

ライフタイムを考慮した鉄筋コンクリート構造物の 構造信頼性評価に関する基礎的研究

東北大学大学院 学生会員 ○大木文宏

東北大学大学院 正会員 秋山充良

東北大学大学院 フェロー 鈴木基行

鹿島建設(株) 正会員 佐藤広和

1. はじめに

コンクリート標準示方書¹⁾では、塩害による劣化に関する耐久設計上の限界状態を鉄筋腐食発生点と定めている。一方で、本来のコンクリート構造物の構造設計の基本は、ライフタイム内に生じる種々の外的作用に対して、構造安全性を確保することにある。構造性能の経時的な変化が予測でき、構造安全性を定量的に把握できるのであれば、耐久設計上の限界状態を鉄筋腐食発生点以降に設定することができ、より合理的な設計が可能になる。本研究では、信頼性理論に基づき、鉄筋腐食による構造性能の低下を考慮した耐震信頼性評価を行い、腐食程度と構造安全性の関係を示した。次に、塩害環境下にあるコンクリート構造物の劣化予測に伴う種々の不確定性を考慮した耐久信頼性評価を行い、鉄筋腐食や腐食ひび割れ発生の可能性を定量化し、構造安全性との関係から、耐久設計で用いるべき限界状態について論じた。

2. 構造性能の低下を考慮した耐震信頼性評価

(1) 解析条件

解析対象橋脚として、道路橋示方書 耐震設計編²⁾の規準を満足する2つのRC橋脚(P1およびP2橋脚)を試設計した。断面形状はそれぞれ3300×2100mmと6000×3500mm、橋脚高さは6000mmと13400mmであり、1次固有周期は0.3secと0.5secである。また、既存不適格構造を想定し、意図的に終局変位を超過する応答が生じる確率が増加するように設計したP3橋脚(P1橋脚の0.5倍の終局変位を持つ橋脚)についても解析対象とした。

(2) 耐震信頼性評価

解析対象橋脚の耐震信頼性は次の条件で評価した。まず、鉄筋の断面減少率と曲げ耐力および靱性率の関係を既往の実験的研究^{例えば³⁾}から求めた。断面減少率が大きくなり、腐食が進行すると、曲げ耐力や靱性率の予測に伴うバラツキが大きくなることが認められたので、それは(実験値)/(断面減少率を考慮した計算値)の統計量に反映させた。なお、今回調査した範囲では、せん断耐力や正負交番載荷を受けた際の除荷剛性と断面減少率に相関が認められなかったため、これらの値は腐食が生じる前の状態から算定した。断面減少率の大きさと劣化レベルは、参考文献4)、5)に基づき表-1のように定義した。

Level 1～4の腐食が生じたと仮定し、前記した3基の橋脚の損傷確率を評価する。損傷確率は、各橋脚の終局変位を超える応答変位が生じる確率と定義し、Monte Carlo法により算定している。平均断面減少率が大きくなるほど、Level 1の状態に比べ曲げ耐力と靱性率が減少し、さらにそれらの予測に伴うバラツキが大きくなることから、損傷確率が大きくなる。地震ハザードは、J-SHIS⁶⁾を使用し、解析対象地点としては神戸市を選定した。なお、他の解析対象地点を選択しても、以下に示す考察に大きな変化はない。

各橋脚の耐震信頼性の評価結果を図-1に示す。縦軸の信頼性指標 β は、損傷確率 pf と $\beta = -\Phi^{-1}(pf)$ (Φ : 標準正規分布の累積分布関数)の関係がある。Level 3までならば、信頼性指標は健全な状態とほぼ同じである。しかし、Level 4まで腐食が進行すると、構造安全性が明らかに低下することが確認できる。したがって、耐久設計上の限界状態は、供用期間内にLevel 3までの腐食の進行に抑え、それ以降の劣化は生じさせないようにかぶりなどを設定する必要がある。

3. 塩害環境下にあるRC構造物の耐久信頼性評価

(1) 概説

鉄筋の腐食程度が耐震信頼性に影響を与えない範囲であるLevel 1(鉄筋腐食発生)、Level 2(腐食ひび割れ

Key Words : 塩害による腐食劣化, 信頼性設計, ライフタイム, 損傷確率

連絡先 : 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06 TEL : 022(795)7449 FAX : 022(795)7448

表-1 劣化過程と劣化度および腐食程度の限界値

劣化過程 ⁴⁾	潜伏期		進展期		加速期		劣化期
劣化度 ⁵⁾	0	I	II	III	IV	V	
平均断面減少率	0%		1.3%	5%	20%		
Level	1	2		3	4		

