

論文

[1088] 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

正会員○大津政康 (熊本大学土木環境工学科)

山村浩紀 (熊本大学大学院)

1. はじめに

コンクリートへの非破壊検査法の適用については、コンクリート構造物の維持・管理へのニーズの高まりとともに、様々な分野で研究されている。筆者らのグループでは、アコースティック・エミッション (AE) 法[1] および超音波法[2] などのひびわれ検出手法、さらに、鉄筋腐食の検出について研究を実施している。鉄筋腐食の非破壊的な検査には、現在のところ自然電位法と分極抵抗法が提案されている。しかしながら、いずれもコンクリート表面での電氣的な評価であり、測定値はコンクリートの状態に非常に影響を受けることが報告されている [3]。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[4]、解析にかなりの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、仮想電荷法 (Charge Simulation Method; CSM) を用いた手法を考案し、これによる鉄筋腐食の評価法の妥当性について検討した。

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。コンクリートの早期劣化を目的としたことから、表のようにかなり W/C の高い配合となっている。

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		
20	70	45	165	236	862	1209	0.8	3.7

この配合で図-1に示すような D10 鉄筋を下面からのかぶりを 3 cm² 本と 4 cm² 本として、合計 4 本設置した鉄筋コンクリート (RC) 製の床版モデルを作成した。この打設時には、電食試験中にマクロセル腐食を促進させるため、図の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。また、鉄筋露出部については、供試体養生中の腐食を避けるために、鉄筋露出部に打設 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。

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	22.98	2.76	27.54
3%食塩水	26.64	2.85	25.87

また、分極抵抗の測定のために対極として 10 cm の D10 鉄筋を図のように一隅に埋め込んだ。そして、恒温室で 4 週間の 20℃ 水中養生を実施した。同配合における標準供試体より求められた

圧縮強度、引張強度、ヤング率を表-2に示す。供試体の片側で使用水が異なるため、それぞれの練り混ぜ水による供試体での値が示されている。

これより、強度についてはわずかであるが、3%食塩水使用のコンクリートが優れていることが分かる

2. 2電食試験

電食試験には、水槽と定電流発生装置を用い図-2に示すように水槽底部に銅板を敷き、3%食塩水中に供試体を2体設置した。このとき、食塩水は供試体上部近くまで達していた。電流は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2本の鉄筋間に50mVを通電した。ただし、鉄筋は4本とも電気的に接続されていた。

通電を実施した電食時間は100時間および200時間である。

2. 3非破壊試験

鉄筋腐食のモニターには、ASTM C876-77適合の硫酸銅電極を用いた装置を用い、図-1の平面図に示されるコンクリート上面の16点の測定点で自然電位および分極抵抗を測定した。

3. CSM解析

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、それはラプラス方程式

$$\nabla^2 u(x, y, z) = 0 \quad (1)$$

を満足する。BEMの理論では、この解は次の積分表示式で表現されることがわかっている。

$$C \cdot u(x) = \int_S \{ G(x, y) \cdot \frac{\partial u(y)}{\partial n} - \frac{\partial G(x, y)}{\partial n} \cdot u(y) \} dS \quad (2)$$

