

RC 柱 - 円形鋼管接合部における孔あき鋼板ジベルの力学挙動

Slip Behavior of Perforated Rib Shear Connectors
Between Circular Steel Tube and Reinforced Concrete Column

契約技術職員
藤枝 洋二

ABSTRACT: Perfobond rib shear connector (PBL) will be more effective in a joint connection between circular steel tube and reinforced concrete column by the reason of concrete confinements of steel tube . From the push-out tests of the joint , we have been confirmed that PBL works effectively as a hard shear connector . However , in fact , the joint is used as a connection between a reinforced concrete pier and a steel post , and the joint serves the cyclic bending moment due to earthquake . Concrete around PBL hole is not necessarily in compressive state when the bending moment acts on the joint . Then , the purpose of this paper is to clarify the ultimate slip behavior and the transformation mechanisms of stresses due to PBL at the joint .

キーワード：孔あき鋼板ジベル，拘束効果，コンクリート充填鋼管，曲げ

Keywords: Perfobond rib shear connector , Concrete confinements , Concrete-filled steel tube , Cyclic bending

1. はじめに

鋼・コンクリート複合構造物において，最も重要とされる部位は鋼とコンクリートを結合する「接合部」である．この「接合部」の応力伝達にはずれ止めが用いられ，そのずれ止めの1つに，孔あき鋼板ジベル（PBL）がある．PBLのずれ耐力はジベル孔部コンクリートの拘束状態に大きく影響する．そこで，ジベル孔部コンクリートを効果的に拘束する方法として，コンクリート充填鋼管内にPBLを配置することを考え，RC柱と円形鋼製柱の接合部に適用させることを考案した．これまでに鋼管による拘束下に置かれたPBLの力学特性の解明を目指して，充填鋼管PBLの1軸圧縮せん断試験を行い，PBLのせん断耐力について研究を進めてきた1)2)3)．その結果，円形鋼管によるコンクリート拘束効果によるPBLのずれ耐力が飛躍的に上昇し，靱性の高いずれ止め構造であることが

分かった．しかし，実際の構造物を視野に入れると，想定する構造形式は地震時等において接合部に正負繰り返し曲げモーメントが作用することになるが，このような場合のずれ挙動の検討はほとんどなされていない．

そこで本研究では，RC柱と円形鋼管柱の接合部にPBLを配置し，接合部に曲げモーメントを作用させた場合のPBLの挙動・破壊メカニズム・ずれ耐力の解明を目的とする．

2. 円形鋼管 PBL の繰り返し曲げ載荷試験

2.1 供試体概要

本実験の供試体形状を図-1に示す．供試体は同じ形状・寸法で全3体を製作した．供試体の全高は1980mmである．接合部の鋼管は，材質STK400，鋼管径 406.4mm，鋼管厚6.4mm，充填鋼管高さ400mm，ベースプレートを含んだ高さ550mmである．鋼管内側に長さ400mm，高さ100mm，

中央に 40の孔の空いた PBL プレートを4枚溶接している。RC 柱の全長は1400mmで、主鉄筋には D22の異形鉄筋を円状に12本組んであり、充填鋼管底部まで伸びている。帯鉄筋には D10の異形鉄筋を70mm間隔で19本配置した。

供試体は、通常接合部での破壊は許されないが、接合部の破壊挙動を見るため、接合部で破壊が先行するように、接合部の耐力よりも接合部以外(RC部・鋼管部)の耐力が大きくなるように、通常の設計よりも断面性能を大きくしている。なお、表 - 1に供試体設計耐力を示す。

