設計用雪荷重評価のための年最大地上積雪深の確率・統計解析

STATISTICAL ANALYSIS OF ANNUAL EXTREME GROUND SNOW DEPTHS FOR STRUCTURAL DESIGN

桜井修次*, 城 攻**
Shuji SAKURAI and Osamu JOH

The purpose of this paper is to discuss the statistical distribution of snow load and the regional property of snow load factor in Load and Resistance Factor Design method according to annual extreme ground snow depths measured at 362 points in Japan. The probability plot correlation coefficient test proposed by Filliben is used for testing five types of probability distribution functions for their goodness of fit to the data samples. The analysis shows that type I and type III distributions are adequate to describe the observed annual extreme ground snow depths in Japan. Snow load factors in combination of dead load and snow load are also discussed.

Keywords : snow load, probability distribution, mean recurrence interval value, snow load factor

雪荷重, 確率分布形, 再現期待値, 雪荷重係数

1. まえがき

建築物設計用の雪荷重は, 地上積雪荷重およびそれを屋根雪荷重へ変換するための各種係数とを用いて評価される。地上積雪荷重の確率・統計的性質については, 積雪重量の観測資料がきわめて少ない現状から, 全国的に整備されている積雪深の観測資料を基にして考察されることが多い。この際に年最大積雪深記録に適合する確率分布形の選定は, 最も重要な事項の一つである。前田^{文1)}は北陸地方の3地点について極値Ⅰ型分布, Ⅱ型分布および対数正規分布を用いて検討した結果, 実用的には対数正規分布が適用できるとしている。和泉^{文2)}は全国423地点の観測記録に対して5種の確率分布形(極値Ⅰ型分布, Ⅱ型分布, Ⅲ型分布, 正規分布および対数正規分布)の適合度を判定した結果, 年最大積雪深の統計的性質は唯一の分布形では表されないことを指摘し, Ⅰ型極値確率紙上で観測値の上位1/3に回帰直線をあてはめて再現期待値を推定する方法を提案している。

また, 鋼構造荷重・耐力係数設計法試案(1986年)(以下, LRFD試案と略す)および鋼構造限界状態設計規準(案)(1990年)(以下, 規準案と略す)では, 終局限界状態においてそれぞれ極値Ⅰ型分布, 対数正規分布を採用しているが, できるだけ多数の観測地点の記録を基にした全国的な検討が必要であると思われる。

確率分布形の観測記録への適合度の優劣の尺度として

は標準化誤差^{文2)}あるいは二乗推定誤差^{文3)}が用いられ, 分布形の相対的な適合度の順位が判定されることが多い。しかし, 適合度順位1位と2位以下の誤差値が僅差であったり, また順位が2位以下であっても誤差値が小さい場合では, 2位以下の分布形を捨ててしまう不都合を生じる。これに対し, Filliben^{文4)}は判定の尺度として標本についての順序統計量と確率分布関数の順序統計量のメディアンとの相関係数 r を用いることを提唱し, かつ正規分布については r 値の検定を行うために必要な数表を与えている。この検定法が小標本にも有効であり, 非対称分布へも容易に拡張できる利点が強調されている。本稿の目的の一つは, Fillibenの検定法を極値Ⅰ型分布, Ⅱ型分布, Ⅲ型分布まで拡張し, 正規分布, 対数正規分布と併せて5種の確率分布形の中から全国一律に用いることのできる分布形の選択を行うことであり, その確率・統計的根拠を明らかにすることである。各地の確率分布形を単一なものに特定できれば, 今日検討されている信頼性理論に基づいた設計法の展開を容易にし得ると言える。二つめは, 適合度の高い分布形と適合度の低い分布形の違いが, 再現期待値そのものに与える差違を考察することである。三つめは, 選定された確率分布形に基づき荷重・耐力係数設計式における雪荷重係数の各地の値について, その地域分布を明らかにすることである。ただし, 荷重係数の算出については, 坂本・河

* 北海学園大学工学部建築学科 教授・工修

** 北海道大学工学部建築工学科 助教授・工博

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Univ. of Hokkaido, M. Eng.
Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Univ. of Hokkaido, Dr. Eng.

図-1 観測地点

野の研究²⁵⁾によって多数の荷重の確率過程の組み合わせを合理的に取り扱う方法が開発され、規準案に反映されているが、ここでは確率変数のみで扱うことのできる雪荷重+固定荷重の場合を対象としている。

2. 解析に用いた資料

筆者らが参画した建設省総合技術開発プロジェクト「雪に強い都市づくりに関する総合技術の開発」建築構造部会(1982~86年)(以下、総プロと略す)によって、気象庁の公開資料である全国423地点における毎日の地上積雪深の観測記録(統計期間1916~1983年)がとりまとめられた。本稿ではこの観測記録を用いて年最大積雪深の解析を行う。観測地点の位置を図-1に示す。

3. 確率分布形の適合度検定

3.1 Fillibenによる確率分布形の適合度検定法

気象統計値に適合性が良いとされている極値Ⅰ型分布およびⅡ型分布、また Ellingwood ら²⁶⁾の研究によってアメリカ合衆国内の積雪量記録についてはⅠ型分布より適合する地点が多いと報告された対数正規分布、さらに極値Ⅲ型分布と正規分布を加えた計5種の確率分布形の適合性について検定を行い、併せて確率分布形の違いによる再現期待値の相違について考察する。これらの確率分布関数 $F(x)$ は周知のように次式で表される。

極値Ⅰ型分布 $F(x) = \exp\{-\exp[-\alpha(x-u)]\}$

$$-\infty < x < +\infty$$

極値Ⅱ型分布 $F(x) = \exp[-(v/x)^k]$

$$0 \leq x < +\infty$$

極値Ⅲ型分布 $F(x) = \exp\{-(\varepsilon - x)/(\varepsilon - w)\}^k$

$$-\infty < x \leq \varepsilon$$

対数正規分布 $F(x) = \phi[(\ln x - \lambda)/\zeta]$

ここに ϕ : 標準正規確率分布関数

$k, u, v, w, \alpha, \varepsilon, \zeta, \lambda$: 確率分布関数のパラメータ

なお、前田²⁷⁾は、最大極値に関するⅡ型確率分布関数 $F(x)$ として下限値のパラメータを含んだ一般形²⁷⁾を用いて検討している。本稿では、日本建築学会の「設計荷重の考え方」(設計荷重理論小委員会1989年4月)あるいは国外のⅡ型分布の扱い(例えば文献8, 9))においては、その下限値をゼロとして扱うことが一般的なので上式を用いた。

