

(29) 孔あき鋼板ジベルのせん断耐力に及ぼす貫通鉄筋の効果に関する研究

グエンミンハイ¹・中島章典²・橋本昌利³・鈴木康夫⁴

¹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: mt126424@cc.utsunomiya-u.ac.jp

²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

³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)

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に孔あき鋼板ジベルを用いる際には、ジベル孔に貫通鉄筋を配置するのが一般的である。しかし、従来の研究では貫通鉄筋がせん断耐力に及ぼす効果やジベル孔径、貫通鉄筋径、板厚などを変えた時の貫通鉄筋の挙動については必ずしも十分に明確にされていない。本研究では、コンクリートブロックでジベル鋼板を取り囲む試験体を用いてジベル孔径と貫通鉄筋径の相対関係、あるいは板厚を変えた押抜き試験を行い、それぞれの場合のせん断耐力と貫通鉄筋のひずみ挙動を調べた。また、比較のために、貫通鉄筋を配置しない試験体の押抜き試験も行った。貫通鉄筋の有無による実験を通して、貫通鉄筋がせん断耐力に及ぼす効果はジベル孔径、貫通鉄筋径および板厚によって異なることを確認し、さらに、貫通鉄筋のひずみ挙動を考察を行った。

Key Words : *steel-concrete hybrid structure, perfobond strip, penetrating rebar, shear resistance, push-out test*

1. はじめに

鋼コンクリート複合構造において、その優れた構造性能を発揮するための重要な鍵となるのが、鋼部材とコンクリート部材の間で応力伝達の役割を果たすずれ止めと呼ばれる構造要素である。複合構造のずれ止めとして、最近では、孔あき鋼板ジベルが用いられる場合も多い。このような孔あき鋼板ジベルの最初の提案者である Leonhardt ら¹⁾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述べていない。しかし、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、孔あき鋼板ジベルの実構造物への適用においては、ジベル孔内に貫通鉄筋を配置するのが一般的となっている。そのため、孔あき鋼板ジベルのせん断耐力評価式の作成を目指した研究においても、貫通鉄筋を配置した孔あき鋼板ジベルの研究が数多く行われてきている。

貫通鉄筋を有する孔あき鋼板ジベルでは、ジベル孔内コンクリートの 2 面せん断抵抗に加えて、貫通鉄筋のダウエル効果でせん断に抵抗すると考えられている。例えば、複合構造標準示方書²⁾においても、貫通鉄筋を有する孔あき鋼板ジベルのせん断耐力評価式が提案されており、また、その評価式作成の基となった保坂らの研究³⁾においても貫通鉄筋を有する孔あき鋼板ジ

ベルのせん断耐力評価式が提案されている。これらのせん断耐力評価式では、ジベル孔部分のせん断抵抗に加えて貫通鉄筋のせん断抵抗を考慮したものとなっている。古内ら⁵⁾も、オリジナルの実験結果に基づいて同様の考え方のせん断耐力評価式を提案している。一方、藤井ら⁷⁾は、貫通鉄筋の曲げ抵抗ではなく、貫通鉄筋はジベル孔部分のコンクリートのせん断抵抗を増加させるという考え方にに基づき、独自のせん断耐力評価式を提案している。

しかし、日向、藤井らの研究⁶⁾や著者らの研究^{8),9)}でも指摘されているように、孔あき鋼板ジベルのせん断抵抗は、ジベル孔径、コンクリートの圧縮強度に加えて、周辺コンクリートの拘束効果やジベル孔部分に位置する粗骨材の配置状況なども影響する。したがって、貫通鉄筋を有する場合には、そのせん断耐力に影響を及ぼす因子がさらに増えると考えられる。そのため、貫通鉄筋を有する孔あき鋼板ジベルのせん断抵抗機構を詳細に確認し、その抵抗機構に基づいてせん断耐力評価式を作成するためには、広範な実験データが必要とされている。

そこで本研究では、コンクリートブロックでジベル鋼板を取り囲む試験体を用いてジベル孔径と貫通鉄筋径の相対関係、あるいはジベル鋼板の板厚を変えた押抜き試験を行い、それぞれの場合のせん断耐力と貫通鉄筋のひずみ挙動を調べた。また、比較のために、貫通

