

論文 コンクリート構造物の補修・補強用無収縮モルタルの研究

小島正朗*1 神山行男*2 米澤敏男*3 宮内靖昌*1

要旨:地震により損傷を受けたコンクリート構造物の補修・補強や、既存構造物の耐震補強で充填材として用いられる無収縮モルタルについて、材料と調合がモルタルの性質および補修・補強した構造物の構造性能に与える影響を実験的に検討した。この結果、モルタルの流動性・充填性と圧縮強度、乾燥収縮、水和熱による温度上昇等を適正にバランスさせるには、骨材最大寸法を 5mm 前後、砂結合材比を 2 程度とすると良いこと、また、無収縮モルタルで補修した部材のせん断特性は、従来の無収縮モルタルに対して砂の最大寸法を大きくすることで改善できることが明らかになった。

キーワード:無収縮モルタル, 砂結合材比(S/B), 充填性, 骨材の最大寸法, せん断特性

1. はじめに

地震により損傷を受けたコンクリート構造物の補修・補強工事では、コンクリートが剥落した部材の断面修復や断面の増し打ち部に無収縮モルタルが使用されることが多い。従来、無収縮モルタルは、機械基礎下部の充填や橋脚支承部の充填を目的として開発され、砂結合材比が 1 程度に調整されたプレミックス製品が一般的である[1]。無収縮モルタルの高流動性と無収縮性は構造物の補修・補強工事においても既存部位との一体性を確保する上で重要であるが、このモルタルの打設時の発熱によるひび割れや、薄肉部材に打設したときの乾燥収縮による亀裂発生の可能性、構造部材に適用した場合の構造性能に関する研究はほとんどなされていない。

本研究は、構造物の補修・補強に用いる無収縮モルタルの材料、調合の最適化を図ることを目的として、流動性・充填性、膨張性、乾燥収縮、水和による温度上昇、圧縮強度といった基本物性に関する検討と、無収縮モルタルを構造部材に適用した場合のせん断特性に関して実験的に検討を行ったものである。

2. 無収縮モルタルの性質に関する実験

2.1 概要

無収縮モルタルのコンシステンシー評価方法として一般的に用いられている J₁₄ ロート（開口径 14mm）の流下時間を一定に調整した無収縮モルタルの、砂結合材比(S/B)と骨材の最大寸法(Smax)を変化させ、モルタルの流動性・充填性、温度上昇、膨張率、乾燥収縮および圧縮強度について検討した。

2.2 実験因子と水準

因子として検討したのは砂結合材比と骨材である砂の最大寸法であり、水準を表-1のように定めた。

表-1. 実験因子および水準

実験因子	水準
砂結合材比(S/B)	1, 2, 3
骨材最大寸法(Smax)	1.2mm, 3.5mm, 5.0mm, 7.5mm

*1(株)竹中工務店技術研究所生産研究開発部研究員, 工修(正会員)

*2(株)竹中工務店技術研究所生産研究開発部副主任研究員, 工博(正会員)

*3(株)竹中工務店技術研究所生産研究開発部主任研究員, Ph.D(正会員)

2.3 使用材料および調合

セメントには普通ポルトランドセメントを用いた。混和材には、石灰系膨張材、粉体状高性能減水剤およびアルミ粉末を用いた。骨材には、大井川産川砂(比重2.61;吸水率1.39)をふるい分け、最大寸法が1.2, 3.5, 5.0および7.5mmとなるよう調整したものを用いた。図-1に調整した粒度分布を示す。

調合を表-2に示す。調合はJ₁₄ロート流下時間が6±0.5秒となるよう調整した。

2.4 実験方法

(1)モルタルの練混ぜ モルタルは、温度20±2℃、

湿度70±5%の恒温恒湿室で、ハンドミキサを使用し、スチール缶の中で1パッチ10リットル練り混ぜた。練り混ぜ時間は材料投入後2分間とした。

(2)流動性・充填性 流動性・充填性の試験では、図-2に示す幅10, 20, 30, 50mmの異なる幅を持つLフロー試験器を用いた。試料を鉛直部に充填し、仕切り板を抜いた後の水平方向流動距離で流動性と充填性を総合して評価した。

