

R=80 mの平面曲線を有する混合橋の設計・施工

～美濃関ジャンクションFランプ橋～

Design and Construction of Curved Steel/PC Mixed Bridge

本摩 敦
Atsushi HOMMA

川田工業(株)橋梁事業部技術部
大阪技術部設計一課係長

水本 泰章
Yasuaki MIZUMOTO

川田工業(株)橋梁事業部工事部
工事二部工事課総括工事長

岩田 幸三
Kozo IWATA

川田工業(株)橋梁事業部工事部
工事二部工事課

近年、鋼とコンクリートを組み合わせることにより、力学特性や経済性の向上を図った混合構造の採用事例が増えつつある。これまでの代表的な混合構造としては、生口橋や多々羅大橋で採用された複合斜張橋や木曾川橋・揖斐川橋で採用された複合エクストラード橋が挙げられる。また桁橋では四国横断自動車道 新川橋^{1), 2)}、吉田川橋 (JH四国支社, 高松工事事務所) がある。しかし新川橋を含め、これまでの数少ない混合橋の実績は、その全てが直線もしくはほぼ直線の平面線形を有する橋梁であり、ランプ橋のような曲線橋への採用事例はこれまでではなかった。本稿は混合桁形式を曲線橋に適用した、初めての事例である美濃関ジャンクションFランプ橋工事の設計・施工について、主に鋼桁部・接合部に着目して報告するものである。

キーワード：曲線桁、鋼・コンクリート混合橋、接合部、大ブロック架設

1. 橋梁概要

本橋は岐阜県美濃市と関市の市境に位置し、東海北陸自動車道と東海環状自動車道を結ぶ美濃関ジャンクションの橋梁群のうち、東海環状自動車道から東海北陸自動車道南行きに接続する流入 (Eランプ)・流出 (Fランプ) の両ランプ橋である。本橋の全体図を図1、側面図を図2、橋梁諸元を表1に示す。東海北陸自動車道跨道部に軽量で架設時の施工性がよい鋼桁と、比較的経済性に有利なPRC桁を連続化し、耐震性・走行性を向上することが混合橋桁式の採用理由である。

2. 曲線を考慮した設計

本橋の特徴は大きい曲率を有する曲線橋であること、および混合桁形式であることが挙げられる。ジャンクション橋であるため道路線形は複雑な形状で、全体図からも分かるように、Eランプ橋は「くの字形」、Fランプ橋は「馬蹄形」の道路線形となっている。最小の曲率半径は80 mである。設計業務ではこれらの曲率に配慮する必要がある。以下に曲率の影響を考慮して決定した項目について述べる。

