Ⅰ-167　限界状態確率に基づく道路橋設計の荷重組合せと荷重係数

大阪大学大学院　学生員　高森博之　　大阪大学工学部　正会員　川谷充郎
大阪大学大学院　学生員　星加益朗　　綜合技術コンサルタント　正会員　久保雅邦
京都大学工学部　正会員　古田均

1．まえがき　限界状態設計法の導入にあたり，さまざまな荷重が同時に作用する場合に対応して，設計照査として考慮すべき荷重組合せと，その荷重係数の評価が求められている。篠塚は，組合せ荷重下における限界状態確率を基に，荷重組合せと荷重係数の評価方法を示した[1]。その基本的な考え方に基づいて，筆者らは，死荷重Ｄ，活荷重Ｌ，温度荷重Ｔ，地震荷重Ｅを取り上げ，各々の荷重強度の確率分布ならびにそれらの荷重の同時発生確率を考慮し，ある限界状態における超過確率の卓越する荷重組合せに着目して，荷重係数を試算した[2]。その研究の流れの中で，ここでは，限界状態確率をモンテカルロシミュレーションではなく，数値積分により算定し，その有用性を明らかにする。さらに，限界状態確率のばらつきの程度から，従来の許容応力度設計法と比較して，荷重係数設計法(LRFD)の利点を示す。

2．荷重係数決定法　基本的な考え方は限界状態確率図[1]による。ある限界状態に対して目標限界状態確率を設定する。各構造物の限界状態確率を求め，目標値のまわりのばらつきを小さくすることで，各構造物に対して均一な信頼性が得られると考える。ここで上記の４種類の荷重を扱うと，設計照査に必要な荷重の組合せは表-1のようになる。しかし，ある限界状態を表す応力度に着目すれば，限界状態確率の卓越する荷重組合せがほぼ限定されるため[2]，設計照査は，この卓越する荷重組合せについてのみ行い，照査式を次のようにおく。

表-1　荷重組合せ

Load-1	D＋L
Load-2	D＋T
Load-3	D＋E
Load-4	D＋L＋T
Load-5	D＋T＋E
Load-6	D＋L＋E
Load-7	D＋L＋T＋E

code-1　$\phi\sigma_a \geq \alpha_{D1}\gamma_{D1}D_n+\alpha_{L1}\gamma_{L1}L_n$

code-2　$\phi\sigma_a \geq \alpha_{D2}\gamma_{D2}D_n+\alpha_{L2}\gamma_{L2}L_n+\alpha_{T2}\gamma_{T2}T_n$

code-3　$\phi\sigma_y \geq \alpha_{D3}\gamma_{D3}D_n+\alpha_{E3}\gamma_{E3}E_n$

code-4　$\phi\sigma_y \geq \alpha_{D4}\gamma_{D4}D_n+\alpha_{T4}\gamma_{T4}T_n+\alpha_{E4}\gamma_{E4}E_n$

ここに，ϕ：抵抗係数，　σ：照査応力度，γ：荷重係数，
　α：荷重から応力への変換係数。

表-2　目標限界状態確率と照査応力

	Target P_f	Limit State(kg/cm^2)
D＋L	0.5×10^{-1}	$\sigma_a=2,100$
D＋L＋T	0.5×10^{-1}	$\sigma_a=2,100$
D＋E	0.5×10^{-3}	$\sigma_y=3,600$
D＋T＋E	0.5×10^{-3}	$\sigma_y=3,600$

以上の考え方に基づき，照査式中の荷重係数を逐次変化させて限界状態確率を求め，次の目的関数Ωが最小となる荷重係数を最適な荷重係数とする。

$$\Omega=\sum_i\left(\frac{\log P_{im}-\log P_m^*}{\log P_m^*}\right)^2$$

ここで，P_{im}は構造物 i の限界状態確率，
　P_m^*は目標とする限界状態確率。

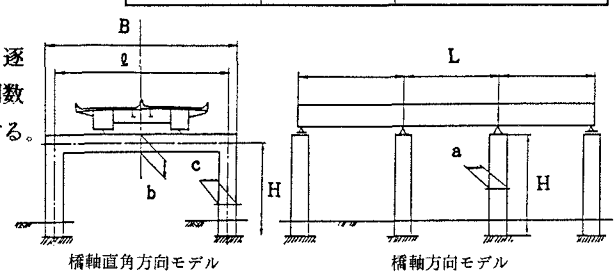

図-1　構造物の一般形状

3．解析モデル[3]　対象とする構造物のモデルは，図-1に示す阪神高速道路の代表的な構造物とし，橋軸方向に10種類，橋軸直角方向に12種類を考える。実働荷重のモデルは，実測データを基に作成されたものを用いた。死荷重は確定値として扱うが，他の荷重の強度分布としては，活荷重を極値Ⅰ型分布，温度荷重を正規分布，地震荷重を極値Ⅲ型分布によりモデル化している。また，ここでは限界状態を応力度で表し，阪神高速道路で使用実績の多い鋼材SM50Y の許容応力度σ_a，降伏応力度σ_yに対して照査を行う。各荷重組合せに対する照査応力度および目標限界状態確率を表-2のように設定する。

4．数値計算例　荷重係数算定の基となる限界状態確率は，本来は確率密度関数の積分により求めるべきである。しかし，組み合わせる荷重の数が多くなると解析的にこの積分値を求めることは困難となる。

