

コンクリート構造の部分安全係数の決定に関する研究

THE STUDY ON THE DETERMINATION OF THE VALUES OF PARTIAL SAFETY FACTORS ON CONCRETE STRUCTURES

小出英夫*・尾坂芳夫**

By Hideo KOIDE and Yoshio OZAKA

This paper presents a method to determine both every value of various partial safety factors and the range of a variety of concrete structures designed by applying these values, in order to establish a design code based on the Partial Safety Factor Design, taking account of both safety and economy. The method consists of two parts. The first part shows how to define partial safety factors satisfying safety on the condition that the values of the same partial safety factor for the same design variable don't have much disparity in different designs. Another part shows how to estimate a waste of economy caused by applying the same set of values of various partial safety factors to the designs of different concrete structures. In this estimation, we use "Fuzzy Set".

Keywords : Partial Safety Factor Design, partial safety factor, safety, economy, Fuzzy Set

1. まえがき

(1) 研究の目的

近年、土木構造物の設計概念は、コンクリート標準示方書¹⁾、鋼構造設計指針²⁾にみられるように、「許容応力度設計」から「限界状態設計」に移行し始めている。限界状態設計方法における各設計基礎変数にかかる部分安全係数値の組 γ は、 $g(\cdot)=0$ を満たす設計値と、目標限界状態到達確率 P_{fr} を満たす特性値との関係を定めるもので、従来は、既往の設計基準と同程度の構造物が設計されるように定められている。さらに、設計基準では、実用面から、対象とする設計空間をいくつかの部分空間（以下、「設計部分空間」とよぶ）に分割し、与えられた設計部分空間に含まれる個々の要素構造の設計（以下、「要素設計」とよぶ）には、共通の γ ($=\gamma_a$) を用いる。よって、本研究では、安全性を支配する破壊モードを1つに特定した静定構造物を対象とし、以下の2条件を満足する設計方法を提案する。

① γ_a は、設計部分空間に対応するすべての要素設

計（以下、「全要素設計」とよぶ）において、与えられた P_{fr} が確保されるように定める。

② 設計部分空間の範囲、およびそれと対応する γ_a は、経済性の最適化が図られるように定める。

(2) 既往の研究とその問題点

設計部分空間、および対応する γ_a の決定は、以下に示す3段階に分けることができる。それについて、既往の研究と問題点を述べる。

a) 設計部分空間の決定 γ_a の決定に関連した決定方法についての研究は、過去に行われていない。

b) 信頼性解析に基づく部分安全係数の与え方（定義）の決定 二次モーメント法³⁾があり、この方法は、個々の部分安全係数の値が限界状態式に関係するすべての設計基礎変数の確率的情報の影響を受けることを示している。また、設計値を限界状態式の線形化点とすることが提案されているが、同一の設計基礎変数にかかる部分安全係数の値が要素設計ごと大きくばらつき、 γ_a を決定する際に困難を生じる可能性がある。

c) γ_a の決定 複数の要素設計において、それぞれの限界状態到達確率 P_f が P_{fr} と等しくなる共通の γ は存在しない。そこで、 γ_a の決定は、各要素設計で共通の γ ($=\gamma_a$) を用いることによって生じる「むだ」を評価し、それをもとに行う必要がある。この決定に「総

* 正会員 工博 東北工業大学講師 工学部土木工学科
(〒982 仙台市太白区八木山香澄町35-1)

** 正会員 工博 東北大教授 工学部土木工学科
(〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)

れた非超過確率を満たす値をもって、実用上の部分安全係数とした。

(3) 各要素設計の安全性と、設計部分空間において共通の γ_a を用いることによって生じる経済性の“むだ”の両方を考慮した。この“むだ”は、Fuzzy 理論を用いて、定量的に評価した。また、 γ_a として仮定した γ の、Fuzzy 集合 “ γ_a として望ましい γ の集合” における帰属度の値をもとに、設計空間から仮定した設計部分空間への分割の良否の判断を行うことができた。

2. 設計基礎変数の確率モデル

(1) コンクリート圧縮強度 f'_c

全国各地で得られたコンクリート強度報告書から、同一配合で標準養生した円柱供試体の 28 日強度を同一母集団として整理した。母集団ごとサンプル数は約 50~500 個、圧縮強度平均値 m_c は 200~500 kgf/cm² で、125 の母集団が得られている。これによると、各母集団ごとの圧縮強度分布は、多くが対数正規分布の仮定が χ^2 検定により有意水準 5% で棄却されず、対数正規分布でモデル化できる。ここで、一般に用いられる $m_c \leq 400$ kgf/cm² 以下のコンクリートに関して、その変動係数 CV_c は 0.02~0.1 の範囲である。

設計において公称値である設計基準強度 f'_{cn} を指定しても m_c 、 CV_c の値はばらつく。そこで、以下の変数を新たに導入する。

$$\alpha_c = m_c / f'_{cn} \quad (9)$$

α_c 、 CV_c の頻度分布をそれぞれ図-1、図-2 に、 α_c と CV_c の関係を図-3 に示した。なお、用いたデータは、一般に良く用いられる $160 \leq f'_{cn} \leq 300$ kgf/cm² のコンクリート、とした。 α_c 、 CV_c は非負で、対数正規分布を定

