

(102) 外ケーブルによるRC中空床版橋の補強 (東名高速道路小柳津高架橋)<sup>おやいづ</sup>

日本道路公団東京第一管理局	西 浩嗣
日本道路公団静岡管理事務所	久保 真一
日本道路公団東京第一管理局	長田 光司
㈱ビー・エス東京支店	正会員 ○服部 政昭

1. はじめに

小柳津高架橋補強工事は、東名高速道路焼津～吉田間に架かる小柳津高架橋のうち、RC3径間連続中空床版橋について、B活荷重に対応させるために外ケーブルによる主版補強を行ったものである。

昭和44年に竣工した本橋は、活荷重としてTL-20を用いて設計されているので、B活荷重増荷に対して照査した結果、補強の必要が生じた。RC中空床版に対して、交通規制等を最小限にする主版補強方法として、公団としては初めての外ケーブルによる工法とした。主版補強は曲げモーメントに対して行い、せん断については補強前後の照査のみを行った。なお、設計施工法の妥当性を確認するため補強効果確認試験を行った。

2. 工事概要

工事名	東名高速道路小柳津高架橋補強工事	橋長	51.9 m (支間 : 16.95+17.30+16.95)
工事内容	外ケーブル補強工 (床版下面補修工)	幅員	全幅員 12.750 m, 有効幅員 10.950 m
橋種	鉄筋コンクリート道路橋	活荷重	B活荷重 (← TL-20)
構造形式	3径間連続中空床版橋	工期	平成7年3月～平成8年3月

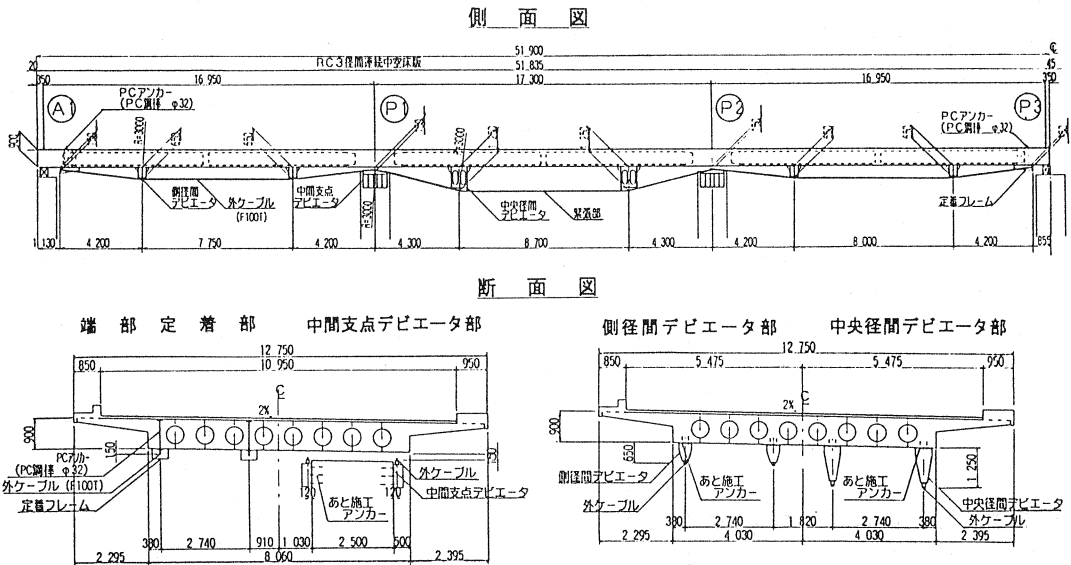


図-1 小柳津高架橋補強構造図

3. 主版の補強設計

本橋は、活荷重としてTL-20を用いて設計されているので、現況断面に現行のB活荷重を作用させた場合の応力度等を計算、安全性を照査し補強の必要性を判断する (B活荷重照査)。このB活荷重照査結果に基づき、外ケーブルによる補強工法を検討した。主版補強は曲げモーメントに対して行った。改良後断面

