

(29) 突起付鋼板を用いた合成角形短柱の
耐荷力に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON ULTIMATE STRENGTH OF COMPOSITE SQUARE
SHORT COLUMNS USING 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

This paper deals with an experimental study on the ultimate strength of composite square short columns using rolled steel plates with small ribs. Through the tests of four steel short column specimens and five composite short column specimens with various height and arrangement of ribs subjected to compression, the following main conclusions were obtained: (1) The ultimate load of composite short column can be approximately evaluated as the summation of the ultimate load of the outer steel plate element and the squash load of the encased concrete element. (2) The ultimate strength of the composite short column specimen in which the ribs were arranged transversely and inside the column was the largest among the specimens.

1. まえがき

最近、橋脚の断面寸法を縮小させ、しかも地震荷重に対して大きな変形能を持たせるため、橋脚の柱部材として、角形鋼製柱の内部にコンクリートを充てんした合成柱の利用が試みられるようになってきた¹⁾。そして、合成柱の耐荷力に関して実験的研究²⁾や理論的研究³⁾が行われ、それらを基にして設計・施工指針(案)⁴⁾が作成されている。

このような合成柱に活用し得る鋼板として、図-1に示すように、突起付鋼板の開発も試みられている。この種の突起付鋼板を利用すれば、縞状の突起が、ずれ止めとしての効果を発揮することが期待されて、従来の鋼構造物より合理的で経済的な合成構造要素や合成構造部材を開発することが可能であると考えられる⁵⁾。

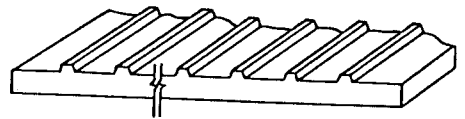


図-1 突起付鋼板の一般形状

本研究は、突起付鋼板を用いた角形合成短柱の耐荷力に与える突起付鋼板とコンクリートとの合成効果について実験的研究を通じて検討したものである。

* 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と材料特性

図-2には、今回用いた2種類の突起付鋼板の断面寸法を示す。これらの突起付鋼板を用いた短柱供試体を製作して耐荷力実験を行った。

また、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耐荷力実験も行った。

引張試験により求めた鋼材の機械的性質を、表-1に示す。表中の“縦縞”および“横縞”は、引張応力を、それぞれ縞突起方向およびそれに直角方向に作用させたことを意味する。突起付鋼板の縦方向と横方向との機械的性質には、有意な差異は認められなかった。

表-1 鋼材の材料試験結果

鋼板の種類		降伏点 σ_y (kgf/mm ²)	引張り強度 (kgf/mm ²)	弾性係数 E_s ($\times 10^6$ kgf/cm ²)	ポアソン比 ν_s	降伏比
平鋼板		2.8	4.6	1.99	0.294	0.61
突起付 鋼板 L	縦縞	3.5	4.2	2.07	0.281	0.83
	横縞	3.6	4.1	2.07	0.287	0.88
	平均値	3.5	4.2	2.07	0.284	0.83
突起付鋼板 H		3.0	4.3	2.18	0.280	0.70

(1 kgf/cm² = 0.098 N/mm²)

3. 純圧縮実験

3.1 実験供試体および実験方法

供試体としては、2種類の突起付鋼板（L、H）と縞の無い平鋼板（F）とを用いた鋼製角柱（S）4体および鋼製柱の中にコンクリートを充てんした合成角柱（C）5体を作製した。そして、図-3に示す載荷方法で純圧縮を与えた。供試体の断面は、すべて図-4に示す大きさに統一した。縞突起の寸法および配置方法による供試体の差異は、以下のとおりである。すなわち、鋼製柱（S）では、図-4(a)に示すように縞突起が縦方向内側（L I、L H）に配置されたもの、図-4(b)に示すように縞突起が横方向内側（T I）に配置されたもの、および縞突起の無いもの（F）を組み合わせた3種類とし、合成角柱では、これらの他に縦縞（L O）と横縞（T O）が外側に配置されたものを組み合わせた5種類とした。これらの供試体の内訳が表-2に示されている。

