

# そそろがわ 笹路川橋の設計と施工

## ～プレグラウト鋼材を用いたPRC3径間連続ポータルラーメン 中空床版橋～

Sosorogawa Bridge Design and Construction

大久保 孝  
Takashi OKUBO

川田建設(株)大阪支店技術部  
設計課

竹之熊 邦志  
Kunishi TAKENOKUMA

川田建設(株)大阪支店工務部工務課

安部 誠一郎  
Seiichiro ABE

川田建設(株)大阪支店工務部  
工務課

野世 真  
Makoto NOSETANI

川田建設(株)大阪支店工務部  
工務課

西村 勝  
Masaru NISHIMURA

川田建設(株)大阪支店技術部  
設計課課長

伊達 安子  
Yasuko DATE

川田建設(株)技術部  
設計課

笹路川橋は、分割施工により架設されたPRC3径間連続ポータルラーメン中空床版橋である。ポータルラーメン橋は橋台部が剛結されているため、上部工と橋台剛結部付近に地震荷重の影響が集中する。そのため、通常のラーメン橋とは異なる構造特性を把握することにより、隅角部における耐震性の向上を図った。また、近年では構造物の耐久性向上を目的として、プレグラウトPC鋼材の使用が増加してきている。これまで同鋼材は床版横締めケーブルとして数多く施工されてきているが、部材寸法が大きく、コンクリートの硬化熱の影響が予想される主ケーブルへの適用はいまだ少なく、使用に際しては確認すべき点が多い。本橋では、温度解析と供試体での確認実験および実橋での温度計測を行い、プレグラウト鋼材の温度に対する影響を確認した。  
キーワード：ポータルラーメン橋、プレグラウトPC鋼材、温度解析・計測

### 1. はじめに

本橋は、第二名神高速道路の亀山JCT（仮称）から甲賀土山IC（仮称）間に建設されたPRC3径間連続ポータルラーメン中空床版橋である。主な特徴は、以下の2点である。

