

信頼性工学的手法による構造物の動的応答倍率の一算定法

広島工業大学工学部 正員 ○ 中山 隆弘
大阪大学工学部 正員 小松 定夫

1. まえがき 衝撃係数やガスト応答倍率などの動的応答倍率は、一般に動的応答の最大値と静的応答値との比で定義され、それらはそれぞれ道路橋の示方書や本四の耐風設計指針などの中に具現化されている。たゞこの種の動的倍率の不備が重大な事故につながった事例が従来なかったためか、これまで動的倍率と構造物の信頼性レベルとの関係が定量的に論じられたことはほとんどなかったようである。本研究はこのような状況と、確率論あるいは信頼性理論を積極的に構造設計に活用しようとする最近の動向¹⁾を踏まえ、構造信頼性レベルとの対応を説明できるような動的応答倍率の算定法を見出すために実施されたものである。ここでは動的信頼性理論に基づく算定法のプロセスと、若干の数値計算結果を提示する。

2 動的応答倍率の算定法 わが国でも近い将来、いわゆる限界状態設計法の概念が設計に導入される可能性が強いと判断し、本研究では設計規範を式(1)で与えた。荷重の組合せとしてはいろいろ考えられるが、たとえば死荷重と交通荷重、あるいは死荷重と風荷重のように、1つの永久荷重と1つの変動荷重の組合せを考えてみると、 γ_c を1として、式(2)が成立する。さらに変動荷重による荷重効果 Q が静的成分 Q^s と動的成分 Q^d に分解でき、 Q^d は平方乗平均値(r.m.s.値) $\bar{\sigma}_a$ と定数 α により $Q^d = \alpha \bar{\sigma}_a$ と表わせるものとすれば、式(2)は式(3)のように書き改められる。次に式(3)を式(4)のように整理して式(5)で動的応答倍率 A を定義し、式(6)を得る。さらにある確率量 U の公称値 U_k は超過確率より決まる定数 α_u によって平均値 $\bar{U}$ と、 $U_k = \alpha_u \bar{U}$ のように関係づけられるから、式(6)は式(7)のようになる。

さて、式(7)の等号条件をとり、式(8)が成立するように設計を行なったときの構造物あるいは構造部材の破壊確率 $P_f \in E$ 、ここでは目標とする信頼性レベルを表わす指標とする。 A に着目して式(8)を式(9)のように変形し、それぞれ式(10)、式(11)、式(12)、式(13)で定義される無次元パラメータ $\bar{m}$ 、 n 、 g_s 、 g_d を用いると式(14)が得られる。また式(15)も成立する。

いま永久荷重の統計的ばらつきは無視できるほど小さいものとし、抵抗力の変動係数を δ_s 、変動荷重の作用時間 cd を動的荷重効果の代表的振動数を用いて無次元化したパラメータ ϵcd^* とすれば、この種の組合せ荷重を受ける構造物の初通過破壊確率 P_f は、 $\bar{m}$ 、 n 、 δ_s 、 ϵcd^* の関数で与えられる。²⁾したがって δ_s 、 ϵcd^* 、 g_s および g_d が既知であれば、 $P_f \in E$ 目標とする P_f とし、かつ式(15)を同時に満たす一組の $(\bar{m}, n)$ を求めることができる。そして、この $\bar{m}$ 、 n と g_s 、 g_d を式(14)に代入すれば、構造物に目標とする信頼性レベル($P_f \in E$)を与えるために必要な動的応答倍率 A がある

$$\gamma_c \left(\gamma_p Q_p + \sum_{i=1}^m \gamma_i Q_i \right) \leq \psi R \quad (1)$$

式中 Q_p : 特性値で与えられた静的荷重とみなせる永久荷重による荷重効果

Q_i : 特性値で与えられた変動荷重による荷重効果

R : 抵抗力の特性値

γ_p, γ_i : 荷重係数 ψ : 抵抗係数

γ_c : 荷重の組合せに関する係数

$$\gamma_p Q_p + \gamma_i Q_i \leq \psi R \quad (2)$$

$$\gamma_p Q_p + \gamma_i^s Q_i^s + \gamma_i^d \alpha \bar{\sigma}_a \leq \psi R \quad (3)$$

