

首都圏中央連絡自動車道裏高尾橋の設計・施工

— 国内最大級の支間と幅員変化を有する波形鋼板ウェブ箱桁橋 —

牟田 広繁*1・松本 卓士*2・伊藤 康輔*3・白浜 寛*4

裏高尾橋工事は、首都圏中央連絡自動車道のうち、中央自動車道との八王子ジャンクション（以下、JCT とする）南側に位置する橋梁を基礎から上部工まで一体で施工するものである。上部工の構造は、波形鋼板ウェブを適用した連続箱桁橋となっており、合成床版を有する鋼合成桁と剛結合する混合桁形式である。JCT の一部となる本橋は、床版幅員の変化および桁の分岐、地形条件による不等支間割り、仮支柱併用の張出し架設など構造・施工双方で複雑な工事となった。

本報告は、PC 上部工の設計と張出し架設を中心に、その概要について報告するものである。

キーワード：幅員変化、波形鋼板ウェブ、混合桁、高強度 PC 鋼材

1. はじめに

首都圏の渋滞緩和と物流の効率化を目的として整備が進められている首都圏中央連絡自動車道は、すでに中央道と関越道の間は供用され、現在は中央道と東名高速の間を早期開通するため各所急ピッチで工事が進められている。

裏高尾橋は、八王子 JCT の南方に位置する橋梁であり、中央道を横過すること、高尾山トンネルまでの谷地形を跨ぐことから支間割りに制約があり、波形鋼板ウェブ PC 箱桁と合成床版を有する鋼合成桁との混合桁形式が採用された。本橋の最大支間は下り線中央径間で 155 m であり、波形鋼板ウェブ PC 箱桁ラーメン橋としては国内最大級の支間を有しているとともに、張出し架設長（上り線 102 m）は国内最大である。

JCT の一部となる本橋は、床版幅員の変化および桁の分岐、地形条件による不等支間割り、仮支柱併用の張出し架設（写真 - 1）など、構造と施工の双方で複雑な工事となった。



写真 - 1 張出し架設状況

本稿では、PC 上部工の設計と施工の概要について報告するものである。

2. 工事概要

2.1 全体工事概要

工事名：首都圏中央連絡自動車道裏高尾橋工事

発注者：中日本高速道路(株) 東京支社

基本設計：(株)長大、日本建設コンサルタント(株)（現いであ(株)）

詳細設計：鹿島建設(株) 土木設計本部

施工者：鹿島建設(株)・(株)間組特定建設工事共同企業体

工事場所：東京都八王子市裏高尾町

工期：2006 (H18).3.10 ~ 2011 (H23).12.8

工事内容：

【上部工】

橋梁形式：PC 波形鋼板ウェブ・鋼混合 4 径間連続ラーメン箱桁橋

橋長：405.5 m（上り線）、438.0 m（下り線）

[PC 桁部 296.2 m（上り線）、316.5 m（下り線）]

