

論文 バーリングシアコネクタの設置方法がずれ止め特性に及ぼす影響

楠本 彩七^{*1}・田中 照久^{*2}・堺 純一^{*3}

要旨：著者らは、孔あき鋼板にプレス加工を施したバーリングシアコネクタと呼ぶ高性能なずれ止めの開発研究を行なっている。本研究は、鋼部材と鉄筋コンクリート部材が直列的に結合される接合部を対象に、バーリングシアコネクタの設置方法やバーリングシアコネクタの孔径およびコンクリートブロックの寸法の違いが耐力およびずれ挙動に及ぼす影響を押抜き試験より把握した。また、バーリングシアコネクタの終局耐力評価式を検討し、実験結果を良好に評価できることを示した。

キーワード：機械的ずれ止め、抵抗機構、寸法効果、孔径、耐力評価、押抜き試験

1. はじめに

近年、鋼・コンクリート合成構造は、部材の高強度化や接合部の多種多様化に伴い、鋼材とコンクリートとの間の応力伝達機能を果たす機械的ずれ止めへの要求性能が高まっている¹⁾。著者らは、このような現状を受けて、孔あき鋼板にバーリングプレス加工を施し孔部にフランジ（突起）を設けたバーリングシアコネクタ²⁾と呼ぶ高剛性・高耐力を有するずれ止めの開発とその応用研究を行い、実用化を進めている³⁾。

バーリングシアコネクタの設置方法をおよび抵抗機構を図-1に示す。これまでは、バーリングシアコネクタを母材に対して垂直に設置する方法（図-1(a)：垂直タイプ）を対象に耐力評価法を構築してきたが、バーリングシアコネクタの鋼板平板部を母材表面に密着させて設置する方法（図-1(b)：水平タイプ）を対象とした実験データは皆無であり、水平タイプのずれ止め特性は明らかにされていない。

垂直タイプの抵抗機構は、バーリング円孔に充填されたコンクリートの二面せん断抵抗およびバーリング突起部によるコンクリートの支圧抵抗である。水平タイプの抵抗機構は、せん断抵抗が垂直タイプの二面から一面に減少するが、鋼・コンクリート接合部において、狭小な空間でもずれ止めを設置できること（図-2参照）、鉄筋との干渉を避けられること、また、ウェブ面に孔をあけてもバーリング鋼板を取り付けることで補強でき、さらに母材に開口があることでコンクリートの充填性が向上することなど、施工上の利点がある。

そこで本論では、水平タイプにおける耐力評価法の構

築を目指し、バーリングシアコネクタの設置方法、バーリングシアコネクタの孔径およびコンクリートブロックの寸法を実験変数とした押抜き試験を行い、水平タイプによるずれ止めの基本特性を定量的に把握する。また、実験結果との比較から、バーリングシアコネクタのせん断抵抗機構が二面から一面になることを考慮した終局耐力評価式の妥当性について検討する。

2. 実験計画

2.1 押抜き試験体

押抜き試験体の形状寸法を図-3に示す。試験体は、母材鋼板（PL-25）の両側にバーリングシアコネクタを設置し、コンクリートブロックに埋め込んだ形式とする。母材鋼板直下は空洞にしている。バーリング鋼板は全周隅肉溶接で母材鋼板に取り付け、母材鋼板の表面にはコンクリートとの付着力を除去するためスチレンボード（1mm厚）を貼り付けている。また、バーリング鋼板下部の板厚面（溶接部）でコンクリートの支圧を受けないようにスチレンボードを増厚している。横補強筋は、異形棒鋼 D13（SD295）とし、100mm 間隔で配筋した。鉄筋コンクリート（RC）部材の下部には鋼板（6mm厚）を敷き、その四隅には横補強筋の位置決め用に縦筋 D13 を配置した。コンクリートの呼び強度 F_c は 21N/mm^2 とした。押抜き試験体に用いた材料特性を表-1に示す。

