

(1) 繰り返しせん断力を受ける機械的ずれ止めの履歴特性に関する実験的研究

田中 照久¹・楠本 彩七²・堺 純一³

¹ 正会員 福岡大学助教 工学部建築学科 (〒 814-0180 福岡市城南区七隈八丁目 19 番 1 号)
E-mail:sttanaka@fukuoka-u.ac.jp

² 非会員 元福岡大学 工学部建築学科 (〒 814-0180 福岡市城南区七隈八丁目 19 番 1 号)

³ 正会員 福岡大学教授 工学部建築学科 (〒 814-0180 福岡市城南区七隈八丁目 19 番 1 号)
E-mail:sakaij@fukuoka-u.ac.jp

機械的ずれ止めは、鋼とコンクリートとの間の応力伝達において有効な接合要素である。頭付きスタッドをはじめとする孔あき鋼板ジベルやバーリングシアコネクタのせん断耐力は、鋼とコンクリートの接合部を模擬した試験体で押抜き試験が行われ、その実験結果に基づいて、ずれ止めの耐力評価式が構築されている。しかし、地震時の多数回繰り返しせん断力が作用すると、ずれ止め性能が劣化する可能性がある。ずれ止めを用いた接合部性能を正確に評価するためには、ずれ止めの復元力特性を把握する必要がある。本論は主に、バーリングシアコネクタと孔あき鋼板ジベルの孔径の違いに着目した正負交番繰り返し载荷の押抜き試験を実施し、単調载荷と比較して、各ずれ変位時における耐力について検討した。

Key Words : *Push-out test, Burring shear connector, Perfobond rib, strength, Slip displacement*

押抜き試験, バーリングシアコネクタ, 孔あき鋼板ジベル, 耐力, ずれ変位

1. 序論

鋼材とコンクリートの応力伝達機構として、機械的抵抗によるずれ止めは重要な役割をもつ。ずれ止めには頭付きスタッド¹⁾が多用されているが、近年の建築構造分野では孔あき鋼板ジベル²⁾やバーリングシアコネクタ³⁾を用いた応用研究が進められ一部実用化されている。各種ずれ止めの力学特性は、鋼とコンクリートの接合部を模擬した試験体で押抜き試験が行われ、その実験結果に基づいて、せん断耐力評価式が提案されている。既往の研究は、単調载荷試験が多いこと、最大耐力に注目したものが多くことが挙げられ、正負交番の繰り返し性状を調べた研究は少なく復元力特性は明らかにされていない。ずれ変位がある限界に達したときにずれ止めに作用するせん断耐力の評価法は未だ確立されていない。地震時の多数回繰り返しせん断力が作用すると、ずれ止め性能が劣化する可能性がある。ずれ止めを用いた接合部の復元力特性を正確に評価するために

は、ずれ止めの耐力低下特性を把握する必要がある。

そこで本論では、バーリングシアコネクタおよび孔あき鋼板ジベルのずれ止めを対象に、孔径の違いに着目した正負交番繰り返し载荷と単調载荷の押抜き試験を実施し、繰り返し载荷における各ずれ変位の耐力の変化を定量的に調べることを目的とする。

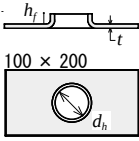
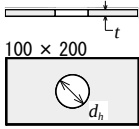
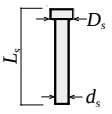
2. 実験計画

ずれ止めの押抜き試験は、2 回に分けて計画する。シリーズ 1 は、代表的なずれ止めを 3 種類選び、各々の繰り返しせん断性状と既往の終局耐力評価式との対応関係を把握すること目的とする。続いてシリーズ 2 は、バーリングシアコネクタと孔あき鋼板ジベルのずれ止めを対象に孔径の違いがせん断力-ずれ変位関係に及ぼす影響を把握し、2 つのシリーズで得られた実験データを使用して繰り返しによる耐力低下特性および単調载荷に対する繰り返し载荷の耐

表-2 試験体一覧

No.	試験体名	ずれ止め	孔径	荷重方法	シリーズ
1	B40-m	バーリング シアコネクタ	40 φ	単調	2
2	B40-c			繰返し	
3	B50-m		50 φ	単調	1
4	B50-c			繰返し	
5	B60-m	孔あき鋼板 ジベル	60 φ	単調	2
6	B60-c			繰返し	
7	P40-m		40 φ	単調	2
8	P40-c			繰返し	
9	P50-m	孔あき鋼板 ジベル	50 φ	単調	1
10	P50-c			繰返し	
11	P60-m		60 φ	単調	2
12	P60-c			繰返し	
13	S19-m	頭付き スタッド	—	単調	1
14	S19-c			繰返し	

