RC 偏心軸圧縮部材の信頼性の評価方法[†]

伊 藤 和 幸* 伊 藤 哲**

Estimation of Reliability of RC-Member under
Eccentric Axial Load

by

Kazuyuki ITO* and Satoshi ITO**

A method of estimating the reliability of double reinforced concrete members under an axial load at a given eccentricity was proposed by using the probabilistic method, considering the variations in strength of both reinforcing bars and concrete and improving the method which was proposed previously to obtain the reduction factor of the balanced steel ratio, the minimum steel ratio, and the ultimate design strength of the single reinforced flexural member with a specified reliability. The validity of the method was examined by comparing the results with the values provided in the ACI-Code which were decided in the safety side, based on a large number of the test data.

Key words : Reinforced concrete, Yield strength, Compressive strength, Failure, Probability

1 研究の目的

ACI Code および JSCE Code (土木学会編:コンクリート標準示方書—昭和 61 年制定)に基づき、汎用の範囲での同じ鉄筋とコンクリートを用いた複鉄筋長方形断面部材 (Case 1, 標準断面, $A_s'/A_s=0.6$, $\rho=A_s/(b \cdot d)=0.03$, $V_c=0.15$: 各内容は 5 章参照) が偏心軸圧縮力を受けた場合の耐力の相互作用図を画けば Fig. 1 のようである。同図中の設計耐力 $M_{ud} \sim N_{ud}$ 図より, $N_{ud}=0$ では JSCE Code による M_{ud} は ACI Code によるものより低いが, その他の N_{ud} に対してはいずれも ACI Code によるものの方が低く,

Fig. 1. Correlation curves between resistant strength of moment and axial load for Case 1 by ACI and JSCE Codes.

特に、釣合状態に近づくに連れて両者の差が大きくなることが伺える。従って、いずれの Code による設計耐力が妥当であるかを判定する必要がある。その為にはまず判定の基準となる方法を確立しなければならない。本研究は先に提案した確率的手法を^{1)~3)}発展させ、判定の基準としての同部材の設計耐力に対する信頼性を評価する方法を提案し、同方法を適用して多数の実験資料に基づいて安全側に規定された ACI Code による同部材の設計耐力に対する信頼性を求め、その方法の妥当性を検証したものである。

今後、本邦において、同部材の設計耐力が所要の信頼性を持つように減係数(または部材係数)を定めるに際して、ここで提案した方法が参考になれば幸である。

なお、本文で取扱う内容は、長方形断面の複鉄筋部材(ただし、部材断面の上および下側に配置された鉄筋群は同一のミルから同一の加工工程を経て製造されたもの)で、帯鉄筋で補強された短柱(柱の横方向変位による二次モーメントを考慮しなくてよい場合)とする。

2 記 号

Fig. 2 に各記号、ひずみ図、応力図を示す。ここに、 $A_s=b \times h$, A_s', A_s =上, 下側配置鉄筋の断面積, C' =圧縮合力, E =弾性係数, T =引張合力, N' =偏心軸圧縮力, M =等価断面の図心軸からのモーメント, α =コンクリートの等価応力ブロックにおける均等圧

[†] 本報を「RC 部材の信頼性に関する研究 (第 2 報)」(Reliability of RC-Member, II) とする。

原稿受理 平成元年 1 月 10 日 Received Jan. 10, 1989

* 正 会 員 中部大学工学部 春日井市松本町, College of Engineering, Chubu University, Matsumoto-cho, Kasugai

** 大成建設(株) 東京都新宿区西新宿, Taisei Construction Company, Nishi-Shinjuku, Shinjuku-ku, Tokyo

Fig. 2. Notations and diagrams of strain and stress.

縮応力度の分布高さ ($a = \beta_1 \cdot x$), b = 断面幅, d = 有効高さ, $d' = A_s'$ の図心から上縁までの距離, e = 等価断面の図心から N' の作用位置までの距離, $e' = A_s$ の図心から N' の作用位置までの距離, f = 材料強度 (コンクリートは圧縮強度, 鉄筋は降伏強度), h = 部材断面高さ, $n = E_s/E_c$, y_1 = 上縁から等価断面の図心までの距離, x = 上縁から中立軸までの距離, $\beta_1 = f_c'/\epsilon_c$ により定まる係数, ϵ = ひずみ, ϕ = 通減係数, ρ = 鉄筋比, σ = 生起応力度

[下付記号] c = コンクリート, b = 釣合状態, d = 設計値, s = 鉄筋, u = 終局状態または耐力, y = 鉄筋の規格降伏強度

[上付記号] ' = 圧縮

3 一般の解法

一般的解法は通常の教科書に詳述されているので, 次に要点のみを記述する. また, 終局設計耐力 (M_{ud} , N_{ud}) は終局耐力 (M_u , N_u) にそれぞれ ϕ を乗ずればよいので省略する.

