

論文 孔あき鋼板ジベルを用いたSC部材の付着抵抗機構に関する研究

田中 照久*1・塚 純一*2

要旨: H形鋼のウェブに孔あき鋼板ジベルを形成した鉄骨コンクリート梁や柱を対象に, 付着抵抗機構を調べるため押抜き試験を実施した。特に, 横拘束の有無, 孔あけ位置・個数を含め, 孔あき鋼板ジベルの耐力算定式の妥当性について検討した。さらに部分的な終局せん断耐力の増大を図る目的でウェブ孔に円柱形状の高強度モルタルを通したものを準備し実験を行なった。実験結果より, コンクリートを横拘束することで, 最大せん断耐力の向上と, その後の耐力低下を抑制する効果がある。また, 孔に円柱体の高強度モルタルを通すことで, せん断耐力とずれ剛性の増大を図ることが可能であることを明らかとした。

キーワード: 鉄骨コンクリート構造, 孔あき鋼板ジベル, 押抜き試験, 終局せん断強度, 拘束効果

1. はじめに

鋼とコンクリートで構成された合成構造・混合構造が力学的に優れた構造性能を十分に発揮するためには, 異種材料間の確実な応力伝達が行われるように, 機械的ずれ止めを設け, 両者を一体化させる必要がある。

一般的に建築分野では, 両者の一体化を図るために頭付きスタッドジベル(以下, スタッドと略す)が用いられている。しかし, 溶接作業場(気候条件, 現場環境など)の条件次第では工期の延長を強いられることや, 溶接後の品質管理検査を行う必要があるため優れた接合法であるとは言い難い点が指摘されている。また, ずれ止め効果を十分に発揮させるためには, かなりのスタッド本数が必要となるため, 省エネルギー化, 工期短縮などの点で解決すべき問題がある。土木分野では, スタッドとは別に鋼とコンクリートを一体化する方法として, 孔あき鋼板ジベル(以下, 孔あきジベルと略す)の開発が行なわれ鋼合成桁橋や合成土留壁に適用されている(例えば¹⁾)。こちらもスタッドと同様に溶接作業を要する。

著者らは, H形鋼フランジ間にコンクリートを充填したSC梁や柱(図-1(b)SC断面参照)を対象に, 予めウェブ面にあけた孔に充填されたコンクリートが孔あきジベルの機能を果たし, 溶接を必要としないずれ止め方法を

提案している²⁾。押抜き試験の実験結果より, 孔あきジベルのずれ止め効果は確認できたが, H形鋼ウェブ面とコンクリートの境界面の隙間(以下, 肌離れと呼ぶ)がせん断抵抗機構に与える影響, 孔あけ位置・個数を含め, 孔あきジベルの耐力算定式の妥当性について検討の余地があることが示された。そこで, 本研究では更なる基礎的データの収集を目的に, 実験変数に機械的ずれ止めの有無と種類, 個数・位置, 横拘束の有無, さらに部分的な終局せん断耐力の増大を図る目的でウェブ孔に円柱形状の高強度モルタルを通したものを製作し, 押抜き試験を実施した。本論文では, この実験結果について述べる。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は, H形鋼のフランジ間にコンクリートを充填したものである(図-1参照)。試験体で使用した鋼材は, H-300x300x10x15(SS400)である。充填コンクリートの設計基準強度は $F_c30\text{N/mm}^2$ であり, 粗骨材の最大寸法は13mmで, 標準スランプが18cmの普通コンクリートを使用した。また, コンクリートの打設方向は縦打ちとし, 鋼とコンクリートの接触する面は, 特に表面処理を施していない。ウェブ孔に通す高強度モルタルは $\phi50\times100\text{mm}$ の円柱体であり, 設計基準強度は 90N/mm^2 である。

スタッドの形状は, 軸径13mmで長さが100mmである。H形鋼のウェブにあけた孔径は, 50mmである。充填コンクリートによって形成される1つ当たりの孔あきジベルは, スタッドとの比較も行うために, 「各種合成構造設計指針同解説」³⁾に規定されているスタッドの1本当たりのせん断耐力(式(1)参照)と同程度となるように孔径を決定した。なお, 孔あきジベルのせん断耐力は, ドイツのLeonhardt⁴⁾らが提案しているコンクリートのせん断破壊が先行する耐力算定式(2)より算出した。

