

(28) 突起付鋼板とコンクリートとの境界面の
付着挙動および付着強度に関する
実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON BOND BEHAVIOR AND BOND STRENGTH OF INTERSECTION
BETWEEN CONCRETE AND ROLLED STEEL PLATE WITH SMALL RIBS

北田俊行^{*}、中井 博^{**}、才村幸生^{***}、吉田康樹^{****}

Toshiyuki KITADA, Hiroshi NAKAI, Yukio SAIMURA, Yasuki YOSHIDA

An experimental study using nine concrete-filled short column specimens with box cross-section was carried out in order to investigate the bond behavior and bond strength at the intersection of the encased concrete and outer rolled steel plate elements with small ribs. Through the experiment, the mean shear stress-slip displacement curves were obtained with parameter of the height of ribs and the transference behavior of the force in the outer steel plate element to the encased concrete is formulated.

1. まえがき

最近、鋼とコンクリートとの合成構造物に用いることを目的に、図-1に示すように、縞状の小さな突起を有する圧延鋼板（突起付鋼板という）の開発が試みられている。突起付鋼板は、その幾何学的形状から、縞突起がコンクリートに対してずれ止めとしての効果を発揮し、コンクリートとの合成構造物に利用すれば、従来の平鋼板を使用した場合に比べて、より合理的な合成構造物を建造することが可能であると考えられる。

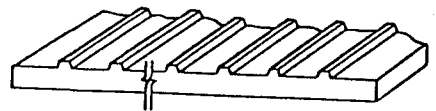


図-1 突起付鋼板の一般形状

このような目的のもとに、文献1)および2)では、突起付鋼板を、それぞれ場所打ち鋼管コンクリート杭および柱継手部に利用した場合の効果を調べるための研究が行われている。

本研究は、突起付鋼板の有効な利用法を検討するための基礎的な研究の一環³⁾として、コンクリートを充てんした角形合成柱の供試体を用いた充てんコンクリートの押し抜き実験および定着長実験を行うことにより、突起付鋼板と充てんコンクリートとの境界面での付着強度、および鋼板要素から充てんコンクリートへの応力の伝達挙動などを実験的研究を通じて明らかにするものである。

*工博 大阪市立大学助教授 工学部土木工学科

**工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科

***工修 住友金属工業(株)

****工修 大阪市立大学大学院 (現 (株)大成建設)

2. 対象とする突起付鋼板の形状

供試体は、図-2に示す2種類の突起付鋼板を用いて製作した。これらの供試体のほか、比較のために、縞突起のない板厚4.5mmの平鋼板を用いた供試体についての実験も行った。

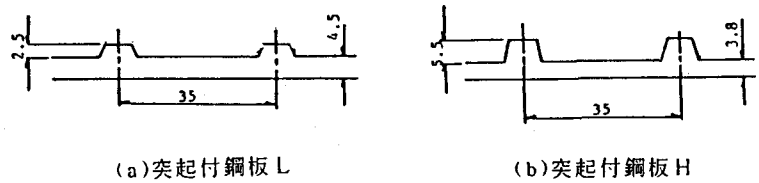


図-2 突起付鋼板の形状寸法

3. 実験供試体および実験方法

鋼板要素と充てんコンクリートとの附着強度を調べるため、図-3に示す装置を用いて押し抜き実験を行った。さらに、鋼板要素から充てんコンクリートへの応力の伝達挙動を調べるため、図-4に示す装置によって定着長実験も実施した。

