

報告 硬化後の収縮を低減した充填モルタルの性状

五十嵐 数馬^{*1}・栖原 健太郎^{*2}・白岩 亨^{*3}・宮口 克一^{*4}

要旨：道路橋・鉄道橋等に用いられる充填モルタルは、現在様々な構造物へも適用されている。今回、硬化後の収縮量を低減させた充填モルタルの性状について検討した。膨張材や収縮低減剤の配合を最適化したモルタルは、無収縮性や流動性等の従来性能を阻害することなく、硬化後の収縮量を低減させることで、ひび割れの発生を抑制できることを確認した。また、数値解析によるひび割れ発生予測を試みたところ、屋外に暴露した供試体のひび割れの発生傾向を反映した結果を得ることができた。

キーワード：充填モルタル，無収縮性，流動性，乾燥収縮，ひび割れ抑制，断面補修

1. はじめに

良好な無収縮性と高流動性を兼ね備えた充填モルタルは、従来、機械基礎下部の充填や橋脚支承部の充填を目的に開発され、砂結合材比が1~2、水結合材比が35~45%のものが一般的である。また、近年では都市直下型巨大地震の教訓から、コンクリート構造物の耐震性を向上させる耐震補強工事やコンクリートが剥落した部材の断面修復工事が多く行われ、各種工法の内、断面増厚工法・鋼板巻立て工法・鉄骨枠付け増設工法・耐震壁の増設工法・免震工法などに広く使用されている。さらに、これらの小規模な工事では、品質確保の点からプレミックスタイプのものを使用することが望ましいとされている^{1),2)}。充填モルタルに要求される性能の中で無収縮性（初期沈下・ブリーディング防止）と高流動性は既設構造物との一体性を確保する上で特に重要であるが、薄肉部材に打設した場合や、脱型後に打設箇所が気中雰囲気直接暴露されるような場合、乾燥収縮によるひび割れが懸念されるという課題がある。既往の研究³⁾では、砂結合材比（以下、S/Bと表す）を大きくすること

で乾燥収縮が小さくなり、乾燥収縮ひび割れに対して有利であることが示されているが、モルタルの乾燥収縮量と実際のひび割れ抑制効果との関係については明らかにされていない。

本研究では、高いひび割れ抵抗性を有する充填モルタルの配合の最適化、さらに、収縮量とひび割れに関する定量的評価手法の構築を目的として、流動性・ブリーディング率・初期膨張量・硬化後の収縮量・圧縮強度といった基本物性に関する検討と乾燥収縮ひび割れに関する実験的な検討、さらに数値解析によるひび割れ発生予測について検討を行ったものである。

2. 充填モルタルの物性試験

2.1 材料設計手法

セメントには普通ポルトランドセメントを用い、膨張材の種類や添加量を変化させ、さらに、収縮低減剤を組み合わせることで硬化後の収縮量の低減を試みた。モルタルの流動性は、粉末高性能減水剤を適用することにより、また、無収縮性を付与するためにガス発泡物質を適用することとした。

*1 電気化学工業(株) 無機材料研究センター 工修 (正会員)

*2 電気化学工業(株) 無機材料研究センター 工修 (正会員)

*3 電気化学工業(株) 無機材料研究センター

*4 電気化学工業(株) 無機材料研究センター 工修 (正会員)

2.2 使用材料と配合

本研究で使用した材料を表 - 1 に示す。普通ポルトランドセメント（以下，C と表す）は，市販品を使用した。膨張材は，カルシウムサルフォアルミネート系膨張材（以下，E1 と表す）およびエトリンサイト - 石灰複合系膨張材（以下，E2 と表す）を用いた。収縮低減剤は，一般的にセメント硬化体中の空隙水の表面張力を低下させ，結果的に乾燥収縮を低減する⁴⁾とされ，今回は，ポリオキシアルキレングリコール系（以下，SR と表す）のものを選定した。高性能減水剤は，ナフタレンスルホン酸塩を主成分とするもの（以下，WR と表す）を使用した。ガス発泡物質（以下，Gs と表す）は，市販品を使用した。そして，細骨材には石灰石砕石（以下，S と表す）を用いた。

