

論文 新型ジベルを用いた鋼コンクリート合成はり部材の性能評価

山口 隆一*1・中村 善彦*2

要旨: 本研究では孔あき鋼板にスリット入り鋼パイプを挿入した新型ジベルを鋼コンクリート合成はり部材に適用した場合の静的載荷実験とその評価を行った。ここで、新型ジベルの配置間隔は別途実施した押抜き載荷試験の結果を用いて決定した。また、同様の手法で孔あき鋼板ジベル（貫通鉄筋が無いものと有るもの）の配置間隔を決定した場合との比較を行った。

その結果、孔あき鋼板にスリット入り鋼パイプを挿入した新型ジベルを鋼コンクリート合成はり部材に適用できる可能性があることが明らかになった。

キーワード: 鋼パイプ, 孔あき鋼板, ジベル, 合成はり部材

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。

これらの問題点を解決するため、ジベル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^{1),2),3)}が行われている。また、近年ではジベルの更なる高性能化を目的とした新しい形式のジベルに関する研究⁴⁾もなされ、著者らも写真-1に示すような孔あき鋼板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、要素レベルにおける実験的、解析的研究を行ってきた^{5),6),7),8)}。

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幅30mmのスリットは、コンクリート打設時に巻き込んだ空気を抜く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、孔あき鋼板ジベル（貫通鉄筋の無いものと有るもの）と新型ジベルの押抜き載荷試験結果⁵⁾からジベルの配置間隔を決定した鋼コンクリート合成はり部材の静的載荷試験を実施し、そのひび割れ性状および耐荷性状を評価した。

2. 押抜き載荷試験

押抜き載荷試験は、日本鋼構造協会「頭付きスタッドの押抜き試験方法（案）⁹⁾」を参考に実施した。

2.1 試験要領

(1) 試験体および試験パラメータ

図-1に押抜き載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載荷用試験体を製作した。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、ジベル部以外の鋼材はセロハンを貼り付けた。押抜き載荷用試験体は全3体とし、全試験体ともコンクリートは30-10-20N（水セメ

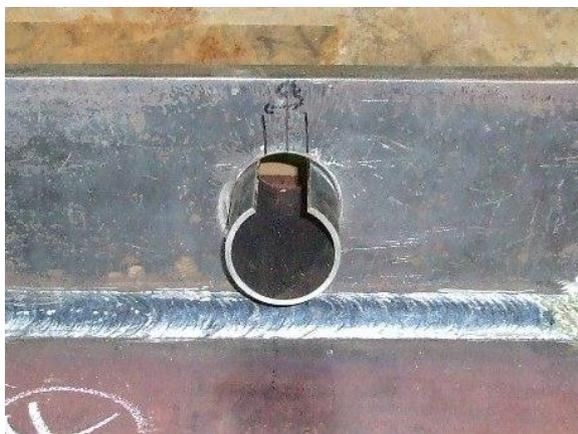


写真-1 新型ジベル挿入状況

*1 (株) IHI 基盤技術研究所 構造研究部構造強度グループ副主任研究員 工修 (正会員)