3.2 充てんコンクリートの機械的性質

充てんコンクリートと同寸法のコンクリートの角柱を作製し、純圧縮実験を行い、その機械的性質を調べた。材料試験結果を表-3に示す。

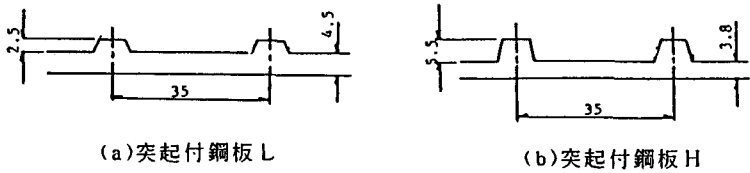


図-2 突起付鋼板の形状寸法

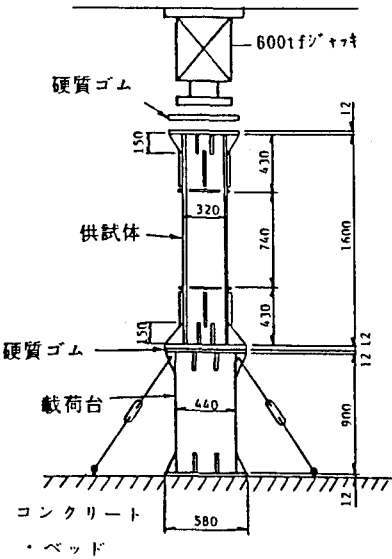


図-3 載荷状況

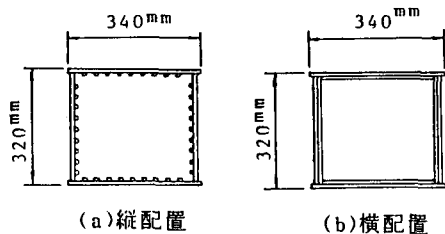


図-4 供試体の断面形状

表-2 実験供試体の内訳と名称

鋼板の種類		鋼製柱	合成柱
平鋼板		S-F	C-F
突起付鋼板 L	縦編	S-L I	C-L I C-L O
	横編	S-T I	C-T I C-T O
突起付鋼板 H	縦編	S-L H	—

I : 編突起内側
O : 編突起外側

表-3 コンクリートの材料試験結果

供試体	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 ($\times 10^{-6}$)
CC1	194	2.51	0.170	1160
CC2	189	2.37	0.192	1200
平均値	192	2.44	0.181	1180

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

3.3 実験結果

(1) 終局強度特性

表-4および表-5には、それぞれ鋼製柱および合成柱の純圧縮実験結果を示す。

図-5には、合成柱の終局荷重 N_{uc} を鋼製柱単体の終局荷重 N_{us} と充てんコンクリートの圧壊荷重 $f_c A_c$ との和として与えられ終局累加荷重($N_{us} + f_c A_c$)で無次元化した値を示す。この図より、合成角柱の終局荷重は、供試体C-TIを除いては、終局累加荷重より約5%増していることがわかる。すなわち、終局累加荷重を用いて合成角柱の終局荷重が精度よく評価できることがわかる。5%の強度増加は、合成柱の鋼板要素の内側への座屈変形が充てんコンクリートにより拘束され、鋼板要素の終局強度が上昇したためと考えられる。その傾向は、編突起を横方向内側に配置した供試体C-TIにおいて最も顕著に現れた。

つぎに、鋼板要素の幅厚比パラメーター R ($= \sqrt{\sigma_y / \sigma_{cr}}$ 、 σ_{cr} : 周辺単純支持の補剛板としての弾性座屈応力度)と鋼板要素の実験終局強度 σ_{us} / σ_y との関係を、図-6にプロットする。黒丸は鋼製柱の終局強度 $N_{us} / \sigma_y A_s$ をプロットし

表-4 鋼製柱の終局強度

供試体	実験値 N_{us} (tonf)	$N_y = \sigma_y \cdot A_s$ (tonf)	$N_{us} / \sigma_y \cdot A_s$
S-F	86.9	160.2	0.542
S-LI	135.2	232.7	0.581
S-TI	129.6	216.1	0.600(0.549)
S-LH	116.2	189.5	0.613

() 内は平均板厚を用いた値
(1tonf = 9.800N)

表-5 合成柱の終局強度

供試体	① 実験値 N_{uc} (tonf)	② $N_{cs} = N_{us} + f_c \cdot A_c$ (tonf)	③ $N_{cy} = \sigma_y \cdot A_s + f_c \cdot A_c$ (tonf)	④ ①/②	⑤ ①/③
C-F	290	272.6	345.9	1.064	0.838
C-LI	339	318.8	416.5	1.063	0.814
C-LO	334	319.7	417.4	1.045	0.800
C-TI	356	314.1	401.8	1.133	0.888
C-TO	336	314.1	401.8	1.070	0.838

ここで、 N_{us} は鋼製柱の終局圧縮力、 f_c はコンクリートの一軸圧縮強度
 A_c 、 A_s はそれぞれコンクリートと鋼の断面積を示す。

(1tonf = 9.800N)

たものであり、白丸は合成柱の終局圧縮力 N_{uc} から充てんコンクリートの圧壊荷重 $f_c A_c$ を差し引いた鋼板要素の受け持つ荷重を鋼板要素のみの降伏軸力 $N_y (= \sigma_y A_s)$ で無次元化したものである。合成柱の板要素の終局強度は、鋼製柱の板要素に比して、上昇するが、供試体C-TI以外は、縞突起があるものと無いもので終局強度には、ほとんど差異がないことが図よりわかる。このことから、合成構造においては、縦縞の効果は、ほとんど発揮されず、縞突起を横方向内側に配置するのが効果的であることがわかる。

