

論文 加熱改質フライアッシュを混和したモルタルの特性に関する研究

日高 幸治*1・秋吉 善忠*2・佐藤 嘉昭*3・大谷 俊浩*4

要旨: 本研究では、加熱改質フライアッシュ (MFA) を混和した断面修復材を開発することを目的に、フレッシュ性状、圧縮および曲げ強度、乾燥収縮ひずみ、硫酸浸食抵抗性に関して実験を実施するとともに、MFA 混和モルタルの圧縮強度および乾燥収縮ひずみの予測式を構築した。その結果、材齢 28 日までの圧縮強度は、セメント水比、細骨材容積率および材齢を関数とする MFA 無混和の基準モルタルの予測式でおおよそ推定できること、材齢 1 日より乾燥した乾燥収縮ひずみの終局値は、MFA を骨材とみなすことで、細骨材容積率を関数とした基準モルタルの予測式で推定可能であることなどを明らかにした。

キーワード: 加熱改質フライアッシュ, 圧縮強度, 曲げ強度, 乾燥収縮, 硫酸浸食, モルタル

1. はじめに

我が国において、高度経済成長期 (1955~73 年の約 20 年) に建設された多くのコンクリート構造物がその寿命を迎える時期になり、「補修・補強」に関する技術開発が積極的に行われてきた。このような中、持続可能な社会を構築するためには、新設・既設を問わず、構造物の長寿命化対策は必要不可欠で、新材料の研究や新技術の開発は、引き続き社会的要請の高い研究課題と言える。

筆者らは、火力発電所から排出される石炭灰を加熱改質処理し、未燃カーボンの少ない改質フライアッシュ (Modified Fly Ash, MFA) を製造する技術を開発したり。MFA を混和したコンクリートは MFA のポズラン活性によって長期にわたって組織が緻密化し (経年強化特性)、また自己治癒機能も備えていることが明らかになっており、補修材としても最適な素材である。フライアッシュ (FA) を混和した補修材についてはいくつかの研究結果が報告されているが^{2),3),4),5)}, FA を十分に活用するまでには至っていない。補修材としてポリマーセメントモルタル (PCM) 系補修材の開発に取り組むが、PCM を選択した理由は、セメントモルタルと比較して、接着性や防水性、耐薬品性に優れているからである²⁾。また、近年、施工現場で水を加えるだけで PCM を得ることができる再乳化形粉末樹脂 (粉末ポリマー) が使用されるようになってきている^{6,7)}。

以上のことから、図-1 に示すような MFA を混和した一材化型ポリマーセメントモルタルの補修材に関して、

(1) 補修材としての基本的特性を明らかにし、(2) 補修材の耐久性の評価と (3) 最適補修材料のための材料設計法の確立を目指すことにした。新しい補修材の開発にあたっては基準となるモルタル、すなわち、ポリマーを混和していない普通モルタル (以下、基準モルタル) の特

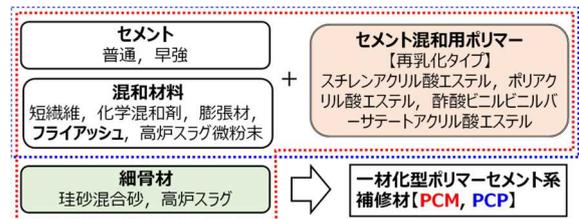


図-1 一材化型ポリマーセメント系補修材の構成

性を明らかにした上で、それらの結果をベースに材料設計システムを構築することを考えている。

そこで本論文では、基準モルタルに及ぼす影響要因として、水セメント比、細骨材種類および容積率、MFA 置換率、ならびに収縮低減剤添加率に着目し、それらがモルタルのフレッシュ性状、圧縮および曲げ強度、乾燥収縮ひずみ、耐硫酸性に及ぼす影響について実験的に検討を行った。さらに、得られたデータを用いて、強度と収縮ひずみの予測式の構築を試みた。

2. 実験

2.1 使用材料および調合

使用材料を表-1 に示す。セメントは普通ポルトランドセメントと早強ポルトランドセメントを混合使用した。細骨材には珪砂 (3,4,5,6 号) および高炉スラグ細骨材を使用した。混和材には JIS A 6201 「コンクリート用フライアッシュ」の II 種に適合する MFA を使用した。また、粉末タイプの高性能減水剤を使用し、収縮低減剤を一部の調合で用いた。

