

孔あき鋼板ジベルのせん断耐力に及ぼす影響因子

宇都宮大学 学生員 ○橋本昌利 グエンミンハイ 渡辺一貴 フェロー 中島章典 正会員 鈴木康夫

1. はじめに

鋼コンクリート複合構造（以下、複合構造と呼ぶ）に使用される異種材料の効果を発揮させるために、ずれ止めなどにより材料間の応力伝達を行う必要がある。近年、剛性や疲労強度が高く、施工性に優れているといった点から孔あき鋼板ジベルが多く適用されている。

これまでに国内外において孔あき鋼板ジベルの研究が数多く行われ、せん断耐力を評価するいくつかの強度評価式が提案されている^{1)~3)}。しかし、孔あき鋼板ジベルのせん断耐力の強度評価式は一般的に頭付きスタッドの押抜き標準試験方法案⁴⁾を参考にした実験結果により構築されている。そのため合成桁に用いられる孔あき鋼板ジベルへの適用を想定している。これらの実験結果には試験体のコンクリートブロック表面にひび割れが生じているものが含まれている。しかし複合ラーメン橋剛結部のように鋼殻により囲まれ、ひび割れが生じにくい構造物も存在するため既往の強度評価式がすべての構造物に適用できるとは言い難い。このことから著者らはひび割れが生じにくい構造物への適応を想定した強度評価式を提案している⁵⁾。しかし著者らの研究において種々のデータの蓄積を行ってきたがジベル孔を有する鋼板の径厚比(板厚をジベル孔径により除した値)の影響がまだ不明確である。複合構造標準示方書²⁾(以下、複合示方書と呼ぶ)に示される強度評価式では貫通鉄筋が無い孔あき鋼板ジベルの場合、板厚の増加によりせん断耐力が増加するように算定される。しかし、既往の研究^{3),5)}において必ずしもそのような結果が得られていないことが確認できる。

そこで本研究では孔あき鋼板ジベルの径厚比に着目し、径厚比がせん断耐力へ及ぼす影響について確認を行う。また複合示方書において提案されている径厚比を考慮した強度評価式（以下、示方書式と呼ぶ）の適応性の確認をする。

2. 押抜き試験

(1) 試験体

本研究では図-1 に示すような、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、コンクリートブロック表面にひび割れが生じにくい試験体により押抜き試験を行う。D6T12P16 を基本試験体として貫通鉄筋が無い試験体を実験Ⅰ、貫通鉄筋を有する試験体を実験Ⅱとする。両者とも径厚比をパラメータとして各タイプ2体ずつ、全18体の試験体を作製した。試験体名においてDはジベル孔径、Tは板厚、Pは貫通鉄筋径を表している。試験体詳細、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、ずれ変位が21mm点でのせん断耐力を表-1に示す。孔あき鋼板ジベルの貫通鉄筋が無い場合のせん断耐力は、初めにせん断耐力が明らかに低下した点をせん断耐力とする。一方、貫通鉄筋が無い試験体とは異なり貫通鉄筋を有する試験体の場合にはせん断力の低下が確認された後も、貫通鉄筋の影響によりせん断力が増加する結果も得られているため貫通鉄筋を有する試験体のせん断耐力は相対

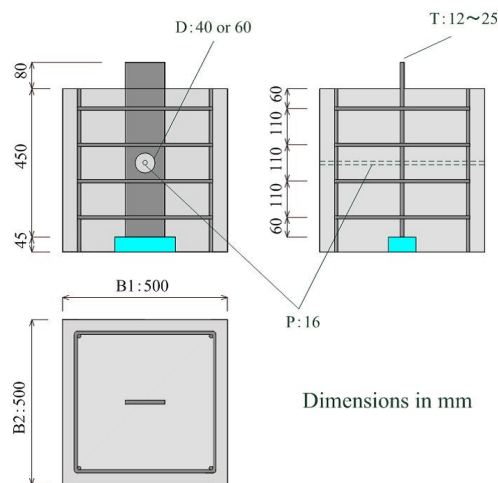


図-1 試験体図 (D6T12)

変位 21mm 内における最大せん断力をせん断耐力と定義する.

