

## 三軒屋高架橋の施工 (湿気硬化型プレグラウトPC鋼材の採用)

日本道路公団 四国支社 徳島工事事務所 桑原 秀明  
 株式会社 鴻池組 土木本部技術部 正会員 池尾 孝司  
 株式会社 鴻池組 大阪本店 下釜 康弘  
 株式会社 鴻池組 土木本部技術部 ○橋口 淳朗

### 1. はじめに

三軒屋高架橋は、四国横断自動車道のうち鳴門 I.C と板野 I.C の間に位置し、橋長 303m の PRC 9 径間連続中空床版ラーメン橋である。PRC 中空床版橋の支間長としては、最長の部類に属する最大支間 35.500 m を有し、梁・支柱式支保工による架設方法を用いている。また、板野 I.C のランプへとつながるため幅員が 10.850m から 17.954m へと変化する。本橋の特徴としては、下り線において新たに開発されたプレグラウト PC 鋼材 (湿気硬化型樹脂) を採用した点である。本文では、湿気硬化型樹脂の採用にあたり実施した温度解析、温度計測、供試体による硬化確認試験及び緊張結果について報告する。

### 2. 工事概要

本工事の工事概要及び橋梁緒元は以下の通りである。

工 事 名：四国横断自動車道三軒屋高架橋 (PC 上部工) 工事

発 注 者：日本道路公団四国支社

工事管理者：日本道路公団四国支社徳島工事事務所

施 工 場 所：徳島県板野郡板野町

構造形式：PRC 9 径間連続中空床版ラーメン橋

橋 長：上り線 297.0m 下り線 303.0m

支 間 割：上り線 32.500m+2@33.500m

+5@33.000m+32.500m

下り線 34.500m+2@35.500m

+5@33.000m+32.500m

幅 員：上り線 10.850m~17.718m 下り線 10.850m~17.954m

活 荷 重：B活荷重

縦断勾配：1.500%~1.580% (V.C.L 区間)

横断勾配：3.714%~4.000%

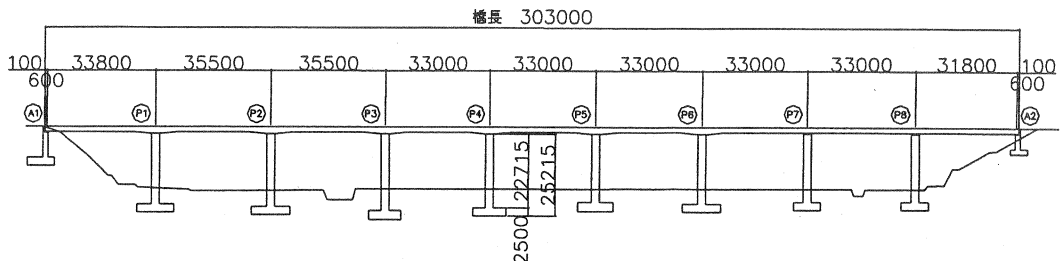
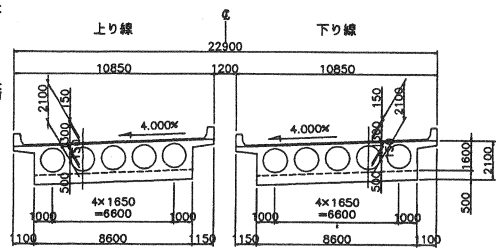


図-1 橋梁一般図

### 3. 湿気硬化型プレグラウトPC鋼材の主ケーブルへの適用

#### 3-1 概要

本橋は、計5回のコンクリート打設による分割施工を行うため、夏季に施工を行う場合、一部のPC鋼材は、高い温度履歴を受けることが予想される。従来のプレグラウト樹脂は、熱硬化性エポキシ樹脂を基材としたものであり、樹脂の曝される温度が上昇すると指数関数的に硬化が促進されるため、条件によってはPC鋼材の緊張が不可能になる恐れがある。一方、新しく開発された湿気硬化型樹脂は、温度依存性が小さい硬化特性をもち最高温度が95℃でも約1ヶ月程度緊張可能であり、また低い温度履歴を受けたPC鋼材の樹脂硬化までの期間も従来の熱硬化型と比較して短くできる利点がある。温度解析結果及び硬化予測から従来タイプの熱硬化型と湿気硬化型を用いた場合の緊張可能日数及び樹脂硬化日数を求め、その比較により、湿気硬化型樹脂を実施工に用いることとした。また、PC鋼材搬入時からコンクリート打設までの外気温の変化及び、コンクリート打設から約1ヶ月間のPC鋼材の温度履歴を、熱電対による温度計測で求めた。得られた温度履歴を基に、湿気硬化型樹脂においても無視できない温度依存性を考慮して、ほぼ正確な樹脂硬化日数を予測した。実際の樹脂硬化の確認として、一片1.60m角のコンクリート供試体を作成し、湿気硬化型PC鋼材及び樹脂を満たした容器を埋め込み、供用開始前に取り出して圧縮試験及び粘度試験を行う。