*2 (株) IHI インフラシステム 営業本部橋梁企画部部長

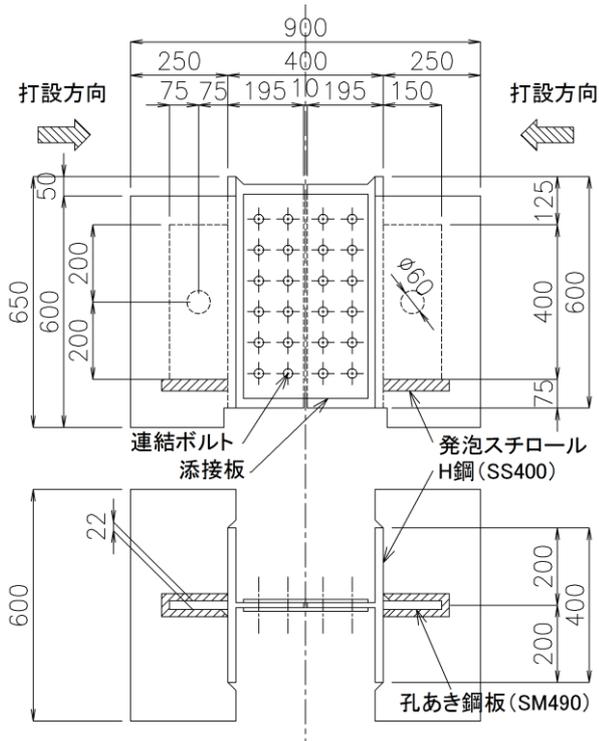


図-1 押抜き载荷用試験体の形状図

ント比 49.3%，試験時の圧縮強度は 48.5N/mm^2 ），孔数は 1 個/1 ブロック，孔径は $\phi 60\text{mm}$ とした。

試験パラメータはジベルの種類とし，C01 を貫通鉄筋の無い孔あき鋼板ジベル，C02 を貫通鉄筋の有る孔あき鋼板ジベル，C04 を新型ジベルとした。ここで，貫通鉄筋は SD345 (D13，長さ 540mm，降伏応力 419N/mm^2 ：ミルシート) とし，鋼パイプは STK400 (長さ 142mm，厚さ 3.2mm， $\phi 60.5\text{mm}$ ，降伏応力 430N/mm^2 ：ミルシート) とした。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。

(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。

2.2 試験結果

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 δ_{\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 (包絡線) を図-2 に示す。ここで，相対ずれ変位量は試験体の 4 隅で測定した変位量がほぼ同値であったため，それらの平均値とした。

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。

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 δ_{\max} (mm)
C01	170.7	0.68
C02	195.9	1.35
C04	356.4	3.36

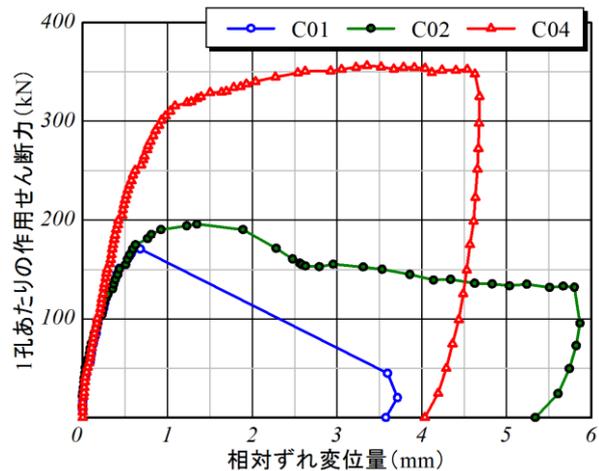


図-2 作用せん断力-相対ずれ変位量関係 (包絡線)

一方，貫通鉄筋のある C02 試験体は作用せん断力が最大で 195.9kN となった。ピーク荷重後は 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。それに対して新型ジベル (C04) の最大せん断力は 356.4kN となり，C01 と比較して 2.1 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。これは鋼パイプのせん断抵抗によるものと考えられる。

3. はり部材の静的载荷試験

前章において要素レベルにおけるジベルの種類ごとのせん断伝達性能を確認した。そこで，本章ではその結果を用いてジベルの配置間隔を決定した鋼コンクリート合成はり部材の静的载荷試験を実施し，部材として用いた場合の挙動を評価する。

3.1 試験要領

(1) 試験体および試験パラメータ

図-3 から図-5 にはり部材の静的载荷試験体 (全 3 体) の形状図を示す。

試験体は厚さ 9mm (SS400，降伏応力 309N/mm^2 ：ミルシート) の鋼板に厚さ 22mm，高さ 170mm の孔あき鋼板 (SS400，降伏応力 348N/mm^2 ：ミルシート) を 2 列溶接したものとコンクリート (30-10-20N，水セメント比 49.3%，試験時の圧縮強度は 45.4N/mm^2) を各種ジベルによって合成させた鋼コンクリート合成部材とした。こ

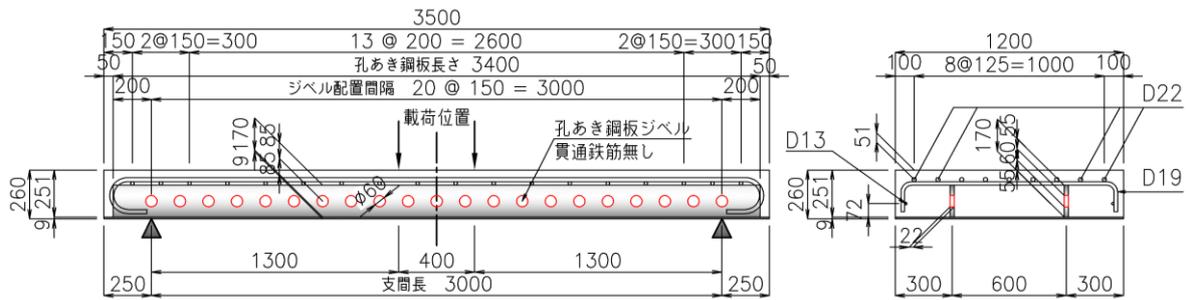


図-3 はり部材の静的荷重試験体の形状図 (M01)

