

孔あき鋼板ジベルのせん断耐力に関する実験的研究

Experimental Study on Shear Strength of Shear Connectors Using Perforated Plate

古 市 耕 輔
平 陽 兵
山 村 正 人¹⁾

要 約

鋼とコンクリートとを一体化するための機械的なずれ止め方法の一つとして、鋼板に孔をあけた孔あき鋼板ジベルがある。孔あき鋼板ジベルは、新しい形式のずれ止めであり、せん断耐力などの力学的特性については未解明な部分が多い。本研究では、孔径 60mm の孔あき鋼板ジベルを用いて、頭付きスタッドに対して行われる押抜きせん断実験を実施し、孔と孔の間隔やコンクリート強度が孔あき鋼板ジベルのせん断耐力に及ぼす影響を明らかにするとともに、既往の設計式の適用性を検討した。その結果、孔あき鋼板ジベルのせん断耐力は、鋼板が破壊する場合には孔と孔の間の鋼板長さと鋼板厚さを乗じて求まる断面積を大きくすることにより増加し、コンクリートがせん断破壊する場合にはコンクリート強度を大きくすることによって増加することが確認された。また、コンクリートの打設方向を変えることにより、ずれ剛性が低下する場合があることを確認した。実験から求まるせん断耐力と既往の設計式から求まる値との比較では、孔と孔の間の断面積あるいはコンクリート強度の増加量に対するせん断耐力の増分は、実験値の方が小さくなることを確認された。

目 次

- I. はじめに
- II. 既往の研究
- III. 実験概要
- IV. 実験結果と検討
- V. まとめ

I. はじめに

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を行うために、様々なずれ止め方法が用いられている。鋼とコンクリートとを一体化する機械的なずれ止めとしては、頭付きスタッドが一般的であり、様々な構造物に利用されている。最近では新しいずれ止めの開発も盛んに行われており、その中で疲労特性や施工性に優れ、また省力化が可能になるもの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、Fig. 1 に示すような孔あき鋼板を、例えば鋼桁のフランジに溶接しフランジ上面にコンクリートを打設し、孔に充填されたコンクリートにより付着をとり、鋼とコンクリートとを一体化するものである。

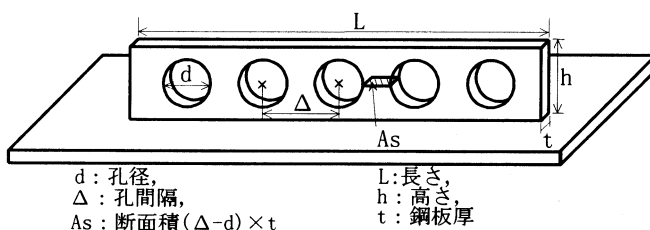


Fig. 1 孔あき鋼板形状
(Detail of Perforated Plate)

孔あき鋼板ジベルは、海外において設計式や施工例が紹介されている²⁾が、それはある限られた孔径によるものであり、その特性について十分な検討はされていない。

著者らは、文献 1) と鋼板寸法が等しい孔あき鋼板ジベルを用いた実験を行い、せん断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た²⁾。

本研究では、鋼とコンクリートとのずれ止めとして孔あき鋼板ジベルを合成桁、あるいは混合構造橋梁の接合部などへ適用することを考え、文献 1) よりも孔径が大きい孔あき鋼板を用いた場合のせん断耐力、ずれ性状及び破壊形態などの基本特性を把握することを目的とした。そのため、せん断耐力に影響を与えると考えられる鋼板の孔と孔の間の断面積(以下、断面積)やコンクリート強度をパラメータとした押抜きせん断実験を実施した³⁾。

本論文では新たに孔あき鋼板厚(以下、鋼板厚)をパラメータに加え、実験を実施し、孔あき鋼板ジベルのせん断耐力について文献 1) で報告されている設計式の適用性を検討した。

