

海洋コンクリート構造物の劣化メカニズム に関する検討

東 急 不 動 産 正 会 員 ○五木公明 近畿大学環境科学研究所 正 会 員 川東龍夫
京都大学工学部 正 会 員 井上 晋 正 会 員 宮川豊章 正 会 員 藤井 学

1. はじめに 近年、塩害によるコンクリート構造物の劣化が大きな社会問題となっている。そこで本研究は、塩害による鋼材腐食やコンクリート劣化のメカニズムの解明、およびその推定方法の確立を目的として、各種非破壊試験・強度試験・化学分析などにより総合的に検討を行なった。

2. 実験概要 暴露地区は、海象条件が穏やかで潮位差の大きい瀬戸内海（明石市西岡地区、暴露5年）、潮位差が小さく、冬の海象条件の厳しい日本海（舞鶴市小橋地区、暴露1年）、および温暖で海象条件の厳しい太平洋（熊野市鷗殿地区、暴露3年）のいずれも飛沫帯にあたる3地区とした。供試体は12X12X118cmのRCはり供試体を用い、実験は暴露現場において毎年行なわれている各種非破壊試験（自然電位、分極抵抗、超音波伝播速度、コンクリート抵抗の測定）および明石の数供試体に対し実験室において行なった腐食試験、塩分分析、中性化試験、X線回折試験、強度試験とした。供試体要因としては、水セメント比(0.60, 0.40)、かぶり(25mm, 50mm)、曲げひびわれ(有, 無)、鉄筋種別(普通, 亜鉛メッキ, 耐塩性、樹脂塗装)およびライニング(10°キシ, 10°キシ+ガラスフレーク, 10°キシ+ガラスクロス, ウレタン, ビニルエステル)の5種類をとりあげた。

3. 実験結果および考察

3. 1 暴露現場における非破壊試験

(1) 経年変化 各供試体の自然電位平均値の変化を図-1に示す。各供試体とも、1年目から2年目にかけて自然電位が大きく卑変しASTM C-876に規定される腐食域($E < -0.35\text{mv}$)に達している。この間に分極抵抗は急激に減少し、また自然電位最大差も大きな上昇を示していた。このことから暴露して1年ないし2年の間に腐食環境が整い、マクロセル的な腐食が進んだものと思われる。

水セメント比の影響は比較的顕著に現れているが、かぶりの影響は、暴露初期において認められるものの、経年とともに現われなくなっている。これはある程度の塩化物イオンの浸透後、大きなかぶりが広い電場を形成し、腐食電流を流れやすくしたためと考えられる。また、ひびわれの有無による影響はほとんど見られないが、鉄筋種別にみると亜鉛メッキ鉄筋が他の2鉄筋に比べ電位が極端に卑で、分極抵抗は大きくなっており、腐食傾向からすると逆の結果となっていた。これは亜鉛と鉄の極性により、亜鉛の電位が卑であることを反映したものと思われ、鉄筋の種類によって腐食域を修正する必要があるものと考えられる。なお、ライニングを施さない供試体において、3年目以降に超音波速度が低下しているのに対し、施した供試体がほとんど変化していなかったことからライニングの効果が確認された。

(2) 測定値間の相互関係 分極抵抗と自然電位において比較的明確な関係が示されていた(図-2)。全体的に自然電位が卑であれば分極抵抗は小さくなっているが、鉄筋の種別によって2領域に分かれる。従って、分極抵抗によって知ることのできる腐食状況は、測定が簡便な自然電位によってもある程度把握できるが、鉄筋の種類を考慮することが必要と考えられる。

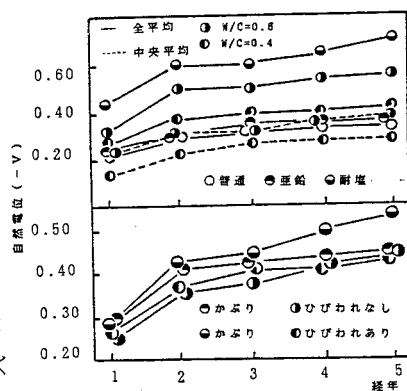


図-1 自然電位の経年変化

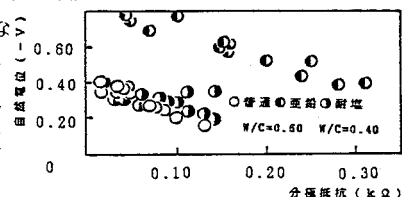


図-2 分極抵抗と自然電位

(3)環境要因 暴露した3地区の3年間(日本海は1年)の自然電位平均値の経年変化を図-3に示す。これによると瀬戸内海において経年とともに自然電位が卑、分極抵抗が小さくなる傾向があるのに対し太平洋においては逆に上がっている。このことから、同じ飛沫帯でも海水の干満によって浸漬し、塩化物イオンの浸入・拡散と乾湿の影響を受けた瀬戸内海の供試体の方が腐食が進んでいるものと思われるが、暴露年数が小さく、日本海の供試体も含めて今後検討を続ける必要がある。

