

(94) キングポスト形式を採用した外ケーブル偏向部の載荷試験および実橋計測

日本道路公団 四国支社建設部構造技術課	望月 秀次
日本道路公団 四国支社建設部構造技術課	花田 克彦
ピーシー橋梁株式会社 本社技術部	正会員 ○中村 定明
ピーシー橋梁株式会社 四国支店技術課	赤松 輝雄

1. はじめに

四国横断自動車道 吹田高架橋は、標準支間 41m を有する 10 径間連続ラーメン橋で、維持管理面および施工の合理化から外ケーブル工法を積極的に採用した構造となっている。本橋のような中小規模の支間を有する PC 橋では、支間中央 1ヶ所に偏向部を有する V 字形の PC 鋼材配置 (以下、キングポスト形式) が、一般に、従来のクイーンポスト形式の鋼材配置に比べて効果的なプレストレスの導入が可能であると考えられる。また、本橋では、キングポスト形式の特性を活かし、偏向管を下床版に埋め込み従来の外ケーブル方式より偏心距離を大きくすることによって、より合理的な偏向部構造を提案した。

本偏向部構造の採用にあたり、事前に安全性を確認するため、FEM 解析および実物大の供試体による載荷試験を実施した。また、実橋の施工においては、外ケーブル緊張時の偏向部のコンクリートおよび鉄筋ひずみの計測を行い本構造の有効性と安全性の検証を行った。

本報告では、FEM 解析結果、載荷試験および実橋計測結果を中心に報告するものである。

2. 工事概要

工事名：四国横断自動車道 吹田高架橋 (PC 上部工) 工事

工事場所：徳島県板野郡板野町

構造形式：PRC 10 径間連続ラーメン箱桁橋

橋 長：410.000m

支間割：39.300m+52.000m+2@41.000m
+2@42.500m+3@41.000m+27.150m

有効幅員：9.890m

活 荷 重：B 活荷重

写真-1 に本橋で採用した偏向部を、図-1 に全体一般図を示す。

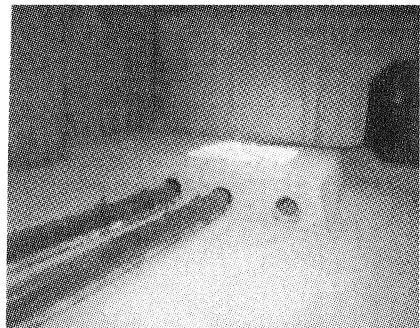


写真-1 偏向部

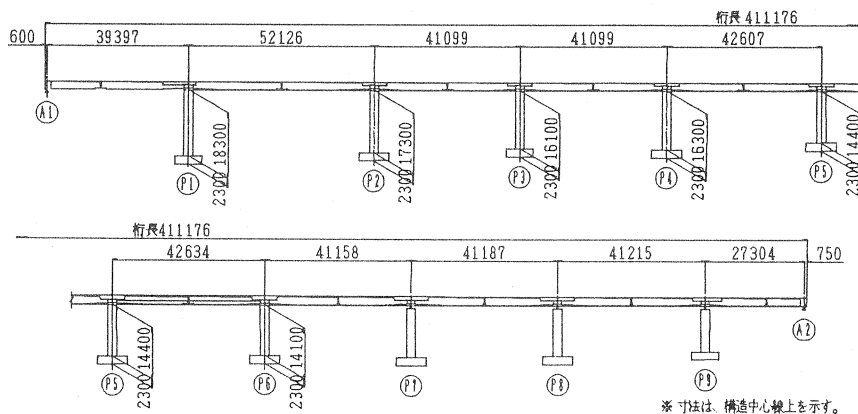


図-1 全体一般図

3. 設計概要および偏向部構造

3.1 外ケーブル形式の比較

外ケーブルの形式としては、図-2に示すようなキングポスト形式とクイーンポスト形式が考えられる。表-1に、両形式での死荷重作用時合成応力度および設計荷重作用時での下縁ひび割れ幅の比較を示す。ここで、キングポスト形式には、図-3に示すように偏心距離を大きくとる形式と従来タイプの形式が考えられるが、表-1では、より効果的な鋼材配置である前者の計算結果を示している。

