

偏心補剛された平鋼圧縮柱の座屈性状に関する実験的研究

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON COMPRESSIVE BUCKLING BEHAVIOR OF PLATE-SECTION COLUMNS WITH ECCENTRIC LATERAL BRACING

金箱 温春^{*1}, 竹内 徹^{*2}, 小河 利行^{*3}, 熊谷 知彦^{*4}
Yoshiharu KANEBAKO, Toru TAKEUCHI, Toshiyuki OGAWA
and Tomohiko KUMAGAI

The authors have clarified the buckling strength of the compressive plate section member with eccentric lateral support by theoretical and numerical analysis. This paper presents the loading test of compressive plate section member with eccentric lateral support. The results of the experimental buckling strength and buckling shape are coincident with the proposal value and the proposal shape in the previous paper. The eccentric lateral support for plate-section column has equal effect to support whole section. This paper also discusses the bracing force of support member compared with the design recommendations.

Keywords : Eccentric Lateral Bracing, Plate-section Columns, Buckling Strength, Lateral Bracing Force, Experiment

偏心補剛, 平鋼柱, 座屈耐力, 補剛力, 実験

1. 序

鉄骨構造物の構造設計においては, 骨組を構成する部材の断面形状の選定が重要な要素の一つである。最近では視覚的要素が部材選定の重要な要素となっている建築も増え, ファサード回りの柱材には, 外形寸法や見付け幅の小さい平鋼が選択される例が増えてきている。平鋼を使用するためには, 経済性が必要以上に悪くなるのを防ぐ意味で, 細長比が過大とならないようにするため, 座屈補剛が重要となる。この場合, 図1(a)のように断面重心でねじれを含めて拘束する方法ではなく, 図1(b)のように部材端部で偏心補剛する使い方がデザインの的に望まれる場合も多い。

補剛材が圧縮部材の座屈変形を完全に拘束するためには, ある一定以上の補剛剛性, 強度を必要とする。これまでに圧縮部材の弾性座屈および弾塑性座屈に関して数多くの研究^{1)~5)}がなされており, 座屈拘束に必要な補剛剛性, 補剛強度が現行の設計規準^{6)~8)}に明記されている。しかし実構造物においては補剛材が必ずしも部材中央に取り付くとは限らず, 材長方向に偏心する場合もある。このような材長方向に偏心して補剛材が取り付けいた場合の研究^{9)~11)}もなされており, 補剛材が座屈変形を拘束するための必要剛性, 強度を明らかにしている。これらの研究では, 圧縮部材の断面重心に補剛材が取り付けくことを前提とした中心補剛であり部材中央における捩れ変形は考慮されていない。

断面的に偏心補剛された圧縮材を対象とする研究として, H形鋼を対象としたものが行なわれているが^{12), 13)}, 平鋼の場合にはH形鋼と大きく異なる性状が報告されている。例えば, 筆者らは,

軸剛性のみを有するつなぎ材により偏心補剛された平鋼を対象として, 軸力及び曲げを受けた場合の座屈耐力に関し, 座屈モードを仮定した理論式を提案し, また, 数値解析によってその性状を検証することにより, H形鋼と異なり, 平鋼柱では曲げ剛性を持たない偏心補剛であっても実用的に使用されるほとんどの範囲で有効であることを示している^{14), 15)}。本論文は実際に偏心補剛された平鋼に静的な軸力及び曲げを加える実験を行い, 座屈耐力, 座屈補剛力の検討及び, 座屈耐力提案式の妥当性を検証するものである。

2. 偏心補剛された平鋼圧縮柱の座屈耐力

2.1 座屈耐力式の誘導

文献15)で示した座屈耐力式を以下に要約して示す。中央で1点を偏心補剛した平鋼柱の弾性座屈耐力を, 2種類の座屈モード

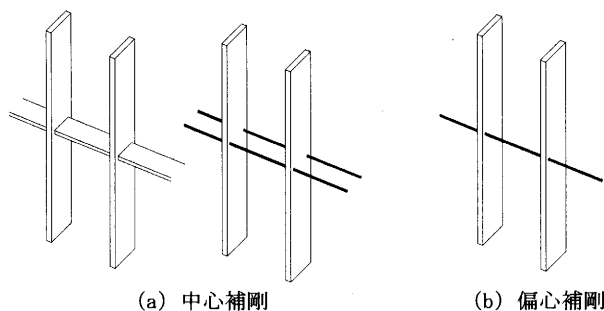


図1 座屈補剛の形式

^{*1} 金箱構造設計事務所 工修

^{*2} 東京工業大学理工学研究科建築学専攻 助教授・博士(工学)

^{*3} 東京工業大学理工学研究科建築学専攻 教授・工博

^{*4} 東京工業大学理工学研究科建築学専攻 助手・博士(工学)

Kanebako Structural Engineers, M. Eng.
Assoc. Prof., Dept. of Arch. and Building Eng., Tokyo Institute of Technology,
Dr. Eng.
Prof., Dept. of Arch. and Building Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
Res. Assoc., Dept. of Arch. and Building Eng., Tokyo Institute of Technology,
Dr. Eng.

に分類して評価する。補剛材は、部材中央で断面重心から $h/2$ 離れた位置にあり、回転剛性は持たず弱軸方向の変位のみを拘束するものとする。補剛材で部材中央を拘束しているにもかかわらず、補剛材の反対側が大きく $\sin$ 半波で座屈するモードを座屈モード1とし、補剛材により十分な補剛効果が得られ、部材全体が $\sin 1$ 波で座屈するモードを座屈モード2とする。

座屈モード1の座屈耐力

図2のように中央拘束点の面外反力を $2F$ とおくと、 x 方向及び振りのモーメントの釣合より以下の方程式が成り立つ。

$$EI_y \frac{d^2 u}{dz^2} + P(u + e\beta) - Fz = 0 \quad (1)$$

$$E\Gamma \frac{d^3 \beta}{dz^3} + (P\rho_0^2 - GJ) \frac{d\beta}{dz} + Pe \frac{du}{dz} + \frac{h}{2} F = 0 \quad (2)$$