① 腹板厚

補剛材間隔と曲率半径のパラメータ (a/R_w , a : 曲率による腹板のライズ, R_w : 腹板の曲率半径) により腹

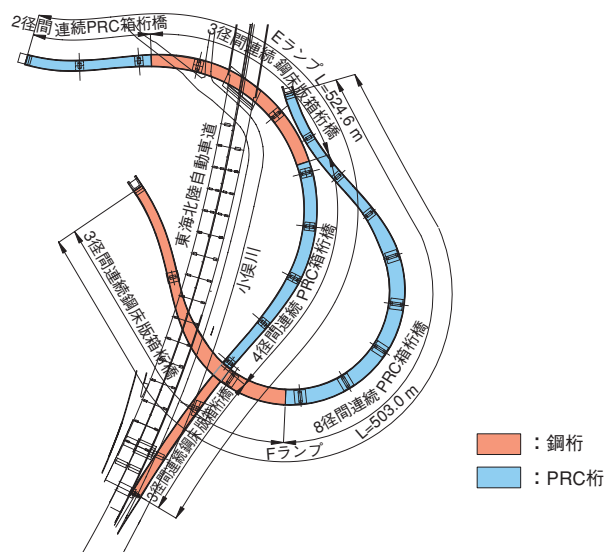


図1 美濃関ジャンクションFランプ橋全体図

表1 主要諸元

道路規格	第2級A規格
構造形式	多径間連続 (鋼床版箱桁+PRC箱桁) 連続橋 (Eランプ橋: 12径間, Fランプ橋: 11径間)
橋長	Eランプ橋: 524.6 m Fランプ橋: 503.0 m
支間割	Eランプ橋: 39.1+44.0+44.0+69.5+48.5 +40.0+40.0+40.0+38.5+42.5+43.8+33.3 m Fランプ橋: 71.0+89.0+55.0+36.0+36.0 +36.0+36.0+36.0+36.0+36.0+36.0 m
有効幅員	Eランプ橋: 6.81 m~ 8.96 m Fランプ橋: 6.86 m~ 10.81 m

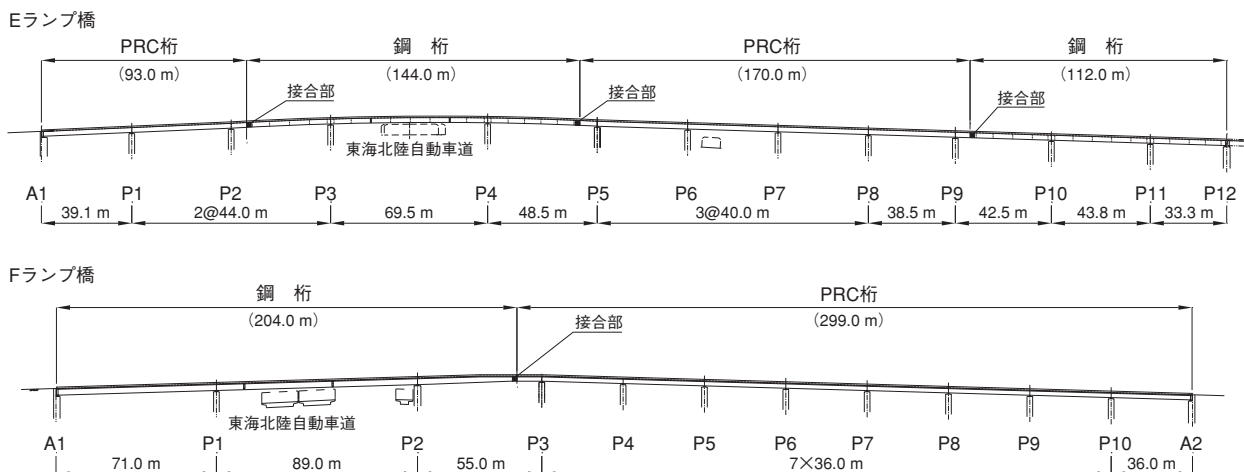


図2 美濃関ジャンクションFランプ橋側面図

板厚増加の要否を判定³⁾した。図3に本橋における a/Rw の頻度分布を示す。Fランプでは全体の約半数の断面が曲率の影響による腹板厚の増加の可能性がある範囲にあることがわかる。照査の結果により、図に示す範囲の腹板厚を増加させた。

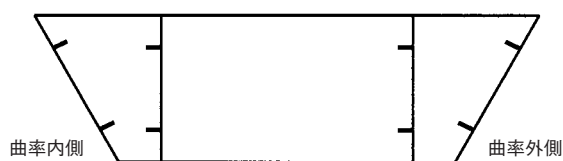


図4 水平補剛材取付位置

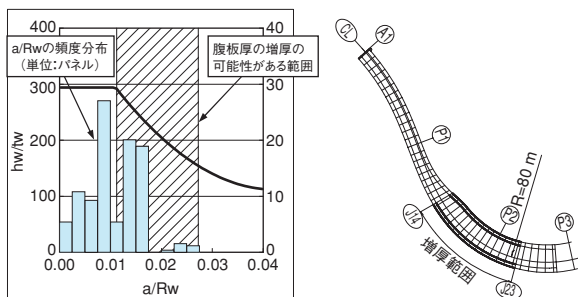


図3 腹板の幅厚比と曲率の頻度分布

② 水平補剛材の取付け位置

水平補剛材の取付け位置は、図4に示すように終局耐荷力の面で有利な腹板の曲率中心側とした。ただし、曲線の最も内側となる腹板位置のみ曲率の外側に取付けた。また照査の結果から必要に応じて水平補剛材の剛比をアップした。

