論文　孔あき鋼板ジベルを持つ鋼板で補強された合成部材のせん断破壊性状に関する一実験

三谷　和司[*1]・上田　洋一[*2]・神谷　隆[*3]・南　宏一[*4]

要旨：本論は，鋼とコンクリートのずれ止めとして用いられる孔あき鋼板ジベルを用いた，鋼板がせん断破壊を生ずる RC 部材の剛性，せん断強度および変形能力の増加に対して，どのように寄与するのかを検討するために，孔あき鋼板ジベルの有無，せん断補強筋量および軸力比を変数として，6 体の基礎実験を行った。その結果，鋼板ジベルの試験体は， RC 部分と一体化して，剛性を大きくする事が示されたが，終局せん断耐力の実験値は計算値に比して小さく，レオンハルトが提案した孔あき鋼板ジベルの耐力式は過大なせん断耐力を与える事が示された。

キーワード：孔あき鋼板ジベル，せん断破壊，付着，合成柱

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掲げられる。**図-1** に孔あきジベルを示す。

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，孔あき鋼板を補強リブとして使用することが出来る[3)]。

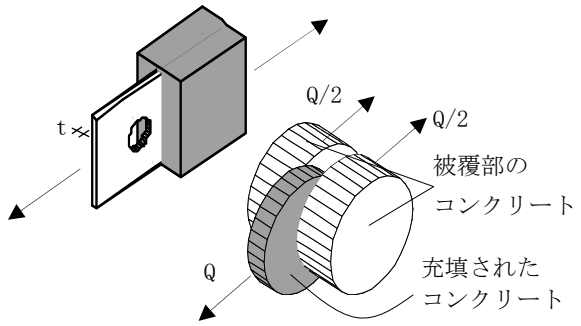


図-1　孔あき鋼板ジベル

2. 孔あき鋼板ジベルの鋼板を用いた RC 部材のせん断抵抗機構

従来 RC 部材において，せん断力は，主筋からせん断補強筋により伝達する。本研究では，孔あき鋼板ジベルを RC 部材に入れることにより，直接的（弦材を主筋，腹材を鋼板）に抵抗機構を構成して，鋼板によりせん断力のみを伝達することができる。**図-2** に試験体の孔あき鋼板のせん断力伝達のモデルを示す[4)，5)]。

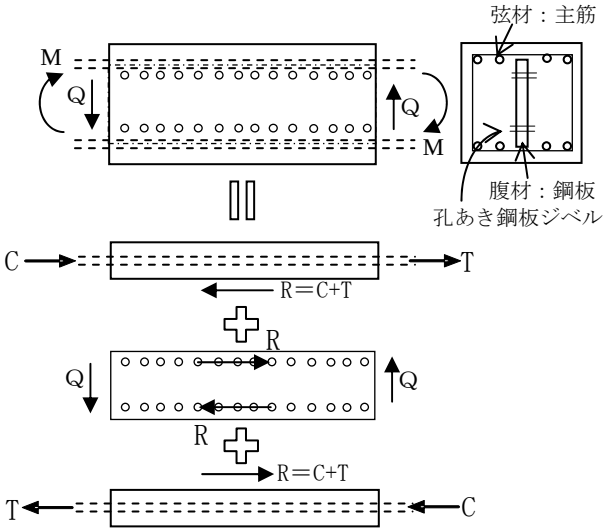


図-2　孔あき鋼板のせん断力伝達機構

*1 福山大学大学院　修士課程　工学研究科建築学専攻　(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　工学部建築・建設学科　教授　工博　(正会員)

3.実験計画

3.1 試験体概要

孔あき鋼板ジベルの力学的性能を把握するための基礎実験計画として**図-3 に試験体形状および断面詳細**，**表-1** に試験体詳細を示す。試験体は，孔なし鋼板を用いた試験体 A-1，C-1 の 2 体，30φ-@100 の孔がある孔あき鋼板を用いた試験体 A-2，B-2，B-3，C-2 の 4 体の全 6 体を計画する。また，試験体 B-2 は孔に貫通鉄筋を通し，B-3 はせん断補強筋比を 0.4%にしたものである。

