現行設計法により設計される建築物の信頼性レベルについての試算的考察

終局限界および使用性限界状態設計に用いる荷重モデル [III]

A STUDY ON RELIABILITY OF BUILDINGS DESIGNED
BY CURRENT BUILDING CODE

Load models for use in ultimate and serviceability limit states design [III]

坂本 順*, 森 保宏**

Jun SAKAMOTO and Yasuhiro MORI

In the previous papers, a probabilistic method to determine two classes of load models for use in safety and functionality limit state design based on the order statistics of basic variates was presented and the probabilistic characteristics of two classes of natural hazard models were discussed. Using the two classes of load models, this paper discusses the reliability of buildings designed by the current building code. Numerical examples show that the reliability of a building differs from site to site and load combinations, and that the reliability can be more consistent using probability-based limit state design.

Keywords: structural reliability, limit state design, probabilistic load model, order statistics

構造信頼性, 限界状態設計, 荷重の確率モデル, 順序統計量

1 まえがき

前稿 [I]¹⁾では, 建築物の安全性と使用性にかかわる性能限界設計のそれぞれに用いる強さと生起率が異なる2つのクラスの荷重を, 荷重強さの順序統計量に基づいて確率論的に設定する方法について論じた。さらに続稿 [II]²⁾では, 代表的な地点における地上積雪深・基準風速・地表加速度の統計資料とこれらの順序統計量を用いて, 積雪深・基準風速については年最大積雪深・年最大基準風速を基本変数とした年生起時系列モデル, 地表加速度については構造工学的見地からある強さ以上の地震動による地表加速度を基本変数としたポアソン時系列モデルによって, 強さと生起率が異なる2つのクラスの地上積雪深・基準風速・地表加速度の算定例を示して, これらの確率的特性について考察を加えた。本稿では, 建築基準法令等の現行設計法によって設計される建築物の信頼性レベルについての考察として, 1) 多雪地域の8地点における雪荷重を含む荷重の組み合わせ時, 一般地域の9地点における風荷重を含む荷重の組み合わせ時, および5地点における地震荷重を含む荷重の組み合わせ時について, 現行設計法によって想定される終局限界耐力および使用性限界耐力とクラス-U・クラス-Sの2つのクラスの荷重モデルを用いて信頼性指標値の試算例を示し, 2) 各荷重時および各地点間において信頼性レベルに不均衡さがあること, また, 信頼性指標値が過大あるいは過小とみなされる点があることを具

体的に指摘して, 3) これらは確率論的方法を用いる設計法によっては正・調整されることを例示している。

本稿の2節および3節では, 信頼性解析に用いる荷重の統計・確率モデルおよび限界耐力モデルについて, 4節では, 信頼性レベルの確率解析法について述べている。5節では, 信頼性レベルの算定結果について考察を加え, さらに6節では, 確率論的方法を用いる設計法の推奨とそれに関連する課題について論じている。

2 信頼性解析に用いる荷重の統計・確率モデル

本節では, 信頼性解析に用いる荷重の組み合わせ, および各荷重の基本統計資料と確率モデルについて述べる。

2.1 荷重の組み合わせ および 固定荷重・積載荷重

本稿における信頼性解析では, 下記の荷重の組み合わせを取り上げて, 雪荷重を含む荷重の組み合わせについては多雪地域を対象とする。

1) $W_D + W_L + W_S$; 多雪地域

2) $W_D + W_L + W_W$

3) $W_D + W_L + W_E$

上記の荷重の組み合わせにおいて, W_D, W_L は固定荷重, 積載荷重を, W_S, W_W, W_E は雪荷重・風荷重・地震荷重を表わす。本稿の信頼性解析ではこれらを確率変数として, それぞれの荷重の組み合わせに

* 愛知工業大学工学部 教授・工博

** 名古屋大学大学院工学研究科 助教授・Ph. D.

Prof., Faculty of Engineering, Aichi Institute of Tech., Dr. Eng.
Assoc. Prof., Faculty of Engineering, Nagoya Univ., Ph. D.

において雪荷重、風荷重および地震荷重を「主の荷重」、固定荷重・積載荷重を「従の荷重」とする。なお、上記の1),2),3)の各荷重時における固定荷重および積載荷重の統計値については、一般論的には実状および床用途による統計資料に基づいて設定されるが、本稿の信頼性解析では、文献3)を参照して下記の統計値を設定する。

$$\overline{W}_L/\overline{W}_D = 0.50, V_{WD} = 0.20, V_{WL} = 0.40 \quad (1)$$

上式および以下の記述では、 $\bar{o}$, V_o は、 o の平均値、変動係数を表わす。また、固定荷重と積載荷重については、時間変動が小さいものとみなして、本稿での考察では時間変動を伴わない確率変数とし、両者の確率分布は対数正規分布を仮定する。

2.2 地上積雪深・基準風速・地震加速度の基本統計資料

本稿での信頼性解析では、多雪地域の「札幌」、「新潟」、「秋田」、「根室」、「函館」、「松江」、「長野」、「仙台」の8地点を選定して、これらの地点における地上積雪深の基本統計資料については文献3)に記載されている年最大積雪深の平均値と変動係数を用いることにする。図-1(1)の(a)および(b)に、各地点における年最大積雪深の平均値と変動係数を示す。これらの地点の付加番号は、図-1(1)の(c)に図示されているように再現期間50年の積雪深（以下では50年再現期間値という。基準風速、地表加速度についても同様。）[文献3)による]が大きい順に付している。

