

論文 交流インピーダンス法による鉄筋腐食の非破壊検知

松村卓郎^{*1}・金津努^{*2}・西内達雄^{*1}

要旨：鉄筋腐食の非破壊検知手法としての交流インピーダンス法の適用性を検討することを目的として、長さの違う2種類の試験体を用いた腐食試験を行った。主な結果は次の通りである。(1)電極とほぼ同じ長さの鉄筋を有する試験体の測定結果に基づき、インピーダンスの測定値より腐食速度、腐食減量を推定する方法を示した。この方法により、電極の約6倍の長さの鉄筋の腐食減量の分布を精度良く推定できた。(2)本研究の方法では、最小かぶり面に電極を設置することが必要である。

キーワード：鉄筋腐食、交流インピーダンス法、非破壊検知

1. はじめに

火力発電所の棧橋、取放水設備など海水の影響を受けるコンクリート構造物では、鉄筋腐食による損傷が生じることがあり、腐食の著しい場合には耐荷性能の低下が懸念される場合もある。このような腐食環境中の構造物を適切に維持管理するためには、内部鉄筋の腐食状態を把握する技術が必要である。交流インピーダンス法は腐食工学の分野で開発され、腐食速度評価あるいは腐食現象解明のために用いられている手法である。近年、コンクリート中の鉄筋腐食の検知技術としての適用性が検討され、その有用性が次第に明らかとなってきている^{1) 2)}。しかし、交流インピーダンス法本来の検知対象である鉄筋の腐食速度に着目した検討は少なく、腐食状態の推定方法を含めて、その適用性については十分に検討されているとは言えない。

本研究は、鉄筋の腐食速度に着目して、交流インピーダンス法の鉄筋コンクリートへの適用ならびに実用化を図るまでの基礎資料を得ることを目的として実施した。

2. 実験概要

2. 1 実験の手順

試験体を腐食促進試験に供し、約1ヶ月間隔で全試験体のインピーダンスを測定した。測定直後に所定の期間を経過した試験体を順次解体し、鉄筋の腐食減量および腐食面積を測定した。

2. 2 試験体

試験体は、鉄筋長さの影響を検討するため、図-1に示すように、同一断面形状で長さの異なるSシリーズ、Lシリーズの2種類を製作した。Sシリーズは10cm×10cm×40cmの形状で、対

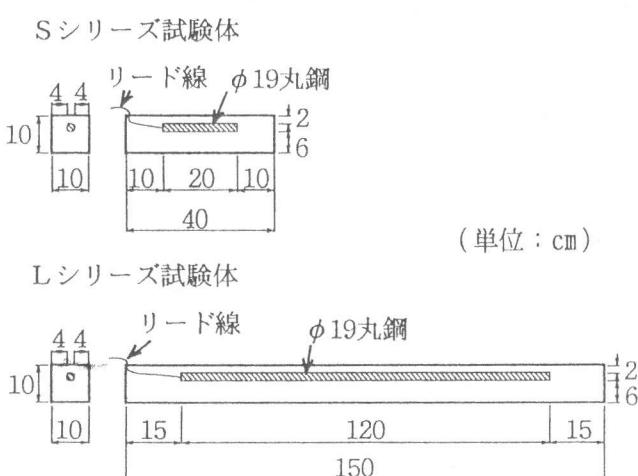


図-1 試験体の形状・寸法

*1 (財)電力中央研究所 構造部建設材料グループ、工修(正会員)

*2 (財)電力中央研究所 構造部建設材料グループリーダー、工修(正会員)

