

論文 建築構造物の切替え部における孔あき鋼板ジベルの適用性に関する実験的研究

山下 真一^{*1}・齊藤 啓一^{*2}・青山 尚樹^{*3}・西村 泰志^{*4}

要旨：建築構造物における切替え部に孔あき鋼板ジベルを活用することを試みる。S部材とRC部材がPBLで直列的に接合された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、挿入鉄筋の有無および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実験的に検討した。その結果、最大耐力および変形量は孔数が多く、かつ、孔位置の深いものが大きい。挿入鉄筋は切替え部の耐力、変形性能とも向上させる働きを有する。また、複数の円孔を直列的に配置すると孔 1 個当たりの耐力が減少する傾向があることを明らかにした。

キーワード：S部材、RC部材、切替え部、孔あき鋼板ジベル、応力伝達機構、破壊性状

1. 序

近年、施工性および構造の合理化を目的に、異種構造で構成される多種多様な構造形式が数多く提案されている。これらの構造では、接合される異種部材間で適切な応力伝達が行なわれることが重要である。本研究では、S部材とRC部材の切替え部を対象として孔あき鋼板ジベル(Die Perfobond-Leiste：以下、PBLと呼ぶ)を活用することを試みる。このPBLは、1987年、ドイツのLeonhardtらが提案したもので、土木構造物では機械式ずれ止めとして用いられている。土木構造物と比較しS部材が小さいため建築構造物では孔をあける発想はなく、PBLのディテールや使用箇所が限られ、現在のところ利用されるに至っていない。しかしながら、PBLは施工性にも優れているので、建築構造物にも応用できると考えられる。

このような観点から本研究では、S部材とRC部材の切替え部への応用の可能性を明らかにする為に、PBLの引抜き耐力を実験的に検討する。

2. 応力伝達機構

S部材とRC部材をPBLで接合された切替え部において、引張力が作用する部位に適応するため、PBLが引抜きを受ける場合について考える。図-1に、PBLからRC部材への応力伝達機構を示す。PBLに引張力 T が作用すると、PBLの円孔に充填されたコンクリートの片面に支圧力が作用する。この支圧力は反作用としてコンクリート圧縮束を介し、RC部材に伝達される。すなわち、コンクリート圧縮束に作用する圧縮力の鉛直成分は付着力として主筋に、水平成分は引張力としてせん断補強筋に伝達される。このような伝達機構が形成されるためには

孔数および孔位置などによるせん断耐力を検討するとともに、PBL周囲にせん断補強筋を配置することが重要である。

3. 実験 (中心引張力を受ける場合)

3.1 実験概要

前述に基づいて、PBLの孔数、孔位置、板厚および挿入鉄筋の有無を変数とした計14体の試験体が計画された。表-1に試験体一覧を、図-2に試験体の形状寸法および配筋詳細を示す。試験体PBL1~4シリーズでは一個の円孔に対して、孔位置によるせん断耐力を明らかにすること、また、PBL0シリーズは複数の円孔が直列的に配置される影響およびせん断破壊性状に及ぼす板厚の影響を検討することを目的とした計7体の試験体を計画した。また、これら試験体のせん断破壊性状の向上を目的として、PBL1~4およびPBL0シリーズと同じ試験体に対して挿入鉄筋を設けた試験体をさらに計7体計画

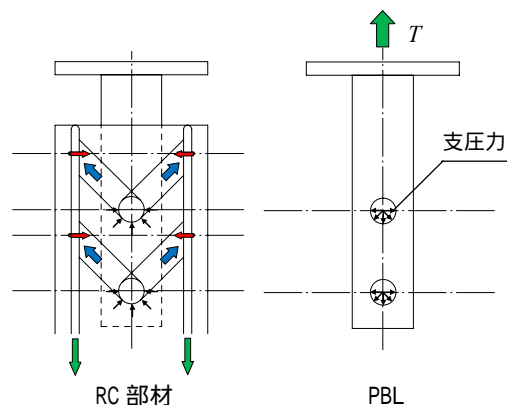


図-1 応力伝達機構

*1 大阪工業大学大学院 博士前期課程 (現 石本建築事務所) (正会員)

*2 大和ハウス工業株式会社 総合技術研究所

*3 大和ハウス工業株式会社 総合技術研究所 (正会員)

