

孔あき鋼板ジベルのせん断強度試験に関する一考察

On Test Method for Slip strength of Perforated Rib Shear Connector

岩崎初美*, 藤井堅**, 豊田正***, 藤村伸智****

Hatsumi Iwasaki, Katashi Fujii, Tadashi Toyota, Nobutoshi Fujimura

*石川島播磨重工業株式会社橋梁事業部設計部 (〒737-0831 広島県呉市光町 5-17)

** 工博 広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻 (〒739-8731 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

***広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻 (〒739-8731 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

****工修 東海旅客鉄道株式会社新幹線鉄道事業本部 (〒140-0003 東京都品川区八潮 3-2-92)

In order to obtain slip strength of perforated rib shear connector (PBL), a lot of tests have been conducted by push-out test, of which method is basically same as "Method of push-out tests for studs with heads" by Japan Society of Steel Construction (JSSC). However, is the method of JSSC applicable to the test for PBL which is usually collapsed by concrete crack, different from stud collapse mode caused by stud failure? This paper, by conducting push-out tests and pull-out tests of PBL, investigates applicability of push-out test method. Tests results show far different slip behaviors and strengths between push-out and pull-out tests, though the slip mechanism of PBL is intrinsically identical in terms of slipping of concrete in a hole by slip force. Since the difference of slip strength according to test method must have depended on concrete confinements caused by factors such as concrete covering, concrete block size, reinforcement through a hole, etc., these confinement effects should be taken into account correctly to evaluate slip strength of PBL.

Key Words: perforated rib shear connectors, push-out test, pull-out test

キーワード：孔あき鋼板ジベル，押し抜きせん断試験，引き抜きせん断試験

1. まえがき

鋼・コンクリート複合構造では，異種材料間の応力伝達にずれ止めが用いられる。従来，ずれ止めにはスタッドジベルが多用されてきたが，孔あき鋼板ジベルの高いずれ剛性や優れた疲労特性¹⁾などから，連続合成桁の中間支点上のずれ止めや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などにおいてすでに実用実績があり，採用される機会は今後益々増加すると予想される。

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あり，Leonhardt²⁾，Andra³⁾，緒方⁴⁾，Kraus⁵⁾，新谷⁶⁾，保坂ら⁷⁾などのせん断強度推定式が提案されている。これらのほとんどは，押し抜き試験によってせん断強度を求めており，とくに我が国では，日本鋼構造協会から「日本鋼構造協会・頭付きスタッドの押し抜き試験方法（案）」⁸⁾が（以降，JSSC押し抜き試験法と呼ぶ）が提案されてからは，孔あき鋼板ジベルについてもこの試験方法が踏襲されているようである。そして，上記のせん断強度推定式においても，押し抜き試験結果に基づいて構築されたものがほとんどである。

しかしながら，JSSC押し抜き試験法がそのまま孔あき鋼板ジベルに適用できるかどうかについての検討はな

されていない。すなわち，普通の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断による崩壊はあまり問題とならないことが多い。これに対して孔あき鋼板ジベルでは，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断に起因してせん断耐力が決まる場合には，鉄筋によるコンクリートのひび割れを拘束する効果や3軸応力状態になることによるいわゆるコンファインド効果によってコンクリートの破壊強度が大きく変わることを考慮すると，コンクリートの拘束状態によっては，試験結果が実際の強度を必ずしも正確には示していないことが懸念される。したがって，実構造物の孔あき鋼板ジベルのせん断強度を推定するためには，上述のコンクリートを拘束する因子を含めた設計強度推定式が必要であろう。しかしながら，前出の強度推定式にはコンクリートの拘束因子が十分には反映されていない。

そこで，本研究では，孔内コンクリートを拘束する因子に注目し，また試験方法についても押し抜き試験のみならず引き抜き試験を行って，試験法によるコンクリートの拘

束状態を変えて両試験のずれ挙動とせん断強度を比較、検討する。さらに、いままでの実験の基本となっている J S S C 押し抜き試験法の孔あき鋼板ジベルへの適用性について考察する。

