

プレグラウトPC鋼材の適用性に関する研究

青木 圭一*1・大中 英揮*2・橋川 勝司*3・中村 収志*4

1. はじめに

PC鋼材の表面を未硬化のエポキシ樹脂とポリエチレンシースで被覆されたプレグラウトPC鋼材は、施工現場でのグラウト作業が不要なポストテンション工法用緊張材として開発された新材料である。プレグラウト材であるエポキシ樹脂は、あらかじめ工場において主剤と硬化剤が混合されて充填されているため、確実な防錆が期待できる。

しかしながら、エポキシ樹脂の硬化速度は温度依存性が大きく、マスコンクリートや水和熱の高いセメントに使用した場合、コンクリートの硬化熱がエポキシ樹脂の硬化速度を促進させることが知られている。そのため、PC鋼材の緊張作業までにエポキシ樹脂が硬化しないようコンクリートの温度対策や樹脂の選定については、十分な配慮が必要となる。

本報告は、プレグラウトPC鋼材をマスコンクリートに適用した場合におけるマスコンクリートの温度対策、コンクリートの上昇温度とエポキシ樹脂硬化速度の関係、さらに温度依存性が小さい湿気硬化型プレグラウトPC鋼材の適用性についての研究結果を報告するものである。

2. プレグラウトPC鋼材の適用性検討フロー

中国横断自動車道見延橋は、最大支間長149 m、最大桁高8.5 mの5径間連続ラーメン橋である。本橋は、鋼管・コンクリート複合構造橋脚および全外ケーブル構造を採用しているため、柱頭部横桁は無垢断面のマスコンクリートとなっている。

見延橋におけるプレグラウトPC鋼材の適用性確認フローを図-1に示す。

第1ステップとしてPC部材として最もマスコンクリートとなる柱頭部横桁の温度解析を行い、コンクリート上昇温度の検討を行う。同時に使用セメントや打設条件を変更し、上昇温度に及ぼす影響を考察する。

次に解析値の整合性を確認するため、第2ステップではマスブロック試験による断熱温度上昇特性の確認、第3ステップでは見延橋実橋での温度計測を実施する。

そして、第4ステップで柱頭部横桁の温度履歴と近似しているマスブロック試験を利用して、プレグラウトPC鋼材樹脂の硬化確認試験を行う。その結果からコンクリートの上昇温度とエポキシ樹脂硬化速度の関係を考察し、マスコンクリートにおける適用性の検討を行う。

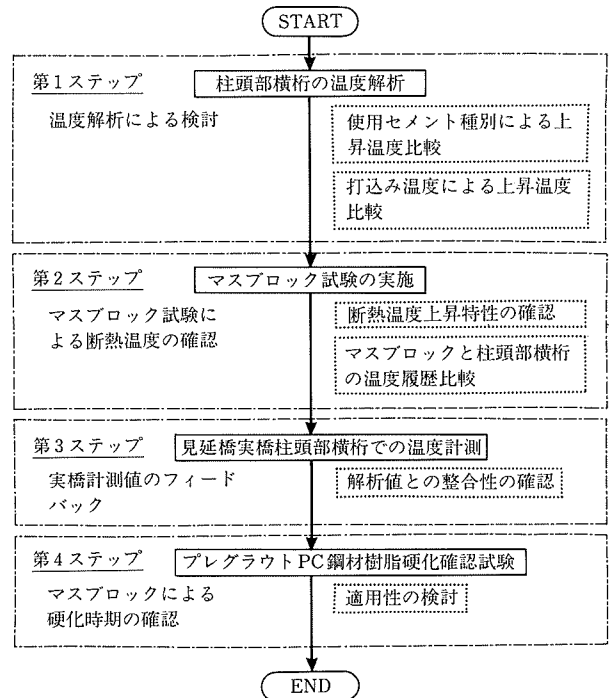


図-1 プレグラウトPC鋼材の適用性検討フロー

3. 見延橋柱頭部横桁の温度解析

3.1 柱頭部横桁の上昇温度予測

見延橋の柱頭部横桁を想定した3次元温度解析モデルおよび解析条件を、図-2および表-1にそれぞれ示す。コンクリート温度が最も上昇すると思われる夏期施工時(外気温30℃)に早強セメントを使用した場合の経験最高温度を図-3、温度履歴を図-4に示す。早強セメントを使用し、460 m³のコンクリートを1回目110 m³、2回目160 m³および3回目190 m³の3回に分割して打設した場合、最高温度は、第2リフト打設2.5日後に96.3℃という解析結果となった。