2.2 実験変数

バーリングシアコネクタの形状寸法を表-2に、試験体一覧を表-3に示す。実験変数は、ずれ止め伝達要素、バーリングシアコネクタの形状寸法、設置方法および

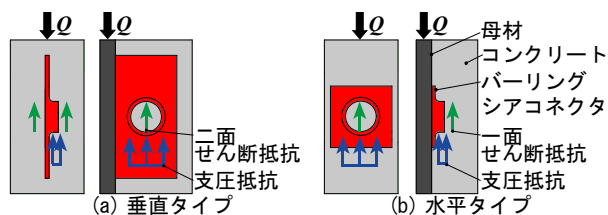


図-1 バーリングシアコネクタの設置方法および抵抗機構

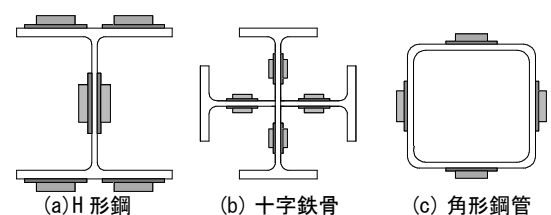
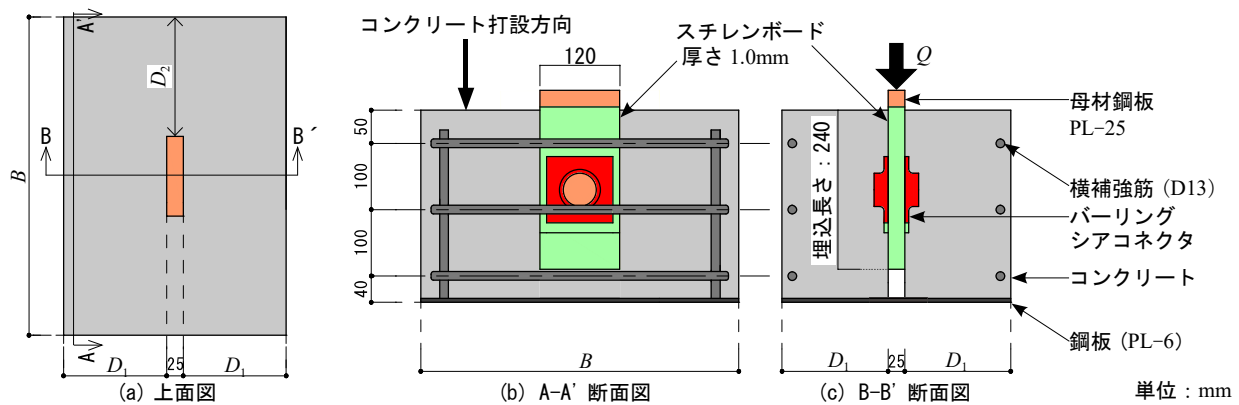


図-2 バーリングシアコネクタ水平タイプの設置例

*1 福岡大学 工学部建築学科助手・学士（工学）（正会員）

*2 福岡大学 工学部建築学科准教授・博士（工学）（正会員）

*3 福岡大学 工学部建築学科教授・博士（工学）（正会員）



図一 3 押抜き試験体の形状寸法

表一 1 材料特性

使用材料	鋼種	降伏点 σ_y (N/mm ²)	引張強さ σ_u (N/mm ²)	ヤング係数 E_s (N/mm ²)
バーリング鋼板 PL-6	SN490B	388	558	208000
母材 PL-25	SN490B	327	528	205000
異形棒鋼 D13	SD295	311	447	183000
使用材料	F_c (N/mm ²)	圧縮強度 σ_b (N/mm ²)	割裂引張強度 σ_t (N/mm ²)	ヤング係数 E_c (N/mm ²)
コンクリート	21	25.7	3.36	25000

F_c : コンクリートの呼び強度

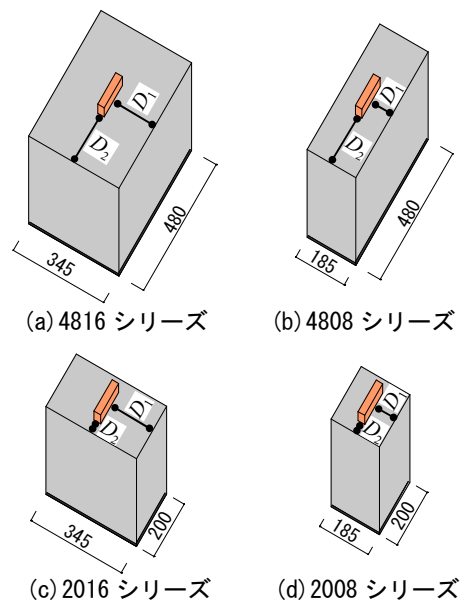
表一 2 バーリングシアコネクタの形状寸法

バーリング形状	鋼板サイズ b (mm) $\times$ d (mm)	バーリング径 d_p (mm)	鋼板厚さ t (mm)	突起高さ h_f (mm)
	80×80	40 (40.0)	6 (6.07)	15 (14.2)
	100×100	50 (49.4)	6 (5.99)	15 (15.5)
	120×120	60 (59.2)	6 (6.02)	15 (15.5)
	200×100	50 (49.4)	6 (6.01)	15 (15.4)

