

# 論文 スリット入り鋼パイプを用いたずれ止めの抵抗機構に関する一考察

中山 和弥\*1・山口 隆一\*2・古内 仁\*3・上田 多門\*4

**要旨:** 鋼コンクリート複合構造の接合部では、狭隘な個所にずれ止めや鉄筋が数多く配置される場合があるため、施工が困難であるとともにコンクリートの充填性が悪くなる懸念される。これらの問題点を解決するため、スリット入り鋼パイプを用いた新型のずれ止めが開発された。既往の研究からこのジベルが優れた力学的性能を有していることは確認されたがその抵抗メカニズムは明らかになっていない。本研究では、提案された新型ジベルを用いて静的載荷試験及び3次元非線形有限要素解析を実施した。その結果、鋼パイプの変形挙動及びパイプ下部コンクリート圧壊荷重を推定し、破壊メカニズムに関する知見を得た。

**キーワード:** 複合構造, ずれ止め, スリット入り鋼パイプ, 有限要素解析

## 1. はじめに

スリット入り鋼パイプを用いたずれ止めは、**図-1**に示すように孔あき鋼板に挿入するタイプのずれ止め（以下、グリップジベルと表記する）で、施工の簡素化とせん断伝達耐力の向上を目的として開発された<sup>1)</sup>。混合構造における鋼桁とプレストレスコンクリート桁の接合部やラーメン橋脚部における接合部などは、一般に設計上狭隘な個所に多くのずれ止めや鉄筋が配置することが要求されるが、施工することが困難となる場合がある。

本研究で対象としているグリップジベルは、施工性にも優れているので、このような箇所への適用が期待できる。グリップジベルは、ジベル内のコンクリートの充填性が耐荷特性に与える影響は大きいと考えられるが、既往の実験<sup>2)3)</sup>から鋼パイプ内のコンクリートの充填性が確認されており、さらに押し抜きせん断試験から優れた耐荷性能を有することが確認されているが、せん断抵抗メカニズム及び破壊モードについては解明されていない。本研究では、グリップジベルを用いて静的載荷試験を実施した後、三次元の非線形有限要素解析を行い実験値との比較検討からピーク荷重到達前までの抵抗メカニズムを確認した。

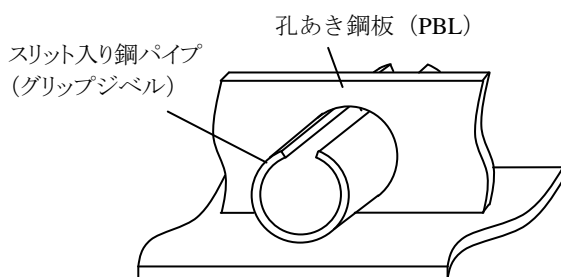


図-1 新型ジベル概要

## 2. 実験概要

### 2.1 実験供試体

**図-2**に示すように実験供試体は、宇都宮大学で行われた孔あき鋼板ジベル（以下、PBLと表記する）の押抜き試験<sup>4)</sup>を参考とした。コンクリートは、レディミクストコンクリート（早強セメント、呼び強度27、スランブ15cm、粗骨材の最大寸法20mm）を使用し、打設はグリップジベルのスリット部分が上向きになるように型枠を回転し、スリットの法線方向から行った。PBLにはSS400（実測降伏強度266N/mm<sup>2</sup>）、鋼パイプにはSTK400（同384N/mm<sup>2</sup>）を使用した。PBLは、降伏による破壊を防ぐために十分な板厚（ $t=22\text{mm}$ ）を持たせた。鋼パイプの長さは、PBLからの張出長がパイプ径の1/2の長さとなるように $L=D+t$ （ $D$ はパイプ径）とした。また、PBLは載荷時の偏心を防ぐため、上端部から70cmまでは十字型とした。コンクリートブロックの補強鉄筋には、D10異形棒鋼（SD345）をループ状にして使用し、高さ方向に3段に分けて配置した。PBL底部は、床からの支圧を受けないように30mmの高さの空洞部を設けた。コンクリートブロック底面には不陸調整のため敷砂を施した。

