

RC港湾構造物の塩害に係わる環境要因の定量的評価 に関する研究

濱田, 秀則

<https://doi.org/10.11501/3142530>

出版情報 : 九州大学, 1998, 博士 (工学), 論文博士
バージョン :
権利関係 :

第4章 モルタル中鉄筋の腐食量指標に関する検討

4.1 序節

前章において述べたように、本研究においてはモルタル供試体を環境条件の異なる全国の19の港湾内に2年間暴露し、その後モルタルおよび内部の鉄筋に関して数種の試験を実施した。環境要因の影響を定量的に評価するにあたり、暴露後の供試体より以下の3種類の情報を取得した。一つは内部鉄筋の分極抵抗試験より得られる鉄筋表面の不動態の状態に関する情報、一つは定電位ステップ試験より得られるモルタル中鉄筋への酸素の供給量に関する情報、そして今一つは、モルタル中の塩化物含有量より求められる内部鉄筋の腐食進行期間に関する情報である。

本章においてはまず宮川らが示すRC部材の塩害進行過程について述べ、前述のモルタル供試体に関する試験項目の塩害進行過程における位置づけを示す。次に、本研究において実施した試験の結果およびその考察を総括する。また、モルタル中の塩化物含有量の計測結果より発錆開始時刻を算出し、暴露2年時までに実際に腐食が進行した期間を求める。また、内部鉄筋の分極抵抗試験および定電位ステップ試験の結果に基づき、各供試体中の鉄筋の腐食速度を相対的に比較するための腐食速度指標を提案する。最後に、腐食速度指標と腐食進行期間より暴露2年時の腐食量を相対的に比較するための腐食量指標を提案し、その腐食量指標と実際の腐食量を比較することにより提案した指標の妥当性を検討するものである。

4.2 RC部材の塩害進行過程と取得データの基本的関係

4.2.1 RC部材の塩害進行過程

図-4.1に宮川らによって提案されているRC部材の塩害劣化の進行過程モデルを示す[1]。宮川らによると、塩害の進行過程は四つの期間に区分され、それぞれ「潜伏期」、「進展期」、「加速期」、「劣化期」と称されている。また、K. Tuttiも塩害の進行過程について独自の考え方を示しており、その期間を「Initiation Period」と「Propagation Period」の二つの期間に区分している[2]。宮川による「潜伏期」とK. Tuttiによる「Initiation Period」は全く同一の期間を指しており、これらの期間は供用開始時からコンクリート中の鉄筋の腐食が始まるまでの期間と定義されている。鉄筋が腐食を開始する時刻を特定するのは難しいが、これまでの研究結果より鉄筋周囲の塩化物含有量がある

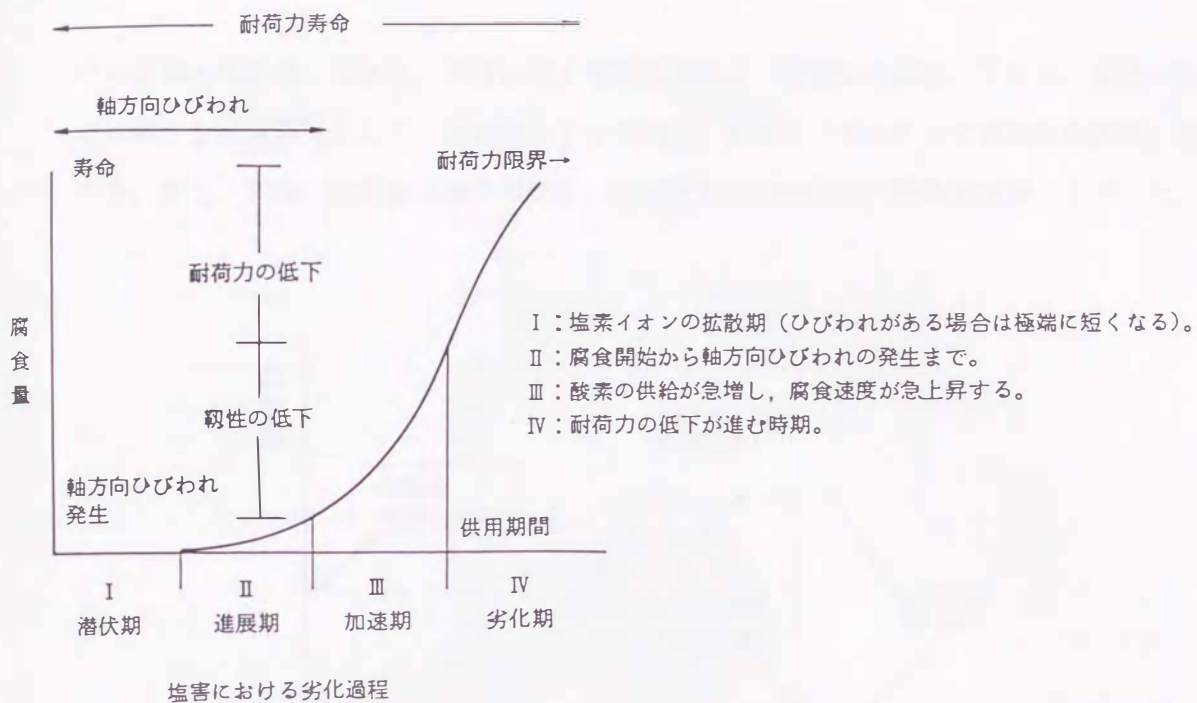


図-4.1 宮川による塩害劣化のモデル

臨界値を越えると鉄筋の腐食が開始されるとする考え方が現在のところ最も一般的である。そして、その臨界濃度はセメントに対する塩化物イオン (Cl^-) の質量比で 0.4% 近傍であるとの研究報告がある [3]。したがって、実際の構造物において潜伏期の長さを決定するのはコンクリート中への塩化物イオンの浸入速度であると考えられる。

潜伏期に続く進展期は内部鉄筋の腐食開始から、かぶりコンクリートにひびわれが発生するまでの期間と定義される。実際の構造物において進展期の長さを決定するのは内部鉄筋の腐食速度、対象とする RC 部材の形状・寸法およびコンクリートの強度であると考えられる。

本研究はモルタル供試体を 2 年間暴露した範囲内で得られる情報を基に構成しており、本文中において議論の対象とするのは潜伏期および進展期である。それに続く加速期および劣化期は本研究では対象としないこととする。

4.2.2 モルタル供試体試験項目の塩害進行過程における位置づけ

図-4.2 にモルタル供試体の試験項目の塩害進行過程における位置づけを示す。潜伏期に影響を及ぼす塩化物イオンの浸入速度に関する試験項目は「塩化物含有量試験 (拡散係数の算出)」である。進展期に関係するものとして「鉄筋の不動態の状態」と「鉄筋表面

への酸素の供給量」があり、前者に関する試験項目は「分極抵抗試験」である。また、後者に関する試験項目として「定電位ステップ試験」および「モルタルの電気抵抗試験」がある。また、鉄筋の腐食量を示す指標として本研究においては「発錆面積率」を用いた。

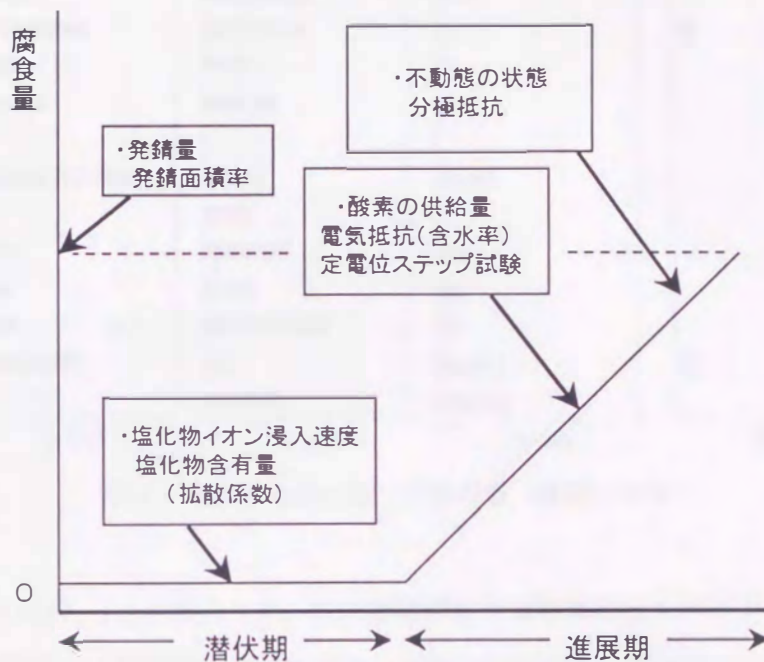


図-4.2 塩害進行過程における試験項目の位置づけ

4.3 試験結果および考察

4.3.1 モルタル中の塩化物含有量

図-4.3 に暴露2年後における鉄筋周囲(かぶり厚さ約20mm)のモルタル中の塩化物含有量を示す。暴露部位の違いによるデータの傾向を見てみると、海中部および干満部において塩化物含有量が多く、飛沫部の場合は海中部および干満部よりも塩化物含有量は少ない。また、陸上部の場合は他の三部位に比べて塩化物含有量はかなり小さい。暴露港の相違によるデータのばらつきを各部位ごとに見てみると、海中部、干満部、飛沫部いずれも暴露港間の相違がある。これより、各部位とも各港間で環境条件に相違があることが明らかである。

図-4.3 よりわかるように、陸上部の場合は塩化物イオンの侵入は暴露2年程度ではほとんど進行しておらず、鉄筋周囲の塩化物含有量も鉄筋腐食を発生させうるに十分な含有

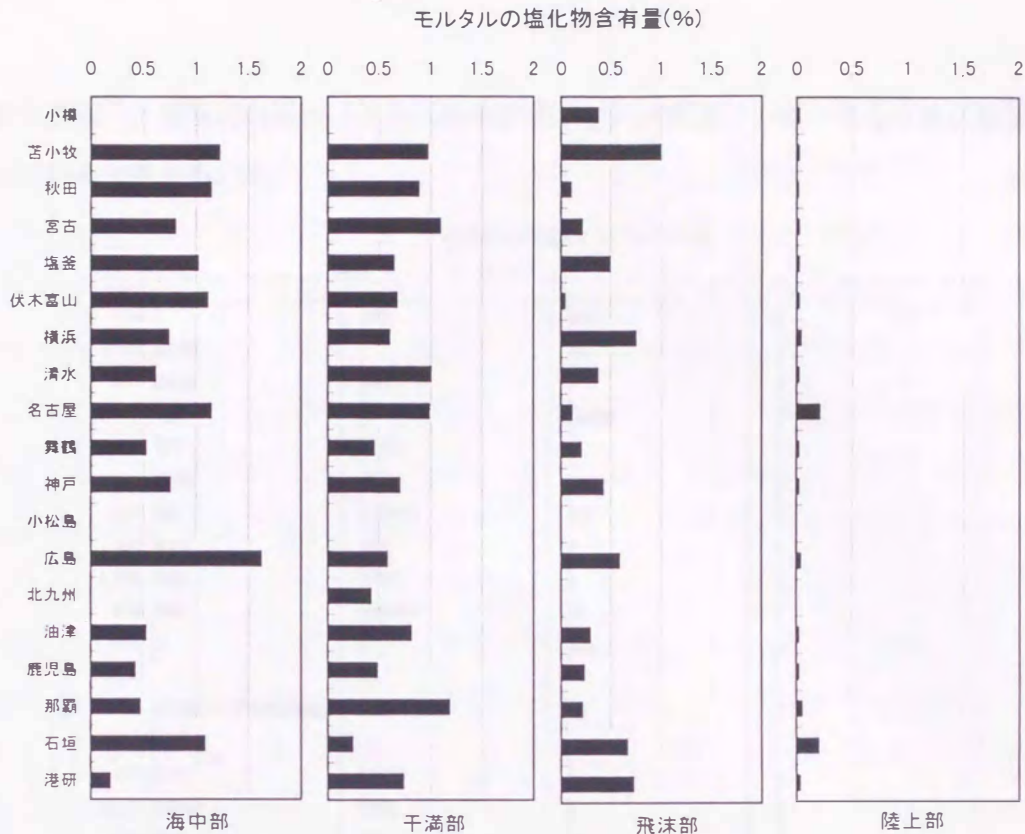


図-4.3 モルタル中の塩化物含有量 (暴露2年後)

量には達していなかった。このため、陸上部に関しては環境要因を評価することは難しいと判断し、以後述べる腐食量指標の考察からは陸上部を除外している。

4.3.2 塩分拡散係数とモルタル表面の塩化物含有量

図-4.4 に計算により求めた見掛けの塩分拡散係数を、また図-4.5 に同じく計算により求めたモルタル表面における塩化物含有量を示す。塩分拡散係数を暴露部位ごとに比較してみると、海中部および干満部において最も大きく、次いで飛沫部、陸上部の順になっている。暴露港の相違によるデータのばらつきは、海中部、干満部、飛沫部いずれにおいても認められる。一方、図-4.5 に示されるように、モルタル表面における塩化物含有量は飛沫部において最も大きく、海中部および干満部は飛沫部よりは小さく両者はほぼ同程度の含有量を示している。塩分拡散係数およびモルタル表面における塩化物含有量の傾向より判断して、海中部と干満部は塩化物イオンの浸入に関して類似の環境条件であると考えられ、飛沫部および陸上部はそれとは異なる環境条件であると考えられる。この結果は第2章における既往の研究の整理より得られた知見と一致している。図-4.4 および図-4.5 の結果より、海中部および干満部の場合は各港の環境要因が主に見掛けの塩分拡散係数に

影響を及ぼし、飛沫部の場合は各港の環境要因が主に表面部分の塩化物含有量に影響を及ぼしていると考えられる。

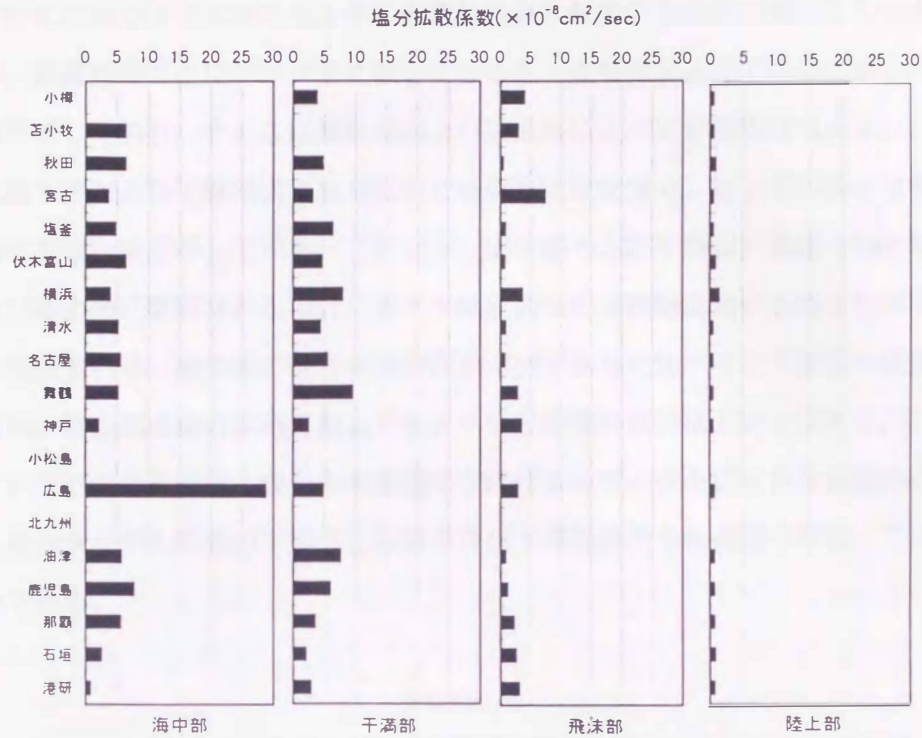


図-4.4 計算により求めた塩分拡散係数

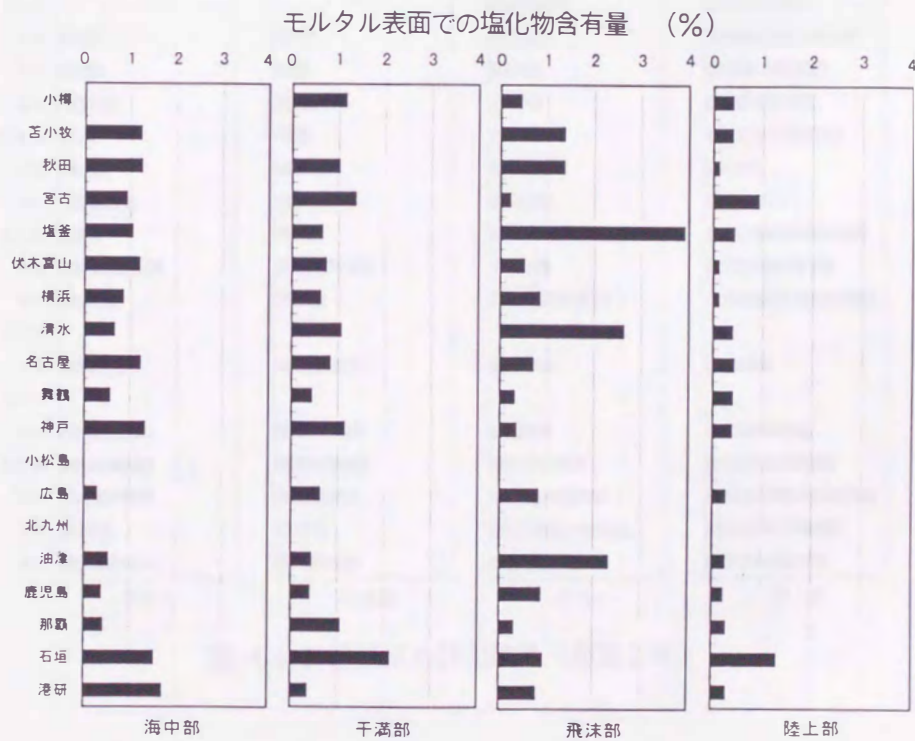


図-4.5 計算により求めたモルタル表面での塩化物含有量

4.3.3 分極抵抗

図-4.6 に暴露2年後におけるモルタル中铁筋の分極抵抗の計測結果を示す。なお、本図は(3.24)式に基づき計測時のモルタルの電気抵抗に起因する誤差の補正を行った値を示している。暴露部位ごとにデータを比較してみると、海中部および干満部においてほぼ同程度の値を示しており、それらは飛沫部および陸上部に比べて分極抵抗は小さい。飛沫部の場合には海中部および干満部よりも全体的に分極抵抗は大きく、陸上部の場合には飛沫部よりもさらに大きな値を示している。これより、海中部および干満部に暴露された場合は飛沫部および陸上部に暴露された場合に比べて鉄筋表面の不動態皮膜が破壊されやすい環境であると判断される。飛沫部の場合には海中部および干満部に比べると不動態の状態はよいと判断され、陸上部の場合には飛沫部よりもさらに不動態の状態はよいと言える。

また、いずれの暴露部位の場合も暴露港の相違によるデータのばらつきが認められることより、モルタル中の鉄筋の不動態に影響を及ぼす環境条件も各港間で異なっていることが明らかである。



図-4.6 分極抵抗の計測結果 (暴露2年)

4.3.4 モルタルの電気抵抗

第3章の3.6において述べた定電位ステップ試験に関する基礎検討の結果より、モルタルの含水率（電気抵抗で示される）とモルタルの酸素の拡散性は必ずしも相関性を有しないことがわかっている。したがって、本項ではモルタル中の酸素拡散性の一参考指標という位置づけでモルタルの電気抵抗の計測結果を示す。なお、前項において示した分極抵抗値は、本項で示す電気抵抗の計測値に基づいて補正を行っているものである。

図-4.7 に暴露2年後におけるモルタルの電気抵抗の計測結果を示す。暴露部位の違いによるデータの傾向を見てみると、海中部および干満部においてモルタルの電気抵抗が最も小さく、次いで飛沫部、陸上部の順に大きくなっている。モルタルの電気抵抗はモルタル中の含水率と密接な相関性を有することより、海中部および干満部に暴露されている場合がモルタルの含水率は最も大きく、飛沫部に暴露されている場合は海中部および干満部の場合よりもモルタルは乾燥しており、陸上部の場合はそれよりもさらに乾燥していることが理解される。また、海中部、干満部、飛沫部、陸上部いずれの場合も暴露港間の相違が認められることより、各港ごとに環境条件が異なっていることが明らかである。

