

空間統計学を利用した港湾コンクリート構造物 の効率的な維持管理に関する研究

兵頭 武志¹・北里 新一郎²・本城 勇介³・大竹 雄⁴

¹正会員 (財) 港湾空港建設技術サービスセンター (〒100-0013東京都千代田区霞が関3-3-1 尚友会館3階)

E-mail: hyoudou@scopenet.or.jp

²正会員 (財) 港湾空港建設技術サービスセンター (〒100-0013東京都千代田区霞が関3-3-1 尚友会館3階)

E-mail: kitazato@scopenet.or.jp

³正会員 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学研究科 (〒501-1193岐阜県岐阜市柳戸1-1)

E-mail: honjo@gifu-u.ac.jp

⁴正会員 岐阜大学特任助教 工学部社会基盤工学研究科 (〒501-1193岐阜県岐阜市柳戸1-1)

E-mail: y_ohtake@gifu-u.ac.jp

港湾構造物は厳しい海洋環境にあることから、塩害が劣化の主要因とされる。特に栈橋上部工コンクリートの下面側は塩害による劣化進行が速く、維持管理上、重視すべき主要な構造部材である。上部工下面側については、通常の点検では、海上から小型船舶を使ってアクセスし、外観目視調査により概略の健全性評価を行う。さらに詳細に調査する場合は、コア採取による塩化物イオン量測定を実施することになるが、荷役作業など施設の利用中は調査が行えないことやコア採取時の足場の確保など、効率的に行うには制約や課題が多い。

本研究では、離散的な位置での情報から対象域全体の情報を推定する場合によく用いられる空間統計学（クリギング）を適用し、栈橋上部工におけるいくつかの塩化物イオン量の離散的なデータから対象全体の劣化状況分布を推定するとともに、目視点検結果と塩化物イオン量の分布の関連性を比較分析し、効率的な維持管理方法を提案する。

Key Words : port structures, maintenance, inspection data, Kriging, deterioration prediction

1. はじめに

港湾施設の適切な維持管理の推進を図るため、平成19年に「港湾の施設の技術上の基準を定める省令」の改訂、「技術基準対象施設の維持に関し必要な事項を定める告示」が施行され、それ以降、港湾施設の維持管理計画書の策定が進められている。また、中央自動車道笹子トンネル天井板の落下事故の教訓から維持管理の重要性が再認識され、社会インフラの一つである港湾施設においても一斉に緊急点検調査が実施されている。今後限られた予算の中で効率的に維持管理を進めるには、これらの点検調査から得られるデータを使い、より精度の高い健全度評価を行って、対策を講じることが重要となる。

港湾構造物では、自然災害や事故を除けば、塩害による劣化に対する調査や対策が維持管理を進めるうえでの重要項目となる。港湾の係留施設の代表的な構造形式として、栈橋、重力式、矢板式があるが、このうち、栈橋

の上部工（RC構造物）の劣化進行が比較的速いことが知られており¹⁾、施設の安定的な機能を維持するうえで予防保全の考えに基づく維持管理の積極導入が必要な構造物と言える。

劣化予測については、外観目視の調査結果を利用したマルコフ連鎖モデルによる確率論的手法が一般に用いられ、劣化速度を示す遷移確率についても多くの施設の実績に基づく平均値が示されており²⁾、簡易な劣化予測法としては汎用性が高い。しかし一方で、コンクリート中の鉄筋が腐食し始める進展期（図-1参照）のRC部材に関しては、コンクリート表面にその兆候を目視で判別することが困難にもかかわらず、一旦腐食が開始すると容易に補修を施すことが難しいことから、目視点検結果とマルコフ連鎖モデルの組み合わせによる従来の劣化予測手法のみで予防保全的な対策を講じることが実務上難しいものと考えられる。

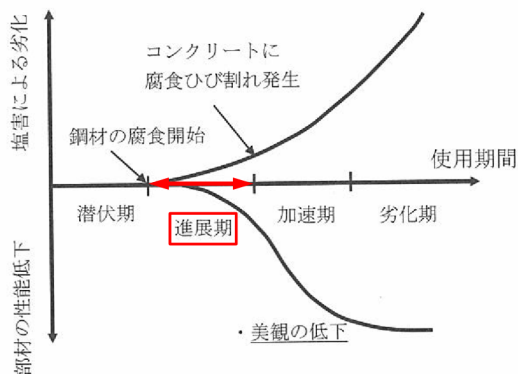


図-1 塩害による劣化進行過程の概念図（文献3）に加筆）

また、維持管理計画書に従って詳細定期点検時に塩化物イオン量計測が実施されている事例はあるが、詳細調査よりも簡易な一般定期点検で行われる外観目視調査結果との関連性について検討されている例はほとんどない。

