限界状態設計法における荷重係数について

正 会 員 坂 本 順*

1. まえがき

前稿(文献1))では、マクロ的時間変動を伴う荷重の確率過程モデルについて閾値横断率および最大値分布の評価手法に関する資料を示し、併せて確率論的限界状態設計法への応用について述べた。

国際的に構造設計法は許容応力度設計法から限界状態設計法へ移行してゆく趨勢にあり、また、実用設計体系の構成に統計・確率論の考え方が組み入れられている。統計・確率論の手法は、荷重と構造挙動の不規則性や変動を定量化して建築物の安全性と使用性についての信頼度設計の体系化に組み入れてゆく上で有用な数理的手法であるが、実用設計法としての構成では、部分的に厳密な統計・確率論を適用して設計手法が煩雑になることを避け設計体系全体の調和と実用性を配慮することが望ましい。このような視点から、本稿では統計・確率論の考え方にに基づく限界状態設計法と荷重モデルの構成について提案的考察を述べている。さらに、前稿で述べた閾値横断率とそれに基づく最大値分布の近似評価法を用いた荷重係数の実用的な設定手法と算定例を示している。荷重係数の設定手法としては、Turkstra 則による組合せ荷重の最大値推定法を適用した終局限界状態設計用荷重係数の設定手法(文献4))およびこれに準じた文献3)の設定例、文献5)に提案されている設定手法があるが、本稿では、組合せ荷重の同時生起率を組入れた手法を例示するとともに荷重係数の算定過程における反復計算を避けた実用的に簡便な荷重係数の設定例について述べている。

1. 荷重・抵抗係数設計式

ある1つの設定された限界状態に対する抵抗を R 、荷重効果を $S_1, S_2, \dots, S_m$ としてこれらは互いに統計的に独立の確率変数(以下では、基本変数という)とする。さらに、限界状態関数 $G(R, S_1, S_2, \dots, S_m)$ と指定された信頼度 $\Phi(\beta_T)$ によって設計条件が次式のように表されるとする。

$$G(R, S_1, S_2, \dots, S_m) = R - \sum_{k=1}^m S_k \dots \dots \dots (1-1)$$

$$P_{rob}[G(R, S_1, S_2, \dots, S_m) \geq 0] \geq \Phi(\beta_T) \dots \dots \dots (1-2)$$

ここに、 $P_{rob}[E]$ =事象 E の生起確率、 $\Phi(\cdot)$ =標準正規関数、 β_T =信頼性指標、 $\sum_k$ は荷重効果の組合せを表す。

基本変数 R および $S_1, S_2, \dots, S_m$ が対数正規変数のときには^{[注1])}、次式により標準正規変数 $u_0, u_1, \dots, u_m$ に変換される。

$$u_0 = \frac{\ln r - \hat{\mu}_R}{\hat{\sigma}_R}, \quad u_k = \frac{\ln s_k - \hat{\mu}_k}{\hat{\sigma}_{s_k}} \dots \dots \dots (1-3)$$

$$k=1, 2, \dots, m$$

ここに、 $\bar{\mu}_x = \ln \bar{X}$, $\hat{\sigma}_x = \sigma_{\ln x}$; $\bar{\cdot}$, σ は、平均値、標準偏差を表す。

(1-3) 式の変換によって、限界状態方程式は下式のよう記述される。

$$g(u_0, u_1, \dots, u_m) = \exp\{\hat{\sigma}_R \cdot u_0 + \hat{\mu}_R\} - \sum_{k=1}^m \exp\{\hat{\sigma}_{s_k} \cdot u_k + \hat{\mu}_{s_k}\} = 0 \dots \dots \dots (1-4)$$

(1-4) 式に Taylor 級数展開を適用して $u_0, u_1, \dots, u_m$ について線形項までを用いると、

$$g^L(u_0, u_1, \dots, u_m) = g(u_0^*, u_1^*, \dots, u_m^*) + \sum_{k=1}^m \frac{\partial g^*}{\partial u_k} \cdot (u_k - u_k^*) = 0 \dots \dots \dots (1-5)$$

ここに、 $(u_0^*, u_1^*, \dots, u_m^*)$ は、限界曲面 $g(u_0, u_1, \dots, u_m) = 0$ 上の展開点座標を表す。

u -空間において(1-5)式は超平面を表すが、原点から超平面までの垂線距離を β_T とすると、 $u_0^*, u_1^*, \dots, u_m^*$ は次式で表される(文献2))。

$$u_k^* = \alpha_k \cdot \beta_T \dots \dots \dots (1-6)$$

$$\alpha_k = -(\partial g^* / \partial u_k) / \sqrt{\sum_{k=1}^m (\partial g^* / \partial u_k)^2} \dots \dots \dots (1-7)$$

$$k=0, 1, 2, \dots, m$$

$u_k^* (k=0, 1, 2, \dots, m)$ に対応する $R^*, S_1^*, S_2^*, \dots, S_m^*$ は、(1-3) 式から下式で表される。

$$R^* = \frac{1}{\sqrt{1+V_R^2}} \cdot \exp\{\alpha_R \cdot \beta_T \cdot \sigma_{\ln R}\} \cdot \bar{R} \dots \dots \dots (1-8)$$

$$S_k^* = \frac{1}{\sqrt{1+V_{s_k}^2}} \cdot \exp\{\alpha_{s_k} \cdot \beta_T \cdot \sigma_{\ln s_k}\} \cdot \bar{S}_k \dots \dots \dots (1-9)$$

$$k=1, 2, \dots, m$$

また、(1-7) 式は、

* 名古屋大学 教授・工博
(昭和 63 年 4 月 18 日原稿受理)

$$\alpha_R = -\sigma_{\ln R} / \sqrt{\sigma_{\ln R}^2 + \sum_{k=1}^m \sigma_{\ln S_k}^2 \left(S_k^* / \sum_{i=1}^m S_i^* \right)^2} \quad (1-10)$$

$$\alpha_{S_k} = \sigma_{\ln S_k} \cdot \left(S_k^* / \sum_{i=1}^m S_i^* \right) / \sqrt{\sigma_{\ln R}^2 + \sum_{k=1}^m \sigma_{\ln S_k}^2 \left(S_k^* / \sum_{i=1}^m S_i^* \right)^2} \quad (1-11)$$

$k=1, 2, \dots, m$

上記の R^* , S_1^* , S_2^* , ..., S_m^* を用いて, (1-2) 式は近似的に次式の設計条件式におき換えられる。

$$R^* \geq S_1^* + S_2^* + \dots + S_m^* \quad (1-12)$$

上式に (1-8), (1-9) 式を代入すると, 下記の荷重・抵抗係数方式の設計式が導かれる。

$$\frac{1}{\sqrt{1+V_R^2}} \cdot \exp\{\alpha_R \cdot \beta_T \cdot \sigma_{\ln R}\} \cdot \bar{R} \geq \sum_{k=1}^m \frac{1}{\sqrt{1+V_{S_k}^2}} \cdot \exp\{\alpha_{S_k} \cdot \beta_T \cdot \sigma_{\ln S_k}\} \cdot \bar{S}_k \quad (1-13)$$

上式中の分離係数 α_R , α_{S_k} は, (1-8) 式～(1-11) 式の反復収束計算により算定される。

上述の荷重効果 S_k ($k=1, 2, \dots, m$) が荷重 W_k ($k=1, 2, \dots, m$) によって生じるものとする, すなわち,

$$S_k = c_k \cdot W_k, \quad k=1, 2, \dots, m \quad (1-14)$$

のように変換係数 c_k (本稿では確定変数とする) によって荷重 W_k が荷重効果 S_k に変換されるものとする (1-13) 式は下式のように記述できる。

$$\phi \cdot R_n \geq \sum_k c_k \cdot \gamma_{W_k} \cdot W_{kn} \quad (1-15)$$

$$\phi = \frac{1}{\sqrt{1+V_R^2}} \cdot \exp(\alpha_R \cdot \beta_T \cdot \sigma_{\ln R}) \cdot \frac{\bar{R}}{R_n} \quad (1-16)$$

$$\gamma_{W_k} = \frac{1}{\sqrt{1+V_{W_k}^2}} \cdot \exp(\alpha_{W_k} \cdot \beta_T \cdot \sigma_{\ln W_k}) \cdot \frac{\bar{W}_k}{W_{kn}} \quad (1-17)$$

