

孔あき鋼板ジベルの押抜きせん断に関する非線形 FEM 解析

九州大学 学生会員 ○宗本 理 九州大学 正会員 園田 佳巨

1. はじめに

近年、複合構造には鋼板に設けた孔の中にコンクリートを充填させた上で鉄筋を貫通させることで高いせん断抵抗が期待できる孔あき鋼板ジベル（以下、PBL と称す）が波型鋼板ウェブ橋などにおける主桁とコンクリート床版のずれ止めとして用いられてきた。一方、研究の分野ではこれまで数多くの PBL に関する実験がなされており、様々な要因をパラメータとした有用な耐力評価式が提案されている。しかし、解析に関しては PBL 自体を主体とした解析事例は実験に比べて少なく、PBL の終局耐力を評価可能な解析手法は確立されていないのが現状である。PBL の耐力を定量的に評価できる手法を確立するため、圧力依存性・損傷を考慮したコンクリートの材料特性モデルを用いて孔径を変えた PBL の押抜き解析を実施した。なお、解析には汎用解析ソフト MSC.MARC2010 を用いた。

2. 解析概要

2.1 側圧に依存したコンクリートの材料特性モデル

PBL の破壊性状には主にせん断破壊と圧壊が挙げられる。また、コンクリートの 3 軸圧縮試験でも拘束圧が高くなるにつれて破壊形態がせん断破壊からセメントペーストの圧壊に変わることが示唆されている。以上のことから、3DFE 解析を用いて既往の側圧を変えた 3 軸圧縮試験¹⁾から静水圧に依存したコンクリートの材料特性モデルを提案した。その際、図-1 に示す線形 Drucker-Prager の降伏関数 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・引張およびせん断破壊を考慮できるモデルを適用した。まず、降伏関数 f_1 上における引張破壊とせん断破壊に関して、Ignacio Carol らが提案した、直交する 3 主応力軸の損傷度を考慮した異方性構成則を適用した。損傷度（主ひずみ/引張限界ひずみ）を決める引張限界ひずみは引張破壊エネルギーと最小要素長から算出したひび割れ幅をもとに決定した。圧縮側では、静水圧によって損傷度（主ひずみ/最大応力時のひずみ）が変化し、最大圧縮応力も変化することを表現するために、図-2 に示すような、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による最大応力時のひずみ（赤点）をその時の静水圧と関係づけ、黒色で示す線形近似した直線を提案した。次に、側圧を変えた 3 軸圧縮試験結果より、破壊性状が斜めひび割れによるせん断破壊から圧縮破壊に変化する際の最大静水圧を圧壊開始時の静水圧 I_1^c とした。さらに、試験結果に見られる側圧に応じた最大応力後の圧縮軟化を再現するため、最大圧縮応力時の静水圧に基づいた 2 次関数の近似曲線を提案し

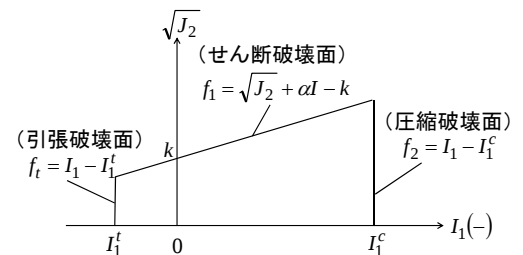
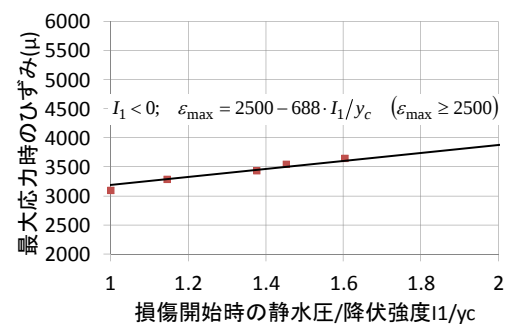
図-1 コンクリートの $\sqrt{J_2} - I_1$ 関係

