

論文・報告

斜角 35°を有する鋼単純非合成曲線箱桁

～くまあき久万秋2号橋の設計・製作・施工～

Design, Fabrication and Construction of KUMAAKI No.2 Bridge

石川 一成^{*1}
ISHIKAWA Kazunari平井 隆嗣^{*2}
HIRAI Takahide佐久間 啓蔵^{*3}
SAKUMA Keizo佐藤 和樹^{*4}
SATO Kazuki大城 泰樹^{*5}
OSHIRO Taiki田坂 裕一^{*6}
TASAKA Hiroichi

久万秋2号橋は、高知県の県道19号窪川船戸線に位置し、四万十川を渡河する橋梁である。本橋の特徴は、当社の施工実績の中で最小の35°の斜角を有していることである。斜角の小さい橋梁では、反力が鈍角側に集中し、鋭角側の支点反力が小さくなることが知られており、施工時、完成時に鋭角側の支点で負反力が発生することがあるため注意が必要となる。また、斜角、曲線によって主桁にねじり変形が生ずるため、主桁の製作には、ねじりキャンバーを考慮して製作する必要がある。さらに、桁端部は斜角により狭隘な構造となることから、付属物の干渉や製作性に配慮したディテールを決定する必要がある。本報告では、斜角が小さい橋梁の配慮事項について設計・製作・架設の観点から記述する。

キーワード：斜角、ねじりキャンバー、負反力、MR (Mixed Reality)

1. はじめに

本橋の位置を図1に示す。架設地点は、周辺の現道幅員が3mと狭く、見通しも良くないこともあり、通行車両の交互通行が困難な状況が発生し安全な走行に支障をきたしている。そのため、久万秋2号橋を含むバイパスを整備することで、先に示した問題の解消を行い、道路利用者の安全確保を図っている。

本橋は、道路線形と流路形状から35°の小さい斜角を有しているため架設時に負反力が生じやすく、また端部は狭隘で複雑な構造となることから製作性にも配慮する必要があった。本稿は、設計、製作、架設における本橋の検討内容について記述する。

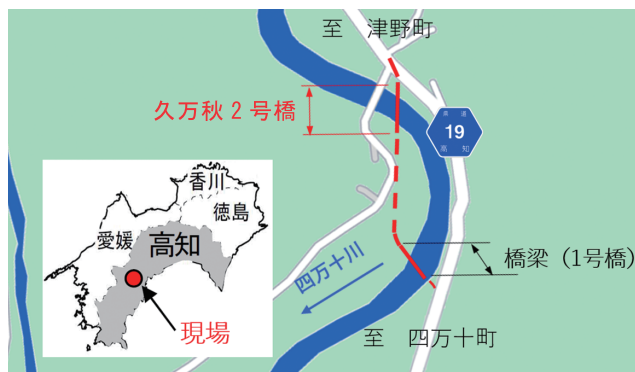


図1 橋梁位置図

2. 橋梁概要

本橋の工事概要を下記に、構造一般図を図2に示す。

工事名	県道窪川船戸線社会資本整備総合交付金（（仮称）久万秋2号線）工事
工事場所	高知県高岡郡中土佐町大野見久万秋
発注者	高知県須崎土木事務所
道路規格	第3種第3級
施工会社	川田工業・北村商事特定建設共同企業体
形式	鋼単純非合成曲線箱桁橋
橋長	83.10m
支間長	80.05m
総幅員	10.0m～11.0m
桁高	2 800mm～2 200mm
平面曲線	R = ∞～A=50～R = 60～A = 50
斜角	A1側 60°，A2側 35°
床版	鉄筋コンクリート床版（以下RC床版）
負反力対策	G2桁のS2上支承にアウトリガー方式を採用
架設工法	トラッククレーン・ベント工法

*1 川田工業(株)橋梁事業部生産統括部生産技術部四国橋梁技術課 係長
*2 川田工業(株)橋梁事業部技術部大阪技術部四国技術課
*3 川田工業(株)橋梁事業部生産統括部生産技術部四国橋梁技術課

*4 川田工業(株)橋梁事業部工事部大阪工事部大阪工事課 工事長
*5 川田工業(株)橋梁事業部工事部大阪工事部大阪工事課
*6 川田工業(株)橋梁事業部技術部大阪技術部四国技術課 係長

