(28) 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

中島章典1・橋本昌利2・グエンミンハイ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元宇都宮大学大学院 工学研究科 博士前期課程(〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2)
³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)
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に関する研究は広範に行われており、 せん断耐力評価式もいくつか提案されている.しかし、これらのせん断耐力評価式で得られる値と既往の実験 結果との相関は必ずしも良くない.本研究では、貫通鉄筋の無い孔あき鋼板ジベルに着目して、まず、ジベル 鋼板を取り囲むコンクリートブロックの大きさがせん断耐力に及ぼす影響を再確認する.また、ジベル鋼板厚 の影響についても検討する.さらに、孔あき鋼板ジベルのせん断抵抗機構に着目し、ジベル孔せん断面のひび 割れ発生、骨材の噛み合わせ状態、およびせん断抵抗に影響する拘束力を調べる実験を行い、せん断抵抗機構 の推定を試みる.そして、著者らが提案している貫通鉄筋の無い孔あき鋼板ジベルのせん断耐力評価式の適応 性を他の研究者らの実験結果も加えて確認する.

Key Words : steel-concrete hybrid structure, perfobond strip, push-out test, shear resistance, shear resisting mechanism

1. はじめに

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は、鋼板のジベル孔内に充填され るコンクリートのせん断抵抗で鋼材とコンクリートを 一体化させる. これらのコンクリートのせん断抵抗力 はジベル孔周辺の拘束の影響を受けるため、ジベル孔 を取り囲むコンクリートブロックの大きさやその中の 鉄筋配置あるいは藤井ら¹⁾も指摘しているように外部 からのコンクリートブロックの支持条件の影響などを 受ける. さらに, 孔あき鋼板ジベルのせん断抵抗を高 め、ジベル孔せん断面の破壊による急激な劣化を抑制 するために、わが国の孔あき鋼板ジベルの適用に際し 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.しかし、孔あき鋼板ジベルの最初の提案者である Leonhardt ら²⁾は、必ずしもジベル孔内に貫通鉄筋を 配置することを強く主張しておらず、コンクリートブ ロック内の鉄筋はジベル孔周辺のコンクリートの早期 の割裂を防止することを目的とすることが述べられて いる.

これに対して、構造物の形式によっては、施工性の 観点から、ジベル孔内に貫通鉄筋を配置するのが難し い場合や孔あき鋼板ジベルが鋼殻などの内部に配置さ れ、ジベル孔部分の拘束度が十分高い場合もあり、貫 通鉄筋を配置しない孔あき鋼板ジベルの使用例も多い 3),4) ところで、貫通鉄筋の無い孔あき鋼板ジベルのせん 断耐力評価式が Leonhardt らを始め、いくつか提案さ れている. Leonhardt ら²⁾によって提案された耐力評価 式は、以下に示すようにジベル孔部分のコンクリート のせん断面の破壊強度に基づいている.

$$V_u = 1.70d^2 f'_c \tag{1}$$

ここに、 V_u : 孔あき鋼板ジベルの孔1個あたりのせん 断耐力 (N), d: 孔径 (mm), f'_c : コンクリートの圧縮 強度 (N/mm²), ここでは、コンクリートのせん断強度 を円柱供試体の圧縮強度に換算して表している.

しかし、その後の研究者によって提案されている耐 力評価式の多くは孔あき鋼板ジベルの正確なせん断抵 抗機構に基づくものではなく、種々のパラメータを有 する実験データの統計処理に基づいて構築されている 場合が多い⁵⁾⁻⁷⁾.また、これらの耐力評価式を構築す るための実験では、合成桁への適用を想定した押抜き 試験体⁹⁾を用いており、複合構造標準示方書において も、保坂らの実験結果に基づき貫通鉄筋の無い場合も 含めて孔あき鋼板ジベルのせん断耐力評価式が規定さ れている⁸⁾.

これに対して,著者らは孔あき鋼板ジベルの周辺コ ンクリートにひび割れが生じにくい構造物への適応を 想定した押抜き試験体による実験結果に基づき,孔あ き鋼板ジベルのせん断耐力評価式を提案している¹⁰⁾. しかし,この耐力評価式の構築に際しては,ジベル鋼



板厚の影響を確認していない.

