

投稿論文 (和文)
PAPERS

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

小山 健*・荒井達也**・中山隆弘***

自然環境の中に置かれるコンクリートは、炭酸化作用の進行と共に劣化し、炭酸化が鉄筋の表面に達すると、鉄筋の腐蝕の可能性が大きくなる。このような腐蝕進行は、かぶり厚さを考える上で重要である。ここでは、信頼性理論に基づいた、耐用年数を考慮した場合の、コンクリート・スラブの最適なかぶり厚さの決定に、ファジィネスを取り込んだ設計法の一代替案を提供しようとするものである。

Key Words : *reliability, optimum, covering, concrete, carbonation, fuzziness, cost minimum*

1. ま え が き

土木構造物の中でも特にコンクリート構造物の早期劣化が問題となっているが、これらの原因のひとつとして、炭酸化による影響が上げられている^{1)~3)}。コンクリート構造物は、一般には耐久性が優れていると考えられていたが、環境条件等の外的要因およびコンクリートの品質による内的要因によって意外と早期に劣化することが報告されている¹⁾。耐久性の劣る構造物は、供用期間中の維持管理に多大な費用および労力が必要になり構造物全体としての経済効果が損なわれることになるとともに、期待寿命の短期化を引き起こす要因になると考えられる。このため、コンクリート構造物の耐久性についての研究が望まれており、これまでも数多くの研究がされている^{1), 4)~7)}。これ等の研究からも、コンクリートのかぶり厚さが炭酸化が原因の耐久性におよぼす影響が大きいことが知られている。かぶり厚さは一般に施工の精度に関係し、施工精度のばらつきによってかぶり厚さも当然ばらつくことになる。したがって、炭酸化による耐久性を考える場合のかぶり厚さの数学的な取り扱い、確定的に処理するより確率的な処理が望ましいとの観点から、コンクリート構造物の物理的耐用年数についての研究を、かぶり厚さを確率変数として、鉄筋の表面まで炭酸化が進行し、それによって鉄筋が腐蝕する可能性が大きくなるあるいは鉄筋の腐蝕確率があるレベルになる場合を、構造物の耐用年数と規定し、腐蝕確率のレベルを設定し必要なかぶり厚さを求めようとする研究がある⁸⁾。

一方、土木学会では、鋼材の腐蝕の防止、およびコン

クリートの品質に応じて、さらにコンクリートの粗骨材の最大寸法、化学作用からの保護等からかぶり厚さの最小値が規定されている⁹⁾。これには当然のこととして、炭酸化による影響あるいは耐用年数、経済性等についての考慮も払われているものと考えられるが、表面的には明確な形で示されていることになっていない。

本研究は、物理的耐用年数としての耐久性を鉄筋表面の腐蝕の発生を限界状態としてとらえ、さらに経済性をも考慮することとして、信頼性に基づいた期待総費用最小化原則¹⁰⁾により、コンクリート床版の最適なかぶり厚さの決定に関する設計法についての一代替案を提供しようとするものである。なおコンクリート構造物が置かれる自然環境は炭酸化を考慮する場合重要な要素となる。これに関しては、コンクリート構造物が置かれる屋外における自然環境はさまざまであり、たとえば炭酸化への影響が大きいとか小さいとかによって、かぶり厚さを決定する場合、根拠となる明確な判断を何処におくかといった境界があいまいである。したがって、このような要因を考慮する場合の処理方法として、言語変数によってファジィネスを処理することで^{11)~13)}、かぶり厚さの決定に取り込むこととした。

2. 期待総費用最小化による最適かぶり厚さ

(1) コンクリートの炭酸化速度について

コンクリートの炭酸化速度はすでに述べたように、外的あるいは内的な要因によって影響を受けることが知られている。現在のところ要因として主なものとして考えられているのは(1)コンクリートの構成材料の種類、(2)コンクリートの圧縮強度、(3)水セメント比、(4)施工条件、(5)仕上げ材の有無とその種類と厚さ、(6)環境条件等である²⁾。ただし最近の研究では社会経済的な背景についても言及されている¹⁾。コンクリートの炭酸化は、基本的には、定数項を含む時間に関する一般的

* 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)

** (株) 関電工

*** 正会員 工博 広島工業大学教授 土木工学科

な物理法則にしたがって進行し、それに関していまでも数多くの研究がなされている^{2),14)-17)}。ここではコンクリートの炭酸化進行速度式として、実験式としての以下の式を採用することとした。どの式を採用するかについては様々な条件を勘案すべきであり、したがって別な式を採用すれば当然結果に違いがでてくるものと思われる。しかしながら本研究では、かぶり厚さがどの程度になるかについて定性的な設計の代替案を提供するという観点からより一般的と思われる式として採用したものであり、許される仮定と考えられる。

$$X_c = \alpha \delta \gamma \sqrt{T} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 X_c は経過期間 T 年におけるコンクリートの炭酸化進行深さを表し、 α 、 δ はそれぞれ環境条件および表面の処理状態から決まる変数である。いま、コンクリートの種類と水セメント比から決まるコンクリート品質係数 γ については JASS 5¹⁸⁾ にも用いられている以下の式¹⁹⁾ が成立するものと仮定する。

$$\gamma = \begin{cases} R(W/C - 0.25) / \sqrt{0.3(1.15 + 0.3W/C)}, & W/C \geq 0.6 \\ 0.3R(4.6W/C - 1.76), & W/C \leq 0.6 \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 R はセメントの種類などから決まる定数（炭酸化比率）をまた W/C は水セメント比を表すものとする。