3.2 使用セメントおよび打設条件による上昇温度比較

PC橋における柱頭部横桁の使用セメントは、一般部と同様に早強セメントを使用することが多い。しかしながら、3.1の解析結果から夏期施工時に早強セメントを使用すると柱頭部横桁内部では95℃を上回る結果となり、温度ひび割れへの対策が必要となる。

また、横桁横締めプレグラウトPC鋼材を使用する場

*1 Keiichi AOKI: 日本道路公団 技術部 構造技術課
 *2 Hideki OHNAKA: 日本道路公団 中国支社 建設部 構造技術課 課長代理
 *3 Katsushi HASHIKAWA: 日本道路公団 中国支社 津山工事事務所
 *4 Atsushi NAKAMURA: 住友建設(株) 土木本部 PC設計部 課長

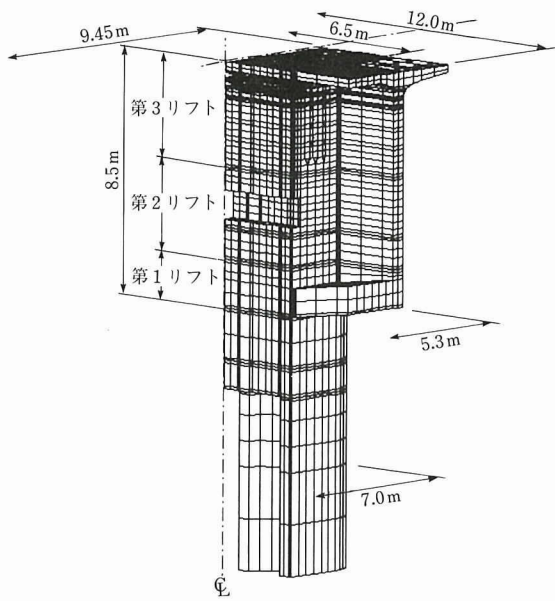


図-2 見延橋柱頭部横桁の温度解析モデル

表-1 見延橋柱頭部横桁の温度解析条件

解析条件			
コンクリート種類	早強 $\sigma_{ck}=40\text{N/mm}^2$	断熱温度上昇特性	標準示方書に準ずる
配合 W_w	171 kg/m ³	線膨張係数	10 μ /°C
W_c	438 kg/m ³	ポアソン比	0.167
W_s	749 kg/m ³	打込み温度	30°C
密度	2 316 kg/m ³	外気温	30°C
熱伝導率	2.7 W/m°C	熱伝達率 型枠	2W/m ² °C
比熱	1.31 kJ/kg°C	外気	12W/m ² °C

