

新名神高速道路 成合高架橋の設計・施工

～主桁ウェブ数の変化や分岐構造を有する PRC 多径間連続桁～

Design and Construction of Shin-Meishin Nariai Viaduct

蓑田 俊介 *1
Shunsuke MINODA

大久保 孝 *2
Takashi OKUBO

豊田 英司 *3
Eiji TOYODA

野世溪 真 *4
Makoto NOSETANI

久安 潤 *4
Jun HISAYASU

山口 泰弘 *2
Yasuhiro YAMAGUCHI

成合高架橋は、名神高速道路と新名神高速道路を結ぶ連絡路内に架かる PRC 多径間連続桁橋である。高槻 IC のランプ接続部分に位置し、2 倍以上の大きな幅員変化や分岐部を有している。幅員変化に対しては中間支点部で主桁ウェブ数を 2～3～4 本と段階的に変化させて対応し、さらに、支間長に応じた版桁から箱桁への断面形状の変化や、4 主版桁から 2 連 2 主版桁への分岐構造を採用することで、上下線の各々で一連の上部工として連続化している。設計においては、これらの複雑な構造に対して、解析的アプローチとして立体格子解析や FEM 解析を活用し、構造の安全性を確保するとともに PC ケーブル配置や構造の合理化を図った¹⁾²⁾。施工においては、施工可能な橋脚より着手し、中間の P7～P6 径間で閉合する変則的な泣き別れ分割施工として、上部工工事開始時期の大幅な遅れに対して工程短縮に努めた³⁾。本稿では、立体格子解析や FEM 解析を用いた各種検討と施工の概要を報告する。

キーワード：多主版桁、分岐構造、立体格子解析、FEM 解析、泣き別れ分割施工

1. はじめに

成合高架橋は、名神高速道路と新名神高速道路を結ぶ連絡路の高槻 IC 付近に架かる固定式支保工架設による PRC 多径間連続桁橋である。本橋は、A ランプ合流部を有する 12 径間の上り線と D ランプ分流部を有する 13 径間＋分岐 2 径間の下り線で構成される。構造的特徴としては、幅員変化に伴う主桁ウェブ数の変化や、支間長に応じた版桁から箱桁への断面形式の変化、4 主版桁から 2 連 2 主版桁への分岐構造などが挙げられる。

設計においては、主桁ウェブ数変化部では中間支点横桁により中ウェブ（中桁）が間接支持されることから、主桁の設計における中間支点部の曲げモーメントの検証として FEM 解析を行った。また、主桁分岐部では主桁縦締めケーブル配置の最適化ならびに局部応力に対する検討として立体格子解析や FEM 解析を行った。さらに、主桁ウェブ数変化部および分岐部の支点横桁についても立体格子解析により面内・面外方向の曲げモーメントやねじりモーメントに対する検討を行った。

施工においては、急峻な山地で狭隘な施工ヤードに加え、河川や市道および工事用道路との交差など、厳しい施工条件下での分割施工で架設を行った。また、分割施工は、1 方向片押し施工から、下部工引き渡し後に施工

可能な橋脚より着手する泣き別れ分割施工に変更した。

本稿では、立体格子解析や FEM 解析を用いた設計における各種検討と施工に関する概要を報告する。

2. 設計

(1) 橋梁概要

橋梁概要として、橋梁諸元を表 1、全体一般図を図 1 に示す。

(2) 主桁ウェブ数変化点（間接支持部）の曲げモーメントの評価

a) 検討概要

主桁ウェブ数が変化する支点部において、すべてのウェブ直下に支承を設けた場合は、外ウェブ位置と中ウェブ位置での反力差が大きく支承の設計が不成立となることから、一部の中ウェブには支承を設けないこととした。そのため、主桁ウェブは横桁による間接支持となることから、中間支点部の曲げモーメント低減作用について FEM 解析による検証を行い、主桁の設計に反映することとした。解析モデルは版桁区間の P5 支点部と箱桁区間の P1 支点部とし、支承の支持条件は格子解析の場合と同様に橋軸方向の支承幅を無視した支承線支持モデルと実挙動を想定した支承幅考慮の支承面支持モデルの 2 ケースを考慮した。

