

# 論文 突起付鋼板に頭付スタッドを併用した場合の付着せん断特性

上中宏二郎<sup>\*1</sup>, 鬼頭宏明<sup>\*2</sup>, 上平謙二<sup>\*3</sup>, 園田恵一郎<sup>\*4</sup>

**要旨:**本研究はその評価方法が整備されていない合成構造用鋼材すなわち突起付鋼材を対象に、押抜き試験法、側圧制御式引抜き試験法、およびはり供試体を用いた曲げ試験法の異なる3種類の載荷試験法を行い、これらの異なる載荷条件の下で頭付スタッドと突起付鋼板を併用した場合の付着せん断特性を相互比較した。その結果、鋼板の面外変形に対する拘束度合が、その特性に深く関与していることが分かった。また各種試験法それぞれの実践的な適用範囲についても考察を加えた。

**キーワード:**合成構造, 付着せん断, 突起付鋼板, 頭付スタッド, 付着試験法

## 1. まえがき

突起付鋼材<sup>1)</sup>とは熱間圧延時に表面に突起を設けた鋼材を指し、我が国の鉄鋼メーカーが独自に開発したものである。その開発目的は鋼・コンクリート合成構造においてコンクリートとの付着を強化・保証することであることであるが、その特性評価法は現在十分に整備されているとは言い難い。

従来の合成構造では鋼とコンクリート間のずれ止めとしてスタッド<sup>2)</sup>を用いることが多い。また、サンドイッチ構造にて鋼殻の補剛材を兼務する形鋼<sup>3,4)</sup>をずれ止めに用いることもある。さらに前記2者を併用したシステムに対する押抜き実験による研究<sup>5)</sup>もなされており、そこでは両者の強度の単純累加強度が与えられるとされている。

以上の背景のもと、突起付鋼材の利用はスタッドなどに賄われていた鋼とコンクリート間のせん断伝達機能の全てあるいはその一部を突起に分担させ、スタッドなどシアコネクタの削減、ひいては工期の短縮などの利点が得られる。一方、突起付鋼材は接合面でのせん断伝達を果たせるものの肌離れ方向の抵抗を有せず、何らかの接合面直交方向の拘束、例えば支点あるいは載荷点からの圧力の確保や吊り材すなわち頭付スタッドまたはサンドイッチ構造のせ

ん断補強鋼板等の配置を必要とすることにも配慮せねばならない。

そこで本研究では、スタッドを上記拘束材を兼務するずれ止めとして併用した突起付鋼板の付着せん断特性に関して、押抜き試験法<sup>6)</sup>、側圧制御式引抜き試験法<sup>7)</sup>(以下引抜き試験法とする)、ならびにはり供試体を用いた曲げ試験法<sup>8)</sup>(以下はり曲げ試験法とする)といった異なる3種の付着せん断試験から得られた既往の6供試体<sup>9,10)</sup>、ならびに新規7供試体の結果より、突起とスタッドの相互作用、すなわち強度と変形特性またそれに及ぼす鋼とコンクリート間の拘束効果の影響を相互比較した。なお、本研究で対象とした突起付鋼材は千鳥格子状の縞突起を有する縞鋼板(図-1参照)である。

## 2. 載荷試験方法の概要

### 2.2 押抜き試験法<sup>2,6)</sup>

供試体(図-2参照)は、慣用の押抜き試験法<sup>2)</sup>のものより形状を大きくし、試験法の精度を高めると共に施工時の実寸<sup>11)</sup>に極力近い寸法とした。また縞鋼板はフランジに溶接し、スタッドは縞鋼板に穴を開けてフランジに溶接した。またコンクリートスラブ底面は石膏により固定した。実験変数はスタッドの

\*1 大阪市立大学大学院 工学研究科土木工学専攻 工修(正会員)

\*2 大阪市立大学助手 工学部土木工学科 工修(正会員)

\*3 ドーピー建設工業(株)技術センター首席研究員 工博(正会員)

\*4 大阪市立大学教授 工学部土木工学科 工博(正会員)

