

# プレグラウトPC鋼材を主ケーブルに用いた PRC中空床版橋の設計と施工

大塚 行輝\*1・相原 英治\*2・田村 多佳志\*3・荒木 毅\*4

## 1. はじめに

プレグラウトPC鋼材は1987年にわが国で開発され<sup>1)</sup>、橋梁へは、1990年に既存橋梁の補強に最初に使用された。1992年に日本道路公団がPC箱桁橋の床版横締めにて初めて採用した後、耐久性と施工性に優れていることが認められて広く普及し、日本道路公団では床版横締めについて標準採用している<sup>2)</sup>。

プレグラウトPC鋼材をPC橋の主ケーブルへ適用する試みは、1995年に群馬県富岡市でマルチストランドタイプ12S12.4のプレグラウトPC鋼材が使用されたのが最初である。しかし、このタイプのプレグラウトPC鋼材は、施工性とコストの両面で実用性に課題が残る、その後の発展は見られなかった。

一方、1997年に太径PC鋼より線1S28.6が開発され、シングルストランドタイプ1S28.6のプレグラウトPC鋼材が供給されるようになった。日本道路公団ではこのタイプのプレグラウトPC鋼材をPRC中空床版橋の主ケーブルに用いることに着目し、1999年に十号沢川橋<sup>3)</sup>および本文で報告する駒形高架橋で試験施工を行った。

駒形高架橋では、夏季にコンクリートを打設するため、プレグラウトPC鋼材近傍の最高温度が90℃近くまで達する

と予測された。そこで、プレグラウト樹脂の設計温度履歴を十分な安全度を有するように設定するとともに、主ケーブル用に新たに開発された高温に耐えるプレグラウト樹脂を採用した。そして、プレグラウト樹脂の温度計測を行って樹脂の硬化度を確認しながら施工を行った結果、緊張前に樹脂が硬化することなく施工を完了している。

本文では、この温度計測結果を中心に、プレグラウトPC鋼材をPRC中空床版橋の主ケーブルに使用した事例について報告する。

## 2. プレグラウトPC鋼材の主ケーブルへの適用

### 2.1 適用橋梁の概要

北関東自動車道駒形高架橋は橋長886.5m、50径間の高架橋を総称しているが<sup>4)</sup>、今回試験施工を行ったのは上り線の橋長522.5mのRC・PRC29径間連続中空床版橋の中のPRC区間(P14~P15、施工延長36.3m)である。同区間の構造図を図-1に示す。

本橋の全体構造はRC中空床版を基本として、桁下交差道路等の条件により支間長が長くなる箇所のみをPRC中空床版とし、RC中空床版と連結して連続化した構造になっている。したがって、プレグラウトPC鋼材を適用した区間の施工はP13までのRC床版部を先に施工した後に行った。PC