同様に、基準風速の基本統計資料についても文献3)の資料を引用して、「鹿児島」、「広島」、「名古屋」、「福岡」、「金沢」、「大阪」、「東京」、「仙台」、「札幌」の9地点における基準風速の年最大値の平均値、変動係数および50年再現期間値を、図-1(2)の(a),(b)および(c)に示す。

地表加速度の統計資料については、前稿²⁾に述べた算定例と同様に地震動をポアソン生起時系列としてモデル化する方法を用いることにして、図-1(3)にポアソン時系列モデルにおける地表加速度の平均値と変動係数および50年再現期間値を「東京」、「名古屋」、「大阪」、「仙台」、「広島」の5地点について示す。同図中の「東京」、「名古屋」、「仙台」における地表加速度の統計値については前稿²⁾に示した統計値と同じであり、「大阪」、「広島」における地表加速度についても、前稿と同様に1800年以降の180年間における地震資料と金井の予測式を用いて、さらに、ある強さ以上の地震動（地表加速度が $40 \sim 50 \text{ cm/s}^2$ 以上の地震動）に限定して算定される統計値を示したものである。図-3(c)に図示されている「大阪」と「広島」における地表加速度の50年再現期間値は、それぞれ 167 cm/s^2 , 102 cm/s^2 である。因みに、前稿²⁾で引用した「6例の地震危険度マップから標準地盤加速度に換算した50年再現期間値」⁴⁾によると、「大阪」については、 220 cm/s^2 (河角), 140 cm/s^2 (金井), 190 cm/s^2 (後藤・亀田), 140 cm/s^2 (尾崎ら), 220 cm/s^2 (牧野・松村), 170 cm/s^2 (垣・神田) であり、本稿にける算定値の 167 cm/s^2 は、これらの6例の平均的な値に対応している。上記の5地点の地表加速度のポアソン時系列モデルにおけるパラメータについては4節で述べる。

なお、年最大積雪深・年最大風速の確率分布については対数正規分布を仮定し、地表加速度の確率分布については前稿²⁾と同じ確率分布（前稿²⁾の(7)式）を用いる。また、以下では、図-1中の記号と同様に S_a および U_a は年最大積雪深および年最大基準風速を、 S_{50} ・ U_{50} はそ

れぞれの50年再現期間値を表わし、 A および A_{50} はポアソン時系列モデルにおける地表加速度および50年再現期間値を表わすものとする。

図-1: 地上積雪深・基準風速・地表加速度の統計値

2.3 雪荷重・風荷重・地震荷重の確率モデル

雪荷重、風荷重および地震荷重の基本値については、上記の各地点における地上積雪深、基準風速および地表加速度を用いて、「鋼構造限界状態設計規準（案）・同解説」および「建築物荷重指針・同解説」3),5)を参照して、下式で表わされるものとする。

$$W_{Sa} = C_s \cdot E_s \cdot \rho_s \cdot S_a \quad (2)$$

ここに、 C_s : 屋根形状係数, E_s : 環境係数, ρ_s : 積雪単位重量である。

$$W_{Wa} = C_f \cdot G_f \cdot 1/2 \cdot \rho_w \cdot E_w^2 \cdot Ua^2 \quad (3)$$

ここに、 C_f ：風力係数、 G_f ：ガスト影響係数、 ρ_w ：空気密度、 E_w ：鉛直方向分布係数である。

$$W_{Ep} = 2.5 \cdot R_t \cdot A_i \cdot W_i \cdot A/g \quad (4)$$

ここに、2.5：応答倍率（短周期を対象）、 R_t ：振動特性係数、 A_i ：地震層せん断力の高さ方向の分布係数、 W_i ： i 階が支える重量、 g ：重力加速度を表わす。なお、本稿の信頼性解析例における(2)～(4)式の各荷重の確率変数としての取り扱いについては4節で述べる。

3 信頼性解析に用いる限界耐力モデル

本節では、基準法令等の現行設計法に用いられている設計用荷重に基づく構造耐力について述べる。基準法令等による現行設計法では、多雪地域における雪荷重時には長期・短期許容応力設計、風荷重時には短期許容応力設計、また、地震荷重時には1次および2次設計が設計の基本とされている。本稿の信頼性解析例では、これらの設計法による構造耐力を、使用性限界耐力および終局限界耐力に換算して、それぞれの限界耐力を想定する。以下に、現行設計法によって設計される建築物の信頼性レベルの試算的考察に用いる使用性限界耐力と終局限界耐力について述べる。なお、本節での下記の(5)～(10)式中の $W_D \cdot W_L$ については、固定・積載荷重の公称値を表わし、本稿では、両者とも平均値と同じとする。

3.1 雪荷重時

- 1) 多雪地域における雪荷重は、地域ごとに地上積雪深を用いて算定されるが、積雪深は地域差が大きいため、基準法令等では定めずに地域ごとに所管行政庁が定めている。前掲の図-1(1)の、各地点において定めてられている積雪深の現時点での精確な資料を筆者らは得ていないので、試算的考察では、各地点について50年再現期間値の80%の積雪深による雪荷重を設計用雪荷重とする。
- 2) 基準法令等では、多雪地域では雪荷重時の設計は長期および短期許容応力設計とすることにされている。本稿での信頼性解析では、長期許容応力設計による許容耐力に基づいて、雪荷重時の使用性限界耐力 R_s と終局限界耐力 R_u を下記のように換算・想定する。

$$R_s = \nu_s \cdot (W_D + W_L + 0.8 \cdot W_{S50}) ; \quad \nu_s = 1.5 \quad (5)$$

$$R_u = \psi_u \cdot \nu_s \cdot (W_D + W_L + 0.8 \cdot W_{S50}) ; \quad \psi_u = 1.5 \quad (6)$$

