

信州大学工学部 正員 長 尚
 信州大学工学部 正員 小山 健
 信州大学工学部 学生員 今尾 雄一

1. まえがき 日本における鉄筋コンクリート部材の現行の設計法はいわゆる許容応力度設計法である。しかしこの方法の最大の欠点は安全性を正當に評価することが難しく、バランスのとれた安全度を確保することができないことである。そのため世界のすう勢はより合理的な安全度の評価が可能な設計法を目指して終局強度設計法からさらに限界状態設計法に移行しつつある。日本においてもその方向に進むものと考えられるが、その場合安全のレベルをどの辺にし、荷重係数・部分安全係数などをどの程度にするかを判断するには、現行の許容応力度設計法と新しい設計法との Code Calibration (整合)を行なう必要がある。本文では鉄筋コンクリートはり断面における終局強度設計法との Code Calibrationの方法について述べる。なお水準Ⅰの限界状態設計法における終局限界状態時の扱い方は終局強度設計法の扱い方と基本的には一致するので本文はそれも含む。

2. 安全性確保のためにとられている方策 各設計法において安全性を確保するためにどのような配慮がなされているかをまとめると次のようになる。許容応力度設計法においては、1)設計荷重(公称値)を作用荷重の平均値より大きめに選ぶ(特に活荷重の場合)、2)平均値より小さい材料強度の規格値を材料安全率で除してこれを許容応力度とする、3)材料の塑性的性質を考慮しないとか、コンクリートの引張抵抗を無視するといったような安全側の計算仮定を設ける、である。終局強度設計法においては、1)同前1)、2)平均値より小さい材料強度の公称値(規格値もしくは基準値)を用いる、3)荷重およびその影響の変動性と不確実性を考慮して設計荷重に荷重係数 γ を乗じる、4)材料強度および部材強度の変動性と不確実性を考慮して部材強度に減少係数 ϕ を乗じる、である。水準Ⅰの限界状態設計法においては(ただし終局限界状態時)、1)荷重作用の変動性(確率・統計理論で処理できるもの)を考慮して、その値を超過する確率が小さなある値になるような特性値を決める、2)材料強度の変動性(同前)を考慮して、その値を下回る確率が小さなある値になるような特性値を決める、3)荷重およびその影響の不確実性(確率・統計理論で処理できないもの)を考慮して、荷重の特性値に部分安全係数 γ を乗じる、4)材料強度および部材強度の不確実性(同前)と崩壊の影響の重大さなどを考慮して強度の特性値を部分安全係数 γ_m で除す、である。

3. 鉄筋コンクリートはり断面の Code Calibration Code Calibrationの方法は、まず現行の許容応力度設計法によって設計されたはり断面について信頼性理論を用いてその安全レベルを評価し、次いで信頼性理論に基づく設計基本式と終局強度設計法の設計基本式とを対比させて、 ϕ 、 γ などを評価するものである。現行の許容応力度設計法に基づいて設計されたはり断面について、その強度(R)と荷重影響(S)の平均値 $\bar{R}$ 、 $\bar{S}$ と変動係数 V_R 、 V_S が計算でき、 R 、 S が正規分布もしくは対数正規分布するものとすれば、現行の設計法で設計されたはり断面の安全レベルを示す安全指標 β は次式から求められる。 $\beta = (\bar{R} - \bar{S}) / \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}$ 又は $\ln(\bar{R}/\bar{S}) / \sqrt{V_R^2 + V_S^2}$ (1) 次終局強度設計法における設計基本式は一般に次のように表わされる。 $\phi R^n \geq \sum_j \gamma_j y_j^n$ (2) ここに R^n は公称強度、 y_j^n は公称荷重影響、 γ は組み合わせを考える荷重の種類数である。一方信頼性理論に基づく設計基本式は安全指標 β が与えられれば次式のように表わされる。 $\bar{R} \geq \bar{S} + \beta \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}$ 又は $\bar{S} \exp(\beta \sqrt{V_R^2 + V_S^2})$ (3) この式(3)を式(2)の形に表現したとき、式(2)の ϕ 、 γ_j に相当する部分が、現行の安全レベルに整合した ϕ 、 γ_j を求める式となる。結果を示すと次のようである。 $\phi = \bar{R} / (1 - \beta \alpha_R) V_R / R^n$ 又は $\bar{R} \exp(-\beta V_R^2 / \sqrt{V_R^2 + V_S^2}) / R^n$ (4) $\gamma_j = \bar{y}_j (1 + \beta \alpha_j V_{y_j}) / y_j^n$ 又は $\bar{y}_j \exp(\alpha_j V_{y_j}) / y_j^n$ (5) ここに $\alpha_R = \sigma_R / \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}$ (6), $\alpha_j = \sigma_{y_j} / \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}$ (7), V_{y_j} , σ_{y_j} は荷重 y_j の変動係数、標準偏差で、 α は次式を満たす値である。 $(\sum_{j=1}^n \bar{y}_j) \exp(\beta V_S^2 / \sqrt{V_R^2 + V_S^2}) = \sum_{j=1}^n (\alpha V_{y_j})$ (8) 鉄筋

