

論文 鋼管拘束された孔あき鋼板ジベルの引抜き耐力

中 嶋 圭吾^{*1}・貞 本 尚亮^{*2}・藤 永 隆^{*3}

要旨: 著者らは、孔あき鋼板ジベル(PBL)を引張抵抗要素として用いた新しいCFT柱継手の提案をしている。本論では、孔数・挿入深さ・孔間隔・鋼管拘束を変数としたPBL引張実験を行い、PBLの引抜き耐力と変形性能の検討を行った。実験結果より、PBLは孔数の増加に伴い孔1つあたりの引抜き耐力が減少し、挿入深さの増加に伴い引抜き耐力が上昇することを確認した。また鋼管拘束により、ひび割れ発生後も最大引抜き耐力以降の耐力低下が小さいことを確認した。加えて、実験で確認された孔数と挿入深さの影響を低減係数として考慮した鋼管拘束下のPBL引抜き耐力式を提案した。

キーワード: 鋼・コンクリート機械的ずれ止め, PBL, 孔数, 挿入深さ, 孔間隔, 設計式

1. はじめに

孔あき鋼板ジベル(以下、PBLとする)は Leonhardt らによって提案された鋼とコンクリート間のずれ止めの方法¹⁾、鋼板リブに施された孔の内部に充填されたコンクリートのせん断ずれ抵抗を利用したものである。PBLは頭付きスタッドと比較して初期剛性が高いという利点があり、近年土木分野では橋梁の床版と鋼桁間のずれ止め等で多く用いられており、PBLの力学的性能を明らかにするためにせん断実験が多く行われている。PBLの終局せん断耐力式はいくつか提案されているが²⁻⁴⁾、それぞれの研究者の実験結果に基づいて提案されているため、得られる耐力値とその他の実験結果との相関は必ずしも良くない。また、耐力に及ぼす影響因子が多いため、包括的に評価できるような終局せん断耐力式は確立されていない。建築分野では鋼とコンクリートのせん断抵抗には頭付きスタッドを使用するのが一般的であり、部材断

面サイズの問題よりPBLは一般的ではなく、その利用法を検討している段階である。

著者らは新しいCFT柱継手を提案しており⁵⁾、充填コンクリートを介した応力伝達材としてPBLを引張抵抗要素として用いている。しかし、PBLを引張抵抗材として用いた例は非常に少なく⁶⁾、その応力伝達機構も明らかになっていない。そこで本論では、PBLの実験データベースを作成し、各種の影響因子が終局せん断(引抜き)耐力に与える影響を検討する。また、図-1のようなCFT柱継手へのPBLの適用を想定しているので、基本的な引張性能を検証するために柱断面中央に配置した場合のPBL引張実験を行い、諸因子がPBLの終局引抜き耐力へ与える影響を検討する。また、PBLを鋼管側に配置した場合は断面中央に配置した場合よりも横拘束力が上昇し、引抜き耐力は上昇すると推察している。

2. PBLの実験データベース

2.1 調査した文献

1988年から2018年の間に日本で行われたPBLの載荷実験のデータを、日本建築学会大会学術講演梗概集、複合・合成構造シンポジウム講演集、土木学会論文集、日本コンクリート工学年次論文集、土木学会年次学術講演会概要集より収集し、実験データベースを作成した⁷⁻¹⁹⁾。本論では、図-2に示す載荷形式の実験データを対象とした。PBLが埋め込まれたブロックがモルタルで作成されているもの、PBLの背かぶりが無いもの、孔内に貫通鉄筋が配されているもの、ジャッキ等により外部から能動的にコンクリートブロックに拘束力が与えられているもの、破壊形式が2面せん断破壊以外であるものは検討より除外した。なお、PBLが2列に配置された試験体もデータベースに含まれている。コンクリートブロックの