*1 川田建設㈱九州支店事業推進部技術課 課長

*2 川田建設㈱大阪支店事業推進部 次長

*3 川田建設㈱九州支店事業推進部技術課

*4 川田建設㈱大阪支店事業推進部工事課 工事長

表 1 橋梁諸元

構造形式	(上り線) PRC12 径間連続桁橋 (2 主版桁~3 主版桁~2 室箱桁~3 室箱桁)
	(下り線) PRC13 径間連続桁橋 (2 主版桁~3 主版桁~4 主版桁~2 連 2 主版桁)
橋 長	(上り線) 390.000m, (下り線) 388.000m
支 間 長	(上り線) 18.600m+2@28.500m+6@32.000m+2@42.000m+35.600m
	(下り線) 24.100m+2@28.500m+6@32.000m+25.000m+34.000m+30.000m+23.100m
全 幅 員	(上り線) 9.900m~20.775m, (下り線) 9.900m~20.377m

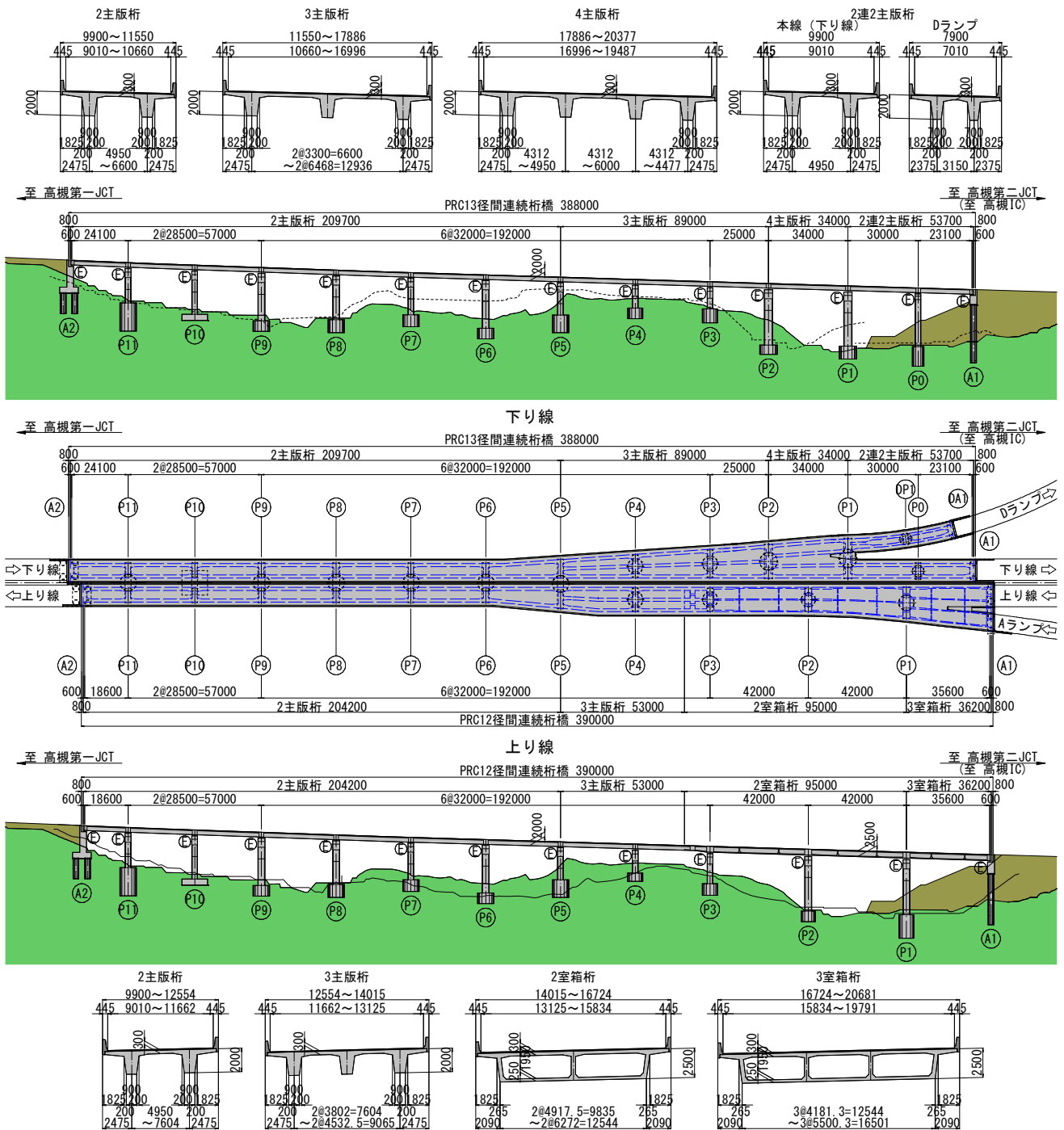
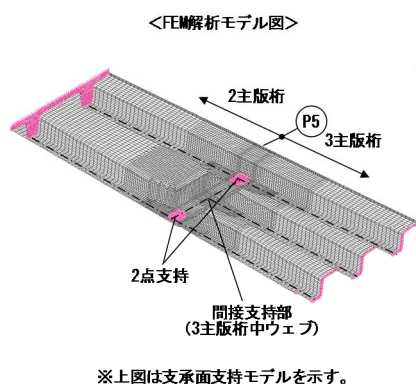