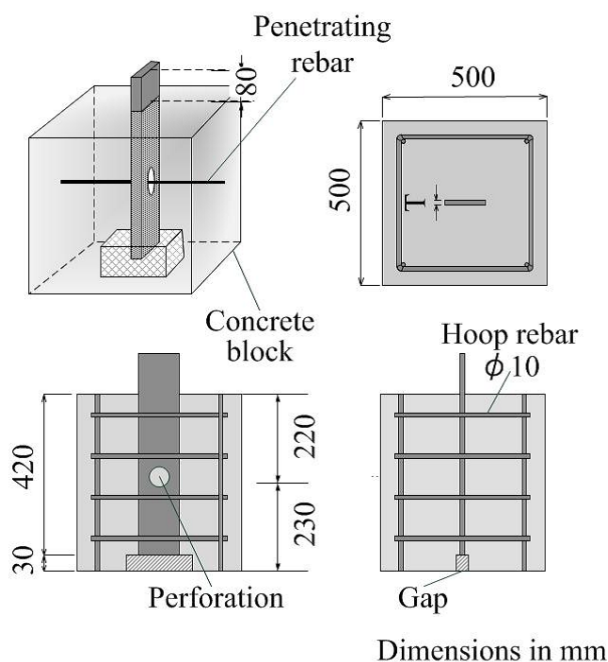


図-1 試験体概要

鉄筋無しの試験体の押抜き試験も行った。そして、貫通鉄筋がせん断耐力に及ぼす効果はジベル孔径、貫通鉄筋径およびジベル鋼板の板厚によって異なることを確認し、また、貫通鉄筋のひずみ挙動を考察した。

2. 押抜き試験概要

(1) 試験体および試験方法

本研究では、孔あき鋼板ジベルの貫通鉄筋がそのせん断抵抗に及ぼす効果を確認するために、ジベル孔径と貫通鉄筋径を相対的に変えた試験体およびそれに加えてジベル鋼板の板厚を変えた試験体を用いた。前者の試験体をシリーズ 1、後者の試験体をシリーズ 2 とする。両シリーズでは、図-1 の左上に示すような 1 個のジベル孔を有する平鋼板をコンクリートブロックで取り囲み、そこに、貫通鉄筋を配置した押抜き試験体を用いた。また、比較のために、貫通鉄筋を配置しない試験体も作製した。図-1 には帯鉄筋や配力鉄筋の配置状況を示している。両シリーズの試験体パラメータの詳細を表-1 に示す。表-1 に示す試験体名では、D の後の数字がジベル孔径を、T の後の数字が鋼板厚を、R の後の数字が貫通鉄筋径を表しており、NR は貫通鉄筋無しを意味している。また、全試験体を 4 回に分けて作製しているので、それぞれの材料特性が異なる。そこで、表-1 の材料特性の列に示したアルファベット A~D で用いた材料を区別し、それぞれの材料特性を表-2 に示す。

押抜き試験体の載荷に際しては、油圧ジャッキを有するフレーム載荷試験装置を用いて、試験体の平鋼板突

き出し部上面から荷重を載荷した。試験体コンクリートブロックの下には砂を敷き、鋼板を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させた。また、ジベル鋼板とコンクリートの付着を低減するために、コンクリート打設前にジベル鋼板にグリースを塗布した。

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た。具体的には、ジベル鋼板上部にアングル材をクランプにより固定し、これに高感度変位計を取り付け、コンクリートブロックの上面に当てて計測している。また、貫通鉄筋の長手方向ひずみを計測するために、貫通鉄筋を溝切りし、上下対面にひずみゲージを貼り付けた。この場合、ジベル孔の板厚中央を基準として、シリーズ 1 では両側 ±80mm の位置まで、シリーズ 2 では ±120mm の位置まで、20mm 間隔で貼り付けた。

なお、コンクリートブロックと鋼板の相対変位が 20mm を越えるまで単調増加荷重あるいは漸増繰返し荷重を載荷した。

(2) 使用材料

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 D10 を使用した。表-1 の材料特性の記号に対応させて、各試験体に使用した材料特性を表-2 に示している。また、本試験のコンクリートには、碎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。押抜き試験時の材齢は 28 日から 60 日であり、その間の各試験体のコンクリートの圧縮強度、引張強度および静弾性係数の平均値を表-2 に示す。

3. 試験結果

(1) 荷重—ずれ変位関係

本試験のすべての試験体の荷重—ずれ変位関係を図-2、図-3 に示す。縦軸は載荷荷重を、横軸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。図-2-a~図-2-c は、貫通鉄筋径 10mm を一定にし、ジベル孔径を 30, 60, 90mm に変えた試験体の関係および対応する貫通鉄筋無しの関係を示している。一方、図-2-d はジベル孔径 60mm を一定にし、貫通鉄筋径を 10, 13, 16mm に変えた試験体の関係および対応する貫通鉄筋無しの関係を示している。また、貫通鉄筋径 16mm で、ジベル鋼板の板厚を変えたシリーズ 2 のすべての試験体の荷重—ずれ変位関係を、板厚 12, 19, 25mm について、貫通鉄筋無しの場合も含めて図-3-a~図-3-c に示している。本研究では、ずれ変位 20mm までの荷重—ずれ変位関係において、荷重の最大値をせん断耐力と定義する。