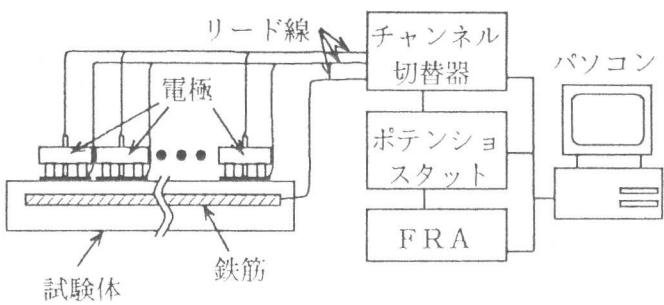


図-2 交流インピーダンス測定装置の構成

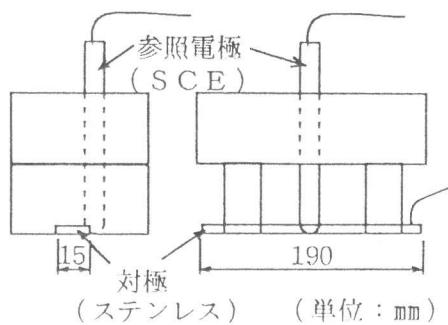


図-3 使用した電極の形状

極長とほぼ同じ長さの20cmのφ19mm丸鋼を純かぶり2cmとなるように1本配置している。LシリーズはSシリーズと同じ断面形状で、長さが150cmであり、対極長の約6倍の長さ120cmのφ19mm丸鋼を1本配置している。試験体の数量は腐食促進期間毎にSシリーズ3体、Lシリーズ1体を標準とし、腐食促進期間は1, 2, 3, 4, 5, 6ヶ月とした。使用したコンクリートの配合は、水セメント比55%、単位セメント量330kg/m³であり、練混ぜ水として3%NaCl水溶液を用い、塩分を混入した。

2.3 測定装置

インピーダンスの測定装置は、図-2に示すように、ポテンショスタット、周波数応答解析器（FRA）、10チャンネル切替装置を用いた。各装置の制御およびデータの収録はパソコンを使用した。電極は、図-3に示すように、参照電極と対極を組み合わせたものを用いた。参照電極は飽和甘こう電極、対極はステンレス製の平板を使用した。対極の形状は、これまでの研究で多く用いられている小面積の円盤状あるいは棒材ではなく、接触面が縦15mm、横190mmの長方形である。これは、対極面積を大きくし、鉄筋に沿うように細長くすることにより、対極直下の部分の鉄筋への電流の流入量を多くすることにより、検知精度を向上させることができると考えたためである。測定の際には、電極と試験体の間に綿製の布を置き、これに飽和水酸化カルシウム溶液を浸した。

2.4 腐食促進試験

試験体は、4週間の水中養生（20°C）の後、雰囲気温度60°Cにおける3%NaCl溶液への浸漬、乾燥の繰返し（浸漬2時間、乾燥10時間）による腐食促進試験に供した。

2.5 交流インピーダンスの測定

図-3に示す電極を最小かぶりのコンクリート表面に設置し、インピーダンスを測定した。初回の測定は、腐食促進試験開始後、約2カ月で行い、その後約1カ月間隔で約6カ月まで測定を行った。Sシリーズ試験体については、電極の設置位置の影響を把握するため、最小かぶり以外の面についても電極を設置してインピーダンスの測定を行った。Lシリーズ試験体については、長さ120cmの鉄筋を長さ20cmの区間6つに区分し、それぞれの部分の直上のコンクリート表面（かぶり2cmの面）に電極を設置し、測定した。印加電圧は自然電位に対して±50mV、周波数は10mHz～10kHzの範囲で変化させた。

3 交流インピーダンス法の適用性の検討

3.1 鉄筋の腐食状態

Sシリーズ、Lシリーズ共に腐食促進期間が長くなると腐食減量、腐食面積は大きくなり、

特に、91日以降で腐食減量、腐食面積ともに急激に増大する傾向が認められた。これは、促進試験開始後91～122日後に、鉄筋の腐食によるひびわれがかぶりの最も小さい面に鉄筋に沿って発生したことから、ひびわれを通じて塩分や酸素などが鉄筋に到達しやすくなつたためであると思われる。腐食状態の測定結果の例として、図-4に、Sシリーズの腐食減量と経過日数の関係を示す。

3.2 インピーダンスの測定結果

周波数をパラメータとした複素インピーダンスの軌跡を、複素平面（縦軸：虚数部、横軸：実数部）上にプロットした。Sシリーズ試験体のインピーダンス軌跡の例（最小かぶり面からの測定値）を図-5に示す。インピーダンスの軌跡は、いずれの試験体についても、若干虚数軸方向に歪んだ2つの半円が連続しているような形状であり、それぞれの半円の直径も時間経過に従い小さくなる傾向が認められる。

3.3 分極抵抗の同定

水溶液中の鋼のインピーダンス測定では、1つの半円が現れることが多く、この半円の直径が分極抵抗（腐食抵抗）を表し、分極抵抗の逆数に係数を乗じることにより腐食速度を推定できるとされている³⁾。分極抵抗と腐食電流の関係は、次式で表される。

$$I_{corr} = K/R_p \quad (1)$$

ここに、 I_{corr} ：腐食電流 (A/cm^2) 、
K：換算係数 (V) 、
 R_p ：分極抵抗 ($\Omega \cdot cm^2$)

