鉄筋コンクリートの打継部に形成するマクロセルへの 腐食速度解析モデルの適用

畑中 達郎* 宮里 心一**

Application of Corrosion Rate Analysis Model to Macrocell Formed at Joint in Reinforced Concrete

by

Tatsuro HATANAKA* and Shinichi MIYAZATO**

Many reinforced concrete structures in Japan are aging. A reasonable and durable design by the numerical analysis is necessary to extend the service life of concrete structures. Based on the above background, this paper is applied the macrocell corrosion rate analysis model whom authors proposed to the members with a joint. First the model is constructed. The input data is an anode polarization curve, a cathode polarization curve, a polarization resistance, and an electrical resistance of mortar. On the other hand, the output data is a total corrosion current. Next, an analytical value is compared with the experiment value while using the mortar specimen that imitated the patch repair part. As a result, it can be cleared that the model is appropriate. Finally, the effect of the macrocell countermeasures method with the spray of the silane type surface penetrant on the joint is verified by this model. Thus, it can be confirmed that when the electrical resistance at the joint is large, the corrosion rate becomes low analytically.

Key words:

Reinforced concrete, Chloride induced corrosion, Macrocell corrosion rate, Analysis model, Joint

1 緒 言

鉄筋コンクリートは、高い耐久性を有し、長期に亘り利活用される。しかしながら、塩化物イオンがコンクリート中の鉄筋に浸透すると、不働態皮膜が破壊し、腐食が発生する。特に、塩化物イオンの濃度差が生じる箇所、すなわち塩分環境下に立地する鉄筋コンクリートのひび割れ部や、母材の塩分除去が不十分な断面修復部では、マクロセルが形成し、その腐食速度は速いことが確認されている^{1)~7)}。このような場所では、鉄筋が減肉して引張耐力が減少したり、鉄筋とコンクリートの付着力が低下したりする。その結果、部材耐力が低減し、要求された安全性や使用性を満足できなくなる。したがって、高度経済成長期に多数の鉄筋コンクリート構造物が建設され、一部の部材で劣化が進んでいる現代、腐食による性能低下も考慮した耐久設計や維持管理が必要である。

さて、コンピュータの性能向上により、様々な分野において、シミュレーションによる予測が可能になってきた。すなわち、従来は実験や観測により現象を再現していたが、現在はメカニズムをモデル化して現象を解析するケースが増えている。例えば、天気予報に関しては、富士山頂のレーザで気象観測する方法から、スーパーコンピュータを用いてシミュレーションする方法に変化した。老朽化が進む日本の鉄筋コンクリート構造物に対

して、このようなシミュレーションを用いれば、再劣化を予防した合理的な補修が可能になると思われる。

ここで、鉄筋コンクリートの腐食を解析するモデルを整理する。丸屋ら⁸⁾、J. Gulikers⁹⁾、ならびに著者ら¹⁰⁾は、コンクリート中の鉄筋を要素に分割し、各要素のアノード分極曲線とカソード分極曲線を交差させて平衡した電流から、マクロセルおよびミクロセル腐食電流を解析するモデルを提案している。このようなモデルを多様に整備し、それぞれの長所と短所を比較することで、今後に改良や統合をすれば、様々な材料や環境に対応した耐久設計に関するシミュレーションが可能になる。そのため、前述のモデル¹⁰⁾では、ひび割れ部のマクロセル腐食を対象にした適用可能性は確認しているが、打継部を対象としたケースは未検討であり、検証が求められていた。特に、実験的検討によれば、打継目を境とした母材と補修材の間の電気抵抗が大きいほど、マクロセル腐食速度は遅くなることが確認されている¹¹⁾。さらに、小松らにより、打継面の電気抵抗を高めることで、断面修復後のマクロセル腐食を抑制する補修方法が提案されている¹²⁾。したがって、もし前述のモデル¹⁰⁾が打継部のマクロセル腐食を解析できることを確認できれば、これらの実験事実を解析によっても検証できる。

以上の背景を踏まえて本研究では、著者らにより提案

† 原稿受理 平成29年1月10日 Received Jan.10, 2017 ©2017 The Society of Materials Science, Japan

* 学生会員 金沢工業大学大学院 工学研究科 環境土木工学専攻 〒924-0838 白山市八東穂
Graduate student, Department of Civil and Environmental Engineering, Kanazawa Institute of Technology, Yatsukaho, Hakusan, 924-0838.

