

(28) 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

深田 和宏¹・藤井 堅²・豊田 正³・岩崎 初美⁴

¹学生会員 広島大学大学院 工学研究科社会環境システム専攻 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

E-mail:blueist@hiroshima-u.ac.jp

²正会員 広島大学大学院助教授 工学研究科社会環境システム専攻(〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

E-mail:ken214f@hiroshima-u.ac.jp

³正会員 (株)ピーエス三菱 土木工事統括部技術部 (〒104-8215 東京都中央区銀座7-16-12)

E-mail:toyota@psmic.co.jp

⁴正会員 石川島播磨重工業株式会社 橋梁事業部設計部 (〒478-8650 愛知県知多市北浜町11-1)

E-mail:hatsumi_iwasaki@ihi.co.jp

孔あき鋼板ジベル(PBL)の終局ずれ耐力は、PBLプレートの降伏あるいは周辺コンクリートの破壊のどちらかの崩壊形式によって決定される。後者の場合、PBL孔周辺のコンクリートのひび割れを拘束する種々の要因が終局せん断耐力に大きく影響する。本研究では、押し抜きせん断試験と引き抜きせん断試験を行い、孔あき鋼板ジベルの終局せん断耐力と終局ずれ挙動をコンクリート拘束効果に注目して調べた。そして、コンクリートのひび割れを拘束する種々の要因を明らかにした。孔内コンクリートには、周辺のコンクリートを押し広げる力が発生し、これを拘束する因子として孔内貫通鉄筋、PBLのかぶりコンクリート及びPBLプレート周辺にPBLプレートに垂直に配置された鉄筋などがあることが明らかになった。また、押し抜きせん断試験では、供試体とテストベットとの間の摩擦による拘束がせん断耐力に大きく影響することを明らかにした。

Key Words : perforated rib shear connector, concrete confinement, push out test, pull out test, ultimate slip strength

1. はじめに

鋼・コンクリートの合成構造では、両材料間の応力伝達を行うためにずれ止めが用いられる。そして、昨今て孔あき鋼板ジベルが多用されるようになった。現在、孔あき鋼板ジベルは、鉄道における連続合成桁の中間支点上のずれ止め、波形鋼板ウェブ橋の鋼ウェブと床版の定着部、上下部一体構造の剛結部に採用されており、今後ますます採用の機会は多くなってくると予想される。

この孔あき鋼板ジベルのせん断強度については、すでに多くの実験的研究がなされており、Leonhardt¹⁾、Andra²⁾、Kraus³⁾、緒方⁴⁾、新谷⁵⁾、保坂⁶⁾らなどのせん断耐力評価式も提案されている。これらのほとんどはジベルの孔径、鋼板板厚、コンクリートの圧縮強度および鋼板の降伏強度などを影響因子として、押し抜きせん断試験

結果を基に構築されたものである。

孔あき鋼板ジベルの崩壊は、ジベル板が非常に薄い場合や孔が密に配置されるような場合を除けば、通常はコンクリートにジベル板と平行なひび割れが発生して耐力を失う崩壊が起こる。このようなコンクリートの破壊に起因してせん断耐力が決まる場合には、孔部コンクリートの破壊強度と、ひび割れが発生した後のひび割れの伸展を拘束する因子によってずれ耐力が大きく影響されるのは明らかである。この因子には、孔内貫通鉄筋の他にコンクリートのかぶりや孔あき鋼板ジベル周辺に配置された補強鉄筋などが考えられる。

この孔あき鋼板ジベルのせん断強度を求めるために用いられる押し抜きせん断試験の多くは、「日本鋼構造協会・頭付きスタッドの押し抜きせん断試験法(案)」⁷⁾に基づいて行われている。通常、押し抜きせん断試験では

载荷中の安定性を考慮して、供試体の下面に石膏などを敷いて据え付ける。このとき、コンクリートと床面に摩擦力が働くと考えられる。スタッドジベルでは溶植部近傍のジベル軸部あるいは溶植部の破断による崩壊形式がほとんどであり、コンクリート部の破壊による崩壊はあまり問題とならない。これに対して、孔あき鋼板ジベルは、コンクリートの破壊に起因してせん断耐力が決まるが、この摩擦力がせん断耐力に及ぼす影響については解明されていない。

そこで本研究では、上記のコンクリートの拘束効果が孔あき鋼板ジベルのせん断耐力に及ぼす影響を明らかにする。

2. 押し抜きせん断試験

(1) 試験条件

従来用いられている押し抜きせん断試験法と崩壊性状を図-1に示す。载荷中の安定をとるため、供試体下面に石膏等が敷かれる。また、図-1に示すように、孔あき鋼板ジベル端部に発泡スチロールを置いてジベル鋼板端面の支圧の影響を除去してある。ほとんどの押し抜きせん断試験では、図-1に示すように、孔あき鋼板ジベルはジベルプレートに平行なひび割れが発生し耐力を失う崩壊が起きている。このときコンクリート部分は2つに割れて崩壊する。このように孔あき鋼板ジベルの最大せん断耐力はジベル周辺のコンクリートの破壊によって決まる。しかしながら、従来の試験法では、図-2に示すようにこのひび割れを拘束する要因が3つ存在すると考えられる。供試体下面に働く摩擦力、背面のかぶりコンクリート、上部のかぶりコンクリートである。ここで、背面のかぶりとはジベル端部からコンクリート表面までの水平距離のことであり、上部のかぶりとはジベル端部からコンクリートの上表面までの鉛直距離のことである。ここでは、背かぶりコンクリート以外の拘束因子がせん断耐力に及ぼす影響を明らかにするために以下の4種類の条件で実験をおこなった。

