

論文

[1084] コンクリート中の鉄筋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 谷川 伸（東亜合成化学工業研究所）

正会員 後藤信弘（新日本製鉄研究所）

1. はじめに

本研究は、亜熱帯海洋性気候下の沖縄県において、海岸に隣接して建設した暴露構造物を対象として、コンクリート中の鉄筋腐食のモニタリング法の開発について行っている。本暴露構造物は1984年9月に完成し、これまでの実験成果は発表済みである〔1〕〔2〕。本論文は1990年11月に行った新たな試験をもとに、その研究成果をまとめたものである。

これまでの実験では、非破壊試験としてASTM-C876に示された自然電位法を用いて鉄筋腐食のモニタリングを行ってきたが、ここでは腐食速度の定量的な評価を行うことができる交流インピーダンス法を採用している〔3〕。本手法では定電流2重パルス重畳方式を用いた計測装置と、2重対極式モニタリング法を用い、交流インピーダンス及び自然電位の測定を行なっている。また、鉄筋腐食の主原因と考えられるコンクリート中の塩分量の分析を行い、塩分量と電気化学特性値との相関について考察を行っている。さらに、鉄筋の腐食状況との対応を考えるため、鉄筋をはりだして腐食面積率を計算し、上記の特性値との関係を論述している。

2. 試験概要

沖縄県本部町備瀬崎に建設した暴露構造物を対象に試験を行っている（写真-1、図-1）。本構造物は海岸に隣接し、常時海塩粒子の影響を受け、強風時には柱の下部で直接波しぶきを受ける。コンクリートは普通ポルトランドセメントを用い、水セメント比63%、スランプ18cm、 $f_c=210\text{Kg/cm}^2$ 、空気量4%である。また、東側半分にはコンクリート重量に換算して0.5%の塩分（NaCl）を練り混ぜ水に溶解して初期混入し、この部分を有塩部と称している。

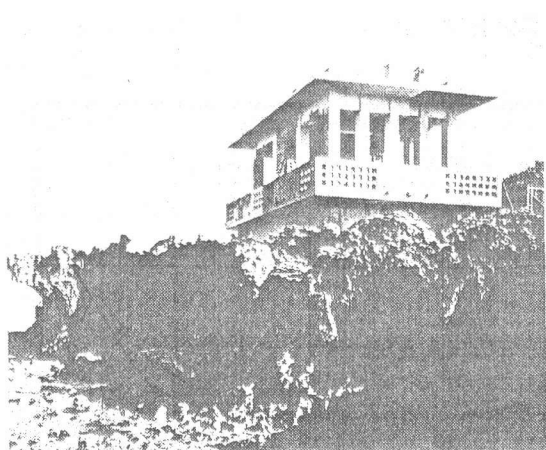


写真-1 構造物の外観

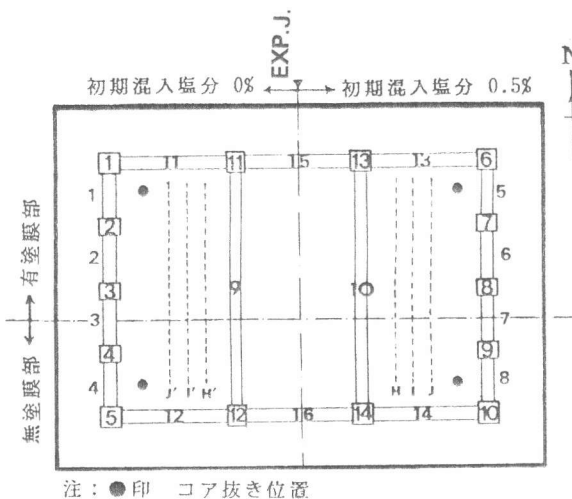


図-1 構造物の平面図

さらに、北側の海側部にはアクリルゴム系の塗膜を施し、この部分を塗膜部と称している。

本構造物のスラブ、梁及び柱を対象に、自然電位、交流インピーダンス、鉄筋の腐食面積率、及びコンクリート中の塩分量等の測定を行っている。自然電位の測定には、センサーの中央に配置された銀・塩化銀電極を用いている。交流インピーダンスの測定には、測定時間を短くするため、高周波として200Hz、低周波として0.1 Hzを用いている。また、測定点に対応した代表的な腐食状況の鉄筋をはつり出し、測定点を中心に長さ10~20cmの腐食部をトレースして面積を測定し、全面積に対する腐食面積率(%)を求めている。さらに、採取したコアをクラッシュして試料を作り、銀イオン選択性電極を用いた電位差滴定法で可溶性塩分濃度を測定し、コンクリート重量に対する重量比(%)で表わしている。

