

## (45) 鋼・コンクリート混合連続曲線箱桁橋の接合部の設計

Design of connection member for curved mixed continuous box bridge

市川博康\*, 山形尚裕\*\*, 本摩敦\*\*\*, 水野篤志\*\*\*\*, 岩田幸三\*\*\*\*\*

Hiroyasu Ichikawa, Naohiro Yamagata, Atsushi Homma, Atsushi Mizuno, Kozo Iwata

\*日本道路公団中部支社岐阜工事事務所 (〒504-0957 岐阜県各務原市金属団地 131 番地)

\*\*日本道路公団中部支社岐阜工事事務所 (〒504-0957 岐阜県各務原市金属団地 131 番地)

\*\*\*川田工業株式会社 大阪技術部 (〒550-0014 大阪府大阪市西区北堀江 1-22-19)

\*\*\*\*極東工業株式会社 技術本部 (〒732-0052 広島県広島市東区光町 2 丁目 6-31)

\*\*\*\*\*川田工業株式会社 工事二部 (〒550-0014 大阪府大阪市西区北堀江 1-22-19)

The Japan Highway Public Corporation Chubu Branch adopted the mixed curved girder bridge type for the Minoseki Junction F-ramp Bridge, which are 11-span and 12-span continuous bridges connecting TOKAI HOKURIKU Highway and TOKAI KANJO Highway. It is especially important to make sure the smooth transmission of forces at the joint between steel and concrete girders of a curved girder bridge. Therefore, in designing and construction these bridges, FEM analysis was carried out in order study stress characteristics, design method validities, etc., of the joints.

*Key words: mixed bridge, joint, perfobond-leiste (PBL), steel cell*

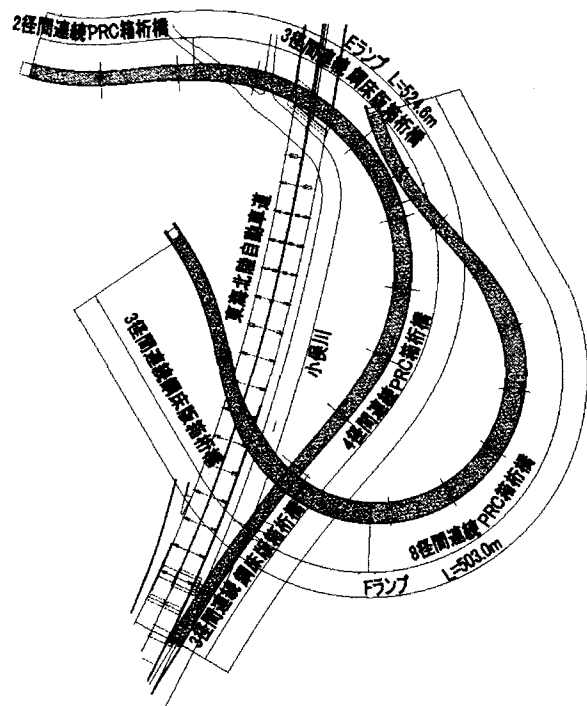
### 1. はじめに

近年、一連の橋梁の中で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曽川橋・掛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<sup>1), 2)</sup>、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はなかった。美濃関ジャンクションFランプ橋工事では、混合桁形式を曲線橋に適用したはじめての事例といえる。本稿は、平面曲線を有する混合桁橋の接合部の設計について報告する。

### 2. 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の長

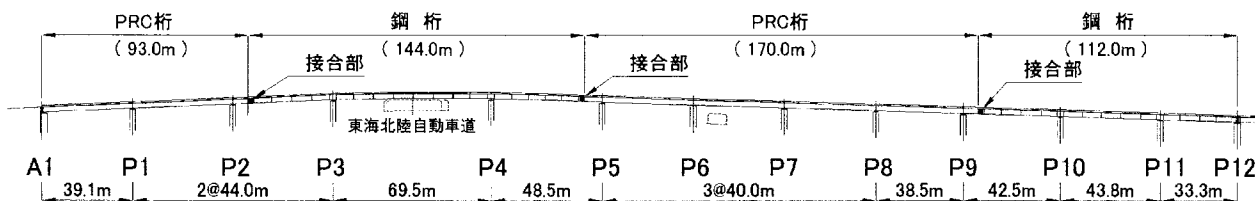
支間に適した軽量の鋼桁と、経済性に有利なPRC桁を連続化し、耐震性・走行性を向上することが混合橋形式の採用理由である。