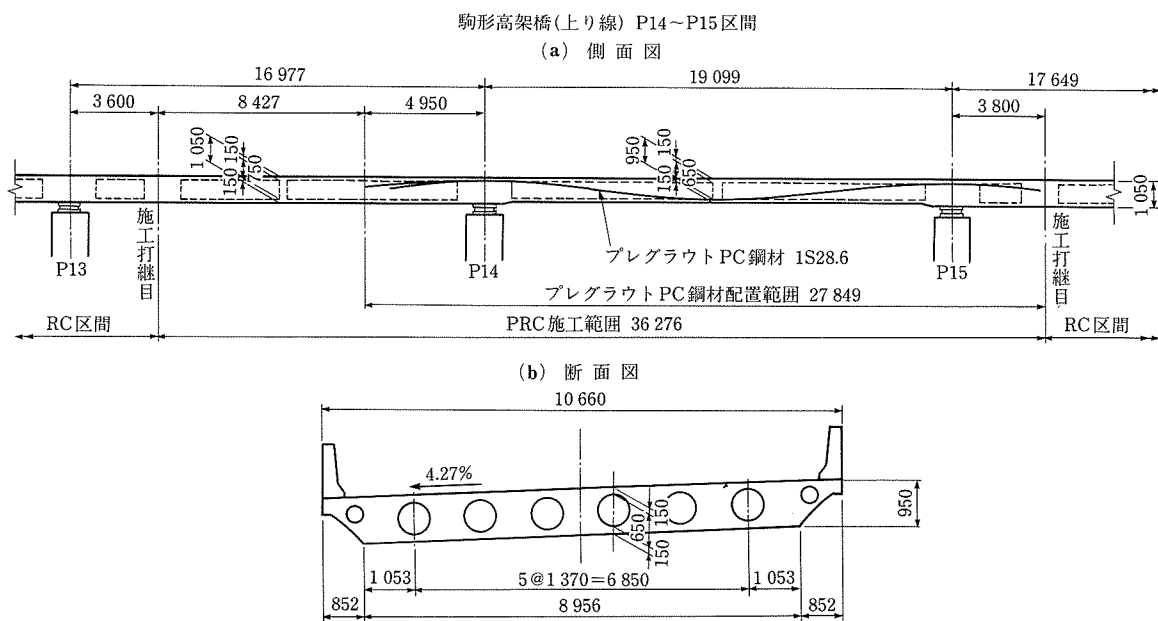


図-1 橋梁構造図

\*1 Yukiteru OTSUKA：日本道路公団 東京建設局 建設第一部 構造技術課

\*2 Eiji AIHARA：日本道路公団 東京建設局 高崎工事事務所 前橋工事長

\*3 Takashi TAMURA：三井建設(株) 土木本部 PC技術部

\*4 Takeshi ARAKI：神鋼鋼線工業(株) 鋼線事業部 PC加工技術部長

ケーブルは、P14側を埋込み式のデッドアンカーとし、P15側からの片引き緊張とした。

### 2.2 プレグラウトPC鋼材での設計

プレグラウトPC鋼材近傍の最高温度が90℃近くまで達するような、かなり高温条件の下で緊張を可能とするプレグラウト樹脂を設計した場合、樹脂の硬化完了には数年を要すると予測される。そこで、プレグラウトPC鋼材での設計においては、樹脂が硬化する前のアンボンドの状態に対しても終局耐力の照査を行い、安全性を確認した。

### 2.3 プレグラウト樹脂の設計条件

コンクリートの打設が7月上旬の予定であったため、樹脂の設計のために以下の温度条件を設定した。

- ① 工場および現場保管 20℃×30日間
- ② 配線後コンクリート打設まで 40℃×22日間
- ③ コンクリート打設後の硬化熱 最高温度90℃  
(後述の図-7参照)

このうち、③のコンクリートの硬化熱による温度は、類似の中空床版橋における温度実測データをもとに、本橋とのコンクリート打設時の気温差を補正した上に、安全側の余裕(+3.5℃)を考慮して設定した。なお、硬化完了の予測に用いるコンクリート打設後2週間日以降の温度は、表-1に示す建設地(群馬県前橋市)の月別平均気温とした。

また、ケーブルを所定の位置に配線後コンクリート打設までの期間は、床版横締めの場合に比べて長期になるうえに、鉄筋組立て等の作業を行うためにケーブルの養生が難

しく、炎天下にさらされた場合にかかなりの温度上昇があるものと予測された。ただし、こういった場合の温度の計測データがなかったため、十分に安全側になるように、②の配線後の温度条件を設定した。

### 2.4 プレグラウト樹脂

プレグラウト樹脂は主剤と硬化剤で構成され、硬化剤には、すぐには硬化剤として効かないようにブロックをかけた潜在性硬化剤が用いられている。従来のプレグラウト樹脂では硬化促進剤を用いてこのブロックを解除しており、コンクリートの水和熱による最高温度が80℃以下の場合に使用されている。しかし、本橋のような中空床版橋を夏季に施工する場合、コンクリートの水和熱による最高温度は80℃を超えることが予想される。

そこで、本橋のプレグラウトPC鋼材には、主ケーブル用として新たに開発された樹脂を採用した。この樹脂は、硬化促進剤を用いず、工場での加熱処理によって潜在性硬化剤のブロック解除の時期を調整する方式で、最高温度が90℃を超える場合でもプレグラウト樹脂として使用できることが確認されている。