#### 3-2 温度解析及び結果

本橋で使用可能なプレグラウト鋼材を選択するために、まずプレグラウト鋼材の温度履歴を把握する必要があり、温度解析を行った。図-2に、下り線STEP1の側面図及びPC鋼材位置を示す。また、図-3に温度解析モデルを示す。温度解析に当たり、断熱温度上昇特性はコンクリート標準示方書に準じ、外気温は理科年表より徳島市の6月上旬の日平均気温とした。また、コンクリート打設温度は、外気温+5℃とした。温度解析の結果、PC鋼材位置での最高温度は、桁中心付近(No1で81.3℃、No3で81.8℃)であり、逆に最高温度が最も低いPC鋼材位置は、桁端部下面(No2)であり、その最高温度は50.7℃であった。

表-1 温度解析条件

項目	単位	数値等
セメント	種類	早強セメント
	単位置量	Kg/m <sup>3</sup> 402
外気温(理科年表より仮定)	°C	20
打設温度(外気温+5℃と仮定)	°C	25
断熱温度上昇	$Q_{\infty}$	63.26
	$\gamma$	1.98689
比熱	Kcal/Kg°C	1.15
密度	Kg/m <sup>3</sup>	2500
熱伝達率	型枠(合板)	W/m <sup>2</sup> °C 8
	養生面(シート養生)	W/m <sup>2</sup> °C 6

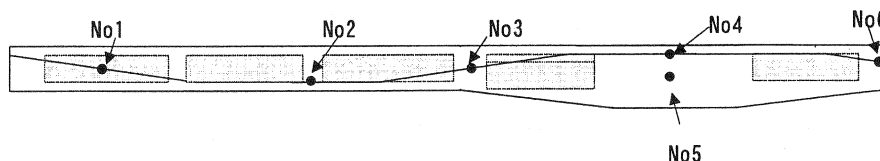


図-2 下り線STEP1 側面図 及び PC鋼材位置図

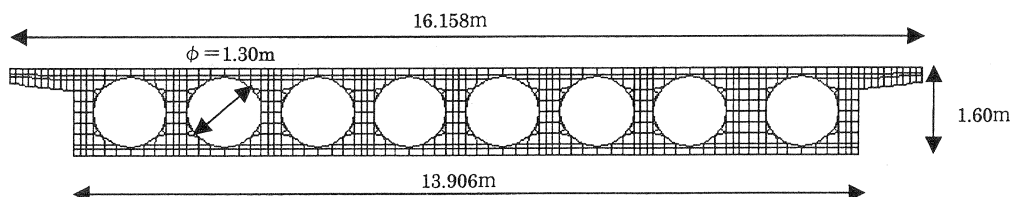


図-3 温度解析モデル

### 3-3 硬化予測と樹脂比較

温度解析結果より、ケーブル配置位置においてコンクリートの最高温度が81.8℃であったため、夏季施工における外気温の上昇を考慮すると、施工に使用可能な樹脂タイプは、熱硬化型では超高温型（硬化促進剤量 0.00phr）及び高温型（硬化促進剤量 0.02phr）の2タイプ、それと新しく開発された湿気硬化型の1タイプと考えられた。樹脂選択のため、コンクリート温度が最も高いNo.3（81.8℃）と最も温度が低いNo.2（50.7℃）の2ケースの硬化予測を行った。硬化条件としては、製造から工場出荷時まで20℃で10日間、現地搬入からケーブル配置まで20℃で10日間、日射の影響をうけるケーブル配置からコンクリート打設までを35℃で5日間の温度履歴を受けると仮定した。コンクリート打設後の温度履歴は、解析結果±0℃のケースと安全側に余裕があるように解析値+5℃の2ケースを想定して硬化予測を行った。この解析値+5℃という値は、断熱温度上昇量の推定誤差や当日の外気温の変動を考慮するため、本橋と類似の中空床版橋における温度実測データをもとに定めた。表-2と表-3に各樹脂タイプにおける緊張可能日数と樹脂硬化日数の予測結果を示す。高温型では、No.3において温度が+5℃上昇した場合、緊張可能日数が3日しかなく緊張を行うために必要なコンクリートの強度（ $\sigma_c = 30\text{N/mm}^2$ ）の発現日数を考慮すると、使用不可能である。

