

[47] 鉄筋のかぶり厚さの信頼性設計による耐久性向上技術の提案

正会員 ○和泉 意登志 (竹中工務店技術研究所)

正会員 嵩 英雄 (竹中工務店技術研究所)

正会員 友沢 史紀 (建設省建築研究所)

正会員 富士 勲 (住宅都市整備公団住宅都市研究試験所)

1. まえがき

鉄筋コンクリート構造物は、従来耐久性に優れたものとの社会的評価がなされていたが、近年の劣化故障の顕在化により、期待されている耐久性が確保されているかどうかについて疑問が生じ、懸念もされている。劣化故障としては、アルカリ骨材反応による膨張ひびわれや塩害による鉄筋腐食など特殊な場合の故障もとりざたされているが、一方では一般環境下においてコンクリートの中性化が進み、内部鉄筋が腐食するという故障事例が増加している¹⁾。一般環境下における鉄筋腐食は、中性化深さと鉄筋のかぶり厚さの相対関係によって決定される²⁾。

鉄筋コンクリート構造物の鉄筋のかぶり厚さについては、日本建築学会や土木学会等によって最小値が規定されているが、これらの規定は絶対判定法であり、統計的な考え方は盛り込まれてはいない。実際の現場施工においては当然かぶり厚さにばらつきがあり、規定の最小値を完全に満足するためには非常に大きな値に設計値を設定しなければならないが、その値の設定手法についても確立されたやり方がないのが現状であり、このため実際の運用面では、最小値かまたは若干の割増しした値を設計目標値として施工しているのが実状であろう。このような現状においては、かぶり不足の鉄筋がある確率で出現することになり、所定の期間に達しないうちに鉄筋腐食が生じ、コンクリートのひびわれやはく落の原因となり、更には鉄筋の断面欠損に至り部材耐力が低下することになる。鉄筋コンクリート構造物の品質を長期にわたって保証していくためには、物理的な耐用年数や劣化故障を定量的に定義し、信頼性工学に基づいた設計・施工を実施していく必要があると考える。

2. 本提案の基本的考え方

本提案は、既存鉄筋コンクリート構造物におけるコンクリートの中性化深さおよび鉄筋の腐食状況並びにそれらのばらつきの実態調査²⁾を基に、鉄筋のかぶり厚さの信頼性設計手法の1つの考え方を提示し、今後新設される鉄筋コンクリート構造物の耐久性の向上を図ろうとするものである。

本提案の基本的な考え方は、鉄筋コンクリート構造物におけるコンクリートの中性化深さと鉄筋のかぶり厚さのばらつきを統計的に考慮し、構造物の設計耐用年数または鉄筋腐食による構造物の故障(以下腐食故障と呼ぶ)を鉄筋が腐食する確率で定量的に定義しようとするものである。具体的には以下の事項を基本としている。

- 1) コンクリートの中性化深さおよび鉄筋のかぶり厚さにはばらつきが存在する²⁾。
- 2) コンクリート中の鉄筋の腐食状況は、環境条件によって異なるがコンクリートの中性化深さと鉄筋のかぶり厚さとの相対関係によって決定される²⁾。
- 3) 所要の耐火性、構造耐力などが得られるかぶり厚さの最小値は別に定める。
- 4) 水や土に常時接しているもの、有害な塩分を含んでいるもの、海塩の侵入の可能性のあるもの、化学的作用または激しい気象作用を受けるもの、速心力締固め成形したものは本提案の対象から除外する。

3. 鉄筋の腐食確率および設計かぶり厚さの算定方法

3.1 与条件

ばらつきをもったコンクリートの中性化の進行と鉄筋のかぶり厚さの関係を概念的に図-1に示す。図-1では以下に示す項目を与条件としたものである。

- 1) 中性化深さの平均値 \bar{C}_t は $\bar{C}_t = \alpha \cdot \beta \cdot r\sqrt{T}$ と表わされる。

