

# 論文 孔あき鋼板ジベルの破壊挙動に及ぼすリブ平行面の拘束度と粗骨材の影響

木作 友亮\*1・塩永 亮介\*2・藤山 知加子\*3・真部 洋大\*4

**要旨:** 本研究では、スラブ状構造物における孔あき鋼板ジベルのずれ挙動を把握することを目的に、押抜き試験によって、孔あき鋼板（以下、リブと呼ぶ）に平行な面の拘束度と粗骨材の存在がせん断耐力およびずれ挙動に及ぼす影響を検討した。その結果、粗骨材を含まないモルタルの試験体は、コンクリートに比べてせん断耐力が低下すること、また、コンクリートの試験体は、リブに平行な面を拘束することにより、せん断耐力が増加することを明らかにした。そして、孔内の貫通鉄筋が存在しなくても、試験体内の補強鉄筋や底面の拘束が、最大せん断力到達後の急激な荷重低下を抑制することを確認した。

**キーワード:** 複合構造, 孔あき鋼板ジベル, 押抜き試験, せん断力-ずれ変位関係, 拘束効果

## 1. はじめに

コンクリート構造物の非線形解析技術は、年々進歩を続けている。現在では、市販の解析ツールでも、せん断破壊挙動やポストピーク挙動が評価できるようになってきた。そして、2012年に改訂された土木学会コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>は、この非線形解析法が積極的に取り上げられた内容になっている。こうした非線形解析技術は、鋼コンクリート複合構造の評価にも用いられている。複合構造を解析評価する場合には、異種材料を接合するずれ止めの挙動を正確に把握することが重要である。

従来、ずれ止めには、頭付きスタッドが良く用いられてきた。近年では、孔あき鋼板ジベル（以下、PBLと呼ぶ）の高いずれ剛性や優れた疲労特性が認められ、採用が増えてきている。土木学会複合構造標準示方書<sup>2)</sup>では、貫通鉄筋の有無により区別したPBLのせん断力-ずれ変位関係が定式化されている。この式は、日本鋼構造協会の頭付きスタッド押抜き試験方法(案)<sup>3)</sup>（以下、JSSC法と呼ぶ）に準じた実験の結果を基にしている。PBLのせん断耐力は、拘束度の影響を受ける<sup>4)</sup>ことが知られているが、JSSC法は、実構造物の拘束状況を正確に再現したものではない可能性がある。例えば、一般に拘束度が小さいと考えられているスラブ状の構造であっても、リブに平行する面はコンクリートが連続しており、拘束度がJSSC法よりも高いものと推測される。

PBLのせん断耐力に影響を与える要因は他にもあり、中島ら<sup>5)</sup>は、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、配置等が、せん断力-ずれ変位関係やせん断耐力に影響を与えることを指摘している。また、稲森ら<sup>6)</sup>は、コンクリートとモルタルの純せん断

試験によって、粗骨材量の増加に伴ってひび割れの凹凸面が複雑化すること、そして純せん断強度が増加傾向となることを明らかにしている。PBLの破壊挙動がジベル孔に沿うせん断破壊であることを考慮すれば、粗骨材によるひび割れ面の凹凸が、せん断耐荷力に影響を与えることは、想像に難くない。

上記に挙げたリブ平行面の拘束度や粗骨材によるひび割れの凹凸面は、相互に影響を及ぼす。ひび割れ面にせん断ずれが生じた場合、ひび割れ面に平行な方向にせん断応力が伝達されるとともに、直交する方向には直応力が伝達される<sup>7)</sup>。この際、ひび割れ面に直交する方向に体積膨張を生じるため、リブに平行となる面の拘束度が高い場合には、粗骨材の噛み合わせがせん断ずれを阻害し、せん断耐力が増加することが予想される。

一般に、PBLのせん断力-ずれ変位関係は、貫通鉄筋の有無によって、ポストピーク挙動が変化する。貫通鉄筋を有している場合は、最大せん断力に達してから緩やかに耐力が減少し、貫通鉄筋を有していない場合は、最大せん断力到達後に急激に耐力が低下するとされている。しかし、著者らは、リブ平行方向の拘束度が高い場合には、貫通鉄筋を有していない場合においても、粗骨材の噛み合わせ効果により、ピーク後は緩やかに耐力が低下すると考えた。

