

(27) 孔あき鋼板ジベルの定量的耐荷性能評価に向けたFEMの留意点に関する一考察

宗本 理¹・鈴木 森晶²・嶋口 儀之³

¹正会員 愛知工業大学講師 工学部土木工学科（〒470-0392 愛知県豊田市八草町八千草 1247）

E-mail: s_munemoto@aitech.ac.jp

²正会員 愛知工業大学教授 工学部土木工学科（〒470-0392 愛知県豊田市八草町八千草 1247）

E-mail: suzuki-moriaki@aitech.ac.jp

³正会員 愛知工業大学 工学部土木工学科（〒470-0392 愛知県豊田市八草町八千草 1247）

E-mail: y_shimaguchi@aitech.ac.jp

これまで孔あき鋼板ジベルの耐荷性能に影響を及ぼす各種要因に関する実験的研究により有用なせん断耐力評価式が提案されている一方で、著者らの研究も含め数値解析による十分な検討が行われているとは言い難い。そこで本研究では、様々な分野で使用され汎用性の高い FEM をベースとし、異なる拘束条件下における孔あき鋼板ジベルの耐荷性能に着目した。具体的には、一定の側圧を与えた一枚板の押抜きせん断試験と CT 鋼を用いた押抜きせん断試験を対象に、低側圧下の 3 軸圧縮強度試験に基づいた修正 Drucker の降伏基準や幾何学的な工夫として導入したせん断破壊を模擬したずれ要素の妥当性や適用範囲などの留意点についてまとめた。

Key Words: *times, italic, 10pt, one blank line below abstract, indent if key words exceed one line*

1. 序論

孔あき鋼板ジベル（以下、PBL と称す）は、孔を有した鋼板にコンクリートを充填させることで高いせん断抵抗を発揮するずれ止め工法として、近年では橋梁の接合部以外にも地下構造物などで使用されている。PBL 接合部の設計では、主に頭付きスタッドの押抜き試験を準用した既往の実験的研究に基づき、ジベル孔径、材料強度、鋼板の板厚、貫通鉄筋の有無などをパラメータとした有用な設計耐力式が提案されており、ジベル孔数が複数の場合には、孔 1 個当たりの耐力に孔数を乗じる簡易な方法で算出されている。PBL に関する既往の実験的研究は、上記のパラメータの他に試験体諸元（試験体寸法、孔の配置条件、かぶり）の影響などに関する実験がなされており、これまでに多くの知見が蓄積されている¹⁾³⁾。

一方で、PBL を対象とした既往の解析的研究では、PBL 接合部の荷重-変位関係を簡易な非線形バネモデルで表現した上で橋梁の全体応答を検討した解析⁴⁾などは実施されているものの、実験に比べて知見が明らかに少ないのが現状である。この理由として、PBL の代表的な破壊性状である二面せん断破壊や圧縮破壊といった大変形問題に対して連続体をベースとした FEM で定量的に

評価するためには何らかの工夫が必要となるためである。著者らは、これまでに孔内コンクリートの圧壊を考慮した材料特性モデルを用いた FE 解析を実施し、比較的に鋼板のずれ変位が小さなポストピーク領域までは、通常の FEM でも定量的に耐力の評価が可能であることを確認している⁵⁾。また、SPH 粒子法を用いると、計算コストによる負荷が大きいものの、鋼板のずれ変位が大きい領域まで耐荷性能を定量的に評価可能であることも確認している⁶⁾。しかし、上記の研究は全て鉄筋の貫通による圧縮破壊も含めた複雑な事象における応力場を全体応答というマクロな観点から評価しており、任意の条件下における PBL 接合部の耐荷性能評価には至っておらず、提案モデルにおける適用範囲なども明確になっていない状況である。

そこで本研究では、任意の条件下における PBL 接合部の定量的評価手法に確立に向けて、異なる拘束条件下における孔あき鋼板ジベルを対象とした非線形 FE 解析の留意点を確認する。特に、PBL 接合部の耐荷性能を把握する上で重要となるジベル孔内部のせん断破壊に着目し、コンクリートの降伏基準や幾何学モデルが PBL の耐荷性能に与える影響を検討するとともに、提案モデルによる FE 解析の妥当性や適用範囲について考察する。

2. 解析概要

(1) 解析対象

a) 一枚板のせん断押抜き試験

本研究では、PBLの特徴でもある有孔鋼板の内部に位置するコンクリートのせん断破壊を対象とした FEM による検討を実施する。そこで、図-1(a)に示すような中島らが実施した一枚板のせん断押抜き試験⁷⁾を解析対象とした。この試験は、コンクリートブロック側面からジベル方向に一定の拘束力を与えた上で、ジベル孔内部のコンクリートのせん断破壊によって耐荷性能が決まる試験である。供試体は、鋼板の板厚方向に平行な側面に隣接するコンクリートのかぶりをなくし、ジベル孔内部のコンクリートのみで連結されている。なお、本解析ではコンクリートブロック側面からの拘束力は 5,50kN の場合に着目した。この試験の特徴として、側面から供試体を拘束することでジベル孔以外の変形を抑制しており、外部からの一定の拘束力による影響が顕著に表れた結果が得られている。

b) CT 鋼を用いたせん断押抜き試験

ジベル孔周辺のコンクリートブロック（上かぶり）や底面摩擦が PBL のせん断耐力に与える影響を検討するため、図-1(b)に示す藤井らが実施した CT 鋼を用いた押抜きせん断試験⁸⁾に着目した。試験体は CT 鋼の両側に溶接された有孔鋼板がジベル孔内部のコンクリートにより埋め込まれており、頭付きスタッドの押抜き試験方法に準じたものである。特徴として、(1a)の試験に比べて、供試体に対して強制的な拘束は少なく、底面摩擦の変化によるコンクリートブロックの影響にジベル孔のせん断耐荷性能が大きく左右される結果が得られている。