- ① 従来の押し抜き試験
- ② 供試体下面の摩擦力を軽減する
- ③ 上かぶりコンクリートを除去する
- ④ 供試体下面の摩擦力を軽減し、かつ、上かぶりコンクリートを除去する

(2) 実験供試体

表-1に押し抜き供試体の特徴を示す。押し抜きせん断試験における供試体は、いずれも孔内貫通鉄筋は配置していない。また、本論文で使用する供試体名は図-3に示

すように設定した。従来通り上部のかぶりコンクリートが存在する供試体の寸法を図-4に、上部のかぶりコンクリートを発泡スチロールを設置することで除去した供試体の寸法を図-5に示す。また、すべての供試体について、ジベル鋼板一枚あたりの孔数は1個、鋼板板厚は12mm、ジベル孔径は60mm、とした。

なお、本実験で使用したジベル鋼板とコンクリートの材料特性を、それぞれ表-2、表-3に示す。なお、コンクリートの粗骨材径は20mmである。

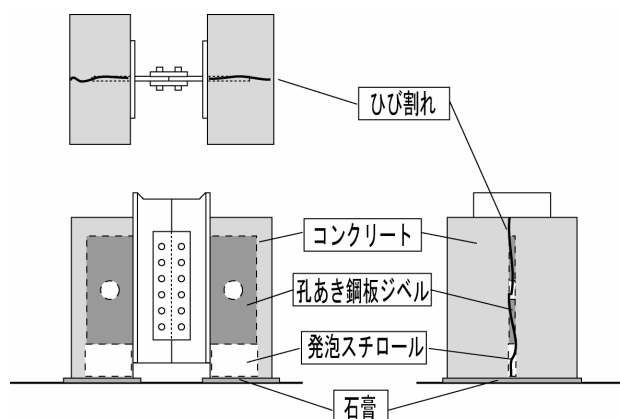


図-1 従来の押し抜きせん断試験法と崩壊性状

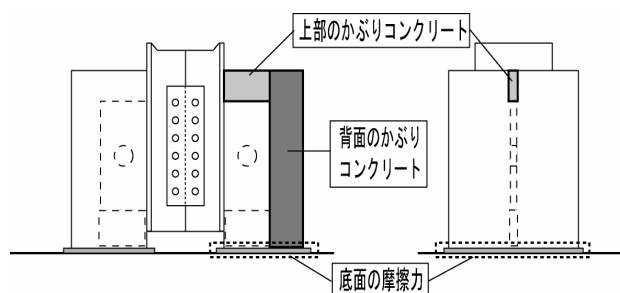


図-2 押し抜き試験におけるコンクリート拘束因子

表-1 供試体一覧

供試体名	上部のかぶり	床面摩擦	最大せん断耐力 (kN)
S-B100-UI20-N	有	有	184.2
S-B100-U0-N	無	有	139.0
S-B100-UI20-N-T	有	無	88.2
S-B100-U0-N-T	無	無	61.3

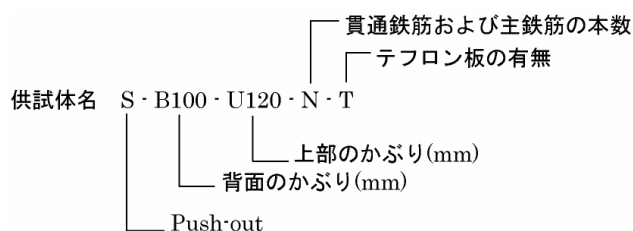


図-3 押し抜き供試体名称

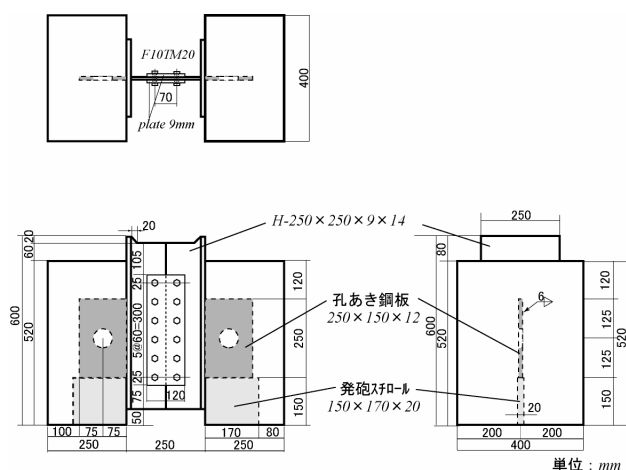


図-4 従来の押し抜き供試体寸法 (S-B100-U120-N, S-B100-U120-N-T)