③ ダイヤフラムの間隔

便覧4) および文献5) に準拠して、曲率の影響を考慮して決定されるダイヤフラム間隔は、図5に示すようにE・Fランプとも製作性を考慮した下限値の領域に入っている。そり応力度の増加が懸念されたが、直応力度の約10%であり、2次のオーダーであることは別途計算により確認している。

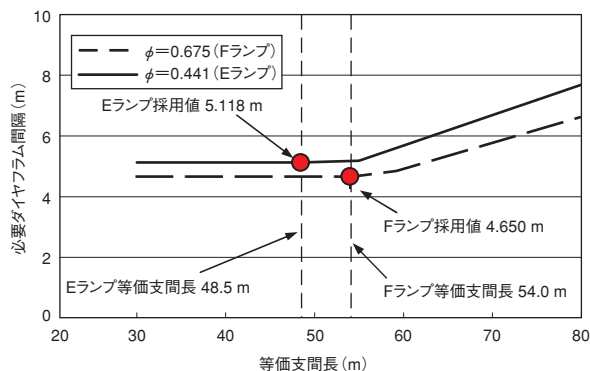


図5 等価支間長とダイヤフラム間隔の関係

雑な道路線形を考慮する必要があったため、複数の加振方向を考慮した立体非線形動的解析をもとに、ゴム支承のせん断変形量が安全な範囲であることを確認した。

サイドブロックの要否に関しては、次のような方針とした。支点位置で橋軸直角方向変位を拘束すると、クリープ収縮・温度伸縮により主構に軸力が作用する。その結果プレストレスが導入されない。また低温時には死荷重状態でもひびわれが開いた状態となることから、中間支点の支承にはサイドブロックを設けないこととした。この場合、図6に示すように、低温時において橋軸直角方向に最大約50 mm (クリープ14 mm, 温度変化36 mm) の変位が生じるが、走行性に影響ないものと判断した。端支点部については通行車両の安全確保のため、水平荷重作用時の橋台部における過大な目違いの防止を目的とした橋軸直角方向の拘束が必要であることから、サイドブロックを設けることとした。

3. 落橋防止システム

(1) 免震沓の採用

本橋の大規模地震に対する耐震設計では鉛プラグ入りゴム支承の履歴減衰を期待した免震設計を採用した。複

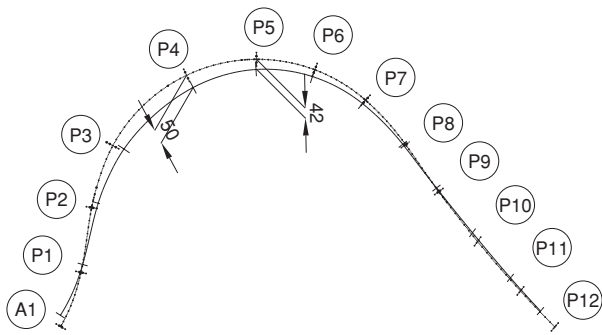


図6 クリープ+温度による変形 (Eランプ)

(2) 落橋防止装置

全ての端支点部には落橋防止装置を設置した。橋軸方向には下部工と上部工をPCケーブルで接続する構造を用いた。ただし、EランプP12部のみは隣接桁との連結構造とした。橋軸直角方向には照査の結果、想定外地震時の上部構造の回転による支承からの脱落、さらに下部構造からの脱落の恐れがあるFランプ橋のA1橋台部については、落橋防止構造と同等の耐力を有する変位制限構造を設ける構成とした。

