

## [31] コンクリート部材の劣化と破壊確率について

正会員 関 博 (早稲田大学理工学部)  
 正会員 松 井 邦 人 (東京電機大学理工学部)  
 松 島 学 (東電設計土木本部)  
 正会員 ○金 子 雄 一 (早稲田大学大学院)

### 1. まえがき

最近、コンクリート構造物の劣化および耐久性が大きな問題として取り上げられるようになっており、塩害による鉄筋やP.C.鋼材の腐食、アルカリ骨材反応によるコンクリート体の劣化、などがあげられている。これらの問題に対しては、劣化の機構、劣化の判定方法、補修方法などが主要な検討項目となっていると思われる。しかし現行の設計法および限界状態設計法では、耐久性に関連する内容は十分とは言い難いのが現状のようである。すなわち、その構造物の置かれている環境における構造物の経年劣化の度合いを定量的に予測するような手法が確立されていないということである。このような手法については不確定な要因が多数含まれるため、それらすべてを含めた正確な予測を行なうということは、容易なことではないと思われる。また、構造物の供用年数とその供用期間中の破壊確率の適切な値を定めることも容易ではない。供用年数は、i) 機能的要因、ii) 物理的要因 — 安全性および使用性より定まる、iii) 経済的要因、などにより定まると考えられるが、種々の要因を定量的に処理することは困難を伴い、この問題の取扱いを複雑にしていると考えられる。表-1<sup>1)</sup>はRC構造物の設計上の供用年数をまとめたものであるが、本表によっても種々の値が用いられている現状がうかがわれると思われる。

本文では、これらの要因のうちii) 物理的要因に関連するものを考え、ひびわれによる鉄筋の腐食とコンクリート体の劣化が構造部材の曲げ破壊に及ぼす影響を考慮したときの部材の安全性の低下に焦点を絞り、既往の資料などをもとに構造物の寿命を推定する方法を検討した。

### 2. 構成材料の劣化について

#### (1) コンクリートの劣化

コンクリート強度の経年変化についての長年に亘る測定例は少ない。ここではNorwayで実施された海水浸漬による30年試験の測定値<sup>2)</sup>を参考とするものとする。

コンクリート強度の経年劣化は、年数を  $t$  年として次式で評価するものとする。

$$fct = (1 + e_c^*) e^{-\lambda c t^2} fco \quad (1)$$

ただし、 $fct$ :  $t$  年後のコン

クリート強度

$fco$ : 初期 ( $t = 0$

年) のコンク

表-1 RC構造物(土木構造物)の設計上の供用年数

規格・規準名	供用年数	備考
道路橋示方書同解説 I.共通編 (1978)	風荷重に対し 50年	非超過確率 0.6 をえた基本風速
「港湾関係助成金等交付規則実施要領について」	岸壁、防波堤 50年 橋 架 60年 さん橋 50年	(物理的要因により定まる年数)
大蔵省令 第15号 (1983.4) (減価償却資産の耐用年数に関する大蔵省令)	橋 梁 50年 トンネル 60年 まくら木 20年	鉄道梁用または軌道梁用のもの
BS 5400 Steel, Concrete and Composite Bridges (1978)	120年	design life
CEB-FIP Model Code (1978) International System of Unified Standard Codes of Practice for Structures-Vol. 1, App. 1	仮設物 5年 一般 50年 記念構造 500年	レベル "2" での方法による design life
Rules for the Design Construction and Inspection of Offshore Structures (1977) by DNV	100年	design period (環境荷重設定における設計期間)

### リート強度の平均値

$\dot{\lambda}_c$ : コンクリート強度の経年劣化の割合を決めるための係数

$\dot{\epsilon}_c$ : コンクリート強度の初期のばらつき  
なお、\*の付いた量は分布をもった量である。

(1)式より  $f_{ct}$  の平均値を  $\bar{f}_{ct}$ 、 $\lambda_c$  の平均値を  $\bar{\lambda}_c$  として

$$\bar{f}_{ct} = \bar{C}_c f_{co} \quad (2)$$

すなわち

$$\bar{C}_c = e^{-\bar{\lambda}_c t^2} \quad (3)$$

とし、 $\bar{\lambda}_c = 0.00077$ としたときの劣化曲線を図-1に示す。

### (2) 鉄筋の劣化

鉄筋の劣化は、i) 材料的な強度の劣化、ii) 腐食による断面積の減少、の2つの要因によって決定される。しかし、両者を別々に評価することは困難であり、本文では i) ii)ともに断面積の減少として評価するものとする。すなわち、i)による強度の低下を断面積の減少に換算し ii)と合わせて断面積とするのである。このようにして求めた断面積を換算断面積と呼ぶことにする。また、換算断面積から求まる半径を換算半径と呼ぶことにする。

