

# 論文 3次元弾塑性 FEM を用いた孔あき鋼板ジベルの耐力評価に関する一考察

宗本 理<sup>\*1</sup>・園田 佳巨<sup>\*2</sup>・奥石 正己<sup>\*3</sup>

**要旨**：孔あき鋼板ジベルの終局耐力に関して、これまでに実験的研究によって種々の有用な耐力評価式が提案されているが、定量的に把握可能な解析手法は未だに提案されていない。そこで、本研究では3次元弾塑性有限要素解析を用いて、孔あき鋼板ジベルの耐荷特性を評価できる手法を確立するため、側圧を変えたコンクリートの3軸圧縮試験結果を引用し、孔周辺に生じるせん断破壊や圧縮破壊を適切に把握できるコンクリートの力学特性モデル（修正 Drucker-Prager モデル）を提案した。さらに、提案手法を用いて既往のジベルの孔径や孔数を変化させた押抜きせん断試験に関するシミュレーションを行い、その妥当性を検討した。

**キーワード**：孔あき鋼板ジベル, FEM, せん断破壊, 圧縮破壊, 修正 Drucker-Prager

## 1. はじめに

土木構造物の中には、コンクリートと鋼材を併用した複合構造物が数多く存在し、接合部にはスタッドジベルのようなずれ止めが用いられるが、鋼板に設けた孔の中にコンクリートを充填させた孔あき鋼板ジベル（以下、PBL）も、連続合成桁橋や波形鋼板ウェブ橋で主桁とコンクリート床版のずれ止めとして用いられている。

PBLの耐荷性能に関する研究には、鋼板の厚みや孔径、コンクリートかぶりなどの要因に着目した引抜き試験や押抜きせん断試験などが行われており、実験結果をベースとした耐力評価式も多数提案されている。その中でも代表的なものとして、Leonhardtらの2面押抜きせん断試験による耐力評価式<sup>1)</sup>や、保坂らによる貫通鉄筋の影響を考慮した評価式<sup>2)</sup>などが挙げられる。一方、解析的な研究例として、PBLの孔の抵抗を非線形バネに置換し、FEMを用いた引抜き解析を行った篠崎らの検討が挙げられる<sup>3)</sup>。著者らも過去に、PBLのせん断破壊をずれ要素で模擬したFEM解析を行い、孔の配置が耐荷特性に与える影響について簡易に検討している<sup>4)</sup>が、PBLの終局耐力を評価するには、孔内コンクリートの圧壊の進展などを適切に表現する必要があり、終局耐力を定量的に評価可能な解析手法は未だに確立されていない。

本研究は、PBLの耐荷特性や破壊性状を把握できる解析手法の確立を目的として基礎的な検討を試みるものである。具体的には、コンクリートの圧力依存性と圧縮破壊を考慮するため、既往の3軸試験結果を用いて圧縮限界に対する側圧の影響を定式化し、圧縮限界（平面キャップ）を有する修正 Drucker-Prager モデルに適用した。その上で、中島らが実施した孔数・孔径を変化させたPBLの押抜きせん断試験のシミュレーションを行い、両

者を比較することでその妥当性について検証した。

## 2. 構成モデル

### 2.1 修正 Drucker-Prager モデル

本研究では、PBL孔内部のコンクリートの圧壊を考慮するため<sup>5)</sup>、Greenらが提案した従来の Drucker-Prager モデル<sup>6)</sup>に引張破壊面と圧縮破壊面を考慮した修正 Drucker-Prager モデルを採用した（図-1 参照）。具体的には、通常線形 Drucker-Prager 降伏関数  $f_1$  に、引張強度から換算した静水圧  $I_1^t$  を上限とする破壊面を引張側に与え、さらに圧縮破壊に対応した  $f_2$  を加えることで圧縮・引張およびせん断の3通りの破壊をモデル化した。