【下部工】

逆 T 式橋台 2 基（A1）、ラーメン橋台 3 基（A2）、

中空式橋脚 4 基（P1、P2）、壁式橋脚 4 基（P3）

【基礎工】

深礎杭 4 基（A1）、大口径深礎杭 6 基（P2、P3）

ニューマチックケーソン基礎 2 基（P1）

2.2 構造概要

構造一般図を図 - 1 に、本橋梁上部工の特筆すべき点を以下に示す。

(1) 主桁拡幅

八王子 JCT のランプ分岐に伴い、幅員が変化（標準部：

*1 Hiroshige MUTA：中日本高速道路(株) 東京支社 八王子工事事務所 所長

*2 Takashi MATSUMOTO：中日本高速道路(株) 東京支社 八王子工事事務所 工事長

*3 Kosuke ITO：首都圏中央連絡自動車道裏高尾橋工事 鹿島建設(株)・(株)間組特定建設工事共同企業体 工事課長

*4 Hiroshi SHIRAHAMA：鹿島建設(株) 土木設計本部 構造設計部 橋梁グループ 設計主査

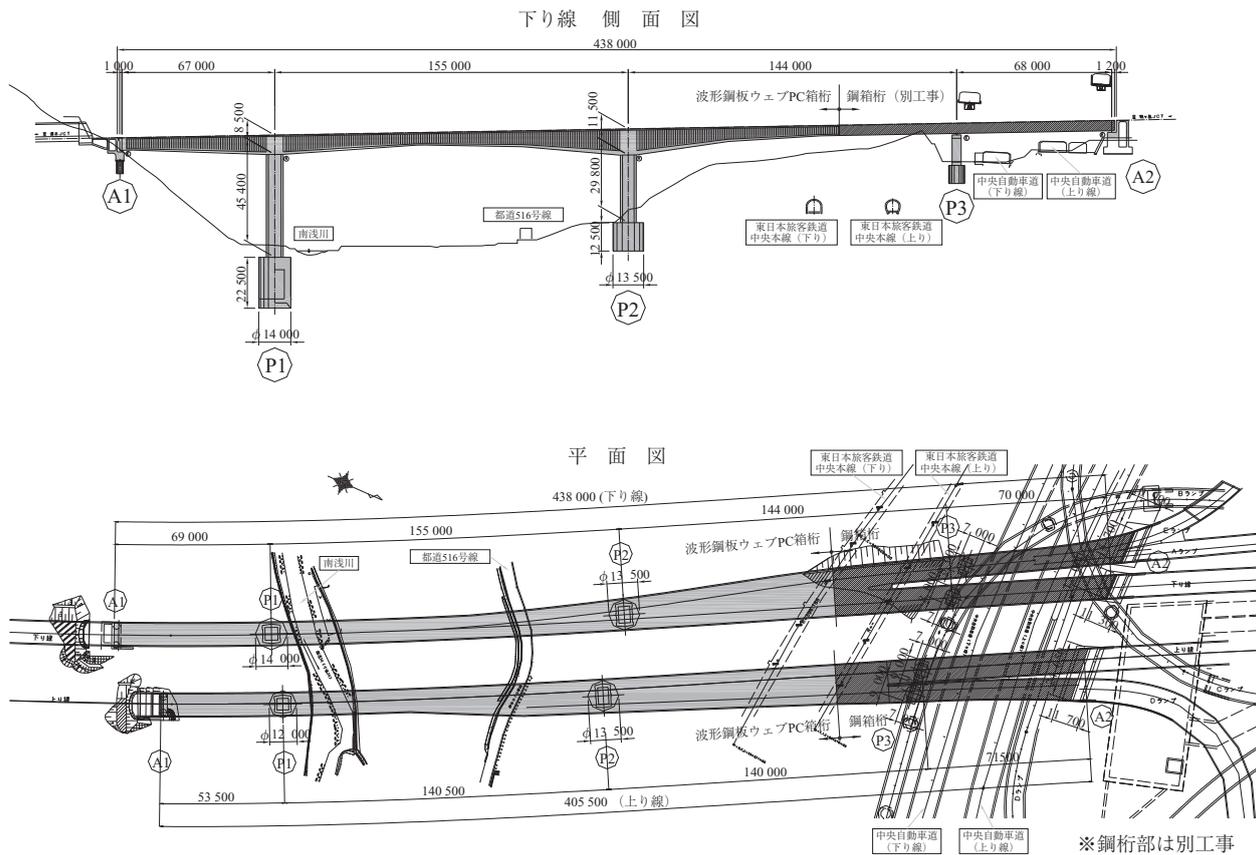


図 - 1 全体一般図

9.75 m, 最大: 20.64 m) するため, A1 ~ P2 間を 1 室, P2 ~ 鋼桁接合部間を 2 室箱桁としている。

(2) 波形鋼板ウェブ

上部工の自重軽減を目的に, 波形鋼板ウェブ形式を採用している。鋼材種別は SM490Y と SM570 の併用とした。波形鋼板同士の接合には, 経済性・施工性の観点から高力ボルト接合方式を採用している。

(3) 混合桁

PC 桁と鋼桁の混合桁形式を採用しており, 接合部は旧日本道路公団の大型混合桁橋梁で実績のある前後面プレート併用方式を基本構造としている。

(4) 桁内排気ダクト

隣接する高尾山トンネルから排出される排気ガスを八王子 JCT 内の換気設備まで送り出すため, 上下線とも箱桁内に鋼製の排気ダクトが設置される (図 - 2)。

3. PC 上部工の設計概要

3.1 全体系断面力の算定

本橋の上部工構造は, ① PC 桁・鋼桁の混合構造, ② 鋼桁部が鋼合成桁 (合成床版), ③ ランプによる拡幅と主桁の分岐, ④ 中央道との交差により P3 および A2 で斜角を有することなどの特徴を有しており, 全体系断面力は, これらの影響を詳細に評価するため, 次の方法により算定した。

• PC 桁および鋼桁の施工中それぞれに作用する荷重に対

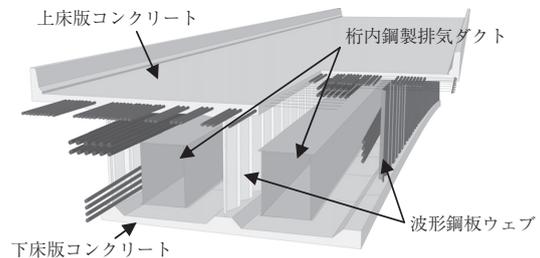


図 - 2 桁内排気ダクト

して, PC 桁部は 2 次元フレーム解析を, 鋼桁部は 3 次元フレーム解析を基本として断面力を算定する。

- PC 桁と鋼桁の閉合後に作用する荷重に対しては, 全体系 3 次元フレーム解析にて断面力を算定する。
- コンクリートのクリープおよび乾燥収縮の影響については, PC 桁部と鋼桁部で双方に影響し合うため, 各施工ステップおよび構造系完成後でそれぞれクリープ解析を行い, これを双方に累加・更新することにより評価する。
- 鋼桁部合成床版のクリープ係数については, コンクリートの打設後に PC 桁部閉合の断面力が作用すること, PC 桁が施工中のクリープの影響を評価していることより, 設計要領第二集の記述に従い, 道路橋示方書 (以下, 道示とする) I 編 2.2.5 に示される材齢に応じたクリープ係数を算定する。
- 鋼桁部のクリープおよび乾燥収縮荷重の載荷範囲は, 本