図 1 全体一般図

b) 検討結果

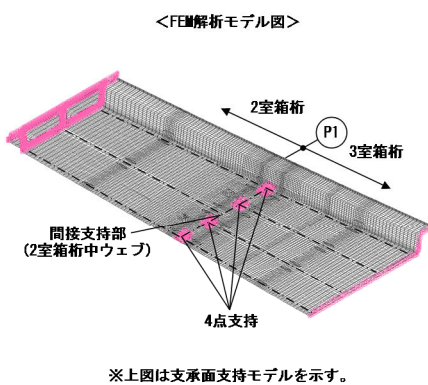
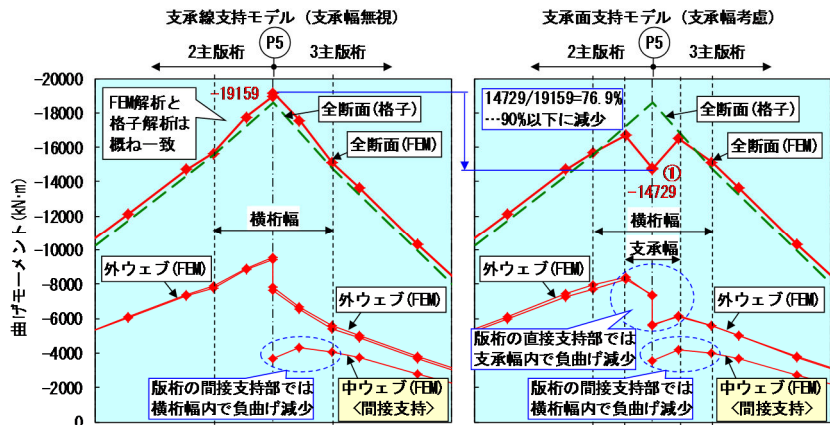
FEM 解析と格子解析の曲げモーメントの比較について、版桁を図 2、箱桁を図 3 に示す。実挙動を想定した

