

## (46) 混合橋接合部の縮小模型供試体による実験的研究

Experimental study on the mixed girder bridge junction

田中雄太\*, 皆川昌樹\*\*, 小泉健治\*\*\*, 上田多門\*\*\*\*  
Yuta Tanaka, Masaki Minagawa, Kenji Koizumi, Tamon Ueda

\*工修, 株式会社ドーコン, 構造部 (〒004-8585 札幌市厚別区厚別中央1条5丁目)  
\*\*独立行政法人 北海道開発土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目)  
\*\*\*札幌市建設局, 土木部工事二課 (〒060-8611 札幌市中央区北1条西2丁目)  
\*\*\*\*工博, 北海道大学大学院助教授, 社会基盤工学専攻  
(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

Kitago viaduct is the bridge of the steel-concrete mixed structure that it is planned in Sapporo. The characteristic is the frictional power between the steel-concrete is expected the transmission of the shear and a deviation stop such as studs and PBL isn't installed in the surface of the junction and the steel shell cell.

Though it can work for the improvement in the simplification of the junction structure and the execution, there are few studies on the frictional force in the junction, so we conducted FEM analysis and experiments to verify the validity of this structure

It is reported about the fatigue and destruction experiment by the reduction specimen of the actual bridge junction

*Key Words: the mixed girder bridge, frictional force, FEM analysis*

### 1. はじめに

北郷立体交差は、3.4.179 北郷通（平和通～北13条・北郷通間）の踏切による渋滞緩和を目的として、計画されている都市内高架橋である。

北海道内で、鉄道輸送量が最も多い千歳線、函館本線を跨ぐ跨線橋となるため、鉄道跨線部の支間長が長く、側径間とのバランスが悪いため、当初は、鉄道跨線部を単純鋼床版箱桁橋とし、側径間を連続PC中空床版橋として計画されていた。

しかし、掛違い部を有することから、大規模地震時における重要路線上での落橋、伸縮装置の維持管理および騒音が懸念されたため、鋼床版箱桁とPC箱桁を連続化させた鋼-コンクリート混合橋形式を採用し、耐震性、走行性および維持管理性の向上を図っている。

本橋接合部の特徴は、従来の混合橋接合部と異なり、接合面および鋼殻セル内にスタッド、PBL等のずれ止めを設けず、せん断力の伝達を、鋼-コンクリート間の摩擦力に期待した「支圧接合方式」を採用している点である（図2参照）。接合部構造の簡略化および施工性の向上が図れる反面、摩擦力に期待した設計事例は極めて少ないことから、本形式の導入にあたり、FEM解析と模型実験を行って、設計の妥当性を検証している。