確率分布形の観測記録への適合度を論ずる場合の尺度として、Filliben は1975年に、標本についての順序統計量 X_i と確率分布関数の順序統計量のメディアン M_i との相関係数 r を用いる方法を提唱している。

すなわち

$$r = \sum (X_i - \bar{X})(M_i - \bar{M}) / \sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2 \sum (M_i - \bar{M})^2}$$

ここに

$$M_i = \Phi^{-1}(m_i)$$

Φ : 確率分布関数

m_i : 一様分布の順序統計量のメディアン

$$m_i = 1 - m_n \quad i = 1$$

$$m_i = (i - 0.3175) / (n + 0.365) \quad i = 2, 3, \dots, n-1$$

$$m_i = 0.5^{1/n} \quad i = n \quad (n: \text{標本数})$$

上式において r 値が1に近いほど適合性がよい。

Filliben は、検定に必要な数表として、無限正規分布母集団からサイズ n ($n=3 \sim 100$) の標本をそれぞれ N 回 ($n \leq 10$ においては $N=10^5$, $n > 10$ においては $N=10^5/n$) ランダムに抽出して、各標本数について得られた r 値の分布の%点を与えている。 r 値の%点は、確率分布関数の適合度検定において有意水準として用いるものであり、本稿では Filliben にならいレベルと記す。対数正規分布については変数を正規分布に対数変換して上記の適合度検定を行うことができる。筆者らは、Ⅰ型分布について、標本サイズ $n=10 \sim 100$ の範囲で上述の方法によって r 値の%点表(表-1)を作成した。Ⅱ型分布およびⅢ型分布については、変数を対数変換する²⁹⁾ことによって同表を用いることができる。各分布形の未知のパラメータは、観測記録を正規確率紙および極値確率紙上に上記の m_i 値に従ってプロットし、回帰分析によって決定した。なおⅢ型分布の上限値 ε については相関係数 r が最も大きくなるように収斂計算によって求めた。

3.2 適合度検定

筆者らは、総プロの資料のうち北海道、東北、北陸地

表一1 r 値の検定表

(n : 標本数)

