

## (18) 複合ラーメン橋のコンクリート充填鋼殻 剛結部における3次元有限要素解析

江本 賢治<sup>1</sup>・古内 仁<sup>2</sup>・佐藤 靖彦<sup>3</sup>・上田 多門<sup>4</sup>・半浦 剛<sup>5</sup>  
宮川 隆雄<sup>6</sup>・桐本 裕二<sup>7</sup>

<sup>1</sup>非会員 北海道大学 大学院工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)  
E-mail:emoto@eng.hokudai.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 北海道大学助手 大学院工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)  
E-mail:jin@eng.hokudai.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 北海道大学助教授 大学院工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)  
E-mail:ysato@eng.hokudai.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 北海道大学教授 大学院工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)  
E-mail:ueda@eng.hokudai.ac.jp

<sup>5</sup>正会員 和光技研(株) 地域開発部 (〒064-8507 札幌市中央区宮の森3条1丁目3-15)  
E-mail:han-ura@wako-giken.co.jp

<sup>6</sup>正会員 和光技研(株) 地域開発部 (〒064-8507 札幌市中央区宮の森3条1丁目3-15)  
E-mail:t.miyakawa@wako-giken.co.jp

<sup>7</sup>非会員 和光技研(株) 地域開発部 (〒064-8507 札幌市中央区宮の森3条1丁目3-15)  
E-mail:y-kiri@wako-giken.co.jp

近年、合理的かつ経済的である複合構造の採用がされている。現在、鋼床版の上部工と鋼管杭の下部工をコンクリート充填鋼殻で剛結する鋼床版複合ラーメン橋が検討されている。本研究では、その剛結部をモデル化した模型実験の試験体に関して、簡略に再現した3次元モデルを用いた有限要素解析を行い、正負交番試験の測定結果との比較を通じて試験体の挙動に関して検証することを目的としたものである。さらに、有限要素解析において、鋼要素とコンクリート要素をボンドリンク要素で接合し、そのボンドリンク要素の解析に用いる剛性値が解析結果に与える影響も検証する。

**Key Words :** 3D FE Analysis, steel concrete composite connection, integrated abutment

### 1. はじめに

近年、鋼とコンクリートのそれぞれの短所を補い、長所を生かすという合理的かつ経済的な鋼コンクリート混合構造がよく利用されている。そして、現在、上部工である鋼床版と下部工である鋼管杭をコンクリート充填鋼殻で剛結する鋼床版複合ラーメン橋が検討されている。図-1にこの構造を簡易的に示す。しかし、このような構造の施工実績は少なく、剛結部の設計手法はまだ確立されていない。

本研究では、この剛結部をモデル化した試験体の正負交番試験<sup>1)</sup>に対して、本研究室で開発された3次元非線形有限要素法プログラム<sup>2)</sup>の解析結果と実験における測定結果との比較、プログラムの妥当性について検討を行った。また、その解析において、鋼要素とコンクリ

ート要素をボンドリンク要素で接合し、そのボンドリンク要素の解析における入力データが解析結果に与える影響も検討した。

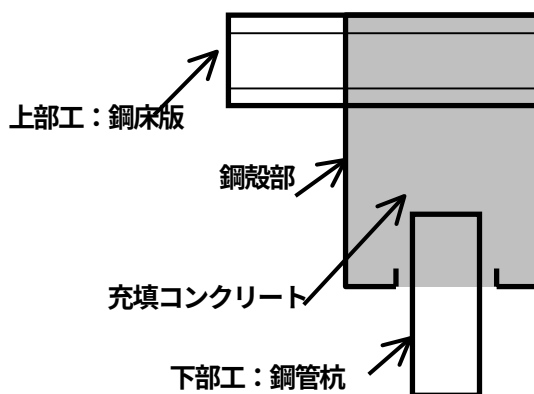


図-1 複合ラーメン橋剛結部の概略図

## 2. 実験概要

本プログラムの妥当性を確認するために行われた正負交番実験の実験供試体概要を図-2に示す。実験供試体は、実構造物の約1/2縮尺モデルとし、主桁、橋台、杭で構成する。供試体の使用材料の各諸元を表-1、表-2に示す。