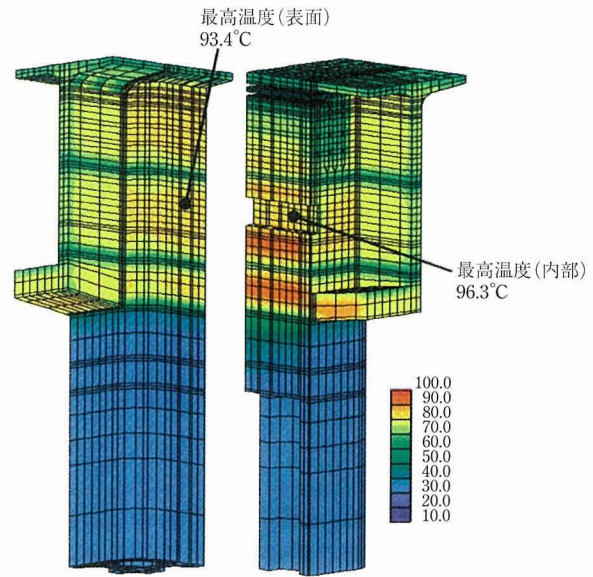


図-3 見延橋柱頭部横桁の最高温度解析値

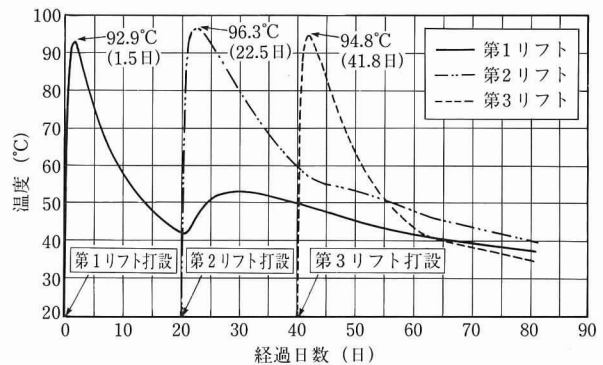


図-4 見延橋柱頭部横桁の温度履歴解析値

合、このような高温下ではエポキシ樹脂の硬化が促進され、緊張作業にも影響を及ぼすことが予想される。

したがって、コンクリート内部に生じる最高温度を抑制するため、使用セメントおよび打設条件による上昇温度の比較を行った。

使用セメントについては、早強セメント、普通セメントおよび中庸熱セメントの3種類で比較した。

表-2に打設条件、配合表および上昇温度の結果を示す。

使用セメントを早強セメントから普通セメントに変更することにより約10°Cの低減、中庸熱セメントを使用することにより、さらに10°C以上の低減が可能であった。打込み

温度は、最高上昇温度に密接に関係し、打込み温度を20°C低くすれば、最高温度も20°C低くなることが分かった。

外気温の差は、温度履歴に若干の差が出るものの、マスコンクリート内部の最高温度にとってはほとんど影響しない結果となった。

これらから、マスコンクリートの上昇温度を抑制するためには、

- ① プレクーリングによる打込み温度の低減
- ② ポストクーリングによる上昇温度の抑制
- ③ 低発熱系セメントの使用による上昇温度の抑制などが考えられる。

表-2 上昇温度比較

セメント種類	早強セメント			普通セメント			中庸熱セメント			
設計基準強度	40 N/mm ²			40 N/mm ²			40 N/mm ²			
配合	単位セメント量			418 kg/m ³			338 kg/m ³			
	水セメント比			40.0%			50.0%			
最高温度	打込み温度	30°C	30°C	10°C	30°C	30°C	10°C	30°C	30°C	10°C
	外気温	30°C	10°C	30°C	30°C	10°C	30°C	30°C	10°C	30°C
	第3リフト	94.8°C	94.3°C	77.6°C	85.3°C	84.6°C	65.0°C	70.8°C	69.0°C	47.8°C
	第2リフト	96.3°C	96.2°C	80.2°C	87.3°C	87.0°C	68.4°C	74.0°C	73.3°C	50.3°C
	第1リフト	92.9°C	92.2°C	74.9°C	83.7°C	82.8°C	63.1°C	68.8°C	67.1°C	46.5°C

4. マスブロック試験による断熱温度上昇特性の確認

4.1 マスブロック試験の概要

見延橋の温度解析結果から柱頭部横桁内部は、準断熱状態となっており、最高上昇温度は打込み温度に断熱温度上昇量を付加した値とほぼ一致した。したがって、最高上昇温度は、使用するコンクリートによる断熱温度上昇試験を実施することにより、高い精度で予測することが可能である。

