

論文

[1092] 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

正会員 ○乙丸正彦(熊本県)
 正会員 大津政康(熊本大学工学部)
 正会員 村上祐治(間組技術研究所)
 正会員 山下英俊(間組技術研究所)

1. はじめに

コンクリート構造物は、古くからメンテナンスフリーと言われ、永久構造物と考えられていたが、最近、NHKの報道以来、コンクリート構造物の早期劣化現象が報告され、社会問題となっている。中でもコンクリートの中性化は、鉄筋腐食の始まりの現象であり、塩害、中性化を含めると、全体の45%程度になり、劣化現象の大半を占めている¹⁾。鉄筋コンクリート部材の鉄筋腐食機構については、既に多くの知見が得られているが、維持管理面からコンクリート構造物の腐食の早期検出法の確立とその際の寿命予測並びに適切な補修、補強法の決定が重要になっている。このような現状を踏まえて、本研究では、鉄筋コンクリート部材内の鉄筋腐食について、非破壊検査である自然電位法を用いた評価と、さらにコンクリート供試体モデルの3次元BEM解析による比較検討を行なった。

コンクリート中の鋼材腐食²⁾は、コンクリート内部から構造物の劣化を進行させるため、その進行がコンクリート表面に現われた時点では、すでにその構造物の耐久性はかなり低下していると考えてよい。従って、鋼材腐食対策を、劣化現象が目視観察される以前に講ずるためには、コンクリート中の鋼材腐食劣化の早期検出の非破壊検査手法の確立が不可欠となる。自然電位法は、このような鋼材腐食の非破壊検査手法として、電気化学的手法の中でもっとも検討が進められているものである³⁾。自然電位とは、金属がその存在する環境で維持している電位のことであり、腐食のアノード反応とカソード反応による電位の分極から定まる。この分極の過程は環境や腐食の状況に影響を受け、時間的にも変化するため、これらの変化にともなって自然電位も変化する。自然電位法とは、基本的にはこのような電位の変化から鋼材の腐食を判定する方法である。

2. 実験概要

本実験においては、まず電食実験によって、電流の強さ、或は電流を流した時間と鉄筋の腐食量、そしてコンクリートのひび割れが生じるまでの時間との関係について調べてみた。さらにそれらのデータを整理した上で、非破壊検査法として自然電位法によって、電食実験の前後で供試体の自然電位を測定し、その電位差と腐食量との関係を調べてみた。

2.1 供試体作製

骨材の物理的性質を表-1に示す。

表-1 骨材の物理的性質

種別	比重	各ふるいに残る重量百分率 (%)									F. M.
		20mm	15mm	10mm	5mm	2.5mm	1.2mm	0.6mm	0.3mm	0.15mm	
細骨材	2.59	0	0	0	0	4	16	36	73	95	2.24
粗骨材	2.97	1	14	86	100	100	100	100	100	100	6.87

表-2 コンクリートの配合

打設日	骨材全寸法(mm)	水セメント比(%)	細骨率(%)	単位置量 (kg/m ³)				A E 剤 (g/m ³)	練り混ぜ水 NaCl 濃度 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)
				C	W	S	G				
	20	54	43	298	161	798	1052	200	3%	8	6
10/17	20	54	43	298	161	798	1052	200	3%	6.0 3.3 2.2	6.3

使用材料は、普通ポルトランドセメント、細、粗骨材、AE剤およびSD35のD10の鉄筋である。供試体は、表-2に示すようなコンクリート配合で作製した。パン型ミキサーで練り混ぜ、10cm×10cm×40cmの供試体（以下、RC40と呼ぶ）、25cm×25cm×10cmの供試体（以下、RC25と呼ぶ）、強度管理用供試体（シリンダー）φ10cm×20cmをそれぞれ作製した。練り混ぜ水は、3%の食塩水(S/S+W=0.03)を用いて練り混ぜた。RC40とRC25供試体の概要を図-1に示す。養生は供試体作製後1週間は、標準水中養生を実施し、その後3週間は気中養生を行なった。供試体の上面は、コンクリートの部分および鉄筋露出部分は、打設して1日後にエポキシ系パテ材で皮膜を設けた。これは、外部環境による鉄筋腐食の影響をなくすためである。硬化コンクリートの圧縮強度、引張強度は、表-3に示す。

2. 2 電食実験方法⁴⁾

まず水槽の中に薄い銅板を敷き、3%食塩水を入れた。そしてRC40を一度に3本ずつ、RC25は2本ずつ、それぞれ片方の鉄筋に導線をつなぎ、50mAの電流で100時間電食実験を行なった。