表-1の比較結果から、本橋の構造形式では、今回採用した偏向部構造を有するキングポスト形式の方がより有効な鋼材配置であることがわかる。

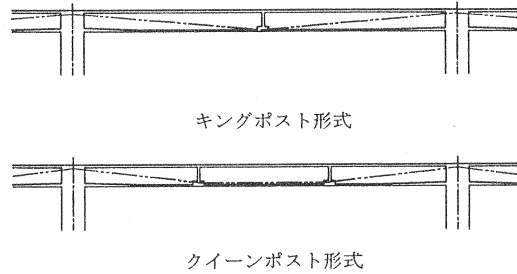


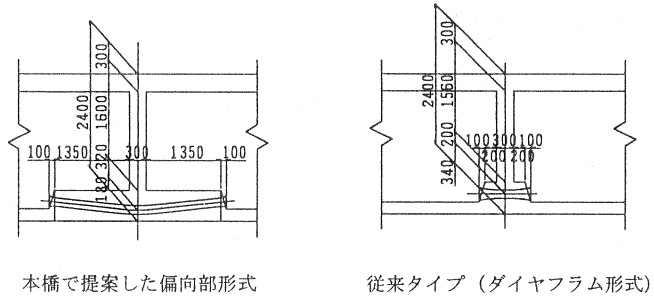
図-2 外ケーブル形式

表-1 死荷重作用時合成応力度および設計荷重作用時曲げひび割れ幅の比較

	キングポスト形式	クイーンポスト形式
鋼材配置 (支間中央)		
死荷重作用時合成応力度	<p>死荷重作用時合成応力度</p>	<p>死荷重作用時合成応力度</p>
設計荷重作用時下縁曲げひび割れ幅	<p>設計荷重作用時下縁曲げひび割れ幅</p>	<p>設計荷重作用時下縁曲げひび割れ幅</p>

3.2 偏向部構造

外ケーブルの偏向部形状は、ダイヤフラム形式、リブ形式、サドル形式が一般的に採用されている。本橋では、より合理的な外ケーブル構造を提案する目的から、図-3に示すような偏向管を下床版に埋め込むタイプの偏向部構造を提案した。形状的には、ダイヤフラム形式とサドル形式の複合のような形状といえる。この偏向部構造の特長を以下に示す。



本橋で提案した偏向部形式

従来タイプ (ダイヤフラム形式)

図-3 偏向部の構造

- ① 偏向管を下床版に埋め込む事で、偏心距離が通常の外ケーブル配置より大きくすることができ、より合理的な鋼材配置が可能となる。
- ② 外ケーブルの偏向を支間中央1箇所の集中配置で行うため、外ケーブル本数が少ない中小規模径間の橋梁に適する。

また、本橋では、偏向管と外ケーブル保護管の間にウレタン等による防水対策を行うものとした。

3.3 偏向部の設計

偏向部の設計は、3次元FEM解析を用いて行った。解析は、偏向部に載荷する緊張力の分力の影響が十分小さくなる範囲までの主桁モデルを作成した。載荷荷重は、偏向角度が最も大きな $\theta=5^\circ 42'$ の緊張力の分力 $P \cdot \sin \theta$ (P : 外ケーブルの設計緊張力) とした。ここで、外ケーブルに使用するケーブルは、SWPR7BL 19S15.2 で、設計緊張力は $P=0.7 \times P_u=3,470\text{kN}$ である。