表-1 供試体一覧

No.	Tag.	Material Properties		Plate							
		$F_c$ (MPa)	$f_{sy}$ (MPa)	Width (mm)	Thick. (mm)	Bond Length (mm)	Embossments			Conf. Stress (MPa)	Testing Method
							sort	Bear. Ratio	Stud (n)		
1	C-A	44.4	302	200	14(6)*	800	Check.	0.0696	Non	0.0	Push out
2	CS-A	44.4	302	200	14(6)*	800	Check.	0.0696	$\phi 22 \times 150$	0.0	Push out
3	CS2-A <sup>9)</sup>	49.0	302	200	14(6)*	800	Check.	0.0696	2@ $\phi 22 \times 150$	0.0	Push out
4	C05-B <sup>9)</sup>	33.4	302	200	6	450	Check.	0.0696	Non	0.5	Pull out
5	S00-B <sup>9)</sup>	28.4	296	200	6	450	Plain	0.0000	$\phi 13 \times 80$	0.0	Pull out
6	CS00-B	30.7	302	200	6	450	Check.	0.0696	$\phi 13 \times 80$	0.0	Pull out
7	CS02-B	30.7	302	200	6	450	Check.	0.0696	$\phi 13 \times 80$	0.2	Pull out
8	CS05-B	30.7	302	200	6	450	Check.	0.0696	$\phi 13 \times 80$	0.5	Pull out
9	CS10-B	30.7	302	200	6	450	Check.	0.0696	$\phi 13 \times 80$	1.0	Pull out
10	CS15-B	30.7	302	200	6	450	Check.	0.0696	$\phi 13 \times 80$	1.5	Pull out
11	C-C <sup>9)</sup>	31.2	296	200	6	400	Check.	0.0696	Non	0.0	Beam
12	S-C <sup>9)</sup>	31.2	296	200	6	400	Plain	0.0000	$\phi 16 \times 80$	0.0	Beam
13	CS-C <sup>9)</sup>	31.2	296	200	6	400	Check.	0.0696	$\phi 16 \times 80$	0.0	Beam

Note: \*: Flange Plate Thickness(Embossed Plate Thickness)

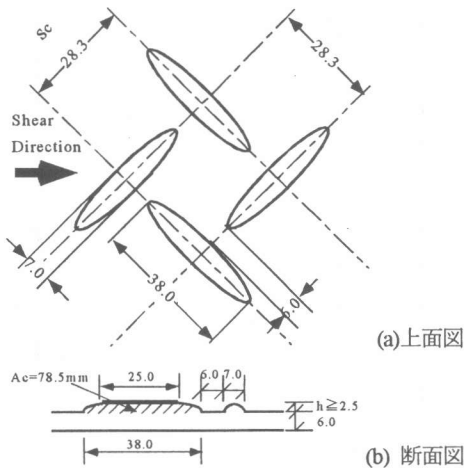


図-1 縞突起詳細(単位:mm)

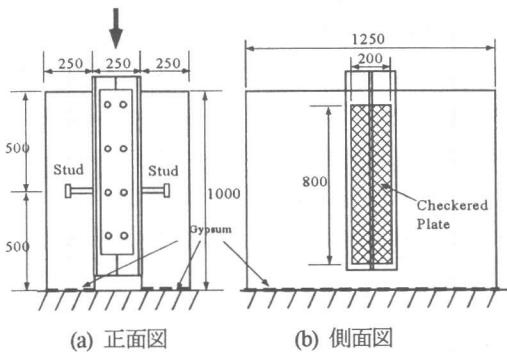


図-2 押抜き試験法(単位:mm)

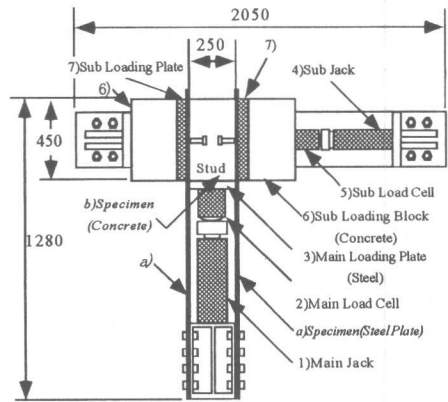


図-3 引抜き試験法(上面図, 単位:mm)

