報 告

軸方向圧縮力と曲げモーメントを受ける合成柱の耐荷力

中井　博*　冨田　穣***
吉川　紀**　由井洋三****

まえがき

最近，土木構造物として利用が期待されている中空鋼管柱にコンクリートを充填した合成柱については，文献1)で紹介したが，その実施にあたっては解決しておかなければならない点も多々あり，筆者らはこれらの諸点について検討を加えてきた[2)~7)]．今回，合成柱設計にあたって最も重要な軸方向圧縮力と曲げモーメントを受ける合成柱の耐荷力（せん断，ねじり耐荷力を除く）に焦点を絞り検討した結果を報告する．

合成柱の耐荷力を求める方法としては，諸外国の設計基準にみられるような相関曲線式や我が国の建築構造物の設計基準で示された累加式が挙げられるが，前者では設計基準によって耐荷力の算出結果に若干の差異があり，後者では弾性範囲内の強度を対象としており，それぞれ一長一短があるようである．

そこで，本論文ではまず柱一たわみ曲線法（CDC 法）[8)9)]を用い合成柱の残留応力や初期たわみも考慮した耐荷力算定法を述べる．次に，DIN18806 と BS5400 の相関曲線式，および，日本建築学会の累加式による耐荷力算定法をこの機会に詳しく紹介する．そして，筆者らが行った実験結果と上記の方法とを比較して，合理的な合成柱の耐荷力算定法について考察する．

最後に，今まであまり調べられていない合成柱の残留応力と初期たわみが耐荷力に及ぼす影響について調べた結果を示すものである．

1. 耐荷力の計算方法

1-1 CDC 法による耐荷力の計算

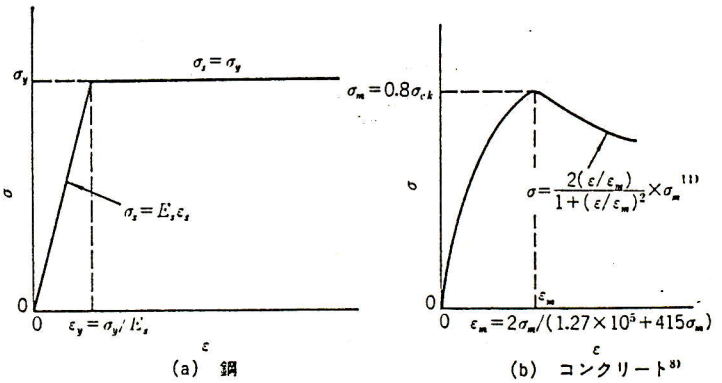
CDC 法は，周知のとおり，梁-柱の基礎微分方程式を数値積分法を利用して解析するもので，Von Kármán によって開発され Chwalla によって一般化された後，多くの研究者により種々のタイプの柱，種々の荷重状態について研究が行われてきており，合成柱についても適用が可能である．今回，合成柱の残留応力と初期たわみを考慮して，以下のような解析を行った．

1-1-1 解析上の仮定

ⓐ 合成柱断面は一定で，作用荷重はスパン中央に対して対称である．

ⓑ 鋼と充填コンクリートは変位の適合条件を満足し，ひずみ分布は平面保持の法則に従うものとする．

ⓒ 鋼は図-1(a)に示す完全弾塑性挙動を呈し，コンクリートは図-1(b)に示す曲線に従うものとする[8)]．



(a) 鋼　　(b) コンクリート[8)]

図-1 応力一ひずみ曲線

ⓓ 鋼管の局部座屈，充填コンクリートのせん断破壊は生じないものとする．

ⓔ 鋼管内の残留応力分布は，実測値をモデル化したものを用いる．

ⓕ 初期たわみ量はスパンの 1/500～1/1 000とし，分布は 2 次放物線と仮定する．

ⓖ 合成柱は軸方向に沿って分割し，分割断面の中央断面で内力と外力がつり合う．

ⓗ その際，引張り領域のコンクリート断面は無視する．

1-1-2 解析手順

図-2に断面力と変位の定義を示す．また，スパン長 L の合成柱は軸方向に $x=x_0, x_1, x_2, \cdots\cdots, x_i, \cdots\cdots x_{i-1}, x_i$ 断面で分割する．すると，軸方向圧縮力 P_0 と曲げモーメント M_0 が作用する際，分割点 $i-1$ と i との中間断面におけるたわみ $w_{i-1/2}$ および曲げモーメント $M_{i-1/2}$ は，次式で与えられる．

$$\left.\begin{aligned} w_{i-1/2}&=w_{i-1}+\left(\frac{x_i-x_{i-1}}{2}\right)\theta_{i-1}+\delta_{i-1} \\ M_{i-1/2}&=M_0+P_0w_{i-1/2} \end{aligned}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots(1)$$

ここに，δ_{i-1} は断面 $i-1$ における初期たわみである．例えば，式(1)は断面 0～1 の中央断面 1/2 において，

$$\left.\begin{aligned} w_{1/2}&=\frac{x_1}{2}\theta_0 \\ M_{1/2}&=M_0+P_0w_{1/2} \end{aligned}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots(2)$$

となる．ここに，θ_0 は合成柱の左端のたわみ角であり，次式の弾性式で近似される．

$$\theta_0=\frac{M_0L}{2E_sI_s} \cdots\cdots\cdots\cdots(3)$$

ここに，I_s：鋼に換算した断面 2 次モーメント

E_s：鋼の弾性係数

* 大阪市立大学 工学部 土木工学科 教授 工博
** 阪神高速道路公団 大阪管理部 保全役
*** 〃 〃 設計係長
**** 東京エンジニアリング(株)

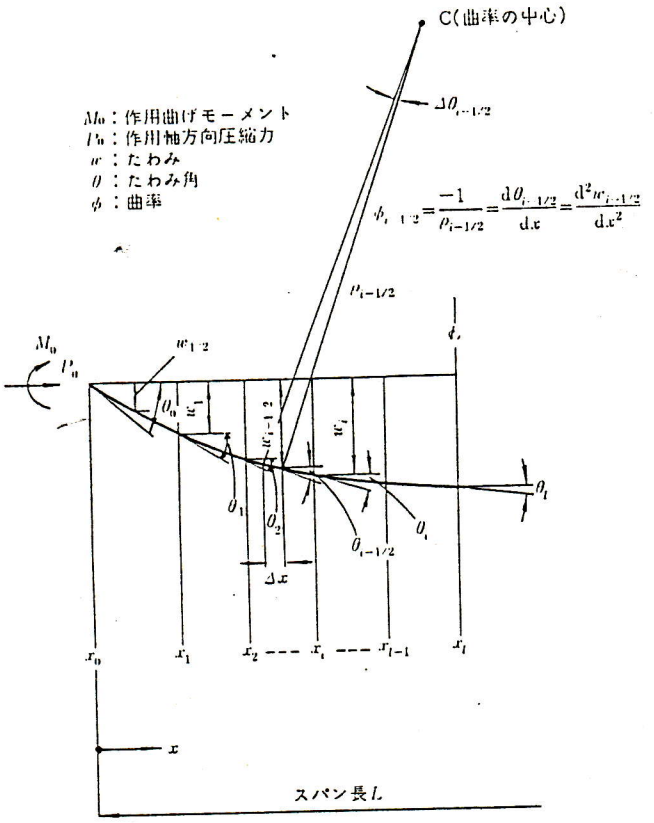


図-2　作用荷重と変位量の定義

次に，式(1)～(3)から，断面 i におけるたわみ角 θ_i，たわみ w_i，および曲げモーメント M_i は，次式のようになる．

$$\left.\begin{aligned}\theta_i&=\theta_{i-1}-(x_i-x_{i-1})\phi_{i-1/2}\\ w_i&=w_{i-1}+(x_i-x_{i-1})\theta_{i-1}-\frac{1}{2}(x_i-x_{i-1})^2\phi_{i-1/2}\\ M_i&=M_0+P_0(w_i+\delta_i)\end{aligned}\right\}\cdots\cdots(4)$$