*4 大阪工業大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

した。挿入鉄筋はPBLに直交するように孔内に鉄筋D10 (SD295)を貫通させ、ずれ挙動に対するダウエル効果を与えることを目的としている。PBL0シリーズは平面寸法が120×425mmの鋼板に50φの円孔を75mm間隔で4個設け、板厚を12、9および6mmの3種とした。PBL1～4シリーズではPBL0シリーズに対する様に各孔を75mmずつずらして1個の円孔を配置した。なお、PBLはRC断面の中央に配置し、埋め込み長さは325mmであり、摩擦による影響を除去するためグリスを塗布した。RC部材は全試験体とも同じであり、断面が300×300mm、主筋はD16(SD295)を8本、せん断補強筋はD6(SD295)を使用し、50mm間隔で配筋されている。表-2に使用材料の力学的特性を示す。

実験は、RC部を取り付けている鋼板にピン治具を設置してピン支持し、上端部に引張力を負荷した。なお、PBLおよびRC部を取り付けている鋼板間およびPBLに取り付けている鋼板とRC部上端部間の変位を各面に設置した変位計によって計測した。

3.2 実験結果・考察

図-3に、最終破壊状況の数例を示す。孔4個シリーズの場合、最大耐力発揮までに、試験体PBL0-t6は最上部の円孔付近に縦および横ひび割れが生じ、PBL0-t12およびPBL0-t9では上から1番目と4番目の円孔付近にひび割れが発生した。以降、著しい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。これら

は挿入鉄筋を有した試験体においても同様の傾向が見られた。孔1個シリーズにおいて、PBL1-t12とPBL2-t12は、それぞれ円孔近傍にひび割れが生じ、挿入鉄筋を有した場合、孔内のコンクリートは挿入鉄筋により局部支圧で破壊した。PBL1シリーズについては挿入鉄筋の有無に係わらずコーン破壊が観察された。それに対し、孔位置が深いPBL3およびPBL4シリーズはひび割れが観察されなかった。実験終了後、RC部材を切断したところ、内部コンクリートにひび割れがなく、孔内のコンクリートおよび挿入鉄筋が破断していたことから2面せん断力で耐力が決定されたことが確認できた。

以上のことから、円孔の2面せん断力で耐力が決まったPBL3およびPBL4シリーズを除いた他の試験体は、PBLに沿った縦ひび割れが生じた後に、円孔近傍に横ひび割れが発生する傾向が見られた。

図-4および図-5に、荷重変形曲線を示す。縦軸は

表-1 試験体一覧

試験体	孔数 (個)	孔径 φ (mm)	板厚 t (mm)	偏心距離 (mm)	挿入鉄筋
PBL0-t6	4	50	6	0	無
PBL0-t6R			6		有
PBL0-t9			9		無
PBL0-t9R			9		有
PBL0-t12			12		無
PBL0-t12R			12		有
PBL1-t12	1 (上から1つ目)	50	12	0	無
PBL1-t12R	1 (上から1つ目)	50	12	0	有
PBL2-t12	1 (上から2つ目)	50	12	0	無
PBL2-t12R	1 (上から2つ目)	50	12	0	有
PBL3-t12	1 (上から3つ目)	50	12	0	無
PBL3-t12R	1 (上から3つ目)	50	12	0	有
PBL4-t12	1 (上から4つ目)	50	12	0	無
PBL4-t12R	1 (上から4つ目)	50	12	0	有

表-2 使用材料の力学的特性

材料	降伏応力度 σ_s	引張強度 σ_u	ヤング係数 E_s	
	(N/mm ²)	(N/mm ²)	×10 ⁵ (N/mm ²)	
PBL	PL-12	292	394	1.95
	PL-9	306	413	2.00
	PL-6	211	307	1.08
主筋	D16	343	501	1.75
せん断補強筋	D6	414	472	1.80
挿入鉄筋	D10	363	486	1.75
材料	圧縮強度 σ_B	割裂強度 σ_t	ヤング係数 E_c	
	(N/mm ²)	(N/mm ²)	×10 ⁴ (N/mm ²)	
コンクリート	27.3	2.29	2.36	