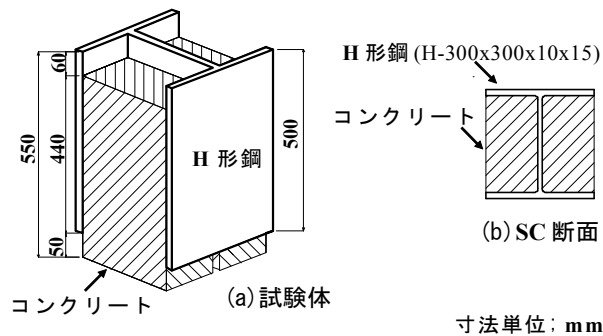


図-1 試験体形状

*1 福岡大学 工学部建築学科助手 (正会員)

*2 福岡大学 工学部建築学科教授 博士(工) (正会員)

表-1 試験体一覧

| シリーズ | 試験体名 | ずれ止めの種類 | ずれ止めの配置 (個数/位置) | モルタル圧縮強度 $m\sigma_B$ (N/mm ²) | コンクリート圧縮強度 $c\sigma_B$ (N/mm ²) | 試験体数 |
|-----------|--------------|--------------|--------------------|--|--|------|
| N | N | なし | | | | |
| S | S-f4 | スタッド | 4/フランジ | | 29.0 | 各1 |
| | S-w2 | | 2/ウェブ | | | |
| H | Hc-c1(-C) | 孔 (普通コンクリート) | 1/中央 | | | |
| | Hm-c1(-C) | | | 87.4 | | |
| | Hc-v2 | 孔 (普通コンクリート) | 2/直列 | | | |
| | Hm-v2(-C) | | | 87.4 | | |
| | Hc-h2 | 孔 (普通コンクリート) | 2/並列 | | | |
| | Hm-h2(-C) | | | 87.4 | | |
| | Hc-v3(-C) | 孔 (普通コンクリート) | 3/直列 | | | |
| | Hm-v3(-C) | | | 87.4 | | |
| | Hc-g4(-C) | 孔 (普通コンクリート) | 4/格子 | | | |
| | Hm-g4(-C) | | | 87.4 | | |
| Hc-g6(-C) | 孔 (普通コンクリート) | 6/格子 | | | | |
| Hm-g6(-C) | | | 87.4 | | | |

$$q_s = 0.5 \cdot s_c \cdot a \cdot \sqrt{F_c \cdot E_c} \quad (1)$$

ここで、 q_s はスタッド1本当たりのせん断耐力、 $s_c a$ はスタッドの軸部断面積、 F_c はコンクリート設計基準強度、 E_c はコンクリートのヤング係数を表す。

$$Q_u = 1.4 \cdot d_o^2 \times (\sigma_B \times 1.16) / \gamma \quad (2)$$

ここで、 Q_u はコンクリートで破壊する場合の終局せん断耐力、 d_o は孔径、 σ_B はコンクリート圧縮強度(但し、ウェブ孔に円柱体を通したタイプはモルタル圧縮強度)、 γ は安全率(=2.1)を表す。なお、昨年度の実験結果²⁾より、安全率を考慮しなければ危険側の評価となることが確認されたため、本研究では安全率2.1を採用している。

2.2 実験変数

試験体は27体製作した。表-1に試験体一覧、図-2に鉄骨の詳細を示す。試験体名の識別記号は、「ずれ止めの種類-ずれ止めの位置・個数(-拘束有)」を意味している。シリーズNは1体であり、ずれ止め無しの基準試験体である。シリーズSは、フランジ内面にスタッドを4本設けたものと、ウェブ面に2本設けたもので各1体である。シリーズHは、ウェブに設ける孔の個数と位置を変数にとる6種類で、別に円柱体の高強度モルタルを通したものを各試験体で準備し、さらに横拘束をしたものを各試験体で準備した (Hc-v2とHc-h2は除く)。表-1に普通コンクリートのシリンダー($\phi 100 \times 200$ mm)と高強度モルタルのシリンダー($\phi 50 \times 100$ mm)の圧縮強度を示す。

