

超低収縮・超高強度型モルタルの性能評価および プレキャストセグメント接合目地への適用

Performance Evaluation on Ultra-low Shrinkage and Ultra-high Strength Mortar and its Application to Precast Segment Joints

建設基盤技術部 坂本 遼 RYO SAKAMOTO
 建設基盤技術部 臺 哲義 AKIYOSHI DAI
 構造技術部 藤岡 泰輔 TAISUKE FUJIOKA
 建設基盤技術部 松田 拓 TAKU MATSUDA

産業副産物系の混和材と細骨材を用いて、超低収縮と超高強度の特徴を有するモルタルを開発し、その性能について市販の超高強度型および汎用型無収縮モルタルと比較した。その結果、市販の超高強度型無収縮モルタルよりも強度が高く、かつ、乾燥収縮ひずみと自己収縮ひずみの両方が非常に小さいことが分かった。中性化、凍結融解および塩化物イオンの浸透に対する抵抗性も市販の無収縮モルタルと同等以上であった。プレキャストセグメント接合目地模型への充填性が良好であること、硬化後のひび割れが市販の無収縮モルタルに比べて大幅に少ないことを確認し、実橋のプレキャストセグメント接合目地へ適用し良好な結果を得た。

キーワード：無収縮モルタル，超低収縮，超高強度，高耐久性，セグメント接合目地

Ultra-low shrinkage and ultra-high strength mortar using industrial by-product SCMs and fine aggregate was developed and its performance was compared with commonly used commercial ultra-high-strength type and general type non-shrink mortars. It was confirmed that developed mortar's compressive strength is higher and both drying and autogenous shrinkage are extremely lower than compared non-shrink mortars. Also, its resistance to carbonation, freezing and thawing, and chloride ions penetration were equivalent or higher than them. Furthermore, the applicability of developed mortar to precast segment joint part was confirmed. In particular; there were significant fewer cracks and sufficient filling performance than compared non-shrink mortar. Through these investigations, developed mortar was applied to precast segment joint part of actual bridge and successful results could be obtained.

Key Words: Non-shrink mortar, Ultra-low shrinkage, Ultra-high strength, High durability, Segment joints

1. はじめに

既往の研究¹⁾では、水結合材比と単位水量が少ない条件下、空隙構造が粗大で吸水率が高い細骨材を使用することで、内部養生効果が期待でき、高い流動性を有しつつ自己収縮が極めて低減された超高強度コンクリートが得られることが示されている。著者らは、この技術を応用し、超低収縮・超高強度型モルタル（以下、XS と称する）を開発した。

本報では、強度特性、収縮特性、耐久性について、XS と表-1 に示す超高強度型（以下、M1 と称する）および汎用型（以下、M2 または M3 と称する）無収縮モ

表-1 比較した市販の無収縮モルタル

略記	セメント系無収縮モルタル
M1	超高強度型
M2	汎用型
M3	汎用型

表-2 超低収縮・超高強度型モルタルの練混ぜ方法

XS	練混ぜ水量	練混ぜ時間
20 kg/袋	1.72 kg/袋	XSを投入 → 回転させながら 練混ぜ水を投入 → 4分間練混ぜ

表-3 試験項目と規格

試験項目	規格	試験項目	規格
フロー	JIS R 5201	圧縮強度	JIS A 1108
Jロート流下時間	JSCE-F541	割裂引張強度	JIS A 1113
凝結時間	JIS A 1147	曲げ強度	JIS A 1106
ブリーディング率	JSCE-F541	せん断強度	JSCE-G553
膨張収縮率	JSCE-F541	鉄筋付着強度	NEXCO 試験法 312
耐凍害性	JIS A 1148 A法	長さ変化率	JIS A 1129-2 附属書 A
スケーリング抵抗性	ASTM C 672	収縮ひずみ	JSCE-K 561
塩化物イオンの拡散係数	非定常法	鉄筋拘束でのひび割れ性状	JCI-SAS2
	JSCE-G572	表層透気係数	トレント法
中性化抵抗性	JIS A 1153	表面吸水速度	SWAT 法

