

論文

[1110] 塩害を受けた RC 構造物の腐食評価法について

正会員○大城 武 (琉球大学建設工学科)

正会員 齊藤 仁 (小野田開発研究所)

近藤忠生 (ナカボーテック)

1. はじめに

本研究は亜熱帯海洋性気候下の沖縄県で、海岸に隣接して設置したRC暴露構造物を対象とし、その塩害による劣化過程の把握と、補修工法の開発を目的としている。塩害をうけたRC構造物の鉄筋腐食のモニタリング法としては、簡易に腐食の発生を評価するASTM C-876の自然電位測定法が広く用いられている。しかし、この手法は環境条件に支配され、正確な評価が常に得られるものではない。ここでは非破壊試験として、電気化学的特性値である自然電位、分極抵抗及びコンクリート抵抗の3要素を測定し、これらの値から鉄筋腐食評価法の開発を行うことを目的としている[1][2]。本報文は、促進試験供試体及び実物暴露構造物について測定を行い、そのデータの解析及び考察を記述している。

2. 試験概要

2.1 促進試験

本試験ではRC供試体を製作し、塩水噴霧・乾燥繰り返しの促進試験を行っている。供試体は実物暴露構造物のコンクリートと同一の調合で製作している[3]。W/Cは63%、単位セメント量は295kg/m³、スランプは18cmのコンクリートを用いている。コンクリートは2種類とし、塩化物量(Cl⁻量)6kg/m³を初期混入したものを有塩と称し、無塩のコンクリートと区別している。供試体の寸法は15cm×15cm×60cmで、かぶりは30mmを確保し、内部には異形及び丸鋼(φ-13mm)の鉄筋を埋め込んでいる。

塩水噴霧・乾燥繰り返し促進試験の1サイクルは、温度55℃の塩水(NaCl 3%)を48時間噴霧し、同温度で24時間乾燥している。所定のサイクルの後に分極抵抗(R_p)、コンクリート抵抗(R_s)及び自然電位(E_{corr})を測定している[1]。

また、供試体からコアを採取して可溶性塩分量を測定している。さらに、腐食面積の測定は、供試体を解体し鉄筋を取り出し、腐食部分をマイラー紙にトレースし、その腐食面積をプラリメータで測定して、全鉄筋面積に対する腐食面積率を算出している。

2.2 実物暴露試験

沖縄県国頭村辺土名の海岸沿いに隣接し、図-1に示すRC暴露構造物を平成元年11月に建設している[3]。柱1~6, 9には6kg/m³、柱7, 8, 10には0.6kg/m³の塩化物量(Cl⁻量)を

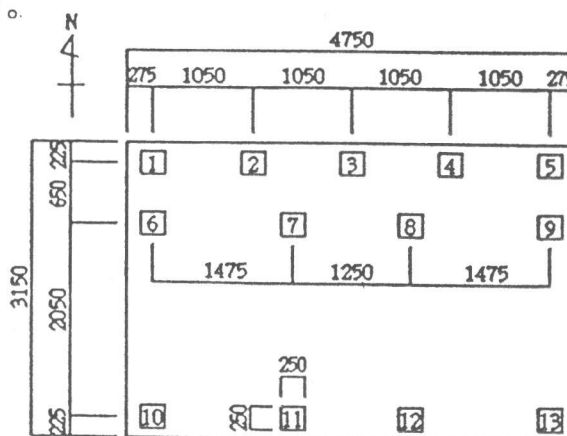


図-1 構造物の概要と柱番号

初期混入し、また、柱12及び13には防錆剤をそれぞれ3ℓ/㎡及び20ℓ/㎡添加している。

本報文は、平成4年1月に測定した結果をまとめたもので、暴露約3年間の試験結果である。測定にはコンクリート表面に28mm径のセンサー（ナカポーテック製作）を固定し、コロージョンモニター（東方技研製作）を用いている。測定時間短縮のため、高周波として1.7kHz、低周波として0.1Hzを用いている。自然電位の測定には飽和カロメル照合電極（SCE）を用い、また、分極抵抗及びコンクリート抵抗の測定値は単位面積当りに換算をしている[1]。

3. 試験結果及び考察

3.1 促進試験

(1) 塩分量分布

無塩及び有塩供試体から所定のサイクルの後にコアを採取し、可溶性塩分量を測定している。ここでは無塩供試体の結果のみを図-2に示している。

無塩供試体には、外部からの塩分浸透が現われ、サイクル増に伴い内部塩分量が増加している。表層部（0～10mm）での塩分増加は初期には急激であるが、16サイクル以降では0.7%の値に収束し、飽和状態を示している。この塩分量に達すると内部拡散が次第に増えている。