以上のことから、本研究では、栈橋上部工の事例を対象とし、すでに実施されている外観目視や塩化物イオン量測定などの点検調査結果を整理分析し、その上でクリギングによる劣化状況の把握とフィックの第二法則（拡散方程式）との組み合わせで将来予測を行う。そして、外観目視の判定基準に着目したデータ整理結果と、クリギングによる塩化物イオン量の分布との比較を行い、効率的な維持管理手法について考察を加えて取りまとめる。具体的な手順は次のとおりである。

- ①塩化物イオン量測定結果（測定数50）を部材別（梁、床版）及び場所別（海側、陸側等）に整理して劣化傾向を把握する。
- ②①で整理した結果を用い、クリギングにより塩化物イオン量の平面分布を求める。
- ③フィックの拡散方程式から将来の塩化物イオンの浸透を予測する。
- ④外観目視点検について判定基準（目視で劣化度a～dと判断した根拠）ごとに整理し、②の結果と比較して関連性を考察する。
- ⑤①～④の結果を踏まえ、維持管理の効率化を図る手法を取りまとめる。

2. 対象構造物の点検調査結果の整理と分析

(1) 対象構造物の概要

検討対象としたA港のコンテナふ頭B栈橋は平成6年に建設された係留施設で、図-2に示すように、栈橋本体とその背後の土留め護岸により構成される。栈橋本体はRC構造物の上部工とこれを支える鋼管杭の下部工から構成され、背後の土留め護岸は鋼管矢板と斜め控え杭

（鋼管杭）により構成される。上部工の幅は20 mで、岸壁延長方向は目地で10ブロックに分割され、総延長は250 m（＝1ブロック延長25 m×10ブロック）である。

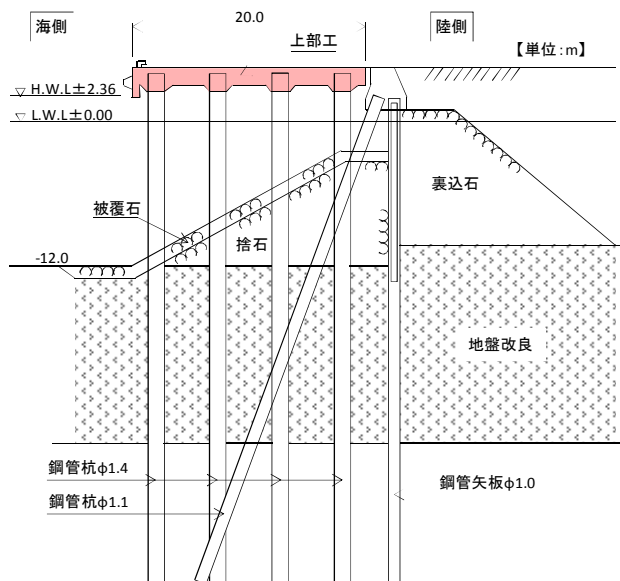


図-2 A港のコンテナふ頭B栈橋の標準断面

B栈橋では、平成19年度に維持管理計画策定に先立って行われた初回点検を含め、表-1に示す時期に一般定期点検、詳細調査が実施されており、本研究ではこれらの点検調査結果を基にデータを整理分析することにした。

表-1 分析に用いたB栈橋上部工の調査項目

点検調査の名称	実施時期	本研究の分析に用いた上部工の調査項目
初回点検	平成19年度	外観目視
一般定期点検	平成22年度	外観目視
詳細調査	平成22年度	コア採取(50箇所)、塩化物イオン濃度試験(50箇所)

(2) 塩化物イオン量測定結果の整理・分析

表-1に示したように、平成22年度に行われた詳細調査では、上部工の梁や床版の部材に関してコアが採取されており、採取した試料について塩化物イオン量測定が実施されている。コア採取箇所は、1ブロックあたり5箇所（図-3参照）、全10ブロック（BL.1～BL.10）合計50箇所である。

