

## 報告 鋼パイプを用いた新型ずれ止め構造の実験的研究

山口 隆一<sup>\*1</sup>・古内 仁<sup>\*2</sup>・上田 多門<sup>\*3</sup>

要旨：本研究では孔あき鋼板ジベルに鋼パイプを挿入した新型ずれ止め構造の充填確認試験および押抜き載荷試験を実施した。その結果、本構造の充填性は問題なく、従来の孔あき鋼板ジベルと比較して優れたせん断伝達性能を有することを確認した。最大せん断力は鋼パイプの長さや厚さの影響を受け、最大せん断力が発生する時点の相対ずれ変位量は鋼パイプの長さの影響を受けることが明らかになった。また、鋼パイプに発生するひずみは、上縁下縁とも載荷過程において符号が逆転する挙動を示した。残留変位は最大荷重の58%～72%の間で急激に増加し、これは鋼パイプの下縁側のひずみが線形的な挙動から外れる段階と一致した。

キーワード：鋼パイプ、ずれ止め、孔あき鋼板ジベル、せん断伝達性能

### 1. はじめに

橋梁上部工における鋼桁とプレストレストコンクリート桁の接合部やラーメン橋脚部における上下部一体構造の接合部などの鋼・コンクリート複合構造は、設計上狭隘な箇所にずれ止め構造や鉄筋が数多く設置することが要求され、それらを配置および施工することが困難となる場合がある。また、配置できたとしてもコンクリートの確実な充填が困難となる場合がある。

これらの問題点を解決するため、ずれ止め1つあたりの受け持つせん断力を増加させ、構造を簡素化する手法が考えられ、従来からせん断伝達性能や疲労耐荷性能に優れた孔あき鋼板ジベルに関する数多くの研究<sup>1),2),3)</sup>が行われている。また、近年ではずれ止め構造の更なる高性能化を目的とした新しい形式のずれ止め構造に関する研究<sup>4)</sup>もなされ、著者らも写真-1に示すような孔あき鋼板ジベルにスリット入り鋼パイプを挿入したずれ止め構造（以下、新型ジベル）を提案した<sup>5)</sup>。



写真-1 新型ジベル挿入状況

本構造は従来の孔あき鋼板ジベルにおける孔部近傍のコンクリート部分に発生する局部応力に対して鋼パイプを挿入することでそれらを緩和し、最大耐力や変形性能などのせん断伝達性能の向上をねらった構造である。

鋼パイプの鉛直上側に設けられたスリットは、コンクリート打設時に巻き込んだ空気を抜き、かつ骨材をパイプ内部にも回り込ませることを目的としたものである。また、スリットを設けることで閉断面の時よりも円周方向に変形しやすくなることで孔あき鋼板への挿入が容易となる。更に、鋼パイプの外径を孔径よりも0.5mmほど大きく製作することで「はめ合い」効果によって打設時の振動に耐えうるよう堅固に孔あき鋼板に設置することが可能である。

本研究では、提案した新型ジベルのコンクリート充填確認試験を実施した後、鋼パイプの長さおよび厚さをパラメータとした押抜き載荷試験を実施し、せん断伝達性能の評価および従来の孔あき鋼板ジベルとの比較を行った。更に載荷試験終了後に試験体を切断し、その破壊性状を確認した。

### 2. 充填確認試験

#### 2.1 試験要領

充填確認試験は鋼板を木で、鋼パイプを塩ビ管で模擬した型枠に生コンクリートを打設し、硬化後にコンクリートカッターで切断して内部の充填状況を確認する方法とした。

コンクリート打設は夏季に実施し、呼び強度30N/mm<sup>2</sup>、スランプ8cm（荷卸し時のスランプは9.5cmであった）、最大骨材径20mmのものを市中の生コンプラントから供給した。打設時の状況を写真-2に示す。