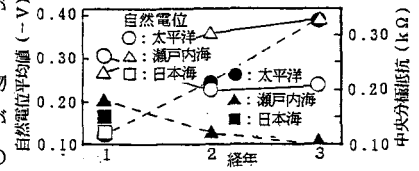


図-3 環境要因-自然電位・分極抵抗

3. 2 室内試験結果

(1)腐食試験と鉄筋の発錆状況

代表的な供試体の分極抵抗と自然電位の分布および鉄筋の発錆状況を図-4に示す。これによると発錆は自然電位、分極抵抗ともにある程度対応しているが、小さな発錆は、分極抵抗の区間極小値に比較的一致しているようである。なお、W/C=0.60の供試体において、W/C=0.40より多くの発錆が認められ、また亜鉛メッキ鉄筋においてはメッキ層の発錆のみ、エポキシ樹脂塗装鉄筋は現時点で発錆が認められなかったものの、耐塩性においては普通鉄筋と同様に発錆が認められた。この耐塩性鉄筋の発錆は、環境要因の項でも述べた乾湿の影響が大きいようであり、使用の際にはこうした環境要因を考慮する必要があるように思われる。

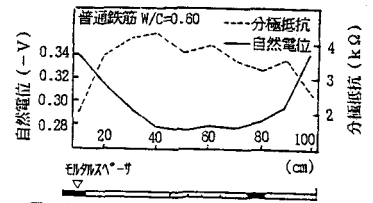


図-4 自然電位・分極抵抗と鉄筋発錆状況

(2)中性化 海洋暴露供試体の中性化深さは、内陸暴露に比べ大きいようであり、特にW/C=0.60において顕著であった。これは海洋環境下での供試体表面の侵食に起因するものと思われる。

(3)塩化物イオン分析 水セメント比別に、深さ方向の全塩分量、および水溶性塩分量(いずれもCl⁻kg/m²)を図-5に示す。これをみると表面の塩分量はW/C=0.40がW/C=0.60より大きく、内部ではW/C=0.40の塩分量が急減するのに対し、W/C=0.60の塩分量はほとんど変化しない。したがって、塩分の表面濃縮および内部への浸透・拡散は配合に大きく影響を受けることがわかる。

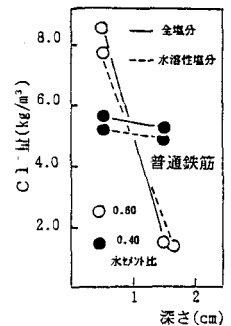


図-5 エアット中のCl⁻量

(4)粉末X線回折試験 炭酸カルシウムは内陸暴露供試体および海洋暴露の表面部分に、水酸化カルシウムは内陸および海洋暴露のW/C=0.40の表面・内部に存在しており、中性化試験結果と一致している。また、フリーデル氏塩は、W/C=0.40の表面において最もピークが明瞭であり、塩化物イオン分析の結果と一致している。

(5)強度試験 各供試体とも、暴露開始時における材料物性値を用いた計算結果とあまり変わらないため、暴露5年目における劣化は耐荷力に影響するほどではないと考えられる。

5. 結論

(1)暴露1年から2年にかけて腐食環境が整い、腐食が進行していったと推定されるが、耐荷力に影響するほどではないようである。中性化試験、塩化物イオン分析、X線回折試験の結果からこれは主に塩化物イオンの浸透によるものと思われる。

(2)自然電位、分極抵抗の両測定値は、ともに分布傾向も含めて鉄筋腐食の指標に十分なり得ると考えられるが、鉄筋の種類による影響を考慮する必要がある。

(3)水セメント比、ライニングの有無の各要因に関しては、鉄筋腐食への影響が顕著に認められた。また、樹脂塗装、亜鉛メッキの防錆性は確認されたが本研究において耐塩性の効果は認められなかった。かぶりは経年とともにその効果が薄れるものと考えられ、瀬戸内海において、太平洋よりも腐食を示す傾向が現れていたが、今後研究の継続が必要とされる。