

# 部分安全係数を用いたコンクリート構造物の 耐久性設計について\*

小山 健\*\*・土屋宏信\*\*\*

コンクリート構造物の耐久性に影響を及ぼす不確定性の要因としては、主として設計・施工、使用材料とその品質等直接コンクリートの構造体に関係するものと、凍結融解作用、塩分による影響等の置かれた環境に関するものがある。本研究は、これらの不確定性を確率変数として処理し、土木学会コンクリート耐久性設計小委員会により提案された設計書式に基づいた場合の、信頼性理論による部分安全係数の設計書式の提案を試みるものである。

**Key Words** : concrete structure, durability, reliability, safety factor, design, fuzziness

## 1. ま え が き

近年コンクリート構造物が早期劣化して、社会的にみて一般に必要とされる寿命を全うする以前に、機能低下を招く事例が数多く報告されるようになった<sup>1)~3)</sup>。これは、コンクリート中に混入された塩分による鉄筋腐蝕、アルカリ骨材(シリカ)反応、施工不良や材料の品質不良による、予想外に早いコンクリートの炭酸化(中性化)等様々な原因が考えられている。こうしたことから、土木構造物として目標とする使用期間中は、その必要とする機能が全うできるようなコンクリート構造物の耐久性が要求され、そのための耐久性設計の必要性が重要になってきている。

このように、コンクリート構造物の耐久性が問題になっている一方で、現行のコンクリート標準示方書に対して、耐久性という面から、次のような問題点が指摘されている<sup>4),5)</sup>。すなわち、(1) 構造物の耐用年数が不明確であること、(2) 耐久性に関して最小限必要な事項を規定してはいるが、種々の劣化要因を特定したときに構造物あるいは構造部材に対する独自の耐久性対策となっていないこと、(3) それに対するはっきりとした評価体系をもっていないこと、等である。また、耐久性に関する設計および施工等に関する総合的研究は、安全性のそれに比較すると、ややもすれば不十分であるとも考えられる。したがって、(1) 耐久性に関して限界状態設計法のようなシステムが必要である。(2) このシステムは、設計法が限界状態設計法でない場合に対しても広く適用可能であることが望まれる<sup>5)</sup>との認識は、コンクリート構造物の耐久性を考える上で、正鵠を得ているものと思われる。

\* 土木学会中部支部研究発表会(1993年3月)にて一部発表済

\*\* 正会員 工博 信州大学工学部助教授 社会開発工学科  
(〒380 長野市若里500)

\*\*\* 工修 日揮(株)

そこで本研究は、現在土木学会コンクリート委員会耐久性設計小委員会およびコンクリート標準示方書改訂小委員会・耐久性調査研究部会で提案されている、コンクリート構造物の耐久性設計のための設計書式<sup>4),5)</sup>を基本として、信頼性理論による部分安全係数を用いた設計書式の提案を試みるものである。

## 2. 部分安全係数による耐久性設計書式

### (1) 耐久性設計書式

土木学会コンクリート委員会耐久性設計小委員会は「コンクリート構造物の耐久設計指針(試案)」<sup>6)</sup>で耐久指数と環境指数の大小の比較による構造物の耐久性の検討方法を提案している。これは部材各部において、次式が成立する場合にそのコンクリート構造物は耐久であると判定されるものである。

$$T_p \geq S_p \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $T_p$ は耐久指数を、 $S_p$ は環境指数を、それぞれ表わすものとする。

なおこの試案による耐久的なコンクリート構造物の標準として、標準的な環境条件のもとで95%の信頼度をもって50年間メンテナンスフリーであるもの、としている。この場合式(1)の環境指数 $S_p$ は以下のように与えられるものとする。

$$S_p = S_0 + \sum (\Delta S_p) \dots\dots\dots (2)$$

ここで $S_0$ に付与されるポイントは上記の条件にあてはまるコンクリート構造物では一般に100としている。

なお、凍結融解作用や塩分の影響が大きいと考えられる厳しい環境条件下では、環境指数の増分値 $\Delta S_p$ によってその影響を取り込むことにしているが、例えば塩分の影響が大きいと判断される場合には10~70ポイントを、凍結融解作用が激しいと判断されるようであれば10~40ポイントを $\Delta S_p$ として $S_0$ に加算することが提案されている。

一方、耐久指数  $T_p$  は、コンクリート材料の品質、コンクリートおよび補強材料の品質、設計ひびわれ、部材の形状鉄筋詳細・設計図、コンクリート工、鉄筋工・型枠・支保工、PC工の補足事項、防護工（以下これをテクノロジーとここでは呼ぶ）に関係するさまざまな要因ごとの耐久性への影響を、定量的に評価した耐久性ポイント  $T_p(I, J)$  より算定するもので、一般に次式で表わされるものである<sup>5),6)</sup>。

$$T_p = 50 + \sum T_p(I, J) \dots\dots\dots (3)$$

なお、 $T_p(I, J)$  への詳細なポイントの付与がどのようになっているかについてはここでは記述しないので、文献等<sup>5),6)</sup>を参照されたい。

以上によって、耐久性設計小委員会の提案になる耐久性設計書式により、耐久性の照査が実行できる。そこで理解を容易にするために、式(1)に基づく簡単な具体例として文献5)にあるものを採用することにする。ただし、説明上多少の変更は行ってあることを断わっておく。

<例> この例は設計詳細が良い例と考えられる場合の耐久指数  $T_p(4, J)$  の評価の例を取り扱っているものである。ただし、粗骨材の最大寸法は25 mmとしている。

- (a) 部材の形状・寸法 ( $J=1$ )  $T_p(4, 1)=0$
- (b) 最小かぶりを9 cm ( $J=2$ )  $T_p(4, 2)=30$
- (c) 鉄筋の段数を2として鉄筋の最小水平あきを15 cmとする ( $J=3$ )  $T_p(4, 3)=10$
- (d) 用心鉄筋断面積/コンクリート断面積を40%とする ( $J=4$ )  $T_p(4, 4)=10$
- (e) 打継目のない構造 ( $J=5$ )  $T_p(4, 5)=0$
- (f) 設計詳細が良い ( $J=6$ )  $T_p(4, 6)=0$

以上のようにこの例はコンクリートの施工が非常にし易い配筋がされており、かぶりも十分にとられている場合の例である。なお、設計詳細以外については普通のレベルと考えてそれらの  $T_p(I, J)$  は0としてある。したがってこの例では、 $T_p = 50 + \sum T_p(I, J) = 50 + 30 + 10 + 10 = 100$ 、 $S_p = 100 + \sum \Delta S_p = 100 + 0 = 100$  であるから  $T_p \geq S_p$  となり、耐久性の照査に合格と判断する。

以上文献に基づき、簡単な例を通して、耐久性設計書式の適用を述べたが、ここで重要な問題点が指摘できる。すなわち、この設計書式で与えられるテクノロジーごとの各評価項目のポイントはその設定に関して確固たる合理的な基準に不確実性が存在するという点である。したがって、現在のところまでのその解釈としては、かなり恣意的な要素が  $T_p(I, J)$  決定に当たって入り込むということが言える。つまり、判断に関して個人差がかなりでてくることも考えられるということである。しかしながら一方で、コンクリート構造物の耐久性設計の必要性は急務であり、でき得ることであれば、簡潔でしたがって利用が容易な、しかも信頼度の高い設計書式の作成が望

