

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1349 December 2018

統計的手法を用いた栈橋上部工の塩害による劣化傾向分析

田中 豊
川端 雄一郎
加藤 絵万

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,
Port and Aviation Technology, Japan

目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 棧橋上部工における劣化進行の非一様性	4
2.1 棧橋上部工下面の劣化度の非一様性	4
2.2 棧橋上部工の床版における塩化物イオン浸透の非一様性	5
2.3 まとめ	8
3. 棧橋上部工下面の塩害による劣化進行の非一様性に影響を及ぼす要因の分析	8
3.1 対象棧橋の概要	8
3.2 分析手法の概要	8
3.3 要因の選定およびグループ分けの基準	8
3.4 生存関数の推定結果	9
3.5 考察	12
3.6 まとめ	13
4. 棧橋上部工の床版における塩化物イオン濃度の非一様性に関する検討	13
4.1 対象棧橋の概要	13
4.2 対象床版の概要および調査内容	13
4.3 表面塩化物イオン濃度および見かけの拡散係数の推定	15
4.4 塩化物イオン濃度の平面的な分布推定	16
4.5 考察	16
4.6 まとめ	18
5. 結論	18
6. あとがき	19
謝辞	19
参考文献	19
付録	20

Analysis on Chloride Induced Deterioration Progress in Superstructure of Open-type Wharf with Statistical Methods

Yutaka TANAKA*

Yuichiro KAWABATA**

Emma KATO***

Synopsis

Reinforced concrete structures in ports and harbours are exposed to severe environments in terms of chloride induced deterioration. It is well known that the progress of chloride induced deterioration in the superstructure of open-type wharf varies widely due to many factors such as seawater levels and location of structural members. The aim of this study is to evaluate the influence of these factors on the deterioration progress and detect the area where it becomes relatively faster. In this study, two statistical approaches were carried out to discuss the variability of the deterioration progress not only in the superstructure of open-type wharves but also in structural members; 1) statistical analysis on the visual inspection data of the superstructure of 19 open-type wharves, and 2) measurement of chloride ion content and estimation of its spatial distribution.

The main results of this study were following;

- The deterioration of horizontal beams, which is parallel to the longer direction of the open-type wharf, was progressive at sea side and land side. The deterioration of vertical beams, which is perpendicular to the longer direction, was progressive when the distance between H.W.L. and the bottom surface of beams was close. The deterioration of slabs was less progressive at land side whereas it was progressive when the tidal variation was small.
- The surface chloride ion contents of two slabs were significantly different and one of them varied widely. However, the results of the estimation of the spatial distribution of the surface chloride ion content of two slabs had a similar spatial distribution; the surface chloride ion content at the rear side of a slab was high and that at the middle and the front side of a slab was low.

From these results, in this study, the areas where the progress of deterioration is relatively faster are parallel beams and slabs at the sea side and beams at the land side of the open-type wharf.

Key Words: Superstructure of open-type wharf, chloride ion induced deterioration, deterioration progress, survival analysis, spatial statistics

* Researcher, Structural Mechanics Group

** Senior Researcher, Structural Mechanics Group

*** Head of Group, Structural Mechanics Group

3-1-1, Nagase, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan

National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology Port and Airport Research Institute

Phone: +81-46-844-5059 Fax: +81-46-844-0255 E-mail:tanaka-yu@p.mpat.go.jp

統計的手法を用いた栈橋上部工の塩害による劣化傾向分析

田中 豊*・川端 雄一郎**・加藤 絵万***

要 旨

栈橋上部工は厳しい塩害環境にさらされているため、塩害による劣化が顕著である。栈橋上部工下面の目視点検は、海上作業であること、点検対象の部材が多いこと、海象条件等による時間制約があること等から、作業にかかる労力が大きい。さらに、塩害による劣化進行は栈橋内だけでなく、部材内でも一様でないことが知られている。栈橋内および部材内における劣化進行の非一様性に影響を及ぼす要因や劣化傾向を把握できれば、重点的に点検すべき箇所や劣化状態を把握するためのセンサーを設置する箇所等を検討することができ、点検の効率化につながると思われる。そこで本研究では、劣化進行に影響を及ぼす要因および劣化傾向を把握することを目的として、①19 施設分の栈橋上部工下面の目視点検データ分析、②2 枚の栈橋上部工の床版における塩化物イオン濃度測定およびその平面的な分布推定を行った。

①19 施設分の栈橋上部工下面の目視点検データ分析より、部材種類ごとに劣化進行に影響を及ぼす要因を把握した。法線平行方向の梁では、海側および陸側に位置する部材の劣化が進行しやすく、法線直交方向の梁では、H.W.L. からの距離が近い環境の場合に全体的に劣化が進行しやすい可能性が示された。また、床版では、陸側に位置する部材の劣化が進行しにくい一方で干満差が小さい環境の場合に全体的に劣化が進行しやすい可能性が示された。

②2 枚の栈橋上部工の床版における塩化物イオン濃度測定の結果、両床版で塩化物イオン濃度の値が大きく異なり、そのうち1枚の床版では、塩化物イオン濃度の値が大きくばらついていた。塩化物イオン濃度の平面的な分布推定の結果、両床版ともに床版の奥側で塩化物イオン濃度が高く、中央および手前側で塩化物イオン濃度が低い特徴が見られた。

以上から、本研究の範囲において、栈橋内および部材内で劣化が進行しやすく、重点的に点検すべき箇所として、海側に位置する法線平行方向の梁および床版（特に床版の奥側）、陸側の梁部材（土留部からの距離が近い場合）が挙げられる。

キーワード：栈橋上部工、塩害、劣化傾向、生存時間解析、空間統計学

* 構造研究領域構造研究グループ研究官

** 構造研究領域構造研究グループ主任研究官

*** 構造研究領域構造研究グループ長

〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所

電話：046-844-5059 Fax：046-844-0255 E-mail:tanaka-yu@p.mpat.go.jp

1. まえがき

栈橋上部工は厳しい塩害環境下にさらされているため、塩害による劣化が顕著である。栈橋上部工下面の点検は小型ボート等による水上からの目視により行われるが、施設延長が長く点検対象となる部材が多いこと、海上作業となるため作業環境が厳しいこと、海象条件や施設の利用等による作業上の制約があること等により、目視点検作業にかかる労力が大きい。点検の効率化を図る方法として、重点的に点検すべき箇所を選定やセンサーを用いたモニタリング等が考えられる。しかし、栈橋上部工下面の劣化は、潮汐等の海象条件や部材配置等の影響を受けて、一様に進行しないことが知られている。さらに劣化進行の非一様性は、栈橋単位だけでなく、ブロック単位や部材単位でも生じている。そのため、劣化進行に影響を及ぼす要因やどこが劣化しやすいかといった劣化傾向を、栈橋単位だけでなく、ブロック単位や部材単位においても把握できれば、対象栈橋内で最も劣化が進行しやすい箇所や条件を推定できる。

栈橋単位あるいはブロック単位における劣化進行の非一様性に関して、塩化物イオンの供給に着目した研究¹⁾や目視点検結果を用いた研究²⁾がある。文献1)では、コンクリート表面における塩化物イオン濃度 (C_0) と海面からの距離との間には負の相関があることが報告されている。文献2)では、栈橋内における部材の空間的な位置によって C_0 およびコンクリートの見かけの拡散係数 (D_{ap}) が異なることが報告されている。文献3)では、マルコフ連鎖モデルを用いて、部材位置ごとに遷移率を計算し、海側に位置する部材の遷移率が高い、つまり劣化が進行しやすいことが報告されている。部材単位における劣化進行の非一様性に関して、床版における塩化物イオン浸透に着目した研究⁴⁾がある。文献4)では、3枚の床版において複数箇所測定された C_0 および D_{ap} のばらつきが床版ごとに異なると報告されている。

既往の研究より、栈橋上部工においてどの部材のどの

部分が最も劣化が進行しやすいか推定するためには、栈橋単位あるいはブロック単位における劣化進行の非一様性に影響を及ぼす要因だけでなく、部材単位における劣化進行の非一様性に影響を及ぼす要因についても検討する必要がある。そこで本研究は、栈橋単位および部材単位における劣化傾向を分析し、栈橋上部工および部材内の塩害による劣化進行の非一様性に影響を及ぼす要因について検討することを目的とした。なお、本研究ではコンクリート品質やかぶり等のコンクリートの諸元・特性についてはなく、塩化物イオン供給や環境条件等の外的要因に着目した。

2章では、栈橋上部工および部材内の塩害による劣化進行の非一様性を目視点検結果および調査結果を用いて示す。3章では、図-1に示すように栈橋上部工全体を対象として、19施設分の栈橋上部工下面の目視点検データを分析し、栈橋上部工の塩害による劣化進行の非一様性に影響を及ぼす要因について検討する。4章では、図-1に示すように床版を対象として、塩化物イオン濃度測定および平面的な塩化物イオン濃度分布を推定し、床版内における海水飛沫による塩化物イオン供給の非一様性に影響を及ぼす要因について検討する。

2. 栈橋上部工における劣化進行の非一様性

2.1 栈橋上部工下面の劣化度の非一様性

栈橋上部工下面における劣化進行について、海側および陸側に位置する部材が劣化しやすいことが経験的に知られている。図-2および図-3に栈橋上部工下面の目視点検結果の一例を示す。両図の栈橋は、環境条件や供用年数等が異なる栈橋である。図-2では、劣化度 a と判定された部材は海側および陸側に位置しており、経験的に知られている劣化傾向と一致している。一方図-3では、海側および陸側だけでなく、中央に位置する梁部材も劣化度 a と判定されており、経験的に知られている劣化傾向と一致していない部分もある。また図-2において、プ