4. 疲労設計

疲労設計は「鋼道路橋の疲労設計指針, H14.3, 日本道路協会」⁶⁾に準拠し、構造詳細による疲労設計と応力度による疲労照査を行った。

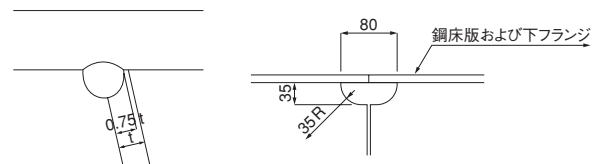
(1) 構造詳細による疲労設計 (図7)

現場溶接部のウェブに設けるスカラップ形状については、長さは超音波探傷試験における、まわし溶接部の影響の排除を目的として80 mmとした。高さは最小施工遊間を考慮して35 mmとした。縦リブの継ぎ手は、重交通路線ではないことを考慮して、スカラップ部のまわし溶接止端部の仕上げは行わないこととした。横リブの継ぎ手(縦シーム位置)は車線範囲内となる継ぎ手位置について、スカラップ部のまわし溶接止端部の仕上げを行った。

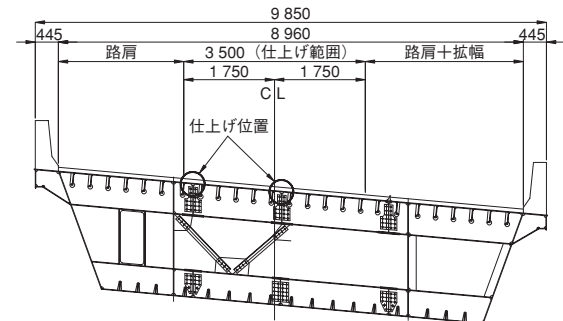
ほぼ直線であり、閉断面縦リブが採用されているEランプP9-P12では、縦リブとデッキプレートの縦方向溶接継ぎ手に、必要などの厚を確保するとともに、リブ板厚の75%以上の溶込み量を確保するものとした。

(2) 応力度による疲労照査 (図8)

Eランプ、Fランプともに支間部のウェブ下縁現場溶接スカラップ部を除き、一定振幅応力に対する応力範囲の打ち切り限界を用いた照査を満足する。支間部のウェブ下縁現場溶接スカラップ部については、さらに累積損傷度を考慮した疲労照査を行い、許容値を満足することを確認した。以上の結果より、応力度の疲労照査に起因した断面の変更や溶接止端部のビード仕上げを不要とした。



a) 閉断面リブとデッキプレートの溶接
b) スカラップ形状 (EランプP9-P12のみ)



c) 横リブ継ぎ手位置の仕上げ範囲

図7 構造詳細による疲労設計

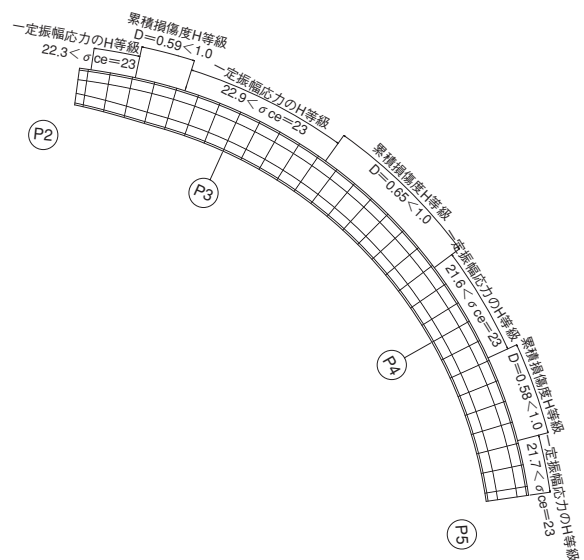


図8 ウェブ下縁現場溶接部疲労照査結果 (Eランプ)

5. 接合部の設計

(1) 接合部の構造

本橋の接合部形式には新川橋で施工実績がある『中詰コンクリートを後施工とする後面支圧板ずれ止め併用方式』を採用した。この形式は鋼桁側の断面の周縁とウェブ部分をマルチセル構造として、鋼殻セル内に充填した中詰コンクリートとマルチセルの後面支圧板を介して応力を伝達する方式である。この構造は中詰コンクリート部とPRC桁部が一体化しているため、力の伝達性に優れ、接合面でのコンクリートの応力集中が比較的小さいなどの特徴を有する。マルチセル内に設けるずれ止めには、製作性とずれ力の一方方向性を考慮して従来からのスタッドジベルに代わり、孔明き鋼板ジベル (PBL) を採用している。接合部の構造を図9に示す。