また、頭付きスタッドに関する既往の研究⁴⁾によれば、コンクリートの打設方向の違いにより、スタッドから荷重を伝達するコンクリート面がブリージングの影響を受け、荷重-ずれ関係における剛性が異なることが報告されている。孔あき鋼板ジベルにおいても、打設方向とずれに抵抗する方向との関係により、打設方向がずれ性状に影響を与えることが考えられるため、コンクリートの打設方向を変えた場合のせん断耐力及びずれ性状について検討した。

II. 既往の研究

孔あき鋼板ジベルのせん断耐力は、孔径、コンクリート強度、鋼

1) 土木設計本部第二設計部

キーワード：ずれ止め、せん断耐力、押抜き実験

板厚, 孔と孔の中心間隔(以下, 孔間隔), 及び孔の中に鉄筋を通すなどの鉄筋によるコンクリート補強方法などが要因となり決定されることが考えられる。

孔あき鋼板ジベルについては, Leonhardt らが文献 1) で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, 孔径が 35mm あるいは 40mm の孔あき鋼板を用いた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。これによれば孔あき鋼板ジベルのせん断耐力は, その破壊形態から, ①孔と孔との間の鋼板がせん断破壊する場合, ②一つの孔に充填されたコンクリートが二つのせん断面においてせん断破壊する場合, を考慮し評価できるとしている。よって, 鋼板のせん断破壊については鋼板の強度と断面積, またコンクリートのせん断破壊については, 孔径及びコンクリート強度が, せん断耐力を決定する要因となる。下記に Leonhardt が提案する孔あき鋼板ジベルの設計式を示す。

・鋼板のせん断破壊

$$P_s = 1.44 \times A_s \times \sigma_{sy} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで P_s : 鋼板がせん断破壊する時の設計せん断強度

A_s : 孔と孔との間の鋼板断面積

σ_{sy} : 鋼板の降伏強度

・コンクリートのせん断破壊

$$P_c = 2 \times (\pi d^2) / 4 \times 0.9 \beta_n \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで P_c : コンクリートがせん断破壊する時の設計せん断強度

d : 孔径

β_n : コンクリート立方体強度

ただし, 設計式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程度以上の鉄筋で補強されていることを前提としている。

III. 実験概要

1. 試験体概要

Table 1 に試験体一覧を示す。鋼板の孔径 d , 高さ h は, それぞれ $d=60\text{mm}$, $h=100\text{mm}$ とし, 全ての試験体で同じとした。

孔あき鋼板の形状を決定するに当たり, Leonhardt の式を用いて, 鋼板がせん断破壊する場合 (S シリーズ), あるいはコンクリートがせん断破壊する場合 (C シリーズ) となるように鋼板断面積及びコンクリート強度を決定した。なお, 鋼板の断面積は孔間隔と鋼板厚を変え

ることで変化させた。

Fig. 2 に試験体形状を示す。試験体は, ずれ止めとして用いる孔あき鋼板を H 形鋼の両フランジにそれぞれ 2 枚ずつ, 合計 4 枚溶接し, H 形鋼とコンクリートを接合した。孔あき鋼板には 1 枚当たり三つの孔を設けた。孔あき鋼板がずれる方向の孔あき鋼板端部には, 鋼板端部のコンクリートへの支圧によるせん断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, 実構造物を模擬して鉄筋を配置した。ただし, 鉄筋は孔の中には通さなかった。コンクリート打設は Fig. 2 に示すように, 載荷を行う際に底となる方向から打ち込むのを基本とし, コンクリートの打設方向による影響の確認を行う試験体 (D シリーズ) のうち D-12-90-R については, それと逆方向から打設を行った。

試験体に使用した材料は, 鋼板を SM490, 鉄筋を SD345 とした。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。Table 1 に各試験体実験時のコンクリート圧縮強度及び鋼板の材料試験による降伏強度を示す。

2. 実験方法

実験は 5,000kN アムスラー型試験機を用いて行い, 載荷は一方単調増加とした。計測項目は, 荷重, 鋼とコンクリートとの相対ずれ, 及び孔あき鋼板の降伏を判定するために鋼板のひずみとした。Fig. 3 に変位計測位置を示す。鋼とコンクリートとの相対ずれは, Fig. 3 に示すとおり孔あき鋼板が取り付けである 4 箇所において計測した。