表-3 各種ずれ止めの形状寸法

バーリングシアコネクタ	鋼板厚さ t (mm)	バーリング径 d_h (mm)	突起高さ h_f (mm)
	6	40 (39.6) 50 (49.4) 60 (59.6)	15
孔あき鋼板ジベル	鋼板厚さ t (mm)	孔径 d_h (mm)	突起高さ h_f (mm)
	12	40 (39.5) 50 (50.0) 60 (59.7)	0 (なし)
頭付きスタッド	軸径 d_s (mm)	頭部軸径 D_s (mm)	呼び長さ L_s (mm)
	19	32	100

※括弧内の数値は、実測値を示す。

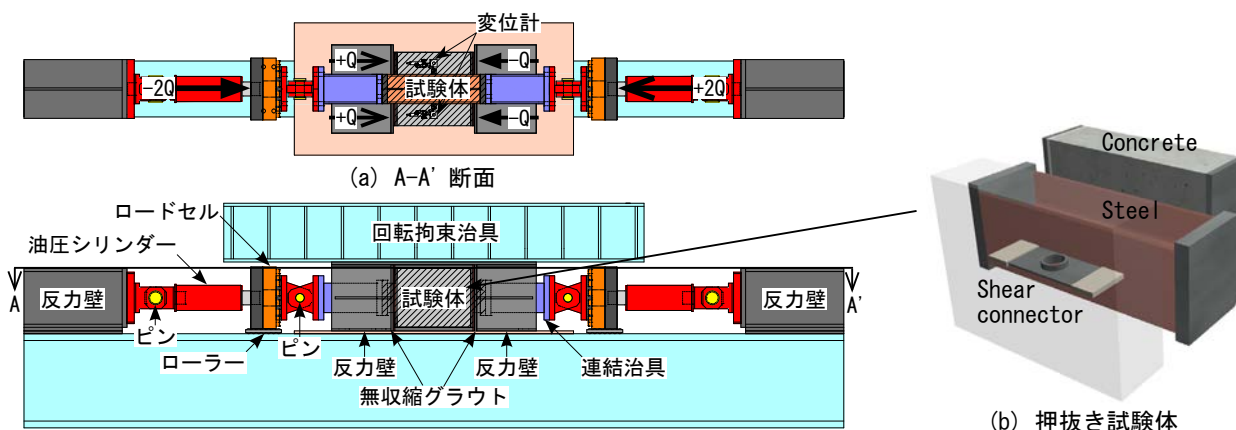


図-2 押抜き試験の正負交番繰返し荷重装置および変位計計測位置

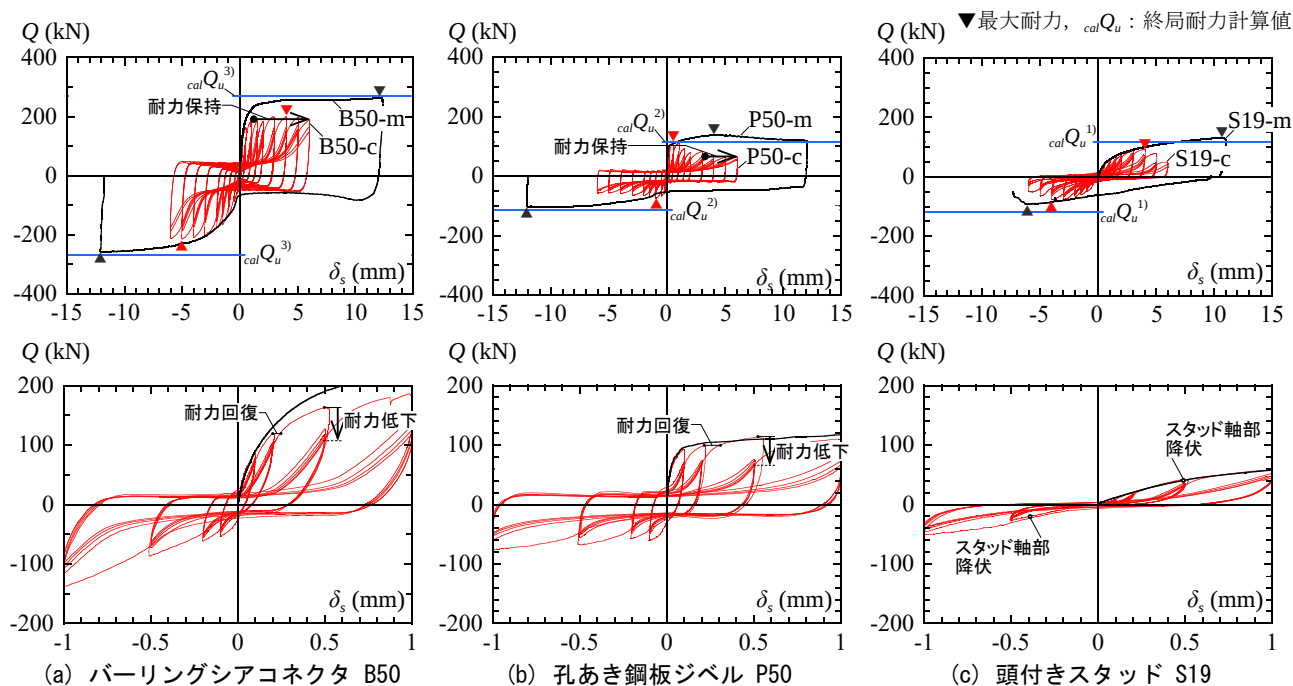
示す。荷重は、試験体 H 形鋼両端のベースプレートに接続したピンを介して、両側に設置した 2 台の油圧ジャッキを用いて一方向に圧縮荷重を交互に加える。試験体設置時のコンクリートブロックの両端は、それぞれの面全体を反力壁と密着させるために予め 10mm 程度の隙間を設け、そこに無収縮高強度グラウトを充填した。