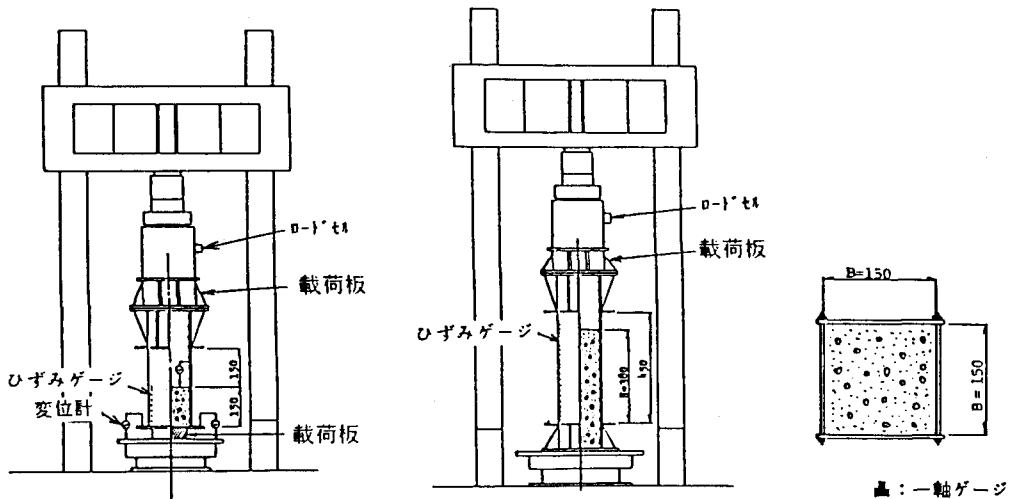


図-3 押し抜き実験の荷重状況

図-4 定着長実験の荷重状況

図-5 断面図

実験供試体の断面は、図-5に示すように、内径15×15cmの正方形とした。突起付鋼板を用いた供試体では、すべて縞突起を供試体の内側で、かつ横方向に配置した。実験に用いた9体の供試体の内訳を表-1に示す。表中の供試体名の記号で、Fは定着長実験用を、Bは押し抜き実験用を、数字15および30は、コンクリー

表-1 附着実験用供試体の一覧

実験の種類	供試体 No.	板厚 (mm)	突起高 (mm)	内径 B (mm)	鋼板 パネル長 (mm)	コンクリート高 H (mm)	充填比 H/B
定着長実験	FL-F	4.5	—	150	450	386	2.57
	FL-L	4.5	2.5	150	450	377	2.51
	FL-H	3.8	5.5	150	450	383	2.55
コンクリート 押し抜き実験	B15F	4.5	—	150	300	160	1.07
	B15L	4.5	2.5	150	300	150	1.00
	B15H	3.8	5.5	150	300	157	1.05
	B30F	4.5	—	150	300	305	2.03
	B30L	4.5	2.5	150	300	300	2.00
	B30H	3.8	5.5	150	300	305	2.03

トの充てん長さ (cm) を、末尾の F、しおよび H は、それぞれ平鋼板、突起付鋼板しおよび突起付鋼板 H を表す。

充てんコンクリートの材料試験結果を、表-2 に示す。

表-2 付着実験用コンクリートの材料試験結果

圧縮強度 f_c (kgf/cm^2)	弾性係数 E_c ($\times 10^5 \text{kgf/cm}^2$)	ポアソン比 ν_c	圧壊ひずみ ($\times 10^{-6}$)
253	2.20	0.173	2050

($1 \text{kgf/cm}^2 = 0.098 \text{N/mm}^2$)

4. 押し抜き実験結果

押し抜き実験によって得られた各供試体の付着強度を、表-3 に示す。ただし、付着強度 τ_b は、次式によって算定した。

$$\tau_b = \frac{N_u}{\psi H} \quad \dots (1)$$

ここに、 N_u : 最大作用荷重

ψ : 充てんコンクリート断面の周長

H : コンクリート充てん長

図-6 には、付着応力-すべり量関係を示す。この図より、突起付鋼板 H を用いた供試体では、付着強度が最も大きく、最大の付着応力の近くまで線形性が保たれているが、最大付着応力を過ぎると付着応力は徐々に低下していくことがわかる。突起付鋼板しを用いた供試体では、突起付鋼板 H の場合に比べて、付着強度が低く、低荷重段階から線形性はないが、最大付着応力を過ぎても付着応力の低下がほとんどないことがわかる。

