

上竹橋の設計・施工

Design and Construction of the KAMITAKE Bridge

松川 治雄

Haruo MATSUKAWA

川田建設大阪支店技術部技術課課長

岩田 直樹

Naoki IWATA

川田建設大阪支店工事事務課工事事務課長

武内 和夫

Kazuo TAKEUCHI

川田建設東京支店工事事務課総括工事事務課長

菅沢 文博

Fumihito SUGASAWA

川田建設大阪支店技術部設計課

大澤 浩二

Koji OHSAWA

川田建設工事本部開発部技術開発課課長

大浴 昭則

Akinori OHEKI

川田建設大阪支店工事事務課

The KAMITAKE Bridge consists of two sets of the 6 span continuous PC box girder bridge, erected by push-out erection methods from the both abutments towards the center of the bridge. Because the span of A1 - P6 is almost identical with the span of P6 - A2 a comparative study was conducted at the stage of the detail design with the side of the A1 erected in an external cable and the side of the A2 in an internal cable. It is the intent of this comparative study to verify the advantages of the external cable method.

For external cabling, two methods i.e. field cabling with PE pipes grouted at the site and prefabrication cabling with unbond cables were employed to compare construction performance. Furthermore, since a deviator, designed to serve fixing purpose at the same time, is structurally unique, stress analysis was performed to confirm the safety of the reinforcers.

This paper compares internal and external cabling, discusses unbond cables, and reports on the results of the stress study of a deviator.

Key words : external cable, unbond cable, deviator, diaphragm

1. はじめに

上竹橋は、中国横断自動車道岡山米子線のうち岡山県上房郡賀陽町上竹地区内に位置する橋長530mのプレストレストコンクリート橋である。架橋位置図を図1に示す。

本橋は、6径間連続箱桁橋の2連からなり、左右の橋台側から橋梁の中央に向かって押出し工法により架設を行っている。また当初設計は内ケーブル方式であったが、「外ケーブル方式は、経済性・施工性ともに優れている」と言われていることを検証するために、一部の区間で外ケーブル方式の採用が決定された。外ケーブル方式の有効性の検討にあたり、本橋のA1～P6径間とP6～A2径間はほぼ同形状であるため、A2側を内ケーブル方式で、A1

側を外ケーブル方式でそれぞれ詳細設計を行い、比較検討を行うこととした。また、外ケーブルとしては、ポリエチレン管（以下PE管と称す）にグラウトを行う現場製作ケーブルと、アンボンドケーブルをPE被覆した工場製作ケーブルの2タイプを採用し、施工性の比較を行った。さらに、今回の偏向部が同時に定着も行う特殊な構造であるため、補強の安全性を確認するために応力計測を行った。