2.3 荷重方法及び測定位置

荷重方法及び測定位置を図-3に示す。試験は、5000kNアムスラー荷重試験機を使用した。コンクリートブロックの下面を反力台に接地させ、荷重部は球座となってお

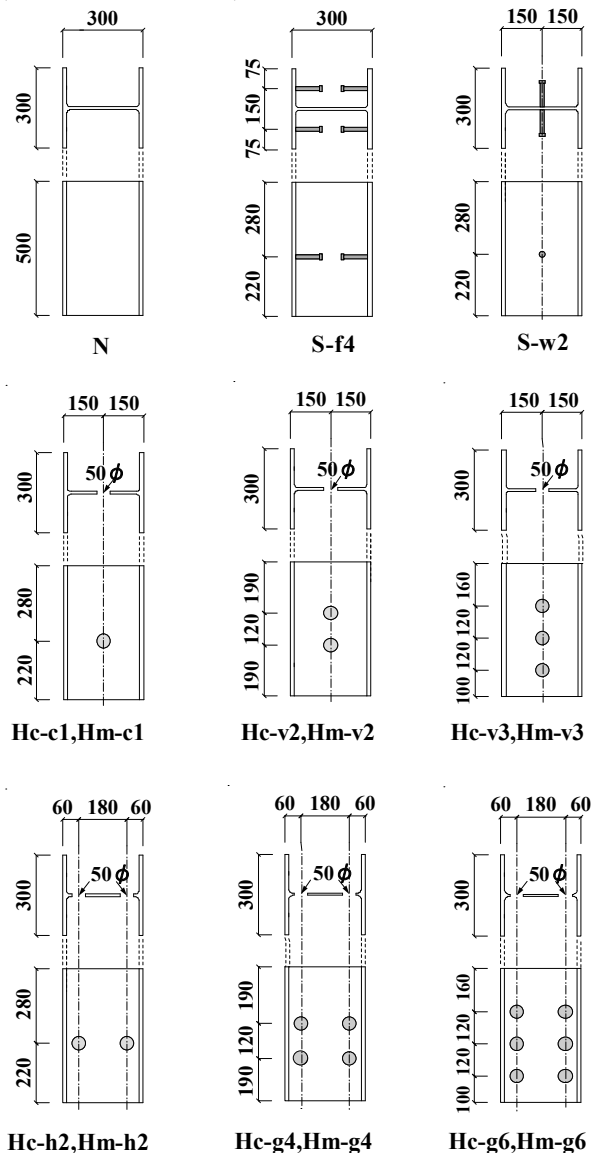


図-2 鉄骨の詳細 寸法単位: mm

り上面のH形鋼に耐圧板を介して圧縮荷重を単調に載荷し、H形鋼の底面が40mm沈下した時点で実験終了とした。H形鋼とコンクリートの肌離れが、孔あきジベルのずれ止め特性に、どの程度の影響を与えているか確認するため、コンクリートの側面に厚さ25mmの鋼板を両側からボルトを介して挟み、横拘束したコンクリートの試験体も準備した(図-3(左)参照)。測定変位は、H形鋼とコンクリートの相対ずれ変形と全長の軸変形を測定した。また、鋼とコンクリートの肌離れによる面外変形を測定した(図-3(右)参照)。

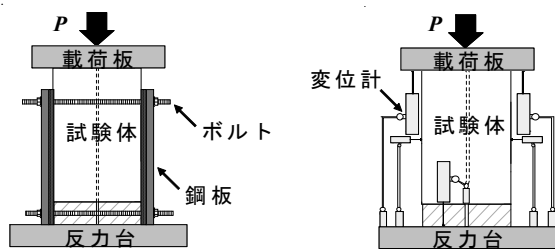


図-3 載荷方法、横拘束した場合(左)、測定方法(右)

3. 実験結果と考察

表-2に各試験体の実験結果を示す。本実験における付着抵抗機構は、ずれ止めが無い試験体の場合、鋼とコンクリートの表面粘着力と摩擦力である。一方ずれ止めを設けた試験体は、両者の抵抗力の他に機械的ずれ止めが付着抵抗の大半を担う。そこで、付着応力度 τ_b は、荷重-ずれ変形において、早期(ずれ量0.3mm程度)に一度荷重が低下する点、即ち粘着力を損失したと考えられる荷重 P_b に基づいて式(3)で定義し算出した。

$$\tau_b = \frac{P_b}{l_b \cdot h_p} \quad (3)$$

ここで、 l_b はコンクリートとH形鋼が接している部分の材軸方向の付着長さ、 h_p はコンクリートとH形鋼が接している部分の周長を表す。算定対象となる試験体数は、明瞭に荷重が一度低下する点 P_b を確認できた27体中17体である。機械的ずれ止めによる最大せん断耐力は、ずれ量20mmまでにおける最大荷重点 P_{max} とした。また、最大ずれ量 δ_{max} は、最大荷重 P_{max} に対応するずれ量である。

