

論文 孔あき鋼板ジベルの埋込み深さが終局せん断耐力に及ぼす影響

中森 璃子*1・馬場 望*2

要旨: 本研究は、孔あき鋼板ジベルの二面せん断耐力に及ぼすコンクリート系部材に対する円孔の埋込み深さ、円孔数及び鋼板の配置方法を実験変数とした単純引張試験を行う。実験の結果、孔あき鋼板ジベルが単孔の場合、埋込み深さが孔あき鋼板ジベルの二面せん断耐力に影響を及ぼす結果に基づいて、既往の孔あき鋼板ジベルの二面せん断耐力式に円孔の埋込み深さを考慮した評価法を提案した。また、孔あき鋼板が単列かつ複数孔の場合、円孔 1 つあたりの二面せん断耐力は低下するが、孔あき鋼板を複数配置する場合、単孔の場合とほぼ同様の二面せん断耐力を発揮することが示された。

キーワード: 鋼コンクリート接合部, 機械的ずれ止め, 孔あき鋼板ジベル, 終局せん断耐力, 埋込み深さ

1. はじめに

鋼コンクリート合成構造において、力学的に構造性能を発揮させるためには、鋼とコンクリート間の適切な応力伝達を確保する必要がある。近年、鉄骨（以下、S という）部材と鉄筋コンクリート（以下、RC という）部材のずれ挙動に対して、孔あき鋼板ジベル（以下、PBL という）を適用した接合部ディテールの研究・開発が行われている。PBL は、鋼とコンクリート間のずれ挙動に対して、円孔に充填されたコンクリートの二面せん断抵抗の効果を期待するもので、Leonhardt らによって開発され¹⁾、土木構造物への実績が高い機械的ずれ止めである。土木分野では、Leonhardt らが提案している PBL の終局せん断耐力評価式¹⁾（以下、Leonhardt 式という）に基づいた設計式が「複合構造標準示方書」²⁾に示されている。一方、建築分野における PBL の実績は数例である。

図-1 は、建築分野における PBL を適用した既往の研究例を接合部形式ごとに分類したものである。S 部材と RC 部材が並列的に結合される並列接合部への PBL の適用を検討した研究では、実験方法として頭付きスタッドのせん断耐力を検証する標準押し抜き試験が行われており、田中らによる一連の研究が挙げられる^{例え3)}。

なお、Leonhardt 式は、並列接合部へ適用された PBL の終局せん断耐力を評価していると考えられる。一方、S 部材に RC 部材が直列的に接合される直列接合部、及び、S 部材が RC 部材を貫通する直交接合部では、西村らによる研究成果がある^{4), 例え5)}。また、西村らは、直列接合部への PBL の適用性について、PBL の引抜き要素試験を実施し、PBL の終局せん断耐力を Leonhardt 式によって評価している⁶⁾。

さらに、建築分野において、PBL のせん断終局耐力の評価法を詳細に検討した研究として福元の成果があり、貫通鉄筋や PBL のかぶりコンクリートによる拘束応力による耐力上昇を考慮した終局せん断耐力の評価（以下、福元式という）を行っている⁷⁾。しかしながら、Leonhardt 式及び福元式は、PBL の鋼板 1 枚に単孔を設けた押し抜き試験の結果を対象としているが、その円孔の配置位置や円孔が複数になった場合の PBL の終局せん断耐力に及ぼす影響は明らかになっていない。

本研究は、直列接合部及び貫通接合部への PBL の適用を想定した PBL の引抜き要素試験を実施し、PBL の円孔の配置位置や円孔を複数とした場合の PBL の終局せん断耐力に及ぼす影響を検討する。