\*1 株式会社IHI 基盤技術研究所 工修（正会員）

\*2 北海道大学大学院 工学研究科 助教 博士（工学）（正会員）

\*3 北海道大学大学院 工学研究科 教授 工博（正会員）



写真 - 2 打設時の状況

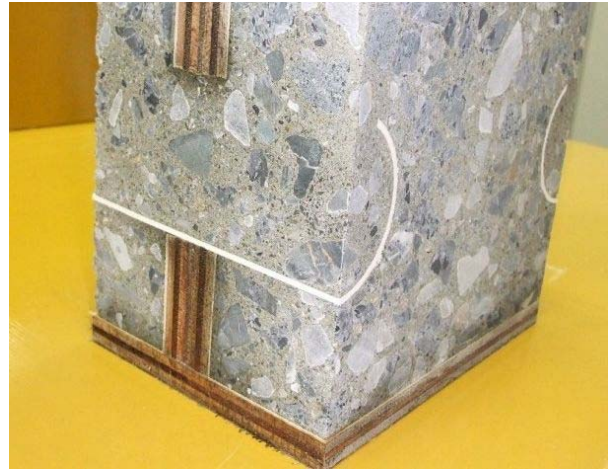


写真 - 3 充填状況

## 2.2 試験結果

コンクリートの打設中は写真 - 2 に示すように外径 60mm のパイプ内部をコンクリートが問題なく通過し、溢れ出す様子が確認された。

その後、コンクリート硬化後に躯体を切断し、内部の充填状況を確認したところ、写真 - 3 に示すようにパイプの内面および外面に接するコンクリート部分には目立った気泡は確認されず、新型ジベルのコンクリート充填性は問題ないことが確認できた。

また、本試験では最大骨材粒径を考慮してスリット幅を 30mm としたことによって、写真 - 3 に示すようにパイプ内部にも粗骨材が均一に分散し、材料分離しないことが確認できた。

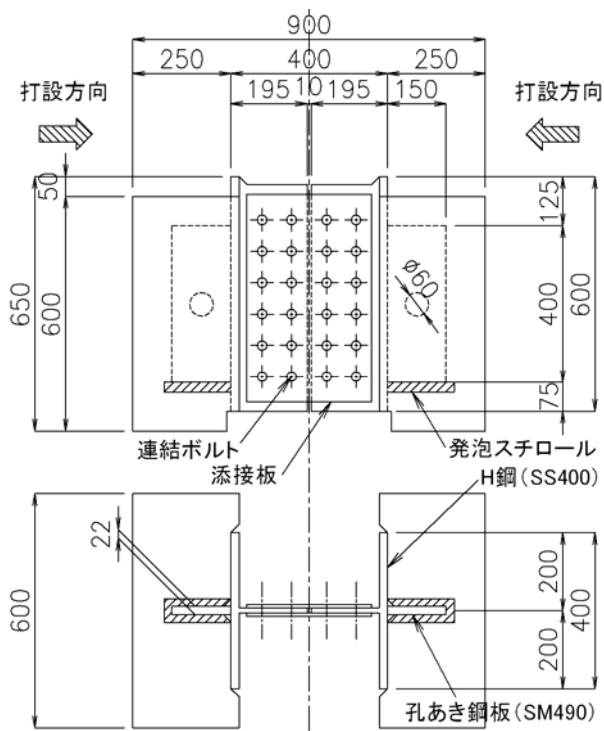


図 - 1 押抜き载荷用試験体の形状図

## 3. 押抜き载荷試験

押抜き载荷試験は、日本鋼構造協会「頭付きスタッドの押抜き試験方法（案）<sup>6)</sup>」を参考に実施した。

### 3.1 試験要領

#### (1) 試験体および実験パラメータ

図 - 1 に押抜き载荷用試験体の形状図を示す。

試験体は先ず、ウェブを切断した H 鋼 (SS400) に孔あき鋼板 (SM490) を溶接した。次に H 鋼のフランジ法線方向からコンクリートを打設することでブロックを製作した。その後、2 つのブロックを添接板と連結ボルトで締め付けることで押抜き载荷用試験体とした。ここで、孔あき鋼板の端面にはその部分での支圧抵抗を避けるため、発泡スチロールを配置した。また、鋼材とコンクリートの付着を除去するため、鋼パイプ以外の鋼材はセロハンを貼り付けた。押抜き载荷用試験体は全 7 体とし、全試験体ともコンクリート呼び強度は 30N/mm<sup>2</sup>、孔数は 1 個 / 1 ブロック、孔径は 60mm とした。