表-4 凝結時間，ブリーディング率および膨張率

モルタル種類	凝結時間		ブリーディング率 (%)	材齢7日の膨張率 (%)
	始発	終結		
XS	5:35	6:35	0.00	0.63
M1	4:16	5:26	0.00	※0.37
M2	3:35	4:47	0.00	0.57
M3	7:10	8:25	0.00	0.95

※試験を実施していないためカタログ値を示す

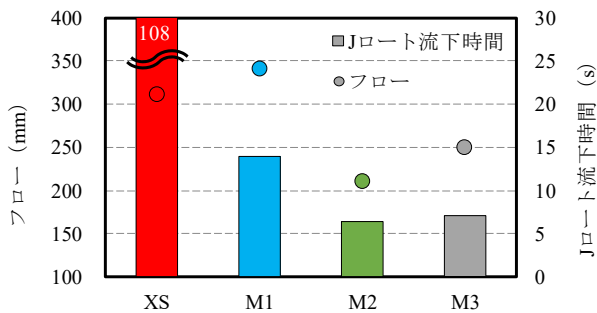


図-1 フローおよびJロート流下時間

ルタルを用いて比較し、評価した結果を報告する。また、プレキャストセグメント接合目地を模擬した試験体を作製し、XSの充填性とひび割れ発生の検証結果およびXSを当社施工の新設橋梁工事へ適用した結果について報告する。

2. 超低収縮・超高強度型モルタルの概要

XSの結合材には、早強ポルトランドセメントと数種類の産業副産物を使用している。細骨材は既往の研究¹⁾より、内部養生による収縮抑制効果が期待されるフェロニッケルスラグ細骨材（以下、FNSと称する）を使用しており、産業副産物の使用割合が高い。また、プレミックス材料に対する練混ぜ水の質量比は約9%であり、比較した市販の無収縮モルタルの約18%に比べて非常に小さい。XSの練混ぜ方法を表-2に示す。練混ぜには逆回転パン型ミキサを使用した。

3. 性能評価試験

(1) 試験項目

試験項目および準じた規格を表-3に示す。強度特性

は圧縮強度、割裂引張強度、曲げ強度、せん断強度および鉄筋付着強度で評価し、収縮特性は自己収縮ひずみおよび乾燥収縮ひずみで評価した。

(2) 試験結果

a) フロー，Jロート流下時間

フローおよびJロート流下時間を図-1に示す。XSのフローはM1と同程度の320mm前後であったが、Jロートの流下時間は長く、粘性の高さが特徴として挙げられる。

b) 凝結時間，ブリーディング率

凝結時間とブリーディング率を表-4に示す。XSの凝結時間はM1，M2と比較しても大きな差はなく、始発から終結までの時間は他の材料と同程度であった。また、ブリーディング率はいずれのモルタルもゼロであった。

c) 膨張収縮率

XS，M2およびM3の材齢7日時点での膨張率を表-4に示す。なお，M1は試験を実施していないため参考にカタログ値を記載した。XS，M2，M3全てにおいて、材齢7日時点で無収縮モルタルの膨張収縮率の規格²⁾を満たす結果となった。

