

論文 鉄筋腐食劣化を考慮した RC 部材の性能評価の評点化手法

岸 雅之^{*1}・森川 英典^{*2}・大山 慎一^{*3}

要旨: RC 部材の劣化機構のうち、鉄筋腐食を伴う塩害、中性化に着目し、劣化状態を点検結果及び劣化予測を基に評点によって表現する手法について検討を行い、点検時及びそれ以降についてのコンクリート構造物の劣化状態を合理的に各性能評価に関連づける手法の構築を試みた。また、構築した手法を実構造部材の性能評価に適用し、その有用性と課題を検討しながら寿命の評価を行った。

キーワード: RC 部材、塩害、中性化、鉄筋腐食、劣化予測、性能評価、評点化手法

1. はじめに

近年、RC 構造物の劣化が社会問題化し、その維持管理基準の制度化が急がれるとともに、合理的な維持管理法の実用化が望まれている。

本研究では、性能照査型の維持管理を合理的に行うこと目的とし、鉄筋腐食を主要因とする RC 部材の耐荷性能低下を評点化手法によって比較的簡便に評価できる手法を構築した。本手法では点検時の耐荷性能のみならず、それ以降の性能低下を時刻歴で予測するとともに、構造物の耐荷性能に関する耐久性能についても評価する。

2. 劣化予測

2.1 潜伏期について

塩害の場合、塩化物が鋼材腐食発生限界量に達する時点を潜伏期の終点である考える¹⁾ため、鉄筋近傍での塩化物量を推定することによって劣化予測を行うことができる。塩化物量は、一般的に Fick の第 2 法則として知られる拡散方程式²⁾の解によって推定できる。

中性化の場合は、コンクリート表面から内部への ph 低下領域が鋼材腐食発生限界深さに達した時点を潜伏期の終点と考える¹⁾ため、その

劣化予測は ph 低下領域すなわち中性化深さを推定することによって行うことができる。

塩害についても中性化についても潜伏期の劣化状態は既往の研究成果を用いることで各種係数を設定し、簡便に推定することが可能であるが、理想的には詳細な点検を行うことが理想的であり、またそのデータを蓄積し、劣化予測式に反映させることで今後の劣化予測の精度を向上させることができるといえる。

2.2 進展期について

鋼材の腐食開始から、腐食ひび割れ発生までの期間である進展期¹⁾の予測は、腐食生成物によって発生する引張応力が、鉄筋周辺のコンクリートの引張強度に到達するまでを表現することが最も望ましい。その手段として、鉄筋腐食量を推定し、FEM 解析等によって鉄筋近傍におけるコンクリートの引張応力の変動を推定する³⁾といった方法等が挙げられるが、実構造物との対応は必ずしも十分でないと言える。その結果、単独で進展期の期間およびその終了時点でのひび割れ幅を予測することは難しい。

しかし劣化は進展期を通過しているということが明確にいえる場合は、その後の性能低下の

*1 片山ストラテック（株） 技術本部 橋梁設計部 設計二課 （正会員）

*2 神戸大学助教授 工学部建設学科 工博 （正会員）

*3 神戸市道路公社 建設部 計画課

評価に関連付ける形で取り扱うことが可能である。その詳細な考え方は3章において述べる。

2.3 加速期以降について

加速期および劣化期は、鉄筋腐食によってコンクリートに腐食ひび割れが発生し、その影響によって腐食速度が増大する期間、および耐力の低下が顕著である期間¹⁾であり、これらは現象としては連続のものであると考えられるため、同一の手法によって劣化予測を行う。ただし、ここでは、腐食した鉄筋に沿ったひび割れが1本発生する場合を対象とし、2本のひび割れが発生して台形状にかぶりがはく落する場合は対象としていない。

加速期以降に関しては、鉄筋の断面減少率に着目して予測を行う³⁾。鉄筋の断面減少率は当然鉄筋の腐食量に密接な関係があり、鉄筋腐食量は既往の実験的研究によってひび割れ幅と線形の関係を示すことが報告されている⁴⁾。その関係を示したもののが式(1)である。また、ここで示す係数 a は既往の実験結果⁴⁾を近似的に数式化した図-1より求めることができる。

$$y = ax \quad (1)$$

$$a = 0.141 \exp(1.078d/\phi) \quad (R^2 = 0.900) \quad (2)$$

ここに、 y ：鉄筋腐食量 (mg/mm^2)

x ：ひび割れ幅 (mm)

d ：かぶり (mm)

