

1. はじめに 材料強度にかかる安全係数を規定する許容応力度設計法に対し、荷重ごとに異なる係数を規定する荷重係数設計法が、設計法として最近注目されている。しかしながら、その荷重係数のもつ理論的根拠は現在のところ必ずしも明確になっていない。そこで本研究では、荷重係数設計法の照査式を満たす事象の起こる確率(考慮確率 P_c)と、満たさない事象の起こる確率(棄却確率 P_u)という新しい概念を導入することにより、荷重係数の理論的考察を試みた。また近い将来、許容応力度設計法から荷重係数設計法に移行する可能性があることを考え、現行許容応力度設計法で設計された実橋に対して荷重係数設計法を適用した場合の、荷重係数のキャリブレーションの媒体として、前述の考慮確率 P_c ・棄却確率 P_u を利用することを試みた。

2. 設計照査式 設計における設計値として、材料強度 R 、死荷重 D 、活荷重 L を考えた場合、荷重係数設計法の照査式は、次式で表わされる。

$$\phi \cdot R \geq \gamma_0 \cdot D + \gamma_L \cdot L \text{-----}(1)$$

ここに、 ϕ 、 γ_0 、 γ_L はそれぞれ、材料係数、不確定係数、死荷重係数、活荷重係数である¹⁾。実現象における確率変量を、材料強度 r 、死荷重 d 、活荷重 l とし、 $\gamma_0 = \gamma_0 \cdot \gamma_0 / \phi$ 、 $\gamma_L = \gamma_L \cdot \gamma_0 / \phi$ 、 $\alpha = R/L = r/l$ 、 $\beta = D/L = d/l$ とあくと、設計式(1)は、 $\alpha = \gamma_0 \cdot \beta + \gamma_L$ ----- (2) となる。

式(2)の等号は図1において、傾きが γ_0 、切片が γ_L の直線に対応することがわかる。 α 、 β の確率密度関数を $f(\alpha)$ 、 $G(\beta)$ とし、図1の第1象限に $f(\alpha) \times G(\beta)$ の確率平面を考え、生起確率の等しい点を結び、等確率密度曲線が描ける。図1において、領域Ⅰは設計式(1)、(2)を満足している事象、すなわち設計時に考慮された事象の起こる確率平面である。そこで、この領域Ⅰの確率を「考慮確率 P_c 」と定義する。また領域Ⅱは設計式(1)、(2)を満足していない事象、すなわち設計時に考慮されずに棄却された事象の起こる確率平面である。そこで、この領域Ⅱの確率を「棄却確率 P_u 」と定義する。図2は図1を3次元空間で表わしたものである。

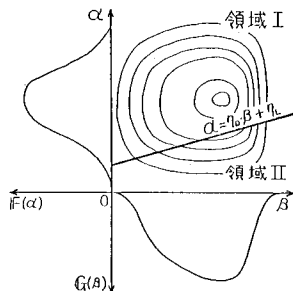


図1. 等確率密度曲線

3. キャリブレーション この節では現行許容応力度設計法で設計された実橋に対するキャリブレーションを試みる。実橋での測定データより、 r 、 d の確率密度関数 $R(r)$ 、 $D(d)$ を正規分布、 l の確率密度関数 $L(l)$ を指数分布とし、それらの変動係数と標準偏差を考慮して、 $\phi = 0.83$ 、 $\gamma_0 = 1.00$ とした。また γ_L は1.10とした¹⁾。その結果、 $\gamma_0 = \gamma_0 \cdot \gamma_0 / \phi = 1.33$ が得られる。現行許容応力度設計法では $\gamma_0 = \gamma_L = 1.70$ であるので、 $\alpha = 1.70\beta + 1.70$ なる直線を図3のように等確率密度曲線上に描き、この直線より下の領域の確率(棄却確率 P_u)を求める。次に傾きが $\gamma_0 = 1.33$ で棄却確率 P_u が先に求めた現行許容応力度設計法の P_u と等しくなるような直線を求める。求めた直線の切片を、現行許容応力度設計法と棄却確率 P_u が一致するようにキャリブレーションされた γ_L であると解釈する。これを「現行許容応力度設計との合理性の一致」と理解する。また応力度を等しくする場合、設計式 $1.70 \times (D+L)$ と $\gamma_0 \cdot D + \gamma_L \cdot L$ の値が等しければ同じ設計断面となる。つまり、 $\gamma_0 = 1.33$ とし、 $1.70 \cdot (D+L) = 1.33 \cdot D + \gamma_L \cdot L$ とす