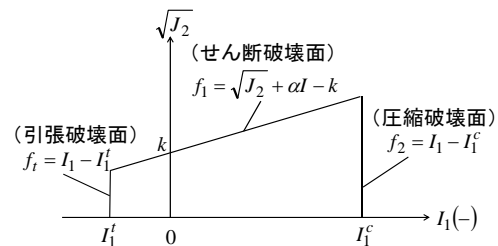


図-1 修正 Drucker-Prager モデル

### 2.2 引張破壊モデル

コンクリートの引張破壊は、図-2 に示すような引張強度以降に線形軟化する特性を考慮した。さらに、Ignacio Carol<sup>7)</sup>らが提案した3主軸方向毎に剛性の低減を考慮した異方性構成則を適用し、ひび割れによる異方性損傷を表現した。解析手順は、各主軸方向の剛性低減率から全体座標軸の損傷度  $D_x^{global}, D_y^{global}, D_z^{global}$  を求め、これを基に式(1)に示す剛性残存率  $\phi_x, \phi_y, \phi_z$  を算出する（図-3 参照）。

\*1 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 修士（工学）（学生会員）

\*2 九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門 教授 工博（正会員）

\*3 清水建設（株） 土木技術本部 設計第一部 工博（正会員）

$$\phi_i = \sqrt{(1 - D_i^{global})} \quad (i = x, y, z) \quad (1)$$

次に式(1)の剛性残存率を用いて、軟化による応力各成分の低下率 $\alpha$ を以下の式で計算した。

$$\alpha_{xx} = \phi_x^2, \alpha_{yy} = \phi_y^2, \alpha_{zz} = \phi_z^2 \quad (2)$$

$$\alpha_{xy} = \phi_x \phi_y, \alpha_{yz} = \phi_y \phi_z, \alpha_{zx} = \phi_z \phi_x \quad (3)$$

さらに、式(2), (3)に示した応力低下率 $\alpha$ を弾性マトリクス $D^e$ に乗じることで、式(4)に示すように異方性を有する弾塑性マトリクス $D^{ep}$ を導出した。

$$[D_{ij}]^{ep} = [D_{ij}]^e \times \alpha_{ij} - [D_{ij}]^p \quad (i = x, y, z \quad j = x, y, z) \quad (4)$$

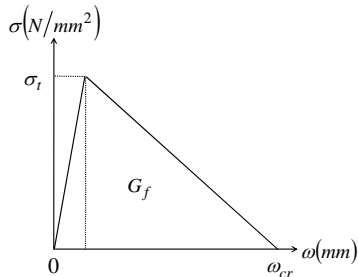


図-2 引張軟化特性

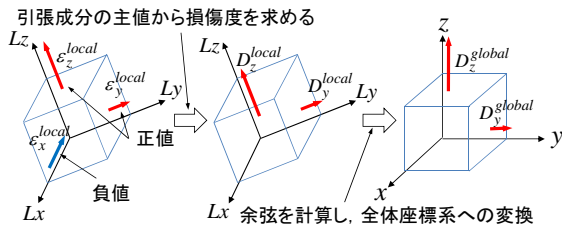


図-3 残存率 $\phi_x, \phi_y, \phi_z$ の算出方法

### 2.3 圧縮域における損傷度の評価

一般にコンクリートの圧縮強度は、側圧が高くなるほど増加することが知られている<sup>8),9)</sup>。それに加え、小坂らは3軸圧縮試験結果を基に、側圧の効果は損傷度とともに低下することを指摘している<sup>10)</sup>。本研究では、2.2節で示した異方性構成則を圧縮場においても適用することで、圧縮応力による損傷の増加とともに各方向に対する剛性の低下を表現した。圧縮域における相当応力-相当塑性ひずみの関係を図-4に示す。図中の最大応力時のひずみ $\epsilon_{max}^c$ は、側圧の大きさとともに変化することを仮定し、式(5)に適用することで側圧によって損傷

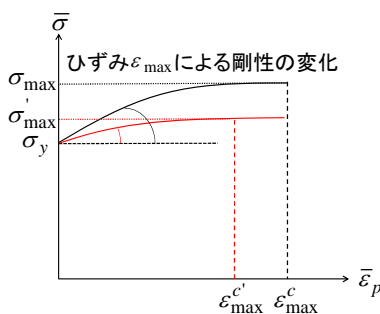


図-4 損傷によるイメージ (圧縮域)

