

論文 複合ラーメン橋の剛結部に関する解析的検討

江本 賢治*1・古内 仁*2・上田 多門*3

要旨：近年，合理的かつ経済的である上下部剛結型の複合ラーメン橋が注目されている。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，3次元モデルを用いた有限要素解析を行った。その解析結果から，実験では載荷試験機の限界で終局状態に至らなかったが，この剛結部の終局状態が鋼管の端面付近のコンクリートが鋼管からの支圧によって圧縮軟化することにより決まることが確認された。

キーワード：3次元有限要素解析，混合構造，一体化橋台，PBL

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。この構造は，鋼桁をコンクリート充填鋼殻構造の橋台躯体に埋め込み，剛結することにより桁高を小さくし，さらにコンクリート充填鋼管構造の基礎杭を橋台下部から貫入して一体化することにより耐震性を高めるものである。しかし，このような構造の施工実績はなく，剛結部の設計手法も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¹⁾に対して，3次元非線形有限要素法プログラム²⁾を用いて解析を行った結果を用いて剛結部の挙動について検討を行った。また，この実験では載荷試験機の限界で終局状態に至らなかったが，解析を用いて，この剛結部の終局状態がどこで決まるのかを推定する。なお，これ以降は，実験供試体が上下逆さで試験されたので(図-2参照)，上下反対の状態で議論を進める。

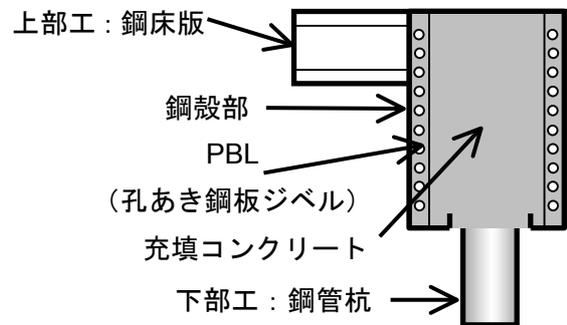


図-1 複合ラーメン橋剛結部の概略図

2. 実験概要¹⁾

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図を図-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。水平荷重の載荷位置は杭端部とする。

表-1 コンクリートの諸元

圧縮強度	23 (N/mm ²)
引張強度	2 (N/mm ²)
ヤング係数	23.3 (k N/mm ²)
ポアソン比	0.21

*1 北海道大学大学院 工学部研究科環境創生工学専攻 (正会員)

*2 北海道大学大学院 工学部研究科環境創生工学専攻助手 工博 (正会員)

*3 北海道大学大学院 工学部研究科環境創生工学専攻教授 工博 (正会員)

表-2 鋼材の諸元

部材	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (k N/mm ²)	ポアソン比
鋼管	333.7	203.5	0.29
主桁・デッキプレート	355.9	202.2	0.28
前面板・背面板・ダイヤフラム・底板	333.7	192	0.26

3. 解析概要

3.1 プログラム概要

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 Gauss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 Gauss点を有する16節点ボンドリンク要素である。

非線形解析手法には修正Newton-Rhapon法を用いる。収束判定基準には Σ (残差力による残差変位)²/ Σ (全変位増分)²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。

3.2 各材料構成則²⁾

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分散ひび割れ-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Gauss点に3本まで考慮している。ひび割れ発生基準には二羽モデル³⁾、青柳・山田モデル³⁾をそれぞれ3次元に拡張し使用している。ひび割れ一本発生時において構成モデルの適用方法は、ひび割れ面座標系でひび割れ直交方向、平行方向、ひび割れ面に沿ったせん断ずれ方向にそれぞれ構成則を適用する方法とする。ひび割れと直交する方向にReinhardtのTension-softeningモデル⁴⁾を用いている。ひび割れと平行する方向においては、Vecchio & Collinsのモデル⁵⁾を使用している。ひび割れ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⁶⁾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⁷⁾を簡略化し用いている。