### 2.5 温度計測

プレグラウト樹脂の実際の温度履歴を確認し、硬化の程度を予測するために、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を行った。温度計測位置は図-2に示すように、コンクリートの水和熱による温度履歴に違いがあるとみられる外桁と中桁の各6点(C2-1~C2-6, C7-1~C7-6)と、最も温度が高くなるとされるコンクリート中心の温度(C7-0)および外気温である。温度計測結果を計測期間ごとに分けて次節に示す。

## 3. プレグラウトPC鋼材の施工と温度計測結果

### 3.1 プレグラウトPC鋼材の現場保管

プレグラウトPC鋼材は、現場搬入後、地面に台木を敷いた上に置き、直射日光を避けるためにブルーシートを掛け

表-1 建設地(前橋市)の月別平均気温  
(単位:℃)

1月	3.0	7月	25.1
2月	5.1	8月	26.0
3月	8.4	9月	23.3
4月	15.5	10月	18.0
5月	19.6	11月	11.1
6月	21.1	12月	7.0

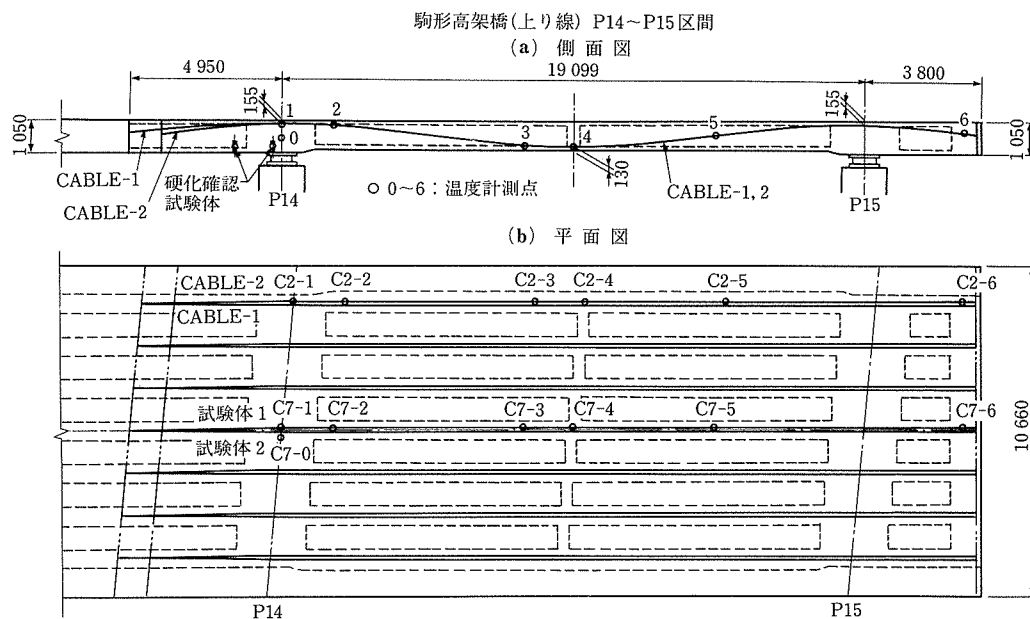


図-2 温度計測位置図

◆工事報告◆

て保管した。温湿度自記記録計により計測した保管場所の気温の変化を図-3に示す。

保管時には真夏のような晴天が続き、6月14日には気象台発表の最高気温が36℃を超え、この日には保管場所の気温も46℃に達した。そこで、温度上昇を抑えるためにシートを遮光性のあるシートに取り替えた。シートを取り替えた後の最高温度は40℃以下であり、シートの変更はケーブル

