

分岐構造と柱頭部省力化施工を採用した波形ウェブ橋の設計

—伊佐布2号高架橋(PC上部工)下り線工事—

名古屋支店	土木技術部	川除達也
名古屋支店	土木工事第一部	武村浩志
大阪支店	技術部	藤原孝司
名古屋支店	土木技術部	杉山宜央

概要：伊佐布2号高架橋(PC上部工)下り線工事は、第二東名高速道路吉原ジャンクション(仮称)付近で建設される高架橋工事である。本橋は、張出施工による3橋の波形鋼板ウェブ橋からなり、拡幅・分岐・同一支間内でのウェブ数変化などの構造的特徴を有している。また、柱頭部施工において、旧来のブラケット支保工に代わり、波形鋼板ウェブと張出架設作業車の部材を利用した「柱頭部の省力化施工」を採用している。

Key Words：波形鋼板ウェブ，拡幅，広幅員，分岐，ウェブ数変化，省力化施工

1. はじめに

現在建設中の第二東名高速道路では、多種多様な新しい構造を有する橋梁が施工されている。その中でも採用事例が多いのが波形鋼板ウェブ橋である。波形鋼板ウェブ橋はその施工実績が増加する中で、波形鋼板ウェブの形状やコンクリート部材の接合方法等の標準化が進みつつあるほか、複雑な条件を有する橋梁にも採用される事例が増えている。また、施工方法についても、波形鋼板ウェブの特性を活かした施工方法が多数開発されている。

伊佐布2号高架橋(PC上部工)下り線工事では、拡幅・分岐・ウェブ数変化など複雑な幾何条件に対し波形鋼板ウェブ橋を採用するとともに、旧来のブラケット施工を用いない柱頭部の省力化施工を採用している。本稿では、このような特徴を持つ本工事について設計面からの報告を行う。

2. 概要

2.1 全体概要

伊佐布2号高架橋(PC上部工)下り線工事は、静岡市清水区伊佐布に位置する3橋の高架橋を施工するもので、平成19年8月の完工へ向け現在施工中である。3橋は第二東名吉原ジャンクション(仮称)付近に位置する連続した高架橋であり、いずれも波形鋼板ウェブ構造による橋梁となっている。表1に主要諸元を示す。

2.2 伊佐布2号高架橋(下り線)

伊佐布2号高架橋は、最大支間110mの4径間連続波形鋼板ウェブ橋である。

本橋は、現東名と第二名神を結ぶ清水連絡路の本線橋であり、さらに山梨方面への中部横断道へ接続する。ただし、今回の暫定系施工では中部横断道への本線連絡は行われなため、吉原ジャンクション(仮称)におけるランプ橋の一部として構成される。暫定系においては2車線ランプ規格の等幅員となっている。



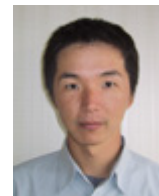
川除達也



武村浩志



藤原孝司



杉山宜央

表-1 主要諸元

	伊佐布2号高架橋	ACランプ高架橋	AIランプ高架橋
道路規格	A規格ランプ 設計速度 V=60km/h		
構造形式	PRC4 径間連続 波形鋼板ウェブ箱桁橋	PRC3 径間連続ラーメン 波形鋼板ウェブ箱桁橋	PRC5 径間連続ラーメン 波形鋼板ウェブ箱桁橋
橋長	345.0m	277.8m	413.4m
最大支間	110.0m	135.0m	118.0m
有効幅員	8.5m(暫定)	8.5m~19.75m	8.5m~17.676m
平面線形	R=1100m(最急)	R=1100m(最急)	R=320m(最急)
横断勾配	4.0%(最大)	2.50%	8.5%(最大)
断面	1室箱桁	1室箱桁	1・2室箱桁
備考	—	広幅員1室断面	分岐構造 ウェブ数変化