$k=1, 2, \dots, m$

ここに, ϕ および γ_{W_k} は, 抵抗係数および荷重係数, R_n および W_{kn} は, 抵抗および荷重の公称値を表す。なお, (1-16), (1-17) 式中の分離係数 α_R および α_{W_k} ($k=1, 2, \dots, m$) は, (1-9) 式中の S_k^* , $\bar{S}_k$ を W_k^* , $\bar{W}_k$ に, (1-10), (1-11) 式中の $S_k^* / \sum_{i=1}^m S_i^*$ を $c_k W_k^* / \sum_{i=1}^m c_i W_i^*$ におき換えた式によって算定する。また,

$$\sigma_{\ln x} = \sqrt{\ln(1+V_x^2)}, \quad V_x \leq 0.3 \text{ のときには } \sigma_{\ln x} \approx V_x \quad (1-18)$$

である。

本稿では, (1-15)～(1-17) 式を設計基本式と呼ぶことにする。

2. 荷重モデル

設計用荷重の一般的表現として下式を用いる^{註2)}。

$$W = L_1 \cdot L_2 \cdots L_p \cdot Y^q \quad (2-1)$$

ここに, Y は積雪深, 風速, 地震動加速度, あるいは人間・物品載荷を表し, $L_1, L_2, \dots, L_p$ は Y を荷重 W に変換するパラメータである。また, q は風荷重のとき $q=2$, その他の荷重のときは $q=1$ とする。

Y および $L_1, L_2, \dots, L_p$ を互いに統計的に独立な確率変数とすると, 荷重 W の平均値, 変動係数は近似的に次式により算定される。

$$\bar{W} \approx \bar{L}_1 \cdot \bar{L}_2 \cdots \bar{L}_p \cdot \bar{Y}^q \quad (2-2)$$

$$V_W \approx \sqrt{\sum_{k=1}^p V_{L_k}^2 + (q \cdot V_Y)^2} \quad (2-3)$$

また, 雪, 風, 地震荷重の公称値を, 積雪深, 風速, 地震動加速度の 50 年再現期待値 $\hat{Y}_{50}$ を用いて設定される荷重値とすると^{註2)}

$$W_n = \bar{L}_1 \cdot \bar{L}_2 \cdots \bar{L}_p \cdot \hat{Y}_{50}^q \quad (2-4)$$

ここに, W_n は荷重 W の公称値を表す。なお, 積載荷重については, 「建築物荷重指針」による荷重値を公称荷重値として用いることにする。

積雪深, 風速, 地震動加速度あるいは人間・物品載荷を表す (2-1) 式中の Y を確率過程 $Y(t)$ におき換えると, 荷重の確率過程モデルは次式で表される。

$$W(t) = L_1 \cdot L_2 \cdots L_p \cdot Y^q(t) \quad (2-5)$$

確率過程 $Y(t)$ は前稿 (文献 1)) で述べたマクロ時間変動過程としてモデル化される。以下の記述では, 積雪深, 風速, 地震動加速度および人間・物品載荷の確率過程を $Y_s(t)$, $Y_w(t)$, $Y_e(t)$ および $Y_L(t)$ とする。また, 本稿の考察では, $Y_s(t)$, $Y_w(t)$ を矩形パルス過程, $Y_e(t)$ についてはある強さ以上の地震動加速度を対象としてポアソン生起の仮定の下でポアソンインパルス過程, $Y_L(t)$ については通常の使用状態における持続的な人間・物品載荷 $Y_{Ls}(t)$ をポアソン方形波過程, 人間・物品の一時的集中載荷 $Y_{Le}(t)$ をポアソンインパルス過程として両者の和 ($Y_L(t) = Y_{Ls}(t) + Y_{Le}(t)$) の確率過程にモデル化した例について述べる。図—1 および表—1 に, これらの確率過程モデルと各確率過程のパルスあるいはインパルスの期待生起率 λ_x , 期待持続時間 μ_x および強さ Y_x ($x = S, W, E, L_s, L_e$) を示す。なお, 同表中の λ_x, μ_x の設定値には, 単位時間に年を用いて 4 節での荷重係数の算定用モデル例として暫定的な設定が含まれている (4 節参照)。

上述の単一確率過程 $Y_x(t)$ ($x = S, E, W, L$) があるレベル $\hat{y}_x$ を単位時間あたりに超過する回数の期待値 (以下, 期待超過率と略記) $\nu_{Y_x(t)}^+(\hat{y}_x)$ は, 次式で表される (文献 1))。

$$\nu_{Y_x(t)}^+(\hat{y}_x) = \lambda_x \{1 - F_{Y_x}(\hat{y}_x)\} \quad (2-5)$$

ここに, $F_{Y_x}(\cdot)$ は確率変数 Y_x の確率分布関数である。

期待超過率の値を $\Phi(-\hat{\beta}_{50})=1/50/\text{年}$ ($\hat{\beta}_{50}\approx 2.05$) とすると、このときの $\hat{y}_x$ は、確率過程 $Y_x(t)$ の 50 年再現期待値 $\hat{Y}_{x50}$ となる。

$$\nu_{Y_x(t)}^+(\hat{Y}_{x50}) = \lambda_x [1 - F_{Y_x}(\hat{Y}_{x50})] = \Phi(-\hat{\beta}_{50}) \cdots (2-6)$$

確率変数 Y_x が対数正規変数のときには、(2-6) 式は下式のように表される。

$$\lambda_x \left\{ 1 - \Phi \left(\frac{\ln \hat{Y}_{x50} - \ln \bar{Y}_x}{\sigma_{\ln Y_x}} \right) \right\} = \Phi(-\hat{\beta}_{50}) \cdots (2-7)$$

上式から 50 年再現期待値 $\hat{Y}_{x50}$ は、次式で表される。

$$\frac{\hat{Y}_{x50}}{\bar{Y}_x} = \frac{1}{\sqrt{1 + V_{Y_x}^2}} \cdot \exp \left\{ \Phi^{-1} \left(1 - \frac{1}{\lambda_x} \cdot \Phi(-\hat{\beta}_{50}) \right) \cdot \sigma_{\ln Y_x} \right\} \cdots (2-8)$$

$\lambda_x=1$ のときには、

$$\frac{\hat{Y}_{x50}}{\bar{Y}_x} = \frac{1}{\sqrt{1 + V_{Y_x}^2}} \cdot \exp \{ \hat{\beta}_{50} \cdot \sigma_{\ln Y_x} \} \cdots (2-9)$$

なお、(2-8) 式中の $\Phi^{-1}(\cdot)$ は、標準正規関数の逆関数を表す。

(2-8), (2-9) 式は、確率変数 Y_x を対数正規変数として導かれているが、図-2 は、 Y_x が地上積雪深および

図-1 荷重の確率過程モデル

表-1 確率過程モデル

確率過程 $Y(t)$	生起率	持続時間	強さ 分布関数	備考
積雪深 $Y_s(t)$ 多雪地域	$\hat{\lambda}_s = 1/\text{yr.}$	$\hat{\mu}_s = 1/3 \text{ yr.}$	年最大値 $f_{YsA}(y)$	年周期事象
風速 $Y_w(t)$	$\hat{\lambda}_w = 1/\text{yr.}$	$\hat{\mu}_w = 1 \text{ yr.}$	年最大値 $f_{YwA}(y)$	年周期事象
地震動 加速度 $Y_e(t)$	$\lambda_e = 1/3/\text{yr.}$	$\mu_e = 0 \text{ yr.}$	$y \geq y_0$ $f_{Ye}(y)$	ポアソン生起
物品・人間 載荷 $Y_L(t)$	$\lambda_{LS} = 1/8/\text{yr.}$ $\lambda_{LR} = 1/\text{yr.}$	$\mu_{LS} = 1/\lambda_{LS}$ $\mu_{LR} = 0 \text{ yr.}$	$f_{YLS}(y)$ $f_{YLR}(y)$	常時載荷 一時集中載荷

