

マルコフ過程を用いたRC部材中の鉄筋腐食予測に関する検討

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

1. はじめに

土木施設のアセットマネジメントにおいてRC部材中の鉄筋腐食予測は重要な課題である。しかし、寸法、材料あるいは環境、荷重の条件により鉄筋の腐食速度には違いが生じ、確率的に予測することも必要となる。また、RC部材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測定時の様々な要因から影響を受ける。

一方、劣化予測には物理・化学現象に基づいた理論式、点検結果の統計的分析、遷移確率など様々な手法があるが、不確定性を考慮でき、マクロな予測ができるものとして遷移確率が用いられる。ここで、物理・化学現象に基づき合理的に腐食の進行を捉え、対策選定に活かすため、目視による健全度でなく自然電位の測定値のランクに対して遷移確率を求めることが考えられる。以上より、本研究では、RC部材中の鉄筋に対し、腐食発生・進行の不確定性と自然電位測定の不確定性をマルコフ確率過程¹⁾で表現し、その適用性を評価することを目的とした。

2. 実験概要

図1に示す供試体を11種70体作成し、材齢28日より所定の環境に設置し、経時的に自然電位を測定した。測定値は自然電位ランクに区分しマルコフ確率行列を作成した。その行列を用いて自然電位ランクの変化の予測を行うとともに、予測値と実測値を比較しマルコフ過程の適用性を評価した。

表1に示すように、材料要因として水セメント比、練込み塩化物イオン量を変化させ、供試体ごとの腐食速度に違いを与えた。塩水噴霧は3%塩水を原則1日1回行った。噴霧パターンは供試体全体、半分、3等分した中央部分の3種類とし、同じ供試体中の鉄筋腐食速度にも違いを与えた。なお、かぶりは一定とみなし、中性化は要因にはしていない。

表1 実験要因

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

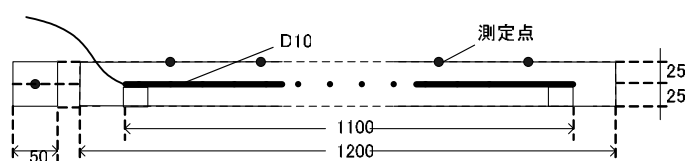


図1 供試体寸法(mm)と測定点

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。測定頻度は1週間毎とした。測定値の評価では測定条件²⁾について考慮しておく必要がある。本研究では、測定条件である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霧することで一定とみなした。

3. マルコフ過程による自然電位ランク予測

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では健全度の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である。特徴は取り扱いが簡易で、1期前の状態のみに依存し、それより前の遷移履歴には依存しないことである。

3.2 遷移確率行列の作成方法と適用性の評価方法

マルコフ遷移確率行列を作成する際、検討すべき事項と本研究で扱ったものを表2に示す。自然電位のランクはASTM C876³⁾を基準に表3のように定めた。腐食の発生時期を詳細に捉えるため、ランクは自然電位の値が貴な方によせた。行列を作成する期間(遷移期間)、予測のための実測値を得る時期(実測時期)および予測対象の時期(予測時期)には種々の組み合わせがある。ここでは遷移期間は0-1, 1-2, …3-4週

キーワード マルコフ過程 鉄筋腐食予測 自然電位 ランク

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 TEL075-383-3320 FAX075-383-3324

の1週間毎の遷移確率と0-4週の4週間の遷移確率を用い、0, 1, …4週の各実測値から4, 12週目の予測を行った。なお、自然電位ランクが貴変したものについては、全供試体数の5%にも満たず少ないと判断し、そのまま遷移確率を求めた。

表2 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ランク
対象部位	・ 一供試体	○
	・ 同条件供試体	×
	・ 各測定部位・点	×
自然電位の代表値	・ 各供試体における全測定点の測定値の平均値	○
	・ 各供試体における全測定点の測定値の最小値	○
遷移期間	・ 1週間～4週間	1, 4週間
実測時期	・ 予測のための実測値を得る時期	0～4週目
予測時期	・ 予測対象の時期	4, 12週目
実験要因	・ 全供試体で作成	○
	・ 各条件で区別して作成	×

○：実施 ×：未実施

表3 本研究における自然電位ランク

自然電位の値の範囲 E vs Ag/AgCl 25℃(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

マルコフ過程の適用性の評価は、ランクごとの供試体数の予測値と実測値の差を用いて行い、全供試体数の±5%(±3.5体)の誤差を許容値とした。

3.3 検討結果および考察

自然電位の代表値を平均値、最小値とした場合の各ランクの供試体数の実測値および予測値をそれぞれ表4、表5に示す。結果の一例として0-1週目の1週間の遷移行列を用い2週目から4週目を予測した値(予測A)と0-4週目の4週間の遷移行列を用い4週目から12週目を予測した値(予測B)を示している。平均値では4週目の予測においては許容されるものがあったが、12週目の予測値は許容できなかった。最小値については許容できるものはなかった。許容できなかった予想値には網掛けにして示す。これらより以下が指摘できる。

表4 平均値による各自然電位ランクの供試体数

		時期(週)							
		0	1	2	3	4	予測A	12	予測B
自然電位ランク	1	25	24	23	18	18	21.6	18	9.3
	2	2	2	3	6	5	1.6	7	2.6
	3	43	37	25	19	18	20.5	17	6.4
	4	0	7	19	27	28	26.8	27	50.0
	5	0	0	0	0	1	0.0	1	5.7

表5 最小値による各自然電位ランクの供試体数

		時期(週)							
		0	1	2	3	4	予測A	12	予測B
自然電位ランク	1	25	24	19	15	17	17.5	15	7.0
	2	0	0	5	6	2	5.0	5	1.6
	3	44	32	14	12	14	7.4	14	3.6
	4	1	14	28	18	18	36.1	23	28.0
	5	0	0	4	19	19	4.0	13	28.0

(1)ランクの推移が激しい期間0～4週中で作成した遷移確率がそのまま短期間の予測に適用できたものと思われる。なお、供試体の自然電位ランクを定める代表値は平均値の方が好ましいと思われる。

(2)4～12週ではランクの遷移が少なかったため、遷移が激しい0～4週中で作成した遷移確率が適用できなかった。また、ランク2に実測される供試体数が少なく遷移確率が大まかになり詳細に求めることができなかったために一部のランクに偏った結果になったと考えられる。自然電位の区分法を改良する余地がある。また、全供試体数が少ないこと等も原因として挙げられる。

4. まとめ

自然電位の予測へのマルコフ過程の適用性を評価した。今後の課題として、供試体数の増加や表2の事項の検討が必要と考えられる。さらに、予測した自然電位ランクとひびわれ性状、鉄筋の腐食面積率、腐食減量率を比較し鉄筋腐食の予測に結びつける必要がある。

【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