橋は通常の連続桁のモーメント分布と異なる部分が多いため、合成後死荷重による正曲げモーメントの範囲に載荷する。

3.2 床版活荷重モーメント

本橋の主桁断面は、幅員変化により主桁間隔が変化する。このため、床版支間が道示の適用範囲を超える部分が生じるため、床版横方向の設計における設計活荷重モーメントの設定については、以下の手順で検討を行った。

- ① 類似断面形状を有する他橋の活荷重モーメントの検討事例を確認
- ② 3次元FEM解析による本橋の活荷重モーメントの算定
- ③ 波高、桁高、ウェブ厚等の各部寸法が活荷重モーメントに与える影響の検討
- ④ 床版活荷重モーメントの決定

検討の結果、本橋では道示の適用範囲内外が混在することに対し、道示適用範囲内は道示式、適用範囲外はFEM解析結果、および他橋での実績値を包絡するように設定した(図-3)。

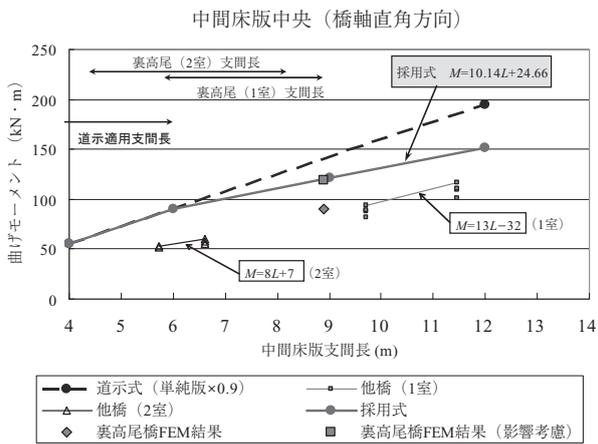


図 - 3 床版の設計曲げモーメント

3.3 局部解析

(1) 張出し外ケーブル定着突起

基本設計では、P2系張出し外ケーブルは27S15.2を定着部1箇所にて最大3本定着する集中配置としていたが、構造検討により上床版コンクリートならびに定着部近傍に過大な引張応力度が生じることが判明した。これを改善するため、鋼材の仕様を19S15.2に変更し、張出し各ブロックに定着部を設ける分散配置とした。

一般的なコンクリート箱桁構造と異なり、波形鋼板ウェブ構造は軸方向力に対して床版のみで抵抗するため、定着部に過大な局部応力が発生することが懸念された。このため、定着突起は図-5に示すような横リブを設けた形状とした。補強鉄筋量は、3次元FEM解析(図-4)によって緊張力による定着部ならびにその近傍に生じる引張応力度の検討を行うことで決定し、最大でD25@125となった。

(2) PC桁・鋼桁接合部

本橋のPC桁と鋼桁の接合部は、旧日本道路公団の大型

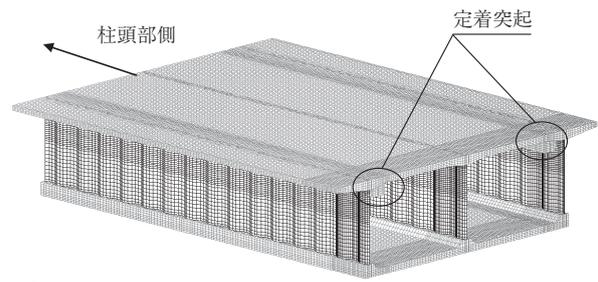


図 - 4 解析モデル (全体図)

