

信頼性設計法によるRC構造物の かぶり厚さの算定

DETERMINATION OF APPROPRIATE COVER OF REINFORCED
CONCRETE STRUCTURES BASED ON RELIABILITY-BASED DESIGN

中山 隆弘*・松原 多孝**

By Takahiro NAKAYAMA and Kazutaka MATSUBARA

The durability of concrete structures have been come into questions in recent years. A very high percentage of lack of durability arises from the corrosion of the steel reinforcement. Determination of the depth of cover to reinforcement, which protects reinforcing bars against corrosion, is therefore quite important. However, depth of cover is specified by minimum values alone in many codes of practice, although there are the variation in neutralizing speed in concrete or construction error. In such cases, probabilistic approach would be most effective if the requirements for structural reliability analysis are completed. This paper describes a procedure of determination of the appropriate cover by means of reliability-based design, taking the scatter of neutralizing speed and construction error into account.

1. まえがき

近年、メンテナンスフリーと考えられていたコンクリート構造物に早期劣化の事例が生じ、コンクリート構造物の耐久性が注目されるようになってきた。日本コンクリート工学協会に、土木・建築にかかわらず、広くコンクリート構造物一般に対して適用可能な耐久性向上のための方策を検討することを目的とした鉄筋コンクリート構造物の耐久性設計法研究委員会¹⁾が設置されたことにも、この問題の重要性が伺える。

さて、コンクリート構造物の早期劣化の原因として、岡田ら²⁾は、「材料としてのコンクリートの物性に関する本質的な問題ではなく、耐久性向上あるいは維持に関する適切な配慮不足があったことによるもの」と指摘し、設計に関しては「初期耐力設計を中心としたものが多く、限界状態設計法についても耐力荷力については比較的よく検討されているものの、耐久性については必ずしも十分とは言えない」と述べている。このことから、耐久性について配慮することなく設計され構築された構造物は、供用期間中に所定の耐久性を失い、補修が必要となる危険性をはらんでいる。したがって、そのライフタイムにおける維持管理コストの増大が予測され、社会発展の障害にもなりかねない。

一方、構造信頼性理論の成熟と共に、「構造計画で、経済性、施工性に加え、信頼性も取り上げるべき

* 工博 広島工業大学教授 工学部 土木工学科 (〒731-51 広島市佐伯区三宅2-1-1)

** 広島工業大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒731-51 広島市佐伯区三宅2-1-1)

である」との指摘³⁾や、「従来の設計方法を信頼性工学のterminologyを用いて解釈しなおし、信頼性解析を行うべきである」との提案⁴⁾がなされるようになってきた。もちろん、これらの指摘や提案は、コンクリート構造物の設計を念頭においたものではないが、その理念は材料の如何を問うものではないと考えられる。本研究は、このような客観的状況と、構造信頼性理論は一部であるにせよ、すでに限界状態設計法の理論的基盤として使用されていること、さらにはコンピュータの著しい進歩と普及などに鑑み、コンクリート構造物の耐久性設計にも現状よりは合理性に勝る信頼性設計手法を導入できる可能性が大きいと判断して行われた。

一般にコンクリート構造物の耐久性設計においては、塩害、骨材のアルカリ反応あるいはコンクリートの中性化が考慮されるが、ここでは、現象を定式化し易いひとつの代表例としてコンクリートの中性化による鉄筋の腐食のみを考えた信頼性設計を対象とし、塩害等については今後の課題とした。具体的には、中性化による鉄筋の腐食を防ぐ策として有効であるかぶりの厚さが、ほとんどの基準で最小値のみで規定され、施工誤差等のばらつきを考慮したかぶり厚さの割り増しについても設計者の経験に委ねられているのが現状であることに着目し、和泉の研究⁵⁾を参考にして、かぶり厚さの設計に信頼性設計を導入することを試みた。

本論文では、信頼性理論に基づいて鉄筋コンクリート構造物の設計かぶり厚さを算定するコンピュータシステムについて述べ、さらにパラメトリック解析に基づき、中性化深さの確率分布形および変動係数の大きさ、施工誤差の標準偏差などが設計かぶり厚さに及ぼす影響について言及する。