ここに α : 環境条件による定数, β : 仕上げ材による抑制係数, r : コンクリートの品質定数

- 2) 中性化深さのばらつきは正規分布で, 変動係数 v は材令に関係なく一定である。
- 3) 鉄筋のかぶり厚さのばらつきは正規分布である。
- 4) 屋外面の風雨にさらされるコンクリート中の鉄筋は, 中性化領域が鉄筋表面に到達すると同時に腐食する。屋内面のコンクリート中の鉄筋は, 中性化領域が鉄筋のかぶり厚さを20mm 通り越した時点で腐食する²⁾。

3.2 算定方法

図-2に示すように, 中性化深さの分布は材令とともに平均値および標準偏差が大きくなり, ある時点から鉄筋のかぶり厚さの分布と重なるようになり, 鉄筋の腐食が始まる。

材令 t における中性化深さの分布 $f(C_t)$ を, 平均値が \bar{C}_t で, 標準偏差が $\bar{C}_t \cdot v$ である正規分布 $N_c(\bar{C}_t, \bar{C}_t \cdot v)$ とし, 鉄筋のかぶり厚さの分布 $f(D)$ を, 平均値が \bar{D} で, 標準偏差が σ である正規分布 $N_b(\bar{D}, \sigma)$ とする。鉄筋のかぶり厚さと中性化深さの差の分布 $f(D-C_t)$ は, $(\bar{D}-\bar{C}_t)$ を平均値とし, $\sqrt{\bar{C}_t^2 \cdot v^2 + \sigma^2}$ を標準偏差とする正規分布 $N_{b-c}((\bar{D}-\bar{C}_t), \sqrt{\bar{C}_t^2 \cdot v^2 + \sigma^2})$ となり, 以下の式で示される⁵⁾。

$$f(D-C_t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot (\bar{C}_t^2 \cdot v^2 + \sigma^2)}} \cdot \exp\left(-\frac{\{(D-C_t) - (\bar{D}-\bar{C}_t)\}^2}{2(\bar{C}_t^2 \cdot v^2 + \sigma^2)}\right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

したがって, 鉄筋腐食の割合 P は, 上述の与条件4)に従って

$$P_1 = \int_{-\infty}^0 f(D-C_t) d(D-C_t) \quad (\text{屋外面で風雨にさらされる場合}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$P_2 = \int_{-\infty}^{-2} f(D-C_t) d(D-C_t) \quad (\text{屋内面の場合}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

となり, $\bar{C}_t, v, \bar{D}, \sigma$ を代入することによって求めることができる。

また, 設計かぶり厚さ D_d を求めるには, 鉄筋の腐食故障を鉄筋の腐食確率で定義 (P を設定) し, \bar{C}_t, v, σ を代入することによって \bar{D} を算出し, $D_d = \bar{D}$ とすればよい。

4. 算定例

4.1 定数の設定

3.1で示した与条件の定数を, これまでに筆者らが実施してきた実態調査に基づいて具体的に設定する。^{2), 6)}

- 1) $\alpha = 1.0$ (屋外面で風雨にさらされる場合), $\alpha = 1.7$ (屋内面の場合)
- 2) $\beta = 1.0$ (仕上げなしの場合), $\beta < 1.0$ (仕上げがある場合, 通気性の小さい仕上げ材ほど β は小さい)
- 3) r は岸谷式を基に, 水セメント比 x の関数とした。³⁾

$$r = \frac{R(x-0.25)}{\sqrt{0.3(1.15+3x)}} \quad (x \geq 0.6), \quad r = 0.37R(4.6x-1.76) \quad (x \leq 0.6)$$

R : 骨材やセメントの種類によって定まる定数 (普通コンクリートを想定し $R = 1$ とする。)

