# 貫通鉄筋を有する孔あき鋼板ジベルのせん断抵抗メカニズムの検討

宇都宮大学大学院 学生員 ○ NGUYEN MINH HAI

フェロー会員 中島章典 正会員 鈴木康夫

# 1. はじめに

鋼コンクリート複合構造の異種材料あるいは部材間で応 力伝達の役割を果たすずれ止めとして、孔あき鋼板ジベル が多く用いられている.孔あき鋼板ジベルを用いた場合、 ジベル孔部分のコンクリートのせん断破壊によって、鋼板 とコンクリートの陽な一体化はなくなるため、実構造物へ の適用に際しては、ジベル孔内に貫通鉄筋を配置するのが 一般的である.貫通鉄筋を配置した孔あき鋼板ジベルでは、 保坂ら<sup>1)</sup>、古内ら<sup>2)</sup>の研究でも述べているように、ジベル 孔のコンクリートの2面せん断抵抗に、貫通鉄筋の抵抗力 を加えたものでせん断に抵抗するが、両者は複雑な機構で 相対的に影響しているため、これらの既往研究ではせん断 抵抗メカニズムが十分に考察されていない.しかし、この 場合のせん断抵抗を評価するためにはせん断抵抗メカニズ ムを十分に理解することは重要である.

本研究では、著者らの既往研究<sup>3)</sup>で検討した貫通鉄筋の 無い孔あき鋼板ジベルのせん断抵抗メカニズムを参考にし、 貫通鉄筋が有る試験体の押抜き試験を行い、測定した貫通 鉄筋のひずみ挙動および貫通鉄筋の曲げ変形に関する数値 解析を用いて、貫通鉄筋を有する孔あき鋼板ジベルのせん 断抵抗メカニズムを考察する.

### 2. 押抜き試験

# (1) 試験概要

本研究では、貫通鉄筋を有する孔あき鋼板ジベルのせん 断抵抗メカニズムを調べるため、図-1に示すような試験 体を用い、ジベル孔径、貫通鉄筋径、ジベル鋼板厚をパラ メータとし、押抜き試験を行った.試験体の一覧を表-1に 示す.試験体名のD,Tに続く数字はそれぞれジベル孔径 とジベル鋼板厚を、Bに続く数字は試験体の幅または奥 行きを、Hに続く数字は試験体の高さを、Rに続く数字 は貫通鉄筋径を示している.また、最後は材料特性の種類 を表す文字と試験体番号である.全試験体のジベル鋼板に はSS400を使用し、帯鉄筋および鉛直方向の配力鉄筋に はSD295AのD10を使用した.ここでは、ジベル鋼板と 貫通鉄筋の材料特性の詳細を省略する.

押抜き試験体の載荷に際しては,試験体の平鋼板突き出 し部上面から荷重を載荷した.試験体底面と載荷台との摩 擦とジベル鋼板とコンクリートの付着を低減するために, 試験体の下には砂を敷き,ジベル鋼板にグリースを塗布し た.一方,載荷試験時には,ジベル鋼板とコンクリートブ ロック間の相対変位を高感度変位計により計測し,溝切し た鉄筋に貼り付けたひずみゲージにより貫通鉄筋の長手方 向ひずみを計測した.ジベル孔の板厚中央を基準として, 両側±80mm,または±120mmの位置まで,20mm間隔で ひずみゲージを貼り付けた.なお,コンクリートブロック と鋼板の相対変位が20mmを越えるまで荷重を載荷した.