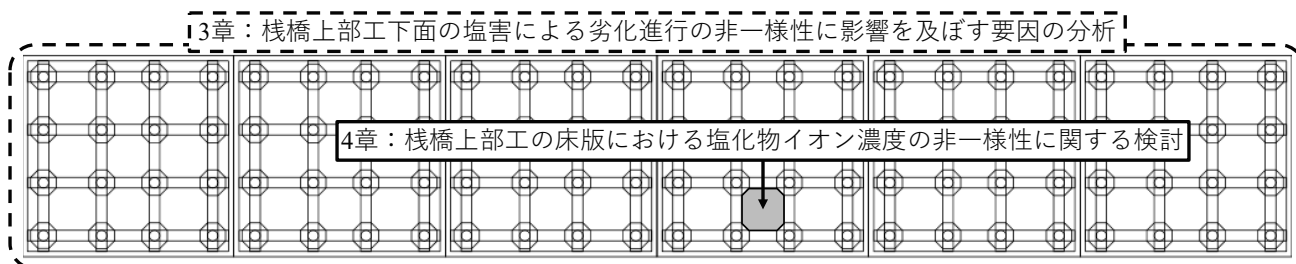


図-1 3章および4章において検討対象とする範囲

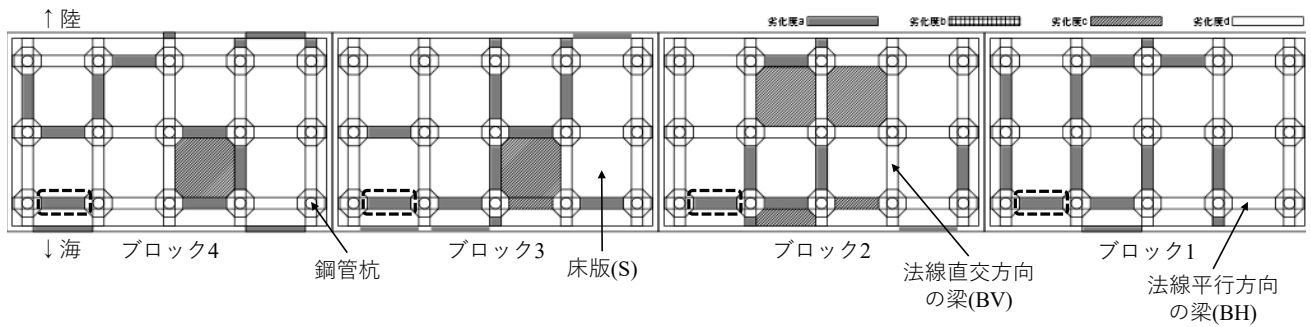


図-2 栈橋上部工下面における劣化度判定結果の例① 地域：関東 供用年数：45年

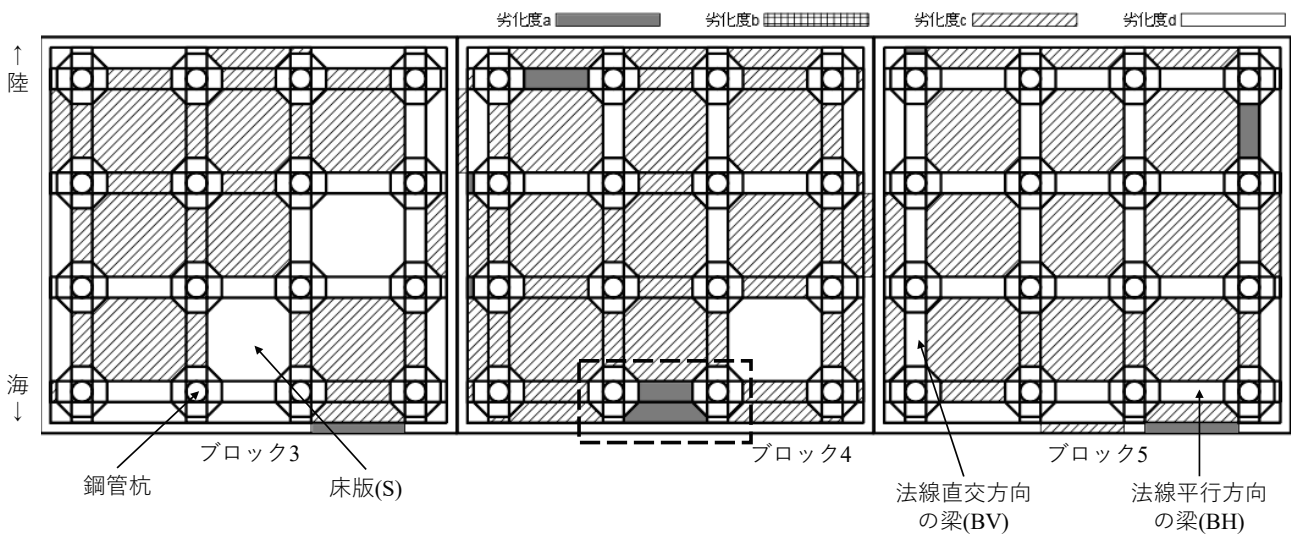


図-3 栈橋上部工下面における劣化度判定結果の例② 地域：関東 供用年数：24年

ブロックごとに劣化度判定結果を見てみると、点線で囲われた箇所位置する梁のみが4つのブロックで共通して劣化度 a と判定されており、ブロックごとでも劣化傾向が異なっている。

表-1 に栈橋上部工下面における劣化度判定の基準⁵⁾⁶⁾を示す。劣化度判定基準は主に塩害による劣化進行を対象としており、平成19年以前は表-1(a)、以降は表-1(b)である。劣化度は部材ごとに判定されるため、対象となる変状が局部的に生じている場合であっても、全体的に生じている場合であっても判定される劣化度は同じとなる。図-3のブロック4で劣化度 a と判定された梁および床版の拡大図(変状図)を図-4に示す。梁および床版ではコンクリートの剥落が局部的に生じていたが、他の箇所は目立った変状が見られなかった。なお、床版で確認されたひび割れ幅は3mm未滿であった。

実際に供用されている栈橋では、栈橋単位やブロック

単位で劣化傾向が異なっているだけでなく、部材単位でも劣化進行は様でなく、局部的に劣化が生じている箇所も見受けられる。以上からも、栈橋上部工において塩害による劣化が最も進行しやすい箇所を推定するためには、栈橋単位やブロック単位における劣化傾向把握だけでなく、部材単位における劣化傾向も把握する必要があると考えられる。

2.2 栈橋上部工の床版における塩化物イオン浸透の非一様性

文献4)では、同一の栈橋上部工床版内であっても、 C_0 および D_{ap} が様でないことが報告されている。つまり、塩化物イオン浸透が床版内で様でないということであり、この非一様性は床版内の塩害による劣化進行の非一様性に影響を及ぼすと考えられる。本節では、文献4)のデータ(1施設3枚の床版を対象)に、別の2施設3枚

表-1 劣化度判定基準
(a) 平成 19 年度以前⁵⁾

劣化度	劣化度の判定基準 (～平成19年度)	
	床版	梁
0	・なし。	・なし。
I	・コンクリート表面に点錆が見られる。 ・一部にひび割れあるいは帯状のまたは線状のゲル吐出物が2,3箇所みられる。	・コンクリート表面に点錆がみられる。 ・小さなひび割れ（ひび割れ幅1mm以下程度）が2,3箇所みられる。
II	・一部に錆汁がみられる。 ・ひび割れ、あるいは帯状または線状のゲル吐出物が数箇所みられる。 ・一部に浮きがみられる。	・一部に錆汁がみられる。 ・ひび割れやや多し、軸方向に垂直なひび割れのみ。 ・一部に浮きがみられる。
III	・錆汁多し、鉄筋腐食が広範囲に認められる。 ・ひび割れ多し、網目状あるいは錆汁をともなうひび割れを含む。 ・一部に剥落がみられる。	・錆汁多し、鉄筋腐食が広範囲に認められる。 ・ひび割れ多し、軸方向につながったひび割れ（ひび割れ幅3mm以上程度）を含む。 ・浮き多し。
IV	・浮き錆多し、鉄筋表面の大部分あるいは全周にわたる腐食が広範囲に認められる。 ・網目状のひび割れ等が全域にわたり多数みられる。 ・浮き・剥落多し。（1区画面積の4割程度以下）	・浮き錆多し、鉄筋表面の大部分あるいは全周にわたる腐食が広範囲に認められる。 ・軸方向につながったひび割れが全域にわたり多数。 ・浮き多し、剥離・剥落が数箇所みられる。（1区画面積の4割程度以下）
V	・浮き錆著しい、鉄筋断面積の有意な減少が全域にわたっている。 ・全域にわたる浮き・剥落。（1区画面積の4割程度以上）	・浮き錆著しい、鉄筋断面積の有意な減少が全域にわたっている。 ・剥離・剥落多数。（1区画面積の4割程度以上）

(b) 平成 19 年度以降⁶⁾

劣化度	劣化度の判定基準 (平成19年度～)	
	床版	梁・ハンチ
a	・網目状のひび割れが部材表面の50%以上ある。 ・かぶりの剥落がある。 ・錆汁が広範囲に発生している。	・幅3mm以上の鉄筋軸方向のひび割れがある。 ・かぶりの剥落がある。 ・錆汁が広範囲に発生している。
b	・網目状のひび割れが部材表面の50%未満である。 ・錆汁が部分的に発生している。	・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	・一方のひび割れ若しくは帯状又は線状のゲル吐出物がある。 ・錆汁が点状に発生している。	・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	・変状なし	・変状なし

の床版のデータを加えた、計3施設6枚の床版を対象とした。これらの施設の床版における塩化物イオン濃度測定結果を用いて、床版内における塩化物イオン浸透の非一様性について整理した。

表-2に各床版および採取コア数等の概要を示す。A港の3枚の床版（S1, S2およびS3）は前述した文献4)で用いられた床版である。追加した3つの床版の経過年数は29年（HK-LおよびHK-S）と41年（YH）であり、コア採取数はそれぞれ36本（HK-L）、63本（HK-S）および19本（YH）であった。

各コアにおける測定深度ごとの塩化物イオン濃度測定結果に対して、式(1)で表される Fick の拡散方程式で回帰することで、各コアにおける C_0 および D_{ap} を求めた⁷⁾。

$$C(x, t) = \gamma_{cl} C_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{ap}t}} \right) \right] \quad (1)$$

ここで、 $C(x, t)$: 深さ x cm, 時間 t 年における塩化物イオン濃度(kg/m³), C_0 : コンクリート表面における塩化物イオン濃度(kg/m³), D_{ap} : コンクリートの見かけの拡散係数(cm²/年), $\operatorname{erf}(\cdot)$: 誤差関数である。なお、 γ_{cl} は予測の精度全般にかかる安全係数で、かぶりのばらつきや環境条件の影響を受ける C_0 および D_{ap} のばらつきを考慮に入れて設定する必要がある。一般的には 1.0 を用いてよく、今回はばらつきを一切考慮しない場合を検討するため、

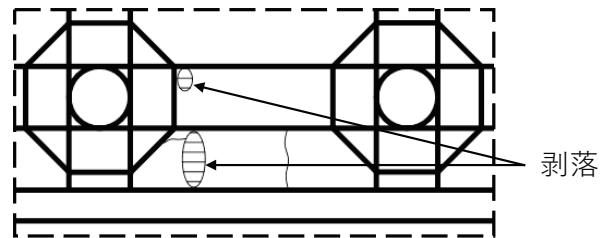


図-4 図-3 のブロック 4 の拡大図（変状図）

表-2 床版の概要

港名	床版名	経過年数	コア採取数	劣化度
HK	HK-L	29	36	d
	HK-S		63	d
YH		41	19	c
A	S1	40	13	c
	S2		21	c
	S3		7	b

$\gamma_{cl} = 1.0$ とした。

A 港の各床版で採取されたコアの塩化物イオン濃度等の詳細は文献4)を参照されたい。なお、A 港に3つの床版はいずれもアルカリ骨材反応（ASR）によるコンクリートの劣化が生じていたため、HK 港および YH 港の床版よりも塩化物イオンが浸透しやすい状態であったことを付記する。HK 港および YH 港の各床版で採取された

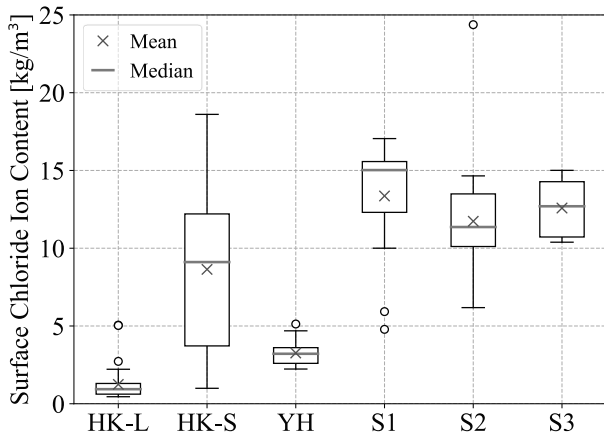


図-5 表面塩化物イオン濃度 (C_0) の箱ひげ図

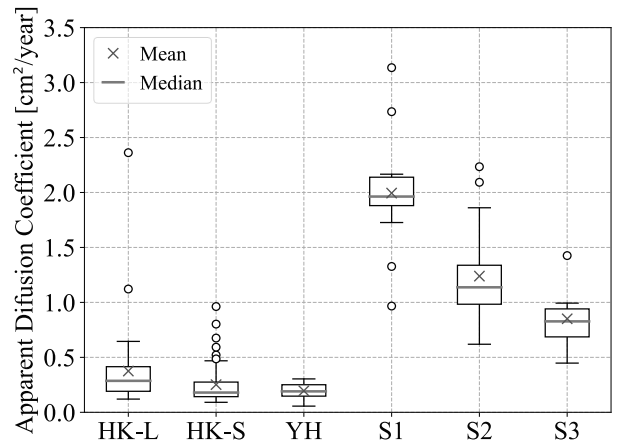


図-6 見かけの拡散係数 (D_{ap}) の箱ひげ図

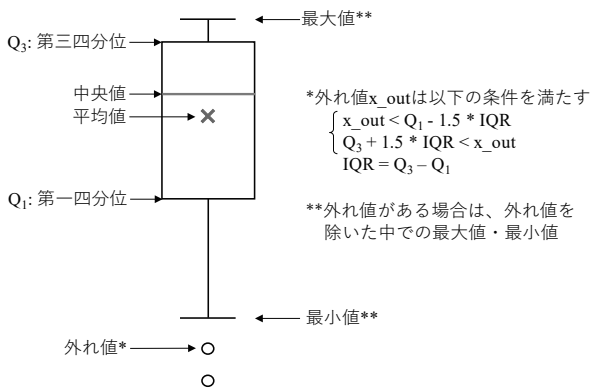


図-7 箱ひげ図の説明

コアの塩化物イオン濃度等を付録 A および付録 B にそれぞれ記載する。図-5 および図-6 に各床版における C_0 および D_{ap} の箱ひげ図を示す。また箱ひげ図の説明を図-7 に示す。図-5 において、HK-S において C_0 が幅広い値を取っており、HK-S における C_0 は一様ではない。また、HK 港の 2 枚の床版の C_0 を比較すると、平均値および中央値が大きく異なるだけでなく、 C_0 が取る範囲も大きく異なる。そのため HK 港では、床版内だけでなく、床版ごとにも C_0 が一様でない。一方図-6 において、HK 港および YH 港の 3 枚の床版における D_{ap} の平均値や中央値は概ね同程度であり、ASR よって塩化物イオンが浸透しやすい状態にある A 港の床版よりも小さな値であった。