そこで本研究では、貫通鉄筋が無い孔あき鋼板ジベ ルについて、まず、ジベル孔を取り囲むコンクリート ブロックの大きさがせん断耐力に及ぼす影響を再確認 する.また、ジベル鋼板厚の影響についても検討する. さらに、孔あき鋼板ジベルのせん断抵抗機構に着目し、 ジベル孔せん断面のひび割れ発生、骨材の噛み合わせ 状態、およびせん断抵抗に影響する拘束力を調べる実 験を行い、せん断抵抗機構の推定を試みる.そして、著 者らが提案している貫通鉄筋の無い孔あき鋼板ジベル のせん断耐力評価式の適応性を他の研究者らの実験結 果も加えて確認する.

孔あき鋼板ジベルのせん断カーずれ変位 関係の概要

著者らは、図-2に示すコンクリートブロックが孔あ き鋼板ジベルを取り囲むような試験体の押抜き試験を 行い、図-1のようなせん断力ーずれ変位関係を得た ¹⁰⁾.この試験体の鋼板のジベル孔径は60mm,板厚は 12mmで、貫通鉄筋は配置していない.赤線が単調載 荷であり、青線が漸増繰返し載荷の場合である.いず れの関係においても、図-1-bのずれ変位が小さい部分 の拡大図に示すようにせん断力が約50kN以下ではほ とんどずれ変位は生じないが、せん断力が約50kNを 越えると曲線の傾きが急激に変わることがわかる.こ れは、有意なずれ変位が生じるまでは、鋼板と周辺コ



ンクリートの付着が存在するためである.

さらにせん断力が増加するとともに、鋼板に載荷された荷重がジベル孔内のコンクリートに伝達され、ジ ベル孔内コンクリートのせん断面にひび割れが生じ始 めると考えられ、せん断力ーずれ変位関係の傾きが徐々 に小さくなるが、ずれ変位が1~5mm 程度まではせん 断力が増加する.しかし、ずれ変位が5mmを越える あたりからずれ変位が増加しなくなる場合やさらにせ ん断力が増加する場合も見られる.また、最大せん断 力に達した後に急激にせん断力が減少する場合やあま りせん断力の低下が認められない場合もある.そして、 図-1-aに示すように、せん断力ーずれ変位関係には大 きなばらつきが見られる.

試験体の寸法の影響に関する押抜き試験

図-1の実験におけるコンクリートブロックの平面寸 法は500×500mmで、高さが420mmであり、コンク リートブロック内にはD10の配力鉄筋と帯鉄筋を図-2 のように配置している.後述の著者らの提案したせん 断耐力評価式においては、ジベル孔径、コンクリート の圧縮強度に加えて、図-2の試験体のB1側から見た コンクリートブロックの側面積(鋼板の面積を除く)を パラメータとして用いている.これは、コンクリート ブロックの寸法を変えた実験において、その側面積が 最も貫通鉄筋の無い孔あき鋼板ジベルのせん断耐力と 相関が高かったからである.しかし、B2側から見た側 面積の影響を調べていないので、以下の実験で確認す る.また、ジベル鋼板厚の影響についても確認する.

(1) 試験体

ここでも、図-2に示す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試験体により押 抜き試験を行う.この試験体では、コンクリートブロッ

