

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 地震動や変動風などのような変動荷重を受けることが事前に予測される構造物の設計を、いわゆる動的応答倍率を用いることによって静的構造解析のみに変えることは多い。これは言うまでもなく設計過程をできるだけ簡便にするためであり、道路橋や鉄道橋の設計における「衝撃係数」、あるいは耐震設計における「設計震度」等の導入はその典型である。この種の動的係数は実験やシミュレーションの手法によって算定されるのが一般的であるが、動的係数と構造物の信頼性レベルとの定量的な関係が論じられたことは従来ほとんどなかったようである。換言すれば、構造物の強度、変動性や安全係数等に留意して、目標とする構造信頼性のレベルに応じた動的係数を決定する方法論が欠如していたとも言えるであろう。本報告はそれに対する1つのアプローチを示したものである。

2. 動的応答倍率の算定法 本研究では構造物の設計規範が式(1)で表わされるものとしている。式中 Q_p , Q_i はそれぞれ静的荷重とみなせる永続荷重(例えば死荷重)および変動荷重による荷重効果の特性値、 R は荷重効果と同じ次元で与えられる構造物の抵抗力の特性値、 ϕ_p , ϕ_i , ψ はそれぞれそれらに関する荷重係数あるいは抵抗係数、 ϕ は荷重の組合せに関する係数である。荷重の組合せとしてはいろいろ考えられるが、例えば死荷重と交通荷重、あるいは死荷重と風荷重などのように、1つの永続荷重と1つの変動荷重の組合せを考えると、 ϕ を1として式(2)が成立する。また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 に分解できるものとし、さらに Q^d を、例えば平方乗平均値(r.m.s.値) σ_{Q_i} のような代表値と適当な定数 α を用いて $Q^d = \alpha \sigma_{Q_i}$ と定義することによれば、式(2)は式(3)のように書き改められる。式中 ϕ^s と ϕ^d はそれぞれ変動荷重による静的荷重効果と動的荷重効果に含まれる種々の不確定性を補う荷重係数である。式(3)を整理して式(4)が得られる。式(4)の左辺に含まれる $\phi^d \sigma_{Q_i} Q / \phi^s Q^s$ の項は、例えて言うならば前述の「衝撃係数」に相当するものである。

いま式(5)で定義される A を ϕ^d と ϕ^s を含んでいるが故に)広義の動的応答倍率と呼ぶことにし、この A を用いて式(4)を表わせば式(6)のようになる。また一般にある確率量 U の特性値 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)のように書き直すことができる。

さて適当に定めた ϕ_p , ϕ_i^s , ψ , α_p , α_i^s , α_r と、以下に述べる方法で算定した A を用いて、式(7)の等号条件、すなわち式(8)が成立するような抵抗力を与えれば、不可抗力としの言いようのない不慮の事故や人為的ミスなどが無い限り、その構造物は所定の構造信頼度を保持できるものと考えられる。

$$\phi_p(Q_p + \sum_{i=1}^m \phi_i Q_i) \leq \psi R \quad \text{----- (1)}$$

$$\phi_p Q_p + \phi_i Q_i \leq \psi R \quad \text{----- (2)}$$

$$\phi_p Q_p + \phi_i^s Q_i^s + \phi_i^d \alpha \sigma_{Q_i} \leq \psi R \quad \text{----- (3)}$$

$$\phi_p Q_p + \phi_i^s \left(1 + \frac{\phi_i^d \sigma_{Q_i}}{\phi_i^s Q_i^s} \alpha\right) Q_i^s \leq \psi R \quad \text{----- (4)}$$

$$A = 1 + \frac{\phi_i^d \sigma_{Q_i}}{\phi_i^s Q_i^s} \alpha \quad \text{----- (5)}$$

$$\phi_p Q_p + \phi_i^s A Q_i^s \leq \psi R \quad \text{----- (6)}$$

$$\phi_p \bar{Q}_p + \phi_i^s \alpha_i^s \bar{Q}_i^s \leq \psi \alpha_r \bar{R} \quad \text{----- (7)}$$

