(53) 孔あき鋼板ジベルの引張破壊性状

味岡 史晃1・齋藤 啓一2・青山 尚樹2・西村 泰志3

¹正会員 大阪工業大学大学院 工学研究科建築学専攻 (〒535-8585 大阪府大阪市旭区大宮5丁目16-1) E-mail:abc two 123@yahoo.co.jp

²正会員 大和ハウス工業株式会社 総合技術研究所 新構法研究グループ (〒631-0801 奈良市左京6-6-2) E-mail:n-aoyama@daiwahouse.jp

³正会員 大阪工業大学教授 工学部 建築学科 (〒535-8585 大阪府大阪市旭区大宮5丁目16-1) E-mail:nishimura@archi.oit.ac.jp

孔あき鋼板ジベル(以下, PBLと呼ぶ)をS部材とRC部材が直列的に接合される切替え部への応用の可能 性を実験的に明らかにするため、PBLに設けた孔数、孔位置、鋼板厚さ、挿入筋の有無およびRC部材に対 するPBLの配置位置を変数とする試験体を用いてPBLの引張破壊性状を実験的に検討した。その結果、 PBLの最大耐力は孔数や孔位置の深さに比例して大きくなることが明らかにされた。また、PBLの孔に挿 入筋を配筋することによって、耐力、変形性能とも向上させる働きを有していることが示された。さらに、 PBLに設けられた孔の埋込み深さによる耐力評価法が提案された。

Key Words : Reinforced Concrete Member, Steel Member, Joint, Perfobond Plate Connector, Failure Behavior, Stress Transferring Mechanism

1. 序

孔あき鋼板ジベル (Die Perfobond-Leiste:以下,PBLと 呼ぶ)は、図-1に示すように円孔に充填されたコンクリ ートのせん断耐力を利用するもので、土木構造物ではし ばしば用いられている¹⁾。PBLは施工性にも優れている ので建築構造物にも応用する価値があると考えられる。

本研究は、PBLをS部材とRC部材の切替え部に活用す ることを念頭に、PBLの引張破壊性状を実験的に明らか にすることを目的とする。



図-1 土木構造物における PBLの使用例

2. 実験概要

図-2に中心, 偏心引張試験体の形状, 寸法及び配筋詳細を示す。

実験はPBLをRC断面の中心に配置した場合と中心から75mm一軸偏心させた場合の2種類計画した。

RC部材は全試験体同じであり,寸法は300×300×425 mmである。主筋はD16 (SD295) を8本,せん断補強筋は D6 (SD295) が50mm間隔で配筋されている。PBLは 120×425mmの鋼板に直径50mmの孔が設けられ,RC上面 から325mm埋め込まれている。PBL表面には付着による 影響を除去するためグリスが塗布されている。

PBL0シリーズは、孔の位置をコンクリート上面から 50、125、200、275mmとして計4個設け、板厚を6、9、 12mmの3種類とした。PBL1~4シリーズではPBL0シリー ズの孔に対するようにそれぞれ1個の孔を配置した。な お、孔の位置が浅い試験体から順にPBL1、2、3、4とし ており、PBLの板厚は12mmである。また、これらの試 験体の各孔に挿入筋D10 (SD295) を配置した試験体も計 画した。表-1に試験体一覧、表-2に材料の力学的特性を 示す。

載荷は図-2に示すように引張力を単調に負荷した。

図-3に最終破壊状況の数例を示す。中心引張において、 孔が1個のPBL1、2試験体は孔の位置近傍に水平および 鉛直ひび割れが発生した。一方、PBL3、4試験体はひび 割れはほとんど観察されなかった。孔が4個の試験体で は、板厚が6mmの試験体は最上部の孔付近に、板厚が9、 12mmの試験体は上から1、4番目の孔付近に水平および 鉛直ひび割れが発生した。これらは最大耐力発揮までに 発生し、最大耐力発揮後、顕著なひび割れは観察されず、 上部のコンクリートが浮き上がるのみであった。なお、 挿入筋を有する試験体でも同様の傾向が見られた。

偏心引張において,孔が1個の試験体では図-3に示す ように最初にA面にひび割れが発生し,そこからB,D 面にひび割れが進展した。これはA面のかぶり厚さが小 さいためである。孔が4個の試験体においても,板厚に