図-5 および図-6 より、極端な外れ値を含むデータがあること、箱ひげ図が上下対称でないことから、平均値および分散を用いた変動係数による比較ではなく、式(2)で表される四分位分散係数を用いて、各床版の C_0 および D_{ap} のばらつきの程度を比較することとした。

表-3 四分位分散係数の計算結果

港名	床版名	コア採取数	四分位分散係数	
			C_0	D_{ap}
HK	HK-L	36	0.358	0.369
	HK-S	63	0.533	0.318
YH		19	0.163	0.261
A	S1	13	0.117	0.064
	S2	21	0.143	0.153
	S3	7	0.142	0.156

$$QCD = \frac{Q_3 - Q_1}{Q_3 + Q_1} \quad (2)$$

ここで、 QCD ：四分位分散係数、 Q_1 ：第一四分位数および Q_3 ：第三四分位数である。この四分位分散係数が大きいほど分布が広がっている、つまりばらつきが大きいと判断できる。

表-3 に各床版における C_0 および D_{ap} の四分位分散係数を示す。 C_0 および D_{ap} ともに HK 港の 2 枚の床版における四分位分散係数は他の床版よりも大きいため、HK 港の床版における C_0 および D_{ap} は他の床版よりもばらつきが大きいと判断できる。また HK 港の 2 枚の床版同士を比較すると、 D_{ap} の四分位分散係数は同程度の値であるが、 C_0 の四分位分散係数の値は異なっている。このことから、HK 港において床版ごとの D_{ap} のばらつきは同程度であるが、 C_0 のばらつきの程度は床版ごとに異なると言える。したがって、HK 港における床版ごとの塩化物イオン浸透の非一様性には、 D_{ap} よりも C_0 のばらつきが影響を及ぼしている可能性がある。

表-4 対象施設の概要

施設 番号	建設 年	点検 年	経過 年数	ブロック 数	部材数			劣化度 判定	施設 番号	建設 年	点検 年	経過 年数	ブロック 数	部材数			劣化度 判定
					梁		床版(S)							梁		床版(S)	
					法線平行方向 (BH)	法線直交方向 (BV)								法線平行方向 (BH)	法線直交方向 (BV)		
1	2000	2013	13	11	330	275	396	d~a	11	2001	2014	13	11	528	462	528	d~a
2	2007	2013	6	5	120	165	120	d~a	12	1987	2013	26	16	848	624	688	d~a
3	1989	2013	24	10	350	320	280	d~a	13	1968	2013	45	11	140	120	96	d~a
4	1989	2013	24	8	222	220	185	d~a	14	1968	2013	45	10	180	180	144	d~a
5	1974	2005	31	10	195	98	156	0~V	15	1980	2013	33	13	330	330	275	d~a
6	1969	2002	33	9	180	180	144	0~V	16	1986	2013	27	11	300	300	250	d~a
7	1968	1999	31	11	220	220	176	0~V	17	1989	2013	24	10	340	338	283	d~a
8	1970	1999	29	15	240	222	180	0~V	18	1996	2008	12	11	249	300	249	d~a
9	1973	2003	30	13	234	260	195	0~V	19	1989	2013	24	17	434	456	372	d~a
10	1973	2003	30	13	234	260	195	0~V	総計					215	5674	5330	4912

2.3 まとめ

本章では、栈橋上部工の塩害による劣化進行の非一様性を栈橋上部工下面の目視点検結果および床版における C_0 および D_{ap} の計算結果から示した。前者では、栈橋単位およびブロック単位で劣化傾向が異なること、部材単位では変状が局所的に生じており、部材単位でも劣化進行が一樣でないことを示した。後者では、床版ごとに C_0 および D_{ap} の平均値や値のばらつきが異なることを示した。以上から、栈橋上部工においてどの部材のどの部分が最も劣化が進行しやすいか検討するためには、栈橋単位の劣化傾向を把握するだけでなく、部材単位における劣化傾向も把握する必要がある。

3. 栈橋上部工下面の塩害による劣化進行の非一様性に影響を及ぼす要因の分析

本章では、栈橋上部工下面における塩害による劣化進行の非一様性に影響を及ぼす要因を検討することを目的として、19施設の栈橋上部工下面の目視による劣化度判定結果を分析した。

3.1 対象栈橋の概要

本研究では、供用期間および環境条件等が異なる19施設の栈橋上部工下面の目視による劣化度判定結果を用いた。対象とした栈橋の概要を表-4に示す。なお、対象とした栈橋の詳細は、付録Cに記載した。表-4に示すように、古い施設で1960年台に、新しいもので2000年台に建設された栈橋がある。また、経過年数(=点検年-建設年)は6年~45年と幅広いが、20年台および30年台が約7割を占める。なお、各部材の劣化度は点検年に判定されたものであり、実際には点検年に部材の劣化度がaやbになったわけではないが、本研究では点検年に部材の劣化度がaやbになったとして扱うこととした。また全ての施設において、完成図書や設計資料等を入手できなかったため、セメント種類やかぶり厚さ等に関する情報は得られなかった。

3.2 分析手法の概要

本研究では、生存時間解析⁸⁾を用いて、目視点検データを分析した。生存時間解析の詳細は付録Dに記載し、ここでは概要を述べる。生存時間解析は、対象とするイベントの生起とそのイベントが生起するまでの時間との関係に焦点を当てた統計的な分析手法の一種である。本研究では、生存時間解析の手法の中でもノンパラメトリックモデルとして知られる、カプラン・マイヤー推定法を用いた。カプラン・マイヤー推定法では生存関数(生存確率の経時変化を表す関数)を観測データから推定する。生存関数を推定する際に、観測データをある共変量ごとにグループ分けすることで、グループごとの生存関数を推定できる。それぞれのグループごとに推定された生存関数の差が統計的に有意であれば、その共変量は生存状況に有意な影響を及ぼす共変量であると判断できる。生存関数の差が有意であるか否かは、生存関数の差を検定することで判断できる。その検定における帰無仮説は「グループ間の生存関数に差がない」である。本研究では有意水準を5%とし、p値が有意水準以下の場合に帰無仮説を棄却し、「グループ間の生存関数に有意な差がある」と判断した。なお、p値は計算された統計量が、帰無仮説が正しいという条件の下で得られる確率のことである。

本研究で対象とした19施設の劣化度判定は、点検実施年が異なるため「0~V」(表-1(a))および「d~a」(表-1(b))が混在している。本研究では、部材の性能が低下したと判断される劣化度aおよびbを生存時間解析で対象とするイベント(劣化あり)と見なして生存関数を推定した。また、表-1(b)と表-1(a)を照らし合わせて、劣化度Ⅲ、ⅣおよびⅤが劣化度aおよびbに相当するとし、劣化度Ⅲ、ⅣおよびⅤもイベントと見なして生存関数を推定した。

3.3 要因の選定およびグループ分けの基準

劣化度判定基準は部材種類によって異なるため、生存時間解析においても部材種類ごとに分析することとした。なお、本研究では図-8に示すように、部材を法線平行方

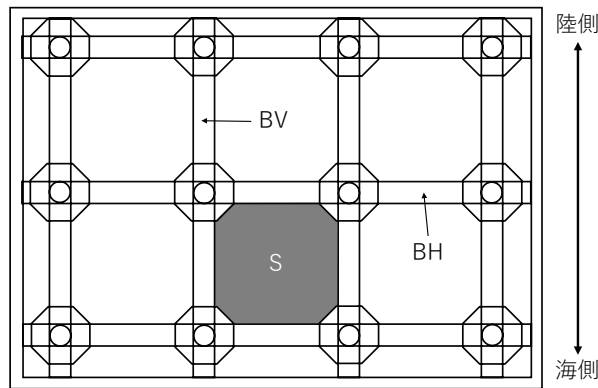


図-8 本研究で対象とする部材種類

表-5 劣化進行に影響を及ぼす要因とグループ分けの基準

要因	グループ1	グループ2	グループ3	備考
① 部材種類	法線平行方向の梁(BH)	法線直交方向の梁(BV)	床版(S)	
② 施設延長方向の位置	栈橋端部 $x/xL < 0.25, 0.75 < x/xL$	栈橋中心部 $0.25 \leq x/xL \leq 0.75$	—	x : 栈橋起点からの距離 xL : 施設延長
③ 海陸方向の位置	陸側 $0.75 < y/yL$	中央部 $0.25 \leq y/yL \leq 0.75$	海側 $y/yL < 0.25$	y : 岸壁法線からの距離 yL : エプロン幅
④ 風向と施設の向き	$ \theta \leq 45^\circ$	$ \theta > 45^\circ$	—	θ : 風向と施設法線直交方向のなす角度
⑤ H.W.L.からの距離 ：梁 ：床版	$H \geq 0.5$ m $H \geq 1.5$ m	$H < 0.5$ m $H < 1.5$ m	— —	H : H.W.L.からの距離
⑥ 干満差	$T \geq 2.0$ m	$T < 2.0$ m	—	T : 干満差

向の梁 (BH)、法線直交方向の梁 (BV) および床版 (S) の3種類に分けて分析した。表-1に示した劣化度判定基準は主に塩害を想定して定められていることを考慮して、本研究では塩化物イオンの供給に影響を及ぼすと考えられる要因として、以下の6つの要因を選定した。

- ① 部材種類
- ② 施設延長方向の位置
- ③ 海陸方向の位置
- ④ 風向と施設の向き
- ⑤ H.W.L.からの距離
- ⑥ 干満差

要因①について、部材種類ごとに劣化度判定基準が異なるため、要因として選定した。要因②および③について、文献2)において、空間的な部材の位置によって塩化物イオン浸透性状が異なると報告されているため要因として選定した。なお、施設ごとに施設延長やエプロン幅が異なることを考慮して、各部材の位置は各施設の施設延長 (xL) およびエプロン幅 (yL) で除した値を用いることとした。

要因④について、風向は海水飛沫の飛来方向や風波の方向に影響を及ぼすため要因として選定した。なお、風向は、各施設周辺の気象庁観測地点における過去30年

間(1986年~2015年)の年最大風速の風向データより、最も出現頻度の高い方角とした。

要因⑤について、文献1)において、H.W.L.から部材下面までの距離と表面塩化物イオン濃度との間に負の相関があると報告されているため要因として選定した。

要因⑥について、干満差による海面から部材下面までの距離の変化が塩化物イオン供給に影響を及ぼすと考え、要因として選定した。

表-5に各要因におけるグループ分けの基準を示す。⑤「H.W.L.からの距離」のみ梁と床版でグループ分けのしきい値が異なるが、この値は対象施設中の梁および床版におけるH.W.L.からの距離の平均値(梁:0.51m,床版:1.54m)から設定した。また、⑥「干満差」のしきい値も対象施設中における干満差の平均値(2.19m)から設定した。

3.4 生存関数の推定結果

(1) 部材種類

図-9に部材種類ごとの生存関数の推定結果を示す。経過年数が20年台および30年台の施設が多いため、生存関数は全体的に30年付近から低下し始めており、30年以降の生存確率は $BH < S < BV$ となった。生存関数の差