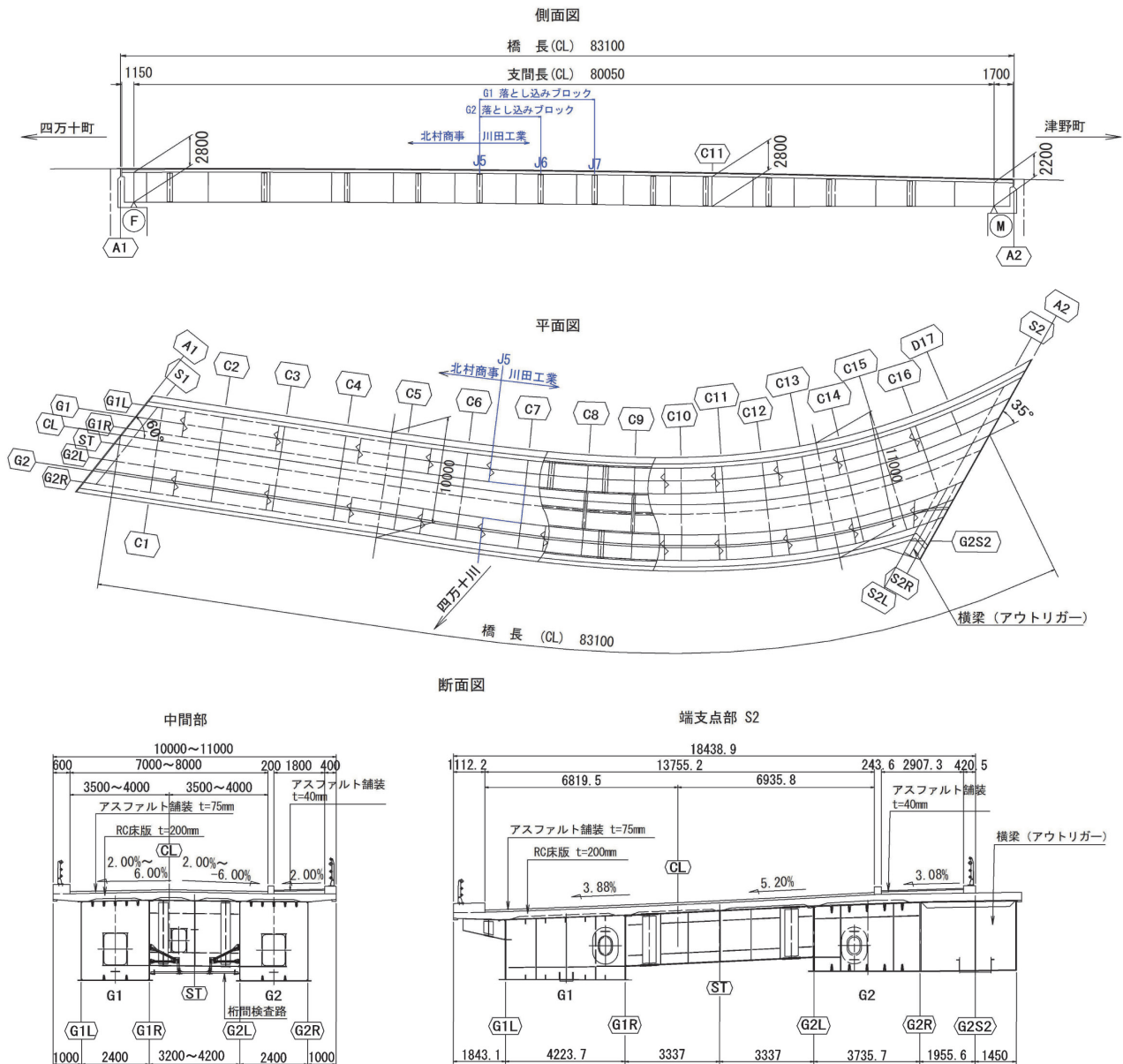


図2 構造一般図

3. 設計における留意事項

(1) ねじりキャンバーの付加

本橋は小さい斜角と曲線の影響により、各主桁にねじり変形が発生する。そのため、腹板を鉛直のままで作成すると、最大28mmの桁倒れが発生し、四国地整の主桁鉛直度の規定値 ($3+h/1000 = 6\text{mm}$ 程度) を満足しない結果となる。また、主桁の回転量は横桁仕口のG1側とG2側で異なるため、横桁をそのまま製作すると横桁と仕口が取り合わなくなることから、ねじりによる回転角を設定して桁を製作する必要がある。これらの理由から、主桁毎のねじり変形とたわみ差による変形を算出し、ねじりキャンバーを付加することとした。

