

## (56) 長手方向に複数配置した孔あき鋼板ジベルのせん断力分担特性

中島章典<sup>1</sup>・内藤雅人<sup>2</sup>・鈴木康夫<sup>3</sup>

<sup>1</sup>フェロー会員 宇都宮大学大学院教授 工学研究部学際先端研究部門 (〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2)

Email: akinorin@cc.utsunomiya-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 戸田建設株式会社 関東支店 (〒330-0063 さいたま市浦和区高砂 2-6-5)

<sup>3</sup>正会員 宇都宮大学大学院助教 工学研究部循環生産研究部門 (〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2)

Email: yasuo-s@cc.utsunomiya-u.ac.jp

近年、鋼板に孔を開けてコンクリートと一体化させる孔あき鋼板ジベルをずれ止めとして用いる鋼コンクリート複合構造物の例が増えてきている。孔あき鋼板ジベルが Leonhardt らによって提案、発表されて以来、わが国においても、孔あき鋼板ジベルの実構造への適用性を確認するための実験が種々行われるようになり、さらに、合成桁への適用を念頭においた孔あき鋼板ジベル設計のための設計強度式も提案されている。しかし、孔あき鋼板ジベルの応力伝達方向に複数の孔が配置されている場合、個々の孔がせん断力をどのように分担するのかはあまり明らかにされていない。そこで本研究では、1~3個の孔の空いた孔あき鋼板ジベルを用いた押抜き試験体の静的載荷試験を行い、個々の孔あき鋼板ジベルのせん断力分担特性を検討した。

**Key Words :** steel-concrete hybrid structure, perfobond strip, shear force distribution, push-out test

### 1. はじめに

種々の鋼コンクリート複合構造物が盛んに利用されているが、そのずれ止めとしては頭付きスタッドが一般的である。しかし、近年、土木分野の複合構造物では、鋼板に孔を開けてコンクリートと一体化させる孔あき鋼板ジベルの適用例が増えてきている。

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<sup>1)</sup>によって提案、発表されたものである。わが国における孔あき鋼板ジベルに関する初期の研究として、阿部ら<sup>2)</sup>は鋼はりウェブに孔をあけてずれ止め効果を期待したSRCはりの挙動を検討している。その後、孔あき鋼板ジベルの実用化の観点から、孔あき鋼板ジベルの挙動に及ぼす種々の要因の影響を明らかにしようとする研究<sup>3)-6)</sup>が多数行われている。また、孔あき鋼板ジベルの実構造への適用に関する研究<sup>7)-13)</sup>も種々行われている。さらに、合成桁への適用を基本とした孔あき鋼板ジベル設計のための強度評価式も提案されている<sup>14)-17)</sup>。一方、藤井ら<sup>18)</sup>は孔あき鋼板ジベルのせん断力-ずれ変位関係やせん断耐力に影響する要因を明らかにするため、種々のタイプの試験体を用いて検討を行っている。

しかし、孔あき鋼板ジベルの応力伝達方向に複数の孔を設けた場合、個々の孔がせん断力をどのように分担するのかはあまり明らかにされていない。

そこで本研究では、1~3個の孔をあけた鋼板をコン

クリートブロックで囲む押抜き試験体を用いて静的載荷試験を行い、鋼板のひずみを詳細に調べることによって、個々の孔あき鋼板ジベルのせん断力分担特性を検討した。

### 2. 押抜き試験

#### (1) 試験体

本研究では、1~3個の孔のあいた平鋼板を囲うようにしてコンクリートを打設した直方体の試験体を用いた。この試験体では、鋼コンクリート複合ラーメン橋の鋼上部構造と鉄筋コンクリート橋脚の剛結部に用いられる孔あき鋼板ジベルのように、ある程度拘束効果を有する孔あき鋼板ジベルの状態を再現している。試験体の形状寸法を孔数2個の場合を例として図-1に示す。鋼板の上面から荷重を載荷することによって、鋼板の孔からコンクリートに荷重を伝達させ、そのときのせん断分担特性を調べる。試験体の種類は、表-1に示すような孔の数(1~3個)及び貫通鉄筋の有無が異なる6つのタイプであり、これら6タイプの試験体を3体ずつ製作し、それぞれの試験体に表-1のような名称を付した。