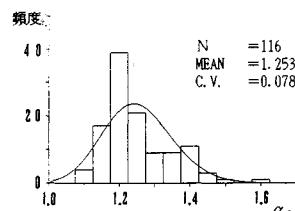


図-1 α_c の頻度分布

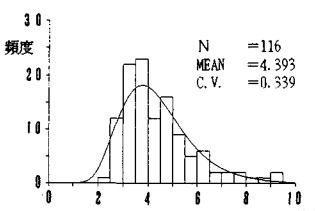


図-2 CV_c の頻度分布

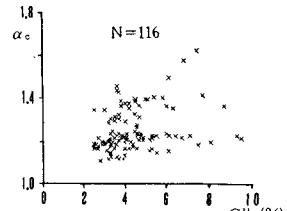


図-3 CV_c - α_c 関係

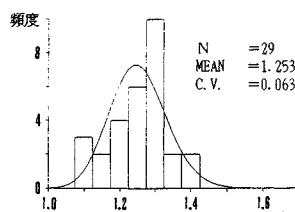


図-4 α_y の頻度分布

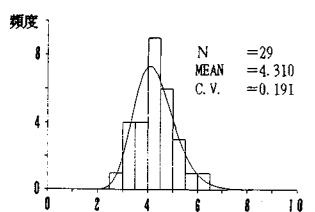


図-5 CV_y の頻度分布

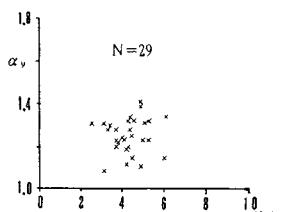


図-6 CV_y - α_y 関係

め、また、 $160 \leq f'_{cn} \leq 300$ kgf/cm² の範囲で、互いに独立であるとして取り扱う（図-3）。 f'_c は対数正規分布を定める、とする。ここで、 f'_c の特性値 f'_{ck} は 5% フラクタイル値とし、 f'_{ck} は、式（7）、（8）を用いて表わされる。

(2) 鉄筋降伏点強度 f_y と鉄筋断面積 A_s

全国各地で得られた SD 30 と SD 35 に関する鋼材検査証明書をもとに、種別、製鉄所、鉄筋径の同じものを同一母集団として検討を行った。SD 30 に対しては 23 個、SD 35 に対しては 6 個の母集団が得られ、それぞれのサンプル数は約 20~60 個であった。その結果、サンプル数が多いものについては、対数正規分布の仮定が χ^2 検定により有意水準 5% で棄却されず、対数正規分布でモデル化できる。 f_y の平均値 m_y は、SD 30、SD 35 ともに 3500~4300 kgf/cm² の間にあり、変動係数 CV_y は 0.02~0.06 の範囲にある。

ところで、 f_y の値は、JIS 規格に基づき、式（10）で与えられ、鉄筋の“見掛けの降伏点強度”である。

$$f_y = W^*/A_s^* \quad (10)$$

W^* ：試験鉄筋の降伏荷重

A_s^* ：試験鉄筋の公称断面積

ここで、断面内の総鉄筋の降伏に要する荷重 W_r は、次式で示される。

$$W_r = \sum_{j=1}^N W_j = \sum_{j=1}^N A_{sj} \cdot f_{yj} \quad (11)$$

N ：断面内で使用する鉄筋本数で、1 本ごとを番号 j ; $j=1, \dots, N$ で特定づける。

W_j ：断面内で使用する鉄筋 j の降伏荷重

A_{sj} ：断面内で使用する鉄筋 j の公称断面積

f_{yj} ：断面内で使用する鉄筋 j の“見掛けの降伏

点强度” ($= W_j / A_{sj}$)

よって、本来、設計において、鉄筋の強度に関しては式(11)を用いることが望ましい。しかし、 f_y の確率密度は、鉄筋の公称断面積によって違いはない、同一断面内で用いられる鉄筋は同一工場で同じ時期に作られた可能性が高い、と考えられる。そこで、耐力算定式では、 W_t として式(12)を用いる。

A_s : 断面内の鉄筋の公称断面積の総和

設計において公称値(規格値) f_{yn} を指定しても、 m_y , CV_y の値はばらつくので、下の変数を導入する。

α_y , CV_y の頻度分布をそれぞれ図-4, 図-5に, α_y , CV_y の関係を図-6に示した。 α_y , CV_y は対数正規分布を定め, 互いに独立であるとする(図-6)。 f_y は対数正規分布を定め, f_y の特性値 f_{yk} は 5% フラクタイルとし, f_{yk} は式(7), (8)を用いて表わされる。

(3) 断面寸法 b, d'

東北新幹線建設工事より得られた出来形検査表をもとに RC 断面の幅 b , 有効高さ d' の絶対誤差を集計した. b については, 公称値 (設計時に指定した寸法) $b_n = 0.5 \sim 1\text{ m}$, $1 \sim 2\text{ m}$, $2 \sim 4\text{ m}$, $4 \sim 7.5\text{ m}$, 7.5 m 以上の 5 つの母集団に分け, d' については, 公称値 $d'_n = 0.7 \sim 1.2\text{ m}$ のデータを 1 つの母集団から得られたとした. その結果, すべての場合で, 正規分布の仮定が χ^2 検定により有意水準 5% で棄却されなかった. それぞれの母集団ごとのデータを表-1 に示す. また, 最も変動係数が大きく評価される公称値に関し, b , d' それぞれの平均値と変動係数も示した.

本研究では、 b_n , d'_n に絶対誤差を加えた b , d' は、非負であり、変動係数が小さい場合は正規分布とあまり変わらないことから、対数正規分布を定める。また、絶対誤差の公称値に対する相対的大きさ、変動係数は非常に小さいため、以下を定める。

$m_b, m_{d'} : b, d'$ の平均値

$CV_b, CV_{d'}; b, d'$ の変動係数

式(14), (15)より, 次式が成立する.