本文では、実橋接合部の縮小供試体による疲労実験および破壊実験について報告する。

### 2. 実験計画とせん断伝達特性

支圧接合方式は、せん断力の伝達を鋼-コンクリート間の摩擦力に期待する方式であるため、その摩擦係数お

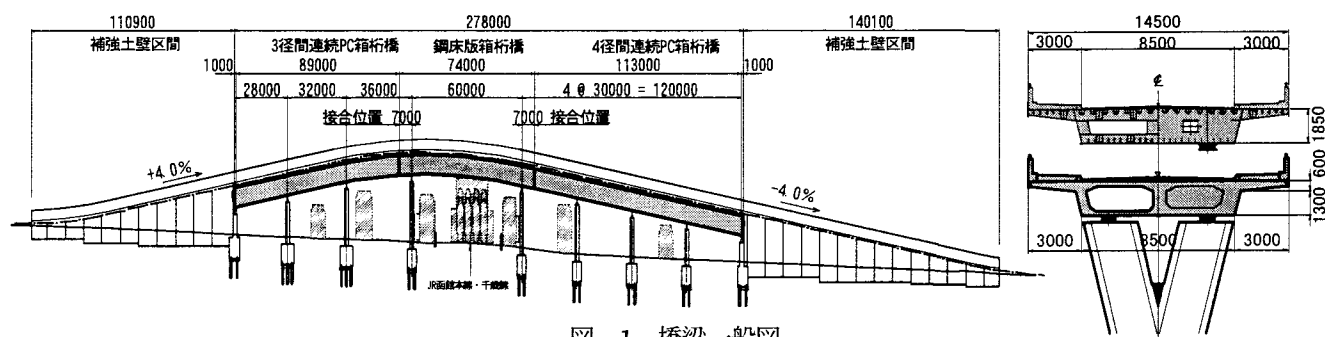


図-1 橋梁一般図

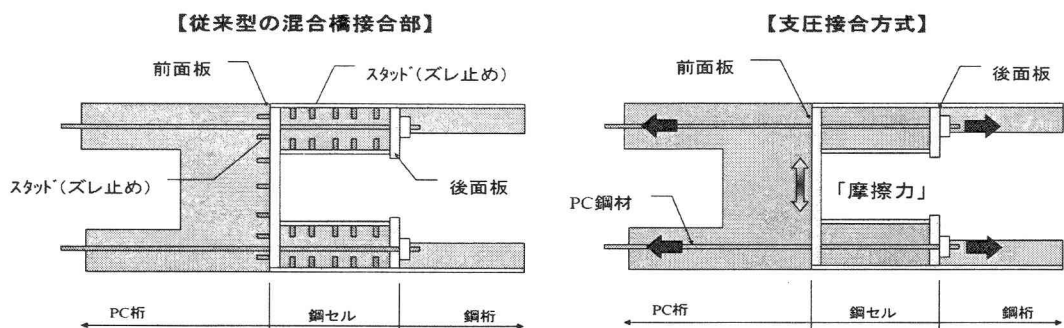


図-2 接合方式の比較

よび、せん断力伝達特性の把握は非常に重要である。しかし、鋼-コンクリート間の摩擦係数に関する定量的な根拠となる研究は少なく、特に本橋接合部のように、曲げモーメントとせん断力が同時に作用する状態についての研究は、ほとんど報告されていないのが現状である。

また本橋の場合は表-1に示すとおり、鋼桁側接合面の防錆および表面保護を目的として、接着剤を塗布後、珪砂を吹付接着することを計画しているため、純粋な鋼-コンクリート間のせん断伝達特性と異なる挙動を示すことが予想された。

表-1 表面処理方法

| 工 程      | 商 品 名            | 色 相     | 標準使用量<br>(g/m <sup>2</sup> ) | 塗 装 方 法    | 塗り重ね<br>塗装間隔<br>(20℃) |
|----------|------------------|---------|------------------------------|------------|-----------------------|
| 1 2次素地調整 | 製品プラスト ISO Se2.5 |         |                              |            |                       |
| 2 前処理    | 無機ジnkリッチプライマー    |         | 2000                         | エアレススプレー   |                       |
| 3 第1層    | アルブロン W-305      | 淡褐色透明液状 | 100                          | 刷毛又はローラー刷毛 | 2時間                   |
| 4 第2層    | アルブロン D-12LT     | 淡緑白色液状  | 1000                         | 刷毛         |                       |
| 5 第3層    | 3号乾燥珪砂           | —       | 2000                         | リシンガン吹き付け  | 直ちに                   |

そこで、表-2に示すとおり、せん断試験（以下、部分模型実験とする）により、鋼-コンクリート間の摩擦係数等を確認したのち、実橋接合部を縮小した供試体による曲げせん断試験（以下、全体模型実験とする）により、本橋接合部の疲労耐久性および破壊形態の確認をおこなった。

表-2 評価項目

|        | 項 目                       |
|--------|---------------------------|
| 部分模型実験 | 摩擦係数の評価<br>接合面処理方法の確認     |
| 全体模型実験 | 疲労耐久性の確認（変動荷重）<br>破壊形態の確認 |

部分模型実験は、コンクリートブロックで挟み込んだ角形鋼管を、アクチュエータで押込む実験である(図-3参照)。珪砂接着の有無などの表面処理方法とPC鋼棒による拘束力をパラメータとした、のべ52体の実験を行って、鋼-コンクリート間の摩擦係数の定量化を行った。

