

## 論文 拘束効果を考慮した孔あき鋼板ジベルの耐力評価法

平 陽兵<sup>\*1</sup>・浅沼 大寿<sup>\*2</sup>・一宮 利通<sup>\*3</sup>・古市 耕輔<sup>\*4</sup>

**要旨：**鋼・コンクリート複合構造のずれ止めである孔あき鋼板ジベルを圧縮強度が  $100\text{N/mm}^2$  を超える高強度コンクリートと鋼の組み合わせに適用することを考えた場合、せん断耐力式は整備されていない。また、孔あき鋼板ジベルのせん断耐力は孔あき鋼板に直交する方向の拘束力に大きく依存するとの指摘がなされている。そこで、コンクリートの圧縮強度が  $40\sim 160\text{N/mm}^2$  の範囲の貫通鉄筋のない1つ孔の試験体を用いて、拘束力を制御した要素試験により耐力式を構築した。また、押抜き試験を実施し、拘束力の作用状況と耐力式の適用性について検討した。その結果、提案する耐力式は既往の耐力式よりも高い算定精度が得られた。

**キーワード：**ずれ止め、孔あき鋼板ジベル、拘束力、せん断耐力

### 1. はじめに

鋼・コンクリート複合構造は部材断面の縮小化や過密配筋の解消など様々な目的で土木構造物に適用されており、孔あき鋼板ジベルは鋼とコンクリートの接合に用いられている。また近年、建築構造物への適用に向けた研究開発も進められている。鋼とコンクリートのそれぞれの材料は、高強度化が図られており、今後、高強度材料を用いることによる複合構造の合理化が期待される。筆者らは圧縮強度が  $100\text{N/mm}^2$  を超える高強度コンクリートと鋼を用いた複合構造物のずれ止めに孔あき鋼板ジベルを用いた場合の検討を進めている。

ずれ止めの設計に当たっては、ずれ止めのせん断耐力を明らかにしておくことが重要であり、複合構造標準示方書<sup>1)</sup>(以下、複合示方書)には孔あき鋼板ジベル(以下、PBL)のせん断耐力式(以下、示方書式)が記されている。複合示方書ではPBLのせん断耐力として、(a)孔内のコンクリートが鋼板面に沿ってせん断破壊する場合と、(b)孔間の鋼板がせん断降伏する場合とが示されている。前者のせん断耐力式は実験結果を統計処理して求められた実験式であり、せん断耐力はコンクリートの圧縮強度に比例する。しかしながら、一宮ら<sup>2)</sup>は圧縮強度が  $150\text{N/mm}^2$  のコンクリートを用いた場合のPBLのせん断耐力の算定に示方書式が適用できないことを指摘している。

一方、示方書式の構築に使われた実験結果は、いずれも図-1に示すような押抜き試験によるものである。押抜き試験は、H形鋼のフランジに取り付けたずれ止めによりH形鋼とコンクリートブロックを接合し、H形鋼とコンクリートブロックの界面にせん断力を作用させるものである。頭付きスタッドではこの試験方法がせん断耐力を求める際の標準的な試験<sup>3)</sup>となっている。PBLについ

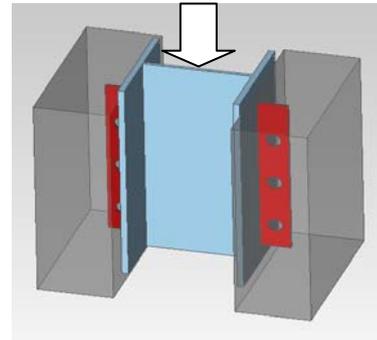


図-1 押抜き試験体

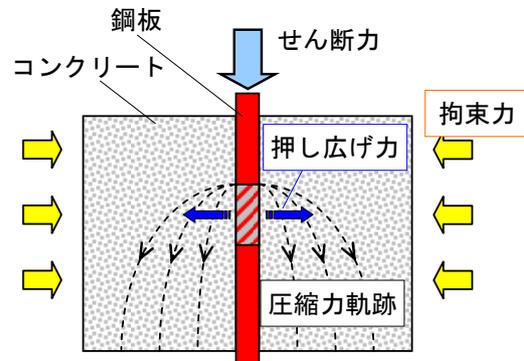


図-2 押し広げ力

ても多くの押抜き試験が実施されており、PBLの開発者とされている Leonhardt ら<sup>4)</sup>の実験も同様に押抜き試験によるものである。しかしながら、藤井ら<sup>5, 6)</sup>はPBLの破壊形態は頭付きスタッドと異なるためPBLのせん断耐力を始めとするずれ特性を把握する際に押抜き試験を用いるのは適切ではないことを指摘し、実験方法や境界条件の違いがせん断耐力に与える影響を検討している。PBLはコンクリートが鋼板面に沿ってせん断破壊する際、図-2に示すような鋼板に垂直な方向にコンクリートブ

