

スリット入り鋼パイプを用いたずれ止めの耐荷メカニズムに関する解析的検討

Analytical study for shear resistance mechanism of shear connector using slit steel pipe

北海道大学大学院工学院
北海道大学大学院工学研究科
北海道大学大学院工学研究科
株式会社 IHI 技術開発本部

○学生員 松尾善紀 (Yoshinori Matsuo)
正員 古内 仁 (Hitoshi Furuuchi)
フェロー 上田多門 (Tamon Ueda)
正員 山口隆一 (Ryuichi Yamaguchi)

1. 序論

複合構造において、異種部材を接合するずれ止めは、異種部材を接合するずれ止めは非常に重要な役割を担う。鋼コンクリート複合構造における鋼桁とプレストレストコンクリート桁の接合部やラーメン橋脚部の上下部一体構造の接合部などでは、一般に設計上狭隘な箇所によくのずれ止めが配置されることがあり、鋼部材の組み込みやコンクリートの確実な充填が困難になることがある。

これらの問題を解決するため、従来の孔あき鋼板ジベル（以下 PBL と表記する）にスリット入りの鋼パイプを挿入した新しいずれ止め（以下グリップジベルと表記

する）が開発された¹⁾（図-1）。

このグリップジベルは既往の研究²⁾より、従来のPBLに比べ優れた性能を有していることが確認されているが、破壊に至るまでの正確なメカニズムは解明されていない。また、既往の研究³⁾で汎用有限要素解析ソフトDIANAを用いてグリップジベルをモデル化し、非線形三次元有限要素解析を実施し、その破壊メカニズムに関して検討がされているが、構成則により解析結果に差が出ることも確認されている。本研究では、Drucker-Prager型構成則を用い、その内部摩擦角による影響について実験値と比較し、適切な構成則を検討した。

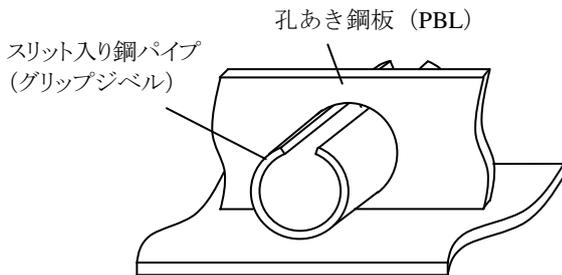


図-1 グリップジベルの概略図

2. 解析対象とした実験供試体

本研究で解析の対象とした実験供試体⁴⁾を図-2に示す。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。コンクリートブロックの補強鉄筋には、D10異形棒鋼(SD345)をフ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の高さの空洞部を有する。コンクリートブロック底面には不陸調整のため敷砂が施されている。材料特性は以下のとおりである。