平鋼板の供試体では、すべり量が約 0.1mm を超えると、鋼板とコン

クリートとの自然付着が切れて急激に滑り出すことがわかる。コンクリートの充てん長さによるすべり挙動の差異は、ほとんどないことがわかる。

表-3 押し抜き実験結果

供試体	コンクリート充 填長 (cm)	最大荷重 (tonf)	付着強度 τ_b (kgf/cm^2)
B15F	15	3.8	4.0
B15L	15	26.0	28.9
B15H	15	37.5	39.7
B30F	30	7.7	4.3
B30L	30	50.5	28.1
B30H	30	65.5	35.8

($1 \text{tonf} = 9.800 \text{N}$, $1 \text{kgf/cm}^2 = 0.098 \text{N/mm}^2$)

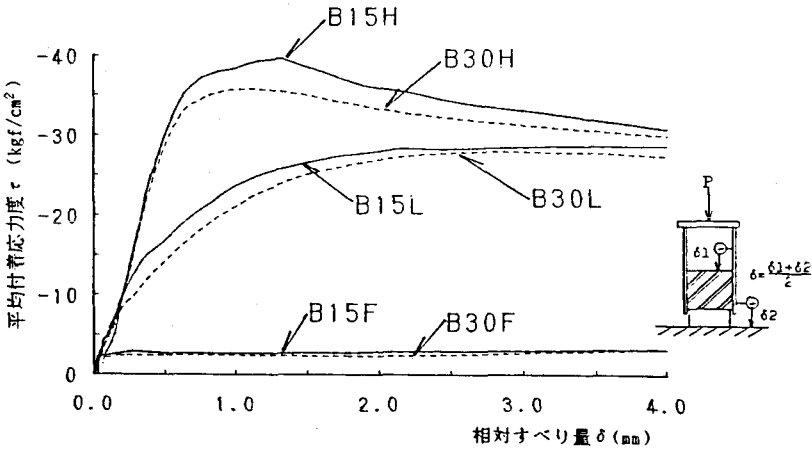


図-6 付着応力-相対すべり量関係

($1 \text{kgf/cm}^2 = 0.098 \text{N/mm}^2$)

5. 定着長実験結果

5.1 鋼板要素の軸方向ひずみ分布

定着長実験によって得られた各供試体鋼板要素の軸方向ひずみ分布を、図-7～図-9 に示す。作用荷重レベルを表すパラメーターは、作用荷重 N を鋼板要素の全塑性軸力 $A_s \sigma_y$ (A_s : 鋼板要素の断面積、 σ_y : 鋼板の降伏点) で無次元化した値 P^* を用いている。

供試体FL-Fでは、鋼板要素
 上端から下端に沿ってのひずみの
 減少率が小さく、鋼板要素からコ
 ンクリート断面には応力がほとん
 ど伝達されていないことがわかる。
 突起付鋼板を用いた供試体では、
 平鋼板に比べて、鋼板要素上端か
 ら下端に沿ってのひずみの減少率
 が大きい。とくに、供試体FL-H
 では、その傾向が顕著に認めら
 れ、突起によるコンクリート断面
 への応力伝達性能が大きいことが
 わかる。

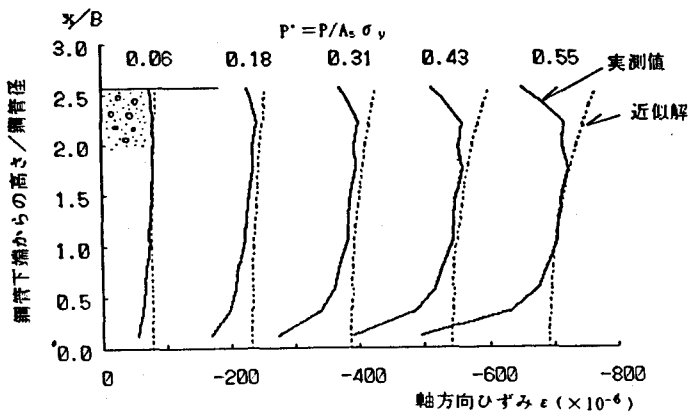


図-7 実験値と近似解との比較 (供試体FL-F)