1 ₩ ₩ ₩ ₩ ₩ ₩ ₩ ₩ ₩ ₩ ₩ ₩ ₩ ₩ ₩ ₩ ₩ ₩ ₩								
	試験体名	D	f_c'	T	B1	B2	せん断耐力	ずれ変位
		(mm)	(N/mm^2)	(mm)	(mm)	(mm)	(kN)	(mm)
ブロック 寸法の影響	D6T12B4-1	60	32.5	12	500	400	232.3	1.6
	D6T12B4-2	60	32.5	12	500	400	239.1	5.4
	D6T12B6-1	60	32.5	12	500	600	190.5	5.8
	D6T12B6-2	60	32.5	12	500	600	231.0	7.9
基本試験体	D6T12-1	60	32.5	12	500	500	218.2	7.6
	D6T12-2	60	32.5	12	500	500	222.2	6.2
	D6T19-1	60	32.5	19	500	500	120.2	4.4
	D6T19-2	60	32.5	19	500	500	174.1	2.2
ジベル鋼板厚	D6T25-1	60	32.5	25	500	500	142.4	1.3
の影響	D6T25-2	60	32.5	25	500	500	171.2	2.6
	D4T12-1	40	32.5	12	500	500	77.8	0.6
	D4T12-2	40	32.5	12	500	500	87.9	1.7
	D4T19-1	40	32.5	19	500	500	71.5	0.1
	D4T19-2	40	32.5	19	500	500	64.7	3.0
	D4T25-1	40	32.5	25	500	500	85.6	2.1
	D4T25-2	40	32.5	25	500	500	76.4	1.6
	MD5T12-1	50	53.1	12	500	500	107.8	6.9
	MD5T12-2	50	53.1	12	500	500	116.3	9.8
モルタル	MD5T19-1	50	53.1	19	500	500	86.6	16.8
試験体	MD5T19-2	50	53.1	19	500	500	77.8	20.0
	MD5T25-1	50	53.1	25	500	500	91.1	14.0
	MD5T25-2	50	53.1	25	500	500	88.5	13.5

封驗休證如

クの寸法が大きいので、コンクリートブロック表面に 至るまでのひび割れが生じにくい. 試験体の寸法, コ ンクリートの圧縮強度、押抜き試験により得られたせ ん断耐力, せん断耐力時のずれ変位などを表-1に示す. D はジベル孔径, T は板厚, B1, B2 は図-2 の左下に 示すコンクリートブロック幅を表し,試験体の高さH は 450mm である. 試験体名の D はジベル孔径, T は 鋼板厚で、コンクリートブロックの幅 B2 が 500mm と 異なる場合には、Bの標記により、B2が400mm ある いは 600mm であることを示している. D6T12 を基本 試験体として,各タイプ2体ずつ試験体を作製した. さらに、ジベル鋼板厚がせん断耐力に及ぼす影響には、 ジベル孔せん断面の粗骨材の配置の影響も含まれるの で、それをできるだけ除くために、粗骨材のないモルタ ルを用いた試験体も作製した.この場合のコンクリー トブロック寸法は上述と同じであるが、その実験で用 いた孔径 40mm のジベル鋼板を拡孔して、ジベル孔径 50mm とし用いた.

なお, せん断耐力は, せん断力-ずれ変位関係にお いて初めにせん断力が明らかに低下した値とする.

(2) 試験方法と測定項目

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,摩擦の影 響を小さくさせた.試験中は載荷荷重の大きさをロー ドセルで計測した.また,鋼板の突き出し部に高感度 変位計を設置して鋼板とコンクリートの相対変位を計 測した.なお,載荷は単調載荷によりコンクリートと 鋼板の相対変位が 21mm を越えるまで行った.

(3) 使用材料

コンクリートには、砕石と川砂利を重量比 1:1 で混 ぜた粗骨材を有し最大骨材寸法 25mm のレディーミ クストコンクリートを用いた.そのコンクリートの 圧縮強度および引張強度、弾性係数の平均値はそれぞ れ 32.5N/mm², 3.3N/mm², 26.5kN/mm² であり、鋼 板の降伏強度、引張強度は板厚 12mm のものがそれ ぞれ 354N/mm², 441N/mm², 19mm のものがそれぞ れ 348N/mm², 439N/mm², 25mm のものがそれぞれ 319N/mm², 424N/mm² で、鋼種は SS400 である. 方、モルタルを用いた場合には、セメントと細骨材の 重量比を 1:2 とした.モルタルを用いた試験体の試験 時の平均圧縮強度は 53.1N/mm² である.

(4) コンクリートブロックの寸法の影響

図-2 に示す試験体の B2 側から見たコンクリートブ ロックの側面積がせん断耐力に及ぼす影響を確認する ために, B1 の寸法は 500mm で一定とし, B2 の寸法を 400, 500, 600mm と変えた試験体の押抜き試験を行っ た. そのせん断力ーずれ変位関係を図-3 に示す. 縦軸 は載荷荷重をせん断力として示し, 横軸はずれ変位で あり,赤線は B2 の寸法が 500mm,青線,緑線はそれ ぞれ B2 の寸法が 400, 600mm の場合である. この図 から, せん断力ーずれ変位関係のばらつきは図-1-a に





図-4 荷重-ずれ変位関係 (ジベル鋼板厚の影響)

見られる程度であり,B2の寸法がせん断耐力に及ぼす 影響は大きくないと言える.