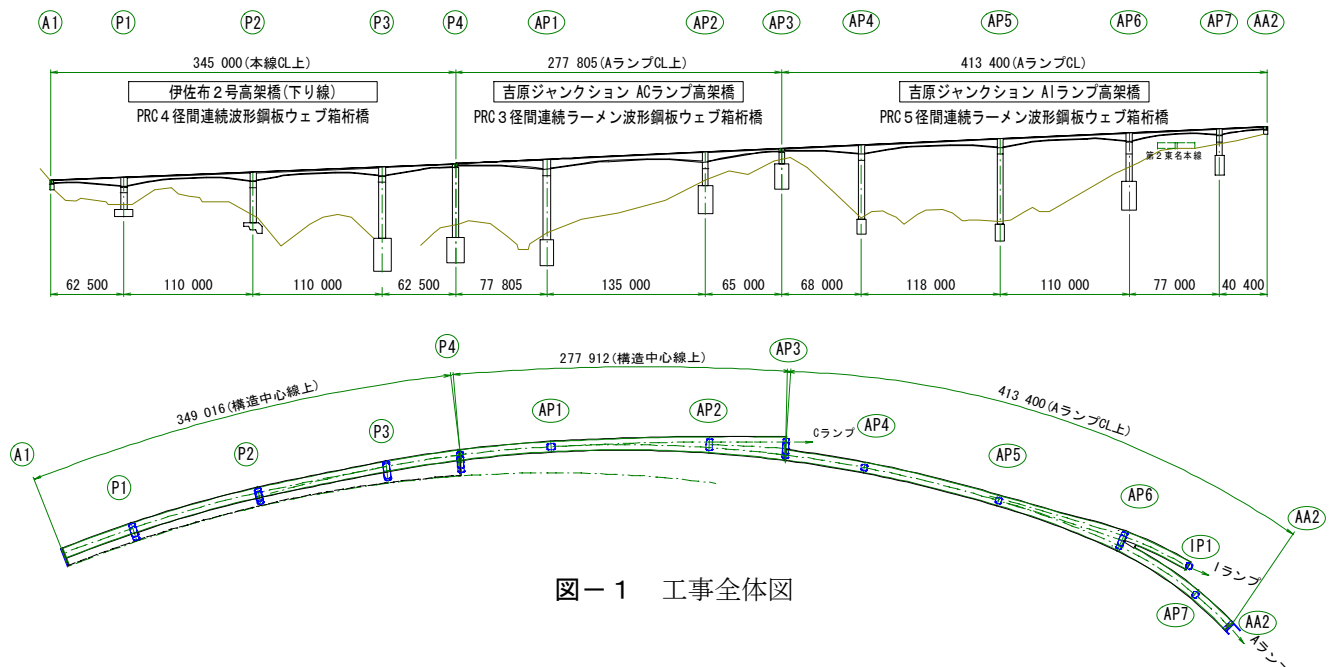


図-1 工事全体図

2.3 吉原ジャンクション(仮称)ACランプ高架橋

ACランプ高架橋は3径間連続ラーメン波形鋼板ウェブ橋である。本橋の中央支間135mは、本工事の中で最大である。有効幅員は2車線ランプ規格($w=8.5\text{m}$)が基本であるが、終点側でAランプとCランプの二つにランプに分岐・接続するため、最大で19.75mまで拡幅する。

桁高は柱頭部で $h=8.5\text{m}$ 、支間中央部で4.3mである。一方、桁端部の桁高は2.5mに制限されており、レベル2地震時への対応から、側径間の一部には高強度鉄筋(SD490 D29)を配置している。

2.4 吉原ジャンクション(仮称)AIランプ高架橋

AIランプ高架橋は、ACランプ高架橋に接続する5径間連続ラーメン波形鋼板ウェブ橋である。中間橋脚位置において2つのランプ橋に分岐することが大きな特徴であり、5径間+分岐1径間の構造となっている。また、分岐部付近では幅員が大きく変化するため、支間部においてウェブ数が増える構造を採用している。

なお、本工事においては張出架設工法が基本であるが、本橋のAP7橋脚からの張出架設部は現場条件・支間等を考慮し、設台式支保工施工に変更している。

3. 主桁の設計

3.1 共通桁高曲線の設定

本工事における3橋のうち、伊佐布2号高架橋は波形鋼板ウェブ橋で、ACおよびAIランプ高架橋は旧来のコンクリートウェブ橋で発注されており、さらに桁高変化形状も異なっていた。伊佐布2号高架橋は波形鋼板ウェブ橋によく見られる直線変化の変断面桁であり、ACおよびAIランプ高架橋は放物線を用いた桁高変化となっていた。しかし、詳細設計時にすべての橋梁を波形鋼板ウェブ橋に統一することとなり、連続する高架橋であることから共通の桁高変化形状を設定することとした。

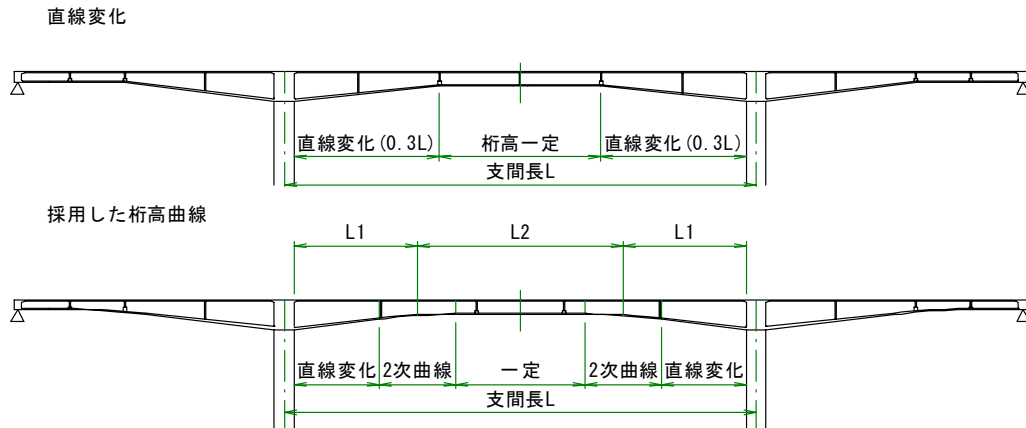


図-2 桁高変化形状

直線変化断面は、等桁高部分が長く波形鋼板ウェブの製作費が経済的となるが、桁高変化の折れ点で大きな集中応力が発生し、ACおよびAIランプ高架橋のような幅員が大きく変化する非対称構造では最適断面変化が得られにくいなどのデメリットがある。

そこで、図-2に示す桁高変化曲線を採用した。直線変化の折れ点に2次曲線を挿入した形状であり、以下のような特長を持つ。

- ・放物線変化に比べ等桁高部分が長く、波形鋼板ウェブの製作費を抑えることができる
- ・断面急変部がないため応力集中が発生しにくく、中間隔壁（外ケーブルディビエータ兼用）設置位置の自由度が高い

