

## 上竹橋の設計と施工

熊谷 義次\*1・中尾 学\*2・武内 和夫\*3・松川 治雄\*4・大澤 浩二\*5

### 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 530 m 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、全体一般図および施工要領図を図-2 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の中央に向かって、押し出し工法により架設を行っている。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、押し出し架設採用時に経済性・施工性ともに優れている」と言われていることを検証すべく外ケーブル方式の採用を決定した。そこで、本橋の A 1~P 6 径間と P 6~A 2 径間がほぼ同形状であるため、A 2 側を内ケーブル方式で、A 1 側を外ケーブル方式で詳細設計を行い、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ポリエチレン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、今回の偏向部が定着も同時に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。

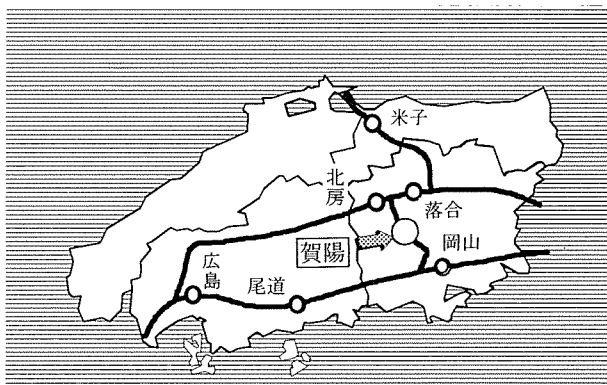


図-1 架設位置図

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、および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：530.0 m  
 支間割：(43.4 m+4@44.25 m+43.4 m)×2 連  
 有効幅員：9.0 m  
 平面線形：R=10 000 m, A=500 m  
 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

### 3. 設計

#### 3.1 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。

##### (1) 断面形状

断面形状の比較を図-3 に示す。桁高は、下部工がすでに施工中であったことより、両者とも  $H=3.0$  m ( $H/L=14.8$ ) とした。上下床版厚は、両者ともそれぞれ  $t_u=300$  mm,  $t_l=270$  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 100 mm 薄くし、標準部および支点部でそれぞれ  $t_{w1}=300$  mm,  $t_{w2}=450$  mm とした。これにより、

