

(7) 拘束度の高い押抜き試験に基づく 孔あき鋼板ジベルの強度評価

中島章典¹・橋本昌利²・小関聡一郎³・鈴木康夫⁴

¹フェロー会員 宇都宮大学大学院教授 工学研究部循環生産研究部門 (〒 321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2)

Email: akinorin@cc.utsunomiya-u.ac.jp

²学生会員 宇都宮大学大学院 工学研究科 博士前期課程 (〒 321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2)

Email: mt116433@cc.utsunomiya-u.ac.jp

³正会員 ジェイアール東日本コンサルタンツ株式会社 (〒 171-0021 東京都豊島区西池袋 1-11-1)

⁴正会員 宇都宮大学大学院助教 工学研究部循環生産研究部門 (〒 321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2)

Email: yasuo-s@cc.utsunomiya-u.ac.jp

鋼コンクリート複合構造のずれ止めとして用いられる孔あき鋼板ジベルの強度評価式はいくつか提案されているが、これらは合成桁への適用を念頭においたものが多く、近年施工例が増えている複合ラーメン橋などに用いられる孔あき鋼板ジベルの強度を適切に評価しているとは言い難い。本研究では、頭付きスタッドの押抜き標準試験とは異なり、ジベル鋼板をコンクリートブロックで取り囲む拘束度の高い試験体を用いた3シリーズの実験検討を行い、せん断耐力やせん断力-ずれ変位関係などを確認した。それらの結果に基づき、孔あき鋼板ジベルのせん断耐力への影響因子を考慮した強度評価式の作成を試みる。

Key Words : *steel-concrete hybrid structure, perfobond strip relation, push-out test, shear resistance, shear force-slip, design formula*

1. はじめに

鋼コンクリート複合構造物では、異種材料間の応力伝達のために材料間の一体化が必要とされる。近年、鋼板に孔を空けてコンクリートと一体化させる孔あき鋼板ジベルが注目されている。孔あき鋼板ジベルは疲労強度が高いことや、施工性に優れているという理由から、鋼コンクリート複合構造物への施工例が増えつつある。孔あき鋼板ジベルは1987年に合成桁用のずれ止めとしてLeonhardtら¹⁾によって提案、発表されて以来、わが国においても、孔あき鋼板ジベルの基本性状を明らかにするための研究^{2)~7)}、孔あき鋼板ジベルの各種複合構造への実用化に向けた研究^{8)~11)}が数多くなされている。また、Leonhardtら¹⁾をはじめ、合成桁への適用を目的とした孔あき鋼板ジベルの強度評価式^{12)~14)}がいくつか提案されており、土木学会から出版された複合構造標準示方書¹⁵⁾(以下、複合示方書と呼ぶ)には、強度評価式のみではなく、せん断力-ずれ変位関係式も規定されている。

近年では、複合ラーメン橋などに孔あき鋼板ジベルを用いる施工例が増えてきている。しかし、一般的に複合ラーメン橋の剛結部における鋼板と周辺コンクリートは鋼殻などに囲まれているためスタッドの押抜き標準試験¹⁶⁾と同じタイプの押抜き試験におけるずれ止めの拘束の程度よりは、拘束度が幾分高いと考えられる。

このことから、これまでに提案されてきた合成桁への適用を念頭においた孔あき鋼板ジベルの強度評価式のみではなく、拘束度の高い複合ラーメン橋剛結部などに適用できる強度評価式の提案が必要と考えられる。また、孔あき鋼板ジベルは孔内コンクリートの破壊強度や周辺コンクリートの拘束度がせん断耐力に影響すると考えられるが、複合示方書で提案されている強度評価式では貫通鉄筋がない場合、ジベルの孔径、板厚、コンクリート圧縮強度のみの変数で強度評価式が提案されている。このことから、孔あき鋼板ジベルの周辺のコンクリートブロック寸法の影響も強度評価式に考慮する必要がある。

そこで本研究では、3つのシリーズに分け実験を行い、コンクリートブロック寸法、コンクリートの圧縮強度およびジベル孔径の影響を検討した。まずシリーズ1の実験ではコンクリートブロック寸法が孔あき鋼板ジベルに及ぼす影響を確認するため、周辺のコンクリートブロック寸法をパラメータとした試験体を用いた実験を行った。シリーズ2の実験ではコンクリートブロック寸法を一定とし鋼板の孔径、コンクリートの圧縮強度をパラメータとした実験を行った。最後にシリーズ3の実験では孔径のみをパラメータとした試験体を製作するが、シリーズ2よりもコンクリートブロック寸法の大きい試験体によって実験を行った。これらのパラメータが孔あき鋼板ジベルのせん断耐力に及ぼ