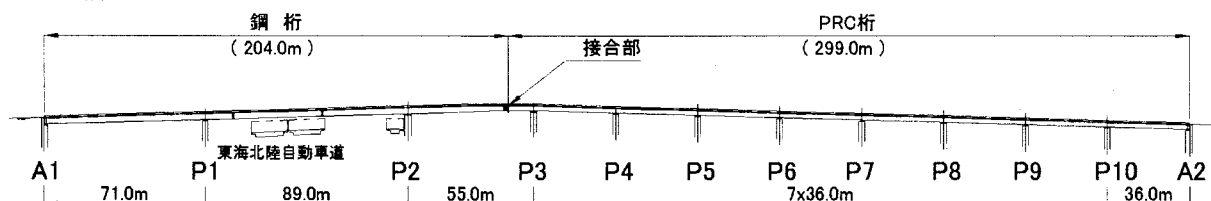
着色部：鋼桁， 無着色部：PRC桁

図-1 美濃関ジャンクションFランプ橋全体図

## Eランプ橋



## Fランプ橋



図－2 美濃関ジャンクションFランプ橋側面図

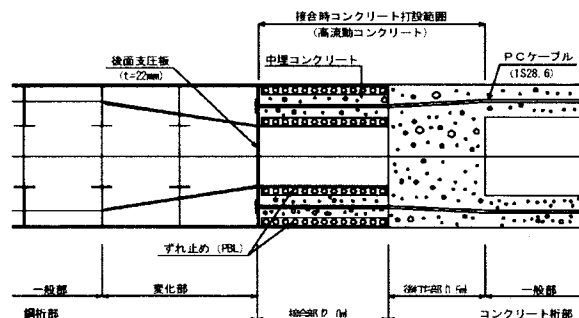
表－1 橋梁諸元

|                               |
|-------------------------------|
| 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：524.6m               |
| Fランプ橋：503.0m                  |
| 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+33.3m         |
| 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+36.0m               |
| 有効幅員：Eランプ橋：6.81m～8.96m        |
| Fランプ橋：6.86m～10.81m            |

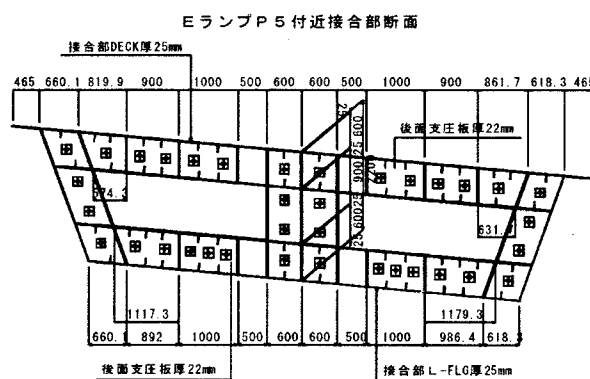
本橋の最大の特徴は、小さい曲率を有する曲線橋であること、および混合橋形式であることが挙げられる。ジャンクション橋であるために道路線形は複雑な形状であり、Eランプ橋は最小半径110mの「くの字形」、Fランプ橋は最小半径80mの「馬蹄形」の道路線形となっている。設計にあたっては、これらの曲率に対する配慮、および、接合部の設計が特に重要な課題であった。

### 3. 接合部の設計

鋼桁とコンクリート桁の境界部に位置する接合部は、鋼桁とコンクリート桁間のスムーズな応力の伝達が要求される重要な部位である。混合構造の接合部は、一般にコンクリート部材と鋼桁部材では断面構成が大きく異なるため、断面のすりつけを行う必要がある。接合のための構造要素は、



図－3 接合部の構造



図－4 鋼殻セルの形状

支圧板、中詰めコンクリート、ずれ止め、PC鋼材があり、この要素の組み合わせにより接合部の構造形式が決定される。接合部の形式には複数の種類があり、それぞれ特長を有しているが、本橋の接合部形式には新川橋で施工実績がある『中詰め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－3に示す。

