

[1157] 塩害環境下における RC 構造物の劣化過程について

大城武*¹ 伊部博*² 近藤忠生*³ 成底佐一郎*⁴

1. はじめに

塩害によるコンクリート構造物の劣化は重大な問題である。本研究は、亜熱帯海洋性気候下の沖縄県において、海岸に隣接して平成元年11月に建設したRC暴露構造物を対象に、塩害による劣化過程を把握する。環境評価として飛来塩分量の測定を行い、この環境に対応したコンクリート中の含有塩分量の経年変化を解明する。また、RC構造物の劣化評価手法として非破壊試験を行っている。非破壊試験としては、電気化学特性値である自然電位、分極抵抗、及びコンクリート抵抗を測定し、これらの値から鉄筋の腐食評価法を確立する。本暴露構造物の試験計画及び鉄筋の腐食評価法については既発表である[1][2][3]。

2. 試験概要

2.1 飛来塩分量測定

暴露試験位置での環境評価を行うため、北西面の飛来塩分量の測定を平成2年6月から3年5月まで行った。測定位置は、沖縄県国頭村辺土名の海岸に隣接して設置した暴露構造物（図-1、写真-1）上で、土研式塩分捕集器を用いる。塩分捕集器中のポリタンクの飛来塩分量を毎月回収し、塩素イオン選択性電極を用いた電位差滴定法で分析する。飛来塩分量に影響を与える風向及び風速は、暴露構造物と15km離れた国頭村奥山原での沖縄気象台の観測データを用いる。

2.2 暴露構造物及び含有塩分量試験

暴露構造物のコンクリートの調合は、沖縄県内のRC建物として一般的なものを用いる。w/cは63%、単位セメント量は295kg/m³、スランプは18cmのコンクリートである。コンクリートは3

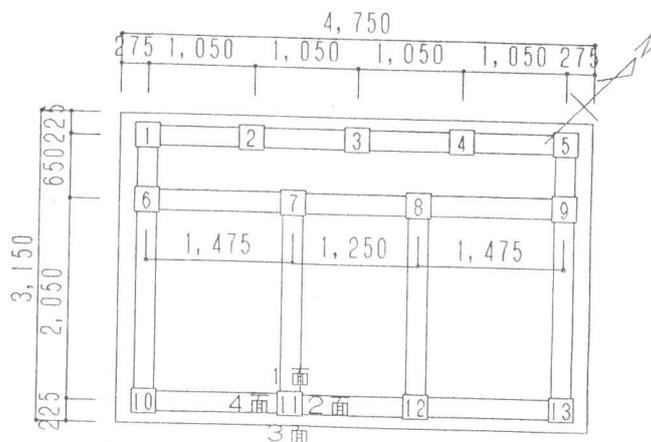
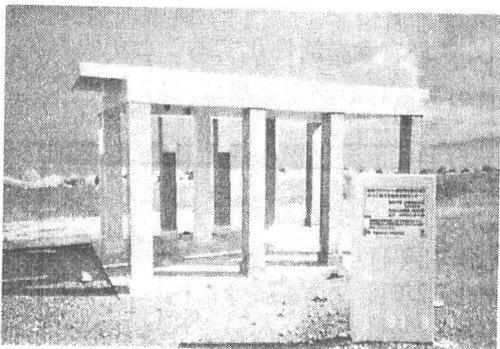


写真-1 暴露構造物

図-1 構造物の概要及び番号（単位mm）

*1 琉球大学教授 工学部環境建設工学科, Ph. D. (正会員)

*2 (株)小野田 リフレッシュ事業部 (正会員)

*3 (株)ナカポーテック RC技術部 (正会員)

*4 ポリテクカレッジ沖縄 講師 (正会員)

種類で、塩化物量 (Cl^- 量) を0, 0.6, 及び $6\text{kg}/\text{m}^3$ とし、 NaCl として初期混入している。暴露構造物平面図 (図-1) に図示する柱からコアを採取し、塩分量の測定を行う。塩分量は可溶性塩分量を電位差滴定により分析し、コンクリート重量に対する NaCl 量の重量百分率 (%) で表す。

2.3 非破壊試験

コンクリート中の鉄筋腐食評価法として、電気化学特性値 (自然電位, 分極抵抗, コンクリート抵抗) を28mm径のセンサー (ナカボーテック製作) とコロージョンモニター (東方技研製作) を用いて測定する[4]。自然電位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には、それらの抵抗に鋼材表面の電気二重層容量 (Cd) を考慮した電氣的等価回路を仮定する。測定時間の短縮のため、高周波として1.7kHz, 低周波として0.1Hzを用いる。