3.1 付着応力度

付着応力度 τ_b と P_b 時のずれ量 δ_b の関係を図-4に示す。ずれ止めの有無・種類に関わらず、ずれ量は約0.05mm~0.2mmの間で P_b に達している。また付着応力度 τ_b は、0.15N/mm²~0.25N/mm²に集中していることが確認できる。対象となる試験体数が少ないため断定はできないが、押抜き試験によるH形鋼のフランジ間にコンクリートを充填したSC

表-2 実験結果

| 試験体名 | τ_b (N/mm ²) | Pmax (kN) | δ_{max} (mm) | Qu (kN) | Pmax/Qu |
|---------|----------------------------------|--------------|------------------------|------------|---------|
| N | 0.18 | 89 | 0.1 | | |
| S-f4 | 0.23 | 417 | 5.6 | 232 | 1.8 |
| S-w2 | 0.23 | 308 | 12.9 | 116 | 2.7 |
| Hc-c1 | 0.20 | 103 | 4.4 | 56 | 1.8 |
| Hc-c1-C | 0.20 | 104 | 4.0 | | 1.9 |
| Hm-c1 | 0.20 | 142 | 2.4 | 169 | 0.8 |
| Hm-c1-C | 0.21 | 182 | 1.7 | | 1.1 |
| Hc-v2① | 0.12 | 80 | 2.4 | 112 | 0.7 |
| Hc-v2② | 0.19 | 144 | 2.8 | | 1.3 |
| Hm-v2 | 0.20 | 194 | 6.3 | 338 | 0.6 |
| Hm-v2-C | 0.24 | 216 | 1.7 | | 0.6 |
| Hc-h2① | | 100 | 4.3 | 112 | 0.9 |
| Hc-h2② | | 108 | 3.0 | | 1.0 |
| Hm-h2 | 0.27 | 266 | 1.4 | 338 | 0.8 |
| Hm-h2-C | | 241 | 2.4 | | 0.7 |
| Hc-v3 | 0.18 | 124 | 2.9 | 168 | 0.7 |
| Hc-v3-C | | 179 | 4.2 | | 1.1 |
| Hm-v3 | 0.25 | 311 | 1.2 | 507 | 0.6 |
| Hm-v3-C | | 329 | 1.2 | | 0.6 |
| Hc-g4 | 0.22 | 123 | 2.0 | 224 | 0.5 |
| Hc-g4-C | 0.16 | 193 | 3.4 | | 0.9 |
| Hm-g4 | | 314 | 1.0 | 676 | 0.5 |
| Hm-g4-C | | 350 | 1.3 | | 0.5 |
| Hc-g6 | 0.29 | 192 | 1.9 | 336 | 0.6 |
| Hc-g6-C | | 266 | 3.0 | | 0.8 |
| Hm-g6 | | 546 | 0.9 | 1014 | 0.5 |
| Hm-g6-C | | 605 | 1.2 | | 0.6 |

τ_b : 付着強度, P_{max} : 最大荷重, δ_{max} : 最大ずれ量, Q_u : 計算耐力

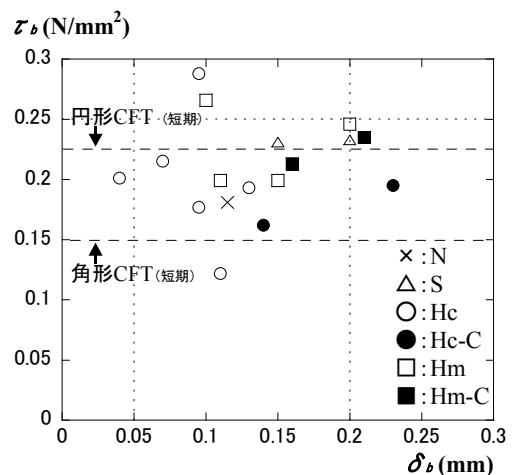


図-4 付着応力度とその時のずれ量の関係

部材の付着応力度は、「コンクリート充填鋼管構造設計施工指針」⁵⁾にある鋼管とコンクリートの短期付着応力度(角形CFT:0.15N/mm², 円形CFT:0.225N/mm²)に近い値を示していることが言える。角形CFTの短期付着応力度で評価すれば、ほぼ安全側であることが確認できる。