A1橋台部が主桁と剛結されているポータルラーメン形式である。

主鋼材にプレグラウト鋼材を使用。

本橋は、笹路川橋の設計と施工および現場において実施した計測等について報告するものである。

### 2. 橋梁概要

笹路川橋の橋梁諸元を以下に、標準断面図を図1、全体一般図を図2に示す。

発注者：日本道路公団関西支社大津工務事務所  
工事名：第二名神高速道路 笹路川橋（PC上部工）  
工事

橋種：プレストレストコンクリート道路橋

道路規格：第1種第1級A規格

構造形式：PRC3径間連続ポータルラーメン中空床版橋

橋長：97.500 m

支間：32.500 m + 33.000 m + 31.500 m

総幅員：18.050 m

有効幅員：16.500 m

平面線形：R =

縦断線形：1.730% ~ 2.000% VCL=120 m

横断勾配：i = 2.500% 片勾配

活荷重：B活荷重

施工方法：A2橋台側からの各径間毎の分割施工

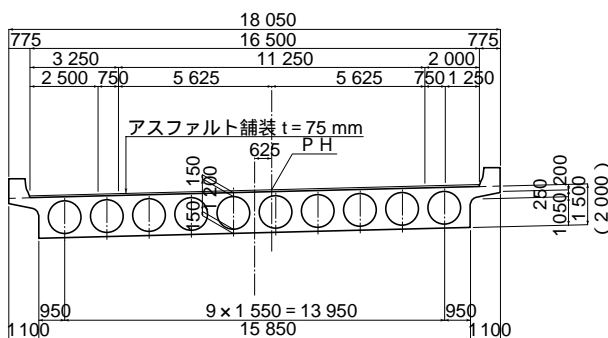


図1 標準断面図

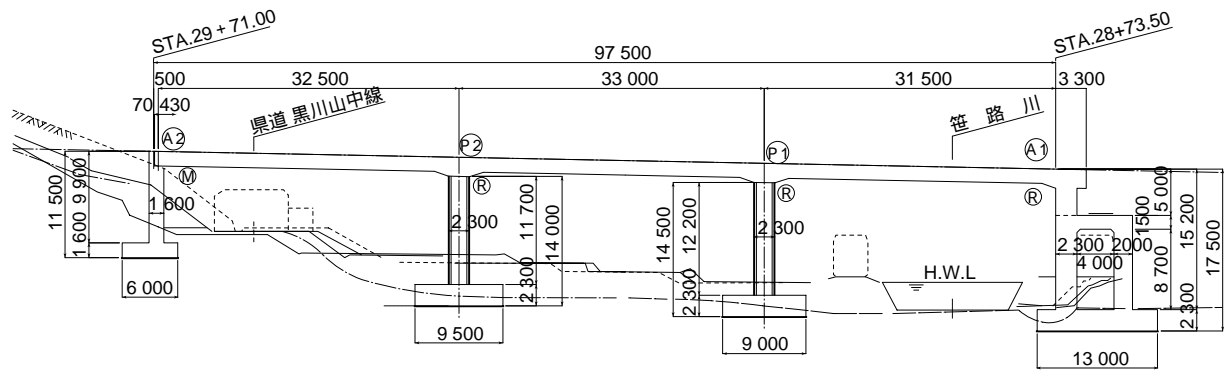


図2 全体一般図

### 3. 設計

#### (1) 設計概要

本橋は、ポータルラーメン構造であるため土圧の影響を受けることから、主桁の設計に用いる断面力は橋台・橋脚をモデル化した平面骨組構造解析に基づき算出した。ただし、活荷重による断面力はオルゼンの版理論による分配係数を考慮した。また、分割施工による構造系の変化により発生するクリープ・乾燥収縮等の不静定断面力は、図3に示す施工段階に従い算出した。

#### (2) 基礎地盤パネの検討および土圧の載荷方法

本橋は直接基礎構造であるが、地質調査報告書より、地盤地質は風化作用を受け著しく軟質化したD<sub>1</sub>級の礫岩であり、基礎地盤の変形係数 $E_0$ が通常の事例に比べ著しく柔軟であったため、構造解析において基礎地盤パネの影響を考慮した。しかし、地盤の変形係数は地盤条件や調査・測定条件等の要因により変動するため、一義的に設定することは難しい。さらに、本橋はラーメン構造であり、パネ値の影響が設計に大きく影響するため、上部工および下部工の断面力や応力状態など総合的に検討しなければならない。したがって、設計では地質調査報告書で示される地盤変形係数を基本値とし、著しく柔らかい値を示す中間橋脚の地盤変形係数 ( $E_0=80 \text{ N/mm}^2$ ) と、硬く変化させた場合 (建設位置付近での地質調査で示されている最大値 $E_0=250 \text{ N/mm}^2$ ) およびその組み合わせケースについて検討を行い、パネ値変化における影響度を把握し、構造物の安全性を確認した。

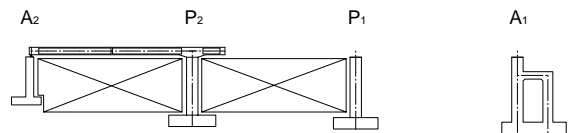
また、ポータルラーメン橋は主桁が橋台と剛結されており、橋台背面の土圧が荷重として常に作用する。設計に際しては、JH設計要領第二集<sup>1)</sup>に示される常時水平土圧および地震時土圧を考慮した。

地震時は、橋台豎壁が土から離れる方向に慣性力が働くとき主動土圧が作用し、背面土の方向に慣性力が働くとき受働土圧が作用する。本橋の地震時土圧は、設計要領第二集に従い、クーロン土圧の片側載荷とした。

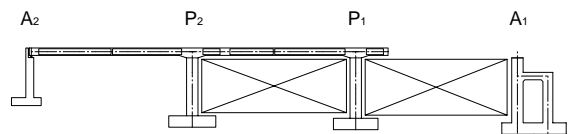
#### STEP - 1 下部工施工完了



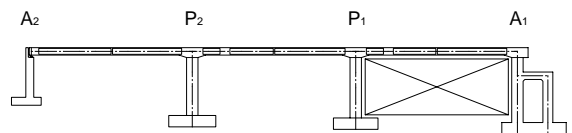
#### STEP - 2 A2 - P2 径間施工 (CON打設・主桁緊張)