有塩供試体については、初期混入塩分量が平均値で0.38%として現われ、サイクル増に伴い外部からの浸透量が加算され、塩分量は増加している。表層部においては0.75～0.8%に収束し、無塩供試体と同様に飽和状態に達している。

(2) 電気化学的特性値

電気化学的特性値（自然電位、分極抵抗、コンクリート抵抗）とサイクルの関係を、23本の測定供試体について考察し、共通する傾向を記述している。また代表的な供試体を図示している。

自然電位の変化を図-3に示している。無塩供試体（A9）の初期値は-100mVと貴な値であるが、初期のサイクルで卑に移行し、-500～-550mVに分布している。この様に初期で卑に移行する原因は、図-2に示すように、浸透塩分量が初期のサイクルで多量に存在し、また、十分な湿潤状態で測定したことによると考えられる。有塩供試体（D6）の初期値は-300mVで、サイクルの増加に伴って-500～-600mVと卑に移行している。この様に、初期の段階で卑に移行し、その状態を維持していることは、ASTM C-876の評価基準の適用を難しくしている。

分極抵抗とサイクルの関係を無塩供試体（A1, A9）及び有塩供試体（D6）について図-4に示している。無塩供試体には、腐食速度の遅い状況に対応した分極抵抗の高い領域（15～22KΩ・cm²）が最初に現われている。この領域は、供試体で差異があり、A9供試体は45サイクル、A1供試体は63サイクルに達している。この領域の後に分極抵抗は急激に減少し、その後再び一定化する領域に入る。この領域での分極抵抗は、A9供試体で2.5～5KΩ・cm²と低い値となっている。A1供試体は9KΩ・cm²前後とまだ減少していないが、サイクル増に伴って、A9供試体とほぼ同じ値に収束するものと考えられる。

有塩供試体（D6）は、初期値が5KΩ・cm²前後で、サイ

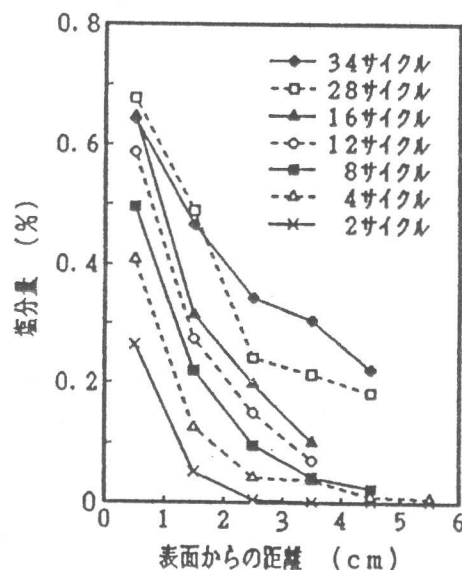


図-2 塩分量分布（無塩供試体）

クル増に伴って $2.5\text{K}\Omega\cdot\text{cm}$ 前後に減少しているが、その変化量は少ない。このことは、高濃度の初期混入塩分が存在するため、初期の時点から腐食速度が大きいことを意味している。

コンクリート抵抗には有塩、無塩の差は現われていない。初期では高い値を示しているが、サイクル増に伴ってほぼ一定となり、 $0.75\sim 1.50\text{K}\Omega\cdot\text{cm}$ の範囲に分布している。この様に低い抵抗値を示す原因は、十分な湿潤状態下での高含水率が影響しているものと思われる。

鉄筋の腐食面積率と分極抵抗の関係を図-5に示している。腐食発生が多い有塩供試体のデータが主であるが、無塩供試体も含まれている。

有塩供試体中の異形鉄筋の分極抵抗は $9\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 以下に分布し、その抵抗値に対応し腐食面積は大きくなっている。しかし、同一の分極抵抗値に対して腐食面積率は大きな幅を示している。このことは、分極抵抗が腐食速度に関連する特性値であり、腐食面積を考える際には分極抵抗値に時間の要素を加えて考慮する必要性を示唆している。しかし、腐食面積率に変動幅を考慮すると一定の相関が現われ、定量的な腐食評価が可能となる[2]。