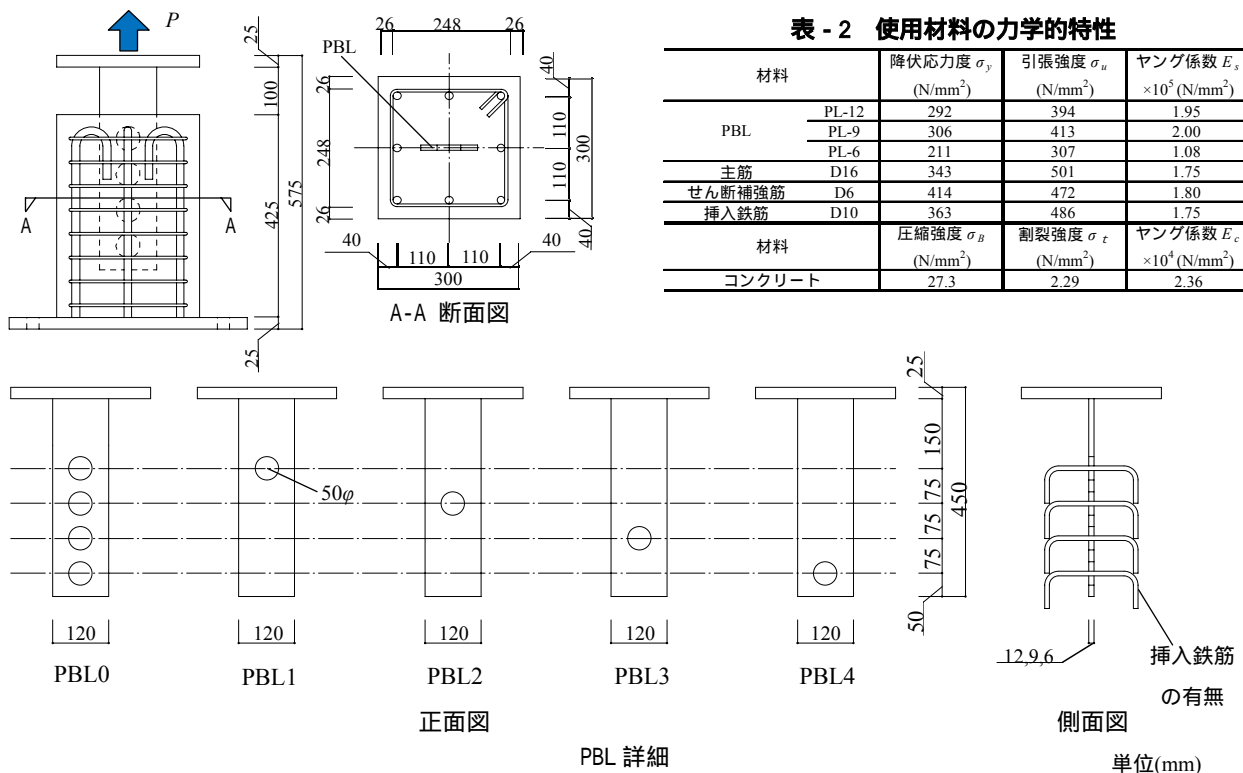


図-2 試験体の形状寸法および配筋詳細(実験)

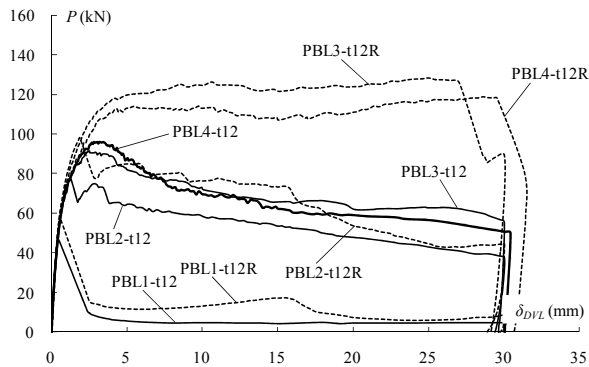


図 - 4 荷重変形曲線(孔1個シリーズ)

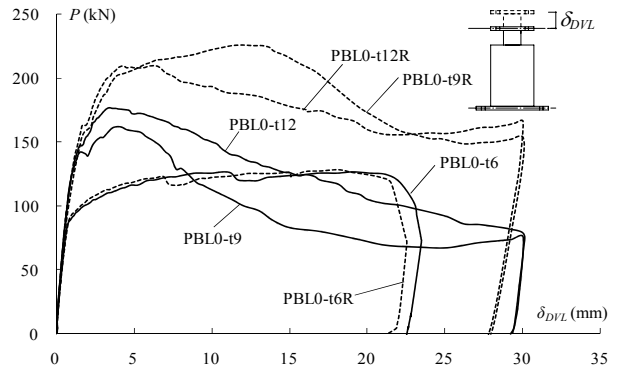


図 - 5 荷重変形曲線(孔4個シリーズ)

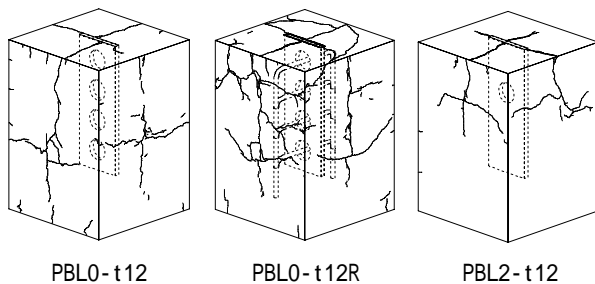


図 - 3 最終破壊状況

負荷された荷重 P , 横軸は RC 部材の伸び量と PBL の引抜き量を合わせた全体変位 δ_{DVL} である。

孔 1 個シリーズでは孔位置が深いほど耐力が大きく、挿入鉄筋を有した試験体 PBL3-t12R および PBL4-t12R は変位 $\delta=30\text{mm}$ 程度まで耐力を保持でき、以後、挿入鉄筋が破断した。PBL1-t12 および PBL1-t12R は最大耐力発揮以降、急激に耐力が低下した。これはコンクリートがコーン破壊したためである。