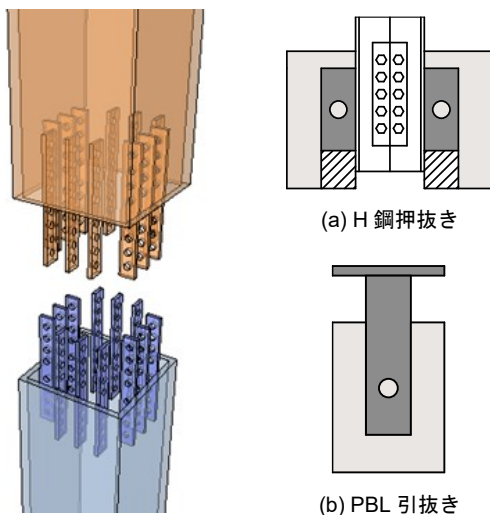


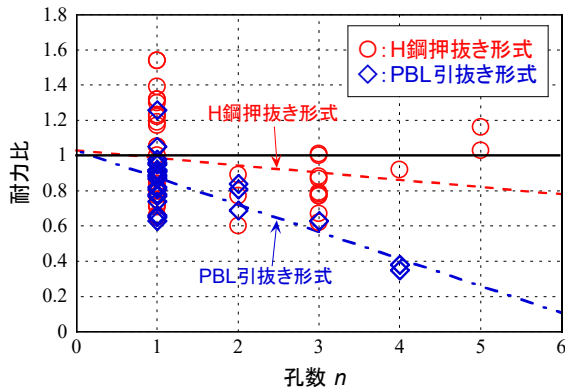
図-1 提案 CFT 柱継手

図-2 PBL 実験載荷状況

*1 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 大学院生 (学生会員)

*2 神戸大学大学院 工学研究科建築学専攻 大学院生

*3 神戸大学 都市安全研究センター 准教授 博士(工学)(正会員)



図－3 孔数の影響

底面摩擦も調査項目としており、摩擦低減を行っていない試験体のみを検討対象とし、載荷床版との間にテフロン板や砂等の摩擦係数の小さなものを設置し摩擦低減をしたものは検討から除外している。なお、文献中に終局せん断耐力の実験値が記述されていない場合は、荷重－変形関係の図から最大耐力を読み取った。

2.2 終局せん断(引抜き)耐力と孔数の関係

PBL の終局せん断耐力と実験値との比(以下、耐力比とする)を用いて、孔数が PBL の終局せん断耐力に及ぼす影響の検討を行った。本論では PBL の終局せん断耐力値として式(1)に示す Leonhardt の提案式¹⁾を用いた。ただし、文献 1 の安全係数 2.1 は考慮していない。

$$V_u = \frac{1.4d^2\beta_{WN}}{\gamma} = 1.08 \cdot 2 \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{f'_c}{\gamma} \quad (1)$$

ここで、 d ：孔径(mm)、 β_{WN} ：コンクリートの立方体強度(MPa)、 f'_c ：コンクリートの圧縮強度 (MPa)、 γ ：安全

係数(本論では 1.0 とする)

図－3 に終局せん断(引抜き)耐力の耐力比と孔数 n との相関関係を示す。図中○、◇印は、それぞれ H 鋼押抜き形式の試験体、PBL 引抜き形式の試験体の耐力比である。孔が複数ある試験体は最大耐力を孔数で除して孔 1 つ分の耐力を求めて図示している。赤破線は H 鋼押抜き形式の試験体による耐力比の、青一点鎖線は PBL 引抜き形式の試験体による耐力比の最小二乗近似直線である。

図より、H 鋼押抜き形式の試験体は孔数が PBL の終局せん断耐力に及ぼす影響が小さいことがわかる。一方、PBL 引抜き形式の試験体では孔数の増加に伴い、耐力比が減少する右下がりの傾向が見られる。H 鋼押抜き形式の試験体の場合は、PBL は直接せん断抵抗要素であるため、孔が複数ある場合でも単孔の終局せん断耐力に孔数を乗じることにより問題なく耐力評価が可能であると言える。しかし、PBL 引抜き形式の試験体の場合には、導入された引張力が各孔に均等に伝達されるわけではなく各孔での応力負担割合が異なるため、単孔の終局引抜き耐力に孔数を乗じた耐力を発揮することはできないと推察される。PBL が引張力を受けるような場合には終局せん断(引抜き)耐力に何らかの低減をする必要があると言える。