ねじりキャンバーの算出は平面骨組解析(面外)で行った。解析で用いたモデルを図3に示す。モデルには、

桁の実剛度を用いた梁要素にカットライン位置(横桁位置とD17)から主桁腹板のL側とR側まで張出した剛な梁要素を組み合わせたフィッシュポーンモデルを用いた。図4にねじりキャンバーの算出方法を示す。剛な梁要素の主桁ウェブ位置(G1L, G1R, G2L, G2R)でのたわみ差から、主桁毎の回転角 θ_1 , θ_2 を求め、G1, G2のたわみ差から、横桁上フランジの傾き θ_3 を求めた。これらの計算結果から製作座標を作成することにした。

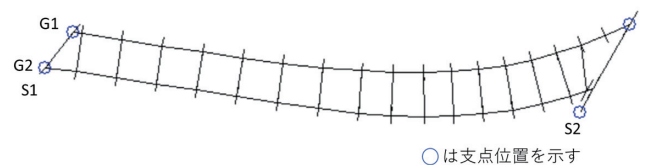


図3 本橋の解析に用いた骨組モデル

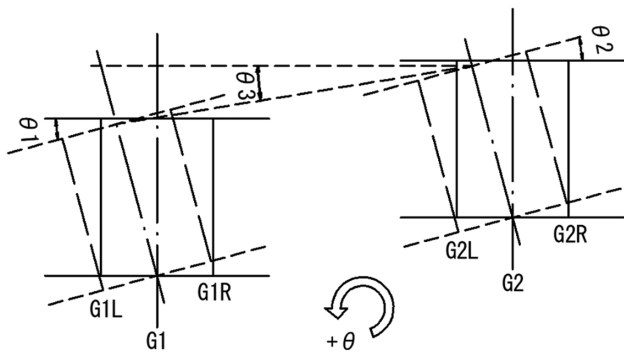


図4 ねじりキャンバーの算出

(2) 架設時の負反力対策

本橋は斜角の影響から鋭角側の支点反力が小さく、特に斜角 35°を有する A2 鋭角側の G1 桁 S2 支点上（以下、G1S2）で反力が小さくなる。そのため、桁架設時、床版打設時に不安定な構造となりやすく、架設ステップ毎の支点反力の管理や負反力対策の検討を行う必要がある。支点反力の確認、負反力対策の検討は、平面骨組解析（面外）を用いて行った。

a) 桁架設ステップ

本橋の架設ステップを図5に示す。ベントを三箇所（B1, B2, B3）に設け、桁をそれぞれ A1 側から J5 まで架設した後、A2 側から G1 桁を J7、G2 桁を J6 まで架設し、最後に支間中央を落とし込み架設する計画である。ステップ10で B3 ベントを解放し、桁を全て架設した後のステップ16で B1 と B2 ベントを解放する。

b) 桁架設時の負反力対策

桁架設時に負反力対策が必要となるステップを図6に示す。

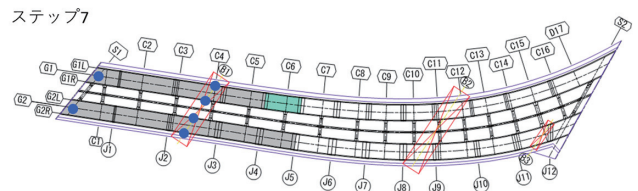
まず G1・G2 桁をステップ6まで架設すると、G1S1 上で支点反力が 11kN となる。また、ステップ7まで架設すると 92kN の負反力が発生する。そのため、ステップ5で G1S1 支点にカウンターウェイトを設置し、ス

テップ7の架設時に発生していた負反力を解消させた。

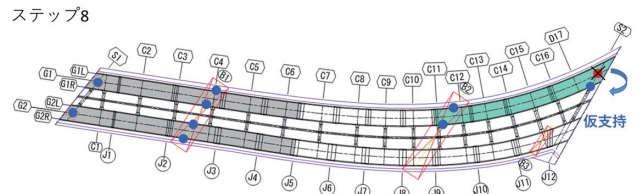
ステップ8で、G1 桁 J9～GE2 を架設する際に G1S2 の本支承で支持した場合、B2 の L 側で負反力が発生する。そのため、ステップ8の支持点は G1R 上のジャッキアップ位置で支持し、G2 桁の J11～GE2 までを架設した後で G1S2 の本支承へ受け変えることとした。