3.2 実物暴露試験

(1) 塩分量分布

柱コンクリート中での塩分量分布を図-6に示している。柱4, 11, 13については可溶性塩分量を、柱6, 7は全塩分量を示している。

柱4は海岸に最も近接した位置にあり、海水飛沫を受けている。内部での初期混入塩分量をベースとし、表層部にむけて浸透塩分量が加算され増加している。海側面が陸側面に比べ浸透塩分量が多くなっている。表層部では1.0%に達し、内部では初期混入量の0.38%を示している。

柱6は柱4と同様に $6\text{kg}/\text{m}^3$ (Cl^- 量)の初期混入塩分量を有している。図示の値は全塩分量で、

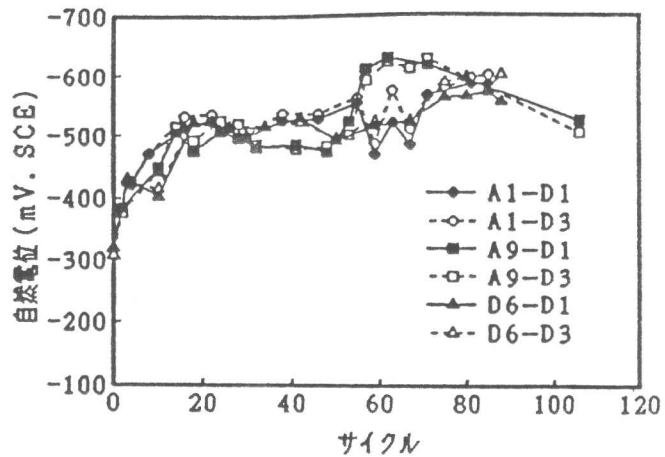


図-3 自然電位とサイクルの関係

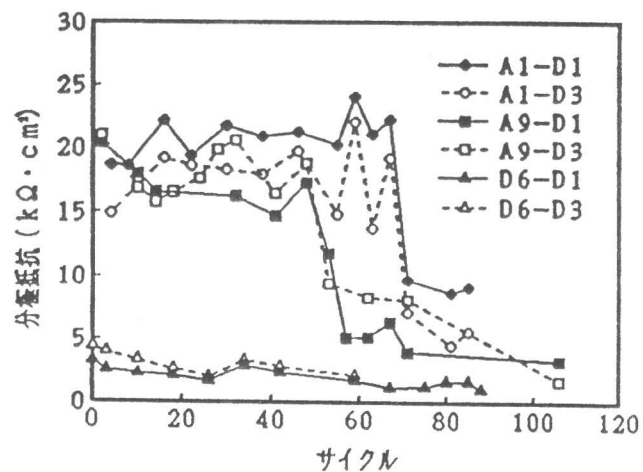


図-4 分極抵抗とサイクルの関係

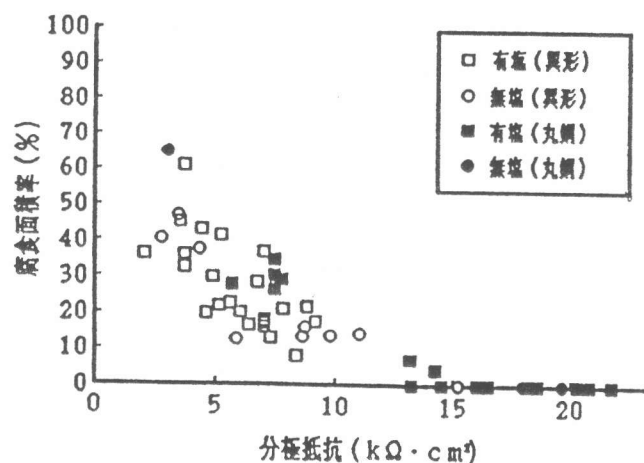


図-5 腐食面積率と分極抵抗の関係

内部では0.4%の初期混入塩分量が検出されている。柱4と柱6の内部での塩分量の差は、複塩として固定化された量を示す。柱4に比べ海水飛沫も少ないため、表面近くでは柱4の可溶性塩分量よりも少なくなっている。

柱7は全塩分量を示している。この柱には初期塩分量 0.6kg/m^3 (Cl^- 量)が混入されており、内部ではこの混入塩分量が検出され

ている。塩分環境の厳しい位置にあり、海側面での影響が現われ、外部からの浸透塩分と内部の塩分加算された分布状況を示している。陸側面での浸透塩分量は環境に対応して小さくなっている。

