

東北大学 正 鈴木 基行
東北大学 正 尾坂 芳夫
東北大学 学 戸谷 有一

1. まえがき

限界状態設計法を水準-Iの検証方法によって構成する場合、設計に係わる構造変数の妥当な変動性を考慮した上で、部分安全係数を合理的に評価することが必要である。部分安全係数の理論的根拠は、CORNELLらによる、いわゆる二次モーメント法で示されているが、限界状態式(9.1)関数)を線形化する場合、各構造変数の平均値で行うよりもその設計値ですべきであるという考え方が最近有望視されている。

本研究は、純曲げを受けるRC矩形単鉄筋断面を対象にその終局限界状態式に関わる全ての構造変数に正規分布をあてはめ、各構造変数が終局限界状態に及ぼす影響を評価し、さらに破壊の確率を安全度の尺度として設計format式での部分安全係数を評価しようとするものである。

2. 理論の展開

限界状態式(9.1)関数)が式(1)で与えられた時、その設計における安全性指数 β は式(2)で表わされる。

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) = Z = 0 \quad \dots (1)$$

$$\beta = m_z / \sigma_z \quad \dots (2)$$

一般式(1)では β を式(2)より求めることができないので $g(\cdot) = 0$ 上の点で式(1)を線形化しその平均値 m_z 、標準偏差 σ_z を求めると次の様になる。

$$m_z = g(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial g}{\partial x_i} \bigg|_{x_i^*} (m_i - x_i^*) \quad \dots (3)$$

$$\sigma_z = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial x_i} \bigg|_{x_i^*} \cdot \sigma_i \right)^2} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \left(\frac{\partial g}{\partial x_i} \bigg|_{x_i^*} \right) \sigma_i \quad \dots (4)$$

$$\text{ただし、} \alpha_i = \frac{\partial g}{\partial x_i} \bigg|_{x_i^*} \cdot \sigma_i / \left\{ \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial x_j} \bigg|_{x_j^*} \cdot \sigma_j \right)^2 \right\}^{1/2} \quad \dots (5)$$

これらを式(2)へ代入すると

$$\sum_{i=1}^n \frac{\partial g}{\partial x_i} \bigg|_{x_i^*} (m_i - x_i^* - \alpha_i \cdot \beta \cdot \sigma_i) = 0 \quad \dots (6)$$

上式が成立するためには式(7)が成立しなければならぬ。

$$x_i^* = m_i - \alpha_i \cdot \beta \cdot \sigma_i, \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad \dots (7)$$

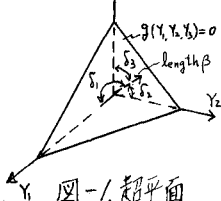
各構造変数 x_i の線形化点 x_i^* は式(7)より求められる。

さて、ここで $Y_i = (x_i - m_i) / \sigma_i$ により正規化すると

$$\beta = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial x_i} \bigg|_{x_i^*} \right) Y_i / \left\{ \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial x_i} \bigg|_{x_i^*} \right)^2 \right\}^{1/2} = \sum_{i=1}^n \alpha_i Y_i \quad \dots (8)$$

ここで Y_i は、図-1に示すよ

うに標準化された超平面上の点である。式(8)はこの超平面の方向余弦を表わしているので β は(8)より原点から超平面までの距離を表わすことになる。なお



α_i は各構造変数 x_i が限界状態に与える影響の度合を表わしている。 $(\sum \alpha_i^2 = 1)$ である)さらに、構造変数 x_i に対する部分安全係数は、設計値 x_i^* と特性値 x_{ki} で除すことで得られるので次式で表わされる。

$$\gamma_i = x_i^* / x_{ki} = (m_i - \alpha_i \cdot \beta \cdot \sigma_i) / x_{ki} \quad \dots (9)$$

3. 対象断面諸元

本研究で対象とした断面を単鉄筋矩形断面とし、引張主鉄筋量をつり合ひ鉄筋量の24%とした。曲げによる終局限界状態式(9.1)関数)は、耐力をWhitneyの理論による終局曲げモーメント、荷重は断面に作用する曲げモーメントと1次式で与える。

$$g(\cdot) = \sigma_s A_s (d - \frac{\sigma_s A_s}{1.7 \sigma_c b}) - F \quad \dots (10)$$

ここで、構造変数(確率変数)としてコンクリート圧縮強度 σ_c 、鉄筋強度 σ_s 、鉄筋量 A_s 、断面幅 b 、有効高さ d 、荷重 F の6ヶを考え、これらの確率変数の分布形を全て正規分布と仮定した。これらの確率変数、およびその変動性が終局限界状態に与える影響を調べるための基本的な量として表-1に

表-1. 構造変数の初期条件

	公称値	平均値	変動係数	変動係数
σ_c	240	288.7	0.2	0.2
σ_s	3000	3395	0.05	0.01
A_s	24.9	24.9	0.03	0.5
d	70	70	0.08	0.5
b	40	40	0.04	0.5
F	特性安全率で指定		0.35	

