

論文 鉄筋腐食評価のための自然電位法の改良

山本利史*1 重石光弘*2 大津政康*3 一田謙治*4

要旨：鉄筋腐食の非破壊検査法である自然電位法では、その判定法に様々な要因の影響による不確定性が指摘されている。そこで、簡易境界要素法による逆解析法を考案し、測定電位の補正法について研究した。この過程で、空隙およびコンクリート抵抗の影響についても解析的に検討した。そして、実際に電食実験を行った供試体において実験、逆解析を行い、腐食状態と照らし合わせることで、補正法の妥当性を検討した。

キーワード：鉄筋腐食、自然電位法、BEM 解析、FEM 解析、電流量解析

1. はじめに

近年コンクリート構造物の早期劣化が報告され、その劣化現象として塩害、コンクリートの中性化、アルカリ骨材反応、凍害、化学的腐食などが問題とされている。その中でも塩害は、コンクリート構造物の外観から内部の鉄筋の状態を評価することは非常に困難で、構造物の表面にひび割れや、さびじろが見られるようになる程、腐食が進んだ状態になって判明するのがほとんどである。このため、従来メンテナンスフリーであると考えられていたコンクリート構造物ではあるが、実際には耐久性確保のための維持管理が必要となり、そのため鉄筋腐食を早期発見するための非破壊検査法による鉄筋腐食の評価法の確立が重要な課題となっている。非破壊検査法による鉄筋腐食の評価法には、現在のところ自然電位法と分極抵抗法とが主体となっている [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、鉄筋表面付近での電氣的な評価を行うことが考えられる。そこで自然電位法を用い、3次元境界要素法 (Boundary Element Method) を簡略化した逆解析法により、コンクリート表面での電位を鉄筋付近の値へと補正する手法の開発を試みた。この検討において、空隙とコンクリート抵抗による自然電位への影響についても数値解析により考察を加えた。

2. 実験概要

2. 1 供試体の作成

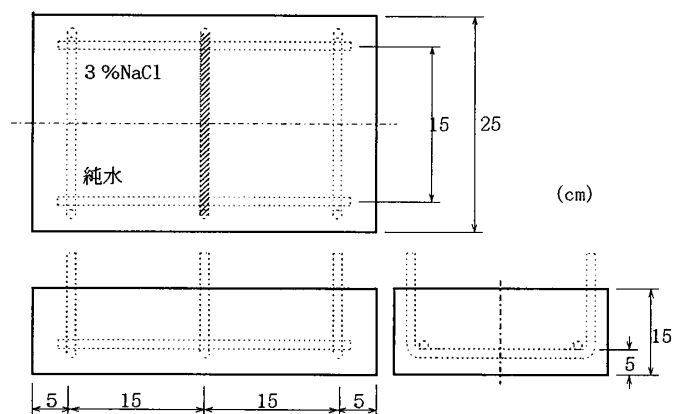
腐食供試体としては、供試体の半分を模擬海水 (3%食塩水) で打設し、残りの半分を純水で打設することにより模擬海水側に塩化物腐食を強制的に生じさせ、マクロセル腐食を促進させることにした。そして、鉄筋に直接電流を流す電食により供試体を作成した。電食実験に用いた供試体のコンクリートの示方配合を表-1に示す。作成した供試体は、10 cm×25 cm×40 cmの床版供試体で、練り混ぜにはパン型ミキサーを用い、練り混ぜ水には3%の食塩水と純水を半々に用

*1 熊本大学大学院工学研究科土木環境工学専攻 (正会員)

*2 熊本大学助教授、工学部環境システム工学科、工博 (正会員)

*3 熊本大学教授、工学部環境システム工学科、工博 (正会員)

*4 東亜建設工業 (株)



図－１ ＲＣ床版供試体図

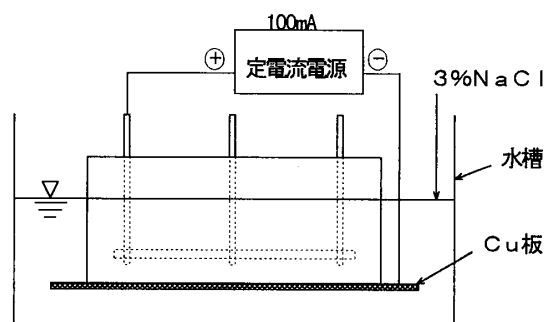
防ぐため、供試体のコンクリート上面と鉄筋露出部分にはエポキシ樹脂を塗布した。なお供試体の形状と配筋図を図－１に示す。