載荷方法は、施工の影響を考慮して、図-4に示す3ケースとした。各荷重ケースは、①Case-1: 最も理想的なPC鋼材配置で偏向部の曲線区間に均等にPC鋼材が接する場合、②Case-2: 偏向部の中央部で集中的にPC鋼材が接する場合、③Case-3: 偏向部の出口付近でPC鋼材が接する場合を想定している。表-2に各要素の最大主引張応力度の最大値を示す。この表から、偏向部の鉛直方向に 3.84N/mm^2 、偏向部上面に橋軸直角方向に 2.26N/mm^2 の最大主引張応力度が発生することが示されている。偏向部の補強鉄筋量は、FEM解析で求めた最も厳しいケースでの全引張応力を鉄筋 (許容応力 $\sigma_{ss}=180\text{N/mm}^2$) が負担するものとして決定した。

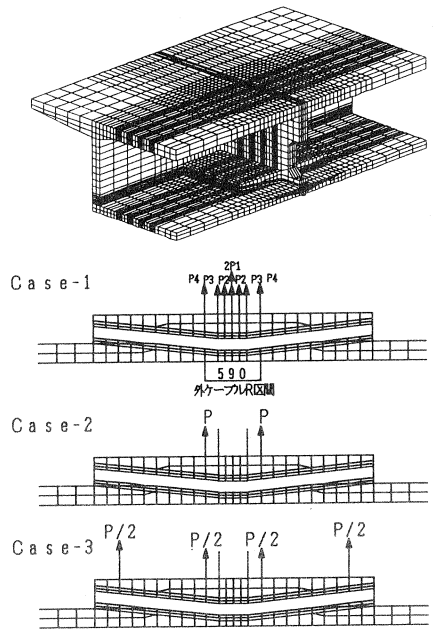
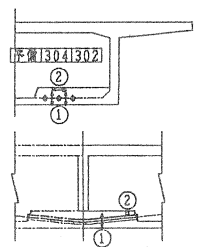


図-4 FEM解析モデル

表-2 FEM解析結果

引張応力度	発生位置	引張応力度の方向	FEM解析値 引張応力度 σ_{\max} (N/mm ²)		
			載荷Case-1	載荷Case-2	載荷Case-3
①	偏向具(鋼管)外側	鉛直方向	2.47	3.84*	2.22
②	偏向部上縁	橋軸直角方向	0.56	0.65	2.26*

*最大値となる載荷ケース



4. 偏向部の確認載荷試験

4.1 試験供試体

施工に先立ち、偏向部構造の安全性を確認するため実物大モデルによる載荷試験を実施した。試験に用いた外ケーブル配置角度は、設計計算と同じ $\theta=5^{\circ}42'$ とした。偏向部形状は外ケーブル2本と予備ケーブル1本のタイプとした。図-5に載荷試験の概要、図-6にゲージ貼付位置を示す。緊張は、コンクリート材齢7日で実施した。表-3に硬化コンクリートの試験結果を示す。