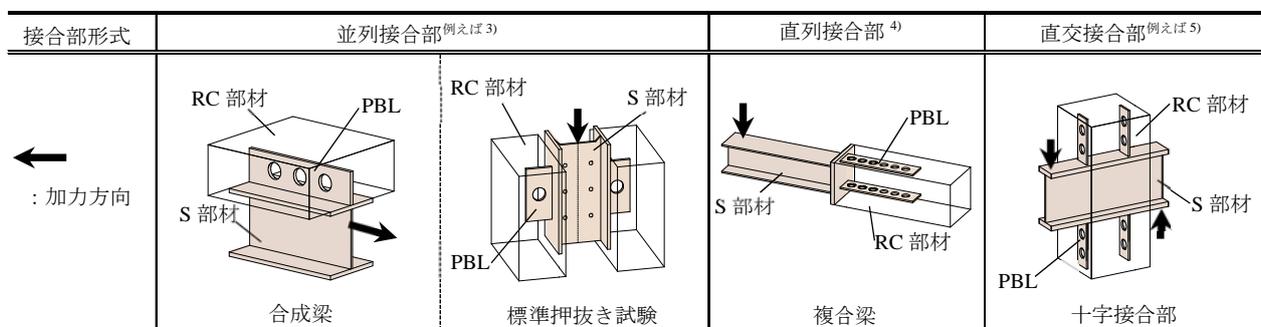


図-1 PBL を適用した鋼コンクリート接合部形式の例

*1 大阪工業大学大学院 工学研究科 建築・都市デザイン工学専攻 (学生会員)

*2 大阪工業大学 工学部建築学科教授 博(工) (正会員)

2. 実験計画

表-1 に実験変数, 図-2 に試験体詳細を示す。試験体は PBL を RC 部材に埋め込んだ要素試験体であり, 計 10 体が計画された。各試験体とも, RC 部材の寸法は 300×300×600 mm, 主筋は 8-D16 (SD295A), セン断補強筋は 2-D6@50 (SD295A) が配置されている。PBL は 120×550 mm, 厚さ 12 mm の鋼板に直径 50 mm の円孔が設けられ, 鋼板の RC 部材に対する埋込み深さは 450 mm である。なお, 鋼板の表面はいずれの処理も行っていない。実験変数は, PBL 円孔の埋込み深さ, その孔数及び PBL の鋼板の配置である。鋼板の配置は, 鋼板 1 枚 (以

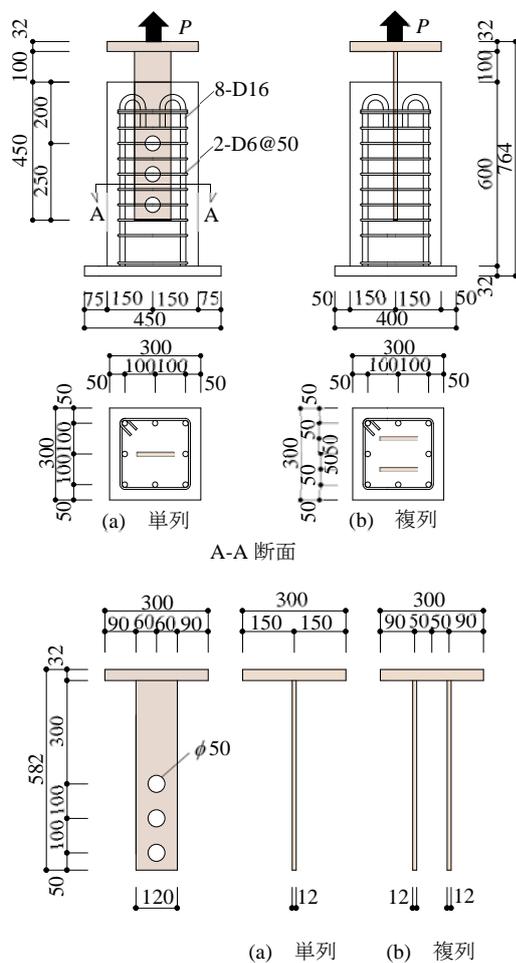


図-2 試験体詳細

下, 単列という) と鋼板 2 枚 (以下, 複列という) の 2 種類が設定されている。円孔のピッチは 100 mm とし, RC 部材の表面から 200, 300 及び 400 mm の位置に配置されている。既往の研究⁹⁾より RC 上面からの第一円孔までの埋込み深さが小さい場合, コンクリートのコーン状破壊に至ることが明らかされていることから, 文献 6) によって評価されているコンクリートのコーン状破壊が生じない位置に第一円孔が配置されている。複列における PBL 鋼板の間隔は, 100 mm である。表-2 に使用材料の力学的特性を示す。実験は, 図-2 に示すように, PBL 端部に単調引張力を負荷する。

3. 実験結果

3.1 最終破壊状況

図-3 に代表的な試験体の最終破壊状況を示す。図中の番号は, 表-1 に示す PBL 円孔の配置位置である。単列・単孔の試験体では, RC 部材のひび割れは観察されなかった。P-s12 及び P-s13 試験体では, 最大荷重時に RC 部材に埋め込まれた PBL 鋼板の下部に引張応力に起因するひび割れが発生し, その後, 鋼板の側面に沿ったコンクリートの割裂ひび割れが観察された。一方, P-s23 試験体では第一及び第二円孔の位置に, P-s123 試験体では各円孔の位置からひび割れが生じた。また, PBL を複列とした場合, P-s12 及び P-s13 試験体とほぼ同様の破壊性状を示した。