実験ケースは次の2ケースとする。ケースAは、鋼管杭に軸力がなしの状態で行う。ケースBは、軸力200kNを加えた状態で行う。尚、本論文ではケースAの結果について議論している。

### 3. 解析概要

### (1) 解析プログラム

使用した非線形3次元有限要素解析プログラムの使用要素は8ガウス点を有する20節点アイソパラメトリックソリッド要素と、4ガウス点を有する16節点ボンドリック要素である。

非線形解析手法には修正Newton-Rhapson法を用いる。収束判定基準には $\Sigma$ （残差力による残差変位）<sup>2</sup>/ $\Sigma$ （全変位増分）<sup>2</sup>を使用している。収束判定基準値に関しては $10^{-5}$ を採用している。

ひび割れ発生前コンクリート，鋼材の構成モデルにおいては3次元弾塑性破壊モデルを採用した.

コンクリートのひび割れに関しては要素内でひび割れを平均的に扱うひび割れ分散モデルを採用し、一度形成されたひび割れ面方向が変化しない固定ひび割れモデルを採用した。またひび割れはひとつのガウス点に3本まで考慮しており、具体的な各構成則の適用方法としてはひび割れ発生した場合、その時点の主応力方向に局所座標系をとり、それをひび割れ面座標系とする。

ひび割れが1本入った場合は、局所座標系においてひび割れ面と直交する方向は一軸引張応力下にあり、ReinhardtのTension-softeningモデル、岡村らのTension Stiffeningモデルを用いている。最大主応力と直交する他の2軸においては、主ひずみ－主応力関係にVecchio&Collinsのモデルを使用している。ひび割れと直交する面の面内せん断応力は、ひび割れ面のせん断剛性と、ひび割れの入っていないコンクリート部のせん断剛性の平均せん断剛性を使用する方法を用い算出する。せん断伝達応力は李・前川らによるせん断伝達モデルを簡略化し用いている。

ひび割れ発生基準には圧縮－引張領域で二羽モデル、引張－引張領域で青柳・山田モデルをそれぞれの境界条件を満たすよう3次元に拡張して使用している。

**表-1** コンクリートの諸元

|                             |      |
|-----------------------------|------|
| 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )   | 23   |
| 引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )   | 2    |
| ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> ) | 23.3 |
| ポアソン比                       | 0.21 |

**表-2 鋼材の諸元**

| 部材                | 降伏強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | ヤング係数<br>(kN/mm <sup>2</sup> ) | ポアソン比 |
|-------------------|------------------------------|--------------------------------|-------|
| 銅管                | 333.7                        | 203.5                          | 0.29  |
| 主桁・デッキプレート        | 355.9                        | 202.2                          | 0.28  |
| 前面版・背面版・ダイヤフラム・底版 | 333.7                        | 192                            | 0.26  |

