

# 海洋環境に長期暴露された鉄筋コンクリートはりの劣化過程と耐久性評価

川東龍夫<sup>1</sup>・葛目和宏<sup>2</sup>・宮川豊章<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 近畿大学助手 環境科学研究所 (〒577-0818 東大阪市小若江3-4-1)

<sup>2</sup>正会員 工修 ㈱国際建設技術研究所取締役社長 (〒550-0005 大阪市西区本町1-7-7)

<sup>3</sup>フェロー会員 工博 京都大学大学院教授 工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

種々の鉄筋コンクリートはり供試体を3カ所の異なる海洋環境に暴露した。鉄筋の腐食性状を含めた供試体の経年変化を電気化学的手法により調査した。その結果、鉄筋の腐食性状の変化は自然電位である程度把握できるものの、分極抵抗、鉄筋間電流などの測定結果の併用によって劣化の特徴と経時変化をより一層明確にすることができた。約10年間にわたる暴露試験結果によって、劣化の特徴は、コンクリートの要因あるいは設置場所の違いに影響を受けることが明らかとなった。

*Key Words: marine environment, deterioration of RC beam, NDT method, monitoring, pulse velocity, half cell potential, polarization resistance*

## 1. まえがき

海洋環境におけるコンクリート構造物の耐久性は、波による波圧、機械的な摩耗、あるいは部材の耐荷性能を上回る荷重などの要因を除くと、主として海水中の塩化物イオンの浸透・拡散によって影響を受けると考えられている。コンクリート中に侵入した塩化物イオンは、セメントにより固定化されるもの、あるいは固定されないで遊離しているものに分かれ、多量の遊離塩化物イオンは、鉄筋を腐食させるに至る<sup>1)</sup>。塩化物イオンの浸透・拡散は、内部的には種々の配合要因によって、また外部的には設置環境の海象作用によって主として支配されるものと考えられる。このような塩害において、耐久性に関する複雑な系を単純に扱うための手法として、マクロ的には海洋環境の気象因子からコンクリートの物性を評価する方法<sup>2)</sup>、メゾ的にはコンクリート中の塩化物イオンの移動をとらえる方法<sup>3)</sup>、ミクロ的には塩化物イオンと鉄筋の腐食現象<sup>4),5)</sup>との関係を検討する方法などの種々のモデル化が挙げられる。さらに、構造物の劣化診断に種々の非破壊手法<sup>6)</sup>が用いられ、海洋構造物への適用においてもめざましいものがある。しかし、モデル化の手法は実

環境への適用性に、非破壊手法は測定結果に対する評価<sup>7)</sup>などに問題が残されていると考えられている。しかも、実際の海洋環境において、これらの問題点が長期にわたって検討された報告例は極めて少ない。筆者らは、内部要因を種々変化させた鉄筋コンクリートはり供試体を異なる海洋環境に設置し、約10数年間の経年変化を主として非破壊測定手法によって調査し、破壊試験とあわせて検討し、これらの結果の一部をとりまとめて報告するものである。

## 2. 塩害と腐食モニタリングの必要性

先にも述べたように、海洋構造物の劣化は、主として海水中の塩化物イオンの浸透・拡散による塩害に起因すると考えられる。また、中性化や海水中の他のイオンの影響によっては、塩化物イオンの浸透速度はさらに加速される場合もある。このように健全な構造物がその性能を低下させ、塩害に至るまでの過程は、第I期：鋼材近傍に塩化物イオンが蓄積されるまでの過程で、塩化物イオンの拡散速度に支配される(潜伏期)、第II期：鋼材が塩化物イオンにより腐食し始め、腐食生成物の膨張圧に

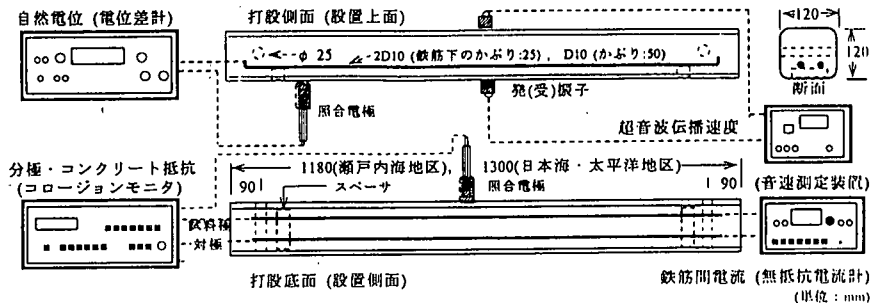


図-1 供試体の基本形と測定方法

よりかぶりコンクリートにひび割れが生じる過程で、溶存酸素と水分の供給量およびコンクリートの電気抵抗に支配される(進展期)、第Ⅲ期:軸方向ひび割れの発生によって、腐食速度が促進され、かぶりコンクリートの剥離、剥落が生じる過程で支配要因は第Ⅱ期とほぼ同様であるが、荷重作用等の影響も受ける(加速期)、第Ⅳ期:鋼材腐食が進み、断面積の減少が顕著となり、耐荷力の低下が明らかとなる過程で、支配要因は第Ⅲ期とほぼ同様(劣化期)、の各段階に分かれる<sup>9)</sup>。一般に、健全な構造物が塩害として確認されるのは、軸方向ひび割れが発生した後のⅢあるいはⅣに至ってからで、補修が施されても、コストあるいはそれ以降の供用期間の点から考えて問題がある場合も多い。

本研究で実施した腐食モニタリングは、自然電位、分極抵抗、コンクリート抵抗、鉄筋間電流などで、それぞれ鋼材腐食の判定あるいは腐食速度の評価を非破壊的に行うためのものである。これらの手法は、劣化過程の第Ⅲ期、第Ⅳ期における鋼材腐食速度、鋼材断面積減少の推定および寿命予測において有効であるばかりでなく、第Ⅰ期、第Ⅱ期におけるコンクリート中の鋼材の状態を非破壊的にとらえる手法としても有効な方法であり、劣化の監視をはじめとする既存構造物の維持・管理において今後更に重要度を増すものと考えられる。

### 3. 実験概要

#### (1) 供試体の要因

実験に使用した材料、配合および各要因を表-1に示す。セメントは高炉B種を、骨材は最大寸法が25mmの川砂利および川砂を用いた。鉄筋は数種類用いているが、ここでの報告は普通(黒皮付き異形丸棒)を基本としている。コンクリートの水セメント比は海洋の耐久性の観点から、40%を基本としているが、比較のため60%のものも作成した。単位水量は150kg/m<sup>3</sup>の一定値とし、単位セメント量を250および375kg/m<sup>3</sup>、スランブを6cm、空気量を6±0.5%とした。また、鉄筋のかぶりは25mm、50mm

表-1 使用材料・配合および要因

使用材料	セメント:高炉B種 骨材:粗骨材 (Gmax:25mm, F.M.:6.88, ρ:2.64) 細骨材 (F.M.:2.90, ρ:2.59)
コンクリート配	水セメント比 (W/C): 60%, 40% 単位水量: 150kg/m <sup>3</sup> 単位セメント量: 250kg/m <sup>3</sup> (W/C: 60%), 375kg/m <sup>3</sup> (W/C: 40%) 空気量: 6 ± 0.5 % スランブ: 6 cm
鉄筋	普通 (他に耐塩性(Cu-W高純度鋼)、亜鉛めっき(550g/m <sup>2</sup> 以上)、エポキシ樹脂塗装(膜厚:200 μm)など) D10, SD30 かぶり:25mm, 50mm(いずれも鉄筋下)
ライニング	なし、あり:エポキシ(350 μm)、エポキシ+クロス(800 μm)、エポキシ+フレーク(600 μm)、ビニルエステル(350 μm)、ポリウレタン(350 μm)
強制ひび割れ	なし、あり:約0.2mm(鉄筋かぶり25mmの供試体中央)