Dimensions in mm

図-1 押抜き試験体の概要

表—1 試験体一覧					
	コンクリート		貫通		
試験体名-番号	圧縮強度	孔径	鉄筋径	板厚	体
	$(N/mm^2)$	(mm)	(mm)	(mm)	数
D30T12B5H4R10-F1,2	30.9	30	10	12	5
D60T12B5H4R10-F1,2	30.9	60	10	12	5
D90T12B5H4R10-F1,2	30.9	90	10	12	5
D60T12B5H4R10-M1,2	32.5	60	10	12	2
D60T12B5H4R13-N1,2	32.5	60	13	12	2
D60T12B5H4R16-O1,2	32.5	60	16	12	2
D60T12B5H4R16-P1,2	32.5	60	16	12	2
D60T19B5H4R16-Q1,2	34.1	60	16	19	2
D60T25B5H4R16-R1,2	34.1	60	16	25	2

# (2) 試験結果

押抜き試験で得られた荷重-ずれ変位関係は後述のせん 断抵抗メカニズムと同時に説明するため、ここでは測定し た貫通鉄筋の曲げひずみ、軸ひずみとずれ変位関係および 観察したせん断破壊面の状況を述べる.

a) 貫通鉄筋の曲げひずみ,軸ひずみとずれ変位関係

押抜き試験で測定した貫通鉄筋の曲げひずみ,軸ひず みーずれ変位関係を図-2の上段と下段に示し,図-2-a, 図-2-b,図-2-cはそれぞれジベル孔径,貫通鉄筋径,ジ ベル鋼板厚を変えた場合に対応している.横軸はずれ変位 を,縦軸は曲げひずみ,あるいは軸ひずみを示し,実線は ジベル孔の中央位置,破線はその±20mmの位置を示して いる.

まず,これらの図から,いずれの場合においてもジベル 孔の中央位置の曲げひずみ (実線)は正側で大きく生じて いるのに対して,その両隣 ±20mm 位置の曲げひずみ (破 線)は負側で生じる傾向を示している.つまり,貫通鉄筋 には局所的な曲げ変形が生じていることがわかる.また, 中央位置の貫通鉄筋には引張軸ひずみも大きく発生してい るが,中央位置の両隣点では圧縮軸ひずみが生じていると ころもある.そして,曲げひずみーずれ変位関係と軸ひず みーずれ変位関係を比較すると,全体的に曲げひずみの方 が軸ひずみより早期に大きくなっていることがわかる.つ まり,孔あき鋼板ジベルのずれ変位が有意に生じ始めると ともに貫通鉄筋の曲げ抵抗力が生じ,せん断抵抗に寄与す

2 3 Relative slip (mm)

11111

D60T12B5H4R16 D60T19B5H4R16 D60T25B5H4R16

2

Relative slip (mm)

**図-2-c** ジベル鋼板厚を変えた試験体







図-2-b 貫通鉄筋径を変えた試験体



る.そして、ジベル孔径にもよるが、著者らの既往研究<sup>3)</sup> に示した貫通鉄筋無しの場合のメカニズムと同様に、ずれ 変位 1~3mm 程度でジベル孔部分のコンクリートの2面 せん断破壊に伴う押し広げ力が生じるため、ジベル孔板厚 中央位置の貫通鉄筋の軸ひずみが生じ始めた.

一方,ジベル孔径に着目した図-2-aから,同じずれ変 位においてジベル孔径が小さいほど、中央位置の曲げひず み,軸ひずみおよびその両隣位置の曲げひずみは早期に大 きく生じている.このことから、同じずれ変位で、ジベル 孔径が小さいほど,貫通鉄筋の変形は早期に生じることが わかる.また、ジベル鋼板厚に着目した図-2-cの上段か ら、赤実線と緑実線で示すジベル鋼板厚 19,25mm の場 合の方が、黒実線のジベル鋼板厚 12mm の場合よりも曲 げひずみが早く大きくなっている. この理由は、後述する が、同じずれ変位でジベル鋼板が厚い方が貫通鉄筋に伝達 される力が大きいためである.一方,貫通鉄筋径に着目し た図-2-bから、同じずれ変位で曲げひずみ、軸ひずみに 明確な傾向は見られないが、図-2-aと図-2-cほど大きな 差は見られない.