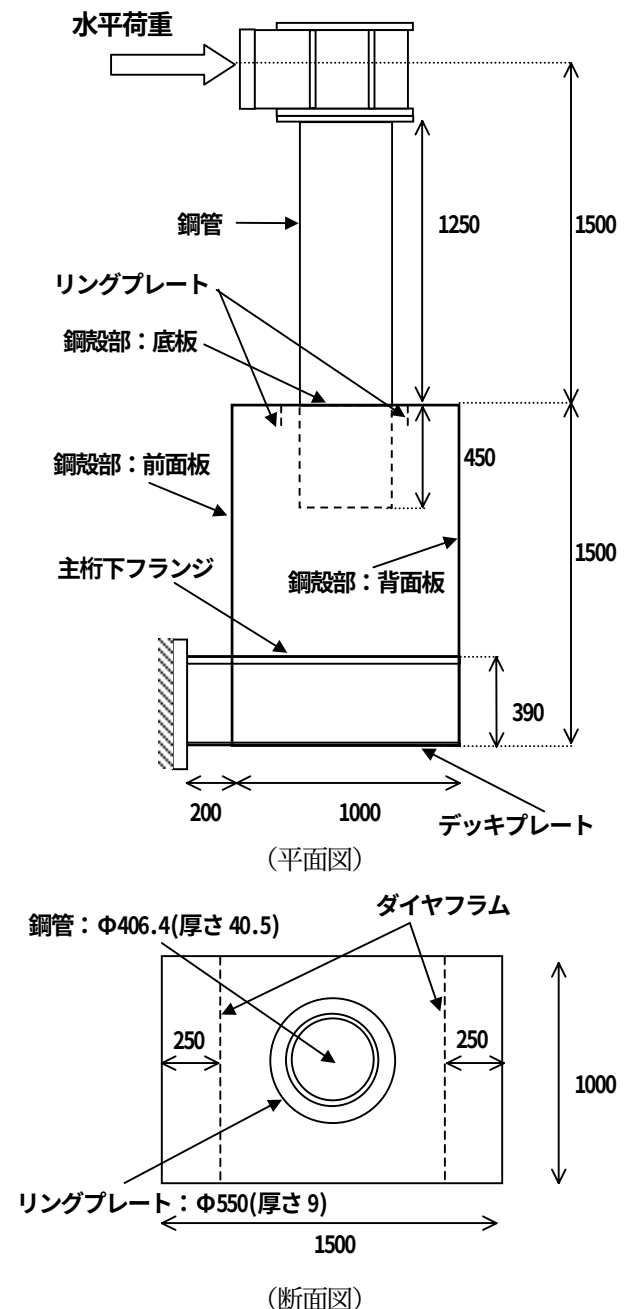


図-2 実験供試体図 (単位はmm)

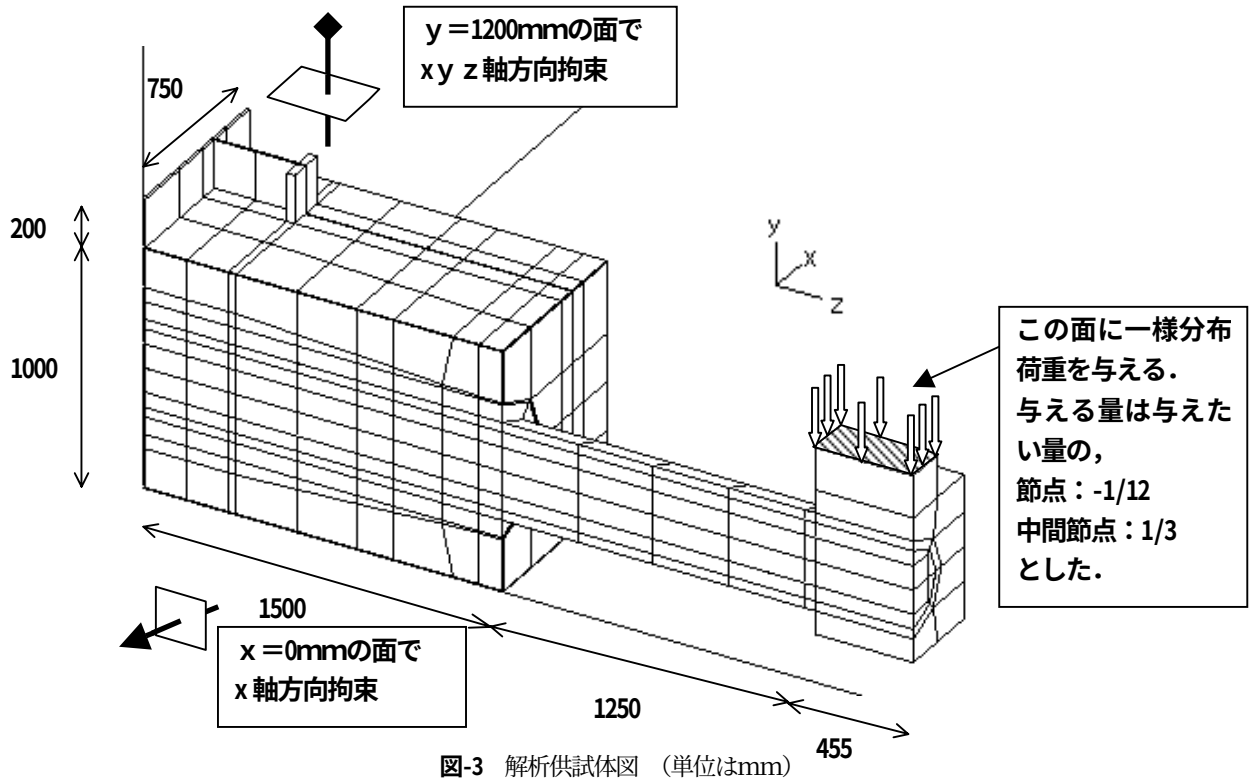
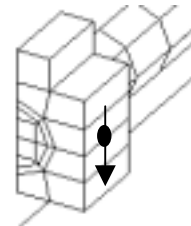