表-2 使用材料の力学的特性

材料	N/mm ²	ヤング係数	降伏強度	引張強度
		E_s	σ_y	σ_u
PBL	PL12 (SS400)	2.04×10^5	352	407
主筋	D16 (SD295A)	1.87×10^5	340	490
補強筋	D6 (SD295A)	1.68×10^5	356	506
材料	N/mm ²	ヤング係数	圧縮強度	割裂強度
		E_c	σ_B	F_t
コンクリート	山砂利 ($\phi 15$)	2.41×10^4	28.3	2.27

表-1 実験変数

配置 試験体名	単列							複列		
	P-s1	P-s2	P-s3	P-s12	P-s23	P-s13	P-s123	P-w1	P-w2	P-w3
円孔 配置位置										
円孔数×鋼板数	1×1			2×1			3×1	1×2		
孔径	$\phi 50$ mm									
板厚	12 mm									

3.2 せん断抵抗力－拔出し量関係

図-4に各試験体のPBLのせん断抵抗力と拔出し量の関係を示す。縦軸はPBLに負荷された引張力 P 、横軸は鋼板の伸び量が除去されたRC部材下端部に対するPBLの拔出し量 δ であり、ここでは $\delta=6\text{ mm}$ までの結果を示す。また、図中の一点鎖線は、Leonhardt式によるPBLの終局せん断耐力の計算値を示す。図-4(a)に示すように、PBLが単列・単孔の場合、P-s1試験体及びP-s2試験体の実験値は、Leonhardt式による計算値よりも若干小さいが、P-s3試験体の実験値は計算値と良い対応を示している。この結果より、単列・単孔の場合、円孔の埋込み深さに伴ってPBLの終局せん断耐力は大きくなり、終局せん断耐力に及ぼす円孔の埋込み深さの影響が示唆される。単列・複数孔の場合、図-4(b)示すように、P-s13試験体の最大荷重は、P-s12試験体の結果とほぼ同程度になった。一方、P-s23試験体の最大荷重は、P-s12試験体と比較して相対的に小さい。これは、P-s23試験体のみ第一及び第二円孔の間にコンクリートの引張応力に起因するひび割れが生じていることから、複数孔の場合、ひび割れ発生位置がPBLの最大耐力に影響を及ぼす可能性がある。また、最大荷重発揮後、PBLの拔出し量が大きくなるにつれてP-s12試験体の荷重は低下しているが、P-s13及びP-s23試験体における荷重低下の度合いは小

さい。孔数3のP-s123試験体の最大荷重は、孔数2の試験体と比較して僅かに大きい程度であり、PBLの孔数と終局せん断耐力は単純に比例しないことが分かる。PBLを複列とした場合、図-4(c)に示すように、最大荷重はPBL円孔の埋込み深さに伴って増大する単列・単孔とほぼ同じ傾向を示し、かつ、円孔の埋込み深さが大きくなるにつれて、最大荷重発揮後の荷重低下の度合いは小さくなっている。

3.3 ひずみ状況

(1) 鉄筋のひずみ度分布

図-5は、PBLが単列配置された代表的な試験体について、主筋及びせん断補強筋の最大荷重発揮時の軸ひずみ度を示したものである。縦軸は主筋及びせん断補強筋のひずみ計測位置、横軸は各々の軸ひずみ度 $\epsilon(\%)$ である。主筋の軸ひずみ度は、PBLの埋込み終点側に向かって直線的に大きくなっている。しかしながら、せん断補強筋の軸ひずみ度はほぼ生じていない。これは、PBLのせん断耐力を検証する一般的な標準押抜き試験体に比べて、本実験の試験体はPBL周辺のコンクリートの体積が大きく、コンクリートによる鋼板の拘束度が大きいと考えられる。