#### STEP - 3 P2 - P1 径間施工 (CON打設・主桁緊張)



#### STEP - 4 P1 - A1 径間施工 (CON打設 主桁緊張 構造系完成時)



#### STEP - 5 構造系完成

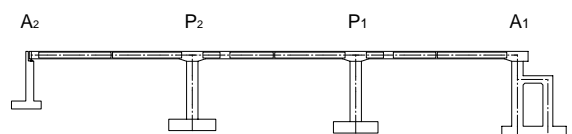


図3 解析ステップ

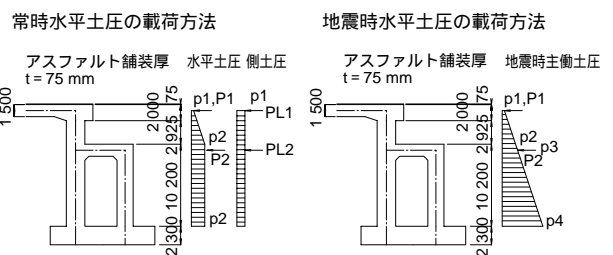


図4 土圧の載荷方法

### (3) 主方向の設計

活荷重作用時のPRC部材のひび割れ制御方法は、方法A（ひび割れ幅制御）を基本とした。これは、架橋位置が山間部であり、また、主鋼材にプレグラウト鋼材を採用していること、橋面防水工が行われること、の2点により十分な防錆対策が施されていることから発注者と協議の上決定した。なお、全死荷重時においては全断面について、耐久性確保の観点から方法B（ひび割れ発生限界）とした。

以下に、全死荷重時および設計荷重時の応力度を示す。

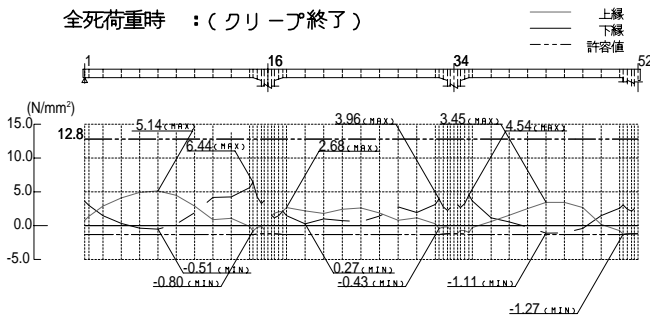


図5 全死荷重時

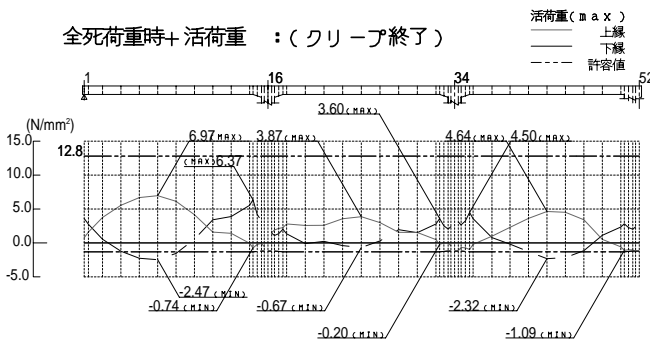


図6 活荷重時 (MAX)

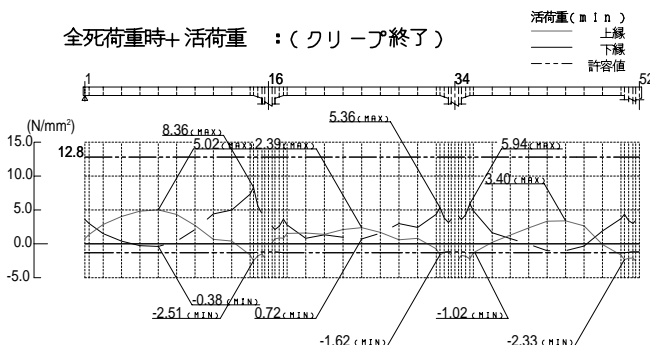


図7 活荷重時 (MIN)