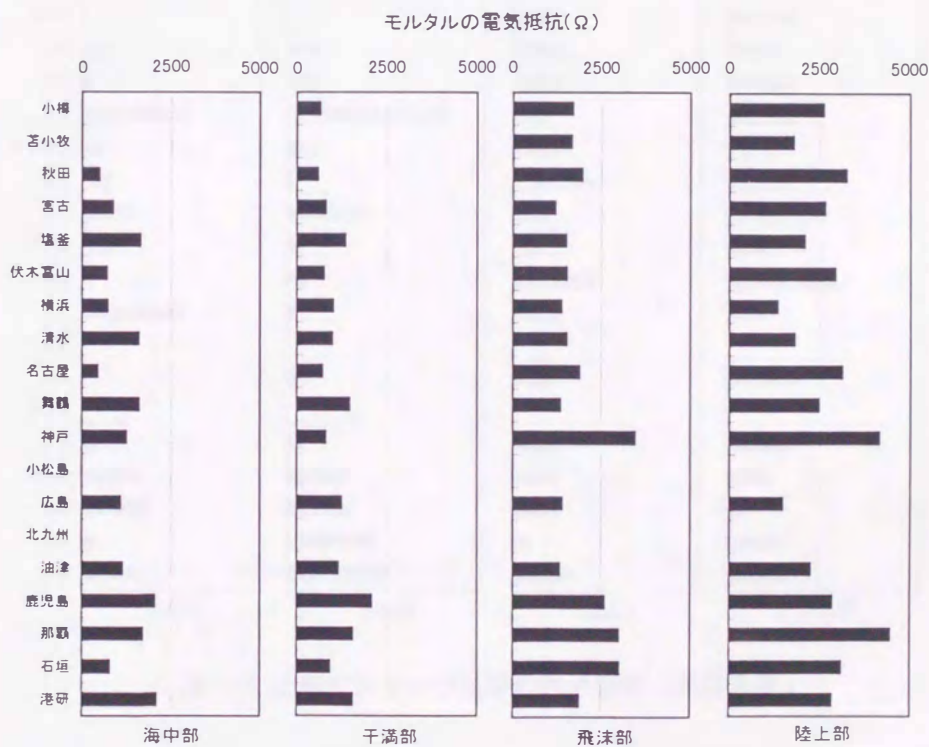


図-4.7 モルタルの電気抵抗の計測結果（暴露2年）

4.3.5 定電位ステップ試験

図-4.8 に暴露2年後の定電位ステップ試験の計測結果を示す。なお、図中のデータは計測開始後10時間における電流値を鉄筋表面積で除した電流密度で表示している。暴露部位の相違によるデータの傾向を見てみると、海中部および干満部のデータがほぼ同様の傾向を示しており、飛沫部および陸上部に比べて暴露港間のばらつきも大きい。飛沫部の場合は海中部および干満部よりも平均的には値が大きいものの、陸上部に比べると小さい。また、飛沫部の暴露港間のばらつきは海中部および干満部よりは小さい。陸上部の場合は飛沫部に比べて全体的に値が大きい、暴露港間のばらつきの傾向は飛沫部の場合とよく似ている。この暴露部位ごとのデータの傾向は図-4.7 に示すモルタルの電気抵抗（含水率）の示す傾向と比較的似ているようであり、モルタルの含水率と定電位ステップ試験は不完全ながらも相互の関係が存在することが推察される。

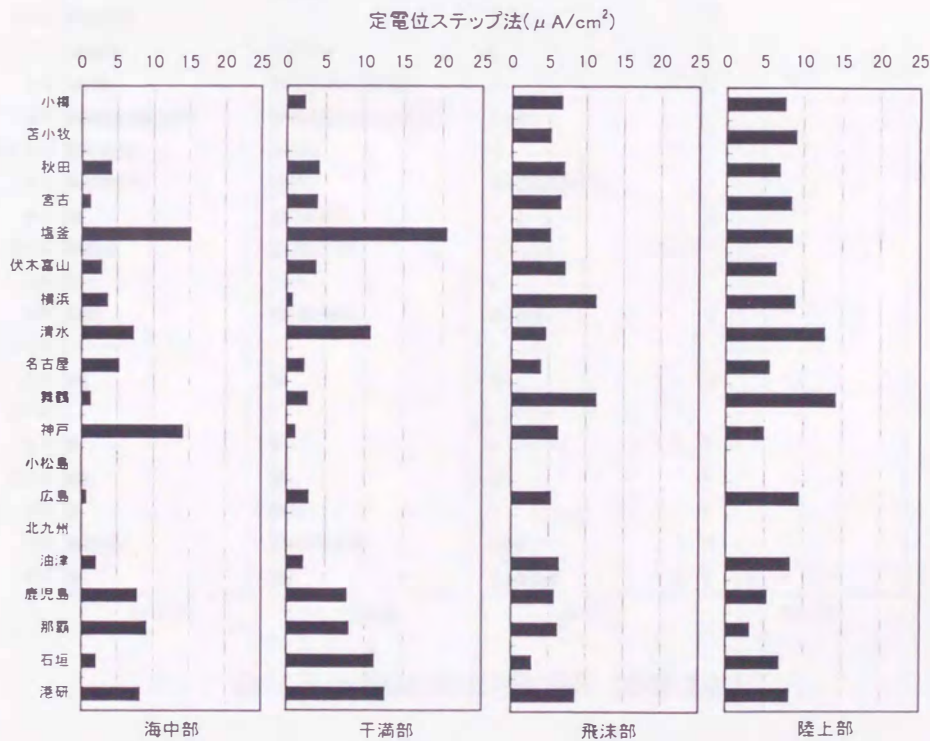


図-4.8 定電位ステップ試験の計測結果（暴露2年）

4.3.6 鉄筋の発錆面積率

図-4.9 に内部鉄筋の発錆面積率の計測結果を示す。暴露部位によるデータの傾向をみると、干満部に暴露された場合が発錆面積率が最も大きく、次いで海中部、飛沫部、陸上部の順になっている。暴露港の相違によるデータのばらつきをしてみると、海中部および干満部の場合には比較的北に位置する港において発錆面積率が大きいという傾向が見られる。一方、飛沫部の場合も暴露港間のばらつきが認められるものの、特に地理上の傾向は認められない。陸上部の場合には発錆面積率自体が極めて軽微であり、暴露港間のばらつきはほとんど認められない。

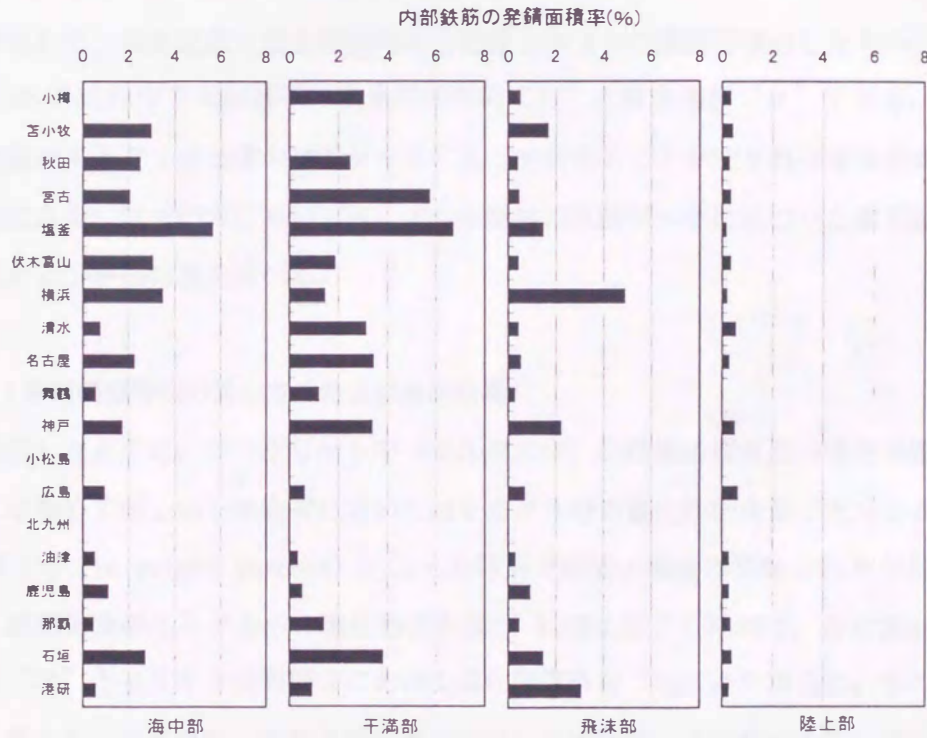


図-4.9 内部鉄筋の発錆面積率 (暴露2年)

4.4 モルタル中铁筋の腐食量指標の算出

4.4.1 腐食量算出の基本的考え方

(3.1)式に基づき、本実験におけるモルタル中の鉄筋の腐食量は基本的には(4.1)式により計算される。

$$W_{corr} = \int_{t_1}^{2\text{year}} \sigma \cdot dt \quad (4.1)$$

ここで、 W_{corr} : 腐食量

σ : 腐食速度

t_1 : 腐食開始時刻

すなわち、腐食速度を腐食開始時から暴露2年までの期間で積分したものが腐食量であり、(4.1)式の中で未知量は、腐食開始時刻“ t_1 ”と腐食速度“ σ ”である。この2つの未知量をモルタル供試体の試験データに基づき定めることができれば腐食量が求められることになる。以下の項においてモルタル供試体の試験データに基づいた腐食量指標の算出方法および算出結果を述べる。

4.4.2 発錆開始時刻の算出方法および算出結果

前述したように、コンクリート中（モルタル中）の鉄筋の腐食開始時を明確に特定することは極めて難しい。本研究においてはモルタル中の塩化物含有量がセメント質量に対して0.4%（in weight percent）になった時点で鉄筋の腐食が開始されたと仮定した。また、鉄筋周囲のモルタル中の塩化物含有量が0.4%に達する時刻は、先に求めた塩分拡散係数“ D_c ”とモルタル表面部分における塩化物含有量“ C_0 ”より求めた。その求め方は、第2章において述べた「拡散係数の概念を用いた収集データの解析方法」を応用した。すなわち、正規確率紙の横軸をコンクリート表面からの距離、縦軸を $(C/2C_0) \times 100$ とし、両者の関係を直線表示すると、その傾きは $1/(2\sqrt{Dt})$ となることを利用した。これらの式の中で“ C_0 ”および“ D_c ”は既に求めている。ここで、モルタル表面からの距離が20mm（埋設鉄筋の表面の位置）において $C=0.4\%$ であるとする、未知量は“ t ”のみとなる。これより、“ t ”すなわち発錆開始時刻を求めた。

図-4.10 に海中部、干満部および飛沫部の発錆開始時刻の算出結果を示す。なお、陸上

部は塩化物含有量が 0.4%に達していなかったため、発錆開始時刻を計算することができなかった。図-4.10 より明らかなように、海中部および干満部の場合はいずれの港の場合も暴露開始後約5ヶ月で発錆が始まっている。また、暴露港間のばらつきも極めて小さいのが特徴である。一方、飛沫部の場合にはそれよりも発錆開始時刻は遅く、かつ暴露港間のばらつきも大きい。表-4.1 に発錆面積率と腐食進行期間の間で求めた相関係数を示す。なお、この場合の腐食進行期間とは、暴露期間（6ヶ月、12ヶ月、24ヶ月）より発錆開始時刻を差し引いた値のことである。6ヶ月、12ヶ月、24ヶ月と分けて相関係数を求めた場合、いずれもさほど大きな相関係数は示されていない。6ヶ月、12ヶ月、24ヶ月を総合して相関係数を求めてみると幾分相関係数は高くなるものの、両者の間に必ずしも明確な線形関係が存在する訳ではない。

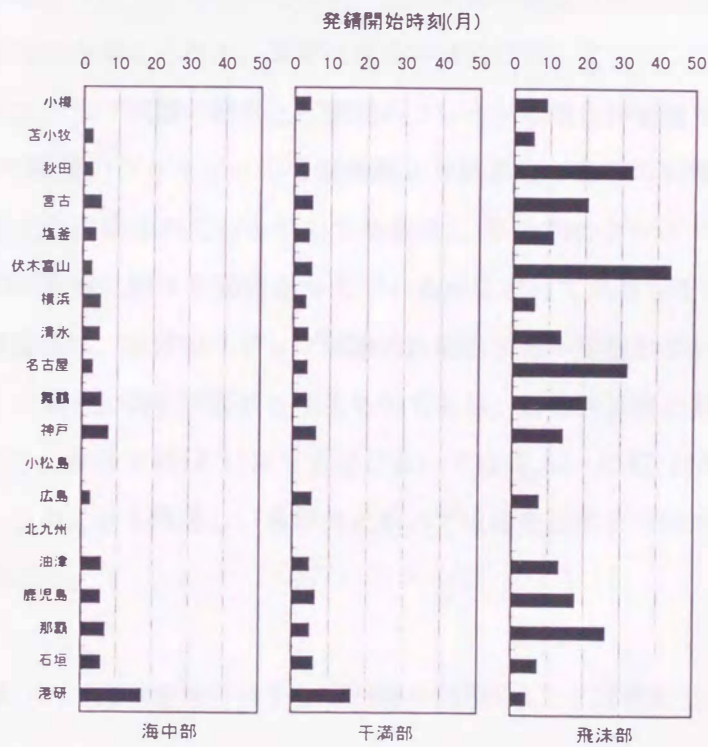


図-4.10 発錆開始時刻の算出結果

表-4.1 発錆面積率と腐食進行期間の相関性

(相関係数)

	海中部	干満部	飛沫部
6ヶ月	0.29	0.35	
12ヶ月	0.43	0.59	
24ヶ月	0.41	0.23	0.57
総合	0.63	0.68	0.57

4.4.3 腐食速度指標の算出

(3.2)式に示されるように、鉄の腐食速度は速度定数“ k_{CORR} ”と反応物質の濃度“[reactants]”の積で表される。コンクリート中の鉄筋の場合、速度定数は鉄筋表面の不動態の状態に規定されるものと考えられ、反応物質の濃度は鉄筋表面への酸素供給量が支配要因になるものと考えられる。筆者は過去の研究において、コンクリート中の鉄筋の腐食量を定電位ステップ試験の結果と不動態のグレイドの総合評価値で推定することを試みている[4]。不動態のグレイドとは分極曲線より鉄筋の不動態の状態を推定する一手法であり、大即により提案されているものである[5]。不動態のグレイドと分極抵抗は両者とも鉄筋表面の不動態に関する情報を与えている点において共通している。参考文献[4]において示す評価法は、定電位ステップ試験の計測結果を不動態のグレイドと同様に6段階に分類し、この両者の積を評価値とするものである。この評価値と腐食量の相関係数を求めてみたところ、参考文献[4]に示す実験においては0.55、0.62および0.84という結果を得ている。このことも考慮し、本研究においては腐食速度を評価する腐食速度指標を次式のように与えた。

$$\text{腐食速度指標} = A \cdot (\text{定電位ステップ試験の結果}) \cdot (1 / \text{分極抵抗}) \quad (4.2)$$

定電位ステップ試験の結果、すなわち鉄筋表面への酸素の供給量を示す指標と分極抵抗の逆数、すなわち鉄筋表面の不動態の状態を示す指標の積にある定数“A”を乗じたものを腐食速度指標として与えた。図-4.11に腐食速度指標から定数Aを除いているもの、すなわち(定電位ステップ試験の結果) × (1 / 分極抵抗)の計算結果を示す。海中部および干満部においては一部に突出して大きな値を示すデータがあるが、飛沫部の場合はその

ような突出したデータは見られない。暴露港間のばらつきは干満部において最も大きく、次いで海中部であり、飛沫部において最も小さい。いずれの部位においても暴露港間ではばらつきが存在することより、各港ごとに環境条件が異なっていることが明らかである。表-4.2 に発錆面積率と腐食速度指標の間で求めた相関係数を示す。海中部および干満部において相関性の存在がわずかに示唆されているが、飛沫部の場合は相関性の存在を認めることはできない。したがって、本項において提案した腐食速度指標は腐食量（発錆面積率）を推定する腐食量指標とはなり得ないことが明らかである。

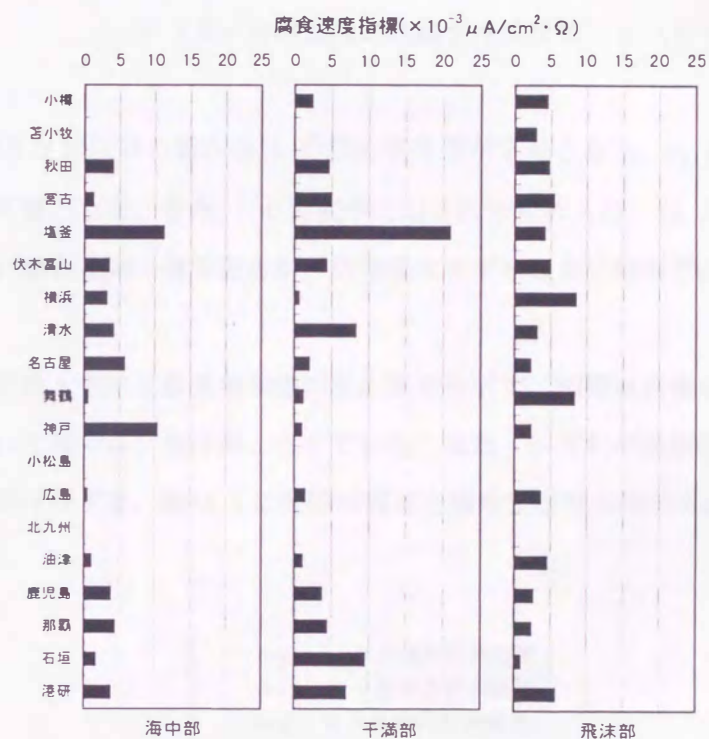


図-4.11 腐食速度指標の算出結果

表-4.2 発錆面積率と腐食速度指標の相関性

(相関係数)

	海中部	干満部	飛沫部
12ヶ月	0.89	0.02	-0.05
24ヶ月	0.53	0.66	0.33
総合	0.65	0.51	-0.01

4.4.4 腐食量指標の提案および発錆面積率との相関性

前項および前々項において述べたとおり、腐食進行期間のみ、あるいは腐食速度指標のみでは腐食量指標とはなり得ないことがわかった。したがって、腐食進行期間と腐食速度指標の両者を加味する腐食量指標を図-4.12 に示すように与えた。図-4.12 に示す腐食量指標の定義は(4.3)式で示される。

$$\begin{aligned} \text{腐食量指標} = & A \cdot [(24 \text{ ヶ月時に求めた腐食速度指標}) \times (12 \text{ ヶ月}) \\ & + (12 \text{ ヶ月時に求めた腐食速度指標}) \times (6 \text{ ヶ月}) \\ & + (6 \text{ ヶ月時に求めた腐食速度指標}) \times (6 \text{ ヶ月} - t_1)] \quad (4.3) \end{aligned}$$

なお、 t_1 が6ヶ月以降の場合は(4.3)式の第3項が不要となり、 t_1 が12ヶ月以降の場合は第2項も不要となる。また、(4.3)式中に示される定数Aは、(4.2)式中の定数Aが経時変化をしない場合は同一値を取るが、経時変化をする場合には両者は異なる値を取ることになる。

図-4.13 に定数Aを除く腐食量指標の算出結果を示す。指標値自体は干満部において最も大きく、次いで海中部、飛沫部となっている。また、いずれの暴露部位の場合も暴露港間のばらつきが存在する。表-4.3 に発錆面積率と腐食量指標の間で求めた相関係数を示

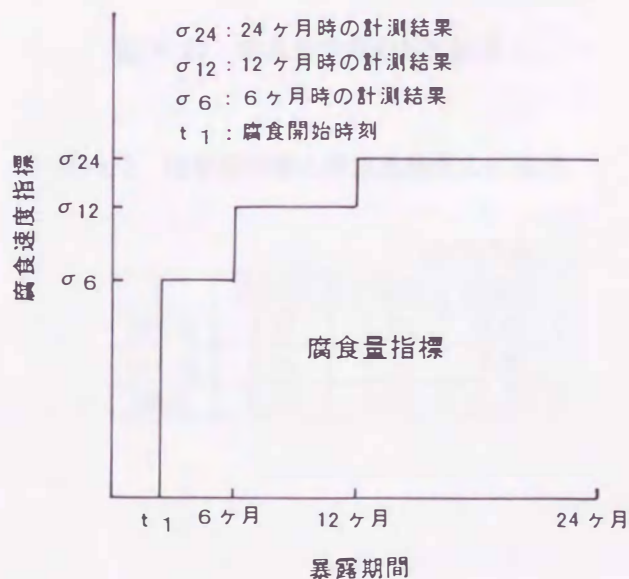


図-4.12 腐食量指標の考え方

す。12ヶ月暴露時、24ヶ月暴露時の相関係数を見てみると、干満部の12ヶ月時を除いて0.6~0.9程度の相関係数を示しており相関性の存在が示唆される。また、12ヶ月暴露時と24ヶ月暴露時の合計で相関係数を求めてみると、海中部、干満部、飛沫部のいずれの場合も相関係数が0.74~0.80を示しており、比較的高い相関性を認めることができる。

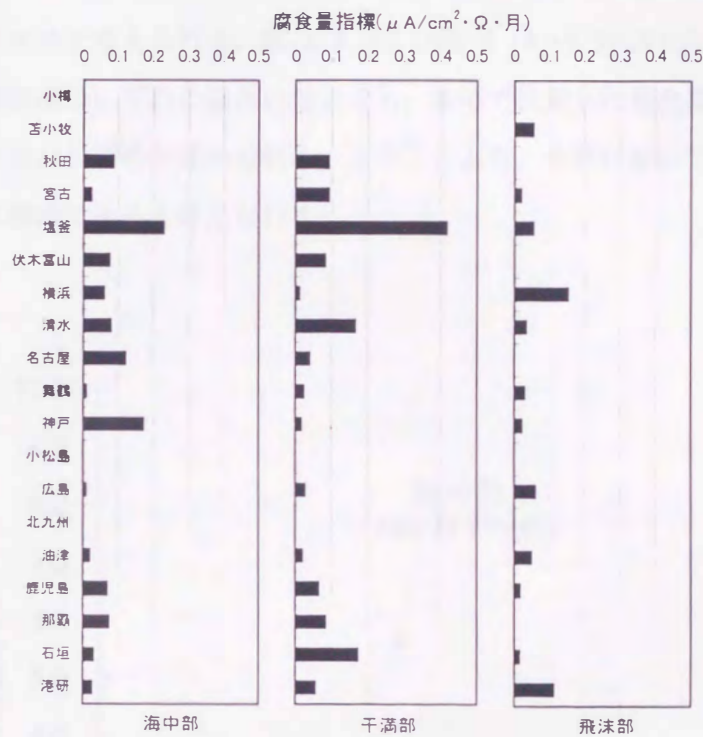


図-4.13 腐食量指標の算出結果

表-4.3 発錆面積率と腐食量指標の相関性

(相関係数)

