論文

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 [1092] に関する研究

正会員	〇乙丸正彦	(熊 本	県)
正会員	大津政康	(熊本大学	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、古くからメイ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	比 各ふるいに残る重量百分率(%)									
	75 1]	Í	20 m	15 800	10 🚥	5 mm	2.5	1.2 mm	0.6	0.3	0.15	r.m.
細情	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 貫材 水セ 細量 戦 鼻公 くど 材率				単位量(kg/m ³)				A E	観と	スラ	空気
	(mm)	(%)	(%)	С	W	S	G	(g/ 面 ³)	水 以201 濃度	ップ (cm)	■ (%)
	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S D35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、RC2 5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+₩=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。

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



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。

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

2.3 非破壊試験器による鉄筋の腐食診断方法

図-1 供試体図

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、供試体表面を石鹸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。

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

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、

電位の計測点 : $u = \overline{u}$ (S₁上で) (3.2) その他の境界 : $q \equiv -\frac{\partial u}{\partial n} = 0$ (S₂上で) (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 に変化するのかを調べてみた。表-4に、 RC40供試体においての電食実験前後 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降下 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RC4 0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(:=)										
		2.5	5.0	1.5	.10.0	12.5	15.0	17.5	20.0	22.5	25.0	27.5
1	θ	. 303	. 297	. 290	. 281	. 270	. 268	. 267	. 265	. 275	. 302	. 303
	⊛	. 240	. 239	. 241	. 239	. 238	. 236	. 237	. 241	. 241	. 240	. 240
反前	Ð	. 248	. 249	. 249	. 249	. 248	. 247	. 250	. 251	. 248	. 246	. 251
נימ	ூ	. 339	. 335	. 337	. 339	. 343	. \$41	. 343	. 348	. 349	. 347	. 347
¢ 44	Ð	. 530	. 623	. 635	. 636	. 637	. 636	. 630	. 629	. 636	. 625	. 556
	∕₽	. 602	. 588	. 582	. 582	. 585	. 583	. 587	. 586	. 583	. 584	. 585
经	⋬	. 613	. 612	. 610	. 609	. 608	. 608	. 608	. 607	. 610	. 613	. 615
<i></i>	⊕	. 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-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

表-5 RC25供試体自然電位測定結果

	T	Į				Į	¥	
	-0.277	-0.280	-0.282	-0. 295	-0.215	-0.219	-0.208	-0.211
電金	-0.278	-0.210	-0.218	-0.298	-0.216	-0.211	-0.206	-0.220
実験	-0.275	-0. 226	-0.235	-0.298	-0.212	-0.212	-0.215	-0.229
	-0.290	-0.276	-0.297	-0.296	-0.215	-0.218	-0.213	-0.222
	-0.592	-0.600	-0.593	-0.631	-0.548	-0.563	-0.538	-0.528
電金	-0.628	-0.574	-0.583	-0.640	-0.545	-0.554	-0.546	-0.544
実験	-0.612	-0.596	-0.598	-0.637	-0.546	-0.543	-0.546	-0.519
	-0.591	-0.591	-0.604	-0.625	-0.545	-0.543	-0.570	-0.532
	-0.315	-0.320	-0.311	-0.336	-0.333	-0.344	-0.330	-0.317
重食	-0.350	-0.364	-0.365	-0.342	-0.329	-0.343	-0.340	-0.324
前後の電	-0.337	-0.370	-0.363	-0.339	-0.334	-0.331	-0.331	-0.290
位差	-0.301	-0.315	-0.307	-0.329	-0.330	-0.325	-0.357	-0.310



図-7 RC25順解析結果

単位(V)

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 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



図-9 RC25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 る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