** 正 会 員 金沢工業大学 環境・建築学部環境土木工学科 〒924-0838 白山市八東穂
Department of Civil and Environmental Engineering, Kanazawa Institute of Technology, Yatsukaho, Hakusan, 924-0838.

されたマクロセル腐食速度解析モデル¹⁰⁾を、打継部に適用できることを明らかにする。その上で、打継面ヘシラン系表面含浸材を塗布することによるマクロセル対策工法¹²⁾の効果の検証に本モデルを適用し、既往の実験結果を確認する。

2 解析モデルの概要

モデルの概要を説明する。なお、基本的なコンセプトは、ひび割れ部のマクロセル腐食を対象にした既往の論文¹⁰⁾と同様である。

本研究では、狭い範囲でアノードとカソードが連結した腐食回路による「ミクロセル腐食電流」と、広い範囲でアノードとカソードが連結した腐食回路による「マクロセル腐食電流」を合計することにより、「総腐食電流」を算定する¹³⁾。そのため、モデルの最終的なアウトプットデータは「総腐食電流」である。一方、インプットデータは、各鉄筋要素の「アノード分極曲線」、「カソード分極曲線」、「分極抵抗」、および「鉄筋要素間のモルタルの電気抵抗」である。

これを踏まえてまずは、マクロセル腐食電流とミクロセル腐食電流を区別して解析するため、鉄筋を要素に分割する。すなわち、Fig.1に示すとおり、一本の鉄筋は複数の鉄筋要素の連続体として考える。また、アノードとカソードが、単一の鉄筋要素内に存在する場合を「ミクロセル」とし、一方異なる鉄筋要素に跨る場合を「マクロセル」とする。

次に、打継部を対象にした解析手順を説明する。アノード分極曲線およびカソード分極曲線の組合せとマクロセル腐食電流およびミクロセル腐食電流の関係を、Fig.2に示す。Fig.2(1)に示すとおり、鉄筋要素②は母材等の塩化物イオンを含有するモルタル内部に存在し、一方鉄筋要素③は補修材等の塩化物イオンを含有しないモルタル内部に存在すると仮定する。ここで、左右のモルタルでは、塩化物イオン含有量や水セメント比が異なる。そのため、塩化物イオン量の影響を受けるアノード分極曲線、および酸素供給量の影響を受けるカソード分極曲線は、鉄筋要素②と鉄筋要素③で異なる¹⁴⁾。

また、アノード分極曲線とカソード分極曲線の交点が電気化学的な平衡状態であり、この電流値で腐食反応は制御される¹⁵⁾。ここで、Fig.2(2)に示すとおり、同一鉄筋要素内 (Fig.2(2)の例では鉄筋要素②) にアノードとカソードが形成されるミクロセルの場合、対象とする鉄筋要素の見掛けの分極抵抗に伴う電位ロスを考慮する必要がある。すなわち、アノード分極曲線とカソード分極曲線の交点よりも左側 (腐食電流が小さい側) において、式(1)のオームの法則を満足するミクロセル腐食電流が流れる。

$$E_{C②} - E_{A②} = (R_{p②} + R_{p②}) \times I_{\text{micro}} \quad (1)$$

ここで、 $R_{p②}$ は鉄筋要素②の見掛けの分極抵抗 (Ω)、

$E_{C②}$ は鉄筋要素②のカソード電位(V)、 $E_{A②}$ は鉄筋要素②のアノード電位(V)を示す。

Fig.1 Divided steel element and corrosion cell.

(1) Location of steel element

(2) Microcell formed in steel element ②

(3) Macrocell formed between steel elements ② and ③

Fig.2 Relationship between polarization curves and corrosion current.