ここで、 EI_y : y 軸まわりの曲げ剛性、 P : 圧縮軸力、 u : 部材中央の x 方向変形、 β : 部材の回転変形角、 e : 軸力の偏心距離、 $E\Gamma$: 部材の曲げねじり剛性、 GJ : サンプナンねじり剛性、 ρ_0^2 : (3)式で表わされる断面係数である。

$$\rho_0^2 = \frac{1}{A} \int_A (x^2 + y^2) dA \quad (3)$$

部材重心の水平変形と回転変形を以下のように仮定する。

$$u = \frac{h}{2} \beta_0 \sin \frac{\pi z}{L} \quad \beta = \beta_0 \sin \frac{\pi z}{L} \quad (4)$$

ここで、 β_0 : 材軸中央の回転変形量を示す。

(4)式を用いて、(1)式、(2)式を表記し、 F を消去すると下記の座屈耐力 P_{cr1} を得る。

$$P_{cr1} = \frac{EI_y \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \left(\frac{h}{2} \right)^2 + GJ + E\Gamma \left(\frac{\pi}{L} \right)^2}{he + \left(\frac{h}{2} \right)^2 + \rho_0^2} \quad (5)$$

座屈モード2の座屈耐力

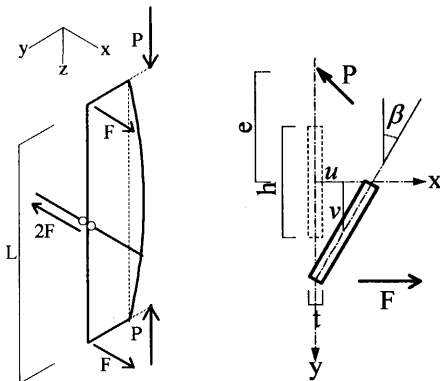
座屈モードを図3のように仮定すると、力の釣合方程式は以下のようなになる。

$$EI_y \frac{d^2 u}{dz^2} + P(u + e\beta) = 0 \quad (6)$$

$$E\Gamma \frac{d^3 \beta}{dz^3} + (P\rho_0^2 - GJ) \frac{d\beta}{dz} + Pe \frac{du}{dz} = 0 \quad (7)$$

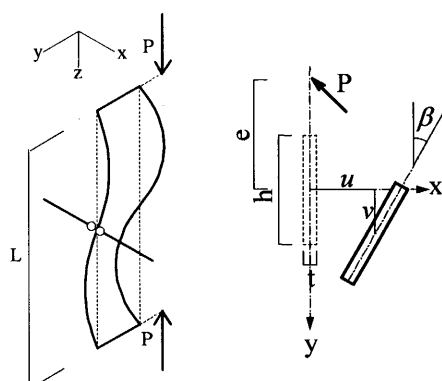
部材中央の x 方向変形と回転変形を以下のように仮定する。

$$u = u_0 \sin \frac{\pi z}{L/2} \quad \beta = \beta_0 \sin \frac{\pi z}{L/2} \quad (8)$$



(a) 仮定した座屈モード (b) 断面モデル

図2 座屈モード1



(a) 仮定した座屈モード (b) 断面モデル

図3 座屈モード2

ここで、 u_0 : 材軸中央の x 方向変形量を示す。

(8)式を用い(6),(7)式に代入し、係数行列式を0とすることにより、以下の安定条件を得る。

$$\begin{vmatrix} (P - P_{ey}) & Pe \\ Pe & \rho_0^2 (P - P_w) \end{vmatrix} = 0 \quad (9)$$

$$\rho_0^2 (P - P_{ey})(P - P_w) - P^2 e^2 = 0 \quad (10)$$

ただし

$$P_{ey} = EI_y \frac{\pi^2}{(L/2)^2} \quad (11)$$

$$P_w = \frac{1}{\rho_0^2} \left(GJ + E\Gamma \frac{\pi^2}{(L/2)^2} \right) \quad (12)$$

以下に示す横座屈モーメントを用い、(10)式を(13)式の2乗で除すると(14)式を得る。

$$M_{ex} = \rho_0 \sqrt{P_{ey} P_w} \quad (13)$$

$$\left(\frac{P}{P_{ey}} - 1 \right) \left(\frac{P}{P_w} - 1 \right) - \left(\frac{Pe}{M_{ex}} \right)^2 = 0 \quad (14)$$

一般的な断面では $P_w > P_{ey} > P$ なので

$$\left(\frac{Pe}{M_{ex}} \right)^2 + \frac{P}{P_{ey}} = 1 \quad (15)$$

これを解くと、座屈モード2の座屈耐力 P_{cr2} を得る。

$$P_{cr2} = \frac{-M_{ex}^2 + \sqrt{M_{ex}^4 + 4(P_{ey} e M_{ex})^2}}{2P_{ey} e^2} \quad (16)$$

$$\text{ただし } e=0 \text{ のとき, } P_{cr2} = P_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(L/2)^2}$$

非弾性座屈領域の座屈耐力

非弾性座屈領域の座屈耐力に関しては、中心圧縮柱で用いられている Johnson 式に準じて以下の式で評価する。

$$P_{cr3} = N_m - \alpha L^2 \quad (17)$$

この耐力曲線は(5)式及び(16)式に対してそれぞれ決定できるが、ここで N_m は偏心軸力下で全塑性状態に至った時の軸力 (図4)、 α は(5)式又は(16)式において