### 2.2 載荷方法

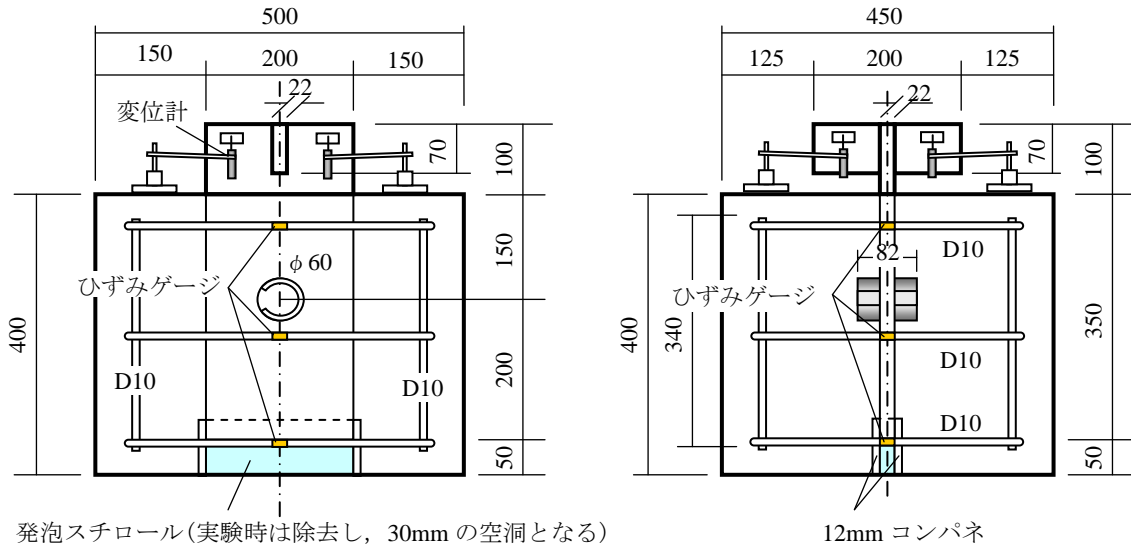
実験には1000kNローゼンハウゼン試験機を使用し、漸増繰り返しによる静的載荷とした。測定項目は載荷荷重、鋼材の十字型上端部におけるコンクリートブロックに対する相対ずれ変位、鋼パイプの軸方向ひずみおよび補強鉄筋のひずみとした。相対ずれ変位は、変位計をコンクリートブロックの四隅に金属板を設置した上で、その上に変位計付属のマグネットスタンドで固定し、PBL上端部の変位を4点で計測した。鋼パイプのひずみゲージは、**図-3**に示すように載荷方向に対して、上下向か

\*1 北海道大学大学院 工学院 (学生会員)

\*2 株式会社 IHI 技術開発本部 (正会員)

\*3 北海道大学大学院助教 工学研究院 博(工) (正会員)

\*4 北海道大学大学院教授 工学研究院 工博 (正会員)



発泡スチロール(実験時は除去し、30mmの空洞となる)

