# 論文 コンクリート強度がバーリングシアコネクタのずれ止め特性に 及ぼす影響に関する実験的研究

井土 祥太\*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,バーリングシアコネクタの使用拡大を目指し,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,単列配置・並列配置によるずれ止め個数の違いやコンクリート 強度の違いがずれ止め特性およびずれ挙動に及ぼす影響を押抜きせん断実験より把握した。また,高強度コ ンクリートを用いた場合を考慮し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,支圧強度,終局耐力評価式,押抜き試験

## 1. 序論

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。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たバーリング シアコネクタと呼ぶ高剛性・高耐力を有するずれ止め<sup>1)</sup> を開発し,建築構造物に一部実用化に至っている<sup>2)</sup>。

最大荷重時のバーリングシアコネクタの抵抗機構は, 図-1(a) に示すようにバーリング孔内に充填されるコ ンクリートの二面せん断力と突起部の支圧力,さらに鋼 板とコンクリート境界面の付着・摩擦相当の抵抗力であ ることを示し,普通コンクリートを用いた場合の各抵抗 力の割合を明らかにしている<sup>3)</sup>。また,鉄骨梁とコンク リートスラブのように並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最大耐力実験値を予測で きる耐力評価式を提案している<sup>1)</sup>。

そこで本研究は,バーリングシアコネクタの使用拡大 を目指し,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, ずれ止め設計法の構築を目指 し, 押抜きせん断実験を行った。本論は, 単列配置・並 列配置によるずれ止め個数の違いやコンクリート強度の 違いがバーリングシアコネクタのずれ止め特性やずれ挙 動に及ぼす影響について述べる。また, 高強度コンクリー トを用いた場合のバーリングシアコネクタの抵抗負担割 合を示し, 既往の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-2に示す。試験体は, 実大スケールでずれ止め鋼板を設けた角形鋼管部材を鉄 筋コンクリート(RC)部材の中央部に埋め込んだ形式で ある。鋼管直下は空洞になっており,コンクリートとは 直接接触しない。また,角形鋼管の表面にはコンクリー トとの付着および摩擦を除去するために,厚さ2.3mmの フッ素樹脂(PTFE)粘着テープを貼り付けた。

ずれ止め鋼板の種類は、バーリングシアコネクタの各 伝達要素の抵抗力を検討するために図ー1に示す3種 類を準備し、角形鋼管の外面それぞれに単列または並 列(2列平行)に取り付ける。ずれ止め鋼板の規格・寸 法を文献1)の研究成果により1種に限定し、表-1に 示す。3種類のずれ止め鋼板の抵抗機構は図-1に示す とおりである。ここで、Type B は支圧、二面せん断、付 着・摩擦で抵抗するバーリングシアコネクタ、Type P は 二面せん断抵抗、付着・摩擦で抵抗する孔あき鋼板ジベ ル、Type Bns は図-1 (b) に示すように Type B の二面 せん断抵抗を除去するために加工したバーリング鋼板を



図-2 押抜き試験体の形状寸法および載荷方法

表-1 試験体一覧および実験結果										
No.	試験体名	ずれ止めType	抵抗機構	ずれ止め 配置	$F_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	<sub>c</sub> P (kN)	$_{c}\delta$ (mm)	P <sub>max</sub> (kN)	$\delta_{max}$ (mm)	$\frac{_{c}P}{P_{max}}$
1	B1-20	h <sub>j</sub> =15 100×200 t <sub>t</sub> =6 d <sub>p</sub> =50 単位:mm	支圧 + 二面せん断 + 付着・摩擦	単列 (1/面)	20	576	1.10	1050	9.7	0.55
2	B1-40				40	949	0.90	1668	7.5	0.57
3	B1-60				60	1293	0.72	2064	7.0	0.63
4	B2-20			並列 (2/面)	20	1103	1.38	2050	5.4	0.54
5	B2-40				40	1994	1.10	3419	6.2	0.58
6	B2-60				60	2333	0.93	4014	10.4	0.58
7	Bns1-20	<u>h=15</u> <u>100×200</u> <u>l=6</u> <u>d<sub>p</sub>=50</u> 単位:mm	支圧 + 付着・摩擦	単列 (1/面)	20	424	1.28	876	13.7	0.48
8	Bns1-40				40	727	0.87	1206	8.3	0.60
9	Bns1-60				60	803	0.48	1469	9.7	0.55
10	Bns2-20			並列 (2/面)	20	818	1.76	1687	27.6	0.48
11	Bns2-40				40	1389	0.90	2897	4.6	0.48
12	Bns2-60				60	1697	0.76	3275	5.1	0.52
13	P1-20	P 100×200 しの×200 しの×200 した した しつ しの した しつ しの と しの と しの と しの と しの し しの と しの し し し し	二面せん断 + 付着・摩擦	単列 (1/面)	20	236	0.45	514	6.3	0.46
14	P1-40				40	545	1.10	802	4.6	0.68
15	P1-60				60	691	0.66	1153	8.3	0.60
16	P2-20			並列 (2/面)	20	328	0.38	930	7.7	0.35
17	P2-40				40	505	0.24	1702	4.0	0.30
18	P2-60				60	783	0.24	2205	2.4	0.36

