

全外ケーブル構造を採用した上和会高架橋の定着部および偏向部の設計 — 工場製プレキャストセグメントPC橋 —

日本道路公団 中部支社 豊田工事事務所	橋場 幸彦
ドービー・日本高圧共同企業体	正会員 ○今村 晃久
同 上	正会員 照沼 英彦
同 上	正会員 岡田 規子

1. はじめに

上和会高架橋は、環境保全、耐久性向上、工期短縮、工事費削減、省力化を目的とした工場製作プレキャストセグメント工法による全外ケーブルPC連続箱桁橋である。本構造は工場にて製作された後、ストック期間を経て架設地点へ搬送する必要があるため、従来の架設地点近傍に大きな現場製作ヤードを確保し、架設を行う場合と異なり、セグメント搬送限界重量の関係から、図-1に示すように上下線各々を二つのセグメントで形成している。このため橋梁規模に対して、比較的小さな主桁断面となっており、そのような断面にプレストレスを全て外ケーブルによって導入し、集中的なケーブルの偏向を行っているため、定着隔壁と偏向部に関する本橋特有の検討と問題解決が必要となった。

本稿では、上和会高架橋詳細設計の中でも特に、定着隔壁と偏向部セグメントに関する検討内容について報告を行うものである。

2. 工事概要

2.1 橋梁概要

本橋の橋梁概要を以下に示す。また、標準部断面図を図-1に示す。

工事名	: 上和会高架橋 (PC 上部工) 工事
路線名	: 高速自動車国道第二東海自動車道 横浜名古屋線 (第1種第2級)
構造形式	: PC17 径間連続箱桁橋
橋長	: 631.0 m
支間	: 10×35.80m+7×39.00m
幅員	: 15.50m×2 (上り線3車線、下り線3車線)
主方向PC鋼材	: SWPR7B 19S15.2 (エポキシ樹脂塗装)

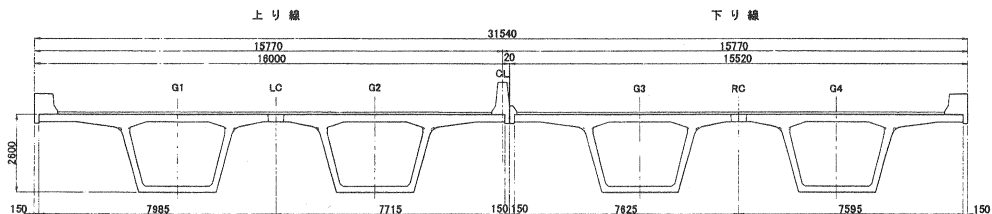


図-1 上和会高架橋断面図

2.2 鋼材配置

本橋で採用している外ケーブル (19S15.2B) の配置を図-2に示す。外ケーブルは支間部のデビエータで偏向され、各支点に設けた隔壁で定着される構造となっている。全てのケーブルは支間毎に定着され、連続したケーブルは存在しない。これは、下部工施工の工程に合わせて、上部工架設工程をフレキシブルに設定することが可能となるように配慮されたものである。

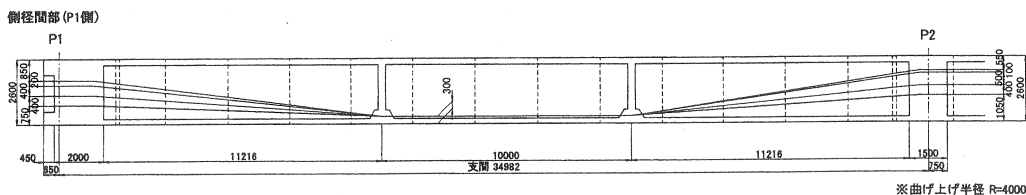


図-2 外ケーブル配置

3. 定着部隔壁の検討

定着部隔壁は図-3 に示すように、各部材寸法が通常のPC橋より比較的小さく、また、通常と同規模の開口部が設けられていることから、非常に密な定着体配置となっている。そのため、端支点部隔壁、中間支点部隔壁共に、当初はRC構造として計画されていたが、図-4 に示す3次元FEM解析モデルを使った解析の結果、横方向プレストレスが必要であることが確認された。両端支点の2箇所については問題無いが、中間支点隔壁については景観上への配慮から、定着部の後埋め処理は、好ましくないため、後埋め処理が不要なプレストレス導入方法の検討が必要となった。よって、ここでは、中間支点隔壁に関してその検討内容を記述するものとする。