2. 3 非破壊試験器による鉄筋の腐食診断方法

電食実験の後、自然電位法によるコンクリート供試体の自然電位測定を行なった。これには、ASTM C876-80 適合の硫酸銅電極を用いた測定器を使用した。RC40においては、供試体表面上の点を2.5cmおきに11点、それぞれ上下左右の4面計44点において各点における自然電位を測定した。RC25においては、上下両面における5cm間隔の格子点16点、計32点の自然電位を測定した。測定に於いては、供試体表面を石鹼水で予め濡らしておき、表面が乾かないようにして行なった。

3. BEM解析

ここでは自然電位を3次元ポテンシャル問題として、以下のLaplace方程式を解く。

表-3 硬化コンクリートの強度 (単位: kg/cm²)

打設日		No. 1	No. 2	No. 3	平均
10/17	圧縮強度	345.7	355.2	345.1	348.7
	引張強度	28.7	32.6	31.0	30.8

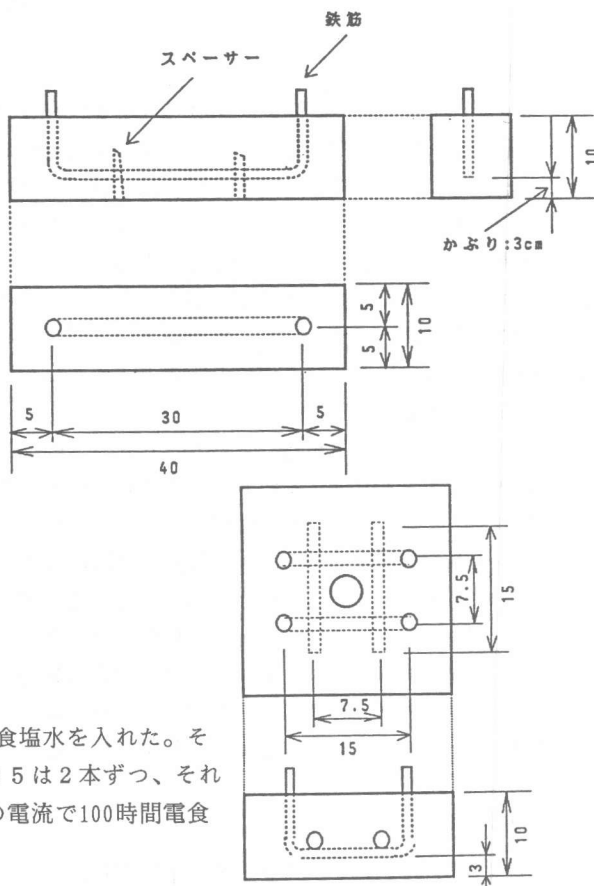


図-1 供試体図

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \nabla^2 u = 0 \quad (3.1)$$

この方程式に対し、以下の境界条件が与えられるものとする。すなわち、領域Vの境界S上の部分境界S₁およびS₂上で、

$$\text{電位の計測点 : } u = \bar{u} \quad (S_1 \text{ 上で}) \quad (3.2)$$

$$\text{その他の境界 : } q \equiv - \frac{\partial u}{\partial n} = 0 \quad (S_2 \text{ 上で}) \quad (3.3)$$

が与えられる。ここで、nは境界上の単位外向き法線であり、qはn方向への電流を意味する。この問題を基本解を導入することにより境界積分方程式に変換し、さらに離散化解析によって代数方程式を得、それを解くことによって内部のポテンシャルを求めることができる。これが、逆問題としてコンクリート表面の電位分布から鉄筋上の電位を決定することに相当する。もちろん、鉄筋上の電位を仮定してコンクリート表面の電位を求めることも可能である。

図-2、図-3にそれぞれ鉄筋コンクリート供試体のモデル図を示す。図-2は10×10×40cmの単鉄筋供試体モデルで、内部に直径10mmの鉄筋に対応する円柱状の穴があいている。図-3は25×25×10cmの床版モデルで、内部には4本の鉄筋が設置されている。これらの表面を図に示すように要素分割し、境界条件を与えて解析した。

4. 結果と考察

4.1 RC単鉄筋モデル

電食実験の前後で自然電位がどのように変化するかを調べてみた。表-4に、RC40供試体における電食実験前後の自然電位測定結果を示す。これより、電食実験後の自然電位の方がかなり低下していることがわかる。その傾向は上面を除けば、ほぼ一様に低下していることが認められる。この測定では供試体表面上の自然電位は外部の環境条件によって、

