

論文 孔あき鋼板ジベルのせん断強度に関する一実験

三谷 和司^{*1}・上田 洋一^{*2}・神谷 隆^{*3}・南 宏一^{*4}

要旨: 鋼とコンクリートのずれ止めとして孔あき鋼板ジベルがある。本研究では孔あき鋼板ジベルの特性を明らかにするために基礎実験の要素試験として鋼・コンクリートの付着性能の基礎データを確認することを目的に押抜き試験を行う。孔あき鋼板ジベルに及ぼす孔径, 板厚, 孔の個数および鋼板との付着の影響について検討を行う。その結果, 孔の個数が1個の場合は, Leonhardt による耐力式に耐力低減 1/2 を乗じて評価できることが示された。孔の個数が3個の場合は個数が1個分の耐力しか発揮されないことが示された。複数個の孔数をもつ場合耐力については更に検討することが必要であることが示された。

キーワード: 孔あき鋼板ジベル, せん断破壊, 付着

1. はじめに

鋼とコンクリートの合成構造では, 異なる材料間の応力伝達や一体化のために, ずれ止めが用いられる。近年注目されているずれ止めとして孔あき鋼板ジベルが挙げられる。

孔あき鋼板ジベルとは, 複数の孔を持つ鋼板をコンクリートに埋設し, その孔の中のコンクリート部が3次元的に拘束されるため大きなせん断力を伝達する機能を有するものである。このずれ止めは優れたずれ耐力と耐疲労特性を持つこと, また, コンクリートに対して能動的に拘束圧を与えれば, ずれ耐力がその拘束圧に対して比例的に向上することが報告されている^{1), 2)}。

このずれ止めは鉄筋補強等によりコンクリートの割裂強度を改善すればずれ耐力が向上することを示唆するものであり, コンクリートの拘束条件が孔あき鋼板ジベルのずれ止め特性に大きな影響を持つと考えられる。現在, 孔あき鋼板ジベルは, 土木構造物に使用されており, 鉄道における連続合成桁の中間支点上のずれ止め, 波形鋼板ウェブと床版の定着部, 上下部一体構造の剛結部などに採用されている。孔あき鋼板ジベルは, 鋼とコンクリートのずれ止めとして, 疲労特性, 施工性に優れ, 省力化が可能になると考えられる。また, 鋼板に孔をあけるだけなので, 加工性がよく, 孔あき鋼板ジベルを補強リブとして使用することが出来る。

2. 実験目的

本研究は, 孔あき鋼板ジベルを持つ鋼板でせん断補強を行なった部材の弾塑性性能を明らかにし, 耐力評価方法の確立を目的とする。基礎実験では, 柱型で実験を行ったが, 実験値は計算値の約8割しか発揮されておらず,

期待していた効果が得られなかった^{3), 4)}。

そこで, 本論では孔あき鋼板ジベルの特性を明らかにするために, 基礎実験の要素試験として鋼・コンクリートの付着性能の基礎データを確認することを目的に押抜き試験を行う。

3. 孔あき鋼板ジベルのせん断耐力の予備解析

孔あき鋼板ジベルは作用せん断力 Q に対し, 図-1 に「直接せん断面」と表示した円孔内に充填された円柱状コンクリートの円形側面で抵抗する。

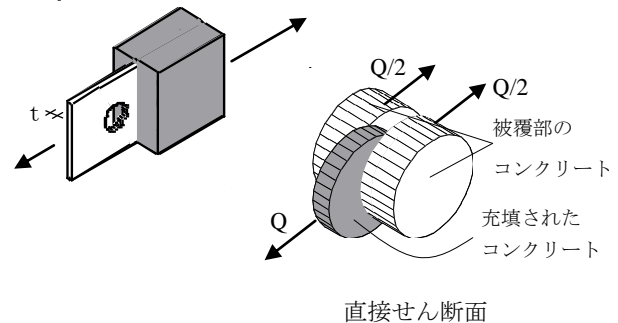


図-1 円孔に充填されたコンクリートの直接2面せん断抵抗機構

孔あき鋼板ジベルの耐力は, ドイツの Leonhardt⁵⁾ が提案している孔あき鋼板ジベルのせん断耐力式, 支圧耐力式より算出した。

孔あき鋼板ジベルの1個当たりのせん断耐力⁶⁾

$$PBQ_S = 2 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sigma_B \cdot 1.08 \quad (1)$$