土木構造物は一般に打ち放しの状態で屋外に建設されるのが普通であり、このような条件においては建築構造物と同様に、 $\alpha=1.0$ 、 $\delta=1.0$ であり、普通コンクリートを想定すると $R=1.0$ とおくことができる^{2),17)}。なお本研究では式 (1) の X_c を確率変数とするために以下においては α を確率変数として取り扱うことにする。この理由として、表面の処理状態や品質係数などに比べ、主観的不明量としての不確実性という点では、環境条件の方が大きいと考えられることから、本研究では α のみを確率変数として処理し、他については、便宜的に、確定量とした。

ただし、式 (2) の数値等の内容については、建築構造物と土木構造物では水セメント比がかなり異なることからその適用についての妥当性が問題になる可能性は残されている。しかしながら、現在では土木構造物においても、使用する骨材などの関係から、かなり大きな水セメント比の存在もあり、さらに前述したように、ここではあくまでもこの式を採用したらどのような結果になるのかといった、設計法の一代替案としてのデータの提供を目指していることから、その点についての考慮はしていないことを断わっておく。

(2) ファジィネスを考慮した限界状態関数

いま X_D を設計で決定すべきかぶり厚さを表す確率

変数とすると、式 (1) で表される確率変数としての炭酸化速度 X_c をもちいて、ファジィネスを考慮した場合の、炭酸化深さが鉄筋表面に達したときを限界状態とする場合の限界状態関数 Z は以下のように表現できる。

$$Z = X_D - N_C \cdot X_c \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 N_C は環境条件によって決まる変数 α について、この環境条件は炭酸化速度にかなり大きな影響があるとかあるいはあまり無いとかの言語表現による主観的不明量をファジィネスとして処理するための補正係数¹¹⁾ を表すものである。

過去の調査等から X_D および X_c は正規分布に従うことが知られており^{2),17)}、本研究でも X_D 、 X_c 正規分布すると仮定する。

この場合、限界状態関数 Z に対する 2 次モーメント安全性指標は以下のように表わされる。

$$\beta_Z = \frac{m_{XD} - m_{NC}m_C}{\sqrt{V_{XD}^2 m_{XD}^2 + (V_{NC}^2 + V_{XC}^2) m_{NC}^2 m_C^2}} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 m_{XD} 、 m_{NC} 、 m_C はそれぞれ確率変数 X_D 、 N_C 、 X_c の平均値を表し、 V_{XD} 、 V_{NC} 、 V_{XC} はそれぞれの変動係数を表す。これよりかぶり厚さの平均値は以下のように求められる。

$$m_{XD} = m_C \cdot m_{NC} \cdot g(\beta_Z) \dots\dots\dots (5)$$

ここで、

$$g(\beta_Z) = \frac{1 + \beta_Z \sqrt{A_1 - \beta_Z^2 \cdot A_2}}{1 - \beta_Z^2 \cdot V_{XD}^2} \dots\dots\dots (6)$$

$$A_1 = V_{XD}^2 + V_C^2 + V_{NC}^2 \dots\dots\dots (7)$$

$$A_2 = (V_{XD}^2 V_{NC}^2 + V_{XD}^2 V_C^2) \dots\dots\dots (8)$$

以上から、もし主観的不明量としての補正係数 N_C が何等かの確率密度関数をもっており、その確率密度関数がファジィ確率密度関数としての平均値、分散による表現が可能となる場合には、式 (4) から安全性指標を求めかぶり厚さの平均値を決定することができる。

(3) 期待総費用最小化について

ここでは、経済性の効果を考慮するために、2.(2) で求められた安全性指標の最適化を考えることにする。そのための一設計手法として、期待総費用最小化を考えることにする。構造物の耐用期間中における期待総費用 $E(C_T)$ は一般に以下のように表される¹⁰⁾。

$$E(C_T) = C_I + p_f C_f \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 C_I は構造物の初期費用を、 p_f はその構造物になんらかの限界状態が生起する確率を、 C_f はそれが生起した場合に必要な修復あるいは改善のための費用を表すものとする。 p_f は式 (4) で得られた 2 次モーメント安全性指標 β_Z を用いて以下のように表される。

$$p_f = \Phi(-\beta_Z) \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 $\Phi(\cdot)$ は標準正規分布関数である。期待総

費用を最小化する β_z は原則的には以下の式を実行することによって得られる²⁰⁾。

$$\frac{\partial E(C_T)}{\partial \beta_z} = \frac{\partial C_I}{\partial \beta_z} + C_r \frac{\partial \beta_f}{\partial \beta_z} = 0 \dots\dots\dots (11)$$

いま、式 (11) を実行するにあたり、初期費用を以下のように与えられるものと仮定する。

$$C_I = W_d [A_s \cdot \text{costs} + \{(h+d/2) + X\beta\} \cdot \text{costc}] \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 W_d はコンクリートスラブの幅員、 A_s は単位幅当たりの鉄筋量、 h はスラブの有効高さ、 d は鉄筋の直径をそれぞれ表わし、 costs 、 costc は鉄筋とコンクリートの単位体積当たりの単価を表わすものとする。

ただし、ここで考えた初期建設費用には型枠あるいは人権費等の諸経費は一切考慮されていない。

なお、 $X\beta$ はかぶり厚さの公称値を表し、平均値 m_{XD} とは以下の関係がある。

$$X\beta = f \cdot m_{XD} \dots\dots\dots (13)$$

ここで、 f は平均値からの公称値の隔たりを表現するための定数である。

以上から、限界状態を制約条件として、目的関数である期待総費用を最小化する最適安全性指標 β_z^{opt} は、以下の式を満足するものとして得られることになる。

$$\beta_z^{opt} = \sqrt{2 \ln(1/WW)} \dots\dots\dots (14)$$

ここで、

$$WW = \sqrt{2\pi} f \cdot m_c \cdot m_{NC} \cdot \frac{1}{\phi} \cdot \frac{\partial}{\partial \beta_z} g(\beta_z) \dots\dots\dots (15)$$

$$\phi = \frac{C_I}{(W_d \cdot \text{costc})} \dots\dots\dots (16)$$

である。最適安全性指標を求めるための式 (14) には、両辺に β_z が含まれているので、数回の繰り返し計算によって求める必要がある。いま、最適な安全性指標 β_z^{opt} が求められれば式 (5) および式 (13) から最適な β_z^{opt} に対する公称かぶり厚さ $X\beta$ が求められることになる。したがって、そのためには式 (5) に含まれるファジィ確率変数 N_c の平均値 m_{NC} の評価が必要となる。