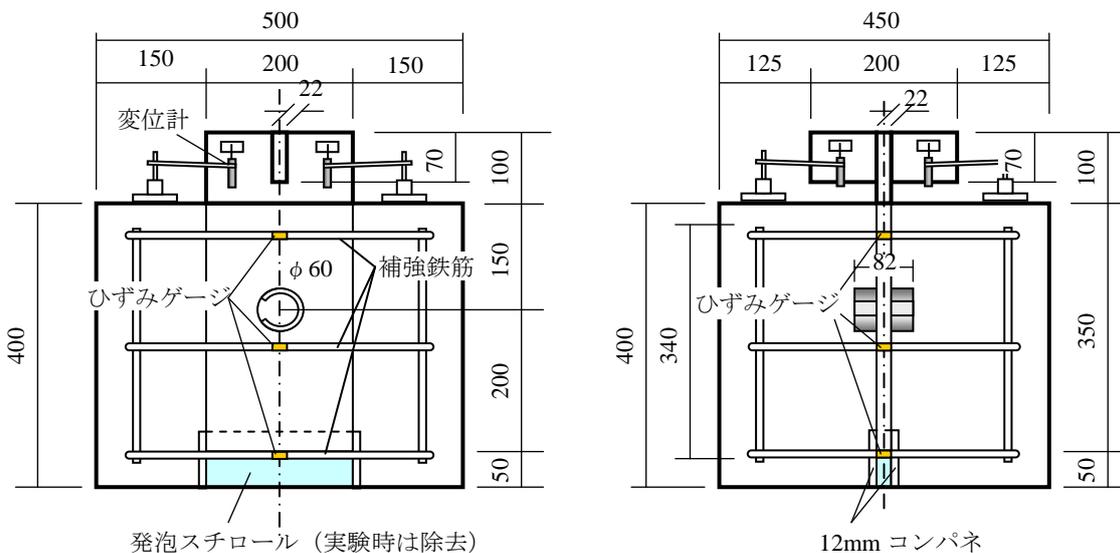


図-2 実験供試体

コンクリート：圧縮強度 29.2 N/mm²
 ヤング係数 26300 N/mm²
 PBL (SS400)：降伏強度 266N/mm²
 鋼パイプ (STK400)：降伏強度 384N/mm²

3. 解析概要

3.1 解析目的

Drucker-Prager 型の破壊基準は Mohr-Coulomb 降伏面のスムーズな近似であり、これは主応力空間において静水圧軸を中心とした円錐形となる (図-3)⁵⁾。この円錐形の勾配は内部摩擦角の値によって決定する。吉田ら⁶⁾が述べているように、コンファインドコンクリートの解析では通常内部摩擦角を 30° 前後とする傾向にある。しかし、石丸ら⁷⁾は内部摩擦角を 50° として実験結果を投影できるとしており、解析対象に応じて内部摩擦角を適切に変化させる必要があると考えられている。

本研究で対象としているグリップジベルのモデルにおいても、既往の研究³⁾では内部摩擦角 $\phi=30^\circ$ としているが、その根拠や適用範囲は明確にはされていない。

本研究においては、Drucker-Prager 型構成則をコンクリートの破壊基準としたときの内部摩擦角による影響を示すことを目的に、内部摩擦角 ϕ をパラメトリックに変化させ、実験結果と比較、考察した。

3.2 解析モデル

汎用 FEM プログラム DIANA を用いて、三次元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 モデルとしたが、鋼パイプのスリット部についてはモデル化を行わなかった。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、不釣り合いエネルギーと外力エネルギーの比が 1.0×10^{-4} 以下となった際に収束と判定した。

3.3 材料構成則

3.3.1 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 は一軸引張強度、 f_c は一軸圧縮強度、 $\sigma_{lateral}$ 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。

3.3.2 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、それぞれの領域に合わせて構成則を用いた。圧縮領域には