そこで本研究では、リブに平行する面を鋼板によって拘束したPBLの押抜き試験を実施し、拘束がせん断力-ずれ変位関係に及ぼす影響を検討した。さらに、モルタルでも押抜き試験を行い、粗骨材がずれ挙動に与える影響についても検討した。

\*1 (株) IHI 技術開発本部 基盤技術研究所 (正会員)

\*2 (株) IHI 技術開発本部 基盤技術研究所 (正会員)

\*3 法政大学 デザイン工学部 都市環境デザイン工学科 准教授 工博 (正会員)

\*4 法政大学大学院 デザイン工学部 都市環境デザイン工学科専攻



法等が用いられている。本研究では、荷重に伴って、十字型鋼板とコンクリートブロックとの接合面が回転による分離を生じる可能性があることを考慮し、試験体底面を完全に拘束することが望ましいと考えた。そこで、試験体の底面には、図-5に示す開き止めを施した。

## 2.4 測定項目

全ての試験体において、コンクリートブロックのジベル孔中心位置と荷重板に変位計を設置し、両者の相対ずれ量を計測した。また、拘束用鋼板に直交する4本の幅止め材にひずみゲージを貼り付け、荷重時のひずみを計測した。変位計の設置位置とひずみゲージの貼り付け位置を図-6に示す。

## 2.5 試験ケースおよび配合

本研究の試験ケースを表-1に示す。リブに平行する面を拘束したPBLのずれ挙動およびせん断耐力を把握するため、3体の押抜き試験を行った。また、拘束用の鋼材を用いない試験体についても、1体の押抜き試験を実施した。これらに加え、粗骨材がせん断耐力やピーク荷重後のずれ挙動に与える影響を検討するため、モルタルで作製した2体の試験体について押抜き試験を実施した。

打設したコンクリートおよびモルタルの配合を表-2に示す。コンクリートは、呼び強度30N/mm<sup>2</sup>とし、モルタルはこれと同程度の圧縮強度になると想定される1:2.5配合のものを使用した。また、合成床版の模擬であることから、いずれの配合についても、低添加型の膨張材を混和した。試験体は打設後7日間の湿潤養生を行い、湿潤養生が終了した後は、試験まで気中で保管した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 強度試験結果

強度試験の供試体は、荷重用の試験体と同様に7日間の湿潤養生を実施後、荷重用試験体の近くで保管した。押抜き試験開始時に行った強度試験の結果を表-3に示す。各材料は、静弾性係数を除いて同程度の強度を得た。

### 3.2 せん断力-ずれ変位関係

#### (1) せん断力の最大値

押抜き試験で得られたせん断力-ずれ変位関係を図-7に示す。縦軸には2孔あたりのせん断力を示し、横軸に十字鋼板とコンクリートブロックの相対ずれ変位を示した。また参考として、保坂ら<sup>10)</sup>のせん断耐力評価式で算定した2孔あたりのせん断耐力と各試験体の最大せん断力およびその際の相対ずれ変位を示した。

側面を拘束した3体の試験体(C-ST-1~C-ST-3)は、多少のばらつきが見受けられるものの、側面を拘束していないC-ST-4に比べて、せん断力の最大値が高くなる傾向が見られた。C-ST-1~C-ST-3の平均値とC-ST-4を比較す

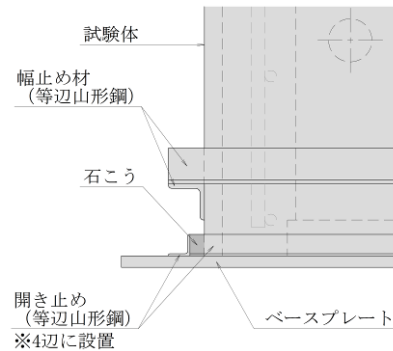
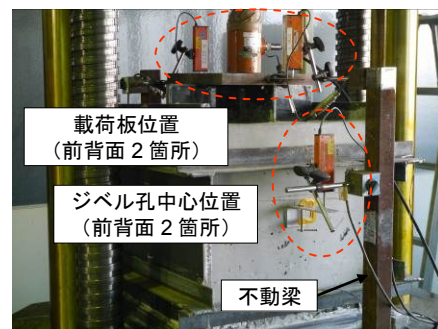
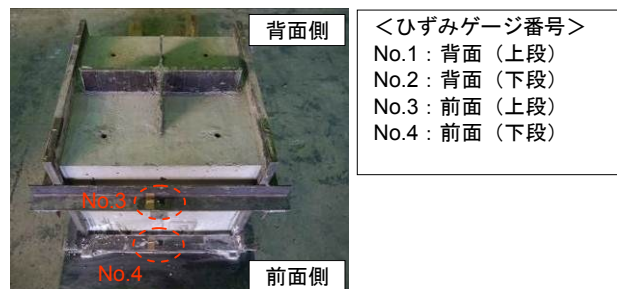


