# 論文 ずれ止めを複数配置した鋼板の引抜き耐荷挙動に関する研究

篠崎 裕生\*1·三上 浩\*2·牧 剛史\*3

要旨: せん断力作用方向に複数のずれ止めを配置した鋼板をコンクリートブロックから引抜く試験と, ずれ 止めを非線形ばねでモデル化した FEM 解析を実施して, その耐荷挙動やずれ止めに発生するせん断力の分布 を検討した。対象としたずれ止めは, 孔あき鋼板ジベルと頭付きスタッドである。引抜き試験では, 載荷点 に近いかぶりの小さい位置のずれ止めはコンクリート表面の損傷の影響を大きく受けること, 引抜き荷重の 増加にともない各位置のずれ止めに発生するせん断力の差が小さくなる傾向にあることなどを明らかにした。 また, ずれ止めの位置に応じて異なる非線形ばねを設定した FEM 解析により, 比較的精度良く引抜き挙動を 再現できることを確認した。

キーワード: 孔あき鋼板ジベル, 頭付きスタッド, 引抜き試験, 発生せん断力

# 1. はじめに

せん断力の伝達方向に複数のずれ止めが配置された 場合に,各ずれ止めに発生するせん断力を知ることは接 合構造の合理的な設計をする上で重要である。しかし, 実務設計においては,平均せん断力で評価したり,作用 せん断力を割増しして設計しているのが現状である。ま た,例えばずれ止め方式による鋼合成桁と PC 桁の接合 構造<sup>11</sup>や,鋼上部工と RC 橋脚の接合などにおいて,ず れ止めを設置した鋼部材がコンクリートから引抜かれ るような力を受けた場合,引抜き側のコンクリートの被 りが小さいと,その損傷によりずれ止めが十分なせん断 耐力を発揮できないことが考えられるが,このような視 点からの検討が十分行われているとは言い難い。

従来からの押抜き試験を基に検討した例としては、中 島ら<sup>2)</sup>が、せん断力作用方向に最大3個の孔あき鋼板ジ ベルを配置した試験を実施し, 各ジベルに発生するせん 断力を検討している。しかし、載荷時のコンクリートブ ロックの動きにより各ジベルの拘束の程度が異なるこ とや、境界条件が与える影響が大きいことを指摘してお り、これらの影響がない場合に各ジベルに発生するせん 断力を検討するには至っていない。建築構造物における 鉄骨部材の接合に, 直列に配置された孔あき鋼板ジベル を利用した研究<sup>3)</sup>では、せん断力作用方向に最大4個の ジベルを配置した引抜き試験を実施している。試験の結 果, 載荷点に近い位置のジベルから順にせん断力に抵抗 しはじめること、また、ジベルの位置によって破壊形式 やせん断耐力が異なっていることなどを指摘している。 また、載荷点に近い位置のジベルのせん断耐力は Leonhardt<sup>4)</sup>による計算値を下回ることを確認しているも のの,具体的なせん断耐力の設定方法は提案されておら

ず、また、解析的な検討も行っていない。

本研究は、孔あき鋼板ジベルと頭付きスタッド(以下、 スタッド)について、最大9段のずれ止めが配置された 鋼板をコンクリートブロックから引抜く試験を実施し て、その耐荷挙動と各ずれ止めに発生するせん断力の分 布を明らかにしようとするものである。各ずれ止めに発 生するせん断力については、ずれ止めを非線形ばねでモ デル化した FEM 解析と試験結果との比較によりその妥 当性を検証した上で、解析値を用いて比較検討すること とした。FEM 解析においては、ばねに入力するずれ止め のせん断力ーずれ変位関係は、試験結果を基にずれ止め の位置に応じてその特性を変えるとともに、同じ非線形 ばねで鋼板面の付着作用も考慮した。