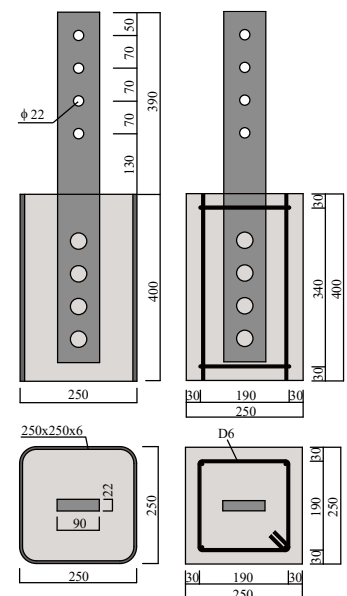
3. PBL の引張実験

3.1 実験概要

PBL が引張を受ける場合の耐力及び力学的特性を調べるため、PBL の引張実験を計画した。表－1 に試験体一覧、図－4 に試験体形状及び寸法の一例を示す。試験体は 250×250mm の CFT ブロックまたは RC ブロックに幅 90mm で板厚 22mm の PBL(SM490A)を埋め込んでい

表－1 試験体一覧

試験体名	試験体形状	変数	試験体名	試験体形状	変数
1-100		孔数	2-50-2d		孔数・挿入深さ
2-100-2d			2-150-2d		
3-100-2d			2-200-2d		
4-100-2d			2-100-3d		孔数・孔間隔
1-50		挿入深さ	3-100-3d		
1-150			1-100-N		鋼管拘束
1-200			4-100-2d-N		



図－4 試験体形状及び寸法の一例

る。鋼板に設けた円孔の直径は 35mm である。コンクリートの設計基準強度は 30MPa で、全ての試験体で孔内コンクリートの二面せん断破壊で耐力が決定するように設計している。なお、鋼板表面は黒皮のままで何れの処理も行っていない。実験変数は、PBL の孔数・挿入深さ・孔間隔・鋼管拘束の有無である。ここで挿入深さとは、コンクリート上面から第一孔中心までの長さである。載荷は図-5 に示すように鉛直上向きに引張力を単調に載荷した。抜け出し量 δ は PBL とブロック部分との相対ずれ変位としている。表-2 に PBL の実測寸法及び材料特性を示す。

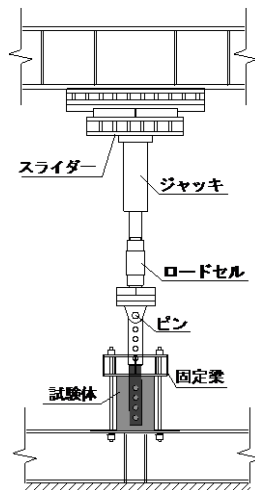


図-5 載荷装置

3.2 実験結果

(1) 諸因子の影響

図-6~9 に各試験体の引張力 P と抜け出し量 δ の関係を、表-3 に実験結果の一覧を示す。

図-6 に孔数の影響を示す。孔数の増加に伴い、引抜き耐力が上昇していることがわかる。これはせん断面の増加によるものであるが、孔が複数ある試験体の最大耐力

表-2 PBL の実測寸法及び材料特性

平均幅 (mm ²)	平均板厚 (mm ²)	ヤング係数 (GPa)	降伏点応力 (MPa)	引張強さ (MPa)
91.4	21.7	213	344	527

表-3 実験結果一覧

試験体名	圧縮強度 f_c' (MPa)	最大引抜き耐力 P_{max} (kN)	δ_{max}^{*1} (mm)	$P_{ave.}^{*2}$ (kN)	計算値 (Leonhardt式)	耐力比 (実験/計算)
1-100	40.9	79.0	1.49	79.0	85.3	0.926
2-100-2d	40.6	141.9	2.26	70.9	169.0	0.840
3-100-2d	40.3	194.8	2.76	64.9	251.5	0.775
4-100-2d	40.3	273.9	2.15	68.5	335.3	0.817
2-100-3d	40.3	149.1	5.54	74.6	167.6	0.889
3-100-3d	41.3	246.9	2.03	82.3	258.1	0.956
1-50	41.6	70.0	3.13	70.0	86.5	0.809
1-150	41.6	86.2	0.91	86.2	86.5	0.997
1-200	41.6	108.2	1.02	108.2	86.5	1.250
2-50-2d	41.0	127.6	1.25	63.8	170.6	0.748
2-150-2d	41.0	146.1	2.02	73.1	170.6	0.856
2-200-2d	41.0	152.1	2.64	76.0	170.6	0.891
1-100-N	40.6	71.8	—	71.8	84.5	0.849
4-100-2d-N	40.6	186.0	—	46.5	337.9	0.550