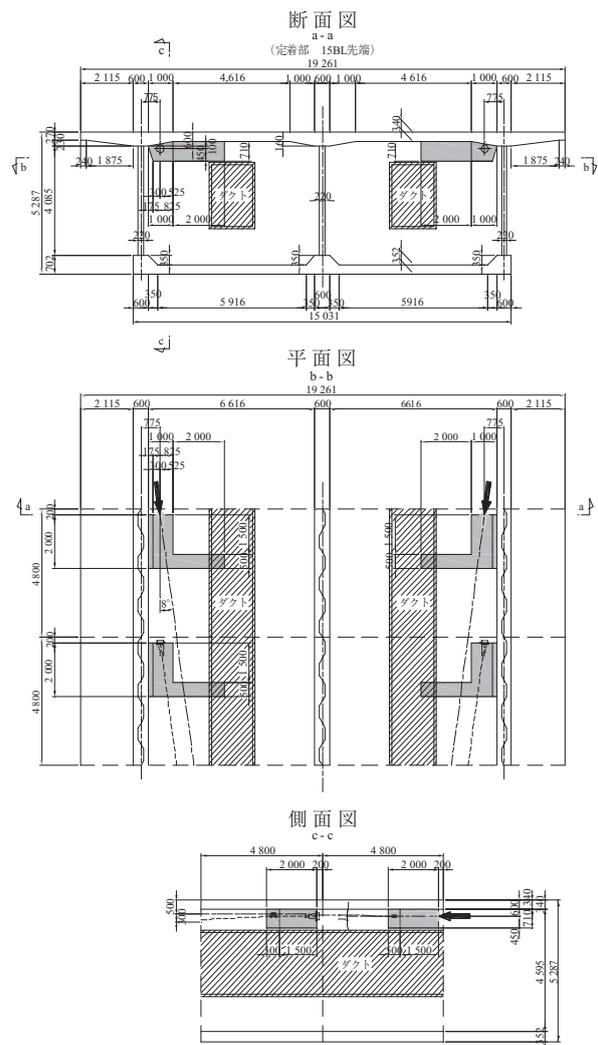


図 - 5 張出し外ケーブル定着突起形状

混合桁橋梁で実績のある前後面プレート併用方式を基本構造としたが、今回特に留意した点を以下に示す。

- ① 交差条件から接合面が支間中央付近となっており、主方向における正曲げモーメントのほぼ最大区間に位置する。
- ② 下り線はPC桁が2室箱桁(ウェブ3枚)、鋼桁が2主箱桁(ウェブ4枚)となっており、接合部を介してウェブの枚数が異なるため、力の伝達が非常に複雑である。

○ 工事報告 ○

これらを踏まえて、図 - 6 に示す 3 次元 FEM 解析によって接合部近傍の局部応力などの検討を実施した。検討の結果、接合部のウェブに対して鋼殻セルにコンクリートを充填した複合セルを設けることで、断面の形状保持と応力の分散を図った（図 - 7）。

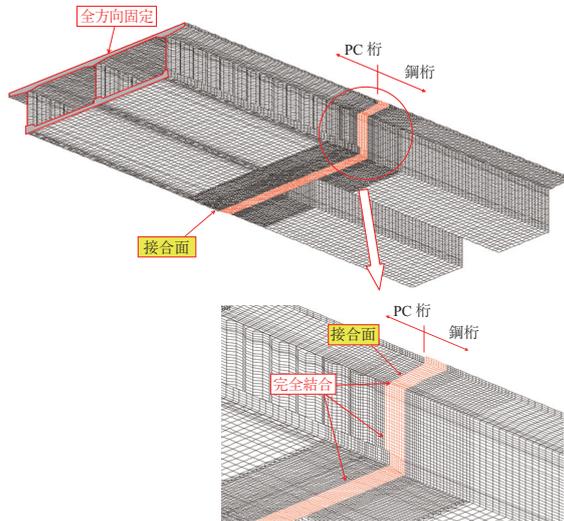


図 - 6 解析モデル（全体図）

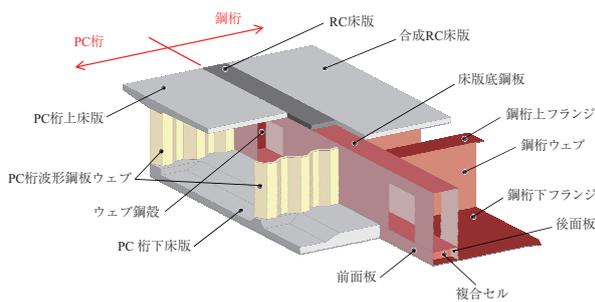


図 - 7 PC 桁・鋼桁接合部概要図

3.4 レベル 2 地震時の照査

(1) 非線形時刻歴応答解析

これまで述べた本橋の構造上の特徴を考慮し、レベル 2 地震動の照査として非線形時刻歴応答解析を実施し、耐震性能の評価（耐震性能 2）を行った。解析には上部工の全部材に M-φ のトリリニア特性を与えた 3 次元フレーム解析モデルを使用した。

解析の結果、耐震設計上の地盤種別が I 種の下り線については所要の耐震性能を満足したが、II 種の上り線については、上部工照査において許容値を満足するように補強鉄筋量を算出すると最大 D32 @ 125 (SD490) が必要となった。

しかし、床版厚や鉄筋の取り合いを考慮すると、補強鉄筋が配置できない断面が広範囲で生じることになり、これを改善するために、高強度 PC 鋼材の適用を検討した。次項に詳細を示す。

(2) 高強度 PC 鋼材の適用

本橋で適用した高強度 PC 鋼材は、内部充てん型エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線 φ 15.7 mm で、従来の PC 鋼より線 (SWPR7BL φ 15.2 mm) と比較し、応力レベルで約 20 %、荷重レベルで約 28 % 向上しており、従来と同等の伸び性能を有するものである（表 - 1）。

表 - 1 材料特性

規格 呼び	JIS G 3536 SWPR7BL (N)	高強度 PC 鋼材
直径 (mm)	15.2	15.7
引張荷重 (kN)	261	335
0.2 % 永久伸びに 対する荷重 (kN)	222	285

高速道路橋としては初めての採用となったことから、PC 鋼材および定着システムに対する各種性能確認実験を実施した。試験方法や規格値は、「高強度 PC 鋼より線を用いた PC 橋の設計施工指針（中日本高速道路(株)）」に準拠した。なお、内ケーブルについてはグラウトとの付着性能向上のため、付着型の内部充填型エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線を採用した。