c) 各試験体寸法

各試験における試験体寸法を表-1 に示す。ジベル孔

径は両試験体とも 60mm、ジベル板厚は 12mm である。また、ジベル孔外のコンクリートブロックに対して貫通鉄筋や補強鉄筋なども本対象試験では含まれていない。

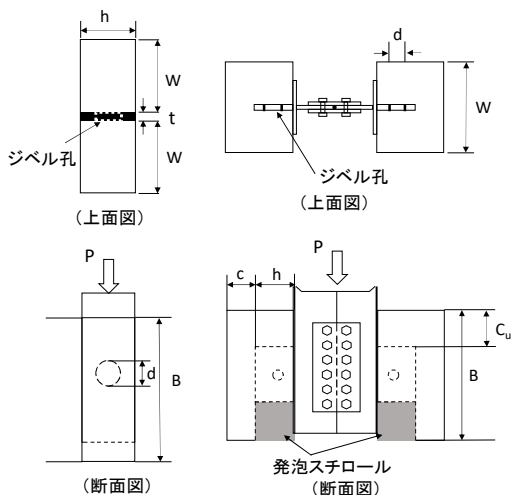
(2) 解析ケースとモデル

a) 解析ケース

(1)で述べた 2 種類の試験に対する解析ケースを表-2 に示す。2 種類の解析対象に対して、ジベル孔界面のモデルとして孔内外コンクリートを連続体として処理したケース、ジベル孔内外コンクリート間にせん断破壊を模擬したずれ要素を導入したケース、さらにずれ要素に静水圧の影響を考慮したケースの 3 種類用意した。なお、一枚板の押抜きせん断試験では 2 種類の拘束圧を作用させており、CT 鋼を用いた押抜きせん断試験ではジベル孔の上かぶりと底面摩擦の有無による検討を行っている。解析ケース名 P-ZV-MDP-SP50 の場合、拘束圧が 50kN 作用した一枚板押抜きせん断試験を対象に静水圧を考慮したずれ要素と降伏基準に MDP を用いた解析を意味する。

b) 解析モデル

本稿に用いた解析モデルは有孔鋼板、コンクリートともに 8 積分点を有した 3 次元ソリッド要素によりモデル化し、対称性を考慮した 1/4 モデルで解析を実施した。なお、汎用解析ソフトウェア MSC.MARC を用いた。解析モデルの一例を図-2 に示す。この図より、境界条件として側面からの拘束圧や底面摩擦などは剛体面との接触により処理し、ジベル鋼板には強制変位を鉛直方向に与えた。なお、CT 鋼を用いた解析では底面の摩擦係数を低減したケースで 0.15 と低減していないケースで 0.5 とした。要素寸法に関して、板厚との接触による影響も考慮し、ジベル孔内部ではジベル板厚方向に対して最小要素長を 2mm とした。一枚板を対象とした解析モデルの要素数は約 4600 個、CT 鋼を対象とした解析モデルの



(a) 1 枚板押抜き (b) CT 鋼を用いた押抜き
図-1 解析対象

表 - 1 各試験体寸法

種類	供試体名	ジベル			コンクリート		かぶり		貫通鉄筋径	補強筋・フレーム筋	側圧
		d	t	h	B	W	c	c _u			
		mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm			
1枚板押抜き	S-P-B0-U0-N	60	12	120	300	300	0	0	無	無	有
CT鋼押し抜き	S-B100-U0-N-T	60	12	150	520	400	100	0	無	無	無
	S-B100-U120-N-T	60	12	150	520	400	100	120	無	無	無

表 - 2 解析ケース

ケース名	解析対象	ジベル孔界面の処理	降伏基準	備考
P-N-VM	一枚板(P)	連続体(N)	VM	拘束圧有り (5kN : SP5,50kN : SP50)
P-N-MDP			MDP	
P-Z-MDP		ずれ要素(Z)	MDP	
P-ZV-MDP		ずれ要素(静水圧を考慮)(ZV)		
CT-N-MDP	CT鋼(CT)	連続体(N)	MDP	上かぶり(無し:u0, 120mm:u120), 底面摩擦の有無(f)
CT-ZV-MDP		ずれ要素(静水圧を考慮)(ZV)		