2. コンクリートの中性化と鉄筋の腐食

2. 1 中性化現象の機構⁶⁾

上述のように、コンクリート構造物の劣化要因としては塩害、アルカリ骨材反応などがあるが、代表例としてコンクリートの中性化による鉄筋の腐食を考える。

一般に、セメントの水和反応から生成される水酸化カルシウムは、pH12～13の強アルカリ性を示し、セメント水和物のpHを決定している。この水酸化カルシウムが大気中に含まれている弱酸性の炭酸ガスにふれると、炭酸カルシウムと水に分解され、炭酸カルシウムになった部分のpHは8.5～10程度になる。このことから「中性化」という言葉が使用されている。中性化はコンクリートの表面から内部へ向かって進み、それに伴い若干のごく微細なひびわれが発生するが問題となるほどではなく、中性化によって物理的な劣化が生じるのは、コンクリート中の鉄筋が発錆することによるものであり、後述するように、本研究でもこの状態を限界状態とみなしている。

さて、コンクリート中のpHが11以上の場合には、鉄は表面上に不動態を形成し、例え酸素が存在しても発錆はしないが、中性化によってpHが11より低くなると鉄筋に錆が発生し、そのため鉄の体積は約2.5倍に膨張する。したがって、コンクリートにひびわれが発生し、鉄筋付着力の低下、かぶりコンクリートの剝離、さらには鉄筋断面積の減少によって抵抗モーメントが低下する。コンクリート構造物の耐久性を考える上で、中性化が重要視されるのはこの理由による。

2. 2 中性化予測式

中性化の予測式は古くから提案されているが、現在最もよく利用されている岸谷式をはじめ、 $\sqrt{t}$ 則を用いているものがほとんどであり、ある環境下に置かれたRC部材の中性化深さ（表面から中性化面までの距離） X を次式によって算定しても、実用上問題ないとされている。

$$X = A \cdot \sqrt{t} \quad (X : \text{中性化深さ}, A : \text{中性化速度に係わる係数}, t : \text{材令})$$

また、中性化速度に係わる係数Aは、水セメント比やセメント、骨材、混和材料等の種類の違いや環境条件、施工品質などによる影響を係数で表し、それらを掛け合わせて計算するのが実用上便利であり、JASS5においてもこの考え方が使われている¹⁾。

本研究において用いた中性化予測式は、岸谷式にもとづいた和泉式⁵⁾と、和泉式では考慮されていないコンクリートの締固め程度を係数とし考慮している依田式⁷⁾である。両式とも、普通ポルトランドセメント、普通骨材を使用する場合の予測式である。

(1) 和泉式

$$X=\alpha \kappa \gamma \sqrt{t} \quad \cdots \cdots \cdots (1)$$

ここで、X：中性化深さ(cm)，α：環境係数，κ：仕上げ材による係数，t：材令(年)

γ：水セメント比w によるコンクリートの品質係数

$$w \geq 0.6 \quad \gamma = \frac{(w-0.25)}{\sqrt{0.3(1.15+3w)}}$$

$$w \leq 0.6 \quad \gamma = 0.37(4.6w-1.76)$$

(2) 依田式

$$X=\alpha \kappa \gamma \tau \sqrt{t} \quad \cdots \cdots \cdots (2)$$

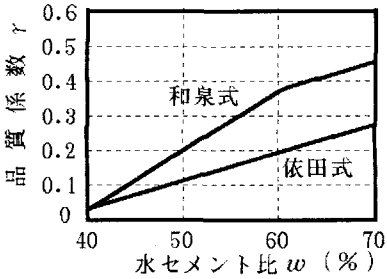
ここで、X：中性化深さ(cm)，α：環境係数，κ：仕上げ材による係数，t：材令(年)

γ：水セメント比w によるコンクリートの品質係数

$$\gamma = \frac{(10w-3.6)}{\sqrt{155}}$$

τ：コンクリートの締め固め係数

なお、両式中の品質係数γ値は中性化深さに大きく影響するパラメータのひとつであり、いずれも水セメント比のみによって与えられる。参考のため、両者の差異を示すと図-1となる。



2.3 限界状態の設定

図-1 品質係数と水セメント比の関係

構造物の信頼性評価を行うためには、まず限界状態の設定が必要である。本研究では、前述の耐久性設計法研究委員会の提案に従い、鉄筋の腐食の発生を限界状態とした。しかし、和泉らの調査によれば、図

-2に示すように、コンクリートの中性化深さがかぶり厚さに達するときに鉄筋の腐食が著しく進展する(さび評点は腐食の程度を表す指標であり、例えば鉄筋の全周または全長にわたって浮きさびが生じている状態では3点が与えられる)ことを考慮すれば、コンクリートの中性化が表面から鉄筋の位置にまで達したときを限界状態とみなすことができる¹⁾。

