

## (96) アフターボンドケーブルを用いたPRC床版の設計・施工

日本道路公団札幌建設局構造技術課	正会員	高橋 昭一
(株)ピー・エス札幌支店工務課	正会員	○高木 隆一
ドービー建設工業(株)北海道本店設計部	正会員	大岡 昭雄
住友電気工業(株)PCエンジニアリング部	正会員	山田 真人

### 1. はじめに

プレストレストコンクリート部材においてはグラウトを確実に施工することが不可欠である。しかし、橋梁規模が長大化している近年においては、グラウト作業に要する労力は大きくなってきている。特に、床版に配置されるPC鋼材は本数が多いため、時として作業が不確実になることがある。このことは、建設工事一般において急務とされている、省力化および作業環境の改善に逆行するものである。

日本道路公団札幌建設局では、床版横締め鋼材の施工の省力化およびグラウト作業の不確実性を解消するために、北海道縦貫自動車道における、貫気別川橋、東雲橋、来馬川橋、ホロナイ川橋の4橋についてアフターボンドシングルストランドを採用した。

また、横締め鋼材をPC鋼棒(SBPR 930/1180  $\phi$ 32)からシングルストランド(SWPR19 1T17.8~21.8)に変更すると、導入緊張力の違いにより配置本数が多くなるため、作業性が劣り工費も増加する。そこで、床版をPRC部材として設計することをアフターボンドシングルストランドの採用と合わせて検討した。

床版をPC部材からPRC部材とすることで、①細径鉄筋を密に配置することにより、終局時のじん性が向上するとともに、ひび割れ制御が容易になる。②PC鋼材の一部を鉄筋で置き換えることが可能なため、工費が減少する。などの利点がある。

本稿では、PRC部材としての床版の設計の概要およびアフターボンドシングルストランドの施工にあたっての特性値の確認、温度解析、および、それを用いた硬化シュミレーション結果などを取りまとめて報告するものである。

### 2. PRC部材としての床版の設計

#### 2.1 設計基本方針

PRC部材としての床版の設計は、PRC道路橋設計マニュアル(案)(高速道路技術センター、以下「PRCマニュアル」と略す)によった。PRCマニュアルにおける、曲げモーメントおよび軸方向力に対する照査項目を表-1に示す。ただし、ひびわれの制御方法をひびわれの発生は許さず許容引張応力度以内とする方法とし、疲労荷重作用時の検討は省略した。

#### 2.2 許容引張応力度

許容引張応力度は、コンクリート標準示方書(土木学会、以下「標準示方書」と略す)の曲げひびわれの検討を省略して良い制限値以下とすることとした。ただし、床版は薄い部材であることから標準示方書解7.3.1式の係数 $k_1$ により補正して算出

表-1 曲げモーメントおよび軸方向力  
に対する照査項目

荷重状態	照査の項目
設計荷重作用時	コンクリートの圧縮応力度 および鋼材の引張応力度
	引張鉄筋量
	曲げひびわれ幅
疲労荷重作用時	鋼材の変動応力度
終局荷重作用時	破壊抵抗曲げモーメント

表-2 制限値 (単位: kgf/cm<sup>2</sup>)

設計基準強度	$f'_{ck}$	400		
設計引張強度	$f_{td}$	27		
部材寸法	B	300	450	500
制限係数	$k_1$	0.896	0.783	0.756
制限値	$f_{tda}$	24	21	20

した。設計に用いた制限値を表-2に示す。

2.3 鉄筋拘束による影響

PRC部材においては配置される鉄筋が多いため、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮を鉄筋が拘束する影響を無視できないので、PC鋼材応力度の変化量 $\Delta\sigma_{p\phi}$ および鉄筋応力度の変化量 $\Delta\sigma_{s\phi}$ は次式 (PRCマニュアル 2-1, 2-2式) により算定した。

$$\Delta\sigma_{p\phi} = \frac{n \cdot \phi \cdot \sigma_{cp} + E_p \cdot \epsilon_{cs}}{1 + \alpha \left(1 + \frac{\phi}{2}\right)} \quad \dots\dots\dots \text{式 (2-1)}$$