ここで、 C は位置 x の係数であり、 x が内部にあれば1、境界上にあれば1/2となる。つまり、 $C = 1/2$ として境界積分方程式を解き、全ての

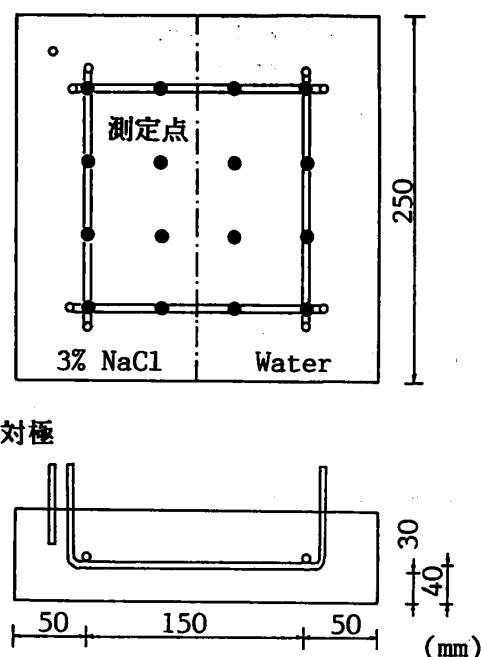


図-1 供試体

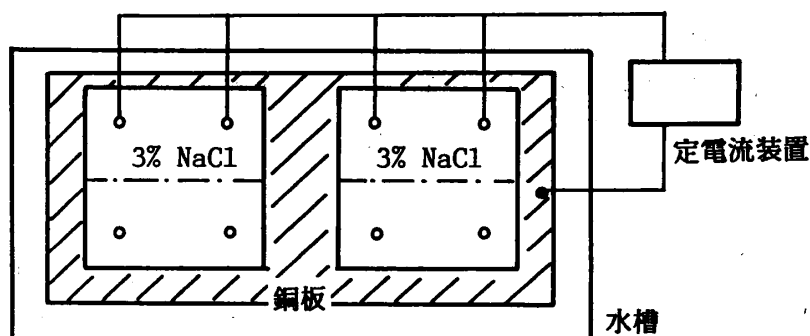


図-2 電食試験の概要

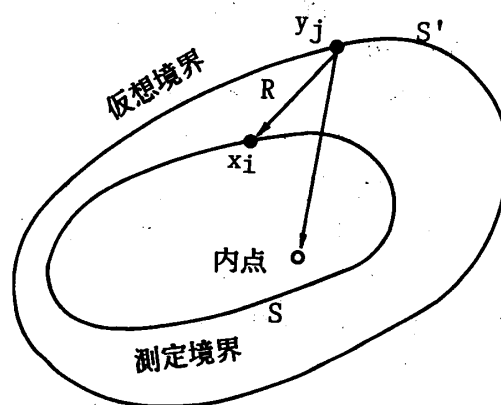


図-3 CSMでの境界

境界 S 上の電位 $u(y)$ とその法線方向導関数 $\partial u(y)/\partial n$ が決定した後、任意の鉄筋表面での電位は、それらを式(2)の被積分内に代入し、あらためて $C = 1$ として内部点での電位を求めることにより得られる[4]。

なお、 $G(x, y)$ は基本解であり、点 x と点 y の距離を $R(x, y)$ として、

$$G(x, y) = 1/[4\pi R(x, y)] \quad (3)$$

と表される。

CSMは、BEMの理論を簡単にし、さらに、面積分を簡略化したと考えればよい。式(2)の被積分関数の第一項のみを考えると、これも一重層ポテンシャル表示と呼ばれる支配方程式(1)の解の表示となる。そこで、積分が実際の境界での面積分ではなく、仮想境界での影響の累積和に置き換えられるとして、式(2)は次のように変形される。

$$u(x_i) = \sum_{j=1}^N G(x_i, y_j) \cdot f_j \quad (4)$$

ここで、 f_j は積分密度と呼ばれるが、数理的には解が基本解の和で表現できるとした場合における影響係数と考えればよい。CSMの特徴は、式(4)の影響係数を与える点 y_j を、図-3に示すように実際の境界点 x_i のある境界 S の外側 S' に取ることである[5]。このようにして、式(2)で表現されるべき解は、式(4)のような近似式で表現されることになる。

解析手順としては、自然電位を計測した面を境界 S として、式(4)の左辺 $u(x_i)$ を与え、境界 S' 上に仮想点 y_j を取ることにより、影響係数 f_j を決定する。次に、鉄筋上の電位も式(4)に従うことより求められた影響係数 f_j に対して、代表点 x_i を鉄筋表面に取り右辺の計算により電位を決定することが出来る。なお、以下での解析では予備検討の結果を参考にして、厚さ10cmの床版モデルの上面に計測点を取り、仮想境界はその直上15cmに設けることにした。

