

## 鋼管充填モルタルジベルのせん断耐力に関する実験的研究

三井住友建設(株) 正会員 ○浅井 洋  
 三井住友建設(株) 正会員 篠崎 裕生  
 三井住友建設(株) 正会員 工修 三加 崇  
 三井住友建設(株) 正会員 工修 竹之井 勇

Abstract : This paper describes about performance of steel-concrete joint method with mortal filled steel tube connectors. The authors developed the equation that evaluates the shear strength of the high strength connector filled mortar to steel tube. This equation is given by adding up strength of mortar and strength of steel tube. However, it is possible to apply to the connector about 50mm in diameter or less. Moreover, if load on a connector is adjusted to 1/3 or less of the share strength, the slip displacement of it will be below 0.1mm.

Key words : Connector , Shear strength , Slip displacement

### 1. 目的

プレストレストコンクリート橋の合理的な構造形式の追求によって、波形鋼板ウェブPC橋やPC複合トラス橋、PC複合斜張橋などの複合構造が適用されている。鋼とコンクリートとの複合構造は、引張に強い鋼と圧縮に強いコンクリートの長所を活かし、単一材料で得られない優れた構造や部材を創造することができる。この優れた性能を発揮するためには、鋼とコンクリートとの一体化が重要である。高いせん断力が作用する部位では、多くのずれ止めを配置する必要がある、コンクリートの充填不良が懸念される。頭付きスタッドジベルとともに多用されている孔あき鋼板ジベルの耐荷力増加を図るには、鋼板孔径や貫通鉄筋径の増大、およびコンクリートの高強度化などが考えられる。しかしながら、接合部はコンクリート部材と一緒に施工されることが一般的であり、構造部材として必要以上の高強度化は不経済である。また、粘性の高いコンクリートが鋼板孔内に充填されたことを確認するのも容易ではない。そこで、著者らはあらかじめ高強度モルタルや鋼管充填モルタルの円柱ジベルを製作し、コンクリート打込前に鋼板孔内に設置するジベルの研究を進めている<sup>1), 2)</sup>。本稿では、円筒鋼管に各種モルタルを充填したジベル（以下、鋼管充填モルタルジベル）による接合方法について二面せん断試験を行い、せん断耐力や降伏せん断耐力、残留ずれ変位について検討し、実用化するための算定式を提案する。

### 2. 試験の概要

ジベルのせん断耐力評価方法は、図-1に示す頭付きスタッドジベルのせん断耐力を実験的に評価する方法として用いられる押抜き試験<sup>3)</sup>によった。鋼板厚は16mmで、直径53mmの孔を設け、モルタル製または鋼管にモルタルを充填した円柱状のジベルを鋼板孔に挿入してコンクリ