ただし、 $\alpha = n \cdot A_{p+s} \cdot \left(\frac{1}{A} + \frac{e_{p+s}^2}{I}\right)$

$$\Delta\sigma_{s\phi} = \frac{E_s}{E_p} \cdot \Delta\sigma_{p\phi} \quad \dots\dots\dots \text{式 (2-2)}$$

また、部材引張部に配置されている鉄筋の増加応力度は、コンクリートには軸引張力として作用するものとした。

2.4 検討結果

東雲橋の場合の、PC鋼棒によるPC部材としての設計結果と、アフターボンドシングルストランドによるPRC部材としての検討結果を表-3に示す。

表-3 検討結果比較

			SBPR 930/1180 $\phi$ 32 c. t. c 600 mm		SWPR19 1T19.3 c. t. c 600 mm	
			支点部	中間部	支点部	中間部
合成 応 力 度	導入直後	上縁	49.0	2.7	21.3	3.8
		下縁	-7.8	59.0	0.8	29.8
	死荷重時	上縁	30.5	2.7	9.3	3.8
		下縁	4.3	48.5	10.8	26.2
設計荷重時	上縁	2.6	46.5	-19.6	45.3	
	下縁	32.2	4.8	37.1	-20.4	
引 張 鉄 筋	実配置		D13 c. t. c 250 mm		D13 c. t. c 125 mm	
	配置面積	cm <sup>2</sup>	5.068		10.136	
	必要面積	鉄筋のみ	—	—	11.988	7.494
		PC+鉄筋	—	—	6.766	2.272
曲 げ ひ び 割 れ 幅	計算値	mm	—		0.066	0.075
	許容値	mm	—		0.175	
曲 げ 破 壊 安 全 度	PC鋼材のみ		1.401	1.430	0.779	0.745
	PC+鉄筋		—	—	1.225	1.248
変 動 応 力 度	鉄筋	kgf/cm <sup>2</sup>	—	—	631.6	403.9
	PC鋼材	kgf/cm <sup>2</sup>	—	—	437.0	145.1

3. アフターボンドシングルストランド

アフターボンドシングルストランドは、図-1に示すようにポリエチレンシース、常温硬化型樹脂 (エポキシ樹脂)、PC鋼より線からなる一体構造を形成しており以下の特徴を有している。

- ① PC鋼材の配置、緊張、定着まではアンボンドPC鋼材と同じで、その後樹脂が自然硬化するため、グラウト作業をせずにセメントグラウトによるボンド工法と同等の構造特性

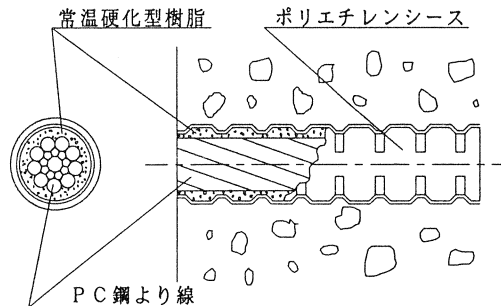


図-1 アフターボンドシングルストランドの概略図

が得られる。

② P C鋼より線に常温硬化型樹脂が塗布され、更にポリエチレンシースで被覆されているため優れた耐食性が得られる。

③ 常温硬化型樹脂は硬化後 P C鋼より線と接着し、またポリエチレンシースは凹凸形状になっているためコンクリートとの高い付着強度が得られる。

3. 1 充填材の基本特性および付着特性

充填材の硬化後の基本特性を表-4に示す。標準示方書によればセメントグラウトの4週の圧縮強度は 200 kgf/cm<sup>2</sup> 以上とされており、充填材の圧縮強度は十分満足している。