の2種類とした。基本コンクリートは非ライニングとしたが、比較のためエポキシ系、エポキシ+ガラスクロス系、エポキシ+ガラスフレーク系、ビニルエステル系、ポリウレタン系の各樹脂を塗装したものも作成した。また、水セメント比が40%の基本コンクリートのうち、一部の中央に0.2mm程度の強制的なひび割れを導入した。なお、供試体は、各要因について2本作成した。供試体の基本形および測定の概略を図-1に示す。

#### (2) 暴露フィールドの選定

フィールドの選定にあたっては、海象作用が鉄筋コンクリートに与える影響を検討するため、瀬戸内海(明石)、日本海(舞鶴)、太平洋(熊野)の計3地区を選んだ。

それぞれの地区は、海洋環境区分<sup>9)</sup>における飛沫帯に属し、海洋からの距離はほぼ0に等しい。しかし、瀬戸内海は潮汐の影響がある穏やかな干満環境、日本海は波の影響を受ける厳しい干満環境、さらに太平洋は潮汐の影響を直接受けないものの消波ブロックで破碎した波しぶきを受ける飛沫環境と、それぞれの地区環境の特性は異なっている。また、フィールドの地理的条件の点から、日本海は冬期に海風が卓越し波が荒く、太平洋は夏期に波が荒いのに対し、瀬戸内海は静穏と考えられる。

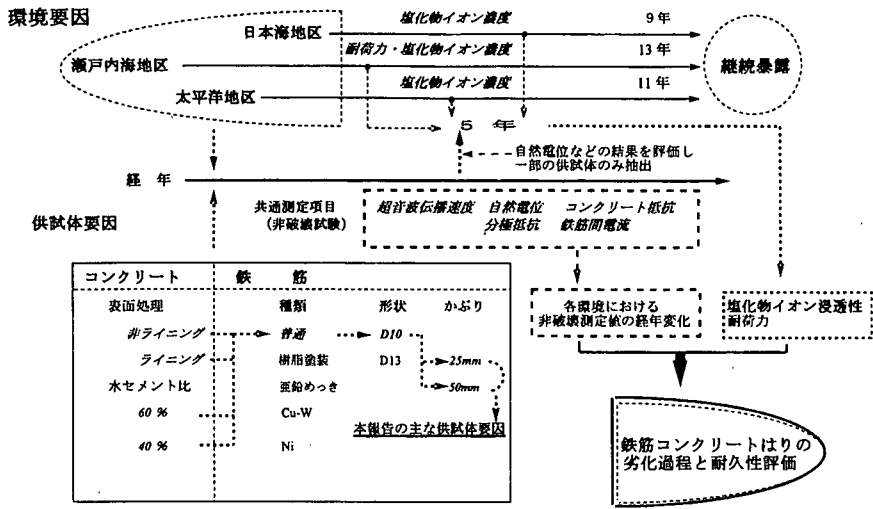


図-2 実験要因と評価手法の関連

そこで、各地区付近（日本海は敦賀、瀬戸内海は神戸、太平洋は尾鷲）の主要な環境因子を比較した<sup>10</sup>。月別平均気温は、年平均で比較すると日本海が14.8℃、他の2地区が15.6℃であった。夏期の7、8月においては太平洋が日本海に比較して1℃程度低い場合を除き、3地区ともほとんど差が見られないが、その他の月では瀬戸内海、太平洋が日本海よりも1～2℃高い。海水の温度は、特に2月において日本海が11～12℃であるのに対し、他の地区は15～17℃と気温より差は顕著であった。月別平均相対湿度は日本海の冬期が他の地区より約10%高いが、夏期は太平洋が他の地域より高い。降水量は冬期に日本海が最も多く、太平洋、瀬戸内海とこれにつづくが、夏期においては太平洋がきわめて多い。したがって、3環境地区の中では太平洋が瀬戸内海、日本海地区より高温・多湿な環境と考えられる。

### (3) 測定項目と検討要因

供試体は、図-1に示された打設時の底面を設置時の側面とし、供試体両端部の面を海・山側に向けて設置した。供試体の経年変化は、超音波伝播速度および自然電位、分極抵抗、コンクリート抵抗、鉄筋間電流などの腐食モニタリングを行って調査した。超音波伝播速度は、発振子と受振子を供試体軸方向と直角方向に対称に配置し、供試体中央およびその両横200mm位置の3点で測定した。自然電位は、供試体端部より100mm間隔に鉄筋かぶり部分の鉄筋直上で測定を行った。分極抵抗は、三電極型のコロージョンモニターを使用し、照合電極として銅硫酸銅電極、対極を埋設鉄筋の試料極でない鉄筋とし、矩形波電流分極法(100 μA, 0.1Hz, 0.8kHz)によって鉄筋全体の分極抵抗とコンクリート抵抗の測定を行った。ま

た、鉄筋間電流は、無抵抗電流計を用いて2本の鉄筋間を流れる電流を短絡後10秒における値として測定した。なお、自然電位以外はライニング供試体についても行っているが、この際にライニング除去は行っていない。

暴露5年経過時における供試体の曲げ載荷試験は、支点間長900mm、曲げ区間長200mmの対称2点載荷とした。同様に暴露5年経過時の塩化物イオン濃度は、供試体中央部付近の表面より深さ方向に採取された試料を電位差滴定法により測定した。なお、概要を図-2に示す。

## 4. 実験結果および考察

### (1) 供試体の経年変化

#### a) 外観

外観観察による調査項目は、表面荒れ、塗装のひび割れと膨れ・剥がれ、供試体のひび割れなどである。設置後1年で日本海、瀬戸内海地区の供試体に表面荒れが認められた。これらは海洋の海象作用に加えて干満による機械的なすり減り作用も影響している。さらに太平洋地区においても供試体の表面荒れが認められ、この地区における荒天時の波の影響あるいは降雨など海象作用の厳しさが考えられる。各地区におけるライニングは、事故による火災などを除いて現在まで顕著な膨れ・剥がれはないものの、退色、微細なひび割れ、すり減りによるコンクリート肌露出など、経年的な変化が認められた。

現時点において、腐食に起因すると考えられる軸方向ひび割れは殆ど確認されていないが、中には供試体端部付近における鉄筋スペーサ部近傍のひび割れが確認されたものがあつた。これは主としてスペーサとコンクリート部分の付着切れによるものと考えられる。図-3は、

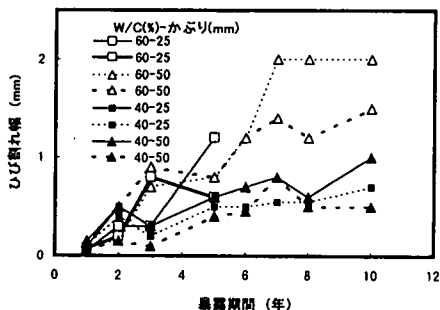


図-3 供試体のひび割れ経年変化 (瀬戸内海地区)

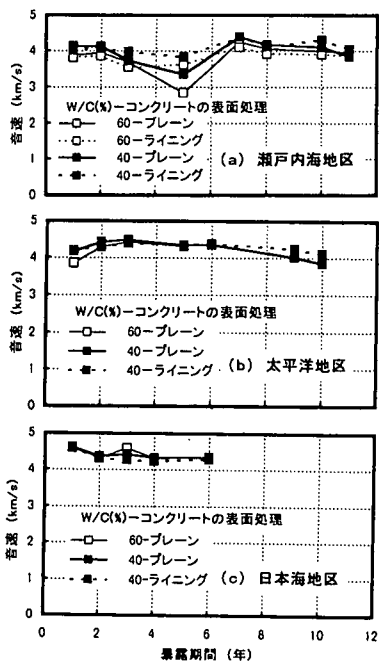


図-4 超音波伝播速度の経年変化

瀬戸内海地区に暴露した供試体の代表的なひび割れ幅の経年変化を追跡したものである。このひび割れから著しい錆汁の溶出、ひび割れ段差などのかぶりコンクリートの膨れは生じておらず、長期間にわたる波の作用、コンクリートの収縮あるいは鉄筋腐食のいずれが主要因かは判別し難い。なお、ひび割れ幅が2mmに達するものがあるが、これはスペーサの付着切れによるものである。