び基準風速の年最大値 (Y_{sA} および Y_{wA}) を表す場合について (2-9) 式 (図中実線で示す) の適用性を示したものである。同図中の $\circ$, $\bullet$ は、文献 3) の資料による 50 年再現期待値の推定値である。積雪深の年最大値の変動係数が大きい場合を除いて (2-9) 式は積雪深と風速の 50 年再現期待値の実用的推定法として適用できると言える。また、(2-8), (2-9) 式は 3 節に述べるように荷重係数の算定式に組み込む上で便利である。

前稿 (文献 1)) で述べたように、確率過程 $Y_x(t)$ の期待超過率 $\nu_{Y_x(t)}^+(y)$ を用いて確率過程 $Y_x(t)$ の T 期間最大値 $\max_T Y_x(t)$ の確率分布は、近似的に次式により推定される。

$$F_{\max Y_x(t)}(y) \approx \exp \{ -\nu_{Y_x(t)}^+(y) \cdot T \} \\ = \exp \{ -\lambda_x T \cdot (1 - F_{Y_x}(y)) \} \cdots (2-10)$$

上式は、 T 期間最大値分布の上側裾野域の近似評価法として適用され、本稿 3 節に述べる荷重係数の実用的な算定式の構成に用いられている。

図-2 地上積雪深および基準風速の 50 年再現期待値

3. 荷重係数

本節では、終局限界状態および使用限界状態の両限界状態に対する設計に用いる荷重係数の設定手法について述べる。前稿 (文献 1)) で荷重効果の単位時間当たりの超過率に基づく荷重係数の設定手法と、ある定められた T_s 期間における荷重効果の非超過確率に基づく荷重係数の設定手法について概述したが、以下に、2 節で述べた荷重の確率モデルに基づく荷重係数の実用的な設定手法を示す。具体的な算定例については、4 節に述べる。

3-1 終局限界状態設計に用いる荷重係数

終局限界状態設計は、主として構造安全性に関係する性格のものであることから、建築物の使用予定期間中における構造安全性に対する信頼度に基づく荷重係数の設定手法を適用する。一般建築物の設計では、使用予定期間は明確に定められないが、ここでは基準期間 (以下では、 T_u 年とする) を設定して基準期間中における構造信頼度に基づいて荷重係数を設定する考え方をを用いるこ

とにする。

基準期間 T_u 年における信頼度 P_s および設計条件は、次式のように表される。

$$P_s = P_{rob} [R_u - \sum_{k=1}^m c_{uk} \cdot W_k(t) \geq 0; T_u] \geq \Phi(\beta_u) \quad (3-1)$$

ここに、 R_u および β_u は終局限界状態に対する抵抗および信頼性指標を表す。

荷重効果の組合せ確率過程

$$S(t) = \sum_k c_{uk} \cdot W_k(t) \quad (3-2)$$

の T_u 期間最大値 $\max_{T_u} S(t)$ の近似推定法として Turkstra の手法を適用すると、

$$\max_{T_u} S(t) \approx \max_j \{ \max_{T_u} (c_{uj} \cdot W_j(t)) + \sum_{k \neq j} c_{uk} \cdot W_k(t) \} \quad (3-3)$$

$$\max_{T_u} S(t) = \max \{ \tilde{S}_1, \tilde{S}_2, \dots, \tilde{S}_m \} \quad (3-4)$$

(3-4) 式中の $\tilde{S}_1, \tilde{S}_2, \dots, \tilde{S}_m$ は、下式によって定義される確率変数である。

$$\tilde{S}_j = \max_{T_u} c_{uj} \cdot W_j(t) + \sum_{k \neq j} c_{uk} \cdot W_k(t^*) \quad (3-5)$$

$$j=1, 2, \dots, m$$

ここに、 $\max_{T_u} W_j(t)$ は荷重 $W_j(t)$ の T_u 期間最大値、 $W_k(t^*)$ は荷重 $W_k(t)$ の任意時刻における荷重強さを表す確率変数である。

さらに、(3-5) 式の荷重効果 $\tilde{S}_j$ ($j=1, 2, \dots, m$) に対する信頼度を P_{sj} とすると、(3-1) 式の設計条件は近似的に (3-7) 式の設計条件におき換えられる。

$$P_{sj} = P_{rob} [R_u - \tilde{S}_j \geq 0], j=1, 2, \dots, m \quad (3-6)$$

$$\min \{ P_{s1}, P_{s2}, \dots, P_{sm} \} \geq \Phi(\beta_u) \quad (3-7)$$

(3-5), (3-6), (3-7) 式は、「1つの荷重の T_u 期間最大値 $\max_{T_u} W_j(t)$ と他の荷重の任意時点 t^* における荷重強さ $W_k(t^*)$ ($k=1, 2, \dots, m; k \neq j$) の組合せを考え、これらのすべての荷重の組合せ ($j=1, 2, \dots, m$) について指定された信頼度 $\Phi(\beta_u)$ を満足するように設計する」ことを意味する。

上述の手法に基づくと終局限界状態設計では、下記の荷重の組合せを考えることになる。

$$W_d + W_{v_u} + \sum_{x \neq y} W_x \quad (3-8)$$

ここに、添字 x, y は s, w, e, l とし、 W_{v_u} は T_u 期間最大荷重を、 $\sum_{x \neq y}$ は他の荷重 W_x の組合せを表す。

任意時点における荷重 W_x の確率変数としての取扱いには、2. 節表—1 中の年最大値 Y_{sa}, Y_{wa} およびこれに準じる Y_e, Y_l と (2-1) 式によって表される荷重 (確率変数; W_s, W_w, W_e, W_l) を用いる。

なお、(3-8) 式中の固定荷重 W_d は時間的変動を考えないことにする。

T_u 期間最大値 W_{v_u} による荷重効果 S_{v_u} の確率分布

は、実用上の簡便さと前稿 (文献1)) で述べた適用性を前提に (2-10) 式の近似評価法を用いると、

$$F_{S_{v_u}}(s) \approx \exp \{ -\lambda_{S_{v_u}} \cdot (1 - F_{S_j}(s)) \cdot T_u \} \quad (3-9)$$

$y=s, e, w$ あるいは l_e

(1-1) 式の荷重効果を表す確率変数 $S_1, S_2, \dots, S_m$ のうちの j 番目の荷重効果を S_{jM} とすると終局限界状態に対する設計条件は、次式で表される。

$$P_{rob} [R_u - (S_{jM} + \sum_{k \neq j} S_k) \geq 0] \geq \Phi(\beta_u) \quad (3-10)$$

$$j=1, 2, \dots, m$$

確率変数 R_u および S_k ($k \neq j$) は対数正規変数として

(1-3) 式の変換を適用する。 S_{jM} の確率分布関数に (3-9) 式を用いると、

$$F_{S_{jM}}(s_j) = \exp \{ -\lambda_{S_j} \cdot (1 - F_{S_j}(s_j)) \cdot T_u \} \quad (3-11)$$

ここに、 $F_{S_j}(s_j)$ は S_j の確率分布関数であり、他の S_k と同様に対数正規分布関数とする。

確率変数 S_{jM} の標準正規変数への変換は、

$$\exp \left\{ -\lambda_{S_j} T_u \cdot \left(1 - \Phi \left(\frac{\ln s_j - \hat{\mu}_{S_j}}{\hat{\sigma}_{S_j}} \right) \right) \right\} = \Phi(u_j) \quad (3-12)$$

上式より、

$$s_j = \exp \left\{ \hat{\sigma}_{S_j} \cdot \Phi^{-1} \left[1 + \frac{1}{\lambda_{S_j} T_u} \cdot \ln \Phi(u_j) \right] + \hat{\mu}_{S_j} \right\} \quad (3-13)$$