表-2 に調合概要を示す。実験はシリーズ I ~ IV で構成されている。シリーズ I では、W/B35%, Vs28.8%とし、セメント全量に対する早強ポルトランドセメント混合率 (以下、H/C) がフレッシュおよび強度性状に与える影響

*1 大分大学 大学院工学研究科博士後期課程環境工学専攻

*2 大分大学 理工学部創生工学科建築学コース助教 博士(工学) (正会員)

*3 大分大学 名誉教授 工博 (フェロー会員)

*4 大分大学 理工学部創生工学科建築学コース教授 博士(工学) (正会員)

を調べた。シリーズIIでは、混和材無混和の基準モルタル(以下、PL)についてW/Cおよび細骨材容積率(以下、Vs)による影響を調べた。シリーズIIIでは、収縮低減剤(SR)添加率および細骨材種類による影響を、シリーズIVではMFA置換率による影響を調べた。混和剤添加率は予備実験において得られた混和剤添加率とフロー値の関係から、Vs28.8%におけるPLの15打フロー値が180~200mm程度となる添加率を調べ、W/B30で0.75%、W/B35%で0.3%、W/B40%で0.05%一定とし、各要因の影響について比較した。なお、空気量は調整していない。

2.2 実験方法

(1) 供試体作製方法

モルタルの練混ぜは恒温恒湿室(温度20±2℃、湿度55±5%RH)で行い、モルタルは練混ぜ後、直ちに型枠へ打設した。練混ぜ方法は、JISA1171「ポリマーセメントモルタルの試験方法」に準じた。

強度試験用供試体の作製には40×40×160mmの3連の鋼製型枠を使用した。モルタルは2層詰めとし、締固めは突き棒およびジッキングにより行った。ブリーディングが生じるため、2層目ではモルタルを型枠上面から5mm程度盛り上げて詰め、打設後2時間程度で、表面をカッティングしてコテで均した。打設面からの水分蒸発を防ぐために型枠の表面をポリエチレンシートで覆い、脱型まで湿空養生を行った。脱型は材齢1日で行い、恒温室(温度20±1℃)において所定の材齢まで水中養生を行った。

(2) フレッシュ試験

フロー試験はJIS R 5201「セメントの物理試験方法」に準じて行い、0打フロー値と15打フロー値を計測した。空気量試験はJISA1128「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法」に準拠した。ただし、モルタル用空気量測定器は容量1.0Lのものを用いた。

(3) 曲げ強度および圧縮強度試験

曲げ強度試験および圧縮強度試験はJIS R 5201に準拠して行った。試験は材齢3日および28日で行い、シリーズIIでは材齢91日でも行った。

(4) 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験には40×40×160mmの角柱供試体を用

表-1 使用材料

種類	記号	物性
セメント	C	普通ポルトランドセメント(N) 密度:3.16g/cm ³ 比表面積 3260cm ² /g
		早強ポルトランドセメント(H) 密度:3.14g/cm ³ 比表面積 4730cm ² /g
混和材	MFA	加熱改質フライアッシュJISⅡ種(JIS A 6201) 密度 2.27g/cm ³ 比表面積 4220cm ² /g 強熱減量 0.8%
細骨材	S1	珪砂(3号~6号)表乾密度 2.63g/cm ³ 吸水率 0.63% 実積率 56.7% 粗粒率 2.96
	S2	高炉スラグ細骨材 表乾密度 2.53g/cm ³ 吸水率 2.94% 実積率 53.9% 粗粒率 2.24
練り混ぜ水	W	上水道水
混和剤	Ad1	高性能減水剤(ナフタレンスルホン酸系) 粉末タイプ
	SR	収縮低減剤(成分:低級アルコールの アルキレンオキシド付加物)粉末タイプ

い、試験は下水道事業団が示す方法⁸⁾に準じて行った。すなわち、供試体は成形後、同恒温恒湿室で24時間封かん養生を行い、その後脱型して基長を測定し、直ちに乾燥を開始した。供試体数は各調査3体である。ひずみはダイヤルゲージ(基長:160mm、最小表示量:1/1000mm)を用いて測定し、また、同一の供試体の脱水量を電子天秤を用いて測定した。

