

軸方向圧縮力と曲げを受ける長方形断面合成柱の一耐荷力解析*

AN ANALYSIS ON ULTIMATE STRENGTH OF CONCRETE FILLED RECTANGULAR STEEL TUBULAR COLUMNS SUBJECTED TO COMPRESSION AND BENDING

中井 博**・吉川 紀***・古田秀博****

By Hiroshi NAKAI, Osamu YOSHIKAWA and Hidehiro FURUTA

The ultimate strength of concrete filled rectangular steel tubes under the combined actions of axial compressive forces and bending moments, so-referred to as the composite beam-columns, is analyzed on the basis of computer program by using CDC method. In this method, both the initial imperfections such as residual stress and initial deflection of steel tubular plates and the non-linear behaviors of steel plates and encased concrete materials are exactly taken into the considerations. Through the various numerical calculations, the properties and variations of ultimate strength for the composite beam-columns due to initial imperfections, cross-sectional configurations, slenderness parameters, load contribution factors between steel and concrete as well as applied load ratio are inquired. Based upon these parametric analyses, the approximate and practical interaction curves between applied axial compressive force and bending moment are investigated and their validities are checked in comparison with the design codes of DIN 18806 and BS 5400 Part 5.

Keywords: composite beam-column, ultimate strength analysis, steel bridge pier, design criterion

1. ま え が き

鋼管にコンクリートを充填した合成柱は、強度と剛度が単なる鋼管柱よりも大きく、さらに地震時におけるダクティリティーの大きい構造物を建設することが可能である。そのため、文献1)で詳しく述べられているように、従来より主に建築構造物や送電鉄塔に利用されてきた。しかし、土木構造物の分野では、地下鉄駅舎の柱やごく限られた構造物に採用されてきているに過ぎなかった。

ところが、最近、高速道路やモノレールの橋脚に合成柱を活用するために活発な研究が行われるようになったが^{2),3)}、建築構造物⁴⁾や送電鉄塔⁵⁾等とは異なり、使用断面寸法および作用断面力も大きいため、まだ検討を加えなければならない点が多々ある。そのうち最も重要な問題は、軸方向圧縮力と曲げモーメントとを受ける合成柱の耐荷力をどのように評価するかということである。こ

種の耐荷力算定法には、DIN 18806⁶⁾やBS 5400 Part 5⁷⁾の基準にみられるような相関曲線式やわが国の建築学会の鋼管コンクリート構造計算規準で示されている累加強度式が挙げられる。

しかしながら、DIN 18806の合成柱設計基準では、短柱の軸方向圧縮力と曲げモーメントに関する相関曲線を基本とし、長柱の場合には全体座屈を考慮してその相関曲線を図式的に補正するという方法をとっている⁸⁾⁻¹¹⁾。そして、BS 5400 Part 5では、軸方向圧縮力の影響を差引き曲げモーメントに対する照査式で設計を行う指針が示されているものの、理論的なバックグラウンドが難解である。また、わが国の建築学会の規準は耐荷力を便宜上弾性的に取り扱っており¹²⁾、いずれもそれぞれ一長一短がある。

そこで、軸方向圧縮力と曲げモーメントを同時に受ける合成柱の耐荷力を調べるため、Von Kármán¹³⁾によって開発されたはり-柱の基礎微分方程式を数値積分法を利用して解析するCDC法(Column Deflection Curve Method)を用いてパラメトリック解析を行う。本文では、まず初期不整の影響を知り、ついで細長比 l/r 、鋼管の荷重分担率 δ および断面形状 b/h 等の耐荷力に及ぼす影響を詳しく調べる。ここでは、長柱も短柱も同一の表現の相関曲線を用いて表わすことを目的としてお

* 本論文の要旨は第40回土木学会年次学術講演会で発表済み、I-478、昭和60年9月。

** 正会員 工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科 (〒558 大阪市住吉区杉本3-3-138)

*** 正会員 工修 阪神高速道路公団大阪第一建設部設計課長 (〒559 大阪市住之江区北加賀屋2-11-8)

**** 正会員 工修 (株)横河技術情報システム開発部第一課 (〒108 港区芝浦4-3-4)

り、全体座屈の影響が入らず、断面の応力分布が明確な短柱の相関曲線を基本とし、それを決定づけるパラメーターと鋼管の荷重分担率との関係を調べ、設計に利用できる近似式を検討する。

さらに、軸方向圧縮力、軸方向圧縮力と一軸曲げおよび軸方向圧縮力と二軸曲げとが作用するケースについての合理的な耐荷力算定式を導く。そして、これらが実設計に使えることを、DIN 18806 や BS 5400 Part 5 の基準との比較を通じて明らかにする。なお、繰返し荷重作用については、じん性の問題になる¹⁴⁾ので、今後の問題としたい。

2. CDC 法による耐荷力のパラメトリック解法

(1) 対象合成柱と解析法

合成柱には円形断面のものがあるが、本文では図-1に示す長方形断面の合成柱に限定して解析する。

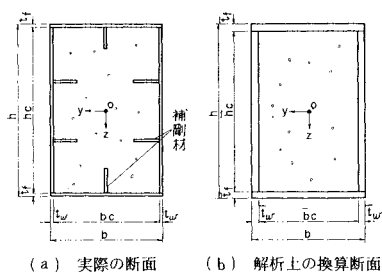


図-1 解析の対象とする合成柱断面

ここに、 b, b_c ：それぞれフランジ幅および充填コンクリートの幅

h, h_c ：それぞれ腹板深さおよび充填コンクリートの深さ

t_f, t_w ：それぞれ鋼管のフランジおよび腹板の板厚

しかしながら、図-1(a)の断面について忠実な耐荷力解析を行うのは煩雑であるので、元の断面を図-1(b)の断面に置換する。すなわち、

$$\bar{t}_f = t_f + iA_{rs}/b, \quad \bar{t}_w = t_w + jA_{ws}/h_c \dots \dots \dots (1 \cdot a, b)$$