(5) ジベル鋼板厚の影響

複合構造標準示方書で提案されている貫通鉄筋の無 い孔あき鋼板ジベルのせん断耐力評価式⁸⁾においては, 式(2)に示すようにジベル鋼板が厚いほどせん断耐力 は大きくなる.なお,この式は,孔あき鋼板ジベルの 破壊が孔間の鋼板のせん断破壊に先行する場合のせん 断耐力評価式である.

$$V_{psud} = (4.31A - 39.0 \times 10^3) / \gamma_b$$
(2)
$$A = \frac{\pi d^2}{4} \left(\frac{t}{d}\right)^{0.5} f'_{cd}$$

ただし、17.3 × $10^3 \le A \le 152.4 \times 10^3$

ここに、 V_{psud} : 孔あき鋼板ジベルの孔1個あたりの設 計せん断耐力 (N), d: 孔径 (mm), t: 鋼板の板厚 (mm), f'_{cd} : コンクリートの設計圧縮強度 (N/mm²), ただし, ここでは、コンクリートの材料係数 $\gamma_c = 1$ として設計 圧縮強度を求めており、 γ_b : 部材係数であり、一般に は、 $\gamma_b = 1$ である.

しかし,著者らのこれまでの実験¹⁰⁾では必ずしもジ ベル鋼板厚が大きくなるとせん断耐力が大きくなると いう結果が得られていない.そこで,ジベル鋼板厚を変 えた実験を行い,ジベル鋼板厚の影響を再度検討する.

ここでは、ジベル孔径を40,60mmとし、コンクリー トブロックの寸法は図-2と同じである.そして、ジベ ル鋼板厚を12mmに加えて、19,25mmに設定した. その場合のせん断力ーずれ変位関係を図-4に示す.図-4-a に示すように、ジベル孔径 60mm で、ジベル鋼板 厚12mmの場合のせん断力-ずれ変位関係に対して, 板厚19,25mmの場合のせん断力-ずれ変位関係は大 きく傾向が異なることがわかる。前者では、せん断耐 力時のずれ変位が 7mm 程度であるのに対して、後者 では、ずれ変位が2~3mm程度で最大せん断力に達し、 その後せん断力が減少する傾向が見られる.これは、鋼 板厚が変化したことによりジベル鋼板からジベル孔部 分のコンクリートに伝達される支圧力の大きさの差異 がせん断ひび割れ面の形状に影響し、また、そのせん 断ひび割れ面に存在する粗骨材の噛み合わせの影響を 受けたためであると考えられる.

これに対して、図-4-bに示すジベル孔径 40mmで、 ジベル鋼板厚を変化させた場合には、ジベル鋼板厚が 12mmの場合のせん断耐力が最も大きいが、せん断力-ずれ変位関係には大きな差異は見られない.これは、ジ ベル孔径が小さい場合には、ジベル孔部分のコンクリー トのせん断破壊面に大きな差異がなく、また、そのせ ん断ひび割れ面に存在する粗骨材の噛み合わせの影響 も小さいからであると考えられる.しかし、ジベル孔 部分の粗骨材の配置状況の差異がその噛み合わせに大 きく影響していることも考えられるため、粗骨材の無 いモルタルを用いた試験体によりジベル鋼板厚の影響 をさらに確認した.

図-5には、モルタルを用いてジベル鋼板厚の影響を 確認した場合のせん断カーずれ変位関係を示す.縦軸は 載荷荷重をせん断力として示し、横軸はずれ変位であ り、線の色の違いが鋼板厚の違いに対応している.この 図から、鋼板厚が12mmの場合のせん断耐力が最も大 きく、せん断カーずれ変位関係も鋼板厚が19,25mmの ものと傾向が異なることがわかる.鋼板厚が19,25mmの 場合には、せん断力が70kN程度で、せん断カーずれ 変位関係の剛性が急激に低下している.これらの傾向 は図-4-aに示す結果に類似しており、ジベル鋼板厚の 違いがせん断ひび割れ面の形状に影響していることが 窺える.ただし、モルタルを用いた試験体の場合、モル



図-5 せん断力ーずれ変位関係(モルタル試験体)

タルの圧縮強度は 53.1N/mm² であり、コンクリート を用いた試験体の圧縮強度よりも大幅に大きいが、せ ん断耐力は必ずしも大きくない.