3.3 解析モデル

本解析では、鋼材とコンクリートのモデル化

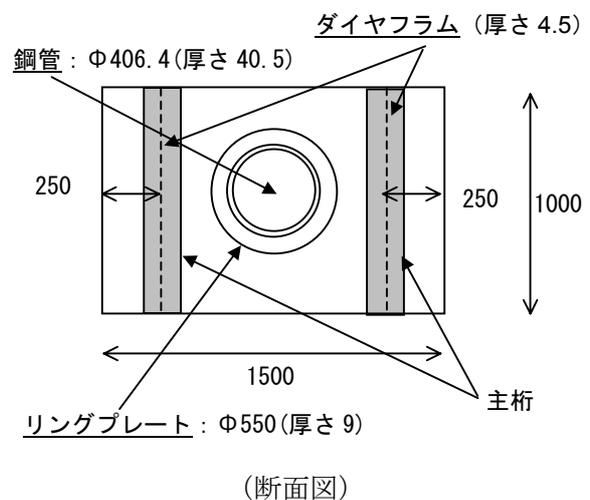
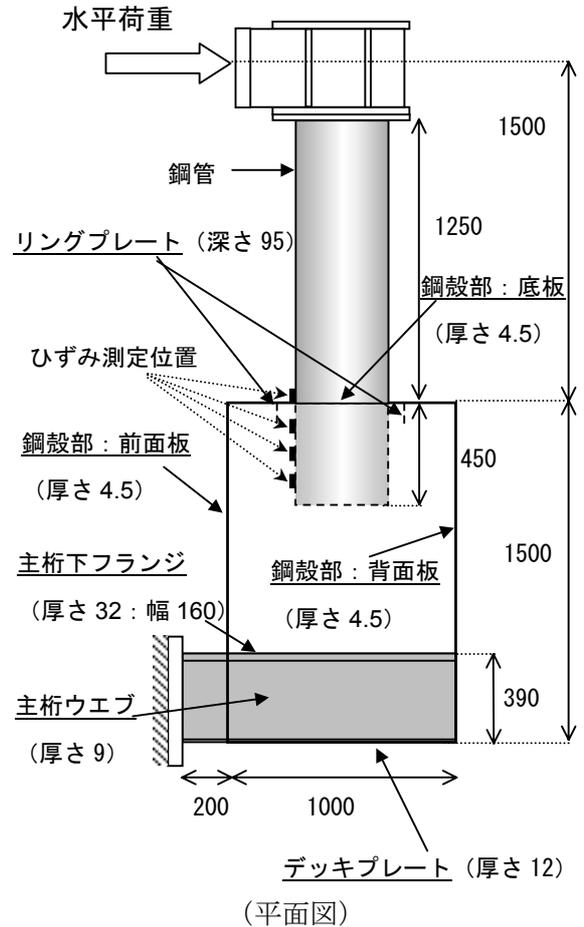


図-2 実験供試体図 (単位はmm)

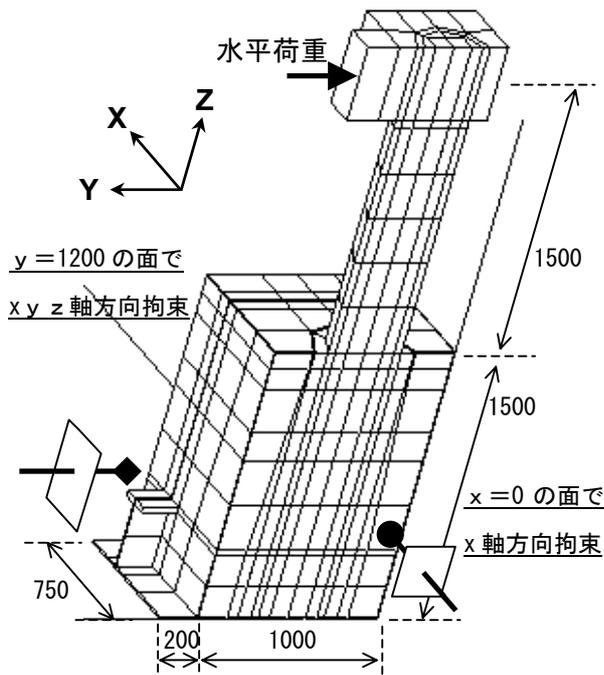


図-3 解析供試体図 (単位はmm)