4) 中性化深さの変動係数 $v = 0.3 \sim 0.5$

5) 鉄筋のかぶり厚さの標準偏差 $\sigma = 1.0 \sim 2.0$ cm

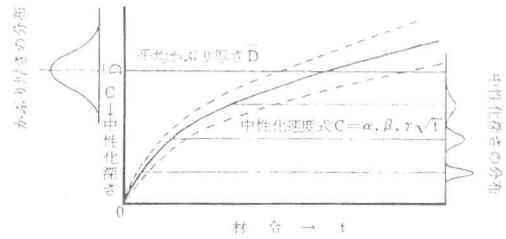


図-1 中性化深さの進行

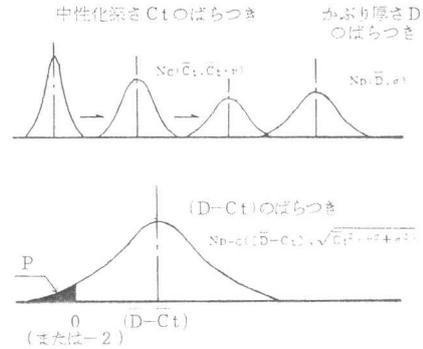


図-2 中性化の進行と鉄筋腐食割合の概念図

4.2 鉄筋腐食の割合と経過年数

α , β , x , v , σ および \bar{D} をパラメーターとして、鉄筋腐食の割合 P と経過年数 t の関係を式(1)~(3)を用いて計算した結果の例を図-3~図-8に示す。

鉄筋腐食の割合 P は、経過年数が大きくなるに従って増加し、その増加の割合は、 σ , β , x および v の値が大きいほど、また \bar{D} の値が小さいほど大となる。

\bar{D} , β , x および σ が P に及ぼす影響は顕著であるが、 v の影響は小さい。

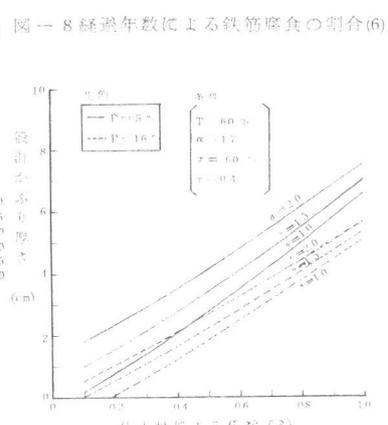
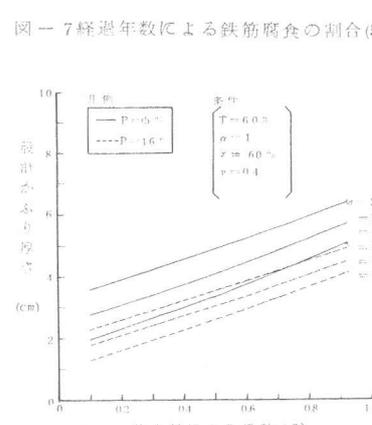
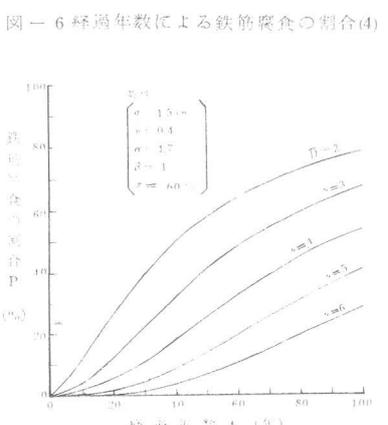
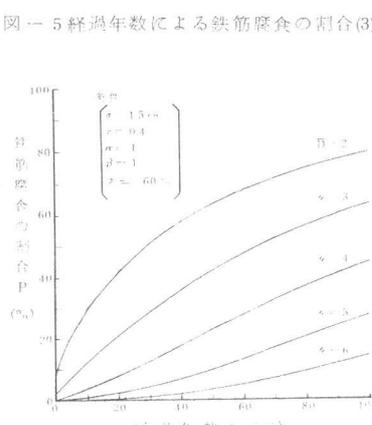
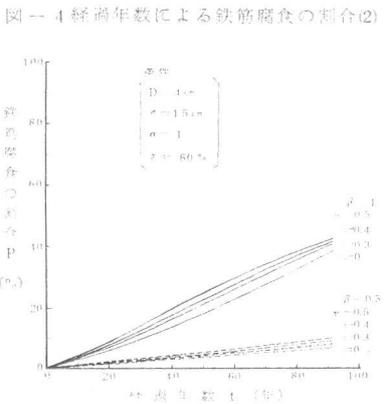
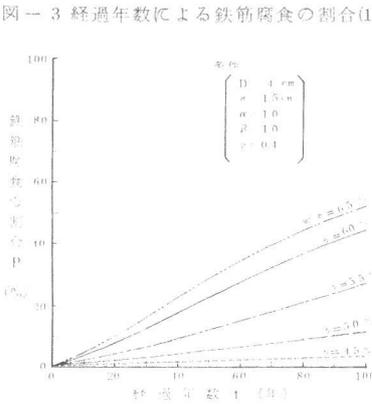
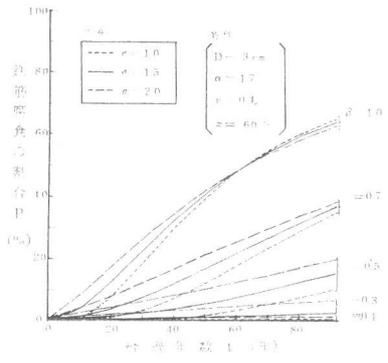
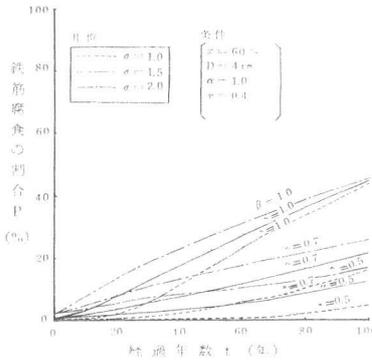
これらの図は、新設または既存のRC構造物の耐久性を定量的に評価・予測する際に活用できる。具体的には、以下のような事例に応用できる。