試験体に用いた鋼板は幅100mm、厚さ12mmで、孔径はすべて50mmとし、孔中心間を200mmとした。なお、1つの孔に対して接するコンクリートブロックの

表-1 押抜き試験体の種類

試験体名	孔数	貫通鉄筋
P101, P102, P103	1	無
P111, P112, P113	1	有
P201, P202, P203	2	無
P211, P212, P213	2	有
P301, P302, P303	3	無
P311, P312, P313	3	有

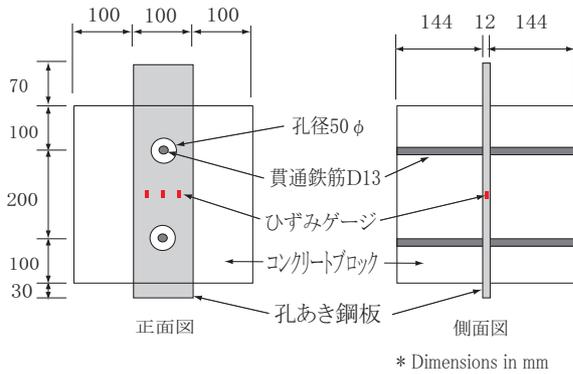


図-1 試験体（孔数2個，貫通鉄筋有り）

長さは孔の上下100mmとし、孔あき鋼板ジベルにある程度の拘束効果を与えることを目的として、コンクリートブロック中にD10の帯鉄筋を2本配置した。そして、孔の数が増えても孔1つに対応するコンクリートブロックの長さが同じになるような試験体とした。貫通鉄筋を有する試験体では、円孔中心にD13の貫通鉄筋を配置した。また、コンクリート打設前に鋼板にはクラフトテープを貼付し、その上にグリースを塗布し極力鋼板とコンクリート間の付着を除去した。

## (2) 測定項目

載荷試験に際しては、鋼板とコンクリートブロック間の相対変位を高感度変位計により計測した。計測位置は、図-2に示すように、鋼板上部からコンクリートブロック上面まで、コンクリートブロック底面から鋼板上部まで、コンクリートブロック底面から鋼板の各孔上端位置のコンクリートまでの3種類である。また、ひずみゲージを、隣接するジベル孔の中央位置に貼り付けた。図-1に示すように、孔数2個の場合、1つ目と2つ目の孔の中央位置において、鋼板表面に25mm間隔で表裏6枚、鋼板側面に右左2枚、計8枚貼り付けた。孔数3個のときは2つ目と3つ目の孔の中央位置にも同様にひずみゲージを貼り、ひずみを計測した。なお、貼り付けたひずみゲージが鋼板とコンクリート間のずれに与える影響を極力小さくするために、ゲージ貼り付け後、上述のように鋼板全体にクラフトテープを貼った。

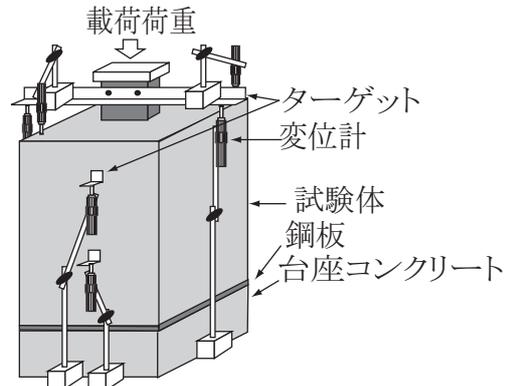


図-2 押抜き試験概要

## (3) 荷重載荷方法

中央に孔をあけたコンクリートブロック及び鋼板からなる台座の上に試験体を置き、アムスラー型万能試験機を用いて、図-2に示すような載荷方法、計測方法で試験を行った。同一条件で作成した3体の試験体のうち2体は単調載荷、残り1体は漸増繰り返し載荷を行った。漸増繰り返し載荷では、鋼板とコンクリートの相対変位が1mm増えるごとに除荷と載荷を繰り返した。