図-5 試験体底面の開き止め



(a) 変位計の設置位置



(b) ひずみゲージの貼り付け位置

図-6 変位計とひずみゲージの位置

表-1 試験体一覧

No.	使用材料	側面拘束
C-ST-1	コンクリート (30-10-20N)	有り
C-ST-2	コンクリート (30-10-20N)	有り
C-ST-3	コンクリート (30-10-20N)	有り
C-ST-4	コンクリート (30-10-20N)	無し
M-ST-1	モルタル (1:2.5)	有り
M-ST-2	モルタル (1:2.5)	有り

表-2 配合表

配合	W/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
		W	C	Ex	S	G	A <sub>d</sub>
コンクリート	50.0	168	316	20	772	1019	3.70
モルタル	54.5	295	522	20	1349	-	-

\* E<sub>x</sub> : 低添加型膨張材

\* A<sub>d</sub> : AE 減水剤

ると、側面拘束の影響によるせん断耐力の上昇率は約22%であった。これは前述のように、リブに平行な面の拘束度が高い場合には、粗骨材の噛み合わせが顕著となり、せん断ずれを阻害するためだと考えられる。

粗骨材を含まない M-ST-1~M-ST-2 のせん断力の最大値は、側面拘束をしていない C-ST-4 をさらに下回り、C-ST-1~C-ST-3 よりも 34~38%低い値であった。コンクリートより圧縮強度や割裂引張強度が若干優れるにも関わらず、M-ST-1~M-ST-2 の最大せん断力が低下することは、PBL のせん断耐力に占める粗骨材の噛み合わせ効果の影響が大きいものであることを示唆している。また、M-ST-1~M-ST-2 のせん断力-ずれ変位関係においては、荷重初期に変位のみが増大する現象が現れた。これは、若干の初期付着が存在しており、それが荷重初期に切れたことや、ブリージングの浮上に伴って、ジベル孔上部や骨材下に脆弱部が形成されたことが原因であると推察される。一方、コンクリートの試験体では、ブリージングの影響が見られなかった。この理由として、モルタルの単位水量や水結合材比 (W/B) がコンクリートに比べて大きいことが影響しているものと考えられる。

**(2) ずれ変位**

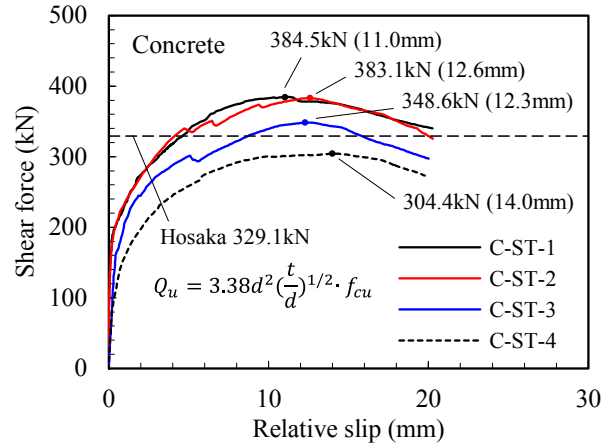
本研究の実験で得られた最大値に達する際の相対ずれ変位は、コンクリートの試験体で 11.0~14.0mm、モルタルの試験体で 18.6~19.4mm であった。モルタルのずれ変位が大きいのは、静弾性係数がコンクリートの 75%程度と小さいことや粗骨材を含まないことが、何らかの影響を及ぼしている可能性がある。貫通鉄筋を有していない一般的な押抜き試験<sup>4),10),11)</sup>では、相対ずれ変位が数 mm 程度でせん断力の最大値を示す傾向であることを考えると、本研究の実験結果は大きい値である。しかし、試験体の拘束度が高い押抜き試験<sup>5)</sup>では、10mm を超える実験結果も見受けられるため、せん断力の最大値を示す相対ずれ変位は、拘束の影響を受けるものと推察される。しかし一方で、C-ST-1~C-ST-4 を比較すると、側面を拘束していない C-ST-4 の最大値への到達が、最も遅れる実験結果が得られているため、この点についてはさらなる検討を要する。