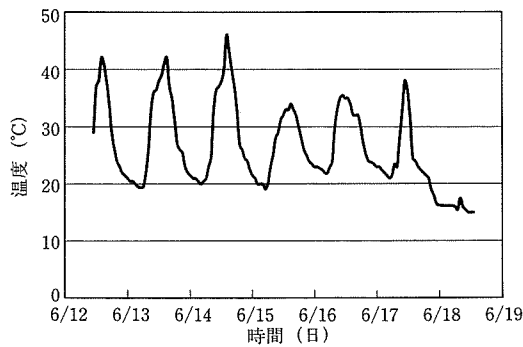


図-3 現場保管時の温度計測結果

の温度上昇を抑えることに効果があったと考えられる。

なお、この期間の平均温度は約26℃であり、2.3項に示した設計条件(20℃)よりも高いが、4.2項で後述するように、この温度差が樹脂の硬化に与える影響は小さい。

3.2 桁内へのケーブルの配置

プレグラウトPC鋼材を被覆しているポリエチレンシースは、鉄筋端部などの鋭利なエッジによって傷つくことがあり、丁寧な取扱いが要求される。本橋においては、ケーブル長が28mと主ケーブルとしては比較的短いこと、および固定着部(コンプレッショングリップと支圧板を合わせて約15kg)がケーブル端に工場でセットされていたこと、ケーブル引出し用のターンテーブルを置いた既設桁端から固定端までの距離があったこと等を考慮して、以下の手順で施工した。

- ① スターラップ間に単管パイプでケーブルを仮置きできる架台を約4mおきにセットした。
- ② 単管パイプの間に一人ずつ作業員を配置し、P13側の既設桁上に置いたターンテーブルからケーブルを手渡しで単管上に引き出した(写真-1)。