※括弧内の数値は、実測値を示す。

表一 3 試験体一覧

No.	試験体名	バーリングシアコネクタ			コンクリート ブロック $B \times D_1$
		ずれ止め 伝達要素	設置方法	孔径	
1	B50-4816(1)	B 支圧 せん断	水平 タイプ	50 ϕ	480×160
2	B50-4816(2)				200×160
3	B50-2016				480×80
4	B50-4806				200×80
5	B50-2008(1)				200×80
6	B50-2008(2)			40 ϕ	480×160
7	B40-4816				200×80
8	B40-2008				480×160
9	B60-4816				200×80
10	B60-2008				200×80
11	BV50-4816	垂直 タイプ	垂直 タイプ	50 ϕ	480×160
12	BV50-2016				200×160
13	Bns50-4816	Bns 支圧	水平 タイプ	50 ϕ	480×160
14	Bns50-4808			50 ϕ	480×80
15	Bns40-4816			40 ϕ	480×160
16	Bns60-4816			60 ϕ	480×160
17	N-4816	なし	—	—	480×160



図一 4 コンクリートブロックの形状寸法

コンクリートブロックの寸法とし、計 17 体である。なお、No.17 の N-4816 試験体はスチレンボード付き母材鋼板とコンクリート間の付着力を確認する。

(1) バーリング鋼板の設置方法および形状寸法

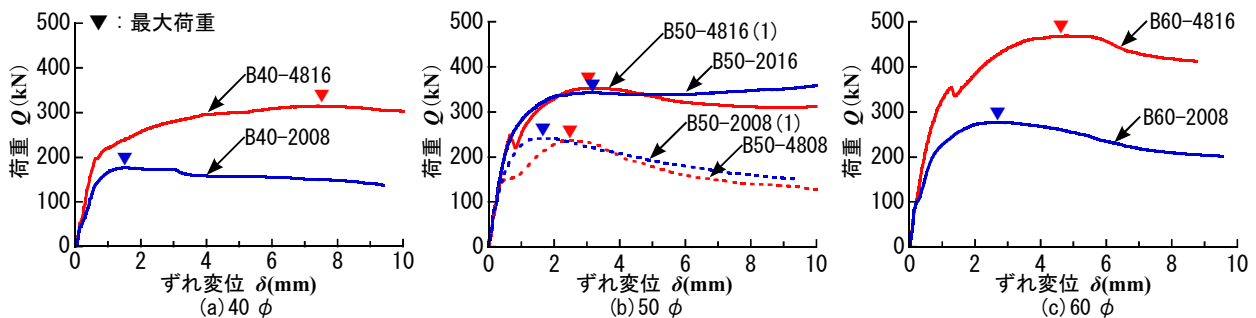
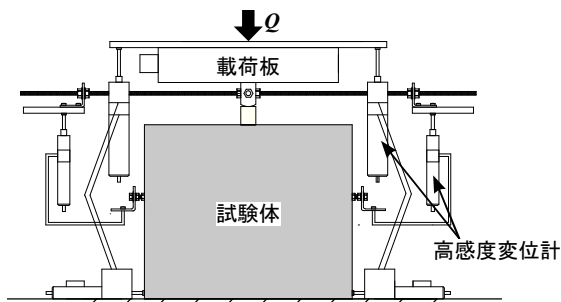
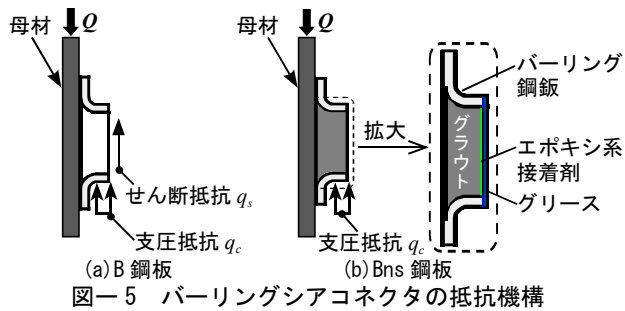
バーリングシアコネクタの設置方法は垂直タイプ（図一 1(a)）と水平タイプ（図一 1(b)）の 2 種類とした。

バーリングシアコネクタの形状寸法は、4 種類とし、バーリング孔径の影響を定量的に把握するため、バーリング孔径は 40 ϕ 、50 ϕ 、60 ϕ を準備した。水平タイプの鋼板サイズは、一辺の長さが孔径の 2 倍（40 ϕ : 80mm, 50

