

(21) 圧縮を受ける鋼 - コンクリート円形断面 柱接合部の孔あき鋼板ジベルの終局ずれ挙動

森 賢太郎¹・藤井 堅²・日向 優裕³・道菅 裕一⁴

¹学生会員 広島大学大学院 工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)
E-mail:m073063@hiroshima-u.ac.jp

²正会員 広島大学大学院准教授 工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)
E-mail:ken214f@hiroshima-u.ac.jp

³学生会員 広島大学大学院 工学研究科 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)

⁴正会員 株式会社 IHI 橋梁エンジニアリング部 (〒478-8650 愛知県知多市北浜町11-1)

本研究では、コンクリート拘束効果を活かしたPBLの合理的活用を目的として、鉄筋コンクリートと円形鋼管接合部に孔あき鋼板ジベル(PBL)を適用することを考案した。そこで、コンクリートの拘束効果の程度、ずれ強度、破壊メカニズムを明らかにするために、鋼管の板厚や鋼管内のPBL数に着目し、押し抜き試験を行った。実験結果から、ジベル孔部でのコンクリートが膨張して割れようとする力に対して鋼管が大きく拘束しており、鋼管内に配置されたPBLのずれ強度は通常の押し抜き試験のずれ強度より少なくとも2倍以上上昇することが確認された。また、ずれ強度は鋼管の板厚が厚くなるほど上昇し、鋼管内のPBL数に比例することがわかった。

Key Words : perforated rib shear connector, ultimate slip behavior, confined effect, thickness of steel tube

1. 序論

鋼・コンクリートの複合構造において、異種材料間の応力伝達のためにずれ止めが用いられる。従来、ずれ止めには、スタッドジベルが多用されてきたが、スタッドジベルよりも高いずれ剛性と優れた疲労特性を有していることから、近年、孔あき鋼板ジベルを実構造物へ採用する事例が増加している。孔あき鋼板ジベルは鋼部材に溶接され、構造物のずれに対してジベル孔部でのコンクリートのせん断抵抗によって抵抗する。

孔あき鋼板ジベルの崩壊は、ジベル鋼板の板厚が薄い場合や孔が密に配置されるような場合、プレートの降伏によって起こるが、通常は図-1に示すように、ジベル孔周辺のコンクリートにジベル鋼板と平行なひび割れが発生して耐力を失う崩壊が起こる。筆者らは、コンクリートの破壊に起因してせん断耐力が決まる場合には、孔部コンクリートの破壊強度と、コンクリートの拘束状態によってずれ耐力が大きく影響されることを既に明らかにしている³⁾。

そこで、実構造物への適用に際して、孔あき鋼板ジベルのコンクリートの拘束効果が期待できる合理的な形式

として、図-2に示すように鉄筋コンクリート柱と円形鋼管柱の接合部に孔あき鋼板ジベルを適用することが有益であると考えた。これは、コンクリート充填鋼管柱に設けられた孔あき鋼板ジベルは、鋼管によって拘束力を受け、ずれ耐力が上昇することが期待されるためである。