接合部の位置は、断面力が小さく、かつほとんど交番しないPRC桁側の支間1/5点付近とした。これは、①下部工反力の低減、②軽量の鋼桁側を長くし、接合部のベント反力解放時における鉛直変位や断面力の発生を極力抑える、などの理由が挙げられる。

接合部が橋梁全体の弱点とならないように、鋼およびコンクリート断面がそれぞれ独自に全断面力を負担できる構造として設計した。接合部は安全性を考慮し、プレキャストセグメント継目部の設計と同様に、設計荷重時に引張応力を発生させないフルプレストレス構造とした。

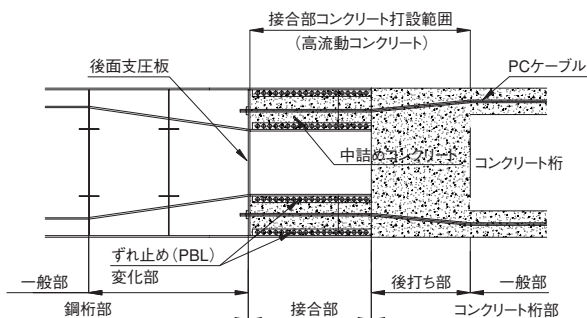


図9 接合部の構造

(2) FEM解析による検証

前述のように混合桁の全ての既往事例は直線かほぼ直線であり、曲線橋への混合桁の適用事例はない。本橋の詳細設計では曲率の影響を考慮した接合部構造の妥当性確認を目的として、3次元FEM解析（部分モデル）を実施した。解析対象は、幅員が狭く半径が小さいEランプ橋P5橋脚付近の接合部を選定した。モデルの構成要素は、鋼部材をシェル要素、コンクリート部材をソリッド要素、PBLを線形バネ要素としている。鋼とコンクリートの接触には、接合部の構造を忠実に再現するため、非線形接触要素であるギャップ要素（図10参照）を用いて結合した。解析結果は設計に反映させて、接合部構造を最終決定している。

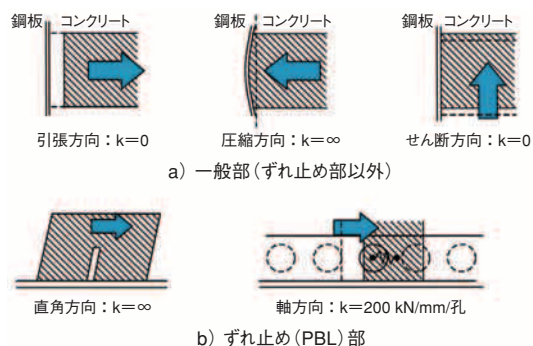


図10 鋼とコンクリートの接触のモデル化

(3) 解析結果

ここでは、接合面のコンクリート応力状態の結果について述べる。なお他の項目については曲線桁として特筆すべき結果ではなかったことを付記しておく。

ねじりモーメント最大ケースでは、接合部境界面において、図11に示すように鋼殻セルの角部（仕切り板とフランジの結合部付近）の極めて狭い範囲で、引張側の応力集中が認められた。この応力集中の原因として、ねじりモーメントに伴い発生する偶力により、仕切り板がコンクリートを圧迫し、背面側のコンクリートに引張応力が発生したと考えられる。