ここに，

δ_i：i 断面における梁の初期たわみ

$\phi_{i-1/2}$：$i-1$ と i 断面の中央断面における曲率

式(1)と式(4)を左端の分割部材から梁の中央まで順次計算を行うと，梁中央断面でのたわみ角 θ_l は構造物と荷重の対称性から，

$$\theta_l=0 \cdots\cdots(5)$$

でなければならない．しかしながら，弾塑性領域での合成柱左端での式(2)のたわみ角 θ_0 は精度の悪い値となる．そこで，ニュートン・ラプソン法を用いて補正する．その補正値 $\Delta\theta_0$ は，

$$\Delta\theta_0=\frac{\theta_l}{\phi_{l-1/2}} \cdots\cdots(6)$$

で与えられる．したがってより精度の高い θ_0 は次式で与えられる．

$$\theta_0=\theta_0+\Delta\theta_0 \cdots\cdots(7)$$

以上の計算のフローチャートを図-3に示す．

1-1-3　曲率の計算

式(4)において曲率 $\phi_{i-1/2}$ は作用力 P_0 と M_0 の2つの関数と中立軸 e を変数とする未知数であるが，これを解析的に求めることは困難である．このために，以下のような数値積分法を適用する．まず，合成柱のひずみ分布を仮定し，次いで1-1-1で述べたように内力と外力とがつり合い状態になるまでひずみ分布を修正する．このため，またニュートン・ラプソン法を用いる．以下，添字 $i-1/2$ は $i-1/2$ 分割点におけるひずみ，応力そして断面等すべてに共通するもので，作用力 $M_{i-1/2}$ 以外は簡便のためすべて省略する．

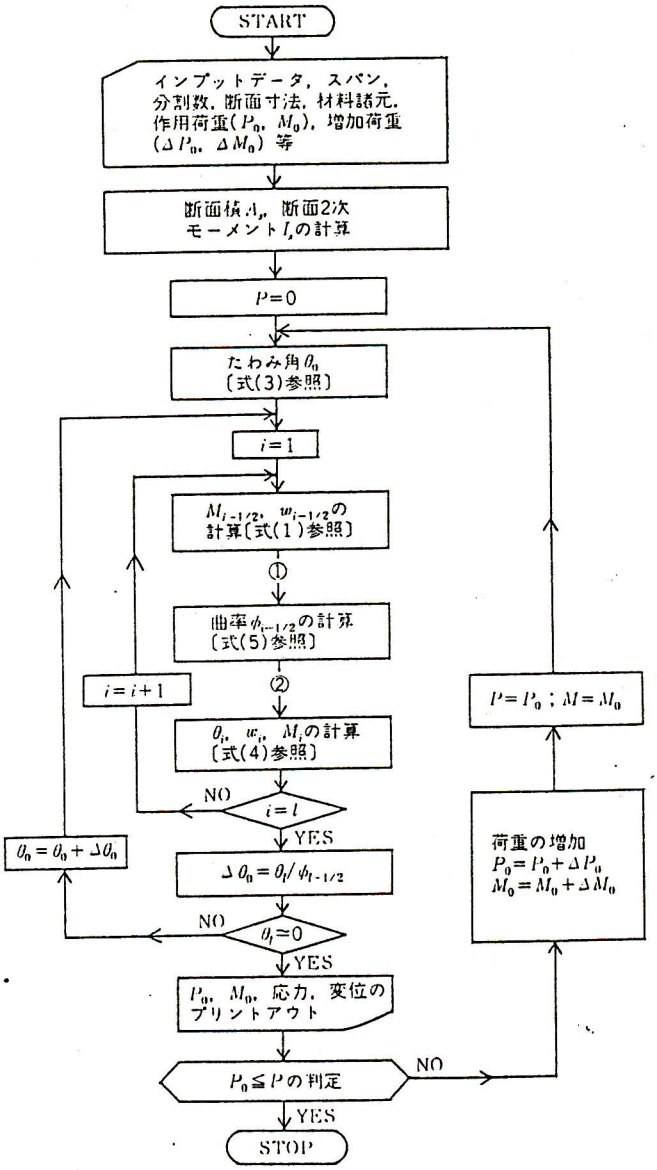


図-3　CDC 法による解析のフローチャート

1)　応力分布

合成柱のひずみと応力分布を図-4に示す．いま，鋼部分を $k=1,\cdots\cdots,m$，コンクリート部分を $j=1,\cdots\cdots,n$ なる微小要素に分割すると，それぞれの分割要素の応力は，以下のように求められる．

(i)　鋼要素

鋼要素 k に対するひずみ ε_{sk} は，

$$\varepsilon_{sk}=\phi(z_{sk}-e) \cdots\cdots(8)$$

ここに，

ϕ：曲率

e：偏心量

z_{sk}：図心0から考えている分割点までの距離

となる．

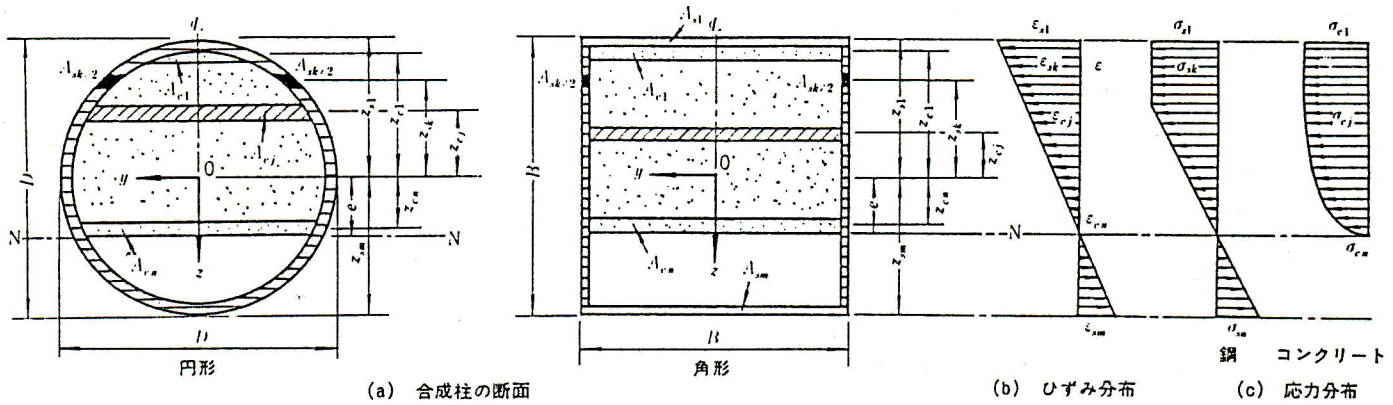
したがって，応力―ひずみ曲線は図-1(a)で与えられているので，鋼管の応力は，次のようになる．

$$\left.\begin{aligned}\sigma_{sk}&=E_s\varepsilon_{sk}&:\ \varepsilon_{sk}\leqq\varepsilon_y\\ &=\sigma_y&:\ \varepsilon_{sk}>\varepsilon_y\end{aligned}\right\}\cdots\cdots(9)$$