### (4) 地震時保有水平耐力法による上部工の照査

耐震照査においては、地震時保有水平耐力法（以下、保耐法と記す）により行った。

#### a) 終局状態の設定

道路橋示方書 耐震設計編9.8<sup>2)</sup>では鉄筋コンクリートラーメン橋脚の終局時として、複数箇所形成される塑性ヒンジが全て終局状態に達する時と規定されている。これは、ラーメン橋が不静定構造であることから、一部の部材が設計上の終局曲げモーメントに達しても、ラーメン橋全体としての崩壊に至りにくいことが、実験的に明らかにされているためである。

しかし、本橋は重交通の第二名神であり、地震後の使用性や復旧の観点から、複数の塑性ヒンジが終局状態に達することは好ましくない。また、本橋はラーメン橋台部と中間橋脚部とは剛度差があり、全ての塑性ヒンジが終局に達した時点では、最初に終局に達した塑性ヒンジが破壊に達することも懸念される。

したがって、本橋の終局状態を以下のように設定することとした。

1つの橋脚の上下端が初降伏に達した時。

1つの塑性ヒンジが終局点に達した時。

#### b) 上部工の照査

保耐法での上部工の安全性の照査では、上記で設定した終局状態（前述のうちいずれか早く達した時）における終局断面力に対して、次の項目について照査を行った。

- ・終局時の曲げモーメントが初降伏モーメント以下であること。
- ・終局時のせん断力がせん断耐力以下であること。

以下の図8に保耐法による上部構造の照査フローを示し、図9に曲げに対する照査結果、図10にせん断に対する照査結果を示す。

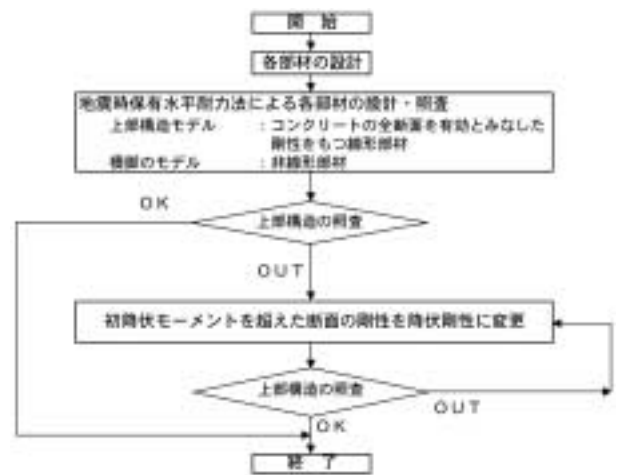


図8 保耐法での上部工照査フロー

初降伏モーメントと終局モーメントの比較 (保耐法配筋時)