3.1 偏心軸圧縮の場合の一般式

$$N_u' = 0.85f_c' \cdot b \cdot a + A_s' \cdot \sigma_s' - A_s \cdot \sigma_s \quad (1)$$

$$M_u = 0.85f_c' \cdot b \cdot a \cdot (d - a/2) + A_s' \cdot \sigma_s' \cdot (d - d') - N_u' \cdot (d - y_1) \quad (2)$$

$$\text{ここに, } y_1 = [(b \cdot h^2/2) + n \cdot (A_s \cdot d + A_s' \cdot d')]/[b \cdot h + n \cdot (A_s + A_s')] \quad (3)$$

3.2 釣合偏心状態の場合

$$a_b = [\epsilon_{cu}'/(\epsilon_{cu}' + f_y/E_s)] \cdot \beta_1 \cdot d \quad (4)$$

$$N_{bu}' = 0.85f_c' \cdot b \cdot a_b + A_s' \cdot f_y' - A_s \cdot f_y \quad (5)$$

$$M_{bu} = 0.85f_c' \cdot b \cdot a_b \cdot (d - a_b/2) + A_s' \cdot f_y' \cdot (d - d') - N_{bu}' \cdot (d - y_1) \quad (6)$$

3.3 圧縮破壊領域 ($N_u' > N_b'$, $e < e_b$, $a > a_b$) の場合

下側鉄筋が降伏する以前 ($\sigma_s < f_y$) にコンクリートが圧壊 ($\epsilon_c' = \epsilon_{cu}'$) する場合であり, σ_s' は f_y' とする. なお, ここでは, e' を与えて N_u' , M_u を求める方法を述べる.

a は次の三次方程式を解いて求められる.

$$a^3 - 2(d - e') \cdot a^2 + 2m \cdot d \cdot [\rho \cdot e' \cdot (\epsilon_{cu}'/\epsilon_y) - \rho' \cdot (f_y'/f_y) \cdot (d - d' - e')] \cdot a - 2\rho \cdot m \cdot d^2 \cdot e' \cdot \beta_1 \cdot (\epsilon_{cu}'/\epsilon_y) = 0 \quad (7)$$

$$\sigma_s = E_s \cdot \epsilon_{cu}' \cdot [(\beta_1 \cdot d/a) - 1] \leq f_y \quad (8)$$

ここに, $\rho = A_s/(b \cdot d)$, $\rho' = A_s'/(b \cdot d)$

$$m = f_y/(0.85f_c')$$

よって, 式 (1), (2) において, $\sigma_s' = f_y'$ と置換えて

N_u' , M_u を求めることができる.

3.4 引張破壊領域 ($N_u' < N_b'$, $e > e_b$, $a < a_b$) の場合

この場合は, まず, 下側鉄筋が降伏 ($\sigma_s = f_y$) し, つづいて中立軸の位置が上昇して, 遂にはコンクリートが圧壊 ($\epsilon_c' = \epsilon_{cu}'$) するものとする. よって, σ_s' が f_y' に達した場合と, それ以下の場合に分けて検討する. なお, ここでは, N_u' を与えて M_u を求める方法を述べる.

$$\sigma_s' = \epsilon_{cu}' \cdot E_s' \cdot [1 - (d' \cdot \beta_1/a)] \leq f_y' \quad (9)$$

式 (1) において, $\sigma_s = f_y$ とし, 式 (9) の σ_s' を代入し, a に関する二次方程式を解けば,

$$a = [-\ell_1 \pm \sqrt{\ell_1^2 + \ell_2}]/2 \quad (10)$$

$$\text{ここに, } \ell_1 = [A_s' \cdot \epsilon_{cu}' \cdot E_s' - A_s \cdot f_y - N_u']/(0.85f_c' \cdot b)$$

$$\ell_2 = 4A_s' \cdot \epsilon_{cu}' \cdot E_s' \cdot d' \cdot \beta_1/(0.85f_c' \cdot b)$$

式 (10) において, $0 \leq a/\beta_1 \leq h$ なる a を採用する.

$$a \geq [\epsilon_{cu}'/(\epsilon_{cu}' - \epsilon_y)] \cdot \beta_1 \cdot d'$$

の場合は $\sigma_s' = f_y'$ とし, そうでない場合は σ_s' をそのまま式 (2) に代入して M_u を求める. ただし, $\sigma_s' = f_y'$ の場合には, 次式で求めた a を適用する.

$$a = [N_u' + A_s \cdot f_y - A_s' \cdot f_y']/(0.85f_c' \cdot b) \quad (11)$$

Fig. 3. Relationship between moment and axial load at given eccentricity.