\*1 Yoshitsugu KUMAGAYA : JH 日本道路公団 中国支社構造技術課 課長

\*2 Manabu NAKAO : JH 日本道路公団 中国支社岡山管理事務所 工務助役

\*3 Kazuo TAKEUCHI : 川田建設(株) 東京支店工事一部工事課 総括工事長

\*4 Haruo MATSUKAWA : 川田建設(株) 大阪支店技術部技術課 課長

\*5 Koji OSAWA : 川田建設(株) 工事本部開発部技術開発課 課長

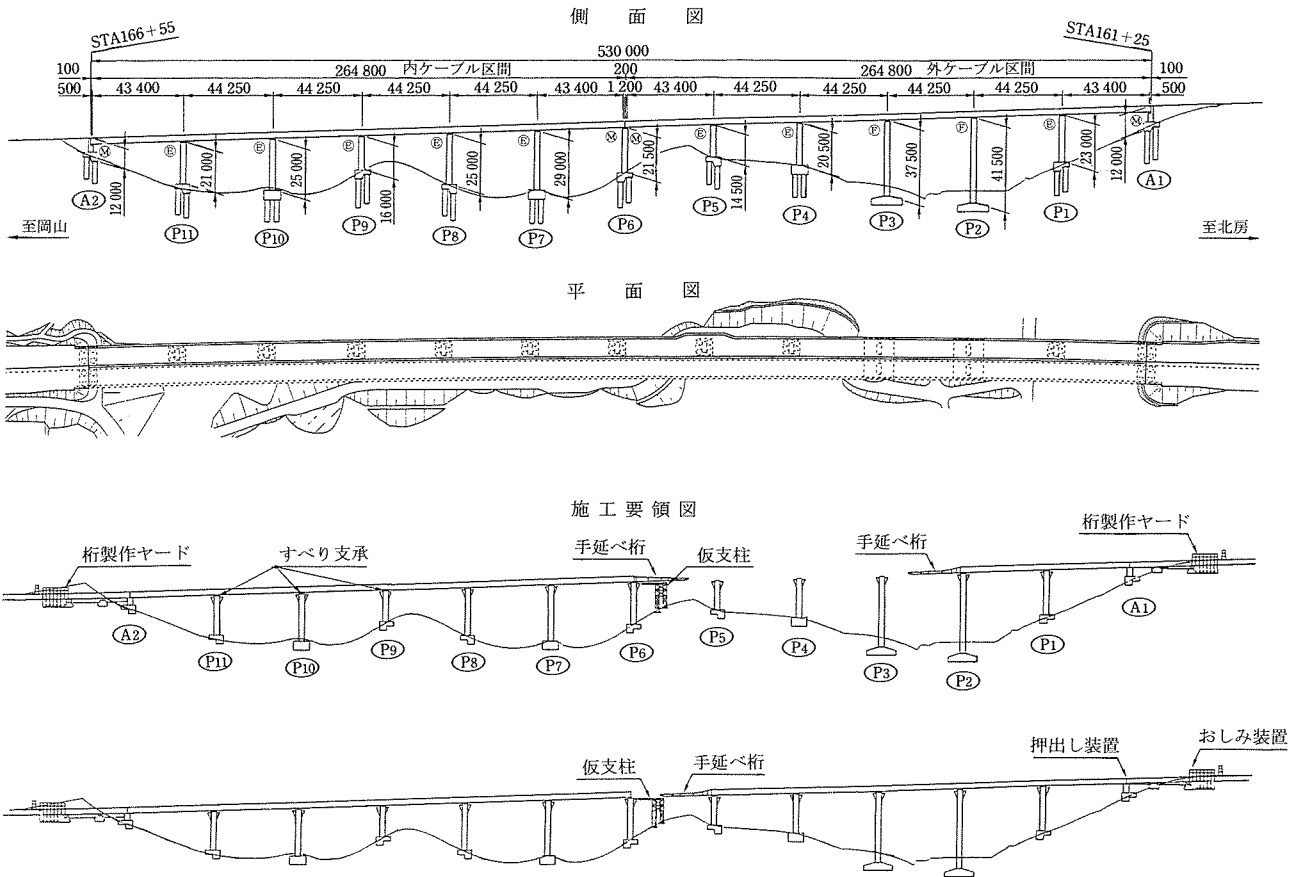


図-2 全体一般図および施工要領図

	内ケーブル	外ケーブル
断面図		
標準部断面積	7.158m <sup>2</sup>	6.672m <sup>2</sup> (6.8%減)

図-3 断面形状の比較

標準部の主桁断面積は6.8%減少している。

(2) 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ため、ここでは2次ケーブルの配置状況を比較し、図-4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(12 T 13 A)に対して、外ケーブル方式では3本(12 T 15 B)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と考え、1段配置とした。また、標準部・支点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。

(3) 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る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。鋼棒φ32は、架

