Ⅴ-215　曲げを受けるRC梁の疲労寿命に関する信頼性解析

武蔵工業大学大学院　学生員　大井祥之
武蔵工業大学工学部　正会員　吉川弘道

1.まえがき

疲労強度は、コンクリート部材の限界状態の一つとして区分される重要な照査項目であるが、ばらつきの大きいことが設計作業の大きな障害となっている。本研究は、曲げ荷重を受ける鉄筋コンクリート梁を対象とし、引張主鉄筋の疲労強度を確率量としたときの破壊確率について考察するものである。

2.線形被害則に基づく疲労寿命の算定手法

RC梁中に配置してあるm本の鉄筋に線形被害則を適用し、最弱鉄筋から逐次破断させていき、梁全体が破壊するに至るまでの過程を考える。以下にそのモデル化と算定手順を示す。

①一定の最大、最小載荷荷重P_{max}、P_{min}がRC梁にそれぞれ交番荷重として作用したとき、残存する鉄筋に均一の最大応力σ_{max}、最小応力σ_{min}が発生する。すなわち荷重は鉄筋が等分に分担する。

②i-1本の鉄筋が破断した状態をi段階(i=1,2,3,・・・・m)とし、このときの応力振幅S_{ri}に対して、所定のS-N線図(松本ら[1]が行った異形鉄筋の単純引張空中疲労試験から導いた式)

$$\log S_r=20.13-4.188\log N \tag{1}$$

より、鉄筋がm-i+1本ある時の平均疲労寿命N_{fi}が求まる。

③残存するm-i+1本の鉄筋の疲労寿命N_{fij}は、logスケール上にて、正規分布するものとし、与えた平均値$m(\log N_{fij})$、変動係数$V_r(\log N_{fij})$に従うものとする。そして、最弱の疲労寿命のものから、j=i,i+1,・・・,mと順番づける(図-1)。

④i段階における繰返し回数をn_i、j番目鉄筋の累積損傷量をM_{ij}、損傷量の増分を$\varDelta M_{ij}$として次式のような線形被害則を適用する。

$$M_{ij}=\sum_{k=1}^{i}\varDelta M_{kj}=\sum_{k=1}^{i}(n_k/N_{fkj}) \tag{2}$$

⑤i段階において最弱の疲労寿命をもつ鉄筋を、線形被害則に基づき、破壊させる。すなわち$M_{ij}=1$が成立したとき、i段階は終了し、次のi+1段階に進む。

以上①～⑤がi段階における1つのループを示すもので各段階で鉄筋を1本づつ破壊させて、m段階まで繰返す。i=mが完了したとき、すなわち、全鉄筋が疲労破壊したときの繰返し回数の総和を、RC梁としての疲労寿命N_{fbeam}とする。そしてこのときm個の連立一次方程式が成り立ち、つぎのようなマトリックスで表現される。

$$\begin{pmatrix} 1/N_{f11} & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 1/N_{f21} & 1/N_{f22} & 0 & \cdots & 0 \\ \cdot & \cdot & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdots & & \cdot \\ 1/N_{fm1} & 1/N_{fm2} & 1/N_{fm3} & \cdots & 1/N_{fmm} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ n_m \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \cdot \\ \cdot \\ 1 \end{pmatrix} \tag{3}$$

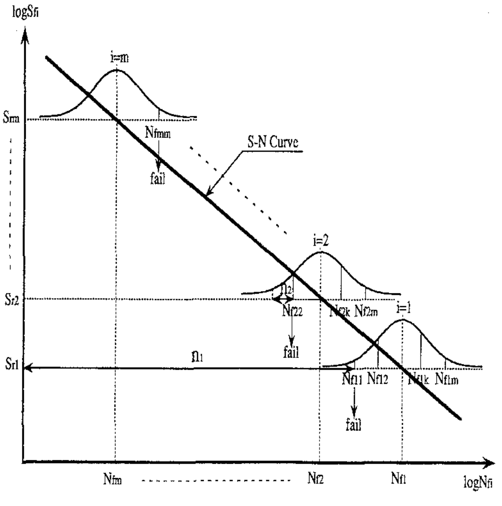

図-1　逐次破断モデルの概念図

3.モンテカルロ法による数値シミュレーション

配置されるm本の鉄筋の疲労寿命の大小は、各鉄筋に潜在している寿命(運命)によって決まると仮定する。そこで、本研究では、まず$X_{j(RND)}$(j=1,2,3,・・・・m)なる、基本値の割付けから出発する。基本値は、標準正規分布N(0,1)に従う、相互に独立(相関係数$\rho=0$)な実現値m個とする。ここで、標準正規に従う乱数の作成には中心極限定理を用いる。

そして、i段階j番目鉄筋の疲労寿命N_{fij}は、基本値を一次変数変換することによって次式で求められる。

$$\log N_{fij}=(V_r\cdot X_{j(RND)}+1)\cdot\log N_{fi} \qquad \therefore\ N_{fij}=N_{fi}^{\,(V_r\cdot X_{j(RND)}+1)} \tag{4}$$