3・5 相互作用図

一般的解法では、式(1)~(11)により、 b , h , d , d' , A_s , A_s' , f_c' , ε_{cu}' , f_y , f_y' , E_c , E_s , e' (または N_u') を与えることによって、 N_u' と M_u (または、 N_{ud}' と M_{ud}) の相互作用図を Fig. 3 のように画くことができる。

図の破線は $N_u' \sim M_u$ を、実線は $N_{ud}' \sim M_{ud}$ を示す。線上の数値は 6 章での計算位置であり、Table I ~ V における No. に相当する。No. 5, 5' は釣合状態、それより数値の大きい方は圧縮破壊領域、小さい方は引張破壊領域にある。図に示すように、前者の各点は e_b を、後者の各点は N_{bu}' を接分したものである。

次に、このようにして求められた部材の耐力 (N_u' , M_u) および設計耐力 (N_{ud}' , M_{ud}) に対する信頼性を評価する方法について述べる。

4 確率的解法

一般的解法では f_c' , f_y , f_y' をそれぞれ一定値として取扱ったが、実際にはこれらの値は多少の変動を示す。それらの確率変数をそれぞれ f_c , f_s , f_s' , 各変動値を f_{ci} , f_{si} , f_{si}' , その平均値を μ_c , μ_s , μ_s' , 変動係数を V_c , V_s , V_s' , 標準偏差を S_c , S_s , S_s' , 確率密度関数を $p(f_c)$, $p(f_s)$, $p(f_s')$ と記号する。ただし、1 章後段の記述により、本研究では $f_y = f_y'$, $V_s = V_s'$, $S_s = S_s'$, $p(f_s) = p(f_s')$ とする。

さて、下・上側鉄筋の応力度 σ_s' , σ_s , および、 a の確率変数をそれぞれ σ_{sp}' , σ_{sp} , a_p と記号すれば、式(1), (2)は次のように書き換えられる。

$$N_u' = 0.85 f_c \cdot b \cdot a_p + A_s' \cdot \sigma_{sp}' - A_s \cdot \sigma_{sp} \quad (12)$$

$$M_u = 0.85 f_c \cdot b \cdot a_p \cdot (d - a_p/2) + A_s' \cdot \sigma_{sp}' \cdot (d - d') - N_u' \cdot (d - y_1) \quad (13)$$

ここに、 N_u' , M_u (または N_{ud}' , M_{ud}) は一般的解法で求めた値であり、本研究の目的は、これらの耐力に対する信頼性を求めることにある。

一般的解法では f_c' , f_y , f_y' はいずれも一定値であったので、圧縮破壊領域、釣合状態、引張破壊領域を区別して明確にそれらを求めることができた。しかし、確率的解法では、特定の f_{ci} に対して無数の f_s が対応し、また、特定の f_{si} に対して無数の f_c が対応するため、一般的解法のように一意的に $N_u' \sim M_u$ の相互作用図を求めることはできない。ここで評価できるのは、所定の部材について、特定の N_u' , M_u (または N_{ud}' , M_{ud}) に対し、その部材が特定の耐力で引張破壊する確率 P_{tr} , および、圧縮破壊する確率 P_{cf} を求めることである。よって、部材がその耐力で破壊する確率 P_f は、

$$P_f = P_{tr} + P_{cf} \quad (14)$$

N_u' , M_u (または N_{ud}' , M_{ud}) に対する信頼性 Q_f は、

$$Q_f = 1 - P_f \quad (15)$$

4・1 引張破壊式による場合

3・4 節の各式を確率変数の式に書き換えると、

$$N_u' = 0.85 f_c \cdot b \cdot a_p + A_s' \cdot \sigma_{sp}' - A_s \cdot f_s \quad (16)$$

$$\sigma_{sp}' = E_s' \cdot \varepsilon_{cu}' \cdot [1 - (\beta_1 \cdot d' / a_p)] \leq f_s' \quad (17)$$

$$M_u = 0.85 f_c \cdot b \cdot a_p \cdot (d - a_p/2) + A_s' \cdot \sigma_{sp}' \cdot (d - d') - N_u' \cdot (d - y_1) \quad (18)$$

式(17)を式(16)に代入して a_p を求める。

$$a_p = [-m_1 \pm \sqrt{m_1^2 + m_2}] / 2 \quad (19)$$

ここに、 $m_1 = [E_s' \cdot \varepsilon_{cu}' \cdot A_s' - A_s \cdot f_s - N_u'] / (0.85 f_c \cdot b)$

$$m_2 = 4E_s' \cdot \varepsilon_{cu}' \cdot \beta_1 \cdot d' \cdot A_s' / (0.85 f_c \cdot b)$$