(5) 硫酸溶液浸漬試験

硫酸浸漬試験にはφ50×100mmの円柱供試体を用いた。モルタルは2層詰めとし、突き棒および木槌を用いて締固めた。モルタルの成形および養生方法は強度試験用供試体と同様である。水中養生は材齢28日まで行い、その後寸法と質量を測定し直ちに濃度5%硫酸溶液に浸漬させ試験を開始した。28日間浸漬後、下水道事業団が提案する試験方法⁸⁾に従い流水で供試体表面を洗浄し、質量および寸法を測定した。その後、ダイヤモンドカッターで供試体中央部を水平に切断し、切断面に1%濃度のフェノールフタレイン溶液を噴霧し中性化深さを測定した。中性化深さは、呈色域の直径を5箇所ノギスで測定し、浸漬試験前の供試体直径との差を2で除して求めた。

3. 実験結果

3.1 セメント混合割合の影響(シリーズI)

図-2にフロー値および圧縮強度とH/Cの関係を示す。フロー値はH/Cが増加するほど低下する傾向にある。これは、比表面積の違いが主な原因と考えられる。圧縮強

表-2 調査概要

シリーズ	H/C(%)	W/C(or W/B)(%)	MFA/B(%)	S種類	Vs(vol.%) ^{*1}	SR(%)	フレッシュ	強度	乾燥収縮	硫酸浸食
I	0, 50, 63, 75, 100	35	0	S1	28.8	-	○	○	-	○
II	63	30, 35, 40, 45, 50	0	S1	18.8, 28.8, 38.8, 48.8	-	○	○	○	○
		30, 35, 40	0	S1	28.8	0, 1.0, 2.0	○	○	○	○
III	63	35	0	S1, S2	18.8, 28.8, 38.8, 48.8	1.0	○	○	○	○
		30, 35	40, 50, 60	S1	28.8	-	○	○	○	○
IV	63	30, 35, 40	20, 40, 60	S1	18.8, 28.8, 38.8	-	○	-	-	○
		35	50	S1, S2	28.8	-	○	○	○	○
		35	50	S1	28.8	0.5, 1.0	○	○	○	○

*1 Vs:細骨材容積率(調査上の記号についてVs1:18.8, Vs2:28.8, Vs3:38.8, Vs4:48.8とする。)

※ 文章中および図表中の調査記号について、W/B-MFA置換率-Vs-S種類で示すものとする。例:35-MFA50-Vs2-S2はW/B35,MFA/B50,Vs28.8,S2(高炉スラグ細骨材使用)を使用した調査であることを示す。

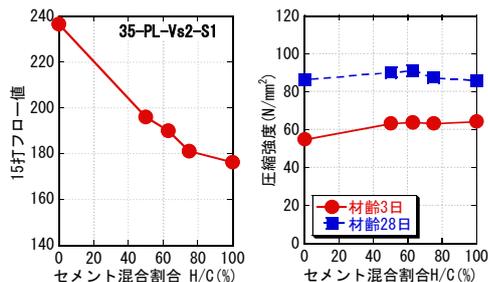


図-2 フロー値および圧縮強度と H/C の関係

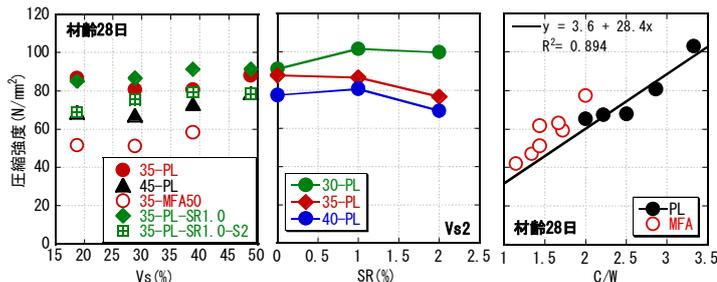


図-3 圧縮強度と各影響因子の関係

度は、材齢 3 日では混合割合が 50%までは増加する傾向を示し、それ以上ではほぼ頭打ちとなった。材齢 28 日では大きな差は見られないが混合割合が 63% (H : N = 1.7 : 1) で最大となった。これらの結果を踏まえ、シリーズ II ~ IV では H/C 63% で一定とし各影響因子について検討している。