本数で、表-1 に示す3 供試体(No. 1-3)を対象とした。なお、ずれ変位は付着長中央すなわちスタッド配置部にて計測した。

## 2.2 引抜き試験法<sup>7)</sup>

供試体と載荷装置を図-3 に示す。供試体は厚さ 6 mm の 2 枚の縞鋼板の突起付面を向かい合わせた形で平行に配置し、その間隔(250 mm)内にコンクリートを打設して作成した。載荷は 4)の副ジャッキにより付着面に与える側圧( $\sigma_0$ :表-1 内、第 10 列参照)を一定に制御しながら 1)の主ジャッキで引抜き荷重

(P)を与え、鋼板を引抜く形式で2つの付着面に同時にせん断力を加えるいわゆる2面せん断方式である。なお、スタッドは両付着面中央に1体ずつ溶接した。実験変数は1)突起の有無、2)スタッドの有無、ならびに3)側圧を選び、表-1に示す7供試体(No. 4-10)を対象とし、押抜き試験同様にずれを測定した。

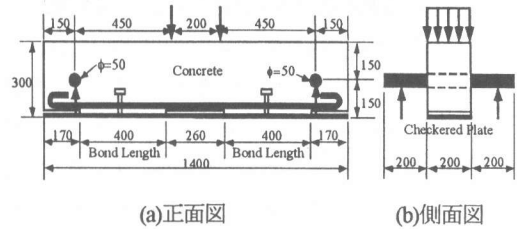


図-4 はり曲げ試験法(単位:mm)

### 2.3 はり曲げ試験法<sup>9)</sup>

R/C 部材内の異形鉄筋の付着試験法の1つである RILEM/CEB/FIP の方法<sup>9)</sup>を規範とした供試体と載荷・支持方式を図-4に示す。供試体は縞鋼板を R/C 部材の底面に配置したオープンサンドイッチ部材である。また支持棒はコンクリート内に貫通させ、鋼とコンクリートとの接合面での拘束圧を除去した。この支持方法より、支点部から何らかの拘束圧が作用する通常のはり部材に比して、鋼板の付着に対して厳しい条件設定となっている。またコンクリートがせん断破壊を起こさないように十分なせん断補強筋も設けた。なお、スタッドは左右両付着面の中央に1本ずつ溶接した。

2.1の押抜き試験法、2.2の引抜き試験法といった直接せん断試験法と本項で述べたはり曲げ試験法との差異は、前者らは直接せん断試験法であるのに対し後者は曲げせん断力が作用するはり部材であり、より実構造部材に近い載荷形式と考えられる。

採用した実験変数は1)縞突起の有無と2)スタッドの有無で、表-1に示す3供試体(No. 11-13)を対象とした。なお、ずれの測定位置は上記2試験法同様に付着長中央である。

### 3. 付着強度算定式

既往の引抜き試験<sup>7)</sup>から得られた縞鋼板の付着強度、すなわち鋼板に作用する最大引抜き力を付着面積で除した平均せん断強度 $\tau_b$ は、突起前面にてコンクリート部が局所的に破壊する支圧破壊形式下で側圧(拘束圧)を $\alpha_0$ 、支圧面積比を $m$ 、ならびコンクリート強度を $F_c$ とし、支圧項(式(1)右边第1項)と摩擦項(式(1)右边第2項)の和である下式で与えられる<sup>7)</sup>。

$$\frac{\tau_b}{F_c} = m \left( 0.623 + 17.1 \frac{\sigma_0}{F_c} \right) + 0.6 \frac{\sigma_0}{F_c} \quad (1)$$