## (4) 使用材料

試験体には、組骨材の最大寸法25mm、呼び強度 $30\text{N/mm}^2$ のレディーミクストコンクリートを使用した。載荷試験実施時のコンクリートの圧縮強度、弾性係数の平均値はそれぞれ $35.6\text{N/mm}^2$ 、 $33.6\text{kN/mm}^2$ である。また、貫通鉄筋D13の降伏強度、引張強度はそれぞれ $380\text{N/mm}^2$ 、 $495\text{N/mm}^2$ であり、帯鉄筋D10の降伏強度、引張強度はそれぞれ $373\text{N/mm}^2$ 、 $478\text{N/mm}^2$ である。さらに、孔あき鋼板の降伏強度、引張強度はそれぞれ $306\text{N/mm}^2$ 、 $452\text{N/mm}^2$ である。

## 3. 試験結果と考察

### (1) 載荷荷重とずれ変位の関係

各試験体の載荷荷重とずれ変位の関係を孔数ごとに図-3に示し、貫通鉄筋の有無によるせん断耐力の違いを比較する。図の横軸のずれ変位は、試験体の一番上の孔位置のコンクリートと載荷点直下の鋼板の相対ずれ変位を表し、鋼板の縮みを考慮して求めた値であり、縦軸は試験体への載荷荷重である。図の青い実線が貫通鉄筋がない試験体の結果であり、赤い破線が貫通鉄筋を有する試験体の結果である。貫通鉄筋がない場合、載荷荷重が最大値に到達した後、徐々に荷重が減少している。これに対して、貫通鉄筋がある場合には、載荷荷重が最大値に到達した後でも、荷重はほとんど減少せずに一定値を保っており、特に、孔数が3個の場合にはずれ変位が10mmを越えると、さらに荷重が増