として、将来計画の壁高欄・遮音壁の設置および上面増厚(張出し床版補強)を荷重増分として考慮した。

- ・ B活荷重照査：[現況断面] [B活荷重載荷]
- ・ 補強設計：[現況断面] [B活荷重載荷] + [外ケーブル補強]
- ：[改良後断面] [B活荷重載荷] + [外ケーブル補強]

死荷重および活荷重による断面力の算出は、オルゼンの版理論によった。コンクリートおよび鉄筋の応力度については、抵抗断面は現況桁高とし、各(仮想)分割主桁について単鉄筋断面として計算した。

### 3.1 外ケーブルによる断面力

#### (1) 外ケーブル配置

外ケーブルはSEE工法タイプ(F100T)4本を使用し、その配置を図-1に示す。鋼製定着フレームはPC鋼棒により端支点の主版下面に、鋼製デビエータはあと施工アンカーにより径間部の主版下面と橋脚側面に設置し、外ケーブルは引き寄せ型ジャッキにより中央で緊張・カップリングするものとした。

#### (2) 外ケーブルの有効引張力

有効引張力の計算では、①初期導入緊張力は、 $0.6Pu$ とした。②外ケーブルの緊張による主版の弾性変形の影響は無視した(主版断面に比し外ケーブル鋼材量は小)。③摩擦の影響は角変化のみとし、 $\mu=0.15$ (摩擦軽減対策：デビエータ部での接触はナイロン樹脂とテフロン)、 $\lambda=0$ とした。ただし、デビエータ部材の設計では $\mu=0.30$ の場合についても検討した。④コンクリートのクリープおよび乾燥収縮によるPC鋼材引張力の減少は考慮しない(建設後30年近く経過)。したがって、⑤引張力の減少は摩擦とPC鋼材のリラクゼーションによるものだけとした。

#### (3) 断面力

外ケーブルによる断面力は、デビエータおよび定着部に作用する外ケーブルの引張力を構造物軸線に作用する外力として3径間連続梁に載荷(換算外力載荷法)して求めた。換算外力のうち、水平力はその影響が小さいので無視した。また、デビエータ部で主版に伝達される曲げモーメントは、デビエータがあと施工アンカーで主版に接合されるため、伝達が不十分でかつ主版への影響も小さいので、これを無視した。したがって、計算に考慮する換算外力は、①鉛直力、②定着フレームによって伝達される曲げモーメント、とした(図-2)。

緊張時のデビエータ部での摩擦により外ケーブルの緊張端と固定端では張力差が生じる。本橋ではデビエータ部での摩擦軽減対策をとるので、この張力差は時間とともに活荷重や橋梁の振動等により減少し張力は均等化する可能性がある。このため、張力が均等化した場合の主版の応力状態も検討した。

### 3.2 断面力の集計および主版の曲げ応力度

主版全体の曲げモーメントを図-3に示す。また、各施工段階の(仮想)分割主桁1のコンクリートおよび鉄筋の応力度を図-4に示す。このように、外ケーブル補強により主版の曲げモーメントが軽減され、主版の応力度も緩和される。