ここに，

$$\varepsilon_y=\sigma_y/E_s \cdots\cdots(10)$$

E_s：鋼の弾性係数



(a) 合成柱の断面　(b) ひずみ分布　(c) 応力分布

図-4 合成柱の応力分布

σ_y：鋼の降伏点

(ii) コンクリート要素

図心0から距離 z_{cj} にあるコンクリート要素のひずみ ε_{cj} は，

$$\varepsilon_{cj}=\phi(z_{cj}-e) \quad \cdots\cdots(11)$$

である．したがって，図-1(b)の応力—ひずみ曲線から，コンクリート要素 j の応力は，次のようになる．

$$\sigma_{cj}=\frac{2(\varepsilon_{cj}/\varepsilon_m)}{1+(\varepsilon_{cj}/\varepsilon_m)^2}\sigma_m \quad \cdots\cdots(12)$$

ここに，

$$\varepsilon_m=\frac{2\sigma_m}{1.266\times10^5+415\sigma_m} \quad \cdots\cdots(13)$$

$$\sigma_m=0.8\sigma_{ck} \quad \cdots\cdots(14)$$

σ_{ck}：コンクリートの終局強度

2) 内力と外力のつり合い

外力 $M_{t-1/2}$，P_0 と内力 $\int_A \sigma\,dA$，$\int_A \sigma_z dA$ とのつり合い式は，次式で与えられる．

軸力に対して：

$$f_P(\phi,e)=P_0+\int_A \sigma\,dA$$
$$=P_0+\left\{\sum_{k=1}^{m}(\sigma_{sk}+\sigma_{rk})A_{sk}+\sum_{j=1}^{n}\sigma_{cj}A_{cj}\right\}=0$$

曲げモーメントに対して：

$$f_M(\phi,e)=M_{t-1/2}+\int_A \sigma_z dA$$
$$=M_{t-1/2}+\left\{\sum_{k=1}^{m}(\sigma_{sk}+\sigma_{rk})z_{sk}A_{sk}+\sum_{j=1}^{n}\sigma_{cj}z_{cj}A_{cj}\right\}=0 \quad \cdots(15)$$

ここに，

σ_{rk}：鋼要素 k の残留応力

A_{sk}：鋼要素 k の断面積

A_{cj}：コンクリート要素 j の断面積

3) ϕ と e の逐次近似

図-4において，図心から中立軸までの距離 e と曲率 ϕ が未知量であるので，式(14)を満足するように逐次近似する．まず，ϕ と e の初期値を，弾性理論によって次のように与える．

$$\phi=\frac{M_{t-1/2}}{E_sI_s}$$
$$e=\frac{P_0}{M_{t-1/2}}\cdot\frac{I_s}{A_s} \quad \cdots\cdots(16)$$

ここに，I_s，A_s：鋼に換算した断面2次モーメントおよび断面積

次に，ϕ と e の初期値に対する修正値 $\Delta\phi_q$ と Δe_q は，次式で示す ϕ と e に関する2変数ニュートン・ラプソン法によって決められる．

$$\Delta\phi=-\frac{f_M(\phi,e)g_{P,e}-f_P(\phi,e)g_{M,e}}{g_{M,\phi}g_{P,e}-g_{P,\phi}g_{M,e}}$$
$$\Delta e=-\frac{f_P(\phi,e)g_{M,\phi}-f_M(\phi,e)g_{P,\phi}}{g_{M,\phi}g_{P,e}-g_{P,\phi}g_{M,e}} \quad \cdots\cdots(17)$$

ここに，

$$g_{M,\phi}=\frac{\partial f_M(\phi,e)}{\partial\phi}=\frac{f_M(\phi+\Delta\phi_0,e+\Delta e_0)-f_M(\phi,e)}{\Delta\phi_0}$$
$$g_{M,e}=\frac{\partial f_M(\phi,e)}{\partial e}=\frac{f_M(\phi+\Delta\phi_0,e+\Delta e_0)-f_M(\phi,e)}{\Delta e_0}$$
$$g_{P,\phi}=\frac{\partial f_P(\phi,e)}{\partial\phi}=\frac{f_P(\phi+\Delta\phi_0,e+\Delta e_0)-f_P(\phi,e)}{\Delta\phi_0}$$
$$g_{P,e}=\frac{\partial f_P(\phi,e)}{\partial e}=\frac{f_P(\phi+\Delta\phi_0,e+\Delta e_0)-f_P(\phi,e)}{\Delta e_0} \quad \cdots(18)$$

また，

$$\Delta\phi_0=\frac{\phi}{100}$$
$$\Delta e_0=\frac{e}{100} \quad \cdots\cdots(19)$$

したがって，より正確な ϕ_{q+1}，e_{q+1} の値は，次のように求められる．

$$\phi_{q+1}=\phi_q+\Delta\phi_q$$
$$e_{q+1}=e_q+\Delta e_q \quad \cdots\cdots(20)$$

この手順を，$q=1,2,\cdots\cdots$とし，ϕ_{q+1} が ϕ_q にほぼ等しくなるまで繰り返し計算する．図-5にこれらの計算手順のフローチャートを示す．

1-2 相関曲線式

柱部材に曲げモーメントと軸方向圧縮力が同時に作用するとき，全塑性曲げモーメントは軸方向圧縮力が作用しないときの全塑性モーメント M_p よりも減少することは明らかである．このような低減を考慮した全塑性モーメント M_{pc} が，軸方向圧縮力と曲げモーメントの関数の相関曲線として得られていれば，耐荷力を容易に求めることができる．DIN 18806[12] と BS 5400[13] では，この方法が採用されている．

1-2-1 DIN 18806 の考え方[12)14)15)17)]