	海中部	干満部	飛沫部
12ヶ月	0.93	0.23	0.62
24ヶ月	0.64	0.72	0.82
総合	0.78	0.74	0.80

図-4.14~4.16 に、海中部、干満部、飛沫部の場合の発錆面積率と腐食量指標の関係を示す。また、同図中に最小二乗法により求めた近似直線も併せて示す。近似直線の傾きは暴露部位ごとに異なる値を示しているが、海中部と干満部では比較的近い値を示している。この近似直線の傾きの違い、すなわち腐食量指標中の定数“A”は暴露部位の違いにより異なってくるものと推察される。このことは、腐食量指標と実際の腐食量の対応関係が暴露部位ごとに異なることを示しており、この定数は鉛直方向の環境条件を示す一つの有力なパラメーターであると考えられる。表-4.3 および図-4.14~4.16 よりわかるとおり、海中部、干満部、飛沫部のいずれの場合においても、本項で提案した腐食量指標と発錆面積率の間には比較的良好な相関性が認められる。このことより、本章において提案した腐食量指標は概ね妥当な指標であると考えられる。

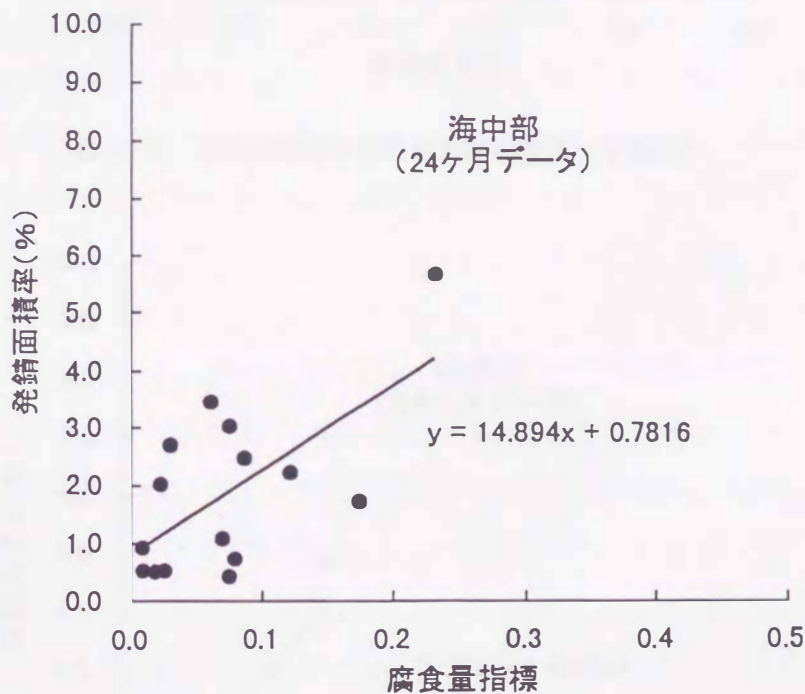


図-4.14 発錆面積率と腐食量指標の関係 (海中部)

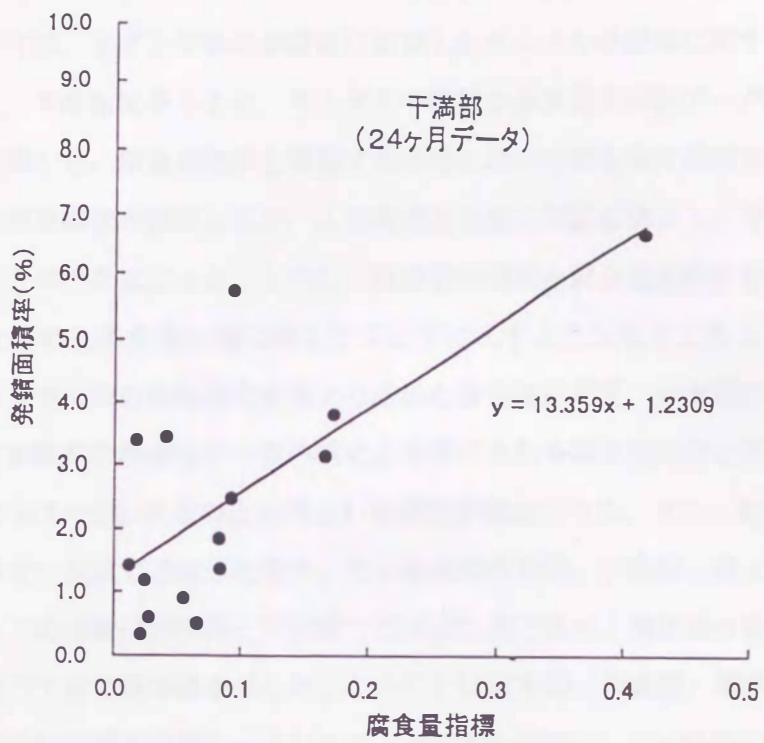


図-4.15 発錆面積率と腐食量指標の関係 (干満部)

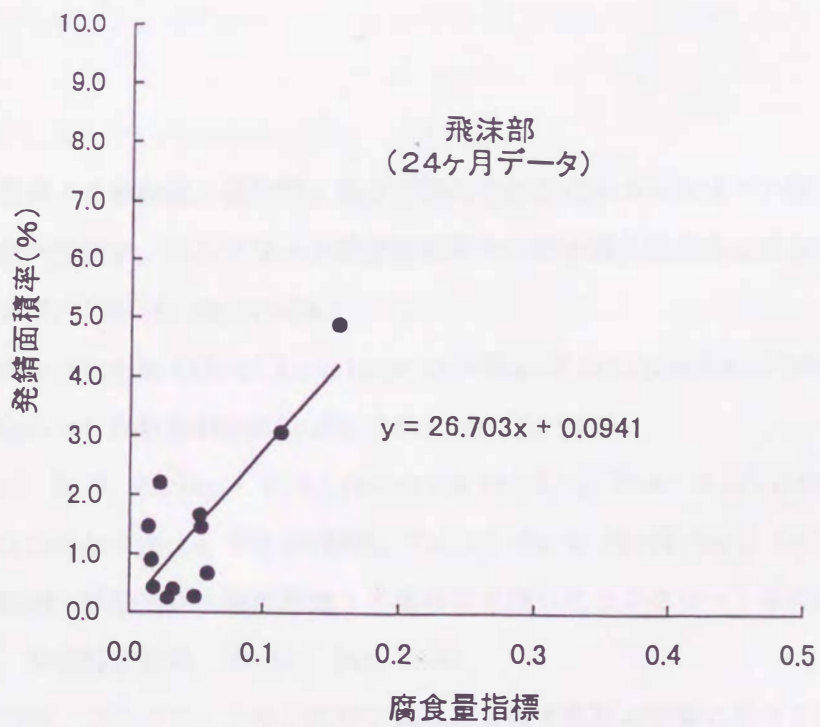


図-4.16 発錆面積率と腐食量指標の関係 (飛沫部)

4.5 まとめ

本章においては、まず2年間の暴露後に実施したモルタル供試体に関する各種の試験結果を総括した。その結果をもとに、モルタル中鉄筋の腐食量を試験データより推定する腐食量指標を提案した。腐食量指標を構築する過程において腐食進行期間を求め、またそれに加えて腐食速度指標を提案したが、この両者と実際の発錆面積率との間には明確な相関性を認めることはできなかつた。しかし、腐食進行期間と腐食速度指標を総合的に考慮することにより求めた腐食量指標に関しては以下に示すような知見を得ることができた。すなわち、モルタル中の塩化物含有量より求めた腐食進行期間、分極抵抗の逆数および定電位ステップ試験の計測結果の3者の積により構成される腐食量指標と発錆面積率の間には相関係数で0.7~0.8程度の比較的よい相関性が認められた。また、腐食量指標と発錆面積率の関係を一次式で近似した場合、その係数は海中部、干満部、陸上部ごとに異なる値となった。この係数は海中部と干満部ではほぼ同程度であり、飛沫部の場合は海中部および干満部に比べて約2倍の値を示した。このことは海中部、干満部、飛沫部ごとに腐食量指標と腐食量の対応関係が異なっていることを示すと同時に、この係数の値は鉛直方向の環境条件の相違を示しているものと考えられる。すなわち、海中部と干満部は類似の環境条件であり、飛沫部はそれとは異なる環境条件であることを示しているものと考えられる。

参考文献

- [1] 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，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，1984. 4，pp. 47~54
- [2] K. Tutti：Service Life of Structures with Regard to Corrosion of Embedded Steel，ACI Special Publication No. 65，1980，pp. 223~236
- [3] 例えば，D. W. Pfeifer・W. F. Perenchio and W. G. Hime：A Critique of the ACI 318 Chloride Limits，PCI JOURNAL，Vol. 37，No. 2，March-April 1992，pp. 68~71
- [4] 大即信明・浜田秀則・原茂雅光：各種補修を施したコンクリート梁の促進海水養生試験，港湾技研資料，No. 631，Dec. 1988
- [5] 大即信明：コンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす塩素の影響に関する研究，港湾技術研究所報告 第24巻 第3号，1985・9

第5章 腐食量指標に及ぼす環境要因の影響度に関する検討

5.1 序節

第4章においてモルタル中鉄筋の腐食量指標について検討した。その結果、モルタル中の塩化物イオンの浸入速度をもとに求めた腐食進行期間、モルタル中の鉄筋表面への酸素供給量の指標となる定電位ステップ試験の計測結果、および鉄筋表面の不動態の状態を示す指標となる分極抵抗の計測結果に基づいた腐食量指標を提案した。

本章においては、暴露港の気象条件、波浪条件および海水成分条件のどの要因が腐食量指標に影響を及ぼしているのかを検討する。そのために、腐食量指標を構成する3要素、すなわち、腐食進行期間（発錆開始時刻）、分極抵抗の逆数および定電位ステップ試験の結果と各種の環境要因の関係を検討する。前章において述べた腐食量指標の検討においては、あらかじめ指標の形を想定した上でそれを検証するという方法を採用した。しかし、本章における検討では予め両者の関係の形を想定することは基本的に不可能であるため多変量解析の手法を用いた。本検討において用いた多変量解析は主成分分析と重回帰分析であり、2回の主成分分析と1回の重回帰分析により構成されている。最終的には、腐食量指標構成要素3項目を従属変数、環境要因を独立変数とする重回帰式を求め、腐食量指標の構成要素に及ぼす各種の環境要因の影響度を明らかにするものである。

5.2 暴露を実施した港の海水成分分析

各港の海水の成分分析結果は第3章の表-3.3に取りまとめている。これらの分析項目のうち、以後の解析の対象とする項目を選定するために各項目間の相関性を検討した。表-5.1に各項目間で求めた相関係数を示す。表-5.1よりわかるとおり、比重と他の項目間に相関性は認められないが、pHと他の海水成分間には相関性（相関係数：0.75～0.85）が認められる。一方、成分分析の対象とした6つの成分間にはほぼ完全な相関性が認められる。したがって、これらの6つの成分項目のうち塩化物イオン（ Cl^- ）濃度を以後の解析の対象として選定した。すなわち、海水成分の検討項目として、比重、pHおよび塩化物イオン濃度の3項目を選定した。

表-5.1 海水成分の各項目間の相関係数

(相関係数)

	pH	海水成分					
		Na	K	Ca	Mg	Cl ⁻	SO ₄
比重	-0.32	-0.10	-0.09	-0.08	-0.04	-0.09	-0.09
pH		0.82	0.83	0.79	0.76	0.83	0.82
Na			0.99	0.99	0.99	1.00	1.00
K				0.97	0.98	1.00	1.00
Ca					0.99	0.98	0.98
Mg						0.98	0.98
Cl ⁻							1.00

5.3 暴露を実施した港の気象条件および波浪条件について

各港の気象条件は第3章の表-3.2に取りまとめている。これらの気象条件の中で解析の対象とする項目を選定するために各項目間の相関性を検討した。また、気象条件と海水成分の相関性、気象条件と波浪条件の相関性についても検討した。

5.3.1 気象条件の各項目間の相関性の検討

表-5.2に気象条件の各項目間で求めた相関係数を示す。なお、表中の相関係数は24ヶ月間の合計値を用いて計算した結果である。表-5.2に示されるように、平均気温と平均最高気温（相関係数：0.99）、および平均風速と最大風速（相関係数：0.92）に関して相関性が認められる。このため、気温および風速に関しては、平均気温および平均風速のみを以後の解析の対象とした。したがって、気象条件の項目として、平均気温、湿度、日照時間、降水量、平均風速を検討項目として選定した。またそれに加えて、気温に関して気温偏差という項目も気象条件の一つに加えた。この気温偏差とは各港の気温と全体平均値の差の絶対値を示している。気温偏差を検討項目として加えた理由は、寒冷地域と熱帯地域を同等に評価する必要がある場合の指標とするためである。

表-5.2 気象条件の各項目間の相関係数

(相関係数)

		気温 最高	湿度	風速		日照時間	降水量
				平均	最大		
気温	平均	0.99	-0.26	0.59	0.44	0.27	0.61
	最高		-0.31	0.51	0.39	0.29	0.63
湿度				0.02	-0.05	-0.50	0.02
風速	平均				0.92	0.28	0.37
	最大					0.22	0.29
日照時間							0.15

5.3.2 気象条件と海水成分の相関性の検討

表-5.3 に気象条件項目と海水成分項目間で求めた相関係数を示す。海水の pH と平均気温の間にわずかな相関性（相関係数：0.55）が示唆されるものの強い相関ではない。全体的に見て、気象条件と海水成分の間に相関性は認められない。したがって、以後の解析においては気象条件の各項目と海水成分の各項目は独立として取り扱うこととした。

表-5.3 気象条件と海水成分間の相関係数

		(相関係数)				
		平均気温	平均湿度	平均風速	日照時間	降水量
海水成分	比重	0.11	-0.27	-0.15	0.36	-0.02
	pH	0.55	-0.06	0.19	-0.07	0.22
	Cl ⁻	0.33	0.00	0.07	0.11	-0.08

5.3.3 気象条件と波浪条件の相関性の検討

(1) 波浪データの各項目間の相関性

波浪の観測データの整理結果は第3章の表-3.6 にまとめている。表-5.4 に平均有義波の H/T（波高／周期）と最大有義波の H/T 間の相関係数を示す。一次データの場合も二次データの場合も各項目間に比較的高い相関性（相関係数：0.90, 0.91）が認められる。したがって、以後の解析においては平均有義波高に関する H/T の 24 ヶ月の合計値を波浪データの代表値とすることとした。

(2) 気象条件と波浪条件の相関性

海面上の波は一般的には海面上の風によって発生し、有義波高を決定する支配要因は風速と吹送距離であることがすでに示されている[1]。ここで、波浪観測より得られた波浪データ（有義波高／周期）と気象観測より得られた風に関するデータ（風速）の関係を

表-5.4 平均有義波と最大有義波の相関係数

		(相関係数)			
		一次データ		二次データ	
		24ヶ月		24ヶ月	
		最大有義波	平均有義波	最大有義波	平均有義波
24ヶ月	最大有義波		0.90		0.91

検討した。図-5.1 に (有義波高/周期) で示される波浪データと風速で示される気象データの関係を示す。データの絶対数が少ない点はあるが、波浪の一次データに関しては両者に高い相関性が認められる。一方、二次データについてはそのような相関性を認めることはできない。

これより、二次データの信頼性はさほど高くない、すなわち暴露対象港の波浪条件と最寄りの港の波浪条件から推定することはできないと判断される。一次データのみに着目して考察すると、各港の波浪条件は気象観測より得られる風に関するデータより推定することが可能であると考えられる。したがって、以後の解析においては、風に関するデータ(風速)を波浪条件を示す指標として用いることとした。

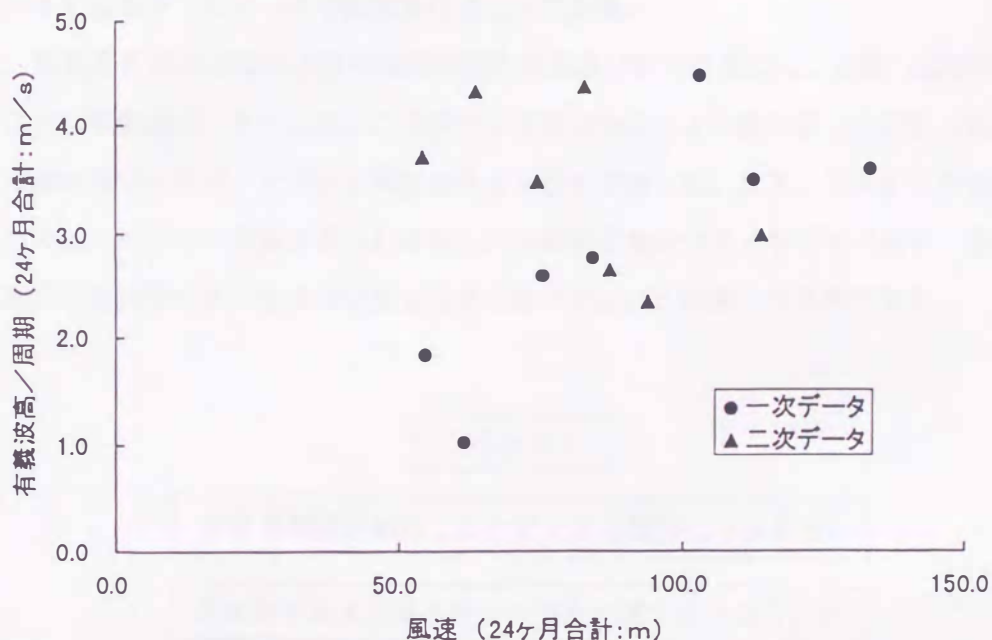


図-5.1 有義波高/周期と風速の関係

5.4 本研究で実施した多変量解析の手順

多変量解析という言葉は極めて広く使用されている用語であり、その定義は種々ある。また、多変量解析に関する参考書も多数出版されている。本研究を遂行するにあたり、筆者が参考にした文献は参考文献[2]~[7]である。これらの参考文献において多変量解析の定義を記しているものは参考文献[5]のみである。それによると多変量解析を「統計とコンピューターの使用を前提として、多くの要因が複雑に絡み合った現象を解明し、本質的

な骨組みを描き出す手法の群、それを多変量解析という」と定義している。

多変量解析は数学の一分野であり、種々ある解析手法を解説し例題を示している参考書は多い。しかし、ある特定の未解決の問題に対してどの解析手法を用いるべきかの判断を示してくれる参考書はなく、その判断は問題の当事者によることになる。すなわち、解析により得られた答えが有意か無意かは解析手法の用い方に大きく依存することになる。

図-5.2に本研究において実施した多変量解析の手順を示す。まず初めに多変量解析の対象としたデータの標準化を行った。なお、データの標準化手法としては、1) 最大を1にする、2) Z得点にする、3) 平均を1にする、4) -1から+1の範囲に変換する、5) 標準偏差を1にする、6) 0から1の範囲に変換する、などがある[6]。本研究においてはZ得点を用いる方法を採用した。Z得点とは、あるデータのグループを平均値が0、標準偏差が1となるようにデータの変換を行うことである。

次に、気象条件および海水成分の項目に関して主成分分析を実施し、変数（独立変数）の絞り込み（変数選択）を行った。この最初の主成分分析により数を絞った変数（気象条件および海水成分の項目）について再度主成分分析を実施した。なお、主成分分析を再度実施したのは、投入する変数が異なれば得られる結果も異なってくるためであり、主成分座標は選択した変数のみの主成分分析より求める方がよいと判断したためである。

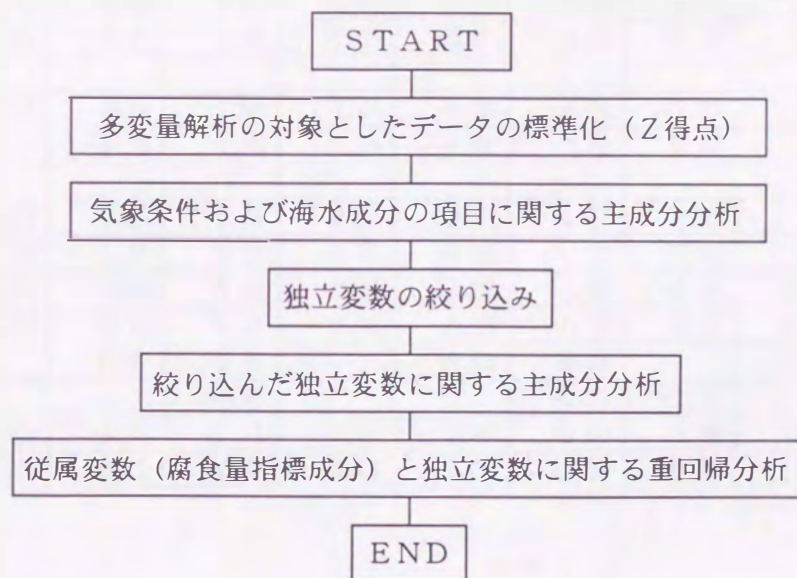


図-5.2 本研究で実施した多変量解析の手順

上述したように、多変量解析の利点は主観を排除することであるものの、その適用は逆に主観による点は、解析結果の判断をする際に十分留意しておく必要があると考えられる。次に、主成分分析により絞り込んだ項目を独立変数、腐食量指標の構成要素を従属変数とする重回帰分析を実施した。その結果を、腐食量指標の構成要素に及ぼす環境要因の影響度の定量的評価とみなした。

5.5 多変量解析の対象とした項目の標準化データの算出

表-5.5に腐食量指標の構成要素、すなわち分極抵抗の逆数、定電位ステップ試験の計測結果、および発錆開始時刻のZ得点（標準化データ）を示す。また、表-5.6および表-5.7に気象条件および海水成分の各項目のZ得点を示す。