まれる。この点から、耐久性設計小委員会の提案になるものは要件をある程度満足しているものと考えられること、さらに現在までのところ日本コンクリート工業協会のもの<sup>7)</sup>を含め、より総合的な耐久性設計書式としては他に適当なものが提案されていないことを考え合わせ、当面はこの書式(1)を受け入れるものとし、そのかわりに各項目ごとに付与するポイントをより合理的に設定する方法論の研究あるいは設計書式の信頼度を高めるための方法論の研究が望まれる。

本研究は、現在の段階ではまだ恣意的と思われるテクノロジーごとの各項目のポイントを確率変数として取り扱い、その場合この設計書式を限界状態設計法で用いられる部分安全係数書式に書き改めた場合に、確保できる耐久性の程度はどの程度かを、確率論的に調べること、テクノロジーごとの付与すべき部分安全係数がどの程度になるかを調べ、式(1)の将来的な信頼度に対する基礎的な資料の提示を目指すものである。

### (2) 部分安全係数を用いた耐久性設計書式

各テクノロジーごとの耐久性ポイントを確率変数として、式(1)を以下のように書き改める。

$$X_{TP} \geq X_{SP} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $X_{TP}$ 、 $X_{SP}$  はそれぞれ  $T_p$ 、 $S_p$  を確率変数とした場合の耐久指数および環境指数である。ただし、

$$X_{TP} = 50 + \sum_{i=1}^6 X_i, X_{SP} = X_7 \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $X_1$  はコンクリート材料に関する耐久性ポイント、 $X_2$  はコンクリートおよび補強材に関する耐久性ポイント、 $X_3$  は設計ひびわれに関する耐久性ポイント、 $X_4$  は部材の形状・鉄筋詳細・設計図に関する耐久性ポイント、 $X_5$  はコンクリート工に関する耐久性ポイント、 $X_6$  は鉄筋工・型枠・支保工に関する耐久性ポイント、したがってこの場合はテクノロジーとして6種類のポイントを、また  $X_7$  は環境条件に関するポイントを表わすものとする。

なお、テクノロジーのうちのPC工の補足事項と、防護工に関する耐久性ポイントについては打ち放しのRC構造物を想定するものとして、本研究では考慮しないものとする。

いま、あるテクノロジー  $i(i=1, \dots, 6)$  に対する部分安全係数  $\phi_i$  とテクノロジー・ポイントの公称値  $X_i^n$  によって、式(4)が以下のように表現できるものとする<sup>7)</sup>。

$$50 + \sum_{i=1}^6 \phi_i X_i^n \geq X_7^n \dots\dots\dots (6)$$

ここでは説明の簡略化のために、各確率変数が正規分布にしたがうものと仮定する。この場合、式(4)を耐久性設計のための限界状態関数と見なすと、安全性指標  $\beta$  は、以下のように表わされる。

$$\beta = (50 + \sum_{i=1}^6 \mu_i - \mu_7) / \sqrt{\sum_{i=1}^6 \sigma_i^2 + \sigma_7^2} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 $\mu_i$ 、 $\sigma_i$  はそれぞれ  $X_i$  の平均値および標準偏差である。さらに式 (7) を平均値でまとめて書き直すと以下のようなになる。

$$50 + \sum_{i=1}^6 (1 - \beta \alpha_1 \alpha_2 V_i) \mu_i - (1 + \beta \alpha_1 V_7) \mu_7 = 0 \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 $V_i = \sigma_i / \mu_i (i=1, \dots, 7)$  は  $X_i$  の変動係数、 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  は分離定数とよばれるもので、以下のように表わされる<sup>9)</sup>。

$$\alpha_1 = \sqrt{\sum_{i=1}^7 \sigma_i^2} / (\sigma_7 + \sqrt{\sum_{i=1}^6 \sigma_i^2}) \dots\dots\dots (9)$$

$$\alpha_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^6 \sigma_i^2} / \sum_{i=1}^6 \sigma_i \dots\dots\dots (10)$$

一方、式 (6) の公称値  $X_i^n$  をそれぞれの平均値を用いて表現すると以下のようなになる。

$$50 + \sum_{i=1}^6 \phi_i (1 - z_i V_i) \mu_i - \phi_7 (1 + z_7 V_7) \mu_7 = 0 \dots\dots\dots (11)$$

ただし、

$$z_i = (X_i^n - \mu_i) / \sigma_i, (i=1, \dots, 6) \dots\dots\dots (12)$$

$$z_7 = (X_7^n + \mu_7) / \sigma_7 \dots\dots\dots (13)$$

である。

以上から、式 (8) と式 (11) の平均値に関する各項を比較することで、式 (4) の限界状態に対して、部分安全係数  $\phi_i (i=1, \dots, 7)$  は、安全性指標  $\beta$  を仲立ちとして以下のように求められる。

$$\phi_i = (1 - \beta \alpha_1 \alpha_2 V_i) / (1 - z_i V_i), (i=1, \dots, 6) \dots\dots\dots (14)$$

$$\phi_7 = (1 + \beta \alpha_1 V_7) / (1 + z_7 V_7) \dots\dots\dots (15)$$

### 3. 環境条件にあいまいさを考慮した部分安全係数

例えば文献6)によると、環境指数の増分値に対しては確定値ではなく、ポイントが範囲として与えられている理由として、構造物が設置される地域、地形、海岸線からの距離、および気象・海象条件等により塩分の影響を一義的に定めることが困難であること、また凍結融解作用の影響も地域により変化が著しいことによる、としている。このことは、ポイントの設定には多少なりとも判断者の主観=恣意性が好むと好まざるとにかかわらず入り込むことになることを示している。したがってここでは判断者の主観をあいまいさとして定量化し、耐久性設計の部分安全係数に反映させることにする。

あいまいさをファジィネスとして処理することで、それを構造工学の設計問題へ適用した例は数多くある<sup>9)</sup>。

ここでは、環境指数の評価を以下のような補正係数を乗ずる形により、あいまいさを取り込むことで考えることにする<sup>9), 10)</sup>。

$$X_{TP} \geq N_s X_{SP} \dots\dots\dots (16)$$

ここで、 $N_s$  は環境条件による影響をファジィネスとして考慮するための補正係数(確率変数)である。いま各テクノロジーごとの耐久性ポイントおよび環境に関するポイントが確率変数で表わされるものとする、式 (5) と同様に以下のようなになる。

$$50 + \sum_{i=1}^6 X_i \geq N_s X_7 \dots\dots\dots (17)$$

これより、前述と同様に安全性指標  $\beta$  は以下のように表わせる。

$$\beta = (50 + \sum_{i=1}^6 \mu_i - \mu_7 \mu_{Ns}) / \{ \alpha_1^* \alpha_2^* \sum_{i=1}^6 V_i \mu_i + \alpha_1^* \alpha_2^* (V_{Ns} + V_7) \mu_{Ns} \mu_7 \} \dots\dots\dots (18)$$