2.2 接合部の設計

接合部では、接合部の曲げモーメントに対して、PBL 孔部のせん断力の偶力によって抵抗すると仮定した。しかし、本研究における PBL の曲げ耐力の評価方法は確立されていないため、式 (2.1) のように仮定して供試体の PBL を設計した。

$$M_{pbl} = \sum_{i=1}^n m \cdot P_{pbl} \cdot h_r \quad (2.1)$$

M_{pbl} : PBLをn個配置した接合部の曲げ耐力

m: PBLプレート1枚に配置されているPBL孔数

P_{pbl} : 円形鋼管PBL1孔あたりのずれ耐力

h_r : 部材断面中立軸から孔位置までの距離

2.3 鉄筋の定着

実験供試体の必要定着長は481mmとなった。しかし、充填鋼管高さ400mmとしたため、鉄筋に必要な定着が確保できなかった。そのため、写真 - 1に示すように充填鋼管最下部に厚さ9mmの鋼板を設け、鋼板と主鉄筋を溶接接合した。この鋼板は鋼管と溶接しないで軸力を受け持たないようにしている。

2.4 載荷概要

載荷状況を写真 - 2に示す。載荷はまず、供試体に所定の鉛直荷重を載荷した後、その軸力を一定に保持した状態で供試体頂部に正負繰り返し水平荷重を準静的に載荷している。載荷は

変位制御で、加力試験機に変位(以下、ストロークと呼ぶ)を正負に与え、所定の最大ストローク値に達した時点でストロークを0mmまで除

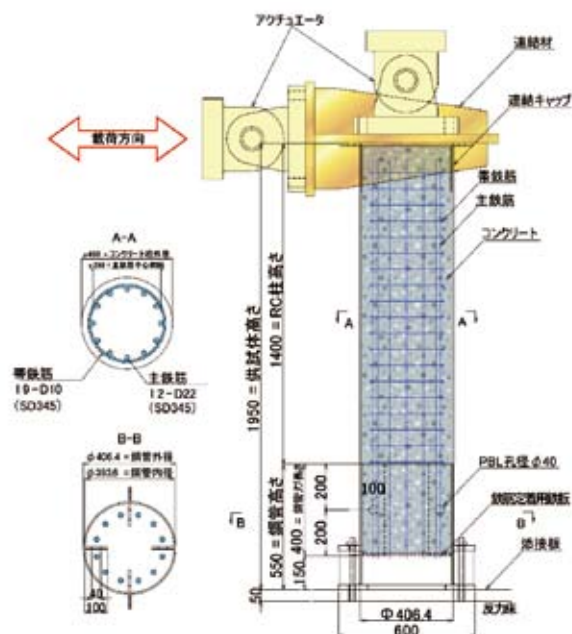


図 - 1 供試体形状

表 - 1 供試体設計耐力

接合部	鉄筋コンクリート柱部	
接合部設計曲げ耐力 (kN・m) *	コンクリート破壊モードによる設計曲げ耐力 (kN・m) (降伏)	鉄筋の引張破断モードによる設計曲げ耐力 (kN・m) (降伏)
98	156	140
PBL ずれ耐力から計算した設計水平力 (kN)	設計鉄筋コンクリート柱の抵抗せん断力 (終局) (kN)	
61	314	

*1孔あたりの PBL のずれ耐力240kN 仮定



写真 - 1 鉄筋と定着用鉄板の様子



写真 - 2 載荷状況

荷し、それを正負で行うことを1サイクルとしている。鉛直荷重は、供試体 No.1, No.2については0kN, 供試体 No.3については120kNの一定軸力を載荷している。

3 実験結果と考察

3.1 荷重 - 柱頭水平変位履歴曲線

表 - 2に各供試体の最高荷重を示す。図 - 2に供試体 No.2の荷重 - 柱頭水平変位履歴曲線を示す。図 - 3に荷重 - 柱頭水平変位包絡線を示す。

表 - 2より、全ての柱頭水平力の最高荷重は想定していた接合部の設計耐力を大きく上回る結果となった。

また、図 - 2の荷重 - 柱頭水平変位履歴曲線をみると、RCの曲げ載荷試験でみられるスリップ型の履歴曲線を描いている。供試体の設計耐力は、RC柱部分で鉄筋の引張破断モードによる設計曲げ耐力が140kN・mであった。各供試体の最高荷重はその計算値を上回っている。しかし実際のRCは鉄筋が降伏した後、コンクリートの引張破壊によって終局耐力が決まる。実際のコンクリートの圧縮強度が31.5MPaということとを考慮すると、その時の柱頭部の水平力は132kNとなり、供試体の最高荷重と概ね合う。当初の設計では、RC柱の曲げ耐荷力よりもPBLの破壊が先行するように設計したが、上記の実験結果からは、PBLの破壊を先行させることができず、RC柱の鉄筋の引張破断モードに

