

神戸大学工学部 正会員 西村 昭
 (株)神戸製鋼所 “ 〇土居 憲司

1. まえがき

構造物、あるいは橋梁などの巨大化、長大化にともなう、死荷重増加の問題を解決する方法の一つとして、部材の軽量化があげられる。そのためには、利用しうる材料を、その特徴に応じて合理的に組み合わせ、複合部材として用いる方法が考えられる。その一例がハイブリッドガーダーである。複合部材としては、このハイブリッドガーダーのように鋼材のみより成るものに限ることなく、鉄筋コンクリートあるいは合成樹脂なども複合部材と考えることができる。このような異種材料から成る複合部材の設計に際しては、単一材の場合に比較して許容応力度の選定など、解決を要する点が多い。そのアプローチの方法の一つとして、構成各材料の強度、延性を確率論的に取扱い、部材として統一的な安全性の評価から出発することが考えられる。

ここでは、複合部材として、とくに軟鋼および高張力鋼から成る複合鋼部材に静的な引張力が作用した場合、その複合鋼部材の機械的性質をシミュレーション法により確率論的に評価する方法を示し、また従来CEB/FIPなどに用いられている材料強度特性値に基づく設計法に対しても考察を加え、複合鋼部材の設計上の基礎的資料を与えようとするものである。

2. 複合鋼部材のモデルとシミュレーション

図-1の複合鋼部材に外力Pが作用する場合、各鋼材をそれぞれ引張鉄試体規模の単位断面積をもつ要素に分割して図-2のようなRedundant parallel systemのモデルに置きかえる。したがって、各要素数を調整することにより各鋼材の断面積を任意に選ぶことができる。各要素は図-3に示されるような応力-ひずみ関係を有するが、それらを3つの確率変数 σ_y 、 σ_B および ϵ_B によって特徴づける。各要素に対する応力-ひずみ曲線は次式¹⁾で表わされるものとする。

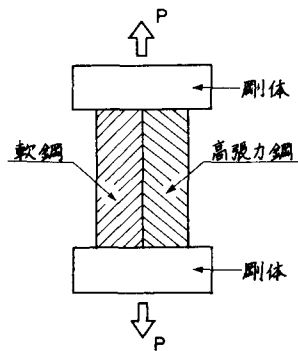


図-1 複合鋼部材のモデル

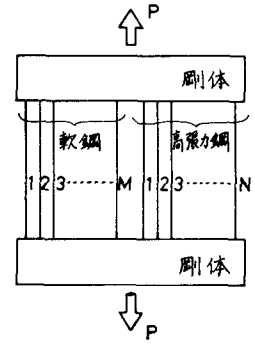


図 2 Redundant parallel system

弾性域 $\sigma = \epsilon \cdot E$ (1)

塑性域 $\sigma = \sigma_y + (\sigma_B - \sigma_y) [1 - e^{-(\sigma_B - \sigma_y)\epsilon_p}]^{\frac{2}{3}}$ (2)

ここに E:弾性係数, ϵ_p :塑性ひずみ = $\epsilon - \epsilon_y$

3つの確率変数(σ_y , σ_B , ϵ_B)が与えられれば、それに対する応力-ひずみ曲線式は、一意的に表わされることになる。

外力Pの増加により、横方向の連続性を無視し、1本の要素が破断した後、残りの各要素に対して応力の再分配が起こり、各要素は連鎖破断を起してシステム全体が破断するものと考えれば、要素1本が破断する直前の荷重をもって部材の最大耐荷力 P_{max} とすることができる。また、各要素をそれぞれ「weakest-link」モデルと考

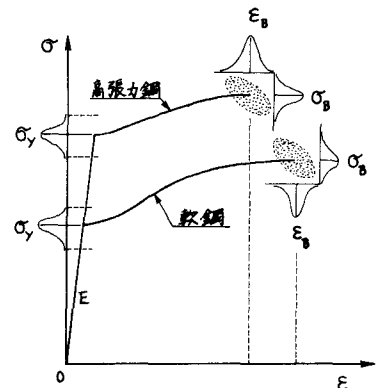


図-3 鋼材の応力とひずみのばらつき

例えば、1要素中の最も弱い部分(欠陥)での破壊によりその要素の破断が起るものと考えられる。また残留ひずみ0.2%を生じるような各要素の平均応力レベルを、部材の降伏点と仮定した。