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)				A E 材 (c c)	スランプ (c m)		空気量 (%)	
			W	C	S	G		純水	NaCl	純水	NaCl
20	45	42	172	378	735	1027	150	7.0	7.6	4.8	3.6

２．２ 電食実験方法

図－２に電食実験装置を示す。水槽に厚さ 1mm の銅板を敷き、その上に供試体を設置し模擬海水（３％食塩水）を供試体上部近くまで入れ純水、食塩水と分けて打設した供試体の食塩水側の鉄筋に導線を接続した。電源には、鉄筋と銅板との電位差によって電流が減少するのを防ぐために定電流電源を用いた。電流の大きさは 100mA で、0～250 時間まで 50 時間毎に自然電位の測定のため一時停止する以外は電流を流しつづけた。



図－２ 電食実験概念図

３．自然電位の補正と電流量解析

３．１ 逆 BEM 解析

コンクリート部の自然電位 $u(x)$ は、ラプラス方程式を満足することから、境界要素法（BEM）により、

$$cu(x) = \int_S \left[G(x, y) \frac{\partial u}{\partial n}(y) - \frac{\partial G(x, y)}{\partial n} u(y) \right] dS \quad (1)$$

と表示される。境界上の電位 $u(y)$ と電流強さ $\frac{\partial u}{\partial n}(y)$ のみを考える場合には、式（１）の係数 c は 1/2 となり、境界値問題として解くことができる [3]。

自然電位法の補正にも式(1)は適用可能であるが、コンクリート表面すべてを境界要素としてモデル化する必要があり、実用的ではない。そこで仮想電荷法(CSM)による解放を提案したが[4]、境界の取り方に任意性が残されていた。そのため、ここでは式(1)を直接に簡略化することを試みた。自然電位の計測面 S_h のみを考え、そこでは電流は流出しないとして、

$$\frac{\partial u}{\partial n}(y) = 0 \text{ と置けるとすれば、内部}(c=1)\text{の電位}u(x)\text{については式(1)より、}$$

$$u(x) = \int_{S_h} -\frac{\partial G(x,y)}{\partial n} u(y) dS \quad (2)$$

と表されることになる。したがって計測面をメッシュに分解し、メッシュの中心点を測定点として式(2)に $u(y)$ を与え積分を実行すれば、鉄筋に接するコンクリート内部での電位 $u(x)$ が計算されることになる。これは、無限物体に境界面 S_h を設定した解に相当する。

3. 2 電流量解析

マクロセル腐食が形成されるとアノード領域とカソード領域の境界は自然電位分布の変曲点となることが予測され、この変曲点の電位が把握できれば腐食領域も判断できることが報告されている[5]。そこで、この変曲点の電位を求めるため、逆BEM解析により求めた鉄筋上の電位と、オームの法則から、

$$I_k = \int_0^l \frac{V_{kx}}{R_k} dx \quad (3)$$

を用いて電流量解析を行った。ここで、 l は鉄筋長(cm)、 I_k は任意の点 k に流れ込む総電流量(A/cm)、 V_{kx} は点 k と各 x 点との単位長さあたりの電位差(V/cm)、 R_k は点 k におけるコンクリートの比抵抗($k \Omega \cdot \text{cm}$)である。ここでは比抵抗 $R=10 k \Omega \cdot \text{cm}$ 一定として解析を行った。

4. 数値実験

4. 1 BEM解析

空隙の影響と逆BEM解析の有効性を検討するため、図-3のようなモデルのBEM解析を試みた。一般に空隙がある場合、自然電位の測定は困難で実施しないことが多いが、ここでは具体的に空隙により自然電位がどのような影響を及ぼすのか、またその結果よりここで提案する逆BEM解析で

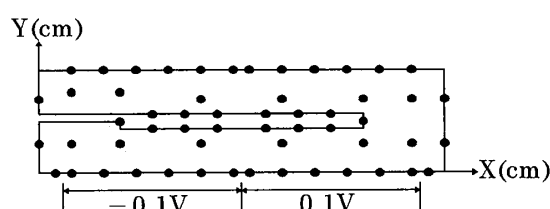


図-3 BEM解析モデル

その空隙の影響をどこまで軽減できるかを数値実験した。このモデルは25cm、7cmの、上面から5cmの深さに厚さ1cm幅15cmの空隙を想定したものである。また、空隙のないモデルも解析した。下部の鉄筋と接する(鉄筋上)のコンクリート境界にアノード反応、カソード反応を想定し、-0.1V、0.1Vの電圧を与えた。これを2次元のBEM解析により式(1)を解いて、コンクリート表面での電位を求めた。次に、この解析解から式(2)の逆BEM解析により鉄筋上の電位を求めた。図-4に解析結果を示す。ここで空隙を考えないモデルの場合には図のように、鉄筋上に設定した電位よりコンクリート表面上は少し大きな値をとることが明らかになった。そのコンクリート表面の電位を逆BEM解析により再び鉄筋上の電位に直すと、無限体を仮定しているために滑らかな連続関数分布となり、ピーク値で実際に鉄筋上にかけた電位にほぼ一致する