ϕ : 100mm, 60 ϕ : 120mm）の正方形とした。垂直タイプの鋼板サイズは、200×100mm の長方形とした。

(2) コンクリートブロックの形状寸法

コンクリートの拘束効果がバーリングシアコネクタの耐力に及ぼす影響を把握するために、コンクリートブロックの断面寸法の選定は、バーリング中央の孔縁から斜め下 45 度方向に直線を引き、その直線がコンクリートブロックの側面にくる場合と、底面にくる場合とし、図一 4 に示す計 4 種類のコンクリートブロックを製作した。ここで、母材鋼板にバーリング鋼板が取り付け面お



および母材鋼板の板厚面からコンクリート側面までの距離を、それぞれ D_1 （以下、側面かぶり厚さ）、 D_2 とする（図-3参照）。

(3) Bns 鋼板

水平タイプの抵抗機構は、図-5(a)に示すように、パーリング孔内に充填されるコンクリートの一面せん断力とパーリング突起部の支圧力である。Bns 鋼板は、文献4)と同様に、パーリングシアコネクタの応力伝達要素の抵抗割合を明確に示すために準備したものであり、図-5(b)のようにせん断力を除去するため、パーリング加工した孔内に予めグラウトを詰め、その表面にエポキシ系接着剤、さらにその上面にグリースを塗布した。

2.3 荷重方法および計測位置

押抜き試験は、1000kN 万能試験機を用い、図-6のように、試験体の母材上面に設置した蒲鉾形球座を介して圧縮力を荷重し、球座の重心位置からコンクリートブロックのパーリング中心位置との間で計測された4点の平均縮み量（以下、ずれ変位）が10mm程度に到達した時点で実験終了とした。

3. 実験結果

実験結果から得られた各試験体の最大耐力および最大

表-4 実験結果

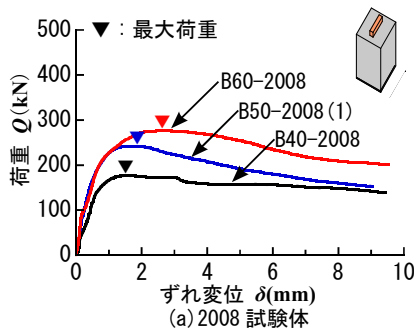
No.	試験体名	最大荷重 Q_{max} (kN)	最大荷重時のずれ変位 δ_{max} (mm)
1	B50-4816(1)	352	3.06
2	B50-4816(2)	361	3.95
3	B50-2016	343	3.23
4	B50-4808	237	2.52
5	B50-2008(1)	241	1.62
6	B50-2008(2)	256	2.48
7	B40-4816	315	7.43
8	B40-2008	177	1.56
9	B60-4816	469	4.77
10	B60-2008	277	2.60
11	BV50-4816	575	7.95
12	BV50-2016	416	1.95
13	Bns50-4816	283	2.72
14	Bns50-4808	235	2.48
15	Bns40-4816	266	3.58
16	Bns60-4816	330	4.63
17	N-4816	3	9.99

耐力時のずれ変位を表-4に示す。No.17のN-4816試験体から得られた付着力は、最大で3kN、付着応力度に換算すると 0.0431N/mm^2 であることを確認した。文献1)にある孔あき鋼板ジベルの鋼板とコンクリートの摩擦付着応力度の1/10以下であることが示された。

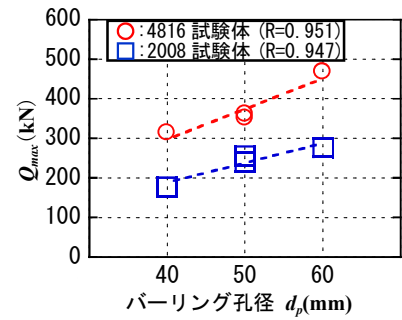
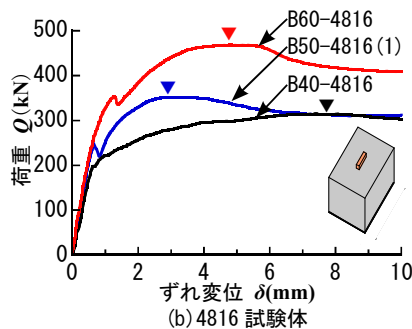
3.1 荷重—ずれ変位関係