筆者らが集めた各種鋼材のデータをまとめた結果²⁾、各確率変数 σ_y と σ_g の間には正の相関が、また σ_y と ϵ_g の間には負の相関がそれぞれ認められた。したがって、複合鋼部材の引張試験のシミュレーションでは、各確率変数を独立なものとして扱うのではなく、それぞれ相関性を考慮しながら乱数を発生させなければならぬ。シミュレーションに用いた方法および仮定などを要約すればつぎのとおりである。[i]図-1に示されるモデルを図-2のように置きかえ、各要素の応力-ひずみ曲線は式(1)および(2)で与えられる。ただし弾性係数はすべて等しく、 $E = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ である。[ii]各鋼材の引張試験から得られた機械的特性をもとに、各確率変数間に回帰線を利用しながら相関性を考慮し正規乱数を発生させる。[iii]各要素のひずみを調べることで、部材の耐荷力を計算し、要素1本が破断する直前の荷重を部材の最大耐荷力 P_{max} とする。以上の手法により、各種鋼材から成る複合鋼部材の各モデルについてそれぞれ1000回のくり返しを行なった。プログラムのフローチャートを図-4に示す。

SS41およびSM58から成る複合鋼部材についての計算結果を図-5および図-6に示す。

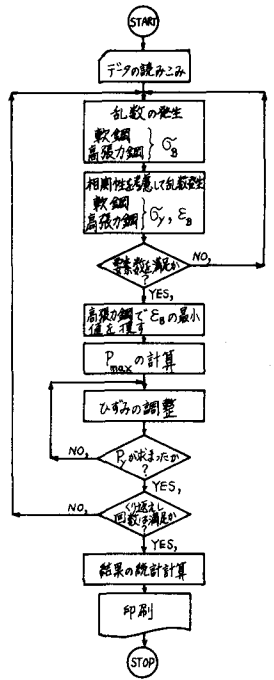


図-4 シミュレーションのフローチャート

3. 複合部材の信頼性

コンクリート構造物の設計を対象にCEB/FIPは、

限界状態設計法概念を導入して準確率的設計手法をまとめている³⁾。これによれば、材料の機械的性質を定める強度に対し特性値を定めている。

$$R^* = R_m - \alpha S \quad (3)$$

たとえば、鉄筋コンクリートの場合鉄筋とコンクリートの両者の強度に対し係数 α をともに等しく1.64(非超過確率5.05%)とあるよう提案している。しかしながら、特性値を決定する前に強度試験を行なうにしても、その母集団の平均値およびばらつきを正確に推定することはむ

ずかしく、したがってばらつきの大きな材料に対してはそれだけ多くの危険性があることを考慮する必要がある。また、このような強度およびばらつきが異なる異種材料から成る部材に対しては、両者の相対的ばらつきをも考慮して特性値を決定する必要がある。

鋼材のメックテスト値

鋼種	会社	標本数	降伏点(σ_y) (kg/mm ²)			引張強さ(σ_g) (kg/mm ²)			伸び (%)		
			平均値	標準偏差	変動係数	平均値	標準偏差	変動係数	平均値	標準偏差	変動係数
SS41	D	100	29.640	3.018	0.102	45.370	2.198	0.048	29.6	2.8	0.095
SM58	D	72	57.083	4.440	0.078	66.917	4.034	0.060	27.6	4.4	0.159

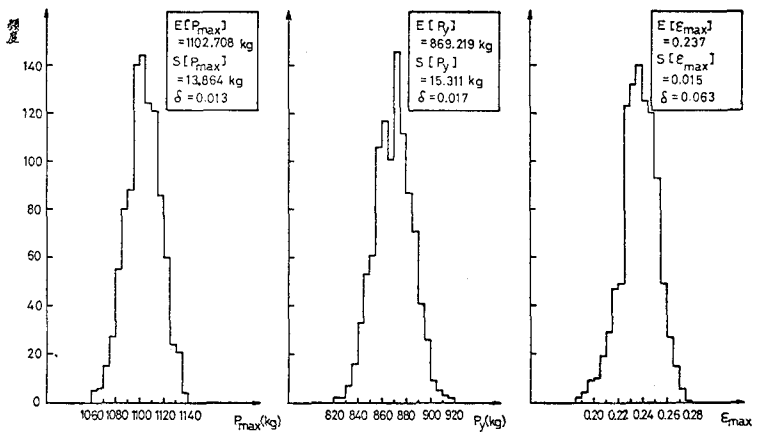


図-5 SS41:10本 & SM58:10本、くり返し回数:1000回、初期応力考慮なし

式(3)のような特性値を各材料のばらつきに応じて補正した,新しい特性値 R^0 をつぎのように導入する。

$$R^0 = R_m - \xi \cdot \gamma \cdot S = R_m (1 - \xi \cdot \gamma \cdot \delta) \quad (4)$$