表-1 断面寸法についての統計的情報

	断面幅					有効高さ
既存寸法(cm) 公称値	50~100	100~200	200~400	400~750	750~	70~120
サブル数	125	111	76	101	58	238
絶対偏差の 平均値(cm)	+0.092	+0.114	+0.286	+0.189	+0.500	+0.160
絶対偏差の 標準偏差(cm)	0.179	0.126	0.272	0.350	0.375	0.280
変動係数が最も大 となる公称値に おける標準偏差(cm)	50.092	100.114	200.286	400.189	750.500	70.160
変動係数が最大人 となる公称値に おける標準偏差(cm)	0.0036	0.0013	0.0014	0.0009	0.0005	0.0004

b_k, d'_k : b, d' の特性値

(4) 作用断面力 S

作用断面力の起源である荷重を、その性質によって次の3つに分ける。

a) 永久荷重 一般に、材料の単位重量は正規分布、または対数正規分布を定めるとしてよいから、ばらつきの非常に小さい断面寸法との積で表わされる死荷重も、正規分布、もしくは対数正規分布を定める、とする。

b) 変動荷重　自動車による活荷重について考えると、 P_f の算定に関しては、部材の設計耐用期間内の最大値分布が必要とされる。建設省土木研究所が行った活荷重実態調査⁶⁾に基づいて、最大値分布は、極値I型最大値分布を定めるとした。

c) 偶発荷重 偶発荷重に対しても、部材の設計耐用期間内の最大値分布が必要とされる。風荷重については、一般に広く極値Ⅰ型最大値分布、および極値Ⅱ型最大値分布がよく適合する、とされている。藤野・伊藤ら⁷⁾は、日本各地のデータをもとに解析を行い、改めて大部分の地域で、極値Ⅰ型最大値分布でモデル化できるとしている。これより、本研究では、風荷重は、極値Ⅰ型最大値分布を定めるとした。地震荷重については、松村・牧野⁸⁾が港湾技術研究所で得た強震観測データをもとに、地震荷重の値に比例する日本各地の年最大加速度分布を求め、極値Ⅱ型最大値分布でモデル化できるとしている。また、坂本・小浜ら⁹⁾は、地震のポアソン生起を仮定すれば、耐用年数間の加速度最大値分布は極値Ⅱ型最大値分布であるとしている。ここで、極値Ⅱ型年最大値分布をもとに得られる設計耐用年数最大値分布は極値Ⅱ型最大値分布となる。以上の結果から、本研究では、地震荷重は極値Ⅱ型最大値分布（下限値=0）を定めるとした。

設計に用いる荷重は、永久・変動・偶発荷重の同時生起確率を考慮して決定される組合せ荷重であるが、数学的に支配的となる荷重の分布型が決まり、上で取り上げたいずれかの分布で近似できると考えられる。また、作用断面力は、ばらつきの小さい断面寸法と荷重の四則演算より導かれる。以上のことより、作用断面力も、正規分布、対数正規分布、極値Ⅰ型最大値分布、または極値Ⅱ型最大値分布（下限値=0）を定めるとした。

3 部分安全係数値の定義

(1) 部分安全系数

X_1, \dots, X_n のパラメーターの組 $(m_1, \dots, m_n, \sigma_1, \dots, \sigma_n)$ によって、特性値の組 (X_{1k}, \dots, X_{nk}) 、および破壊確率 P_f は定まる。一方、設計において、設計値の組として、なんらかの方法で $g(\cdot) = 0$ 上の一点 (X_{1d}, \dots, X_{nd}) が選ばれたとする。ここで、部分安全係数値

式(24)より、 S の平均値 m_s (または、 R の平均値 m_R)にある定数を与えることによって、 I_R , I_s , CV_R , CV_s , pr_R , pr_s , P_f の一般的な関係を知ることができる。これを用いて、以下の手順で pr_R , pr_s を導く。なお、 R_k , S_k を極端に分布の裾の値とすることは、実用上認め難いと思われるため、ここでは、 $0.001 \leq pr_R$, $pr_s \leq 0.999$ として取り扱う。

• pr_R についての基礎資料

① $m_s = 1$, I_R は対数正規分布とし、 I_s , P_f , pr_R , CV_s (≤ 0.5)を与える。

② CV_R (≤ 0.3)と R_k の関係を得る。

③ ①②を繰り返し、与えられた I_s , P_f , CV_s に関して、 CV_R の変化が R_k にあまり影響を与えない pr_R を選ぶ。

• pr_s についての基礎資料

④ $m_R = 100$, I_R は対数正規分布とし、 I_s , P_f , pr_s , CV_R (≤ 0.3)を与える。

⑤ CV_s (≤ 0.5)と S_k の関係を得る。

⑥ ④⑤を繰り返し、与えられた I_s , P_f , CV_s に関して、 CV_s の変化が S_k にあまり影響を与えない pr_s を選ぶ。

• pr_R , pr_s の決定

⑦ ③⑥より選ばれる pr_R , pr_s の候補の組を用いて、与えられた I_R は対数正規分布、 I_s , P_f に対して、 CV_R , CV_s を両軸にとり、 γ_k の等値線を描く。その結果より、広い等値線の間隔を示す pr_R , pr_s の組を求める。

b) pr_R , pr_s の候補の決定 計算結果より、以下の結論を得た。なお、①~⑥の計算結果の一例として、 $P_f = 10^{-5}$, S が極値I型最大値分布における場合を、 pr_R に関して図-7に、 pr_s に関して図-8に示す。