3. 試験結果及び考察

3.1 飛来塩分量

沖縄気象台の気象観測記録 (1990~1993年) の月別風配図によると、冬期には北北西の出現頻度が多く、3月から次第に南成分の風が増し、6, 7月には南西の風が卓越する。8月には南東の頻度が多く、9, 10月には東~北東の風が増し、11月には北東の風が卓越する。測定位置での環境条件は厳しく、強風時には北西側より砕波による波しぶきが直接かかる。

飛来塩分量の測定結果を日平均塩分量 ($\text{mg}/\text{dm}^2/\text{day}$) で表す。この値には風向及び風速の影響が強く、季節風の卓越する北西面が海岸に隣接しているため、冬期の塩分量が著しく多い。平成2年9~10月, 12月, 平成3年1~3月に多く、それらの月の平均値は $44.0\text{mg}/\text{dm}^2/\text{day}$ である。6, 7月及び4, 5月は比較的少なく $2.0\text{mg}/\text{dm}^2/\text{day}$ となる。これらの値から年平均値は $27.0\text{mg}/\text{dm}^2/\text{day}$ となり、この値が環境の厳しい位置における飛来塩分量を表す。上記の値は台風時のデータを含まず、平成2年8月の台風の月には $402.8\text{mg}/\text{dm}^2/\text{day}$ と、他の月とは異なり著しく多量の塩分量を表す。

3.2 コンクリート中の塩分量

多量の飛来塩分量が検出され、厳しい塩害環境下の柱から採取したコアの塩分量の経年変化を図-2に示す。ここでは、非破壊試験を行っている柱11, 12, 及び13を図示する。これらの柱のうち、柱13が最も海水飛沫を受ける位置にある。暴露2年で海側面表層部で0.6~0.7%を示し、陸側面は著しく少ない。しかし、暴露4年においては陸側面の塩分量が増加し、0.3%に達している。この様に海水飛沫を受ける面は、建設から短期間に塩分量が増加し、鉄筋腐食を活性化することが明らかとなり、遮塩対策を初期に処す必要がある。初期混入塩分量のある柱の測定結果は、混入量をベ-

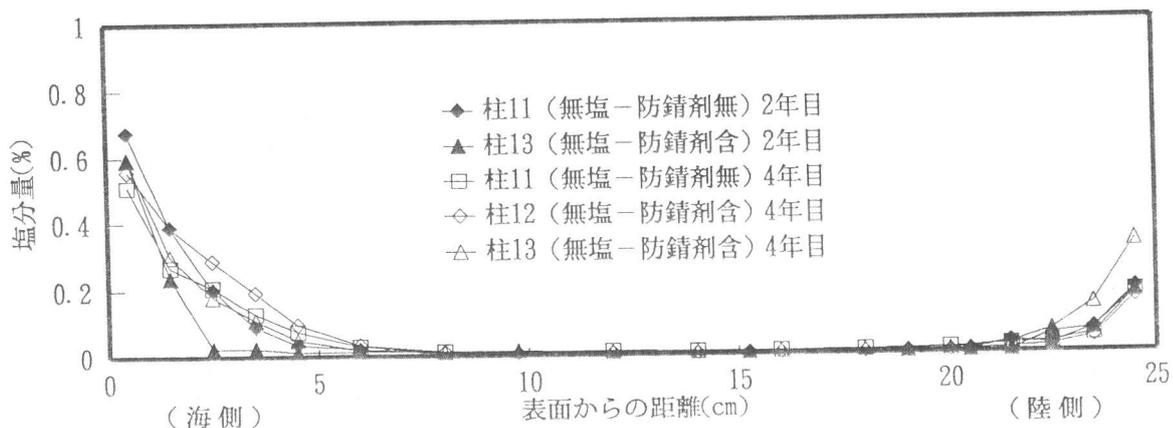


図-2 塩分量分布

スに外部から浸透してくる塩分量が加算され、著しく大きくなっている。

3.3 非破壊試験

本暴露構造物を対象とした暴露2年の腐食評価は既発表である[2]。ここでは、暴露4年で得られた電気化学特性値（自然電位、分極抵抗）の評価及び経時変化を論述する。自然電位による鉄筋の腐食評価はASTM-C876-80に準拠する。また、分極抵抗による腐食評価は、塩水噴霧促進試験の試験成果及び本暴露構造物の劣化状況を判断し、4つのランクを提案した[2]。腐食大を表すランクIを $4\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 以下とし、 $4\sim 8\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 、 $8\sim 12\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ を各々ランクII、IIIとし、腐食中及び小の領域とする。また、 $12\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 以上を腐食の無い健全域と考える。

