

(69) コンクリートが側圧拘束された孔あき鋼板 ジベルのずれ耐荷力に関する研究

民家 洋輔¹・藤井 堅²・道管 裕一³

¹学生会員 広島大学大学院 工学部建築学科 社会基盤環境工学専攻 (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)
E-mail:m133985@hiroshima-u.ac.jp

²正会員 広島大学大学院工学研究院 社会基盤環境空間部門 教授 (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1)

³正会員 (株)IHIインフラシステム (〒590-0977 大阪府堺市大浜西町3番地)

近年、鋼コンクリート複合構造物のずれ止めとして、孔あき鋼板ジベル(PBL)の施工事例が増えてきている。PBLのずれ耐荷力には、ジベル孔部コンクリートの拘束状態に大きく影響することが明らかにされているが、能動的に側圧を作用させた場合の拘束効果が、PBLの破壊挙動やずれ耐荷力及ぼす影響については十分に解明されていない。そこで、本研究では側圧によるコンクリートの拘束効果がPBLのずれ耐荷力とその挙動に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、十字柱供試体のコンクリート部にPC鋼棒により側圧を作用させた状態で、PBLの押し抜き試験を行った。その結果、側圧によるコンクリート拘束効果がPBLのずれ耐荷力を大きく上昇させることを確認した。そして、コンクリートが側圧を受ける場合のPBLのずれ耐荷力評価式を示した。

Key Words : *perfobond strip, slip strength, lateral pressure, confined effect of concrete*

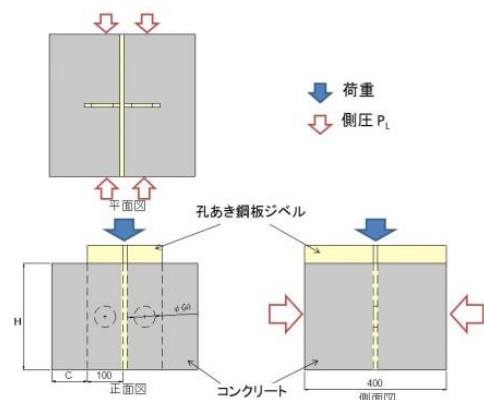
1. 背景・目的

複合構造物において、鋼とコンクリートの間の応力の伝達にずれ止めが使われている。従来、鋼部分とコンクリート部分を一体化させるためのずれ止めには、頭付きスタッドジベルが多様されてきた。しかし、近年では、高いずれ剛性や優れた疲労特性から、孔あき鋼板ジベル(PBL)の施工事例が増加している。

孔あき鋼板ジベルは合成桁用のずれ止めとして、1987年に Leonhardt ら¹⁾によって提案、発表されたもので、その後、わが国でも PBL の力学挙動や終局ずれ耐荷力の解明を試みた多数の研究がある²⁾⁻¹⁰⁾。一般的に PBL のずれ耐荷力は、PBL プレートの降伏か孔部コンクリートの破壊によって決まるとされている。ジベル鋼板が極端に薄い場合や孔が密に配列された場合を除けば、多くの場合、孔部コンクリートの破壊に起因してずれ耐荷力が決まっている。藤井ら¹¹⁾⁻¹⁸⁾は、PBL の破壊形式が孔部コンクリートの破壊に起因する場合、PBL のずれ耐荷力はジベル孔部のコンクリートの拘束状態に大きく影響されることを明らかにした。また、PBL の押し抜き試験における拘束因子は、コンクリートの寸法、かぶり、孔内貫通鉄筋、ジベル板に直交する方向に配置された鉄筋、供

表—1 供試体のパラメータ

供試体名	高さ H (mm)	背かぶり C (mm)	コンクリート幅 W (mm)	ジベル孔 φ (mm)	初期側圧 P _l (kN)
x-c0-h300-0kN	300	0	400	60	0
x-c0-h300-11.5kN-No.1	300	0	400	60	11.5
x-c0-h300-11.5kN-No.2	300	0	400	60	11.5
x-c0-h300-29.5kN-No.1	300	0	400	60	29.5
x-c0-h300-29.5kN-No.2	300	0	400	60	29.5
x-c100-h300-0kN	300	100	400	60	0
x-c100-h300-11.5kN	300	100	400	60	11.5