ϕ ：鉄筋径 (mm)

既往の研究によると、鉄筋腐食速度もひび割れ幅に対応して線形的に増大する³⁾と考えられ、その関係は次のような式で表されるとしている。

$$\sigma = \alpha x \quad (3)$$

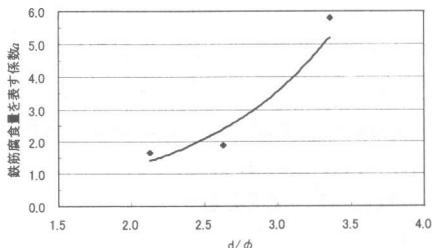


図-1 鉄筋腐食量に関する係数 a

$$\alpha = 54.82 d^{-1.17} \quad (R^2 = 0.981) \quad (4)$$

ここに、 σ ：鉄筋腐食速度 ($\text{mg/mm}^2/\text{year}$)

また、鉄筋腐食量、腐食速度、ひび割れ幅の関係を図-2に示す。

ここに示す係数 α は同様に実験結果⁴⁾などから図-3のように推定することができる。しかし腐食速度については、環境条件などにも左右されるため、現時点では明らかにされていない要因も十分に考えられ、ひび割れ幅との関係を厳密に決定することは極めて困難である。したがって、係数 α の推定については今後の長期的な研究が必要である。

ここに示される関係を用いることによって、簡便にひび割れ幅から鉄筋の腐食量および腐食速度を推定し、断面減少率を算定できる。またそれらを時間の関数として表現することで、今後の劣化の進行を予測することができる。ひび割れ幅を時間の関数として表現すると次式で表される³⁾。

$$x = C \cdot \exp\left(\frac{\alpha}{a} t_{crk}\right) \quad (5)$$

ここに、 C ：積分定数、ここでは初期ひび割れ幅 (mm) と同義である。

t_{crk} ：ひび割れ発生時点からの経過年数 (year)

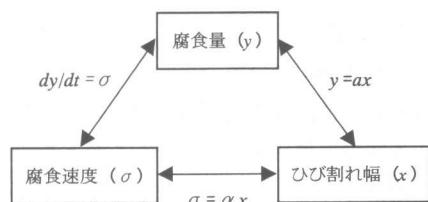


図-2 鉄筋腐食とひび割れ幅の関係

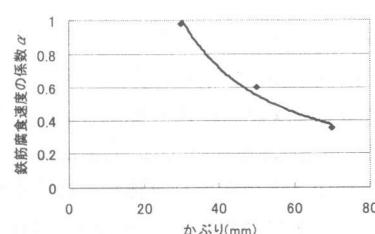


図-3 鉄筋腐食速度に関する係数 α

式(5)を用いることによって、鉄筋の腐食速度および腐食量についても同様に時間の関数として表現することが可能となる。

3. 初期ひび割れの仮定

先述したように、進展期の期間を精度良く推定することが困難であるため、加速期開始時点のひび割れ幅すなわち式(8)における係数 C を推定できず、点検時の状態評価を行うことはできても、それ以降の性能低下の時刻歴を予測することは困難である。そこで、この問題点に対する手法を検討した。

進展期において、鉄筋腐食は発生しているがひび割れは発生していないため、腐食速度は比較的小さな値のまま、一定の速度を保つと考えられる。また、既往の研究結果から進展期の期間は他の期間に比べて短期間である⁵⁾。

以上の点を考慮に入れた上で Mangat ら⁶⁾による耐力低下の考え方方が鉄筋腐食発生以後について一定の算定式を用いていることを参考とし、現実の初期ひび割れが発生する段階以前についても、現実には存在しない極めて微小なひび割れが発生していると仮定することによって、腐食速度を加速期以後と同様に算定できると考えた。この現実には存在しないひび割れのことを以降、仮想ひび割れと称する。仮想ひび割れによる腐食速度の経時変化のイメージを図-4 に示す。この仮想ひび割れを用いて評価を行うことによって、ひび割れ発生の始点を確定することができるため、点検時以後の性能低下の時刻歴を示すことが容易となる。具体的には式(5)