表-5.5 腐食量指標の構成要素の標準化データ（Z得点）

	分極抵抗の逆数			定電位ステップ試験の結果			発錆開始時刻		
	海中部	干満部	飛沫部	海中部	干満部	飛沫部	海中部	干満部	飛沫部
秋田	0.81	1.09	0.39	-0.28	-0.28	0.29	-1.21	-0.82	1.38
伏木 富山	1.86	1.28	0.40	-0.56	-0.35	0.37	-1.21	0.25	2.35
横浜	0.47	-0.11	0.86	-0.39	-0.92	2.19	0.33	-1.44	-1.04
塩釜	-0.10	0.78	1.18	2.08	2.81	-0.52	-0.54	-0.58	-0.58
宮古	1.16	1.64	1.36	-0.91	-0.32	0.08	0.36	0.36	0.29
広島	-0.41	-1.12	0.38	-1.02	-0.52	-0.45	-1.27	0.53	-0.89
小松島									
神戸	-0.13	0.19	-1.56	1.84	-0.85	-0.04	1.77	1.78	-0.31
舞鶴	-1.31	-1.36	0.73	-0.90	-0.56	2.20	0.54	-1.02	0.28
北九州									
鹿児島	-1.08	-1.26	-0.98	0.50	0.41	-0.27	0.55	1.68	0.01
油津	-0.95	-1.17	0.58	-0.73	-0.65	0.02	0.66	0.00	-0.39
名古屋	1.24	0.31	-0.26	-0.04	-0.63	-1.07	-0.99	-0.85	1.28
清水	-0.74	-0.17	0.38	0.38	0.97	-0.78	0.17	-0.77	-0.38
小樽		0.80	0.32		-0.63	0.14		-0.59	-0.77
苫小牧			-0.40			-0.51	-1.20		-1.09
那覇	-1.09	-1.00	-1.51	0.77	0.45	-0.06	1.34	0.16	0.77
石垣	0.27	0.11	-1.87	-0.73	1.07	-1.59	0.71	1.31	-0.92

表-5.6 海水成分の標準化データ (Z得点)

	海水成分		
	比重	pH	Cl ⁻ 濃度
秋田	-2.71	-1.72	-2.64
伏木富山	-1.42	-0.68	-1.43
横浜	0.24	0.02	0.12
塩釜	0.60	0.02	0.48
宮古	0.05	-1.02	0.08
広島	0.05	-0.33	-0.12
小松島	0.05	0.71	0.16
神戸	0.05	0.37	0.20
舞鶴	0.42	0.71	0.31
北九州	0.79	1.06	0.70
鹿児島	0.79	1.06	0.72
油津	0.79	1.06	0.90
名古屋	-1.42	-2.06	-1.37
清水	-1.05	-1.02	-1.12
小樽	0.42	0.02	0.37
苫小牧	0.60	-0.33	0.60
那覇	0.79	0.71	0.96

表-5.7 気象条件の標準化データ (Z得点)

	気象条件項目					
	気温	気温偏差	湿度	風速	日照時間	降水量
秋田	-0.86	0.20	0.42	0.75	-1.51	0.26
伏木富山	-0.36	-0.58	1.07	-0.89	-1.63	0.46
横浜	0.12	-0.94	-0.63	0.06	0.36	0.07
塩釜	-0.85	0.18	1.26	0.35	0.26	-1.49
宮古	-1.05	0.48	0.32	-1.34	-0.04	-0.53
広島	0.22	-0.79	-1.16	0.41	0.57	-0.10
小松島	0.28	-0.69	-1.72	-0.49	0.95	-0.35
神戸	0.17	-0.87	-1.44	-0.07	0.46	-1.32
舞鶴	-0.22	-0.79	1.42	-1.36	-1.94	0.12
北九州	0.26	-0.73	-0.80	-0.14	-0.58	0.00
鹿児島	0.68	-0.09	-0.56	-1.04	0.37	1.27
油津	0.64	-0.14	0.07	1.16	0.51	1.97
名古屋	0.13	-0.93	-0.98	-0.60	1.25	0.05
清水	0.21	-0.80	0.31	1.21	1.98	1.28
小樽	-1.53	1.21	-0.05	-0.96	-0.49	-1.60
苫小牧	-1.74	1.54	1.46	-0.45	-0.29	-1.24
那覇	1.82	1.66	0.00	2.06	-0.38	0.10
石垣	2.10	2.08	1.02	1.35	0.15	1.04

5.6 環境要因の項目に関する主成分分析

5.6.1 主成分分析の方法

主成分分析に関しては多数の参考文献が存在するため、その説明は本文においては割愛する。筆者が参考にした文献[3]～[7]においても、それぞれに主成分分析の説明がなされている。主成分分析の定義について一例を挙げると、「主成分分析とは、多くの変量の値をできるだけ情報の損失なしに1個または少数個の総合的指標（主成分）で代表させる方法である。p変量（p次元）の観測値をm変量（m次元）の主成分に縮約するという意味で、次元を減少させる方法と言うこともできる」と説明されている[3]。本研究における分析では、海水成分の項目（pH、Cl⁻濃度、比重）と気象条件の項目（気温、気温偏差、湿度、風速、日照時間、降水量）の合計9項目に関して主成分分析を実施した。本研究において主成分分析を実施する目的は、いくつかの主成分を求めることではなく、主成分に対する環境要因の各項目の寄与度を求め、それに基づき類似の項目を明確にすることにより必要最小限の項目を選択することである。なお、分析には市販の多変量解析プログラム（SPSS ver. 7.5 for Windows）を使用した。

5.6.2 第一次主成分分析の結果

図-5.3および図-5.4に主成分分析より得られた因子負荷量の平面プロットを示す。なお、図-5.3は第一主成分と第二主成分が座標軸であり、図-5.4は第一主成分と第三主成分が座標軸である。両図よりわかるとおり、検討対象の9項目の中には比較的傾向の似ている項目が存在する。例えば、降水量と風速、あるいは海水のpHとCl⁻濃度と比重は第一主成分から第三主成分への寄与の傾向が似ている。一方、湿度と日照時間は、両者とも第一主成分への寄与がほとんどなく、第二主成分と第三主成分への寄与が相反するという傾向を示している。この結果をもとに、重回帰分析の対象とする気象条件および海水成分の項目を表-5.8に示す5つの項目に絞った。すなわち、海水成分を代表する項目として海水中のCl⁻濃度、波浪条件および風条件を代表する項目として風速、環境温度を代表する項目として気温および気温偏差、環境の乾燥・湿潤状態を代表する項目として湿度、の合計5項目である。

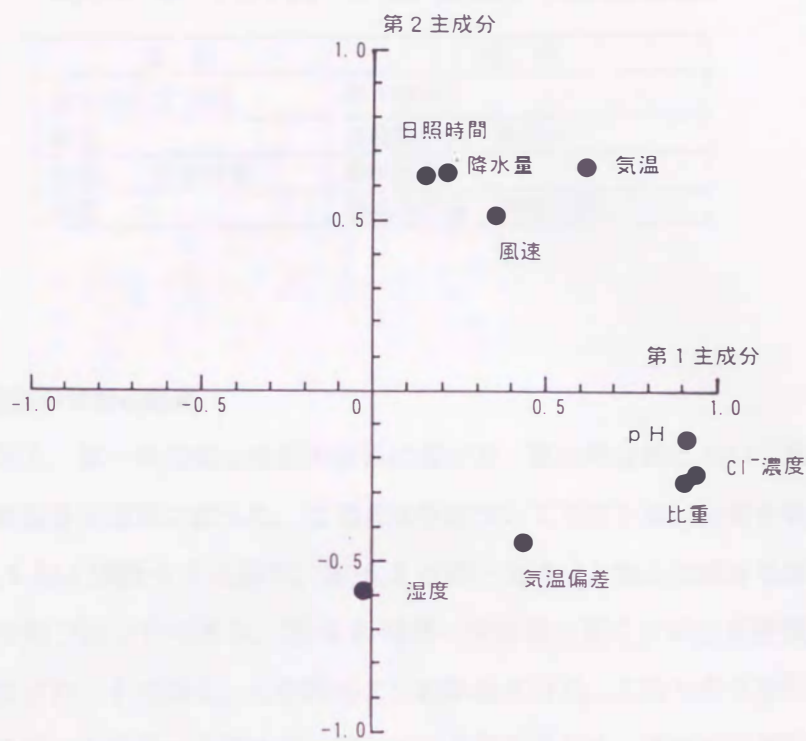


図-5.3 因子負荷量の平面プロット（第一主成分と第二主成分）

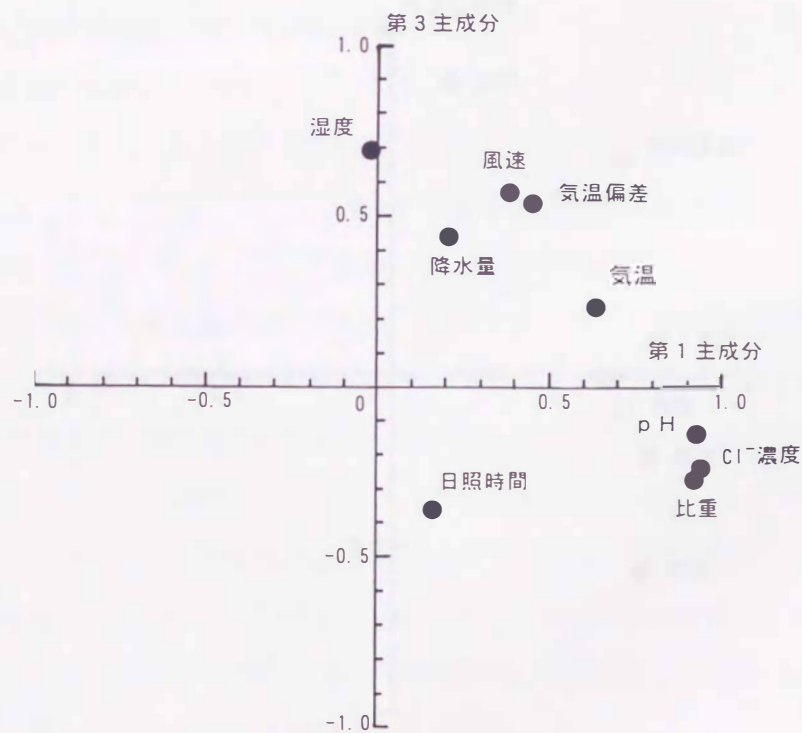


図-5.4 因子負荷量の平面プロット（第一主成分と第三主成分）

表-5.8 第一次主成分分析により抽出した環境要因項目

項目	備考
海水中のCl ⁻ 濃度	海水成分
風速	波浪条件、 風条件
気温、 気温偏差	環境温度
湿度	環境の乾燥・湿潤状態

5.6.3 第二次主成分分析の結果

前述したとおり，第一次主成分分析の結果に基づき，重回帰分析において独立変数として用いる環境要因を5項目に絞った。この5項目について再度主成分分析を実施した。その結果を図-5.5 および図-5.6 に示す。図-5.5 は第一主成分と第二主成分を座標軸とした因子負荷量の平面プロットであり，図-5.6 は第一主成分と第三主成分を座標軸とした因子負荷量の平面プロットである。この両図よりわかるように，これらの5項目の中には，第一主成分から第三主成分への寄与が一致している項目はなく，すべての項目が主成分座標上において異なる傾向を示している。

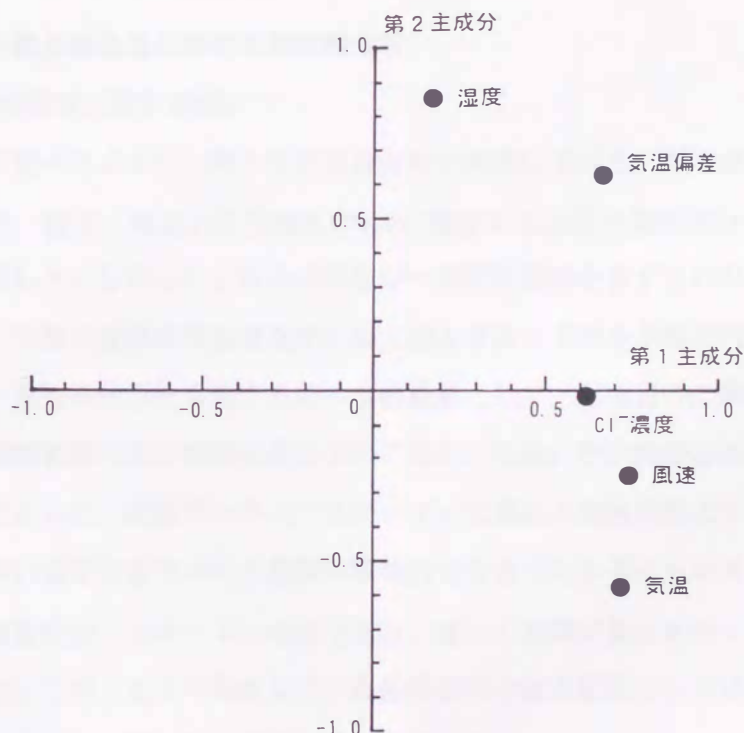


図-5.5 因子負荷量の平面プロット（第一主成分と第二主成分）

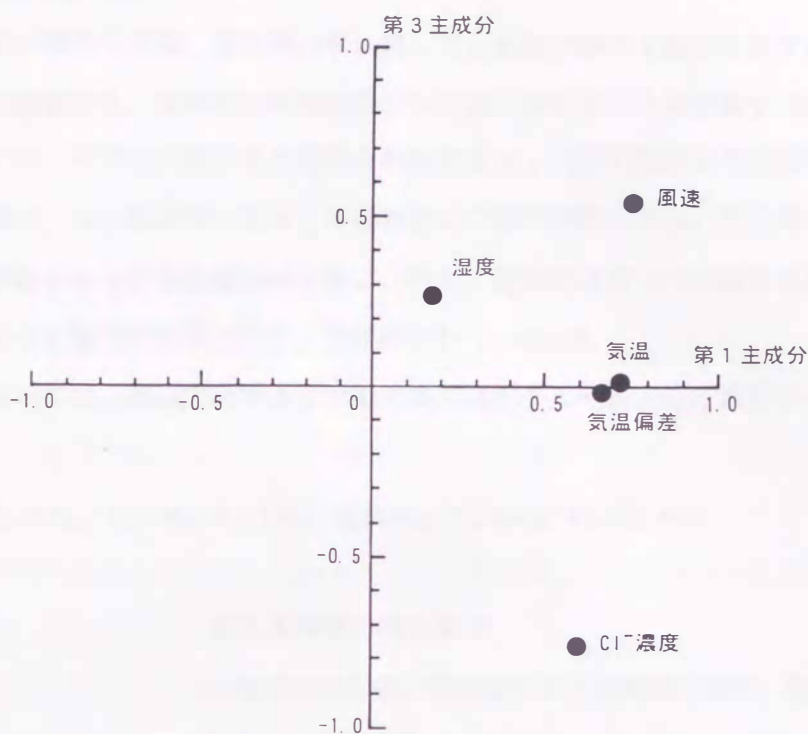


図-5.6 因子負荷量の平面プロット（第一主成分と第三主成分）

5.7 環境要因と腐食量指標に関する重回帰分析

5.7.1 独立変数の形状に関する検討

前節において述べたように、第一次主成分分析の結果に基づき、環境要因の項目のうち気温、気温偏差、湿度、風速および海水中のCl⁻濃度の5項目を重回帰分析における独立変数として選択した。しかし、これらの項目が一次的に関係を有するのか、あるいは重回帰モデルにおいて独立変数の累乗値を用いる方がよりよいモデルが得られるのかは未知である。そこで、重回帰分析を実施する前の事前検討として上記項目の二乗値および平方根と腐食量指標構成要素の間の相関係数を求めてみた。なお、その結果は本文では割愛するが、その結果によると、直接データ（一次データ）で求めた相関係数よりも二乗値で求めた相関係数あるいは平方根で求めた相関係数の方が大きくなる場合もある。しかし、その場合でも相関係数で 10^{-2} のオーダーの差であり、著しく相関係数が大きくなるケースは認められなかった。このことより判断して、重回帰分析の独立変数としてはいずれの項目の場合も直接データ（一次データ）を用いることとした。

5.7.2 重回帰分析の方法

主成分分析の場合と同様に重回帰分析に関しても多数の参考文献が存在するためその説明は本文では割愛する。重回帰分析の定義としては、例えば「ある変数 y (目的変数または従属変数) と、それに影響すると考えられる変数 x_j (説明変数または独立変数) の間の関係式を求め、それに基づいて x_j の値から y の値を予測したり、その際の x_j の影響の大きさを評価する分析を回帰分析と呼ぶ。特に、説明変数が1つの場合を単回帰分析、2つ以上の場合を重回帰分析という」と説明されている[2]。

本研究においては、次式で示すような線形重回帰モデルを想定し分析を行った。

$$y_i = a_{i1} \cdot x_1 + a_{i2} \cdot x_2 + a_{i3} \cdot x_3 + a_{i4} \cdot x_4 + a_{i5} \cdot x_5 + b_i + \varepsilon \quad (5.1)$$

- ここで、 y_i : 腐食量指標の構成要素
(分極抵抗の逆数, 定電位ステップ試験の結果, 発錆開始時刻)
- x_1 : 海水中の Cl^- 濃度
- x_2 : 平均風速
- x_3 : 平均気温
- x_4 : 平均湿度
- x_5 : 気温偏差
- $a_{i1} \sim a_{i5}$: 回帰係数
- b_i : 定数項 (標準化データを用いる場合は $b_i=0$)
- ε : 誤差

分析に用いたコンピュータプログラムは主成分分析に用いたものと同様のSPSSであり、重回帰分析プログラム中の変数減少法を用いた。この方法は、まず初めに5つの説明変数すべてをモデルに投入して回帰式を求め求めたおのおのの回帰係数の信頼度の比較を行い、信頼度の最も低い説明変数を順次除去していき残った変数で再度回帰式を求めるという方法である。本分析における変数選択の基準は分散比 (F 値) であり、分散比が0.1を越える変数のうち最もF値が大きな変数を順次除外していくというものである。なお、筆者が行った分析においては、得られた数種の重回帰式のうち自由度調整済みの重相関係数が最も大きくなるモデルを最適モデルであるとみなした。

5.7.3 重回帰分析の結果

(1) 分極抵抗の逆数を目的変数とした場合

表-5.9および表-5.10に分極抵抗の逆数を目的変数とした場合の重回帰分析結果を示す。表-5.9はすべての独立変数を含む重回帰式における標準化重回帰係数を示している。また、表-5.10には自由度調整済みの重相関係数を基準とした場合の最適モデルを示している。なお、本分析においては標準化データを用いて分析を行っているため定数項は0となっている。

海中部の場合、鉄筋表面の不動態にとって不利な環境は、 Cl^- 濃度が低い海水、低い気温、大きな気温偏差、低い湿度、小さい風速（弱い波浪）となる。また、最適モデルの説明変数として、海水中の Cl^- 濃度、気温偏差および風速が選定された。3つの説明変数の中で影響度が最も大きい変数は、海水中の Cl^- 濃度である。気温偏差と風速の影響度は海水中の Cl^- 濃度の影響度より小さい。

干満部の場合、鉄筋表面の不動態にとって不利な環境は海中部の場合と全く同一であった。これより考察すれば、鉄筋の不動態にとっては海中部と干満部はほぼ同一の環境であるとも考えられる。最適モデルの説明変数としては、海水中の Cl^- 濃度、気温偏差および気温が選定された。気温偏差と気温が説明変数として同時に選定されるのは若干奇異な印象を受けるが、これについては以下のように解釈できる。すなわち、一般的傾向として気温が低い方が鉄筋の不動態にとっては厳しい環境と言えるが、逆にかなり気温が高い場合も不利であると解釈できる。3つの説明変数のうちでは、気温の影響度が最も大きく、気温偏差、海水中の Cl^- 濃度と続いているが、これら3項目の影響度に大きな相違はない。

飛沫部の場合、鉄筋表面の不動態にとって不利な環境は、 Cl^- 濃度が高い海水、低い気温、小さな気温偏差、高い湿度、大きな風速（強い波浪）となる。また、自由度調整済みの重相関係数が最大となった場合の説明変数は、湿度、気温および気温偏差となる。ところが、気温と気温偏差の重回帰係数がともに負であることの合理的説明を行うことは難しい。したがって、この二つの変数のうち一方が説明変数からはずれた場合のモデルをこの場合の最適モデルとみなした。このような考え方を基に求めた説明変数として気温のみが選定された。

上述したように、鉄筋の不動態の状態に関しては、海中部と干満部は環境条件が極めて似ていると考えられるが、飛沫部はそれとは異なる環境条件であると言える。

表-5.9 すべての独立変数を含む重回帰式における標準化重回帰係数

(分極抵抗の逆数を目的変数とした場合)

	海中部	干満部	飛沫部
海水中のCl ⁻ 濃度	-0.669	-0.494	0.141
気温	-0.144	-0.467	-0.662
気温偏差	0.562	0.538	-0.626
湿度	-0.195	-0.007	0.345
風速	-0.414	-0.111	0.232

表-5.10 重回帰分析により得られた最適モデル

暴露環境	回 帰 式
海中部	Y = -0.691 (海水中のCl ⁻ 濃度) + 0.422 (気温偏差) - 0.423 (風速) R* = 0.358、R = 0.712
干満部	Y = -0.460 (海水中のCl ⁻ 濃度) + 0.504 (気温偏差) - 0.539 (気温) R* = 0.502、R = 0.780
飛沫部	Y = -0.622 (気温) R* = 0.343、R = 0.622

R* : 自由度調整済みの重相関係数

R : 重相関係数

(2) 定電位ステップ試験の結果を目的変数とした場合

表-5.11および表-5.12に定電位ステップ試験結果を目的変数とした場合の重回帰分析結果を示す。表-5.11はすべての独立変数を含む重回帰式における標準化重回帰係数を示しており、表-5.12は重回帰分析より得られた最適モデルを示している。