ただし、 $0 \leq a_p / \beta_1 \leq h$ なる a_p を採用する。

4・2 圧縮破壊式による場合

3・3 節の各式を確率変数の式に書き換えると、

$$N_u' = 0.85 f_c \cdot b \cdot a_p + A_s' \cdot f_s' - A_s \cdot \sigma_{sp} \quad (20)$$

$$\sigma_{sp} = E_s \cdot \varepsilon_{cu}' \cdot [(\beta_1 \cdot d / a_p) - 1] \leq f_s \quad (21)$$

$$M_u = 0.85 f_c \cdot b \cdot a_p \cdot (d - a_p/2) + A_s' \cdot f_s' \cdot (d - d') - N_u' \cdot (d - y_1) \quad (22)$$

式(21)を式(20)に代入して a_p を求める。

$$a_p = [-n_1 \pm \sqrt{n_1^2 + n_2}] / 2 \quad (23)$$

ここに、 $n_1 = [A_s' \cdot f_s' + E_s \cdot \varepsilon_{cu}' \cdot A_s - N_u'] / (0.85 f_c \cdot b)$

$$n_2 = 4E_s \cdot \varepsilon_{cu}' \cdot \beta_1 \cdot d \cdot A_s / (0.85 f_c \cdot b)$$

ただし、 $0 \leq a_p / \beta_1 \leq h$ なる a_p を採用する。

4・3 破壊の確率 P_f を求める手順

4・1, 2 節の各式から P_{tr} , P_{cf} を求めるには、次の手順によればよい。

(1) 特定の f_{si} を与える。

(2) f_{si} のとき、ある f_{cj} を与える。

(3) $f_s = f_s' = f_{si}$, $f_c = f_{cj}$ として、式(19)または式(23)より、 $a_p = a_{pij}$ を求める。

(4) $a_p = a_{pij}$ として、式(18)または式(22)より M_{uij} を求める。

(5) 特定の f_{si} に対して f_{cj} を変化させ、手順(3), (4)を繰返し、 M_u (または $M_{ud} = M_{uij}$ となったときの f_{cj} を f_{ci} とする。

(6) 手順(3)で求めた a_{pij} を式(17)または式(21)に代入したとき、 σ_{sp}' または σ_{sp} が f_{si}' または f_{si} に等しいかまたは大きい場合は、それぞれ、 $\sigma_{sp}' = f_{si}' = f_{si}$, $\sigma_{sp} = f_{si}$ とする。

(7) 次に f_{si} を変え、手順(1)~(6)により、それに対応する f_c を求めると、Fig. 4 に示す f_c の分布は同図の f_s 軸上の f_{sc} の分布に変換できる。この際、 f_{sc} の分布形は、 f_{si} 以上の確率分布関数が f_c の分布の f_{ci} 以下の確率分布関数に等しくなるように画けばよい。ここで f_c , f_{sc} の確率分布関数を反転して対応させたのは、Fig. 4 に示すように、 f_c の分布は平均値を

Fig. 4. Relationship between distributions of f_c , f_{sc} and f_s .

中心として左右反転して f_s 軸上に変換されるからである。

このようにして求められた f_{sc} の分布は、単に式 (16), (18) または式 (20), (22) を満足させるための f_c と f_s の関係であって、真の鉄筋の降伏強度 f_s の分布とは異なる。よって、これと区別するために f_{sc} と記号したのである。

(8) さて、Fig. 4 の $f_{sci} = f_{si}$ に着目しよう。 f_{si} 以上のハッチした面積は、手順 (7) により、 f_c の分布の f_{ci} 以下のハッチした面積に等しい。また、式 (18) または式 (22) において、特定の M_u (または M_{ud}) 値を与えたとき、特定の $f_{si} = f_{sci}$ の場合のこれらの式を満足する f_c の値が f_{ci} であった。

いま、仮に、 $f_s = f'_s = f_{si}$ はそのままとし、 f_c のみ f_{ci} より低い値 f_{ci} を与えて式 (19) または式 (23) より a_{pl} を求め、式 (17) または式 (21) より σ_{spl}' , σ_{spl} を求めて、それぞれを式 (18) または式 (22) に代入して M_{ui} を求めると、これは特定の M_u (または M_{ud}) 値より小さい値となる。したがって、 $f_{si} = f_{sci}$ のとき、所定の M_u (または M_{ud}) 値以下となる確率はハッチした面積で示される。

f_s が f_{si} である確率は $p(f_s) \cdot d(f_s)$ であり、 f_c と f_s は確率的に独立であるから、所定の M_u (または M_{ud}) 値以下になる確率は

$$\begin{aligned} & p(f_s) \cdot d(f_s) \times \int_{-\infty}^{f_{ci}} p(f_c) \cdot d(f_c) \\ & \equiv p(f_s) \cdot d(f_s) \times \int_{f_{sci}}^{+\infty} p(f_{sc}) \cdot d(f_{sc}) \end{aligned}$$

