

論文

[1123] 自然電位法の CSM 逆解析によるコンクリート中の鉄筋腐食の評価に関する研究

山村浩紀\*1・大津政康\*2

1. はじめに

コンクリート中の鉄筋腐食を非破壊的に評価する方法には、現在のところ自然電位法と分極抵抗法とが主に使用されている[1]。しかしながら、いずれもコンクリート表面での電氣的評価に過ぎず、測定値は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]。これを解決するには、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[4],[5]が、まだ適用性について表面コーティング、配筋などの影響も含めて、明らかにすべき点があると考えられたため、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、図-2

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 <sup>3</sup> )				スラフ <sup>*</sup> (cm)		空気量(%)	
			W	C	S	G	純水	NaCl	純水	NaCl
20	55	45	165	300	803	1037	4.6	4.0	5.1	4.7

に示すようなD10鉄筋を配

した単鉄筋コンクリートRC梁モデル、およびRC床版モデルを作成した。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

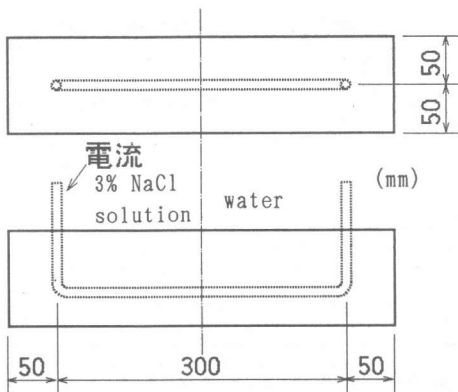


図-1 RC梁供試体

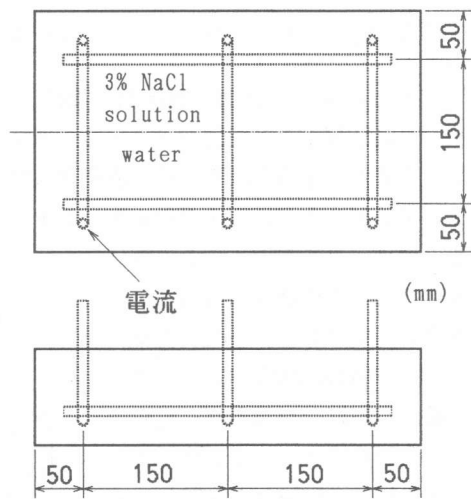


図-2 RC床版供試体

\*1 鹿島建設(株) (正会員)

\*2 熊本大学教授 工学部土木環境工学科, 工博(正会員)

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。また、RC梁モデルについては、エポキシ樹脂による測定値への影響を調べるため、全面にエポキシ樹脂を塗布した供試体も併せて作成した。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。

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)	ポアソン比
純水	35.56	3.45	34.10	0.20
3%食塩水	34.37	3.02	32.05	0.18

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。

### 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RC梁モデル10mA、RC床版モデル50mAを図に示す鉄筋に流した。採用した電食時間はRC梁モデル0, 50, 100, 150時間(全面エポキシ供試体0, 300時間)、RC床版モデル0, 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、RC梁モデルの上面、下面ならびに側面の鉄筋直上の測定点で、RC床版モデルは上面、下面の測定点で自然電位を測定した後、コンクリートを鉄筋付近まで穿孔し、その孔底でも測定を実施した[6]。

### 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、数値実験のため一応考慮しておくことにする。

そこで、図-3に示すような3次元モデルを考え、鉄筋部にアノード部およびカソード部に対応する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。但し、総節点数は218であり、全領域の平均電位は-0.3Vで、コンクリートの抵抗は1.0kΩと仮定した。図-4は、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-3のモデルでのコンクリート上面の電位分布を解析してもの

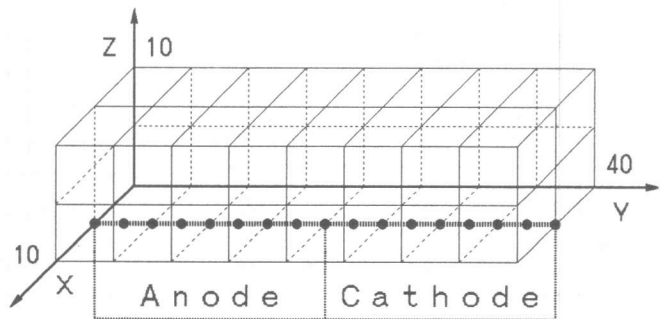


図-3 BEM解析モデル

である。これより、昨年の2次元での結果[5]と同じように、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容易ではないことが認められる。