ステップ16では、B1 と B2 のベントを解放する。B1 のベントを先に解放した場合 328kN の負反力が G2S2 に発生し、B2 のベントを先に解放した場合は G1S1 で 827kN の負反力が生じる。それらの負反力をカウンターウェイトで解消することは困難であるため、B1 ベントと B2 ベントを 20mm ずつ交互にジャッキダウンし、負反力が生じないように計画した。

ステップ7



ステップ8



ステップ16

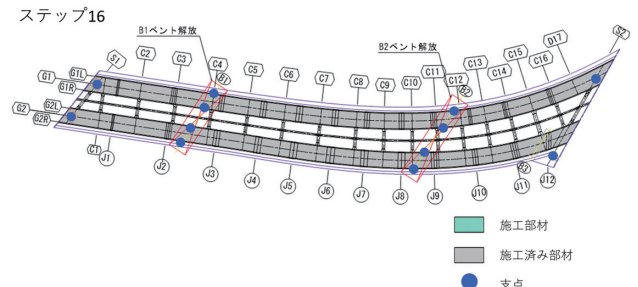


図6 負反力対策が必要となるステップ

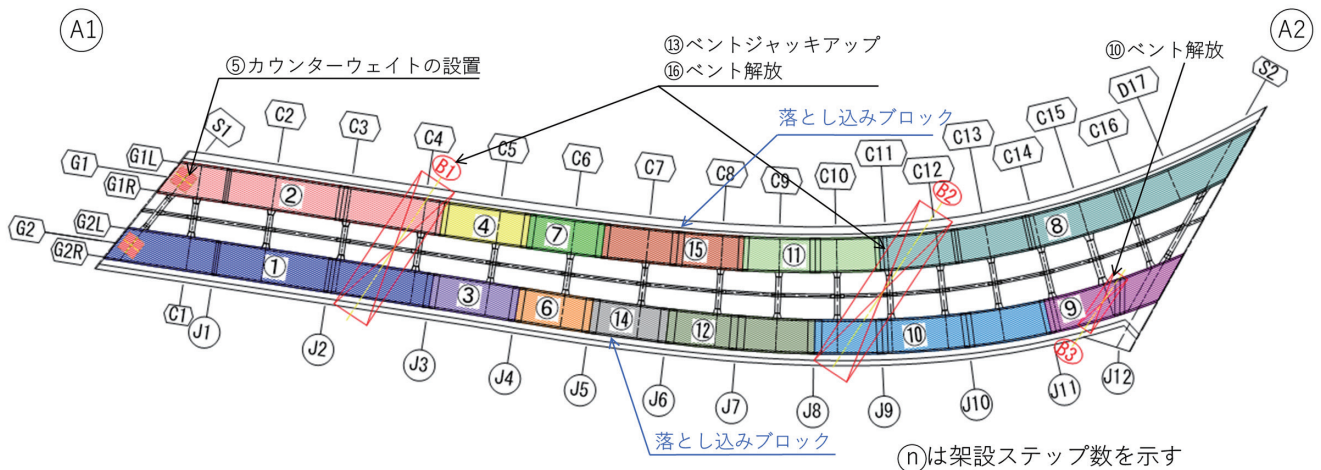


図5 架設ステップ

(3) 床版打設時の負反力対策

RC 床版を有する単純桁の床版打設ステップは、1 回目に変形の大い中央径間から打設し、その後桁端部を打設することが一般的である。本橋もそれに倣い、径間中央付近である C4～C11 間に打設した場合を想定し解析を行った。図 7 に 1 回目の打設範囲を示す。結果として、G1S2 支点で 171kN の負反力が発生する。そのため、1 回目の床版打設範囲を変更し、負反力が発生しない打設範囲について検討を行った。

図 8 に変更後の床版の打設範囲を示す。G1 桁の S2 支点上に負反力が生じやすいことから、1 回目は S2 側端部から中央径間に向かって打設を行うこととした。2 回目は G2 桁の S1 支点上に負反力を発生させない様、S1 側端部から中央径間に向かって打設を行うこととした。