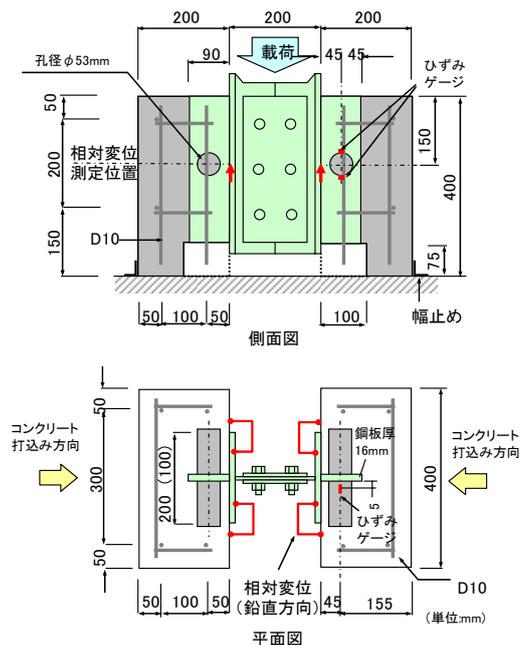


図-1 試験体形状

ートに埋め込み一体化する。ジベルの標準長さは200mmである。コンクリートと鋼板との付着を小さくする目的でコンクリートに埋め込まれる鋼板表面にグリースを塗布した。試験体下面と底板との間に石こうを敷いてなじみを取り、試験体外側に水平方向の開きを防止する幅止め (L形鋼) を設けた。ジベルの荷重方向にコンクリートの脆弱部が生じないように図に示す方向からコンクリートを打ち込んだ。ジベルは鋼板孔内面の荷重側に接触するように配置して隙間をエポキシ樹脂で充填した。周囲コンクリートの圧縮強度は38~50N/mm<sup>2</sup>であり、D10鉄筋で補強している。ジベルの種類を表-1に示す。本稿では、普通強度モルタル使用試験体 (NC, CFT6) , 小径試験体 (HC2, UFC4, CFT5) , 鋼板孔とジベルとの間に遊間を設けた試験体 (CFT7, CFT8, CFT9) , およびジベル長を標準長さの半分とした試験体 (UFC3, CFT3) を実施した。また、既往の研究<sup>1),2)</sup>で実施した試験体についても示している。

3. 試験結果および考察

3.1 最大せん断荷重

(1) モルタルジベル

φ52mmモルタルジベルのせん断荷重とずれ変位の関係を図-2に示す。ずれ変位が1mm程度に達するまでに最大耐力を示し、圧縮強度が大きいジベルほど最大耐力が大きくなっている。最大耐力後の荷重低下でジベルは破壊したと考えられ、ずれ変位が大きく増加する。試験後のジベルには、写真-1

表-1 試験体および試験結果一覧

記号	ジベルの形状	直径 (mm)	モルタル強度 (N/mm <sup>2</sup> )	鋼管厚 (mm)	コンクリート強度 (N/mm <sup>2</sup> )	備考/参考文献	最大せん断力 Vuex (kN)	鋼管降伏荷重 Vyex (kN)	0.1mm 除荷前荷重 (kN)	
N	無	-	-	-	50	鋼板孔無 <sup>1)</sup>	48	-	-	
NC	モルタル	52	73	-	43	普通強度	188	-	162	
HC1		52	115	-	50	高強度 <sup>1)</sup>	236	-	115	
HC2		34	120	-	43	小径ジベル	125	-	119	
HFC		52	142	-	50	繊維補強 <sup>1)</sup>	189	-	146	
HC+SP		52	115	-	50	周囲スパイラル補強 <sup>1)</sup>	259	-	213	
HC+B		52	115	-	50	周囲支圧補強 <sup>1)</sup>	303	-	133	
UFC1		52	223	-	35	超高強度繊維補強 <sup>1)</sup>	331	-	209	
UFC2		52	213	-	39	超高強度繊維補強 <sup>2)</sup>	305	-	177	
UFC3		52	213	-	39	ジベル長100mm	311	-	172	
UFC4		34	193	-	43	小径ジベル	182	-	123	
UFC+SP		52	213	-	50	周囲スパイラル補強 <sup>1)</sup>	256	-	209	
UFC+G		52	213	-	50	周囲グリッド筋補強 <sup>1)</sup>	312	-	230	
CFT1		鋼管充填 モルタル	49	115	2.3	50	薄肉鋼管 <sup>1)</sup>	358	339	182
CFT2			49	129	3.5	39	厚肉鋼管 <sup>2)</sup>	461	367	149
CFT3	49		129	3.5	39	ジベル長100mm	456	399	153	
CFT4	61		129	3.2	39	大径ジベル <sup>2)</sup>	491	381	164	
CFT5	34		101	2.3	38	小径ジベル	249	231	158	
CFT6	49		73	3.5	41	普通強度	443	349	149	
CFT7	49		129	3.5	39	隙間0.2mm	458	385	170	
CFT8	49		129	3.5	39	隙間1.0mm	445	368	163	
CFT9	49		129	3.5	39	隙間2.0mm	447	355	30	
CFT+SP	49		115	2.3	50	周囲スパイラル補強 <sup>1)</sup>	408	352	149	