3. ファジィ確率密度関数の評価

前述したように、 β_z^{opt} に対するかぶり厚さ $X\beta$ を求めるには、 m_{NC} が必要になる。したがってここでは、ファジィ確率変数 N_c の確率密度関数 $f(n_c)$ の評価について参考文献 11) に基づいて求めることにする。

いま N_c 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^{14), 21)}。

$$P_T = \int_{U \times W} \bigvee_i [\mu_{p_i}(u) \wedge \mu_{W_i}(w)](u, w) \dots\dots\dots (17)$$

ここで、 μ_{p_i} は要因 i に対する言語変数で表現された

サイズ p_i の帰属度関数を、 μ_{W_i} はその要因の重要度を表わす重み W_i の帰属度関数を表す。ただし、式 (17) で評価されるファジィ空間 U, W は、 $0 \leq (u, w) \leq 1$ で定義される全領域を含む。また、記号 \bigvee, \wedge はファジィ集合における演算としての \max (大きいほうの値をとる)、 \min (小さいほうの値をとる) を表すものとする。ここでのサイズとは影響が「大きい」とか「小さい」などという言語表現によるファジィ評価である。この表現を統一するためにここでは、ある現象の確率の生起が大きくなると判定される場合の表現として LARGE を用いその反対について SMALL を用いるものとした。中間の表現としては MEDIUM とする。

補正係数としての N_c が確率変数であるという条件を満足させるため、 N_c は $\lambda(n_c)$ なる先験分布を持つものと仮定する¹¹⁾。さらに N_c の総合評価 P_T と N_c の確率密度関数 $\lambda(n_c)$ を結び付けるために核 $K(v)$ を用いてファジィ関係 R_{NC} を定義する^{11), 21)}。ここで核とは、積分方程式における核に類似したもので、あるファジィ集合とほかのファジィ集合とを関連づけるために用いられるものである。ここで、 v は核の帰属度の広がりを表わすものとする。

このとき変数 N_c の核 $K_{NC}(v)$ の帰属度関数 $\mu_{KNC}(v)$ は、総合評価 P_T とファジィ関係 R_{NC} の帰属度関数をそれぞれ μ_{PT} および μ_{RNC} とすれば以下のように求められる。

$$R_{NC} \circ P_T = \int_{W \times V} \bigvee_u [\mu_{RNC} \wedge \mu_{PT}(v, u)](w, v) \dots\dots\dots (18)$$

$$\mu_{KNC} = \int_U \bigvee_w R_{NC} \circ P_T | v \dots\dots\dots (19)$$

ここで、 V は $0 \leq v \leq 1$ からなる空間を表わし、その定義域は n_c である。また演算 \circ はファジィ合成を意味するものである。これより N_c に関するファジィ確率 $P(n_c)$ およびファジィ化された確率密度関数 $f_{NC}(n_c)$ はそれぞれ、以下のように求められる^{11), 21)}。

$$P(n_c) = \int_V \mu_{KNC}(v) \lambda(n_c + v) dv \dots\dots\dots (20)$$

$$f_{NC}(n_c) = \frac{P(n_c)}{\int_{-\infty}^{\infty} p(n_c) dn_c} \dots\dots\dots (21)$$

ただし $p(n_c)$ は $P(n_c)$ の確率密度関数である。これより式 (21) から求められた補正係数 N_c のファジィ化された確率密度関数を用いて平均値、標準偏差を式 (14) および式 (5) に代入することにより、環境条件について主観的な言語変数で表わされた定量的不確定性の影響を考慮に入れた最適安全性指標および、そのときのかぶり厚さを求めることができる。