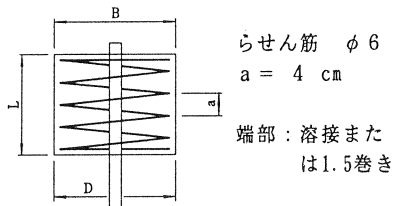
また、アフターボンドシングルストランドと従来材のコンクリートとの付着力を比較するために、以下の条件で引抜試験を実施しているが、いずれも従来材よりも大きな値を示しており、十分な付着力を有している。供試体寸法を図-2に、試験結果を表-5に示す。

<試験条件>

①試験鋼線：アフターボンドシングルストランド 21.8mm×3本、※従来材 21.8mm×3本。②供試体：日本コンクリート工学協会引抜試験方法案。③コンクリート強度：f'c= 300±30 kgf/cm<sup>2</sup>。④測定項目：初滑荷重（鋼線が 0.025mm滑った時点での荷重）および最大荷重。

表-4 基本特性

項目	特性値
圧縮強度	740 kgf/cm <sup>2</sup>
引張強度	230 kgf/cm <sup>2</sup>
弾性率	0.8×10 <sup>5</sup> kgf/cm <sup>2</sup>
鋼材とのせん断接着強度	135 kgf/cm <sup>2</sup>
硬度(ショア-D)	85~90
硬化収縮率	1.0%以下
熱分解温度	約 370 °C



B cm	L cm	D cm
20×20	20	16~20

図-2 供試体寸法

表-5 引抜試験結果

		アフターボンドシングルストランド		従来材	
		tf	kgf/cm <sup>2</sup>	tf	kgf/cm <sup>2</sup>
初滑荷重	1	6.89	43.6	4.82	25.2
	2	7.70	48.9	5.33	28.0
	3	7.59	48.2	7.56	39.6
	平均値	7.39	46.8	5.90	30.9
最大荷重	1	6.89	43.6	5.86	30.7
	2	7.70	48.9	5.39	28.3
	3	7.59	48.2	7.56	39.6
	平均値	7.39	46.8	6.27	33.9

3. 2 充填材の硬化特性

充填材の硬化時間は硬化促進材添加量により調整することが出来るが、樹脂の硬化は温度の影響を非常に受けやすく、温度が高くなれば硬化時間は短くなる。例えば、20°Cで 0.2 phrの硬化促進材を添加した場合は約 100日で硬化するが、80°Cの場合は約6時間で硬化してしまうことがわかる。

なお、ボンド発現時間はアンボンド P C鋼材のグリースの軟度の目安として用いられている単位の稠度が 20になる時間とした。

図-3にボンド発現時間と硬化促進材添加量の関係を示す。

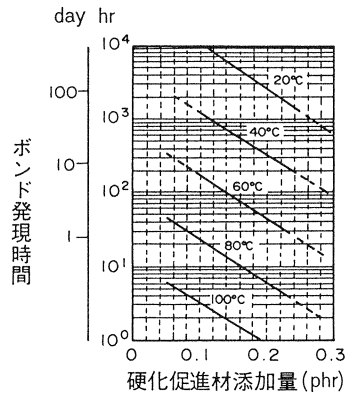


図-3 ボンド発現時間と硬化促進材添加量の関係

### 3.3 硬化シュミレーション

一定温度下での 充填材の硬化状況は実験により確認できているが、実際の橋梁においてはコンクリートの打設後、コンクリートの水和反応により図-4に示すような温度上昇が見られ、それにより充填材の硬化が促進される。温度上昇が大きければ緊張前に充填材が硬化してしまうことも考えられるので、実構造物の温度条件下における硬化状況を推定するために硬化シュミレーションを行い、またその妥当性を実験により確認した。

シュミレーションは、以下の手法によるものとした。

- ①構造物の温度履歴を階段状の一定温度条件 (5分ごとに一定) の集合と近似 (図-5) する。
- ②一定温度条件下で充填材を5分間保持することにより、硬化に与える影響を次式により計算する。

$$\Sigma \frac{\text{近似から得られる温度 } T \text{ での保持時間 (5/60時間)}}{\text{温度 } T \text{ での緊張可能時間}}$$