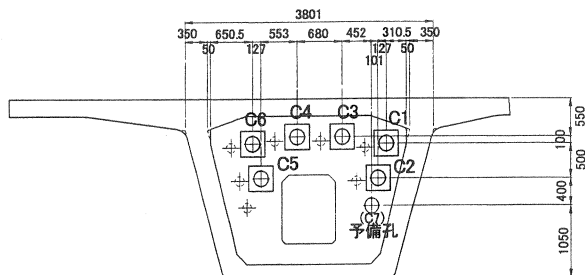


図-3 定着部隔壁形状

3.1 中間支点隔壁の問題点とその対処方法

先に記した景観への配慮の他に、以下に示すような中間支点隔壁に関する対応が必要となった。

- ① 鋼材定着に伴って中間定着部隔壁に発生する幅員方向の応力度に対して、RC構造では許容ひび割れ幅を満足できない。
- ② 横桁を後打ちにするとともに、1500mm以上の横桁厚にした場合は中間定着部隔壁セグメントの長さが3000mmを越え、搬送重量やセグメント長のバランスに問題が生じる。また、2000mm程度の厚さでは、上記①の応力度に大きな改善が見られない。
- ③ FEMによる解析の結果、横桁の表面近傍で引張応力度が卓越した状態となっている。

以上の理由から、1500mm厚の横桁のまま、安全性と耐久性を確保する手法として、両端に250mm厚のプレテンションを導入したプレキャスト横桁（以下、プレテン横桁と記す）を配置し、その間を架設後に後打ち打設する方法を採用した。

3.2 プレテン横桁の構造

プレテン横桁の正面図を図-5に、側面図を図-6に示す。中間隔壁の一部をプレキャスト構造にした例は過去に無く、採用にあたっては、設計および製作に関する入念な検討を行った。以下に、プレテン横桁の構造的な検討内容の概要を記す。

1) セグメントとの接合

セグメントとの周辺接合部については当初、突出鉄筋を考えていたが、セグメント型枠への取付け、ウエ

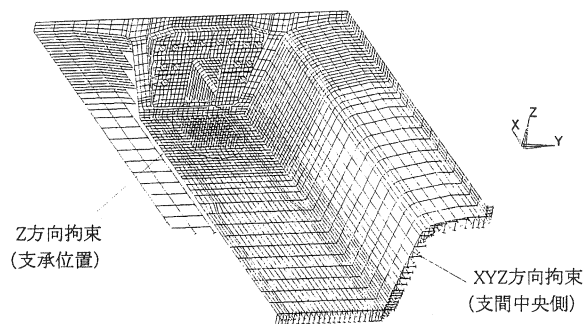


図-4 定着部隔壁 FEM 解析モデル

ブ・床版厚に伴う鉄筋継手の問題から、スタッドジベルでプレテン横桁と接合したパーフォボンドリブを用いることとした。パーフォボンドリブの形状を図-7に示す。パーフォボンドリブを用いたジベル構造の設計には、既往の研究における提案式¹⁾を用いた。設計に用いた提案式を式-1に示す。

$$\left. \begin{aligned} Q &= 1.1 \cdot \phi^2 \{-0.818 \times (\phi / \phi_{40}) + 2.691\} \times \sigma_c \\ \Delta Q &= 1.1 \cdot \phi^2 \times (12.966 \cdot p - 0.312) \times \sigma_c \\ Q_a &= Q + \Delta Q \end{aligned} \right\} \text{(式-1)}$$

ここで、 Q : コンクリートジベル1個当りの終局せん断耐力

ϕ : パーフォボンドリブの孔径

σ_c : コンクリートの設計基準強度

p : 貫通鉄筋比

Q_a : ジベル1個当りの終局時合計せん断耐力

上式より単位長さ当りの終局時せん断耐力 Q_a を求めると、1736kN/mとなる。

終局時の作用設計せん断力は3次元FEM解析の解析値を使用して算出した。図-8にFEM解析におけるプレテン横桁部250mm分を、取出したものを示す。応答値 τ_{yz} の最大値は、2.21N/mm²であった。この解析値は死荷重+活荷重(D+L)に対する値のため、終局時の作用せん断力は、

$$\begin{aligned} Qu &= 1.7 \times 2.21 \times 250 \times 1000 / 1000 \\ &= 939.3 \text{ kN/m} < Q_a = 1736 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