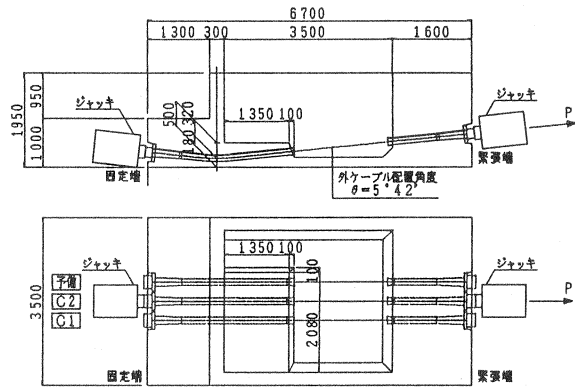


図-5 載荷試験の概要

4.2 試験方法

荷重載荷は、外ケーブルの緊張によって行った。試験方法を以下に示す。

- ① 供試体の両端部にジャッキをセットする。
- ② C1ケーブルの緊張側ジャッキの圧力を徐々に上げ、最終緊張力45MPa (0.7Pu) まで緊張する。緊張は、5MPa毎に載荷し、鉄筋およびコンクリートひずみの計測とひび割れ発生の有無を確認する。
- ③ 最終緊張力での計測完了後、定着を行う。
- ④ C2ケーブルも同じ手順で緊張・定着を行う。
- ⑤ 続いて、予備ケーブルも同じ手順で緊張し、緊張後約30分間おき、ひび割れの有無を確認後、緊張力を解放する。
- ⑥ ④の状態を2日間おき、ひずみ計測およびひび割れ発生有無の確認を行う。

表-3 硬化コンクリート試験結果(材齢7日)

圧縮強度	ヤング係数
34.0N/mm ²	2.75×10 ⁴ N/mm ²

4.3 試験結果および考察

表-4に本試験から得られた計測値とFEM解析値の比較を示す。計測値は、得られたひずみ値をコンクリート応力に換算したものである。この時、コンクリートのヤング係数は材料試験結果で得られた $E_c=2.75 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ を用いた。

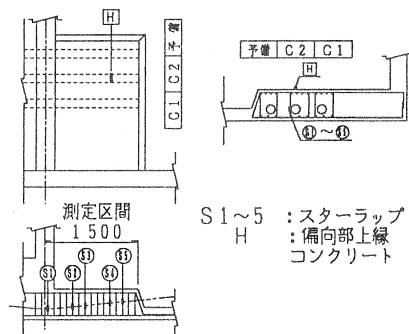


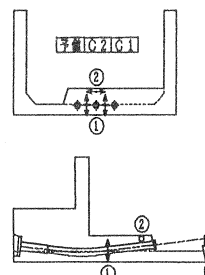
図-6 ひずみゲージ貼付位置

FEM解析は、各要素の最大主引張応力度の最大値を示している。図-7に各計測位置 (S1~S5) での鉛直方向コンクリート応力度の計測値とFEM解析の比較を、図-8に偏向部上縁直角方向のコンクリート応力度の計測値とFEM解析の比較を示す。試験によって得られた結果を以下に示す。

表-4 FEM解析結果と実測値の比較

引張応力度	発生位置	引張応力度の方向	FEM解析値			試験値 (N/mm ²)
			引張応力度 σ_{max} (N/mm ²)			
			荷重Case-1	荷重Case-2	荷重Case-3	
①	偏向具(鋼管)外側	鉛直方向	1.94	3.67*	2.12	1.02
②	偏向部上縁	橋軸直角方向	1.18	1.32	2.88*	1.51

*最大値となる荷重ケース



(1) 鉛直方向のコンクリート応力

- ① 試験によって得られた鉛直方向のコンクリート応力度は、S1 から S5 に向かって小さくなっていく。これは、Case-1 の解析結果と同じ傾向を示しており、偏向部中央のダイヤフラム付近に緊張力の鉛直分力が均等に作用していることを示している。
- ② 試験によって得られた鉛直方向のコンクリート応力度は、最大で 1.02N/mm² 程度であり、FEM 解析結果より小さいことがわかる。これは、外ケーブル緊張力の鉛直分力が、シースおよび偏向管を介してコンクリート内に分散されたため、応力の集中が緩和されたものと考えられる。

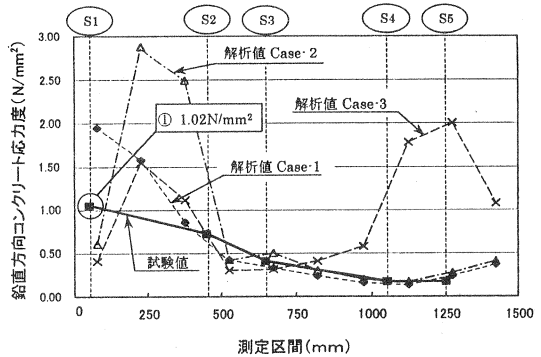


図-7 鉛直方向のコンクリート応力

- ③ 試験実施時のコンクリートの推定引張強度は、 $f_t = 0.23f_c^{2/3} = 2.41\text{N/mm}^2$ ($f_c = 34.0\text{N/mm}^2$) となり、ひび割れが発生する可能性は少ない。また、目視検査からもひび割れの発生は認められなかった。