一方, Fig.2(3)に示すとおり, 異なる鉄筋要素 (Fig.2(3)の例では鉄筋要素②と③) に跨ってアノードとカソードが形成されるマクロセルの場合, 対象とする鉄筋要素②と③の見掛けの分極抵抗や両鉄筋要素間のモルタル抵抗に伴う電位ロスも考慮する必要がある. すなわち, アノード分極曲線とカソード分極曲線の交点よりも左側 (腐食電流が小さい側) において, 式 (2) のオームの法則を満足するマクロセル腐食電流が流れる.

$$E'_{C③} - E'_{A②} = (R_{P③} + R_{C②③} + R_{P②}) \times I_{\text{macro}} \quad (2)$$

ここで, $R_{P③}$ は鉄筋要素③の見掛けの分極抵抗 (Ω), $R_{C②③}$ は鉄筋要素②と③の間のモルタル抵抗 (Ω), $E'_{C③}$ は鉄筋要素③のカソード電位(V), $E'_{A②}$ は鉄筋要素②のアノード電位(V)を示す.

3 検証実験

3.1 実験手順

3.1.1 供試体概要 供試体概要を Fig.3 に示す. 多量の塩化物イオンを含有する母材部 (左側) と, 塩化物イオンを含有しない打継部 (右側) を接合した. 母材部には鉄筋要素①と②を, 一方打継部には鉄筋要素③を, かぶり 20mm に埋設した. なお, モルタルの配合は, W/C が 50% で, S/C が 3.0 とした. 接合部を補強するため, 供試体側面 (幅 10mm) にエポキシ樹脂を被覆した.

母材部を打設後, 4 週間に亘り湿潤気中 (20°C, 90%RH) で養生した. その後, 打継部を接合し, 1 週間に亘り湿潤気中養生を兼ねた暴露を行った. 2 週目以降は温度を 40°C とし 13 週目まで暴露した.

なお, 3 体の同種の供試体を作製し, 実験および解析に用いた.

3.1.2 測定概要 Fig.4 に示すとおり, 鉄筋要素のカソードおよびアノード分極曲線, 鉄筋要素の分極抵抗, 鉄筋要素間のモルタルの電気抵抗, および鉄筋要素間のマクロセル腐食電流を暴露 13 週後に測定した. なお, ミクロセル腐食電流の実験値は, 分極抵抗の測定値を用い, 文献 13) を参考に算定した.

(1) 鉄筋要素のカソードおよびアノード分極曲線

Ag/AgCl を参照電極として, 鉄筋要素の電位を強制的に 1mV/秒で卑へ変化させ, その時に流れる電流をカソード分極曲線として記録した. 続いて, 鉄筋要素の電位を強制

Fig.3 Specimen.

的に 1mV/秒で貴へ変化させ, その時に流れる電流をアノード分極曲線として記録した. なお, カソード分極曲線とアノード分極曲線は同じ試料を用いて, 連続的に測定した.

(2) 鉄筋要素の分極抵抗

交流インピーダンス法により各鉄筋要素の分極抵抗を測定した.

(3) 鉄筋要素間のモルタルの電気抵抗

交流インピーダンス法により各鉄筋要素間のモルタルの電気抵抗を測定した.

(4) マクロセル腐食電流

鉄筋要素間に流れるマクロセル腐食電流を無抵抗電流計により測定した.

3.2 解析手順

3 体の内の 1 体の供試体を例に, 具体的な解析手順を説明する.

インプットデータである, カソード分極曲線およびアノード分極曲線を Fig.5 に, 分極抵抗を Table 1 に, モルタルの電気抵抗を Table 2 に示す. なお, カソード分極曲線とアノード分極曲線の低電流側における電位は, 同じ値になる測定結果が報告されている^{16),17)}. ただし本実験では, 先に実施したカソード分極により電極表面で還元体が消費され, その濃度が変化した状態でアノード分極を実施した. したがって, アノード分極曲線の測定結果は

Fig.4 Measurement method.

Fig.5 Example of input data about polarization curve.