そこで、これらを検証するため、1m角の供試体を断熱材で覆い、擬似断熱状態としたマスブロック試験体を製作し、温度履歴を測定して断熱温度上昇特性の確認を行った。

使用セメントは、解析に用いた3種類のセメントで実施し、配合はすべて40 N/mm²となるように単位セメント量お

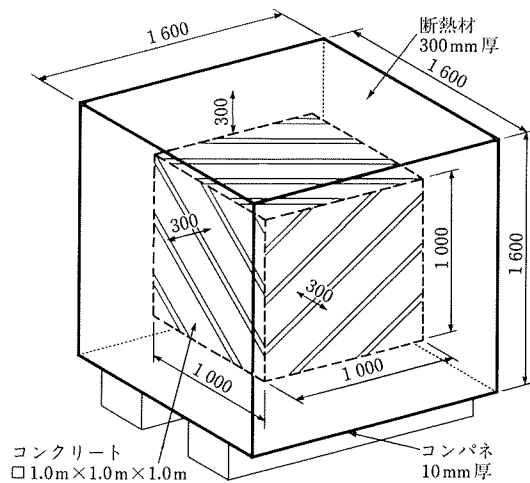


図-5 マスブロック試験供試体形状

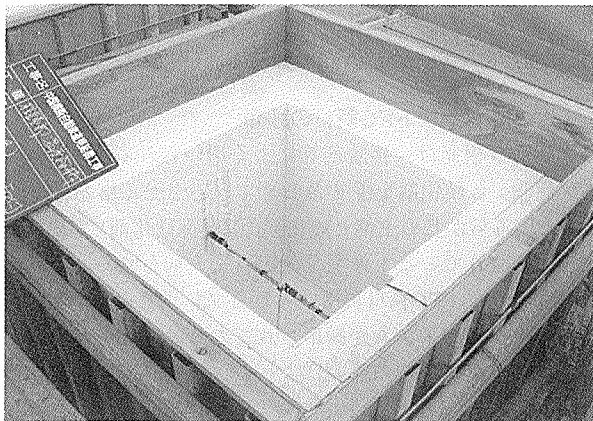


写真-1 マスブロック試験準備状況

よび水セメント比を決定した。図-5にマスブロック試験供試体形状、写真-1にマスブロック試験準備状況を示す。

4.2 マスブロック試験による断熱温度上昇特性

マスブロック試験に用いた断熱材は、厚さ30cmの発泡スチロールを使用した。本試験では完全な断熱状態を再現することができないため、放熱量を算出し履歴曲線の補正を行うことにより、断熱温度上昇量を推定した。

図-6に3種類のコンクリートによる温度履歴と補正した断熱温度上昇曲線、表-3にマスブロック試験結果を示す。

「コンクリート標準示方書」の標準値¹⁾と比較すると、上昇速度には若干の差が生じるものの、断熱温度上昇量はほぼ同等の結果となった。

4.3 マスブロック試験と柱頭部横桁温度履歴の比較

本来、マスブロック試験は、使用コンクリートの断熱温度上昇量を簡易的に算出するための試験であるが、マスブロックの大きさや断熱材の厚さを調整することにより、柱頭部横桁のマスコンクリートとほぼ同様の擬似断熱状態を再現することができる。

図-7に早強セメントを使用した場合のマスブロック試験と柱頭部横桁の温度履歴の比較を示す。打込み温度を同一とした場合、最高温度は、若干マスブロック試験値が低いものの6日後からは高い値を維持し、10日後の積算温度ではほぼ同程度となった。

柱頭部横桁のマスコンクリート内部における高温域での温度履歴は、簡易的なマスブロック試験でもおおよそ再現可能であることが分かった。したがって、プレグラウトPC鋼材樹脂硬化確認試験は、エポキシ樹脂の硬化速度が積算温度に依存することから、マスコンクリートと同程度の積

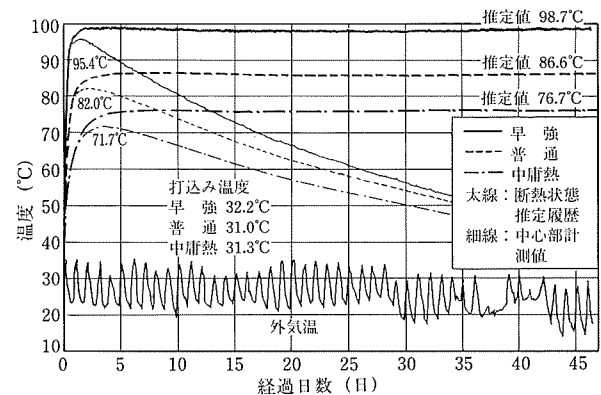


図-6 マスブロック試験温度履歴

表-3 マスブロック試験結果

セメント種類		早強セメント	普通セメント	中庸熱セメント
配合	水セメント比	39%	40%	50%
	単位セメント量	449 kg/m ³	418 kg/m ³	338 kg/m ³
打込み温度		32.2°C	31.0°C	31.3°C
計測結果	最高温度	95.4°C	82.0°C	71.7°C
	上昇量	63.2°C	51.0°C	40.4°C
断熱温度 (実験から推定)		98.7°C	86.6°C	76.7°C
断熱温度上昇量	(実験から推定)	66.5°C	55.6°C	45.4°C
	(コンクリート標準示方書)	66.4°C	57.8°C	46.6°C