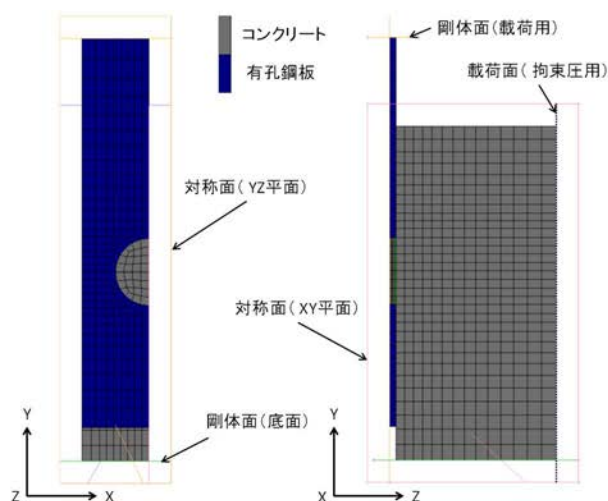


図-2 解析モデルの一例

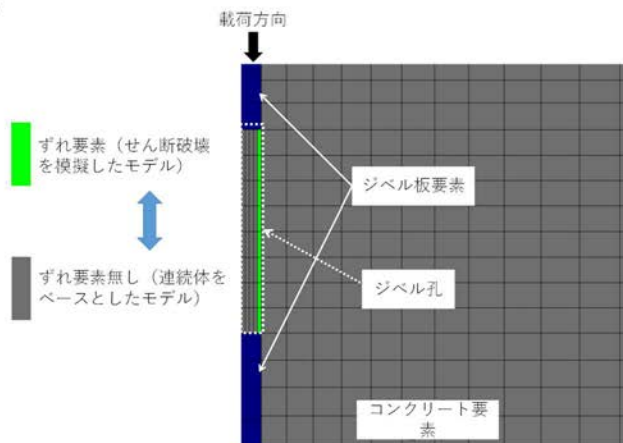


図-3 界面処理方法

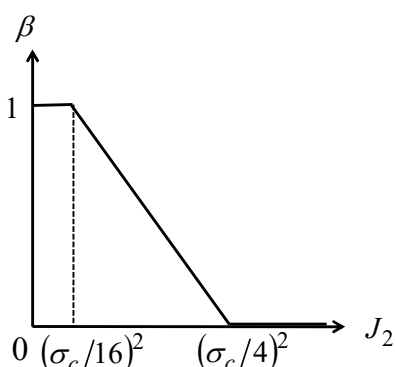


図-4 低減率 - 偏差応力の2不変量

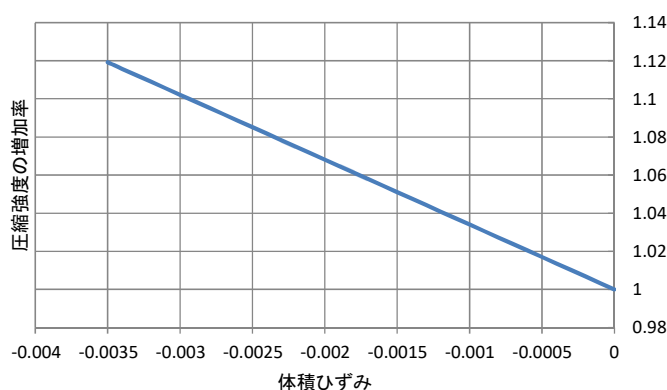


図-5 圧縮強度増加率－体積ひずみ

要素数は18000個である。

次に、a)で紹介した2種類の界面処理方法に関するモデルを図-3に示す。1つ目のモデルは、ジベル孔内外コンクリートの要素間で節点を共有した一般的な離散化モデルである。このモデルは幾何学形状の観点からせん断破壊に対する工夫は行わず、材料特性モデルのみでコンクリートのせん断破壊を表現する。2つ目のモデルは、ジベル孔内外コンクリートの要素間にコンクリートの特性を有した等方弾性体要素（以後、ずれ要素）を配置することでせん断破壊を模擬したモデル⁹⁾である（図-3を参照）。このモデルでは有孔鋼板との接触による計算は考慮せず、Leonhardtらによる設計耐力式¹⁾に基づき偏差応力とコンクリートの圧縮強度を関連付け、偏差応力の2次不変量に伴いせん断弾性係数を低減することでせん断破壊を表現する。本解析で使用した低減係数－偏差応力の2次不変量の関係を図-4に示す。なお、詳細な決定方法に関しては省略する。また、拘束圧による影響を考慮するため、鈴木らが実施した荷重速度の異なるコンクリートの圧縮強度試験¹⁰⁾によるコンクリートの圧縮強度の増加率と体積ひずみの関係に着目し、図-5に示すコンクリートの圧縮強度が静水圧の状況に応じて変化する

特性を考慮したモデル（以後、ZVモデル）も検討する。コンクリートの圧縮強度の増加率と体積ひずみの関係を図-5に示す。

(3) 材料特性

a) コンクリートの降伏基準と損傷表現

コンクリートの材料特性として用いた力学モデルについて、本研究では2種類の降伏基準に着目した。1つ目はRC梁を対象とした既往の解析で妥当性が確認されており、主に鋼材に使用されているVonMisesの降伏基準（以後、VM）である。2つ目は著者らが以前に提案したキャップ付き修正Drucker-Pragerの降伏基準^{7,8)}（以後、MDP）である。上記の各降伏基準について、偏差応力の2次不変量－静水圧の関係を図-6に示す。これらより、前者は静水圧依存性を無視した1パラメータで表現した降伏基準、後者は静水圧の状況に応じて降伏強度が変化し、さらにダイラタンシーを抑制するための平面キャップを有した降伏基準である。コンクリートのひび割れ評価に関しては、MDPモデルにおいて著者らが既往の研究より導入済みである主ひずみに応じた異方性損傷⁹⁾を適用した。圧縮側に関しては、低側圧下の3軸圧縮

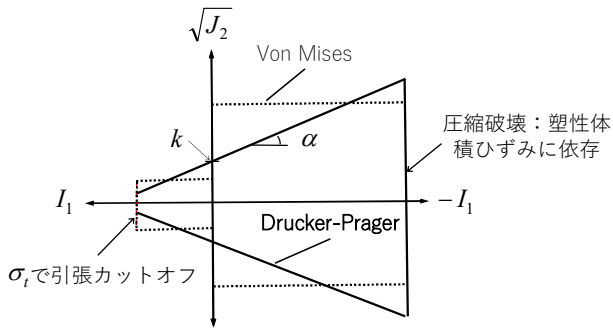


図-6 本研究で使用する各降伏基準

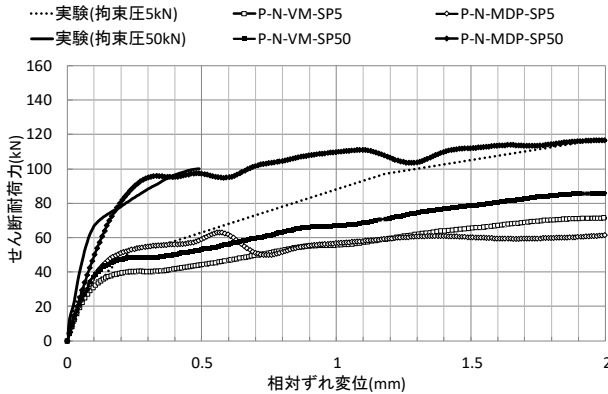


図-7 せん断耐力カー-相対ずれ変位（降伏基準別）

試験に関する既往の研究に基づき、図-6 に示すキャップ位置に関連する塑性体積ひずみの閾値や応力の軟化を感度解析に基づいて考慮した。なお、本解析で用いるMDPモデルでは摩擦角 ϕ は25度とし、 α と k はそれぞれ0.47と2.52である。ここでは、引張破壊と圧縮破壊に関する詳細は割愛する。