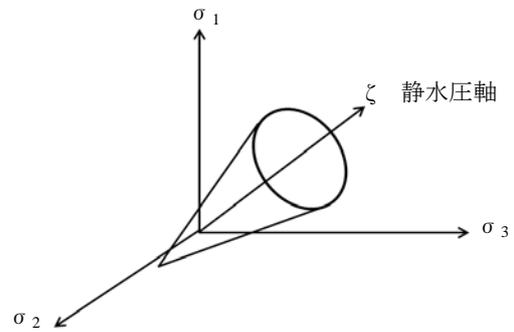


図-3 Drucker-Prager 降伏曲面

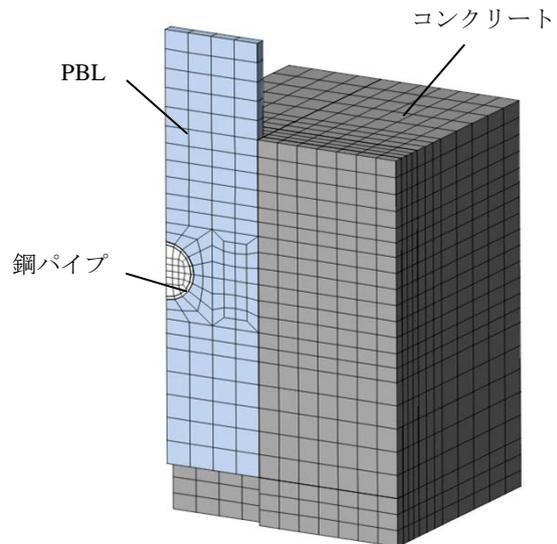


図-4 要素分割図

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 Thorenfeldt モデルを使用した⁸⁾。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)⁹⁾。引張域には多直線引張軟化モデル⁷⁾を使用した。ここで破壊エネルギー G_f は 0.1N/mm とした (図-5)。

3.3.3 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 200GPa とし、鋼パイプは曲げ剛性を等しくするため 194 GPa とした。

3.3.4 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。

3.3.5 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 ϕ 、膨張 (ダイレイタンス) 角 ψ はそれぞれ、 $C=0$ 、 $\phi=30^\circ$ 、 $\psi=0^\circ$ とした。本解析では、剛性吉田らの研究⁶⁾を参考に初期剛性の値を直応力、せん断応力各方向について $D_n = D_t = 10^3(\text{N/mm}^3)$ とした。

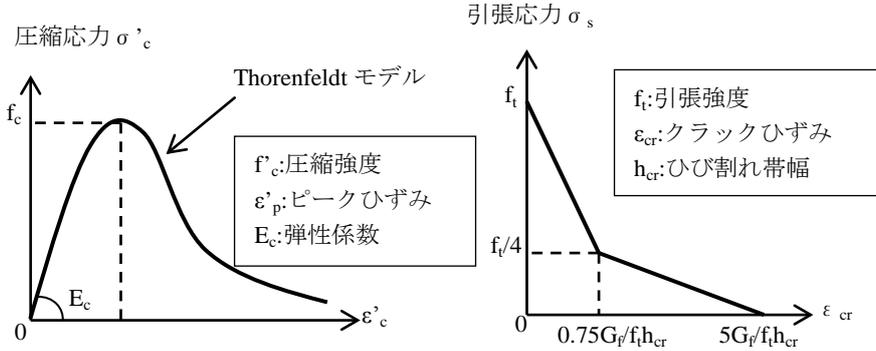


図-5 コンクリートの材料構成則

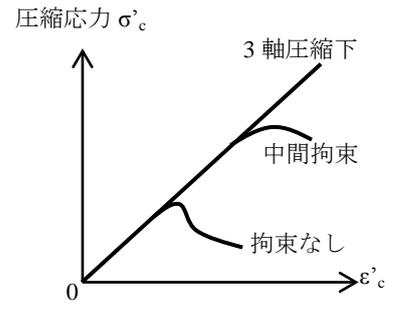


図-6 三軸拘束モデル

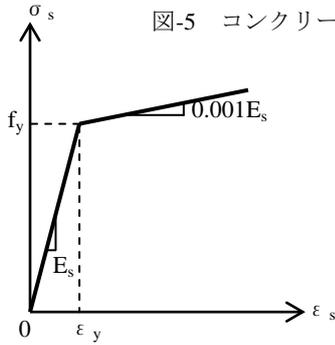


図-7 鋼材の材料構成則

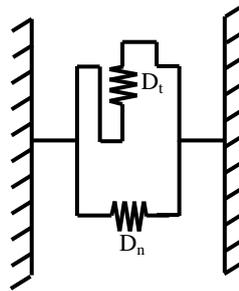
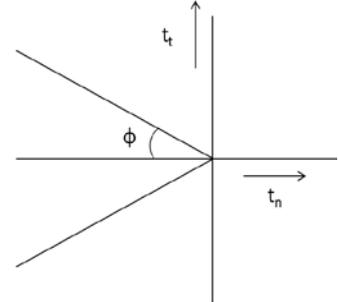