\*1 鹿島建設株式会社 技術研究所土木構造グループ 上席研究員 (正会員)

\*2 鹿島建設株式会社 技術研究所土木構造グループ 研究員 (正会員)

\*3 鹿島建設株式会社 技術研究所土木構造グループ 上席研究員 (正会員)

\*4 鹿島建設株式会社 技術研究所土木構造グループ グループ長 工博(正会員)

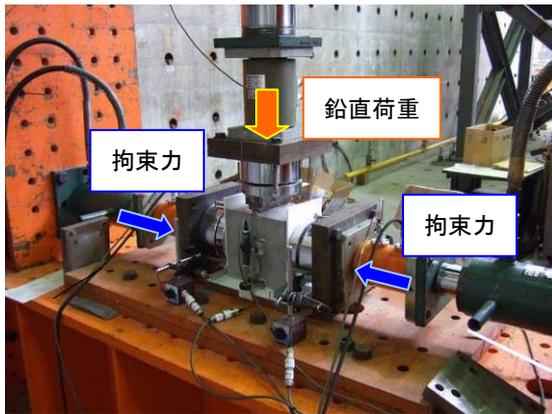


写真-1 要素試験状況

ロックを押し広げる力が作用し、その反力として拘束力が作用する。そのため押し広げ力を拘束する要因となるものがせん断耐力に影響を与えていると考えられている。また、中島ら<sup>7)</sup>は拘束力としてコンクリートブロックの大きさに着目し、コンクリートブロック内に1つ孔を有する鋼板を押し抜く試験を実施し、孔あき鋼板の周りのコンクリートブロックの面積とコンクリートの圧縮強度の影響を考慮した耐力式を提案している。

以上のような背景から、高強度コンクリートに適用でき、さらに拘束力の影響を考慮したPBLのせん断耐力式の構築を目指した。実構造物における拘束力の多くは、押し広げ力の反力として作用するものと考えられ、それはコンクリートの大きさやPBL周囲の鉄筋量によって変化すると考えられる。そのため、これらを変化させた実験が考えられるが、実際にどの程度の拘束力が作用したかを評価するのは難しい。一方、拘束力を制御した実験では実構造物においてどの程度の拘束力が作用するかの評価はできないが、拘束力とせん断耐力の関係を明らかにできる。本研究では、最初のステップとしてPBLにおける拘束力の影響に関する基本データを得ることを重視し、孔1個を有する孔あき鋼板を用いて外的に拘束力を与えた状態でのせん断実験（以下、要素試験）を実施することとした。そして、その結果をもとに圧縮強度と拘束力を変数とするせん断耐力式を提案する。次に、押抜き試験を実施し、拘束力の作用状況とせん断耐力の確認、及び提案するせん断耐力式による評価を行った。

## 2. 要素試験

### 2.1 試験概要

#### (1) 試験方法

写真-1に試験状況を示す。本実験では貫通鉄筋を用いない試験体を用いて拘束力の大きさを直接計測できるように、外部から拘束を与える方法でせん断実験を実施した。実験では試験体底面にテフロンシートを用いて摩擦を極力小さくし、また、鋼板を挟む2つのコンクリートブ