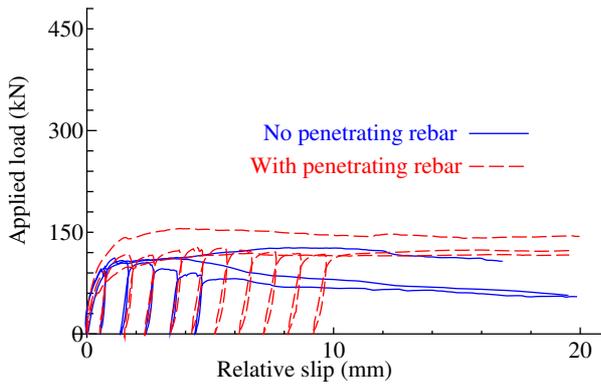


図-3-a 孔数 1

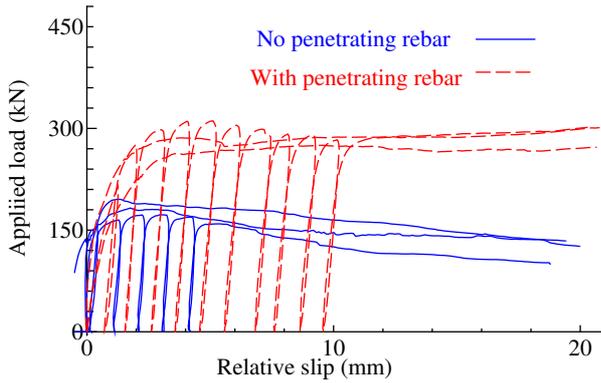


図-3-b 孔数 2

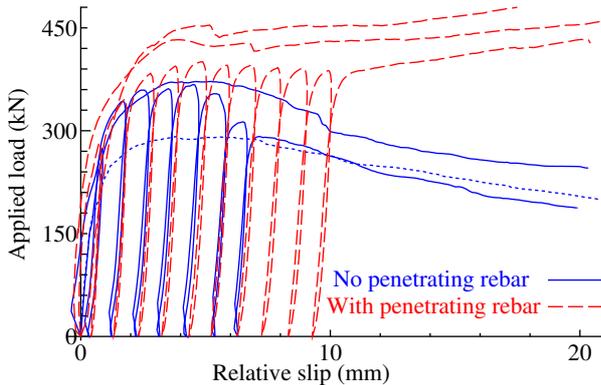


図-3-c 孔数 3

図-3 載荷荷重とずれ変位の関係

加傾向にある。この荷重が増加する理由は、鋼板とコンクリートとの相対ずれによって貫通鉄筋が孔内を移動して鋼板に接近するためである。また、ばらつきはあるものの貫通鉄筋を有する場合のほうが最大荷重は大きいことがわかる。

## (2) 最大せん断耐力と孔数の関係

各試験体の最大せん断耐力は、図-3 に示した載荷荷重とずれ変位の関係において、ずれ変位 10mm 以内に示した最大荷重とし、最大せん断耐力と孔数の関係を図-4 に示す。図の縦軸は最大せん断耐力を、横軸は孔数であり、赤が貫通鉄筋有り、青が貫通鉄筋なしの場合である。この図から、貫通鉄筋の有無によらず、孔

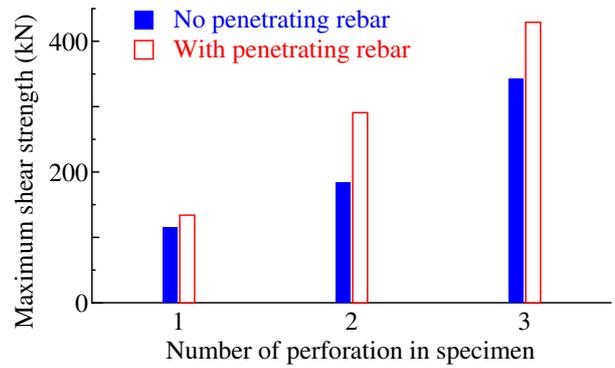


図-4 孔数と最大せん断耐力の関係

の数が増えるに従って、最大せん断耐力も増加することがわかる。また、孔の数によらず貫通鉄筋を有する試験体のほうが貫通鉄筋のない試験体に比べ最大せん断耐力は大きい。最大せん断耐力を比較すると、孔数 1 個の試験体に比べ孔数 2 個の試験体は、貫通鉄筋のない場合は約 1.6 倍の増加、貫通鉄筋の有る場合は約 2 倍の増加が見られる。さらに、孔数 1 個の試験体に比べ、孔数 3 個の試験体は貫通鉄筋の有無によらず約 3 倍の耐力増加が見られる。なお、孔数の増加に伴うせん断耐力の増加割合は、古内らの研究<sup>16)</sup>の場合よりも大きい。

## (3) せん断力の分担

次に、鋼板に複数個設けた場合の 1 個の孔あき鋼板ジベルのせん断力分担を検討する。ここでは、孔間の中央断面に複数枚貼付けたひずみゲージの平均ひずみから求めた軸力を、孔間の鋼板に働いている軸力と見なし、孔の上下の鋼板に働いている軸力の差から、その孔が伝達するせん断力を算定する。ただし、1 つ目のジベルが伝達するせん断力は載荷荷重と孔の下の鋼板の軸力より算定する。