海中部の場合は回帰式でモデル化することができなかった。このことは、分析の対象とした環境要因の項目のみでは定電位ステップ試験の結果、すなわち海中部におけるモルタル中鉄筋への酸素供給量の相違を十分に説明することはできないことを意味している。

干満部の場合、モルタル中鉄筋への酸素供給量が多くなる環境条件は、Cl⁻濃度の大きな海水、低い気温、小さな気温偏差、高い湿度および大きな風速（強い波浪）となる。また、最適モデルの説明変数としては風速および湿度が選定された。湿度と風速の影響度を比較してみると、湿度の影響度の方が大きく、風速の影響度の約2倍となっている。

飛沫部の場合、モルタル中鉄筋への酸素供給量が多くなる環境条件は干満部の場合とほぼ同様であるが、風速のみ傾向が異なる。すなわち、風速が小さい方、あるいは波浪の弱い方が酸素の供給量が多くなる。すなわち、干満部と飛沫部の環境の相違は風の影響もしくは波浪の影響によるものであることが推察される。また、最適モデルの説明変数として、湿度および気温偏差が選定された。しかし、このモデルの重相関係数は0.464にすぎず、適合性に優れたモデルであるとは言い難い。

干満部の場合も飛沫部の場合も最適モデルから風速が除外されていること、および風速以外の独立変数の重回帰係数の符号がすべて一致していることより、酸素の供給に影響を及ぼす環境条件は干満部および飛沫部では近いものであると考えられる。

表-5.11 すべての独立変数を含む重回帰式における標準化重回帰係数
(定電位ステップ試験の結果を目的変数とした場合)

	海中部	干満部	飛沫部
海水中のCl ⁻ 濃度		0.149	0.259
気温	モデル化 不可	-0.099	-0.106
気温偏差		-0.023	-0.567
湿度		0.559	0.255
風速		0.365	-0.141

表-5.12 重回帰分析により得られた最適モデル

暴露環境	回 帰 式
海中部	モデル化ができなかった
干満部	Y = 0.562 (湿度) + 0.312 (風速) R* = 0.316、R = 0.643
飛沫部	Y = 0.281 (湿度) - 0.512 (気温偏差) R* = 0.095、R = 0.464

R* : 自由度調整済みの重相関係数

R : 重相関係数

(3) 発錆開始時刻を目的変数とした場合

表-5.13および表-5.14に発錆開始時刻を目的変数とした場合の重回帰分析の結果を示す。表-5.13はすべての独立変数を含む重回帰式における標準化重回帰係数を示しており、表-5.14は重回帰分析より得られた最適モデルを示している。

海中部の場合、発錆開始時刻が早くなる環境条件はCl⁻濃度が低い海水、低い気温、大きな気温偏差、低い湿度、大きな風速（激しい波浪）となる。また、最適モデルの説明変数として、気温および海水中のCl⁻濃度が選定された。この両者の影響度に大きな差はないが、気温の影響度の方が若干大きな値を示している。

干満部の場合、発錆開始時刻が早くなる環境条件は、Cl⁻濃度の低い海水、低い気温、小さな気温偏差、高い湿度、大きな風速（激しい波浪）となる。また、自由度調整済みの重相関係数が最大となる最適モデルの説明変数としては、気温、湿度、気温偏差および風速の4項目が選定された。しかし、気温および気温偏差の重回帰係数がともに正である、すなわち気温が低くかつ気温偏差が小さい方が発錆開始時刻が早いという結果を合理的に説明することは困難である。したがって、変数減少法の過程においてこれらの2変数のうちのどちらか一方が説明変数から除外された時のモデルをこの場合の最適モデルとみなした。その時の説明変数としては、気温および風速が選定された。この両者の影響度を比較してみると、気温の影響度の方が大きく、風速の影響度の約1.5倍となっている。

飛沫部の場合、発錆開始時刻が早くなる環境条件は、Cl⁻濃度の大きな海水、低い気温、小さな気温偏差、低い湿度、大きな風速（激しい波浪）である。最適モデルの説明変数として、気温、湿度、Cl⁻濃度および風速が選定された。この4項目の影響度を比較してみると、海水中のCl⁻濃度の影響度が最も大きく、次いで気温、風速と続き、湿度の影響度が最も小さい。

表-5.13および表-5.14よりわかるとおり、発錆開始時刻に関しては海中部、干満部および飛沫部ごとに影響を及ぼす環境要因がそれぞれ異なる。その中で、共通しているのは気温が低いほど発錆開始時刻が早くなるという点と風速が大きくなるほど、すなわち波浪が激しくなるほど発錆開始時刻が早くなるという点である。

表-5.13 すべての独立変数を含む重回帰式における標準化重回帰係数

(発錆開始時刻を目的変数とした場合)

	海中部	干満部	飛沫部
海水中のCl ⁻ 濃度	0.371	0.075	-0.894
気温	0.589	0.537	0.631
気温偏差	-0.218	0.326	0.185
湿度	0.093	-0.327	0.190
風速	-0.152	-0.436	-0.510

表-5.14 重回帰分析により得られた最適モデル

暴露環境	回帰式
海中部	Y = 0.444 (気温) + 0.320 (海水中のCl ⁻ 濃度) R* = 0.311、R = 0.640
干満部	Y = 0.683 (気温) - 0.401 (風速) R* = 0.168、R = 0.536
飛沫部	Y = 0.598 (気温) - 0.811 (海水中のCl ⁻ 濃度) - 0.442 (風速) + 0.260 (湿度) R* = 0.479、R = 0.786

R* : 自由度調整済みの重相関係数

R : 重相関係数

5.8 まとめ

本章においては、暴露を実施した港の環境要因と腐食量指標の構成要素（腐食進行期間、分極抵抗、定電位ステップ試験の結果）の関係を検討した。その結果、以下に示すような知見が得られた。

環境要因および海水成分の項目に関して主成分分析を行った結果、環境要因の項目を以下の5項目、すなわち、

- ① 海水成分を代表する項目として、海水中の Cl^- 濃度
- ② 波浪条件および風の条件を代表する項目として、風速
- ③ 環境温度を代表する項目として、気温
- ④ 同じく環境温度を代表する項目として、気温偏差
- ⑤ 環境の乾湿・湿潤状態を代表する項目として、湿度

に絞ることができた。

分極抵抗の逆数と環境要因5項目について重回帰分析を行った結果、独立変数が以下のように選定された。すなわち、海中部の場合は海水中の Cl^- 濃度、気温偏差および風速である。その3項目の中では、海水中の Cl^- 濃度の影響度が最も大きく、気温偏差および風速の影響度は海水中の Cl^- 濃度の影響度の約70%であった。干満部の場合は気温、気温偏差および海水中の Cl^- 濃度が独立変数として選定され、その3項目の影響度はほぼ等しいレベルであった。飛沫部の場合は気温のみが説明変数として選定された。重回帰分析の結果より考察すれば、鉄筋の不動態の状態に関しては、海中部と干満部はほぼ同様の環境条件であると判断された。

定電位ステップ試験の結果と環境要因5項目について重回帰分析を行った結果、海中部の場合のみ最適なモデルが得られなかった。干満部および飛沫部については独立変数が以下のように選定された。すなわち、干満部の場合は湿度および風速が選定された。この2項目の中では、湿度の影響度の方が大きく、風速の影響度はその約60%であった。飛沫部の場合は湿度および気温偏差が選定された。その2項目の中では、気温偏差の影響度が大きく、湿度の影響度はその約60%であった。干満部と飛沫部に共通している環境要因は湿度であり、湿度が高いほどモルタル中铁筋への酸素供給量は多くなるという傾向を示した。

発錆開始時刻と環境要因5項目について重回帰分析を行った結果、重回帰式における独立変数が以下のように選定された。すなわち、海中部の場合は気温および海水中の Cl^- 濃

度が選定された。その2項目の中では、気温の影響度の方が大きく、海水中の Cl^- 濃度の影響度はその約 80%であった。干満部の場合は気温および風速が選定された。その2項目の中では、気温の影響度の方が大きく、風速の影響度はその約 60%であった。飛沫部の場合は風速、湿度、気温および海水中の Cl^- 濃度が選定された。その4項目の中では、海水中の Cl^- 濃度の影響度が最も大きく、次いで気温の影響度、風速の影響度、湿度の影響度の順であった。湿度の影響度は、海水中の塩化物イオンの影響度の約 30%程度であった。海中部、干満部および飛沫部に共通している環境要因は気温と風速であり、気温が低いほど、また風速が大きいほど発錆開始時刻は早くなるという傾向であった。

参考文献

- [1] 佐藤昭二・合田良実：海岸・港湾—わかり易い土木講座，17，p. 110，彰国社，1972. 3
- [2] 測定値の統計的処理（電気学会大学講座），電気学会，昭和43年2月
- [3] 田中豊・垂水共之・脇本和昌 編：パソコン統計ハンドブックⅡ（多変量解析）共立出版，1984. 9
- [4] 藤沢偉作：楽しく学べる多変量解析法，現代数学社，1985. 6
- [5] 大村平：多変量解析の話，日科技連出版，1988. 2
- [6] 新村秀一：パソコンによるデータ解析，講談社，1995. 11
- [7] 清水誠：データ分析はじめの一步，講談社，1996. 10

第6章 環境要因の定量的評価の試みおよび耐久設計への応用に関する検討

6.1 序節

第4章においてモルタル中の鉄筋の腐食量指標について考察し、以下の3項目、すなわち鉄筋の分極抵抗の逆数、定電位ステップ試験の計測結果および腐食進行期間の積が腐食量指標となり得ることを示した。また、第5章において、これらの3つの腐食量指標構成要素と環境条件（気象条件、波浪条件、海水成分）の関係を考察し、最終的には重回帰式を求めた。本章においては、上記の結果に基づき本研究の主題である環境要因の定量的評価を試みる。そして、その結果を耐久設計に応用する考え方について考察するものである。

本研究の基本的な目的は、ある港湾環境にRC構造物が新規に建設される場合あるいは既に建設されている場合に、その環境が構造物の塩害に及ぼす影響の程度を定量的かつ総合的に評価することである。さらに、その定量的評価が耐久設計あるいは補修設計に応用可能であることが望ましい。本研究における環境条件の評価の手順は第3章の3.3（図-3.8）において既述している。その手順は、まず構造物が立地する地点の環境要因の項目を個別に評価し、その評価値をもとに発錆開始時刻、鉄筋表面の不動態の状態および鉄筋表面への酸素の供給量を推定評価する。そして、この三者を総合的に評価することにより、腐食速度および腐食量を推定し、それに基づき総合的な環境条件の評価を行うというものである。言い換えれば、環境要因項目から腐食量を推定するというものである。そして、この環境条件の総合評価を耐久設計および補修設計に応用していく必要がある。

耐久設計および補修設計についてはこれまでに学協会あるいは学術論文においていくつかの案が示されている。しかし、これらの設計法は現時点では十分にオーソライズされている訳ではない。本章においては、これまでに学協会あるいは学術論文などで発表されている耐久設計法案を取りまとめ、それらに共通する基本的考え方を整理した上で耐久設計の基本的枠組みについて考察する。そして、土木学会より提案されている耐久設計法案に対して本研究の成果を応用する一つの考え方を示す。

6.2 環境要因の定量的評価試案

6.2.1 評価の手順

第1章ならびに前節においても述べたように、環境要因の定量的評価の目的は耐久設計あるいは補修設計に資することである。表-6.1に筆者のイメージによる総合的な環境条件評価表を示す。また、図-6.1に環境条件の評価手順を示す。基本的な考え方は、環境要因の項目である「気温」「湿度」「風速」「海水中のCl⁻濃度」「気温偏差」をおのおのまず個別に評価する。そして、その評価結果を前章において求めた重回帰式に代入することにより、腐食量指標の構成要素を評価する。その評価より腐食量指標の構成要素の具体的値を逆に求め、さらに腐食量指標値を算出する。そして、求めた腐食量指標値を用いて、海中部、干満部、飛沫部ごとに総合評価を行うという手順である。

表-6.1 筆者による環境条件評価の考え方

港	気象・海象条件の評価					総合評価		
	気温	湿度	風速	海水中のCl ⁻ 濃度	気温偏差	海中部	干満部	飛沫部
l								
i	+1.5	+0.5	+1.5	-0.5	-1.5	IV	II	III
n								

注：表中の数字は仮想数字であり、特に意味を有しない

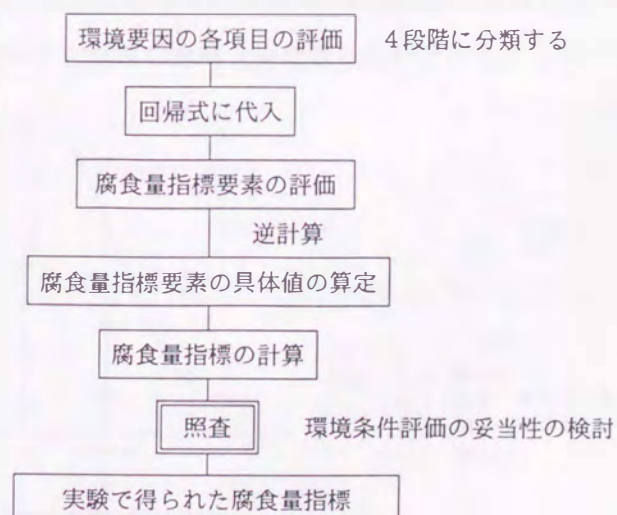


図-6.1 環境条件評価の手順およびその確認

総合評価を何らかの方法により試みた場合、その総合評価が妥当なものであるかを確認することが必要であるが、本検討においては、図-6.1に示すように、環境要因の評価より求めた腐食量指標値と暴露実験より得られた腐食量指標値を比較することにより、環境条件評価の妥当性を検討する。

6.2.2 環境要因の評価試案

(1) 標準偏差に基づく評価

あるデータのグループが存在する場合、そのグループ内のデータのばらつきを示す統計値として分散あるいは標準偏差が多用されている。また、標準偏差は品質管理を行う際にも重要な役割を果たしている。この標準偏差を用いて各項目の評価を試みた。その基本的考え方を図-6.2に示す。図に示すように、4段階の評価を行うこととし、その境界を「平均値 (m)」, 「平均値+標準偏差 ($m+\sigma$)」, 「平均値-標準偏差 ($m-\sigma$)」とするものである。そして、「 $m-\sigma$ 」より小さい範囲に属するものを「穏やか」と判定し「-1.5点」を与える。「 $m-\sigma$ 」と「 m 」の範囲に属するものを「やや穏やか」と判定し「-0.5点」を与える。「 m 」と「 $m+\sigma$ 」の範囲に属するものを「やや厳しい」と判定し「+0.5点」を与える。そして、「 $m+\sigma$ 」より大きいものを「厳しい」と判定し「+1.5点」を与えるものである。

このように4段階の分類を考えたのは、さらに細分する場合その信頼性を十分に確保できると考えにくいこと、一方、3段階の分類では若干粗いという感じを認めないためである。現時点では、4段階の分類でほぼ妥当であると考えた。なお、上述のように4段階の分類に対して-1.5点、-0.5点、+0.5点、+1.5点を与えた理由は、以後に続く計算をスムーズに進めるためにZ得点による標準化データと同等の意味を持たせるためである。

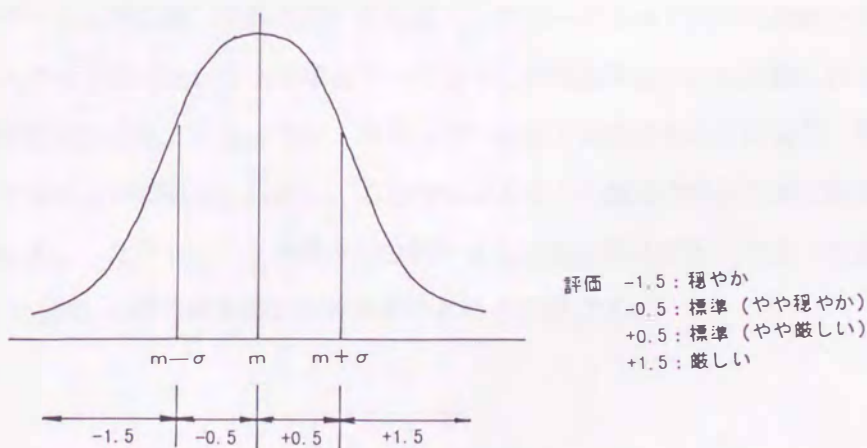


図-6.2 標準偏差を用いた各要因の評価 (分類) の考え方

表-6.2 標準偏差を用いた環境要因の評価

	海水中のCl ⁻ 濃度	気温	気温偏差	湿度	風速
秋田	-1.5	-0.5	0.5	0.5	0.5
伏木富山	-1.5	-0.5	-0.5	1.5	-0.5
横浜	0.5	0.5	-0.5	-0.5	0.5
塩釜	0.5	-0.5	0.5	1.5	0.5
宮古	0.5	-1.5	0.5	0.5	-1.5
広島	-0.5	0.5	-0.5	-1.5	0.5
小松島	0.5	0.5	-0.5	-1.5	-0.5
神戸	0.5	0.5	-0.5	-1.5	-0.5
舞鶴	0.5	-0.5	-0.5	1.5	-1.5
北九州	0.5	0.5	-0.5	-0.5	-0.5
鹿児島	0.5	0.5	-0.5	-0.5	-1.5
油津	0.5	0.5	-0.5	0.5	1.5
名古屋	-1.5	0.5	-0.5	-0.5	-0.5
清水	-1.5	0.5	-0.5	0.5	1.5
小樽	0.5	-1.5	1.5	-0.5	-0.5
苫小牧	0.5	-1.5	1.5	1.5	-0.5
那覇	0.5	1.5	1.5	0.5	1.5
石垣	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5

(2) クラスタ分析による評価

多変量解析の一手法としてクラスタ分析と呼ばれる分析法がある。これは、あるグループ内のデータを分類する、あるいは多数のグループを分類する際に用いる手法である。なお、クラスタ分析手法の中でも、分類の対象とするデータあるいはグループの類似度の尺度をどのように定めるかでいくつかの種類がある。本研究においては、クラスタ分析手法を用いて環境要因の各項目の分類も試みた。分析は前出の多変量解析プログラムSPSSを用いて行い、その際データの類似度（非類似度）の尺度としてユークリッドの平方距離を採用した。なお、クラスタ分析においても前項において述べた標準偏差を用いた分類と統一するために4段階の分類を試みた。このように、クラスタ分析を適用することにより、合理的に各項目を分類することができる。しかし、この方法によると分類の境界を明確に数値で示すことは困難となる。したがって、クラスタ分析による分類結果は前項(1)で述べた標準偏差を用いた評価（分類）の妥当性を確認するためのものと位置づけた。

(3) 評価の結果および考察

表-6.2に標準偏差を用いて実施した環境要因の評価(分類)の結果を示す。また、図-6.3~図-6.7に標準偏差による分類とクラスター分析による分類の比較を示す。これらの図よりわかるとおり、海水中のCl⁻濃度および気温偏差において両者の不一致があるが、その他の項目は両評価値が比較的良好一致している。図-6.3および図-6.7のように両者の不一致が多い場合でも、大部分のデータは一分類ずつずれていることがわかる。したがって、図-6.3および図-6.7の場合でも定性的には両手法による分類は同一の答えを示しているとも考え得る。これより、標準偏差を用いた分類は概ね妥当な分類であると判断した。

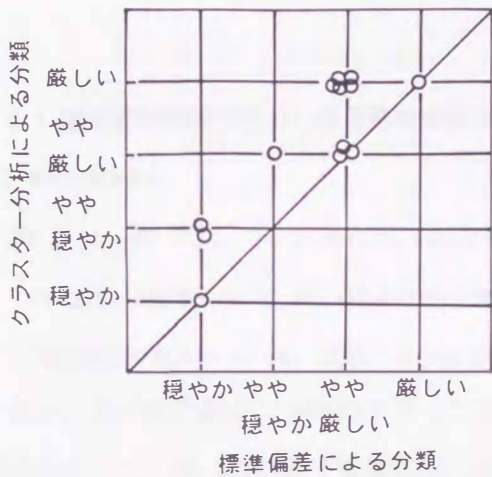


図-6.3 二分類の比較(海水中のCl⁻濃度)

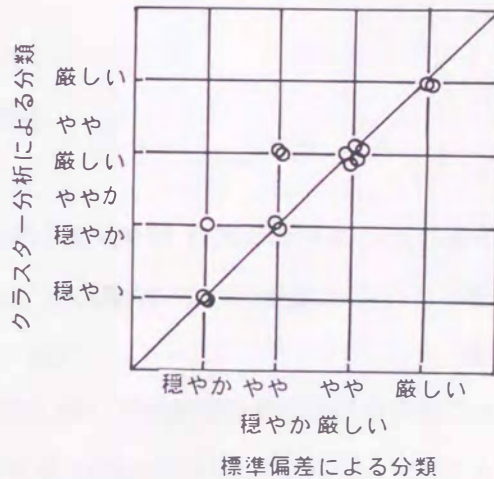


図-6.4 二分類の比較(気温)

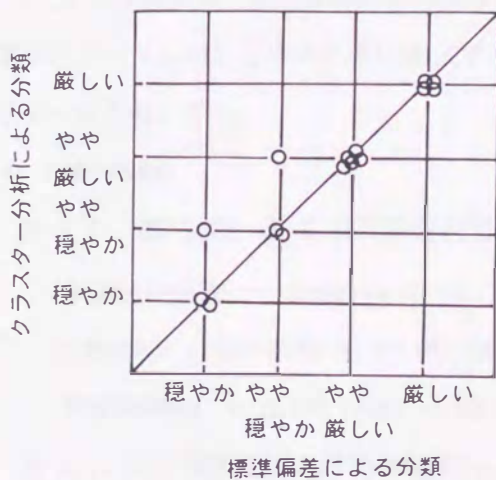


図-6.5 二分類の比較(湿度)