F: コンクリートの目標強度, P: 初期剛性を失う荷重, S: P時のずれ変位, Pmax: 最大荷重, Smax: 最大荷重時のずれ変位

表す。Type Bns の加工方法は,図-1(b)のようにバー リング加工した孔内に予めモルタルを詰め,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。エポキシ系接着剤は、モルタルがグリースを吸収す ることを防ぐために塗布した。ずれ止め鋼板の並列間隔 は,既往の研究成果<sup>4)</sup>を参考にいずれも100mmとし, Type Bと Type Bns の並列配置は、バーリング突出方向が互い に外向きになるタイプとした。ずれ止め鋼板の表面は黒 皮の状態である。また,ずれ止め鋼板の下端部には高さ 60mmの発泡材を配置し、コンクリートとの接触による 支圧抵抗が生じないようにした。

角形鋼管部材は□-250x250x12 (鋼種: BCR295) を用 い、ずれ止めの最大耐力発揮時まで鋼管部が降伏しない 十分な断面とし、さらに鋼管の局部変形を抑制するため に,鋼管内部にコンクリートを予め充填した。

RC 部材の断面寸法は 550x550mm であり、ずれ止めが

表--2 材料特性 降伏点 引張強さ ヤング係数 使用材料 鋼種  $\sigma_v (N/mm^2)$  $\sigma_u (N/mm^2)$  $E_s(N/mm^2)$ バーリング鋼鈑 SN490B 389 519 212000 PL-6 孔あき鋼板 SS400 378 547 201000 PL-12 角形鋼管 BCR295 356\* 437 205000 □-250×250×12 異形棒鋼 SD295A 199000 363 535 D13  $F_c$ 圧縮強度 割裂引張強度 ヤング係数 使用材料  $(N/mm^2)$  $\sigma_b (\text{N/mm}^2)$  $\sigma_t (\text{N/mm}^2)$  $E_c$  (N/mm<sup>2</sup>) 3.09 25000 20 23.6 コンクリート 40 43.0 4.49 30700 60 5.25 36400 57.6

F:コンクリー トの目標強度 \*0.2%オフセット値

取り付いた鋼管とその周囲に配筋される横補強筋の最小 かぶり厚さを考慮して決定した。横補強筋は, RC 規準 5) を参考に異形棒鋼 D13 (SD295A) とし、ずれ止めの中 心位置を基準に上下に 100mm 間隔で振り分け配筋した。 RC 部材の下部には鋼板(16mm 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 リートの目標強度は、20N/mm<sup>2</sup>、40N/mm<sup>2</sup>、60N/mm<sup>2</sup>の 3 種類を対象とし、粗骨材の最大寸法はいずれも 20mm を使用した。押抜き試験体に用いた材料特性を**表-2**に 示す。

## 2.2 実験変数

**表**-1に試験体一覧を示す。実験変数は、ずれ止め鋼板の種類(Type B, Type Bns, Type P), コンクリートの目標強度(*F<sub>c</sub>*=20,40,60N/mm<sup>2</sup>),ずれ止め個数(単列配置:1個/面,並列配置:2個/面)とし,試験体数は計18体とする。

## 2.3 載荷方法と計測位置

押抜きせん断実験は、5000kN大型圧縮試験機を用 い、図-2(c)に示すように、試験体の鋼管上面に圧縮 力を載荷し、鋼管とコンクリートとの間のずれ変位量が 25mmに到達した時点で実験終了とする。ずれ変位は、 鋼管頂部からずれ止め中心位置までのコンクリートとの 間で計測された縮み量とし、試験体の四隅にそれぞれ2 本ずつ設置した計8本の高感度変位計の全平均値で評価 する。実験結果より、各試験体における最大荷重時の角 形鋼管の縮み量は、それぞれの最大荷重時のずれ変位の 1/1000~1/500程度であったため、角形鋼管の圧縮変形 がずれ止めの挙動に及ぼす影響はないものとした。