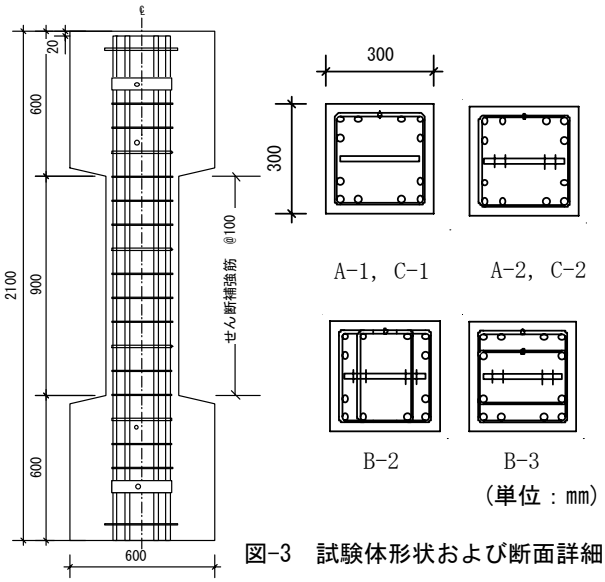


図-3　試験体形状および断面詳細

表-1　試験体詳細

試験体名	鋼材の孔の有無	貫通鉄筋の有無	せん断補強筋比 p_w(%)	作用軸力 (kN)
A-1	N	－	0.2	0
A-2	Y	N		
B-2	Y	Y		0
B-3	Y	N	0.4	
C-1	N	－	0.2	$0.3N_0$
C-2	Y	N		

註)Y:有,N:無,N_0:中心圧縮耐力,$N_0=A_C\cdot\sigma_B+A_t\cdot{}_r\sigma_y+{}_st\cdot{}_sb\cdot{}_s\sigma_y$,$A_C$:コンクリート断面,$\sigma_B$:コンクリート強度,$A_t$:主筋断面積,${}_r\sigma_y$:主筋降伏強度,${}_st$:鋼板厚さ,${}_sb$:鋼板の幅,${}_s\sigma_y$:鋼板降伏強度

3.2 使用材料の機械的性質

主筋は D16（SD345），せん断補強筋は D6（SD295A），鋼材は t16（SS400）を用いた。鋼材の機械的性質を**表-2** に示す。また，コンクリート圧縮強度は，圧縮試験を実験前（材齢 35 日），実験中（材齢 53 日），実験後（材齢 66 日）の三回行った圧縮試験の平均値で σ_B=35.1N/mm^2 となっている。

表-2　鋼材の機械的性質

種別	材質	降伏点強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)
D16	SD345	379.9	547.3
D6	SD295A	423.3	585.5
PL-16	SS400	279.0	443.7

コンクリート強度-材齢関係を**図-4** に示す。

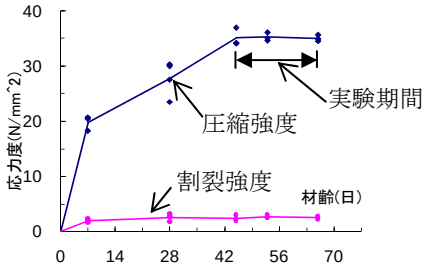


図-4　コンクリート強度-材齢関係

3.3 載荷方法

載荷は**図-5** に示す福山大学設置の建研式載荷装置を用いた。載荷はＬ型載荷フレーム側面のオイルジャッキにより，L フレームを介して柱長さの 1/2 の点に水平荷重を作用させる。

載荷方法は柱頭の水平変位制御とし，水平変位および鉛直変位は，試験体上下端に固定した治具に変位計を各 2 個ずつ取り付け測定し，平均値を用いる。載荷サイクルは，部材端水平変位量δを試験体長さ 1 で除した部材角 R（=δ/l）による変位制御として，R=0.2×10^{-2}rad を正負 2 サイクル行い，R=1.2×10^{-2}rad まで R=0.2×10^{-2}rad ずつ増加させる。その後は，R=0.4×10^{-2}rad ずつ増加させ各 2 サイクルずつ繰返し載荷を行い，R=3.2×10^{-2}rad まで載荷を行う。