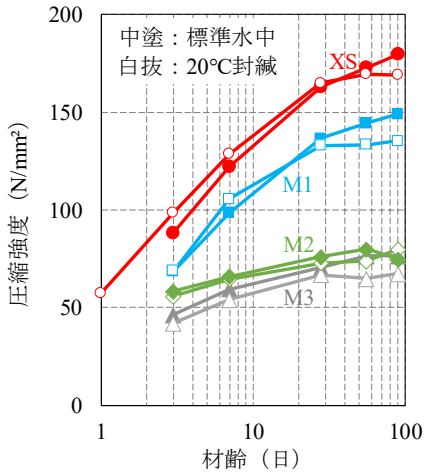


図-2 圧縮強度試験結果

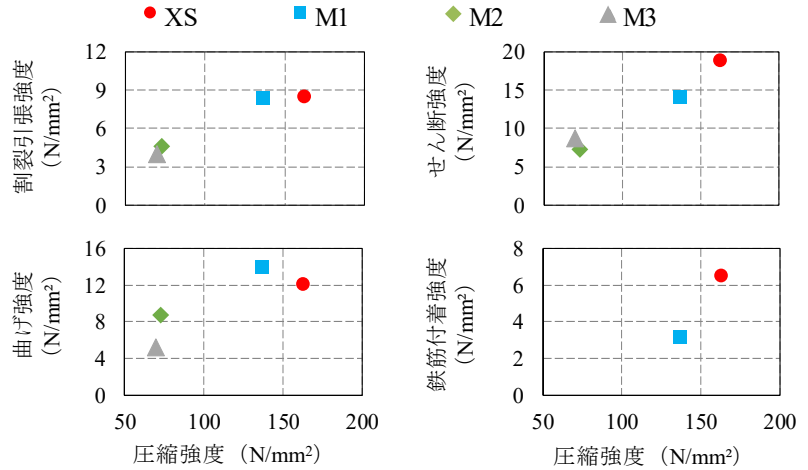


図-3 各強度と圧縮強度の関係 (材齢 28 日, 標準水中養生)

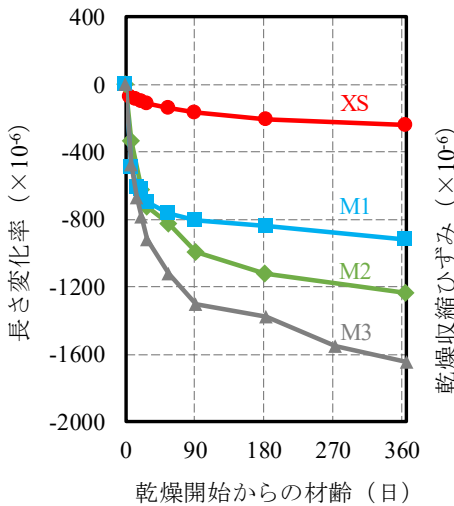


図-4 長さ変化率

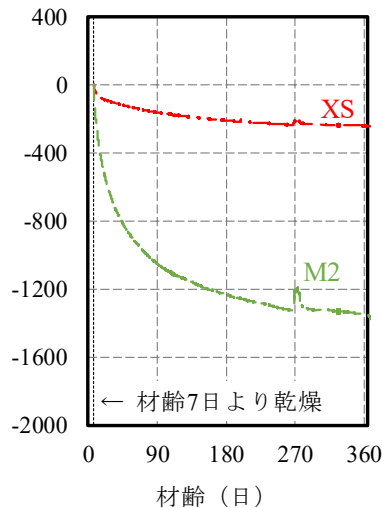


図-5 乾燥収縮ひずみ

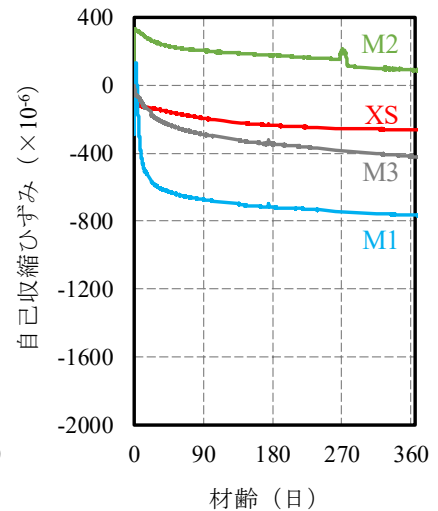


図-6 自己収縮ひずみ

d) 強度特性

圧縮強度を図-2 に示す。養生は標準水中および 20°C 封かんとした。試験材齢は、3、7、28、56、91 日とし、XS の 20°C 封かん養生については材齢 1 日での試験も実施した。XS は、材齢 1 日で 55 N/mm²、材齢 3 日で 85 N/mm² と、初期材齢から他のモルタルよりも強度発現が大きいことが分かる。また、材齢 28 日で 160 N/mm²、材齢 91 日で 170 N/mm² と長期的にも非常に高い圧縮強度を発現することが分かった。