また、腐食電流と腐食速度との関係は、鉄が全て Fe^{2+} になると考へた場合、ファラデーの第2法則から次式が成り立つ。

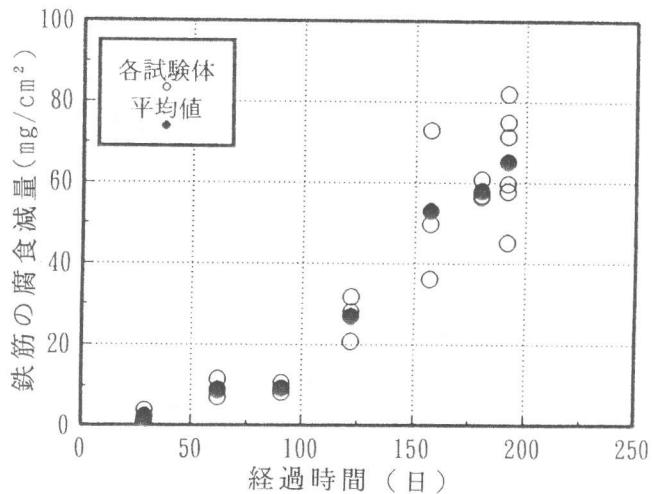


図-4 Sシリーズの腐食減量と経過日数の関係

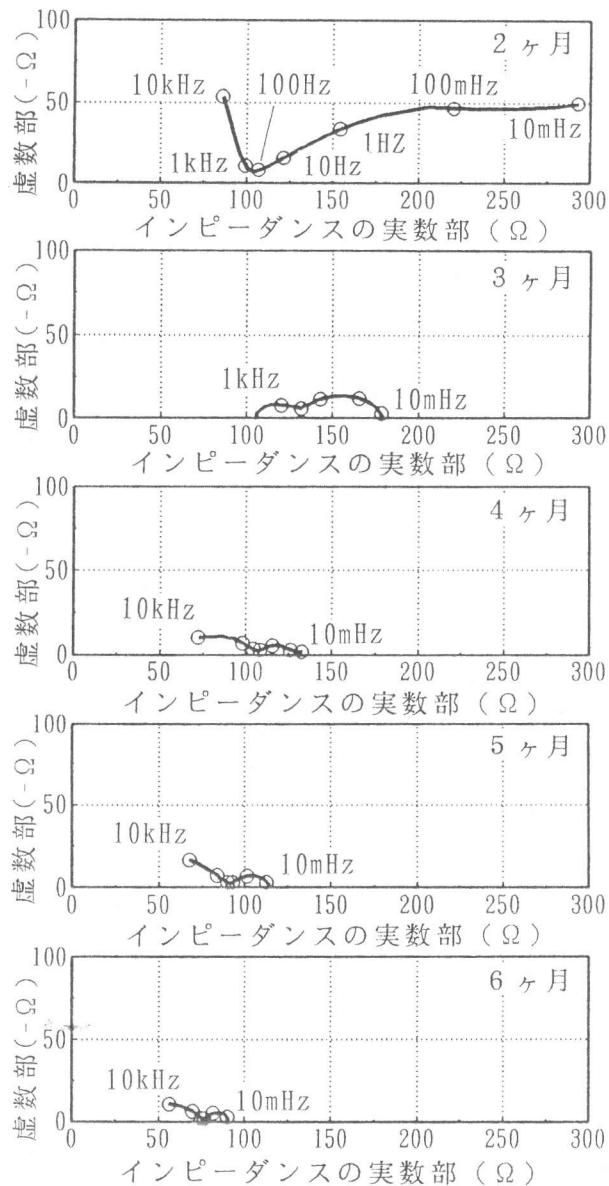


図-5 インピーダンス軌跡の経時変化の例

$$I_{corr}/F_a = V/(M/2) \quad (2)$$

ここに、 F_a ：ファラデー定数（96500クロン）、 M ：
Feの原子量（55.8）、 V ：腐食速度（ $\text{g}/\text{cm}^2 \text{ sec}$ ）