本研究では、鉄筋コンクリート柱と鋼管柱の接合部に孔あき鋼板ジベルを適用した場合の、鋼管内に配置された孔あき鋼板ジベルの終局ずれ挙動を明らかにする。

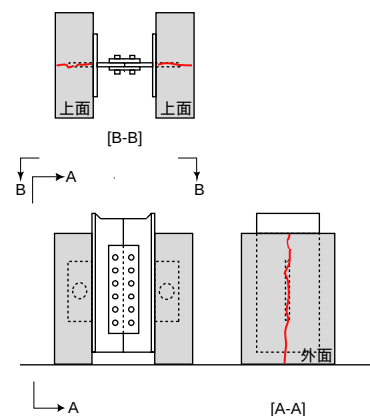


図-1 孔あき鋼板ジベルの一般的な崩壊

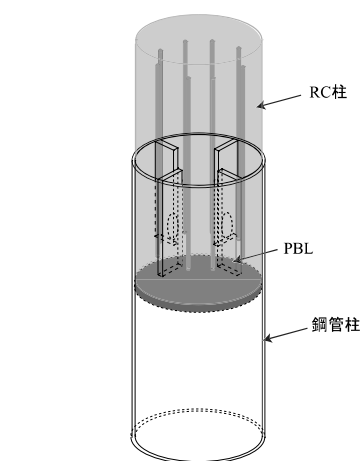


図2 RC柱と鋼管柱の接合部に配置された
孔あき鋼板ジベル

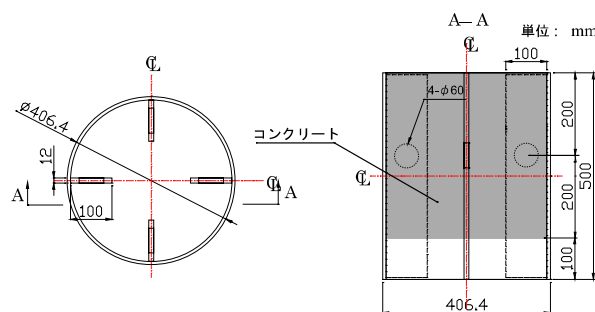


図3 供試体寸法 (ジベル数4枚)

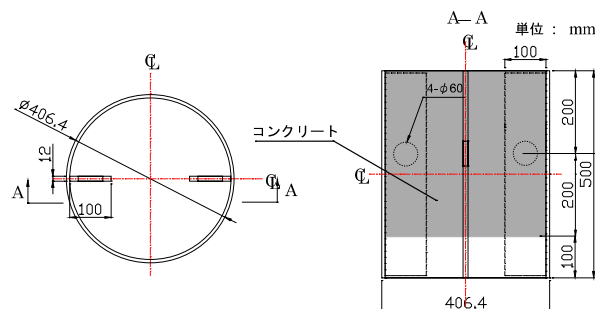


図4 供試体寸法 (ジベル数2枚)

2. 実験方法

(1) 実験供試体

供試体一覧を表-1に、供試体の寸法を図-3～5に示す。すべての供試体について、ジベル鋼板一枚あたりの孔数は1個、鋼板板厚は12mm、ジベル孔径は60mm、鋼管の外径は406.4mmとした。また、鋼管による拘束効果の程度の違いを明らかにするため、鋼管の板厚は6種類、鋼管内のジベル数は3種類用意した。図-3～5に示すように鋼管内のコンクリートは上面から400mmの高さまで打設

し、載荷した際のコンクリートのずれを考慮して100mmの隙間を設けた。また、ジベル孔内以外の全ての鋼表面には剥離剤を塗って、コンクリートと鋼材の付着を取り除いた。本実験で使用したコンクリートの材料特性についても表-1に示している。なお、コンクリートの粗骨材の寸法は20mmであり、供試体の上下を逆にしてコンクリートを打設した。