(2) 測定項目

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する。溝切を施した貫通鉄筋を有する試験体では貫通鉄筋 1 本あたり 26 枚のひずみゲージを両面に中央から 20mm 間隔で貼り付けている。

(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。また、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。

(4) 使用材料

実験Ⅰのコンクリートの圧縮強度及び引張強度、弾性係数の平均値はそれぞれ 32.5N/mm^2 , 3.3N/mm^2 , 26.5kN/mm^2 であり、実験Ⅱのそれぞれは 34.1N/mm^2 , 3.1N/mm^2 , 26.6kN/mm^2 である。鋼板は SS400 を使用し、降伏強度、引張強度は板厚 12mm のものがそれぞれ 354N/mm^2 , 441N/mm^2 , 19mm のものがそれぞれ 348N/mm^2 , 439N/mm^2 , 25mm のものがそれぞれ 319N/mm^2 , 424N/mm^2 である。貫通鉄筋の降伏強度、引張強度はそれぞれ 356N/mm^2 , 505N/mm^2 である。

(5) 試験結果と考察

a) せん断力-ずれ変位関係及びせん断耐力

実験Ⅰ、実験Ⅱのせん断力-ずれ変位関係を図-2～図-4に示す。まず、実験Ⅰ（貫通鉄筋無し）のせん断力-ずれ変位関係である図-2に着目する。基本試験体 D6T12 と板厚を増加させた D6T19 と D6T25 のせん断力-ずれ変位関係を比較すると傾向が明らかに異なっていることが確認できる。D6T12 はせん断耐力時のずれ変位が 7mm 付近であ

Key Words: 鋼コンクリート複合構造, 孔あき鋼板ジベル, 貫通鉄筋, 径厚比, ジベル孔内コンクリートの表面性状

〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2 宇都宮大学大学院工学研究科地球環境デザイン学専攻 Tel.028-689-6210 Fax.028-689-6210

表-1 試験体一覧

	試験体名	D (mm)	f'_c (N/mm ²)	T (mm)	P (mm)	せん断耐力 (kN)	ずれ変位 (mm)	せん断力 (21mm) (kN)
実験 I 貫通鉄筋 無し	D6T12-1	60	32.5	12	-	218.2	7.6	144.1
	D6T12-2	60	32.5	12	-	222.2	6.2	143.4
	D6T19-1	60	32.5	19	-	120.2	4.4	119.6
	D6T19-2	60	32.5	19	-	174.1	2.2	124.8
	D6T25-1	60	32.5	25	-	142.4	1.3	102.6
	D6T25-2	60	32.5	25	-	171.2	2.6	120.6
	D4T12-1	40	32.5	12	-	77.8	0.6	52.6
	D4T12-2	40	32.5	12	-	87.9	1.7	51.3
	D4T19-1	40	32.5	19	-	71.5	0.1	46.4
	D4T19-2	40	32.5	19	-	64.7	3.0	46.4
	D4T25-1	40	32.5	25	-	85.6	2.1	62.7
	D4T25-2	40	32.5	25	-	76.4	1.6	43.8
実験 II 貫通鉄筋 有り	D6T12P16-1	60	34.1	12	16	228.0	15.3	219.5
	D6T12P16-2	60	34.1	12	16	214.6	21.0	214.6
	D6T19P16-1	60	34.1	19	16	257.1	20.9	257.1
	D6T19P16-2	60	34.1	19	16	226.7	21.1	226.7
	D6T25P16-1	60	34.1	25	16	284.2	18.8	284.2
	D6T25P16-2	60	34.1	25	16	252.9	20.8	252.9