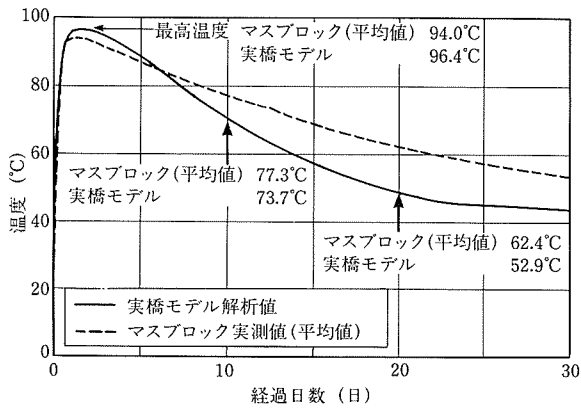


図-7 マスブロック試験実測値と柱頭部横桁温度履歴の比較

算温度となるマスブロック供試体を使用することとした。

5. 見延橋柱頭部横桁の温度計測

見延橋の柱頭部横桁における温度解析値と実測値の整合性を確認するため、温度計測を実施した。

その比較結果を図-8に示す。

解析値①は事前解析として、断熱温度上昇特性を「コンクリート標準示方書」の標準値¹⁾、外気温を標準平均気温として算出し、解析値②では事後解析として、マスブロック試験で算出した使用コンクリートによる断熱温度上昇特性値と実測の外気温を用いて算出した。

今回の温度解析では、3次元有限要素法により算出しているが、解析値と実測値が比較的一致していることから、温度履歴においては、各種条件を適切に設定することにより、高い精度で再現することが可能であることが分かった。

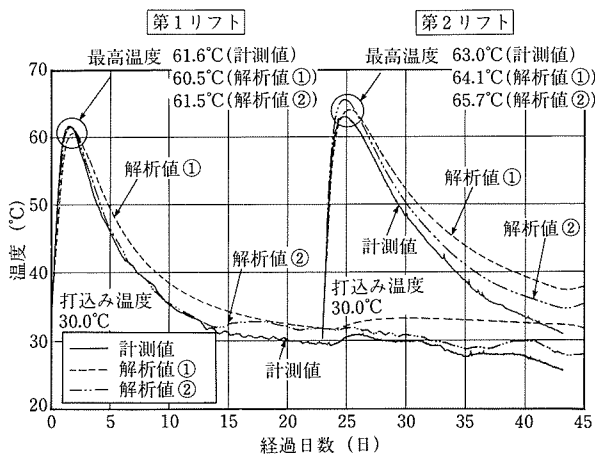


図-8 解析値と実測値の比較

6. プレグラウトPC鋼材樹脂の硬化確認試験

6.1 プレグラウトPC鋼材樹脂硬化確認試験の概要

プレグラウトPC鋼材は、PC鋼材の表面を未硬化のエポキシ樹脂とポリエチレンシースで被覆され、コンクリート打設後、硬化剤の反応により樹脂が硬化するメカニズムの鋼

材である。

しかしながら、硬化剤の反応は、コンクリート温度に大きく影響を受けるため、マスコンクリートに本鋼材を使用した場合は、セメントの水和熱の作用により緊張前にエポキシ樹脂が硬化する可能性がある。

したがって、コンクリートの温度履歴とエポキシ樹脂の硬化時期の関係について、とくに高温状態での硬化速度を確認するため、柱頭部横桁とほぼ同様の温度履歴を再現するマスブロックを用いてプレグラウトPC鋼材樹脂の硬化確認試験を実施した。

試験概要については、マスブロック試験と同様の試験体を使用し、その内部にプレグラウトPC鋼材を配置して硬化の状況を確認した。エポキシ樹脂の硬化は、緊張が不可となる硬化状態と所定の強度に達する最終硬化状態に分類される。本試験では緊張が不可となる硬化状態を確認するため、初期の段階では打撃試験、硬化が進んだ状態では図-9に示した緊張試験で判定した。

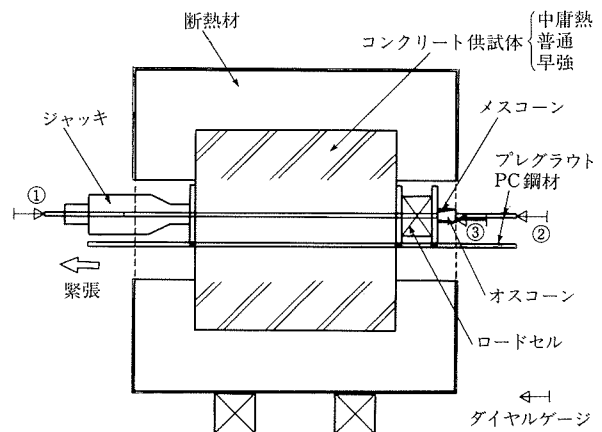


図-9 プレグラウトPC鋼材樹脂硬化確認試験

6.2 プレグラウトPC鋼材の種類

エポキシ樹脂は、接着剤等によく用いられる主剤(エポキシ樹脂)と硬化剤を混ぜ合わせて反応させる2液型システムと、あらかじめ主剤と硬化剤(潜在性硬化剤)が出荷時から混合されている1液型システムに大別される。