(2) 偏向部上縁直角方向のコンクリート応力

- ① 試験によって得られた偏向部上縁の直角方向のコンクリート応力は、C1, C2 ケーブル 100% 緊張時で 1.51N/mm²、予備ケーブル緊張時で 1.84N/mm² であった。コンクリートの推定引張強度 $f_t = 2.41\text{N/mm}^2$ 以下であり、ひび割れ発生の可能性は少ない。また、目視検査からも、ひび割れ発生は確認できなかった。
- ② 図-8 から、試験によって得られた計測値は、Case-1 あるいは Case-2 の解析結果とほぼ同じ値となっていることがわかる。

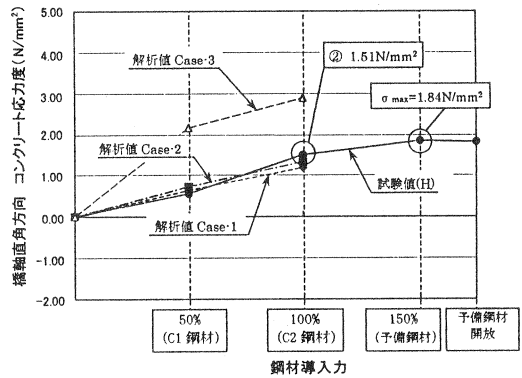


図-8 偏向部上縁直角方向コンクリート応力度

5. 実橋計測

5.1 計測概要

偏向部の荷重試験により、安全性を確認した後、実橋における外ケーブルの施工を行った。実橋の施工では、偏向部および定着部の設置誤差など施工の要因が偏向部の応力状態に影響を及ぼすことが考えられる。そこで、P5~P6 径間 (図-1 参照) の偏向部において実橋計測を実施し、荷重試験結果と比較することで、施工要因の影響、確認試験および設計の妥当性について検討を行った。ひずみゲージの貼付位置を図-9 に示す。計測されたひずみ値は、確認試験と同様に、コンクリートの応力に換算して解析結果と比較検討を行った。

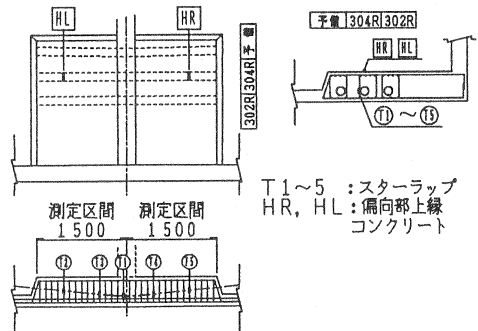


図-9 ひずみゲージ貼付位置

5.2 計測結果

(1) 鉛直方向のコンクリート応力

図-10 に外ケーブル緊張直後の鉛直方向のコンクリート応力度を示す。また、この図中には、参考値として

て確認試験結果および Case-1~Case-3 の FEM解析結果も合わせて表示した。計測結果を以下に考察する。

- ① 実橋の計測値は、確認試験結果の応力分布と同じ傾向を示している。
- ② 実橋の計測で得られたコンクリートの最大引張応力度は、 0.90N/mm^2 である。緊張時のコンクリートの圧縮強度を $f'_c=36\text{N/mm}^2$ とすると、引張強度は $f_t=0.23f'_c{}^{2/3}=2.51\text{N/mm}^2$ となり、発生応力は引張強度の50%以下である。偏向部に鉛直方向のひび割れは、目視観察からも認められなかった。