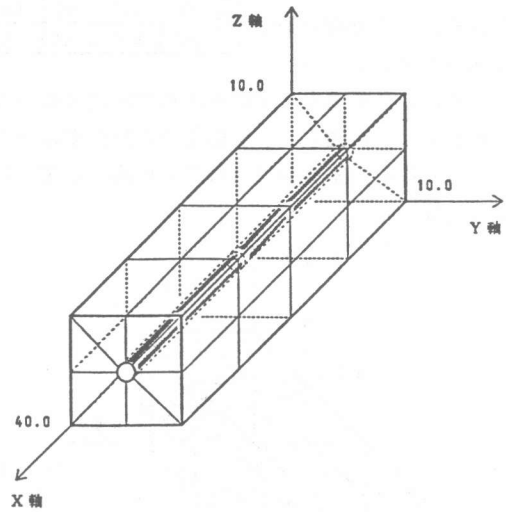


図-2 RC40モデル

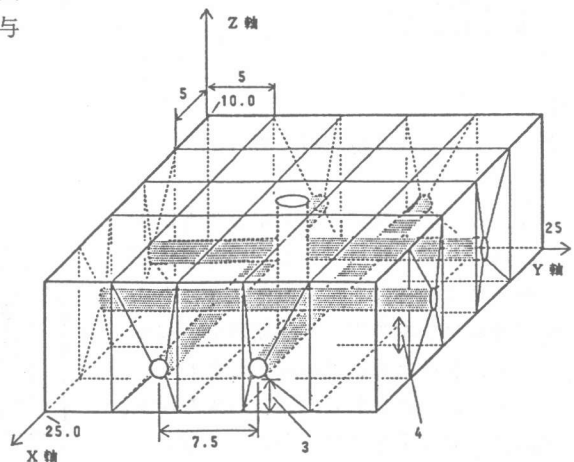


図-3 RC25モデル

値が非常に変わり易いことも認められた。

図-4は、実際のRC40供試体をモデルとし、自然電位測定を行った点に境界条件（電位ポテンシャル： U ）を与えて鉄筋表面上の電位を解析するという逆解析のモデルである。ここで境界条件の電位ポテンシャルは、

表-4 RC40供試体の自然電位測定結果（単位：-V）

No.	測定点 (cm)											
	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0	22.5	25.0	27.5	
電食前	①	.303	.297	.290	.281	.270	.268	.267	.265	.275	.302	.303
	②	.240	.239	.241	.239	.238	.236	.237	.241	.241	.240	.240
	③	.248	.249	.249	.249	.248	.247	.250	.251	.248	.246	.251
	④	.339	.335	.337	.339	.343	.341	.343	.348	.349	.347	.347
電食後	①	.530	.623	.635	.636	.637	.636	.630	.629	.636	.625	.556
	②	.602	.588	.582	.582	.585	.583	.587	.586	.583	.584	.585
	③	.613	.612	.610	.609	.608	.608	.608	.607	.610	.613	.615
	④	.609	.611	.610	.608	.605	.603	.608	.609	.609	.611	.612

表-4における電食実験前後の自然電位の差を与えた。図-5には、そのRC40供試体の解析結果を示す。この図より、鉄筋上の電位分布は全て-0.3V以下であり、軸方向でかなり変動することがわかる。X座標の15cm付近での腐食の著しいことがうかがえるが、表-4の電位分布では明かではない。