面支持モデルの FEM 解析結果において、中間支点部の負曲げ低減作用が確認された。そこで、詳細設計では基本設計と同様にすべての中間支点部で道路橋示方書Ⅲコ



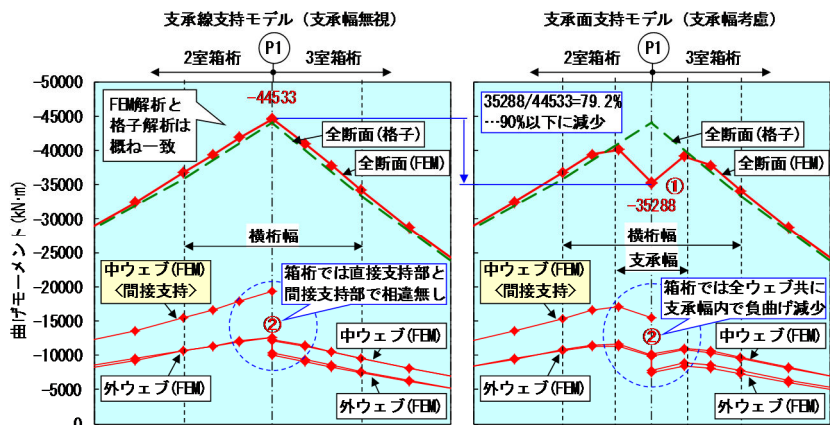
※上図は支承面支持モデルを示す。

図2 版桁部の主桁ウェブ数変化点（間接支持部）の曲げモーメント比較（上り線 P5）



※上図は支承面支持モデルを示す。

図3 箱桁部の主桁ウェブ数変化点（間接支持部）の曲げモーメント比較（上り線 P1）



ンクリート橋編 14.3.2 に準拠した負曲げの低減を行う方針とした。中間支点部の負曲げ低減作用が期待できる理由は以下のことが考えられる。

- ① 起点側か終点側のどちらか一方ではすべてのウェブが直接支持されているため各桁共に十分な負曲げ低減作用があり、支承線上の全断面（各ウェブ合計）あたりの曲げモーメントは起点側と終点側で一致する。そのため、間接支持側でも直接支持側と同等の負曲げ低減作用を受ける。（図 2①、図 3①）
- ② 箱桁は断面のねじり剛性が高く箱形の全断面で一体として曲げに抵抗するため、支承がウェブ直下ではなくても直接支持と同様の挙動となる。（図 3②）

(3) 主桁分岐部の縦締めケーブル配置の検討

a) 検討概要

4主版桁から2連2主版桁に分岐する下り線 P1 支点近傍（写真 1）では、分岐区間の幅員や支間長が本線部とランプ部で異なるため、分岐部近傍の各主桁の断面力分布を把握して適切な鋼材配置を決定するとともに、局部応力についても検討する必要がある。そのため、各主桁の断面力は自重やプレストレス 2 次力についても立体格子解析による施工ステップを考慮した逐次解析により算出した。また、応力性状の確認や局部応力に対する補強検討のため、死荷重時および負曲げ最大時、ねじり最大時に着目した FEM 解析を実施した。



写真 1 主桁分岐部（下り線 P1）

b) 検討結果（立体格子解析）

主桁分岐部の縦締めケーブル配置は、立体格子解析で算出した図 4 に示す主桁自重および活荷重による分岐部近傍の各主桁の曲げモーメント分布に基づき後述する方針で最適化を図ることとした。P1 支点部では一体側の 4 主版桁と分岐側の 2 連の 2 主版桁の計 3 断面で応力度が制限値以下となるようにケーブル本数を決定した。

- ① 一体構造区間では支間中央の曲げモーメントが同等のため、各桁共通配置（図 4①）
- ② 分岐構造区間では本線とランプのそれぞれの 2 主版桁断面で 2 主桁の曲げモーメントが同等のため、本線とランプのそれぞれで各桁共通配置（図 4②）
- ③ 分岐境界の P1 支点部では応力バランスの均等化を図るため、各桁共通配置を基本配置として負曲げが大きい本線側のみ支点から 0.2L (L:支間長) の区間にキャップケーブルを追加配置（図 4③、図 5）