例えば、0.1phr硬化促進材を添加した充填材の場合、40℃で緊張可能な時間は1225時間であり、5/(1225×60)となる。また、80℃ならば緊張可能な時間は20時間であり、5/(20×60)となる。③その累積が1になる時間を緊張可能時間とする。なお、この場合の緊張可能時間としては稠度が、アンボンドPC鋼材のグリースと同じ 300になるまでの時間とした。

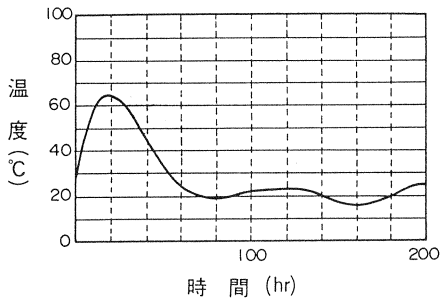


図-4 実構造物の温度履歴の例

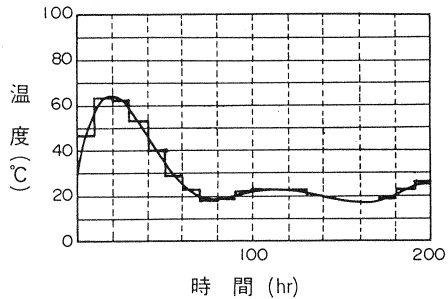


図-5 階段状近似の概略図

このシュミレーション解析の信頼性を評価するために試験を行った結果、緊張可能時間は実験値で 111.2 時間、理論値で 118.3時間で、93%の相関があり信頼できるものであることを確認した。図-6に試験に用いた温度履歴線図、図-7に試験結果を示す。

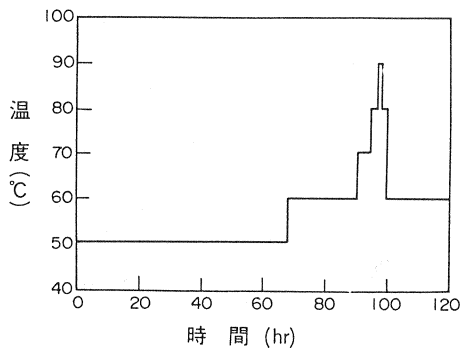


図-6 温度履歴線図

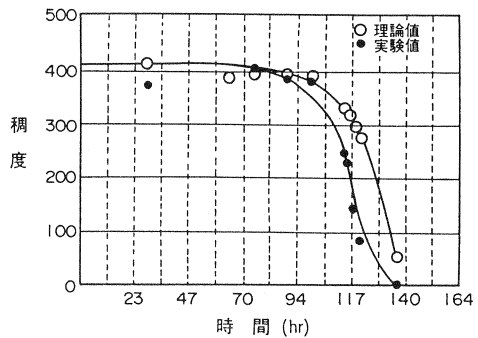


図-7 試験結果

### 3. 4 温度解析および温度測定

実際の施工にあたって事前に温度解析を行い、その結果による温度履歴を用いて硬化シュミレーションを行った。その結果、硬化促進材の添加量は床版横締め使用するアフターボンドシングルストランドの場合は、常温で1年で硬化するように調整した充填材で十分緊張可能であることがわかった。なお、温度解析は日本コンクリート工学協会の「マスコンクリートの温度・応力計算用プログラム」を使用して行った。

