

論文

[1122] 自然電位法のCSM逆解析に関する研究

正会員○山村浩紀(熊本大学大学院)

正会員 大津政康(熊本大学土木環境工学科)

1. はじめに

鉄筋腐食の非破壊的検査には、現在までに分極抵抗法と自然電位法とが主に使用されている。しかし、分極抵抗法は腐食電流を測定するもので計測時点での腐食の程度を直接に表すものではない[1]。一方、自然電位法は腐食の程度に関係するが、コンクリート表面での電氣的な評価にすぎず、測定値がコンクリートの状態にかなりな影響を受けることが報告されている[2]。これを解決するための一解決法として、コンクリート表面ではなく、鉄筋表面での電位を求めることが考えられる。このため、3次元境界要素法(BEM)による解析法を提案したが[3]、解析にかなりな労力が必要となり実用的でない点が問題であった。そこで、仮想電位法(Charge Simulation Method; CSM)を用いた手法を考案したが[4]、まだ適用性について明かにすべき点があると考えられたため、この解析法の妥当性について数値実験および実験により検討する。

2. 実験概要

2.1 供試体

鉄筋腐食の試験

に使用したコンクリートの配合を表-1に示す。これを用いて、図-1に示すようなD10鉄筋をかぶり30mmで配した単鉄筋

表-1 コンクリートの配合

最大粒径 mm	W/C (%)	細骨材率 (%)	単位量(Kg/m ³)				スランプ(cm)		空気量(%)	
			W	C	S	G	純水	NaCl	純水	NaCl
20	55	45	165	300	803	1037	3.6	6.0	4.8	5.0

コンクリートRC梁モデルを作成した。この場合、電食試験中にマクロセル腐食を促進させるため、図に示すように供試体の片側のコンクリートには練り混ぜ時に3%の食塩水を用いた。なお、鉄筋露出部の養生中の腐食を避けるため、鉄筋露出部は打設1日後にエポキシ塗料をコンクリート上面とともに塗布した。そして、恒温室で4週間の20℃水中養生を実施した。このコンクリートの28日材令における力学特性を表-2に示す。

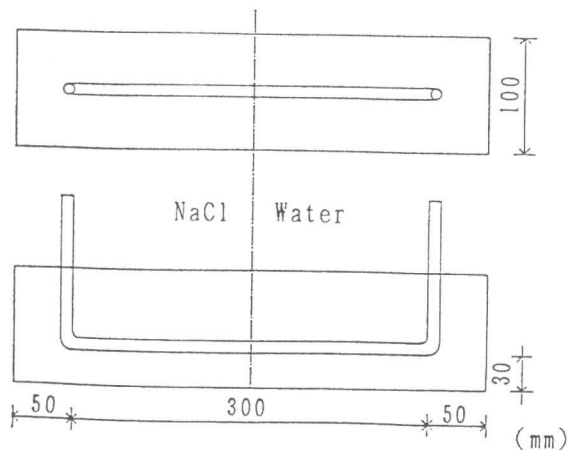


図-1 RC供試体図

2. 2 自然電位の測定

鉄筋腐食を制御するための電食試験では、水槽底部に銅板を敷き、その上に供試体を設置し3%食塩水を供試体上部近くまで注いだ後に、電流を定電流発生装置により銅板と食塩水打設側に露出している鉄筋に20mAを流した。採用した電食時間は0, 50, 100時間である。そして、これらの電食後直ちに、ASTM C876-77適合の硫酸銅電極を用いて、図-1の供試体の上面、下面ならびに側面の鉄筋直上の測定点で自然電位を測定した。

表-2 コンクリートの力学特性

	圧縮強度 (Mpa)	引張強度 (Mpa)	弾性係数 (Gpa)
純水	54.33	3.50	32.90
3%食塩水	42.78	3.42	31.40

3. BEMによる数値実験

自然電位法で測定されるのはコンクリート表面の電位 $u(x, y, z)$ であり、コンクリートが均質ならば、それはラプラス方程式を以下のような境界条件のもとに満足する解として得られる。

領域内で $\nabla^2 u(x, y, z) = 0$ (1), 電位の測定境界では $u = u \langle C. S. E \rangle$ (2),