繰返し荷重は、H 形鋼とコンクリートブロックとの間の相対ずれ変位 δ_s で制御し、 $\delta_s = \pm 0.1\text{mm}$, $\pm 0.2\text{mm}$, $\pm 0.5\text{mm}$, $\pm 1.0\text{mm}$, $\pm 1.5\text{mm}$, $\pm 2.0\text{mm}$, $\pm 3.0\text{mm}$, $\pm 4.0\text{mm}$, $\pm 5.0\text{mm}$ は同ずれ変位で各 5 サイクルとし、 $\pm 6.0\text{mm}$ は 3 サイクルとした。単調荷重は、ずれ変位 $\pm 12\text{mm}$ の 1 サイクルを基本とし、孔あき鋼板ジベルの孔径 40 φ はずれ変位 $\pm 6.0\text{mm}$ の 1 サイクルとした。

3. 実験結果

(1) 各種ずれ止めの繰返し性状

図-3 に、バーリングシアコネクタ、孔あき鋼板ジベルおよび頭付きスタッドの単調荷重と繰返し荷重を比較したせん断力-ずれ変位関係を示す。縦軸のせん断力は、片側ブロックのずれ止め 1 個あたりである。各種ずれ止めの単調荷重に対する繰返し荷重の最大耐力比は、平均 0.77 となった。ずれ止めの種類別に耐力比を見ると、バーリングシアコネクタは正側 0.78、負側 0.84、孔あき鋼板ジベルは正側 0.81、負側 0.71、頭付きスタッドは正側 0.70、負側 0.84 となり、いずれも繰返し荷重の最大耐力は、単調荷重時に比べて 20 ~ 30 % 程度減少する結果が得られた。最大耐力時のずれ変位は、ずれ止めの種



類に関係なく単調荷重に比べて繰り返し荷重の方が小さくなる傾向がある。最大耐力時のずれ変位（正側）に着目すると、バーリングシアコネクタは荷重方法によらず最大耐力に到達後も耐力を保持しながらずれ変形が進んでいるのに対して、繰り返し荷重を受ける孔あき鋼板ジベルと頭付きスタッドは単調荷重時に比べて早期に耐力低下が生じている。これは、繰り返し力を受けることで、孔あき鋼板ジベルは円孔側面（せん断抵抗面）において骨材同士の噛み合いによる抵抗が低下したものと推測され、頭付きスタッドは根元近くの軸部に塑性変形が集中し早期に亀裂が生じたものと考えられる。