表 - 2 に配合を示す。配合は，充填モルタルの流動性評価方法として一般的に用いられている J_{14} 漏斗流下時間で 8 ± 0.5 秒となるよう調整した。E1 および E2 は，C に内割置換して用いた。SR は，C と E1 および E2 の合計に対して外割で 2.5 質量% 添加した。WR および Gs は，流動性や膨張性を確保するために混和剤として，C と E1 および E2 の合計に対して所定量を外割で添加した。また，S/B が 1/1 と 1/2 となるように S は，C と E1 および E2 の合計に対して 100 および 200 質量% とした。

2.3 実験方法

(1) モルタルの練混ぜ

モルタルは，温度 20℃，湿度 80% の恒温恒湿室でハンドミキサ (1000rpm) を使用し，スチール缶で 1 バッチ約 13 リットル練り混ぜた。練混ぜ時間は，材料投入後 90 秒間とした。

(2) 流動性

流動性試験は，JSCE-F 541 1999 「充填モルタルの流動性試験方法」に準じて J_{14} 漏斗流下時間を測定した。経時変化を確認するため，練り上げてから 15 分毎に測定した。

(3) プリーディング率

JSCE-F 542 1999 「充てんモルタルのプリーディング率および膨張率試験方法」に準じて測定した。

(4) 膨張率

JSCE-F 542 1999 「充てんモルタルのプリーディング率および膨張率試験方法」に準じて測定した。測定材齢は，24 時間後とした。

(5) 硬化後の収縮量

40 × 40 × 160mm の供試体を作製し，温度 20℃，湿度 60% の恒温恒湿室で 2 日間養生後，脱型したものを供試体とし，JIS A1129 に準じて測定した。

(6) 圧縮強度

50 × 100mm の供試体を作製し，24 時間後に脱型し，以降は標準養生とした。測定材齢は，3 日，7 日，28 日とした。

表 - 1 使用材料

略記	使用材料
C	普通ポルトランドセメント
E1	カルシウムサルフォアルミネート系膨張材
E2	エトリンサイト - 石灰複合系膨張材
SR	ポリオキシアルキレングリコール系収縮低減剤
WR	ナフタレンスルホン酸塩系高性能減水剤
Gs	ガス発泡物質
S	石灰石砕石細骨材

表 - 2 試験配合

配合	S/B	使用材料と配合割合 (質量%)						
		W/B	C	S	E1	E2	SR	WR+Gs
1	1/1	36.0	90	100	10	0	0	0.8
2	2/1	47.0	90	200	10	0	0	1
3	2/1	47.0	96	200	0	4	0	1
4	2/1	47.0	96	200	0	4	2.5	1
5	2/1	47.0	94.75	200	1.25	4	2.5	1
6	2/1	47.0	93.5	200	2.5	4	2.5	1

2.4 実験結果

(1) 流動性

図 - 1 に各配合のモルタル J_{14} 漏斗流下時間の経時変化を示す。E1 を用いた配合 1 と配合 2 を比較すると、 $S/B=1/1$ である配合 1 は練り上がり 30 分後までは良好な流動性であったが、45 分後には測定不能となった。 $S/B=2/1$ の配合 2 では、配合 1 よりも 30 分後までの流動性の低下率は大きいと 45 分まで測定可能であった。一方、E2 を用いた配合 3 は、配合 2 と比較して 60 分後まで良好な流動保持性を示していることが分かる。配合 4 には SR が配合されているが、SR が流動保持性にも寄与していると推察される。配合 5 および配合 6 は E1 と E2 の併用系であるが、今回の配合割合であれば良好な流動保持性を示すことが分かった。

(2) プリーディング率

図 - 2 に各配合のモルタルのプリーディング率を示す。測定結果から膨張材として E2 を使用した場合、プリーディングが発生する傾向となった。しかし、E1 を併用することでプリーディングを抑制することができた。E1 は膨張材としての役割の他、プリーディングを抑制する効果があると考えられる。

(3) 膨張率

図 - 3 に各配合のモルタルの膨張率を示す。 G_s を適量添加することで、全ての配合において同等に膨張することを確認した。膨張材の種類やその他の混和剤が初期の膨張量に影響を与えることはほとんどないと考えられる。