$$\phi_p \bar{Q}_p + \phi_i^s A \alpha_i^s \bar{Q}_i^s = \psi \alpha_r \bar{R} \quad \text{----- (8)}$$

$$A = \frac{1}{\phi_i^s \alpha_i^s} \left(\psi \alpha_r - \phi_p \bar{Q}_p \frac{\bar{Q}_p}{\sigma_{Q_i}} \frac{\bar{Q}_i^s}{\bar{R}} \right) \frac{\bar{R}}{\bar{Q}_i^s} \quad \text{----- (9)}$$

$$\bar{m} = \frac{\bar{R}}{\sigma_{Q_i}} \quad \text{----- (10)} \quad n = \frac{\bar{Q}_p + \bar{Q}_i^s}{\bar{R}} \quad \text{----- (11)}$$

$$\frac{1}{\bar{m} n} = \frac{\sigma_{Q_i}}{\bar{Q}_p + \bar{Q}_i^s} \quad \text{----- (12)}$$

$$A = \frac{1}{\phi_i^s \alpha_i^s} \left(\psi \alpha_r - \phi_p \bar{Q}_p \frac{\bar{Q}_p}{\sigma_{Q_i}} \frac{1}{\bar{m}} \right) \left(1 + \frac{\bar{Q}_p}{\bar{Q}_i^s} \right) \frac{1}{n} \quad \text{----- (13)}$$

$$\phi_s = \frac{\bar{Q}_i^s}{\bar{Q}_p} \quad \text{----- (14)} \quad \phi_d = \frac{\sigma_{Q_i}}{\bar{Q}_p} \quad \text{----- (15)}$$

$$\frac{1}{\bar{m} n} = \frac{\phi_d}{1 + \phi_s} \quad \text{----- (16)}$$

$$A = \frac{1}{\phi_i^s \alpha_i^s} \left(\psi \alpha_r - \frac{\phi_p \bar{Q}_p}{\phi_d \bar{m}} \right) \left(1 + \frac{1}{\phi_s} \right) \frac{1}{n} \quad \text{----- (17)}$$

$$P_r = f(\bar{m}, n, \phi_s, \phi_d^*) \quad \text{----- (18)}$$

$$P_{r,c} = f(\bar{m}, n, \phi_s, \phi_d^*) \quad \text{----- (19)}$$

まず動的応答倍率 A に着目して式(8)を式(9)のように変形する。式中の $\bar{Q}_d$ は、特性値 Q_d ではなく平均値 $\bar{Q}_d$ で与えられた変動荷重による動的荷重効果の代表値(例えばr.m.s.値)である。次に式(10)と式(11)でそれぞれ定義される無次元パラメータ $\bar{m}$ および N を導入する。 $\bar{m}$ は抵抗力の平均値と動的荷重効果の代表値との比、 N は静的荷重効果($\bar{Q}_p + \bar{Q}_d$)と抵抗力の平均値との比で、いずれも構造物の信頼度を支配する主要なパラメータである。式(10)と式(11)の定義式より、式(12)が成立することは明らかであり、また $\bar{m}$ と N を用いれば式(9)は式(13)のようになる。さらに無次元パラメータ δ_s および δ_d をそれぞれ式(14)および式(15)で定義し、それらを式(12)および式(13)に代入すれば、それらはそれぞれ式(16)および式(17)となる。

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、さらに抵抗力の変動係数を δ_r 、変動荷重の作用時間 t 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を ψ とすれば、文献(1)に示したとおり、この種の組合せ荷重を受ける構造物の信頼度 P_r は、 $\bar{m}$ 、 N 、 δ_s 、 δ_d の関数として与えられる(式(18))。したがって δ_s 、 δ_d 、 ψ および δ_r が既知であるとすれば、 P_r を所定の信頼度 $P_{r,c}$ にし、かつ式(16)をも満たす一組の $\bar{m}$ 、 N が、式(16)と式(19)とを連立させることにより得られる。そしてこの $\bar{m}$ 、 N と δ_s 、 δ_d とを式(17)に代入すれば、構造物に目標とする信頼度($P_{r,c}$)を与えるために必要な動的応答倍率 A を、ある一組の δ_p 、 δ_s 、 ψ 、 α_p 、 α_s 、 α_r に対して決定することができることになる。