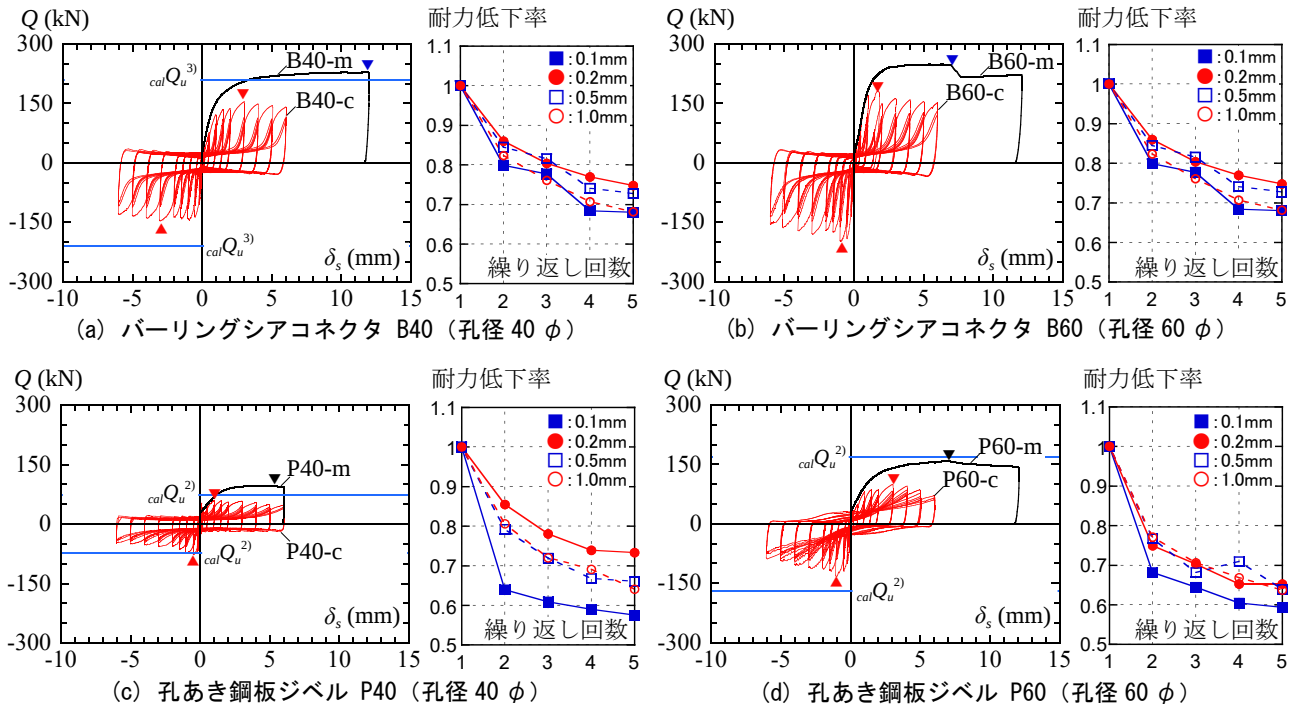
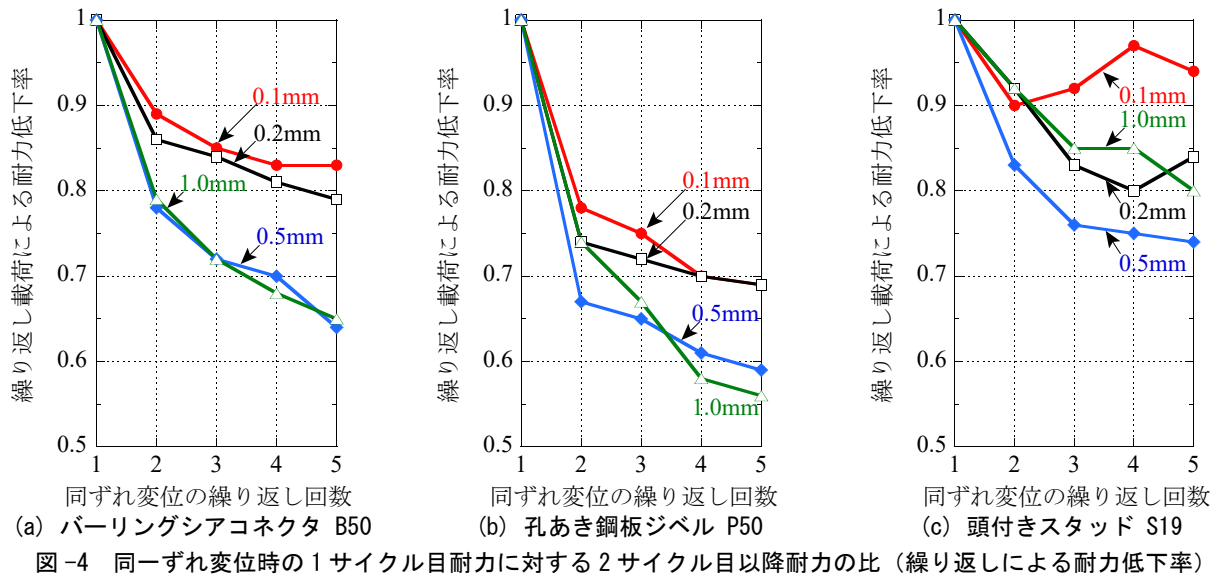
それぞれの最終破壊形式は単調と繰り返しの荷重方法による明確な違いは見られず、バーリングシアコネクタがバーリング円孔側面のコンクリートの二面せん断破壊とバーリングフランジ（突起）部のコンクリートの支圧破壊であり、孔あき鋼板ジベルが円孔側面のコンクリートの二面せん断破壊であり、頭付きスタッドがスタッド軸部のせん断破壊であった。単調荷重における各種ずれ止めの最大耐力実験値は、それぞれの終局耐力式^{1)~3)}を用いた計算値 $calQ_u$ と良い対応を示している。ただし頭付きスタッドの負側は、ずれ変位 -6mm を超えたあたりでスタッド軸部の破断で耐力が低下して、終局耐力計算値に対する最大耐力実験値の比は0.77であった。一方、繰り返し荷重の実験値 / 計算値は、バーリングシア