(4) 硬化後の収縮量

図 - 4 に各配合のモルタル硬化後の収縮量を示す。配合 1 と配合 2 の結果から、 S/B を大きくすることで収縮量が約 300μ 小さくなっていることが分かる。単位水量、単位セメント量の減少による効果と考えられる。流動性試験の結果から、膨張材 E2 は良好な流動保持性が認められたため、膨張材 E2 を用いた配合 3 (配合 2 と同程度の収縮量) を基本にさらなる収縮低減配合を試みた。SR を結合材に対し 2.5 質量%添加

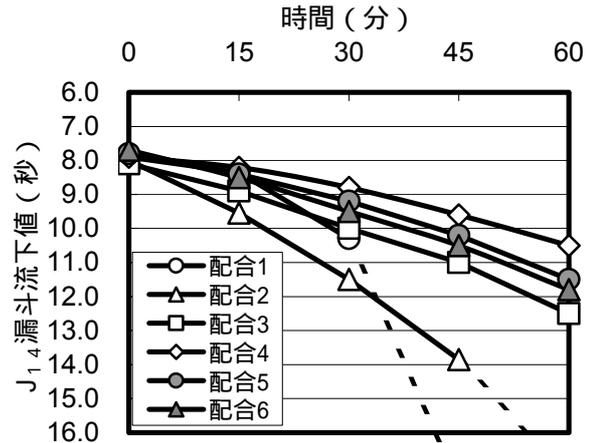


図 - 1 J_{14} 漏斗流下時間の経時変化

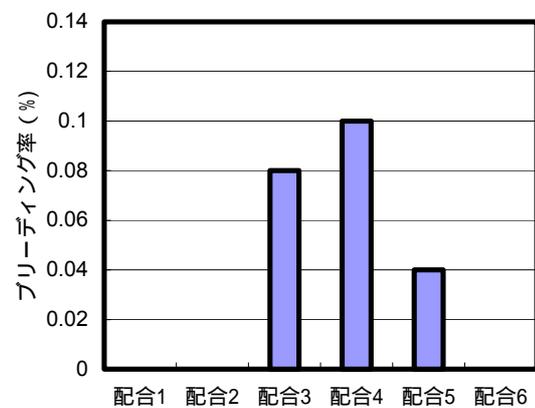


図 - 2 プリーディング率

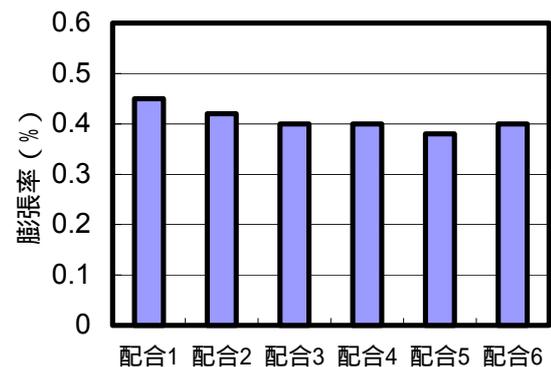


図 - 3 膨張率

することで、さらに 300μ 程度収縮量が低減した (配合 4)。さらに、E1 を併用することで、プリーディングを抑制し、材齢 28 日で、全体の収縮量を 500μ 程度まで低減できた。このことから、膨張材、収縮低減剤を併用することで、収縮量の低減効果が大きいことが確認された。

(5) 圧縮強度

図 - 5 に各配合のモルタル圧縮強度を示す。圧縮強度に関し、E1 を用いた配合 2 のモルタルは、E2 を用いた配合 3 のモルタルより 15%強度が大きくなった。E1 を増加させることで強度が若干増進することから（配合 5，配合 6），E1 は強度増進効果にも寄与していると考えられる。