充填コンクリート形式の耐荷力計算は，次の仮定のもとに行われている．

① 鋼とコンクリートは破壊に至るまで完全に合成している．

② 引張り領域のコンクリート断面は無視する．

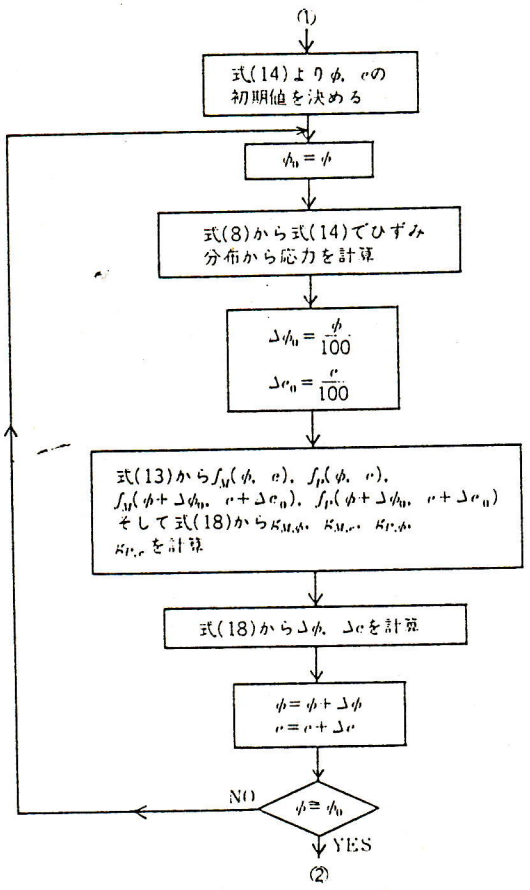


図-5　ϕの逐次近似計算のフローチャート

③　コンクリートの応力—ひずみ曲線は図-6に示すものを使用する．

④　一方，鋼の応力—ひずみ曲線としては，図-1(a)に示すものを使用する．

まず，基本となる圧縮耐荷力 N_{pl} を，次式より求める．

$$N_{pl}=A_a\beta_{s,a}+A_b\beta_R \quad\cdots\cdots(21)$$

ここに，

A_a, A_b：それぞれ鋼およびコンクリートの断面積

$\beta_{s,a}$：鋼の降伏応力度

β_R：コンクリートの圧縮強度$=0.7\beta_{WN}$

β_{WN}：DIN 1045 に従うコンクリートの材令28日における立方体圧縮強度

ただし，中心軸圧縮荷重を受けるコンクリート充填円形合成短柱の場合は，鋼管の拘束によるコンクリートの強度増加を考慮する．

次に，理想座屈荷重 N_{kl} を次式より求める．

$$N_{kl}=\frac{\pi^2}{s_k^2}(E_aJ_a+E_bJ_b) \quad\cdots\cdots(22)$$

ここに，

E_a, E_b：それぞれ鋼およびコンクリートの弾性係数

$$E_b=0.5E_{b0}=500\beta_R \quad\cdots\cdots(23)$$

J_a, J_b：それぞれ鋼およびコンクリート断面の断面2次モーメント

s_k：有効座屈長

さらに，換算細長比$\bar{\lambda}$を次式より求める．

$$\bar{\lambda}=\sqrt{\frac{N_{pl}}{N_{kl}}} \quad\cdots\cdots(24)$$

この換算細長比$\bar{\lambda}$より耐荷力 N_{cr} を求めるが，その際 ECCS の

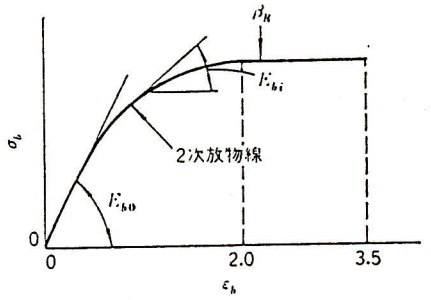


図-6　コンクリートの応力—ひずみ曲線

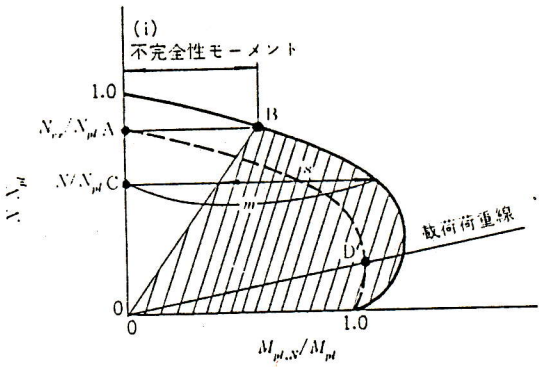


図-7　M—N相関図

基準耐荷力曲線"a"[16]に合わすための低減係数 $\kappa=f(\bar{\lambda})$〔文献12)の表-4〕を乗じ，

$$N_{cr}=\kappa\cdot N_{pl} \quad\cdots\cdots(25)$$

とする．

一方，全塑性モーメントM_{pl}は，円形断面あるいは角形断面に応じ，次式により求める．

$$M_{pl}=\frac{\bar{m}}{6}\{d^3-(d-2t)^3\}\sigma_F \quad (\text{円形断面}) \quad\cdots\cdots(26)$$

$$M_{pl}=\frac{\bar{m}}{4}\{d^3-(d-2t)^3\}\sigma_F \quad (\text{角形断面}) \quad\cdots\cdots(27)$$

ここに，

$\bar{m}$：鋼種とコンクリート強度に応じ，幅厚比 d/t の関数として文献14)の表-2にまとめられている．

d：鋼管の直径または1辺の長さ

t：鋼管の板厚

最後に，軸方向圧縮力と曲げモーメント間の相関曲線は次式で与えられる．

$$(1+C)\left(\frac{N}{N_{pl}}\right)^2-C\left(\frac{N}{N_{pl}}\right)+\frac{M_{pl,N}}{M_{pl}}=1 \quad\cdots\cdots(28)$$

ここに，Cは断面形状および鋼部分とコンクリート部分の面積に依存する係数であり，

$$C=\frac{N_{pl,b}}{N_{pl,a}}=\frac{A_b\cdot\beta_R}{A_a\cdot\sigma_F} \quad\cdots\cdots(29)$$

で与えられる．

荷重N_{cr}のもとでは，柱は限界耐荷力に達している．すなわち，図-7におけるN_{cr}の場合，生じている曲げモーメント(点B)は不完全性(柱の初期不整)によって引き起こされたものである．軸方向圧縮力NがN_{cr}より小さければ，柱は総計$m\cdot M_{pl}$の曲げモーメントを負担することができる．しかしながら，この総モーメント$m\cdot M_{pl}$から不完全性の影響を差し引かねばならない．不完全性によって引き起こされるモーメントを軸力Nの大きさに対応して直線的に変化

表-1　d/t 制限

断面＼鋼種	St37	St52
d ○	84以下	68以下
d □	51以下	42以下

するものと仮定すれば，図-7の斜線を施した部分が外部からのモーメントの負担分を表すことになる．そこで，耐荷力の安全性の照査は，設計荷重N，Mが不完全性を考慮した図-7の破線内にあるときに行われる．軸方向圧縮力の最大値は N_{cr}/N_{pl}（点A）となり，この点から横軸に平行に実線まで引いた $\overline{AB}$ が幾何学的および構造的不完全性の影響を差し引くための不完全性モーメントである．

後述する実験合成柱の DIN 18806 による耐荷力は，載荷荷重線と相関曲線（破線）との交点Dの値を読み取り求めた．

なお，以上のほか，局部座屈に対して安全なように，コンクリート充填方式の鋼管の場合のみ最小板厚 t が表-1，また次式により規定されている．

$$d/t \leqq \sqrt{\frac{3E_a}{\beta_{s,a}}} \quad \text{（矩形断面）} \cdots\cdots (30)$$

$$d/t \leqq \sqrt{\frac{8E_a}{\beta_{s,a}}} \quad \text{（円形断面）} \cdots\cdots (31)$$

以上の計算の流れを図-8に示す．

1-2-2　BS 5400 の考え方[13]

BS 5400 の考え方も基本的には 1-2-1 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，管厚は，