**(3) 最大せん断力到達後の挙動**

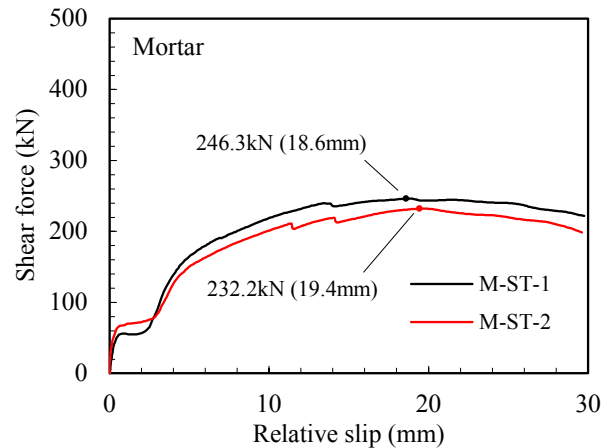
側面の拘束度が高い場合には、最大せん断力に到達した後は緩やかに耐力が低下し、拘束度が低い場合には急激な耐力低下を生じると予測していた。森ら<sup>12)</sup>が実施した十字型試験体による押抜き試験では、せん断力の最大値に到達した後に急激な耐力低下を生じている。しかし、本研究の実験においては、側面の拘束が無い場合や粗骨材を含まないモルタルの試験体であっても、最大せん断力後、急激に耐力が低下することはなかった。これは、床版上面筋を模擬した補強鉄筋や試験体底面の開き止め

表-3 強度試験結果 (材齢 39 日)

	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	割裂引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
コンクリート	41.1	25.1	3.0
モルタル	43.5	18.9	3.3



(a) コンクリート



(b) モルタル

図-7 せん断力-ずれ変位関係

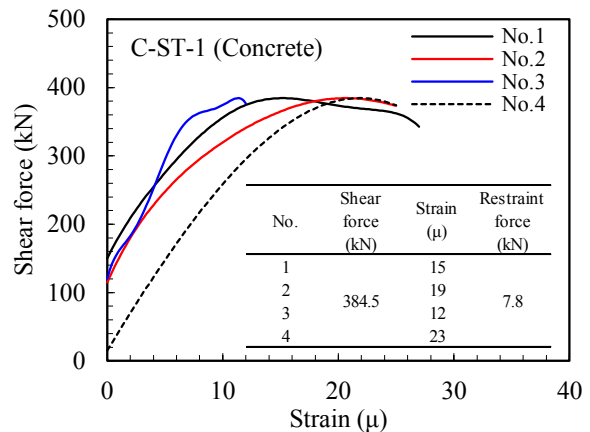


図-8 幅止め材のひずみ計測値

による拘束が、ひび割れを伴う破壊の急激な進展を抑制しているためだと考えられる。したがって、実橋床版のPBLにおいては、急激な耐力低下を生じない可能性がある。しかし、開き止めによる底面の拘束が、実構造物の挙動を再現できているかについては、慎重な判断が必要である。図-8には、C-ST-1における幅止め材のひずみ計測結果を示す。また、せん断力の最大値に到達した時点のひずみ計測値より、幅止め材に生じた拘束力を求め、図内に示した。幅止め材に生じた拘束力は、7.8kNであった。コンクリートブロックの側断面積で除した拘束応力は、約0.03N/mm<sup>2</sup>と僅かなものであり、補強鉄筋や底面拘束の効果が大いものであることを示唆している。

#### (4) 荷初期のずれ挙動

図-9に荷初期に着目したせん断力-ずれ変位関係を示す。側面を拘束したC-ST-1は、100kNに達するまでずれが生じていない。これに対し、側面を拘束していないC-ST-4は、荷初期から緩やかな勾配を示しており、側面の拘束が荷初期のずれ剛性に大きな影響を与えることが確認された。

