

論文 孔あき鋼板ジベルの基本特性に関する実験的研究

平陽兵*1・古市耕輔*2・山村正人*3・富永知徳*4

要旨：鋼とコンクリートのずれ止め方法として、鋼板に孔をあけた孔あき鋼板ジベルがある。本研究では、孔あき鋼板ジベルを複合構造橋梁の接合部などにおけるずれ止めとして用いることを想定し、せん断耐力、ずれ性状などの基本特性を把握するために押抜きせん断実験を実施した。その結果、ジベルのせん断耐力に影響を与えると考えられる孔と孔の間隔やコンクリート強度を変化させることにより、破壊形態が変わり、せん断耐力も変化することが確認された。

キーワード：ずれ止め、孔あき鋼板ジベル、押抜き試験

1. はじめに

最近、異なる材料あるいは部材を組み合わせる構造として、合成構造や混合構造などの複合構造が注目されている。複合構造は、力学的特性の向上や構造物の軽量化など様々な効果が期待できると考えられ、また、コスト縮減、労働力の減少などの社会的要求を満たす構造としても期待され、多方面で研究開発が進められている。

複合構造では、鋼とコンクリートなどの異なる材料間の応力伝達や一体化のために、ずれ止めを用いる必要がある。鋼とコンクリートのずれ止めは、従来、頭付きスタッドが一般的に用いられているが、疲労特性、施工性に優れ、省力化が可能になると考えられるずれ止めとして孔あき鋼板ジベルが考案されている。

孔あき鋼板ジベルは、鋼板にあけた孔に充填されたコンクリートがジベルの働きをするものである。Leonhardtらは、孔あき鋼板ジベルを合成桁でのずれ止めに適用することを考え数体の要素実験を行い、その設計法について提案を行っている¹⁾。これによれば、孔あき鋼板ジベルの破壊について2つのせん断面で抵抗するコンクリートのせん断破壊が先行する場合と、孔と孔との間の鋼板のせん断破壊が先行する場合とで耐力を評価できると

している。また、Veldandaらは合成桁での孔あき鋼板ジベルの適用性を検討しており²⁾、最近ではKrausらが別の観点から設計法の提案を行っている³⁾。著者らもLeonhardtらと同様の実験を行い、孔あき鋼板ジベルの静的耐力や疲労試験後の残存耐力などを調べ、疲労特性に優れていることを確認している⁴⁾。

Leonhardtらの行った実験は、孔あき鋼板ジベルを主に合成桁に適用することを想定し、比較的小さな孔(35~40mm)を用いているなどの限られた条件による実験から導かれている。また、設計法の適用に当たっては、孔内へ鉄筋を通すことを含め、コンクリートがある量の鉄筋で補強されていることを前提としている。

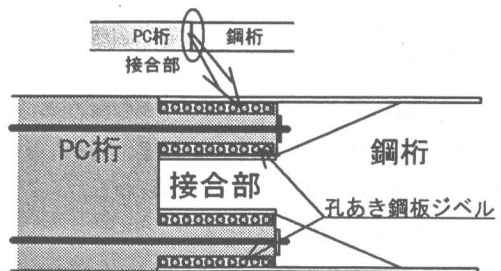


図-1 接合部イメージ

*1 鹿島(株)技術研究所 第一研究部研究員 (正会員)

*2 鹿島(株)技術研究所 第一研究部主任研究員 (正会員)

*3 鹿島(株)土木設計本部 設計長

*4 新日本製鐵(株)鋼構造研究開発センター 研究員

表-1 試験体一覧

試験体	長さ L(mm)	孔間隔 Δ(mm)	孔数	コンクリート強度 (N/mm ²)	パラメータ
1-1	300	100	3	34.3	基本形状
1-2	360	120	3	34.3	孔間隔 大
1-3	240	80	3	34.3	孔間隔 小
1-4	300	100	3	51.9	コンクリート強度 大
1-5	300	100	3	23.8	コンクリート強度 小
1-6	500	100	5	34.3	孔数 多
2-1	300	100	3	27.4	圧縮応力度3.5N/mm ²
2-2	300	100	3	27.4	圧縮応力度7.0N/mm ²