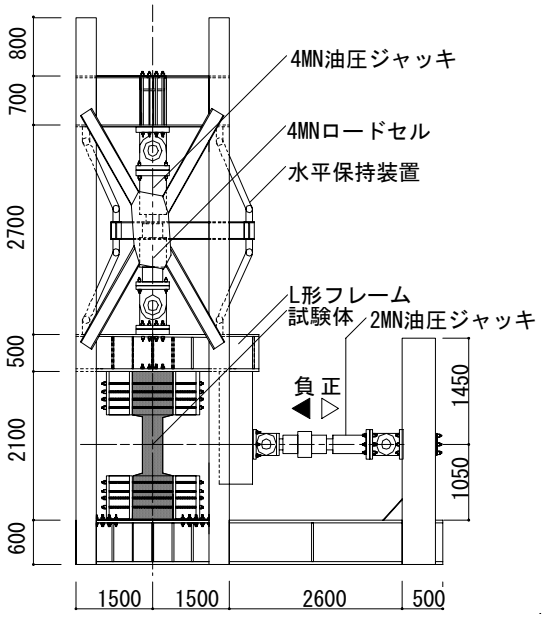


図-5　実験装置（単位 mm）

4. 実験結果

4.1 破壊性状

最大耐力時，終局時の破壊性状の数例を**図-6** に示す。

A シリーズ，B-3 では共通したひび割れ性状を示した。ひび割れは曲げひび割れ，端部斜めひび割れ，中央斜めひび割れの順に発生し，最大耐力時に中央にひび割れが生じ，耐力の低下とともにひび割れが徐々に多く発生した。最終的に主筋に沿って付着割裂ひび割れが大きくなり，端部のかぶりコンクリートの剥離が生じた。実験後に孔あき鋼板ジベルの損傷の状況を確認した。A-2 の終局状況を**写真-1** に示すが，コンクリートは孔に完全に充填されており，かつ局部支圧破壊などは見られなかった。

4.2 初期剛性

図-7 に初期剛性を示す。軸力がない試験体ではジベルの有無が，初期剛性に寄与している。ジベルのある試験体は，ジベルと RC 部分が一体化して，剛性を高くする事を示した。