**b) 超音波伝播速度**

超音波伝播速度の経年変化を図-4に示す。

瀬戸内海地区における暴露開始直後の音速は、供試体要因間に差はなく約4 km/secの値を示したが、一部に低下するものが認められた。特に水セメント比が60%の非ライニングコンクリートで、暴露5年経過時において音速が約3 km/sec以下に減少するものがあった。音速の減少は、一般にはコンクリートの品質低下あるいはひび割

れ発生などに起因するが、コンクリートの表面荒れに起因する発・受振子の接触不良などによる測定結果への影響も考えられる。なお、供試体の中央に強制ひび割れを導入したもので速度が低下したものもあったが、このような特別な場合を除き各測定点付近でのひび割れは肉眼で観察されるようなものはなかった。しかし、音速が著しく低下したものは希で、11年までの平均値の推移は全体的に約4 km/secの値を維持し、水セメント比が40%あるいはライニング仕様のコンクリートにおいては顕著な音速の低下は認められなかった。また、パルスは鉄筋を通らない経路としており、鉄筋の影響はないものと考えられる。太平洋、および日本海地区においても顕著な音速の低下は認められず、瀬戸内海地区を含め超音波伝播速度測定結果から見たコンクリートの品質は、ほとんどの供試体において低下していないものと判断された。

**c) 自然電位の経年変化**

水セメント比60%および40%の非ライニング供試体中に、普通鉄筋をかぶり25mmあるいは50mmで配筋された1本についての自然電位測定結果例を図-5に、また、図-6に自然電位主要値の経年変化例を示す。

暴露1年経過後では、ほとんどの供試体で約-200mVの平坦な電位分布を示している。この値はASTM<sup>11)</sup>による非腐食領域(>-200mV)と不確定領域(-350~-200mV)の境界にあり、水セメント比60%をはじめ各鉄筋とも腐食に至っていないと判断されるが、各点の値は全体としてその後経年とともに卑変し、それぞれの要因により腐食領域に至る期間は異なっている。供試体両端部に近い部分では中央付近に比較して自然電位が卑であるものが多い。これは、モルタルスペーサとコンクリートの付着切れが生じ、塩化物イオンの浸透・拡散が密実部と比較して速くなったため、マクロセル腐食のアノード部としての働きが大きくなったために起こったものと考えられる。一部に中央部分で卑変したものがあるが、暴露初期には見られなかったもので、この部分での顕著なひび割れもなく、影響因子の特定はできないものの、中央部分が経年とともにアノード部としての働きをするようになったものと考えられる。

同一暴露期間、同一かぶりのものを比較すると、水セメント比40%が60%のものより貴であるものが多く、水セメント比の低いものの方が防食効果があるものと考えられる。かぶり50mmの25mmに対する顕著な優位性は認められなかった。同一水セメント比であっても、供試体中央に強制ひび割れを導入したものはひび割れの無いものと同様に暴露数年間に若干の卑変が見られたが、モルタルスペーサ付近で見られたような顕著な局部卑変は認められなかった。一般にひび割れのような部分的な欠陥は腐食速度を速める可能性があるが、暴露期間が長期となるとひび割れの影響が小さくなることも知られている<sup>12)</sup>。

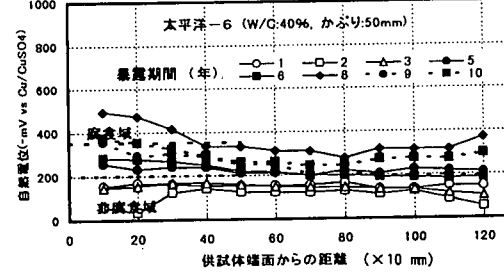
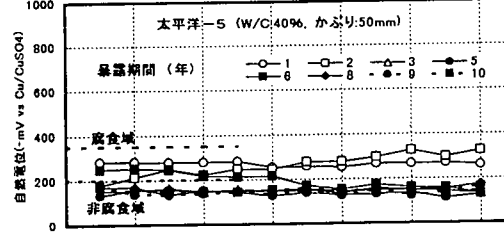
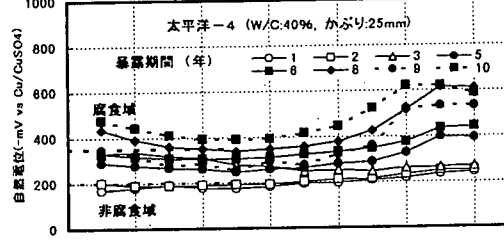
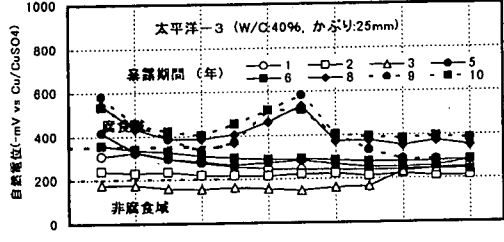
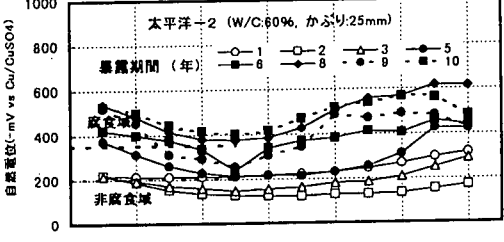
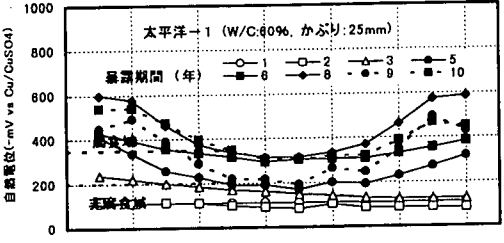
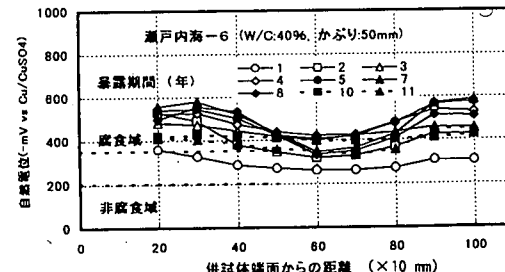
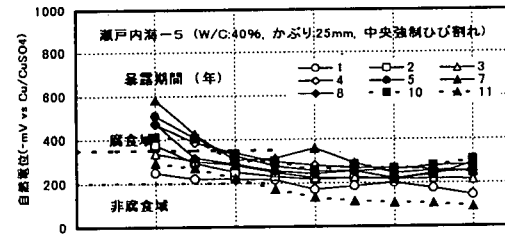
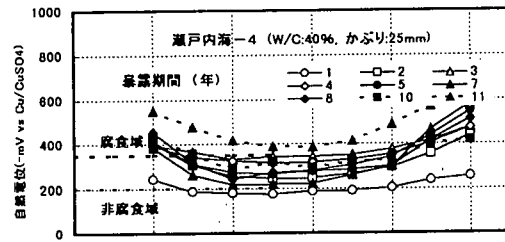
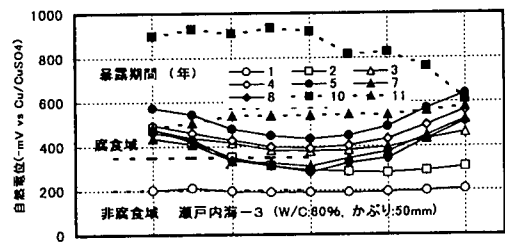
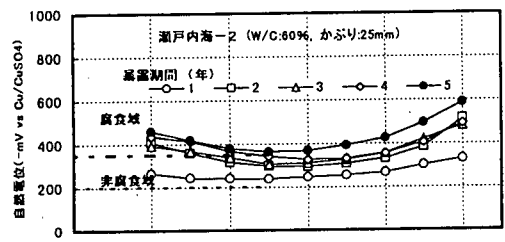
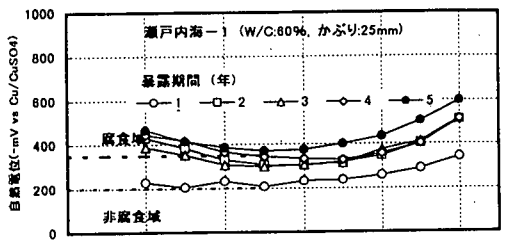