表-1 シリーズ1の試験体一覧

	試験体名	B (mm)	H (mm)	配筋 (本)	d (mm)	f'_c (N/mm ²)	f_t (N/mm ²)	せん断耐力 (kN)	ずれ変位 (mm)	備考
シリーズ1	B4H4NB-1	400	400	-	50	32.6	3.3	181.0	5.0	基準
	B4H4NB-2	400	400	-	50	32.6	3.3	126.9	1.9	基準
	B3H4-1	300	400	4	50	32.6	3.3	131.5	5.2	
	B3H4-2	300	400	4	50	32.6	3.3	105.6	2.0	
	B5H4-1	500	400	4	50	32.6	3.3	219.0	1.9	
	B5H4-2	500	400	4	50	32.6	3.3	210.7	1.8	
	B4H3-1	300	400	4	50	32.6	3.3	166.1	4.7	
	B4H3-2	300	400	4	50	32.6	3.3	126.0	2.6	
	B4H5-1	300	500	6	50	32.6	3.3	180.6	2.5	
	B4H5-2	300	500	6	50	32.6	3.3	199.3	2.2	
	B4H4NP-1	400	400	4	-	32.6	3.3	23.9	0.03	孔無
	B4H4NP-2	400	400	4	-	32.6	3.3	25.8	0.02	孔無
	B4(1)H4NC-1	400(100)	400	-	50	32.6	3.3	42.5	0.6	かぶり無
	B4(1)H4NC-2	400(100)	400	-	50	32.6	3.3	22.7	0.1	かぶり無
	B3H4PC-1	300	400	4	50	32.6	3.3	141.9	2.4	開き止有
	B3H4PC-2	300	400	4	50	32.6	3.3	160.6	3.3	開き止有

す影響を確認し、全シリーズの実験結果に対して統計処理を行い、拘束度の高い複合ラーメン橋剛結部などに適用できる孔あき鋼板ジベルの強度評価式の作成を試みた。

2. シリーズ1の実験

(1) 試験体

本研究では、従来用いられているスタッドの押抜き標準試験体とは異なり、孔あき鋼板ジベルを取り囲むようにコンクリートブロックを設けた図-1のような押抜き試験体を使用する。シリーズ1の試験ではコンクリートブロック寸法をパラメータとすることにより、コンクリートブロック寸法がせん断耐力に及ぼす影響を確認すると同時に、試験体にひび割れが生じていないことを確認する。具体的な試験体寸法を図-1に示す。基本的に試験体はジベル孔を一個有する鋼板をコンクリートで囲み、試験体の底面に空隙を設けることにより載荷荷重に対する反力がジベル孔内の充填コンクリート以外で受け持たないようにする。試験体の詳細を表-1に示す。試験体名はBをコンクリートブロック幅、Hがコンクリートに埋め込まれている鋼板の高さとする。例として、試験体 B4H4 の場合コンクリートブロック幅 $B_1=B_2=400\text{mm}$ 、高さ $H=400\text{mm}$ であることを意味し、最後に示す数字は試験体番号である。基本的にコンクリートブロック幅 B_1 と B_2 は等しい寸法であるが、例外として B4(1)H4NC は $B_1=100\text{mm}$ 、 $B_2=400\text{mm}$ とし、 B_1 方向のかぶりが無い試験体となっている。また、試験体 B3H4PC では図-1の右上図に示すよう試験体上下端に開止めを設置した。この際、開止めによる拘束力が影響しないように、落下しない程度に締めつけている。試験体 B4H4NB ではコンクリートブロック

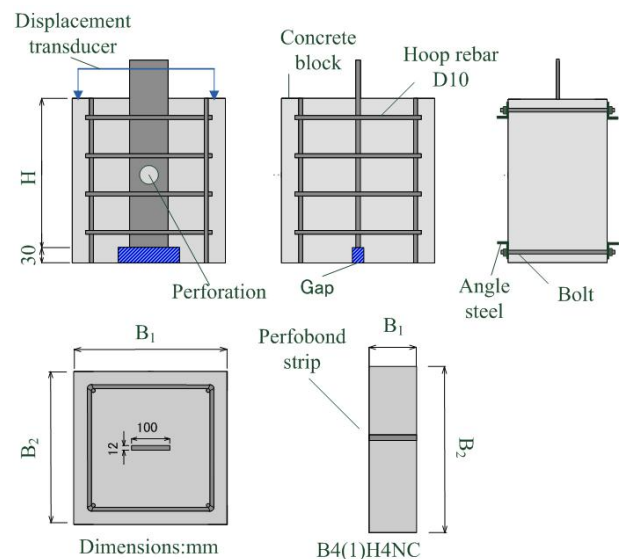


図-1 押抜き試験体の形状

中の帯鉄筋がない試験体、試験体 B4H4NP では鋼板とコンクリートの付着の影響を確認するためにジベル孔がない試験体となっている。平鋼板は幅 100mm、厚さ 12mm、ジベル孔径 50mm とした。帯鉄筋の配置は高さに応じて本数を変更し、高さが $H=300, 400\text{mm}$ の場合は 4 本、 $H=500\text{mm}$ の場合は 6 本と定めた。打設前に鋼板にはグリースを塗り、鋼とコンクリート間の付着力が孔あき鋼板ジベルのせん断耐力に及ぼす影響を極力小さくした。

(2) 測定項目

押抜き試験体の載荷試験に際しては、鋼板上部とコンクリートブロック上面間の相対変位を高感度変位計により 2 点計測を行う。高感度変位計の設置位置を図-1の左上図に示す。