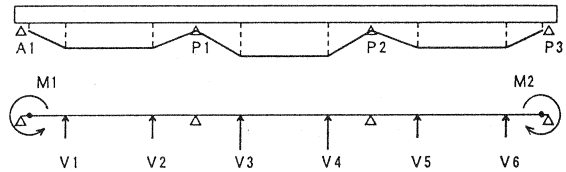


図-2 換算外力

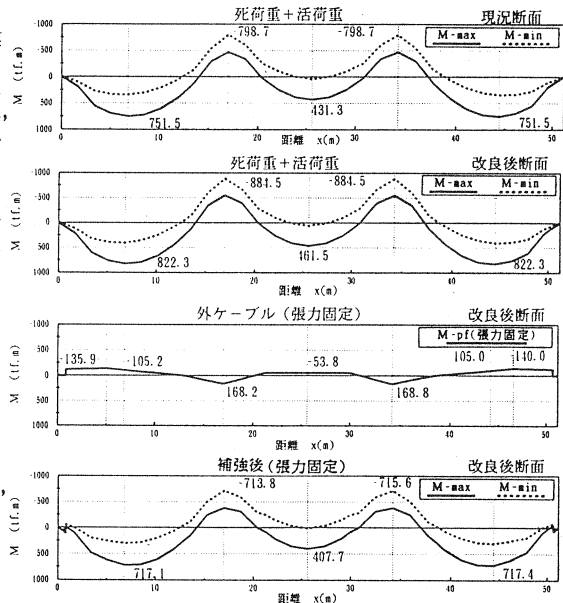


図-3 主版曲げモーメント

### 3.3 曲げ破壊安全度の検討

曲げ破壊安全度の計算では、外ケーブルによる作用を外力扱いし、外ケーブルの有効プレストレス力(張力変化やアーム長の変化は無視)を終局荷重用作用時の荷重側に入れ、抵抗側は鉄筋を引張抵抗材として鉄筋コンクリート部材の破壊抵抗モーメントを求め、両者を比較した。

## 4. 外ケーブル定着部および偏向部の設計

### 4.1 定着部

外ケーブル定着部は鋼製フレームとし、施工性、摩擦接合の有効性から、外ケーブル固定端に1個の設置とした。既設主版への固定は、1箇所4本のPC鋼棒(SBPR 930/1180,  $\phi 32$ )による摩擦接合とし、設計値は、①摩擦係数： $\mu = 0.5$ (鋼とコンクリート)、②滑動に対する安全率： $F = 2.0$ とした。

定着フレームベースプレートと主版の間には、間詰材(速硬性セメントグラウト：厚さ5mm)を注入するものとした。

接合用PC鋼棒長は極端に短い(≒1m)ために、緊張後の引張力低下が心配されたので、外ケーブル緊張直前に再緊張を行い所定の張力を確保するものとした。

定着部付近の応力解析(2次元FEM)を行った結果、外ケーブル定着フレーム前面には大きな引張力が作用するので、鋼板接着工法により補強した。

### 4.2 偏向部

デビエータは鋼製とし、外ケーブルと接する曲線形状部分には、摩擦軽減を図りナイロン樹脂(切削加工)を用いた。ナイロンとの摩擦面にはスライドパイプ(テフロン塗装)を用いた。

デビエータは、①中間支点(橋脚取付)デビエータ、②中央径間デビエータ(主版下面取付)、③側径間デビエータ(主版下面取付)、の3種類とし、あと施工アンカーにより固定した。

あと施工アンカーは、接着系(ポリエステル系樹脂)を用い、設計耐力は「あと施工アンカー定着強度確認試験：引張およびせん断破壊試験、長期引張載荷試験(3ヶ月)」を行い、既往の算定式を参考に定めた。