一方、孔 4 個シリーズの試験体 PBL0-t12 と PBL0-t9 を比較すると、最大耐力の差はあまり見られず、耐力発揮以降においては PBL0-t12 の方が耐力低下の度合いが若干小さい。これは挿入鉄筋を設けた場合においても同様の傾向が見られた。次いで、試験体 PBL0-t6 および PBL0-t6R は鋼板の耐力で決まるため、荷重 80kN 付近からは変位とともに緩やかに耐力が上昇した後、ほぼ変位 $\delta=22\text{mm}$ で最上部の円孔欠損部で鋼板が引張破断した。

以上のことから最大荷重およびその時の変形量は PBL の孔数が多いと大きいことが分かる。なお、最大耐力に関して、試験体 PBL0-t12 および PBL0-t12R の最大耐力は孔 1 個シリーズの耐力の単純累加にはならなかった。これは円孔を直列配置させた場合、個々の円孔の破壊形式が異なるためだと考えられる。

図 - 6 に、主筋の軸ひずみ状況を示す。各主筋の軸ひずみは概ね同等の値を示しており、最大耐力の大きいものは若干軸ひずみも大きい傾向が見られる。

図 - 7 に、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。図中の点線は材料試験から得られた降伏

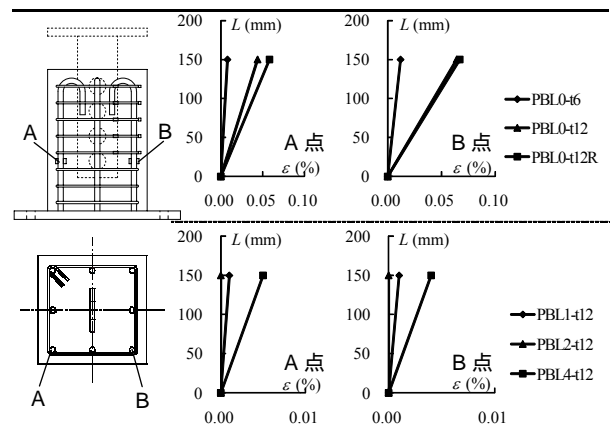


図 - 6 主筋の軸ひずみ分布

ひずみ ϵ_y である。縦軸はひずみゲージ貼付位置、横軸は軸ひずみ ϵ を表す。なお、ひずみゲージは鉄筋の内面および外面に貼付し、その平均より軸ひずみ ϵ を求めた。孔 4 個シリーズでは板厚が厚いもの、孔 1 個シリーズでは上から 2 番目に孔がある試験体が A ~ C 点において軸ひずみが顕著に表れた。これは前述の応力伝達機構で示されたように、各孔内から生じたコンクリート圧縮束が、せん断補強筋の A ~ C 部に形成されたためと推察される。なお、背面、側面部ともに概ね同じ値を示した。

一方、孔 1 個シリーズの孔位置に着目するとそれが浅い場合はコーン破壊で、深い場合は円孔の 2 面せん断破壊するため、軸ひずみがほぼ 0 に近い値を示した。

図 - 8 に、載荷初期および最大荷重時における PBL の軸ひずみ推移状況を示す。縦軸はひずみゲージ貼付位置、横軸は軸ひずみ ϵ を表す。孔 4 個シリーズでは板厚の大きい試験体の PBL は載荷初期、A 点では引張ひずみ、B ~ D 点は圧縮ひずみを生じ D 点に向けてひずみが減少している。なお、圧縮ひずみが生じていることから、円孔に充填されたコンクリートが鋼板を支圧していることが分かる。載荷が進むにつれ A 点の引張ひずみは 0 に近づき、B ~ D 点の圧縮ひずみが増大し、最大荷重時には D 点の圧縮ひずみが大きく現れた。