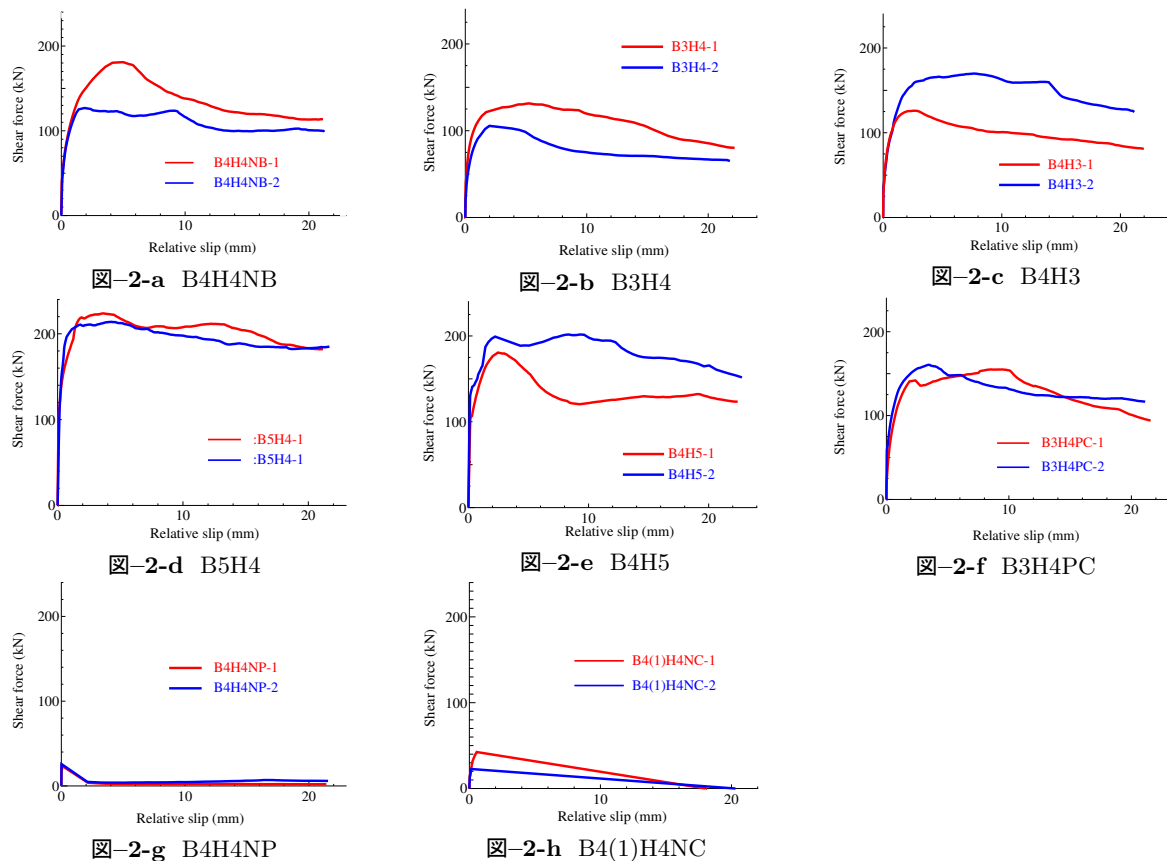


図-2 シリーズ 1 のせん断力-ずれ変位関係

(3) 試験方法

油圧ジャッキを有するフレーム載荷試験機を用いて、平鋼板のみから荷重が作用するように試験体の平鋼板突き出し部上面から荷重を載荷した。試験体の下には砂を敷き、鋼板の垂直を保たせるとともに、試験体底面と載荷台との摩擦の影響を小さくしている。なお、コンクリートと鋼板の相対変位が 20mm を越えるまで単調増加荷重を載荷した。

(4) 使用材料

ジベル鋼板には SS400 を使用し、その降伏強度、引張強度はそれぞれ 355N/mm²、446N/mm² である。また帯鉄筋には D10 を使用し、その降伏強度、引張強度はそれぞれ 365N/mm²、528N/mm² である。シリーズ 1 のレディーミクストコンクリートを用いた押抜き試験時のコンクリート圧縮強度 f'_c 、引張強度 f_t の平均値はそれぞれ 32.6、3.3N/mm² である。

(5) シリーズ 1 の実験結果

a) せん断力-ずれ変位関係

シリーズ 1 のすべての試験体のせん断力-ずれ変位関係を図-2 に示す。縦軸には孔あき鋼板ジベルに作用するせん断力を示し、横軸には鋼板とコンクリートブロッ

ク上面の相対変位をずれ変位として示している。なお、せん断力-ずれ変位関係において明らかにせん断力が低下した最初の点を孔あき鋼板ジベルのせん断耐力とする。かぶり無しの試験体 B4(1)H4NC とジベル孔を設けていない試験体 B4H4NP を除くと、すべての試験体において、ずれ変位が数 mm 程度でせん断耐力を示し、その後のせん断力は緩やかに減少している。ここでは、かぶり無しの試験体 B4(1)H4NC 以外、すべてコンクリートブロックの表面にはひび割れが生じていないことを確認した、このことからひび割れの影響がないせん断耐力が得られたと考えられる。かぶり無しの試験体 B4(1)H4NC の結果は図-2-h に示すように、ずれ変位が 1mm 以下の段階でひび割れが生じせん断耐力に到達し、せん断力がゼロになっている。一方、開き止めを有する試験体 B3H4PC の結果では同寸法の試験体 B3H4 と比較すると開き止めを設けたことによりせん断耐力が約 1.3 倍増加していることがわかる。これらのことから鋼板周辺のコンクリートブロックの寸法やコンクリートブロックの拘束が孔あき鋼板ジベルのせん断耐力に及ぼす影響は大きいと考えられる。またジベル孔が無い試験体 B4H4NP では図-2-g に示すように、ずれ変位が 0.1mm の段階でせん断耐力を示し、その後はゼロに近いせん断力を保ったままずれ変位が増加し