表 - 2 実験結果

	No.1	No.2	No.3
柱頭水平力 (kN)	161.8	188.3	170.8
換算接合部曲げモーメント (kN・m)	258.9	301.3	273.3

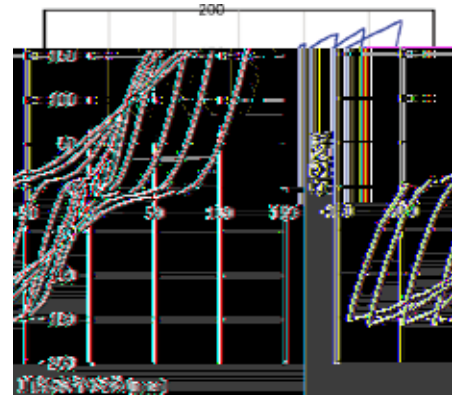


図 - 2 荷重 - 柱頭水平変位履歴曲線 (No.2)

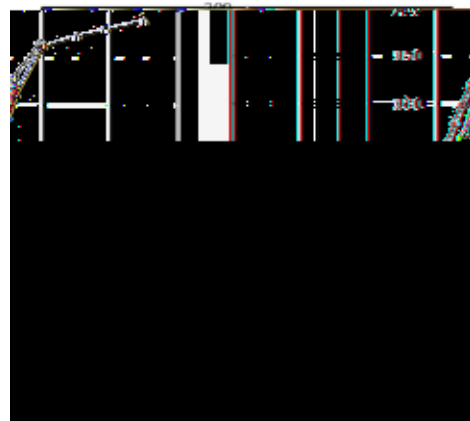


図 - 3 荷重 - 柱頭水平変位包絡線

よる曲げ崩壊に起因して供試体の耐力が決まったと考えられる。したがって、RC柱 - 鋼管接合部の強度は、十分な曲げモーメントを伝達する能力があったことになる。

図 - 3で、供試体 No.1, 2と No.3の包絡線を比較すると、No.3の剛性がわずかに大きく、柱頭水平変位が-45mm程度と等しくなった時の最高荷重を比較すると、No.1では-151.8kN, No.2では-144.7であるのに対して、No.3では170kNとなっており、わずかに大きくなっている。すなわち接合部に軸力がかかることでコンクリート有効断面積が増え、曲げ耐力の増大が起こったのではないかと考えられる。

3.2 崩壊性状

写真 - 3に示すように、載荷時に RC 柱のコンクリート表面には、柱軸と直交するかなり大きな曲げひび割れが発生している。このひび割れは荷重が大きくなるにつれてひび割れの数が多くなり、その後、載荷方向直角面に斜め方向にひび割れが伸びていっている。

図 - 4に RC 柱と鋼管継ぎ目の鉄筋のひずみ曲線を示す。RC と鋼管の継ぎ目において、水平力が約130kN のとき鉄筋が降伏している。

3.3 RC と鋼管のずれ

図 - 5に、載荷方向面の荷重 - RC と鋼管の継ぎ目のコンクリート抜け出し量の履歴曲線を示す。図 - 6に各供試体の荷重 - RC の鋼管からの抜け出し量の包絡線を示す。図 - 7に本実験から求めた1孔あたりの PBL のずれ力と、円形鋼管 PBL の1軸せん断圧縮試験における1孔あたりのずれ力を比較して示す。ここで、本実験から求めた1孔あたりの PBL のずれ力は、載荷軸方向にある2つの PBL のみで荷重に抵抗していると考え、求められた供試体耐力を考慮した PBL 孔数2で割ったものを1孔あたりの PBL のずれ力としてい