3. 試験結果及び考察

3.1. 塩分量分析試験

暴露期間6年3ヵ月を経た屋根スラブ及び梁について、初期の段階からの測定結果を比較検討している。スラブについては図-1に示すように4ヵ所からコアを採取し、また、梁については梁4(無塩・無塗膜)から採取して塩分量分析試験を行なっている。

屋根スラブの塩分濃度分布を無塩部及び有塩部について、各々、図-2及び3に示している。

塗膜部のスラブ表面近くの塩分量は、コンクリート打設後から塗膜施工までの3ヵ月間に浸入した塩分量と考えられ、6年の経過に伴って内部に拡散して平均化の傾向を示している。塗膜部での塩分量が少ないのに対し、無塗膜で著しく増加している。塗膜部と無塗膜部

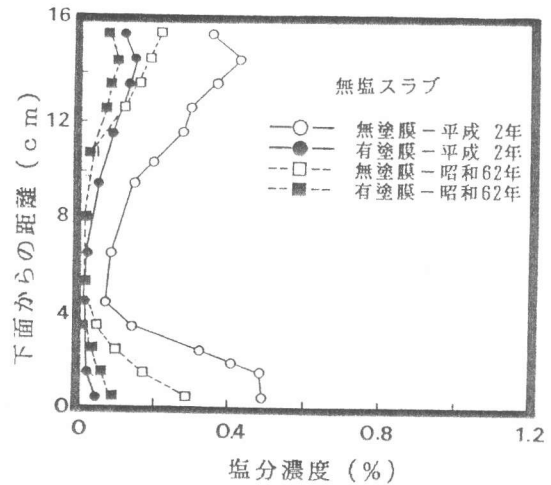


図-2 塩分量濃度分布図(スラブ無塩部)

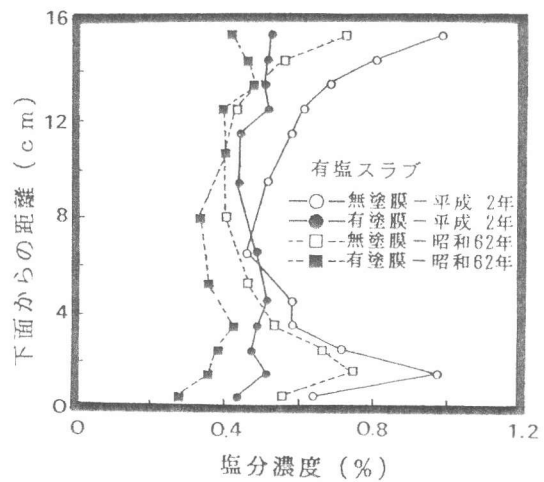


図-3 塩分量濃度分布図(スラブ有塩部)

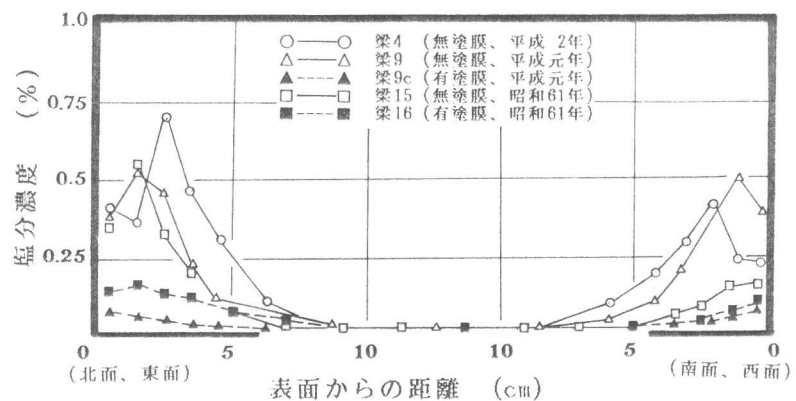


図-4 塩分量濃度分布図(梁無塩部)

の下表層部での塩分量を比較すると、無塩部で7倍、有塩部で1.8倍以上の差があり、塗膜による遮塩効果が現れている。また、後述の電気化学特性値の測定対象の鉄筋のかぶりは30~35mmであり、この位置での、無塩塗膜部の塩分量が0.012%に対し、無塩無塗膜部では0.142%であり、外部から多量の塩分が浸透している。有塩塗膜部では0.486%で、無塗膜部で0.580%と、初期塩分に外部浸透塩分が加算された値になっている。これらの塩分量に対応して鉄筋の腐食面積率は現れている。