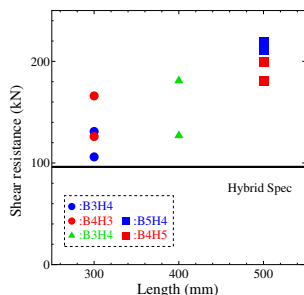


図-3 コンクリートブロック寸法の影響

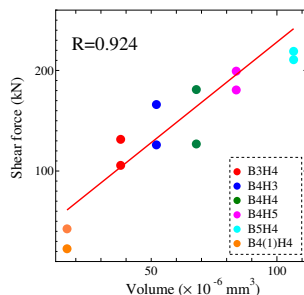


図-4 体積の影響

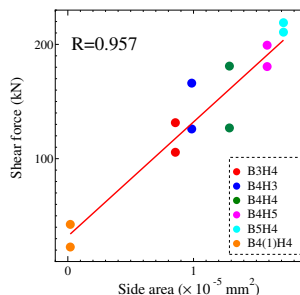


図-5 側面面積の影響

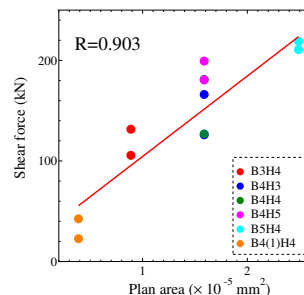


図-6 立面面積の影響

ている。このことから本実験では付着力がせん断力に及ぼす影響は微小なものと考えられる。また図-2-a を見てわかるように、同寸法の試験体であってもせん断耐力やせん断力-ずれ変位関係に大きな差異が生じている場合がいくつか見受けられる。この理由についての考察は後述する。

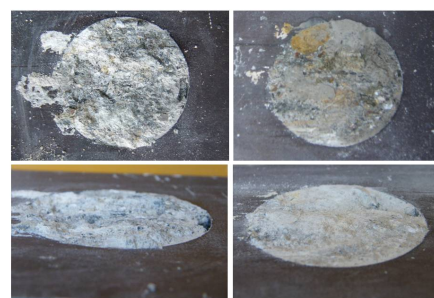
b) せん断耐力とコンクリートブロック寸法の関係

各試験体のせん断耐力とコンクリートブロック寸法の影響を図-3 に示す。縦軸はせん断耐力を示し、横軸はコンクリートブロックの幅 B あるいは高さ H を示している。また図中には、複合示方書に規定される強度評価式によるせん断耐力を実線で示している。強度評価式によるせん断耐力は、試験中のコンクリートの圧縮強度 $f'_c=32.6\text{N/mm}^2$ を用い、部材係数は 1.0 として算定している。この図から同じ寸法の孔あき鋼板ジベルを有する試験体であっても、コンクリートブロック寸法が大きくなるにつれてせん断耐力は大きくなることを確認できる。また、いずれのコンクリートブロック寸法の場合においても、そのせん断耐力は複合示方書に規定されるせん断耐力よりも大きい値を示している。この理由は、複合示方書に規定される孔あき鋼板ジベルの強度評価式は、基本的にスタッドの押抜き標準試験と同様の試験体を用いて実施された実験結果に基づいて規定されているためと考えられる。

次に、せん断耐力に最も影響するコンクリートブロックの諸元を調べるため、図-4、図-5、図-6 にそれぞれコンクリートブロックの体積、コンクリートブロックの側面面積(図-1 の左上図に示す視点からみた場合のコンクリートブロックのみの側面面積)、コンクリートブロックの立面面積(図-1 の左下図に示す視点からみた場合のコンクリートブロックのみの立面面積)を横軸にとり、縦軸にはせん断耐力をとる。これらの結果から側面面積とせん断耐力の間に相関係数 R が 0.957 と最も高い相関が得られたので、孔あき鋼板ジベルのせん断耐力は側面面積の影響を大きく受けると言える。せん断耐力-体積関係よりもせん断耐力-側面面積関係の相関が高いことから、コンクリートブロック寸法における B₂ よりも B₁ の寸法がせん断耐力に影響する可能性がある。

表-2 試験体 B4H4NB のジベル孔内の粗骨材数

試験体	骨材径 30~ 20mm (個)	骨材径 20~ 10mm (個)	骨材系 10mm 以下 (個)	最大 骨材径 (mm)
B4H4NB-1	1	8	5	25.8
B4H4NB-2	0	7	8	18.3



B4H4NB-1

B4H4NB-2

写真-1 試験体ジベル孔付近の切断面

c) ジベル孔せん断破壊面の骨材の影響

ところで、シリーズ 1 では同寸法の試験体であってもせん断耐力にばらつきが生じるものが多く見受けられた。B4H4NB-1 のせん断耐力は B4H4NB-2 のせん断耐力の約 1.4 倍であり、図-2-a から、大きな差が生じていることがわかる。この理由は写真-1 に示すように、B4H4NB-1 の方が B4H4NB-2 に比べジベル孔内コンクリート破壊面の凹凸が大きく、このことがせん断力-ずれ変位関係やせん断耐力に影響したと考えられる。さらに、切断面のジベル孔内に残ったコンクリートを塩酸に浸し、粗骨材を取り出したところ表-2 のような結果が得られた。B4H4NB-1 の方が最大骨材径は大きく、10mm 以上の骨材も多く存在していることから骨材の大きさ、種類や配置がせん断耐力に影響を及ぼしたと考えられる。また骨材によって B4H4NB-1 のように急激にせん断力が減少するものと B4H4NB-2 のようにせん断耐力が得られた後もせん断力を維持するようなせん断力-ずれ変位関係の違いが生まれる。