荷重—ずれ変位関係においては、全体的に以下のよ

表-1 試験体の種類

シリーズ	試験体名 -番号	材料 特性	ジベル 孔径 (mm)	貫通 鉄筋径 (mm)	板厚 (mm)	孔数	ブロック寸法			せん断耐力 の平均値 (kN)	備考
							高さ (mm)	幅 (mm)	奥行 (mm)		
シリーズ 1	D30T12NR-1,2,3	A	30	-	12	1	450	500	500	49	貫通 鉄筋 無
	D30T12NR-4	B	30	-	12	1	450	500	500	59	
	D60T12NR-1,2,3	A	60	-	12	1	450	500	500	221	
	D60T12NR-4	B	60	-	12	1	450	500	500	176	
	D60T12NR-5,6	C	60	-	12	1	450	500	500	220	
	D90T12NR-1,2,3	A	90	-	12	1	450	500	500	386	
	D90T12NR-4	B	90	-	12	1	450	500	500	395	
	D30T12R10-1,2	A	30	10	12	1	450	500	500	106	貫通 鉄筋 有
	D30T12R10-4,5	B	30	10	12	1	450	500	500	82	
	D60T12R10-1,2,3	A	60	10	12	1	450	500	500	280	
	D60T12R10-4,5	B	60	10	12	1	450	500	500	253	
	D60T12R10-6,7	C	60	10	12	1	450	500	500	204	
	D60T12R13-1,2	C	60	13	12	1	450	500	500	238	
	D60T12R16-1,2	C	60	16	12	1	450	500	500	271	
	D90T12R10-1,2,3	C	90	10	12	1	450	500	500	410	
	D90T12R10-4,5	B	90	10	12	1	450	500	500	388	
シリーズ 2	D60T12NR-5,6	C	60	-	12	1	450	500	500	220	貫通 鉄筋 無
	D60T19NR-1,2	C	60	-	19	1	450	500	500	147	
	D60T25NR-1,2	C	60	-	25	1	450	500	500	157	貫通 鉄筋 有
	D60T12R16-1,2	C	60	16	12	1	450	500	500	271	
	D60T12R16-3,4	D	60	16	12	1	450	500	500	217	
	D60T19R16-1,2	D	60	16	19	1	450	500	500	242	
	D60T25R16-1,2	D	60	16	25	1	450	500	500	269	

表-2 使用材料特性

種類	鋼板 (板厚 mm)		帯鉄筋・配力鉄筋		貫通鉄筋 (径 mm)		コンクリート		
	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
A	361 (12)	439 (12)	394	520	409 (10)	548 (10)	31.1	2.8	29.2
B	355 (12)	443 (12)	394	520	394 (10)	520 (10)	33.2	3.3	27.3
C	354 (12)	441 (12)	356	505	410 (10) 410 (13) 356 (16)	540 (10) 543 (13) 505 (16)	32.5	3.3	26.5
D	354 (12) 272 (19) 319 (25)	444 (12) 424 (19) 424 (25)	356	505	356 (16)	505 (16)	34.1	3.1	26.6

うな傾向が見られる。まず、荷重が 50kN くらいまでは鋼板とコンクリートの付着の影響によりずれ変位はほとんど生じないが、付着が切れた直後に、鋼板とコンクリートブロックの有意なずれ変位が認められる。そして、荷重の増加と共にずれ変位は増加するが、ずれ変位が 1mm 以下では、貫通鉄筋有りの場合と貫通鉄筋無しの場合で両者の荷重－ずれ変位関係にほとんど差異がない。しかし、荷重がさらに増加するとともに、両者の荷重－ずれ変位関係に差異が生じ始めることがわかる。

a) シリーズ 1

貫通鉄筋径 10mm に対して、ジベル孔径を 30, 60, 90mm と変えた試験体においては、図-2-a～図-2-c に示すように、ジベル孔径が大きくなるほどずれ変位と共に明らかに荷重が大きくなっている。ジベル孔径 30mm で貫通鉄筋有りの試験体 D30T12R10 では、ずれ変位が 15mm 以降において、荷重が急激に減少しているところがあるが、これ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したためである。一方、ジベル孔径 90mm の試験体では、貫通