## 2. 試験の概要

引抜き試験の模式図を図-1 に示す。1000×1000× 600mm のコンクリートブロックにずれ止め鋼板を埋込



図-1 試験体の概要

\*1 三井住友建設(株)技術開発センター土木 PC グループ 工博 (正会員) \*2 三井住友建設(株)技術開発センター 工博 (正会員) \*3 埼玉大学大学院理工学研究科 准教授 工博 (正会員)



図-2 試験体形状寸法(孔あき鋼板ジベル)

み、2箇所に離して配置したジャッキを用いて引抜き荷 重を与える。コンクリートブロックを比較的マッシブに することで、かぶりの小さいずれ止め以外はコンクリー トの損傷や拘束の度合いの影響を受けないよう配慮し た。また、2箇所のジャッキを800mm、ジャッキプレー ト内寸で 600mm 離して配置することで、少なくともコ ンクリート表面から 300mm の位置のずれ止めから生じ るコーン破壊(45°の破壊面を仮定)は阻害することが ないよう配慮した。コンクリートブロックは、D19の鉄 筋で補強した。鉄筋はかぶり 40mm で、100mm 間隔の格 子状に配置した。ブロック上面で試験体と鉄筋が交差す る部分では、試験体手前で鉄筋を折り曲げて鋭角フック で定着した。

図-2 に孔あき鋼板ジベル試験体の形状寸法を示す。 孔あき鋼板ジベルは,孔径 35mm で貫通鉄筋に D10 を用 いた。貫通鉄筋の定着長さは片側に 30D (D は鉄筋直径) とした。P1T, P1B 試験体は,ジベルをかぶりの小さい 位置と大きい位置にそれぞれ1個配置したもので,配置 位置の影響を確認する。P3 と P6 試験体は,せん断力作 用方向にそれぞれ3個,6個のジベルを配置したもので ある。P3-2は,せん断力作用方向に3個で2列に配置し た試験体である。

図-3 にスタッド試験体およびずれ止めがない試験体の形状寸法を示す。スタッドは、軸径 8mm,長さ 60mmの特注品で、既製品である軸径 φ 16mmのスタッドの形状寸法を正確に 1/2 にしたものである。本スタッドは別途、寸法効果確認試験を実施しており、φ 16mm スタッドの耐力のほぼ 1/4 (寸法比の 2 乗)になることを確認している <sup>5)</sup>。試験体は、かぶり 75mm に 1 段(両面で 2



図-3 試験体形状寸法(スタッドおよび付着確認用)

表-1 鋼材の材料特性値

試験体	降伏強度	引張強度	弾性係数
	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
鋼板 t=12(SM490Y)	512	640	207100
鉄筋 D10(SD345)	386	546	195500
スタッドφ8mm	366	482	

本) 配置した S1 試験体と, せん断力作用方向に9段(18 本) 配置した S9 試験体の2体とした。スタッドの中心 間隔は, 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編<sup>60</sup>に示されるス タッドの最小配置間隔である5×d(dはスタッド軸径) よりも大きい50mmとした。

鋼板の幅や厚さは、ずれ止め設置数が最も多い試験体 (P6, P3-2, S9)において、複合構造標準示方書<sup>の</sup>で計 算されるずれ止めの耐力に設置箇所数を乗じた値の引 張力を与えた時に鋼板が降伏するような大きさに設定 した。なお、鋼板表面の付着や摩擦を除去するような特 別な処理は施していない。

発生せん断力の分布を詳細に得るためには、鋼板表面の付着作用は無視できないと考え、ずれ止めがない鋼板のみの引抜き試験を鋼板の長さを変えて2種類実施した(図-3)。鋼材の材料特性値を表-1に示す。コンクリートの圧縮強度はS1,S9試験体が33.1N/mm<sup>2</sup>,それ以外の試験体が41.4N/mm<sup>2</sup>であった。