表-3 シリーズ2の試験体一覧

	試験体名	B (mm)	H (mm)	配筋 (本)	d (mm)	f'_c (N/mm ²)	f_t (N/mm ²)	せん断耐力 (kN)	ずれ変位 (mm)
シリーズ2	D5C3-1	400	400	4	50	29.0	2.4	159.6	2.7
	D5C3-2	400	400	4	50	29.0	2.4	120.7	3.9
	D5C3-3	400	400	4	50	29.0	2.4	163.2	5.9
	D6C3-1	400	400	4	60	29.0	2.4	188.5	8.5
	D6C3-2	400	400	4	60	29.0	2.4	221.3	8.2
	D6C3-3	400	400	4	60	29.0	2.4	187.8	8.7
	D7C3-1	400	400	4	70	29.0	2.4	257.2	10.5
	D7C3-2	400	400	4	70	29.0	2.4	268.2	10.9
	D7C3-3	400	400	4	70	29.0	2.4	236.2	10.0
	D5C4-1	400	400	4	50	48.6	3.4	207.3	4.3
	D5C4-2	400	400	4	50	48.6	3.4	172.5	2.7
	D5C4-3	400	400	4	50	48.6	3.4	165.1	2.5
	D5C5-1	400	400	4	50	53.8	4.2	190.6	1.8
	D5C5-2	400	400	4	50	53.8	4.2	199.6	2.6
	D5C5-3	400	400	4	50	53.8	4.2	249.7	7.0

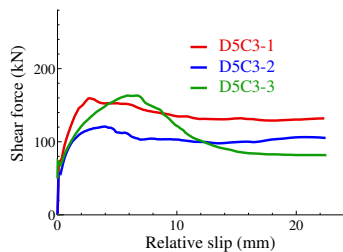


図-7-a D5C3

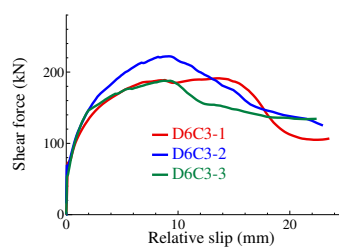


図-7-b D6C3

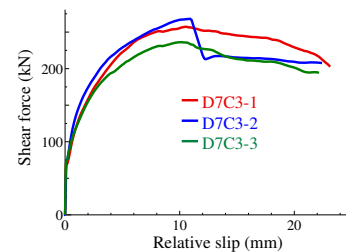


図-7-c D7C3

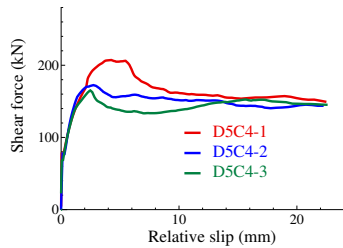


図-7-d D5C4

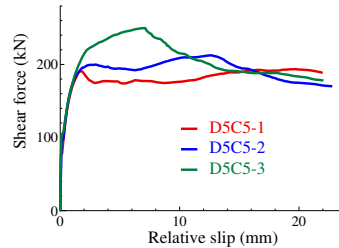


図-7-e D5C5

図-7 シリーズ2のせん断力-ずれ変位関係

3. シリーズ2の実験

(1) 試験体, 測定項目, 载荷方法

シリーズ2の試験体のコンクリートブロック寸法はすべてシリーズ1におけるB4H4のコンクリートブロック寸法と同じとし、孔径50, 60, 70mmの3種類、想定したコンクリートの圧縮強度を30, 40, 50N/mm²の3種類としたパラメータを設定し、各試験体3体ずつ製作した。試験体名は例としてD5C3の場合、D5が孔径50mm, C3がコンクリート圧縮強度 $f'_c=30\text{N/mm}^2$ を意味する。また鋼板はすべて幅120mm, 厚さ12mmである。

シリーズ2における測定項目及び試験方法はシリーズ1と同様である。

(2) 使用材料

ジベル鋼板にはSS400を使用し、その降伏強度、引張強度はそれぞれ364N/mm², 450N/mm²である。また帯鉄筋にはD10を使用し、その降伏強度、引張強度はそれぞれ388N/mm², 507N/mm²である。シリーズ2のコンクリートの圧縮強度 f'_c を30, 40, 50N/mm²と変化させて打設した場合の実際のコンクリート圧縮強度の平均値はそれぞれ29.0, 48.6, 53.8N/mm²となった。また引張強度 f_t の平均値はそれぞれ2.4, 3.4, 4.2N/mm²となった。