図-3 解析供試体図 (単位はmm)

表-3 各種終局状態

|                    | 荷重<br>(kN) | 変位<br>(mm) |
|--------------------|------------|------------|
| 実験                 | -685       | -86.9      |
| 解析A (24500 kN/mm)  | -1000      | -432       |
| 解析B (245000 kN/mm) | -1000      | -298       |

(載荷変位の計測位置と方向)



## (2) 解析モデル

本解析では、鋼材とコンクリートのモデル化についてはソリッド要素を用い、鋼材要素とコンクリート要素は一樣な接合モデルのボンドリンク要素を用いて接合する。本解析の解析モデルの形状寸法・境界条件を図-3に示す。解析は対称性を利用し1/2モデルで行った。鋼材とコンクリートの要素特性については各材料試験結果<sup>1)</sup>によって得られたデータを用いた。

## (3) 接合要素モデル

複合構造において、接合面は全体の挙動に大きな影響を与える重要な要因の一つである。本解析では、次のような接合モデルを用いている。支圧方向については、圧縮力は伝達させるが、引張力は伝達させないとした。せん断方向については、摩擦を考慮し、バネ接合とした。しかし、支圧方向に引張が働くときは肌離れを考慮しせん断力を伝達させないモデルとする。与えたせん断方向の剛性値は、解析Aについては24500 kN/mm、解析Bについては245000 kN/mmを与えた。