なお、形状決定にあたっては経済比較を行い、中央桁高は $h=L/32$ 、桁高変化点 $L1=0.25L$ と決定した。

3.2 主桁断面

3.2.1 基本断面

標準幅員部の主桁断面は1室箱桁断面を基本とした。上床版は、経済性および主ケーブルの定着を考慮し中間床版厚290mmを基本とした。

波形鋼板ウェブ形状は、最近の標準である波高 $H=220\text{mm}$ 、 $L=1600$ 型を基本とし(図-4(a))、板厚は一部を除き9mm~16mmである。3橋ともに内外ケーブル併用構造であるが、張出架設時に外ケーブルを用いていないため、上床版の定着突起が不要となる。このため、接合部の床版には打ち下ろしを設けておらず、厚さ500mmの床版支点部に波形鋼板ウェブを直接接合している。波形鋼板ウェブ同士の接合はすみ肉溶接による重ね方式で、上床版との接合はツインパーフォンドリブ、下床版との接合部は埋込み接合である。これらの接合方法はアングルジベルと比べ経済性に優れる。波形鋼板への裏打ちコンクリートは、柱頭部もしくは柱頭部+1ブロックに設けている。

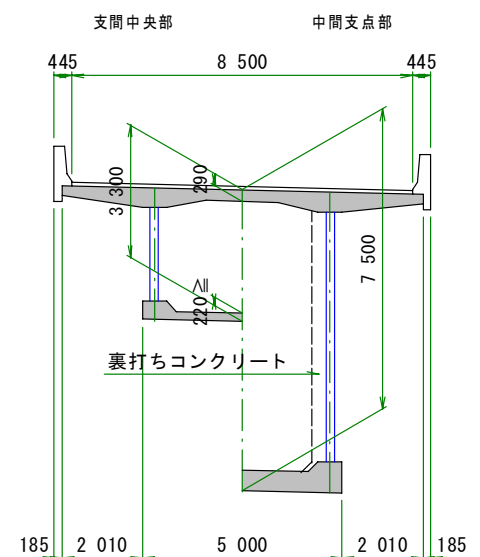


図-3 基本断面

3.2.2 AC ランプ高架橋(拡幅部)

AC ランプ高架橋は標準有効幅員 8.5m に対し、終点側で最大 19.75m まで拡幅する。発注時の設計では拡幅部については2室の箱桁断面となっていたが、経済比較を行い全径間にわたり1室断面とした。拡幅量の大きい箇所では図-5に示すとおり広幅員の扁平断面となっており、中間床版厚は床版支間に応じて最大 340mm とした。広幅員断面を2枚のウェブで受け持たせるため、波形鋼板ウェブは最大 28mm 厚となっ

ているほか、ウェブ間隔が 10m を超える AP2~AP3 径間においては、横方向剛性を上げるため波高を 330mm と標準より大きくしている(図-4 (b))。また、端支点近傍においては地震時のせん断力の一部を裏打ちコンクリートに受け持たせている。

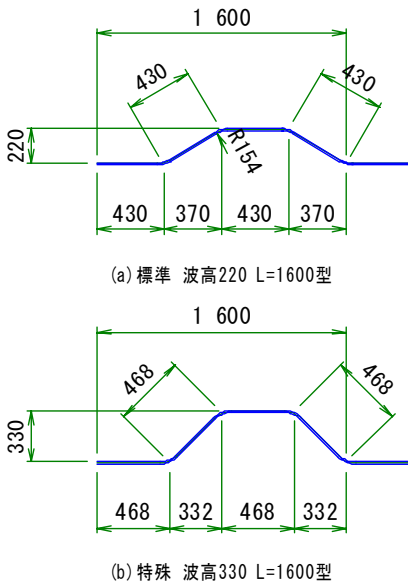


図-4 波形鋼板ウェブ

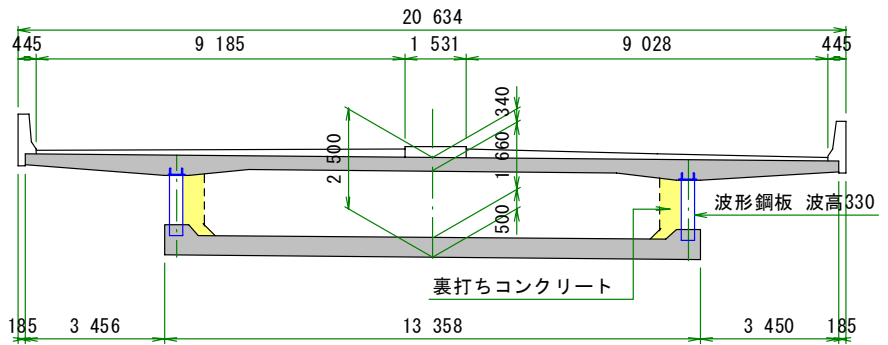


図-5 AP3 付近断面図

3.2.3 AI ランプ高架橋(拡幅部・分岐部)

AI ランプ高架橋においては、AC ランプ高架橋と異なり、拡幅部の構造を1室から2室へ変化させている。これは拡幅の後、分岐することを考慮したものである。1室断面では張出床版長が大きくなり、分岐点前後において、ウェブ位置を合わせることが不可能であること、PC 鋼材の取り合いが配置上困難であることを考慮した結果である。なお、AP6 からの張出施工においては、架設作業車が左側1基(大型)・右側2基(中型)の計3基による張出施工となる(図-6)。