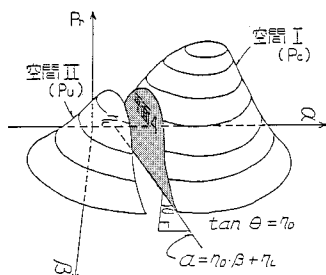
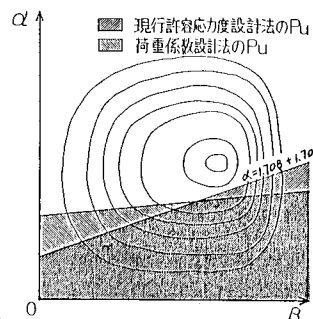


図2. 確率空間と設計照査式の関係

図3. P_u を合わせるように引いた直線

ると、 $\eta_L = 0.37\beta + 1.70$ ----- (3) が得られる。この η_L は、現行許容応力度設計法と経済性が一致するようにキャリブレーションされた η_L であると解釈できる。

4. 結果 材料強度 r 、活荷重 l 、死荷重 d の分布を与える各数値を実データに適合するように与えた結果を表1に示す。この分布を用いて、2.で述べた等確率密度曲線を作成し、現行許容応力度設計法を表わす直線($\alpha = 1.70\beta + 1.70$)を等確率密度平面図上に描く。一例としてA₁橋における結果を図4に示す。図4においては、 $0 \leq \alpha \leq 3$ の範囲を拡大して描いてある。また図中の数字は、 7 は 10^{-7} の確率を示している。この等確率密度平面図から実橋の現行許容応力度設計法による棄却確率 P_U を求めた結果が表2である。慣用的に使用されている破壊確率 P_F もあわせて表2に示した。本来、破壊確率算出の際は分布の裾野の形状がその値に大きく影響するので、実データと分布の裾野が合うように決めた確率密度関数を用いるべきだが、参考のため、棄却確率との対比を考え棄却確率算出時と同じ高頻度部分を合わせた確率密度関数を用いて求めた破壊確率も表2に載せてある。また3.で述べたキャリブレーションの方法により、現行許容応力度法へのキャリブレーションの結果を表3に示す。

表 1. 各確率密度関数のパラメータ

分布	分布式	パラメータ	A ₁ 橋	A ₂ 橋	B 橋	C 橋
材料強度	正規分布	$R(r)$	平均値 μ_r 2998	2998	3729	2998
			標準偏差 σ_r 353	353	282	353
			変動係数 C_v 0.12	0.12	0.076	0.12
活荷重	指数分布	$L(l)$	平均値 μ_l 66.09	60.83	53.19	34.73
			シト量 S_H 256.2	254.2	193.9	126.8
		設計荷重による応力度 $\bar{\sigma}_l$	84.3	85.0	123.5	50.5
死荷重	正規分布	$D(d)$	平均値 μ_d 53	53	153	268
			標準偏差 σ_d 0.95	5.67	2.76	4.82
			変動係数 C_v 0.018	0.018	0.018	0.018
		図面より算出した応力度 $\bar{\sigma}_d$	53	53	153	268

