

# コンクリート構造物の耐久設計指針(案)に基づいた耐久性確保の度合いについて

小山 健<sup>1</sup>・花田 潤治<sup>2</sup>

<sup>1</sup>フェロー会員 信州大学助教授 工学部社会開発工学科 (〒380 長野市若里 500)

<sup>2</sup>豊田市役所 (〒471 豊田市西町 3-60)

今回土木学会コンクリート委員会コンクリート標準示方書改訂委員会耐久性・耐久設計部会により改訂された「コンクリート構造物の耐久設計指針(案) 1995」<sup>1)</sup>に注目し、この改正案が前回のものと比較して、耐久性ポイントの算定に大きな差がみられ、各小項目についても違いがでていることから、これらの値の違いの耐久性に及ぼす影響をみるために、各項目ごとのポイントを確率変数として処理した場合の、信頼性理論による部分安全係数を用いた耐久性設計書式を作成し、この設計書式で確保できる耐久性はどの程度となるかを「コンクリート構造物の耐久設計指針(試案) 1989」<sup>2)</sup>の場合と比較しながら確率論的に調べることを主眼としている。

**Key Words:** durability design, concrete structure, partial safety factor, JSCE subcommittee proposition

## 1. まえがき

コンクリート構造物の耐久性は、骨材への塩分混入、アルカリ骨材反応、コンクリートの炭酸化、施工の不良等の多くの要因の影響を受ける<sup>1)</sup>。すなわち、コンクリート構造物の耐久性は、材料、設計、施工等に関するさまざまな要因に左右される。

今回土木学会コンクリート委員会コンクリート標準示方書改訂委員会耐久性・耐久設計部会（以下耐久設計部会とする）は、コンクリート構造物の総合的な耐久性設計について「コンクリート構造物の耐久設計指針(案) 1995」<sup>1)</sup>を（以下、改正案とする）を発表した。

今回の改正案においては、耐久性を検討する手順、メンテナンスフリーの期間の設定、ならびに環境指数や耐久指数の算定などに、これまでに提示された疑問点や問題点に答えたものとしている一方で、環境指数や耐久指数の細部については今後とも検討すべき余地は残されていると述べている。したがって、今回の改正案について前回のものと比較し、今後の検討のためにもある種のガイドラインとなるデータが必要であると考えた。

本研究では、「コンクリート構造物の耐久設計指針(試案) 1989」<sup>2)</sup>（以下、前試案とする）における場合と比較しながら今改正点に注目し、耐久設計部会が設定した耐久指数および環境指数を確率変数とし、改正案で確保できる耐久性の程度を確率論的に評価することにした。

## 2. 耐久設計指針(案)による耐久性設計書式

### (1) 耐久性設計書式

耐久設計部会は、前試案と同様に今回の改正案でも、耐久指数と環境指数の大小による耐久性の検討を行うとしている。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的であると判定されるというものである。

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

ここで、 $T_p$ =耐久指数、 $S_p$ =環境指数である。耐久指数 $T_p$ は設計ひび割れ、コンクリート材料の品質、コンクリート工、鉄筋工・型枠工・支保工などの要因（以下、テクノロジーとする）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 $T_{pi}$ より算定するもので、一般に式(2a)、式(2b)で表される。各要因ごとの項目もさらに細かく分類され、各ポイントのあたえ方も改訂された。

$$T_p = 30 + \sum_i T_{pi} \quad \text{改正案} \quad (2a)$$

$$T_p = 50 + \sum_i T_{pi} \quad \text{前試案} \quad (2b)$$

また、環境指数 $S_p$ は構造物が置かれる環境条件および要求されるメンテナンスフリーの期間を考慮して定め、一般に次式で表される。

$$S_p = S_0 + \sum (\Delta S_p) \cdot \quad (3)$$

表-1 平均値 $\mu_i$ と変動計数 $V_i$ 

	改正案		前試案	
	MEAN : $\mu_i$	C.O.V. : $V_i$	MEAN : $\mu_i$	C.O.V. : $V_i$
X <sub>1</sub>	2.0	0.90	2.0	1.00
X <sub>2</sub>	15.0	0.25	15.0	0.25
X <sub>3</sub>	30.0	0.50	7.0	0.50
X <sub>4</sub>	31.0	0.60	25.0	0.50
X <sub>5</sub>	23.0	0.65	23.0	0.50
X <sub>6</sub>	12.0	0.60	17.0	0.75
X <sub>7</sub>	100.0	0.10	100.0	0.10