$$P_{cr1,2} = 0.6 N_m \quad (18)$$

に至る限界細長比において、(5)式又は(16)式と交わるように決める。

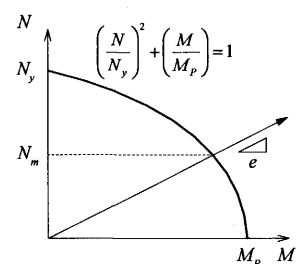


図4 N_m の定義

2.2 平鋼柱とH型鋼柱の座屈性状の違い

小規模の鉄骨建物でマリオンとして使用される部材として平鋼25mm×250mmを想定し、上記の理論式により中心圧縮材の場合と部材せいと同じ距離の偏心を持つ圧縮材の場合について弾性座屈耐力曲線を示すと図5のようになる。図5(a)においては(5)式の値は図中の縦軸より大きいため表現されていない。長さ100mm程度以上の範囲で(16)式が(5)式を下回り、座屈モード2が卓越することになり、中間を座屈補剛された圧縮材の座屈耐力として評価でき、偏心補剛が有効となる。比較のために同じ程度のせいを持つ細幅H形鋼について弾性座屈耐力曲線を示すと図6のようになる。 $L \leq 4000$ (mm)の範囲では座屈モード1の耐力が座屈モード2の耐力を常に下回り、回転剛性のない偏心補剛は有効ではない。これはH形鋼では弱軸方向の断面2次モーメントに比較してねじれ剛性が小さく、片側を拘束した場合でも部材がねじれるように座屈していくのに対し、平鋼では弱軸方向の断面2次モーメントが小さく、オイラー座屈が生じる状況においても相対的にねじれ変形が生じにくいという断面形状の特性によるものである。したがって、偏心補剛された平鋼圧縮材の座屈性状はH形鋼と異なり、補剛材に回転剛性が無くても、実用的に用いられるほとんどの範囲で補剛の効果が有効となる。文献15)では、文献12)で提案されている偏心補剛されたH形鋼の座屈耐力式と、文献15)で提案している平鋼の座屈耐力式とが、それぞれの断面形状を考慮すると同様の結果となることを示している。

3. 偏心補剛された平鋼柱の圧縮実験の概要

本章では、前章で検討した部材中央を偏心補剛された平鋼圧縮柱を実際に製作して圧縮荷重実験を行い、その座屈性状を確認することにより、提案した耐力式の妥当性を検証する。

3.1 試験体

試験体一覧を表1に、試験体に用いる鋼材の試験片による引張試験結果を表2に示す。試験体形状は前章で検討した平鋼25mm×250mmを想定し、その半分のスケールのAタイプ(12mm×125mm)と、比較のため設定した幅広で板厚が薄く座屈モード1が発現するBタイプ(6mm×250mm)の2種類とし、長さを500mm, 1000mm, 2000mmの3種類を、また、軸圧縮力の偏心量を0mmと62.5mmの2種類として計画した。試験体長さは上下の実験治具の回転中心間の距離としている。さらに比較のため、座屈補剛を行なわない試験体(ANタイプ)も計画した。試験体長さより求めた板厚方向の細長比は145～578の範囲にある。

3.2 荷重装置

試験体の端部治具

図7に荷重装置の全景を示している。アムスラー型試験機を用い、試験体両端部の支持条件を理論式と一致させるため、2方向にピン支持となる端部治具を用いて荷重を行なっている。治具の構成は図8に示すように、まず試験体をボックス状の治具Aに挟み込んで固定し、この治具の長手の両端面のプレートに穴を設け、ベアリングを介して外側を覆うように設けられる治具Bに取り付ける。治具Bは長手の両端面及び短手の両端面に穴が設けられ、短手両端面のプレートでベアリングを介して外側のコの字型の治具Cに取り付けられている。治具Aの内側

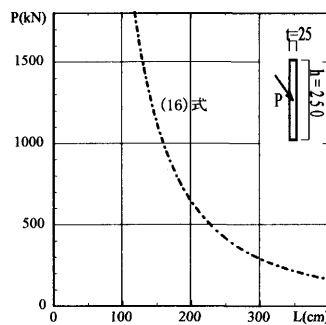


図5(a) 平鋼中心圧縮柱の弾性座屈耐力

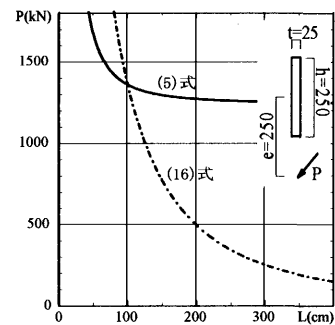


図5(b) 平鋼偏心圧縮柱の弾性座屈耐力

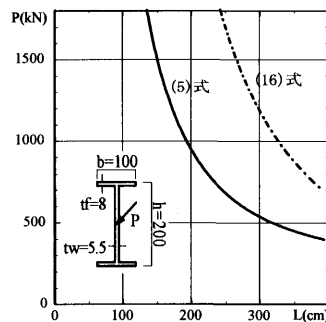


図6(a) H型鋼中心圧縮柱の弾性座屈耐力

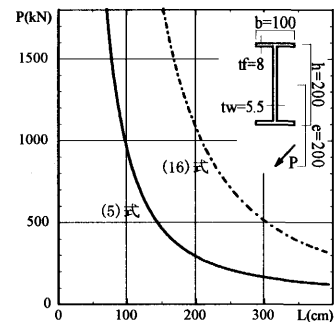


図6(b) H型鋼偏心圧縮柱の弾性座屈耐力

表1 試験体一覧

名称	厚さ (mm)	幅 (mm)	長さ (mm)	細長比	加力点	座屈補剛
A-50-0	12	125	500	145	中心	有
A-100-0			1000	289		
A-200-0			2000	578		
A-50-6.25	12	125	500	145	62.5mm 偏心	有
A-100-6.25			1000	289		
A-200-6.25			2000	578		
B-50-0	6	250	500	289	中心	有
B-100-0			1000	578		
AN-50-0	12	125	500	145	中心	無
AN-100-0			1000	289		
AN-200-0			2000	578		
AN-100-6.25	12	125	1000	289	62.5mm 偏心	無
AN-200-6.25			2000	578		

A-50-6.25

軸力偏心距離
試験体長さ

A:FB-12×125, B:FB-6×250, AN:FB-12×125 補剛なし

表2 素材引張試験結果

試験体名称	規格	ヤング係数E	降伏応力 σ_y	引張強さ σ_u	降伏歪 ε_y
		(N/mm^2)	(N/mm^2)	(N/mm^2)	(%)
A,ANタイプ(t=12mm)	SM490A	203	383	559	0.189
Bタイプ(t=6mm)	SM490A	204	387	558	0.190