(5)式中の ν_s は、長期許容耐力を短期相当耐力（初期降伏耐力；使用性限界耐力とする）に換算する係数を、 W_{S50} は50年再現期間値による雪荷重を表わす。また、(6)式の $\psi_u = 1.5$ については、初期降伏耐力の1.5倍の終局限界耐力を有すると仮定したものである。この係数値はやや過大な設定とも思われるが不静定構造物を想定している。

3.2 風荷重時

- 1) 風荷重については、基準法令等では設計用速度圧($q = 60\sqrt{h}$, $120\sqrt{h}$)を定めており、それを用いて設計用風荷重を算定することになっている。なお、特定の地域については地域係数 Z_w （速度圧の低減係数）が適用され、図-1(2)の「仙台」・「札幌」では $Z_w = 0.8$ が適用される。

- 2) 風荷重に対する設計は、基準法令等では短期許容応力設計とされている。本稿での信頼性解析では、風荷重時の使用性限界耐力 R_s と終局限界耐力 R_u を下記のように想定する。

$$R_s = (W_D + W_L + W_{Uo} \cdot Zw) \quad (7)$$

$$R_u = \psi_u \cdot (W_D + W_L + W_{Uo} \cdot Zw) ; \quad \psi_u = 1.5 \quad (8)$$

ここに、 W_{Uo} は、設計用速度圧による風荷重を表わす。

3.3 地震荷重時

- 1) 地震荷重については、基準法令等では標準地震層せん断力係数 C_0 などを定めている。1次設計では $C_{01} = 0.2$ として短期許容応力設計、2次設計では $C_{02} = 1.0$ として保有水平耐力を確認することになっている。なお、地域係数 Ze については、図-1(3)中の地点では「広島」で、 $Ze = 0.9$ が適用される。
- 2) 使用性限界耐力 R_s と終局限界耐力 R_u を下記のように想定する。

$$R_s = \psi_m \cdot (W_D + W_L + I.F. \cdot \psi_{C_0} \cdot W_{C_{01}} \cdot Ze) \quad (9)$$

$$R_u = \psi_m \cdot (W_D + W_L + I.F. \cdot W_{C_{02}} \cdot Ze) \quad (10)$$

(9)、(10)式中の $W_{C_{01}}$ および $W_{C_{02}}$ は、 $C_{01} = 0.2$ および $C_{02} = 1.0$ による地震荷重を表わす。また、両式中のI.F.は重要度係数を表わし、5節においてI.F.=1.50、1.25の重要度係数を適用した場合の信頼性レベルの算定例を示す上で両式に含ませたものである。また、 $\psi_m = 1.15$ は、材料の規格降伏強さと実降伏強さの平均値の比（ここでは、鋼材を想定）を表わす係数である。なお、(9)式中の ψ_{C_0} は、5節において詳しく述べるが、 $C_{01} = 0.2$ に基づく地震荷重による設計限界耐力 R_s では、使用性に対する信頼性指標値が雪・風荷重時に比べて著しく小さく、地域によっては負の値となることから、 $\psi_{C_0} = 1.5$ を組み入れて $C_{01} = 0.2$ を50%割り増したものである。

3.4 2つの限界耐力の統計値

次節以下に述べる信頼性解析では、上記の(5)～(10)式の使用性限界耐力および終局限界耐力を確率変数として取り扱い、両者については、下記の確率分布と平均値・変動係数を設定する。

- 1) 各限界耐力の確率分布については、対数正規分布を仮定する。
- 2) 各限界耐力の平均値は、(5)～(10)式中の W_D , W_L にこれらの平均値を用いて算定される値とする。
- 3) 変動係数については、 $V_R = 0.2$ と $V_R = 0.3$ を想定する。文献3)によると、鋼構造では、構造要素（部材・接合部など）の限界耐力の変動係数は、およそ15～20%程度とされているが、本稿では、構造部分または全体の限界耐力の変動係数として $V_R = 0.3$ を想定した場合の信頼性解析結果も併せ示すことにする。

4 信頼性レベルの確率解析法

次節以下に、2、3節に述べた荷重の組み合わせと基本統計資料による荷重モデルおよび2つのレベルの限界耐力モデルによって、基準法令等の現行設計法により設計される建築物の信頼性レベルについての試算例を示すが、本節では、信頼性レベルの確率解析法および試算例における各パラメータの設定と仮定について述べる。

4.1 信頼性レベルの確率解析法

信頼性レベルの確率解析では、荷重については、固定荷重と積載荷重は時間変動がないものとし、雪荷重と風荷重については年最大荷重強さを基本変数とする年生起時系列としてモデル化する。また、地震荷重については前稿²⁾で述べたポアソン時系列モデルを用いる。

さらに、前稿^{1),2)}で論じた荷重強さの順序統計量による方法を用いて、終局限界耐力と使用性限界耐力のそれぞれに対する生起率と強さが異なる2つのクラスの荷重を設定する。クラスーUおよびクラスーSの荷重の確率密度関数などの算定法については、前稿^{1), 2)}に詳しく述べているので、ここではクラスーU・クラスーSの荷重を含む荷重の組み合わせにおける確率解析法を付記しておく。

