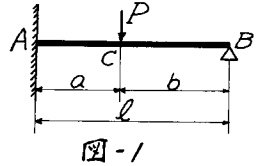


神戸大学 工学部 正員 西村 昭  
長大橋設計センター 正員 ○村 梁秀

1. まえがき 一般に、構造物の設計に際しては、不可避の不確定要素に対処するため、いわゆる安全率が導入される。この際、大きく分けて次のような2つの方法がある。すなわち、

- ① 材料安全率 =  $\frac{\text{基準強度(降伏応力など)}}{\text{許容応力度}}$
- ② 荷重係数 =  $\frac{\text{限界状態荷重(あるいは最大塑性強度)}}{\text{設計荷重}}$

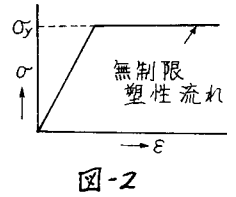


①は許容応力度設計法に用いられ、②は終局強度設計法に用いられるものである。

これらの設計法は、その根拠を有す思想が全く異なるが、いずれも実荷重を受けられた場合の安全性を確保しようとする点は共通する。その意味から、両安全率間の相関性を明らかにしておく必要がある。ことに、①の材料安全率は、永年にわたる経験の裏付けを有するものであり、少なくとも現在までに設計されてきた構造物の安全性を確保してきた事実を重視してよいと見なすものである。

そこで、本研究においては、両者間の相関性を破壊確率を通じて明らかにするため、図-1のような梁について基礎的研究を行なったのである。本研究では、後述のように最終的な破壊状態のみを対象とするだけでなく、それに至るまでの各段階を順次取り挙げた。

2. 強度および荷重の確率分布 考えうる不確定要素のうち、強度と荷重を確率変数として取り挙げる。構造材料として鋼材SS41(降伏応力度 $\sigma_y$ の平均値 $E(R) = 2965 \text{ N/cm}^2$ 、標準偏差 $\sigma(R) = 322.6 \text{ N/cm}^2$ )と考へ、 $\sigma_y$ は対教正規分布に従うとした。また、応力-ひずみ曲線は図-2を仮定した。



次に、荷重は図-1のように一点荷重の集中荷重とし、荷重位置は不変と考へ、その大きさは交通車両輪荷重の実測結果(平均値 $E(S) = 3114 \text{ kg}$ 、標準偏差 $\sigma(S) = 1757 \text{ kg}$ )をもとに対教正規分布に従うとした。また、設計荷重 $P^*$ としては、 $P_n = E(S) + n \cdot \sigma(S)$ と考へ、 $n = 1, 2, 3$ の3つの場合を考へた。

3. 崩壊形式と破壊確率 図-1でA点の曲げモーメントとC点のせん断力は、A点の方が大きい場合を考へることとし、図-1において $l = 10.0 \text{ m}$ 、 $a = b = 5.0 \text{ m}$ を用いた。すなわち、A点、C点の順で塑性ヒンジが生じ最終的に崩壊すると考へた。この際、終局強度設計法では図-1のほりにA点に塑性ヒンジが生じ、モーメントの再配分が起こった後、最終的にC点が終局状態に達することを設計基準と考へるが、ここでは、その前の段階として図-1のほりにおいて、モーメントの再配分までを考へずA点が終局状態に達することを基準と考へたものを導入し、これを基準とする設計法を便宜上、準終局強度設計法とよぶことにし、その安全率を $\alpha$ 、前述の普通の終局強度設計法における安全率を $\beta$ とする。また、許容応力度設計法では、図-1のほりにおいてA点が降伏状態に達することを基準に材料安全率を導入するものとし、その安全率を $\gamma$ とする。

また、破壊確率を仮義に解釈し、段階的に生ずる降伏状態あるいは終局状態に対してA点が降伏状態をこえる確率、次いで終局状態をこえる確率、さらにモーメントの再配分が起こった後にC点が降伏状態をこえる確率、次いで終局状態をこえる確率を考へた。これと同時に、上梁のせん断力の状態に対する中央安全率(Central Safety Factor)も考へた。

以上のような各段階での破壊確率、および中央安全率を表わすのに、それぞれ $P_1-K1K2K3$ および $F1K1K2K3$

を用いる。添字 $K_1, K_2, K_3$ の位置には、考えている各段階に応じて次のよう記号を当てはめるものとする。すなわち、 $K_1$ の位置には、降伏状態には $y$ 、終局状態には $u$ ； $K_2$ の位置には、準拠する設計法に用いられる安全率、すなわち、前述の $\nu, \alpha, \beta$ のいずれかが入る。また $K_3$ の位置には、注目している点AあるいはCを記入し、Cの場合であれば、上述のようにA点で塑性ヒンジが生じた後のC点を意味することになる。