表-2 各樹脂タイプにおける緊張可能日数

	温度条件	種別	PC鋼材位置	
			No.2	No.3
緊張可能 日数	±0℃	高温型	620日	20日
		超高温型	700日	230日
		湿気硬化型	95日	70日
	+5℃	高温型	500日	3日
		超高温型	600日	15日
		湿気硬化型	80日	65日

表-3 各樹脂タイプにおける樹脂硬化日数

	温度条件	種別	PC鋼材位置	
			No.2	No.3
樹脂硬化 日数	±0℃	高温型	1200日	690日
		超高温型	1820日	1390日
		湿気硬化型	600日	540日
		高温型	1170日	450日
	+5℃	超高温型	1750日	1180日
		湿気硬化型	570日	535日

また、超高温型と湿気硬化型では、温度が5℃上昇した場合でも緊張可能日数はそれぞれ15日と65日あり、施工可能である。さらに、温度履歴の低いNo.2においても湿気硬化型は、超高温型硬化期間1820日の約1/3の600日で硬化する。このことは、湿気硬化型鋼材の方が、アンボンド状態から橋体と鋼材が一体化した状態へと早く移行することを示し、供用開始から早い段階で終局時におけるPC鋼材の耐力評価が可能となる。以上のことから本施工では、湿気硬化型樹脂を選択することとした。

### 3-4 プレグラウトPC鋼材の温度計測及びコンクリート打設

温度依存性が小さな湿気硬化型樹脂といえども、コンクリートの水和熱による影響を無視することは出来ないため、実際の温度履歴を把握する必要がある。そこで主桁内に配置後のケーブル表面に熱電対を貼付して温度計測することとした。実橋における温度計測位置は、図-4に示すように、コンクリートの水和熱により温度履歴に差が生じると思われる桁中心部と桁端部の各8点（No.1-1～No.1-4、No.2-1～No.2-4）及び最も温度が高くなると思われるP1支点横桁中心（No.1-5）と外気温（日向、日陰）の計11点である。

また、硬化確認試験のために作成した一片1.60mのコンクリート供試体にも、埋め込んだ樹脂の温度履歴を把握するため温度計測を行った。

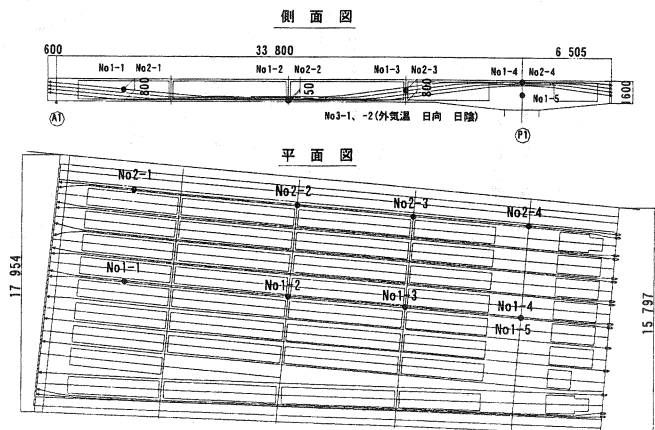


図-4 温度計測位置図

表-4に実橋と供試体における対応を、図-5に供試体配置図を示す。

表-4 実橋と供試体との対応

- ケーブルの搬入からコンクリート打設までの現場状況としては、
- ① 5月18日にケーブル現場搬入して、その後ブルーシートで4日間養生(平均温度 約20℃)
  - ② 5月22日～24日 3日間でケーブル61本を桁内に配線完了
  - ③ 5月25日～6月7日 まで円筒型枠組立て、鉄筋組立て、コンクリート打設準備である。ケーブル配線後及びコンクリート打設後の温度計測結果を図-6に示す。ケーブル配線からコンクリート打設までの17日間において、ケーブル温度は直射日光の影響を強く受けたことがわかった。天気の良い5月31日においてケーブル温度は上昇し続け、最も温度の高かった計測点No1-1では午前11時に47.9℃を記録している。また、ケーブル現場搬入からコンクリート打設までの21日間におけるケーブルの温度を平均すると約23℃であり、事前に実施した硬化予測の仮定(保管養生20℃×10日間、ケーブル配置後35℃×4日間)より、ケーブル樹脂には若干大きな温度履歴が与えられた。このことは、後述する樹脂の硬化予測に反映させた。

