

投稿論文 (和文ノート)

**TECHNICAL
NOTE**

中性化速度式の違いがコンクリート床版のかぶり厚さに及ぼす影響について

小山 健*・中川博司**

鉄筋の腐食を限界状態として、費用最小化原則に基づき、コンクリート床版のかぶり厚さを決定する場合、中性化速度式の評価が重要となる。中性化速度式は数多く発表されているが、ここでは代表的と思われる2つの式を用い、異なる中性化速度式によって得られた最適なかぶり厚さを求め、その影響について調べたものである。また、中性化速度式に関連する環境条件に伴うあいまいさの影響についても調べた。

Key Words : cover tickness, concrete slab, carbonation, cost minimum

1. まえがき

コンクリート構造物の劣化の主要因として考えられるものに、コンクリートの炭酸化、コンクリート骨材への塩分の混入、アルカリ骨材反応等に起因する内部鉄筋の早期腐食があげられる^{1),2)}。しかし、特殊な劣化要因がない場合には、大気中の炭酸ガス等の侵食性ガスによるコンクリートの炭酸化現象に伴う内部鉄筋腐食による構造耐力低下やかぶりのひびわれ・剝離が、鉄筋コンクリート構造物の物理的耐用年数の設定の概念となる^{3),4)}。従ってコンクリート構造物のかぶり厚さの決定には中性化の経時進行を考慮しなければならないが、土木学会のかぶり厚さの規定⁵⁾には、必ずしも中性化の経時進行という観点から耐用年数を考慮にいたしたものとは考えにくい。そこで本研究では、物理的耐用年数としての耐久性を鉄筋表面の腐食の発生を限界状態としてとらえ⁶⁾、中性化に関与する不確定量のうち確率統計的に処理するなどの定量化が困難なあいまいさを伴った主観的、定性的な不確定量をファジィネスと定義して、これを期待総損失費用最小化原則に基づく信頼性設計に取り込み、耐用年数を考慮にいたしたコンクリートスラブの最適かぶり厚さを求めることにした⁶⁾。

なお中性化経時進行速度式としては、魚本、高田らによって提案されている水セメント比の二次近似式と呼ばれる式⁷⁾を採用することにした。この式は中性化速度に及ぼす炭酸ガス濃度、温度および水セメント比の影響を含んだ式であり、以前著者らの一人が用いた中性化速度式(岸谷式)⁷⁾とは異なる。中性化速度式にはさまざまな式が提案されているが^{1),8)}、実験式に基づくものがほとんどであり、得られている定数項についての数値そのも

の信頼性がはなはだ薄い点が、以前の論文⁶⁾でも指摘された。従ってその点も踏まえて、今回両式の違いがどのようにかぶり厚さの決定に影響を及ぼすかを調べ、さらに、あいまいさを表す先験分布の違いの、かぶり厚さに及ぼす影響についても調べたので報告する。

ただし、かぶり厚さは、許容ひび割れはばの制限を受けるが、本研究はその点については考慮していないことを断っておく。

2. 期待総損失費用最小化原則によるファジィネスを考慮した最適かぶり厚さ

期待総損失費用最小化に基づく設計は、一般に次式のように表される⁹⁾。

$$E(C_T) = C_i + p_f \cdot C_r \rightarrow \min \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 C_i は初期費用、 p_f は構造物が何らかの限界状態を満たさなくなる確率、 C_r はその時の修復あるいは改善のための費用を示す。ただし、 $p_f = \Phi(-\beta)$ で、 β は一般に2次モーメント安全性指標と呼ばれているもので、 $\Phi(\cdot)$ は標準正規分布関数を示す。原理的には式(1)を最小にする β_2 は、次式を解くことにより求められる¹⁰⁾。

$$\frac{\partial E(C_T)}{\partial \beta_2} = \frac{\partial C_i}{\partial \beta_2} + C_r \cdot \frac{\partial p_f}{\partial \beta_2} = 0 \dots \dots \dots (2)$$