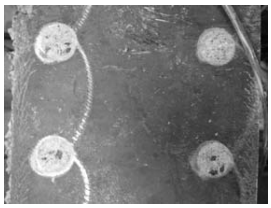


写真-1　孔あき鋼板ジベルの終局状況（A-2）

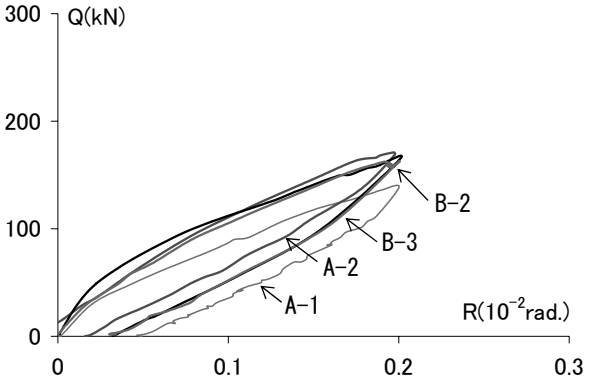


図-7　初期剛性

4.3 履歴性状

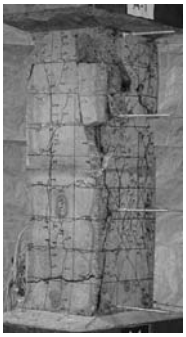
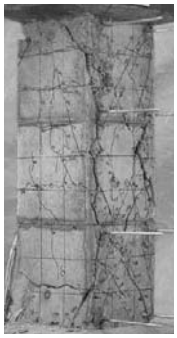
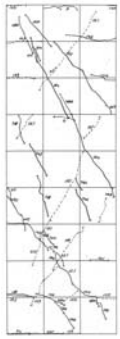
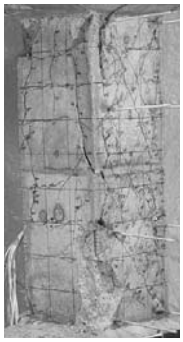
各試験体の荷重－部材角関係を**図-8** に示す。縦軸は水平荷重Q（kN），横軸は部材端水平変位量δを試験体長さ l で除した部材角 R（10^{-2}rad）を表す。

鉛直変位の関係では，縦軸に水平荷重Q（kN），横軸に軸方向の変形量を試験体長さ l で除した鉛直ひずみ度 ε_N（%）と縦軸に鉛直ひずみ度 ε_N（%），横軸に部材角 R（10^{-2}rad）とを共に示す。

A および B シリーズとも逆 S 字形のスリップ性状を示しており，C シリーズでは紡錘形の性状を示している。

A シリーズでは R=1.0×10^{-2}rad で最大耐力に達し，B-2 は A シリーズと同様に R=1.0×10^{-2}rad で最大耐力に達している。しかし，せん断補強筋比が 0.4%である B-3 は R=1.6×10^{-2}rad で最大耐力に達している．C シリーズでは，両試験体とも R=0.8×10^{-2}rad で最大耐力を発揮した。作用軸力がない A，B シリーズの最終部材角は R=3.2×10^{-2}rad であったが，C シリーズではせん断補強筋が破断した為 R=2.0×10^{-2}rad で作用軸力の支持が不可能になり，実験を終了した。

水平荷重と鉛直ひずみ度の関係ではＡシリーズとＣシリーズでは軸力のないＡシリーズは最終部材角まで載荷を行っても鉛直ひずみ度は小さく，軸力が高いＣシリーズでは水平変位が進むにつれ，鉛直ひずみ度が高くなっている。Ａシリーズの孔の有無で比較すると，鉛直ひずみ度はほぼ同じである。Ｃシリーズの孔の有無で比較すると，鉛直ひずみ度は鋼板に孔が有る試験体の方が高くなっている。