ここでは、設計の観点から内外ケーブルの比較、施工の観点からアンボンドケーブル、加えて偏向部の応力計測結果について報告するものである。

2. 工事概要

工事名：上竹橋他4橋（PC上部工）工事

路線名：中国横断自動車道岡山米子線

道路規格：第1種3級B規格

構造形式：PC 6径間連続箱桁

橋長：530.0m

支間割：(43.4m+4@44.25m+43.4m)×2連

有効幅員：9.0m

平面線形：R=10 000m, A=500m

縦断勾配：2.5425%

活荷重：B活荷重

工期：平成6年2月1日～平成8年3月21日

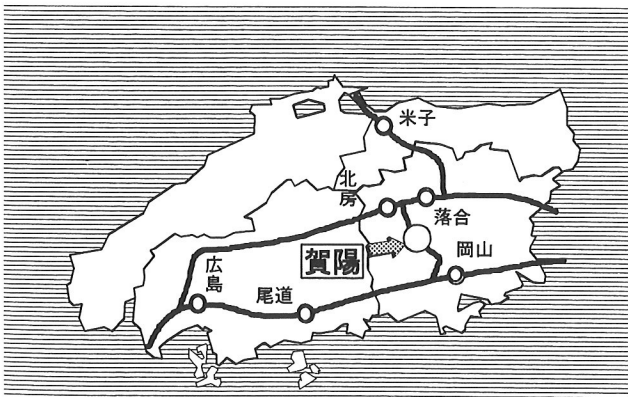


図1 架設位置図

3. 設計

(1) 内外ケーブル方式の比較

本橋は、同一形状の橋梁2連に対して、それぞれ内ケーブル方式と外ケーブル方式を採用している。ここでは、断面形状、ケーブル配置、主要数量に着目して、両者を比較する。

a) 断面形状

断面形状の比較を図2に示す。桁高は、下部工がすでに施工中であったことより、基本設計から変更しないものとし、両者とも $H=3.0\text{m}$ ($H/L=14.8$) とした。上下床版厚は、横方向設計および架設鋼棒の定着を考慮して、両者ともそれぞれ $t_u=300\text{mm}$, $t_l=270\text{mm}$ とした。ウェブ厚は、終局荷重時の平均せん断応力度および架設時の斜め引張応力度の検討結果より、外ケーブル方式では内ケーブル方式に対して100mm薄くし、標準部および支点部でそれぞれ $t_{w1}=300\text{mm}$, $t_{w2}=450\text{mm}$ とした。これにより、標準部の主桁断面積は6.8%減少している。

b) ケーブル配置

押し出し架設中の曲げモーメントに対しては、両者とも同様に架設鋼棒で対処している。外ケーブルの配置状況を図2に示す。1ウェブ当たりの配置本数は、内ケーブル方式が6～9本(12T13A)に対して、外ケーブル方式では3本(12T15B)に減少している。これは、主桁自重の減少、PC鋼材応力度の摩擦ロス分の減少、大容量ケーブルの使用、および外ケーブルの配置方法によるものである。

外ケーブル方式での鋼材配置は、偏心量を確保することを主体に考え、1段配置とした。また、標準部・支点

表1 主要数量の比較

項目	種別	単位	内ケーブル (A2～P6)	外ケーブル (A1～P6)	差
コンクリート	P2-2	m ³	2 175	2 080	-95
鉄筋	P	t	220	265	+45
PC鋼材	ケーブル	t	24.4 (12T13A)	14.5 (12T15B)	-9.9
	φ32B	t	78.7	78.5	-0.2

上で必要なケーブル本数が異なるため、偏向部で途中定着をするケーブル配置とし、その結果、鋼材量を減らすことが可能となった。

c) 主要数量

主要材料の比較を表1に示す。外ケーブル方式は、鉄筋を除いて各数量が減少している。鉄筋の増加は、ウェブ厚を薄くしたことによりせん断抵抗断面の減少に伴うものと、偏向部の補強鉄筋によるものである。

(2) 外ケーブル方式の設計

a) 外ケーブル比率の選定

外ケーブル方式での鋼材配置は、以下に示す6ケースを比較して、応力および経済的に優位となる橋面荷重・活荷重に対して配置するものとした。すなわち、

- ① 全外ケーブル
- ② ①を基本にして架設時に必要な鋼材を内ケーブル
- ③ ②に対しさらに曲げ破壊安全度を満たさない断面の外ケーブルの一部を内ケーブルとする
- ④ 橋面荷重・活荷重に必要な鋼材を外ケーブル
- ⑤ ④に対しさらに設計時に不必要な架設鋼材の応力を解放する
- ⑥ 全内ケーブル方式(当初設計と同様)