12mm コンパネ

図-2 実験供試体図

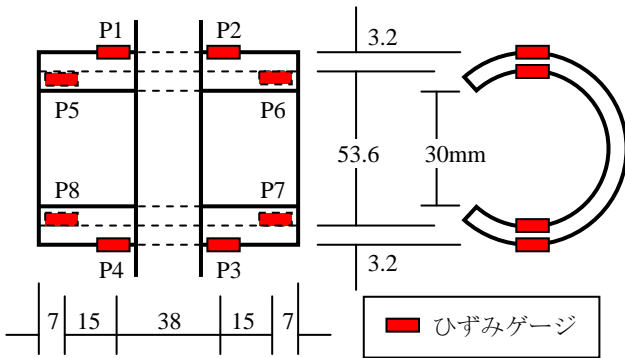


図-3 鋼パイプの寸法とゲージ取り付け位置

い合わせで4箇所に取り付けた。ただし、ゲージを貼り付ける十分なスペースがなかったため、両端部のゲージはパイプ内側に貼り付けた。

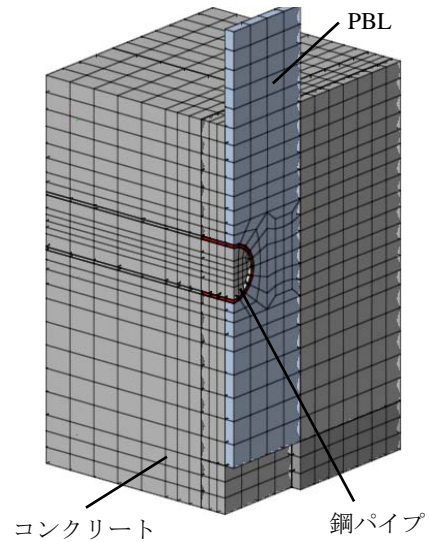


図-4 要素分割図 (1/4 モデル)

### 3. 解析概要

#### 3.1 解析モデル

汎用 FEM プログラム DIANA を用いて、3次元の非線形有限要素解析を行った。解析モデルは、実験供試体の対称性から 1/4 モデルとした。本解析では、コンクリートが充填されたグリップジベルの曲げ剛性を考えたときにスリットの有無がその値に与える影響が小さいことから、要素の作成においてはスリット部をモデル化しなかった。そのかわり、解析上は鋼パイプの曲げ剛性を実験供試体のパイプと等価となるように減少させた。

図-4 に要素分割図を示す。コンクリート、PBL、鋼パイプには 8 節点アイソパラメトリックソリッド要素を用い、補強鉄筋には埋め込み鉄筋要素を用いた。また鋼パイプとコンクリートの間には 4 + 4 節点界面要素を用い、水平方向の滑りを許容した。求解法としては割線剛性収束法を用い、不釣合いエネルギーと外力エネルギー

の比が  $1.0 \times 10^{-4}$  以下となった際に収束と判定した。

#### 3.2 構成則と材料モデル

##### (1) ひび割れモデル

コンクリートのひび割れモデルには分散ひび割れモデルの 1 つである固定ひび割れモデルを用いた。

ひび割れは線形応力カットオフを指定し、最大主引張応力が  $f_t$  と  $f_t (1 + \sigma_{lateral} / f_c)$  のうちの小さい方を越えたときに生じるものとした。ただし、 $f_t$  は 1 軸引張強度、 $f_c$  は 1 軸圧縮強度、 $\sigma_{lateral}$  は横方向主応力である。ひび割れ帯幅  $h_{cr}$  は要素の大きさに影響される。本解析では、パイプ内部および周辺コンクリートに着目しているため  $h_{cr}$  はそれらの体積の 3 乗根とし、 $h_{cr} = 22\text{mm}$  とした。

##### (2) コンクリート

コンクリートの圧縮強度とヤング率は、実験で得られた値としてそれぞれ 29.2MPa、26.3GPa を用いた。コンクリートは圧縮領域と引張領域で挙動が異なるため、そ