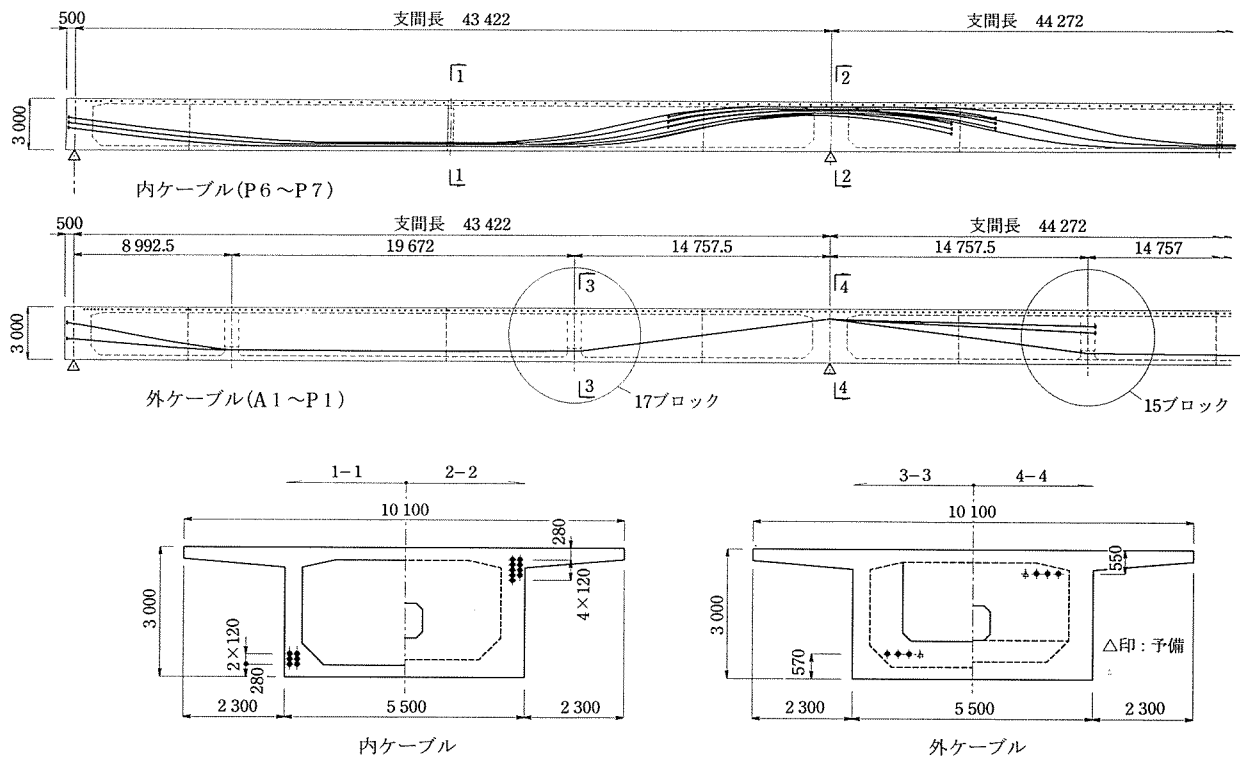


図-4 ケーブル配置図の比較

表-1 主要数量の比較

項目	種別	単位	内ケーブル (A 2~P 6)	外ケーブル (A 1~P 6)	差
コンクリート	P 2-2	m <sup>3</sup>	2175	2080	-95
鉄筋	P	t	220	265	+45
PC鋼材	ケーブル	t	24.4 (12 T 13 A)	14.5 (12 T 15 B)	-9.9
	φ32 B	t	78.7	78.5	-0.2

設鋼棒を示したが、自重の低減によりわずかに減少している。

### 3.2 外ケーブル方式の設計

#### (1) 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架設時に必要な鋼材を内ケーブル、③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、④橋面荷重・活荷重に必要な鋼材を外ケーブル、⑤さらに設計時に不必要な架設鋼材の応力を解放、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案で経済比較を行い、④案を採用した。

#### (2) 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構造であり、外ケーブルの分力により各部に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-5)。偏向部の部材厚さは、外

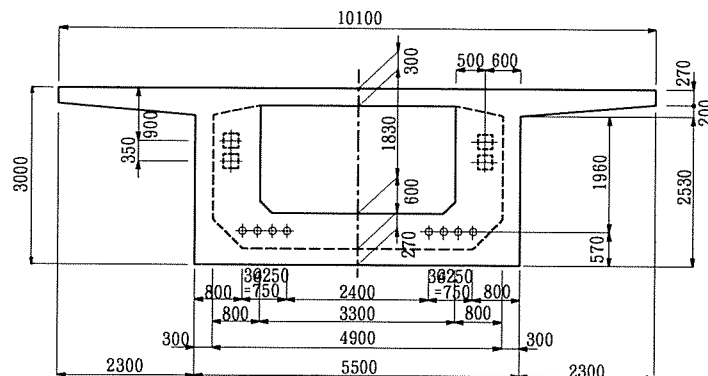
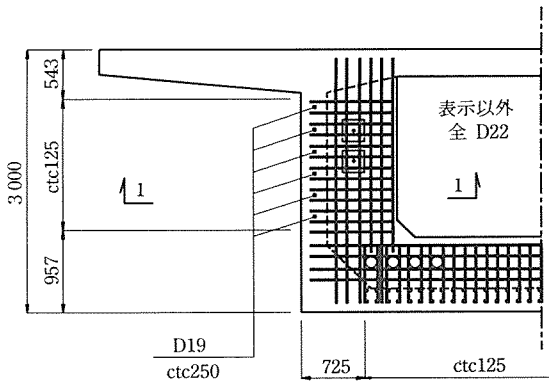


図-5 偏向部断面図



1-1 断面図

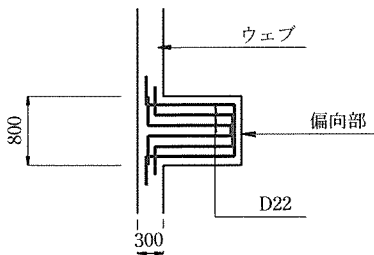


図-6 偏向部配筋図

ケーブルの曲げ半径  $R=3.5$  m 部を部材内に納める考え方から  $t=800$  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と考え、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 解析を行い、その結果を基に補強鉄筋量を決めている。図-6 に配筋図を示す。