次に、図-4でcase Aの場合に求められた鉄筋上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-5に示す。鉄筋表面の離散点はあまり多くないが、求められた電流密度の分布は図-4での仮定値と比較しても、ほぼ同様な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、計測のある程度の領域で均質と見なせるならば、既報[4],[5]のコンクリート抵抗を考慮しないCSM逆解析によって、鉄筋表面上の電位分布は決定可能なことが導かれる。そこで、3次元での妥当性を確認するために、図-5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解析により鉄筋表面の電位分布を推定した。そして、これを図-4のcase Aの解析で求められていた鉄筋上の電位分布(図中のBEM解析値)と比較した(図-6)。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を測定後、CSM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。

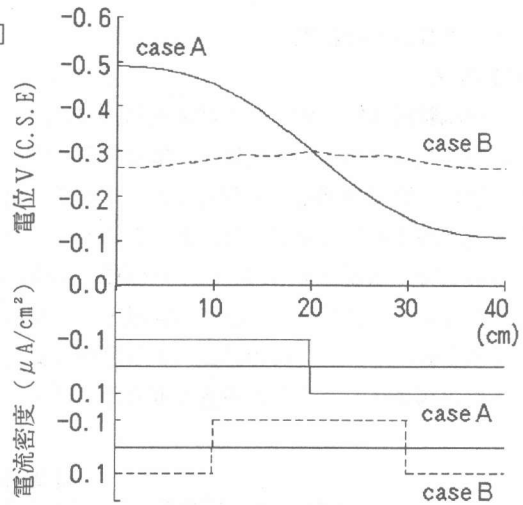


図-4 鉄筋上の電流密度とコンクリートの表面電位

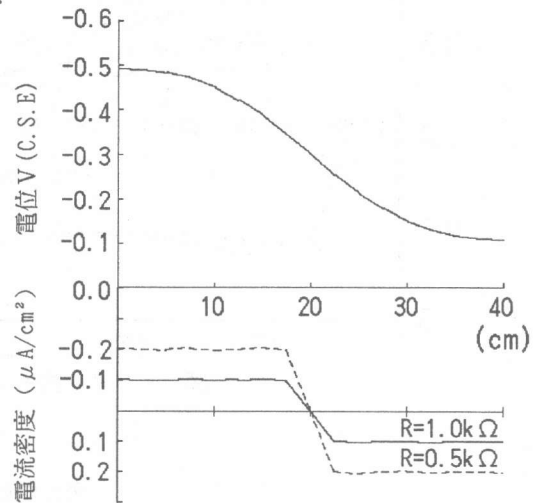


図-5 表面電位と電流密度へのコンクリート抵抗の影響

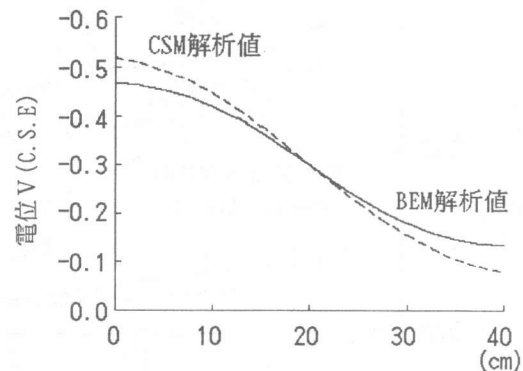


図-6 表面電位から求めた鉄筋上の電位分布

#### 4. CSM解析結果

##### (1) RC梁モデル

電食試験前(0時間)および電食50, 100, 150時間後(全面エポキシ樹脂塗布供試体は0, 300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5 cm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、測定された自然電位を用いてCSM解析により鉄筋表面下部の電位を推定した。図-7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解では鉄筋上で-0.35V以下の領域と実際の腐食領域とがよく対応していることが認められる。さらに、穿孔プローブ法での結果とCSM解の一致が認められる。図-8で、電食300時間後の測定値はエポキシ樹脂除去により卑へと変化し、その場合もCSM解析値の-0.35V以下の部分と腐食域がよく対応し、樹脂を取り除けば十分に実用的な測定が可能ながわかった。