## 5. 施工

施工手順を図-5に示す。

### 5.1 外ケーブル定着部および偏向部

定着フレーム固定のための主版穿孔とPC鋼棒設置は、秋期集中工事期間に車線規制(24時間・2回)を行って施工した。

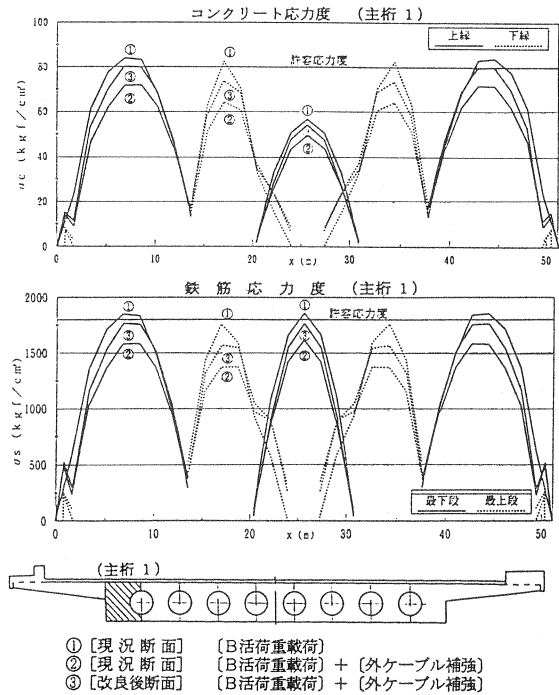


図-4 分割主桁のコンクリート・鉄筋応力度

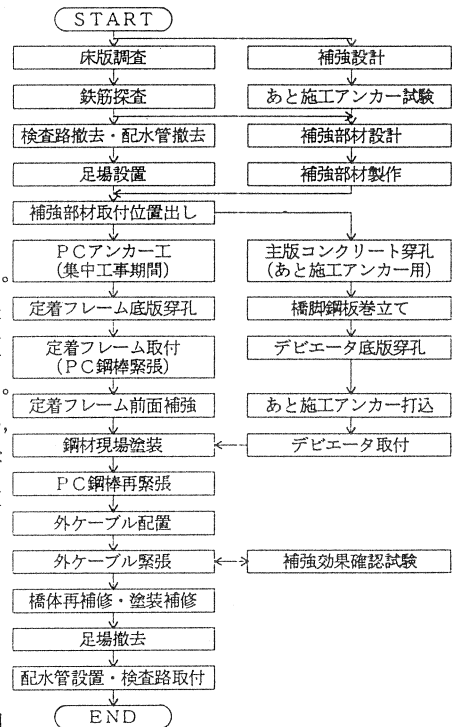


図-5 外ケーブル補強施工手順

### 5.2 外ケーブルの緊張

偏向部の角変化の摩擦係数 $\mu$ による変動は小さいので、緊張管理は圧力計の示度とPC鋼棒の伸び量により行った。緊張は、引き寄せ型緊張ジャッキを使用して中央で緊張・カップリングした(写真-1)。

### 5.3 橋脚の鋼板巻立てで補強

本橋では、中間支点デビエータは橋脚に設置されるため、後に予定される固定橋脚のRC巻立てで補強に支障をきたすことが予想されたので、橋脚上部に鋼板巻立てを行った後にデビエータを取り付けた。

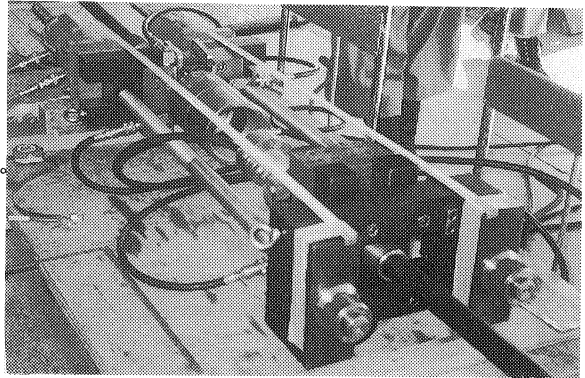


写真-1 外ケーブル引き寄せ緊張

## 6. 補強効果確認試験

試験では、外ケーブル緊張時による主版各部および補強部材(定着フレーム、デビエータ)の挙動を計測し、構造解析の妥当性、補強効果および各部の安全性を確認するとともに今後の補強設計および維持管理に必要なデータを得るものとした(表-1)。

計測結果の解析では、以下の点について特別に考慮した。①ひずみ・変位等は温度の日変化による影響が大きいので、補強効果および安全性の確認に対する解析は、主として経時変化に温度変化の影響を加味して行い、外ケーブル緊張時の挙動を参考した。②外ケーブル緊張時の静的測定は、努めて大型車両通行の影響のない時に行ったが、完全に通行車両の影響を排除出来たとはいえない。③経時変化の測定は、静ひずみ測定器によるインターバル測定としたので測定値には通行車両の影響が含まれている。