また、i段階における繰返し回数n_iは連立方程式(3)を解くことにより求まる。したがって、RC梁としての疲労寿命N_{fbeam}は次式より求められる。

$$N_{fbeam}=n_1+n_2+n_3+\cdots+n_m=\sum_{i=1}^{m} n_i \tag{5}$$

4．シミュレーション結果および考察

以上のような設定で、$X_{j(RND)}$を唯一の確率的な変動値とした数値シミュレーションを行う。他のパラメータは全て表-1のような確定値として扱うものとする。

表-1　各種パラメータ

パラメータ		数値
P_{max}	最大載荷荷重	25 t(m=10本のとき)
P_{min}	最小載荷荷重	3 t(m=10本のとき)
ρ	相関係数	0, 0.5, 0.9999
V_r	変動係数	2,4,6,8,10 %
m	鉄筋本数	10,5,3,1 本
T	試行回数	10000 回

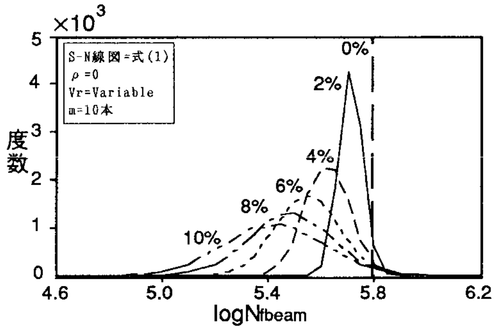

図-2 変動係数がRC梁の疲労寿命に与える影響

①変動係数が梁の疲労寿命に与える影響：各変動係数に対するRC梁の疲労寿命の度数分布を図-2に示す。ただし、相関は考えていない。得られた疲労寿命の分布形を正規分布と仮定した場合、その平均値は、S-N線図より求まる確定値(変動係数0%)、すなわち応力振幅S_{r1}に対する平均疲労寿命N_{f1}をすべて下回った。このことは、相関特性を導入したときにも同様のことが認められた。さらに、鉄筋単体のばらつきである変動係数を大きくしていくと、RC梁の疲労寿命の平均値はより低下し、変動も増加した。

②相関特性が梁の疲労寿命に与える影響：相関特性を導入したときのRC梁の疲労寿命を図-3.aに示す。図-3.bは変動係数6%における逐次破断の様子を示すもので、横軸はj番目鉄筋の疲労寿命をRC梁の疲労寿命で除して無次元化した値である。図-3.aより、相関性が強いものほどRC梁の疲労寿命は大きくなり、より確定値に近づく。しかし、図-3.bより、その破壊のしかたは1本の鉄筋が破壊すると、たちまち残存鉄筋が破壊するといった連鎖破壊型の現象が見られる。

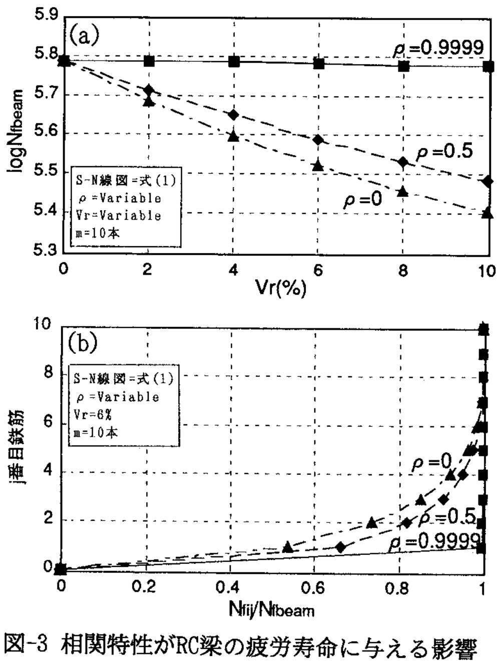

図-3 相関特性がRC梁の疲労寿命に与える影響

③梁の疲労寿命に対する本数効果：RC梁中の鉄筋の本数をm=10本から、5本、3本、1本に変化させたときのRC梁の疲労寿命を図-4に比較した。m=10本あるときの載荷荷重、RC断面の大きさを1とし、鉄筋の本数が5本、3本、1本と減るにつれて、それぞれの大きさも0.5、0.3、0.1と変化させて、算出したものである。同図より、本数mが増加するに従ってRC梁の疲労寿命が低下していることがわかる。これは、疲労寿命に対する本数効果を示すもので、松本ら[1]の指摘を異なる手法で追認するものである。

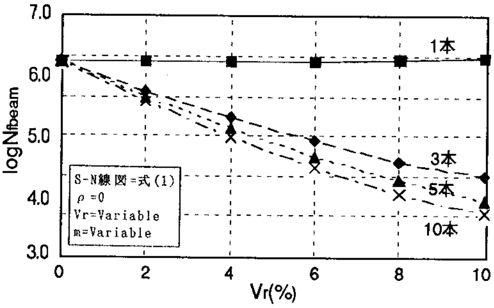

図-4 RC梁の疲労寿命に対する本数効果

【参考文献】

1)松本信之,山住克巳,宮本征夫:多本数の引張鉄筋を配置したRC梁の疲労寿命，コンクリート工学年次論文報告集，13-2,pp321-326,1991

2)星谷 勝,石井 清:構造物の信頼性設計法,鹿島出版会,1986