：それぞれ鋼管のフランジおよび腹板の換算板厚

i, j ：それぞれフランジおよび腹板に取り付けられた補剛材の本数

A_{rs}, A_{ws} ：それぞれフランジおよび腹板に取り付けられた補剛材 1 個の断面積

および、

\bar{b}_c, \bar{h}_c ：それぞれ充填コンクリートの換算幅および深さ

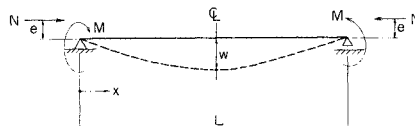


図-2 合成柱部材への軸方向力と曲げモーメントとの載荷方法

一方、合成柱は両端が単純支持されているものとし、それに軸方向圧縮力 N と曲げモーメント M とが、図-2に示すように比例して載荷するものとする。

ここに、 N ：作用軸方向圧縮力

e ：軸方向圧縮力の偏倚量

$M = Ne$ ：作用曲げモーメント

L ：部材長

w ：最大初期たわみ

このような長方形断面を有する合成柱の耐荷力を、文献13) および文献15)~17) で詳しく述べられているCDC法を用いて解析する。その際、解析上の仮定のみを列記すると、以下のようである。

- ① 合成柱断面は一定で、荷重はスパン中央に対して対称に作用する。
- ② 鋼と充填コンクリートとは変位の適合条件を満足し、ひずみは平面保持の法則に従って分布するものとする。
- ③ 鋼は完全な弾塑性挙動を呈し¹⁸⁾、コンクリートは文献19)に示す曲線に従うものとする。
- ④ 鋼管の局部座屈および充填コンクリートのせん断破壊は生じないものとする。
- ⑤ 鋼管内の残留応力分布は、模型実験等から得られた実測値をモデル化したものを用いる^{16), 20)}。
- ⑥ 初期たわみ量はスパンの0および1/500とし、その形状はsin波形と仮定する。
- ⑦ 合成柱は軸方向に沿っていくつかの要素に分割し、各要素中央断面における内力と外力とが釣り合うものとする。
- ⑧ 引張領域におけるコンクリート断面は無視する。

(2) 解析パラメーター

耐荷力相関曲線に影響を与える材料(鋼材、コンクリート)、初期不整(残留応力、初期たわみ)および形状寸法(断面形状、鋼管の荷重分担率、長方形断面における縦横比、部材長)に着目して解析を行った。これら解析に用いたパラメーターは、文献21)の実績調査結果を参考にして決めたが、それらを表-1に示す。ただし、表中、軸方向圧縮力のうち鋼管が受け持つ荷重分担率 δ は、まず

$$N_{s,p} = \sigma_y A_s, \quad N_{c,p} = \sigma_{ck} A_c \dots \dots \dots (2 \cdot a, b)$$

：それぞれ鋼管および充填コンクリートの圧壊荷重

表一 解析パラメーターの組合せ

項 目	パラメーター
鋼材の降伏点 σ_y (Mpa)	$\frac{K_y}{cm^2}$ [2,400], 3,600, 4,600 [235.4], (353.0), (451.1)
コンクリートの圧縮強度 σ_{ck} (Mpa)	$\frac{K_y}{cm^2}$ [240], 270, 300 [23.5], (26.5), (29.4)
残留応力 σ_{rc} (Mpa)	0, $0.3\sigma_y$, $0.5\sigma_y$
初期たわみ w_1	0, $L/500$
断面形状 b/h	0.5, 1.0, 1.5, 2.5
鋼管の荷重分担率 δ	0, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9
細長比 λ/r	30, [65], 90, 100

□ 内の値はパラメトリック解析をする場合の基準値を示す。

$$A_s = 2(b\bar{t}_f + \bar{h}_c\bar{t}_w), A_c = \bar{b}_c\bar{h}_c \dots (3 \cdot a, b)$$

とし,

$$N_p = N_{s,p} + N_{c,p} \dots (4)$$

とすれば,

$$\delta = \frac{N_{s,p}}{N_p} = \frac{2\sigma_y(b\bar{t}_f + \bar{h}_c\bar{t}_w)}{2\sigma_y(b\bar{t}_f + \bar{h}_c\bar{t}_w) + \sigma_{ck}\bar{b}_c\bar{h}_c} \dots (5)$$

で与えられる。

なお、コンクリートの圧縮強度 σ_{ck} と鋼の降伏点 σ_y との比を γ とすれば、 γ と δ との関係は、次式で与えられる。

$$\gamma = \frac{\sigma_{ck}}{\sigma_y} = \frac{2(b\bar{t}_f + \bar{h}_c\bar{t}_w)(1-\delta)}{\bar{b}_c\bar{h}_c\delta} \dots (6)$$

次に、解析結果の整理をする際、表一中の細長比 l/r のほかに、以下の無次元化細長比 λ を用いることとする。

$$\lambda = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E_s}} \cdot \frac{l}{r} \dots (7)$$

ここに、 E_s : 鋼のヤング係数

$$l = \phi L: \text{部材の有効座屈長}$$

で、有効座屈長係数 ϕ はわが国の道路橋示方書 (JSHB)²²⁾ によるものとする。

$$\gamma = \sqrt{I_v/A_v} \dots (8)$$

$$A_v = A_s + A_c/n, I_v = I_s + I_c/n \dots (9 \cdot a, b)$$

: それぞれ合成柱断面を鋼に換算した断面積および断面二次モーメント

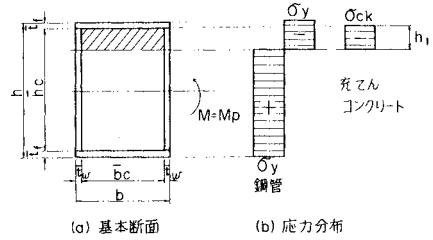
$$I_s = \frac{b\bar{t}_f}{2} (\bar{h}_c + \bar{t}_f)^2 + \frac{\bar{t}_w\bar{h}_c^3}{6}, I_c = \frac{\bar{b}_c\bar{h}_c^3}{12} \dots (10 \cdot a, b)$$

: それぞれ鋼管および充填コンクリートの断面二次モーメント

$$n = E_s/E_c \dots (11)$$

: 鋼のヤング係数 E_s とコンクリートのヤング係数 E_c との比

さらに、任意の軸方向圧縮力 N と曲げモーメント M とが作用する合成柱の耐荷力を CDC 法で解析した結果は、それぞれ合成柱の圧壊荷重 N_p および曲げモーメン