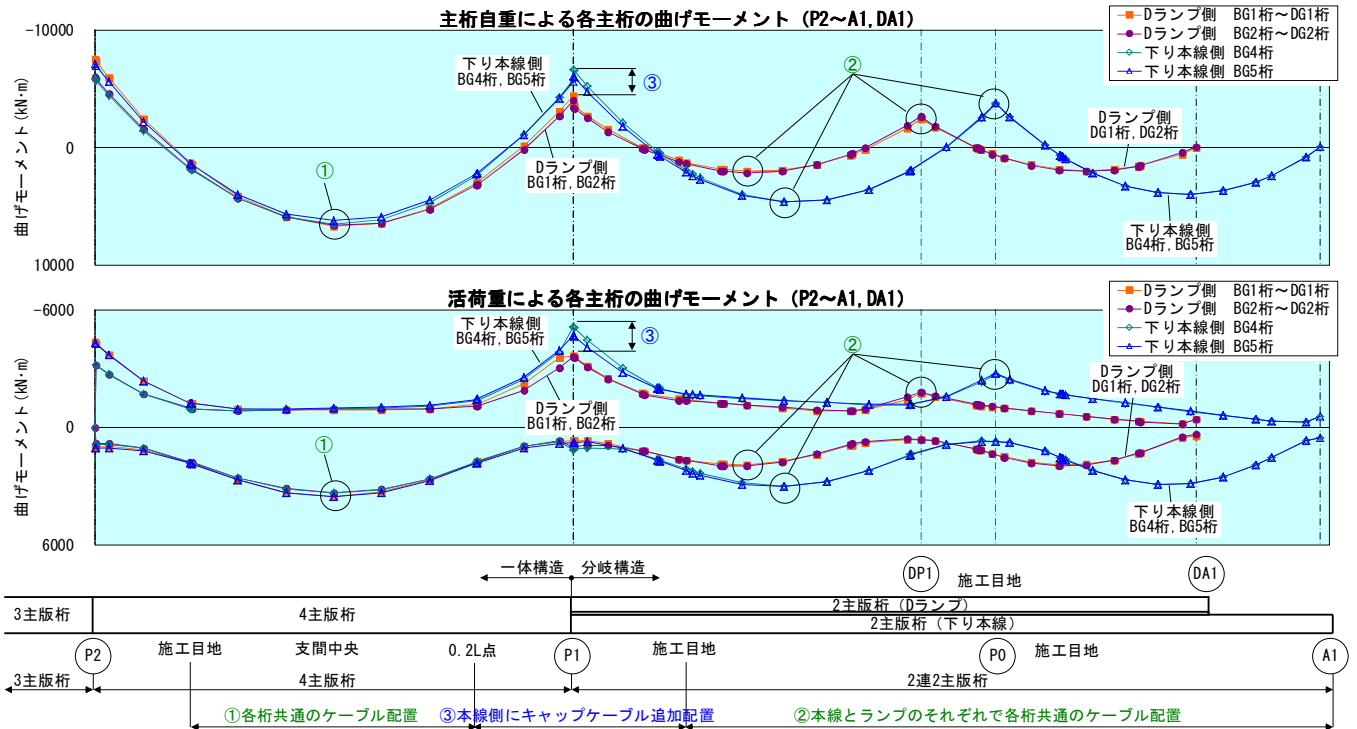


図4 分岐部近傍の各主桁の曲げモーメント分布 (下り線 P1)

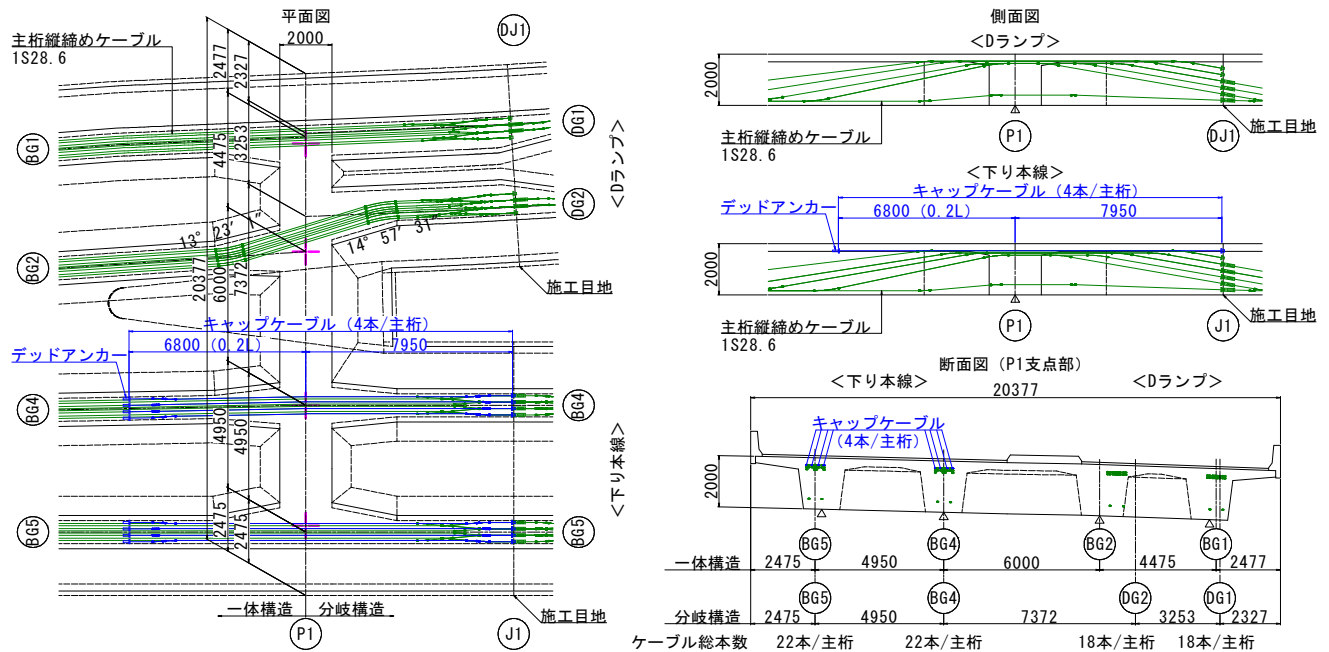


図5 分岐部の縦締めケーブル配置 (下り線 P1)

c) 検討結果 (FEM 解析)