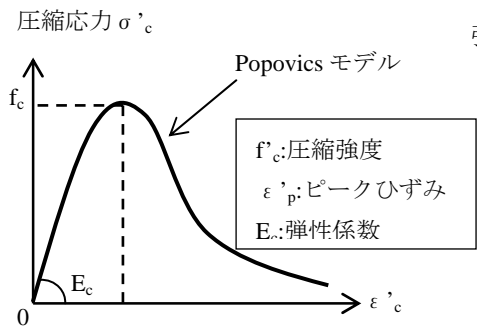


図-5 コンクリートの構成則

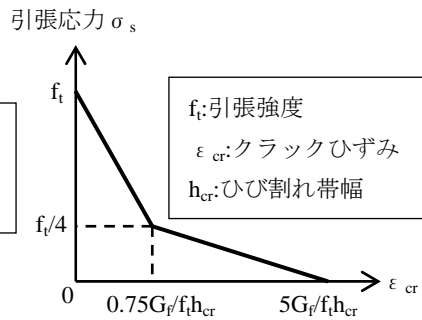


図-6 三軸拘束モデル

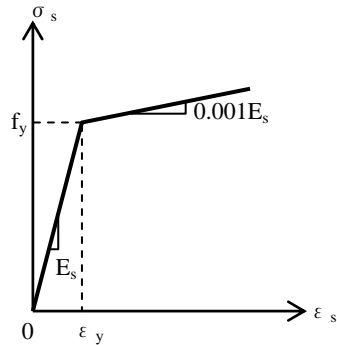
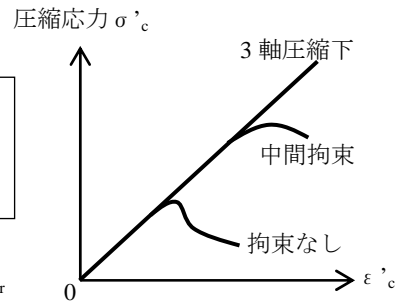


図-7 鋼材のバイリニアモデル

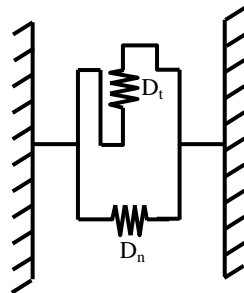


図-8 界面要素モデル

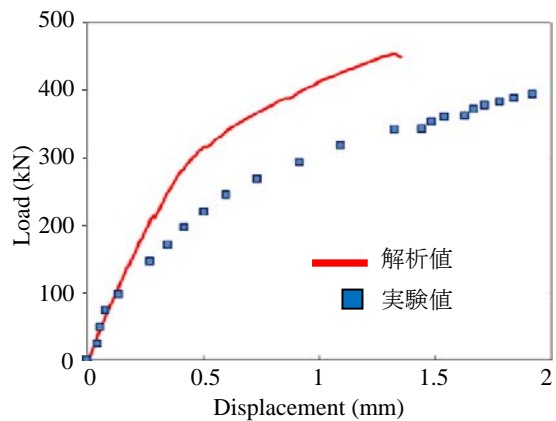
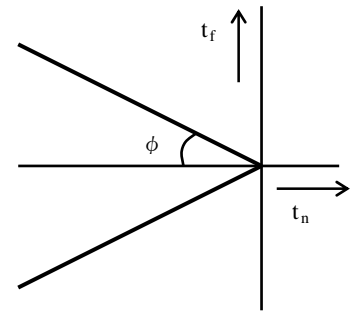


図-9 せん断カーズれ変位関係

それぞれの領域に合わせて構成則を用いた。圧縮領域には Drucker-Prager 破壊基準を採用し、内部摩擦角  $\phi = 30^\circ$  とした。圧縮側の応力とひずみの関係には Popovics モデルを使用した<sup>5)</sup>。また、補強鉄筋によるコンクリート圧縮強度増加を考慮するため Selby と Vecchi により提案されたモデルを用いた (図-6)<sup>6)</sup>。引張域には多直線引張軟化モデル<sup>7)</sup>を使用した。ここで破壊エネルギー  $G_f$  は  $0.1\text{N/mm}$  とした (図-5)。

### (3) PBL 及び鋼パイプ

PBL および鋼パイプは、図-7 に示すように降伏強度  $f_y$  に達するまでは弾性体とし、その後は剛性が初期弾性係数の  $1/1000$  となるバイリニアモデルを用いた。なお、PBL の初期弾性係数  $E_s$  は  $200\text{GPa}$  とし、鋼パイプは曲げ剛性を等しくするため  $194\text{GPa}$  とした。

### (4) 補強鉄筋

鉄筋はコンクリートと完全付着していると仮定し、降伏点到達後は完全弾塑性とした。

### (5) 鋼パイプとコンクリートの界面要素

鋼とコンクリート界面にインターフェイス要素を挿入した。モデルにはクーロン摩擦要素を用いた (図-8)。コンクリートの粘着力  $C$ 、内部摩擦角  $\phi$ 、膨張角  $\psi$  は  $C=0$ 、 $\phi=30^\circ$ 、 $\psi=0^\circ$  とした。非線形解析では摩擦の影響が結果に大きな影響を与えるためそのモデル化は大変重要である。本研究では、適切な摩擦則を用いることが出来なかったため既往の研究の値を参考にして初期剛性を  $D_n=D_t=10^3\text{ (N/mm}^3\text{)}$  とした。