### 6.1 試験緊張時の外ケーブル張力

緊張端張力 $P_o$ と固定端張力 $P_f$ の測定結果と見かけの摩擦係数 $\hat{\mu}$ の計算結果を表-2に示す。

この結果より、外ケーブルの見かけの摩擦係数 $\hat{\mu}$ の設計値0.15は妥当であると判断できる。さらに、デビエータ鋼材部本体の取付精度および偏向部のナイロン樹脂の取付精度、加工形状を改善して平面線形上(ケーブル側面)の接触をスムーズにすれば摩擦係数のバラツキは小さくできると思われる。

外ケーブル偏向部は図-6の構造であるが、滑动面は①または②であることが確認された。このことから、①テフロンとナイロン間、②テフロンとポリエチレン被覆材間、の摩擦係数はほぼ等しいと考えられる。

### 6.2 主版変位およびひずみ

主版のたわみ(側径間中央部)、コンクリートひずみ(中間支点部主版下面)および主鉄筋ひずみ(支間中央部)の経時変化測定結果の一部

表-1 補強効果確認試験(項目・目的)

外ケーブル補強設計方法の妥当性と補強効果の確認	
試験緊張時の外ケーブル張力	摩擦係数の評価
主版の変位: 支点変位 主版たわみ	構造モデルの妥当性 補強効果確認
主版鉄筋・コンクリートひずみ	補強効果確認
主版の振動特性	補強効果確認
外ケーブルの振動特性	張力減少および均等化 主版との共振の可能性
各部、主として補強部材の安全性の確認	
定着フレーム鋼材ひずみ	補強部材の安全性確認
デビエータ鋼材ひずみ	補強部材の安全性確認
定着フレーム周辺鋼材ひずみ	補強部材の安全性確認
定着フレーム周辺 コンクリートひずみ	主版の安全性の確認 (定着フレーム付近)
維持管理に利用できるデータの把握	
主版の振動特性	主版剛性の変化(低下)
外ケーブルの振動特性 (張力推定)	張力減少および均等化 (振動の弦長)

表-2 見かけの摩擦係数 $\hat{\mu}$

ケーブル番号	緊張端 $P_o$ (tf)	固定端 $P_f$ (tf)	角変化 $\alpha$ (rad)	摩擦係数 $\mu$	
C2	(A1)	47.8	44.7	0.8564	0.078
	(P3)	47.8	42.6	0.8564	0.134
C3	(A1)	54.8	48.3	0.8564	0.147
	(P3)	54.8	50.4	0.8564	0.098
C1	(A1)	54.8	47.1	0.8564	0.177
	(P3)	54.8	46.5	0.8564	0.192
C4	(A1)	54.8	48.9	0.8564	0.133
	(P3)	54.8	48.8	0.8564	0.135
平均				$\mu =$	0.137
標準偏差				$\sigma =$	0.037

$$\mu = 1/\alpha \cdot \ln(P_o/P_f)$$

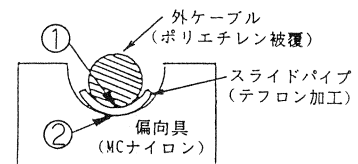
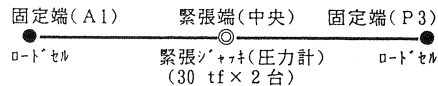