• pr_R についての結果

$P_f = 10^{-3}$ のとき、 S の分布型にかかわらず、 $pr_R = 0.001 \sim 0.1$ が望ましい。 $P_f = 10^{-5}$, 10^{-7} のとき、 S が

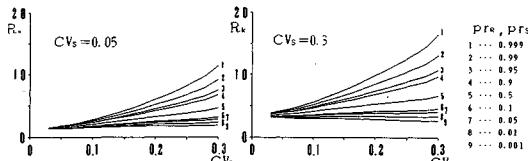


図-7 CV_R - R_k 関係 ($P_f = 10^{-5}$, S : 極値I型最大値分布)

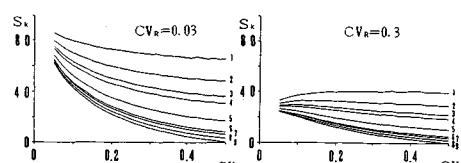


図-8 CV_s - S_k 関係 ($P_f = 10^{-5}$, S : 極値I型最大値分布)

正規分布の場合は $pr_R = 0.001 \sim 0.1$ 、対数正規・極値I型最大値分布の場合は $pr_R = 0.05 \sim 0.1$ 、極値II型最大値分布の場合は、 $pr_R = 0.1$ が望ましい。

• pr_s についての結果

$P_f = 10^{-3}$ のとき、 S の正規分布の場合は $pr_s = 0.9 \sim 0.999$ 、その他の分布型の場合、 $pr_s = 0.99$ が望ましい。 $P_f = 10^{-5}$ のとき、 S が正規分布の場合は $pr_s = 0.9 \sim 0.999$ 、対数正規分布の場合は $pr_s = 0.9 \sim 0.99$ 、その他の分布型の場合は $pr_s = 0.99$ が望ましい。 $P_f = 10^{-7}$ のとき、 S が正規、対数正規、極値I型最大値分布の場合は $pr_s = 0.9 \sim 0.999$ が望ましい。 S が極値II型最大値分布の場合は、望ましい pr_s は存在しない。

• pr_R , pr_s の候補

上記の結果より、 pr_R として、0.05, 0.1を、 pr_s として、0.95, 0.99を候補として考える。

c) pr_R , pr_s の決定 (pr_R, pr_s) の組の候補として、(0.05, 0.95), (0.05, 0.99), (0.1, 0.95), (0.1, 0.99)の4組を考える。これらについて手順⑦に従い、さまざまな I_s , P_f における γ_k の等値線を、 CV_R , CV_s 平面上に描いた。 $P_f = 10^{-5}$, S が極値I型最大値分布のときの結果を図-9に示す。図より、 $pr_R = 0.05$, $pr_s = 0.99$ で最も γ_k の値の変動が小さい(等値線間隔が広い)ことがわかり、その他の場合についても同様の結論が得られた。

これより、 $pr_R = 0.05$ (R_k は R の5%フラクタイル値), $pr_s = 0.99$ (S_k は S の99%フラクタイル値)とする。

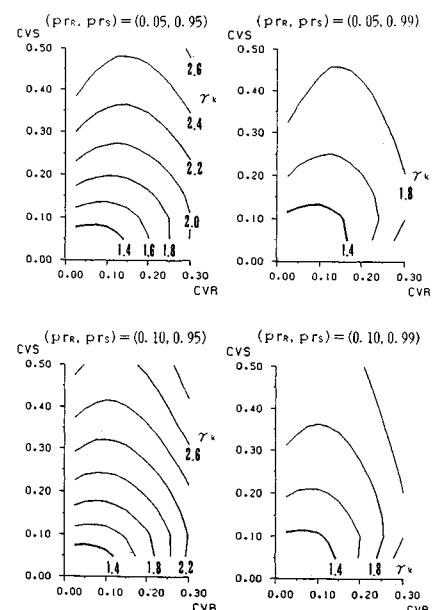


図-9 CV_R , CV_s , γ_k 関係 ($P_f = 10^{-5}$, S : 極値I型最大値分布)

4. 設計部分空間、および対応する γ_a の決定方法

(1) 決定方法

設計において、 X_1, \dots, X_{n-1} に関しては、実用上、特性値として公称値が代用される。そのとき材料強度 X_1, \dots, X_t は、与えられた公称値に対応する平均値、変動係数が現場ごとに相違する。そこで、公称値 X_{in} に対応する確率変数 X_i の平均値 m_i は式(2)の形で、変動係数 CV_i とともに確率変数として取り扱う。

X_n と X_{1n}, \dots, X_{in} 、および $X_{(i+1)n}, \dots, X_{(n-1)n}$ の中の制約条件である値を与えたとき、1つの $(\alpha_1, \dots, \alpha_i, CV_1, \dots, CV_i)$ の実現値の組に対して、 P_{rt} を満たす未知の $X_{(i+1)n}, \dots, X_{(n-1)n}$ が定まり、式(25), (30)より γ が1つ与えられる。よって、 $\alpha_1, \dots, \alpha_i, CV_1, \dots, CV_i$ は確率変数であるため、 P_{rt} を満たす1つの要素設計に対応する γ は確率量となる。そこで、部分安全係数ごと、ある非超過確率をもつ値を用い、そこから構成される部分安全係数の組を、要素設計における部分安全係数値の組 $\gamma_k = (\gamma_{1k}, \dots, \gamma_{nk})$ とする。 γ_k は、与えられた要素設計に対して、 $\gamma = (\gamma_1 \leq \gamma_{1k}, \dots, \gamma_n \leq \gamma_{nk})$ を満たす γ が導かれる $(\alpha_1, \dots, \alpha_i, CV_1, \dots, CV_i)$ の組が実現した場合には、確実に P_{rt} を満たすことを保証する。 γ_{ik} を γ_i の $P_i\%$ フラクタイル値とすると、 $\gamma = (\gamma_1 \leq \gamma_{1k}, \dots, \gamma_n \leq \gamma_{nk})$ を満たす γ が導かれる $(\alpha_1, \dots, \alpha_i, CV_1, \dots, CV_i)$ の組が実現する確率 P_a は、以下で示される。