- 1) ある条件下におけるコンクリート中の鉄筋の腐食割合の将来予測
- 2) 鉄筋腐食故障(または寿命)を鉄筋腐食の割合 P で定量的に定義した場合における耐用年数の予測
- 3) 鉄筋腐食故障を定義し、目標耐用年数を設定した場合における鉄筋コンクリート工事および仕上げ工事の品質性能ならびに施工グレートの選定

4.3 設計かぶり厚さの算出

鉄筋腐食故障(または寿命)を鉄筋腐食の割合 P で具体的に定義し、目標耐用年数を設定した場合における設計かぶり厚さを式(1)~(3)を用いて計算した。ここでは、鉄筋腐食故障の定義として $P=5$ または 16% の2種類を仮定し、 α , x , v , σ および耐用年数 T をパラメーターとして設計かぶり厚さ D_d と仕上げ材による係数 β との関係計算した結果の例を図-9~図-14に示す。

設計かぶり厚さ D_d は、仕上げ材の係数 β , 鉄筋腐食故障の定量的な設定値 P , かぶり厚さの標準偏差 σ , 水セメント比 x および耐用年数 T によって大きく影響を及ぼされ、 β , P , σ , x および T の値が大きいほど大きな値が必要となる。



これらの図は、鉄筋コンクリート工事および仕上げ工事の材料品質および施工のグレードが設定されている場合の設計かぶり厚さの算出、または設計かぶり厚さが設定されている場合の鉄筋コンクリート工事および仕上げ工事の仕様の決定に適用できる。

例えば図-9では、耐用年数を60年と設定し、屋外で風雨にさらされる条件下において、 $x = 60\%$ 、 $v = 0.4$ と仮定した場合、 P および σ をパラメーターとして設計かぶり厚さ Dd と β の関係を表している。ここで、 $P = 16\%$ 、 $\beta = 1.0$ 、 $\sigma = 1.5\text{cm}$ 、 $v = 0.4$ とした場合、設計かぶり厚さは 4.5cm 必要であることになる。また逆に、 $Dd = 3\text{cm}$ に設定されている場合、 $P = 16\%$ 、 $\sigma = 1.5\text{cm}$ 、 $v = 0.4$ とすると $\beta = 0.5$ となり、耐用年数を60年とするには $\beta = 0.5$ である仕上げを施す必要があることになる。