式中 γ_i^s, γ_i^d : 荷重係数

$$\gamma_p Q_p + \gamma_i^s \left(1 + \frac{\gamma_i^d \bar{\sigma}_a}{\gamma_i^s \bar{\sigma}_i^s} \alpha \right) Q_i^s \leq \psi R \quad (4)$$

$$A = 1 + \frac{\gamma_i^d \bar{\sigma}_a}{\gamma_i^s \bar{\sigma}_i^s} \alpha \quad (5)$$

$$\gamma_p Q_p + \gamma_i^s A Q_i^s \leq \psi R \quad (6)$$

$$\gamma_p \alpha_p \bar{Q}_p + \gamma_i^s A \alpha_i^s \bar{Q}_i^s \leq \psi \alpha_r \bar{R} \quad (7)$$

$$\gamma_p \alpha_p \bar{Q}_p + \gamma_i^s A \alpha_i^s \bar{Q}_i^s = \psi \alpha_r \bar{R} \quad (8)$$

$$A = \frac{1}{\gamma_i^s \alpha_i^s} \left(\psi \alpha_r - \gamma_p \alpha_p \frac{\bar{Q}_p}{\bar{\sigma}_{a_i}} \frac{\bar{R}}{\bar{Q}_i^s} \right) \frac{\bar{R}}{\bar{Q}_i^s} \quad (9)$$

式中 $\bar{\sigma}_{a_i}$: 平均値で与えられた変動荷重による動的荷重効果のr.m.s.値

$$\bar{m} = \frac{\bar{R}}{\bar{\sigma}_{a_i}} \quad (10) \quad n = \frac{\bar{Q}_p + \bar{Q}_i^s}{\bar{R}} \quad (11)$$

$$g_s = \frac{\bar{Q}_i^s}{\bar{Q}_p} \quad (12) \quad g_d = \frac{\bar{\sigma}_{a_i}}{\bar{Q}_p} \quad (13)$$

$$A = \frac{1}{\gamma_i^s \alpha_i^s} \left(\psi \alpha_r - \frac{\gamma_p \alpha_p}{g_d} \frac{1}{\bar{m}} \right) \left(1 + \frac{1}{g_s} \right) \frac{1}{n} \quad (14)$$

$$\bar{m} n = \frac{1 + g_s}{g_d} \quad (15)$$

一組の β , δ , α , α_s , α_r に対して決定することができよう。

3. **数値計算例** 動的荷重効果は定常正規確率過程の性質を示すものとして数値計算を行った。まず表-1は変動荷重による静的荷重効果 $\bar{Q}_s$ と永久荷重による荷重効果 $\bar{Q}_p$ との比 δ_s を 0.6, 変動荷重による動的荷重効果の r.m.s. 値 $\sigma_{\bar{Q}_d}$ と $\bar{Q}_p$ との比 δ_d を 0.3 とし特性値と平均値との比を表わすパラメータ $\alpha_p, \alpha_s, \alpha_r$ をそれぞれ 1.0, 1.3, および 0.834 (これは抵抗力が正規分布を示す場合で, 対数正規分布の場合には 0.844) としたときの動的応答倍率の計算結果である。

ただし δ_s, δ_d はそれぞれ 0.1 および 1000 である。また表中の R は抵抗力の確率分布形を示している。当然ではあるが, 表より構造物の目標信頼性レベルを上げるに従って動的倍率を大きくしなければならないことがわかる。また抵抗力が正規分布を示す場合には, 対数正規分布の場合に比較して, かなり大きい値を設定しなければならないことも理解できる。さらに a) と b) との比較により, 信頼性工学的観点から言えば, 動的倍率を荷重係数や抵抗係数と独立に論じることができないと言えるであろう。なお, 図-1 は抵抗力が対数正規分布を示す場合の結果を得るために用いた図で, 図中の実線は式(15)を満たす $\bar{m}$, n と P_f との関係を示している。