3.2 荷重-変形関係

図-5(a)と(b)は、ずれ止め無しNとスタッドS-w2を含

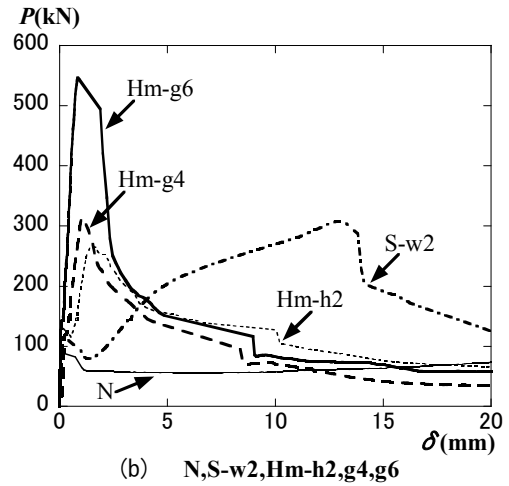
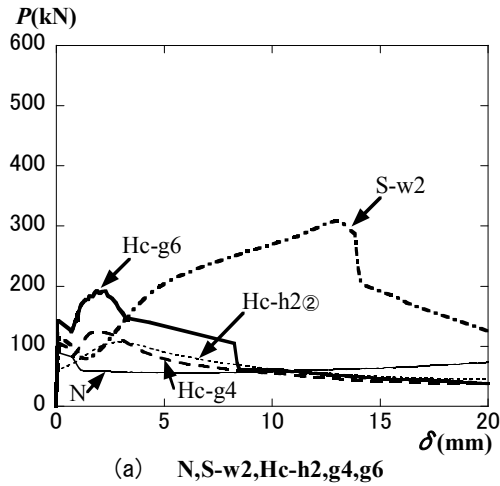


図-5 荷重-ずれ変形関係

めた、孔あきジベルHcとHmの荷重-ずれ変形関係の例を示す。図-5より、ずれ止めの有無と種類、個数の特徴が顕著に現れている。粘着力を失った後、S-w2は、ずれ変形が大きくなるにつれて最大耐力に達している。一方HcとHmは、小さなずれ変形で最大耐力を発揮していることが分かる。これは、文献6)にあるように、スタッドが柔なずれ止めに対し、孔あきジベルは剛なずれ止めと評価できる。シリーズHは、孔の個数が多くなるに従って最大せん断耐力は増大する傾向を示したが、孔一つ当たりが負担する耐力は小さくなる結果であった。円柱体の高強度モルタルを通したHmは、せん断耐力とずれ剛性の飛躍的な増大が見込まれる。Hmのピーク後の挙動は、Hcに比べて急激な耐力低下が見られるが、ずれ量15mm辺りから両者ともに一定の耐力を維持していることが確認できる。理由は、最大せん断耐力発揮後、孔の位置・個数に関係なく、鋼とコンクリート間の摩擦力が支配的になるからと考える。

3.3 横拘束の効果

3.3.1 最大耐力と最大ずれ量に与える影響

図-6にHcとHmの各試験体で横拘束の有無による最大ずれ量の比(拘束有 $H-C \delta_{max}$ / 拘束無 $H \delta_{max}$)と最大耐力比(拘束有 $H-C P_{max}$ / 拘束無 $H P_{max}$)の関係を示す。図-6より

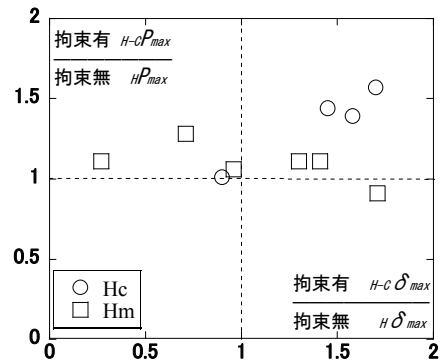


図-6 拘束有無の最大耐力比と最大ずれ量の比の関係

Hcは、コンクリートを横から拘束することで最大耐力と最大ずれ量は、拘束していない結果に比べ、どちらも約1.5倍の増大が確認できる。これに対し、Hmは拘束による影響は小さいということがわかる。この要因を、図-7より説明する。

孔あきジベルのせん断抵抗機構を考えると、作用せん断力 Q_u に対して、H形鋼ウェブにかけた円孔内に充填されたコンクリートの円形側面(以下、せん断抵抗面と呼ぶ)で抵抗する。図-7(a)より Type Hc の場合、円孔内とせん断抵抗面に粗骨材が混在することで、一様な抵抗