2. 押し抜きせん断試験

2. 1 供試体

図-1 に孔あき鋼板ジベルの押し抜きせん断試験供試体の一例を示す。押し抜き試験供試体は、J S S C 押し抜き試験法にしたがって作成した。供試体は、ジベル鋼板 1 枚当りの孔数 1 個、孔径 60mm、ジベル鋼板厚 (SS400) 12mm に統一しており、貫通鉄筋および補強鉄筋は全て D16 (SD345) である。

表-1 に、ジベル孔内のコンクリート拘束に影響すると思われる因子、すなわち、ジベル孔内を貫通する鉄筋 (以下では貫通鉄筋と呼ぶ) の有無、ジベルを取り囲むようにコンクリートブロック内に配置した井型状鉄筋 (図-1 参照。以下、補強鉄筋と呼ぶ) の有無、かぶりの大きさを示す。なお、かぶり厚は、孔あき鋼板端部からコンクリート表面までの距離であり、各供試体のコンクリートブロックは、幅(400mm)と高さ(520mm)は一定であるが、かぶり厚に対応して厚さが変化する。

表-1 の○で示すように、供試体 PS-100-N と PS-100-R1 を比較することにより貫通鉄筋の有無の影響を、また、供試体 PS-100-N と PS-100-N-FR からは補強鉄筋の有無の影響を、さらに、PS-30-R1, PS-100-R1, PS-150-R1 の 3 体よりかぶり厚の影響を調べる。

なお、図-1 に示すように、孔あき鋼板ジベル端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た。

本実験で使用したコンクリート、ジベル鋼板 (SS400)、鉄筋 D16 (SD345) の材料試験結果を表-2~表-4 に示す。なお、コンクリートの引張強度は、割れ試験 (コンクリートの引張強度試験法 J I S 1 1 1 3) より求めた。

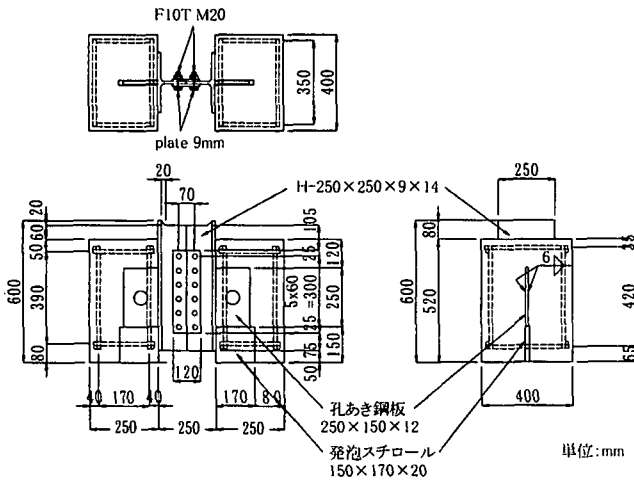


図-1 押し抜き供試体 (PS-100-N-FR)

表-1 押し抜き供試体タイプ

供試体名	貫通鉄筋		補強鉄筋		かぶり厚 (mm)	
PS-30-R1	有		無		30	○
PS-100-N	無	○	無	○	100	
PS-100-R1	有	○	無		100	○
PS-100-N-FR	無		有	○	100	
PS-150-R1	有		無		150	○

表-2 コンクリートの材料強度試験結果

供試体番号	圧縮試験結果			引張試験結果		
	ヤング係数 (kN/mm ²)	ポアソン比	圧縮強度 (N/mm ²)	供試体番号	破壊荷重 (kN)	引張強度 (N/mm ²)
No.1	28.9	0.21	32.2	No.1	80.9	1.72
No.2	28.4	0.15	30.8	No.2	57.8	1.17
No.3	28.1	0.22	38.5	No.3	72.5	1.50
平均	28.5	0.19	33.8	平均	70.4	1.46

表-3 鋼板の材料試験結果

供試体番号	引張試験結果			
	ヤング係数 (kN/mm ²)	ポアソン比	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
No.1	203	0.26	309	364
No.2	197	0.27	284	355
平均	200	0.265	296.5	359.5