#### 実験結果と考察

3.1 荷重一ずれ変位関係

各試験体の荷重-ずれ変位関係を図-3に示す。

(1) 初期剛性を失う荷重

各試験体の初期のずれ剛性はコンクリート強度の増加

に伴い,大きくなっている。ずれ変位 1mm 前後で各試 験体の初期剛性を失うことが確認された。

各試験体の初期剛性を失う荷重点(以下。**P**と呼ぶ)に ついて考察する。既往の研究成果<sup>®</sup>より,荷重-ずれ変 位関係において, Type B および Type P の初期のずれ剛性 が急激に低下するずれ変位は 0.1mm であることが報告さ れていることから,初期剛性は原点と 0.1mm 時の荷重点 を結ぶ割線剛性。K で評価することにした。

各試験体の初期剛性を失う要因については、横補強筋 のひずみ性状と関連づけて説明する. 図-4に,各試験 体の横補強筋4本に貼付したひずみゲージの位置を示す。 ひずみゲージは,横補強筋の中央部内外の材軸方向に貼 付した。ここでは,各横補強筋の外側に貼付したひずみ ゲージを用いて考察する。図-5に、各試験体の単列配 置の荷重-ひずみ関係および荷重-ずれ変位関係を示す。 なお,ひずみの値は横補強筋4本の平均値とする。図-5より,各試験体の横補強鉄筋の平均ひずみが引張側に 急増する荷重点と荷重-ずれ変形関係の初期剛性を失う 荷重点は概ね一致している現象が確認できる。このこと から、コンクリート内部にひび割れが生じたことで各試 験体の初期剛性は失ったと推察される.紙面の都合で図 を示せないが,並列配置された試験体の場合においても, それぞれの横補強筋のひずみは,単列配置された各試験 体と同様の現象が確認された。

表-1より,各試験体の*P<sub>max</sub>*に対する*<sub>e</sub>P*は,TypeBは 0.54 ~ 0.63 (平均:0.57倍), TypeBnsは0.48 ~ 0.60 (平均: 0.52倍), TypePは0.30 ~ 0.68 (平均:0.46倍) であった。 したがって,バーリングシアコネクタは,最大耐力の0.5 倍の耐力を用いれば,コンクリート内部のひび割れが抑





制でき、かつ、鋼とコンクリートとの間のズレが急増し ないずれ止めの設計が可能であると考えられる。

(2) 最大荷重

**図ー6**に各試験体の最大荷重 *P<sub>max</sub>*とコンクリート圧縮 強度<sub>c</sub>*o*<sub>b</sub>の関係を示す。各試験体の最大荷重はコンクリー ト圧縮強度が増加すると線形的に増加することがわか り,増加率の相関係数が0.97以上と高い相関が得られた。

図-7に最大荷重時のバーリングシアコネクタ1枚あ たりに作用した各伝達要素の抵抗力(支圧,二面せん 断,付着・摩擦)とその割合を示す。各抵抗力は文献3) に従い, Type B・Bns・P 試験体の各荷重 - ずれ変位関 係より, Type B 試験体の最大荷重時のずれ変位に対応す る Type Bns・P 試験体の荷重をそれぞれ足し引きして評 価した。図-7(a)~(c)に示す回帰直線は単列配置□ と並列配置●の平均のプロットによるものである。バー リングシアコネクタの各伝達要素の抵抗力は,単列配置 と並列配置の平均でみると、コンクリート強度の増加に 伴い線形的に増加し,0.965以上の高い相関が得られた。 図-7 (d) より, コンクリート強度が増加してもバー リングシアコネクタの最大荷重時の支圧抵抗の割合は約 50%程度であり、文献3)の結果と同程度であった。また、 これらの結果から, Type BのPmax時に作用する各伝達要 素の抵抗力(支圧,二面せん断,付着・摩擦)の増加は いずれもコンクリート強度の増加に依存するといえる。

## (3) ずれ止め鋼板の最終破壊状況

ずれ止め鋼板の最終破壊状況は,高強度コンクリート においても普通コンクリートの場合と同様の形式であっ た。Type B はバーリング孔内に充填されたコンクリート の二面せん断破壊とバーリング突起部の支圧破壊, Type Bnsはバーリング突起部の支圧破壊, Type Pはコンクリー トの二面せん断破壊が確認された。