で試験体の厚さ方向を両端から留めつける拘束ねじを設け、位置調整をこのねじによって行ない、試験体に荷重不整がなるべく生じないように芯の調整を行なうとともに、試験体は製作時に生じた不整以外は初期不整は与えないようにした。治具AとBを接続するベアリングにより試験体の弱軸(Y軸)方向の回転が可能となり、治具BとCを繋ぐベアリングにより試験体の強軸(X軸)方向の回転が可能となる。

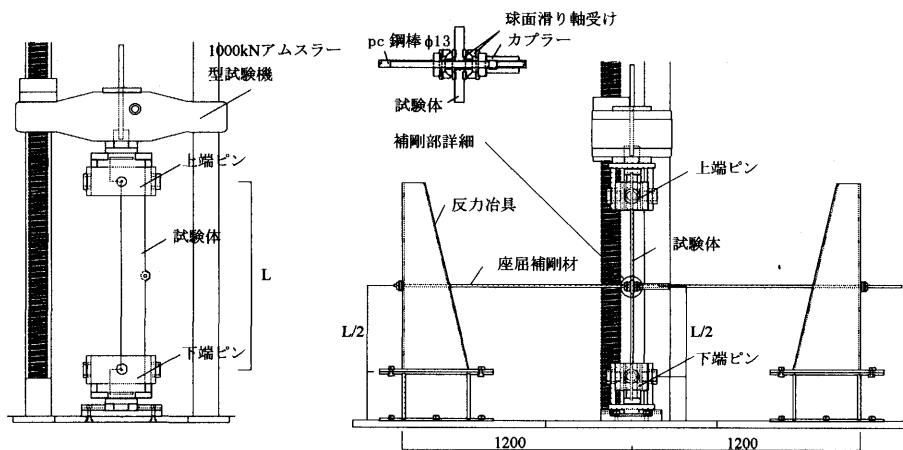


図7 荷重装置

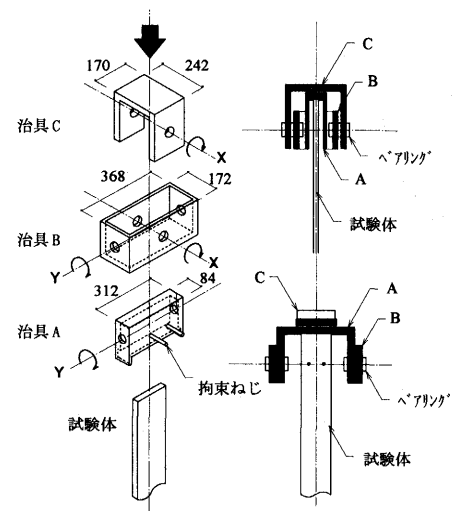


図8 端部治具
(寸法の単位はmm)

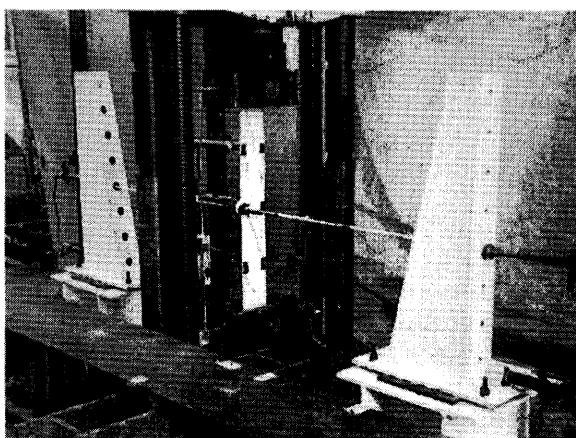


写真1 座屈補剛装置

座屈補剛装置

座屈補剛材は試験体の長さ方向の中央の位置で縁に丸穴を開け、そこに回転自由な接合金物を介して丸鋼を取り付け、丸鋼を両側の拘束治具に取り付けている。反力治具は偏断面のボックス状の片持ち柱とし、試験体と反対側に丸穴を開け丸鋼を支持する。補剛材は試験体の両側に設けているが、丸鋼に圧縮力が作用したときはボックス柱との接合部分が離間するため、圧縮力は発生せず、補剛力は常に片側の丸鋼に引張り力として生じるようにする。丸鋼やボックス柱の断面は、理論的に必要とされる座屈補剛剛性が十分に確保できるよう決めている。写真1に補剛材の取付け状況を示す。

