

茶間川橋の設計

川戸 彰^{*1}・大川 宗男^{*2}・和田 信秀^{*3}・吉井 正明^{*4}

1. はじめに

茶間川橋は、本州四国連絡道路（神戸・鳴門ルート）が明石海峡大橋を渡ってから約 1.5 km 地点の淡路島北端の淡路町岩屋地区に建設され、国立公園第 2 種特別地域に指定されている地区の急峻な谷間に流れる 2 級河川茶間川および県道上を横断するもので、地形条件等から構造形式には鉄筋コンクリート (RC) アーチ橋が、架設工法には斜吊材を用いた張出し架設工法（ピロン工法）が採用されている。

わが国の長大支間の RC アーチ橋は、ほとんどが張出し架設工法を用いて施工されているが、張出し架設時のアーチリング先端では、斜吊材が水平に近くなりその効果が小さくなること、および基礎構造の安定から、帝釈川橋、宇佐川橋および別府明礬橋のように、アーチリング中央部にメラン材という鋼部材を併用するのが一般

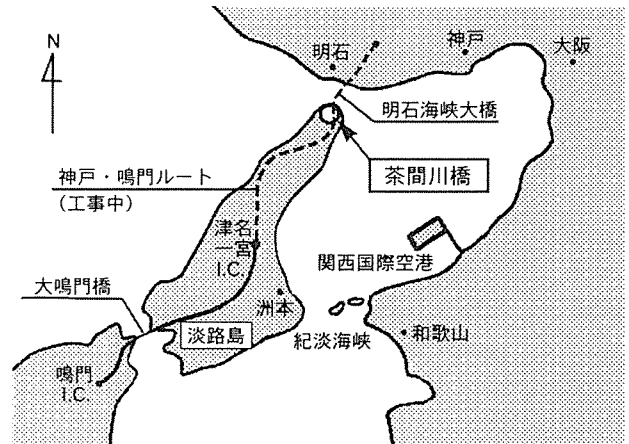


図-2 施工位置図

的である。

本橋のアーチリングはスパン・ライズ比が大きいので斜吊材の効果が良いこと、および張出し架設時の構造系

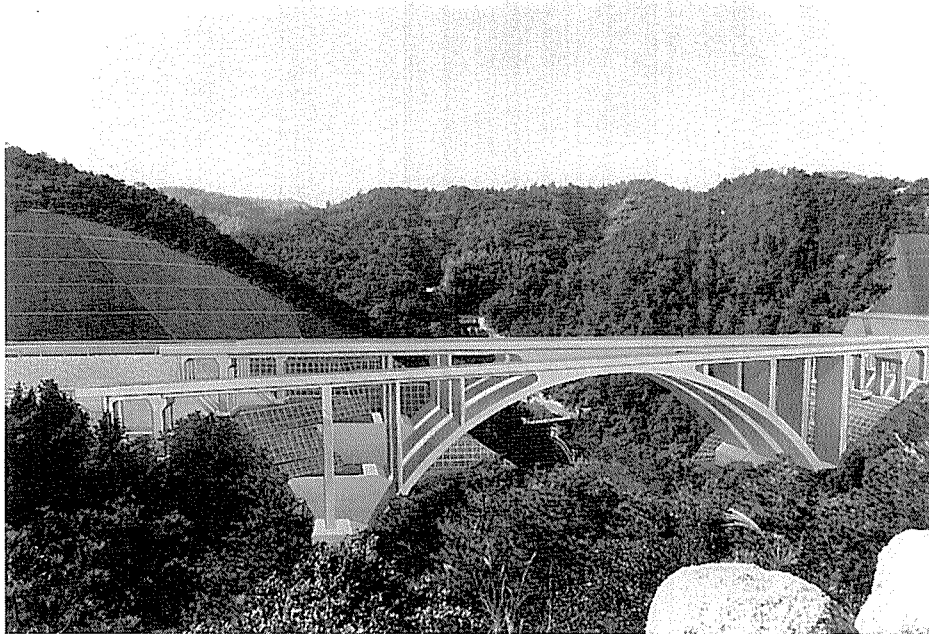


図-1 完成予想写真

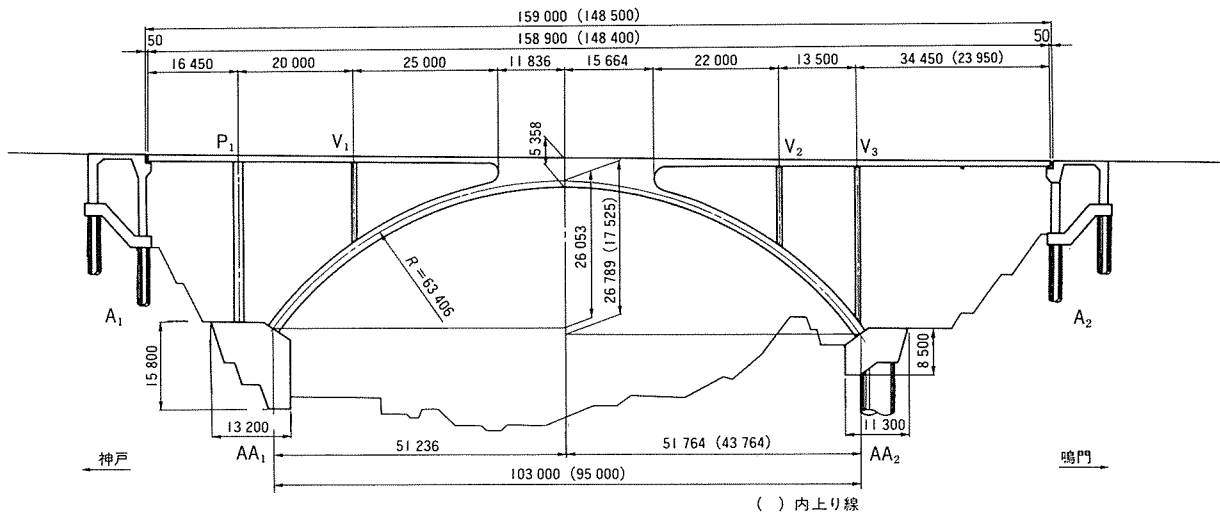
*1 Akira KAWADO : 本州四国連絡橋公団 第一建設局洲本工事事務所 第四工事長