部材別の塩化物イオン量の傾向を把握するため、全ブロックに対してコア採取箇所別の塩化物イオン量の平均を求めた結果を図-4に、また、塩化物イオン量測定結果を基に式(1)に示すフィックの拡散方程式から見かけの拡散係数を $1.07 \text{ cm}^2/\text{y}$ で一定（全体の平均値）として、逆算して求めた梁底面におけるコンクリートの表面塩化物イオン量を図-5に示す。図-4には、「港湾の施設の技術

上の基準・同解説」⁴⁾に示される鉄筋腐食発生限界の塩化物イオン量 2.0 kg/m^3 を赤線で示している。また、部材の鉄筋かぶりは 84 mm である。

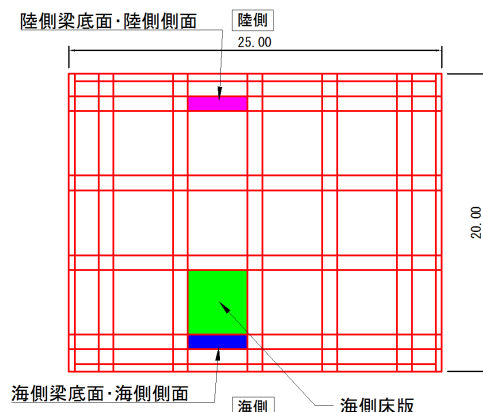


図-3 コア採取箇所（ブロック平面図）

$$C(x, t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_d \cdot t}} \right) \quad (1)$$

ここに、

$C(x, t)$: コンクリート表面からの深さ x (cm), 時刻 t (y)における塩化物イオン量 (kg/m^3)

C_0 : コンクリートの表面塩化物イオン量 (kg/m^3)

D_d : 塩化物イオンの見かけの拡散係数 (cm^2/y)

erf : 誤差関数 ($\operatorname{erf}(s) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^s e^{-\eta^2} d\eta$)

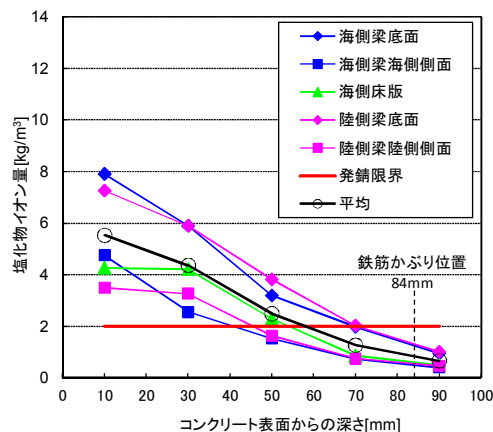


図-4 採取箇所別の塩化物イオン量の平均値

図-4に示した表面塩化物イオン量の結果より、同じ梁部材であっても、海側と陸側ではほぼ同じで、図-5を見ると海側、陸側ともにBL.5〜7で比較的大きな表面塩化物イオン量となっていて、今回の対象構造物全体としては大きな差は見られない。その一方で、梁側面は海側、陸側ともに梁底面より低い傾向にある。梁よりも海面からの距離が大きい床版での塩化物イオン量の結果が梁側

面の結果よりも大きいことを踏まえると、面の向きは塩害劣化に影響しているようであるが、現時点では1回の測定データによる結果であり、今後データを蓄積しながら判断すべきと考える。

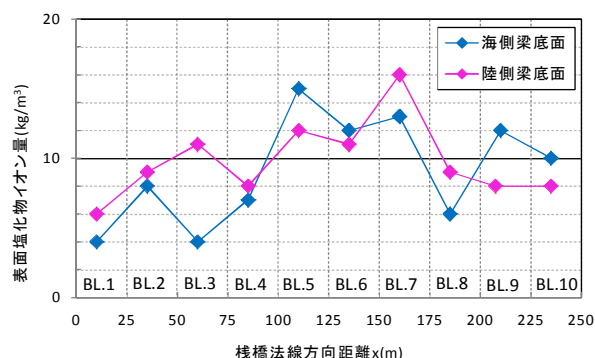


図-5 拡散方程式より逆算した表面塩化物イオン量（梁底面）

3. クリギングによる劣化分布の推定

(1) クリギングとは

横橋上部工下面側の外観目視調査は小型船舶によりアクセスして実施するのが一般的で、さらに施設の利用上の制約や、波浪、潮位の影響などにより作業性が変化するため、陸上調査よりも作業効率は極めて低い。さらに、RC部材の塩化物イオン量を計測するためのコア採取の際も、固定された作業足場の確保などが必要となるため、必然とコア採取数が限られる。このような状況を踏まえると、少ないデータから、確率論的に広範囲に劣化状況を推定する手法が求められる。