度や最大応力が変わるものと考えた。なお、式(5)中の $\epsilon_{max}^c$ の値は、側圧をパラメータとした3軸圧縮試験結果<sup>9)</sup>を用いて決定した。

$$D_i^{local} = \epsilon_i / \epsilon_{max}^c \quad (i = x, y, z) \quad (D_i^{local} \leq 0.4) \quad (5)$$

なお、損傷度 $D$ の上限値としてChinn, Zimmermanらが示した3軸試験後に得られた圧縮強度が無損傷時の強度の約60%程度である結果<sup>11)</sup>を引用し、 $D \leq 0.4$ とした。

### 3.3 軸圧縮試験によるパラメータの同定

#### 3.1 解析概要

側圧に依存したコンクリートの力学特性モデルを構築するために、圧縮破壊面の静水圧 $I_1^c$ および2章で述べた最大応力時のひずみ $\epsilon_{max}^c$ と圧縮軟化による終局ひずみを側圧を変えた3軸圧縮試験結果を解析的に再現することで決定した。対象とした実験は、直径50mm、高さ100mmの円柱供試体を用いて、側圧0, 5.9, 11.8, 23.5, 47.1, 94.1N/mm<sup>2</sup>の6種類の条件で行われた静的3軸圧縮試験<sup>9)</sup>である。コンクリートの材料定数を表-1、解析モデルと解析条件を図-5に示す。解析モデルは対称性を考慮した1/4モデルで8積分点を有するソリッド要素(要素長5mm、要素数1620個)を使用した。载荷条件は、解析モデル上面に強制変位を与えて圧縮载荷状態を再現した。コンクリートの力学特性は、2章で説明した構成モデルを用いて定義し、引張限界ひずみの値は要素寸法と破壊エネルギー<sup>12)</sup>の関係から、本解析では6800 $\mu$ と設定した。解析は汎用有限要素解析ソフトMSC.MARC2010を用いて行っている。

#### 3.2 解析結果および考察

##### (1) 単軸圧縮応力-ひずみの関係

側圧11.8 N/mm<sup>2</sup>、側圧23.5 N/mm<sup>2</sup>、側圧47.1 N/mm<sup>2</sup>の3通りの側圧条件で、圧縮による損傷や軟化を考慮しない場合の解析結果と実験結果を単軸圧縮応力-ひずみ関係について比較した結果を図-6に示す。側圧が増加するにつれて、解析結果と実験結果で単軸応力-ひずみ

表-1 材料定数

弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比
26.7	37.4	3.74	0.2

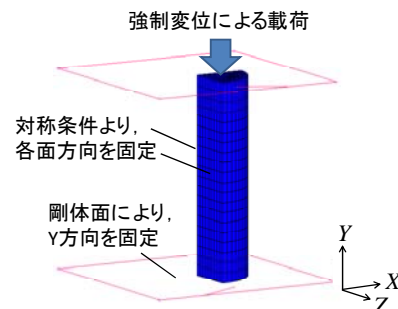


図-5 解析モデルおよび解析条件

の関係に大きな乖離が生じ、実験結果を正しく評価できないことが認められる。これは2章でも述べたように、供試体の損傷による剛性の低下や破壊形態がせん断破壊から圧縮破壊へと移行する点が反映されていないためと考えられる。

## (2) 静水圧と関連付けたパラメータの同定

側圧とともに増加する静水圧の影響で圧縮応力による損傷が生じて剛性が低下する<sup>10)</sup>ことを考慮するため、3軸圧縮試験結果から2章で述べた最大応力時のひずみ $\epsilon_{max}^c$ を決定した。具体的には、側圧が異なる各ケースで実験の単軸圧縮応力-ひずみ関係を良好に再現できた解析で得られたひずみ $\epsilon_{max}^c$ に対応する静水圧を圧縮応力による損傷開始時の静水圧とした。側圧の異なる各ケースで得られたひずみ $\epsilon_{max}^c$ を赤点で示した結果を図-7に示す。横軸は圧縮応力による損傷開始時の静水圧を降伏強度で除した値 $I_1/y_c$ であり、線形近似した直線を黒色で示している。この図から、損傷開始時の静水圧が高くなるほど、ひずみ $\epsilon_{max}^c$ は3000~4000 $\mu$ の範囲内で増加する傾向が確認できる。