表-1 供試体一覧

供試体名	鋼管の 板厚 (mm)	PBL 鋼板 の数	コンクリートの材料特性				実験結果		
			ヤング係数 (GPa)	ポアソン比	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	ずれ耐力 (kN)	ずれ耐力 (1孔あたり) (kN)	ずれ (mm)
S.C-B100-t2.3-n4-N-T-No.1	2.3	4	25.2	0.21	37.4	2.79	—	—	—
S.C-B100-t2.3-n4-N-T-No.2	2.3	4	25.2	0.21	37.4	2.79	990	247	15.95
S.C-B100-t2.3-n4-N-T-No.3	2.3	4	25.2	0.21	37.4	2.79	855	214	11.67
S.C-B100-t3.2-n4-N-T-No.1	3.2	4	25.2	0.21	37.4	2.79	826	206	9.02
S.C-B100-t3.2-n4-N-T-No.2	3.2	4	25.2	0.21	37.4	2.79	921	230	8.42
S.C-B100-t3.2-n4-N-T-No.3	3.2	4	25.2	0.21	37.4	2.79	—	—	—
S.C-B100-t4.5-n4-N-T-No.1	4.5	4	25.2	0.21	37.4	2.79	1132	283	11.22
S.C-B100-t4.5-n4-N-T-No.2	4.5	4	25.2	0.21	37.4	2.79	1005	251	10.50
S.C-B100-t4.5-n4-N-T-No.3	4.5	4	25.2	0.21	37.4	2.79	1142	285	10.57
S.C-B100-t6.4-n2-N-T-2005	6.4	2	24.4	0.20	28.7	2.45	718	359	7.82
S.C-B100-t6.4-n3-N-T-2005	6.4	3	24.4	0.20	28.7	2.45	1240	413	7.65
S.C-B100-t6.4-n4-N-T-2005	6.4	4	24.4	0.20	28.7	2.45	1570	393	9.12
S.C-B100-t6.4-n4-N-T-No.1	6.4	4	25.2	0.21	37.4	2.79	1524	381	9.44
S.C-B100-t6.4-n4-N-T-No.2	6.4	4	25.2	0.21	37.4	2.79	1440	360	16.62
S.C-B100-t6.4-n4-N-T-No.3	6.4	4	25.2	0.21	37.4	2.79	1428	357	13.03
S.C-B100-t12-n4-N-T-No.1	12	4	25.2	0.21	37.4	2.79	1744	436	10.46
S.C-B100-t12-n4-N-T-No.2	12	4	25.2	0.21	37.4	2.79	1872	468	9.89
S.C-B100-t12-n4-N-T-No.3	12	4	25.2	0.21	37.4	2.79	2058	515	13.37
S.C-B100-t16-n4-N-T-No.1	16	4	25.2	0.21	37.4	2.79	2189	547	9.96
S.C-B100-t16-n4-N-T-No.2	16	4	25.2	0.21	37.4	2.79	2237	559	11.40
S.C-B100-t16-n4-N-T-No.3	16	4	25.2	0.21	37.4	2.79	2270	567	8.76

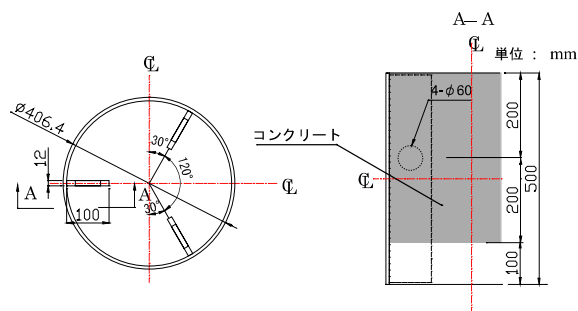


図5 供試体寸法（ジベル数3枚）

(2) 荷荷方法

500tfアムスラー試験機により押し抜き試験を行った。荷荷はすべて荷重制御で行い、荷荷速度は5tf/minを目安にした。図-6に荷荷方法、ダイヤルゲージの位置、ひずみゲージの位置を示す。また、写真-1に荷荷状況を示す。

本実験は孔あき鋼板ジベルのせん断耐力を調べることが目的であるため、図-6に示すように、ジベル位置に切り込みのある治具を用いて荷荷荷重がコンクリートのみ作用する様に配慮した。また、図-6、写真-1に示すように、供試体底面に台形型のテフロン板を12枚並べて配置し、さらにその下に正方形のテフロン板を敷き、この2層の間にオイルを塗布した。これは、鋼管とテストベッド間の摩擦力を軽減し、また鋼管下部での半径方向の広がりを自由にするためである。

図-6に示すように、テストベッドと治具の間の変位をダイヤルゲージで測定し、これをコンクリートのずれ量とした。また、図に示すように、2軸ひずみゲージを鋼管の表裏両面に貼り付け、鋼管の周方向、鉛直方向のひずみを測定した。なお、鋼管の膜ひずみは表裏両面のひずみを平均して求めた。

