

(10) 構造細目を考慮した各種ずれ止め形式のせん断力－ずれ変位関係の比較

大口 真司¹・酒井 武志²・久保 典之³・梅原 郁弘⁴
木村 淳⁵・中島 章典⁶

¹正会員 株式会社サクラダ 設計部 (〒272-0002 千葉県市川市二俣新町21番地)
E-mail:s-ohguchi@sakurada.co.jp

²正会員 株式会社巴コーポレーション (〒104-0054 東京都中央区勝どき4-5-17 勝どき泉ビル)
E-mail:ta_sakai@tomoe-corporation.co.jp

³伊藤忠テクノソリューションズ株式会社 科学システム事業部 (〒100-6080 東京都千代田区3-2-5 霞が関ビル)
E-mail:noriyuki.kubo@ctc-g.co.jp

⁴セントラルコンサルタント株式会社 東京事業本部 橋梁部 (〒104-0042 東京都中央区入船1-4-10)
E-mail:iumeihara@central-con.co.jp

⁵株式会社オリエンタルコンサルタンツ SC事業本部 (〒151-0071 東京都渋谷区本町3-12-1)
E-mail:kimura-jn@oriconsal.com

⁶フェロー 宇都宮大学大学院 工学研究部 (〒321-8585 宇都宮市陽東7-1-2)
E-mail:akinorin@cc.utsunomiya-u.ac.jp

近年、コンクリート床版と鋼桁を組み合わせた合成桁を始めとした、鋼とコンクリートの複合構造物が盛んに建設されている。鋼とコンクリートの接合部材として各種ずれ止めが提案されており、押抜きせん断試験により1個あたりの設計せん断耐力として定められている。

しかし、各種ずれ止めを配置間隔など構造細目に従って一定の区間や面積に配置した場合において性能を比較している事例はみられない。そのため本稿では、各種ずれ止めのせん断耐力やせん断力－ずれ変位関係を相互に比較し、考察を行う。

Key Words : stud shear connector, PBL, block shear connector, shear force – slip relation

1. 目的

鋼コンクリート複合構造に用いる各種ずれ止めのうち、広く普及しているものとして「頭付きスタッド」、「孔あき鋼板ジベル」、「ブロックジベル（馬蹄形ジベル）」があり、その設計せん断耐力やせん断力－ずれ変位関係式の定式化も行われている。

それらは各ずれ止めの要素試験で求められた結果をもとに定められており、その結果から剛なジベルや柔なジベルと分類される場合もある。しかし、各種ずれ止めを実際の構造物に適用する際は、配置間隔等の制約があるため、全体的なせん断耐力は1個あたりのせん断耐力とは異なる特性を示すことが予想される。

さらに、性能照査設計への適用を考えると複合構造の種類によらず要素試験による結果からせん断力等を判断することに疑問が生じる。そこで2009年制定複合構造標準示方書（土木学会）¹⁾に規定される各種ずれ止め形式

のせん断力－ずれ変位関係を相対的に比較し関係性を明らかにしていく。

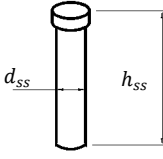
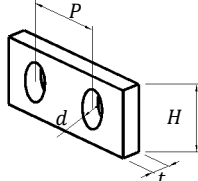
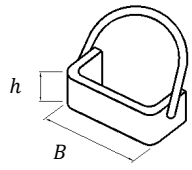
2. 比較検討

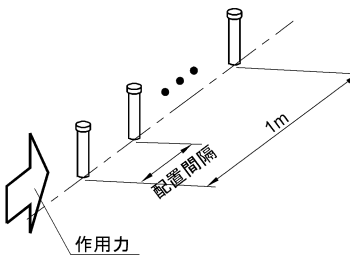
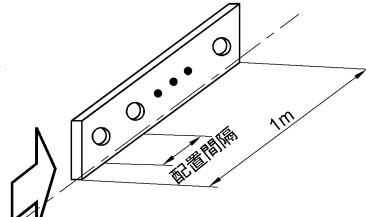
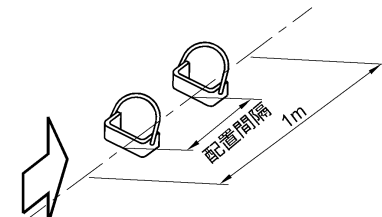
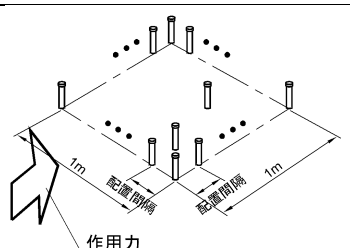
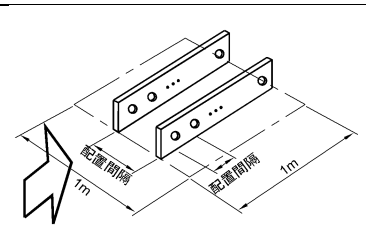
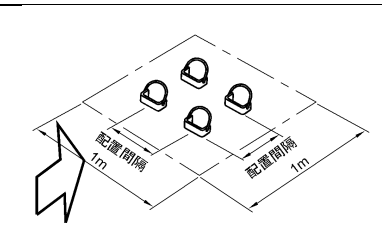
以下の項目に従って配置した各種ずれ止めの「一方向荷重に対するせん断力（V）－ずれ変位（ δ ）関係」（以下、V－ δ 関係）について使用限界範囲を含めて比較するものとした。

- ① ずれ止め1個あたりのV－ δ 関係
- ② 一定の大きさの荷重に対して必要なずれ止め個数
- ③ 作用力方向の1mに配置した1列あたりのV－ δ 関係
- ④ 1m²あたりに配置した場合のV－ δ 関係