暴露4年（平成5年12月測定）の柱11, 12, 及び13について、主鉄筋位置での自然電位及び分極抵抗の分布を図-3~8に示す。図-2に示す柱11の1面及び3面の鉄筋位置での塩分量は、0.13%及び0.02%が検出され、1面の鉄筋は著しい腐食環境下の状況にある。この状況に対応し、1面の自然電位は $-308\sim -482\text{mV}$ (SCE)の卑の値を示す。3面は1面に対して貴であるが、最も貴な値でも -249mV を示し、腐食発生の確率は高いと評価される。3面の東側は2面からの影響があり、その環境に対応して卑の値を表す。柱12には防錆剤 ($3\text{l}/\text{m}^3$) を添加している[1]。自然電位は柱11に比較して僅かに貴となり、1面では $-262\sim -470\text{mV}$ に分布し、3面での $-214\sim -370\text{mV}$ に比較して卑の値を示す。柱13は最も海水飛沫を受ける位置にあるが、防錆剤 ($20\text{l}/\text{m}^3$) を添加したコンクリートである。そのため、自然電位は柱11, 12と全く異なった分布を示す。全体に貴な値で、1面で $-142\sim -232\text{mV}$ 、3面では $-86\sim -201\text{mV}$ に分布し、柱の上、下端部を除くと腐食無しの評価がされる。

分極抵抗の分布形状は自然電位と対応し、自然電位の卑の位置では分極抵抗が小さくなる。柱11の1面東側では最も小さく、平均値 $5.4\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ を示し、ランクI及びIIと腐食評価される。