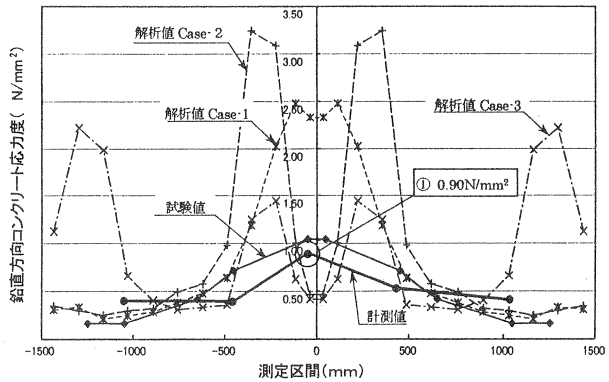


図-10 鉛直方向コンクリート応力度

(2) 偏向部上縁直角方向コンクリート応力

図-11 に偏向部上縁直角方向コンクリートの応力度を示す。計測は、外ケーブル緊張完了後30日まで実施した。偏向部左側の計測結果をHL、右側をHRとして図-11に示した(計測位置は図-9を参照)。計測結果について、以下に考察する。

- ① HLのコンクリート応力は、外ケーブル緊張直後、 1.36N/mm^2 から約 2.0N/mm^2 に急増している。これは、確認試験と異なった傾向である。その後は、 $2.0\text{N/mm}^2 \sim 2.3\text{N/mm}^2$ 付近で安定している。この応力は、FEM解析 Case-3の場合に近い値となっており、偏向管の設置誤差等により発生したものと考えられ、設計で考慮した荷重状態の妥当性が確認できた。

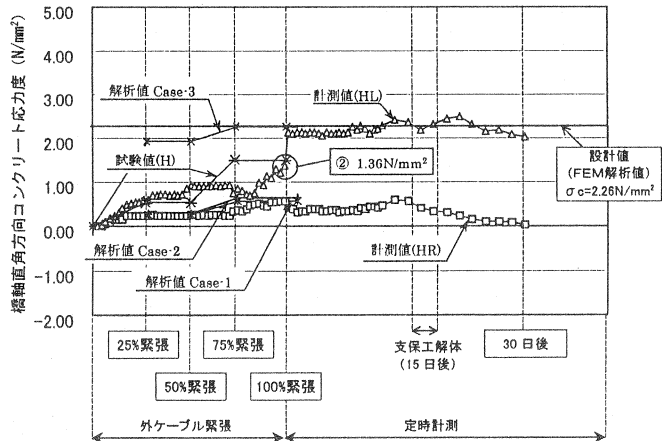


図-11 偏向部上縁直角方向コンクリート応力度

- ② 計測されたコンクリートの最大引張応力度は約 2.3N/mm^2 で、引張強度 $f_t=2.51\text{N/mm}^2$ とほぼ同程度であったが、目視観察では、ひび割れの発生は認められなかった。

6. まとめ

本橋は、外ケーブルにキングポスト形式の鋼材配置を採用した。この形式の利点を活かし、支間中央の偏向部で鋼材の偏心距離を通常の場合より大きくできる偏向部形状を提案し、安全性を確認するため実物大供試体を用いた載荷試験を行い、実橋計測により確認試験および設計で仮定した載荷荷重の妥当性を検証した。得られた結果を以下に要約する。

- ① 支間40m程度の中小規模径間である本橋のような場合、偏心距離を大きくしたキングポスト形式での鋼材配置はクイーンポスト形式より有効な鋼材配置であることが確認された。また、本橋では、偏向部の防水にも十分な配慮を行い、保護管と外ケーブルの保護管の間にウレタン等の充填を実施する予定である。
- ② 偏向部載荷試験より、本橋で提案した偏向部構造は十分な耐力を有していることが確認された。また、実橋計測から、確認試験の妥当性と実橋での偏向部の安全性を確認した。