図-4に無塩部の梁の塩分濃度の経時変化を示している。濃度分布はスラブと同じように表層部で高い値を示している。塩分濃度分布を見ると、梁4の塩分浸透量の最大値は0.7%に達し、この値が東面に現れている。この面は西面よりも外部塩分の影響を強く受ける面であり、それに伴って浸透量に差が現れている。

3.2 電気化学特性値

スラブ下面での南北方向の鉄筋のかぶりは30~35mmで、下表面に最も近く配置されている。測定は図-1に示す6本の鉄筋について行っている。その測定結果を自然電位、分極抵抗、及びコンクリートの抵抗について図5~7に示している。図中には有塩部と無塩部を区別し、さらに、塗膜部と無塗膜部を図示している。

図-5の自然電位の測定は、有塩塗膜部で平均値-230mVの卑な値に対し、無塩塗膜部で平均値-100mVの貴な値を示している。これらに対し、無塗膜部では有塩部及び無塩部ともに卑の値を示し、有塩部で平均値-370mV、無塩部で平均値-320mVとなっている。

分極抵抗の測定結果を図-6に示す。有塩塗膜部で平均値 $4\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 、無塩塗膜部で $12\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ を示し、塩分濃度の差が分極抵抗の値に影響している。無塗膜部においては、有塩部で平均値 $1.5\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ に対し、無塩部で $3.5\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ の値である。この様に無塩部で低い値を示す原因は、図-2に示す高濃度の塩分浸透による鉄筋腐食が

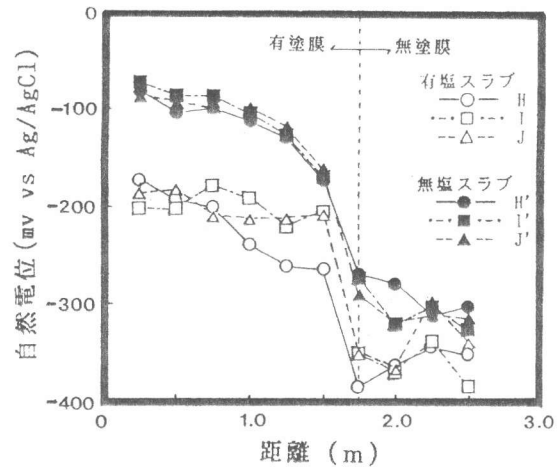


図-5 自然電位測定結果

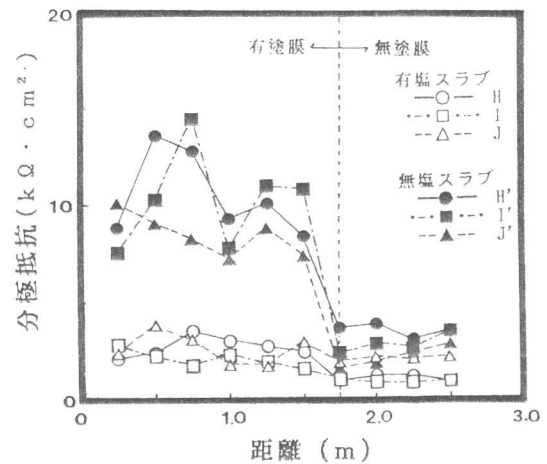


図-6 分極抵抗測定結果

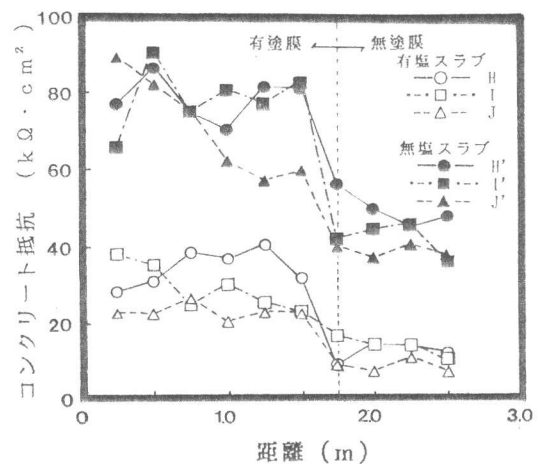


図-7 コンクリート抵抗測定結果

考えられる。

コンクリートの抵抗を図-7に示している。有塩塗膜部で平均値 $30\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ の値に対し、無塩塗膜部で $75\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ の値を示している。これらの値の差は内部塩分量に起因すると考えられる。有塩無塗膜部で平均値 $12\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ で、この値は有塩塗膜部の1/3である。無塩塗膜部で平均値 $46\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ の値で、無塩塗膜部の約半分に減少している。無塩無塗膜部においては塩分浸透により塩分濃度が増加し、コンクリートの抵抗を下げていていると思われる。コンクリートの抵抗が塗膜部で高い値となっている原因としては、6か年間にわたる塗膜被覆で水分の供給が無く、コンクリート内部が乾燥状態にあるためと考えられる。