コネクタは平均0.77（正側0.75，負側0.79），孔あき鋼板ジベルは平均0.82（正側0.99，負側0.65），頭付きスタッドは平均0.71（正側0.78，負側0.64）であり、ずれ止めの種類にかかわらず最大耐力の実験値は計算値を下回ることが明らかとなった。

図-4に、正側ずれ変位0.1mm, 0.2mm, 0.5mm, 1.0mm時の1サイクル目の耐力に対する2サイクル目以降の耐力の比（以下、耐力低下率と呼ぶ）の推移を示す。耐力低下率は頭付きスタッドのずれ変位0.1mm時を除いて、ずれ止めの種類に関係なくそれぞれ類似の推移であること、同ずれ変位で繰り返し回数を重ねるごとに耐力が低下すること、2～5サイクル目の耐力低下率では2サイクル目が最も大きくなる傾向にあること、3サイクル目以降は耐力低下率の傾きが相対的に緩やかになることが明らかとなった。ただし、図-3（下段）に示すように、バーリングシアコネクタおよび孔あき鋼板ジベルは、ずれ変位が進行することで耐力が回復し、ずれ変位を1mm以降は一定の耐力を保持しており安定した挙動を示している。

(2) 孔径の違いによる繰り返し性状

図-5（左）に、バーリングシアコネクタおよび孔あき鋼板ジベルの孔径40φと60φにおける単調荷重と繰り返し荷重を比較したせん断力-ずれ変位関係を示す。シリーズ1の実験結果と同様に、繰り返し

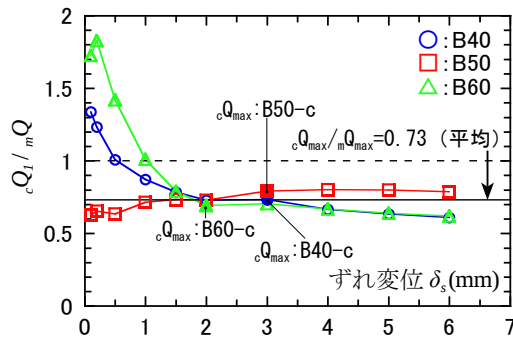


し載荷の耐力は単調載荷に比べて小さくなること、繰返し載荷の耐力はずれ変位の大小にかかわらず1サイクル目が最も大きいこと、同ずれ変位で繰返し回数を重ねるごとに耐力が低下していく傾向にあることが確認できた。

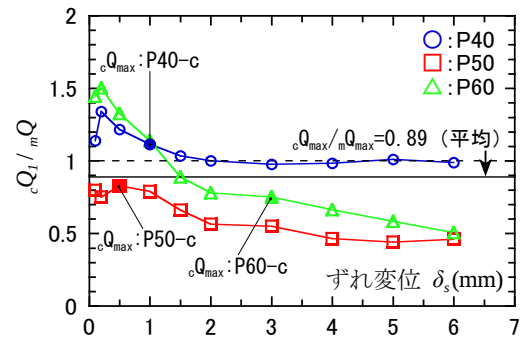
図-5（右）は、図-4と同様に、ずれ変位0.1mm、0.2mm、0.5mm、1.0mm時の耐力低下率の推移を示す。バーリングシアコネクタにおいては、孔径40φでは同ずれ変位の繰返し回数が5回目であっても1回目の耐力の70%程度を保持しており、孔径60φ

の場合は60%程度であった。孔あき鋼板ジベルにおいては、孔径にかかわらず繰返し回数が5回目の耐力低下率は約60～80%の範囲にあり、ばらつく傾向がみられた。

各ずれ変位時における単調載荷の耐力に対する繰返し載荷1サイクル目耐力の比の推移を図-6に示す。なお、繰返し載荷の耐力は正負でややばらつく傾向にあったため、ここでは平均値を用いて検討を行う。中塗りのプロットは繰返し載荷での最大耐力時である。バーリングシアコネクタのずれ変