S_j について (3-13) 式を、 S_k ($k \neq j$) について (1-3) 式の変換を用いると限界状態方程式 ((1-4) 式参照) は、次式のように表される。

$$\begin{aligned} \tilde{g}_u(u_0, u_1, \dots, u_m) &= \exp \{ \hat{\sigma}_{R_u} \cdot u_0 + \hat{\mu}_{R_u} \} \\ &\quad - \exp \left\{ \hat{\sigma}_{S_j} \cdot \Phi^{-1} \left(1 + \frac{1}{\lambda_{S_j} T_u} \cdot \ln \Phi(u_j) \right) + \hat{\mu}_{S_j} \right\} \\ &\quad - \sum_{k \neq j} \exp \{ \hat{\sigma}_{S_k} \cdot u_k + \hat{\mu}_{S_k} \} = 0 \quad (3-14) \end{aligned}$$

上式に (1-5) ~ (1-12) 式と同じ展開手法を適用すると、(1-13) 式および (1-15) ~ (1-17) 式と同型の設計式が導かれる^(注3)。

$$\phi_u \cdot R_{un} \geq c_{uj} \cdot \gamma_{wj} \cdot W_{jn} + \sum_{k \neq j} c_{uk} \cdot \gamma_{wk} \cdot W_{kn} \quad (3-15)$$

上式右辺の第1項の荷重 W_j は T_u 期間最大荷重を表し、以下では「主たる荷重」と云う。第2項の $\sum$ 記号中の荷重 W_k ($k=1, 2, \dots; k \neq j$) は「従の荷重」を表す。抵抗係数および荷重係数は、

$$\phi_u = \frac{1}{\sqrt{1 + V_{R_u}^2}} \cdot \exp(\bar{\alpha}_R \cdot \beta_u \cdot \sigma_{\ln R_u}) \cdot \frac{\bar{R}_u}{R_{un}} \quad (3-16)$$

$$\begin{aligned} \gamma_{wj} &= \frac{1}{\sqrt{1 + V_{W_j}^2}} \cdot \exp \left\{ \Phi^{-1} \left(1 + \frac{1}{\lambda_j T_u} \ln \Phi(\bar{\alpha}_j \cdot \beta_u) \right) \right. \\ &\quad \left. \cdot \sigma_{\ln W_j} \right\} \cdot \frac{\bar{W}_j}{W_{jn}} \quad (3-17) \end{aligned}$$

$$\gamma_{wk} = \frac{1}{\sqrt{1+V_{wk}^2}} \cdot \exp\{\tilde{\alpha}_k \cdot \beta_u \cdot \sigma_{\ln wk}\} \cdot \frac{\bar{W}_k}{W_{kn}} \cdots (3-18)$$

$k=1, 2, \dots; k \neq j$

ここに,

$$\left. \begin{aligned} \tilde{\alpha}_R &= -(\partial \tilde{g}_u^* / \partial u_0) / \sqrt{\sum_{i=0}^m (\partial \tilde{g}_u^* / \partial u_i)^2} \\ \tilde{\alpha}_i &= -(\partial \tilde{g}_u^* / \partial u_i) / \sqrt{\sum_{i=0}^m (\partial \tilde{g}_u^* / \partial u_i)^2} \end{aligned} \right\} \cdots (3-19)$$

また, (3-17), (3-18) 式中の $\bar{W}_i / W_{in}$ ($i=1, 2, \dots, j, k, \dots, m$) は, (2-2), (2-4) 式および (2-8) 式から次式のように表される。

$$\begin{aligned} \frac{\bar{W}_i}{W_{in}} &= \left(\frac{\bar{Y}_i}{\hat{Y}_{i50}} \right)^q = (1 + V_{Yi})^{q/2} \\ &\cdot \exp \left\{ -q \cdot \Phi^{-1} \left(1 - \frac{1}{\lambda_j} \Phi(-\hat{\beta}_{50}) \right) \cdot \sigma_{\ln Y_i} \right\} \\ &\quad i=1, 2, \dots, j, k, \dots, m \\ &\quad q=2: \text{風荷重のとき} \\ &\quad q=1: \text{その他のとき} \\ &\quad \hat{\beta}_{50}=2.05 \cdots \cdots (3-20) \end{aligned}$$

なお, (3-17), (3-18), (3-20) 式の地震荷重と積載荷重への適用は, (3-22. d, e, i) 式に示す。

上述の終局限界状態設計用の荷重係数を固定荷重 W_D , 雪荷重 W_S , 風荷重 W_W , 地震荷重 W_E , 積載荷重 W_L について具体的に示すと下記ようになる。

$$\begin{aligned} \phi_u \cdot R_{un} &\geq C_{uD} \cdot \gamma_{wD} \cdot W_{Dn} + C_{uY} \cdot \gamma_{wY} \cdot W_{Yn} \\ &+ \sum_{X=Y} C_{uX} \cdot \gamma_{wX} \cdot W_{Xn} \cdots \cdots (3-21) \end{aligned}$$

ここに, W_Y ($Y=S, W, E$ あるいは L) は「主たる荷重」, $\sum_{X=Y}$ は「従の荷重」($X=S, W, L; X \neq Y$) の組合せを表す。
抵抗係数 ϕ_u は,

$$\phi_u = \frac{1}{\sqrt{1+V_{Ru}^2}} \cdot \exp\{\tilde{\alpha}_R \cdot \beta_u \cdot \sigma_{\ln Ru}\} \cdot \frac{\bar{R}_u}{R_{un}} \cdots \cdots (3-22. a)$$

荷重係数 γ_w は,

1) 主たる荷重に対して

$$\gamma_{wS} = \frac{\sqrt{1+V_{YSA}^2}}{\sqrt{1+V_{wS}^2}} \cdot \exp\{eq\beta_u \cdot \sigma_{\ln wS} - 2.05 \cdot \sigma_{\ln YSA}\} \cdots \cdots (3-22. b)$$

$$\gamma_{wW} = \frac{1+V_{YWA}^2}{\sqrt{1+V_{wW}^2}} \cdot \exp\{eq\beta_u \cdot \sigma_{\ln wW} - 2 \cdot 2.05 \cdot \sigma_{\ln YWA}\} \cdots \cdots (3-22. c)$$

$$\gamma_{wE} = \frac{\sqrt{1+V_{YE}^2}}{\sqrt{1+V_{wE}^2}} \cdot \exp\{eq\beta_u \cdot \sigma_{\ln wE} - eq\hat{\beta}_{50} \cdot \sigma_{\ln YE}\} \cdots \cdots (3-22. d)$$

$$\gamma_{wL} = \frac{1}{\sqrt{1+V_{Le}^2}} \cdot \exp\{eq\beta_u \cdot \sigma_{\ln wLe}\} \cdot \frac{\bar{W}_{Le}}{W_{Ln}}$$

$$+ \frac{1}{\sqrt{1+V_{LS}^2}} \cdot \exp\{\tilde{\alpha}_{wLS} \cdot \beta_u \cdot \sigma_{\ln wLS}\} \cdot \frac{\bar{W}_{LS}}{W_{Ln}} \cdots \cdots (3-22. e) * \text{注)}$$

ここに,

$$\begin{aligned} eq\beta_u &= \Phi^{-1}(1+1/T_u \cdot \ln \Phi(\tilde{\alpha}_{wS \text{ or } wW} \cdot \beta_u)); \\ &\quad \text{雪あるいは風荷重のとき} \\ &= \Phi^{-1}(1+1/\lambda_E \text{ or } \lambda_L T_u \cdot \ln \Phi(\tilde{\alpha}_{wE \text{ or } wLe} \cdot \beta_u)); \\ &\quad \text{地震あるいは積載荷重のとき} \\ eq\hat{\beta}_{50} &= \Phi^{-1}(1-1/\lambda_E \cdot \Phi(-\hat{\beta}_{50})); \text{地震荷重のとき} \end{aligned} \cdots \cdots (3-22. f)$$