しかし、上記の考察は貫通鉄筋の変形を示しているが, それぞれの場合において鋼板からコンクリートを介して貫 通鉄筋に伝達される力の大きさは明確に分かっていない. このことについては後述の数値解析を用いて示す.

# b) せん断破壊面の状況

ジベル孔に配置する貫通鉄筋は曲げ抵抗力および軸方向 の抵抗力で孔あき鋼板ジベルのせん断抵抗に寄与するが, 貫通鉄筋がジベル孔内を移動するため、ジベル孔内のコン クリートせん断面を破壊することも考えられる. このこと を調べるため、押抜き試験の終了した後に試験体のせん断 破壊面を観察した.一例として、写真-1-aはジベル孔径 60mm, 貫通鉄筋径 10mm の試験体 D60T12B5H4R10-F2 を、写真-1-b はジベル孔径 60mm、貫通鉄筋径 16mmの 試験体 D60T12B5H4R16-O2 のせん断破壊面を示してい る. 前者の貫通鉄筋はジベル鋼板に接近するほど移動して いないが、後者の貫通鉄筋はジベル鋼板に接近している. したがって,貫通鉄筋径が大きいほど,貫通鉄筋はジベル



Bending strain (10<sup>-6</sup>)

-3000

3000

10<sup>-6</sup>)

strain (

Axial

写真-1-a D60T12B5H4R10F2 写真-1-b D60T12B5H4R16O2

写真-1 押抜き試験の終了した後のせん断面



孔内を移動する量が大きく、ジベル孔コンクリートせん断 面を破壊する影響も大きいと予想される.

#### 貫通鉄筋の曲げ抵抗力に関する数値解析 3.

2(2) の考察から、ずれ変位の増加による貫通鉄筋の変 形状況はわかるが、貫通鉄筋に伝達される力の大きさは分 かっていない. また, 2(2) では述べていないが, 押抜き 試験時の貫通鉄筋の長手方向の曲げひずみ分布を調べた結 果、同じずれ変位で見た時に貫通鉄筋径、ジベル孔径、ジ ベル鋼板厚によって貫通鉄筋の曲げひずみ分布が異なって いる.したがって、それぞれの場合に対して、貫通鉄筋に 作用する力の分布幅も異なると考えられる. そこで, 押抜 き試験で調べた貫通鉄筋の曲げひずみを参考にし、その曲 げ変形を生じさせる力の大きさと分布幅を数値解析で求め た.以下は解析モデルの概要と解析結果を示す.



# (1) 解析モデルの概要

解析モデルの概要を図-3に示す.このモデルは押抜き 試験体の貫通鉄筋および周辺コンクリートの部分を再現し, コンクリートの支圧および鉄筋とコンクリートの付着を表 すばね要素を貫通鉄筋とした梁要素の上下に垂直に連結さ せている.モデルの梁部分を50要素に分割し、1つの要素 の長さを 5mm とし、全長が 250mm となる.また、支圧 ばね要素の支圧強さは土木学会の PC 設計施工指針のコン クリート支圧強度の算定方法4)を参考にし、支圧ばね定数 は前川らの算定方法5)を参考にした. さらに, 押抜き試験 の結果より、貫通鉄筋は長手方向に移動しないため、付着 ばねのばね定数を十分大きい値 (10<sup>7</sup>N/mm) で与えた. ま た,貫通鉄筋とした梁要素に対して,鋼材の完全弾塑性モ デルに基づく応力--ひずみ関係を与えた. 一方, 境界条件 として,支圧ばねの片方の節点に3方向の固定条件を与え ,荷重は図−3のように貫通鉄筋の直角方向中央部に等分 布荷重として与えた.