(2) 鋼板の軸ひずみ度分布

図-6に最大荷重発揮時の鋼板の軸ひずみ度分布を示

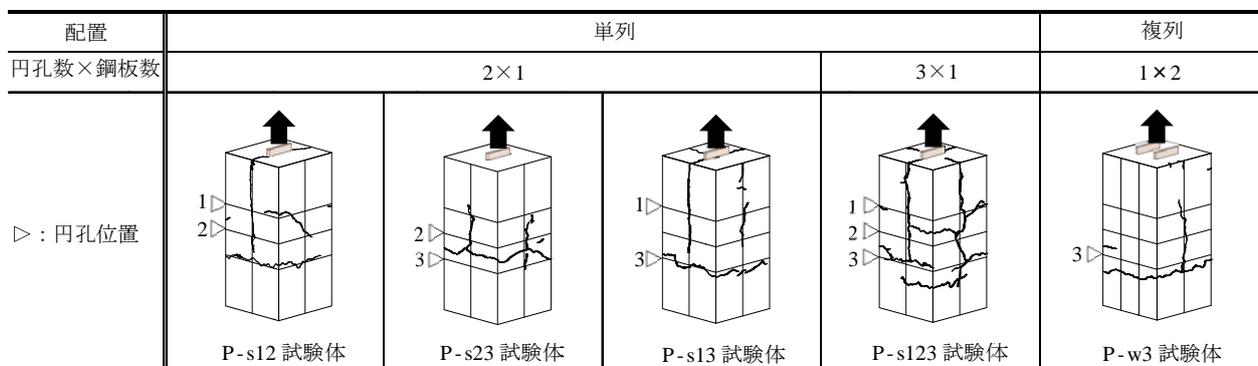


図-3 最終破壊状況

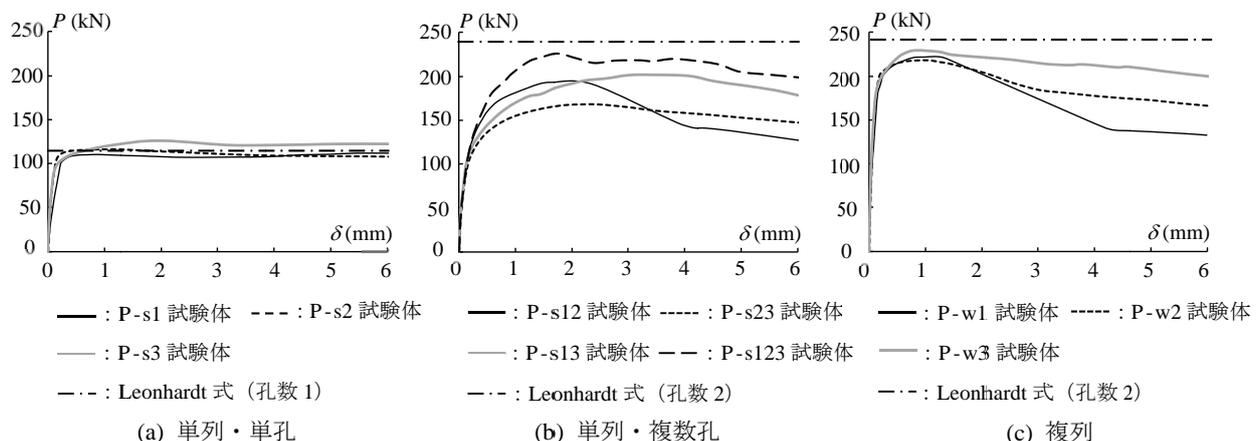


図-4 せん断抵抗力－拔出し量関係

す。縦軸はひずみ計測位置、横軸は鋼板の軸ひずみ度 ϵ_p (%)である。鋼板のひずみ計測位置は、鋼板に設けられた円孔の上部、下部及び円孔の中心に応じる位置である。単列・単孔の場合、図-6(a)に示すように、円孔上部及び円孔の中心に応じる位置には引張ひずみが生じているのに対して、円孔下部では圧縮ひずみが生じている。これは、円孔に充填されたコンクリートの支圧力の反力が円孔下部の鋼板に作用するとためと考えられる。円孔上部及び円孔の中心に応じる位置の引張ひずみ度の大きさは、円孔の埋込み深さに依存せずほぼ同じ値であるが、円孔下部に生じる圧縮ひずみ度は、若干ではあるが円孔の埋込み深さに伴って大きくなっている。鋼板の材軸方向の力の釣合いを考えれば、円孔の埋込み深さが大きくなると、円孔から鋼板の埋込み終点側の端部にかけて鋼