その結果、珪砂接着がない場合でも、摩擦係数として0.8程度の値が計測され、接合部設計において想定している0.4を大幅に上回ることが確認された。(部分模型

実験については、後日別の機会に報告する予定である)

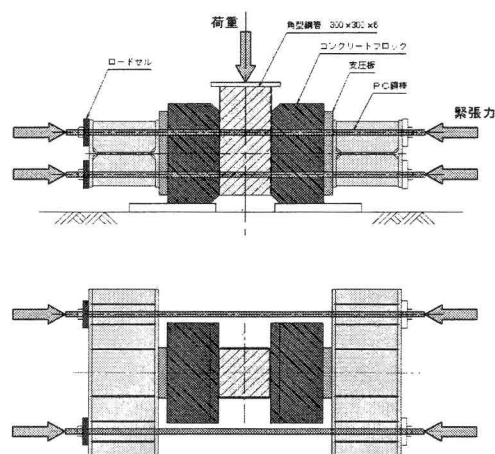


図-3 部分模型実験概要

### 3. 全体模型実験

#### (1) 供試体概要

図-4、5に示す供試体を用いて、全体模型実験を行った。断面形状は、実橋接合部の半断面モデルで1/2スケールの供試体とし、せん断伝達耐力への貢献を計算上考慮しないことから、張出床版は無視した形状とした。

また支間長7mの単純桁とし、接合部の位置は、鋼桁部とPC桁部の桁長比が、実橋と等しくなる位置(PC桁：鋼桁=4.9m：2.1m)とし、載荷位置は、接合面から10cm離れた位置とした。

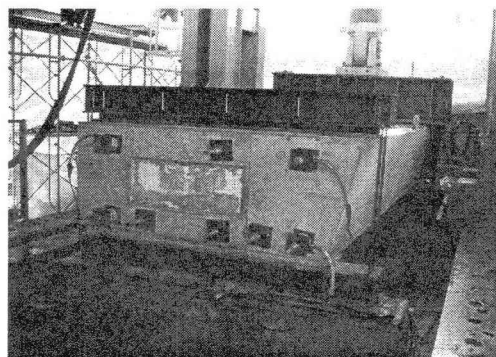


図-4 全体模型実験風景

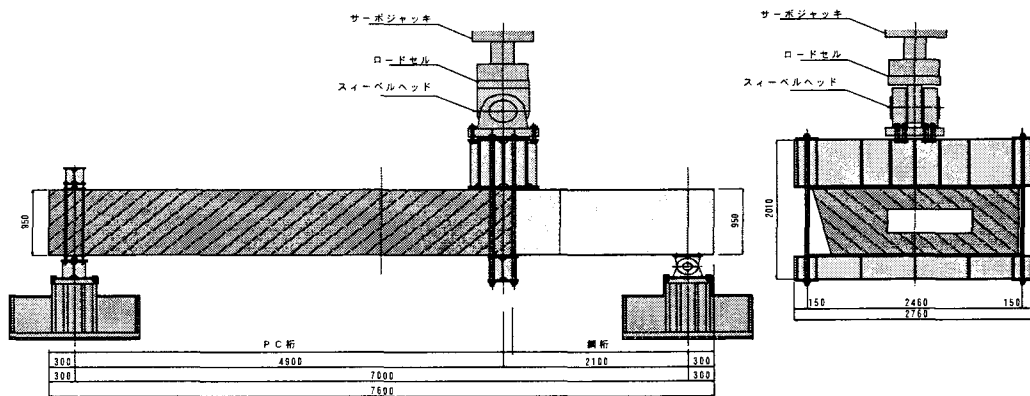


図-5 全体模型実験荷重要領図

また表-2で前述した、実橋にて計画されている接合面処理を実施するために、まず鋼桁側接合面に接着剤を塗布し、リシガンにより珪砂を吹き付けたのち、鋼桁側接合面を型枠替わりとして、PC桁部を打設した。

コンクリート養生後、PC鋼棒により、接合面に緊張力を導入した。緊張力の導入レベルは、実橋接合部の死荷重時と、ほぼ同等の曲げ応力度を再現するものとした。

荷重治具は、両振りの疲労試験をおこなうため、供試体を上下から挟み込む形式として、アクチュエータのスィーベルヘッドと接続した。支承は両振りの疲労試験にて発生する負反力（上揚力）に抵抗できる構造とした。