Table 1 試験体一覧
(List of Test Specimens)

試験体*1	孔径 $d(\text{mm})$	鋼板 厚さ $t(\text{mm})$	孔の 中心間隔 $\Delta(\text{mm})$	鋼板 長さ $L(\text{mm})$	鋼板断面積 (孔欠損考慮) $A_s(\text{mm}^2/\text{枚})$	コンクリート 圧縮強度 $\sigma_{c'}(\text{N/mm}^2)$	鋼板 降伏強度 $\sigma_{sy}(\text{N/mm}^2)$
S-12-70	60	12	70	210	360	34.9	333
S-12-75	60	12	75	225	540	34.9	333
S-12-80	60	12	80	240	720	34.3	363
S-12-100	60	12	100	300	1440	51.9	363
S-6-80	60	6	80	240	360	34.9	349
S-6-100	60	6	100	300	720	34.9	349
C-12-140-L	60	12	140	420	2880	23.1	333
C-12-140-H	60	12	140	420	2880	36.3	333
C-25-140-L	60	25	140	420	6000	21.8	330
C-25-140-H	60	25	140	420	6000	36.3	330
D-12-90	60	12	90	270	1080	23.1	333
D-12-90-R	60	12	90	270	1080	23.1	333

*1: ①-②-③-④

①: シリーズ; S (鋼板破壊), C (コンクリート破壊), D (打設方向)

②: 鋼板厚さ, ③: 孔間隔

④: L (コンクリート強度低), H (コンクリート强度高), R (打設方向が逆)

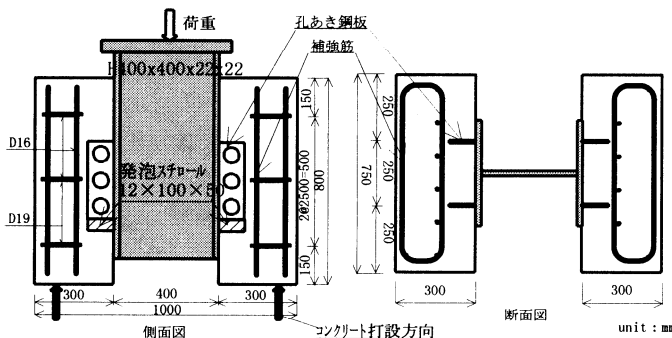


Fig.2 試験体形状図
(Detail of Specimens)

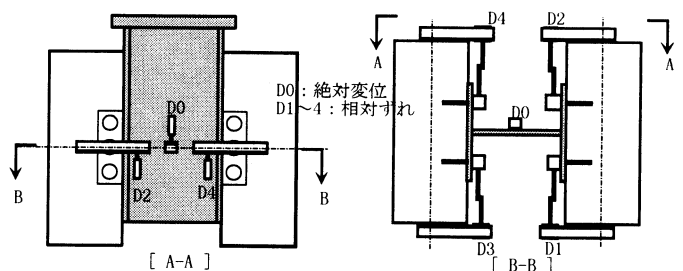


Fig.3 計測位置図
(Measurement Position)

IV. 実験結果と検討

Table 2 に実験結果一覧を示す。実験結果として、せん断耐力、及せん断耐力時の相対ずれである最大ずれ量を示す。また、初期ずれ剛性を把握する目的で、荷重-ずれ関係におけるせん断耐力の1/3点と原点を結ぶ割線剛性であるずれ定数(K)を示す⁵⁾。なお、ずれ定数は孔あき鋼板2枚分の荷重から求めた。

破壊形態は鋼板の破壊とコンクリートの破壊とに区別した。ここで、鋼板の破壊はせん断耐力を示す前に鋼板が降伏した場合で、コンクリートの破壊はせん断耐力を示した時に鋼板が降伏していなかった場合とした。