対象とした3軸圧縮試験では、側圧が比較的小さい5.9N/mm<sup>2</sup>のケースで斜めひび割れによるせん断破壊が見られたのに対し、側圧23.5N/mm<sup>2</sup>以上になると一方の材端付近に圧壊型の膨らみをとまなう破壊が確認されている。そのため、側圧が23.5N/mm<sup>2</sup>より小さいケースではDrucker-Pragerの条件によるせん断破壊面上の破壊が生じ、側圧23.5N/mm<sup>2</sup>以上では圧縮破壊面上の圧壊が発生すると仮定した上で、実験の破壊形態の移行状況から

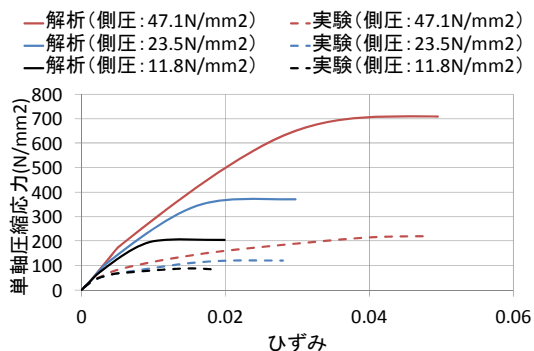


図-6 損傷・圧縮軟化を考慮していない場合

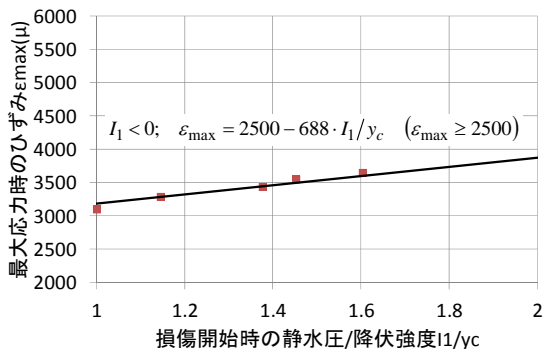


図-7 静水圧に応じた最大応力時のひずみの設定

圧壊の発生を判断するための静水圧を決定した。具体的には、せん断破壊だけが生じる場合の塑性体積ひずみが側圧23.5N/mm<sup>2</sup>の場合の値より小さいことに着目し、側圧23.5N/mm<sup>2</sup>の場合の最大静水圧をせん断破壊から圧縮破壊に移行する静水圧の値とみなした。

さらに、実験結果によると、側圧が大きくなるほど最大圧縮応力後の応力の低下が小さくなることが認められている。そこで、応力が最終的に0となる時の終局ひずみ $\epsilon_u$ を側圧の影響を考慮して決定し、最大応力以降は線形の軟化勾配で応力の低下を表現した。側圧の異なる各ケースで、実験結果をもとに決定した終局ひずみ $\epsilon_u$ を赤点で示した結果を図-8に示す。横軸は最大圧縮応力時の静水圧を降伏強度で除した $I_1/y_c$ で、図中には静水圧の2次関数として近似した曲線を黒色で示している。この図より、静水圧の増加とともに終局ひずみも大きくなると仮定することで、軟化勾配が小さくなり、実験結果と同様の圧縮軟化に対する側圧の影響を考慮できることがわかる。これらの静水圧の影響を考慮したモデルで、図-6と同様に単軸圧縮応力-ひずみ関係を比較したものを図-9に示す。この図から、図-6に比べて現実の応力-ひずみ関係を良好に再現できていることが認められる。なお、圧縮破壊では硬化による剛性を有しているが圧縮軟化を考慮しているため、側圧が47.1N/mm<sup>2</sup>の解析結果では圧縮応力が頭打ちになっているように見えている。以上の結果から、静水圧による損傷や圧壊の影響を考慮することで、側圧がコンクリートの弾塑性挙動に与える影響を把握できることが認められた。