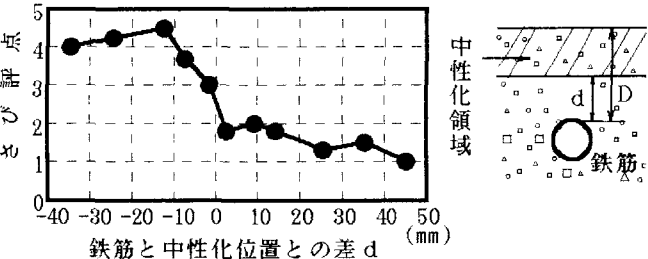


図-2 中性化の進行位置と鉄筋発錆の関係¹⁾

3. 設計かぶり厚さの算定法⁸⁾

「設計かぶり厚さ」とは、鉄筋コンクリートの耐久性上必要とされるかぶり厚さに施工誤差の影響を加味したかぶり厚さである。

さて、上述のように、鉄筋にとって有害な腐食は、屋外では、コンクリートの中性化領域が鉄筋の位置にまで到達すると急速に進行し始める。ただし、中性化領域の進行速度はかなりの不確実性を伴うので、本研究では、式(1)あるいは式(2)で与えられる中性化深さ X は、あくまでその平均値であると考えた。また、施工時の誤差も確定的に取り扱うことは難しいが、コンクリートの表面から鉄筋位置までの距離、すなわち、かぶり厚さ D のばらつきとして信頼性解析に取り入れることができる。

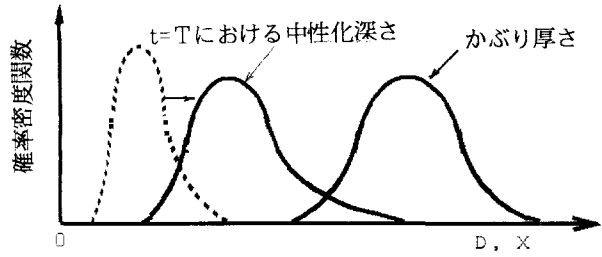


図-3 鉄筋腐食限界状態に達する確率の概念図

このとき、鉄筋の腐食の発生、すなわち構造物の耐久性に対する限界状態の発生も確率的な事象と考えられる。概念図を示せば図-3のようである。さらに、目標耐用年数 T における限界状態関数 Z は次式で与えられる。

$$Z = D - X \dots\dots\dots (3)$$

式(3)に基づいて安全性指標 β を算定できるが、 β は、かぶり厚さ D が目標耐用年数 T における中性化深さ X に対してどの程度の余裕をもっているかの定量的指標となる。

さて、確率量となる中性化深さ X とかぶり厚さ D は次の確率特性性質を持つものとする。

まず、中性化深さの平均値は、式(1)において α, κ, w を、式(2)においては α, τ, κ, w を設定し、目標耐用年数 T を t に代入することにより求められ、その変動係数は、材令には関係なく一定値 δ_c を有するものとする⁹⁾。また、かぶり厚さ D は施工誤差によりばらつくものとし、平均値によらず一定の標準偏差 σ を有するものとする⁵⁾。さらに、上述のような限界状態を考える限りコンクリートのかぶり厚さと中性化速度の間の相関性はないと考えられるので、 D と X は互いに独立な確率変数とする。

和泉は、中性化深さとかぶり厚さのばらつきが共に正規分布するときのみ有効な定式化を行うことによって、安全性指標と設計かぶり厚さの関係を検討しているが、本研究では、最近では一般的な信頼性解析法として周知の1次ガウス近似法¹⁰⁾を導入し、両者が非正規分布に従う場合にも対応できるシステムとした。このとき1次ガウス近似法により求める安全性指標 β が目標安全性指標 β_t を満たすようにかぶり厚さを変化させることにより、 β_t に応じた設計かぶり厚さ D_d を決定できる。