ただし、 $\alpha_1^*$ 、 $\alpha_2^*$ 、 $\alpha_3^*$  は分離定数で以下のように求められる。

$$\alpha_1^* = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^6 \sigma_i^2 + \mu_{Ns}^2 \sigma_i^2 + \mu_7^2 \sigma_{Ns}^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^6 \sigma_i^2 + \mu_{Ns}^2 \sigma_i^2 + \mu_7^2 \sigma_{Ns}^2}} \dots\dots\dots (19)$$

$$\alpha_2^* = \sqrt{\sum_{i=1}^6 \sigma_i^2} / \sum_{i=1}^6 \sigma_i \dots\dots\dots (20)$$

$$\alpha_3^* = \frac{\sqrt{\mu_{Ns}^2 \sigma_i^2 + \mu_7^2 \sigma_{Ns}^2}}{\mu_{Ns} \sigma_7 + \mu_7 \sigma_{Ns}} \dots\dots\dots (21)$$

ここで、 $\mu_{Ns}$ 、 $\sigma_{Ns}$ 、 $V_{Ns}$  はそれぞれ補正係数  $N_s$  の平均値、標準偏差、変動係数である。

さらに、式 (17) をそれぞれの公称値を用いて式 (6) のように書き改めると以下のようなになる。

$$50 + \sum_{i=1}^6 \phi_i X_i^n \geq N_s^* \phi_7 X_7^n \dots\dots\dots (22)$$

この場合の部分安全係数は、式 (8) から式 (13) と同様にすると、以下のように得られる。

$$\phi_i = \frac{1 - \beta \alpha_1^* \alpha_2^* V_i}{1 - z_i V_i} (i=1, 2, \dots, 6) \dots\dots\dots (23)$$

$$\phi_7 = \frac{1 + \beta \alpha_1^* \alpha_2^* V_7}{(1 + z_{Ns} V_{Ns}) (1 + z_7 V_7)} \dots\dots\dots (24)$$

以上から、式 (23)、(24) から部分安全係数を評価するには、分離定数  $\alpha_i^* (i=1, 2, 3)$  の中にあるファジィ補正係数  $N_s$  の確率変数としての平均値  $\mu_{Ns}$  および標準偏差  $\sigma_{Ns}$  が必要となる。以下では文献9)に基づいてその評価方法を簡単に述べることにし、それによって得られた結果については、冗長さを避けるために文献10)を利用することにする。

いま  $N_s$  に関するファジィ性の評価を言語変数によって行うものとする、言語変数の各要因に関する総合評価  $P_T$  は以下のように表わされる<sup>9)</sup>。

$$P_T = \int_{U \times W} \bigvee_i [\mu_{P_i}(u) \wedge \mu_{W_i}(w)] (u, w) \dots\dots\dots (25)$$

ここで、 $\mu_{P_i}$  は要因  $i$  (例えば自然環境の影響等) に対する言語変数で表現されたサイズ (size)  $P_i$  の帰属度関数

を、 $\mu_{wi}$  は要因  $i$  に対する重要度を表すウェイト (weight)  $W_i$  の帰属度関数を表わしている。

ただし、ファジィ空間  $U$ ,  $W$  は  $0 \leq (u, w) \leq 1$  で定義されていて、記号  $\vee, \wedge$  はファジィ集合演算の  $\max, \min$  演算の意味である。ここでのサイズとは、影響が「著しい」とか「少ない」等の言語表現をファジィ評価するものであり、ここでは LARGE, MEDIUM, SMALL とした場合の帰属度関数値を与え、ウェイトについても重要度の大小に応じて、LARGE, MEDIUM, SMALL としてサイズと同様に評価する。

また補正係数  $N_s$  は確率変数であることを満たす必要がある、それは事前には未知であることから、ここでは先験分布  $\lambda(n_s)$  を持つものと仮定する。さらに、 $P_T$  とファジィ関係  $R$  の帰属度関数から求められる核  $K^{(1)}$  の帰属度関数  $\mu_{KNs}(v)$  と先験分布  $\lambda(n_s)$  から、 $N_s$  に関するファジィ確率  $P(n_s)$  およびその確率密度関数  $f_{Ns}(n_s)$  は以下のよう求められる。

$$P(n_s) = \int_v \mu_{KNs}(v) \lambda(n_s + v) dv \dots \dots \dots (26)$$

$$f(n_s) = \frac{P(n_s)}{\int_{-\infty}^{\infty} p(n_s) dn_s} \dots \dots \dots (27)$$

ここで、 $p(n_s)$  は  $P(n_s)$  の確率密度関数である。以上簡単にファジィ確率密度関数  $f(n_s)$  の求め方を述べたが、詳細については文献 9), 10) を参照されたい。このようにして求めた確率密度関数から、 $N_s$  に関する平均値、標準偏差を式 (19) から式 (24) に代入することで、主観的な言語変数で表わされたあいまいさの定量的な影響を、信頼性理論に基づいた部分安全係数の決定に取り込むことが可能となる。

#### 4. 計算例および考察

##### (1) 環境条件にファジィネスを考慮しない場合

数値シミュレーションを実行するために、各テクノロジーごとの耐久性ポイントおよび環境条件に関するポイントの平均値、変動係数を **Table 1** のように仮定する。ただし、これらの数値は、土木学会コンクリート委員会耐久性設計小委員会が提案している各テクノロジー毎へのポイントの配点になるべく合うように、文献 6) 中の付録に記載されてある例題のいくつかを参考にして設定したものである。したがって、ここで与えた数値自体に関しては妥当性に問題の残る点もあるが、本研究は部分安全係数を用いた耐久性設計の設計書式の提案と各テクノロジーごとの平均値等のパラメタの変化が部分安全係数に及ぼす影響およびその程度を調べることを主眼としており、部分安全係数の厳密な数値そのものを求めることではないので、いくぶん緩やかな仮定となっている。というのも、前述したように、各テクノロジーごとに付

**Table 1** Means and C.O.V. s of Variable  $X$

Variable	Mean: $\mu$	C. O. V. : $V$
$X_1$	2.0	1.00
$X_2$	15.0	0.25
$X_3$	7.0	0.50
$X_4$	25.0	0.50
$X_5$	23.0	0.50
$X_6$	17.0	0.75
$X_7$	100.0	0.10

与されている現行のポイント自体にも恣意性が指摘できることもあり、したがって将来変化することも考えられるから、大まかに配慮することにとどめることとした。

なお、テクノロジーについては、確率変量と確定量がポイントとして混在するものもある (例えば  $X_5$ )。これらの変動については、確定量を除いた確率変量に関するのみの変動を代表させて、そのテクノロジーの変動係数とした。

いまこれらの値を用いて、耐久性ポイントおよび環境条件に関する確率変数が、(a) すべて正規分布に従う場合、(b) 一部が一様分布 ( $X_4, X_5, X_6$ ) に従うが残り正規分布のままの場合、(c) すべてが一様分布に従う場合、について耐久指数が環境指数を下回る確率、すなわち  $X_{TP} < X_{SP}$  となる確率を、モンテカルロ法で求めたものと、標準化空間での Hasofer-Lind による安全性指標  $\beta_{H/L}$ <sup>12)</sup> を利用して求めたものを **Table 2** にのせる。