図—1 供試体形状

試体とテストベッド間の摩擦，があるとしている．しかし，これらの拘束因子はジベルのずれ挙動にともなって出現する受動的な拘束力であり，能動的に側圧を作用させた場合の拘束効果が，PBLの破壊挙動やずれ耐荷力及ぼす影響については十分に解明されていない．

そこで，本研究では，PBLの孔部コンクリートに能動的に側圧を作用させた場合の，コンクリート拘束効果がPBLのずれ耐荷力に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする．

2. 実験概要

(1)供試体概要

本研究では，表—1に示す7体の十字柱供試体の押し抜き試験を行った．また，供試体の形状は図—1に示す通りである．表—1中の背かぶりはジベル端部からコンクリート表面までの水平距離を示す．なお，ジベルプレートの材質はSS400，板厚は12mm，各PBL鋼板の1枚当たりの孔数は1個とし，孔内貫通鉄筋は配置していない．また，コンクリートと鋼材の境界面には，剥離剤を塗布し，コンクリート部とPBL鋼板の付着を除去した．また，表—2および表—3に実験で使用したコンクリートの配合条件および材料特性を示す．

今回の実験では，表—1に示すように，まず背かぶりの無い供試体を用いて，初期側圧の大きさを0kN，11.5kN，29.5kNと変化させて，ずれ耐荷力およびずれ挙動を調べた．次に，背かぶり厚を100mmとして，初期側圧の大きさを0kN，11.5kNとし，背かぶりがある場合の側圧の影響もあわせて示した．

(2)載荷方法

本実験で行った押し抜き試験の状況を図—2および図—3に示す．図—2に示すように，PC鋼棒を用いて孔部コンクリートに側圧を所定の大きさまで作用させた状態で，押し抜き試験を行った．

また，供試体底面には，図—4に示すように，4枚のテフロン板を2層敷き，テフロン板の間には潤滑油を塗布することで，テストベッドと供試体底面との間の摩擦による拘束の影響を受けないように配慮した．

(3)測定項目

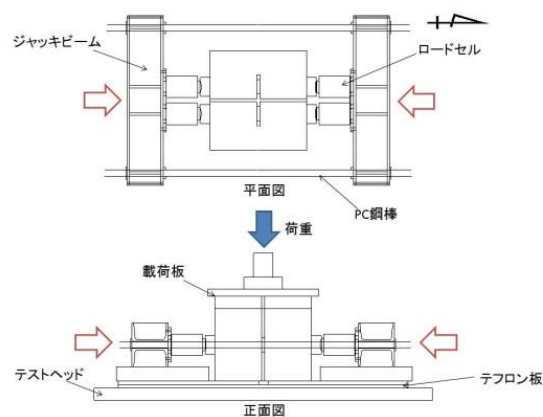
図—5に変位計の取り付け位置を示す．供試体の側面に上下2個ずつクリップゲージを設置し，PBL鋼板とコンクリートの相対ずれを測定する．また，側圧を作用させた供試体は，大きなずれを発生してもずれ力の低下がなく，載荷途中でクリップゲージによるずれ測定が不可

表—2 コンクリートの配合条件

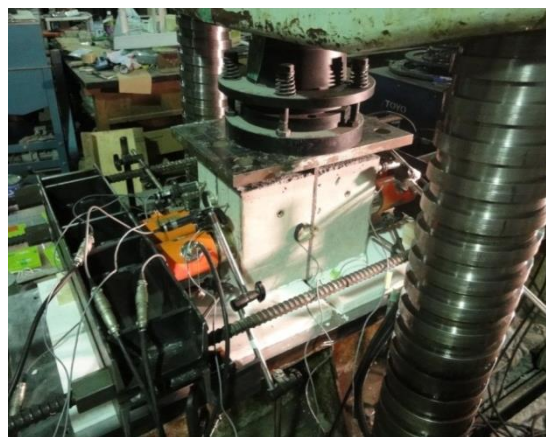
セメントの種類	粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	スランプ (cm)	呼び強度 (N/mm ²)
普通ポルトランドセメント	20	50	10	30