4. せん断抵抗機構確認のための基礎実験

孔あき鋼板ジベルのせん断抵抗機構を確認するため に、ここでは、図-6のような試験体3体を用いて、押 抜き試験を行った.試験体のジベル孔径 60mm,板厚 12mm のジベル鋼板は上述の試験のものを再利用し、 側面のコンクリートのかぶりをなくした. また, コン クリートブロック内には鉄筋を配置していない. した がって、コンクリートはジベル孔内の部分のみで連結 されるため、その部分に発生したせん断ひび割れが貫 通した場合、せん断破壊面を容易に観察できる.しか し、図-2の試験体と異なり、せん断抵抗に影響する拘 東が弱い. そこで、試験中の押抜き試験体の設置状況 を図-7に示すが、ジベル孔せん断面に擬似的に拘束を 与えるために、4本の全ねじ(径 20mm)を用いて水 平方向にも拘束力を与えた. 試験体の側方に設置した ロードセールの値で、拘束力の大きさを調整した.西 海らの研究¹¹⁾を参考にして、3体の試験体に与える拘 束力を, それぞれ 50, 25, 5kN とし, 以下では, その 試験体名を HL50, HL25, HL5 と呼ぶ.

また,鉛直荷重は,前述の試験と同じ油圧ジャッキを 有するフレーム載荷試験機を用いて,試験体の平鋼板 突き出し部上面から載荷した.また,鋼板の突き出し 部に高感度変位計を設置して鋼板とコンクリートの相 対変位を計測した.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,摩擦の影響を小さくさせた. なお,実験中に鉛直荷重とずれ変位の関係を確認し,あ る段階で載荷を止め,途中のジベル孔せん断面のひび 割れ状況などを観察した.なお,せん断面を観察した 結果,ひび割れが生じていた場合においても,できる だけ骨材の噛み合わせなどを乱さないようにして試験 体を設置し,再び荷重を載荷した.

ここでは、使用材料の材料特性の説明は省略する.



(1) せん断カーずれ変位関係とせん断面の状況

本実験で得られたせん断カーずれ変位関係を図-8の 上段に示す.横軸はずれ変位を,縦軸は荷重をせん断力 として表しており,試験体の違いを線の色で区別して いる.また,試験体 HL5(緑線)では,ずれ変位 2mm で,試験体 HL25(赤線)では,ずれ変位 1mm で,試 験体 HL50(黒線)では,ずれ変位 0.5mm および 2mm で鉛直荷重を除荷し,拘束力も開放してジベル孔せん 断面の状況を観察した.そのため,図-8の上段に示す せん断カーずれ変位関係においては,それぞれ対応する ずれ変位で関係が途切れている.また,ずれ変位 2mm 以下の関係を図-8の上図内に拡大して示している.

試験体 HL50 のジベル孔のせん断面をずれ変位 0.5mm で確認した際には、両側のコンクリートブロッ クは分離しないことから、この段階ではまだジベル孔 せん断面の全面に貫通するほどひび割れは生じていな い.しかし、ずれ変位 2mm でせん断面を確認した際に は、両側のコンクリートブロックが容易に分離し、ジ ベル孔せん断面の両面にひび割れが生じていた.観察 後に試験体せん断面の凹凸をできるだけ元の状態にな るように設置し、所定の拘束力を与えて荷重を載荷し た際のせん断力-ずれ変位関係においてもずれ変位の 増加に伴ってせん断力が増加することから、せん断面 の骨材の噛み合わせ効果が認められた.