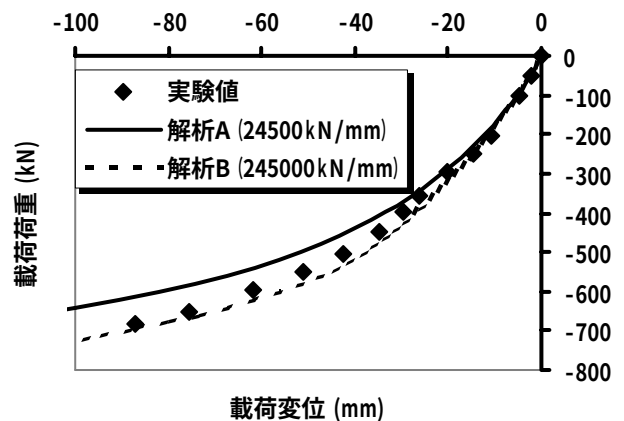


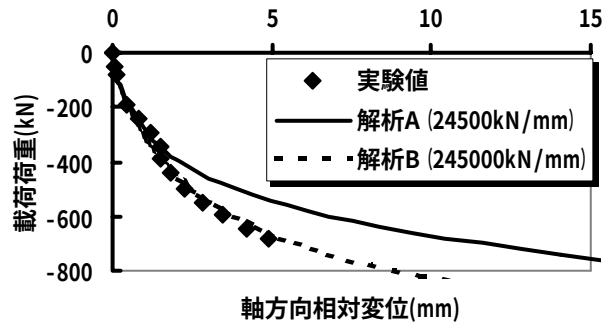
図-4 載荷-変位曲線

## 4. 解析結果

### (1) 荷重-変位関係

正負交番載荷試験の実験結果、解析結果を図-4に示す。ただし、実験値は正負交番載荷試験の包絡線を示したものである。また、各種終局状態を表-3に示す。

Disp-NX-B1：背面板側の軸方向相対変位



Disp-NX-F1：前面板側の軸方向相対変位

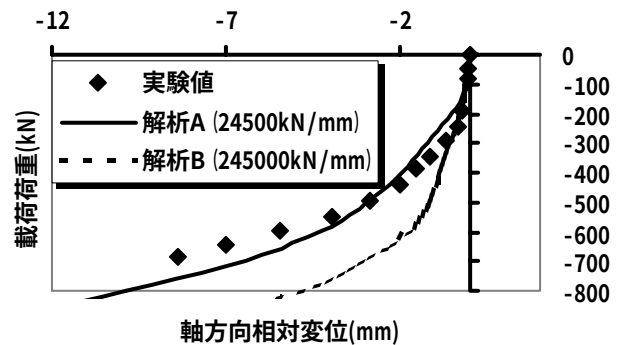


図-6 相対軸方向変位と水平荷重の関係

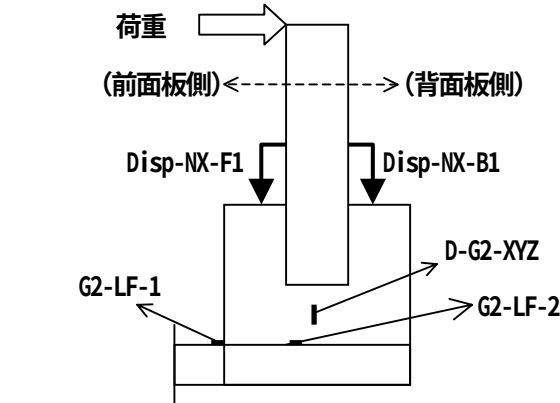


図-5 相対軸変位とひずみゲージの計測位置と方向

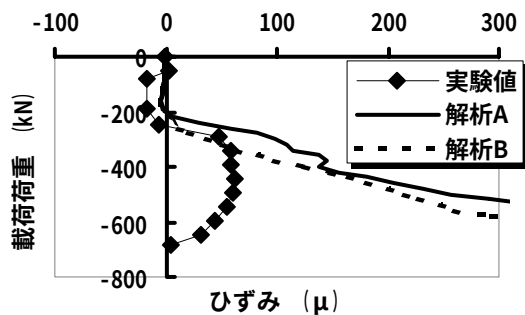


図-8 ダイアフラムのひずみの値と水平荷重の関係

解析結果はおおむね実験状態を再現できているといえる。特に、解析Bでは非常に近い値になっている。また、実験結果は、最大荷重が-685kNである。解析では、解析A・解析Bともに-1000kNまで載荷したが、ピークには至らなかった。以上の結果からもこの剛結部がとても大きな耐力を持っていることが明らかである。

また、ボンドリンク要素内のせん断剛性値を大きくすると、鋼材とコンクリートの合成度が上がり、剛結部全体の剛性が上がることが確認できる。

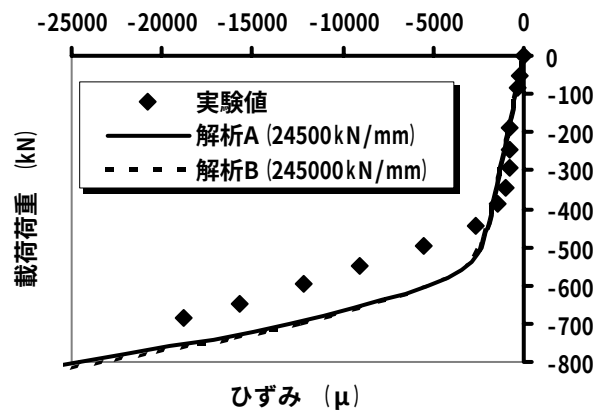
## (2) 杭とコンクリートの相対軸方向変位

図-6に鋼管杭ーコンクリート間の相対軸方向変位関係の実験結果と解析結果を示す。位置は鋼管杭とリングプレートと鋼管の間のコンクリート表面との相対変位である。Disp-NX-B1は背面板側、Disp-Nx-F1は前面板側の相対軸方向変位を指す。図-5に位置と方向を示す。解析結果から、杭によって圧縮を受ける側（前面板側）の方が、引張を受ける側（背面板側）より剛性値が小さい事が確認できる。