d : 孔径, σ_B : コンクリートの圧縮強度

次に, 円孔内のコンクリートの支圧破壊による支圧耐

*1 福山大学大学院 博士課程 工学研究科地域空間工学専攻 修士 (工学) (正会員)

*2 矢作建設工業株式会社 地震工学技術研究所

*3 矢作建設工業株式会社 地震工学技術研究所 (正会員)

*4 福山大学 名誉教授 工博 (正会員)

力 P_{BQ_b} に対して⁶⁾

$$P_{BQ_b} = 7.2 \cdot \sigma_B \cdot d \cdot t \quad (2)$$

ここで、 t : 鋼板の厚さ

孔あき鋼板ジベルの耐力は円孔内のコンクリートとその周りのコンクリートとのずれによるもの（せん断破壊）、もしくは円孔内のコンクリートの破壊によるもの（支圧破壊）の2つの破壊モードに分けられる。孔径が大きくなるにつれてせん断破壊から支圧破壊に破壊モードが移行する。表-1に式(1)、式(2)より計算した予測破壊モードを示す。計算に使用したコンクリート強度はFc30とする。

表-1 予測破壊モード

系列	孔径	孔なし	20φ	30φ	40φ	50φ	60φ	70φ	80φ
I	A	-	せん断破壊			支圧破壊			
	B		せん断破壊			支圧破壊			
II	C	-	せん断破壊			支圧破壊			
	D		せん断破壊			支圧破壊			
III	E	-	せん断破壊					支圧破壊	
	F		せん断破壊						

4. 実験計画

4.1 試験体概要

孔あき鋼板ジベルの耐力に及ぼす孔径および板厚の影響について検討を行う。試験体には、 α シリーズの H-300×150×6.5×9 (SS400) と β シリーズの H-300×300×10×15 (SS400) を使用した。孔径は粗骨材の最大寸法が15mmまでなので、コンクリートが孔径に十分に充填されるよう20φより大きい孔径を計画した。

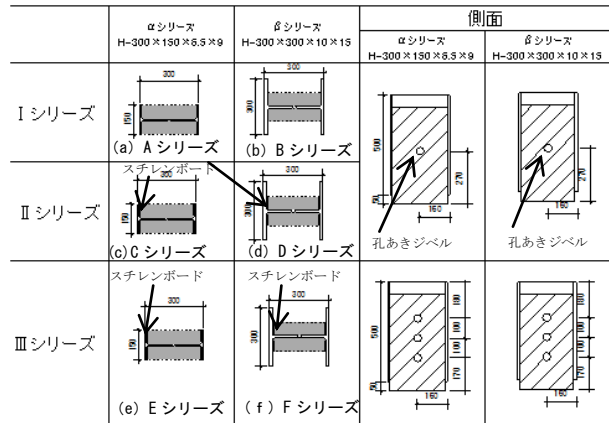
I シリーズはフランジとウェブに付着が有る試験体を10体計画した。IIシリーズではウェブだけに付着があるようにフランジ部分にスチレンボードを貼り、側面の付着を低減した試験体を10体を計画した。IIIシリーズでは、IIシリーズと同様にウェブだけに付着が有り孔の個数を3個にした試験体10体の計30体を計画した。表-2に試験体一覧を示す。図-2に試験体形状を示す。コンクリート強度はFc30とする。