1. 全体挙動について

Table 2 から、孔あき鋼板ジベルのせん断耐力は1孔当たり85～166 kNであった。実験値と計算値を比較すると、その差は試験体によって異なっており、実験値と計算値が一致しているとは言えなかった。ただし、破壊形態はDシリーズを除いて計算値から想定される通りの結果となった。Dシリーズの破壊形態が想定した形態と異なったのは、二つの計算値がほぼ等しく、両破壊形態の境界にあったためだと思われる。

最大ずれ量は、コンクリート破壊の試験体の方が小さく、ずれ定数についてはコンクリート破壊の試験体の方が大きかった。これは、コンクリート破壊の孔あき鋼板は孔間隔が大きく、孔あき鋼板の剛性が大きいためだと考えられる。

また、ずれ定数は同程度の耐力を

有する頭付きスタッドの場合と比べても大きく⁶⁾、孔あき鋼板ジベルは高いずれ剛性を必要とする場合に有効であると考えられる。

Fig. 4 に全ての試験体の荷重-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見られなかったため4点の平均で代表させた。

荷重は、破壊形態に関係なくせん断耐力を示した後も徐々に低下しており、相対ずれが大きくなっても比較的大きな荷重を保持していた。鉄筋を孔の中に通した場合の実験では、せん断耐力を示した後も荷重が大きく低下しないことが報告されているが⁶⁾、これは鉄筋のダウエル作用によるものと考えられる。しかし、本研究のように鉄筋を孔の中に通さない場合についても、急激な荷重の低下は生じておらず、摩擦力によりずれに抵抗しているものと思われる。

Table 2 実験結果一覧
(List of Test Results)

試験体	せん断耐力 P (kN)	せん断耐力 1枚当たり P' (kN/枚)	せん断耐力 1孔当たり P'' (kN/孔)	破壊 形態	最大 ずれ量 δ_{Pmax} (mm)	ずれ定数 K (kN/mm)	計算値*1) コンクリート破壊 (kN/枚)	計算値*2) 鋼板破壊 (kN/枚)
S-12-70	1242	311	104	鋼板	5.39	2993	621	173
S-12-75	1360	340	113	鋼板	5.43	4387	621	259
S-12-80	1560	390	130	鋼板	8.28	4105	610	376
S-12-100	2170	543	181	鋼板	2.11	6781	923	753
S-6-80	1014	254	85	鋼板	15.36	3826	621	181
S-6-100	1323	331	110	鋼板	23.02	4200	621	362
C-12-140-L	1315	329	110	コンクリート	3.42	10522	411	1381
C-12-140-H	1967	492	164	コンクリート	1.22	12690	646	1381
C-25-140-L	1546	387	129	コンクリート	1.50	13443	388	2851
C-25-140-H	1992	498	166	コンクリート	0.76	19920	646	2851
D-12-90	1387	347	116	鋼板	5.31	3853	411	518
D-12-90-R	1381	345	115	鋼板	6.91	791	411	518