したがって、 M_u (または M_{ud}) に対する部材の破壊の確率 P_{cf} (または P_{Lr}) は、 f_s 軸の全域にわたって上記の積分を実施することによって求められる。

$$P_{cf} \text{ (or } P_{Lr}) = \int_{-\infty}^{+\infty} P(f_s) \cdot d(f_s) \times \int_{f_{sci}}^{+\infty} P(f_{sc}) \cdot d(f_{sc})$$

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} p(f_s) \cdot \left[\int_{f_{sci}}^{+\infty} p(f_{sc}) \cdot d(f_{sc}) \right] \cdot d(f_s) \quad (24)$$

よって、 M_u (または M_{ud}) に対する部材の信頼性は、式 (14) を経て式 (15) で求めることができる。

(9) 手順 (7) により f_s 軸上に変換された f_c の分布 f_{sc} は、中心軸圧縮の場合には正規分布³⁾、釣合鉄筋比および最小鉄筋比の場合には近似正規分布として取扱えたが³⁾、本研究の場合は、純曲げ部材の耐力の信頼性の場合と同様に、非対称分布となる。また、単鉄筋純曲げ部材の場合には f_c と f_{sc} の関係は二次方程式を解くことによって簡単に求めることができたが³⁾、本研究では複鉄筋を配置しているため、手順 (1)~(7) の試算を実施しなければならない。計算の結果によれば、 f_c から変換された f_{sc} の分布の平均値 μ_{sc} は、引張破壊式の場合には μ_s に近く、かつ、その下方に変換されるが、圧縮破壊式の場合には μ_s よりはるか下方の f_s 軸の負の領域に変換される。

(10) 6 章の計算は次の要領で実施した。

(a) 式 (24) の積分の下限値は、 $\mu_s - 10S_s$, $\mu_{sc} - 6S_{sc}$ のいずれか低い方の値とし、上限値は $\mu_s + 10S_s$ とした。

(b) f_{sc} の標準偏差 S_{sc} の近似値は次のようにして求めた。すなわち、手順 (1) の f_{si} の代りに μ_c , $f_{cu} = \mu_c - 1S_c$, $f_{co} = \mu_c + 1S_c$ と置き、手順 (2) の f_{cj} の代りに f_{sj} とし、手順 (3)~(5) を実施し、求められた f_{sj} をそれぞれ μ_{sc} , f_{scu} , f_{sc0} とする。よって、

$$S_{sc} \doteq [(\mu_{sc} - f_{scu}) + (f_{sc0} - \mu_{sc})] / 2 \quad (25)$$

(c) (b) の手順 (2) の f_{sj} の試算の下限値は、引張破壊式の場合は $\mu_s - 20S_s$ 、圧縮破壊式の場合には $\mu_s - 50S_s$ とした。ただし、最小鉄筋比に対する場合には、後者では $\mu_s - 100S_s$ 、前者では引張破壊領域に限り $\mu_s - 6S_s$ とした。

(d) 手順 (2) の f_{cj} の初期値はいずれの場合も $\mu_c + 15S_c$ とし、 f_c 値の低い方に向かって試算を行った。

(e) Fig. 3 に示す $d(f_s)$ 値は、計算結果の精度を考慮して次の各値を適用した。

引張破壊領域、引張破壊式の場合	10 psi
圧縮破壊領域、引張破壊式の場合	100 psi
引張破壊領域、圧縮破壊式の場合	100 psi
圧縮破壊領域、圧縮破壊式の場合	1000 psi
(1 ksi=1000 psi=6.89 MPa)	

このように積分の刻みを変えたのは、10 psi の場合には f_s と f_{sc} の分布が極めて接近しており、1000 psi の場合には両者の分布が著しく離れているためであって、上記以下の刻みを用いて計算しても P_f 値の order はほとんど変わらず、計算時間の節約のため、参考までに掲示した。

5 試算への適用値

5・1 材料

5・1・1 コンクリート

(1) 割増し係数, $y_c: f'_c$ から配合設計強度 μ_c への割増し係数 $y_c (= \mu_c / f'_c)$ は次のようにして求める.

$$y_c = 1 / (1 - 1.34 V_c) \quad (26)$$

$$y_c = (f'_c - 0.5) / [f'_c \cdot (1 - 2.33 V_c)] \quad (\text{ksi}) \quad (27)$$