### (2) 解析結果

貫通鉄筋の周辺に位置するコンクリート中の骨材の配置 状況などの影響で、貫通鉄筋に伝達される力の分布状況も 変わり、これを再現することは難しい. しかし本解析では、 この力は等分布で貫通鉄筋に作用していると仮定する. そ して,解析結果と実験結果の貫通鉄筋の長手方向の曲げひ ずみ分布を比較することによって力の分布幅は試行錯誤的 に決める.この比較は貫通鉄筋の曲げひずみが1000,2000, 5000, 10000×10<sup>-6</sup>程度となる4段階で行った. 一例とし て、図-4はジベル鋼板厚12mm,貫通鉄筋径10mm, ジベ ル孔径 30,60,90mmに変えた場合で、貫通鉄筋の中央位置 の曲げひずみが2000~3000×10-6程度にある時の解析結 果と実験結果の比較である.図の縦軸は曲げひずみを、横 軸は節点の位置を示している (ここでは, 125mmとなる節 点が貫通鉄筋の中央点に対応している). また, 黒丸が解 析結果,青,赤,緑丸がジベル孔径ごとに実験結果を示し ,比較している試験体名を図-4-a,図-4-b,図-4-cの中 に示している. この際, ジベル孔径 30,60,90mmに対して 作用力の分布幅を10.20.30mmと仮定した.なお、これら の図から貫通鉄筋の長手方向の曲げひずみ分布では、解析 結果と実験結果がほぼ一致にしていることがわかる.また , ここに示していないが, 比較した他の段階においても解 析結果と実験結果は一致した. したがって, 仮定した作用 力の分布幅で貫通鉄筋の曲げ変形が表せたと言える. そし て、同様な比較を行った結果、ジベル孔径 60mm、貫通鉄 筋径 16mm, ジベル鋼板厚 12, 19, 25mmに対して作用力の 分布幅は20,30,30mmとなり、ジベル鋼板厚12mm、ジベ ル孔径 60mmの貫通鉄筋径を変えた場合の作用力の分布幅 は20mmとなった.このことから,正確な数値を判断する ことは難しいが,ジベル孔径およびジベル鋼板厚の大きい 方が鋼板からコンクリートを介して貫通鉄筋に伝わる力の 分布幅が広いと言える.

一方、図-5は作用力-貫通鉄筋の中央位置の曲げひず み関係を示し、実線、点線、1 点鎖線および線の色でジベ ル孔径、貫通鉄筋径およびジベル鋼板厚の違いを表してい る.まず、図-5のジベル孔径の違いを表す黒線、赤実線と 緑線に着目すると、同じ曲げひずみでジベル孔径が小さい ほど作用力は幾分小さい.しかし、2(2)の貫通鉄筋のひ ずみデータから,同じずれ変位1mmの時,ジベル孔径30, 60,90mmの貫通鉄筋の中央位置の曲げひずみはそれぞれ  $6000 \times 10^{-6}, 1500 \times 10^{-6}, 500 \times 10^{-6}$ 程度になっており,図 -5 に対応させると作用力はそれぞれ 15,9,4kNとなってい る. そして,同様な比較で,同じずれ変位 2mmの時,作 用力はそれぞれ 17.19.8kNとなっている. さらに、同じず れ変位 6mmの時, ジベル孔径 60,90mmの場合に対応して 作用力は 25,30kNとなっており、ジベル孔径 30mmの場合 ,貫通鉄筋にひずみが非常に大きく発生したため,ひずみ ゲージによるひずみの計測ができなくなった.しかし,図 -5の黒線により曲げひずみの増加に対して作用力の増加が 少ないことから、この際の貫通鉄筋に作用する力は 20kN 以下にあることが予想される.このことから,ジベル孔径 が大きいほど鋼板からの力は貫通鉄筋に遅れて大きく伝達 されてくると考えられる.一方,貫通鉄筋径 10,13,16mm を表す図-5の赤実線、赤点線、赤1点鎖線に着目すると ,同じ曲げひずみで貫通鉄筋径が大きいほど作用力は大き い. また, 2(2)の 図-2-b では同じずれ変位で、明確な傾 向はないが、曲げひずみの差は少ない.このことから、同 じずれ変位で,貫通鉄筋径が大きいほど,貫通鉄筋に伝 達される力は大きく、貫通鉄筋径の小さい場合と同程度の 曲げ変形が生じている.一方,ジベル鋼板厚の違いを表す 赤1 点鎖線と青線に着目すると、同じ曲げひずみでジベ ル鋼板厚 19,25mmの青線はジベル鋼板厚 12mmの赤1 点 鎖線より作用力は大きい. それに、図-2-cから同じずれ変 位でジベル鋼板の厚い方が曲げひずみは大きく生じている . したがって、同じずれ変位ではジベル鋼板の厚い方が生 じる曲げひずみは大きく、貫通鉄筋に伝達される力も大き いと言える.