電流密度の与えられる境界では $q = 1/R \cdot \partial u / \partial n$ (3)

ここで、 $u \langle C. S. E \rangle$ は、硫酸銅電極による自然電位の測定値であり、 R はコンクリートの電気抵抗、 n は境界上の法線方向ベクトルである。また、実際の測定では、式(3)の境界条件は測定不可能であるが、数値実験のために一応考慮しておくものとする。

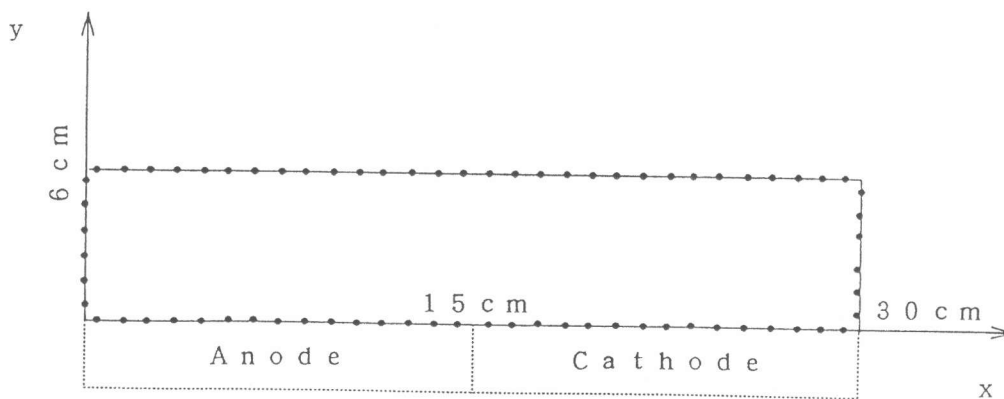


図-2 BEM解析モデル

数値実験では、簡単のために式(1)の2次元の場合を考え、図-2に示すような2次元モデルで、鉄筋部にアノード部およびカソード部に腐食のマクロセル電流による電流密度を与え、他の境界は電流の遮断境界として、コンクリート表面での電位をBEMにより解析した[5]。但し、総節点数は72であり、全領域の平均電位は $-0.3 \text{ V} \langle C. S. E \rangle$ で、コンクリートの抵抗は $0.1 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ と仮定した。図-3に図中に示すA, Bの二つの鉄筋上の電流密度分布に対する図-2のモデルのコンクリート上面での電位分布の解析結果を示す。これより、アノード部、カソード部の分布とコ

ンクリート表面での電位分布には関係は認められるが、電位の大きさそのものは、鉄筋上の電位および腐食電流の大きさに直接対応するものではないことがわかる。つまり、コンクリート表面の電位分布のみから鉄筋の腐食状況を推定することは必ずしも容易ではないことが認められる。

次に、図-3でcase Aの場合に求められた鉄筋上縁の電位分布をもとに、他の境界は同じく電流遮断境界として、コンクリート上面の電位および鉄筋上縁の電流密度を推定した。この場合、コンクリートの抵抗の影響を検討した。その結果を図-4に示す。鉄筋表面の離散点があり多くないため、求められた電流密度の分布は図-3での仮定値に比べ端の境界付近で変動しているが、平均的にはステップ状の電流密度をよく表している。また、このようなコンクリートの抵抗変化による電流密度の変化にもかかわらず、コンクリート表面の電位は変化しないことがわかる。これは、式(1)、(3)からも予測されるように、コンクリートの抵抗の影響は、鉄筋上の電流密度およびコンクリート中を流れる電流の差異に反映され、鉄筋上およびコンクリート表面の電位分布にはコンクリートが均質ならば関係しないということを表している。