2) 従の荷重に対して

$$\gamma_{wS} = \frac{\sqrt{1+V_{YSA}^2}}{\sqrt{1+V_{wS}^2}} \cdot \exp\{\tilde{\alpha}_{wS} \cdot \beta_u \cdot \sigma_{\ln wS} - 2.05 \cdot \sigma_{\ln YSA}\} \cdots \cdots (3-22. g)$$

$$\gamma_{wW} = \frac{1+V_{YWA}^2}{\sqrt{1+V_{wW}^2}} \cdot \exp\{\tilde{\alpha}_{wW} \cdot \beta_u \cdot \sigma_{\ln wW} - 2 \cdot 2.05 \cdot \sigma_{\ln YWA}\} \cdots \cdots (3-22. h)$$

$$\begin{aligned} \gamma_{wL} &= \frac{1}{\sqrt{1+V_{wLS}^2}} \cdot \exp\{\tilde{\alpha}_{wLS} \cdot \beta_u \cdot \sigma_{\ln wLS}\} \cdot \frac{\bar{W}_{LS}}{W_{Ln}} \\ &+ \frac{1}{\sqrt{1+V_{wLe}^2}} \cdot \exp\{\tilde{\alpha}_{wLe} \cdot \beta_u \cdot \sigma_{\ln wLe}\} \cdot \frac{\bar{W}_{Le}}{W_{Ln}} \end{aligned} \cdots \cdots (3-22. i)$$

上述の荷重係数式は, 年最大値 Y_{SA} , Y_{WA} , あるいはそれに準じる Y_E , Y_L とそれらを用いて算定される W_X ($X=S, W, E, L$) の統計量によって記述されており, 実用上の便利さを具えている。

3-2 使用限界状態設計に用いる荷重係数

使用限界状態設計は, 建築物の常時の正常な使用時における機能性・使用性に対する設計を目的とするが, 使用限界状態についての設計規範は, 建築物の構造種別や用途によって異なるであろう。例えば, 一般的な鋼構造建築物では, 使用性に関する限界状態として, 1) 局所的な過度の降伏によって生じる残留変形, 局所変形 (部材板要素の局所座屈), 高力ボルト接合のすべり, 2) 過度のたわみ, 変形 (drift), 3) 1), 2) による仕上げ材などの損傷, 機能上の支障などがあげられる。これらは, 強度に関する限界状態と変形に関する限界状態, あるいは, 非回復的または修復が容易でない限界状態と回復的な限界状態として取扱われ, さらにこれらの使用限界がおかされる事象は, ある期間中における過度的な荷重によって生じる場合と任意時点における荷重の変動によって生じる場合が考えられる。一般的には, 上述 1) の非回復的な限界状態を超過する確率 (超過事象の発生頻度) は, 2) の限界状態を超過する確率より低い値に設定されるであろう。

使用限界状態の多様性とその設計規範を一律に論じる

*注) W_{Le} を主たる荷重とみなしたときの荷重係数を示す。

ことの難しさから、本稿では、使用限界状態設計における荷重係数の2つの設定手法について述べておく。ここに述べる2つの荷重係数の設定手法は、建築物の用途、設計において想定する限界状態および荷重の生起特性に応じて設計者によって選択されるであろう。

(1) ある基準期間における非超過確率に基づく荷重係数の設定法

使用限界状態設計における信頼度レベルをある適切な基準期間 (T_s 年とする) と信頼性指標値 (β_s とする) に基づいて設定する。この考え方に基づく設計基本式と荷重係数については、前項 3-1 で述べた構成手法が適用される。(3-21), (3-22) 式中の ϕ_u , R_{un} , c_u を使用限界状態設計における抵抗係数, 抵抗の公称値, 変換係数におき換え, また, β_u , $eq\beta_u$, T_u の代りに β_s , $eq\beta_s$, T_s を用いればよい。

$$\phi_s \cdot R_{sn} \geq c_{sd} \cdot \gamma_{w_d} \cdot W_{dn} + c_{sy} \cdot \gamma_{w_y} \cdot W_{yn} + \sum_{X=Y} c_{sx} \cdot \gamma_{w_x} \cdot W_{xn} \quad (3-27)$$

$$Y, X=S, W, E, L, X+Y$$

なお、荷重係数 γ_w および下記の荷重係数中の分離係数 $\tilde{\alpha}_w$ についても添字 s を付して (3-21), (3-22) 式のそれらと区別すべきであるが、記述を簡潔にする上で添字 s を省略している。

抵抗係数は、

$$\phi_s = \frac{1}{\sqrt{1+V_{R_s}^2}} \cdot \exp\{\tilde{\alpha}_{R_s} \cdot \beta_s \cdot \sigma_{lnR_s}\} \cdot \frac{\bar{R}_s}{R_{sn}} \quad (3-28)$$

荷重係数は、

1) 主たる荷重に対して

(3-22. b) ~ (3-22. f) 式中の β_u , $eq\beta_u$, T_u を β_s , $eq\beta_s$, T_s に置き換える。

2) 従の荷重に対して

(3-22. g) ~ (3-22. i) 式中の β_u を β_s に置き換える。

(2) 単位時間超過率を用いる荷重係数の設定法

荷重効果 ($\sum_k S_k(t)$) が使用限界抵抗 (R_s) を超過する事象の単位時間生起率を指定された値 ($\Phi(-\beta_s)$) 以下とする設計条件に基づく荷重係数の1つの設定法としては、単位期間 (基準期間) を1年とし、前稿で述べた点横断公式 (point-crossing formula) と Turkstra の近似手法を適用して、3-1 項と同様な手順によって荷重係数を設定する手法がある。この考え方の構成では、例えば雪荷重が「主たる荷重」のときは積雪深の年最大値が用いられるが、雪荷重が「従の荷重」のときには、基準期間 (1 年) より短い期間の積雪深 (例えば積雪深の月最大値など) を用いることになる。したがって、月最大値などの統計資料が用意されなければならない。ここでは、実用的設計法の構成として他の1つの荷重係数の設定手法について述べておこう。

幾つかの荷重の組合せ (例えば後述表—3) を選定して、

それらの組合せ荷重効果が使用限界抵抗を超過する事象の生起率 (単位時間 (年) 当たりの期待超過率) を指定された値 $\Phi(-\beta_{s1})$ / 年 以下とする設計条件を考えたと、設計条件式は次式のように記述できる。

$$\int_0^{\infty} \nu_{\sum_{k \in [j]} S_k(t)/r_s}(r_s) f_{R_s}(r_s) dr_s \leq \Phi(-\beta_{s1}) \quad (3-29)$$

$$j=1, 2, \dots$$

ここに、 $[j]$ ($j=1, 2, \dots$) は選定された荷重の組合せ、 $\nu_{\sum_{k \in [j]} S_k(t)/r_s}(\cdot)$ は、荷重効果の閾値 r_s についての条件付期待横断率、 R_s および $f_{R_s}(r_s)$ は、使用限界抵抗を表す確率変数および確率密度関数、 β_{s1} は信頼性指標である。

(3-29) 式は、近似的に下式のように表される。

$$\lambda_{c,[j]} \cdot \int_0^{\infty} \{1 - F_{\sum_{k \in [j]} S_k}(r_s)\} \cdot f_{R_s}(r_s) dr_s \leq \Phi(\beta_{s1}) \quad (3-30)$$

$$j=1, 2, \dots$$

ここに、 λ_c は単一の時間変動荷重効果過程のときには、その期待生起率、2つ以上の荷重効果過程のときには、同時生起率を、同様に、 $F_{\sum_{k \in [j]} S_k}(\cdot)$ は、単一の確率変数 (S_k) あるいは和 ($\sum_k S_k$) の確率分布関数を表すことにする。