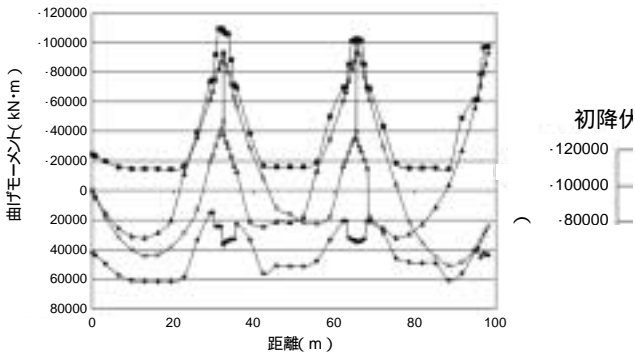


図9 保耐法での曲げ照査結果

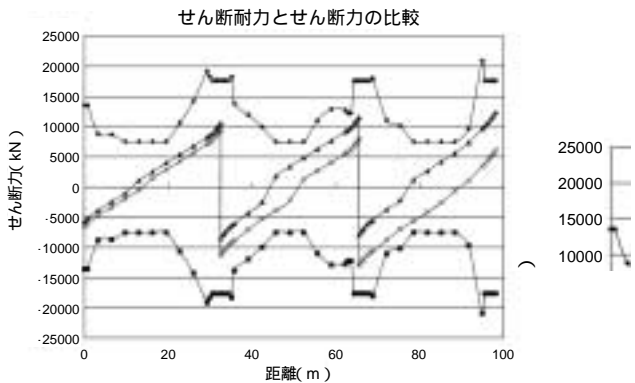


図10 保耐法でのせん断照査結果

c) 主桁 - 橋台部剛結隅角部の構造

本橋のA1橋台はラーメン式橋台で剛性が高く、また主桁とも剛結されているため、大規模地震時において上下部を剛結した隅角部に大きな地震時断面力が発生する。

このため、A1橋台と剛結される主桁の充実断面区間を支間部に延長することにより(図11)、隅角部付近の急激な断面剛性変化を緩和した。これにより、保耐法での必要鉄筋の配置も容易になり、耐震性の向上が図れた。

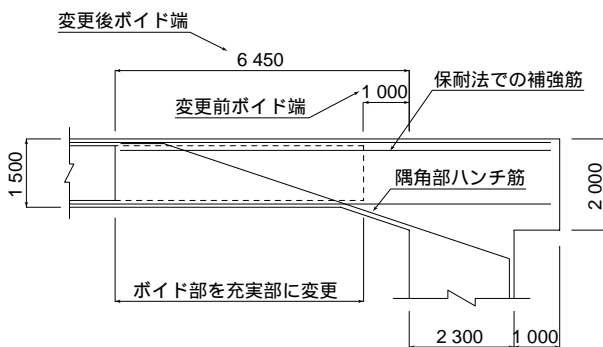


図11 A1橋台部での剛結構造

(5) プレグラウト鋼材樹脂の選定と確認試験

プレグラウト鋼材に充填されている樹脂は温度依存性が高い。したがって、マスコンクリートとなるラーメン結合部では、コンクリート打設後の水和熱による温度がどの程度になるかを把握し、鋼材の緊張作業に支障をきたすことのないよう、樹脂を選定する必要があった。

そこで、FEM解析と供試体での確認試験により温度上昇履歴を把握することとした。

a) 温度履歴解析

解析モデル・解析条件

解析は、柱頭部より取り出したマスブロックを、後述する試験体に置き換えて、3節点3角形ひずみ要素でモデル化(図12)し、2次元FEM解析により行った。なお、プログラムは社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」を使用した。

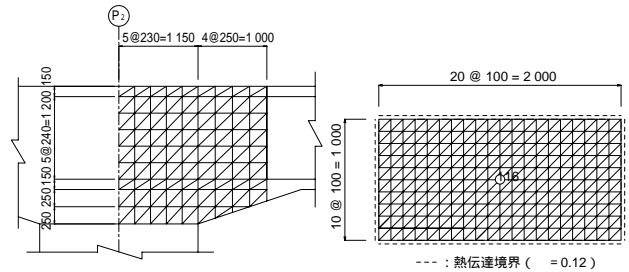


図12 解析モデル

解析条件のうち、コンクリート温度については、本橋のコンクリート打設時期(11月~1月)における滋賀県彦根の月別平均気温より選定し、さらにコンクリートの練り上がりの温度上昇を考慮した。以下にコンクリート温度の解析ケースを示す。

- ・CASE1: 10 (外気温度)
- ・CASE2: 20 (練り上がりの温度上昇を想定)