柱11及び13は初期混入塩分量の無い柱で、塩分量分布は外部からの浸透量を現わしている。海側面の表層部では $0.6\sim 0.7\%$ を示しているが、陸側面では著しく少なくなっている。

(2) 電気化学的特性値

各柱の海側面(1面)、陸側面(3面)の東、西側の鉄筋位置での測定値を平均し、表-1に示している。分極抵抗及びコンクリート抵抗は測定箇所特定される値であるが、全体的な傾向を把握するために平均値を表示している。

柱1, 3, 4, 5, 9は初期混入塩分量が多く、初期から鉄筋腐食の要因が存在し、さらに、海水飛沫を受ける厳しい塩分環境下にある。外観的には、主筋に沿った断続的なクラックが発生し、その巾は 0.1mm 前後である。しかし、柱4, 5の海側面では 0.2mm に、柱9の陸側面では 0.35mm に達している。自然電位は $-330\sim -450\text{mV}$ (SCE)と著しく卑であるが、初期の段階からこのような値を示している。この傾向は、多量の塩分の存在する場合の自然電位の変化の性状を現わし、腐食環境下にあることを示している。分極抵抗も低い値を示し、海側面で $5.0\sim 7.5\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$ に、陸側面では柱5, 9を除いて $5.1\sim 10.0\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$ に分布している。陸側面西側では外部塩分の影響が他の鉄筋に比べて少なく、この状況に対応し分極抵抗は比較的大きくなっている。柱5, 9の陸側面で特に小さい原因は、塩分量が海側面と同様に高く、また所定のかぶり厚が確保されていないためにクラック(巾 0.35mm)が生じ、腐食を促進させているためと考えられる。

柱8, 10は初期塩分量が 0.6kg/m^3 と少ないが、図-6に示す様に鉄筋位置($20\sim 30\text{mm}$)においては上記の柱と同様に多量の塩分が存在している。さらに、かぶり厚の少ない影響が強く現われている。塩分環境の厳しい柱8の海側面東、西側、陸側面東側、及び柱10の海側面東側で $1.6\sim 4.4\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$ と低い値を示している。柱10の海側面東側の $1.6\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$ は鉄筋に沿うクラック(巾 $0.5\sim 0.65\text{mm}$)に対応している。外部塩分の影響の少ない柱8の陸側面西側、柱10の陸側面東、西側については、 $5.9\sim 9.3\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$ と比較的大きくなっている。

柱11, 12, 13には浸透塩分量が存在するが、鉄筋周辺においては少ない。従って、この塩分量に対応し海側面で $7.2\sim 10.5\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 、陸側面では $11.4\sim 17.2\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$ と大きな値を示している。

コンクリート抵抗については、分極抵抗の値と対応し、柱5, 9の陸側面で $2\sim 3\text{K}\Omega\cdot\text{cm}$ を示している。また、塩分環境との対応を示し、柱1, 3, 4, 5の厳しい位置で $3\sim 5\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 、その他の位置

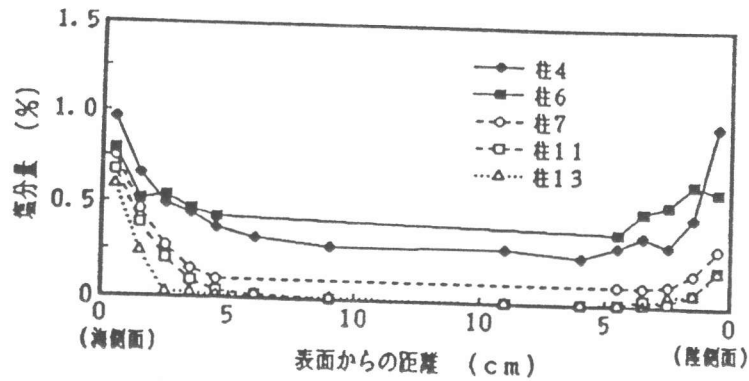


図-6 塩分量分布(柱)

(柱11, 12, 13の陸側面)で5~10KΩ・cmと差異が現われている。

分極抵抗と測定位置の関係を、3つの異なる塩分環境を考慮し、その中から代表的な分布形状を図-7, 8, 9に示している。

柱5の海側面(1面)については、東側が5.1KΩ・cm、西側が5.3KΩ・cmの平均値を示している。上部で僅かに高くなる傾向を示し、中央から下部では2~7KΩ・cmに分布している。分極抵抗値が4KΩ・cmより小さい値を示す位置ではクラック(巾0.08~0.25mm)が存在している。陸側面(3面)では、東側で3.8KΩ・cm、西側で2.8KΩ・cmと小さな平均値を示し、特に上部で小さな値を示している。