図-6 偏向部断面

を温度とともに、図-7に示す。

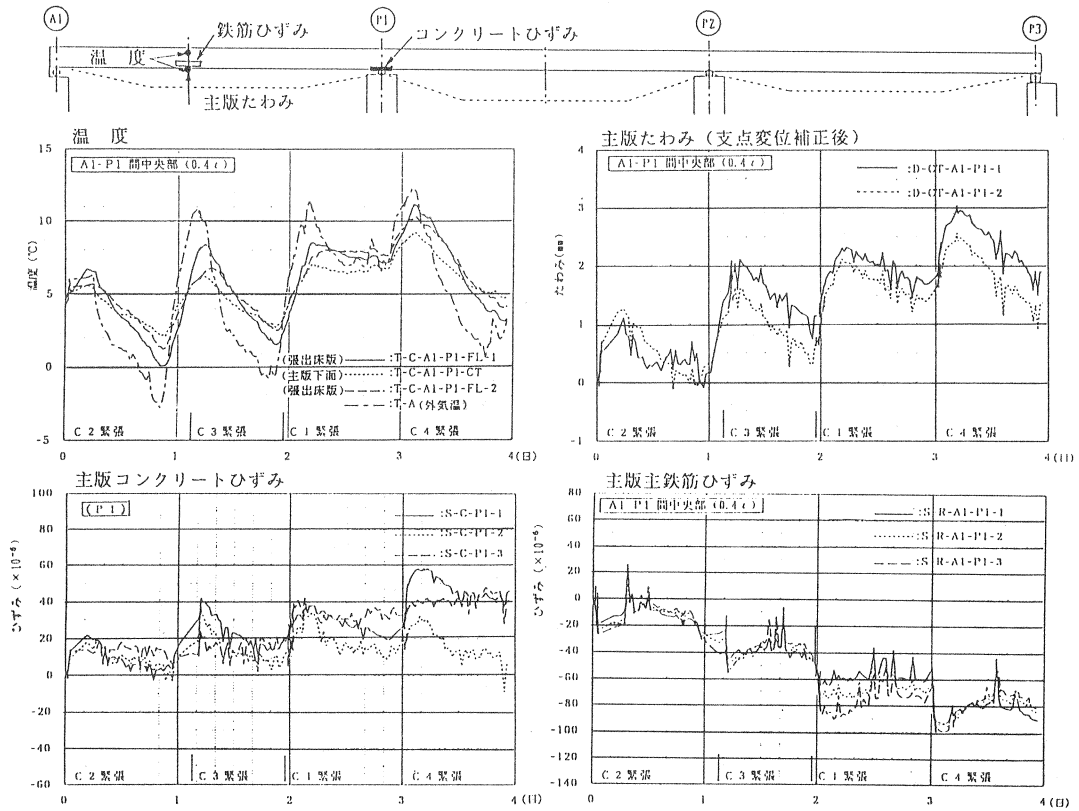


図-7 温度、主版変位および主版コンクリート・主鉄筋ひずみ

(1) 主版支点鉛直変位

主版の支点鉛直変位は、緊張時にはほとんど生じない。経時変化では、①端支点 (A1) の鉛直変位は、ほとんど無い。②中間支点も変化は小さい (P1: 0.2~0.8 mm, P2: 0~0.2 mm)。このことから、構造解析において中間支点では自重の作用により主版は上方にも拘束されており、外ケーブルによる上向き力に対しても連続梁として作用するという構造モデルも妥当であると考えられる。

(2) 主版たわみ

外ケーブル緊張時の主版側径間中央部 (A1-P1: 0.4l) の鉛直変位 (たわみ) を図-8に示す。

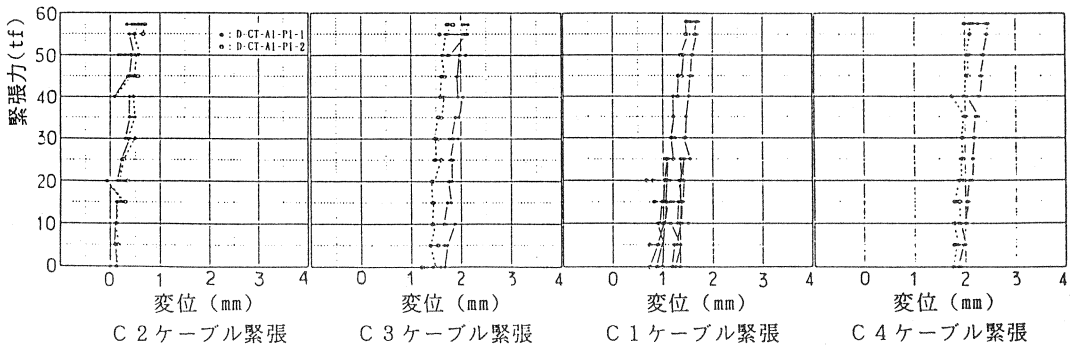


図-8 外ケーブル緊張時の鉛直変位 (A1-P1側径間中央部: 0.4l)