換算断面積は年数を  $t$  年として次式によって表わすものとする。

$$\dot{A}_t = \frac{(1 + \dot{\epsilon}_s) r - \dot{\lambda}_s t^m}{r^2} A_o \quad (4)$$

ただし、 $\dot{A}_t$ :  $t$  年後の鉄筋の換算断面積

$A_o$ : 初期 ( $t = 0$  年) の鉄筋の換算断面積の平均値

$r$ : 初期 ( $t = 0$  年) の鉄筋の換算半径の平均値

$m$ : 曲線の形状を決めるための係数

$\dot{\lambda}_s$ : 鉄筋の換算半径の経年の減少量を決める係数

$\dot{\epsilon}_s$ : 鉄筋の換算半径の初期のばらつき

すなわち、 $t$  年間で換算半径が  $\dot{\lambda}_s t^m$ だけ減少すると考えるのである。

ここで、劣化曲線の形状は  $m$  によって決まるが、 $m$

の値については 1 と 2 の間程度の値であると思われる。また、初期の値についても、径のばらつきと強度のばらつきの両者があるので<sup>3)</sup>、換算する必要がある。

(4)式より  $\dot{A}_t$  の平均値を  $\bar{A}_t$ 、 $\dot{\lambda}_s$  の平均値を  $\bar{\lambda}_s$  として、

$$\bar{A}_t = \bar{C}_s A_o \quad (5)$$

$$\bar{C}_s = \left(1 - \frac{\bar{\lambda}_s t^m}{r}\right)^2 \quad (6)$$

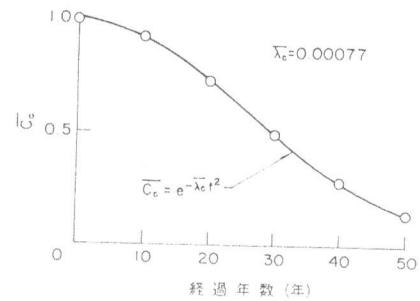


図-1  $\bar{C}_c$  の経年による劣化曲線

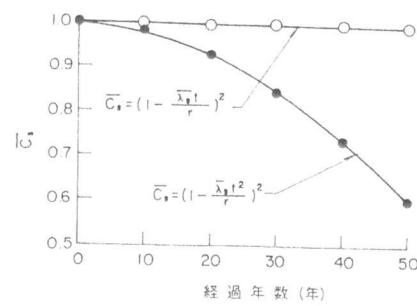


図-2  $\bar{C}_s$  の経年による劣化曲線  $[r=1.1 \text{ cm}, \bar{\lambda}_s=9.9 \times 10^{-5}]$

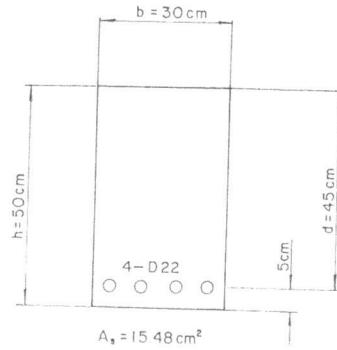


図-3 試算の断面

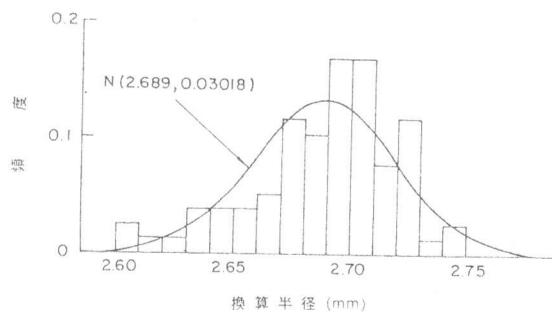


図-4 鉄筋の引張試験結果から求めた換算半径の頻度分布

とし、 $\gamma = 1.1 \text{ cm}$ 、 $\bar{\lambda}_s = 9.9 \times 10^{-5}$  とし、 $m$  の値については、 $m = 1$ 、 $m = 2$  と 2 つの値を仮定したときの劣化曲線を図-2 に示す。

### 3. RC 部材の劣化と破壊確率の算定

$\dot{\lambda}_s$ 、 $\dot{e}_s$ 、 $\dot{\lambda}_c$ 、 $\dot{e}_c$  の分布を決め、2.に述べた式によって劣化を評価し、断面の破壊耐力を求め、破壊確率を算定する。方法としてはモンテカルロ法を用い、乱数は 2000 個発生させた。想定した断面は図-3 に示す単鉄筋長方形断面で、作用モーメントの値は  $10 t \cdot m$  と仮定した。