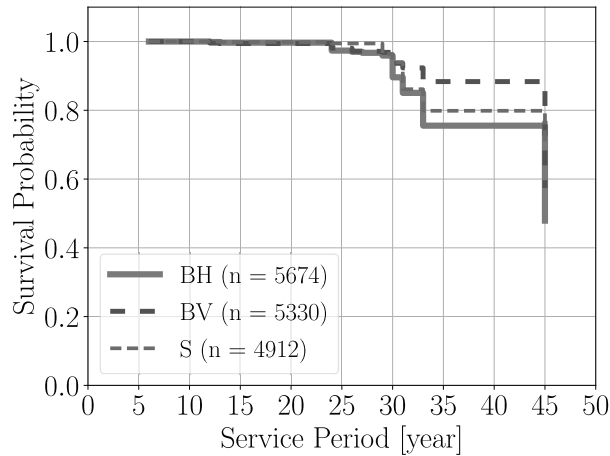


図-9 部材種類ごとの生存関数の推定結果

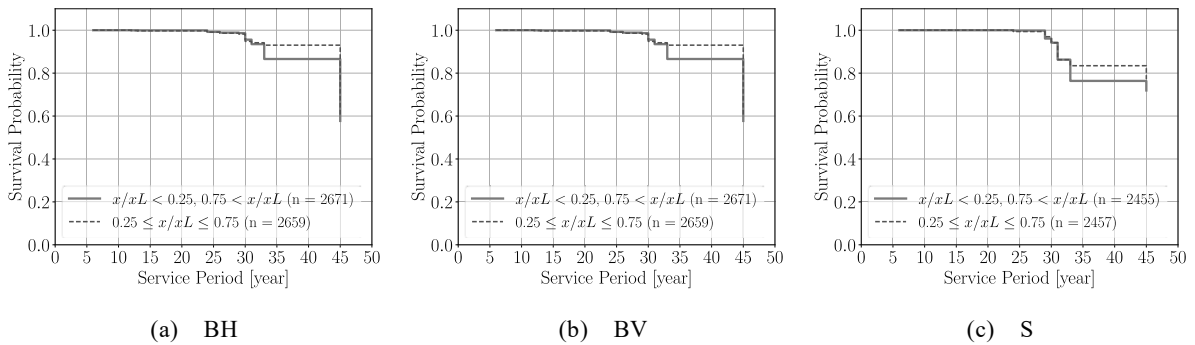


図-10 施設延長方向の位置を要因とした生存関数の推定結果

の検定をBHとBV、BHとSおよびBVとSに分けて行った結果、BHとBVおよびBHとSのp値は0.001未満となり、生存関数の差が統計的に有意であると判定された。しかし、BVとSのp値は0.483であり、帰無仮説は棄却されなかった。このことは、30年付近でBVとSの生存関数が交差しているために生じたと考えられる。なお、2つの生存関数に交差が生じている場合、グループ間の生存関数の差を正しく検出できないことが知られている。このことから、BVとSの生存関数に有意な差があると判断できない。

以上から、BVとSの劣化進行に差があるとは言えないが、BHはBVおよびSよりも劣化が進行しやすいと言え、部材の種類によって劣化の進行しやすさが異なることが確認された。

(2) 施設延長方向の位置

図-10に施設延長方向の位置を基準にグループ分けした生存関数の推定結果を示す。全てのグラフにおいて、栈橋端部(実線)と栈橋中心部(破線)の生存関数は30年ごろまでほぼ重なっている。一方30年以降では、栈橋端部の生存関数が栈橋中央部よりも低い値となった。生

存関数の差の検定より、全ての部材種類においてp値は有意水準である5%を上回ったため、生存関数の差は統計的に有意でないとして判定された。したがって、施設延長方向の位置は劣化進行に影響を及ぼす要因であるとは言えない。

(3) 海陸方向の位置

図-11に海陸方向の位置を基準にグループ分けした生存関数の推定結果を示す。ここでは、実線を「陸側」、間隔の長い破線を「中央部」、間隔の短い破線を「海側」の生存関数と称する。

図-11(a)より、BHにおいて生存関数は海側 ≒ 陸側 < 中央部となった。生存関数の差の検定結果より、海側と中央部および中央部と陸側の生存関数の差は統計的に有意であると判定された。したがって、BHにおいて中央部に位置する部材は陸側および海側に位置する部材よりも劣化が進行しにくいと言える。

図-11(b)より、BVにおいて3つの生存関数は概ね重なっていた。生存関数の差の検定結果より、海側と中央部の生存関数の差のみ統計的に有意であると判定されたが、2つの生存関数の差は最大で0.05程度であった。

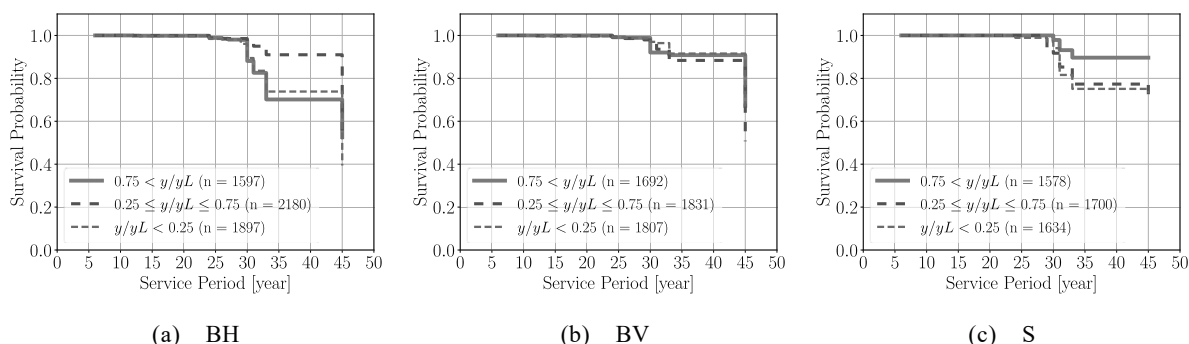


図-11 海陸方向の位置を要因とした生存関数の推定結果

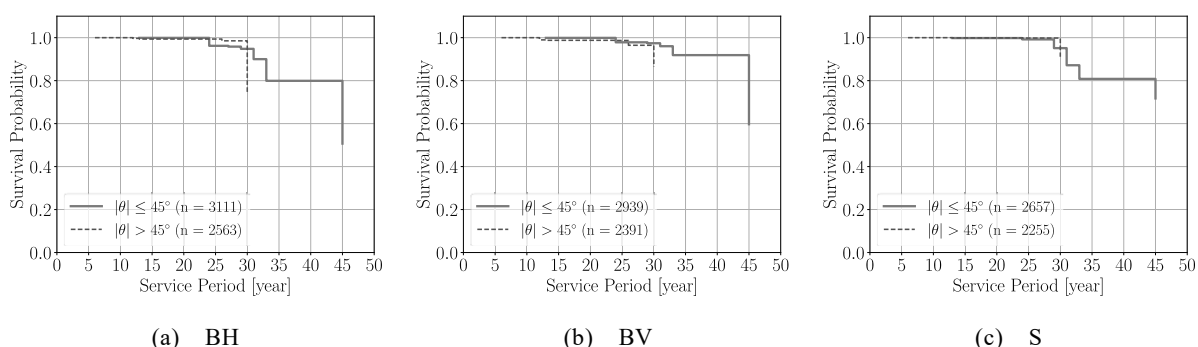


図-12 風向と施設の向きを要因とした生存関数の推定結果

図-11(c)より、Sにおいて生存関数は海側 ≧ 中央部 < 陸側となった。生存関数の差の検定結果より、中央部と陸側および陸側と海側の生存関数の差は統計的に有意であると判定された。したがって、Sにおいて陸側に位置する部材は海側および中央部に位置する部材よりも劣化が進行しにくいと言える。

(4) 風向と施設の向き

図-12に風向と施設の向きを基準にグループ分けした生存関数の推定結果を示す。全てのグラフにおいて片方の生存関数が途切れていた。このことは、風向と施設の向きの関係が施設ごとに一意に決まるため、その施設内の部材が全てどちらかのグループに属することになり、グループ間でデータが偏ってしまったために生じたと考えられる。片方の生存関数が途切れる前までを比較すると、全ての部材種類において生存関数が交差している。p値はBHおよびBVで有意水準を下回ったが、生存関数が交差していることから、風向と施設の向きは劣化進行に影響を及ぼす要因であると判断できない。

(5) H.W.L.からの距離

図-13にH.W.L.からの距離を基準にグループ分けした生存関数の推定結果を示す。(4)風向と施設の向きと同様の理由から、片方の生存関数が途切れていた。片方の生

存関数が途切れる前までを比較すると、図-13(a)および図-13(c)では、2つの生存関数が交差しているが、図-13(b)では、生存関数が交差しておらず、H.W.L.からの距離が近い場合(破線)の方が、H.W.L.からの距離が遠い(実線)よりも生存関数が低い値となった。また、BVにおける生存関数の差は統計的に有意であると判定されたため、BVにおいてH.W.L.からの距離は劣化進行に影響を及ぼす要因である可能性が示唆された。

(6) 干満差

図-14に干満差を基準にグループ分けした生存関数の推定結果を示す。(4)および(5)と同様の理由から、片方の生存関数が途切れていた。片方の生存関数が途切れる前までを比較すると、図-14(a)および図-14(b)では2つの生存関数が交差しているが、図-14(c)では生存関数の交差が生じておらず、干満差が小さい場合(破線)の方が、干満差が大きい場合(実線)よりも生存関数が低い値となった。また、Sにおける生存関数の差は統計的に有意であると判定されたため、Sにおいて干満差は劣化進行に影響を及ぼす要因である可能性が示唆された。

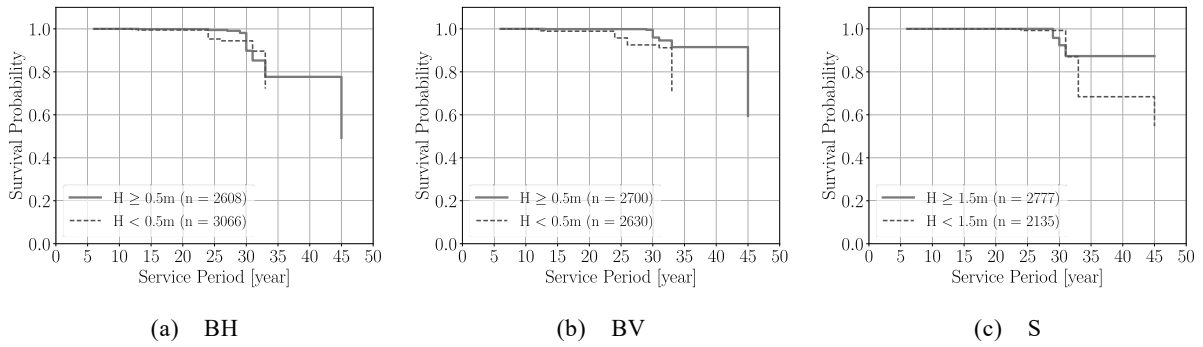


図-13 H.W.L.からの距離を要因とした生存関数の推定結果

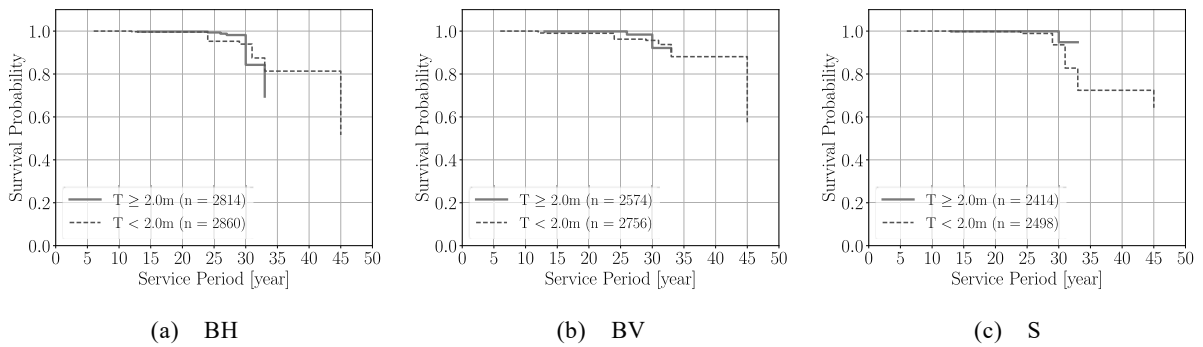


図-14 干満差を要因とした生存関数の推定結果

3.5 考察

(1) 部材種類ごとの生存関数の差

法線平行方向の梁 (BH) と法線直交方向の梁 (BV) において、生存関数の差が有意であると判定された。その理由として、栈橋下面に進入する波や風の影響が考えられる。BH は栈橋下面に進入する波や風に対して直交する向きであるため、波や風的作用を直接的に受けやすいと考えられる。一方 BV は、波や風の進入方向に対して平行であることに加えて、前後に鋼管杭が位置しているため、波や風的作用を BH よりも受けにくいと考えられる。そのため、波や風により供給される塩化物イオン量に違いが生じ、その結果として劣化進行に差が生じたと考えられる。なお、BV よりも床版 (S) の生存関数が低かった明確な原因は不明である。