表-2 試験体一覧

系列	孔径	孔なし	20φ	30φ	40φ	50φ	60φ	70φ	80φ
I	A	○	○	○	○	○	-	-	-
	B	○	○	○	○	○	-	-	-
II	C	-	-	○	○	○	○	-	○
	D	-	-	○	○	○	○	-	○
III	E	-	-	○	○	○	○	○	-
	F	-	-	○	○	○	○	○	-

4.2 使用材料の機械的性質

試験体に使用したコンクリート圧縮および割裂試験結果の平均値を表-3にそれぞれ示す。



- 註) I シリーズ:ウェブ、フランジにコンクリートとの付着有り
 II シリーズ:ウェブのみコンクリートとの付着有り
 III シリーズ:ウェブのみコンクリートとの付着有り

図-2 試験体形状 (単位:mm)

表-3 コンクリート強度試験結果 (単位:N/mm²)

a) I シリーズ

材令	7日	21日 実験前	29日 実験中	35日 実験後
圧縮強度	25.4	33.1	35.5	36.1
割裂強度	—	2.7	2.9	2.6

b) II シリーズ

材令	7日	29日	49日 実験前	56日 実験後
圧縮強度	20.7	27.7	29.1	32.3
割裂強度	—	2.5	1.9	2.4

c) III シリーズ

材令	7日	14日 実験前	28日 実験後
圧縮強度	35.1	36.9	43.4
割裂強度	2.2	2.3	2.3

4.3 荷重方法

荷重装置は、島津万能試験機 UH-5000kN A 形を用いた。鉛直荷重による押し抜き試験とし、繰返し荷重と単調荷重を行う。

制御は鉛直変位によって行い、鉛直変位は、コンクリートの両側面に埋め込んだずん切りボルトに変位計を各1個ずつ取り付け測定し、変位量の大きい方を用いる。

最大変位は20.0mmまでとし、AシリーズおよびB-20では0.5mmから2.0mmまでを0.5mmずつ除荷と荷重を繰返し、2.0mmから10.0mmまでは1.0mmずつ除荷と荷重を繰返す。10.0mmから20.0mmまでは2.0mmずつ除荷と荷重を繰返した。また、B-20を除くBシリーズ、Cシリーズ、Dシリーズでは単調荷重とし最大変位を20.0mmまで荷重した。Eシリーズ、Fシリーズでは0.5mmから5.0mmまでを0.5mmずつ除荷と荷重を繰返し、その後単調荷重とし、最大変位を20.0mmまで荷重した。図-3に測定方法、写真-1に荷重方法を示す。