#### (1) コンクリートに対する算定条件

コンクリート強度の分布については  $\dot{e}_c$ 、 $\dot{\lambda}_c$  とも正規分布と仮定する。初期のはらつきは変動係数を 10% として  $\dot{e}_c = N(0, 0.1)$  とした。

$\dot{\lambda}_c$  の分布は、コンクリート強度が 30 年で 50% 程度に低下するものと仮定し、また  $\dot{\lambda}_c$  の変動係数を 10% と仮定することによって、次の値となつた。すなわち、 $\dot{\lambda}_c = N(0.00077, 0.000077)$ 。

$\dot{\lambda}_c$  の平均値は、自然環境における条件としてはかなり過酷なものと考えられる。実際の構造物と比べると大きすぎる値とも考えられるが、 $\dot{\lambda}_c$  の影響を明らかにするため、今回は大きな値を採用することにする。

#### (2) 鉄筋に対する算定条件

鉄筋の換算断面積の分布形状に関しては、本文では取扱いを容易とするため、 $\dot{e}_s$ 、 $\dot{\lambda}_s$  ともに正規分布と仮定した。初期のはらつきとしては変動係数として 5% とし、 $\dot{e}_s = N(0, 0.05)$  と仮定した。次に、 $\dot{\lambda}_s$  の分布については、2通りの場合について計算を行なった。

第 1 の方法は、室内での促進試験の結果<sup>4)</sup> を参考に  $\dot{\lambda}_s$  を逆算する方法である。用いたデータを図-4 に示す。これは、高強度コンクリート中の高強度鉄筋 ( $5.5 \varnothing$ ;  $\gamma = 2.75 \text{ mm}$ ) の腐食後の引張試験の結果から換算半径を求めたものである。試験は促進試験であり、本測定値を  $t_0$  年に相当するものと仮定し、 $t_0$  の値を 4, 5, 7, 10, 20, の 5 通りに変化させたときの  $\dot{\lambda}_s$  の分布を計算した。表-2 は計算結果を示している。

第 2 の方法は  $\dot{\lambda}_s = N(\bar{\lambda}_s, \sigma_{\lambda_s})$  において  $\bar{\lambda}_s$  を一定にし、 $\sigma_{\lambda_s}$  をパラメトリックに変化させる方法である。鉄筋の換算断面積の標準偏差  $\sigma_s$  は、時間に無関係なもの  $\sigma_{s_1}$  と時間の影響によるもの  $\sigma_{s_2}$  によって

$$\sigma_s = \sqrt{\sigma_{s_1}^2 + \sigma_{s_2}^2} \quad (7)$$

として表わせる。ここで  $\dot{\lambda}_s$  の標準偏差と関係のあるものは  $\sigma_{s_2}$  である。そこで 50 年後の  $\sigma_{s_2}$  すなわち  $\sigma_{s_2}|t=50$  の値を 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, の 5 通りに変化させ、 $\bar{\lambda}_s = 0.000049$  と仮定した。 $\bar{\lambda}_s$  の値は、 $t = 50$  年において  $\bar{C}_s = 0.79$  ( $m = 2$ ) となる値である。

$\dot{\lambda}_s$  の分布を表-3 に示す。

$m$  の値としては、図-2 より影響の大きい方を採用し、 $m = 2$  と仮定して計算を行なった。

表-2  $t_0$  と  $\lambda_s^*$  との関係

$t_0$ (年)	$\lambda_s^*$
4	$N(0.0003822, 0.0001886)$
5	$N(0.0002446, 0.0001207)$
7	$N(0.0001248, 0.0000616)$
10	$N(0.0000612, 0.0000302)$
20	$N(0.0000153, 0.0000075)$

表-3  $\sigma_{s_2}|t=50$  と  $\lambda_s^*$  との関係

$\sigma_{s_2} t=50$	$\lambda_s^*$
0.05	$N(0.000049, 0.0000979)$
0.10	$N(0.000049, 0.0001386)$
0.15	$N(0.000049, 0.0001705)$
0.20	$N(0.000049, 0.0001969)$
0.25	$N(0.000049, 0.0002200)$