P1 支点部を中心とした 2 径間の FEM 解析モデルに主桁作用荷重ならびにプレストレスを载荷した結果、主桁上下縁の応力は立体格子解析に基づく設計値と FEM 解析値で概ね一致し、主桁縦締めケーブル配置や立体格子解析のモデル化などの設計手法は妥当と判断した。局部応力としては、軸線が不連続な BG2 桁と DG2 桁においても主桁縦締めケーブルを連続配置としたことでケーブル平面角変化部のウェブ側面に腹圧力による引張応力が発生し、DG2 桁側で最大 2.4 N/mm²であった (図 6)。

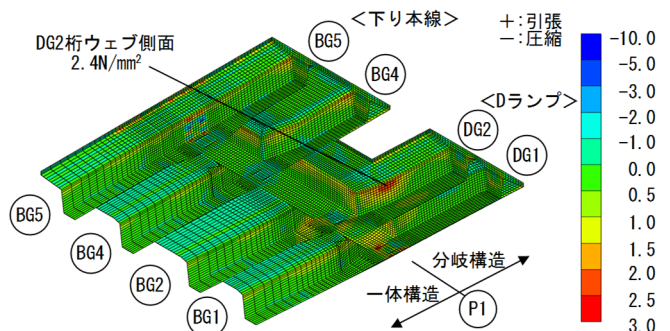


図6 分岐部近傍の死荷重時最大主応力 (下り線 P1)

そこで、図7に示すようにウェブ擦り付け形状を拡大して引張応力を斜引張応力度の制限値 1.22 N/mm² 以下に低減するとともに、補強鉄筋としてスターラップと軸方向鉄筋を配置して腹圧力に対する安全性を確保した。

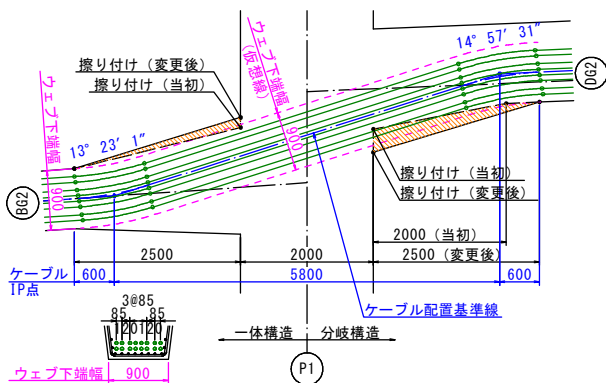


図7 ウェブ擦り付け形状 (BG2 桁~DG2 桁)

(4) 主桁ウェブ数変化部および分岐部の支点横桁の検討

a) 検討概要

多主版桁橋の設計では一般的に、主桁断面力は設計要領第二集に準拠して、自重、橋面荷重、活荷重を平面格子解析、それ以外の荷重を平面骨組解析により算出する。また、支点横桁断面力はコンクリート道路橋設計便覧に準拠して、横桁断面を梁モデルとした平面骨組解析により自重、橋面荷重、活荷重の支点反力相当の荷重を対象に算出する。本橋においては、主桁ウェブ数が変化する下り線の P5, P2 支点部 (図8) や分岐構造となる P1 支点部 (図5) では支点横桁を境に主桁中ウェブの軸線が不連続となる。そのため、横桁断面を梁モデルとする一般的な設計方法では算出されない以下の支点横桁断面力についても影響が大きいことが懸念された。

- ① 主桁プレストレスによる支点横桁の面内曲げモーメント (橋軸回り)
- ② 主桁プレストレス、乾燥収縮による支点横桁の面外曲げモーメント (鉛直軸回り)
- ③ 自重、橋面荷重、活荷重、主桁プレストレスによる支点横桁のねじりモーメント (橋軸直角軸回り)

