木橋技術に関する講習会テキスト・シンポジウム論文報告集

平成13年7月25日　発行

編 集 者：　〒160-0004　東京都新宿区四谷一丁目無番地
土木学会　鋼構造委員会　木橋技術小委員会

発 行 者：　東京都新宿区四谷一丁目無番地　社団法人土木学会　古木　守靖

発 行 所：　社団法人　土木学会
〒160-0004　東京都新宿区四谷一丁目無番地
電話　03-3355-3441(代表)　FAX 03-5379-0125　振替　00160-9-16828

ISBN　4-8106-0361　　印刷:㈱ワコー

第２章　限界状態設計

2.1 荷重

2.1.2 活荷重（ＴとＬ）

（１）Ｔ荷重

p.52 の最後の行の後ろに、次項を追加のこと。

（iii）グンベル分布

図-2.5 で示される、輪重の確率密度は、一日の一輪重についての確率密度である。表-2.1 からは以下に述べるように確率分布が得られる。現在ではその確率分布形がなんであれ、母集団の年最大値分布の平均値と標準偏差、および変動係数という独立な２個のパラメータを用いて、統計量を議論するように整理されてきている。ここでは図-2.5 から得られる確率分布をグンベル分布で近似する方法を述べる。

グンベル分布の確率分布関数と確率密度関数は

$$F_T(x) = \exp\left[-\exp\left\{-a(x-b)\right\}\right] \tag{32'}$$

$$f_T(x) = ae^{-a(x-b)} \cdot \exp\left[-\exp\left\{-a(x-b)\right\}\right] \tag{33'}$$

で表される。ここでa, b はパラメータであり、元の母集団の平均値および標準偏差と

$$\mu_T = b + \frac{\gamma}{a}, \qquad \sigma_T = \frac{\pi}{\sqrt{6}a} \tag{34'}$$

の関係がある。$\gamma = 0.5772$・・・・はオイラー定数である。

$$\mu_T = 1.99 \quad (\mathrm{tf}), \qquad \sigma_T = 1.77 \quad (\mathrm{tf})$$

を用いてa, b を算出すると

$$a = 0.72 \quad (\mathrm{tf}^{-1}), \qquad b = 1.19 \quad (\mathrm{tf})$$

となる。上述のように、これは一輪重の分布に関するパラメータである。表-2.2 から得られる確率密度と、グンベル分布の確率密度関数（式(33)'）を図化したものを、図-2.5' として以下に示す。

実線は表-2.2 の輪数 N_i を総輪数 N で除した値に、実線で囲まれる面積が 1 となるように、補正係数を乗じたものである。破線は式(33)'を表す。輪重の小さいところでは若干の差異が見られるが、ほぼ$x \geq 6$ tf では両者は良く一致している。正規分布で近似した図-2.3（概念図）に比べて、密度関数のピーク値が観測値にほぼ等しくなっている。ただし$x \leq 0$ tf の領域でも、小さいがある値を持っている。

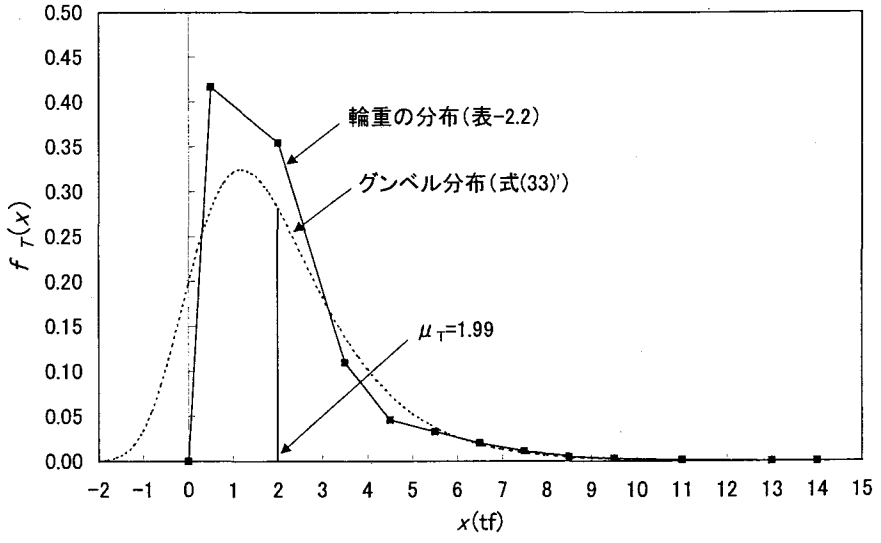

図-2.5' 確率密度関数

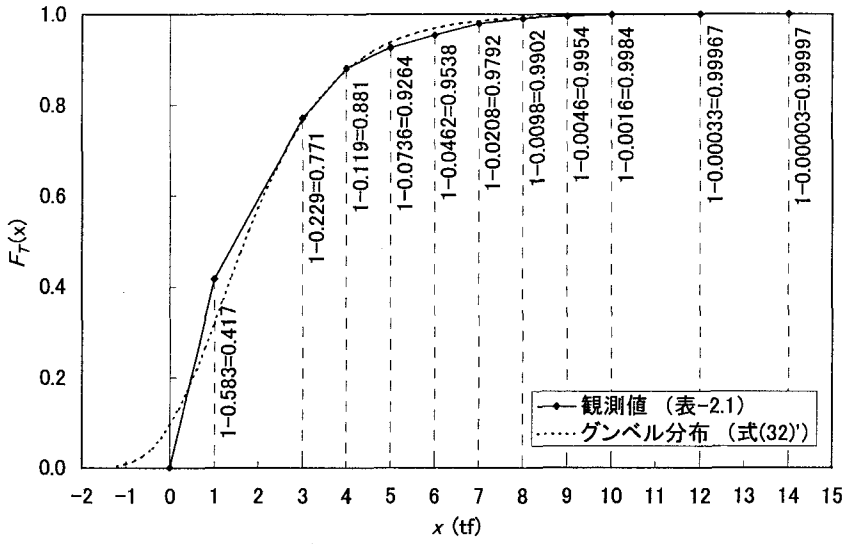

図-2.5" 一輪重の分布とグンベル分布

図-2.5" は確率分布を比較したものである。実線は表-2.1 から得られる値を、破線はグンベル分布（式(32)'）を表す。図から、グンベル分布は$x \le 0$でも 0.095 より小さいが、ある値を持つとはいえども、両者は非常に良く一致していると言えよう。グンベル分布は本来、ある確率分布（指数関数で表示される）から抽出した標本値の最大値の分布を表している。したがって図-2.5" あるいは表-2.1 の確率分布は一日の一輪重の最大値分布を表すと言える。

式(25)の上で述べたように、n を年間当たりの輪数とすると、式(32)'の確率が n 回連続して生起する確率は

$$F_{T,M}(x) = [F_T(x)]^n = [\ \exp[-\exp\{-a(x-b)\}]\ ]^n$$

$$= \exp\left[-\exp\left\{-a\left(x-b-\frac{\ln(n)}{a}\right)\right\}\right] \qquad (35)'$$

となる。これは後節 2.1.3, (2) 項で述べる、$n = 50$ 年最大積雪深に対する考え方と同じである。上式はグンベル分布の式(32)'において、b に相当するものが$b' = b + \ln(n)/a$ となっている。よって

$$b' = b + \frac{\ln(n)}{a} = 1.19 + \frac{\ln(100 \times 365)}{0.72} = 15.8 \quad \text{(tf)}$$

平均値と標準偏差を式(33)'から逆算すると

$$\mu_{T,M} = b' + \frac{\gamma}{a} = 15.8 + \frac{0.577}{0.72} = 16.6 \quad \text{(tf)}$$

$$\sigma_{T,M} = \sigma_T = 1.77 \qquad \text{(tf)}$$

変動係数は

$$V_{T,M} = \frac{\sigma_{T,M}}{\mu_{T,M}} = \frac{1.77}{16.6} = 0.107$$

となる。以上の値を輪重の年最大値分布に対する基本統計量とする（なお、本項は、新潟大学農学部の中村昇助教授の助言によるところが大きい）。

正誤文

【　p.68 の（ⅳ）荷重効果が対数正規分布でない場合　～　p.86 の最後　】
までを以下の文で置き換えること。

$$c_1 = \frac{\kappa_{S1}}{\sum \kappa_{Sj}} = \frac{1.0}{3.0} = 0.333, \quad c_2 = \frac{\kappa_{S2}}{\sum \kappa_{Sj}} = \frac{2.0}{3.0} = 0.667$$

$$V_R{}^2 + \sum \left(c_j V_{Sj}\right)^2 = 0.1^2 + (0.333 \times 0.1)^2 + (0.667 \times 0.25)^2$$

$$= 0.0100 + 0.0011 + 0.0278$$

$$= 0.0389$$

$$\therefore \sqrt{V_R{}^2 + \sum \left(c_j V_{Sj}\right)^2} = \sqrt{0.0389} = 0.197$$