確率変数の組み合わせとして一様分布を採用した理由は、テクノロジーごとのポイントの付与に対する任意性が大きくても対応できるモデルを想定したからである。ただし、 $\beta_{H/L}$  による方法において、正規分布以外の分布関数をあつかう場合にはなんらかの形で、標準正規分布に従う分布となるよう近似が必要となる。そこで、ここでは以下の式に基づいて一様分布を標準正規分布に従う確率変数に近似している。

$$f(X^p) = \phi(z_i) \dots \dots \dots (28)$$

$$F(X^p) = \Phi(z_i) \quad z_i = \Phi^{-1}(F(X^p)) \dots \dots \dots (29)$$

ここで、 $F(\cdot), f(\cdot), \Phi(\cdot), \phi(\cdot)$  はそれぞれ一様分布および標準正規分布の累積密度関数と確率密度関数を表わし、 $X^p$  は確率変数  $i$  の原空間での設計点を表わすものとする。なお、表中の安全性指標  $\beta$  と生起確率  $p_f$  は一般に、 $p_f = \Phi(-\beta)$  の関係がある。

本研究では、式 (6) で用いられる公称値  $X^p$  として、現実には、上で得られた設計値  $X^p$  を採用していることになっている。ちなみに、**Table 2** の (a) の例では ( $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7$ )<sup>p</sup> = (1.73, 14.06, 6.18, 14.52, 14.13, 6.10, 106.71) と得られる。テクノロジーにして

**Table 2** Probability  $p_f$  and Safety Index  $\beta$  with the Occurrence of  $X_{Tb} < X_{Sp}$

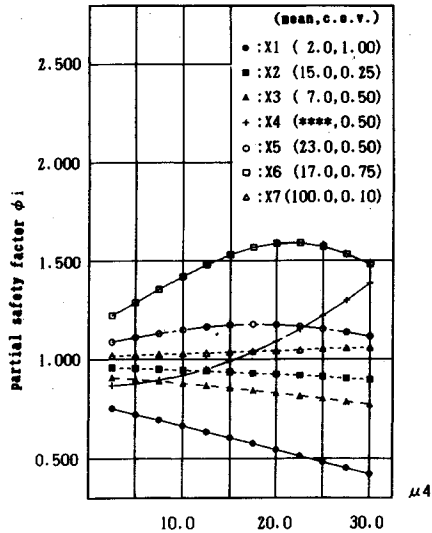
CASE	モンテカルロ法		$\beta_{H/L}$ による方法	
	$p_f$	$\beta_M$	$p_f$	$\beta_{H/L}$
(a)	0.0532	1.613	0.0529	1.618
(b)	0.0968	1.303	0.0934	1.318
(c)	0.1151	1.205	0.1112	1.219

4, 5, 6すなわち、部材の形状・鉄筋詳細・設計図、コンクリート工、鉄筋工・型枠・支保工といった、他のテクノロジーにくらべて現場において製品としてのばらつきが大きいとおもわれる変数の変動係数を大きくしたものは、当然ではあるが、設計点において平均値からのずれが大きくなっている。現在のところ公称値は未知であることから決めようがない。したがって本研究のような処理がひとつの方法と考えられる。勿論、テクノロジーごとに付与されたポイントが、より信頼性の高いものとなりそれに基づいて公称値が設定されるようになれば、この限りではない。

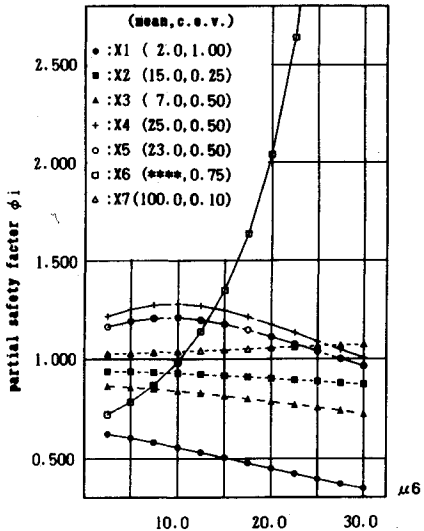
ここで与えた平均値の変化が部分安全係数に及ぼす影響をみるために、他に比べて比較的大きな平均値を持つ変数  $X_4$  について、本研究で設定した平均値の近傍で、妥当と思われる範囲で変化させた場合について Fig.1 にのせた。これから、 $X_4$  の平均値の変化に対して、 $X_4$  そのものおよび  $X_1$ ,  $X_6$  の部分安全係数に多少変化がみられるがそれほど顕著ではない。これに関しては  $X_5$  を同様に変化させた場合は、Fig.1 の  $X_4$  の軌跡と  $X_5$  のそれを入れ替えただけといった、ほとんど同じ結果となる。一方、鉄筋工・型枠・支保工に関する耐久性ポイント  $X_6$  の平均値の変化については Fig.2 に見られるように、 $X_6$  そのものに関する部分安全係数にかなりの変化をもたらすことがわかる。ただしそれ以外のものについてはそれほどでもない。これは  $X_6$  の変動係数が 0.75 と比較的大きいことから考えられる。なお、変動係数が一番大きく設定されている変数  $X_1$  は、平均値が小さめに設定されているため、他への影響はほとんど無いことが結果として得られている。

いま、簡単のために、耐久性ポイントおよび環境条件に関するポイントがすべて正規分布に従うものとして、データが Table 1 のように与えられた場合の、耐久性照査式に部分安全係数を用いない場合と部分安全係数を用いる場合に、耐久指数  $T_p$  が環境指数  $S_p$  を下回る確率 = 危険度を、モンテカルロ法（生起回数 1000 回）を用いて求めたものを Table 3 にのせた。

これから、ここで仮定した平均値および変動係数を用いると、耐久性小委員会では提案された式 (4) を満足しない状況が 1000 回に 50 回程度発生することが予想され



**Fig.1** Partial Safety Factors for Variation of Mean Values of  $X_4$  (All  $X$  are Normal Distribution)



**Fig.2** Partial Safety Factors for Variation of Mean Values of  $X_6$  (All  $X$  are Normal Distribution)

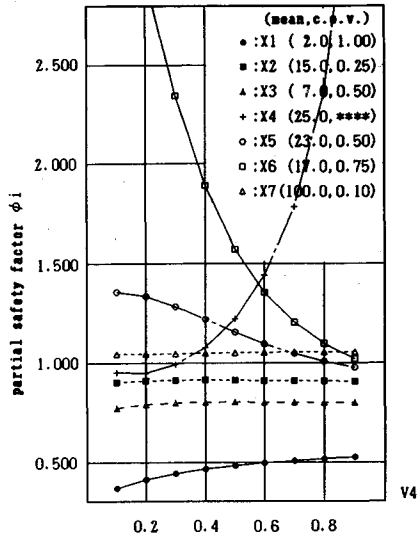
る状況が、部分安全係数を用いる照査式 (6) に基づくと 1000 回に 40 回程度に減少することが期待される状況となることを示している。もちろんこの状況は平均値、変動係数の設定の違いで変化するものと考えられるが、耐久的なコンクリート構造物の確保の度合いが大きくなることは期待できることになる。

次に、各テクノロジーごとのばらつき、例えば施工精度等のばらつきを表現する変動係数の変化が、部分安全係数におよぼす影響をみるために、平均値がほかに比べて比較的大きいと思われる変数を代表して、 $X_4$ ,  $X_6$ ,  $X_7$  について、Fig.3 から Fig.5 にのせた。

なお、変数  $X_5$  (コンクリート工) の変動係数の変化に

**Table 3** Degree of Safety Improvement with Partial Safety Factors

	$\beta_f$	$\beta_M$
$50 + \sum_i X_i \leq X_7$	0.0532	1.613
$50 + \sum_i \phi_i X_i \leq \phi_7 X_7$	0.0432	1.715