クリギング (Kriging) は、確率場のある領域内の任意地点におけるデータを、領域内のいろいろな位置で計測された確率場の一組のデータから推定する空間統計学の代表的な手法である。その特長は、①離散空間から連続空間へと導くことができる、②限られた散在ポイントデータから対象領域全体の分布を把握できる、③空間的データ変動が不規則すぎる局地的異常値の場合には、スプラインのような滑らかな数学関数よりも、確率論的なクリギングの方が適合しやすい、などがあり、空間的な相関を持つ距離または方向のバイアスがある場合は最適な手法とされる。なお、クリギングの詳細については、関連する解説書⁵⁾を参照いただきたい。

本報告では、港湾の施設の維持管理にクリギングによる確率論的手法を組み込むことを考え、効率的な維持管理手法の検討を試みた。ここでは、図-4で示したように、比較的劣化が進んでいるとみられる梁底面に着目して検討した結果について述べる。

(2) 塩化物イオン量の分布推定と浸透予測

上述の塩化物イオン量の試験結果（離散データ）を入力データとし、クリギングを用いてコンクリートの表面塩化物イオン量の分布を推定した。クリギングで設定する自己相関関数 ρ については下式の指数型を採用し、そのパラメータである自己相関距離 θ を同定する。下式において、 Δx は相対距離(m)である。

$$\rho = \exp\left(-\frac{\Delta x}{\theta}\right) \quad (2)$$

全ての調査地点同士の組み合わせで相関係数を計算し、相対距離との関係を示したものが図-6である。

図中の赤プロットは、それぞれの相対距離における平均値を示しているが、その平均値の傾向の適合度を確認しながら θ を目視で設定し、ここでは15mと仮定した。対象の栈橋上部工の陸側及び海側の梁底面の結果を図-7

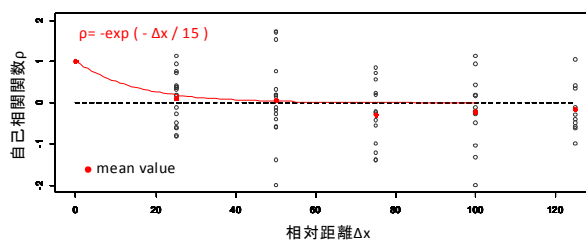


図-6 相対距離 Δx と自己相関関数 ρ の関係

に示す。同図では、横軸が栈橋法線方向の距離、縦軸は法線直角方向の距離を示しており、グラフの上側を陸側として表示している。また、梁部材は、図-3に示したように、実際は格子状に構成配置されているが、判読のしやすさを優先させるため、一様な平面図で表している。図-7に示すように、今回着目とした栈橋上部工の梁底面については、BL5～7、9の表面塩化物イオン量が高い傾

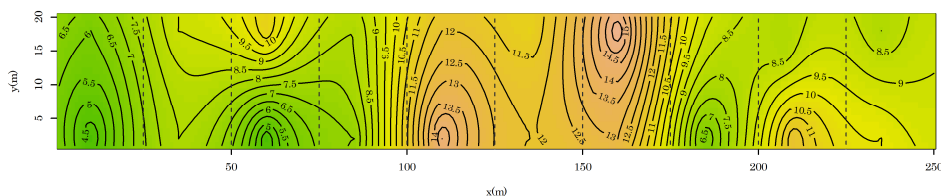
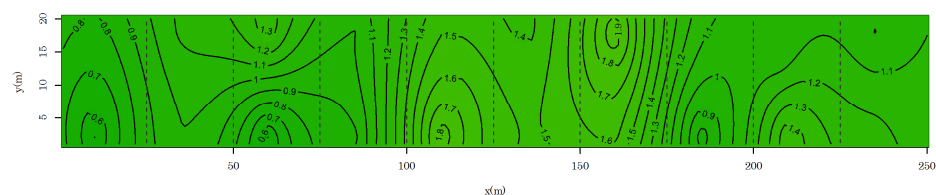
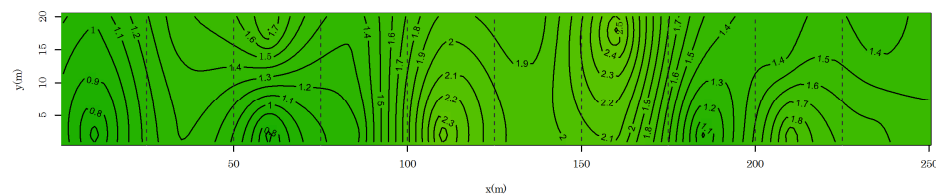