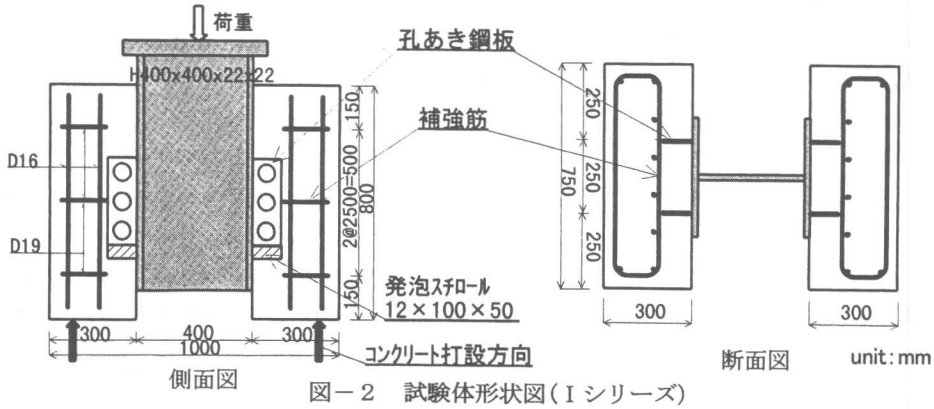
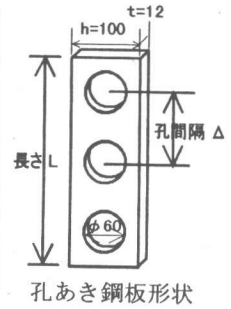


図-2 試験体形状図(Iシリーズ)

そこで、本研究では、孔あき鋼板ジベルの他への利用方法として、図-1に示すようなPCを用いた混合構造橋梁の接合部のずれ止めとして適用することを想定し、孔が大きく、孔内に鉄筋を通さない場合の孔あき鋼板ジベルのせん断耐力（以下、耐力とする）、ずれ性状、破壊形態などの基本特性を把握することとした。

2. 実験概要

2.1 実験パラメータ

Leonhardtによれば孔あき鋼板ジベルの耐力は、下記のとおり孔径、コンクリート強度、孔と孔との間の鋼板断面積、鋼板強度が要因となる。

・コンクリートの破壊

$$P_c = 2 \times (\pi \phi^2) / 4 \times 0.9 \sigma_c' \quad (1)$$

ここで、 P_c ：コンクリートで破壊する場合の設計せん断強度、 ϕ ：孔径、 σ_c' ：コンクリート立方体強度。

・鋼板のせん断破壊

$$P_s = 1.44 \times A_s \times \sigma_{sy} \quad (2)$$

ここで、 P_s ：鋼板で破壊する場合の設計せん断強度、 A_s ：孔と孔との間の鋼板面積、 σ_{sy} ：鋼板の降伏強度。

本研究では混合構造橋梁の接合部における施工性、鋼板の加工性などの点から、鋼板の孔径、高さ、厚さを一定とし、孔と孔の中心間隔（以下、孔間隔）及びコンクリート強度をパラメータとした実験、また、孔数によって耐力の変化を確認するために孔数をパラメータとした実験をIシリーズ（1-1～1-6）として実施した。

また、図-1に示したようにプレストレスを利用した接合を想定し、孔あき鋼板に平行な方向のプレストレスの影響を確認するために、プレストレスによるコンクリートの応力状態をパラメータとした実験をIIシリーズ（2-1、2-2）として実施した。

表-1に試験体一覧を示す。鋼板の孔径 ϕ 、高さ h 、厚さ t は、それぞれ $\phi=60\text{mm}$ 、 $h=100\text{mm}$ 、 $t=12\text{mm}$ とした。孔間隔は1-1を基本形状とし、式(1)、(2)からコンクリートの破壊となるよう