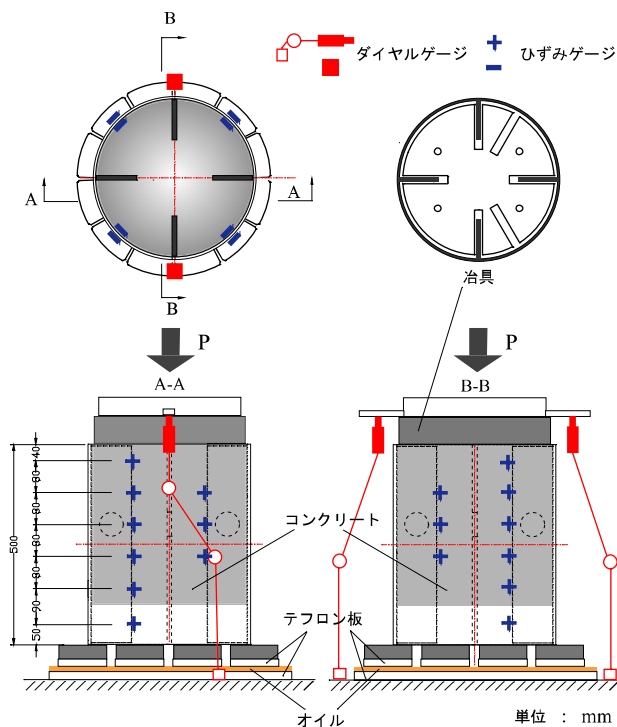


図-6 荷荷方法とダイヤルゲージ測定位置とひずみゲージ測定位置

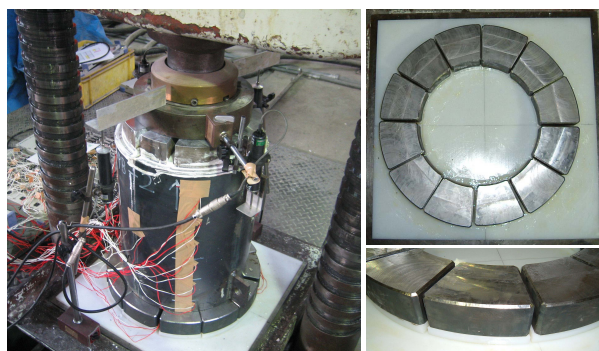


写真-1 荷荷状況とテフロン板の配置

3. 実験結果

(1) せん断耐力

押し抜き試験結果を図-7、8、表-1に示す。図-1に示すような従来の押し抜き試験では、孔一つあたりのせん断力がおよそ100kNであるのに対して、表-1に示す孔一つあたりのせん断耐力はすべての供試体において100kNより大きいことがわかる。供試体の中で鋼管の板厚が最も薄いS.C.B100-t2.3-n4-N-Tでも従来の供試体の2倍以上のせん断耐力が得られた。これは鋼管による拘束効果のためであることは明らかである。

図-7に示すように、荷荷荷重が小さいとき、すべての供試体におけるずれ剛性はほぼ等しい。一方、最大ずれ耐力は鋼管の板厚が厚くなるほど大きくなることから、これより、孔あき鋼板ジベルのずれ耐力は、鋼管の板厚に影響されることがわかる。