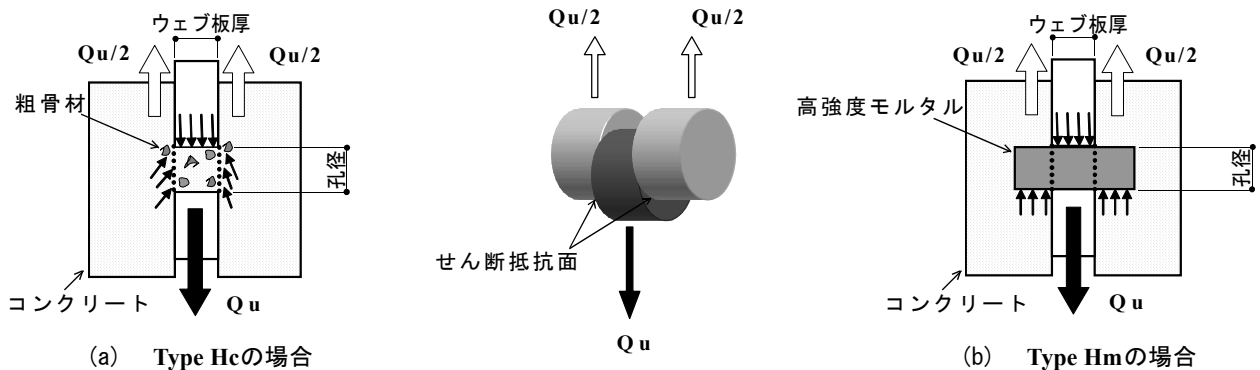


図-7 孔あき鋼板ジベルのせん断抵抗機構⁶⁾

力を保持できず、材軸方向に垂直な成分の力が発生する。この力の増大に伴ってウェブとコンクリートの境界面に肌離れが生じ、確実な応力伝達が厳しい条件となる。これに対して、図-7 (b)より Type Hmは円孔内に円柱形状のモルタルが存在する、即ち粗骨材が混在してないため、Type Hcに比べて加力方向にせん断抵抗力を十分に発揮できる。以上のことから、横拘束した Type Hcは鋼とコンクリートの肌離れを防ぐことができるため、耐力と靱性を向上させる十分な効果があったと考えられる。

3.3.2 最大耐力に達した後の挙動に与える影響

図-8に、横拘束の有無による荷重-ずれ変形関係の比較の例を示す。最大耐力に達した後、拘束無しの場合のHcとHmは急激な耐力低下が見られるが、拘束有りの場合のHc-CとHm-Cは緩やかに低下していることが確認できる。同様に他の試験体においても、拘束の有無によるピーク後の挙動の違いは顕著に現れた。最大耐力までの付着機構は、孔あきジベルによるせん断抵抗が大半を担っているが、ピーク到達後は鋼とコンクリートの摩擦力が支配的になる。即ち、コンクリートブロックを横拘束することで4面拘束された状態となり、コンクリートがポアソン比によって膨張し、横拘束していない3面拘束の状態に比べ摩擦力が増大するためと考えられる。

実験終了後の孔あきジベルの破壊状況について、孔内に充填されたコンクリート (Type Hc) と孔に通した高強度モルタル (Type Hm) は、拘束条件に関係なくどちらもウェブ面に沿ってせん断破壊していた。

3.4 孔あきジベルのせん断耐力算定式

Leonhardt⁴⁾の示した式(2)から求めたせん断耐力 Q_u と実験結果の最大耐力 P_{max} を比較したのが図-9(a)と図-10(a)であり、それぞれType Hc (普通コンクリート)とType Hm (高強度モルタル)の場合である。なお、図に示す式(2)は、後述で検討する式(7)と比較するため、置き換えた式で表記している。Type HcとHc-Cの場合、孔あきジベルが負担したせん断耐力の実験値/計算値の平均は0.94と1.14であり、安全率を考慮した式(2)で評価できる。しかし、図-9(a)からType Hcは実験結果にばらつきが目立つ。さらに表-3に示す変動係数CVは、Type Hmに比べ大きいことが確認できる。これは、各試験体によって孔近辺に存在する粗骨材の量が均等でないことが原因の一つと考えられる。Type HmとHm-Cの場合、実験値/計算値の平均は0.64と0.70であり、図-10(a)からも確認できるように、概して実験値は計算値を下回っており、安全率2.1で除しているにも関わらず式(2)では、危険側の評価であることがわかる。つまり、円柱体の高強度モルタルを式(2)で評価した場合、充填コンクリートに比べせん断耐力は計算値より低い傾向を示すことから、粗骨材の有無がせん断抵抗に対して影響を及ぼしていることが推察