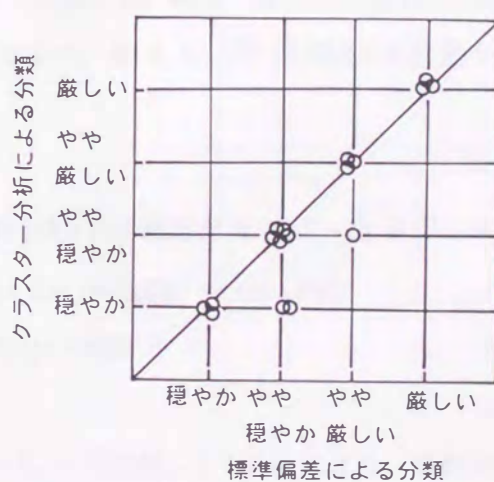


図-6.6 二分類の比較(風速)

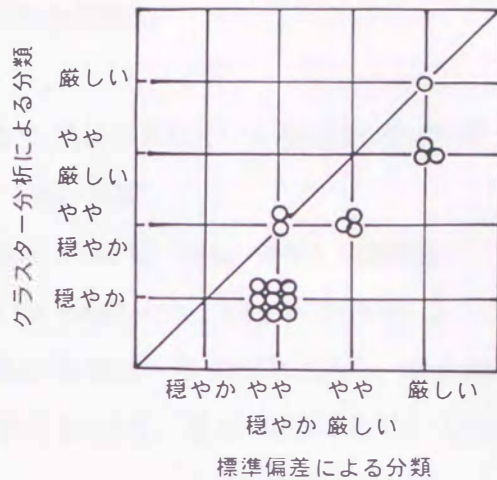


図-6.7 二分類の比較 (気温偏差)

6.2.3 環境要因評価に基づく腐食量指標構成要素の評価

(1) 海中部の場合

表-5.21, 表-5.23, 表-5.25に示される重回帰分析の結果を(6.1)式および(6.2)式に示す。

$$(\text{分極抵抗の逆数}) = -0.691 (\text{海水中のCl}^- \text{濃度}) + 0.422 (\text{気温偏差}) - 0.423 (\text{風速}) \quad (6.1)$$

$$(\text{発錆開始時刻}) = +0.444 (\text{気温}) + 0.320 (\text{海水中のCl}^- \text{濃度}) \quad (6.2)$$

なお、海中部の場合、定電位ステップ試験の結果に関しては最適な重回帰式を得ることができなかった。表-6.2に示す環境要因の評価結果を(6.1)式および(6.2)式に代入することにより、分極抵抗の逆数と発錆開始時刻の評価値を求めた。その算出結果を表-6.3に示す。表-6.2に示す評価値は性質上Z得点と考えることができること、また、(6.1)式および(6.2)式は標準化データに対して求めた重回帰式であることより、表-6.3に示す計算結果も性質上標準化データと考え得る。

(2) 干満部の場合

表-5.21, 表-5.23, 表-5.25に示されている重回帰分析の結果を(6.3)式~(6.5)式に示す。

$$(\text{分極抵抗の逆数}) = -0.460 (\text{海水中のCl}^- \text{濃度}) + 0.504 (\text{気温偏差}) - 0.539 (\text{気温}) \quad (6.3)$$

$$(\text{定電位ステップ法の結果}) = +0.562 (\text{湿度}) + 0.312 (\text{風速}) \quad (6.4)$$

$$(\text{発錆開始時刻}) = +0.683 (\text{気温}) - 0.401 (\text{風速}) \quad (6.5)$$

表-6.2に示す環境要因の評価結果を(6.3)式~(6.5)式に代入することにより、腐食量指標の構成要素の評価値を求めた。その算出結果を表-6.4に示す。表-6.4に示されている評価結

果も性質上標準化データと考え得る。

(3) 飛沫部の場合

表-5. 21, 表-5. 23, 表-5. 25に示されている重回帰分析の結果を(6. 6)式～(6. 8)式に示す。

$$\text{(分極抵抗の逆数)} = -0.622 \text{ (気温)} \quad (6.6)$$

$$\text{(定電位ステップ法の結果)} = +0.281 \text{ (湿度)} -0.512 \text{ (気温偏差)} \quad (6.7)$$

$$\text{(腐食開始時刻)} = +0.598 \text{ (気温)} -0.811 \text{ (海水中のCl}^- \text{濃度)} -0.442 \text{ (風速)} +0.260 \text{ (湿度)} \quad (6.8)$$

表-6. 2に示す評価結果を(6. 6)式～(6. 8)式に代入し、腐食量指標の構成要素の評価値を求めた。その算出結果を表-6. 5に示す。表-6. 5に示されている評価結果も性質上標準化データと考え得る。

表-6. 3 環境要因評価に基づく腐食量指標構成要素の評価 (海中部)

	分極抵抗の逆数	定電位ステップ試験結果	発錆開始時刻
秋田	0.61	評 価 が 不 可	-0.70
伏木富山	0.62		-0.70
横浜	-0.77		0.38
塩釜	-0.77		-0.06
宮古	0.50		-0.51
広島	-0.50		0.06
小松島	-0.77		0.38
神戸	-0.77		0.38
舞鶴	-0.34		-0.06
北九州	-0.77		0.38
鹿児島	0.08		0.38
油津	-1.19		0.38
名古屋	0.62		-0.26
清水	-0.23		-0.26
小樽	0.50		-0.51
苫小牧	0.50		-0.51
那覇	-0.35		0.83
石垣	-1.04		1.15

表-6.4 環境要因評価に基づく腐食量指標構成要素の評価 (干満部)

	分極抵抗の逆数	定電位ステップ試験結果	発錆開始時刻
秋田	0.71	0.44	-0.54
伏木富山	0.20	0.69	-0.14
横浜	-0.75	-0.13	0.14
塩釜	-0.21	1.00	-0.54
宮古	0.83	-0.19	-0.42
広島	-0.80	-0.69	0.14
小松島	-1.26	-1.00	0.54
神戸	-1.26	-1.00	0.54
舞鶴	-0.72	0.38	0.26
北九州	-1.26	-0.44	0.54
鹿児島	-0.75	-0.75	0.94
油津	-0.75	0.75	-0.26
名古屋	-0.34	-0.44	0.54
清水	-0.34	0.75	-0.26
小樽	1.33	-0.44	-0.82
苫小牧	1.33	0.69	-0.82
那覇	-0.28	0.75	0.42
石垣	-0.74	1.31	0.42

表-6.5 環境要因評価に基づく腐食量指標構成要素の評価 (飛沫部)

	分極抵抗の逆数	定電位ステップ試験結果	発錆開始時刻
秋田	0.31	0.40	0.83
伏木富山	0.31	1.19	1.53
横浜	-0.31	0.12	-0.46
塩釜	0.31	0.68	-0.54
宮古	0.93	-0.12	-0.51
広島	-0.31	0.35	0.09
小松島	-0.31	0.35	-0.28
神戸	-0.31	0.35	-0.28
舞鶴	0.31	1.19	0.35
北九州	-0.31	0.63	-0.02
鹿児島	-0.31	0.12	0.43
油津	-0.31	0.40	-0.64
名古屋	-0.31	0.63	1.61
清水	-0.31	0.91	0.98
小樽	0.93	-0.91	-1.21
苫小牧	0.93	-0.35	-0.69
那覇	-0.93	-0.63	-0.04
石垣	-0.93	-0.35	-0.59

6. 2. 4 構成要素の評価に基づく腐食量指標の算出

表-6. 3～6. 5に示す腐食量指標の構成要素の評価値は、性質上標準化データ（Z得点）と考え得る。なお、標準化データ（Z得点）の定義は(6. 9)式によるものであり、この式を用いて標準化データから原データを計算することも可能である。

$$Z = \frac{x - m}{\sigma} \quad (6. 9)$$

ここで、Z：標準化データ（Z得点）

m：母集団（グループ）の平均値

σ ：母集団（グループ）の標準偏差

x：原データ

この(6. 9)式に表-6. 3～6. 5に示す腐食量指標の構成要素の評価結果を代入することにより腐食量指標の構成要素の値を逆に求めた。この算出結果を表-6. 6～6. 8に示す。なお、算出する際に平均値と標準偏差が必要であるが、この両値は第4章でまとめた暴露実験結果の平均値および標準偏差を用いた。また、表-6. 6～6. 8にこれら構成要素より求めた腐食量指標値も併せて示す。なお、腐食量指標は暴露2年時を対象として計算しているため、腐食進行期間は、「24ヶ月－発錆開始時刻」より算出したものである。なお、上述したとおり、海中部の場合は定電位ステップ試験については評価が不可能であったため、表-6. 6において示している腐食量指標は分極抵抗の逆数と腐食進行期間を掛け合わせたものに、定電位ステップ試験の実験値の平均値を乗じたものを便宜上用いている。

図-6. 8～6. 10に上記の手順で環境要因評価より求めた腐食量指標と実験より求めた腐食量指標の比較を示す。干満部および飛沫部に比べて海中部の方が若干不一致が大きいようである。この理由として、海中部の場合は定電位ステップ試験を評価していないためとも考えられる。図-6. 8～6. 10に示されるとおり、環境要因評価より求めた腐食量指標と実験より求めた腐食量指標が比較的良好に一致しているデータもあるが両者が一致していないデータも存在する。干満部および飛沫部の場合は大まかな傾向はつかめているが、両者が完全に一致している訳ではない。一部のデータで両者の不一致が大きいデータも存在する点は極めて重要であり、このことは、本研究で取り上げた環境要因のみでは十分に評価することができないほ

ど厳しい環境も存在するというを示している。図-6. 8~6. 10における実線は両指標値が一致するラインを示し、点線は環境要因評価から求めた腐食量指標よりも実験から求めた腐食量指標が0.05だけ大きくなるラインを示している。一つの考え方ではあるが、環境条件評価を行う際に実線で示すラインではなく点線で示すラインで評価を行えば、ほぼすべてのデータを安全側で評価することができることになる。この考え方はあくまでも一案にすぎず、また、評価の精度の問題も残されているが、一つの考え方であると考えている。

表-6.6 構成要素の評価より求めた腐食量指標値 (海中部)

	分極抵抗の逆数 ($\times 10^{-3}$ / Ω)	定電位ステップ試験 ($\mu A/cm^2$)	発錆開始時刻 (月)	腐食量指標 (月・ $\mu A/cm^2$ / Ω)
秋田	0.93	評 価 不 可 平均値 5.40	3.26	0.10
伏木富山	0.93		3.26	0.10
横浜	0.57		5.06	0.06
塩釜	0.57		4.32	0.06
宮古	0.90		3.59	0.10
広島	0.64		4.53	0.07
小松島	0.57		5.06	0.06
神戸	0.57		5.06	0.06
舞鶴	0.68		4.32	0.07
北九州	0.57		5.06	0.06
鹿児島	0.79		5.06	0.08
油津	0.45		5.06	0.05
名古屋	0.93		4.00	0.10
清水	0.71		4.00	0.08
小樽	0.90		3.59	0.10
苫小牧	0.90		3.59	0.10
那覇	0.68	5.79	0.07	
石垣	0.50	6.32	0.05	

表-6.7 構成要素の評価より求めた腐食量指標値（干満部）

	分極抵抗の逆数 ($\times 10^{-3} / \Omega$)	定電位ステップ試験 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	発錆開始時刻 (月)	腐食量指標 (月・ $\mu\text{A}/\text{cm}^2 / \Omega$)
秋田	0.99	7.91	4.09	0.16
伏木富山	0.85	9.23	4.47	0.15
横浜	0.59	4.94	4.73	0.06
塩釜	0.74	10.88	4.09	0.16
宮古	1.02	4.61	4.20	0.09
広島	0.58	1.96	4.73	0.02
小松島	0.46	0.31	5.11	0.00
神戸	0.46	0.31	5.11	0.00
舞鶴	0.60	7.58	4.84	0.09
北九州	0.46	3.29	5.11	0.03
鹿児島	0.59	1.64	5.49	0.02
油津	0.59	9.56	4.35	0.11
名古屋	0.71	3.29	5.11	0.04
清水	0.71	9.56	4.35	0.13
小樽	1.16	3.29	3.82	0.08
苫小牧	1.16	9.23	3.82	0.22
那覇	0.72	9.56	5.00	0.13
石垣	0.60	12.53	5.00	0.14

表-6.8 構成要素の評価より求めた腐食量指標値（飛沫部）

	分極抵抗の逆数 ($\times 10^{-3} / \Omega$)	定電位ステップ試験 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	発錆開始時刻 (月)	腐食量指標 (月・ $\mu\text{A}/\text{cm}^2 / \Omega$)
秋田	0.67	7.21	26.55	-0.01
伏木富山	0.67	9.01	34.36	-0.06
横浜	0.56	6.57	12.27	0.04
塩釜	0.67	7.85	11.40	0.07
宮古	0.77	6.05	11.69	0.06
広島	0.56	7.10	18.40	0.02
小松島	0.56	7.10	14.30	0.04
神戸	0.56	7.10	14.30	0.04
舞鶴	0.67	9.01	21.24	0.02
北九州	0.56	7.73	17.19	0.03
鹿児島	0.56	6.57	22.10	0.01
油津	0.56	7.21	10.25	0.06
名古屋	0.56	7.73	35.23	-0.05
清水	0.56	8.37	28.29	-0.02
小樽	0.77	4.25	3.89	0.07
苫小牧	0.77	5.53	9.67	0.06
那覇	0.46	4.89	16.90	0.02
石垣	0.46	5.53	10.77	0.03

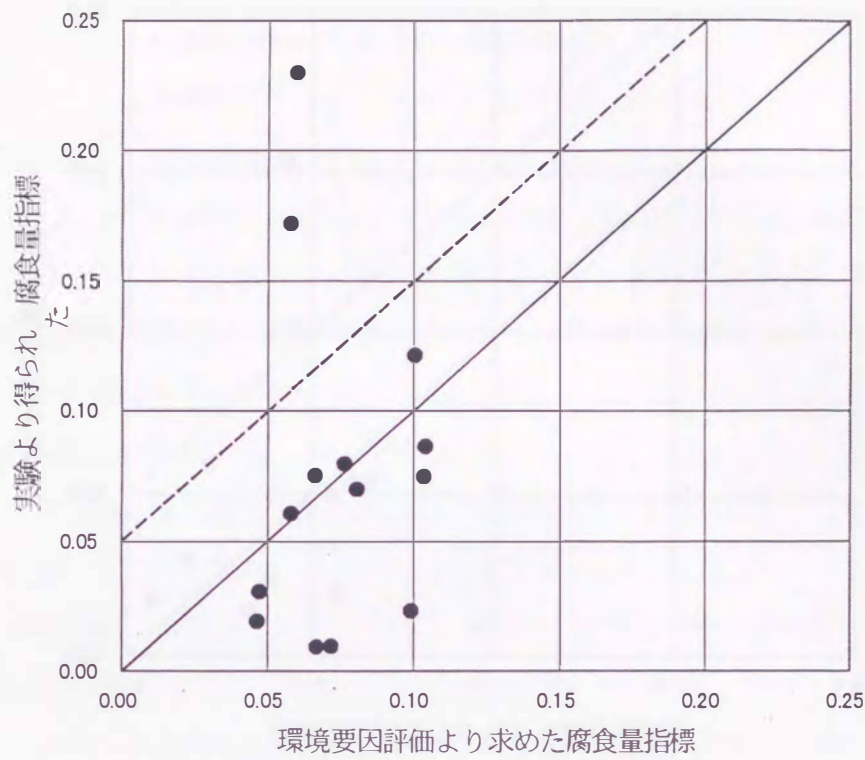


図-6.8 環境要因評価より求めた腐食量指標と実験より求めた腐食量指標の比較 (海中部)

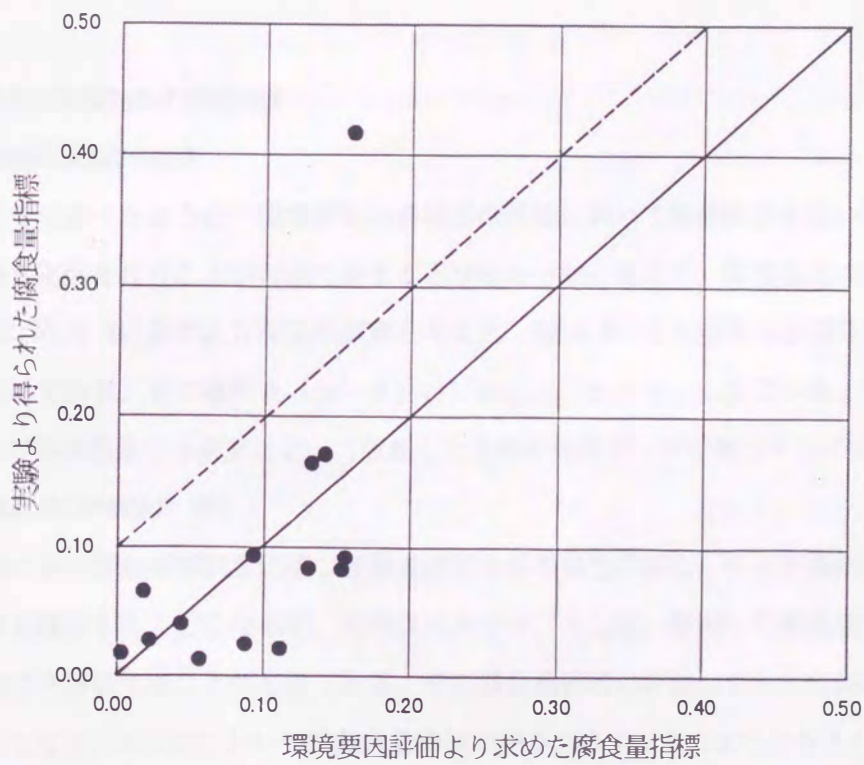


図-6.9 環境要因評価より求めた腐食量指標と実験より求めた腐食量指標の比較 (干満部)

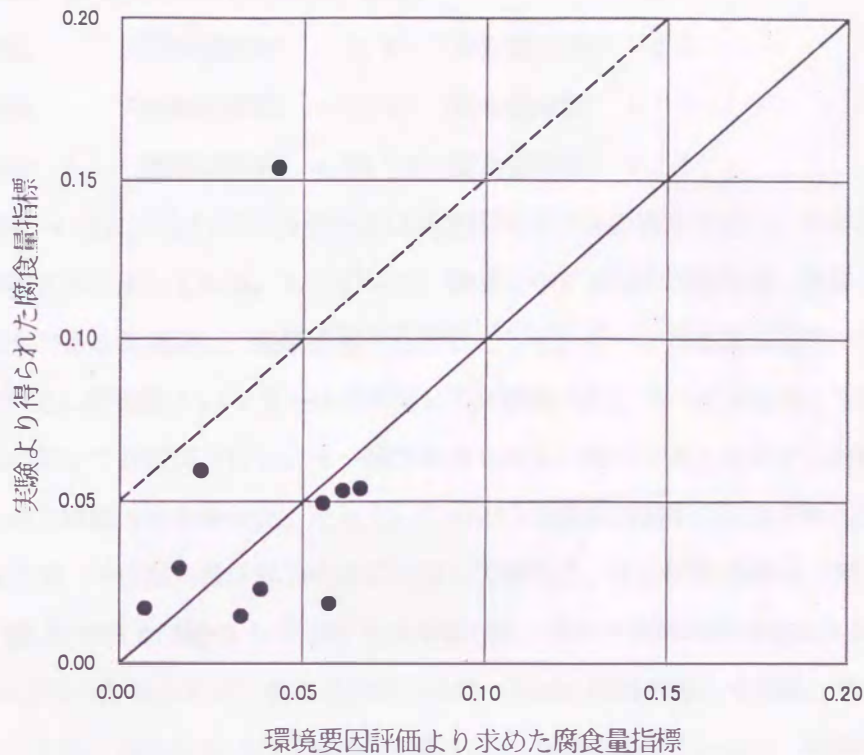


図-6.10 環境要因評価より求めた腐食量指標と実験より求めた腐食量指標の比較 (飛沫部)

6.2.5 最終的な環境条件評価試案

(1) 環境要因の評価基準試案

前項までに述べたように、環境要因の各項目の評価において標準偏差を用いることによりほぼ妥当な評価を行うことが可能であることがわかった。そこで、環境要因の各項目の評価基準として表-6.9に示すような基準試案を考えた。表-6.9に示す試案は各項目を4段階に評価するものであり、その境界を「 $m-\sigma$ 」、「 m 」、「 $m+\sigma$ 」としている。なお、この平均値および標準偏差は本研究において収集した各港の気象データに基づくものである。

(2) 腐食量指標の評価基準 (案)

表-6.9に示す評価基準試案に基づき環境要因の各項目を評価し、その評価結果に基づき腐食量指標を算出することになるが、その次のステップとして、算出した腐食量指標をある考え方に基づき評価することが必要である。その腐食量指標の評価がすなわち最終的な環境条件の評価となる。本研究においては腐食量指標の評価方法を以下のように考えた。

第4章の図-4.14~4.16に示す発錆面積率と腐食量指標の関係を示す一次の近似式は以下

の(6.10)式～(6.12)式に示すとおりである。

$$\text{海中部} \quad (\text{発錆面積率}) = 14.9 \times (\text{腐食量指標}) + 0.8 \quad (6.10)$$

$$\text{干満部} \quad (\text{発錆面積率}) = 13.4 \times (\text{腐食量指標}) + 1.2 \quad (6.11)$$

$$\text{飛沫部} \quad (\text{発錆面積率}) = 26.7 \times (\text{腐食量指標}) + 0.1 \quad (6.12)$$

