその物性, わかりやすいセメント化学, セメント協会, pp.78-104, 1993