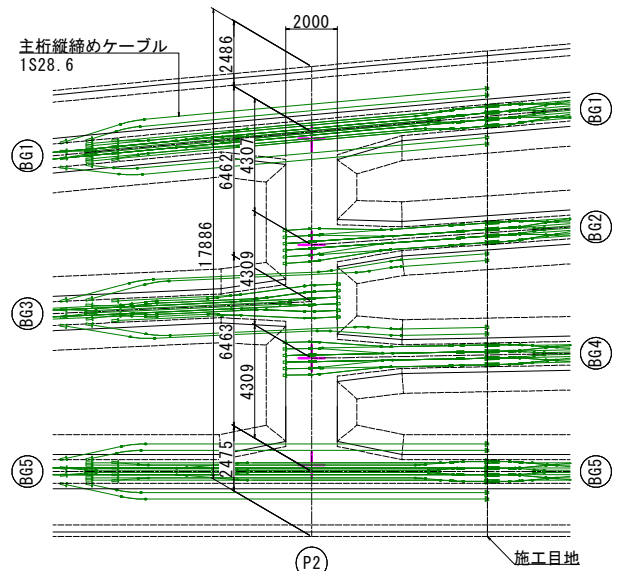


図8 支点横桁平面形状 (下り線 P2)

そのため、本橋ではこれらの断面力の算出を目的として、面内・面外の断面力が算出可能な立体格子解析を採用し、自重、橋面荷重、活荷重を載荷するとともに主桁プレストレスや乾燥収縮の影響を考慮した。下り線 P5, P2, P1 支点横桁には立体格子解析で算出した断面力を梁モデルの断面力に加算することで、主桁中ウェブの軸線が不連続であることに起因する支点横桁への影響を考慮した設計を行うこととした (表2)。上り線の P5 支点部も同様である。

表2 支点横桁の設計断面力

	一般的な場合		本橋			
	面内曲げ	面外曲げ	ねじり	面内曲げ	面外曲げ	ねじり
自重	○	-	◎	-	-	●
橋面荷重	○	-	◎	○	-	●
活荷重	○	-	◎	○	-	●
主桁プレストレス	-	-	-	●	●	●
乾燥収縮	-	-	-	-	●	-

凡例
 ○: 考慮 (平面骨組解析) … 横桁設計モデル
 ◎: 考慮 (平面格子解析) … 主桁設計モデル兼用
 ●: 考慮 (立体格子解析) … 主桁設計モデル兼用
 -: 無視

b) 検討結果

標準的な2主版桁区間の P11~P6 支点部と主桁中ウェブの軸線が不連続となる下り線の P5, P2, P1 支点部について、支点横桁の設計結果を図9に示す。

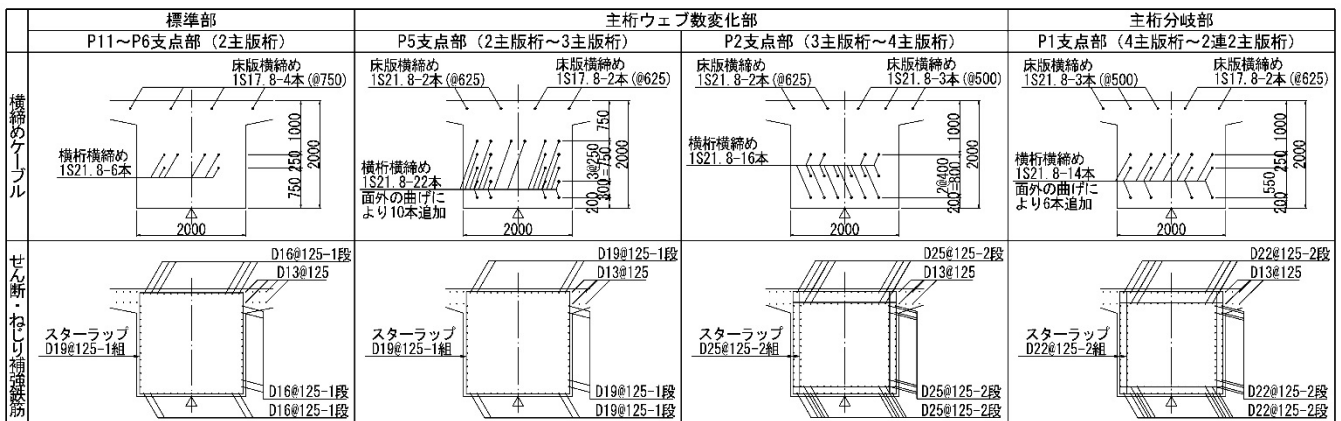


図9 支点横桁設計結果一覧 (下り線)