これより、既報[4]のコンクリート抵抗を一定値と仮定するCSM逆解析によっても鉄筋表

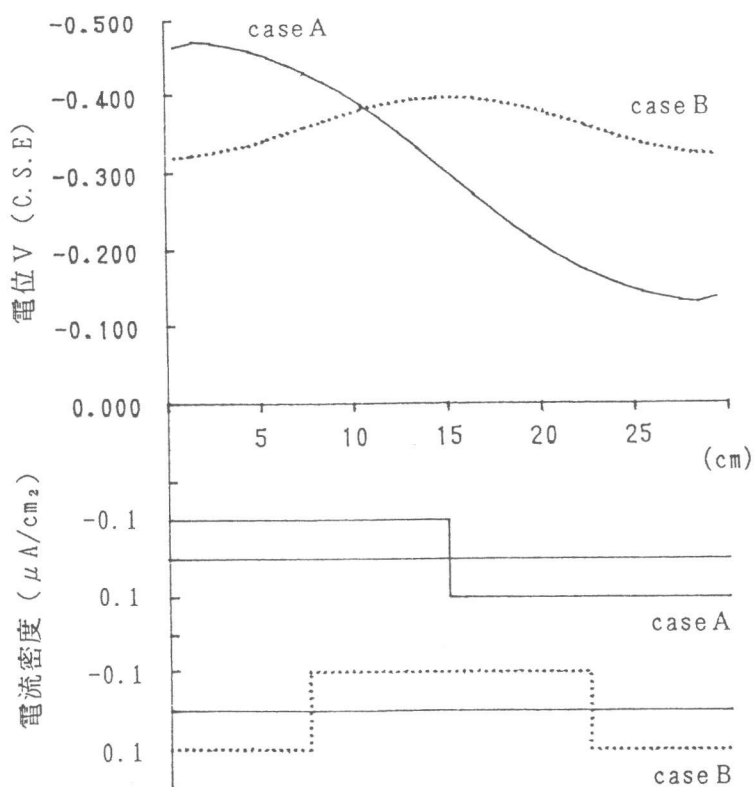


図-3 鉄筋上の電流密度とコンクリートの表面電位

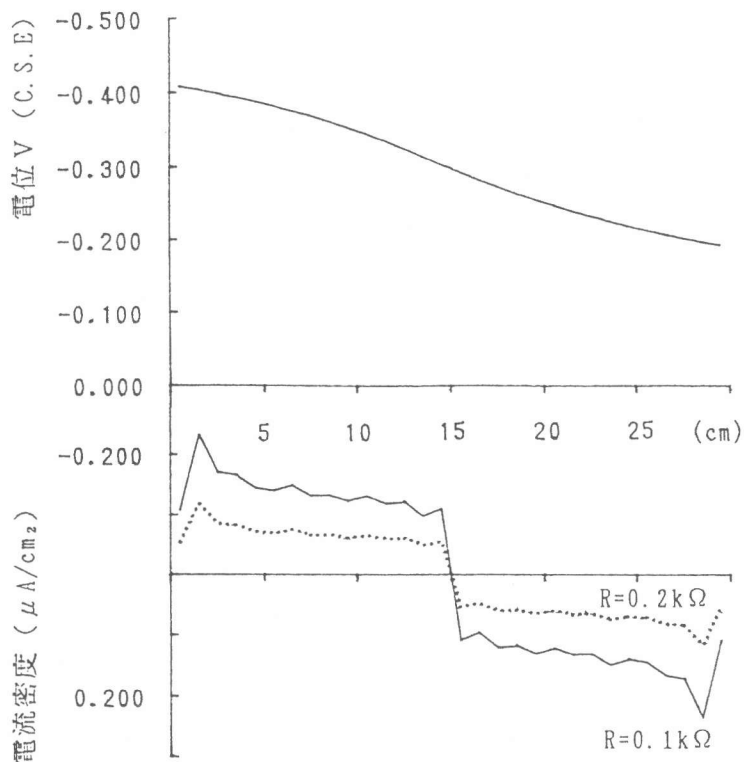


図-4 表面電位と電流密度へのコンクリート抵抗の影響

面の電位分布については決定可能なことが導かれる。そこで、この妥当性を確認するために、図-4でのコンクリート表面における電位分布を測定値として、CSM解析により鉄筋上縁の電位分布を推定した。そして、これを図-3のcaseAの解析で求められていた鉄筋上縁の電位分布と比較した結果を図-5に示す。これより、鉄筋端部を除けば、十分な精度で鉄筋上の電位が推定出来ていることがわかる。したがって、コンクリート表面の自然電位分布が与えられていれば、CSM逆解析により鉄筋上の電位分布が決定できることになった。これは、自然電位法の不確実性に関する欠点を補填するものであると考えられる。