また、コンクリート( $\sigma_{ck}=36 \text{ N/mm}^2$  早強)の熱物性値を表1に示す。

表1 コンクリートの熱物性値

物性	記号	単位	数値		適用
			CASE1:10	CASE2:20	
熱伝導率	c	W/m	2.8		コンクリート標準示方書
密度		kg/m <sup>3</sup>	2 500		"
比熱	Cc	kJ/kg	1.26		"
熱伝達率(発泡型特+合板)		W/m <sup>2</sup>	0.12		"
断熱温度上昇量	Q(t)		=Q (1-e <sup>-rt</sup> )		"
終局断熱温度上昇量	Q		61.41	58.41	"
温度上昇速度定数	r	-	1.0492	1.5425	"
熱物性係数	a	-	0.13	0.13	"
熱物性係数	b	-	15.0	12.0	"
熱物性係数	g	-	0.0016	0.0025	"
熱物性係数	h	-	0.478	0.650	"
単位セメント量	C	kg/m <sup>3</sup>	357		配合計算より

解析結果

図13にCASE2での解析による温度履歴結果を示す。

解析結果より、最高温度は打設後3日で約80 となった。樹脂の硬化反応は、最高温度と高温域での積算日数

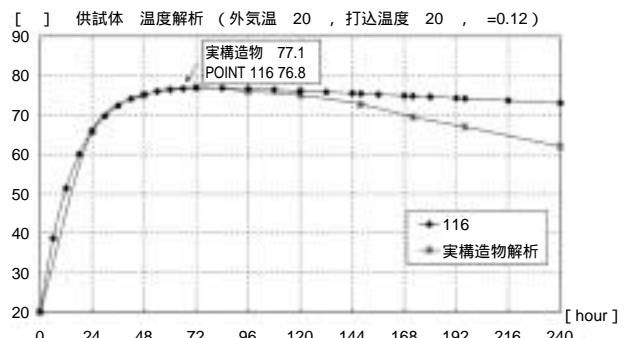


図13 CASE2での温度履歴

から決定されるため、温度履歴曲線から緊張可能日数を算定することになる。

よって、表2に示す樹脂の高温域に対する硬化特性から、緊張可能日数を考慮し、本橋での樹脂は超高温タイプを採用した。

表2 高温域に対する硬化特性

加温条件	樹脂タイプ (phr)	緊張可能日数 (day)
80 一定	0.00 (超高温タイプ)	10
	0.01 (超高温タイプ)	9
	MC901	5
90 一定	0.02 (高温タイプ)	5
	0.00 (超高温タイプ)	5
	0.01 (超高温タイプ)	4
	MC901	2
	0.02 (高温タイプ)	2

b) 準断熱モデル供試体での確認試験

試験目的と試験内容

前述の解析により選定した樹脂について、図14に示す供試体で確認試験を行った。

試験は、解析値と準断熱モデル供試体の温度履歴比較、緊張時材令における樹脂の非硬化状態確認 (= 樹脂の稠度が300以上であること)の2項目を目的とした。ここで稠度とは、グリース状の物体の軟らかさを示す数値で、熱硬化型樹脂の軟らかさの指標として用いられ、数値が大きいほど軟らかいことを示す。(JIS K2220)

試験方法は、供試体の実測温度による樹脂の硬化度指数の累計値が、温度解析での緊張時の硬化度指数累計値を上回った時点、すなわち供試体の樹脂の硬化反応状態が解析と等価になった時点で緊張作業を行い、緊張の可否を確認する。