*2 Munee OHKAWA : 本州四国連絡橋公団 第一建設局洲本工事事務所 第四工事長代理

*3 Nobuhide WADA : 鹿島・安藤特定建設工事共同企業体 所長

*4 Masaaki YOSHII : 鹿島・安藤特定建設工事共同企業体 工務課長

側面図



断面図

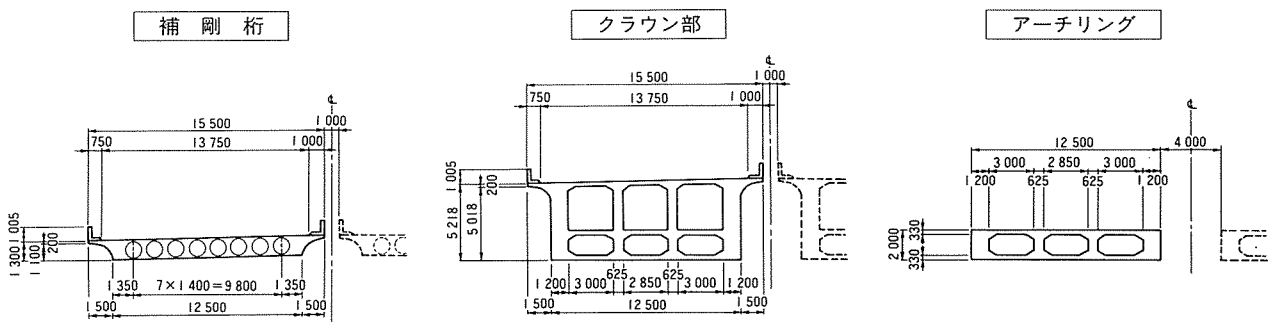


図-3 一般図

を他定式として基礎構造の安定に影響を与えないようにしたことから、アーチリングすべてをピロン工法で施工することが可能となったが、ピロン工法でメラン材を用いず施工することはわが国でも初めてのことである。

本稿では、茶間川橋の詳細設計結果およびアーチリング架設時の計測計画の概要について報告するものである。

2. 工事概要

工事名：茶間川橋上部工工事

路線名：一般国道28号線

(本四道路神戸・鳴門ルート)

工事場所：兵庫県津名郡淡路町岩屋字茶間

工期：平成6年9月1日～平成9年11月30日

活荷重：B活荷重

構造形式：鉄筋コンクリート固定アーチ橋

橋長：148.5 m (上り線), 159.0 m (下り線)

アーチ支間：95.0 m (上り線), 103.0 m (下り線)

有効幅員：13.75 m (上下線とも片側3車線)

架設工法：斜吊材を用いた張出し架設工法(ピロン工法)

主要材料：

コンクリート

アーチリング ($\sigma_{ck}=400 \text{ kgf/cm}^2$) : 4677 m³

補剛桁 ($\sigma_{ck}=350 \text{ kgf/cm}^2$) : 3212 m³

鉛直材他 ($\sigma_{ck}=240 \text{ kgf/cm}^2$) : 2259 m³

鉄筋 (SD 345) : 1193 t

PC鋼材 (SBPR 930/1180 ϕ 32)

アーチリング : 78 t

補剛桁 (一部転用材) : 145 t

斜吊材 (一部転用材) : 280 t

鋼材 (SS 400)