## (2) 疲労試験

実橋の供用時における疲労耐久性を確認するために、疲労試験（繰返し荷重試験）をおこなった。

接合部の設計方針は、供用時（死荷重+B活荷重載荷時）に、引張応力を発生させない（フルプレストレス）設計を行っているため、実橋の設計荷重であるB活荷重に相当する繰返し荷重を、以下の2シリーズに分けて載荷した。

- |              |         |
|--------------|---------|
| ①両振り（正負交番載荷） | : 20万回  |
| ②片振り（1方向載荷）  | : 180万回 |

繰返し載荷中の応力振幅、変位振幅等に、顕著な変化は認められず、両シリーズの実験終了後の供試体性状は健全であり、疲労による劣化が懸念された接合面および鋼桁部についても、顕著な異常は見られなかった。

疲労安全性の照査として、上記の応力振幅と実験中止時の載荷回数を疲労寿命とした想定S-N曲線と、実橋の計画大型車交通量と、大型車重量による応力振幅の比較をおこなった。（図-6，7参照）

曲げ、せん断のいずれのケースでも、想定S-N曲線は、実橋の大型車交通量を満足しており、支圧接合方式による接合部は、十分な疲労耐久性を有していることが確認された。

表-3 疲労試験結果

| 【曲げ応力度】                    | 実橋        | 疲労試験           |                |
|----------------------------|-----------|----------------|----------------|
|                            |           | 両振             | 片振             |
| $\Delta \sigma_u (N/mm^2)$ | 0.31      | 4.59           | 2.50           |
| $\Delta \sigma_L (N/mm^2)$ | -0.40     | -4.77          | -2.60          |
| N                          | 1,319,475 | 200,000        | 1,800,000      |
| 備考                         | 設計値       | 疲労破壊せず<br>実験中止 | 疲労破壊せず<br>実験中止 |

| 【せん断応力度】               | 実橋        | 疲労試験           |                |
|------------------------|-----------|----------------|----------------|
|                        |           | 両振             | 片振             |
| $\Delta \tau (N/mm^2)$ | 0.015     | 0.429          | 0.234          |
| N                      | 1,319,475 | 200,000        | 1,800,000      |
| 備考                     | 設計値       | 疲労破壊せず<br>実験中止 | 疲労破壊せず<br>実験中止 |

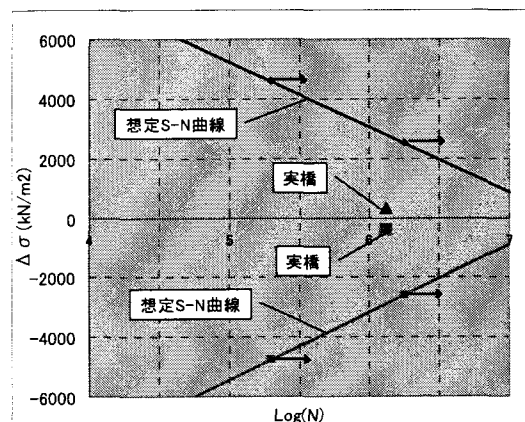


図-6 S-N曲線（曲げ）

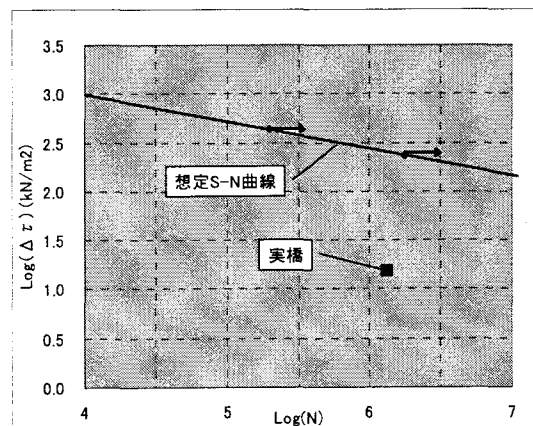


図-7 S-N曲線（せん断）

### (3)破壊試験

疲労試験終了後、引き続き破壊試験を行った。

断面破壊時（終局荷重時）には、接合部に大きな曲げが作用するため、接合面に引張応力が発生し、鋼桁とP C桁間に「肌隙」が生じる。その結果、供用時には、接合面に一様に分布していた摩擦力が、圧縮領域だけに発生することになる。