一方、中性化深さに対する限界状態式を

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

と表現した場合、式(3)によって得られる二次モーメント安全性指標 β_2 は以下のように求められる。ただし、ここで X_D =かぶり厚さ、 X_C =中性化深さ、 N_C =ファジィネスを表す変数の言語変数として表現するための補正係数^{6),11)}でそれぞれ確率変数である。

$$\beta_2 = \frac{\mu_{XD} - \mu_{NC} \cdot \mu_{XC}}{\sqrt{V_{XD}^2 \cdot \mu_{XD}^2 + (V_{NC}^2 + V_{XC}^2) \mu_{NC}^2 \cdot \mu_{XC}^2}} \dots \dots \dots (4)$$

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

**信州大学大学院 博士前期過程 社会開発工学専攻

いま文献12)を参考にすると、式(1)の初期費用 C_i を X_D の公称値 X_D^* で表現し、さらに式(2)を実行することで、最適な二次モーメント安全性指標 β_2^{OPT} が求められる。ただし、 X_D の公称値 X_D^* は係数 f ($=1.0\sim 1.3$) を用いて以下のように表される^{6),12)}。

$$X_D^* = f \cdot \mu_{XD} = f \cdot \mu_{XC} \cdot \mu_{NC} \cdot g(\beta) \quad \dots\dots\dots(5)$$

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、

$$g(\beta) = \frac{1 + \beta_z}{\sqrt{(V_D^2 + V_C^2 + V_{NC}^2)^2 - \beta_z (V_D^2 V_{NC}^2 + V_D^2 V_C^2)}} / (1 - \beta_z^2 V_D^2) \quad \dots\dots\dots(6)$$

である。ただし、 V_C , V_D , V_{NC} は確率変数 X_D , X_C , N_C の変動係数である。以上から、 β_2^{OPT} が求められれば、それを式(5)に代入して最適な X_D^* を求めることができる。そのためには式(4), (5)に含まれるファジィ確率変数 N_C の平均値 μ_{NC} の評価が必要となる。従ってここでは、ファジィ確率変数 N_C の確率密度関数 $f_{NC}(n_c)$ の評価については以下の式を利用して求めることとした^{11),13)}。

$$f_{NC}(n_c) = \frac{P(n_c)}{\int_{-\infty}^{\infty} p(n_c) dn_c} \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここで、

$$P(n_c) = \int_v \mu_{KNC}(v) \phi(nc+v) dv \quad \dots\dots\dots(8)$$

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(7)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(4)および式(5)に代入することにより、その他の要因について主観的な言語変数で表された定量的不確定性の影響を考慮に入れた2次モーメント安全性指標およびその時のかぶり厚さを求めることができる⁶⁾。

3. コンクリートの中性化速度について

コンクリートの中性化速度 X_c を表す式としては、魚本、高田らによって水セメント比の二次近似式と呼ばれる、中性化速度に及ぼす炭酸ガス濃度、温度および水セメント比の影響を含んだ次式が提案されている³⁾。

$$X_c = (2.804 - 0.847 \log C) \cdot \exp(8.748 - 2563/T) \times (2.39W/C^2 + 44.6W/C - 3980) \times 10^{-4} \times \sqrt{C \cdot t} \quad \dots\dots\dots(9)$$

ここで、 C は炭酸ガス濃度(%), T は絶対温度(K), W/C は水セメント比(%), t は経過時間(週)である。ただし、炭酸ガス濃度は屋内自然環境下 $\sim 100\%$ 、温度については $10^\circ\text{C}\sim 40^\circ\text{C}$ 、水セメント比については $30\%\sim 80\%$ までの範囲とする。以降、 $T=273+20$ として用いた。