図一 全塑性モーメント M_p とそれによる応力分布

トのみが合成柱に作用するときの全塑性モーメント M_p とで無次元化し、 $N/N_p \sim M/M_p$ 相関曲線として表わすことにする。全塑性モーメント M_p は、図一より

$$M_p = \sigma_y W_p \dots (12)$$

で与えられる。ただし、充填コンクリートが圧縮応力 σ_{ck} を受けて鋼管と協力する深さ h_1 は、

$$h_1 = \frac{2\bar{h}_c}{4 + \gamma \cdot \bar{b}_c/\bar{t}_w} \dots (13)$$

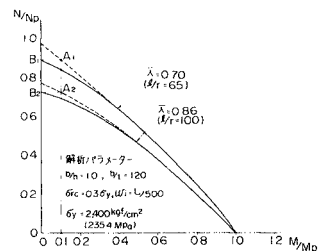
であり、全塑性断面係数 W_p は、次式で求められる。

$$W_p = \bar{h}_c\bar{t}_w(\bar{h}_c - h_1) + b\bar{t}_f(\bar{h}_c + \bar{t}_f) \dots (14)$$

3. パラメトリック解析結果とその考察

(1) 鋼管と合成柱との耐荷力の差異

まず、CDC 法の妥当性を確認するため、長方形断面を有する鋼管の耐荷力を計算する。その一例を図一4中の点線の曲線で示す。その際、これらの $N/N_p \sim M/M_p$ 相関曲線は、以下のように安全側になるよう修正を施した。すなわち、曲げモーメントがごく小さい範囲の合成柱の耐荷力を CDC 法で求めるのは収束性の点で検討すべき点があったこと、また特に曲げモーメントが小さく、 $M/M_p \leq 0.1$ の場合には中心圧縮力を受ける柱として耐荷力を評価したため、 $M/M_p = 0.1$ の線と点線で示す相関曲線との交点 A_1 あるいは A_2 に相当する N/N_p の値をこのような場合の柱の耐荷力とした。次に、 A_1 あるいは A_2 を平行移動して N/N_p 軸上に B_1 あるいは B_2 を定めた。そして、この B_1 あるいは B_2 を通るように元の点線の曲線を二次曲線と仮定し、最小二乗法で回帰し、このようにして得られた実線の曲線を最終的な耐荷力曲線とした。



図一 鋼断面のみの場合の細長比による相関曲線の求め方

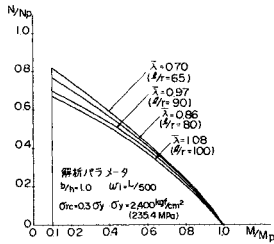


図-5 鋼断面のみの場合の細長比による
相関曲線の変動（補正後）

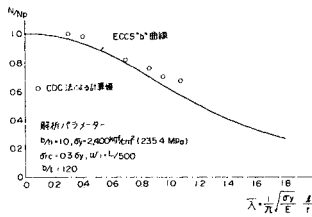


図-6 ECCS の“b” 曲線と CDC 法による解析結果との比較

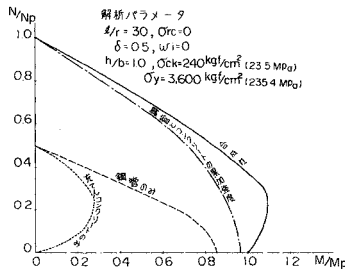


図-7 鋼とコンクリートとの合成効果の変動

図-5 はそれらを例示したものであり、当然、適用範囲は、

$$0.1 < M/M_p \leq 1.0 \dots\dots\dots (15)$$

である。

ところで、 $M=0$ のときの N/N_p の値（図-4 の B_1 、 B_2 など）と無次元化細長比 $\bar{\lambda}$ との関係についてプロットし、ECCS の耐力曲線“b”²³⁾ と比較したものを図-6 に示す。この図より、今回の CDC 法による解析結果には以上のような修正が施してあるが、ECCS の“b” 曲線より若干高い値を示しており、全体の傾向もよく一致しているといえる。このことから、上述のような方法で求めた合成柱の圧縮耐力曲線の妥当性が認められたと思われる。

次に、鋼管と充填コンクリートとの合成効果を評価するために、鋼管断面のみ、充填コンクリートのみおよび合成柱とみなした場合の解析結果を、図-7 に示す。この図から、合成柱はそれぞれ単独の柱の耐力曲線を重ね合わせたものよりも相当に大きな耐力力を有している

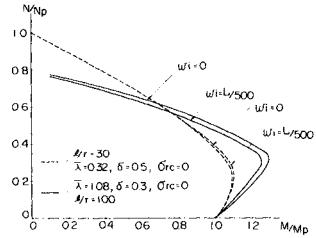


図-8 初期たわみ w_i による相関曲線の変動

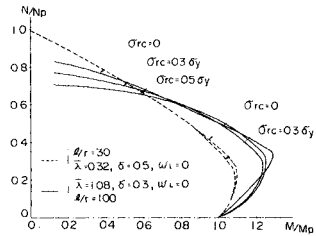


図-9 残留応力 σ_{rc} による相関曲線の変動

ことがわかった。したがって、合成柱では、鋼管と充填コンクリートとが完全に一体化するように、ジベルまたは両端に強固なダイヤフラムを入れて両者がずれないように配慮する必要がある。

(2) 初期不整が耐力力に及ぼす影響

まず、表-1 の基準値を用い、 $l/r=30, 100$ および $\delta=0.3, 0.5$ に対して最大初期たわみを $w=0$ あるいは $L/500$ と変動させたときの相関曲線を図-8 に示す。この図から、初期たわみを JSHB の製作基準の許容値の 2 倍の値 $L/500$ にしても、耐力力の変動はかなり小さいことがわかる。長方形断面の鋼管柱では溶接 1 桁のように初期たわみに敏感でない。これは、合成柱ではコンクリートの関与が大であるためであるとする。