主版の側径間中央部のたわみ(支点変位補正後)の経時変化(図-7)と合わせて評価すると、①たわみは外ケーブル1本の緊張により、0.5mm程度減少している。②経時変化から温度変化の影響(断面内の温度差による断面力等)を控除すると外ケーブルの緊張により、たわみは2.0~2.5mm減少している。

たわみの実測値は、全断面有効(ひびわれによる剛性低下、地覆等の影響は考慮しない。両者は相殺傾向)とした計算値に近い(図-9)。

(3)主版コンクリートおよび鉄筋のひずみ  
ひずみは温度補正しているが、この補正したひずみには主版各部の温度変化による影響(断面内の温度差による断面力等)が含まれている。

外ケーブル緊張時のひずみと経時変化から評価した外ケーブルの緊張によるひずみの概略値を計算値と比較して表-3に示す。この結果より、①支間中央部のひずみの実測値はRC計算と全断面有効計算の間で

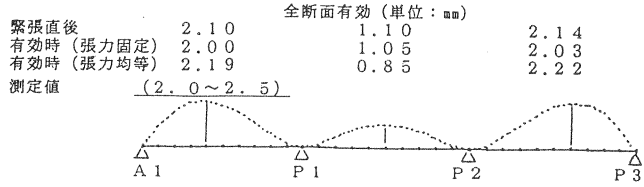


図-9 外ケーブル緊張によるたわみの計算値との比較

表-3 外ケーブル緊張による主版ひずみの計算値との比較

断面 No.	側径間中央部		中間支点部		中央径間中央部		
	$\epsilon_c$	$\epsilon_s$	$\epsilon_c$	$\epsilon_s$	$\epsilon_c$	$\epsilon_s$	
計	RC計算(n=15)	87	-119	122	-161	48	-92
算	RC計算(n=8.4)	57	-115	82	-155	32	-90
値	全断面有効計算	40	-33	54	-43	21	-19
測定値	—	A1-P1 (-90)	P1 (+40)	—	—	P1-P2 (-55)	—
	—	P2-P3 (-90)	P2 (+40)	—	—	—	—

(コンクリート:  $\epsilon_c$ , 鉄筋:  $\epsilon_s$ , 引張ひずみ: +, 圧縮ひずみ: -, 単位:  $\times 10^{-4}$ )

ある。②中間支点上の計算値は、曲げモーメントの低減をしていないのでひずみを大きく評価した値となる。

主版変位の測定結果と合わせて評価すると、主版全体に対する外ケーブルの外力としての作用は設計計算に近いと思われる。

### 6.3 補強部材のひずみ

定着フレームとその周辺のひずみの測定結果より、①定着フレームの支圧板を支持するフランジプレート(500×284×50mm)には、大きな応力が生じている(実測値:1550~1650 kgf/cm<sup>2</sup>, 設計値:1503, 許容値:1900)。②定着部前面の引張力に対する鋼板接着工法による補強は、ある程度有効である。③定着フレームおよびデビエータは、全体および部分的な剛性、アンカーの配置等を考慮して設計したので、実測値も設計計算上も大きな応力(ひずみ)は生じていない。

### 6.4 振動試験

振動試験により、主版と外ケーブルの共振の可能性はないことを確認した。

主版の振動特性(固有振動数)からは、剛性増加等の補強効果はその傾向はわずかに認められるものの、明確には確認できなかった。

また、外ケーブルの固有振動数の測定結果から、維持管理において外ケーブルの固有振動数測定から張力推定を行うデータ(振動の弦長)が得られた。



写真-2 小柳津高架橋(補強完了)

## 7. おわりに

小柳津高架橋補強工事は平成8年3月に無事竣工した(写真-2)。本工事において、RC中空床版に対する外ケーブルを用いた主版補強工法の十分な施工性と補強効果が確認された。今後、多方面で本補強工法が活用されることを期待する。