柱1から柱5を結ぶ梁を無塩部の梁、また、柱6から柱10を結ぶ梁を有塩部の梁と称し、それらの東側を2面、西側を4面と呼んでいる。

自然電位の測定結果を図-8に示し、塗膜部と無塗膜部を区別している。無塩塗膜部での平均値 -100mV の値に対し、有塩塗膜部で平均値 -290mV の卑の値を示している。これらの値は無塩無塗膜部で平均 -310mV の卑に移行し、有塩無塗膜部の平均値 -375mV とほぼ同じ値である。無塩部において、塗膜部と無塗膜部で自然電位に大きな差が現れており、この傾向は腐食状況に対応している。

分極抵抗の測定結果を図-9に示している。無塩塗膜部の分極抵抗は測定位置で変動し、平均値 $22\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ と大きな値を示している。有塩塗膜部で平均値 $5\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ と小さくなっている。無塩及び有塩の無塗膜部において分極抵抗はさらに小さく、平均値 $4\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ となっている。

コンクリートの抵抗を図-10に示している。無塩塗膜部では平均値 $113\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ と大きい値を示し、有塩塗膜部では $56\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ に減少している。無塗膜部では有塩及び無塩部とも小さい抵抗となり、無塩部で平均値 $30\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 、有塩部で $16\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ となっている。

柱4, 11及び13の試験結果を図11~13に示して

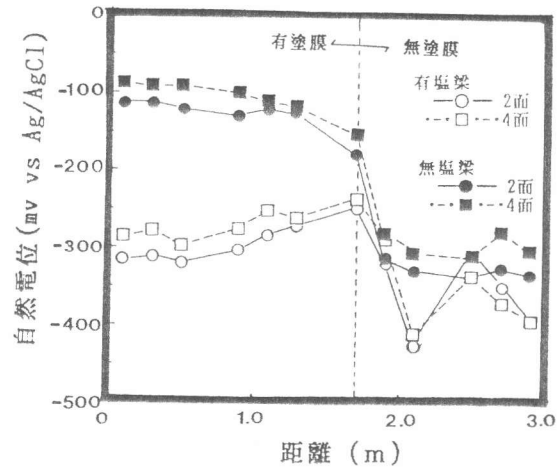


図-8 自然電位測定結果

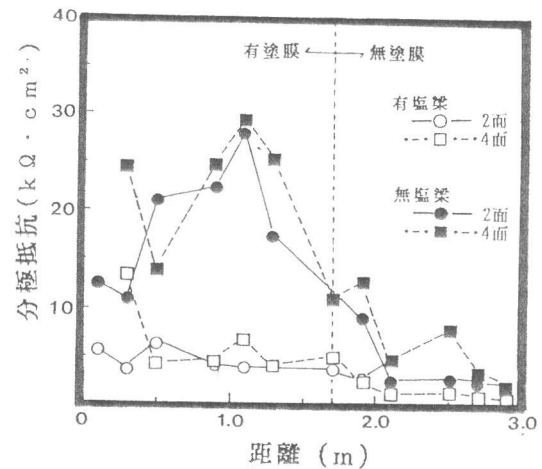


図-9 分極抵抗測定結果

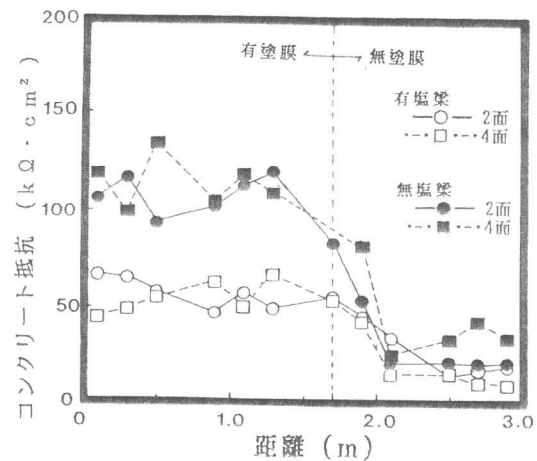


図-10 コンクリート抵抗測定結果

いる。図-11の自然電位の測定結果によると、無塩無塗膜部の柱4、無塩塗膜部の柱11、及び有塩塗膜部の柱13に対して、平均値は各々、 -245mV 、 -150mV 及び -309mV となっている。この様に無塩塗膜部の柱は貴の値であるのに対し、有塩塗膜部及び無塩無塗膜部の柱は卑の値を示している。無塩無塗膜部は外部からの塩分の浸透により、自然電位を卑に移行させている。