ことが分かった。次に、空隙のあるモデルでは、コンクリート表面の電位は、空隙の位置に関係なく、実際の鉄筋上の電位よりも非常に大きい値をとることが認められた。逆 BEM 解析でも、鉄筋上に想定した電位より若干大きくはなるが、コンクリート表面での電位だけで評価するよりもより実際に負荷した電位に近くなることが認められる。

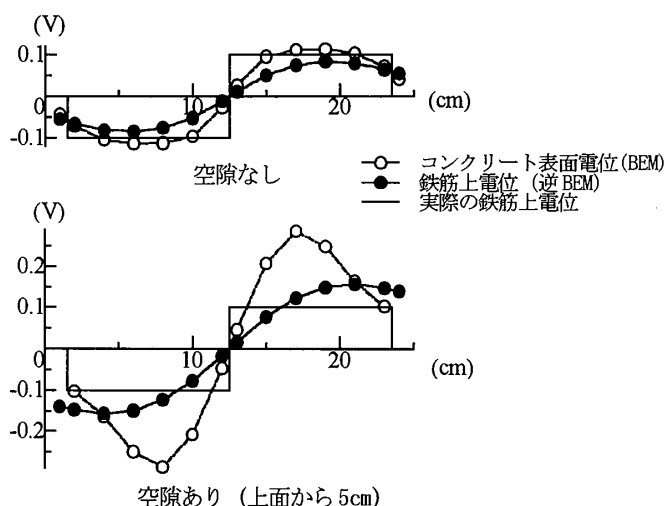


図-4 BEM 解析結果

4. 2 FEM 解析

次に、コンクリート抵抗の影響を検討するために、内部の抵抗の変化を考慮した FEM 解析を行った。なお BEM 解析でなく FEM 解析を用いたのは、様々な抵抗の影響を考えるに内部要素の状態を自由に変えられる FEM 解析の方が適しているからである。ここでは BEM 解析と同様に実験で用いた供試体のモデルを考え、鉄筋部にアノード部およびカソード部腐食のマクロセル電流密度 ($\pm 0.1\text{mA}$) を与えた。そして 2 種類の抵抗 (0.1 、 $0.05\text{k}\Omega$) を様々なパターンで与え、局部的に抵抗の異なるコンクリートについて鉄筋上の電位とコンクリート表面での電位を推定した。さらに、FEM 解析により求められたコンクリート表面の電位を逆 BEM 解析により鉄筋上の電位