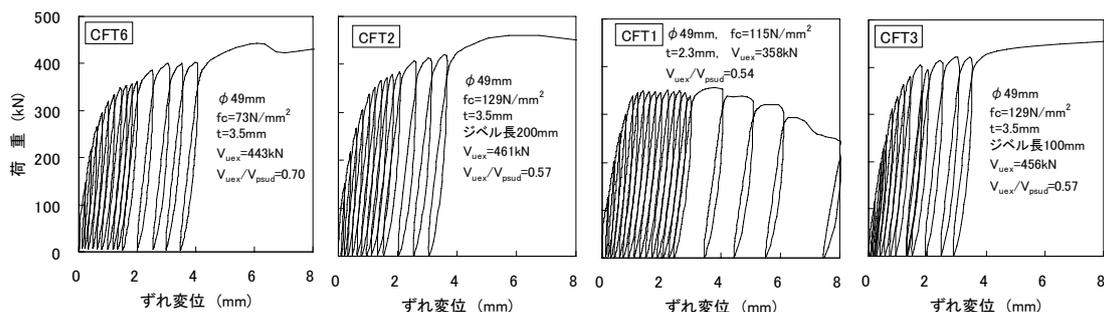


図-2 モルタルジベルのせん断荷重とずれ変位の関係

に示す鋼板面に沿った破壊が観察された。φ52mmモルタルジベルの圧縮強度と最大せん断力との関係を図-3に示す。モルタルジベル周囲にスパイラル筋やグリッド筋を設けて補強した試験体は無補強に比べて耐力が高い傾向が認められる。一方、超高強度繊維補強モルタルでは顕著な傾向は認められない。貫通鉄筋を有さない孔あき鋼板ジベルの耐力式<sup>4)</sup>による値と実験値とは、圧縮強度が大きい領域で一致していない。そこで、梁のせん断耐力式<sup>5)</sup>を参考にしてコンクリートの圧縮強度の1/3乗とジベル断面積との積に比例するものとして、モルタルジベルのせん断強度を式(1)で表した。ジベルは鋼板の表裏2断面で抵抗するものとしている。縦軸との切片は、鋼板とコンクリートとの摩擦力である。本稿では鋼板孔の無いN試験体のずれ変位が1mmにおける荷重(30×10<sup>3</sup>N)を摩擦力として用いた。係数はHFCを除く試験体を満足するように決定した。HFCはHC1の配合に鋼繊維を混入した試験体であるがHC1より耐力が小さい。図-1に示す4箇所のをずれ変位を比較すると均等に変位が生じていないことから、荷重の偏りが影響していると考えられる。

$$V_u = \left( 9.0A_c \cdot \sqrt[3]{f_c} \right) \times 2 + V_{fr} \tag{1}$$

ここに、 $V_u$  : ジベルのせん断耐力(N)、 $A_c$  : モルタルジベルの断面積(mm<sup>2</sup>)

$f_c$  : ジベルのモルタル強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $V_{fr}$  : 鋼板とコンクリートとの摩擦力

(2) 鋼管充填モルタルジベル

鋼管充填モルタルジベルの耐力低下後は写真-1に示す変形を示し、さらに荷重を続けると鋼板面に沿って破壊した。コンクリートには微細なひび割れが認められた。図-4に鋼管充填モルタルジベルの荷重とずれ変位の関係を示す。CFT6とCFT2は同寸法の鋼管であり、内部に充填したモルタル強度が異なる。高強度モルタルを使用したCFT2の耐力は、普通強度のモルタルを使用したCFT6の耐力より大きく、充填モルタル強度は鋼管充填モルタルジベルの耐力に寄与している。CFT1とCFT2は、充填モルタルの強度と鋼管外径が同じで、鋼管厚の異なるジベルである。CFT1の最大耐力はCFT2の0.78倍であり、鋼管断面積比0.68より若干高い値を示した。このように、鋼管充填モルタルジベルの最大せん断力は、モルタル強度や鋼管断面積に影響を受ける。鋼管を同じ断面積の棒鋼として孔あき鋼板ジベル