表-2 改正案、前試案におけるX<sub>T,p</sub> < X<sub>S,p</sub>の生起確率 p<sub>f</sub> と安全性指標 β

	改正案		前試案		改正案		前試案	
	モンテカルロ法による				Hasofer-Lindによる			
	p <sub>f</sub>	β <sub>M</sub>	p <sub>f</sub>	β <sub>M</sub>	p <sub>f</sub>	β	p <sub>f</sub>	β
①	0.083	1.387	0.053	1.613	0.083	1.385	0.053	1.618
②	0.147	1.048	0.097	1.303	0.135	1.105	0.093	1.317
③	0.158	1.002	0.115	1.205	0.148	1.047	0.111	1.219

ここで、S<sub>0</sub>は標準的な環境条件における環境指指数値を示し、50年間メンテナンスフリーを目標とする場合では一般に100である。△S<sub>P</sub>は塩分や凍結融解作用の影響が厳しい環境条件における環境指指数の増分値である。しかし、前述のように各要因ごとの耐久性ポイントの決定には改正案でもなお不確定性が存在すると考えられる。そこで、本研究ではすべての耐久性ポイントを確率変数として扱うことにして、式(2a)を以下のように書き改める。

$$30 + \sum_i^6 X_i \geq X_7 \quad (4)$$

ここで、変数X<sub>1</sub>～X<sub>7</sub>は前試案の評価項目と照らし合わせ、X<sub>1</sub>=コンクリート材料に関する耐久性ポイント、X<sub>2</sub>=コンクリートに関する耐久性ポイント、X<sub>3</sub>=設計ひび割れに関する耐久性ポイント、X<sub>4</sub>=設計作業・部材の形状・補強材の種類・補強材の詳細・設計図に関する耐久性ポイント、X<sub>5</sub>=コンクリート工に関する耐久性ポイント、X<sub>6</sub>=鉄筋工・型枠工・支保工に関する耐久性ポイント、X<sub>7</sub>=環境条件に関するポイント、と定めたものであり、いずれも確率変数である。

ただし、本研究で定義したこれらのテクノロジー項目のうちたとえば、「コンクリート材料に関する耐久性ポイント」X<sub>1</sub>は前試案では第1項目であったものが改正案では第4項目に変更されているほか、前試案では第2項目「コンクリートおよび補強材に関する耐久性ポイント」中の小項目6(防錆した補強材)が、改正案のテクノロジー第1項目「設計作業・部材の形状・補強材の種類・補強材の詳細・設計図に関する耐久性ポイント」中の小項目4に移動されている。

さらに、前試案でテクノロジー項目第6に含まれていた小項目(型枠)と項目第8「防護工に関する耐久性ポイン

ト」とがまとめられて、改正案では独立したテクノロジー項目第3「特別な型枠、表面防護工」になっている。

したがって前試案との対比でポイントを設定する場合にこれらの考慮が必要となる。また耐久性ポイントの範囲も例えばいわゆる「施工」に関しては、前試案(85～135)と改正案(88～145)とでは異なっているので注意が必要である。

## (2) 部分安全係数を用いた耐久性設計式

いま、式(4)が部分安全係数を用いて次式のように表現できるとする。

$$30 + \sum_i^6 \phi_i X_i \geq \phi_7 X_7 \quad (5)$$

ここで、 $\phi_i$  ( $i=1, 2, \dots, 7$ ) は要因 i の部分安全係数で、すべての確率変数が正規分布に従うとするとき、次のように表される<sup>3), 4)</sup>。