## 4. 実験値と解析値の比較

### 4.1 せん断カーズれ変位曲線

静的載荷実験および解析から得られた PBL のせん断カーズれ変位曲線を図-9 に示す。実験値は、最大荷重が  $528\text{kN}$  であった。図の曲線は漸増繰り返し載荷の包絡線で示している。解析値は、PBL 上端部に強制変位  $5\text{mm}$  を  $1$  パーセントずつ与えて行った。解析値のせん断力は、強制変位を与えた節点反力の合計である。また、相対変位は強制変位を与えた節点の変位とした。解析値は実験値に比べて変位が小さくなったが、非線形挙動は概ねとらえている。また、解析値は実験値の最大荷重の約  $85\%$  で非線形性が強くなり解が収束しなくなったため計算を終了させた。



写真-1 鋼パイプの局部変形

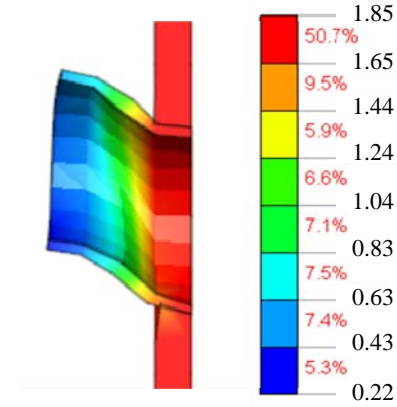


図-10 変形のコンター図 (mm)

#### 4.2 鋼パイプの変形

##### (1) コンター図による比較

試験終了後の供試体の解体により鋼パイプの変形を確認したところ、**写真-1**に示すようにPBL付近の鋼パイプの局所的な変形が見られた。解析値のせん断力が最大の時の変位のコンター図も示す (**図-10**)。コンター図でも PBL 付近の鋼パイプの変形がほぼ同様であることが分かる。

##### (2) 鋼パイプの曲率

**図-11** および**図-12**に鋼パイプの曲率の実測値と解析値を示す。曲率は、鋼パイプ下部のひずみから上部のひずみを差し引いて、パイプ外径あるいは内径で除すことにより求めた。実験ではスペース確保のためパイプ外側のゲージ (P1~P4) はPBL 付近に、パイプ内部のゲージ (P5~P8) は端部よりやや内側に貼りつけた。そこで、実験値と数値解析の比較では、内側は  $x = 10\text{mm}$  ( $x$  はPBL 表面からの距離) におけるパイプの曲率を使用し、外側は  $x = 20\text{mm}$  の位置における曲率を使用した。両者とも精度は高くないものの、概ね実験値を再現できている。このグラフから、PBL に近い所のパイプは初めに曲率が正の方向に増え、ある荷重値から符号が逆転していることが分かる。即ち、初めはパイプ中央が下に凸の変形をするが、パイプが降伏し始めるとパイプ中央下部の変形がさらに進み曲率の符号が逆転したものと考えられる。即ち、初めはパイプ中央が下に凸の変形をするが、パイプが降伏し始めるとパイプ中央下部の変形がさらに進み曲率の符号が逆転したものと考えられる。一方、パイプの端部の曲率は荷重の増加に伴って正に大きくなっていくことが分かる。また、**図-9**において解析値のせん断力が  $300\text{kN}$  付近 (最大せん断力  $P_{max}$  の約70%) でずれ変位の増加が大きくなっているが、これはパイプ中央部の曲率が逆転する荷重とほぼ等しいことが分かる。

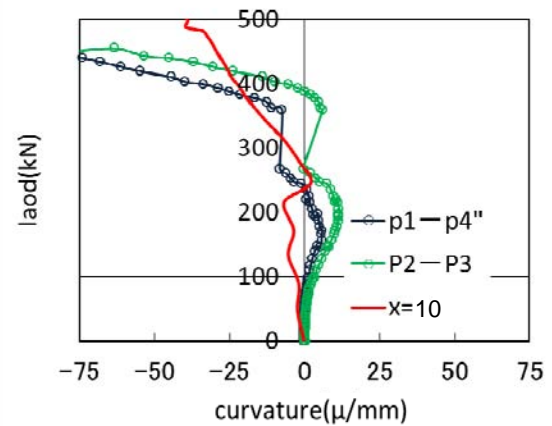


図-11 鋼パイプの曲率 (中央部付近)