表 - 1 に実験パラメータを示す。実験パラメータは孔あき鋼板に挿入する鋼パイプ (STK400) の長さおよび厚さとした。ここで、鋼パイプの長さは孔径の 1,2,3 倍に孔あき鋼板厚の 22mm を加えた値とした。また、全試験体

表 - 1 実験パラメータ

| 試験体名 | ジベル種類   | パイプ長さ (mm) | パイプ厚さ (mm) |
|------|---------|------------|------------|
| C01  | 貫通鉄筋無し  | -          | -          |
| C02  | 貫通鉄筋*有り | -          | -          |
| C03  | 新型ジベル   | 82         | 3.2        |
| C04  |         | 142        |            |
| C05  |         | 202        |            |
| C06  | 新型ジベル   | 82         | 2.3        |
| C07  |         | 82         | 4.9        |

\* 貫通鉄筋は SD345,D13 とした。

ともスリットの幅は 30mm とし、スリットは H 鋼フランジと反対側に向けて設置した。さらに、比較のため従来の孔あき鋼板ジベル（貫通鉄筋の無いものと有るもの）も実施した。

(2) 測定項目および载荷方法

測定項目は载荷荷重、孔中心高さにおける鋼とコンクリートの相対ずれ変位量、孔あき鋼板および鋼パイプのひずみとした。载荷方法は 2000kN の油圧ジャッキを用いて H 鋼の軸方向に鉛直下向きに载荷した。荷重履歴は 1 孔あたりの作用せん断力が 250kN までは約 50kN ごとの漸増繰り返し载荷とし、その後は終局まで単調増加载荷とした。载荷装置を写真 - 4 に示す。

3.2 試験結果

(1) 結果一覧と作用せん断力 - 相対ずれ変位量関係

表 - 2 に全試験体の 1 孔あたりの最大せん断力  $Q_{max}$  と  $Q_{max}$  が発生する時点の相対ずれ変位量  $\delta_{max}$  を示す。また、全試験体の作用せん断力と相対ずれ変位量の関係を図 - 2 に示す。ここで、相対ずれ変位量は 4 隅で測定した変

位量がほぼ同値のため、それらの平均値とした。また、孔あき鋼板は孔部近傍に貼り付けたひずみゲージの値から全試験体で弾性範囲内であった。

(2) 従来の孔あき鋼板ジベルとの比較

図 - 2 の (a), (b) それぞれに従来の孔あき鋼板ジベルを用いた C01, C02 試験体の作用せん断力と相対ずれ変位量の関係（包絡線）を示す。これらより、貫通鉄筋の無い C01 試験体は 170.7kN でピーク荷重に達し、その直後脆性的な挙動を示してずれ止め構造としての耐力を失った。一方、貫通鉄筋のある C02 試験体は作用せん断力が最大の 195.9kN となった。ピーク後は C01 と異なり脆性的な挙動は示さなかったが相対ずれ変位量が 2mm を超えたあたりからせん断力が緩やかに低下した。