分極抵抗の試験結果を図-12に示している。ここでは柱11が平均値 $10.3\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ と高い値を表わすのに対し、柱4及び13が低い値となり、各々、平均値 4.0 及び $5.1\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ となっている。

コンクリートの抵抗の試験結果を図-13に示しているが、柱11が平均値 $91\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ と高い値を示している。また、柱4及び13は高濃度の塩分を含有するために低くなり、各々 32 及び $30\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ の平均値となっている。

前述の電気化学特性値の測定結果について、次の事がらが明らかになった。自然電位は無塩塗膜部で貴の電位が保たれているのに対し、有塩塗膜部では $-200 \sim -300\text{mV}$ の卑の値となる。無塗膜部はスラブ下面、梁及び柱ともに卑な値で $-245\text{mV} \sim -370\text{mV}$ の範囲にある。これら自然電位の値は鉄筋の腐食状況に対応している。分極抵抗は梁が特に大きく平均値 $22\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ の値を示している。しかし、無塗膜部ではいずれの部位でも $2 \sim 4\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ の範囲に分布している。これらの値は鉄筋の腐食状況と対応している。

コンクリートの抵抗は、いずれの部位の無塩無塗膜部で平均値 $75 \sim 113\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ の範囲で高い抵抗を示している。有塩塗膜部では梁の方が大きく、平均値で $27\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ を示している。無塗膜部においてはコンクリートの抵抗が減少し、その傾向は有塩部において著しい。