コンクリートはり断面を長方形断面で代表させ、終局時の破壊形式は引張破壊と仮定し、抵抗曲げモーメント M_R の算定は A C I 基準に示されている式によるものとする。 M_R は確率変数 σ_{cu} (コンクリートの円筒体試体の強度)、 σ_{sy} (鉄筋の降伏点強度)、 A_s (鉄筋量)、 b (断面の幅)、 d (有効高さ) および A_u (抵抗曲げモーメント解析修正係数) の関数として次のように表わされる。 $M_R = \sigma_{sy} A_s \{ d - \sigma_{sy} A_s / (1.7 \sigma_{cu} b) \} A_u$ (9) 次に現行の許容応力度設計法で設計された断面をつりあい断面で代表させて公称作用曲げモーメントを逆算し、それを用いて作用曲げモーメント M_S を表わすと次のようになる⁴⁾。 $M_S = V_E (D + L) A_a \bar{b} \bar{d}^2$ (10) ここに D 、 L は死、活荷重影響係数 ($\bar{D}^2 + \bar{L}^2 = 1$)、 A_a は作用曲げモーメント解析修正係数、 $V_E = 0.5 \sigma_{ca} k_0 (1 - k_0/3)$ 、 $k_0 = n \sigma_{ca} / (n \sigma_{ca} + \sigma_{sa})$ (11) である。これらの式 (9)、(10) を用いて、一次近似法により式 (4)、(5) に示す ϕ 、 γ_j を求めると次のようになる。

1) 正規分布の場合: $\beta = (C_R - C_S) / \rho$ 、 $\phi = C_R (1 - \beta \alpha_R V_R) / C_R^2$ 、 $\gamma_D = 1 + \beta \alpha_D V_{DA}$ 、 $\gamma_L = \bar{L} (1 + \beta \alpha_L V_{LA}) / \bar{L}^2$ 、

2) 対数正規分布の場合: $\beta = \ln (C_R / C_S) / V_f$ 、 $\phi = C_R \exp (-\beta V_R^2 / V_f) / C_R^2$ 、 $\gamma_D = \exp (\alpha V_{DA})$ 、 $\gamma_L = \bar{L} \exp (\alpha V_{LA}) / \bar{L}^2$

ここに $C_R = \bar{\sigma}_{sy} \bar{\rho} (1 - a_0)$ 、 $a_0 = \bar{\sigma}_{sy} \bar{\rho} / (1.7 \bar{\sigma}_{cu})$ 、 $C_S = V_E (\bar{D} + \bar{L})$ 、 $\rho = \sqrt{\beta_R^2 + \beta_S^2}$ 、 $\beta_R = \bar{\sigma}_{sy} \bar{\rho} \sqrt{a_0^2 (V_{\sigma_{cu}}^2 + V_b^2) + (1 - 2 a_0)^2 (V_{\sigma_{sy}}^2 + V_{A_s}^2) + (1 - a_0)^2 V_{a_0}^2 + V_d^2}$ 、 $\beta_S = V_E \sqrt{\bar{D}^2 V_D^2 + \bar{L}^2 V_L^2 + (\bar{D}^2 + \bar{L}^2) V_{A_a}^2}$ 、 V_i : i の変動係数、 $V_R = \beta_R / C_R$ 、 $V_S = \beta_S / C_S$ 、 $V_f = \sqrt{V_R^2 + V_S^2}$ 、 $V_{DA} = \sqrt{V_D^2 + V_{A_a}^2}$ 、 $V_{LA} = \sqrt{V_L^2 + V_{A_a}^2}$ 、 $\alpha_R = \beta_R / \rho$ 、 $\alpha_D = V_E \bar{D} V_{DA} / \rho$ 、 $\alpha_L = V_E \bar{L} V_{LA} / \rho$ 、 $C_R^2 = \bar{\sigma}_{sy}^2 \bar{\rho}^2 (1 - a_0^2)$ 、 $a_0^2 = \bar{\sigma}_{sy}^2 \bar{\rho}^2 / (1.7 \bar{\sigma}_{cu}^2)$ 、 α は次式を満たす値である。 $(\bar{D} + \bar{L}) \exp (\beta V_f^2 / V_f) = \bar{D} \exp (\alpha V_{DA}) + \bar{L} \exp (\alpha V_{LA})$ なお上添字の n は公称値であることを示す。