矩形管断面（RHS）の各辺に対して $b_f\sqrt{f_y/3E_s}$

円形管断面（CHS）に対して $D\sqrt{f_y/8E_s}$

ここに，b_f：RHS の外径寸法

D：CHS の外径

E_s：鋼の弾性係数

f_y：鋼の基本降伏点強度

の値を下回らないものとする．なお，コンクリートは材令28日立方体強度が充填柱のとき 20N/mm² 以上とし，最大骨材寸法は 20mm 以下とする．

次に，コンクリートの分担係数 α を次式により求めるが，本文の適用範囲は，

$$0.1<\alpha<0.8 \cdots\cdots (32)$$

とする．

$$\alpha=0.45A_cf_{cu}/N_u \cdots\cdots (33)$$

ここに，

A_c：コンクリートの断面積

f_{cu}：コンクリートの28日立方体強度

N_u：圧縮耐荷力

圧縮耐荷力 N_u は，次式より求める．

$$N_u=0.91f_yA_s+0.45f_{cu}A_c \cdots\cdots (34)$$

ここに，

A_s：鋼の断面積

f_y：鋼の基本降伏強度

ただし，コンクリート充填円形鋼管断面の場合には3軸応力効果を考慮して，次式によるものとする．

$$N_u=0.91f_{yc}A_s+0.45f_{cc}A_c \cdots\cdots (35)$$

ここに，

f_{cc}：1軸荷重のもとで，3軸応力効果のあるコンクリートの割増し特性強度$=f_{cu}+C_1(t/D)f_y$

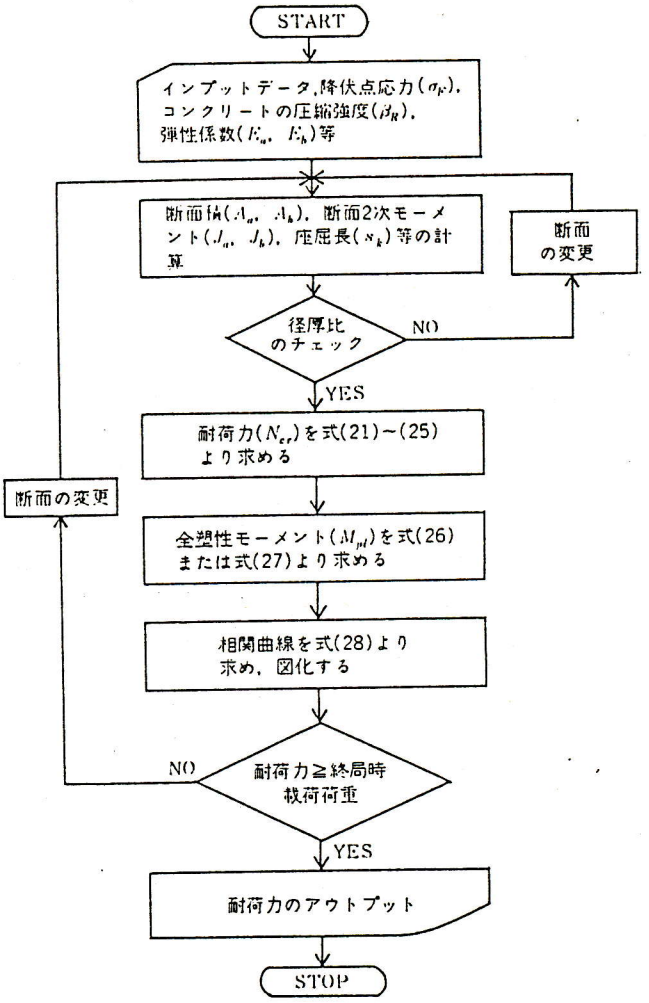


図-8　DIN 18806 による耐荷力算定のフローチャート

f_{yc}：鋼管の低減された基本降伏応力度$=C_2f_y$

C_1，C_2：定数〔文献13)の表-12〕

D：鋼管の外径

t：鋼管の板厚

次に，限界細長比 λ を求めるため，まず柱の有効座屈長 L_F を次式より求める．

$$L_F=\pi\left(\frac{E_cI_c+E_sI_s}{N_u}\right)^{1/2} \cdots\cdots (36)$$

ここに，

E_s，E_c：それぞれ鋼およびコンクリートの弾性係数

f_c：コンクリートの特性立方体強度

I_s，I_c：それぞれ鋼およびコンクリートの断面2次モーメント

$$\lambda=l/L_F \cdots\cdots (37)$$

l：着目している曲げ面内における実際の柱の有効長

ただし，有効長さの合成柱の最小横方向寸法に対する比は，次の値を超えてはならない．円形管断面のとき55，矩形管断面のとき65．

一方，終局曲げモーメント M_u を求めるために次の仮定を設ける．

① 鋼断面の全域は引張りまたは圧縮における設計降伏強度，すなわち基本降伏点強度/γ_m まで載荷されうる．

② 塑性中立軸より引張り側にあるコンクリート強度は無視する．

③ 塑性中立軸より圧縮側にあるコンクリートの面積は設計強度，すなわち，$0.4f_{cu}$ まで均等に載荷されうる．

④ 鋼断面のフランジ厚は一定であり，フィレット部は無視される．

次に，鋼の設計降伏点強度に対する破壊時のコンクリートの平均圧縮応力度比Pと鋼断面の塑性断面係数Sを，次式により求める．

$$P=\frac{0.4f_{cu}}{0.91f_y} \cdots\cdots(38)$$

$$S=t^3(D/t-1)^2 \cdots\cdots(39)$$

ここに，

D：鋼管の外径

t：鋼管の板厚

D/t とPから文献13)の図-11を用いてmを求めると，終局曲げモーメントM_uは，

$$M_u=(1+0.01m)Sf_y \cdots\cdots(40)$$

で求められる．

次に，強軸まわりに曲げモーメントを受ける柱（弱軸まわりの崩壊が防止されている場合）には，柱に作用する設計荷重Nは，

$$N_x=N_u\left\{K_{1x}-(K_{1x}-K_{2x}-4K_3)\frac{M_x}{M_{ux}}-4K_3\left(\frac{M_x}{M_{ux}}\right)^2\right\} \cdots(41)$$

を上回ってはならない．

ここに，

N_x：一定の設計荷重 M_x を受ける柱の設計破壊荷重

K_1：文献13)の付録 C.1 より求める定数

K_2：$0\leqq K_2/K_{20}\leqq 1$ でかつ $K_{20}\leqq 0.75$，ただし，K_2/K_{20} の値が負ならば $K_2=0$ とする．

$$\frac{K_2}{K_{20}}=\left\{\frac{115-30(2\beta-1)(1.8-\alpha)-C_3\lambda}{50(2.1-\beta)}\right\} \cdots\cdots(42)$$

$$K_{20}=0.9\alpha^2+0.2 \cdots\cdots(43)$$

β：各々の軸まわりに作用する2つの端モーメントの大きい方に対する小さい方の比

$$C_3=100 \cdots\cdots(44)$$

λ：細長比関数

α：コンクリートの分担係数

$$K_3=K_{30}+\frac{\{(0.5\beta+0.4)(\alpha^2-0.5)+0.15\}C_5\lambda}{1+(C_5\lambda)^3} \cdots\cdots(45)$$

$$K_{30}=0.04-\lambda/15 \cdots\cdots(46)$$

$$C_5=1.0\ (\text{定数}) \cdots\cdots(47)$$

$K_{30}>0$

式(41)を軸方向圧縮力と曲げモーメントの相関曲線式にすると，

$$\frac{N_x}{N_u}=K_{1x}-(K_{1x}-K_{2x}-4K_3)\frac{M_x}{M_{ux}}-4K_3\left(\frac{M_x}{M_{ux}}\right)^2 \cdots\cdots(48)$$