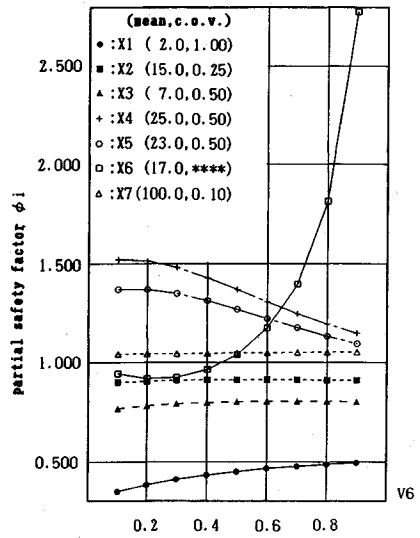


**Fig. 3** Partial Safety Factors for Variation of C.O.V.s of  $X_4$  (All  $X$  are Normal Distribution)

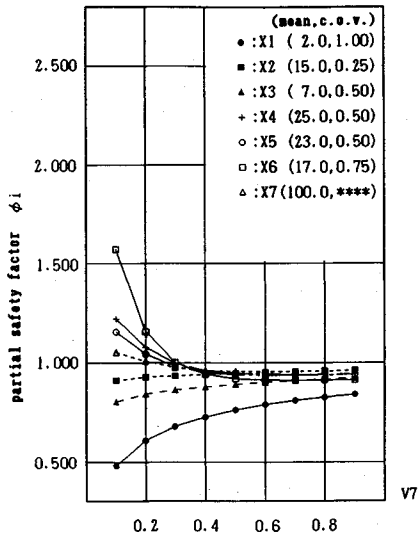
対する部分安全係数の変化については、Fig.3の  $X_4$  と  $X_5$  の軌跡をほぼそのまま入れ替えただけの形となるので、ここでは省略した。また、変数全体的に大きな変動係数を持つと考えられる場合として、 $X_2$ ,  $X_3$ ,  $X_7$  の変動係数を 0.9 と与えて Fig.6 にのせた。

これらの図について、テクノロジーごとに見ると、例えば Fig.3 から、 $X_4$  (部材の形状・鉄筋詳細・設計図) の変動係数の変化に対して  $X_6$  (鉄筋工・型枠・支保工) の部分安全係数が大きく変化することが認められる。

一方、Fig.4 から  $X_6$  の変動係数の変化については  $X_4$ ,  $X_5$  とともにそれほど激しく変化する傾向は認められない。したがって、式 (4) を満足するすなわち、耐久設計が確保される可能性を高めるためには、変動係数が高い、即ち完成精度のばらつきが大きいと思われるテクノロジーについて、その部分安全係数を大きく設定しておく必要があることを示している。特に、 $X_6$  (鉄筋工・型枠・支保工) の設定が、変動係数の設定に関連して考慮する必要がでてくる。というのも  $X_4$ ,  $X_5$  に比較して  $X_6$  の管理の方が、困難がより多くなると予想されるからである。なお、環境指数  $X_7$  に関する変動係数の変化に関して、それぞれのテクノロジーの部分安全係数の変化を Fig.5



**Fig. 4** Partial Safety Factors for Variation of C.O.V.s of  $X_6$  (All  $X$  are Normal Distribution)



**Fig. 5** Partial Safety Factors for Variation of C.O.V.s of  $X_7$  (All  $X$  are Normal Distribution)

に示す。これとさらに、Fig.3, Fig.4, Fig.6 をふくめて、環境指数の変動係数が各テクノロジーの部分安全係数に及ぼす影響は少ないことが分かる。これは式 (15) において、 $X_1 \sim X_6$  の変動係数が  $X_7$  の変動係数の設定より相対的にかなり大きくなっているため、 $\alpha_1$  がほぼ 1.0 に近くなることと、 $X_7$  の変動係数のこの程度の変化については設計点があまり変化せず全体的に一定となるからと考えられる。勿論これは、基本的にはここで設定した数値に関してだけに限定されるが、はじめにも述べたように、かなり大雑把に設定したとは言えコンクリート耐久性小委員会の設定ポイントから大きく逸脱している訳ではないのでしたが、設定データの変化によって多少の違

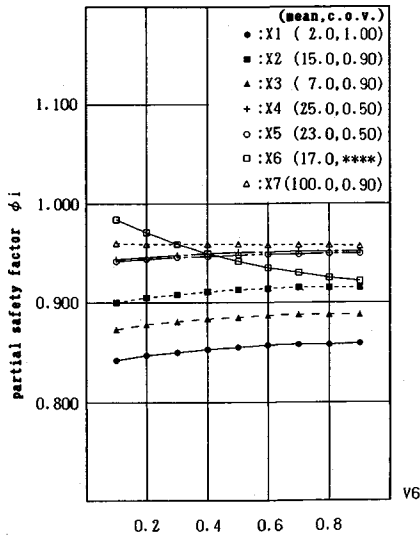


Fig.6 Partial Safety Factors for Variation of C.O.V.s of  $X_6$  (All  $X$  are Normal Distribution)

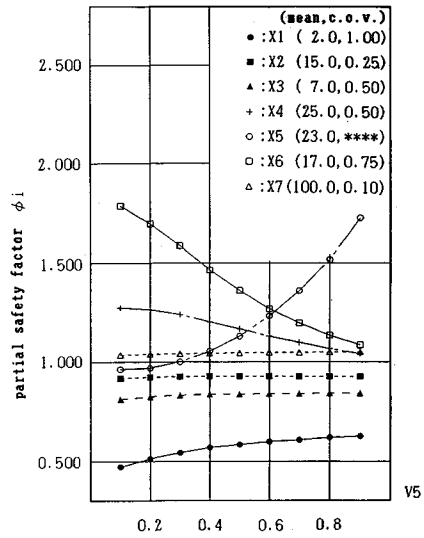


Fig.7 Partial Safety Factors for Variation of C.O.V.s of  $X_5$ ,  $X_6$  are Uniform Distribution)

いはあっても、ほぼ傾向は同じものになると期待される。

以上は耐久指数と環境指数の変数全てが正規分布に従う確率変数の場合についての計算例を示したが、比較のために前述のように、(b) 一部が一様分布に従う場合、(c) 全部が一様分布に従う場合、についての各テクノロジーに付与すべき部分安全係数を、 $X_5$ ,  $X_6$  の場合を代表させて、Fig.7 から Fig.10 にのせた。これ等の図から、部分安全係数についてみると (b) と (c) とではほぼ同様な大きさおよび変化となっている。

以上の図から、妥当と思われる変動係数の変化においては、それぞれのテクノロジーに付与される部分安全係数の値は、 $X_4$ ,  $X_5$ ,  $X_6$  のように平均値と変動係数がほかのテクノロジーのそれ等に比べて比較的大きいものを除いて大まか次のようになる。