## 4. 施 工

### 4.1 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、保護管にポリエチレン管を使用し、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として施工した(写真-1)。

#### (1) 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(12φ15.2 B種)である。保護管にはポリエチレン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、配管用炭素鋼鋼管を使用し、曲げ加工および端部の加工をし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)。ポリエチレン管は、外ケーブル方式用保護管として開発されたパイプ(外径φ89 mm, 内径φ79

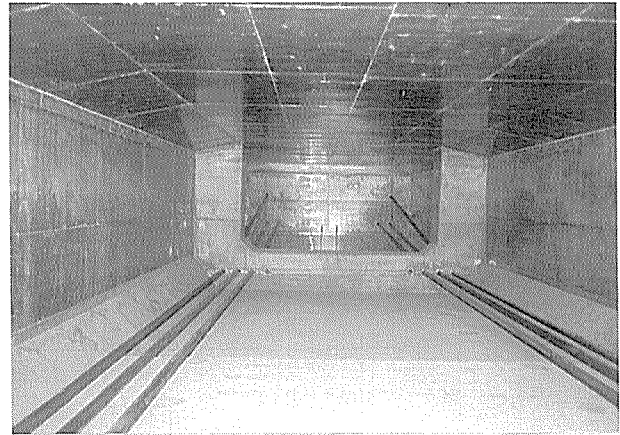


写真-1 外ケーブル施工完了状況

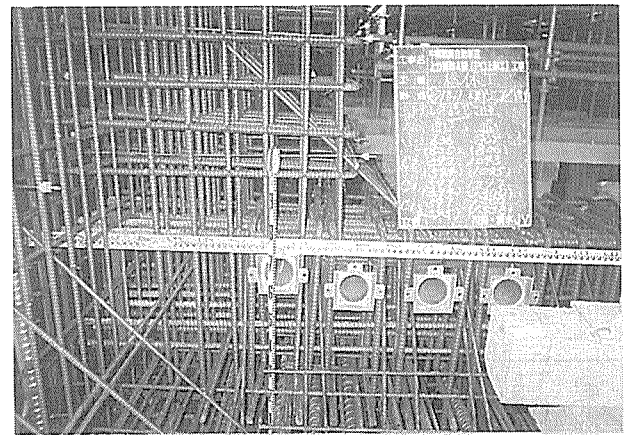


写真-2 偏向部配筋状況

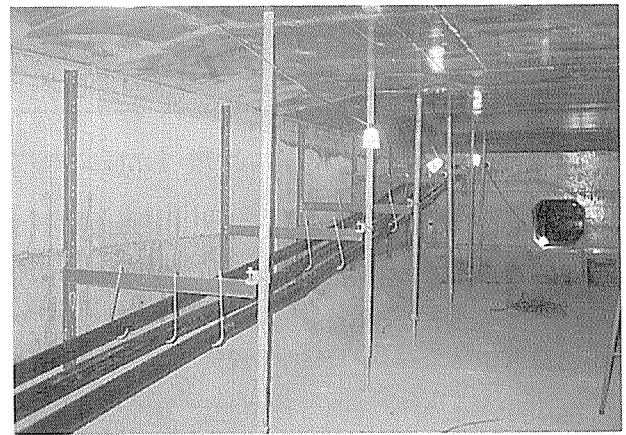


写真-3 ポリエチレン管配置状況

mm, 厚さ5 mm)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種類を使用した。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。

ケーブル形状保持のため、支持金具を取り付けた後、ポリエチレン管を配置した(写真-3)。次に、PC 鋼材

をプッシングマシンにより挿入した後、緊張し、グラウトを行って完了した。

## (2) 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、箱桁内に挿入した後、緊張を行う。その後、定着具付近に防錆グリースを注入する。ポリエチレン管の配置、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(φ15.2 B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鋼より線の間には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-7参照)。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ナー 12 E 15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(写真-4)。

ケーブルの挿入に先立ち、箱桁内にケーブルの支持材をセットしておく。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