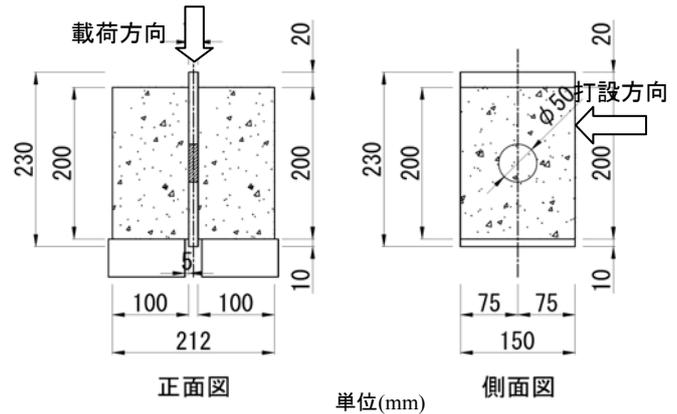


図-3 試験体形状 (要素試験)

ックを孔内のコンクリート以外では一体化させないことにより、外部から与えるもの以外、拘束力が作用しないようにした。

#### (2) 試験体

図-3に試験体形状を示す。試験体はその中央に厚さ12mmで直径50mmの孔を有する鋼板を配置し、その両側にコンクリートブロックを配置したものである。PBLに貫通鉄筋はなく、また、試験体両側のコンクリートブロックも無筋とした。孔の直径は土木構造物で比較的多く使われるものとして直径50mmを設定し、鋼板の幅を150mmとした。コンクリートブロックの幅は両側のコンクリートが中央の孔あき鋼板で完全に分割されるように孔あき鋼板と同じ幅の150mmとした。

表-1に試験体一覧を示す。試験体は全26体であり、試験要因はコンクリートの圧縮強度と拘束力とした。試験体名は圧縮強度の目標値-面圧で示している。ここで面圧とは、拘束力をコンクリートブロックの面積(200mm×150mm)で除した値である。

試験体の製作は、鋼板とコンクリートの付着を除去するために鋼板にグリスを塗布し、図-3に示す方向からコンクリートを打設した。

#### (3) 載荷方法

コンクリートブロックに挟まれた孔あき鋼板を鉛直下向きに油圧ジャッキで加力し、鋼板とコンクリートブロックの接合面にせん断力を与えた。孔あき鋼板への加力中、水平方向の油圧ジャッキによる拘束力を一定に保つようコンピューターで制御した。

載荷は最大荷重が得られた後、鋼板とコンクリートの相対ずれが8mmとなるまで途中除荷をせずに行った。

#### (4) 計測

計測項目は、載荷荷重(鉛直ジャッキ)と拘束力(水平ジャッキ)のほか、鋼板とコンクリートブロックの相対ずれとした。

### 2.2 実験結果

表-1に最大荷重及び最大荷重時の相対ずれを示す。表

表-1 試験体一覧（要素試験）

試験体 No.	孔径 mm	板厚 mm	板面積 mm <sup>2</sup>	孔面積 mm <sup>2</sup>	圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>	拘束力 kN	面圧 N/mm <sup>2</sup>	拘束圧 =拘束力 /孔面積 N/mm <sup>2</sup>	最大荷重 (せん断耐力) kN	最大 荷重時 のずれ mm	計算値 ※2 kN	実験値 / 計算値
40-1	50	12	30000	1963.5	42.2	30.0	1.0	15.3	75	0.357	136	0.55
40-2						60.0	2.0	30.6	114	0.625	136	0.84
40-3						90.0	3.0	45.8	135	1.405	136	0.99
40-4						120.0	4.0	61.1	163	1.257	136	1.20
40-6					45.2	180.0	6.0	91.7	236	0.270	148	1.59
40-8						240.0	8.0	122.2	237	0.778	148	1.59
40-10						300.0	10.0	152.8	295	0.022	148	1.99
80-2					75.7	60.0	2.0	30.6	140	0.516	275	0.51
80-4						120.0	4.0	61.1	227	0.710	275	0.82
80-6					81.5	180.0	6.0	91.7	298	0.675	299	1.00
80-8						240.0	8.0	122.2	358	1.081	299	1.20
80-10						300.0	10.0	152.8	385	0.682	299	1.29
120-2					126.3	60.0	2.0	30.6	168	0.504	485	0.35
120-4						120.0	4.0	61.1	251	1.166	485	0.52
120-6					130.7	180.0	6.0	91.7	354	0.618	503	0.70
120-8						240.0	8.0	122.2	386	0.696	503	0.77
120-10						300.0	10.0	152.8	428	0.648	503	0.85
150-1					153.9	30.0	1.0	15.3	97	0.109	599	0.16
150-2						60.0	2.0	30.6	177	0.443	599	0.29
150-3						90.0	3.0	45.8	204	0.604	599	0.34
150-4	120.0	4.0	61.1	248		1.171	599	0.41				
150-6	156.3	180.0	6.0	91.7	341	0.561	609	0.56				
150-8		240.0	8.0	122.2	364	0.689	609	0.60				
150-10		300.0	10.0	152.8	468	0.667	609	0.77				
160-2	165.4	60.0	2.0	30.6	162	0.816	647	0.25				
160-4		120.0	4.0	61.1	257	0.804	647	0.40				