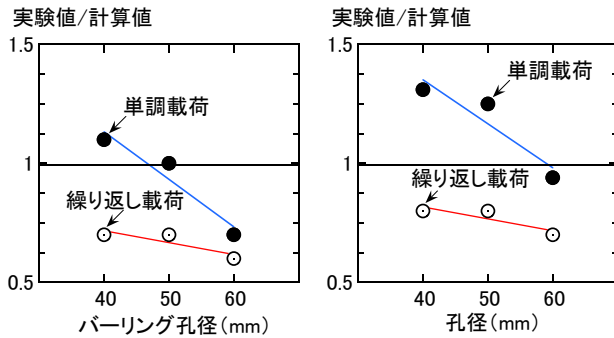


(a) バーリングシアコネクタ



(b) 孔あき鋼板ジベル

図-6 単調荷重 Q に対する繰返し荷重1サイクル目 Q_c の耐力比 ϕ_1



(a) バーリングシアコネクタ (b) 孔あき鋼板ジベル

図-7 最大耐力実験値と計算値の比較

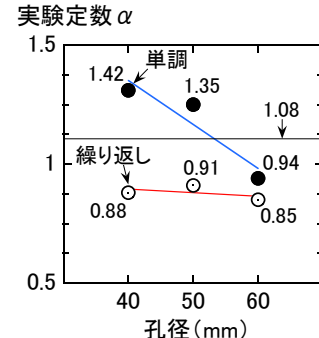


図-8 孔あき鋼板ジベルの二面せん断耐力の実験定数 α

位 1mm 程度までの耐力比は鋼板とコンクリートの間の付着作用による影響でばらつくが、それ以降の繰返し荷重の耐力は単調荷重の 70% に収束する傾向にある。孔あき鋼板ジベルの孔径 40 φ では、ずれ変位 6mm まで単調と繰返しの耐力差はほとんどなく、孔径 50 φ と 60 φ の場合と異なる特性が見られる。バーリングシアコネクタおよび孔あき鋼板ジベルの単調荷重に対する繰返し荷重 1 サイクル目の耐力比はそれぞれ平均 0.73, 0.89 となる。

(3) 最大せん断耐力

バーリングシアコネクタおよび孔あき鋼板ジベルの最大耐力実験値を次式で示される計算結果と比較する。(1) 式, (2) 式はそれぞれ文献 (3), (2) による。

$$mQ_u = q_s + q_c \quad (1)$$

$$q_s = \alpha (\pi d_h^2 / 4) \cdot \sigma_b \cdot 2 \quad (2)$$

$$q_c = A_p \cdot f_b \quad (3)$$

ここで、 q_s ：せん断耐力、 α ：実験定数 (Leonhardt らの場合 = 1.08²⁾)、 d_h ：孔径、 σ_b ：コンクリート圧縮強度、 q_c ：支圧耐力 (孔あき鋼板ジベルの場合 = 0)、 A_p ：バーリング突起部の投影面積 ($= (d + 2t_h) \cdot h_f$)、 h_f ：突起高さ、 t_h ：鋼板厚さ、 A_c ：コンクリートの支承面積 ($= B_c \cdot t_c$)、 B_c ：コンクリートブロックの幅

($= \beta \cdot t_c$)、 β ：有効幅係数 ($= 2.0^4$)、 t_c ：コンクリートブロックの厚さ

図-7 は、最大耐力の計算値に対する実験値の比を示す。繰返し荷重の最大耐力実験値は正側と負側の平均値であり、孔径 50 φ はシリーズ 1 の実験結果による。単調荷重を受けるバーリングシアコネクタの孔径 40 φ と 50 φ の実験値と計算値はほぼ一致しているが、孔径 60 φ の実験値は計算値の 70% 程度であった。単調荷重を受ける孔あき鋼板ジベルの孔径 40 φ と 50 φ の実験値 / 計算値は 1 を上回っているが、孔径 60 φ の実験値は計算値の 90% 程度であった。一方で、繰返し荷重の場合、全ての実験値は計算値を下回る結果となった。

図-8 は、孔あき鋼板ジベルの二面せん断耐力 (2) 式における実験定数 α を本実験の最大耐力から逆算して求めた結果である。単調荷重において孔径 40 φ と 50 φ の場合は既往²⁾の 1.08 を上回る一方で、孔径 60 φ の場合は 1.08 を下回り、孔径が大きくなるにつれて実験定数は小さくなる。繰返し荷重の場合は孔径の大きさにかかわらず 1.08 を全て下回っているが、孔径に対する実験定数 α の変動は単調荷重の場合に比べて小さく平均 0.88 である。

以上から、既往の耐力式では多数回繰返し荷重

を受けるずれ止めの最大耐力を正確に評価できないことがわかった。また、孔径 60 φ は、単調載荷の場合においても既往の耐力式では最大耐力実験値を過大評価することが確認できた。