5. 2 応力伝達挙動の定式化

図-10に示すように、合成柱の
 下端が剛体に固定されており、合
 成柱上端の鋼板要素に引張応力 σ_{s0}
 が作用する合成柱モデルを考える。
 そして、鋼板要素からコンク
 リートへの応力の伝達機構を、以
 下の仮定の基に定式化する。

- (1) 鋼板要素からコンクリートには境界面に生じる付着応力のみに
 よって応力が伝達される。
- (2) このとき、充てんコンクリートは、
 付着応力により、同一断面
 では均等な軸方向応力が発生する
 ものとする。
- (3) 鋼板要素と充てんコンクリートは一軸
 応力状態にあり、弾性挙
 動を示し、フックの法則が成立す
 る。
- (4) 境界面に発生する付着応力は、
 鋼とコンクリートとのずれ量に比
 例する。なお、比例定数である付
 着剛性係数 k は、押し抜き実験の
 $\tau-\delta$ 曲線より求めるものとする。

以上の仮定より、以下の微分方
 程式が導ける。

$$\frac{d^4 u_s}{dx^4} - \lambda^2 \frac{d^2 u_s}{dx^2} = 0 \quad \dots(2)$$

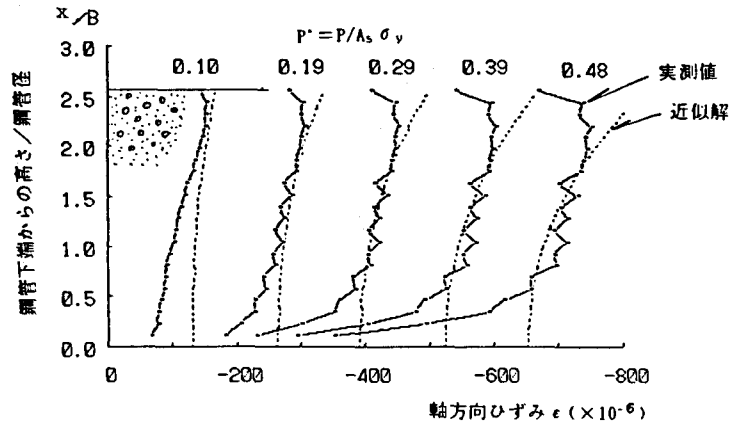


図-8 実験値と近似解との比較 (供試体FL-L)

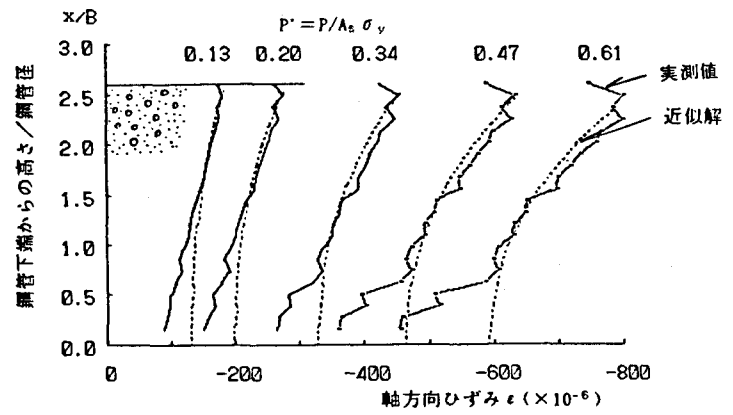


図-9 実験値と近似解との比較 (供試体FL-H)

ここに、 u_s は鋼板要素の軸方向変位であり、 λ^2 は次式で与えられるパラメーターである。

$$\lambda^2 = \frac{t E_s + B E_c / 4}{B t E_c E_s / 4 k} \quad \dots(3)$$

また、 E_s および E_c は、それぞれ、鋼板およびコンクリートのヤング係数である。

式(2)を解いて得られた解析結果を、図-7～図-9に示す。これらの図より、解析によつて求めたひずみ分布は、 $P' < 0.6$ の範囲では、実測結果とよく一致していることがわかる。以上のことから、付着によつて鋼板からコンクリートに応力が伝達される場合、コンクリートの押し抜き実験を行つて付着剛性係数 k を求めれば、そのひずみ分布や定着長を精度よく推定できることがわかった。