(1) コンクリートブロックのサイズによる比較

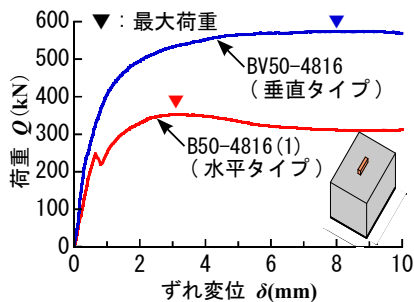
コンクリートブロックのサイズによる違いを比較した荷重—ずれ変位関係を図-7に示す。図-7(b)のパーリング孔径50φにおいて、 D_1 が160mmの4816試験体と2016試験体は、最大耐力時にはコンクリートブロックの表面にひび割れが入らず、高い耐力が発揮される。一方で D_1 が80mmの小さい2008試験体および4808試験体は、 D_1 が160mmの場合に比べて、小さなずれ変位でコンクリートブロック表面までひび割れが生じることで最大耐力に至った。図-7(a), (c)より、パーリング孔径40φ, 60φにおいても同様の傾向であることが確認できた。また、 D_1 が160mmの4816試験体と2016試験体、 D_1 が80mmの4808試験体と2008試験体は、それぞれで同等の最大耐力が発揮された。これらのことから、水平タイプにおける最大耐力はコンクリートブロックの D_2 には依存されず、 D_1 の大きさに影響を受けることが示



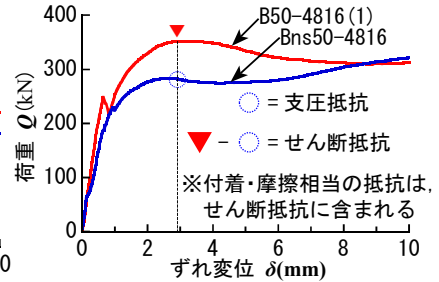
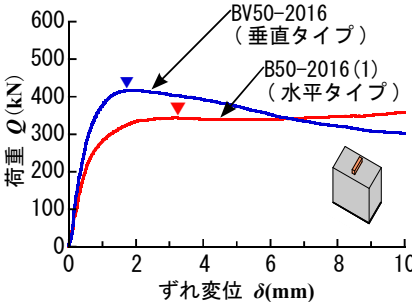
図一 8 パーリング孔径の違いを比較した荷重—ずれ変位関係



図一 9 最大耐力とパーリング孔径の関係



図一 10 パーリング鋼板の設置方法の違いを比較した荷重—ずれ変位関係



図一 11 パーリングシアコネクタの応力伝達要素の算出方法

された。

(2) パーリング孔径による比較

パーリング孔径の違いを比較した荷重—ずれ変位関係を図一 8 に示す。いずれのコンクリートブロックのサイズにおいても、パーリング孔径が大きくなるにつれて、耐力が増加していることがわかる。最大耐力とパーリング孔径の関係を図一 9 に示す。パーリング孔径が大きくなると最大耐力は線形的に増加することがわかり、その相関係数は、4816 試験体で 0.951, 2008 試験体で 0.947 を示し、それぞれで高い正の相関が得られた。

(3) パーリング鋼板の設置方法の違いによる比較

パーリングシアコネクタの設置方法の違いを比較した荷重—ずれ変位関係を図一 10 に示す。水平タイプの最大耐力は垂直タイプに比べて、4816 試験体で 37.4 ~ 38.5%, 2016 試験体で 17.6% 低下することが確認できた。低下する要因は、水平タイプは垂直タイプに比べて円孔側面によるせん断抵抗が少ないためである。また、垂直タイプ BV50 において、2016 試験体の最大耐力が 4816 試験体より低いのは、パーリング鋼板の板厚中心からコンクリート表面までの距離がパーリング孔径の 3 倍より小さく、側面が厚さが十分でないためである⁵⁾。

3.2 パーリングシアコネクタの応力伝達要素の分類

パーリングシアコネクタの応力伝達要素（支圧力・せん断力）の算出方法を図一 11 に示す。その算出方法は、荷重—ずれ変位関係において、B 試験体の最大耐力 BQ_{max} (▼印) のずれ変位に対応する Bns 試験体の耐力を支圧抵抗力 $BnsQ_c$ (○印) とする。 BQ_{max} から $BnsQ_c$ を差し引いて算出した耐力をせん断抵抗力とした⁴⁾。ここで、水平タイプに設置したパーリング鋼板の形状は孔径の 2

倍の正方形であり、コンクリートとの付着面積が小さいことから、付着・摩擦相当の抵抗力はせん断抵抗力に含めて評価することとした。

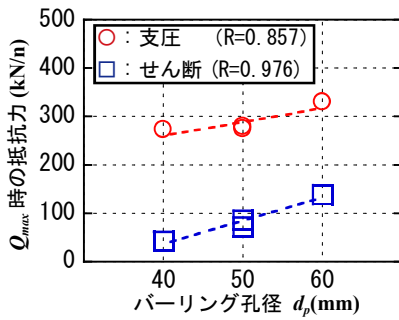
図一 12 に算出した最大耐力時の各抵抗力とパーリング孔径の関係を示す。水平タイプの伝達要素である、支圧抵抗力および一面せん断抵抗力は、いずれもパーリング孔径の増加に伴い線形的に増加することがわかる。相関係数は、支圧力で 0.857, せん断力で 0.976 と高い正の相関が得られた。