前稿と同様に、2つのクラスの荷重強さを $W_{Xu}(\lambda u; N)$ および $W_{Xs}(\lambda s; N)$ [$X = S$, W または E , ポアソン時系列モデルでは $\lambda u, \lambda s$ を $\lambda pu, \lambda ps$ に置き換える: 前稿²⁾ 参照] とすると、 N 年間に終局限界および使用性限界状態におちいる確率（以下では、超過確率と言う） P_{fu} および P_{fs} は、(11)式で算定される。

$$\begin{aligned} P_{fu} &= \text{Prob}[Ru - (W_D + W_L + W_{Xu}(\lambda u; N)) \leq 0] \\ P_{fs} &= \text{Prob}[Rs - (W_D + W_L + W_{Xs}(\lambda s; N)) \leq 0] \end{aligned} \quad (11)$$

さらに、 N 年間における終局限界および使用性限界についての信頼性指標値は、下式で算定される。

$$\beta u = \Phi^{-1}(1 - P_{fu}), \quad \beta s = \Phi^{-1}(1 - P_{fs}) \quad (12)$$

ここに、 $\Phi^{-1}(\bullet)$ は、標準正規分布関数の逆関数を表わす。

(11)式の右辺の確率計算の畳み込み積分は、両式中の限界耐力および各荷重の確率密度関数が解析関数として得られておれば、文献6)に述べたFFTによる確率解析法によって容易に算定される。

4.2 信頼性レベルの解析における各パラメータの設定および仮定

本稿での信頼性レベルの解析における各パラメータの設定と仮定について述べておく。

- 雪荷重に関するパラメータについては、(2)式中の屋根形状係数および環境係数は、 $C_S = 1.0$, $E_S = 1.0$ とし、積雪単位重量 ρ_s については(5), (6)式中の W_{S50} の算定に用いる重量と同じとする。また、これらの平均値は公称値と同じとし、変動係数については文献3)に記載されている値を用いる。
- 風荷重に関するパラメータについては、(3)式の W_{Wa} と(7), (8)式の W_{Uo} における風力係数・空気密度は同じとし、風速の鉛直方向の分布については本稿では簡略化して $\sqrt{h}$ ($h=10\text{m}$)を用い、(3)式中のガスト影響係数については $G_f = 2.0$ を設定している。また、(3)式中の風力係数などの平均値は公称値と同じとし、変動係数は文献3)に準じている。
- 地震荷重については、(4)式は基準法令等による地震荷重の算定式を地表加速度を用いて表わしたものであり、ここでは短周期域を対象にして応答倍率を2.5、振動特性係数は $R_t = 1.0$ とする。また、(4)式中の各パラメータの平均値、変動係数は、上記の1), 2)と同様に文献3)に準じて設定している。地震荷重時における終局限界については、例えば文献7), 8)などに述べられている塑性変形限界・エネルギー吸収限界性能を併せ考えるべきである

表-1: 算定例における m および ku 値

		標本の大きさ m	順序統計量の 区分順位値 ku
積雪深・基準風速		200	10
地 表 加 速 度	東 京	90	11
	名古屋	70	11
	大 阪	56	11
	仙 台	47	11
	広 島	39	8

が、本稿での信頼性解析では「変位一定則」あるいは「エネルギー一定則」の近似則による等価限界耐力を仮定していることを付記しておく。

- 地表加速度の5地点におけるポアソン時系列モデルの単位期間当たりの生起率と、順序統計量におけるパラメータ(m, ku)については、前稿²⁾(表-5, 表-6)と同様な方法によって設定する。本稿の信頼性解析における順序統計量のパラメータの設定値を、地上積雪深・基準風速のそれらと併せて、表-1に示す。

5 信頼性レベルの算定結果とその考察

前節までに述べたクラスーU・クラスーSの荷重モデルと現行設計法に基づく終局限界・使用性限界耐力モデル および FFTを用いた確率解析法による雪荷重時、風荷重時、地震荷重時における信頼性レベルの算定結果とその考察について述べる。本節での算定例では、全て $N = 50$ 年間における終局限界および使用性限界についての信頼性レベルの算定値を示し、信頼性レベルの尺度指標としては「信頼性指標値」を用いる。本節の5.1および5.2では、各荷重の組み合わせ時についての信頼性指標値の算定結果とその考察を個別的に述べ、5.3において総括的な考察を加えることにする。

5.1 終局限界についての信頼性レベル

(1) 雪 荷 重 時

多雪地域の8地点の雪荷重時における終局限界についての信頼性指標値の算定例を図-2(1)に示す。同図横軸の数値1.~8. は、図-1(1)の地点番号を表わす。これらの算定結果についての考察は、下記のように要約される。

- 8地点における $V_{Ru} = 0.2$ のときの信頼性指標値は、 $\beta u = 1.49 \sim 2.41$ であり、8地点の中で2.新潟, 4.根室, 6.松江における信頼性指標値が相対的に小さい値となっている。これは図-1(1)の(b)に示されるように、これらの3地点における年大積雪深の変動係数が大きいことによる。
- 本稿での算定例では、各地点において所管行政庁が定める積雪深の現時点での精確な資料を得ていないことから、設計用積雪深として50年再現期間値(図-1(1)参照)の80%の積雪深を仮定したが、これらは各地点のおよそ10~15年再現期間値に対応する。各地点における積雪深の再現期間値が用いられていることにより、信頼性指標値の地域差が小さい点が指摘される。8地点を2つの地点群に分けると、信頼性指標値は、地点1.3.5.7.8.では、 $\beta u = 2.04 \sim 2.41$ 、地点2.4.6.では、 $\beta u = 1.49 \sim 1.72$ となる。
- 終局限界耐力の変動係数が $V_{Ru} = 0.3$ のときの信頼性指標値は、地点1.3.5.7.8.では、 $\beta u = 1.52 \sim 1.73$ 、地点2.4.6.では、 $\beta u = 1.19 \sim 1.33$ となる。