斜吊柱 (上下線転用) : 399 t

3. 施工順序

本橋の施工順序を図-4に示す。

◇設計報告◇

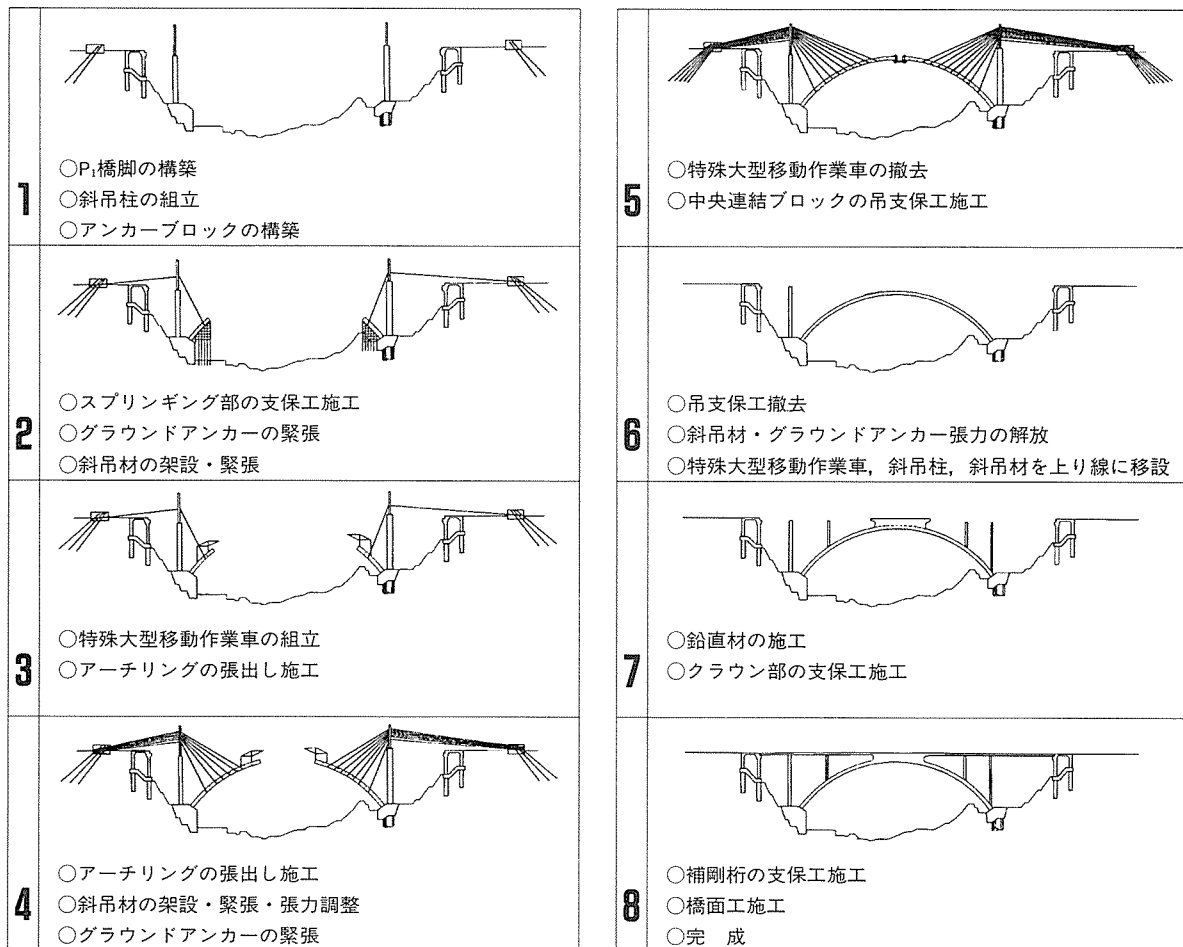


図-4 施工順序図

4. 設計方針および設計条件

4.1 設計方針

本橋の設計における基本方針は下記のとおりである。

- 1) 茶間川橋は、県道バイパスと本四道路上下線の合計3橋のアーチ橋が建設され、架設地点が急峻な谷となっているので、各橋で橋長、アーチ支間が異なるが、景観を考慮してアーチリングの軸線・桁高、橋脚・鉛直材の位置等を一致させる構造とした。
- 2) アーチリングは、アーチリングが閉合するまではPC構造として、閉合後はRC構造として設計した。
- 3) 補剛桁は、支間長が大きい中空スラブ構造であるのでPC構造として、そのPC鋼材にはアーチリングの架設で使用した斜吊材用のPC鋼棒を転用する。
- 4) 斜吊材は、転用する予定であるので、その許容張力は架設時に想定されるすべての荷重が作用しても降伏点を超えないように設定した。
- 5) アーチリングのスプリング、クラウン部については局部応力の影響を検討するためFEM解析を

実施して補強量を決定した。

4.2 設計条件

設計条件で本橋固有のものについてのみ記述する。

風荷重：施工時 風速 40 m/s

支点変位：鉛直方向 AA₁ 0.2 cm
AA₂ 0.4 cm

水平方向 AA₁ 0.3 cm
AA₂ 1.0 cm

温度変化：コンクリート ±10℃
鋼材（斜吊材） ±30℃

地震時慣性力：完成時 $K_h=0.2$
施工時 $K_h=0.1$

施工時荷重：特殊大型移動作業車荷重 $W=255 \text{ tf}$
作業荷重 $w=0.1 \text{ tf/m}^2$

5. 架設時の設計

5.1 概要

架設時の設計は、アーチ橋の全体構造系が完成するまでの施工時の荷重変化や架設時の構造系の変化に対して、アーチリング、鉛直材および補剛桁の応力がどの施工段階でも許容値以内で各部材が安全であることを確認

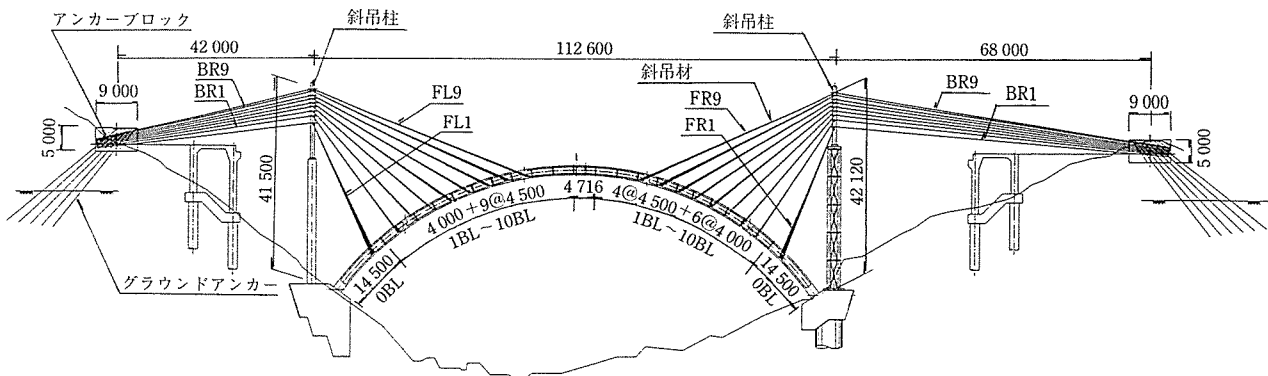


図-5 張出し架設時の構造系

するために実施した。また、アーチリングは、アンバランスな構造系での張出し架設となるので、架設時の構造系を構成する、斜吊材、斜吊柱、アンカーブロック、グラウンドアンカー等の仮設材についても、アーチリング等と同様に、どの施工段階でも所要の許容値以内で十分に安全であることを確認した。

5.2 アーチリング

(1) 断面形状

アーチリングの桁高 2.0 m は、県道バイパスの茶間川橋と外観を一致させることから決定した。また、アーチリングの部材厚を最小にすることから、張出し架設時にアーチリングに生じる引張応力度に対する補強方針を

下記のとおりとした。

- 1) アーチリングに生じる引張応力度に対しては、斜吊材で抵抗させることを基本とする。
- 2) 斜吊材を設置する前の張出し区間に生じる引張応力度については、アーチリング断面内に配置した PC 鋼棒で抵抗させる。