適用範囲は、補強鉄筋量が過大となる区間を考慮して、設定した（図 - 8）。なお、断面の曲げ耐力を引き上げるために内ケーブルの総本数は変更せず、ケーブル 1 本あたりの導入力は普通強度の PC 鋼材と同等とした。

高強度 PC 鋼材を配置することにより、概ね設計荷重作用時で決定される鉄筋量で耐震性能を満足し、配置可能な補強鉄筋量となった（図 - 9）。

ただし、エポキシ樹脂被覆の影響により、通常の PC 鋼材に対して見かけのリラクゼーション（無被覆 1.5 %、樹脂被覆 5.0 %）およびセット量（無被覆 5 mm、樹脂被覆 11 mm）が大きくなり、P2 柱頭部上縁においてプレスト

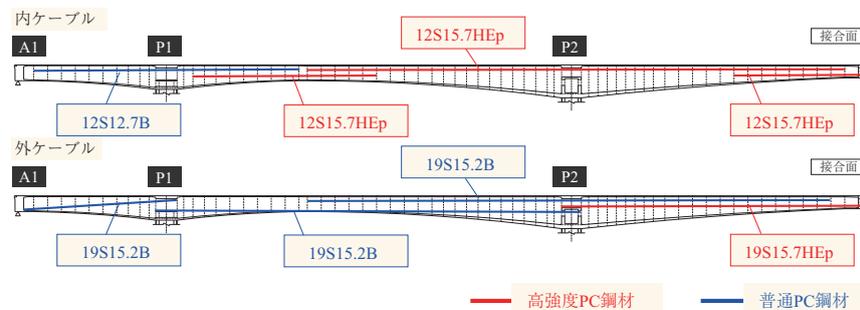


図 - 8 高強度 PC 鋼材配置概要図

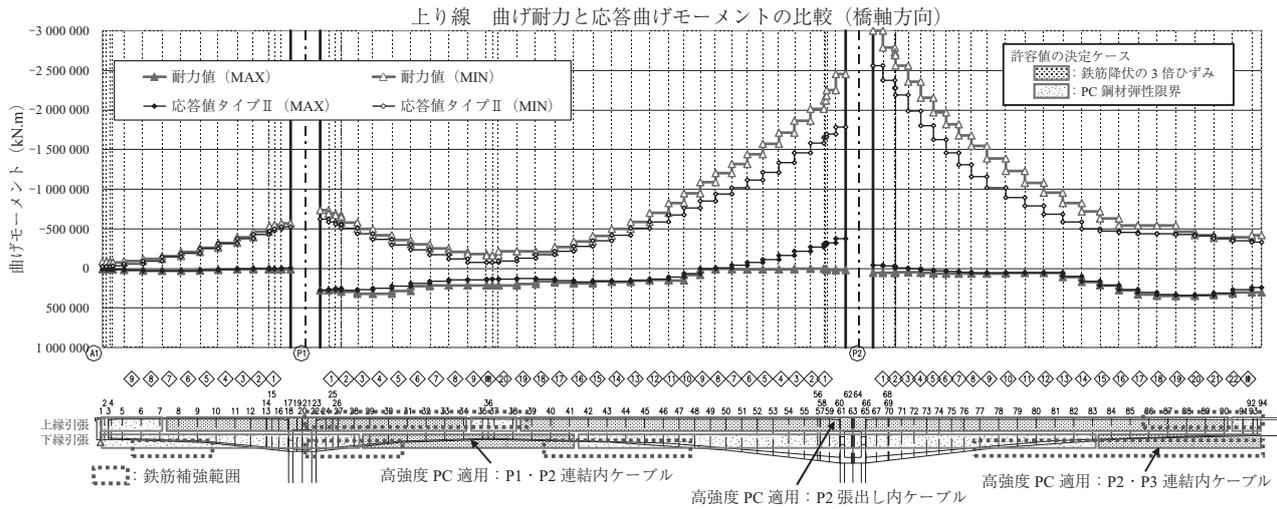


図 - 9 曲げ耐力と応答曲げモーメントの比較 (橋軸方向)

レス力が不足した。

そこで、桁内ダクトなどのスペースの制約により、内・外ケーブルとも追加配置ができないため、P2 から接合部間の連続外ケーブルについても高強度 PC 鋼材を採用し、導入力を増やして必要プレストレス量を確保した。

4. PC 上部工の施工概要

4.1 幅員変化部の張出し架設

(1) 移動作業車

P2 橋脚からの張出し施工には、主桁の幅員変化に合わせて、メインフレームと上部トラス梁の間で横断方向へスライドする機構を有する移動作業車を用いた (図 - 10)。

(2) 波形鋼板の製作・据付け

ウェブ間隔が変化する主桁断面形状であるため、所定の出来形精度を確保するためには、架設中の波形鋼板の先端 (次ブロックとの継目) 位置で確実に所定のウェブ間隔を保持する必要がある。しかし、一般的に用いられる形鋼等による形状保持材の適用は、本橋では施工ブロックごとに寸法を変化させなければならず、非常に手間がかかりコストアップにもつながる。これに対処するため、波形鋼板