*1: P_{max} 時の抜け出し量 *2: 最大耐力を孔数で除した値

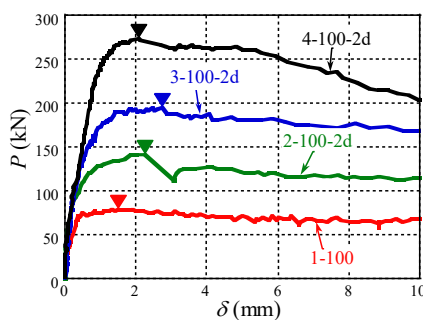
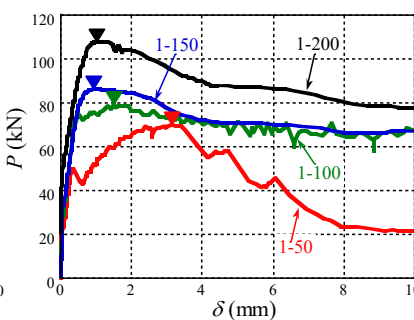
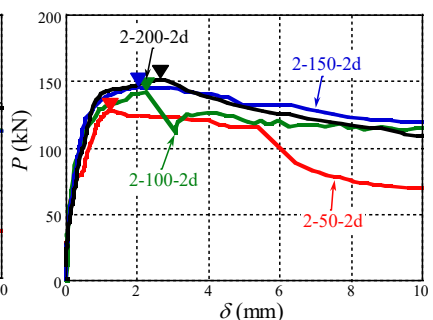


図-6 孔数の影響

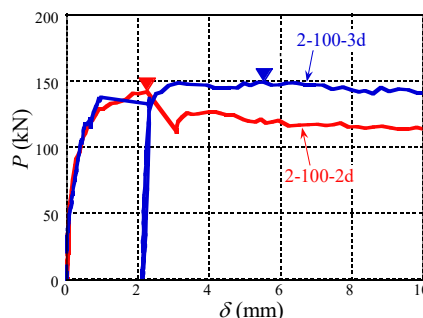


(a) 孔数が 1 つの場合

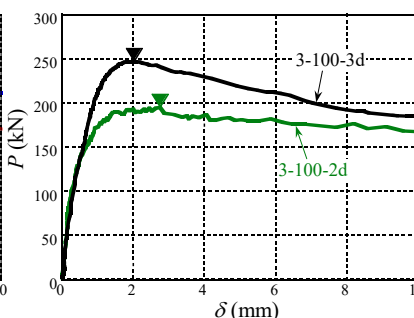


(b) 孔数が 2 つの場合

図-7 挿入深さの影響



(a) 孔数が 2 つの場合



(b) 孔数が 3 つの場合

図-8 孔間隔の影響

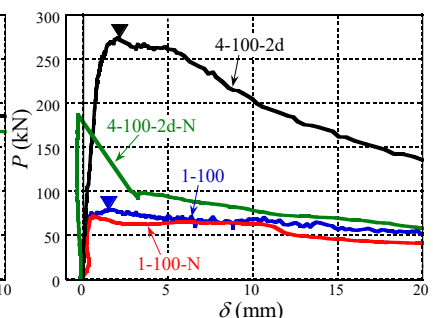


図-9 鋼管拘束の影響
(孔数が 1 つと 4 つの場合)

力を孔数で除した孔1つ分の耐力は、単孔の試験体の引抜き最大耐力よりも小さいことがわかる(表-3 参照)。

図-7 に挿入深さによる影響を示す。図より、挿入深さの増加に伴い最大耐力が大きくなる傾向が見られた。これは、挿入深さが深くなると、引張力に伴う孔内コンクリートの押し広げ力に抵抗するかぶりコンクリートの断面積が大きくなるためだと推察される。挿入深さが浅い(挿入深さ 50mm)試験体では、载荷中にコンクリートブロック上面の広い範囲でひび割れが生じ、急激な耐力低下を伴う挙動であったが、挿入深さ 3d 以上の試験体(挿入深さ 150, 200mm)では安定した挙動を示した。実験終了後の破壊状態も、挿入深さが大きいほどコンクリート上面 PBL 付近のコンクリートの剥離が小さかった。