この方針のもとで、斜吊材および断面内の PC 鋼棒の配置を検討した結果、図-6 に示すように以下の部材厚となった。

- 1) アーチリングのスラブ厚 ($t=33$ cm) は、張出し架設時の PC 鋼棒を 1 段配置として、PC 鋼棒定着体と鉄筋の関係から決定した。

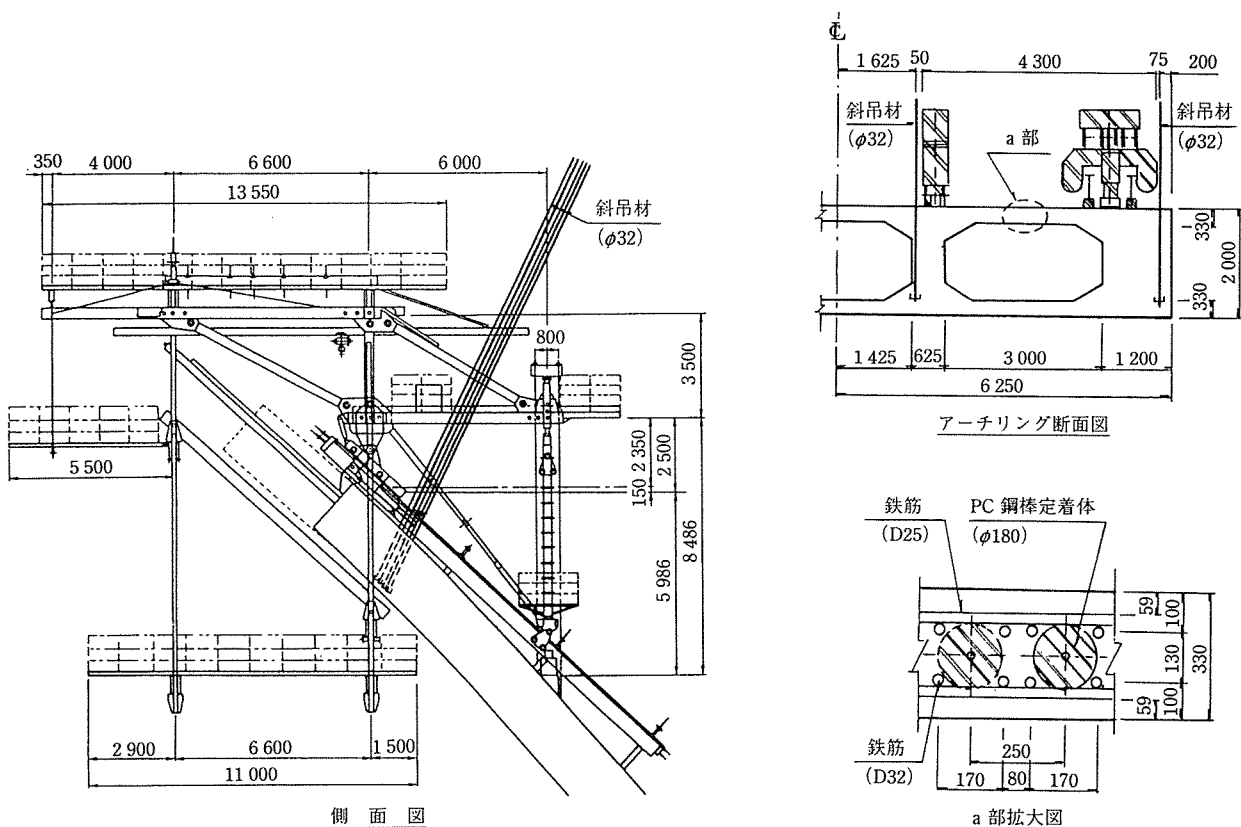


図-6 アーチリング断面形状

表-1 アーチリング許容引張応力度

		従荷重の影響					許容 応力度*5 ②	差 分 ②-①	許容 応力度*6
		プレストレス のロス*1	床版 温度差*2	斜吊材 温度変化*3	斜吊材 緊張誤差*4	合 計 ①			
アーチ スプリング	上縁	-1.2	-3.3	-13.2	-1.4	-19.1	-25.0	-5.9	-5.0
	下縁	0.3	-3.3	-13.2	-1.4	-17.6		-7.4	
一般部	上縁	-3.3	-3.3	-2.3	-3.4	-12.3		-12.7	-10.0
	下縁	0.7	-3.3	-2.3	-3.4	-8.3		-16.7	

注) *1: コンクリートのクリープ乾燥収縮およびPC鋼棒のリラクゼーションを考慮。
 *2: アーチリングのスラブとウェブの温度差5℃を考慮。
 *3: 斜吊材の温度変化±10℃を考慮。
 *4: 斜吊材の緊張誤差±2.5 tf/本を考慮。
 *5: 主荷重および従荷重に対する許容応力度。
 *6: 主荷重のみに対する許容応力度。

2) アーチリングのウェブ厚は、斜吊材と特殊大型移動作業車を側面的に交差させる必要があったので、接触しないように、外ウェブ厚を $t=120$ cm, 内ウェブ厚を $t=62.5$ cm とした。

(2) 許容引張応力度

アーチリングの架設時のコンクリートの許容引張応力度は、架設時の荷重に対して、 $\sigma_{ct}=-25.0$ kgf/cm² とし、設計の簡略化をはかるため、表-1で示すように、施工中に作用する従荷重によるコンクリートの引張応力度をあらかじめ、上記許容値から差し引いて、架設時主荷重に対する許容引張応力度を設定した。

(3) 応力調整

斜吊材の応力調整は、張出し架設時のコンクリート打設、特殊大型移動作業車の前進等の荷重増加に対して、アーチリングの引張応力度を許容値以内となるように実施する。斜吊材の応力調整は、表-2で示すように、以下の考え方で実施することとした。

架設時荷重によって最も上縁引張応力度が厳しくなる位置に着目し、上縁引張応力度を許容値以内にするため、コンクリート打設前に最上段の斜吊材を緊張する。このとき、斜吊材の緊張をコンクリート打設前後の2段階に分けても、スプリング部の下縁引張応力度が許容値を超えるようであれば、最下段の斜吊材の張力を緩めることでスプリング部に下縁圧縮応力度を導入する。

また、斜吊柱に作用する水平力のアンバランス分をできるだけ小さくするため、コンクリート打設および特殊大型移動作業車の前進が終了するごとに釣り合うように応力調整を実施する。

この考え方で、施工各段階での検討を実施した結果、斜吊材の応力調整回数は1本当たり平均4回程度必要となった。アーチリング応力度の推移を図-7に示す。

(4) アーチリング閉合後の検討

アーチリング閉合後は、RC構造として取り扱うの

表-2 応力調整方法

	荷重、曲げモーメント図	応力度(kgf/cm ²)
応力調整		① $\sigma_o=31$ $\sigma_u=-5$
		② $\sigma_o=13$ $\sigma_u=45$
コンクリート打設		① $\sigma_o=8$ $\sigma_u=19$
		② $\sigma_o=-10$ $\sigma_u=70$
応力調整		① $\sigma_o=26$ $\sigma_u=1$
		② $\sigma_o=1$ $\sigma_u=59$
特殊大型移動作業車前進		① $\sigma_o=21$ $\sigma_u=6$
		② $\sigma_o=-10$ $\sigma_u=70$

注) σ_o : アーチリング上縁応力度
 σ_u : アーチリング下縁応力度

で、クラウン部・鉛直材・補剛桁の施工順序については、アーチリングに耐久性の観点から有害なひび割れが生じることを避けるため、鉄筋の引張応力度が1000 kgf/m²程度以下となるようにそれらの施工順序を決定した。その結果を図-8に示す。