(2) 風荷重時

風荷重時については、図-1(2)に示した9地点の終局限界についての信頼性指標値を図-2(2)に示す。同図横軸の数値1~9は、図-1(2)の地点番号を表わす。これらの算定結果についての考察は、下記のように要約される。

- 1) 9地点における $V_{Ru} = 0.2$ のときの信頼性指標値は、 $\beta_u = 1.70 \sim 5.04$ であり、地域差が極めて大きい。これは基準法令等によって設計用速度圧が一律に適用されていることによる。地域係数 Z_w を適用した地点の8.仙台と9.札幌における信頼性指標値は4以上、7.の東京においても3.5を上回る値となっている。因みに、 $\beta_u = 3.5$ は、 $N=50$ 年間における超過確率が約 $2 \cdot 10^{-4}$ であることに対応する。
- 2) 9地点における信頼性指標値は、図-1(2)に示した年最大風速の平均値、変動係数および50年再現期間値の大きさの順と対比するとほぼ逆の大きさ順になっている。ただし、6.大阪は例外的である。これは同地点における年最大風速の観測資料あるいは統計的性質の特殊性によるのではないかと推測される。
- 3) 終局限界耐力の変動係数が $V_{Ru} = 0.3$ のときの信頼性指標値は、 $\beta_u = 1.34 \sim 3.73$ となる。

(3) 地震荷重時

地震荷重時については、算定例の地点数が少ないが、5地点における終局限界についての信頼性指標値を図-2(3)に示す。同図横軸の数値1~5は、図-1(3)の地点番号を表わす。これらの算定結果については、下記のように要約される。

- 1) 5地点における $V_{Ru} = 0.2$ のときの信頼性指標値は、 $\beta_u = 1.15 \sim 2.18$ であり、上述の雪荷重時・風荷重時に比べると信頼性レベルが低い。5.広島については地域係数 $Z_e = 0.9$ を適用しているが、5地点についての算定例では、2.名古屋、5.広島のように地表加速度の変動係数（図-1(3)(b)参照）が大きい地点では、信頼性指標値が小さくなる傾向がある。
- 2) 終局限界耐力の変動係数が $V_{Ru} = 0.3$ のときの信頼性指標値は、 $\beta_u = 1.03 \sim 1.89$ となる。
- 3) 図-3には、重要度係数を適用した場合の算定結果を示す。同図の算定例は、終局限界耐力の変動係数が $V_{Ru} = 0.2$ の場合であり、同図(a)および(b)には、それぞれ重要度係数がI.F. = 1.50、およびI.F. = 1.25のときの信頼性指標値を図示している。両者の場合の信頼性指標値は、I.F. = 1.50のときには、 $\beta_u = 1.70 \sim 2.99$ 、I.F. = 1.25のときには、 $\beta_u = 1.46 \sim 2.63$ となる。重要度係数の適用とそれによる信頼性レベルの向上については、6節で再び述べることにする。
- 4) 地震荷重時の算定例については、地点数が限られており、かつ地震危険度の著しく低い地点が含まれていないことから、信頼性指標値の地域差が小さい算定結果となっていることを付記しておく。

5.2 使用性限界についての信頼性レベル

(1) 雪荷重時

多雪地域の8地点における使用性限界についての信頼性指標値を図-4(1)に示す。これらの算定例から、下記の点が指摘される。

図-2: 終局限界に対する信頼性レベル

図-3: 終局限界に対する信頼性レベル；地震荷重時

- 多雪地域の8地点における信頼性指標値は、 $V_{Rs} = 0.2$ のときには、 $\beta_s = 1.54 \sim 1.76$ 、 $V_{Rs} = 0.3$ のときには、 $\beta_s = 0.98 \sim 1.17$ となっている。これらの使用性限界についての信頼性指標値は、5.1(1)に述べた終局限界についてのそれらと比べると、地点差がさらに小さくなっており、各地点における積雪深の再現期間値を用いることの合理性を示唆している。

(2) 風荷重時

9地点の風荷重時における使用性限界についての信頼性指標値を図-4(2)に示す。これらの算定結果から、下記の点が指摘される。

- 1) 9地点における信頼性指標値は、 $V_{Rs} = 0.2$ のときには、 $\beta_s = 2.11 \sim 4.26$ 、 $V_{Rs} = 0.3$ のときには、 $\beta_s = 1.41 \sim 2.96$ となっている。
- 2) これらの9地点における使用性限界についての信頼性指標値は、5.1(2)に述べた終局限界についての信頼性指標値と比較すると、定性的にはほぼ類似しているが、地点差が相対的に小さいことが指摘される。

(3) 地震荷重時

5地点の地震荷重時における使用性限界についての信頼性指標値を図-4(3)に示す。これらの算定結果から、下記の点が指摘される。

- 1) 5地点における信頼性指標値は、 $V_{Rs} = 0.2$ のときには、 β_s

図-4: 使用性に対する信頼性レベル

$= 0.06 \sim 1.07$, $V_{Rs} = 0.3$ のときには, $\beta_s = 0.02 \sim 0.78$ となっている。

- 2) 地震荷重時における使用性限界耐力については、基準法令等による標準地震層せん断力係数 $C_{01} = 0.2$ を50%割り増した地震荷重によって設定されているが、図-4(3)に見られるように、地点 1. 東京の信頼性指標値は $\beta \approx 0$ となっている。また、5 地点全体についても $C_{01} = 0.2$ を50%割り増したにもかかわらず、前述の雪・風荷重時に比べて信頼性指標値が小さい。