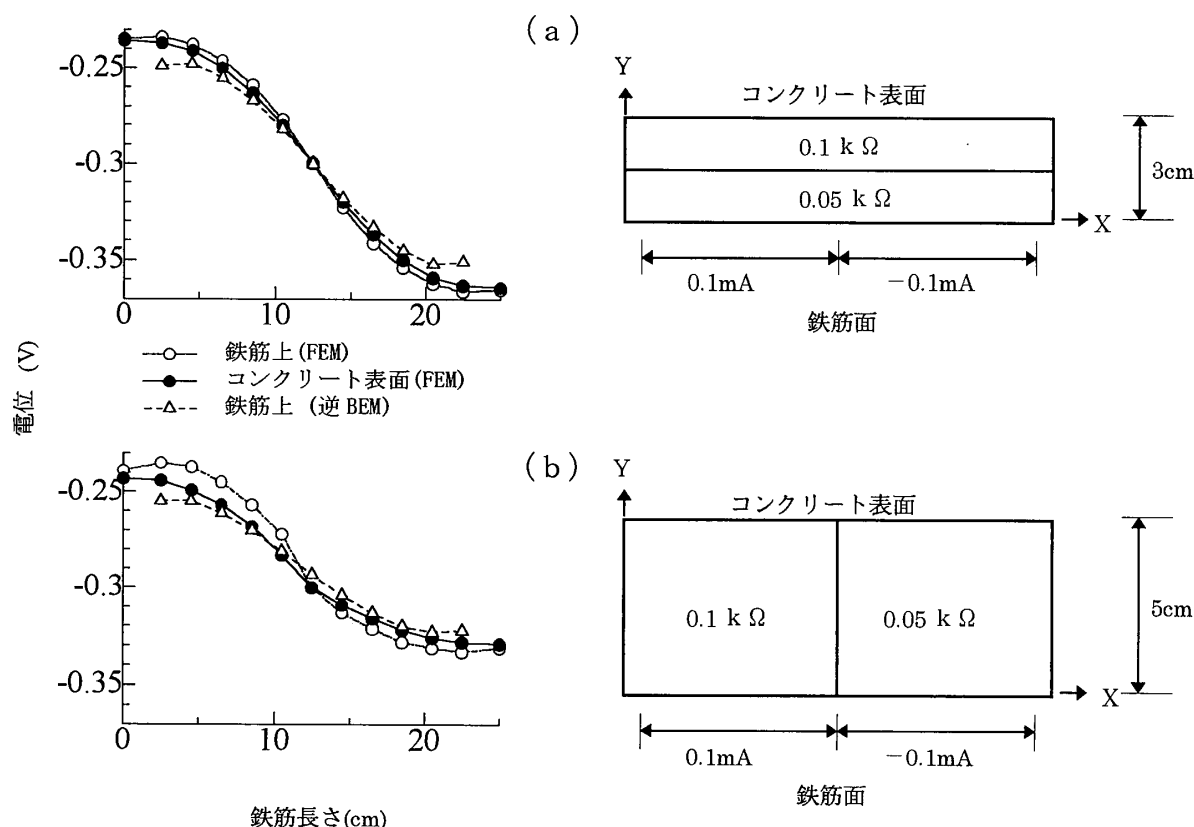


図-5 FEM 解析結果

へと補正した。解析結果の例として、特徴的な結果を図-5に示す。

図-5(a)で、FEM解析による鉄筋上の電位と逆BEM解析による鉄筋上の電位とを比較してみると、2つの電位差は小さく、逆BEM解析で求められる電位値は、厚さ方向に違う抵抗の影響は小さいことがわかる。一方、図-5(b)のように表面上の抵抗に差異があれば、逆BEM解析の補正値は抵抗の大きな側でかなりの差異を生じ、これよりコンクリート表面を含めて場所的に抵抗が異なる場合においては逆BEM解析による鉄筋上の電位は多少の影響を受けることが推測される。

5. 実験結果及び考察

以上の数値実験により、空隙が無く、抵抗の差異も大きくない場合には、逆BEM解析の有効性が認められたので、図-1に示すRC供試体の電食実験中に自然電位をコンクリート表面で測定した。なお実験ではコンクリート抵抗も測定したが、図-5(b)のケースのような大きな差異は塩水使用の有無では認められなかった。そして250時間の電食実験後に供試体を解体し鉄筋をはつりだした。図-6に、図-1中に斜線で示す鉄筋の結果を例として示す。