	A-1		A-2		B-3	
	終局時	最大耐力時	終局時	最大耐力時	終局時	最大耐力時
						
Q_{max}	331		319		415	
R	3.2	1.0	3.2	1.0	3.2	1.6

註）Q_{max}：最大耐力（kN）（正負の平均とする），R:部材角（10^{-2}rad）

図-6　破壊性状

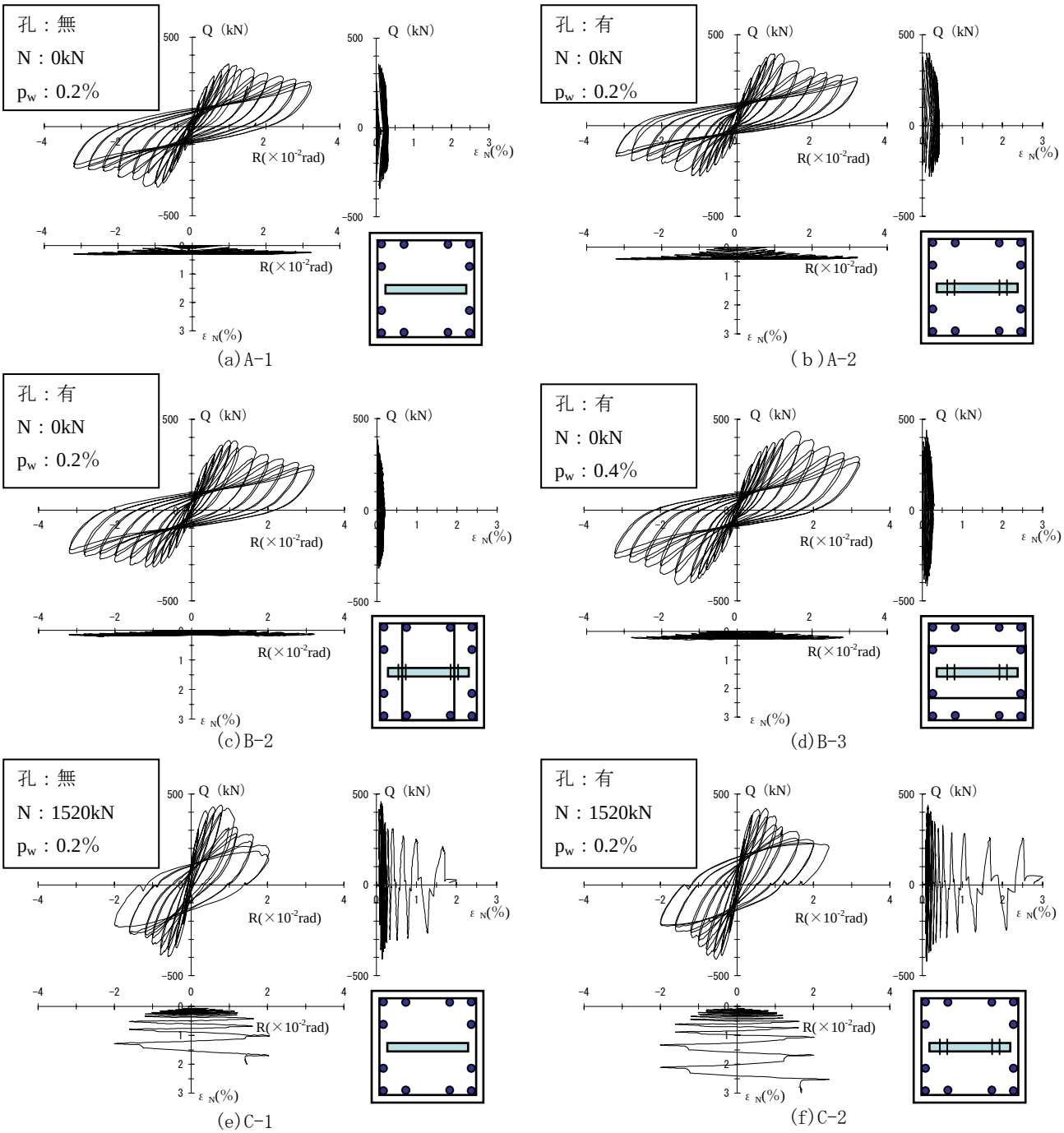


図-8　荷重-部材角関係

5. 終局耐力

実験値と計算値の比較を**表-3** に示し，鉄骨部分およびRC 部分の終局耐力の計算式を下記に示す。

孔あき鋼板を用いていない試験体の終局耐力は，(1)式で算定した。

$$Q_u = {}_W Q_u + {}_C Q_u + {}_S Q_u \qquad (1)$$

- RC 部分 ${}_W Q_u$：帯筋による抵抗力(トラス耐力)

$$ {}_W Q_u = p_w \cdot {}_w\sigma_y \cdot \frac{b}{b_t} \cdot b_t \cdot j_t = p_w \cdot {}_w\sigma_y \cdot b \cdot j_t \qquad (2)$$

- RC 部分 ${}_C Q_u$：コンクリートによる抵抗力（アーチ耐力）

$$ {}_C Q_u = \sigma_B \cdot (b - b_t) \cdot \frac{D}{2} \cdot \left(\sqrt{1+\eta^2} - \eta\right) \qquad (3)$$

ただし，

b_t：トラス機構の形成に必要とされる幅

- 鉄骨部分 ${}_S Q_u$：鋼板による抵抗力

$$ {}_S Q_u = \frac{2M_S}{\ell} \qquad (4)$$

$$M_S = M_{S0} \cdot m = m \cdot \frac{t_s \cdot d_s^2}{4} \cdot {}_s\sigma_y \qquad (5)$$