板の表面に作用する付着及び摩擦力の効果は小さくなるためと考えられる。また、複列・単孔の場合の鋼板の軸ひずみ度分布においても、図-6(b)に示すように、単列・単孔の場合とほぼ同じ性状を示している。しかしながら、単列・複数孔の場合の鋼板の軸ひずみ度分布は、図-6(c)に示すように、単列・単孔あるいは複列・単孔の場合と異なる。単列・複数孔の場合、各円孔の上部、下部及び中心に応じた位置におけるひずみ度の符号、及び、円孔の中心に応じた位置に生じる引張ひずみ度と円孔下部に生じる圧縮ひずみ度の分布に関する傾向は、単列・単孔の場合と同じであるが、円孔の中心に応じた位置に生じる引張ひずみ度は、円孔の埋込み深さに伴ってほぼ直線的に小さくなっている。その大きさは、RC部材上面より第一円孔の中心に応じた位置に生じる引張ひ

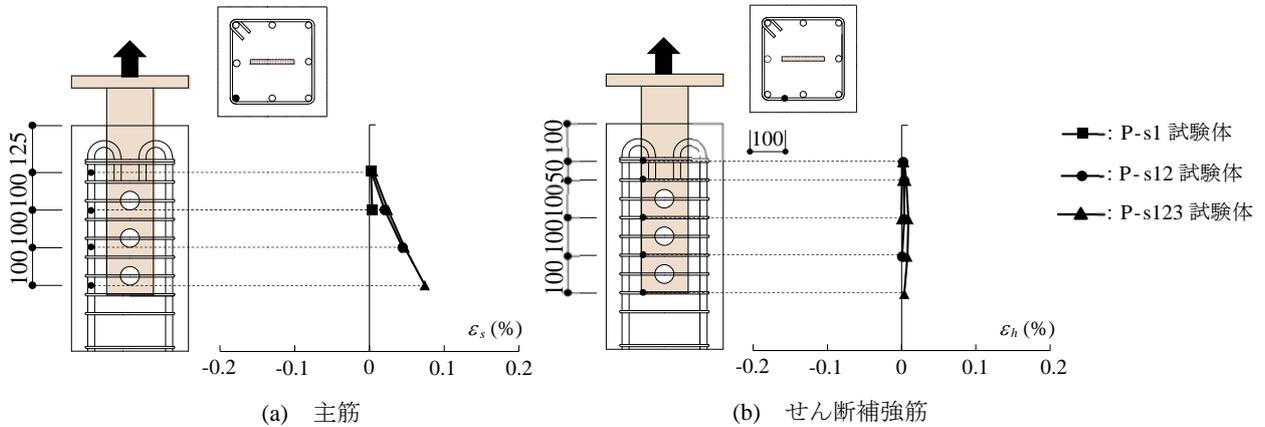


図-5 鉄筋の軸ひずみ度分布 (最大荷重発揮時)