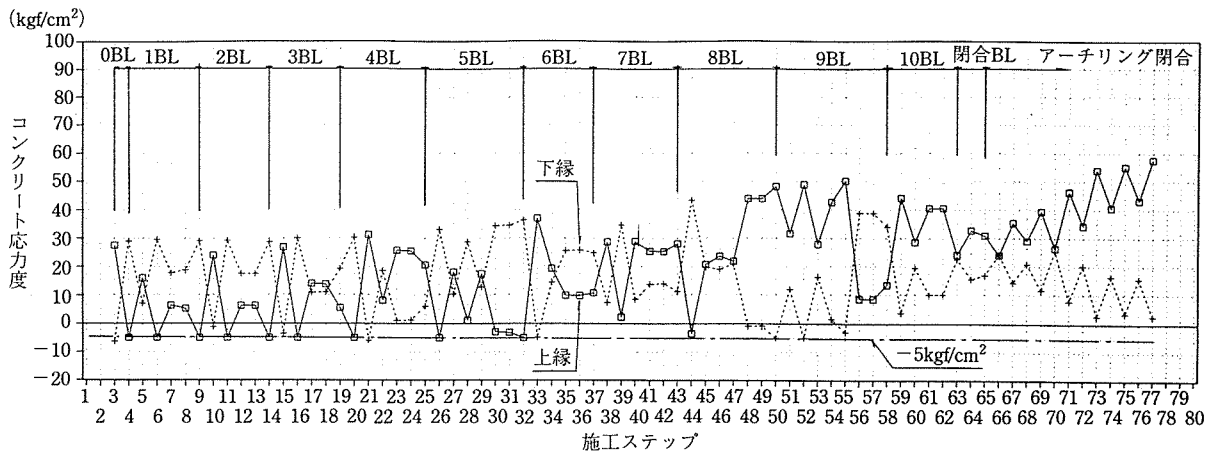


図-7 アーチリング応力度の推移 (アーチスプリング)

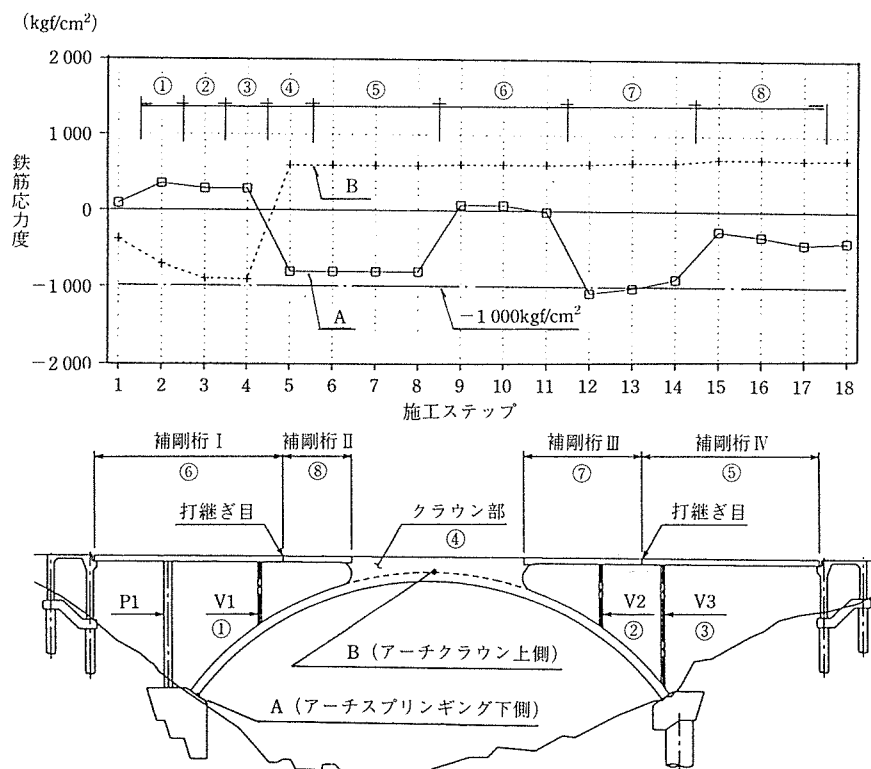


図-8 アーチリング鉄筋応力度の推移

5.3 グラウンドアンカー

グラウンドアンカーは、張出し架設中のアーチリング自重等を斜吊材を介して最終的に支持し、架設時の構造系の生命線とも言える重要な構造物である。したがって、設計にあたっては、グラウンドアンカー1本ごとの引抜きやアンカーブロックの滑動（グラウンドアンカー全体の引抜き）に対し、十分な安全性を確保するよう以下のように対処した。

1) 詳細設計に先立ち、ボーリング調査およびグラウンドアンカーの引抜き試験を実施して、定着地盤の位置および地山とアンカー体との付着強度（周面摩擦抵抗値）を確認した。

2) 常に斜吊材（荷重側）による水平力よりもグラウンドアンカー（抵抗側）の水平力が大きくなるように張力管理を行うこととし、グラウンドアンカーの緊張は、アーチリング張出し架設の進捗に合わせて、18本のグラウンドアンカーを4段階に分けて実施することとした。

3) アンカーブロックの滑動に対して、斜吊材張力、グラウンドアンカー張力、アンカーブロック自重などを考慮して安全率を1.5以上とるようにした。

4) 緊張材は、再緊張が可能なこと、および使用期間が1年の長期にわたるため自由長部の防食を考慮し、ナット定着で2重防食タイプのものを使用し

◇設計報告◇

た。定着長の決定にあたっては、引抜きに対する安全性を高めるため、永久アンカーとしての安全率を採用した。

- 5) 施工中にグラウンドアンカー張力、アンカーブロックの変位に異常が生じた場合に備え、グラウンドアンカーを増設できるようにアンカーブロックに予備のダクトを設けることとした。

表-3 グラウンドアンカー諸元

tendon	呼名 設計アンカー張力	SEEE F 230 U 0.6 P _u =139.1 tf
アンカー	アンカー体径 定着地盤 周囲摩擦抵抗 定着長の安全率	d _A =13.5 cm 中風化岩 τ=10 kgf/cm ² F=2.5 以上
グラウト	設計基準強度 許容着床応力度	σ _{ck} =300 kgf/cm ² τ _u =9 kgf/cm ²

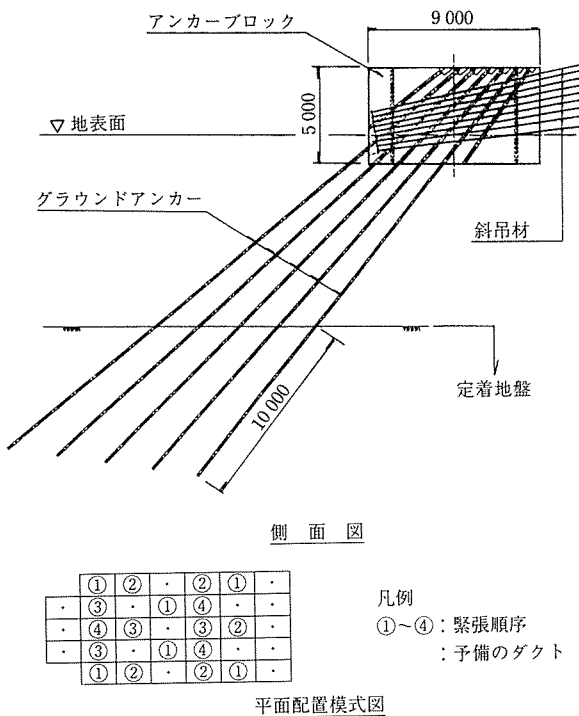
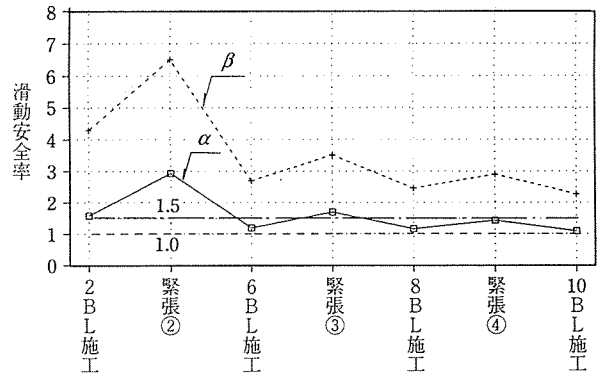