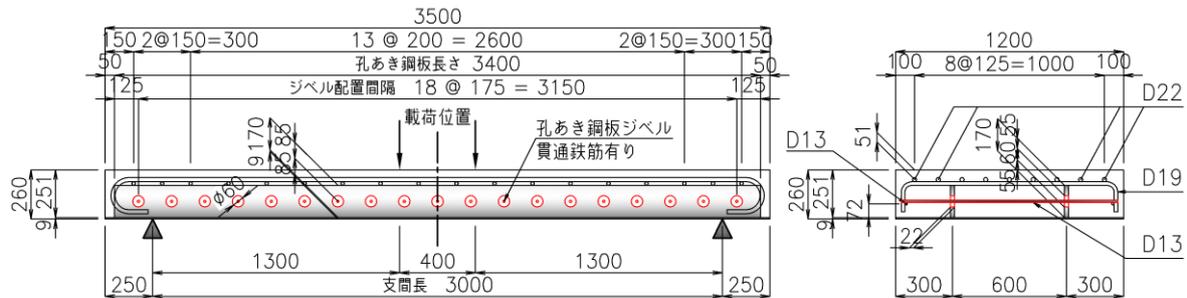


図-4 はり部材の静的荷重試験体の形状図 (M02)

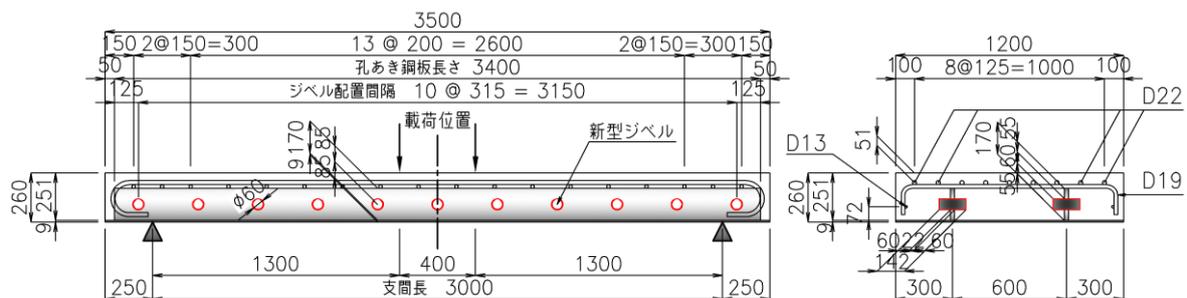


図-5 はり部材の静的荷重試験体の形状図 (M04)

表-3 はり部材の静的荷重試験パラメータ

試験体名	ジベルの種類	配置間隔 (mm)
M01	孔あき鋼板ジベル (貫通鉄筋無し)	150
M02	孔あき鋼板ジベル (貫通鉄筋有り)	175
M04	新型ジベル	315



写真-2 M04 試験体

ここで、上縁のはり支間方向鉄筋は D22、配力筋は D19 とした (いずれも SD345)。また、試験体の外形は全厚 260mm、幅 1200mm、長さ 3500mm であり、支間長を 3000mm、荷重位置間隔を 400mm とした。

試験パラメータはジベルの種類およびその配置間隔とした (表-3)。ジベルの配置間隔は鋼とコンクリートが相対ずれを起こさずに平面保持を保つと仮定し、試験体下縁の鋼板が降伏応力の規格値 (235N/mm²) となった際に各種ジベルが表-2 に示す最大せん断力になるように 5mm 刻みで決定した。この際、コンクリート引張断面を無視し、圧縮強度を呼び強度、鋼材とコンクリート

のヤング係数比を 10 と仮定して設計した。また、本試験では鋼材とコンクリートの付着を除去するため、ジベル部を除く鋼材にグリースを塗布した。例として M04 試験体のコンクリート打設前の状況を写真-2 に示す。