ここで、孔数 2 個で貫通鉄筋を有する試験体の単調載荷時の場合を例として、ひずみから求めた軸力に基づいて算定した 1 つ目のジベルが伝達するせん断力分担と載荷荷重の関係を図-5 に示す。縦軸は 1 つ目のジベルが伝達するせん断力の載荷荷重に対する割合を、横軸は載荷荷重を表している。この図から、載荷荷重が大きくなるにつれて 1 つ目のジベルが伝達するせん断力の割合は減少して 60% 程度に漸近する傾向が認められる。これは、1 つ目と 2 つ目のジベルが伝達するせん断力の大きさが異なるためであると考えられる。一方、孔数 3 個で貫通鉄筋を有する試験体の単調載荷時の場合について、各ジベルが伝達するせん断力分担と載荷荷重の関係を図-6 に示す。この図では、縦軸は各ジベルのせん断力分担割合を、横軸は載荷荷重である。また、黒線、赤線、青線が、それぞれ 1 つ目、2 つ目、3 つ目のジベルが分担するせん断力であり、実線及び破線がそれぞれ試験体 P311 及び P312 の結果である。こ

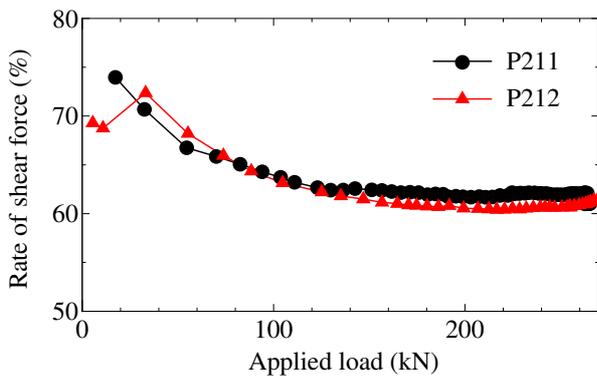


図-5 セン断力分担と載荷荷重の関係 (孔数 2 個)

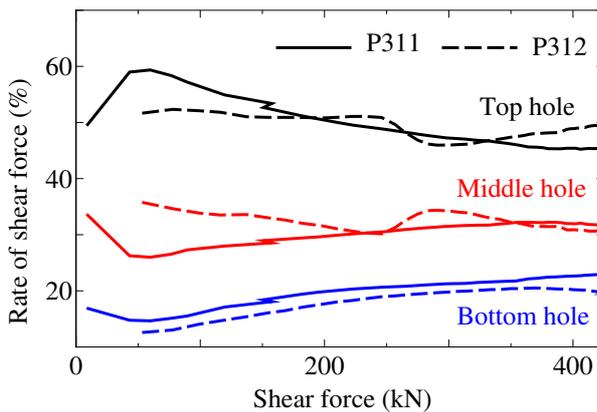


図-6 セン断力分担と載荷荷重の関係 (孔数 3 個)