4. 繰返しによる影響を考慮した耐力評価

(1) 繰返し載荷による耐力低減係数の設定

前述の実験結果より、多数回繰返し載荷を受けるずれ止めの耐力評価は、次の①～③の耐力低減を考慮する必要がある。

① 1 サイクル目における単調載荷に対する繰返し載荷の耐力低減

図 -6 に示した単調載荷に対する繰返し載荷 1 サイクル目において、ずれ変位 0.5mm まではばらつきが大きい、最大耐力時の耐力比に着目すると、バーリングシアコネクタでは 70% 以上、孔あき鋼板ジベルでは 80% 以上を発揮できている。バーリングシアコネクタの耐力比は平均して 0.73 であり、これを 1 つ目の耐力低減係数 ϕ_1 とする。

② 繰返し載荷の 1 サイクル目に対する 2 サイクル目の耐力低減

図 -4 および図 -5 に示した繰返しによる耐力低下より、各々 5 サイクルのうち 1 回目から 2 回目の耐力低下率が最も大きい。図 -9 はバーリングシアコネクタと孔あき鋼板ジベルの孔径 40 φ・50 φ・60 φ を対象に、ずれ変位 6mm までの 1 回目から 2 回目の耐力低下率を整理した結果である。バーリングシアコネクタおよび孔あき鋼板ジベルの各プロットの平均はいずれも 0.82、全プロットの平均値は 0.82 (変動係数 0.081) となった。各ずれ変位における 2 サイクル目のせん断耐力は 1 サイクル目に対し

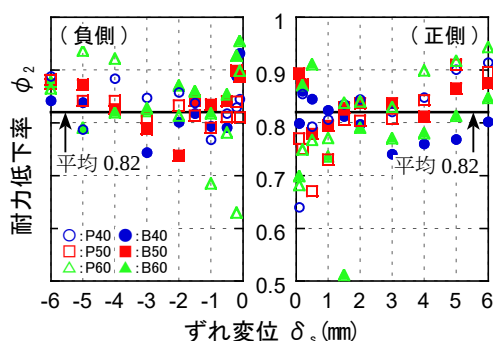


図 -9 各ずれ変位時における 1 サイクル目耐力に対する 2 サイクル目耐力の比 (耐力低下率)

約 82% の耐力であることから、これを 2 つ目の耐力低減係数 ϕ_2 とする。

③ 3 サイクル目以降の繰返し載荷に伴う耐力低減

図 -10 に、2 回目の耐力を 1 とした 3 ～ 5 回目の耐力に対する比 (耐力低下率) の推移を示す。バーリングシアコネクタおよび孔あき鋼板ジベルの耐力低下率 ϕ_3 と繰返し回数 n_q との間の回帰式は図中のように表され、その相関係数はそれぞれ 0.875, 0.861 であり高い負の相関が認められる。これを 3 つ目の耐力低減係数 ϕ_3 とする。

以上の①～③より、繰返し載荷を受けるずれ止めの最大耐力は、以下の評価式で表すことができる。

$${}_c Q_u = \phi_1 \cdot \phi_2 \cdot \phi_3 \cdot {}_m Q_u \quad (4)$$

ここで、

${}_m Q_u$: 単調載荷によるせん断耐力

ϕ_1 : 単調載荷に対する耐力低減係数 (=0.73)

ϕ_2 : 1 回目に対する 2 回目の耐力低減係数 (=0.82)

ϕ_3 : 2 回目に対する 3 回目以降の耐力低減係数

$$\phi_3 = 1.1 \cdot e^{(-0.05n_q)} \quad n_q: \text{繰返し回数} (\geq 3)$$

(2) 耐力低減係数を用いた評価式の妥当性

(1) 式および (4) 式の評価式による計算結果と実験結果の比較を図 -11 に示す。ここでは紙面の都合上バーリングシアコネクタを対象に、最大耐力発揮時の 1 ～ 5 サイクル目の繰返し回数ごとに得られた実験値と比較して評価式の妥当性を示す。図 -11(a) より既往評価式の計算値は実験値を過大に評価する。図 -11(b) より、繰返しを考慮した評価式では、孔径 40 φ と 50 φ の場合は十分な評価が可能である。孔径 60 φ の実験値 / 計算値は平均 0.75 である。これは図 -7 に示した単調載荷の結果も踏まえて、孔径が大きい場合は支圧耐力による影響を他の因子 (特にコンクリートブロックの有効幅係数 β 等) に