(3-30) 式は、次式のように表される。

$$P_{rob}[R_s - \sum_{k \in [j]} S_k \geq 0] \geq \Phi(eq\beta_{s1}) \quad (3-31)$$

$$eq\beta_{s1} = \Phi^{-1}(1 - 1/\lambda_{c,[j]} \cdot \Phi(-\beta_{s1})) \quad (3-32)$$

$$j=1, 2, \dots$$

このときの設計基本式は、(1-1) ~ (1-17) 式の展開と2節で述べた荷重モデルを用いて次式で表される。

$$\phi_s \cdot R_{sn} \geq c_{sd} \cdot \gamma_{w_d} \cdot W_{dn} + \sum_X c_{sx} \cdot \gamma_{w_x} \cdot W_{xn} \quad (3-33)$$

$$X=S, W, E, L$$

抵抗係数および荷重係数は、

$$\phi_s = \frac{1}{\sqrt{1+V_{R_s}^2}} \cdot \exp\{\tilde{\alpha}_{R_s} \cdot \beta_{s1} \cdot \sigma_{lnR_s}\} \cdot \frac{\bar{R}_s}{R_{sn}} \quad (3-34. a)$$

$$\gamma_{w_s} = \frac{\sqrt{1+V_{Y_{SA}}^2}}{\sqrt{1+V_{W_s}^2}} \cdot \exp\{\tilde{\alpha}_{w_s} \cdot eq\beta_{s1} \cdot \sigma_{lnW_s} - 2.05 \cdot \sigma_{lnY_{SA}}\} \quad (3-34. b)$$

$$\gamma_{w_w} = \frac{1+V_{Y_{WA}}^2}{\sqrt{1+V_{W_w}^2}} \cdot \exp\{\tilde{\alpha}_{w_w} \cdot eq\beta_{s1} \cdot \sigma_{lnW_s} - 2 \cdot 2.05 \cdot \sigma_{lnY_{WA}}\} \quad (3-34. c)$$

$$\gamma_{w_E} = \frac{\sqrt{1+V_{Y_E}^2}}{\sqrt{1+V_{W_E}^2}} \cdot \exp\{\tilde{\alpha}_{w_E} \cdot eq\beta_{s1} \cdot \sigma_{lnW_E} - eq\hat{\beta}_{50} \cdot \sigma_{lnY_E}\} \quad (3-34. d)$$

$$\gamma_{w_L} = \frac{1}{\sqrt{1+V_{W_{LS}}^2}} \cdot \exp\{\tilde{\alpha}_{w_{LS}} \cdot eq\beta_{s1} \cdot \sigma_{lnW_{LS}}\} \cdot \frac{\bar{W}_{LS}}{W_{Ln}} + \frac{1}{\sqrt{1+V_{W_{LE}}^2}} \cdot \exp\{\tilde{\alpha}_{w_{LE}} \cdot eq\beta_{s1} \cdot \sigma_{lnW_{LE}}\} \cdot \frac{\bar{W}_{LE}}{W_{Ln}} \quad (3-34. e)$$

ここに,

$$\left. \begin{aligned} e_q \beta_{s1} &= \Phi^{-1}(1 - 1/\lambda_c \cdot \Phi(-\beta_{s1})) \\ e_q \hat{\beta}_{s0} &= \Phi^{-1}(1 - 1/\lambda_E \cdot \Phi(-\hat{\beta}_{s0})) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3-35)$$

上述の (3-30)~(3-35) 式による荷重係数算定手法の例を示しておく。なお、荷重の変動係数および信頼性指標は、次節に示す表—2 および表—3 の値を用いている。

i) W_D (または W_S あるいは W_W あるいは W_L) の組合せ

$\lambda_c = \lambda_s$ あるいは $\lambda_w = 1$, $\beta_{s1} = 2.0$, $\tilde{\alpha}_w = 0.84$ ((4-4) 式参照) を用いて

$$\gamma_{ws} = \frac{\sqrt{1+0.45^2}}{\sqrt{1+0.50^2}} \cdot \exp \{0.84 \cdot 2.0 \cdot \sqrt{\ln(1+0.50^2)} - 2.05 \sqrt{\ln(1+0.45^2)}\} \approx 0.90$$

$$\gamma_{ww} = \frac{1+0.20^2}{\sqrt{1+0.50^2}} \exp \{0.84 \cdot 2.0 \cdot \sqrt{\ln(1+0.50^2)} - 2 \cdot 2.05 \cdot \sqrt{\ln(1+0.20^2)}\} \approx 0.90$$

γ_{wl} については, $\tilde{\alpha}_{wls} = \tilde{\alpha}_{wle} = 0.6$ ((4-6) 式参照), $\lambda_c = \lambda_{le} = 1$ として

$$\begin{aligned} \gamma_{wl} &= \frac{1}{\sqrt{1+0.40^2}} \exp \{0.6 \cdot 2.0 \cdot \sqrt{\ln(1+0.40^2)}\} \cdot \frac{65}{180} \\ &\quad + \frac{1}{\sqrt{1+0.60^2}} \exp \{0.6 \cdot 2.0 \cdot \sqrt{\ln(1+0.60^2)}\} \\ &\quad \cdot \frac{45}{180} \approx 0.94 \end{aligned}$$

ii) W_D + W_E の組合せ

$\lambda_c = \lambda_E = 1/3$, $\beta_{s1} = 1.20$ を用いると, $e_q \hat{\beta}_{s0} = \Phi^{-1}(1 - 1/1/3 \cdot \Phi(-2.05)) \approx 1.55$, $e_q \beta_{s1} = \Phi^{-1}(1 - 1/1/3 \cdot \Phi(-1.20)) \approx 0.4$, したがって

$$\gamma_{we} = \frac{\sqrt{1+0.75^2}}{\sqrt{1+0.80^2}} \exp \{0.84 \cdot 0.4 \cdot \sqrt{\ln(1+0.80^2)} - 1.55 \cdot \sqrt{\ln(1+0.75^2)}\} \approx 0.43$$

iii) W_D + W_S + W_E

W_S と W_E の同時生起率 $\lambda_c = \lambda_s \lambda_E$ ($\mu_s + \mu_E$) = $1 \cdot 1/3$ ($1/3 + 0$) = $1/9$ ((文献1) 参照), 「主たる荷重」*^(注) を W_S とするとき, $\tilde{\alpha}_{ws} = 0.84$, $\beta_{s1} = 2.0$ を用いて, $e_q \beta_{s1} = \Phi^{-1}(1 - 1/1/9 \cdot \Phi(-2.0)) \approx 0.82$,

$$\gamma_{ws} = \frac{\sqrt{1+0.45^2}}{\sqrt{1+0.50^2}} \exp \{0.84 \cdot 0.82 \cdot \sqrt{\ln(1+0.50^2)} - 2.05 \cdot \sqrt{\ln(1+0.45^2)}\} \approx 0.56$$

$$\gamma_{we} = \frac{\sqrt{1+0.75^2}}{\sqrt{1+0.80^2}} \exp \{0 \cdot 0.82 \cdot \sqrt{\ln(1+0.80^2)} - 1.55 \sqrt{\ln(1+0.75^2)}\} \approx 0.35$$

「主たる荷重」が W_E のときは, $\beta_{s1} = 1.20$ を用いて同様に算定される。

*注) ここでの「主たる荷重」は、荷重効果が相対的に大きい荷重を表すことにする。

4. 荷重係数の算定例

前節に述べた終局限界状態設計および使用限界状態設計用の荷重係数の算定例 (3-1. および 3-2. (2) による算定例) について述べておく。ただし、各荷重の確率過程としてのモデル化とそれに関連する統計資料は、今後の研究・調査によるところが残されていることから、ここでは表—2 の荷重モデルと統計値、および表—3 の荷重の組合せと信頼性指標値を算定例用に設定して算定される荷重係数を参考資料として示す。