図-8 に孔間隔による影響を示す。試験体 2-100-3d は、载荷中の計測機器の不調により最大耐力が計測できていない可能性がある。孔数が2つ、孔数が3つ何れの場合も孔間隔 2d よりも孔間隔 3d の試験体のほうが最大耐力が大きかった。これは、孔間隔が大きくなると、第二孔以降の挿入深さが大きくなる影響と推測される。

図-9 に孔数が1つと孔数が4つの場合の鋼管拘束による影響を示す。鋼管拘束のない試験体2体(1-100-N, 4-100-2d-N)は、変位計の固定部が载荷中に移動したため、正確な変位が計測できておらず参考値である。孔数が1つ、孔数が4ついずれの場合も鋼管拘束のない試験体より鋼管拘束のある試験体のほうが最大耐力が大きかった。鋼管拘束のない試験体では、孔数が1つと孔数が4つ何れの場合も、ブロック側面のひび割れが最も深い孔の位置まで進展し、孔数が1つの場合では最大耐力到達後にゆるやかに耐力が低下し、孔数が4つの場合では大きな音とともに急激に耐力が低下した。鋼管拘束のある試験体では、孔数が1つと孔数が4つ何れの場合も、ひび割れによる急激な耐力低下は見られなかった。鋼管の存在により、PBL の引抜きに伴う孔内コンクリートから周囲

のコンクリートへの押し広げ力によるひび割れが抑制されるため、ひび割れ発生後も耐力を保持していると推測される。孔が複数ある場合では、鋼管拘束の有無の影響はより大きかった。

(2) 既往の研究結果との比較

本論の実験で鋼管拘束のない試験体は2体のみであるため、前章のデータベースの引張実験結果との比較を行う¹⁷⁻¹⁹⁾。

図-10 に PBL の引抜き耐力に与える挿入深さ比の影響を示す。縦軸は式(1)により算出した耐力比、横軸は挿入深さ h を孔径 d で除した挿入深さ比 h/d である。

図-10 (a)より、本実験と既往の研究を比較した場合でも、鋼管拘束のある試験体は鋼管拘束のない試験体よりも耐力比が大きくなり、本実験結果と同様の傾向が見られた。また、前項で鋼管拘束のある試験体では、挿入深さの増加に伴い最大耐力が大きくなる傾向があることを示したが、鋼管拘束のない試験体においても同様の傾向が見られた。図-10 (b)より、単孔の場合と同様に、鋼管拘束のない試験体よりも鋼管拘束のある試験体のほうが耐力比が大きい結果となった。