(3)簡易断熱温度上昇

Φ10×20cmの型枠に充填した試料を40×40×40cmのスチロール製容器に詰め、試料中心部の温度を測定した。

(4)膨張率

練混ぜ後、試料をΦ5×10cmの型枠に詰め、天端に反射板と乾燥防止を兼ねる硬質フィルムを置き、レーザー変位計(KEYENCE社製)で膨張量を測定した。測定は、温度20℃、湿度60%の恒温恒湿室で行った。

(5)乾燥収縮 JIS A 1129に準じ、4×4×16cmの供試体の乾燥収縮率を測定した。

(6)圧縮強度 供試体はΦ5×10cmとし、材齢4週に試験を行った。養生条件は、標準養生、封緘養生および気中養生(温度20℃、湿度60%)の3種類とした。

2.5 実験結果

(1)流動性・充填性 砂結合材比を2とし、最大寸法を1.2~7.5mm(調合No.2~5)まで変化させたモルタルの、Lフロー試験器の間隙幅と水平流動距離の関係を図-3に示す。全てのモルタルで、間隙幅が大き

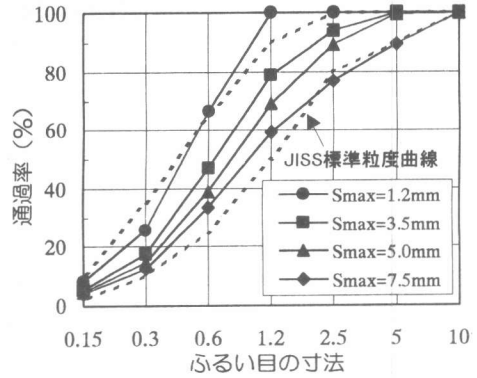


図-1. 細骨材の粒度分布

表-2. 調合

調合 No	S/B	最大寸法 (mm)	水結合材比 (%)	Kg/m ³				J ₁₄ 流下時間(S)
				水	セメント	混和材	骨材	
1	1	5.0	35.5	339	874	80	954	6.2
2	2	1.2	51.8	339	574	80	1308	6.4
3		3.5	47.5	311				6.0
4		5.0	44.8	293				5.8
5		7.5	43.4	284				6.0
6	3	5.0	58.0	287	414	80	1482	6.4

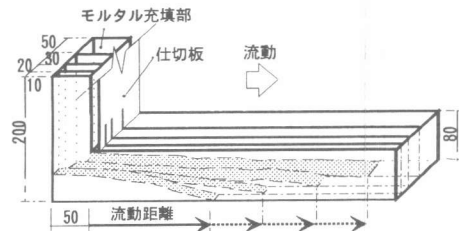


図-2. Lフロー試験器

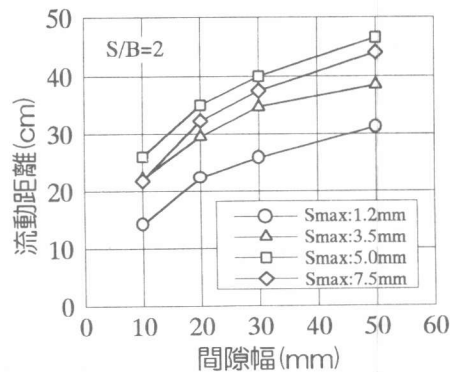


図-3. 充填性試験結果(No.2~5)

いほど流動距離は長くなっている。また、 J_{14} ロート流下時間が同じでも、骨材の最大寸法によって流動距離に差が生じている。骨材の最大寸法が7.5mmと比較的大きな粒子を含むものでも、10mmの間隙へ充填可能であった。図-4に骨材の最大寸法と各間隙幅における流動距離を示す。狭隘な間隙への充填性の良い、最適な骨材の最大寸法が存在すると考えられ、今回の実験では、5mm程度とすることで流動性・充填性は最も良好となった。

(2) 簡易断熱温度上昇 図-5に最大寸法を5mmとし、砂結合材比(S/B)を1~3まで変化させたモルタル(調合No.1,4,6)の簡易断熱温度上昇試験結果を示す。セメント量の多いS/B=1では、90°C以上の温度となっており、S/B=2, 3とすることにより、それぞれ約70°C, 60°Cと低下した。これは、単位セメント量が874 kg/m³からそれぞれ574 kg/m³, 414 kg/m³と減少したことによると考えられる。S/Bを大きくすることで、比較的大断面の部材へ充填した時の水和発熱による温度ひび割れを大幅に低減できると考えられる。