分離係数は

$$\alpha_R = \frac{V_R}{\sqrt{V_R{}^2 + \sum \left(c_j V_{Sj}\right)^2}} = \frac{0.1}{0.197} = 0.508$$

$$\alpha_{S1} = -\frac{0.333 \times 0.1}{0.197} = -0.169$$

$$\alpha_{S2} = -\frac{0.667 \times 0.25}{0.197} = -0.846$$

検算：$\alpha_R{}^2 + \sum \alpha_{Si}{}^2 = 0.508^2 + 0.169^2 + 0.846^2$

$$= 0.258 + 0.029 + 0.716 = 1.003 \approx 1$$

耐力係数は式(110)より

$$\phi = \frac{1}{\sqrt{1 + V_R{}^2}} \exp\left(-\alpha_R \beta \zeta_R\right) \frac{\mu_R}{R_n} = \frac{1}{\sqrt{1 + 0.1^2}} \exp\left(-0.508 \times 2.5 \times 0.1\right) \times 1.33$$

$$= 0.995 \times 0.881 \times 1.33 = 1.17 \approx 1.2$$

荷重係数は式(111)より

$$\gamma_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + V_{S1}{}^2}} \exp\left(-\alpha_{S1} \beta \zeta_{S_1}\right) \frac{\mu_{S1}}{S_{1n}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 0.1^2}} \exp\left(0.169 \times 2.5 \times 0.1\right) \times 1.0$$

$$= 0.995 \times 1.04 \times 1.0 = 1.03 \approx 1.0$$

$$\gamma_2 = \frac{1}{\sqrt{1 + V_{S2}{}^2}} \exp\left(-\alpha_{S2} \beta \zeta_{S2}\right) \frac{\mu_{S2}}{S_{2n}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 0.25^2}} \exp\left(0.846 \times 2.5 \times 0.25\right) \times 0.45$$

$$= 0.970 \times 1.70 \times 0.45 = 0.742 \approx 0.74$$

例題３終わり」

（iv）荷重効果が対数正規分布でない場合

式(101)の第二式を下サフィックスを若干変更して再記すれば

$$u_i = \frac{\ln S_i - \lambda_{eqSi}}{\zeta_{eqSi}} \tag{135}$$

ただし荷重効果S_iは一般に対数正規分布でないものとする。したがって上式の対数平均値λ_{eqSi}および対数標準偏差ζ_{eqSi}は、何らかの方法で（後述の式(149)以下）得られた近似値とする。一般にパラメータx_{eqSi}の下サフィックスは対数正規分布に等価なパラメーター値であることを示す。

対数正規近似された荷重効果S_iの規準化対数平均値を次のように定義する。

$$\begin{aligned} \lambda_{eqSi}{}^* &= E\left[\ln\left(S_i / \mu_{Si}\right)\right] \\ &= E\left[\ln S_i - \ln \mu_{Si}\right] \\ &= \lambda_{eqSi} - \ln \mu_{Si} \end{aligned} \tag{136}$$

ここでμ_{Si}は元の年最大値分布の確率変数S_iの平均値である。λ_{eqSi}を対数正規分布に準じて（［例題２］参照）

$$\lambda_{eqSi} = \ln \frac{\mu_{eqSi}}{\sqrt{1+V_{eqSi}{}^2}} \tag{137}$$

と表す。V_{eqSi} は等価変動係数であり、

$$\begin{aligned}\sqrt{1+V_{eqSi}{}^2} &= \sqrt{1+\left(\frac{\sigma_{eqSi}}{\mu_{eqSi}}\right)^2} \\ &= \sqrt{\exp\left(\zeta_{eqSi}{}^2\right)} \\ &= \exp\left(\frac{1}{2}\zeta_{eqSi}{}^2\right)\end{aligned} \tag{138}$$

である。またσ_{eqSi} およびμ_{eqSi} は対数正規近似された荷重効果S_i の標準偏差および平均値である。式(137)に式(136)および式(138)を代入して

$$\begin{aligned}\mu_{eqSi} &= \exp\left(\lambda_{eqSi} + \frac{1}{2}\zeta_{eqSi}{}^2\right) \\ &= \exp\left(\lambda_{eqSi}{}^* + \ln \mu_{Si} + \frac{1}{2}\zeta_{eqSi}{}^2\right) \\ &= \exp\left(\lambda_{eqSi}{}^* + \frac{1}{2}\zeta_{eqSi}{}^2\right)\cdot \mu_{Si}\end{aligned} \tag{139}$$

を得る。これの死荷重平均値に対する比を

$$\kappa_{eqSi} = \frac{\mu_{eqSi}}{\mu_D} \tag{140}$$

と置くと

$$\kappa_{eqSi} = \exp\left(\lambda_{eqSi}{}^* + \frac{1}{2}\zeta_{eqSi}{}^2\right)\cdot \kappa_{Si} \tag{141}$$

ここでκ_{Si} はすでに（iii）で定義されたものである。荷重効果の和、$Q=\Sigma S_j$ の対数正規近似された平均値と標準偏差は

$$\mu_Q = \sum \mu_{eqSj} \tag{142.a}$$

$$\sigma_Q = \sqrt{\sum \sigma_{eqSj}{}^2} \tag{142.b}$$

等価変動係数は

$$V_{eqQ} = \frac{\sigma_Q}{\mu_Q} = \frac{\sqrt{\sum \sigma_{eqSj}{}^2}}{\sum \mu_{eqSj}} = \frac{\sqrt{\sum \left(\sigma_{eqSj}/\mu_D\right)^2}}{\sum \left(\mu_{eqSj}/\mu_D\right)} \tag{143}$$

ここで

$$\frac{\sigma_{eqSi}}{\mu_D} = \frac{\sigma_{eqSi}}{\mu_{eqSi}}\cdot\frac{\mu_{eqSi}}{\mu_D} = V_{eqSi}\cdot\kappa_{eqSi} \tag{144}$$

である。以上より

$$V_{eqQ} = \frac{\sqrt{\sum \left(V_{eqSj}\cdot\kappa_{eqSj}\right)^2}}{\sum \kappa_{eqS_j}} = \sqrt{\sum \left(c_j V_{eqSj}\right)^2} \tag{145}$$

ここで

$$c_i = \frac{\kappa_{eqSi}}{\sum \kappa_{eqSj}} \tag{146}$$

分離係数も（iii）と類似の表示となり、下記のようである。

$$\alpha_R = \frac{\zeta_R}{\sqrt{\zeta_R{}^2 + \varsigma_Q{}^2}} \cdot u \approx \frac{V_R}{\sqrt{V_R{}^2 + V_{eqQ}{}^2}} \cdot u = \frac{V_R}{\sqrt{V_R{}^2 + \sum \left(c_j V_{eqSj}\right)^2}} \cdot u \tag{147}$$

$$\alpha_{Si} = -\frac{\zeta_{Si}}{\zeta_Q}\sqrt{1-\alpha_R{}^2} \cdot u \approx -\frac{c_i V_{eqSi}}{\sqrt{V_R{}^2 + \sum \left(c_j V_{eqSj}\right)^2}} \cdot u \tag{148}$$

ここで$u = 1.05$は耐力・荷重係数を安全側に評価するための安全係数。荷重効果S_iの規準化対数平均値、対数標準偏差および等価変動係数は以下から求める。

規準化対数平均値：　$\lambda^*_{eqSi} = e_0 + e_1 V_{Si} + e_2 V_{Si}{}^2 + e_3 V_{Si}{}^3$　(149)

対数標準偏差：　$\zeta_{eqSi} = s_0 + s_1 V_{Si} + s_2 V_{Si}{}^2 + s_3 V_{Si}{}^3$　(150)

等価変動係数：　$V_{eqSi} = \sqrt{\exp\left(\zeta_{eqSi}{}^2\right) - 1}$　(151)

ここで係数$e_i, s_i (i = 0,1,2,3)$は次のように分類されて数表で与えられている。

a) 年最大値を対数正規変数に近似する場合→ガウス分布、グンベル分布、フレッシュ分布に対して。
b) 50年最大値を対数正規変数に近似する場合→ガウス分布、グンベル分布、フレッシュ分布に対して。

数表は次節の表-2.8、2.9を参照。

荷重係数の評価は式(111)で、V_{Si}, ζ_iおよびμ_iの代わりに、それぞれV_{eqSi}, ζ_{eqSi}およびμ_{eqSi}を用いる。

2.3 荷重の組み合わせ

2.3.1 耐力（終局限界耐力）

実験データによらない場合の公称値、変動係数は規準公称値によってよいことになっている。規準公称値の決め方の細部については、ここでは深入りしないことにする。飯島[8]によると木材の曲げ強さf_b (MPa=N/mm^2≒10kgf/cm^2)について