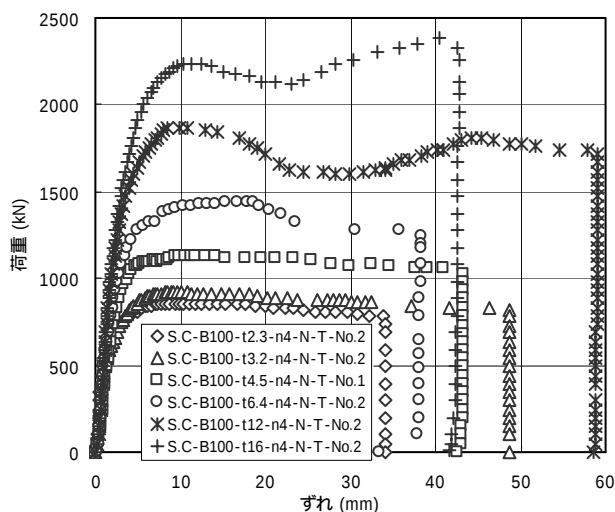


図-7 荷重とずれの関係

ところで図-7で、鋼管の板厚が厚い供試体S.C.B100-t12-n4-N-T-No.2, S.C.B100-t16-n4-N-T-No.2に注目すると、最高荷重後に荷重が一旦減少して再び上昇していることが確認できる。しかし、S.C.B100-t2.3-n4-N-T-No.2, S.C.B100-t3.2-n4-N-T-No.2といった鋼管の板厚が薄い供試体に関しては、最高荷重後もずれ耐力が維持されていることがわかる。

図-8に鋼管の板厚を6.4mmに統一し、鋼管内のジベル鋼板の数を変化させたときの孔一つあたりのせん断力-ずれの関係を示す。図より、孔一つあたりの最大せん断耐力と初期のずれ剛性はほぼ等しいといえる。このことから、鋼管の板厚が等しい場合、ジベル数に比例してずれ耐力は上昇すると判断できる。

(2) 鋼管のひずみ

図-9に荷重とジベル位置での鋼管の周方向ひずみの関係を示す。図から、すべての曲線は、荷重が500kNまでほぼ同じ傾きであることに気づく。しかし荷重が500kNを超えると鋼管の板厚ごとに曲線は変化している。またその後、荷重が最高荷重に達すると、薄い鋼管であるS.C.B100-t2.3-n4-N-T-No.3, S.C.B100-t3.2-n4-N-T-No.1は降伏ひずみよりも大きいことがわかる。一方、鋼管の板厚が12mm以上であるS.C.B100-t12-n4-N-T-No.3, S.C.B100-t16-n4-N-T-No.2はひずみが降伏ひずみに達していない。

図-10に鋼管の板厚4.5mmでの荷重ごとの周方向ひずみ分布、図-11に鉛直方向ひずみ分布を示す。両ひずみは鋼管の上面においてほとんどひずみが発生していないことがわかる。これは、ジベル孔部を通してコンクリートから鋼管に荷重が伝達されているためである。さらに、ジベル孔部より下部分で鋼管が力を受けなければならないので、ジベル孔部より下部分での鉛直方向ひずみは大きい。また、ジベル孔部付近で周方向ひずみが大きいのは、ジベル孔部で鋼管がコンクリートのひび割れを拘束しているためと考えられる。

(3) 崩壊性状

写真-2に実験後における供試体の上下面の様子を示す。すべての供試体についてコンクリートのひび割れは、上下面ともに認められなかった。

そこで、供試体内部に発生したコンクリートのひび割れを確認するため、実験後の供試体を図-12に示す箇所切断した。写真-3に崩壊後のジベル孔部周辺のコンクリートと鋼管を示す。写真より、孔部でのコンクリートは二面せん断破壊をしており、孔部にコンクリートが残っていることがわかる。

二つの供試体におけるコンクリートのひび割れの様子を写真-4, 5に示す。二つの写真を比較すると、鋼管の板厚が3.2mmであるS.C.B100-t3.2-n4-N-Tのコンクリートの