※1 面圧＝拘束力／コンクリートブロックの断面積（200mm×150mm）

※2 示方書式  $Q_u = 3.38 \times d^2 \times (t/d)^{1/2} \times f'_c - 39.0$  (kN)

$Q_u$ ：せん断耐力(kN),  $d$ ：孔径(mm),  $t$ ：板厚(mm),  $f'_c$ ：コンクリートの円柱体の圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)

には複合示方書に示される貫通鉄筋がない場合の示方書式による計算値も合わせて示す。また、図-4 に載荷荷重と相対ずれの関係を示す。ここでは No.40-4 と No.160-4 の結果を示すが、いずれの試験体も挙動に大きな違いはなく、最大荷重前に相対ずれが生じ始め、最大荷重以降、荷重は緩やかに低下した。図-5 には各試験体の最大荷重時の相対ずれを示すが圧縮強度や拘束力との間に明確な関係は見られず試験体により異なるが概ね 0.5 から 1.0mm の範囲であった。

載荷終了後の試験体の状況を写真-2 に示す。ここでは試験体 No.160-4 について示すが、いずれの試験体も鋼板の孔の中に鋼板とほぼ同じ厚さのコンクリートが残っており、鋼板面に沿って 2 面の破壊面を持つせん断破壊をした。破壊面は完全な平滑ではなく、試験体によって異なるが若干の凹凸が見られ、孔周囲の粗骨材の状況などの影響だと思われる。PBL の最大荷重時の孔周辺のひび割れ状況を実験から把握することは難しく、コンクリート内部の状況までは不明である。ただし、試験体により異なるがせん断耐力に達した時点で相対ずれが 0.5mm

程度生じていることを鑑みると、この時点で孔周辺にはひび割れが生じていると思われる。つまり、孔の周辺には最大荷重に達する前にひび割れが生じ、その後、ひび割れ面が形成されひび割れ面におけるコンクリート同士の摩擦力によりずれが生じた後も荷重が増加したものと思われる。

最大荷重（せん断耐力）と圧縮強度の関係に着目し、縦軸にせん断耐力、横軸に圧縮強度をとり、面圧ごとにとまとめたグラフを図-6 に示す。圧縮強度の増加に伴いせん断耐力は若干増加傾向が見られた。同様に横軸を面圧としたグラフを図-7 に示す。面圧の増加に伴ってせん断耐力は増加する傾向が見られた。本実験の範囲では高強度コンクリートを用いても耐力の頭打ちは見られなかったが、圧縮強度に比例して増加することはなかった。

以上より、圧縮強度と拘束力の両者がせん断耐力に影響を与えており、これらを考慮したせん断耐力式の構築が可能だと考えた。

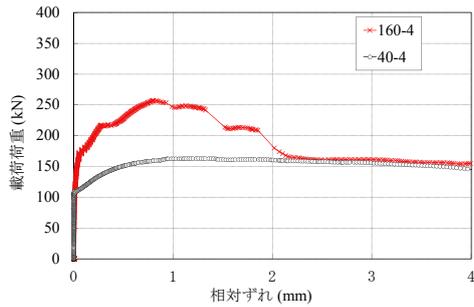


図-4 載荷荷重と相対ずれの関係

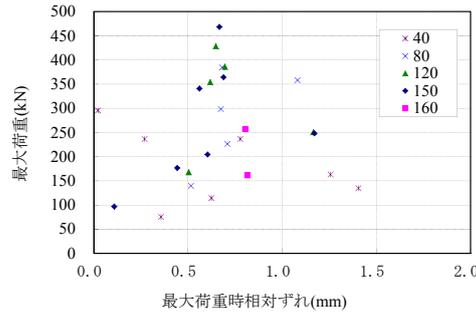


図-5 最大荷重と最大荷重時の相対ずれの関係



写真-2 実験後の状況 (No.160-4)