① 強度分布は、正規、対数正規、2P ワイブル分布のいずれと見なしても、工学的には概ね良好な適合度が得られる。強いて言えば、概ね対数正規分布と見なせる。
② 木材の等級ごとの変動係数は機械等級区分材では20%程度である。目視等級区分材では20~35%の範囲にある。
③ 樹種別のE_b（曲げヤング係数）とf_bの回帰直線は3グループに分けられる。
④ 公称値は100%データフィットによる対数正規分布あてはめ、またはデータ数が多い場合は、下限15%データフィットによる2Pワイブル分布あてはめ、による75%信頼水準、5%下限値とするのが適当。

としている。以上で2Pワイブル分布とは最小値分布のことであり、極値Ⅲ型分布とも言われる、2個のパラメーター（つまり2P）を持つ確率分布のことである。荷重効果の場合は最大値分布が問題となるのに対して、耐力では最小値分布が問題となることから、このような分布が出てくるのである。上の④でいう75%信頼水準、5%下限値は

正規分布　：$R_n = \mu_R - k \cdot \sigma_R$

対数正規分布　：$R_n = \exp\left(\lambda_R - k \cdot \zeta_R\right)$　(152)

ここで前節までと同様に、一般にμ_X, σ_Xは母集団Xの平均値および標準偏差、λ_X, ζ_Xは対数平均値および対数標準偏差を表す。そして下サフィックスnは公称値（ nominal value ）を表す。係数kは

$$k = k(n, \eta, \xi) \tag{153}$$

で、母集団の試料数n、信頼水準η%、下限値ξ%が与えられれば定まる係数とされる。変動係数はこれも前節までと同様に（式(91)）

$$V_R = \frac{\sigma_R}{\mu_R} \tag{154}$$

と定義されている。以上のようにして得られた規準公称値は表-2.6，表-2.7のようになっている。これらの表において、ヤング係数は使用限界状態設計において必要となる量であり、参考のために載せてあ

る。そして正規分布が良く当てはまるとしている。

表-2.6　構造用木材の強さの変動係数

区　　分	曲げ	圧縮	引張	せん断	めり込み強さ	めり込み剛性	ヤング係数
目視等級区分材	0.30	0.24	0.40	0.25	0.20	0.35	0.25
機械等級区分材	0.20	0.16	0.27	0.20	0.20	0.35	0.15
集成材	0.15	0.12	0.20	0.15	0.20	0.35	0.10
単板積層材	0.15	0.12	0.20	0.15	0.20	0.35	0.10

表-2.7　構造用木材の平均値／公称値

区　　分	曲げ	圧縮	引張	せん断	めり込み強さ	めり込み剛性	ヤング係数
目視等級区分材	1.97	1.65	2.92	1.70	1.49	2.36	1.70
機械等級区分材	1.49	1.36	1.78	1.49	1.49	2.36	1.33
集成材	1.33	1.25	1.49	1.33	1.49	2.36	1.20
単板積層材	1.33	1.25	1.49	1.33	1.49	2.36	1.20

2.3.2 死荷重＋活荷重

前項で述べたように、耐力は対数正規分布とする。死荷重（2.1.1 項）は正規分布、活荷重はT荷重（2.1.2 項（1））およびL荷重ともに正規分布（2.1.2 項（2））分布であった。よって耐力以外は対数正規分布に変換しなければならない。2.2.4 項（3）の（iv）で述べたように日本建築学会[6]は次のような表を用意している。ただしここではフレッシュ分布（極値Ⅱ型）は省略する。

非対数正規関数の荷重効果 X の元の確率分布関数 $F_X(x)$ の値が0.5および0.99のときの x の値をそれぞれ x_{50}, x_{99} とし、$G_X(x)$ を対数正規確率分布関数とすると、パラメータ λ_X, ζ_X は次の連立方程式を解くことにより得られるとしている[9]。

$$\left.\begin{aligned} F_X(x_{50}) &= G_X(x_{50}) \\ F_X(x_{99}) &= G_X(x_{99}) \end{aligned}\right\} \tag{155}$$

例えば確率分布関数が正規分布で $F_X(x) = N(\mu_X, \sigma_X)$ と与えられていると、上の連立方程式を解いてパラメータ λ_X, ζ_X を求める。するとこれらは変動係数 $V_X = \sigma_X / \mu_X$ で表される。以上のようにして表の係数が決められている。

表-2.8　年最大値を対数正規変数に近似する場合

年最大値の確率分布形	式(149)の係数				式(150)の係数			
	e_0	e_1	e_2	e_3	s_0	s_1	s_2	s_3
ガウス分布	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.85	-0.49	0.14
グンベル分布	0.00	-0.16	-0.01	0.00	0.02	1.13	-0.67	0.20

表-2.9　50 年最大値を対数正規変数に近似する場合

年最大値の確率分布形	式(149)の係数				式(150)の係数			
	e_0	e_1	e_2	e_3	s_0	s_1	s_2	s_3
ガウス分布	0.02	1.89	-1.05	0.30	0.02	0.34	-0.32	0.11
対数正規分布	0.01	2.34	-1.01	0.16	0.00	0.66	-0.13	0.00
グンベル分布	0.04	2.32	-1.43	0.43	0.05	0.59	-0.60	0.22

（1）木床版

2.1.1 項（3）で述べた桁橋（坊川林道２号橋と鵜養橋）の舗装と集成材パネル床版は図-2.8 のよう

になっている。床版を設計するための輪荷重の分布を、幅員方向と支間方向について、図 (a), (b)に示す。床版の支間長 L (m)は（主桁中心間隔－主桁幅／2）としている。図-2.9 の D (tf/m^2)は 2.1.1 項（3）で述べた（木材＋鋼材＋舗装）の値である。T は輪荷重 (tf) である。床版は幅（図-2.9 の奥行き方向）c' (m)を持った連続梁として設計される[10]。 許容応力度設計法と異なって、これらの荷重は確率変数である。

死荷重および活荷重による曲げモーメントはそれぞれ

$$M_D = \frac{Dc'L^2}{8}, \qquad M_T = T\left(\frac{L}{4} - \frac{c}{8}\right) \tag{156}$$

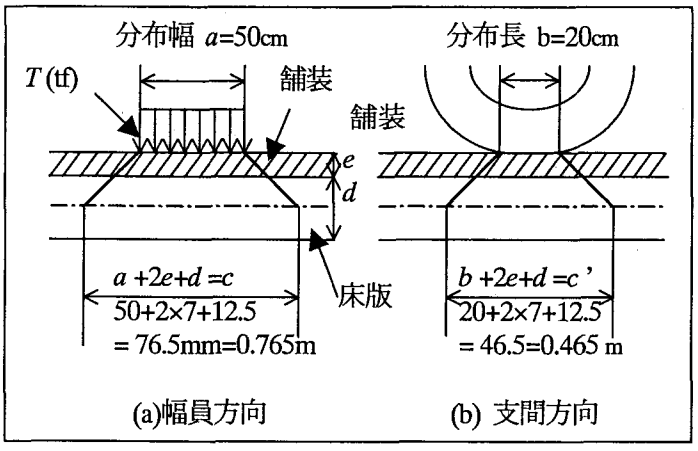

図-2.8　輪荷重の分布

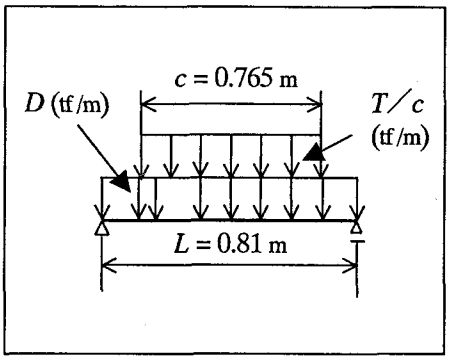

図-2.9　床版支間と荷重

断面係数を $W\left(= c'd^2/6\right)$ とすると性能関数は

$$Z = R - \frac{0.8}{W}\left\{\frac{Dc'L^2}{8} + T\left(\frac{L}{4} - \frac{c}{8}\right)\right\} \geq 0 \tag{157}$$

となる。R (tf/m^2)は耐力であり、乗数 0.8 は連続梁効果による。床版の衝撃係数を i とすると輪荷重 T に $(1+i)$ を乗じてもよい。死荷重 D および輪荷重 T に乗じられている係数は確定値であり、したがってこれら荷重の平均値や標準偏差は元の値と変わるが、変動係数など無次元の統計量には影響を及ぼさない。よって係数を含んだ形で上式を単に

$$Z = R - \left(D_E + T_E\right) \geq 0 \tag{158}$$

と表記する。下サフィックス E がない場合は、式(157)の死荷重およびT荷重そのものを表す。死荷重耐力係数および荷重係数の算法は前節の（iv）による（式(135)以下）。