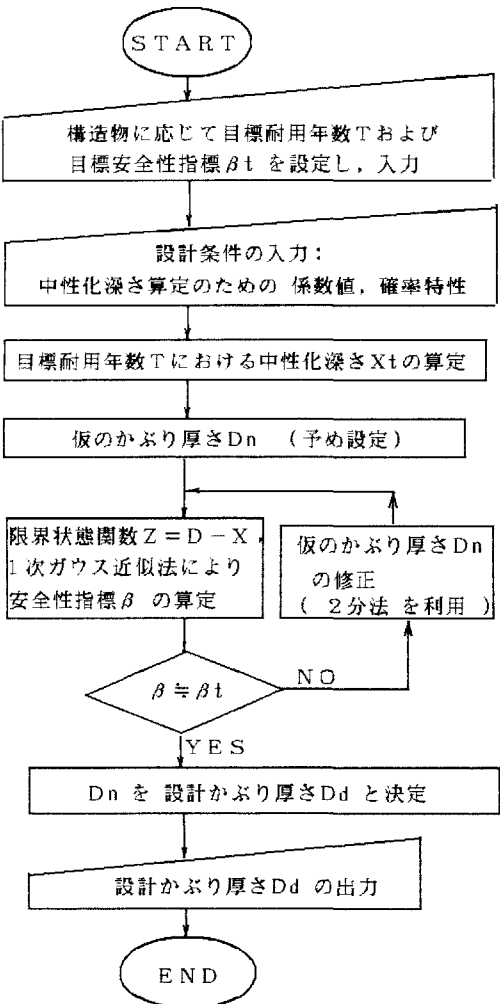


図-4 設計かぶり厚さ算定のフローチャート

その流れ図を示せば図-4のようになる。なお、くり返し計算によって設計かぶり厚さを目標の D_d に収束させる過程では、単純な2分法を使用した。収束性は非常に良好であった。

4. 数値解析結果および考察

まず、設計条件として、式(1)中の諸係数および中性化深さの変動係数 δc 、施工誤差の標準偏差 σ を調査データ⁹⁾に基づいて表-1のように設定し、目標耐用年数 T と目標安全性指標 βt に応じた設計かぶり厚さを試算してみた。

なお、中性化速度式の基本である $\sqrt{t}$ 則が材令に係らず成立するものと仮定して目標耐用年数 T は、仮に100年、65年、30年と設定した¹¹⁾。また、中性化深さの確率分布は実態調査の結果⁹⁾を参考にして正規分布と対数正規分布に従うものとし、施工誤差によるかぶり厚さは正規分布するものとした。

本システムでは上述のパラメータと構造物の重要性によって設定される目標安全性指標を入力すれば、設計かぶり厚さ D_d が出力される。

図-5には、 β の初期値から目標値 βt が得られるまでの繰り返し計算の過程を示したが、上述したように、実用上、収束性の問題はほとんどない。

計算に用いたパーソナルコンピュータはPC-9801DA、プログラミング言語はFORTRANであり、1ケース当たりのCPU timeは、約2秒である。

さて、 βt に対応して D_d が変化することは当然では

あるが、表-1に示す値を基準にしたパラメトリック解析の結果によれば、両者の関係を定量的に検討することができる。まず、中性化速度式として和泉式を用い、中性化深さが正規分布に従うとした場合の解析結果を、横軸に安全性指標、縦軸に設計かぶり厚さを取り、図-6(a)～(d)に示す。

図(a)は、当然のことながら目標耐用年数を長く、目標安全性のレベルを高く設定するほど設計かぶり厚さを大きくしなければならないことを定量的に示しているが、水セメント比が45%と小さいため目標耐用年数の影響はさほど大きくない。また、あくまで本設計条件と同様の条件の下では、わが国の道路橋示方書¹²⁾に規定された最小かぶりを採用し、目標耐用年数を仮に65年としてけたを設計した場合の安全性指標がほぼ2.4であることも同図より読み取れる。

次に、コンクリートの水セメント比をパラメータとした図(b)より、水セメント比が55%の部材は45%の部材に比して設計かぶり厚さを1.5～2.5cmほど厚くすることによって、ほぼ一定の安全性レベルを維持できることが分かる。

さらに、施工時の誤差の大きさおよび中性化深さの予測値のばらつきが設計かぶり厚さに与える影響を示したものが、それぞれ図(c)と図(d)である。施工誤差の大きさあるいは中性化深さの予測値の変動係数が与えられた場合、両図より所定の安全性指標に対する設計かぶり厚さを決定することができる。また、図(d)より、水セメント比が45%と小さい場合には、中性化深さの変動係数が設計かぶり厚さに及ぼす影響がほとんどないことが理解できる。一方、施工誤差の標準偏差については、水セメント比が45%でも55%でも、設計かぶり厚さにかなり大きく影響することが図(c)より明かである。特に安全性を大きく設定する場合にはその影響が著しい。