図一 13 に最大耐力時のパーリングシアコネクタに作用する各抵抗力の割合を示す。図一 13 より、パーリング孔径が大きくなると支圧抵抗の割合が小さくなることがわかる。これは、後述にあるせん断強度式 q_s および支圧強度式 q_c の孔径 d_p からも明らかである。一方、B50-4808 試験体の抵抗割合に着目すると、せん断抵抗がほとんど発揮されていないことが確認できる。この要因を、図一 14 に示す。図一 14(a) のように D_1 が十分な場合はパーリング突起部から斜め下方向に生じるひび割れがコンクリート表面に到達しないが、図一 14(b) に示すように D_1 が小さい場合は、このひび割れがコンクリート表面に到達する。ひび割れ後、母材鋼板とコンクリート間に開きが生じることでパーリングシアコネクタのせん断面とコンクリート界面にかい離が生じ、せん断抵抗が十分に発揮できないためであると考えられる。

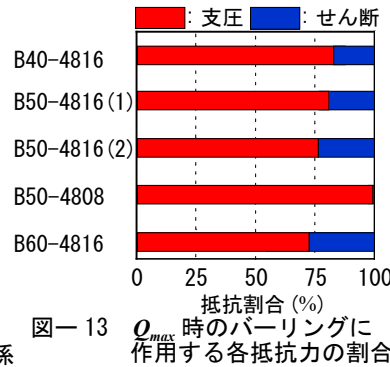
4. 終局耐力評価方法

4.1 終局耐力評価

既往の押抜き試験で提案されたパーリングシアコネクタの終局耐力式は、文献 2) の式 (1) により、孔あき鋼

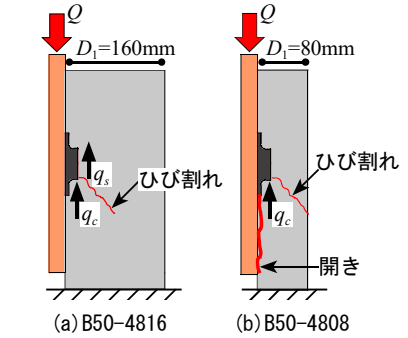


図一 12 各抵抗力とバーリング孔径の関係

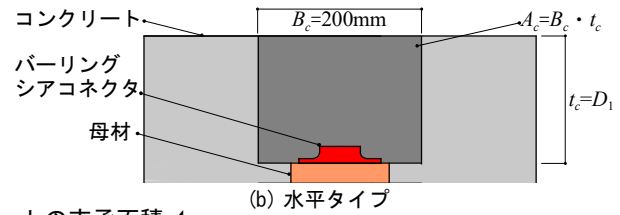
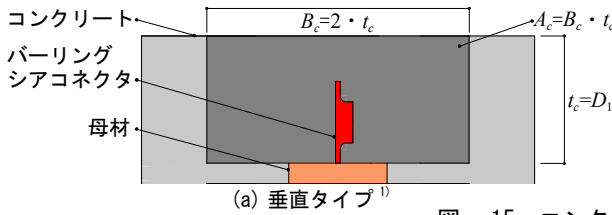


図一 13

Q_{max} 時のバーリングに作用する各抵抗力の割合



図一 14 せん断抵抗が低下する要因



図一 15 コンクリートの支承面積 A_c

板ジベル⁶⁾のせん断強度式 q_s の式 (2) とブロックジベル⁷⁾の支圧強度式 q_c の式 (3) の単純和で評価している。ただし、鋼板とコンクリート界面の付着・摩擦力は、式 (2) に含む。

$${}_B Q_u = n_s \cdot q_s + q_c \quad (1)$$

$$q_s = \alpha \cdot \pi d_p^2 / 4 \cdot \sigma_B \quad (2)$$

ここに、 n_s ：せん断面の数（水平タイプの場合： $n_s=1$ ，垂直タイプの場合： $n_s=2$ ）， α ：実験定数（Leonhardt⁶⁾の場合： $\alpha=1.08$ ）， d_p ：バーリング孔径， σ_B ：コンクリートシリンダーの圧縮強度