AC ランプ高架橋と同様に、拡幅部の径間は波高 330mm の波形鋼板ウェブを用い、ウェブ数変化点においては、厚さ 500mm の隔壁を設けウェブのせん断力を伝達している。主桁の分岐部は中間支点横桁を介してウェブ数が3から4に変化することから、せん断力の伝達を FEM 解析により確認している。

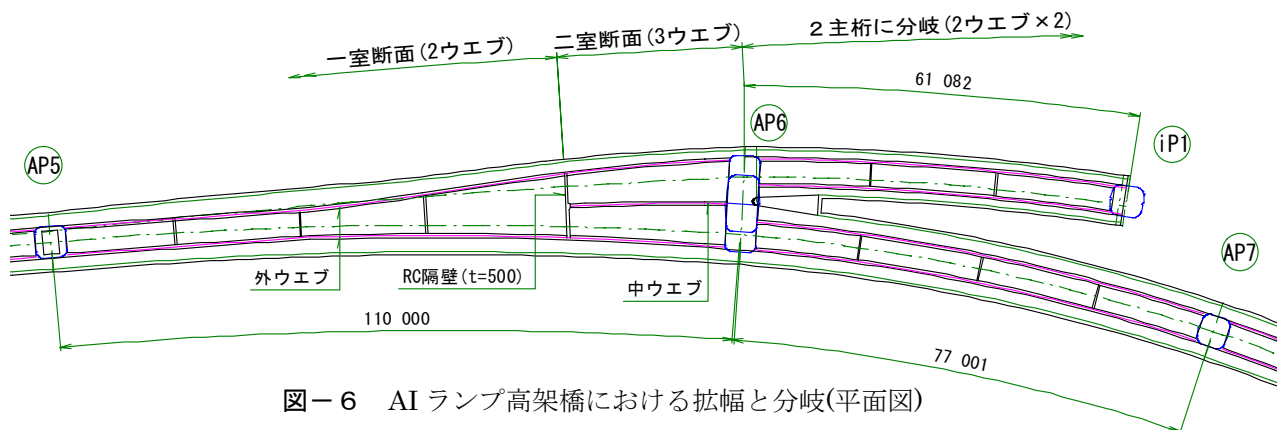


図-6 AI ランプ高架橋における拡幅と分岐(平面図)

3.3 PC 鋼材配置

3.3.1 架設ケーブル

架設ケーブルはすべて内ケーブルである。内ケーブルは SWPR7BL 12S15.2 を使用し、床版内に1段配置

とした。定着具はディビダークの MA タイプを使用した。定着面は小口面に対し直交させ、波形鋼板ウェブ接合部のパーフォボンドリブと緊張ジャッキの干渉を避ける配置とした。シースはポリエチレンシースを使用し、内ケーブル1本ごとにグラウトセンサー1ヶ所配置している。

内ケーブルはウェブを基準に配置・定着するが、AI ランプ高架橋の分岐部においては柱頭部を挟んでウェブ数が起点側3・終点側4と変化する。そこで、図-7に示すようなウェブ数変化に対応し、かつ張出施工においても支障のない特殊な配置としている。この付近では、内ケーブルが大きく変曲するため、水平方向の腹圧力に対して床版の鉄筋補強を行った。

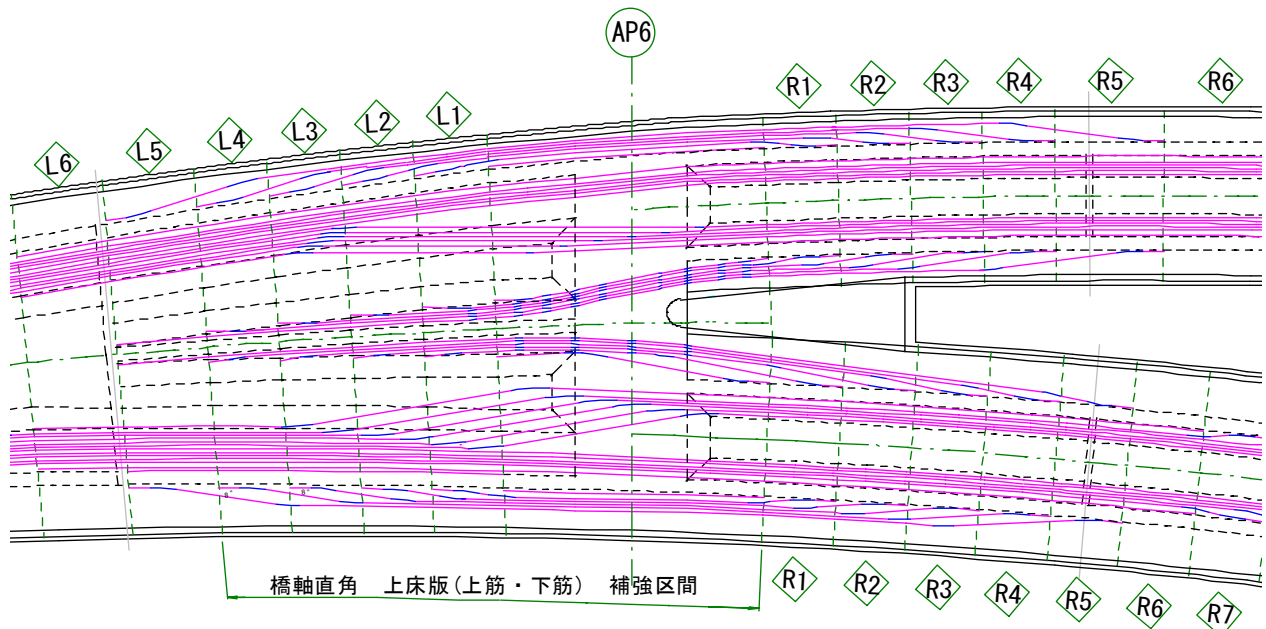


図-7 AI ランプ高架橋分岐の内ケーブル配置(平面図)