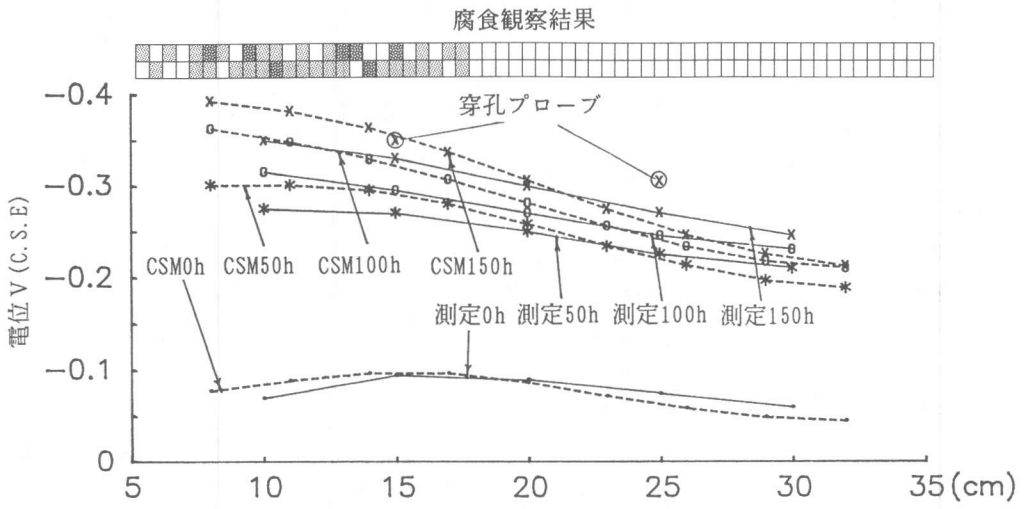


図-7 RC梁モデルCSM解析結果

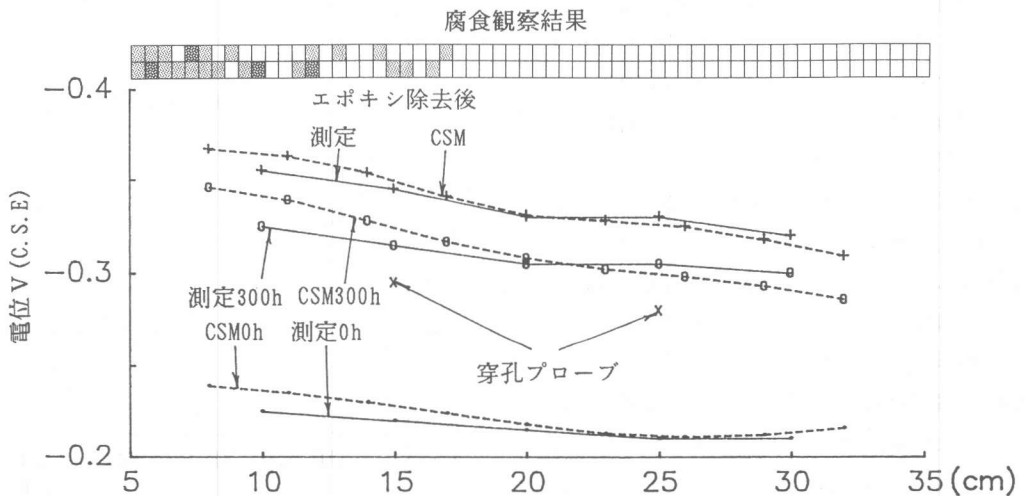


図-8 RC梁モデルCSM解析結果(エポキシ樹脂全面塗布)

(2) RC床版モデル

RC床版モデルの電食試験前(0時間)および電食100時間後におけるコンクリート表面での測定値による等高線図を図-9, 図-10に、測定および解析結果を図-11, 図-12に示す。

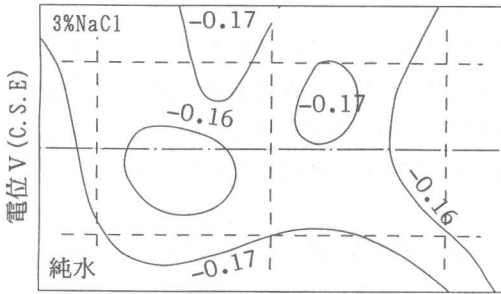


図-9 自然電位の等高線図(0h)

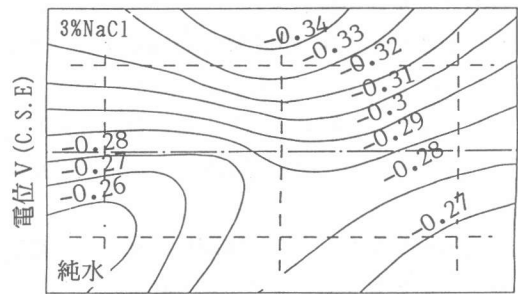


図-10 自然電位の等高線図(100h)