の6ケースより曲げ破壊安全度を満たす③～⑤案で経済

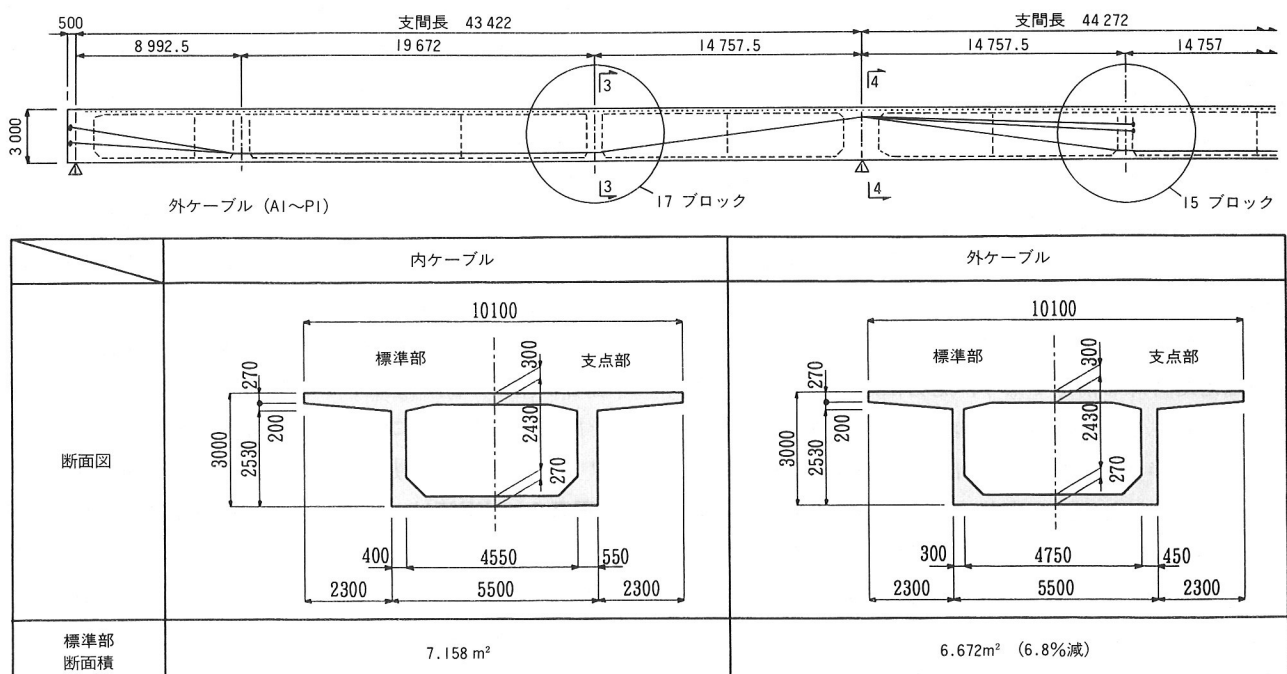


図2 外ケーブル配置および断面形状の比較

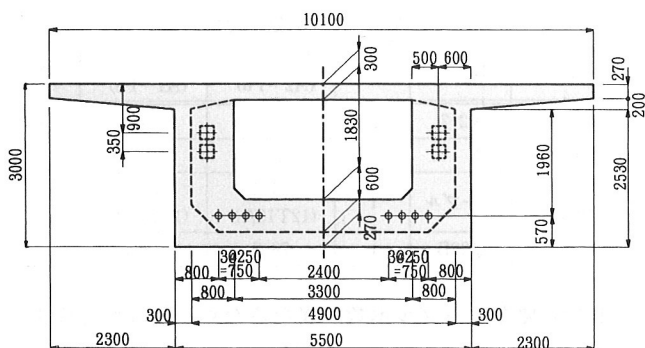


図3 偏向部

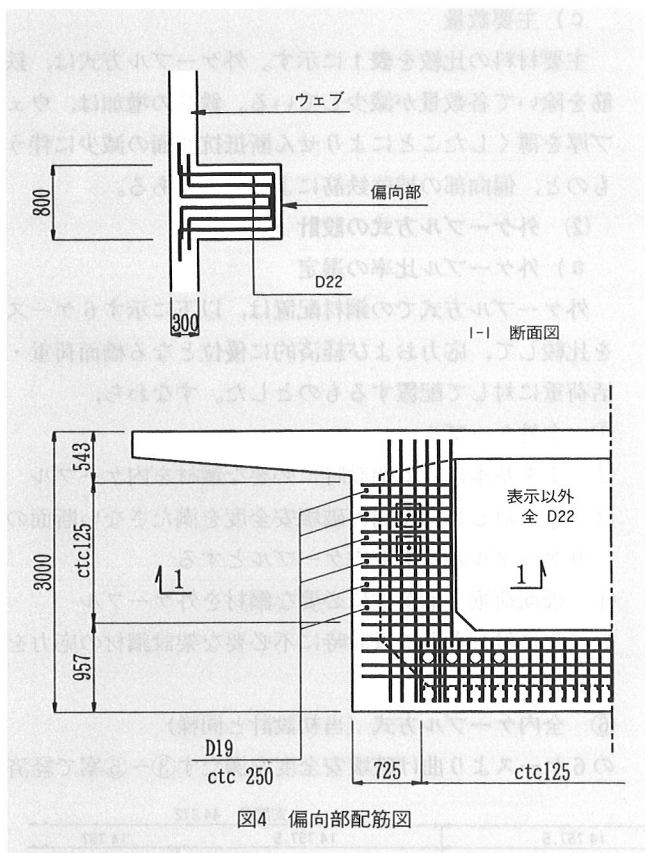


図4 偏向部配筋図

比較を行い、④案を採用した。

b) 偏向部の設計

偏向部は、外ケーブルに導入された緊張力を主桁に伝達するための重要な部材であり、外ケーブルの分力により発生する引張力に対して、鉄筋を配置して補強を行っている。

本橋の偏向部は、外ケーブルの定着および偏向機能を兼ね備えた特殊な構造であり、応力伝達の確実なダイヤフラム形式とした(図3)。偏向部の部材厚さは、外ケーブルの曲げ半径 $R=3.5\text{m}$ 部を部材内に納める必要性から $t=800\text{mm}$ とした。なお、定着のないケーブル通過部においても、ケーブルを1段配置として偏心量を確保することを主体に考え、定着のある偏向部と同様のダイヤフラム形式とした。

偏向部の設計は、3次元FEM解析を用いて行い、その結果を基に補強鉄筋量を決めている。図4に鉄筋配筋図

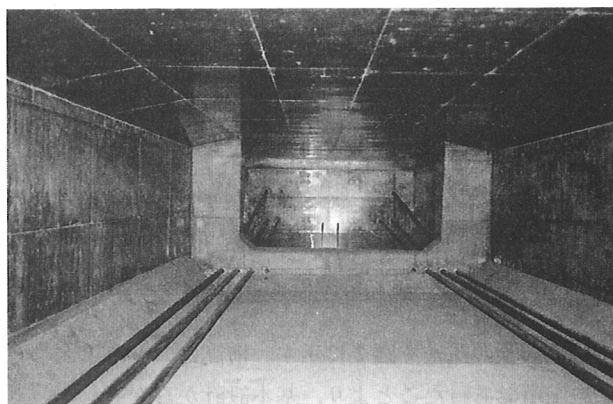