(3) 膨張率 無収縮モルタルは、膨張材としてアルミ粉末を使用しているため、打設して硬化するまでに体積膨張を示す。図-6はアルミ粉末量を一定としたときの膨張率であり、S/Bが小さいほど膨張率は大きくなった。これは、S/Bが小さいほど単位セメント量が多くアルカリ濃度が高いため、アルミ粉末の反応が促進されたことによると推定される。単位セメント量の少ない調合、すなわち砂結合材比(S/B)が大きいものほど、同一の膨張率を得るためのアルミ粉末量は増える。

(4) 乾燥収縮 図-7に最大寸法5mmとして砂結合材比(S/B)を変化させたモルタル(調合No.1,4,6)の乾燥収縮率の測定結果を示す。乾燥収縮率は、S/Bを大きくすると小さくなっており、これはS/Bの増大による単位水量の減少とペースト量の減少の両方によると考えられる。乾燥収縮亀

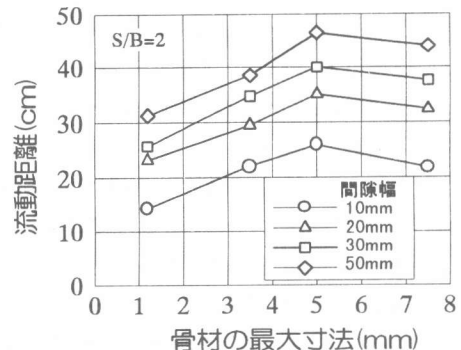


図-4. 骨材の最大寸法と流動距離(調合 No.2,3,4,5)

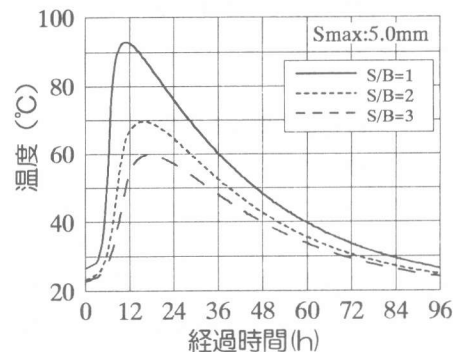


図-5. 簡易断熱温度上昇試験結果(調合 No.1,4,6)

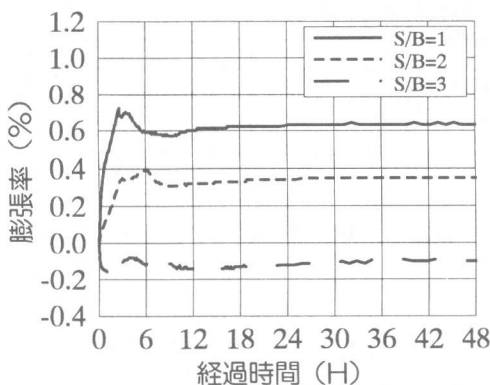


図-6. 膨張率測定結果(調合 No.1,4,6)

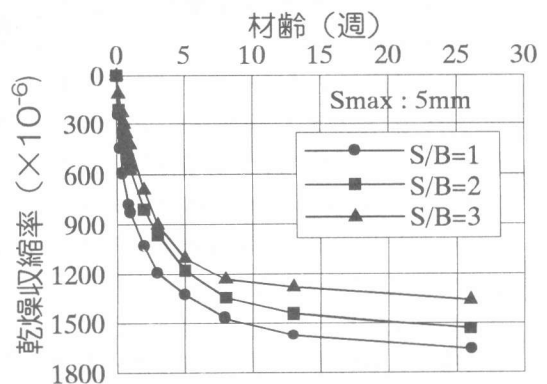


図-7. 乾燥収縮率測定結果(調合 No.1,4,6)

裂の抑制には砂結合材比が大きいほうが有利であることは明らかである。

(5)圧縮強度 図-8に最大寸法5mmとし、砂結合材比(S/B)を変化させた場合の圧縮強度を示す。いずれのS/Bでも圧縮強度は標準養生が最も高く、次いで封緘養生、気中養生の順であった。標準養生強度に対する気中養生強度の低下は、S/B=1で約25%、S/B=2, 3で約20%程度であった。構造体強度は、気中養生で評価しておけば安全側であると考えられるが、設計基準強度を、20~30N/mm²程度とすると、骨材寸法5mmではS/Bを2以下とすれば十分な構造体強度を確保できると考えられる。