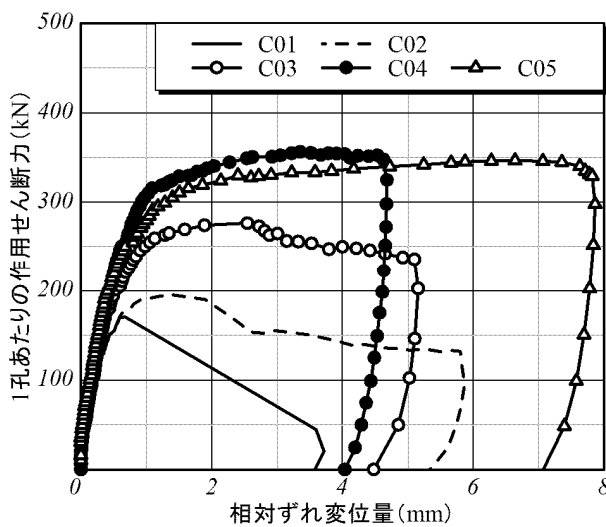
それに対し新型ジベルの最大せん断力は、C01 と比較して 1.6 倍 ~ 2.2 倍増加した。また、ピーク荷重時の相対ずれ変位量も大きく増加した。更にピーク荷重後の挙動は貫通鉄筋と同様に緩やかに低下するか若しくは最大せん断力を保持したまま変形量が増加する挙動を示した。



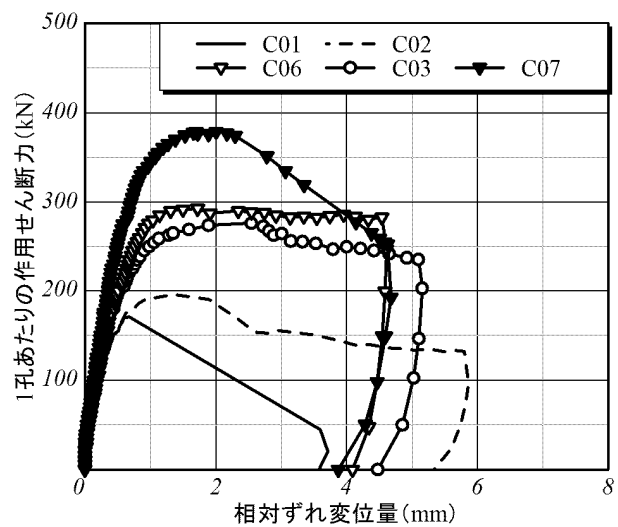
写真 - 4 载荷装置

表 - 2 結果一覧

| 試験体名 | 1 孔あたりの最大せん断力 $Q_{max}$ (kN) | $Q_{max}$ となる時点の相対ずれ変位量 $\delta_{max}$ (mm) |
|------|------------------------------|---|
| C01  | 170.7                        | 0.68  |
| C02  | 195.9                        | 1.35  |
| C03  | 276.7                        | 2.55  |
| C04  | 356.4                        | 3.36  |
| C05  | 346.6                        | 6.64  |
| C06  | 293.0                        | 1.72  |
| C07  | 379.0                        | 2.00  |