表—3 コンクリートの材料特性

弾性係数 (kN/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	せん断強度 (N/mm ²)
31.2	35.5	2.80	4.98



図—2 載荷試験の概略



図—3 載荷状況



図—4 テフロン板の配置

能となった。この場合、その後のずれ量は、載荷板とテフロン板との間に設置したダイヤルゲージの変化量をずれ量とした（図-6参照）。

また、載荷時のコンクリートブロックの幅の変化（広がり）も、図-5に示すダイヤルゲージを用いて計測した。

3. 実験結果

(1) 荷重—ずれ関係

図-7 および図-8 に荷重—ずれ曲線を示す。これらの図から、背かぶりがある場合もない場合も、側圧が作用すると、ずれ耐荷力（3.2 に求め方を示す）、最高荷重ともに無い場合に比べて格段に上昇することがわかる。また、側圧の値が大きくなるほどずれ耐荷力も大きくなる。このように、PBL のずれ耐荷力は、ジベル孔の拘束状態（側圧）に大きく依存する。

また、図からわかるように、側圧が大きくなるほど初期のずれ剛性（曲線の傾き）も大きくなる。これは、側圧によって鋼板とコンクリート境界面での摩擦力が大きくなることによる。

図-7 と図-8 を比較すると、側圧がない場合、かぶりのある供試体の最高荷重は、無い場合の2倍以上となっている。これは、すでに藤井ら^{11)・10)}が指摘しているように、かぶりにより拘束効果である。一方、側圧がある場合には、x-c100-h300-11.5kN を除いて、ずれ耐荷力を越えても荷重低下は起こらず、徐々に荷重が増加する傾向を示しているのがわかる。ここで、最高荷重は、ずれが 5mm（試験におけるずれ範囲）以上発生しても荷重低下が起こらずさらに荷重増加傾向を示したため、本論文では、載荷を中止したときを最高荷重と呼ぶこととした。この現象は、孔内貫通鉄筋がある場合の従来の押し抜き試験と同様のずれ挙動と考えられる。

ところで、図-8 に示す供試体 x-c100-h300-11.5kN は、ずれが 0.82 mm の時に荷重が一旦低下している。この供試体は、荷重が 77.98kN となったときに背かぶりの表面までひび割れが発生した。この荷重低下は、背かぶりによる拘束力の消滅によると考えられる。その後は、背かぶりのない供試体 x-c0-h300-11.5kN とほぼ同じずれ挙動を呈していることから、背かぶりにひび割れが発生した後は、側圧による拘束力のみで強度を保っていると考えられる。

(2) ずれ耐荷力

図-9 に 1 孔あたりの荷重—側圧曲線を示す。図-9 に示すように、荷重が小さいうちは、側圧はあまり変化しないが、ある荷重を越えると、初期に導入した側圧よりも大きくなり、側圧が急激に増加しはじめる。そし