4. 計算例および考察

コンクリートの炭酸化進行速度式 (1) に含まれる係

Table 1 Combination of Verbal Variables on SIZE and WEIGHT

(a)		(b)	
SIZE	WEIGHT	SIZE	WEIGHT
SMALL	SMALL	LARGE	SMALL
SMALL	MEDIUM	LARGE	MEDIUM
SMALL	LARGE	LARGE	LARGE

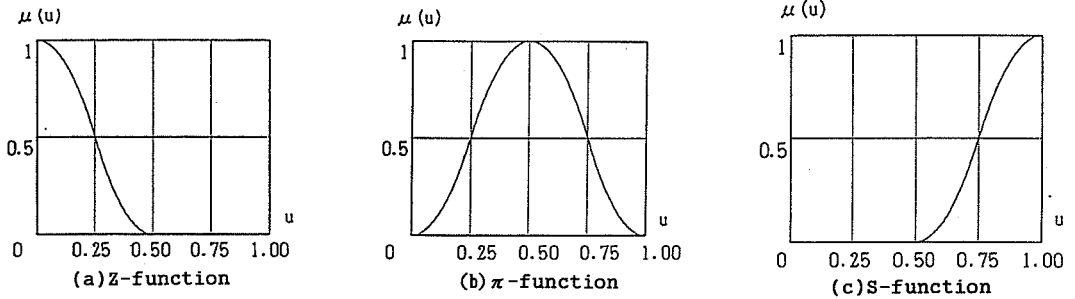


Fig.1 Membership Functions of Verbal Variables

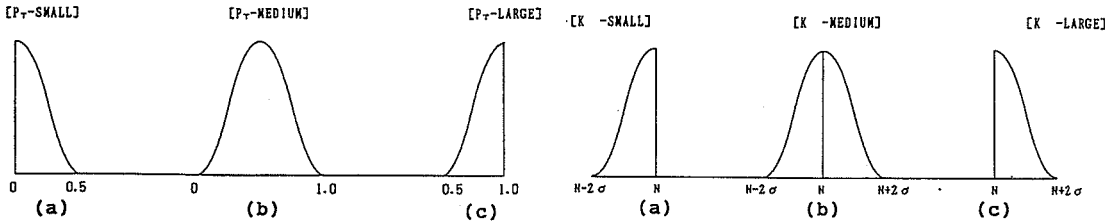


Fig.2 Membership Function of P_T

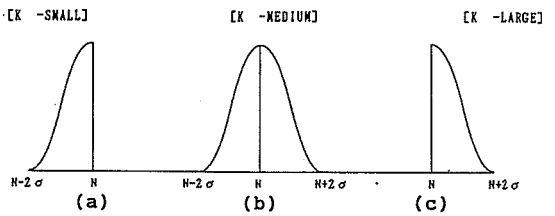


Fig.3 Membership Function of K

数 α の値として例えば文献 17) では、屋外面で風雨にさらされる場合として $\alpha=1.0$ 、屋内面の場合として $\alpha=1.7$ を採用している。したがって本研究でも、一般の土木構造物においては条件に大差は無いと考え、屋外の環境に関しては $\alpha=1.0$ を平均値として考えた。しかしながら、屋外における自然環境として様々な状況が考えられ、風雨だけに限定しても、どの程度の頻度あるいは厳しさにおいて風雨にさらされるのかどうかについての明確な判断領域を規定することは不可能であろう。このような環境について、係数 α にファジィ的な考慮をいれることは、かぶり厚さの決定の際に必要なと思われる。この観点から、本研究ではこのようなファジィネスについて、前述のような補正係数を用いることで考慮することにした。

炭酸化速度進行式に関するファジィネスを考慮した限界状態関数を式 (3) で与えた場合、自然環境が炭酸化速度におよぼす影響を言語変数として Table 1 (a), (b) のようなサイズとウェイトの組み合わせを考えることにする。さらに、これ等の言語変数 LARGE, MEDIUM, SMALL に対して Fig.1 のような帰属度関数を用いた。これ等は、標準関数として一般に用いられる帰属度関数であり^{11), 12), 21)}、それぞれ以下のように表

される。

Z-function

$$\mu(u) = \begin{cases} 1-8u^2, & 0 \leq u \leq 0.25 \\ 8(u-0.5)^2, & 0.25 \leq u \leq 0.5 \end{cases} \dots\dots\dots(22)$$

π -function

$$\mu(u) = \begin{cases} 8u^2, & 0 \leq u \leq 0.25 \\ 1-8(u-0.5)^2, & 0.25 \leq u \leq 0.75 \\ 8(u-1)^2, & 0.75 \leq u \leq 1 \end{cases} \dots\dots\dots(23)$$

S-function

$$\mu(u) = \begin{cases} 8(u-0.5)^2, & 0.5 \leq u \leq 0.75 \\ 1-8(u-1)^2, & 0.75 \leq u \leq 1 \end{cases} \dots\dots\dots(24)$$

以上のような組み合わせと、その帰属度関数に基づき、式 (17) を実行することにより、すべてのサイズが LARGE、およびすべてのサイズが SMALL の場合に対する総合評価 P_T が求められる。その結果については、文献 11) における Table 5 と同じになるので、冗長さを避けるためここでは載せないで、それを参照されたい。

つぎに、ここで求めた主観的総合評価 P_T が、ファジィ確率変数 N_C の平均値および分散にどのような影響を与えるかを核 K を用いて、ファジィ関係 R_{N_C} として以下のように定義する。

Table 2 Membership Values for P_T and K LARGE

MEM.GR.	K											
	-N	0.2σ	0.4σ	0.6σ	0.8σ	1.0σ	1.2σ	1.4σ	1.6σ	1.8σ	2.0σ	
P_T	0.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.6	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.02	0.00
	0.7	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.18	0.08	0.02	0.00
	0.8	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.50	0.32	0.18	0.08	0.02	0.00
	0.9	0.92	0.92	0.92	0.82	0.68	0.50	0.32	0.18	0.08	0.02	0.00
	1.0	1.00	0.98	0.92	0.82	0.68	0.50	0.32	0.18	0.08	0.02	0.00

Table 3 Membership Values for P_T and K SMALL

MEM.GR.	K											N
	-2.0σ	-1.8σ	-1.6σ	-1.4σ	-1.2σ	-1.0σ	-0.8σ	-0.6σ	-0.4σ	-0.2σ		
P_T	0.0	0.00	0.02	0.08	0.18	0.32	0.50	0.68	0.82	0.92	0.98	1.00
	0.1	0.00	0.02	0.08	0.18	0.32	0.50	0.68	0.82	0.92	0.92	0.92
	0.2	0.00	0.02	0.08	0.18	0.32	0.50	0.68	0.82	0.68	0.68	0.68
	0.3	0.00	0.02	0.08	0.18	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32
	0.4	0.00	0.02	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
	0.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Table 4 Membership Values for P_T and K MEDIUM