(2) Steel element ②

(3) Steel element ③

Fig.5 Example of input data about polarization curve.

Table 1 Example of input data about polarization resistance.

Steel element	Polarization resistance ($k\Omega \cdot cm^2$)
1	3.4
2	18.8
3	1219.0

Table 2 Example of input data about mortar resistance.

(k Ω)			
Steel element	1	2	3
1	—	0.9	1.8
2	0.9	—	1.1
3	1.8	1.1	—

Fig.6 Example of analysis of microcell corrosion current.
(steel element ①)

Fig.7 Example of analysis of macrocell corrosion current.

(Anode: steel element ①, Cathode: steel element ③)

Table 3 Example of analyzed corrosion currents.

		Cathode		
		Cathode		
		1	2	3
Anode	1	6	8	4
	2	4	4	3
	3	2	2	1

Table 4 Example of outputted corrosion current density.

($\mu A/cm^2$)			
Steel element	Microcell	Macrocell	Total
1	6	6	12
2	4	-3	4
3	1	-3	1

その影響を受け、文献 16),17)に示される様な真値と差が生じたと考えられる。すなわち、両分極曲線の低電流側における電位が同等になると仮定すれば、真のアノード分極曲線は Fig.5 に描かれる線より左上にシフトすると考えられ、その影響については Fig.9 で後述する。

次に、これらのインプットデータを用いた解析方法を説明する。まずは、任意の鉄筋要素についてアノード分極曲線とカソード分極曲線を重ね合わせる。例えば、Fig.6 のようにミクロセルを対象とする際には、同一の鉄筋要素 (Fig.6 の例では鉄筋要素①) のアノード分極曲線およびカソード分極曲線を重ね合わせる。また、鉄筋要素①の見掛けの分極抵抗の 2 倍を、アノードとカソードの間の電気抵抗による電位ロスとして考慮する。そのため、ミクロセル腐食電流は、分極曲線の交差する点よりも左に移動した、 $0.006mA/cm^2$ となる。一方、Fig.7 のようにマクロセルを対象とする際には、異なる鉄筋要素のアノード分極曲線 (Fig.6 の例では鉄筋要素①) およびカソード分極曲線 (Fig.6 の例では鉄筋要素③) を重ね合わせる。また、鉄筋要素①の見掛けの分極抵抗と、鉄筋要素①と③の間のモルタルの電気抵抗、および鉄筋要素③の見掛けの分極抵抗の和を、アノードとカソードの間の電気抵抗による電位ロスとして考慮する。そのため、マクロセル腐食電流は、分極曲線の交差する点よりも左に移動した、 $0.004mA/cm^2$ となる。すべての鉄筋要素間において上述の

解析をした結果, 各鉄筋要素間を流れる腐食電流は, Table 3 に示すとおりとなる.

さらに, 各鉄筋要素におけるマクロセルのアノードになる場合の腐食電流からマクロセルのカソードになる場合の腐食電流を差し引いた値が, マクロセル腐食電流になる. したがって, 各鉄筋要素のマクロセル腐食電流とミクロセル腐食電流は, Table 4 に示すとおりとなる. ここで, 腐食による鉄筋の減肉はアノード反応により進行する. そのため, 正の値のマクロセル腐食電流とミクロセル腐食電流を足し合わせた値が, 総腐食電流になる.

3.3 結果

Fig.8 に, 全 3 体の供試体における総腐食電流密度分布の解析値と実験値を比較する. これによれば何れも, 塩化物イオンを含有するモルタル内の鉄筋要素①において, 総腐食電流密度が高くなった. 一方, 塩化物イオンを含有しないモルタル内の鉄筋要素③において, 総腐食電流密度が低くなった. この様なマクロセルの形成は第 1 章に示した既往の知見とも整合する. したがって, 本モデルによる解析は, 打継部のマクロセル腐食の形成をシミュレーションできると判断した.