(a) パイプの長さの影響



(b) パイプの厚さの影響

図 - 2 作用せん断力 - 相対ずれ変位量関係（包絡線）



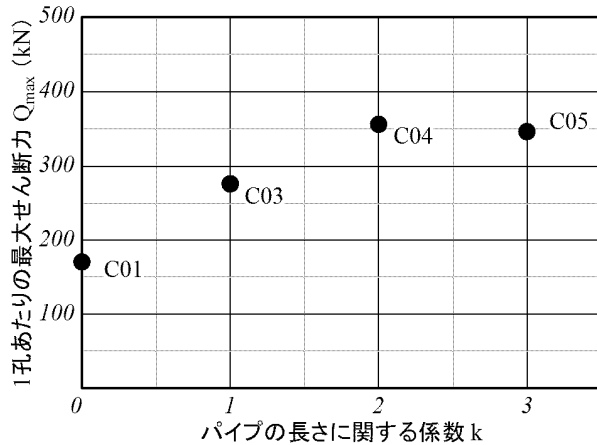


図 - 3 パイプの長さに関する係数 k と最大せん断力の関係

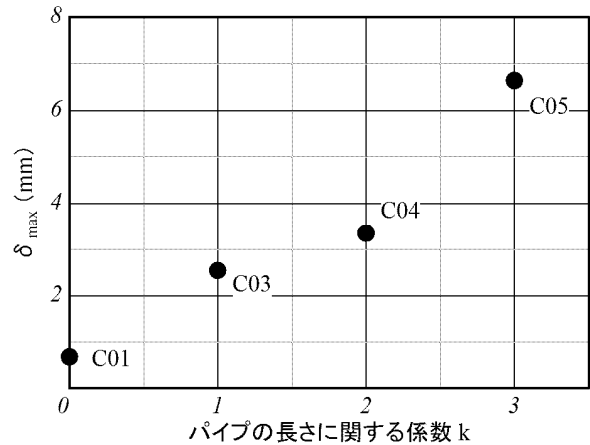


図 - 4 パイプの長さに関する係数 k と  $\delta_{max}$  の関係

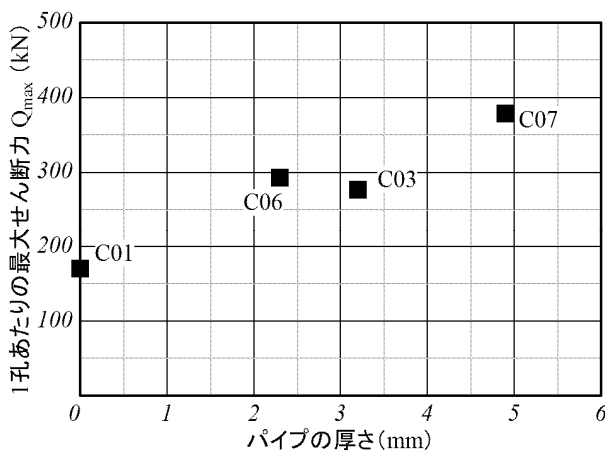


図 - 5 パイプの厚さと最大せん断力の関係

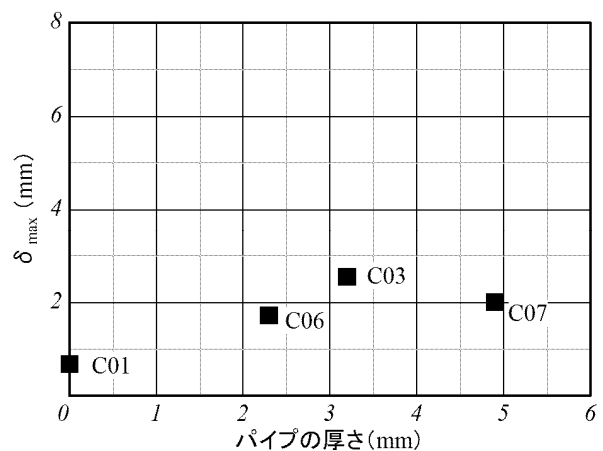


図 - 6 パイプの厚さと  $\delta_{max}$  の関係

これは鋼パイプを挿入することで、孔部近傍のコンクリート部分に発生していた局部せん断力を鋼パイプが分担したためであると推測する。

また、全供試体とも孔あき鋼板に沿ったひび割れが発生した。

### (3) パイプ長さの影響

図 - 3 にパイプの長さに関する係数 k と最大せん断力  $Q_{max}$  の関係を、図 - 4 に係数 k と  $Q_{max}$  が発生する時点の相対ずれ変位量  $\delta_{max}$  の関係をそれぞれ示す。ここで、パイプの長さに関する係数 k はパイプの長さ（全長）から孔あき鋼板厚の 22mm を差し引いた長さを孔径 60mm で除した値とし、C01, C03, C04, C05 の各試験体でそれぞれ  $k=0, 1, 2, 3$  とした。

これらよりパイプの長さが増加するに伴い、最大せん断力  $Q_{max}$  が増加することが分かった。しかし、 $k=2.0$  以上となるとその増加は頭打ちとなることが明らかになった。それに対して  $Q_{max}$  が発生する時点の相対ずれ変位量  $\delta_{max}$  は、パイプの長さが増加するとともに増加することが分かった。