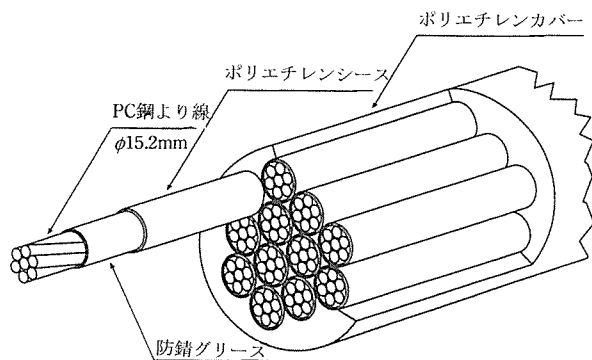


図-7 アンボンドタイプケーブル概要図

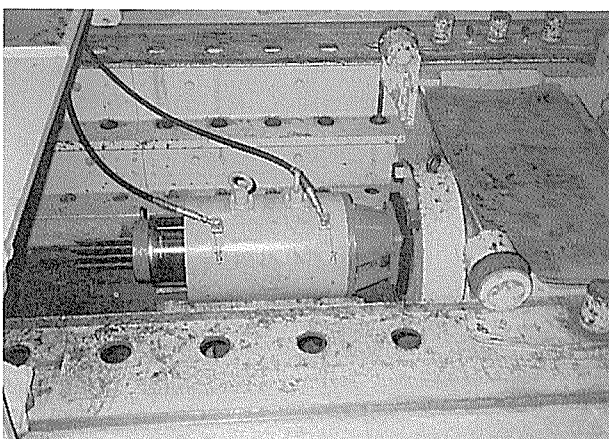


写真-4 定着性能試験状況

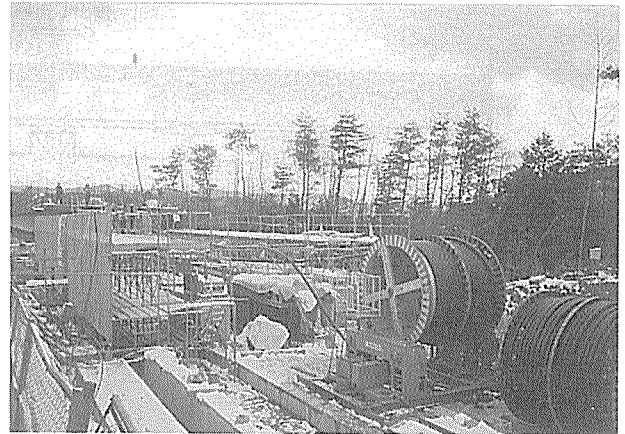


写真-5 アンボンドタイプケーブルの挿入状況

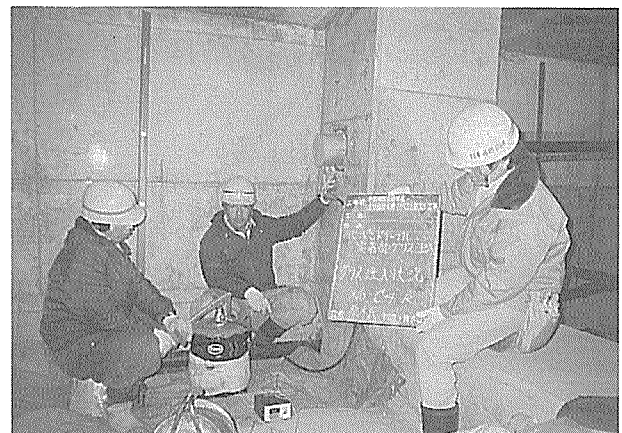


写真-6 防錆グリース注入状況

み配置した(写真-5)。緊張完了後、定着具に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(写真-6)。

## (3) 両タイプの比較

アンボンドタイプではグラウトタイプに対して、ポリエチレン管の配置、PC鋼材の挿入、グラウトの注入といった工種が不要である。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ものがある。

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。

## 4.2 下り勾配での押し出し架設

A1橋台側からの押し出し架設は、下り勾配(2.543%)で行うこととなるので、逸走防止装置を計画した(図-8)。本橋では、引張材としてPC鋼より線を採用し、おしめ装置用にウェッジ(PC鋼より線用のくさび)の定着・解放を自動的に行う装置を新たに開発した(写真-7)。それを用いて、コンピュータ制御により押し出し装置とおしめ装置とを連動させ、一定のブレーキ力をかけながら押し出し架設を行えるようにした。押し出し装置には