しかし、この式にはその他の因子である湿度、養生条件の違いおよびセメントや骨材等の材料の種類の違いによる影響が含まれていない。よって本研究では、その他

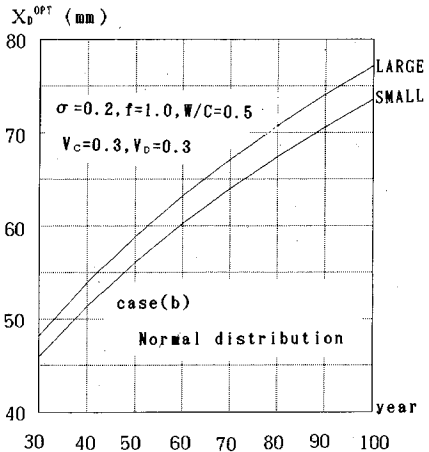
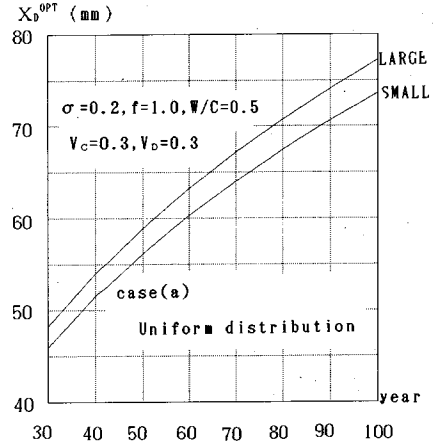


Fig.1 X_D^{OPT} obtained by the different distribution function

の不確実性因子を含ませるために変数 δ で補正して中性化経時進行速度式として次式を採用した。

$$X_c = \delta \cdot (2.804 - 0.847 \log C) \cdot \exp(8.748 - 2563/T) \times (2.39W/C^2 + 44.6W/C - 3980) \times 10^{-4} \times \sqrt{C \cdot t} \quad \dots\dots\dots(10)$$

なお本研究では、式(9)の X_c を確率変数とするために以下においては δ を確率変数とし、平均値を $\mu_\delta = 1.0$ と仮定する。

また、中性化速度式の違いがかぶり厚さに及ぼす影響を調べるために、以前著者らの一人が用いた以下に示す中性化速度式(岸谷式)⁷⁾を比較のために用いた。

$$X_c = \alpha \cdot \lambda \cdot \gamma \cdot \sqrt{t} \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$\gamma = R(4.6W/C - 1.76) / (7.2\sqrt{t})$$

($WC \leq 0.6$ の場合)

$$\gamma = R(W/C - 0.25) / \{0.3(1.15 + 3W/C) \cdot \sqrt{t}\}$$

($WC \geq 0.6$ の場合)