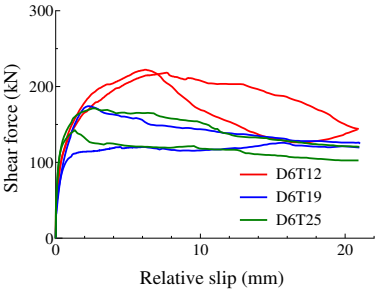


図-2 D6T12-D6T25

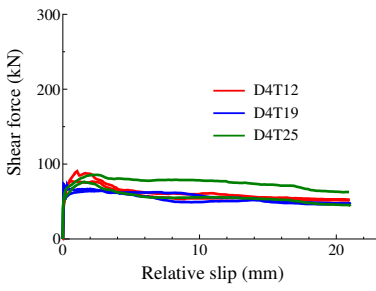


図-3 D4T12-D4T25

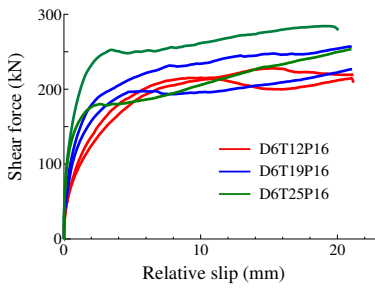


図-4 D6T12P16-D6T25P16

るのに対し、D6T19 と D6T25 はずれ変位が 2~4mm 付近で傾きが大きく変化し、せん断耐力に達した後にせん断力が減少している。ここで孔あき鋼板ジベルの破壊メカニズムに着目すると、孔あき鋼板ジベルは孔内のコンクリートに生じるせん断面のひび割れによる凹凸の噛み合わせがせん断耐力へ大きく影響すると考えられる。D6T19 や D6T25 の試験体ではジベル孔内のコンクリートにひび割れが発生した後、ジベル孔内凹凸の噛み合わせが悪くせん断力が 2~4mm 付近で減少する傾向が得られたと考えられる。一方、D6T12 の場合は D6T19 や D6T25 と同様にずれ変位が 2~4mm 付近においてジベル孔内のひび割れが生じ、2 面せん断破壊が起きていると考えてられるが、凹凸の噛み合わせによりせん断力が増加したと予想できる。また、実験値のせん断耐力と示方書式から得られるせん断耐力値との比較を図-5-a、図-5-b に示す。本実験結果から板厚の増加により明らかにせん断耐力の減少が見受けられ、示方書式から算定される値と反する結果が得られている。板厚の増加によるせん断耐力の増加は必ずしも認められないため、示方書式を見直す必要がある。本研究ではせん断耐力の減少として考えられるジベル孔内の凹凸状況の確認のため非接触レーザー変位計により凹凸状況の確認を行った。凹凸の評価に関しては 3 次元レーザー変位計による凹凸評価に後述する。

実験 II (貫通鉄筋有り) のせん断力-ずれ変位関係を図-4 に示す。貫通鉄筋を有する試験体の場合はずれ変位が

21mm に至るまでせん断力が増加する傾向が見受けられる。この場合のせん断力にはジベル孔内のコンクリートの凹凸の他に鉄筋による効果が影響している。そして、板厚が大きいほどせん断耐力が大きくなる結果が得られている。

図-6 に示すように鋼板から作用する力を等分布荷重としてジベル孔内コンクリートに伝わると仮定すると、板厚が大きな試験体ほど鉄筋と鋼板間に位置するジベル孔内コンクリートの圧縮領域が広がる。このことから、板厚が厚い試験体ほど孔あき鋼板ジベルのせん断力に対する剛性が高くなる結果が得られている。加えて貫通鉄筋が曲げ変形を起こした後に板厚が厚い場合、貫通鉄筋と鋼板の接触が生じやすくなるためせん断力の増加が顕著に見受けられる。

b) 貫通鉄筋のひずみ

実験 II により得られた貫通鉄筋の軸ひずみの結果を示す。また軸ひずみの結果に関しては、各試験体一体ずつの結果を示している。

ずれ変位が 2.0mm の時点における長手方向軸ひずみ分布を比較した結果を図-7 に示す。軸ひずみはどの試験体においても中央部に引張りひずみが大きく生じている。一方、中心部以外の軸ひずみは多少生じているが全体的にみて小さい。孔あき鋼板ジベルはジベル孔内コンクリートに 2 面せん断破壊が生じ、孔内のコンクリートが鋼板と一緒に移動しようとするが、破壊面には骨材等の凹凸が生じて