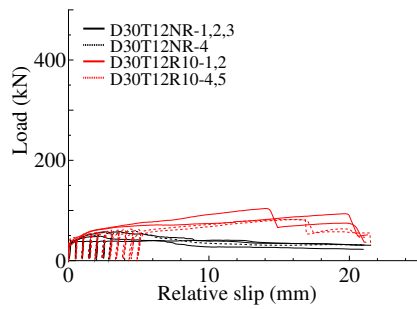


図-2-a ジベル孔径 30mm

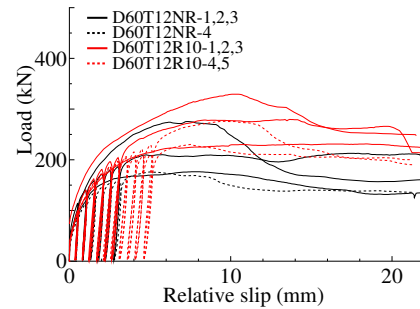


図-2-b ジベル孔径 60mm

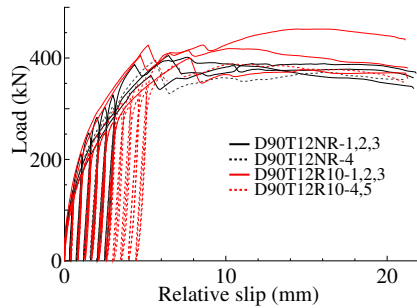


図-2-c ジベル孔径 90mm

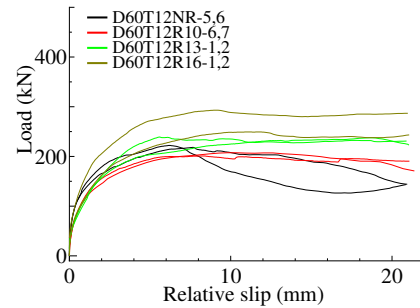


図-2-d 貫通鉄筋径の変化

図-2 シリーズ 1 の荷重-ずれ変位関係

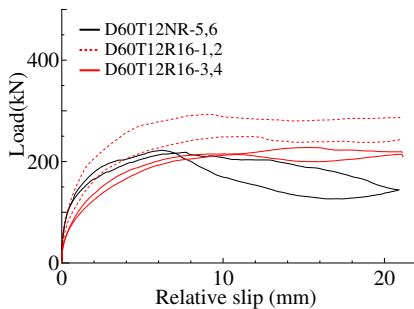


図-3-a 板厚 12mm

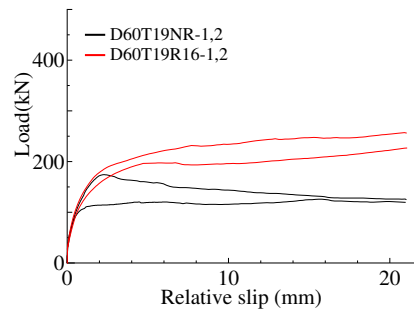


図-3-b 板厚 19mm

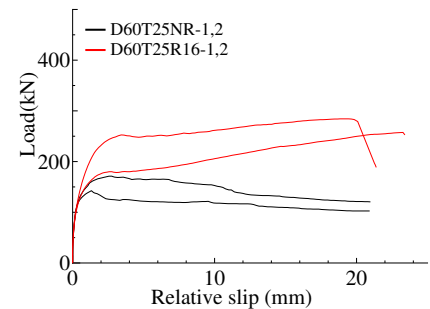


図-3-c 板厚 25mm

図-3 シリーズ 2 の荷重-ずれ変位関係

鉄筋の有無に関わらずずれ変位が 5~7mm 付近で荷重が一時的に減少しており、貫通鉄筋の有無で最大荷重にあまり大きな差異は認められない。この理由は、荷重が 400kN 程度で試験体コンクリートブロックの表面に至るひび割れが発生したためである。これに対して、ジベル孔径 60mm で貫通鉄筋有りの場合には、ずれ変位 6~10mm 程度でせん断耐力に達した後、ずれ変位と共に荷重が減少する場合と、荷重がほとんど減少しない場合が見られる。これらはジベル孔部分のコンクリートせん断破壊面のせん断抵抗に加えて、貫通鉄筋の曲げ挙動およびジベル孔内を移動した貫通鉄筋とジベル鋼板の相対的な位置などが複雑に関係するためと考えられる。

一方、ジベル孔径 60mm に対して、貫通鉄筋径を 10, 13, 16mm と変えた試験体においては、図-2-d に示すように、平均的には、貫通鉄筋径が大きくなるほどせん断耐力は大きくなっている。しかし、貫通鉄筋径が 10mm の場合には、そのせん断耐力は貫通鉄筋無しの場合とあまり変わらない。この理由は、図-2-b に示すように、ジベル孔径 60mm 程度の場合には、貫通鉄筋無しの試験体のせん断耐力に大きなばらつきが認められるからであると考えられる。