式(1)と式(2)より、腐食速度と分極抵抗の関係は次式のように表すことができる。

$$V = \alpha (1/R_p) \quad (3)$$

$$\alpha = (M/2) (K/F_a) (\Omega \cdot \text{g/sec})$$

ここで、式(3)の両辺を時間で積分すると、次式のようになる。

$$\int V dt = \alpha \int (1/R_p) dt \quad (4)$$

式(4)の左辺は腐食速度の時間積分値であるから、腐食量（腐食減量）を表している。すなわち、分極抵抗の逆数の時間積分値は腐食減量と線形関係にある。

本研究で得られたインピーダンスにおいても、どちらかの半円の直径が分極抵抗である可能性が高い。そこで、図-6に示すように、高周波数側、低周波数側に現れる半円の直径（実数軸を横切る距離）をそれぞれ R_1 、 R_2 として、Sシリーズ試験体の全ての最小かぶり面からの測定データについて整理し、 R_1 、 R_2 それぞれの逆数の時間積分値を求め、鉄筋の腐食減量と比較した。 R_1 の逆数の時間積分値と腐食減量との間には明確な関係が認められないが、図-7に示すように R_2 の逆数の時間積分値と腐食減量との間には線形関係が認められた。したがって、 R_2 が分極抵抗を表していると考えられる。以降、 R_2 を分極抵抗と称する。

3.4 分極抵抗からの鉄筋の腐食状態の推定

分極抵抗の逆数の時間積分値と腐食減量の関係から、原点を通る直線の回帰式を求めると次式のようになる。

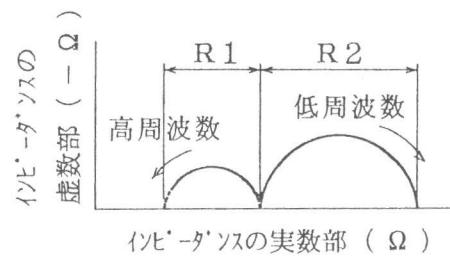


図-6 インピーダンス軌跡の概念図

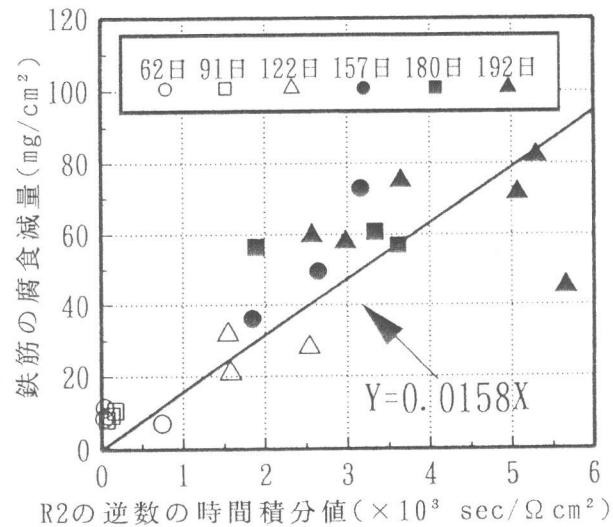


図-7 R_2 の逆数の時間積分値と腐食減量の関係

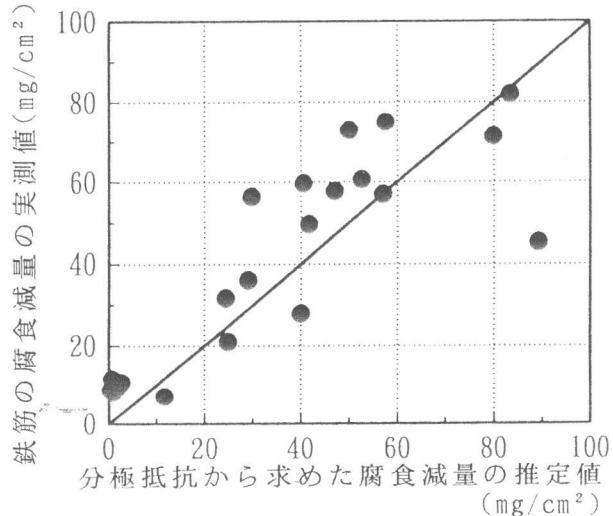


図-8 分極抵抗から求めた腐食減量の推定値と実測値の比較（Sシリーズ）

$$G = 0.0158 \times 10^{-3} \times S$$

(5)

ここに、S：分極抵抗の逆数の時間積分値 ($\text{sec}/\Omega \text{ cm}^2$) 、G：鉄筋の腐食減量 (g/cm^2)