(3) シリーズ2の実験結果

a) せん断力-ずれ変位関係

シリーズ2の全試験体のせん断力-ずれ変位関係を図-7に示す。シリーズ2の試験体においてもすべてせん断力は2~10mm程度で最大値を示している。

しかし、孔径をパラメータとした図-7-a, 図-7-b,

表-4 シリーズ3の試験体一覧

	試験体名	B (mm)	H (mm)	配筋 (本)	d (mm)	f'_c (N/mm ²)	f_t (N/mm ²)	せん断耐力 (kN)	ずれ変位 (mm)
シリーズ3	D3-1	500	420	4	30	30.5	3.1	57.8	3.6
	D3-2	500	420	4	30	30.5	3.1	48.7	2.3
	D3-3	500	420	4	30	30.5	3.1	40.2	6.4
	D6-1	500	420	4	60	30.5	3.1	275.4	7.3
	D6-2	500	420	4	60	30.5	3.1	176.4	7.6
	D6-3	500	420	4	60	30.5	3.1	210.1	5.8

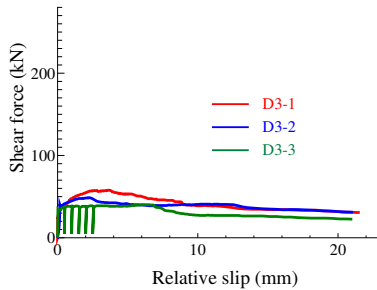


図-8-a D3

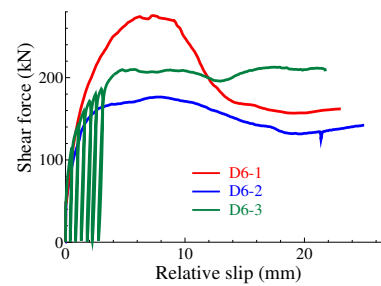


図-8-b D6

図-8 シリーズ3のせん断力-ずれ変位関係

図-7-cに着目すると、孔径が増加するにつれて、せん断耐力時のずれ変位が平均的に大きくなっていることがわかる。また、孔径 70mm の試験体 D7C3-2 の最大値付近のせん断力が急激に減少しているが、これは押抜き試験中に試験体にひび割れが生じてしまったことが原因であり、D7C3-2 ではひび割れが生じない場合のせん断耐力が得られなかった。他の試験体においてひび割れは発生していない。

一方、コンクリートの圧縮強度の変化に着目すると、せん断耐力時のずれ変位に大きな違いは見られないが、コンクリートの圧縮強度が大きくなるにつれて、やはりせん断耐力は大きくなっている。

4. シリーズ3の実験

(1) 試験体、測定項目、载荷方法

シリーズ3の試験体ではコンクリートブロック寸法を幅 B=500mm、高さ H=450mm に定め、孔径を 30, 50mm の2種類とした各3体製作した。鋼板はすべて幅 150mm、厚さ 12mm である。試験体名は例として D3-1 の場合、孔径 30mm、試験体番号 1 を意味する。

シリーズ3における測定項目はシリーズ1, 2と同様とする。载荷方法として3体中2体はシリーズ1, 2と同様に単調载荷し、1体は漸増繰返し载荷を行う。この場合、ずれ変位が 0.5mm 増加するごとに除荷を行い、ずれ変位が 3mm に到達した時に漸増繰返し载荷から単調载荷に切り替える。どの载荷方法においてもずれ変位が 20mm に達した時点で载荷を終了する。

(2) 使用材料

ジベル鋼板には SS400 を使用し、その降伏強度、引張強度はそれぞれ 361N/mm², 439N/mm² である。また帯鉄筋には D10 を使用し、その降伏強度、引張強度はそれぞれ 409N/mm², 548N/mm² である。押抜き試験時のコンクリート圧縮強度 f'_c 、引張強度 f_t の平均値は 30.5, 3.1N/mm² となった。

(3) シリーズ3の実験結果

シリーズ3のせん断力-ずれ変位関係を図-8に示す。シリーズ3もシリーズ2同様、ジベル孔径の拡大によりせん断耐力の増加が確認できる。また漸増繰返し载荷によるせん断耐力への影響はあまりないことを確認した。

一方、D6-1のせん断耐力が D6-2 のせん断耐力の約 1.6 倍となる結果が得られた。シリーズ3においても孔内骨材によるせん断耐力への影響が顕著に表れていると考えられる。

5. 強度評価式の試案

既往の研究及び本実験結果により、孔あき鋼板ジベルのせん断耐力にはジベル孔径、コンクリートの圧縮強度に加えて、コンクリートブロックの側面面積が大きく影響を及ぼしていることがわかる。このことから、シリーズ1, 2, 3の実験データのうちひび割れが生じた試験体以外の実験結果を用いて、ジベル孔径、コンクリートの圧縮強度、コンクリートブロックの側面面

