

高炉スラグ超微粉末を用いたモルタル注入材料の開発と実部材への適用

(株)デイ・シイ	正会員	工修	○藤原	了
(株)デイ・シイ			北川	陽介
(株)デイ・シイ		工博	蝦名	貴之
宇都宮大学大学院		工博	藤原	浩巳

Abstract : In this study, the application of mortar material using in joining precast wall balustrade and concrete floorboards was experimented. The required performance of the mortar material is reducing the risk of thermal stress cracking and a high compressive strength from early age for the purpose of shortening the construction period. As a result, we developed mortar materials combining ground granulated blast furnace slag 3000 and ground granulated blast furnace slag of single micron particle. A mortar material with high compressive strength from early age and low possibility of thermal cracking was obtained. The mortar material was applicable to construction of an actual member from the result of construction experiment.

Key words : Granulated blast furnace slag, Single micron, Compressive strength, Temperature rise

1. はじめに

道路橋の壁高欄は、場所打ちコンクリートで構築されることが主流であった。しかし、近年では、安定した品質、耐久性の向上、製作時や施工時の省力化、工期短縮などの観点からプレキャスト製の壁高欄も製作されるようになってきた¹⁾。このプレキャスト壁高欄と床板を接合する際には、一般的にモルタル注入材料が使用される。モルタル注入材料の品質の要求性能は、部材の一体化、鉄筋保護を目的とした遮塩性および工期短縮を目的とした早期強度を得ることである。また、ポンプでの注入時の施工性が良好であることが要求される。さらに、プレキャスト壁高欄と床板を接合する際のモルタル注入部の厚さは30~50cmと比較的大きく、コンクリートよりも単位結合材量が多いので硬化時のモルタルの最高温度が高くなるため温度ひび割れの発生確率が大きくなりやすい。

一般的に、モルタル注入材料に早期強度を付与させるために早強ポルトランドセメントが用いられる。早強ポルトランドセメントが用いられた場合、混合セメントと比較して温度ひび割れの発生や遮塩性が低いことが知られている。そのため、温度ひび割れ対策や遮塩性向上を目的として、JIS A 6207に準拠した高炉スラグ微粉末3000を早強ポルトランドセメントの一部に混和したモルタル注入材料が使用されている。しかし、高炉スラグ微粉末3000を用いることで、初期強度が低下し、モルタル注入後の脱型まで3日程度の期間が必要となる。早強ポルトランドセメントを普通ポルトランドセメントに代替することが温度ひび割れ対策に有効であるが、混和材料の添加と同様に初期強度が小さくなり工期短縮の観点からも課題が残る。したがって、モルタル注入材料に初期強度の増加による工期短縮および温度ひび割れの低減の両立が求められる。

そこで、本研究では、高炉スラグ微粉末3000と従来のモルタル注入材料に使用されていない50%累積体積通過径(以下、 D_{50})がシングルミクロンの高炉スラグ微粉末を組み合わせた新たなモルタル注入材料の開発に向けて各種実験を行った。最初に、シングルミクロンの高炉スラグ微粉末を用いたモルタル注入材料の各種物性と従来用いられているモルタル注入材料と比較を行った。次に、開発したモルタル注入材料を実機レベルでの練混ぜ機による練混ぜ性能の確認および簡易模擬部材による最高温度

と収縮量の確認を行った。最後に、実部材における注入実験による施工性の確認を行い、打設から1ヵ月後にひび割れの有無の確認を行うことによりモルタル注入材料の実用性の検証をした。