標準水中養生を行った材齢 28 日での割裂引張強度、曲げ強度、せん断強度および鉄筋付着強度と圧縮強度の関係を図-3 に示す。なお、せん断強度試験は 2 体の平均とし、鉄筋付着強度試験は XS と M1 のみで実施した。超高強度型の XS と M1 の比較より、割裂引張強度と曲げ強度は同等であるが、せん断強度と鉄筋付着強度は XS の方が高かった。

e) 収縮特性

図-4 は JIS 法による長さ変化率であり、図-5 と図-6 は 100×100×400mm の供試体に熱電対内蔵埋込型ひずみ計を設置して測定された収縮ひずみである。図-6 は打設直後から試験体を 20°C 条件で封かんして測定された自己収縮ひずみである。図-5 は、図-6 の条件において材齢 7 日に封かきを解き、20°C 60%RH の気中養生の条件で測定された収縮ひずみであり、ひずみの起点は封かきを解いた時点である (XS と M2 で実施)。図-5、6 どちらも、線膨張係数を 10×10⁻⁶/°C と仮定し温度ひずみを除去している。

図-4~6 のいずれの結果においても、XS の乾燥収縮と自己収縮ひずみはどちらも他に比べて極めて小さい。なお、図-5 に示す乾燥条件の収縮ひずみの結果において、XS の材齢 1 年の収縮ひずみは約 250×10⁻⁶ となり、図-4 に示す JIS 法による長さ変化率と同程度となった。

