

## 信頼性解析によるコンクリート構造物の塩害劣化評価に関する研究

鹿島技術研究所 正会員 ○林 大介  
 (株) イー・アール・エス (鹿島技術研究所) 正会員 永田 茂  
 鹿島技術研究所 正会員 横関 康祐  
 鹿島技術研究所 フェロー 須田 久美子  
 鹿島技術研究所 フェロー 坂田 昇

## 1. はじめに

近年、土木構造物の性能照査型設計や計画的な維持管理が実現されつつある。これらの背景には、コンクリート構造物の耐久性に関する研究の進歩があり、長期劣化予測手法が確立されてきたことが大きく寄与しているものと考えられる。今後は、長期劣化予測に用いられる各パラメータが予測結果に及ぼす影響の把握や性能照査型設計における適切な部分安全係数の設定等が望まれている。本研究では、既往の塩害劣化予測モデルを用いた信頼性解析を行い、水セメント比やかぶり等のパラメータが長期耐久性に及ぼす影響について検討した。

## 2. 塩害劣化に関する信頼性解析

## (1) 塩害劣化に関する性能関数と評価指標

塩害劣化予測では、進展期と加速期の境界すなわち腐食ひび割れの発生を耐久性に関する限界状態とした。この限界状態に対する性能関数として、潜伏期についてはフィックの拡散方程式を適用し、鉄筋位置の塩化物イオン量が腐食限界量に達した後の進展期については、鉄筋腐食速度および腐食ひび割れ発生限界腐食量の推定式を用いた<sup>1)</sup>。信頼性解析では、修正2次モーメント法<sup>2)</sup>によって式(1)の腐食ひび割れ発生確率および信頼性指標 $\beta$ を評価し、さらに式(1)に対する水セメント比、単位セメント量、腐食限界塩化物イオン量、かぶりおよび鉄筋間隔の感度係数および設計点を算出した。ここで、感度係数は、各パラメータの腐食ひび割れ発生確率に及ぼす影響度を評価するための指標であり、-1.0 から 1.0 までの範囲で絶対値の大きなパラメータほど影響が大きいことを示す。この係数は、現行のコンクリート標準示方書の部分安全係数の評価にも用いられている。また、設計点は、各供用年数において腐食ひび割れが発生する状態と発生しない状態を分ける限界状態における各パラメータの値と考えることができる。

$$P_f = P[W_{cr} - W_t \leq 0] = \Phi(-\beta) \quad \text{式(1)},$$

$$W_t = f(RH, W/C, T, t, t_0) \quad \text{式(3)}$$

$$t_0 = f(C, d, W/C, T, C_{cr}) \quad \text{式(4)}$$

ここに、 $P[\ ]$ : 確率、 $\Phi(\ )$ : 正規確率分布関数、 $P_f$ : 腐食ひび割れ発生確率、 $W_{cr}$ : 腐食ひび割れ発生限界腐食量の確率パラメータ ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )、 $W_t$ : 時間 $t$ の鉄筋腐食量 ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )、 $\beta$ : 式(1)によって腐食ひび割れ発生確率と対応づけられる信頼性指標、 $t$ : 供用年数 (年)、 $t_0$ : 潜伏期 (年)、その他: 表-1 参照

## (2) 事例検討ケース

事例検討では、表-1に示す3ケースを設定した。ケース1は海洋構造物を想定して平均値を設定したものであり<sup>3)</sup>、ケース2および3はそ

$$W_{cr} = f(L, ctc, d_s, \phi, \alpha_s, D) \quad \text{式(2)}$$

表-1 事例検討ケース

パラメータ	記号	確率分布	ケース1	ケース2	ケース3
			基準ケース	配合の影響	かぶりの影響
水セメント比(%)	W/C	正規分布	45 4.0	55 4.8	45 4.0
単位セメント量( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	C	正規分布	330 15	300 15	330 15
腐食限界塩化物イオン量( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$C_{cr}$	正規分布	1.8 0.3	1.8 0.3	1.8 0.3
かぶり(mm)	L	正規分布	100 15	100 15	60 20
鉄筋間隔(mm)	ctc	正規分布	150 30	150 30	150 30
鉄筋径(mm)	$d_s$	確定値	16	16	16
クリップ係数	$\Phi$	確定値	0.4	0.4	0.4
鉄筋体積膨張率	$\alpha_s$	確定値	3.2	3.2	3.2
鉄筋腐食角度( $^\circ$ )	D	確定値	360	360	360
離岸距離(km)	d	確定値	0.00001 (干満帯)	0.00001 (干満帯)	0.00001 (干満帯)
年平均気温( $^\circ\text{C}$ )	T	確定値	15	15	15
年平均湿度( $^\circ\text{C}$ )	RH	確定値	85	85	85

※: 上段には平均値を示し、下段には標準偏差を示してある。

キーワード 塩害劣化予測, 信頼性解析, 修正2次モーメント法, 劣化発生確率, 信頼性指標 $\beta$

連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島技術研究所 TEL 0424-89-7071

れぞれコンクリート配合およびかぶりの影響を把握するために設定したものである。各ケースの水セメント比の標準偏差には、一般的なレディーミクストコンクリート工場の圧縮強度の変動係数とされている 10%に相当する値<sup>4)</sup>を与えており、かぶりの標準偏差には調査事例<sup>5)</sup>を参考に設定した値を与えた。また、腐食限界塩化物イオン量の平均値および標準偏差には、実環境で 1.2~2.4kg/m<sup>3</sup>とされていること<sup>6)</sup>を参考に設定した値を与えた。