# 4. 貫通鉄筋を有する孔あき鋼板ジベルのせん 断抵抗メカニズム

上記の考察に加えて、図-6に示す本研究の押抜き試験 で得られた荷重-ずれ変位関係に沿って、貫通鉄筋を有す る孔あき鋼板ジベルのせん断抵抗メカニズムを以下のよう るが、貫通鉄筋の曲げ抵抗力はジベル孔のせん断抵抗に直接的に寄与するのに対して、貫通鉄筋の軸方向の抵抗力はジベル孔のせん断面の開きを抑制する役割で、せん断抵抗に間接的に寄与しているものとして考えられる.このような機構で、荷重がせん断耐力に達し、結果的に図-6のようになっている.つまり、同じジベル孔径で貫通鉄筋径とジベル鋼板厚が大きいほど貫通鉄筋の曲げ抵抗力が大きいが、2(2)の考察によりジベル孔内での貫通鉄筋の移動量も大きいためジベル孔のコンクリートせん断抵抗を大きく減少させる.そのため、結果的に図-6-bと図-6-cのようにせん断耐力は同程度になっている.一方、図-6-aでは

の面積が大きいため、せん断耐力は大きくなっている. 次に、せん断耐力の後に、荷重が急激に低下する場合、 比較的緩やかに低下する場合と荷重の低下がほとんど見ら れない場合がある.ただし、図-6-aのジベル孔径 30mm、 貫通鉄筋径 10mm の場合では、荷重の増加と共に貫通鉄筋 がジベル孔内を移動し、ついには貫通鉄筋が破断するため ずれ変位が 15mm 程度において、荷重が急激に低下した. また、ジベル孔径 90mm、貫通鉄筋径 10mm の場合では、 ジベル孔が大きく、骨材の噛合わせにより発生する押し広 げ力も大きくなり、コンクリートブロックにひび割れが生 じたため、ずれ変位が 5~7mm 付近で荷重が一時的に低 下した.

ジベル孔が大きいほど、ジベル孔のコンクリートせん断面

# 5. おわりに

本研究では、ジベル孔径、貫通鉄筋径およびジベル鋼板 厚のパラメータで押抜き試験を行い、得られた荷重-ずれ 変位関係に沿ってせん断抵抗メカニズムを推定した.この 際に、押抜き試験で計測した貫通鉄筋のひずみ挙動、およ び貫通鉄筋の曲げ変形に関する数値解析の結果も加えて考 察した.今後は推定したせん断抵抗メカニズムに基づいて せん断耐力評価式の構築を試みる.

### 参考文献

- (R坂ら: 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.
- 2) 古内ら: 孔あき鋼板ジベルのせん断伝達耐力に関する一考察,第6回複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, No.26, 2005.11.
- 3) 中島ら: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,第10回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集,No.28, 2013.11.
- 4) 土木学会:プレストレストコンクリート設計施工指針, pp.82, 1961.
- 5) K. Maekawa and J. Qureshi: Computational model for reinforcing bar embedded in concrete under combined axial pullout and transverse displacement, Concrete structure, JSCE, No. 538, V-31, 227-239, 1996.5.