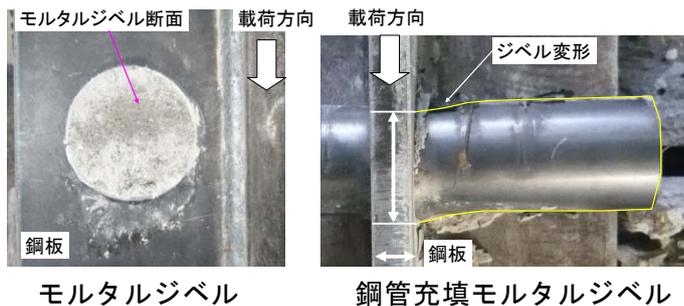


写真-1 ジベルの破壊形状

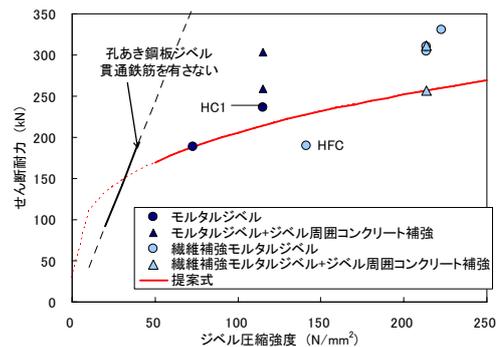


図-3 圧縮強度とせん断耐力の関係

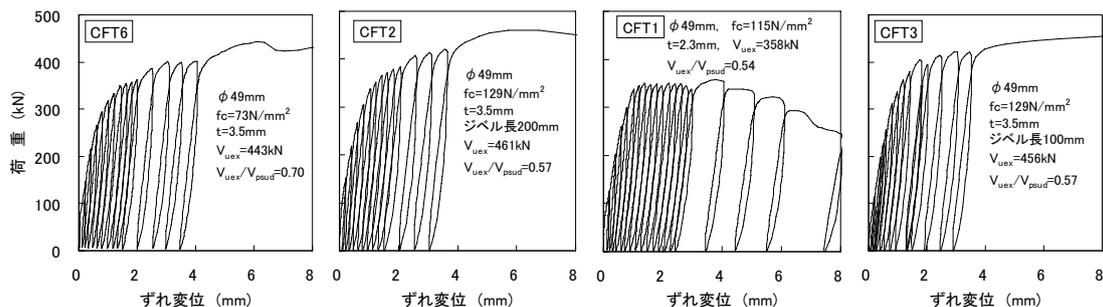


図-4 鋼管充填モルタルジベルの荷重とずれ変位の関係

ルの耐力式<sup>4)</sup>を適用した値と実験値との比 ( $V_{uex}/V_{psud}$ ) を図中に示した。実験値は計算値より大幅に小さい。そこで、鋼管充填モルタルジベルのせん断耐力をモルタルジベル耐力と鋼管のせん断耐力との和として式(2)で表した。モルタルジベルが1mm以下で最大せん断力を示すのに対し、鋼管充填モルタルジベルのずれ変位は4mm前後まで荷重が増加する。鋼管に充填したモルタルは鋼管に拘束されることにより変形に対して耐力を維持できるものとして両者の耐力の和で表した。Von Misesの降伏条件によれば、せん断降伏強さは引張降伏強さの $1/\sqrt{3}$ 倍で示される。鋼管のせん断強さと引張強さも同じ割合と仮定し、鋼管の全断面で抵抗するものとした。

$$V_u = \left( 9.0A_c \cdot \sqrt[3]{f_c} + \frac{A_{st} \cdot f_{stu}}{\sqrt{3}} \right) \times 2 + V_{fr} \quad (2)$$

ここに、 $A_{st}$  : 鋼管断面積、 $f_{stu}$  : 鋼管引張強度

図-5は、モルタルジベルおよび鋼管充填モルタルジベルの最大せん断力と計算値とを比較した結果である。計算値と実験値との関係はよく一致しており、本式によってジベル耐力を評価できることがわかる。

### 3.2ジベル寸法の影響

図-5ではφ61mmジベル(CFT4)の最大せん断力は計算耐力より小さい。ジベル径の異なるCFT2およびCFT5と比較してもφ61mmジベルだけが計算値に対して小さい。この原因として、鋼管によるモルタルの拘束効果が小径のものより小さく、内部モルタルの強度と鋼管強度の和として算出できないことも考えられる。例えば、モルタルの破壊が先行した後、鋼管の破壊が進行するなどの現象が考えられる。拘束の程度は、鋼管厚が厚くなれば大きくなり、鋼管直径が大きくなるほど拘束効果は小さくなると思われる。鋼管直径Dと鋼管厚 $t_t$ との比( $D/t_t$ )とせん断耐力の実験値と計算値の比( $V_{uex}/V_u$ )との関係を図-6に示す。CFT4の $D/t_t$ はCFT5に比べて大きい。さらに大きいCFT1で $V_{uex}/V_u$ が1.0を越えており、拘束効果の影響は明確に判断できない。また、相対的に試験体寸法が小さくなり、高いジベル耐力により、周囲コンクリートがひび割れて損傷する程度も大きくなるのが原因の一つに考えられる。太径ジベルについては試験体寸法を含めた検討が必要と考える。ジベルの長さが200mmと100mmの結果を図-2および図-4に示す。最大せん断力は表-1に示すようにUFC3はUFC2の1.02倍、CFT3はUFC2の0.99倍であり、同等のせん断耐力を有している。これより、ジベルの長さはさらに短くできる可能性を示唆している。