(1) モンテカルロシミュレーションによる方法　従来，限界状態確率を求めるのにモンテカルロシミュレーション法によっていた[4]。具体的には，各荷重特性に従う実働荷重サンプルをモンテカルロ法により発生させ，それを構造物に載荷する。このとき，発生した断面応力度の頻度分布に対して確率密度関数を当てはめ，限界状態確率を求めていた。しかし，確率分布の異なるものの組合せにより得られる頻度分布を一つの確率分布で当てはめるため，その確率分布の種類によって限界状態確率が異なり，最適値として得られる荷重係数が異なる。当てはめに用いる確率分布に極値Ⅰ型あるいは極値Ⅲ型を用いた場合の荷重係数を表-3と表-4に掲げる。乱数の初期値を変えてそれぞれ15ケース行い，その平均値と標準偏差（括弧内）を示している。

(2) 数値積分による方法　数値積分法では，code-1～4 で示される限界状態における超過確率を，実働荷重強度の確率密度関数を直接積分もしくはたたみ込み積分することにより求める。表-5は数値積分法により求まった荷重係数である。

表-3　モンテカルロ法（極値Ⅰ型で当てはめ）による荷重係数

Longitudinal model	Transverse model
1.05D＋1.10(0.026)L	1.05D＋1.06(0.039)L
1.05D＋1.07(0.044)L＋0.73(0.063)T	1.05D＋0.99(0.032)L＋0.82(0.043)T
1.05D＋1.93(0.246)E	1.05D＋2.02(0.215)E
1.05D＋0.37(0.123)T＋1.83(0.220)E	1.05D＋0.50(0.097)T＋1.89(0.184)E

表-4　モンテカルロ法（極値Ⅲ型で当てはめ）による荷重係数

Longitudinal model	Transverse model
1.05D＋1.07(0.026)L	1.05D＋1.04(0.036)L
1.05D＋1.04(0.041)L＋0.80(0.041)T	1.05D＋0.99(0.041)L＋0.74(0.040)T
1.05D＋2.00(0.300)E	1.05D＋2.12(0.242)E
1.05D＋0.08(0.149)T＋1.87(0.257)E	1.05D＋0.24(0.120)T＋1.96(0.219)E

表-5　数値積分を用いた方法による荷重係数

Longitudinal model	Transverse model
1.05D＋1.11L	1.05D＋1.06L
1.05D＋1.06L　　＋0.78T	1.05D＋1.00L　　＋0.73T
1.05D＋2.18E	1.05D＋2.19E
1.05D＋0.38T　　＋2.03E	1.05D＋0.43T　　＋2.03E

(3) 考察　モンテカルロ法では，死荷重と組み合わせる荷重が一種類のとき，その組み合わせる荷重と同じ種類の確率分布で近似する方が，確率特性をより正確に反映でき，求められる荷重係数が数値積分による値に近くなる（表-3のD+L，表-4のD+E）。しかし，死荷重と組み合わせる荷重が二種類以上になると，むしろ対象とする荷重の確率分布以外の確率分布で当てはめを行った方が良い結果を与えており（表-3のD+T+E，表-4のD+L+T），どの確率分布で当てはめるべきかは，もとの確率分布の特性だけからは判断できない。一方，数値積分により限界状態確率を求める方法は，各荷重の確率特性を的確に表現でき，荷重係数を評価する上で有効であると思われる。

(4) 限界状態確率のばらつき　表-5の荷重係数を用いて設計された橋軸直角方向モデルの，限界状態確率を算出して図-2に示す。σ_aとσ_yの2つの応力レベルについて着目断面での限界状態確率を算出し，それらのうちの最大のものを構造物の限界状態確率としてプロットした。また許容応力度法により設計した構造物の限界状態確率を併記した。応力レベルがσ_yの場合では，LRFDの方が許容応力度法に比べてばらつきも小さく目標値に近い値をとっている。応力レベルがσ_aの場合は，LRFDの方がばらつきが大きくなっているように見えるが，本研究の特徴である目標値からのばらつきを小さくするという点から考えると，LRFDの方が最適化されていることが分かる。

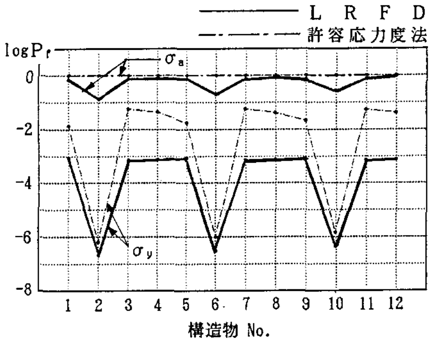

図-2 限界状態確率

（謝辞）本研究を行うにあたり，御指導頂いたPrinceton大学 篠塚正宣教授に謝意を表します。

参考文献　1) Shinozuka,M., Proc. of IABSE Symposium, pp.65-69, Sept.,1986, Tokyo.
2) 川谷・久保・古田・北沢・篠塚: 第9回設計における信頼性工学シンポジウム論文集, pp.87-92, 1989.11.
3) 阪神高速道路公団: 限界状態設計法における荷重係数の算定方法に関する検討報告書, 1988.3.
4) 北沢・久保・明田: 土木学会第42回年次学術講演会講演概要集, I-143, 1987.10.