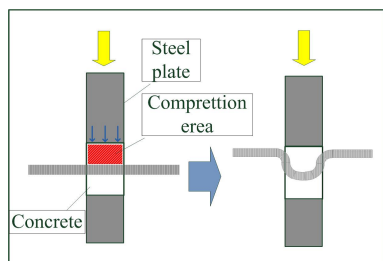


図-6 ジベル孔内の破壊状況

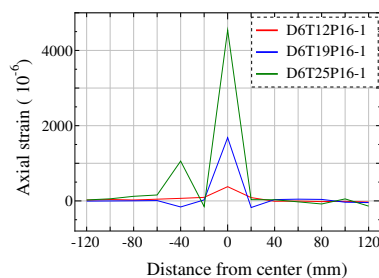


図-7 貫通鉄筋軸ひずみ (ずれ変位 2.0mm)

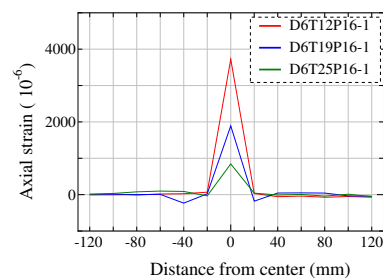


図-8 貫通鉄筋軸ひずみ (せん断力 180kN)

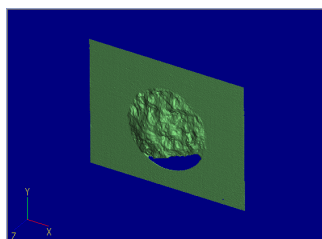


図-9 ジベル孔内コンクリートの凹凸図

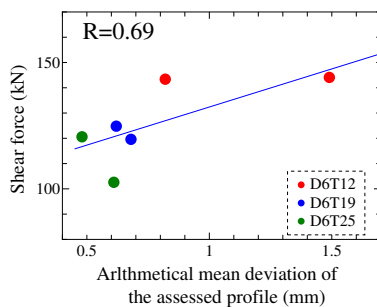


図-10 算術平均高さ 孔径 60mm

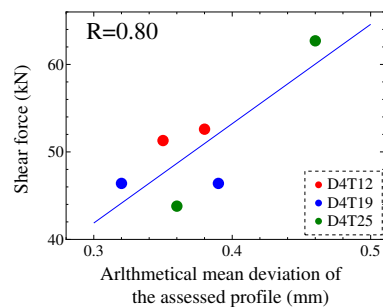


図-11 算術平均高さ 孔径 40mm

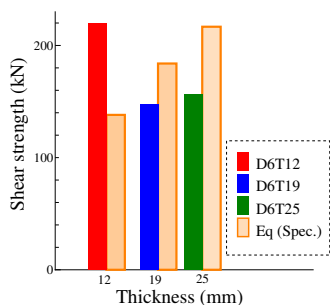


図-5-a 孔径 60mm

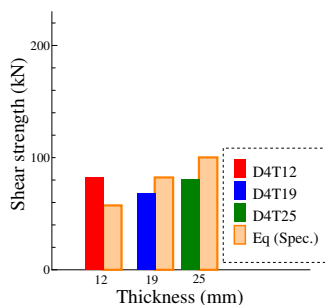


図-5-b 孔径 40mm

図-5 せん断耐力の比較

いるので、その噛み合わせを押し広げながら移動する。その押し広げ力により周辺コンクリートが広がることによりジベル孔内に位置する軸ひずみが発生していると考えられる。変位が 2.0mm の時点では板厚が大きい試験体ほどせん断力が大きく軸ひずみは大きい結果が得られているが、図-8 のように荷重が 180kN の時点で比較を行うと、板厚が小さい試験体ほど軸ひずみが大きく生じている。板厚が小さい試験体では剛性が低いことから 180kN の時点においてジベル孔内コンクリートのひび割れにより 2 面せん断破壊に至り、大きな押し広げ力が生じていることが原因として考えられる。