図-4.14～4.16に示されているデータは暴露期間が2年の場合であり、腐食面積率が最大の場合で約8%を示している。したがって、暴露2年では腐食が最も進んだ場合でも約10%程度が最大であると推定し、発錆面積率を指標にして、0～2%を最も穏やかな条件の場合であると判定し評価値「I」、2～4%に対して評価値「II」、4～6%に対して評価値「III」、6～8%に対して評価値「IV」、8～10%を最も厳しい条件であると判定し評価値「V」を与えるという評価方法を考えた。そして、このような発錆面積率の区分に対応する腐食量指標を、海中部、干満部、飛沫部おのおのに対して求めた。その結果を表-6.10および図-6.11に示す。表-6.10および図-6.11に示すものが本研究における最終的な環境条件評価となる。

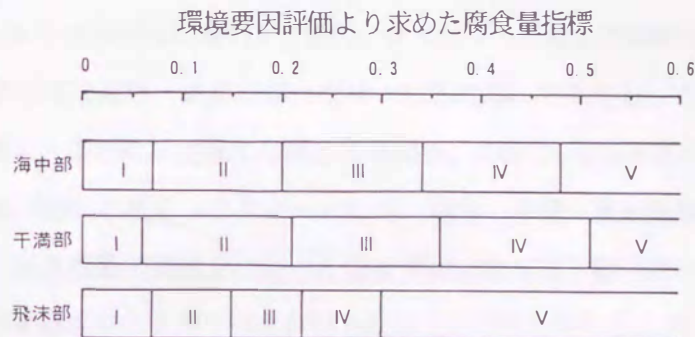
図-6.11よりわかるとおり、腐食量指標の分類(評価)は海中部、干満部、飛沫部ごとに異なるものとなる。海中部および干満部は比較的近い分類となっているが、飛沫部はそれとは大きく異なる。その特徴は、腐食量指標が同じ値であれば、海中部および干満部に比べて飛沫部の方が厳しい環境条件と評価されることである。すなわち、長期の暴露期間を想定した場合、例えば5年、10年、20年といった場合の腐食量指標を想定すると、暴露期間が長くなるにつれて飛沫部の環境条件の評価値と海中部および干満部の環境条件の評価値の差がさらに大きくなることになる。

表-6.9 環境要因の評価基準試案

	評 価 値			
	-1.5	-0.5	+0.5	+1.5
海水中のCl ⁻ 濃度 (ppm)	～11398.3	～15345.8	～19293.3	19293.3～
月間平均気温の年間合計 (°C)	～140.6	～189.3	～238.0	238.0～
月間平均湿度の年間合計 (%)	～807.7	～850.5	～893.2	893.2～
月間平均風速の年間合計 (m/s)	～31.3	～42.9	～54.5	54.5～
月間気温偏差の年間合計 (°C)	～3.9	～35.8	～67.7	67.7～

表-6.10 腐食量指標の評価基準試案

	発錆面積率				
	0~2%	2~4%	4~6%	6~8%	8~10%
	I	II	III	IV	V
海中部	~ 0.07	0.07 ~	0.20 ~	0.34 ~	0.48 ~
干満部	~ 0.06	0.06 ~	0.21 ~	0.36 ~	0.51 ~
飛沫部	~ 0.07	0.07 ~	0.15 ~	0.22 ~	0.30 ~



表中の数値は評価値を示す

図-6.11 腐食量指標の評価基準試案

6.3 耐久設計への応用

以上、6.2 までに本研究に基づく環境条件評価試案を述べた。次に、この環境条件評価試案を耐久設計に応用する考え方について考察する。

設計という用語は極めて広く使用されており、設計にも多くの種類がある。港湾工学に関する分野では、たとえば耐震設計とは地震に対して構造物を安全に設計する技術のことをさし、耐波設計とは防波堤、海岸堤防あるいは海洋構造物などを高波に対して安全でかつ合理的に設計する方法をのことをさす[1]。また、構造設計とは種々の外力に対して、建設する構造物が耐え得るように構造体の設計をすることと言え、その手法別に許容応力度設計法あるいは限界状態設計法などに分類される。

耐久設計という言葉は比較的新しい用語と言える。定義自身がいまだ曖昧であり、学協会では議論が進められているのが実状である。本項においては、他の研究者の耐久設計に対する考え方を取りまとめつつ、港湾構造物の耐久設計の基本的考え方を考察し、本研究の成果である環境条件の定量的評価を耐久設計へ応用する方法について考察する。

6.3.1 耐久設計法に関する既往の提案

(1) 土木学会の提案1 [2][3][4]

この提案によれば、耐久設計の定義は、「所望の期間メンテナンスフリーでその後所定の期間の維持管理が容易に行えるように、コンクリートの品質、施工方法ならびに構造物の詳細を環境その他に対して総合的に設計すること」とされている。耐久性の照査は、 T_p （耐久指数） $\geq S_p$ （環境指数），という式を用いて行うとしている。耐久指数（ T_p ）の決定ファクターとして、コンクリート材料に関して7項目、コンクリートおよび補強材に関して8項目、設計ひびわれに関して2項目、鉄筋詳細・形状・図面に関して8項目、コンクリート工に関して6項目、鉄筋工・型わく・支保工に関して4項目、の計35項目を挙げている。

一方、環境指数（ S_p ）の決定ファクターとして、塩分の影響、凍結融解作用、の2項目が挙げられている。耐久指数の精緻さに比べた場合環境指数が若干粗いという感じは否定できないが、この分野の研究データが十分に存在しないことを示していると考えられる。

この提案の大きな特徴は、設計における照査の方法を限界状態設計法の照査式に近い形で表現しようとしている点であると考えられ、これは上に示したように耐久性の照査を極めて簡便な式で実施しようと試みている点に現れている。

(2) 土木学会の提案2 [4]

この提案によれば、耐久性の照査は、 $T_s \geq T_d$ ，という式を用いて行うことになっている。そして、耐久限界期間（ T_s ）は供用開始から鉄筋腐食が開始されるまでの期間（ T_{cr} ）と鉄筋腐食開始後からコンクリートに腐食ひびわれが発生するまでの期間（ T_{ck} ）の和で表わされるとされている。この T_{cr} と T_{ck} をあらかじめ設計段階で推定することを提案し、算定式が提示されている。照査式より理解されたとおり、この考え方は構造物の耐久性上の限界状態を腐食ひびわれの発生時と考えている。この提案は、上述の土木学会の提案1に比べて、塩害過程により則した考え方と言える。この提案の重要な点は、 T_{cr} と T_{ck} を精度よく推定できるかという点である。

(3) 日本コンクリート工学協会の提案[5]

この提案によれば、鉄筋コンクリート構造物の内部鉄筋の腐食を考慮した場合の限界状態を、鉄筋の腐食が発生した時、と考えている。この限界状態の設定は若干厳しすぎると思われるが、このような考え方も一つの考え方としてはあり得るものと思われる。そして、耐久性の照査を、 $C \geq C_{de}$ ，という式を用いて行うとしている。

本提案によると、等価かぶり厚さを決定する要因として、設計かぶり厚さ、施工誤差、仕

上げ材の有無，を挙げている。一方，劣化深さを決定する要因として，環境係数（中性化，塩害），品質係数（材料，設計，施工），設計耐用期間，の3項目を挙げている。

この考え方は上記の土木学会の提案2の考え方に比較的近いが，構造物の限界状態の設定が土木学会の提案2とは異なっている。

(4) V. C. Li の提案[6]

V. C. Li は繊維補強コンクリートの開発を出発点として，その応用を促進する意味もあり「Performance Driven Design」という考え方を提示している。議論の出発点が上記の学協会の提案法とは異なるが，この「Performance Driven Design」の考え方も耐久設計と深く関連するものであるため，その概要をここで述べる。

図-6.12 にその基本的考え方を示す。「Performance Driven Design」とは，まず与えられた構造物あるいは構造部材に要求される挙動（performance）あるいは機能（functionality）を決定し，その要求機能を満足させ得るような性質を有する材料を選定すると同時に，材料の構造を設計するというものである。この「Performance Driven Design」の特徴は，構造物に要求される挙動と材料の構造を直接定量的に関係づけるという点である。

Li は構造物側からの要求性能として「Durability（耐久性）」を取り上げ，材料側の性質として「Crack Width（ひびわれ幅）」の制御を考慮し，繊維補強コンクリートの材料構造を設計することによりひびわれ幅を制御するという考え方を提案している。その基本的考え方を図-6.13 に示す。この考え方は耐久設計の一つの考え方ととらえることが可能である。Li

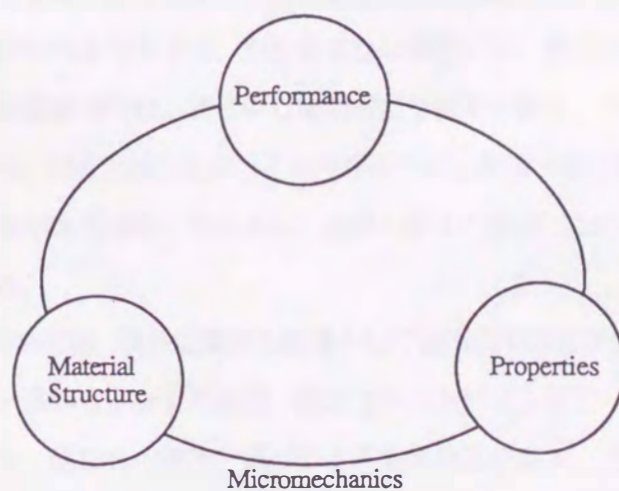


図-6.12 Li が提案する「Performance Driven Design」の基本的考え方

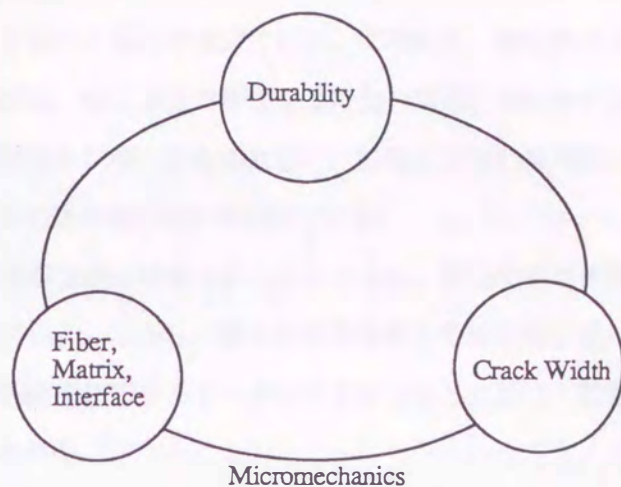


図-6.13 耐久性の確保を主眼とした場合の「Performance Driven Design」

の提案は、材料開発を起点としている点で純粋な耐久設計の範疇に入らないかもしれないが、構造物の設計時に耐久性を考慮した材料の設計手法を確立することをLiは主張している。しかしながら、耐久性の照査をどのように行うかという点にまではLiは言及していない。

6.3.2 港湾構造物の耐久設計に関する関・大即の提案[7]

港湾構造物を対象を絞って耐久設計を論じているのはおそらくこの関・大即の提案が最初のものであると思われる。関・大即による耐久設計の考え方は、「設計耐用年数内にはできるだけ劣化しないよう設計・施工するが、ある程度の劣化は許容し、計画的な維持管理によって耐用年数の低下がないようにする。やむをえない場合には、補修あるいは補強を行う」というものである。目標耐用年数、あるいは実現可能な耐用年数を、ケーソンのように壁が主体のものでは100年、栈橋上部工のようにはりや床版が主体のものでは50年、と設定している。このような耐用年数を実現するために、設計・施工の段階において講じる配慮を耐久設計であるとしている。

関・大即の提案においては、材料に関する配慮として以下の項目を挙げている。すなわち、第1種防食法として、高炉セメントの使用、低水セメント比コンクリートの使用、低単位水量コンクリートの使用、混和材の使用、ポゾラン反応性物質の混入、ポリマーセメントの使用、鋼繊維補強コンクリートの使用を挙げており、第2種防食法として、コンクリートの表面処理（表面塗装、含浸塗装、モルタル被覆、永久型枠）、鋼材への防食性の付与（被覆防

食、電気防食、耐塩性鉄筋)を挙げている。

設計上の配慮として以下の項目を挙げている。すなわち、構造型式に関するものとして、壁部材を主体とした構造、波しぶきの影響を受けない構造、単純かつ表面積の小さい形状の部材設計を挙げ、部材設計に関するものとして、許容ひびわれ幅の設定、構造細目に関するものとして、かぶり厚の最小値の設定を挙げている。

関・大即の提案の主要な部分は以上のとおりである。構造物の耐久性向上のための具体的な手法がまとめられている。しかし、耐久性の具体的な照査手法に関しては言及されていない。環境条件の定量的評価に関するデータが不十分であるために、照査式の提案までには至っていないものと思われる。

6.3.3 耐久設計の基本的考え方

前項においてまとめたように、耐久設計に関して学協会あるいは学術論文においていくつかの設計法案が提案されている。これらの考え方を基本にして耐久設計のあり方を考察してみると、「構造物に求められる耐久性を当該構造物が有するように材料、構造の設計を行い、何らかの方法でその耐久性の照査を行うこと」が、耐久設計と定義づけられるようである。図-6.14に、現時点で考え得るところの耐久設計の基本的考え方を示す。この考え方がさら

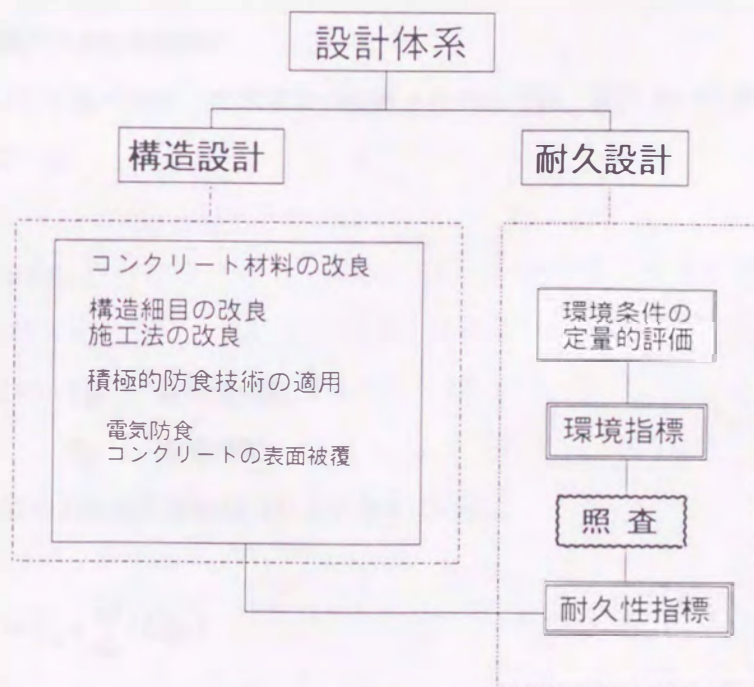


図-6.14 耐久設計の基本的な考え方

に改良され、耐久設計が実用化される日も近いと思われるが、そのためには以下の項目に関して、さらなる検討が求められる。

- 1) 関・大即が取りまとめているような各種防食法の効果の定量的評価。この定量的な評価が、構造物の耐久性の定量的評価、すなわち耐久性指標につながる。
- 2) 構造物が置かれている環境条件の定量的評価。この定量的評価が環境指標につながるとともに、真に合理的な耐久設計が可能になる。
- 3) 耐久性の照査方法の確立。設計はサイエンスではなくアートであると言われることもある。構造設計も近年、許容応力度設計法から限界状態設計法に移行しつつある。両設計法は構造解析がベースになっている点は同じであるが、いわば照査の考え方が異なる。耐久設計の場合も照査の考え方は種々考案できるものと思われる。

6.3.4 環境条件評価の耐久設計への応用に関する一試案

前項までに耐久設計の考え方について考察した。学協会などから提案されているいくつかの方法を取りまとめたが、これらの方法に共通して必要とされているのは、構造物が置かれている環境条件の定量的な評価である。ここでは、前述の土木学会の提案1を例にとり、この設計法の考え方の中で本研究の成果を応用する一つの考え方を述べる。また、土木学会の提案2に対する応用法についても言及する。

(1) 土木学会の提案1への応用法試案

6.3.1においても述べたが、土木学会の提案1においては、耐久性の照査を(6.13)式で行うことになっている。

$$T_p \geq S_p \quad (6.13)$$

ここで、 T_p : 耐久性指数

S_p : 環境指数

また、(6.13)式中の環境指数を(6.14)式で与えている。

$$S_p = S_0 + \sum (\Delta S_p) \quad (6.14)$$

ここで、 S_0 : 標準的な環境条件における環境指数値

ΔSp : 塩分や凍結融解作用の影響が厳しい環境条件における
環境指数の増分値

塩分の影響が著しい場合はΔSpを10～70の範囲で設定するとされている。このΔSpを設定する際に本研究の成果が応用される。本研究の成果は表-6.10に示すように環境条件を5段階に区分するものである。この5段階の評価を例えば表-6.11のように応用する。ここで、環境区分「V」に対してはΔSpを70以上に設定しているが、これは以下の理由による。すなわち、本研究の結果でも明らかなように、一部の港湾環境においては、環境要因の評価よりも実験データの方がかなり大きな腐食傾向を示す場合がある。このような厳しい環境は、本研究において取り上げた環境要因項目のみでは十分に評価することができなかった。したがって、これまでの経験、あるいは既存構造物の劣化状況などから明らかに厳しい劣化環境であると判断される場合には、環境条件区分Vを適用しΔSpを70もしくはそれ以上の値に設定する方がよいと考えたためである。

以上が土木学会の提案1への本研究成果の応用方法の一つの考え方である。

表-6.11 土木学会の提案1への応用法試案

本研究に基づく評価	I	II	III	IV	V
ΔSp設定の一つの考え方	10～20	30～40	40～50	60～70	70～

(2) 土木学会の提案2への応用について

6.3.1においても述べたとおり、土木学会の提案2は宮川が示すモデルの潜伏期間(Tcr)と進展期間(Tck)を推定し、それに基づき耐久性の照査を行うものである。本提案によればTcrおよびTckの算定式を次式のように与えている。

$$T_{cr} = \frac{(C_c - \alpha_1)^2 \cdot Q_{cr}}{E_{cr}} + T_a \quad (6.15)$$

ここで、Cc : 等価かぶり (cm)

α1 : 塩害が対象の場合は0

Qcr : 腐食開始期間にかかわるコンクリートの品質係数

Ecr : 腐食開始期間にかかわる環境係数

Ta : 表面仕上げ材の耐用期間

$$T_{ck} = \frac{\alpha_{ck} \cdot C_c \cdot Q_{ck}}{E_{ck}} \quad (6.16)$$

ここで、 α_{ck} : コンクリートの圧縮強度と鉄筋径により与えられる係数

C_c : 等価かぶり (cm)

Q_{ck} : ひびわれ発生時間にかかわるコンクリートの品質係数

E_{ck} : ひびわれ発生時間にかかわる環境係数

(6.15)式と(6.16)式において、環境条件を E_{cr} と E_{ck} という係数で評価することになっている。 E_{cr} は腐食開始期間にかかわる環境条件を示すものであり、この係数を決定する際に本研究の成果である表-6.3~6.5 に示す発錆開始時刻の評価結果が応用されるものと考えられる。また、 E_{ck} はひびわれ発生時間にかかわる環境条件を示すものであり、この係数を決定する際に本研究の成果である表-6.3~6.5 に示す分極抵抗の評価結果および定電位ステップ試験の結果が応用されるものと考えられる。 E_{cr} および E_{ck} の具体的な決定方法については本文では十分な考察を行うまでに至っていないが、本研究の成果を応用できるものと考えている。

6.4 まとめ

本章においては、第5章までに得られた結果をもとに環境条件評価の評価方法を提案し、その評価結果の妥当性を検討した。また、評価結果の耐久設計への応用方法について一試案を示した。本章における要点は以下のとおりである。

第4章での成果である腐食量指標と第5章での成果である重回帰式をもとに、環境要因評価の一つの考え方を提案した。また、環境要因評価より求めた腐食量指標と暴露実験より得られた腐食量指標を比較し、環境要因評価結果の妥当性を検討した。環境要因評価より求めた腐食量指標は当然のことながら、ある程度の誤差を含んだ値を示す。したがって、実験で得られた腐食量指標と完全に一致するわけではないが、図-6.8~6.10に示すようにある程度の傾向はつかめていると判断できる。したがって、環境要因評価より求まる腐食量指標を解釈する際に、例えば図-6.8~6.10に示すように安全側のラインで評価することにより、ある程度有意な環境条件の評価を行うことができるものと考えられる。

また、これまでに学協会、学術論文等で提案されている耐久設計の考え方を整理し、港湾構造物を含めたコンクリート構造物の耐久設計の基本構造について考察した。いずれの提案法においても、構造物の置かれた環境条件に対して構造物が適切な耐久性を有するように設計するというのが基本的考え方であり、耐久設計法を確立するためには信頼性のある環境条件の評価が不可欠とされている。本章においては、土木学会の提案する耐久設計法案に対して、本研究の成果を応用する一つの考え方を示しているが、それ以外の提案法に対する応用方法については具体的考え方の提示を行うまでには至らなかった。しかし、いずれの提案法に対しても本研究成果を応用することが可能であると考えている。この点に関しては今後の課題としたい。