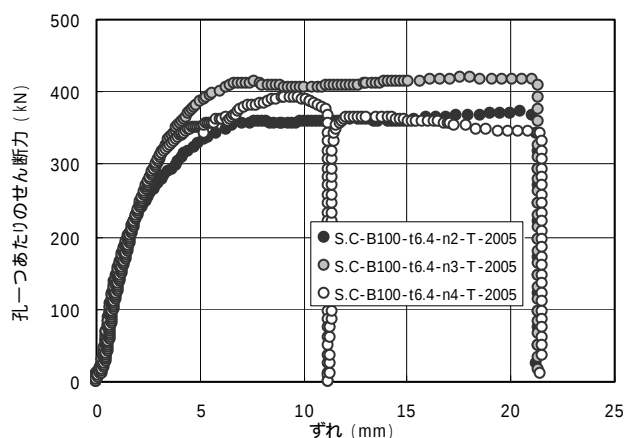


図-8 孔一つあたりのせん断力とずれの関係

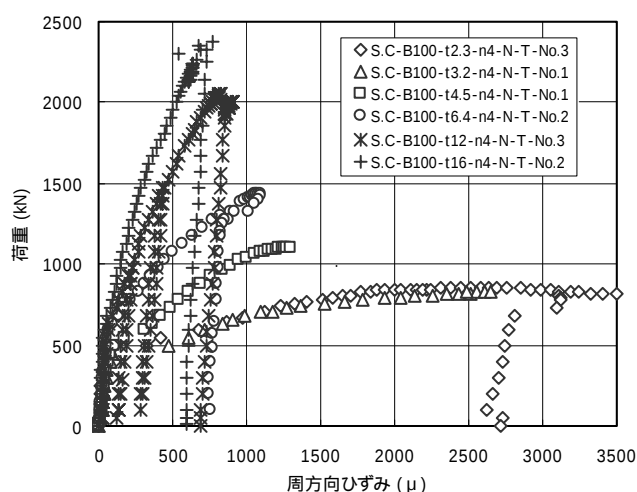


図-9 荷重とジベル孔位置での周方向ひずみの関係

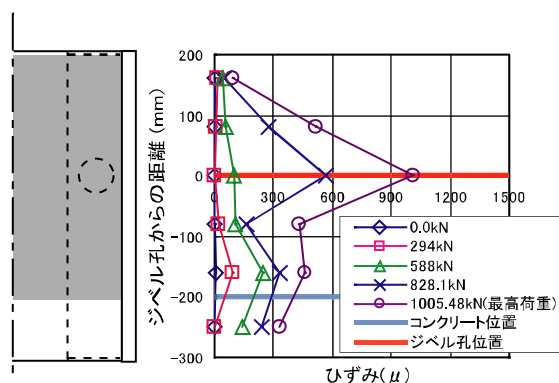


図-10 鋼管の周方向ひずみ分布 (鋼管板厚 4.5mm)

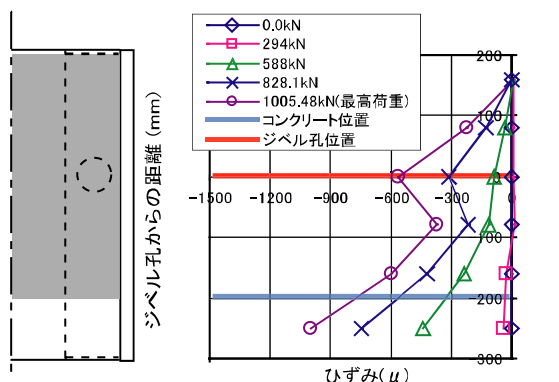


図-11 鋼管の鉛直方向ひずみ分布 (鋼管板厚 4.5mm)



写真-2 実験後の供試体の様子

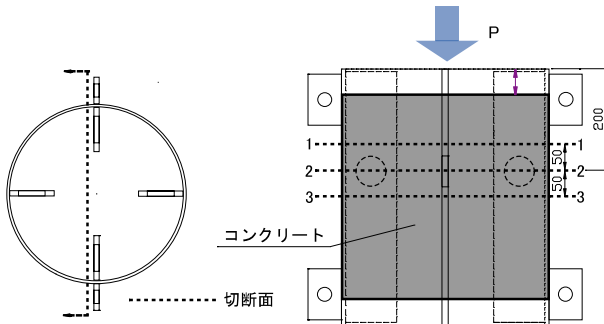


図-12 供試体切断箇所



写真-3 実験後のジベル孔周辺の様子

ひび割れ幅は鋼管の板厚が12mmであるS.C.B100-t12-n4-N-Tより大きい。これは、鋼管の拘束力の違いのためと考えられる。

写真-4, 5に示すように、鋼管内の孔あき鋼板ジベルの崩壊は、コンクリートが円錐型のひび割れを生じることにより崩壊したといえる。また、このひび割れは、垂直線から約 45° に生じている。しかし、ジベル孔部周辺のひび割れに注目すると、その部分だけひび割れの角度が 45° より大きいことに気づく。これは、以下に示すことが推測される。