なお、②の一定の大きさの荷重については、ブロック

表－１ せん断力－ずれ変位関係と選定形状

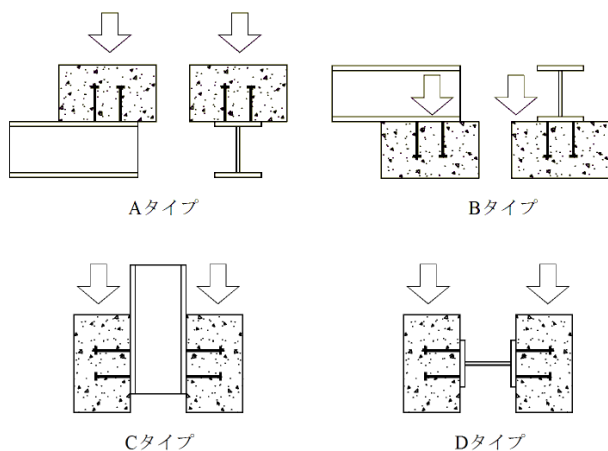
	頭付きスタッド (STUD)	孔あき鋼板ジベル (PBL)	ブロックジベル																																																						
ずれ変位式	$V_{ss} = V_{ssud} (1 - e^{-\alpha \delta_{ss}/d_{ss}})^{\beta}$ V_{ss} : 頭付きスタッド 1 本あたりのせん断力 V_{ssud} : 頭付きスタッド 1 本の設計せん断耐力 δ_{ss} : 頭付きスタッド位置における鋼板とコンクリートの相対ずれ変位 d_{ss} : 頭付きスタッドの軸径 α, β : 係数 ($\alpha=60, \beta=0.8$) 	<u>貫通鉄筋を有する場合</u> $0 \leq \delta_{ps} \leq \delta_{ps0}$ $V_{ps} = V_{psud} (1 - e^{-\alpha \delta_{ps}/\phi})^{\beta}$ $\delta_{ps0} \leq \delta_{ps} \leq \delta_{psu}$ $V_{ps} = V_{psud} (1 - e^{-\alpha \delta_{ps0}/\phi})^{\beta} + V_{psud} \left\{ \frac{2}{15} \left(1 - \frac{\delta_{ps}}{\delta_{ps0}} \right) \right\}$ $\alpha = \frac{50}{(d/t)} \beta = \frac{1}{3}$ <u>貫通鉄筋を有さない場合</u> $0 \leq \delta_{ps} \leq \delta_{psu}$ $V_{ps} = V_{psud} (1 - e^{-\alpha \delta_{ps}/d})^{\beta}$ $\alpha = \frac{500}{(d/t)} \beta = \frac{1}{3}$ 	$V_{bs} = V_{bsud} (1 - e^{-\alpha \delta_{bs}/B})^{\beta}$ V_{bs} : ブロックジベル 1 個あたりのせん断力 V_{bsud} : ブロックジベル 1 個あたりの設計せん断耐力 δ_{bs} : 相対ずれ変位 B : 馬蹄形の鋼板の前面の幅 h : 馬蹄形の鋼板の前面の高さ α, β : 係数 ($\alpha=60, \beta=0.8$) 																																																						
	設計せん断耐力式	$V_{ssud} = \left(31 A_{ss} \sqrt{(h_{ss}/d_{ss}) f'_{cd}} + 10000 \right) / \gamma_b$ あるいは $V_{ssud} = A_{ss} f_{ssud} / \gamma_b$ のうち小さい方を用いる。 A_{ss} : 頭付きスタッドの断面積 h_{ss} : 頭付きスタッドの高さ f_{ssud} : 頭付きスタッドの設計引張強度 (440N/mm²) f'_{cd} : コンクリートの設計圧縮強度 (36N/mm²) γ_b : 部材係数 (1.3)	<u>貫通鉄筋を有する場合</u> $V_{psud} = (1.85A - 26.1 \times 10^3) / \gamma_b$ $A = \frac{\pi(d^2 - \phi^2)}{4} f'_{cd} + \frac{\pi\phi^2}{4} f'_{ud}$ ただし, $40.1 \times 10^3 \leq A \leq 383.3 \times 10^3$ <u>貫通鉄筋を有さない場合</u> $V_{psud} = (4.31A - 39.0 \times 10^3) / \gamma_b$ $A = \frac{\pi d^2}{4} \left(\frac{t}{d} \right)^{1/2} f'_{cd}$ ただし, $17.3 \times 10^3 \leq A \leq 152.4 \times 10^3$ f'_{cd} : コンクリートの設計圧縮強度 (36N/mm²) f'_{ud} : 貫通鉄筋の設計引張強度 (180N/mm²) γ_b : 部材係数 (1.3)	$V_{bsud} = (f'_{ad} A_{ab} + \mu f_{ryd} A_r) / \gamma_b$ あるいは $V_{bsud} = (f'_{ad} A_{ab} + f'_{cd} \phi B) / \gamma_b$ のうち小さい方を用いる。 f'_{ad} : 馬蹄形の鋼板前面の設計支圧強度 $f'_{ad} = \eta_b f'_{cd}$ η_b : 係数 (45) f'_{cd} : コンクリートの設計圧縮強度 (36N/mm²) μ : 輪形筋の破壊と馬蹄形の鋼板前面のコンクリート支圧破壊が同時に生じないことを考慮した係数 f_{ryd} : 輪形筋の設計引張降伏強度 (235N/mm²) A_{ab} : 馬蹄形の鋼板の支圧面積 $= Bh$ A_r : 斜めに取り付けた輪形筋の断面積の 2 倍 $= \pi \phi^2 / 2$ ϕ : 斜めに取り付けた輪形筋の直径 γ_b : 部材係数 (1.3)																																																					
終局ずれ変位式	$\delta_{ssu} = 0.3 \times d_{ss}$ δ_{ssu} : 終局ずれ変位	<u>貫通鉄筋を有する場合</u> $\delta_{psu} = 2.5 \delta_{ps0}$ <u>貫通鉄筋を有さない場合</u> $\delta_{psu} = 0.006 \left(\frac{d}{t} \right) d$ δ_{psu} : 終局ずれ変位 δ_{ps0} : 最大せん断力時のずれ変位 $\delta_{ps0} = 0.067 \left(\frac{d}{t} \right) \phi$	$\delta_{bsu} = h/12$ δ_{bsu} : 終局ずれ変位																																																						
選定形状	<table><tr><td></td><td>d_{ss}</td><td>h_{ss}</td></tr><tr><td>最大形状 (STUDmax)</td><td>22</td><td>200</td></tr><tr><td>最小形状 (STUDmin)</td><td>19</td><td>100</td></tr></table>		d_{ss}	h_{ss}	最大形状 (STUDmax)	22	200	最小形状 (STUDmin)	19	100	<u>貫通鉄筋を有する場合</u> <table><tr><td></td><td>H</td><td>d</td><td>t</td><td>P</td><td>ϕ</td></tr><tr><td>最大形状 (PBLmax)</td><td>100</td><td>80</td><td>16</td><td>130</td><td>22</td></tr><tr><td>最小形状 (PBLmin)</td><td>100</td><td>40</td><td>12</td><td>120</td><td>13</td></tr></table> <u>貫通鉄筋を有さない場合</u> <table><tr><td></td><td>H</td><td>d</td><td>t</td><td>P</td></tr><tr><td>最大形状 (PBLmax)</td><td>100</td><td>60</td><td>16</td><td>100</td></tr><tr><td>最小形状 (PBLmin)</td><td>100</td><td>35</td><td>12</td><td>95</td></tr></table>		H	d	t	P	ϕ	最大形状 (PBLmax)	100	80	16	130	22	最小形状 (PBLmin)	100	40	12	120	13		H	d	t	P	最大形状 (PBLmax)	100	60	16	100	最小形状 (PBLmin)	100	35	12	95	<table><tr><td></td><td>B</td><td>h</td><td>ϕ</td></tr><tr><td>最大形状 (ブロックジベルmax)</td><td>260</td><td>60</td><td>28</td></tr><tr><td>最小形状 (ブロックジベルmin)</td><td>180</td><td>50</td><td>16</td></tr></table>		B	h	ϕ	最大形状 (ブロックジベルmax)	260	60	28	最小形状 (ブロックジベルmin)	180	50	16
	d_{ss}	h_{ss}																																																							
最大形状 (STUDmax)	22	200																																																							
最小形状 (STUDmin)	19	100																																																							
	H	d	t	P	ϕ																																																				
最大形状 (PBLmax)	100	80	16	130	22																																																				
最小形状 (PBLmin)	100	40	12	120	13																																																				
	H	d	t	P																																																					
最大形状 (PBLmax)	100	60	16	100																																																					
最小形状 (PBLmin)	100	35	12	95																																																					
	B	h	ϕ																																																						
最大形状 (ブロックジベルmax)	260	60	28																																																						
最小形状 (ブロックジベルmin)	180	50	16																																																						