2. シングルミクロンの高炉スラグ微粉末を用いたモルタル注入材料の各種物性

2. 1 使用材料

使用材料を表-1に示す。汎用モルタル(以下, M1)は、早強ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末3000を結合材とした注入モルタルであり、質量割合で46:54である。超微粉モルタル1(以下, M2)は普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末3000と $D_{50}=1.8\mu\text{m}$ の高炉スラグ微粉末を結合材とした注入モルタルであり、質量割合で33:44:22である。超微粉モルタル2(以下, M3)はM2の $D_{50}=1.8\mu\text{m}$ の高炉スラグ微粉末の部分を $D_{50}=3.8\mu\text{m}$ (ブレン比表面積で11,000 cm^2/g 程度)の高炉スラグ微粉末に置換した注入モルタルであり、M2と高炉スラグ微粉末の粒径の違いによる特性を比較することを目的に試作した。なお、高性能減水剤などの材料の割合は、M2およびM3とも同一とした。ここで、 $D_{50}=1.8\mu\text{m}$ の高炉スラグ微粉末は、 $D_{50}=3.8\mu\text{m}$ の高炉スラグ微粉末より、初期強度改善効果が大きく、乾燥収縮や自己収縮が優れている特徴²⁾を有する高炉スラグ微粉末である。また、M1よりM2の方が粉体組成を検討している段階で分離傾向となったため、水結合材比(W/P)をM1より2.0%低下させ、最適な流動性と分離抵抗性を向上させた。

表-1 使用材料

名称	材料名	記号	備考
水	上水道水	W	-
注入材	汎用モルタル	M1	早強ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末3000の組合せ
	超微粉モルタル1	M2	普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末3000と $D_{50}=1.8\mu\text{m}$ の高炉スラグ微粉末の組合せ
	超微粉モルタル2	M3	普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末3000と $D_{50}=3.8\mu\text{m}$ の高炉スラグ微粉末の組合せ

表-2 実験水準

2. 2 実験配合と練混ぜ方法

実験水準は表-2の3水準とした。練混ぜは、回転数1300rpmのハンドミキサーを用いた。20L容量のペール缶に所定の水を用意し、ハンドミキサーで練混ぜを行いながら注入材25kgをペール缶に投入し、材料の投入完了から2分間練混ぜを行った。練上がり量は約13Lとした。

注入材種類	注入材	水	W/P(%)
M1	25.0kg	4.5kg	18.0
M2	25.0kg	4.0kg	16.0
M3	25.0kg	4.0kg	16.0

2. 3 実験項目と測定方法

(1) フレッシュ性状

フレッシュ性状の評価は、充填モルタルの流動性試験方法であるJ14漏斗を用い、JSCE-F 541-2013に準拠して試験を行った。流下時間の目標値は 8.0 ± 2.0 秒とした。

(2) 圧縮強度

圧縮強度はJSCE-G 505-2018に準拠して試験を行った。 $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の円柱供試体を用いて、材齢は1, 2, 3, 7および28日とした。材齢1日は24時間後に脱型した時点とした。24時間後の脱型から20℃の水中で所定材齢まで養生を行った。目標強度は材齢3日で $25\text{N}/\text{mm}^2$ 以上とした。

(3) 塩化物イオン濃度

塩化物イオン濃度の測定は、JSCE-G 572-2007「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法(案)」に準じて測定を行った。なお、浸せき前の養生は標準水中養生で材齢28日まで行い、浸せきは $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の10%塩化ナトリウム水溶液に1年間浸せきを行った。

(4) 拘束下での膨張および収縮量 (拘束 B 法)

注入モルタル材料は、プレキャスト壁高欄と床板を接合する際に用いられるため、鉄筋と上下の構造物で拘束されている。そのため、拘束した状態の膨張および収縮量を把握するため、JIS A 6202 2017 「コンクリート用膨張材」の附属書B(参考)膨張コンクリートの拘束膨張および収縮試験方法に準拠してひずみ量の測定を行った。ひずみ量の測定は、拘束棒の中央部の上下2箇所にひずみゲージを貼り、データロガーにより注入モルタルの打込み直後から測定を行った。24時間後に脱型後、供試体を温度 $20\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $60\pm 2\%$ の条件にして30分間隔で材齢14日までひずみ量の測定を行った。

(5) 乾燥収縮

乾燥収縮は、練混ぜ時の注水から48時間後に脱型し、基長の測定後、温度 $20\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $60\pm 2\%$ の条件で所定の期間まで供試体を乾燥後、JIS A 1129-3(ダイヤルゲージ法)に準拠して長さ変化率(乾燥収縮)を算出した。供試体は $40\times 40\times 160\text{mm}$ のモルタル供試体とした。乾燥期間は、1, 3, 7, 14, 21, 28, 56および91日とした。