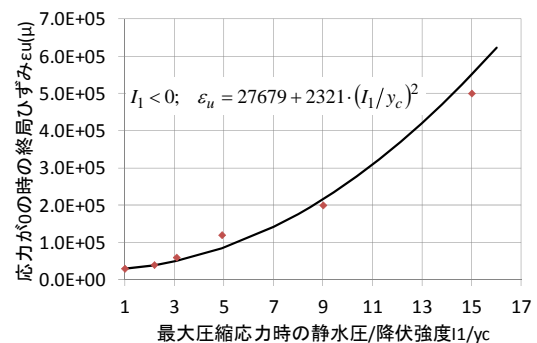


図-8 静水圧に応じた終局ひずみの設定

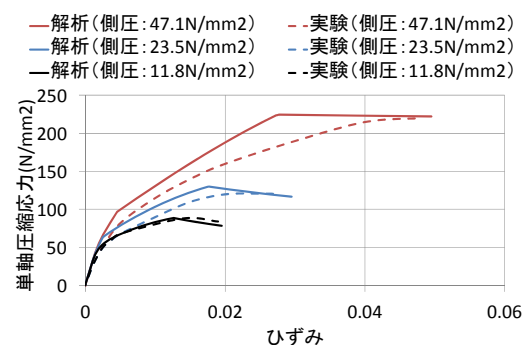


図-9 損傷・圧縮軟化を考慮した場合

#### 4. PBL の押抜きせん断解析による検証

##### 4.1 ジベル孔径を変えた PBL

###### (1) 解析概要

対象とした実験は、ジベル孔径を 30,60,90mm の 3 種類変えた PBL をコンクリートブロックから静的に押抜く試験である<sup>13)</sup>。鋼板の最下端は、コンクリートブロックに接しておらず空隙になっているため、コンクリートから受ける支圧は考慮していない。各孔径別にジベル孔内の貫通鉄筋の有無による 2 種類が存在し、合計 6 ケースの解析を実施した。対象とした試験体は 500×500×450mm のコンクリートブロックに厚み 12mm、幅 100mm の鋼板が 420mm 埋め込まれている試験体である。貫通鉄筋は D10 (公称直径: 9.53mm, 公称周長: 30mm, 公称断面積: 71.33mm<sup>2</sup>, 単位重量: 0.56kg/m) を用いた。

解析モデルには 3 章と同様の 1/4 モデルを用いており、8 積分点を有するソリッド要素で各部材のモデル化を行っている。載荷条件は、図-10 に示すように鋼板上面に強制変位を与えた。なお、解析モデルのジベル孔内部要素の最小寸法が約 3mm であるのに対し、鋼板に最大 20mm の強制変位を与えると、ジベル孔内部のコンクリート要素が潰れて解析精度の低下が予想される。そこで、本研究では相当塑性ひずみに閾値を設け、要素の塑性ひずみが閾値以上に大きくなった場合にメッシュを切り直す (再定義する) remesh 機能を適用して解析を行った。また鋼板とコンクリートの付着に関して、せん断応力度

が 1.07N/mm<sup>2</sup> に達した後に鋼板がすべり出すと同時に摩擦係数 (摩擦係数 0.6) が働くクーロン摩擦モデルを仮定した。最大せん断応力度の閾値は、既往の孔無し鋼板の引抜き試験による文献<sup>14)</sup>から最大耐力を付着面積で除すことで決定した。コンクリートの力学特性には、図-7, 8 で求めた静水圧の依存性を考慮した式を適用した平面キャップ付き Drucker-Prager モデルを用いた。また、引張域では 3 章と同様の方法により、引張限界ひずみを 2500 $\mu$  と仮定した上で引張軟化を考慮している。一方、鋼板と貫通鉄筋の力学特性には Von Mises の降伏条件を仮定した簡易なバイリニア型を用いて、降伏後は初期剛性の 1/100 の剛性による等方硬化を仮定した。各材料定数を表-2 に示す。

###### (2) 解析結果

ジベル孔径 60mm と 90mm の場合に関して、貫通鉄筋の有無が PBL のせん断力-相対ずれ変位に与える影響について解析と実験で比較したものを図-11 に示す。図-11 の横軸に示す相対ずれ変位は、コンクリートブロック上面の鋼板とコンクリートの変位差から求めている。この図より、ジベル孔径が大きくなるにつれてせん断力が大きくなる定性的な傾向は解析によって良好にシミュレートできていることが確認できる。次にジベル孔径別に最大せん断力について解析と実験でまとめたものを図-12 に示す。図-12 から、貫通鉄筋の有無に関わらず、ジベル孔径が大きくなるにつれてせん断力が増加