スタッドの引抜き試験において,スタッド単体のせん

断カーずれ変位関係を導くために実施した S1 試験体(ス タッド1 段配置)の結果が予想と異なりコンクリートが コーン破壊した。このため、別途実施していた押抜き試 験の結果を用いることとした。押抜き試験は、頭付きス タッドの押抜き試験方法(案)<sup>80</sup>に従って実施した。試 験体の形状寸法を図-4 に示す。使用したコンクリート は S1, S9 試験体と同じものである。H 形鋼フランジ表 面にはグリスを塗布している。ブロックの開き止めは設 置していない。載荷は一方向の単調載荷で、スタッドの 高さ位置でH形鋼とコンクリートブロックのずれを4箇 所計測し、その平均値をずれ変位とした。いずれの試験 体も抜出し変位あるいはずれ変位が一定の間隔で載荷 と除荷を1回ずつ繰り返した。

## 3. 試験結果

## 3.1 孔あき鋼板ジベル

図-5 に孔あき鋼板ジベル試験体の荷重と抜出し変位 関係の包絡線を示す。P1T 試験体は,抜出し変位 0.4mm で鋼板近傍のコンクリートの浮きが確認され,最大荷重 43.8kN に達したあと荷重は徐々に低下し,9mm でコー ン破壊した。P1B 試験体は,抜出し変位 0.7mm で荷重 104kN まで増加したあと,抜出しが顕著になり,16mm, 荷重 141kN で貫通鉄筋が破断して大きく荷重が低下し た。コーン破壊やひび割れは発生していない。

P3 試験体は,抜出し変位が 0.5mm で鋼板近傍のコン クリートの浮きが確認され,1.6mm で 213kN の最大荷重 を示した後,ほぼ一定の荷重を保持したまま鋼板からの 放射状のひび割れが増加するとともに,14mm で鋼板周 囲のコンクリートが広い範囲で浮き上がり荷重が大き く低下した(写真-1)。P6 試験体は,抜出し変位 0.4mm 程度からコンクリート表面の浮きが確認できた。その後, 400kN 付近から抜出し変位の増加が顕著となり,20mm で一部の貫通鉄筋が破断して荷重が低下した。P3-2 試験 体も同様に抜出し変位 0.4mm 付近でコンクリート表面 の浮きが観察され,その後 15mm で P3 と同様な広い範 囲でコンクリートが浮き上がり荷重が低下した。

試験後に P3, P3-2 試験体の浮き上がったコンクリート を除去して内部を観察した結果,図-6 に示すような破 壊面が形成されていた。抜出し変位 0.4~0.5mm で生じ た鋼板近傍のコンクリートの浮きは1段目のジベルから 生じている。抜出し変位 10mm 以上で生じたコーン破壊 は、2段目のジベル位置から生じていたことが分かった。 3 段目のジベルからの破壊面は生じておらず,孔内コン クリートのせん断破壊およびその位置での貫通鉄筋の 破断が生じたものと考えられる。

## 3.2 スタッド

図-7 にスタッド試験体の結果を示す。S1 試験体は,





図-5 荷重-抜出し変位の関係(孔あき鋼板ジベル)





抜出し変位が 1.5mm で 48.2kN の最大荷重を示した後に, コーン状のひび割れが発生して荷重が徐々に低下した。 スタッドは破断していなかった。89 試験体は抜出し変位 0.5mm 程度でずれ止め鋼板近傍から放射状にひび割れが 生じた。その後、4.5mmにおいて最大荷重 420kN を示し た時点で、鋼板からの放射方向のひび割れがコンクリー トブロック端まで達して荷重が低下した。図-7 にはス タッド押抜き試験の結果を併記した。S1 試験体との比較 のためスタッド 2 本分の荷重を表している。試験では、 ずれ変位が約 3.0mm で 40.9kN まで荷重が増加した荷重 が徐々に低下し、約 4mm でスタッドが破断して荷重が 低下した。S1 試験体よりも初期剛性や耐力が小さいのは、 押抜き試験では鋼板面の付着を除去しているためと考 えられる。