n	0.005	0.010	0.025	0.050	0.100	0.250	0.500	0.750	0.900	0.950	0.975	0.990	0.995
10	0.841	0.862	0.888	0.908	0.927	0.951	0.969	0.980	0.988	0.990	0.992	0.994	0.995
11	0.848	0.867	0.892	0.914	0.932	0.954	0.970	0.981	0.988	0.990	0.993	0.994	0.995
12	0.854	0.872	0.896	0.916	0.935	0.956	0.972	0.982	0.988	0.991	0.993	0.994	0.995
13	0.860	0.878	0.903	0.919	0.938	0.958	0.973	0.983	0.989	0.991	0.993	0.994	0.995
14	0.861	0.882	0.905	0.922	0.940	0.960	0.974	0.983	0.989	0.991	0.993	0.994	0.995
15	0.867	0.886	0.909	0.926	0.943	0.961	0.975	0.984	0.989	0.991	0.993	0.994	0.995
16	0.872	0.890	0.911	0.931	0.945	0.962	0.976	0.984	0.989	0.992	0.993	0.995	0.995
17	0.880	0.894	0.916	0.933	0.948	0.964	0.977	0.985	0.990	0.992	0.993	0.995	0.995
18	0.881	0.897	0.918	0.934	0.949	0.965	0.977	0.985	0.990	0.992	0.993	0.995	0.996
19	0.882	0.897	0.920	0.936	0.950	0.966	0.978	0.985	0.990	0.992	0.994	0.995	0.995
20	0.883	0.902	0.922	0.938	0.951	0.967	0.979	0.986	0.990	0.992	0.994	0.995	0.995
21	0.887	0.904	0.923	0.939	0.953	0.968	0.980	0.986	0.991	0.993	0.994	0.995	0.996
22	0.889	0.905	0.925	0.940	0.954	0.969	0.980	0.987	0.991	0.993	0.994	0.995	0.996
23	0.892	0.906	0.928	0.943	0.955	0.970	0.981	0.987	0.991	0.993	0.994	0.995	0.996
24	0.895	0.907	0.930	0.944	0.957	0.971	0.981	0.987	0.991	0.993	0.994	0.995	0.996
25	0.894	0.906	0.929	0.946	0.958	0.972	0.982	0.988	0.992	0.993	0.994	0.995	0.996
26	0.897	0.910	0.929	0.948	0.959	0.973	0.982	0.988	0.992	0.993	0.994	0.995	0.996
27	0.899	0.913	0.932	0.950	0.960	0.973	0.982	0.989	0.992	0.993	0.995	0.996	0.996
28	0.901	0.914	0.933	0.950	0.961	0.974	0.983	0.989	0.992	0.994	0.995	0.996	0.996
29	0.903	0.914	0.935	0.951	0.962	0.975	0.984	0.989	0.992	0.994	0.995	0.996	0.996
30	0.909	0.916	0.936	0.952	0.963	0.975	0.984	0.989	0.992	0.994	0.995	0.996	0.996
31	0.908	0.918	0.937	0.953	0.964	0.975	0.984	0.989	0.992	0.994	0.995	0.996	0.997
32	0.908	0.920	0.941	0.953	0.964	0.976	0.984	0.990	0.993	0.994	0.995	0.996	0.996
33	0.913	0.922	0.941	0.955	0.965	0.977	0.985	0.990	0.993	0.994	0.995	0.996	0.996
34	0.919	0.926	0.944	0.956	0.966	0.977	0.985	0.990	0.993	0.994	0.995	0.996	0.996
35	0.920	0.928	0.944	0.957	0.967	0.978	0.985	0.990	0.993	0.994	0.995	0.996	0.996
36	0.918	0.927	0.945	0.959	0.967	0.978	0.986	0.990	0.993	0.995	0.995	0.996	0.997
37	0.921	0.930	0.946	0.959	0.968	0.979	0.986	0.991	0.993	0.995	0.995	0.996	0.997
38	0.920	0.930	0.946	0.959	0.969	0.979	0.986	0.991	0.993	0.995	0.995	0.996	0.997
39	0.928	0.932	0.949	0.960	0.970	0.979	0.986	0.991	0.994	0.995	0.996	0.996	0.997
40	0.923	0.934	0.951	0.960	0.970	0.980	0.986	0.991	0.994	0.995	0.996	0.996	0.997
41	0.931	0.935	0.951	0.961	0.971	0.980	0.987	0.991	0.994	0.995	0.996	0.997	0.997
42	0.932	0.936	0.953	0.962	0.970	0.980	0.987	0.991	0.994	0.995	0.996	0.996	0.997
43	0.931	0.938	0.952	0.962	0.971	0.981	0.987	0.991	0.994	0.995	0.996	0.997	0.997
44	0.929	0.939	0.953	0.963	0.971	0.981	0.987	0.992	0.994	0.995	0.996	0.997	0.997
45	0.927	0.938	0.952	0.963	0.972	0.981	0.987	0.992	0.994	0.995	0.996	0.997	0.997
46	0.928	0.940	0.953	0.962	0.972	0.981	0.988	0.992	0.994	0.995	0.996	0.997	0.997
47	0.932	0.942	0.954	0.963	0.972	0.982	0.988	0.992	0.994	0.995	0.996	0.997	0.997
48	0.933	0.942	0.955	0.963	0.972	0.982	0.988	0.992	0.994	0.995	0.996	0.997	0.997
49	0.933	0.944	0.956	0.964	0.972	0.982	0.988	0.992	0.994	0.995	0.996	0.997	0.997
50	0.933	0.946	0.955	0.964	0.972	0.982	0.988	0.992	0.994	0.995	0.996	0.997	0.997
51	0.932	0.946	0.954	0.964	0.973	0.982	0.989	0.992	0.994	0.995	0.996	0.997	0.997
52	0.936	0.944	0.956	0.964	0.973	0.983	0.989	0.992	0.995	0.996	0.996	0.997	0.997
53	0.937	0.947	0.957	0.966	0.974	0.983	0.989	0.993	0.995	0.996	0.996	0.997	0.997
54	0.939	0.948	0.958	0.966	0.974	0.983	0.989	0.993	0.995	0.996	0.996	0.997	0.997
55	0.940	0.948	0.960	0.967	0.975	0.983	0.989	0.993	0.995	0.996	0.996	0.997	0.997
56	0.940	0.949	0.960	0.967	0.975	0.984	0.989	0.993	0.995	0.996	0.996	0.997	0.997
57	0.940	0.950	0.960	0.967	0.975	0.984	0.990	0.993	0.995	0.996	0.996	0.997	0.997
58	0.943	0.952	0.961	0.967	0.976	0.984	0.990	0.993	0.995	0.996	0.996	0.997	0.997
59	0.940	0.951	0.960	0.968	0.975	0.984	0.990	0.993	0.995	0.996	0.996	0.997	0.997
60	0.941	0.951	0.961	0.969	0.975	0.984	0.990	0.993	0.995	0.996	0.997	0.997	0.997
61	0.940	0.950	0.961	0.969	0.976	0.985	0.990	0.993	0.995	0.996	0.997	0.997	0.997
62	0.940	0.949	0.961	0.969	0.976	0.985	0.990	0.993	0.995	0.996	0.997	0.997	0.997
63	0.937	0.948	0.961	0.969	0.977	0.985	0.990	0.993	0.995	0.996	0.997	0.997	0.998
64	0.938	0.951	0.962	0.969	0.977	0.985	0.990	0.993	0.995	0.996	0.997	0.997	0.997
65	0.938	0.952	0.961	0.969	0.977	0.986	0.991	0.994	0.995	0.996	0.997	0.997	0.997
66	0.939	0.952	0.962	0.970	0.978	0.986	0.991	0.994	0.995	0.996	0.997	0.997	0.998
67	0.938	0.951	0.963	0.970	0.978	0.986	0.991	0.994	0.995	0.996	0.997	0.997	0.998
68	0.941	0.952	0.963	0.971	0.978	0.986	0.991	0.994	0.995	0.996	0.997	0.997	0.998
69	0.941	0.952	0.964	0.971	0.978	0.986	0.991	0.994	0.995	0.996	0.997	0.998	0.998
70	0.942	0.955	0.965	0.971	0.978	0.986	0.991	0.994	0.995	0.996	0.997	0.997	0.998
71	0.941	0.955	0.965	0.972	0.979	0.986	0.991	0.994	0.995	0.996	0.997	0.997	0.998
72	0.943	0.955	0.965	0.972	0.979	0.986	0.991	0.994	0.995	0.996	0.997	0.997	0.998
73	0.943	0.954	0.965	0.972	0.979	0.986	0.991	0.994	0.996	0.996	0.997	0.997	0.997
74	0.943	0.954	0.966	0.973	0.979	0.987	0.991	0.994	0.996	0.996	0.997	0.997	0.998
75	0.943	0.957	0.965	0.974	0.980	0.987	0.991	0.994	0.996	0.996	0.997	0.997	0.998
76	0.943	0.956	0.966	0.974	0.980	0.987	0.991	0.994	0.996	0.996	0.997	0.998	0.998
77	0.942	0.956	0.965	0.974	0.980	0.987	0.991	0.994	0.996	0.996	0.997	0.998	0.998
78	0.942	0.955	0.966	0.974	0.981	0.987	0.992	0.994	0.996	0.997	0.997	0.998	0.998
79	0.944	0.955	0.967	0.974	0.981	0.987	0.992	0.994	0.996	0.997	0.997	0.998	0.998
80	0.947	0.955	0.966	0.975	0.981	0.987	0.992	0.994	0.996	0.997	0.997	0.998	0.998
81	0.947	0.955	0.966	0.974	0.981	0.988	0.992	0.994	0.996	0.997	0.997	0.998	0.998
82	0.947	0.958	0.966	0.974	0.981	0.987	0.992	0.994	0.996	0.997	0.997	0.998	0.998
83	0.946	0.958	0.966	0.974	0.981	0.988	0.992	0.994	0.996	0.997	0.997	0.998	0.998
84	0.947	0.959	0.966	0.975	0.982	0.988	0.992	0.994	0.996	0.997	0.997	0.998	0.998
85	0.950	0.959	0.966	0.974	0.982	0.988	0.992	0.995	0.996	0.997	0.997	0.998	0.998
86	0.950	0.959	0.968	0.974	0.981	0.988	0.992	0.995	0.996	0.997	0.997	0.998	0.998
87	0.953	0.959	0.968	0.974	0.981	0.988	0.992	0.995	0.996	0.997	0.997	0.998	0.998
88	0.953	0.959	0.968	0.975	0.982	0.988	0.992	0.995	0.996	0.997	0.997	0.998	0.998
89	0.954	0.960	0.968	0.974	0.982	0.988	0.992	0.995	0.996	0.997	0.997	0.998	0.998
90	0.953	0.959	0.968	0.975	0.982	0.989	0.992	0.995	0.996	0.997	0.997	0.998	0.998
91	0.954	0.959	0.968	0.976	0.982	0.989	0.993	0.995	0.996	0.997	0.997	0.998	0.998
92	0.951	0.959	0.968	0.975	0.982	0.989	0.993	0.995	0.996	0.997	0.997	0.998	0.998
93	0.952	0.959	0.969	0.976	0.982	0.989	0.993	0.995	0.996	0.997	0.997	0.998	0.998
94	0.950	0.958	0.969	0.975	0.982	0.989	0.993	0.995	0.996	0.997	0.997	0.998	0.998
95	0.950	0.958	0.										