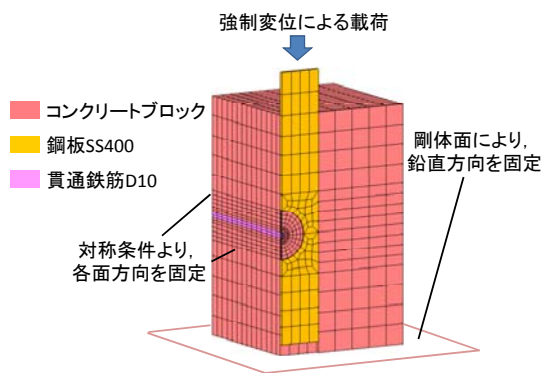
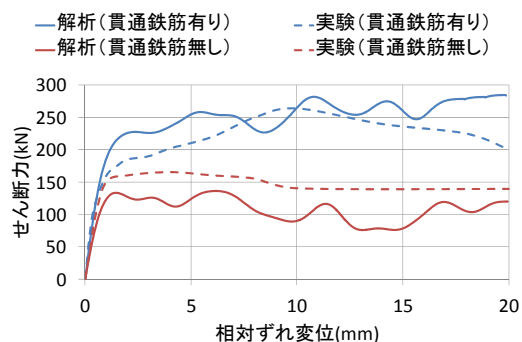


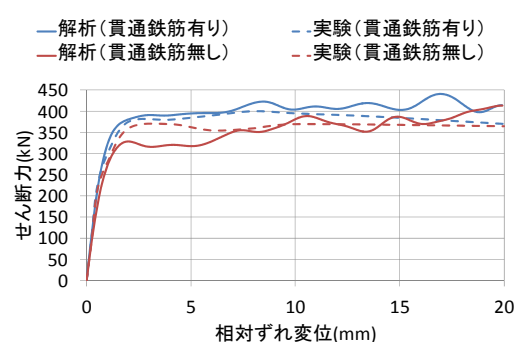
図-10 解析モデル (ジベル孔径 90mm の場合)

表-2 材料定数

	コンクリート	鋼板 SS400	鉄筋 D10
弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	27.3	200	200
降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	— (圧縮強度:33.2)	355	361
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	3.3	443	439
ポアソン比	0.2	0.3	0.3



(a) ジベル孔径 60mm



(b) ジベル孔径 90mm

図-11 せん断力-相対ずれ変位

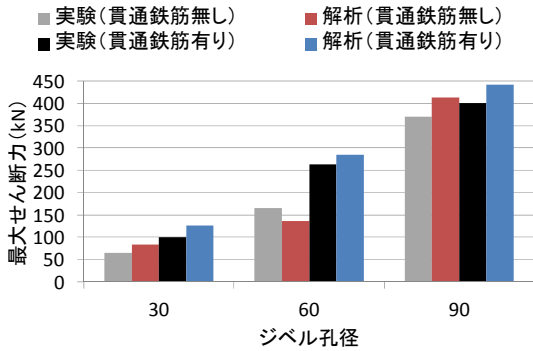


図-12 最大せん断力に対するジベル孔径の影響

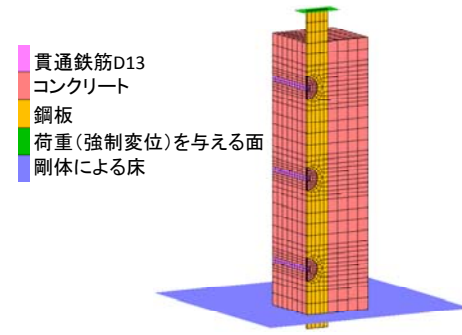


図-13 解析モデル(ジベル孔数3個の場合)