# 4. 解析

#### 4.1 解析の概要

非線形ばねによる解析モデルの概要を図-8 に示す。 ずれ止め鋼板を梁要素でモデル化し、ずれ止め位置の節 点において、ずれ止めのせん断力-ずれ変位関係をモデ ル化した非線形ばねを配置した。鋼板表面の付着作用に ついても、ずれ止めの配置間隔に相当する長さに相当す る分の特性を非線形ばねでモデル化して、ずれ止め位置 に並列に配置した。なお、付着ばねは、ずれ止め間の中 心に配置したとしてもずれ止めに生じるせん断力に大 きく影響しないことを確認している。

# (1)鋼板面の付着特性の設定

鋼板の付着作用を模擬したばねのせん断力ーずれ変 位関係は,鋼板のみの引抜き試験結果である N-90 試験 体の結果を以下の式(1), (2)で近似した曲線とした。

$$P = P_{\max} \times (1 - e^{-\alpha \times \delta})^{\beta} \qquad 0 \le \delta \le \delta_{P\max} \tag{1}$$

$$P = P_{\max} - \gamma \times (\delta - \delta_{P\max}) \quad \delta_{P\max} \le \delta \qquad (2)$$

ここに,  $P_{max}$ :最大荷重(kN),  $\delta$ :抜出し変位(mm),  $\delta_{pmax}$ : 最大荷重時の抜出し変位(mm),  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ は係数である。

検証のため、このばねを3箇所に設置したN-230試験 体の解析結果を図-9に示す。図にはN-90の試験結果と その近似曲線も示した。解析結果はN-230試験体の挙動 を比較的良好に再現している。なお、このばねをずれ止 めの付いた試験体の解析に適用する際には、付着力が鋼 板の大きさやずれ止めの間隔等の影響を受けず、鋼板の 表面積にのみ比例するとの仮定に基づいて、各ずれ止め 位置に分散させて配置することとした。

# (2) ずれ止めのせん断カーずれ変位関係の設定

解析で用いるずれ止め単体のせん断カーずれ変位関係は、鋼板面の付着の影響を除去したものを用いる必要がある。孔あき鋼板ジベルについては、鋼板長さの一致する P1T と N-90, P1B と N-230 の組み合わせで、それぞれの試験結果を式(1),(2)で近似し、その近似値同士を差し引いくことで付着の影響を除去した。P1B 試験体は、



図-7 荷重-抜出し変位の関係(スタッド)









図-10 せん断カーずれ変位関係(孔あき鋼板ジベル)

ずれ変位にジベル位置からコンクリート表面までの鋼 板の伸びが含まれているため、鋼板のひずみ計測値から 求めた伸び量を差し引いた値をずれ変位とした。なお、 厳密にはジベルのある鋼板とジベルのない鋼板ではず れ変位の分布形状が異なるため、単純な近似値の差し引 きでは誤差が含まれることとなるが、鋼板長がそれほど 大きくない点と得られたばね特性値の初期剛性を小さ く見積もる方向の誤差であるため、ここでは無視した。

得られた孔あき鋼板ジベル単体のせん断カーずれ変 位関係をまとめて図-10に示す。2段目のジベルについ ては,試験結果がないが,ここでは1段目と3段目の中 間的な特性を持つものと仮定し,伸び出し量が顕著にな る 2mm 程度までは3段目と同じ特性とし,その後はせ ん断力が変化しないような特性に設定した。

スタッドについては、3 段目よりかぶりの大きいもの については、押抜き試験を式(1)で近似したものを用いる こととした。最大荷重以降は、ずれ変位 10mm まで直線 的に低下するものとした。2 段目は、S1 試験体の結果の 近似値から付着作用を除去したものを用いた。1 段目に ついてはコンクリート表面から極めて近い位置にある ことから無視することとした。図-11 に設定したせん断 カーずれ変位関係を示す。