(2) 測定項目および荷重方法

測定項目は荷重荷重、支間中央における鉛直変位量、試験体端部における鋼とコンクリートの相対ずれ変位量 (試験体支間方向) とした。また、支間中央におけるコンクリート上縁、支間方向鉄筋、孔あき鋼板上縁、試験体下縁の鋼板のひずみをそれぞれ測定した。

荷重方法は 2000kN の油圧ジャッキを用いて鉛直下向

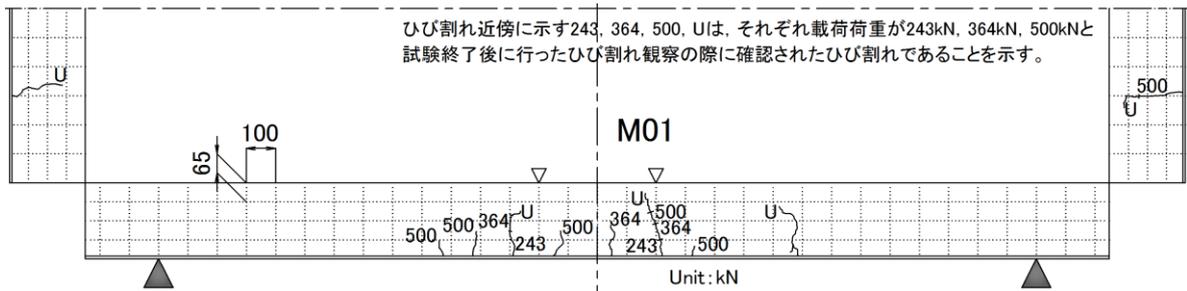


図-6 M01 試験体のひび割れ性状

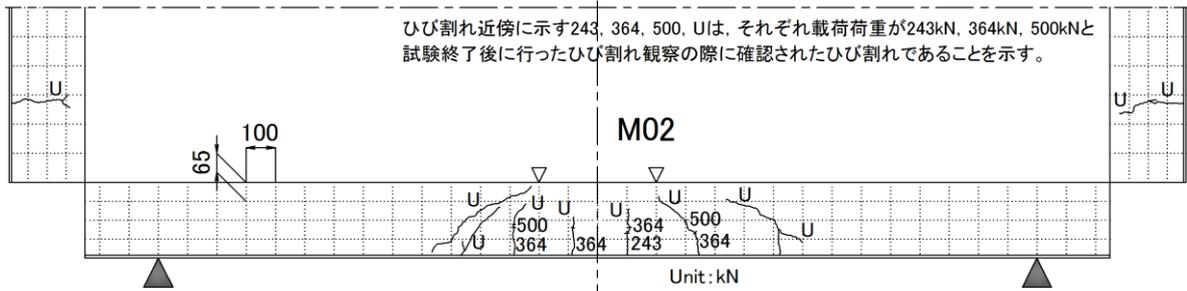


図-7 M02 試験体のひび割れ性状

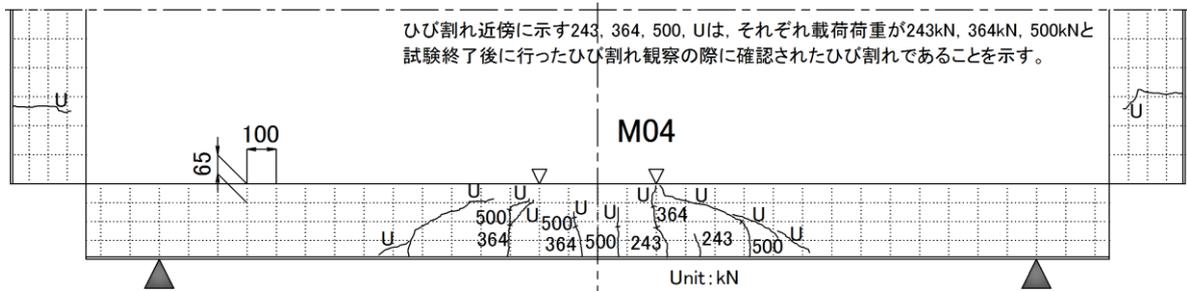


図-8 M04 試験体のひび割れ性状

きに載荷した。荷重履歴は単調増加載荷とした。

3.2 試験結果

(1) ひび割れ性状

図-6 から図-8 にひび割れ性状を示す。ここで、これらの図は供試体側面のひび割れの多い方とした。

図-7 および図-8 より、貫通鉄筋がある孔あき鋼板ジベルを用いた M02 試験体と、新型ジベルを用いた M04 試験体は支間中央近傍に曲げひび割れとせん断ひび割れが発生した。また、試験体端面には孔あき鋼板の位置にひび割れが発生した。