する傾向は解析においても顕著に表れていることが認められる。

#### 4.2 ジベル孔数を変えた PBL

##### (1) 解析概要

ジベル孔の数を深さ方向に1~3個と変化させたPBLの押抜き試験<sup>15)</sup>を対象とし、貫通鉄筋の有無を含めた6ケースのシミュレーションを行った。対象とした試験体は300×300×400mmのコンクリートブロックに厚み12mm、幅100mmの鋼板が埋め込まれた試験体である。貫通鉄筋はD13(公称直径:12.7mm, 公称周長:40mm, 公称断面積:126.7mm<sup>2</sup>, 単位重量:0.995kg/m)が用いられている。なお、ジベル孔の直径は50mmとし、孔1つに対して接するコンクリートの長さは孔の上下100mmとしている。解析モデルに関しては4.1節と同様とし、鋼板上面に20mmの強制変位を与え、コンクリートの引張限界ひずみは1700 $\mu$ と仮定した。なお、鋼板とコンクリート間の付着力と鋼板の最下端面とコンクリート間の接触力は実験と同様に生じないようにモデル化している。その他の力学特性に関しては、4.1節と同様の仮定を用いた。解析モデルおよび各材料定数をそれぞれ図-13、表-3に示す。

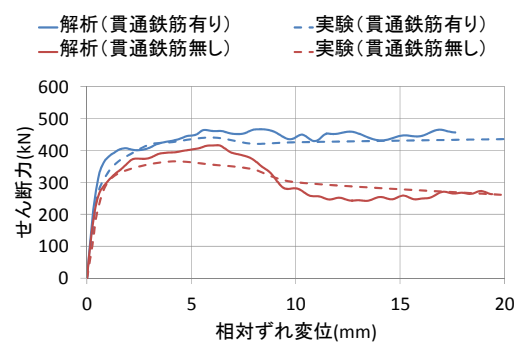
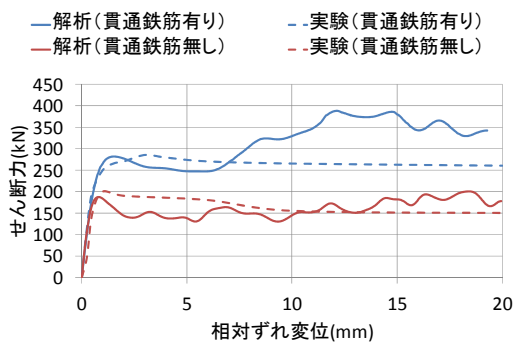
##### (2) 解析結果

ジベル孔数2個と3個の場合について、貫通鉄筋の有無がPBLのせん断耐力-相対ずれ変位に与える影響について解析と実験と比較した結果を図-14、ジベル孔数

表-3 材料定数

	コンクリート	鋼板 SS400	鉄筋 D13
弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	33.6	200	200
降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	— (圧縮強度:35.6)	306	380
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	4.1	452	495
ポアソン比	0.2	0.3	0.3

別に最大せん断力を解析と実験でまとめた結果を図-15に示す。図-14より、貫通鉄筋の有無に関わらずジベル孔数が増加するにつれてせん断力が増加する定性的な傾向だけでなく実験で得られた降伏せん断力を解析で概ね再現できることが認められる。なお、(b)の貫通鉄筋有りの解析では、remesh機能による要素の切り直しが行われず、ずれ変位17mm程度で解析自体が停止する結果となった。図-15の最大せん断力に関しては、実験と解析の結果にそれぞれ、ジベル孔数1個(貫通鉄筋有り)のケースで約25%、2個(貫通鉄筋有り)のケースで約30%、3個(貫通鉄筋無し)のケースでは約12%の乖離が生じている。ジベル孔数3個のケースに関して、貫通鉄筋の有無による最大せん断力の差が実験では100kN程度に対し、解析では50kN程度の差しか見られ



(a) ジベル孔数2個

(b) ジベル孔数3個

図-14 せん断力-相対ずれ変位

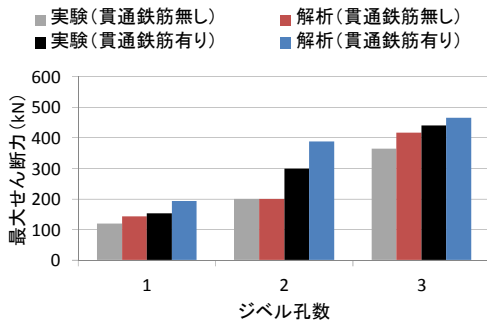


図-15 最大せん断力に対するジベル孔数の影響

ない。この理由として、ジベル孔内部のコンクリートが完全に破壊する前に母材コンクリート下面の要素が限界ひずみに達し、他のジベル孔数のケースと破壊形態が異なっていることが挙げられる。これは、本解析ではコンクリートの静水圧依存性に関して1種類の材料強度の試験体による3軸圧縮実験結果を用いて設定し、異なる材料強度のコンクリートに適用する際には、材料強度の比で簡易に補正しているためであると考えられる。したがって、解析の精度を向上させるには、材料強度の異なる複数の試験体を用いた検討を改めて行うことが望ましいと考えられる。