比較項目	頭付きスタッド (STUD)	孔あき鋼板ジベル (PBL)	ブロックジベル																																																																										
③ (1mあたり1列に配置)	 <table> <tr> <th></th><th>配置間隔 (mm)</th><th>個数</th></tr> <tr> <td>STUDmax</td><td>110</td><td>9.1</td></tr> <tr> <td>STUDmin</td><td>600</td><td>1.7</td></tr> </table>		配置間隔 (mm)	個数	STUDmax	110	9.1	STUDmin	600	1.7	 <table> <tr> <th>貫通鉄筋</th><th></th><th>配置間隔 (mm)</th><th>個数</th></tr> <tr> <td rowspan="2">あり</td><td>PBLmax</td><td>130</td><td>7.7</td></tr> <tr> <td>PBLmin</td><td>110</td><td>9.1</td></tr> <tr> <td rowspan="2">なし</td><td>PBLmax</td><td>100</td><td>10.0</td></tr> <tr> <td>PBLmin</td><td>95</td><td>10.5</td></tr> </table>	貫通鉄筋		配置間隔 (mm)	個数	あり	PBLmax	130	7.7	PBLmin	110	9.1	なし	PBLmax	100	10.0	PBLmin	95	10.5	 <table> <tr> <th></th><th>配置間隔 (mm)</th><th>個数</th></tr> <tr> <td>ブロックジベルmax</td><td>500</td><td>2.0</td></tr> <tr> <td>ブロックジベルmin</td><td>500</td><td>2.0</td></tr> </table>		配置間隔 (mm)	個数	ブロックジベルmax	500	2.0	ブロックジベルmin	500	2.0																																						
	配置間隔 (mm)	個数																																																																											
STUDmax	110	9.1																																																																											
STUDmin	600	1.7																																																																											
貫通鉄筋		配置間隔 (mm)	個数																																																																										
あり	PBLmax	130	7.7																																																																										
	PBLmin	110	9.1																																																																										
なし	PBLmax	100	10.0																																																																										
	PBLmin	95	10.5																																																																										
	配置間隔 (mm)	個数																																																																											
ブロックジベルmax	500	2.0																																																																											
ブロックジベルmin	500	2.0																																																																											
④ (1m ² あたりに配置)	 <table> <tr> <th></th><th colspan="2">作用力方向</th><th colspan="2">作用力直角方向</th></tr> <tr> <th></th><th>配置間隔 (mm)</th><th>個数</th><th>配置間隔 (mm)</th><th>個数</th></tr> <tr> <td>STUDmax</td><td>110</td><td>9.1</td><td>52</td><td>19.2</td></tr> <tr> <td>STUDmin</td><td>600</td><td>1.7</td><td>600</td><td>1.7</td></tr> </table>		作用力方向		作用力直角方向			配置間隔 (mm)	個数	配置間隔 (mm)	個数	STUDmax	110	9.1	52	19.2	STUDmin	600	1.7	600	1.7	 <table> <tr> <th>貫通鉄筋</th><th></th><th colspan="2">作用力方向</th><th colspan="2">作用力直角方向</th></tr> <tr> <th></th><th></th><th>配置間隔 (mm)</th><th>個数</th><th>配置間隔 (mm)</th><th>個数</th></tr> <tr> <td rowspan="2">あり</td><td>PBLmax</td><td>130</td><td>7.7</td><td>300</td><td>3.3</td></tr> <tr> <td>PBLmin</td><td>110</td><td>9.1</td><td>300</td><td>3.3</td></tr> <tr> <td rowspan="2">なし</td><td>PBLmax</td><td>100</td><td>10.0</td><td>300</td><td>3.3</td></tr> <tr> <td>PBLmin</td><td>95</td><td>10.5</td><td>300</td><td>3.3</td></tr> </table>	貫通鉄筋		作用力方向		作用力直角方向				配置間隔 (mm)	個数	配置間隔 (mm)	個数	あり	PBLmax	130	7.7	300	3.3	PBLmin	110	9.1	300	3.3	なし	PBLmax	100	10.0	300	3.3	PBLmin	95	10.5	300	3.3	 <table> <tr> <th></th><th colspan="2">作用力方向</th><th colspan="2">作用力直角方向</th></tr> <tr> <th></th><th>配置間隔 (mm)</th><th>個数</th><th>配置間隔 (mm)</th><th>個数</th></tr> <tr> <td>ブロックジベルmax</td><td>500</td><td>2.0</td><td>500</td><td>2.0</td></tr> <tr> <td>ブロックジベルmin</td><td>500</td><td>2.0</td><td>500</td><td>2.0</td></tr> </table>		作用力方向		作用力直角方向			配置間隔 (mm)	個数	配置間隔 (mm)	個数	ブロックジベルmax	500	2.0	500	2.0	ブロックジベルmin	500	2.0	500	2.0
	作用力方向		作用力直角方向																																																																										
	配置間隔 (mm)	個数	配置間隔 (mm)	個数																																																																									
STUDmax	110	9.1	52	19.2																																																																									
STUDmin	600	1.7	600	1.7																																																																									
貫通鉄筋		作用力方向		作用力直角方向																																																																									
		配置間隔 (mm)	個数	配置間隔 (mm)	個数																																																																								
あり	PBLmax	130	7.7	300	3.3																																																																								
	PBLmin	110	9.1	300	3.3																																																																								
なし	PBLmax	100	10.0	300	3.3																																																																								
	PBLmin	95	10.5	300	3.3																																																																								
	作用力方向		作用力直角方向																																																																										
	配置間隔 (mm)	個数	配置間隔 (mm)	個数																																																																									
ブロックジベルmax	500	2.0	500	2.0																																																																									
ブロックジベルmin	500	2.0	500	2.0																																																																									