（i）既知の統計量

(a) 耐力 R

対数正規分布である。集成材とすると変動係数および平均値／公称値は、表-2.6、2.7 より曲げに対して

$$V_R = \frac{\sigma_R}{\mu_R} = 0.15$$

$$\frac{\mu_R}{R_n} = 1.33$$

(b) 死荷重 D

正規分布である。（木材＋鋼材＋舗装）に対して式(22)、(24)より

$$V_D = \frac{\sigma_D}{\mu_D} = 0.035$$

$$\frac{\mu_D}{D_n} = 0.98$$

式(149)、(150)および(151)と表-2.8 より

$$\zeta_{eqD} = s_0 + s_1 V_D + s_2 V_D{}^2 + s_3 V_D{}^3$$
$$= 0.01 + 0.85 \times 0.035 - 0.49 \times 0.035^2 + 0.14 \times 0.035^3$$
$$= 0.010 + 0.030 - 0.001 + 0.000$$
$$= 0.039$$

$$V_{eqD} = \sqrt{\exp\left(\zeta_{eqD}{}^2\right) - 1} = \sqrt{\exp\left(0.039^2\right) - 1}$$
$$= \sqrt{1.52 \times 10^{-3}}$$
$$= 0.039$$

$$\lambda_D{}^* = e_0 + e_1 V_D + e_2 V_D{}^2 + e_3 V_D{}^3 = 0$$

式(120)、(141)より

$$\kappa_D = \frac{\mu_D}{\mu_D} = 1.0$$

$$\kappa_{eqD} = \exp\left(\lambda_{eqD}{}^* + \frac{1}{2}\zeta_{eqD}{}^2\right) \cdot \kappa_D$$
$$= \exp\left(\frac{1}{2} \times 0.039^2\right) \times 1.0 = 1.00$$

次頁の式(160)と同様に、対数正規近似した死荷重の D の平均値と、元の平均値との比は

$$\frac{\mu_{eqD}}{\mu_D} = \exp\left(\lambda_{eqD}{}^* + \frac{1}{2}\zeta_{eqD}{}^2\right)$$
$$= \exp\left(\frac{1}{2} \times 0.039^2\right) = 1.00$$

したがって

$$\frac{\mu_{eqD}}{D_n} = \frac{\mu_D}{D_n} = 0.98$$

(c) 活荷重 T

2.1.2（1）項、（iii）グンベル分布を採用する。100 台／日の交通量に対する年最大値分布の変動係数は式(34)以下に述べたとおりである。平均値／公称値も併せて再記すれば

$$V_T = \frac{\sigma_T}{\mu_T} = \frac{1.77}{16.6} = 0.107$$

$$\frac{\mu_T}{T_n} = \frac{16.6}{8.0} = 2.08$$

活荷重は「主な荷重」であるから、橋の供用寿命期間を T 年とすると、T 年最大値分布が問題となる。年最大値分布がグンベル分布のとき、T 年最大値分布もグンベル分布となる（式(34)で n が T に変わるのみ）。T= 50 とすると、表-2.9 が利用できてグンベル分布を対数正規分布に変換したときのパラメータは

$$\lambda_{eqT}{}^* = e_0 + e_1 V_T + e_2 V_T{}^2 + e_3 V_T{}^3$$
$$= 0.04 + 2.32 \times 0.107 - 1.43 \times 0.107^2 + 0.43 \times 0.107^3$$
$$= 0.04 + 0.248 - 0.016 + 0.001$$
$$= 0.273$$

$$\zeta_{eqT} = s_0 + s_1 V_T + s_2 V_T{}^2 + s_3 V_T{}^3$$
$$= 0.05 + 0.59 \times 0.107 - 0.60 \times 0.107^2 + 0.22 \times 0.107^3$$
$$= 0.05 + 0.063 - 0.007 + 0.000$$
$$= 0.106$$

$$V_{eqT} = \sqrt{\exp\left(\zeta_{eqT}{}^2\right)-1}$$
$$= \sqrt{\exp\left(0.106^2\right)-1}$$
$$= 0.106$$

式(139)より、

$$\frac{\mu_{eqT}}{\mu_T} = \exp\left(\lambda_{eqT}{}^* + \frac{1}{2}\zeta_{eqT}{}^2\right) \tag{160}$$
$$\therefore \frac{\mu_{eqT}}{\mu_T} = \exp\left(0.273 + \frac{0.106^2}{2}\right)$$
$$= 1.32$$

これは50年最大値分布の平均値と年最大値分布の平均値の比を表している。従って50年最大値分布の平均値の公称値に対する比は

$$\frac{\mu_{eqT}}{T_n} = \frac{1.32 \times \mu_T}{T_n} = \frac{1.32 \times 16.6}{5.6} = 3.91$$

ここで公称値は当時の2等橋の設計輪荷重とした。次項の**表-2.10**に現在の林道橋の橋格を示すが、後輪荷重5.6 tfは2等林道橋として生きている。なお、この項の最初に述べた変動係数と平均値／公称値は、元の母集団（年最大値分布）に関する値なので、50年間最大値分布に対しては採用しない。

以上より、荷重効果の年最大値分布の平均値の、死荷重効果の平均値に対する比は

$$\kappa_T = \frac{E[T_E]}{E[D_E]} = \frac{\mu_T \cdot \left(\frac{L}{4} - \frac{c}{8}\right)}{\mu_D \cdot \frac{c'L^2}{8}} \approx \frac{\mu_T / L}{\mu_D \cdot c'}$$
$$= \frac{16.6/0.81}{0.259 \times 0.465} = 170$$

ここで**図-2.9**において$c \approx L = 0.81\,\mathrm{m}$と近似した。死荷重の平均値は式(21)の値ではなく、主桁自重を除いた平均値（式(18)で右辺第2項を無視）である。主桁間隔および床版厚は2.1.1節で述べた鵜養橋の値を基準値とした。上の結果、T荷重効果は死荷重効果の約170倍であることを示している。各国の規準では木床版に衝撃の影響を考慮していないので、ここでもこれに準じた。以上より

$$\kappa_{eqT} = \exp\left(\lambda_{eqT}{}^* + \frac{1}{2}\zeta_{eqT}{}^2\right) \cdot \kappa_T$$
$$= \frac{\mu_{eqT}}{\mu_T} \cdot \kappa_T$$
$$= 1.32 \times 170 = 224$$

（ii）パラメータの算出

式(146)の分母は

$$\sum \kappa_{eqSj} = \kappa_{eqD} + \kappa_{eqT} = 1.00 + 224 = 225$$

よって

$$c_D = \frac{\kappa_{eqD}}{\sum \kappa_{eqSj}} = \frac{1.00}{225} = 0.00444,$$
$$c_T = \frac{\kappa_{eqT}}{\sum \kappa_{eqSj}} = \frac{224}{225} = 0.996$$

式(147)の分母は

$$V_R{}^2 + \sum \left(c_j V_{eqSj}\right)^2 = 0.15^2 + (0.00444 \times 0.0390)^2 + (0.996 \times 0.106)^2$$
$$= 0.0225 + 0.0000 + 0.0111$$
$$= 0.0336$$

$$\therefore \sqrt{V_R{}^2 + \sum \left(c_j V_{eqSj}\right)^2} = \sqrt{0.0336} = 0.183$$

分離係数は式(147)、(148)より以下のようになる。

$$\alpha_R = \frac{V_R}{\sqrt{V_R{}^2 + \sum \left(c_j V_{eqSj}\right)^2}} \cdot u = \frac{0.15}{0.183} \times 1.05 = 0.861$$

$$\alpha_D = -\frac{c_D V_{eqD}}{\sqrt{V_R{}^2 + \sum \left(c_j V_{eqSj}\right)^2}} \cdot u = -\frac{0.00444 \times 0.0390}{0.183} \times 1.05 = -0.000994$$

$$\alpha_T = -\frac{c_T V_{eqT}}{\sqrt{V_R{}^2 + \sum \left(c_j V_{eqSj}\right)^2}} \cdot u = -\frac{0.996 \times 0.106}{0.183} \times 1.05 = -0.606$$