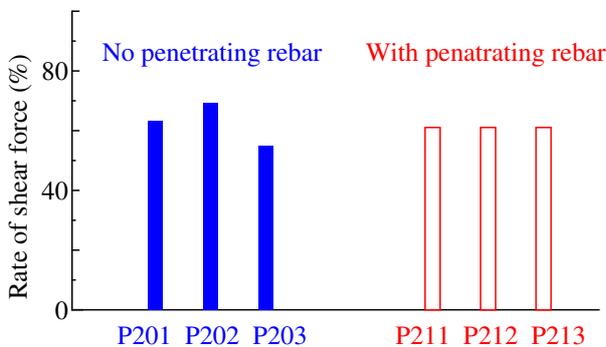


図-7 孔数 2 における 1 つ目のジベルのせん断力分担割合

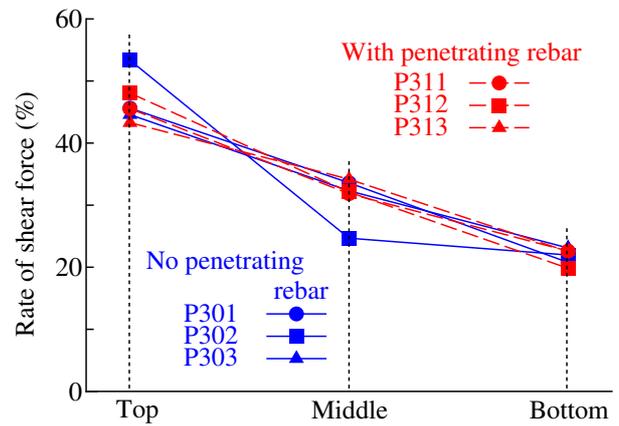


図-8 孔数 3 における各ジベルのせん断力分担割合

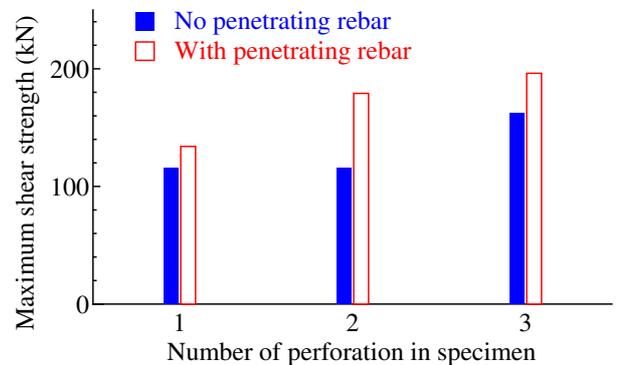


図-9 各試験体の 1 つ目のジベルの最大せん断耐力

の図からも載荷荷重の大きさとともに各ジベルが伝達するせん断力の割合が変化する傾向が認められる。そこで、ひずみゲージによって軸力が算定された範囲で最も荷重が大きい時の結果を用いて各孔あき鋼板ジベルのせん断力分担を算定する。

以上のようにして求めた各孔あき鋼板ジベルのせん断力分担割合を図-7 及び図-8 に示す。孔数 2 個の結果を示す図-7 では、縦軸が 1 つ目のジベルのせん断力分担割合であり、横軸が試験体名である。貫通鉄筋がない試験体の場合少しばらつきが見られるが、孔数 2 の試験体の 1 つ目のジベルのせん断力分担は平均すると 60%程度であり、これは、貫通鉄筋を有する試験体とほとんど同じであることがわかる。一方、孔数 3 個

の結果を示す図-8 では、縦軸が各ジベルのせん断力分担割合を、横軸が上、中、下段のジベルを表している。この図から、分担割合が大きく異なる P302 の試験体を除くと、貫通鉄筋の有無にかかわらず、試験体の各ジベルのせん断力分担は、上、中、下段のジベルの順で大きいことが確認できる。その分担割合もほぼ同程度で、貫通鉄筋の有無による違いはあまり認められない。孔数 3 個の試験体におけるせん断力の分担割合は、1 つ目のジベルで約 50%、2 つ目のジベルで約 30%、3 つ目のジベルで約 20%となっている。

図-4 に示された試験体としての最大せん断耐力と図-7 及び図-8 に示した個々の孔あき鋼板ジベルのせん断力分担から、各試験体の 1 つ目の孔あき鋼板ジベルの最大せん断耐力を算定した。その結果を図-9 に示す。図の縦軸は 1 つ目のジベルの最大せん断耐力を、横軸は試験体の孔数を表している。この図から、1 つ目のジベルの最大せん断耐力は、孔数とともに増加する傾向が認められる。これは、孔数の増加により、押抜き試験体全体としてジベル孔に作用する拘束効果が大きくなったためと考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、1～3個の孔を空けた鋼板をコンクリートブロックで囲む押抜き試験体を用いて静的載荷試験を行い、鋼板のひずみを詳細に調べることによって、個々の孔あき鋼板ジベルのせん断力分担特性を検討した。

本研究を通して得られた主な知見をまとめると以下のようである。

1. 貫通鉄筋がない場合には、最大荷重に到達した後、荷重が徐々に減少するが、貫通鉄筋がある場合には、最大荷重に到達した後の荷重低下はほとんど認められない。
2. 試験体の孔数が増えるに従って、貫通鉄筋の有無によらず、試験体上段の孔あき鋼板ジベルのせん断耐力は増加する傾向が認められる。
3. 貫通鉄筋の有無によらず、孔数2個の試験体では、上下の孔あき鋼板ジベルが分担するせん断力は6:4程度、孔数3個の試験体では、上中下の孔あき鋼板ジベルが分担するせん断力は5:3:2程度である。ただし、載荷荷重の大きさによって分担割合は変化する。