b) 各材料の応力-ひずみ関係

コンクリートでは前述した2種類の降伏基準とも引張強度以降は破壊エネルギーと最小要素長の影響を考慮した上で、応力を解放し軟化を表現した。圧縮側に関しては、降伏強度以降に剛性が0となる完全弾塑性型とした。一方で、鋼材は降伏基準をVMとし、降伏後は初期剛性の1/100で硬化する等方的なバイリニア型を設定した。なお、CT鋼を用いた試験での鋼材は弾性体とした。各種材料定数を表-3に示す。

3. 解析結果

(1) 一枚板の押抜きせん断試験

a) せん断耐力カー-相対ずれ変位

せん断耐力カー-相対ずれ変位に関して、降伏基準で比較したものを図-7に示す。なお、初期剛性から顕著に低下が見られた箇所を本研究では降伏せん断耐力力と称した。この図より、実験の降伏せん断耐力力に対して拘束圧5kNのケースではVMモデル、MDPモデルともに

表-3 本研究で使用了各降伏基準

解析対象	材種	弾性係数 (Gpa)	強度 (引張) (MPa)	降伏強度 (MPa)	ポアソン比
一枚板 押抜き	コンクリート	26.5	32.5(3.3)	—	0.17
	鋼材	210	441	354	0.3
CT鋼 押抜き	コンクリート	25.6	34.7(2.8)	—	0.17
	鋼材	200	—	—	0.3

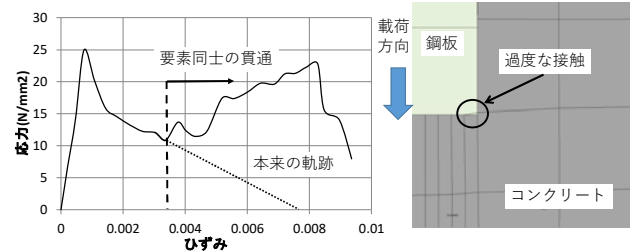
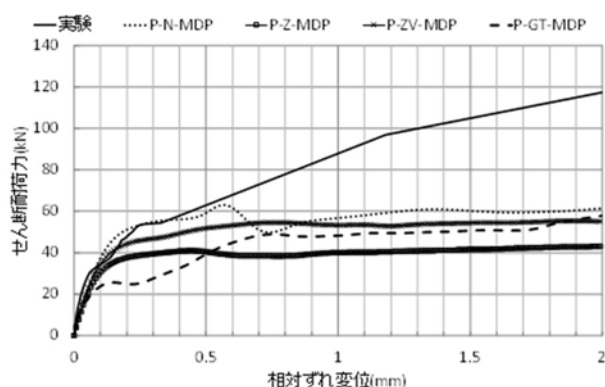


図-8 要素の貫通による影響

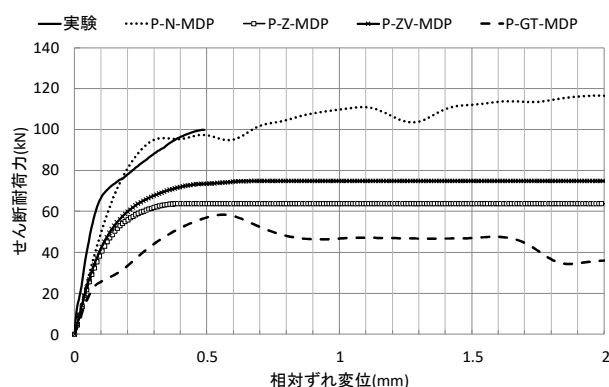
概ね良好な結果が得られた。一方で、拘束力が高い50kNケースではMDPモデルの方がVMモデルに比べて実験値に近い結果となった。初期剛性に関しては、解析の方が実験に比べてやや小さい。この理由として、解析では一枚板とコンクリートブロック間での摩擦を完全に無視しているのに対して、実験では側圧の影響により摩擦が多少なり生じていると考えられる。

降伏せん断耐力力以降の傾向について実験と解析で比較すると、拘束圧5kNのケースでは実験によると相対ずれ変位0.5mmまでにジベル孔のせん断破壊が見られており、その後はジベル孔界面の摩擦力により耐力が増加している。一方で、VMモデル、MDPモデルともに実験と似た勾配で荷重が一見増加しているが、解析ではせん断界面を連続体として処理しているため、図-8に見られるような相対ずれ変位が約0.5mm付近で有孔鋼板の要素とジベル孔内部のコンクリート要素との貫通が見られた。そのため、本解析モデルでは応力の軟化と過度な接触力により過剰な応力の増加を引き起こすし、全体応答波形が振動する可能性がある。よって、本解析モデルを用いたP-Nシリーズの適用範囲としてずれ変位0.5~1mm程度までの降伏せん断耐力力なら弾塑性解析でも評価可能であると判断した。

次に界面処理方法による影響について、拘束圧別に実験と解析で比較したせん断耐力カー-相対ずれ変位を比較したものを図-9に示す。図-9(a)より、実験とP-Zシリーズで比較すると実験の降伏せん断耐力力に対して解析結果は全体的に小さい結果となった。P-Z-MDPとP-ZV-MDPで比較すると、P-ZV-MDPの方が実験と近い降伏せん断耐力力が見られており、体積ひずみによる強度増加の影響を考慮することが有用であると言える。これらのモデルは降伏せん断耐力力以降も安定した波形が得られ