図-5 (a) 各測定点での自然電位経年変化(瀬戸内海地区)

図-5 (b) 各測定点での自然電位経年変化(太平洋地区)

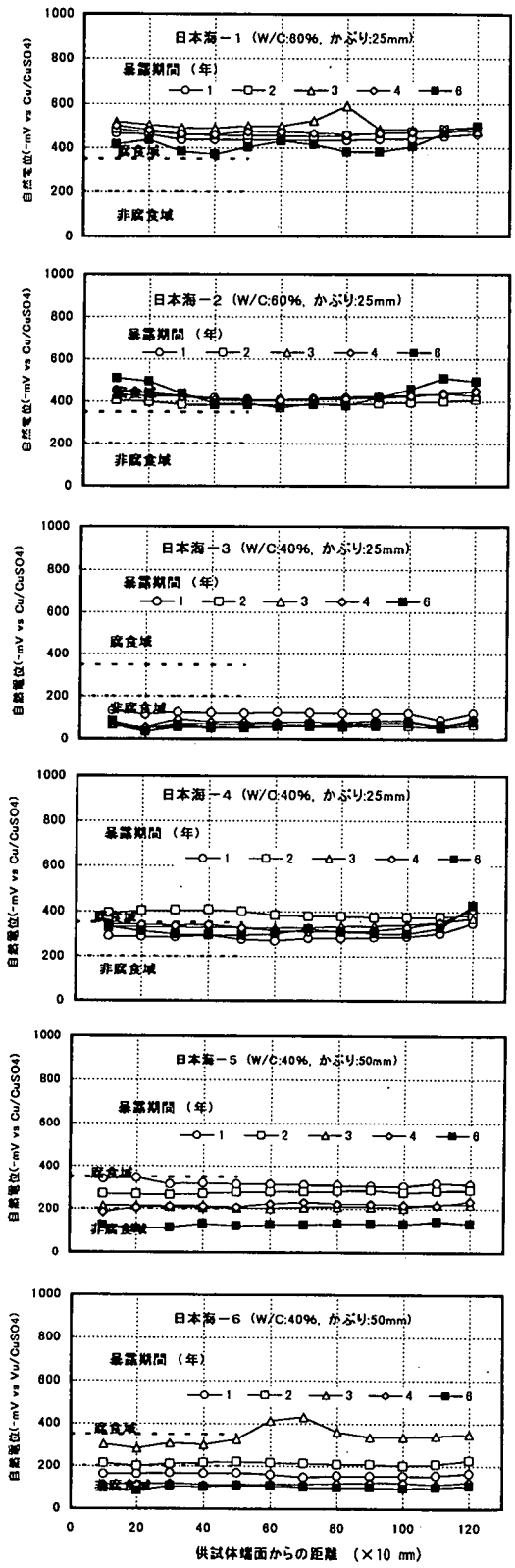


図-5 (a) 各測定点での自然電位経年変化(日本海地区)

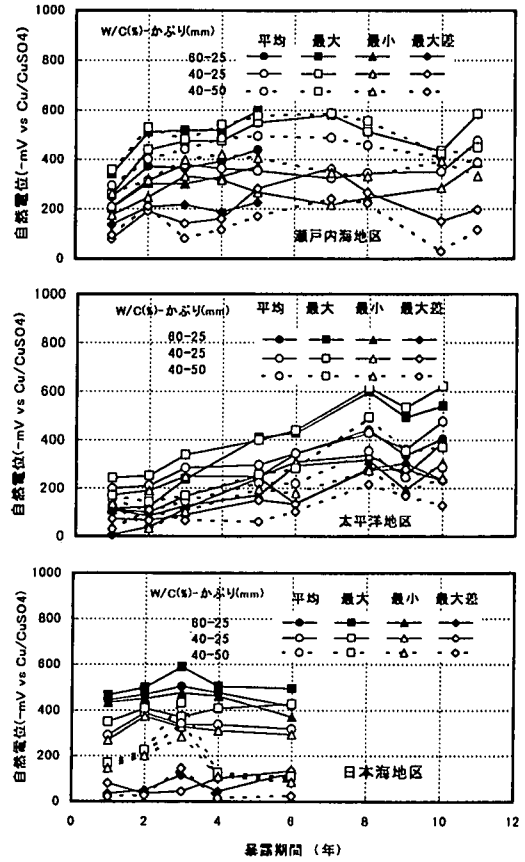


図-6 自然電位主要値の経年変化

全体的な自然電位結果から、瀬戸内海地区では暴露1年から2年にかけて著しい卑変が認められ、コンクリート内部での腐食環境が形成され始めたものと推定される。しかし、暴露フィールドは干満環境で、酸素の拡散の抑制効果により自然電位の卑変が現れた可能性が考えられる他、高炉スラグ混入による自然電位の卑変の可能性も考えられ<sup>13)</sup>、今後の検討が必要である。経年的な自然電位の変化は、一部のものを除いて暴露初期のような著しい卑変は認められないが、自然電位から推定される鉄筋腐食の目安としては、全て不確定域から腐食域に存在している。また、自然電位の最大差(1本の鉄筋における最も貴な電位と最も卑な電位との差)は、数年間増加する場合もあり、このような期間においては鉄筋のマクロセル腐食が進行しているものと考えられる。

一方、太平洋、日本海については、日本海の一部を除いて瀬戸内海のような暴露初期における卑変は少ないが、太平洋の供試体両端部付近の経年的な卑変は瀬戸内海と類似し、日本海には認められない特徴である。また、両地区の自然電位は、全体的に瀬戸内海より貴側にある。

#### d) 分極抵抗とコンクリート抵抗

一般に、鉄筋が腐食を生じていない場合には分極抵抗は大きい値を示し、腐食速度の増大とともに値は減少する。分極抵抗とコンクリート抵抗の経年変化を図-7に示す。なお、図中のA~Lはライニングの種類を、また、同一供試体中の2本の鉄筋を実線と破線で区別した。

瀬戸内海地区における非ライニングコンクリート中の普通鉄筋の分極抵抗は1年から2年にかけて大きく減少している。コンクリート抵抗もこの期間の減少が著しく、自然電位結果から推定される「鉄筋近傍の腐食環境の形成開始」と同様な観点を導き出せるような結果が得られた。非ライニングコンクリートに埋設された普通鉄筋の分極抵抗は5年まで減少し、それ以降の値は測定不能あるいは著しく大きいものが多くなった。一方、樹脂などのライニングを施した供試体中の鉄筋は、自然電位での検証は行えないものの、非ライニングコンクリート中の鉄筋と比較して分極抵抗の減少は比較的少なく、ライニングによる防水性・遮塩性、これらによる防食効果のあることが示されているものと考えられる。