3.3.2 連続ケーブル

連続ケーブルは外ケーブル SWPR7B 19S15.2 を用いた。外ケーブルは支点横桁に定着するが、経済性に配慮できるかぎり2径間にわたる配置とし、定着具個数・緊張工数を低減している。外ケーブルの防食はエポキシ被覆鋼材を用いることとし、定着具付近のみグラウトを行う。エポキシ被覆鋼材を外ケーブルシステムに用いた場合、透明シース+グラウトタイプに比べ定着具や偏向管の寸法が小さくなり、鋼材配置の面で有利である。

張出施工による PRC 箱桁橋では、一般に中間支点上は応力的に余裕があるのに対し、支間中央部の下縁側における引張応力・曲げひび割れが設計上のクリティカルとなるケースが多い。したがって、連続ケーブルは、2次プレストレス力により正の曲げモーメントを小さくする配置が求められる。本橋においても、ディビエータをできるかぎり支間中央部に寄せ、支間中央の正曲げモーメントを減らす配置を採用している。

3.3.3 横締ケーブル

本工事においては、幅員・床版支間が多種多様であることから、床版横締 PC 鋼材は SWPR19L 1S19.8/1S21.8/1S28.6 の3種類を条件に応じて使い分けている。

4. 特殊解析・構造細目

4.1 AC ランプ高架橋拡幅部

AC ランプ高架橋のうち、終点側側径間は広幅員の1室断面を採用したことから、図-5に示すような扁平断面を有する。この構造に対し、FEMを用いて以下の照査・検討を行った。

4.1.1 床版の有効幅に対する検討

AP3 支点付近は長支間の床版を有する構造であるとともに桁高も低く、著しく扁平な断面となっている。そこで、主方向曲げに対する有効幅の検討を3次元 FEM 解析により確認した。床版において、ウェブ接合位

置とその他の位置では、橋軸方向応力度に若干の差異が見られるものの、おおむね均等に分配しており、床版の全幅が主桁フランジとして有効であることが確認された。

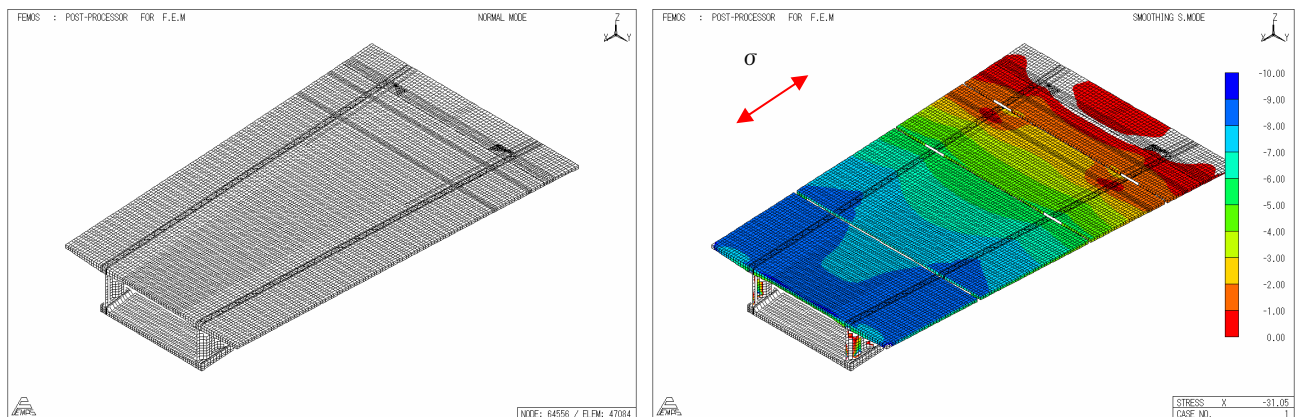


図-8 ACランプ高架橋広幅員床版部 FEM モデル(左) 橋軸方向応力図(右)

4.1.2 全体モデルによる横方向の照査

箱桁橋の横方向設計においては、主桁を単位長さのボックスラーメン構造として解析し、断面力算定を行うのが一般的である。しかし、本橋のような拡幅を有する広幅員一室断面においては、橋軸方向の主桁の変形や隔壁の変位拘束の影響により、ボックスラーメン解析とは異なった断面力となる懸念がある。そこで、終点側側径間全体をモデル化して FEM 解析を行い、ボックスラーメン解析結果との比較・照査を行った。

この結果、上床版にはボックスラーメン解析との大きな差異は認められなかったが、下床版については橋軸方向応力の影響と見られる橋軸直角方向の変形・曲げ応力が発生する箇所が見られた。これは、とりわけ桁高変化が 2 次曲線となる区間において顕著であり(図-9 右囲み部)、下床版の橋軸方向応力の圧力線が腹圧力として下床版面に働いたためと考えられる。当該区間では、FEM 解析結果から、下床版橋軸補直角方向鉄筋を決定することとした。