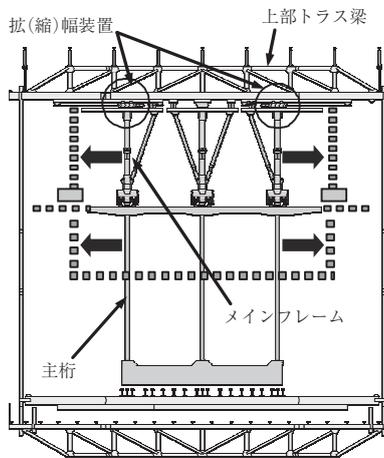


図 - 10 スライド機構概要図

に架設用金具を取り付けて (図 - 11)、ワイヤー、レバブロックなどで微調整と固定を行うとともに、H 鋼クランプおよび単管を用いてウェブ間隔を正確に保持することとした。

実施工において、本対処方法は良好な結果が得られた。

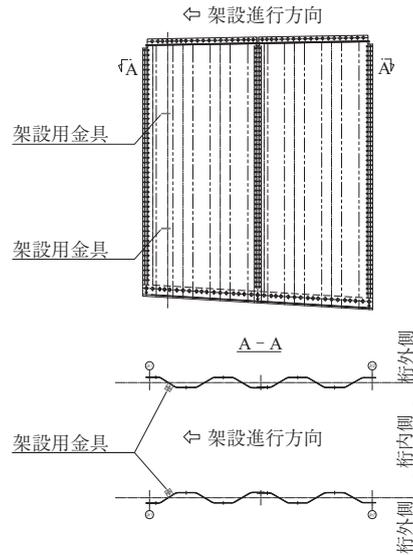


図 - 11 架設用金具配置図

(3) 上床版型枠の構造

上床版は、幅員変化に応じてウェブ間隔が変化するうえ、張出し外ケーブルの定着突起およびリブを有する。張出し施工部は、型枠を有効に転用するため鋼製型枠を使用した。幅員変化に対処するために、上床版内型枠の幅調整が可能となるようメタルフォームと木製合板を組み合わせ使用した。また、上床版内型枠の補強材 (櫛枠) については、図 - 12 に示すとおり、断面方向にスライド機構を有するものとし、補強材の追加および削除による組換え作業の回数を減少させた。

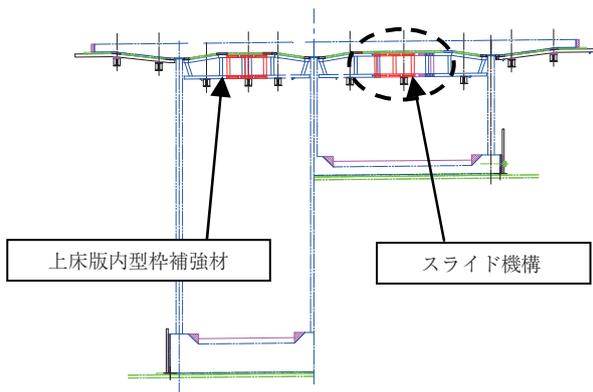


図 - 12 型枠構造の概略図

4.2 高強度 PC 鋼材の施工

本工事で使用する高強度 PC 鋼材はφ 15.7 mm であったが、当現場では通常のφ 15.2 mm およびφ 12.7 mm も取り扱っており、これに加え、緊張用油圧ジャッキに使用する別タイプのウェッジも存在した。定着ウェッジは、PC 鋼より線の緊張力を保持する、いわば PC 橋の生命線となる部品であることから、定着ウェッジの取付け間違いという重大な品質トラブルを回避するために、作業員がつねに識別できるよう図 - 13 のようにウェッジに着色を加え、また、現場内に識別表を掲示した。これにより、ウェッジ取り違えのトラブルはまったく生じなかった。

4.3 仮支柱併用の張出し架設

P2 張出し系においては、主桁拡幅のため張出しブロック重量がアンバランスとなった。このため、主桁ブロック長を調整して橋脚に生じるアンバランスモーメントの低減を図ったが、橋脚に生じる曲げ応力度がコンクリートの引

張強度を超えるために、仮支柱を併用して張出し架設を実施した。なお、仮支柱は、交差する JR 中央本線のトンネルの影響範囲を避けて設置した。

(1) 仮支柱の構造

仮支柱の構造は、基礎部・支柱部・ジャッキ部に大別され、支点とするブロックの各ウェブ直下に配置した(図 - 14)。基礎部は H 鋼杭、支柱部は H 鋼および形鋼で構成される構台形式とした。また、ジャッキ部には 4~5 台の 200 t 油圧ジャッキを設置し、各施工ステップに応じた設計反力値となるように制御した(写真 - 2)。ジャッキ反力のはつねにモニタリングを行い、橋面高さ等の情報も加味し、適宜調整できるものとした。荷重は複数台のジャッキで負担するため、橋桁に偏荷重が生じないよう等圧油圧回路を採用した(図 - 15)。