#### 参考文献

- 1) Leonhardt, F., Andrä, W., Andrä, H.P. and Harre, W. : Neues, vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit, Beton- und Stahlbetonbau, 82 Heft 12, pp.325-331, 1987.
- 2) 阿部英彦, 中島章典 : SRC はりのウェブ面のずれ止め効果, 構造工学論文集, Vol.34A, pp.307-314, 1988.3.
- 3) 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, pp.859-864, 1998.
- 4) 西海健二, 富永知徳, 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研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.3, pp.865-870, 1998.
- 5) 西海健二, 沖本眞之 : 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, pp.193-203, 1999.10.
- 6) 上中宏次郎, 赤城尚宏, 鬼頭宏明, 園田恵一郎 : パーフォ

ボンドストリップ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.1605-1616, 2000.3.

- 7) 望月秀次, 安藤博文, 宮地真一, 柳澤剛文, 高田嘉秀 : 孔あき鋼板ジベルを用いた混合桁接合部の静的力学特性に関する実験的検討, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.1479-1490, 2000.3.
- 8) 中州啓太, 依田照彦, 佐藤幸一, 櫻田道博 : 鋼板孔のずれ止めを用いた波形鋼板ウェブを持つ合成桁の面外曲げ挙動に関する研究, 土木学会論文集, No.647/I-51, pp.267-279, 2000.4.
- 9) 本間宏二, 平田尚 : 孔あき鋼板ジベルを用いた鋼桁-RC橋台接合構造の実験的研究, 鋼構造論文集, 第8巻, 第30号, pp.23-30, 2001.6.
- 10) 明橋克良, 永田淳, 木水隆夫, 西川孝一 : コンクリートの打設方向を考慮した孔あき鋼板のせん断強度特性に関する実験的研究, 鋼構造論文集, 第8巻, 第31号, pp.81-87, 2001.9.
- 11) 高木優任, 中村俊一, 室井進次 : PBL を用いた複合ラーメン橋隅角部に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.49A, pp.1063-11074, 2003.3.
- 12) 岩崎初美, 藤井堅, 豊田正, 深田和宏 : 合成桁における鋼板ジベルのずれ挙動に関する研究, 構造工学論文集, Vol.51A, pp.1483-1491, 2005.3.
- 13) 高嶋豊, 蒲原武志, 佐々木保隆, 小田章治, 茂木浩二, 梅田法義 : 孔あき鋼板リブ付き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, Vol.53A, pp.1321-1330, 2007.3.
- 14) 保坂鐵矢, 光木香, 平城弘一, 牛島祥貴, 橘吉宏, 渡邊滉 : 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, pp.1593-1604, 2000.3.
- 15) 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実験的研究, 構造工学論文集, Vol.48A, pp.1265-1272, 2002.3.
- 16) 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, 第6回複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, No.26, 2005.11.
- 17) 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.
- 18) 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, 2008.6.

## SHEAR STRENGTH DISTRIBUTION OF PERFOBOND STRIP WITH PLURAL LONGITUDINAL HOLES

Akinori NAKAJIMA, Masato NAITO and Yasuo SUZUKI

Recently, the perfobond strip is widely applied to the civil steel-concrete hybrid structures. The perfobond strip is a kind of a shear connector and is composed of the steel plate with the holes surrounded by the concrete. Since the perfobond strip was proposed by Leonhardt et al., various experiments are conducted to confirm the efficiency in applying the perfobond strips to the actual hybrid structures. Furthermore, the design resistance formula of the perfobond strip is proposed for taking into account the application to the steel-concrete composite structure. However, the shear strength distribution of the perfobond strip with the plural longitudinal holes is not clear. In this research, the static push-out test of the perfobond strip with plural longitudinal holes is conducted and the shear force distribution of the each perfobond strip is examined.