### 3. せん断耐力式の提案

前述した要素試験結果を基に、コンクリートの圧縮強度と拘束力を考慮したせん断耐力式を構築した。耐力式の構築に当たっては、ひび割れ発生後の最大荷重時にせん断破壊したと考え、これをせん断耐力とした。コンクリート標準示方書<sup>8)</sup>には圧縮強度と面圧の影響を積の形で考慮した次のせん断伝達耐力式が示されており、これを参考にせん断耐力の評価を試みた。

$$V_c = \mu \cdot f'_{cd} \cdot (\sigma_{nd} / 2)^b \cdot A_c \quad (1)$$

ここで、 $V_c$ ：せん断伝達耐力、 $\mu$ ：固体接触に関する平均摩擦係数、 $f'_{cd}$ ：コンクリートの設計圧縮強度、 $\sigma_{nd}$ ：せん断面に垂直に作用する平均圧縮応力度、 $b$ ：面形状を表す係数 (0~1)、 $A_c$ ：せん断面の面積である。

式(1)では、 $\sigma_{nd}$ を設計上安全側とするために 1/2 としているが、本実験結果については孔に作用する拘束圧 (= 拘束力/孔の面積) を  $\sigma_{nd}$  とし、2 面の孔の面積分のせん断伝達面によってせん断抵抗するとした。よって、式(2)に示す関数を設定し、回帰分析によって係数を決定した。

$$Q_c = (\alpha \cdot f'_c \cdot A \cdot \sigma_n^B) \times \frac{\pi d^2}{4} \times 2 \quad (2)$$

ここで、 $Q_c$ ：PBLのせん断耐力、 $f'_c$ ：コンクリート圧縮強度、 $\sigma_n$ ：拘束圧 (= 拘束力/孔の面積)、 $d$ ：孔の直径、 $\alpha$ 、 $A$ 、 $B$ ：係数とする。

まず、圧縮強度と拘束力の影響度合いを示す係数  $A$ 、 $B$  を重回帰分析<sup>9)</sup>により決定した。その結果、 $A=0.315$ 、 $B=0.629$  を得た。拘束圧は圧縮強度に比べてせん断耐力に与える影響が大きく、指数として 2 倍程度であった。次に、この数値を丸めて  $A=1/3$ 、 $B=2/3$  と設定し、回帰分析により係数  $\alpha$  を求めた。その結果、 $\alpha=0.784$  が得られ PBL のせん断耐力式として式(3)を得た。

$$Q_c = \left( 0.784 \cdot f'_c \cdot \frac{1}{3} \cdot \sigma_n^{\frac{2}{3}} \right) \times \frac{\pi d^2}{4} \times 2 \quad (3)$$

図-8 に実験結果と式(3)による計算値の比較を示す。また、示方書式による算定値も示した。示方書式による計算値はコンクリートの圧縮強度に比例するとされていること、また、拘束力は考慮できないことからばらつき

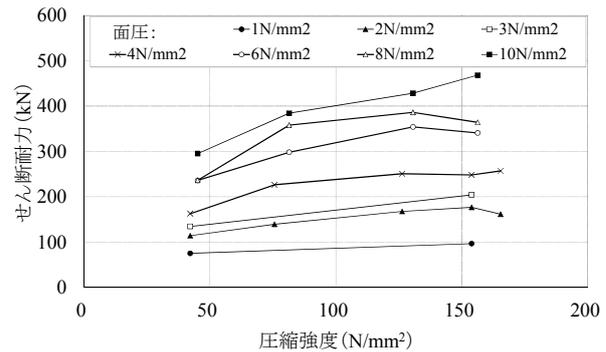


図-6 せん断耐力と圧縮強度の関係

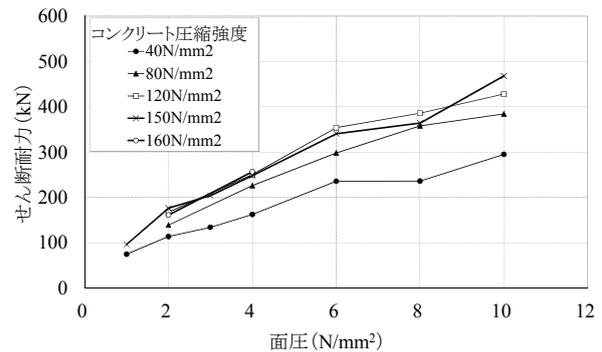


図-7 せん断耐力と面圧の関係

大きい結果となっている。一方、式(3)による計算値は圧縮強度と拘束力の影響を考慮できており、実験値と計算値の比は、平均値 1.02、変動係数 7.1% となり、高い精度を有することを確認した。