b) シリーズ 2

シリーズ 2 の貫通鉄筋無しの試験体では、ジベル鋼板厚が増加するにつれてどちらかと言えばせん断耐力が減少する傾向を示している。これについては、本研

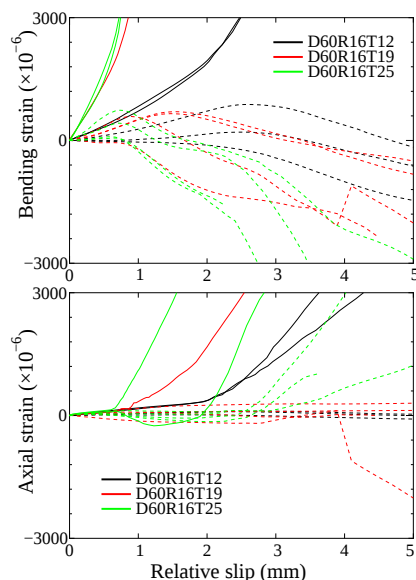


図-4 曲げひずみ，軸ひずみ－ずれ変位関係

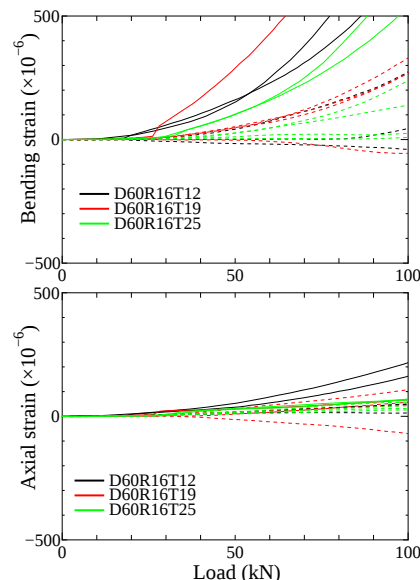


図-5 曲げひずみ，軸ひずみ－荷重関係

究では議論しない。これに対して，貫通鉄筋有りの試験体では，せん断耐力に大きな差異は認められないが，ジベル鋼板が厚いほど最大せん断力に達するまでの剛性が高く，また，ずれ変位が 20mm 程度に至るまでずれ変位が増加するにつれて徐々に荷重が漸増していることがわかる。後者の理由は，ジベル鋼板が厚いほど，曲がってジベル孔内を移動した貫通鉄筋がジベル鋼板の上部に接近あるいは接触するためである。そのため，図-3-c に示すようにジベル鋼板厚 25mm の試験体の 1 つにおいて，ずれ変位が 20mm 程度で荷重が急激に減少しているが，この時点で貫通鉄筋が破断したためである。

(2) ずれ変位および載荷荷重と貫通鉄筋の曲げひずみ，軸ひずみの関係

ここでは，貫通鉄筋有りの孔あき鋼板ジベルのせん断抵抗に及ぼす貫通鉄筋の効果を確認するために，貫通鉄筋の長手方向に 20mm 間隔で貼り付けたひずみゲージの挙動を説明する。一般に，貫通鉄筋有りの孔あき鋼板ジベルでは，ジベル孔内のコンクリートの 2 面せん断抵抗に加えて，貫通鉄筋のダウエル効果でせん断に抵抗すると考えられている。また，貫通鉄筋無しの孔あき鋼板ジベルではジベル孔内のコンクリートの 2 面せん断破壊時に，押し広げ力が生じるので，貫通鉄筋有りの孔あき鋼板ジベルでも貫通鉄筋の軸ひずみ挙動を確認することは有用であると考えられる。

図-4，図-5 は，ジベル鋼板の板厚をパラメータとした場合の貫通鉄筋の曲げひずみおよび軸ひずみとずれ変位または荷重の関係を示している。縦軸が曲げひずみ，軸ひずみであり，横軸がずれ変位または荷重である。また，実線はジベル孔に貫通する鉄筋の中央点でのひずみ，破線はその両隣 ±20mm にある点のひず

みを示す。図-4 から，まず，0.5mm 以下のずれ変位が生じるとともにジベル孔位置の曲げひずみ（実線）が急激に生じ始めることがわかる。ずれ変位がさらに増加し，1mm 程度になると軸ひずみも大きくなり始めることがわかる。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ダウエル効果がせん断抵抗に影響していることを示している。そして，その後に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によって，ジベル孔部分の貫通鉄筋の軸ひずみが生じ始めることがわかる。

この場合，赤実線および緑実線で示すジベル鋼板厚 19mm あるいは 25mm の場合の方が，黒実線で示すジベル鋼板厚 12mm の場合よりもずれ変位に対する曲げひずみが早期に大きくなり，軸ひずみも同様の傾向を示している。この理由は，図-3-a～図-3-c に示すように，ジベル鋼板厚が厚いほど同じずれ変位に対して荷重が大きいからである。また，図-4 の点線で示すジベル孔位置の両隣 ±20mm 位置の曲げひずみは，ずれ変位が 3mm 程度までは正の曲げひずみを示している場合もあるが，ずれ変位の増加に伴って次第に負の曲げひずみになっている。さらに，同位置の軸ひずみはばらつきもあるが軸ひずみの値はあまり大きくない。これに対して，同じ位置の曲げひずみおよび軸ひずみと荷重の関係を示した図-5 においても，荷重に対してジベル孔位置の曲げひずみが早期に大きくなり，その後，軸ひずみが大きくなることがわかる。ただし，この図では板厚の違いによるひずみ挙動の差異は少ない。