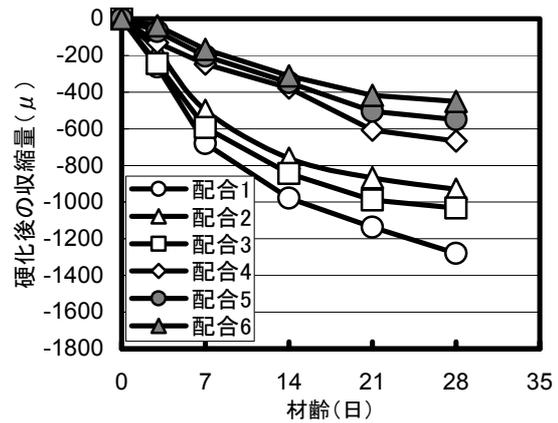


図 - 4 硬化後の収縮量

3. 屋外暴露試験および数値解析

3.1 実験概要

実際の収縮ひび割れと数値解析による定量的評価を行うため、著者らは、屋外に暴露供試体を作製し、供試体に発生する実際のひび割れを直接観察し、数値解析の結果と比較検討を行った。数値解析には、充填モルタルの物性試験より得た硬化モルタルの収縮量や圧縮強度等の各物性値を入力値として用いた。

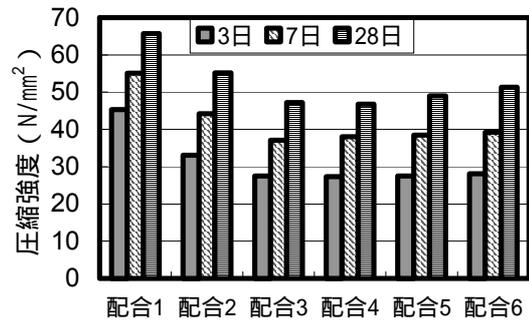


図 - 5 圧縮強度

3.2 屋外暴露試験

写真 - 1 に屋外暴露供試体を示す。試験に用いた配合は、表 - 2 中の配合 2 および配合 6 を選定した。供試体の反力版は、呼び強度が 30N/mm² のコンクリートで打設した。表層はチップング処理を行った。供試体は、反力版に型枠を設置し、モルタルを流し込み、長さ 2,500mm × 幅 250mm × 厚さ 50mm に作製した。モルタル打設後は、コテ押さえ、水打ちを行い、シート養生を 3 日間行った。その後脱型し、以降は屋外環境条件で養生し、ひび割れ本数の観察を行った。対象は、目視確認できるすべてのひび割れとした。打設は、2005 年 5 月に行った。



写真 - 1 屋外暴露試験

3.3 ひび割れ解析

(1) 解析概要

解析には、有限要素法を用いた。解析対象は、屋外暴露試験におけるモルタル打設箇所（写真 - 1）とした。本解析を実施するにあたり、以下の仮定を適用した。

- ・ ひび割れは供試体の中央に発生
- ・ モルタルの応力が引張強度を超えた時点でひび割れが発生

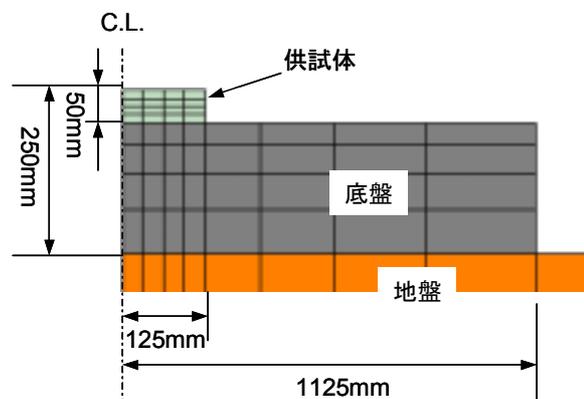


図 - 6 解析モデル断面図

・ひび割れ後の応力はすべて開放される

・体積変化は、2.4(4)で測定したモルタル硬化後の収縮量とし、温度による体積変化は考慮しない

(2) 解析モデル

図 - 6 に解析モデル断面図を示す。また、各要素の入力値を表 - 3 に、解析水準を表 - 4 に、解析手順を図 - 7 に示す。解析パラメータには、屋外暴露供試体の有効長さを用いた。有効長さは、図 - 6 の供試体奥行き方向の部材長さであり、ひび割れ発生後の解析対象となる部材長さである。

