

変動疲労荷重による累積損傷を受ける RC 柱の信頼性理論

武蔵工業大学 正会員 吉川弘道
武蔵工業大学 学生会員 戸澤潤帆・丸本 智

1. はじめに

構造物の保有する部材耐力は、疲労荷重を受けることにより、時間とともに徐々に低下し、かつ、あるばらつきをもって存在する。一方、作用荷重も確率量となるので、構造物の信頼性は時間とともに変化する確率量として評価されるべきである。本研究は、偏心軸圧縮力を受ける RC 柱部材を対象に、この部材耐力と作用荷重をある確率密度関数によって表される確率変数と考え、構造物の使用期間における破壊確率を考察するものである。破壊確率の算定に際してはモンテカルロ法を用い、変動応力場での取扱については一般化マイナー数を用いる。

2. 一般化マイナー数と残存強度のモデル化

S-N 線式: まず、疲労寿命を表す S-N 線式は、上限応力 S_u により、

$$S_u = \gamma_1 - \gamma_2 \log N \quad \dots \dots \dots (1)$$

(γ_1, γ_2 : 定数)

のように表す。この上限応力 S_u は、実構造物では大小変動するが、その頻度分布を次式で表す¹⁾。

$$f_s(S) = C \exp \{-C(S_u - S_{min})\} \quad \dots \dots \dots (2)$$

係数 C が小さい程、 S_u が大なる域での頻度が小さくなり、ここでは、阪田らの検討結果¹⁾を用いる。

一般化マイナー数: 変動荷重を受ける場合に定式化された一般化マイナー数 M として、次式を用いる²⁾。

$$M = G(t) \int_{S_{min}}^{S_{max}} \frac{f_s(s)}{N(s)} ds \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここで、上限応力 S_u の最大値を S_{max} 、最小値 S_{min} (疲労限) を表し、 G は総作用回数を示す。このように、一般化マイナー数は、S-N 線式と作用応力の頻度分布及び総作用回数で定義され、累積損傷を表すものである。また、これを適当に離散化すれば、 $M = \sum \Delta n_k / N_k$ のように従来のマイナー数に帰着する²⁾。

コンクリートの残存強度: 変動疲労荷重を受けるコンクリートの圧縮強度は徐々に低下し、かつばらつきが大

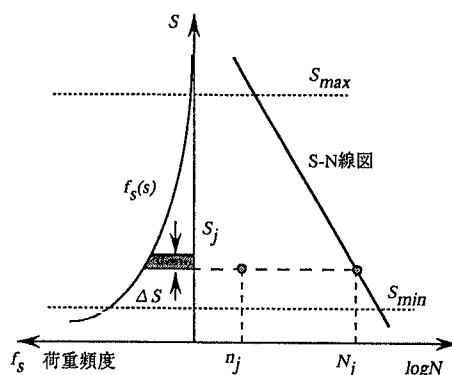


図-1 荷重頻度関数と S-N 線図

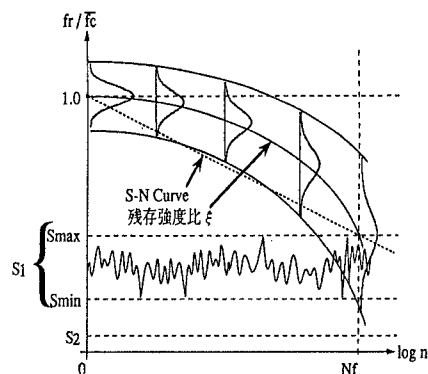


図-2 コンクリートの劣化モデル

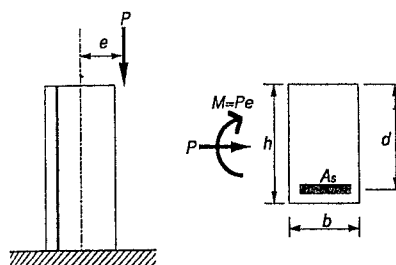


図-3 解析対象偏心圧縮部材

きくなる。残存強度の平均値 $\bar{f}_r$ の劣化モデルは著者らの実験結果³⁾を用い、次のように表す（ただし、 n/N をマイナー数 M に置き換えている）。

$$\xi(M, S_u) = \frac{\bar{f}_r}{f_c} = -(1 - S_u)M^\alpha + 1 \quad \dots \dots \dots (4)$$

さらに、上限応力 S_u が、 $S_{min} \sim S_{max}$ の間で変動し、式(2)の頻度分布に従うと考えると、最終的残存強度を次式のように表すことができる[4].

$$\bar{f}_r(M) = \bar{f}_c \frac{\int_{S_{min}}^{S_{max}} f_s(S_u) \xi(M, S_u) dS_u}{\int_{S_{min}}^{S_{max}} f_s(S_u) dS_u} \dots\dots\dots (5)$$

一方、残存強度のばらつきを表す変動係数については、一定振幅の実験結果から、次式とする.

$$\sigma_{cr}(M) = \lambda_1 M^\alpha + \lambda_2 \dots\dots\dots (6)$$

上式で用いられる材料定数については、限られた実験数であるが、 $\alpha = 5$ 、 $\lambda_1 = 25.75$ 、 $\lambda_2 = 0.658$ とする[3].