式(5)を用いれば、分極抵抗の逆数の時間積分値から鉄筋の腐食減量を推定することができ、図-8に示すように、当然のことながら、推定される鉄筋の腐食減量は実測値と良好に一致する。また、式(3)の α を $\alpha = 0.0158 \times 10^{-3}$ とし、腐食速度を推定し実測値と比較した。結果を図-9に示す。ここで腐食速度の実測値は腐食減量の変化量を経過時間で除した値とし、推定値は、実測値の算定に用いた試験体の分極抵抗の値を用いた値である。推定値は、ひびわれの発生した91日を境にした腐食速度の急激な増加を良く表しており、腐食速度を比較的良好に推定できていると考えられる。

3.5 鉄筋長手方向の腐食分布の推定

Sシリーズ試験体の結果から得られた式(5)を用いて、Lシリーズについても分極抵抗の逆数の時間積分値から腐食減量を推定し、実測値と比較した（図-10参照）。腐食減量の推定値は実測値よりも若干小さい値を示しているが、精度良く腐食減量を推定できていると考えられる。対極長の約6倍の長さの鉄筋を有するLシリーズ試験体についても、測定位置の鉄筋の腐食状態を良好に推定できていると考えられる。また、Lシリーズでは、同一腐食促進試験期間の試験体が1体と少く、信頼できる腐食速度の実測値が得られず、推定値との比較は行わなかったが、図-10の結果から腐食速度についても精度の良い推定が可能であると考えられる。

3.6 断面方向の測定位置の影響の検討

Sシリーズでは、図-11に示すように、鉄筋に最も近い位置（D面）に電極を設置してインピーダンスの測定を行ったが、他の3面（A面、B面、C面）についてもそれぞれ電極を設置して、測定を行った。D面に対極を設置して得られた式(5)を用いて、他の3面（A面、B

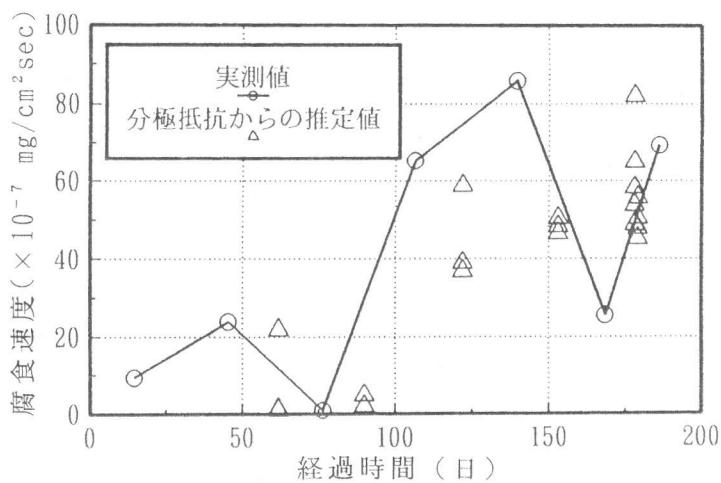


図-9 腐食速度の推定値と実測値の比較（Sシリーズ）

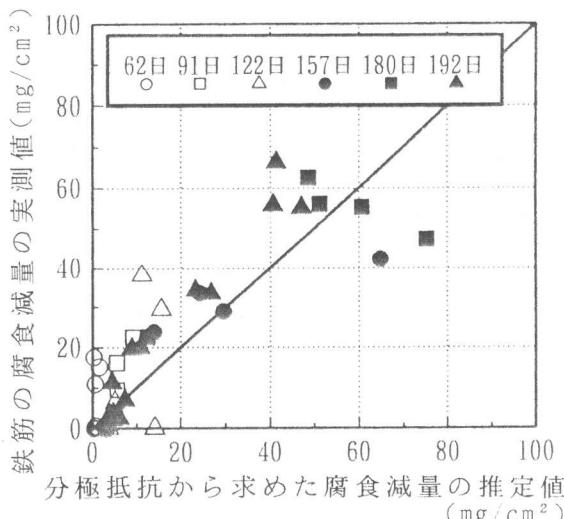


図-10 腐食減量の推定値と実測値の比較
(Lシリーズ)