MEM.GR.	K																					
	-2.0σ	-1.8σ	-1.6σ	-1.4σ	-1.2σ	-1.0σ	-0.8σ	-0.6σ	-0.4σ	-0.2σ	N	+0.2σ	+0.4σ	+0.6σ	+0.8σ	+1.0σ	+1.2σ	+1.4σ	+1.6σ	+1.8σ	+2.0σ	
P_T	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.1	0.00	0.02	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.02	0.00	0.00
	0.2	0.00	0.02	0.08	0.18	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.18	0.08	0.02	0.00	0.00
	0.3	0.00	0.02	0.08	0.18	0.32	0.50	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.50	0.32	0.18	0.08	0.02	0.00	0.00
	0.4	0.00	0.02	0.08	0.18	0.32	0.50	0.68	0.82	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.82	0.68	0.50	0.32	0.18	0.08	0.02	0.00
	0.5	0.00	0.02	0.08	0.18	0.32	0.50	0.68	0.82	0.92	0.98	1.00	0.98	0.92	0.82	0.68	0.50	0.32	0.18	0.08	0.02	0.00
	0.6	0.00	0.02	0.08	0.18	0.32	0.50	0.68	0.82	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.82	0.68	0.50	0.32	0.18	0.08	0.02	0.00
	0.7	0.00	0.02	0.08	0.18	0.32	0.50	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.50	0.32	0.18	0.08	0.02	0.00
	0.8	0.00	0.02	0.08	0.18	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.18	0.08	0.02	0.00
	0.9	0.00	0.02	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.02	0.00
1.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

Table 5 Membership Values for μ_{RNC}

(a) All sizes are LARGE.

MEM.GR.	K_{NC}											
	-2.0σ	-1.6σ	-1.2σ	-0.8σ	-0.4σ	N	0.4σ	0.8σ	1.2σ	1.6σ	2.0σ	
P_T	0.0	0.00	0.08	0.32	0.32	0.32	1.00	0.92	0.68	0.32	0.08	0.00
	0.1	0.00	0.08	0.32	0.32	0.32	0.92	0.92	0.68	0.32	0.08	0.00
	0.2	0.00	0.08	0.32	0.32	0.32	0.68	0.68	0.68	0.32	0.08	0.00
	0.3	0.00	0.08	0.32	0.32	0.32	0.68	0.68	0.68	0.32	0.08	0.00
	0.4	0.00	0.08	0.32	0.32	0.32	0.92	0.92	0.68	0.32	0.08	0.00
	0.5	0.00	0.08	0.32	0.32	0.32	1.00	0.92	0.68	0.32	0.08	0.00
	0.6	0.00	0.08	0.32	0.32	0.32	0.92	0.92	0.68	0.32	0.08	0.00
	0.7	0.00	0.08	0.32	0.32	0.32	0.68	0.68	0.68	0.32	0.08	0.00
	0.8	0.00	0.08	0.32	0.32	0.32	0.68	0.68	0.68	0.32	0.08	0.00
	0.9	0.00	0.08	0.32	0.32	0.32	0.92	0.92	0.68	0.32	0.08	0.00
1.0	0.00	0.08	0.32	0.32	0.32	1.00	0.92	0.68	0.32	0.08	0.00	

(b) All sizes are SMALL.

MEM.GR.	K_{NC}											
	-2.0σ	-1.6σ	-1.2σ	-0.8σ	-0.4σ	N	0.4σ	0.8σ	1.2σ	1.6σ	2.0σ	
P_T	0.0	0.00	0.08	0.32	0.68	0.92	1.00	0.32	0.32	0.32	0.08	0.00
	0.1	0.00	0.08	0.32	0.68	0.92	0.92	0.32	0.32	0.32	0.08	0.00
	0.2	0.00	0.08	0.32	0.68	0.68	0.68	0.32	0.32	0.32	0.08	0.00
	0.3	0.00	0.08	0.32	0.68	0.68	0.68	0.32	0.32	0.32	0.08	0.00
	0.4	0.00	0.08	0.32	0.68	0.32	0.92	0.32	0.32	0.32	0.08	0.00
	0.5	0.00	0.08	0.32	0.68	0.92	1.00	0.32	0.32	0.32	0.08	0.00
	0.6	0.00	0.08	0.32	0.68	0.92	0.92	0.32	0.32	0.32	0.08	0.00
	0.7	0.00	0.08	0.32	0.68	0.68	0.68	0.32	0.32	0.32	0.08	0.00
	0.8	0.00	0.08	0.32	0.68	0.68	0.68	0.32	0.32	0.32	0.08	0.00
	0.9	0.00	0.08	0.32	0.68	0.92	0.92	0.32	0.32	0.32	0.08	0.00
1.0	0.00	0.08	0.32	0.68	0.92	1.00	0.32	0.32	0.32	0.08	0.00	

「もし P_T が LARGE ならば核 K も LARGE
 P_T が MEDIUM ならば核 K も MEDIUM
 P_T が SMALL ならば核 K も SMALL」
 この場合のファジィ関係 R_{NC} の帰属度関数は以下のようである。

$$\mu_{RNC}(u, v) = \int_{U \times V} \mu_{PT}(u) \wedge \mu_K(v) | (u, v) \dots (25)$$

上で述べた定義における総合評価 P_T および核 K の帰属度関数は Z -関数, π -関数, S -関数を用いてそれぞれ $[0, 1]$, $[-2\sigma, 2\sigma]$ の範囲で Fig.2 (a), (b), (c), および Fig.3 (a), (b), (c) のように設定することにした。ここで, σ は核 K の先験的 (a priori) 確率分布の標準偏差を表す。ファジィ関係 R_{NC} の帰属度関数

の値を P_T および K の組み合わせについて Table 2 から Table 4 に載せた。これらの数値は以下のように求められる。いま例として Table 2 における $P_T=1.0$, $K=N$ $+0.2\sigma$ の値を求めてみる。 $P_T=LARGE$ および $K=LARGE$ の組み合わせは, Fig. 2, 3 を参考にして式 (24) から $\mu_{PT}(1.0)=1.0$ となる。一方, $\sigma=0.5$ に対して式 (22) を用いて $\mu_K(0.2\sigma)=\mu_K(0.25)=0.98$ と計算される。したがって, これらを式 (25) に代入することで $\mu_{RNC}(u, v)$ が評価されることになる。これらをすべての組み合わせについて実行することで Table 2 から Table 4 が求められる。これ等を総合することで全体に対するファジィ関係 R_{NC} が求められることになるが, 総合化されたファジィ関係の結果については省略する。