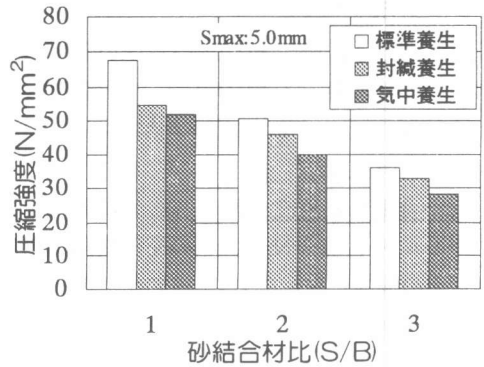


図-8. 圧縮強度試験結果(調査 No.1,4,6)

2.6 考察

無収縮モルタルの流動性・充填性は、骨材の最大寸法を従来から多く使用されている1~3mmから5mm程度に大きくすることでかなり向上する。また、水和による温度上昇、乾燥収縮の点では、砂結合材比を従来の1から大きくするほど構造物の補修・補強に適したものが得られる。強度の点では、砂結合材比を2程度としておけばJ₁₄ロート流下時間6秒、骨材最大寸法5mmの条件で40N/mm²程度の構造体強度を確保できる。

上記の結果から、コンクリート構造物の補修・補強に用いる無収縮モルタルは、砂結合材比は2程度、骨材の最大寸法は5mm程度が適正であると考えられる。

3 せん断特性に関する実験

3.1 概要

鉄筋補強した小型の試験体(マトックモデル)の一面せん断試験およびRC柱試験体の繰り返しせん断試験により、無収縮モルタルの骨材の最大寸法がせん断特性のに与える影響について実験的に検討した。

3.2 使用材料, モルタルの調合条件および力学的性質

一面せん断強度の検討に使用した無収縮モルタルの調合条件および試験材齢での力学的性質を表-3に示す。また、RC柱のせん断特性の検討に使用した無収縮モルタルの調合条件および試験材齢の力学的性質を表-4に示す。鉄筋は、降伏点強度335N/mm²(D6)および462N/mm²(D16)のものをを用いた。

3.2 実験方法

(1)一面せん断特性 図-9に一面せん断強度試験に使用した試験体を示す。せん断面の法線方向に補強筋(4-D6:補強筋比P_w=0.71%)を配置した。試験体のせん断面には、切り欠きにエッジをあてかい割裂して

表-3. 調合条件および力学的性質(一面せん断特性)

種類	S/B	水結合材比(%)	最大寸法(mm)	圧縮強度(N/mm ²)	ヤング係数(N/mm ²)
無収縮モルタル	1	36	1.2	62.5	2.69 × 10 ⁴
	1.7	42	3.5	50.7	2.08 × 10 ⁴
	2	45	5.0	52.2	2.30 × 10 ⁴
	2	45	7.5	52.6	2.26 × 10 ⁴
コンクリート	—	55	20	35.9	2.94 × 10 ⁴

圧縮強度は封緘養生強度

表-4. 調合条件および力学的性質(RC柱のせん断特性)

種類	適用部位	S/B	水結合材比(%)	最大寸法(mm)	圧縮強度(N/mm ²)	ヤング係数(N/mm ²)
無収縮モルタル	欠損断面の充填部	1	36	1.2	57.0	2.49 × 10 ⁴
		1.7	42	3.5	56.5	2.17 × 10 ⁴
		2	45	7.5	54.2	2.85 × 10 ⁴
コンクリート	無破損柱	—	60	20	25.0	2.31 × 10 ⁴
	破砕部の残存コン部	—	60	20	28.6~33.7	2.46~2.62 × 10 ⁴