まず、図-6のいずれの関係においても初期段階では貫 通鉄筋無しの場合<sup>3)</sup>と同様に、ジベル鋼板とコンクリート の付着力により荷重が 50kN まで増加し, その後付着力が 切れると同時に荷重がジベル孔内のコンクリートに伝達 されることによって、ジベル孔内コンクリートのせん断面 にひび割れが生じる.同時に、貫通鉄筋にも力が伝達され る. 2(2) の曲げひずみ挙動から、伝達された力は主に貫 通鉄筋の垂直方向に作用し,貫通鉄筋の曲げ変形を生じさ せると考えられ,発生する曲げ抵抗力がせん断抵抗に寄与 する. そして、ジベル孔径にもよるが、図-6のずれ変位1 ~3mm 程度まで荷重の増加とともに、せん断ひび割れが ジベル孔の全面に進行すると予想される.この段階の同じ ずれ変位で、図-6-bでは1つの緑線を除いて、貫通鉄筋 径の違いにも関わらず荷重が同程度になっている. この原 因として、貫通鉄筋径が大きいほど貫通鉄筋の曲げ抵抗力 が大きく発生するが、ジベル孔のコンクリートせん断面の 面積が少なく,かつ貫通鉄筋の曲げ抵抗力が大きく発生す ることによって周辺コンクリートを破壊させようとする効 果も大きくなるため、ジベル孔のコンクリートせん断面に よるせん断抵抗も減っていると考えられ、結果的に貫通鉄 筋径の大きい場合と小さい場合の荷重が同程度になってい る.これに対して、図-6-cはずれ変位3mm以下の範囲で はジベル鋼板が厚いほど荷重が若干大きい. これは2(2) および3(2)の考察のように、同じずれ変位でジベル鋼板 が厚いほど、鋼板から貫通鉄筋に伝達される力の分布幅が 大きく、その力も大きいため、貫通鉄筋の曲げ抵抗力が大 きく、せん断抵抗に大きく寄与するためと考えられる. 一 方,図-6-aではジベル孔が大きいほど,荷重は大きくなっ ているが、この際ジベル孔が小さいほど荷重はコンクリー トを介して早期に貫通鉄筋に伝達されてくるため、曲げひ ずみも早期に大きく発生する.

次に、せん断ひび割れがジベル孔の全面に進行した後、 ジベル孔せん断面の骨材の噛合わせにより、ジベル鋼板の 垂直方向に押し広げ力が発生する.この押し広げ力により 貫通鉄筋の軸ひずみが生じると同時に貫通鉄筋の軸方向の 抵抗力によりジベル孔せん断ひび割れ面の開きを抑制する 効果が生じ、ジベル孔せん断面のせん断抵抗に寄与する. もちろん、この段階においても貫通鉄筋の垂直方向に力 の伝達が続き、軸ひずみと曲げひずみが同時に増加してい る.したがって、この際のせん断抵抗はジベル孔せん断面 の骨材の噛合わせと貫通鉄筋の抵抗の組合わせたものとな

500r D30T12B5H4R10-F1.2 D60T12B5H4R10-M1.2 D60T12B5H4R16-P1.2 D60T12B5H4R10-F1,2 D60T12B5H4R10-F1,2,M1,2 D60T12B5H4R13-N1,2 D60T12B5H4R16-O1,2 D60T19B5H4R16-Q1,2 D60T25B5H4R16-R1,2 (N) 250 (kN) 250 (KN) 250 20 10 Relative slip (mm) 20 10 Relative slip (mm) 20 10 Relative slip (mm) 図-6-a ジベル孔径を変えた試験体 図-6-c ジベル鋼板厚を変えた試験体 図-6-b 貫通鉄筋径を変えた試験体

図-6 荷重-ずれ変位関係