300

表-1 試験体一覧

	試験体名	孔位置	板厚t	挿入筋
PBL1~ 4シリーズ	PBL1-t12(e) ^{*)}			無
	PBL1-t12(e)R			有
	PBL2-t12(e)		12mm	無
	PBL2-t12(e)R			有
	PBL3-t12(e)			無
	PBL3-t12(e)R			有
	PBL4-t12(e)			無
	PBL4-t12(e)R			有
PBL0シリーズ	PBL0-t6(e)		6mm	無
	PBL0-t6(e)R			有
	PBL0-t9(e)	Haaa	9mm 12mm	無
	PBL0-t9(e)R	Hagge		有
	PBL0-t12(e)			無
	PBL0-t12(e)R			有

^{*) &}quot;e"は偏心引張を受ける試験体を意味する



図-2 試験体の形状, 寸法及び配筋詳細

表-2	使用材料の力学的特性
-----	------------

材料		降伏応力度 σ_y		引張強度 σ_u		ヤング係数 E_s	
		(N/mm^2)		(N/mm^2)		$\times 10^{5} (\text{N/mm}^2)$	
		中心引張	偏心引張	中心引張	偏心引張	中心引張	偏心引張
	PL6	212	287	307	429	2.00	2.00
PBL	PL9	306	282	413	417	2.00	2.01
	PL12	294	280	394	392	2.04	1.99
主筋	D16	342	342	502	502	1.74	1.74
せん断補強筋	D6	417	417	477	477	1.80	1.80
挿入筋	D10	358	358	486	486	1.75	1.75
材料		圧縮引	闺度 F_c	割裂引	$ \pm gF_t $	ヤング	係数E _c
		(N/mm^2)		(N/mm^2)		$\times 10^4 (\text{N/mm}^2)$	
コンクリ・	- ŀ	27.5	28.5	2.30	2.71	2.09	2.11

*) コンクリートの材料強度は各試験体ごとに計測し、その平均値とした。





図-3 最終破壊状況



(a) PBL4-t12



(b) PBL0-t12R

図-4 PBL 近傍の切断面のひび割れ状況

関わらず、すべての試験体でA面のひび割れが顕著である。最大耐力発揮までに、上から1番目の孔に水平および鉛直ひび割れが生じ、発揮後は4、2、3番目の順に水 平ひび割れが発生し、上部のコンクリートが浮き上がる のみである。なお、挿入筋を有する試験体の方が、ひび 割れが多く見られた。

図-4に実験終了後のPBL近傍の切断面のひびわれ状況を示す。

図-4 (a)のPBL4t12試験体を見ると、孔に充填されたコ ンクリートがせん断破壊していることがわかる。これは PBL3-t12試験体でも同様の傾向が見られた。一方、図-4 (b)のPBL0-t12R試験体を見ると、孔の位置近傍からコン クリートの圧縮束が形成されたと考えられるひび割れ状 況が観察される。

4. 荷重変形曲線

図-5に荷重変形曲線を示す。縦軸は負荷された荷重P, 横軸はRC部材の伸び量とPBLの引抜き量を含む全体変 位 δ である。中心,偏心引張ともに,各試験体の初期剛 性は,孔が1個のものよりも4個の方が若干大きくなって おり,ひび割れが生じるまでは大きな相違はみられない。

中心引張において,孔が1個の試験体では,孔の位置 が深いほど最大荷重が大きい。PBL1試験体は挿入筋の 有無に関わらず,最大荷重に達した後,急激に耐力が低



図-5 荷重変形曲線

下した。これはコンクリートがコーン破壊したためである。PBL3、4試験体では挿入筋を有することで耐力低下が小さくなり、最大荷重も大きくなったが、変位 δ =30mm付近で挿入筋が破断した。

孔が4個の試験体において、板厚が6mmの試験体では 挿入筋の有無に関わらず、荷重80kN付近で剛性が低下 している。これはPBL鋼板が薄いために鋼板が降伏する ためである。板厚が9,12mmの試験体では最大荷重に大 きな相違は見られない。これは挿入筋を有する場合でも 同じである。