ここに, $\xi = A^\delta$ ($A > 1$), また $\delta = S/R_m$ である。係数 γ については従来どおり使用される材料に対してすべて等しく 1.64 である。筆者らが集めたデータによれば, δ の値は降伏点についてはおよそ 0.04 ~ 0.12, また引張強さについては 0.02 ~ 0.09 である。いま各種要因を考慮しながら $A = e$ (自然対数の底) を採用すれば, R^* にかわって R^0 を用いた場合の非超過確率および γ の値は表-1 のようになる。

つぎに, 材料の強度を構造物の強度と仮定した場合, その特性値を許容応力とし荷重分布の特性値 Q^* ($= Q_m + \gamma S$) を制限荷重と決めれば, 制限荷重に安全率 S_F をかけたものが最大荷重となるので, 構造物の信頼性を計算することができる。従来の特性値 R^* と新しい特性値 R^0 を用いた場合の比較が図-7 に示されている。

4. あとがき

複合鋼部材に限らず複合部材の強度および安全性などを各材料の強度のばらつきを考慮しながら理論的に厳密に評価することは, その取扱いが複雑で困難となるが, シミュレーションを用いることによりある程度の評価はできるものと考えられる。ここに用いたモデルの設定にはなお問題点もあると思われるが, 複合鋼部材の強度試験のシミュレーションを行なう際の一手法を示した。これよりさらに複合鋼部材に曲げなどが作用する場合のシミュレーションも同様に考えることができる。

また, 材料強度が特性値以下となる確率を小さくするための合理的な方法として新しい特性値 R^0 を提案した。複合部材に用いられる各材料の強度特性値については, 従来の特性値にかわって, 各材料の相対的ばらつきを考慮した新しい特性値が必要になるものと考えられる。

参考文献

- 1) J.W. Fisher, "On the Behavior of Fasteners and Plate with Holes", J. of ST. Division, Vol. 91, No. ST6, ASCE, Dec., 1965.
- 2) 西村 昭, "鋼材の機械的性質のばらつきについて", JSSC, Vol. 5, No. 48, 1969, pp. 68~74.
- 3) CEB/FIP, "コンクリート構造物設計施工国際指針", 日本語訳, 鹿島出版会, 1970.

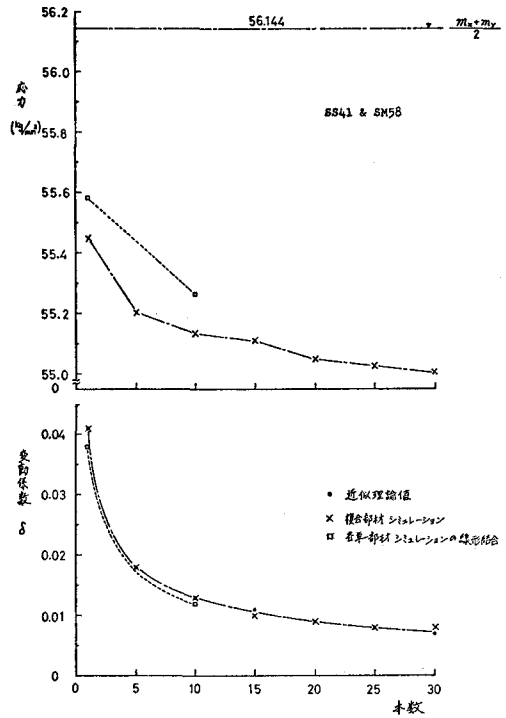


図-6 変数数が増加する場合の引張強さ ($\alpha=1$)

表-1 ($\gamma = 1.64 : 5.05\%$)

変動係数 δ	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12
ξ	1.02	1.04	1.06	1.08	1.11	1.13
$\xi \cdot \gamma$	1.67	1.71	1.74	1.77	1.82	1.85
非超過確率(%)	4.8	4.4	4.1	3.8	3.4	3.2

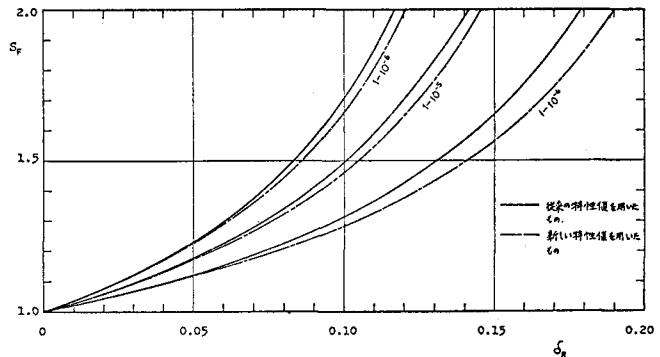


図-7 安全率と 係数の変動係数との関係