(a) 拘束圧 5kN の場合



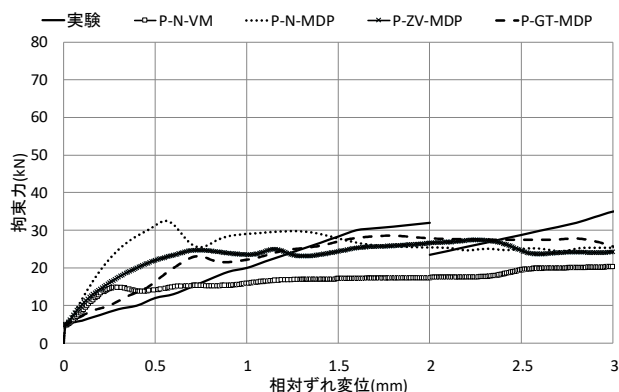
(b) 拘束圧 50kN の場合

図-9 せん断耐力-相対ずれ変位 (界面処理別)

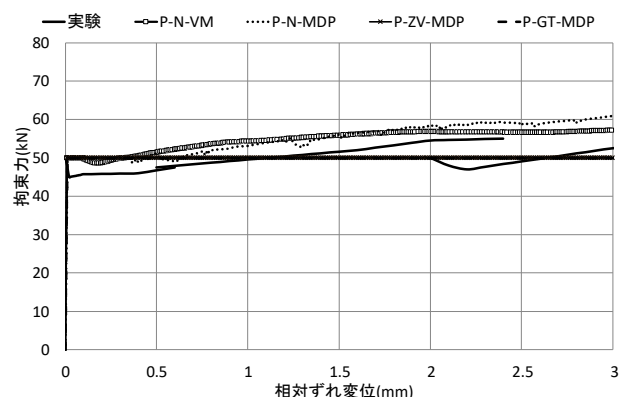
ている。しかし、実験結果のように降伏せん断耐力以降の摩擦現象を偏差応力に基づきせん断破壊のみでは適切に評価できていないことも認められる。図-9(b)について実験と P-ZV-MDP モデルにおける初期剛性や降伏せん断耐力を比較すると図-9(a)に比べて差異が大きいことが分かる。これは、P-ZV-MDP に使用したモデルは体積ひずみに基づき偏差応力の閾値が変化するものの、設定した最大偏差応力に基づき頭打ちしていることから実験よりもせん断破壊エネルギーを過小に評価したものと考えられる。

b) 拘束力-相対ずれ変位

拘束圧別に実験と各界面処理モデルの拘束力-相対ずれ変位を比較したものを図-10 に示す。なお、拘束力は側圧を作用させた剛体面の接触力により算出した。図-10(a)から分かるように、実験結果に対して解析では全体で初期剛性が最大で2倍近く大きいことが確認できる。この原因として、特に MDP モデルによる押し広げ力は静水圧に依存していることから実験よりも高く評価している可能性がある。次に(b)について実験と解析で比較すると、実験では拘束力が一度低下した後に荷重が徐々に増加していくのに対して、解析では拘束力の低下はあまり表れなかった。これは、载荷と同時に実験におけるコンクリートブロックがジベル孔内部のコンクリート方



(a) 拘束圧 5kN の場合



(b) 拘束圧 50kN の場合

図-10 拘束力-相対ずれ変位 (界面処理別)

向に引き寄せられていく現象を解析の方が剛性に評価しているためと思われる。

c) 各モデルによる破壊性状

P-N-MDP-SP5 と P-ZV-MDP-SP5 による破壊性状として、降伏せん断耐力時における最大主ひずみを図-11 に示す。この図より、ジベル孔上部付近における孔内外コンクリートの要素がひび割れに相当するひずみに達していることが両モデルで確認できる。しかし、ジベル孔の中心から下部の領域では P-N-MDP モデルではひび割れに相当する最大主ひずみが見られていないが、P-ZV モデルではせん断破壊による最大主ひずみが表れていることが確認できる。よって、P-ZV モデルの方がせん断破壊の破壊性状を良好に評価できていると言える。しかし、前述したように摩擦の影響は反映されておらず、今後の課題である。

d) 各提案モデルによる留意点

上記の a)-c)の結果を踏まえて、本研究で用いたモデルの留意点について以下に記述する。まず V-N シリーズのモデルによる適用範囲は、一要素長と押し込み量、ジベル孔径の兼ね合いにもよるが、本検討ではずれ変位が小さい領域 (約 0.5~1mm) での降伏せん断耐力は評価可能であることを確認した。次に降伏基準による比較では、拘束力が小さい場合には VM モデルと MDP モデル