表一2 分布形の適合順位と検定レベルに該当する地点数

2-(a) 極値Ⅰ型分布

分布形の適合順位	検定レベル			
	◎ 50～	○ 5～50	△ 1～5	× ～1
1	57	41	4	1
2	64	55	2	0
3	14	59	18	10
4	1	25	9	2
5	0	0	0	0
合計 (%)	136 (38%)	180 (50%)	33 (9%)	13 (3%)

2-(b) 極値Ⅱ型分布

分布形の適合順位	検定レベル			
	◎ 50～	○ 5～50	△ 1～5	× ～1
1	8	11	0	0
2	2	11	1	1
3	0	1	0	0
4	0	53	10	6
5	0	30	89	139
合計 (%)	10 (3%)	106 (29%)	100 (28%)	146 (40%)

2-(c) 極値Ⅲ型分布

分布形の適合順位	検定レベル			
	◎ 50～	○ 5～50	△ 1～5	× ～1
1	155	48	2	0
2	40	45	3	1
3	8	29	3	0
4	0	10	10	8
5	0	0	0	0
合計 (%)	203 (56%)	132 (37%)	18 (5%)	9 (2%)

2-(d) 正規分布

分布形の適合順位	検定レベル			
	◎ 50～	○ 5～50	△ 1～5	× ～1
1	23	11	0	0
2	27	30	3	0
3	6	50	11	11
4	2	47	21	20
5	0	10	18	72
合計 (%)	58 (16%)	148 (41%)	53 (15%)	103 (28%)

2-(e) 対数正規分布

分布形の適合順位	検定レベル			
	◎ 50～	○ 5～50	△ 1～5	× ～1
1	56	41	2	1
2	9	16	3	0
3	20	56	13	15
4	0	43	20	66
5	0	0	0	1
合計 (%)	85 (23%)	156 (43%)	38 (11%)	83 (23%)

図一2 検定レベルに該当する地点数の割合

方について、Filliben 法によって観測地点ごとに5つの確率分布形それぞれの r 値を求め、その大小を比較して分布形の適合度判定を行ったが、いずれの分布形も適合度順位1位の地点数が全地点の大半を占めるには至らなかった^{文10)}。まえがきで述べたように、観測記録の各確率分布形に対する適合度を検定し分布形の良否を考察する場合、判定の尺度となる値の大小を比較するだけでは不十分である。このことからレベルが50%を超える場合◎印、5～50%の場合○印、1～5%の場合△印、1%以下の場合×印をつけ検定の目安とした。レベルの区切りの設定値は確定したものではないが、少なくとも数字が高いことが適合度が良いことを表している。本稿では、統計期間中積雪のない年が多く統計処理のしにくい四国と九州を除いた地域362地点の観測記録について、上記5つの分布形によるあてはめを行う。これらの地点の統計期間は1916～1983年の範囲にあり、統計年数は15～68年であるが、多くは1983年までの20～40冬期である。

表一2(a)～(e)に上記の各検定レベルに該当する観測地点数を示す。また、同表には r 値の大小によって定まる5つの分布形の中での適合度順位別の地点数も示されている。図一2には各レベルに該当する地点数の362地点に対する割合を分布形ごとに示すが、レベルが1%を超える地点数が最も多いのはⅢ型分布の353個(全