図-9 グラウンドアンカー配置図



滑動に対する照査式：

$$\alpha = \frac{(\text{グラウンドアンカー張力の水平成分})}{(\text{斜吊材張力の水平成分})} > 1.0$$

$$\beta = \alpha + \frac{(\text{鉛直力の和}) \times (\text{摩擦係数})}{(\text{斜吊材張力の水平成分})} > 1.5$$

図-10 滑動安全率の推移

5.4 斜吊材

斜吊材は、アーチリング閉合後に、上り線の斜吊材あるいは補剛桁に転用することを考慮して、SBPR 930/1180 φ32 mm の PC 鋼棒を使用し、下記のとおり許容張力および仕様を決定した。

- 1) 斜吊材の許容張力は、張出し架設時に想定されるすべての荷重が作用した場合でも降伏させないことを条件として、表-4 に示すように、風荷重、温度

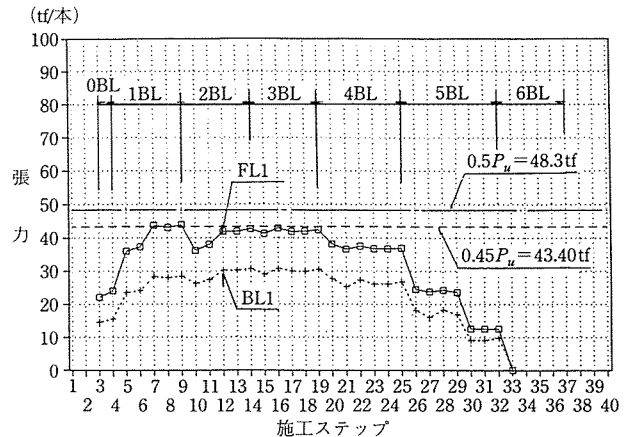


図-11 斜吊材張力の推移

表-4 斜吊材の許容張力

	従荷重の影響				合計 ①	許容張力*5 ②	差分 ②-①	許容張力*6
	風荷重*1	温度変化*2	サグ*3	緊張誤差*4				
FL 1	3.8	6.5	2.6		15.4	0.85 P _y	49.5	0.50 P _u
FL 5	4.1	5.2	3.1	2.5	14.9	64.9	50.1	48.3
FL 9	5.1	5.6	5.0		18.2		46.8	
BL 1	6.0	6.7	7.0		22.2	0.85 P _y	42.8	0.45 P _u
BL 5	6.0	3.9	7.0	2.5	10.4	64.9	45.6	43.4
BL 9	6.0	2.8	6.9		18.2		46.7	

注) *1: 静的風圧および風による振動を考慮。
*2: 斜吊材の温度降下 -30℃を考慮。
*3: サグにより生じる定着部の曲げ応力度を考慮。

*4: 斜吊材の緊張誤差 ±2.5 tf/本を考慮。
*5: 主荷重および従荷重に対する許容張力。
*6: 主荷重のみに対する許容張力。

変化、サグの影響、緊張誤差の影響を考慮して、架設時主荷重の許容張力を設定した。

- 2) 直射日光（温度変化）の影響による張力変動を軽減するため、斜吊材表面に断熱材（ $t=10$ mm）被覆を行うこととした。
- 3) 施工中の防錆、および補剛桁に転用するさいのグラウトとの付着を考慮して斜吊材表面に有機ジンクリッチプライマーによる塗装を行うこととした。

5.4 斜吊柱

斜吊柱は、H形鋼（H-900）を主部材とし、各斜吊材の定着部には鋼板を組み合わせた台形断面の梁を用いて

表-5 斜吊柱の座屈モード

構造のモデル化		
座屈荷重の比較		
座屈モードの比較	<p>回転：自由 水平変位：自由</p> <p>有効座屈長$=\beta_L=2.1L$</p>	<p>回転：自由 水平変位：固定</p> <p>有効座屈長$=\beta_L=0.8L$</p>
備考	—	採用

いる。設計にあたっては、立体骨組み解析により断面力を算出し各部材の応力度を照査した。

特に柱部材の許容軸圧縮応力度の設定にあたっては、斜吊柱の全体座屈に対する安全性を確保することに留意し、表-5 に示す検討に基づいて、斜吊材による斜吊柱上部の水平方向への変位の拘束効果を評価したうえで、有効座屈長を算出した。

6. 完成時の設計

6.1 概要

張出し架設工法で施工されるコンクリート橋の設計にあたっては、その施工順序を考慮する必要がある。これは、架設時と完成時において構造系が異なるため、コンクリートのクリープによる不静定力が発生するためである。したがって、茶間川橋のアーチリング、鉛直材および補剛桁とも、この影響を考慮した断面力で各部材の応力度の検討を実施した。