写真1 外ケーブル施工完了状況

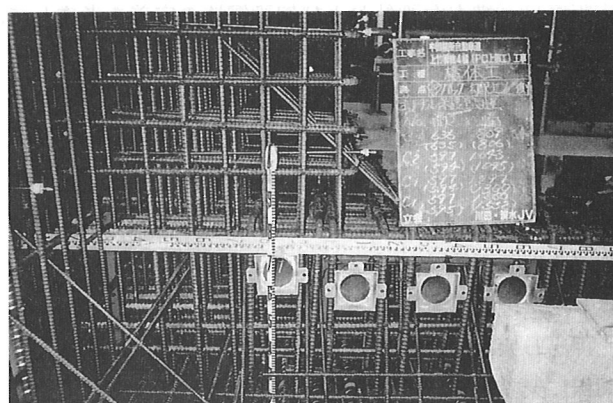


写真2 偏向部配筋状況

を示す。

4. 施工

(1) 外ケーブル

2次ケーブルである外ケーブルは、全部で16ケーブルである。このうち、C5～C8(8ケーブル)については、保護管にPE管を使用し、緊張後セメントミルクを注入するグラウトタイプとした。C1～C4については、工場において製作されたアンボンドタイプのケーブルを用いた(写真1)。

a) グラウトタイプ

外ケーブルに使用したPC鋼材は、PC鋼より線(12 $\phi 15.2\text{B}$ 種)である。保護管にはPE管を使用し、偏向部および横桁部には鋼管を配置した。

偏向部および横桁部に配置した鋼管は、配管用炭素鋼管を使用し、曲げ加工および端部処理の後、垂鉛メッキを施した。取付けに際しては支持金具を使用して、コンクリート打設時に動くことのないように堅固に固定した(写真2)。PE管は、外ケーブル方式用保護管として開発されたパイプ(外径 $\phi 89\text{mm}$ 、内径 $\phi 79\text{mm}$ 、厚さ5mm)を使用した。接合方式により、スタンダードタイプとEFタイプの2種類がある。スタンダードタイプは、パイプの端部に接合用の金具があらかじめセットされ、差し込むことにより接合するタイプである。EFタイプは、融着によ