表-4 貫通鉄筋の材料試験結果

供試体番号	引張試験結果		
	ヤング係数 (kN/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
No.1	179.4	371.1	563.8
No.2	184.5	375.5	563.9
No.3	180.9	384.1	570.0
平均	181.9	377.1	565.9

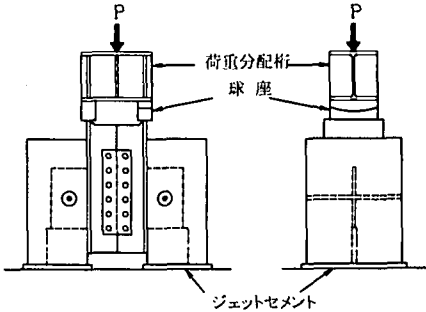


図-2 押し抜きせん断試験の载荷方法

2. 2 試験方法

試験方法は、JSSC押し抜き試験法にしたがった。載荷には500tf耐圧試験機を使用し、荷重制御で約1tf毎に荷重を増加させた。図-2に示すように、供試体下面にはジェットセメントを敷き反力面の不陸をなくすとともに、H形鋼の載荷端に球座を設けた。

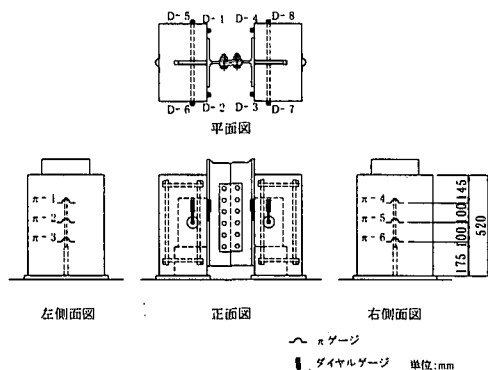


図-3 ダイヤルゲージ・πゲージ取り付け位置

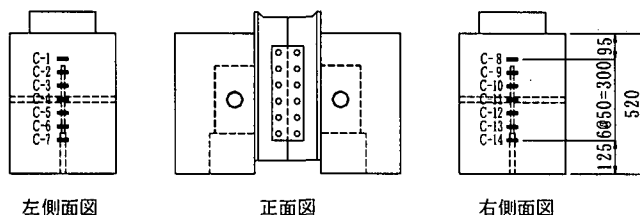


図-4 コンクリートゲージ貼り付け位置

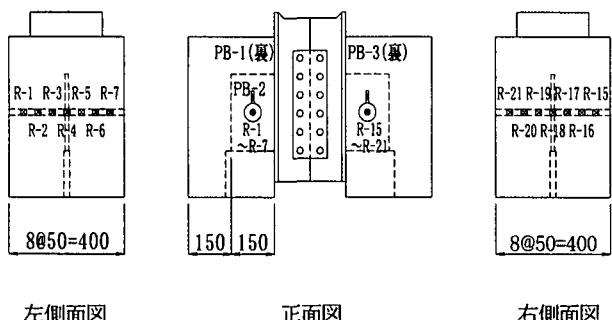


図-5 孔あき鋼板・鉄筋ひずみゲージ貼り付け位置

図-3～図-5に変位およびひずみの測定位置を示す。ジベルのずれは、孔中心位置と鋼フランジ下面の変位をダイヤルゲージにより計測し、その差から求めた。コンクリート表面のひびわれ幅を測定するため、孔の位置を中心にしてπゲージを100mm間隔で各面に3個取り付けた(図-3)。また、コンクリート表面のひずみを、孔位置から50mm間隔で各面に7枚設けたひずみゲージより求めた(図-4)。貫通鉄筋のひずみゲージは供試体中心から50mm間隔に7枚、また、ジベル鋼板では、孔端から5mm離してひずみゲージを貼付した(図-5)。ひずみゲージは鉄筋断面当り1枚としたが、鉄筋の曲げの影響がないような位置に配置している。

3. 引き抜きせん断試験

3. 1 供試体

表-5に孔あき鋼板ジベルの引き抜きせん断試験用供試体を示す。また、図-6に引き抜き供試体の例(PL-100-R1)を示す。引き抜き試験でも、貫通鉄筋の有無、コンクリートかぶり厚に注目したが、引き抜き試験では、ジベル板を囲む補強鉄筋はない。