一般に、表面積 $S(\text{cm}^2)$ の鉄筋の分極抵抗( $R_p: \text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ )と腐食電流( $I_{\text{corr}}: \text{A}/\text{cm}^2$ )の間には  $I_{\text{corr}} = K/R_p$  の関係があり、腐食速度の評価に用いられている。ここでの定数 $K(\text{V})$ を信頼度の高い0.026~0.030程度<sup>(4), (15), (16)</sup>とすると、測定された分極抵抗が低いもので  $I_{\text{corr}}$ は数 $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ にも達し、腐食速度が極めて大きいものと推測される。しかし、この傾向は、自然電位の場合と同様に高炉スラグによる影響の可能性<sup>(13)</sup>があるとともに、モルタルスペーサ部での腐食に関係があるものと考えられる。

ここで、かぶりが大いにかかわらず、暴露期間の進行にともない分極抵抗が低く腐食傾向が大きくなる傾向を示すものがある。暴露初期では、かぶりが供試体内部への塩化物イオンの浸透・拡散を抑制するため、その効果が発揮されるが、ある程度の量が浸透すると大きなかぶりは小さなものより広い電場を形成するためかぶりの効果は低いものと考えられる。このような状況下では腐食速度は主として酸素とコンクリートの電気抵抗に影響を受けるが、酸素の供給も充分であれば、測定値はコンクリートの電気抵抗値に支配されると考えられる<sup>(17)</sup>。このことは、塩化物イオン浸透後において腐食電流を流す電場が広いと考えられるかぶり50mmの方が25mmのものよりもコンクリート抵抗が小さい結果になっていることから類推される。

太平洋、日本海地区の分極抵抗は、瀬戸内海の非ライニングコンクリートに見られたような経年にもなう減少傾向は少ない。また、先程の $I_{\text{corr}}$ を分極抵抗から推定すると、太平洋、日本海における鉄筋の腐食速度は瀬戸内海のような著しく大きいものではなかった。このように分極抵抗の結果が瀬戸内海と異なるのは、環境作用

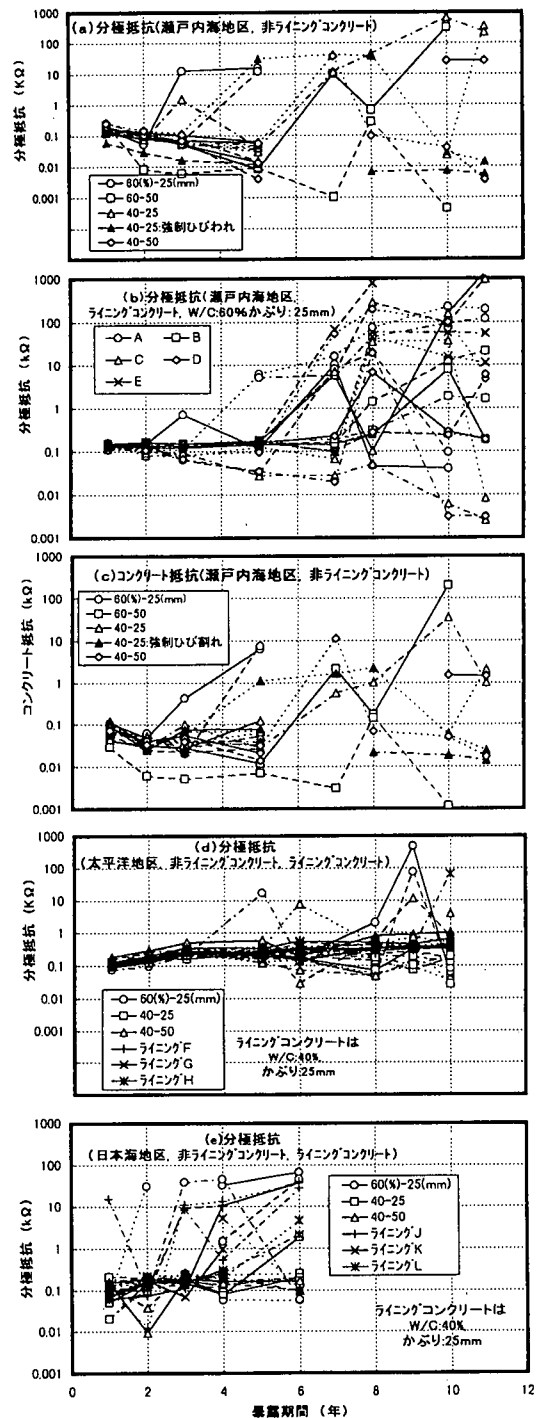


図-7 分極抵抗, コンクリート抵抗の経年変化

の影響が瀬戸内海で大きいと考えられること、スペーサ部分での影響が瀬戸内海の供試体に大きいと考えられること、などが原因としてあげられる。

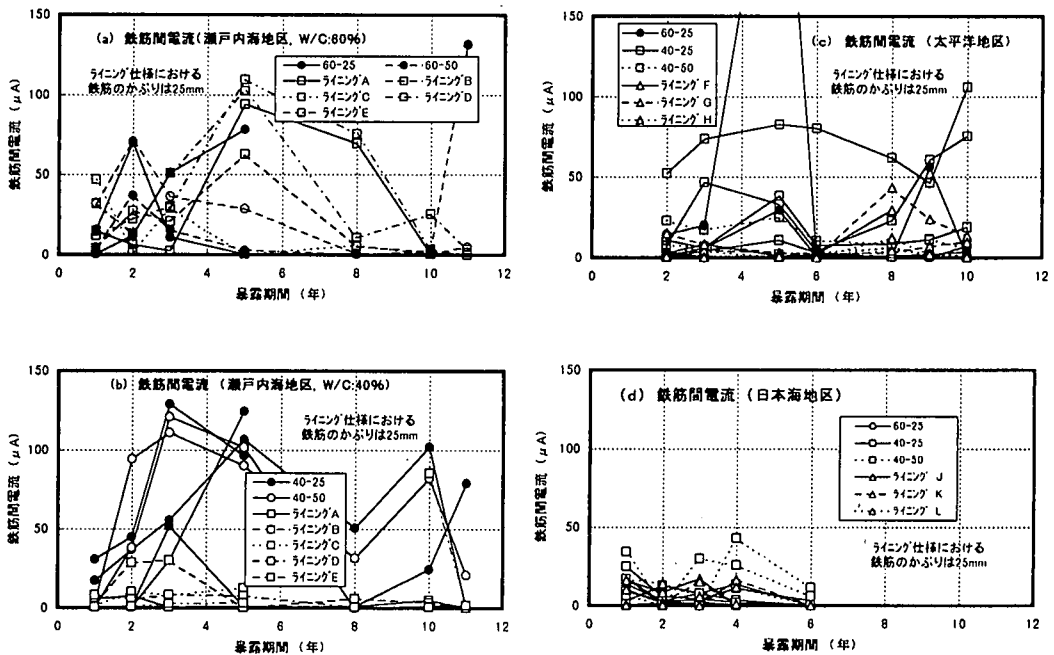


図-8 鉄筋間電流の経年変化

### e) 鉄筋間電流

鉄筋間電流は2本の鉄筋間電位差の起電力によって生じる電流で、一般に鉄筋が両者とも不動態を形成している場合には電流値は低い、腐食することにより大きな電流が流れる。電流の絶対値の経年変化を図-8に示す。

瀬戸内海地区の鉄筋間電流は、他の海洋地区と比較すると、大きな値を示すものの割合が多い。図には示されていないが、2年目以降は逆方向に流れるもの、同一方向に流れるものが供試体の要因に関係なく混在している。逆方向に流れるものはマクロセル腐食におけるアノードとカソードの逆転によるものと考えられる。したがって、測定時における鉄筋の電流値は、計測時点での鉄筋個々の腐食状況に依存するようである。

W/Cが60%の場合、鉄筋間電流値を供試体要因別に評価することは難しいが、W/Cが40%におけるライニング処理のない場合には電流値の増大が暴露初期に生じ、ライニング処理がある場合には、電流値は前者より小さい。このような結果は、水セメント比の減少とライニング処理の鉄筋防食に対する効果を示唆するものである。