ここで支圧面積比は、単位付着面積に対する載荷方向に直行する突起の全投影面積の比を表し、図-1に示すように突起軸がせん断方向に対し45度の交角を有すること、突起投影面積 $A_c$ が $78.5 \text{ mm}^2$ であること、ならびに突起間隔( $s$ )が $28.3 \text{ mm}$ の正方形状であることにより、次式で与えられる<sup>7)</sup>。

$$m = \frac{A_c}{\sqrt{2}s^2} = 0.0696 \quad (2)$$

すなわち、実験結果の参照値とする縞鋼板の付着強度算定値 $\tau_b(e)$ は、式(1)にて、はり曲げ試験法においては無拘束圧状態すなわち側圧 $\alpha_0=0$ として、引抜き試験法は実験変数である側圧を代入して算出した。

一方、スタッドの終局強度( $Q_u$ )は文献2)より、 $A_s$ をスタッドの断面積、 $E_c$ をコンクリートのヤング率とすると次式で与えられる。

$$Q_u = 0.5A_s \sqrt{E_c F_c} \quad (3)$$

なお、実験値との比較においては、スタッド1本当たりの強度を付着面積で除した値すなわちせん断応力換算値： $\tau_b(s)=Q_u/A_b$ ( $A_b$ は付着面積)を算定値とした。

### 4. 実験結果と考察

表-2に付着強度に関する実験結果一覧を示す。表中、算定値として[1]:式(1)による縞鋼板の強度、[2]:式(3)によるスタッドの強度を、[3]:実験から得られた強度を、[4]:[1]と[2]の和いわゆる縞鋼板とスタッドの単純累加強度の算定値に対する[3]実験値の比を、そして[5]:[1]縞鋼板のみの算定値に対する[3]実験値の比の計5者を示した。

ここではまずスタッドまたは突起単体の特性を論じた後、両者を併用した場合の付着せん断特性を検討する。

#### 4.1 各種荷重実験下でのスタッドのみの特性

各試験法で得られたスタッドのみを用いた供試体(表-2, No. 5, 12)のずれ挙動を図-5に示す。また図中の実線は、既往の押抜き試験法によるスタッドのずれ挙動<sup>2)</sup>を表す曲線であり、具体的には式(3)より得られたスタッドの終局強度:  $Q_u$ と鋼とコンクリート間のずれ量:  $\delta$ (mm)から次式のように与えられる。

$$\frac{Q}{Q_u} = \frac{3.15\delta}{1+3.15\delta} \quad (4)$$

引抜き試験法とはり曲げ試験法によるずれ挙動は、式(4)に比して柔な挙動であった。これは、参照値となる押抜き試験法による強度式(3)と変形式(4)が、H型鋼フランジ部という面外変形の生じにくい剛な鋼板に溶接されたスタッドを対象に求められているのに対し、図中の引抜き試験法の S00-B, とはり曲げ試験法の S-C ではスタッドは薄鋼板に溶接され、スタッド基部での鋼板に面外変形が生じ易く、それによりスタッドのせん断抵抗、すなわちずれ剛性が前者より低下することに起因する。

#### 4.2 各種荷重実験下での突起のみの特性

各試験法によるスタッドを併用しない供試体(表-2, No. 1,4,11)のずれ挙動を図-6に示す。いずれの試験法でも突起特有の剛なずれ変形挙動すなわちずれ剛性がほぼ無限大に近く、また最大応力すなわち付着強度到達後、応力値が著しく低下し、最終的に幾らかの残留せん断応力を保持する性状が認められた。縞鋼板のずれ挙動と図-5で示したスタッドのその差異は、前者が最大応力値到達までずれを生じない剛な性状を呈することに対し、後者は数ミリのずれ発生時に最大応力値に達する柔な性状を呈することである。これが、次節で示す両者を併用した場合の強度が両者の各々の強度の単純累加値に達しない原因となる<sup>7,8)</sup>。