貫通鉄筋に引張軸ひずみが生じることは，コンクリートの 2 面せん断破壊およびその後のせん断面の骨材の噛み合わせに貫通鉄筋が影響を及ぼすことを意味する。しかし，ずれ変位または荷重がさらに大きくなるにつれて，ジベル孔部分のコンクリートせん断破壊面の骨

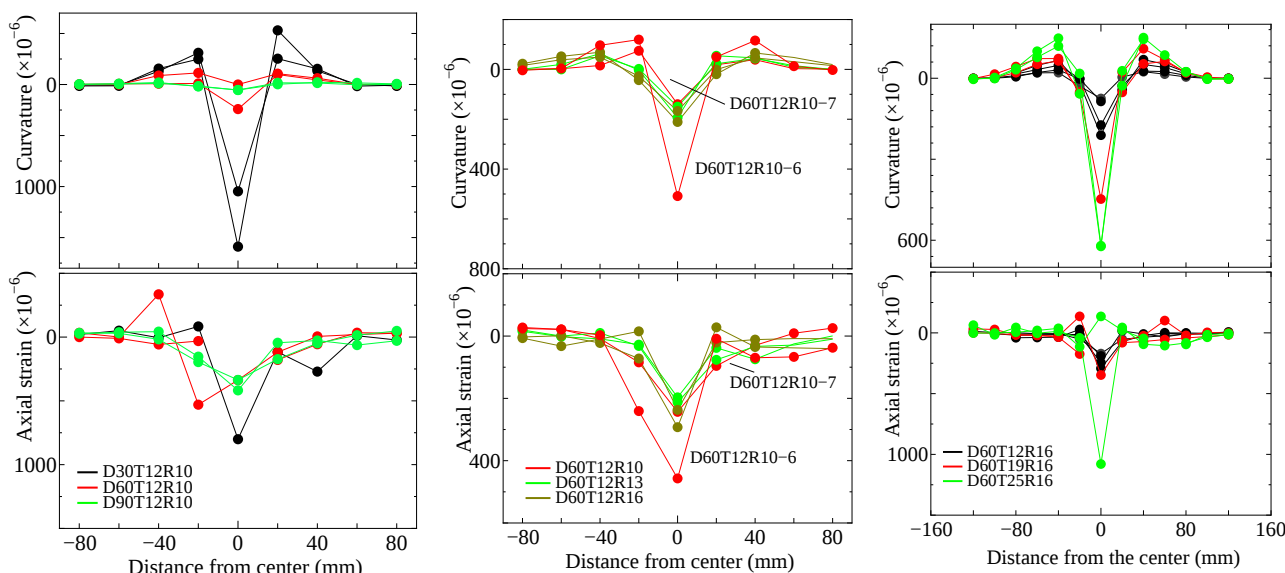


図-6-a ジベル孔径を変えた試験体

図-6-b 貫通鉄筋径を変えた試験体

図-6-c 板厚を変えた試験体

図-6 ずれ変位 1mm の時の曲率および軸ひずみ分布

材の噛み合わせが劣化し、さらに、曲げによる貫通鉄筋の塑性化のために、全体として、孔あき鋼板ジベルのせん断抵抗は減少することになる。ただし、図-3-b、図-3-c に示すように貫通鉄筋がジベル孔内を移動してジベル鋼板の上側に接近、あるいは、接触するとずれ変位の増加につれて荷重が増加する場合もある。

(3) 貫通鉄筋の長手方向の曲率、軸ひずみ分布

貫通鉄筋に貼り付けたひずみゲージにより計測した両シリーズの長手方向の曲率分布および軸ひずみ分布を図-6 の上段および下段に示す。いずれの図においても縦軸に曲率あるいは軸ひずみを、横軸にはジベル孔中央位置からの左右の距離を示している。

図-6-a には、貫通鉄筋径を 10mm で一定とし、ジベル孔径を変えた試験体の結果を、図-6-b には、ジベル孔径を 60mm で一定とし、貫通鉄筋径を変えた試験体の結果を、図-6-c には、ジベル孔径を 60mm、貫通鉄筋径を 16mm で一定とし、ジベル鋼板厚を変えた試験体の結果である。ここでは、代表としてずれ変位 1mm の場合について示している。

まず、ジベル孔径を変えた試験体の結果である図-6-a から、ジベル孔部分の曲率はジベル孔径が小さいほど大きく、また、その両側の負の曲率も大きいことがわかる。軸ひずみ分布では、ジベル孔中央位置の軸ひずみが大きく、どちらかと言えば、ジベル孔径が小さい方がジベル孔中央位置の軸ひずみは大きい。しかし、この場合の貫通鉄筋径は 10mm であり、溝切りが容易ではなく、軸ひずみ分布の定量的な信頼性に劣ると考えられる。