Table 6 Means and Standard Deviations

先験的分布	主観的不確定度評価	
	(A) LARGE	(B) SMALL
(1)	$m_{nc}=1.0546$	$m_{nc}=0.9454$
$m_{nc}=1.0$	$\sigma=0.1124$	$\sigma=0.1124$
$\sigma=0.1$	$V=0.1066$	$V=0.1189$
(2)	$m_{nc}=1.1093$	$m_{nc}=0.8907$
$m_{nc}=1.0$	$\sigma=0.2253$	$\sigma=0.2253$
$\sigma=0.2$	$V=0.2031$	$V=0.2529$
(3)	$m_{nc}=1.1691$	$m_{nc}=0.8310$
$m_{nc}=1.0$	$\sigma=0.3355$	$\sigma=0.3355$
$\sigma=0.3$	$V=0.2870$	$V=0.4038$

この求められた R_{NC} と P_T を用いた式 (18), (19) より核の帰属度関数 μ_{KNC} は Table 5 のように求められる。ここで, Table 5 (a) はすべてのサイズが LARGE の場合を, Table 5 (b) はすべてのサイズが SMALL の場合を表わす。

さらに, 式 (20), (21) における先験分布としていま文献 11) を参考にして以下のような 3 つの一樣分布を考える。ただし, 先験分布の平均値 m_{nc} はすべて 1.0 としてある。

for $m_{nc}=1.0, \sigma=0.1$

$$(1) \lambda(n_c) = \begin{cases} 2.9, & 0.83 \leq n_c \leq 1.17 \\ 0.0, & n_c < 0.83 \text{ and } n_c > 1.17 \end{cases} \quad \dots(26)$$

for $m_{nc}=1.0, \sigma=0.2$

$$(2) \lambda(n_c) = \begin{cases} 1.44, & 0.65 \leq n_c \leq 1.35 \\ 0.0, & n_c < 0.65 \text{ and } n_c > 1.35 \end{cases} \quad \dots(27)$$

for $m_{nc}=1.0, \sigma=0.3$

$$(3) \lambda(n_c) = \begin{cases} 0.96, & 0.48 \leq n_c \leq 1.52 \\ 0.0, & n_c < 0.48 \text{ and } n_c > 1.52 \end{cases} \quad \dots(28)$$

以上から式 (20), (21) を用いてファジィ化された確率密度関数 $f_{NC}(n_c)$ の平均値および標準偏差あるいは変動係数 Table 6 のように求めることができる。これ等の値を式 (4) に用いて安全性指標 β_z を求め, 式 (14) による期待総費用最小化となる場合の最適な安全性指標 β_z^{opt} の結果の一部を, 水セメント比 $W/C=0.50$, 費用の比 $\phi=50$ について Fig.4 (a), (b) に載せた。水セメント比としては, 土木のコンクリート構造物として一般的に用いられると思われる 45% から 55% を, また ϕ としては, 一般的に評価が困難ではあるが, 通常の床版工としての単価を 11~13 万円程度を基本とし, 諸経費, 一般管理費, 修復あるいは改善費およびそれぞれに必要な人件費等を考慮しておおよそ 30 から 50 程度と評価した。ここで, Fig.4 (a) はファジィネスの影響を考慮にいれてない場合の結果であり, Fig.4 (b) はそれを考慮にいれた, 先験分布の $\sigma=0.1$ の場合の, サイズの違いについてのものである。これ等の計算には, 式 (4) に用いられる X_D と X_C の変動係数 V_{XD}, V_C の数多くの組み合わせが考えられるが, 本研究では一応, $V_{XD}=0.3,$

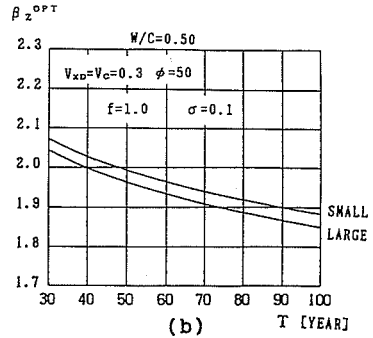
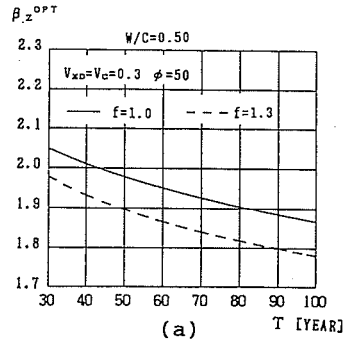


Fig.4 Optimal Safety Index for Total Cost Minimum

$V_C=0.3, 0.4$ の場合を代表させて示すものとする。

この図から, $f=1.0$ の場合のファジィネスを考慮しない場合の β_z^{opt} は, 考慮している場合の, サイズが SMALL と LARGE の中間になっていることが分かる。なお Fig.4 (b) 中には $f=1.3$ についての β_z^{opt} については省略してあるが結果は $f=1.0$ の場合と同じになる。また, $\sigma=0.2 \sim 0.3$ と σ が大きくなると, LARGE の場合の β_z^{opt} が $T=30$ および $T=100$ で約 2.02~1.99 および 1.83~1.80 程度になり, $\sigma=0.1$ に比べてやや小さくなるが, SMALL の場合の β_z^{opt} の値は差がほとんど無いことが確かめられた。さらに, 全体として耐用年数 T が長くなるに従い, 相対的に安全のレベルを下げるのが経済性につながる結果になることを示している。つぎに, W/C の違いによる最適なかぶり厚さを $f=1.0, \phi=50$ の場合で $\sigma=0.1$ と $\sigma=0.3$ を, Fig.5 (a), (b), (c), および Fig.6 (a), (b), (c) に載せる。図中の A PRIOPi はファジィネスの影響を考慮にいれてない場合のかぶり厚さを意味している。また Fig.6 では A PRIOPi についての結果を省略した。これ等の図から, W/C の最適かぶり厚さにおよぼす影響の大きいことが分かる。例えば $\sigma=0.1$ の場合, $T=30$ から $T=100$ に対して, $W/C=0.45$ と $W/C=0.55$ で比較すれば, サイズが LARGE, SMALL とともに約 2 倍程度の厚さが必要となることを示している。この傾向は $\sigma=0.3$ についても同様である。当然のことではあるが, 自然環境の中世化進行速度におよぼす影響が大き