偏心引張において,孔が1個の試験体では,挿入筋を 有する場合,孔の位置が深いほど最大荷重が大きいが, 挿入筋が無い場合は孔の位置に関わらず,概ね同じであ る。これはかぶりコンクリートが破壊したためと考えら れる。PBL1試験体では中心引張と同様にコンクリート がコーン破壊したため最大荷重に達した後,急激に耐力 が低下した。PBL2~4試験体では挿入筋を有する場合, 無い試験体に比べ耐力の低下が小さい。なお,PBL4t12R試験体では,変位δ=22mmで挿入筋が破断した。

孔が4個の試験体において、板厚が6mmで挿入筋を有 する試験体では荷重120kN付近でPBL鋼板が降伏したた め剛性が低下し、以降緩やかに耐力が上昇している。そ の他の試験体では挿入筋を入れることで耐力の低下は小 さくなっているが、最大荷重は挿入筋の有無や板厚に関 わらず、概ね同じである。これは孔が1個の場合と同様 に、かぶりコンクリートが破壊したためと考えられる。

5. 実験変数による最大荷重の相違

図-6に中心引張および偏心引張の各試験体の最大荷重 を示す。縦軸は最大荷重P,横軸はコンクリート上面か らの孔の深さh,あるいはPBLの板厚tを表す。なお、太 破線はPBL鋼板の板厚が6mmの降伏荷重、細破線はPBL 鋼板の板厚が9mmの降伏荷重である。

PBL1試験体は中心, 偏心引張ともに挿入筋の有無に 関わらず, 最大荷重は概ね同じ値となっている。これは, コンクリートがコーン破壊したためである。PBL2~4試 験体において, 中心引張では孔の位置が深くなるほど最 大荷重は増加しているが, 偏心引張では孔の位置による 最大荷重の違いがあまり見られない。これは偏心引張で はかぶりコンクリートが破壊しているためである。

一方, 孔が4個の試験体において, 中心引張では板厚 が大きいほど最大荷重は増加しているが, 偏心引張では 板厚に関わらず, 概ね同じ値となっており, 最大荷重は 中心引張の方が大きくなっている。これは偏心引張では 孔が1個の場合と同様に, かぶりコンクリートが破壊し たためである。なお, 図-6に示すように板厚が6mmの試



図-6 最大荷重の比較







図-8 せん断補強筋の軸ひずみ & と & の 関係 (PBL0-t12R)

	式の提案者	提案式
(1)	Leonhardt, W.Andra	$Q = 1.08 \cdot f + 2 \cdot \pi/4 \cdot d^2$
	H.Andra and Harre ²⁾ (1987)	$Q_u = 1.08 \cdot J_{cu} \cdot 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{4} \cdot u$
(2)	H.Andra ³⁾ (1990)	$Q_u = 1.58 \cdot d^2 \cdot f_{cu}$
(3)	緒方,村山,沖本,今西 ⁴⁾ (1994)	$Q_u = 1.767 \cdot d^2 \cdot f_{cu}$
(4)	新谷,蛯名,上平,柳下 ⁵⁾ (1999)	$Q_u = 1.1 \cdot d^2 \{-0.818(d/d_{(40)}) + 2.691\} f_{cu}$
(5)	保坂, 光木, 平城	$Q_u = 3.38 \cdot d^2 \cdot (t/d)^{1/2} \cdot f_{cu} - 39.0 \times 10^3$
	牛島,橘,渡辺 ⁶⁾ (2000)	$22.0 \times 10^3 < d^2 \cdot (t/d)^{1/2} \cdot f_{cu} < 194.0 \times 10^3$

表-3 既往のせん断耐力評価式

Q_u:孔1個あたりの終局せん断強度 *t*:板厚 d: 孔径 $f_{au}: コンクリートの圧縮強度$

d₄₀: 直径 40mm の孔径



図-9 応力伝達機構

験体と9mmの挿入筋を有する試験体はPBL鋼板が引張降 伏している。

6. ひずみ推移の比較

図-7に孔が4個の場合の最大荷重時におけるせん断補 強筋の軸ひずみ分布を示す。縦軸はひずみゲージ貼付位 置,横軸は軸ひずみら, らを表す。なお,らはせん断補 強筋の背面部,らは側面部の軸ひずみ,らはせん断補強 筋の降伏ひずみを表す。