### 3.3 試験体のひび割れ

押抜き試験で生じたひび割れの一例を図-10に示す。

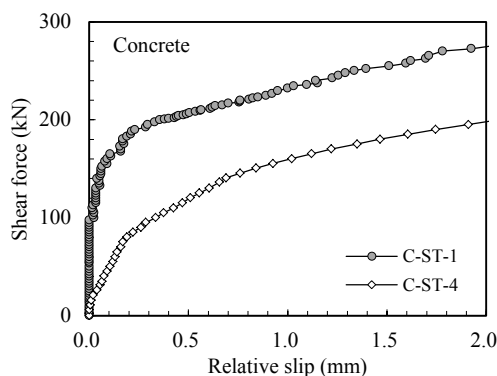


図-9 荷初期のずれ挙動

ひび割れの幅には有意な差が見られず、いずれの試験体においても、上面には0.20~0.10mm、側面には0.10~0.06mm程度のひび割れが生じていた。また、ひび割れ幅は、底面に向かうに従って小さくなる傾向が見られた。これは、試験体底面の開き止めがひび割れ幅の拡大を抑制しているためだと考えられる。試験体のひび割れで特徴的であったのは、側面を拘束していないC-ST-4のひび割れが短く、試験体上面の鉄筋位置付近で停止していることであった。このことは、側面の拘束が逆にひび割れの進展を助長する可能性があることを示唆している。側面を拘束している場合、ひび割れ凹凸面のせん断ずれによって生じる体積膨張を吸収することができず、ひび割れの開口によってこれを吸収しているためだと推察される。このイメージを図-11に示す。

### 3.4 ジベル孔のせん断破壊面

荷終了後に試験体を切断し、ジベル孔のせん断破壊面を観察した。その一例を図-12に示す。ジベル孔内のコンクリートは粉化しており、観察ができなかった。これは、保坂<sup>10)</sup>らが指摘しているように、板厚が薄いことが原因であると考えられる。コンクリートの破壊面は、粗骨材による大きな凹凸を有していた。また、一部の粗

