

鉄筋コンクリートの終局強度設計法の検討

北大 工学部

正員 能町 純雄

シ

正員 角田 久史郎

シ

正員 松井 司

1. まえがき

現在わが国における鉄筋コンクリート構造物の断面設計は、弾性理論に基づく許容応力度法を基本としているが、弾性理論は元来鉄筋コンクリートのような複合材料の破壊安全性の評価には適さないため、現行の示方書においても部分的に塑性理論を導入しているが、そのため曲げ部材と圧縮部材との間の不連続が生じている。近年コンクリート構造物の設計理論に関する研究の進歩により、限界状態設計の概念が国際的に高い評価を受け、終局限界状態に対する設計には塑性理論(終局強度理論)、使用限界状態には弾性理論という考え方が定着してきた。鉄筋コンクリートの終局強度理論は、古くからの数多くの研究によつて、終局状態においても平面保持の仮定が適用しうること、コンクリートの引張強度は無視しうること、終局限界状態の成立条件としてひずみ限界を設定する方法が実用的であること、などの基本的な問題についてはほぼ合意を見ている。しかし、コンクリートの塑性係数や終局ひずみの値など、具体的な内容については意見が広く分裂し、また、これを実際の設計へ応用する際には構造安全性や各種の不確実性要因に対する考え方や手法の相違も加わって、すでに終局強度理論を採用した諸外国の示方書を見ても相互に大きな違いをもっている(図-1参照)。そこで、本文ではこのように多様に分散した既往の設計法の一般化を図り、その中に含まれる各種の変数の変動の影響度について明らかにすることによつて、合理的でありながら実用性をも損わない設計法を確立していく上の指針を得ようとするものである。

2. 終局強度設計法の概要

2.1 終局強度理論の基本形態

曲げモーメント、軸力または両者の組合わせ作用を受ける鉄筋コンクリート断面の終局強度理論の最も基本的な形態は、次のようである。

鉄筋およびコンクリートの応力度-ひずみ曲線の形状が与えられる(図-2)。後者については、その形状の特性を塑性係数 α^* および β^* によつて表わすことができる。コンクリートの終局ひずみ ϵ_c^* が与えられる。これらの仮定に基づくときの経済的配筋法の例として、図-3(a)に示すような矩形断面に対するものを模式的に示せば、図-4に示すようになる。ここに領域Ⅰは無筋、Ⅱは引張複筋、Ⅲは引張単筋、Ⅳは引張/圧縮複筋、Ⅴは圧縮単筋、Ⅵは圧縮複筋を表わし、それぞれに対するひずみ状態は図-3(b)に示すとおりである。なお、図-4において実線は合計鉄筋量が一定、すなわち $P_k = P_k + P_c = \text{一定}$ の線を、点線は上、下の鉄筋量の割合、すなわち $\rho = P_k / P_k = \text{一定}$ の線を表わす。

2.2 安全性を考慮する一般的手法と諸係数

上記の終局強度理論に対して、構造安全性または不確実性を考慮する方法として用いられている主なものを考

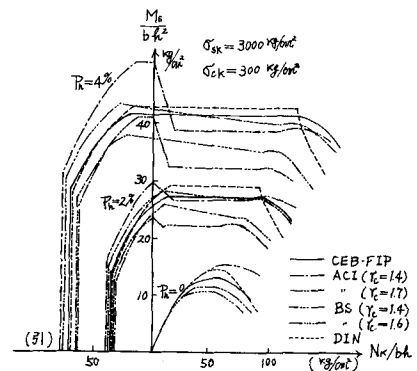


図-1 CEB-FIP, ACI 318, CP110, DIN 1045 による軸力の M/N - interaction curves の比較

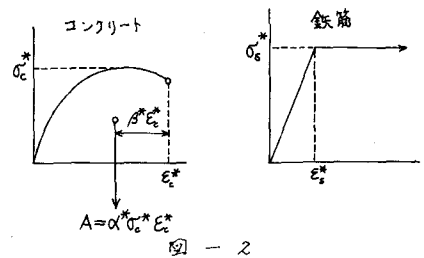


図-2

げれば次のとおり
である。

(1) コンクリート強度の不確実性—コンクリート強度の客観的不確実性は、試験値 σ_c の統計的性質から

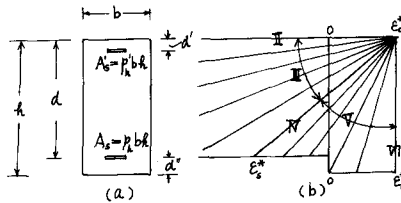


図 - 3

の特性値 σ_{ck} を定める際に考慮し、供試体と実際の構造物との間の形状寸法や製作・環境条件および載荷条件などの相違の影響および客観的に評価しがたい不確実性は、材料係数 γ_c によって考慮する。

$$P\{\sigma_c < \sigma_{ck}\} = p_c, \quad \sigma_c^* = \sigma_{ck} / \gamma_c \quad (1)$$