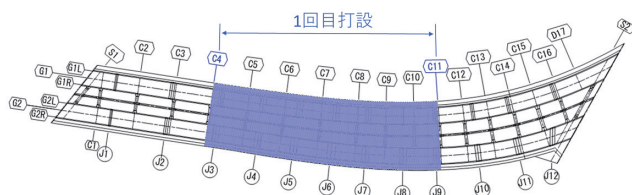


図 7 床版打設範囲 (C4～C11)

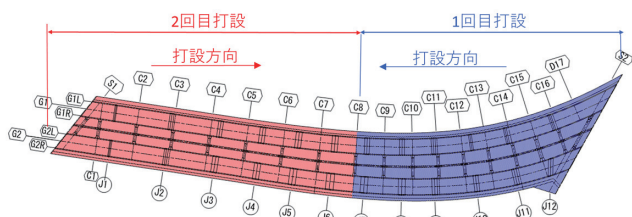


図 8 床版打設範囲 (変更後)

(4) 本橋のディテールにおける留意事項

a) エンドプレートの追加

写真 1 に主桁の A1 側桁端部の様子を示す。本橋の G1 桁の A1、A2 側と G2 桁の A1 側の上フランジの板厚が 10mm 程度と薄く、また桁端部の主桁張出し長は A1 側で 1.2m、A2 側で 1.6m と大きく、また斜方向の主桁ウェブ間隔が S2 側で最大約 4.2m となる。そのため、主桁端部に板厚 12mm のエンドプレートを設置し、上フランジの座屈防止と振動・騒音の原因となるたわみ防止とさせた。

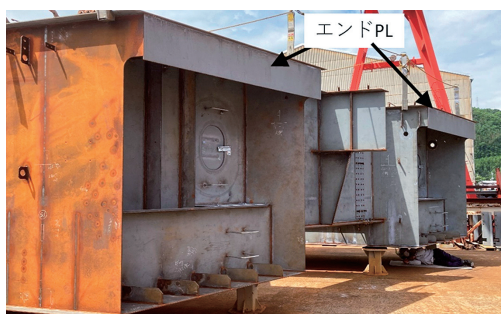


写真 1 A1 側桁端部

b) 端部構造の変更

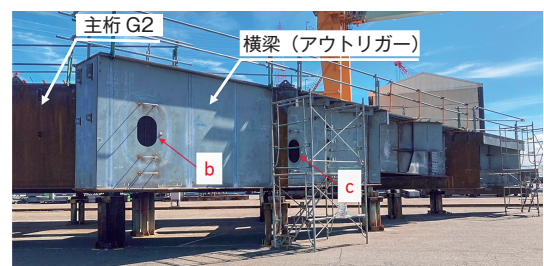
斜角を有する橋梁では支点部に、斜角に起因する負曲げが発生する。発注時の A2 側桁端部の構造は負曲げに対して下フランジの補強がされておらず、また応力の伝達機構が不明瞭であった。そのため、構造の見直しを行った。写真 2 に G1 桁の A2 側桁端部を示す。負曲げに対する補強として縦リブを桁端部まで延長した。また、桁端に横リブを設け、横方向補剛材と支点上補強リブを兼用させるシンプルで応力の伝達機構が分かりやすい構造に変更した。



写真 2 G1 桁の A2 側桁端部

c) マンホール位置の見直し

G2 桁の A2 側桁端部は、斜角の影響から狭隘であったため、マンホールの出入りの可否について確認を行った。写真 3 に G2 桁の内部（横梁との交差部）の様子を示す。写真の (b) の箇所では、横梁への進入時に支点上補剛材が障害になることから、マンホールの位置を支点上補剛材から離れた位置に移動させた。(c) では構造の見直しにより、ダイヤフラムが追加となったため、通り抜けの可否や作業空間の確保に留意した位置にマンホールを追加した。



(a) G2 桁 A2 側端部



(b) 横梁先端部



(c) G2 桁と横梁部の交差部

写真 3 G2 桁の内部の様子

d) 縦桁下フランジのコネクション構造

発注時の縦桁仕口の構造を図9 (a) に示す。縦桁仕口のウェブとコネクションプレートは隙間が約 20mm であり、横桁腹板に溶接すると、すみ肉ビードの間隔がほとんど無くなる。栗山ら¹⁾の報告によるとビード間隔が 3mm 未満の場合、溶接ひずみの集中によって溶接割れを引き起こす可能性があることを示していることから、縦桁のコネクションプレートについて図9 (b) のように構造を変更し、コネクションプレートを縦桁仕口ウェブに直接溶接することで、溶接ビードが近接する箇所を無くす構造とした。