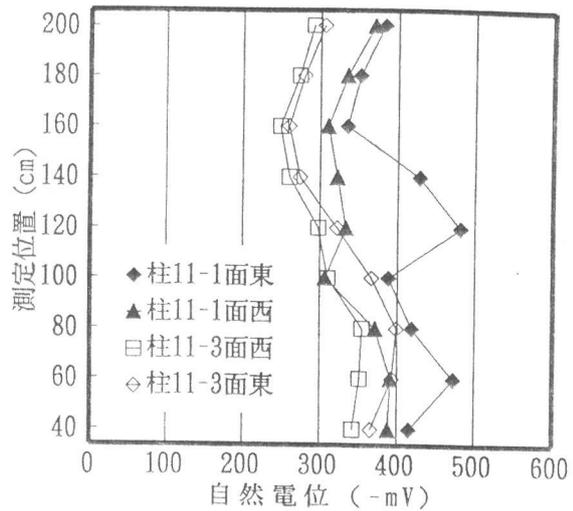


図-3 自然電位測定結果（柱11）

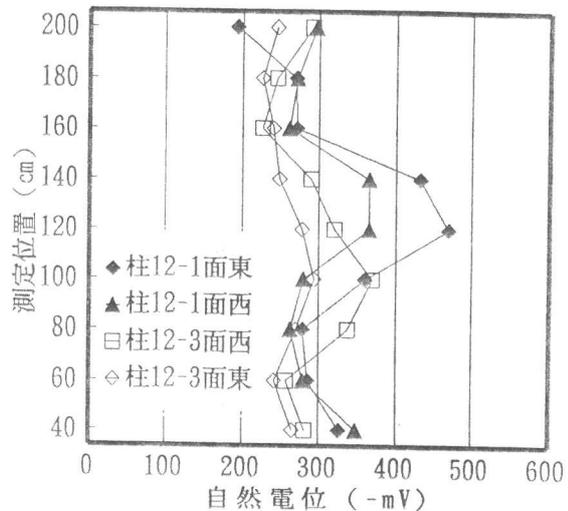


図-4 自然電位測定結果（柱12）

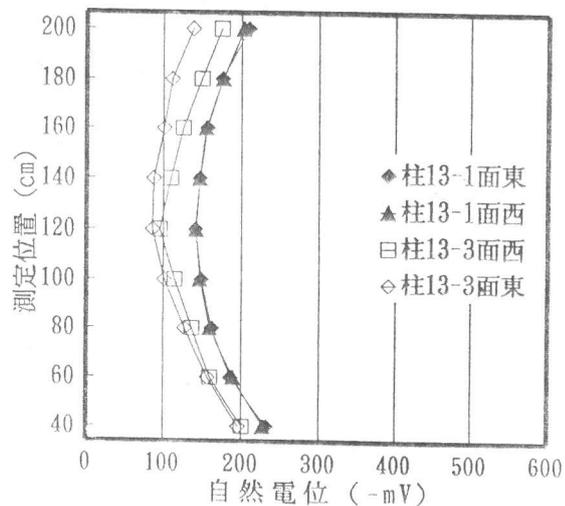


図-5 自然電位測定結果（柱13）

この中央部においては鉄筋に沿うクラックの発生が確認され、ランクⅠと対応する。1面西側及び3面東、西側はランクⅡ及びⅢとされる。柱12も柱11と同様な傾向を示す。1面東側の中央部でランクⅠに対応した $3.6\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$ が表れ、その他の位置ではランクⅡ及びⅢと評価される。柱13は貴の自然電位に対応して分極抵抗が大きい。この柱は他に表れる局所的な小さい値が無く、1面で平均値 $10.6\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$ に集中して分散し、ランクⅢが考えられる。しかし、3面は上部で $21.4\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 、下部で $7.8\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$ を示し、ランクⅢ及びⅣと評価される。

代表的な分極抵抗の分布形状の経時変化を図-9, 10に示す。海水飛沫を受け、劣化の著しいパターンを表す柱11東側の経時変化を図-9に示す。暴露1年時では上部鉄筋は健全域にあるが、海水飛沫を強く受ける下部では腐食中と評価される。2年, 3年で全体的に分極抵抗は減少し、4年では局所的に腐食大の領域が増加している。柱11中、鉄筋腐食の少ないと予測される3面東側の分極抵抗の経時変化を図-10に示す。1年で軽微な腐食発生が考えられる下部で $10\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 前後を示し、上部では $12\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$ をはるかに越える。健全域にある2年, 3年においても高い分極抵抗を維持しているが、4年において減少傾向が表れ、腐食活性化の進行を表す。

自然電位及び分極抵抗の経時変化の代表的なパターンを、柱5, 11, 13について図-11~12に示す。ここでは測定値の平均値を図示する。柱5は初期混入塩分量 $6\text{kg}/\text{m}^3$ (Cl^-)を含むため、初期から鉄筋腐食の著しい柱である。この状況に対応し、初期の自然電位は $-279\sim-348\text{mV}$ で、経時的に卑の値を増大する。柱11は初期混入塩分量は無く、外部の塩害環境により劣化が進行している柱である。従って初期段階で腐食は無く、貴の値を示し、経時的に卑に移行する。特に1面においてその傾向が著しい。柱13は防錆剤の添加により腐食が抑制されている柱の例で、自然電位は貴の値を維持する。

図-12は柱5の1面, 柱11の1, 3面, 及び柱13の

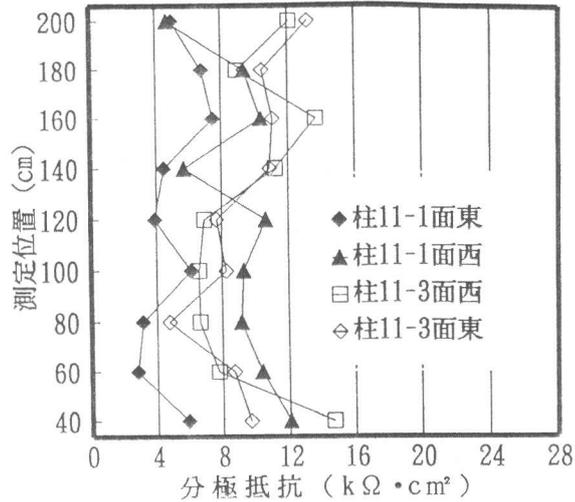


図-6 分極抵抗測定結果 (柱11)