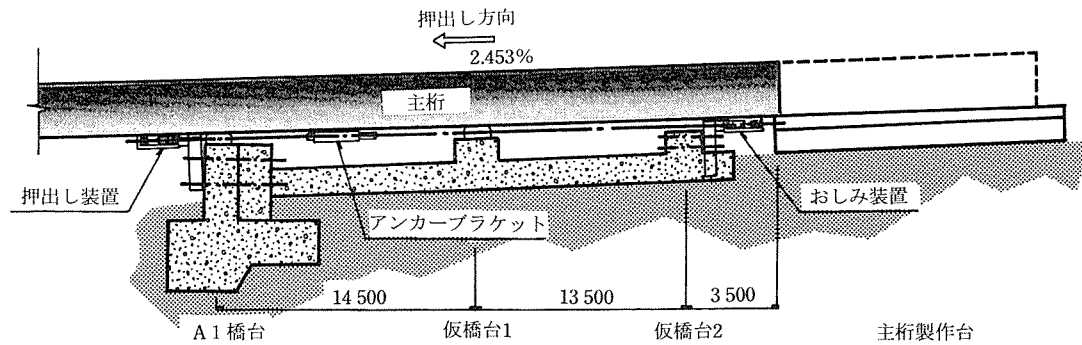


図-8 下り勾配側の押し概要図

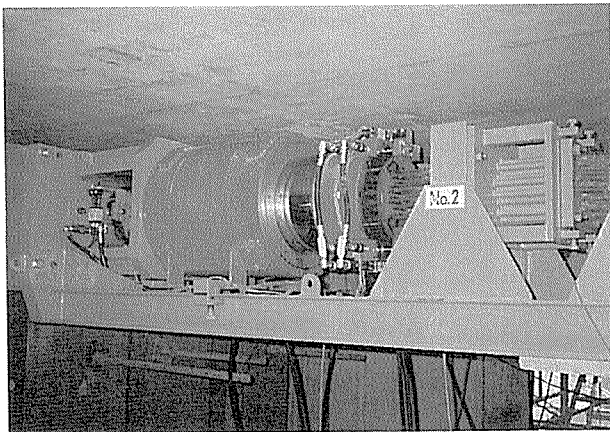


写真-7 おしめ装置

400 tf のジャッキを 1 台、おしめ装置には 400 tf のジャッキを 2 台配置し、引張鋼材として PC 鋼より線 (φ12.7) を 1 台当たり 31 本使用した。これらにより、主桁が逸走するという不安を生ずることなく、スムーズに押し出し架設が完了した。

## 5. 偏向部の応力計測

### 5.1 計測内容

#### (1) 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、局部応力度の大きくなる箇所のひずみ計測を行った。

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

#### (2) 計測時期

計測は、外ケーブルだけの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ケーブル (全 6 本) の緊張前後に行った。

#### (3) FEM 解析

詳細設計とは別に再度応力計測用のモデルを作成し、FEM 解析を実施した。図-9 にメッシュ割を示す。モ

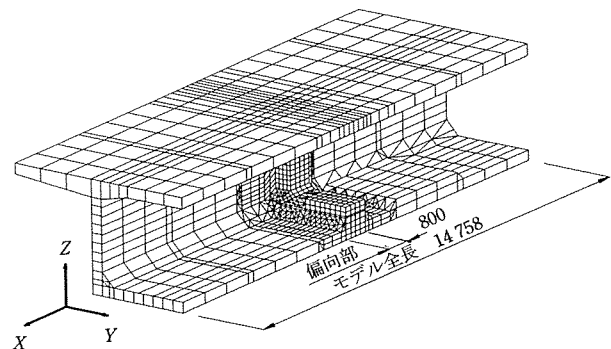


図-9 計算モデル (FEM メッシュ図)

デル長は施工ブロック長  $L=14.758$  m とし、構造対称性より半断面モデルを採用している。境界条件は、モデル両端部での単純支持とし、境界断面力として外ケーブルによるプレストレスとそれに伴う 2 次力を考慮している。また、偏向部の荷重としては、外ケーブルの定着力および偏向力を載荷している。

### 5.2 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 ( $342\,000$  kgf/cm<sup>2</sup>) を乗じたコンクリート応力度で示す。

#### (1) 15 ブロック偏向部

この偏向部は、1 ウェブ当り 3 本の外ケーブルが配置され、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-10 参照)