Fig.9 に, すべての供試体におけるすべての鉄筋要素での, 総腐食電流密度の解析値と実験値を比較する. これによれば, 解析値と実験値は概ね等しいことが認められる. したがって, 本モデルによる解析は, 打継部のマクロセル腐食電流を定量的にシミュレーションできると判断した. なお, すべてのプロットは 1:1 の線より若干左上にあり, 解析値が実験値より僅かに大きい傾向を示している. これは, Fig.5 で前述の通り, アノード分極曲線の電流が大きく測定された影響と考えられる. すなわち, もしアノード分極曲線が左上にシフトされれば, Fig.6 および Fig.7 により解析されるマクロセル腐食電流とミクロセル腐食電流は小さくなる. その結果, 解析値は実験値に近づくと考えられる.

4 マクロセル対策工の実験結果に対する検証

4.1 実験手順

第 3 章と同様の供試体を用いた. ただし, 母材モルタルの打設から 4 週間に亘り湿潤気中で養生した後に, 1 週間に亘り乾燥(20℃, 60%RH)させ, 打継面の表面水分率を 8% 以下に調整した. それから既往の研究¹⁸⁾で最も効果の高かったシラン・シロキサン系含浸材を, 200g/m² の量で打継面に塗布した後, 1 週間に亘り乾燥気中で養生した. その後, アクリル系接着剤を塗布し, 約 3 時間に亘り気中乾燥させた. さらに第 3 章と同様に打継部を接合し, 1 週間に亘り湿潤気中養生を兼ねた暴露を行った. また 2 週目以降は温度を 40℃として, 13 週目まで暴露した.

4.2 解析に用いたインプットデータ

鉄筋要素①と③の間で測定されたモルタルの電気抵抗を Fig.10 に示す. これによると, 含浸材を塗布することにより, モルタル抵抗が増加することを確認できる.

Fig.8 Distribution of analyzed and measured total corrosion current densities.

Fig.9 Comparison between analyzed and measured total corrosion current densities.

Fig.10 Mortar resistance between steel elements ① and ③.

Fig.11 Distribution of analyzed and measured total corrosion current density for specimen with silane type surface penetrant on joint.

4.3 結果

Fig.11 に、表面含浸材の塗布の有無が総腐食電流密度分布に及ぼす影響に関する、解析値と実験値を示す。ここで、無塗布の結果は、Fig.8 の 3 体の結果の平均値を示す。これによれば、解析値と実験値はともに、表面含浸材を塗布した場合に、塗布しない場合と比較して、総腐食電流密度が低くなった。したがって、母材と補修材の間に表面含浸材を塗布し、打継面の電気抵抗を高めることが再腐食を抑制できることについて、既往の実験結果^{12),18)}のみならず解析的にも確認された。Fig.12 に、総腐食電流密度の解析値と実験値を比較する。これによれば、解析値と実験値は概ね等しいことが認められる。したがって、本モデルによる解析は、打継部にマクロセル腐食対策工を実施する場合にも、適用できることが明らかになった。

Fig.12 Comparison between analyzed and measured total corrosion current densities for specimen with silane type surface penetrant on joint.

5 結 論

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 著者らにより提案されたマクロセル腐食速度解析モデル¹⁰⁾は、塩化物イオンの濃淡差がある打継部にも適用できた。
- (2) 打継面へシラン系表面含浸材を塗布することによるマクロセル対策工法の防食性は、本モデルを用いた解析でも、既往の実験^{12),18)}と同様に効果を有することが確認できた。

今後、事後保全として断面修復工法が適用される際、本研究成果を踏まえて、母材コンクリートと補修材の品質を反映したインプットデータを用い、補修後のマクロセル腐食電流を試算すれば、再劣化を抑制できる補修材の選択が可能になる。また、山口らの実験的研究¹⁹⁾も考慮して、犠牲陽極材を用いた流電陽極方式の電気防食を実施する際に、本研究成果を踏まえて防食電流を試算すれば、最も効果の高い補修材の選択が可能になる。

参考文献

- 1) S. Nagataki, N. Otsuki, A. Moriwake and S. Miyazato, "The experimental study on corrosion mechanism of reinforced