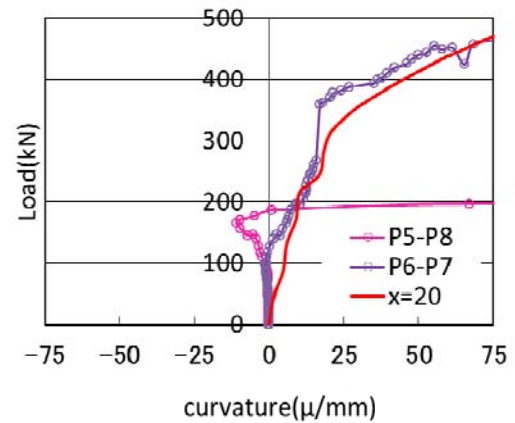


図-12 鋼パイプの曲率 (端部付近)

### 5. ピーク荷重前までの抵抗機構に関する考察

#### 5.1 コンクリートのひび割れ状況

**写真-2**に実験終了後に観察されたパイプ下部コンクリートの圧縮破壊の様子を示す。また、解析による鋼パイプ近傍のコンクリートのひび割れの分布を**図-13**に示す。写真及びひび割れ分布図に示すとおり、鋼パイプが負担する荷重が増えるにつれて鋼パイプ周辺のコンクリートが徐々に破壊していくことが確認できた。また、



写真-2 パイプ下部コンクリートの圧縮破壊

パイプ周辺のコンクリートから徐々に下方全体にひび割れが広がっていくことが分かる。

### 5.2 コンクリートに作用する応力

ある作用せん断力下における鋼パイプとその下部コンクリートの支圧応力を比較することにより、グリップジベルの抵抗機構及び破壊モードに関する考察を行った。

図-14 に  $x=10$  の位置における荷重とパイプ下部のコンクリートの主応力とせん断力の関係を示す。なお、ここでは圧縮応力を正としている。この図から、PBLに近い位置におけるコンクリートは荷重の増加につれて3つの主応力が圧縮状態で増加しているのが示されている。数値計算上、荷重が400kN付近では圧縮強度のおよそ約10倍程度の圧縮応力を負担している結果となった。これは、コンクリートがフープ状に配置された補強鉄筋によって拘束されるためと考えられるが、本解析では3軸圧縮状態に対して応力値の増加に対する上限を設けなかったためであると思われる。

そこで、別途、図-15に示すような三軸拘束状態を仮定した立方体のコンクリートの解析を行い、網掛け要素の主応力-主ひずみ関係から3軸圧縮状態の破壊の目安を調べることにした。なお、コンクリートの構成則には圧縮領域の圧壊による損傷を考慮できる修正前川モデル<sup>9)</sup>を用いた。先の解析から得られた最大せん断力時のパイプ下部コンクリートの最大変位を立方体コンクリートに強制変位として与えた。この結果、図-16示すようにコンクリートが圧壊するときの最大主応力として $\sigma'_u$ が得られた。これは1軸圧縮強度の3.4倍となった。

### 5.3 抵抗モデルに関する考察

図-14と図-16の比較から、PBLにきわめて近い鋼パイプ下部コンクリートは、荷重が273.9kNの時点で局部的に圧壊し始める(解析では $x=10$ mmまでのパイプ下部コンクリート)。一方、図-17より鋼パイプは変曲点となる $x=10$ の位置の要素が最初に降伏し、そこから上下に降伏域が広がっていくという結果となった。最初に降伏点に達した要素の荷重-応力関係を図-18に示す。