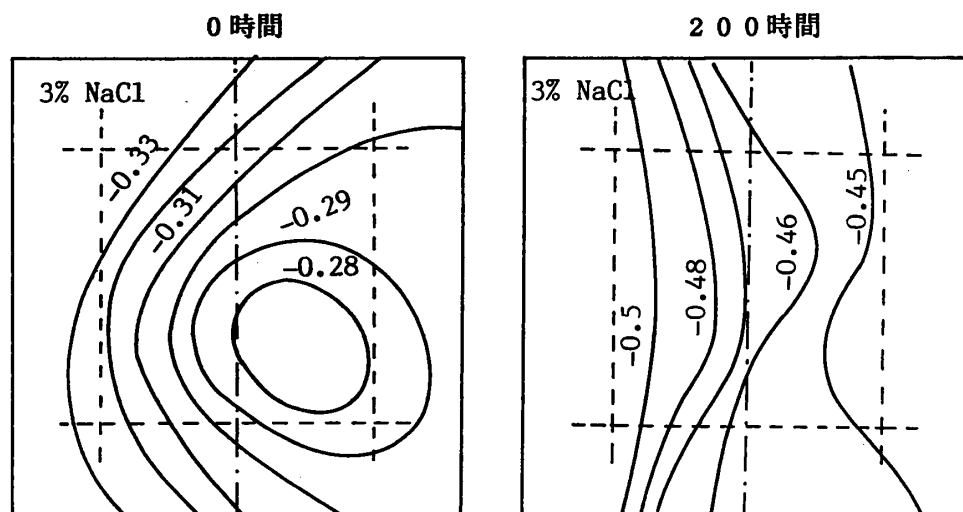
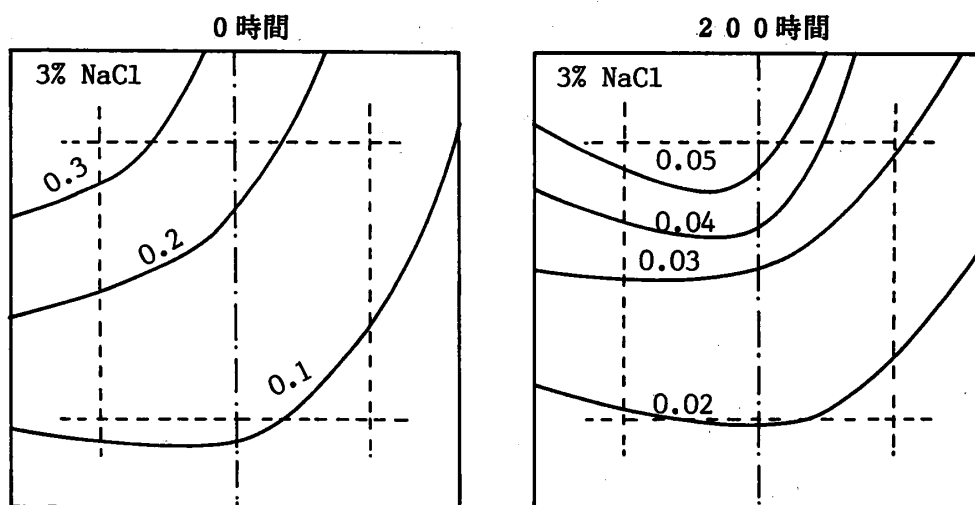


図-4 自然電位の等高線図 (V)

図-5 分極抵抗の等高線図 ($k\Omega$)

4. 実験および解析結果

電食試験前 (0 時間) および電食100 時間、200 時間後におけるコンクリート表面で測定された自然電位および分極抵抗から求めたコンター図を、それぞれ図-4 および図-5 に示す。