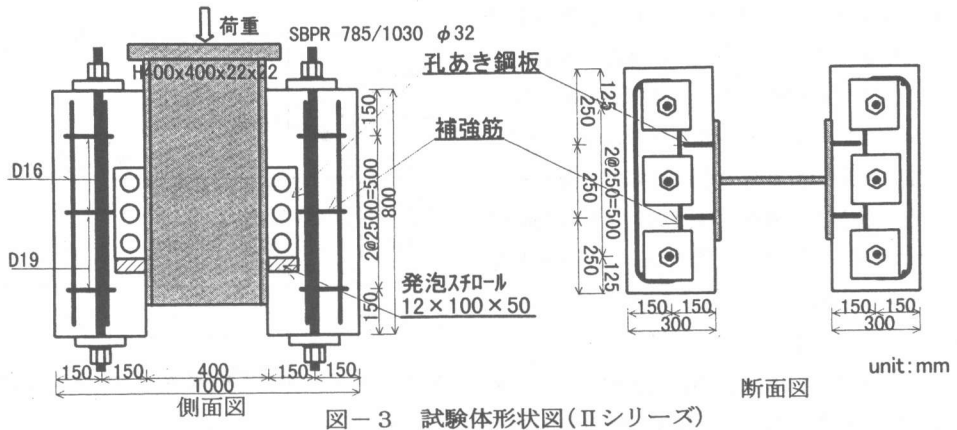


図-3 試験体形状図(IIシリーズ)

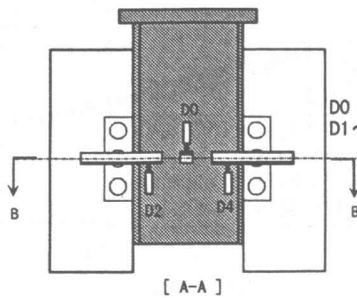


図-4 変位計位置

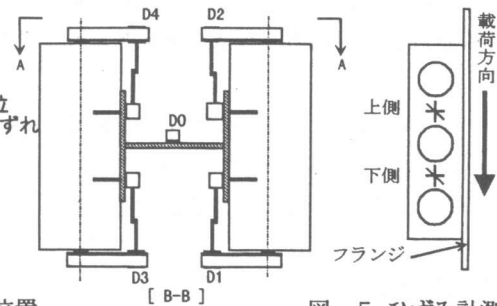


図-5 ひずみ計測位置

100mmとした。また、1-2と1-5はコンクリートの破壊、1-3と1-4は鋼板の破壊となるよう孔間隔及びコンクリート強度を設定した。1-6は孔間隔を100mmとし、鋼板1枚当たりの孔数を5個とした。2-1、2-2の孔間隔は基本形状とし、プレストレスによるコンクリート圧縮応力度を3.5及び7.0N/mm²とした。

2.2 試験体

図-2にIシリーズの試験体形状を示す。試験体は、ずれ止めとして用いる鋼板をH形鋼のフランジ片側に2枚、合計4枚溶接し、H形鋼とコンクリートを接合した。孔あき鋼板がずれる方向には、プレート端部の支圧による耐力への影響を取り除くために発泡スチロールを配置した。コンクリートには、孔あき鋼板と直角方向に補強用の鉄筋(以下、補強筋)を配置した。また、コンクリートの打設は図に示すように、載荷の際に底となる方向から行った。

図-3にIIシリーズの試験体形状を示す。IIシリーズの試験体は、基本的にIシリーズの1-1

試験体と同様のものであるが、鋼板と平行な方向の圧縮応力をプレストレスを利用して導入するために、PC鋼棒を配置した。

試験体に使用した材料は、鋼板をSM490、鉄筋をSD345とした。引張試験の結果、鋼板は降伏強度363N/mm²、引張強さ543N/mm²であった。コンクリートは早強セメントを使用し、最大粗骨材寸法を20mmとした。表-1に各試験体の実験時のコンクリート圧縮強度を示す。

2.3 実験方法

実験は5,000kNアムスラー型試験機を用いて行った。載荷は一方単調増加とした。

図-4に変位計設置位置、図-5にひずみ計測位置を示す。計測項目は、荷重、H形鋼とコンクリートとの相対ずれ、鋼板ひずみ、及び孔あき鋼板と直角方向に配した鉄筋のひずみとした。相対ずれは、図-4に示すとおり4個所で計測した。

3. 実験結果

図-6~9に実験パラメータごとに荷重-相対

ずれ関係を示す。ここで、荷重は孔あき鋼板1枚分の値、つまり実験より得られた荷重の4分の1で示し、相対ずれは載荷による各計測点のばらつきがなかったため4点の平均で代表させた。また、最大荷重と、最大荷重時のずれ量である最大ずれ量を示すとともに、鋼板に降伏が生じた時点を示号で示す。図-8には、孔数5個である1-6の荷重を3孔分に換算したものを合わせて示す。