本工事では施工性（鋼殻セルの製作、鉄筋およびPC鋼材の配置、中埋コンクリートの打設）や維持管理（桁内マンホールの高さ）を考慮し、鋼殻セル形状を、既往の実績から最大で高さ600mm×幅1000mm以下にした。鋼殻セルの形状を図－4に示す。また、鋼殻セル内のPBL形状は100×12－φ60ctc100とした。さらに、鋼桁とコンクリート桁の一体化を確実にするために接合用PC鋼材を配置し、プレストレス力を導入する。使用したPC鋼材は、主桁と同様のプレグラウト鋼材IS28.6で、配置可能な鋼殻セル内すべてに配置した。接合完了後の接合部の鉛直変位は、死荷重時で5mm程度に抑えた。鋼殻セル内に配置される橋軸方向鉄筋は、接合面でコンクリート部と鋼殻セルを分断させないために、機械式継手を用いて連続化した。

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コンクリート桁側の支間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、接合後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。

接合部は、橋梁全体の弱点とならないように、鋼断面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。

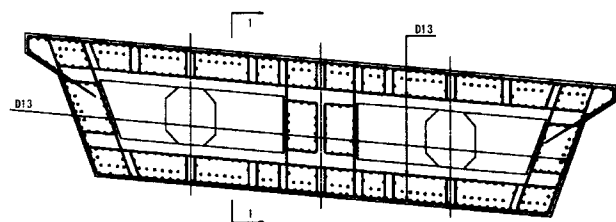
設計断面力（曲げモーメント、せん断力、軸力）は、架設ステップを考慮した平面骨組み解析と立体格子解析により算出した。主桁自重、プレストレス力、クリープ・乾燥収縮を平面骨組み解析で求め、橋面荷重、活荷重、温度荷重を立体格子解析で算出した。ねじりモーメント（主桁自重、橋面荷重、プレストレス、活荷重、温度荷重）はすべて立体格子解析で算出した。接合面における断面力を表－2に示す。

表－2 接合面における断面力

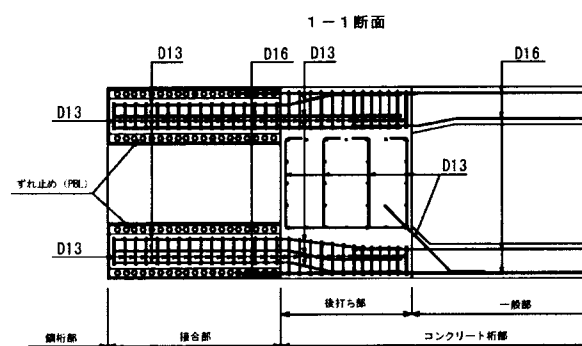
|       |      | 曲げ<br>モーメント<br>(kN・m) | せん断力<br>(kN) | ねじり<br>モーメント<br>(kN・m) |
|-------|------|-----------------------|--------------|------------------------|
| 設計荷重時 | Mmax | 7,926                 | -1,005       | -3,777                 |
|       | Mmin | -1,851                | -3,035       | ---                    |

ねじりは最大値のみ

コンクリート主桁の曲げに対する設計は、死荷重時には曲げひびわれ発生限界制御、設計荷重時以降は曲げひびわれ幅限界制御とするPRC構造であるが、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。せん断の検討は、「接合面の直接せん断」に対する検討を追加した。ここでは、ウェブを有効断面とする接合面における主桁断面の直接せん断抵抗に対する検討と、全断面を有効断面とするプレストレス力による摩擦抵抗に対する検討を行った。本工事で決定した接合面の断面配筋図を図－5に、側面配筋図を図－6に示す。