図-8に解析モデル、図-9に解析結果、図-10にシュミレーション結果を示す。

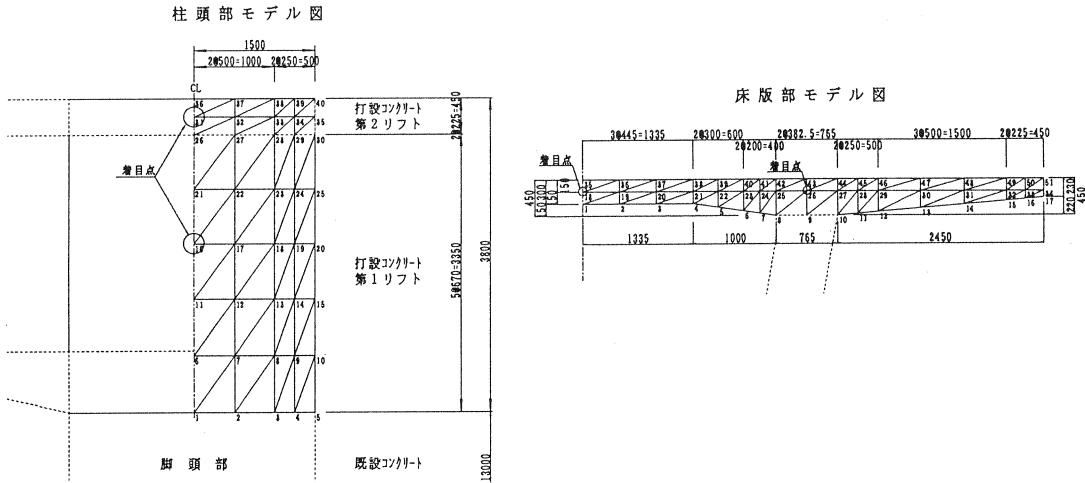


図-8 解析モデル

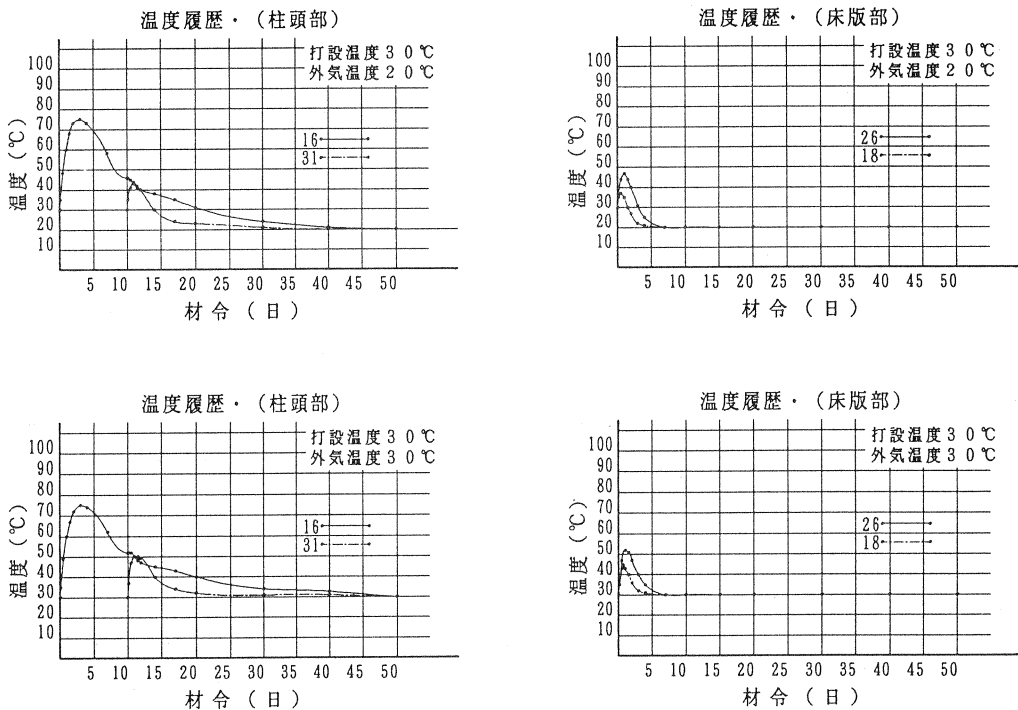


図-9 解析結果

また、温度解析の結果では柱頭部は最高到達温度は75℃であり、これは、硬化シュミレーションによれば1年硬化型を使用できる上限の値であるため、実際に温度を測定することとした。図-11に測定位置、図-12に測定結果を示す。