図-2 静水圧に応じた最大応力時のひずみ

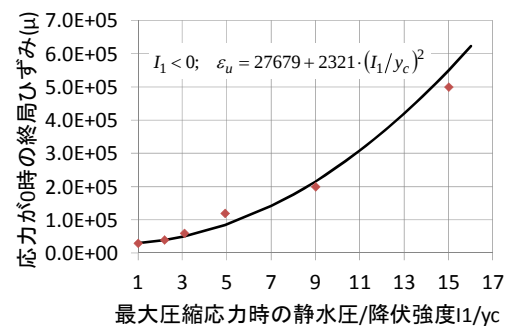


図-3 静水圧に応じた終局ひずみ

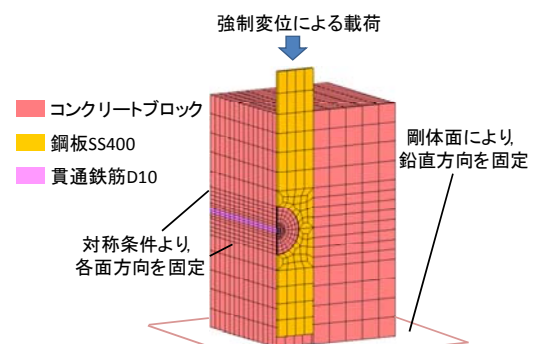


図-4 解析モデル

キーワード 孔あき鋼板ジベル, 非線形 FEM, せん断力, ジベル孔径, 押抜きせん断

連絡先 〒819-0385 福岡県福岡市西区元岡 744 ウェスト 2 号館 11 階 1102 号室

た(図-3を参照)。これは静水圧が大きい状況下では大きい終局ひずみ ε_u を仮定することで、応力に乗ずる圧縮軟化勾配を小さくし、圧縮軟化を制御した。

2.2 PBLの押抜き解析概要

対象とした中島らの実験²⁾は、ジベル孔径を30,60,90mmと3種類変えて、さらに貫通鉄筋の有無を含め合計6種類の供試体を用いたPBLの押抜きせん断試験である。試験体は500×500×450mmのコンクリートブロックに厚み12mm、幅100mm、孔1つの鋼板が420mm埋め込まれている試験体である。解析に関して、対称性を考慮した1/4モデルとし、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た(図-4を参照)。載荷条件として鋼板上面に強制変位20mmを与えているが、解析モデルのジベル孔内部要素の最小寸法が約3mmと小さいため、ジベル孔内部のコンクリート要素が潰れ、解析精度の低下が予想される。そこで、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。鋼板とコンクリートの付着に関して、既往の文献を参考に、せん断応力が1.07N/mm²に達した後に鋼板がすべり出すと同時に摩擦力(摩擦係数0.6)が働くクーロン摩擦モデルを仮定した。鋼板および貫通鉄筋の材料特性は、圧縮・引張両域で同じ強度特性を有するMisesの降伏条件を適用し、降伏後は初期剛性の1/100の剛性で等方硬化するバイリニア型モデルを用いた。具体的な材料定数を表-1に示す。

3. 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-5、ジベル孔径別に最大せん断力を図-6に示す。図-5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。図-6の最大せん断力に関して、実験値に対して解析値はジベル孔径30mmの場合で約28%程度、ジベル孔径60mmの場合で約17%、ジベル孔径90mmの場合で約12%の乖離が生じているが、PBLのジベル孔径が最大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。

4. おわりに

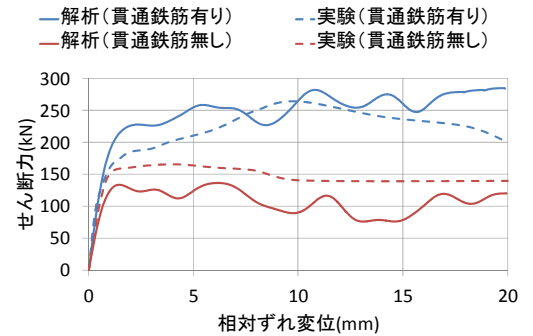
本研究では、PBLジベルの耐力を定量的に把握可能な解析手法を確立するために、静水圧に依存したコンクリートの材料特性モデルの妥当性について検証した。今後、分離やすべりなど表現がFEMに比べて容易であるメッシュレス手法を用いたPBLの解析や動的荷重に対するPBLの耐荷挙動について検討していく予定である。

参考文献

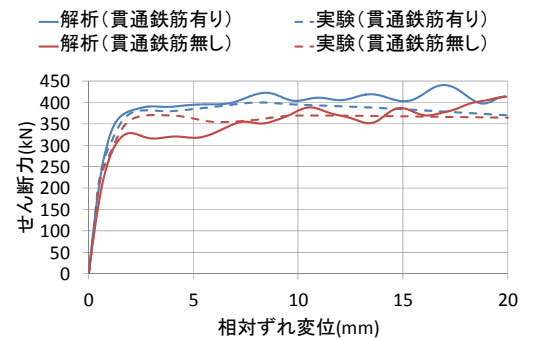
- 1) 上林勝敏：三軸圧縮応力下におけるコンクリートの動的構成モデルに関する研究，九州大学，学位論文，2002.3.
- 2) NGUYEN MINH HAJ, 橋本昌利, 中島章典, 鈴木康夫：貫通鉄筋の効果に着目した孔あき鋼板ジベルの押し抜き試験，第67回年次学術講演会講演概要集，pp.27-28，2012.

表-1 各種材料定数

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



(a) ジベル孔径 60mm の場合



(b) ジベル孔径 90mm の場合

図-5 せん断力-相対ずれ変位

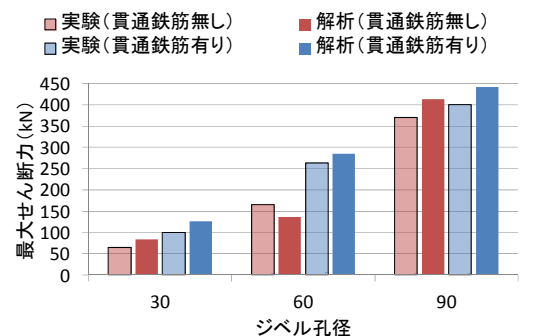


図-6 最大せん断力