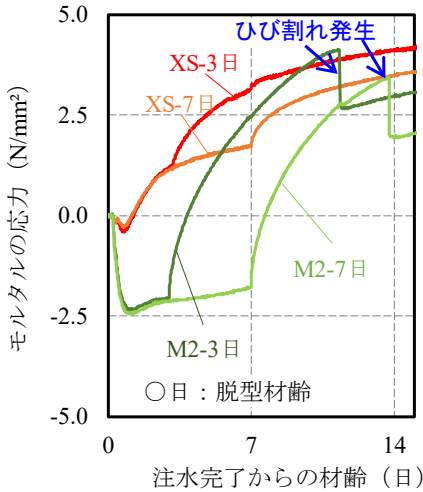


図-7 モルタルの応力

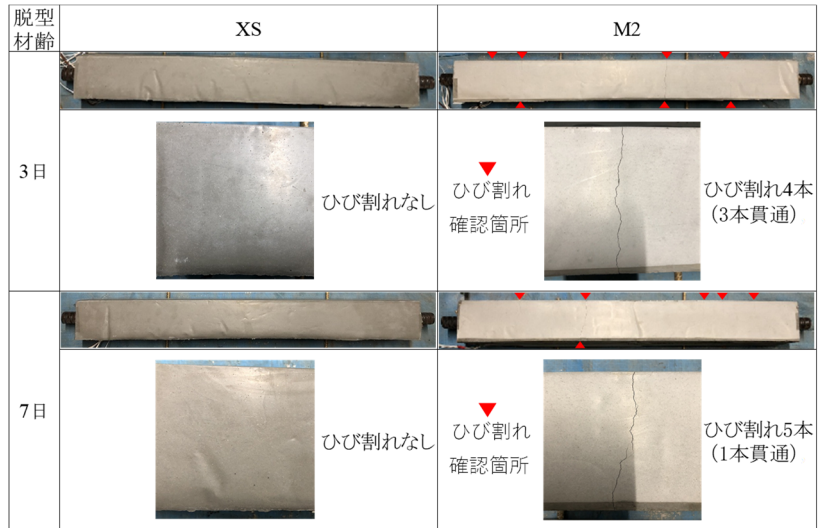


図-8 乾燥材齢1年 鉄筋拘束試験体のひび割れ状況

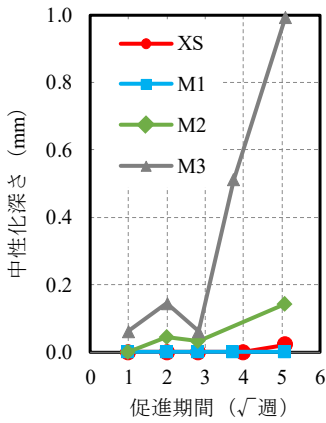


図-9 中性化深さ

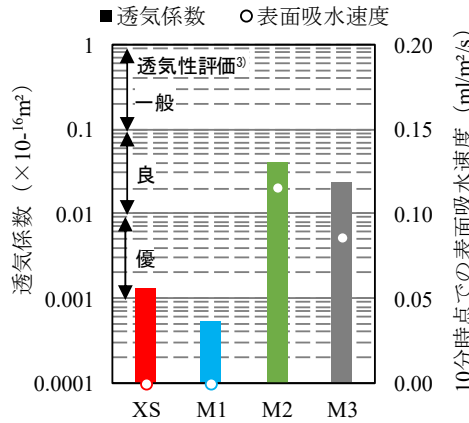


図-10 透気係数および表面吸水速度

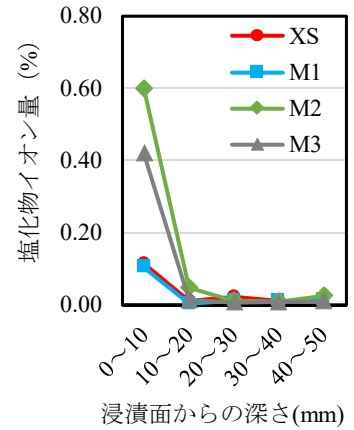


図-11 塩化物イオン量

f) 鉄筋拘束によるひび割れ抵抗性

鉄筋拘束によるひび割れ抵抗性試験は XS と M2 で実施した。試験体の乾燥条件は材齢3日および7日に脱枠して、温度 20℃、相対湿度 60%の気中環境とした。試験体の寸法は 100×100×850mm とし、中央 150mm 間のリブと節を取り除いた D32 を中心に配置した。

モルタルの応力を図-7 に、ひび割れの発生状況を図-8 に示す。M2 の材齢3日乾燥試験体では乾燥開始より8日後に、材齢7日乾燥試験体では乾燥開始より7日後にひび割れが発生した。一方、XS は乾燥材齢1年経過後でも鉄筋応力の低下は無く、目視によるひび割れも確認できなかった。XS は割裂引張強度が高く、長期材齢の乾燥収縮ひずみが小さいため、M2 に比べて高いひび割れ抵抗性を有していると考えられる。

g) 中性化抵抗性

中性化深さを図-9 に示す。XS の促進期間 26 週での中性化深さは 0.02mm となり、中性化抵抗性が非常に優れることが分かった。

h) 表層透気、表面吸水

供試体寸法はφ150×300mm とし、試験面は打設面とした。打込み直後からフィルムによる封かん養生を行い、翌日より養生マットによる湿潤養生を2日間実施した。4日目より温度 20℃、相対湿度 60%の気中環境で53日間保管し、材齢56日に測定を行った。

表層透気係数と表面吸水速度を図-10 に示す。XS と M1 の透気係数は、透気性評価試験方法³⁾を参考とすれば、最も評価の高い優であった。また、表面からの吸水は認められなかった。これらより、両モルタルは透気性および吸水性が低く、緻密な表層品質を有していることが分かった。

i) 塩化物イオン浸透性

濃度 10%の NaCl 水溶液に3か月間浸せきした試験体の浸せき面からの深さと塩化物イオン量の関係を図-11 に示す。また、非定常法により算出した塩化物イオンの拡散係数を表-5 に示す。両試験ともに XS と M1 は塩化物イオン浸透抵抗性に優れていることが分かった。