(2) 計測管理

仮支柱の反力は、ジャッキ設置後の施工の進捗に伴う荷重の変化により、受動的に変化する。実施工における反力

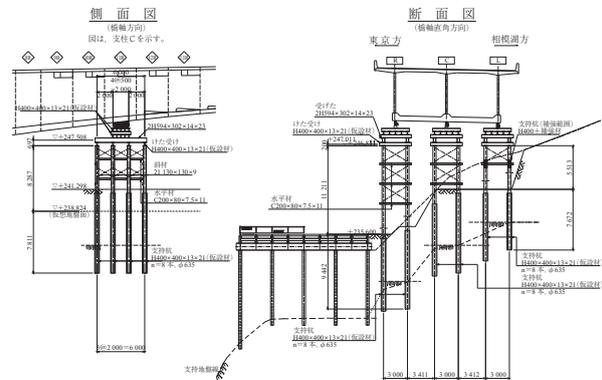


図 - 14 仮支柱設置概要図(下り線)

鋼材仕様	定着用ウェッジ	ジャッキ用ウェッジ	
		12S 用 (DWJ-300-250 ジャッキ用)	19S 用 (DWJ-500-250 ジャッキ用)
通常強度 15.2EP	黄色 O リング (外径 29 × 高さ 52)	赤色 O リング (外径 34.5 × 高さ 50)	赤色 O リング 後端面に黄色スプレー塗布* (外径 32.0 × 高さ 52)
高強度 15.7EP	黄色 O リング 後端面に緑色スプレー塗布 (外径 31 × 高さ 62)	赤色 O リング 後端面に青色スプレー塗布* (外径 34.5 × 高さ 50)	赤色 O リング 後端面に白色スプレー塗布* (外径 32.0 × 高さ 55)

* 後端面に“157”の刻印有り。

図 - 13 定着ウェッジの識別



写真 - 2 油圧ジャッキ設置状況

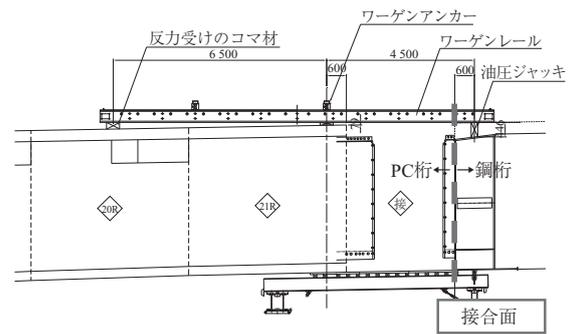


図 - 16 変位拘束計画図

(重ねすみ肉溶接部両端部の形状)は、相対変位拘束時の既設両端仕口の現場計測を反映して決定し、工場加工したものを現場搬入して架設した。

(2) 複合セル充てんコンクリートの施工

複合セルの割付図を図 - 17 に示す。複合セル内の充てんコンクリートは、密閉された鋼セル内の充てんとなり、締固めが困難であることから、自己充てんコンクリート(ランク2)を使用した。配合表を表 - 2 に示す。コンクリートの打込みは、コンクリートポンプ車を使用して行った。確実な充てんを行うため、ウェブ部などは配管にシャッターバルブを設けてセル下側からの圧入とした(写真 - 3)。さらに、排出孔付近にMSセンサを設置し、セル内の充てん状況を確認した。

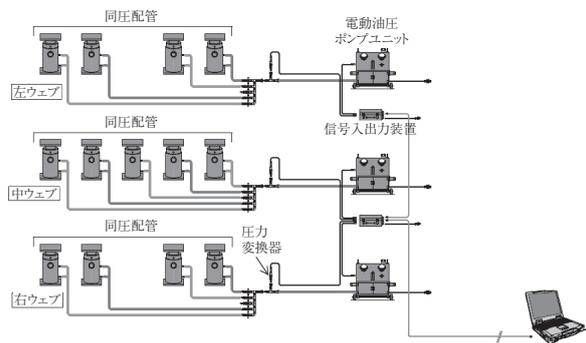


図 - 15 油圧ジャッキシステム概念図

の管理幅は、支点位置で鉛直方向固定として算定した設計値に対し0~+10%としたが、これを超えることはなかった。

仮支柱の施工中の計測管理は、反力管理に加えてジャッキ直上の橋面高さ、支柱部上端および基礎杭上端高さを管理することとし、初期荷重載荷時からの経時変化を確認することとしたが、いずれも有意な変化は生じなかった。また、ジャッキによる反力調整も必要とならず、全般を通じて計画とおりに管理することができた。

4.4 PC 桁・鋼桁接合部の施工

(1) 閉合部の変位拘束

PC 桁と鋼桁の接合部の施工に際し、閉合の相手方となる鋼桁は、合成床版のコンクリートが未施工の状態であり、日照の影響で接合部側の片持ち先端に変位が生じていた。日照により桁上面の温度が上昇する日中は桁先端が下がり、日照の影響のない夜間および早朝は元の高さに戻る。PC 桁側も同傾向の変位が生じるが、その相対差は、現場実測によれば±15mm程度であった。波形鋼板架設およびその後の閉合部の施工に対し、相対高さ関係を保持する目的で、移動作業車レールおよび油圧ジャッキを使用して変位拘束を行った。移動作業車レールは、張出し架設時と同様に移動作業車アンカーで固定し、鋼桁側に設置する油圧ジャッキは、複合セル部の波形鋼板仕口延長線上に配置した(図 - 16)。