図－5 接合面の断面配筋図

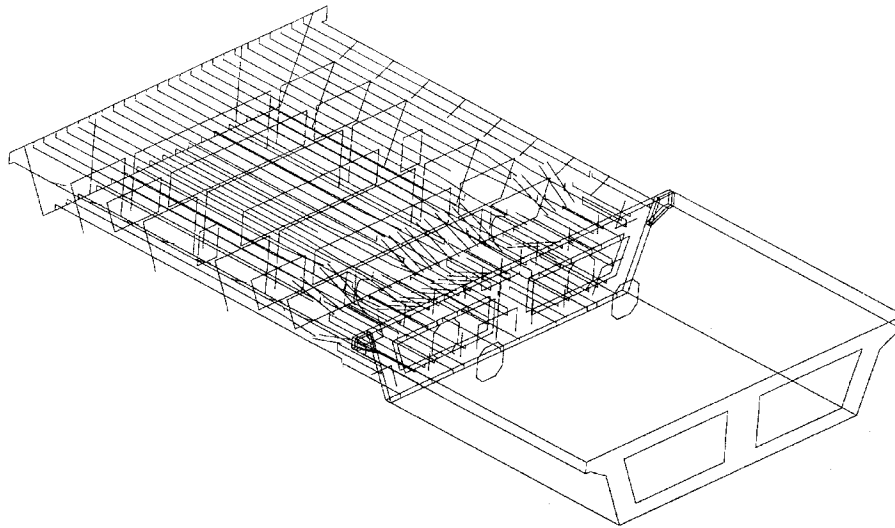


図－6 接合面の側面配筋図

#### 4. FEM解析

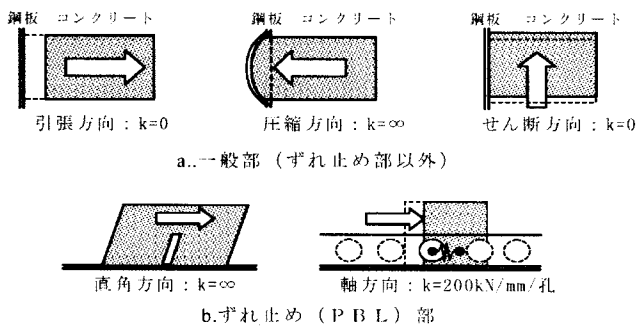
本形式の接合部の安全性については既往事例の業務の中で確認がなされているが、前述のように全ての既往事例は直線かほぼ直線であり、曲線橋への混合桁の適用事例はない。したがって、曲線の影響によるねじりモーメントの伝達の際に生じるコンクリートの局部応力、および鋼殻セルを構成する鋼板の発生応力など、次に示すような要点を確認することが、曲線橋の接合部設計における課題であった。

- ①PBLに作用するずれ力の橋軸方向分布
- ②PBLに作用するずれ力の橋軸直角方向分布
- ③PBLと後面支圧板の荷重分担率
- ④鋼殻セルを構成する鋼板の応力状態
- ⑤接合面のコンクリート応力状態



図－７ 解析モデル図

表－３ 解析概要



図－８ 解析に用いたギャップ要素

これらは簡易計算による確認が困難であるため、3次元FEM解析を用いて接合部構造の妥当性を確認した。本解析結果を設計に反映させて、接合部構造を最終決定している。

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。モデル化は、接合部と接合部付近の応力の確認を目的としているため部分モデルを用いた。モデル化の範囲は、後面支圧板を中心に鋼桁一般部からコンクリート桁橋脚部までの19.4m区間とした。解析モデル図を図－７に示す。

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－８参照）を用いて結合した。

載荷荷重は各着目点に応じて表－４のように設定した。載荷方法は、着目点である接合部に所定の断面力が作用するように、

- 1) モデル両端部に剛な面を設け剛な棒で結ぶ。
- 2) コンクリート桁側端部拘束条件を完全固定とする。
- 3) 立体骨組み解析により得た断面力を剛な棒の後面支圧板位置に載荷する。

| 項 目          | 概 要                                                                                                                                                           |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 解析対象         | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ E ランプ P5 付近接合部－幅員が小さく曲率半径が小さい(120R)</li> <li>・ 接合面を含み鋼桁一般部から PRC 桁一般部の 19.4m 区間</li> </ul>                           |
| 使用要素         | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 鋼桁部－4 節点シェル要素</li> <li>・ コンクリート部－8 節点ソリッド要素</li> <li>・ ずれ止め－線形バネ要素</li> <li>・ 鋼とコンクリートの接触－ギャップ要素(非線形接触要素)</li> </ul> |
| 要素数<br>・ 節点数 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 要素数－ 104,976 (シェル・ソリッド要素) + 29,807 (バネ要素) = 134,783</li> <li>・ 節点数－ 91,062</li> </ul>                                |
| 材料条件         | ・ 線形弾性                                                                                                                                                        |
| ソルバー         | ・ MSC NASTRAN ver. 70.7                                                                                                                                       |