この現象を説明するための概念図を図 - 8 に示す。図に示すように、RC 柱に曲げがかかると、圧縮側のコンクリートが鋼管の上部を押し、鋼管から水平方向力を受ける。さらにジベルより

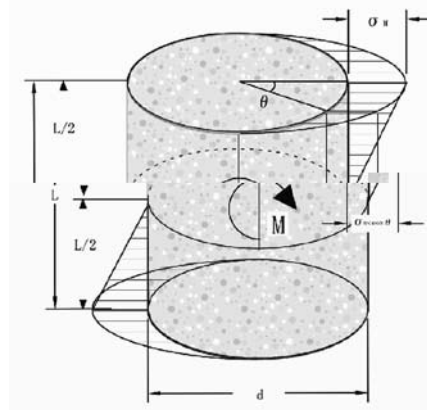


図 - 8 鋼管に作用する支圧力の概念図

下側の鋼管は反対側のコンクリートが鋼管を押すために鋼管から逆向きの水平力を受けることになる。この水平方向の偶力によって曲げモーメントが発生して、荷重に抵抗すると考えられる。

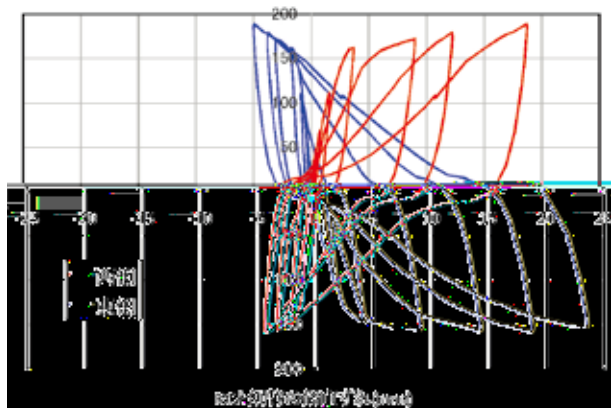


図 - 5 荷重 - RC の鋼管からの抜け出し量履歴曲線 (No.2)

3.4 鋼管のひずみ

図 - 9 に、供試体 No.2 の各鋼管高さでのひずみ履歴曲線を示す。それぞれ左側に周方向ひずみ、右側に鉛直方向ひずみで、グラフ上側が圧縮領域、グラフ下側が引張領域の場合のひずみである。図 - 9 は、a が鋼管上端から 50mm、b が PBL 孔位置、c が鋼管上端から 335mm の位置のひずみの履歴曲線である。

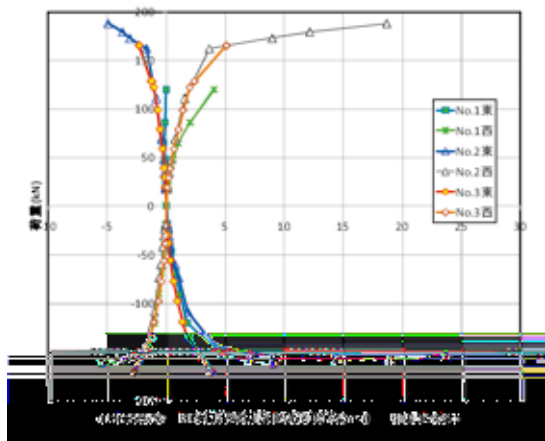


図 - 6 荷重 - RC の鋼管からの抜け出し量の包絡線

図 - 9 より図の上下でひずみ曲線の形が大きく異なる。これは、接合部に曲げモーメントが作用すると、載荷方向の鋼管上部と、対角側の鋼管下部に図 - 8 に示すような支圧力が作用するためである。逆に、載荷方向の鋼管下部と対角側の鋼管上部はコンクリートが抜け出したり、付着がきれたりしているためにひずみがあまり発生しないのではないかと考えられる。