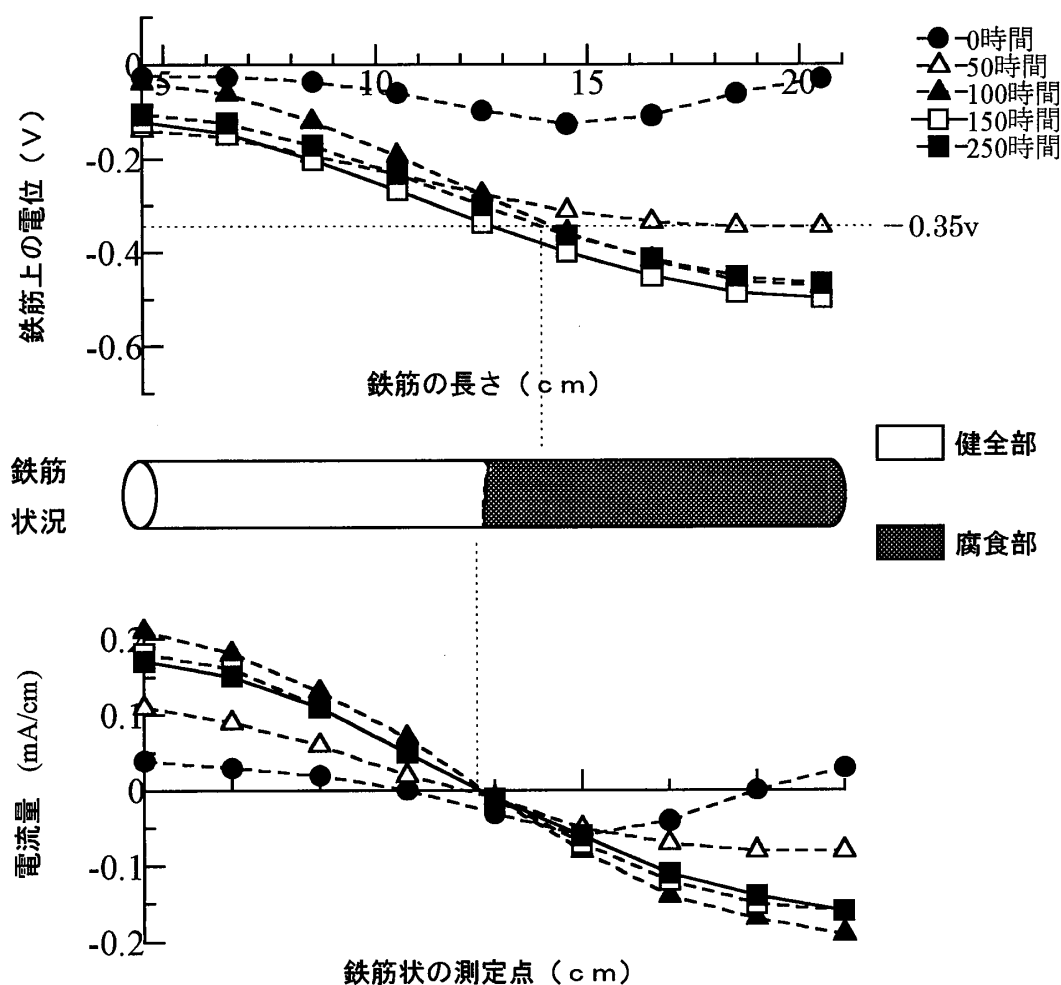


図-6 実験結果

コンクリート表面で測定した自然電位を3次元の逆BEM解析により鉄筋上の電位を求めた結果を上図に示す。逆BEM解析により求めた鉄筋上の電位を、供試体解体後実際の腐食状況(図

の中段)と比較したところ、図のように ASTM 基準に対応する -0.35V 以上の付近で腐食していない鉄筋部分がみられた。この結果は、コンクリート表面の自然電位だけでは判断できない、各々の鉄筋の腐食状態を、逆解析により定量的に把握することができることを示している。同じ供試体において先の逆 BEM 解析により求めた鉄筋上の電位を用いて電流量解析を行った結果、図の下段のように鉄筋の左側から 12cm のところからアノード部がみられ、ここより鉄筋の腐食が起きているのではないかと推測された。これは、明らかに実際の鉄筋と非常によく対応している。このように、腐食領域を定量的に特定するのに電流量解析は有効であることが認められた。

6. まとめ

本研究では、鉄筋コンクリート構造物を破壊せずに内部の腐食状況を診断することを最大の目的として、非破壊検査法の中で最も多用されている自然電位法についての補正法を研究した。そして、このことから次のようなことを結論付けた。

- (1) コンクリート表面で測定した自然電位を、そのまま ASTM 規格に当てはめて腐食状態を判断するより、逆 BEM 解析により鉄筋上の電位に直すことで鉄筋の腐食状態の範囲などの判断の精度を上げることができる。
- (2) 自然電位法は、コンクリートの内部状況に影響を受けるといわれているが、鉄筋とコンクリート表面の間に空隙があると、コンクリート表面では実際の鉄筋付近の電位よりも負に大きい電位値となる。ただし、逆 BEM 解析により鉄筋付近の電位に直すと空隙の位置に関係なくより実際の鉄筋付近の電位値に近い値になる。
- (3) コンクリート表面を含めて場所的に抵抗が異なる場合においては、逆 BEM 解析による鉄筋上の電位は多少の影響を受ける。しかし、空隙が無く抵抗の差異が大きい場合においては有効である。
- (4) さらに個々の鉄筋での腐食領域を特定するには、逆 BEM 解析により鉄筋上の電位に直した電位値を用いての電流量解析は非常に有効である。

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 Defferent 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、コンクリート学会年次論文報告集、Vol.12、No.1、pp.539-544,1990.6
- [4] 山村浩紀、大津政康：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、コンクリート学会年次論文報告集、Vol.15、No.1、pp.739-744,1992.6
- [5] 小山理恵、矢島哲司、魚本健人、星野富夫：自然電位を用いた鉄筋腐食状態の推定手法に関する基礎的研究、土木学会論文集 No.550 /V-33、13-22、1996.6