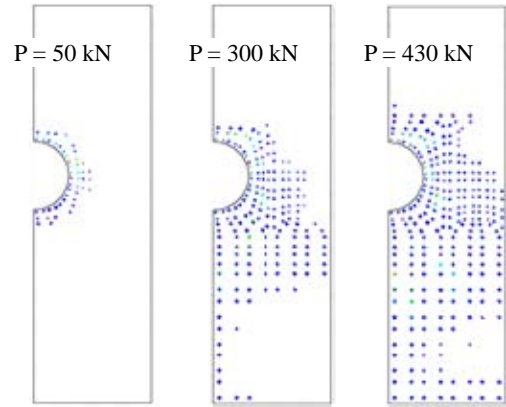


図-13 パイプ近傍コンクリートのひび割れ分布

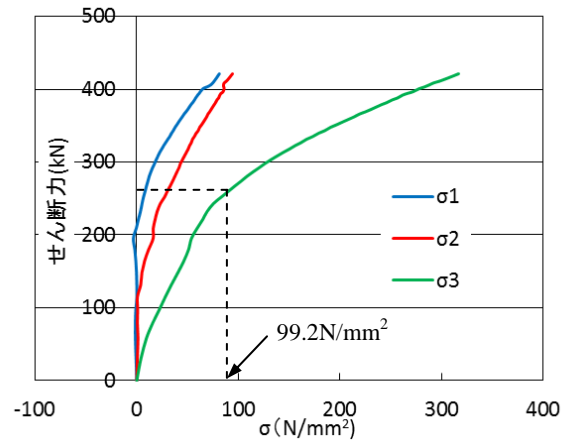


図-14 せん断力-主応力関係 ( $x=10$ )

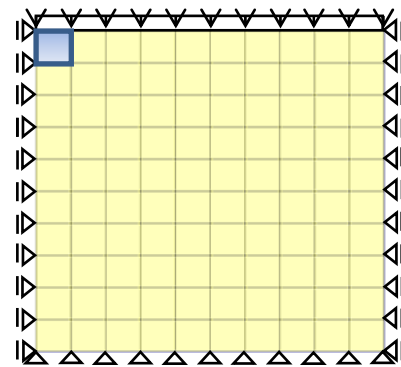


図-15 三軸拘束下のコンクリートの解析

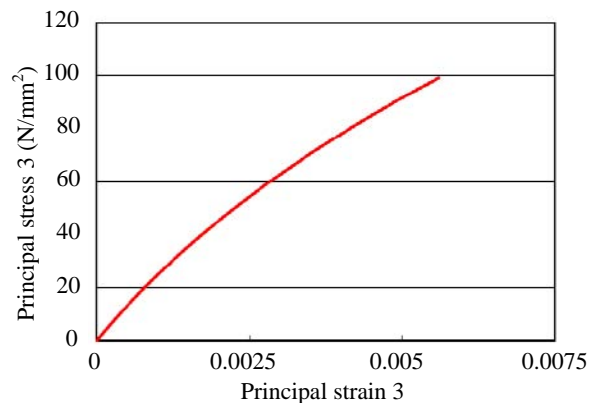


図-16 荷重-主応力関係

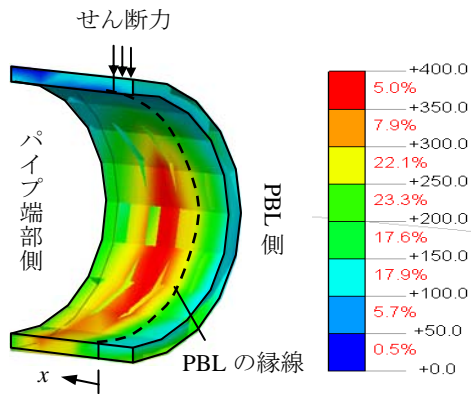


図-17 鋼パイプの降伏

この結果から、おおよそ 200kN くらいで PBL 付近で鋼パイプの局部降伏が始まり、次にその直下のコンクリートの局部的圧壊が 270kN (図-14 において最大主応力が 99.2N/mm<sup>2</sup>に達するせん断力) くらいで生じると思われる。最大荷重までには、鋼パイプの降伏は進んでいくが、全体的にはひずみ硬化により降伏後も耐力を保持しており最終的には鋼パイプの破断が補強鉄筋の拘束効果が消失したときに荷重が減少するものと考えられる。