表—2 中の雪荷重および風荷重の変動係数については、文献3) に示されている各地 (雪荷重については多雪地域) の統計資料の代表的な値として設定されている。雪荷重の $\hat{\lambda}_s$, $\hat{\mu}_s$ については、文献6) に述べられているモデル化があるが、ここでは $\hat{\lambda}_s = 1/\text{年}$, $\hat{\mu}_s = 1/3 \text{ 年}$ (多雪地域) とする。 $\hat{\mu}_s$ は他の荷重 (効果) との同時生起率に関係する。なお、 $\wedge$ 記号は、生起時間間隔、持続時間を確定的に取扱うことを表すことにする。風荷重の λ_w , μ_w については、強風 (台風) と常時風を区別した統計資料が用意されていないこともあり、 $\hat{\mu}_w = 1/\hat{\lambda}_w = 1.0$ としている。地震荷重の変動係数については、文献3), 7), 8) などを参考に概略的な値として設定している。また、 λ_E についてもここでの算定例として仮に設定されている。積載荷重のモデル化と統計量は床用途によって異なるが、ここでは事務所建築に類する場合を想定して文献3), 6) などの資料を参考に設定している。

表—3 中の終局限界状態設計および使用限界状態設計における信頼性指標値 β_u (基準期間 $T_u = 50$ 年とする) および $\beta_s (= \beta_{s1})$ は、文献3) における設定値に準じた値としている。使用限界状態設計における $\beta_s = \beta_{s1} = 2.0$ の設定は、現行の許容応力度設計法における短期応力設計とほぼ同等な設計規範に対応する。「主たる荷重」が地震荷重のときの荷重の組合せにおける $\beta_u = 1.5$ および $\beta_s = 1.2$ は、注2) の地震荷重の公称値を設定したときに係数倍地震荷重値が現行の1次および2次耐震設計用の地震荷重値 ($C_0 = 0.2$ および $C_0 = 1.0$ の地震荷重値) と同等となるように設定されている^(注4)。

表—2 荷重モデルの統計値

	V_x の 変動係数	W_x の 変動係数	生起率 持続時間	備 考
雪荷重 多雪地域	$V_{rsa} = 0.45$	$V_{ws} = 0.50$	$\hat{\lambda}_s = 1$ $\hat{\mu}_s = 1/3$	V_{rsa} = 地上積雪深の年最大値
風荷重	$V_{rwa} = 0.20$	$V_{ww} = 0.50$	$\hat{\lambda}_w = 1$ $\hat{\mu}_w = 1$	V_{rwa} = 基準風速の年最大値
地震荷重	$V_{re} = 0.75$	$V_{we} = 0.80$	$\lambda_E = 1/3$ $\mu_E = 0$	V_E = ある強さ以上の地震動 加速度
積載荷重	—	$V_{wls} = 0.40$ $V_{wle} = 0.60$	$\lambda_{ls} = 1/8$ $\mu_{ls} = 1/\lambda_{ls}$ $\lambda_{le} = 1$ $\mu_{le} = 0$	$\bar{W}_{ls} = 65 \text{ kg/m}^2$ $\bar{W}_{le} = 45 \text{ kg/m}^2$ $W_{la} = 180 \text{ kg/m}^2$

表—3 荷重の組合せと信頼性指標値 ($\bar{W}$ は「主たる荷重」を表す)

荷重の組み合わせ	終局限界状態設計	使用限界状態設計
	β_u	β_s
0) W_D	2.5	2.0
1) $W_D + \overset{\circ}{W}_L + W_S$	2.5	2.0
2) $W_D + \overset{\circ}{W}_S + W_L$	2.0	2.0
3) $W_D + \overset{\circ}{W}_W + W_L$	2.0	2.0
4) $W_D + \overset{\circ}{W}_E + W_L$	1.5	1.2
5) $W_D + \overset{\circ}{W}_S + W_E$	2.0	2.0

抵抗係数および荷重係数に含まれる分離係数 $\bar{\alpha}_R$ および $\bar{\alpha}_{W_x}$ ($x=S, W, E, L$) は、1 節に述べたように抵抗と各荷重 (効果) の相対的大きさと変動係数に依存し、分離係数の精確な算定には反復計算が必要となる。ここでは、分離係数の 1 つの簡便な実用的設定法を用いることにする。

抵抗の分離係数 $\bar{\alpha}_R$ は、抵抗の変動係数が相対的に小さいこと、さらに実用設計法としての取扱い易さを配慮して、

$$\bar{\alpha}_R = -0.5 \dots \dots \dots (4-1)$$

と定める。また、固定荷重に対する分離係数 $\bar{\alpha}_{W_D}$ についても、

$$\bar{\alpha}_{W_D} = 0.2^{*註}) \dots \dots \dots (4-2)$$

とする。

分離係数の条件

$$\bar{\alpha}_R^2 + \bar{\alpha}_{W_D}^2 + \sum_x \bar{\alpha}_{W_x}^2 = 1.0 \dots \dots \dots (4-3)$$

から、

$$\sum_x \bar{\alpha}_{W_x}^2 = 1 - (\bar{\alpha}_R^2 + \bar{\alpha}_{W_D}^2) = 0.71 \approx 0.84^2 \dots \dots \dots (4-4)$$

したがって、固定荷重以外の荷重に対する分離係数は、例えば (1-11) 式から **註)

$$\bar{\alpha}_{W_x} = 0.84 \frac{\sigma_{\ln W_x} \cdot (C_x \bar{W}_x^*)}{\sqrt{\sum_Y \sigma_{\ln W_Y}^2 \cdot (C_Y \bar{W}_Y^*)^2}} \dots \dots \dots (4-5)$$

$$Y = S, W, E, L$$

W_x ($x=S, W, E, L$) の変動係数に著しい差異がないときには、

$$\bar{\alpha}_{W_x} \approx 0.84 \frac{\sigma_{\ln W_x} \cdot (C_x \bar{W}_x)}{\sqrt{\sum_Y \sigma_{\ln W_Y}^2 \cdot (C_Y \bar{W}_Y)^2}} \dots \dots \dots (4-6)$$

さらに、実用設計法としての構成上、3 節 3-1 項に述べたように 1 つの「主たる荷重」とその他の荷重の組合せの組を考え、各組合せに対する設計を行うことを設計条

* 註) (4-2) 式において固定荷重のみのときには $\bar{\alpha}_{W_D} = \sqrt{1-0.5^2} \approx 0.87$ を用いる。

** 註) 一般的には、(3-19) 式による。

件としており、一般に「主たる荷重」による荷重効果が支配的となるとみなして、「主たる荷重」に対する分離係数を $\bar{\alpha}_{WM} \approx 0.84$ とする近似的設定法が用いられるであろう。

上記の荷重モデルと統計値、および分離係数の設定手法によって算定される荷重係数値は、下記ようになる。なお、荷重係数値は、各「荷重の組合せ」について算定された数値をまとめた値としている。

(a) 終局限界状態設計用の荷重係数

$$1.1 W_{Dn} + 1.7 W_{Ln} + 0.4 W_{Sn}, \text{ かつ, } 1.3 W_{Dn} \dots \dots \dots (4-6.1)$$

$$1.1 W_{Dn} + 1.7 W_{Sn} + 0.6 W_{Ln} \dots \dots \dots (4-6.2)$$

$$\phi_U \cdot R_{Un} \geq 1.1 W_{Dn} + 1.7 W_{Wn} + 0.6 W_{Ln} \dots \dots \dots (4-6.3)$$

$$1.0 W_{Dn} + 2.0 W_{En} + 0.4 W_{Ln} \dots \dots \dots (4-6.4)$$

あるいは、

$$1.0 W_{Dn} + 2.0 W_{En} + 0.4 W_{Ln} + 0.4 W_{Sn} \dots \dots \dots (4-6.4')$$

$$1.1 W_{Dn} + 1.7 W_{Sn} + 0.4 W_{En} \dots \dots \dots (4-6.5)$$

(b) 使用限界状態設計用の荷重係数

$$1.0 W_{Dn} + 0.9 W_{Ln} + 0.4 W_{Sn}, \text{ かつ, } 1.2 W_{Dn} \dots \dots \dots (4-7.1)$$

$$1.0 W_{Dn} + 0.9 W_{Sn} + 0.6 W_{Ln} \dots \dots \dots (4-7.2)$$

$$\phi_S \cdot R_{Sn} \geq 1.0 W_{Dn} + 0.9 W_{Wn} + 0.6 W_{Ln} \dots \dots \dots (4-7.3)$$

$$1.0 W_{Dn} + 0.4 W_{En} + 0.4 W_{Ln} \dots \dots \dots (4-7.4)$$

$$1.0 W_{Dn} + 0.6 W_{Sn} + 0.4 W_{En} \dots \dots \dots (4-7.5)$$

参考に、ANSI A 58.1 (文献 4)) の終局限界状態設計用の荷重係数 (1 部記述を省略) を示しておく。ANSI の荷重係数値は、主たる荷重が固定、積載あるいは雪荷重のときには $\beta = 3.0$ 、風荷重のときには $\beta = 2.0$ 、地震荷重のときには $\beta = 1.75$ の信頼性指標値を用いて設定されている。