コンクリートの材料試験結果を表-6に示す。なお、ここでもコンクリートの引張強度は、割列試験より求めた。なお、鉄筋及び鋼板の材料は、押し抜きせん断試験と同じである。

図-7～図-9に、変位およびひずみの測定位置を示す。引き抜き試験でのジベルのずれは、図-9に示すように供試体下面の鋼板とコンクリートの変位差から求めた。試験後の鋼板の変形状態に残留変形は見られなかったこと、コンクリート表面に鋼板と平行に貫通ひび割れが生じて崩壊したこと、また、鋼板には剥離剤を塗布して付着を低減させていることから、供試体下面の相対変位はジベル孔のずれと同じと予想される。

表-5 供試体の種類

供試体名	貫通鉄筋	かぶり厚(mm)
PL-0-R1	有 △	0 ○
PL-0-N	無 △	0
PL-100-R1	有 ○	100 ○
PL-100-N	無 ○	100
PL-125-R1	有	125 ○

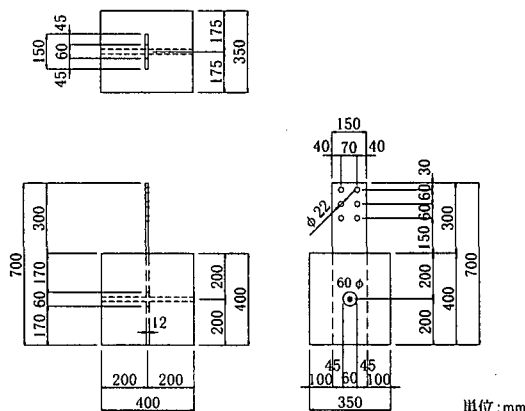


図-6 引き抜き供試体 (PL-100-R1)

表-6 コンクリートの材料試験結果

供試体番号	圧縮試験結果			引張試験結果		
	ヤング係数 (kN/mm ²)	ポアソン比	圧縮強度 (N/mm ²)	供試体番号	破壊荷重 (kN)	引張強度 (N/mm ²)
No.1	26.0	0.15	30.0	No.1	84.5	1.76
No.2	25.5	0.17	32.1	No.2	134.8	2.78
平均	25.8	0.16	31.1	平均	109.7	2.27