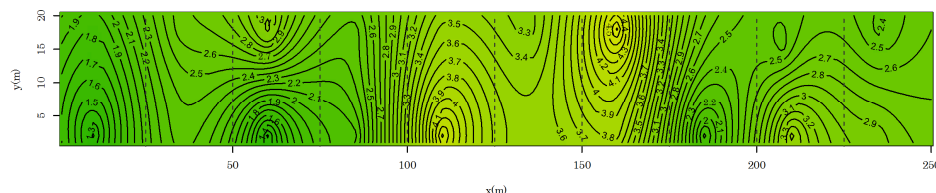
図-7 梁底面の表面塩化物イオン量の平面分布(平成22年度, 等値線間隔 0.5 kg/m^3)



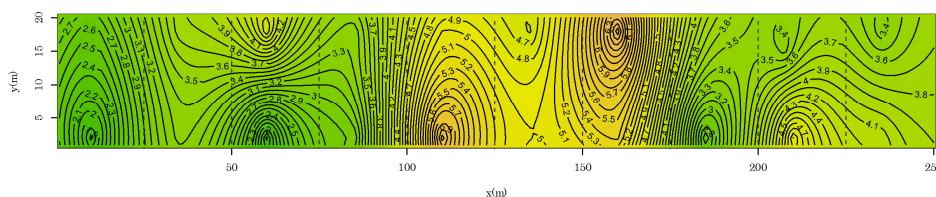
(a)建設14年経過(平成19年度初回点検時)



(b)建設17年経過(平成22年度定期点検時)



(c)建設30年経過



(d)建設50年経過

図-8 梁底面の鉄筋位置での塩化物イオン量の予測（等値線間隔 0.1 kg/m^3 。色分けは図-7に同じ）

向にあることがわかる。今回の分析では、見かけの拡散係数を一定としているので、劣化の進行の程度を結論的に述べることはできないが、図-7のように表すことで、維持管理を進めるうえで注視すべき部材を視覚的に確認することができる。

図-7 に示した梁底面の表面塩化物イオン量をフィックの拡散方程式に入力し、将来の浸透状況を算定して、クリギングで分布を推定した結果の例を図-8 に示す。

同図は、外観目視調査を行った平成 19 年度及び平成 22 年度の時点について、梁底面の鉄筋位置（かぶり 84 mm）における塩化物イオン量の分布を予測したもので、入力データは、図-5 に示した梁底面の全ブロックの表面塩化物イオン量の平均値である。今回の例では、図-8 と表面塩化物イオン量を示した図-7 の分布形状と同じとなっているが、これは、浸透速度を表す拡散係数をすべての梁に対して一定値（平均値）を入力していることによる。本来、フィックの拡散方程式を逆解析して求まる表面塩化物イオン量と見かけの拡散係数は相関があるとされているので、詳細を分析して採取箇所それぞれの塩化物イオン量測定値に基づく拡散係数を用いれば、より精度の高い予測を行うことは十分可能である。

(3) 外観目視結果との比較

一般に、港湾の施設の維持管理に関しては、「港湾の施設の維持管理技術マニュアル」⁶⁾（以下、技術マニュアルと略称）を参考に行われる。技術マニュアルには、外観目視調査は、構造物全体の状態を把握するための基本となるもので、客観性の確保と重要な変状の見落としがないよう適切に実施することと記されており、詳細調査に比べると経済性や簡便性に優れているので、継続的に行うには実務上、都合が良い。しかし一方で、調査の判定に客観性が不十分であると、そのデータを使った分析や将来予測の信頼性は損なわれることになる。