図 - 6 の供試体奥行き方向の部材長さであり、ひび割れ発生後の解析対象となる部材長さである。

図 - 6 の供試体奥行き方向の部材長さであり、ひび割れ発生後の解析対象となる部材長さである。

図 - 6 の供試体奥行き方向の部材長さであり、ひび割れ発生後の解析対象となる部材長さである。

図 - 6 の供試体奥行き方向の部材長さであり、ひび割れ発生後の解析対象となる部材長さである。

3.4 実験結果および解析結果

(1) 応力・ひずみの数値解析

数値解析から得られた応力履歴を図 - 8 に示す。応力が引張強度に到達した段階で、ひび割れが発生し、応力が開放されることを再現している。配合 2 と配合 6 を比較すると、配合 2 ではひび割れ発生する時間が配合 6 よりも早いことが確認できる。

数値解析から得られた応力履歴を図 - 8 に示す。応力が引張強度に到達した段階で、ひび割れが発生し、応力が開放されることを再現している。配合 2 と配合 6 を比較すると、配合 2 ではひび割れ発生する時間が配合 6 よりも早いことが確認できる。

数値解析から得られた応力履歴を図 - 8 に示す。応力が引張強度に到達した段階で、ひび割れが発生し、応力が開放されることを再現している。配合 2 と配合 6 を比較すると、配合 2 ではひび割れ発生する時間が配合 6 よりも早いことが確認できる。

数値解析から得られた応力履歴を図 - 8 に示す。応力が引張強度に到達した段階で、ひび割れが発生し、応力が開放されることを再現している。配合 2 と配合 6 を比較すると、配合 2 ではひび割れ発生する時間が配合 6 よりも早いことが確認できる。

(2) ひび割れ本数の比較

図 - 9 に各材齢における屋外暴露供試体のひび割れ本数と数値解析によって算出したひび割れ本数の結果を示す。屋外暴露供試体のひび割れ本数を配合 2 と配合 6 で比較すると、配合 6 のひび割れ本数が少ないことが明らかであり、収縮量を低減することでひび割れの発生を抑制することが確認された。また、数値解析の結果と実測値を比較すると、配合 2 の場合、解析値は実測値に比べ少ない結果となった。これは、今回の数値解析において、ひび割れ幅・ひび割れ形状を考慮していないことやひび割れ発生箇所を供試体の中央と仮定したことが原因であると考えられる。写真 - 2 に実際の供試体を示すが、ひび割れの発生状況は、ある程度規則的だ

表 - 3 入力値

項目	底盤	配合 2	配合 6	備考	
呼び強度 (N/mm ²)	30				
圧縮強度推定の特性値	推定式	fc(t)={t/(a+bt)}fc28・d		1	
	fc28	30	60	50	2
	a		2.0	2.5	2
	b		0.9	0.9	2
引張強度推定の特性値	推定式	ft(t)=c{fc(t)}		1	
	c	0.44	0.28	0.28	2
ヤング係数 (N/mm ²)		0.5	0.65	0.70	2
	推定式	Ec(t)= :クリープに関する係数		1	
		4700	2000	1800	2
		0.5	0.65	0.65	2
ポアソン比	0.18	0.18	0.18	1	