なお, Type B はコンクリート強度が 40N/mm<sup>2</sup> 以上にな ると微小ではあるが, バーリング突起部が楕円形に変形 し, また鋼板部がせん断変形していることが確認された。

## 4 最大耐力評価方法

 $q_c = A_p \cdot f_b$ 

#### 4.1 既往の評価式との対応

バーリングシアコネクタの最大耐力実験値は,コンク リート強度に関係なく,同様の破壊形式が確認されたこ とから,既往の研究で提案されている終局耐力評価式<sup>1)</sup> から求まる計算値と比較検討する。

バーリングシアコネクタ1個あたりの終局せん断耐力  ${}_{B}Q_{u}$ は、二面せん段抵抗と付着・摩擦相当の抵抗を考慮 した Type P のせん断耐力  $q_{s}^{7)}$  と複合示方書によるブロッ クジベル<sup>8)</sup> のせん断耐力  $q_{c}$  の単純和による式(1) で表す ことができる<sup>1)</sup>。バーリング孔に充填されたコンクリー トの二面せん断抵抗によるせん断強度  $q_{s}$  は文献7) に基 づき式(2) で求める。また、バーリング突起部の支圧抵 抗によるコンクリートのせん断強度  $q_{c}$ は、式(3) から求 まる。なお、コンクリートの支承面積  $A_{c}$  は図-8 に示 すとおりである。

$${}_{B}Q_{u}=q_{s}+q_{c} \tag{1}$$

 $q_s = \alpha \cdot \pi d_p^{2/4} \cdot \sigma_b \cdot 2 \tag{2}$ 

(3)

ここに, $\alpha$ : 実験定数 (Leonhardtらの場合:  $\alpha$ =1.08<sup>7</sup>),  $d_p$ : バーリング径, $\sigma_b$ : コンクリートシリン



ダーの圧縮強度<sub>,</sub> $A_p$ : バーリング突起部の投影面積(= ( $d_p$ +2t)・ $h_p$ ), $h_f$ : 突起高さ, $f_b$ : コンクリートの支圧強度 (= $\sigma_b$ ・ $\sqrt{A_c}$  /  $\sqrt{A_p}$ ), $A_c$ : コンクリートの支承面積(= $B_c$ ・ $t_c$ ), $B_c$ : コンクリートのブロック幅(= $\beta$ ・ $t_c$ ), $\beta$ : コンクリー トの有効幅係数( $\beta$ =2.0<sup>8</sup>)), $t_c$ : コンクリートブロックの 厚さ

図-9(a) にバーリングシアコネクタ1 個あたりの最 大荷重時の耐力 <sub>1</sub>*P<sub>max</sub>* に対する計算値 <sub>*B*</sub>*Q<sub>u</sub>* の比とコンク リート圧縮強度 <sub>c</sub>*σ<sub>b</sub>* との関係を示す。この結果から,コ ンクリート強度が 40N/mm<sup>2</sup> 以上の計算値は実験値を過 大に評価していることがわかり, Type B の <sub>1</sub>*P<sub>max</sub>/<sub>B</sub>Q<sub>u</sub>* は 0.81 ~ 1.04 (平均: 0.92, 変動係数: 0.09) であった。

図-9(a)の結果をうけて,各伝達要素(支圧,二面 せん断,付着・摩擦)の実験値と式(2)および式(3) から求まる計算値の対応を図-9(b)~(c)に示す。そ れぞれの伝達要素の実験値は、単列配置と並列配置の 平均値を示している。図-9(b)より,支圧抵抗力の  $_{P_{max}/q_c}$ は0.62~0.94(平均:0.80,変動係数:0.14)で あり,式(3)で求めた支圧抵抗の計算値は、いずれのコ ンクリート強度において実験値を過大に評価しているこ とがわかる。一方,図-9(c)より二面せん断抵抗力と 付着・摩擦相当の抵抗力の和の $_{P_{max}/q_s}$ は0.99~1.23(平 均:1.11,変動係数:0.07)となり、コンクリート強度が 増加しても良好に対応していることが確認できた。

### 4.2 支圧強度評価法の再検討

式(3)で算出したバーリングシアコネクタの支圧抵 抗の計算値は実験値を過大に評価しているため,支圧強 度の評価式を検討する。本論では,文献9)で紹介され



図一8 コンクリートの支承面積 A<sub>c</sub>

ている森田・中塚らによって提案された,  $\sigma_b=9N/mm^2$ の 低強度から  $\sigma_b=100N/mm^2$ クラスの超高強度コンクリートにまで適用できる支圧強度推定式<sup>10)</sup> をバーリングシア コネクタの支圧強度耐力評価式への適用を試みる。

$$f_b = 1.8 \cdot \sqrt{\frac{A_c}{A_p}} \ _c \sigma_b^{(0.8 - \ _c \sigma_b/2000)} \tag{4}$$