3. 評価結果

(1) 腐食ひび割れ発生確率および信頼性指標  $\beta$

腐食ひび割れ発生確率および信頼性指標  $\beta$  をそれぞれ図-1 および図-2 に示す。同図より、本検討の範囲ではコンクリート配合に比べてかぶりの影響の方が大きい結果となった。

(2) 感度係数

海洋構造物を想定したケース1の感度係数を図-3 に示す。感度係数が正の範囲では、かぶり、腐食限界塩化物イオン量、鉄筋間隔の順に絶対値が大きくなり、負の範囲では水セメント比、単位セメント量の順に絶対値が大きくなった。全体的な傾向として、腐食ひび割れの発生にはかぶりが大きな影響を及ぼし、単位セメント量の影響は小さかった。

(3) 設計点

感度係数の検討において最も腐食ひび割れの発生に影響を及ぼす結果となったかぶりおよび水セメント比の各ケースの設計点を図-4 に示す。本検討のように、かぶりの平均値に対して標準偏差が小さい場合、かぶりの設計点は、配合およびかぶりの違いによらず、ほぼ同程度の値となり、供用年数が長くなるに従って大きくなる傾向があった。一方、水セメント比の設計点は、各ケースの水セメント比の平均値に近い値となり、供用年数によって値が大きく変わることはないものの、平均値を高く設定したケースの方が、低く設定したケースよりも大きな変化を示す傾向があった。これは、かぶりおよび水セメント比の部分安全係数を、それぞれ供用年数および水セメント比に応じて設定してもよいことを示唆している。

4. おわりに

各パラメータで考えられる不確定性を考慮した信頼性解析により、合理的に構造物の耐久性能を評価できる見通しが得られた。具体的には、こうした検討手法を新材料や補修材料の部分安全係数の評価等に適用していくことが考えられる。

参考文献

- 1) 林ほか：塩害環境下におけるコンクリート構造物の劣化予測に関する研究，JCI 年次論文集，2003 年（投稿中）
- 2) 永田ほか：線形構造物の信頼性評価に関する一研究，構造工学論文集，Vol.34A，pp.689-697，1988 年
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書[施工編]，1996 年
- 4) コンクリート工学協会：コンクリート便覧，1996 年
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書[維持管理編]および [施工編]，2001 年および 2002 年
- 6) 守分ほか：既設コンクリート構造物の塩化物イオンの拡散過程より評価される表面処理工法の適用性，土木学会論文集，No.520/V-28，pp.111-112，1995 年 8 月

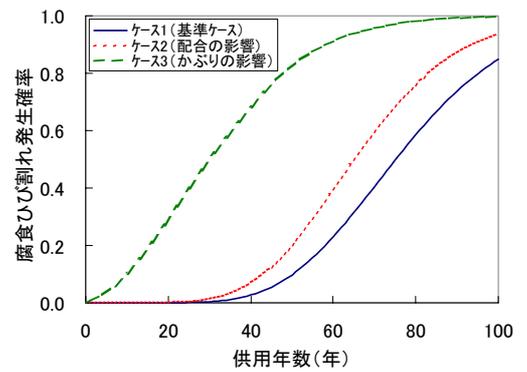


図-1 腐食ひび割れ発生確率

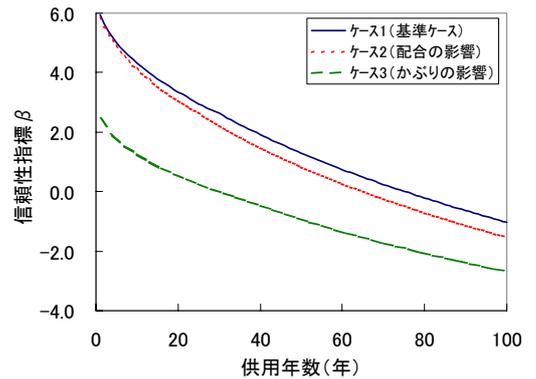


図-2 信頼性指標  $\beta$

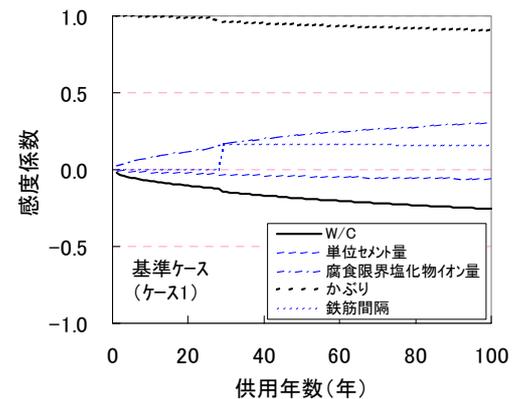


図-3 感度係数 (ケース1)

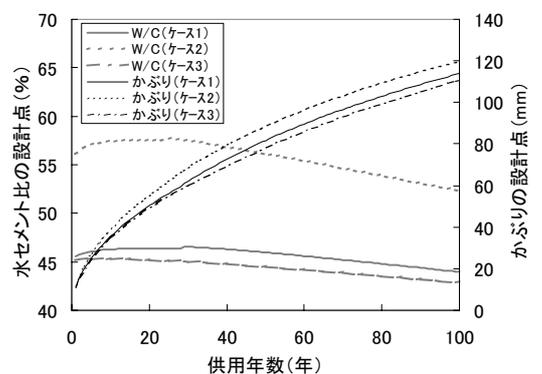


図-4 設計点