の発生), Level 3 (平均断面減少率 5%) に到達する確率を許容値に抑えるためのかぶりを算定する. 各 Level への到達確率は次のように算定する. まず, 平均風速と海風比率, および海岸線からの距離の関数として, 対象構造物地点の飛来塩分量を参考文献 7) の手法で推定する. 飛来塩分量を表面塩化物イオン量に変換し, その後, Fick の拡散方程式から鉄筋位置の塩化物イオン濃度が鉄筋腐食発生の限界塩化物イオン濃度に到達するかを判定し, この判定までに介在する不確定性を考慮した信頼性解析により Level 1 への到達確率を算定する⁷⁾. 次に, 腐食ひび割れ発生時の鉄筋腐食量, および鉄筋腐食発生後の腐食速度を既往の実験的研究^{例えば 8), 9)}に基づき評価し, Level 1 の場合と同様に, 不確定性を考慮した信頼性解析により, ライフタイム内に腐食ひび割れが発生する確率や平均断面減少率が 5% に達する確率を算定する¹⁰⁾. 最終的に, かぶりの大きさを変更した計算を繰り返すことにより, 各 Level への到達確率を許容値に漸近させる.

(2) 耐久信頼性評価

ここでは, 北海道江差町にある RC 構造物を対象とし, 耐久信頼性評価を行った例を示す. 供用期間 50 年における鉄筋腐食および腐食ひび割れ発生確率を算定し, 信頼性指標 $\beta = 2.0$ を確保するための必要かぶりを海岸線からの距離ごとに算定した. その結果を図-2 に示す. Level 1, 2, 3 について必要かぶりを算定した結果, Level 2 が生じる確率を目標値以下となるような耐久設計を実施すれば, かぶりを相当に小さくでき, Level 1 を限界状態とする場合に比べ必要かぶりを半減できることが確認できた. また, Level 2 と Level 3 では必要かぶりに大きな差はみられなかったことから, Level 2 を限界状態として設定するのが合理的であり, かつ安全側の判断と言える.

4. まとめ

腐食ひび割れ発生点を耐久設計上の限界状態とすれば, 腐食のない状態と同程度の耐震安全性を確保でき, また, 鉄筋腐食発生点を限界状態とする場合に比べかぶりを半減できるなど, 合理的な設計が可能になる.

参考文献

- 1) 土木学会: コンクリート標準示方書 施工編, 2002.
- 2) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2002.
- 3) 土木学会: 材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能, コンクリート技術シリーズ, No.71, 2006.
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書 維持管理編, 2002.
- 5) 古玉悟ほか: 栈橋の維持補修マネジメントシステムの開発, 港湾技研資料, No.1001, 2001.
- 6) 防災科学技術研究所: 地震ハザードステーション J-SHIS, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>
- 7) 秋山充良, 伊東佑香, 鈴木基行: 塩害環境下における鉄筋コンクリート構造物の耐久信頼性設計に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.2, pp.385-401, 2006.
- 8) 松島学, 横田優, 関博: 鉄筋腐食膨張によるひび割れ発生時の腐食量, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.1669-1674, 2004.
- 9) 松林裕二, 梶田佳寛, 笹渕優樹: 塩化物を含んだコンクリート中の鉄筋腐食速度に関する屋外暴露実験, 日本建築学会構造系論文集, 第 536 号, pp.9-15, 2000.
- 10) 佐藤広和, 李月鳳, 秋山充良, 鈴木基行: 腐食ひび割れ発生点を限界状態とした RC 構造物の耐久信頼性設計に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, 2007 (投稿中).

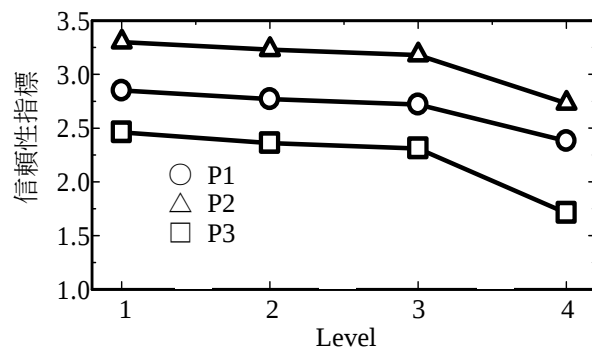
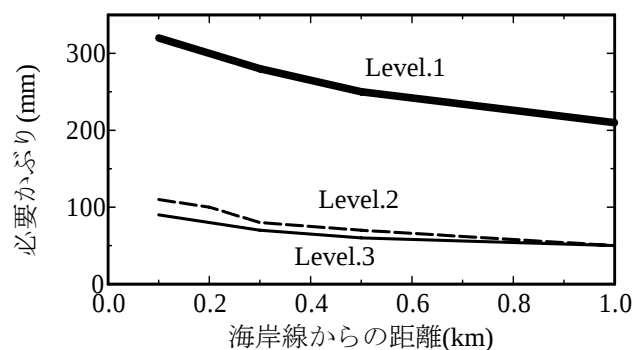


図-1 各 Level と信頼性指標の関係

図-2 $\beta = 2.0$ を満足するかぶり