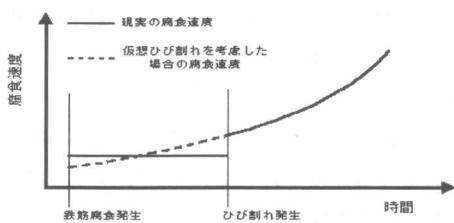


図-4 仮想ひび割れによる腐食速度の経時変化

表-1 進展期の終点が明らかな場合と仮想ひび割れを用いる場合との評価比較

(年)		42.3	45.0	50.0
鉄筋断面 減少率	進展期の期間を 特定した場合 ⁵⁾	0.0269	0.0383	0.0728
	仮想ひび割れを 考慮した場合	0.0269	0.0383	0.0728

を進展期に対しても加速期と連続して適用することによって計算できる。

この考え方の適用性を検証するため、既往の解析的手法により鉄筋断面減少率の経時変化が示されている RC 枠⁵⁾に対して、進展期の期間を特定した場合と、その期間の設定を無視して仮想ひび割れを用いて計算した場合における断面減少率の時刻歴を比較した。その結果を表-1 に示す。この結果を見ても明らかのように、供用開始後 50 年の段階でも断面減少率は全く一致し、本研究における性能評価に対して、仮想ひび割れを用いる考え方は適用可能であると考えられる。

4. 性能評価の評点化手法

4.1 評点化手法による耐荷性能評価

本研究において耐荷性能の評価は、各劣化機構の影響により発生する鉄筋腐食によって低下するコンクリート構造物の曲げ耐力を間接的に評点化することによって行う。その評点化の考え方は、Znidaric によるコンクリート構造物の安全性評価の考え方⁷⁾に基づいている。

耐荷性能の評価値は、劣化機構による影響の大きさを表す係数 K_1 と、劣化進行状態を表す係数 K_2 の関数として表現し、健全な状態を 100 ポイントとし、性能低下が進むにつれてその値が低下するよう以下の式(6)のように設定する。この評価式は、仮想ひび割れを適用した上で成立する。

$$R_{loa} = 100 - K_1 \{ W_{lat} K_{2bc} + (W_{dev} + W_{acc}) K_{2ac} \} \quad (6)$$

ここに、 R_{loa} ：耐荷性能評価値

K_1 ：劣化機構による影響

の度合いを表す係数

K_{2bc} ：鉄筋腐食発生以前に関する劣化

進行状態を表す係数、ただし最大値を 1.0 とする

K_{2ac} ：鉄筋腐食発生以降に関する劣化進行状態を表す係数

W_{lat} , W_{dev} , W_{acc} ：それぞれ潜伏期、進展期、加速期以降における評価値の重み係数

上式より得られる評価値の低下を耐力の低下と対応させるために、堤らの既往の実験結果³⁾を基に鉄筋断面減少率を耐力低下率に関連付け、重み付け係数の調整を行った結果、 $W_{lat} = W_{dev} = 2.56$, $W_{acc} = 38.1$ となった。

鉄筋腐食発生前（潜伏期）における劣化進行状態を表す係数 K_{2bc} は、例えば塩害ならば式(7)に示すように、鉄筋近傍におけるその時点での塩化物量と鉄筋腐食が発生する限界塩化物量の比率で表現される。

$$K_{2bc} = \frac{C(d,t)}{C_{lim}} \quad (7)$$

ここに、 $C(d,t)$ ：時刻 t 、深さ d （かぶり）における塩化物量 (mg/mm^3)

C_{lim} ：鉄筋腐食が発生する限界塩化物量 (mg/mm^3)

同様に中性化の場合は、その時点での中性化深さと鉄筋腐食が発生する限界深さとの比率で設定する。またこの係数は潜伏期が終了するまでを対象とするため、最大値を 1.0 としている。

鉄筋腐食発生後における劣化進行状態を表す係数 K_{2ac} は、その時点での鉄筋断面減少率と加速期終点における断面減少率の比率で表現し、式(8)のように表される。

$$K_{2ac} = \frac{V_{red}}{V_{r,max}} \quad (8)$$

ここに、 V_{red} ：鉄筋の断面減少率

$V_{r,max}$ ：加速期終点の鉄筋断面減少率

また鉄筋断面減少率は、鉄筋腐食量から算出すことができる。

4.2 耐荷性能に関する耐久性能の評価

耐荷性能を評価するにあたっては、その耐久

性能も同時に評価する必要がある。本研究において耐久性能の評価は、コンクリート標準示方書〔施工編〕において定義されるように、設計耐用期間中に鉄筋腐食を発生させないとした場合と、現実に既に鉄筋腐食が発生している既存コンクリート構造物を対象とした場合の 2 段階で行うものとした。