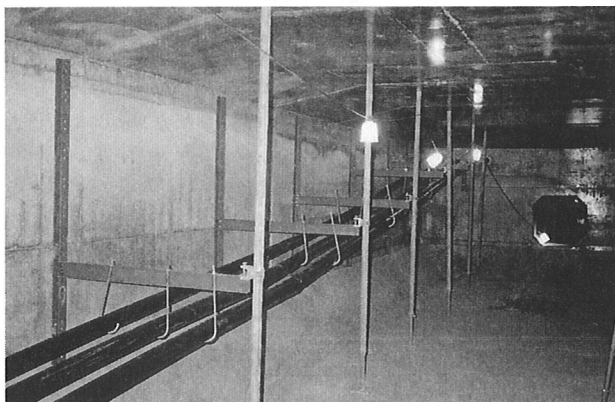


写真3 ポリエチレン管配置状況

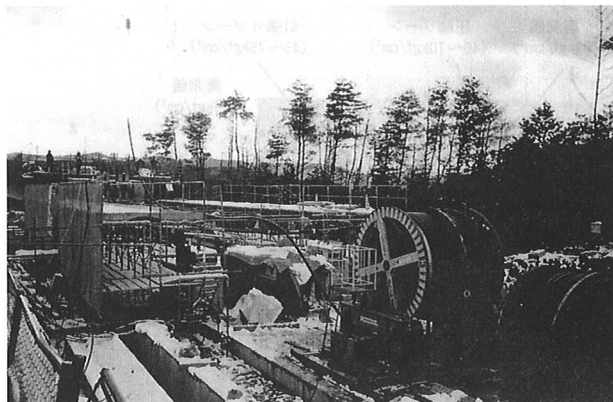


写真4 アンボンドタイプケーブルの挿入状況

り接合するタイプで、ジョイントスリーブ内にある発熱体ニッケル線により融着する。

施工は、ケーブル形状保持のため、支持金具を取り付けた後、PE管を配置した(写真3)。次に、PC鋼材を挿入した後、緊張し、グラウトを行って完了した。

b) アンボンドタイプ

工場で加工されたケーブルを現場に搬入し、箱桁内に挿入配置した後、緊張を行った。その後、定着具付近に防錆グリースを注入した。PE管の配置、PC鋼材の挿入、グラウトの注入は不要となる。

アンボンドタイプに使用したPC鋼材は、グラウトタイプと同じPC鋼より線(12φ15.2B種)である。PC鋼より線1本ずつにポリエチレンシースが被覆され、そのシースとPC鋼より線の間に防錆グリースが充填されている。そして、この被覆されたPC鋼より線を12本束にして、その外側をポリエチレンでさらに被覆する(図5参照)。このように加工されたケーブルをリールに巻き取った状態で現場に搬入した。

定着具は、外ケーブル用に開発されたフレシネー 12 E15を使用した。このケーブルの使用実績がないため、使用に先立ち、定着性能試験を行った。その結果、定着性能について問題のないことが確認された。

ケーブルの挿入に先立ち、箱桁内にケーブルの支持材(鋼製アングル)をセットしておく。次にアンリラーに

ケーブルリールをセットし、ウインチにより箱桁内にケーブルを引き込み配置した(写真4)。緊張完了後、定着具にカバーキャップをセットし、グリースポンプにて防錆グリースを注入した。

c) 両タイプの比較

アンボンドタイプに対してグラウトタイプでは、PE管の配置、PC鋼材の挿入、グラウトの注入といった工種が必要である。そのため、施工性においては明らかにアンボンドタイプが優れている。また、ケーブルに対する信頼性も高い。

経済性の面では、わずかにグラウトタイプが有利となった。その差は主に材料費にあると考えられる。今回の施工では数量が少なかったため、アンボンドケーブルの材料費が割高になったものと思われる。