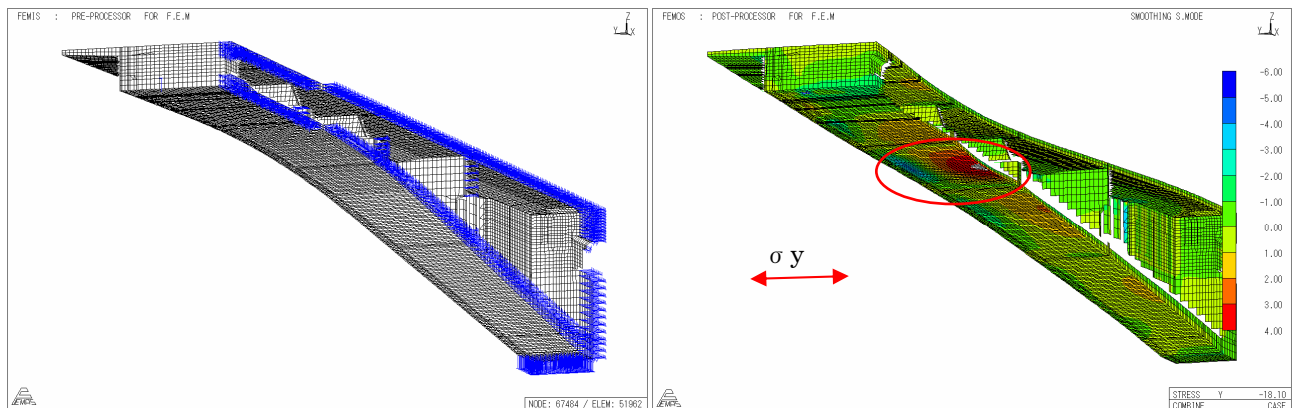


図-9 ACランプ高架橋広幅員部全体 FEM モデル(左) 変形・橋軸直角方向応力図

4.2 AI ランプ拡幅部・分岐部

AI ランプ高架橋は拡幅・ウェブ数変化・主桁の分岐を有する。これにともない、以下の詳細検討を行った。

4.2.1 拡幅・ウェブ数変化(AP5~AP6)の解析

本橋のうち、AP5~AP6 は幅員が 8.5m~17.676m と変化し、さらに支間内でウェブ数が増える構造である。この径間の AP6 側から起点側の張出施工部についてモデル化し、3次元 FEM 解析を行って急激な拡幅・ウェブ数変化の影響と隔壁について検討した。

その結果、図-10に示すとおり、せん断力は各ウ

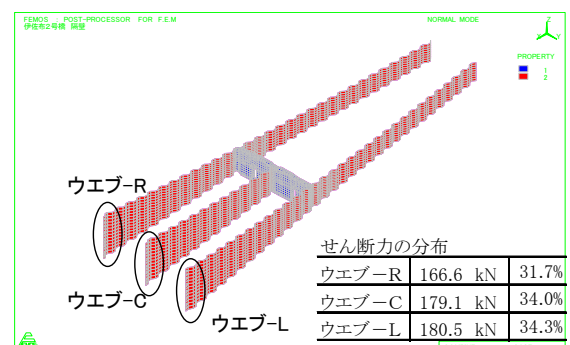


図-10 せん断力の分布

ウェブに対し 31.7%~34.3%とほぼ均等に分配し、厚さ 500mm の隔壁が有効に機能することが確認された。また、この付近の下床版・上床版においてとくに有害な応力の発生は見られなかった。

4.2.2 主桁分岐部(AP6 支点横桁)の解析

主桁が分岐する AP6 付近について 3次元 FEM 解析を行った(図-11)。AP6 柱頭部および隣接各 2ブロックをモデル化し、荷重は骨組解析による境界断面力を载荷した。活荷重満載ケースのほか、活荷重偏載荷の影響を見るため各隣接径間それぞれのみ活荷重を载荷したケースについても考慮している。

解析の結果、主たる引張主応力は活荷重満載時に生じ、発生部位は下床版付け根位置の支点横桁鉛直方向応力であった(図-12)。この応力は 5N/mm^2 を超えていたため、人道孔位置と柱頭部下床版と支点横桁におけるハンチの形状を見直した。この結果、引張応力度は 3N/mm^2 程度となり、鉄筋(D25 ctc 250)にて補強可能なレベルに抑えることができた。

支点横桁内のせん断応力分布(鉛直)は、解析結果からコンクリートが負担できる 0.55N/mm^2 以上の平均せん断応力度は発生しておらず、所定のスターラップ以外にとくに補強の必要性はない。また、橋軸直角方向の鉛直せん断応力度についても、 0.55N/mm^2 を超えている箇所はあるが、大きなせん断応力の発生は見られず、所定のスターラップを配置することより安全性を確保することができた。

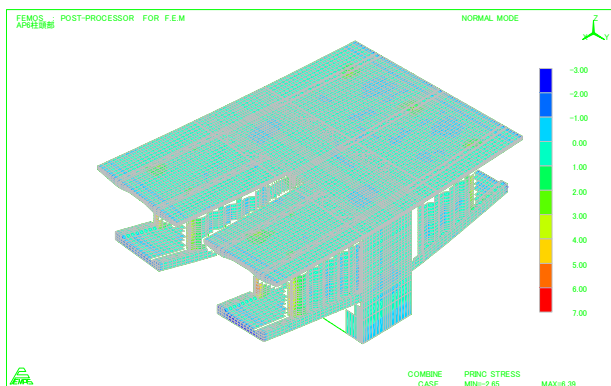


図-11 分岐部の FEM(モデル全景 主応力図)