3. 数値計算例 式(17)に含まれる荷重係数等の値については従来の研究結果²⁾を参考に設定し、さらに動的荷重効果は定常正規確率過程の性質を示し、抵抗力は正規分布に従うとして数値計算を行った。

まず変動荷重による静的荷重効果 $\bar{Q}_d$ と永久荷重による荷重効果 $\bar{Q}_p$ との比を表わすパラメータである δ_s を0.60、変動荷重による動的荷重効果のr.m.s.値 $\bar{Q}_d$ と $\bar{Q}_p$ との比である δ_d を0.1とし、荷重係数 δ_p 、 δ_s をそれぞれ1.20、1.60、目標破壊確率 $P_r(1 - P_{r,c})$ を 1.0×10^{-6} 、 1.0×10^{-5} 、 1.0×10^{-4} としたときの結果を、縦軸に動的増幅率 A 、

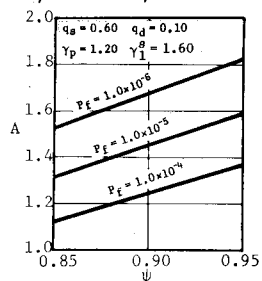


図-1 動的応答倍率 (抵抗係数との関係)

横軸に抵抗係数 ψ をとって示したものが図-1である。ただし α_p 、 α_s 、 α_r はそれぞれ1.0、1.3、0.834、 δ_s 、 δ_d はそれぞれ0.1、1.000としている。例えば P_r を 1.0×10^{-5} 、 ψ を0.85とすれば、 A は約1.32となる。同様に図-2、図-3はそれぞれ永久荷重に関する荷重係数 δ_p と変動荷重に関する荷重係数 δ_s と A との関係を与えるものである。さらに δ_s あるいは δ_p と A との関係を図-4に示しておく。自明のことではあるが、 A は δ_s の増加と共に漸増している。

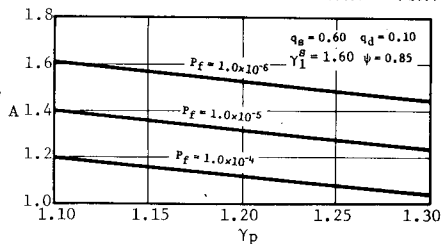


図-2 動的応答倍率 (永久荷重に関する荷重係数との関係)

4. あとがき 構造物の信頼性レベルとの対応を、荷重係数などの安全係数も考慮して統一的に説明できる動的応答倍率の算定法を示した。今後はこの方法を活用し、具体的な構造物の動的信頼性問題について考察してゆきたい。

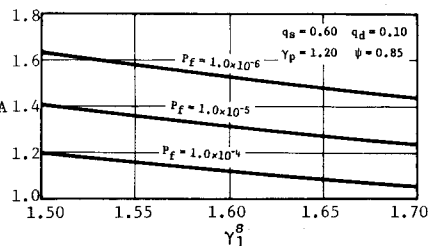


図-3 動的応答倍率 (変動荷重に関する荷重係数との関係)

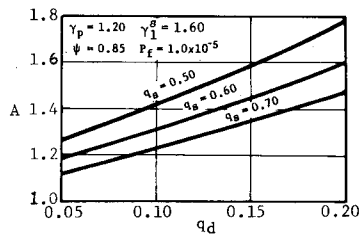


図-4 動的応答倍率 ((動的荷重効果)/(永久荷重効果)との関係)

(参考文献) 1) 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年4月 2) 例えばEllingwood・Galambos・MacGregor・Cornell: Development of…、U.S. Dept. of Commerce, SP-577, pp.44~95, June, 1980, 木下・伊藤・藤野: 信頼性アプローチによる…、土木学会第33回年講概要集, I-150, pp.286~287, 1978年9月, 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年7月 杉山・藤野・伊藤: データ数を考慮した…、土木学会第38回年講概要集, I-206, pp.411~412, 1983年9月