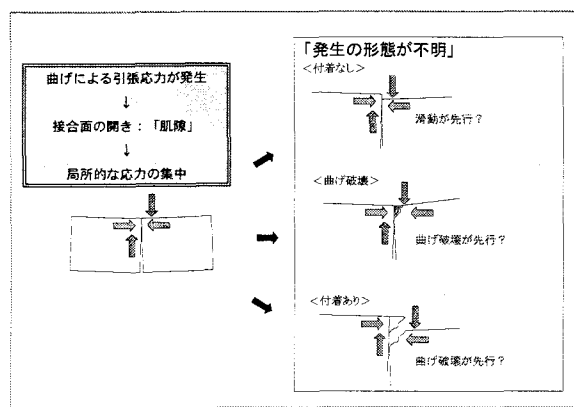
さらに荷重が増加し、断面の圧縮破壊直前になると、接合面のほとんどが引張領域となり、摩擦力は、わずかな圧縮領域に集中し、曲げによる圧縮応力とせん断力（＝摩擦力）による引張応力が、局所的に同時に作用する状態となる。その場合の破壊形態は不明確であり、通常の梁部材において期待されている靱性を有した曲げ破壊とは異なり、脆性的な破壊となる可能性がある。（図－8参照）そこで、接合部の破壊実験により、その破壊形態の確認を行った。

図－9に、載荷点における荷重－変位曲線と、接合面の前後(PC桁側と鋼桁側)において、別々に測定した変位の差（＝接合面のずれ）を、載荷ステップ毎に並べてプロットしている。

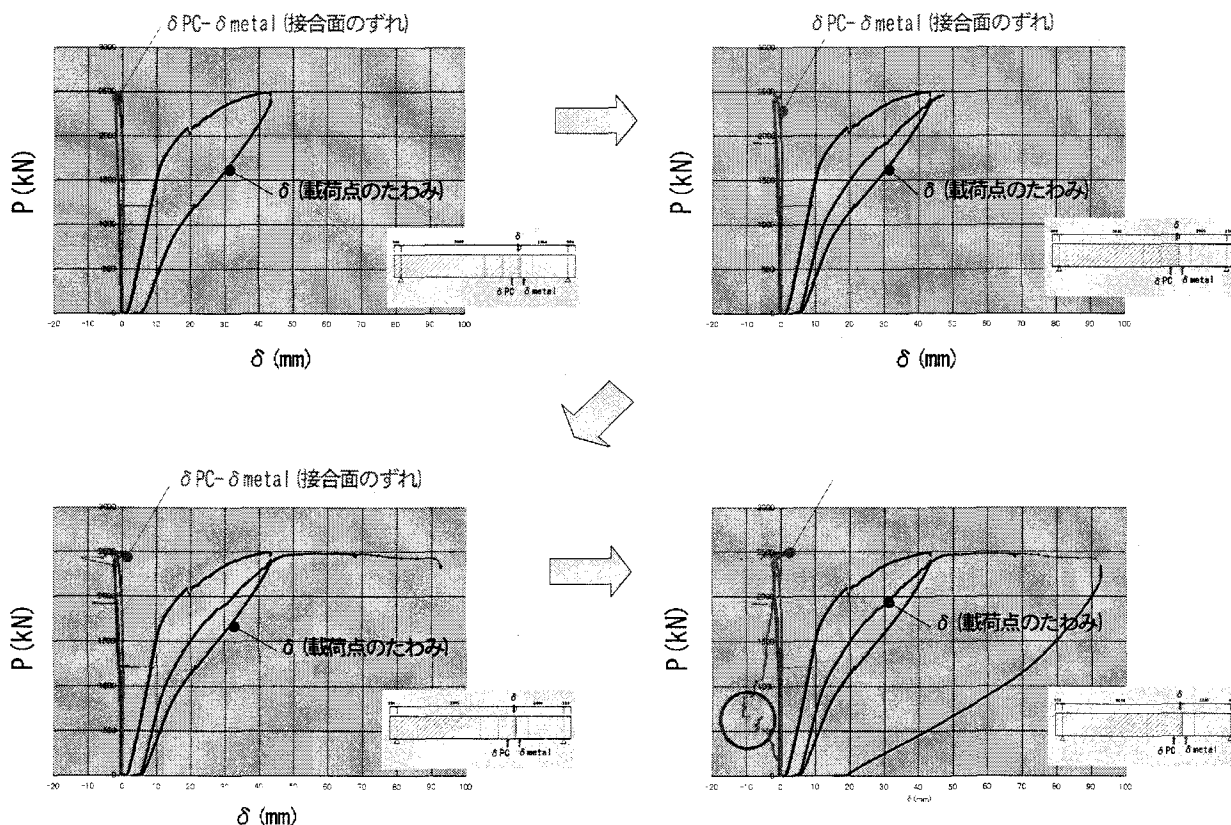
荷重－変位曲線は、通常のP C桁と、ほぼ同様の挙動を示しており、載荷荷重の増加にともない、接合面の付着が切れたのち、P C鋼棒の降伏後、接合面P C桁側コンクリートの圧壊により、破壊実験を終了した。