## (3) 各種鋼材ひずみ

図-7に、主桁下フランジのひずみの値と載荷点の水平荷重の関係を示す。G2-LF-1は剛結部近傍の下フランジ、G2-LF-2は剛結部内の下フランジの水平方向のひずみを指す。位置と方向を図-5に示す。剛結部の外側の主

G2-LF-1：剛結部近傍の下フランジのひずみ



G2-LF-2：剛結部内の下フランジのひずみ

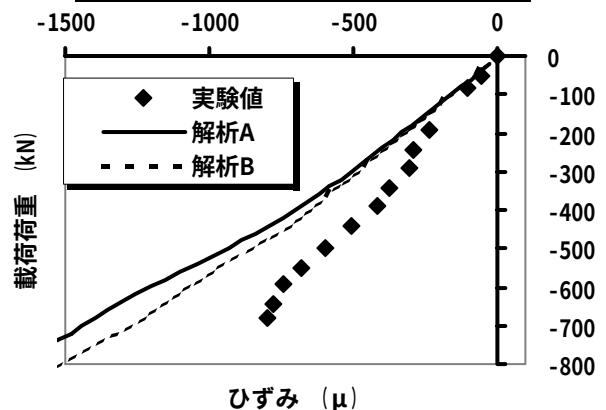


図-7 下フランジのひずみの値

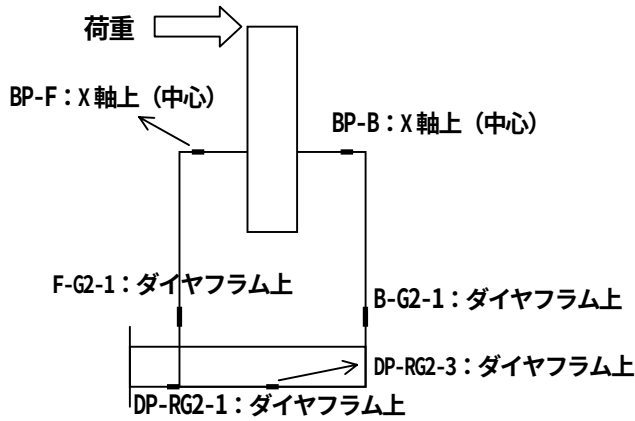


図-9 ひずみゲージの位置

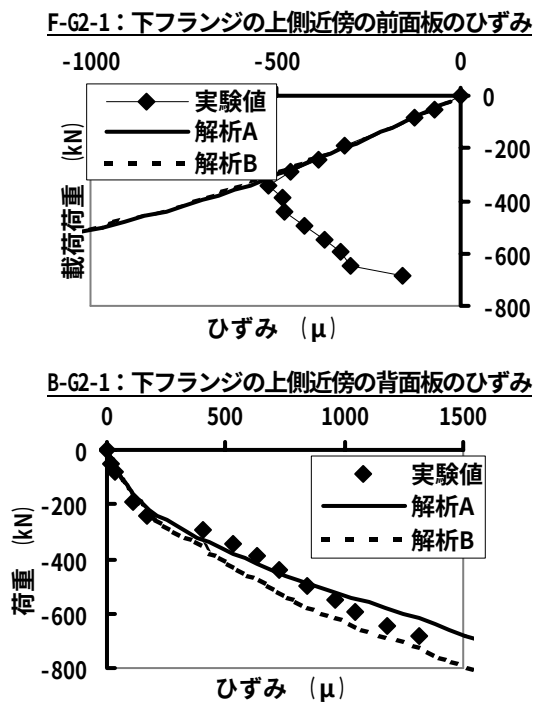


図-10 前面板と背面板のひずみ値と水平荷重の関係

桁のひずみの値は、接合要素の剛性値はあまり関係していないと考えられる。

図-8にダイヤフラムのZ軸方向のひずみの値と載荷点の水平荷重の関係を示す。位置と方向を図-5に示す。実験値を見ると、鋼材とコンクリートの付着がない状態と考えられる。解析では、支圧方向が圧縮方向の時、ボンドリンク要素は線形関係であるから付着がなくなる挙動が忠実に再現できていないと考えられる。