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

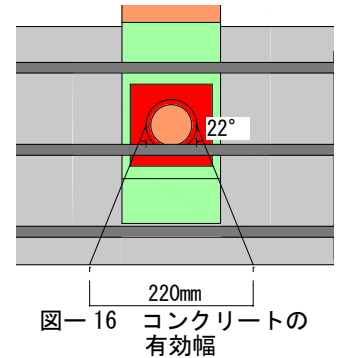
ここに、 A_p ：バーリング突起部の投影面積（ $= (d_p + 2t) \cdot h_f$ ）， h_f ：突起高さ， f_b ：コンクリートの支圧強度（ $= \sigma_B \cdot \sqrt{A_c/A_p}$ ）， A_c ：コンクリートの支承面積（ $= B_c \cdot t_c$ ）， B_c ：コンクリートブロックの有効幅（ $= \beta \cdot t_c$ ）， β ：コンクリートの有効幅係数（複合示方書⁷⁾の場合： $\beta=2.0$ ）， t_c ：コンクリートブロックの厚さ

(1) 支圧強度 q_c の評価

コンクリートの支承面積 $A_c (= t_c \times B_c)$ の考え方について説明する。垂直タイプは、図一 15(a) に示すように、厚さ t_c は D_1 とし、有効幅 B_c は t_c にコンクリートの有効幅係数 ($\beta=2.0$) を乗じている²⁾。水平タイプは、図一 15(b) のように、厚さ t_c は D_1 とし、コンクリートブロックの大きさに応じて 160mm, 80mm を使用した。有効幅 B_c は、コンクリートブロックの大きさに関わらず 200mm とした。その理由は、図一 7(b) より、コンクリートブロックの幅 B を 480mm, 200mm と変化させても耐力は同程度であったことと、写真一 1 よりコンクリート内部のひび割れを確認したところ、バーリング突起部から斜め $18^\circ \sim 25^\circ$ 方向（ひび割れ角度平均 22° ）にひび割れが発生しており、これから推定される有効幅は 200mm 程度であつ



写真一 1 実験後のひび割れの様子



図一 16 コンクリートの有効幅

たことによる（図一 16 参照）。

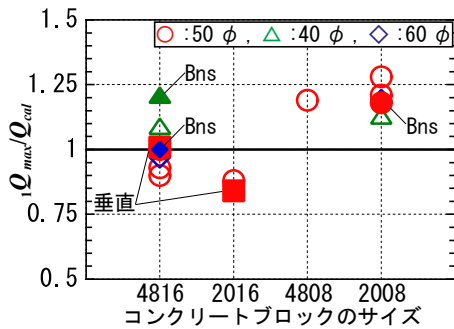
(2) せん断強度 q_s の評価

まず、 D_1 が 80mm の試験体と Bns 試験体は、せん断強度 q_s を 0 として評価した。このように考えた理由は 3 つあり、 D_1 が 80mm の試験体と Bns 試験体の最大耐力は同程度であったこと、バーリング円孔面からコンクリート側面までの距離が小さいと早期にひび割れが生じ、その影響により、バーリング円孔面とコンクリート界面に離れが生じてせん断抵抗が消失していることが推測されたこと、Bns 試験体は、バーリング円孔側面においてコンクリートのせん断抵抗が生じないことである。

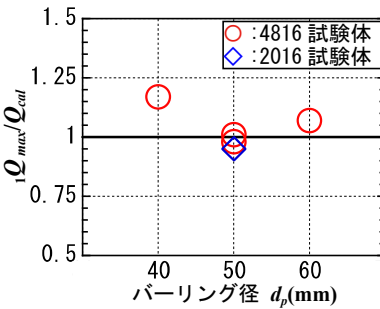
なお、せん断強度式 q_s の実験定数 α は Leonhardt⁶⁾ の 1.08 を用いた。

4.2 実験値と計算値の対応

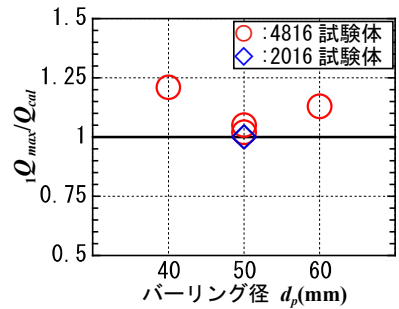
本研究で得られた最大耐力の実験値と式 (1) の計算値の対応について図一 17 に示す。せん断強度 q_s を 0 として評価した 4808 試験体と 2008 試験体の計算値は、実験値を安全側に評価していることが分かる。一方で、せん断強度式 q_s を用いて評価した 4816 試験体と 2016 試験体は実験値 / 計算値が 1.0 を下回るものがある。その要因は、実験結果から逆算して q_s の実験定数 α を求めた結果は 0.610 ~ 0.977 (平均値 0.765, 変動係数 0.179) であり、Leonhardt⁶⁾ の 1.08 より小さいことから、せん断強度