参考文献

- [1] 合田良実：耐波設計，土木学会誌，1997 February Vol. 82, pp. 15～pp. 19
- [2] 岡村甫：コンクリート構造物の耐久性設計の考え方 -土木構造物の場合-，コンクリート工学，Vol. 26, No. 11, Nov. 1988
- [3] コンクリート構造物の耐久設計指針（試案），コンクリートライブラリー，第 65 号，土木学会，1991 年
- [4] コンクリート構造物の耐久設計指針（案），コンクリートライブラリー，第 82 号，土木学会，1996 年
- [5] 鉄筋コンクリート構造物の耐久性設計に関する考え方，社団法人日本コンクリート工学協会，鉄筋コンクリート構造物の耐久性設計法研究委員会，1991 年 5 月
- [6] V. C. Li : Performance Driven Design of Fibre Reinforced Cementitious Composites, Fibre Reinforced Cement and Concrete, Proceedings of the Fourth International Symposium held by RILEM and organized by the Department of Mechanical and Process Engineering, University of Sheffield, U.K. July, 1992
- [7] 関博・大即信明：コンクリート構造物の耐久性設計の考え方 -港湾・海洋構造物の場合-，コンクリート工学，Vol. 26, No. 11, Nov. 1988

第7章 結論

7.1 本研究のまとめ

本研究においては、RC港湾構造物の塩害に係わる環境要因を定量的に評価することを目的に、モルタル供試体の全国規模の暴露試験およびその解析を行った。その結果に基づき、環境条件の定量的評価を試み、その評価結果を耐久設計へ応用する考え方を考察した。

本研究の内容および得られた結論を各章ごとに以下に総括する。

第1章においては、本研究の背景および目的について述べた。

第2章においては、既往の研究を収集・整理することにより、RC構造物の塩害に影響を及ぼすと考えられる各種の環境要因が有する影響の有無および程度についてこれまでに明らかにされている知見を明確にした。既往の研究より得られている知見は以下のとおりである。

- 1) 陸上部（海岸付近，海上大気中）において，飛来塩分量を決定する最も重要な要因は海風の風速である。
- 2) 飛沫部において，コンクリート中へ浸入する塩分量を決定する最も重要な要因は波のエネルギーである。
- 3) 海中部，干満部，飛沫部，陸上部という鉛直方向の異なる環境を比較した場合，陸上部が他の三環境よりも潜伏期間（鉄筋の腐食が開始されるまでの時間）がかなり長い。また，飛沫部よりも海中部および干満部の方が潜伏期間は短い。
- 4) コンクリート中の塩化物含有量に関しては，海中部・干満部，飛沫部および陸上部の三環境に大まかに分類できる。また，同一の暴露環境内にあってもさらに細かく見れば条件の相違がある。しかし，その同一の暴露環境内における塩化物含有量のばらつきは海中部においては他の環境よりも小さいようである。
- 5) コンクリート中の塩化物含有量の経時変化は，異なる暴露環境においては異なる傾向を示す。しかし，いずれの暴露環境の場合も共通している傾向は，暴露初期の段階においてはコンクリート中の外部表面領域の塩化物含有量が主に増加し，暴露時間の経過とともにコンクリートの内部領域の塩化物含有量が徐々に増加していくという点である。

- 6) コンクリート中の塩化物含有量の分布に最適な拡散係数は、コンクリートの外部表面領域と内部領域とで異なる値を示す。すなわち、コンクリート表面からの距離が 30～50mm の領域を境にして塩化物イオンの浸入メカニズムが変化するものと考えられる。
- 7) コンクリートの外部表面領域の拡散係数は、暴露約 5 年時以降ほぼ一定の値を示すようになる。この一定になった拡散係数の値は、コンクリート表面が海水と接触する時間の影響を受ける。また、コンクリートの内部領域の拡散係数は、異なる暴露環境ごとに異なる値を示す。海中部および干満部ではその値が大きく、飛沫部および陸上部ではそれに比べると小さな値を示す。
- 8) 異なる暴露環境におけるコンクリート中の塩化物含有量の相違は、主にコンクリート表面の塩化物含有量とコンクリートの内部領域における拡散係数の相違に起因するものである。

第 3 章においては、まず反応エネルギー論および電気化学理論に基づいたコンクリート中鉄筋の腐食量・腐食速度理論について述べ、その理論式に基づいて考案した本研究における環境要因の評価手法を示した。また、暴露後のモルタル供試体において実施した各種の試験の試験方法を示した。その中で、鉄筋の不動態の状態を評価するための分極抵抗試験ならびに定電位ステップ試験の 2 種類の電気化学的計測を実施しており、これら 2 種類の電気化学的計測値のデータの構造および意味を明らかにすることを目的に基礎実験を行った。その基礎実験の結果より以下に示すような知見を得ることができた。

分極抵抗試験（本研究の場合は直線分極抵抗試験）の計測値に影響を及ぼす要因は、計測の対象とする鉄筋と対極間の電気抵抗、ならびに計測の対象とする鉄筋の環境の相違、である。計測の際に、計測システムにおける鉄筋と対極間の電気抵抗が計測可能であれば、それに基づき計測値を補正することは可能である。本研究においては、分極抵抗の計測値に対して、鉄筋と対極間の電気抵抗に起因する計測誤差の補正を行った。

定電位ステップ試験に関して実施した基礎実験の結果より、モルタル中への海水の浸入量が多い場合はモルタルの含水率と酸素拡散性の間に相関関係が認められるが、海水の浸入量がほとんどない場合は両者に明確な相関性を認めることはできないことが明らかとなった。モルタル中への海水の浸入量がほとんどない場合は、含水率が 50%程度で酸素の拡散性が最も大きくなる可能性が示唆された。

第4章においては、まず2年間の暴露後に実施したモルタル供試体に関する各種の試験結果を総括した。その結果をもとに、モルタル中鉄筋の腐食量を試験データより推定する腐食量指標を提案した。腐食量指標を構築する過程において腐食進行期間を求め、またそれに加えて腐食速度指標を提案したが、この両者と実際の発錆面積率との間には明確な相関性を認めることはできなかった。しかし、腐食進行期間と腐食速度指標を総合的に考慮することにより求めた腐食量指標に関しては以下に示すような知見を得ることができた。

すなわち、モルタル中の塩化物含有量より求めた腐食進行期間、分極抵抗の逆数および定電位ステップ試験の計測結果の三者の積により構成される腐食量指標と発錆面積率の間には相関係数で0.7~0.8程度の比較的よい相関性が認められた。そして、腐食量指標と発錆面積率の関係を一次式で近似した場合、その係数は海中部、干満部、陸上部ごとに異なる値となった。この係数は海中部と干満部ではほぼ同程度であり、飛沫部の場合は海中部および干満部に比べて約2倍の値を示した。このことは海中部、干満部、飛沫部ごとに腐食量指標と腐食量の対応関係が異なっていることを示すと同時に、この係数の値は鉛直方向の環境条件の相違を示しているものと考えられる。すなわち、海中部と干満部は類似の環境条件であり、飛沫部はそれとは異なる環境条件であることを示しているものと考えられる。

第5章においては、暴露を実施した港の環境要因と第4章において提案した腐食量指標の構成要素（腐食進行期間、分極抵抗、定電位ステップ試験の結果）の関係を検討した。その結果、以下に示すような知見が得られた。

環境要因および海水成分の項目に関して主成分分析を行った結果、環境要因の項目を以下の5項目、すなわち、海水成分を代表する項目としての海水中の Cl^- 濃度、波浪条件および風の条件を代表する項目としての風速、環境温度を代表する項目としての気温および気温偏差、環境の乾湿・湿潤状態を代表する項目としての湿度、に絞ることができた。

分極抵抗の逆数と環境要因5項目について重回帰分析を行った結果、独立変数が以下のように選定された。すなわち、海中部の場合は海水中の Cl^- 濃度、気温偏差および風速である。その3項目の中では、海水中の Cl^- 濃度の影響度が最も大きく、気温偏差および風速の影響度は、海水中の Cl^- 濃度の影響度の約70%であった。干満部の場合は気温、気温偏差および海水中の Cl^- 濃度が独立変数として選定され、その3項目の影響度はほぼ等しいレベルであった。飛沫部の場合は気温のみが説明変数として選定された。重回帰分析の

結果より考察すれば、鉄筋の不動態の状態に関しては、海中部と干満部はほぼ同様の環境条件であると判断された。

定電位ステップ試験の結果と環境要因5項目について重回帰分析を行った結果、海中部の場合のみ最適なモデルが得られなかった。干満部および飛沫部については独立変数が以下のように選定された。すなわち、干満部の場合は湿度および風速が選定された。この2項目の中では、湿度の影響度の方が大きく、風速の影響度はその約60%であった。飛沫部の場合は湿度および気温偏差が選定された。その2項目の中では、気温偏差の影響度が大きく、湿度の影響度はその約60%であった。干満部と飛沫部に共通している環境要因は湿度であり、湿度が高いほどモルタル中铁筋への酸素供給量は多くなるという傾向を示した。

発錆開始時刻と環境要因5項目について重回帰分析を行った結果、重回帰式における独立変数が以下のように選定された。すなわち、海中部の場合は気温および海水中の Cl^- 濃度が選定された。その2項目の中では、気温の影響度の方が大きく、海水中の Cl^- 濃度の影響度はその約80%であった。干満部の場合は気温および風速が選定された。その2項目の中では、気温の影響度の方が大きく、風速の影響度はその約60%であった。飛沫部の場合は風速、湿度、気温および海水中の Cl^- 濃度が選定された。その4項目の中では、海水中の Cl^- 濃度の影響度が最も大きく、次いで気温の影響度、風速の影響度、湿度の影響度の順であった。湿度の影響度は、海水中の塩化物イオンの影響度の約30%程度であった。海中部、干満部および飛沫部に共通している環境要因は気温と風速であり、気温が低いほど、また風速が大きいほど発錆開始時刻は早くなるという傾向であった。

第6章においては、第5章までに得られた結果をもとに環境条件評価の評価方法を提案し、その評価結果の妥当性を検討した。また、評価結果の耐久設計への応用方法について一試案を示した。本章における要点は以下のとおりである。

第4章での成果である腐食量指標と第5章での成果である重回帰式をもとに、環境要因評価の一つの考え方を提案した。また、環境要因評価より求めた腐食量指標と暴露実験より得られた腐食量指標を比較し、環境要因評価結果の妥当性を検討した。環境要因評価より求めた腐食量指標は、当然のことながらある程度の誤差を含んだ値を示す。したがって、環境要因評価より求めた腐食量指標と実験で得られた腐食量指標が完全に一致するわけではないが、ある程度の傾向はつかめていると判断できた。したがって、環境要因評価より

求まる腐食量指標を解釈する際に若干工夫をすることにより、耐久設計に応用するに際してある程度有意な環境条件の評価を行うことができるものと考えられる。

また、これまでに学協会、学術論文等で提案されている耐久設計の考え方を整理し、港湾構造物を含めたコンクリート構造物の耐久設計の基本構造について考察した。いずれの提案法においても、構造物の置かれた環境条件に対して構造物が適切な耐久性を有するように設計するというのが基本的考え方であり、耐久設計法を確立するためには信頼性のある環境条件の評価が不可欠とされている。

本章においては、土木学会の提案する耐久設計法案に対して、本研究の成果を応用する一つの考え方を示すことができたが、それ以外の提案法に対する応用方法については具体的考え方の提示を行うまでには至らなかった。しかし、いずれの提案法に対しても本研究成果を応用することが可能であると考えている。この点に関しては今後の課題としたい。

7.2 本研究の問題点と今後の課題

本研究においては、港湾環境におけるモルタル供試体の2年間の暴露試験に基づき論を進めた。実際のコンクリート構造物の塩害による劣化進行過程の長さを考慮した場合、2年間の暴露期間では短いという印象を受ける。この点に関しては以下のように考えている。

- 1) モルタル供試体の寸法を小さくし、鉄筋のかぶり厚さを20mmと小さく設計したため2年間の暴露試験でも供試体の劣化は進行している。2年間の暴露後、大部分の供試体において内部鉄筋に腐食が生じていた。
- 2) 暴露試験を通じて環境要因の影響を供試体に吸収させ、暴露後にその情報を供試体より取り出すという当初の基本的考え方に立てば、2シーズンを経過することにより、ほぼ環境要因の影響は吸収されていると考えられる。
- 3) 本研究においては宮川の示すモデルにおける潜伏期および進展期を議論の対象としており、それに続く加速期、劣化期は議論の対象とはしていない。

上述した理由により、2年間という比較的短い暴露期間でも有意な知見は得られているものと考えている。

暴露試験、鋼材腐食および電気化学的計測はいずれも比較的多くのばらつきを包含していると考えられる。本研究においては、それらのばらつきをある程度認めた上で環境条件評価を行い、新たな知見を得ることができた。一方、本研究で得られた知見のみでは十分

に説明ができないデータも存在しており、本研究ではこれらに関しては十分な考察を加えることができなかつた。したがって、本研究で提案した環境条件評価、また、その耐久設計への応用も十分な精度を有しているとは言い難い。今後、実構造物の調査などを実施し本研究成果の妥当性を十分検討する必要がある。その結果を待って初めて本研究成果の信頼性の評価ができるものと考えている。

設計法を実用化するためには、その精度を定量的に評価しかつ妥当性を十分に検討することが不可欠である。また、設計法あるいはその体系を構築するためにはその理論的背景を確立することも重要である。本文の第6章において、本研究成果の耐久設計への応用方法について一試案を述べたが、理論的背景は必ずしも十分であるとは言い難い。耐久設計を実用化するためには、理論的背景の評価が不可欠であり、今後も検討を継続していきたいと考えている。この点は本研究に続く今後の研究課題としたい。

本論文の結語として以上の点を明記する。

謝 辞

本論文をまとめるにあたりましては、九州大学建設都市工学科松下博通教授に終始懇切丁寧なご指導を賜りました。ここに、心より感謝とお礼を申し上げます。松下教授は筆者の九州大学在学時の恩師であります。筆者が就職した後も常に研究の進捗、論文執筆の進捗に対しましてお心遣いをいただきました。また、本論文のとりまとめに際しましては、九州大学建設都市工学科彦坂熙教授、九州大学建築学科松藤泰典教授、崎野健治教授、九州大学建設都市工学科角知憲教授にご指導とご鞭撻を賜りました。ここに、心より感謝とお礼を申し上げます。

また、筆者が九州大学卒業後も常に研究の遂行ならびに論文の執筆に対しまして暖かいご支援を賜りました九州大学建設都市工学科太田俊昭教授ならびに九州共立大学土木工学科牧角龍憲教授に心よりお礼申し上げます。

本研究は筆者が運輸省港湾技術研究所におきまして実施したものであります。このような研究を行う機会を与えていただきました、元構造部長土田肇博士（現新日本製鐵株参与）、元構造部長横井聰之博士（現株ピーエス常務）、元構造部長野田節男博士（現(財)沿岸開発技術研究センター理事長）、元構造部長上田茂博士（現鳥取大学土木工学科教授）、元構造部長故稲富隆昌博士、現構造部長岩上淳一氏、現計画設計基準部長矢部泰治氏に心より感謝とお礼を申し上げます。平成9年12月にご逝去されました稲富隆昌博士には、御病床においてまでも本論文の執筆に対しご指導を賜りました。本論文ができあがりましたことをここに謹んでご報告申し上げる次第です。

本研究の発端は昭和63年に遡ります。本研究で用いた手法で環境条件の評価を行うことを発案されたのは当時の港湾技術研究所材料研究室室長大即信明博士（現東京工業大学開発システム工学科教授）であります。その後、少しずつではありますがデータの蓄積および解析を行い本論文の執筆に至りました。ここに記してお礼申し上げます。

筆者が昭和61年に港湾技術研究所に配属されて以来、多くの方のご指導を賜りました。材料研究室福手勤室長、構造部阿部正美主任研究官には十年以上の永きにわたりご指導を賜りました。また、構造強度研究室横田弘室長には筆者が港湾技術研究所に就職して以来社会人としての姿勢を学びました。元材料研究室室長関博博士（現早稲田大学土木工学科教授）、前構造強度研究室室長清宮理博士（現早稲田大学土木工学科教授）、元構造部主任研究官善一章博士（前ナカポーテック株取締役）には研究の遂行ならびに論文の執筆に

関しましてご指導をいただくとともに常に暖かいご支援を賜りました。

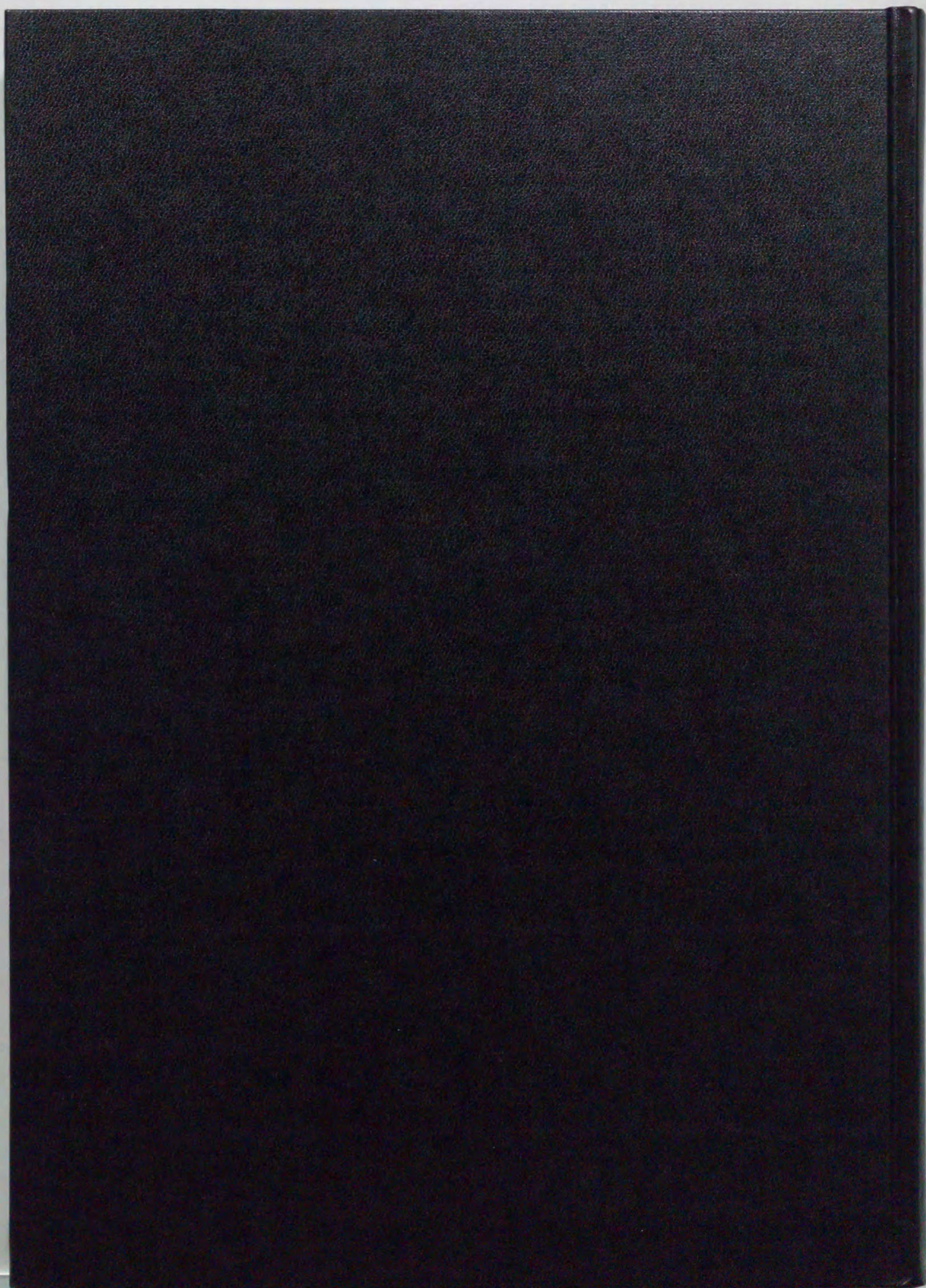
本論文の第2章において取りまとめましたコンクリート中の塩化物含有量に関するデータの収集および解析は、筆者が平成4年10月から平成5年9月にかけてイギリス・シェフィールド大学に滞在した際に実施したものであります。筆者の滞在を快く受け入れ、熱心にご指導いただきました同大学の R. N. Swamy 教授に心よりお礼申し上げます。

筆者が材料研究室および設計技術研究室におきまして机を並べました皆様には日々の生活の中で、数知れず励ましていただきました。構造部主任研究官山田昌郎氏、元材料研究室研究員山本邦夫氏（現運輸省第三港湾建設局）、元材料研究室非常勤職員田中寛氏、元材料研究室研究員三浦幸治氏（現運輸省第四港湾建設局）、設計技術研究室研究官松淵知氏、材料研究室非常勤職員野村年世氏、ここですべての方のお名前をあげることはできませんが皆様のご支援、ご協力に対しまして心よりお礼申し上げます。

本研究で実施しましたモルタル供試体の暴露試験は、昭和63年度から平成2年度にかけて組織されました「運輸省港湾局・研究協議会・補修工法技術開発ワーキンググループ」の活動の一環として実施したものであります。供試体の暴露作業を快く引き受けていただきました、運輸省港湾建設局、北海道開発庁開発局、総理府沖縄総合事務局の皆様にご心よりお礼申し上げます。

最後になりますが、数多いモルタル供試体の製作に熱心にご協力頂くとともに常に暖かいご支援を賜りました松尾睦氏（㈱ピーエス）、三輪翠氏（元㈱ピーエス）、また、論文の取りまとめおよび提出に際しまして快くご協力していただきました九州大学建設都市工学科鶴田浩章助手に心よりお礼申し上げます。

日々の業務・生活の中でお世話になりました皆様に改めて心よりお礼申し上げます。



Inches 1 2 3 4 5 6 7 8
cm 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19

Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM: Kodak



Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM: Kodak

A 1 2 3 4 5 6 **M** 8 9 10 11 12 13 14 15 **B** 17 18 19