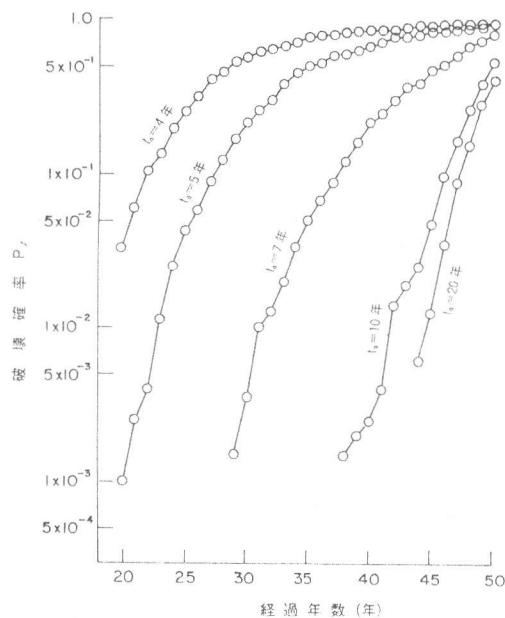


図-5 実験結果に基づく破壊確率の経年変化

### (3) 破壊確率の計算結果

(1), (2)に述べた条件にしたがって、今回の試算の断面の破壊確率を求めた結果を図-5および図-6に示す。なお、鉄筋腐食による軸方向ひびわれやコンクリートのはく離等の影響は無視し、曲げ破壊のみを考慮している。いずれの計算結果も  $\lambda_c$  より  $\lambda_s$  の方が破壊確率に大きく影響することを示している。すなわち、 $\lambda_c$  を一定とし、 $\lambda_s$  を変化させたときに異なった結果となっている。破壊確率が 5%となるのは、図-5において  $t_0 = 7$  年で 35 年、 $t_0 = 10$  年で 45 年であり、図-6においては 27 年から 35 年の値となっている。双方の図とも破壊確率が小さい領域では精度が劣っているようであるが、これは乱数の個数が少ないと想定される。コンクリートの劣化の係数に大きな値を用いたり、鉄筋の腐食を高強度の試験結果から求めるなどの問題はあるが、破壊確率の大きい領域では良い傾向を示していると思われる。

図-7には、 $t_0 = 10$  年の  $t = 50$  年における破壊耐力の頻度分布を示す。図中に示すように、ほぼ対数正規分布となっていて、半分以上が作用モーメントを下まわっている。

### 4. まとめ

構造物の構成材料の劣化による安全性の低下についての定量的な予測についての検討を行ない、経年により破壊確率が増大するなど概略の傾向を把握することができた。しかし、本文では荷重作用のばらつきなどは考慮しておらず、また、データの不足などにより多くの仮定を設けている。特に  $\lambda_s$  の分布形状と  $m$  の値についてはさらに検討が必要であると思われる。

今後、上記の問題点を考慮するとともに、多くの測定値を背景として、破壊確率をより信頼性の高い精度で推定する必要があると考えられる。

### 参考文献

- 1) 関 博他：RC 部材の耐久性と供用年数について、第11回セメント・コンクリート研究討論会講演要旨集、(セメント・コンクリート研究会)、1984年10月
- 2) Gjørv, O.E. : Long-time Durability of Concrete in Seawater. ACI Journal. Vol. 68, No 1 1971年1月
- 3) 青木義次：鉄筋の強度と断面のばらつき、セメント・コンクリート、No. 384. 1979年2月
- 4) 関 博他：コンクリート中の鉄筋の腐食量に関する実験的考察、土木学会第39回年次学術講演会講演概要集、(土木学会)、1984年10月

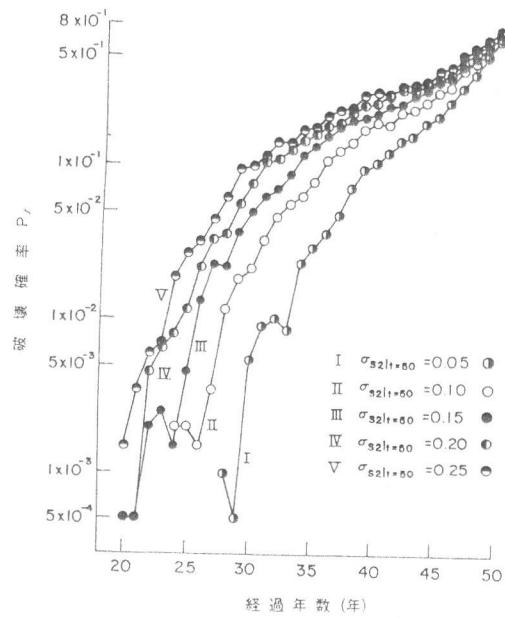


図-6  $\sigma_{s2l1-s0}$  の値を変化させたときの破壊確率の経年変化

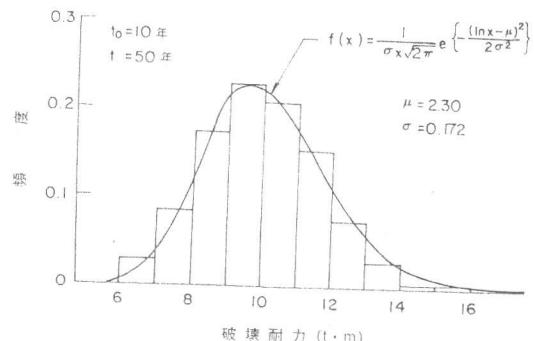


図-7 破壊耐力の頻度分布