表 2. 現行許容応力度設計法による棄却確率 P_U と破壊確率 P_F

	棄却確率 P_U	破壊確率 P_F	
		高頻度部分合わせ	裾野部分合わせ
A ₁ 橋	1.603×10^{-6}	3.336×10^{-10}	2.617×10^{-9}
A ₂ 橋	1.389×10^{-3}	9.232×10^{-9}	9.291×10^{-9}
B 橋	3.786×10^{-8}	3.130×10^{-20}	3.130×10^{-20}
C 橋	3.929×10^{-5}	7.780×10^{-11}	3.910×10^{-9}

5. 考察 表3より棄却確率 P_U を一致させた時と、応力度を一致させた時の η_L と β の関係を図示すると図5のようになる。棄却確率 P_U を合わせた場合は、プロットから直線の式 $\eta_L = 1.50\beta + 1.70$ ----- (4) が得られる。一方、応力度を一致させた場合の直線の式は、式(3)より $\eta_L = 0.37\beta + 1.70$ である。図5から同じ β ならば、棄却確率を一致させた η_L より応力度を一致させた η_L の方が常に小さくなることが分る。 $\eta_L = 1.33$ で統一しているので計算応力度は、棄却確率を一致させた場合の方が大きくなり、現行許容応力度設計法より不経済となることが分る。これが表3の応力度の増加につながっているわけである。すなわち、合理性を現行許容応力度法と一致させると荷重係数設計法の方が不経済になり、その割合は β が大きくなるに従って増加する。

6. おわりに. 本研究では、合理性あるいは経済性を個々の実橋について現行許容応力度法と合わせるということを目標として検討を進めてきた。その結果、 η_L が構造物や部材によって変化するという結果を得たのであるが、一見バラバラのように見える η_L も β をパラメータにすることによって関係をつかむことができた。さらに、棄却確率 P_U をキャリブレーションの媒体として用いることができることも確認できた。

参考文献

- 1) 日本道路協会：荷重係数設計法について，道路，1979.6.
- 2) 国広・藤原・小笠原：建設省土木研究所資料，第960号，1974.9.
- 3) 西村：鋼材の機械的性質のばらつきについて，JSSC,VOL.5,NO.38，1969.
- 4) 伊藤：外力と構造物の安全性，JSSC,VOL17,NO.179，1981.

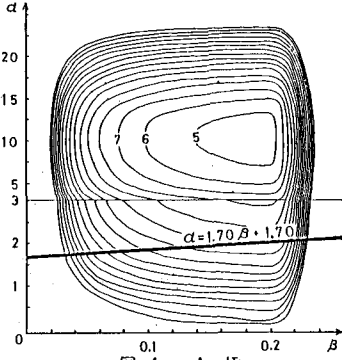


図 4. A₁ 橋

表 3. 結果のまとめ

	$\beta = \frac{P}{R}$	棄却確率 P_U	P _U 一致(合理性一致)				応力度一致(経済性一致)			
			η_L	η_L	応力度増加率 P_F	η_L	η_L	設計応力度増加率 P_F	η_L	設計応力度増加率 P_F
A ₁ 橋	0.04912	1.603×10^{-6}	1.33	1.77	2.9 %	1.33	1.72	28.6 %		
A ₂ 橋	0.2895	1.389×10^{-3}	1.33	2.11	13.8 %	1.33	1.81	47.5 %		
B 橋	0.1059	3.786×10^{-8}	1.33	1.97	12.3 %	1.33	1.74	61.6 %		
C 橋	0.4460	3.929×10^{-5}	1.33	2.38	21.0 %	1.33	1.87	49.3 %		

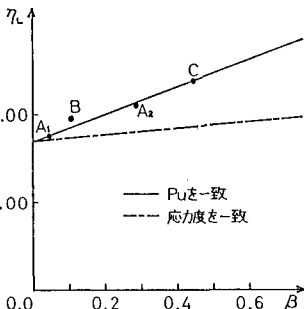


図 5. η_L と β の関係