柱8の海側面(1面)は、上記の柱5よりも小さく、東側で4.4KΩ・cm、西側で3.7KΩ・cmの平均値を示している。測定位置では大きな差異は無く、平均化した分布状況を示している。陸側面(3面)では東側の上部で小さい値を、下部で大きくなる傾向を示している。西側では外部塩分の浸透が少なく、大きな値を示している。

柱11の海側面(1面)は、外部塩分浸透の多い東側で7.2KΩ・cm、西側で9.8KΩ・cmと比較的大きな値を示している。陸側面(3面)は図-6に示す柱13と同様に塩分量も少なく、腐食環境も特に厳しくなく、分極抵抗は大きくなっている。

10本の柱の海側、陸側面について、分極抵抗の平均値及び分布状況、さらにクラック状態、塩分環境、促進試験結果、及び過去の研究成果[2]等を考慮の上、分極抵抗値を4つのランクに分類し、各々のランクと腐食評価との関係を考えている。ランクⅠは分極抵抗が4KΩ・cm以下の値の領域としている。この領域ではクラックの発生があり、この状況に対応して鉄筋腐食が大の領域と考えられる。ランクⅡは4~8KΩ・cm、ランクⅢは8~12KΩ・cmの領域としている。これらのランクは、各々、鉄筋腐食の中、小の領域と考えられる。ランクⅣは12KΩ・cm以上の領域で、ここでは鉄筋腐食が現われていなく、又は微量の領域と考えている。これらの4つのランクを用い、対象とした柱の腐食評価を行い、その結果を上記の表-1に記入している。

表-1 鉄筋の腐食評価

柱及び面の位置	鉄筋位置	Ecorr mV, SCE	Rp kΩ・cm	Rs kΩ・cm	腐食評価	
1	1面	東側	-387	5.0	4.0	Ⅱ
		西側	-330	7.5	4.1	Ⅱ
	3面	東側	-392	5.1	3.4	Ⅱ
		西側	-377	10.0	5.2	Ⅲ
3	1面	東側	-422	5.2	4.1	Ⅱ
		西側	-390	7.2	4.5	Ⅱ
	3面	東側	-412	5.8	3.3	Ⅱ
		西側	-388	8.1	3.6	Ⅱ~Ⅲ
4	1面	東側	-382	7.0	3.6	Ⅱ
		西側	-384	5.8	3.8	Ⅱ
	3面	東側	-383	5.5	3.2	Ⅰ~Ⅱ
		西側	-364	8.1	3.8	Ⅱ
5	1面	東側	-450	5.1	3.2	Ⅱ
		西側	-449	5.3	2.8	Ⅱ
	3面	東側	-435	3.8	2.8	Ⅰ
		西側	-373	2.8	2.7	Ⅰ
8	1面	東側	-419	4.4	3.8	Ⅰ
		西側	-422	3.7	3.5	Ⅰ
	3面	東側	-385	3.9	2.8	Ⅰ~Ⅱ
		西側	-378	9.3	2.7	Ⅲ
9	1面	東側	-408	6.0	4.4	Ⅱ
		西側	-413	5.1	3.9	Ⅱ
	3面	東側	-435	3.0	2.2	Ⅰ
		西側	-417	4.0	3.1	Ⅰ
10	1面	東側	-477	1.6	2.1	Ⅰ
		西側	-416	6.3	3.9	Ⅱ
	3面	東側	-345	5.9	4.2	Ⅱ
		西側	-327	6.3	4.2	Ⅱ
11	1面	東側	-338	7.2	6.0	Ⅱ
		西側	-317	9.8	6.5	Ⅲ
	3面	東側	-318	14.2	9.7	Ⅳ
		西側	-290	11.4	8.2	Ⅳ
12	1面	東側	-303	10.5	6.0	Ⅲ
		西側	-298	9.4	6.5	Ⅲ
	3面	東側	-276	17.0	9.7	Ⅳ
		西側	-248	15.0	8.2	Ⅳ
13	1面	東側	-170	11.4	4.4	Ⅲ
		西側	-166	10.0	4.1	Ⅲ
	3面	東側	-153	13.2	4.9	Ⅳ
		西側	-130	17.2	5.6	Ⅳ