表-5 塩化物イオンの
拡散係数（非正常法）

塩化物イオンの 拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)	
XS	0.09
M1	0.04
M2	2.26
M3	3.44

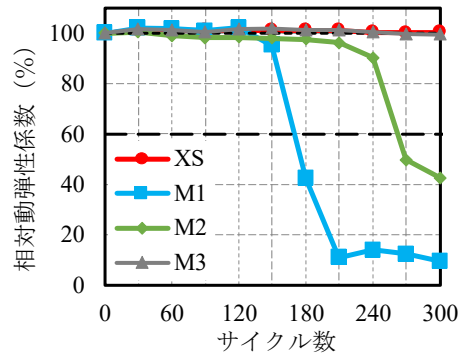


図-12 凍結融解試験結果

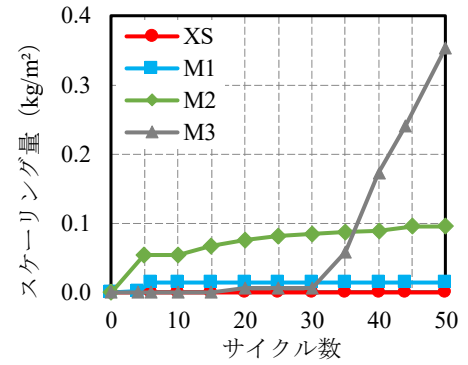


図-13 スケーリング試験結果



写真-1 XSの充填作業の様子

表-6 圧送前後での性状変化

条件	フロー (mm)	圧縮強度 (N/mm^2)		
		3日	7日	28日
圧送前	298	63.8	91.5	130
圧送後	317	67.8	98.6	135

j) 凍結融解抵抗性、スケーリング抵抗性

凍結融解試験結果を図-12に示す。耐久性指数は $M1 < M2 < M3 < XS$ となった。XSの耐久性指数は100を示し凍結融解抵抗性が非常に高いことが分かった。

スケーリング抵抗性試験によるスケーリング結果を図-13に示す。供試体寸法、試験面および養生方法については前述の表層透気および表面吸水試験と同様とし、材齢56日より試験を開始した。スケーリング量は $XS < M1 < M2 < M3$ となり、XSのスケーリングはほとんど認められなかった。表面透気および表面吸水試験の結果と同様にXSの表層は非常に緻密であることがわかった。また、凍結融解抵抗性とスケーリング抵抗性の両方に優れるモルタルはXSのみであった。

4. 施工性試験およびひび割れ発生の検証

(1) 試験概要

a) 圧送前後の性状評価

モルタルポンプを使用した際の圧送性と圧送前後の品質変化を確認すべく、スクイズ式グラウトポンプを用いた圧送実験を実施した。ホース内径は2インチ、長さは30mとし、圧送前後でのモルタルフローと圧縮強度

を確認した。なお、強度試験用の供試体は屋外（冬期）における封かん養生とした。

b) 充填性

プレキャストセグメント接合目地幅を15mmと30mmとした模擬試験体にてXSの充填性を確認した。写真-1に示すように充填方法は上部からの流し込みとし、硬化後にコア削孔して断面の観察から充填状況を評価した。

c) ひび割れ観察

長さ2m、幅30mmおよび高さ260mmの接合目地部を模擬したコンクリート試験体にXSを充填した。なお、比較として、後述するXSを適用した橋梁の接合目地の要求性能である材齢28日圧縮強度が $80\text{N}/\text{mm}^2$ 以上を満たすM1についても実施した。養生は、実施工での条件よりも厳しい条件とし、無収縮モルタルの養生に関する規定²⁾で最も厳しい3日間の湿潤養生とした。養生終了後から打設面と底面のひび割れの状況を観察した。また、雨上がり後の底面の状況を確認した。