6.2 アーチリング

完成時のアーチリングは、架設時の PC 鋼棒のプレストレスを考慮した RC 構造として設計した。

アーチリングの断面力図を図-12 に、主要断面の応力度を表-6 に示す。

6.3 補剛桁

補剛桁は、鉛直材位置を県道バイパス茶間川橋に一致させたことにより、非常に不等支間でかつ支間長が大き

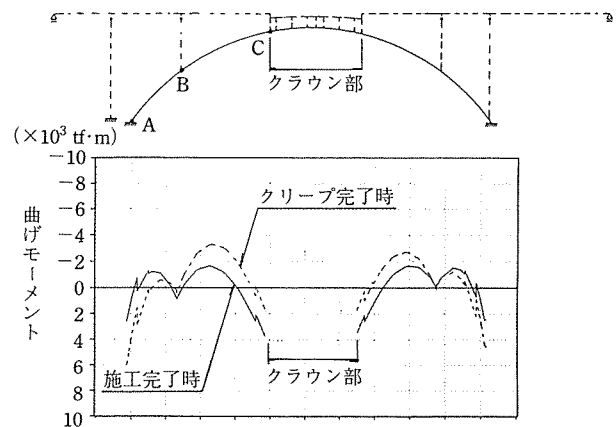


図-12 アーチリングの断面力図

表-6 アーチリング主要断面の応力度

	許容応力度		A 断面		B 断面		C 断面	
	σ_{ca}	σ_{sa}	σ_c	σ_s	σ_c	σ_s	σ_c	σ_s
① 死荷重作用時（クリープ完了時）	140	-1800	65	239	67	645	78	0
② ①+活荷重 (M_{max})			79	91	77	514	96	-305
③ ①+活荷重 (M_{min})			55	421	64	743	74	84
④ ①+地震荷重 (→)	210	-3000	78	-142	82	231	80	-246
⑤ ①+地震荷重 (←)			152	-1417	72	788	77	149

注) σ_c : コンクリート応力度, σ_s : 鉄筋応力度, 圧縮を正とする。

表-7 補剛桁主要断面の応力度

(kgf/cm²)

	許容応力度		支 点 上			支 間 中 央			備 考
	圧 縮	引 張	A断面	C断面	E断面	B断面	D断面	F断面	
上 縁	125.0	0.0	10.5	8.5	35.1	60.9	78.2	110.7	死荷重作用時（クリープ完了時）+活荷重時
下 縁	125.0	-13.0	84.7	99.8	102.6	36.4	-2.4	-8.7	

注) 圧縮を正とする。

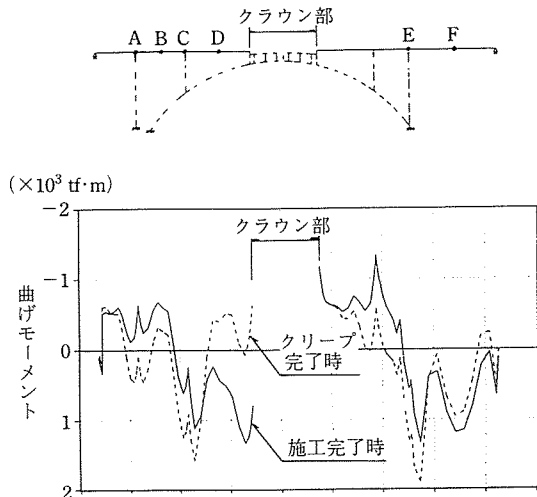


図-13 補剛桁の断面力図

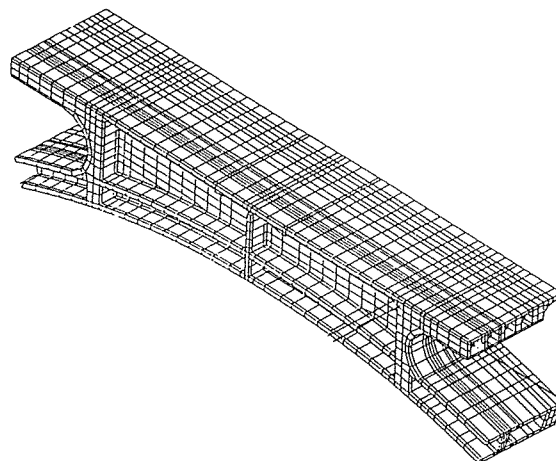


図-14 クラウン部解析モデル図

い中空スラブ構造であるのでPC構造とした。PC鋼材としては、アーチリングの架設で使用した斜吊材用のPC鋼棒を転用することとした。

PC鋼棒の配置上の特徴は下記のとおりである。

- 1) アバットが先行施工されているので、PC鋼棒の緊張は片引きとなるため、打継ぎ部で緊張した後PC鋼棒を接続する構造として、摩擦による緊張力のロスを軽減した。
- 2) 補剛桁のクラウン側桁端部に緊張端をすべて配置すると、クラウン部に引張応力が生じるため、PC鋼棒のうち約半数をクラウン部中央側に延長し、左右岸のPC鋼棒を交差定着する配置とした。

補剛桁の断面力図を図-13に、主要断面の応力度を表-7に示す。

6.4 局部応力解析

(1) 目 的

本橋のスプリング部およびクラウン部等の断面急変部の応力状態は、骨組解析では評価できないためFEM解析を実施し、必要に応じて補強を行った。

(2) 解析モデル

解析モデルはソリッド要素により構成した図-14に示す立体モデルとし、構造物の橋軸回りのねじりモーメントの影響は小さいと考え半橋モデルとした。

(3) 解析結果

FEM解析結果の要点は下記のとおりである。

- 1) クラウン部のウェブ・床版の橋軸方向の応力は、

平面骨組み解析結果に近いものであったが、横桁については、図-15に示す曲げ応力が生じるため、鉄筋による補強を行った。

- 2) 補剛桁からクラウン部に延長して配置されるPC鋼棒定着部付近については、PC鋼棒が水平方向に曲げ配置されている影響により、図-16に示す引張応力が生じるため、鉄筋による補強を行った。
- 3) スプリング部のアーチリングからアーチア