## 4. 押抜き試験との比較

### 4.1 押抜き試験概要

コンクリートの圧縮強度をパラメータとして押抜き試験を実施し、拘束力の作用状況とせん断耐力の確認、並びに前章で提案したせん断耐力式の適用性の検証を行った。表-2 に試験体一覧を、図-9 に試験体形状を示す。試験は圧縮強度が 50~150N/mm<sup>2</sup> の範囲で全 6 体について実施した。試験体は H 形鋼に高さ 100mm、厚さ 12mm で直径 50mm の孔を 180mm 間隔で 3 個設けた孔あき鋼板を各フランジに 1 枚ずつ溶接した。コンクリートプロ

ックは幅 600mm, 厚さ 250mm, 高さ 780mm とした。コンクリート内には補強筋 D16 を配置したが, 貫通鉄筋は配置しなかった。鋼材のコンクリートと接触する部分にはグリスを塗布した。

試験体設置は, 床と試験体との間の摩擦を極力小さくするために平滑な鋼製の床の上にビニールシートを敷き石膏で不陸調整した。載荷時には荷重, 及び鋼とコンクリート間の相対ずれを計測したほか, コンクリート内の孔あき鋼板に直交方向の変形を確認するために, コンクリート表面と補強鉄筋にひずみゲージを貼付し, コンクリート内部にはモールドゲージを埋め込んだ。

#### 4.2 実験結果

表-2 に最大荷重と最大荷重時の相対ずれ, 及び示方書式による計算値を示す。圧縮強度の増加に伴いせん断耐力も増加する傾向が見られたが, 示方書式による計算値との差は圧縮強度の増加に伴い大きくなった。図-10 に載荷荷重と相対ずれの関係を, 写真-3 に載荷後の状況を示す。破壊形態は全試験体とも同様で, 鋼板面に沿ったコンクリートのせん断破壊であった。コンクリートブロックの上面に発生したひび割れは, 最大荷重に達する直前に孔あき鋼板の位置に発生したものである。

図-11 にコンクリート表面と鉄筋ひずみ及びモールドゲージから得られた各試験体の最大荷重時におけるコンクリートブロックのひずみ分布を示す。試験体外側が圧縮, フランジ側が引張となるひずみ分布が得られた。これは, 押し広げ力によるものと考えられる。

#### 4.3 実験結果の評価

コンクリートブロックに生じるひずみ分布について, 藤井ら<sup>5)</sup>は PBL からの押し広げ力によってコンクリートブロックが曲げ変形し, その反力として拘束力が作用するとしている。本実験でも同様の挙動が見られたことから, 図-11 に示すようにコンクリートブロックに生じたひずみから三角形分布を仮定し, それらの合力を押し広げ力として算出した。そして, この押し広げ力を孔面積で除したものを拘束圧として式(3)によりせん断耐力を算出した。実験値と計算値を比較した結果, 図-12 に示すように提案したせん断耐力式による計算値は, 示方書式による計算値と比較して高い精度の結果が得られた。