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¹⁾によって得られたデータを用いた。

3.4 接合モデル

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。鋼とコンクリートの摩擦による付着応力-ずれ関係およびPBL(孔あき鋼板ジベル)に働くせん断力-ずれ関係をボンドリンク要素に導入することで、コンクリートと鋼板間における力の伝達を表現する。用いたせん断力-ずれ関係を以下に示す。

鋼とコンクリートの摩擦は、猪俣らの実験結果⁸⁾を基に図-4に示すようなせん断応力-ずれ関係を用いた。

図-4中の τ_{max} はせん断応力の最大値であり、実験結果⁸⁾より、直応力(支圧応力) σ (N/mm²)と比例するとして次の式で与える。

表-3 PBLの剛性値

板厚 (mm)	孔 1 個あたりの剛性値 (kN/mm)
12	1575
8	732

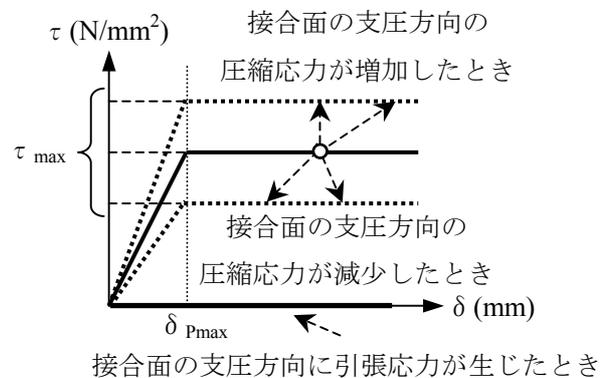


図-4 解析での鋼とコンクリートの摩擦のせん断応力-ずれ関係

$$\tau_{max} = 0.578 \times \sigma \quad (1)$$

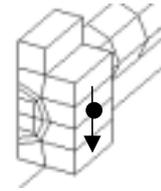
τ_{max} には、実験が正負交番試験であるので一度肌離れが生じた後であると仮定し、一度ずれが生じた後も作用している残留せん断応力を与えた。次に δ_{Pmax} は最大荷重時のずれ変位であり、実験結果⁸⁾の平均値である0.15mmを用いた。ただし、この関係はあくまで支圧力が圧縮方向である時であり、引張が生じた時のせん断力は伝達させない。支圧方向の剛性は、圧縮方向は大きな値(鋼材の50倍程度)与え、引張方向は0とした。

鋼殻の補剛材に設けたPBL¹⁾については、鋼殻内ということもありずれ量は少ないと推定し、せん断力-ずれ関係を直線とした。用いた剛性は、今回の実験供試体と非常に近い形状である保坂らの押抜きせん断実験の結果⁹⁾のせん断力-ずれ関係の初期剛性を用いることとした。用いた剛性を表-3に示す。また、PBLに対して垂直方向の剛性に対しては、Taufiqによって提案されている次の式¹⁰⁾を用いた。

$$k = 0.00818 \times E_c \quad (2)$$

ここに、 k (kN/mm²)は剛性値で E_c (N/mm²)

はコンクリートのヤング係数である。支圧方向は引張方向の時、孔 1 個分の剛性を与えた。また保坂らの実験は鋼板に塗装を施し付着の除去を行っているのですべてのボンドリンク要素に鋼コンクリート摩擦モデルを入れ、PBLのある要素にはこれらの値を足し合わせた。



(荷重変位の計測位置と方向)

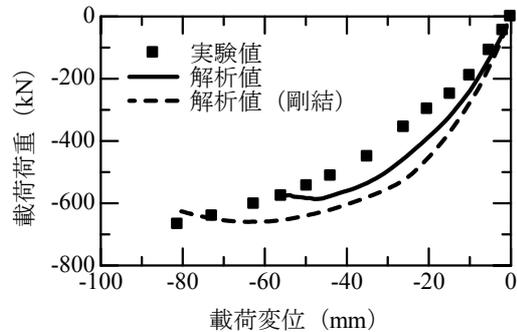


図-5 荷重-変位曲線

4. 解析結果

4.1 荷重—変位曲線

正負交番荷重試験の実験結果、および解析結果（解析値と名づける。）を図-5に示す。あわせて鋼板とコンクリートを剛結して解析した結果（解析値（剛結）と名づける。）も示す。実験値は正負交番荷重試験の包絡線を示したものである。