太平洋地区においては、同一配合の非ライニングコンクリートとライニング処理されたコンクリートを比較すると、瀬戸内海地区の結果と同様に、ライニング処理されたコンクリート中に埋設された鉄筋は電流値が低く、

大きくなる時期も遅れている。日本海地区における電流値は、ほとんどが瀬戸内海、太平洋地区に比較して全体的に小さく、要因別に比較した結果も他の2地区ほど明確ではなかった。

### (2) 非破壊試験と鉄筋腐食の相関性

瀬戸内海に暴露した供試体の一部について、5年経過後の物理試験ならびに塩分分析を行った。発錆は腐食の一部と考えられるが、暴露5年後の鉄筋の観察によると、端部付近はモルタルスペーサの影響で発錆しているものが多く、自然電位も他の測定点に比較して卑であった。しかし、鉄筋の発錆開始と自然電位の関係や鉄筋発錆後の自然電位の変化はこの関係からは評価できない。そこで、腐食の確率が高い鉄筋で発錆が確認された箇所と自然電位と発錆が認められない箇所での自然電位を比較すると、図-9のようになり、その差は約100mVとなった。しかし、発錆が認められた電位は約-450mV、発錆が認められない箇所の電位は約-350mVで、高炉スラグの影響も考えられるが、発錆・非発錆ともASTMの腐食領域の電位-350mVを越えた値となっている。図には発錆がないと考えられる鉄筋(W/Cが40%)の電位も併せて示しているが、発錆している鉄筋の未発錆部分の電位とは約150mVの差が認められた。この差がアノードとカソードの分極によ



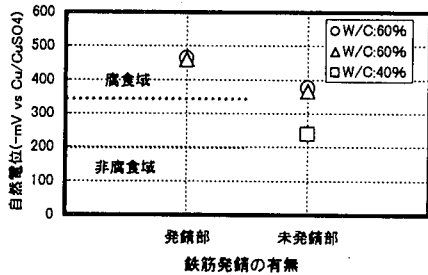


図-9 発錆部と未発錆部の自然電位(瀬戸内海, 5年)

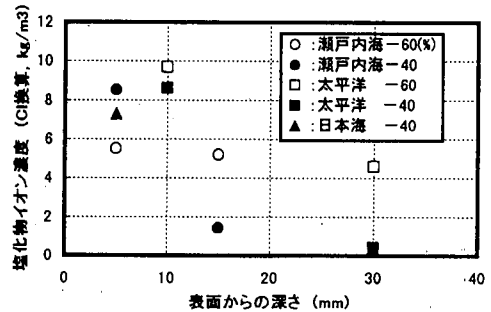


図-11 塩化物イオン濃度(全塩)

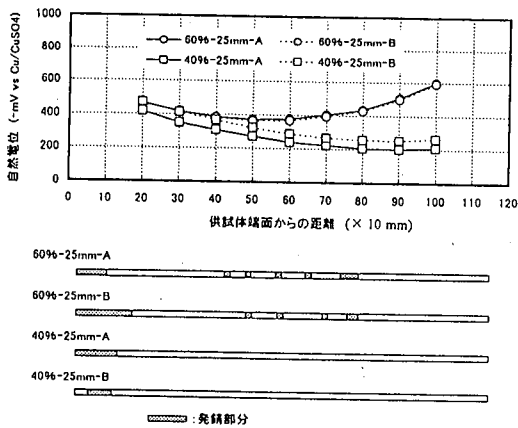


図-10 自然電位と鉄筋発錆の関係(瀬戸内海, 5年)

る影響と考えると、実際の電位差は約250mVとなる。また、発錆部分と未発錆部分の距離が十分大きいとこのようなアノードによる卑側へのシフトも少ないと考えられ、鉄筋の寸法によっても影響は異なると考えられる。したがって、ASTMによる評価区分によって、鉄筋の発錆および未発錆の領域と自然電位の関係がある程度は評価できるものと考えられるが、単純な電位区分による発錆部分の推定は困難であり、自然電位の分布と経年的な変化の差をとらえて鉄筋の発錆を推定することが望ましい。なお、自然電位と鉄筋の発錆箇所の相関例を図-10に示す。発錆量はいずれも少なく、鉄筋の強度に与える影響は小さいものと考えられた。

### (3) 塩化物イオンの存在と非破壊測定結果との相関性

瀬戸内海、太平洋<sup>19)</sup>および日本海地区に5年間暴露されたコンクリート中の全塩化物イオン量を図-11に示す。図-11の瀬戸内海、太平洋地区で得られた塩化物イオン量をもとに正規確率紙上で見かけの拡散係数 $D$ 、表面お

表-2 正規確率紙から求められた濃度 $C$ と拡散係数 $D$ (概算)

	瀬戸内海	太平洋	日本海
表面濃度 $C_{0.60}$ (kg/m <sup>3</sup> )	6.5	12.0	
$C_{0.40}$	9.4	17.5	(7.3)
鉄筋近傍濃度 $C_{0.60,25}$ (kg/m <sup>3</sup> )	3.7	6.2	
$C_{0.40,25}$	0.3	1.0	(0.4)
拡散係数 $D_{0.60}$ (cm <sup>2</sup> /sec)	$6.0 \times 10^9$	$4.5 \times 10^9$	
$D_{0.40}$	$4.4 \times 10^9$	$5.5 \times 10^9$	( $5.0 \times 10^9$ )

よび鉄筋近傍における塩化物イオン濃度 $C$ を求めた<sup>19), 20)</sup>。算出結果を表-2に示す。

$D$ の算出には、供試体打設下面(設置側面)における深さ方向の塩化物イオン量を採用していることと、測定点が2点であるため、概算値の値と比較することとした。両地区の $D$ は、瀬戸内海のW/Cが60%で $D_{60\%} \approx 6 \times 10^9$  cm<sup>2</sup>/sec、40%で $D_{40\%} \approx 4.4 \times 10^9$  cm<sup>2</sup>/sec、また太平洋の場合、 $D_{60\%} \approx 4.5 \times 10^9$  cm<sup>2</sup>/sec、 $D_{40\%} \approx 5.5 \times 10^9$  cm<sup>2</sup>/secとそれぞれ求められ、既往の結果<sup>19), 21)</sup>より値は低く、地区間での顕著な相違はなかった。

見かけの表面濃度 $C_0$ と鉄筋近傍における濃度 $C_{25}$ については、表-2のように太平洋の見かけの濃度が瀬戸内海より大きい。したがって、塩化物イオンの供給については、波の破碎による飛沫環境の太平洋が潮の干満環境である瀬戸内海よりも厳しい環境であると考えられる。

また、日本海地区のW/Cが40%の表面濃度を表面から10mm区間において実際に測定された濃度7.3kg/m<sup>3</sup>とし、拡散係数は他の地区で得られたものと同程度の約 $5 \times 10^9$  cm<sup>2</sup>/secと仮定すると、鉄筋近傍の濃度 $C_{0.40,25}$ は約0.4kg/m<sup>3</sup>と推定される。ここで、鉄筋が腐食を開始する限界塩化物イオン量を1.2kg/m<sup>3</sup>~2.5kg/m<sup>3</sup><sup>22)</sup>とすると、塩化物イオン量を測定した5年経過時点におけるW/Cが60%の供試体では、瀬戸内海、太平洋地区とも限界量に到達しており、W/Cが40%では日本海も含め全て限界量以下と考えられる。

表-3 曲げ試験結果 (瀬戸内海, 5年)