(2) 試験結果

a) 圧送前後の性状評価

表-6にXSの圧送前後での性状比較を示す。圧送後は粘性が若干小さく感じられたがフロー値に大きな変化はなかった。一方、圧縮強度は若干高くなった。

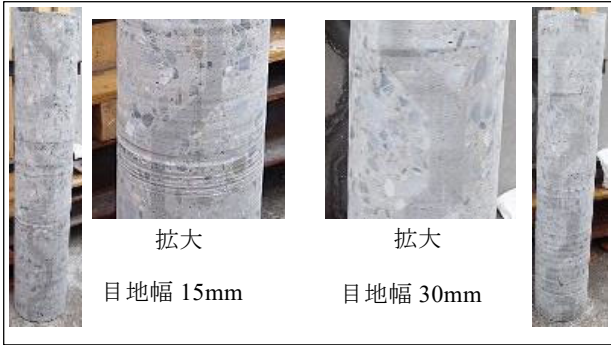


図-14 接合目地部の充填状況

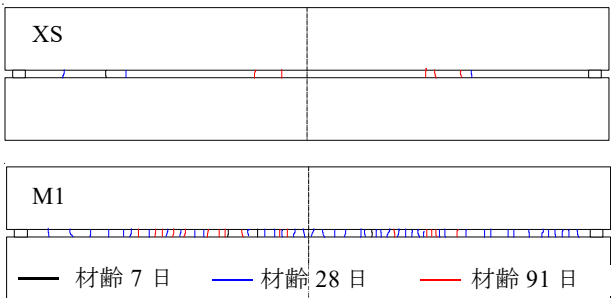


図-15 接合目地部打込み面 ひび割れの様子



写真-2 雨上がり 接合目地部底面の様子

b) 充填性

図-14 に XS の接合目地への充填状況を示す。目地幅が 30mm と 15mm のいずれにおいても、上方から流し込む方法で密実に充填できることが分かった。しかし、わずかに巻き込み空気が残存している様子が見られ、一方向から流し込み、突き棒によるかき乱しを行うなど、巻き込み空気に留意する必要がある。

c) ひび割れ観察

接合目地打込み面のひび割れ状況を図-15 に示す。M1 よりも XS のひび割れが大幅に少ないことが分かった。材齢 201 日における降雨後の目地部底面の様子を写真-2 に示す。M1 はひび割れと肌すきからの漏水が見られたが、XS には漏水が見られなかった。図-4 と図-6 に示した通り、XS は M1 よりも収縮ひずみが極めて小さいため、ひび割れが大幅に少なく、ひび割れの貫通や肌すきが発生しなかったと考えられる。

表-7 橋梁諸元

桁長	26.500 m	桁高	2.800 m
支間長	25.500 m	有効幅員	10.660 m
橋梁形式	非鉄製バタフライウェブ箱桁橋		
架設工法	トラス梁を用いた固定式支保工架設		

表-8 XS の施工概要

施工日	2020年7月1日～7月3日
打設箇所	上床版、下床版の接合目地 各 11 箇所
目地幅と高さ	平均幅 30mm 打込み最大高さ 750mm
練混ぜ量	合計 約 1670L

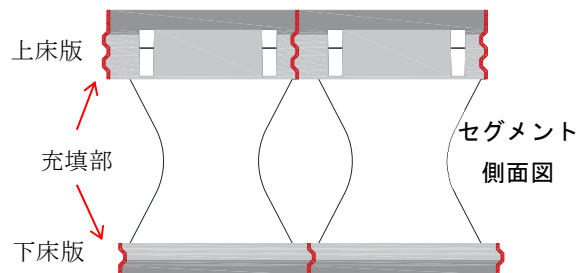
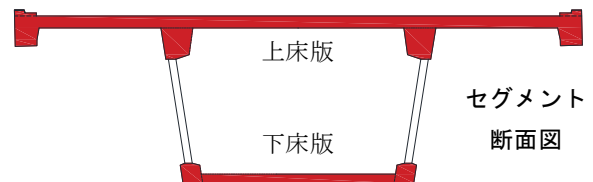