検算：$\sum \alpha_j{}^2 = 0.861^2 + 0.000994^2 + 0.606^2 = 1.05^2$

対数標準偏差をまとめると以下である。対数正規分布する耐力 R は式(123)による。

$$\zeta_R = \sqrt{l_n\left(1 + V_R{}^2\right)} \approx V_R = 0.15$$

$$\zeta_{eqD} = 0.039$$

$$\zeta_{eqT} = 0.106$$

（iii）耐力係数・荷重係数の算出

AASHTO では許容応力度設計法とのキャリブレーションによってスパン 60m 以下の橋梁に対し目標安全性指標として $\beta = 3.5$ を推奨している。これを採用すると耐力係数と荷重係数は式(110)、(111)より以下のようになる。

$$\phi = \frac{1}{\sqrt{1 + V_R{}^2}} \cdot \exp\left(-\alpha_R \beta \zeta_R\right) \cdot \frac{\mu_R}{R_n}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1 + 0.15^2}} \cdot \exp\left(-0.861 \times 3.5 \times 0.15\right) \times 1.33$$

$$= 0.989 \times 0.636 \times 1.33$$

$$= 0.837$$

$$\approx 0.8$$

$$\gamma_D = \frac{1}{\sqrt{1 + V_{eqD}{}^2}} \cdot \exp\left(-\alpha_D \beta \zeta_{eqD}\right) \cdot \frac{\mu_{eqD}}{D_n}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1 + 0.0390^2}} \cdot \exp\left(0.000994 \times 3.5 \times 0.0390\right) \times 0.98$$

$$= 0.999 \times 1.00 \times 0.98$$

$$= 0.979$$

$$\approx 1.0$$

$$\gamma_T = \frac{1}{\sqrt{1 + V_{eqT}{}^2}} \cdot \exp\left(-\alpha_T \beta \zeta_{eqT}\right) \cdot \frac{\mu_{eqT}}{T_n}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1 + 0.106^2}} \cdot \exp\left(0.606 \times 3.5 \times 0.106\right) \times 3.91$$

$$= 0.994 \times 1.25 \times 3.91$$

$$= 4.86$$

$$\approx 4.9$$

以上より雪荷重と衝撃を考えない木床版の設計規範（案）は

$$0.8R_n \geq 1.0D_n + 4.9T_n$$

ここで公称値は

R_n ：集成材曲げ強度分布の5%下限値（式(152)の第二式）

D_n ：木材＋鋼材＋舗装の規準死荷重で0.26 (tf / m^2)（式(24)の下）

T_n ：輪荷重の大きさで5.6 tf（２等林道橋）

T荷重については1977年の統計報告を元に議論した。現在でもこれらの統計量に大きな差はないとすると、現行の設計荷重のもとでは上記の荷重係数は変わるが、荷重係数×公称値は同じである。すなわち現行のAおよびB活荷重は

$$T_n = 10 \text{ tf}$$

このときの平均値／公称値および荷重係数として

$$\frac{\mu_{eqT}}{T_n} = \frac{1.32 \times \mu_T}{T_n} = \frac{1.32 \times 16.6}{10.0} = 2.19$$

$$\gamma_T = \frac{1}{\sqrt{1+V_{eqT}{}^2}} \cdot \exp\left(-\alpha_T \beta \zeta_{eqT}\right) \cdot \frac{\mu_{eqT}}{T_n}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1+0.106^2}} \cdot \exp(0.606 \times 3.5 \times 0.106) \times 2.19$$

$$= 0.994 \times 1.25 \times 2.19$$

$$= 2.72$$

$$\approx 2.7$$

が得られるが、荷重係数×公称値は

$$\gamma_T \times T_n = 4.9 \times 5.6 = 2.7 \times 10.0 = 27 \quad \text{(tf)}$$

となって同じ結果なのである。すなわち耐力・荷重係数設計法では公称値をどこに置こうと、係数×公称値は同じとなる。限界状態設計法では基本的に設計点で設計されるので、確率分布が重要なのである。

林野庁監修「林道必携（平成10年度、技術編）」[11]によると橋格には次の三種がある。

表-2.10 林道橋の橋格と輪荷重

		総荷重 W(tf)	前輪荷重 $0.1W$(kgf)	後輪荷重 $0.4W$(kgf)	前輪輪帯幅 b_1 (cm)	後輪輪帯幅 b_2 (cm)	車輪接地長 a (cm)
1等林道橋	T−25	25	2,500	10,000	12.5	50	20
2等林道橋	T−14	14	1,400	5,600	12.5	50	20
3等林道橋	T−9	9	900	3,600	9.0	36	20

本報告で採用した2橋の林道橋（坊川2号林道橋と鵜養橋）のT荷重は2等林道橋で、**表-2.10**のように現在も生きている。

（2）短スパンの主桁および縦桁

2.1.1項で述べたように、本報告では基本的に継手のないスパン5~15 mの単純支持集成材桁を対象としている。それ故L荷重ではなく、むしろT荷重が設計を支配する。したがって我国では未だ例がないが、木トラス橋などの縦桁もこの範疇に入る。

図-2.10に内桁の反力影響線と輪荷重の主桁への載荷状態を示す。林道橋では**表-2.10**の後輪荷重 T_r と前輪荷重 T_f は車軸距離4 m離して載荷する。つまり道路橋の旧規定を生かしている。

主桁の自重を含む死荷重を D (tf/m^2)とするとスパン中央での死荷重モーメントと活荷重モーメントは

$$M_D = \frac{DcL^2}{8}$$

$$M_L = \frac{L}{4}\left\{T_r + T_f\left(1 - \frac{8}{L}\right)\right\} \times 1.25$$

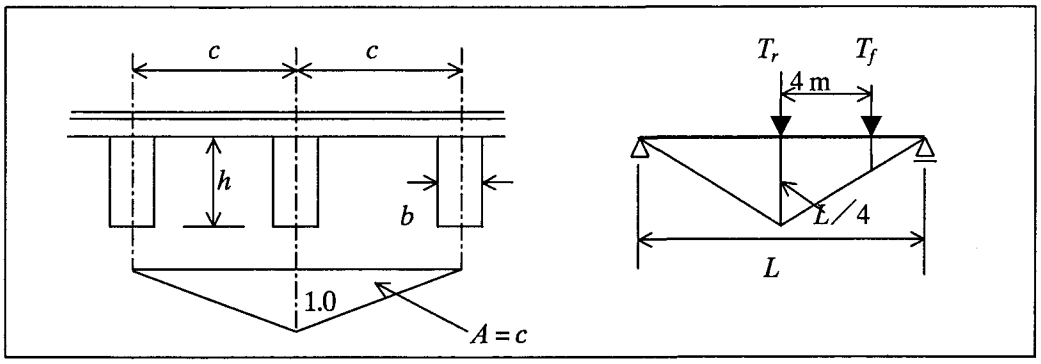

図-2.10 主桁

ここでL(m)はスパン長、乗数 1.25 は衝撃係数として暫定値$i = 0.25$ を採用した場合である。断面係数を$W(= bh^2/6)$とすると、性能関数は

$$Z = R - \frac{1}{W}\left[\frac{DcL^2}{8} + \frac{L}{4}\left\{T_r + T_f\left(1 - \frac{8}{L}\right)\right\} \times 1.25\right] \geq 0$$

係数を含んでこれを単に

$$Z = R - (D_E + T_E) \geq 0$$

と表記する。下サフィックスEは効果（Effect）を表す。

（ｉ）既知の統計量

(a) 耐力 R

変動係数および平均値／公称値は前項(a)と同じである。

(b) 死荷重 D

2.1.1 節の式(24)以下で述べたように、床版のみと（床版＋主桁）についての統計量は同じものを用いることができる。よって前項(b)と同じである。ただし公称値と平均値は異なり各々D_n=0.380(tf/m^2)およびμ_D=0.374 (tf/m^2)である。

(c) 活荷重 T

活荷重効果の平均死荷重に対する比は上式より

$$\kappa_T = \frac{E[T_E]}{E[D_E]} = \frac{\frac{L}{4}\left\{E[T_r] + E[T_f]\left(1 - \frac{8}{L}\right)\right\} \times 1.25}{\frac{E[D]\,cL^2}{8}}$$

$$= \frac{\frac{2.50}{L}\left\{\mu_{Tr} + \mu_{Tf}\left(1 - \frac{8}{L}\right)\right\}}{\mu_D c}$$

ここで前項での輪重の年間最大値分布における平均値、μ_T = 16.6 tf は後輪荷重に対する値と考えられるので

$$\mu_{Tr} = \mu_T = 16.6 \quad \text{(tf)}$$

前輪荷重の平均値は、表-2.10 から前輪荷重／後輪荷重＝1／4 であるから

$$\mu_{Tf} = \mu_{Tr} \times \frac{1}{4} = \frac{16.6}{4} = 4.15 \quad \text{(tf)}$$

と評価できる。スパン長Lとして最小値 5 m、最大値 15m、主桁間隔はc = 90 cm を基準値とする。よって

$$\kappa_T = \frac{2.50 \times 16.6/5.0}{0.374 \times 0.9} = \frac{8.30}{0.337} = 24.6 \qquad (L = 5.0m)$$

$$\kappa_T = \frac{2.50 \times \{16.6 + 4.15(1 - 8/15.0)\}/15.0}{0.374 \times 0.9}$$

$$= \frac{3.09}{0.337} = 9.17 \qquad (L = 15.0m)$$

つまりスパン長が長くなると死荷重効果が大きくなり、κ_T の値は減少する。
活荷重効果の公称値に対する平均値の比は

$$\frac{\mu_{eqT}}{T_n} = \frac{E[T_E]}{T_{nE}} = \frac{\mu_{eqTr} + \mu_{eqTf}(1 - 8/L)}{T_{nr} + T_{nf}(1 - 8/L)} \qquad (L \geq 8.0m)$$