となり、十分な安全性を確保していることが確認された。

2) 外ケーブル定着部処理

支圧板、トランペットシース、スパイラル鉄筋については、プレテン横桁製作の段階で、組込み配置しておくこととした。なお、予備緊張用鋼材についても、同様に定着具一式を製作段階で設置することとした。

3) 中埋めコンクリート

柱頭部に設置した後に打設される中埋めコンクリートの設計基準強度も他と同様に60N/mm²とし、両ウェブ、上床版との密着性を確保するため、自己充填型膨張コンクリートを使用した。

4) 中埋めコンクリートとの接合

FEM解析の結果、中埋めコンクリートとプレテン横

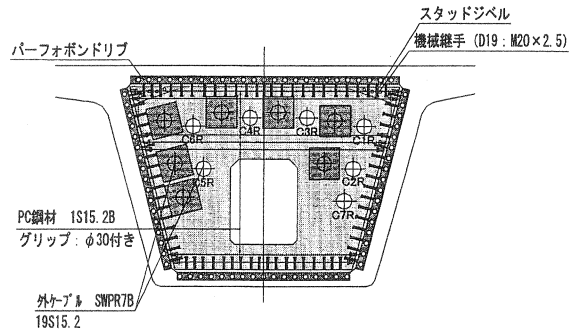


図-5 プレテン横桁正面図

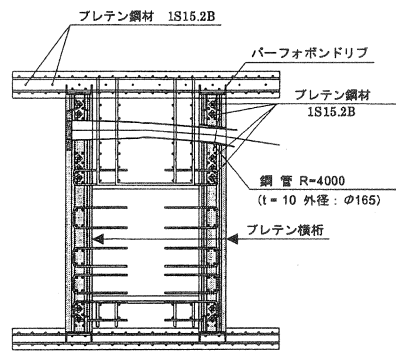


図-6 プレテン横桁側面図

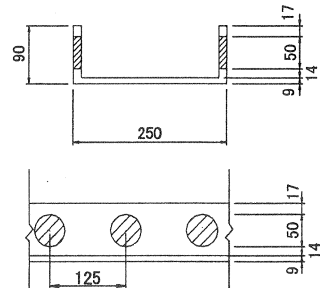


図-7 パーフォボンドリブ概略図

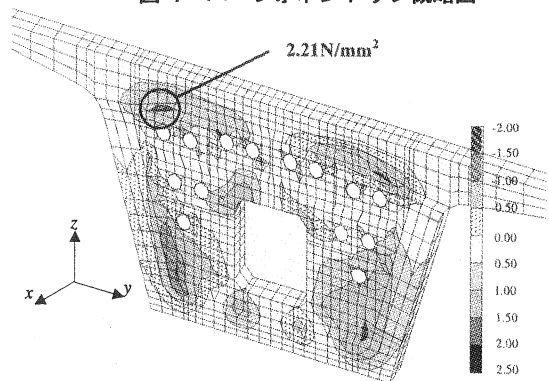


図-8 せん断応力分布 (τ_{yz})

桁接合部にずれせん断力は殆ど作用せず、板曲げによる変形も小さいことを確認した。中埋め部が 1000mm と狭いため、施工性を考慮した上で、付着確保用の突出鉄筋と、上床版ハンチ部鉄筋用の機械継手を配置した。なお、プレテン横桁の表面については、硬化遅延材を塗布した上で、洗い出し処理を行った。

5) プレテンション鋼材の定着

プレテン横桁には、1S15.2B の PC 鋼材を用いた。通常の付着によるプレテンション鋼材の定着方法では、部材端付近の鋼材付着切れにより、鋼材径を ϕ とした時にストレスが有効となる距離は 65ϕ となる。プレテン横桁は 3000mm 程の長さしかなく、この付着切れを解消するために、数種類の定着方法による張力導入試験を行った上で、図-9 に示すような、圧着グリップと鋼プレートをを用いた定着方法を採用することとした。なお、製作にあたっては事前に圧着グリップと鋼プレートを PC 鋼材に取付けた状態でアバットに設置し、緊張力を導入した。