本研究の手法において、耐久性能はその限界状態に対する時間的余裕で表現するものとする考え方とは同様であるため、以下に鉄筋腐食発生以前についての耐久性能評価式のみを示す。

$$R_{dur} = \frac{T_{corr} - t}{T_{resi}} \times 100 \quad (9)$$

ここに、 R_{dur} ：鉄筋腐食発生以前における耐久性能評価値

T_{corr} ：供用開始から鉄筋腐食が発生するまでの時間 (year)

T_{resi} ：点検時からの残りの設計耐用期間 (year)

鉄筋腐食発生以降については、その耐久性能評価値を R'_{dur} と表現する。さらに T_{corr} に代わり、供用開始から構造物に設定された要求レベルの限界に達するまでの期間である T_{lim} を用いる。

5. 評点法の実構造部材への適用

5.1 対象構造物の概要および点検データ

本章においては、これまでに構築してきた評点法による性能評価手法を実構造部材の評価に適用し、その有用性について検討する。

評価対象は、道路施設の RC 版部材で、上面から局部的に水分が供給され、下面からは車両の CO₂ 侵入による中性化が進行している。さらに、洗浄不十分な海砂の使用による塩害も複合的に生じている。また設計耐用期間は 50 年である。

この構造物に対して建設後 24 年目において次のような点検を行った。中性化深さ、自然電位および分極抵抗の測定を実施し、さらに鉄筋をはつり出すことによって、鉄筋の単位重量の低下割合について調べた。また、コンクリート

表-2 構造物概要および点検データの一例

かぶり	30mm	中性化深さ	53mm
水セメント比	0.8	分極抵抗最小値	32.0kΩcm ²
鉄筋径	D13	鉄筋断面減少率	0.0367

コア採取により種々の実験を行った。その結果の一例を表-2に示す。この結果より、ひび割れ幅から腐食量を推定する係数を $\alpha = 1.799$ 、腐食速度を推定する係数を $\alpha = 1.025$ と決定できる。これらの係数を用いて劣化予測を行うためには点検時のひび割れ幅が既知である必要があるが、本ケースでは排気ガスのすすによる目詰まりのため読みとることが極めて困難であったため、鉄筋のはつり出しによって求められた断面減少率より逆算的に推定し、0.509mmを得た。同様に腐食速度も推定できる。

また、腐食速度は電気化学的に分極抵抗から腐食電流密度を算定し、ファラデーの第2法則より推定することも可能である。分極抵抗から腐食電流密度を推定する手法⁸⁾を以下の式(10)に示す。

$$i_{corr} = \eta k_v / R_p \quad (10)$$

ここに、 i_{corr} ：腐食電流密度 (A/cm²)

R_p ：分極抵抗 (Ω cm²)

k_v ：材料、環境などによって決定する係数 (V)

η ：補正係数

分極抵抗から腐食速度を求める際の係数は、横田⁸⁾の実験によると 33mV 程度であるが、環境などによって大きく左右されることが知られている。詳細な評価を行うためには水分、温度等の季節変動をモニタリングすることによって予測式を構築することが理想であり、長期的な研究が必要不可欠となる。本論においては腐食の進行が活性化されていると考えられる一時点のデータのみに適用するため、横田の実験値 (k_v) に対し、係数 η を考慮することによって変動分を表現するものとした。

今回の点検において分極抵抗最小値を観測した位置は、鉄筋はつり出し位置と同じであった。したがって分極抵抗から求める腐食速度と、断

面減少率から求められる腐食速度が対応すると考えられ、調整を行った結果、式(10)における係数を $\eta = 5.564$ と設定できる。

この値を用いることで、部材における腐食速度の等高線分布を推定することができる。また、その結果、着目する範囲における腐食速度の平均値は 0.306mg/mm²/year と計算され、この値から図-2 の関係より、点検時における部材の平均的なひび割れ幅および腐食量も推定することができる。

5-2 評点法による実構造部材の評価

以上の条件より、部材断面の耐荷性能の評価を行う。点検時のデータとしては、先に示した腐食速度の平均値を用いる。また腐食速度は、ある一定値以上にはならないと考えられるため、その上限値の設定を考慮し、表-3 に示す 2 通りの評価を行い比較検討する。