3.2 圧縮強度 (シリーズ II ~ IV)

本実験では、フレッシュモルタルの空気量の平均値は約 3%であったが、その範囲は 0.5~7.9%と調合条件によって差が認められた。空気量が圧縮強度に及ぼす影響について、コンクリートの場合では、W/C が一定のとき、空気量 1%の増加によって強度は 4~6%低下すると言われている。そこで、モルタルの強度に及ぼす空気量の影響については、谷川ら⁹⁾のセメントペーストの強度の確率統計性質を対象にした研究を参考に、圧縮強度は 4%、曲げ強度は 2%として強度を補正することとした。

図-3に補正後の材齢 28 日圧縮強度と Vs, SR 添加率, C/W の関係を示す。図より、調合条件によって Vs が強度に及ぼす影響がやや異なっているが、Vs が 30%以上の範囲においてはやや増加する傾向が見られた。これは、既往の研究における結果と同様の傾向である¹⁰⁾。また、SR 添加率の影響について、W/C によってやや傾向が異なるものの大きな差は見られない。C/W との関係について、図中の実線は PL のデータを直線近似したものであるが、PL の近似線に比べると MFA が全体的に高い値を示している。この点について、黄らは FA を外割混合した場合にポゾラン反応が進行していない比較的若い材齢においても、FA の充填効果により強度がやや増加することを示しており¹¹⁾、MFA においても同様の効果が発揮されたものと思われる。

なお、PL の W/C が 40~50% (C/W では 2.0~2.5) の範囲では強度に差が見られない。この原因としては、ブリーディングによる影響が考えられる¹²⁾。本実験では、W/C が高いほどブリーディングが比較的多く生じていたことから、実際の W/C が小さくなり強度が増加したことが影響しているものと推察される。ブリーディングが W/C に及ぼす影響を定量的に明らかにすることができれば、実験結果の補正も可能となると思われるが、今回

の実験ではそのようなデータは得られておらず、今後の課題としたい。

3.3 乾燥収縮ひずみ (シリーズ II ~ IV)

図-4に乾燥収縮ひずみの最終値 (以下、終局ひずみ) と各影響因子の関係を示す。最終値は各実測値を用いて、双曲線関数である式 (1) に基づき、式中の $\varepsilon_\infty, \alpha, \beta$ をパラメーターとして非線形最小二乗法によって求めた。

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_\infty \left(\frac{t}{\alpha + t} \right)^\beta \quad (1)$$

ここに、 t は乾燥期間 (日)、 $\varepsilon(t)$ は乾燥期間 t 日における乾燥収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)、 α, β は係数、 ε_∞ は乾燥収縮ひずみの最終値である。

図より、Vs の増加に伴い終局ひずみはほぼ直線的に減少していることがわかる。細骨材種類の影響について、Vs が大きい範囲では珪砂より高炉スラグ細骨材の方が若干小さい値を示したが、大きな差は見られなかった。W/C の影響について、Vs4 では W/C が大きいほうが終局ひずみが大きくなっているが、その他の調合では、W/C による影響は見られない。また、MFA 置換率の影響について、置換率の増加に伴いほぼ直線的に減少しており、MFA 置換率 60%において約半分程度となった。SR 添加率の影響について、添加率の増加に伴いひずみは大幅に減少しており、1.0%では混和材無混和の場合に比べて 3~4 割小さな値を示した。添加率 2.0%では 1.0%に比べて同等かやや小さくなる傾向にあり、その効果は頭打ちになる傾向を示した。

3.4 硫酸浸食による中性化深さ (シリーズ II ~ IV)

図-5に中性化深さと Vs および MFA 置換率の関係を示す。図より、中性化深さは、珪砂を用いた場合には、Vs による大きな差は見られず、その影響は明らかではない。一方、高炉スラグ細骨材は珪砂よりも全体的に中性化深さが小さく、また Vs の増加に伴いほぼ直線的に小さくなっている。MFA 置換率による影響について、置換率 0~40%では大きな差は見られないが、40%以上の範囲では同等か小さくなる傾向を示した。高炉スラグ細骨材を用いた調合では中性化深さは小さくなる傾向を示した。高炉スラグ細骨材を用いた場合には、緻密で剥がれ落ちにくい二水石こうの膜がモルタル表面に形成される