3. 1 最大荷重及びずれ性状

Iシリーズでは、最大荷重は390kN(1-3)～548kN(1-2)の間であった。荷重は最大荷重に達した後も緩やかな低下であり、最大荷重以降はずれに対し摩擦による抵抗が作用しているものと考えられる。

IIシリーズでは、2-1と2-2がほぼ同じ最大荷重を示し、1-1と比較しても同程度であった。また、荷重はIシリーズと同様に最大荷重以降も緩やかに低下した。

最大ずれ量は試験体により1.00～8.28mmと大きな違いが生じた。特に1-3は、他の試験体の最大ずれ量が約2mmであるのに対し、300kNを超えた辺りから徐々に剛性が低下し、8.28mmで最大ずれ量に達しており、他と異なる挙動を示した。

3. 2 ひずみ

図-10に図-5に示した位置における1-1と1-5の鋼板の主ひずみを示す。鋼板の主ひずみは、1-1、1-3、1-4、1-6、2-1、2-2において1-1のように最大荷重を示す前に鋼板の塑性化が見られた。また、主ひずみの方向は降伏時まで載荷方向に対しほぼ45度の方向であり、せん断降伏したと考えられる。1-2、1-5の鋼板のひずみは最大荷重以降も含めて弾性域であった。

最大荷重時の鉄筋のひずみは、約 $300\sim 500\times 10^{-6}$ であった。1-6のひずみは、他より多少大きく 700×10^{-6} を超えていた。

3. 3 破壊状況

図-11に1-1と2-1のひび割れ図を示す。ひび割れは、最大荷重を示したのとほぼ同時に発生した。Iシリーズの試験体はすべて同様のひび割れが発生した。IIシリーズは、Iシリーズと比べてコン

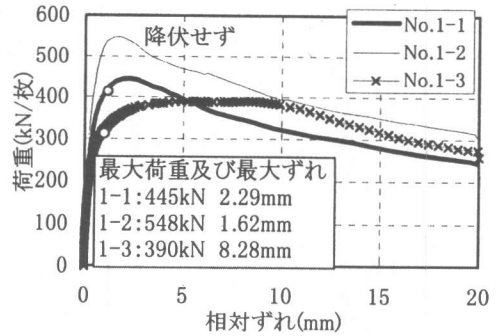


図-6 荷重-相対ずれ関係 (Iシリーズ, 孔間隔)

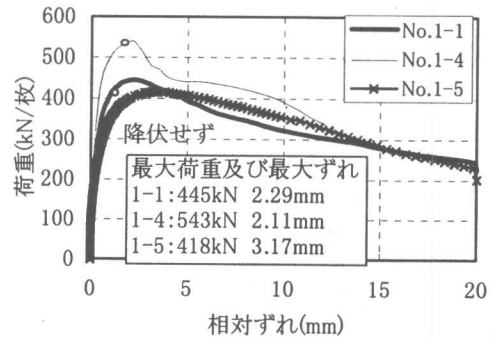


図-7 荷重-相対ずれ関係 (Iシリーズ, コンクリート強度)

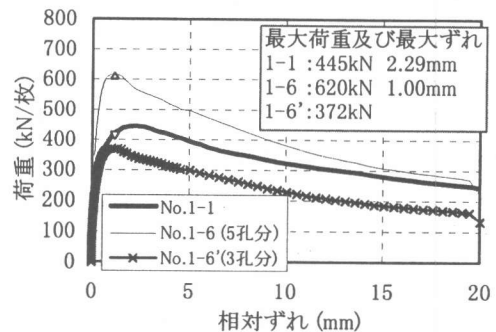


図-8 荷重-相対ずれ関係 (Iシリーズ, 孔数)

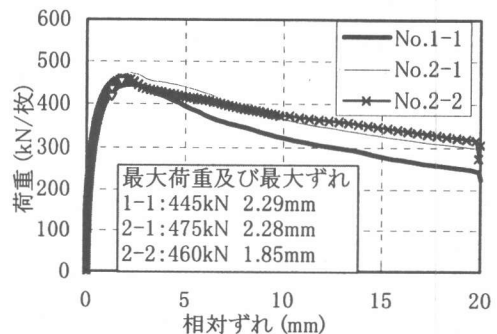


図-9 荷重-相対ずれ関係 (IIシリーズ)