剛結で解析を行うと構造物全体の剛性が実験値より大きくなり忠実には再現できていないことになる。ボンドリンク要素を入れると、構造物の剛性は与えた接合モデルにより変化するが、既往の結果のとおり押し抜きせん断試験の結果を用いたモデルでは剛結部全体の剛性は高く評価してしまうという結果になった。

4.2 終局荷重とコンクリートの軟化箇所

終局荷重については解析結果が両者とも実験結果を下回っており、忠実には再現できていないことになる。表-4 に各種終局状態を示す。各解析結果の終局荷重時でのコンクリートの軟化しているガウス点の位置を図-6、図-7 に示す。二つの解析結果は異なっている。剛結モデルの解析結果では杭からの力を 3 箇所支えていたが、鋼管杭直下のコンクリートが鋼管からの支圧力により降伏してまい、力を支えられなくなって終局荷重に達していると考えられる。剛結でない場合は杭によって押される部分のコンクリートと杭の直下の隣にあるコンクリートが圧縮破壊してしまい杭からの力を支えられなくなって終局荷重に至っていると考えられる。実験でも杭に押される部分のコンクリートに圧縮破壊の傾向がみられたが解析での終局荷重を上回っている。

表-4 各種終局状態

	荷重 (kN)	変位 (mm)
実験	-685	-86.9
解析結果 (接合要素)	-587	-48
解析結果 (剛結)	-660	-64

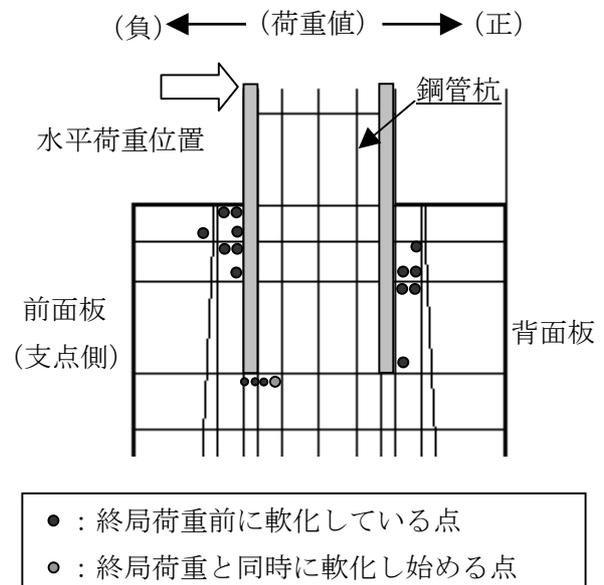
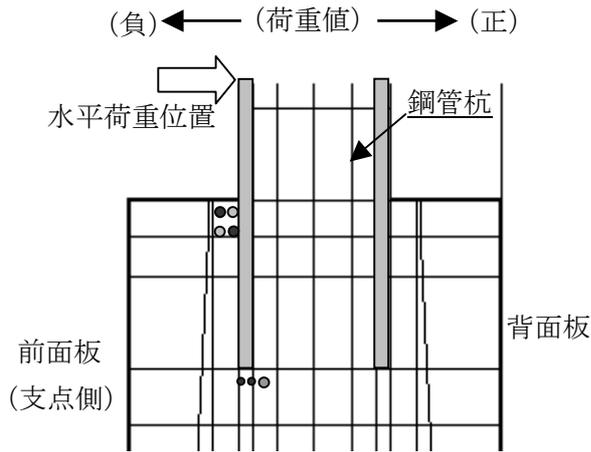


図-6 終局荷重時のコンクリートの軟化部分 (剛結モデル) (位置：中心軸)

終局荷重の解析結果が実験結果を下回ってしまった理由として、杭直下のコンクリートはメッシュの関係上、少し細長い要素 (150×45mm)