一方、板厚が薄い場合、A 点では載荷初期、引張ひずみを示していたが、載荷が進むにつれ徐々に圧縮に転じ

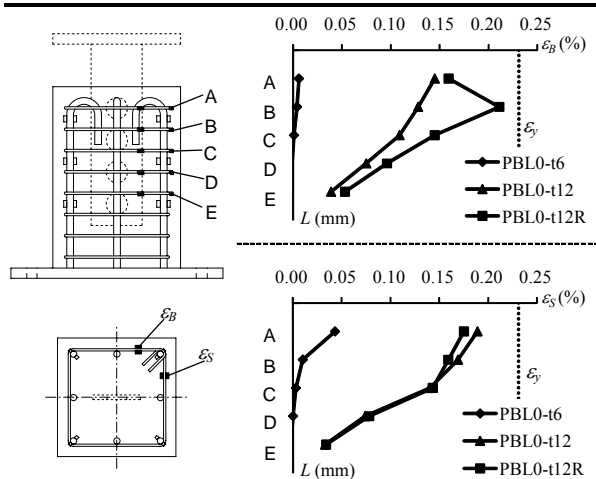


図 - 7 せん断補強筋の軸ひずみ分布(最大荷重時)

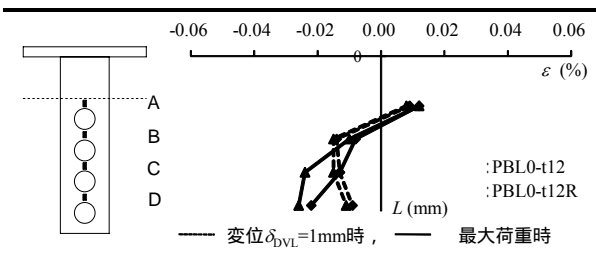


図 - 8 PBL の軸ひずみ推移状況

た。B～D点では板厚の大きいものより大きな圧縮ひずみを示したが、円孔の効く順序は板厚が大きいものと概ね同じ傾向を示した。なお、A点のひずみは圧縮側に傾く傾向が見られたが、これは円孔欠損部に局部応力が集中するためだと考えられる。孔1個シリーズでは最大耐力の大きい試験体に、A点の引張ひずみが顕著に現れた。

4 実験 (偏心引張力を受ける場合)

4.1 実験概要

実験では、実験の各試験体のPBLをRC断面中央から75mm偏心させ、偏心引張力の影響を検討する。表-3に試験体一覧を、図-9に形状寸法および配筋詳細を示す。なお、RC部材およびPBLの形状寸法は実験と同様である。表-4に使用材料の力学的特性を示す。

実験は、RC部分が偏心荷重となるので、試験体の下端部を固定し、上端部(PBL)に引張力を負荷した。

4.2 実験結果・考察

図-10に、最終破壊状況の数例を示す。各試験体ともPBL近傍の面にひび割れが顕著に現れた。実験と同様に、孔4個シリーズでは最大耐力発揮までに上から1番目の孔に縦と横ひび割れが生じ、以降は4番目、2および3番目の順に横ひび割れが発生し、上部のコンクリートが浮き上がるのみである。また、挿入鉄筋を有する方が、ひび割れが多く現れている。

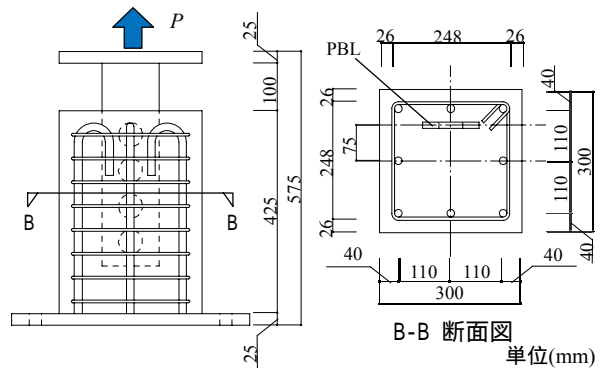


図 - 9 試験体の形状寸法および配筋詳細(実験)

表 - 3 試験体一覧

試験体	孔数 (個)	孔径 φ (mm)	板厚 t (mm)	偏心距離 (mm)	挿入鉄筋	
PBL0-t6e	4	50	6	75	無	
PBL0-t6eR			無			
PBL0-t9e			9		無	
PBL0-t9eR			無			
PBL0-t12e	1 (上から1つ目)	50	12	75	無	
PBL0-t12eR					有	
PBL1-t12e					1 (上から1つ目)	無
PBL1-t12eR					1 (上から1つ目)	有
PBL2-t12e					1 (上から2つ目)	無
PBL2-t12eR					1 (上から2つ目)	有
PBL3-t12e					1 (上から3つ目)	無
PBL3-t12eR					1 (上から3つ目)	有
PBL4-t12e	1 (上から4つ目)	無				
PBL4-t12eR	1 (上から4つ目)	有				