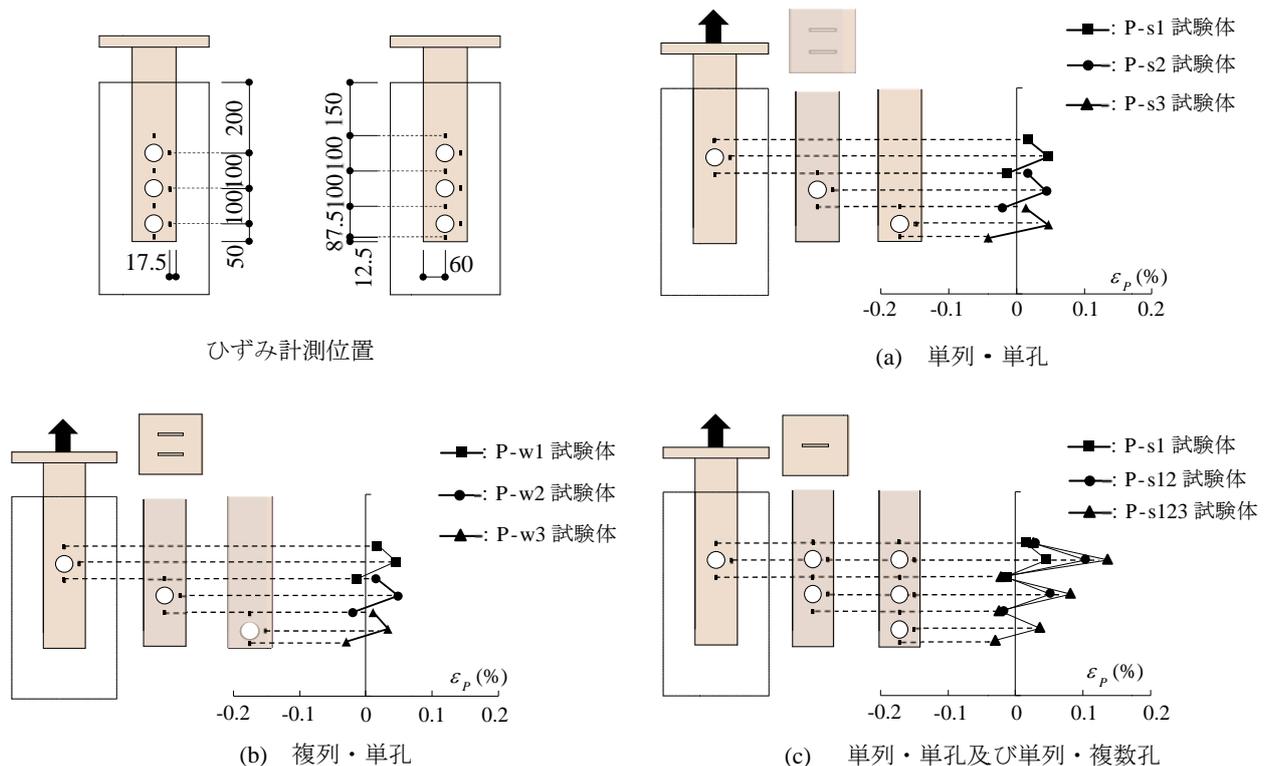


図-6 鋼板の軸ひずみ度分布 (最大荷重発揮時)

ずみ度に対して、第二円孔の中心に応じた位置ではひずみ度が0.05%、第三円孔の中心に応じた位置では0.1%程度減少している。これらの結果より、単列の鋼板に円孔が複数設けられる場合、RC部材上面より円孔の埋込み深さに伴ってせん断抵抗は小さくなることが推察される。

4. PBLの終局せん断耐力

4.1 終局せん断耐力に及ぼす円孔の埋込み深さの影響

図-7は、PBLの単純引張試験を実施した西村らの既往の研究⁶⁾と本研究の単列・単孔の実験値について、PBLの終局せん断強度と円孔の埋込み深さの関係を示したものである。縦軸はPBL円孔の終局せん断強度 τ_{PBL} をコンクリートの圧縮強度 σ_B で無次元化した値、横軸はRC部材上面から円孔中心までの距離 H_1 である。なお、PBL円孔の終局せん断強度 τ_{PBL} は、最大荷重 P_{max} を円孔二面の面積 A_0 で除した値 $\tau_{PBL}=P_{max}/A_0$ として算出している。また、図中の太線は、PBL円孔の埋込み深さが小さい場合、PBLの終局せん断耐力がコンクリートのコーン状破壊に支配される場合の耐力 Q_{cf} であり、(1)式によって評価する⁶⁾。

$$Q_{cf} = 0.6 \cdot \sqrt{\sigma_B} \cdot A_i \quad (1)$$

$$A_i = 2 \cdot d \cdot (H_1 \cdot \tan \theta) + \frac{\pi \cdot (H_1 \cdot \tan \theta)^2}{2}$$

ここに、

σ_B : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

A_i : コンクリートのコーン状破壊における有効投影面積 (mm²)

d : PBL円孔の孔径 (mm)

H_1 : RC部材上面からの埋込み深さ (mm)

θ : コンクリートのコーン状破壊面の角度

文献6)では、実験結果に基づいて、コンクリートのコーン状破壊面の角度 θ を $\theta = 53^\circ$ としてコーン状破壊耐力を算定しており、図-7に示す結果はこれに従っている。

PBLが単列・単孔の場合、実験値は、RC部材の上面

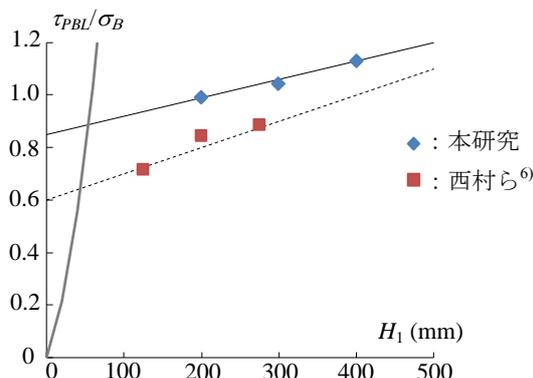


図-7 単孔の埋込み深さとせん断強度の関係

から円孔中心までの距離に伴って、ほぼ直線的にコンクリートの終局せん断強度は増大しているが、本実験と既往の研究の結果では、図中の実線及び破線で示す実験値の回帰直線の傾きが異なっている。これは、鋼板の表面状態が異なる(本実験:表面処理なし、西村ら⁶⁾:グリス塗布)ためと考えられる。