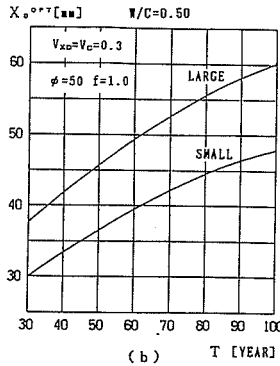
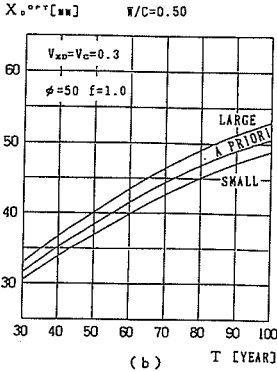
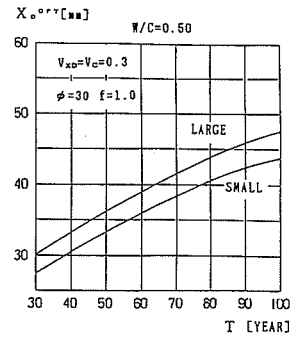
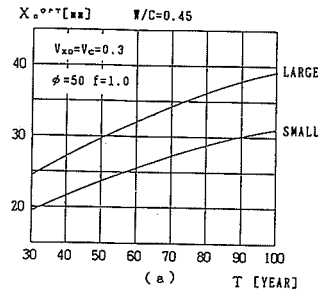
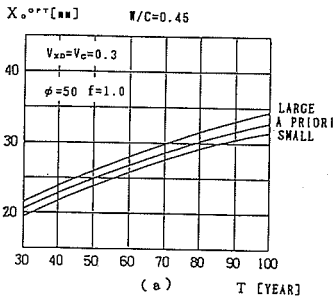


Fig.7 $X_0^{\beta^t}$ vs T for $\phi=30$ and $\sigma=0.1$

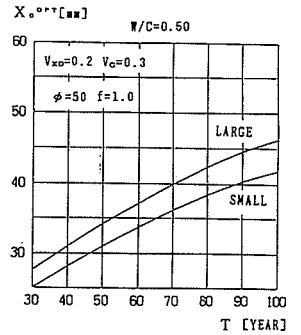


Fig.8 $X_0^{\beta^t}$ vs T for $V_{XD}=0.2$ and $\sigma=0.1$

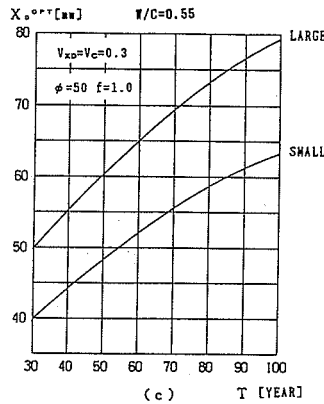
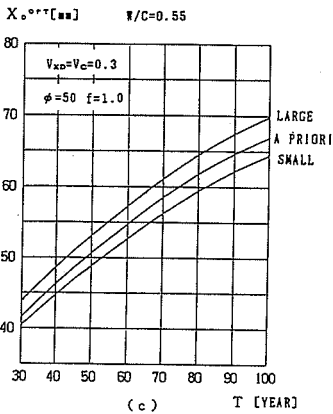


Fig.5 $X_0^{\beta^t}$ vs T for $\sigma=0.1$

Fig.6 $X_0^{\beta^t}$ vs T for $\sigma=0.3$

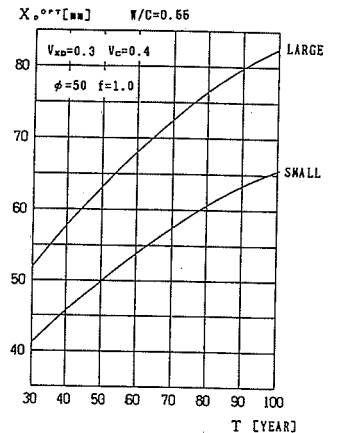


Fig.9 $X_0^{\beta^t}$ vs T for $V_C=0.4$ and $\sigma=0.3$

いと主観的に判定される場合は、その逆に比べて、先験分布の標準偏差の違いにより $\sigma=0.1$ では約 3 mm ~ 6 mm 程度、 $\sigma=0.3$ では約 10 mm ~ 15 mm 程度厚くすることが経済化をもたらすことを示している。このことは、先験分布を標準偏差の違いによってもかぶり厚さは影響を受けることを意味している。ただし、その影響は SMALL の場合には W/C の変化を通して、 $\sigma=0.1$ と $\sigma=0.3$ ではほとんど差が無いことも分かる。以上の結果については、 $\sigma=0.2$ の場合は $\sigma=0.1$ と 0.3 の中間の値となるが結果については省略した。

つぎに、費用の比の影響をみるために、Fig.7 に $\phi=30$ の場合を $W/C=0.50$ について載せた。ただし、他の条件は Fig.5 (b) と同じである。Fig.5 (b)、Fig.7 から、費用の比が大きい場合と判断される場合の

かぶり厚さを、 $W/C=0.50$ に限れば、最大で 5 mm 程度厚くしておくことが耐用年数からみて経済化につながるという結果になっている。この傾向は、厚さの程度の違いはあっても、 W/C の変化に対して同様な結果となっている。