3. 3次元レーザー変位計による凹凸評価

前述したように貫通鉄筋無しの試験体では板厚の増加によりせん断耐力が減少している原因として、孔あき鋼板ジベルのせん断耐力はジベル孔内コンクリートの凹凸状況が大きく関係していると考えられる。本研究ではレーザー変位計を用いて凹凸を測定することを試みている。

(1) 測定方法、評価方法

本研究において凹凸表面性状の確認のため 3 次元レーザー変位計を使用し、試験体切断後のジベル孔内コンクリートの測定を行った。x 軸/y 軸/z 軸方向にそれぞれ約 0.2mm 間隔でジベル孔内両面を測定する。一例として、測

定により得られた D6T12-1 のジベル孔内コンクリート凹凸の図を図-9 に示す。レーザー変位形により測定されたデータよりジベル孔内コンクリート部分のみを抽出し、JIS 規格⁶⁾の表面性状評価方法によって評価を行う。JIS には 2 次元での表面性状パラメータが定義されており、最大断面高さ、算術平均高さ等が挙げられる。またデータ整理の簡易化のため、3 次元により扱われている測定データの各行を上端から順に連結しデータを直線化する。

(2) 測定結果

測定を行った試験体は実験終了後に切断し、取り出したものであるのでずれ変位 21mm におけるせん断力と表面性状の関係性により評価を行う。算術平均高さとの比較結果を孔径 60mm と 40mm に分け、図-10 と図-11 に示す。両者ともある程度高い相関が得られている。算術平均高さが低い試験体ほどせん断力が低くなる傾向が見受けられる。データ数が少ないことが懸念されるが、これらの結果からは板厚の変化がジベル孔内の表面性状に影響を及ぼす可能性があることが確認でき、板厚の増加によりジベル孔内に位置する骨材が鋼板間に入りこみやすくなり、凹凸が発生しにくくなると考えられる。本研究の結果からは板厚の増加によりせん断耐力の増加は見込めないと言えるが、あくまで孔あき鋼板ジベルの孔内コンクリートの破壊状況が 2 面せん断破壊であるということを前提として考察している。1 面せん断破壊を起こす場合は板厚を増加させて 2 面せん断破壊に破壊性状を移行することでせん断耐力は増加するが、2 面せん断破壊の場合は板厚を増加させてもせん断耐力は増加しないということが本研究の見解である。

4. 既往の強度評価式の評価

示方書式 (貫通鉄筋無し)²⁾は板厚の増加によりせん断耐力の増加が期待されているが、本実験の結果から必ずしもそのような結果が得られないことを確認した。示方書式の適応性を確認するため、既往の研究データ^{1),3),5),7)-17)}を用い、実験値 Q_{exp} を縦軸に、示方書式から得られる値 Q_{spec} を横軸にプロットしたものを図-12 に示す。示方書式ではジベル孔径、コンクリート圧縮強度、径厚比を変数