(2) 海陸方向の位置の違いによる生存関数の差

BH において、海側だけでなく、陸側に位置する部材の生存関数も低下していた理由として、土留部における波の打ち上げによって、陸側に位置する BH にも海水飛沫が供給されたためと考えられる (図-15)。しかし、土留部における波の打ち上げは BV および S の生存関数においても影響すると考えられるが、BV および S では陸側に位置する部材の生存関数の低下は、海側および中央部 BH ほど顕著ではなかった。そこで単純ではあるが部材

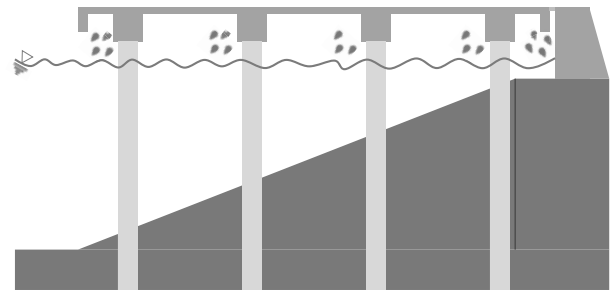


図-15 栈橋上部工下面の海水飛沫供給量の違い

種類ごとに、「陸側に位置する部材かつ劣化度が III, IV, V, a および b と判定された部材」の内、「土留部からの距離が 1.0 m 未満の部材」の割合を計算した。その結果、BH : 0.72 (141/197), BV : 0.67 (47/70) および S : 0.00 (0/29) となった。このことから、土留部における波の打ち上げは梁部材の劣化進行に影響し、床版の劣化進行には影響しないと考えられる。この理由として、床版は梁部材よりも海面からの距離が遠いため、海水飛沫の供給量が少ないことが考えられる。

(3) 干満差による生存関数の差

S において、干満差が大きい場合よりも干満差が小さい場合の方の生存関数が低下していた明確な理由は不明である。干満差が小さい場合、干潮時と満潮時における

海面から部材下面までの距離の差は小さいため、干潮時と満潮時における塩化物イオン供給量の差も小さくなる。そのため干満差が大きい場合よりも干満差が小さい場合の方が、床版への塩化物イオン供給量の変動が小さく、塩害が進行しやすい環境にあった可能性が考えられるが、明確な根拠がなく、今後さらなる検討が必要である。

3.6 まとめ

本章では、19施設の栈橋上部工下面の目視点検データを用いて、塩害による劣化進行に影響を及ぼす要因の分析を試みた。本研究では生存時間解析の手法を用いて、劣化進行に影響を及ぼすと考えられる6つの要因ごとに点検データを分析した。点検データ分析で得られた結果は以下の通りである。

- ① 部材種類ごとに劣化の進行しやすさが異なり、梁部材では、法線平行方向(BH)と法線直交方向(BV)でも劣化の進行しやすさが異なる。
- ② BHにおいて、海陸方向の位置は劣化進行に影響を及ぼす要因であり、海側および陸側に位置する部材の劣化が進行しやすい。
- ③ BVにおいて、H.W.L.からの距離が近い場合に、全体的に劣化が進行しやすい可能性がある。
- ④ 床版(S)において、陸側に位置する部材の劣化は進行しにくい。一方、干満差が小さい環境にある場合、全体的に劣化が進行しやすい可能性がある。

②～④から、栈橋上部工下面の塩害による劣化進行に影響を及ぼす要因は部材種類ごとに異なること、各部材種類において劣化が進行しやすい箇所や条件を推定できた。これらは、これまでに経験的に知られていた劣化傾向と概ね一致する結果であるため、本研究により、経験的に知られていた劣化傾向の数値的な根拠を示すことができた。

今回は、カプラン・マイヤー推定法により、6つの要因について分析したが、単変量解析かつ定性的な評価に留まった。実際の環境では、本研究で対象とした要因が同時にかつ互いに影響を及ぼし合っていると考えられるため、多変量解析および定量的な評価が可能な解析モデルを用いて検討する必要がある。また、対象とした施設は19施設だけであること、1施設1回分の点検結果だけであることから、本研究で得られた結果が一般的なものであるか検証が必要である。定期点検の義務化によって目視点検データが今後蓄積されていけば、本研究結果の妥当性の検証だけでなく、より詳細に劣化傾向を分析できると考えられる。

4. 栈橋上部工の床版における塩化物イオン濃度の非一様性に関する検討

本章では、部材内における塩化物イオン供給の非一様性に影響を及ぼす要因および塩化物イオン供給の分布の特徴について検討するために、栈橋上部工の床版における塩化物イオン濃度測定および塩化物イオン濃度の平面的な分布推定を行った。なお本研究では、床版内における塩化物イオン供給の非一様性が床版内の塩害による劣化進行の非一様性に直接的に関係するとして検討する。

4.1 対象栈橋の概要

図-16 および図-17 に本研究で対象とした栈橋の断面図および平面図を示す。両図中で「HK-L」および「HK-S」と示されている箇所は、本研究で用いた床版を切り出した箇所である。なお、HK-L および HK-S は 2.2 で用いた床版と同一の床版である。図-16 に示すように、対象とした栈橋では干満差が約 3.7 m あり、満潮時(+3.76 m)には梁下面(+3.65 m)が没水する。本研究では、床版内の位置について、床版の陸側を「奥側」、床版の海側「手前側」と呼び、栈橋内の床版の位置の呼び方と区別する。

対象とした栈橋は 29 年間(1987 年～2016 年)供用されてきた。2013 年に一般定期点検が行われており、梁およびハンチで数箇所の部材が劣化度 a と判定されたものの、床版は全て劣化度 d または c であった。なお、2013 年の点検時における HK-L および HK-S の劣化度判定結果は、両床版とも d であった。

4.2 対象床版の概要および調査内容

HK-L の寸法は 3520 mm (L)×3125 mm (W)×427 mm (H)、HK-S の寸法は 3280 mm (L)×3890 mm (W)×440 mm (H)であった。鉄筋間隔は縦鉄筋および横鉄筋ともに約 100 mm 間隔であった。かぶり厚さについては、平均値で HK-L: 87 mm および HK-S: 86 mm であった。なお、セメント種類や使用材料等のコンクリートに関する情報は得られなかったため不明である。

(1) 外観目視調査

HK-L および HK-S の底面のひび割れ図を図-18 および図-19 に示す。両床版の底面に最大で幅 0.25 mm の表面ひび割れが確認された。しかし、鉄筋に沿ったひび割れや錆汁は確認されなかったため、これらのひび割れは鉄筋腐食によるものではなく、乾燥収縮や上載荷重等の鉄筋腐食以外の要因により生じたひび割れと判断した。

(2) 自然電位測定 (HK-S のみ)

HK-S において、縦鉄筋と横鉄筋の交差部の自然電位

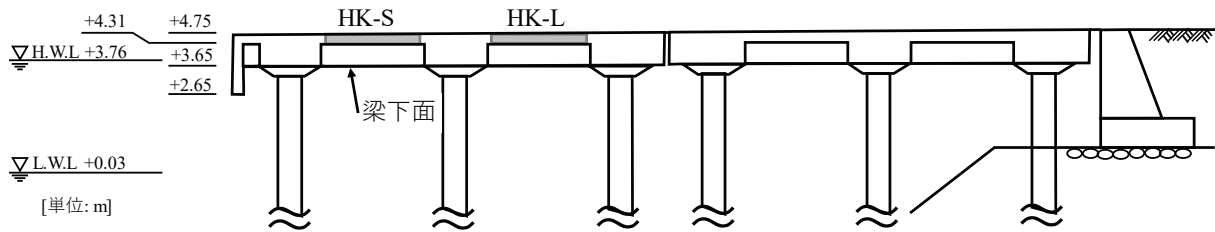


図-16 対象栈橋の断面図

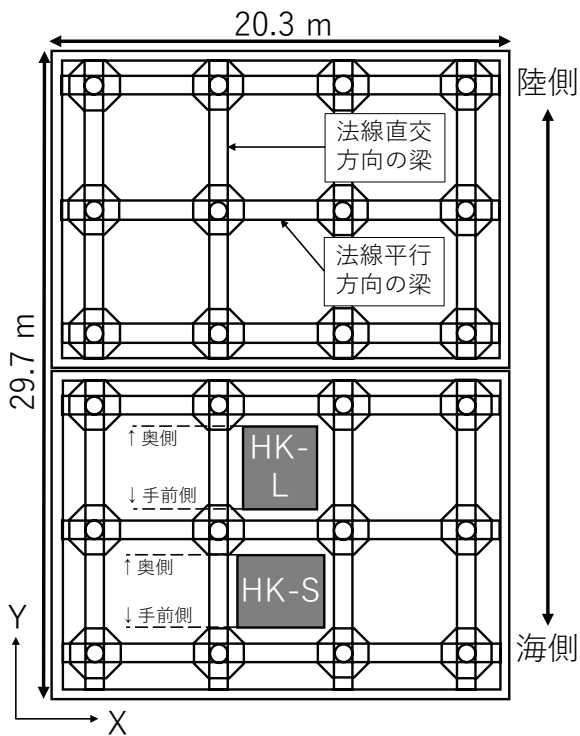


図-17 対象栈橋の平面図 (1ブロック分)

を銀-塩化銀電極を用いて測定した。なお、測定値は表-6に示す ASTM C 876⁹⁾による自然電位測定値の評価基準を用いるために、銅硫酸銅電極基準に換算した。

図-20 に自然電位の測定結果を示す。床版の中央から手前側にかけての測定値は概ね-200 mV を上回っており、表-6 の判定基準から「90%以上の確率で腐食なし」と判断できる。一方奥側における測定値は、-350 mV~-250 mV の間であり、「不確定」と判断できる。以上から、HK-S の奥側で鉄筋が腐食している可能性があるが、中央および手前側では腐食が生じていない可能性が高い。

(3) コンクリートコア採取

図-21 および図-22 に HK-L および HK-S におけるコンクリートコア採取箇所 (図中の白丸) を示す。なお、黒の実線は鉄筋を表す。コア採取数は、HK-L : 36 点、HK-

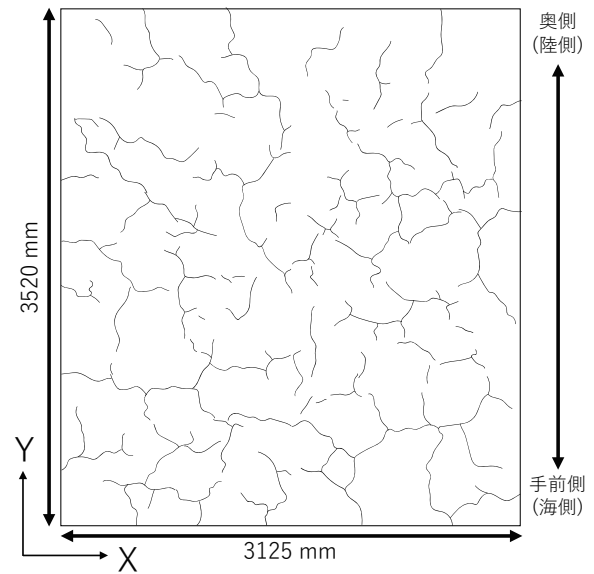


図-18 ひび割れ図 (床版 HK-L)