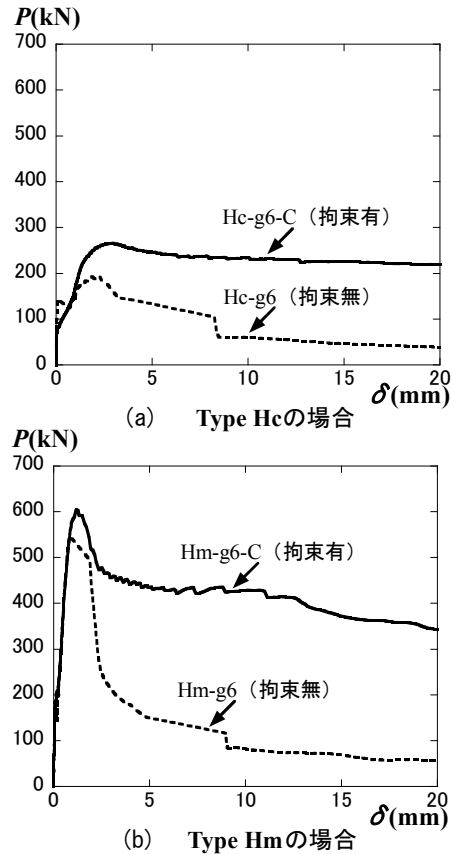


図-8 拘束の有無による実験挙動の比較

される。そこで、本研究では既往の研究⁴⁾の考え方に基づいて、以下の手順でせん断耐力算定式を検討した。

図-7より孔あきジベルのせん断強度 Q_u は、コンクリートのせん断応力度 τ_u とせん断抵抗面の2面分の円面積 $(\pi \cdot d_o^2 / 4) \times 2$ の積と考えられ、次式(4)で表せると仮定する。

$$Q_u = \tau_u \times \left(\pi \cdot d_o^2 / 4 \right) \times 2 \quad (4)$$

コンクリートのせん断応力度 τ_u は、各Type別の実験結果における孔一つ当たりが負担した最大せん断耐力の平均値 $Ave P_{max}$ を用いて次式(5)で算出する。

$$\tau_u = Ave P_{max} / \left\{ \left(\pi \cdot d_o^2 / 4 \right) \times 2 \right\} \quad (5)$$

式(5)より算出したコンクリートのせん断応力度 τ_u とシリンダー圧縮応力度 σ_B を係数 k として式(6)と表す。

$$k = \tau_u / \sigma_B \quad (6)$$

よって、本実験における孔あきジベルのせん断耐力式は、式(4)、(6)より次式(7)が得られる。各Type別の算出結果を表-3に示す。

$$Q_u = k \cdot \sigma_B \times \left(\pi \cdot d_o^2 / 4 \right) \times 2 \quad (7)$$

式(7)より算出したせん断耐力 Q_u と実験結果より得られた最大耐力 P_{max} の比較をそれぞれ図-9と10の(b)と(c)に示す。いずれのTypeも対象となる試験体数が少ないた