図－1 ③、④の配置状態

ジベル個数が1個以下にならない実設計で想定しうる範囲の荷重とし5MNとした。また、③・④の配置方法は、文献1)で定める、最大・最小配置間隔をもとに決定している。また、最大形状(max)あるいは最小形状(min)とは、配置するずれ止め個数が最も多い場合あるいは最も少ない場合である。

比較に使用した具体的な形状については、文献1)に定める制約事項の範囲内で実構造物において多用されている



※ 矢印はコンクリートの打設方向を示す。

図－2 スタッドのタイプ

と判断したものの中から最大・最小となる形状を著者らが選定した。表－1にせん断力－ずれ変位関係式、設計せん断耐力式、選定形状等を示す。

馬蹄形鋼板前面の設計支圧強度算出に係る係数(η_b)について、今回の検討では断面を定義していないことから最大値(4.5)を用いた。

また、比較項目③の1mあたり1列に配置した状態と④の1m²あたりに配置した状態を図－1に示す。ブロックジベルの配置については作用力方向、作用力直角方向の最大・最小間隔の規定がないため、標準としている500mm間隔とした。

3. 使用限界範囲の設定

比較に際しては、実際に使用される範囲を考慮する必要がある。文献1)において使用限界としているのは残留変位が0.1mm程度となるような範囲としている。

このことから残留ずれ変位が0.1mm程度となるせん断力について、以下の通り定められている。

なお3. (1)のタイプは図－2に示す頭付きスタッドに対するコンクリート打設方向を示す。

(1) スタッド (STUD)

$$V_{ss}' = 0.5V_{ssud} \quad (\text{A, Dタイプ}) \quad \text{——(1)}$$

$$V_{ss}' = 0.3V_{ssud} \quad (\text{Cタイプ}) \quad \text{——(2)}$$

$$V_{ss}' = 0.43V_{ssud} \quad (\text{Bタイプ}) \quad \text{——(3)}$$

V_{ss}' : 使用限界状態におけるせん断力

V_{ssud} : スタッド 1 本の設計せん断耐力

(2) 孔あき鋼板ジベル (PBL)

1) 貫通鉄筋を有する場合

$$V_{ps}' = 0.33V_{psud} \quad \text{——(4)}$$

V_{ps}' : 使用限界状態におけるせん断力

V_{psud} : PBL 孔 1 個の設計せん断耐力

2) 貫通鉄筋を有さない場合

実験等を実施して残留変位を適切に定める必要がある。

(3) ブロックジベル

$$V_{bs}' = \left(\frac{2}{5}\right)V_{bsud} \quad \text{——(5)}$$

V_{bs}' : 使用限界状態におけるせん断力

V_{bsud} : ブロックジベル 1 個の設計せん断耐力

式(1)～(5)及び表－1に示す関係を用いて、各種ずれ止めについて使用限界時のずれ止め1個あたりのせん断力及びずれ変位を算出すると表－2に示すような結果となる。

表－2 使用限界時のせん断力とずれ変位 (1個あたり)

		せん断力 (N)	ずれ変位 (mm)
STUDmax	式(1)	64 325	0.20
	式(2)	38 595	0.09
	式(3)	55 320	0.16
STUDmin	式(1)	47 977	0.17
	式(2)	28 786	0.08
	式(3)	41 260	0.14
PBLmax	式(4)	157 667	0.29
PBLmin		35 751	0.12
ブロックジベルmax	式(5)	858 240	1.66
ブロックジベルmin		477 692	1.15

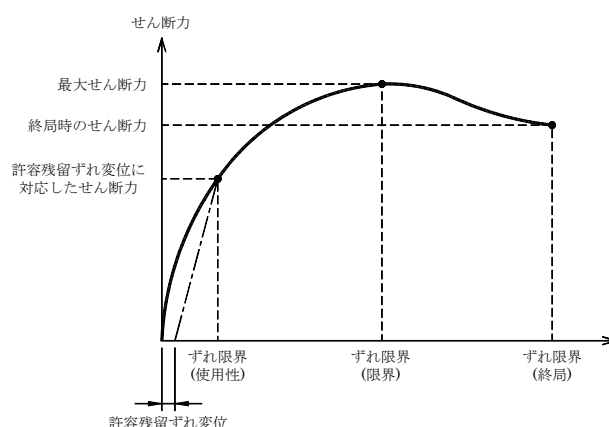
表－2の結果から分かるとおり、ずれ変位は最小で0.08mm、最大で1.66mmとなっている。