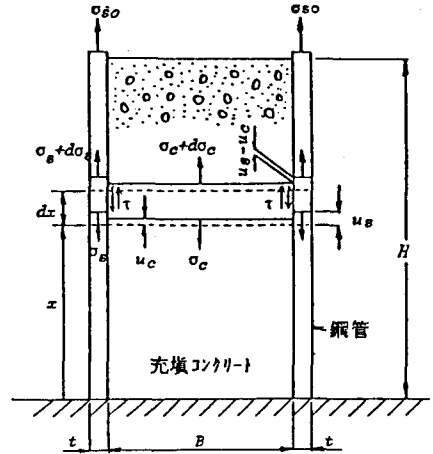


図-10 解析モデル (その1)

5.3 定着長に関する考察

図-11に示すように、実験供試体と同一断面で供試体長 H の長い解析モデルを考える。この合成柱モデルの上端の鋼板要素に力を作用させると、この力は次第にコンクリートにも伝達されてゆき、合成柱下部では、鋼板要素とコンクリートとが一体として働き、ほぼ平面保持が成立する断面が現れるはずである。このような平面保持がほぼ達成される断面が、上端から l の距離にあるものとする。そして、この距離 l を定着長と定義する。

たとえば、部材長 H が鋼板パネル幅 B の100倍であると仮定して前述の解析法を適用すると、各解析モデルの鋼板要素に発生する軸方向応力分布は、図-12に示すようになる。この図からも、突起が大きくなるほど、鋼板要素の応力の減少率が大きくなることがわかる。そこで、ある断面における鋼板要素の応力度が、合成断面とみなした時の応力度の95%になるときのモデル上端からの距離 l を求めると、図-12中の・印のようにプロットされる。この距離 l は、実質的な定着長を意味する。この解析結果によると、実質的な定着長 l は、平鋼板では $8.8B$ 、突起付鋼板しでは $4.8B$ 、また突起付鋼板Hでは $4.2B$ となることがわかる。

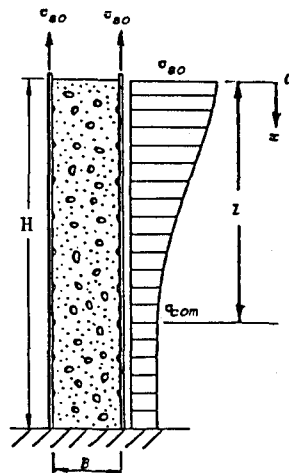


図-11 解析モデル (その2)

6. 押し抜き実験後の充てんコンクリートの破壊状況

平鋼板を用いた供試体の充てんコンクリートには、破壊箇所が認められなかった。突起付鋼板の突起高の違いによる充てんコンクリートの破壊状況は、図-13のようにまとめられる。すなわち、突起付鋼板しを用いた供試体では、断面の隅角部

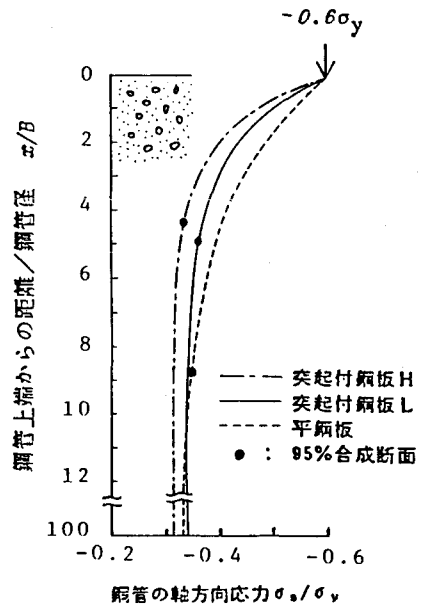


図-12 各供試体鋼板の軸方向応力分布の解析値の比較

周辺の充てんコンクリートは、図-13(a)に示すように、局部圧壊していた。しかし、鋼板パネルの中央部では、鋼板が面外にたわむため、突起部分直下のコンクリートしか破壊せず、その後はコンクリートが突起上を滑っていた。突起付鋼板Hを用いた供試体の鋼板パネルは、突起高が大きく、コンクリートに強固に定着しているため、突起周辺における局部的な破壊は起こらず、突起と突起との間に挟まれたコンクリートが一体となって突起頭部を結ぶ線に沿ってせん断破壊していた。