クリート側面のひび割れが少なかった。

実験終了後の孔あき鋼板の様子として、40mmの相対ずれを与えた後の様子を、写真-1に1-3を例として示す。これより、コンクリートが鋼板の面に沿ってせん断破壊しているのが確認された。孔の中にはコンクリートが詰まっており、孔内でコンクリートが鋼板から支圧を受ける部分に圧壊の様子は見られなかった。ほかの試験体についても、コンクリートは同様にせん断破壊していた。1-3の鋼板は、ほかの試験体と比べて変形が大きく、孔が楕円状に変形した。ほかの試験体においても、鋼板のひずみに応じて多少変形が見られた。

4. 考察

4. 1 孔間隔の影響 (1-1, 1-2, 1-3)

図-12に最大荷重と孔間隔の関係及び式(1)、(2)による計算値を示す。図より、鋼板1枚当たりの最大荷重は、孔間隔の増加に伴い増大していることが分かる。鋼板のひずみに着目すると、1-2では鋼板が降伏せず、1-3は鋼板が降伏、1-1は鋼板の一部が降伏しており、孔間隔に伴い破壊形態が移行していることが確認された。

実験値と計算値を比較すると、1-3と1-2は近い値を示しており、計算値と同様の傾向を示しているが、1-1については低い値を示した。これは、1-1が式(1)、(2)で示される破壊の境界近くであり、コンクリートの破壊と鋼板の破壊とが複合された形の破壊形式であるからだと考えられる。

次に、孔間隔を変化させることで鋼板全体の長さが増えることから、図-12に最大荷重を鋼板

長さ1m当たりに換算したものを示す。その結果、孔間隔の違いによる最大荷重の大小関係が、同じく図-12に示した鋼板1枚当たりの最大荷重とは異なることが分かる。これより、耐力により孔あき鋼板ジベルの孔の間隔を決める場合には、破壊形態だけではなく、配置できる長さに対して効率のよい間隔を考慮し決定することが必要であるといえる。

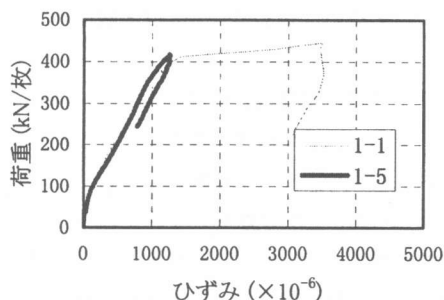


図-10 荷重-ひずみ関係

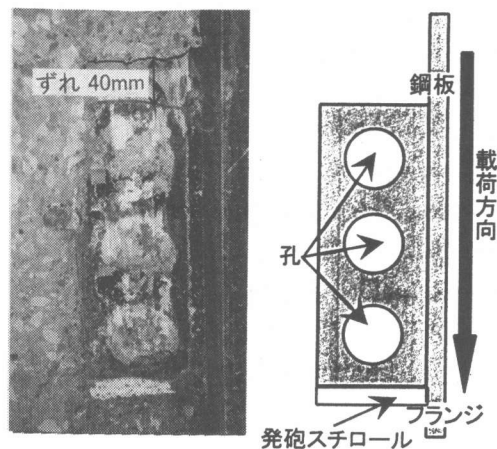


写真-1 孔あき鋼板

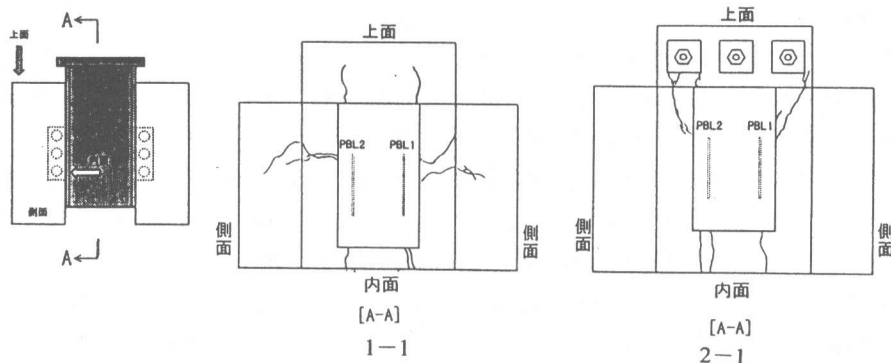


図-11 ひび割れ図

4. 2 コンクリート強度の影響 (1-1, 1-4, 1-5)