圧縮強度は封緘養生強度

幅 0.2mm の先行亀裂を導入した。亀裂導入後、図-9に示すよう載荷し、せん断力と鉛直方向ずれ変位を測定した。

(2)RC柱のせん断特性 図-10にRC柱試験体の断面および形状を示す。各試験体の設定条件を表-5に示す。基準となる損傷を受けていない柱は、粗骨材最大寸法 20mm のコンクリートとした。補修柱は、損傷を受けた柱を模擬するためコア部分に別途作成した破碎コンクリートを積み上げ、間隙とかぶり部分に無収縮モルタルを流し込んで充填した。加力には、建研式加力装置を用い、一定軸力載荷後、正負繰り返しの逆対称曲げせん断力を載荷した。加力サイクルは、柱脚に対する柱頭の水平変位 δ を柱長さ ($h=90\text{cm}$) で除した柱の変形部材角 $R(\delta/h)$ による変形制御とした。

3.3 実験結果

(1)一面せん断特性 一面せん断試験結果を表-6に示す。また、図-11にせん断応力とずれ変位の関係を示す。無収縮モルタルのせん断耐力は、いずれもコンクリートよりは小さいが、無収縮モルタルの中では最大寸法を大きくするほどせん断耐力は向上している。これは、骨材が大きいほどインターロッキング作用によりせん断耐力が向上したことを示している。

図-12に骨材の最大寸法と単位圧縮強度当たりのせん断応力 (τ/σ_c) の関係を示す。モルタルの砂結合材比が 1~2 の範囲では骨材の最大寸法と最大せん断応力との間には直線的な相関が認められ、骨材の最大寸法が大きいほど最大せん断耐力は大きくなる傾向がある。

(2)RC柱のせん断特性 写真-1に柱試験体のひび割れ状況を示す。図-13にせん断力と部材角曲線から得られた包絡線を示す。写真-1から、骨材の最大寸法を 7.5mm と大きくすることでひび割れがよく分散することがわかる。せん断耐力

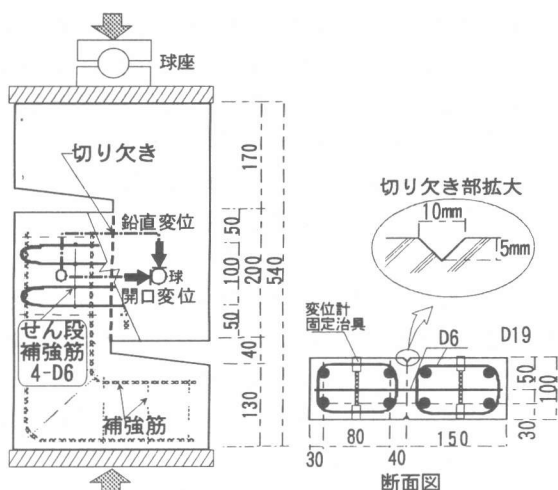


図-9. 一面せん断試験体

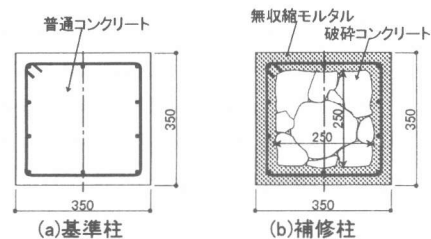


図-10. RC柱の断面

表-5. 試験体設定条件

種類	最大寸法 (mm)	主筋	帯筋
無収縮モルタル	1.2	10-D16 (Pt=0.65%)	D6□@100(Pw=0.18%)
	3.5		
	7.5		
コンクリート	20		

表-6. 一面せん断試験結果

種類	最大寸法 (mm)	最大せん断耐力における各値			
		荷重 (KN)	応力 (N/mm ²)	鉛直変位 (mm)	開口変位 (mm)
無収縮モルタル	1.2	50.1	2.78	0.938	0.269
	3.5	51.0	2.83	0.869	0.217
	5.0	56.5	3.14	0.729	0.142
	7.5	75.2	4.18	0.521	0.161
コンクリート	20	111.4	6.19	0.579	0.333

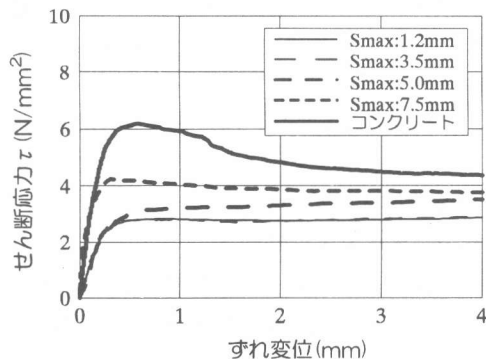


図-11. 一面せん断試験結果

は無収縮モルタルで補修した柱のほうが無収縮モルタルの強度が高いため、基準柱より大きくなった。また、最大寸法を大きくすることで、最大荷重時の部材角も骨材の最大寸法が大きくなるに従い増大しており、せん断性能が改善されている。これらの結果は、一面せん断実験から得られた結果と一致する。