なお、押抜き(C-A)ならびに引抜き(C05-B)という直接せん断試験法と、曲げせん断力が作用するはり曲げ試験法(C-C)のずれ挙動の差異が見られるのは、これは前者がずれが発生後も面外変形を拘束することにより接合面に拘束圧が作用しているのに対し、後者はずれの発生後肌離れが生じ、それが作用して

表-2 実験結果一覧

No.	Tag.	Estimated Value		Exp.	Comparison	
		[1] $\tau_b(e)$ (MPa)	[2] $\tau_b(s)$ (MPa)	[3] $\tau_b$ (MPa)	[4] $[3]/([1]+[2])$	[5] $[3]/[1]$
1	C-A	1.93	0.00	1.70	0.88	0.88
2	CS-A	1.93	1.41	1.85	0.56	0.96
3	CS2-A <sup>9)</sup>	2.13	1.48	4.82	1.34	2.27
4	C05-B <sup>9)</sup>	2.33	0.00	2.18	0.94	0.94
5	S00-B <sup>9)</sup>	0.00	0.62	0.71	1.14	-
6	CS00-B	1.33	0.64	0.71	0.36	0.53
7	CS02-B	1.68	0.64	1.59	0.68	0.94
8	CS05-B	2.21	0.64	1.81	0.63	0.82
9	CS10-B	3.10	0.64	3.06	0.82	0.99
10	CS15-B	3.98	0.64	3.45	0.75	0.87
11	C-C <sup>9)</sup>	1.36	0.00	1.40	1.03	1.03
12	S-C <sup>9)</sup>	0.00	1.13	0.74	0.65	-
13	CS-C <sup>9)</sup>	1.36	1.13	1.49	0.60	1.10

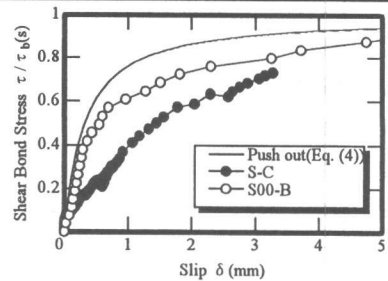


図-5 ずれ挙動(スタッドのみ)

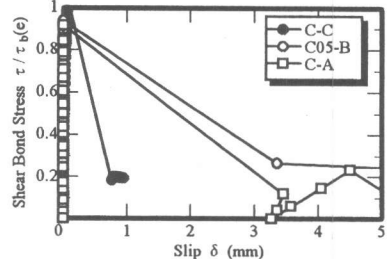


図-6 ずれ挙動(縞突起のみ)

いないことに起因する。また、いずれの試験法においても縞鋼板の付着強度を示す式(1)の適用性も表-2[5]欄に示すように確認できた。

#### 4.3 各種荷重実験下での突起付鋼板—スタッドを併用した場合の特性

##### (1) 破壊モード

引抜き試験法で無拘束の供試体(CS00-B)を除く全ての供試体で、局所的な支圧破壊を伴う付着破壊が

観察された。なお鋼板の降伏はいずれの供試体でも認められず、突起のみと突起とスタッドを併用した場合の破壊形式の差異は認められなかった。

### (2) 付着せん断強度とずれ特性

3種の試験法から得られた作用せん断応力とずれの関係を各々図-7, 8ならびに9の○印で示す。さらに各図に綫突起のみの付着強度(表-2[1])と、スタッドのそれ(表-2[2])を破線で併記した。

図-7より、押抜き試験法で得られたずれ挙動は式(1)の綫鋼板の付着強度(表-2[1])に概ね到達後、突起のみのそれに比して付着強度の低下が少なくスタッドの寄与が認められた。しかし、載荷時において鋼とコンクリートとの間に肌離れが生じ、スタッドがその特性を十分に発揮できず、最終的には式(4)に比して、低強度となった。

その他の試験法でも押抜き試験法同様に突起のみの付着せん断強度が得られていることが理解できる(表-2[5]欄参照)。しかしその後は前例と異なりずれの増加に伴い概ねスタッドの強度に収束していった。すなわちスタッドと突起を併用した場合、スタッドは付着せん断強度向上には寄与しないものの、ずれ発生後の強度低下の防止すなわち変形性向上への寄与が確認できた。