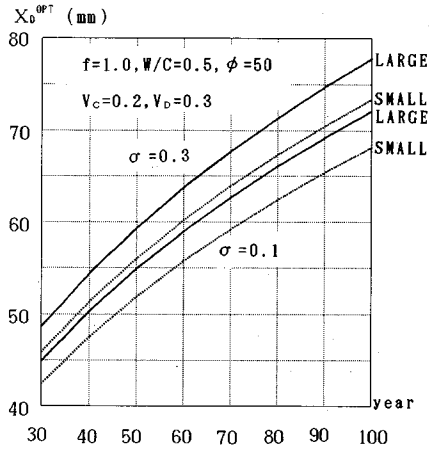


Fig.2 X_b^{OPT} obtained by the different σ of distribution function

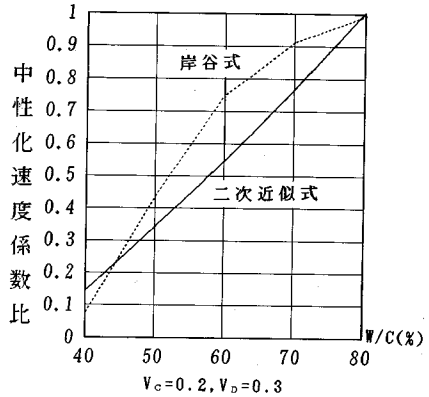


Fig.3 Carbonation velocity for water cement ratio

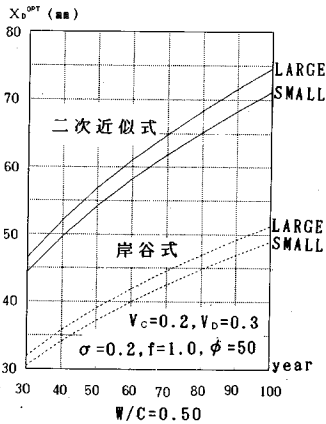


Fig.4 X_b^{OPT} for second Approximation formula and Kishitani formula

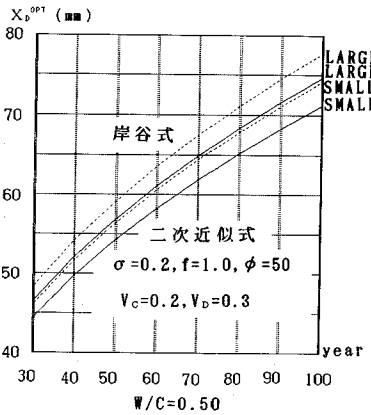


Fig.5 X_b^{OPT} for second Approximation formula and Kishitani formula

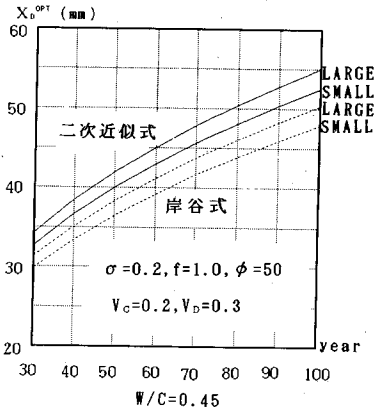


Fig.6 X_b^{OPT} for second Approximation formula and Kishitani formula

ここで、 α は環境条件による係数、 λ は仕上げ材による係数、 R は中性化比率、 W/C は水セメント比 (%), t は経過時間 (年) を示す。

4. 最適かぶり厚さの計算及び考察

設計において目標とする最適かぶり厚さを、耐用年数 30~100 年を想定して、式 (4), (5) から求めた。ただし、本研究において X_c , X_b の変動係数の値は、 $V_c=0.2 \sim 0.4$, $V_d=0.2 \sim 0.3$ と仮定した。また費用の比 $\phi=C_r / (Wd \cdot \text{cost}C)^0$ については、一般に正確な定量化は困難であるが、通常の床版工としての単価を 11~13 万円/m² 程度を基本とし、諸経費、一般管理費、修復あるいは改善費及び必要な人件費等を考慮し、おおまかではあるが、 $\phi=50$ とした場合について計算を行った。さらにファジネスを導入するための補正係数の先験的分布は一般には未知であるので本研究では一様分布、正規分布を想定して、先験的分布の違いによる影響を見ること

にした。なお、標準的な屋外環境として $C=0.02$ を採用した。その結果を Fig.1 case (a), case (b) にのせた。これらの図で、LARGE, SMALL はそれぞれ環境条件等不確定要因が X_c に及ぼす影響が大きいか、小さいかを言語変数で表現する N_c のファジィ評価である。以下に、考察結果を示す。

(1) 先験的分布の確率密度関数の影響

先験的分布の違いによるかぶり厚さの影響を Fig.1 にのせたが、先験的分布の違いはかぶり厚さの変動にほとんど影響を与えないということが分かり、パラメータの組み合わせの異なる場合も同様であった。

(2) 先験的分布の確率密度関数における分散の影響

分散の違いによるかぶり厚さの影響を Fig.2 にのせた。この図によると、かぶり厚さには、分散の違いによる影響が表れている。これはすなわち、環境条件のあいまいさの変動の評価体系が重要であることを示唆している。