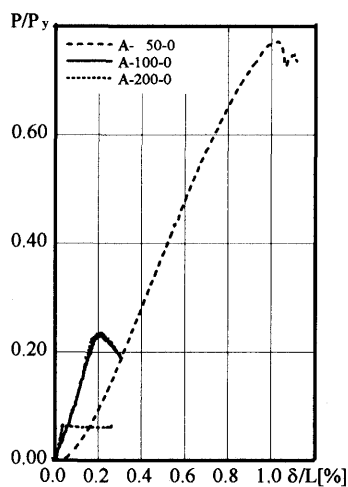


図9(a) A-L-0
荷重 - 軸方向変位関係

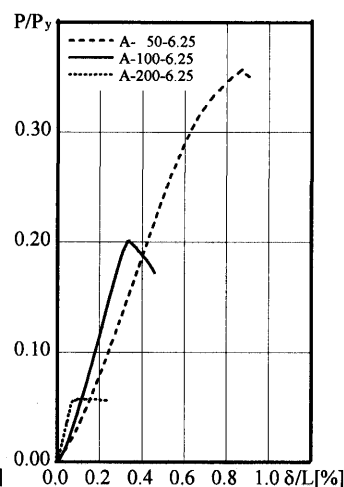


図9(b) A-L-6.25
荷重 - 軸方向変位関係

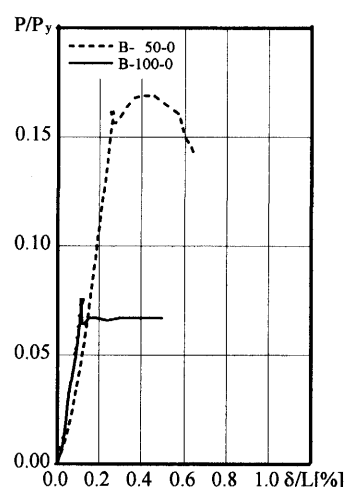


図9(c) B-L-0
荷重 - 軸方向変位関係

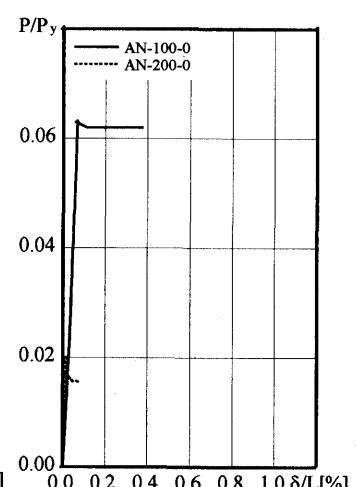


図9(d) AN-L-0
荷重 - 軸方向変位関係

縮力は発生せず、補剛力は常に片側の丸鋼に引張り力として生じるようにする。丸鋼やボックス柱の断面は、理論的に必要とされる座屈補剛剛性が十分に確保できるよう決めている。写真1に補剛材の取付け状況を示す。

文献15)において補剛材剛性を数値解析で検討した結果、偏心補剛の場合は鋼構造限界状態設計指針で示されている必要補剛剛性の2倍以上の剛性が必要であるとの結果が得られている。本実験の補剛装置では、最も小さいものでも指針で示されている必要値の6倍以上の剛性が確保できていることが確認された。

4. 偏心補剛された平鋼柱の座屈性状

4.1 圧縮柱の耐力と変形状

軸力と試験体の軸方向変位の関係を、試験体の形状と軸力の偏心量ごとにタイプ分けしたものを図9(a)～(d)に示す。最大耐力に達するまで、荷重と軸変形の関係はほぼ線形の関係にある。B-50-0のみモード1で座屈し、他の試験体は全てモード2で座屈した。最大耐力後は、A-200-0, A-200-6.25, AN-100-0, AN-200-0, B-100-0の試験体では耐力を維持したまま軸変形が進むが、他の試験体では最大耐力後すぐに荷重低下が見られ

る。前者の試験体は座屈時に部材が弾性域にあり、荷重が一定のままで面外変形を生じることにより幾何学的に軸方向変形が進むためと考えられる。

図 10 (a)～(d)に A タイプの 500mm と 2000mm, B タイプの 500mm と 1000mm の試験体について、座屈発生後と実験終了時の補剛側と非補剛側の面外変形の状況をそれぞれ示す。補剛側の

試験体中央部は端部より 45mm の位置で、それ以外の補剛側、非補剛側は試験体端部より 30mm の位置で計測した変位である。図中のプロットした点が実験結果であり、点線は最大変位を振幅とする sin 曲線を示したもので理論式誘導時に仮定した変形モードを示している。B-50-0 以外の試験体は補剛側、非補剛側とも同じ方向にほぼ同じ量だけ変形しており、特に座屈発生直後は sin 曲線にほぼ対応した変位状況で、部材全体が中央で拘束された座屈モードを示しており、図 3 で想定した座屈変形モードと対応している。但し、A-50-62.5 の試験体等、実験終了時に補剛側、非補剛側の座屈波形の形が異なるものも見られた。B-50-0 の試験体の変形性状は、補剛側は部材全長にわたつ