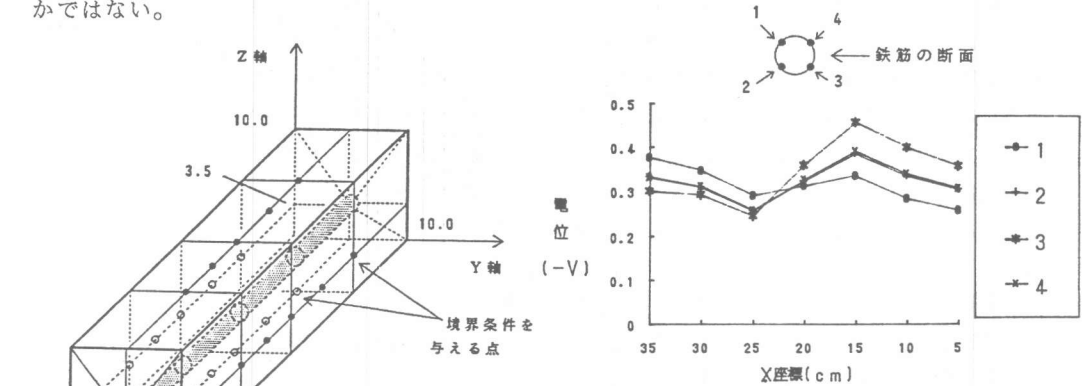


図-5 RC40逆解析結果

図-4 RC40逆解析モデル

4.2 床版モデルBEM順解析結果
 図-6はRC25供試体で、内部の鉄筋表面上に境界条件を与えたモデルである。境界条件は2本の平行な鉄筋表面上に $U = -1.0$ を与え、他は $U = 0$ とした。そして、図-7にこれらの解析結果を示す。供試体上面と下面では、かぶりの違いにより下面の方が大きな値を示していることがわかる。この順解析においては、こ

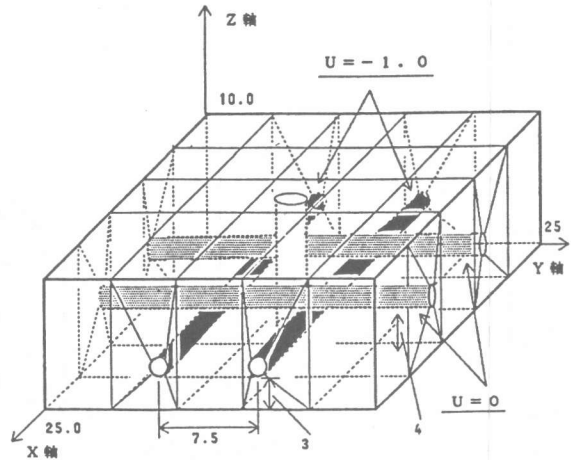


図-6 RC25順解析モデル

のように定性的な結果は得られたが、場所によって非常にばらつきがみられる。これは鉄筋配置による要素分割の影響をさらに検討する必要があると考えられる。

4. 3 電食実験と非破壊試験器による鉄筋の腐食診断結果

表-5は、RC25供試体において、電食実験前後に自然電位を測定した結果である。これより、電食後の自然電位は大幅に降下していることがわかる。また、その傾向はやはり一様分布である。

図-8は、RC25供試体をモデルにし、供試体表面上に境界条件を与えて内部の鉄筋上のポテンシャルを解析するという、逆解析モデルである。境界条件を与える

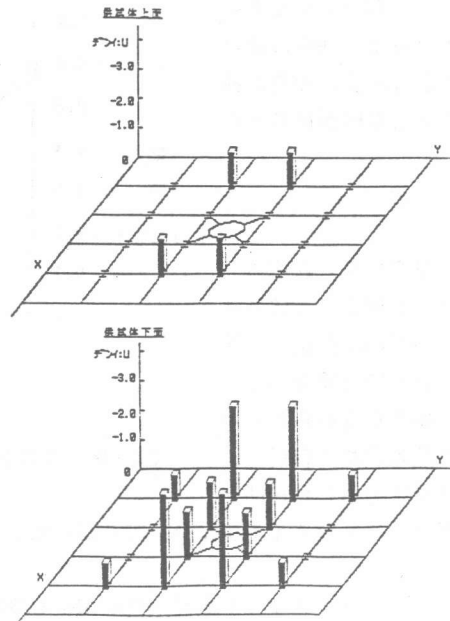


図-7 RC25 順解析結果

表-5 RC25 供試体自然電位測定結果

単位 (V)

		表				裏			
電食前	食前	-0.277	-0.280	-0.282	-0.295	-0.215	-0.219	-0.208	-0.211
	食後	-0.278	-0.210	-0.218	-0.298	-0.216	-0.211	-0.206	-0.220
	食前	-0.275	-0.226	-0.235	-0.298	-0.212	-0.212	-0.215	-0.229
	食後	-0.290	-0.276	-0.297	-0.296	-0.215	-0.218	-0.213	-0.222
電食後	食前	-0.592	-0.600	-0.593	-0.631	-0.548	-0.563	-0.538	-0.528
	食後	-0.628	-0.574	-0.583	-0.640	-0.545	-0.554	-0.546	-0.544
	食前	-0.612	-0.596	-0.598	-0.637	-0.546	-0.543	-0.546	-0.519
	食後	-0.591	-0.591	-0.604	-0.625	-0.545	-0.543	-0.570	-0.532
電食前後電位差	食前	-0.315	-0.320	-0.311	-0.336	-0.333	-0.344	-0.330	-0.317
	食後	-0.350	-0.364	-0.365	-0.342	-0.329	-0.343	-0.340	-0.324
	食前	-0.337	-0.370	-0.363	-0.339	-0.334	-0.331	-0.331	-0.290
	食後	-0.301	-0.315	-0.307	-0.329	-0.330	-0.325	-0.357	-0.310