4. 鋼管拘束下の PBL 引抜き耐力式の提案

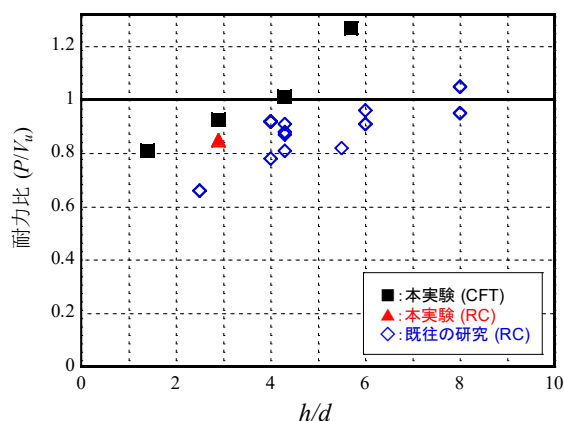
4.1 PBL 引抜き耐力提案式

本論の実験結果を基に、鋼管拘束下の PBL 引抜き耐力式(式(2))を提案する。

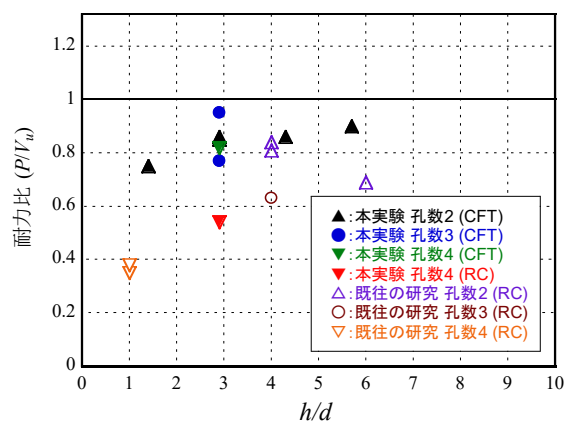
$$P_{cal} = \alpha \cdot \beta \cdot P_b \quad (2)$$

$$P_b = A_c \cdot f'_c = 2 \cdot n \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot f'_c \quad (3)$$

ここで、 P_{cal} : PBL1 本あたりの引抜き耐力(N)、 α : 孔数低減係数、 β : 挿入深さ比低減係数、 P_b : PBL の基本引抜き耐力(N)、 A_c : 孔内コンクリート二面せん断面積(mm²)、 f'_c : コンクリートの圧縮強度(MPa)、 n : 孔数、 d : 孔径(mm)



(a) 孔数が1つの場合



(b) 孔が複数の場合

図-10 鋼管拘束と挿入深さ比の影響¹⁷⁻¹⁹⁾

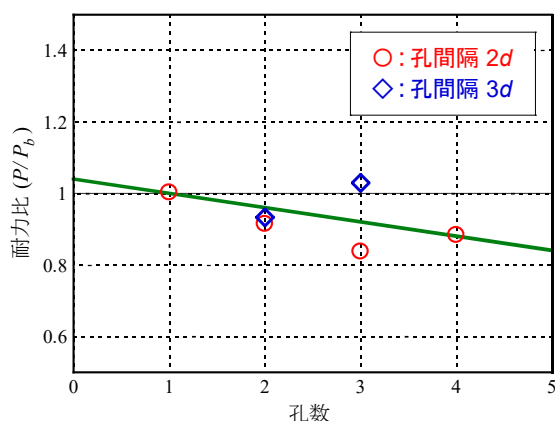


図-11 基本式による耐力比と孔数の関係

PBLの引抜き耐力は孔内のコンクリートの二面せん断で決定されており、基本引抜き耐力式は式(3)に示すとおり、孔の断面積とコンクリート圧縮強度の積とした。PBL1 本あたりの引抜き耐力式は基本引抜き耐力式に孔数低減係数 α と挿入深さ比低減係数 β を乗じて算定している。

4.2 孔数による低減係数 α

前章の実験結果より、孔が複数ある試験体の最大耐力を孔数で除した孔1つ分の耐力は、単孔の試験体の最大耐力よりも小さくなることがわかっている。図-11に前述の基本式(式(3))を用いて算定した耐力比(P/P_b)と孔数の関係を示す。これより、孔数1の時の耐力比が1.0となるような直線回帰式として式(4)が得られた。