地点数の98%)であり、次いでⅠ型分布の349個(同96%)、対数正規分布の279個(同77%)、正規分布の259個(同72%)、Ⅱ型分布の216個(同60%)の順となる。また、レベルが5%を超える地点数は、Ⅲ型分布が335個(全地点数の93%)、Ⅰ型分布が316個(同88%)、対数正規分布241個(同66%)、正規分布206個(同57%)、Ⅱ型分布116個(同32%)である。したがって、これらの結果はⅢ型分布およびⅠ型分布の適合度が高いことを表している。これに対し、レベルによる検定ではなく r 値の大小によって順位づけを行うと、適合度順位1位となる地点数はⅢ型分布が205個(全地点の57%)、Ⅰ型分布103個(同28%)、対数正規分布100個(同28%)、正規分布34個(同9%)、Ⅱ型分布では19個(同5%)となり、いずれの分布形も適合性が低いという結果になる。しかし、順位が2位以下であっても5%検定に合格する地点数は、表一2から分かるようにⅢ型分布が132個(全地点の36%)、Ⅰ型分布218個(同60%)、対数正規分布144個(同40%)、正規分布172個(同48%)、Ⅱ型分布では97個(同27%)となり各分布形とも相当数の地点を含んでいる。Ⅰ型分

図—3 区画ごとの判定結果（極値Ⅲ型分布）

図—4 区画ごとの判定結果（極値Ⅰ型分布）

布は対数正規分布より74地点多く、このことはⅠ型分布が対数正規分布に比べより汎用的に用いることができる分布形であることを示し、適合度判定としては χ 値による順位づけよりレベルによる検定法がすぐれていることを示唆している。

雪荷重を確率論的に論じる場合地域ごとの適合度についても明らかにする必要がある。本稿では、建設省国土地理院の国土数値情報による第1次地域区画（経度差1度、緯度差40分、日本の中央付近では縦横とも辺長約80 km）を基準区画として、各区画ごとの適合レベルについて考察する。このとき区画内に位置する各観測地点のレベルのうち、適合度の高いほうから数えてその半数を超えるレベルをその区画のレベルとする。ただし、レベルの異なる地点が同数の場合、2つのレベルが1ランク離れているときは中間のレベルを、連続しているときは低い方のレベルを用いる。図—1に示したように、区画内の地点数は1～14個の範囲でばらつきがあり、必ずしも十分な地点数を有している区画ばかりではないが、この方法は、適合レベルの地域分布を概観するうえでは有効であると思われる。5つの分布形のうちレベル検定による上位の3分布すなわちⅢ型分布、Ⅰ型分布および対数正規分布についての検討結果を図—3、4、5に示す。Ⅲ型分布とⅠ型分布は図—3、4に示すように全国的には◎あるいは○印で表されており、全国一律に用いることのできる分布形であることが分かる。対数正規分布は

図—5 区画ごとの判定結果（対数正規分布）

図—5に示すように、北海道、東北、北陸地方については一部の区画を除きおおむね適合するが、中国地方などではきわめて適合度が低く、Ⅲ型およびⅠ型分布に比べ

表—3 観測地点ごとの最適分布形を用いて求められる期待値に対する5つの確率分布形それぞれによる期待値の比

再現期間		I 型	II 型	III 型	正規	対数
10年	$\bar{x}$	1.00	1.07	1.00	0.98	1.07
	σ	0.019	0.070	0.017	0.023	0.099
30年	$\bar{x}$	1.01	1.41	0.98	0.91	1.18
	σ	0.076	0.398	0.054	0.087	0.297
50年	$\bar{x}$	1.01	1.66	0.97	0.88	1.25
	σ	0.108	0.716	0.076	0.115	0.426
100年	$\bar{x}$	1.02	2.14	0.96	0.85	1.34
	σ	0.151	1.481	0.103	0.148	0.634

期待値の比

図—6 観測地点ごとの最適分布形を用いて求められる期待値に対する5つの確率分布形それぞれによる期待値の比

全国的な適合性は劣る。

結局、これらの検討結果は、全国的に採用する単一の確率分布形としてはIII型分布あるいはI型分布が適当であることを示しており、確率分布形のパラメータの算定あるいは荷重の組み合わせにおける雪荷重係数の算定などにおける数値計算上の便宜さを考慮すればI型分布を選定するほうが実用的であろう。

3.3 再現期待値

再現期待値はLRFD試案、規準案などにおいて設計用の公称値として用いられるので、確率分布形の特性によって生じる差を検討することも必要である。再現期間100年までを対象期間として、 r 値の大小から定まる観測地点ごとの最適分布形を用いて求められる年最大積雪深の期待値に対する5つの分布形それぞれを一律に用いて求められる年最大積雪深の期待値の比（以下、期待値の比と記す）について、362地点の平均値 $\bar{x}$ と標準偏差 σ を表—3に示す。図—6には、期待値の比の平均値について再現期間ごとの推移を示す。各分布形とも再

50年期待値の比

図—7 観測地点ごとの最適分布形を用いて求められる50年期待値に対する5つの確率分布形それぞれによる50年期待値の比

図—8 「56 豪雪」年における各地の年最大積雪深に相当する再現期間

現期間10年では期待値の比に大きな違いはみられないが、再現期間が大きくなるにつれII型分布および対数正規分布は期待値を過大評価し、正規分布は過小に評価する傾向がみられる。III型分布およびI型分布については、再現期間100年までの範囲では期待値の比に大きな変化は見られず1.0前後を推移している。また、図—7に再現期間50年における期待値の比の値の362地点の平均

値と標準偏差 σ を示すが、Ⅱ型分布では $\sigma=0.716$ 、対数正規分布では $\sigma=0.426$ となり他の分布形に比べこの2分布形のばらつきが特に顕著である。したがってこれらの結果は、全国一律に適用するには不適切な確率分布形を用いれば、Ⅱ型分布および対数正規分布などのように、再現期間が大きくなるにつれ各地の再現期待値評価においても大きな誤差が現れることを示している。