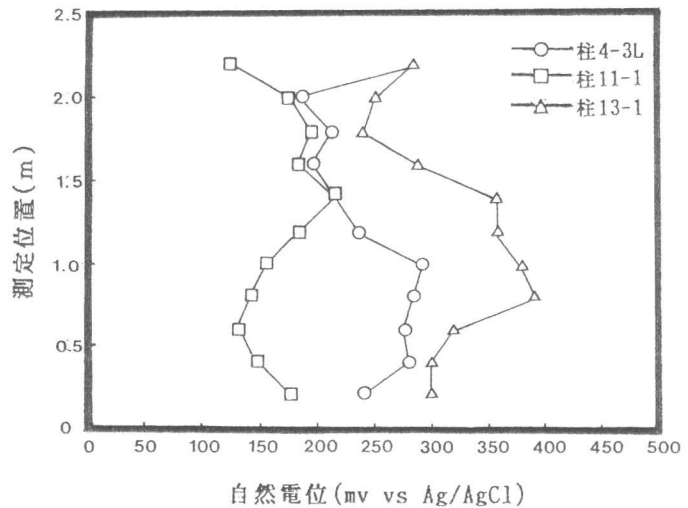


図-11 自然電位測定結果

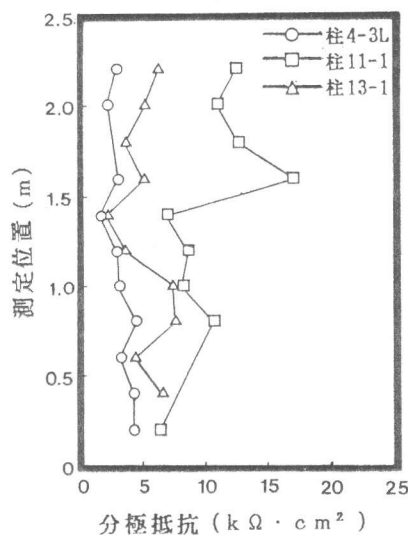


図-12 分極抵抗測定結果

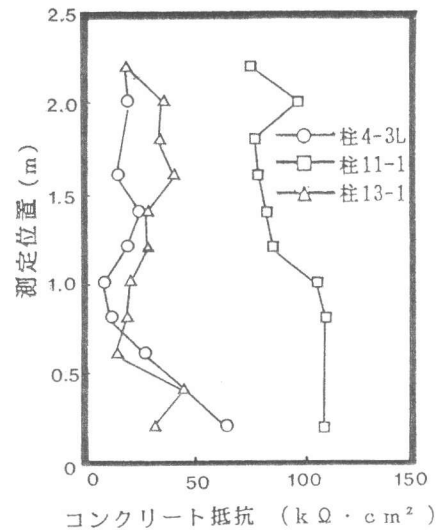


図-13 コンクリート抵抗測定結果

3.3 腐食面積率と分極抵抗の関係

スラブ、梁及び柱の各部位から代表的な腐食状況を表わしている鉄筋をはつり取り、長さ $10 \sim 20\text{cm}$ に切断して腐食面積を測定し、全面積に対する腐食面積率を計算している。データ数を

増加させるため、別に行っている促進試験の試験結果もここに含めている〔4〕。

腐食面積率と分極抵抗の関係を図-14に示す。図中の点線で表わす変動幅は、分極抵抗が $4.0\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 以下の場合、下限値は20~50%の腐食面積率を、上限値は100%となることを示している。この様に、分極抵抗が $4.0\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 以下の場合、著しい腐食の発生領域と考えられる。4.0から $14.0\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$ の分極抵抗の値は、その値に対応して著しい腐食から軽微な腐食を表わしている。この値に対応した自然電位の

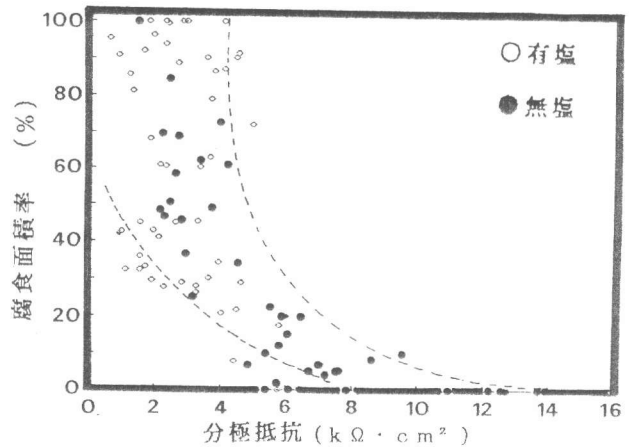


図-14 分極抵抗-腐食面積率

の測定結果は $-200\text{mV}\sim-350\text{mV}$ (CSE)の範囲を示し、この範囲の自然電位はASTM C-876では腐食の発生を推定することが不可能である。しかし、図示している様に、分極抵抗の値を測定することにより、それに対応する腐食面積率の推定が可能となる。図中には無塩部のデータを結んだ線を示しているが、無塩部では変動が少なく、分極抵抗から腐食面積率の推定が精度よく出来る。さらに、経時的に分極抵抗を測定すると、将来の腐食面積率の推定が可能となる。

4.まとめ

本研究では暴露構造物を対象に交流インピーダンス法を適用した鉄筋腐食のモニタリング法を行い、また、塩分量の分析結果をもとに、鉄筋腐食の環境条件の検討を行っている。ここでは、以下の点が明らかとなった。

- (1) 厳しい自然環境下においては、コンクリート中への塩分の浸透量は著しく多い。しかし、塗膜部では遮塩効果の有効性を表わしている。
- (2) 無塩塗膜部での鉄筋の腐食面積率は軽微であり、塗膜による保護効果が現われている。この部位での分極抵抗値は大きく、鉄筋保護効果の定量的評価の可能性を示唆している。
- (3) 分極抵抗と腐食面積率には相関があり、腐食程度を定量的に評価する一つの指標としての可能性が示されている。

今後は分極抵抗に加えて、コンクリートの抵抗、自然電位、塩分濃度等を含めた統合的な評価方法の検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) T. Oshiro, and S. Tanikawa: A Field Study on Durability of RC Buildings Exposed to a Marine Environment, Protection of Concrete, E&H. N. Spon, P483-482, 1990,
- 2) 大城武、谷川伸: 塗膜によるRC構造物の保護について、コンクリート工学年次報告集12-1、P483-488, 1990. 6,
- 3) 後藤信弘、他2名: 土木構造物の腐食診断・設計1、交流インピーダンス法による鉄筋腐食モニタリング法、土木学会第45回年次学術講演会、P554-555, 1990. 9
- 4) 成底佐一郎、他2名: 鉄筋コンクリートの鉄筋腐食パラメータ、建築学会九州支部研究報告集、P61-64, 1991. 3,