(2) 鉄筋の降伏強度の不確実性 — (1)と同様に

$$P\{\sigma_s < \sigma_{sk}\} = p_s, \quad \sigma_s^* = \sigma_{sk} / \gamma_s \quad (2)$$

(3) 過大変形による終局状態 — これはコンクリートと同様に鉄筋の引張に対しては終局ひずみ ϵ_s^{**} を決定することによって考慮することがある。 ϵ_s^{**} として0.005または0.01程度の値が用いられる。

(4) 圧縮支配破壊型式に対する安全性の増進 — 圧縮支配の破壊型式は一般に脆性に乏しく、予告なしに急激に生ずるため、構造安全性の面からできるだけ避けなければならない。その手段としては ϵ_c^* の低減、 ϵ_s^* の増進、平衡状態に対する中立軸高さの低減および鉄筋の圧縮に対する計算用強度の低減などがある。

$$\epsilon_s^* = \gamma_s \epsilon_{sy} \quad \text{こゝに} \quad \epsilon_{sy} = \sigma_{sy} / E_s \quad (3)$$

$$h_0 = h_o / \gamma_h \quad \text{こゝに} \quad h_o = \epsilon_c^* / (\epsilon_c^* + \epsilon_s^*) \quad (4)$$

$$\sigma_s^{**} = \sigma_s^* / \gamma_s^* \quad (5)$$

(5) 耐力算定上の不確実性 — 施工誤差などによる部材形状寸法の変動や既往の研究の不完全や耐力算定式の近似化などによる耐力算定上の不確実性は、耐力低減係数によって考慮することができる。

$$R^* = R_o / \gamma_R \quad \text{こゝに} \quad R_o \text{は(1)～(4)の仮定に基づく耐力の試算値} \quad (6)$$

(6) 荷重の不確実性 — 荷重の客観的不確実性および主観的不確実性は(1)と同様に考慮することができる。

$$P\{Q > Q_k\} = p_q, \quad Q^* = \gamma_Q Q_k \quad (7)$$

(7) 構造安全性 — いま、例えば R および Q がそれぞれ $N(M_R, \sigma_R^2)$ 、 $N(M_Q, \sigma_Q^2)$ なる正規分布に従うとすると、設計条件として $R_k = Q_k$ とおけば、破壊確率は $p_f = \Phi\left\{\left[\sigma_R \Phi^{-1}(p_R) + \sigma_Q \Phi^{-1}(p_Q)\right] / \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}\right\}$ となる。この値と設計条件から与えられる p_f との差異は、 γ_Q の中で考慮するのが普通である。

3. 各種の変数の影響領域と一般的傾向

3.1 終局強度理論に関する変数の影響

図-4の interaction curve に対するコンクリートの塑性係数 α^* および β^* 、ならびに終局ひずみ ϵ_c^* の影響の一般的傾向について図-5～7に示す。ここに真線は実線に対して上記の変数値を増したときの図-4の境界線の移動を示したものである。これらの図に見られるように α および β の変動の影響は無筋に対するa-b-c線

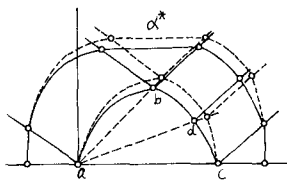


図 - 5

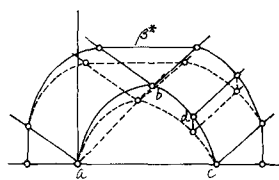


図 - 6

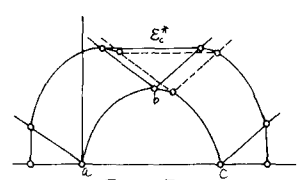


図 - 7

に対する影響として現われ、有筋に対する影響は単にその平行移動としてのみ現われる。一般にコンクリート強度が高い程 α^* および β^* の値は小さくなるが、両者の変動の影響は相殺するように作用すると云える。なお、図-6における d 変は下線ひずみが0の場合の耐力を表わす。 E_s^* の影響は単筋領域の増減として現われる。なお、合計鉄筋量に対する E_s^* の増加の影響の方向は、 $4\beta^*k^*d/l$ により異なる。