図-8 界面要素モデル



4. 解析結果

4.1 内部摩擦角による影響

内部摩擦角 ϕ 及びダイレイタンス角 ψ は $15 \sim 45^\circ$ の間で変化させた。ここでは $\phi = \psi$ とし、関連流れ則が成り立つとする。

静的載荷試験及び解析から得られた荷重変位曲線を図-9 示す。なお、 $\phi = \psi = 55^\circ$ のモデルは解析初期段階で発散したため、除外している。実験値は、最大荷重が 528kN であった。図の実験値は漸増繰り返し載荷の包絡線で示している。解析では PBL 上端部に強制変位 5mm を 1 パーセントずつ与えて行った。解析値の荷重は、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。実験値と比較して、どのモデルも初めほぼ同じ挙動を示すが、100kN 付近から実験値より剛性が大きくなっている。また解析では比較的小さな変位で破壊に至っていることが分かる。

内部摩擦角に着目すると、内部摩擦角 ϕ が大きくなると強度、剛性が大きくなる傾向にあることが分かった。この結果は田辺ら¹⁰⁾の研究とも一致している。内部摩擦角を 30° としている研究が多いが、本研究のモデルにおいては、剛性のみ評価すれば内部摩擦角 15° のものが最も実験値に近いという結果になった。また、最大荷重で比較すると内部摩擦角 25° のものが近い値を示している。

4.2 支圧下コンクリートにおける主応力との関係

図-10 に解析によるグリップジベルの変形図の一例を示す。変形図では PBL、鋼パイプ及びその周辺コンクリートのみ表示しており、変形は 15 倍に拡大してある。図中で赤色ほど変形が大きく、青色ほど変形が小さいことを表している。グリップジベルの抵抗機構において、

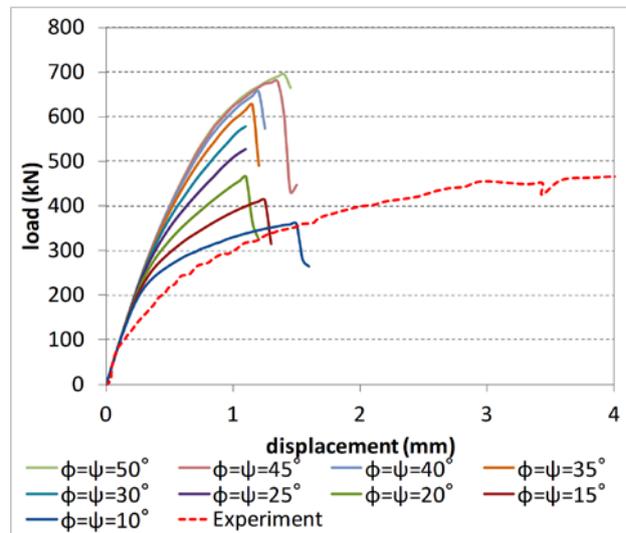


図-9 荷重変位関係

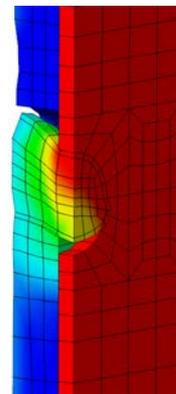


図-10 グリップジベルの変形

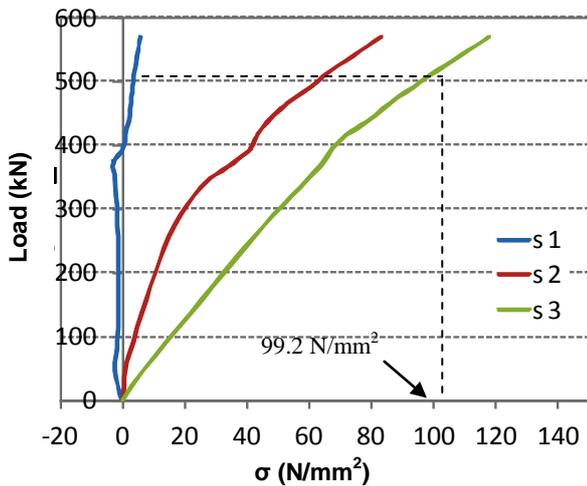


図-11 荷重-主応力関係

鋼パイプ下部のコンクリートに支圧反力が作用する。このコンクリート要素について、内部摩擦角 $\phi=30^\circ$ のときの荷重と主応力の関係を図-11 に示す。