使用性に関する照査としては、使用時の一体性を確保するために、使用時に顕著な残留変位が生じないことを照査するため、各種ずれ止めとも図－3に示すように残留変位が急激に大きくなる点として残留変位0.1mm程度を目安としている。

しかし、残留変位が0.1mm程度になるものとして与えられたせん断力式(1)～(5)により使用限界ずれ変位 (除荷前) を求めると、頭付きスタッドにおいて式(2)では0.1mmを下回り、孔あき鋼板ジベルはほぼ変わらない値もみられた。

この結果から、本検討における使用限界時のずれ変位については、頭付きスタッドの最大・最小形状とも式(1)～(3)で最も小さい値である0.1mmとし、孔あき鋼板ジベル、ブロックジベルについては表－2の値を用いる。

なお貫通鉄筋を有さない孔あき鋼板ジベルについては定義されていなかったため、今回の比較では貫通鉄筋を有するものと同じ式を用いることとした。



図－3 ずれ止め限界の概念

4. 比較検討

(1) ずれ止め1個あたりのV－δ関係

図－4にずれ止め1個あたりのV－δ関係（比較項目①）を示す。

1) ずれ止め毎のせん断耐力

せん断耐力の各種ずれ止めの最大形状 (max) に対する最小形状 (min) の比 (最小/最大) は、頭付きスタッド (STUD) が75%、貫通鉄筋を有する孔あき鋼板ジベル (PBL鉄筋あり) が23%、貫通鉄筋を有さない孔あき鋼板ジベル (PBL鉄筋なし) が26%、ブロックジベルが60%となった。

このことから、ずれ止め毎の最大形状と最小形状に対するせん断耐力は、貫通鉄筋を有する孔あき鋼板ジベルが最も差が大きく、逆に頭付きスタッドは差が小さいこ

とがわかった。

2) セン断耐力に対する全ずれ止めでの比較

せん断耐力を全ずれ止めと比較すると、ブロックジベル最大形状が最も大きくこれを100%とすると、ブロックジベル最小形状が60%、貫通鉄筋を有する孔あき鋼板ジベル最大形状が17%、貫通鉄筋を有さない孔あき鋼板ジベルが9%、頭付きスタッド最大形状が8%、頭付きスタッド最小形状が6%、貫通鉄筋を有する孔あき鋼板ジベル最小形状が4%、貫通鉄筋を有さない孔あき鋼板ジベル最小形状が2%となっており、1個あたりでみたせん断耐力はブロックジベルが非常に大きいことがわかった。

3) ずれ止め毎の終局ずれ変位

各種ずれ止めの最大形状に対する最小形状の比について最大せん断力に達したときの終局ずれ変位を比較すると、頭付きスタッドが86%、貫通鉄筋を有する孔あき鋼板ジベルが43%、貫通鉄筋を有さない孔あき鋼板ジベルが45%、ブロックジベルが84%それぞれ小さくなる結果となり、貫通鉄筋を有する孔あき鋼板ジベルで最も差が大きいことがわかった。

頭付きスタッドやブロックジベルの差が80%台であるのに対し、孔あき鋼板ジベルは貫通鉄筋の有無に限らず40%台となり、形状により終局ずれ変位に違いがあった。

なお、各ずれ止めの終局ずれ変位は表-1に示す値を用いている。貫通鉄筋を有する孔あき鋼板ジベルでは、例えば、図-7に示すようにせん断力-ずれ変位関係の劣化領域の点を終局ずれ変位としているが、その他のずれ止めでは最大せん断力時を終局ずれ変位としている。

4) 終局ずれ変位に対する全ずれ止めの比較

さらに終局ずれ変位を全ずれ止めの最大形状について比較すると、貫通鉄筋を有する孔あき鋼板ジベルが最も大きくこれを100%とすると、頭付きスタッドが38%、ブロックジベルが29%、貫通鉄筋を有さない孔あき鋼板ジベルが8%とそれぞれ小さくなっている。

貫通鉄筋を有する孔あき鋼板ジベルは他のずれ止めと比較して、非常に大きな終局ずれ変位を有しており、貫通鉄筋を有する孔あき鋼板ジベルの最小形状についても、頭付きスタッド最大形状を12%上回る結果で、貫通鉄筋を有する孔あき鋼板ジベルの終局ずれ変位は他のずれ止めに比べ大きいことがわかった。

孔あき鋼板ジベル同士について最大形状の貫通鉄筋の有無で比較すると、貫通鉄筋を有する方が非常に大きく、鉄筋がコンクリートのひび割れによる早期の耐力劣化を防いでいることがわかった。

ブロックジベルは最大せん断力到達後の劣化領域を考

慮していないため、他のずれ止めと比較して最大せん断力到達後のずれ変位の伸びは見られない。

5) 使用限界における比較

図-4に示したV- δ 関係においてずれ変位の小さい範囲を拡大して使用限界範囲内で表示したものを図-5に示す。使用限界の範囲については3.で述べた通りである。

使用限界時のせん断力を比較すると、ブロックジベルを100%とすると貫通鉄筋を有する孔あき鋼板ジベル最大形状の18%となり、せん断耐力における比較で得られた17%とほぼ同じ値となった。

その他、ブロックジベル最小形状が56%、貫通鉄筋を有さない孔あき鋼板ジベル最大形状が13%、頭付きスタッド最大形状が4%、そして頭付きスタッド最小形状と貫通鉄筋を有さない孔あき鋼板ジベルが最小形状が3%となっており、ブロックジベル最大・最小形状とも使用限界時においても非常に大きなせん断力を有していることがわかった。