解析では、大きな局部応力 (定着面に  $45\sim 75$  kgf/cm<sup>2</sup> の引張応力、定着背面に  $40\sim 70$  kgf/cm<sup>2</sup> の圧縮応力) が生じる。計測でもほぼ同程度の約  $40$  kgf/cm<sup>2</sup> の引張応力、約  $60$  kgf/cm<sup>2</sup> の圧縮応力が実測されたが、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  $35$  kgf/cm<sup>2</sup>) を考慮すれば、実際にはほとんど引張応力が生じていないことになる。



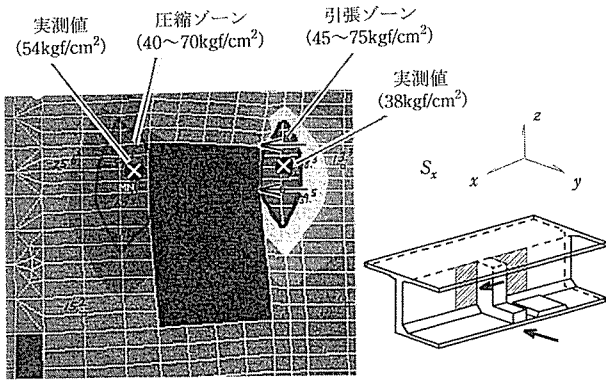


図-10 ウェブ内面の橋軸方向応力度 (15 ブロック)

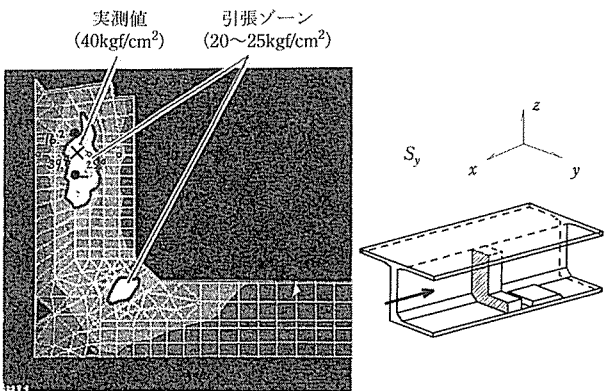


図-11 定着部の橋軸直角方向応力度 (15 ブロック)

なお、設計ではこの区間に補強鉄筋として D 19 が 25 cm 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、前面に 25 kgf/cm<sup>2</sup> の引張応力、背面に 15 kgf/cm<sup>2</sup> の圧縮応力が実測され、解析値と一致している。

また、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、1 部ケーブル間の中心では解析値よりも大きな引張応力約 40 kgf/cm<sup>2</sup> が実測されているが (図-11 参照)、補強鉄筋の応力度は鉄筋ですべて負担したとしても 1 400 kgf/cm<sup>2</sup> 程度であり、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 60 cm 離れた断面の橋軸方向応力度の桁高方向分布を図-12 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計算値を示す。なお、図では圧縮応力を負で表している。FEM 解析値と実測値は良い一致を示している。局部応力の影響を明確にするために、ここに示す計算値は主方向の設計に用いる棒理論による結果を示す。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 60 cm 程度の離れでは解消されていないものの、その影響は小さくなっていることがわかる。

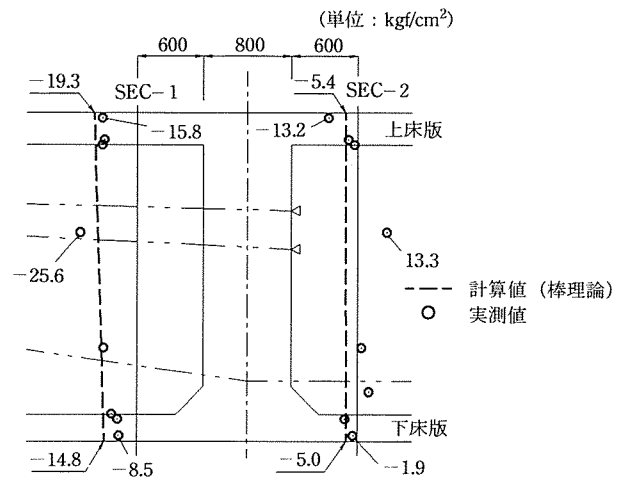


図-12 橋軸方向応力度の桁高方向分布 (15 ブロック)

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-12 の SEC-1 に示した計算値は、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。実測値は、定着された外ケーブルも有効とした計算値と良く一致しており、剛性の大きい偏向部がウェブ定着された導入力断面全体への伝達に効果があることがわかる。