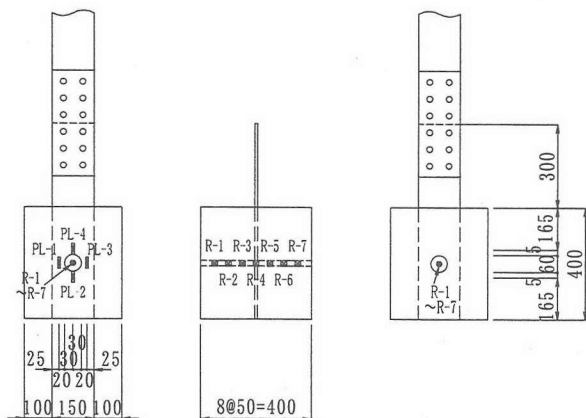


図-7 孔あき鋼板・鉄筋ひずみゲージ貼り付け位置

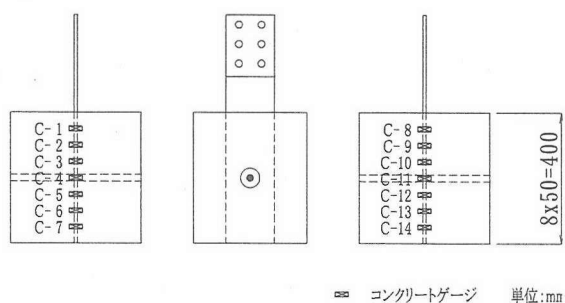


図-8 コンクリートゲージ貼り付け位置

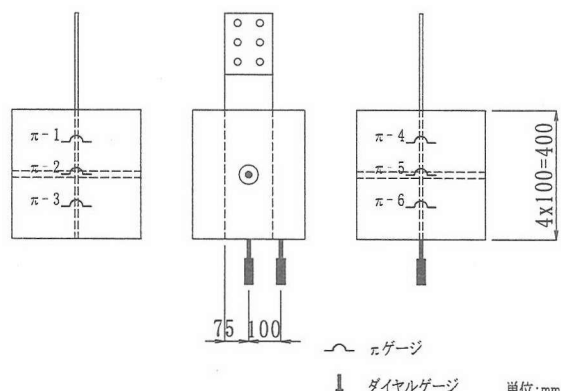


図-9 ダイヤルゲージ・πゲージ取り付け位置

3.2 試験方法

引き抜きせん断試験の概略を図-10に示す。载荷には50tf アクチュエーターを使用し、変位制御でクロスヘッドを約0.1mm毎に増加させた。

供試体と押さえビームの間にはジェットコンクリートを敷き、押さえビームはP C鋼棒で床面と固定した。

押し抜き試験では、供試体と床面の間に直接ジェットセメントを敷くので、供試体のコンクリートブロックは水平方向に拘束されることになる。一方、引き抜き試験では押

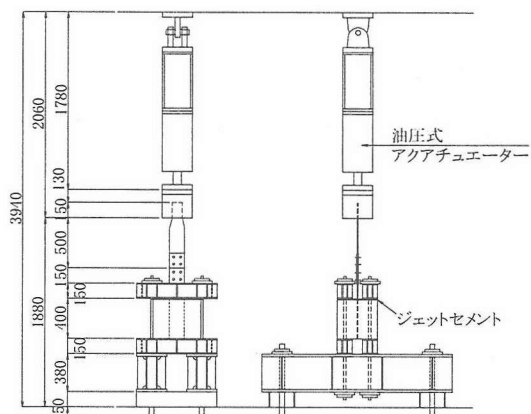


図-10 引き抜きせん断試験の载荷方法

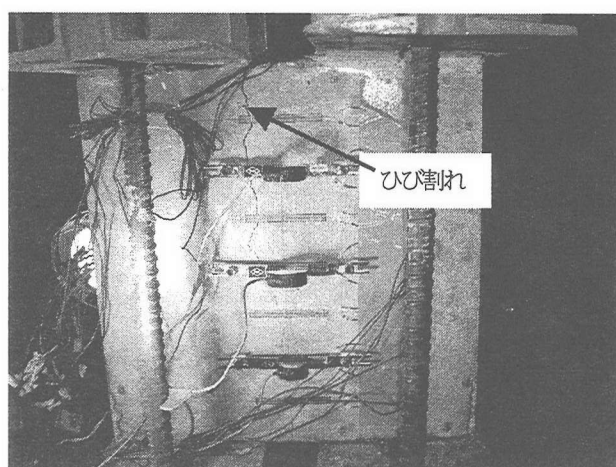


図-11 引き抜きせん断試験写真

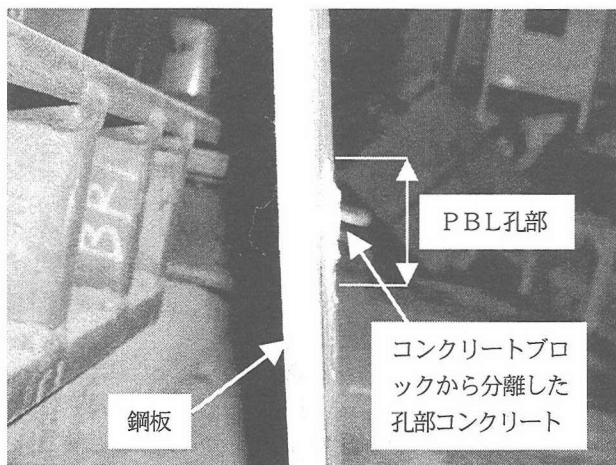


図-12 破壊後の孔部コンクリート (PL-100-N)

さえビームがP C鋼棒で固定されているので水平方向の拘束は無い（あるいはかなり低減されている）と推測される。また、引き抜き試験では、荷重軸上にジベル孔があるので、押し抜き試験とは異なって、荷重の偏心による影響はない。