図-13に最大荷重とコンクリート強度の関係及び式(1), (2)による計算値を示す。図より、コンクリート強度の増加に伴い最大荷重が増大しているのが分かる。また、コンクリート強度の増加に伴い破壊形態がコンクリートの破壊から鋼材の破壊へと移行していることが確認された。

実験値と計算値を比較すると、1-5 は計算値とほぼ同じであるのに対して、1-4 は実験値が下回った。

4. 3 孔数の影響 (1-1, 1-6)

図-8より、孔数を増やすことにより1孔当たりの最大荷重は小さくなる結果となった。この結果の原因として、1-6の鉄筋ひずみが他と比べて大きいことから、1-6の1孔当たりあるいは鋼板長さ当たりの補強筋量が、1-1と比べて少なく拘束度が小さくなっていることなどが考えられる。

4. 4 コンクリートの応力状態の影響 (2-1, 2-2)

図-9より、圧縮応力度に関係なく最大荷重はほぼ等しくなった。孔あき鋼板と平行な方向のプレストレスは、ひび割れを生じ易くさせ、耐力を減少させる要因になることが考えられたが、その影響はみられなかった。ただし、「4.2」で述べたとおり、コンクリート強度が大きい方が最大荷重も大きくなることから、1-1よりコンクリート強度は低いものの最大荷重がほぼ等しくなった2-1と2-2の結果は、孔あき鋼板と平行な方向の圧縮応力は耐力を増加させる効果があるとも考えられる。

5. まとめ

鋼とコンクリートのずれ止めとして孔あき鋼板ジベルの適用を考え、その特性を把握するために押抜きせん断実験を実施した。その結果、鋼板の孔間隔及びコンクリート強度は、耐力に影響を与え、両方のバランスにより破壊形態が変化することが分かった。また、孔あき鋼板と平行な方向に与えたコンクリートの圧縮応力は、耐力を減少させる要因とはならないことが分かった。

ずれ止めとして孔あき鋼板ジベルを様々な部位

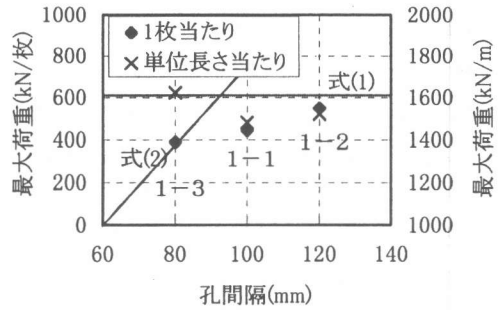


図-12 耐力-孔間隔関係

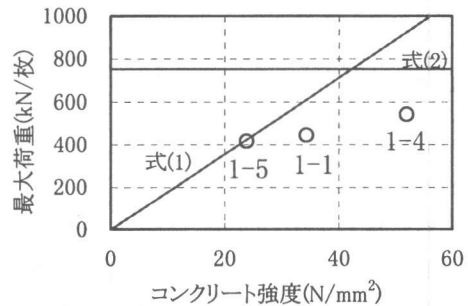


図-13 耐力-コンクリート強度関係

で適用するに当たり、今回検討しなかった孔径や鋼板厚さの違いなども、耐力やずれに関与していると考えられる。今後、孔あき鋼板ジベルの耐力算定法の確立を目指し、ほかの要因についても研究を進める予定である。

参考文献

- 1) Leonhardt, F. et al. : Neues vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund- Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit, Beton- und Stahlbetonbau, Heft 12/1987
- 2) Verdanda, M.R., Hosain, M.U. : Behavior of perfobond rib shear connectors, Can. J. Civ. Eng. Vol. 19, 1992
- 3) Kraus, D., Wurzer, O. : Bearing Capacity of Concrete Dowels, Composite Construction- Conventional and Innovative, 1997
- 4) 平陽兵, 天野玲子, 大塚一雄 : 孔あき鋼板ジベルの疲労特性, コンクリート工学年次論文報告集, vol19, No.2, pp1503-1508, 1997.6