$$P_a \geq [100 - \sum_{i=1}^n (100 - P_i)] / 100 \quad \dots \dots \dots (32)$$

すなわち、 γ_k を用いた設計は、最低でも式(32)右辺の確率で、 P_{rt} を満たす。設計部分空間、および対応する $\gamma_a = (\gamma_{1a}, \dots, \gamma_{na})$ の決定を、以下の手順に従い行う。

① 要素設計ごと、 γ_k を求める。ここで、 m は設計空間に含まれる要素設計の数、 $\gamma_{kj}; j=1, \dots, m$ は要素設計 j に関する γ_k 、 $\gamma_{kj} = (\gamma_{1kj}, \gamma_{2kj}, \dots, \gamma_{njk})$ とする。

② γ_{kj} が近寄った値の組となる要素設計は、同一の設計部分空間に含まれるとし、設計空間からいくつかの設計部分空間への分割を仮定する。

③ 仮定された設計部分空間ごと γ_a の候補を以下の式より算定する。

$\gamma_{1a} = \text{MAX}(\gamma_{1kj}), (j=1, \dots, m)$ 、ただし、注目する設計部分空間に対応する要素設計のみを考える)

$$; i=1, \dots, n \quad \dots \dots \dots (33)$$

④ “ γ_a として望ましい γ の集合” という Fuzzy 集合を構築する。そして、要素設計ごとに、 γ_k でなく γ_a を用いることによって生じる経済性の“むだ”を、この Fuzzy 集合における帰属度で評価する。

⑤ 設計空間全体における、設計部分空間ごと各 γ_a を用いることによって生じる経済性の“むだ”を評価する。評価は、設計空間全体での、各要素設計の使用頻度と経済性における帰属度の重みつき平均値 C を用いて行う。

⑥ ①～⑤を繰り返し、 C が与えられる許容値 C_f 以上となるような、設計部分空間、および γ_a を導く。

④, ⑤に関して、以下で述べる。

(2) Fuzzy 理論¹⁰⁾による評価方法

以下の手順に従い、設計部分空間、および対応する γ_a を評価する。

① 設計空間を設計部分空間に分割し、設計部分空間ごと γ_a の候補を導く。ここで、要素設計 j に対応する γ_a を γ_{aj} とする。

② 各要素設計の mA_j ($\gamma = \gamma_{aj}$); $j=1, \dots, m$ を導く。

$mA_j(\gamma); j=1, \dots, m$: 要素設計 j における、Fuzzy 集合 “ γ_a として望ましい γ の集合” の帰属度関数

γ_a としての“望ましさ”は、 γ_a を用いた設計と、 γ_k を用いた設計との比較によって評価される。設計されたものを評価するための尺度としては、たとえば、部材断面積、総費用などが考えられる。この評価量を $A(\gamma)$ で表す。次に、 γ_a としての“望ましさ”を、定量的に評価する評価関数 $A_E(\gamma)$ の設定を行う。この関数には、たとえば、 γ と γ_k で設計した RC 部材断面の差(比)、総費用の差(比)などを用い、以下のような式で示される。

$$A_E(\gamma) = A(\gamma) - A(\gamma_k) \quad \dots \dots \dots (34)$$

$$A_E(\gamma) = A(\gamma)/A(\gamma_k) - 1 \quad \dots \dots \dots (35)$$

なお、 $A_E(\gamma) \geq 0$ で、 A_E が増加する γ ほど γ_k で設計されたものより“望ましくない”となるように $A_E(\gamma)$ は設定する。

最後に、 γ の帰属度 $mA_j(\gamma)$ を $A_E(\gamma)$ の関数で与える。帰属度は、 $A_E(\gamma) = 0$ となる $\gamma = \gamma_k$ に対して 1.0 を与え、 $A_E(\gamma)$ の増加とともに減少するように設定する。帰属度関数 $mA_j(\gamma)$ は、たとえば、式(36)で定義する(図-10)。

$$mA_j(\gamma) = \begin{cases} \left[\frac{A_E(\gamma) - A_{Ex}}{A_{Ex}} \right]^2 & 0 \leq A_E(\gamma) \leq A_{Ex} \\ 0 & A_{Ex} \leq A_E(\gamma) \end{cases} \quad \dots \dots \dots (36)$$