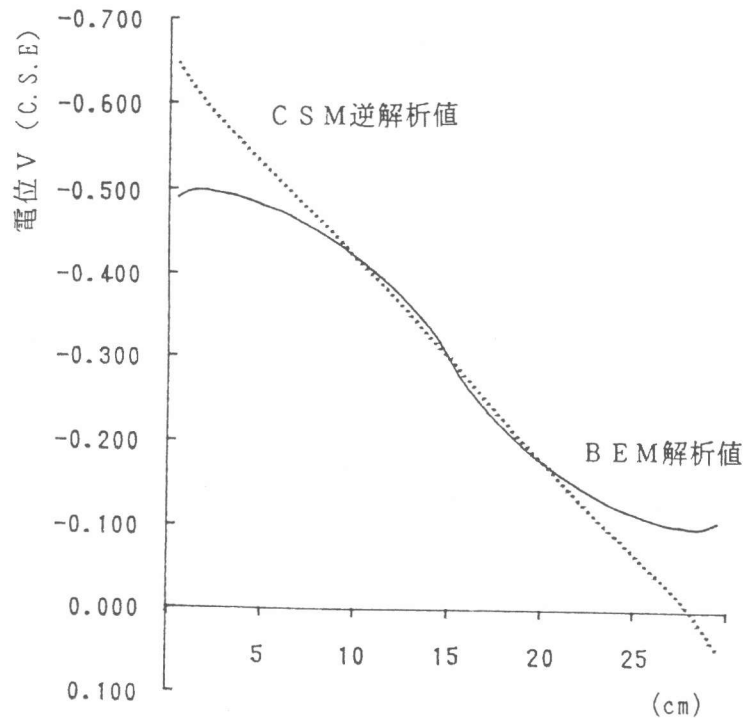


図-5 表面電位から求めた鉄筋上の電位分布

4. CSM解析結果

電食試験前(0時間)および電食50時間、100時間後にそれぞれ供試体を水槽より取り出し、コンクリート表面の各面で5cm間隔に鉄筋直上に当たる点で自然電位を測定した。そして、測定された上・下・側面における自然電位を用いてCSM逆解析により鉄筋上縁の電位を推定した。これは、BEM解析での一重層ポテンシャル解のみを用いて表面電位より内部点の電位を決定することに相当する。

これらの結果を図-6、7、8に示す。図より、コンクリート表面での電位分布では明確ではないが、CSM解では電位分布の負値への変化ばかりでなく、電位分布の勾配が明らかに増加していることが認められる。この電位分布の勾配は、腐食電流の増加に対応していることから、マクロセルにより腐食が進行している様子が伺える。これは、コンクリート表面での電位勾配ではそれほど明かではないことより、CSM逆解析の有効性が認められる。

ところで、鉄筋上の実際の腐食域をコンクリートをはつり出して調査したところ、電食100時間において練り混ぜ水として純水を使用した側の端部を除いて、ほぼ全体に腐食していることが認められた。自然電位の結果によれば、コンクリート上面での電位は全ての点で、 -0.4 V (C.S.E) 以下にまで降下している。しかし、CSM逆解析による鉄筋表面の電位は、端部を除いて -0.35 V (C.S.E) 以下となっている。ASTMの基準によると、 -0.35 V (C.S.E) 以下の場合90%以上の確率で腐食が生じているとされており、CSM逆解析結果による鉄筋上の電位は、このASTMの基準とかなりよく対応づけられることを示していると考えられる。