図-10(a) に式(4) を適用したバーリングシアコネ クタ1個あたりの最大耐力計算値<sub>B</sub>Q<sub>u</sub>に対する実験値  $_{1}P_{max}$ の比を示す。 $_{1}P_{max}/_{B}Q_{u}$ は、 $0.99 \sim 1.09$ (平均:1.04, 変動係数:0.03)となり、高強度コンクリートに用いた場 合においても良好に対応していることが確認できた。

図-10(b) に式(4) で求めた最大荷重時のバーリン グシアコネクタ1枚あたりの支圧抵抗力 $q_c$ の計算値に対 する実験値 $_1P_{max}$ の比較を表す。図中のプロットは、図-9(b) ~ (c) と同様に単列配置と並列配置の平均とした。  $_1P_{max}/q_c$ は、0.87~1.05(平均:0.99,変動係数:0.06)となり、 式(4) で求めた支圧抵抗力の計算値は、コンクリート 強度が増加しても実験値と良好に対応した。





## 5. 結論

本論はコンクリート圧縮強度の違いがバーリングシア コネクタのずれ止め特性に及ぼす影響を実験的に把握し た。以下に,コンクリート圧縮強度が20~60 N/mm<sup>2</sup> の範囲において,押抜きせん断実験から得られた知見を 示す。

- 初期剛性を失う点(鋼とコンクリート間のずれが急増 する直前)の荷重は、コンクリート強度の増加に伴い 線形的に増加する。また、この荷重点は、コンクリー ト内部の横鉄筋のひずみが急増する点とほぼ一致する ことが確認できた。
- 2)最大荷重時のバーリングシアコネクタに作用する各伝 達要素(支圧・二面せん断・付着+摩擦)の抵抗力は, いずれもコンクリート強度の増加に伴い線形的に増加 する。また,その抵抗割合は,単列配置と並列配置に よる個数の違いやコンクリート強度に関係なく,バー リング突起部による支圧抵抗力が全体の約半分を占め ていることが明らかになった。
- 3)バーリングシアコネクタの既往の終局耐力評価式<sup>1)</sup>による最大耐力計算値は、コンクリート強度の増加に伴い、実験値を過大評価する傾向がみられた。
- 4)低強度から超高強度コンクリートまで適用可能とされている既往の支圧強度推定式<sup>10)</sup>を導入したバーリングシアコネクタの終局耐力評価式は、実験結果を精度良く評価できることを示した。

## 謝辞

本研究は、日本学術振興会の科学研究費補助金(若手研究(B)課題番号16K18193)および一般社団法人日本鉄

鋼連盟の2017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。実験にあたっては、福岡大学 技術職員の石橋宏一郎氏、当時大学院生2年生の山下慎 太郎氏,学部4年生の永水優貴氏、吉川眞里氏にご協力 頂いた。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 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
- 2)田中照久:主集 設計を支える構造実験 第3章設計への適用性-3 鋼材とコンクリートの接合に用いる機械的 ずれ止め(シアコネクタ),structure,日本建築構造技 術者協会,第140号,pp.44-47,2016.10
- 3)田中照久,堺純一,河野明彦: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, 第24号,pp.107-115,2013.7
- 4)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回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演集、pp.57-1-8、2017.11
- 5)日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 第9版,2018.12
- 6) 則松一揮,田中照久,堺純一,河野昭彦:繰り返しせん断力を受ける各種ずれ止めの力学的性状,鋼構造年次論文報告集,第21巻,pp.375-382,2013.11
- 7) Leonhardt, F et al : Neues, vorteilhaftes Verbundmittrl fur Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit, Betonund Stahlbeton, pp.325-331, Dec.1987
- 8) 土木学会: 複合構造標準示方書, 第1版, 2009.12
- 9)日本建築学会:鋼コンクリート構造接合部の応力伝達 と抵抗機構,第1版,2011.2
- 10)森田真由美、中塚佶、坂田博史: PC 圧着工法のための 支圧強度と一面せん断強度に関する基礎研究、コンク リート工学年次論文集, Vol. 31, No. 2, pp. 499-504, 2009,7