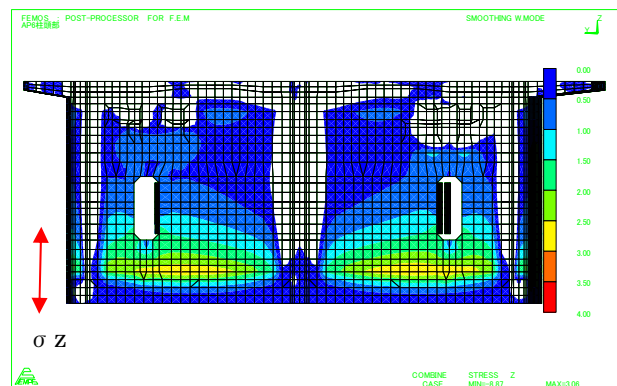


図-12 支点横桁 鉛直方向応力図

5. 柱頭部の省力化施工

5.1 柱頭部省力化施工法の概要

従来、張出架設工法における柱頭部の施工にはブラケット支保工が用いられてきた(図-13左)。用いられるブラケットは H 鋼を組み合わせた大型の部材であり、組立解体作業における難易度が高い。とくに柱頭部直下でのブラケット解体作業は、施工時の安全性に対するリスクが大きくなることが多い。

一方、近年の張出架設工法においては、波形鋼板ウェブや外ケーブル構造の採用により、柱頭部施工が煩雑化し長い期間を要する傾向にある。

このような背景を踏まえ、本工事では波形鋼板ウェブを用いた柱頭部の省力化施工を採用した(図-13右)。本工法では従来のブラケットに替え、波形鋼板ウェブにより柱頭部のコンクリート打設荷重を支持する構造としている。また、足場および型枠支持部材に張出架設作業車(ワーゲン)の部材を使用し、作業の合理化を図るとともに、柱頭部施工から張出架設へ速やかに移行することで工期の短縮を図っている。

この工法による柱頭部施工の手順を以下に示す。

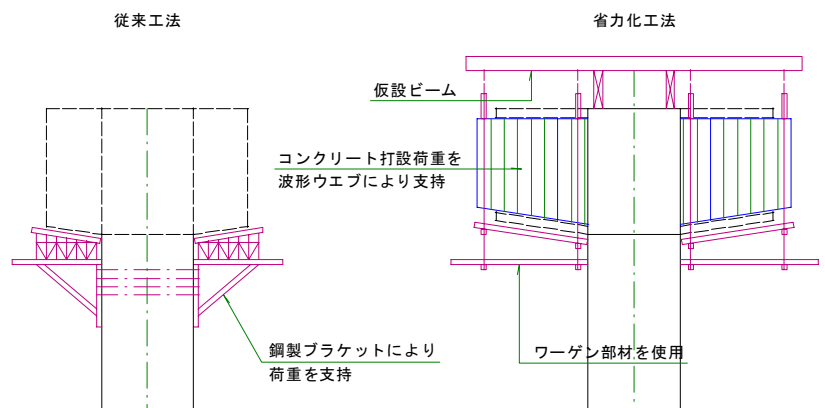


図-13 柱頭部施工方法の比較

- 1) 橋脚直上部のコンクリートを打設する (図-14(1))
- 2) 柱頭部に設けた仮設ビームから、張出架設作業車の下段作業台を吊り下げる
- 3) 下段作業台を用いて柱頭部張出部分の施工を行う (図-14(2))
コンクリート打設荷重は、波形鋼板ウェブにより支持する。
- 4) 柱頭部施工完了後、下段作業台を張出架設作業車に吊り変え、張出施工を行う (図-14(3))