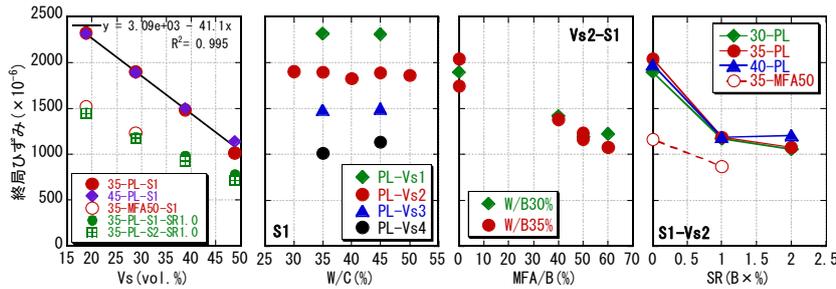


図-4 終局ひずみと各影響因子の関係

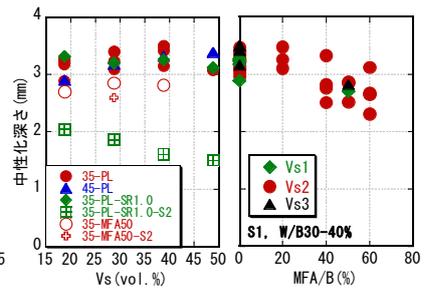


図-5 中性化深さと Vs, MFA 置換率の関係

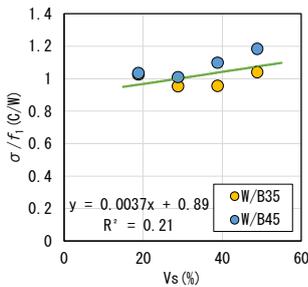


図-6 Vs と σ/f_1 (C/W) の関係

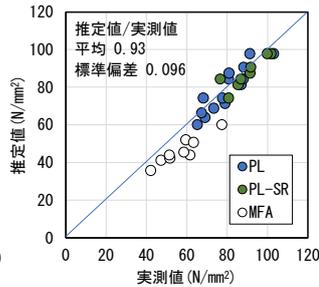


図-7 圧縮強度の推定結果 (28 日)

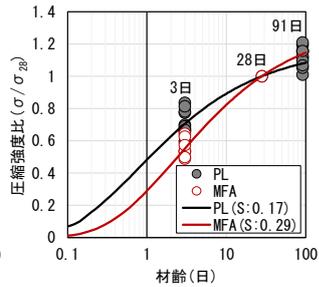


図-8 圧縮強度比の経時変化

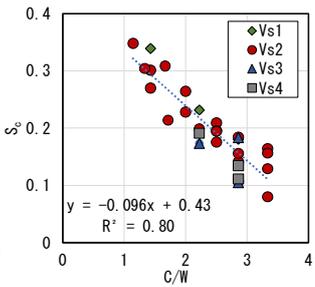


図-9 係数 S と C/W の関係

ため、耐硫酸性が高まることが明らかにされており¹³⁾、本実験でも同様の傾向が確認された。

SR 添加率および W/B の影響については紙面の都合上図示していないが、SR 添加率の影響については、同等か若干大きくなる傾向にあるものの大きな差は見られなかった。また、W/B の影響は明確ではなかった。

4. 推定式の構築

4.1 圧縮強度推定式

本節では、3 章で得られた実験データを用いて MFA を混和したモルタルの圧縮強度の予測式の構築を試みた。推定式について、圧縮強度の主な影響要因として、C/W、Vs および材齢に着目し、下記の式 (2) に示す影響関数を用いて検討を行うこととした。