5. まとめ

コンクリートの中性化深さと鉄筋のかぶり厚さのばらつきを統計的に考慮し、鉄筋が腐食する確率で鉄筋コンクリート構造物の設計耐用年数または腐食故障を定量的に定義する方法とその具体的使用方法について述べた。

本方法は鉄筋のかぶり厚さの信頼性設計手法として今後新設される鉄筋コンクリート構造物の耐久性の向上に活用可能であるとともに、既存構造物の耐久性診断、余寿命の推定にも応用できるものであると考える。しかし本方法を実際の設計や診断に用いるためには、耐用年数や鉄筋腐食故障を定義する腐食確率の設定値をどう取るかという社会的コンセンサスが不可欠で、今後の課題として残っている。

〔謝辞〕

本研究を進めるに当たり、建設省昭和58年度総合技術開発プロジェクト「建築物の耐久性向上技術の開発：鉄筋コンクリート造分科会（分科会長岸谷孝一東京大学教授）、鉄筋腐食ワーキング・グループ」のメンバーの各位の御指導と、竹中工務店技術研究所押田氏、西原氏の御協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

〔参考文献〕

- 1) 例えば、朝日新聞：昭和57年12月9日 夕刊
- 2) 嵩，和泉他：既存RC構造物におけるコンクリートの中性化と鉄筋腐食について（その1～3），日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和58年9月
- 3) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事，昭和52年10月，P.38，P.225～P.226
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書，昭和53年3月，P.29
- 5) 松井：おはなし統計の手法，1972年3月，P.9～22
- 6) 和泉，嵩：経年鉄筋コンクリート建築物におけるコンクリートの中性化と鉄筋腐食の実態について，第10回セメント・コンクリート研究討論会講演要旨集，昭和58年11月

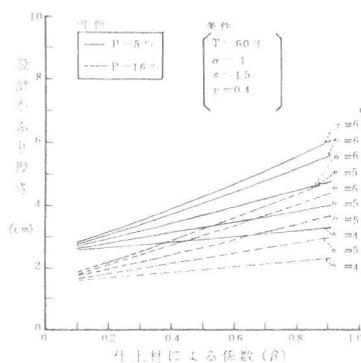


図-11 設計かぶり厚さの算定図(3)

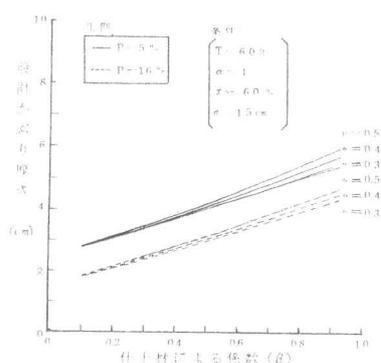


図-12 設計かぶり厚さの算定図(4)

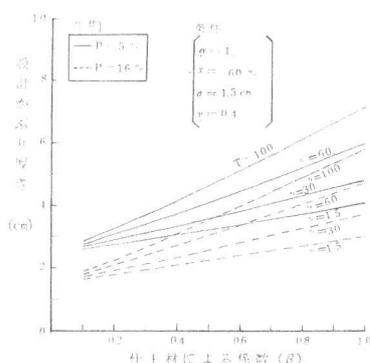


図-13 設計かぶり厚さの算定図(5)

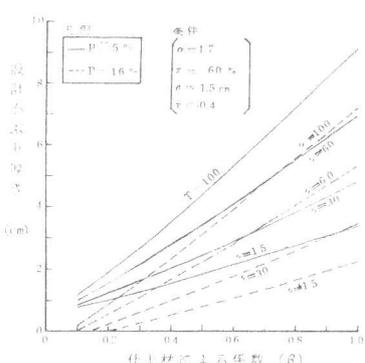


図-14 設計かぶり厚さの算定図(6)