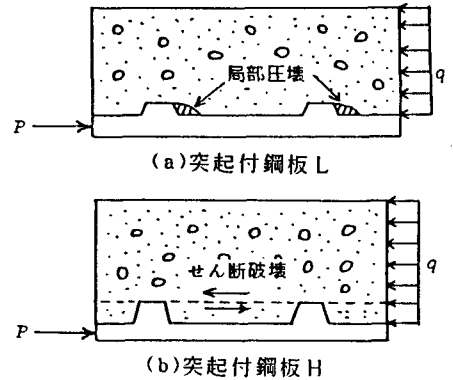


図-13 コンクリートの破壊状況の比較

7. まとめ

コンクリートを充てんした箱形断面鋼製柱の押し抜き実験および定着長実験によって、以下のことが明らかになった。

- 1) 今回用いた供試体鋼板要素の幅厚比 B/t (33~39)の範囲においては、充てんコンクリートに対する最大付着強度は、突起付鋼板Lでは $28\sim 29\text{kgf/cm}^2$ 、また突起付鋼板Hで $36\sim 40\text{kgf/cm}^2$ となった。これは、平鋼板の場合に比して、それぞれ6~7および8~10倍の付着強度となった。
- 2) 付着応力-すべり量関係は、突起が大きいくほど初期剛性が大きく、高い荷重レベルまで線形挙動を示すが、最大付着応力を越えてからの付着応力の低下量は大きくなった。
- 3) 突起付鋼板Lと突起付鋼板Hとの付着挙動の違いは、鋼板突起部に接触する充てんコンクリートの破壊状況に起因していることがわかった。突起付鋼板Hでは突起間に挟まれたコンクリートがせん断破壊したが、突起付鋼板Lでは鋼管隅角部周辺で突起付近のコンクリートが局部圧壊しており、鋼板パネル中央部では、鋼突起が充てんコンクリート表面の凹形の溝から外れていた。
- 4) 定着長実験では、突起が大きくなるほど鋼管からコンクリートへの応力伝達効果が大きいことがわかった。
- 5) 鋼板からコンクリートに応力が伝達される場合、コンクリートの押し抜き実験を行って付着応力とずれ量の曲線を求め、その付着剛性係数 k を求めれば、鋼板内のひずみ分布や定着長を精度よく推定できる評価式を示した。
- 6) 鋼板からの応力をコンクリートに伝達し、95%の合成断面となるのに必要な定着長さは、平鋼板では管径の8.8倍であるが、突起付鋼板Lでは4.8倍、また突起付鋼板Hでは4.2倍であることがわかった。

なお、本研究は、昭和63年~平成元年度の文部省科学研究費一般研究(C)：鋼とコンクリートからなる合成構造物の弾塑性挙動に関する基礎的研究(代表者 北田俊行)の一部として行っているものであることを付記する。

参考文献

- 1) Matsumura, H. and Sakuma, H.: Experimental Study on Strength and Deformation Capacity of Concrete-Filled Steel Pipe with Inner Ribs, 構造工学論文集, Vol. 33B, 昭. 62年3月, pp. 201~210
- 2) 松村弘道・澤田実・佐久間仁: 付着応力伝達による鋼管コンクリート柱の継手, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭和63年10月, pp. 1385~1386
- 3) 吉田康樹・中井博・北田俊行・才村幸生: 鋼鋼板を用いた鋼製角柱および合成角柱の耐力力実験, 土木学会第43回年次学術講演会概要集, 1-102, 昭和63年10月, pp. 258~259