図-7に示す実験結果に基づいて、PBLの終局せん断耐力がコンクリートの二面せん断強度に支配される場合、PBLの終局せん断耐力に及ぼす円孔の埋込み深さに関する効果を鋼板の付着・摩擦を考慮した係数 ϕ_1 によって表現すると、(2)式となる。

$$\phi_1 = \alpha \cdot H_1 + \beta \quad (2)$$

$$\phi_1 \leq 1.08$$

表面処理なしの場合: $\alpha = 0.0007$, $\beta = 0.85$

表面にグリスの場合: $\alpha = 0.0010$, $\beta = 0.60$

なお、 ϕ_1 はLeonhardt式に基づいて、1.08以下とする。

4.2 PBL円孔の埋込み深さの影響を考慮した単孔の

終局せん断耐力

コンクリートの二面せん断強度に支配される場合のPBLの終局せん断耐力は、既往の耐力式に単列・単孔を対象とした円孔の埋め込み深さを考慮した係数 ϕ_1 を乗じることによって評価する。既往の単列・単孔の場合のPBLのせん断耐力 ${}_{PBL}Q_{u1}$ あるいは ${}_{PBL}Q_{u2}$ は、Leonhardt式あるいは福元式によって、(3)あるいは(4)式によって求められる。なお、 ${}_{PBL}Q_{u2}$ の算定の条件は文献7)による。

$${}_{PBL}Q_{u1} = 1.08 \cdot \sigma_B \cdot 2 \left(\frac{d^2 \cdot \pi}{4} \right) \quad (3)$$

$${}_{PBL}Q_{u2} = Q_{su} + Q_b \quad (4)$$

ここに、

Q_{su} : 円孔部分のコンクリート部のせん断耐力

Q_b : 鋼板とコンクリート間の終局付着・摩擦耐力

したがって、円孔の埋込み深さを考慮した単列・単孔のPBLの終局せん断耐力は、(5)式あるいは(6)式によって評価する。

$${}_{PBL}Q_{u1} = \phi_1 \cdot \sigma_B \cdot 2 \left(\frac{d^2 \cdot \pi}{4} \right) \quad (5)$$

$${}_{PBL}Q_{u2} = \phi_1 \cdot (Q_{su} + Q_b) \quad (6)$$

図-8に(5)式及び(6)式によって算定された計算値と実験値の比較を示す。縦軸及び横軸は実験値及び計算値である。また、図中の破線は、(3)あるいは(4)式で算出される円孔の埋込み深さの影響 ϕ_1 を考慮しない場合の計算値である。単列・単孔の場合、係数 ϕ_1 を考慮した

Leonhardt 式 (5式) による計算値は、図-8 (a) に示す (図中のプロット：◆・■) ように、実験値と非常に良い対応を示している。一方、係数 ϕ_1 を考慮した福元式 (6式) は、図-8 (b) に示す (図中のプロット：◆・■) ように、Leonhardt 式による結果に比べてばらつきは認められるものの、係数 ϕ_1 を考慮しない場合と比較して、実験値を概ね評価しているといえる。

4.3 複数孔への適用の検討

単列・複数孔とする場合、円孔の埋込み深さごとにそのせん断耐力を算出する必要があると考えられるが、図-6 に示す鋼板の軸ひずみ度分布より、RC 部材上面から第一の円孔のせん断抵抗が最も支配的であると考えられることから、ここでは、(3)式及び(4)式への円孔の埋込み深さ係数として、RC 部材上面から第一円孔までの埋込み深さを考慮した(2)式のみを適用を試みる。その結果、図-8 (a) に示す (図中のプロット：×・▲) ように、Leonhardt 式による計算値は危険側の評価を与えており、PBL のせん断耐力は単純に円孔数に比例しない結果を示している。一方、図 8 (b) に示す (図中のプロット：×・▲) 福元式の計算値は、概ね実験値を安全側に評価している。

PBL が複列・単孔の場合、単列・単孔と同様に Leonhardt 式及び福元式ともに実験値を概ね評価している。これら

の結果から、PBL が単列・複数孔の場合は、係数 ϕ_1 を考慮した福元式によって、複列・単孔の場合は単孔と同様に係数 ϕ_1 を考慮した Leonhardt 式及び福元式によって、実験値を概ね推定できると考えられる。