**4. 結果と考察** 図-3は設計荷重 $P^* = P (=EGS) + 1.0TS$ 、 $\nu = 1.70$ 、 $f = 1.50$  (矩形断面の形状係数)としたときのA点について、 $\alpha\%$ に対する $P_f \cdot y_{xA} / P_f \cdot y_{yA}$  および  $P_f \cdot u_{xA} / P_f \cdot u_{yA}$ 、さらに $\alpha\%$ に対する $F_{yxA} / F_{yYA}$  および  $F_{uxA} / F_{uYA}$  を示したものである。この図によると、 $\nu$ はA点の降伏状態を基準に考えた安全率であり、 $\alpha$ はA点の終局状態を基準に考えた値であるため、 $\alpha\%$ が材料の形状係数 $f$ に等しいとき、中央安全率の比は破壊確率の比と共に1.0になる。しかしながら、 $\alpha\%$ の変化に対する中央安全率の比は直線的に変化するのに対し、 $\alpha\%$ の変化に対する破壊確率の比は対数グラフ上ではほぼ直線に近いことから、指数的に変化している。さらに $\alpha\%$ に対し、 $F_{yxA} / F_{yYA}$  と  $F_{uxA} / F_{uYA}$  は全く等しく変化するのに対し、 $P_f \cdot y_{xA} / P_f \cdot y_{yA}$  に比べ  $P_f \cdot u_{xA} / P_f \cdot u_{yA}$  の方が変化の仕方が大きい。

次に、図-4は上記と同じ $P^*, \nu, f$ のときのC点について $\beta\%$ に対する $P_f \cdot y_{xC} / P_f \cdot y_{yC}$ 、 $P_f \cdot u_{xC} / P_f \cdot u_{yC}$  および  $F_{yxC} / F_{yYC}$ 、 $F_{uXC} / F_{uYC}$  を示したものである。これも図-3と同じく安全率の比の変化に対し、中央安全率の比は直線的に変化するが、破壊確率の比は指数的に変化する。しかしながら、これは許容応力度設計とエレメントの再配分が起ることを期待した普通一般の終局強度設計との比較であるため、明らかに $\beta\%$ が形状係数 $f$ に等しいときに中央安全率の比、破壊確率の比は共に1.0にはならず、1.0になるのは $\beta\%$ が $f$ より小さく大きくなるに依ってである。これらが示すように、終局強度設計法の安全率(荷重係数)は許容応力度設計法の安全率(材料安全率)を参考に形状係数を考慮に入れて選定することが出来る。

例えば、図-5は $P^* = P, \nu = 1.70$ として、 $f_1 = 1.50, f_2 = 1.12$  (I形断面の形状係数の平均値)の着場合に、A点について $\beta\%$ に対する中央安全率の比および破壊確率の比を示したものである。

次に、紙面の都合上、図は省くが安全率の比、すなわち $\beta\%$ あるいは $\beta\%$ の変化に対し、中央安全率の比の変化は $\beta\%$ の値によらないが、破壊確率の比の変化は $\beta\%$ の値によって異なり、 $\beta\%$ が大きいものは傾斜はより急となる。さらに、設計荷重として $P^*$ を大きくとったものほど、破壊確率の比の変化はより急となるが中央安全率の比の変化は $P^*$ の値によらない。

しかしながら、以上は荷重、強度の分布形として対数正規分布を用いたが、これらを用いる分布形によっても異なる。例えば、荷重、強度の分布形として共に正規分布を用いた場合であれば、

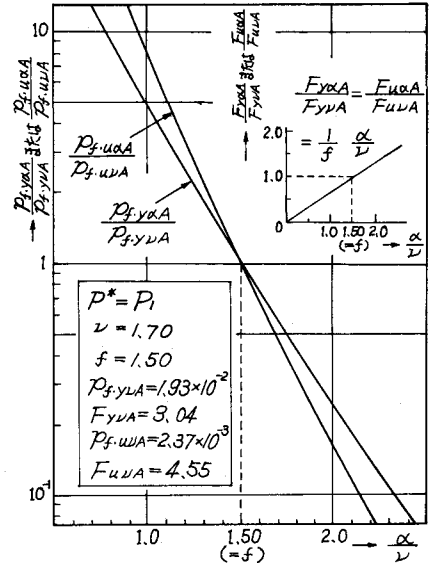


図-3

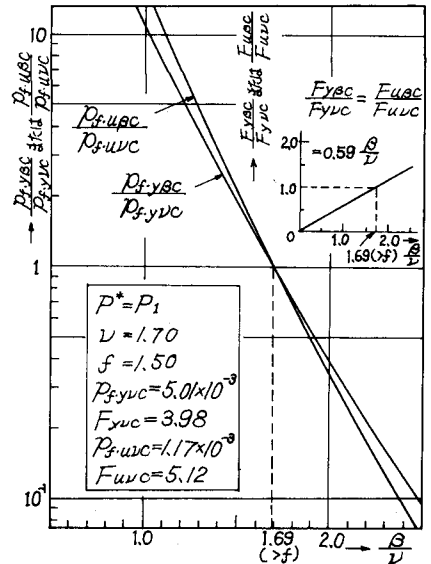


図-4

安全率の比の変化に対し、中央安全率の比の変化は前述の対数正規分布を用いた場合と全く同じように変化するが、破壊確率の比の変化は安全率の比の変化に対し、正規分布を用いた場合の方が傾斜はより急なものと成る。