5. 偏向部の応力計測

(1) 計測内容

a) 計測位置

計測位置は、以下の2カ所の偏向部(図4参照)とし、FEM解析の結果を基に、局部応力度の大きくなる箇所を選定した。

- ① 15ブロック中央の偏向部(1ウェブ当たり1本通過、2本定着)
- ② 17ブロック中央の偏向部(1ウェブ当たり3本通過)

b) 計測時期

計測は、外ケーブルの緊張による影響を抽出するために押し出し架設の完了後とし、着目偏向部を通過あるいは定着するC1~C3ケーブル(全6本)の緊張前後に計測を行った。

(2) 計測結果

計測結果は、実測ひずみに試験により求めたコンクリートの静弾性係数(342 000kgf/cm²)を乗じたコンクリート応力度で示す。

a) 15ブロック偏向部

この偏向部は、1ウェブ当たり3本の外ケーブルが配

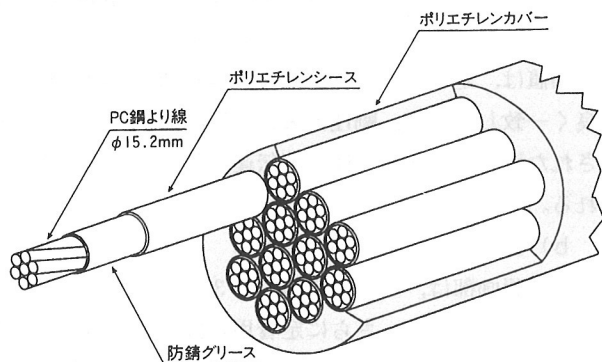


図5 アンボンドタイプケーブル概要図

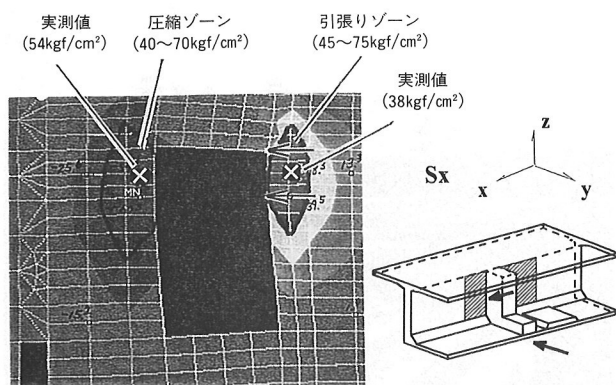


図6 ウェブ内面の橋軸方向応力度 (15ブロック)

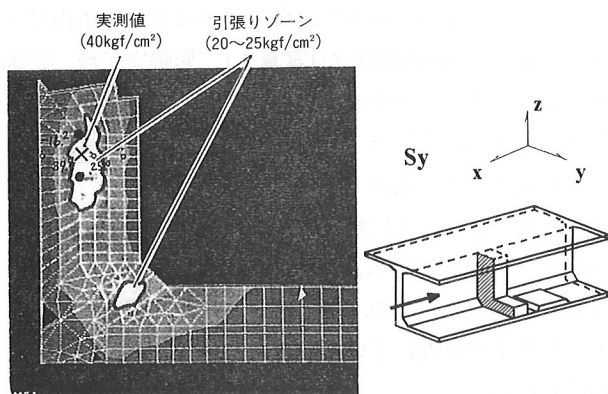


図7 定着部の橋軸直角方向応力度 (15ブロック)

置され、そのうち1本が通過、2本が定着されるため、定着部周辺の上床版、ウェブ、偏向部に大きな引張応力度が発生している。

① ウェブ内面の橋軸方向応力度 (図6 参照)

解析では、大きな局部応力 (定着面に45~75 kgf/cm²の引張り、定着部背面に40~70 kgf/cm²の圧縮) が生じる。計測でもほぼ同程度の約40 kgf/cm²の引張り、約60 kgf/cm²の圧縮が実測されたが、ひび割れは観測されていない。

今回計測した結果は外ケーブルの緊張による増分だけであるが、すでに導入されている架設鋼棒によるプレストレス (図心付近で約35kgf/cm²) を考慮すれば、実際にはほとんど引張りが生じていないことになる。