## 5. 結言

本研究では、PBLジベルの耐力を定量的に評価可能な解析手法を確立するために、3次元FEMの適用可能性について検証した。本研究で行った解析で得られた知見を示す。

- (1) 拘束圧などの側圧が作用する状況下のコンクリートの応力-ひずみ関係を正確に評価するため、側圧を変えた3軸圧縮試験をもとに、平面キャップを有する修正 Drucker-Prager の降伏条件に圧縮による損傷の影響を考慮することで、任意の拘束圧が作用するコンクリートの挙動を定量的に評価できる力学モデルを提案した。
- (2) PBL の押抜きせん断解析に提案モデルを適用したところ、ジベル孔径の増加や貫通鉄筋の有無が最大せん断力に与える影響について、解析により良好に再現できることが確認できた。
- (3) PBL のジベル孔数が最大押抜きせん断力に与える影響についても、提案モデルを用いて概ね定量的に把握できることを確認した。

## 参考文献

- 1) F. Leonhardt, et al.: Neues, vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit, Beton und Stahlbetonbau, pp.325-331, 1987.

- 2) 保坂鐵矢, 光木香, 平城弘一, 牛島祥貴, 橋吉宏, 渡辺滉: 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, pp.1593-1604, 2000.
- 3) 篠崎裕生, 竹之井勇, 浅井洋, 三上浩: 孔あき鋼板ジベルの引抜き耐荷挙動のパネモデルによる評価, 三井住友建設技術研究所報告第7号, pp.85-89, 2009.
- 4) 園田佳巨, 手嶋康博: 3次元弾塑性FEMによる孔あき鋼板ジベルの設計式に関する基礎的考察, 応用力学論文集, Vol.11, pp.283-290, 2008.
- 5) Drucker D.C., Gibson R.E., Henkel D.J.: Soil Mechanics and Work-Hardening Theories of Plasticity, Transactions, ASCE, Vol.122, pp.338-346, 1957.
- 6) Green S.J., Swanson S.R.: Static constitutive relations for concrete, AWFLTR-72-244, U.S. Air Force Weapon Laboratory, 1973.
- 7) Ignacio Carol, Egidio Rizzi and Kaspar Willam: On the formulation of anisotropic elastic degradation. I. Theory based on a pseudo-logarithmic damage tensor rate, International journal of solid and structures 38, 491-518, 2001.
- 8) Balmer, Glenn G: Sheraing strength of concrete under high triaxial stress-computation of Mofr's envelope as a curve, Structural Research Laboratory report SP-23.
- 9) 上林勝敏: 三軸圧縮応力下におけるコンクリートの動的構成モデルに関する研究, 学位論文
- 10) 小坂義夫, 谷川恭雄, 畑中重光: 低側圧3軸圧縮下のコンクリートの塑性変形挙動, 第6回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.257-260, 1984.
- 11) Chinn, Zimmerman, Roger M: Behavior of plain concrete under various high triaxial compression loading conditions, Technical Report WL TR 64-163.
- 12) 土木学会: コンクリート標準示方書(耐震性能照査編), 丸善, 2002.
- 13) NGUYEN MINH HAJ, 橋本昌利, 中島章典, 鈴木康夫: 貫通鉄筋の効果に着目した孔あき鋼板ジベルの押し抜き試験, 第67回年次学術講演会講演概要集, pp.27-28, 2012.
- 14) 篠崎裕生, 三上浩, 中島規道, 川上健太郎: 孔あき鋼板ジベルの引抜き耐力に関する実験的研究, 三井住友建設技術研究所報告第5号, pp.51-56, 2007.
- 15) 中島章典, 小関聡一郎, 内藤雅人, 中島絢平, 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に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.57A, pp.996-1006, 2011.