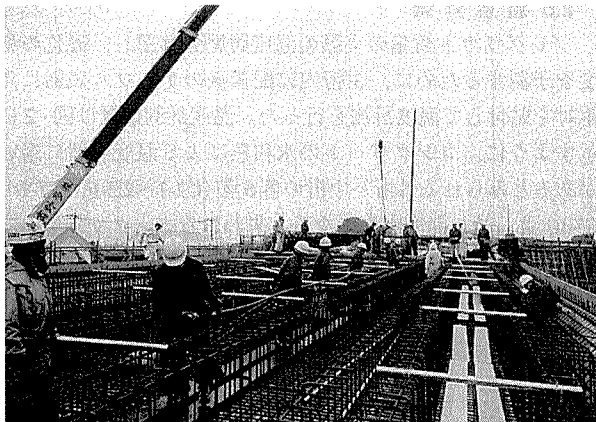


写真-1 ケーブル引出し状況



写真-2 ケーブル配置状況

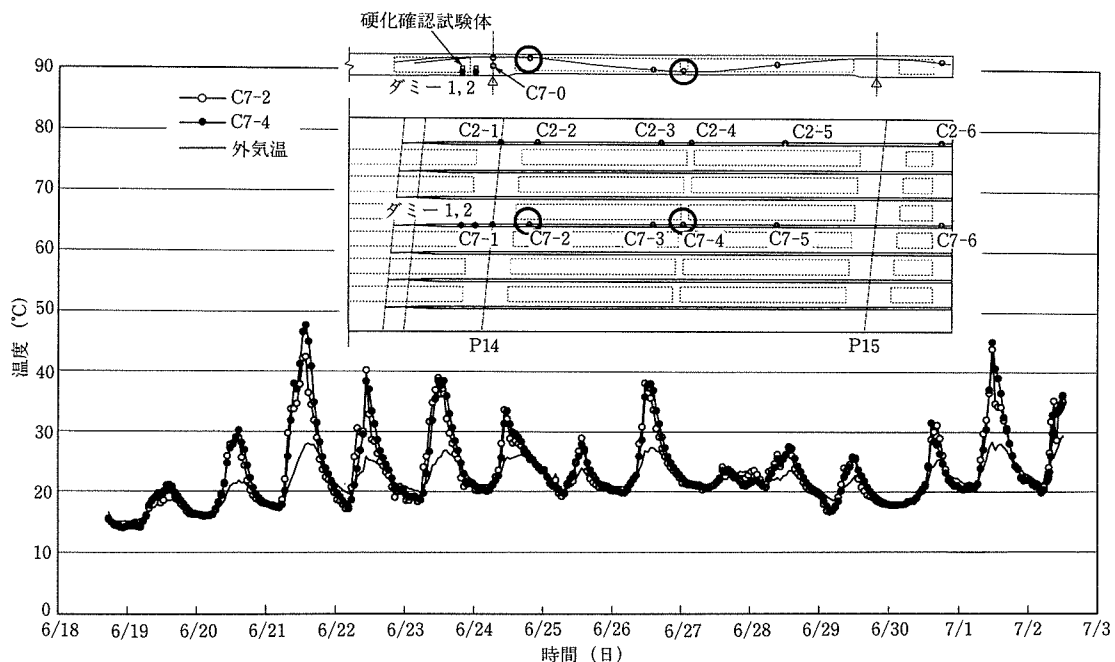


図-4 ケーブル配線後の温度計測結果

③ ケーブルを所定の位置まで引き出した後、一斉にスターラップ上部の空きを通して、所定の棚筋上へセットした(写真-2)。

桁内へのケーブルの配置は6月18日に行ったが、配線にかかった時間は1本あたり20分～30分程度でシースの損傷も見られなかった。

### 3.3 配線後コンクリート打設までのケーブル温度

ケーブル配線後すぐに、図-2に示した位置のシース表面に熱電対を貼付し自動温度計測を行った。コンクリート打設までの期間の温度計測結果を図-4に示す。

天気が良かった6月21日と7月1日に直射日光の影響を受けてケーブル温度が上昇しており、最も温度が高かったC7-4計測点でそれぞれ最高47.7℃、45.1℃を記録した。ただし、この期間の温度を平均すると約25℃であり、樹脂の設計条件(40℃×22日間)に対しては余裕があった。

なお、直射日光によるケーブル温度の上昇を低減するために、ケーブルの一部を水道用の凍結保護カバーで覆って養生することを試みた。しかし、図-4に示すC7-4計測点はカバーで覆った部分であるが、6月21日の計測では覆っていないC7-2計測点よりも温度が高くなっている。7月1日に