一方、貫通鉄筋が無い孔あき鋼板ジベルを用いた M01 試験体側面は曲げひび割れのみであった(図-6)。また、試験体端面には載荷荷重 500kN 時のひび割れ観察で孔あき鋼板の位置にひび割れが発生した。

(2) 荷重-変位関係と荷重-相対ずれ変位量の関係

図-9 に載荷荷重と支間中央における鉛直変位量の関係を、図-10 に載荷荷重と試験体端部における鋼とコンクリートの相対ずれ変位量の関係をそれぞれ示す。ここで、図-9 の全断面有効と引張断面無視の直線は鋼とコンクリートが相対ずれを起こさずに平面保持を保つと仮

定した場合の計算値である(コンクリートの圧縮強度、鋼材とコンクリートのヤング係数比は試験時のもの)。また、図-9 および図-10 に示す P_{yd} (891kN) および P_y (1127kN) は、それぞれ試験体下縁の鋼板が降伏応力の規格値 (235N/mm²)、ミルシートの降伏応力 (309N/mm²) となる計算値である。本検討で扱うジベルを用いた場合のせん断耐力は引張鋼材比に関する低減係数¹⁰⁾ が明らかにされていないため、その算出が困難である。よって、同図にはせん断補強鉄筋を用いない RC はりのせん断耐力式¹¹⁾による計算値 ($P_s=1109kN$) を参考データとしてプロットした。

図-9 より全ての試験体で曲げひび割れが発生する 200kN 程度までは全断面有効とした場合と同様な挙動を示した。その後、図-10 に示す鋼とコンクリートの相対ずれ変位が発生し、引張断面を無視した場合の剛性(図-9 の傾き)よりも低い剛性となった。また、荷重の増加とともに剛性はなだらかに低下する結果となった。これらのことは支間中央断面のひずみの分布(例えば、M04 試験体の最大荷重時のひずみは、鋼板下面で 1881×10^{-6} 、孔あき鋼板上縁で -1858×10^{-6} 、支間方向鉄筋で -929×10^{-6} 、