(6) 断熱温度上昇量

注入モルタルの断熱温度上昇量の測定は、断熱温度上昇測定装置³⁾を用いた。測定に用いた試料は4.5Lとし、練上がり直後に試料を測定装置にセットし、断熱温度の測定を行った。

2. 4 実験結果および考察

実験結果を表-3に、断熱温度上昇量を図-1に、拘束B法ひずみを図-2に、乾燥収縮を図-3に示す。J14漏斗流下時間は、M1とM2は目標値の範囲内となったが、M3は18.2秒と目標範囲外となった。そのため、実験ケースM3については、実験項目(3)~(6)は実施しなかった。M2よりM3のJ14漏斗流下時間が長い理由は、M2に用いた高炉スラグ微粉末よりM3に用いた高炉スラグ微粉末の粒径が大きく、M2よりM3の粉体の充填性が減少することによりM3の流動性が低下したためと考えられる。

圧縮強度は、M1が材齢3日、M2が材齢1日、M3が材齢2日で目標強度に到達した。いずれの材齢でもM2およびM3は、M1より強度が高かった。シングルミクロンの高炉スラグ微粉末を用いたとき、セメントの種類を早強ポルトランドセメントから普通ポルトランドセメントに変更しても強度発現が優れていた。とくに、M2の材齢1, 2日の強度は、M1またはM3の2倍以上の強度を示した。M2に用いた高炉スラグ微粉末はM3に用いた高炉スラグ微粉末より初期強度改善効果が大きい高炉スラグ微粉末²⁾であるためM2の初期材齢の強度発現が優れたと考えられる。

M2の塩化物イオン濃度は、M1と比べて若干低いため、遮塩性においてはM2の方が良好であることが分かった。これは、M2の方がM1と比べて、結合材中の高炉スラグ微粉末の割合が10%程度多いことによると考えられる。

図-1の断熱温度上昇量の結果から、M1とM2の終局断熱温度上昇温度がほぼ同じである。断熱温度上昇速度に関する係数はM1よりM2が小さい。そのため、温度ひび割れ発生確率はM2の方がM1より低減できると考えられる。なお、図-1に示した各係数は、断熱温度上昇量を測定した結果から下記の式[1]に従ってフィッティングにより算出した係数である。

$$\text{材齢}t\text{日までの断熱温度上昇量}(^{\circ}\text{C}):Q(t)=Q_{\infty}[1-\exp\{-\gamma(t-t_{1,q})\}] \quad [1]$$

図-2の拘束B法ひずみの結果から、初期の膨張量はM1とM2ともに $500\mu\text{m}$ 程度まで膨張を示す。材齢2日以降に収縮する収縮量はM2の方がM1より約 $140\mu\text{m}$ 小さい。また、図-3の乾燥収縮の結果から、長期においてもM2の方がM1より収縮量は小さいため、乾燥収縮によるひび割れ発生確率もM2の方がM1より小さいと考えられる。

以上の結果から、普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末3000および $D_{50}=1.8\mu\text{m}$ のシングルミ

表-3 実験結果

注入材種類	J14漏斗(s)	練上がり温度(°C)	圧縮強度(N/mm ²)					塩化物イオン濃度(kg/m ³)				見掛けの拡散係数Dc(cm ² /年)
			1日	2日	3日	7日	28日	ブランク	0~2cm	2~4cm	4~6cm	
M1	8.1	20.1	17.6	24.3	31.8	40.4	54.0	0.13	14.79	0.19	0.17	0.281
M2	7.4	19.8	43.6	57.5	66.8	75.1	79.5	0.09	10.32	0.09	0.09	0.217
M3	18.2	20.5	20.4	28.9	48.9	62.9	71.3	-	-	-	-	-