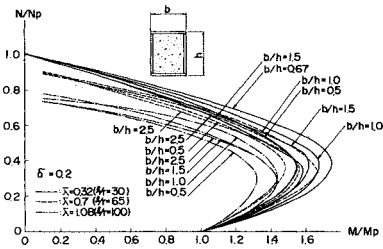
一方、表-1 の基準値を用い、 $l/r=30, 100$ および $\delta=0.3, 0.5$ に対して残留応力 $\sigma_{rc}/\sigma_y=0, 0.3$ あるいは 0.5 とした場合の計算結果を図-9 に示す。ここでも上述の場合と同様、合成柱ではコンクリートの関与により、残留応力が耐力力に及ぼす影響は少ない。

(3) 荷重分担率、細長比、断面形状が耐力力に及ぼす影響

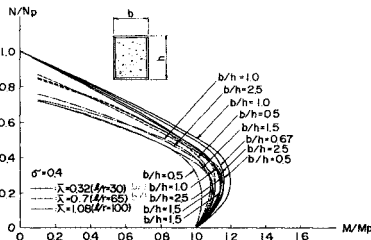
初期不整と材料強度として表-1 の基準値を用い、 $\delta, l/r, b/h$ を種々変化させた場合の耐力力相関曲線を、図-10~13 に示す。

これらの図から、荷重分担率 δ 、細長比 l/r および断面形状 b/h の耐力力に及ぼす影響について個別に考察すれば、以下のとおりである。

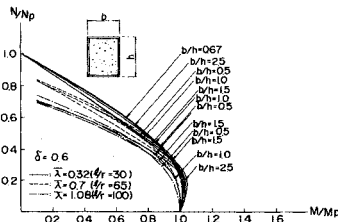
a) 鋼管の荷重分担率の影響 鋼管の荷重分担率 δ の耐力力に及ぼす影響を代表的な場合について例示すると、図-14 が得られる。この図より、部材長および部



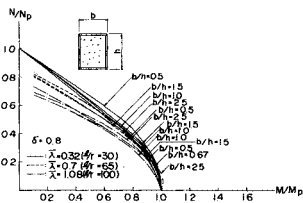
図—10 断面形状 b/h と細長比 λ による相関曲線の変動 ($\delta = 0.2$)



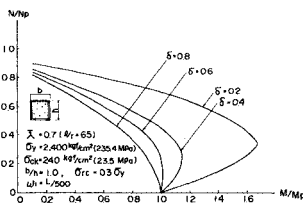
図—11 断面形状 b/h と細長比 λ による相関曲線の変動 ($\delta = 0.4$)



図—12 断面形状 b/h と細長比 λ による相関曲線の変動 ($\delta = 0.6$)



図—13 断面形状 b/h と細長比 λ による相関曲線の変動 ($\delta = 0.8$)



図—14 鋼管の荷重分担率 δ による相関曲線の変動

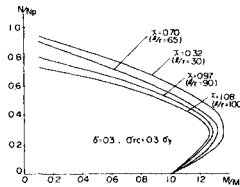
材断面形状にかかわらず、荷重分担率 δ が小さいほど、すなわち式 (5) より鋼管断面積が小さいほど、充填コンクリートと鋼管との合成効果が発揮される。また、この効果は、 δ が小さい場合、部材長の影響が大きく現われることがわかる。

b) 細長比の影響 表—1 の基準値を用い、 $l/r = 30, 65, 90, 100$ に対する耐荷力相関曲線を図—15 に示す。この図より、細長比によってかなり耐荷力に差異が認められる。

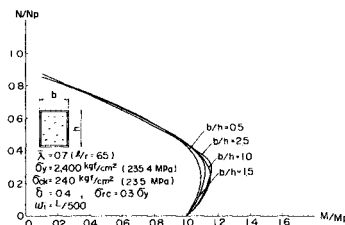
c) 断面形状の影響 断面形状の相関曲線に与える効果を明らかにするため、その一例を図—16 に示す。この図より、断面形状 b/h が耐荷力相関曲線に与える効果は多少あるものの、 δ や l/r の効果に比較してその影響は小さく、大きな差異は認められない。

(4) 最大曲げ耐荷力に及ぼす板厚および材料強度の影響

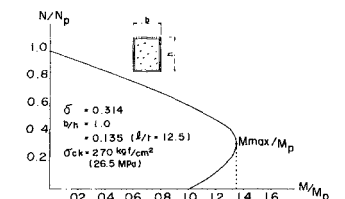
以上に述べたパラメーターのほか、式 (6) に示したように、鋼管と充填コンクリートの強度比 $\gamma = \sigma_{ck} / \sigma_y$ ならびに鋼管の幅厚比 b_c / t_f および h_c / t_w が合成柱の耐荷力に影響を及ぼすものと思われる。そこで、鋼管の降伏点を $\sigma_y = 2400 \text{ kgf/cm}^2$ (235.4 MPa), 3600 kgf/cm^2 (353.0 MPa), 4600 kgf/cm^2 (451.1 MPa), 充填コンクリートの圧縮強度を $\sigma_{ck} = 240 \text{ kgf/cm}^2$ (23.5 MPa),



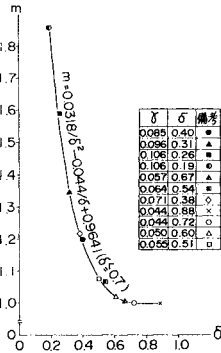
図—15 細長比 l/r による相関曲線の変動



図—16 断面形状 b/h による相関曲線の変動



図—17 耐荷力の相関曲線と最大曲げモーメント M_{max}



図一18 鋼管の荷重分担率 δ と係数 m との関係

270 kgf/cm² (26.5 MPa), 300 kgf/cm² (29.4 MPa) とし、また幅厚比を $b/t=15, 40, 60, 80, 100, 120, 180$ と変化させて耐荷力の変動を調べる。そのとき、図一17に示すように、合成柱が耐え得る最大曲げモーメント M_{max} と全塑性モーメント M_p との比

$$m = M_{max}/M_p \dots\dots\dots(16)$$

を調べた。図一18は係数 m 値と鋼管の荷重分担率 δ との関係のプロットしたものである。この図から、以下のよう事項が明らかである。

① 断面形状を一定に保ち鋼管および充填コンクリートの強度を変化させた場合、鋼管の強度が増加するにつれて m 値は小さくなり、合成柱としての利点が生じない。一方、コンクリートの強度が増加すると合成柱としての利点が生じる。