プレグラウトPC鋼材に用いられるプレグラウト樹脂は、後者の1液型システムが採用されており、硬化剤の反応を抑制するメカニズムの違いによって次の2種類が開発されている。

(1) 熱硬化型プレグラウト樹脂

固形粉末状の硬化剤を用いて早期の硬化進行を抑制する。硬化促進剤の配合量によって硬化速度を調整する。

本樹脂は、硬化速度に及ぼす温度の影響が大きい「熱硬化型樹脂」と呼ばれ、温度条件ごとに樹脂タイプが用意されている。

(2) 湿気硬化型プレグラウト樹脂

化学的にキャップを被せた状態の硬化剤を用いて早期の硬化進行を抑制する。キャップは、時間の経過とともに樹脂に含まれる微量の水分と反応して外れ硬化が進行する。

硬化剤のキャップを外す第1段階は、温度依存性が小さ

いため、高温下でも早期の硬化を抑制できる。常温においてもキャップが外れるため、1年～2年程度で完全硬化に至る。

図-10に湿気硬化型エポキシ樹脂の硬化メカニズムを示す。

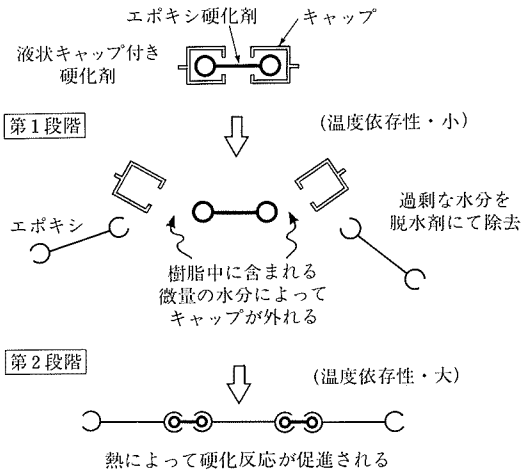


図-10 湿気硬化型エポキシ樹脂の硬化メカニズム

6.3 硬化確認試験状況

硬化確認試験で使用したプレグラウトPC鋼材の種類を表-4に、試験一覧を表-5に示す。3種類のセメントを使用したのは、水和熱の違いにより3パターンの温度履歴を再現することが可能であることから、早強セメント、普通セメント、中庸熱セメントを使用したマスコンクリートを想定して確認試験を実施した。

緊張の可否については、PC鋼材長が1mと付着定着長が短いことから、摩擦係数で判定することが難しいため、緊張端と固定端の張力が等しい場合に緊張可、両端で明確な張力差が生じた場合は、緊張不可と判定した。

写真-2に硬化確認試験状況を示す。

表-4 硬化確認試験使用鋼材

名称		備考
熱硬化型	暑中型 (A-050)	2年硬化型 (床版に使用)
	高温型 (A-020)	3年硬化型 (横桁、柱頭部に使用)
	超高温型 (A-000)	
	超々高温型 (MC-900)	
湿気硬化型		新開発樹脂を使用

表-5 硬化確認試験一覧

	外気温	セメント種類	打込み温度	最高温度	鋼材種類	備考
試験① 9月 1日～見延 (岡山)	20℃～30℃	早強セメント	32.0℃	89.6℃	熱硬化型 暑中型 高温型	屋外試験
		普通セメント	33.0℃	84.1℃		
		中庸熱セメント	32.6℃	71.5℃		
試験② 10月 2日～見延 (岡山)	5℃～20℃	早強セメント	31.0℃	95.9℃	熱硬化型 超高温型 超々高温型 湿気硬化型	屋外試験
		普通セメント	27.0℃	78.2℃		
		中庸熱セメント	27.0℃	62.6℃		
試験③ 1月 16日～小山 (栃木)	30℃～42℃	早強セメント	30.0℃	93.2℃	湿気硬化型	室内試験