5.3 終局限界・使用性限界についての信頼性レベルの総括的考察

5.1および5.2では、雪荷重時、風荷重時、地震荷重時における終局限界および使用性限界についての信頼性レベルの算定結果を、各地点ごとに示したが、本節では総括的な考察について述べる。

図-5は、雪荷重時・風荷重時・地震荷重時における終局限界についての信頼性指標値を対比して図示したものである。同図の上段は、終局限界耐力の変動係数が $V_{Ru} = 0.2$, $V_{Ru} = 0.3$ の場合であり、同図下段は、地震荷重時において重要度係数 $I.F. = 1.50, 1.25, 1.00$ を適用した場合の信頼性指標値を示したものである。同様に、図-6には、 $V_{Rs} = 0.2$, $V_{Rs} = 0.3$ のときの使用性限界についての信頼性指標値が対比して図示されている。これらの図では、信頼性指標値の各地点間における差異は読み取れなくなっているが、各荷重時間における信頼性指標値の差異、および地震荷重時において重要度係数を適用した場合の信頼性指標値の相対的な信頼性レベルが読み取れる。図-5および図-6の信頼性指標値について、下記の事項が指摘される。

- 1) 図-5から、終局限界についての信頼性指標値は、雪荷重時、風荷重時、地震荷重時では信頼性指標の下限(左方)の値がおおよそ0.5づつ異なり、また、風荷重時における信頼性指標値の上下限幅が著しく大きい点が指摘される。なお、地震荷重時については、信頼性指標の下限値が他の荷重時より小さい点は指摘されるが、本稿での算定例の地点数が少ないこと、また地震危険度の低

図-5: 終局限界に対する信頼性指標値

図-6: 使用性限界に対する信頼性指標値

い地点が含まれていないことから、信頼性指標値の上下限幅については、他の荷重時と対比して論じられない。右側の図は、終局限界耐力の変動係数が $V_{Ru} = 0.3$ の場合であるが、変動係数が大きくなると信頼性指標値の上下限幅が狭くなる傾向がある。

- 2) 図-5の下段の図は、重要度係数と信頼性指標値との関係を表わしており、 $I.F. = 1.00$ のときを基準にすると、重要度係数 $I.F. = 1.50$ を適用した場合には、同図に見られるように信頼性指標の下方値(名古屋・東京が該当)が約0.75ほど大きくなる。また、全体的には、限界状態におちいる確率が約1/10 低くなる。
- 3) 図-6の使用性限界に対する信頼性指標値については、雪荷重時における信頼性指標値の上下限幅が著しく狭くなっている点と地震荷重時における信頼性指標値が相対的に小さい点が指摘される。前者は、各地点(8地点)において積雪深の再現期間値による設計用雪荷重に基づいて限界耐力が設定されていることによる。後者については、 $C_{01} = 0.2$ を50%割り増して限界耐力を設定した算定例であるが、他の荷重時に比べて信頼性レベルがなお低い結果となっている。また、使用性限界についての信頼性指標値に限界耐力の変動係数が及ぼす影響は、図-6 から、前記の終局限界についての場合と同じことが言える。
- 4) ここまでに示した各荷重時における信頼性指標値の試算例は、前稿^{1),2)}で論じたクラス-U・クラス-Sの荷重モデルを用いて終局限界および使用性限界についての両者とも $N=50$ 年における信頼性指標値の算定例を示したものであるが、多雪地域の8地点における雪荷重時、一般地域の9地点における風荷重時および5地点における地震荷重時についての信頼性指標値の算定結

果から、各荷重時および各地点間において著しい不均衡さがあること、また、信頼性指標値が過大あるいは過小とみなされる点があることが指摘される。これらを是正・調整する方法についての考察を次節に述べる。

6 確率論的方法を用いる設計法の推奨と関連する課題

6.1 確率論的方法を用いる設計法における信頼性指標値の算定例

前節までには、現行設計法によって設計される建築物の終局限界および使用性限界についての信頼性レベルの試算例を示して、各荷重時および各地点間において信頼性指標値に不均衡さがあること、また、過大あるいは過小とみなされる点があることを具体的に例示した。本節では、これらの不均衡さなどが確率論的方法を用いる設計法によって、どのように是正・調整されるかの1つの算定例を示して述べる。

建築物の安全性と使用性にかかわる2つの性能限界設計を設計の基本とすると、これらの性能限界に対する安全性・信頼性についての照査形式(safety/reliability-checking format)としては、下記の荷重係数・耐力(抵抗)係数方式が実用設計法に適している。

終局限界および使用性限界について、下記の荷重・耐力係数を設定した場合の信頼性指標値の算定例について示す。これらの荷重係数・耐力係数の設定の根拠については、考察のところで述べる。

$$\begin{aligned} 0.9 \cdot R_{U_n} &\geq 1.1 \cdot W_{D_n} + 0.8 \cdot W_{L_n} + 1.6 \cdot W_{S_n} \\ 0.9 \cdot R_{U_n} &\geq 1.1 \cdot W_{D_n} + 0.8 \cdot W_{L_n} + 1.6 \cdot W_{W_n} \end{aligned} \quad (13)$$

$$0.9 \cdot R_{U_n} \geq 1.1 \cdot W_{D_n} + 0.8 \cdot W_{L_n} + 1.8 \cdot W_{E_n}$$

$$\begin{aligned} 0.9 \cdot R_{S_n} &\geq 1.1 \cdot W_{D_n} + 0.8 \cdot W_{L_n} + 1.1 \cdot W_{S_n} \\ 0.9 \cdot R_{S_n} &\geq 1.1 \cdot W_{D_n} + 0.8 \cdot W_{L_n} + 1.1 \cdot W_{W_n} \end{aligned} \quad (14)$$

$$0.9 \cdot R_{S_n} \geq 1.1 \cdot W_{D_n} + 0.8 \cdot W_{L_n} + 0.8 \cdot W_{E_n}$$