ジベル孔部でのコンクリートのひび割れは鋼管を周方向に押し広げようとするが、これに抵抗して、図-13に示すように、鋼管にはコンクリートを拘束しようとする力が発生する。その結果、図-14に示すように、ジベル孔に向いた半径方向の圧縮応力が現れ、また、ずれ力によってせん断応力が発生する。これらから、ジベル孔部周辺でのコンクリートのひび割れは 45° より大きくなると考えられる。

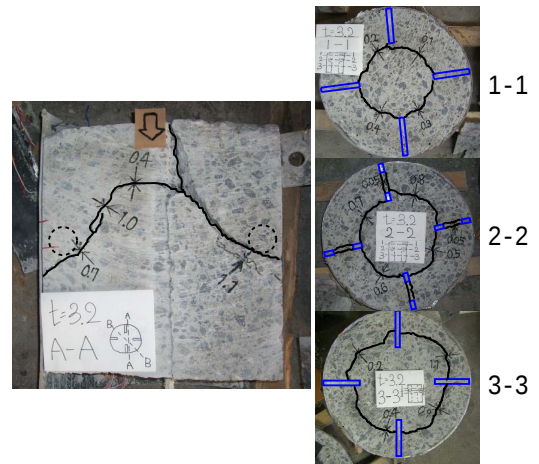


写真-4 供試体内部のひび割れ (S.C.B100-t3.2-n4-N-T)

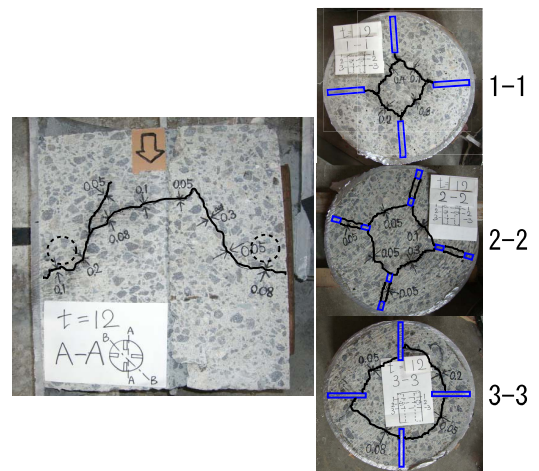


写真-5 供試体内部のひび割れ (S.C.B100-t12-n4-N-T)