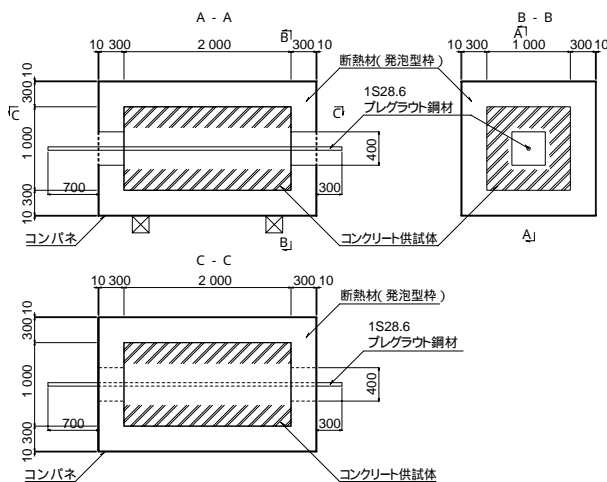


図14 準断熱モデル試験体

試験結果と考察

・温度履歴比較

図15に試験体の温度履歴を示す。

ピーク時温度は、解析値77.1 に対して実測値は75.0 とほぼ等しい。

ピーク到達時間は、解析値では打設後72時間前後であ

るのに対し、実測値では36時間程度と、解析値より早い。

ピーク到達時間に若干の誤差はあるものの、ピーク付近の履歴曲線および最高温度は、解析値と大きな差異はなく、解析の妥当性が確認できた。

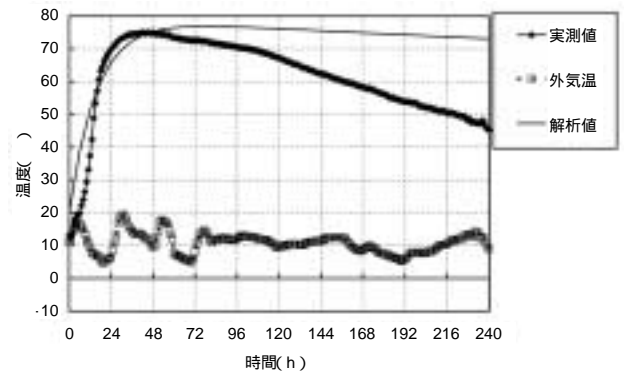


図15 試験体の温度履歴

・緊張時のプレグラウト樹脂の非硬化確認

ロードセルで計測した緊張端と固定端の荷重示度は、ほぼ線形状態であることから、緊張時材令において樹脂の非硬化が確認できた(図16)。

緊張時の最大伸び量の平均は L = 15.13 mmであり、解析値 L = 12.84 mmに対してやや大きい。すなわち、樹脂の稠度は、解析値よりも大きいことが推測できる。

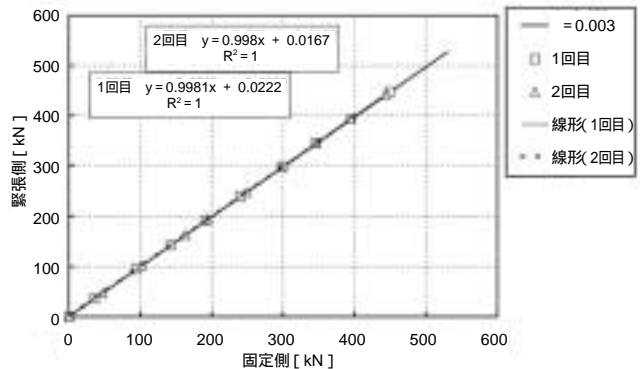


図16 緊張端・固定端のロードセルの荷重示度

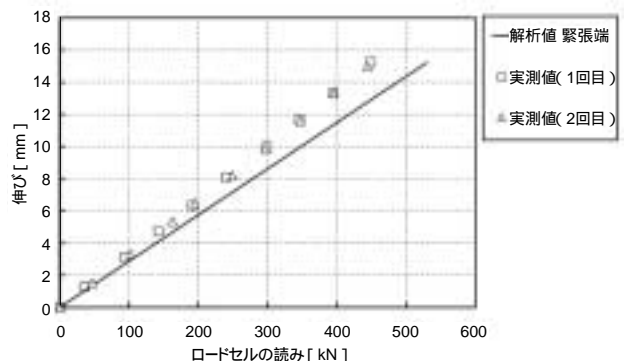


図17 ロードセルの荷重示度と鋼材伸び量

以上の結果より、本橋でのプレグラウトPC鋼材の樹脂選定は適切であると判断した。

## 4. 施工

### (1) 施工概要

本橋の施工は、A2側からの各径間毎の分割施工で行った。A1-P1径間は一級河川笹路川を跨ぐためトラス式支保工、P1-P2径間は橋体下面ヤードの交通確保のため、P2-A2径間は県道 - 黒川山中線を跨ぐため、梁支柱式支保工により架設した。写真1に橋体全景を示す。

