

第V部門

RC部材中の鉄筋腐食予測へのマルコフ過程の適用に関する検討

京都大学工学部	学生員	○仲井	亮平
京都大学工学研究科	正会員	河野	広隆
京都大学工学研究科	正会員	服部	篤史
京都大学工学研究科	正会員	大島	義信

1. はじめに

RC中の鉄筋腐食の非破壊検査として広く用いられている自然電位法は様々な要因から影響を受ける。また、同一の環境、条件の供試体でも鉄筋の腐食速度には違いがある。しかし、様々な要因に左右される自然電位を活用し、確率的に発生する腐食現象の予測を行う必要がある。そこで、本研究では、RC部材中の鉄筋に対し、環境要因により変動する自然電位の不確定性と、腐食発生の不確定性をマルコフ確率過程¹⁾で表現するとともに、マルコフ過程による鉄筋の腐食予測を行い、その適用性を検討する。

2. 実験概要

実験では様々な要因、条件でコンクリート中の鉄筋を腐食させ、自然電位を測定した。そして、測定データを自然電位ランクで評価しマルコフ確率行列を作成し、その行列を用いて腐食予測を行った。最後に、腐食予測と実測値を比べることでマルコフ過程がRC中の鉄筋腐食予測に適用できるか否かを判断した。

実験要因を表2.1に示す。供試体ごとに腐食速度の違いを出すために水セメント比、練込み塩化物イオンを変化させた。塩水噴霧は一日1回行った。同じ供試体中の鉄筋の腐食速度に違いを与えるために噴霧パターンは供試体全体に噴霧するもの、半分に噴霧するもの、3等分した中央部分に噴霧するものの3種類を用意した。

表 2.1 実験要因

水セメント比 (W/C)	65%, 45%
練込み塩化物イオン	0 kg/m ³ , 8 kg/m ³
環境	自然曝露, 塩水噴霧
噴霧パターン	3種類

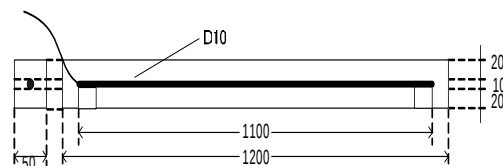


図 2.1 供試体寸法(mm)

自然電位の測定は各供試体につき 100 mmおきに 11 点の測定点で行った。

RC中の鉄筋腐食を自然電位の測定値を用いて評価するために各要因²⁾について考慮しておく必要がある。本研究では、かぶり、温度については一定とみなし、含水率に関しては測定時に噴水することで一定とした。含有塩化物量、水セメント比、中性化については測定値のバラつきと捉え評価した。

3. マルコフ過程による腐食予測の検討

3.1 マルコフ過程

マルコフ過程はマネジメント分野や計画分野で広く使用されている手法であり、土木構造物のアセットマネジメントとして劣化予測に応用されている。状態の推移する確率をマルコフ遷移確率行列とし、元の状態から連鎖させていく過程のことである。特徴は取り扱いが簡易で、現在の状態のみに依存し、過去の状態の遷移履歴には依存しないということである。今、任意時刻 t_a において測定した当該供試体の健全度を状態変数 $h(t_a)$ として表すと、健全度が i であると $h(t_a) = i$ となる。任意の将来時刻 t_b において健全度 $h(t_b) = j$ が生起する条件付

推移確率を π_{ij} として定義する。これを基に、健全度の階級が m 個あるとすると、全ケースの推移確率 π を表すことができる。時刻 t_a での $1 \sim m$ 番目の健全度が選定される供試体数を m 次の列ベクトル X_a で表すと、 X_b は次のようになる。 Π がマルコフ遷移確率行列になる。ここでの遷移確率はその健全度に該当する

供試体数を全供試体数で割ったものになる。

$$X_b = X_a \Pi \quad (\text{式 3.1})$$

$$X_a = (X_{1a} \quad X_{2a} \quad \cdots \quad X_{ma})$$

$$X_b = (X_{1b} \quad X_{2b} \quad \cdots \quad X_{mb})$$

$$\Pi = \begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \cdots & \pi_{1m} \\ \pi_{21} & \pi_{22} & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \\ \pi_{m1} & \cdots & & \pi_{mm} \end{bmatrix}$$

3.2 検討方法

マルコフ過程によって腐食を予測する際、まず実測データに基づいてマルコフ遷移確率行列を作成しなければならない。その際、検討すべき事項と本研究で扱ったものを表 3.1 にまとめた。

表 3.1 マルコフ遷移確率行列作成時の検討事項

検討事項	詳細	本研究での条件
ランク	・ 自然電位の区分法	1 パターン
	・ ランク数	5 段階
自然電位の代表値	・ 各供試体における測定点の測定値の平均値	○
	・ 各供試体における測定点の測定値の最小値	○
遷移期間	・ 1 週間～4 週間ごと	1 週間ごと
試験要因	・ 全供試体での行列	○

○：実施

自然電位ランクは ASTM C876³⁾ を基準に表 3.2 のように定めた。

表 3.2 本研究における自然電位ランク

自然電位の値 E (mV)	ASTM C 876 基準	ランク
-80 < E	90%以上の確率で腐食が生じていない	1
-150 < E ≤ -80		2
-230 < E ≤ -150	不確定領域	3
-300 < E ≤ -230		4
E ≤ -300	90%以上の確率で腐食が生じている	5

マルコフ過程がコンクリート中の鉄筋腐食予測に適用できるか否かの判断は、算定したマルコフ遷移確率行列に基づき予測した値と実際の実測値との比較により行う。ランクごとの供試体数のデータを比べた上で全供試体の 5%の誤差を許容値として予測の正しさを判断した。

3.3 検討結果

自然電位の代表値を平均値、最小値とした場合のランク評価は表 3.3、表 3.4 のようになった。結果の一例を示すと、平均値に関しては 3～4 週目のマルコフ

遷移確率行列での予測値が実測値に近い値となったのに対し、最小値に関しては一致するものがなかった。

表 3.3 平均値による自然電位ランク評価

		時刻 (週)				
		0	1	2	3	4
自然電位 ランク	1	25	24	23	18	18
	2	2	2	3	6	5
	3	43	37	25	19	18
	4	0	7	19	27	28
	5	0	0	0	0	1

表 3.4 最小値による自然電位ランク評価

		時刻 (週)				
		0	1	2	3	4
自然電位 ランク	1	25	24	19	15	17
	2	0	0	5	6	2
	3	44	32	14	12	14
	4	1	14	28	18	18
	5	0	0	4	19	19

4. 結論

本研究では以下の結論が得られた。

- (1) 本研究では供試体の自然電位ランクを判断する代表値は、その供試体の測定点 11 点の測定値の平均値とし、遷移期間 3～4 週目の遷移確率行列を用いたマルコフ過程で鉄筋腐食予測が可能であった。
- (2) 本研究では全供試体で作成したマルコフ遷移確率行列が適用できたため、環境や試験要因で区別する必要はなかった。そのため、様々な環境、条件の供試体の統計的な鉄筋腐食予測ができる可能性がある。

また、今後の課題としてより長期的な予測、詳細な条件での予測などが挙げられる。また、自然電位に影響を及ぼす要因を詳細に評価しより信頼性のある予測をしなくてはならない。

【参考文献】

- 1) Rinaldo B.Schinazi：マルコフ連鎖から格子確率モデルへ 現代確率論の基礎と応用，2001
- 2) 中川元宏：中性化による鉄筋腐食状態の自然電位法による推定に関する研究，2005.3
- 3) ASTM C876：Standard Test Method for Half Cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete，1977