なお、設計ではこの区間に補強鉄筋として D19が25cmピッチで配筋されている。

② 定着部の橋軸直角方向応力度

ウェブと横桁の付け根には、定着曲げにより、定着前面に25kgf/cm²の引張り、背面に15kgf/cm²の圧縮が実測され、解析値との傾向がほぼ一致している。

また、定着背面のケーブル間の局部応力についても解析値と同様に割裂応力が生じており、一部ケーブル間の中心では解析値よりも大きな引張り約40 kgf/cm²が実測されているが (図7 参照)、補強鉄筋の応力度は鉄筋です

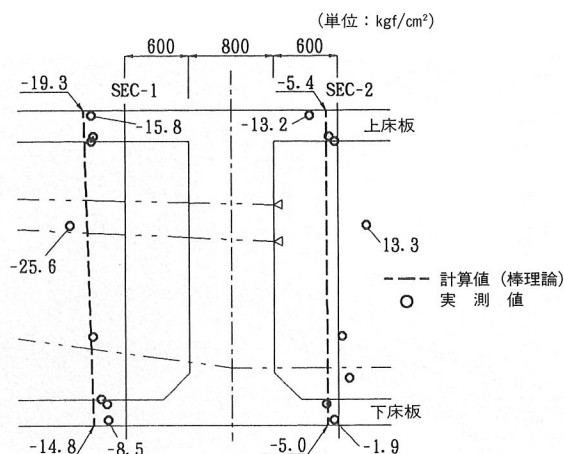


図8 橋軸方向応力度の桁高方向分布 (15ブロック)

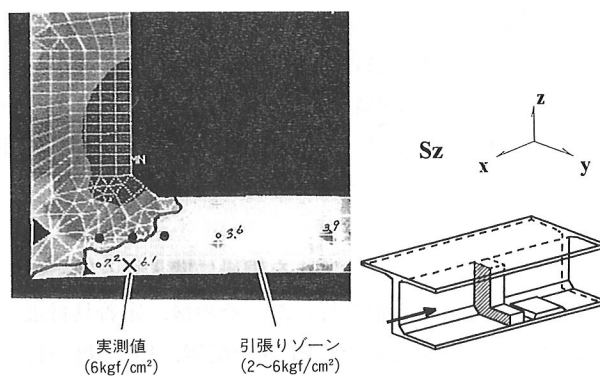


図9 偏向部の鉛直方向応力度 (17ブロック)

べて負担したとしても 1400kgf/cm²程度であり、応力度としては十分安全である。

③ 橋軸方向応力度の桁高方向分布

偏向部の表面から前後に60cm離れた断面の橋軸方向応力度の桁高方向分布を 図8 に示す。ここで、上下床版の実測値は箱桁中心での値を、点線は外ケーブルの緊張による変動応力の設計値を示す。なお、図では圧縮を負で表している。これによれば、①で述べた定着近傍での局部応力の影響が60cm程度の離れでは解消されていないことが予想される。

また、設計では、有効伝達長の考え方から偏向部背面直後では定着されたケーブルを無視してプレストレスの計算を行っているが、図8のSEC-1に示した解析値は、定着された外ケーブルも有効であるとして計算している。計測値は、定着された外ケーブルも有効とした解析値と良く一致しており、剛性の大きい偏向部がウェブに定着された導入力の断面全体への伝達に効果があると考えられる。

b) 17ブロック偏向部

この偏向部は、1ウェブ当たり3本の外ケーブルが偏向するだけであり、さらに定着用の偏向部と同様に剛性の高い隔壁型としているため、偏向部自体には問題となるような大きな引張りは生じていない。

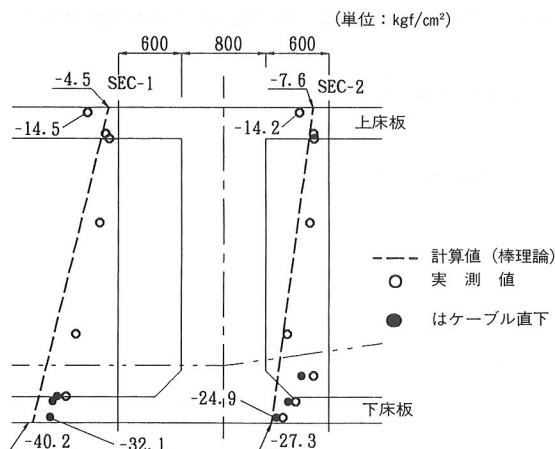


図10 橋軸方向応力度の桁高方向分布 (17ブロック)