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

$$\phi_7 = (1 + \beta \alpha_1 V_7) / (1 + z_7 V_7) \quad (7)$$

ただし、 $\alpha_1, \alpha_2$ =分離定数、 $V_i$  ( $i=1, 2, \dots, 7$ )=テクノロジー項目 i の変動係数、 $z_i$  ( $i=1, 2, \dots, 7$ ) 設計点における確率変数の値、である。

## 3. 計算例および考察

ここでは、今回の改正案により耐久性確保がどの程度になるかを、耐久指数X<sub>T,p</sub>が環境指指数X<sub>S,p</sub>を下回る状態(X<sub>T,p</sub> < X<sub>S,p</sub>)の生起確率(危険度)で調べた。

数値計算シミュレーションを行うため、耐久性ポイントおよび環境条件に関するポイントを表す確率変数X<sub>i</sub>の平

表-3 改正案、前試案における部分安全係数の適用による耐久性の確保の程度

		$p_f$	$\beta_M$
前試案	$50 + \sum_i^6 X_i \geq X_7$	0.053	1.613
	$50 + \sum_i^6 \phi_i X_i \geq \phi_7 X_7$	0.043	1.715
改正案	$30 + \sum_i^6 X_i \geq X_7$	0.083	1.387
	$30 + \sum_i^6 \phi_i X_i \geq \phi_7 X_7$	0.074	1.450

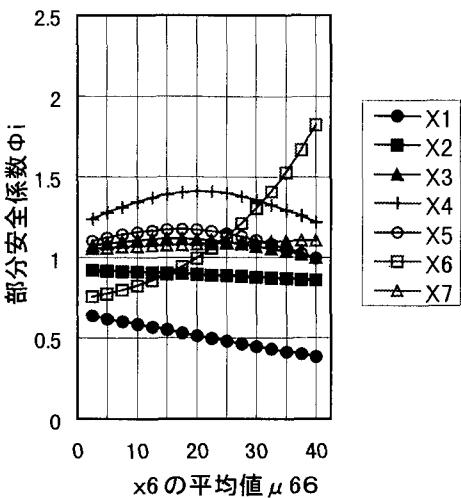


図-1 X6の平均値の変動による部分安全係数

均値  $\mu_i$  と変動係数  $V_i$  を表-1のように仮定した。

ただし、これらの数値は、小委員会が提案している各テクノロジーへのポイントの配点に合うように、改正案付録-3および前試案付録-4に記載されていた例題のいくつかを参考に設定したものである。

たとえばコンクリート材料に関する耐久性ポイント  $X_1$  については、前試案付録-4の表-9からの改善策後の平均値は約 2.5 となり標準偏差は約 8.5 となる。また改正案付録-3表-1～7で、極端にマイナスの大きいポイントを除いたものの中から、プラスポイントのみを抽出した平均値と、マイナスポイントをも含めた平均値はおおよそ 2.7～0.0 の範囲にあり、また標準偏差は約 2.0 として、これらを参考にして本文表-1のように仮定した。またコンクリート工  $X_5$  に関しては前試案と改正案の平均値は約 20～22 であり標準偏差は約 9 から 12 と判断した。残りのものについても同様に仮定したが、設計ひび割れの耐久性ポイントについては前述のように前試案と改正案では