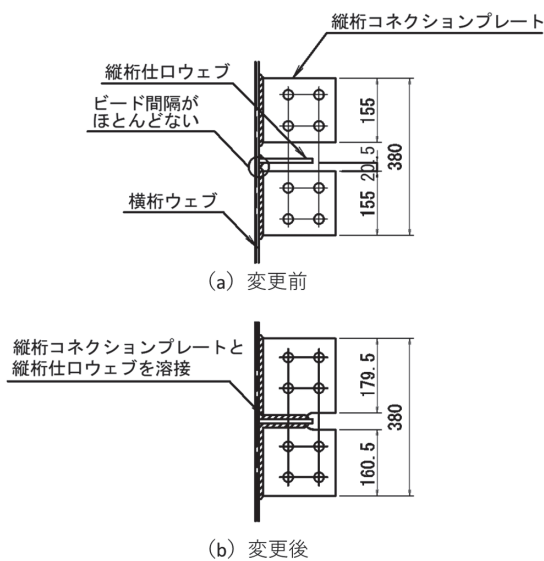


図9 縦桁のコネクション PL の構造

e) 維持管理に配慮した構造

A1 側の桁端部は支点上補強リブが 900mm と高く、またダイヤフラムと支点上補強リブの隙間が 330mm 空いていることから、点検者の安全を考慮し、写真4のような縞鋼板の塞ぎ板を設置した。また、塞ぎ板には取手を付け、支点回りの点検時には取外しができるよう配慮した。

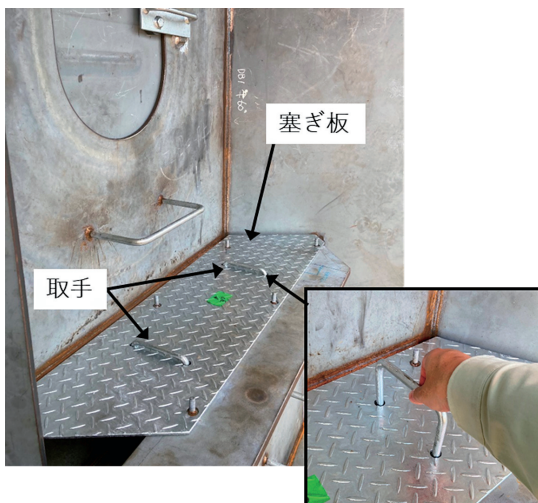


写真4 G1 桁の桁端部の塞ぎ板

4. 工場製作における留意事項

(1) 主桁回転角の設定方法

主桁毎の回転角 θ_1 、 θ_2 とキャンバー差から求めた回転角 θ_3 は、ほぼ同値であったため θ_3 を桁全体に反映した。ただし、C16 ~ S2 間においては、斜角の影響により G2 側の C16 ~ S2 の格点間距離が 900mm 程度しかないため、回転角を個別に設定することが困難であった。そのため、S2 上の回転角の値に近い C16 の回転角を S2 支点部まで延長して製作し、桁倒れに対応した。A2 側のアウトリガー部については主桁 G2 の回転挙動に追従するものと考え、完成時の形状で製作した。

(2) 狭隘部の製作時の配慮事項

a) MR による狭隘部の確認

A2 側桁端部の箱桁内は複雑な構造かつ狭隘であるため、部材溶接の可否について MR (Mixed Reality) を用いて確認した。MR は 3D モデルを現実空間に実物大に投影し、可視化する技術である。投影するモデルは原寸作業に用いる 3D 生産情報システム Symphony (シンフォニー) のモデルを利用した。写真5に MR で桁内部を確認している様子を示す。ヘッドマウントディスプレイ (HoloLens2) で、実物大の 3D モデルを現実空間に投影することができる。HoloLens2 使用者の視点は左側のモニターに共有されている。MR を用いて溶接できない箇所を視覚的に確認することで問題点を把握し、端部構造の改良に生かすことができた。