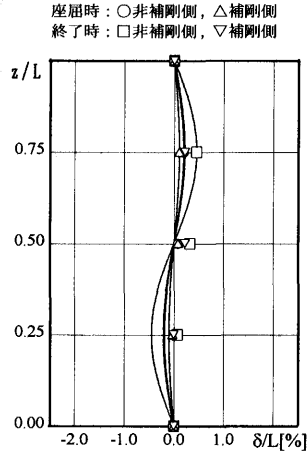


図 10 (a) A-50-6.25 面外変形

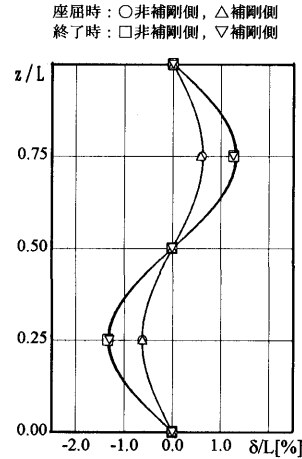


図 10 (b) A-200-6.25 面外変形

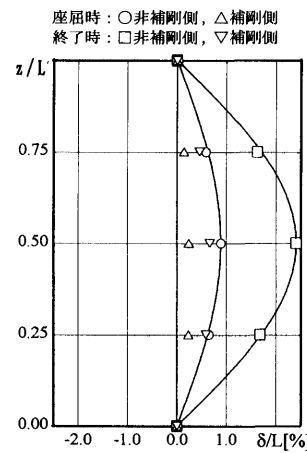


図 10 (c) B-50-0 面外変形

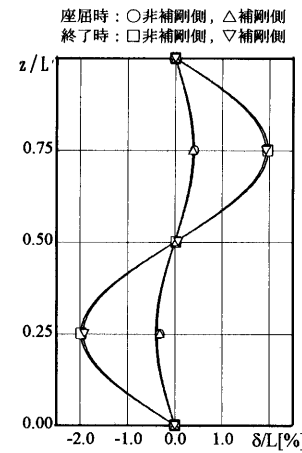


図 10 (d) B-100-0 面外変形

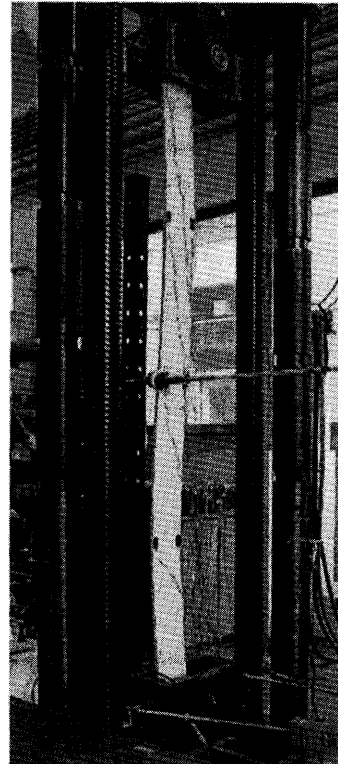


写真 2 A-200-6.25 座屈変形性状

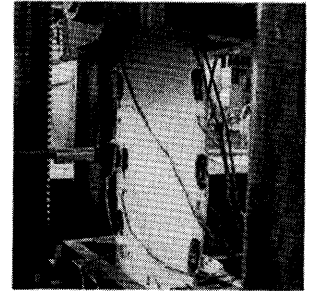


写真 3 B-50-0 座屈変形性状

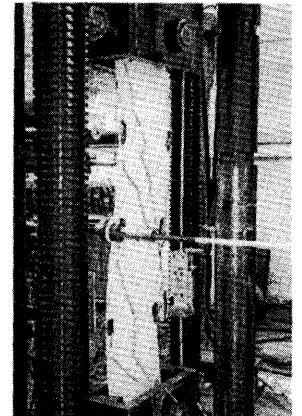


写真 4 B-100-0 座屈変形性状

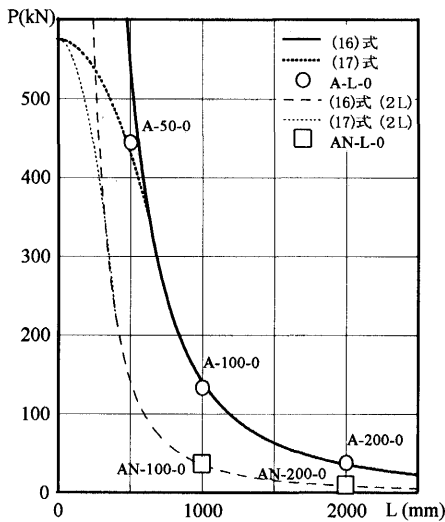


図 11 (a) A-L-0, AN-L-0
座屈荷重 - 材長関係

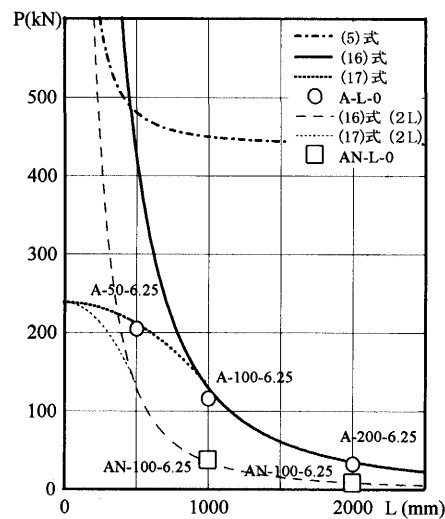


図 11 (b) A-L-6.25, AN-L-6.25
座屈荷重 - 材長関係

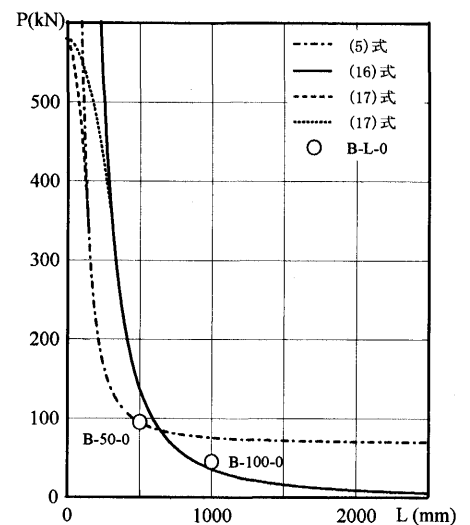


図 11 (c) B-L-0 座屈荷重 - 材長関係

てほとんど変形を生ぜず、非補剛側が全体で $\sin$ 半波の座屈変形となり、図 2 で想定した座屈変形モードと対応している。図 9 (c) で補剛側に変形が示されているが、計測位置が部材端部より内側にあるためであり、両側の変形を直線近似して部材端での変形を求めるとほとんどゼロとなっている。写真 2 ～ 4 に代表的な試験体の最大変形時の状況を示す。

4.2 座屈耐力の理論値との比較

表 3 に実験から得られた各試験体の座屈耐力を、図 11 (a) ～ (c) に各試験体の最大耐力と部材長さの関係を試験体タイプごとに示す。図中の曲線はねじれ変形（モード 1）によって決まる座屈耐力を評価した (5) 式、補剛位置を支持点としたオイラー座屈（モード 2）で決まる座屈耐力を評価した (16) 式、及び弾塑性座屈耐力を評価した (17) で示される座屈耐力曲線であり、実験値を○印で示している。A タイプについては無補剛の場合も合わせて□印で示しており、この時に曲線は試験体全長での弾性座屈耐力曲線及び弾塑性座屈耐力曲線である。A-200-0 や A-200-6.25 の試験体は (16) 式で評価される領域に、また。A-100-0, A-50-0, A-100-6.25, A-50-6.25 など (17) 式で評価される領域にあり、それぞれ実験で得られた座屈耐力結果と提案式はほぼ一致している。B-50-0 の試験体はねじれを伴う座屈モード 1 による (5) 式の耐力式で決定される領域にあり、実験で得られた座屈耐力と提案式はほぼ一致している。総じて、座屈耐力は (5), (16), (17) 式の最小値で評価できると考えられ、理論式からの展開による提案式や数値解析結果とよい一致を示している。

4.3 補剛力、補剛剛性

表 3 に実験より得られた補剛力を実験結果の座屈耐力で無次元化したものを示す。図 12 は補剛力と圧縮力の関係を示したもので、補剛力は実験により得られた座屈耐力、圧縮力は降伏荷重で無次元化している。図中の▼印は最大荷重点を示す。A-50-6.25 の試験体は最大荷重点時の補剛力は極めて小さく約 0.16% であったが、他の A タイプの試験体は 0.5 ～ 1.5% と分布している。文献 11) では補剛材剛性比（実際の補剛材剛性と

必要補剛材剛性の比）が 1.0 から 4.0 までについて検討されており、剛性比が大きくなると 2% から 3% までになったと報告されている。今回の試験では補剛材剛性を十分に大きくとっていることと、試験体に初期不整を与えていないことより、文献 11) の報告に比べて全体的に小さくなったものと考えられる。