図-16 XS 充填箇所

5. セグメント接合目地への施工

(1) 施工概要

徳島自動車別荘谷橋 (PC 上部工) において、プレキャストセグメントの接合目地に XS を適用した。橋梁諸元を表-7 に、XS の施工概要を表-8 に示す。XS を充填した箇所は図-16 に示す赤い着色部である。

(2) XS の製造および管理

XS の標準配合例および品質管理値を表-9 に示す。施工時期が夏期であったため、練上り温度が非常に高くなることが懸念された。そのため、XS はスポットクーラーを用いて 25℃程度を、練混ぜ水はチラーユニットを用いて 10℃前後を目標に管理した。練混ぜ水量は管理

表-9 標準配合例および品質管理値

XS	20 kg
練混ぜ水量	1.72 L (1.63~1.80 L)
練上り量	約 8.8 L
練上り温度	5~35 °C
フロー	260~340 mm



写真-3 充填の様子

写真-4 充填状況

範囲内で調整した。品質管理試験（練上り温度およびフロー）は、5 バッチに一回実施した。その結果、練上り温度は 22~26°C、フローは 270~320mm となり、いずれも管理基準を満たした。

（3）充填方法および養生方法

XS の充填は、写真-3 に示す床版上部から流し込む方法とした。充填に先立ち、セグメントと XS の目開き抑制を目的に吸水防止剤をセグメント面の充填上部箇所塗布した。また、充填直前には水湿しを行い、かき乱しを行いながら空気を巻き込まないように一方向から打込みを行った。打込み後、フィルムを用いて表面の乾燥を防ぎ、1~2 時間後に仕上げ補助剤を使用して荒均しを行い、3~5 時間後に最終仕上げ作業を行った。その後、フィルムを用いて再び封かん養生を行った。充填翌日、吸水させたマットを敷設した湿潤養生を行い、脱枠後は保水養生テープにて材齢 28 日まで養生した。

上床版接合目地の充填状況を写真-4 に示す。気泡や未充填箇所はなく、XS が密実に充填されていることを確認した。また、ひび割れの発生は確認されなかった。これらの事より、充填や養生方法が適切であったと考える。

6. まとめ

超低収縮・超高強度型モルタルを開発し、その性能と施工性を確認して新設橋梁工事に適用した。開発したモルタルの性能と施工性について、以下にまとめる。

- ① 市販の超高強度型無収縮モルタルと比較して強度発現に優れるとともに、自己収縮ひずみおよび乾燥収縮ひずみが極めて小さい。また、鉄筋付着強度が従来の超高強度型無収縮モルタルの 2 倍以上となった。
- ② 耐久性は、比較した市販の無収縮モルタルと同等以上である。すなわち、中性化抵抗性が極めて高く、透気性と吸水性が低い。さらに塩化物イオン浸透性が極めて低く、高い凍結融解抵抗性とスケール抵抗性を有する。
- ③ 実験した条件において、スクイズ式モルタルポンプを使用した圧送距離 30m の施工が可能である。
- ④ プレキャストセグメントの接合目地への充填性は良好であり、充填後に発生するひび割れは比較した超高強度型無収縮モルタルに比べて極めて少ない。

謝辞：本報告にあたり、太平洋マテリアル株式会社 中島裕氏にご協力いただきました。ここに深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 松田拓ほか：細骨材の違いが超高強度コンクリートの性状に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1117-1122，2015
- 2) 東日本高速道路（株），中日本高速道路（株），西日本高速道路（株）：構造物施工管理要領，pp.237-240，2017.7
- 3) 土木学会：コンクリート技術シリーズ No.80 構造物表面のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会（335 委員会）成果報告書およびシンポジウム講演梗概集，pp.30-36，2008.4