表－４ 載荷荷重ケース

|        |                                 |
|--------|---------------------------------|
| Case-1 | 最大ねじりモーメント発生ケース                 |
| Case-2 | 水平軸回り曲げモーメント発生ケース               |
| Case-3 | 最大ねじりモーメント発生ケースからねじりモーメント除去した場合 |
| Case-4 | プレストレス導入時                       |

表－５ 載荷断面力

| 解析<br>ケース | 軸力     | せん断力   |          |  | ねじり<br>モーメント | 曲げモーメント  |          |
|-----------|--------|--------|----------|--|--------------|----------|----------|
|           | FX(kN) | FY(kN) | FZ(kN)   |  | MX(kN・m)     | MY(kN・m) | MZ(kN・m) |
| Case-1    | -128.3 | 39.9   | -2,215.4 |  | -4,166.0     | 8,662.8  | -221.3   |
| Case-2    | -128.9 | 37.9   | -772.5   |  | -1373.8      | 14,673.5 | -145.5   |
| Case-3    | -128.3 | 39.9   | -2,215.4 |  | 0.0          | 8,662.8  | -221.3   |
| Case-4    | 0.0    | 0.0    | 0.0      |  | 0.0          | 0.0      | 0.0      |

という手法を用いた。また、プレストレスは、後面支圧板の鋼材位置に集中荷重として载荷した。载荷断面力は、接合部鋼殻セル両端の後面支圧板側と接合面側の断面力を比較し、断面力の大きい値を用いた。（表－5参照）

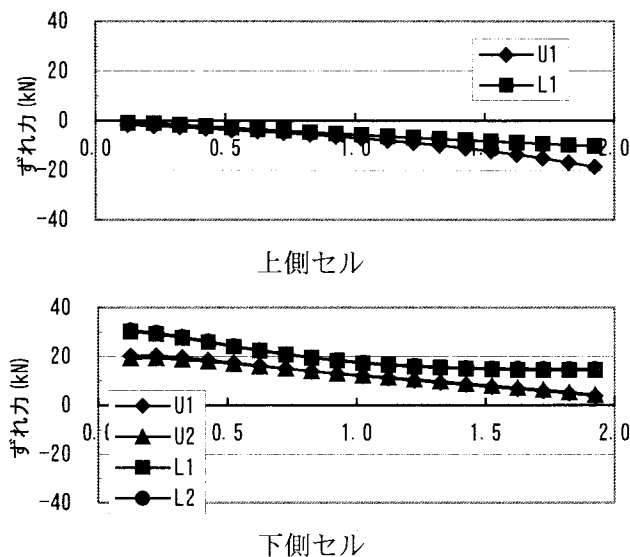
## 5. FEM解析結果

### ①PBLに作用するずれ力の橋軸方向分布

鋼殻セルの上側下側それぞれのPBLに作用するずれ力の橋軸方向分布 (Case-2) を図－9に示す。ここに表記するずれ力はPBL孔1個あたりの値である。図－9の解析結果より次のことがわかる。

- ・上下側セルともに、ずれ力は三角形分布となる。
- ・曲げモーメント最大となるCase-2において、圧縮となる上側セルではセル出口側端部でずれ力の最大値を示し、後面支圧板側端部でのずれ力は出口側の1/10程度である。また、引張となる下側セルでは後面支圧板側端部でずれ力の最大値を示し、出口側端部でのずれ力は後面支圧板側の1/2程度である。
- ・PBL孔1個あたりの最大発生ずれ力は30kN程度である。下記のPBLずれ耐力 (Pa) の半分以下であり、耐力上の問題は無いことが確認された。