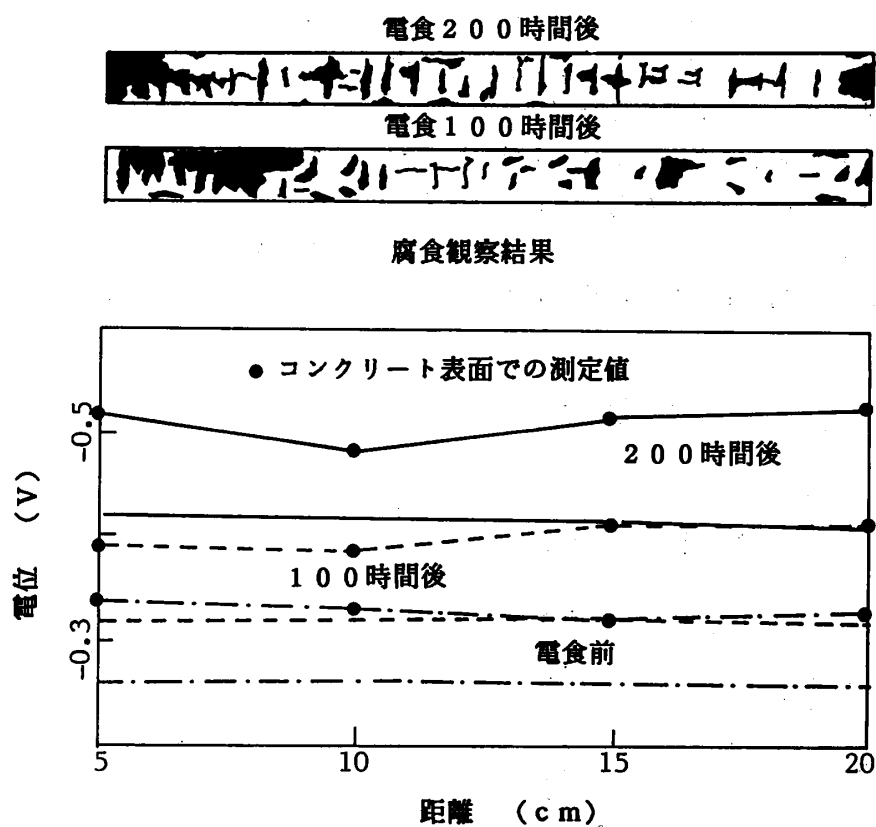


図-6 (a) CSM解析結果 (食塩中の鉄筋)