表 - 4 使用材料の力学的特性

材料	降伏応力 σ_y	引張強度 σ_u	ヤング係数 E_s
	(N/mm^2)	(N/mm^2)	$\times 10^5$ (N/mm^2)
PBL	PL-12	286	1.99
	PL-9	280	1.98
	PL-6	279	1.93
主筋	D16	343	1.75
せん断補強筋	D6	414	1.80
挿入鉄筋	D10	363	1.75
材料	圧縮強度 σ_B	割裂強度 σ_c	ヤング係数 E_c
	(N/mm^2)	(N/mm^2)	$\times 10^4$ (N/mm^2)
コンクリート	27.9	2.47	2.38

次に、孔1個シリーズの試験体において各円孔近傍にひび割れが集中した。孔位置の浅い試験体PBL1-t12eおよびPBL1-t12eRは実験と同様に上部がコーン破壊するのみだった。その他の試験体で挿入鉄筋の無いものは、最大耐力発揮時に縦と横ひび割れが発生するのみである。それに対し、挿入鉄筋を有した試験体は最大耐力発揮直前に縦と横ひび割れが発生し、以降は円孔から斜めひび割れが発生した。この斜めひび割れは孔位置が深いほど顕著に見られた。これは、PBLのかぶり厚さが小さいため、PBLのずれに伴い割裂破壊したと推察される。

また、実験終了後、上部の破壊したコンクリートをつると、PBL近傍側における挿入鉄筋のフックが大きく引き抜かれているのが推察された。

図-11および図-12に、荷重変形曲線を示す。実験と比較し、PBLを偏心配置させた影響により全体的に最大耐力が小さくなった。孔1個シリーズにおいて、各試験体とも挿入鉄筋の無いものは、有するものに比べ最大耐力の発揮が早く、耐力低下の度合いが大きいことが

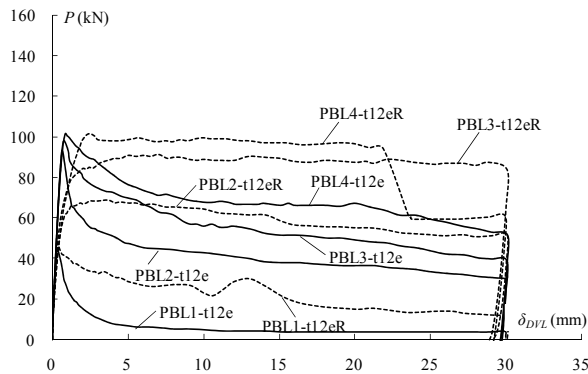


図 - 11 荷重変形曲線(孔 1 個シリーズ)

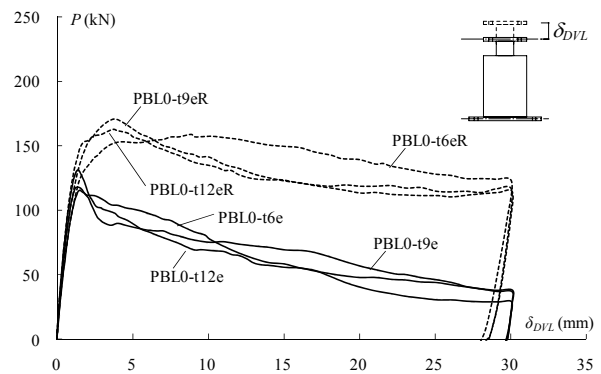


図 - 12 荷重変形曲線(孔 4 個シリーズ)

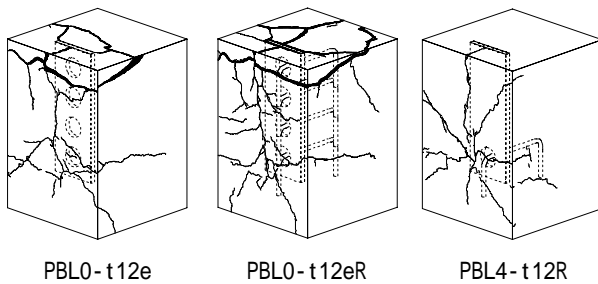


図 - 10 最終破壊状況

分かる。また、孔位置が浅いほど耐力低下の勾配が大きい。それに対し、挿入鉄筋を有したものは、孔位置が浅くなるに比例し最大耐力は減少しているものの、実験終了時まで耐力を保持することができた。しかし、PBL1シリーズは、実験のPBL1シリーズと同様にコーン破壊で決まるため、他の試験体と比べ著しく耐力が小さく、試験体 PBL1-t12eR に関しては挿入鉄筋を有するにも係わらず、最大耐力発揮後、急激に耐力が低下した。PBL4-t12eR に関しては変位 $\delta=22\text{mm}$ で挿入鉄筋が破断した。