断面が圧壊するまでの間に、接合面に大きなずれは認められなかった。図－9は、左上の図から右下の図にかけて荷重が増加していることを表しているが、この間に支間中央のたわみ（＝ $\delta$ ）は増加していくのに対して、接合面のずれは、供試体が破壊するまで、ほとんど発生していないことがわかる。これは、曲げにより供試体が破壊する直前のわずかな圧縮領域によって、接合面のせん断力が伝達されていたことを示している。

言い換えると、曲げ破壊直前の圧縮領域が極端に少ない状態になっても、支圧接合方式によるせん断伝達耐力は確保されており、通常の曲げ部材と同様な靱性のある挙動を示すことが確認された。（図中の○は、圧壊により、急激に変位が増加し、供試体下面と変位計が接触したことにより、生じた計測値の乱れ）



図－8 接合部の破壊形態



図－9 P- $\delta$  曲線と接合面の変位（ずれ）

#### (4)破壊後の検証

破壊試験終了後、鋼桁部とP C桁部を引き離して、接合部破壊面の検証をおこなった。

接合面のP C桁側の上縁コンクリートに、圧壊が発生し、圧壊部のひび割れは、ほぼ水平に発生していた。

事前に実施したF E M解析結果では、上縁からおよそ110mm の位置に、鉛直方向のせん断応力度が集中しており、接合面の水平ひび割れ位置と、ほぼ一致した結果となっている。(図- 1 0、1 1 参照)

また検証後、鋼殻セルをワイヤーソーにより切り出し、中詰めコンクリートの確認をおこなった。

実橋接合部では、中詰めコンクリートとしては、高流動コンクリートの使用を予定しているが、実験供試体には普通コンクリート（早強セメント）を用いて、実験をおこなった。通常のパイププレートによる打設を行ったが、鋼殻セル内には、ずれ止めおよび鉄筋は配置されていないことから、コンクリートの充填性は極めてよく、顕著な空隙等の不具合は認められなかった。

また、P C桁側上縁のコンクリートが圧壊しているのに対して、接合面を介して圧壊部と接していた中詰めコンクリートには、ひび割れは発生していないことが確認された。(図- 1 2 参照)



接合面 (P C桁側)



接合面 (鋼桁側)