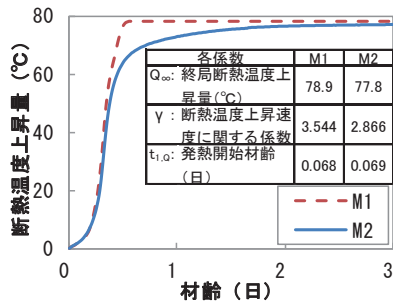


図-1 断熱温度上昇量

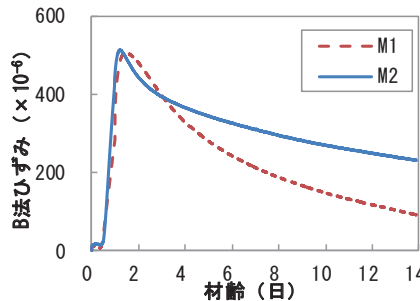


図-2 拘束B法ひびずみ

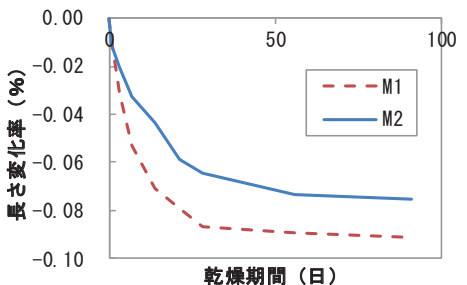


図-3 乾燥収縮

クロン高炉スラグ微粉末の組み合わせにより、遮塩性が同等以上、初期の強度が大きく、乾燥収縮および温度ひび割れ発生確率が小さい注入モルタルを開発できる可能性を見出した。

しかし、実機レベルでの練混ぜ性能の確認および実際の部材による温度ひび割れ状況の確認など検証が必要と考えられる。次節以降では現場レベルでの練混ぜ性能の確認と簡易模擬部材および実部材による温度ひび割れ発生状況の確認を行った。

3. 実機における練混ぜ性能の確認および簡易模擬部材による温度ひび割れの検証

3.1 実機における練混ぜおよび注入の概要

注入モルタル材料は、事前にプレミックスされたM1, M2の2種類を用いた。実施工に用いられるミキサでの練混ぜ性能および簡易模擬部材による最高温度と収縮量の確認を行った。

練り混ぜおよび注入は、3.7kWの高速攪拌ミキサ(容量175L)、3.7kWのスクイズポンプ(最大3.5MPa)とφ40mmの耐圧ホース10mを用いた。モルタルの練混ぜ容量は約78L、90秒間の練混ぜを行い、模擬部材1体あたり約0.7m³の流し込み量、流し込み速度12L/minとした。

模擬部材は、プレキャスト壁高欄の一種であるDAK式プレキャスト壁高欄¹⁾のハンチ部をもたない注入部分を簡易的に模擬した。写真-1に示すように、4m(プレキャスト壁高欄の1ブロックの長さ)×幅0.6m×高さ0.30mの大きさとし、鉄筋はD16で150mmピッチで配筋した。なお、実際は上部に壁高欄が設置されるが、注入実験時は上部を解放した。上部の拘束がない方が上下の収縮差が大きくなり、温度ひび割れ発生状況の確認には適していると考えたためである。上部が開放しているため、注入は一箇所からの流し込み、注入完了後、上面をビニールと養生マットとベニヤ板で養生をした。側面の型枠は流し込みの翌日に脱型した。

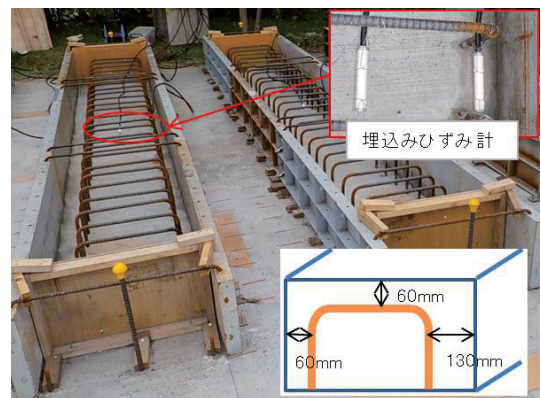


写真-1 簡易模擬部材の概要

3.2 実験項目と測定方法

フレッシュ性状は、J14漏斗流下時間の目標8.0±2.0秒となるように練混ぜ水量の調整を行った。温度ひび割れのリスクが高い夏期の施工を想定して、練上がり温度は30°Cを目標とし、JIS A 1156に準拠して測定を行った。模擬部材の収縮と温度は、写真-1に示すように、模擬部材の中央部とその