② 材料強度を一定として板厚を変化させた場合、板厚が小さくなるほど、 m の値が大きくなり、合成柱としての利点が現われる。

③ 荷重分担率 δ を固定して、鋼管および充填コンクリートの強度の組合せを変化させても m 値の変動は小さく、 $\delta \leq 0.7$ の範囲で係数 m と鋼管の荷重分担率 δ との関係は、

$$m = 0.0318/\delta^2 - 0.044/\delta + 0.9641 \dots\dots\dots(17)$$

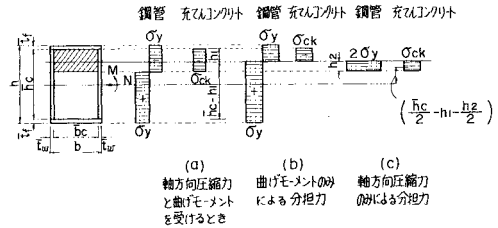
と近似し得る。

4. 軸方向圧縮力と曲げモーメントを受ける合成柱の相関曲線について

(1) 短柱の相関曲線

以上のパラメトリック解析結果から、合成柱の耐荷力相関曲線に影響を及ぼす主な要因としては、鋼管の荷重分担率 δ であることが判明した。そこで、スパンが短い合成柱断面に軸方向圧縮力 N と曲げモーメント M とが作用し、図一19の応力分布を呈する場合について、 $N/N_p \sim M/M_p$ 相関曲線に及ぼす δ の関与について検討する。

上図の状態 (a) は状態 (b) と状態 (c) との合計で



図一19 合成短柱が軸方向圧縮力 N と曲げモーメント M を同時に受ける全断面が塑性に至ったときの応力分布

あり、状態 (b) の軸方向力はつり合っているの、図一19(c) より、

$$N = 2 \sigma_y \bar{t}_w h_2 + \sigma_{ck} \bar{b}_c h_2 \dots\dots\dots(18)$$

となる。そこで、上式より h_2 を求めれば、

$$h_2 = N / (4 \sigma_y \bar{t}_w + \sigma_{ck} \bar{b}_c) \dots\dots\dots(19)$$

である。したがって、軸方向力 N が作用した場合の最大曲げモーメント M は、次式で表わされる。

$$M = M_p + N \left(\frac{\bar{h}_c}{2} - h_1 - \frac{h_2}{2} \right) = M_p + \frac{1}{2} (\bar{h}_c - 2 h_1) N \frac{N^2}{2(4 \sigma_y \bar{t}_w + \sigma_{ck} \bar{b}_c)} \dots\dots\dots(20)$$

そこで、両辺を M_p で割れば、次式が得られる。

$$\frac{1}{2(4 \sigma_y \bar{t}_w + \sigma_{ck} \bar{b}_c) M_p} N^2 - \frac{\bar{h}_c - 2 h_1}{2 M_p} N + \frac{M}{M_p} = 1 \dots\dots\dots(21)$$

この式は、また次のように書きかえられる。

$$\alpha \left(\frac{N}{N_p} \right)^2 - \beta \frac{N}{N_p} + \frac{M}{M_p} = 1 \dots\dots\dots(22)$$

ここに、無次元の係数 α, β は、

$$\alpha = \frac{N_p^2}{2(4 \sigma_y \bar{t}_w + \sigma_{ck} \bar{b}_c) M_p} = \frac{A_p^2}{2(4 \bar{t}_w + \gamma \bar{b}_c) W_p} \left. \begin{aligned} \beta &= \frac{(\bar{h}_c - 2 h_1)}{2 M_p} N_p = \frac{\left(\bar{h}_c - \frac{4 \bar{h}_c \bar{t}_w}{4 \bar{t}_w + \bar{b}_c \gamma} \right) A_p}{2 W_p} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(23 \cdot a, b)$$

で、 W_p は式 (14) より求められ、 A_p は次式で定義されるものである。

$$A_p = A_s + \gamma A_c \dots\dots\dots(24)$$

(2) 係数 α および β の近似

以上から、係数 α および β は、式 (23) で示したように、鋼管の荷重分担率 δ と断面形状 ($\bar{b}_c, \bar{h}_c, \bar{t}_w, \bar{t}_c$) とのほか、鋼管と充填コンクリートとの強度比 $\gamma = \sigma_{ck}/\sigma_y$ が影響を及ぼすことがわかる。

しかしながら、いま式 (22) において、

$$M = 0 \text{ かつ } N = N_p \dots\dots\dots(25 \cdot a, b)$$

なる限界状態を与えれば、次式が得られる。

$$\alpha - \beta = 1.0 \dots\dots\dots(26)$$

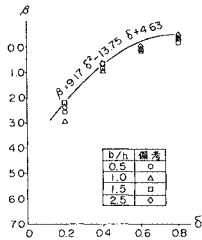


図-20 パラメーターβの鋼管の荷重分担率δによる変動

したがって、上式を用いれば、式(22)は、次式のように、係数βのみを用いて表わされる。

$$(1+\beta)\left(\frac{N}{N_p}\right)^2 - \beta \frac{N}{N_p} + \frac{M}{M_p} = 1.0 \quad (27)$$

そこで、合成短柱について係数βと鋼管の荷重分担率δとの関係を計算したものを図-20に示す。この図で、耐荷力を安全側に評価するための最大のβの値3点を選び出し、二次曲線で近似すると、