図一 17 実験値と計算値の比較 ($\alpha=1.08$)



図一 18 実験値と計算値の比較 (平均値: $\alpha=0.765$)



図一 19 実験値と計算値の比較 (下限値: $\alpha=0.610$)

式 q_s の実験定数 α による影響が大きいと考えられる。

そこで、バーリングシアコネクタの支圧とせん断の抵抗力を有する 4816 試験体と 2016 試験体を対象に、実験値と実験定数 $\alpha=0.765$ を用いた計算値の対応について図一 18 に示す。 q_s の実験定数 α を 0.765 にすることで、実験値は計算値と良好に対応する (平均値 1.04, 変動係数 0.0738) ことが示された。また、図一 19 に実験値と実験定数 α を下限値である 0.610 を用いた計算値との対応を示す。全ての試験体において安全側に評価できることが確認できた。

垂直タイプの 2016 試験体 (図一 17 ■印) の実験値が計算値を下回る要因は、バーリング円孔側面からコンクリート表面までの距離 (97mm) が小さいためである。既往研究より、バーリングシアコネクタの耐力を十分に発揮する条件として、側面かぶり厚さはバーリング孔径の 3 倍以上必要であることが分かっている⁵⁾ が、当該試験体の側面かぶり厚さはバーリング孔径の 2 倍を下回っているため、計算値が実験値を過大評価したと考えられる。

5. 結論

本論では、バーリング鋼板の平板部を母材鋼板に取り付けた水平タイプのバーリングシアコネクタを対象に、バーリング孔径、コンクリートブロック寸法および設置方法の違いがずれ止め特性に及ぼす影響を検討するために押抜き試験を行った。本実験から得られた知見を以下に示す。

- 1) 水平タイプのバーリングシアコネクタの抵抗機構は、バーリング突起部による支圧抵抗力、バーリング円孔に充填されるコンクリートの一面せん断抵抗力が同時に作用していることを確認した。ただし、バーリング鋼板が取り付け母材面からコンクリートブロック表面までの距離 D_1 が小さい場合は、表面までひび割れが到達することでせん断抵抗力が消失し、最大耐力時の抵抗力は支圧作用のみになることを明らかにした。
- 2) 母材面からコンクリートブロック表面までの距離 D_1, D_2 に対して、バーリングシアコネクタの孔径と最大耐力との間に強い正の相関関係が得られた。
- 3) 垂直タイプと水平タイプのバーリング鋼板のずれ挙動

は明確に異なるものの、設置方法に応じてバーリング突起部からコンクリート表面までの最短距離を適切に設定することで、いずれも十分なずれ止め効果を発揮する。また、既往の終局耐力評価式において、支圧強度はコンクリート有効幅 B_e を、せん断強度はせん断面積とコンクリート実験定数 α を、それぞれ適切に設定することで実験値と良好に対応する。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP20K04785 および (一社) 日本鉄鋼連盟「2020 年度 鋼構造研究・教育助成事業」の助成を受けて実施した。実験にあたっては、当時大学院生 2 年生の井土祥太氏、学部 4 年生の天野佑美氏にご協力頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鋼・コンクリート機械的ずれ止め構造設計指針・同解説，pp.15-24, 2022.2
- 2) 田中照久，堺純一，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
- 3) 田中照久：1. 異種構造接合部の課題と研究動向 (2) 機械的ずれ止めの研究動向，2022 年度日本建築学会大会 (北海道) 構造部門 (SCCS) PD 資料，pp.5-13，2022.9
- 4) 田中照久，堺純一，河野昭彦：鋼材とコンクリートを繋ぐバーリングシアコネクタの応力伝達機構 - バーリングの応力伝達機構の分類と適正配置間隔 -，都市・建築学研究 九州大学大学院人間環境学研究院紀要，Vol.24，pp.107-115，2013.7
- 5) 田中照久，山下慎太郎，堺純一：並列配置したバーリングシアコネクタおよび孔あき鋼板ジベルの押抜き試験，第 12 回復合・合成構造の活用に関するシンポジウム，pp.(57)-1-8，2019.6
- 6) Leonhardt, F et al. : Neues, vorteilhaftes Verbundmittl für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit, Beton- und Stahlbeton, 82 Heft 12, pp.325-331, Dec.1987
- 7) 土木学会：2014 年制定 複合構造標準示方書 設計編，pp.79-80，2015.5