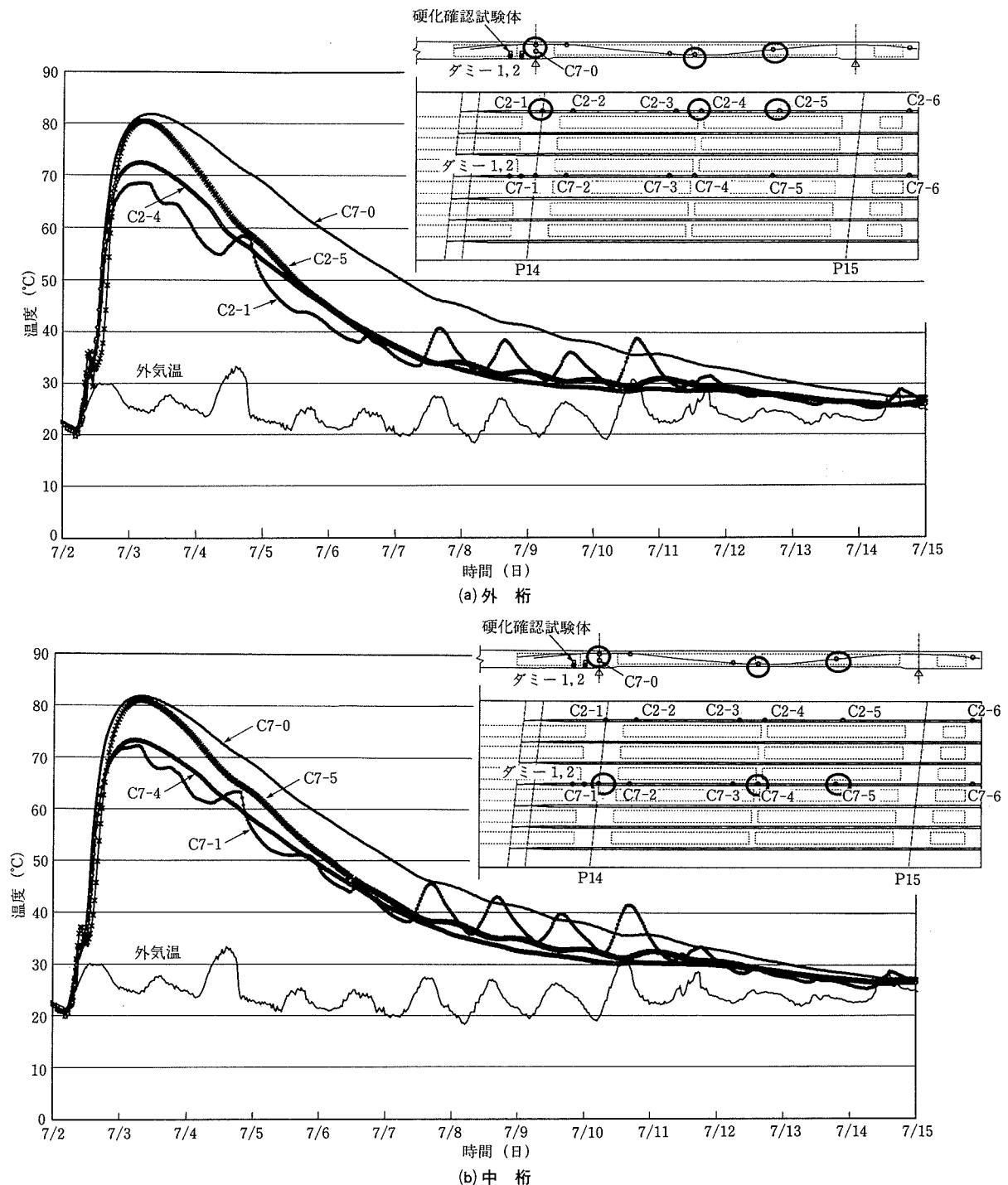


図-5 コンクリート打設後の温度計測結果

はコンクリート打設準備のためカバーをすべて取り外しており、このときの両測点の温度差は6月21日よりも小さかった。以上から判断すると、今回の施工では、カバーで直射日光を避けるように養生したものの、放熱を妨げて逆効果になっていたようである。

### 3.4 コンクリート打設後のケーブル温度

主桁コンクリート（設計強度36 N/mm<sup>2</sup>）は7月2日に打設した。コンクリート打設後の温度計測結果を図-5に示す。桁側面からの放熱があるため、外桁よりも中桁の方がケーブル温度が高く、ケーブルの最高温度はC7-5計測点でコンクリート打設約1日後に達した81.0℃である。なお、最も温度が高くなる支点上横桁コンクリートの中心位置（C7-0計測点）の最高温度は81.8℃であった。

コンクリート打設後の温度履歴は、設計で想定した最高温度90.0℃に対して余裕があったが、樹脂の硬化に対する影響度合については4節で再検討する。

### 3.5 緊張

プレグラウトPC鋼材の緊張は、コンクリート打設後4日目（7月6日）に行った。本橋のPCケーブルの配置は、図-2に示したようにP14側が埋込み固定端であるため、P15側からの片引きで緊張した。試験緊張ができないため、緊張管理においては、横締めで一般的に用いられているPC鋼より線の見かけの弾性係数  $E_p = 186 \text{ kN/mm}^2$ 、および摩擦係数比（ $\mu = 0.10/\text{rad}$ 、 $\lambda = 0.003/\text{m}$ ）に対応する  $\lambda/\mu = 0.030$ ）を用いた。緊張管理結果を表-2に示す。全14本のケーブルの平均摩擦係数は、 $\mu = 0.17 (1/\text{rad})$ 、 $\lambda = 0.0051 (1/\text{m})$  であった。

## 4. プレグラウト樹脂の硬化予測

### 4.1 温度解析

今回の実温度履歴を解析的に検証するために、FEM解析を行った。解析モデルを図-6に、解析条件を表-3に示す。解析条件は「コンクリート標準示方書」<sup>5)</sup>に準じた標準的な値としている。解析結果を実測温度履歴および今回の樹脂の設計温度履歴とともに図-7に示すが、最高温度が実温度より約5℃低い結果になった。温度の下降勾配は実測値とほぼ一致していることから、この差は断熱温度上昇量  $K$  の推定

表-2 緊張管理結果

緊張順序	ケーブル番号	ケーブル長 (m)	角度変化 (rad)	$\mu$ 値 (1/rad)	$\lambda$ 値 (1/m)
1	C 7	27.784	0.6283	0.10	0.0030
2	C 8	26.749	0.6370	0.16	0.0048
3	C 9	27.920	0.6283	0.20	0.0060
4	C10	26.885	0.6370	0.18	0.0054
5	C 5	27.648	0.6283	0.15	0.0045
6	C 6	26.613	0.6370	0.17	0.0051
7	C 3	27.512	0.6283	0.18	0.0054
8	C 4	26.477	0.6370	0.16	0.0048
9	C11	28.192	0.6283	0.24	0.0072
10	C12	27.156	0.6370	0.16	0.0048
11	C13	28.192	0.6283	0.15	0.0045
12	C14	27.156	0.6370	0.19	0.0057
13	C 1	27.377	0.6283	0.16	0.0048
14	C 2	26.341	0.6370	0.17	0.0051
平均値		27.286	0.6327	0.17	0.0051