ただし, 計算に使用する V_c が, 既知の f'_c に対し, 式 (26) = (27) を満足する V_c の値より大きいときは式 (27) を, 小さいときは式 (26) を適用する. これらの両式は所定の強度以下となる確率が 1/100 となるように設定されたものである. ACI, 4.3.2.1

(2) 変動係数, V_c : Mirza, Hatzinikolas and MacGregor⁶⁾ は V_c を品質管理の程度によって大凡の分類をし, $V_c \div 0.20$ では Poor, 0.15 では Average, 0.10 では Excellent としている. 本研究では $V_c = 0.15$ として以下の試算を行う.

(3) f'_c の分布形: Rüsch, Shell and Rackwitz⁷⁾, Tait⁸⁾ の報告に基づき, 正規分布として取扱う.

(4) 弾性係数, $E_c: 57000 \sqrt{f'_c}$ (psi) ACI, 8.5.1

(5) 終局ひずみ, $\epsilon_{cu}: 0.003$ ACI, 10.2.3

5・1・2 鉄筋

(1) 変動係数 V_s および t_s 値: Mirza and MacGregor⁹⁾ によれば, f_y (Grades 40, 50, 60) の実際の分布は $t_s = 1.0 \sim 2.5$, $V_s = 0.04 \sim 0.12$ であると報告している. ここに, $t_s = (\mu_s - f_y) / (\mu_s \cdot V_s)$. よって, 本研究では $V_s = 0.08$, $t_s = 2.0$ として以下の試算を行う.

(2) f_s の分布形: f_s の分布は厳格には β -分布と言われているが⁹⁾, その非対称性は, 規格値以下および近傍の強度をもつ鉄筋を棄却した結果によるものと考え,

一般に適用されているように, 正規分布として取扱う.

(3) 弾性係数, $E_s: 29 \times 10^6$ (psi) ACI, 8.5.2

5・2 材料の組合せ

一般に広く使用されている両材料の強度は, f_y に対しては 40~60 ksi, f'_c に対しては 3~5 ksi であるので, 次の組合せについて以下の計算を実施する.

Case 1: Grade 40 (276 MPa), $f'_c = 3$ ksi (21 MPa)

Case 2: Grade 60 (414 MPa), $f'_c = 3$ ksi (21 MPa)

Case 3: Grade 60 (414 MPa), $f'_c = 5$ ksi (35 MPa)

Case 4: Grade 40 (276 MPa), $f'_c = 5$ ksi (35 MPa)

5・3 その他の設計規定値

(1) 偏心軸圧縮部材の通減係数, ϕ

ACI, 9.3.2.2. (b)

圧縮破壊領域: $\phi = 0.7$

引張破壊領域: $\phi \cdot N_u$ が $0.10 f'_c \cdot A_g$ または $\phi \cdot N_{bu}$ のいずれか小さい方から 0 に減少するにつれて, ϕ を 0.7 から 0.9 まで比例的に増加できる.

(2) 最大鉄筋量 ACI, 10.9.1

圧縮部材の軸方向最大鉄筋量: $0.08 A_g$

(3) 最小鉄筋量 ACI, 10.9.1

圧縮部材の軸方向最小鉄筋量: $0.01 A_g$

(4) β_1 ACI, 10.2.7.3

$f'_c = 3$ ksi のとき, $\beta_1 = 0.85$

$f'_c = 5$ ksi のとき, $\beta_1 = 0.80$

5・4 標準断面

6 章の試算に適用する断面のうち, $b = 15"$, d

Table I. Probability less than M_{ud} and M_u for standard section in Case 1. ($P_f = G \cdot D - X = G \cdot 10^{-X}$).

	Zone		Ductile failure					Brittle failure				
			No.									
M_{ud} · N'_{ud}	Eq.	P_f	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	DU	P_{tr}	4.9D-5	7.9D-6	6.4D-6	2.0D-5	3.5D-5	1.7D-5	7.2D-6	6.5D-6	—	—
	DU	P_{tr}					3.5D-5					
	BR	P_{cr}	1.3D-6	1.2D-6	1.4D-6	2.2D-6	5.3D-6	6.1D-6	6.7D-6	9.2D-6	1.3D-5	2.1D-5
	BR	P_{cr}					5.3D-6					
		P_f	5.0D-5	9.1D-6	7.8D-6	2.2D-5	4.0D-5	2.3D-5	1.3D-5	1.6D-5	1.3D-5	2.1D-5
		X	5	6	6	5	5	5	5	5	5	5
M_u · N'_u			1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'	9'	10'
	DU	P_{tr}	0.021	0.043	0.088	0.126	0.142	0.075	0.031	0.014	—	—
	DU	P_{tr}					0.142					
	BR	P_{cr}	2.2D-5	3.0D-4	2.2D-3	9.1D-3	0.025	0.025	0.026	0.026	0.028	0.030
	BR	P_{cr}					0.025					
		P_f	2.1D-2	4.3D-2	9.0D-2	1.3D-1	1.6D-1	1.0D-1	5.7D-2	4.0D-2	2.8D-2	3.0D-2
		X	2	2	2	1	1	1	2	2	2	2

Eq. DU: Equation of ductile failure, Eq. BR: Equation of brittle failure.