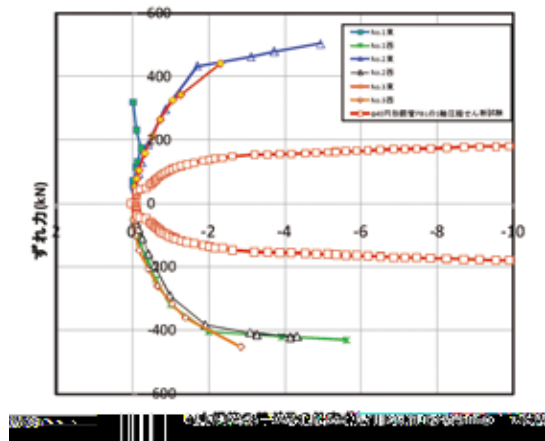
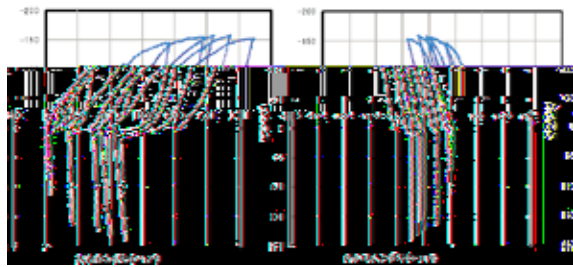
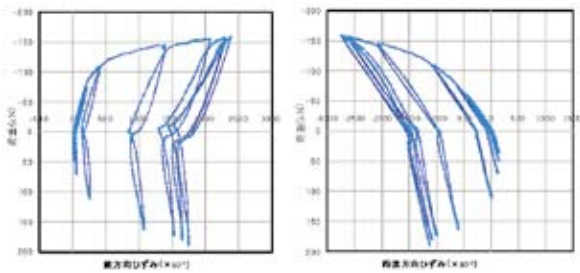


図 - 7 PBL 1 孔あたりのせん断力 - ずれ曲線

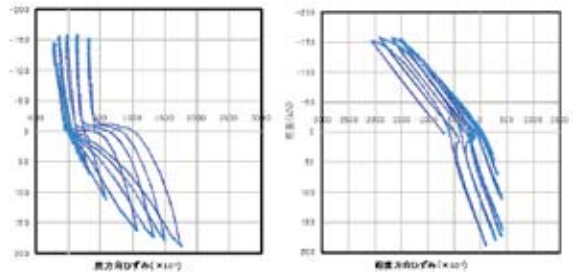
また、荷重がマイナス約 80kN を過ぎたとき、PBL 孔位置の周方向ひずみ曲線の傾きが変化していることがわかる。これは、PBL 孔部で 2 面せん断破壊が生じることによって孔部が広がろうとするが、この広がりを鋼管が周方向ひずみを大きくしながら拘束するためと考えられる。



a) 鋼管上部から50mm



b) PBL 孔高さ



c) 鋼管上部から335mm

図 - 9 ひずみ履歴曲線 (左に周方向, 右に鉛直方向ひずみ)

一方 PBL 孔位置での引張領域(各図下側)では、PBL 孔部で2面せん断破壊していても鋼管による拘束力は期待できず、PBL のずれ耐力は上昇しないと考えられる。加えて、コンクリートから鋼管に作用する支圧力が荷重の増大に伴って大きくなると推測される。

次に、a の鉛直方向ひずみで、図下側 (F 列が引張領域) のひずみ曲線が荷重の増加に対し全く変化していない。すなわち、この位置ではコンクリートと鋼管の付着がきれているため、完全に鉛直方向の荷重は伝達されないと考えられる。

図 - 10 に各鋼管高さにおける周方向ひずみ分布を示す。周方向ひずみは圧縮領域において、荷重が小さい場合には、供試体下部になるほど一定の傾きで小さくなっており、6 サイクル目