これに対して、貫通鉄筋径を変えた試験体の結果で

ある図-6-b から、ジベル孔部分の曲率は貫通鉄筋径が 10mm の 1 つの結果を除いて、ほぼ同程度となっている。また、ジベル孔中央位置の軸ひずみの値も貫通鉄筋径によらずほぼ同程度となっている。これは、ずれ変位 1mm において作用している荷重の大きさが異なるためであり、貫通鉄筋径が大きいほど作用している荷重は大きい。したがって、荷重が同程度であれば、貫通鉄筋径が小さいほどジベル孔部分の曲率および軸ひずみは大きくなっている。

次に、貫通鉄筋径を 16mm で一定とし、ジベル鋼板厚を変えた試験体の結果である図-6-c から、ジベル孔部分の曲率は下に凸となり、鋼板が厚いほど曲率は大きく、その両側では鋼板が厚いほどジベル孔部分から離れた位置まで逆の曲率を示している。ここで、鋼板が厚いほどジベル孔部分の曲率が大きい理由は、ずれ変位 1mm において、作用する荷重が大きいからである。一方、軸ひずみ分布では、ジベル鋼板厚 25mm の 1 体の試験体に乱れはあるが、他ではジベル孔部分のひずみは引張りひずみとなっており、その両側では軸ひずみはあまり大きくない。つまり、ジベル孔部分のコンクリートのせん断破壊面が形成されて、ずれ変位に伴って骨材の噛み合わせが起こり、押し広げ力が作用する段階でジベル孔部分の貫通鉄筋にのみ引張り軸力が発生していると考えられる。

(4) せん断耐力に及ぼす貫通鉄筋の効果

前述の荷重-ずれ変位関係からわかるように、ばらつきはあるものの平均的には貫通鉄筋を配置しない試験体よりも貫通鉄筋を配置した試験体の方がせん断耐力は高いことがわかる。つまり、孔あき鋼板ジベルに

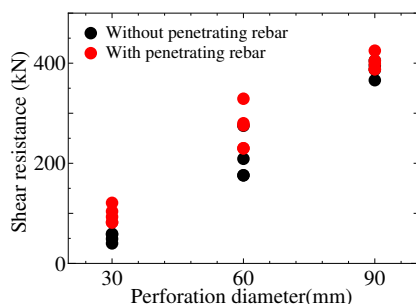


図-7 ジベル孔径とせん断耐力の関係

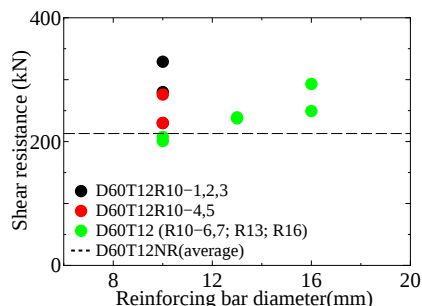


図-8 貫通鉄筋径とせん断耐力の関係

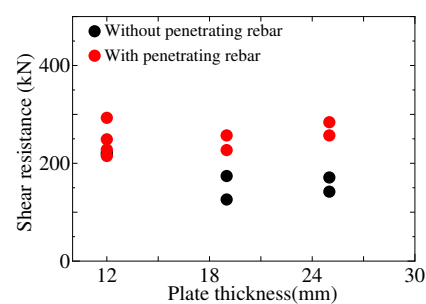


図-9 ジベル鋼板厚とせん断耐力の関係

配置した貫通鉄筋がそのせん断耐力を増加させる効果を有すると言える。具体的には、貫通鉄筋が曲げに抵抗することによるダウエル効果と貫通鉄筋がジベル孔部分のせん断破壊面の骨材の噛み合わせ力などを増加させる効果があると考えられるが、ここではこの2つの効果を合わせて、貫通鉄筋の有無によるせん断耐力の差異を貫通鉄筋の効果と考える。

図-7は貫通鉄筋径10mmを一定とし、ジベル孔径を変化させた場合のジベル孔径とせん断耐力の関係である。縦軸はせん断耐力を、横軸はジベル孔径を示し、赤マークが貫通鉄筋有り、黒マークが貫通鉄筋無しである。ジベル孔径30, 60, 90mmにおける貫通鉄筋の有無によるせん断耐力の差は、平均的にそれぞれ45, 59, 13kNであり、同じ径の貫通鉄筋を使用しても貫通鉄筋の効果は異なることがわかる。まず、ジベル孔径90mmでは、荷重400kN程度でコンクリートブロックの表面に至るひび割れが発生したために、貫通鉄筋の効果が十分に発揮されなかったと言える。一方、ジベル孔部分の貫通鉄筋の曲率は、ジベル孔径60mmの場合よりも30mmの場合の方が大きい、貫通鉄筋の有無によるせん断耐力の差異は、ジベル孔径30mmの場合の方が小さい。この理由は、ジベル孔径30mmでは、荷重が増加するにつれて貫通鉄筋がジベル孔内のコンクリートを割り裂くように移動したために、コンクリートのせん断破壊面のせん断抵抗が低下したことによると考えられる。