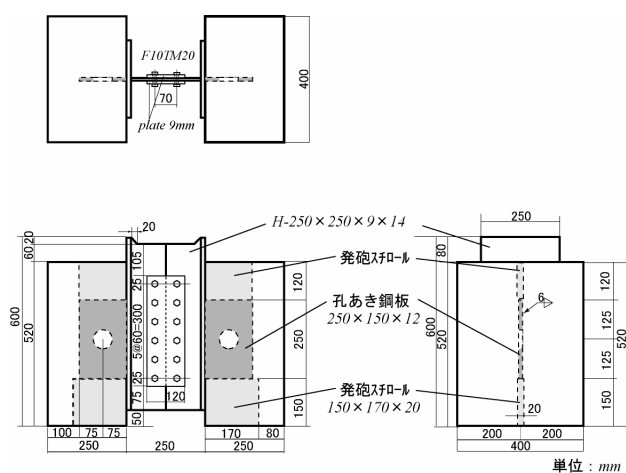


図-5 上部のかぶりを除去した押し抜き供試体寸法 (S-B100-UI20-N, S-B100-UI20-N-T)

表-2 ジベル鋼板の材料特性

ヤング係数 (MPa)	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	ポアソン比
203000	309	364	0.26

表-3 コンクリートの材料特性

圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (MPa)	ポアソン比	引張強度 (MPa)
34.7	25600	0.26	2.8

(3) 試験方法および測定項目

載荷は、荷重制御で行い、約1tfの載荷ステップで測定を行った。従来の試験方法の通り床面摩擦がある場合の載荷方法を図-6に、テフロン板を用いて床面摩擦を軽減した載荷方法を図-7に示す。図-7に示すように、床面にテフロン板を設置する際には、コンクリートのひび割れを拘束しないように上側のテフロン板をジベル板の直下で分割した。また、2枚のテフロン板の間にはグリス

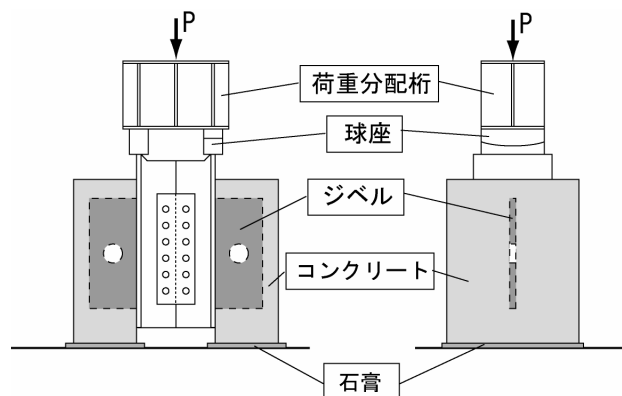


図-6 従来の載荷方法

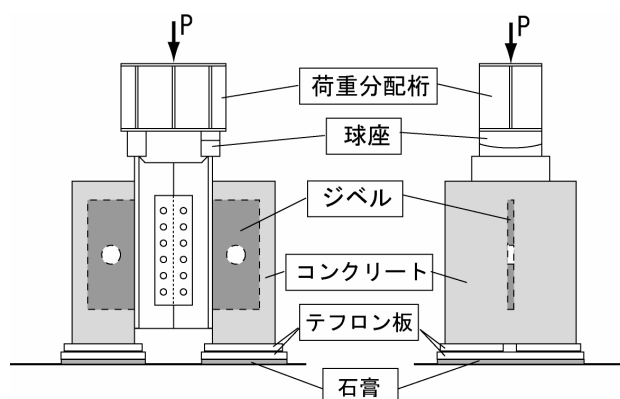


図-7 床面摩擦を軽減した載荷方法

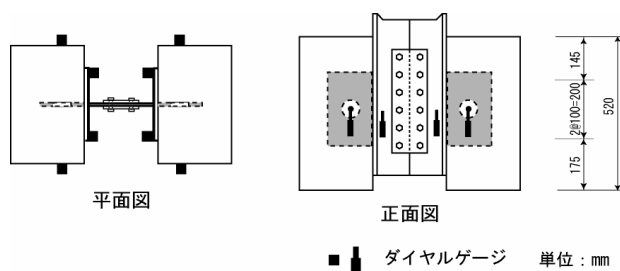


図-8 ダイヤルゲージ測定位置

を塗布し、摩擦力を軽減した。このとき用いた2枚のテフロン板の摩擦係数は0.15である。

図-8にダイヤルゲージの測定位置を示す。すべての供試体において、ジベル孔中心位置のコンクリートブロックとH形鋼にダイヤルゲージを設置し、両者の相対ずれを孔あき鋼板ジベルのずれ量とした。

(4) 試験結果および考察

本研究で実施した押し抜きせん断試験のせん断力-ずれ関係を図-9に、最大せん断耐力を表-1に示す。縦軸には孔あき鋼板ジベル1孔分のせん断力（載荷時の荷重をジベル孔数で除したもの）、横軸にはジベル孔部分のずれ量を示す。ここで、ずれ量とは孔あき鋼板とコンクリートブロックの相対ずれのことであり、このずれ量は最初に破壊が生じたコンクリートブロックの各計測点の平