また図-2, 図-3, 図-4 はそれぞれ荷重係数 γ_p, γ_s および抵抗係数 ψ の変化に対する動的倍率の変化を示したものである。なお各係数の値の範囲は従来の研究成果³⁾を参考にした。さらに δ_s をパラメータとして, δ_d と動的倍率との関係を図-5 に示す。自明のとおり, A は δ_d の増加と共に漸増している。

4. **あとがき** 荷重係数などの安全係数, あるいは目標信頼性レベルの決定など, 問題は残されているものの, 本研究により, 信頼性工学的手法に基づく動的応答倍率の算定法の 1 つを見出すことができた。

(参考文献) 1) 例えば Ellingwood・Galambos・MacGregor Cornell: Development of..., U.S. Dept. of Commerce, SP-577, pp.44~95, June, 1980, 2) 小松・中山: 静的荷重と..., 土木学会論文報告集, 第 332 号, pp.25~33, 1983.4, 3) 例えば 木下・伊藤・藤野: 信頼性アプローチによる..., 土木学会第 33 回年講要集, I-150, pp.286~287, 1978.9, 長・小山: 鉄筋コンクリート構造物設計法の..., 土木学会論文報告集, 第 287 号, pp.115~125, 1979.7, 杉山・藤野・伊藤: データ数を考慮した..., 土木学会第 38 回年講要集, I-206, pp.411~412, 1983.9.

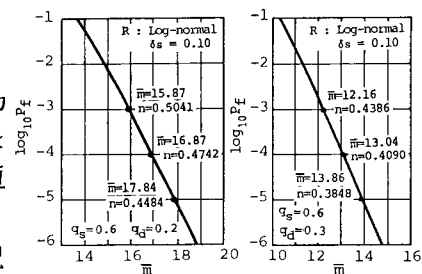


図-1 ($\bar{m}$, n) と P_f との関係

表-1 動的応答倍率

$\alpha_s = 0.6$, $\alpha_d = 0.3$

a) $\gamma_p = 1.2$, $\gamma_s^s = 1.6$, $\psi = 0.85$

P_f, t	R	Normal	Log-normal
1.0×1.0^{-3}		1.481	1.136
1.0×1.0^{-4}		1.713	1.287
1.0×1.0^{-5}		1.963	1.429

b) $\gamma_p = 1.1$, $\gamma_s^s = 1.5$, $\psi = 0.85$

P_f, t	R	Normal	Log-normal
1.0×1.0^{-3}		1.665	1.297
1.0×1.0^{-4}		1.913	1.459
1.0×1.0^{-5}		2.180	1.609

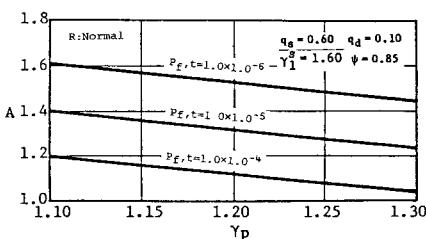


図-2 永久荷重に関する荷重係数と動的応答倍率との関係

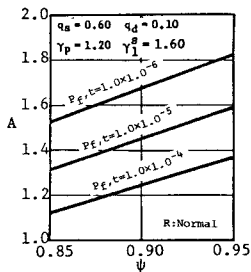


図-4 抵抗係数と動的応答倍率との関係

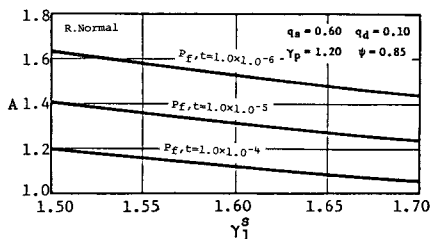


図-3 変動荷重に関する荷重係数と動的応答倍率との関係

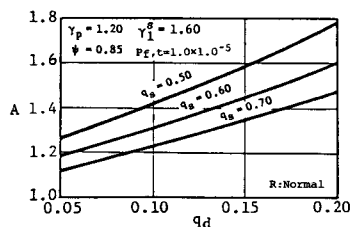


図-5 動的荷重効果/永久荷重効果と動的応答倍率との関係