写真5 MR による狭隘部の確認

b) G2 桁 A2 側端部の縦リブ溶接

本橋は A2 側の斜角が 35°であることから、主桁腹板と横梁ウェブの交差部など多くの溶接部材の交角が 60°未満または 120°以上となる。道路橋示方書²⁾では、応力の伝達を期待する溶接部材の交角が 60°未満または 120°以上となる場合は完全溶込み溶接としなければならないことが規定されているため、本橋の A2 側も多くの部材が完全溶込み溶接となる。また、狭隘であること

からも、A2 側端部の溶接作業が容易ではないと考えられたため、MR モデルを用いて、溶接手順の確認を行った。

写真6にG2 桁 A2 側端部の MR モデルを示す。モデルを用いた確認の結果、主桁縦リブを先行して下フランジに溶接すると、横桁バックアップが溶接できないことが判明した。そのため、横桁バックアップを先行して溶接し、その後ダイヤフラムに設けたスリットから縦リブを挿入し、溶接することとした。



写真6 MRによる溶接作業性の確認

c) 曲線部材の長さの精度確保

写真7にG1 桁の A2 側端部の様子を示す。写真のように、曲線を有する部材であるため、部材長を精度よく製作することが課題となる。本橋は、部材精度を確保するために、トータルステーション（三次元測距儀）を使って部材長さや組付け位置を計測しながら製作した。



写真7 G1 桁の A2 側端部

5. 架設における留意事項

(1) 落とし込み時のモーメント連結対策

本橋はG1がJ5～J7間、G2はJ5～J6間が落とし込みブロックであり、モーメント連結で計画している。そ

のため、仕口角度と落とし込みブロックのたわみをそれぞれ算出し、ベント受点位置での必要なジャッキアップ量について算出する必要がある。仕口角度と落とし込みブロックのたわみは平面骨組解析（面外）で算出し、ベント位置でのジャッキアップ量を決定した。

(2) MRによる狭隘部の床版配筋の確認

A2 側端部は主鉄筋、配力筋、端部補強鉄筋が2段ずつ計6段、配置されることから、密な配筋となっており、鉄筋同士のあきが小さく、現場でコンクリートの締固めが可能か確認する必要があった。このため、MRを用い、床版打設時の鉄筋との取合いを3次元で確認を行った。写真8にMRでモデルを重ね合わせた様子を示す。配筋とパイプレーターを使用する人の3Dモデルを作成し、同一空間に投影し、重ね合わせることでパイプレーターを挿入し、締固めが可能であることを確認することができた。

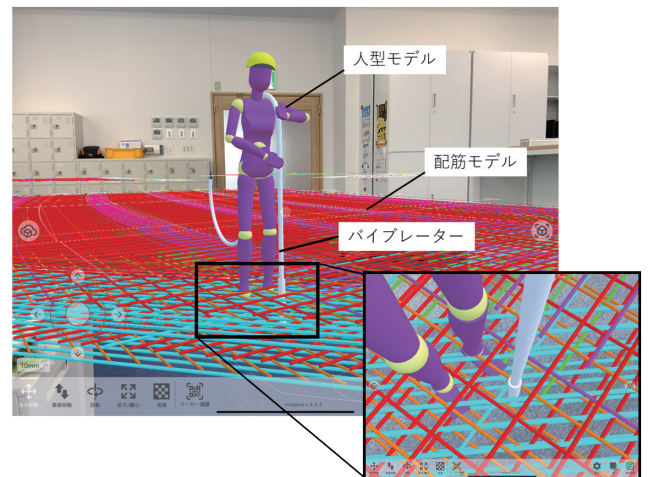


写真8 MRによる狭隘部の鉄筋の確認

6. おわりに

久万秋2号橋は桁架設が2022年の11月から開始される。これまでに今回のような斜角と曲線を有している橋梁について、ねじりキャンバーの精度と現場での倒れ量を比較した例が少ない。そのため、今後現場で桁架設時、床版打設時のキャンバーと桁倒れ量の計測管理を行い、その結果について引き続き報告する予定である。

参考文献

- 1) 栗山，河野，村上，中西：すみ肉溶接止端部割れに関する研究一二つのすみ肉溶接部が接した谷間における割れの発生，石川島播磨技報，第18巻，第4号，pp.327- 333，1978.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説・Ⅱ鋼橋編，丸善，2017.