点は、図のように供試体の上下両面においてプロットした点である。境界条件は、表-5より求まるRC25供試体の電食実験前後の自然電位差である。RC床版の場合は、単鉄筋と異なり複数の鉄筋があるため、それらの鉄筋がどのように腐食するか、あるいはそれによって供試体表面上の電位

どのように変化するかを検討する必要がある。解析結果によれば、4本の鉄筋は全て同じような傾向がみられた。そこで、 $Y=7.5, Z=3.5$ の鉄筋上の電位分布を図-9に示す。図-5と比較して電位分布が異なり、中央部の鉄筋の腐食が早く進んで

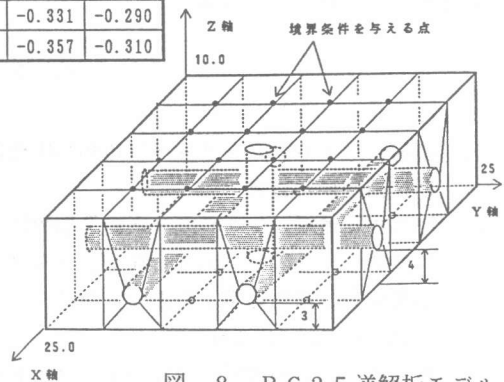


図-8 RC25 逆解析モデル

いることがうかがえる。
 このように、鉄筋の組合せにより腐食の傾向が異なることが明かになった。

5. 結論

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非破壊検査法として、研究が進められている自然電位法に着目し、BEMを適用した鉄筋上の

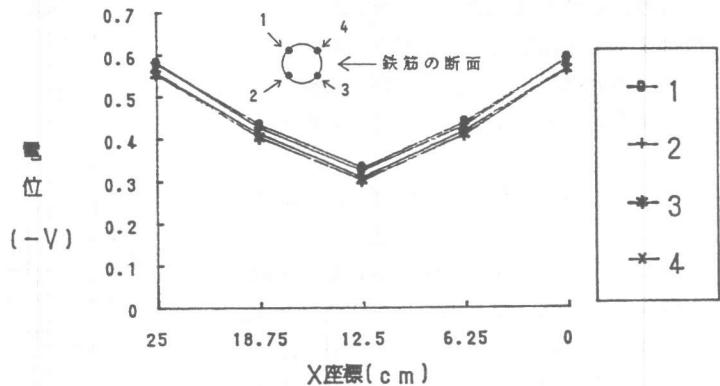


図-9 RC 25 逆解析結果 (鉄筋表面上の電位 Y=7.5 Z=3.5)

の電位分布を求める手法について考察した。このことから、次のようなことが明らかになった。

- (1) コンクリート表面の自然電位を測定し、それを基にBEMで解析することによって内部の腐食状況を推定することが可能となった。
- (2) RC単鉄筋供試体において、BEM逆解析により得られた鉄筋の軸方向の腐食状況は軸方向中心に対して逆対称なマクロセル反応を暗示するような分布となった。
- (3) 自然電位法による測定は、かなりの誤差を生じ、外部環境や測定方法などによって値が変わってくる。したがって、鉄筋の腐食診断においては腐食前後の電位差などの相対的な基準で判断した方が妥当であると考えられる。
- (4) RC床版供試体における鉄筋の腐食は、全ての鉄筋にわたって均一に進行することが認められた。そして、鉄筋上の電位分布は単鉄筋モデルとかなり異なり、腐食の進行に配筋の影響のあることが認められた。

さらに今後は、コンクリート中の鉄筋の位置、あるいは深さ等と自然電位との関係を検討し、非破壊検査法としての自然電位法を確立させるとともに、他の非破壊検査法との比較を行ってみたい必要があると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 塩害に対するコンクリート構造物の劣化診断法に関する研究、(株)間組技術研究所第59期技術開発報告書
- 2) 岸谷孝一他編、コンクリート構造物の耐久性シリーズ 塩害(1)、技報堂出版株式会社
- 3) コンクリート工学 Vol.27 No.3、日本コンクリート工学協会
- 4) 小林和夫、宮川豊章、かぶりコンクリートが鉄筋腐食に与える影響、セメント技術年報36巻, 1982.12. pp.497-501
- 5) 結城良治、木須博行、境界要素法による弾性解析、培風館、1987、pp.3-9