中心引張で板厚が9,12mmの試験体では6mmの試験体 に比べてひずみが顕著に表れている。特に、A~D点で はひずみは大きいが、E点では小さい。また、背面部、 側面部のひずみ分布はほぼ同じである。一方、偏心引張 では側面部よりも背面部に大きなひずみがみられる。

図-8にPBL0-t12R試験体のA,C点におけるせん断補強筋の軸ひずみなとの関係を表す。

中心引張では なと なはほぼ同じ大きさである。一方, 偏心引張の場合は なに比べて なが大きい。これは付図に



示す様に円孔に作用する支圧力の反力が,柱主筋偶角部 に向かう力となっているためであると推察される。従っ て,円孔の位置とせん断補強筋の配置位置が応力伝達に 大きく影響することがわかる。

図-4で示したPBL近傍の切断面および図-8で示したせん断補強筋の軸ひずみ推移状況より図-9のようにPBLからRC部材への応力伝達機構が考えられる。

PBLに引張力Tが作用すると、孔に充填されたコンク リートの片面に支圧力 σ_{tb} が作用する。この支圧力 σ_{tb} は 反作用としてコンクリート圧縮束を介してRC部材に伝 達され、圧縮束に作用する圧縮力の鉛直成分Tは付着力 として主筋に、水平成分T_sは引張力としてせん断補強筋 に伝達される。

7. 既往の算定式との比較

表-3に既往の研究²⁰で提案されているせん断耐力評価 式を示す。なお,表-3に示している(1)~(5)式はすべて



表-4 実験値と計算値の比較

試験体名	$Q_{exp}(kN)$	$Q_{theo}(kN)$	Q_{exp}/Q_{theo}	
PBL1-t12	46.3	42.9	1.08	
PBL2-t12	77.2	93.3	0.83	
PBL3-t12	91.3	93.3	0.98	
PBL4-t12	95.8	93.3	1.03	
<i>Q</i> _{em} :実験値 <i>Q</i> _{ten} :(6),(7)式による計算値				

押抜きせん断耐力式である。(1)~(4)式ではせん断耐力 に影響を与える要因として孔径d, 圧縮強度 f_{ai} が挙げら れており,(5)式では孔径d, 圧縮強度 f_{ai} , 板厚tが挙げ られている。なお,(1)~(5)式すべてにおいて埋め込ま れる孔の深さは考慮されていない。

図-10に既往の評価式との対応を示す。縦軸は荷重P, 横軸はコンクリート上面からの孔の深さhであ る。 \bullet , \bullet , \diamond , \land はそれぞれPBL1~4試験体 の最大荷重,破線は(1)~(5)式を用いた計算値である。 いずれの式も実験値を正しく評価できているとはいえず, PBL3-t12, PBL4t12試験体の実験値は(1)~(4)式を用い た計算値の0.7~0.8倍,(5)式を用いた計算値の1.2~1.3倍 となった。これは既往の研究による実験と本実験では実 験方法に違いがあることや,(1)~(5)式では孔の深さを 考慮していないためであると考えられる。従って,これ らの式を建築でそのまま用いると耐力を過大評価する恐 れがあるので,本実験結果に関しては(1)~(4)式を用い る場合,コンクリートのせん断耐力を低減する必要があ ると考えられる。

8. 耐力評価の一試み

土木分野で提案された耐力評価式では、孔の埋込み深 さhによって耐力を評価できないことが示された。ここ



図-12 孔の深さを考慮した耐力式の妥当性

では、孔1個で中心引張を受けるPBLの耐力を評価する ことを試みる。

(1) 孔の位置が浅い場合

孔の位置が浅い試験体ではコンクリートがコーン破壊 している。アンカーボルトの設計ⁿで用いられているコ ーン破壊の式に準じて,次式によって評価できると考え られる。

$$Q_1 = 0.6 \cdot \sqrt{f_{cu}} \cdot A_c \tag{6}$$

ここに,

 Q_1 :コーン破壊耐力 f_{cu} :コンクリートの圧縮強度

 A_c :有効水平投影面積

式中の有効水平投影面積 A_c は、図-11 (a) に示す斜線 部分とする。なお、本実験ではコーン破壊の領域が通常 想定される45°よりも大きく、50°程度である。