これに対して、試験体 HL5 のずれ変位 2mm、試験 体 HL25 のずれ変位 1mm でジベル孔のせん断面を確 認したところ、それぞれ片方のジベル孔せん断面だけ が分離した. つまり、片面のジベル孔せん断面の全面 にひび割れが生じたが、もう一方のせん断面のひび割 れは全面までには至っていなかったと予想される.こ れらの試験体についても試験体のせん断面の凹凸を合 わせ、所定の拘束力を与えて荷重を載荷したときに得 られたせん断力ーずれ変位関係においては、ずれ変位 が増えるとともにせん断力は顕著に増加して、最大せ ん断力に達したのちせん断力が減少する関係を示した. 片方のジベル孔せん断面においてひび割れは全面に生 じていなかったが、この実験からも、ジベル孔せん断 面のひび割れが生じた後においてもせん断面の骨材の 噛み合わせ効果によってせん断力は増加し、せん断抵 抗力が最大値に達した後にせん断力が減少することが



図-8 せん断力および拘束力とずれ変位関係

わかった.

(2) 拘束カーずれ変位関係とせん断面の状況

側方の拘束カーずれ変位関係を図-8の下段に示す. 横軸はずれ変位を,縦軸はロードセルで計測した拘束力 である.上述のように,ずれ変位1mmあるいは2mm で鉛直荷重を除荷し,ジベル孔せん断面を観察してか ら,再度試験体を設置し,拘束力を与えているため,そ れらの変位で拘束力が不連続に変化している.しかし, ジベル孔せん断面の観察後に荷重を載荷した場合,ず れ変位が増加するとともに拘束力が大きくなっており, ジベル孔せん断面の骨材の噛み合わせによる押し広げ 力が生じていることが推察される.特に,試験体HL5 と HL25 では,ずれ変位の増加に伴って拘束力が顕著 に大きくなっている.

これに対して、試験体 HL50 では、再載荷後のずれ変 位の増加に伴う拘束力の増加はあまり大きくない. 試 験体 HL50 のずれ変位 2mm 時にジベル孔せん断面を観 察した際には、両側のジベル孔せん断面が分離したた め、再載荷時のせん断面の凹凸の噛み合わせが必ずし も元のようにならなかったと考えられる. しかし, 試 験体 HL5 と HL25 においてジベル孔せん断面を観察し た際には、片方のせん断面のみが分離し、再載荷時の せん断面の凹凸の噛み合わせを元の状態に近づけるこ とができたと考えられる. さらに、HL5、HL25 に比較 して、HL50 の場合には観察したせん断面の凹凸は大 きくなかったことが上述のような性状の原因になった と考えられる.

(3) せん断破壊面の状況

試験体 HL25 のずれ変位 1mm におけるせん断破面 の写真とその後さらに荷重を載荷してずれ変位 21mm





写真-1 せん断破壊面 **写真-2** せん断破壊面 (HL25, 1mm) (HL25, 21mm)

に達したときの同じせん断面の写真を写真-1と写真-2 に示す. ずれ変位 1mm 時においてはせん断面の凹凸は かなり大きいが, ずれ変位 21mm 時のせん断面は比較 的滑らかになっており, せん断面のずれとともに骨材 の噛み合わせにより凹凸が崩されたことがわかる.

1. 孔あき鋼板ジベルの想定されるせん断抵 抗機構

ここでは、本論文で示した試験結果および著者らの これまでの孔あき鋼板ジベルの押抜き試験結果に基づ いて、孔あき鋼板ジベルのせん断抵抗機構を推定する.

図-1-aに示したように、せん断力-ずれ変位関係に おける初期の鋼板と周辺コンクリートの付着による抵 抗は省略する.付着が切れるとせん断力の増加ととも に有意なずれ変位が生じ始める.まず、鋼板に載荷さ れた荷重がジベル孔内のコンクリートに伝達され、ジ ベル孔内コンクリートのせん断面にひび割れが生じ始 めるために、せん断力-ずれ変位関係の傾きが徐々に 小さくなると考えられる.

そして、せん断抵抗機構確認の基礎実験のところで 述べたように、ずれ変位が1~3mm 程度でせん断ひび 割れがジベル孔の全面を貫通していると予測される.し かし、この時点から劣化域に入るわけではなく、さら に、ずれ変位の増加とともにせん断力は増加する.こ の段階においては、ジベル孔内コンクリートのせん断 ひび割れ面の骨材の噛み合わせもせん断抵抗に寄与す る.せん断ひび割れ面の凸凹はジベル孔内に充填され るコンクリートの粗骨材量や粗骨材の配置状況の影響 を受ける.そして、さらにずれ変位が大きくなるとせ ん断ひび割れ面の骨材の噛み合わせ抵抗が徐々に低下 しせん断力が減少し始めるものと考えられる.