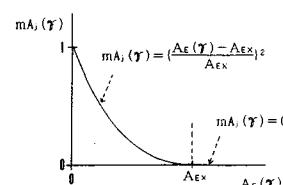
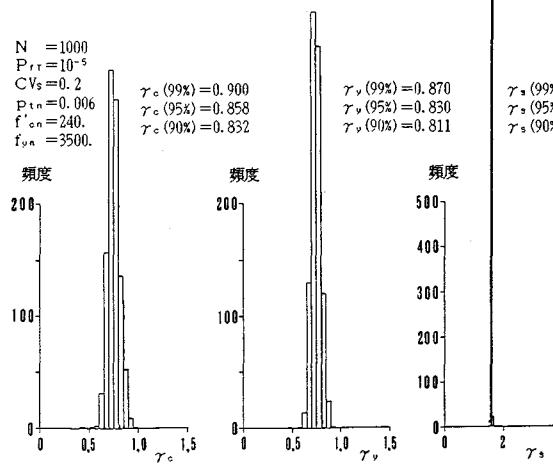


図-10 $mA_j(\gamma)$ の設定

図-12 γ_c , γ_y , γ_s の頻度分布 (S : 極値 I 型最大値分布)表-3 各要素設計における $A_E(\gamma_d)$, $m_A(\gamma_d)$

要素設計 番号	$A_E(\gamma_{d1})$	$A_E(\gamma_{d2})$	$A_E(\gamma_{d3})$	$m_A(\gamma_{d1})$	$m_A(\gamma_{d2})$	$m_A(\gamma_{d3})$
1	0.39	0.18	0.99	0.49	0.67	1.09
2	0.11	0.09	—	0.49	1.09	—
3	0.09	—	—	1.09	—	—
4	0.30	0.18	0.99	0.49	0.67	1.09
5	0.11	0.09	—	0.79	1.09	—
6	0.00	—	—	1.00	—	—
7	0.30	0.18	0.99	0.49	0.67	1.09
8	0.11	0.09	—	0.79	1.09	—
9	0.30	0.18	—	1.09	—	—
10	0.11	0.09	—	0.79	1.09	—
11	0.11	0.09	—	1.09	—	—
12	0.00	—	—	1.09	—	—
13	0.30	0.18	0.99	0.49	0.67	1.09
14	0.11	0.09	—	0.79	1.09	—
15	0.30	0.18	0.99	0.49	0.67	1.09
16	0.11	0.09	—	0.79	1.09	—
17	0.11	0.09	—	1.00	—	—
18	0.00	—	—	1.00	—	—
19	0.30	0.18	0.99	0.49	0.67	1.09
20	0.11	0.09	—	0.79	1.09	—
21	0.00	—	—	1.09	—	—
22	0.30	0.18	0.99	0.49	0.67	1.09
23	0.11	0.09	—	0.79	1.09	—
24	0.30	0.18	—	1.00	—	—
25	0.30	0.18	0.99	0.49	0.67	1.09
26	0.11	0.09	—	0.79	1.09	—
27	0.00	—	—	1.00	—	—
28	0.30	0.18	0.99	0.49	0.67	1.09
29	0.11	0.09	—	0.79	1.09	—
30	0.30	0.18	0.99	0.49	0.67	1.09
31	0.11	0.09	—	0.79	1.09	—
32	0.00	—	—	1.00	—	—
33	0.30	0.18	0.99	0.49	0.67	1.09
34	0.11	0.09	—	0.79	1.09	—
35	0.00	—	—	1.00	—	—

表-2 各要素設計における γ_k

要素設計 番号	p_{in}	f'_cn	f_{yn}	CV_s	$\gamma_k(99\%)$	$\gamma_k(95\%)$	$\gamma_k(90\%)$
					γ_{ck}	γ_{yk}	γ_{sk}
1	0.002	240	3500	0.1	1.36	1.35	1.35
2	0.002	3000	0.2, 0.90	0.87	1.60	0.86	0.83
3	0.002	3000	0.3	—	1.77	1.75	1.75
4	0.002	3500	0.2, 0.90	0.87	1.60	0.86	0.83
5	0.002	3500	0.3	—	1.77	1.75	1.75
6	0.002	3000	0.2, 0.90	0.87	1.60	0.86	0.83
7	0.002	3000	0.3	—	1.77	1.75	1.75
8	0.002	3000	0.2, 0.90	0.87	1.60	0.86	0.83
9	0.002	3000	0.3	—	1.77	1.75	1.75
10	0.002	3000	0.1	—	1.36	1.35	1.35
11	0.002	3500	0.2, 0.90	0.87	1.60	0.86	0.83
12	0.002	3500	0.3	—	1.77	1.75	1.75
13	0.002	3000	0.2, 0.90	0.87	1.60	0.86	0.83
14	0.002	3000	0.3	—	1.77	1.75	1.75
15	0.002	3000	0.2, 0.90	0.87	1.60	0.86	0.83
16	0.002	3000	0.3	—	1.77	1.75	1.75
17	0.002	3500	0.2, 0.90	0.87	1.60	0.86	0.83
18	0.002	3500	0.3	—	1.77	1.75	1.75
19	0.002	3000	0.2, 0.90	0.87	1.60	0.86	0.83
20	0.002	3000	0.3	—	1.77	1.75	1.75
21	0.002	3500	0.2, 0.90	0.87	1.60	0.86	0.83
22	0.002	3500	0.3	—	1.77	1.75	1.75
23	0.002	3000	0.2, 0.90	0.87	1.60	0.86	0.83
24	0.002	3500	0.3	—	1.77	1.75	1.75
25	0.002	3000	0.2, 0.90	0.87	1.60	0.86	0.83
26	0.002	3000	0.3	—	1.77	1.75	1.75
27	0.002	3500	0.2, 0.90	0.87	1.60	0.86	0.83
28	0.002	3500	0.3	—	1.77	1.75	1.75
29	0.010	3500	0.2, 0.90	0.87	1.60	0.86	0.83
30	0.010	3500	0.3	—	1.77	1.75	1.75
31	0.010	3000	0.2, 0.90	0.87	1.60	0.86	0.83
32	0.010	3000	0.3	—	1.77	1.75	1.75
33	0.010	3500	0.2, 0.90	0.87	1.60	0.86	0.83
34	0.010	3500	0.3	—	1.77	1.75	1.75
35	0.010	3000	0.2, 0.90	0.87	1.60	0.86	0.83
36	0.010	3500	0.3	—	1.77	1.75	1.75