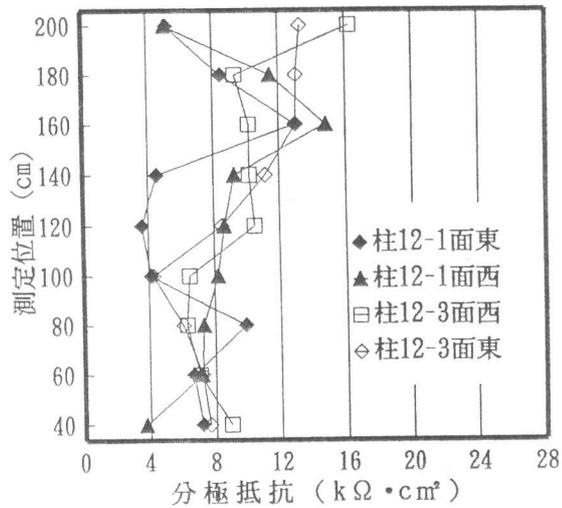


図-7 分極抵抗測定結果 (柱12)

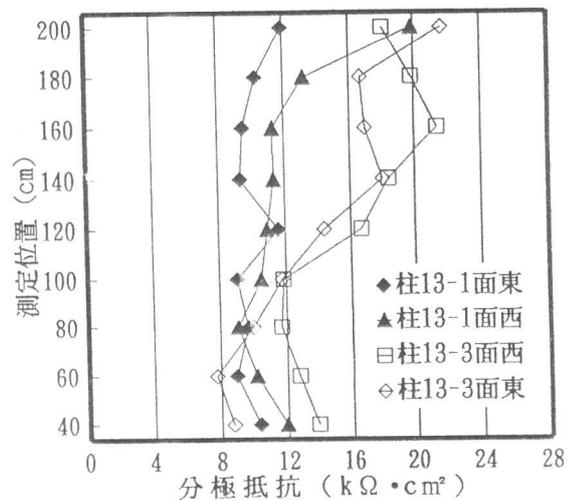


図-8 分極抵抗測定結果 (柱13)

3面の分極抵抗の経時変化を表す。塩化物量 (Cl⁻量) 6kg/m³を含む柱5の1面は、鉄筋腐食によるクラックが1年目で確認され、3年目には錆汁の流出があり、最も劣化が著しい。この状況に対応し、初期で4.6~6.2kΩ・cm²の低い値を示し、2年6ヶ月においてさらに減少する。柱11の1面東は、1年目で

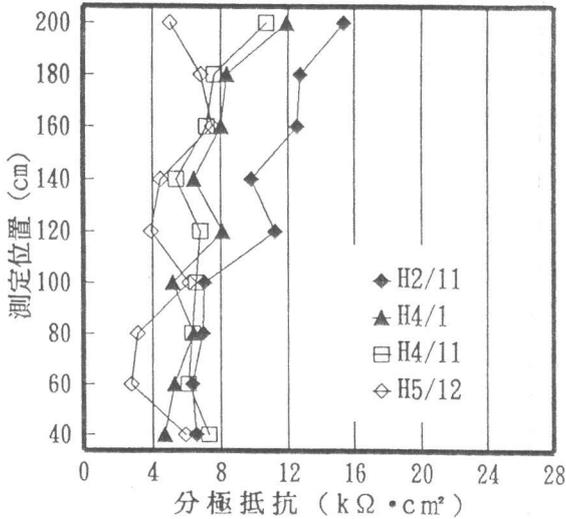


図-9 分極抵抗の経時変化
(柱11-1面東)

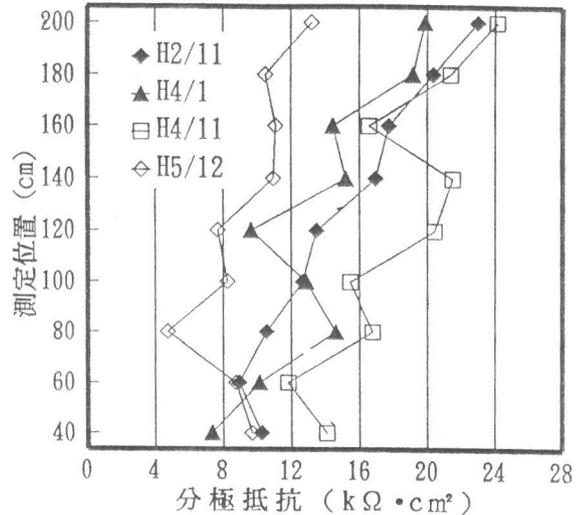


図-10 分極抵抗の経時変化
(柱11-3面東)