(2) 鋼板要素の座屈特性

図-7には、供試体S-TIの中央断面における中央位置での鋼板要素の表裏の軸方向ひずみの挙動を示した。図中の▲印は、弾性座屈に相当する点($\epsilon_{cr} = 927 \times 10^{-6}$)を示している。この図より、実際の鋼板要素の座屈は、理論上の弾性座屈応力の60%程度の応力で発生していることがわかる。これは、初期たわみや、とくに残留応力の影響などに起因するものと考えられる。

図-8には、供試体C-TIの中央断面の荷重-軸方向ひずみ曲線を示す。この図より、合成断面であるこの供試体の鋼板要素の座屈は、理論上の座屈ひずみ $\epsilon_{cr} = 927 \times 10^{-6}$ を上回るひずみ $\epsilon \approx 1100 \times 10^{-6}$ 付近で発生していることがわかる。これは、横方向内側に配置された縞突起が座屈防止に対して有効に働いていたためであると判断される。

(3) 変形能

図-9には、合成柱供試体の荷重と軸方向の平均ひずみとの関係を示している。平均ひずみは、供試体の軸方向変位を供試体長で除したものである。この図に示すように、合成柱

供試体の場合、終局荷重付近で荷重がほとんど低下せず軸方向変位が急増している。すなわち、合成柱を構造物の柱として用いた場合、地震荷重に対して大きな変形能が期待できることがわかる。これに対して鋼製柱供試体の場合には、終局状態直後に急激な荷重の低下現象が認められた。

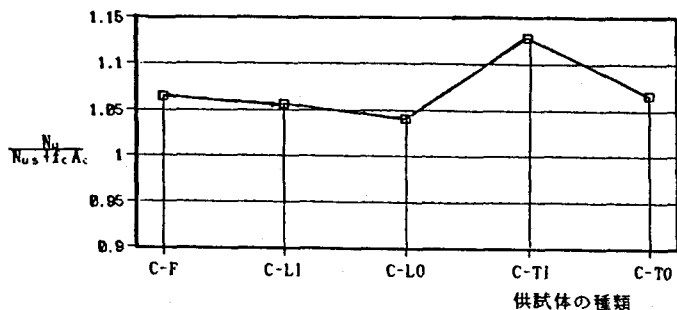


図-5 合成柱の終局強度

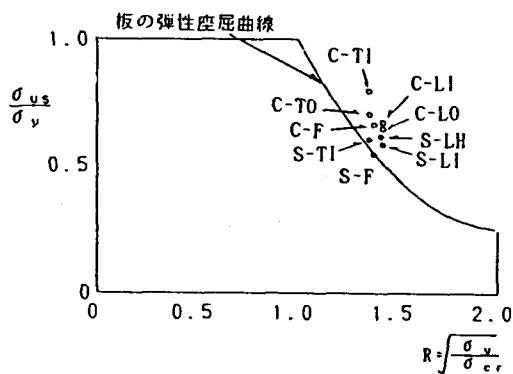


図-6 鋼板要素の終局強度曲線

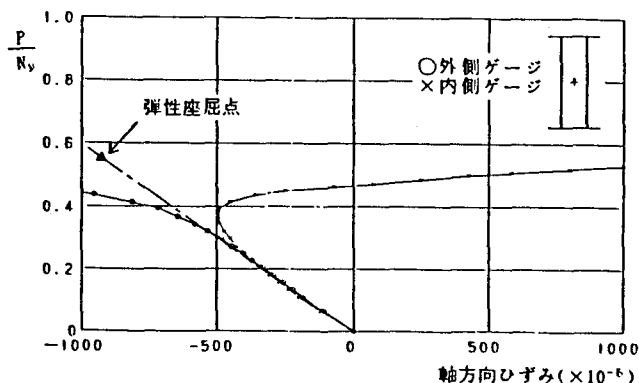


図-7 中央断面の荷重-軸方向ひずみ曲線
(供試体S-TI, D面)

(4) 崩壊状況

鋼製柱供試体の鋼板要素の残留座屈波形は、供試体の中央部分(320×740mm)で、供試体S-F、S-LIおよびS-LHでは一波形、供試体S-TIでは1.5波形となっていた。

合成柱供試体では、鋼板要素が充てんコンクリートによって拘束されるため、たわみは外側にしか発生せず、しかも充てんコンクリートの圧壊部分で大きな残留座屈波形が生じていた。大きな残留座屈波形の長さは150~200mmであった。今回の実験で対象とした合成柱では、鋼板要素より先に充てんコンクリートが圧壊ひずみに達して崩壊し、その後、この部分の鋼板断面の荷重分担率が急増し、この部分の鋼板要素が座屈したものと考えられる。