となる．この相関曲線（図-9）を用いてA点を求め，最大耐荷力を計算する．

以上の計算のフローチャートを図-10に示す．

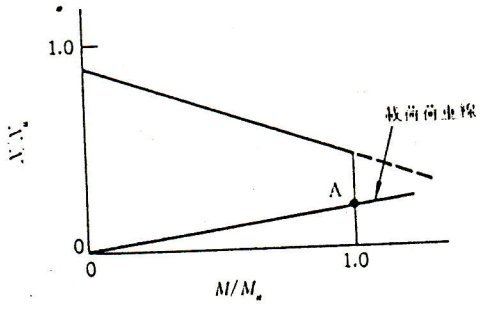


図-9 $M-N$ 相関図

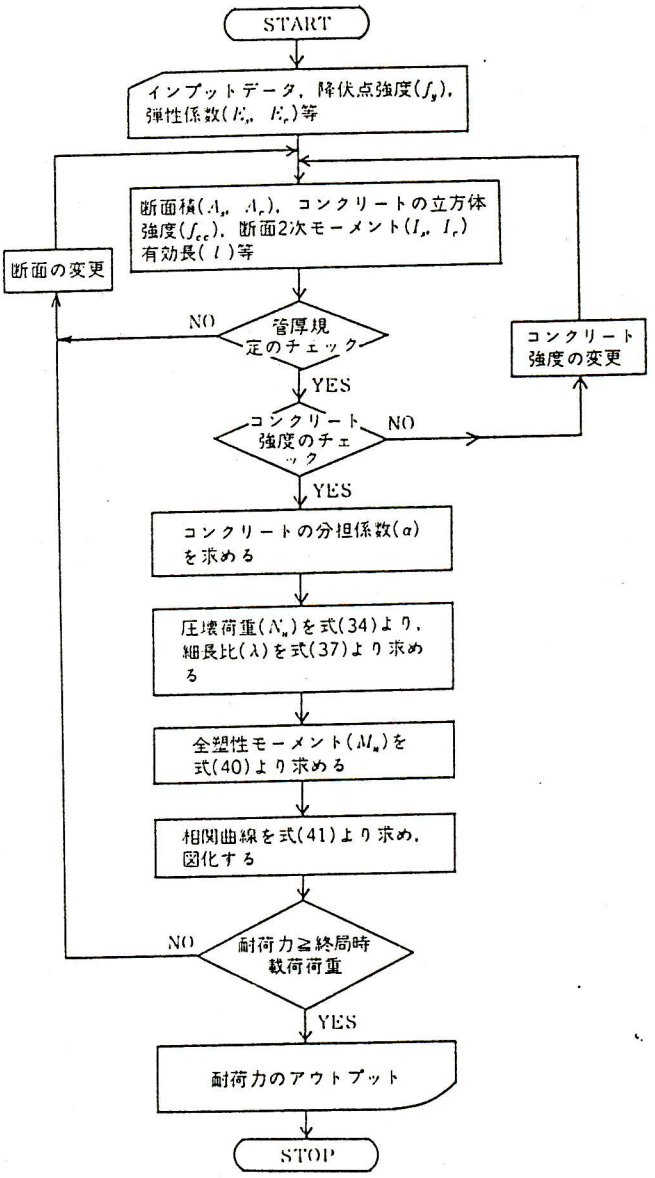


図-10 BS 5400 による耐荷力算定のフローチャート

1-3 累 加 式

日本建築学会[18]では累加式が採用されているが，この方法は弾性解析に基づくものである．すなわち，曲げモーメントと軸方向圧縮力に対する鋼管部分とコンクリート部分の各々の許容値を個々の許容応力度より算出し，それを累加した値が作用する曲げモーメントと軸方向圧縮力以上であることにより安全性の照査をする方法である．しかし，この方法は，同一断面内で鋼管部分と充填コンクリート部分のひずみが必ずしも適合するとは限らない点，限界状態設計法で必要な耐荷力が求まらない点等に注意が必要である．

まず，径厚比および幅厚比の制限は，

$${}_sD/t\leqq 240/F\ \ (\text{円形断面}) \cdots\cdots(49)$$

$$d/t\leqq 74/\sqrt{F}\ \ (\text{角形断面}) \cdots\cdots(50)$$

ここに，

${}_sD$：円形鋼管の公称外径

t：鋼管の板厚

F：鋼管の許容応力度を決定する場合の基準値

d：平板部分の幅

次に，鋼管部分が曲げモーメントのみを受け持つ場合の許容曲げ

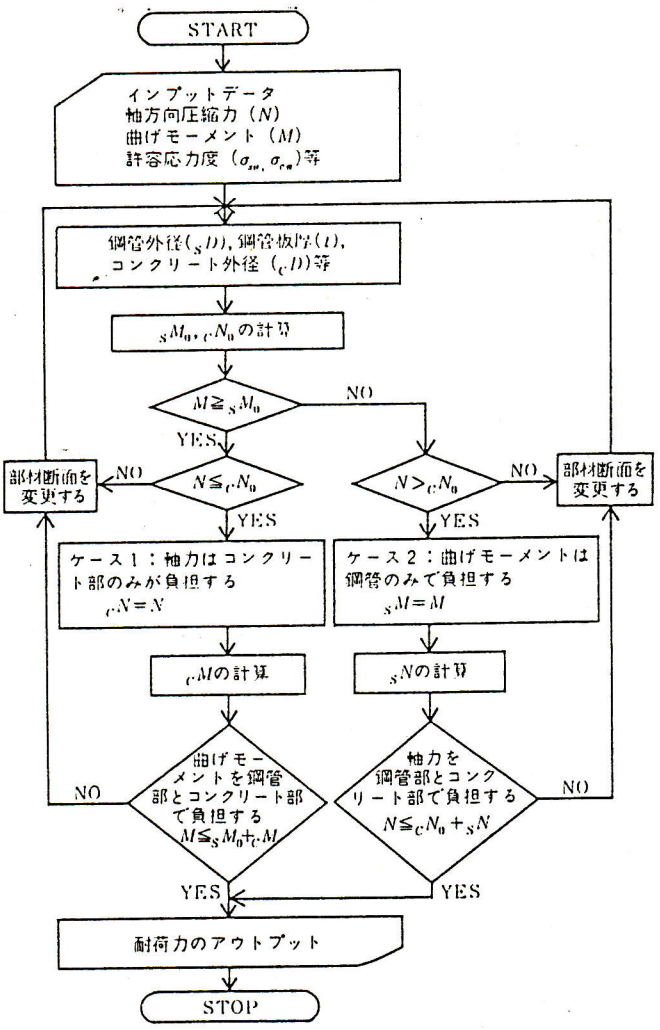


図-11　累加式による算定のフローチャート

モーメント$_sM_0$と充填コンクリート部分が軸方向圧縮力のみを受け持つ場合の許容圧縮力$_cN_0$とを許容応力度より算出し，それらの値と作用曲げモーメントMおよび作用軸方向圧縮力Nの大小関係に応じて，以下のように強度を算出する．

1)　ケース1（$M \geqq {}_sM_0$ かつ $N \leqq {}_cN_0$）

作用曲げモーメントMが許容曲げモーメント $_sM_0$ より大きく，作用軸方向圧縮力Nが許容軸圧縮力 $_cN_0$ より小さい場合：

$$N={}_cN \quad \cdots\cdots(51)$$

$$M \leqq {}_sM_0+{}_cM \quad \cdots\cdots(52)$$

ここに，$_cM$ は充填コンクリート部分が，軸方向圧縮力 $_cN$ を許容する状態での充填コンクリート部分の許容曲げモーメント．

2)　ケース2（$M < {}_sM_0$ かつ $N > {}_cN_0$）

作用曲げモーメントMが $_sM_0$ より小さく，作用軸方向圧縮力Nが $_cN_0$ より大きい場合：

$$N \leqq {}_cN_0+{}_sN \quad \cdots\cdots(53)$$

$$M={}_sM \quad \cdots\cdots(54)$$

ここに，$_sN$ は鋼管部分が曲げモーメント $_sM$ を許容する状態での鋼管部分の許容軸方向圧縮力．

以上の計算のフローチャートを図-11に示す．

2.　実験結果との比較

実験についての詳細は文献7）に報告されているので，ここでは耐荷力実験のみについて述べることにする．表-2はこれらの耐荷力実験を一覧にして示したものである．

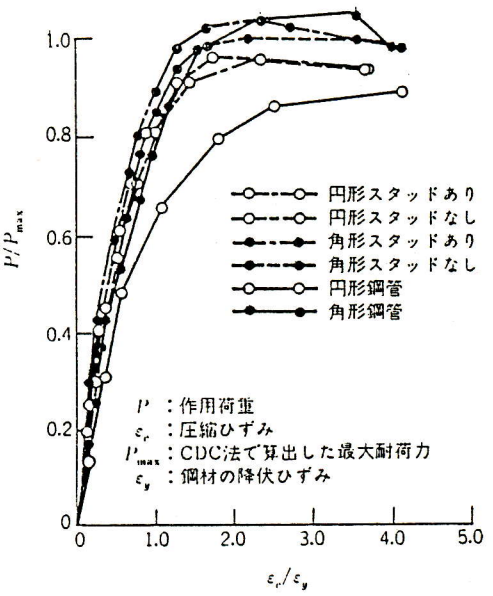


図-12　荷重—ひずみ曲線

2-1　供　試　体

円形供試体の製作は，ローラ曲げ法で半割状にしたものを2個所に溶接継手を設けて円形とした．一方，角形供試体の製作は治具を用い，4隅を溶接することにより組み立てた．その際の溶接条件は，アーク電圧220V，溶接電流135A（本体），150～155A（補剛材），溶接速度 150 mm/min（本体），300 mm/min（補剛材），溶接棒はLBを使用した．ビードの厚さ3～4 mm，脚長4～5 mmとした．スタッドジベルは，スタッド溶植法によって行った．