### 3.3降伏せん断荷重

鋼管充填モルタルジベルが降伏する荷重は、モルタルが負担する荷重と鋼管が降伏する荷重との和として式(3)で表した。鋼管が降伏するときモルタル部分はモルタルジベル単体の最大せん断力の85%に達しているとした。鋼管のせん断降伏強度は引張降伏強度の $1/\sqrt{3}$ 倍とした。

$$V_y = \left\{ 0.85 \times 9.0A_c \cdot \sqrt[3]{f_c} + \frac{A_{st} \cdot f_{sty}}{\sqrt{3}} \right\} \times 2 + V_{fr} \quad (3)$$

ここに、 $V_y$  : 鋼管充填モルタルジベルの降伏せん断耐力、 $f_{sty}$  : 鋼管の引張降伏強度

図-7に鋼管充填モルタルジベルの降伏荷重と本式による計算値との関係を示す。ジベルの降伏荷重は、鋼管表面で測定したひずみが降伏ひずみに達したときの荷重で、鋼管の降伏ひずみは材料引張

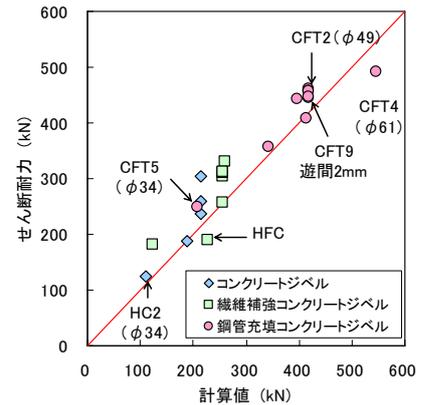


図-5 せん断耐力の比較

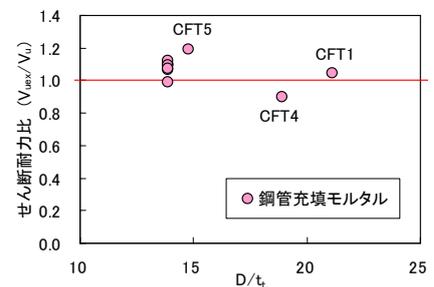


図-6 D/t\_tによる比較

試験より得られた値である。鋼管降伏荷重は、φ61mmジベル(CFT4)を除き計算値を超えており、太径ジベルを除き本式で算出できると言える。

### 3.4 残留変位0.1mm除荷前荷重

図-8に除荷する前の荷重と除荷したときの残留ずれ変位との関係を示す。スタッドジベルの場合、残留ずれ変位が急激に大きくならず小さく抑えるための残留ずれ変位は0.1mm程度とされている<sup>3)</sup>。モルタルジベルは、0.2mm程度を越えると残留変位が大きくなり始め、0.5mm程度で除荷前荷重が最大値を示す。ジベルの破壊により、それ以降の残留変位の増加が著しくなり、除荷前荷重は低下する。鋼管充填モルタルジベルは0.1~0.2mmを超えると徐々に残留変位が増加するが、0.5mmを超えても除荷前荷重は低下せず増加し続けており、ジベルが完全に分断されていないためと推察される。この関係から残留変位が0.1mmに達するときの除荷前荷重を算出し、最大せん断力 $V_{uex}$ の1/3倍との関係を図-9に示す。ジベルに作用するせん断力をせん断耐力の1/3以下で使用することで、残留ずれ変位は0.1mm程度に抑えることができる。CFT4は、鋼管外径が61mmとしたジベルで計算値より若干小さい。CFT9は鋼板孔とジベルとの間に2.0mmの遊間を設けて設置した試験体で、0.1mm除荷前荷重が $1/3V_{uex}$ より大幅に小さい。図-10に遊間と0.1mm除荷前荷重との関係を示す。鋼板孔とジベルとの遊間が1.0mmを超えると残留ずれ変位に与える影響が大きくなる。この結果より、残留ずれ変位を小さく抑えるためには、荷重を $1/3V_u$ 以下とし、鋼板との遊間を1.0mm以下に抑える必要がある。