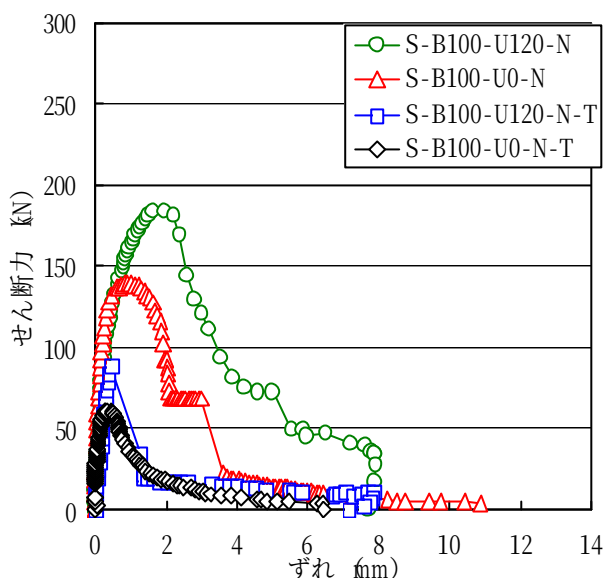


図-9 せん断力-ずれ関係

均値を用いた。

いずれの供試体においても、荷重が小さいときはずれ挙動は同様であることがわかる。従来の押し抜きせん断供試体である S-B100-U120-N を基準に考えると、上部かぶりによる拘束を除去した S-B100-U0-N のせん断耐力は 45.2kN 減少しており、床面の摩擦を除去した S-B100-U120-N-T では 96kN 減少している。孔内コンクリートを拘束する因子が最も少ない S-B100-U0-N-T において、そのせん断耐力は S-B100-U120-N と比較して 122.9kN 減少している。この結果から、押し抜き供試体の最大せん断耐力は拘束因子によって大きく異なることが確認できた。特に、床面に働く摩擦がせん断耐力に大きく影響することが図-9 からわかる。

3. 引き抜きせん断試験

(1) 実験供試体

表-5 に引き抜き供試体を示す。供試体名は図-10 に示すように設定した。引き抜き試験においては、以下の拘束要因に着目した。①背面のコンクリートかぶり、②孔内貫通鉄筋、③コンクリートかぶり内の補強鉄筋である。押し抜きせん断試験と同様に、すべての供試体について、鋼板一枚あたりの孔数は 1 個、鋼板板厚は 12mm、ジベル孔径は 60mm とした。

引き抜き供試体の代表例として L-B220-R5-10 を図-11 に示す。なお、本実験で用いたコンクリートは押し抜き試験と同様の配合である。

表-5 引き抜き供試体一覧

供試体名	背面かぶり厚(mm)	貫通鉄筋	補強鉄筋	最大せん断耐力(kN)
L-B400-N	400	無	無	266.9
L-B400-R1	400	D10	無	268.7
L-B220-R1	220	D10	無	270.0
L-B220-R5-10	220	D10	D10	234.5
L-B220-R5-19	220	D10	D19	249.3
L-B100-N	100	無	無	138.3
L-B100-R1	100	D16	無	174.0
L-B0-N	0	無	無	19.2
L-B0-R1	0	D16	無	73.8

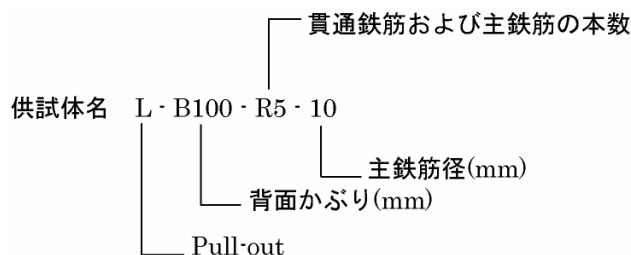


図-10 引き抜き供試体名称

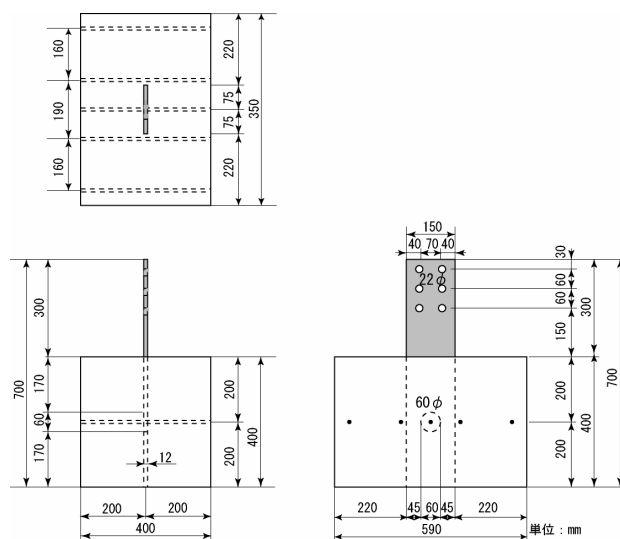


図-11 引き抜き供試体寸法 (L-B220-R5-10)

(2) 載荷方法および測定項目

載荷には、50tf 油圧式アクチュエーターを使用し、載荷速度 0.01(mm/s)の変位制御で行った。供試体の据え付けと載荷方法を図-12 に示す。供試体は、H 形鋼をコンクリートブロックの上に設置し、下の H 形鋼とアンカーボルトで固定した。このとき、背面のかぶりに生じるひび割れを拘束しないように上部の H 形鋼はジベルプレートと平行に設置した。