$$\alpha = 1 - 0.040(n-1) \quad (4)$$

4.3 挿入深さ比による低減係数 β

前章の実験結果より、挿入深さの増加に伴い引抜き耐力が上昇する傾向が見られた。図-12に式(3),(4)を用いて求めた孔1つ分の耐力比と挿入深さ比の関係を示す。

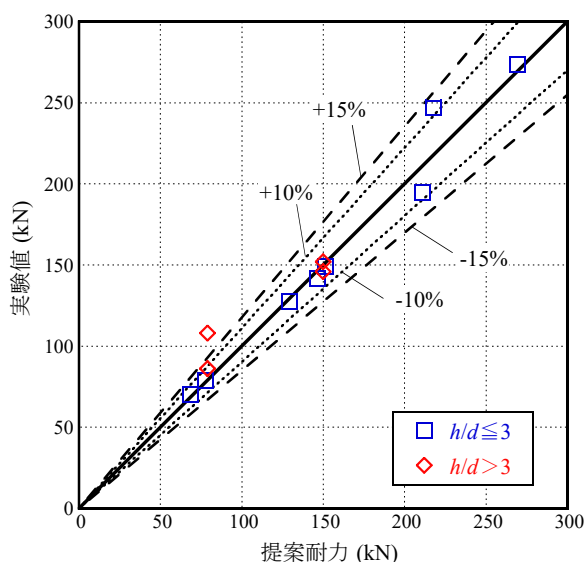


図-13 実験値と提案耐力の比較

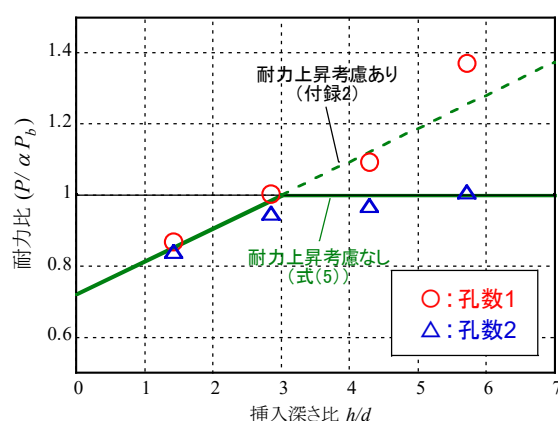


図-12 基本式による耐力比と挿入深さ比の関係

横軸は挿入深さ h を孔径 d で除した挿入深さ比 h/d としている。図より挿入深さ比が3程度で耐力比が1となることがわかる。挿入深さ比が3を超えると孔数が1つの試験体では耐力比が上昇するが、孔数が2つの場合には耐力比の上昇は見られない。下限値を挿入深さ比1.5とし、挿入深さ比3以下での耐力低減係数として回帰式(5)を求めた。挿入深さ比3以上では耐力低減を考慮しない。

$$\begin{aligned} 1.5 \leq \frac{h}{d} \leq 3 \text{ のとき } \beta &= 1 + 0.093 \left(\frac{h}{d} - 3 \right) \\ \frac{h}{d} > 3 \text{ のとき } \beta &= 1 \end{aligned} \quad (5)$$

挿入深さ比低減係数として本式を用いるものとするが、PBLの設計の際は挿入深さ比3以上であることが望ましい。

4.4 実験値との比較

図-13に実験値と提案耐力の比較を示す。提案式で、試験体1体を除いて15%以内で、試験体2体を除いて10%以内で耐力を評価できている。提案式により算出した耐力比の平均値は1.04で、相関係数は0.978であった。これより、鋼管拘束下におけるPBL引抜き耐力は式(2)によって実験値を概ね推定できると考えられる。しかし、PBL引張载荷の実験データは非常に少ない。今後、これらのデータを蓄積し、提案したPBL引抜き耐力式の妥当性をさらに検討していく必要がある。

5. まとめ

本論では、孔数・挿入深さ・孔間隔・鋼管拘束の有無を実験変数としたPBLの引張実験を行い、鋼管拘束がある時のPBLの引抜き耐力式の導出を試みた。得られた知見を以下に示す。

- 1) 孔が複数あるPBLの孔1つ当たりの引抜き耐力(最大耐力を孔数で除した値)は、単孔の場合の引抜き最大耐力よりも小さかった。
- 2) 挿入深さの増加に伴いPBLの引抜き耐力が上昇し、

挿入深さ $3d$ 以上 (挿入深さ 150, 200mm) の試験体では最大耐力以降も安定した挙動を示した。

- 3) 鋼管拘束のある試験体では、ひび割れ発生後も急激な耐力低下は見られなかった。また、孔が複数ある場合ではその影響がより顕著であった。
- 4) 鋼管拘束下の PBL の引抜き耐力式を提案した。孔数及び挿入深さの低減係数を考慮した提案式によって、実験値を概ね評価できることを示した。

付録 1 鋼管拘束のない場合の引抜き耐力

本論では鋼管拘束のある場合の引抜き耐力式を提案したが、鋼管拘束のない場合の基本式、孔数低減係数、挿入深さ低減係数も同様の方法で求めることができる。鋼管拘束のない場合の係数を求める際には、本論の実験と 2 章のデータベースの数値を用いている。

$$P_b = \gamma \cdot A_c \cdot f'_c = \gamma \cdot 2 \cdot n \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot f'_c \quad (\text{付 1-1})$$

$$\gamma = 0.908 \quad (\text{付 1-2})$$

$$\alpha = 1 - 0.093(n-1) \quad (\text{付 1-3})$$

$$1.5 \leq \frac{h}{d} \leq 3 \text{ のとき } \beta = 1 + 0.21 \left(\frac{h}{d} - 3 \right) \quad (\text{付 1-4})$$

$$\frac{h}{d} > 3 \text{ のとき } \beta = 1$$

付録 2 単孔の挿入深さ比の低減係数 ($h/d > 3$ の場合)