供試体の板厚については測定誤差 ±0.1mm の超音波厚み計により，外径はノギスにより，全長は実験装置にセットののちスチールテープによって計測した．初期たわみはいずれの供試体も文献19）の表15.3.13の範囲（1/1 000）内にあり，よく製作されていた．なお，ダイヤフラムとして，円形供試体は50mm×3.2，角形供試体は40mm×3.2のものを40cmピッチに供試体の外側に取り付けた．

2-2　耐　荷　力

実験の結果，次のことがわかった．

①　充填コンクリートの一部が軸方向圧縮力および曲げモーメントを分担していた．

②　荷重—ひずみ曲線（図-12）において，合成柱では鋼管が降伏するまで急激なひずみの増加が見られない．

③　したがって，ほぼ鋼管と充填コンクリート間のひずみの適合性が満足されていると考えられる．

④　最終耐荷力は，表-3のように総括される．

この耐荷力の実測値と CDC 法，DIN 18806，BS 5400 を比較すれば，以下のようであった．

①　円形，角形供試体とも実測値と CDC 法は良好な一致を示した．

②　DIN 18806 の方法は円形，角形供試体とも実測値よりも高い値を示している．

③　BS 5400 の方法も DIN 18806 とほぼ同じ傾向を示していた．

3.　残留応力と初期たわみの耐荷力に及ぼす影響

前に述べたように CDC 法が実験値とよく一致していたので，こ

表-2 室内実験内容

実験名	供試体	形状 断面		スタッドなし	スタッドあり	実験内容	備考
軸力と曲げを受ける柱の実験	6体 SM50 板厚t=3.2mm	鋼管柱	円形	200φ A-1	—	①長柱と短柱の中間に位置する柱に偏心軸方向圧縮力を作用させ，最大耐荷力を調査する． ②σ_cとσ_Mの比率 $\sigma_c/\sigma_{ca}:\sigma_M/\sigma_{ba}=0.2:0.8$ (e=26.0cm)	(1)初期たわみをトランシットとスチールテープで16断面について測定 (2)残留応力を切断法により測定 (3)コンクリートは早強ポルトランドを使用 σ_{ck}=300kgf/cm², スランプ7～10cm，最大骨材寸法20mm，空気量3～5% (4)外ダイヤフラム寸法は40mm×3.2mm（角形），50mm×3.2mm(円形) (5)付着を高めるためにM3×20，ピッチ45mmでスタッドジベルを使用 (6)スタッドジベルを使用した供試体には外ダイヤフラムなし (7)縦リブは局部座屈防止用である
			角形	178 A-2	—		
		合成柱	円形	200φ A 3	200φ A 5		
			角形	178 A 4	178 A 6		

$\sigma_c=\dfrac{P}{A}$, $\sigma_M=\dfrac{M}{W}$

ここに，P：作用軸方向圧縮力(kgf)
M：作用曲げモーメント$=P\cdot e$(kgf·cm)
A：断面積(cm²)
W：断面係数(cm³)
σ_{ca}：許容軸方向圧縮応力度(kgf/cm²)(道路橋示方書による)
σ_{ba}：許容曲げ圧縮応力度(kgf/cm²)(道路橋示方書による)

表-3 耐荷力の実験値と理論値の比較（単位 tf）

供試体			実測値 許容値*1 ①	実測値 最大値 ②	CDC法による計算値 許容値*3 ③	CDC法による計算値 最大値*2 ④	①/③	②/④	DIN 18806[9] 許容値*3	DIN 18806[9] 最大値*2	BS 5400[8] 許容値*3	BS 5400[8] 最大値*2	日本建築学会[10] 許容値	日本建築学会[10] 最大値	備考
軸力と曲げを受ける柱の実験	円形	鋼管柱A-1	6.3	13.6	—	14.5	—	0.93	—	—	—	—	—	—	$\dfrac{\sigma_c}{\sigma_{ca}}:\dfrac{\sigma_M}{\sigma_{ba}}$ =0.2：0.8
		合成柱 ジベルなしA-2	9.9	19.0	9.1	18.6	1.08	1.02	—	20.9	—	20.3	8.9	—	
		合成柱 ジベルありA-3	9.5	19.0			1.04	1.02							
	角形	鋼管柱A-4	9.1	18.4	—	17.7	—	1.04	—	—	—	—	—	—	
		合成柱 ジベルなしA-5	13.2	23.5	11.5	23.5	1.15	1.00	—	28.8	—	25.6	12.5	—	
		合成柱 ジベルありA-6	12.3	24.0			1.07	1.02							

注）＊1：鋼管縁ひずみが1 000μに達したときのゲージの読みから求めた値である．
＊2：幾何学的および構造的不完全性の影響を考慮．
＊3：σ_{sa}=1 900kgf/cm², $\sigma_{ca}=\sigma_{ck}/3$, σ_{ck}=380kgf/cm²

表-4 残留応力と初期たわみの組合わせ

タイプ	計算仮定条件 コンクリート σ-ε曲線	残留応力	初期たわみ	σ-ε曲線の記号 円形 鋼管	円形 合成柱	角形 鋼管	角形 合成柱
A	Desayi式[11]	無	無	a	b	c	d
B		有		e	f	g	h
C			l/200	i	j	k	l
D			l/500	—	m	—	n
E			l/1 000	—	n	—	v
F	道示式[20]		無	—	o	—	p
実験値	—		有	q	r	s	t

表-5 耐荷力の比較

タイプ	計算仮定条件 コンクリート σ-ε曲線	残留応力	初期たわみ	円形 合成柱 ①	円形 合成柱 ①/実験値	角形 合成柱 ①	角形 合成柱 ①/実験値
A	Desayi式[11]	無	無	18.7	0.98	24.0	1.00
B		有		18.9	0.99	23.5	0.98
C			l/200	17.8	0.94	22.1	0.92
D			l/500	18.4	0.97	23.0	0.96
E			l/1 000	18.6	0.98	23.5	0.98
F	道示式[20]		無	19.0	1.00	23.4	0.98
実験値	—		有	19.0		24.0	

注）①：CDCによる理論値

の方法により，

① 残留応力の有無

② 初期たわみ量を l/200, l/500, l/1 000 と変化させた場合の耐荷力に及ぼす影響

を調べた．合成柱では，コンクリートと鋼が合成されることにより鋼板が薄くできるが，その反面，残留応力と初期たわみの影響が大きく現れるため，検討しておく必要があると考えたからである．