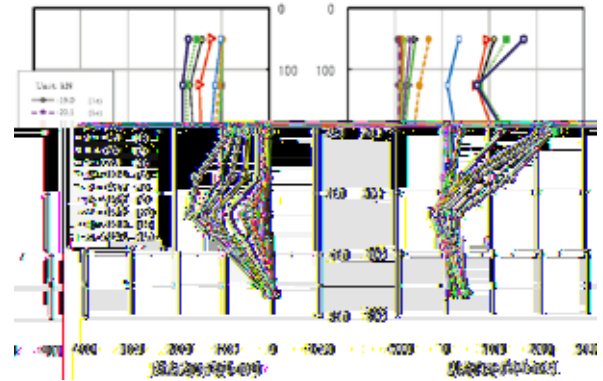


図 - 10 周方向ひずみ分布

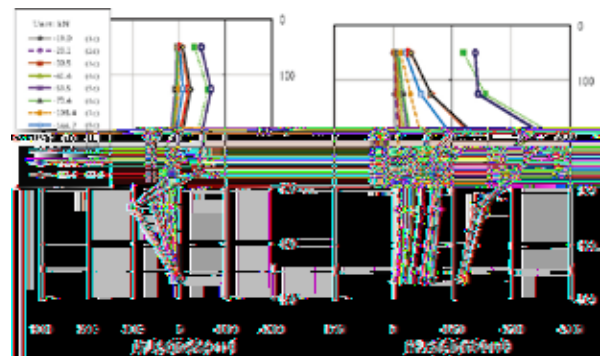


図 - 11 鉛直方向ひずみ分布

まではその傾向となっている。これはコンクリートが鋼管に作用する支圧力によるものと考えられる。しかし7サイクル目になると、周方向ひずみの増加が大きくなり、8サイクル目になると、ひずみの増加がより増え、加えて、PBL 孔位置での周方向ひずみが大きくなっていることがわかる。この原因として、6 ~ 8 サイクル目、つまり73kN ~ 108 k N の間に PBL 孔部で2面せん断破壊を起こしたことに起因していると考えられる。そして、2面せん断に伴って鋼管が周方向ひずみを大きくしながら孔部コンクリートを拘束していると考えられる。一方、引張領域の周方向ひずみは、PBL 孔位置よりも下側の周方向ひずみ分布において、供試体下部になるほど周方向ひずみほど大きくなる傾向があり、コンクリートが鋼管に作用する支圧力によるものと考えられる。また、荷重が大きくなるにつれて供試体上部から PBL 孔位置までのひずみが増加しているが、引張領域の上端は、

コンクリートと鋼管の間にはだすきができる可能性があり，残留ひずみの影響が大きいと考えられる．

図 - 11より，鉛直方向ひずみの分布は，圧縮領域においては下側に一定の割合で大きくなる圧縮ひずみが生じている．その後，周方向ひずみの孔位置でのひずみが大きくなるのと同時に，つまり，PBL 孔部で2面せん断破壊を起こしたことに起因して，鉛直方向ひずみも孔位置で急激に大きくなっていると考えられる．

図 - 12, 13に周方向，鉛直方向応力分布を示す．左図が引張領域で，右図が圧縮領域の応力分布である．周方向応力分布について，まず，圧縮領域において，荷重が小さい場合は，PBL 孔位置の周方向応力はほぼ0である．鋼管上部では引張応力，鋼管下部では圧縮応力となる．また，鋼管上部から鋼管下部に向かって応力の変動率はほぼ一定と見なせる．一方，引張領域については鋼管上部から鋼管下部に向かって引