表-3　実験値と計算値の比較

	作用軸力 N (kN)	実験値 Qu (kN)			S部分 PBQu (kN)	S部分 SQu (kN)	RC部分 CQu (kN)	RC部分 WQu (kN)	合計 Qu (kN)	実験値/計算値		
		正荷重	負荷重	平均						正荷重	負荷重	平均
A-1	0	342.7	319.7	331.2	0.0	76.1	243.0	60.3	379.3	0.90	0.84	0.87
A-2	0	388.6	249.8	319.2	56.4	53.7	243.0	60.3	413.3	0.94	0.60	0.77
B-2	0	378.6	311.7	345.2	56.4	53.7	243.0	60.3	413.3	0.92	0.75	0.84
B-3	0	430.6	398.6	414.6	56.4	65.9	229.7	120.5	472.5	0.91	0.84	0.88
C-1	1520	435.6	391.6	413.6	0.0	117.4	243.0	60.3	420.6	1.04	0.93	0.98
C-2	1520	406.6	395.6	401.1	56.4	100.0	243.0	60.3	459.7	0.88	0.86	0.87

$$m = \frac{M_S}{M_{S0}}$$

$$= \sqrt{1-\left(\Lambda\cdot\frac{M_S}{M_{S0}}\right)^2}\cdot\left[1-\left(\frac{N_S}{N_{S0}}\right)^2\cdot\frac{1}{1-\left(\Lambda\cdot\frac{M_S}{M_{S0}}\right)^2}\right] \tag{6}$$

上式の(6)式に基づいてm値を求めると，

$$m^2 = (\sqrt{1-(\Lambda\cdot m)^2})^2\cdot[1-n^2\cdot\frac{1}{1-(\Lambda\cdot m)^2}]^2$$

$$= (\sqrt{1-(\Lambda\cdot m)^2})^2\cdot[\frac{1-(\Lambda\cdot m)^2-n^2}{1-(\Lambda\cdot m)^2}]^2$$

$$= \frac{[1-(\Lambda\cdot m)^2-n^2]^2}{1-(\Lambda\cdot m)^2} \tag{7}$$

ここに，

$$A = \Lambda^2\cdot(1+\Lambda^2)$$

$$B = 2\Lambda^2\cdot(n^2-1)-1$$

$$C = (1-n^2)^2$$

$$\Lambda = \frac{\sqrt{3}}{2}\cdot\frac{d_s}{\ell}\cdot\frac{1}{\kappa}$$

$$\frac{N_S}{N_{S0}} = \frac{N_C-N_R}{N_{S0}}$$

(7)式において，

$X = m^2$　とおくと

$$AX^2+BX+C=0$$

$$X = \frac{B\pm\sqrt{B^2\cdot 4\cdot A\cdot C}}{2\cdot A} \tag{8}$$

としてm^2が求められる。

孔あき鋼板ジベルを用いた試験体の終局耐力は，(9)式で算定した。ただし，(8)式は鋼板の全塑性せん断力から孔あき鋼板ジベルの寄与に必要な板厚を引いた残りの板厚で求める。

$$Q_u = {}_WQ_u + {}_CQ_u + {}_{PB}Q_u + {}_SQ'_u \tag{9}$$

- 鉄骨部分 ${}_{PB}Q_u$：鋼板ジベルによる抵抗力 [6)]

$${}_{PB}Q_u = \frac{j_t}{\ell}\cdot n\cdot R_0 \tag{10}$$

$$R_0 = 1.4\cdot d^2\cdot(1.16\cdot\sigma_B)$$

$$t_{PB}\cdot(\ell-n\cdot d)\frac{{}_s\sigma_y}{\sqrt{3}} = n\cdot R_0$$

$$t_{PB} = \frac{n\cdot R_0\cdot(\ell-n\cdot d)\cdot\sqrt{3}}{{}_s\sigma_y}$$

ただし，

t_{PB}：鋼板ジベルの寄与に必要とされる板厚

- 鉄骨部分 ${}_SQ'_u$：鋼板による抵抗力

$${}_SQ'_u = \frac{2M'_S}{\ell} \tag{11}$$

M'_Sは(5)式の t_s を t_s-t_{PB} として計算したものである。

$$M'_S = M'_{S0}\cdot m' = m'\cdot\frac{(t_s-t_{PB})\cdot d_s^2}{4}\cdot{}_s\sigma_y \tag{12}$$