ここで後輪および前輪荷重の公称値は表-2.10 より 2 等林道橋に対して、$T_{nr} = 5.6(\mathrm{tf})$ および $T_{nf} = T_{nr}/4 = 1.4(\mathrm{tf})$ である。また $\mu_{eqTr} = \mu_{eqT}$ （μ_{eqT} は式(160)を満たす）、$\mu_{eqTf} = \mu_{eqTr}/4$ と考えられる。各スパン長に対して

$$\frac{\mu_{eqT}}{T_n} = \frac{1.32 \times 16.6}{5.6} = 3.91 \qquad (L = 5.0m)$$

$$\frac{\mu_{eqT}}{T_n} = \frac{1.32 \times \{16.6 + 4.15(1 - 8/15.0)\}}{5.6 + 1.4(1 - 8/15.0)} = \frac{24.5}{6.25} = 3.91 \quad (L = 15.0m)$$

となり、スパン長の影響を受けず一定値となる。
等価活荷重比率は前項の（ｉ）、(c)より

$$\kappa_{eqT} = \exp\left(\lambda_{eqT}{}^* + \frac{1}{2}\zeta_{eqT}{}^2\right) \cdot \kappa_T$$

$$= \frac{\mu_{eqT}}{\mu_T} \cdot \kappa_T = 1.32\kappa_T$$

（ii）パラメータの算出

$$\sum \kappa_{eqSj} = \kappa_{eqD} + \kappa_{eqT} = 1.00 + 1.32\kappa_T$$

よって最小スパン長 L =5.0m のとき

$$c_D = \frac{\kappa_{eqD}}{\sum \kappa_{eqSj}} = \frac{1.00}{1.00 + 1.32 \times 24.6} = \frac{1.00}{33.5} = 0.0299$$

$$c_T = \frac{\kappa_{eqT}}{\sum \kappa_{eqSj}} = \frac{1.32 \times 24.6}{33.5} = 0.969$$

最大スパン長 L =15.0m のとき

$$c_D = \frac{\kappa_{eqD}}{\sum \kappa_{eqSj}} = \frac{1.00}{1.00 + 1.32 \times 9.17} = \frac{1.00}{13.1} = 0.0763$$

$$c_T = \frac{\kappa_{eqT}}{\sum \kappa_{eqSj}} = \frac{1.32 \times 9.17}{13.1} = 0.924$$

同じようにスパン長 L =5.0m のとき

$$V_R{}^2 + \sum (c_j V_{eqSj})^2 = 0.15^2 + (0.0299 \times 0.0390)^2 + (0.969 \times 0.106)^2$$

$$= 0.0225 + 0.0000 + 0.0106$$

$$= 0.0331$$

$$\therefore \sqrt{V_R{}^2 + \sum (c_j V_{eqSj})^2} = \sqrt{0.0331} = 0.182$$

分離係数は

$$\alpha_R = \frac{V_R}{\sqrt{V_R{}^2 + \sum\left(c_j V_{eqSj}\right)^2}} \cdot u = \frac{0.15}{0.182} \times 1.05 = 0.865$$

$$\alpha_D = -\frac{c_D V_{eqD}}{\sqrt{V_R{}^2 + \sum\left(c_j V_{eqSj}\right)^2}} \cdot u = -\frac{0.0299 \times 0.0390}{0.182} \times 1.05 = -0.00673$$

$$\alpha_T = -\frac{c_T V_{eqT}}{\sqrt{V_R{}^2 + \sum\left(c_j V_{eqSj}\right)^2}} \cdot u = -\frac{0.969 \times 0.106}{0.182} \times 1.05 = -0.593$$

検算：$\sum \alpha_j{}^2 = 0.865^2 + 0.00673^2 + 0.593^2 = 1.05^2$

スパン長L =15.0m のとき

$$V_R{}^2 + \sum\left(c_j V_{eqSj}\right)^2 = 0.15^2 + \left(0.0763 \times 0.0390\right)^2 + \left(0.924 \times 0.106\right)^2$$
$$= 0.0225 + 0.0000 + 0.0096$$
$$= 0.0321$$

$$\therefore \sqrt{V_R{}^2 + \sum\left(c_j V_{eqSj}\right)^2} = \sqrt{0.0321} = 0.179$$

分離係数は

$$\alpha_R = \frac{V_R}{\sqrt{V_R{}^2 + \sum\left(c_j V_{eqSj}\right)^2}} \cdot u = \frac{0.15}{0.179} \times 1.05 = 0.880$$

$$\alpha_D = -\frac{c_D V_{eqD}}{\sqrt{V_R{}^2 + \sum\left(c_j V_{eqSj}\right)^2}} \cdot u = -\frac{0.0763 \times 0.0390}{0.179} \times 1.05 = -0.0175$$

$$\alpha_T = -\frac{c_T V_{eqT}}{\sqrt{V_R{}^2 + \sum\left(c_j V_{eqSj}\right)^2}} \cdot u = -\frac{0.924 \times 0.106}{0.179} \times 1.05 = -0.575$$

検算：$\sum \alpha_j{}^2 = 0.880^2 + 0.0175^2 + 0.575^2 = 1.05^2$

（iii）耐力係数・荷重係数の算出

目標安全性指標$\beta = 3.5$として計算すると以下のようになる。

スパン長L =5.0m のとき

$$\phi = \frac{1}{\sqrt{1 + V_R{}^2}} \cdot \exp\left(-\alpha_R \beta \zeta_R\right) \cdot \frac{\mu_R}{R_n}$$
$$= \frac{1}{\sqrt{1 + 0.15^2}} \cdot \exp\left(-0.865 \times 3.5 \times 0.15\right) \times 1.33$$
$$= 0.989 \times 0.635 \times 1.33$$
$$= 0.835$$
$$\approx 0.8$$

$$\gamma_D = \frac{1}{\sqrt{1 + V_{eqD}{}^2}} \cdot \exp\left(-\alpha_D \beta \zeta_{eqD}\right) \cdot \frac{\mu_{eqD}}{D_n}$$
$$= \frac{1}{\sqrt{1 + 0.0390^2}} \cdot \exp\left(0.00673 \times 3.5 \times 0.0390\right) \times 0.98$$
$$= 0.999 \times 1.00 \times 0.98$$
$$= 0.979$$
$$\approx 1.0$$

$$\gamma_T = \frac{1}{\sqrt{1 + V_{eqT}{}^2}} \cdot \exp\left(-\alpha_T \beta \zeta_{eqT}\right) \cdot \frac{\mu_{eqT}}{T_n}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1+0.106^2}} \cdot \exp(0.593 \times 3.5 \times 0.106) \times 3.91$$
$$= 0.994 \times 1.25 \times 3.91$$
$$= 4.86$$
$$\approx 4.9$$

スパン長L=15.0m のとき

$$\phi = \frac{1}{\sqrt{1+V_R{}^2}} \cdot \exp(-\alpha_R \beta \zeta_R) \cdot \frac{\mu_R}{R_n}$$
$$= \frac{1}{\sqrt{1+0.15^2}} \cdot \exp(-0.880 \times 3.5 \times 0.15) \times 1.33$$
$$= 0.989 \times 0.630 \times 1.33$$
$$= 0.829$$
$$\approx 0.8$$

$$\gamma_D = \frac{1}{\sqrt{1+V_{eqD}{}^2}} \cdot \exp(-\alpha_D \beta \zeta_{eqD}) \cdot \frac{\mu_{eqD}}{D_n}$$
$$= \frac{1}{\sqrt{1+0.0390^2}} \cdot \exp(0.0175 \times 3.5 \times 0.0390) \times 0.98$$
$$= 0.999 \times 1.00 \times 0.98$$
$$= 0.979$$
$$\approx 1.0$$

$$\gamma_T = \frac{1}{\sqrt{1+V_{eqT}{}^2}} \cdot \exp(-\alpha_T \beta \zeta_{eqT}) \cdot \frac{\mu_{eqT}}{T_n}$$
$$= \frac{1}{\sqrt{1+0.106^2}} \cdot \exp(0.575 \times 3.5 \times 0.106) \times 3.91$$
$$= 0.994 \times 1.24 \times 3.91$$
$$= 4.82$$
$$\approx 4.8$$

以上をまとめると以下のようになる。

目標安全性指標を$\beta = 3.5$ として、スパン長L=5.0m のとき

$$0.8R_n \geq 1.0D_n + 4.9T_n$$

スパン長L=15.0m のとき

$$0.8R_n \geq 1.0D_n + 4.8T_n$$

公称値は

R_n ：集成材曲げ強度分布の 5%下限値（式(152)の第二式）
D_n ：（主桁＋床版＋舗装）の規準死荷重で 0.38 tf / m^2
T_n ：後輪荷重 5.6 tf、前輪荷重 1.4 tf（２等林道橋）