これは、パイプの長さが短い場合はパイプ下縁のコン

クリート支圧面積が小さくなり、その部分のコンクリートの局部破壊が顕著になることなどが考えられ、結果として  $Q_{max}$  および  $\delta_{max}$  に影響を及ぼしているものと考えられる。

また、図 - 2 に示すようにパイプの長さは作用せん断力 - 相対ずれ変位量関係で非線形挙動が顕著となる領域（例えば相対ずれ変位量が 2mm 程度以上となる領域）におけるせん断伝達挙動に影響を与えることが確認された。

具体的には、パイプの長さの短い ( $k=1$ ) C03, C06, C07 は相対ずれ変位量が 2mm を超えると作用せん断力が低下する挙動を示したのに対して、パイプの長さのある程度確保した ( $k=2, 3$ ) C04, 05 は、相対ずれ変位量が 2mm を超えても作用せん断力を保持するかもしくはやや増加する挙動を示した。

### (4) パイプ厚さの影響

図 - 5 にパイプの厚さと最大せん断力  $Q_{max}$  の関係を、図 - 6 にパイプの厚さと  $Q_{max}$  が発生する時点の相対ずれ変位量  $\delta_{max}$  の関係をそれぞれ示す。

これらより一部ばらつきはあるものの、パイプの厚さ

が増加するに伴い、最大せん断力  $Q_{max}$  が増加することが分かった。これは、鋼パイプの剛性が  $Q_{max}$  に影響することを示している。

それに対して鋼パイプを挿入した新型ジベルの  $Q_{max}$  は、貫通鉄筋の無い従来の孔あき鋼板ジベルである C01 と比較して 2.5 ~ 3.8 倍程度増加するが、パイプの厚さの違いによる顕著な違いは見られなかった。

相対ずれ変位量が 2mm 程度以降の挙動に関しては、程度にばらつきがあるものの、C06, C03, C07 試験体ともに荷重が低下した。これは C06, C03, C07 試験体はパイプ長さが短いため、前述のパイプ下縁のコンクリート局部破壊などが考えられ、 $Q_{max}$  の最も大きかった C07 試験体において荷重低下度合いが顕著となっている。

(5) 鋼パイプに生じるひずみおよび変形と荷重抵抗メカニズムに関する一考察

図 - 7 に鋼パイプの長さが最も長い C05 試験体の作用せん断力と相対ずれ変位量の関係を、図 - 8 に C05 試験体の作用せん断力と鋼パイプのひずみ量の関係をそれぞれ示す。また、載荷試験後の変形性状を写真 - 5 および

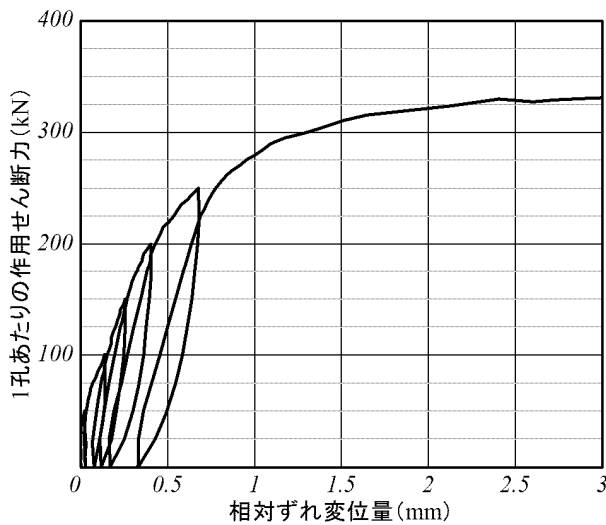


図 - 7 作用せん断力と相対ずれ変位量の関係 (C05)