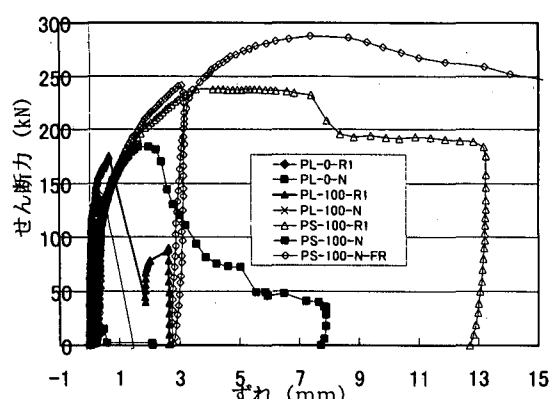


図-1 3 セン断力-ずれ (貫通鉄筋比較)

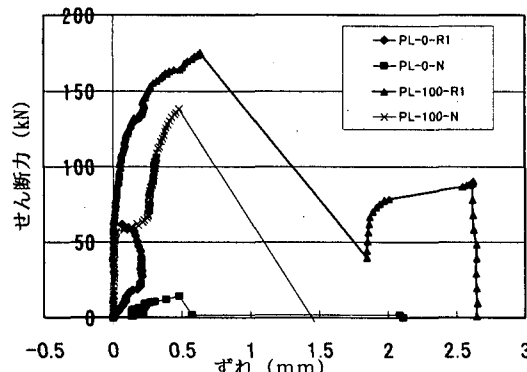


図-1 4 引き抜き試験せん断力-ずれ (貫通鉄筋比較)

4. 実験結果と考察

4. 1 崩壊性状

Leonhardt²⁾は、孔あき鋼板ジベルではコンクリートの破壊とジベル板の降伏の2種類の崩壊形式があるとしている。本研究の供試体はジベル板の降伏に起因する崩壊を防ぐように設計しており、すべてコンクリートの破壊に起因する崩壊形式が得られた。引き抜き試験、押し抜き試験ともに、最高荷重に達した後、コンクリート表面にジベル板と平行に厚さ方向に貫通するひび割れが発生し耐力が低下した。(図-1 1) 孔内貫通鉄筋がある場合には、最高荷重後の耐力低下は緩やかで、ずれの増加とともに徐々に耐力が低下した。これに対して補強鉄筋および貫通鉄筋の無い供試体は、最高荷重に達すると同時に急激に耐力低下を起こしコンクリート部が2つに分割されて崩壊した。なお、孔内のコンクリートは、コンクリートブロック本体から分離して孔内にそのまま残っているのがみられた。(図-1 2)

4. 2 貫通鉄筋の影響

貫通鉄筋の有無について、押し抜きせん断試験と引き抜きせん断試験の荷重-ずれ曲線を図-1 3に示す。図から、押し抜き試験ではずれが大きく、また最高荷重時のずれは数ミリ程度であるのに対して、引き抜き試験のずれは1 mm以下であった。

引き抜きせん断試験のずれは、図-1 3ではわかりにくいので、ずれを拡大したものを図-1 4に示す。

かぶりが100mmの押し抜きせん断試験(PS-100-

R1)と引き抜きせん断試験(PL-100-R1)を比較すると、押し抜き試験では、ずれが約4.1mmで最高荷重となり、その後あまり耐力の低下がないのに対し、引き抜き試験では約0.6mm程度のずれしか生じていないことが図-1 4からわかる。

また、押し抜きせん断試験で、補強鉄筋のあるPS-100-N-FRは、それがないPS-100-Nに比べ、せん断耐力が約100kN大きいことを図-1 3は示している。また、最高荷重時のずれは、PS-100-Nは約2.2mmであるのに対し、PS-100-N-FRは8mm程度であり、補強鉄筋があることにより、より大きな耐力とずれが現れているのがわかる。さらに、図-1 3で、貫通鉄筋のあるPS-100-R1と貫通鉄筋の無いPS-100-Nを比較すると、補強鉄筋の有無の場合と同様に、貫通鉄筋があることにより耐力、ずれともに大きくなることがわかる。このことは、図-1 4に示すように、引き抜き試験結果からもいえる。