図-10 破壊後の接合面

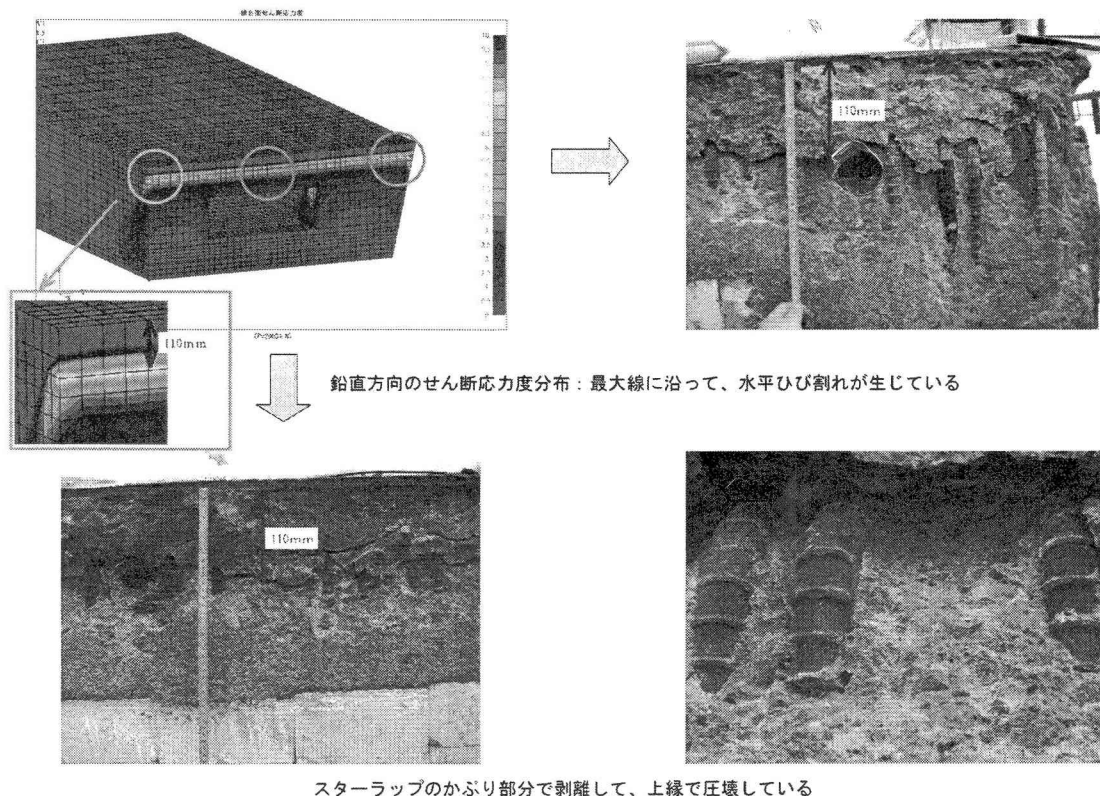


図-11 FEM 解析（せん断応力度）と破壊面の比較



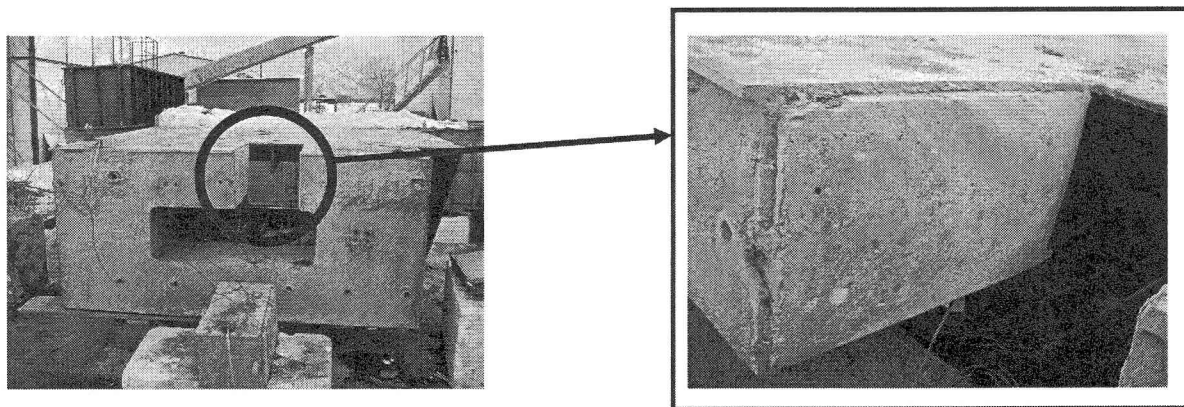


図-12 破壊実験後の鋼殻セル内コンクリート

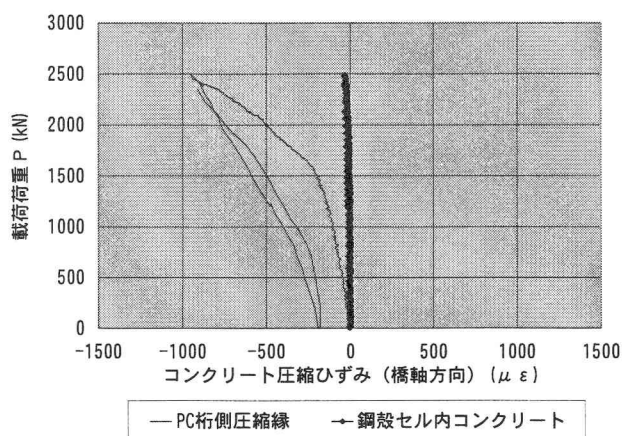


図-13 圧縮ひずみ計測結果

この結果は、コンクリートの圧縮ひずみの測定結果とも合致している。P C桁側の上縁コンクリートの圧縮ひずみは、荷重とともに増加しているが、鋼殻セル内の圧縮ひずみは、ほとんど変化していない。また事前のF E M解析でも、鋼殻セル内では、引張応力は、ほとんど発生していない。(図-13、14参照)

本橋の接合部では、接合面だけではなく、鋼殻セル内にも、ずれ止めを設置しない計画となっているが、鋼殻セルとコンクリート間に一体化が図られないため、どちらかに負担が集中することが懸念されていた。

しかし、本実験の結果からは、鋼殻セル内にずれ止めを設置していなくても、コンクリートが密に充填されている場合には、一体化した挙動を示していると考えられる。また定量化はできないものの、鋼板による拘束効果の影響も期待できると考えられる。