3. 解析対象と破壊確率

ここで、対象構造物として図-3のような偏心荷重を受ける RC 柱を例にとりその破壊確率を求める。
（偏心軸圧縮荷重 P ，偏心量 e とすると、軸力 $= P$ ，曲げモーメント $= P \cdot e$ なる荷重が作用する）。本研究は曲げ圧縮破壊モードを想定するため $e_c < e < e_b$ (c : コア作用点、 b : 釣合破壊点) を考える。諸荷重・耐力として、健全時の最大耐力力を P_{ult} 、残存耐力を P_r 、設計最大荷重を P_d とすると、これらは、

$$\text{建設当初: } P_{max} < P_d < P_{ult} \dots\dots\dots (7)$$

$$\text{供用期間: } P_{max} < P_d < P_r \dots\dots\dots (8)$$

のような大小関係にあると考える。従って、供用期間における信頼性は、確率量となる最大荷重 P_d と残存耐力力 P_r を対比することにより表される。このため、 $Z = P_r - P_d$ なる性能関数を定義する。そして、破壊確率 p_f は、 $Z > 0 \rightarrow$ 非破壊、 $Z \leq 0 \rightarrow$ 破壊から算出され、本研究ではモンテカルロ・シミュレーションを適用する。

4. 数値シミュレーション及び考察

以上の定式化に基づき、設計最大荷重 P_d およびその変動係数 V_{pd} をそれぞれ変化させ、また式(2)の C として3水準 ($C = 5/10, 4/10, 3/10$) を採用し、モンテカルロシミュレーションを実行した⁴⁾。図-4は、最大荷重 $P_d = P_{ult} \times 85\%$ ，変動係数 $V_{pd} = 5\%$ の場合についてのシミュレーション結果である。(a) は実際の総作用回数 G と破壊確率 p_f の関係を示したものである。荷重頻度分布係数 C が大きいもの(上限応力比が大きくなる程その頻度が小さくなる)ほど長寿命となり破壊確率 p_f の増加の仕方が緩やかであること

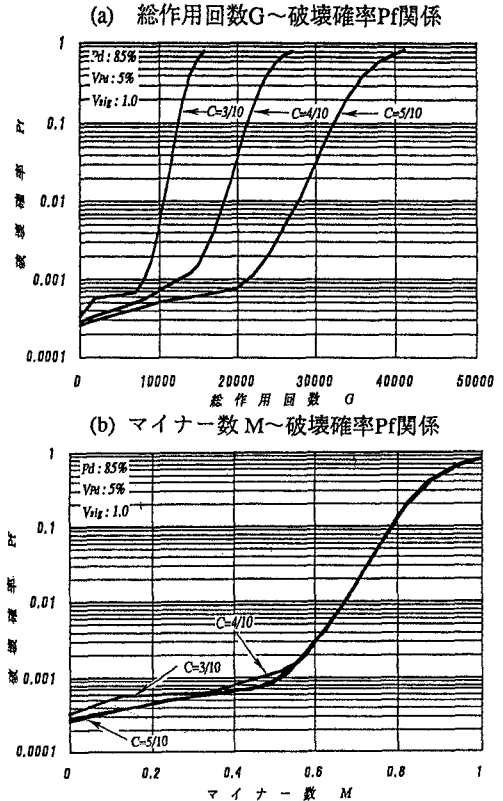


図-4 モンテカルロシミュレーションによる破壊確率の算定結果

がわかる。一方(b)は、マイナー数 M と破壊確率 p_f の関係を表したものである。破壊確率は $M = 0.5$ 付近から急激に増大するが、荷重頻度の分布形に依存せず一般化マイナー数 M により一義的に表し得ることがわかる。

参考文献

- 1) 阪田・矢村・西林: ランダム荷重を受けるコンクリートの疲労特性に関する研究、第7回 JCI 1985 pp.317 ~ pp.320
- 2) 吉川・中林・山内: 変動疲労荷重を受けるコンクリートのマイナー数の評価と破壊確率に関する基礎的研究(土木学会論文集(第5部門)投稿中)
- 3) 丸本・菅野・戸沢・吉川: コンクリートの耐力劣化(土木学会第50回(第5部門))
- 4) 戸沢: 変動荷重による累積損傷を受ける構造物の信頼性理論(平成6年度本学卒業論文)