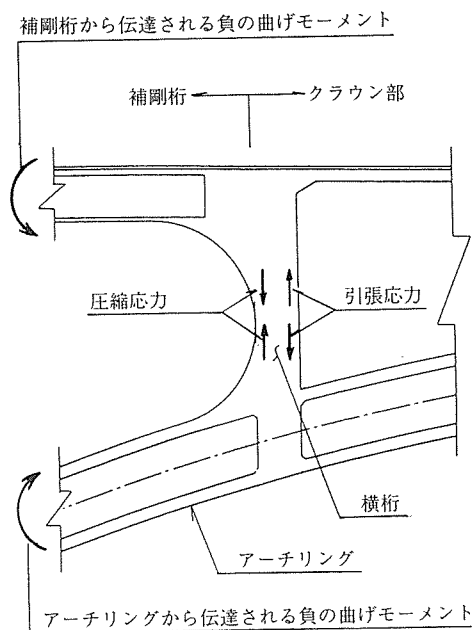


図-15 クラウン部横桁局部応力概念図

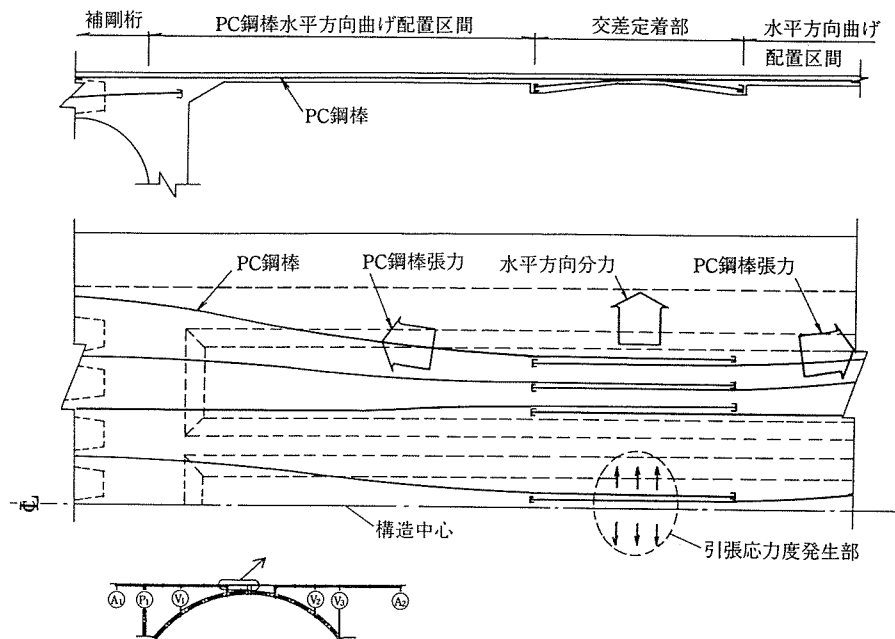


図-16 クラウン部床版局部応力概念図

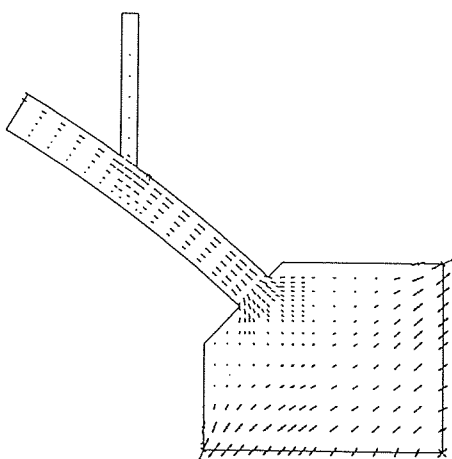


図-17 スプリング部主応力分布

バットへの応力伝達は図-17に示すとおり、際立った応力集中が見られず、円滑であることを確認できた。

7. 計測計画

7.1 計測目的

ピロン工法でアーチリングを施工する場合の、計測による施工管理上のポイントは下記のとおりである。

- 1) 張出し架設中に作用する荷重はすべて、斜吊材を介して斜吊柱およびグラウンドアンカーで支持する構造となっているため、斜吊柱の座屈やグラウンドアンカーの引抜き等が生じた場合、構造系全体の破壊に至る危険性がある。
- 2) 各施工段階ごとに、架設時の構造系を構成する各部材の応力度、変位が逐次変化するため、これらの

推移を正確に把握し、アーチリングにひび割れを生じさせないように応力度を制御したうえで、所定の施工精度を確保する必要がある。

このため、計測により各部材の挙動を把握し設計値と対比したうえで、安全性を確認しながら施工を進める必要がある。

7.2 計測項目と管理方法

計測項目、計測機器およびその台数は、表-8に示すとおりである。計測システムとしては、アンカーブロックの変位などを常時観測する必要があるため、2時間ごとに自動計測を行うこととした。

施工中の安全性を判断するための計測値の解析・検討にあたっては、安全管理値および管理基準値を設けて、計測管理を進めることとした。

1) 安全管理値

安全管理値は、各部材の設計上の許容値で、施工中の安全性を確保するためにこの値を超えてはいけない管理値である。

2) 管理基準値

管理基準値は、斜吊材の緊張誤差や計測誤差等の設計上考慮しているバラツキの範囲を設計値に考慮

表-8 計測項目および計測機器

計測項目	計測機器	数量
グラウンドアンカー張力	センターホール型荷重計	10台
アンカーブロック水平変位	ワイヤー式変位計	4台
斜吊材張力	センターホール型荷重計	32台
アーチリング応力度	有効応力計	20台
斜吊柱応力度	ひずみゲージ	8枚
斜吊柱傾斜	据置型傾斜計	5台
温度	熱電対	16台

表-9 安全管理値および管理基準値

計測項目	安全管理値とその背景	管理基準値とその背景
グラウンドアンカー張力	$139.1 \text{ tf} \leq P \leq 145.0 \text{ tf/本}$ 下限値として設計アンカー張力を、上限値として tendon とグラウトの付着から決まる許容値の 95% の値を採用。	-
アンカーブロック水平変位	$\delta \leq 0$ (斜吊材側への変位を正とする) 水平方向の力の釣り合いに対する設計思想(斜吊材側よりもグラウンドアンカー側を大きくする)を反映。	-
斜吊材張力	$P \leq 64.9 \text{ tf/本} (0.85 p_y)$ 架設時の荷重に対する許容値。	設計値 $\pm 2.5 \text{ tf/本}$ 設計上考慮している緊張誤差。
アーチリング応力度	$\sigma_t \geq -25 \text{ kgf/cm}^2$ 架設時の荷重に対する許容値。	設計値 $\pm 10 \text{ kgf/cm}^2$ 斜吊材の緊張誤差およびアーチリング断面諸値の設計と実構造との違いを考慮。
斜吊柱応力度	$\alpha = f(\sigma_c, \sigma_b) \leq 1.25$ 架設時の荷重に対する許容値。	設計値 $\pm 45 \text{ kgf/cm}^2$ 斜吊材の緊張誤差および計測誤差を考慮。

した値で、計測値がこの範囲で推移すれば、ほぼ設計と整合していると判断するための基準値である。

計測値を検討した結果、管理基準値を超えた場合、超えなくとも異常の傾向が認められる場合には速やかに原因を究明し対策を実施することとする。

なお、施工中に生じる温度変化の影響を考慮し、上記の管理の実施にあたっては、基準温度を 20°C として温度補正を行うこととする。

8. あとがき

平成 8 年 5 月現在、本橋の下り線はアーチリングが閉合し、引き続き鉛直材、クラウン部・補剛桁の支保工施工を進めていくところである。上り線はアーチリングの張出し架設に取りかかるところで、最盛期は平成 8 年の夏から冬にかけてとなる。

本稿では、茶間川橋の詳細設計結果と計測計画の概要について報告したが、施工結果についても本誌で報告したいと考えている。

【1996 年 6 月 10 日受付】