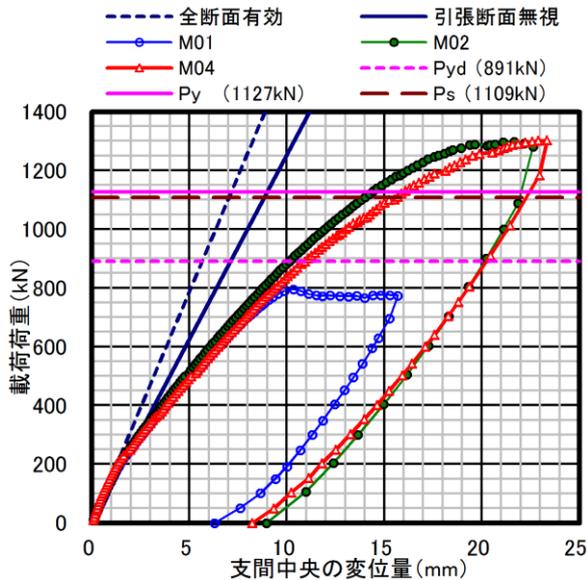


図-9 載荷荷重と支間中央における変位量の関係

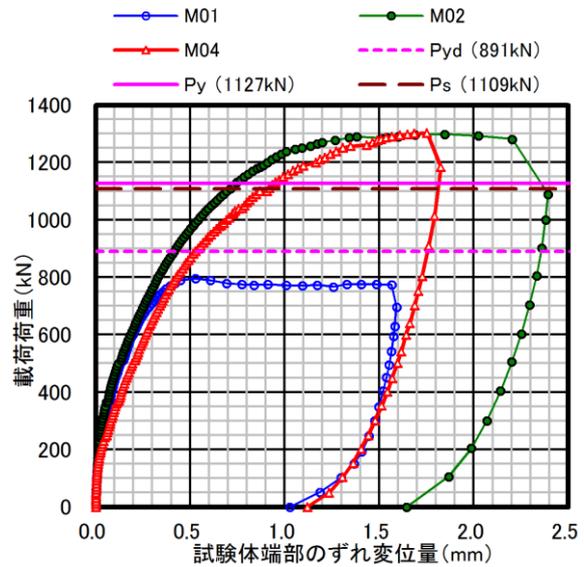


図-10 載荷荷重と試験体端部にずれ変位量の関係

コンクリート上縁で -2108×10^{-6})が平面保持の仮定から大きく外れることによっても確認できた。

M02 試験体と M04 試験体の最大荷重はそれぞれ 1298kN, 1303kN とほぼ同程度であり、 P_{yd} の 1.46 倍となった(最大荷重時の鋼板下縁のひずみは M02 試験体で 1740×10^{-6} , M04 試験体で 1881×10^{-6} でミルシートの降伏応力から推測される降伏ひずみを上回った)。これは、孔あき鋼板を並列配置したことで拘束力が増加し最大せん断力が増加すること¹²⁾が要因として挙げられる。また、図-7 および図-8 に示すようにずれ変位量が最も大きくなる支点部付近とそこから 900mm 程度内側のコンクリートは曲げひび割れが発生しておらず全断面有効の状態にある。これに対して本試験体のジベルの配置間隔は中立軸がより上側にある引張断面無視の状態与安全側の設計していることも一因であると考えられる。具体的には、全断面有効と仮定して P_{yd} における必要ジベル配置間隔を計算すると、引張断面を無視した場合の 1.33 倍程度の配置間隔となる。

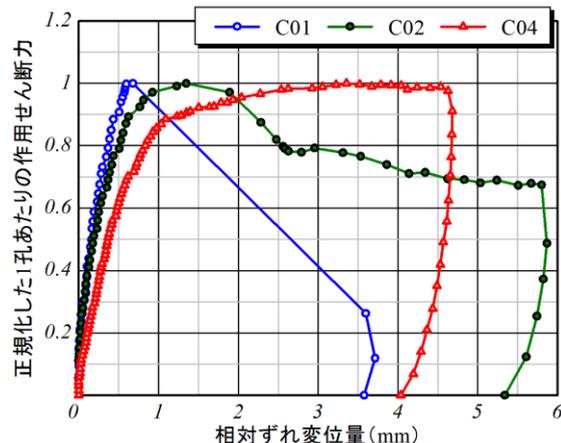


図-11 図-2 を正規化したグラフ

M02 試験体と M04 試験体のずれ変位は最大荷重付近を除き、M04 試験体の方がやや大きい結果となった。これは図-2 に示す両者の最大せん断力に至るまでの履歴カーブの差異によるものと考えられ、同図の縦軸を最大せん断力で正規化した履歴カーブ(図-11)とほぼ同じような傾向を示した。

一方、M01 試験体の最大荷重は 796kN となり、 P_{yd} の 0.89 倍に留まる結果となった(鋼板下縁のひずみは最大荷重時で 1018×10^{-6} , 最大変位時で 1064×10^{-6} , 孔あき鋼板上縁のひずみは最大荷重時で -902×10^{-6} , 最大変位時で -1252×10^{-6} となり、ミルシートの降伏応力から推測される降伏ひずみを下回った)。このことから前述の孔あき鋼板を並列配置した影響や引張断面無視の状態与安全側の設計した影響を鑑みると低い値であると考えられる。この現象は鋼桁とコンクリート床版の合成桁の実験¹³⁾でも同様の傾向があることが確認されており、要因としてジベルの合成部材軸方向の作用せん断力やずれ変位量が配置位置によって異なること¹⁴⁾と、ジベルの変形性能が挙げられる。具体的には図-2 の C01 に示すような小さな相対ずれ変位量で最大作用せん断力発生し、かつその後急激に耐荷性能を失う場合は、合成部材の最端部に配置されたジベルが隣接するジベルに作用せん断力を分配、平準化する前に破壊し、結果として連続的に支間中央側のジベルが破壊していくものと考えられる。M01 試験体もこのような機構で最大荷重の低下に至ったものと思われ、表-2 に示す δ_{max} (0.68mm) と M01 の最大荷重時のずれ変位量 (0.53mm) は概ね一致した。ここで、最大荷重後に荷重を保持するのは前述のとおり鋼板と孔あき鋼板の降伏によるものではなく、合成状態から純粋な重ねはりに移行する過程であると考えられる。