測定項目は、孔あき鋼板とコンクリートの変位、孔内貫通鉄筋のひずみ、補強鉄筋のひずみおよびジベル背面コンクリートのひずみである。

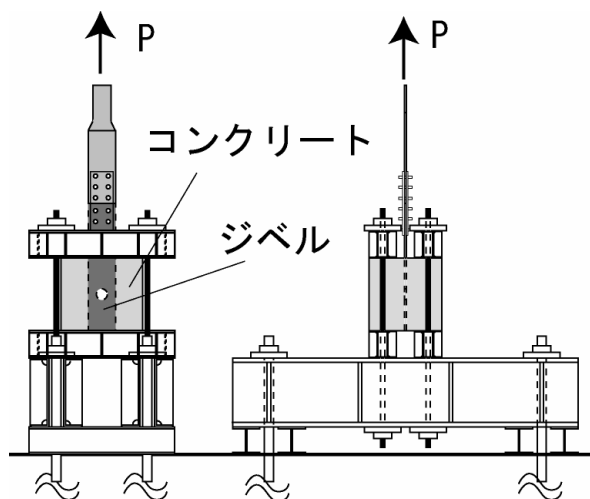


図-12 引き抜き試験の荷重方法

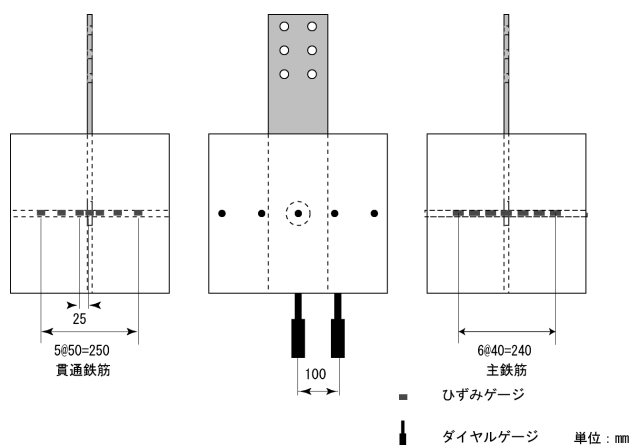


図-13 ダイヤルゲージ据え付け位置、鉄筋のひずみゲージ貼り付け位置

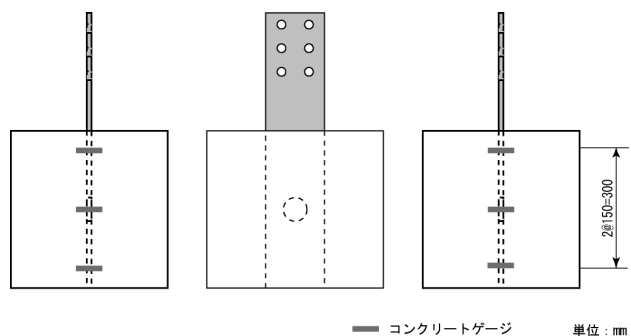


図-14 コンクリートゲージ貼り付け位置

図-13にダイヤルゲージの取り付け位置と鉄筋ひずみゲージの貼り付け位置を、図-14にコンクリートひずみゲージの貼り付け位置を示す。

(3) 試験結果および考察

a) 背面のかぶり厚と貫通鉄筋による影響

図-15に背面のかぶり厚と貫通鉄筋の有無に着目した

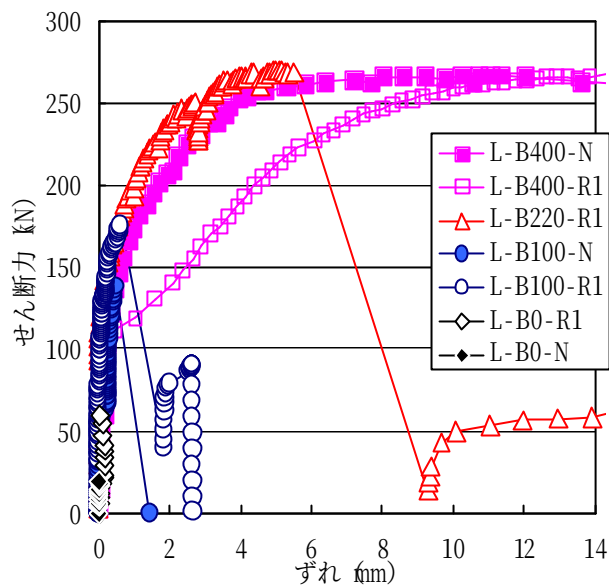


図-15 背面のかぶり厚と貫通鉄筋の有無に着目したせん断力-ずれ関係

引き抜き試験におけるせん断力-ずれ関係を示す。縦軸にせん断力を、横軸にジベルのずれ量を示す。ジベルのずれ量は、ジベル鋼板下端とその近傍のコンクリート下面の相対ずれとした。

各供試体とも、初期状態ではほぼ同様のずれ剛性を示している。

貫通鉄筋の有無に着目すると、背面のかぶり厚がない場合とかぶり厚が100mmの供試体ともに貫通鉄筋がある場合には、最大せん断耐力の上昇が確認された。しかしながら、かぶり厚が400mmの供試体については貫通鉄筋による耐力の上昇は認められなかった。