$=19"$, $d'=3"$, $h=22"$ ($1"=2.54$ cm) の断面で, $A_s'=3A_s/5$, $\rho=0.03$ の部材を標準断面部材と呼称する. ここで, $\rho=0.03$ としたのは, 5・3 (2), (3) 項により求めた鉄筋比は, それぞれ, $\rho_{\max}=0.0579$, $\rho_{\min}=0.0072$ であり, それらのほぼ中央値に相当するからである.

6 ACI Code による耐力の信頼性

6・1 標準断面で Case 1 の場合の信頼性

計算の結果を Table I に示す. 表中の No. は M_{ud} の計算位置 (Fig. 3 参照) である. また, P_f は P_{cf} と P_{tr} を合算した値で, X , D は $P_f=G \times 10^{-X}=G \cdot D-X$ を意味する. X 値は部材の破壊に対しては 4 以上 (すなわち $P_f < 1/1000$) が望ましい³⁾. したがって, ここでは信頼性の目安として X 値を適用する. 表より次の事が要約される.

(1) ACI Code で規定された通減係数を考慮しない場合の N_u' , M_u に対する X 値は 1~2 であって, 部材の信頼性は極めて低い.

(2) 通減係数を考慮した場合の設計耐力 N_{ud}' , M_{ud} に対する X 値は 5~6 であって, いずれも所要の信頼性 ($X \geq 4$) を充足している.

(3) 引張破壊式は条件として $\sigma_s=f_y$ としているため, 圧縮破壊領域において偏心距離が短くなるにつれて実状に合わなくなる. したがって, No. 5 から 10 に進むに連れて P_{tr} が減少傾向から増加傾向に転じた場合からは不合理であるので, Table I では — 印で示して削除した.

6・2 標準断面で各 Case の場合の信頼性

計算の結果を Table II に示す. 表より次の事が要約される.

(1) いずれも所要の信頼 ($X \geq 4$) を充足している.

(2) 規格強度の高い Case 2, 3 (Grade 60) の方が, それより低い Case 1, 4 (Grade 40) よりも, No. 4 以上に対して信頼性が高い.

(3) 表には示されていないが, 各 Case の No. 2 についての P_f 値は次のようであった.

Case 1: $P_f=9.1 D-6$, Case 2: $P_f=1.2 D-5$

Case 3: $P_f=3.2 D-6$, Case 4: $P_f=1.0 D-5$

よって, Case 1, 2, 4 の No. 2 における信頼性はほぼ同一と見なせる. よって, 各 Case の代表として,

Table II. Reliabilities of M_{ud} for standard section in Case 1-4.

Case	No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	X	5	6	6	5	5	5	5	5	5	5
2	X	5	5	6	6	6	6	6	6	6	6
3	X	5	6	6	6	6	6	6	6	6	5
4	X	5	5	6	5	5	5	5	5	5	5

Table III. Reliabilities of M_{ud} for maximum and minimum steel ratio in Case 1.

Steel ratio	No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.0300	X	5	6	6	5	5	5	5	5	5	5
0.0579	X	3	4	4	5	5	6	6	6	6	6
0.0072	X	6	6	5	4	4	4	4	4	4	4

以下の試算には Case 1 を適用する.

6・3 鉄筋比を変化させた場合の信頼性

標準断面寸法で $A_s'=3A_s/5$ の部材について, 鉄筋比のみ $\rho=0.03$, $\rho_{\max}=0.0579$, $\rho_{\min}=0.0072$ に変化した場合の信頼性の計算結果を Table III に示す. 表より次の事が要約される.

(1) $\rho_{\max}$ の No. 1 を除き, 他はすべて所要の信頼性 ($X \geq 4$) を充足している.

(2) 標準断面に比べ, 鉄筋比が大きいほど引張破壊領域での信頼性は低下し, 圧縮破壊領域では上昇している. 鉄筋比の小さい場合は, 大凡, その逆の傾向を示している.