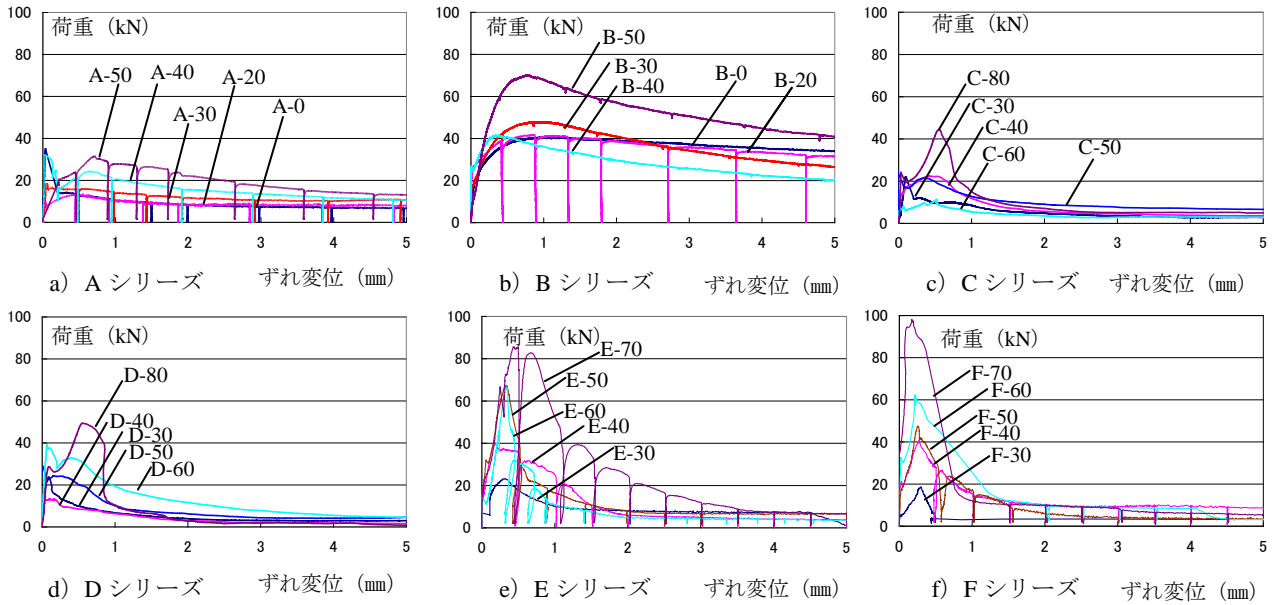


図-4 荷重-ずれ変位関係

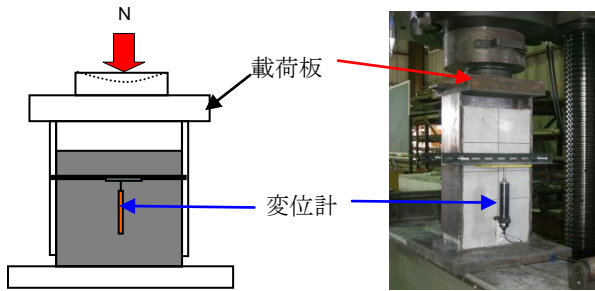


図-3 測定方法

写真-1 載荷方法

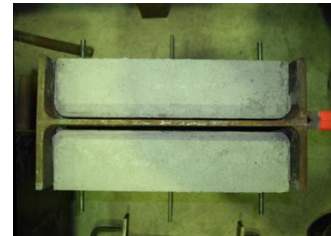


写真-2 肌別れ (A-30)

5. 実験結果

5.1 破壊性状

全試験体に対して実験中、実験後もコンクリート外面にひび割れが見られなかったが、コンクリートとウェブ面に肌別れが生じていた。IシリーズおよびIIシリーズとも孔径が大きくなるにつれ、肌別れの幅が広がっている。IIIシリーズではFシリーズの50φの試験体が肌別れの幅が最大になっていた。写真-2に肌別れを示す。また、実験後にはつり、孔を確認したところ孔径が大きくなるにつれ、孔内のコンクリートがせん断破壊から支圧破壊に移行していることが示された。予測した破壊現象に近い破壊をしたが、IIIシリーズでは孔数が3個で、それぞれの孔の破壊性状が異なっている試験体があった。表-4に破壊モードを示す。写真-3にせん断破壊と支圧破壊の孔径内の破壊状況を示す。



(a)せん断破壊

(b)支圧破壊

写真-3 孔内の破壊状況

5.2 荷重-ずれ変位関係

AシリーズおよびB-20では除荷を行っているが、荷重を取り除く間はずれることが無く、除荷を行う前の荷重まで荷重を加えないとずれることはなかった。しかし、E、Fシリーズにおいても除荷を行ったが、Aシリーズ、

表-4 破壊モード

孔径	孔なし	20φ	30φ	40φ	50φ	60φ	70φ	80φ
I	A	せん断破壊	せん断破壊	支圧破壊	支圧破壊	-	-	-
	B	せん断破壊	支圧破壊	せん断破壊	支圧破壊	-	-	-
	C	-	せん断破壊	せん断破壊	支圧破壊	-	-	支圧破壊
II	D	-	-	せん断破壊	支圧破壊	-	-	せん断破壊
	E	-	せん断破壊	両方	両方	支圧破壊	支圧破壊	せん断破壊
	F	-	せん断破壊	両方	両方	せん断破壊	せん断破壊	-