誤差と考えられる。今後、温度解析のみによりケーブルの最高温度を推定する場合、この程度の誤差は見込んでおく必要があると考える。

### 4.2 樹脂の硬化予測

設計温度履歴（当初設定）および実測温度履歴を用いた場合の緊張可能日数および硬化完了日数の予測結果を表-4に示す。ここで、緊張可能日数はちよう度試験（JIS K 2220）によるちよう度280に到達するまでの日数、硬化完了日数は圧縮試験（JIS K 6911）による圧縮強度70 N/mm<sup>2</sup>に到達するまでの日数で定義している。

また、当初設定で緊張が計算上不可能となる時点（コンクリート打設後8日目）までの施工の各期間における硬化影響度を、設計温度履歴（当初設定）および実測温度履歴（C7-5）の場合について比較して図-8に示す。ここで、硬化影響度は、温度  $T$ ℃である時間を  $T$ ℃一定とした場合の最大緊張可能時間で除したもので、その累積値が1に達した時点で計算上緊張が不可能となる。

図-8によれば、工場および現場保管期間の硬化影響度は当初設定でも7%と小さく、実測温度でもほとんど差がない。ケーブルの主桁への配置からコンクリート打設までの

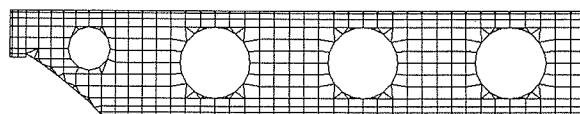


図-6 温度解析モデル

表-3 温度解析条件

使用プログラム	ASTEA-MACS (計算力学センター) 2次元熱解析プログラム
熱伝導率	2.6 W/m℃
熱伝達率	8 W/m <sup>2</sup> ℃ (型枠面とコンクリート養生面で同じ)
単位体積重量	2 500 kg/m <sup>3</sup>
比熱	1.26 kJ/kg℃
打込み温度	30.9℃ (実測値)
断熱温度上昇特性	$K=55.3, \alpha=2.265 (T(t)=K \times (1-e^{-\alpha t}))$

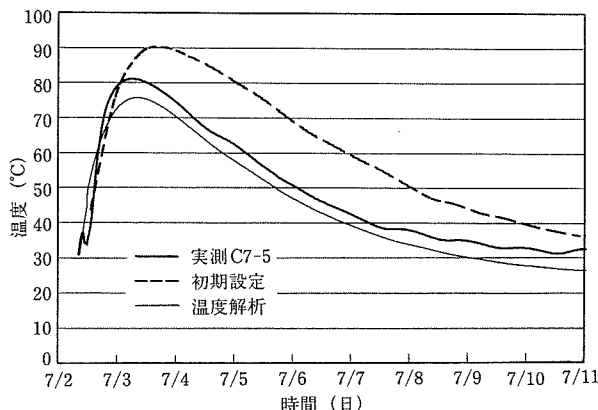


図-7 コンクリート硬化熱データの比較

表-4 樹脂の硬化予測結果

	当初設定	C2-2	C2-5	C7-2	C7-5
最高到達温度 (℃)	90.0	68.4	80.4	70.7	81.0
緊張可能日数 (日)	7	388	340	370	315
硬化完了日数 (日)	706	1 081	1 016	1 059	953