本論では、単孔で挿入深さ比が 3 を超えるときの耐力比増加を考慮していないが、考慮する場合は以下の式を用いることができる。

$$\frac{h}{d} > 3 \text{ のとき } \beta = 1 + 0.093 \left(\frac{h}{d} - 3 \right) \quad (\text{付 2})$$

謝辞 本研究の一部は、JSPS「国際的な活躍が期待できる研究者の育成 (R2904)」の一貫として実施されたものである。

参考文献

- 1) F. Leonhardt, W. Andrä, H.-P. Andrä, W. Harre : Neues, vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit, BETON-UND STAHLBETONBAU, Vol.82, issue12, pp.325-331, Dec.1987
- 2) 土木学会 : 2014 年制定複合構造標準示方書, pp.581-583, 2014.5
- 3) 保坂鐵矢ほか : 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研究, 構造工学論文集, Vol.48A, pp.1265-1272, 2002.3
- 4) 福元敏之 : 拘束応力を考慮した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 81 巻, 722 号, pp.803-812, 2016.4
- 5) 貞本尚亮, 藤永隆 : 孔あき鋼板ジベルを用いた CFT 柱継手に関する実験的研究 (その 1) 等曲げ実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1429-1430, 2017.7
- 6) 西村泰志, 吉田幹人, 齋藤啓一, 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 75 巻, 第 655 号, pp.1727-1735, 2010.9
- 7) 藤井堅ほか : 孔あき鋼板ジベルのずれ耐力評価式, 土木学会論文集 A1, Vol.70, No.5, pp.53-68, 2014.5
- 8) 森賢太郎, 藤井堅ほか : 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, I-554, pp.1107-1108, 2009.9
- 9) 深田和宏, 藤井堅, 豊田正, 岩崎初美 : 孔あき鋼板ジベルの終局せん断耐力に影響を及ぼすコンクリート拘束因子, 第 6 回複合構造の活用に関するシンポジウム, No.28, pp.28-1~28-8, 2005.11
- 10) 藤井堅ほか : 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
- 11) 保坂鐵矢ほか : 孔あき鋼板ジベルのせん断特性に関する実験的研究, 土木学会構造工学論文集, Vol.46A, pp.1593-1604, 2000.3
- 12) 山口隆一 : 高性能コンクリートを用いた孔あき鋼板ジベルの押抜き試験, 第 8 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム, pp.54-1~54-7, 2009.11
- 13) 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-考察, 第 6 回複合構造の活用に関するシンポジウム, pp.26-1~28-8, 2005.11
- 14) 古賀卓, 田中照久, 堺純一 : パーリング加工を活用した新しい機械的ずれ止めの開発 実験概要及び結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1471-1472, 2012.9
- 15) 則松一揮, 田中照久, 堺純一, 河野昭彦 : パーリング加工を活用した新しい機械的ずれ止めの開発 その 3 配置間隔, 個数及び繰返し載荷の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1597-1598, 2013.8
- 16) 田中照久, 堺純一, 河野昭彦 : パーリング加工を活用した新しい機械的ずれ止めの開発 その 5 パーリング孔に配置した貫通鉄筋がずれ挙動に及ぼす効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1373-1374, 2015.9
- 17) 味岡史晃, 齋藤啓一, 青山尚樹, 西村泰志 : 孔あき鋼板ジベルの引張破壊性状, 第 8 回複合・合成構造に関するシンポジウム, pp.53-1 - 53-8, 2009.11
- 18) 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張試験, 土木学会第 54 回年次学術講演会, I -A149, pp.298-299, 11999.9
- 19) 馬場望, 中森璃子 : 孔あき鋼板ジベルの埋め込み深さが終局せん断耐力に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No2, pp.1153-1158, 2018.7