図-10に前面板と背面板のひずみの値と載荷点の水平荷重の関係を示す。F-G2-1は下フランジの上側近傍の前面板、B-G2-1は下フランジの上側近傍の背面板の軸方向ひずみを指す。位置と方向を図-9に示す。これもダイヤフラムのときと同じことが言え、付着がなくなる挙動が忠実に再現できていないため、F-G2-1のように解析結果と実験結果に差ができてきていると考えられる。

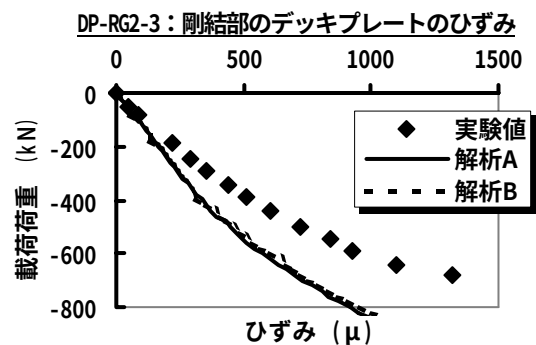
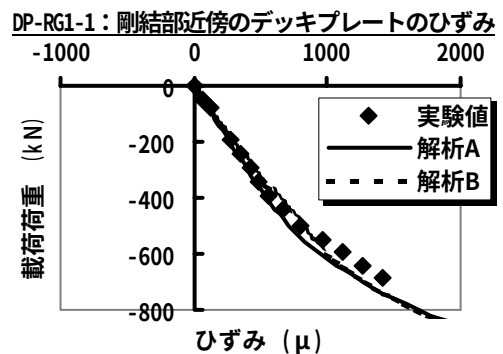
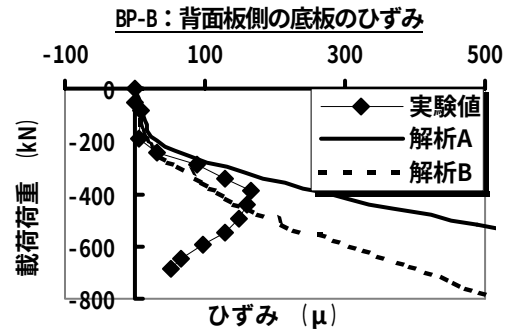
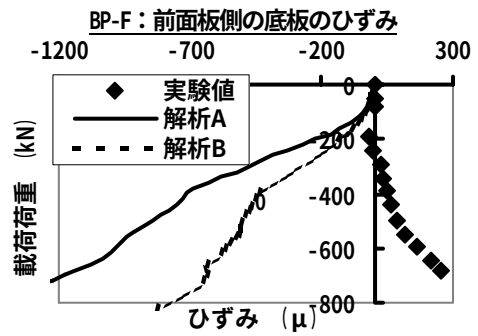


図-11 デッキプレートと底板のひずみ値と水平荷重の関係

図-11にデッキプレートと底板のひずみ値と載荷点の水平荷重の関係を示す。BP-Fは前面板近傍の底板、BP-Bは背面板近傍の底板、DP-RG1-1は剛結部近傍のデッキプレート、DP-RG2-3は剛結部のデッキプレートの水平方向ひずみを指す。位置と方向を図-9に示す。デッキプレートについては、剛性値の違いによる解析結果の違いがほとんどない。このことからデッキプレートのひずみは、鋼とコンクリートの合成度より、鋼殻全体の変形による影響が大きいと考えられる。底板については、引張と圧

縮の方向が逆になっており、忠実には再現できていないと言える。

#### (4) コンクリートのひずみ

図-12に各荷重におけるコンクリートのひずみを示す。位置は、前面板側でありコンクリート表面と、表面から杭に沿って125mm, 225mm, 325mmである。また、鋼管表面から水平方向へ70mmのところである。そして、ひずみの方向は荷重に対して水平方向である。図-13に位置と方向を示す。