この場合,最大せん断力に達する前にずれ変位とと もにせん断力が大きく増加する場合と,これに比して, せん断力があまり大きく増加せず,比較的せん断力が一 定の大きさでずれ変位が増加する場合が見られる.前 者の場合には,図-9に示すせん断ひび割れ面のイメー ジの左側の図のようにせん断ひび割れ面が凸形状になっ ていることが考えられ,後者の場合には,図-9の右側



図-9 孔あき鋼板ジベルのせん断ひび割れ面のイメージ

の図のようにせん断ひび割れ面に比較的凹凸が少ない ことが考えられる.大きな凸形状を有する場合には,こ のせん断面がずれることによる押し広げ力も大きいた め,骨材の噛み合わせ力が大きくなり,結果的にせん 断抵抗力が大きくなっていると考えられる.そして,次 第にせん断面が破壊されてずれ変位とともにせん断力 が低下しているものと考えられる.これに対して,せ ん断ひび割れ面の凹凸が少ない場合には,押し広げ力 も前者よりは小さくせん断力はそれほど大きくならな いが,せん断ひび割れ面の大きな劣化も起こらないた めに,せん断力の低下も少ないと考えられる.もちろ ん,これに加えて,せん断ひび割れ面の粗骨材の配置 状況もせん断抵抗機構に影響を及ぼしていると言える.

6. 既往の強度評価式の適応性

式(2)に示すように、複合構造標準示方書⁸⁾で規定さ れる貫通鉄筋が無い場合のせん断耐力評価式では,板厚 の増加によりせん断耐力は増加する.しかし、本実験の 結果から必ずしもそのような結果は得られないことを確 認した. そこで、種々の実験データに対する式(2)の適応 性を確認するため,既往の研究データ^{1),3)-5),7),10)-18)} を用い,実験値 Qexp を縦軸に,式(2)から得られる値 Q_{spec}を横軸にプロットしたものを図-10に示す.式 (2) では、ジベル孔径、コンクリート圧縮強度および ジベル孔径に対する鋼板厚の比を変数としてせん断耐 力を算出している.両者の回帰直線に対する相関係数 R=0.68 であり、ある程度の相関は得られているが、既 往の研究データにはせん断耐力に大きく影響するジベ ル孔内周辺のコンクリートブロック寸法や底面拘束の 有無をパラメータとしている試験体が含まれているこ とから、式(2)の値と実験値が大きく異なる場合も多 く見受けられる.

一方,著者らの研究¹⁰⁾ではジベル孔周辺のコンクリー トブロック寸法がせん断耐力に大きく影響することを 確認し,コンクリートブロック寸法を考慮した以下の 式(3)を提案している.

$$Q_u = 0.044A f_c^{0.65} A_s^{0.43} \tag{3}$$

ここで、 Q_u はせん断耐力 (N)、Aはジベル孔面積



図-10 複合構造標準示方書式⁸⁾と実験値の比較



図-11 式(3)と実験値の比較

 (mm^2) , 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) である.

図-10 と同様に式(3) より得られる Q_u と実験値 Q_{exp} を比較したものを図-11 に示す. 鋼殻により囲ま れている西海らの試験体¹⁷⁾やせん断耐力に達する前に 試験体表面にひび割れが確認された著者らの試験体¹⁰⁾ を除けば実験値に近い値を算定することができ,両者 の回帰直線に対する相関係数も R=0.87 と相関の高い 結果が得られている.

7. おわりに

本研究では、貫通鉄筋の無い孔あき鋼板ジベルに着 目して、まず、コンクリートブロック寸法およびジベ ル鋼板厚がせん断耐力に及ぼす影響を再確認した.ま た、孔あき鋼板ジベルのせん断抵抗機構に着目した基 礎実験を行い、せん断抵抗機構の推定を試みた.さら に、著者らが提案している貫通鉄筋の無い孔あき鋼板 ジベルのせん断耐力評価式の適応性を他の研究者らの 実験結果も加えて確認した.