- 1 土木学会コンクリート標準示方書より
- 2 実測値から近似

表 - 4 解析水準

水準	1	2	3	4	5	6	7
有効長さ L(mm)	2500	1250	625	312	156	78	39

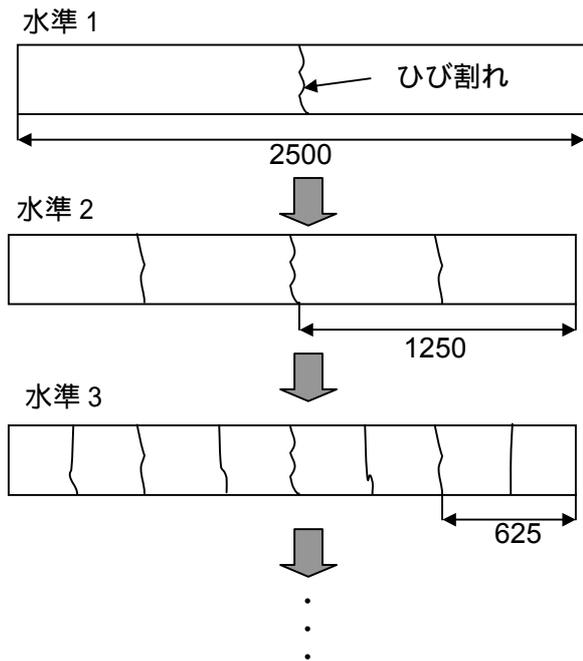


図 - 7 解析手順

が、長さや幅がそれぞれ異なっている。このように、ひび割れ発生に関する応力・ひずみには、より複雑な機構があると考えられる。配合 2 において、小さいひび割れ数本分が、解析で得られたひび割れ 1 本に相当すると思われる。一方、配合 6 では、解析値と実測値が比較的良く一致した。以上より、今回の解析は、ひび割れの発生傾向は予測可能だが、定量的な評価にはまだ課題があると言える。今後は、ひび割れ幅、長さ、構造物の実ひずみ等を考慮した評価手法を検討する必要があると思われる。

4. まとめ

本研究結果から以下の知見を得た。

- (1) エトリンガイト - 石灰複合系膨張材を用いることで充填モルタルの流動保持性が向上する。
- (2) カルシウムサルフォアルミネート系膨張材には、ブリーディング抑制効果が認められた。
- (3) 膨張材と収縮低減剤を併用することで、充填モルタルの乾燥収縮を大幅に低減することができる。
- (4) 乾燥収縮量を低減した材料設計を行うことで、充填モルタルの乾燥収縮ひび割れが抑制された。
- (5) 充填モルタルの物性値から、実際の構造物に発生する乾燥収縮ひび割れの傾向を数値解析により予測することができた。

参考文献

- 1) 友澤史紀ほか：最新・コンクリート混和剤の技術と応用，シーエムシー，2001
- 2) 建設大臣官房官庁営繕部監修：建築改修工事監理指針平成 14 年版（下巻），（財）建築保全センター，pp.225，1999
- 3) 小島正朗，神山行男，米澤敏男，宮内靖昌：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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.2，pp.195-200，1997.6
- 4) 阪田憲次ほか：コンクリート構造物のクリー

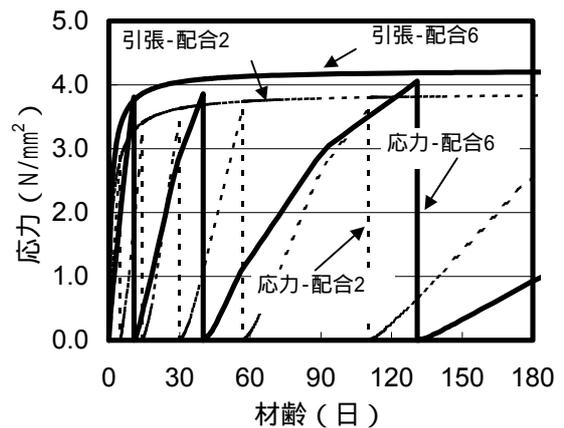


図 - 8 応力の履歴

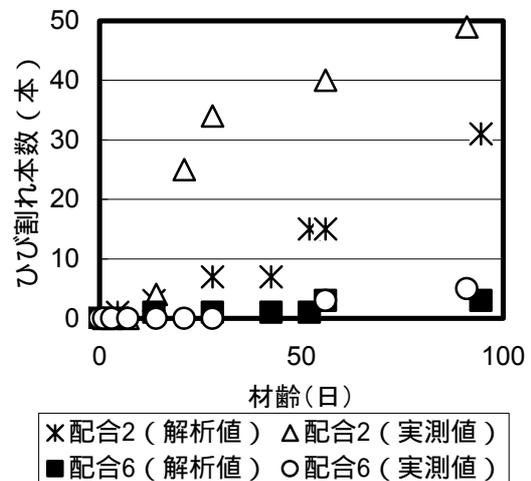


図 - 9 ひび割れ本数



写真 - 2 配合 2 の供試体

プおよび収縮による時間依存変形に関するシンポジウム委員会報告集，（社）日本コンクリート工学協会，pp.67-79，2001.