実験結果と解析結果を比較すると大きく違っていることが明らかである。杭の変形が実験とさほど変わらないことから、ボンドリンク要素のせん断方向のせん断力-ずれ関係が影響していると考えられる。解析ではせん断力-ずれ関係を線形関係としている。そのため、コンクリートへのボンドリンク要素からの伝達せん断力に最大値が存在せず、鋼材とコンクリートとのずれ変位が大きくなれば大きくなるほど伝わるせん断力は大きくなる。しかし、実際の鋼材とコンクリートの界面の挙動は、最大値以降はせん断力は伝達しない。この違いから解析ではコンクリートへ大きなせん断力が伝達し、載荷荷重が増加し鋼材とコンクリートとのずれ変位が大きくなるほど実験結果のひずみ分布に大きな違いが生じてくると考えられる。

## 5. まとめ

本研究で得られた結論を以下にまとめる。

- (1) 解析結果から、この剛結部は終局耐力は1000 kN以上あり、レベル2地震時の耐力である209 kNの約5倍以上であることを確認した。
- (2) 鋼とコンクリートとの界面のせん断剛性は、剛結部全体の剛性、コンクリートのひずみ性状などに影響を与える。

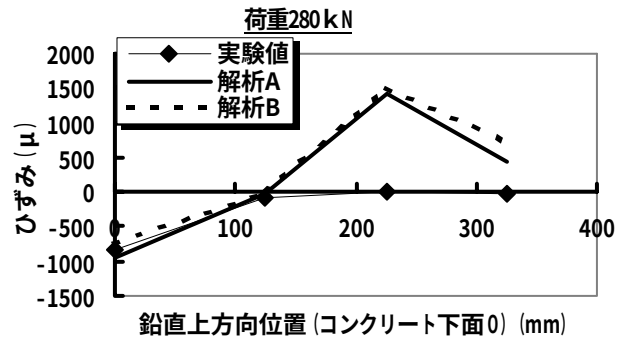
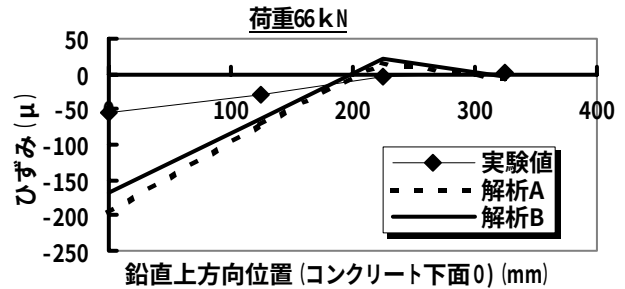


図-12 荷重別のコンクリートのひずみ

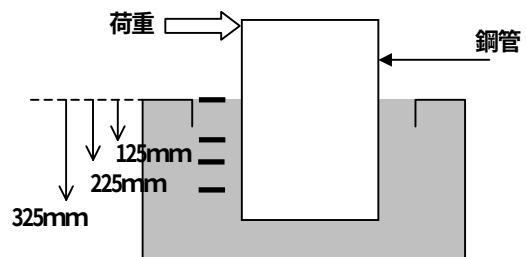


図-13 コンクリートのひずみゲージの位置

## 参考文献

- 1) 長山秀昭ほか：コンクリート充填鋼殻複合構造接合部における水平交番載荷試験，第6回複合構造の活用に関するシンポジウム，2005
- 2) 高橋良輔：3次元非線形有限要素法によるコンクリート系部材の挙動解析に関する研究，北海道大学大学院 工学研究科 博士論文，2003年3月

## 3D FE ANALYSIS OF CONNECTION USING CONCRETE FILLED STEEL BOX SHELL FOR HYBRID RIGID-FRAME BRIDGE

Kenji EMOTO, Hitoshi FURUUCHI, Yasuhiko SATO, Tamon UEDA,  
Takeshi HAN-URA, Takao MIYAKAWA and Yuji KIRIMOTO

Hybrid structures that are economical and rational have been adopted recently. A hybrid rigid-frame bridge consisting of steel beams as superstructure, partially concrete filled steel piles as substructure and concrete filled steel box shell as their connection is under consideration as a practical bridge. The purpose of this study is to clarify the behavior of the connection through the comparizon of experimental results under reverced cyclic loading with 3D finite element (FE) analytical results. In the analysis, effects of shear stiffness of bond-link element for steel-concrete interface is considered.