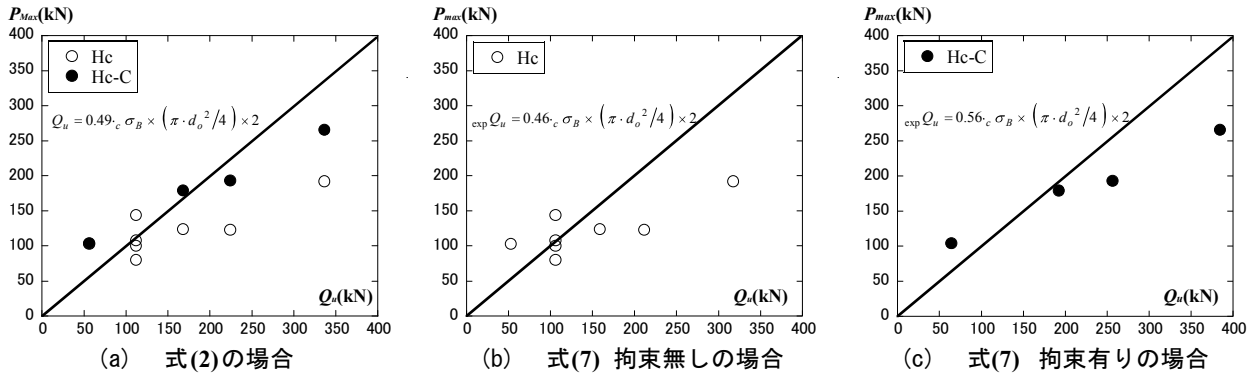


図-9 Type Hcの実験と計算の比較

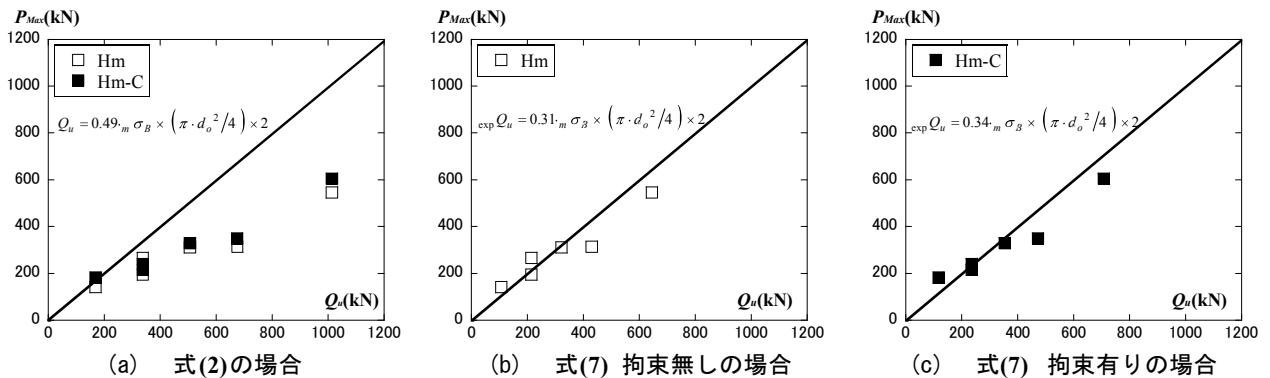


図-10 Type Hmの実験と計算の比較

表-3 各Typeの算出結果

| Type | 横拘束 | σ_B (N/mm ²) | Ave P_{max} (kN) | CV | τ_u (N/mm ²) | k (τ_u / σ_B) |
|------|-------|------------------------------------|-----------------------|------|----------------------------------|------------------------------|
| Hc | 無 | 29.0 | 52.9 | 0.43 | 13.5 | 0.46 |
| | 有(-C) | | 64.1 | 0.37 | 16.3 | 0.56 |
| Hm | 無 | 87.4 | 107.5 | 0.21 | 27.4 | 0.31 |
| | 有(-C) | | 118.1 | 0.26 | 30.1 | 0.34 |

め断定はできないが、Type Hcは、孔の数が増えるにつれて危険側の評価となるが、式(2)の係数と比べると若干異なるだけである。Hc-Cの係数は、拘束効果によりHcに比べて約1.2倍の評価となる。次にType Hmは、拘束の有無に関わらずどちらもほぼ安全側の評価となる。これを式(2)で表す場合は、安全率とは別に低減率として約0.6を乗じる必要がある。Hm-Cの係数は、拘束効果によりHmに比べて約1.1倍の評価となる。

4. まとめ

H形鋼のウェブに孔あき鋼板ジベルを形成したSC部材の付着抵抗機構について実験的に検討した結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 孔あきジベルは、スタッドより剛なずれ止めと評価できる。
- 2) コンクリートを横拘束することにより、最大せん断耐力の向上と、その後の耐力低下を抑制する効果が確認された。

3) 孔あきジベルは、ウェブ孔に円柱体の高強度モルタルを通すことで、せん断耐力とずれ剛性の増大を図ることが可能である。

4) SC部材に孔あきジベルを用いた場合、Leonhardtらの算定式⁴⁾を含め、既往の研究でいくつか提案されている式¹⁾の適用に向け、耐力算定法の確立が課題である。

謝辞

本研究は、平成19,20年度科学研究費補助金(基盤研究(C)研究代表者:堺純一)の援助を受けた。実験準備にあたり、福岡大学工学部建築学科助教(材料)本田悟氏、堺研究室荒木拳氏他の協力を得た。ここに記して、感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 平陽兵: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
- 2) 田中照久, 堺純一:鉄骨コンクリート梁材の弾塑性変形形状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No.3, pp.1363-1368, 2008.7
- 3) 日本建築学会:各種合成構造設計指針同解説, 1985.2
- 4) Leonhardt, F et al: Neues, vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit, Beton- und Stahlbetonbau, pp.325-331, Dec. 1987
- 5) 日本建築学会:コンクリート充填鋼管構造設計施工指針, 2007.10
- 6) 鬼頭宏明, 園田恵一郎:鋼・コンクリート複合構造, 森北出版社, pp.21-32, 2008.3