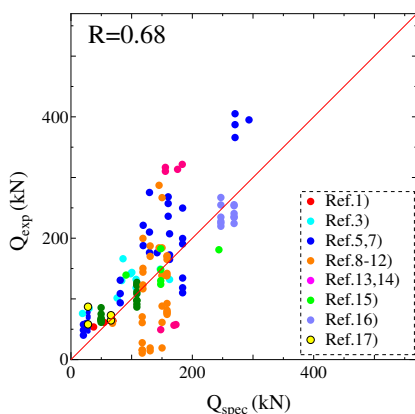


図-12 示方書式と実験値の比較

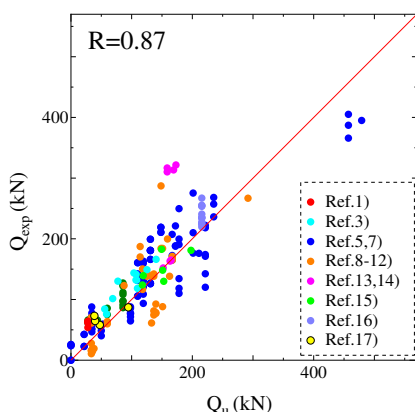


図-13 式 (1) と実験値の比較

としてせん断耐力を算出している。相関係数が $R=0.68$ であり、ある程度の相関が得られているが、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、示方書式の値と実験値が大きく異なる試験体も多く見受けられる。

一方、著者らの研究⁵⁾ではジベル孔内周辺のコンクリートブロック寸法がせん断耐力へ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 (1) を提案している。

$$Q_u = 0.044A f_c^{0.65} A_s^{0.43} \quad (1)$$

ここで、 Q_u はせん断耐力 (N)、 A はジベル孔面積 (mm^2)、 f_c はコンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)、 A_s はコンクリートブロックの側面面積 (mm^2) である。

図-12 と同様に式 (1) より得られる Q_u と実験値 Q_{exp} を比較したものを図-13 に示す。鋼殻により囲まれている西海らの試験体¹³⁾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⁵⁾を除けば実験値に近い値を算定することができ、相関係数も $R=0.87$ と相関の高い結果が得られている。これらの結果から示方書式ではコンクリートブロック寸法が考慮されていないことや、径厚比の適応範囲が適切でないことが今後検討すべき点として挙げられる。

5. おわりに

孔あき鋼板ジベルの押抜き試験から貫通鉄筋有りの試験体及び貫通鉄筋無しの試験体とも径厚比をパラメータとして実験を行った。得られた知見と今後の予定を以下に示す。

1. 実験 I において板厚をパラメータとした貫通鉄筋無しの試験体では板厚の増加により、せん断耐力の増加が生じないことを確認し、示方書式により算定される値とは大きく異なる結果が得られた。
2. 実験 II において板厚をパラメータとした貫通鉄筋有りの試験体では板厚の増加による剛性の向上や鉄筋と鋼板間の圧縮領域の拡大が生じることでせん断耐力の増加が生じると考えられる。
3. JIS に規定される表面性状評価方法によりジベル孔の表面性状とせん断力との相関があることを確認し、板厚を増加させることによりジベル孔内の凹凸の噛み合わせが悪くなり、実験 I においてせん断耐力が減少する結果が得られた。
4. 貫通鉄筋が無い試験体において示方書式により得られる算定値と既往の研究の実験結果を比較検討した。試験体のコンクリートブロック寸法の影響や評価式における径厚比の考慮により、示方書式による算定値は必ずしも実験値に適応できる値が得られているとは言い難い。既往の研究の実験においても、試験体形状、拘束条件、ひび割れの有無など研究ごとに試験方法が異なっているため、今後は複合示方書の強度評価式が一般的に適応できるように再検討を図る必要がある。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 土木学会：複合構造標準示方書，pp.64-66，2009.12.
- 3) 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，No.26，2005.11.
- 4) 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，pp.6，1996.11.
- 5) 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，pp.495-508，2012.8.
- 6) 日本規格協会：JIS B 0601 製品の幾何特製仕様 (GPS)-表面性状：輪郭曲線方式-用語，定義及び表面性状パラメータ，JIS ハンドブック 2006 金属表面処理，pp.81-94，2006.
- 7) 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..
- 8) 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，土木工学論文集 A，Vol.64，No.2，pp.502-512，2008.6.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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，No.28，2005.11.
- 13) 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.
- 14) 西海ら：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.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 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.