## 6. 結論

スリット入り鋼パイプを用いたずれ止めの押抜き試験に対して、3次元 FEM 解析を実施した。本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) せん断力-ずれ変位関係において、解析値は実験値に比べて変位が小さくなったが、非線形的な挙動は概ねとらえることができた。また、解析値は実験値の最大荷重の約 85%で非線形性が強くなり計算が収束しなくなった。
- (2) 実験と解析の両方から、PBL 付近の鋼パイプの局所的な変形が観察された。解析によるコンター図でも実験とほぼ同等の変形を確認することが出来た。
- (3) 解析結果から、PBL に極めて近いパイプ下部コンクリートはせん断力が約 270kN で圧壊し始めるという結果を得た。この時、コンクリートは 3 軸圧縮状態となっており約 100 N/mm<sup>2</sup>の圧縮応力を負担していた。これは、圧縮強度のおよそ 3.4 倍である。
- (4) 鋼パイプの降伏は、コンクリートの局部圧壊に先行して、PBL 近傍のパイプ中央部付近から始まり、せん断力の増加に伴い進行することが確認できた。
- (5) 以上のことから、破壊のメカニズムは、始めに PBL 付近の鋼パイプの局部降伏が始まり、次にその直下のコンクリートの局部的圧壊が生じる。最大荷重までには、鋼パイプの降伏は進んでいくが、全体的にはひずみ硬化により降伏後も耐力を保持しているが最終的には鋼パイプの破断が補強鉄筋の拘束効果が消失したときに荷重が減少するものと考えられる。

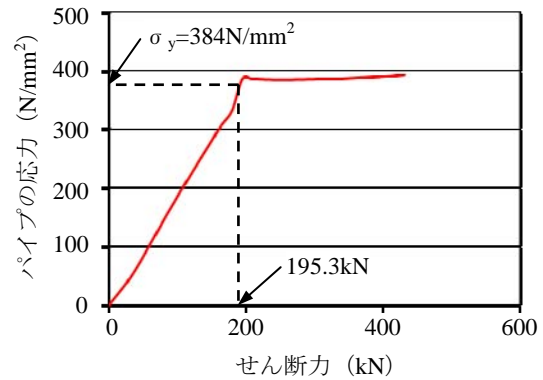


図-18  $x=10$  における鋼要素の応力の推移

謝辞：本研究を遂行するにあたり、北海道大学大学院工学研究院博士研究員の張大偉氏、同大学院工学院修士 1 年の松尾善紀君には多大なるご助力を頂きました。ここに記し謝意とさせていただきます。

## 参考文献

- 1) 山口隆一, 中村善彦：孔あき鋼板ジベルを改良した新型ジベルの押抜き試験, 第 64 回年次学術講演会報告集, CS, pp.71-72, 2009
- 2) 山口隆一, 古内 仁, 上田多門：鋼パイプを用いた新型ずれ止め構造の実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp. 1231-1236, 2010
- 3) 中山和弥, 山口隆一, 古内 仁, 上田多門：スリット入り鋼パイプを用いた新型ずれ止めのせん断耐力に関する研究, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集, V, pp.1433-1434, 2010
- 4) 中島章典, 内藤雅人, 鈴木康夫：長手方向に複数配置した孔あき鋼板ジベルのせん断力分担特性, 第 8 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演集, CD-ROM, 2009
- 5) 篠原保二, 宮間覚也, 渡辺 洋, 林 静雄：横方向プレストレス RC 柱の能動的拘束効果と破壊メカニズムに関する解析的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 578 号, 115-121, 2004
- 6) 村田裕志, Chunyakom SIVALEEPUNTH, M., 二羽淳一郎, 片桐 誠：UFC トラス部材をウェブ部に用いた複合 PC はりに関する数値解析的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.1423-1428, 2004
- 7) 土木学会：複合構造標準示方書, 2009
- 8) 吉田幸夫, 畑中重光, 水野英二：Drucker-Prager 型構成則を用いた円柱コンファインド供試体の圧縮破壊 FEM 解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 587 号, 155-162, 2005
- 9) JIP テクノサイエンス株式会社：DIANA9 ユーザーマニュアル日本語参考資料材料ライブラリー