(2) 17 ブロック偏向部

この偏向部は、1 ウェブ当り 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応力は生じていない。

① 下床版偏向部の橋軸直角方向応力度

解析と同程度の 5~10 kgf/cm<sup>2</sup> の引張応力が実測された。

② 下床版偏向部の鉛直方向応力度 (図-13 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 5~10 kgf/cm<sup>2</sup> の引張応力が実測された。これを鉄筋応力度に換算すると、30~60 kgf/cm<sup>2</sup> 程度である。

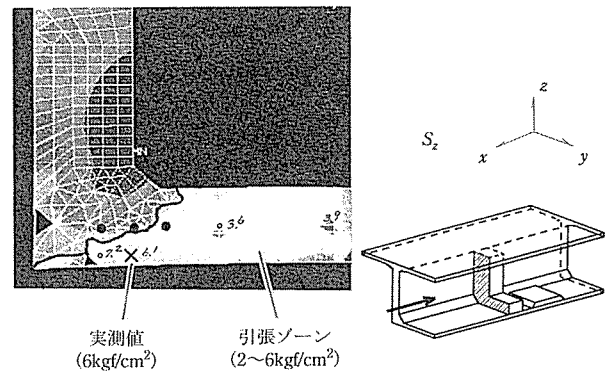


図-13 偏向部の鉛直方向応力度 (17 ブロック)

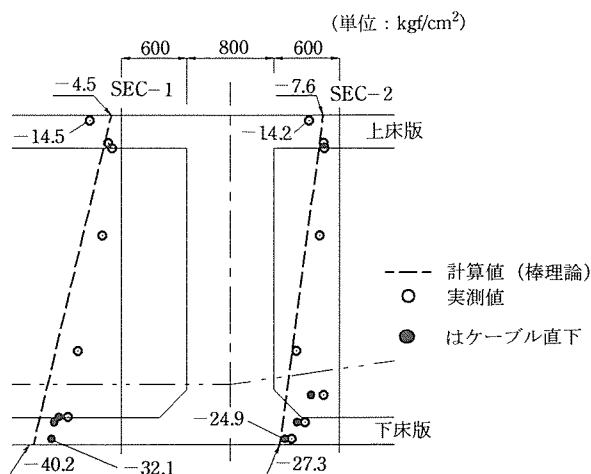


図-14 橋軸方向応力度の桁高方向分布 (17ブロック)

### 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 60 cm 離れた断面の橋軸方向応力度の桁高方向分布を図-14 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計算値を示す。なお、図では圧縮応力を負で表している。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。

### 5.3 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。

#### (1) 定着リブ部の補強筋

リブの曲げおよび割裂に対して、詳細設計では D 22 etc 125 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 250 kgf/cm<sup>2</sup> 程度 (5.2 (1) 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 1 400 kgf/cm<sup>2</sup> (許容値 1 800 kgf/cm<sup>2</sup> の約 80%) となり、鉄筋径を小さくするまでの差はなく、設計で妥当であったと考えられる。

#### (2) 偏向通過部の補強筋

通過するケーブルの偏向力に対して、D 22 etc 125 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 100 kgf/cm<sup>2</sup> 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、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考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 D 19 で十分であると考えられる。

### (3) まとめ

図-12, 14 に示すように、偏向部付近の応力の乱れは、局部的なものであり、主方向の設計を行うにあたっては、従来どおり棒理論によって良いことがわかる。

ただし、定着部近傍のウェブや上床版には、FEM 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。

## 6. おわりに

今回、押し出し架設を行う PC 橋梁への外ケーブル方式の有効性を検証するために、2 連の連続桁のうちの 1 連を内ケーブル方式、もう 1 連を外ケーブル方式とし、設計と施工の両面から比較を行った。

本文では、設計の観点から内外ケーブルの比較、施工の観点から外ケーブルタイプの比較、および偏向部の応力計測結果について報告したが、結論として以下のことが確認できた。

- ① 外ケーブル方式とすることで、主桁コンクリートおよび PC 鋼材量を減少させることができたが、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により、工費を増やさず施工性や信頼性を向上させることが可能である。
- ③ FEM 解析値と実測値は良く一致しており、設計の妥当性が確認された。本橋のように偏向部にて定着を行う構造の場合には、FEM 解析を実施し、偏向部回りのウェブや上下床版に発生する局部応力に対して補強検討を行う必要がある。

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、特に室井智文殿(前構造技術課課長)、前川利聡殿(前構造技術課担当)に厚くお礼申し上げます。

【1996 年 8 月 5 日受付】