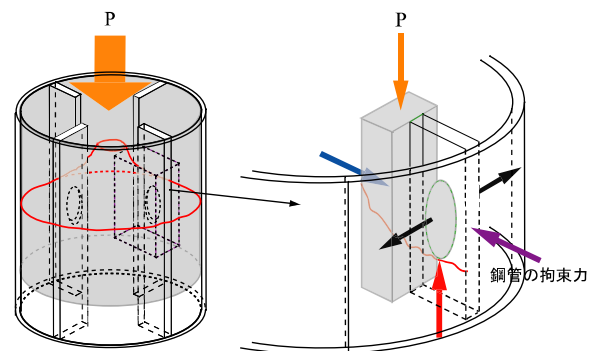


図-13 ジベル孔周辺の力の関係

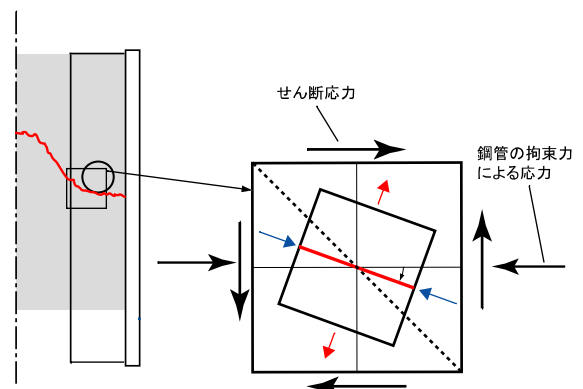


図-14 ジベル孔周辺の応力状態

4. まとめ

本研究では、鉄筋コンクリート柱と円形鋼管柱の接合部におけるずれ止めとして使用される孔あき鋼板ジベルを、コンクリートに対する鋼管の拘束効果に注目して、孔あき鋼板ジベルの終局ずれ挙動を実験的に調べた。

本研究で得られた結論を以下に示す。

鋼管内に配置された孔あき鋼板ジベルのずれ耐力は、通常の押し抜き試験で得られたずれ耐力より少なくとも2倍以上であった。このことから、孔あき鋼板ジベルをコンクリート充填鋼管での接合部として使用することは効果的であると思われる。

ずれ耐力は鋼管の板厚が厚いほど高くなり、また鋼管の板厚が厚いほど、より大きな拘束力が得られることがわかった。さらに、ずれ耐力は鋼管内に配置されたジベル数に比例する。

荷重が最大ずれ荷重に到達した後、鋼管の板厚が薄い場合には周方向ひずみは降伏ひずみより大きくなるが、鋼管の板厚が厚い場合には、降伏ひずみに達しなかった。

鋼管内部のコンクリートのひび割れは、最終的に円錐状のひび割れを生じ、またジベル孔内のコンクリートは二面せん断破壊を生じていた。

参考文献

- 1) Leonhardt F, Andra W, Andra H P, Hare W. : Neues vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit. *Beton-und Stahlbetonbau*, pp. 325-331, 1987.
- 2) 保坂鐵矢, 光木香, 平城弘一, 牛島祥貴: 孔あき鋼板ジベルのせん断強度評価式と設計法に関する研究, 構造工学論文集, Vol.48A, pp. 1265-1272, 2002.
- 3) 深田和宏, 藤井堅, 豊田正, 岩崎初美: 孔あき鋼板ジベルの終局せん断耐力に影響を及ぼすコンクリート拘束因子, 第6回複合構造の活用に関するシンポジウム論文集, Vol.6, pp. 28-1-28-8, 2005.
- 4) 矢木誠一郎, 山本竜哉, 江上武史, 大西悦郎, 吉川孝男: コンクリート充填鋼管のズレ止めに関する実験的研究 - 波形鋼板ジベルの強度特性について, 土木学会第56回年次学術講演会, pp.592-593, 2001.
- 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.
- 6) 藤井堅, 岩崎初美, 深田和宏, 豊田正, 藤村伸智: 孔あき鋼板ジベルの終局ずれ挙動とコンクリート拘束因子, 土木学会論文集(投稿中)。

ULTIMATE SLIP BEHAVIOR OF PERFORATED RIB SHEAR CONNECTORS IN A JOINT CONNECTING CIRCULAR STEEL TUBE AND REINFORCED CONCRETE COLUMN

Kentaro MORI, Katashi FUJII, Masahiro HIMUKAI and Yuuichi DOUKAN

Push-out tests were conducted to clarify the ultimate slip behavior of perforated rib shear connector (called PBL hereafter) used as a shear connector of a joint between a reinforced concrete column and a steel tubular column. The effect of the concrete confinement on PBL set inside of the steel tube was investigated by changing the thickness of the steel tube. From the test results, the following conclusion remarks have been obtained: 1) The slip strength of PBL set inside of steel tubes was at least twice higher than that obtained from the ordinary push out test. 2) The slip strength become higher as the thickness of a circular tube becomes thicker, by the reason of larger confinement produced by thicker steel tube.