- concrete at local repair part", Journal of JSCE, No.544, pp.109-119 (1996).
- 2) T. Kawahigashi, K. Kobayashi and T. Miyagawa, "A study of macro-cell and micro-cell corrosion of steel in concrete", Journal of JSCE, No.732, pp.1-15 (2003).
- 3) H. Murakami, N. Ominda, Y. Kato and T. Uomoto, "Influence of cathodic area on macrocell corrosion rate", Proceedings of JSCE Annual Meeting, Vol.65, No.5, pp.411-412 (2010).
- 4) P. Schiessl, W. Breit and M. Raupach, "Durability of local repair measures on concrete structures damaged by reinforcement corrosion", Proceedings of 3rd CANMET ACI International Conference on Durability of Concrete, pp.1195-1215 (1997).
- 5) C. Andrade, I. R. Maribona, S. Feliu, J.A. González and S. Feliu Jr, "The effect of macrocells between active and passive areas of steel reinforcements", Corrosion Science, Vol.33, No.2, pp.237-249 (1992).
- 6) J. Gulikers, "Experimental investigations on macro cell corrosion in chloride-contaminated concrete", Heron, Vol.41, No.2, pp.107-123 (1996).
- 7) M. Wasim and R. R. Hussain, "Experimental investigation of re-corrosion phenomenon in simulated repaired steel reinforced self consolidating concrete structures", International Journal of Electrochemical Science, No.8, pp.1678-1690 (2013).
- 8) T. Maruya, H. Takeda, K. Horiguchi, S. Koyama and K. L. Hsu, "Simulation of steel corrosion in concrete based on the model of macro-cell corrosion circuit", Journal of JSCE, Vol.62, No.4, pp.757-776 (2006).
- 9) J. Gulikers, "Numerical modeling of reinforcement corrosion in concrete", pp.71-90 (2005) Woodhead Publishing Ltd and CRC Press LLC
- 10) Y. Hasegawa, S. Miyazato, T. Oyamoto and K. Yokozeki, "Proposal of corrosion rate analytical model of reinforced concrete with crack", Journal of Concrete Research and Technology, Vol.17, No.1, pp.31-40 (2006).
- 11) S. Nagataki, N. Otsuki, A. Moriwake, T. Kamada and S. Miyazato, "Influence of permeability through joint on macrocell corrosion", Journal of JSCE, No.578, pp.31-42 (1997).
- 12) S. Komatsu, S. Miyazato, Y. Maeda, T. Ohshiro and T. Matsui, "Proposal of prevention method for re-degradation near knock down part using silane type penetrants", Journal of JSCE, Vol.70, No.1, pp.19-28 (2014).
- 13) S. Miyazato, N. Otsuki and A. Konagai, "The experimental and theoretical investigation of macrocell current measurement method using special divided steel bar", Proceedings of JCI, Vol.23, No.2, pp.547-552 (2001).
- 14) Japan Concrete Institute, "Technical report on electrochemical measurements based on physicochemical theory" CD-ROM, (2015)
- 15) Corrosion Association, "Introduction to electrochemistry to understand corrosion", 23rd technical seminar, pp.13-25 (2000).
- 16) Y. Akira, T. Yamaji and H. Kobayashi, "Long-term durability of the concrete of the tide zone using seawater as a mixing water", Proceedings of JCI, Vol.34, No.1, pp.820-825 (2012).
- 17) M. Suzuki, N. Fukuhara and T. Maruya, "Establishment of a coupled analysis between structure and reinforcement corrosion for predicting deterioration of reinforced concrete structure by salt damage", Journal of JSCE, Vol.70, No.3, pp.301-319 (2014).

- 18) T. Hatanaka, S. Miyazato and S. Mizutani, "Influence of application quantity of penetrants on reduction of macrocell corrosion", Proceedings of the 57th Japan Congress on Materials Research, pp.81-82 (2013).
- 19) A. Yamaguchi, S. Miyazato and K. Yamamoto, "Influence of electrical resistance of patch repair material on anti-corrosion performance by sacrifice anode material", Proceedings of JSMS Symposium on Concrete Structure Scenarios, Vol.9, pp.315-322 (2009).