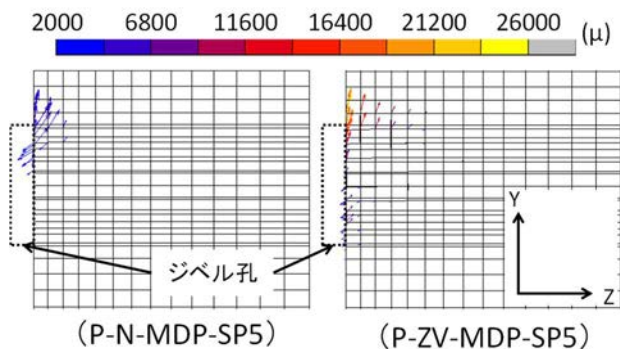


図-11 降伏せん断耐力時の最大主ひずみ

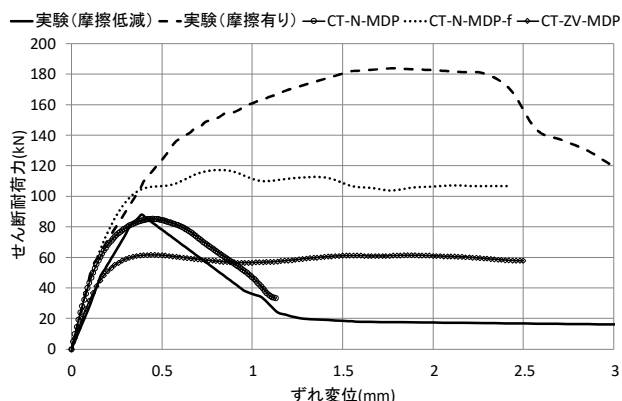


図-13 せん断耐力ーずれ変位（上かぶり 120mm）

ともに降伏せん断耐力を評価できる可能性が高い一方で、拘束圧が高い場合には一般的な VM モデルでの評価は困難であることを確認した。ここで、有孔鋼板と最初に接触する要素における最大相当応力時における偏差応力の 2 次不変量ー静水圧の関係を各モデル別にまとめたものを図-12 に示す。この図より、本検討で用いた 2 種類の降伏曲面の交点である一軸圧縮点を境に VM モデルと MDP モデルが左右に分かれている。本検討における MDP モデルによる応力場が適切と仮定した場合、一定の外部拘束圧下におけるジベル孔のせん断破壊で耐荷性能が決まる実験では静水圧の影響を考慮可能なモデルが望ましい。また P-Z シリーズのようなせん断破壊を模擬したモデルを用いる場合、二面せん断破壊以外のせん断破壊も含めて統一的に静水圧による影響を適切に考慮する必要があることを確認した。最後に、実験では拘束圧による影響によりせん断破壊面の凹凸が変化しており、せん断破壊後の摩擦現象を解析で適切に評価するためにはせん断破壊による膨張や粗骨材の影響なども含めて破壊面の凹凸を考慮できるモデルを構築する必要がある。

(2) CT 鋼を用いた押抜きせん断試験

a) 底面摩擦による影響

底面摩擦の影響に関して、上かぶりが 120mm のケースで実験と解析によるせん断耐力ーずれ変位関係を図

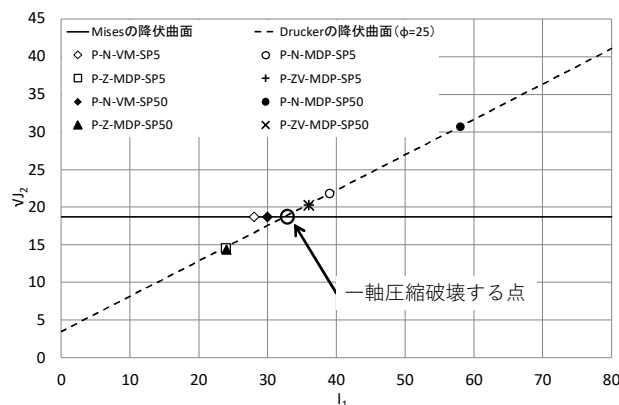


図-12 偏差応力の 2 次不変量ー静水圧（各モデル別）

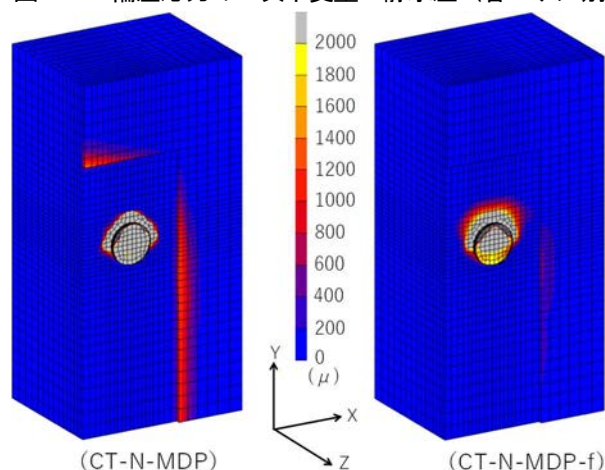


図-14 最大主ひずみ分布（摩擦の影響別）

ー13 に示す。なお、(1)の結果も踏まえて本節では降伏せん断耐力時までを比較・考察する。この図より実験と解析で比較すると、底面摩擦を低減させた場合に解析の方が実験に比べて初期剛性は高いが、降伏せん断耐力力は CT-N-MDP で良好に評価できている。CT-ZV-MDP では、(1)の一枚板の押抜きせん断試験と同様に、実験値を過小評価する結果となった。これは、静水圧による影響を考慮しているものの、二面せん断破壊を仮定した低減係数によるせん断剛性の低下の影響が支配的であるためと考えられる。次に、底面摩擦の影響について実験と解析で比較すると、底面摩擦が生じることで降伏せん断耐力力とずれ変位が増加する傾向は同様の傾向が得られた。しかし、降伏せん断耐力力を比較した場合、実験では約 2 倍、解析 (CT-N-MDP) では約 1.3 倍と両者で大きな乖離が生じた。この理由に関しては後述する。

次に、破壊性状として CT-N-MDP、CT-N-MDP-f のケースにおける降伏せん断耐力時のコンクリートの最大主ひずみ分布を図-13 に示す。この図ではひび割れが想定される領域を灰色とした。この図より、ジベル孔近傍以外に上かぶり部と背かぶり部における最大主ひずみ分布が高く、CT 鋼を用いた押抜きせん断試験の破壊性状であるジベル板面に平行なひび割れを示唆している。

b) 上かぶりによる影響

ジベル孔上部に位置する上かぶりの影響について実験とCT-N-MDPシリーズで比較したものを図-15に示す。この図より、上かぶりの影響について実験では約30kNの差があるのに対して、解析では約10kNの差となっている。これは、図-13に示す最大主ひずみ分布の上かぶり部分に引張領域が表れており、PBLの耐荷性能に影響を与える領域であることから解析にも実験と同様の定性的な傾向が表れたものと思われる。しかし、上かぶりによる降伏せん断耐荷力は実験と解析で約3倍もの差異が生じる結果となった。

c) コンクリートブロックの変形性状

ここでは、実験とCT-N-MDPにおける背かぶり部コンクリート表面のひずみについて比較する。荷重ごとにジベル孔からの距離-ひずみの関係をまとめたものを図-16(a), (b)に示す。これらの図から、せん断耐荷力が増加するにつれて背かぶり部のひずみも増加している傾向は実験・解析ともに得られていることが確認できる。しかし、ジベル孔からの距離で比較した際、ジベル孔より上部(+)の位置では実験と解析で比較的近い値となっているが、ジベル孔より下部(-)の位置によるひずみでは解析値が実験値よりも明らかに小さいことが分かる。つまり、解析の方が背かぶり部における圧縮度合いが小さいことが推測される。