また、本橋のコンクリート体積は表3に示すように、1 738 m<sup>3</sup>となる。現地プラントの能力より、1日の打設量を最大で600 m<sup>3</sup>として、施工を3BLの分割とした。



写真1 橋体全景

表3 主要数量

項目	種別	単位	数量	備考
コンクリート	36 N/mm <sup>2</sup>	m <sup>3</sup>	1 738.3	
型 枠	外枠	m <sup>2</sup>	2 457.6	
	1 200	m	755.5	テーパーボイド含
鉄 筋	SD345	t	198.728	
PC鋼材引張	1S28.6	kg	26 317.7	プレグラウトタイプ

### (2) プレグラウトPC鋼材の管理

本橋で主鋼材に使用したプレグラウトPC鋼材は、表面がポリエチレンシースで被覆されており、従来の内ケーブルのようにプッシングマシン等による鋼材配置ができない。このため組立に際しては、損傷を生じることのないよう、細心の注意をはらった。

保管においては、損傷防止はもちろんのこと、温度に敏感な樹脂に日射の影響が生じないように、シート等による養生を行った。

分割施工での鋼材の接続は、アンダーソン工法のプレグラウト( 28.6)システムで行った。接続箇所には、透明カップラーシースを取り付け、エポキシ樹脂を充填し、確実な防錆を行った。

### (3) 実橋での温度計測

実施工に先立ち温度解析と供試体により、樹脂選定を行ったが、さらに、実橋においても温度計測を行いコンクリート内部の温度履歴を確認し、樹脂選定の妥当性を確認した。温度計測には、熱電対を用い、打設後10日間

表4 ピーク時温度および累計硬化度指数

測定位置	P2柱頭部	A1橋台部
温度(℃)	75.9	66.0
発現時期(hour)	36~40	38~42
緊張終了時材令(日)	6	6
緊張終了時累計硬化度指数	0.14878	0.13254

累計硬化度指数は、1.0以下であることから  
稠度が300以上であり、緊張可能である。

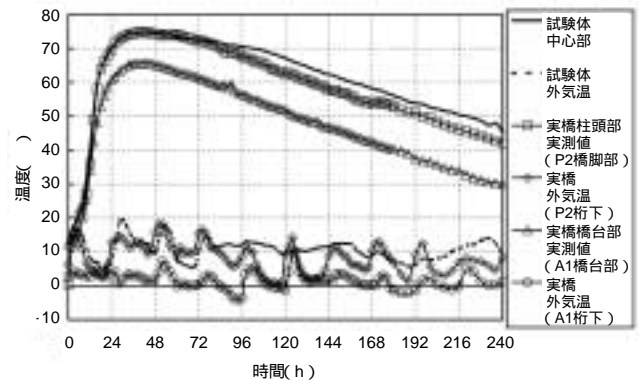


図18 実橋の温度履歴

継続して計測した。

表4に各測定位置でのピーク時温度と累計硬化度指数を、また図18に実橋での温度履歴計測結果を示す。

上記の結果から、最高温度履歴と発現時期は供試体での確認試験と良く一致しており、供試体のモデル化の妥当性が確認できたとともに、実橋での緊張時では樹脂の未硬化状態が間接的に判断できた。よって、緊張作業に支障なく適切にプレストレスが導入された。

## 5. おわりに

本橋は、平成13年3月に無事竣工し、現在鈴鹿トンネルの工事用道路として仮舗装され、本線開通までの役割を果たしている。無事故・無災害で橋体完成を迎えたことは、本橋に携わった技術者として何にもましてうれしい限りである。

最後に本橋の計画・設計・施工にあたり、多大なるご指導・ご尽力をいただいた関係各位に本誌面を借りて、感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 日本道路公団：設計要領第二集，1998.7.
- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 耐震設計編，1996.12.