提案するせん断耐力式で設計するためには, 事前に拘

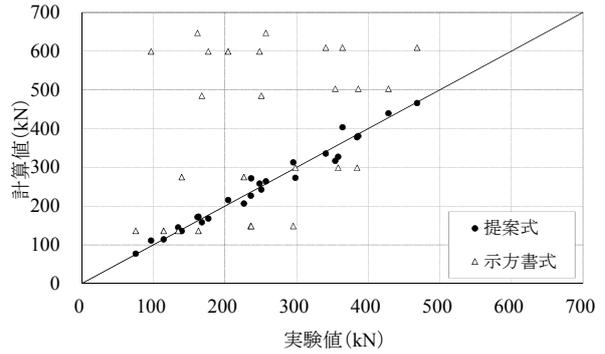


図-8 実験値と計算値の比較

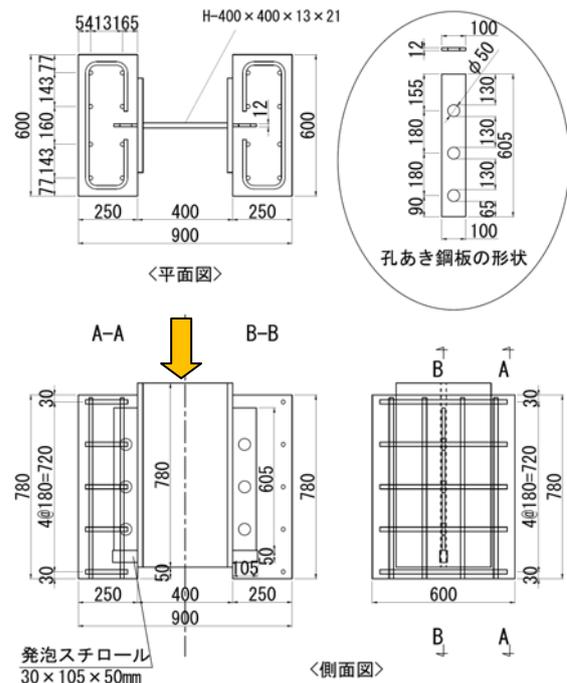


図-9 試験体形状 (押抜き試験)

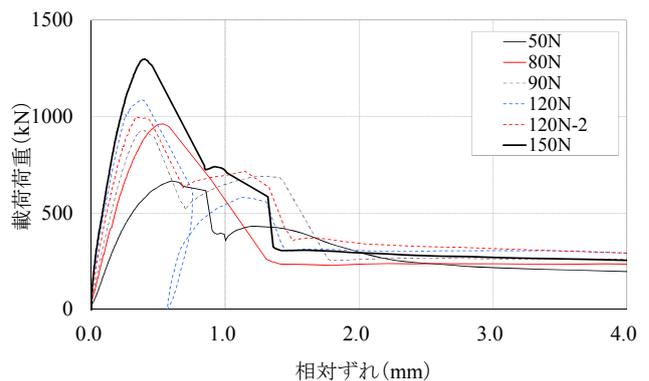


図-10 載荷荷重と相対ずれの関係

表-2 試験体一覧 (押抜き試験)

試験体 No.	コンクリート			PBL			最大荷重 kN	1 孔当りのせん断耐力 kN	最大荷重時のずれ mm	示方書式 kN	提案式	
	圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>	引張強度 N/mm <sup>2</sup>	弾性係数 N/mm <sup>2</sup>	孔径 mm	板厚 mm	孔数 個					拘束圧 N/mm <sup>2</sup>	計算値 kN
50N	50.5	4.1	33,000	50	12	3	665.6	110.9	0.604	170.4	25.7	98.5
80N	79.1	5.2	35,300				961.3	160.2	0.540	288.9	34.6	140.4
90N	94.4	4.8	36,600				930.2	155.0	0.378	352.4	40.7	165.1
120N	124.7	6.5	40,900				1088.0	181.3	0.374	478.0	39.2	176.1
120N-2	121.9	7.0	40,600				997.7	166.3	0.331	466.4	41.6	182.8
150N	149.3	6.4	44,500				1298.6	216.4	0.400	580.0	46.6	209.8

束力を算出する必要がある。本実験では、最大荷重の直前に写真-3 に示すように PBL 直上のひび割れが観察されたことから、PBL 直上のコンクリートひずみがひび割れ発生ひずみに達するときがせん断耐力発現時と考えることができる。そして、ひび割れひずみに達するひずみ分布を生じさせる押し広げ力（拘束力）を算出することで、せん断耐力を求めることが可能であると考えられる。ただし、これについてはさらにデータを収集し、今後考察を進めていきたい。