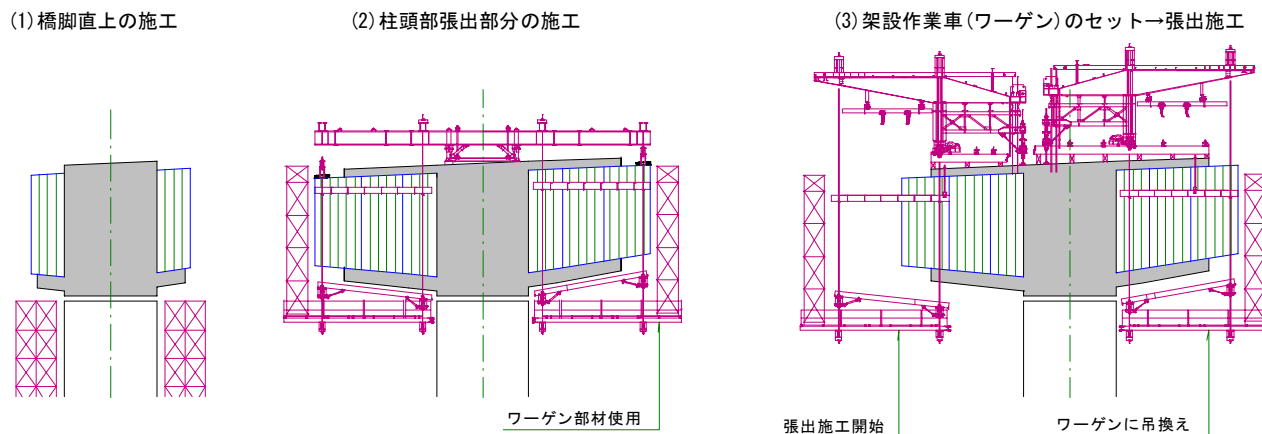


図-14 省力化施工の施工順序図

5.2 特徴

この工法の特徴は以下の通りである。

5.2.1 ブラケット支保工が不要

これまで用いられてきたブラケット支保工は、柱頭部の直下に設けられるため解体作業時の安全性が問題になることがある。また、ブラケットは橋脚を貫通する PC 鋼棒により緊張・固定されるが、中空橋脚や近年施工事例の増えている鋼管複合橋脚では、PC 鋼棒の配置が困難となる。

本工事においては、高さ 50m に及ぶ高橋脚や鋼管複合橋脚が多いこと、また現場の地形が急峻でブラケットの組立解体作業に必要なクレーンヤードの確保が困難であることから、ブラケット支保工が不要であることは大きなメリットとなる。

5.2.2 足場の組立・解体作業の簡略化が可能

この工法においては、柱頭部施工に張出架設作業車の部材である下段作業台を用い、柱頭部施工の後、そのまま張出架設に移行できる。したがって、足場の解体作業が不要で、また張出架設作業車の足場組み立て作業も不要となるため、作業工程を簡素化し工期を短縮することができる。

5.2.3 張出架設作業車の転用に留意する必要がある

本工法では、柱頭部施工時に張出架設作業車の部材を用いるため、転用計画に留意する必要がある。本工事においては、高橋脚や鋼管複合橋脚などの優位性の高い 4 箇所柱頭部施工において本工法を採用したが、他の柱頭部は張出架設作業車の転用計画を考慮し、従来のブラケット支保工施工もしくは支柱式支保工により施工することとした。

5.2.4 その他

本工法では下段作業台の吊換作業に必要な柱頭部長が必要であり、従来の柱頭部の施工長より長くなる。柱頭部長は架設作業車の構造や橋脚幅により異なり、本工事の場合で 16m~17.5m となった。これにより、ブラケット支保工による施工箇所と比べ、張出ブロック数が 1 張出当たり 1 箇所少なくなり、架設 PC 鋼材本数を 1 柱頭部当たり 2 本減じている。

波形鋼板ウェブにコンクリートの打設時荷重を受け持たせる工法では、曲げモーメントに対しても波形鋼板ウェブで抵抗する必要があるため、上下フランジを設置するとともにフランジ同士を接合しておく必要がある。本工事では下床版との接合部は埋込み接合が基本であり、下フランジのない構造であるが、省力化施工を行う柱頭部付近のみ下フランジを設ける構造とした。この部位における下床版接合は、シングルパーフ

ォボンドリブ+スタッド接合である。また、引張部材となる上フランジは、柱頭部横桁を挟んで PC 鋼材で連結し、施工時の安定性を図るため作用引張力相当分の緊張力をあらかじめ与えている。

6. まとめ

本稿では、伊佐布 2 号高架橋(PC 上部工)下り線工事の概要および設計について報告を行った。要約すると以下のとおりである。

- (1) 張出架設工法による PRC 波形鋼板ウェブ箱桁 3 橋から構成
- (2) 直線と 2 次曲線を組み合わせた桁高変化曲線を採用
- (3) 波形鋼板ウェブと上床版の接合はツイーパーフォボンドリブ、下床版は埋込み接合を採用
- (4) 幅員の広い支間には波高 330mm の波形鋼板ウェブを採用 (標準波高 220mm)
- (5) 広幅員 1 室扁平断面において、フランジ有効幅として上下床版全幅が有効であることを FEM により確認 (AC ランプ高架橋)
- (6) 広幅員 1 室断面の全体系 FEM 解析により、下床版横方向応力を照査し、追加補強を実施 (AC ランプ高架橋)
- (7) 支間内のウェブ数変化部において、厚さ 500mm の隔壁により均等にせん断力が分売されることを FEM により確認 (AI ランプ高架橋)
- (8) 主桁分岐の挙動を偏載荷の影響を考慮した FEM にて照査し、形状変更・補強を実施 (AI ランプ高架橋)
- (9) ブラケット支保工を用いない柱頭部の省力化施工を採用

謝辞

本橋の設計では、中日本高速道路株式会社横浜支社横浜技術事務所および清水工事事務所の皆様よりご指導・ご助言をいただきました。また、本稿の作成にあたり本工事の共同企業体構成会社である株式会社銭高組技術部からご協力をいただいております。関係各位に、心よりお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 (I~V) , 2002.3
- 2) 日本道路公団：設計要領 第二集, 1989.4
- 3) 土木学会：複合構造物の性能照査指針(案), 2002.4
- 4) 保坂鐵矢・光木香・平城弘一・牛島祥貴・橘吉宏・渡辺滉：孔あき鋼板ジベルのせん断特性に関する実験的研究, 構造工学論文集(土木学会), 2000.3
- 5) 松本正之・小林寛・正司明夫・栗田章光：波形鋼板ウェブ PC 橋 (中野高架橋) —波形鋼板と床版接合部のせん断実験—, プレストレストコンクリート技術協会 第 10 回シンポジウム論文集, 2000.10