深さ(mm)	供試体番号	実橋位置
150	No.A	No.1-2、1-4
400	No.B	(中間値)
800	No.C	No.1-1、1-3

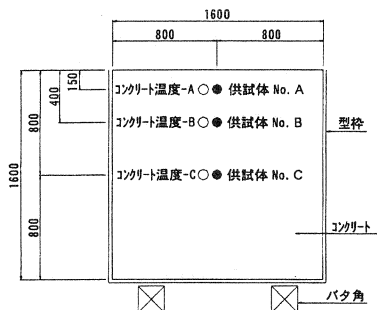


図-5 供試体配置図

主桁コンクリート(設計基準強度36N/mm<sup>2</sup>、打設量715m<sup>3</sup>)の打設は6月8日の午前6:00～午後3:00までの約9時間で完了した。計測の結果、ケーブルの最高温度は計測点No.1-1におけるコンクリート打設から約1日後に達した87.9℃である。一方、ケーブルの最高温度が最も低い位置は、No.2-2計測点で69.7℃であった。ほぼ断熱状態に近いP1支点横桁コンクリートの中心位置(計測点No.1-5)の最高温度は、88.2℃であった。

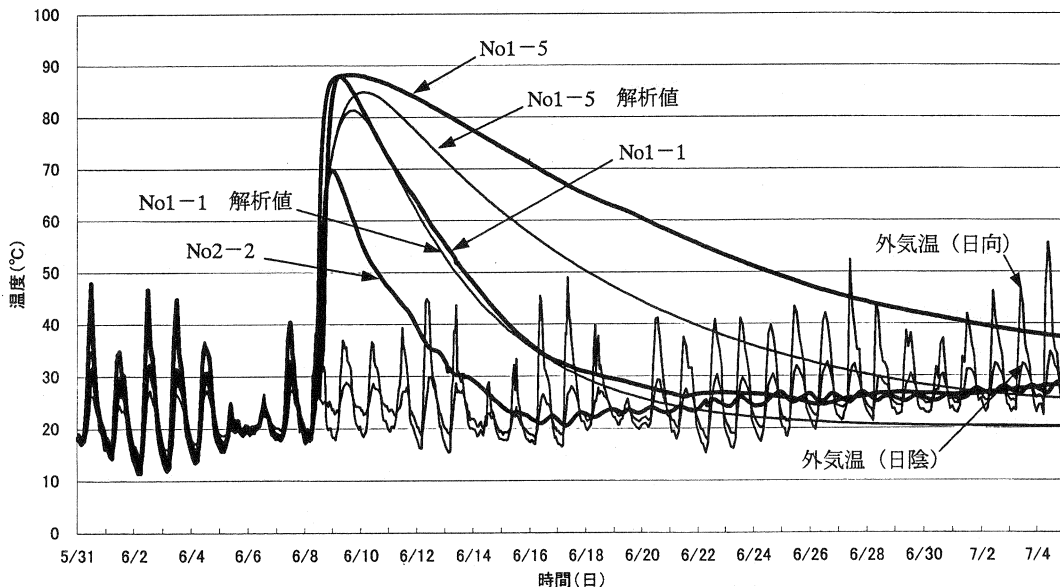


図-6 ケーブル配線後及びコンクリート打設後の温度計測結果

実際のケーブルの最高温度 87.9℃ (計測点 No.1-1) と温度解析結果 81.3℃を比較すると、6.6℃の差が生じている。この差が生じた原因として、まず断熱温度上昇量の推定誤差、次に当日の外気温の変動が考えられる。当日の外気温 (日陰) は打設開始時の午前 6:00 で既に 19.8℃あり、打設中の午後 1:00 では 26.5℃まで達した。そのため、温度解析で用いたコンクリート打設温度 (6 月初旬の日平均気温 20℃+5℃とし、25℃を使用) と実際のコンクリート打設温度に差が生じ、結果として解析値と実測値における最高温度の差の一因となった。