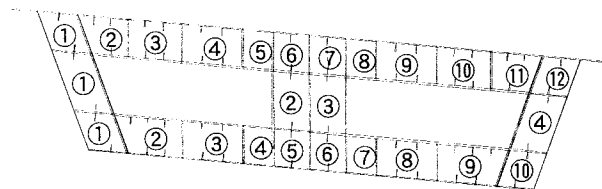
$$\begin{aligned} Pa &= \alpha \times 1.4 \times d^2 \times \sigma_{ck} / f \\ &= 0.7 \times 1.4 \times 60^2 \times (36/1000) \times 1.16 / 2.1 \\ &= 70.2 \text{ kN} \end{aligned}$$



図－9 ずれ力の橋軸方向分布

### ②PBLに作用するずれ力の橋軸直角方向分布

PBLの発生ずれ力の橋軸直角方向分布 (Case-2) を図－10に示す。ここで表記しているずれ力はPBL 1枚あたりのずれ力の合計である。図－10の解析結果より以下のことがいえる。



図－10 ずれ力の橋軸直角方向分布

- ・上側セルでは橋軸直角方向のずれ力の分布はほぼ均等である。
- ・下側セルでは③および⑧近辺でPBLの発生ずれ力が若干卓越する性状を示している。
- ・下側セルのずれ力の合計は上側セルの約2倍であるが、鋼桁一般部における水平軸周りの曲げモーメントに対する上下フランジ発生軸力の比率にほぼ等しく、部材中立軸からの縦距の差によるものと考えられる。

### ③PBLと後面支圧板の荷重分担率

PBLの荷重分担率の解析結果を表－6に示す。ここで、PBLのずれ力はセル1箇所あたりの合計である。解析結果より以下のことがわかる。

- ・圧縮となる上側セルにおけるPBLの荷重分担率は平均で0.540であり、新川橋で提案された圧縮側PBLの分担率算出式<sup>1)</sup>の値(0.35)と比べて、本解析結果は幾分大きめの値を示している。
- ・引張となる下側セルにおけるPBLの荷重分担率は平均で0.964であり、新川橋において提案された分担率算出式<sup>1)</sup>による値(約1.0)と同等であった。

表－6 PBLの荷重分担率

|         |        | (単位: kN) |        |        |        |       |       |
|---------|--------|----------|--------|--------|--------|-------|-------|
| セル番号    |        | ①        | ②      | ③      | ④      | ⑤     | ⑥     |
| 上側 (圧縮) | 後面支圧板  | 189.3    | 263.2  | 148.8  | 233.2  | 320.8 | 178   |
|         | PBL    | -138.7   | -237.8 | -379.3 | -393.5 | 0.0   | -196  |
|         | PBL分担率 | 0.423    | 0.475  | 0.718  | 0.628  |       | 0.525 |
| 下側 (引張) | 後面支圧板  | -16.4    | -21.5  | -24.0  | -196.7 | -18.3 | -18   |
|         | PBL    | 369.1    | 790.1  | 788.2  | 0.0    | 405.4 | 396   |
|         | PBL分担率 | 0.957    | 0.974  | 0.970  |        | 0.957 | 0.957 |

| セル番号    |        | ⑦      | ⑧     | ⑨      | ⑩      | ⑪      | ⑫     | 平均    |
|---------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|
| 上側 (圧縮) | 後面支圧板  | 179.0  | 312.7 | 174.0  | 152.9  | 233.4  | 217.2 |       |
|         | PBL    | -189.5 | 0.0   | -383.2 | -334.6 | -194.6 | -87.0 |       |
|         | PBL分担率 | 0.514  |       | 0.688  | 0.686  | 0.455  | 0.286 | 0.540 |
| 下側 (引張) | 後面支圧板  | -197.0 | -21.5 | -20.0  | -15.0  | 0.0    | 0.0   |       |
|         | PBL    | 0.0    | 711.4 | 652.7  | 308.0  | 0.0    | 0.0   |       |
|         | PBL分担率 |        | 0.971 | 0.970  | 0.954  |        |       | 0.964 |