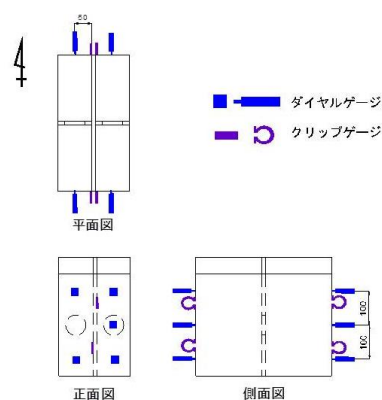


図-5 高感度変位計の取り付け位置



図-6 ダイヤルゲージの設置様子

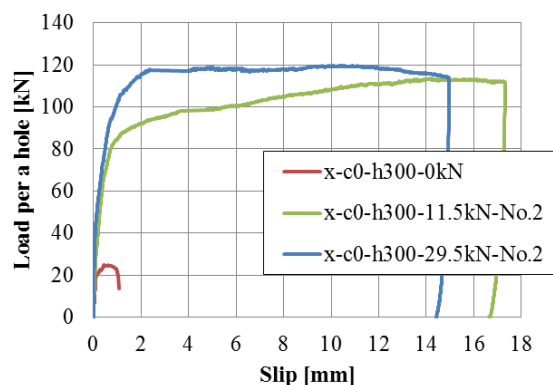


図-7 荷重—ずれ曲線（かぶりコンクリートない場合）

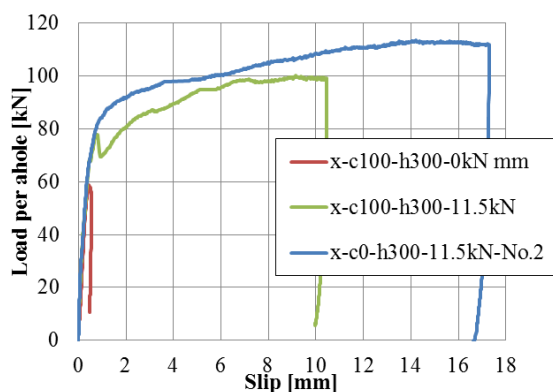


図-8 荷重—ずれ曲線（かぶりコンクリートある場合）

て、ある値に収束する傾向を示す。また、先述のように、最高荷重まで荷重低下は見られなかった。そこで本論文では、図-10 に示すように、側圧が増加しない区間の曲線より側圧が急増した後の曲線を用い、2本の曲線の接線の交点を以て、ずれ耐力力とした。図-9 には、このようにして求めたずれ耐力力を◆で示した。なお、側圧=0 の◆は、側圧のない場合の最高荷重を示す（この場合は、荷重低下が認められている）。表-4 に、試験結果をまとめて示す。

図-10 から、ずれ耐力力は、側圧が大きいほど大きくなることを確認できる。また、側圧がずれ耐力力後急増していることから、ずれ耐力力後おおきなずれを生じても荷重低下が見られないのは、側圧が増加すること起因しているように見える。今回の実験では、側圧を PC 鋼棒を用いて与えているが、これについては、一定の側圧に保持したままの実験等を実施して確認する必要がある。

上記の方法で求めたずれ耐力力とそのときに発生している側圧 P_L の関係を、図-11 に示す。図から 1 孔あたりのずれ耐力力 V_u とずれ耐力力時の側圧 P_L には、ほぼ線形関係が成り立つことがわかる。その傾きを回帰すると 2.5 となった。すなわち、ジベル 1 孔あたりのずれ耐力力 V_u は次式で与えることができる。

$$V_u = V_{int} + 2.5P_L \quad (1)$$

式中の V_{int} は、側圧が無い場合のずれ耐力力であり、ほぼ求めた値と同じであった。

$$V_{int} = k \frac{\pi d^2}{4} \tau_{ct} \quad (2)$$

$$(\tau_{ct} = 0.5 \sqrt{f_{ck} \cdot f_{ct}}) \quad (3)$$

ここで、 k : 破壊形状係数（一面せん断の場合:1, 二面せん断の場合:2）、 d : ジベル孔径、 τ_{ct} : コンクリートのせん断強度、 f_{ck} : コンクリートの圧縮強度、 f_{ct} : コンクリートの引張強度である。

(3) 押し広げ量

図-12、図-13 に 1 孔あたりの荷重—押し広げ量（コンクリートの広がり量）の分布を示す。図-12 から、側圧による拘束力がない供試体は、供試体上面付近は押し広げ量が小さく、底面付近は大きいことがわかる。これは、テフロン板により供試体底面の摩擦が除去されており、コンクリートブロックにはずれ荷重による曲げが作用しているためである。図-13 から、側圧を作用させた場合も、供試体底面の摩擦は除去されており、側圧を作用させない場合と同様と考えられる。