背面のかぶり厚に着目すると、かぶり厚が220mmまでは、かぶり厚が増加するにつれて最大せん断耐力は上昇していることがわかる。しかしながら、かぶり厚が220mmと400mmの供試体を比較するとほぼ同程度の最大せん断耐力であることがわかる。このことから、背面のかぶり厚を220mm以上にしても、かぶりコンクリートがひび割れを拘束する効果はあまり期待できないといえる。

b) 試験方法の比較

図-16に押し抜き供試体S-B100-U0-Nと引き抜き供試体L-B100-Nのせん断力-ずれ関係を示す。縦軸にはせん断力を、横軸にはずれ量を示す。両供試体とも背面のかぶりコンクリート厚は100mm、ジベル孔径は60mmであり、孔内貫通鉄筋と背面のかぶりコンクリート内の補強鉄筋は配置していない。また、押し抜き供試体については上部のコンクリートかぶりを除去している。

図16より、両供試体の最大せん断耐力はほぼ等しく

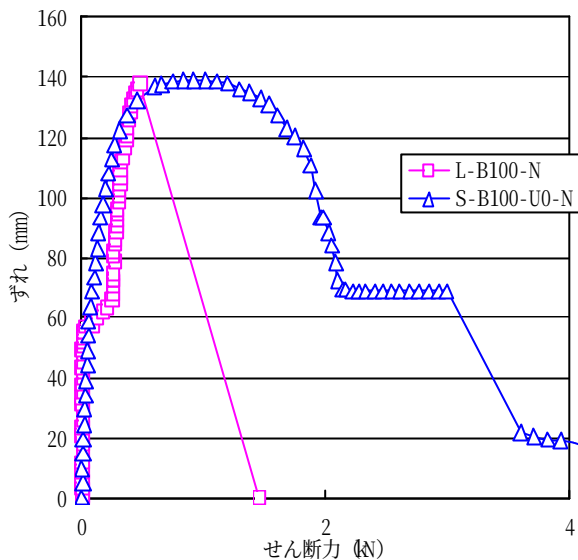


図-16 試験方法に着目したせん断力-ずれ関係

約140kNくらいであることがわかる。両供試体におけるコンクリートの拘束効果は、上記のようにほぼ同じ条件である。したがって、同じ条件下の供試体については、試験方法に関わらず最大ずれ耐力は同じになると判断できる。

c) 背面のかぶりコンクリート内の補強鉄筋による影響

図-17に、背面のかぶりコンクリート内に補強鉄筋を配置した場合と配置しなかった場合の引き抜き試験におけるせん断力-ずれ関係を示す。図-17より、せん断耐力はかぶり内補強鉄筋のないL-B220-R1が最も大きくなっているが、この原因は解明できなかった。

図-18にL-B220-R1のひび割れ図を示す。供試体L-B220-R5-10とL-B220-R5-19も図-18とほぼ同様のひび割れを起こしている。しかしながら、L-B220-R1は最大せん断耐力に達した後、急激に耐力低下を起こしている。これは、L-B220-R1のひび割れ幅が他の供試体のひび割れ幅よりも大きいことに起因すると考えられる。一方、補強鉄筋を配置した供試体L-B220-R5-10とL-B220-R5-19は、最大せん断耐力に達した後も一定のせん断耐力を保持していることがわかる。

供試体L-B220-R5-10における背面のかぶりコンクリート内の補強鉄筋の軸ひずみ分布を図-19、図-20に示す。それぞれ、横軸にはジベル孔からの距離を、縦軸には軸ひずみを示している。図-19から、最大せん断耐力付近においてジベル板近傍に設置した補強鉄筋のひずみが急激に増加していることがわかる。これに対して、コンクリート表面近傍に設置した補強鉄筋のひずみは小さいことが図-20からわかる。これは、コンクリート内部にひび割れが生じているが、そのコンクリートひび割れは背

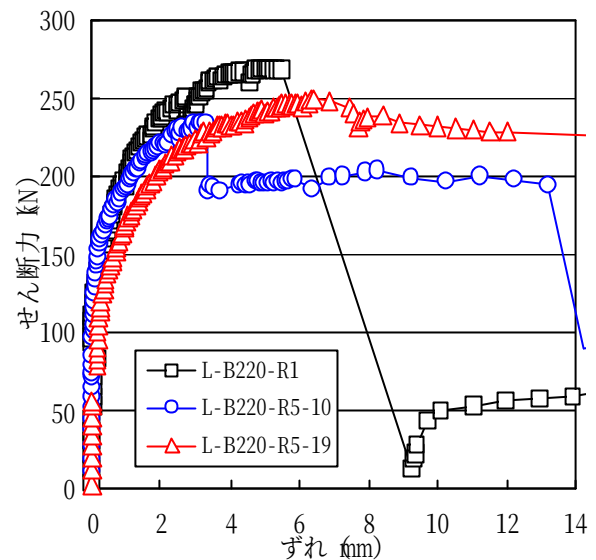


図-17 補強鉄筋に着目したせん断力-ずれ関係

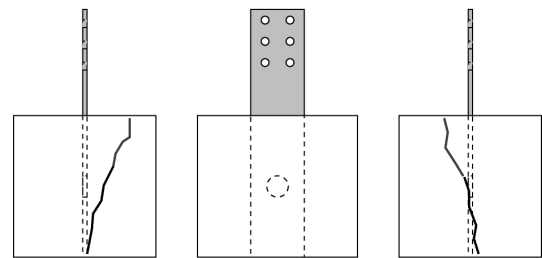
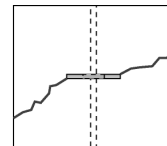