### 3.5 せん断荷重とずれ変位の関係

複数のジベルを配列する場合には、せん断荷重とずれ変位の関係を考慮して各々のジベルに作用する荷重分担を決定する必要がある。式(4)は鋼管断面積を同等の断面積を有する貫通棒鋼に換算し、孔あき鋼板ジベルの荷重とずれ変位の関係式<sup>4)</sup>を適用した算定式である。ここで、 $V_u$ は式(2)より算出した値である。代表的な試験体の荷重とずれ変位の関係を図-11に示す。ジベル直径がφ61mmであるCFT4や鋼板孔とジベルとの遊間が大きいCFT9を除けばよく一致しており、本式を用いることができる。CFT9は、初期のずれ変位量は大きいですが、表-1および図-5に示すようにせん断耐力は遊間0mm(CFT2)と同程度であり、遊間がせん断耐力に及ぼす影響は小さいと考えられる。

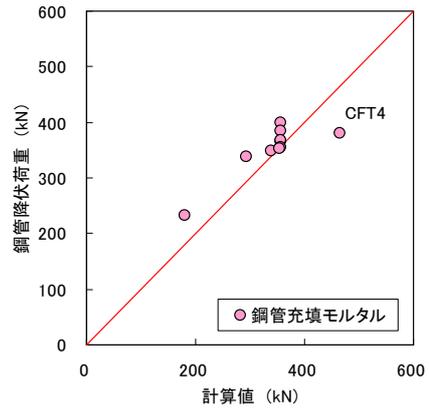


図-7 降伏荷重と計算値の比較

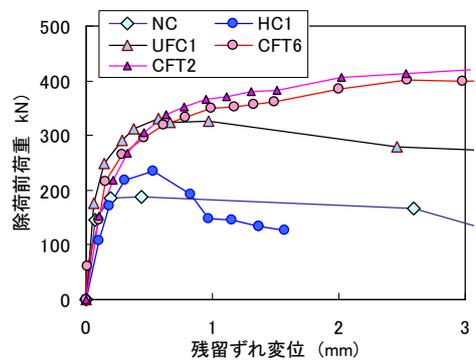


図-8 除荷前荷重と残留ずれ変位

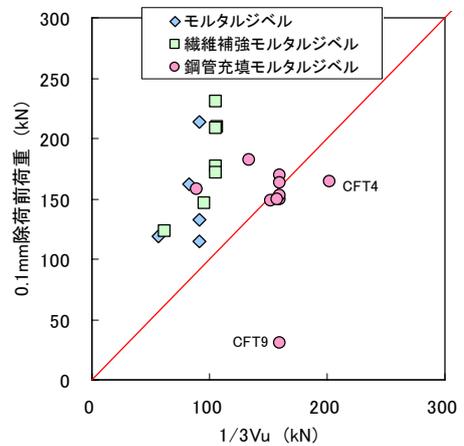


図-9 0.1mm 除荷前荷重と  $1/3V_{uex}$  比較

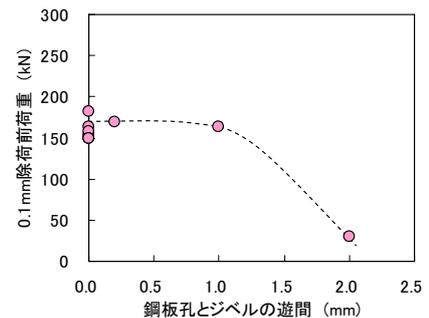


図-10 ジベル遊間の影響

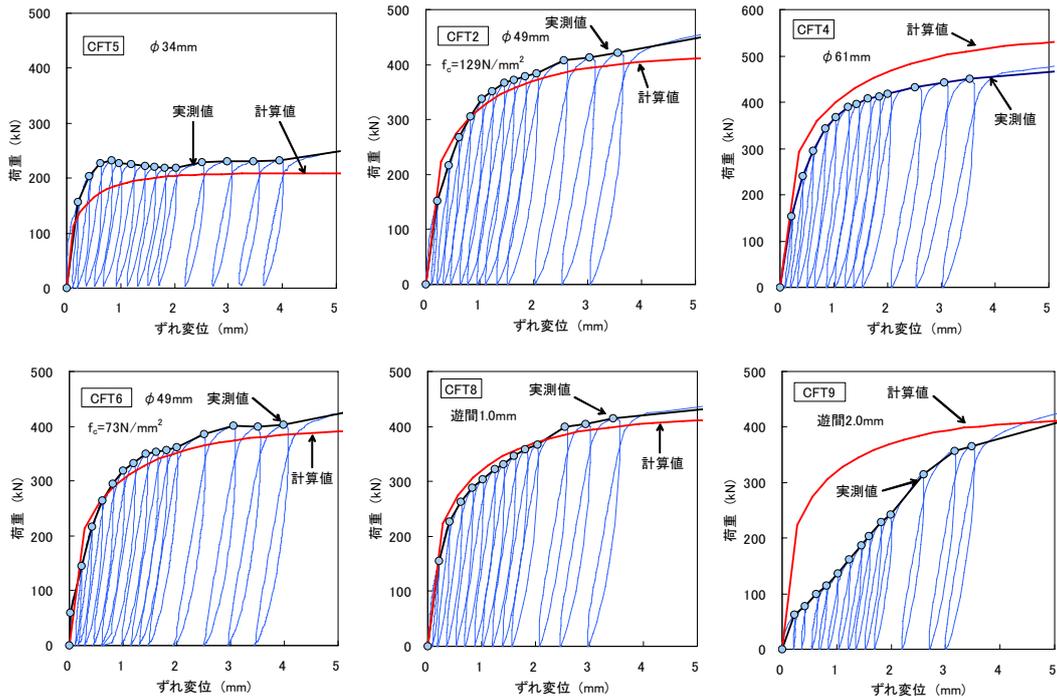


図-1-1 荷重とずれ変位の関係

$$V = V_u \{1 - \exp(-\alpha\delta/\phi)\}^\beta \quad (0 \leq \delta \leq \delta_o) \quad (4)$$

ここに、 $\delta$  : ずれ変位,  $\delta_o$  : 最大せん断力時のずれ変位  $\delta_o = 0.067(d/t)\phi$ ,  $\alpha$  : 係数  $\alpha = 50/(d/t)$