*1: 式 (2) より計算

*2: 式 (2) より計算

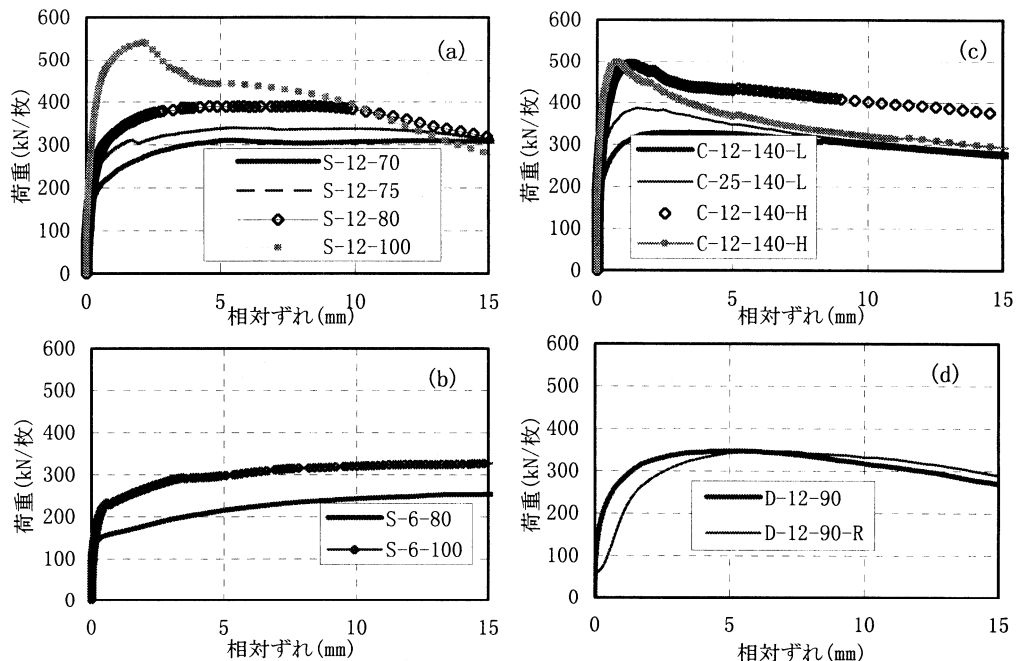


Fig.4 荷重-相対ずれ関係
(Load-Relative Slip Curves)

2. せん断耐力について

(1) 鋼板が破壊する場合

せん断耐力時に鋼板が降伏した試験体、S-12-70, S-12-75, S-12-80, S-12-100, S-6-80, S-6-100 について、Fig. 5 にせん断耐力と鋼板降伏強度との比と鋼板断面積の関係を示す。また、式(1)による計算値を図中に破線で示す。

図から、鋼板厚が同じであれば、断面積の増加に伴いせん断耐力も増加し、それはほぼ直線的に増加することが分かる。鋼板厚が6mmの場合と12mmの場合とを比較すると、図中に直線で示すように、実験値を結んだ直線の勾配は同程度であるがせん断耐力は鋼板厚が薄い6mmの方が小さくなっている。これより、鋼板が破壊する場合の耐力は、断面積だけでなく、孔間隔と鋼板厚との比などの形状による影響があると考えられる。

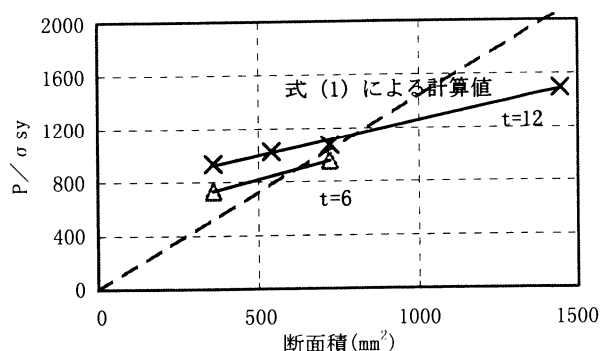


Fig. 5 P/σ_{sy} -鋼板断面積関係
(P/σ_{sy} -Cross Section Relationships)

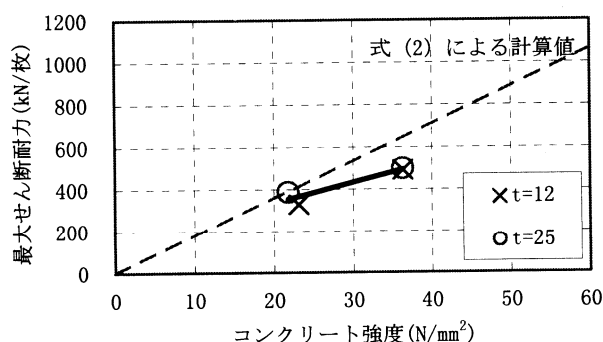


Fig. 6 せん断力-コンクリート強度関係
(Shear Force-Concrete Strength Relationships)

実験値と計算値を比較すると、実験値を結んだ直線の勾配は計算値よりも小さく、断面積の増加に対するせん断耐力の増分は小さかった。

以上より、本実験の条件において Leonhardt の式を適用するためには、式(1)の係数を低減する必要がある。また、Fig. 5 から断面積 A_s が 700mm^2 以下であれば(1)式でせん断耐力を安全側に算定することは可能であると思われる。