表-1 各パラメータの設計条件

目標耐用年数 T	30, 65, 100 (年)	
環境係数 α	1.0 (一般大気中)	
仕上げ材係数 κ	1.0 (仕上げ材無し)	
締固め条件 $\tau^{11)}$	1.0～2.0	
水セメント比 w	45～55 (%)	
中性化深さの変動係数 δc	0.3～0.5	
かぶり厚さの標準偏差 σ	0.5～1.5 (cm)	
分布形	中性化深さ	正規分布, 対数正規分布
	かぶり厚さ	正規分布

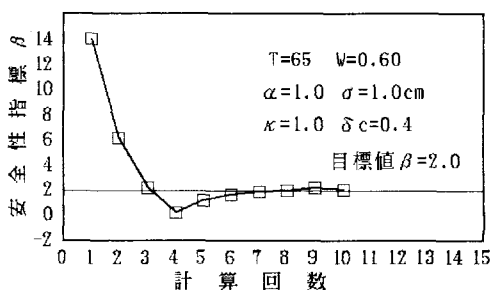


図-5 2分法による目標値への収束状況

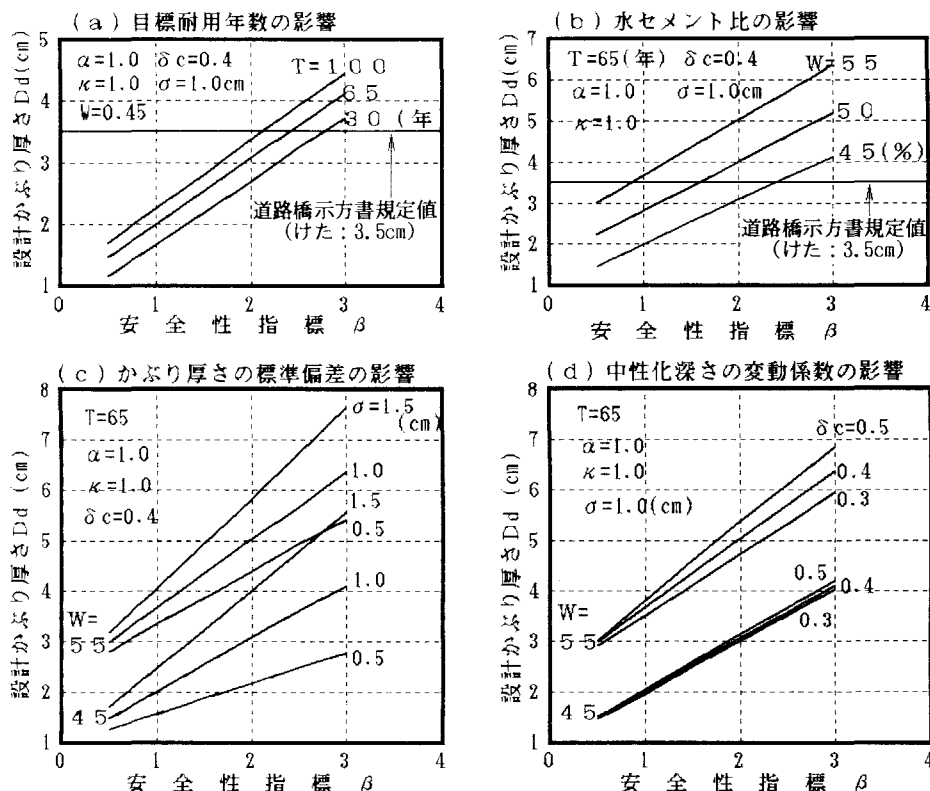


図-6 安全性指標と設計かぶり厚さの関係

さて、和泉らの実測データによれば中性化深さの確率分布は正規分布に従うようであるが、必ずしもすべての環境下で保証されている訳ではない。したがって、本論文では、同分布を対数正規分布と仮定したときの解析も行い、その影響を検討した。