以上のことから本研究の範囲ではスリット入り鋼パイ

プを用いた新型ジベルを鋼コンクリート合成はり部材に適用できる可能性があることが明らかになった。

4. 結論

以下に本研究で得られた主な結論を示す。

- (1) 鋼コンクリート合成はり部材の静的載荷試験の結果、貫通鉄筋がある孔あき鋼板ジベルを用いた場合と、新型ジベルを用いた場合は支間中央近傍に曲げひび割れとせん断ひび割れが発生した。しかし、貫通鉄筋が無い孔あき鋼板ジベルを用いた場合は曲げひび割れのみであった。また、全ての試験体端面に孔あき鋼板の位置にひび割れが発生した。しかし、貫通鉄筋が無い孔あき鋼板ジベルの場合は比較的早期にそのひび割れが発生した。
- (2) 荷重-変位関係において、全ての試験体で曲げひび割れが発生するまでは全断面有効とした場合と同様な挙動を示した。その後、鋼とコンクリートの相対ずれが発生し、引張断面を無視した場合の剛性よりも低い剛性となった。また、荷重の増加とともに剛性はなだらかに低下する結果となった。
- (3) 貫通鉄筋がある孔あき鋼板ジベルを用いた場合と、新型ジベルを用いた場合の最大荷重はほぼ同程度（1300kN）であり、試験体下縁の鋼板が降伏応力の規格値となる計算値 P_{yd} の1.46倍となった。これは、孔あき鋼板を並列配置したことで試験体のジベルの配置間隔を引張断面無視の状態である安全側の設計していることが要因であると考えられる。また、ずれ変位は最大荷重付近を除き、新型ジベルの方がやや大きい結果となった。これは最大せん断力に至るまでの履歴カーブの差異によるものと考えられる。
- (4) 貫通鉄筋がある孔あき鋼板ジベルを用いた場合の最大荷重は P_{yd} の0.89倍に留まった。これは孔あき鋼板を並列配置した影響や引張断面無視の状態である安全側の設計した影響を鑑みるとやや低い値であると考えられる。この要因はジベルの合成部材軸方向の作用せん断力やずれ変位量が配置位置によって異なること、ジベルの変形性能が上げられる。具体的には小さな相対ずれ変位量で最大作用せん断力が発生し、かつその後急激に耐荷性能を失う場合は、合成部材の最端部に配置されたジベルが隣接するジベルに作用せん断力を分配、平準化する前に破壊し、結果として連続的に支間中央側のジベルが破壊していくものと考えられる。
- (5) 本研究の範囲では新型ジベルを鋼コンクリート合成はり部材に適用できる可能性があることが明らかになった。

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, 古内 仁, 上田多門: 鋼パイプを用いた新型ずれ止め構造の実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, 2010
- 6) 山口隆一, 中村喜彦, 古内 仁, 上田多門: スリット入り鋼パイプを用いた新型ずれ止めにおけるせん断伝達性能の実験的研究, 複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, Vol.9, pp.101-110, 2011
- 7) 山口隆一, 中村喜彦, 古内 仁, 上田多門: 拘束状態におけるスリット入り鋼パイプを用いたずれ止めの性能評価, 第 67 回年次学術講演会報告集, CS, pp.35-36, 2012
- 8) 松尾善紀, 古内 仁, 上田多門, 山口隆一: スリット入り鋼パイプを用いたずれ止めの耐荷メカニズムに関する解析的検討, 土木学会北海道支部論文報告集, Vol.68, 2013
- 9) 日本鋼構造協会: 頭付きスタッドの押抜き試験方法(案), 1996
- 10) 二羽淳一郎, 山田一字, 横沢和夫, 岡村甫: せん断補強筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, 第 372 号/V-5, pp.167-176, 1986
- 11) 土木学会: 複合構造標準示方書, 2009
- 12) 日向優裕, 藤井堅, 深田和宏, 道管裕一: 並列配置された孔あき鋼板ジベルの終局ずれ挙動, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.1089-1098, 2007.3
- 13) 浅沼大寿ほか: 高強度コンクリートと鋼桁を孔あき鋼板ジベルで接合した合成桁の載荷実験, 第 68 回年次学術講演会報告集, CS03-009, pp.17-18, 2013
- 14) 坂口淳一, 渡辺忠明, 池田 学: ずれ止め非線形のせん断力-ずれ変位関係を考慮した合成部材の 2 次元解析, 第 68 回年次学術講演会報告集, CS3-015, pp.29-30, 2013