4. まとめ

海岸に隣接した厳しい塩害環境下にあるRC暴露構造物について、3カ年暴露時における塩害状況の研究を行っている。また、供試体による促進試験も行い、塩害劣化に達する過程を把握している。これらの研究から次のことが明らかになっている。

- (1) 供試体の促進試験結果は浸透塩分量の増加の過程を明らかにしている。この分布形状は実物暴露構造物でも同様な傾向として現われている。
- (2) 促進試験結果は電気化学的特性値の変化を明らかにしている。自然電位は初期のサイクルで早に移行する。分極抵抗には、初期の高い抵抗値を維持する領域、低い値に遷移する領域、及び減少した小さい値で定常化する領域が存在する。最後の領域は鉄筋腐食の活性領域と考えられる。分極抵抗と鉄筋腐食面積率の関係は、鉄筋の腐食評価の可能性を示唆している。
- (3) 実物暴露構造物の電気化学的特性値の測定結果は塩害環境と対応している。特に分極抵抗について注目すると、4つのランクに分類が可能である。各々のランクは鉄筋の腐食状況に対応し、これらのランクを用いて腐食評価が可能であると考えられる。

参考文献

1. 望月紀保, 他4名 : コンクリート中の鉄筋腐食評価法について、コンクリート構造物の耐久性診断に関するシンポジウム論文集、JCI P97-102, 1988, 5
2. T. Oshiro, S. Tanikawa, and N. Goto : A Study on Durability of Structures Exposed to Marine Environment, Evaluation and Rehabilitation of Concrete Structures and Innovations in Design, ACI SP-128, P433-447, 1991, 12
3. 大城武, 家室育夫 : 塩害環境に位置するRC構造物の暴露実験、日本建築学会大会梗概集、P133-134, 1990. 10

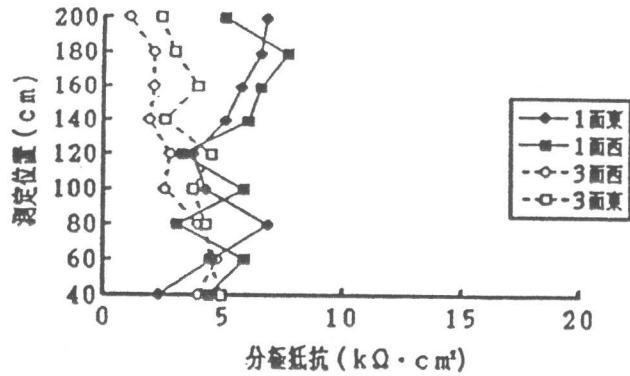


図-7 分極抵抗分布 (柱5)

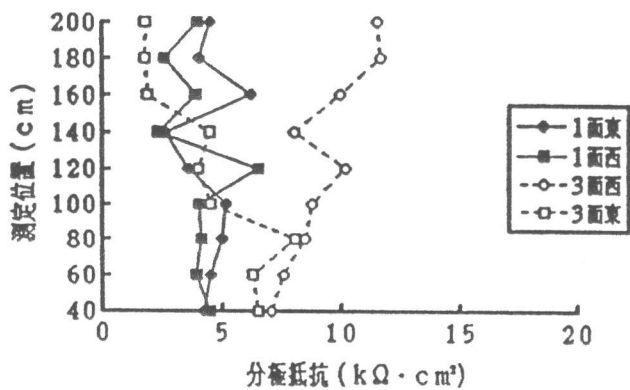


図-8 分極抵抗分布 (柱8)

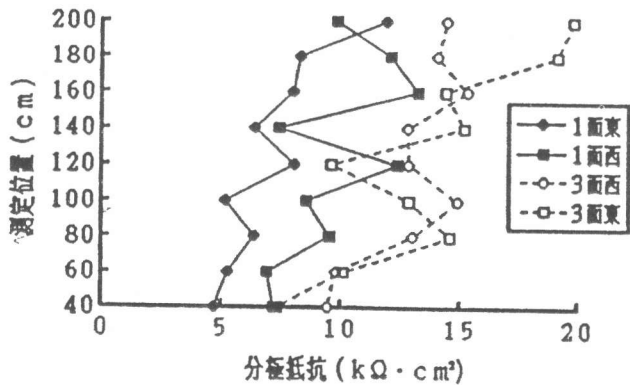


図-9 分極抵抗分布 (柱11)