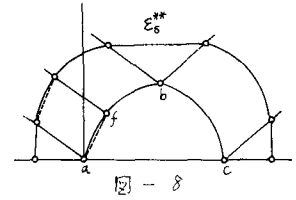


図-8

3.2 安全性に関する変数の影響

2.2 に述べた諸係数 $\gamma_c, \gamma_s, \gamma_R, \gamma_{Es}/E_s, \gamma_k, \gamma_{G'}$ および鉄筋ひずみ限界 E_s^{**} の影響の一般的傾向について図-8~13に示す。これらの図より明かなように、 E_s^{**} の影響はわずかの領域でのみ現われ、 γ_c の影響は $a-b-c$ 線の変動として、 γ_s は有筋領域に対してのみ、 γ_R は全領域に対して、 γ_{Es}/E_s および γ_k は b 点の移動として、そして $\gamma_{G'}$ は圧縮支配領域の有筋の場合にのみ影響が現われる。

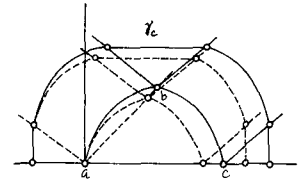


図-9

3.3 まとめ

以上の結果をまとめれば、引張支配領域に対してのみ影響をもつ変数は E_s^{**} 、は圧縮支配領域に対してのみ影響をもつ変数は $E_s^*, \gamma_{Es}, \gamma_k, \gamma_{G'}$ であり、全領域に影響するものとしては $\alpha^*, \beta^*, \gamma_c, \gamma_s, \gamma_R$ である。

4. 各種の変数の影響に関する数値的検討

ここで各種の変数の変動に対する影響について、実際上的変動幅の大小がばな見積りを基礎にして調べることにする。いま、一般に Y が確率変数 $X_1, X_2, \dots, X_n$ の関数として表わされ、その予測方程式を

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (8)$$

とする。このとき Y の期待値および変動係数は近似的に次式で表わされる。

$$M_Y = f(M_{X1}, M_{X2}, \dots, M_{Xn}), \quad M: \text{期待値} \quad (9)$$

$$\delta_Y^2 = \left[\sum_{i=1}^n \left(\partial f / \partial X_i (M_{X1}, \dots, M_{Xn}) \right)^2 \delta_{Xi}^2 \right] / M_Y^2, \quad \delta: \text{変動係数} \quad (10)$$

上式を用いて、各種の変数の終局耐力に対する影響について数値的に調べた。計算は矩形断面を用い、各種の変数の期待値を次のように選んだ。

$\alpha = 0.8095, \beta = 0.4160, E_s^* = 0.0035, E_s^{**} = \infty, \gamma_c = 1.765, \gamma_s = 1.15, \gamma_k = 1.5, \gamma_R = 1, \gamma_{Es} = 1, \gamma_k = 1, \gamma_{G'} = 1, E_s = 2.1 \times 10^4$ kg/cm^2 、なお、上記の値で、 $E_s^{**} = 1\%, 0.5\%$ のときについても求めた。

これらの各種の変数の変動係数 δ_{Xi} に対する δ_{Yi} の値を計算し、 mp ($m = \sigma_s^* / \sigma_c^*, p = \text{鉄筋比}$) と $\delta_{Yi} / \delta_{Xi}$ との関係を求めたのが図-14、15である。図-14は軸力が作用しない引張単鉄筋のみのものであり、図-15は、引張、圧縮鉄筋断面が等しい複鉄筋断面において、軸力も作用する場合のものである。図-14においては、鉄筋の強度の違いによる影響はみられないが、極限ひずみ E_s^{**} の制限があるか否かによって、 mp の小さい

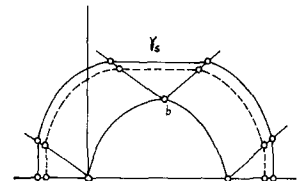


図-10

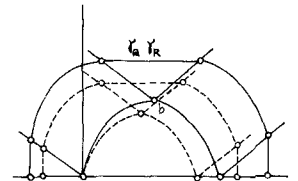


図-11

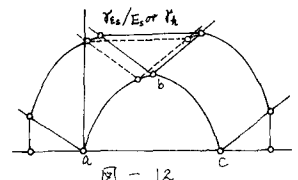


図-12

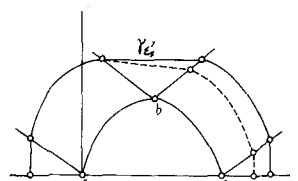


図-13

部分で差異の現われることが示されている。図-15では鉄筋の強度によって影響の現われ方が異なっており、 E_s^*, E_s^{**} が一番大きい違いがみられ、 β, d' についてはほとんど差異がみられない。各種の変数において最大の影響を与える変数は、図-14、15 からみられるごとく、鉄筋の有効高さ d であ