① 下床版偏向部の橋軸直角方向応力度

解析と同程度の $5\sim 10\text{kgf/cm}^2$ の引張りが実測された。

② 下床版偏向部の鉛直方向応力度 (図9 参照)

外ケーブル直下の下床版との付け根に解析と同程度の $5\sim 10\text{kgf/cm}^2$ の引張りが実測された。これを鉄筋応力度に換算すると、 $30\sim 60\text{kgf/cm}^2$ 程度である。

③ 橋軸方向応力度の桁高方向分布

偏向部の表面から前後に60cm離れた断面の橋軸方向応力度の桁高方向分布を 図10に示す。ここで、上下床版の実測値は箱桁中心での値を、点線は外ケーブルの緊張による変動応力の設計値を示す。なお、図では圧縮を負で表している。これによれば、平面保持が成立していること、所定のプレストレス導入ができたことがわかる。

(3) 考察

計測した結果を踏まえて、偏向部補強鉄筋量について考察する。

a) 偏向部 (定着リブ部) の補強筋

偏向部 (定着リブ部) の曲げおよび割裂に対して、D22ctc125 の補強筋が配筋されている。これは、断面に発生する引張応力をコンクリートの引張強度を無視して、すべて鉄筋で負担するものとして決めたものであるが、実際にはコンクリートにひび割れが発生しておらず、鉄筋に発生する引張応力度は 250kgf/cm^2 程度 (5. (2), a) ② 参照) にすぎない。ただし、前述の考えによりすべて鉄筋で負担するものとするれば、発生応力度は 1400kgf/cm^2 (許容値 1800kgf/cm^2 の約80%) となり、鉄筋径を小さくするまでの差はなく、解析が妥当であったと考えられる。また、定着部近傍のウェブや上床版には、解析と同程度の大きな局部応力が発生しており、同種の構造を設計する際にはこのような箇所の補強にも十分留意する必要がある。

b) 偏向通過部の補強筋

通過するケーブルの偏向分力として生ずる腹圧力に対して、D22ctc125 の補強筋が配筋されているが、鉄筋に

発生した引張応力度は 100kgf/cm^2 程度にすぎない。

これは、ケーブル偏向部の真上に偏向部と同幅のリブ (横桁) があるためで、ケーブル偏向による鉛直力がリブを介してウェブや上床版に伝達されるためである。

また、実際に施工された偏向部には、下床版部にハンチを設ける等の配慮がなされたことが局部応力を小さくしたと考えられる。以上より、標準的な偏向部の補強筋としては1ランク下のD19で十分であると考えられる。

c) まとめ

外ケーブル方式を採用するにあたって、不明な点が多い偏向部について応力計測を行った結果、設計で用いたFEM解析値と大きな差はみられず、解析の妥当性が確認された。

6. おわりに

今回、PC橋梁への外ケーブル方式の有効性を検証するために、内ケーブル方式で設計された2連の連続桁のうちの1連を外ケーブル方式に変更し、設計と施工の両面から比較を行った。桁高の変更ができない条件下での外ケーブルの採用であったため、結果的に、外ケーブルは橋面荷重と活荷重に必要な鋼材量となった。そのため、外ケーブル比率の少ない範囲での比較となったが、以下のことが確認できた。

- ① 外ケーブル方式を採用することで、自重は低減され、鋼材量を減らすことが可能になったが、偏向部の補強により若干鉄筋量は増加した。
- ② 外ケーブルとしてアンボンドタイプを採用することより、施工性を向上させることができ省力化につながる。
- ③ アンボンドタイプは使用材料が少ないこともあり、材料費が高く現時点では内ケーブルとほぼ同じ工事費であるが、使用材料が増えればさらに経済的になる可能性がある。
- ④ FEM解析値と実測値は良く一致しており、解析の妥当性が確認された。

本橋は平成8年3月に無事竣工した。本橋の設計施工にあたり、多大なるご指導、ご協力を頂いた関係者の皆様に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) (財)高速道路調査会：PC橋の新しい構造事例に関する研究報告書，平成5年3月。