積とせん断耐力の関係を統計処理して強度評価式の作成を試みる．ここでは，平城ら¹⁷⁾の研究に示されている方法を参考にして，重回帰分析を行い指数関数型の回帰式を求めた．回帰式に数値の丸めなどの処理を行い以下の強度評価式を得た．

$$Q_{u1} = 0.020A f_c'^{0.65} A_s^{0.51} \quad (1)$$

ここで， Q_{u1} はせん断耐力 (N)， A はジベル孔面積 (mm)， f_c' はコンクリートの圧縮強度 (N/mm²)， A_s はコンクリートブロックの側面面積 (mm²) としている．この式の適用範囲は本実験の変数の範囲内であり，ジベル孔径が 30～70(mm)， f_c' が 29～53.8(N/mm²)， A_s は $8.56 \times 10^4 \sim 1.58 \times 10^5$ (mm²) である．本研究のシリーズ 1, 2, 3 に加えて，コンクリートブロック寸法が異なる同様の試験体を用いた実験結果^{18),19)}も加えて，上記の強度評価式で得られたせん断耐力 Q_{u1} と実験で得られたせん断耐力 Q'_u の関係を図-9 に示す．縦軸に強度評価式により得られる値，横軸に実験値を示している．この図から，強度評価式によるせん断耐力と実験で得られたせん断耐力の相関は良いことがわかるので，同様の押抜きせん断試験体でコンクリートブロック寸法が本研究の範囲程度であれば，ここで作成した強度評価式によるせん断耐力をコンクリートブロック寸法に応じて評価することができると考えられる．

ところで，一般的に孔あき鋼板ジベルのせん断耐力の影響因子のひとつとしてコンクリートの圧縮強度が挙げられているが，孔あき鋼板ジベルの破壊性状に着目するとコンクリートの引張強度がせん断耐力に影響している可能性があるとも言える．そこで前述した強度評価式と同様の方法でジベル孔径，コンクリートの引張強度，コンクリートブロックの側面面積とせん断耐力の関係を統計処理し，強度評価式を作成した．作成した強度評価式を以下に示す．

$$Q_{u2} = 0.080A f_t A_s^{0.49} \quad (2)$$

ここで， f_t はコンクリートの引張強度 (N/mm²) であり，適用範囲は 2.2～4.2(N/mm²) としている．式 (2) で得られたせん断耐力 Q_{u2} と実験で得られたせん断耐力 Q'_u の関係を図-10 に示す．図からわかるように圧縮強度を引張強度に変えた場合でも相関の高い結果が得ることができた．式 (1)，式 (2) の作成する際に行った重回帰分析により得られた重相関係数はそれぞれ $R_1=0.94$ ， $R_2=0.93$ とほぼ等しい値が得られた．よって式 (2)，式 (2) の推定精度は同等であると考えられる．

また一般的に設計時のコンクリートの引張強度は圧縮強度に基づいて以下の式により求められる²⁰⁾．

$$f_t = 0.23f_c'^{2/3} \quad (3)$$

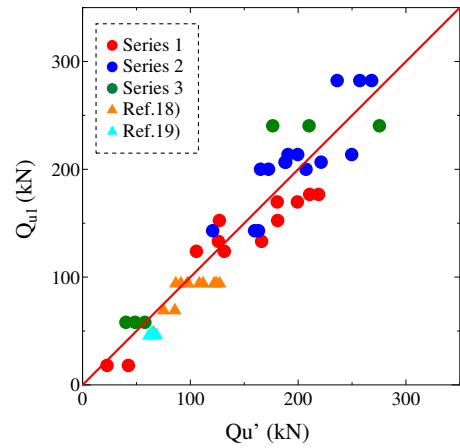


図-9 強度評価式 (1) と実験値の比較

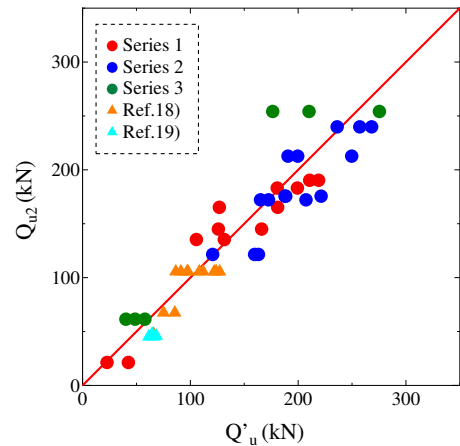


図-10 強度評価式 (2) と実験値の比較

ここで式 (3) を式 (2) に代入した場合以下の式が得られる．

$$Q_{u3} = 0.018A f_c'^{2/3} A_s^{0.49} \quad (4)$$

式 (1) と式 (4) の右辺の係数および各パラメータの乗数を比較してみると非常に近い数値になるという興味深い結果が得られた．

6. おわりに

本研究では，鋼コンクリート複合ラーメン橋の剛結部など拘束度の高い箇所に用いられる孔あき鋼板ジベルを想定し，孔あき鋼板ジベルの強度評価式を作成するために，孔あき鋼板ジベルをコンクリートブロックで取り囲む 3 つのシリーズの試験体を用いて検討した．シリーズ 1 においてはコンクリートブロック寸法に着目し，シリーズ 2, 3 ではジベル孔径，コンクリート圧縮強度を変数として試験体を製作した．これら 3 つのシリーズによる実験結果を整理し，以下のような知見が得られた．

1. 押抜き試験体のコンクリートブロックの寸法をパ

ラメータとした実験によって、コンクリートブロック寸法を増加させることにより、孔あき鋼板ジベルのせん断耐力が増加することを確認した。その際、コンクリートブロックの側面面積がせん断耐力に対して高い相関をもつことがわかった。

2. 同じ諸元を有する押抜き試験体であってもせん断力-ずれ変位関係やせん断耐力にいくらかの差異が生じる場合がある。この原因として、せん断破壊面となるジベル孔内に存在する粗骨材の大きさ、種類、配置などが考えられる。