4. 計算例 新しい設計法において用いられる公称値もしくは特性値をどの程度にするかは別に議論されなければならないが、ここでは現行の公称値を用いるとして (死荷重 + 活荷重) 時について Code Calibration した。計算に用いたデータは若干の文献^{2), 5)}を参照して次のように決めた。 $V_D = 0.1$ 、 $V_L = 0.3$ 、 $V_{\sigma_{cu}} = 0.2$ 、 $V_{\sigma_{sy}} = 0.08$ 、 $V_{A_s} = 0.03$ 、 $V_b = 0.04$ 、 $V_d = 0.08$ 、 $V_{A_a} = V_{a_0} = 0.1$ 、 $\bar{D}^2 / \bar{D} = 1$ 、 $\bar{L}^2 / \bar{L} = 1.5$ 、 $\bar{\sigma}_{cu}^2 / \bar{\sigma}_{cu} = 0.85$ 、 $\bar{\sigma}_{sy}^2 / \bar{\sigma}_{sy} = 0.8$ 、 $\bar{\sigma}_{cu}$ (σ_{ca}) = 180 (60)、240 (80)、300 (100)、360 (120) kg/cm^2 、 $\bar{\sigma}_{sy}$ (σ_{sa}) = 2400 (1400)、3000 (1600)、3000 (1800)、3500 (2000)、4000 (2100) kg/cm^2 、 $\xi = \frac{\bar{L}^2}{\bar{D}^2} = 0, 0.5, 1, 2, 3, 4$ 。結果は次の通りである。1) 正規分布の場合: $\phi = 0.543$ (0.9)、 $\gamma_D = 1.10$ (1.82)、 $\gamma_L = 0.95$ (1.61) 2) 対数正規分布の場合: $\phi = 0.778$ (0.9)、 $\gamma_D = 1.45$ (1.68)、 $\gamma_L = 1.52$ (1.75) なおこれらの値はコンクリートの強度4種、鉄筋の強度5種および公称死活荷重比6種の組み合わせ120ケースの平均値であり、()内は $\phi = 0.9$ とした場合のものである。

5. 考察 上述の計算結果は減少係数および荷重係数 (もしくは部分安全係数) を考える上での一つの参考資料に過ぎないが、さらによりの確かなものを得るためには次の諸点について配慮する必要がある。1) 現行の設計法で用いられている公称値と平均値の関係を数値的により正確につかむ。2) 各確率変数の変動係数の値をより正確に評価する。3) 新しい設計法において用いられる公称値もしくは特性値を数量的にはっきり定義する。4) 算定式の相違によって結果がかなり違ってくる点について検討する。例えば上述の計算例において、正規分布によるか対数正規分布によるかによって結果が違っている。一般的には対数正規分布の方がよいといわれているが²⁾検討を要する問題である。又 Ang, Lind らは Code Calibration の算定式の誘導の過程において計算を簡単にするためにいわゆる分離定数を用いているが、ここではそれを用いなかった。分離定数を用いた場合と用いない場合とでは結果にかなりの差があるものもあった。この点についても検討する必要がある。

なお上述の計算例において正規分布による場合 γ_j がより小さく、しかも γ_D の方が γ_L より大きくなっているのは、活荷重においては公称値を用いる段階ですでに安全性確保のための配慮が入っており、しかも強度減少係数がかなり小さくなったことによるためと思われる。たゞし対数正規分布ではそうっていない点については前述の4)に関連して検討を要する。参考文献 1) Ang, A. H. S.: Structural Risk Analysis and Reliability-Based Design, Proc. ASCE, Vol. 99, No. ST9, 1973. 2) Ravindra, M. K. et al.: Illustration of Reliability-Based Design, Proc. ASCE, Vol. 100, No. ST9, 1974. 3) Ang, A. H. S. et al.: Reliability Bases of Structural Safety and Design, Proc. ASCE, Vol. 100, No. ST9, 1974. 4) 長尚: 鉄筋コンクリートT形はり断面の最適設計, 土木学会論文報告集 258号, 1977 5) 土木学会: 鉄筋コンクリート設計法の最近の動向, コンクリートライブラリー 41号, 1975.