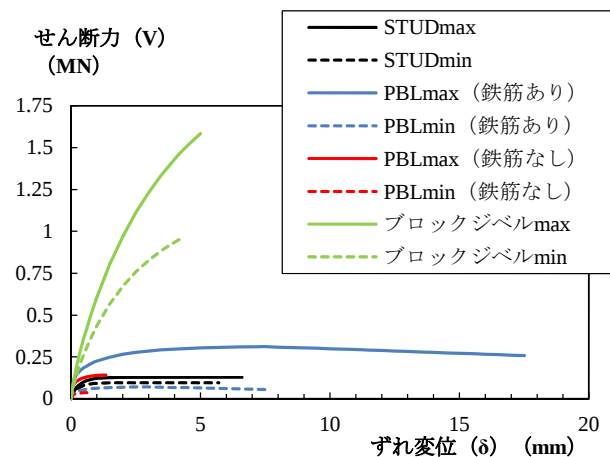


図-4 ① V- δ 関係 (1個あたり)

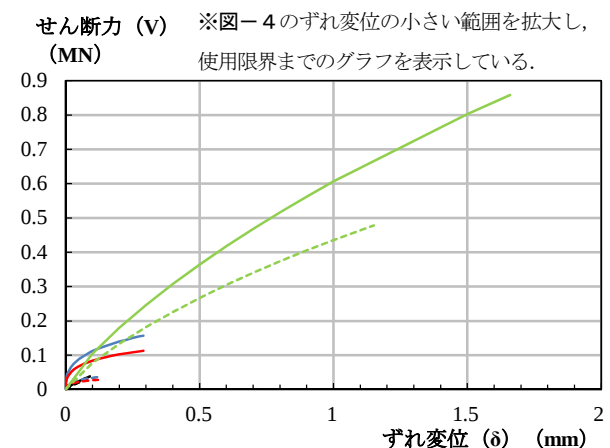


図-5 ①V- δ 関係 (1個あたり)

(2) 一定の大きさの荷重に対して必要なずれ止め個数

図-6に荷重5MNあたりに必要なずれ止め個数(比較項目②)を示す。孔あき鋼板ジベルの個数は、孔数を示しリブ高さ、厚さ、孔間隔は変化させないものとした。個数の算定は、荷重5MNを設計せん断耐力で除することにより求めた。

貫通鉄筋を有さない孔あき鋼板ジベル最小形状が最も必要個数が多い。次いで、貫通鉄筋を有する孔あき鋼板ジベル最小形状が52%に低減する。孔あき鋼板ジベルの最大形状についても貫通鉄筋を有するものに対して有さないものが46%に低減され半分近く個数を低減できることがわかった。貫通鉄筋が有する孔あき鋼板ジベルでは、最大形状に対して最小形状の個数が23%に低減、同様に貫通鉄筋を有さないものでは26%に低減していた。

頭付きスタッドについては、最小形状に対して最大形状が75%に低減していた。孔あき鋼板ジベルに比べて形状による個数の変化が少ないことがわかる。ブロックジベルについては最大形状が2.3個と、最も個数の多い貫通鉄筋を有さない孔あき鋼板ジベルに対して29%に低減されていた。孔あき鋼板ジベルや頭付きスタッドよりも荷重が作用する方向に対して一定の支圧面積を有していることにより設計せん断耐力が大きくなっていることによるものである。

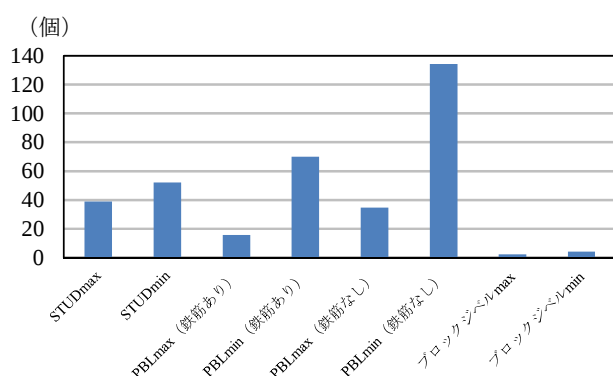


図-6 ② 5MNあたりに必要なずれ止め個数

(3) 作用力方向に1mに配置した1列あたりのV-δ関係

図-7にずれ止めを1列に1m区間配置した場合のV-δ関係(比較項目③)を示す。頭付きスタッドについては2列以上で配置することが規定されているが、今回は比較のため1列配置としている。

1) ずれ止め毎のせん断耐力

各種ずれ止めの最大形状に対する最小形状の比は、頭付きスタッドが14%, 貫通鉄筋を有する孔あき鋼板ジベルが26%, 貫通鉄筋を有さない孔あき鋼板ジベルが27%, ブロックジベルが60%となりそれぞれ小さくなっていた。各ずれ止めの最大形状と最小形状の差は、頭付きスタッ

ドが最も大きい。

①の比較では、最大形状と最小形状の差が大きいのは貫通鉄筋を有する孔あき鋼板ジベルであったが、②の比較では頭付きスタッドが大きくなっており配置の設定により変化したものである。

2) せん断耐力に対する全ずれ止めでの比較

せん断耐力は、①の比較と変わらずブロックジベルの最大形状が最大でありこれを100%とすると、貫通鉄筋を有する孔あき鋼板ジベル最大形状が63%, ブロックジベル最小形状が60%, 貫通鉄筋を有さない孔あき鋼板ジベル最大形状が45%, 頭付きスタッド最大形状が37%, 貫通鉄筋を有する孔あき鋼板ジベル最小形状が16%, 貫通鉄筋を有さない孔あき鋼板ジベル最小形状が12%, 頭付きスタッド最小形状が5%となりそれぞれ小さくなっていた。①の比較ではブロックジベルの最大・最小形状が他のずれ止めよりもせん断耐力は大きい。しかし、③の比較ではブロックジベル最小形状を貫通鉄筋を有する孔あき鋼板ジベル最大形状が上回る結果となった。