表-2. $\gamma_i - \beta_i - \beta$ 関係

γ_k	β_k	β
1.0	1.27×10^{-2}	2.27
1.1	4.05×10^{-3}	2.69
1.2	1.18×10^{-3}	3.08
1.3	3.25×10^{-4}	3.46
1.4	8.53×10^{-5}	3.82
1.5	2.18×10^{-5}	4.16
1.6	5.57×10^{-6}	4.48
1.7	1.46×10^{-6}	4.79
1.8	4.09×10^{-7}	5.08
1.9	1.27×10^{-7}	5.36
2.0	4.54×10^{-8}	5.62

のもとで特性安全率 k , 安全性指数 β , 破壊の確率 P_f を算定すると表-2のようになる。

4. 解析結果および考察

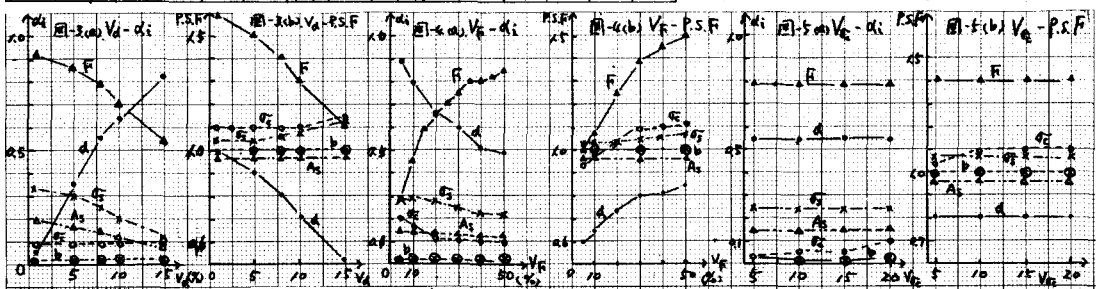
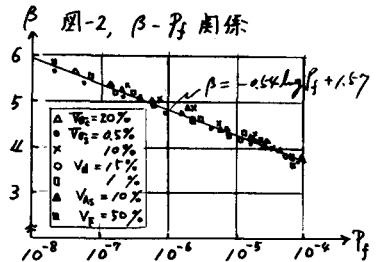
表-3は、1つの確率変数の変動のみ変化させ他の確率変数の変動性は表-1に示した値とし、その確率変数の変動性が断面耐力 $R = \phi_s A_s (d - \frac{\phi_s A_s}{27 b})$ の分布形、変動性に及ぼす影響を算定した結果である。又図-2は、上記と同様の变化に対し安全指数 β と破壊確率 P_f とを算定してプロットしたものである。さらに、図-3~図-5は、特性安全率 k を1.6に固定した時の特に構造変数 d , F , ϕ_s の変動性が終局限界状態におよぼす影響度——すなわち α_i ——および各構造変数に対する部分安全係数(Partial Safety Factor)を求めて図示したものである。(なお F の α_i の値は、実際は-1である。)これらの解析結果から次の事が判明した。

- (1) 全構造変数と正規分布と仮定し耐力 R の分布を正規確率紙上にプロットして確認した結果、 R の分布は実用上正規分布と仮定してもさしつかえない。
- (2) 本研究で採用した終局限界状態式および設計条件に関する限り、耐力の変動性に影響を強くおよびす構造変数は有効高さ d , および鉄筋強度 ϕ_s の2つであり、鉄筋断面積 A_s , 断面幅 b , コンクリート圧縮強度 ϕ_c の変動性はほとんど R の変動性に影響を与えない。この事は設計条件がunder reinforcement 状態であり、引張耐力が引張鉄筋に支配される事と矛盾しない。
- (3) 安全指数 β と破壊の確率 P_f との関係は、構造変数の種々の変動性に対して直線関係にあり

$$\beta = -0.54 \log P_f + 1.57$$
で表わせる。
- (4) 実際上8変数の変動性に強い影響を与える構造変数は、 d と F であり合理的な部分安全係数評価のために、これらの諸量の実際のバラツキ程度を把握する必要がある。

表-3. 構造変数 X_i の変動性が耐力 R に及ぼす影響

$\frac{X_i}{X_i \text{の変動係数}} V_{X_i}(\%)$	σ_c		b		A_s		σ_s		d				
耐力	5	20	1	10	1	3	10	0.5	5	10	1	8	15
平均値(ε-m)	54.9	55.2	55.2	55.2	55.3	55.2	55.0	48.8	55.2	62.8	55.2	55.2	55.2
標準偏差(ε-m)	6.0	5.8	6.0	6.0	5.5	6.0	7.8	4.6	6.0	8.4	3.6	6.0	9.5
変動係数(%)	10.5	10.8	10.8	10.8	9.9	10.8	14.2	8.1	10.8	13.4	6.4	10.8	17.2



次に破壊の確率 P_f と安全度の尺度として式(17)で表わされる設計format式での3つの部分安全係数——すなわち材料強度安全係数 γ_{mc} , γ_{ms} および荷重の安全係数 γ_F ——の詳細を行った結果の一例を図-6, 図-7に横軸を F 及 d の変動性によって示す。

$$f\left(\frac{\phi_c}{\gamma_{mc}}, \frac{\phi_s}{\gamma_{ms}}\right) \geq \gamma_F F_k \quad \dots (11)$$

今後は、正規分布以外の他の分布形や荷重の組合せを考慮するべく数値解析を行い合理的な部分安全係数の評価を試みる予定である。