$$m' = \frac{M'_S}{M'_{S0}}$$

$$= \sqrt{1-\left(\Lambda\cdot\frac{M'_S}{M'_{S0}}\right)^2}\cdot\left[1-\left(\frac{N'_S}{N'_{S0}}\right)^2\cdot\frac{1}{1-\left(\Lambda\cdot\frac{M'_S}{M'_{S0}}\right)^2}\right] \tag{13}$$

上式の(13)式に基づいてm’値を求めると，

$$m'^2 = (\sqrt{1-(\Lambda\cdot m')^2})^2\cdot[1-n^2\cdot\frac{1}{1-(\Lambda\cdot m')^2}]^2$$

$$= (\sqrt{1-(\Lambda\cdot m')^2})^2\cdot[\frac{1-(\Lambda\cdot m')^2-n^2}{1-(\Lambda\cdot m')^2}]^2$$

$$= \frac{[1-(\Lambda\cdot m')^2-n^2]^2}{1-(\Lambda\cdot m')^2} \tag{14}$$

ここに，

$$A = \Lambda^2\cdot(1+\Lambda^2)$$

$$B = 2\Lambda^2\cdot(n^2-1)-1$$

$$C = (1-n^2)^2$$

(14)式において，

$X = m'^2$　とおくと

$$AX^2+BX+C=0$$

$$X = \frac{B\pm\sqrt{B^2\cdot 4\cdot A\cdot C}}{2\cdot A} \tag{15}$$

としてm'²が求められる。

孔の有無で比較すると，軸力の有無に関わらずどの試験体も孔あき鋼板ジベルを用いた試験体の計算値は高い値を示したが，実験値には有意差は示されなかった。

せん断補強筋量の違いで比較すると，計算値，実験値ともせん断補強筋が多いほど大きい値を示した。

6. まとめ

履歴性状ではAおよびBシリーズとも逆S字形のスリップ性状を示しており，C シリーズでは紡錘形の性状を示している。

水平荷重と鉛直ひずみ度の関係では軸力のないAシリーズは最終部材角まで載荷を行っても鉛直ひずみ度は小さく，軸力が高いCシリーズでは水平変位が進むにつれ，鉛直ひずみ度が高くなっている。

Aシリーズの孔の有無で比較すると，鉛直ひずみ度はほぼ同じである。Cシリーズの孔の有無で比較すると鋼板に孔が有る試験体の方が高くなっている。

孔あきジベルは剛性の増加に対して寄与することが示されたが，せん断耐力では予測したような十分な耐力を発揮することが示されなかったが，今後，更に検討を行う予定である。

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) 保坂鉄矢，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) 岩崎初美，藤井堅，豊田正，深田和宏：合成桁における孔あき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

4) 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

5) 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

6) 望月秀次，安藤博文，宮地真一，柳澤則文，高田嘉秀：孔あき鋼板ジベルを用いた混合桁接合部の静的力学特製に関する実験的検討，構造工学論文集，Vol.46A，pp.1479 - 1490，2000.3

付録．記号

ℓ ：部材長さ

p_w ：せん断補強筋比

$_w\sigma_y$ ：せん断補強筋の降伏強度

j_t :弦材の主筋間距離

σ_B :コンクリート圧縮強度

t_S :板厚

d_s :板幅

κ :形状係数

M_S ：鋼板のモーメント

M_{S0} :鋼板の全塑性モーメント

N_{S0} :鋼板の全塑性引張力

N_S :鋼板の引張力

N_c ：コンクリートの圧縮力

N_R :主筋の引張力

d :孔あき鋼板ジベルの直径

R_0 ：孔あきジベルの 1 個の抵抗力