#### 4. まとめ

接合面および鋼殻セル内にスタッド等のずれ止め設置しない支圧接合方式による接合部について、疲労実験および破壊実験をおこなった結果、以下の知見が得られた。

- ①実橋の設計活荷重を想定した疲労実験を行ったが、疲労破壊・劣化等は認められなかった。

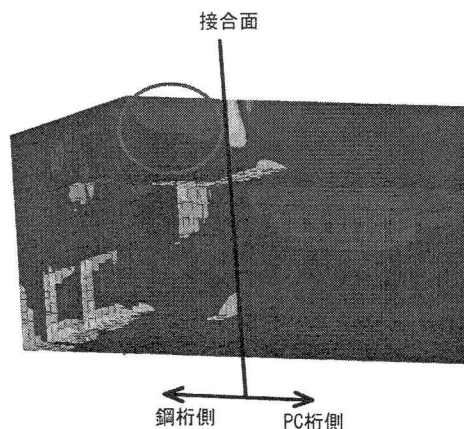


図-14 主応力分布

また想定したS-N曲線と実橋の計画交通量による応力振幅による照査をおこなった結果、十分に疲労耐久性があることが確認された。

- ③接合部の破壊形態は、曲げ破壊型であり、通常のR C梁と同様に靱性のある挙動を示すことが明らかになった。また終局荷重時において、接合面に発生する引張力による「肌隙」の影響が懸念されたが、曲げ破壊するまで、せん断力が伝達されることが確認された。
- ④鋼殻セル内の中詰めコンクリートの充填性は良好であり、打設上の不具合は認められなかった。また鋼殻セル内にスタッドなどのずれ止めを設置していないが、中詰めコンクリートの状態は健全であった。

#### 5. あとがき

本稿では、北郷立体交差接合部の疲労実験、破壊実験およびF E M解析について報告を行った。現在、最終の設計取りまとめと平行して、下部工の施工が開始されたところである。

部分模型試験、橋梁全体の設計総括等については、別の機会に、報告を行う予定である。

以上