中央部の端部から50mmの位置に埋込みひずみ計(T社製 KM100BT)を設置し、材齢100日まで測定を行った。収縮ひずみは流し込みが完了した時間を基準とした。現場封緘養生の圧縮強度は、φ100×200mmの円柱供試体を用いてJIS A 1108に準拠して測定を行い、材齢1, 2, 3, 5, 7および28日とした。

3. 3 実験結果および考察

模擬部材での実験結果を表-4に、材齢と模擬部材の収縮ひずみとの関係を図-4に、材齢と模擬部材の温度との関係を図-5に、M1を用いた模擬部材のひび割れ発生状況を写真-2にそれぞれ示す。なお、図-4の収縮ひずみは、熱膨張係数 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ として温度補正を行った。

表-4 模擬部材での実験結果

注入材種類	W/P (%)	J14漏斗 (s)	練上がり温度 ($^{\circ}\text{C}$)	外気温 ($^{\circ}\text{C}$)	注入圧 (MPa)	圧縮強度 (現場封緘養生) (N/mm^2)					
						1日	2日	3日	5日	7日	28日
M1	18.0	7.1	29.5	29.3	0.0	19.4	29.2	38.7	43.0	47.1	57.4
M2	16.0	6.7	29.1			54.3	58.4	72.1	76.9	81.0	93.4

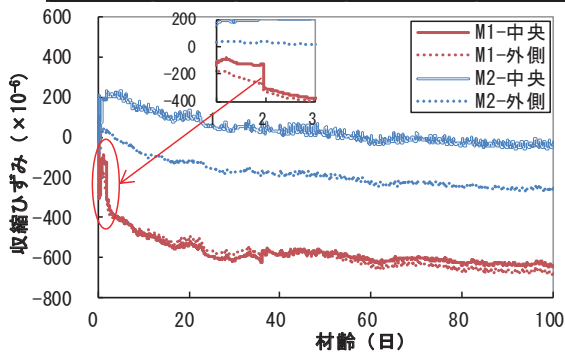


図-4 模擬部材の収縮ひずみ

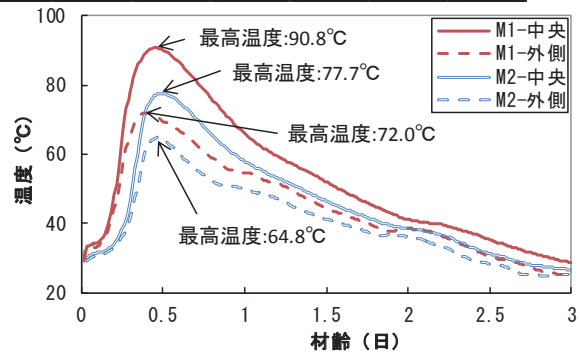


図-5 模擬部材の温度

フレッシュ性状および練上がり温度は、M1, M2ともに目標値を満足した。先端部が開放であり、M1, M2ともにポンプ注入時の圧力が0.0MPaであった。したがって、M1, M2の注入作業などの施工性はほぼ同様と考えられる。

現場封緘養生の圧縮強度は、標準水中養生と同様な傾向となり、M2の初期強度の発現が優れていた。

図-4から、収縮ひずみはM2の方がM1より600 μm 程度小さくなった。M2の中央のひずみは約200 μm まで膨張後、0 μm まで収縮しており、M1より収縮が小さいことが分かった。

図-4上部に示す材齢1~3日のひずみの拡大図から、材

齢2日においてM1の収縮ひずみが200 μm 程度急激に低下している。写真-2に示す材齢2日に発生した流し込み位置を0mとした場合の長さ方向1.8mの位置のひび割れにより、ひずみの急激な低下を示したと考えられる。M1の長さ方向1.8mの位置のひび割れによるひずみの急激な低下が発生しなければ、M1の模擬部材中央部における材齢100日の収縮ひずみは-400 μm 程度に相当したと考えられる。