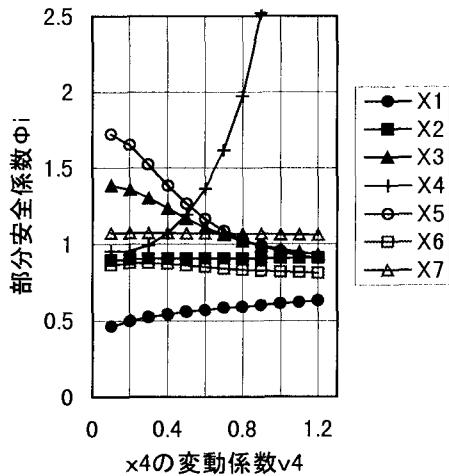


図-2 X4の変動係数の変動による部分安全係数

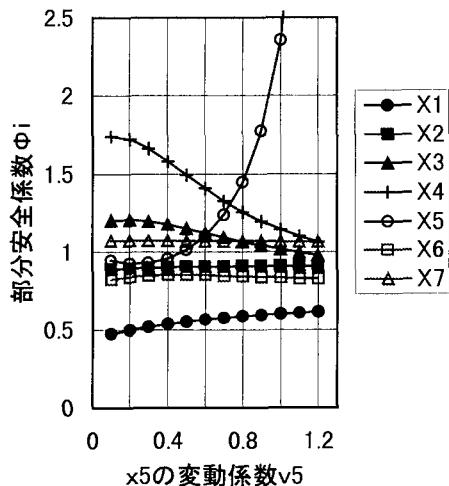


図-3 X5の変動係数の変動による部分安全係数

ポイントの与え方が異なっていることから、本研究では改正案のポイントとして最尤値 30 を用いた。

ただし、これら仮定した平均値および変動係数は確定値ではないので、それらが仮定値から変動した場合に部分係数にどの程度の影響があるかについても考慮した。

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①すべて正規分布に従う場合、②一部が一様分布 ( $X_4, X_5, X_6$ ) に従う場合、③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標を下回る確率(危険度)について モンテカルロ法(生起回数 10000 回)と、標準化空間での Hasofer-Lind による安全性指標<sup>3)</sup>  $\beta_{HL}$  ( $= \beta$ ) を利用して求め表-2 に示した。

表-4 部分安全係数の推定

	改正案	前試案
φ 1	0.5～0.6	0.5～0.6
φ 2	0.9	0.9
φ 3	1.0～1.3	0.8
φ 4	1.1～1.6	1.2～1.5
φ 5	1.0～1.4	1.2～1.5
φ 6	0.8～0.9	1.0～1.5
φ 7	1.0	1.0～1.1

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、文献4)にゆづる。

表-2から、耐久性確保の度合いについて、今回の改正案と前試案とを比較すると、前試案と同程度の耐久性の確保のためには、今回の改正案の方がより向上対策が求められることが分かる。これは、耐久性指数が式(2b)から式(2a)と改訂されたこと、各項目のポイントの与え方が変わったこと、などの影響が現れたと思われる。これより、今回の改正案は前試案に比べて、コンクリート構造物の耐久性に対する検討が厳格になっていることが明らかである。

次に、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、データが表-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用いる場合に、 $X_{Tp} < X_{Sp}$ となる確率(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表-3に示す。これより、ここで仮定した平均値および変動係数を用いると、小委員会で提案された式(1)を満足しない状況が 1000 回に 80 回程度発生することが予想される状況が、部分安全係数を用いる照査式 式(5)に基づくと 1000 回に 70 回程度に減少することが期待される。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。しかし、部分安全係数を用いる照査式 式(5)に基づく場合の確率を前試案と改正案とで比較しても分かるように、改正案においての耐久性の確保の度合いは前試案の場合ほど容易に得られていないことが分かる。

次に、平均値の変化が、部分安全係数に及ぼす影響を見るために、前試案において部分安全係数が大きく変動した  $X_6$  (鉄筋工・型枠工・支保工)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の部分安全係数  $\phi$  を図-1に示す。

これより前試案ほど  $\phi_6$  は変動しないこと、また変動係数が比較的小さく設定された他の要因には影響が少ないことが分かる。一方計算結果を総合的に見て、 $X_4$  の部分安全係数は、他の要因に比べて大きく変動することが分かった。なお、前試案より平均値が大幅に大きく設定された  $X_3$  (設計ひび割れ) の平均値を変動させた場合については、

$X_6$  の平均値を変動させたときほど変動は大きくないが、ほぼ同じような変動の傾向が見られた<sup>5)</sup>。前試案においても言えたことであるが、変動させた要因自身の平均値が大きいほど、要因自身の部分安全係数の変動は大きくまた、平均値が大きく設定されているほかの要因に影響する。