文献 13) の H 形鋼を対象とした実験においても、補剛力は限界状態設計指針で示されている 2% より小さな値となることが報告されており、本実験と同様の結果となっている。

なお、A-200-0 や A-200-6.25 などの試験体では座屈耐力に達してから荷重がほとんど一定値を維持するため、最大荷重の判定が難しいが、一般的に極めて小さい補剛力で荷重が一定値の領域に達する。非補剛側のみが面外変形をした B-50-0 の試験体では最大耐力時の補剛比は 0.5% であった。

4.4 偏心補剛された平鋼柱の許容圧縮耐力

本実験及び既報の数値解析結果より、偏心補剛された平鋼柱の座屈を考慮した許容圧縮耐力式について提案する。(16) 式は、部材長の半分を座屈長さと考えた場合の座屈耐力式であるので、補剛区間長を座屈長さと考え、鋼構造設計規準で示されている圧縮材の弾性もしくは弾塑性座屈耐力を評価する。この際に (5) 式の座屈耐力式が上記の耐力を上回ることを確認する必

表 3 圧縮柱の最大耐力と補剛材の補剛力

試験体名称	①実験値 P_{max} (kN)	②理論値 P_{cr} (kN)	①/②	補剛力 F (kN)	F/P_{max} (%)
A-50-0	444	438.0	1.01	2.934	0.661
A-100-0	133	145.0	0.92	1.986	1.489
A-200-0	36	36.0	1.00	0.041	0.115
A-50-6.25	204	212.5	0.96	0.280	0.137
A-100-6.25	116	132.5	0.88	1.053	0.909
A-200-6.25	32	35.3	0.91	0.267	0.827
B-50-0	95	95.9	0.99	0.574	0.603
B-100-0	39	36.3	1.07	0.414	1.074
AN-100-0	36	36.1	1.00	-	-
AN-200-0	9	9.0	1.00	-	-
AN-100-6.25	37	35.3	1.05	-	-
AN-200-6.25	8	9.0	0.89	-	-

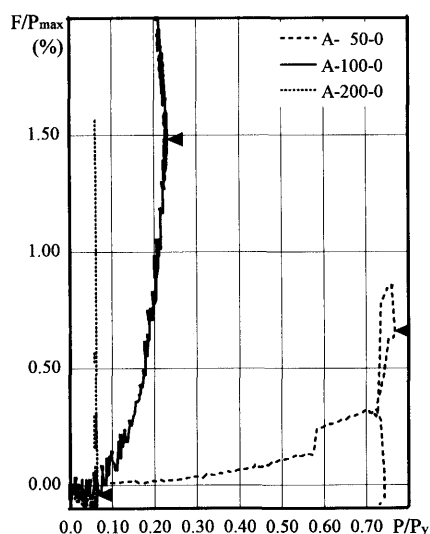


図 12 (a) A-L-0 補剛力 - 圧縮力関係

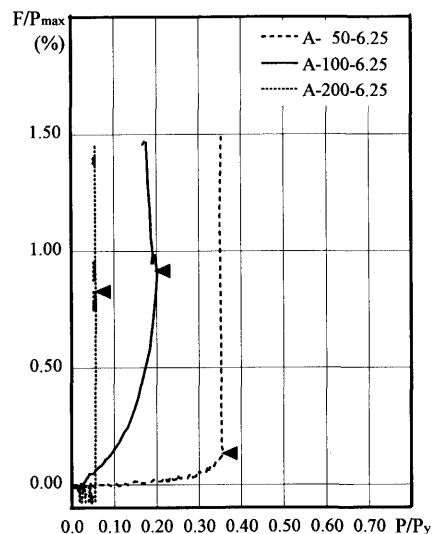


図 12 (b) A-L-6.25 補剛力 - 圧縮力関係

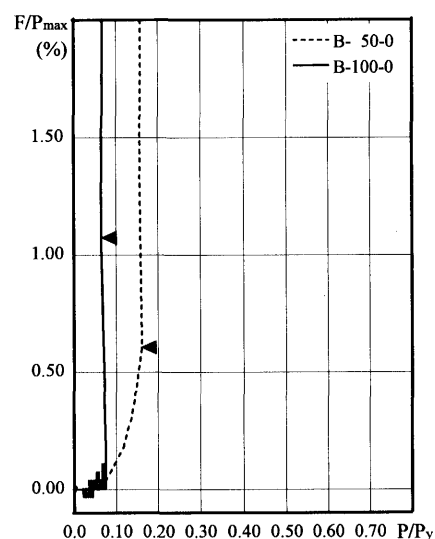


図 12 (c) B-L-0 補剛力 - 圧縮力関係

要があるが、中心圧縮の平鋼断面に限定すると、板厚を t 、せいを h として以下の式で表現できる。

$$\rho_0^2 = \frac{1}{12}(h^2 + t^2), J \cong \frac{1}{3}ht^3, I \cong 0 \text{ を (5) 式に適用して}$$

$$P_{cr4} = \frac{E \frac{h t^3}{12} \left(\frac{\pi}{L}\right)^3 + \frac{8}{3} G \frac{t^3}{h}}{\frac{\pi}{L} + \frac{1}{3} \left(1 + \frac{t^2}{h^2}\right)} \quad (19)$$

(19) 式を設計規準に定められている長期許容座屈耐力 P_a と比較する場合には、安全率を考慮して以下の式で座屈モード 1 に対する長期座屈耐力を決定する。 λ は限界細長比を示す。

$$\lambda \leq \lambda : P_a = \frac{P_{cr4}}{\left\{ \frac{3}{2} + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\}} \quad (20)$$

$$\lambda > \lambda : P_a = \frac{P_{cr4}}{\left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2} \quad (21)$$

荷重偏心等、曲げが伴う場合にも (5) 式に同様の安全率を適用することで設計に使用できると考えられる。

5. 結

本研究では、軸剛性のみを有する補剛材により偏心補剛された、板厚方向の細長比 145 ～ 578 の平鋼柱に圧縮力と曲げを載荷する実験を行い、その座屈耐力を筆者らが提案した評価式と比較したものである。以下に得られた結論を記す。