このように、コンクリートのひび割れを拘束する鉄筋により、耐力、変形能ともに向上させることが可能であることがわかる。しかしながら、実構造物において、たとえば連続する1枚のジベル板に孔があり補強鉄筋はない形式では、このような孔あき鋼板ジベルの耐力推定に補強鉄筋がある場合の試験結果を適用すると、実際の耐力よりも大きく見積もってしまうことは容易に予想される。

4. 3 かぶりの影響

かぶりに着目した押し抜きおよび引き抜きせん断試験のせん断力-ずれ曲線を図-1 5に示す。引き抜きせん断試験については、ずれを拡大して図-1 6に示す。これらの図の供試体は、全て孔内貫通鉄筋を配置している。

図からわかるように、かぶりが大きくなると、両試験結果ともにせん断耐力が上昇する。たとえば、押し抜きせん断試験で、かぶりが30mmのPS-30-R1とかぶり150mmのPS-150-R1を比較すると、後者の最高荷重は約30kN増加する。また、引き抜き試験においても、かぶりのないPL-0-R1の最高荷重62kN、かぶりが100mmのPL-100-R1では174kNであり、かぶりの増加とともにせん断耐力が上昇するのが、図-1 6からわかる。

図-1 7に、引き抜きおよび押し抜き試験のかぶり厚とせん断耐力の関係を示すが、図からかぶり厚の増加によるせん断耐力の増加率は引き抜き試験の方が大きいことがわかる。

なお、この耐力上昇を直線補間してその傾きを求めると、押し抜きせん断試験は、0.2 (kN/かぶりmm)、引き抜き試験では1.4 (kN/かぶりmm)であった。

また、図-1 7には、Leonhardt²⁾のせん断耐力(208kN)をあわせて示すが、かぶり厚の小さい引き抜き試験結果はそれを大きく下まわっているのがわかる。

このように、かぶり厚の増加につれてせん断耐力が上昇するのは、ジベル孔内のコンクリートがコンクリートブロックから剥離した後、孔内コンクリートがずれる(骨材間の乗り上げ)ことによって発生するコンクリートブロックを押し広げる力に対し、かぶり部コンクリートが抵抗する

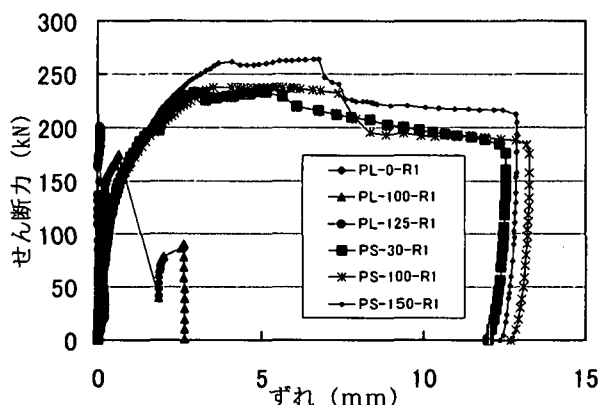


図-15 せん断力-ずれ (かぶり比較)

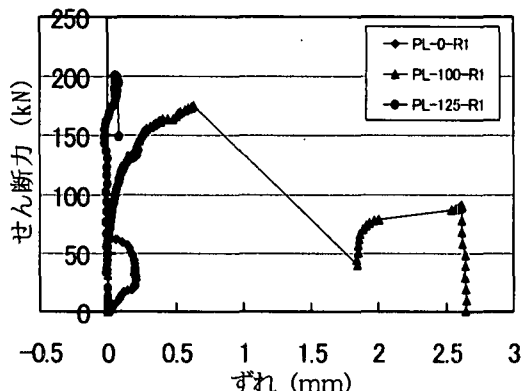


図-16 引抜き試験せん断力-ずれ (かぶり比較)