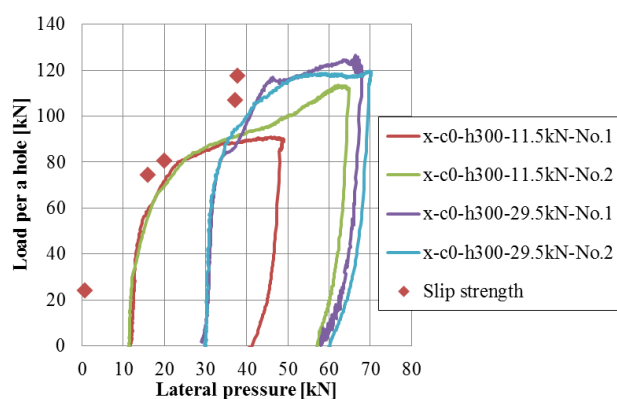


図-9 荷重—側圧曲線

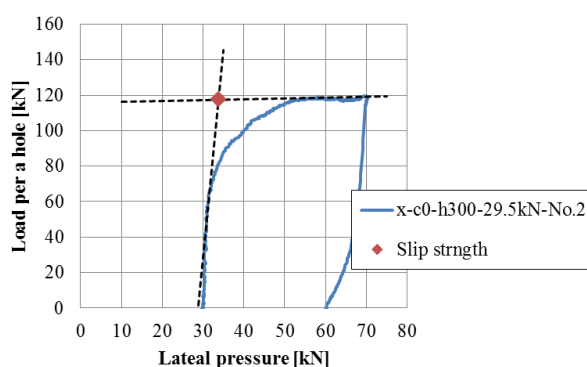


図-10 荷重—側圧曲線 (x-c0-h300-29.5kN)

表-4 実験結果

供試体名	高さ	背かぶり	初期側圧	1孔あたりの ずれ耐力 荷重	ずれ耐力 荷重時の側圧	最高荷重時の 1孔あたりの 荷重	最高荷 重時の側圧
	H (mm)	C (mm)	P_{i0} (kN)	V_{u0} (kN/孔)	P_{L0} (kN)	V_{umax} (kN/孔)	P_{Lmax} (kN)
x-c0-h300-0kN	300	0	0	23.96	0	23.96	0
x-c0-h300-11.5kN-No.1	300	0	11.5	74.43	16.01	81.37	25.4
x-c0-h300-11.5kN-No.2	300	0	11.5	80.52	20.04	92.69	39.93
x-c0-h300-29.5kN-No.1	300	0	29.5	106.87	37.2	115.72	50.13
x-c0-h300-29.5kN-No.2	300	0	29.5	117.55	37.76	119.58	69.81
x-c100-h300-0kN	300	100	0	58.65	0	58.65	0
x-c100-h300-11.5kN	300	100	11.5	77.98	19.19	100.13	53.48

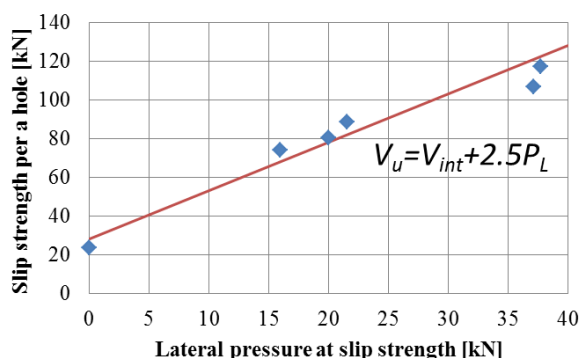


図-11 側圧とずれ耐力力の関係

(3) コンクリートの破壊面

試験終了後にジベル孔に残留したコンクリート表面の状態について、側圧がある場合と無い場合をそれぞれ図-14および図-15に示す。側圧がない場合のコンクリートの破壊面は、この場合は最高荷重後にコンクリートが2分されているので、凸凹が残ったままである。一方、側圧がある場合には、コンクリート内を孔が側圧が作用下状態で移動するので、コンクリート表面の凹凸が削られ、凹凸が小さくなっているのがわかる。