ところで、CSM逆解析のソフトウェアプログラムは非常に簡単であり、既に自然電位の計測

がマイクロコンピュータなどにより自動化されている場合も多いことから、容易にCPU上の計測ソフトに組み込むことが期待できると考えられる。

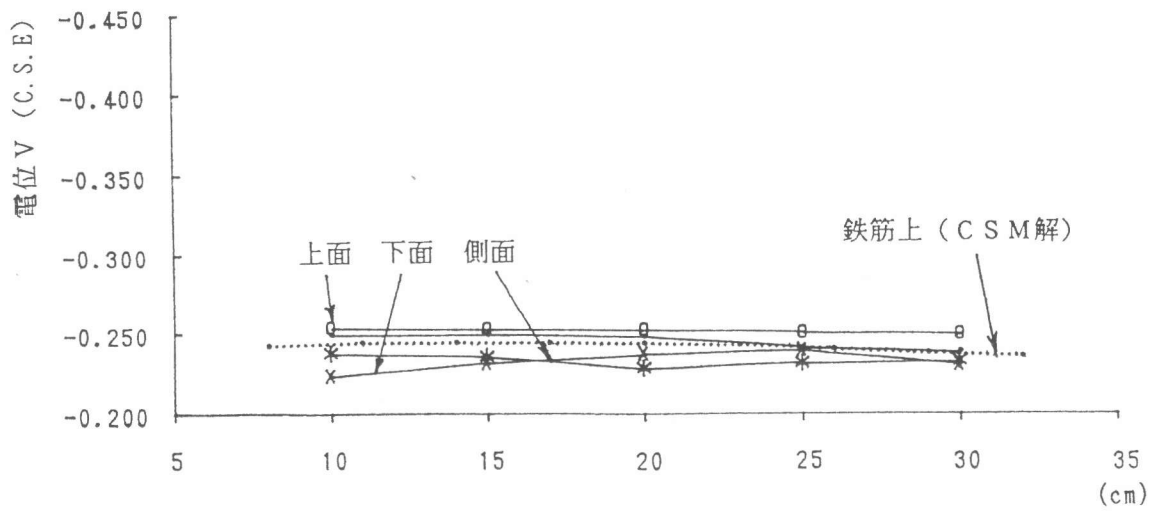


図-6 CSM逆解析結果 (電食0時間)

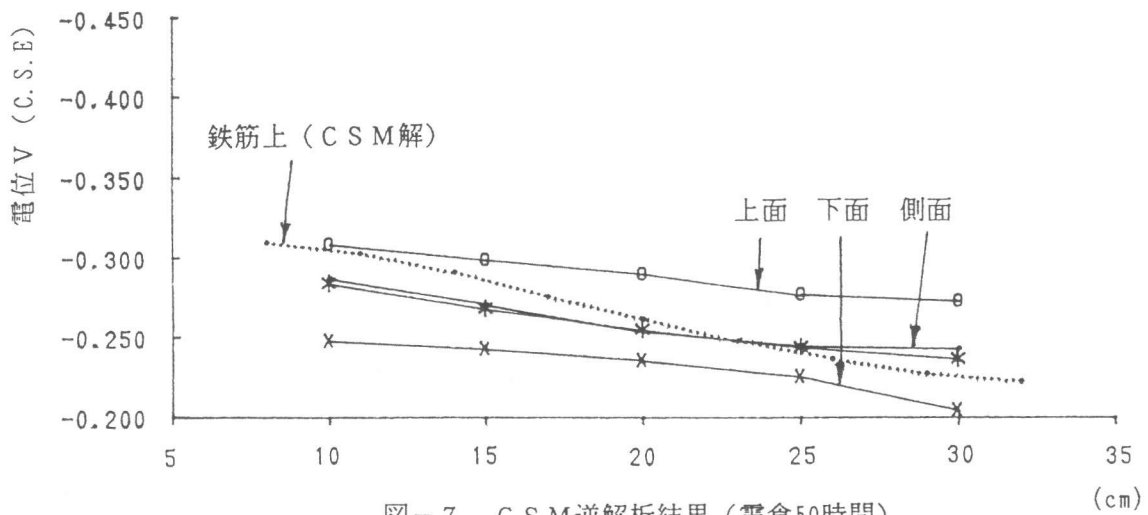


図-7 CSM逆解析結果 (電食50時間)