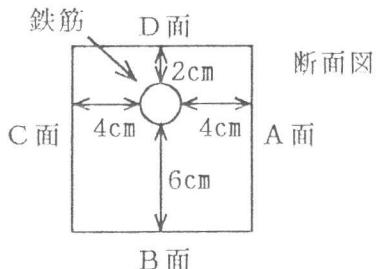


図-11 電極の設置位置

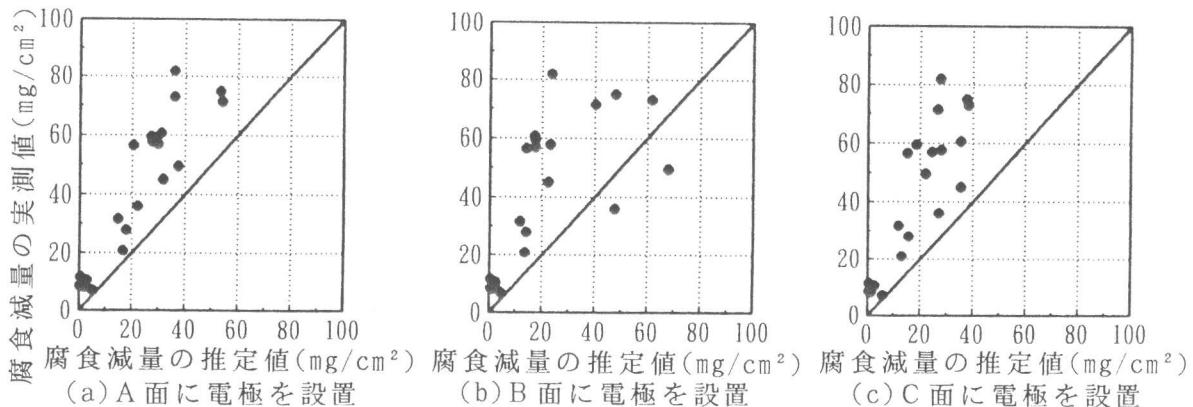


図-12 異なる面から測定した分極抵抗からの腐食減量の推定値と実測値の比較

面、C面）から測定した分極抵抗から、それぞれ腐食減量を推定し、実測値と比較した。結果を図-12に示す。腐食減量の推定値は実測値より小さい値を示している。

鉄筋断面を周方向に8等分し、鉄筋全周の腐食面積に対する各部分の腐食面積の割合（部位別腐食面積率と定義する）を求め、全試験体の部位別腐食面積率の平均値を図-13に示す。かぶりの小さい位置の部位別腐食面積率が大きく、腐食は鉄筋周上のかぶりの小さい部分に多く生じている。この周方向の腐食分布から、D面以外の面から測定した分極抵抗から推定した腐食減量が、実測値よりも小さ目の値となる理由として、電流の分布が鉄筋の周方向に均一でないことが考えられる。対極からの電流は対極を設置した面に近い部分の鉄筋表面に偏って流れるため、他の面から測定した分極抵抗の値には、腐食程度の小さい部分の情報が多く含まれることが考えられる。

本研究で得られた推定式は、腐食の著しい部分に最も近い面（かぶりの最も小さい面）からの測定値を用いて導かれたものである。よって、他の面からの測定値から腐食減量を推定した場合には、小さ目の値が得られる可能性があり、推定式の適用範囲外であると考えられる。

4. まとめ

今回の実験の範囲では、最小かぶり面に電極を設置すれば、鉄筋の長さに係わらず、交流インピーダンス法により鉄筋の腐食速度、腐食減量を比較的精度良く推定できることが示された。

参考文献

- 1) 後藤信弘ほか：交流インピーダンス法によるコンクリート中の鉄筋腐食モニタリング、コンクリート工学年次論文報告集12-1, pp. 527-532, 1990
- 2) 横田優：電気化学的手法によるコンクリート中の鉄筋腐食評価、コンクリート工学年次論文報告集12-1, pp. 545-550, 1990
- 3) 水流徹・春山志郎：交流インピーダンス法、防食技術、Vol. 28、No. 3、1979

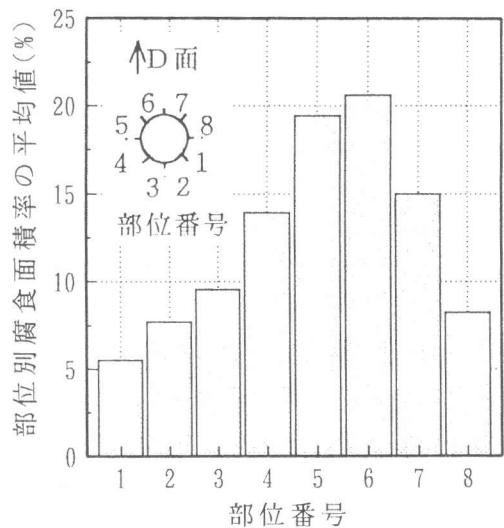


図-13 鉄筋周方向の腐食面積分布