PBL 近傍のコンクリートは荷重の増加に伴い主応力が増加していることがわかる。既往の研究³⁾では、このコンクリートが三軸圧縮状態にあるため、コンクリートの一軸圧縮強度に比べて極めて高い数値を示していると述べているが、本解析においても支圧部の応力は、一軸圧縮強度の4倍ほどの値を示している。中山ら³⁾によると三軸圧縮状態の破壊の目安は $\sigma'_c=99.2\text{N/mm}^2$ であり、この値を図-11 中に示すと、おおよそこの予測の範囲内にある結果であると考えられる。

また、内部摩擦角を $\phi=10^\circ \sim 55^\circ$ と変化させ、3つの主応力ごとに荷重との関係を示したグラフが図-12 である。どの主応力も、荷重が160kN付近に達するまでの挙動はほぼ同じだが、160kNを超えると内部摩擦角が大きいほど強度、傾きが大きくなる傾向にあることが示された。

5. 結論

スリット入り鋼パイプを用いたずれ止めの3次元FEM解析を通して、以下の知見が得られた。

- (1) Drucker-Prager型の破壊基準をコンクリート要素に適用する場合、内部摩擦角 ϕ の値は解析条件によって大きく異なることが示された。また、内部摩擦角が増大すると剛性、強度が大きくなる傾向にあることが確認できた。
- (2) グリップジベルの破壊に支配的な鋼パイプ下部コンクリート要素の荷重-主応力関係から、荷重が200kNに達する付近から内部摩擦角の影響が顕著になることが示された。

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

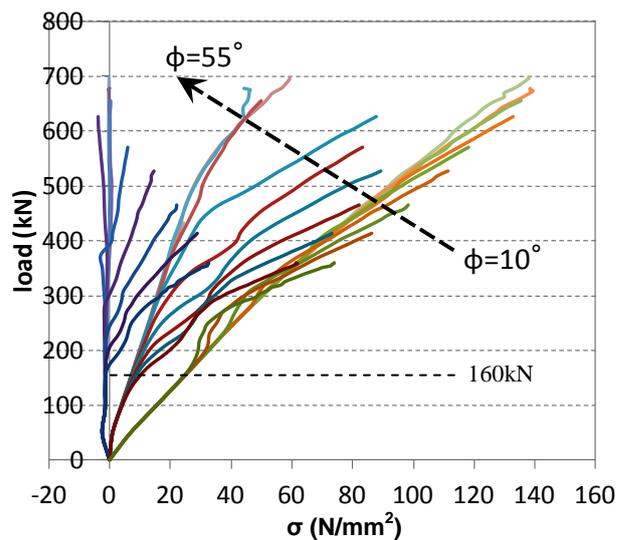


図-12 内部摩擦角による変化

- 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ずれ止めの抵抗機構に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, 2012
- 4) 松尾善紀, 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ずれ止めに対するフープ鉄筋の拘束効果について, 第64回年次学術講演会報告集, CS, pp.37-38, 2009
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 藤田吉夫, 石丸麟太郎, 花井重孝, 末永保美: Plain Concreteの内部摩擦角と引張強度についての一考察, 日本建築学会構造系論文集, 第494号, pp.7-14, 1997.4
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 田辺忠顕, 呉 智深, 余 国雄: コンクリート材料統一塑性モデル, 土木学会論文集, No.496/V-24, pp.21-29, 1994.8