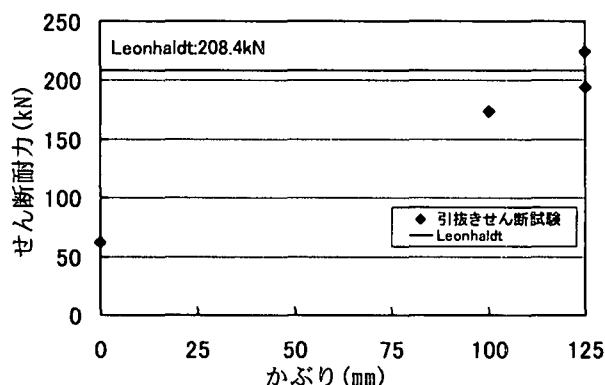


図-17 せん断耐力-かぶり関係

ことに起因すると考えられる。

また、図-16で、かぶりのないPL-0-R1あるいはかぶり厚が100mmのPL-100-R1は、引き抜き力に対して徐々にずれが大きくなるが、かぶり厚が125mmのPL-125-R1は、最高荷重直前までずれがあまり生じていないのもかぶりコンクリートの拘束によると推察される。

ところで、図-17に示すように、かぶりが小さい場合には、押し抜きせん断試験による耐力は引き抜き試験のそれよりもかなり大きい。これは、押し抜き試験では、床面にジェットコンクリートを敷いているために摩擦力が働き、これがコンクリート下面においてひび割れ発生に抵抗しているためと考えられる。引き抜き試験では、この摩擦抵抗が無いために、低い荷重でひび割れが発生したと考えられる。

5. まとめ

本研究では、コンクリートの破壊に起因する崩壊が起こる孔あき鋼板ジベルの押し抜きせん断試験と引き抜きせん断試験を実施し、孔内コンクリートの拘束効果の観点から、ずれ特性とせん断強度について考察した。以上の結果をまとめれば次のようになる。

- (1) 押し抜きせん断試験と引き抜きせん断試験の実験結果を比較すると、押し抜きせん断試験によるせん断強度は引き抜き試験のそれよりも大きく、また、最高荷重時のずれも極めて大きい。これは、試験時に供試体を設置するために敷かれたジェットセメントの摩擦抵抗によると考えられる。
- (2) かぶり厚が大きくなるにつれて、せん断強度は上昇する。このとき、強度上昇率は引き抜き試験結果の方が大きい。
- (3) 孔内貫通鉄筋がある場合には、最高荷重後も耐力低下が小さく、また、ずれ能力も大きい。
- (4) 押し抜きせん断試験におけるジベル板周辺を井型に配置した補強鉄筋も、コンクリートのひび割れに抵抗するので強度上昇を起こす要因になる。
- (5) 上記のコンクリートひび割れを拘束する効果が実際と対応していない場合には、押し抜き試験結果から得られたせん断強度は必ずしも正確とはいえない。したがって、試験結果から実際の終局せん断耐力を求めるためには、実構造物における種々のコンクリート拘束効果を考慮して求める必要がある。

参考文献

- 1) 平陽兵, 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, 1997年。
- 2) Fritz Leonhardt, et al: Neues vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit, *Beton- und Stahlbetonbau*, pp325-331, Dec. 1987.
- 3) Hans - Peter Andra: Economical Shear Connectors with High Fatigue Strength, IABSE SYMPOSIUM, 1990.
- 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年。
- 5) Dieter Kraus, Otto Wurzer: Bearing Capacity of Concrete Dowels, Composite Construction-Conventional and innovative, pp133-138, 1997.
- 6) 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年。
- 7) 保坂鐵矢, 光木香, 平城弘一, 牛島祥貴, 渡辺 晃: 孔あき鋼板ジベルにおける耐力評価式の一考察, 土木学会第55回年次学術講演会I-A261, 2001年9月。
- 8) ed by 松井繁之: 頭付きスタッドの押し抜きせん断試験方法(案)とスタッドに関する研究の現状, (社)日本鋼構造協会, 1996年11月。
- 9) 高東劭, 吳智深, 町田篤彦, 西海健二: 不連続有限要素法解析法に用いた有孔鋼板とコンクリートの付着の特性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集 Vol.18, No.2, 1996年。

(2003年4月18日受付)