(2) 孔の位置が深い場合

図-4 (a) で示したように孔の位置が深いPBL3-t12, PBL4-t12試験体は孔に充填されたコンクリートがせん断 破壊していた。本論文では、Leonhardtのせん断評価式に 低減係数を乗じることで評価する。

$$Q_{2} = \phi \cdot 1.08 \cdot f_{cu} \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{4} d^{2}$$
 (7)

ここに,

(3) 孔の深さと破壊形式の関係

図-12に孔の深さを考慮した耐力式の妥当性を示す。 縦軸は荷重P,横軸はコンクリート上面からの孔の深さ hである。なお、 — 線は(6)式による計算値、 – – 線は(7)式による計算値、 ● 、 ■ 、 ◆ 、 ▲ はそ れぞれPBL1~4試験体の最大荷重である。

表-4に実験値と計算値の比較を示す。

計算値は, PBL1-t12試験体は (6) 式, PBL2-t12, PBL3t12, PBL4-t12試験体は (7) 式を用いて求められた値であ る。

PBL2-112試験体では実験値と計算値の比に若干ばらつ きがあるものの,それ以外の試験体では実験値と計算値 は,ほぼ対応している。

9. 結語

- 1) PBLの板厚が大きく、孔位置が深いほど、最大荷重 は大きくなる
- 2) 挿入筋が無い場合, PBLを偏心させるとコンクリートの中心に配置した場合より最大荷重が低下する。
- 挿入筋を入れると、最大耐力発揮後の耐力低下を抑 えることができる。

- 4) 破壊状況およびせん断補強筋のひずみ状況より, PBLからRC部材への応力伝達機構が示された。
- 5) 建築分野では土木分野で用いられている既往のせん 断評価式をそのまま用いることができないが、低減係 数を乗じることで評価することができる。
- 6) 中心引張で挿入筋が無い場合の孔1個の試験体について、破壊形式による耐力評価式の提案とその妥当性を示した。今後、提案された応力伝達機構に基づく耐力評価法を検討していく予定である。

参考文献

- 1) 文献調査委員会:鋼とコンクリートを一体化する孔あき鋼板 ジベルの耐力評価式に関する最近の研究,コンクリート工 学, Vol.42, No.3, pp.61-67, 2004.3
- Leonhardt Fritz, Wolfhart Andra, Hans-Peter Andra and Wolfgang Harre : Neues, vorteilhaftes Verbundmittel Fur Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit, Beton-und Stahlbetonbau, Heft, 12/1987.
- Hans-Peter Andra : Economical Shear Connectors with High Fatigue Strength, IABSE SYMPOSIUM, 1990.
- 4)緒方紀夫,村山 陽,沖本真之,今西直人:鋼製エレメント とコンクリートとの付着特性に関する研究,コンクリート 工学年次論文報告集, Vol.16, No2, 1994.
- 5) 新谷英司, 蛯名貴之, 上平謙二, 柳下文夫:パーフォボンド リブのせん断耐力に関する基礎的研究, 第8回シンポジウム 論文集, プレストレストコンクリート技術協会, pp31-36, 1998.
- 6) 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.40A, pp.1201-1209, 2000.
- 7) 日本建築学会:各種合成構造設計指針・同解説, pp.191-195, 1998.5

Tensile Behavior Of Perfobond Strip

Fumiaki AJIOKA, Keiichi SAITO, Naoki AOYAMA and Yasushi NISHIMURA

To apply perfobond plate connector to a joint connected steel member with reinforced concrete member in series,pull-out type shear tests were carried out on twenty eight specimens. The experimental variables were the number of hole, the thickness of plate ,position of perfobond plate connector and existence of reinforcing bar inserted into hole. From its test results, failure mode, the ultimate strength, strain distribution and so on were shown in detail. Based on these test results, stress transferring mechanism of the joint was proposed. A method capable of estimating ultimate shear strength considering the embedded depth of hole was proposed.