(c) 終局限界状態設計用の荷重係数 (ANSI A 58.1)

$$1.4 W_{Dn} \dots \dots \dots (4-8.0)$$

$$1.2 W_{Dn} + 1.6 W_{Ln} + 0.5 W_{Sn} \dots \dots \dots (4-8.1)$$

$$1.2 W_{Dn} + 1.6 W_{Sn} + 0.5 W_{Ln} \dots \dots \dots (4-8.2)$$

$$1.2 W_{Dn} + 1.3 W_{Wn} + 0.5 W_{Ln} \dots \dots \dots (4-8.3)$$

$$1.2 W_{Dn} + 1.5 W_{En} + 0.4 W_{Ln} \text{ あるいは } 0.2 W_{Sn} \dots \dots \dots (4-8.4)$$

上述 (a) の終局限界状態設計用の荷重係数の算定例は、荷重の代表的な統計値と暫定的な確率モデル例を用いていること、また、各荷重の公称値および変動係数と設定されている信頼性指標値が異なることから、(c) に引用した ANSI の荷重係数値と比較して論じられるものではないが、定性的には両者の荷重係数は類似した構成となっている。なお、(a)、(b) の荷重係数の (4-6.4)、(4-6.4') および (4-7.4) 式の算定例では、地震荷重 W_E と、人間・物品の一時集中荷重 W_{Le} の同時生起の可能性は少ないとみなして積載荷重は W_{Ls} のみ

を考慮している。

図-3は、「主たる荷重」が雪荷重のときの例について、終局限界状態設計用の雪荷重に対する荷重係数の各地域ごとの算定例を示したものである。各地の積雪深の年最大値の変動係数は、文献3)に示されているものを用いている。各地の積雪深の年最大値の変動係数の差異により、雪荷重係数値は $\gamma_{ws} \approx 1.65 \sim 2.00$ の値となっている。ここには算定例を記載しないが、風荷重に対する荷重係数値（主たる荷重のとき）は、図-2中に示す各地では差異が小さい。

図-3 雪荷重用荷重係数

あとがき

本稿では、統計・確率論的考え方に基づく荷重・抵抗係数方式の限界状態設計法における設計基本式と荷重モデルの構成および荷重係数の設定手法について提案的考察を述べた。荷重の確率モデルの構成とそれに関する統計資料については今後の研究・調査によるところが残されていることから暫定的なモデルと統計量を用いて荷重係数の算定例を示した。なお、使用限界状態設計については、従来の設計慣習（長期および短期設計）の見直しとともに使用限界状態の明確化と合理的な設計規範の設定についての今後の調査・研究が必要とされる（文献9)）。

注

- 1) 荷重効果を表す確率変数を対数正規変数としているが、これは設計用の荷重モデルが(2-1)式のように表されるとき、積雪深や風速などの確率分布を対数正規に近い分布（2節、図-2参照）であるとみなし、さらに、(2-1)式のように、非負の確率変数の積で表される確率変数（荷重 W ）の確率分布は対数正規分布に漸近する性質があるとの判断から実用上の仮定もしくは近似としてよいであろう。ただし、ある強さ以上の地震動加速度を取扱い、それを表す確率変数（ Y_E ）の累積分布が対数正規分布と著しく異なるときには等価対数正規変換手法を適用する。

- 2) 例えば、文献3)のp.4 (2.4.1), (2.5.1)式参照。地震荷重については、各地の地震動加速度の統計資料が現時点では一般建築物の設計に利用できる段階ではないので、本稿では、暫定的に地震荷重モデルを建築基準法施行令に準じて下式のように設定している。

$$W_E = C_D \cdot A_t \cdot W_i, \quad C_D = 2.5 \cdot R_t \cdot Y_E / g \cdots \cdots (\text{注 2-1})$$

C_D は設計用せん断力係数を表し、その他の記号は基準法施行令に準じる。また、地震動加速度の50年再現期待値を仮に $\hat{Y}_{E50} = 0.2g$ として地震荷重の公称値をほかの荷重と同様に

$$W_{En} = 2.5 \cdot R_t \cdot A_t \cdot W_i \cdot \hat{Y}_{E50} / g \cdots \cdots (\text{注 2-2})$$

としている。(注2-1), (注2-2)式は、地震荷重についてもほかの荷重と同様に(2-1)式のように表して、荷重・抵抗係数設計方式を適用しやすい構成にしたものである。

- 3) 終局限界状態設計では、一般論的には荷重の荷重効果への線形変換と荷重効果の重ね合わせは適用できないので、この置き換えは厳密には正しくない。構造物によっては、終局限界状態設計においても線形解析が適用され、また、塑性ヒンジ理論に基づく機構法における仮想仕事式では、荷重効果（外力仕事）は、線形和で表される。
- 4) 地震荷重モデルと耐震設計規範の統計・確率論的取扱いについては、なお今後の研究・調査にまところが多いことから、本稿では、ほかの荷重と同様の限界状態設計式の構成表現（注2）として、数値的には基準法施行令による耐震設計と同等となる β 値を設定した荷重係数の算定例を示すにとどめている。

引用・参考文献

- 1) 坂本 順：荷重の確率過程モデルについて、日本建築学会構造系論文報告集、第393号、昭和63年11月
- 2) 坂本 順：信頼性解析と信頼性設計、建築における確率統計処理（第2回セミナー）、日本建築学会構造委員会・環境工学委員会・確率統計処理合同委員会、1986
- 3) 日本建築学会構造委員会鋼構造分科会：鋼構造荷重・耐力係数設計法試案、1986
- 4) Ellingwood, B., et al: Development of a Probability Based Load Criterion for American National Standard A 58 Building Code Requirements for Minimum Design Loads in Buildings and Other Structures, National Bureau of Standards, June 1980
- 5) 田中 尚：荷重・耐力係数決定法私案、日本建築学会構造系論文報告集、第379号、昭和62年9月
- 6) Hendrickson, E., et al: Limit State Probabilities for Wood Structural Members, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.113, No.1, January, 1987
- 7) 坂本 順、小浜芳朗ほか：荷重抵抗係数設計法における地震荷重の確率・統計モデルに関する考案、日本建築学会論文報告集、第346号、昭和59年12月
- 8) 坂本 順、小浜芳朗ほか：地震荷重に対する荷重・抵抗係数設計法に関する考案、日本建築学会構造系論文報告集、第353号、昭和60年7月
- 9) Ad. Hoc. Committee on Serviceability Research: Structural Serviceability, A Critical Appraisal and Research Needs, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.112, No.12, December, 1986

SYNOPSIS

UDC : 624.042.4 : 006 : 001.8

LOAD FACTORS FOR USE IN PROBABILITY-BASED LIMIT STATES DESIGN

by Dr. JUN SAKAMOTO, Prof. of Nagoya Univ., Member
of A. I. J.

This paper describes a basis for probability-based limit states design. Basic design formats and load modelings for load and resistance factor design method are summarized, and practical procedures of calculating the load factors for ultimate and serviceability limit states are presented with numerical examples.