に示す。なお、 α_c , α_y , CV_c , CV_y の各確率分布は、2.で示したもの用い、 $\gamma_k=1.0$ として取り扱う。シミュレーションの結果として、 $p_{in}=0.006$, $f'_cn=240$ kgf/cm², $f_{yn}=3500$ kgf/cm², $CV_s=0.2$, $P_{fr}=10^{-5}$, S を極値I型最大値分布としたときの γ_c , γ_y , γ_s の分布、および99%, 95%, 90% フラクタイル値を図-12に示す。

(2) 設計部分空間、および γ_a の決定

ここでは、以下の条件より構成される全組合せを設計空間として与え、各組合せを要素設計と考える。そして、この設計空間における、設計部分空間、および対応する γ_a の決定を試みる。

I_s : 極値I型最大値分布

$CV_s: 0.1, 0.2, 0.3$

$p_{in}: 0.001, 0.006, 0.01$

$$P_{fr} : 10^{-5}$$

$$f'_cn : 240, 300 \text{ kgf/cm}^2$$

$$f_{yn} : 3000, 3500 \text{ kgf/cm}^2$$

各要素設計における、99%, 95%, 90% フラクタイル値となる $\gamma_k=(\gamma_{ck}, \gamma_{yk}, \gamma_{sk})$ の組をモンテカルロシミュレーションより導いた。その結果を表-2に示す。

表より、設計空間の設計部分空間への分割として、以下の3つI, II, IIIを考え、各設計部分空間における $\gamma_a=(\gamma_{ca}, \gamma_{ya}, \gamma_{sa})$ を式(33)より導いた。なお、 γ_k としては、99% フラクタイル値を用いた。

I. 全設計空間=設計部分空間とする。 $\gamma_a=\gamma_{a1}=(0.90, 0.87, 1.77)$. II. $CV_s=0.1, 0.2$ の要素設計からなる設計部分空間, $CV_s=0.3$ の要素設計からなる設計部分空間の2つに分割する。 $CV_s=0.1, 0.2$ の要素設計において、 $\gamma_a=\gamma_{a2}=(0.90, 0.87, 1.36)$, $CV_s=0.3$ の要素設計において、 $\gamma_a=\gamma_{a3}=(0.90, 0.87, 1.59)$, $CV_s=0.2, 0.3$ の要素設計において、 $\gamma_a=\gamma_{a4}=(0.90, 0.87, 1.35)$

次に、要素設計ごと、対応する γ_a の帰属度 $m_A(\gamma_a)$ を以下の手順で算定する。ここででは、 $A(\gamma)$ を部材断面積で評価し、式(35)を用いる。 $\gamma=(\gamma_c, \gamma_y, \gamma_s)$ による設計においては、次式が成立する。

$$\gamma_s \cdot S_k = d'^2 \cdot b_n$$

$$\left[p_{in} \cdot \frac{f_{yn}}{\gamma_y} - \frac{p_{in}^2}{1.7} \cdot \left(\frac{f_{yn}}{\gamma_y} \right)^2 \cdot \left(\frac{\gamma_c}{f'_cn} \right) \right] \dots \dots \dots (58)$$

よって、断面積 $A(\gamma)=b \cdot d' = b_n \cdot d'_n$ は、次式で示される。

$$A(\gamma) = \frac{\gamma_s \cdot S_k}{d_n \cdot \left\{ p_{tn} \cdot \frac{f_{yn}}{\gamma_y} - \frac{p_{tn}^2}{1.7} \cdot \left(\frac{f_{yn}}{\gamma_y} \right)^2 \cdot \left(\frac{\gamma_c}{f'_{cn}} \right) \right\}} \quad \dots \dots \dots (59)$$

ここで、 d'_n も制約条件として与えられているとすれば、 $A_E(\gamma=\gamma_d)$ は次式で示される。

$$A_E(\gamma_d) = \frac{\gamma_{sd} \cdot \left\{ \frac{1}{\gamma_{yd}} - \frac{p_{tn}}{1.7} \cdot \left(\frac{f_{yn}}{\gamma_{yd}} \right) \cdot \left(\frac{\gamma_{cd}}{f'_{cn}} \right) \right\}}{\gamma_{sk} \cdot \left\{ \frac{1}{\gamma_{yd}} - \frac{p_{tn}}{1.7} \cdot \left(\frac{f_{yn}}{\gamma_{yd}} \right) \cdot \left(\frac{\gamma_{cd}}{f'_{cn}} \right) \right\}} - 1. \quad \dots \dots \dots (60)$$

求められた $A_E(\gamma_d)$ を用い、 γ_d の帰属度 $mA(\gamma_d)$ を、式 (36) を用いて求める。なお、 $A_{Ex}=1.$ とする。各要素設計における、 $A_E(\gamma_d)$ 、 $mA(\gamma_d)$ を表-3 に示す。

最後に、 $\omega_i \sim \omega_{36}$ ；要素設計の使用頻度、断面積の絶対量などを考慮して定められる“重み係数”，を導入し、仮に、 $\omega_i=1/36$ ； $i=1, \dots, 36$ とする。