$$\sigma = f_1(C/W) \cdot f_2(Vs) \cdot f_3(t) \quad (2)$$

ここに、C/W:セメント水比、Vs:細骨材容積率(%), t:材齢(日)。

(1) $f_1(C/W)$ および $f_2(Vs)$

モルタルの圧縮強度は図-3 で示したように C/W と比例関係にあることから、式(3)により推定できるとした。

$$f_1(C/W) = 28.4 \cdot C/W + 3.6 \quad (3)$$

図中の式は Vs28.8%における PL の C/W との関係式である。Vs によらず C/W による影響は同式で表すことができると仮定し、図-6 に示す $d/f_1(C/W)$ と Vs の関係から Vs の影響関数を求めた結果、式 (4) が得られた。

$$f_2(Vs) = 0.0037 \cdot Vs + 0.89 \quad (4)$$

前章で述べた通り、収縮低減剤が圧縮強度に及ぼす影響は小さいこと、MFA を混和したモルタルの強度は図-

3 に示すように PL と同一の式で表せることから、両者の影響については、PL と同様の式で推定することとした。その結果を示したものが図-7 である。図より、PL および PL-SR については推定値の $\pm 10\%$ 程度の範囲に納まっている。しかしながら、MFA については安全側の評価ではあるが全体的に低く推定する結果を示している。これは、前述したとおり PL の近似式に比べて MFA モルタルの強度がやや高い傾向にあるためである。

(2) $f_3(t)$

材齢による影響については、CEB-FIP1990 モデルコード式を用いて、材齢 28 日の圧縮強度から推定可能であるととした。

$$\frac{f(t)}{f_{28}} = \exp \left\{ S_c \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad (5)$$

ここに、 $f(t)$:コンクリートの圧縮強度 (N/mm²), t:コンクリートの材齢 (日), S_c :実験定数。

図-8 に式 (5) で PL と MFA を混和したモルタルについて近似した結果を示している。図中の曲線はそれぞれのモルタルの全データについて回帰した結果である。図より、PL では S_c が 0.17 に対して、MFA では 0.29 である。また、同じ材齢で比較すると PL でも調合によって差が見られることがわかる。そこで調合条件ごとに S_c を求め、C/W との関係で描いたものが図-9 である。図より、ばらつきはあるものの Vs によらず係数 S_c は C/W の増加に伴いほぼ直線的に減少する傾向を示している。そこで、ここでは S_c を次式で表すことにした。

$$S_c = -0.96 \cdot C/W + 0.43 \quad (6)$$

図-10 に式 (3) ~ (6) を用いて推定した結果を示す。

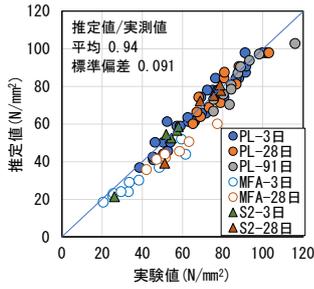


図-10 圧縮強度の推定結果 (全データ)

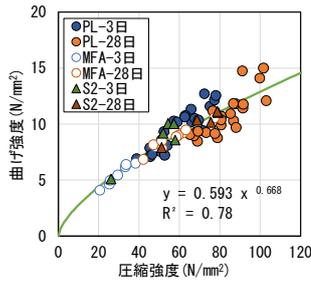


図-11 曲げ強度と圧縮強度の関係

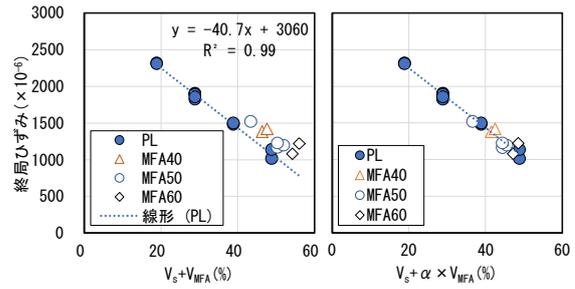


図-12 終局ひずみと細骨材容積率の関係

ばらつきは見られるものの、予測式は実測値をおおよそ表すことができることがわかった。

図-11に圧縮強度と曲げ強度の関係を示す。図中の実線はコンクリートにおける既往の関係式¹⁴⁾を用いて、係数を最小二乗法により回帰分析を行った結果得られた式を示したものである。

$$\sigma_b = 0.593 \cdot \sigma_c^{0.668} \quad (7)$$

図より、MFAの曲げ強度は式(7)で表すことができ、圧縮強度からおおよそ推定可能である。しかしながら、PLを用いた条件では、ばらつきが大きくなっている。これは、PLとMFAで圧縮および曲げ強度の強度発現性が異なっていることが影響しているものと考えられる。この点については、今後さらにデータを蓄積して検討する必要があると思われる。