次に、解析における底面摩擦が変形性状に与える影響について把握するため、コンクリートブロック上面から

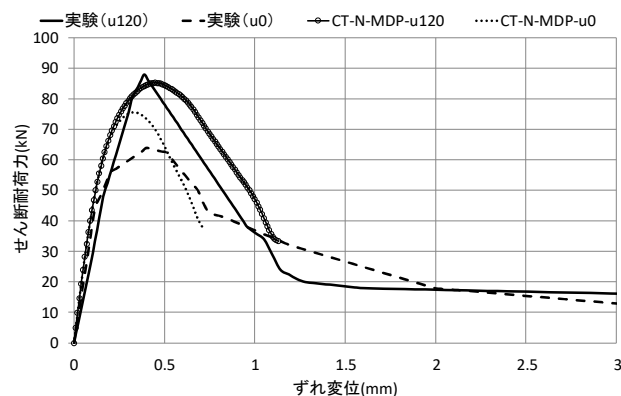


図-15 せん断耐荷力-ずれ変位（上かぶりによる影響）

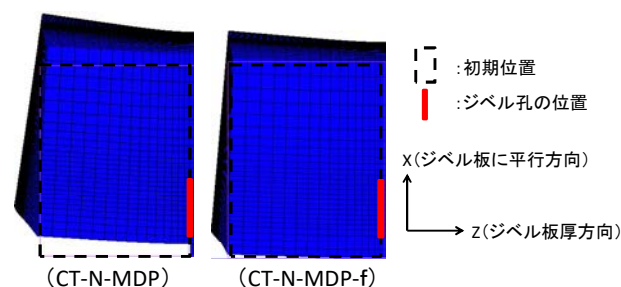
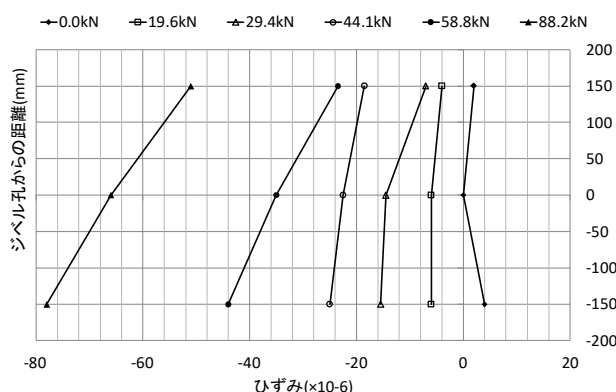


図-17 水平変位の変化状況（変形倍率 1000 倍）

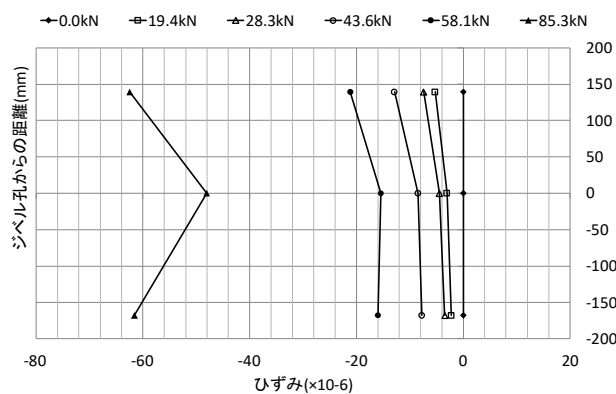
見た CT-N-MDP と CT-N-MDP-f のケースによる同時刻（CT-N-MDP の降伏せん断耐荷力時）の水平変位の変化状況を図-17に示す。なお、これらの図は変形倍率を1000倍とした。これらの図から、まずCT鋼を押抜くことでジベル孔側のコンクリートは板厚方向に広がろうとすると同時に背かぶり側は圧縮されていることが分かる。CT-N-MDP と CT-N-MDP-f で底面摩擦による影響を比較すると、CT-N-MDP-fの方がCT-N-MDPよりも変形量が小さい一方で、両ケースともジベルの板厚方向よりも板面に平行な方向に変形量が大きいことが図-17より見てとれる。つまり、CT-N-MDP では板面方向への拘束力が卓越していることが予測される。そのため、底面摩擦の影響に関して解析の方が実験よりも小さい結果となったと考えられる。ジベル板厚方向よりもジベル板面に平行な方向に変形量が大きくなった原因については次項で推察する。

d) 本解析における留意点

a)-c)までの結果、さらに(1)の一枚板の押抜きせん断解析結果も踏まえて本解析モデルの留意点を以下に記述する。連続体処理をベースとしたMDPモデルでは底面摩擦を考慮しない場合における降伏せん断耐荷力-ずれ変位の関係を良好に評価可能であることを確認した。ただ