次に、大豪雪となった昭和55～56年冬期の各地の年最大積雪深が、再現期間何年値に相当するのかを検討する。前節では、極値Ⅲ型分布あるいは極値Ⅰ型分布を用いることが適当であることを指摘したが、ここでは全地点にⅠ型分布を適用して再現期間を求める。各県で再現期間の大きい地点は、例えば青森県七戸では24年(141 cm)、岩手県遠野24年(61 cm)、宮城県白石96年(59 cm)、山形県山形46年(113 cm)、福島県若松44年(115 cm)、長野県長野111年(92 cm)、岐阜県高山100年(128 cm)、新潟県十日町33年(422 cm)、富山県富山18年(160 cm)、福井県福井75年(196 cm)などである。各地の再現期間は、図-8のようになっていて、全地点が大きな期待年になっている訳ではなく、各地で様々である(ただし同図では、ほとんどの地点が格別に多雪の年ではなかった北海道と中国地方を除いている^{文11)})。その中で北陸、中部地方に、30年以上の地点が特に集中し、豪雪年の特徴を示している。

4. 雪荷重係数

総プロの資料を基に荷重・耐力係数設計式における雪荷重係数について、考慮すべき顕著な地域的特性が見られるのかどうかを検討する。荷重の組み合わせとしては雪荷重+固定荷重を対象とする。積載荷重については、統計資料が十分ではないこと、またLRFD試案では雪荷重との組み合わせにおける積載荷重の平均値と固定荷重の平均値との比 $\bar{L}/\bar{D}$ を0.5として設定しており、したがって後述の $\bar{S}/\bar{D}$ における $\bar{D}$ を固定荷重+積載荷重と読みかえることも可能であることから、本稿では組み合わせ荷重から除いた。限られた地点数の統計量から求めているLRFD試案の荷重係数と362地点の荷重係数とを対比して検討するためLRFD試案とあわせて以下の関係式、諸数値を用いた。すなわち、荷重係数 γ は $\gamma=(1+\alpha\beta V_w)\bar{W}/W_n$ 式から得る。ここで雪荷重の確率分布関数は前節までの結果からⅠ型分布とし、雪荷重の平均値/雪荷重の公称値 ($\bar{W}/W_n$) については、50年最大積雪深の平均値^{文12)}/50年再現期待値とした^{注1)}。この値の362地点の平均値は1.10となり、1.07～1.13の範囲に全地点の93%が含まれている。雪荷重の変動係数 V_w については、屋根形状係数、環境係数、雪の単位重量それぞれの変動係数を0.1として^{注2)}、50年最大積雪深の変動係数との二乗和の平方根から得た。 V_w は、

図-9 区画ごとの雪荷重係数

362地点の平均値が0.26であり、0.22～0.30の範囲に全地点の93%が含まれている。また分離係数 α については、全地点一律に定数を与えるのではなく、各地点ごとに破壊点において非正規確率分布を正規化近似する際の繰返し計算によって求めた^{文13)}。

終局耐力および固定荷重の確率分布関数ならびに標準的な統計量は、終局耐力については対数正規分布、耐力の平均値/公称耐力=1.10、耐力の変動係数=0.15、固定荷重については正規分布、固定荷重の平均値/公称値=1.00、固定荷重の変動係数=0.10を設定した^{注2)}。

雪荷重係数値の地域分布を検討する際、基準区画ごとの代表値^{注3)}を基にすればよりその地域特性を把握しやすい。図-9に許容安全性指標 $\beta=2.0$ の場合の雪荷重係数の区画代表値を示す。北海道では1.44～1.64の範囲にあり、道央から道北にかけてほぼ1.5、その他ではほぼ1.6前後である。本州では1.52～1.85の範囲にあるが、関東地方の太平洋岸を除く地域では1.5～1.7程度とみられる。したがって、全国的に雪荷重係数値に関して差は小さいと言える。図-10には区画代表値のヒストグラムを示すが、全国平均値は1.59である。なお、

注) 各区画の雪荷重係数代表値としては、観測点位置を正規化した後区画を10×10の格子点に分割し、不規則に分布する観測点のデータから各格子点の値を制約条件つき最適化問題としてペナルティ法により求め、それから得られる重み付き平均値を用いた。ただし、海の面積が大きい区画などでは各観測点の単純平均値を採用した。

図-10 区画ごとの雪荷重係数のヒストグラム

図-11 雪荷重係数のコンターマップ

362 地点個々の雪荷重係数値によるコンターマップ^(注3)を図-11に示すが、緯度と標高差による影響が見られる。また、雪荷重係数値 1.7 以下には 338 地点（全地点の 93 %）が含まれる。

$\beta=2.5$ の場合での区画代表値は図-12 のようになる。北海道では 1.55～1.78 の範囲にあり、道央から道北にかけてはほぼ 1.6、その他ではほぼ 1.6～1.8 程度とみてよい。本州では 1.64～2.02 の範囲にあり、 $\beta=2.0$ の場合に比べ雪荷重係数値のばらつきがやや大きくなる。ただし、関東地方の太平洋岸と山陰地方の一部が 1.85 以上であり、これを除く地域では 1.6～1.8 程度で

図-12 区画ごとの雪荷重係数

図-13 区画ごとの雪荷重係数のヒストグラム

あるので、雪荷重係数値に関する差は小さいといえる。図-13に示すように区画代表値の全国平均値は 1.72 である。また、図-14にコンターマップを示すが、雪荷重係数値 1.8 以下には 313 地点（全地点の 86 %）が含まれる。なお、図-9～14に示す雪荷重係数 γ は雪荷重の平均値と固定荷重の平均値との比 $\bar{S}/\bar{D}=4$ の場合におけるものである。 $\bar{S}/\bar{D}=2$ における γ と $\bar{S}/\bar{D}=4$ における γ の差は、許容安全性指標 $\beta=2.0$ および $\beta=2.5$ のいずれにおいても、362 地点のうちの最大の地点でも 2 % 程度でしかない。したがって、362 地点の $\bar{W}/W_n$ 、 V_w および α それぞれの性状を考慮しても $\bar{S}/\bar{D}=2$ 以上では γ を一定とみなすことができる。