2.3.3 死荷重＋活荷重＋雪荷重

除雪される橋梁（2.1.3 項）を考え、圧雪荷重を加える。統計量は（式(40),(41)）以下のようである。

$$\frac{\mu_S}{S_n} = 1.0, \qquad V_S = \frac{\sigma_S}{\mu_S} = 0.1$$

μ_S とσ_S は平均値および標準偏差、$S_n = 100$ kgf/m^2 は公称値とするが、上式は暫定値である。

（1）木床版

図-2.8 の舗装の上に圧雪厚さ（公称値 15 cm）が加わるが、輪荷重の分布には寄与しないと考える。死荷重 D（＝床版＋舗装）に雪荷重 S が加わる。式(157)に相当する性能関数は

$$Z = R - \frac{0.8}{W}\left\{\frac{(D+S)c'L^2}{8} + T\left(\frac{L}{4} - \frac{c}{8}\right)\right\} \geq 0$$

R (tf/m^2)は耐力、$W(=c'd^2/6)$は床版の断面係数、乗数 0.8 は連続梁効果による係数である。上式を単に

$$Z = R - (D_E + T_E + S_E)$$

と記す。

（i）既知の統計量

(a) 耐力 R

対数正規分布で前節までと同じである。

(b) 死荷重 D

正規分布で「従の荷重」である。つまり年最大値分布を考えればよい。2.3.2 項の（1）と同じであり、変動係数および平均値／公称値の結果をまとめると

$$V_D = 0.035, \qquad \frac{\mu_{eqD}}{D_n} = \frac{\mu_D}{D_n} = 0.98$$

そしてパラメータは

$$\zeta_{eqD} = 0.039$$

$$V_{eqD} = 0.039$$

$$\lambda_{eqD}{}^* = 0$$

および

$$\kappa_D = \kappa_{eqD} = 1.00$$

(c) 活荷重 T

グンベル分布で「主の荷重」である。2.3.2 項の（1）と同じであり、50 年間最大値分布に対して結果をまとめると

$$V_{eqT} = 0.106, \qquad \frac{\mu_{eqT}}{T_n} = 3.91$$

そしてパラメータは

$$\zeta_{eqT} = 0.106$$

$$V_{eqT} = 0.106$$

$$\lambda_{eqT}{}^* = 0.273$$

および

$$\kappa_T = 170$$

$$\kappa_{eqT} = 224$$

(d) 雪荷重 S

正規分布で「従の荷重」である。対数正規分布関数への変換は、式(149)~(151)と表-2.8 より

$$\begin{aligned}\zeta_{eqS} &= s_0 + s_1 V_S + s_2 V_S{}^2 + s_3 V_S{}^3 \\ &= 0.01 + 0.85 \times 0.1 - 0.49 \times 0.1^2 + 0.14 \times 0.1^3 \\ &= 0.01 + 0.0850 - 0.0049 + 0.0001 \\ &= 0.0902\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}V_{eqS} &= \sqrt{\exp\left(\zeta_{eqS}{}^2\right) - 1} \\ &= \sqrt{\exp\left(0.0902^2\right) - 1} \\ &= \sqrt{8.17 \times 10^{-3}} = 0.0904\end{aligned}$$

$$\lambda_{eqS}{}^{*} = e_0 + e_1 V_S + e_2 V_S{}^2 + e_3 V_S{}^3 = 0$$

死荷重効果の平均値に対する雪荷重効果の平均値の比は

$$\kappa_S = \frac{E[S_E]}{E[D_E]} = \frac{\mu_S}{\mu_D} = \frac{0.10}{0.259} = 0.386$$

よって

$$\kappa_{eqS} = \exp\left(\lambda_{eqS}{}^{*} + \frac{1}{2}\zeta_{eqS}{}^2\right)\cdot\kappa_S$$

$$= \exp\left(\frac{1}{2}\times 0.0902^2\right)\times 0.386$$

$$= 1.00\times 0.386 = 0.386$$

$$\frac{\mu_{eqS}}{\mu_S} = \exp\left(\lambda_{eqS}{}^{*} + \frac{1}{2}\zeta_{eqS}{}^2\right)$$

$$= \exp\left(\frac{1}{2}\times 0.0902^2\right) = 1.00$$

$$\therefore \frac{\mu_{eqS}}{S_n} = \frac{\mu_S}{S_n} = 1.00$$

（ii）パラメータの算出

式(146)の分母は

$$\sum \kappa_{eqSj} = \kappa_{eqD} + \kappa_{eqT} + \kappa_{eqS}$$

$$= 1.00 + 224 + 0.386$$

$$= 225$$

よって

$$c_D = \frac{\kappa_{eqD}}{\sum \kappa_{eqSj}} = \frac{1.00}{225} = 0.00444$$

$$c_T = \frac{\kappa_{eqT}}{\sum \kappa_{eqSj}} = \frac{224}{225} = 0.996$$

$$c_S = \frac{\kappa_{eqS}}{\sum \kappa_{eqSj}} = \frac{0.386}{225} = 0.00172$$

式(147)の分母の値は

$$V_R{}^2 + \sum\left(c_j V_{eqSj}\right)^2$$

$$= 0.15^2 + (0.00444\times 0.039)^2 + (0.996\times 0.106)^2 + (0.00172\times 0.0904)^2$$

$$= 0.0225 + 0.0000 + 0.0111 + 0.0000$$

$$= 0.0336$$

$$\therefore \sqrt{V_R{}^2 + \sum\left(c_j V_{eqSj}\right)^2} = 0.183$$

分離係数は式(147)、(148)より以下のようになる。

$$\alpha_R = \frac{V_R}{\sqrt{V_R{}^2 + \sum\left(c_j V_{eqSj}\right)^2}}\cdot u = \frac{0.15}{0.183}\times 1.05 = 0.861$$

$$\alpha_D = -\frac{c_D V_{eqD}}{\sqrt{V_R{}^2 + \sum\left(c_j V_{eqSj}\right)^2}}\cdot u = -\frac{0.00444\times 0.0390}{0.183}\times 1.05 = -0.000994$$

$$\alpha_T = -\frac{c_T V_{eqT}}{\sqrt{V_R{}^2 + \sum\left(c_j V_{eqSj}\right)^2}}\cdot u = -\frac{0.996\times 0.106}{0.183}\times 1.05 = -0.606$$

$$\alpha_S = -\frac{c_S V_{eqS}}{\sqrt{V_R{}^2 + \sum\left(c_j V_{eqSj}\right)^2}} \cdot u = -\frac{0.00172 \times 0.0904}{0.183} \times 1.05 = -0.000892$$

$$\sum \alpha_{Sj}{}^2 = 0.861^2 + 0.000994^2 + 0.606^2 + 0.000892^2 \approx 1.05^2$$

対数標準偏差をまとめて書くと以下である。

$$\zeta_R = \sqrt{\ln\left(1 + V_R{}^2\right)} \approx V_R = 0.15$$

$$\zeta_{eqD} = 0.0390$$

$$\zeta_{eqT} = 0.106$$

$$\zeta_{eqS} = 0.0902$$

（iii）耐力係数・荷重係数の算出

目標安全性指標を $\beta = 3.5$ として係数を求める。

$$\phi = \frac{1}{\sqrt{1 + V_R{}^2}} \cdot \exp\left(-\alpha_R \beta \zeta_R\right) \cdot \frac{\mu_R}{R_n}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1 + 0.15^2}} \cdot \exp\left(-0.861 \times 3.5 \times 0.15\right) \times 1.33$$

$$= 0.989 \times 0.636 \times 1.33$$

$$= 0.837$$

$$\approx 0.8$$

$$\gamma_D = \frac{1}{\sqrt{1 + V_{eqD}{}^2}} \cdot \exp\left(-\alpha_D \beta \zeta_{eqD}\right) \cdot \frac{\mu_{eqD}}{D_n}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1 + 0.0390^2}} \cdot \exp\left(0.000994 \times 3.5 \times 0.0390\right) \times 0.98$$

$$= 0.999 \times 1.00 \times 0.98$$

$$= 0.979$$

$$\approx 1.0$$

$$\gamma_T = \frac{1}{\sqrt{1 + V_{eqT}{}^2}} \cdot \exp\left(-\alpha_T \beta \zeta_{eqT}\right) \cdot \frac{\mu_{eqT}}{T_n}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1 + 0.106^2}} \cdot \exp\left(0.606 \times 3.5 \times 0.106\right) \times 3.91$$

$$= 0.994 \times 1.25 \times 3.91$$

$$= 4.86$$

$$\approx 4.9$$

$$\gamma_S = \frac{1}{\sqrt{1 + V_{eqS}{}^2}} \cdot \exp\left(-\alpha_S \beta \zeta_{eqS}\right) \cdot \frac{\mu_{eqS}}{S_n}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{1 + 0.0904^2}} \cdot \exp\left(0.000892 \times 3.5 \times 0.0902\right) \times 1.0$$

$$= 0.996 \times 1.00 \times 1.0$$

$$= 0.996$$

$$\approx 1.0$$

結局、圧雪荷重の存在は他の係数の値に影響を与えないことが分かる。係数の算出過程から分かるように、圧雪荷重の変動係数をもっと大きくとると係数も変動する。設計規範は

$$0.8R_n \geq 1.0D_n + 4.9T_n + 1.0S_n$$

ここで公称値は

R_n ：集成材曲げ強度分布の5%下限値（式(152)の第二式）

D_n ：主桁自重を含まない（木床版＋舗装）の規準死荷重で0.26 tf/m^2

T_n ：後輪荷重の大きさで5.6 tf（2等林道橋）

S_n ：圧雪荷重で100 kgf/m^2

（2）短スパンの主桁および縦桁

2.3.2 項（2）で述べた性能関数において死荷重 D に圧雪荷重 S が加わる。

$$Z = R - \frac{1}{W}\left[\frac{(D+S)L^2}{8} + \frac{L}{4}\left\{T_r + T_f\left(1 - \frac{8}{L}\right)\right\} \times 1.25\right] \geq 0$$