その結果の一部である図-7は、目標耐用年数を65年、環境係数および仕上げ材による係数をいずれも1.0、施工誤差の標準偏差を1.0cm、中性化深さの変動係数を0.4とし、水セメント比をパラメータとして、安全性指標と設計かぶり厚さとの関係を示したものである。図-7より水セメント比が45%の場合、両者の差異は、安全性指標が3程度以下の場合にはほとんど認められず、仮に4の場合でもその差はかなり小さいことが分かる。しかし、水セメント比が55%と比較的大きい場合には、安全性指標が大きくなれば、その差がかなり大きくなることが理解できる。

次に、地域性の影響を見るために、コンクリートの

中性化が進行し易い地域、標準的な地域さらには進行し難い地域として各々東京、広島、宮崎を選び、文献1)に示された環境係数(表-2)を使用して解析した結果の一部を示す。図-8は環境係数以外は図-6(a)と同一の解析条件で目標耐用年数 $T=65$ (年)の場合の解析結果である。非常に限られた解析結果で

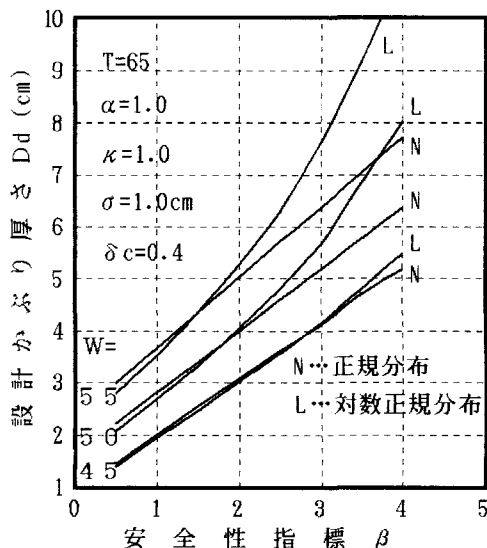


図-7 中性化深さの確率分布形が設計かぶり厚さに及ぼす影響

はあるが、この図による限り、東京におけるコンクリート構造物は、宮崎におけるものよりも約1cm程度かぶりを厚くしなければ同一の安全性レベルを確保できないと考えられる。

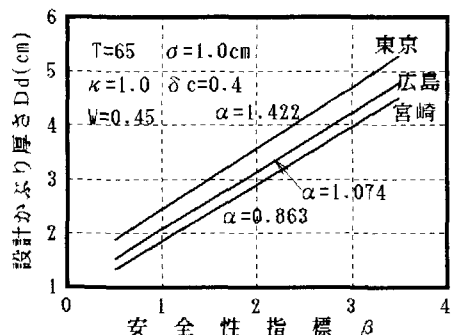


図-8 環境条件が設計かぶり厚さに及ぼす影響

図-9は、和泉式(式(1))と、施工の良否を考慮できる依田式(式(2))、表-3)に基づく結果を示したものである。

依田式による結果を見れば、施工程度の違いによって設計かぶり厚さにかなりの差異が生じることは明瞭であり、施工時の締固めを非常に良好にするとの条件の下で設計かぶり厚さを決定すれば、締固めが劣る(不良)場合より、設計かぶり厚さを1cm程度薄くすることができる。さらに、和泉式がほぼ普通の施工程度を想定した式であることが理解できる。

5. まとめ および あとがき

これまで多くの場合経験によって決められていた設計かぶり厚さを、コンクリートの中性化による耐久性の劣化のみを想定してではあるが、パーソナルコンピュータを用いた信頼性設計システムに委ねることを試みた。パラメトリック解析によって得られた結果等に基づき、著者らの考えをまとめると次のとおりである。

- 1) 示方書や基準で与えられた最小かぶりを目安とするにしても、構造物の建設される地域、耐用年数、施工誤差さらには重要度に応じた目標安全性指標等を設定して設計かぶり厚さを決定するまでの収束性は良好で、パーソナルコンピュータで効率よくかぶり厚さの算定ができる。
- 2) 現状では設計者が自らの設計経験を知識ベースとして、自らの頭脳を駆使して適なかぶりを決定していると思われるが、基礎データの入力に経験を活用(場合によっては、例えば文献1)などの資料を参照すればよい)するのみで、より科学的で、説得力のある意志決定が可能である。
- 3) 通常、RC床版の水セメント比は45%程度であるが、そのように比較的水セメント比の小さいRC部材の設計かぶり厚さに及ぼす中性化深さの変動係数の影響はほとんどない。
- 4) 目標安全性指標および水セメント比の大きい部材ほど、中性化深さの確率分布形の設計かぶり厚さに与える影響は大きくなり、対数正規分布に従う場合には正規分布に従う場合よりも設計かぶり厚さを大きくしなければならない。