3.4 考察

ひび割れを導入した小型試験体による一面せん断試験の結果、骨材最大寸法が1~3mmの従来の無収縮モルタルは、コンクリートと比べせん断耐力は低い。しかし、骨材を大きくすることによってせん断耐力は向上する。また、RC柱の繰り返しせん断試験から、骨材寸法が1~3mm程度と小さい砂を用いた従来の無収縮モルタルでは、ひび割れが一面に集中して脆性的な破壊を起こしたのに対し、骨材の最大寸法を大きくすることでひび割れが分散し、最大耐力以降の変形能力も増大した。これらの結果から、無収縮モルタルの骨材の最大寸法を大きくすることにより、従来の無収縮モルタルのせん断性能が改善されることがわかる。

4. まとめ

本研究の結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 無収縮モルタルの流動性・充填性は、骨材の最大寸法を5mm程度に大きくすることによりかなり向上する。
- (2) 水和による温度上昇や乾燥収縮の点からは、砂結合材比を大きくするほど構造物の補修・補強に適したものが得られる。

- (3) 無収縮モルタルの膨張率

は、アルカリ濃度が高いほど高くなるため、同一膨張率を得るための膨張材量は、砂結合材比が大きくセメント量の少ないものほど多くなる。

- (4) 構造物の補修・補強に必要な構造体強度を確保するための砂結合材比は、最大寸法5mmの調査条件で2程度とすれば良い。

- (5) 従来の無収縮モルタルの骨材寸法は1~3mm程度であるが、最大寸法を大きくすることによってRC部材にせん断力が作用した場合のびび割れの分散や最大耐力以降の変形性能が向上する。

参考文献 [1] (社)日本道路協会：道路支承便覧，pp.93~94，平成3年7月

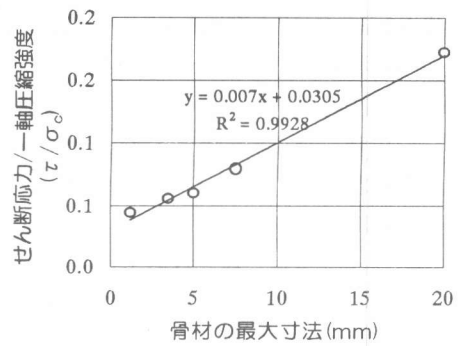


図-12. 骨材最大寸法と τ/σ_c の関係

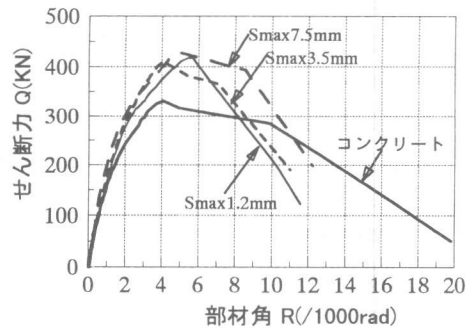


図-13. 包絡線の比較

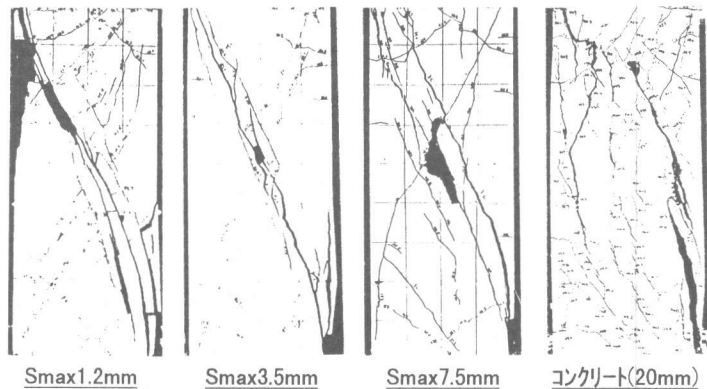


写真-1