4. 結論

PBLの孔部コンクリートに能動的に側圧力を作用させた場合のコンクリートの拘束効果がPBLのずれ耐荷力に及ぼす影響を調べるために、十字柱供試体にPC鋼棒を用いて側圧を作用させ、押し抜き試験を行った。その結果として、得られた知見を以下に示す。

- 1) 孔部コンクリートに作用させた側圧が大きいほど、PBLのずれ耐荷力は増加する。この増加は、側圧の無い場合に比べて極めて大きい。また、ずれ剛性も大きくなる。ずれ剛性の増加は、コンクリートとジベル板の間の摩擦力に起因する。
- 2) 今回の実験は、側圧をPC鋼棒で与えた。そのため、側圧は、荷重増加に連れて初期に導入した側圧よりも大きくなり、ずれ耐荷力後急増する。
- 3) 荷重は、ずれ耐荷力を過ぎた後も、ほぼ一定あるいは緩やかに上昇しながらずれ量は増加した。このとき、側圧の無い場合のずれは1mm程度であるのに対して、側圧がある場合には6mmを越えて大きなずれを発生した。これは、孔内貫通鉄筋がある場合の挙動と同様である。このとき、側圧拘束を受けたPBLの孔部コンクリートの破壊面は、側圧で抑えられているので、鋼板と孔部コンクリートが擦れあいながらずれ、コンクリートの破壊凹凸面が削られて平らになる。
- 4) 背かぶりのない供試体について、ずれ耐荷力と側圧との関係から、ジベル孔1孔あたりのずれ耐荷力評価式(1)を提案し、本評価式が実験結果をよくとらえていることを示した。

参考文献

- 1) Fritz Leonhardt/Fritz Leonhardt, et al : Neues vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit, Beton-und Stahlbetonbau, pp325-331, Dec. 1987.

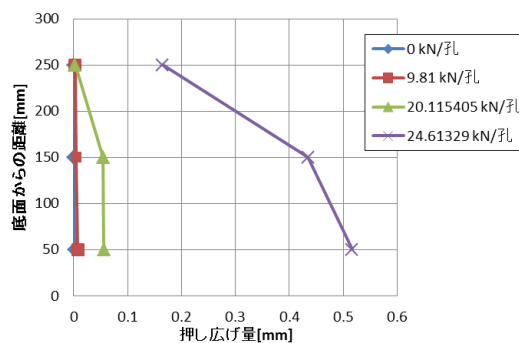


図-12 押し広げ量分布(x-c0-h300-0kN)

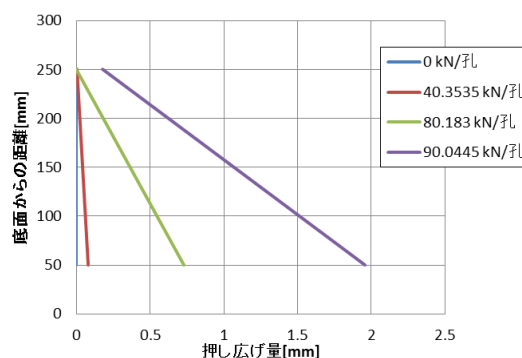


図-13 押し広げ量分布(x-c0-h300-11.5kN-No.1)



図-14 孔部コンクリートの破壊形状
(側圧がない場合)



図-15 孔部コンクリートの破壊形状
(側圧がある場合)