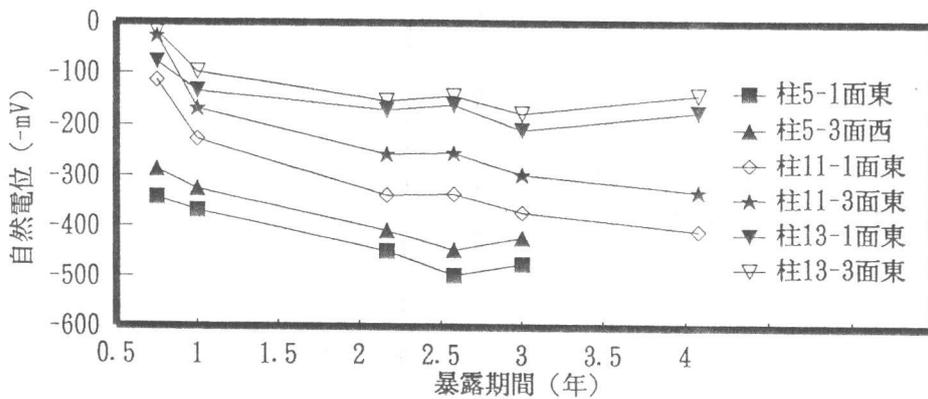


図-11 自然電位の経時変化 (平均値)

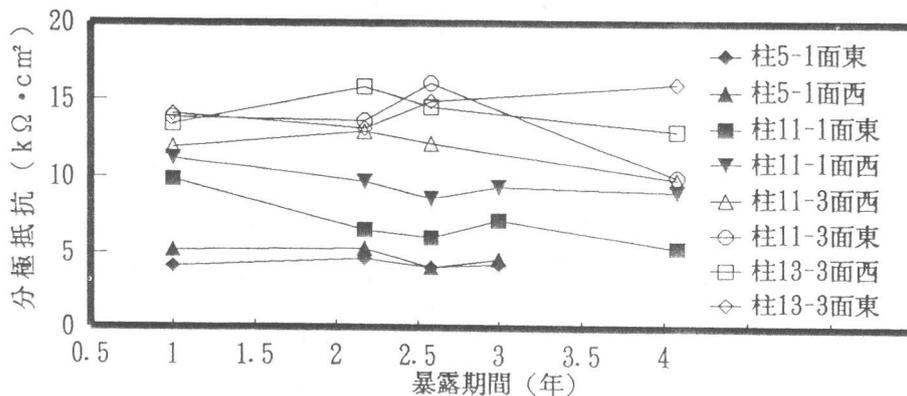


図-12 分極抵抗の経時変化 (平均値)

軽微の腐食が発生したと評価される。腐食の活性化に伴って1面の分極抵抗は経時的に減少するが、1面東の減少は特に著しい。3面は $12\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 以上を維持しているが、4年目で減少傾向が表れる。柱13の3面は高い分極抵抗が表れ、健全状態が維持されている。

4. まとめ

厳しい塩害環境下のRC暴露構造物を対象に、過去4ヶ年にわたり暴露実験を行ってきた。外観調査、含有塩分量試験、及び電気化学特性値測定等によって塩害劣化過程が解明された。暴露4年時の実験から次の知見が得られた。

- (1) 海水飛沫を受ける厳しい環境下では、コンクリート中への塩分浸透が建設当初から著しい。柱の1面及び3面の鉄筋位置で、各々、0.13%及び0.02%に達し、1面側の鉄筋は著しい腐食環境下にある。
- (2) ASTM-C876-80の自然電位による腐食評価、及び既提案の分極抵抗による腐食評価[2]にもとづき柱の鉄筋腐食評価を行った。この評価は外観状況及び塩害環境に対応している。
- (3) 自然電位及び分極抵抗の値は、塩害環境に伴う鉄筋腐食状況に対応して経時的に変化する。自然電位は腐食劣化に対応して卑に移行し、また、分極抵抗は健全状態の $12\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 以上の値から漸次減少する。その減少過程を区別することにより、腐食評価のランクが確立できる。
- (4) 自然電位法に分極抵抗による腐食評価を加えることにより、より精度の高い腐食評価が可能となる。

参考文献

- 1) .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
- 2) .大城武, 斉藤仁, 近藤忠生: 塩害を受けたRC構造物の腐食評価法について, コンクリート工学年次論文報告集 14-1, P649-654, 1992.
- 3) .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
- 4) .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