● : 終局荷重前に軟化している点
○ : 終局荷重と同時に軟化し始める点

図-7 終局荷重時のコンクリートの軟化部分 (接合要素モデル) (位置: 中心軸)

になっているため、実際より弱く評価していることが考えられる。このことにより杭直下のコンクリートが早めに軟化してしまい、その分杭がより傾きコンクリートにより大きな力がかかってしまい実験結果を下回ってしまったとも考えられる。また、構成則の適用限界などから鋼管杭周辺のコンクリートの3軸応力を精度良く再現できていないため、この部分のコンクリートが実際より早めに軟化してしまっている可能性も考えられる。図-8に前面板側(圧縮側)の鋼管杭におけるZ軸(杭軸)方向のひずみの分布を示す。(ひずみ測定位置は図-2参照)図中の横軸は杭とリングプレート間のコンクリート表面からの距離である。杭は常に圧縮で杭が押し込まれていることがわかる。なお、杭端部での鋼管の応力は $100\text{N}/\text{mm}^2$ である。

4.3 コンクリート主応力図

図-9に終局荷重時の解析結果の主応力図を示す。図の白線が圧縮方向で黒線が引張方向である。線の長さが主応力の値になっている。位置は中心軸である。剛結とそうでない場合の解析に大きな差はなく、杭周辺のコンクリートに大きな応力が伝わっていることがわかる。杭からの荷重は杭周辺のコンクリートを経由して鋼殻

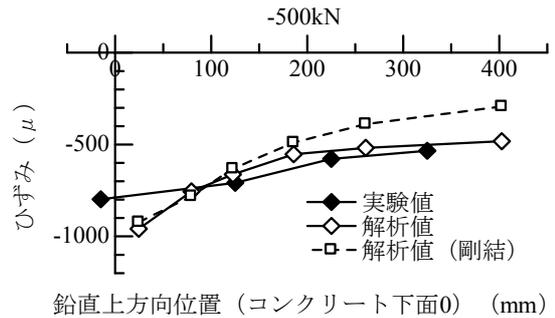
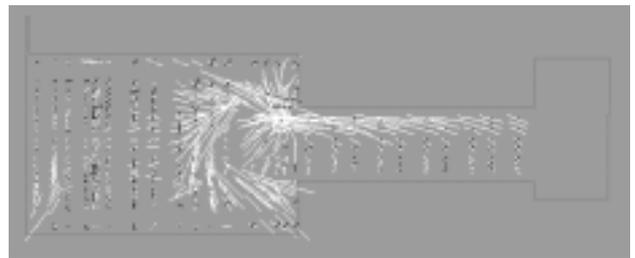


図-8 鋼管杭のひずみ分布

(剛結モデル)



(接合要素モデル)

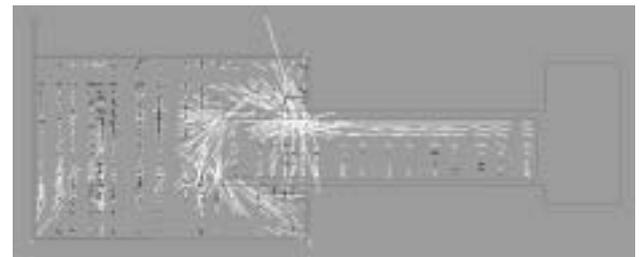


図-9 終局荷重時の主応力状態

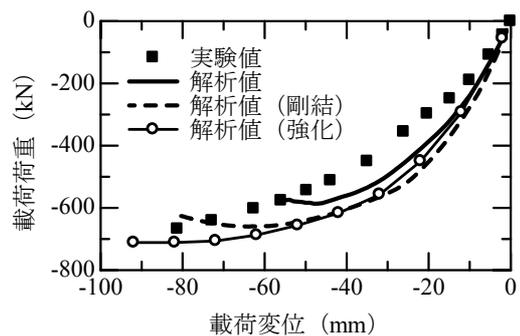


図-10 荷重-変位曲線

に伝わっている様子がよく確認できる。

4.4 数値解析(強化モデル)

以上のことから杭直下部分でのコンクリートの軟化が起こらないようするために、この部分のコンクリートを実際の10倍程度の圧縮強度と引張強度にし解析を行った。図-10に載荷点の荷