本研究を通して得られた知見を以下に示す.

1. 図-2 に示すコンクリートブロックの B2 側の側面

積は孔あき鋼板ジベルのせん断耐力にあまり影響 しない.

- 2. ジベル鋼板厚が 12mm の場合に比較して, ジベル 鋼板厚が 19, 25mm ではせん断耐力が低下する傾 向が認められ, 複合構造標準示方書のせん断耐力 評価式と異なる結果が得られた.
- 孔あき鋼板ジベルのせん断抵抗機構を確認する基礎実験から、ジベル孔部分のコンクリートのせん 断ひび割れが発生した後に、骨材の噛み合わせによってせん断抵抗が増加することを確認した.そして、骨材の噛み合わせによる押し広げ力が大きいほどせん断抵抗が大きくなることを確認した.
- 4. 著者らが提案した貫通鉄筋の無い孔あき鋼板ジベルのせん断耐力評価式は、試験体形状が異なる他の研究者の実験結果を加えても、試験体のコンクリートブロック寸法の影響を考慮することによって平均的に実験結果を良好に評価できることを確認した。

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.こ こに記して関係各位に謝意を表する.

参考文献

- 藤井ら: 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.
- Leonhardt, F. et al. : Neues, vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit, *Beton und Stahlbetonbau*, 82 Heft 12, pp.325-331, 1987.
- 3) 明橋ら: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.
- 4) 美島ら:鋼製橋脚と杭基礎との接合構造に関する実験的 研究,橋梁と基礎, Vol.41, No.11, 2007.11.

- 5) 保坂ら: 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.
- Oguejiofor E. C. and Hosain, M.U. : A parametric study of perfobond shear connectors, *Canadian Jour*nal of Civil Engineering, Vol.21, No.4, pp.614-625, 1994.
- 7) 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, No26, 2005.11.
- 8) 土木学会: 複合構造標準示方書, pp.64-66, 2009.12.
- 9) 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, pp.6, 1996.11.
- 中島ら:単純な押抜き試験に基づく孔あき鋼板ジベルの せん断耐力評価,土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.68, No.2, pp495-508, 2012.8.
- 西海,沖本:拘束力を考慮した有穴鋼板のずれ止め特性 に関する研究,土木学会論文集,No.633, pp.193-203, 1999.10.
- 12) 中島ら:長手方向に複数配置した孔あき鋼板ジベルのせん断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.
- 森ら: PBL の種々の試験方法におけるコンクリート拘束 効果,土木学会第64回年次学術講演会,I-554,2009.9.
- 14) 岩崎ら: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.
- 日向ら: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.
- 16) 深田ら: 孔あき鋼板ジベルの終局せん断耐力に影響を及 ぼすコンクリート拘束因子,第6回複合構造の活用に関 するシンポジウム, No28, 2005.11.
- 17) 西海ら: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.
- 18) 平ら: 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, 1988.

SHEAR RESISTING MECHANISM AND SHEAR RESISTANCE EVALUATION OF PERFOBOND STRIP WITHOUT PENETRATING REBAR

Akinori NAKAJIMA, Masatoshi HASHIMOTO, Minh Hai NGUYEN and Yasuo SUZUKI

A perfobond strip is widely used as the validated shear connector in the various steel-concrete hybrid structures and many researches on the perfobond strip are also conducted and the design formula for the perfobond strip has been already proposed by some researchers. However, the shear resistance evaluated by these design formula does not successfully correlate with the experimental ones. In this research, the effect of the concrete block proportion and of the thickness of the steel plate on the shear resistance is investigated for the perfobond strip without the penetrating rebar. The fundamental experiment is also conducted to investigate the effect of the crack of the filled concrete in the perforation, interlocking action of the aggregate and the restrained force on the shear resistance of the perfobond strip, paying attention to its shear resisting mechanism. And we attempt to predict the shear resisting mechanism of the perfobond strip without the penetrating rebar. Finally, applicability of the design formula of the perfobond strip without the penetrating rebar to the extensive experimental data by other researchers is confirmed.