3. 本研究の実験結果を整理して、ジベル孔径、コンクリートの圧縮強度、コンクリートの側面面積をパラメータとした孔あき鋼板ジベルの強度評価式の作成を試みた。この強度評価式によって、過去のデータ^{18),19)}と本研究の実験結果のせん断耐力を評価することができた。またジベル孔径、コンクリートの引張強度、コンクリートの側面面積をパラメータとして強度評価式を作成した場合でも同程度の相関を有する強度評価式が得られた。

今回作成を試みた強度評価式はあくまで本研究の試験結果のみによるものであるため、適応範囲が広い強度評価式とは言い難い。今後データの蓄積が必要と考えられる。また、貫通鉄筋を有する試験体による実験も今後の課題となる。

謝辞：本研究の一部は、科学研究費補助金（基盤研究(C)、課題番号 22560472）の補助を受けて実施した。また、本研究の内容については、土木学会複合構造委員会・複合構造ずれ止めの性能評価法に関する調査研究小委員会のメンバーに種々の有益なご意見をいただいた。ここに記して関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) Leonhardt, F., Andrä, W., Andrä, H.P. and Harre, W. : Neues, vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit, Beton- und Stahlbetonbau, 82 Heft 12, pp.325-331, 1987.12.
- 2) 平陽兵, 古市耕輔, 山村正人, 富永知徳 : 孔あき鋼板ジベルの基本特性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.3, pp.859-864, 1998.6.
- 3) 西海健二, 富永知徳, 室井進次, 古市耕輔 : 拘束条件を考慮した孔あき鋼板ジベルのずれ止め特性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.3, pp.865-870, 1998.6.
- 4) 上中宏次郎, 赤城尚宏, 鬼頭宏明, 園田恵一郎 : パフォー

Bondsストリップ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.1605-1616, 2000.3.

- 5) 明橋克良, 永田淳, 木水隆夫, 西川孝一 : コンクリートの打設方向を考慮した孔あき鋼板のせん断強度特性に関する実験的研究, 鋼構造論文集, 第 8 巻, 第 31 号, pp.81-87, 2001.9.
- 6) 日向優裕, 藤井堅, 深田和宏, 道管裕一 : 並列配置された孔あき鋼板ジベルの終局ずれ挙動, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.1089-1098, 2007.3.
- 7) 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, 2008.6.
- 8) 望月秀次, 安藤博文, 宮地真一, 柳澤則文, 高田嘉秀 : 孔あき鋼板ジベルを用いた混合桁接合部の静的力学特性に関する実験的検討, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.1479-1490, 2000.3.
- 9) 本間宏二, 平田尚 : 孔あき鋼板ジベルを用いた鋼桁-RC 橋台接合構造の実験的研究, 鋼構造論文集, 第 8 巻, 第 30 号, pp.23-30, 2001.6.
- 10) 高木優任, 中村俊一, 室井進次 : PBL を用いた複合ラーメン橋隅角部に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.49A, pp.1063-11074, 2003.3.
- 11) 岩崎初美, 藤井堅, 豊田正, 深田和宏 : 合成桁における鋼板ジベルのずれ挙動に関する研究, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.1483-1491, 2005.3.
- 12) 保坂鐵矢, 光木香, 平城弘一, 牛島祥貴, 橘吉宏, 渡邊滉 : 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.
- 13) 保坂鐵矢, 光木香, 平城弘一, 牛島祥貴 : 孔あき鋼板ジベルのせん断強度評価式と設計法に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.48A, pp.1265-1272, 2002.3.
- 14) 古内仁, 上田多門, 鈴木統, 田口秀彦 : 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 回復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.
- 15) 土木学会複合構造委員会 : 複合構造標準示方書 [2009 年制定], 2009.12.
- 16) 社団法人 日本鋼構造協会 : 頭付きスタッドの押抜き試験方法 (案) とスタッドに関する研究の現状, 1996.11.
- 17) 平城弘一, 松井繁之, 福本秀士 : 頭付きスタッドの強度評価式の誘導-静的強度評価式-, 構造工学論文集, Vol.35A, pp.1221-1232, 1989.3.
- 18) 中島章典, 小関聡一郎, 内藤雅人, 中島純平, 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分担に関する実験的研究, 構造工学論文集 Vol.57A, pp.996-1006, 2011.3.
- 19) 小関聡一郎, 中島章典, 鈴木康夫, 中島純平 : 十字型鋼板押抜き試験による孔あき鋼板ジベルのせん断力分担特性, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集, CS2-036, 2010.9.
- 20) 土木学会 : コンクリート標準示方書設計編 [2007 年制定]. 2007.10.

EVALUATION OF SHEAR STRENGTH OF PERFOBPND STRIP BASED ON RESTRAINED PUSH-OUT TEST

Akinori NAKAJIMA, Masatoshi HASHIMOTO, Soichiro KOSEKI and Yasuo SUZUKI

Recently, a Perfobond strip is used as the shear connector in the various steel-concrete hybrid structures. However, these design formulas are not always applicable to the one employed in the steel-concrete rigid frame bridge. In this paper, the shear resistance and the shear force-slip relation of the perfobond strip are examined experimentally by employing the push-out specimen different from the standard one for the stud shear connector. As a result, the design formula is proposed for evaluating the shear resistance of the perfobond strip taking into account the diameter of the perfobond strip and the concrete compressive strength, and the dimension of the concrete block of the test specimen.