#### ④鋼殻セルを構成する鋼板の応力状態

鋼殻セルを構成する鋼板応力分布の解析結果は次の通りであった。

- ・発生応力は最大でも $20\text{N/mm}^2$ と小さい。
- ・後面支圧板のPCケーブル定着具近傍では若干の応力集中が見られるが応力値が最大となるケースでも $142\text{N/mm}^2$ と、ほぼ許容応力度と同等であり、問題とはならない。
- ・下側セルの鋼殻セル出口に応力集中が見られるが応力値が最大となるケースでも $34\text{N/mm}^2$ と小さく、その他の部位でも応力集中は生じていない。

#### ⑤接合面のコンクリート応力状態

ねじりモーメントが大きいCase-1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、反対側のコンクリートに引張応力が発生したことが考えられる。

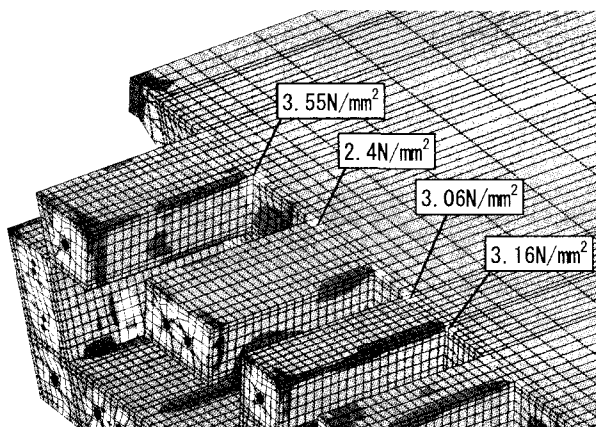


図-11 コンター図 (Case-1, コンクリート桁側)

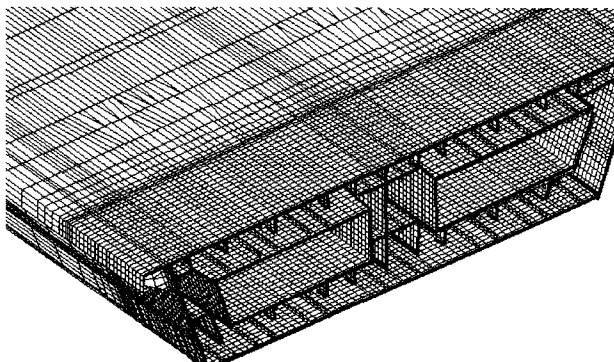


図-12 対策構造

そこで、応力集中の緩和対策として、図-12に示すような、仕切り板を境界面から500mm控え、鋼桁～コンクリート桁間のねじりモーメントを段階的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。

#### 7. まとめ

美濃関ジャンクション橋(鋼・コンクリート混合橋)の接合部の設計にあたり、接合部を対象としたFEM解析を実施した結果、以下のことが確認された。

- ・接合部は鋼桁およびPRC桁が単独で抵抗できるように設計している。また接合部は交番部に位置しており断面決定の支配的な要因となる水平軸回りの曲げモーメントが小さい。そのため鋼材およびコンクリートの応力レベルは小さい。
- ・PBLに作用するずれ力は耐力の半分以下のレベルである。
- ・鋼桁部に過度な応力集中などは認められない。
- ・ねじりモーメント最大ケースでは鋼殻セル出口側仕切り板端部のコンクリートの極めて狭い範囲に引張応力が発生する。
- ・仕切り板を鋼殻セル端部より控え、段階的にねじりモーメントを伝達させることで、コンクリートの応力集中のレベルを低減することができる。
- ・本解析におけるPBLの荷重分担率について、引張側では新川橋・吉田川橋工事で提案された算出式とよい一致を示した。

最後に、本検討を行うにあたり、適切なご指導を頂いた関係各位の方々に対し、深甚なる謝意を表する次第である。

#### 参考文献

- 1) 望月秀次, 安藤博文, 宮地真一, 柳澤則文, 高田嘉秀: 孔明き鋼板ジベルを用いた混合桁接合部の静的力学特性に関する実験的検討, 構造工学論文集, Vol. 46A, 2000-3, pp1479-1490
- 2) 望月秀次, 山田稔, 安藤博文, 縄田俊文, 高田嘉秀, 宮地真一: 鋼・PC混合橋(新川橋)の設計と施工, 橋梁と基礎, 2000-11, pp2-8