## 3.2 解析結果

## (1)荷重-抜出し変位の関係

図-12に P3, P3-2, P6 および S9 試験体の解析値との 比較を示す。解析値は,抜出し変位 1mm 程度までの領 域および全体の挙動は概ね良好に再現している。しかし, P6 試験体以外は,最大荷重や抜出し変位が 1~2mm を超 える領域の挙動との乖離が見られた。また,P3 試験体で は,比較的ずれ変位の小さな領域から乖離が大きくなっ ている。これは 2 段目のずれ止めのモデル化に問題があ った可能性がある。ずれ止めを模擬したばねの設定にお



いては、特に、大きなずれ変位が生じる領域において、 更なる改善が必要と考える。

## (2)ひずみ分布

図-13 は, P6, S9 試験体の鋼板のひずみ分布を解析 結果と比較したものである。それぞれ最大荷重の 1/6, 1/3, 2/3 の時点のひずみ分布で,解析結果はその傾向を 概ね良く再現していることが分かる。

## (3) ずれ止めに発生するせん断力

ずれ止めを模擬したばねの反力から,個々のずれ止め に発生するせん断力を検討した。図-14 は,P6,S9 試 験体の,抜出し変位 1mm までの各段のずれ止めに発生 するせん断力の推移を示したものである。図より,いず れも1段目のせん断力が最も大きく,2段目,3段目の 順に小さくなる傾向が見られた。抜出し変位の増加とと もに,各位置のせん断力の差は小さくなる傾向にあった。

図には、深さ方向の各ずれ止めに発生するせん断力の 最大値と最小値の差分を最大値で除したものを百分率 で併記した。抜出し変位の増加とともにその割合は急激 に低下し、0.4mm 程度で20%以下に低下していた。

ずれ止め前後の鋼板ひずみの差分からずれ止めに発 生するせん断力を求めた場合,値のわずかなばらつきが 結果に大きく影響するため,FEM で得られたような分布 や推移の傾向を見ることが難しい。今後は、より解析の 精度を向上させるとともに、汎用性の高い解析モデルの 構築を進めて行く予定である。

## 4. まとめ

複数のずれ止めを配置した鋼板の引き抜き試験およ びばねを用いた FEM 解析を実施し、以下を確認した。

- (1) かぶりが小さい位置のずれ止めは、コンクリートが コーン破壊し、耐力が十分発揮されないことがある。
- (2) コンクリートの破壊を考慮し、ずれ止めの位置により異なる非線形ばねを設定した FEM 解析により、ずれ止め鋼板の引抜き挙動および発生せん断力を比較的精度良く再現できることが分かった。
- (3) ずれ止めに発生するせん断力は、載荷点に近いほど 大きくなる傾向がある。抜出し変位の増加にともない、その差異は小さくなる傾向にあった。

## 参考文献

- (篠崎裕生,浅井洋,紙永祐紀,牧剛史,睦好宏史: 少数主桁形式の鋼合成桁と PC 桁のずれ止め方式に よる接合構造の研究,構造工学論文集 Vol.60A, pp.861-871, 2014.3
- 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 せん断力負担に関する実験的研究,構造工学論文集,



Vol.57A, pp.996-1006, 2011.3

- 山下真一, 齊藤啓一, 青山尚樹, 西村泰志: 建築構 造物の切替え部における孔あき鋼板ジベルの適用 性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文 集, Vol.31, No.2, pp.1219-1224, 2009.
- Leonhardt, F., Andra, W., Andra, H. P., Harre, W.: Neues vorteilhaftes Verbundmittel fur Stahlverbund Tragwerke mit hoher Deuerfestigkeit, Beton-und Stahlbetonbau, Heft 12, 1987
- 5) 土橋浩:分合流部を有するシールドトンネル拡幅構 造接合部の応力伝達機構の実験的検証および数値 解析による評価,土橋浩博士論文,pp.117-119, 2008.12
- 6) 道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編,(社)日本道路協会, p.355, 2012.3
- 複合構造標準示方書 2009 年制定, 土木学会, pp.64-67, 2009.
- 8) 頭付きスタッドの押抜き試験方法(案), JSSC テク ニカルレポート, No.35, (社)日本鋼構造協会 p.9, 1996.11