しかしながら、PBL の終局せん断耐力を検討した試験体は、図-1 に示す標準押し抜き試験によるものが大半であり、PBL に引張力を負荷した実験データは非常に少ない。今後、これらの実験データを蓄積し、提案された単列・単孔配置される PBL の終局せん断耐力式の妥当性、及び、鋼板に複数の円孔が設けられる場合の終局せん断耐力の評価法について、より詳細に検討する必要がある。

5. 結語

本研究によって得られた知見を以下に示す。

- 1) PBL が単列・単孔及び複列の場合、PBL の終局せん断耐力は、PBL 円孔の埋込み深さに伴って増大する。
- 2) PBL が単列・複数孔の場合、単列・単孔と比較して円孔 1 つあたりのせん断耐力は低下する。
- 3) PBL が単列・単孔及び複列の場合、本実験結果に基づいて提案された PBL 円孔の埋込み深さを考慮した Leonhardt 式及び福元式によって、実験値を評価できる。
- 4) PBL が単列・複数孔の場合、PBL 円孔の埋込み深さを考慮した評価法及び福元式によって、実験値を安全側に評価できる。

参考文献

- 1) F.Leonhardt, W.Andrä, H.P. Andrä, W.Harre : Neues, vorteilhaftes Verbundmittl für Stahlverbund-Tragwerkemithoher Dauerfestigkeit, beton-und Stahlbeton, pp.325-331, 1987.12
- 2) 土木学会：2014 年度制定 複合構造標準示方書[原則編・設計編], 2015.5
- 3) 楊東, 田中照久, 塚純一, 河野昭彦：各種ずれ止めを用いた合成梁の弾塑性曲げ性状に関する実験的研究, 日本建築学会九州支部研究報告, 第 53 号, pp.397-400, 2014.3
- 4) 西村泰志, 山下真一：S 部材と RC 部材を孔あき鋼板ジベルで接合した切替え部の破壊性状, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第 48 巻, pp.277-280, 2008
- 5) 西村泰志, 又吉大輔, 斎藤啓一, 青山尚樹：孔あき鋼板ジベルによる柱 RC 梁 S とする柱梁接合部の支圧破壊性状の改善, 日本建築学会構造系論文集, 第 665 号, pp-1727-1736, 2010.9
- 6) 味岡史晃, 斎藤啓一, 青山尚樹, 西村泰志：孔あき鋼板ジベルの引張破壊性状 (その 6), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp.1301-130, 2011.8
- 7) 福元敏之：摩擦・付着を考慮した拘束応力下に於ける孔あき鋼板ジベルの終局せん断耐力, 日本建築学会構造系論文集, 第 82 巻, 第 742 号, pp.1935-1944, 2017.12

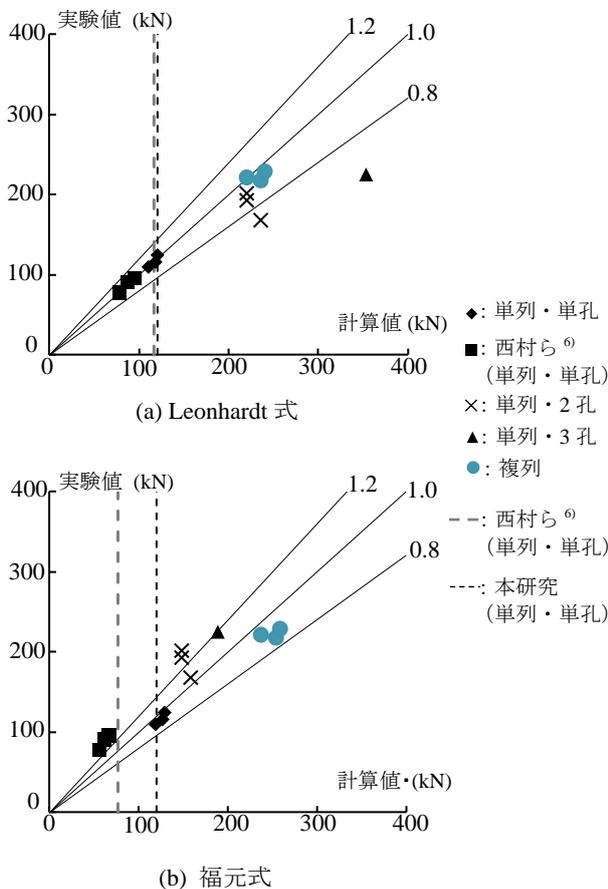


図-8 実験値と計算値の比較