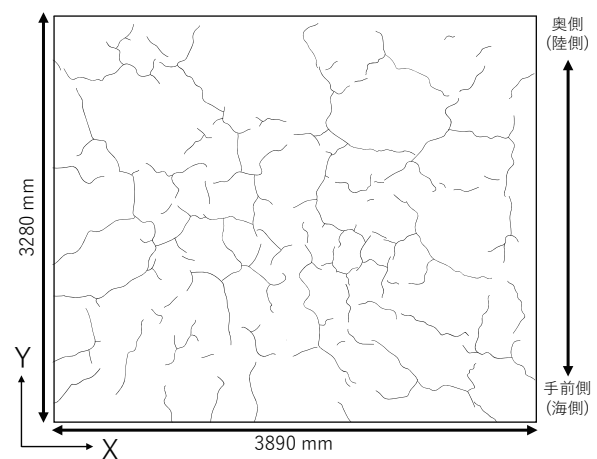


図-19 ひび割れ図 (床版 HK-S)

S : 63 点であり、採取箇所は以下を念頭に置き、可能な限り偏りが生じないように選定した。

- ・ひび割れ等の変状がない箇所

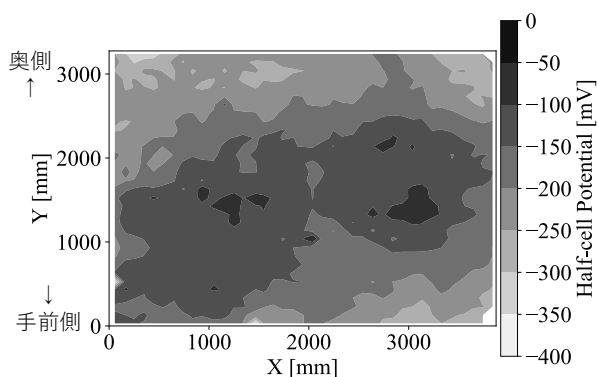


図-20 自然電位の測定結果 (HK-S)

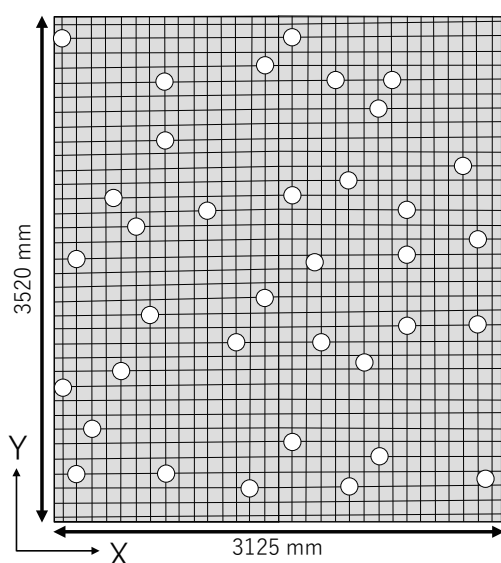


図-21 コア採取箇所 (床版 HK-L)

・縦鉄筋と横鉄筋の交差部

採取したコアの長さの平均値はそれぞれ 87 mm (HK-L) および 86 mm (HK-S) であった。また、コア長さの最小値および最大値は、HK-L で 75 mm および 97 mm、HK-S で 74 mm および 99 mm であった。詳細は付録 A に記載した。なお、縦鉄筋と横鉄筋との交差部においてコアを採取したため、コアの長さはかぶり厚さに相当する。

コア採取後、鉄筋の交差部の状態を目視観察したところ、鉄筋に多少の点錆が見られたが、大部分は腐食していなかった。また、採取したコア数本に対してフェノールフタレインを噴霧し、簡易的に中性化深さを測定した結果、表面から 10 mm 程度中性化していることが確認された。

(4) 塩化物イオン濃度測定

中性化深さが約 10 mm であったことを考慮し、塩化物イオン濃度測定範囲をコンクリート表面から 20 mm~60 mm とした。測定範囲を 10 mm ごとにスライスし、1 本

表-6 ASTM C 876 による腐食判定基準

自然電位 E(mV : CSE)	腐食確率
E > -200	90%以上の確率で 腐食なし
-200 ≧ E > -350	不確定
-350 ≧ E	90%以上の確率で 腐食あり

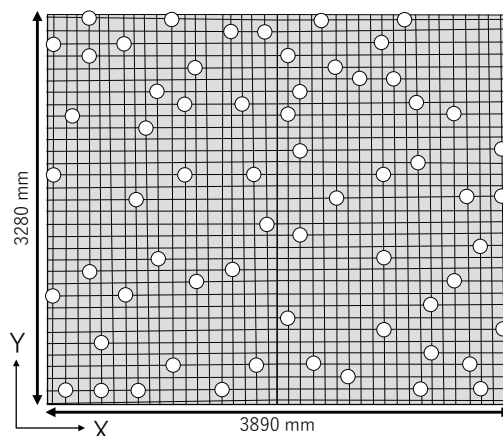


図-22 コア採取箇所 (床版 HK-S)

のコアから 4 枚のスライス片を切り出した。スライス片を粉末にし、JIS A 1154 に準拠して、電位差滴定法で塩化物イオン濃度を測定した。測定結果の詳細は付録 A に記載した。

4.3 表面塩化物イオン濃度および見かけの拡散係数の推定

4.2 (4)において測定した各コアにおける深度ごとの塩化物イオン濃度を、Fick の拡散方程式 (式(1)) で回帰することで、各コアにおける C_0 および D_{ap} を求めた。なお、本研究においても $\gamma_{cl} = 1.0$ とした。

C_0 および D_{ap} の推定結果の詳細は付録 A に記載した。

図-23 および図-24 に HK-L および HK-S における C_0 と D_{ap} の箱ひげ図を示す。箱ひげ図の見方は図-7 を参照されたい。

図-23 において、HK-L と HK-S の C_0 の値は大きく異なっており、特に HK-S では $1.0 \text{ kg/m}^3 \sim 18 \text{ kg/m}^3$ と幅広い値を取っている。それぞれの四分位分散係数は、0.318 および 0.533 であり、ばらつきは HK-S の方が大きい。

図-24 において、 D_{ap} の平均値および中央値は両床版において同程度の値である。四分位分散係数は HK-L と HK-

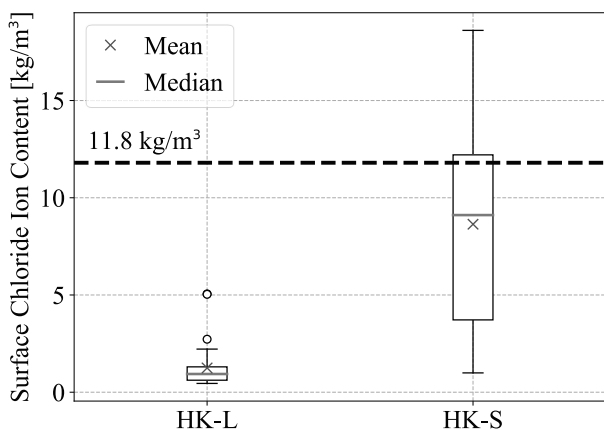


図-23 表面塩化物イオン濃度 (C_0) の箱ひげ図

S でそれぞれ、0.369 および 0.318 であるので、ばらつきの程度も両床版で同程度であると言える。また、港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成 30 年度版）⁷⁾に記載されている C_0 および D_{ap} の設計値 (C_d および D_d) を、H.W.L. から部材下面までの距離を 0.55 m、セメント種類を普通ポルトランドセメントおよび水セメント比を 0.5 の条件で計算したところ、それぞれ 11.8 kg/m³ および 0.63 cm²/year となった。なお、H.W.L. から部材下面までの距離は標準断面図から把握できたが、セメント種類および水セメント比に関する情報は入手できなかったため、それぞれ一般的な材料および値を仮定した。 C_0 の平均値および中央値と C_d は特に HK-L において大きく異なった。一方、了承版における D_{ap} の平均値および中央値は D_d よりも値が小さいものの、オーダーはほぼ同程度であった。

以上から、HK-L と HK-S で D_{ap} は同程度の値およびばらつきを有しているが、 C_0 は値もばらつきの程度も大きく異なっていることがわかった。

4.4 塩化物イオン濃度の平面的な分布推定

両床版における塩化物イオン濃度測定結果に対して、補間法の一つであるクリギング¹⁰⁾を用いて、測定深度ごとの塩化物イオン濃度および C_0 の平面的な分布を推定した。図-25 に HK-L における C_0 および測定深度ごとの塩化物イオン濃度の分布推定結果を示す。また、図-26 に HK-S における C_0 および測定深度ごとの塩化物イオン濃度の分布推定結果を示す。

HK-L において、表面に最も近い深度 25 mm (図-25 (b)) における塩化物イオン濃度は最大で 2.0 kg/m³ 程度であること、最も表面から遠い深度 55 mm (図-25 (e)) における塩化物イオン濃度は 0.5 kg/m³ 以下であることから、HK-L における塩化物イオン浸透量は少ないことがわかる。HK-L における塩化物イオン濃度の平面的な分布は

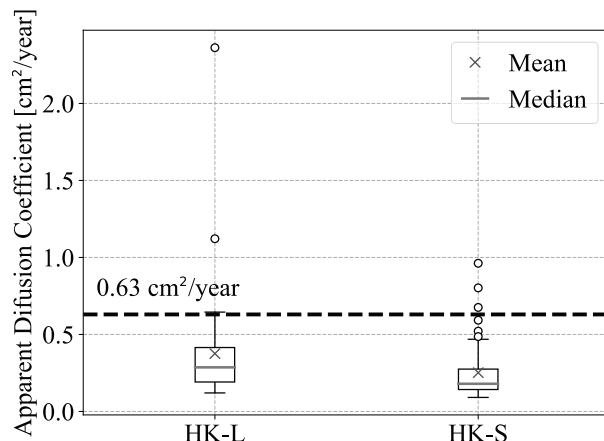


図-24 見かけの拡散係数 (D_{ap}) の箱ひげ図

一様でなく、床版の奥側で濃度が高く、中央および手前側で低い特徴が見られた。

HK-S において、深度 25 mm (図-26 (b)) における塩化物イオン濃度は 0.5 kg/m³ ~ 12 kg/m³ と幅広い値を取っている。また、深度 55 mm (図-26 (e)) における塩化物イオン濃度も 0.1 kg/m³ ~ 6.0 kg/m³ 程度と幅広い値を取っている。HK-S における塩化物イオン濃度の平面的な分布は一様でなく、床版の奥側で濃度が高く、中央部および手前側で濃度が低い特徴が見られた。

HK-L と HK-S を比較すると、HK-S の方が表面および浸透している塩化物イオン濃度が高かった。しかし、床版中央の塩化物イオン濃度は両床版とも同程度であった。また、塩化物イオン濃度の平面的な分布について、両床版とも奥側の塩化物イオン濃度が高く、中央および手前側の塩化物イオン濃度が低い特徴が見られた。

4.5 考察

HK-L と HK-S は栈橋内における位置が若干異なる程度の違いしかないにも関わらず、測定された塩化物イオン濃度に大きな差があった。その一方、塩化物イオン濃度の平面的な分布の特徴は両床版で共通点があった。このことは、波や風による海水飛沫（塩化物イオン）の供給量が両床版で異なるものの、その供給分布は両床版で同様であったと考えられる。

本研究で対象とした栈橋は、満潮時に梁下面が没水する環境にあるため、特に法線平行方向の梁側面に波や風が当たりやすいと考えられる。波や風が栈橋下面の陸側へ進入しにくくなるため、海側と陸側に位置する床版で塩化物イオンの供給量に差が生じたと考えられる。また、波や風が梁側面に当たると、海水飛沫が打ち上げられるため、床版の奥側に打ち上げられた海水飛沫が供給されると考えられる。そのため、図-25 (a) および図-26 (a) に