$d$  : 鋼板孔径,  $t$  : 鋼板厚,  $\phi$  : 棒鋼換算径  $\phi = \sqrt{4A_{st}/\pi}$ ,  $\beta$  : 係数  $\beta = 1/3$

#### 4. まとめ

直径約50mm以下の鋼管充填モルタルジベルについて、以下の結果が得られた。

- (1) 鋼管充填モルタルジベルのせん断耐力は、モルタルジベル耐力と鋼管のせん断耐力の和で算出することができる。
- (2) 降伏せん断耐力は、モルタルジベル耐力の85%と鋼管の降伏耐力の和で算出することができる。
- (3) ジベルに作用する荷重がせん断耐力の3分の1以下であれば、残留変位は0.1mm以下に抑えることができる。その際、鋼板孔とジベルとの遊間を1mm以下に抑える必要がある。
- (4) せん断荷重とずれ変位の関係は、鋼管断面積を棒鋼径に換算し、提案するせん断耐力式を用いることで、従来の孔あき鋼板ジベルの関係式が適用できる。

#### 参考文献

- 1) 浅井洋, 篠崎裕生, 竹之井勇, 三加崇 : 高強度コンクリートジベルを用いた鋼・コンクリート接合方法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 2, pp. 1237-1242, 2010
- 2) 竹之井勇, 篠崎裕生, 三加崇, 浅井洋 : 高強度コンクリートジベルを用いた鋼・コンクリートの接合方法に関する基礎的研究, 第19回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム, pp. 49-54, 2010
- 3) 日本鋼構造協会 : 頭付きスタッドの押抜き試験方法 (案) とスタッドに関する研究の現状, JSSCテクニカルレポートNo. 35, pp. 1-8, 1996
- 4) 土木学会 : 2009年制定複合構造標準示方書, pp. 59-67, 2009
- 5) 土木学会 : 2007年制定コンクリート標準示方書 [設計編], pp. 132-140, 2008