図—14 雪荷重係数のコンターマップ

規準案に示されている雪荷重係数値 1.6 ($\beta=2.0$) は荷重および耐力の確率分布関数を対数正規分布として、また雪荷重の基本統計量として年最大積雪深の変動係数および平均値/公称値を用いて得られているので、本稿による雪荷重係数値との直接的な比較は意味をなさないが、図—7 に示すように、雪荷重係数に乗ずるべき年最大積雪深の 50 年期待値を対数正規分布に依拠して算定するならば、確率分布関数を極値Ⅰ型分布に設定した場合に比べ雪荷重値は結果として過大に評価されることになる。これに対し、本稿の性能関数の構成は LRFD 試案と基本的に同一なので (LRFD 試案では屋根形状係数、環境係数、雪の単位重量などの変動係数の扱いが規準案のように明示されていないが) 雪荷重係数値相互の比較ができよう。すなわち LRFD 試案では $\beta=2.5$ として多雪地域における雪荷重係数値 2.0 が示されているが、本稿の検討結果では対象地域のほぼ最大値に相当する。

本稿での雪荷重係数の算定過程における反復計算から得た分離係数 α は、 $\beta=2.0$ の場合 362 地点の平均値が 0.86 となり、0.83~0.88 の範囲に全地点の 90 % が含まれる。また、雪荷重係数値 1.7 に相当する値は 0.88 である。 $\beta=2.5$ の場合、362 地点の平均値は 0.87 となり、0.84~0.89 の範囲に全地点の 95 % が含まれる。また、雪荷重係数値 1.8 に相当する値はおおよそ 0.88 である。

5. 結 論

四国と九州を除く全国 362 地点の年最大積雪深の統計資料を基に、信頼性理論に基づいた設計法において用い全国一律に用いられる確率分布形の適否によって、各地の積雪深の再現期待値評価に表れる差違について言及した。さらに、荷重・耐力係数設計式における雪荷重係数の地域分布について考察を加えた。本研究により得られた結論は以下のとおりである。

た結論は以下のとおりである。

(1) 観測記録への 5 つの分布形 (極値Ⅰ型分布、極値Ⅱ型分布、極値Ⅲ型分布、正規分布、対数正規分布) それぞれの適合度を Filliben の方法によって検定したが、Ⅲ型およびⅠ型分布が全国的によく適合することが示された。5 % 検定では、前者は全地点の 93 %、後者は 88 % が合格となる。対数正規分布は、北海道、東北、北陸地方においては一部地域を除きおおむねあてはまるが、5 % 検定では全地点の 34 % が不合格となりⅢ型・Ⅰ型には及ばない。特に、中国地方においてきわめて適合性が低い結果となった。正規分布は 5 % 検定不合格率が 43 %、Ⅱ型分布では 68 % となり上位 3 分布に比べ劣るが、とりわけⅡ型分布の適合性の低さが顕著である。したがって、全国的に用いるべき単一の確率分布形としてはⅢ型分布あるいはⅠ型分布が適当であり、確率分布形のパラメータの算定あるいは荷重の組み合わせにおける雪荷重係数の算定などについての数値計算上の便宜さを考慮すればⅠ型分布を選定するほうが実用的であろう。

(2) 全国一律に単一の確率分布形を用いたときの再現期待値について、各観測地点ごとに判定される適合度順位 1 位の分布形を用いて求められる再現期待値との対比を行った。再現期間 10 年程度では 5 つの分布形の期待値には大きな違いはみられない。しかし、再現期間が大きくなるにつれⅡ型分布と対数正規分布は期待値を過大に、逆に正規分布は過小に評価する傾向がみられ、全国一律に適用するには不適切な確率分布形を用いれば、各地の年最大積雪深の再現期待値評価において大きな誤差が現れることが示された。

(3) 雪荷重+固定荷重の組み合わせにおける各地の雪荷重係数 γ ($\gamma=(1+\alpha\beta V_w)\bar{W}/W_n$) の地域分布特性について検討した。ただし、確率分布関数は雪荷重を極値Ⅰ型分布、固定荷重を正規分布、終局耐力については対数正規分布とした。許容安全性指標 β として 2.0 を設定した場合の第 1 次地域区画ごとの代表値は、北海道では道央から道北にかけてはほぼ 1.5、その他ではほぼ 1.6 前後である。本州では、関東地方の太平洋岸においては 1.7 を超えるが、それを除く地域では 1.5~1.7 程度である。また、 $\beta=2.5$ の場合は、道央から道北にかけてはほぼ 1.6、その他ではほぼ 1.6~1.8 程度とみてよい。

本州では、関東地方の太平洋岸と山陰地方の一部が 1.85 以上であり、これを除く地域では 1.6~1.8 程度である。したがって、 $\beta=2.0$ および $\beta=2.5$ のいずれにおいても雪荷重係数値に関して顕著な地域的違いはみられないことが示された。

6. あとがき

本稿では四国と九州を除外して考察したが、これらの地域の観測記録の処理については別の機会に検討する予定である。

謝 辞

本研究は北海道大学 柴田拓二教授のご指導のもとに行われたものである。深甚なる謝意を申し上げます。解析に用いる資料としては、建設省総合技術開発プロジェクト「雪に強い都市づくりに関する総合技術の開発」建築構造部会において作成した積雪資料を使わせて頂きました。雪荷重係数の算定にあたっては名古屋大学 河野守博士、東京職業訓練短期大学校 高橋利恵博士から有益な助言を頂きました。また、J. J. Filliben 博士には貴重な示唆を頂きました。併せて感謝申し上げます。