係数を含んでこれを単に

$$Z = R - (D_E + T_E + S_E) \geq 0$$

と記す。

（i）既知の統計量

(a) 耐力 R

変動係数および平均値／公称値は前項(a)と同じである。

(b) 死荷重 D

変動係数および平均値／公称値は前項(b)と同じである。主桁自重を含む死荷重の公称値と平均値を再記すれば D_n=0.380 tf/m^2 および μ_D=0.374 tf/m^2 である。

(c) 活荷重 T

2.3.2 項（2）を参照のこと。活荷重効果の平均死荷重効果に対する比をまとめて再記すれば

$$\kappa_T = 24.6 \qquad (L = 5.0\text{m})$$

$$\kappa_T = 9.17 \qquad (L = 15.0\text{m})$$

等価活荷重比率と平均値／公称値も同じであり

$$\kappa_{eqT} = 0.132 \times \kappa_T$$

$$\frac{\mu_{eqT}}{T_n} = 3.91$$

対数標準偏差および等価変動係数は

$$\zeta_{eqT} = 0.106$$

$$V_{eqT} = 0.106$$

(d) 雪荷重 S

前項(d)の結果をまとめると

$$\zeta_{eqS} = 0.0902$$

$$V_{eqS} = 0.0904$$

$$\lambda_{eqS}{}^* = 0$$

$$\frac{\mu_{eqS}}{S_n} = 1.0$$

死荷重効果の平均値に対する雪荷重効果の平均値の比は前節と異なり

$$\kappa_S = \frac{E[S_E]}{E[D_E]} = \frac{\mu_S}{\mu_D} = \frac{0.100}{0.374} = 0.267$$

μ_D には主桁の自重が含まれる。よって等価な平均値の比は

$$\kappa_{eqS} = \exp\left(\lambda_{eqS}{}^{*} + \frac{1}{2}\zeta_{eqS}{}^{2}\right)\cdot\kappa_S$$
$$= \exp\left(\frac{1}{2}\times 0.0902^2\right)\times 0.267$$
$$= 1.00\times 0.267$$
$$= 0.267$$

（ii）パラメータの算出

式(146)の分母の値はスパン長、$L = 5.0\,\mathrm{m}$ のとき

$$\sum \kappa_{eqSj} = \kappa_{eqD} + \kappa_{eqT} + \kappa_{eqS}$$
$$= 1.00 + 1.32\cdot\kappa_T + 0.267$$
$$= 1.00 + 1.32\times 24.6 + 0.267$$
$$= 33.7$$

よって

$$c_D = \frac{\kappa_{eqD}}{\sum \kappa_{eqSj}} = \frac{1.00}{33.7} = 0.0297$$
$$c_T = \frac{\kappa_{eqT}}{\sum \kappa_{eqSj}} = \frac{1.32\times 24.6}{33.7} = 0.964$$
$$c_S = \frac{\kappa_{eqS}}{\sum \kappa_{eqSj}} = \frac{0.267}{33.7} = 0.00792$$

式(147)の分母の値は

$$V_R{}^2 + \sum\left(c_j V_{eqSj}\right)^2$$
$$= 0.15^2 + (0.0297\times 0.039)^2 + (0.964\times 0.106)^2 + (0.00792\times 0.0904)^2$$
$$= 0.0225 + 0.0000 + 0.0104 + 0.0000$$
$$= 0.0329$$
$$\therefore \sqrt{V_R{}^2 + \sum\left(c_j V_{eqSj}\right)^2} = 0.181$$

分離係数は式(147)、(148)より以下のようになる。

$$\alpha_R = \frac{V_R}{\sqrt{V_R{}^2 + \sum\left(c_j V_{eqSj}\right)^2}}\cdot u = \frac{0.15}{0.181}\times 1.05 = 0.870$$
$$\alpha_D = -\frac{c_D V_{eqD}}{\sqrt{V_R{}^2 + \sum\left(c_j V_{eqSj}\right)^2}}\cdot u = -\frac{0.0297\times 0.0390}{0.181}\times 1.05 = -0.00672$$
$$\alpha_T = -\frac{c_T V_{eqT}}{\sqrt{V_R{}^2 + \sum\left(c_j V_{eqSj}\right)^2}}\cdot u = -\frac{0.964\times 0.106}{0.181}\times 1.05 = -0.593$$
$$\alpha_S = -\frac{c_S V_{eqS}}{\sqrt{V_R{}^2 + \sum\left(c_j V_{eqSj}\right)^2}}\cdot u = -\frac{0.00792\times 0.0904}{0.181}\times 1.05 = -0.00415$$
$$\sum \alpha_{Sj}{}^2 = 0.870^2 + 0.00672^2 + 0.593^2 + 0.00415^2 \approx 1.05^2$$

対数標準偏差をまとめて書くと以下である。

$$\zeta_R = \sqrt{\ln\left(1 + V_R{}^2\right)} \approx V_R = 0.15$$
$$\zeta_{eqD} = 0.0390$$

$$\zeta_{eqT} = 0.106$$
$$\zeta_{eqS} = 0.0902$$

（iii）耐力係数・荷重係数の算出

目標安全性指標を $\beta = 3.5$ として係数を求める。

$$\phi = \frac{1}{\sqrt{1+V_R{}^2}} \cdot \exp\left(-\alpha_R \beta \zeta_R\right) \cdot \frac{\mu_R}{R_n}$$
$$= \frac{1}{\sqrt{1+0.15^2}} \cdot \exp\left(-0.870 \times 3.5 \times 0.15\right) \times 1.33$$
$$= 0.989 \times 0.633 \times 1.33$$
$$= 0.832$$
$$\approx 0.8$$

$$\gamma_D = \frac{1}{\sqrt{1+V_{eqD}{}^2}} \cdot \exp\left(-\alpha_D \beta \zeta_{eqD}\right) \cdot \frac{\mu_{eqD}}{D_n}$$
$$= \frac{1}{\sqrt{1+0.0390^2}} \cdot \exp\left(0.00672 \times 3.5 \times 0.0390\right) \times 0.98$$
$$= 0.999 \times 1.00 \times 0.98$$
$$= 0.979$$
$$\approx 1.0$$

$$\gamma_T = \frac{1}{\sqrt{1+V_{eqT}{}^2}} \cdot \exp\left(-\alpha_T \beta \zeta_{eqT}\right) \cdot \frac{\mu_{eqT}}{T_n}$$
$$= \frac{1}{\sqrt{1+0.106^2}} \cdot \exp\left(0.593 \times 3.5 \times 0.106\right) \times 3.91$$
$$= 0.994 \times 1.25 \times 3.91$$
$$= 4.86$$
$$\approx 4.9$$

$$\gamma_S = \frac{1}{\sqrt{1+V_{eqS}{}^2}} \cdot \exp\left(-\alpha_S \beta \zeta_{eqS}\right) \cdot \frac{\mu_{eqS}}{S_n}$$
$$= \frac{1}{\sqrt{1+0.0904^2}} \cdot \exp\left(0.00415 \times 3.5 \times 0.0902\right) \times 1.0$$
$$= 0.996 \times 1.00 \times 1.0$$
$$= 0.996$$
$$\approx 1.0$$

スパン長 L=15.0 m の場合も全く同様に進行する。結果のみ記すと以下のようになる。

$$\left[\ \phi \ \ \gamma_D \ \ \gamma_T \ \ \gamma_S\ \right] = \left[0.8 \quad 1.0 \quad 4.8 \quad 1.0\right]$$

設計規範はスパン長 L=5.0 m のとき

$$0.8R_n \geq 1.0D_n + 4.9T_n + 1.0S_n$$

スパン長 L=15.0 m のとき

$$0.8R_n \geq 1.0D_n + 4.8T_n + 1.0S_n$$

ここで

R_n ：集成材曲げ強度分布の 5%下限値（式(152)の第二式）
D_n ：（主桁＋木床版＋舗装）の規準死荷重で 0.38 tf/m^2
T_n ：後輪荷重 5.6 tf、前輪荷重 1.4 tf（2 等林道橋）
S_n ：圧雪荷重で 100 kgf/m^2