測定の結果、解析は普通セメントで行ったが実際の施工では早強セメントを使用しているため、解析値よりも到達温度が高いことがわかったので、横桁に用いるアフターボンドケーブルは2年硬化型を使用することとした。

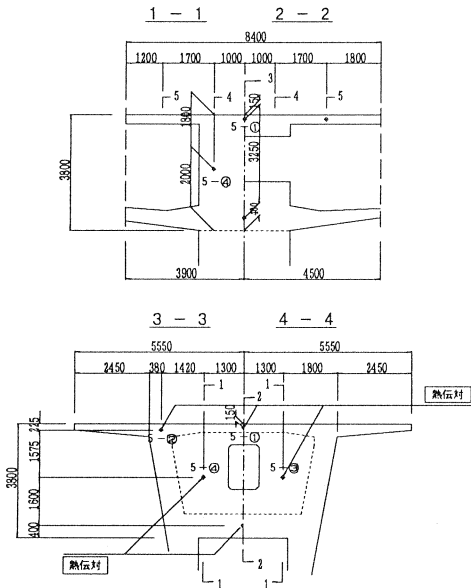


図-11 測定位置

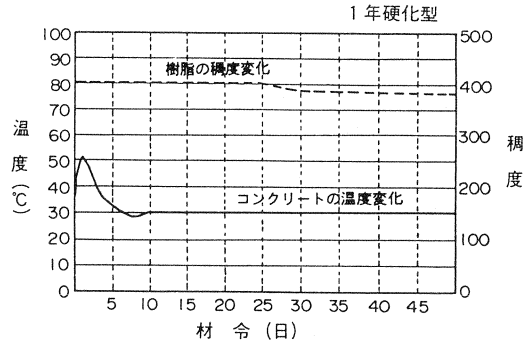


図-10 シュミレーション結果

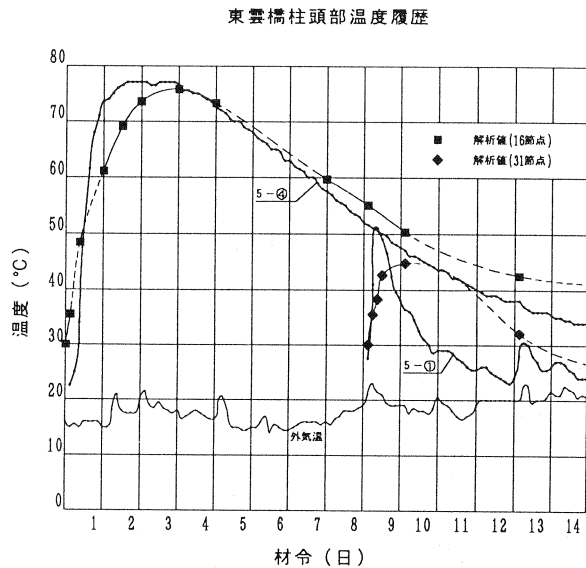


図-12 測定結果

#### 4. おわりに

今回、アフターボンドシングルストランドを採用した橋梁は、いずれも施工途中であるため簡単な施工途中報告となってしまったが、事前に行った検討の結果により緊張作業に支障を来すことなく順調に工事は進んでいる。しかし、寒冷地という北海道特有の気象条件において極低温下における充填材の硬化特性の把握など、まだ検討しなければならない課題が残っている。これについては実験を行う予定であるので、機会があれば又報告したいと思っている。本報告が、今後アフターボンドケーブルを採用する橋梁の参考になれば幸いである。

#### 参考文献

- 1) 財団法人 高速道路技術センター：PRC道路橋設計マニュアル(案)，北海道横断自動車道(清水～池田) PRC道路橋の実用的設計法に関する調査検討(その3) 報告書，pp.17～102, 1993.3
- 2) 社団法人 日本コンクリート工学協会マスコンクリートの温度応力研究委員会，ユーザーズマニュアルマスコンクリートの温度・応力計算用パソコンプログラム集