5. 疲労に対する照査 一般に疲労度は、Minerの法則に基づき次式で示される。

$$\int \frac{N_c \times P_f(S)}{N(S)} ds \quad (1)$$

ここに、 $N_c$ は荷重の全繰返し回数であり、 $P_f(S)$ は $S$ の応力振幅の生じる確率、また $N(S)$ は $S$ の応力振幅での破壊繰返し数であり、式(1)が1.0に達したとき疲労破壊が起るものとしている。また、 $S$ と $N(S)$ との関係は $A, B$ を定数として

$$S = A \cdot \log_{10} N(S) + B \quad (2)$$

のように表わされるものとする。

このMinerの法則を適用して異なる設計法から得られる図-1の梁の疲労破壊の確率の相関性を検討する。簡単のため、強度の確率的变化は考えず、また強度は極限強度 $\sigma_B = 4518 \text{ kg/cm}^2$  ( $\sigma_B$ に対する平均値)を考慮する。さらに、断面の縁応力が $\sigma_B$ をこえるような荷重が作用すれば、無条件で破壊が起る訳であるが、ここでの疲労度の計算に当っては、 $\sigma$ を $n$ 回の載荷で疲労破壊をひき起こすような荷重と考えてMinerの法則を適用する。

具体的には疲労限度を $\sigma = 450 \text{ kg/cm}^2$ 、また $S$ を片振り応力とし荷重分布に前項の対数正規分布を用い、式(1)において $N_c = 1$ とすると、計算結果は全荷重の載荷/回当たりの疲労度の期待値を与えることになる。例えば、 $P^* = P_1$ 、 $\nu = 1.70$ 、 $f = 1.50$ のときに、許容応力度設計法で決められる断面のA点の疲労期待値 $MVA$ に対する、前述の単終局強度設計法の様なる安全率 $\alpha$ で決められる断面のA点の疲労期待値 $MaxA$ の比 $MaxA/MVA$ を、前項までの破壊確率の比と共に図-5に示した。この図が示すように、安全率の比の変化に対し、疲労期待値の比の変化は破壊確率の比を上回るこがわかる。

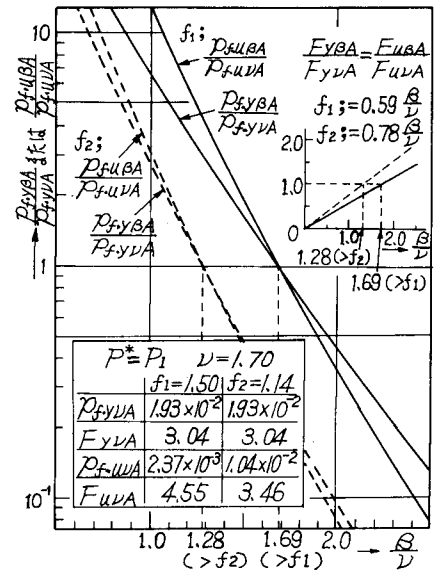


図-5

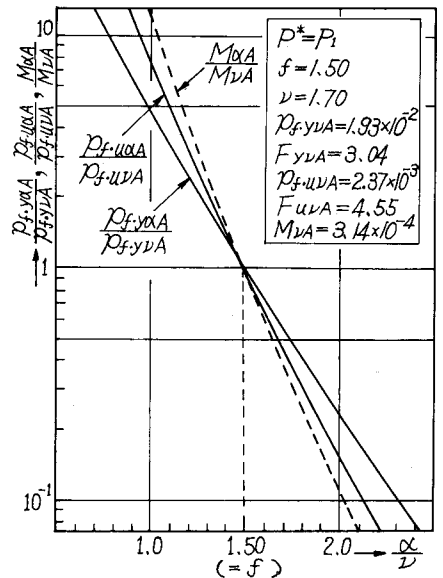


図-6

6. ちすび 単純な梁の場合を例にとりて、許容応力度設計法ならびに終局強度設計法による場合の破壊確率に基づいて、それぞれの設計法の安全率の相関性、および疲労破壊の面からの同相関性の検討を試みた。とくに曲げによる破壊性状を考えた単一の例下はあるが、安全率導入の背景が異なる場合に、それぞれの安全率と(各段階の)破壊確率との関係を計算によって示したが、その中でとくに断面の形状係数が重要な要素として考えられることが示された。これらのことは、永年の許容応力度設計法の経験と、終局強度設計法における荷重係数の選定に際し有効な情報として利用しようものと思われる。

なお、本文は発表者の修士論文(昭和48年3月)に基づいてまとめられたものである。