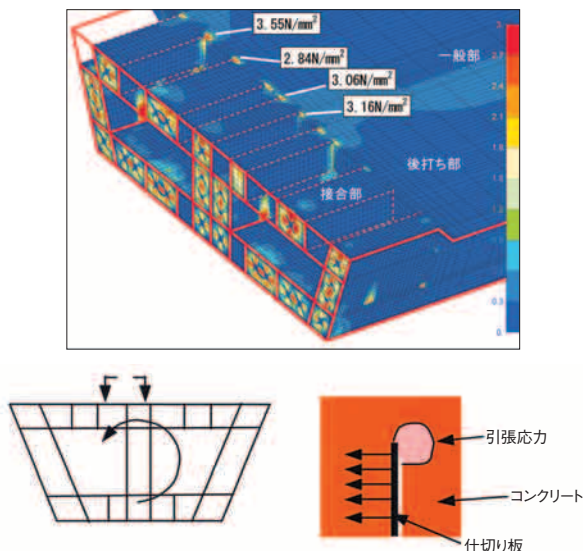


図11 コンター図（PRC桁側）および引張応力発生状況

そこで、応力集中の緩和対策として、写真1に示すような、仕切り板を境界面から500 mm控え、鋼桁～PRC桁間のねじりモーメントを段階に伝達する構造を考案し、FEM解析で以下に示す対策効果を確認した。

- ・仕切り板を接合面より控えることで、鋼桁からコンクリート桁へ断面力が段階的に伝達される構造になり、接合面（仕切り板端部のコンクリート断面）に作用するせん断力が5～20%減少した。
- ・コンクリート引張応力の発生位置が、拘束効果の高い鋼殻セル内部に移り、コンクリートの応力集中が全体的に緩和された。仕切り板端部の引張応力は若干残るが、その領域はごく一部の局所的なものであり、構造上の問題はないと判断された。



写真1 対策構造

6. 架設工事

本橋の鋼桁部分の架設は、基本的にはトラッククレーンベント工法であるが、特徴的な項目を以下に述べる。

(1) 現場溶接

本橋の現場添接方式には、景観に配慮して全断面溶接が採用された。桁は陸上輸送上の高さ幅制限等制約のため、部材長10 mまでの架設ブロックを3～7部材に分割し、輸送した。縦シームの現場溶接も含めて地組み立てを行った後に架設し、ベント上にて突合せ溶接を行った。

施工に際して最も留意したのは溶接時の施工精度であった。鋼床版上に罫書いた基準線により工場仮組み状態を再現し、各ブロックダイヤ間の対角長を測定し微調整を行って施工した。出来形のキャンバー許容値は $-50 \sim +25$ mmであるが ± 25 mm (PRC床板の規格) を目標値として施工した結果、E・Fランプ橋ともに目標値を満足することができた。

(2) 大ブロック架設

東海北陸道本線の跨道部の架設は、ランプ桁架設工事に伴う本線規制期間を最小限とするため、大型クレーンを用いたE・Fランプ同日の大ブロック一括架設工法が採用された。以下に、大ブロック架設に関する検討事項および対策を述べる。

① 吊り上げ時の安定性確保

大ブロック架設時において、吊り上げ時の桁の振れに最も留意した。本橋の場合、桁の曲率が $80 \sim 100$ Rと小さく、さらに拡幅・変断面を有しているため、安定な状態で吊り上げるためには、正確な重心位置の把握が必要とされた。詳細設計完了後、誤差50 cmを目標として、材片レベルから重心位置を算出した。実施工でもアンカー振れ止めを4箇所設置し、桁は振れることなく、ほぼ水平を保った状態で吊り上げることができた。

② 架設後の転倒防止対策

事前検討において、桁をクレーンから解放した際に曲線の内側に負反力が発生することが判明したため、曲線の外側に仮設のアウトリガーを設置し、負反力の発生を防止した。(写真2)