- 1) 本実験では、試験体両端部で 2 方向の回転を許容した状態で、偏心圧縮軸力を試験体に加力可能な載荷治具を考案した。この実験装置により、試験体の座屈後の変形が座屈耐力を誘導した理論式の変形性状と一致することが確認できた。
- 2) 実験結果より、軸剛性のみを有する補剛材により偏心補剛された圧縮材の座屈耐力や変形性状は、提案した理論式及び仮定した座屈モードとほぼ対応している。この座屈耐力式は二つの弾性座屈モードに対応した耐力式、またこれらの弾塑性座屈耐力式 (5), (16), (17) 式の最小値として評価できる。
- 3) 提案式および実験結果より、H 型断面と異なり、平鋼柱に対しては回転剛性の無い偏心補剛が有効な範囲が広く、ほとんどの実用的な範囲で、断面全体が補剛された部材と同様に考えて、補剛されたスパンを座屈長さと考え座屈耐力を算定することができる。適用できる範囲の確認としては、補剛材の剛性が十分に大きいこと及び、(5) 式で計算される座屈耐力が補剛を考慮して求めた座屈耐力を上回っていることが確認できる範囲であればよい。
- 4) 初期不整をできる限り生じないように実験を行なった結果、座屈補剛力は、部材形状や長さ、荷重の偏心の有無によらず、圧縮部材の座屈耐力のおおよそ 0.5 ～ 1.5% であり、現行の設計指針^{7), 8)}で示されている補剛力より小さい値を示した。しかし、実際の構造物では施工時に生じる不整が想定され、設計上より大きな補剛力を見込む必要があると考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたりご協力いただきました、新日本製鐵、木村功氏ならびに東京工業大学、小形信太郎氏・真木英二郎氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) 横尾義貴, 若林実, 上田憲司: 圧縮材の支点の補剛について, 日本建築学会論文報告集, No. 89, pp. 105, 1963. 9
- 2) 最相元雄, 田中尚, 高梨晃一, 宇田川邦明: 圧縮材の横補剛について, 日本建築学会論文報告集, No. 184, pp. 73 ～ 79, 1971. 6
- 3) 松井千秋, 村松弘道: 圧縮材の支点補剛に関する研究 (その 1 弾塑性解析), 日本建築学会論文報告集, No. 205, pp. 23 ～ 29, 1973. 3
- 4) 松井千秋, 村松弘道: 圧縮材の支点補剛に関する研究 (その 2 矩形断面材に関する実験的研究), 日本建築学会論文報告集, No. 208, pp. 15 ～ 21, 1973. 6
- 5) 小野徹郎, 石田交広, 下野耕一: 限界状態を考慮した鋼構造圧縮部材及び曲げ材の補剛に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No. 469, pp. 117 ～ 125, 1995. 3
- 6) 日本建築学会: 鋼構造座屈設計指針・同解説, 1996
- 7) 日本建築学会: 鋼構造限界状態設計指針・同解説, 1998
- 8) 日本建築学会: 鋼構造設計規準・同解説, 2005
- 9) 辻文三, 西川大介: 圧縮材の構造特性に及ぼす偏心補剛材の剛性・強度, 鋼構造論文集, Vol. 4, No. 15, pp. 63 ～ 70, 1997. 9
- 10) 深尾英邦, 森野捷輔: 中間に座屈補剛支点を有する圧縮材の弾塑性挙動と必要補剛剛性, 日本建築学会構造系論文集, No. 528, pp. 151 ～ 157, 2000. 2
- 11) 深尾英邦, 桑田志都子, 森野捷輔, 川口淳: 中間に弾性補剛ばねを持つ圧縮材の弾塑性挙動に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, No. 530, pp. 171 ～ 176, 2000. 4
- 12) 木村祥裕, 小河利行: 偏心補剛された H 形鋼圧縮部材の座屈荷重と必要補剛剛性, 日本建築学会構造系論文集, No. 574, pp. 213 ～ 218, 2003. 12
- 13) 木村祥裕, 小河利行, 正岡典夫, 山下哲郎: 偏心補剛された H 形鋼圧縮部材の必要補剛剛性と必要補剛耐力, 日本建築学会構造系論文集, No. 585, pp. 207 ～ 213, 2004. 11
- 14) 小形信太郎, 金箱温春, 竹内徹, 小河利行: 偏心補剛された平鋼圧縮柱の座屈性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 787 ～ 788, 2004. 8
- 15) 金箱温春, 竹内徹, 小河利行, 小形信太郎: 偏心補剛された平鋼圧縮柱の座屈性状, 鋼構造論文集, Vol. 12, No. 45, pp. 147 ～ 153, 2005. 3
- 16) F. Bleich: Buckling Strength of Metal Structure; McGraw-Hill, 1952

付 1

本論で紹介した座屈耐力は、ポテンシャルエネルギーの停留条件からも求めることができる。例えば図 2 の部材における全ポテンシャルエネルギーは文献 16) より下式で表現できる。

$$U = \frac{1}{2} \int_0^L \left[EI_y u''^2 + E\Gamma \beta'^2 + GJ \beta'^2 - Pu'^2 - 2Peu' \beta' - P\rho_0^2 \beta'^2 \right] dz \\ = \int_0^L g(u', u'', \beta', \beta'') dz \quad (\text{付 1})$$

式 4) より関数 u は関数 β で直接的に表現できるので、エネルギーの停留条件は Euler-Lagrange の方程式より、

$$-\frac{d}{dz} \frac{\partial g}{\partial \beta'} + \frac{d^2}{dz^2} \frac{\partial g}{\partial \beta''} \\ = \left[\left\{ EI_y \left(\frac{h}{2} \right)^2 + E\Gamma \right\} \beta'' \right]' - \left[\left\{ GJ - P \left(\frac{h}{2} \right)^2 - 2Pe \left(\frac{h}{2} \right) - P\rho_0^2 \right\} \beta' \right]' = 0 \quad (\text{付 2})$$

式 (付 2) に (4) 式を代入することにより、(5) 式が求まる。

(2005年11月9日原稿受理, 2006年4月7日採用決定)