7. プレグラウトPC鋼材樹脂の硬化確認試験結果

7.1 硬化確認試験結果

表-5に示したように試験は3回実施し、試験①が熱硬化型樹脂、試験②が超高温型の熱硬化型および湿気硬化型樹脂、試験③が湿気硬化型樹脂のみの確認試験を行った。

また、試験③は、1月～3月に夏期施工条件を再現するため、温度コントロールが可能な試験室を製作して室内試験とした。

緊張確認試験状況を写真-3、試験結果の一部を図-11、試験結果一覧を表-6に示す。

試験結果は、次のとおりである。

(1) 熱硬化型プレグラウトPC鋼材

硬化促進剤の配合量を調整した4種類について確認試験を行ったが、早強セメントを使用した温度パターンⅠと普通セメントを使用した温度パターンⅡは、ともに1週間以内に緊張不可となった。最も高温型である超々高温型 (MC-900)でも温度パターンⅠでは、1週間以内に緊張不可となることから、マスコンクリートにおける使用は、低発熱系セメントの使用またはプレおよびポストクーリング等により最高上昇温度を70℃以下 (温度パターンⅢ)になるように設定する必要がある。

(2) 湿気硬化型プレグラウトPC鋼材

温度依存性を小さくするよう新しく開発された本鋼材は、最高上昇温度95℃の温度パターンⅠにおいても3週間以上緊張可能であることが確認された。

室外試験と室内試験の2回実施した温度パターンⅠで緊

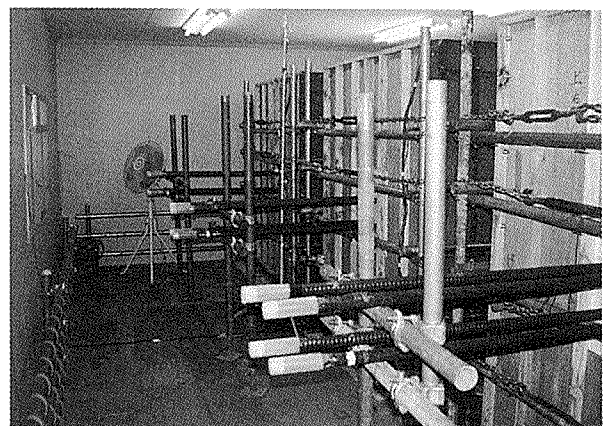


写真-2 硬化確認試験状況



写真-3 緊張確認試験状況

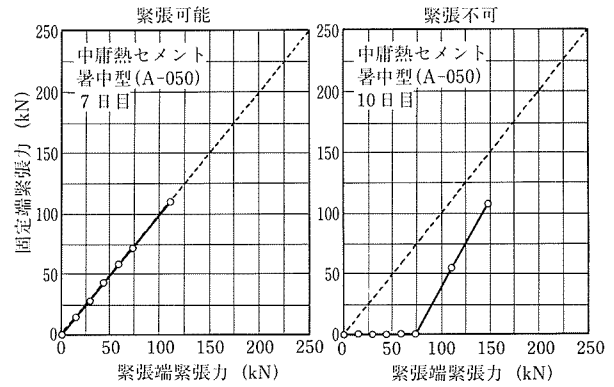


図-11 緊張確認結果

表-6 硬化確認試験結果一覧

熱硬化型プレグラウトPC鋼材			鋼材種類	予 測	3日	5日	7日	10日	14日	21日	28日	35日	42日
温度パターンⅠ (早強セメント) 最高温度 90℃~95℃	暑中型 (A-050)	予 測	予 測	予 測									
		試験結果	予 測	予 測	×	3日で緊張不可							
	高温型 (A-020)	予 測	予 測	予 測									
		試験結果	予 測	予 測	×	3日で緊張不可							
超高温型 (A-000)	予 測	予 測	予 測										
	試験結果	予 測	予 測	×	5日で緊張不可								
超々高温型 (MC-900)	予 測	予 測	予 測										
	試験結果	予 測	予 測	×	7日で緊張不可								
温度パターンⅡ (普通セメント) 最高温度 80℃~85℃	暑中型 (A-050)	予 測	予 測	予 測									
		試験結果	予 測	予 測	×	3日で緊張不可							
	高温型 (A-020)	予 測	予 測	予 測									
		試験結果	予 測	予 測	○ ×	3日で緊張可, 5日で緊張不可							
超高温型 (A-000)	予 測	予 測	予 測										
	試験結果	予 測	予 測	×	7日で緊張不可								
超々高温型 (MC-900)	予 測	予 測	予 測										
	試験結果	予 測	予 測	○	×	7日で緊張可, 14日で緊張不可							
温度パターンⅢ (中府熱セメント) 最高温度 65℃~75℃	暑中型 (A-050)	予 測	予 測	予 測									
		試験結果	予 測	予 測	○	×	7日で緊張可, 10日で緊張不可						
	高温型 (A-020)	予 測	予 測	予 測									
		試験結果	予 測	予 測	○	○	×	14日で緊張可, 21日で緊張不可					
超高温型 (A-000)	予 測	予 測	予 測										
	試験結果	予 測	予 測								○	28日で緊張可, 42日で緊張不可	×
超々高温型 (MC-900)	予 測	予 測	予 測										