B-20とは異なり、除荷を行う前の荷重にいたる前にずれ始めている。

Iシリーズの履歴性状を比較すると、Aシリーズでは最大耐力をむかえてずれ始めているが、Bシリーズではずれ始めても最大耐力になっておらず、0.5mmから1.0mmずれた時に最大耐力になっている。履歴性状ではAシリーズとBシリーズでは違いがあり、Aシリーズではある程度耐力が低下をするとそれ以降は耐力の低下

はずれ変位だけが進んでいる。しかし、Bシリーズでは最大耐力をむかえた後なだらかに耐力低下をしながら変位が進んだ。これはコンクリートの幅をAシリーズの幅で揃えている為、AシリーズとBシリーズではフランジの形状が異なるため、コンクリートの側圧が異なりこのような結果になったと推測する。

フランジの付着を取除いたIIシリーズでは80φ以外ではAシリーズとほぼ同じ履歴性状を示した。C-80、D-80はずれ始めに荷重が低下した後0.5mmずれて最大耐力になっている。最大耐力後は急激に耐力が低下をし、ある荷重まで低下をした後は一定になっている。

IIIシリーズでは、C-80、D-80と同様にずれ始めに荷重が低下、0.2mmから0.5mmずれた時に最大耐力になっている。最大耐力後は急激に耐力が低下をし、ある荷重まで低下をした後は一定になっている。E-50、E-60では孔径の違いに関係なく耐力がほとんど変わっていない。またIIシリーズと同様にEシリーズとFシリーズでも板厚の関係に関わらず最大耐力は50φを除いて近い値になっている。IとIIシリーズではフランジの付着の有無によって最大耐力がかなり低下をした、フランジによる影響があったと考えられる。

図-4に荷重-ずれ変位関係を示す。

6. 計算値と実験値の比較

上記で示した式(1)、式(2)より求めた計算値と実験値の比較を図-5に示す。破線は7章で検討した計算値を示している。計算値と実験値を比較するとIシリーズでは、B-20は計算値よりも大きくなっている。しかし他の試験体では計算値の半分ぐらいの耐力しか発揮されていない。Bシリーズでは50φ以外の試験体では孔径に関わらず最大耐力がほぼ等しくなった。IIシリーズでは付着がウェブ面しかないため、Iシリーズよりも最大耐力は低く、計算値とも約半分近く低い値となった。IIIシリーズでは孔の個数を3個に増やしたが、どの試験体も計算値と実験値は大きく違いが出た。

7. 孔あき鋼板ジベルの耐力式の検討

Iシリーズ、IIシリーズでは試験体のうちほとんどが式(1)、式(2)で算定した計算値の1/2程度の強度しか発揮されていない。そこで式(1)、式(2)に補正係数0.5を乗じた耐力式を、孔あき鋼板ジベルの耐力評価式とし、下記に示す。