土木構造物は、比較的中性化の進みにくい屋外にあり、しかも現状では一般的にかぶりも厚いので、コ

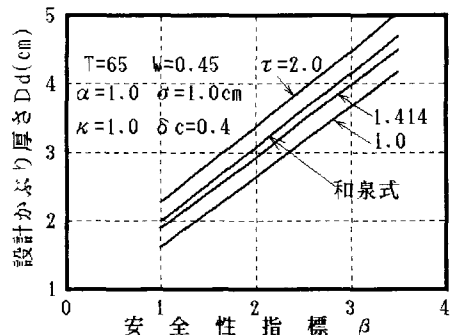


図-9 締固め程度が設計かぶり厚さに及ぼす影響

表-2 中性化に係わる環境係数 α

地点	環境係数 α	地点	環境係数 α
東京	1.422	大阪	1.394
広島	1.074	仙台	1.025
宮崎	0.863	鳥取	0.887

表-3 コンクリートの締固め程度による係数 τ

非常に良	普通	劣
1.0	1.414	2.0

ンクリートの中性化によるRC構造物の耐久性は、あまり問題にされていないように思われる。しかし、土木構造物の健全度診断例¹³⁾においても取り上げられるなど、最近では自動車社会がコンクリートの中性化へ及ぼす問題点も指摘されている。また、中性化による鉄筋の腐食確率と実構造物の劣化状況を比較検討し、維持管理に役立てようとする試み¹⁴⁾も見られる。

また、土木構造物の信頼性設計については、時機尚早との見方が大勢のように思われるが、板垣も指摘しているように、信頼性解析に必要なデータが完備するまで信頼性解析の適用を見送るとすれば、永久に（確率論に基づく）信頼性設計は行われなくなる。許容応力度設計法の経験を十分に活かしつつ（今回も、道路橋示方書の「最小かぶり」が、本研究の大きな拠り所となったことを明記しておきたい）、可能と判断できるところから、徐々にでも、信頼性解析の利点を取り入れて設計してゆく時機にきていると考える。

なお、構造物の耐用期間における耐久性の喪失確率をより厳密に論じるためには、確率論ではなく、確率過程論に基づく解析が必要であるが、そこまで精緻な解析を実設計レベルで要求すべきかどうかは今後の検討課題である。

参考文献

- 1) 鉄筋コンクリート構造物の耐久性設計法研究委員会／日本コンクリート工学協会：鉄筋コンクリート構造物の耐久性設計に関する考え方，1991.5.
- 2) 岡田 清編：最新コンクリート工学，国民科学社，1986.3.
- 3) 白石成人：構造物の信頼性解析，カラム，No.95，June，pp.11-14，1985.
- 4) 板垣 浩：信頼性工学の方向，船体構造委員会シンポジウム，pp.149-156，1990.1.
- 5) 和泉意登志：構造物の耐久性設計手法例，コンクリート工学，Vol.26，No.11，Nov.，pp.38-43，1988.
- 6) 岸谷孝一・西澤紀昭 他 編：中性化（コンクリート構造物の耐久性シリーズ），技報堂，1986.8.
- 7) 依田彰彦：中性化・炭酸化，セメント・コンクリート，No.492，pp.38-40，Feb.，1988.
- 8) 松原多孝・中山隆弘：信頼性設計法によるRC構造物のかぶり算定に関する基礎的研究，土木学会第46回年次学術講演会，I-367，pp.772-773，1991.9.
- 9) 押田文雄，和泉意登志：コンクリートの中性化深さのばらつきについて，日本建築学会大会学術講演概要集，pp.251-252，1987.10.
- 10) 星谷 勝，石井 清：構造物の信頼性設計法，鹿島出版会，1986.5.
- 11) 耐久性設計研究委員会／日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の寿命予測と耐久性に関する技術の現状，コンクリート工学，Vol.26，No.11，Nov.，pp.89-99，1988.
- 12) 日本道路協会：道路橋示方書（コンクリート橋編）・同解説，pp.167-168，1990.
- 13) 岡田 清監修：鉄道事例にみる土木構造物の診断，山海堂，pp.136-150，1990.10.
- 14) 西田丈美・藤本広和・出穂 浩：コンクリート劣化の検証について，平成3年度土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集，pp.550-551，1991.5.

（1991年 9月30日受付）