$$\beta = 9.17\delta^2 - 3.75\delta + 4.63 \quad (28)$$

と表わすことができる。

5. 合成柱の一耐荷力算定法

合成柱の設計法について、上記の結果を踏まえて検討する。まず、鋼材と充填コンクリートとのヤング係数比nは、ずれ止めの有無にかかわらず、剛度の算定法において、

$$n = 10 \quad (29)$$

にとるのが適当であろう^{2),24)}。

次に、合成柱として考える範囲は、図-18に示したように、鋼管の荷重分担率δがあまり大きいとその利点が活かされないので、

$$0.2 \leq \delta \leq 0.8 \quad (30)$$

の範囲が適切であると考えられる。

(1) 合成柱の耐荷力の照査法

a) 中心軸方向圧縮力のみを受ける合成柱 中心軸方向圧縮力のみが作用するとみなせる曲げモーメントMの範囲は、3.(1)で述べた理由により、

$$M/M_p \leq 0.1 \quad (31)$$

となる。

したがって、この範囲の合成柱に対する耐荷力は、軸方向圧縮力Nのみを考え、次式によって照査することができる。

$$N/N_u \leq 1.0 \quad (32)$$

ここに、N_uの算出は、図-6に示したように、ECCSの耐荷力曲線のうち“b”曲線を用いる。すなわち、

$$N_u = \chi N_p \quad (33)$$

そして、N_pの計算にあたっては、式(2)~(4)を用いることができるが、充填コンクリートの圧縮強度σ_{ck}

のばらつきを考え、σ_{ck}に材料安全係数0.85を乗じて、次式で求める。

$$N_p = N_{s,p} + N_{c,p} = \sigma_y A_s + 0.85 \sigma_{ck} A_c \quad (34)$$

また、圧縮耐荷力の低減を表わすパラメーターχは、同じくECCSに従って次式で計算する²⁵⁾。

$$\chi = \psi - \sqrt{\psi^2 - 1/\lambda^2} \quad (35)$$

ただし、

$$\psi = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1 + \alpha \sqrt{\lambda(\lambda - 0.2)}}{\lambda^2} + 1 \right\} \quad (36)$$

α = 0.314 (ECCSの耐荷力曲線“b”に相当するもの) …………… (37)

$$\bar{\lambda} = \sqrt{N_p/N_{cr}} \quad (38)$$

および

$$N_{cr} = \pi^2 EI_b / l^2 \quad (39)$$

b) 中心軸方向圧縮力と一軸曲げモーメントを受ける合成柱 柱の全体座屈が起こらない短柱の相関曲線は、式(27)に示したように、

$$(1+\beta)\left(\frac{N}{N_p}\right)^2 - \beta \frac{N}{N_p} + \frac{M}{M_p} \leq 1.0 \quad (40)$$

で表わされる。しかしながら、①長柱の場合、上式の左辺の第1項および第2項の分母のN_pは、一般にN_u ≤ N_pである。また、②実験による^{26),27)}と、鋼管の局部座屈が卓越する場合には、M ≤ 0.9M_pにとった方がよいことが明らかにされている。上記2点から合成柱をできるだけ安全に設計するためには、式(40)のN_pの代わりにN_uを用い、そして第3項には係数1/0.9 ≒ 1.1を乗じると、次のように表わすことができる。

$$(1+\beta)\left(\frac{N}{N_u}\right)^2 - \beta \frac{N}{N_u} + 1.1 \frac{M}{M_p} \leq 1.0 \quad (41)$$

ただし、βは式(28)に示したものをを用いる。

上式は、また軸方向圧縮力の項を右辺に移行し、次式に示す曲げモーメントに対する照査式に書きかえることができる。

$$M/M_p \leq \psi \quad (42)$$

$$M = \frac{M_0}{1 - N/N_{cr}} \quad (43)$$

ここに、

M: 2次曲げを考慮した作用曲げモーメント

M₀: 作用曲げモーメント

$$\psi = \frac{1}{1.1} \left\{ 1 - (1+\beta)\left(\frac{N}{N_u}\right)^2 + \beta \frac{N}{N_u} \right\} \quad (44)$$

c) 中心軸方向圧縮力と二軸曲げモーメントを受ける合成柱 式(43)を軸方向圧縮力Nと二軸曲げモーメントM_yおよびM_zを受ける場合に拡張すれば、

$$\frac{M_y}{M_{p,y}} + \frac{M_z}{M_{p,z}} \leq \psi \quad (45)$$

と表わされる。

ここに、

$$M_y = M_{y0} \frac{1}{1 - N_y / N_{cr,y}}$$

: 2次曲げを考慮した合成柱 y 軸まわりに作用する曲げモーメント

$$M_z = M_{z0} \frac{1}{1 - N_z / N_{cr,z}}$$

: 2次曲げを考慮した合成柱 z 軸まわりに作用する曲げモーメント

M_{y0}, M_{z0} : それぞれ y 軸ならびに z 軸まわりに作用する曲げモーメント

$$M_{p,y} = \sigma_y \{ 2 \bar{t}_{w,y} (\bar{h}_{c,y} - h_{1,y}) + b_y \bar{t}_{f,y} (\bar{h}_{c,y} + \bar{t}_{f,y}) \}$$

: 合成柱 y 軸まわりの全塑性モーメント

$$M_{p,z} = \sigma_y \{ 2 \bar{t}_{w,z} (\bar{h}_{c,z} - h_{1,z}) + b_z \bar{t}_{f,z} (\bar{h}_{c,z} + \bar{t}_{f,z}) \}$$

: 合成柱 z 軸まわりの全塑性モーメント

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 EI_{0,y}}{l^2}, \quad N_{cr,z} = \frac{\pi^2 EI_{0,z}}{l^2}$$

: それぞれ y および z 軸に関する弾性座屈荷重

$I_{0,y}, I_{0,z}$

: それぞれ y および z 軸 (図-1 参照) に関する合成柱の断面二次モーメント

(2) 諸外国の設計基準との比較・検討

a) DIN 18806 の考え方¹⁷⁾ まず、基本となる合成短柱の圧壊荷重 N_p を求める。次に、理想座屈荷重 N_{cr} ($= \frac{\pi^2}{l^2} (E_s I_s + E_c I_c)$) を算出する。さらに、換算細長比 $\bar{\lambda}$ を求め、この換算細長比 $\bar{\lambda}$ より耐荷力 N_u を求めるが、その際 ECCS の基準耐荷力曲線“a”を用いるものとしている。

一方、全塑性モーメント M_p を求め、最後に式 (27) と類似の式と定められた図表とを用い、 $N/N_p \sim M/M_p$ 相関曲線を図化する。それを図-21 に例示するが、このような相関曲線を作成した後、 N_u/N_p に対応する点 A から平行線を引き、相関曲線との交点を B とする。そして、OAB の部分が座屈に伴う不完全性モーメントであるものとして、合成短柱の相関曲線から差し引くと、図中で斜線を施した部分が合成柱の曲げモーメントとして取らせることができる領域であるので、結局、全体座屈が起こる合成長柱としては図中の点線で示す相関曲線を得る。この図で、荷重の載荷線が一点鎖線で入