### (3) 複数スタッド併用時の付着せん断強度とずれ特性

片面にスタッドを2本配置した供試体(CS2-A)のずれ特性を図-10に□印で示す。図より、前節(2)と異なりCS2-Aはスタッドを1本配置したCS-Aならびに突起のみの算定付着強度を大幅に上回り、算定上の単純累加強度に達した(表-2[4]欄参照)。

この強度増加がスタッドのずれ止めとしての効果であるのか、あるいは接合面に拘束圧を与える吊り材としての効果であるか考察してみる。図-10を見れば、ほぼずれが発生せずに最大せん断応力に達する綫鋼板特有の挙動と判断でき、それよりスタッドの効用は後者の吊り材すなわち拘束圧の付与と推察できる。また式(1)より、作用した拘束圧を算出すると1.2 MPa程度であった。なお、ずれ発生後はスタ

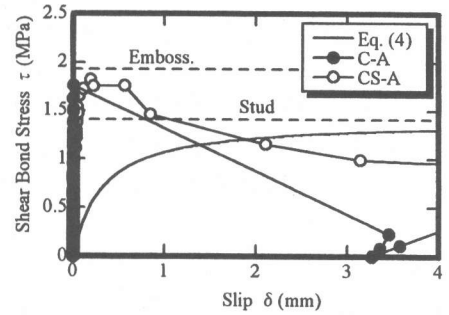


図-7 ずれ挙動(押抜き試験法)

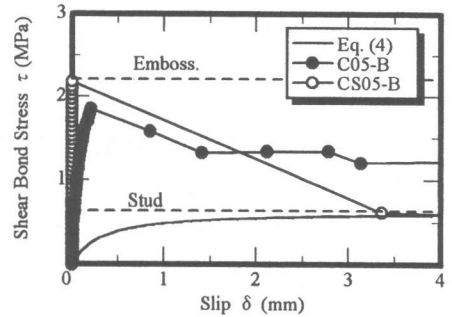


図-8 ずれ挙動(引抜き試験法(σ<sub>0</sub> = 0.5 MPa))

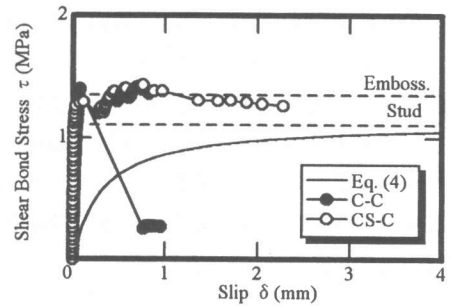


図-9 ずれ挙動(はり曲げ試験法)

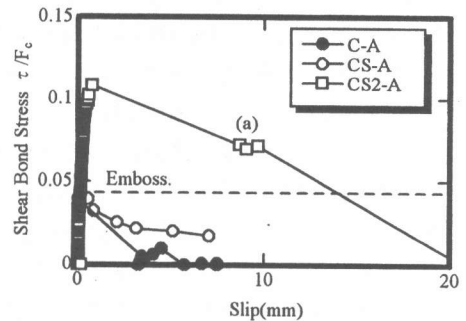


図-10 ずれ挙動(押抜き試験法, スタッド2本)

ッドの柔な挙動は見られず、点(a)においてその破断が観察された。

このように複数本のスタッドを吊り材として適宜配置すれば、接合面に拘束圧を与え突起とスタッドの併用したシステムが有効に機能しうる可能性があると考えられる。

以上、突起付鋼板とスタッドを併用の場合の付着応力-ずれ関係を調べたが、実用しうる付着応力度を規定するずれ量に関する既往の知見を参照すれば、突起付鋼材に対し  $0.05 \text{ mm}^{10}$ 、また RC 部材の異形鉄筋に関して  $0.25 \text{ mm}$  以下<sup>11)</sup>ということを勧告すると、設計における安全率の設定にスタッド同様の方式を準用するか否かはさておき、これらのずれ量以下で最大せん断応力すなわち付着強度に到達するその付着強度そのものが、実践でも活用できるものと考えられる。更にここで調べた付着強度到達以降の挙動は、上記安全率の設定に有用であろう。