図-5に示す模擬部材の最高温度は、M1に比べてM2の方が中央部で約13 $^{\circ}\text{C}$ 、外側(端部から50mmの位置)で約7 $^{\circ}\text{C}$ 温度がそれぞれ低下した。また、写真-2のM1を用いた模擬部材は、長さ方向1.8mに材齢2日、0.8mに材齢7日、3.2mに材齢12日と初期の材齢ですべて長手方向に対して垂直方向に貫通ひび割れが発生した。材齢2日のひび割れは、温度下降時の終局に近い温度応力によるひび割れと考えられる。材齢7日と12日においては、収縮が進行していることから外部拘束型の体積変化を含んだひび割れと考えられる。M2を用いた模擬部材は材齢100日を経過してもひび割れの発生は確認されなかった。

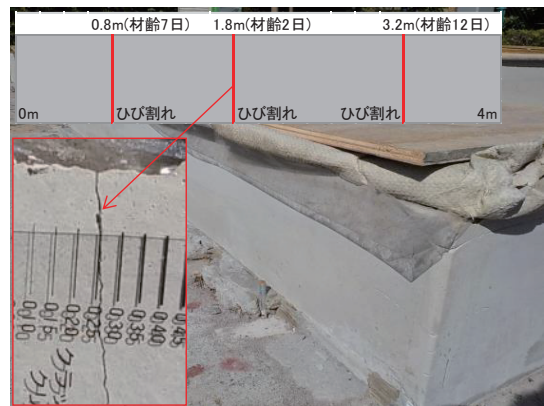


写真-2 M1を用いた模擬部材

4. 実部材における試験施工

4. 1 試験施工概要

試験施工した実部材は、写真-3に示すように長さ4mのDAK式プレキャスト壁高欄を2ブロック設置した長さ8mの実部材を用いた。注入モルタル材料は、事前にプレミックスされたM2とした。なお、実部材の注入は、生産性向上の観点からモルタル練り混ぜミキサおよび注入ポンプを搭載したシステム車を使用した。注入は、 $\phi 50\text{mm}$ の注入ホースを約1.4m間隔に設置し、注入を行った。

4. 2 実験結果

注入したモルタルのJ14漏斗流下時間が8.7秒、練上がり温度が 21.5°C であり、システム車による練混ぜが良好にできた。なお、外気温は 20.4°C であった。注入圧 $0.2\sim 0.4\text{MPa}$ 程度で、注入開始から30分以内で注入を完了することができた。注入翌日の脱型後に注入部分にモルタルが充填されたことを確認した。写真-4に示すようにモルタル注入部分のひび割れの発生は1ヵ月後でも確認されなかった。



写真-3 実験前の実部材の概要



写真-4 モルタル注入部脱型後の状況

5. おわりに

高炉スラグ微粉末3000と従来のモルタル注入材料に使用されていないシングルミクロンの高炉スラグ微粉末を組み合わせた新たなモルタル注入材料の検討を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) 粒径の小さいシングルミクロン高炉スラグ微粉末を用いた方が流動性は良好となる。
- (2) 早強ポルトランドセメントから普通ポルトランドセメントに変更しても材齢1日で目標強度を満足するため、早期脱型の可能性が大きい。
- (3) 汎用モルタルと比べて模擬部材の最高温度は、 10°C 程度低く、収縮量も小さくなるため、温度ひび割れに対する抵抗性が向上する。
- (4) 汎用モルタルと同様の作業性とポンプ注入性を有する。今回の実験において模擬部材および実部材のモルタル注入部分のひび割れの発生が認められなかった。

参考文献：

- 1) 青木ほか：急速施工と高耐久を目指した新たなプレキャスト壁高欄の開発と衝突安全性能について、橋梁と基礎，Vol. 47，pp. 41～46，建設図書，2013年3月
- 2) 藤原ほか：シングルミクロン高炉スラグ微粉末を用いたモルタルの収縮特性の改善，セメント・コンクリート論文集，Vol. 72，pp. 122～128，セメント協会，2019年3月
- 3) 萩原ほか：長期間に亘る測定で高性能を目指した断熱温度上昇測定装置の開発，熱物性，Vol. 23，No. 1，pp. 21～26，日本熱物性学会，2009年2月