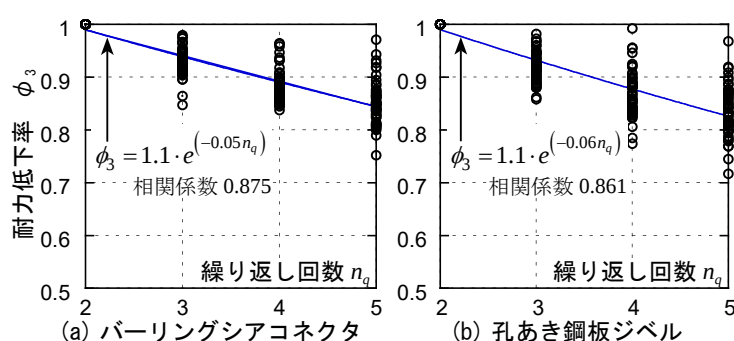


図 -10 同ずれ変位時の 2 サイクル目耐力に対する 3 サイクル目以降耐力の比 (繰返しによる正負の耐力低下率)

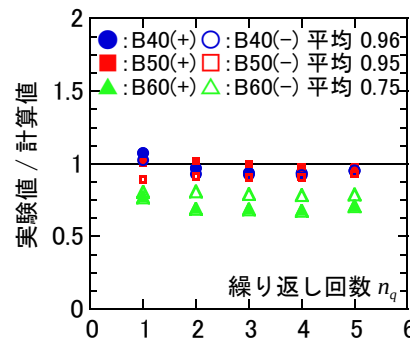
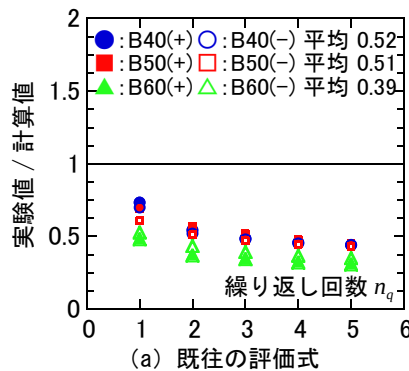


図-11 繰返し載荷を受けるバーリングシアコネクタの最大耐力実験値と計算値の比較

についての検討を行う必要がある。

5. 結論

本論は、バーリングシアコネクタおよび孔あき鋼板ジベルを対象に、単調載荷と繰返し載荷の押抜き試験を行い、繰返しせん断性状について調べた。本実験から得られた知見を以下にまとめる。

- 1) ずれ止めの種類にかかわらず繰返し載荷の耐力は単調載荷の耐力より小さくなる。また、既往の終局耐力式による計算値は繰返し載荷の最大耐力実験値を過大評価する。
- 2) 同一ずれ変位で繰返し回数を重ねるごとに耐力が低下する。その耐力低下の度合いは2サイクル目が最も大きい。ずれ変位の進行に伴って耐力は回復する。最大耐力以降は一定の耐力を保持しながらずれ変位が進行する。
- 3) 同一ずれ変位時における、繰返し載荷を受ける

ずれ止めの耐力評価は、単調載荷に対する耐力低減、1回目に対する2回目の耐力低減、3回目以降の耐力低減を考慮すればよい。ただし、孔径60φの場合は、単調載荷による終局耐力評価式を見直す必要がある。

謝辞

本研究は、日本学術振興会の科学研究費補助金（基盤研究(C) 課題番号 20K04785）および一般社団法人日本鉄鋼連盟の2019年度「鋼構造研究・教育助成事業」による助成を受けて実施した。実験の実施にあたっては、福岡大学技術職員の石橋宏一郎氏、大野敦氏、当時学部4年生の西島佳紅氏にご助力を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説，2010
- 2) Leonhardt, F et al : Neues, vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit, Beton und Stahlbeton, pp.325-331, Dec.1987
- 3) 田中照久，堀純一，河野昭彦：バーリング加工を活用した新しい機械的ずれ止めの開発，日本建築学会構造系論文集，Vol.78 No.694, pp.2237-2246, 2013.12
- 4) 土木学会：複合構造標準示方書，第1版，2009.12

EXPERIMENTAL STUDY ON HYSTERETIC PROPERTIES OF MECHANICAL SHEAR CONNECTORS UNDER CYCLIC LOAD

Teruhisa TANAKA, Ayana KUSUMOTO and Junichi SAKAI

The shear connector is an effective conjugative element between steel and concrete with stress transferring mechanism. To evaluate mechanical behaviors of a headed stud, a perfbond rib, and a burring shear connector, push-out tests on shearing force were conducted with a simulation model of the joint parts. Based on experimental results, a strength formula of shear connectors was constructed. Repeated multiple performances of shearing force at seismic conditions, however, involve a risk of degradation of connector functions. To thoroughly evaluate the performance of joints using shear connectors, it is required to comprehend characteristics of resisting force deterioration on shear connector strength. The present study conducted cyclic load push-out tests with peak-to-peak alternative loading, focusing on differences in size of bores between a burring shear connector and a perfbond rib. With comparison to monotonic loading, yield strength was examined on each slip displacement.