4.2 乾燥収縮ひずみの推定式

モルタルの乾燥収縮ひずみの影響因子としては、骨材量、単位水量、水セメント比等が考えられる。本実験では、PLのW/Cによる影響は小さかったが、 V_s による影響は顕著であった。また、MFA置換率の増加に伴いひずみはほぼ直線的に小さくなる傾向を示した。これは、MFAを混和したセメントペーストがセメント単体のセメントペーストよりも乾燥収縮ひずみが小さいことや、セメントに比べて密度の小さいMFAを、セメントに対し質量置換することで単位水量が減少すること等が原因として考えられる。

これらの影響を定量的に評価することは困難であるため、MFAの細骨材としての働きに着目して、細骨材容積との関係式に、MFAの影響を組み込むことでMFAモルタルの終局ひずみを推定することとした。

図-12は V_s とMFA容積率(V_{MFA})の和と終局ひずみの関係を示したものである。図より、MFA置換率によらず、細骨材とMFAの容積が大きいほどひずみは直線的に減少する傾向が見られる。しかしながら、同じ容積で比較すると、MFAを混和したモルタルの方がひずみは全体的に大きくなっており、細骨材に比べるとMFAの方が収縮の低減効果は低いことがわかる。これは、MFAの粒径が細骨材よりも小さく、収縮に対する拘束効果が

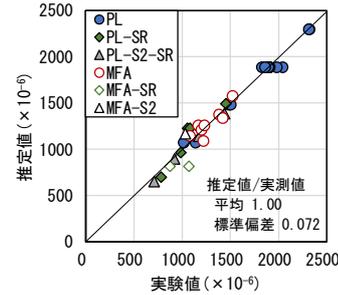


図-13 終局ひずみの推定結果

小さいことが要因の1つであると考えられる。そこで、MFA容積に係数 α を乗じた容積を足し合わせた細骨材容積率(等価細骨材容積率、以下 V_{eq})で評価することとした。 V_{eq} は式(8)で表せる。

$$V_{eq} = V_s + \alpha \cdot V_{MFA} \quad (8)$$

ここに、 V_{eq} : 等価細骨材容積率(%), V_s : 細骨材容積率(%), V_{MFA} : MFA容積率(%), α : 有効係数。

V_{MFA} の効果を表(8)の係数 α で表した結果、 α は0.72であった。この α を用いて描いたものが図-12の右図である。図より、MFA置換率に関わらず、同一の式でひずみを表わせることがわかる。

図-13に終局ひずみの推定結果を示す。なお、骨材種類および収縮低減剤による影響については、式(9)の係数 γ として評価した結果、高炉スラグ細骨材では0.92、SRでは0.65が得られた。

$$\epsilon_\infty = \gamma \{-40.7(V_s + \alpha \cdot V_{MFA}) + 3060\} \quad (9)$$

図より、予測式は実測値を十分に表すことができることがわかった。

5. まとめ

本研究では、各種要因がプレーンモルタルおよび加熱改質フライアッシュ(MFA)を混和したモルタルのフレッシュ性状、圧縮および曲げ強度、乾燥収縮ひずみ、ならびに耐硫酸性に及ぼす影響について実験的に検討を行うとともに、強度および乾燥収縮ひずみの予測式の構築を試みた。その結果、本研究の範囲内で以下の知見が得られた。