	曲げ試験結果			耐力から計算された荷重	
	最大荷重	降伏荷重	破壊形式		
W/C:60% 鉄筋:2D10 かぶり:25mm	A	32.2	27.4	せん断	安全係数を考慮した場合 曲げ : 15.6 せん断 : 12.6
	B	30.4	27.6	曲げ	
	C	33.4	27.7	曲げ	
	D	31.9	27.8	せん断	
	E	30.0	28.0	曲げ	
	F	24.7	24.7	せん断	
	G	32.9	28.5	せん断	
	H	31.5	27.9	曲げ	
W/C:40% 鉄筋:2D10 かぶり:25mm	A	31.5	28.6	せん断	安全係数を考慮した場合 曲げ : 17.1 せん断 : 15.3
	B	32.3	28.3	曲げ	
	C	33.4	32.1	せん断	
	D	32.4	28.5	曲げ	
	E	34.1	28.8	曲げ	
	F	32.4	24.5	曲げ	
	G	30.1	28.5	せん断	
	H	33.1	28.4	曲げ	

(単位:kN)

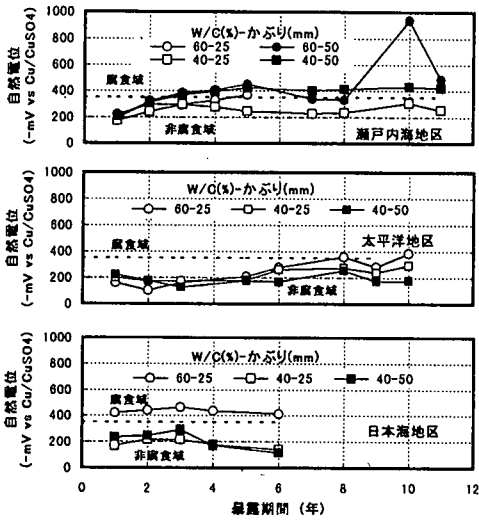


図-12 自然電位中央値の経年変化

一方、図-12に示された自然電位中央値(モルタルスペーサの付着切れによる電位の影響が少ないと考えられる中央の3点または4点の平均値)の経年変化において、かぶり25mm, W/Cが60%では太平洋地区を除き、瀬戸内海、日本海地区とも暴露5年で腐食域にあり、W/Cが40%の場合は3地区とも腐食域にあるものはほとんどない。したがって、鉄筋近傍の塩化物イオンに起因するミクロな腐食環境と自然電位との相関性はほぼあるものと思われる。ここで、太平洋地区で塩化物イオン量と自然電位との間に相関性が認められなかったのは、臨界量はコンクリート配合や暴露環境など多くの要因によって異なる<sup>2)</sup>と考えられ、内部塩化物イオン量と非破壊測定結果の相関性を検討する場合は、これらの影響因子を考慮して行う必要があるものと考えられる。

(4) 曲げ破壊試験結果

瀬戸内海地区における5年暴露供試体の内、一部のものについて曲げ耐力の試験を行った。その結果を表-3、図-13に示す。表-3は鉄筋の種類を種々変化した供試体の結果であり、図-13は普通鉄筋使用についてのみ示したものである。

破壊形式は供試体によって曲げあるいはせん断のものがあつたが、降伏荷重はいずれも同一期間経過後の内陸暴露供試体の結果に劣ることはなく、計算より求められた曲げ耐力、せん断耐力から得られる荷重を越えており、性能の低下は現れていないものと判断された。このことは、(2)における鉄筋腐食からの推定と一致する。

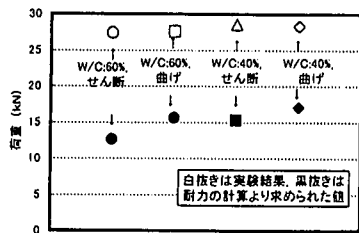


図-13 非ライニング供試体の曲げ試験結果 (瀬戸内海, 5年, 普通鉄筋使用)

(5) 環境作用の評価

これまで、各測定による検討を行ってきたが、ここではそれらを総合して各環境作用の影響を評価した。

自然電位は、(3)で示された図-12を各要因別にまとめると以下のように評価される。

現段階で原因は特定できないものの、暴露初期の電位が腐食域にある日本海のW/Cが60%を除くと、自然電位の卑変から見て最も腐食環境の形成が早いのは瀬戸内海であり、日本海、太平洋地区はその後の経年変化から瀬戸内海地区より後に腐食が進むものと考えられる。瀬戸内海地区にこのような特徴が現れた原因は、モルタルスペーサの縁切れによる腐食発生が比較的多く、その影響を暴露初期から受けたため、あるいは潮の干満による乾湿の繰り返しなどによるものと思われる。一方、日本海地区においても瀬戸内海地区と同様に乾湿と塩化物イオンの定常的な補給が考えられるが、W/Cが40%の測定結果から見てコンクリートそのものの防食効果が現れたものと思われる。暴露期間5、6年で比較すると、W/Cが40%、かぶり25mmの場合、日本海地区の電位は非腐食域にあり、太平洋、瀬戸内海地区より貴の値を示した。したがって、コンクリート構造物に対しては、温暖で干満環境にある瀬戸内海と温暖で波しぶきの大きな太平洋が日本海の家象作用より腐食に関する影響が大きいものと考えられる。

しかし、このような自然電位結果から評価された各環境の相違にはモルタルスペーサの影響も含まれているものと考えられる。ここで、他の測定結果からは次のように評価される。分極抵抗の結果においては瀬戸内海が太平洋および日本海より、鉄筋間電流においては瀬戸内海および太平洋が日本海より厳しく、また塩化物イオンの浸透・拡散結果においては太平洋>瀬戸内海>日本海の順に厳しい環境と評価される。

したがって、当該実験フィールドの範囲内であるが、それぞれの環境作用は総合的に瀬戸内海、太平洋地区が日本海地区より厳しいものと判断される。

また、各種腐食モニタリングによる劣化過程の評価からすると、瀬戸内海地区ではW/Cが60%および40%とも暴露1年から2年にかけて第I期の潜伏期を経過し第II期の進展期に進み、太平洋地区では5、6年まで全て潜伏期であったものがその後60%で進展期、40%で潜伏期から進展期への過渡期、日本海ではほとんどが潜伏期の劣化過程にあり、現在に至っているものと考えられる。

このように3環境地区での暴露期間、配合要因による違いはあるものの、供試体の全般的な劣化過程は、第I期の潜伏期から第II期の進展期にあるものと考えられる。

## 5. 各測定手法の評価

海洋区分では飛沫帯に属するが、それぞれの環境要因が異なった海洋環境における構造物の劣化過程を非破壊手法によって経年的に追跡した。

超音波伝播速度では、長期間海象作用を受けたいずれの供試体においても、顕著な品質の低下は認められず、要因別に見た品質の相違を評価することは困難である。一方、自然電位では海洋環境、供試体要因などの特徴に対応した結果が得られ、それらの違いをある程度評価することが可能である。さらに、分極抵抗、コンクリート抵抗、鉄筋間電流の測定において、ライニング仕様の供試体は他のものに比較して防食上良好であるという評価が得られた。したがって、これらの手法は、コンクリートの配合、ライニングの有無など要因の違いによる劣化過程の相違を推定する際にも有効な評価手法であると考えられ、腐食モニタリングと評価手法のさらなる検討が望まれる。

## 6. 海洋暴露実験に関する今後の展開

耐久性評価の最終目的は性能の経時的評価と考えられるが、これは、性能の低下が現れる前と性能の低下が生じた時点での原因および程度の適確な把握を行うことにより、正しい耐久性評価が可能となる。

図-2に示したように、当該実験は環境の異なる3海

洋地区で現在も継続している。筆者らは本報告において、2.に述べた劣化過程を種々の実験により検討した結果、当該暴露期間における劣化過程は主として第I期および第II期であることを示した。また、瀬戸内海地区で5年間暴露した供試体を曲げ試験した結果、耐力は充分あるものの、破壊形式は曲げ破壊とせん断破壊に分かれていることを示した。このような点で、性能の経時的評価からみると、現時点での暴露供試体は性能の低下が現れる以前の状態と考えられる。したがって、今後は、2.で示した第III期から第IV期に至った供試体の曲げ耐力を評価することが必要となり、破壊形式を制御し相对比较する必要性が生じるものと考えられる。このような状況に対応するため、例えば、破壊試験に際しては全ての供試体で曲げ破壊させることを目的に、せん断区間は供試体外部よりシート状の連続繊維横拘束筋を巻くなどの補強を行い<sup>20</sup>最終的な耐久性評価を行う必要がある。