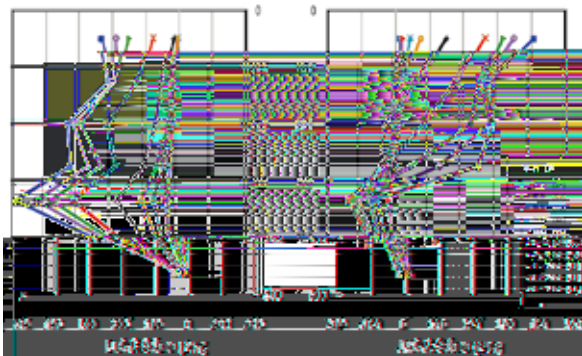


図 - 12 周方向応力分布

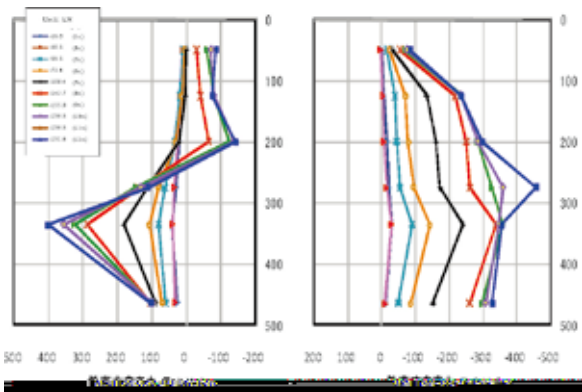


図 - 13 鉛直方向応力分布

張応力が大きくなる分布になる．圧縮領域の鋼管上部，引張領域の鋼管下部の応力は，コンクリートから鋼管に作用する支圧力によるものと考えられ，荷重が小さい場合，PBL 孔位置の高さで均等に上下に分けて，圧縮領域の上部と引張領域の下部の支圧力の偶力によって曲げモーメントに抵抗していると考えられる．

8サイクル目の125kN 程度，圧縮領域の鋼管上端の周方向応力が計算上では235N/mm²以上になり降伏したとき，PBL のずれ耐力の増加は大きくなりだす．コンクリートによる支圧力の一定の傾きの応力分布より大きい周方向応力が発生すると見られる．同じくして，圧縮領域の鉛直応力も急激に増大しだす．つまり本研究の構造では，まず，鋼管に作用する支圧力の偶力で荷重を持ち，鋼管が降伏に達すると PBL が抵抗しだすと考えられる．

4. 結論

RC 柱と円形鋼管柱の接合部に PBL を配置し，接合部に曲げモーメントを作用させた場合の PBL の挙動・破壊メカニズム・ずれ耐力の解明を目的とし，供試体を設計・製作し，曲げ載荷試験を行なった．本研究で得られた結論の一部を以下に示す．

- 1) 当初想定した接合部の設計耐力は98kN・mで，接合部に98kN・m 載荷するのに必要な柱頭水平力は61kNであったが，繰り返し曲げ載荷試験の結果は，それぞれの柱頭水平力の最高荷重は，供試体 No.1では，161.8kN，No.2では188.3kN，No.3では170.8kN となり，すべての供試体の最高荷重は，大きく上回る結果となった．
- 2) PBL 孔部が2面せん断する前，コンクリートから鋼管に作用する支圧力と，載荷方向にある2つの PBL 孔部せん断力が主に曲げモーメントに抵抗すると考えられる．

参考文献

- 1) 日向優裕：コンクリート拘束効果に注目した孔あき鋼板ジベルの合理的活用に関する研究，広島大学大学院修士論文，2008.3
- 2) 森賢太郎，藤井堅，日向優裕，道菅裕一：圧縮を受ける鋼 - コンクリート円形断面柱結合部の孔あき鋼板ジベルの終局ずれ挙動：複合構造の活用に関するシンポジウム，2007.11.
- 3) 道菅裕一，藤井堅，日向優裕，森賢太郎，鋼管内に配置された孔あき鋼板ジベルの挙動に関する実験的研究：鋼構造年次論文集，2007.
- 4) 高嶋豊，蒲原武志，佐々木保隆，小田章治，茂木浩二，梅田法義：孔あき鋼板リブ付鋼管ソケット接合の力学性状に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol153A，2007.3.ppt1321 ~ 1330.
- 5) 岩崎初美，孔あき鋼板ジベルの構造部材における力学特性とせん断強度評価に関する研究，広島大学博士論文，2006.3.