1. 孔あきジベルの1個当たりのせん断耐力

$$P_B Q_s = \{1.4 \cdot d^2 \cdot (1.16 \cdot \sigma_B)\} \times 0.5 \quad (3)$$

2. 孔あきジベルの1個当たりの支圧耐力

$$P_B Q_b = (7.2 \cdot \sigma_B \cdot d \cdot t) \times 0.5 \quad (4)$$

IシリーズおよびCシリーズでは、ほぼ計算値と実験

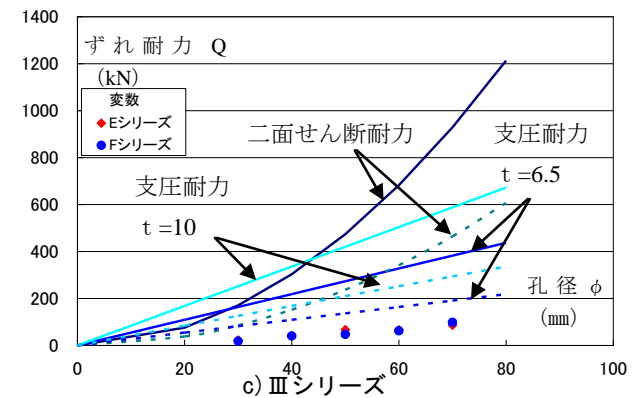
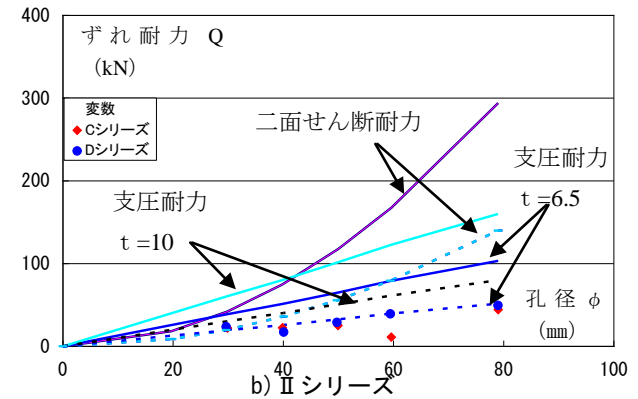
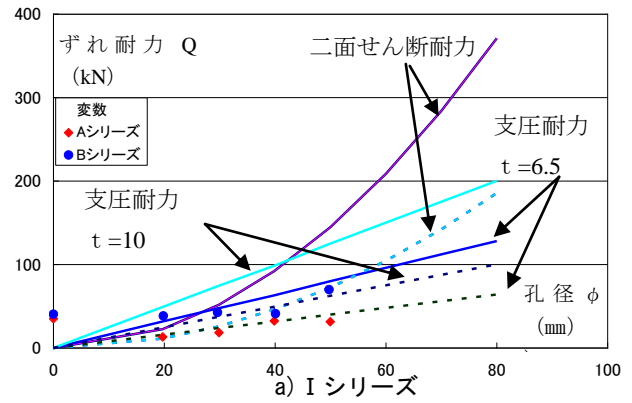


図-5 計算値と実験値の比較

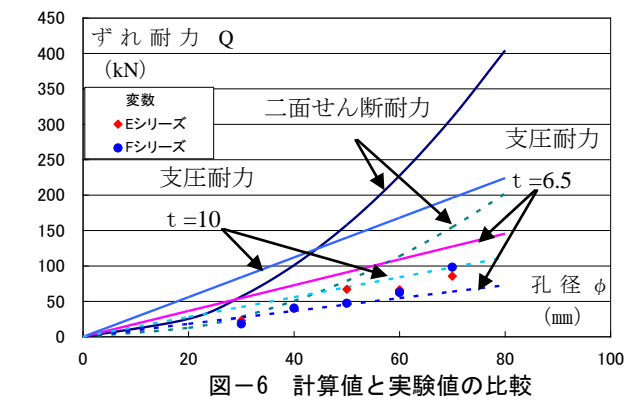


図-6 計算値と実験値の比較

値の値は等しくなることが認められる。Dシリーズになると板厚6.5mmの支圧耐力とほとんど変わらず板厚10mmでの支圧耐力および孔あき鋼板ジベルのせん断耐力まで耐力が発揮されていなかった。IIIシリーズでは孔

を3個として計算をしているが、補正係数0.5を乗じた耐力式でも評価できず、孔を1個とした式(4)の計算値とほぼ等しくなる結果を示した。Ⅲシリーズでは孔数3個の耐力が発揮されていないと考えられる。この原因としては早期に付着が無くなり、肌別れが生じた為、孔がそれぞれ単体で機能したことによるものと考えている。参考文献3)、4)の基礎実験では孔径が小さい為計算値までの耐力が発揮されていなかったと考える。図-6にⅢシリーズの孔1個の計算値と実験値を示す。