すなわち、 $\phi_1 \approx 0.5 - 0.6$  程度、 $\phi_2 \approx 0.9$  程度、 $\phi_3 \approx 0.8$  程度、 $\phi_7 \approx 1.0 - 1.1$  程度を目安とする。ただし  $\phi_4$ ,  $\phi_5$ ,  $\phi_6$  については、それぞれの変動に基づいて決定する必要があるが、通常の変動係数を有する場合として、分布の違いについても考慮すると、おおそ変動係数の値が 0.4 から 0.8 程度に関しては、 $\phi_4$ ,  $\phi_5 \approx 1.2 - 1.5$  程度、 $\phi_6 \approx 1.0 - 1.5$  程度となる。以上のように、テクノロジー  $X_4$ ,  $X_5$ ,  $X_6$  の耐久性ポイントに関する部分安全係数の値が全体的に 1.0 より大きくなった原因としては、変動係数を大き目に設定したことにより、公称値  $X^n$  としての設計値  $X^D$  の値が平均値よりかなり下回り、結局式 (6) を満足するためには相対的に大きな部分係数が必要となったからと思われる。

(2) 環境条件にファジィネスを考慮した場合

これまでの計算例では、耐久指数および環境指数の評価の不確実性に関して、テクノロジー・ポイントの与え

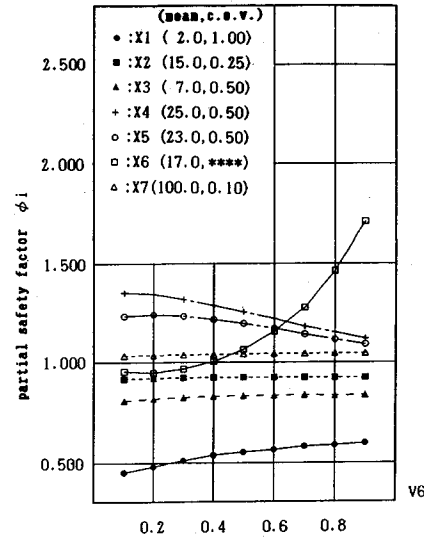


Fig.8 Partial Safety Factors for Variation of C.O.V.s of  $X_6$  ( $X_4$ ,  $X_5$ ,  $X_6$  are Uniform Distribution)

かたの恣意性を確率変数として捉え、ばらつきに関しては変動係数の大小で見えてきた。しかし、恣意性については、確率論的な取り扱いだけでは十分ではなく、ファジィ論的な取り扱いも組み込む必要がある。ここでは特に環境指数に関してファジィネスを取り込んだ場合の部分安全係数を求めることにする。

自然環境のような変数に関しては、一般的にそれが構造物に及ぼす影響を、ここでは影響が大きく、ここでは影響が少ない、といったように明確に定義できる境界線を引くことは本来不可能である。このような場合に前述のように、ファジィ論的な処理が望まれる。

いま影響が「大きい」とか「小さい」という言語表

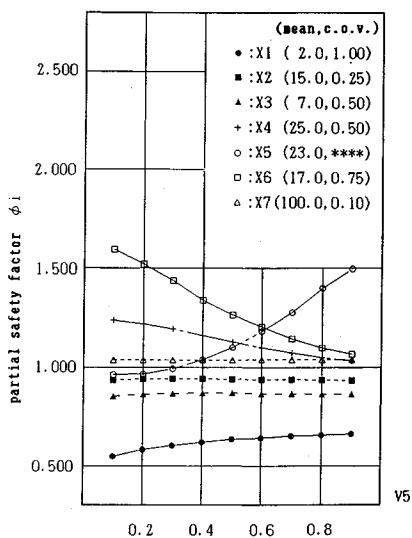


Fig.9 Partial Safety Factors for Variation of C.O.V.s of  $X_5$  (All  $X$  are Uniform Distribution)

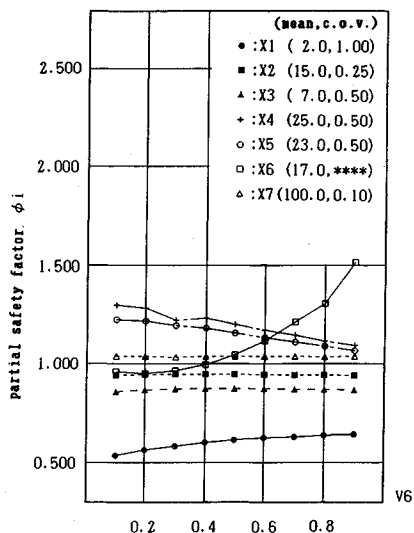


Fig.10 Partial Safety Factors for Variation of C.O.V.s of  $X_6$  (All  $X$  are Uniform Distribution)

現によるファジィ評価であるサイズを LARGE と SMALL として<sup>9),10)</sup>, すべてのサイズに LARGE を採用した (A) LARGE モデル, すべてのサイズに SMALL を採用した (B) SMALL モデルの 2 つを設定した。式 (25) におけるサイズとウェイトの言語変数「大きい」, 「中くらい」, 「小さい」に対する帰属度関数として  $Z$ -,  $\pi$ -,  $S$ -関数を用いた<sup>9)-11)</sup>。いまファジィ関係  $R$  として、  
 「もし  $P_T$  が LARGE ならば核  $K$  も LARGE  
 もし  $P_T$  が MEDIUM ならば核  $K$  も MEDIUM  
 もし  $P_T$  が SMALL ならば核  $K$  も SMALL」  
 のようなルール<sup>9),11)</sup>を定義し、式 (26), (27) から補正係数  $N_s$  の平均値  $\mu_{N_s}$  および標準偏差  $\sigma_{N_s}$  を求めると

Table 4 Means and Standard Deviations of Fuzzy Adjustable Factor  $N_s$

$\lambda$ ( $n_s$ )	主観的不確定量評価	
	(A) LARGE	(B) SMALL
$\sigma = 0.1$	$\mu_{N_s} = 1.014$ $\sigma_{N_s} = 0.100$	$\mu_{N_s} = 0.982$ $\sigma_{N_s} = 0.099$
$\sigma = 0.2$	$\mu_{N_s} = 1.030$ $\sigma_{N_s} = 0.199$	$\mu_{N_s} = 0.963$ $\sigma_{N_s} = 0.198$
$\sigma = 0.3$	$\mu_{N_s} = 1.042$ $\sigma_{N_s} = 0.298$	$\mu_{N_s} = 0.944$ $\sigma_{N_s} = 0.297$

Table 4 のようになる<sup>9),10)</sup>。ただしこの場合、先験分布  $\lambda$  ( $n_s$ ) の分布は正規分布とし、平均値は 1.0 としてある。

これらの結果について、(A) LARGE モデルと (B) SMALL モデルの場合の各テクノロジーに関する部分安全係数の値の変化を Fig.11, Fig.12 にのせる。これらの図から、2 つのモデルともに、先験分布の変動係数の変化に伴い部分安全係数が変化するが、(A) と (B) の間の変化はそれほど顕著ではない。この現象は、先験分布を一様分布あるいは三角形分布と仮定した場合にも差はほとんど認められなかった。

もともと先験分布は未知であるので、先験分布の違いが結果に大きく影響を及ぼすようでは設計に関する情報として困ることになるが、そうではないことから、先験分布の影響を細かく考える必要がないことになる。さらに、環境に関する主観的あいまいさとして、その影響が大きいと判断した場合にも、またその逆の場合についても、部分安全係数に関して差があまりない。したがって、ここで取り扱ったように、環境に関する主観的あいまいさを、ファジィネスとして処理する必要性はそれほど認められない。また、補正係数としての  $N_s$  の役目としては、主として  $X_7$  のみに関連している。もちろん、分離定数として一部他にも貢献するが、主には環境指数の部分に貢献するので、傾向としては、Fig.5 の修正をしているとも考えられる。