### 3-5 緊張計算及び緊張管理

従来の P C 鋼材 (例えば 12S12.7) と今回使用したプレグラウト P C 鋼材 (1S28.6) を比較すると、1 本当たり導入できるプレストレスは、ほぼ鋼材断面積比となる。よって 1 S28.6 を用いて、主桁に同じプレストレスを導入するためには、12S12.7 と比較して約 2.3 倍の鋼材本数が必要となる。図-7 に、P 1 側緊張端詳細図を示す。また、下り線の各施工ブロックの施工目地側における緊張端では、定着プレートの最小離隔を確保するため、従来の P C 鋼材 (12S12.7) の場合よりも平面的に大きく角度を振って鋼材を配置する必要があった。そのため、通常の場合では、その影響が小さいために無視されている平面角を考慮して緊張計算を行った。

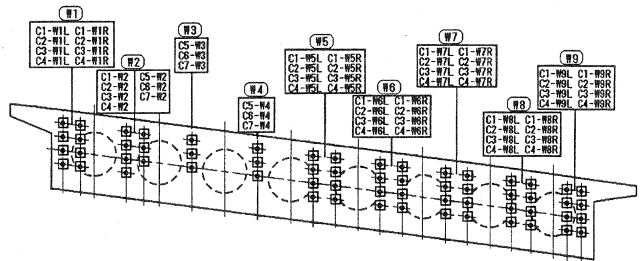


図-7 P 1 側緊張端詳細図

(コンクリート道路橋設計便覧では、鉛直面における角変化を  $\alpha_v$ 、平面における角変化を  $\alpha_H$  とした場合、合成角変化の近似値  $\alpha$  は、 $\alpha = \sqrt{\alpha_v^2 + \alpha_H^2}$  として示されている。)

また、設計時点においては、プレグラウト P C 鋼材を主ケーブル使用した事例がまだ少なく、主ケーブルに用いた場合の摩擦係数については十分な試験や議論がなされていないため、安全を考慮して設計計算では、 $\mu=0.30/\text{rad}$   $\lambda=0.004/\text{m}$  を用いた。次に、緊張計算であるが鋼材メーカー資料では横締ケーブルにプレグラウト P C 鋼材を使用する場合は、 $\mu=0.10/\text{rad}$ 、 $\lambda=0.003/\text{m}$ 、摩擦係数比  $\lambda/\mu=0.030$  を標準とされている。この摩擦係数比は、P C 鋼材とシースの摩擦係数比  $\lambda/\mu=0.0133$  の 2 倍以上の値となっている。つまり  $\lambda/\mu=0.030$  を用いた場合、 $\mu=0.30$  において  $\lambda=0.009$  となるため、計算上導入されるプレストレスは、通常の P C 鋼材の摩擦係数  $\mu=0.30$ 、 $\lambda=0.004$  を用いた場合より少なくなってしまう。また  $\lambda$  は、P C 鋼材が長いほどその影響を大きく受けるため、片引きケーブルで設計断面が固定端に近いケースを試算してみた。試算の結果、 $\lambda/\mu=0.030$  を用いると  $\mu>0.15$  程度で所要のプレストレスが導入できないことがわかった。このため、本橋では通常の P C 鋼材と同様に  $\mu=0.30$ 、 $\lambda=0.004$  を基準に、 $\lambda/\mu=0.0133$  を用いて緊張計算を行うこととした。次に合成角の変化が、P C 鋼材の摩擦に与える影響を判断するために、できるだけ合成角の異なったケーブル (合成角の総和  $27.5^\circ \sim 60.4^\circ$ ) である 10 本を選んで、試験緊張を行った。試験緊張の結果、見かけのヤング係数の平均値  $E_p=186 \text{ kN/mm}^2$ 、摩擦係数の平均値  $\mu_{AVE}=0.123$  であり、摩擦係数の標準偏差も  $\sigma=0.022$  と小さく、合成角の大小によって摩擦係数に差は見られなかった。このことは試験緊張や本緊張においても、合成角の算出方法及びプレグラウト鋼材においても  $\lambda/\mu=0.0133$  とする仮定に問題がないことを示している。本緊張においては当社作成の緊張管理プログラムを使用し、現場でパソコンを用いて緊張管理を行ったため、極めて順調に施工することが出来た。緊張管理の結果としては、全 61 本の摩擦係数の平均値  $\mu_{AVE}=0.152$ 、最大値  $\mu_{MAX}=0.240$ 、 $\mu_{MIN}=0.092$  であり、主ケーブルにおけるプレグラウト P C 鋼材の摩擦係数としては、通常のシースを用いた P C 鋼材の摩擦係数と比較すると小さな値であることがわかった。また、緊張管理手法として、最小二乗法を用いて圧力と伸びの直線を求め