表-3 鉄筋腐食速度の上限設定

腐食速度の上限の設定	
case1	上限値を設定しない
case2	鉄筋を海水中に浸漬させた場合の腐食速度である 1.02mg/m ² /yearとする

今回の評価においては、特に構造物に対する要求レベルを設定していないため、鉄筋腐食発生以降における耐久性能の限界状態を加速期終点、ここでは断面減少率 20%³⁾と設定する。また、式(6)における劣化機構による影響の度合いを表す係数 K_1 は、評価モデルの基礎として塩害、中性化を対象としているため、これを基準として 1.0 と設定する。

一例として、case2 における耐荷性能およびそれに関する耐久性能と、併せてひび割れ幅、鉄筋腐食量および腐食速度の時刻歴を次頁図-5、図-6 に示す。また、評価を行うにあたって重要な時点を表-4 にまとめた。この結果を見ても明らかなように、2 ケースともに加速期終点に到達する時点は 28 年から 29 年であり、ほとんど差異は見られなかった。しかし断面減少率 40% に達する時点については、腐食速度の差が大き

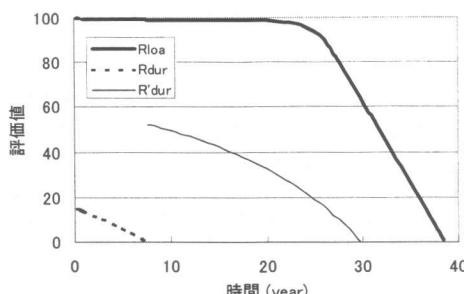


図-5 case2 に関する耐荷性能およびその耐久性能の経時変化

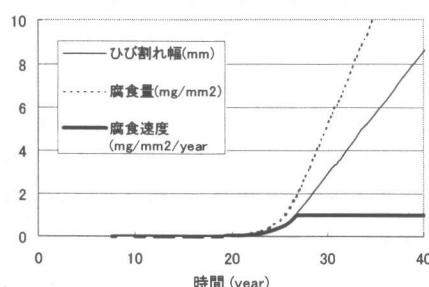


図-6 case2 に関するひび割れ幅などの時刻歴

表-4 耐荷性能評価に関する重要な時点

点検時			case1	case2
	鉄筋腐食量 (mg/mm ²)	鉄筋腐食速度 (mg/mm ² /year)		
Rloa			93.1	
R'dur	15	20.2		
最大腐食速度到達時点 (year)	----	26.1		
加速期終点 (year)	27.9	29.3		
断面減少率40%時点 (year)	29.2	34.2		

く影響した。すなわち加速期終点が断面減少率20%の状態であるとの仮定が正しいのであれば、最大腐食速度を厳密に考慮しなくても比較的正しい評価結果を得ることができるのでないかと考えられる。しかしながら、それ以上の断面減少率を基準とするのであれば腐食速度の最大値を適切に定める必要が生じる。

6. まとめ

本研究は、塩害と中性化によって経年劣化したコンクリート構造部材の耐荷性能に関する性能の評価を評点化によって簡便に評価する手法の構築を試みたものである。

また、耐荷性能に関する耐久性能についても評価し、それらの性能低下を時刻歴に示すことによって点検時以降の予測を含めた評価を行える手法を構築した。

その結果、潜伏期から劣化期にかける各段階において、劣化の進行を時刻歴で表現することができ、特に簡便に推定することが困難である進展期については仮想ひび割れの考え方を適用することで全体的な時間軸を考慮した予測を可能にすることができた。

さらに、実RC部材に本手法を適用し、その有用性と適用条件を示した。

参考文献

- 1) 土木学会：2001年制定コンクリート標準示方書【維持管理編】，2001.1.
- 2) 土木学会：平成11年版コンクリート標準示方書【施工編】，2000.1.
- 3) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告書，1998.10.
- 4) 武若耕司、松本進：コンクリート中の鉄筋腐食がRC部材の力学的性状に及ぼす影響、第6回コンクリート工学年次講演会論文集，1984.
- 5) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の構造・耐久設計境界問題研究委員会報告書，1998.7.
- 6) Mangat, P.S. and Elgafal, M.S. : Flexural Strength of Concrete Beams with Corroding Reinforcement, ACI Structural Journal, 1999.1-2.
- 7) CEB Bulletin 243 : Strategies For Testing and Assessment of Concrete Structures Guidance Report, 1998.5.
- 8) 大即信明、樫野紀元、片脇清士、小林明夫、宮川豊章著：塩害I（コンクリート構造物の耐久性シリーズ），技報堂出版 1986.5.