#### (4) 各種試験法の実践的な適用範囲

得られた上記の(2)、(3)の結果より、押抜き試験法は実構造物において面外変形が作用しない状況下すなわち圧縮側の合成桁の鋼とコンクリート間の付着挙動を、一方はり曲げ試験法は薄鋼板を用いて面外変形が無視できない部材の引張側の挙動を、そして引抜き試験法は2者を位置づける要因である接合面の拘束度に対する知見を与える基礎的手法として3者3様の用途があると考えられる。

#### 5. 結論

本研究は突起とスタッドを併用した付着せん断システムの評価を押抜き、引抜きならびにはり曲げという異なる3種の試験法を用いて行ったものであり、結論づけられる事項は以下の通りである。

- (1) 引抜きならびにはり曲げ試験法によるスタッドのみのずれ挙動は、従来の押抜き試験法より提案されているずれ曲線と比して柔な挙動を呈した。これはスタッド近傍の薄鋼板の局所曲げひいては接合面拘束度が影響したものと考えられた。
- (2) 突起のみのずれ挙動はいずれの試験法でも算定

付着せん断強度までずれを生じない剛なずれ挙動を呈した。また、はり曲げ試験法でのそれはずれ発生後、押抜き、引抜き両試験法のそれと比して大きな面外変形が発生するため付着せん断応力の低下が著しかった。

- (3) 突起とスタッド1本を併用した場合のずれ挙動より、スタッドは付着せん断強度の向上に寄与しないものの、付着せん断強度到達後にはスタッド特有の柔なずれ挙動を呈し、付着せん断応力の低下の防止すなわち延性の向上が認められた。
- (4) (3)にて得られた破壊形式は引抜き試験法供試体 CS00-Bを除き、橋突起の前者でのコンクリートの支圧破壊が確認された。

謝辞：押抜き実験の実施に関しては近畿大学助教授・柳下文夫先生に多大なご尽力を賜りました。また日本鋼管(株)基盤技術研究所より縞鋼板の提供も受けました。ここに関係者各位に謝意を表す次第です。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：合成構造用鋼材の利用に関する調査研究報告書，pp. 1-149，1993。
- 2) 土木学会：鋼・コンクリート合成構造の設計ガイドライン，pp. 86-96，pp. 176-178，1989。
- 3) 横田他：鋼・コンクリート合成部材での形鋼によるずれ止めの耐荷力，港湾技研資料，pp. 3-24，1987。
- 4) 上田他：形鋼シアコネクタのせん断強度，第2回合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，pp. 149-156，1989。
- 5) 山田他：山形鋼と頭付きスタッドによる合成構造シアコネクタの耐荷力に関する実験的研究，日本コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 14，No. 2，pp. 791-796，1992。
- 6) 上平他：波形鋼板ウェブ PC 橋の鋼板とコンクリート床版の合成手法に関する研究，土木学会第52回年次学術講演会講演概要集，共通セッション，pp. 118-119，1997。
- 7) 園田他：突起付き鋼板のせん断伝達特性に関する系統的研究，土木学会論文集(投稿中)。
- 8) 鬼頭他：オープンサンドイッチ形鋼・コンクリート合成はりにおける突起付き鋼材のせん断付着特性，構造工学論文集，Vol. 44A，pp. 1527-1536，1998。
- 9) Four Recommendations of the RILEM/CEB/FIP Committee III: Bond Test for Reinforcing Steel, Material and Structures, Vol. 3, No. 15, pp. 169-178, 1970.
- 10) 佐藤他：平鋼および突起付き鋼材の付着特性，コンクリート工学年次学術講演論文集，Vol. 2，pp. 365-368，1980。
- 11) 横道他：鉄筋コンクリート工学(第2版)，共立出版，1971。