図-18 コンクリートひび割れ図 (L-B220-R1)

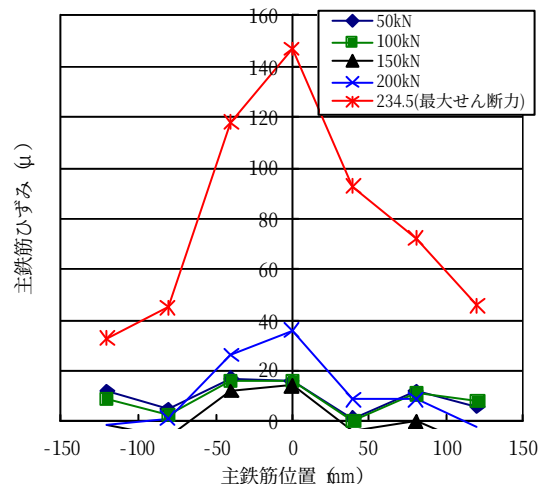


図-19 ジベル板近傍の補強鉄筋軸ひずみ分布 (L-B220-R5-10)

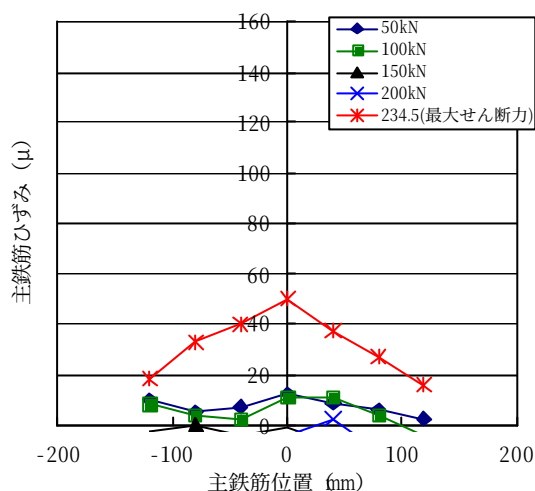


図-20 コンクリート表面近傍の補強鉄筋軸ひずみ分布 (L-B220-R5-10)

面かぶりコンクリート表面まで進展していないことを示している。

これらの結果から、かぶりコンクリート内に配置した補強鉄筋による拘束効果は周辺コンクリートのひび割れ発生後に現れるといえる。

c) 背面コンクリートかぶり内部

図-21にコンクリートの背面かぶり部分におけるひずみ分布を示す。縦軸にはジベル板端部からの距離を、横軸にはそれぞれのひずみを示している。この分布は、図-22に示す斜線部のひずみ分布であり、ジベル板近傍に設置した補強鉄筋、コンクリート表面近傍に設置した補強鉄筋、コンクリート表面のひずみより求めたものである。図-21より、ジベル端部には引張ひずみが、表面付近には圧縮ひずみが生じており、背面のかぶりコンクリート部分は曲げ状態になっていることを示す。これから、以下の孔あき鋼板ジベルの崩壊メカニズムが推定される。

せん断力が作用すると、図-23に示すように孔あき鋼板ジベルの孔内コンクリートと周辺のコンクリートの間でせん断破壊が生じ、コンクリートが分離する。その後、孔内コンクリートがジベルと一緒に周辺コンクリート中を移動しようとする、剥離面の骨材などの凹凸を乗り越えるために周辺コンクリートを押し広げながら移動することになる。これによって周辺のコンクリートを押し広げる力が発生し、背面のかぶりコンクリート部分に曲げが生じる。もしも、この押し広げる力に抵抗する要因が無ければこの時点でジベルは崩壊すると考えられる。一方、十分な背面かぶり厚や補強鉄筋など抵抗力がある場合には、それによる摩擦力がずれ抵抗力となって現れる。