写真 - 6 に示す。ここで、ひずみゲージは写真 - 5 に示すように孔あき鋼板の表面から 15mm 離れた上下縁の位置に鋼パイプの長手方向に貼り付けた。

図 - 7 より、作用せん断力 - 相対ずれ変位量関係は 200 ~ 250kN 程度以降に非線形性が顕著となった。また、図 - 8 より鋼パイプの上縁側のひずみは作用せん断力が 200kN 程度までは圧縮ひずみが発生し、その後引張側に移行し 300kN 程度で降伏ひずみ ( $2150 \times 10^{-6}$ ) を超えた。一方、下縁側のひずみは作用せん断力が 225kN 程度までは線形的に引張ひずみが発生し、その後圧縮側に移行し 330kN 程度で降伏ひずみを超えた。写真 - 5 および写真 - 6 に示すように載荷試験後の変形性状は、下縁側の鋼パイプは滑らかな変形をしているのに対し、上縁側は孔あき鋼板と接する部分で折り曲げられたような変形であった。

このことから初期段階は鋼パイプおよびコンクリートともに弾性体の状態であるが、比較的早い段階で孔あき鋼板のごく近傍の上縁側の鋼パイプが局所的な塑性曲げ変形を起こすものと考えられる。その結果、鋼パイプ

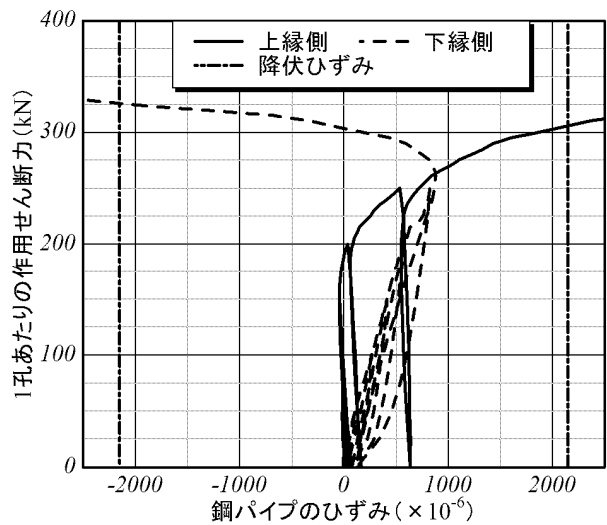


図 - 8 作用せん断力と鋼パイプひずみの関係 (C05)

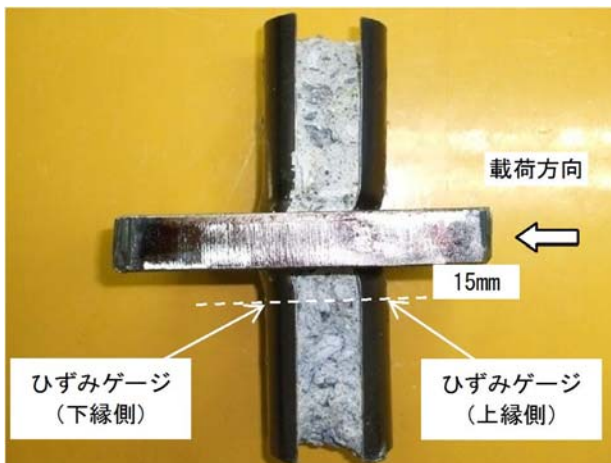


写真 - 5 載荷試験後の変形性状 (その 1)



写真 - 6 載荷試験後の変形性状 (その 2)

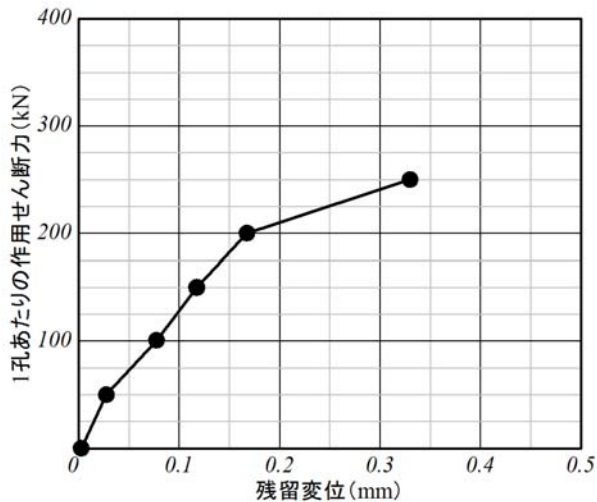


図 - 9 作用せん断力と残留変位の関係 (C05)