ここに、

$$R_{S_n} = \bar{R}_s / \psi_m, \quad R_{U_n} = \bar{R}_u / \psi_m, \quad \psi_m = 1.15 \quad (15)$$

$$\begin{aligned} W_{D_n} &= \bar{W}_D, \quad W_{L_n} = 1.25 \bar{W}_L, \quad W_{X_n} = W_X 50,; \\ X &= S, W, E \end{aligned} \quad (16)$$

上記の(13)、(14)式において、添字の n は、各限界耐力・各荷重の公称値を表わし、各限界耐力の公称値は(15)式で設定されるものとする($\psi_m=9$)、(10)式参照)。雪・風・地震荷重の公称値については、(16)式に示すように地上積雪深・基準風速・地表加速度の「50年再現期間値」に基づいて設定されているものとする。また、各限界耐力の変動係数と確率分布および各荷重の統計値と確率モデルなどについては、前節までの信頼性解析に用いたそれらと同じとする。

図-7に、(13)、(14)式の設計条件を満たす終局限界耐力・使用性限界耐力が設定された場合の信頼性指標値の算定結果を示す。

これらの算定結果について、下記の事項が指摘される。

- 1) 図-7の左図は、各荷重時における終局限界についての信頼性指標値($V_{Ru} = 0.2$)を図示したものである。図-7(1)の雪荷重時における地点3.5.7.および図-7(2)風荷重時における地点5.7.の信頼性指標値は、ほぼ $\beta_u = 2.0$ となっている。これらの地点における雪荷重(積雪深)の変動係数および風荷重の変動係数

図-7: 終局限界・使用性限界に対する信頼性指標

図-8: 終局限界に対する信頼性指標値

(基準風速の変動係数の約2倍)は、図-1(1)、図-1(2)の資料から、40~45%である。

(13)式における雪荷重、風荷重係数の1.60は、この変動係数を標準にし、信頼性レベル $\beta_T = 2.0$ を目標としたものである。

- 2) 同様に地震荷重時については、図-7(3)における地点3.4.の信頼性指標値は、雪・風荷重時と同様に $\beta_u = 2.0$ となっている。両地点における地表加速度の変動係数は、図-1(3)の(b)に示されているように約50%でやや小さいが、この場合に目標信頼性レベルが $\beta_T = 2.0$ となる算定例として、(13)式の地震荷重係数の1.80を設定したものである。また、1.東京では、 $\beta_u = 1.75$ であるが、再現期間50年の地表加速度を図-1(3)(c)に示した180 cm/s^2 とすると、(13)式の地震荷重時における荷重係数を用いて設定される終局限界耐力(の平均値)は、基準法令等が定めている $C_{02} = 1.0$ による終局耐力にほぼ対応する。
- 3) 図-7に示されている各荷重時および各地点における信頼性指標値は、図-2に示したそれらと比べると不均衡さと過大・過小さが是正されている。なお、各荷重時において信頼性指標値にやや差異があるが、これは主に各地点における積雪深、基準風速、地表加速度の変動係数の差異に起因している。すなわち、図-

1(1), (2), (3)の(b)に示した積雪深, 基準風速, 地表加速度の変動係数が相対的大きい地点では信頼性指標値が小さくなる。

- 4) 図-7(1), (2), (3)の右図は, 雪・風荷重時・地震荷重時における使用性限界についての信頼性指標値 ($V_{Ru} = 0.2$) の算定結果を図示したものである。(14)式における雪荷重・風荷重の荷重係数 1.10, および地震荷重の荷重係数 0.80 は, $N=50$ 年間における使用性限界についての「目標信頼性レベル」を $\beta_T = 2.0$ として設定したものであり, 雪荷重時における 8 地点の信頼性指標値は, 各地点とも $\beta_s = 2.0$ となっている。
- 5) 風荷重時の 9 地点における信頼性指標値は, 地点 1.~6. においてやや高目の値となっており, 図-7(2)左図の終局限界に対する信頼性指標値と対比すると, 9 地点の信頼性指標値の大きさが逆の順になっている。これは地点 1.~6. と地点 7.~9. の地点群では, 風環境が異なることによるものと判断される。
- 6) 地震荷重時については, 地点 3.4. における信頼性指標値が $\beta_s = 2.0$, その他の 3 地点では, やや小さい値となっているが, 図-4(3)と比較すると信頼性指標値の不均衡さが是正されている。また, 各地点における再現期間 50 年の地表加速度と地震荷重係数 0.8 を用いて算定される地震荷重値は, 現行設計法における 1 次設計の C_{01} に換算すると, 東京, 名古屋, 大阪では $C_{01} = 0.30 \sim 0.35$, 仙台では $C_{01} = 0.25$, 広島では $C_{01} = 0.20$ にほぼ対応する。
- 7) 図-8は, (13)式の地震荷重時において, 重要度係数 $I.F.=1.50$, および $I.F.=1.25$ の適用した場合の終局限界についての信頼性指標値の算定結果を示したものである。同図に見られるように, $I.F.=1.50$ を適用した場合には, 1.東京, 2.名古屋では, 信頼性指標値が $\beta_u = 2.0 \sim 2.5$ となる。この信頼性指標値に対応する $N=50$ 年間における超過確率 (性能限界がおかされる確率) は, $2 \cdot 10^{-2} \sim 6 \cdot 10^{-3}$ である。