8. まとめ

1. AシリーズおよびB-20では除荷をしてもずれることが無かった。しかし、E、Fシリーズにおいても除荷を行ったが、Aシリーズ、B-20とは異なり、除荷を行う前の荷重にいたる前にずれ始めている。

2. Iシリーズの履歴性状を比較すると、Aシリーズでは最大耐力をむかえてずれ始めているが、Bシリーズではずれ始めても最大耐力になっておらず、0.5mmから1.0mmずれた時に最大耐力になっている。

Ⅱシリーズでは80φ以外ではAシリーズとほぼ同じ履歴性状を示した。C-80、D-80はずれ始めに荷重が減った後0.5mmずれて最大耐力になっている。

Ⅲシリーズでは、C-80、D-80と同様にずれ始めに荷重が減り、0.2mmから0.5mmずれた時に最大耐力になっている。最大耐力後は急激に耐力が低下し、ある荷重まで低下した後は一定になっている。E-50、E-60では孔径の違いに関係なく耐力がほとんど変わっていない。またⅡシリーズと同様にEシリーズとFシリーズでも板厚の関係に関わらず最大耐力は50φを除いて近い値になっている。

3. 履歴性状においてもAシリーズとBシリーズでは違いがあり、Aシリーズではある程度耐力が低下をするとそれ以降は耐力の低下はせず変位だけが進んでいる。しかし、Bシリーズでは最大耐力をむかえた後、なだらかに耐力低下を生じながら変位が進んだ。これはコンクリートの幅をAシリーズの幅で揃えている為、AシリーズとBシリーズではフランジの形状が異なるため、コンクリートの側圧が異なりこのような結果になったと推測する。

4. 計算値と実験値を比較すると、Iシリーズでは、A-0、B-0、B-20の実験値は計算値よりも大きくなっている。しかし、他の試験体では計算値の半分ぐらいの耐力しか

出てない。

Ⅱシリーズでは付着がウェブ面しかないため、Iシリーズよりも最大耐力は低く計算値とも約半分近く低い値となった。

Ⅲシリーズでは孔の個数を3個に増やしたが、どの試験体も計算値と実験値は大きく違いが出た。

補正係数0.5を乗じて計算値と実験値を比較すると、IシリーズおよびCシリーズでは、ほぼ計算値と実験値の値は等しくなることが認められる。

Dシリーズでは板厚6.5mmの支圧耐力とほとんど変わらず板厚10mmでの支圧耐力および孔あき鋼板ジベルのせん断耐力まで耐力が発揮されていなかった。

Ⅲシリーズでは孔を3個として計算をしているが、補正係数0.5で乗じた耐力式でも評価できず、孔を1個とした式(4)の計算値とほぼ等しくなる結果を示した。Ⅲシリーズでは孔数3個の耐力が発揮されていないと考えられる。今後更に耐力式の検討、板厚の違いによる検討および孔の個数が増えた場合の検討を新たに行う予定である。

参考文献

- 1) 保坂鐵矢, 光木香, 平城弘一, 牛島祥貴, 橘吉弘, 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
- 2) 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, Vol.48A, pp.1265-1272, 2002.3
- 3) 上田洋一, 三谷和司, 神谷隆, 南宏一: 孔あき鋼板ジベルを持つ鋼板で補強されたRC部材のせん断破壊性状に関する実験的研究その1, 日本建築学会大会学術講演集C-1, pp.1171-1172, 2008.9
- 4) 三谷和司, 上田洋一, 神谷隆, 南宏一: 孔あき鋼板ジベルを持つ鋼板で補強されたRC部材のせん断破壊性状に関する実験的研究その2, 日本建築学会大会学術講演集C-1, pp.1173 - 1174, 2008.9
- 5) F.Leonhardt, W.Andrä, H.-P.Andrä, W.Harre: Neues, vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund- und Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit, Beton und Stahlbetonbau, pp.325 - 331, 1987.12
- 6) 鬼頭宏明, 園田恵一郎: 鋼・コンクリート複合構造, 森北出版社, pp.21-32, 2008.3