(3) 水セメント比の二次近似式と岸谷式の違いによる影響

これまで、水セメント比の二次近似式と呼ばれるもの³⁾によって求められたかぶり厚さを示してきたが、ここでは岸谷式⁹⁾によるかぶり厚さとの違いを考察する。Fig.4,5においては $W/C=0.5$ 、Fig.6においては $W/C=0.45$ とした。まずFig.4から、2次近似式でかぶり厚さを求めた場合と岸谷式でかぶり厚さを求めた場合とでは、かぶり厚さに大きな違いがみられる。これは岸谷式において α (環境条件による係数)を1.0(屋外)としたのに対して、二次近似式は屋内環境下での式であるためであり、両式によるかぶり厚さを絶対値で比較できないため、まず水セメント比80%を1とした場合についてFig.3で比較した³⁾。これによると水セメント比が中性化速度に与える影響は、土木構造物としてよく用いられる $W/C=40\sim 50\%$ の範囲では、二次近似式、岸谷式ともに一致している。これを踏まえた上で岸谷式において、 α を1.7(屋内)として両者を比較し、Fig.5, Fig.6にのせた。これから、二次近似式と岸谷式の耐用年数に対するかぶり厚さはほぼ一致している。しかし、これらの図からわかるように、 $W/C=0.5$ のときには二次近似式によるかぶり厚さの方が、また $W/C=0.45$ のときは逆に岸谷式によるかぶり厚さの方がわずかに大きい。これは W/C が中性化深さに及ぼす影響として、二次近似式の方が二酸化炭素の濃度という要素を非常に重視しているためと思われる。

5. まとめ

本研究は、期待総損失費用最小化原則に基づく信頼性設計によってコンクリートスラブのかぶり厚さの決定を行う場合、先験的分布の確率密度関数と分散の違い、および水セメント比の2次近似式と岸谷式の違いが、かぶり厚さにどのように影響を与えるかについて調べた。その結果、岸谷式と水セメント比の2次近似式によるかぶり厚さの差はほとんどなく、また先験的分布の確率密度関数の違いの影響はあまり受けず、むしろ分散の影響が大きいことが指摘できた。先験分布は原則的に未知であ

るので、この結果は設計にとっては都合のよい条件と思われるが、一方先験分布の分散の評価が問題となる。しかしながら、分布も未知な確率変数の分散の推定を行うことはほとんど不可能に近いわけであるから、この研究はその点に制限と困難さが生じることもいえない。従って、おおまかに N_c の評価に関して、ばらつき大小が主観的に評価できるかぎりにおいて、設計の代替案としてのかぶり厚さの目安として利用できる可能性は残されているように思われる。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 魚本健人・高田良章：コンクリートの中性化速度に及ぼす要因，土木学会論文集，Vol. 17, No. 451, pp. 119-128 1992.8.
- 4) 和泉意登志：構造物の耐久設計手法例—鉄筋かぶり厚さの信頼性設計法—コンクリート工学，Vol. 26, No. 11, Nov., pp. 38-42, 1988.
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書（平成3年版）改訂資料，コンクリートライブラリー70，pp. 244-245, 1991. 9.
- 6) 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.
- 7) 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，p. 165, 1962.
- 8) 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.
- 9) 例えばMau, S. and Sexsmith, R. : Minimum expected cost optimization, Proc. of ASCE, Vol. 100, No. ST. 9, pp. 2043-2058, 1972.
- 10) 例えば藤野陽三：確率論に基づく安全性照査法と構造設計，土木学会誌（1978），pp. 33-39.
- 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.
- 12) 小山健・土屋宏信・矢野勲：耐用年数を考慮したコンクリート床版の信頼性に基づいた最適かぶり厚さ，構造物の安全性および信頼性，Vol. 2, JCOSSAR' 91, 1991, 11.
- 13) 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.

(1993.11.5 受付)

THE EFFECT OF COVER THICKNESS OF CONCRETE SLAB DEPENDING ON THE DIFFERENT CARBONATION FORMULAE

Ken KOYAMA and Hiroshi NAKAGAWA

The determination of the optimal cover thickness of concrete slab provided with the limit state as the corrosion of reinforcement is affected by the carbonation formulae. In this paper, typical two formulae are employed to investigate the differences of the results between them. It shows that the differences don't affect the results, greatly.