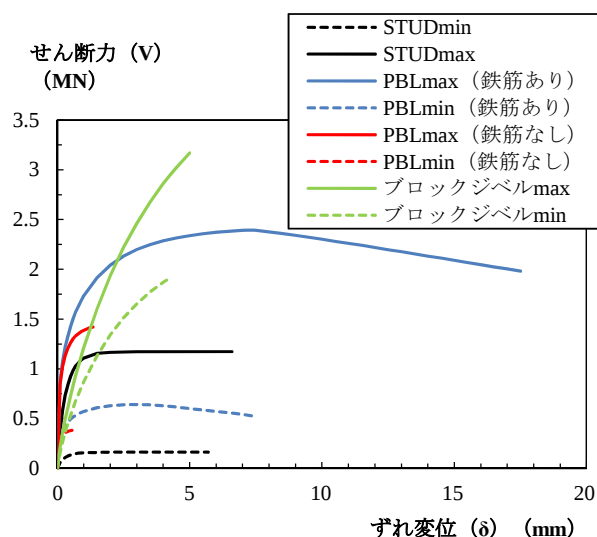


図-7 ③ V-δ関係(1列1mあたり)

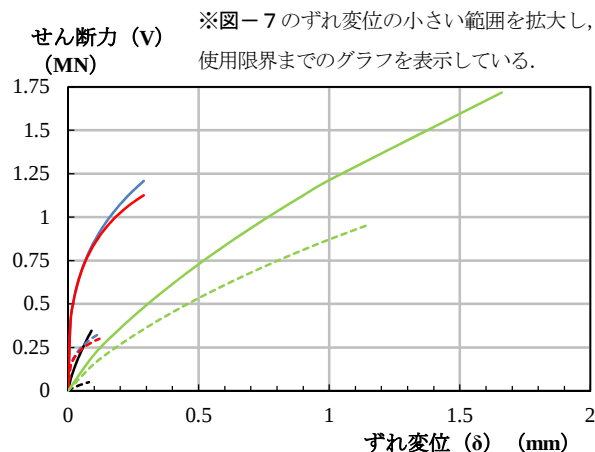


図-8 ③ V-δ関係(1列1mあたり)

3) 使用限界による比較

図-8に、図-7のずれ変位の小さい範囲を拡大して表示したものを示す。使用限界の範囲におけるせん断力は①の比較同様にブロックジベル最大形状が最大となっている。これを100%として、貫通鉄筋を有する孔あき鋼板ジベル最大形状が70%、貫通鉄筋を有さない孔あき鋼板ジベル最大形状が66%、ブロックジベル最小形状が56%、頭付きスタッド最大形状及び貫通鉄筋を有する孔あき鋼板ジベル最小形状が19%、頭付きスタッド最小形状が3%となっていた。

①の比較では、ブロックジベル最大・最小形状が他と比較して大きなせん断力を有していたものの、③では鉄筋の有無に関わらず孔あき鋼板ジベルのせん断力がブロックジベル最小形状を超える結果となった。

また、ブロックジベルは終局ずれ変位のまでグラフの傾きが①では非常に大きかったが、②では他の多くのずれ止めより小さくなっていた。これはブロックジベルの配置個数が少ないためである。

(4) 1㎡あたりに配置した場合のV-δ関係

図-9に、1㎡あたりに配置した場合のV-δ関係(比較項目④)を示す。

1) ずれ止め毎のせん断耐力

せん断耐力の各種ずれ止めの最大形状に対する最小形状の比は、頭付きスタッドが1%、貫通鉄筋を有する孔あき鋼板ジベルが26%、貫通鉄筋を有さない孔あき鋼板ジベルが27%、ブロックジベルが60%となりそれぞれ小さくなっている。最小形状と最大形状の差は、頭付きスタッドの差が最も大きいのは③と同様であるが、その差はさらに大きくなった。

2) せん断耐力に対する全ずれ止めでの比較

せん断耐力は①、③と異なり、頭付きスタッド最大形状が最大であった。これを100%として貫通鉄筋を有する孔あき鋼板ジベル最大形状が29%、ブロックジベル最大形状が28%、貫通鉄筋を有さない孔あき鋼板ジベル最大形状が21%、ブロックジベルの最小形状が17%、貫通鉄筋を有する孔あき鋼板ジベル最小形状が8%、貫通鉄筋を有さない孔あき鋼板ジベル最小形状が6%、そして頭付きスタッドが1%それぞれ小さくなっていた。

最大せん断力は、頭付きスタッドの最大形状が最も大きく、最小形状が最も小さい結果となっていた。そのため、頭付きスタッドが最も構造選定の自由度が高いと言える。ただし、孔あき鋼板ジベルの孔が多段配置することによりこの傾向が変わることも考えられる。

3) 使用限界での比較

図-10に、図-9のずれ変位の小さい範囲を拡大して表示したものを示す。使用限界時のせん断力においても、頭付きスタッド最大形状が最も大きく、これを100%として貫通鉄筋を有する孔あき鋼板ジベル最大形状が61%、貫通鉄筋を有さない孔あき鋼板ジベル最大形状が57%、ブロックジベル最大形状が52%、ブロックジベル最小形状が29%、貫通鉄筋を有する孔あき鋼板ジベルが最小形状が17%、貫通鉄筋を有さない孔あき鋼板ジベルが15%となりそれぞれ小さくなっていた。使用限界の範囲内でも頭付きスタッド最小形状が最も低いせん断力となっていた。

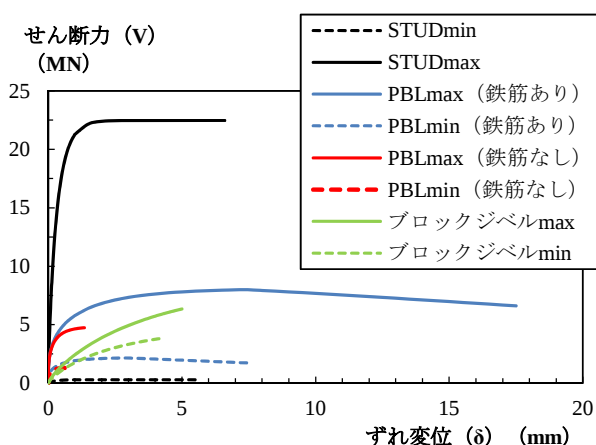


図-9 ④ V-δ関係(1㎡あたり)