の曲率の正負が変わる変極点の位置が、鋼パイプの片側張出長の間付近から孔あき鋼板側に移動したことによって、前述の上縁側のひずみの符号が反転する挙動を示したと思われる。

その後、上縁側の鋼パイプの局部変形が更に進むことで鋼パイプの下縁側の孔あき鋼板の近傍でも顕著な変形が生じ、その部分のコンクリートが支圧によって局部的に塑性化するものと思われる。

これらの荷重抵抗メカニズムを経て破壊に至るものと思われるが、今後、有限要素解析のようなより詳細な方法で検証する必要があるものと考えられる。

また、図 - 9 に作用せん断力と残留変位の関係を示す。これより、200kN (最大せん断力の 58%) までは荷重の増加とともにほぼ線形的に残留変位が増加した。その後、250kN (最大せん断力の 72%) まで増加すると残留変位が急激に増加した。よって残留変位が急激に増加し始める荷重は 200kN ~ 250kN 程度であると考えられ、これは図 - 8 で鋼パイプの下縁側のひずみが線形的な挙動から外れる段階と一致した。

#### 4. 結論

本研究で得られた主な結論を以下に示す。

充填確認試験の結果、パイプの内面および外面に接するコンクリート部分には目立った気泡は確認されず、また粗骨材も均一に分散したことから、新型ジベルのコンクリート充填性は問題ないことが確認できた。

また、押抜き載荷試験の結果、新型ジベルの最大せん

断力は、従来の構造と比較して 1.6 倍 ~ 2.2 倍増加し、変形性能も大きく向上した。これは鋼パイプを挿入することで、孔部近傍のコンクリート部分に発生していた局部せん断力を鋼パイプが分担したためであると推測する。

パイプの長さが増加するに伴い、最大せん断力とその時の相対ずれ変位量は増加する。しかし、長さが孔径の 2 倍+孔あき鋼板厚以上となると最大せん断力の増加は頭打ちとなることが明らかになった。

パイプの厚さが増加するに伴い、最大せん断力は増加したが、最大せん断力が発生する時点の相対ずれ変位量は顕著な違いは見られなかった。

鋼パイプの長さが最も長い C05 試験体の載荷試験後の変形性状は、下縁側の鋼パイプは滑らかな変形をしているのに対し、上縁側は孔あき鋼板と接する部分で折り曲げられたような変形であった。また、鋼パイプに発生するひずみは、上縁下縁とも載荷過程において符号が逆転する挙動を示した。これらは鋼パイプおよびコンクリートの局部的な破壊に起因するものと考えられる。

C05 試験体の残留変位は最大荷重の 58% ~ 72% の間で急激に増加し、これは鋼パイプの下縁側のひずみが線形的な挙動から外れる段階と一致した。

#### 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, pp.1503-1508, 1997
- 2) 保坂鐵矢ほか: 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
- 3) 古内 仁, 上田多門, 鈴木 統, 田口秀彦: 孔あき鋼板ジベルのせん断伝達耐力に関する一考察, 複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, Vol.6, pp.26-1-26-8, 2005
- 4) 田中照久, 堺 純一: SC 部材に用いた無溶接孔あき鋼板ジベルのせん断抵抗機構と耐力算定式に関する研究, 複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, Vol.8, pp.55-1-55-8, 2009
- 5) 山口隆一, 中村善彦: 孔あき鋼板ジベルを改良した新型ジベルの押抜き試験, 第 64 回年次学術講演会報告集, CS, pp.71-72, 2009
- 6) 日本鋼構造協会: 頭付きスタッドの押抜き試験方法 (案), 1996