(1) セメントの混合割合について、フロー値は早強ポル

トランドセメントの割合を増加させると、低下する傾向を示す。圧縮強度は材齢 28 日において、混合割合が約 6 割で最大となる。

- (2) フレッシュ性状に関して、15 打フロー値は同一 W/B の場合、細骨材容積率 (V_s) が大きくなると低下する。W/B30%において、MFA 置換率が増加するとフロー値は低下する。
- (3) 圧縮強度は、 V_s 30%以上の範囲では V_s が大きいほどやや増加する。また、収縮低減剤 (SR) 添加率による明確な影響は見られない。
- (4) 乾燥開始材齢が 1 日の場合に、終局ひずみは V_s ならびに MFA 置換率が大きくなるほど直線的に小さくなるが、水セメント比による影響は小さい。
- (5) 硫酸浸漬試験における中性化深さは、MFA 置換率 20%では無混和と差がないが、置換率 40~60%の範囲では小さくなる傾向にある。また、珪砂では V_s による影響は明確ではないが、高炉スラグ細骨材では V_s が大きいほど耐硫酸性が向上する。
- (6) 基準および MFA モルタルの材齢 28 日までの圧縮強度は、セメント水比、 V_s および材齢の進行を表す関数の積で表した予測式でおおよそ推定可能である。
- (7) 基準および MFA モルタルの収縮ひずみは、MFA 容積率に有効係数 α (0.72) を乗じた容積を足し合わせた細骨材容積率を用いた予測式で推定可能である。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 (基盤研究 (C) 平成 31~33 年度、研究代表者：佐藤嘉昭、課題番号：19K04691) の支援を受けて実施した。また、日本ジッコウ㈱ (佐藤匡良社長) との共同研究として実施した。実験を実施するにあたり、本学技術職員・遠矢義秋氏、本学修論生・柴田敏央君、卒論生・古園隆倅君、松本萌花さんをはじめとするコンクリート工学研究室の諸氏のご助力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 李 相培, 佐藤嘉昭, 山田高慶, 大谷俊浩: 改質石炭灰 (CfFA) を用いたコンクリートの特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.213-218, 2008
- 2) 矢島典明, 渡辺修吉, 渡久地政義, 武内 浩: フライアッシュを用いたポリマーセメントモルタルによる補修実績について, 土木学会第 65 回年次学術講演会, pp.773-774, 2010
- 3) 久保田阜, 塚越雅幸, 野波優二, 上田隆雄: フライアッシュ添加によるポリマーセメント系材料の改質効果, 土木学会第 70 回年次学術講演会, pp.231-232, 2015
- 4) 横山直哉, 上田隆雄, 高 玉荃, 塚越雅幸: フライアッシュと亜硝酸リチウムを用いた断面修復材料の適用性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.3, No.1, pp.1905-1910, 2016
- 5) Alaa A. Abdul-hamead, Farhad M.Othman, Noor A. Hmeed: The Effect of Nano Fly Ash on Properties of Cement Mortar, AIP Conference Proceedings 2045, 020011, 2018; <https://doi.org/10.1063/1.5080824>
- 6) 榊原弘幸, 安藤重裕, 大崎敬一, 川上明大, 佐々木孝彦, 上田 洋, 藤原申次: ポリマーセメントモルタルの物性に及ぼすセメントおよび再乳化形粉末樹脂の種類の影響, 材料, Vol.53, No.10, pp.1103-1108, 2004
- 7) 田中健介, 河野伊知郎, 中嶋清実: ポリマーセメントモルタルの基礎的性状に関する研究, 土木学会中部支部研究発表会, pp.383-384, 2012
- 8) 下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食技術マニュアル, (地方共同法人) 日本下水道事業団, 2017
- 9) 谷川恭雄, 山田和夫: セメント系複合材料の強度に関する確率論的研究 (第 1 報: セメントペースト強度について), 日本建築学会論文報告集, 第 267 号, pp.1-9, 1978
- 10) 寺西浩二, 谷川恭雄, 清水厚年: 構造躯体用モルタルの強度特性および乾燥収縮, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.475-480, 2009
- 11) 黄光律, 野口貴文, 友澤史紀: フライアッシュを大量混和したコンクリートの微細組織と圧縮強度, 日本建築学会構造系論文集, 第 517 号, pp.11-16, 1999.3
- 12) 辻正哲, 坂井秀紀: ブリージング水の処理がコンクリート強度に及ぼす影響について, セメント技術年報, Vol.38, pp.226-229, 1984
- 13) Paweena J. et.al., Improvement of resistance to sulfuric acid attack of concrete by use of blast furnace slag sand, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. E2 (Materials and Concrete Structures), Vol.69, No.4, pp.337-347, 2013
- 14) 野口貴文, 友澤史紀: 高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性との関係, 日本建築学会構造系論文集, 第 472 号, pp.11-16, 1995