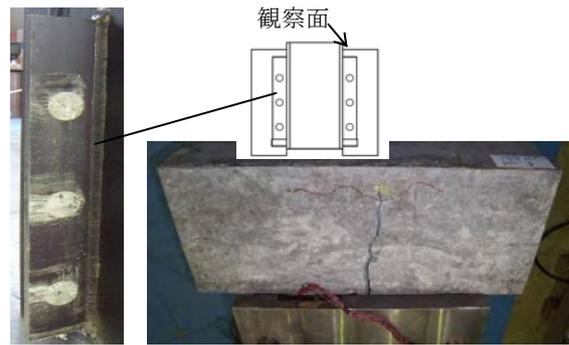


写真-3 実験後の試験体状況

## 5. まとめ

孔あき鋼板ジベルについてコンクリートの圧縮強度が  $40\sim 160\text{N/mm}^2$  の範囲で拘束力を与えたせん断試験と押抜き試験を実施した。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 圧縮強度と拘束力をパラメータとしたせん断試験を実施し、コンクリートが2面せん断破壊する場合のせん断耐力を確認した。
- (2) 実験結果から圧縮強度と拘束力を変数としたせん断耐力式を提案し、良好な算定精度を有することを確認した。
- (3) 圧縮強度をパラメータとした押抜き試験を実施し、せん断耐力を確認するとともにコンクリートブロックの曲げ変形を確認した。
- (4) コンクリートブロックのひずみ分布から算出した拘束力を用いて、提案式で算出したせん断耐力は精度よく実験結果を算定できることを確認した。

実構造物の設計に用いるためには、様々な部材でどのような拘束力が作用するのか把握する必要がある。現在、実構造物に近い部材での載荷実験を実施し、提案したせん断耐力式を適用した合理的な部材設計法の検討を進めている。

## 参考文献

- 1) 複合構造標準示方書：土木学会，pp.59-73，2009
- 2) 一宮利通，盛田行彦，日紫喜剛啓：孔あき鋼板で補強した超高強度コンクリート部材の構造性能，JCI「高強度コンクリート構造物の構造性能評価研究委員会」報告会・シンポジウム，pp.510-515，2006
- 3) 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：日本鋼構造協会，1996
- 4) F. Leonhardt, W. Andra, H.-P. Andra, W. Harre: Neues, vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit, Beton und Stahlbetonbau, pp.325-331, 1987
- 5) 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

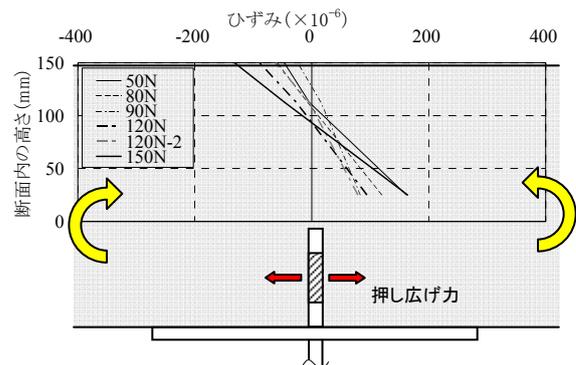


図-11 最大荷重時のコンクリートのひずみ分布

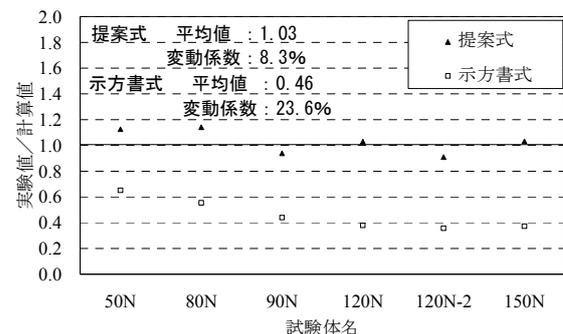


図-12 実験値と計算値の比較

拘束因子，土木学会論文集 A，Vol.64，No.2，pp.502-512，2008.6

- 6) 古川祐輔，藤井堅，道菅裕一，山口詩織：孔あき鋼板ジベルの押し抜き試験における各種パラメータのずれ耐力への影響，第9回複合構造の活用に関するシンポジウム，pp.58-64，2011
- 7) 中島章典，橋本昌利，小関聡一郎，鈴木康夫：拘束度の高い押し抜き試験に基づく孔あき鋼板ジベルの強度評価，第9回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム，pp.49～57，2011
- 8) コンクリート標準示方書（設計編）：土木学会，pp.147，2007
- 9) 平城弘一，松井繁之，福本嘸士：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