以上のことから、環境指数に関してはファジィネスと云った量を設計に積極的に取り込む必要はあまりないと言える。このことは、設計基準の作成に関して、設計実務家に余分な負担をかける必要がないことを示している。

### 5. まとめ

最近わが国をはじめとして、コンクリート構造物の耐久性が要求されており、耐久性設計の確立が望まれている。その設計システムは、できることなら限界状態設計法におけるような設計システムが望まれている。

そこで本研究は、コンクリート構造物の耐久性設計に関して、土木学会コンクリート委員会耐久性設計小委員会によって提案されている耐久性設計書式を、信頼性理



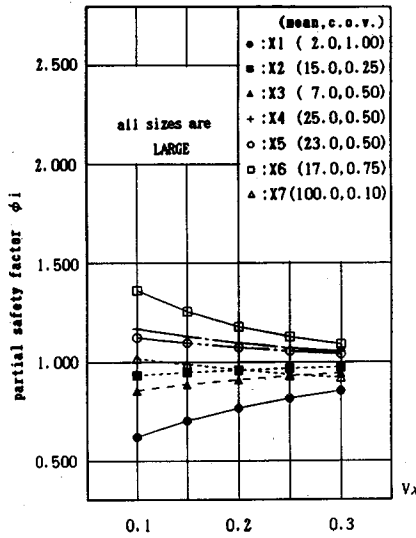


Fig.11 Partial Safety Factors for Variation of C.O.V.s of  $\lambda(n_s)$  (All X are Normal Distribution)

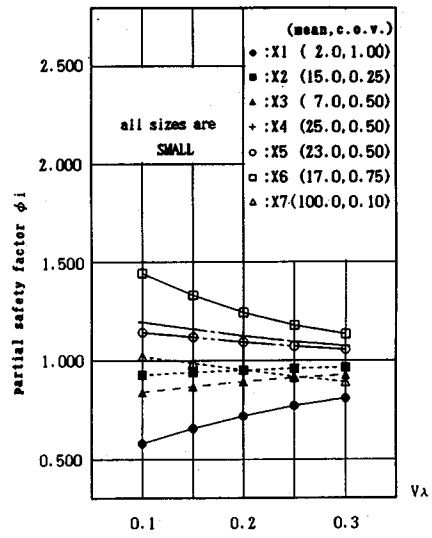


Fig.12 Partial Safety Factors for Variation of C.O.V.s of  $\lambda(n_s)$  (All X are Normal Distribution)

論に基づいた部分安全係数を用いた設計書式で表現することで、耐久性設計に対する設計システムの提案を行い基礎的な資料作成のためのデータの提案を試みた。この場合、部分安全係数は、委員会から提案されている各テクノロジーごとのポイントを確率変数として処理した場合に、その平均値および変動係数の設定によって変化する。したがって本研究では、平均値および変動係数の変化が各テクノロジーに付与すべき部分安全係数に及ぼす影響を求め、耐久性設計のための大まかな部分安全係数の値を推定し提案し、部分安全係数設計書式の確保できる安全性の度合いを評価した。さらに、確率変数の分布の違いが部分安全係数に及ぼす影響を調べた。

環境条件がコンクリート構造物の耐久性に及ぼす影響が大きいことはよく知られている。耐久性に及ぼす環境条件の影響の大小の評価に関する、主として恣意的なあいまいさを、ファジィネスとして処理して部分安全係数の決定に組み込んだ。それによると、本研究で設定した平均値および変動係数を用いる限りでは、主観に関するあいまいさの影響は、例えばコンクリート工といったテクノロジーに関する変動の影響ほど顕著には設計に響かない可能性を示唆した。

本研究はしかしながら、各テクノロジーごとに付与するポイントの平均値および変動係数の設定に関しては、委員会から提案されている値および計算例を参考にしたとはいえ、確実性のある根拠に欠けている点が限界となっている。したがって、確実性のある基礎データが委員会から提案されればここで得られた部分安全係数の値は当然代えられることになる。

参考文献

- 1) 小林一輔：コンクリート構造物の早期劣化と耐久性診断，森北出版，1991.7.
- 2) 小林一輔・丸 章夫・立松英信：アルカリ骨材反応の診断，森北出版，1991.3.
- 3) 福島敏夫：鉄筋コンクリート造建築物の寿命，技報堂出版，1990.9.
- 4) 土木学会コンクリート標準示方書改訂小委員会：コンクリート標準示方書（平成3年版）改訂資料およびコンクリート技術の今後の動向，pp.266~272，土木学会，1991.9.
- 5) 岡村 甫：コンクリート構造物の耐久性設計の考え方—土木構造物の場合—，コンクリート工学，Vol.26，No.11，pp.11~14，1988.
- 6) コンクリート委員会耐久性設計小委員会：コンクリート構造物の耐久設計指針（試案），コンクリート・ライブラリー第65号，土木学会，1989.8.
- 7) 例えば Mayasandra K. Ravindra, Niels C. Lind and Wilfred Siu : Illustrations of Reliability-Based Design, Journal of the Structural Division, ASCE, ST 9 pp.1789~1811, 1974.
- 8) 例えば，古田 均・小尻利治・宮本文穂・秋山孝正・大野研・背野康英共著：ファジィ理論の土木工学への応用，森北出版，1992.8.
- 9) 白石成人・古田 均・池島賢治：信頼性解析法へのファジィ理論の適用に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，No.325，pp.1~10，1982.9.
- 10) 小山 健・荒井達也・中山隆弘：ファジィネスを考慮したコンクリート床版の最適かぶり厚さについて，土木学会論文集 No.465/I-23，pp.47~55，1993.4.
- 11) 矢川元基編：ファジィ推論，計算力学とCAEシリーズ4，pp.189~223，培風館，1991.1.
- 12) Hasofer, A.M. and Lind, N.C. : Exact and Invariant Second-Moment Code Format, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.100, No. EM1, pp.111~121, 1974. (1993.7.16 受付)

## DURABLE DESIGN FOR CONCRETE STRUCTURES USING RELIABILITY BASED PARTIAL SAFETY FACTORS

Ken KOYAMA and Hironobu TSUCHIYA

The design format proposed by the subcommittee for durable concrete design of JSCE Concrete Committee is expected to obtaining durable concrete structures. According to the design format, it is to be performed by making the point sum for durability indices greater than the point for environmental index. However, the points assigned to technologies like concrete materials or concrete and reinforcement works, for example, seem to having no rational reason. Therefore, reliability based partial safety factor design format in which points are considered to be random variables is introduced, alternatively, to investigate the usefulness of the format.