たが、全 61 本のポンプ圧力と鋼材伸びとの相関係数は、 $\gamma = 0.9995 \sim 0.9999$  の範囲にあり、平均値は  $\gamma_{AVE} = 0.9998$  であった。このことは、個人差の生じやすいポンプ圧の読みや鋼材伸びの読みに対しても、データのばらつきの少ない精度の高い緊張管理が行われたことを示している。

### 3-6 実測温度履歴による硬化予測と硬化確認試験

実測温度履歴を用いた場合の緊張可能日数及び樹脂硬化日数の予測結果を表-5 に示す。ここで、緊張可能日数は稠度試験 (JIS K 2220) による稠度 280 に到達するまでの日数、樹脂硬化日数は付着強度が  $2.5\text{N/mm}^2$  以上発現するまでの日数としている。緊張可能日数は、最も高い温度履歴を受けた樹脂で 45 日であった。この値は、温度解析の値より短くなっているが、ケーブル配線からコンクリート打設までの期間に直射日光の影響を強く受けたこと及び当日の外気温が予想より若干高かったことによる。また STEP1 の全ての樹脂は、コンクリート打設から 535 日程度で硬化する。樹脂の硬化を直接確認するために、橋体とは別に一片 1.6m (桁高と同一) のコンクリート供試体を作成した。写真-1 に示すように、ポリエチレン製の容器に樹脂を充填したものと長さ 30cm のプレグラウト PC 鋼材を、温度履歴を考慮して埋め込む位置を変えてセットし、温度計測を実施した。供試体の作成は、今回実施した STEP1 と外気温が低い時期の打設でかつ供用開始までの期間が最も短い STEP5 においても実施する。硬化確認時期としては、STEP1 の供試体は竣工前、STEP5 の供試体は供用開始前とし、コンクリート供試体から樹脂及びプレグラウト PC 鋼材を取りだし、樹脂が、未硬化の場合は粘度試験 (JIS Z 8803) を、硬化している場合は圧縮試験 (JIS K 6911) を行い、硬化状況の確認と未硬化の樹脂については粘度試験結果及び温度履歴から硬化時期の予測をさらに行う。

表-5 硬化予測結果

項目	温度解析	No.1-1	No.2-2
最高温度	81.8°C	87.9°C	69.7°C
緊張可能日数	70日	45日	65日
樹脂硬化日数	540日	520日	535日

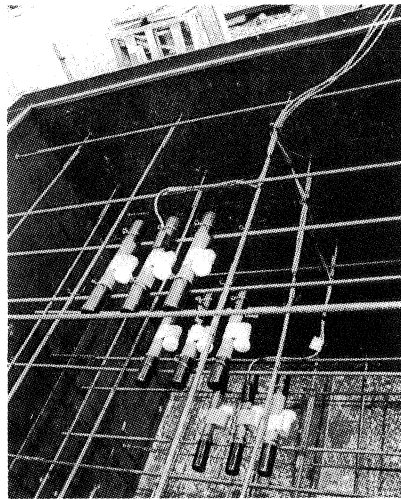


写真-1 硬化確認用供試体

### 4. おわりに

本橋は、平成 13 年 7 月現在、下り線 STEP 1 の施工を完了し、プレグラウト PC 鋼材の接続を行い下り線 STEP 2 の施工中である。道路公団では、プレグラウト PC 鋼材において湿気硬化型樹脂が標準タイプとして採用されており、今後、多くの橋梁で施工されると思われる。本報告が、主ケーブルに湿気硬化型プレグラウト PC 鋼材を使用する場合の参考の一助になれば幸いである。最後に、本橋の設計及び施工にあたり、多大なご指導、ご協力を賜った関係各位に感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 大塚・相原・田村・荒木：プレグラウト PC 鋼材を主ケーブルに用いた PRC 中空床版の設計と施工，プレストレストコンクリート，Vol.42, No.3, pp52~57, 2000
- 2) 青木・大中・橋川・中村：プレグラウト PC 鋼材の適用性に関する研究，プレストレストコンクリート，Vol.43, No.3, pp55~61, 2001