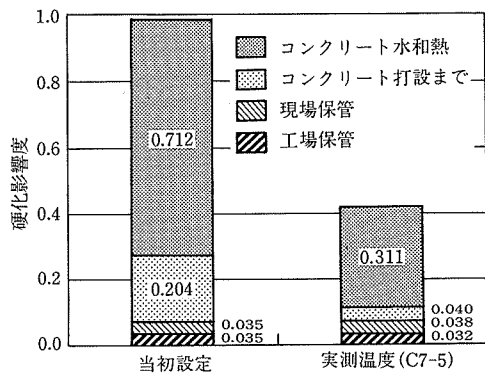


図-8 硬化影響度の比較

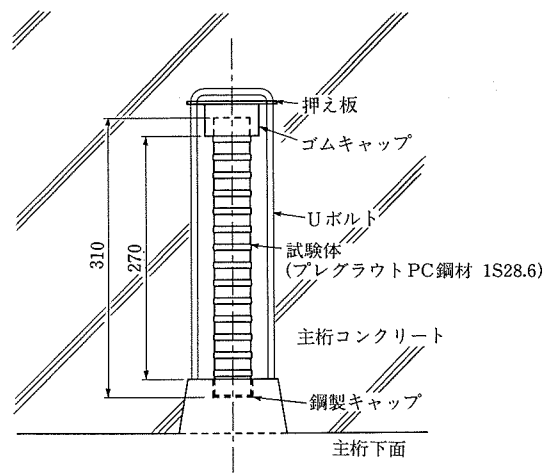


図-9 硬化確認試験体

期間は、2.3項に示したように、当初設定では40℃×22日と安全側に評価したこともあって硬化影響度は20%あった。実際の温度履歴は平均的には25℃×13日であり、硬化影響度は4%と当初設定の1/5になっている。

コンクリート打設後の期間の硬化影響度は、最高到達温度を90℃としていた当初設定では71%と大きく、コンクリート水和熱の影響が樹脂の硬化に対して支配的であることが分かる。図-7に示したように、実際の温度履歴は最高到達温度81.0℃で温度降下も比較的早いことから、その硬化影響度は31%と当初設定の1/2以下になっている。

以上よりコンクリート打設後8日目までの硬化影響度の累計値は、当初設定ではほぼ100%に達しており、計算上緊張不可能になっているが、実測温度履歴では42%であり、樹脂の硬化が当初設定の1/2以下しか進展していないことが分かる。

#### 4.3 硬化確認試験

樹脂の硬化を直接確認するため、図-9に示す硬化確認試験体を主桁コンクリート内に埋め込んでいる(図-2)。この試験体の外端(図-9の下端)をシュミットハンマーで叩いて反発度を測定すると、当初のゴムキャップの反発度から樹脂の硬化に伴い反発度が大きくなるので、硬化が確認できる。4.2項に示した硬化予測に合わせて定期的に試験を行っているが、平成12年4月現在は樹脂の硬化は認められない。

### 5. おわりに

プレグラウトPC鋼材を主ケーブルに使用したPRC中空床

版橋の試験施工を行った。プレグラウトPC鋼材を主ケーブルに使用する場合、コンクリートの水和熱により、従来使用されていた床版横締めと比較してケーブル温度が高温になるため、樹脂の硬化への配慮が必要になる。そこで、主ケーブル用に新たに開発された樹脂を採用するとともに、ケーブルの温度計測を行って実際の温度履歴を確認した。

プレグラウトPC鋼材の採用には、PC橋の耐久性の向上とグラウト作業の省略による現場での作業性の向上という大きなメリットがあるため、今後、主ケーブルへの適用がますます増加していくものと期待される。本報告がそのための一助になれば幸いである。

最後に、本橋の設計および施工に際し、ご指導、ご協力をいただいた方々に深く感謝の意を表する次第である。

#### 参考文献

- 1) 材寄, 南, 小林:アフターボンドPC鋼材の諸特性について, プレストレストコンクリート, Vol.32, No.4, pp.91~98, 1990
- 2) 日本道路公団:設計要領第二集橋梁建設編, 1998.7
- 3) 中村, 宮越, 高木, 脇島:プレグラウト鋼材を用いた十号沢川橋の設計と施工, 第9回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, プレストレストコンクリート技術協会, pp.647~652, 1999
- 4) 野村, 都竹:北関東自動車道(JH高崎工事事務所)全線で活発に工事推進, 橋梁, Vol.34, No.10, pp.6~14, 1998.10
- 5) 土木学会:コンクリート標準示方書施工編, 1996

【2000年3月31日受付】