## 7. 結論

本報告は、得られた長期暴露実験結果の一部をとりまとめたものであり、以下のような結論が導かれた。

(1)超音波伝播速度測定結果から、各暴露地区における経年的なコンクリートの品質の著しい低下は認められなかった。

(2)W/Cが40%における自然電位の経年変化は、瀬戸内海に卑変の傾向が大きく、日本海地区は瀬戸内海、太平洋より貴の値を示した。

(3)瀬戸内海地区における分極抵抗、コンクリート抵抗は、経年的に減少し腐食速度が大きくなると考えられるが、ライニングの有無によって差を生じた。特にライニング仕様は分極抵抗の低下が少なく、防食上有効であることが示された。太平洋、日本海地区における分極抵抗は、経年的な減少をするものが少なかった。

(4)鉄筋間電流は、瀬戸内海地区では暴露初期からかなり大きな値を示すものが多く、腐食が早期に始まっていることが考えられる。また、ライニングの防食効果も分極抵抗と同様に読みとれた。太平洋地区は、自然電位が瀬戸内海地区のような卑変傾向は少ないものの、非ライニングコンクリート中の鉄筋間電流は大きいものがあつた。日本海地区における電流値は、他の2地区と比較して小さく、要因別に見た特徴も顕著ではなかった。

(5)今回の暴露実験における3環境地区の総合的な評価において、各地区の環境要因は異なるものの、地区間における環境作用の厳しさを評価することは可能と考えられる。

(6)海洋環境における鉄筋コンクリートはりの劣化過程を推定し、海洋環境作用も含めた評価を行うには、各種モニタリング手法の併用が有効であることが示された。

謝辞：本研究は、京都大学大学院工学研究科 故藤井學教授のご指導、ならびに若手コンクリート研究会を母胎とする海洋コンクリートワーキンググループによって調査・測定された結果の一部をとりまとめたものである。ここに、関係各位のご教示・ご協力に深く感謝します。

#### 参考文献

- 1) 宮川豊章：コンクリート中の鋼材の腐食機構，塩害（I），コンクリート構造物の耐久性シリーズ，3.1，pp. 23-44，技報堂出版，1986。
- 2) 日本コンクリート工学協会気象環境解析ワーキンググループ：(1) 気象条件とコンクリート，自然環境とコンクリート性能に関するシンポジウム論文集，pp. 322-329，1993。
- 3) 丸屋剛，SOMNUK T.，松岡康訓：コンクリート中の塩化物イオンの移動に関する解析的研究，土木学会論文集，No. 442/V-16，pp. 81-90，1992。
- 4) 大即信明，横井聡之，下沢治：モルタル中鉄筋の不動態に及ぼす塩素の影響，土木学会論文集，No. 360/V-3，pp. 111-118，1985。
- 5) 小林豊治：コンクリート中の鋼材の腐食・防食の基礎，海洋コンクリート構造物の防食指針(案)，日本コンクリート工学協会，pp. 39-46，1983。
- 6) 葛目和宏：塩害に関する検査・試験方法，第12回材料講習会「コンクリート構造物の損傷評価と補修」，pp. 126-148，日本材料学会，1988。
- 7) 小山理恵，矢島哲司，魚本健人，星野富夫：自然電位法を用いた鉄筋腐食状態の推定手法に関する基礎的研究，土木学会論文集，No. 550/V-33，pp. 13-21，1996。
- 8) 宮川豊章，小林和夫，藤井学：塩分雰囲気中におけるコンクリート構造物の寿命予測と耐久性設計について，コンクリート構造物の寿命予測と耐久性設計に関するシンポジウム論文集，pp. 17-24，1988。
- 9) 土木学会：コンクリート標準示方書，施工編，22章，海洋コンクリート，pp. 227-234，1997。
- 10) 川東龍夫，井上晋，宮川豊章，藤井学：海洋環境におけるコンクリートはりの劣化に関する検討，自然環境とコンクリート性能に関するシンポジウム論文集，pp. 215-222，1993。
- 11) ASTM C876-77：Half Cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete，1980。
- 12) 岡田清，宮川豊章：コンクリートの水セメント比およびひび割れが鉄筋腐食に与える影響について，セメント技術年報，33巻，pp. 494-497，1979。
- 13) 中村士郎，小林孝一，宮川豊章，藤井学：高炉スラグ微粉末が高流動コンクリートの耐久性に与える影響，土木学会関西支部平成8年度年次学術講演会講演概要，V-37-1-2，1996。
- 14) 岡田清，小林和夫，宮川豊章，本田哲：分極抵抗法を用いた鉄筋腐食モニタリングによる補修基準について，第5回コンクリート工学年次講演会講演論文集，pp. 249-252，1983。
- 15) 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，Vol. 12，No. 1，pp. 545-550，1990。
- 16) Flis, J., Sabol, S., Pickering, H. W., Sehgal, A., Osseo-Asare, K. and Cady, P. D.: Electrochemical Measurements on Concrete Bridges for Evaluation of Reinforcement Corrosion Rates, *Corrosion*, Vol. 49, No. 7, pp. 601-613, 1993。
- 17) Raupach, M.: Investigations on the influence of oxygen on corrosion of steel in concrete-Part I, *RILEM, MATERIALS AND STRUCTURES*, VOL. 29, No. 187, pp. 174-184, 1996。
- 18) 高木直章：シリカフェームを用いたコンクリートの基本物性と構造部材への適用に関する研究，京都大学博士論文，1994。
- 19) 濱田秀則，Swamy, R. N.: 種々の海洋環境下におけるコンクリート中への塩化物イオンの浸入過程および浸入量に関する一考察，コンクリート工学論文集，第7巻，第1号，pp. 11-22，1996。
- 20) 丸屋剛，宇治公隆：コンクリートへの塩分の拡散浸透に関する表面塩分量の定式化，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 11-1，pp. 597-602，1989。
- 21) 笹谷輝彦：過酷な塩分環境下におけるコンクリート構造物の劣化機構とその防止対策，金沢大学博士論文，1997。
- 22) 宮川豊章：Early chloride corrosion of reinforcing steel in concrete，京都大学博士論文，1985。
- 23) CEB: Durable concrete structures, *CEB Design Guide, Bulletin d'Information*, No. 182, 2nd Edition, 1989。
- 24) 山本貴士，服部篤史，宮川豊章，藤井学：各種連続繊維拘束筋を用いた曲げ部材の靱性改善効果，土木学会関西支部平成8年度年次学術講演会講演概要，V-16-1-2，1996。

(1997. 12. 1 受付)

**DETERIORATION PROCESS AND ESTIMATION OF DURABILITY  
OF REINFORCED CONCRETE BEAMS IN LONG-TERM EXPOSURE  
TO MARINE ENVIRONMENT**

**Tatsuo KAWAHIGASHI, Kazuhiro KUZUME and Toyooki MIYAGAWA**

Reinforced concrete beams of several types were placed in the splash zone at three locations on the Sea of Japan, the Seto Inland Sea and the Pacific Ocean. The changes in the beams over time, including the corrosion of the reinforcing steel, were investigated using electrochemical methods. Although corrosion of the reinforcing steel could not be precisely measured using the half-cell potential method, the characteristics of the deterioration and changes could be clearly observed when the results of polarization resistance and the current between the steels were also considered. These 10-year exposure tests have shown that the deterioration of reinforced concrete is influenced by characteristics of the concrete as well as the marine environment.