支点横桁は PRC 構造としてひび割れを制限する方針とし、曲げに対しては死荷重時に方法 C (フルプレストレス)、設計荷重時に方法 B (曲げひび割れ発生限界)、せん断・ねじりに対しては斜引張応力度の制限値を満足するように横締めケーブル (1S21.8) の配置を決定した。その結果、横締めケーブル本数は面内・面外の 2 軸曲げ照査により、P5 支点部 22 本、P2 支点部 16 本、P1 支点部 14 本となった。とくに、P5 および P1 支点部では主桁プレストレスによる面外の曲げの影響が大きく、面内の曲げ照査のみの場合に比べて P5 支点部で 10 本、P1 支点部で 6 本の追加となった。また、終局荷重時のせん断・ねじりに対するスターラップと軸方向鉄筋は、ねじりモーメントの影響が大きく、P5 支点部 D19-1 段、P2 支点部 D25-2 段、P1 支点部 D22-2 段となった。主桁ウェブ数の変化や分岐を有する支点部では標準的な 2 主版桁区間に比べて多くの補強鋼材量となっており、2 軸曲げやねじりの影響を適切に評価することは重要である。

3. 施工

(1) 施工概要

当初の架設計画では、A2 側から A1 側に向かって 1 径間毎の片押し分割施工であったが、下部工工事工程との調整が必要となり、上部工工事開始時期の大幅な遅れが、橋体引き渡し時期を見据えた全体工程への懸念事項となった。

このことを踏まえ、下部工引き渡し時期の再調整とそれに対応した上部工詳細設計での施工ステップ検討から、先行可能な径間より施工を開始する変則的な分割施工で行うことを決定した。具体的には、ステップ 1 として P11 橋脚から P8 橋脚に向かって、ステップ 2 として P5 橋脚から A1 橋台に向かって、ステップ 3 として A2 橋台～P11 径間、ステップ 4 として P7～P6 径間を閉合ブロックとする 1 径間毎の泣き別れ方式での分割施工を行った。

固定支保工による分割施工であるが、架橋位置は片側が急峻な山地でかつ狭隘な施工ヤードであり、さらには交差条件となる河川や市道を跨ぐため、各径間で支保工形状が異なる計画を立て施工を行った (写真 2)。



写真 2 急峻斜面への杭基礎支保工施工状況

(2) コンクリートの品質確保に対する取組み

主要材料となるコンクリートは、密実でひび割れ発生のないコンクリートとすることが最も重要である。フレッシュコンクリートの品質を確保し、確実な打込み充填と養生を実施し、耐久性に優れたコンクリート構造物の構築を念頭に置き施工した。フレッシュコンクリートは、試験練りにて配合、性状、強度などを確認したのち、打設箇所までの運搬、打設に必要な要素 (区間割りの明示、打込み高さ、締固め間隔、打重ね時間管理など) を取り入れた詳細な打設計画書に基づく現場搬入、打設を行いその品質を確保した。マスコンクリート部材の箱桁部支点横桁においては、エアーパイプクリーニングを行い、水和発熱に起因する温度ひび割れの抑制を図った。養生においては、初期に保湿性の高いコンクリート湿潤養生マットによる湿潤養生を 5 日間行い、その後、材齢 28 日まで気泡緩衝シート・ブルーシートの敷設、型枠存置による封かん湿潤養生を行った。

4. おわりに

近年、維持管理の省力化や耐震性の向上のために、幅員変化に伴う主桁ウェブ数の変化、異なる断面形式を接合する混合桁や分岐構造など、上部工の連続化が進んでいる。構造の多様化、複雑化は、設計の高度化が要求されることになるが、解析的アプローチとして立体格子解析や FEM 解析は有効である。

本工事は 2017 年 10 月に竣工し、2017 年 12 月より供用が開始された (写真 3)。関係各位に対し深く感謝の意を表すとともに、本稿が今後の類似構造の設計・施工において参考になれば幸いである。



写真 3 完成写真 (上り線 A1 側面より)

参考文献

- 1) 蓑田, 山本, 大久保, 豊田: 新名神高速道路 成合高架橋 (上り線) の設計, プレストレストコンクリート工学会 第 24 回シンポジウム論文集, pp.663-666, 2015.10.
- 2) 蓑田, 大久保, 豊田, 福宿: 新名神高速道路 成合高架橋 (下り線) の設計, プレストレストコンクリート工学会 第 25 回シンポジウム論文集, pp.441-444, 2016.10.
- 3) 大久保, 蓑田, 野世溪, 山口: 新名神高速道路 成合高架橋の設計・施工, プレストレストコンクリート Vol.60, No.2, pp.68-73, 2018.3.