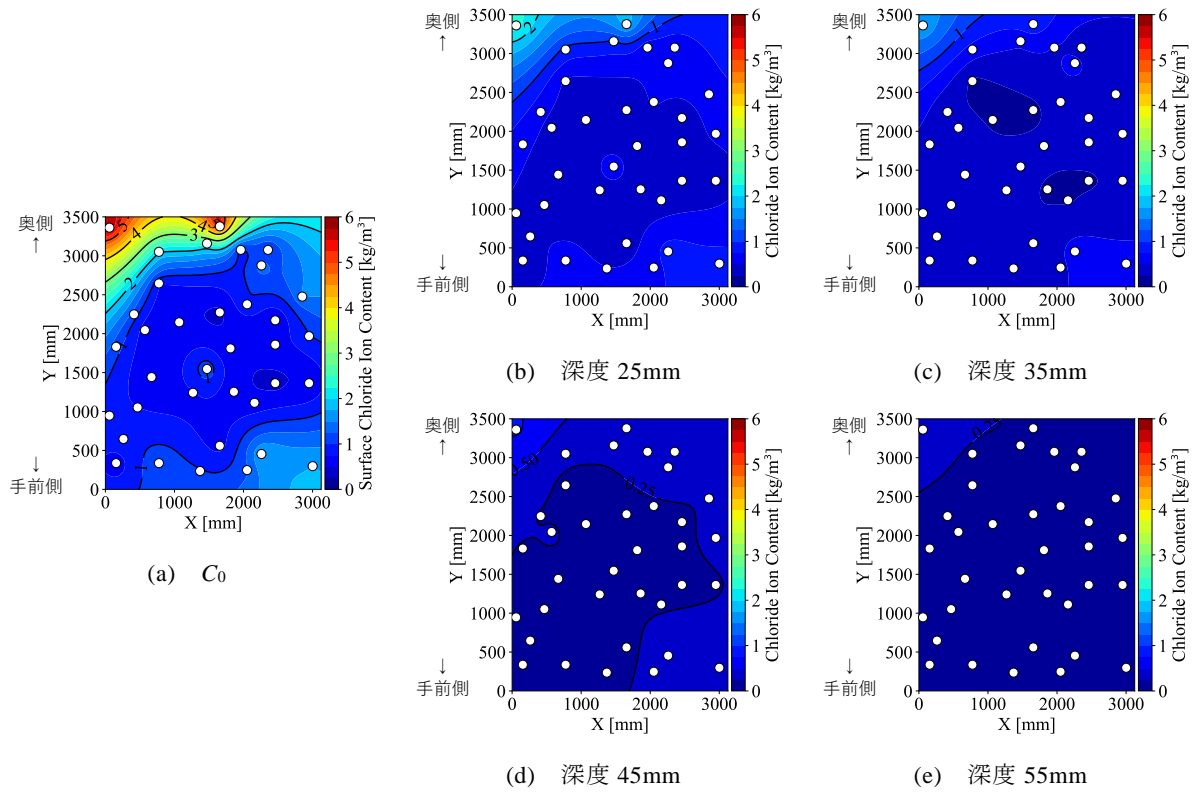


図-25 塩化物イオン濃度分布の推定結果 (床版 HK-L)

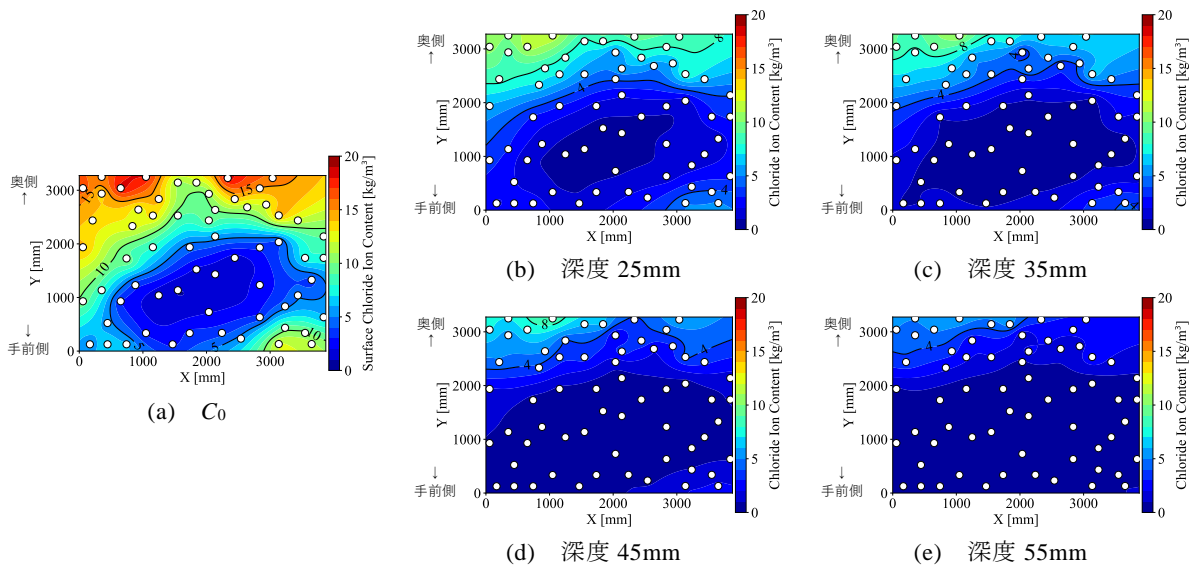


図-26 塩化物イオン濃度分布の推定結果 (床版 HK-S)

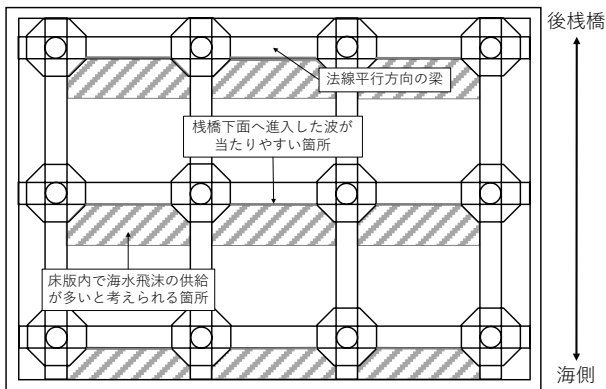


図-27 床版内で海水飛沫の供給が多い箇所

示すように床版の奥側で塩化物イオン濃度が高く、中央および手前側で塩化物イオン濃度が低かったと推察できる（図-27）。

以上のことから、床版における塩化物イオン供給量および塩化物イオン供給分布の非一様性は栈橋内における床版の位置や潮汐等の海象条件だけでなく、床版の周囲に位置する部材の影響を受けていると考えられる。これらの要因の影響を考慮すれば、海水飛沫の供給が多い箇所、ひいては塩害による劣化が進行しやすい箇所を推定できる可能性がある。本研究で対象とした栈橋上部工の床版では、海側に位置する床版における塩化物イオン供給が多く、その中でも床版の奥側で最も塩化物イオンの供給が多いため、塩害による劣化もその箇所が最も進行しやすいと考えられる。

4.6 まとめ

供用開始から 29 年が経過した栈橋から切り出した 2 枚の床版を用いて、塩化物イオン濃度を多点で測定した。その結果、両床版における塩化物イオン濃度の平均値は大きく異なっており、特に HK-S において、 C_0 および各測定深度における塩化物イオン濃度が幅広い値を取っていた。また、塩化物イオン濃度の平面的な分布推定の結果、両床版とも塩化物イオン濃度の分布は、床版の奥側で濃度が高く、中央および手前側で濃度が低い特徴が見られた。これらの塩化物イオン濃度の非一様性は、栈橋内における床版の位置、潮汐等の海象条件および床版の周囲に位置する部材の影響によって生じると考えられる。

以上のように、塩化物イオン濃度およびその平面的な分布が様でないことによって、床版内における塩害による劣化進行も様でないと考えられる。本研究で対象とした栈橋の床版において、最も塩化物イオンの供給が多い箇所は、海側に位置する床版内の奥側であった。

本研究で対象とした栈橋は、満潮時に梁下面が没水す

る環境であったため、満潮時に梁下面が没水しない環境の栈橋では本研究の結果と異なる塩化物イオン濃度の平面的な分布の特徴が見られる可能性がある。そのため今回対象とした栈橋と環境条件が異なる栈橋を対象として同様の調査を実施して、本研究で得られた成果の妥当性を検証する必要がある。

5. 結論

本研究では、①栈橋上部工下面の目視点検データ分析、②栈橋床版の塩化物イオン濃度分布推定を通して、栈橋内および床版内の塩害による劣化進行の非一様性に影響を及ぼす要因について検討し、栈橋上部工の塩害による劣化傾向の把握を試みた。

①に関して、19 施設の栈橋上部工下面の目視点検データを生存時間解析の手法を用いて分析した。その結果、以下の成果が得られた。

- 部材種類ごとに劣化の進行しやすさが異なり、梁部材でも法線平行方向（BH）と法線直交方向（BV）で劣化の進行しやすさが異なる。
- BH では海陸方向における位置が劣化進行に影響を及ぼす要因であり、海側および陸側に位置する部材は、劣化が進行しやすい。
- BV では H.W.L. からの距離が近い場合に、全体的に劣化が進行しやすい可能性がある。
- 床版（S）では、陸側に位置する部材の劣化が進行しにくい。一方、干満差が小さい環境にある場合は全体的に劣化が進行しやすい可能性がある。

②に関して、供用開始から約 30 年が経過した栈橋から切り出した 2 枚の床版に対して、多点で塩化物イオン濃度を測定し、塩化物イオン濃度の平面的な分布を推定した。その結果、以下の成果が得られた。

- HK-L と HK-S では、塩化物イオン濃度の平均値および中央値が大きく異なっており、特に HK-S において、塩化物イオン濃度は幅広い値を取っていた。
- 塩化物イオン濃度の平面的な分布は、HK-L と HK-S で同様の特徴を示した。両床版における塩化物イオン濃度分布は、床版の奥側で濃度が高く、中央および手前側で濃度が低い特徴が見られた。
- 本研究で対象とした床版における塩化物イオン濃度の平面的な分布の非一様性は、栈橋内における床版の位置、潮汐等の海象条件および床版の周囲に位置する部材の影響を受けると考えられる。

①および②の検討の成果から、栈橋上部工の塩害による劣化傾向に関して、部材種類ごとに劣化進行に影響を

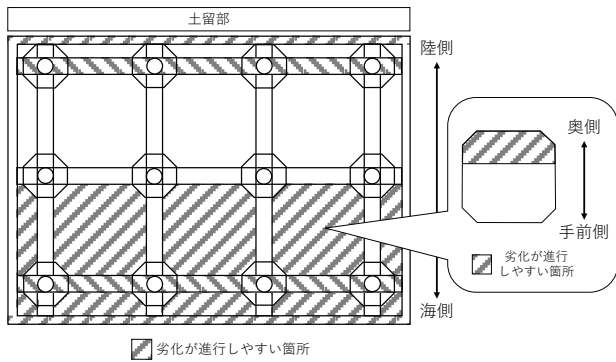


図-28 劣化が進行しやすいと考えられる箇所

及ぼす要因が異なること、床版内における塩化物イオン供給量および供給分布の非一様性は、栈橋内の床版の位置、潮汐等の海象条件および床版の周囲に位置する部材の影響を受けることがわかった。前者の結果は、これまで経験的に知られていた劣化傾向と概ね一致しているため、本研究の成果は経験的に知られていた劣化傾向の数値的な根拠を示したと考える。また後者について、先に挙げた要因の影響を考慮することで、床版内における塩害による劣化が進行しやすい箇所を推定できる。本研究の範囲において、栈橋内で劣化が進行しやすく、重点的に点検すべき箇所として、海側に位置する法線平行方向の梁および床版、土留部からの距離が近い梁部材が挙げられる。特に床版については、床版の奥側が床版の中央および手前側よりも劣化が進行しやすいと考えられる(図-28)。