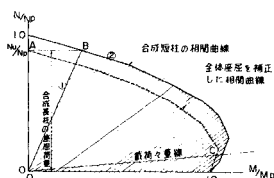


図-21 DIN による $N/N_p \sim M/M_p$ 相関曲線

れているが、かくして相関曲線と載荷々重線との交点 C が求める最終耐荷力を与える。

b) BS 5400 Part 5 の考え方¹⁷⁾ BS 5400 Part 5 の考え方も基本的には a) で述べた方法と同じで、鋼とコンクリートとの合成作用を考慮に入れて設計するものである。まず、鋼管厚が規定値を下回らないことの照査を行う。次に、コンクリートの分担率 δ を求める。さらに、合成柱の圧壊荷重 N_p を求める。そして、限界細長比 λ を求める。一方、全塑性モーメント M_p を求めておいて、最後に相関曲線を図化する。このような相関曲線 (図-22) を用いて載荷々重線との交点 A を求めると、これが最大耐荷力を与える。

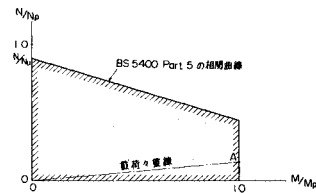


図-22 BS 5400 Part 5 による $N/N_p \sim M/M_p$ 相関曲線

表-2 DIN 18806, BS 5400 Part 5 および CDC 法による耐荷力計算条件と結果

項目	規準等	DIN 18806	BS 5400 Part 5	CDC 法	備考
鋼材降伏点 σ_y	kgf/cm^2	3,670	3,670	3,670	Ockal 鋼種より耐荷力係数を考慮 $\sigma_{2a} = 39.0 \text{ kgf/cm}^2$ (37.3 Mpa)
	(Mpa)	(360.0)	(360.0)	(360.0)	
鋼材の圧縮強度 σ_{ck}	kgf/cm^2	266	475	323	CDC: $0.85 \sigma_{2a}$ DIN: $0.7 \sigma_{2a}$
	(Mpa)	(26.1)	(46.6)	(31.7)	
鋼材の弾性係数 E_c	kgf/cm^2	1.3×10^5	2.1×10^5	3.1×10^5	BS: $\sigma_{2a} + C_1 (\frac{1}{2}) \sigma_y$
	(Mpa)	(1.3 $\times 10^4$)	(2.1 $\times 10^4$)	(3.1 $\times 10^4$)	
最大耐荷力 P	t (kN)	21.5	22.0	22.5	P = 20t ¹⁾ (196kN)
	(kN)	(210.7)	(215.6)	(220.5)	M = 5.2t ²⁾ (51.0kN-m)

$$b/h = 64, \quad b/h = 1.0, \quad \delta = 0.46, \quad \delta_{rc} = 2, \quad \omega_1 = 2^1$$

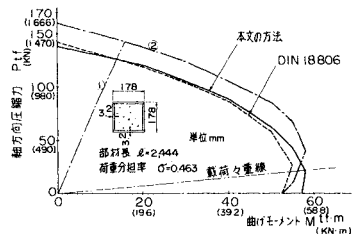


図-23 DIN 18806 と本文の方法とによる耐荷力の比較

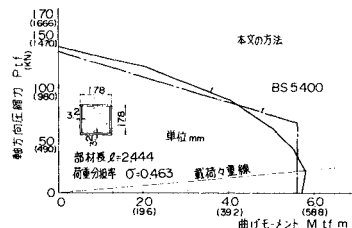


図-24 BS 5400 Part 5 と本文の方法とによる耐荷力の比較

c) 本文の提案式 以上のように, DIN 18806 および BS 5400 Part 5 では, いずれも合成柱の耐荷力を図式的に求めるもので, 煩雑な手続きが必要である. しかしながら, 本文で提案した式を利用する場合, ①耐荷力相関曲線を規定する係数 β は荷重分担率 δ のみで表わされており, 計算が簡単化されている. ②断面形状についても最も影響が大きく現われる β を用いているため, 安全側の計算ができる. ③全体座屈を起こす合成柱に対しては, 細長比 l/r または λ の関数として耐荷力を低減させ, それを図式的にはなく, 数式として与えられた相関式として考慮している, などの理由により実設計に利用するのに便利である.

図-23 および 24 には, DIN 18806, BS 5400 Part 5 ならびに CDC 法による耐荷力を表-2 に示す条件のもとに計算した結果を示す. 図-23, 24 から, 提案式と各設計基準で求めたものとはよい一致を示していることがわかる.

6. ま と め

本論文は, コンクリートを充填した角形断面鋼管柱に軸方向圧縮力と曲げモーメントが作用する場合の耐荷力を CDC 法を用いてパラメトリック解析を行い, その特性を明らかにするとともに, 合成柱の耐荷力算定法の一提案を行ったものである. 本文で得られた結果を要約すると, 以下のようである.

(1) CDC 法は, 合成柱の耐荷力を求める方法として有用である.

(2) 合成柱としての耐荷力は, 鋼管と充填コンクリートとの耐荷力をそれぞれ個別に累加したものよりも大きいことがわかった.

(3) 初期不整の耐荷力に与える影響は僅少であった. 特に, 初期たわみの影響については JSHB の 2 倍の値としても耐荷力の低下が少なかった.

(4) 鋼管の荷重分担率が小さいほど, すなわち鋼管の断面が少ないほど, 合成柱としての効果が発揮されることがわかった.

(5) 細長比の変化による合成柱の耐荷力の変動は, ECCS の耐荷力曲線 "b" に近かった.

(6) 断面形状の変化は, 上記の (4) および (5) ほどには耐荷力に影響を与えなかった.

(7) 材料強度を一定として鋼管の板厚を変化させた場合, 鋼管の板厚が小さくなるほど, 合成柱としての利点が生じる.

(8) これに対して鋼管板厚を一定にして材料強度を変化させた場合, その効果は小さく, あまり高強度の材料を合成柱に用いても利点がないことがわかった.