3-1 残留応力と初期たわみの組合わせ

表-4にインプットデータの組合わせを示す．

3-2 計算結果

耐荷力の計算結果を比較したものを表-5に示す．また，図-13の荷重—ひずみ曲線から，コンクリートの応力—ひずみ曲線仮定の差異は顕著でない．最終耐荷力は，初期たわみ量が l/500 まであまり低下していない．

次に，図-14に残留応力の有無，初期たわみ l/200, l/500, l/1 000 の組合わせによる荷重—ひずみ曲線を示す．まず，鋼管の残留応力の耐荷力に及ぼす影響はあまり大きくはない．次に，初期たわみが l/500 以下では耐荷力の低下は大きくないが，初期たわみが l/200 以下になると耐荷力の低下が著しくなる．

以上のことから，残留応力の有無は合成柱の場合はあまり影響はないように思われる．しかし，初期たわみ量は l/500 以下におさまるように製作すべきであろう．

4. まとめ

① 軸方向圧縮力と曲げモーメントが作用する合成柱の耐荷力を求める方法としては，柱—たわみ曲線法（CDC 法）が実験値

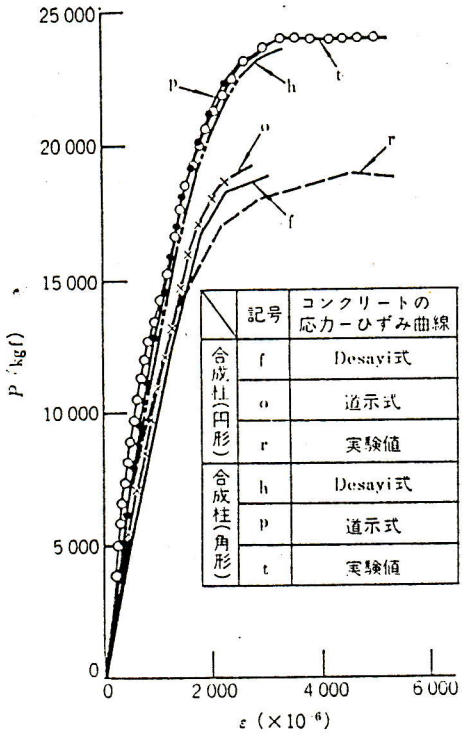


図-13 コンクリート応力—ひずみ曲線の差による荷重—ひずみ曲線

ともよく一致していた．

② 残留応力，初期たわみを考慮した理論式（CDC 法）と実験値は，よく一致している．

③ コンクリートの応力—ひずみ曲線は，Desayi 式，道示式とも差がなかった．

④ 平面保持の仮定は，満足されているように思われる．

⑤ 初期たわみは $l/500$ までにおさえるべきである．

⑥ 残留応力の有無は，最終耐荷力にはあまり影響しないようである．

あとがき

合成柱は鋼構造とコンクリート構造の境界領域にあり，最近になって研究が始められたばかりで，まだ細部において調査研究を必要とする問題点が山積しているように思われる．今回は耐荷力算定法に焦点を絞って報告したものであり，今後の設計の参考になれば幸いである．

本報告をまとめるにあたり，先輩諸賢の多くの著書，論文を参考にさせていただいた．ここに深く謝意を表します．

〔参考文献〕

1) 河井，吉川，石崎：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，pp. 42～50，pp. 45～47．（昭58. 2，3）

2) 袴田，吉川，石崎，田中：合成柱（充てんコンクリート方式）を有する柱基部の載荷実験，第37回土木学会年次学術講演会 pp. 377～378（昭57. 10）

3) 吉川，冨田，瀬川，木島：合成柱（充てんコンクリート方式）を有する柱基部のくり返し載荷実験，第29回構造工学シンポジウム，pp. 153～159（昭58. 2）

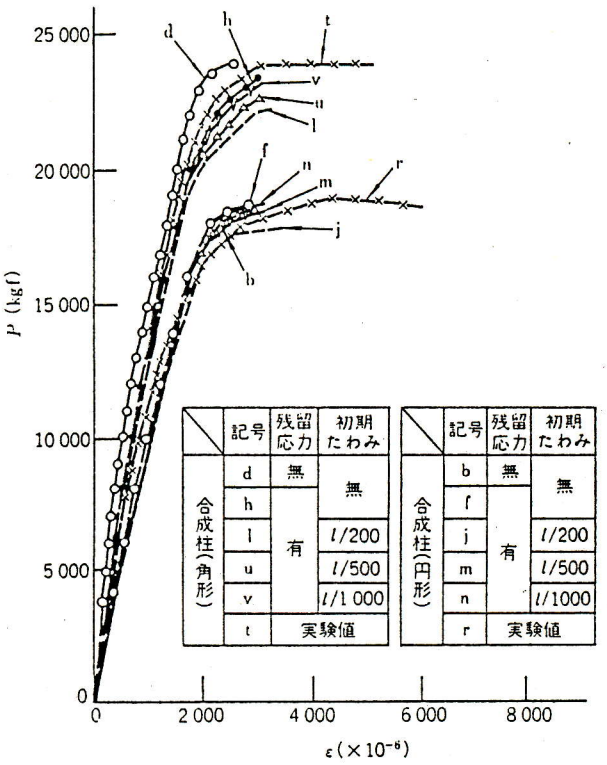


図-14 残留応力と初期たわみの組合わせにおける荷重—ひずみ曲線

4) 中井，吉川，酒造，坂本：合成柱を用いた鋼製橋脚の剛性確認に関する実験的研究，土木学会関西支部年次講演会，I-51-1～51-2（昭58. 9）

5) 中井，吉川，冨田，山井：軸力と曲げを受ける合成柱（充てん方式）の静的挙動に関する実験的研究，第38回土木学会年次学術講演会，pp. 489～490（昭58. 9）

6) 中井，酒造，吉川，冨田：合成柱を用いた鋼製橋脚の現場振動実験，第15回日本道路会議論文集，pp. 617～618（昭58. 10）

7) 中井，吉川：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，土木学会論文報告集に投稿中

8) Neogi, P. K. and Sent, H. K.: Concrete-filled Tubular Steel Columns under Eccentric Loading, The Structural Engineer, No. 5, Vol. 47 (May 1969)

9) Chen, W. F. and Atsuta, T.: Theory of Beam-Columns, Vol. 1, Mc Graw-Hill (1976)

10) 福本，西野：鋼構造部材と骨組—強度と設計—，丸善（昭45. 10）

11) Desayi, P. and Krishnan, S.: Equation for the Stress-Strain Curves of Concrete, Journal of ACI. Proc., Vol. 61, No. 3 (Mar. 1964)

12) DIN 18806, Tragfähigkeit von Verbundstützen, Berechnung und Bemessung, Teil 1 (Juni. 1980)

13) British Standard: BS 5400, Part 5 (Mar. 1979)

14) Roik, K., Wagenknecht, G.: Ermittlung der Grenztragfähigkeit von Ausbetonierten Hohlprofilstützen aus Baustahl, Bauingenieur 51 (1976)

15) 赤尼，栗田：コンクリート充てん鋼管柱の限界耐荷力の算定，コンクリート工学，Vol. 16, No. 1, pp. 63～67（昭53）

16) ヨーロッパ鋼構造協会連合（European Convention of Constructional Steelworks, ECCS）が推しょうする座屈曲線〔文献19)，図解 2.2.1（p. 98 参照）〕

17) 前田，栗田，春元，石崎，石川：DIN 18806 第1編合成柱の設計規準（草案）と設計施工例，橋梁と基礎，pp. 8～15（昭58. 6）

18) 日本建築学会：鋼管コンクリート構造計算規準・同解説（昭55. 2）

19) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，I 共通編，II 鋼橋編（昭55. 2）

20) 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55. 2）