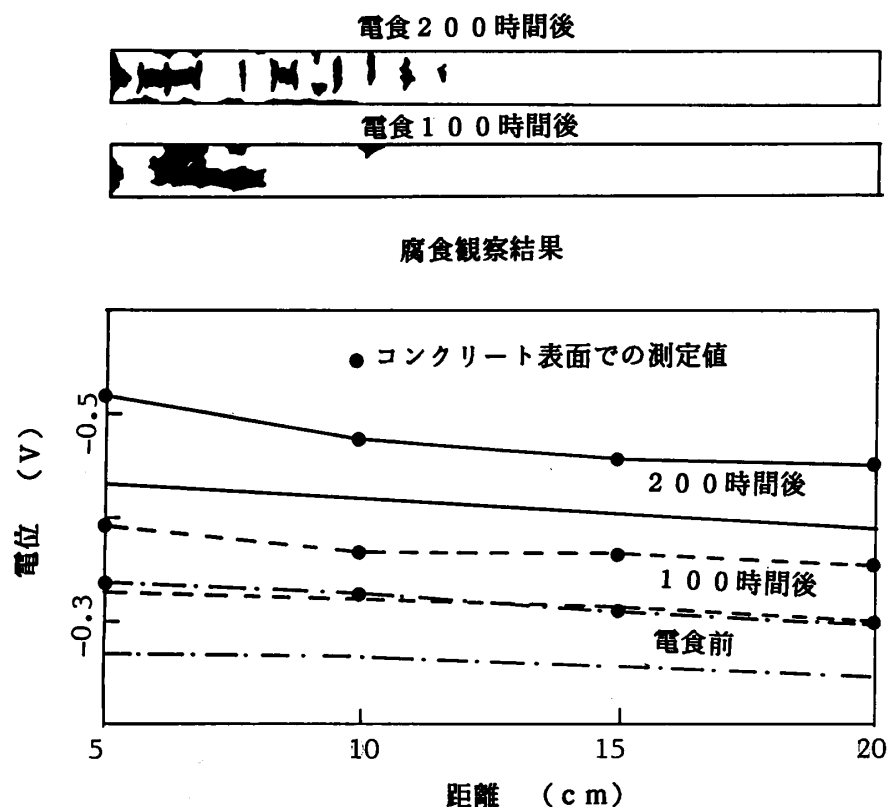


図-6 (b) CSM解析結果 (食塩水の鉄筋)

測定後に床版モデルを解体し鉄筋を取り出したところ、200 時間後では打設時に食塩水を練り混ぜた部分の鉄筋は表面に腐食が観察された。図-4 の結果によれば、電食0 時間でも食塩水を練り混ぜた側でかなり低い電位が観察されること、200 時間後では自然電位の低い領域と鉄筋に腐食が観察された領域はよく一致していることがわかる。

一方、分極抵抗の値の分布は、対極より遠い程抵抗が小さくなっており、200 時間後には値がかなり低くなっていることは観察できるが、自然電位ほどは腐食鉄筋の位置とよく対応していないことがわかる。これは、測定法にも問題があったと思われる。

図-4 の結果を式(4) の右辺に代入し、コンクリート表面の上方15cmの位置に設けた仮想境界における積分密度を決定し、これを用いて、もう一度式(4) により鉄筋表面位置での電位を推定した。

結果の例として、食塩水打設側に埋設された鉄筋の場合を図-6 (a) に、食塩水側から純水側にわたって埋設された鉄筋の場合を図-6 (b) に示す。それぞれの図の上方には、試験終了後にモデルを解体して観察した鉄筋の腐食領域を示してある。そして、解析値は鉄筋直上のコンクリート表面で得られた値と比較してある。

これより、コンクリート表面で観察された自然電位の値は、電食100 時間後には全て-0.35 V 以下まで下がっていることがわかる。しかし、図中の実際の腐食領域より明らかなように100 時間後では、腐食域はそれほど広がっていない。一方、CSM解析結果の鉄筋表面と腐食箇所の対応を見れば、おおよそ自然電位が-0.3V 以下に下がっている領域で、実際に鉄筋腐食が観

察されるのが認められる。これは、CSM解析を用いれば、コンクリート表面での計測結果の曖昧さを改善して、明確な自然電位法における腐食判定の基準が導かれる可能性を示しているものと考えられる。CSM解析のソフトウェアは非常に簡単であり、既に自然電位および分極抵抗の計測が自動化されている場合も多いことより、容易に計測ソフトに組み込むことも期待できる。

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による解析を試みた。この結果、次のような結論が得られた。

- 1) 電食試験により腐食させたRC床版モデルのコンクリート表面での非破壊検査の結果では、自然電位の測定結果の分布図は、実際の鉄筋腐食とよく対応していた。しかし、今回の計測では分極抵抗の結果は明確にはならなかった。これは、測定法に問題がある可能性もある。
- 2) 自然電位測定の結果より鉄筋表面の電位を推定する方法としてCSMによる解析法を考案した。これは大変簡単な解法であり、容易に自然電位の自動測定に組み込むことが期待できる。
- 3) CSM解析により求められた鉄筋表面の電位の値と実際の腐食の関係は、 $-0.3V$ を基準として腐食部とよく対応していることが認められた。

参考文献

- [1] 重石光弘、大津政康：A E波形逆解析によるコンクリート円筒引張試験の観察、コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 12, No. 1, pp. 185-190, 1990.6
- [2] 坂田康徳、大津政康：超音波スペクトロスコピーに基づいた部材のひびわれ深さ診断、セメント・コンクリート論文集, No. 44, pp. 282-287, 1991.1
- [3] 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
- [4] 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
- [5] 村瀬治比古他：パソコンによる計算力学 順・逆解析入門、森北出版(株), 1990.7