(2) コンクリートが破壊する場合

コンクリート破壊の場合において、コンクリート強度の違いによるせん断耐力を比較するために、孔あき鋼板の寸法が等しくコンクリート強度のみが異なる C-12-140-L 及び C-12-140-H、並びに C-25-140-L 及び C-25-140-H について比較する。Fig. 6 にせん断耐力とコンクリート強度の関係を示す。また、式(2)による計算値を破線で示す。

図から、コンクリート強度の増加に伴いせん断耐力も増加していることが分かる。また、鋼板厚の違いによる影響をみると、 $t=6\text{mm}$ の場合と $t=12\text{mm}$ の場合とではせん断耐力に明確な差は見られなかった。

実験値と計算値を比較すると、鋼板が破壊する場合と同様に、実験値を結んだ直線の勾配は計算値より小さかった。これは、(2)式を導いた際の実験条件に比べ孔径が大きいため、骨材と孔径の関係や孔径と鋼板厚の関係が異なるためだと考えられる。

以上より、本実験の条件において Leonhardt の式を適用するためには、式(2)の係数を低減することで耐力を算定することが可能であると思われる。

3. コンクリートの打設方向の影響について

孔あき鋼板形状及びコンクリート強度が等しく、打設方向のみが異なる、D-12-90 と D-12-90-R とを比較する。Fig. 4(d)に示すようにせん断耐力はほぼ等しいが、D-12-90-R は 60kN を超えた辺りでずれが進行し、剛性が低下している。

剛性低下の原因として、D-12-90-R の打設方向では頭付きスタッドの場合と同様に鋼板から支圧力を受けるコンクリート部分にブリージングが形成されるため、それが悪影響を与え、ずれが生じたものと考えられる。また、せん断耐力が等しかったのは、Table 2 の計算値に示すように、当初はコンクリートの破壊を意図したものの、実際には鋼板の破壊となり鋼板の強度により耐力が決まったためだと思われる。よって、コンクリートの破壊であれば、ブリージングの影響によってコンクリートのせん断面が減少するなどの現象が生じ、せん断耐力は低下すること考えられる。

V. まとめ

鋼とコンクリートの機械的なずれ止め方法として孔あき鋼板ジベルを考え、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、以下の点が確認された。

- 鋼板が破壊する場合、せん断耐力は鋼板断面積の増加に伴って増加した。また、断面積に対するせん断耐力の増分は Leonhardt の提案する式より小さかった。
- コンクリートが破壊する場合、せん断耐力はコンクリート強度の増加に伴って増加した。また、コンクリート強度に対するせん断耐力の増分は Leonhardt の提案する式より小さかった。
- 鋼板が破壊する場合、コンクリートの打設方向はせん断耐力には影響を与えないが、ずれ剛性に影響を与えることが確認された。

本研究では、孔あき鋼板の孔径を限定し実験を実施した。孔あき鋼板ジベルは孔径などの鋼板形状を変化させるとその破壊形態も変化すると考えられる。今後、本研究で実施した実験結果と解析による研究を進め、耐力算定法を提案するとともに、孔あき鋼板ジベルの特性を生かした適用方法を提案していく予定である。

参考文献

- Leonhardt, F. et al. ; Neues vorteilhaftes verbundmittel fur stahlverbund-tragwerke mit hoher dauerfestigkeit, Beton- und Stahlbetonbau, 1987. 12.
- 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, Vol. 19, 1997. 6, pp. 1503-1508.
- 平陽兵, 古市耕輔, 山村正人; 孔あき鋼板ジベルの実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, 1998. 7.
- 赤尾親助, 栗田章光他; 頭付きスタッドの押抜き挙動に及ぼすコンクリートの打ち込み方向の影響, 土木学会論文集, Vol. 380, 1987.
- (社)日本鋼構造協会, 頭付きスタッドの押抜き試験方法(案)スタッドに関する研究の現状, 1996.
- 保坂鐵矢, 平城弘一他; 鉄道用連続剛性桁に用いるずれ止め構造のせん断特性に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 44A, 1998, pp1497~pp. 1504.