7 あとがき

本稿では, 基準法令等の現行設計法によって設計される建築物の 2 つの性能限界についての信頼性レベルの試算例を示して, 各荷重時および各地点間における信頼性指標値の不均衡さを具体的に指摘し, さらに確率論的方法を用いる設計法によって, これらの不均衡さが是正・調整されることを例示した。これらの一連の試算的考察で用いた生起率と強さが異なる 2 つのクラスの荷重モデルも含めて, 統計・確率論に基づく設計法に関連する課題について書き加えておく。

- 1) 設計に用いる雪荷重・風荷重については, 「建築物荷重指針」⁵⁾では, 各地点における積雪深・基準風速の再現期間値を用いて設定することが推奨され, 多くの技術者もそれらを用いることの合理性を理解している。本稿の試算例において選定した地点以外にも含めて, 地上積雪深・基準風速の観測資料は, 統計学の視点からは不十分さがあるが, 工学的観点からは, これらの利用できる資料を統計・確率論に基づく設計法に用いることができる段階にきていると言える。地震荷重に関連する地表加速度については, 現時点では, 観測資料が限られており, 地震の歴史資料と予測式 (距離減衰式) による推定法に頼らざるをえないが, その推定幅

が大きいことを認識した上で, 確率論的評価手法を地震荷重の設定に用いることができるであろうと判断される。

- 2) このような状況を踏まえて, 前稿 [I], [II] および本稿 [III] では, 性質が異なる 2 つの性能限界設計のそれぞれに用いる荷重を合理的に設定する方法を開発する目的から, 積雪深, 基準風速, 地表加速度の順序統計量に基づいて, 生起率と強さが異なる 2 つのクラスの雪荷重, 風荷重, 地震荷重を確率論的に設定する共通的な方法を提示して一連の考察を加えた。この荷重モデルの設定法では, 2 つのクラスの荷重を区分する順序統計量における区分順位の設定が要点となる。本稿を含めた一連の考察では, 現時点において利用できる統計資料の量的あるいは質的な不十分さ, 特に, 観測・推定資料の分布の上側裾野域における大型台風や大地震などの資料が限られていることから, 区分順位を客観的に設定する上でやや困難さがあつたが, この困難さについては, 今後の観測・調査・研究によって解決されていくであろう。
- 3) 上記の各荷重の統計・確率論的評価法に対して, むしろ構造的な性能, 特に地震荷重時の構造性能の取り扱いに課題が多いと思われる。米国の「LRFD 規準」や「鋼構造限界状態設計規準 (案)」³⁾では, 構造要素 (部材・接合部・耐震壁等) の耐力 (抵抗) と荷重効果との相互間の信頼性レベルを基礎にして構成されている。各構造要素とともに各構造要素の性能の相対的な信頼性レベルの設定は, 設計において基本となるが, 建築物全体の信頼性 (システム信頼性) の評価とそれを設計体系に組み入れてゆく合理的で, かつ実用的な方法を考える必要がある。システム信頼性は, 設計・建設の過程におけるさまざまな要因を包含して検討される必要がある課題である。
- 4) 本稿では, (15), (16) 式に示した「荷重・抵抗 (耐力) 係数方式」の設計法による信頼性レベルの算定例を例示したが, これらの荷重係数・抵抗係数は, 目標とする信頼性レベルと荷重・抵抗 (耐力・変形など) の変動係数および各荷重の相対的な強さに応じて設定される。これに関連する課題としては, 性能限界設計において「目標とする信頼性レベル」を, 建築物の用途・規模・重要度などに応じて, 合理的に設定する方法と基準が考えられなければならない。

参考文献

- 1) 坂本 順, 森 保宏; 順序統計量による荷重の確率モデルに関する考察, 終局限界および使用性限界状態設計に用いる荷重モデル [I], 日本建築学会構造系論文集, 第 493 号, pp.9-15, 1997.3.
- 2) 坂本 順, 森 保宏; 順序統計量による 2 つの強さクラスの地上積雪深・基準風速・地表加速度についての考察, 終局限界および使用性限界状態設計に用いる荷重モデル [II], 日本建築学会構造系論文集, 第 495 号, pp.29-36, 1997.5.
- 3) 日本建築学会; 鋼構造限界状態設計規準 (案)・同解説, 1990.2
- 4) 日本建築学会; 建築耐震設計における保有耐力と変形性能, pp.21-24, 1990.3.
- 5) 日本建築学会; 建築物荷重指針・同解説, 1993.6.
- 6) 坂本 順, 森 保宏, 関岡 孝膳; 離散高速フーリエ変換による確率解析法, 日本建築学会構造系論文集, 第 472 号, pp.39-45, 1995.6.
- 7) 坂本 順, 小浜 芳朗, 森 保宏; 地震荷重に対する荷重・抵抗設計法に関する考察, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 353 号, pp.37-47, 1985.7.
- 8) 日本建築学会; 建築耐震設計における保有耐力と変形性能, 1990.3.

(1997年1月28日原稿受理, 1997年6月24日採用決定)