注

- 1) 基準期間を 50 年として、雪荷重の平均値および雪荷重の公称値を次式のように設定した。

$$\text{雪荷重の平均値 } \bar{W} = C \cdot E \cdot \rho \cdot \bar{Y}_{s50} \dots\dots\dots ①$$

$$\text{雪荷重の公称値 } W_n = C \cdot E \cdot \rho \cdot Y_{ns0} \dots\dots\dots ②$$

ここで C : 屋根形状係数

E : 環境係数

ρ : 積雪の単位重量相当値

$\bar{Y}_{s50}$: 50 年最大積雪深の平均値

Y_{ns0} : 50 年積雪深再現期待値

筆者らは、既往の研究¹⁴⁾において、北海道から新潟県にいたる多雪地域の年最大地上積雪重量記録および同時観測された年最大地上積雪深記録について、極値 I 型分布を設定し次の知見を得ている。すなわち、積雪の単位重量相当値 ρ は、再現期間 100 年までの範囲においては、再現期間にかかわらず同一地点においてほぼ一定であり、また地域間の変差も小さいため、 $\rho=3.5$ (kgf/m²/cm) とみなしてよく、年最大積雪重量の再現期待値 (kgf/m²) = $3.5 \times$ 年最大積雪深の再現期待値 (cm) の関係が成立する。I 型分布では 50 年最大積雪深の平均値 $\bar{Y}_{s50}$ はほぼ 90 年再現期待値 (Y_{ns0}) に相当するので、①式において $\bar{Y}_{s50}$ を便宜的に Y_{ns0} と読みかえることが可能である。したがって、①式および②式における ρ として上記の値 3.5 を設定することができる。ただし、多雪地域以外の一般の地域においては、統計処理を行えるだけの積雪重量記録が得られていないのが現状なので、具体的な数値は特定せず、50 年再現期待値と 90 年再現期待値の ρ は同等であることのみを仮定した。また、屋根形状係数と環境係数は、それぞれを①式および②式において同等なものとして設定した。したがって、これらから雪荷重の平均値/雪荷重の公称値 = 50 年最大積雪深の平均値/50 年積雪深再現期待値として扱い、積雪深から荷重へ変換することができる。

- 2) 屋根形状係数、環境係数および雪の単位重量それぞれの変動係数、終局耐力および固定荷重の確率分布関数ならびに標準的な統計量などについては、これらの統計的特性の評価に立入ることは本稿の主旨ではない。しかし LRFD 試案に示されている雪荷重係数値と比較するために、LRFD 試案に依拠して設定した。ただし、札幌市内に建つ無暖房大型陸屋根倉庫における筆者らの 8 冬期間の実測調査によれば、屋根形状係数の変動係数はおよそ 0.14 (屋根形状係数については別の機会に報告する予定である) であり、設定値 0.1 は札幌についてはほぼ妥当である。また、積雪の単位重量相当値の変動係数は、筆者らの研究¹⁵⁾によれば、我が国の多雪地域において 0.14 である。したがって、設定値 0.1 は概略値として適当である。環境係数の変動係数については、屋根上積雪量に及ぼす環境因子についての検討を含めて、統計的に処理できるだけの資料が必ずしも得られていないことから適正值の評価が難しいため、暫定的に 0.1 を仮定している。
- 3) 地上の積雪深は気象要因および地理的・地形的要因などによって大きく影響を受け、観測資料のない地点の再現期待値などの推定は容易ではない。これに対し、雪荷重係数値は、各観測地点の気象的条件および地理的・地形的条件が異なるにもかかわらず、本稿で対象とした 362 地点についてはその地域的差違が小さいことは注目すべきことである。このことから気象要因および地理的・地形的要因を無視して、雪荷重係数値の平面的分布のみに基づいてコンターマップを作成しても大きな誤差はないと考えられる。本稿では、観測地点が適当に散在していること、また雪荷重係数値の同位の地点が連続して分布していることを目視によって判断できることを利用してコンターマップを得た。すなわち、雪荷重係数値のみに基づいて、各区域を包含する仮のラインを目視によって引くことができる。それをはさんで近接している各観測地点の平面上での相対的位置関係から、相互の雪荷重係数値差を比例配分して得られる地点を基本にして、コンターラインを描いた。

参考文献

- 1) 前田博司：積雪深の極値分布，福井工業大学研究紀要，第 10 号，pp.23~31，1980 年
- 2) 和泉正哲，三橋博三，高橋 徹：年最大積雪深の確率統計的性質と再現期間推定法，日本建築学会構造系論文報告集，第 390 号，pp.49~58，1988 年 8 月
- 3) 藤野陽三，伊藤 学，酒井利夫：年最大風速記録による設計基本風速の算定に関する研究，土木学会論文報告集，第 305 号，pp.23~34，1981 年 1 月
- 4) Filliben, J. J. : The Probability Plot Correlation Coefficient Test for Normality, Technometrics, Vol.17, No.1, pp.111~117, 1975
- 5) 河野 守，坂本 順，青木和雄：荷重の確率過程の組み合わせにおける超過確率の理論とその応用に関する考察，日本建築学会構造系論文報告集，第 405 号，pp.31~40，1989 年 11 月
- 6) Ellingwood, B. and Redfield, R. : Ground Snow Loads for Structural Design, Structural Engineering, No.4, pp.950~963, 1983
- 7) E. J. Gumbel：極値統計学，河田竜夫，岩井重久，加瀬滋男監訳，生産技術センター新社，1978 年

- 8) H-S. Ang, H. Tang : 土木建築のための確率・統計の応用, 伊藤 学, 亀田弘行, 黒田勝彦, 藤野陽三共訳, 丸善 1988 年
- 9) Schueller, G. I. : 構造物の安全性と信頼性, 小西一郎, 高岡宣善, 石川 浩訳, 丸善, 1984 年
- 10) 桜井修次, 藤田久志, 城 攻, 柴田拓二 : 北海道, 東北, 北陸地方の年最大積雪記録に関する統計解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B, pp. 41~42, 1986 年
- 11) 昭和 56 年豪雪被害調査報告 : 日本建築学会, 1981 年
- 12) 神田 順 : 限界状態設計法での荷重の扱い, 建築技術, pp. 204~212, 1991 年 7 月号
- 13) 星谷 勝, 石井 清 : 構造物の信頼性設計法, 鹿島出版会 1986 年 5 月
- 14) 桜井修次, 城 攻, 柴田拓二 : 多雪地域における地上最大積雪重量の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1149~1150, 1982 年
- 15) 桜井修次, 城 攻, 柴田拓二 : 設計用雪荷重評価のための年最大地上積雪重量の確率・統計的性質に関する考察, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 437 号, 1992 年 7 月号掲載予定

(1991 年 9 月 3 日原稿受理, 1992 年 3 月 23 日採用決定)