つぎに、施工精度のばらつきの影響をみるために、かぶり厚さの変動係数 V_{XD} を 0.2 とした場合を、 $W/C=0.50$ の場合について Fig.8 に載せた。ただし残りの条件は、Fig.5 (b) と同じとする。この図から、最適かぶり厚さは、 V_{XD} の大きさによっても影響を受け、 V_{XD}

$=0.2$ の場合は $V_{xd}=0.3$ に比べて耐用年数全体的に約 10 mm 程度薄くできる可能性があり、したがって、当然ではあるが施工精度の向上が経済化につながることを示している。一方、中性化速度の変動 V_c の影響は Fig.9 からも分かるように、結果に一番違いがでると思われる組み合わせである Fig.6 (c) と比較してもそれほどほどの違いは認められなかった。このことから不確かさを管理しなければならないものとする、施工精度の不確かさの管理がより重要になってくる。

5. ま と め

本研究はコンクリートの耐久性に観点を置いた、耐用年数を考慮した場合の Slab の最適かぶり厚さを求め、設計法の代替案を提供することを主眼としている。最適かぶり厚さの算定には、信頼性理論に基づいた、期待費用最小化原則により求めている。この場合、初期費用に対する破損費用の比が常に問題となるが、ここではそれを代表的に 50 と 30 の結果について吟味した。また、施工精度の影響がかぶり厚さにどの程度影響を及ぼすかについても、その変動係数を変化することで調べた。

耐久性を考慮する場合、かぶり厚さは重要な要素であり、コンクリートの炭酸化速度に影響を受ける。炭酸化速度は、一般に耐用年数の 1/2 乗に比例し、自然環境および水セメント比によってその大きさが左右される。この場合の自然環境の要因をファジィネスとして、その影響を大小の言語変数として処理することで、かぶり厚さの決定に取り込んだ。これから、かぶり厚さに大きく影響をおよぼす要因として、水セメント比、施工精度、およびファジィネスを考慮する変数の先験分布の標準偏差等を指摘することができた。全体として、費用比が大きいと判断される場合はその逆の場合よりかぶり厚さを大き目に設計することがまた、ファジィネスとしてのサイズの大きいと考えられる場合のほうのかぶり厚さを厚くするほうが経済化につながる事が指摘できる。

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) 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.
- 3) 例えば福島敏夫：コンクリート中の経時進行に関する基礎的考察，日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），pp.199~200，1983.
- 4) 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.
- 5) 友澤史紀：コンクリート構造物の耐久設計の考え方—建築構造物の場合—，コンクリート工学，Vol.26，No.11，pp.15~20，1988.
- 6) 山田順治：コンクリートの耐久性—原点にかえて，セメント・コンクリート，No.491，pp.5~8，Jan.，1988.
- 7) 小林茂敏・河野広隆・丹野 弘：耐久性の優れたコンクリート構造物—道路構造物—，土木学会論文集，V-6，No.378，pp.35~46，Feb.，1987.
- 8) 和泉意登志：構造物の耐久性設計手法例—鉄筋のかぶり厚さの信頼性設計手法—コンクリート工学，Vol.26，No.11，pp.38~42，Nov.，1988.
- 9) 例えば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：コンクリート・ライブラリー70；土木学会，pp.244~245，1991.9.
- 10) 例えば Mau, S. and Sexsmith, R. : Minimum expected cost optimization, Proc. of ASCE, Vol.100, No.ST. 9, pp.2043~2058, 1972.
- 11) 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.
- 12) 水本雅晴：ファジィ理論とその応用 11章，サイエンス社，1988.7.
- 13) 宮本文穂：構造物の耐久性設計手法例—ファジィ集合論を利用した耐久性設計手法—，コンクリート工学，Vol.26，No.11，pp.43~50，Nov.，1988.
- 14) 和泉意登志：耐久性診断事例—中性化—，コンクリート工学，Vol.26，No.7，pp.107~110，1988.
- 15) 福士 勲・友澤史紀・工藤矩弘・嵩 英雄：コンクリートの中性化とその評価<中性化と RC 建築物の耐久性>，セメント・コンクリート，No.461，pp.8~16，1985.
- 16) 鄭 載東・平井和喜・三橋博三・成田 健：コンクリートの中性化に関する研究の現状と課題，セメント・コンクリート，No.496，pp.40~48，1988.
- 17) 嵩 英雄・和泉意登志・友澤史紀・福士 勲：RC 建築物のコンクリートの中性化と鉄筋の腐蝕，セメント・コンクリート，No.454，pp.29~39，Dec.，1984.
- 18) 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5：日本建築学会，pp.207，1986.9.
- 19) 岸谷孝一：鉄筋コンクリートの耐久性，鹿島建設技術研究所出版部，pp.165，1962.
- 20) 例えば杉山俊幸・酒井利夫・藤野陽三・伊藤 学：構造設計における信頼性レベル・安全率の設定に関する考察，土木学会論文報告集，No.327，pp.21~28，1982.
- 21) 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，Jan.，1991.

(1992.4.1 受付)

OPTIMAL COVER THICKNESS OF CONCRETE SLAB TAKING THE FUZZINESS OF NATURAL CIRCUMSTANCES INTO CONSIDERATION

Ken KOYAMA, Tatsuya ARAI and Takahiro NAKAYAMA

Concrete structures in the natural circumstances are going to deteriorate gradually, affected by carbonation (neutralization). The possibility of corrosion of reinforcement steel is considered to be significant when carbonation reaches its cover thickness. Also, the carbonation velocity of concrete is much affected by the natural circumstances. In this paper, to estimate the optimal cover thickness which contains the lifecycle term, the concept on reliability based total cost minimum technique is used. Furthermore, to evaluate the ambiguity of influences of natural circumstances that affects the carbonation velocity, fuzzy algebra is adopted.