4. まとめ

平鋼板および突起付鋼板を用いた角形鋼製柱の供試体4体、および、コンクリートを充てんした角形合成柱の供試体5体の純圧縮実験を行い、以下のことが明らかになった。なお、供試体の鋼板要素の幅厚比パラメーターRは約1.4であり、用いた鋼材の降伏点 σ_y は2800~3600kgf/cm²、充てんコンクリートの圧縮強度は192kgf/cm²であった。

- (1) 合成柱の終局荷重は、鋼製柱としての終局荷重と充てんコンクリートの圧壊荷重との和として与える累加荷重で、ほぼ正確に評価することができる。
- (2) 平鋼板、縦突起付鋼板(縦縞を内側および外側に設けた場合)、および横突起付鋼板(横縞を外側に設けた場合)を用いた合成柱の終局強度は、累加強度の5%増しとなったのに対して、縞突起を内側に設けた横突起付鋼板を用いた合成柱の終局強度は、累加強度の10%増しとなった。すなわち、突起付鋼板を角形合成柱に用いる場合には、縞突起を内側横方向に設けるのが最も有効であることがわかった。
- (3) 鋼製柱では、終局状態以降の耐荷力の低下が大きいのに対して、合成柱では、終局状態に至るまでに大きな塑性変形が生じるとともに、終局状態以降の耐荷力の低下量も極めて小さく変形能(ダクティリティ)が極めて大きいことがわかった。
- (4) 鋼製柱の鋼板要素では、初期たわみや残留応力の存在により、理論上の弾性分岐座屈応力よりもかなり低い応力で座屈が発生したが、合成柱の鋼板要素では、理論上の座屈応力よりも大きな応力で座屈が生じた。この傾向は、縞突起を横方向内側に配置した場合に顕著であった。

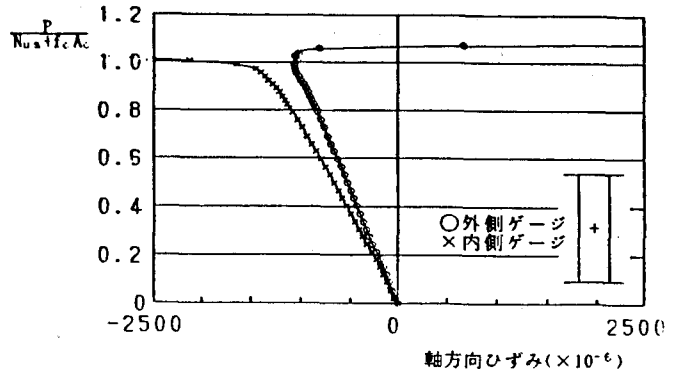


図-8 中央断面の荷重-ひずみ曲線
(供試体C-TI, B面)

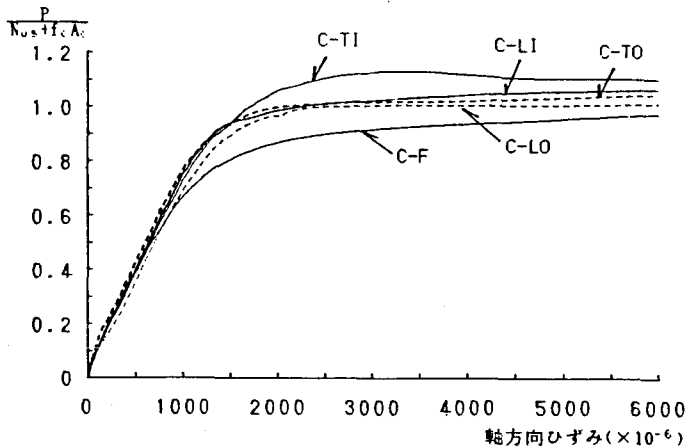


図-9 合成柱の荷重-軸方向ひずみ曲線

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) 中井 博・吉川 紀・山内幸裕・田中実雄・吉田 茂：合成柱（コンクリート充填方法）を有する鋼製橋脚の現場載荷実験、橋梁と基礎、Vol. 21、No. 3、pp. 17～22、1987年3月
- 2) Nakai, H., Yoshikawa, O. and Terada, H.: An Experimental Study on Ultimate Strength of Composite Columns for Compression or Bending, Structural Eng./Earthquake Eng., JSCE, Vol. 3, No. 2, pp. 235～245, October 1986
- 3) 中井 博・北田俊行・吉川 紀：コンクリートを充填した鋼製角形柱の鋼板要素の一設計法、土木学会論文報告集、第356号／1-3、pp. 405～413、1985年4月
- 4) 阪神高速道路公団：合成柱（充てん方式）を有する鋼製橋脚の設計・施工指針（案）、昭和61年3月
- 5) 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、pp. 200～210、1987年3月