6) 緊張計画

本橋梁は一支間当り 6 本の外ケーブルが配置されているが、定着部の応力緩和と場所打接合床版へのプレストレス誘導のため、架設時に 4 本を緊張し、場所打接合床版打設後に残りの 2 本を緊張する計画とした。外ケーブルの緊張手順を図-10 に示す。

3.3 中間定着部隔壁の応力状態

中間定着部隔壁の応力状態が最も不利な状態になるのは、図-10 における Step1 に示した片側支間 4 本の外ケーブルを定着した時である。その時の FEM 解析による横桁表面応力の状態を示したものが、図-11 である。また、図-12 がプレテン横桁にプレテンションを入した時の応力状態を示したものである。プレテンションの有効係数を 0.85 と仮定すると、図-10 と図-11 に矢印で示した部分の応力度は、 $6.69 - 0.85 \times 5.09 = 2.36 \text{ N/mm}^2$ となる。これはひび割れ発生限界応力度よりも低い値であり、プレテン横桁の効果と定着部隔壁の安全性が設計上で確認された。

3.4 プレテン横桁完成状況

上記の検討結果を踏まえ、本橋で計画されている実物大試験のために、プレテン横桁を製作した。写真-1 にプレテン横桁の完成状況を示す。製作にあたっては、特に定着装置の配置と設置角度に関する精度に対して、細心の注意を払った。

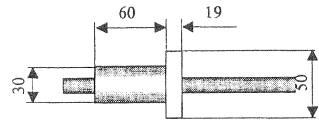


図-9 PC 鋼材定着部

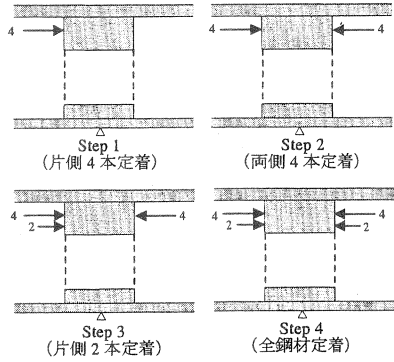


図-10 外ケーブル緊張手順

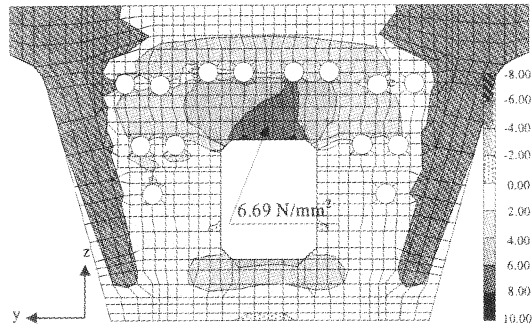


図-11 片側 4 本定着時定着部隔壁応力度 (プレテン横桁無し)

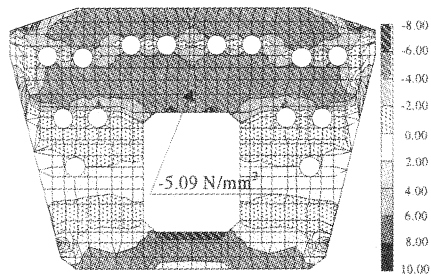


図-12 プレテン横桁プレテンション導入時応力度 (0.7fpu)

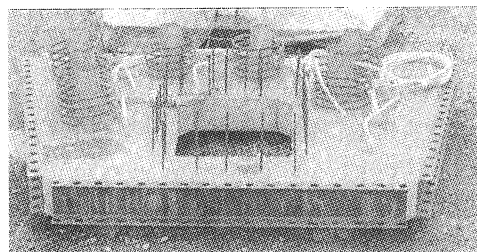


写真-1 完成状況

4. 偏向部の設計

4.1 偏向部セグメントの形状

本橋ではその支間規模から考えて、図-2 に示したような集中偏向方式を採用している。しかし、定着隔壁と同様に比較的小さな断面に予備鋼材を含めると7本の鋼材を偏向することとなるため、複数の形状案に対してFEM解析を行い、それぞれの応力性状を把握した上で、偏向部セグメントの形状を決定した。その際に考慮した形状選定に対する要求項目は以下の通り。