③ 桁架設完了後の本線規制軽減策

鋼製型枠・化粧板の取付けや添接部塗装など、本線規制が必要となる工種については予め施工した。

④ 支保工の弾性変位対策

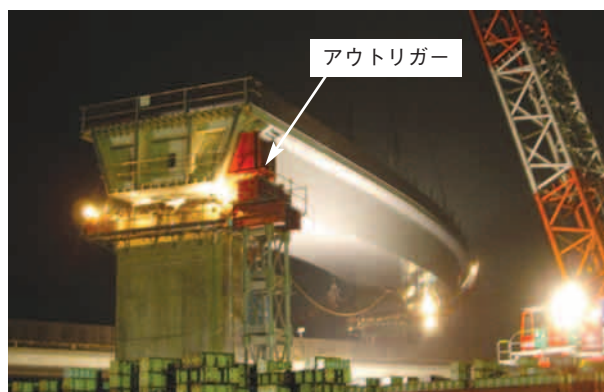


写真2 アウトリガー

Fランプの大ブロック部材が荷重されるベントは、河川上に位置するため、梁による支持となっている。事前検討により、大ブロック部材の荷重により梁が50 mm沈下することがわかったため、沈下量分を予め上げ越して設置した。

大ブロック架設には、世界最大級のクローラクレーンであるTEREX-DEMAG社製CC8800、1 250 t吊クレーンを使用した。このクレーンは世界で8台、国内では2台の保有で今回が国内初使用となった。2003年11月10日23時より桁架設が開始され、多数の関係者、一般見学者が見守る中、無事架設を完了した。(写真3, 4)



写真3 1 250 t吊クレーン



写真4 大ブロック架設

(3) 接合部の施工

接合部の施工は、中詰めコンクリートの鋼殻セル内への充填性が重要となる。充填促進を目的として、設計段階で鋼殻セルの仕切り板を境界面より500 mm控え、また、これまでの施工経験を活かし、充填確認孔を50 mm径に拡大、孔位置をセル上面中央より横断勾配の高い位置に変更するなど構造の改善を行った。

打設直後の夜間には、気温の低下によって桁が収縮し、強度発現前の中詰めコンクリートに引張力が作用することによる、ひびわれの発生が懸念された。対策として、写真5に示す鋼桁・PRC桁の相対変位拘束治具を考案し、コンクリートへの引張力を低減する手法を用いた。



写真5 変位拘束治具

4箇所の接合部のうち、2箇所については縦横断勾配が最大で約10%と大きいため、写真6に示す鋼殻セルの実物大試験体を製作し、高流動コンクリートの充填性確認試験を実施した。試験の結果、①コンクリートは打設口位置から直線的には良好に流動するが、経路が屈曲すると流動性は低下する ②連続してコンクリートを投入すると良好に流動するが、投入を停止し、一旦流動が止まると再流動しにくい などがわかった。



写真6 高流動コンクリート実物大試験体

これらの知見を反映して、打設口は2セルに1箇所設けることとし、打設手順についてもコンクリートを連続投入できるように計画を行った。その結果、実施工では無事中詰めコンクリートの充填・打設を問題なく完了することができた。(写真7)



写真7 打設状況

7. おわりに

近年、コスト縮減、構造の合理化などを目的として複合構造が注目され、様々な新構造形式が検討され、適用例が増加している。本橋においても同様の目的で採用されたものであるが、混合桁形式としてはこれまでに例のない曲線橋への適用事例である。本文では一連の検討結果を述べたが、今後の事例に有用となれば幸いである。

最後に本工事にあたり、日本道路公団中部支社ならびに岐阜工事事務所の皆様には常に的確なご指導を賜りました。またJV構成員である極東工業(株)の関係各位にご協力いただきました。心よりお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 望月, 山田, 安藤, 縄田, 高田, 宮地: 鋼・PC混合橋(新川橋)の設計と施工, 橋梁と基礎, 2000.11.
- 2) 縄田, 高田, 木本, 宮地, 柳沢, 岩田: 新川橋(鋼・PC複合上部工)工事の設計・施工, 川田技報, Vol.19, 2000.1.
- 3) 阪神高速道路公団: 曲線桁設計の手引き(案), 1988.10.
- 4) 日本道路協会: 鋼道路橋設計便覧, 1980.8.
- 5) 坂井, 長井: 曲線鋼箱桁橋の中間ダイアフラム設計法に関する一提案, 土木学会論文報告集 No.305, 1981.1.
- 6) 日本道路協会: 鋼道路橋の疲労設計指針, 2002.3.