技術マニュアルによると、栈橋上部工の梁の外観目視調査における劣化判定基準は表-2に示す「ひび割れ」、「錆汁」、「剥離」の3項目に整理でき、3項目のうち最も劣化進行した状態が確認された項目の劣化度がその部

材の劣化度として判定されることになる。同表に見る通り、ひび割れと錆汁については各劣化度に対応する4つの劣化状態が示されるが、剥離に関しては、劣化した状態が観察された時点で部材の劣化度はaと判定されることになる。一つの例として、B栈橋における調査時期の異なる二つの外観目視結果（平成19年度と平成22年度で、調査会社は異なる）を図-9に判定基準項目別に比較して示す。同図では、各調査時期においてひび割れと錆汁については比較的緩やかな劣化進行が確認できるが、剥離では平成22年度に劣化度aと判定される部材が大幅に増えた一方で、逆に劣化度が後退した（点検者のなんらかのエラーによって劣化度aがdと判定された）部材が少なからずあることがわかる。この点については当該施設のデータの蓄積や多くの事例に基づく分析が必要であるが、港湾施設での厳しい調査環境を踏まえると、客観性の確保や見落としのない適切な調査の実施には限界があり、劣化予測精度向上のためには図-9のように判定基準の項目別にデータを整理して、相関や傾向を把握することが適切な方法と考えられる。今後の検討課題としたい。

表-2 上部工下面 RC 梁の劣化判定基準（文献 6)に基づき整理）

劣化度	部位部材の状態	判定基準		
		ひび割れ	錆汁	剥離
a	部材の性能が著しく低下している状態	幅3mm以上の鉄筋軸方向のひび割れがある	錆汁が広範囲に発生している	かぶりの剥落がある
b	部材の性能が低下している状態	幅3mm未満の鉄筋軸方向のひび割れがある	錆汁が部分的に発生している	—
c	部材の性能低下はないが、変状が発生している状態	軸と直角な方向のひび割れのみがある	錆汁が点状に発生している	—
d	変状が認められない状態	異常なし	異常なし	—

次に、塩化物イオン量の予測結果の図-8(a), (b)と、外観目視結果について比較して考察する。両者をそれぞれの調査時期で比べると、平成19年度の外観目視結果では劣化度a～cと判定された部材数が少ないので単純な比較はできないが、平成22年度の外観目視結果、特にひび割

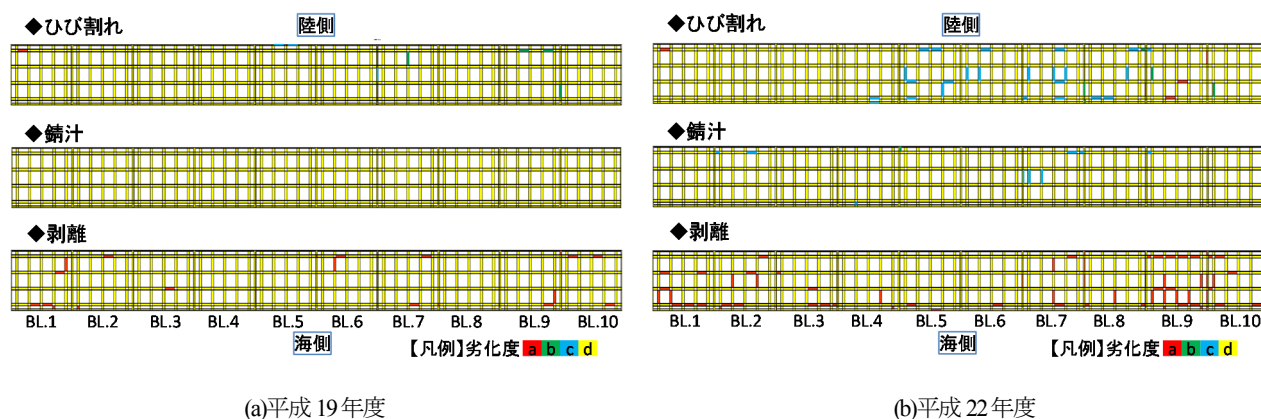


図-9 外観目視による梁の劣化度の平面分布(判定基準別)