一方、孔 4 個シリーズでは挿入鉄筋の有無に係わらず、最大耐力発揮以降の耐力低下の度合いは概ね同じである。しかし、試験体 PBL0-t6eR は荷重 120kN 付近で鋼板が降伏したため剛性が低下するが、その後も緩やかに耐力上昇した。なお、板厚による最大耐力の影響は小さい。

図 - 13 に、主筋の軸ひずみ状況を示す。軸ひずみは PBL に近い A 点の方が顕著に現われ引張を示したのに対し、B 点では 0 ないし若干圧縮を示した。孔 1 個シリーズにおいて、孔位置が深いほど、かつ、挿入鉄筋を有するものはひずみが大きい。孔 4 個シリーズは、板厚が薄いほどひずみが大きく現れた。

図 - 14 に、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。図中の点線は材料試験から得られた降伏ひずみ ϵ_y である。ひずみゲージ貼付け位置は実験と同様である。ここでも実験と同様に A~C 点の軸ひずみが卓越している。各試験体とも背面部のひずみ ϵ_B が顕著に現れていることから、前述の応力伝達機構が妥当であ

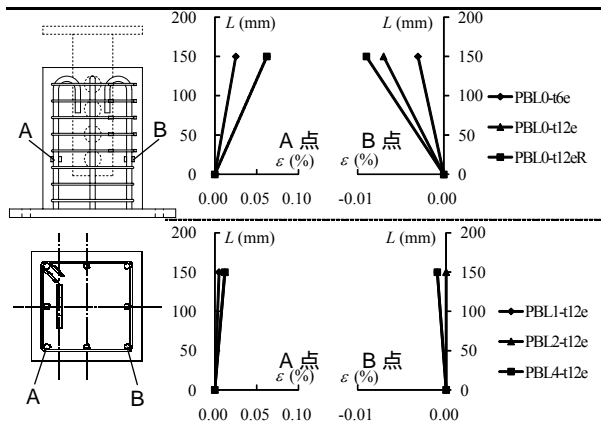


図 - 13 主筋の軸ひずみ状況

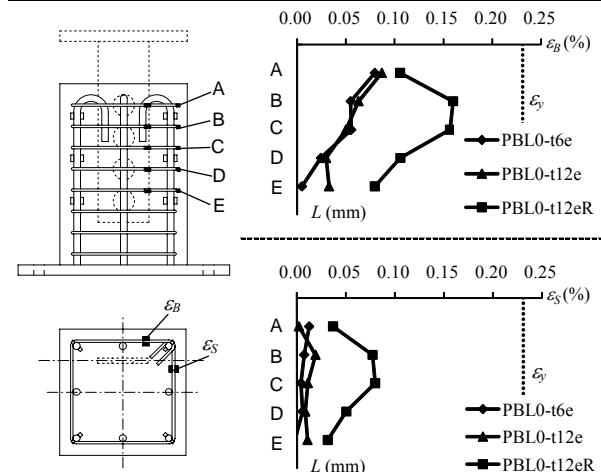


図 - 14 せん断補強筋の軸ひずみ分布(最大荷重時)

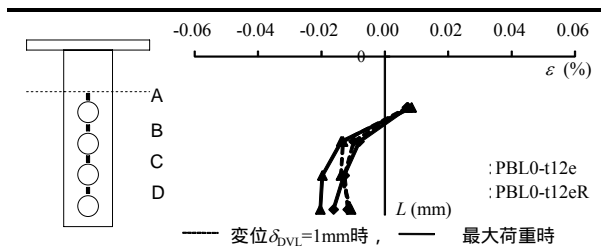
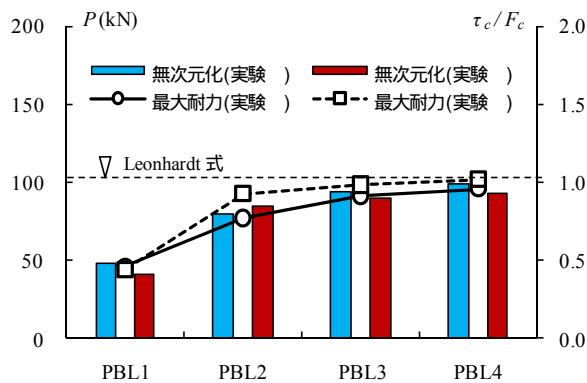
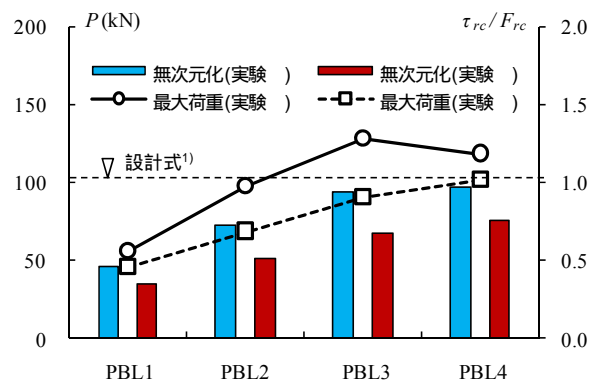