(9) 以上のような検討を通じ, 耐荷力相関曲線に影

響を与える主な要因としては, 荷重分担率であることがわかった. そして, それに対する近似式を導いた.

(10) 合成柱の耐荷力を, ①中心軸方向圧縮力の場合, ②一軸曲げ, および, ③二軸曲げを受ける場合について照査する方法を述べた.

(11) 最後に, 諸外国の設計基準との比較ならびに実験値との比較^{16), 17)}を行って, 本文で提案した相関曲線の有用性を検討した. その結果, 本文の方法が合成柱の耐荷力を正しく評価し得るものであることを示した.

謝 辞: 合成柱の耐荷力計算法の検討にあたって, 神戸大学工学部 藤井 学助教教授および大阪市立大学工学部 北田俊行助教教授には種々なご意見を賜ったことに対し深謝する次第である.

参 考 文 献

- 1) 河井章好・吉川 紀・石崎 浩: 合成柱 (充てんコンクリート方式) を有する鋼製橋脚の諸問題 (上, 下), 橋梁と基礎, Vol. 17, pp. 42~50 および pp. 45~47, 1983 年 2 月, 3 月.
- 2) 中井 博・吉川 紀: コンクリートを充てんした鋼製橋脚の耐荷性に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第 344 号 / I-1, pp. 195~204, 1984 年 4 月.
- 3) 中井 博・北田俊行・吉川 紀: コンクリートを充てんした鋼製角形柱の鋼要素の一設計法, 土木学会論文集, 第 356 号 / I-3, pp. 405~413, 1985 年 4 月.
- 4) 日本建築学会: 鋼管コンクリート構造計算基準・同解説, 第 2 版, 昭和 55 年 2 月.
- 5) 送電線建設技術研究会: コンクリート充てん鋼管鉄塔施工研究報告書 (改訂版), 電気書院, 昭和 48 年 6 月.
- 6) DIN 18806, Teil 1, Tragfähigkeit von Verbundstützen, Berechnung und Bemessung, Sept. 1981.
- 7) British Standards Institution, BS 5400, Part 5, March 1980.
- 8) Roik, K., Bergmann, R., Bode, H. and Wagenknecht, G.: Tragfähigkeit von ausbetonierten Hohlprofilstützen aus Baustahl, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität, Bochum, Mitteilung, Nr. 75-4, Mai 1975.
- 9) Roik, K. und Wagenknecht, G.: Ermittlung der Grenztragfähigkeit von ausbetonierten Hohlprofilstützen aus Baustahl, Bauingenieur, Bd. 51, s. 183~188, 1976.
- 10) Stahlbau Handbuch: Für Studium und Praxis Bd. 1, Stahlbau-Verlags-GmbH, Köln, 1982.
- 11) Roik, K. and Bergmann, R.: Composite Columns Design and Examples for Construction, The Second US-Japan Joint Seminar on Composite and Mixed Construction, University of Washington, Seattle, Washington, pp. 1~12, July 18~20, 1984.
- 12) 若林 実・吉田 望: 細長い合成柱の設計式, 日本建築学会論文報告集, 第 278 号, pp. 27~36, 昭和 54 年 4 月.
- 13) Von Kármán, T.: Untersuchungen über Knickfestigkeit, Mitteilungen über Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, Nr. 81, Berlin, 1910.

- 14) 吉川 紀・富田 穰・瀬川章彦・木島信雄：合成柱（充填コンクリート方式）を有する柱基部のくり返し載荷実験について，第29回構造工学シンポジウム，土木学会，pp.153～159，昭和58年2月。
- 15) 福本昉士・西野文雄：鋼構造部材と骨組——強度と設計——(Theodore V. Galambos著)，丸善(株)，pp.271～291，昭和45年10月。
- 16) Nakai, H. and Yoshikawa, O. : A Study on Ultimate Strength of Concrete-Filled Steel Beam Column by CDC Method, *Memoirs of the Faculty of Engineering, Osaka City University*, Vol.24, Dec. pp.225～269, 1983.
- 17) 中井 博・吉川 紀・富田 穰・由井洋三：軸方向圧縮力と曲げモーメントを受ける合成柱の耐力，橋梁と基礎，Vol.18，pp.24～30，1984年4月。
- 18) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅰ共通編，Ⅲコンクリート橋編，昭和53年1月。
- 19) Neogi, P. K. and Sent, H. K. : Concrete-Filled Tubular Steel Columns under Eccentric Loading, *The Structural Engineer*, No.5, Vol.47, pp.187～195, May 1969.
- 20) 小松定夫・牛尾正之・北田俊行：補剛材の溶接残留応力および初期たわみに関する実験的研究，土木学会論文報告集，第265号，pp.25～35，1979年9月。
- 21) 中井 博・河井章好・吉川 紀・北田俊行・酒造敏廣：鋼製ラーメン橋脚の実績調査（上，下），橋梁と基礎，Vol.16，pp.35～40およびpp.43～49，1982年6月，7月。
- 22) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅰ共通編，Ⅱ鋼橋編，昭和55年2月。
- 23) 成岡昌夫・福本昉士・伊藤敏一：ヨーロッパ鋼構造協会連合・▼委員会の鋼柱座屈曲線について，JSSC, Vol.6, No.55, pp.56～71，1970年。
- 24) 中井 博・吉川 紀・山内幸裕・吉田 茂・田中美雄：合成柱（コンクリート充填方式）を有する鋼製橋脚の現場載荷実験，土木学会第41回年次学術講演会，Ⅰ-233，pp.465～466，昭和61年11月。
- 25) (社)建設コンサルタント協会近畿支部一長大鋼橋調査研究委員会訳：DIN 18800，第2部，鋼構造の安定基準（草案）（1980年12月発行），部材および骨組構造の座屈，1985年1月。
- 26) 中井 博・吉川 紀・中村一平・袴田文雄・寺田博昌：合成柱（充填方式）の圧縮，曲げ耐力および付着に関する基礎実験，橋梁と基礎，Vol.19，pp.19～27，1985年6月。
- 27) Nakai, H., Yoshikawa, O. and Terada, H. : An Experimental Study on Ultimate Strength of Concrete Columns for Compression or Bending, 土木学会論文集投稿中。

(1986.1.13・受付)