次に、施工精度等のばらつきを表現する変動係数を変化させ、平均値が他に比べ比較的大きいと思われる要因を代表して、 $X_4$ (設計作業・部材の形状・補強材の種類・補強材の詳細・設計図)、 $X_5$ (コンクリート工)の場合を図-2、図-3に示した。

これらの図より、 $X_4$  の変動係数を変化させると  $X_3$ (設計ひび割れ) および  $X_5$  の部分安全係数にかなり影響が見られるが、 $X_5$  の変動係数の変化は  $X_4$  の部分安全係数には影響があるものの他の要因の係数にはあまり影響を及ぼしていない。このことは、前試案に比較して平均値が大きめに設定されたテクノロジーが影響を受けやすいことを示している。

本研究で得られた他の結果を総合して各テクノロジーごとの部分安全係数の値は、大まかに表-4のように推定できる。ただし、 $\phi_3$ 、 $\phi_4$ 、 $\phi_5$ については、それぞれの変動に応じて変化が著しいが、表-1を基準として、分布関数の違いについても考慮した場合のものである。

一方、前試案における部分安全係数の推定値から考察すると、今回の改正案においては、前試案と比較して  $X_3$  がポイントを得られ易くなったと思われ、 $X_6$  がポイントを得られにくくなつたと思われる。

#### 4. 考察およびまとめ

本研究では、コンクリート構造物の耐久性の確保という観点から、今回の改正案に注目し、確保できる耐久性の程度を前試案における場合と比較しながら確率論的に評価した。その結果、現在の改正案において確保できる耐久性の程度は、前試案における場合に比べ下がること、また、部分安全係数を用いることによる耐久性の確保の度合いは向上することが、前試案における場合ほど望めないことが分かった。これより、今回の改正案は、前試案よりコンクリート構造物の耐久性に対する検討が厳格となっていることが指摘できた。

また、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について、前試案における場合と比較しながら検討を行った。

部分安全係数は平均値、変動係数の影響を受けて変動しやすく、それらが大きく設定されている設計、施工に関するテクノロジーは耐久性の照査式全体の中でもその影響は大きい。これらのテクノロジーでは耐久性ポイントを容易に向上させることができる反面、そのばらつきは大きくなる。このことは、設計・施工における精度、適切な処

置等の現場での管理の重要性を示唆している。

部分安全係数の大まかな推定についても、はじめに設定する各要因の平均値、変動係数に大きく左右されるため、実際に妥当な部分安全係数を設定するには、耐久性に影響を及ぼす様々なテクノロジーにおけるポイント（確率変数）を、多くの統計的データや専門的知識により、的確に評価する必要がある。

## 参考文献

- 1) 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（案），コンクリート・ライブラリー第82号，土木学会，1995.11.
- 2) 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.
- 3) Alfred H-S. Ang and C. Allin Cornell : Reliability Bases of structural safety and Design, ASCE, ST9, 1974.
- 4) 小山 健，土屋宏信：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，土木学会論文集，No.484/V-22, pp. 87-96, 1994.2.
- 5) 花田潤治、小山 健：コンクリート構造物の部分安全係数を用いた耐久性の確保について，土木学会中部支部研究発表会，V-61, 1997.3.

（1997. 4. 2 受付）

## ON THE DEGREE OF ASSURANCE FOR DURABLE CONCRETE STRUCTURES BASED ON THE PROPOSED SPECIFICATION OF DURABILITY DESIGN FOR CONCRETE STRUCTURES BY JSCE RESEARCH WORKING GROUP

Ken KOYAMA and Junji HANADA

JSCE research working group on durability design for concrete structures has changed the design format this time from prior one. Based on two formats, the differences of the degree of assuring the durable concrete structures are investigated probabilistically, and the checking format using the partial safety factors is proposed to ensure the durable concrete structures in this paper. The partial safety factors are obtained based on the distributions law such as normal and uniformal probability density functions. The proposed format looks very severe to obtain the durable concrete structures compare with the prior design format.