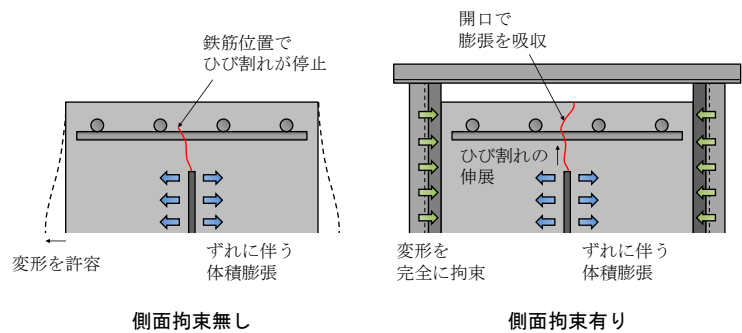


図-11 リブを起点とするひび割れの進展挙動

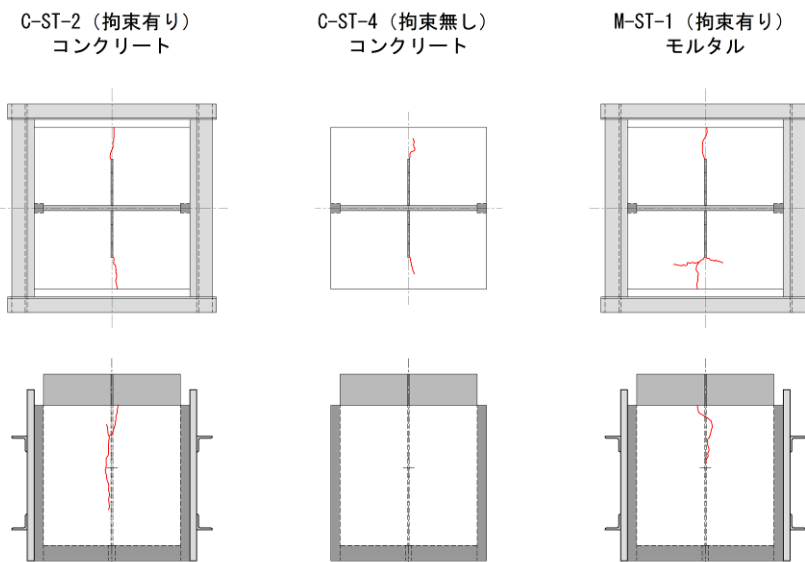


図-10 試験体のひび割れ図1013-

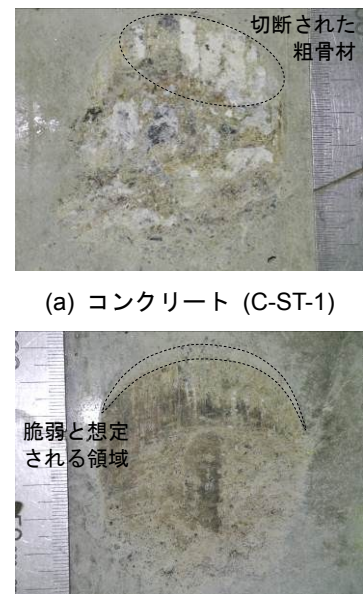


図-12 ジベル孔付近の破壊面

骨材は孔あき鋼板によって切断された痕跡が見られた。モルタルの破壊面は、これに比べて破壊面の凹凸が小さいものであった。また、ジベル孔の上部には、数 mm の色調が異なる領域があり、これがブリージングによって脆弱化した部分であるものと推察される。また、ジベル孔下部から 20mm~30mm の範囲には、えぐられた様な損傷が見られた。この高さは、載荷した際の最終的な変位量に相当することから、ジベル孔内の骨材によってもたらされた損傷であるものと考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、スラブ状の構造物における孔あき鋼板ジベルのせん断耐力を把握するため、押抜き試験を通じて、特にリブに平行な面の拘束度と粗骨材の存在がせん断耐力やずれ挙動におよぼす影響について実験的検討を試みた。本研究の範囲で得られた知見を以下に要約する。

- (1) 試験体側面の拘束度が高い場合、粗骨材の噛み合わせ効果が顕著となり、せん断耐力が約 22%増加することを明らかにした。
- (2) モルタルの試験体では、粗骨材の噛み合わせ効果が存在しないために、コンクリートに比べてせん断耐力が低下することを明らかにした。本研究におけるせん断耐力の低下率は、34~38%であった。
- (3) 最大せん断力に達する際の相対ずれ変位は、11.0~14.0mm であり、既往の研究<sup>4),10),11)</sup>に比べて大きい値であった。せん断力の最大値における相対ずれ変位は、拘束の影響を受けるものと考えられる。
- (4) 側面を拘束していない試験体やモルタルの試験体であっても、最大せん断耐力到達後に急激な耐力低下を生じないことがわかった。これは、補強鉄筋や試験体底面の拘束が急激な破壊の進展を抑制しているためだと考えられる。
- (5) 試験体側面の拘束が、載荷初期のずれ剛性に影響を与えることを確認した。
- (6) 試験体側面を拘束していない試験体は、載荷後に生じたひび割れが短く、試験体上面の範囲で停止していた。このことから、側面の拘束がひび割れの進展を助長している可能性が考えられる。
- (7) ジベル孔周辺のせん断破壊面は、コンクリートとモルタルで凹凸の大きさが異なることを確認した。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書設計編 [2012 年

制定], 2013.3

- 2) 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
- 3) 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
- 4) 深田和宏, 藤井 堅, 豊田 正, 岩崎初美：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講演論文集, Vol.6, pp.28-1~28-8, 2005.11
- 5) 中島章典, 橋本昌利, 小関聡一郎, 鈴木康夫：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, 第 9 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, Vol.9, pp.49~57, 2011.11
- 6) 稲森あゆみ, 吉武 勇, 久部修弘, 浜田純夫：コンクリート要素の純せん断強度に与える粗骨材の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.781~786, 2005.6
- 7) 李 宝祿, 前川宏一：接触面密度関数に基づくコンクリートひびわれ面の応力伝達構成式, コンクリート工学, Vol.26, No.1, pp.123~137, 1988.1
- 8) 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荷力への影響, 第 9 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, Vol.9, pp.58~65, 2011.11
- 9) 島 弘, 中島章典, 渡辺忠朋：土木分野におけるずれ止めの性能評価法—土木学会複合構造委員会研究小委員会—, 第 9 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, Vol.9, pp.S29~S37, 2011.11
- 10) 保坂鐵矢, 光木 香, 平城弘一, 牛島祥貴, 橘 吉宏, 渡辺 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
- 11) 平 陽平, 天野玲子, 大塚一雄：孔あき鋼板ジベルの疲労特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.1503~1508, 1997.6
- 12) 森賢太郎, 藤井 堅, 道菅裕一, 佐々木達也, 山口詩織：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 回年次学術講演会講演概要集, pp.1107~1108, 2009.8