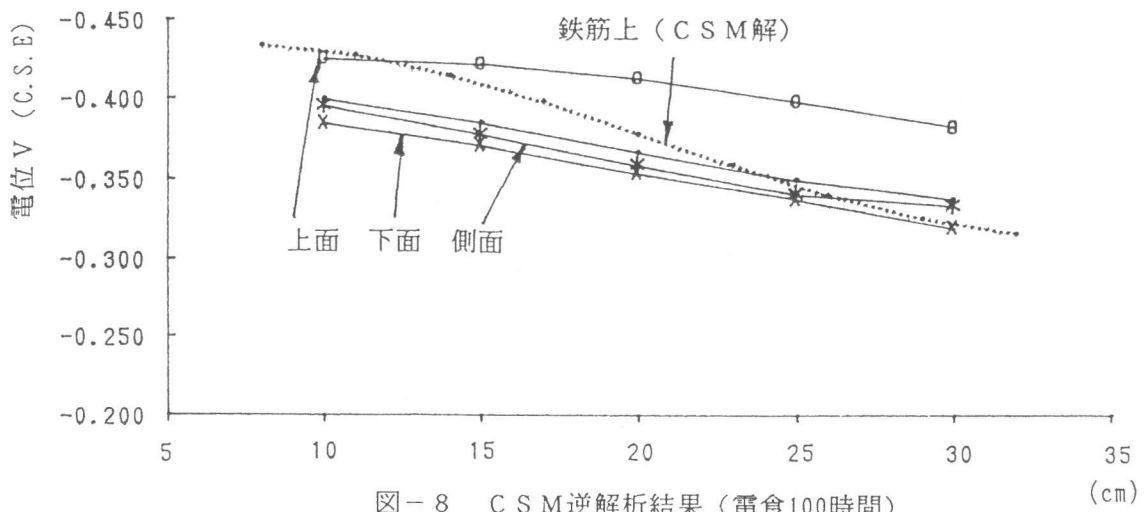


図-8 CSM逆解析結果 (電食100時間)

5. 結論

自然電位法の測定値より鉄筋表面での電位を推定する方法としてCSMにより逆解析する手法の開発を試みた。この結果、次のような結論が得られた。

(1)鉄筋でのアノード-カソード反応による電位の変化を、BEMを用いた数値実験により検討した。この結果、鉄筋上の腐食電流密度の分布とコンクリートの表面電位分布は対応するが、それは一意な関係を与えるものではなく、電位分布のみから腐食電流の発生している領域を推定することは容易ではないことが認められた。

(2)鉄筋上の電位を境界条件としたBEM解析により、コンクリートの抵抗は腐食電流の変化には関係するが、コンクリート表面での電位には均質なコンクリートと仮定できるならば、影響されないことが明らかになった。ただし、現実のコンクリートでは、内部の水分分布、表面の電気的條件などにより、均質として取り扱える領域は限られることもあり、その点はさらに検討することが求められよう。

(3)これらの結果によって、コンクリート表面での自然電位の測定結果が与えられており、鉄筋の配筋位置がわかっているならば、鉄筋上の電位分布は既に開発しているCSM逆解析法により求められることが導かれる。そこで、その精度について同じ数値実験のモデルを用いて検討した。その結果、鉄筋端部を除けば、十分に精度よく鉄筋上の電位分布が決定できることが明らかになった。

(4)電食実験において促進腐食させたRC梁モデルにおいて、コンクリート各面の自然電位を電食実験後に測定した。そして、これらの値を用いて、CSM逆解析により鉄筋表面での電位を推定した。求められた鉄筋表面の電位の値と実際の腐食の関係は、ASTMの基準とよく対応していることが認められた。これは、自然電位法における不確定性を大きく改良した手法であると考えられる。

(5)また、最近では自然電位の測定は、マイクロコンピュータを用いた自動計測システムとなっている場合が多いと考えられるが、CSM逆解析のソフトウェアは非常に簡単であり、容易にそれらのシステムに組み込むことが期待される。

参考文献

- 1) 大城 武、谷川 伸、後藤信弘：コンクリート中の鉄筋の腐食評価法について、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 13, No. 1, pp. 503-508, 1991.6
- 2) Misra, S. and Uomoto T.:Corrosion of Rebars under Different Conditions、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 12, No. 2, pp. 825-830, 1990.6
- 3) 乙丸正彦、大津政康：3次元BEM解析に基づいた自然電位法による鉄筋腐食の評価に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 12, No. 1, pp. 539-544, 1990.6
- 4) 大津政康、山村浩紀：自然電位法の仮想電荷法(CSM)解析による鉄筋腐食の評価に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 13, No. 1, pp. 527-532, 1991.6
- 5) 青木 繁、浦井芳洋：クラスタリングによるガルバニック腐食逆問題解析、材料, Vol. 40, No. 452, pp. 111-116, 1991.5