- ① RC 構造として設計し、 $0.7f_{pu}$ の緊張力が作用した時点の許容ひび割れ幅を $0.005c$ (c : かぶり厚) とする。
- ② 標準セグメント製作ラインで製作するために、キャストイングセル (鋼製内型枠) が通過可能である。
- ③ 予備鋼材緊張作業を想定し、緊張ポンプが通過できるようなフラットな区間を設ける。

以上の検討から選定された偏向部セグメント形状を図-13 に示す。リップ形状は上記②を満たした上で、偏向力を効率良く伝える形状とし、200mm厚の下床版応力の緩和のためB-B断面に示したように、偏向部にテーパを設けることとした。

4.2 応力解析

偏向部の形状検討と安全性の検証には、3次元 solid 要素を用いた FEM 解析を用いた。解析規模としては、荷重条件が橋軸方向に対称であるため 1/2 径間分とし、片側 Box 断面を Solid 要素で再現した。実橋に極力近い形状となるよう解析モデルを作成したが、ダクトについては直線形状とした。解析モデルを図-14、その内部形状を図-15 に示す。

1) 境界条件

境界条件は、支点側の x 方向 (橋軸方向) を拘束、支間中央側は対称条件を満たすため x 方向を拘束した。本モデルは 2 主桁断面の片側 Box を用いているため、上床版端部には全長に渡って y 方向 (橋軸直角方向) 拘束し、2 主桁の影響を考慮している。また、梁としての曲げの影響を排除するためウェブ上端全長と、実橋の支承位置の z 方向を拘束をしている。

2) 荷重載荷方法

外ケーブルの鋼材配置に従い、プレストレスによる向心力を求め、節点荷重として載荷した。その際、平面方向の向心力も考慮した。緊張力は $0.7f_{pu}$ とした。断面方向には、集中荷重による応力集中を避けるため、図-16a に示すように、ダクトを形成する 8 節点のうち上側 3 点それぞれに計算値の 25%、50%、25%、を載荷した。橋軸方向については、ケーブル形状から向心力の

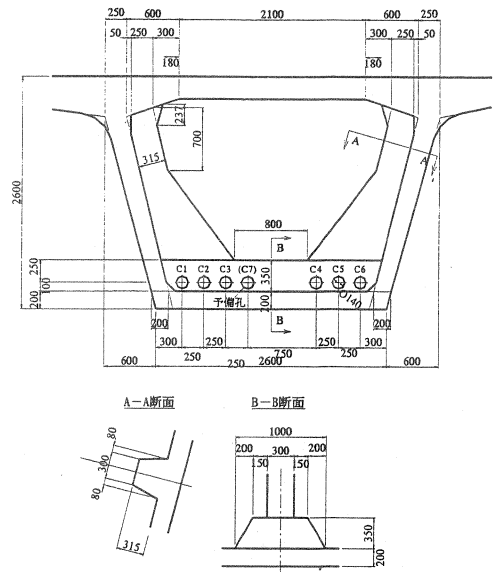


図-13 偏向部セグメント形状

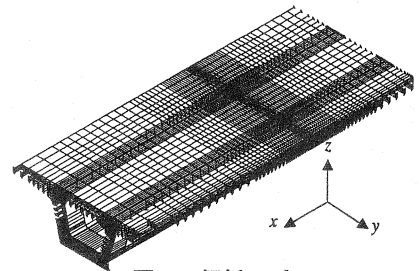


図-14 解析モデル

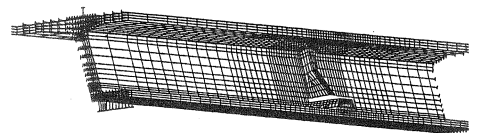


図-15 解析モデル内部形状

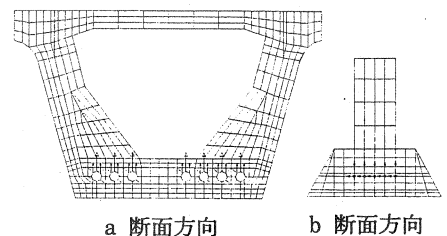


図-16 荷重載荷位置

作用する区間を求めた上で、図-16b で示した位置 (偏向部内の5箇所) に全向心力の1/5 づつを載荷した。

3) 発生応力度

外ケーブル偏向部における予備鋼材を除く6本緊張時の橋軸直角方向応力度 (σ_y) を図-17 に、同じく橋軸方向応力度 (σ_x) を図-18 に示す。

先に記したように、予備鋼材緊張作業時のポンプ車通過のために設けた 800mm のフラットな区間に最大 4.08N/mm^2 の引張応力が発生しているが、本個所を含め、全ての引張応力発生個所において、許容ひび割れ幅を満足出来ることを確認した。