れで比較的劣化が進んでいるブロックと塩化物イオン量で比較的大きな値となっているブロックがおおむね整合していることがわかる。一般に、腐食発生あるいはひび割れ発生以降は塩化物イオン量と劣化度は直接の関係はないとされるが、目視確認が難しい状態、例えば劣化進展期にある部材を事前に把握する場合などの目安として、あるいは、上述したように、従来のマルコフ連鎖モデルを用いた劣化予測手法は予防保全の考えに適用しにくいことを踏まえると、このような詳細な劣化分布の把握は維持管理の効率化に大いに役立つものと考えられる。今後、今回の調査データの詳細分析を進めるとともに、他の事例についてもデータ収集して検証する予定である。

4. 結論

本報告では、港湾施設の維持管理のさらなる効率化を図ることを目的に、クリギングという空間統計学における代表的な手法の適用を考え、具体的な栈橋上部工の事例を対象に検討した。その結果を以下に取りまとめる。

- 塩化物イオン量測定結果を整理分析して、比較的劣化の進んでいる梁底面の離散データを基にクリギングによる劣化状況を連続データとして表すことで、詳細な劣化分布を推定できることを示した。
- クリギングによる劣化分布とフィックの拡散方程式を組み合わせることで、将来の塩化物イオンの浸透予測手法を提案した。
- 外観目視結果について、判定基準の項目（ひび割れ、錆汁、剥離）ごとに劣化度分布を示し、クリギングによる塩化物イオン量の分布を比較したところ、平成22年度に実施した外観目視結果のひび割れの分布と塩化物イオン量の分布はおおむね整合する結果となった。目視確認が難しい状態、例えば劣化進展期にある部材を事前に把握する場合などの目

安として塩化物イオン量の分布推定は有用である。ただし、一般に塩化物イオン量とひび割れや腐食発生後の劣化進行とは直接的な関係はないとされており、今後、他の事例による検証が必要である。

今回の事例では比較的多くの塩化物イオン量測定データを利用することができたが、施設の利用上の制約や厳しい調査作業環境や条件、経済性などから、通常は、塩化物イオン量測定などの詳細定期調査を実施する頻度としては約10年間隔で、1回につき数箇所の部材を対象に採取する程度とみられる。したがって、今回示した手法を実用にするためには、外観目視調査結果の活用が有効で、そのためには劣化度の判定基準であるひび割れ、錆汁、剥離の3項目それぞれについて相関や傾向を分析したうえで、例えば、劣化度a～dを数値化するなどしてクリギングで劣化度の分布を推定し、少ない塩化物イオン量測定データでキャリブレーションしながら劣化の進行状況や予測の精度を高めるという手順が適切と考えられる。今後の検討課題として取り組みたい。

参考文献

- 1) 福手勤、濱田秀則、大即信明：栈橋コンクリート上部工の劣化実態に関する詳細調査、セメント技術大会講演集、Vol.43, pp.644-649, 1989.
- 2) 古谷宏一、横田弘、橋本勝文、花田祥一：マルコフ連鎖モデルを用いた係留施設の劣化進行予測の信頼性評価、土木学会論文集 F4（建設マネジメント）、Vol.67, No.4, I_159-I_168, 2011.
- 3) 土木学会：2007 年度制定 コンクリート標準示方書維持管理編、p.101, 2008.3.
- 4) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説、日本港湾協会、2007.
- 5) 例えば、Hans Wackernagel：地球統計学、地球統計学研究委員会 訳編／青木謙治 監訳、森北出版、2003.5.
- 6) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の維持管理技術マニュアル、（独）港湾空港技術研究所編著、（財）沿岸技術研究センター、2007.10.

A STUDY ON EFFICIENT MAINTENANCE OF RC DECK IN OPEN-TYPE WHARF BY KRIGING METHOD

Takeshi HYODO, Shinichiro KITAZATO, Yusuke HONJO and Yu OTAKE

Since port structures are exposed in the severe natural condition, it is difficult to estimate the deterioration of components of port structures frequently. This paper presents the more effective procedure for efficient maintenance of RC deck in open-type wharf. Kriging method, a typical method in geostatistics, was applied in this study to estimate the deterioration of a target RC deck using inspection data such as deterioration degree from visual inspection and concrete chloride ion tested from in-situ samples. The results show that Kriging method is useful to figure out the distribution of concrete chloride ion and to predict the deterioration process.