式 (38) より、表-3 の結果を用いて、I, II, III それぞれの C は以下のように求められる。

$$\text{I. } C=0.76, \quad \text{II. } C=0.89, \quad \text{III. } C=0.93$$

いま、 $C_J=0.80$ であったとすれば、以下の結果を導くことができる。

I. $0.76 < C_J = 0.80$ 設計空間を 1 つの設計部分空間として扱うことができないといえる。

II. $0.89 > C_J = 0.80$ 設計空間を II で設定した 2 つの設計部分空間として扱うことができ、 $CV_s=0.1, 0.2$ の要素設計からなる設計部分空間において、 $\gamma_d=(\gamma_{cd}=0.90, \gamma_{yd}=0.87, \gamma_{sd}=1.60)$ 、 $CV_s=0.3$ の要素設計からなる設計部分空間において、 $\gamma_d=(\gamma_{cd}=0.90, \gamma_{yd}=0.87, \gamma_{sd}=1.77)$ 、となる。

III. $0.93 > C_J = 0.80$ 設計空間を III で設定した 2 つの設計部分空間として扱うことができ、 $CV_s=0.1$ の要素設計からなる設計部分空間において、 $\gamma_d=(\gamma_{cd}=0.90, \gamma_{yd}=0.87, \gamma_{sd}=1.36)$ 、 $CV_s=0.2, 0.3$ の要素設計からなる設計部分空間において、 $\gamma_d=(\gamma_{cd}=0.90, \gamma_{yd}=0.87, \gamma_{sd}=1.77)$ 、となる。

なお、II と III を比較した場合、C の大小から判断 ($0.93 > 0.88$) して、II より III の方が有効であるといえる。

6. まとめ

本研究で提案した決定方法の特徴を列挙する。

① $\gamma_n(\gamma_s)$ は、与えられた $X_n(S)$ に対して、 P_{fr} を満たすために要求される R の特性値の算定に用いられる部分安全係数。 $\gamma_1, \dots, \gamma_{n-1}$ ($\gamma_c, \gamma_y, \gamma_b, \gamma_d$) は、 $X_{1k}, \dots, X_{(n-1)k}$ の仮定により導かれる R_k が、上で求めた値と等しくなるように各設計変数を決定するために用いられる部分安全係数となる。このように、各部分安全係数のもつ意味が明確である。

② $\gamma_1, \dots, \gamma_{n-1}$ は、 CV_k の値の影響を大きく受ける性質をもつ。よって、要素設計間の CV_k の変動が小さければ、 $\gamma_1, \dots, \gamma_{n-1}$ の値の変動も小さくなり、 γ_d の決定が容易になる。

③ $\gamma_n(\gamma_s)$ は、S の分布型、 CV_s が与えられれば CV_k によってのみ特定される。よって要素設計間の S の分布型の変化がなく、 CV_s, CV_k の変動が小さければ、 γ_n の値の変動も小さくなり、 γ_d の決定が容易になる。

④ 安全性と経済性の両面を満足する設計を行うことができる。経済性に関しては、Fuzzy 理論を用いることによって、設計部分空間で共通の γ (= γ_d) を用いることによって生じる“むだ”を定量的に評価できた。また、これにより、設計部分空間の決定も、 γ_d の帰属度の値によって、経済性の面からの評価が可能となった。

設計部分空間、および対応する γ_d の決定の過程で、本研究ではまだ不十分であり、今後の課題となる部分は、各設計基礎変数の確率的情報、 γ_k の決定に用いる各部分安全係数の非超過確率の決定方法、帰属度関数の与え方、などである。今後、これらの部分が 1 つ 1 つ精度良く評価されていけば、本研究で示した方法より導かれる設計部分空間、および対応する γ_d を用いることにより、より良い“部分安全係数設計方法”に進んでいくものと期待できる。

参考文献

- 1) 土木学会：「昭和 61 年制定 コンクリート標準示方書、設計編」、1986.
- 2) 土木学会：「鋼構造物設計指針 PART A 一般構造物 鋼構造シリーズ 3 A」、1987.
- 3) 尾坂芳夫：コンクリート構造の限界状態設計法の省察、土木学会論文集、第 378 号、pp. 1~13、1987. 2.
- 4) 伊藤 学・尾坂芳夫：設計論 土木工学大系 15、彰国社、1980.
- 5) Ravindra, K. R. and Lind, N. C. : Theory of Structural Code Optimization, J. Structural Div. ASCE, Vol. 99, ST 7, 1973. 7.
- 6) 建設省土木研究所構造橋梁部橋梁研究室：橋梁活荷重の信頼性解析、土木研究所資料、第 1865 号、1982. 7.
- 7) 藤野陽三・伊藤 学・酒井利夫：年最大風速記録による設計基本風速の算定に関する研究、土木学会論文報告集、第 305 号、pp. 23~34、1981. 1.
- 8) 村松和雄・牧野 稔：ポアソン確率モデルから求められる最大地動の極値分布、(その 1) 最大地動の極値分布における観測値と解析値の比較、日本建築学会論文報告集、第 273 号、pp. 55~62、1978. 11.
- 9) 坂本 順・小浜芳朗ほか：荷重・抵抗係数設計法における地震荷重の確率・統計モデルに関する考察、日本建築学会論文報告集、第 346 号、pp. 60~70、1984. 12.
- 10) 西田俊夫・竹田英二：ファジィ集合とその応用、森北出版、1978.

(1989. 11. 20・受付)