	試験結果	予 測	予 測									○	42日で緊張可

予 測 : 緊張可能 (ちょう度300以上, 粘度 10万 Pa・S 以下)
 : 緊張不可能 (ちょう度300以下, 粘度 10万 Pa・S 以上)

試験継続中
182日で緊張可

湿気硬化型プレグラウトPC鋼材			試験場所	7日	14日	21日	28日	35日	42日	49日	56日	63日	70日	77日	182日
温度パターンⅠ (早強セメント) 90℃~95℃	室外試験	試験結果	試験結果	○	○	○	×	21日で緊張可, 28日で緊張不可						○	70日で緊張可, 77日で緊張不可
		試験結果	試験結果	○	○	○							○	×	
温度パターンⅡ (普通セメント) 80℃~85℃	室外試験	試験結果	試験結果	○	○	○	○	○	○	○	×	49日で緊張可, 56日で緊張不可			
		試験結果	試験結果	○	○	○	○	○	○	○	○	○			
温度パターンⅢ (中府熱セメント) 65℃~75℃	室外試験	試験結果	試験結果	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	~ ×
		試験結果	試験結果	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

試験結果 ○ : 引張試験により緊張可能 × : 引張試験により緊張不可能

張可能日数に差が生じた理由は、鋼材端部から浸入した水分量に起因していると推測される。

7.2 プレグラウトPC鋼材の適用性

今回の試験結果から、早強セメントおよび普通セメント

を使用するマスコンクリートにおいては、湿気硬化型の有効性が確認された。プレグラウトPC鋼材を早強セメントを使用したマスコンクリートに適用しても、コンクリート打設後、1ヵ月以上経過してから緊張するような特別な場合を

除いては、緊張前に硬化するといった問題は回避できると思われる。

今回、試験の対象としなかった寒冷地での最終硬化時期も1年～2年程度であるという結果報告もあることから、マスコンクリートにおける高温下での使用だけでなく、寒冷地での使用も十分適用可能な鋼材と言える。

8. おわりに

湿気硬化型樹脂のプレグラウトPC鋼材は、マスコンクリートへも十分適用可能であることが確認された。しかしながら、施工上の留意事項として緊張前においては鋼材端部からの水分浸入防止、緊張後においては定着グリップからの未硬化樹脂の漏出防止などに配慮する必要がある。

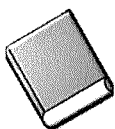
また、湿気硬化型樹脂は温度依存性が小さいとは言え、マスコンクリートの上昇温度対策は、温度ひび割れを防止してコンクリートの耐久性を向上させるためにも、入念な施工計画を立てて対処することが望まれる。

最後に、今回の試験に関しては、住友電工(株)および神鋼鋼線工業(株)の多大なるご協力をいただいた。ここに記して、関係者各位に対して深謝申し上げる次第である。

参 考 文 献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書（施工編），平成8年制定
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書－耐久性照査型－（施工編），平成11年版
- 3) 土木学会：最新のマスコンクリート技術，1996.11
- 4) 室井：わかりやすいエポキシ樹脂，工文社，1994.5

【2001年4月25日受付】



刊行物案内

- 複合橋設計施工規準(案)
- PC構造耐震設計規準(案)
- PC斜張橋・エクストラドーズド橋設計施工規準(案)－抜粋－

(平成11年12月)

頒布価格：3点セット 5 000円 (送料600円)

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会