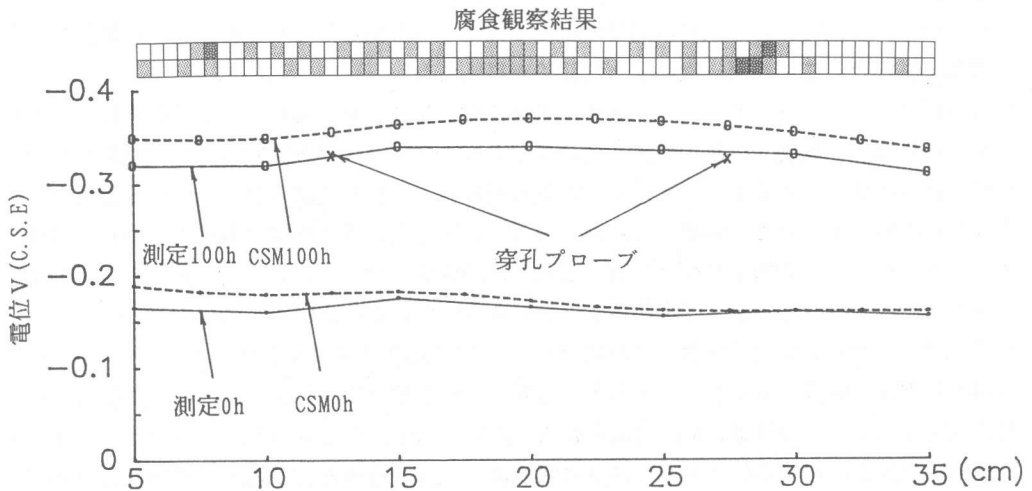


図-11 RC床版モデルCSM解析結果(3%NaCl側)

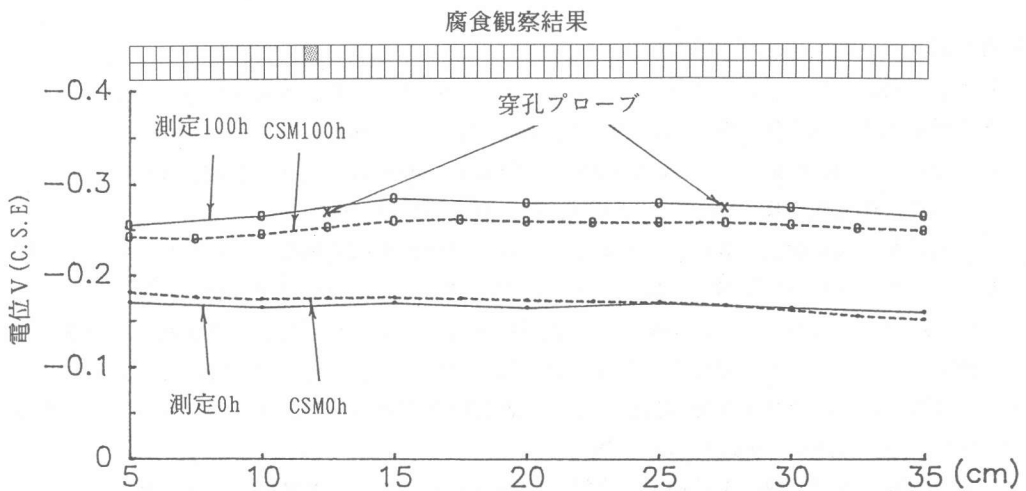


図-12 RC床版モデルCSM解析結果(純水側)

等高線図からも明らかなように3%食塩水側の鉄筋の交点を中心に自然電位の卑への変化が観察され、マクロセル腐食が進行しているのが伺える。また、3%食塩水側の鉄筋については、表面測定値はASTMの基準による不確定の領域であるが、CSM解ではASTMの基準による腐食域に変化していることがわかる。

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、図に示す腐食観察結果のように、RC梁モデル、RC床版モデルとも練り混ぜ水に3%食塩水を使用した側が腐食していることが認められた。これはCSM解析結果の $-0.35V$ 以下の領域とかなりよく一致しており、穿孔プローブ法を実施することなく腐食領域を推定することが可能であることが明らかになった。

以上のことより、CSM解析結果による鉄筋上の電位は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。

## 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)鉄筋でのアノードと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。そして、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は均質なコンクリートと仮定できる測定領域では、影響されないことが明らかになった。

(2)電食実験において促進腐食させたRC梁モデル、RC床版モデルにおいて、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解析により鉄筋表面での電位を推定した。その結果、硫酸銅電極による測定の妨げになるものを取り除いてやれば、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。

## 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) 山村浩紀、大津政康：自然電位法のCSM逆解析に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 14, No. 1, pp. 717-722, 1992.6
- 6) 永山 勝、田村 博、下澤和幸：実構造物の腐食モニタリング事例、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 14, No. 1, pp. 763-768, 1992.6