重一変位曲線を示す。あわせて今までの解析結果も示す。終局荷重は変位-80mm のところで-713kN となり実験結果により近い値となった。剛結部全体の剛性は実験結果より大きくなり、剛結の挙動に近くなった。図-11 に終局荷重時でのコンクリートの軟化しているガウス点の位置を示す。この解析でも杭真下の隣のコンクリートが軟化するときにはピークを迎えている。

5. まとめ

本研究で行った鋼桁と鋼管杭とのコンクリート充填鋼殻構造剛結部の杭への水平交番載荷試験の解析により得られた結論を以下にまとめる。

- (1) この剛結部の終局荷重は、鋼管の端面付近のコンクリートが鋼管からの支圧によって圧縮軟化することにより決まる。したがって、杭端部の局所的な支圧力を抑制することが重要である。
- (2) 鋼殻や鋼管と充填コンクリートとの接合面の剛性は、剛結部の剛性・終局荷重に影響を与える。
- (3) 終局荷重の正確な推定には、鋼管杭周辺のコンクリートの3軸応力を精度良く再現できる構成則が必要である。

参考文献

- 1) 長山秀昭ほか：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水平交番載荷実験，第6回複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集 (CD-ROM)，pp.(19-1)-(19-8)，2005.11
- 2) 高橋良輔ほか：3次元非線形有限要素解析による鋼コンクリート合成板のせん断挙動シミュレーション，構造工学論文集，Vol.48A，pp1297-1304，2002.3
- 3) 岡村甫，前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技法堂出版，1991
- 4) H. W. Reinhardt, et al.: Tensile tests and Failure Analysis of Concrete, Journal of Structural

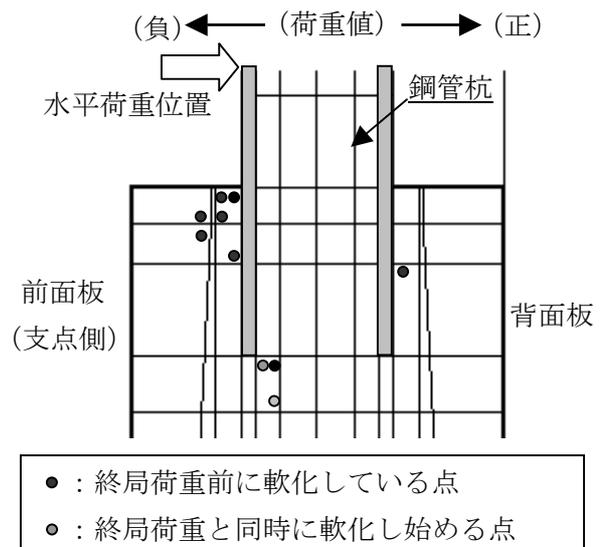


図-11 終局荷重時のコンクリートの軟化箇所 (強化モデル) (位置：中心軸)

Engineering (ASCE), Vol.112/No.11, pp2462-2477, Nov.1986

- 5) M. P. Collins, et al.: A General Shear Design Method, ACI Structural Journal, pp36-45, Jan.-Feb.1996
- 6) 前川宏一，福浦尚之：議事直交2方向ひび割れを有する平面RC要素の空間平均化構成モデルの再構築，土木学会論文集，No.634/V-45，pp157-476，1999.11
- 7) 李宝禄，前川宏一：接触密度関数に基づくコンクリートひび割れ面の応力伝達構成式，コンクリート工学，Vol26，No.1，pp123-137，1998
- 8) 猪俣勇希ほか：支圧力を受ける鋼・コンクリート接触面の静的・疲労付着性状，第6回複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集 (CD-ROM)，pp.(21-1)-(21-8)，2005.11
- 9) 保坂鐵矢ほか：孔あき鋼板ジベルのせん断特性に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.46A，pp1593-1604，2000.3
- 10) Taufiq, S.: Constitutive law for transferred shear force and relative displacement relationship of shear connector in steel-concrete sandwich beam, Hokkaido university Doctor thesis, Feb.2000