図 - 15 PBL の軸ひずみ推移状況

ることが分かる。孔 1 個シリーズでは各円孔から形成されると考えられるコンクリート圧縮帯近傍にひずみが



(a) 挿入鉄筋 無



(b) 挿入鉄筋 有

図 - 16 孔位置，偏心および挿入鉄筋の有無による比較

若干現れ，さらに挿入鉄筋を有すると顕著に現れる。

孔 4 個シリーズにおいて板厚による差異は小さく，挿入鉄筋を有する試験体はひずみが大きく現れている。

図 - 15 に，載荷初期および最大荷重時における PBL の軸ひずみ推移状況を示す。孔 4 個シリーズは，偏心の影響に関係なく円孔の効く順序および軸ひずみの大きさは実験 と同等の傾向が見られる。孔 1 個シリーズの A 点ではコーン破壊したもの以外は概ね同じ値を示した。

5. 耐力の検討

図 - 16 は，孔位置，偏心および挿入鉄筋の有無が孔 1 個当たりのせん断強度に及ぼす影響を示す。横軸は試験体，左側の縦軸は荷重 P を，右側は無次元化した円孔のせん断強度を示す。なお，図中の—は実験，--- は実験の最大荷重を示しており，■は実験を，■は実験における各円孔のせん断強度を無次元化したものである。また，--- 線は Leonhardt 式による円孔のせん断強度の計算値であり，挿入鉄筋を有するものは Leonhardt 式に挿入鉄筋の効果を加味している。なお，Leonhardt 式によるコンクリートの 2 面せん断によるせん断強度 Q_u は，文献 2 に基づいて， $Q_u=1.08f'_c \times 2 \times \pi D^2/4$ によって求めた。ここに f'_c はコンクリートの圧縮強度， D は円孔の直径である。無次元化は，挿入鉄筋の無いものについては荷重 P を円孔の面積 A_c とコンクリート圧縮強度 σ_B をかけた値で除した。挿入鉄筋の有するものは荷重 P を，円孔の面積 A_c とコンクリート圧縮強度 σ_B の積と鉄筋断面積 A_s と降伏せん断応力度 τ_{sy} の積で算出した値を累加して，これで除した。

挿入鉄筋の無い場合，中心引張の方が偏心引張力を受けるものより円孔のせん断強度が若干大きく現れているものの，偏心による影響は比較的小さい。PBL1 を除いて，PBL 2,3,4 のせん断強度は Leonhardt 式による計算値より小さくなっている。したがって，本実験結果に対して，Leonhardt 式はせん断強度を若干過大評価するので，

評価式のせん断強度を低減する必要がある。なお，PBL1 は他の試験体と破壊形式が異なるため Leonhardt 式より小さい値を示していると考えられる。

一方，挿入鉄筋を有する場合においても孔位置に比例しせん断強度は増大しており，中心引張においては孔位置が深いときは Leonhardt の提案式で評価できる。しかし，偏心引張では耐力をほぼ保持しながら変形が増加するものの，最大耐力に関しては挿入鉄筋の効果は期待できないことが分かる。また，中心引張と比べ，挿入鉄筋による耐力向上の度合いが小さく，Leonhardt 提案式に準じて挿入鉄筋の効果を加味した計算値より低く見積るので，前述の実験結果で示されたように，挿入鉄筋の定着方法等について詳細に検討することが必要である。

6. 結語

本研究によって，以下の知見を得た。

- 1) 孔数が多く，孔位置が深いほど最大耐力およびその時の変形量が大きくなる。また，挿入鉄筋は切替え部の耐力および変形性能を向上させる働きを有し，中心引張においてはその効果が顕著である。
- 2) 円孔が複数ある場合，孔位置が浅い箇所から順に抵抗しはじめ，孔位置により破壊形式が異なってくる。
- 3) コーン破壊を起こさない位置に円孔を設ければ，最大耐力は著しく小さくなることはない。
- 4) RC 断面に対し，PBL を偏心配置させると中央配置の場合と比較し，最大耐力と変形性能が低下する。

参考文献

- 1) 山下真一，西村泰志：S 部材と RC 部材が孔あき鋼板ジベルで接合した切替え部の破壊性状（その 1，2），日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1，pp.1249-1252，2008
- 2) 鬼頭宏明，園田恵一郎：鋼・コンクリート複合構造，森北出版，pp. 29, 2008