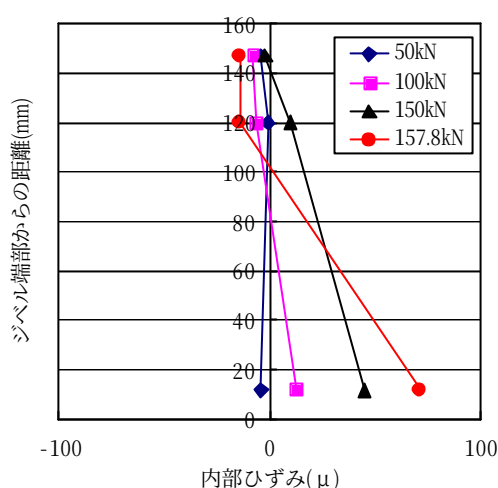


図-21 背面かぶりコンクリート部のひずみ分布

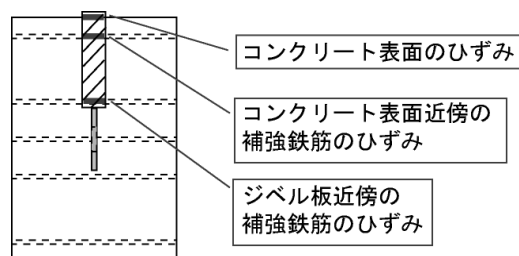


図-22 背面かぶりコンクリート部のゲージ

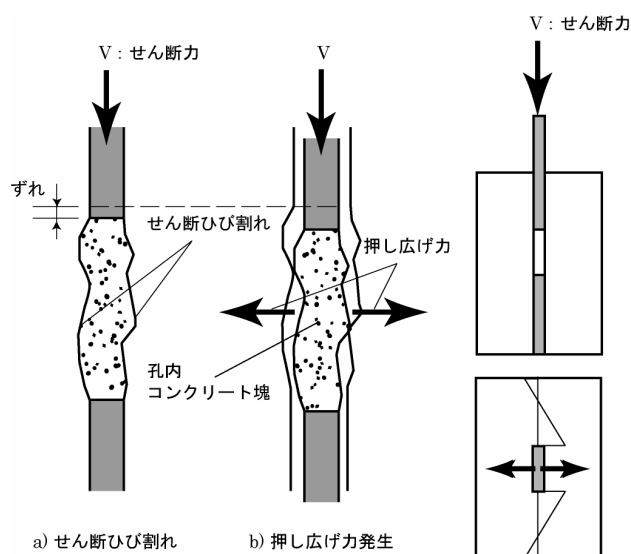


図-23 孔あき鋼板ジベルの崩壊メカニズム

4. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- ① 従来の押し抜き試験の供試体(コンクリート上部かぶり有、底面摩擦有)と比較して、上部のコンクリートのかぶりによる拘束を除去すると25%、底面の摩擦

による拘束を除去すると52%の耐力低下が生じた。そして、両方の拘束力を除去すると、66%も最大せん断耐力が低下している。この結果から、押し抜き試験の場合、供試体底面の摩擦およびコンクリート上部かぶりによる拘束力はせん断耐力に大きな影響を及ぼすことが確認できた。押し抜き試験により得られた孔あき鋼板ジベルのせん断耐力は、実際のせん断耐力よりも大きく評価してしまう可能性がある。

- ② 背面のかぶりコンクリート厚を大きくすると、かぶり厚に依存してせん断耐力は大きくなる。しかしながら、せん断耐力の増加はある一定の厚さ以上は期待できない。本研究ではその厚さは220mmである。
- ③ 背面のかぶりコンクリート内に補強鉄筋を配置すると、背面のかぶりコンクリート内にひび割れが生じた後にひび割れの進展を拘束し、最大せん断耐力後の急激な耐力の低下を防ぐことができる。
- ④ 背面のかぶりコンクリート部分は曲げ応力状態になることが確認できた。これは、ジベル孔内部のコンクリートが周辺のコンクリートの骨材に乗り上げ、その結果、周辺のコンクリートを押し広げることにより起因すると考えられる。
- ⑤ 以下の3つの拘束因子が孔あき鋼板ジベルのせん断耐力に大きく影響することが確認できた。
 - ・ジベル孔内の貫通鉄筋
 - ・ジベル周辺のかぶりコンクリート（補強鉄筋を含む）
 - ・押し抜きせん断試験における供試体底面の摩擦

参考文献

- 1) Leonhardt, F. et al. : Neues vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit., Beton-und Stahlbetonbau, pp325-331, 1987.
- 2) Andra, H. P. : Economical shear connectors with high fatigue strength, IABSE SYMPOSIUM, pp167-172, 1990.
- 3) Kraus, D. & Wurzer O. : Bearing Capacity of Concrete Dowels, Composite Construction-Conventional and innovative, pp133-138, 1997.
- 4) 緒方紀夫, 村山陽, 沖本真之, 今西直人 : 鋼製エレメントとコンクリートとの付着性能に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.2, pp1165-1170, 1994.
- 5) 新谷英司, 蛭名貴之, 上平謙二, 柳下文夫 : 波形鋼板とコンクリート床版の結合方法に関する実験的研究, 第9回シンポジウム論文集, プレストレストコンクリート技術協会, pp91-96, 1999.
- 6) 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研究, 構造工学論文集, 48A巻, pp1265-1272, 2002.
- 7) 日本鋼構造協会 : 頭付きスタッドの押し抜きせん断試験法(案)とスタッドに関する研究の現状, 1996.

CONCRETE CONFINEMENT THAT INFLUENCES ULTIMATE SLIP STRENGTH OF PERFORATED RIB SHEAR CONNECTOR

Kazuhiro FUKADA, Katashi Fujii, Hatsumi IWASAKI and Tadashi TOYOTA

The ultimate slip strength of PBL is decided by the collapse of concrete near the PBL. And its collapse is influenced by concrete confinements. In this study, we investigated the ultimate slip strength and the ultimate slip behavior of PBL by conducted push-out and pull-out tests. As the results, we clarified followings. Bending moment is produced in concrete covering by the force expanding concrete. Concrete confinements are reinforcing bars through a PBL hole, thickness of concrete covering and reinforcing bars in concrete covering. Moreover, in push-out test, the ultimate slip strength is greatly influenced by the frictional force between specimen and test bed.