閉合部の波形鋼板ウェブは、施工誤差ならびに製作誤差を調整できるように、一般部のボルト接合と変えて、両端重ねすみ肉溶接接合を採用した。閉合部の波形鋼板の形状

表 - 2 複合セル充てんコンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)							
			水 W	セメント C	細骨材 S			粗骨材 G	石粉 LP	混和剤 減水剤 (g/m ³)
					S1 (石灰)	S2 (陸砂)	S3 (砕砂)			
20	41.0	44.8	170	415	274	137	274	851	200	8303



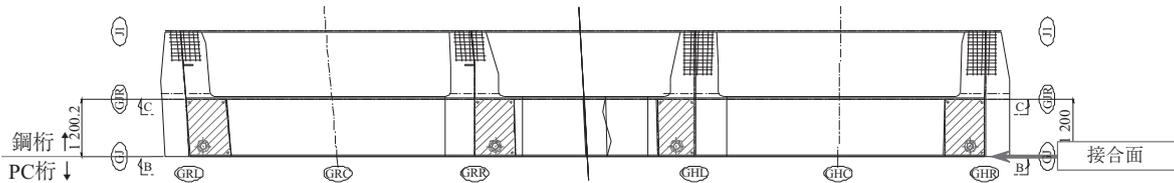
写真 - 3 中詰めコンクリート打設状況

4.5 桁内排気ダクトの架設

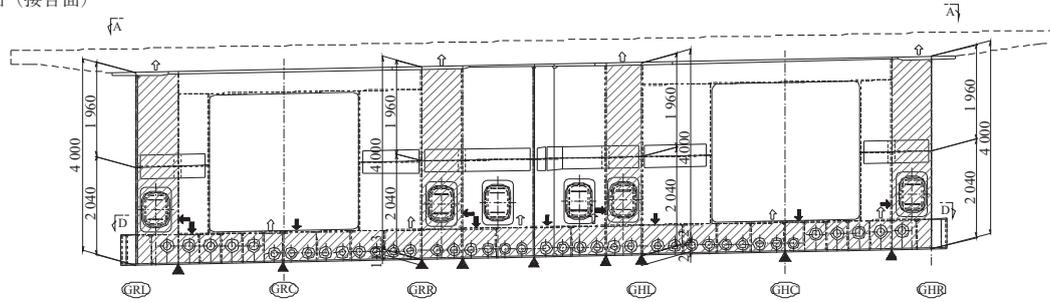
桁内排気ダクトは、板厚9mmの箱断面形状で、各辺1パネルをボルト継手にて連結する構造であり、橋軸方向の分割は、中央道からの搬入による寸法制限から、部材巾寸法で2.5m未満とした。これをヤード内で地組み立てし、クレーンを使用して桁内に吊り込んだ。架設時期は、張出

○ 工事報告 ○

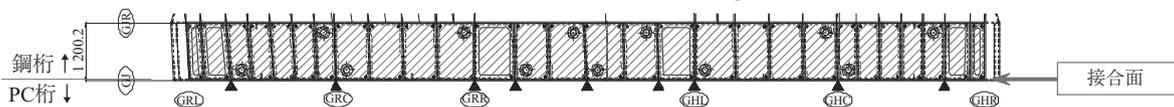
平面図（上フランジ上面）



断面図（接合面）



平面図（下フランジ上面）



▲：コンクリート打設時の分割位置を示す。
 ↓：コンクリート打設時の圧入孔位置を示す。
 ↑：コンクリート打設時の確認孔位置を示す。

図 - 17 接合部の複合セル割付図（下り線の例）

しの進捗の関係で施工待ちの生じる期間および張出し架設完了後とした。桁内には、ダクトを支持する架台（H200）の上に将来の交換および搬出の際に使用するレールを有しており、これを使用して台車にて搬入した。レール勾配でダクトが逸走しないように、ウィンチで前後に反力を取りながら桁内移動を行った（写真 - 4）。



写真 - 4 桁内排気ダクトの架設状況



写真 - 5 完成写真

さまざまな技術的ならびに施工的課題を克服し、また随所に新工法や新材料を適用して完成した本橋の事例が、今後の同種橋梁の設計・施工に携わる方々の参考になれば幸いである。

また、多大なご協力とご指導をいただいた関係各位に感謝する次第である。

参考文献

- 1) 伊藤 康輔, 牟田 広繁, 松本 卓士, 渡辺 義光: 首都圏中央連絡自動車道裏高尾橋の施工, 第20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, pp.573 ~ 576, 2011.10

【2011年11月25日受付】

5. おわりに

裏高尾橋は、本稿投稿時点で橋体部分は完成し、付帯工事や仮設備の撤去を残すのみである（写真 - 5）。隣接区も鋭意施工中であり、当該部分の開通に向けて全力で工事を進めている。