---

自動車交通問題解析ソフト

# TRシリーズ

未来設計企業

# CRC

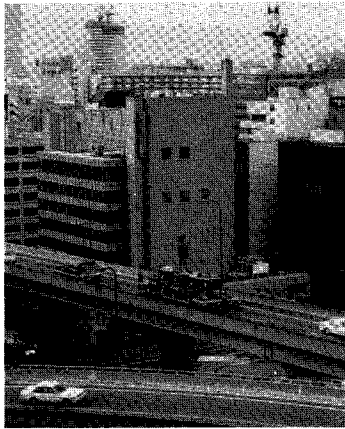
自動車騒音解析システム

## TRNOISE

パソコン用に開発された自動車騒音解析システムです。道路に直角な断面における騒音レベルの中央値を予測します。計算方法は、日本音響学会式によるもので、1970年の提案以来、最も広く利用されている方法です。

操作は、画面に表示されるメニューを選択し、指定されたデータを入力しますので、特にコンピュータに関する知識を必要としません。

計算結果は、プリンタ及びフロッピーディスクに出力され、断面等騒音線図、距離減衰曲線を描くことができます。計算点は、格子点、環境基準評価高さ点、任意点の3方式による選択ができます。



自動車排ガス解析システム

## TRGAS

パソコン用に開発された自動車排ガス解析システムです。道路に直角な断面における一酸化炭素(CO)・窒素酸化物(NOx)の濃度(ppb)を予測します。計算方法は、建設省提案モデルです。

操作は、画面に表示されるメニューを選択し、指示に従ってデータを入力します。特に、コンピュータに関する知識は必要としません。

結果は、プリンタ及びフロッピーディスクに出力され、距離減衰曲線を描くことができます。計算予測点は、任意に10点まで設定できます。

自動車振動解析システム

## TRVIB

パソコン用に開発された自動車振動解析システムです。道路に直角な断面における振動レベルの80%レンジの上端値を予測します。計算方法は、建設省提案モデルです。

操作は、画面に表示されるメニューを選択し、指示に従ってデータを入力します。特に、コンピュータに関する知識は必要としません。

結果は、プリンタ及びフロッピーディスクに出力され、距離減衰曲線を描くことができます。計算予測点は、任意に10点まで設定できます。



□お問い合わせ先

株式会社 **CRC** 総合研究所

西日本支社 総合研究部

〒541 大阪市中央区久太郎町4-1-3 伊藤忠ビル

☎06-241-4126

本社/〒103 東京都中央区日本橋本町3-6-2 小津本館ビル ☎03-3665-9711(案内)

「TRシリーズ」機能アップ  
新バージョン1.5を  
好評出荷中

担当: 薮内・中川

# 土と水の連成逆解析プログラム

未来設計企業



# UNICOUP

応力解析と浸透解析がドッキングした!

軟弱地盤の解析に!

海洋開発・埋立

盛土・掘削

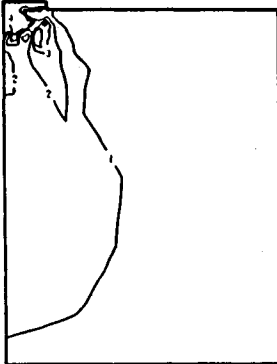
## 出力項目

- 各節点での変位、各要素での応力
- 各節点での全水頭・圧力水頭 他
- 豊富な図化処理  
変位図、変位ベクトル図、応力ベクトル図、応力コンター図、安全率コンター図、水頭コンター図、圧力水頭コンター図

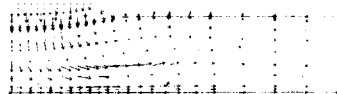
## プログラムの特長

- 応力と地下水の流れをカップルさせた問題が解析可能です。(圧密含む)
- 地下水の流れは飽和・不飽和域を対象としています。
- 多段掘削・盛土や降雨等が扱えます。
- 梁や連結要素も扱え実用的です。
- 経時観測記録(変位・水位)があれば、非線形最小二乗法に基づき変形係数や透水係数が逆解析できます。(順解析、逆解析がスイッチにて選択可能です。)
- 弾性・非線形弾性・弾塑性・弾粘塑性を示す地盤が扱えます。  
非線形弾性(電中研式、ダンカン・チャンの双曲線モデル)  
弾塑性(ドラッカー・ブラガー、モール・クーロン、カムクレイモデル、ハードニング、ソフトニング)  
弾粘塑性(関口・太田モデル)

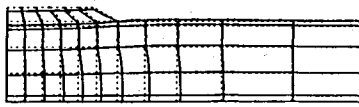
(荷重)



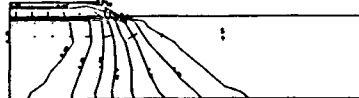
応力増分コンター( $\Delta\sigma_v$ )  
(10日後)



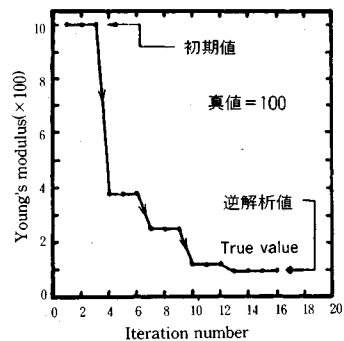
変位ベクトル図(40日後)



盛土(40日)後の地盤の変形



盛土(40日)後の地下水の流れと水頭  
コンターおよび自由水面



ヤング率と繰り返し回数関係

逆解析によるパラメータの推定

この製品は、情報処理振興事業協会の委託を受けて開発したものです。  
通商産業省 特別認可法人

IPA 情報処理振興事業協会

株式会社 CRC 総合研究所 西日本支社

〒105 東京都港区芝公園三丁目1番38号  
TEL. (03) 3437-2301

問合せ先

〒541 大阪市中央区久太郎町4丁目1-3  
(06) 241-4121 営業担当: 岩崎  
(03) 3665-9741 本社窓口: 菅原

# 地盤の有限要素法解析ソフト

未来設計企業

CRC

3月リリース  
開始

世界標準のソフトウェア

## Mr.SOIL Ver.3.0 WINDOWS 版

Mr. SOILの新バージョン (Ver.3.0) はWindows\*で稼働する強力なシステムに生まれ変わり大モデルも扱えるようになりました。

また、マウスを使ったメニュー形式の導入、画面上での出力が可能になるなどの新機能により、すぐれた操作性をもたらします。

\*Windowsは、米国マイクロソフト社の登録商標です。

### バージョンアップ項目

#### 入力部

- モデル作成のためのメッシュジェネレート機能。
- モデル図を参照しながら荷重条件、境界条件、材質条件、はり、棒要素のデータをメニュー画面のテーブルにより入力することが可能。

#### ソルバー部

- 強制変位。
- 解析途中の材質の変更。(薬注施工のモデル化)
- 節点数制限のUP。(約3000節点が可能)

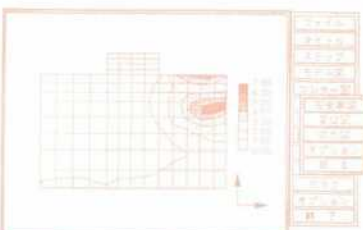
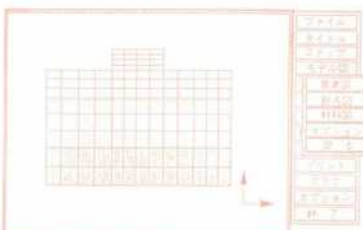
#### 出力部

- 線画だけでなく画面塗りつぶし処理が可能。
- マウス入力とメニュー型式による操作性の大幅な向上。

#### 動作環境

CPU 80386 以上 (推奨 80486 以上)  
Windows 3.1 以上  
メモリ 640Kbyte + 7Mbyte (プロテクトメモリー)  
ハードディスク 10Mbyte以上

以上のメモリーは今後、改良により小さくなる場合もあります。



製品数は、一部異なる場合があります。



株式会社CRC総合研究所 西日本支社

大阪市中央区久太郎町4丁目1-3  
(06)241-4121 担当/村中 一意