(a) 実験（底面摩擦を低減したケース）



(b) 解析（CT-N-MDP）

図-16 背かぶり部コンクリート表面のひずみ

し、上かぶりの無い u_0 シリーズでは実験に比べて過大評価する結果となった。さらに、底面摩擦による影響に関する検討では、底面摩擦を低減した場合には実験の降伏せん断耐荷力を良好に評価できたのに対し、底面摩擦がある場合には実験の降伏せん断耐荷力を過小評価する結果となった。これらの結果を踏まえて原因を推察すると、本研究で用いた MDP モデルでは CT 鋼を用いた押抜きせん断解析における押し広げ力を過小評価している、もしくはコンクリートブロックを過大評価している可能性が高く、その影響によりコンクリートブロックのジベル板厚方向への変位量が小さくなったものと考えられる。つまり、背かぶり側が圧縮となる曲げ挙動や上かぶりによる影響も抑制され、コンクリートブロック底面の变形に依存する底面摩擦による拘束力もコンクリート内部に作用しなかったと考えられる。これは、本研究で用いた MDP モデルが塑性体積ひずみ-静水圧を考慮した単純平面キャップを導入することでダイラタンシーを制御し、低側圧下における 3 軸圧縮応力場を評価するモデルであることに起因する。よって、(I)の一定の側圧下における一枚板の押抜きせん断解析ではコンクリートブロック曲げによる影響も少なく、ジベル孔では一定側圧下における平面ひずみ状態に近い状態のため、異なる側圧下における降伏せん断耐荷力を良好に評価できたと思われる。様々な PBL 接合部の耐荷性能を適切に評価するために、DP モデルを使用する際の重要なファクターである摩擦角や硬化による影響についても今後検討していく必要がある。

4. 結論

本研究では、異なる拘束力が作用する PBL 接合部に着目し、提案モデルを用いた FEM によるジベル孔のせん断耐荷性能に関する妥当性や適用範囲について検討した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) ジベル板厚方向に一定の拘束圧が作用する一枚板の押抜きせん断解析では、高い拘束条件下で VM モデルよりも提案した MDP モデルが有用であることが認められた。また、せん断破壊面を連続体として処理した場合、ずれ変位が小さい領域における降伏せん断耐荷力時が本解析における適用範囲であることを確認した。
- 2) 孔内外コンクリート要素間にせん断破壊を模擬したずれ要素を導入したモデルでは、静水圧を考慮することの有用性が認められた。さらに連続体として処理したモデルよりもずれ変位が大きい領域まで安定して評価できることを確認した。
- 3) CT 鋼を用いた押抜きせん断解析では、底面摩擦が無い場合には連続体として処理したモデルで実験の降伏

せん断耐荷力を良好に評価できることを確認した。しかし、コンクリートの変形性状はジベル孔より下部の背かぶり部で実験と解析で差異が生じる結果となった。

- 4) CT 鋼を用いた押抜きせん断解析による上かぶりと底面摩擦による影響について実験と同様の定性的な傾向は得られているものの、降伏せん断耐荷力には乖離が生じることを確認した。
- 5) 本研究で使用した MDP モデルに関して、拘束圧が作用する条件下では平面ひずみに近い状態やコンクリートブロックの变形に伴う拘束力（摩擦力）が影響しない場合に適用可能であることを確認した。

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) 公益社団法人土木学会複合構造委員会：複合構造標準示方書，丸善出版，2009.
- 3) 公益社団法人土木学会複合構造委員会：複合構造レポート 10 複合構造ずれ止めの抵抗機構の解明への挑戦，丸善出版，2014.
- 4) 中島章典，池川真也，山田俊行，中島純平，阿部英彦：ずれ止めの非線形挙動を考慮した不完全剛性析の弾塑性解析，土木学会論文集，No.537/I-35，pp.97-106，1996.
- 5) 宗本理，園田佳巨，奥石正己：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，コンクリート工学年次講演会論文集，Vol.35，No.2，pp.1243-1248，2013.
- 6) 宗本理，園田佳巨：PBL 接合部の耐荷性評価法に関する基礎的研究，構造工学論文集，Vol.60A，pp.838-847，2014.
- 7) 中島章典，橋本昌利，NGUYEN MINH HAI，鈴木康夫：貫通鉄筋の無い孔あき鋼板ジベルのせん断抵抗機構とせん断耐力評価，土木学会論文集 A1，Vol.70，No.537，II20-30，2014.
- 8) 藤井堅，岩崎初美，深田和宏，豊田正，藤村伸智：孔あき鋼板ジベルの終局ずれ挙動とコンクリート拘束因子，土木学会論文集 A，Vol.64，No.2，pp.502-512，2008.
- 9) 宗本理，園田佳巨，奥石正己，中山賢司：貫通鉄筋を有する孔あき鋼板ジベルの非線形解析，土木学会第 67 回年次学術講演会講演概要集，pp.31-32，2012.
- 10) 鈴木澄江，小山善行，陣内浩，早川光敬：圧縮強度試験における荷重速度がコンクリートの圧縮強度と変形性状に及ぼす影響に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，第 74 巻，第 636 号，pp.201-207，2009.
- 11) 本間仁，安芸皓一：物部水理学，pp.430-463，岩波書店，1962.

(Received August 30, 2019)

A STUDY ON QUANTITATIVE SHEAR STRENGTH EVALUATION OF PERFOBOND STRIP SHEAR CONNECTORS FOR FEM

Satoru MUNEMOTO, Moriaki SUZUKI and Yoshiyuki SHIMAGUCHI

In this paper, we conducted static push-out simulations of perfobond strip shear connectors(PBL) under different confined pressure using FEM, and validated the utility of proposed models in terms of their static strength and failure mechanism. In particular, this study is focused on the influence of exterior constraints and bottom friction to shear strength. As to proposed models, the Drucker-Prager criteria with plane cap model(MDP model) and damage concept caused by compression fracture were applied. Moreover, in order to express shear fracture, slip elements with hydrostatic pressure dependency of concrete were also introduced as isotropic elastic body. As a result, we confirmed there are utilities and limitations to proposed model for static strength evaluation of PBL under confined pressure.