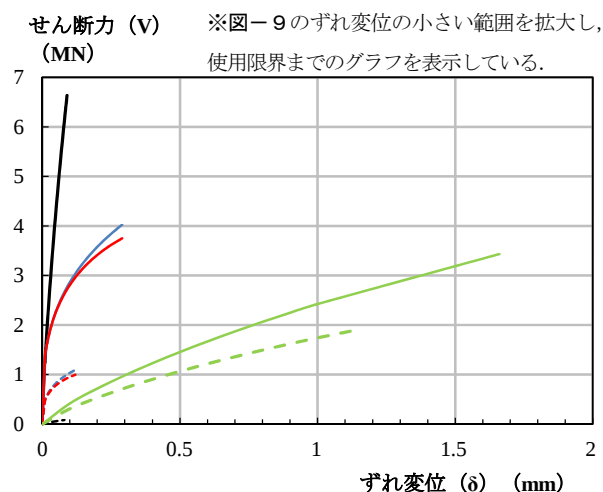


図-10 ④ V-δ関係(1㎡あたり)

5. まとめ

本稿では、一般に用いられるずれ止めのV-δ関係やせん断耐力を比較することにより各種ずれ止めの関係を明らかにすることができた。今回、得られた知見を以下にまとめる。

・文献1)では使用限界範囲について、顕著な残留変位が生じない0.1mm程度となるように除荷前のずれ変位を定めており、概ね0.1～0.2mm程度となったが一部に0.1mmを下回る結果も見られた。

・せん断耐力が①の1個あたりの比較では大きなせん断力を持つブロックジベルも、④の比較では孔あき鋼板ジベルや、頭付きスタッドよりも小さい値となっていた。

このように、大きなせん断耐力を持つずれ止めも、配置可能な間隔を考慮すると、必ずしも大きなせん断耐力を有するものではない。

設計せん断耐力は、要素試験から得られた結果であり、それをもとに「剛なジベル」や「柔なジベル」と表現されているが、実配置を考えればそうではないことがわかる。

・④の比較では、せん断耐力及び使用限界時のせん断力も、他ずれ止めと比較して頭付きスタッドが最大値と最小値を示していた。

このことから、今回行った比較においては頭付きスタッドが最も構造選定の自由度が高いと言える。

・全体の比較を通して、頭付きスタッドや孔あき鋼板ジベルは最大せん断力到達までグラフの傾きが急であり初期剛性が大きいことがわかる。

・最大・最小形状とも終局ずれ変位が最も大きかったのは貫通鉄筋を有する孔あき鋼板ジベルであり、鉄筋の作用であると考えられる。

今回行った検討では、一定の区間、面積で制約に従って配置したものであり、それら配置可能な個数をせん断力に乗じて「せん断力ーずれ変位関係」を算出している。現在の設計においても、ずれ止め個数でせん断力を評価している。

しかし、複合構造においては合成桁橋や複合ラーメン橋、ポータルラーメン橋といった様々な構造があり、ただ単純に個数でせん断耐力を算出し、その構造が荷重ーずれ変位関係と一致することは考えにくいのではないだろうか。実際、作用力に対するずれ止めの配置や数、拘束度などにより要素試験によって得られた設計せん断耐力を満足しない場合も起こっている²⁾。

今後、性能照査設計への適用を考えると使用限界、修復限界、終局限界といった限界状態を構造毎に求められることが必要だと考える。

謝辞：本検討は、鋼橋技術研究会にて行ったものであり、貴重なご助言を頂いた研究会各位に感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) 土木学会 複合構造委員会：2009年制定複合構造標準示方書，2009.12.
- 2) 芦塚，宮田，坂手，木曾，栗田：直接基礎を有する鋼ポータルラーメン橋の設計と剛結部構造の合理化，構造工学論文集，pp.936-945, Vol.53A, 2007.3.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（Ⅱ鋼橋編），2002.3.
- 4) 国土交通省監修 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説，2009.7.
- 5) NEXCO：設計要領第二集，2009.7.
- 6) 土木学会：鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物，1997.9.
- 7) 日本橋梁建設業協会：複合橋梁の概要，2007.4.
- 8) 保坂，光木，平城，牛島，渡辺：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回学術年次講演会，I-A261, 2000.9.
- 9) 明橋，永田，大水，西川：コンクリートの打設方向を考慮した孔あき鋼板のせん断強度特性に関する実験的研究，鋼構造論文集，第8巻第31号，pp.81-87, 2001.9.
- 10) 赤尾，栗田，平城：頭付きスタッドの押し抜き挙動に及ぼすコンクリートの打ち込み方向の影響，土木学会論文集，第380号/I-7, pp.311-320, 1987.4.
- 11) 鈴木，阿部，平城，児島，橘：軽量骨材コンクリートを用いたずれ止めのせん断特性に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.50A, pp.1165-1172, 2004.3.
- 12) 田中，皆川，小泉，上田：混合橋梁接合部の縮小模型供試体による実験的研究，第5回複合構造の活用に関するシンポジウム論文集，pp.329-334, 2003.11.
- 13) 鋼橋技術研究会：鋼コンクリート複合構造研究部会報告書（複合ラーメン橋の剛結部の実例に基づいた設計資料），TECHNICAL REPORT/No.071, 2009.7.
- 14) 園田，手嶋：3次元弾塑性 FEM による孔あき鋼板ジベルの設計式に関する基礎的考察，応用力学論文集，Vol.11, pp.283-290, 2008.8.
- 15) 小関，橋本，中島，鈴木：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38回土木学会関東支部技術研究発表会，I-47, 2011.3.
- 16) 大口，酒井，梅原，久保，木村，中島：せん断力ーずれ変位関係に着目した各種ずれ止め形式の比較，土木学会第66回年次学術講演会，CS2-024, 2011.9.

Comparison of shear force- slip relation in various shear connector considering each structural details.

Shinji OHGUCHI, Takeshi SAKAI, Noriyuki KUBO, Ikuhiro UMEHARA
Atsushi KIMURA, and Akinori NAKAJIMA

Recently, many steel-concrete hybrid structures including the composite girder with the steel girder and the RC slab have been constructed. In these structures, the various shear connectors are employed and their design shear resistances are usually obtained by conducting the push-out test. But, in the push-out test, the design shear resistance generally corresponds to the resistance of a shear connector. Then, the shear resistance of shear connectors arranged along the finite length and in the finite area according to the structural details such as spacing is required to confirm. In this paper, the shear resistance and shear force-slip relation of several types of shear connectors are compared with each other.