6・4 断面寸法を変化させた場合の信頼性

$A_s'=3A_s/5$, $\rho=0.03$ の部材で, 標準断面寸法のもの, これより d のみを大きくしたもの, さらに b を大きくしたもの, 等について信頼性を求めた結果を Table IV に示す. 表より次の事が要約される.

(1) いずれも所要の信頼性 ($X \geq 4$) を充足している.

(2) d を大きくした場合は, 標準断面に比べ, 引張破壊領域において信頼性が低下する.

(3) さらに b を大きくした場合の信頼性は前項の信頼性と全く同じである. すなわち, 断面幅の増減は信頼性に影響しない.

(4) (2) 項に述べたように, 有効高さの大小が信頼性に影響するので, 偏心軸圧縮力を受ける部材の場合には, 釣合鉄筋比, 最小鉄筋比, 単鉄筋純曲げ部材の耐力の場合に求めたように, 鉄筋の降伏強度とコンクリートの圧縮強度の変動のみによって, 総括的に, 所要の信頼性でもって, 適用可能な両材料の品質を規定することはできない.

6・5 現場打設コンクリートの場合の信頼性

参考として, ここでは現場打設コンクリートの場合の部材の信頼性を求めてみる.

Table IV. Reliabilities of M_{ud} for deeper d and wider b in Case 1.

b	d	d'	h	No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
15	19	3	22	X	5	6	6	5	5	5	5	5	5	5
15	27	3	30	X	4	5	5	4	4	5	5	5	5	5
20	27	3	30	X	4	5	5	4	4	5	5	5	5	5

b, d, d', h : in inch (1 inch=2.54 cm).

Table V. Reliabilities of M_{ud} for concrete placed at construction sites in Case 1.

Content	No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Case 1	X	5	6	6	5	5	5	5	5	5	5
C. C. S	X	4	5	5	4	4	4	4	4	4	4

C. C. S: Concrete in construction site.

Mirza, Hatzinikolas and MacGregor^{6),10)}は、最小限許容できる程度の養生をした現場打設コンクリートの28日圧縮強度の平均値 $\bar{f}_x$ は次式で示される、と報告している。

$$\bar{f}_x = 0.675f'_c + 1.1 \leq 1.15f'_c \quad (\text{ksi}) \quad (28)$$

よって、今までの計算に使用した μ_c の代りに $\bar{f}_x$ を適用すればよい。計算の結果をTable Vに示す。表より、現場打設コンクリートの場合は、Case 1の標準断面の場合に較べ、No. のいずれの場合でも X 値が1つ少なく、すなわち、信頼性は1 order 低下することが判る。しかし、いずれも P_f は1/1000以下である。

7 結 論

(1) 偏心軸圧縮力を受ける複鉄筋 RC 部材の耐力の信頼性 Q_f は、式(16)~(19)を適用し、4・3節で述べた手順により求めた引張破壊を生じる確率 P_{Lf} と、式(20)~(23)を適用し、同様の手順で求めた圧縮破壊を生じる確率 P_{cf} の和を P_f とすれば、 $Q_f = 1 - P_f$ として求められる。

(2) 前項の方法を適用し、多くの実験資料に基づいて安全側に規定されたACI Codeによる同部材の設

計耐力に対する信頼性を求めたところ、極めて良好な適合を得た(Table I ~ V 参照)。したがって、ここで提案した信頼性の評価方法は充分に実用性のあるものと思料される。

おわりに本研究の遂行に当たり、有益なご助言を戴いた京都大学名誉教授・岡田清博士に深謝します。

(昭和63年10月4日 第43回土木学会年次学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) K. Ito and A. Sumikama, Proc. ACI, **82**, 5, 701 (1985).
- 2) K. Ito and A. Sumikama, Proc. ACI, **83**, 4, 695 (1986).
- 3) 伊藤和幸, 伊藤 哲, 材料, **36**, 410, 1272 (1987).
- 4) 岡田 清, 伊藤和幸, 不破 昭, 平沢征夫, “鉄筋コンクリート工学”, p. 49 (1987) 鹿島出版会.
- 5) ACI Committee, “Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-83)” (1983) ACI, Detroit.
- 6) S. A. Mirza, M. Hatzinikolas and J. G. MacGregor, Proc. ASCE, **105**, ST. 6, 1021 (1979).
- 7) H. Rüschi, R. Shell and R. Rackwitz, Bulletin **206**, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 38 (1969) Berlin (in German).
- 8) J. B. Tait, Concrete International, Design & Construction, **3**, 9, 79 (1981).
- 9) S. A. Mirza and J. G. MacGregor, Proc. ASCE, **105**, ST. 5, 921 (1979).
- 10) J. G. MacGregor, J. Canadian C. E., **3**, 4, 484 (1976) Ottawa.