- 2) 保坂鐵矢, 平城弘一, 小枝芳樹, 橘吉宏, 渡辺滉: 鉄道用連続合成桁に用いるずれ止め構造のせん断特性に関する実験的研究: 構造工学論文集, Vol.44A, pp1497~1504, 1998.3.
- 3) 保坂鐵矢, 光木香, 平城弘一, 牛島祥貴, 橘吉宏, 渡辺滉: 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, pp1593~1604, 2000.3.
- 4) 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耐力評価式と設計法に関する研究, 構造工学論文集, Vol.48A, pp1265~1272, 2002.3.
- 5) 平陽兵, 古市耕輔, 山村正人, 富永知徳: 孔あき鋼板ジベルの基本特性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.3, 1998.
- 6) 永田淳, 明橋克良, 渡辺将之: コンクリートの打設方向を考慮した孔明鋼板引抜試験, 土木学会第54回年次学術講演会概要集, I-A149, 1999.9.
- 7) 富永智徳, 西海健二, 室井進次, 古市耕輔: 拘束条件を考慮した孔あき鋼板ジベルのずれ止め特性に関する報告, 土木学会第53回年次学術講演会概要集, I-A323, pp646-647, 1998.
- 8) 西海健二, 沖本真之: 拘束力を考慮した有孔鋼板のずれ止め特性に関する研究, 土木学会論文集, No.633, I-49, pp193-203, 1999.10.
- 9) Fujii, K., Iwasaki, H. and Fujimura, N. : Ultimate Shear Strength of perforated Rib Shear Connector, Advances in Structures, Int. Conf. on Steel Concrete Composite and Aluminum' 03, Vol. 2, pp. 771-776, 2003.
- 10) 岩崎初美, 藤井堅, 豊田正, 藤村伸智: 孔あき鋼板ジベルのせん断強度試験に関する一考察, 土木学会応用力学論文集, Vol.6, pp.487-492, 2003.
- 11) 深田和弘, 藤井堅, 豊田正, 岩崎初美, 藤村伸智: コンクリート拘束効果を考慮した孔あき鋼板ジベルのずれ耐力評価, 第6回複合構造の活用に関するシンポジウム, 2005.
- 12) 岩崎初美, 藤井堅, 豊田正, 深田和宏: 合成桁における孔あき鋼板ジベルのずれ挙動に関する研究, 土木学会構造工学論文集, Vol.51A, pp.1483-1491, 2005.
- 13) 岩崎初美: 孔あき鋼板ジベルの構造部材における力学的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.
- 14) 岩崎初美, 藤井堅, 深田和宏, 天野仁美: 少数主桁橋梁における孔あき鋼板ジベルのずれ挙動に関する研究, 土木学会構造工学論文集, Vol.52A, pp.1073-1082, 2006.
- 15) 日向優裕, 藤井堅, 深田和宏, 道菅裕一: 並列配置された孔あき鋼板ジベルの終局ずれ挙動, 土木学会構造工学論文集, Vol.53A, pp.1089-1098, 2007.
- 16) 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A, Vol.64, No.2, pp.502-512, 2008.
- 17) 森賢太郎, 藤井堅, 道菅裕一, 佐々木達也, 山口詩織: PBLの種々の試験方法におけるコンクリート拘束効果, 土木学会第64回年次学術講演会
- 18) 古川祐輔, 藤井堅, 道菅裕一, 山口詩織: 孔あき鋼板ジベルの押し抜き試験における各種パラメータのずれ耐荷力への影響, 第9回複合構造の活用に関するシンポジウム, 2011.

SLIP STRENGTH OF PERFOBOND STRIP CONFINED WITH LATERAL PRESSURE

Yosuke TAMIYA, Katashi FUJI, and Yuichi DOKAN

Recently, the perfbond strip (PBL), a type of shear connector, has been adopted in many composite structures because of high rigidity and slip strength. Though it has been indicated that PBL slip strength is influenced by concrete confinement at PBL, the confinement effect has not been clarified yet. In this study, push-out tests with lateral pressure given actively were conducted to investigate the effects of the lateral pressure on the slip strength. From the test results, the following conclusions were obtained: 1) The slip rigidity and slip strength became higher due to the lateral pressure, 2) When the specimens were pressed by lateral pressure, the slip loads does not drop or increased gently after the slip strength.