4) 必要鉄筋量の算出について

以上の解析結果から、図-19 に示す T1~T8 の偏向部、上床版、下床版に作用する引張応力、および局部的割裂力に対して、許容ひび割れ幅を満足するように、必要鉄筋量の算出を行った。

5. 最後に

工場製セグメント工法は、現在橋梁に求められている省力化、経済性、高品質を高いレベルで実現する工法である。本文では、定着隔壁部と偏向部に関する検討の概要を述べた訳だが、中でも特に定着部隔壁におけるプレテン横桁の採用は前例も無く、解析、設計、製作、セグメント型枠への立て込み手法等、クリアすべき問題点は多岐に渡った。これらの検討結果を確認する目的で行った実物大試験では、 0.7fpu を導入した状態で、一部ダクト周辺の縁応力による微細クラックが発生したものの、健全な状態を維持しており、その効果を実際に確認することが出来た。

本文で報告した内容が、今後の工場製セグメント工法に対する一助となれば幸いである。

最後に本橋の設計にあたり多大なご指導を頂いた日本道路公団中部支社豊田工事事務所及び、関係各位の皆様にご場を借りて感謝の意を表する次第である。

参考文献

- (1) 新谷英司、蛭名貴之、上平謙二、柳下文夫：波形鋼板とコンクリート床版の接合方法に関する実験的研究、第9回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集 1999年 pp91~96
- (2) (社)プレストレストコンクリート技術協会、外ケーブル構造・プレキャストセグメント工法設計施工基準(案)
- (3) (社)プレストレストコンクリート技術協会、PPC 構造設計基準(案)、平成8年3月
- (4) 土木学会 コンクリート標準示方書、平成8年度12月
- (5) (社)日本道路公団、設計要領第二集、平成10月7月
- (6) (社)日本道路協会、道路橋示方書・同解説、平成8年12月 (社)日本道路協会

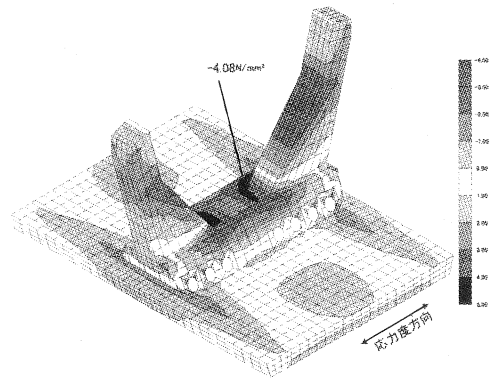


図-17 橋軸直角方向応力度 (σ_y)

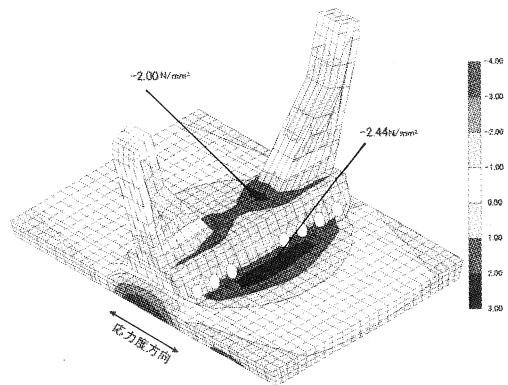


図-18 橋軸方向応力度 (σ_x)

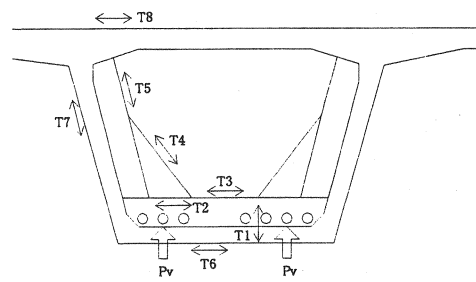


図-19 必要鉄筋量の算出箇所