次に、図-8はジベル孔径60mmを一定とし、貫通鉄筋径を変えた場合の貫通鉄筋径とせん断耐力の関係である。横軸は貫通鉄筋径を示し、マークの色の違いは、異なる材料特性の試験体であることを示している。また、図中の破線は貫通鉄筋無しの試験体のせん断耐力の平均値である。貫通鉄筋径が10mmの場合には、せん断耐力にばらつきが大きく見られ、貫通鉄筋無しの場合よりもせん断耐力が低いものもある。しかし、緑マークの結果から貫通鉄筋径が大きくなるとせん断耐力も大きくなることがわかる。この場合、貫通鉄筋径が大きくなるほど、ジベル孔部分のクリアランスが小さくなるために、ジベル孔部分に粗骨材が入りにくくなると考えられる。したがって、貫通鉄筋径が10mmの

ときのせん断耐力に対して、貫通鉄筋径が13, 16mmの場合には、せん断耐力の増加がそれほど大きくないと考えられる

一方、図-9は、ジベル孔径60mm、貫通鉄筋径16mmで一定とし、ジベル鋼板厚を変化させた場合のジベル鋼板厚とせん断耐力であり、横軸はジベル鋼板厚を示している。貫通鉄筋が無い場合、ジベル鋼板が厚くなるほどせん断耐力は低下する傾向が見られる。これに対して、貫通鉄筋有りの場合、せん断耐力はジベル鋼板厚の影響をあまり受けない結果となっている。そのため、貫通鉄筋がせん断耐力に及ぼす効果の平均は、ジベル鋼板厚12, 19, 25mmのときに、それぞれ26, 92, 114kNとなっており、ジベル鋼板が厚いほど大きく貫通鉄筋の有無によるせん断耐力の差異は大きい。しかし、貫通鉄筋無しの場合のジベル鋼板厚がせん断耐力に及ぼす影響については検討の余地もある。

4. まとめ

本研究では、コンクリートブロックでジベル鋼板を取り囲む試験体を用いてジベル孔径と貫通鉄筋径の相対関係、あるいはジベル鋼板の板厚を変えた押抜き試験を行い、孔あき鋼板ジベルのせん断耐力に及ぼす貫通鉄筋の効果について検討を行った。得られた知見をまとめると以下ようになる。

1. 孔あき鋼板ジベルに配置した貫通鉄筋は、まず、ダウエル効果でせん断に抵抗し、その後、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によって引張にも抵抗し、平均的には、貫通鉄筋が無い場合よりもせん断耐力は増加する。
2. ジベル鋼板厚を12mm、ジベル孔径を60mmで一定とし、貫通鉄筋径を10, 13, 16mmと変化させた場合、鉄筋径が大きくなるほどせん断耐力は大きくなる。これに対して、ジベル孔径を60mm、貫通鉄筋径を16mmで一定とし、ジベル鋼板厚を12, 19, 25mmと変化させた場合、ジベル鋼板厚はせん断耐力にほとんど影響しない。
3. 孔あき鋼板ジベルの貫通鉄筋の存在はコンクリー

トのせん断面積の減少，粗骨材の配置などに影響し，また，せん断力の増加に伴って貫通鉄筋がジベル孔内を移動する場合もあり，さらに，貫通鉄筋をジベル孔の中央位置に正確に配置することも容易ではない．そのため，孔あき鋼板ジベルのせん断耐力に及ぼす貫通鉄筋の効果を定量的に評価することを難しくしている．

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ことを付記し，ここに謝意を表します．

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) 土木学会：複合構造標準示方書, pp.64-66, 2009.12.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 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) 中島章典, 小関聡一郎, 橋本昌利, 鈴木康夫, グエンミンハイ：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, pp.495-508, 2012.8.
- 9) 中島章典, 小関聡一郎, 内藤雅人, 中島絢平, 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 望月秀次, 安藤博文, 宮地真一, 柳澤則文, 高田嘉秀：孔明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.
- 14) 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.

EXPERIMENTAL STUDY ON PENETRATING REBAR EFFECT ON SHEAR RESISTANCE OF PERFOBOND STRIP

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

A perfbond strip is widely used as the validated shear connector in the various steel-concrete hybrid structures and in general the penetrating rebar is arranged in the perforation to suppress the brittle fracture of the perfbond strip due to the shear failure of the concrete at the perforation. However, the effect of the penetrating rebar on the shear resistance, and of the diameter of the perforation and the penetrating rebar, and the thickness of the steel plate on the behavior of the penetrating rebar are not always clarified up to now. In this research, in order to investigate the effect of the penetrating rebar on the shear resistance of the perfbond strip, two series of simple push-out tests are conducted paying attention to the relation between the perforation diameter and the penetrating rebar diameter, and the variation of the steel plate thickness.