6. あとがき

本研究では、栈橋上部工の塩害による劣化進行の非一様性に影響を及ぼす要因を把握するために、栈橋全体と部材(床版)の2点から検討を試みた。

今後の課題として、点検データの分析では、多変量解析かつ定量的な評価が可能なモデルを用いてより詳細に検討することが挙げられる。栈橋床版における塩化物イオン濃度の非一様性については、今回対象とした栈橋とは異なる環境条件を有する栈橋を対象として、本研究で得られた成果の妥当性を検証することが挙げられる。

(2018年8月10日受付)

謝辞

本研究で用いた栈橋上部工の目視点検結果は、全国の国有港湾施設の維持管理計画書および2013年に実施された緊急点検結果報告書から抜粋したものであり、国土技術政策総合研究所からご提供いただいた。また、2枚

の床版は広島港湾・空港整備事務所ならびに広島港湾空港技術調査事務所よりご提供いただいた。本研究の一部は、平成28年度吉田研究奨励賞の助成を受けて実施した。また、本研究の一部は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の「SIPインフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(管理法人:JST)によって実施した。関係者各位に対して、ここに記して心からの謝意を表す。

また、本研究を進めるにあたって適切なアドバイスやご助力いただいた構造研究グループの皆様へ心からの謝意を表す。特に様々な測定および作業に快くご協力いただいた構造研究グループ染谷望氏、床版の塩化物イオン濃度測定に際して大変ご助力いただいた構造研究グループ伊藤孝吉氏、実務訓練生井向日向君(長岡技術科学大学)に心からの謝意を表す。

参考文献

- 1) 山路徹:海洋に位置するコンクリート構造物の耐久性照査手法に関する研究,港湾空港技術研究所資料, No.1232, 2011年.
- 2) 網野貴彦, 大即信明, 斎藤豪, 羽瀨貴士:栈橋上部工の空間的位置の違いが塩化物イオン浸透性状および鉄筋の腐食速度に与える影響,コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, 2010年.
- 3) 加藤絵万, 山本幸治, 川端雄一郎, 岩波光保:栈橋RC上部工の鉄筋腐食モニタリングに関する一検討,港湾空港技術研究所資料, No.1307, 2015年.
- 4) 加藤絵万, 岩波光保, 山路徹, 横田弘:建設後30年以上経過した栈橋上部工から切り出したRC部材の劣化性状と構造性能,港湾空港技術研究所資料, No.1140, 2006年.
- 5) 運輸省港湾技術研究所編著:港湾構造物の維持・補修マニュアル, 1999年, p.97.
- 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, 2007年, p.182.
- 7) 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, 2018年, p.600.
- 8) David W. Hosmer, Stanley Lemeshow, Susanne May (五所正彦監訳):生存時間解析入門, 東京大学出版会, 2014年, pp.1-70.
- 9) ASTM C 876: Standard Test Method for Half-cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, Annual Book of ASTM Standards, Vol.03.02, 1999, pp.457-462.
- 10) 間瀬茂:地球統計学とクリギング法, オーム社, 2010年, 213p.

付録 A. HK 港における塩化物イオン濃度の測定結果等

A.1 HK-L における塩化物イオン濃度測定結果一覧

表-A.1 塩化物イオン濃度測定結果一覧 (HK-L)

コア番号	塩化物イオン濃度 [kg/m ³]				C_0 [kg/m ³]	D_{ap} [cm ² /year]	かぶり [mm]	X座標 [mm]	Y座標 [mm]
	25 mm	35 mm	45 mm	55 mm					
1	0.58	0.32	0.21	0.16	1.23	0.19	87	775.0	337.0
2	0.51	0.35	0.25	0.14	0.98	0.25	93	261.5	647.0
3	0.41	0.32	0.23	0.14	0.75	0.32	84	1268.0	1241.0
4	0.37	0.28	0.23	0.21	0.52	0.65	87	668.0	1442.0
5	0.41	0.39	0.35	0.32	0.50	2.36	86	572.0	2045.0
6	0.60	0.30	0.18	0.14	1.45	0.15	88	414.0	2248.5
7	0.92	0.64	0.28	0.18	2.22	0.17	86	775.0	3051.0
8	0.97	0.55	0.23	0.14	2.73	0.13	79	1471.0	3158.0
9	0.51	0.35	0.16	0.14	1.12	0.19	84	1371.0	235.5
10	0.37	0.32	0.21	0.16	0.62	0.41	97	155.0	337.0
11	0.44	0.32	0.16	0.14	0.89	0.23	94	58.5	946.5
12	0.41	0.37	0.21	0.16	0.76	0.34	91	466.5	1052.0
13	0.60	0.32	0.28	0.16	1.18	0.22	84	1471.0	1546.0
14	0.58	0.39	0.21	0.12	1.32	0.18	89	155.0	1831.5
15	0.37	0.23	0.18	0.16	0.60	0.36	85	1069.0	2146.0
16	0.46	0.21	0.12	0.09	1.30	0.12	85	775.0	2645.0
17	2.37	1.75	0.94	0.60	5.04	0.22	86	58.5	3361.5
18	0.87	0.62	0.55	0.28	1.52	0.34	88	2259.5	454.0
19	0.35	0.30	0.25	0.23	0.45	1.12	86	1811.0	1810.8
20	0.41	0.35	0.21	0.21	0.67	0.43	88	2459.5	1858.5
21	0.55	0.41	0.37	0.23	0.88	0.45	94	2949.5	1968.0
22	0.53	0.37	0.23	0.18	1.00	0.27	86	2051.5	2377.0
23	0.71	0.60	0.39	0.37	1.12	0.49	84	2259.5	2876.5
24	0.55	0.48	0.39	0.25	0.87	0.54	85	1960.5	3076.0
25	0.64	0.44	0.30	0.25	1.13	0.31	86	2051.5	247.0
26	0.83	0.58	0.32	0.23	1.73	0.22	94	3001.3	297.8
27	0.39	0.25	0.14	0.12	0.82	0.21	84	1656.5	560.0
28	0.37	0.23	0.21	0.07	0.74	0.23	85	2159.0	1111.8
29	0.37	0.23	0.23	0.16	0.56	0.45	85	1861.0	1253.5
30	0.30	0.23	0.16	0.12	0.52	0.35	88	2459.5	1363.5
31	0.35	0.25	0.21	0.16	0.53	0.46	91	2949.5	1363.5
32	0.32	0.28	0.21	0.12	0.56	0.39	90	2459.5	2171.5
33	0.32	0.21	0.16	0.14	0.53	0.35	85	1656.5	2272.5
34	0.69	0.32	0.23	0.12	1.78	0.14	93	2850.5	2476.0
35	0.55	0.32	0.25	0.09	1.22	0.19	86	2355.0	3076.0
36	1.86	0.94	0.53	0.30	5.05	0.13	75	1656.5	3378.5
平均値	0.61	0.41	0.27	0.19	1.25	0.38	87	-	-

A.2 HK-Sにおける塩化物イオン濃度測定結果一覧

表-A.2 塩化物イオン濃度測定結果一覧 (HK-S) (1/2)

コア番号	塩化物イオン濃度 [kg/m ³]				C ₀ [kg/m ³]	D _{ap} [cm ² /year]	かぶり [mm]	X座標 [mm]	Y座標 [mm]	自然電位 [mv vs CSE]
	25 mm	35 mm	45 mm	55 mm						
1	1.87	0.94	0.55	0.30	5.05	0.13	93	167.0	126.5	-150
2	2.28	1.02	0.52	0.24	7.45	0.10	91	444.0	126.5	-173
3	2.54	1.85	0.90	0.34	6.19	0.17	85	742.5	126.5	-160
4	1.14	0.88	0.33	0.26	2.70	0.18	78	1467.0	126.5	-213
5	3.44	1.66	0.87	0.59	9.79	0.12	92	57.5	929.5	-217
6	1.22	0.49	0.50	0.19	2.99	0.14	81	651.0	929.5	-128
7	0.62	0.38	0.17	0.19	1.39	0.18	79	1249.0	1039.0	-114
8	2.80	1.04	0.64	0.23	9.89	0.09	84	742.5	1728.5	-126
9	5.86	4.26	1.90	0.87	14.47	0.17	98	57.5	1937.5	-202
10	6.87	5.51	3.74	2.20	12.74	0.31	86	835.0	2332.0	-181
11	8.44	6.68	4.83	3.76	13.78	0.42	97	209.3	2437.0	-250
12	7.06	5.67	3.35	2.20	14.02	0.26	82	1157.0	2528.0	-187
13	7.64	5.10	3.84	2.09	14.74	0.25	80	1249.0	2837.0	-217
14	8.62	7.48	5.28	4.35	14.20	0.46	93	352.0	2936.0	-267
15	10.71	9.08	7.20	5.02	16.82	0.52	99	57.5	3039.5	-252
16	11.58	9.35	7.39	5.17	18.48	0.47	86	651.0	3039.5	-252
17	7.64	6.88	6.05	4.51	11.06	0.80	76	1549.0	3142.5	-253
18	8.71	7.43	6.21	5.56	11.70	0.96	81	1841.0	3142.5	-207
19	10.01	8.56	6.95	5.04	15.20	0.59	91	352.0	3249.5	-326
20	11.86	10.97	9.25	6.01	18.00	0.68	74	1048.0	3249.5	-218
21	1.20	0.64	0.48	0.23	2.71	0.17	82	1048.0	335.0	-135
22	1.33	0.71	0.37	0.30	3.35	0.15	78	1735.5	335.0	-183
23	2.07	0.90	0.71	0.32	5.44	0.13	94	444.0	523.5	-125
24	3.01	1.77	0.87	0.39	8.07	0.14	89	352.0	1135.5	-123
25	0.51	0.32	0.21	0.16	0.99	0.23	76	1549.0	1135.5	-106
26	1.38	0.76	0.48	0.23	3.38	0.15	82	882.0	1230.0	-122
27	0.69	0.32	0.21	0.14	1.79	0.14	78	1841.0	1523.5	-110
28	2.99	2.00	0.76	0.39	8.06	0.14	79	1157.0	1937.5	-133
29	1.61	0.87	0.41	0.25	4.44	0.13	79	1735.5	1937.5	-116
30	5.38	4.39	3.50	1.98	9.18	0.40	79	1549.0	2528.0	-229
31	7.66	6.14	5.08	3.40	12.11	0.48	84	929.0	2639.0	-217
32	4.96	3.27	1.91	0.51	12.22	0.16	89	3135.5	131.5	-281
33	5.10	4.17	2.17	0.97	11.08	0.22	78	3652.5	131.5	-267
34	2.59	1.29	0.83	0.87	4.74	0.24	81	2540.5	232.5	-213
35	3.44	1.85	1.06	0.32	9.58	0.13	93	3234.5	434.5	-213
36	2.71	1.34	0.95	0.69	6.07	0.17	96	3840.0	632.0	-210
37	0.81	0.41	0.32	0.13	1.95	0.16	77	2036.5	729.0	-168
38	1.57	0.98	0.33	0.20	4.55	0.12	90	3234.5	834.0	-169
39	1.48	0.51	0.41	0.18	5.03	0.09	94	3436.0	1039.5	-159
40	2.84	2.07	0.63	0.32	7.86	0.14	99	3549.0	1738.5	-121

表-A.2 塩化物イオン濃度測定結果一覧 (HK-S) (2/2)

コア番号	塩化物イオン濃度 [kg/m ³]				C_0	D_{ap}	かぶり	X座標	Y座標	自然電位
	25 mm	35 mm	45 mm	55 mm	[kg/m ³]	[cm ² /year]	[mm]	[mm]	[mm]	[mv vs CSE]
41	3.18	1.85	1.11	0.55	7.72	0.16	99	3840.0	1738.5	-155
42	4.04	3.19	1.51	0.83	9.11	0.20	98	3840.0	2138.5	-162
43	4.18	2.98	1.35	0.73	10.10	0.17	80	2036.5	2437.5	-176
44	8.18	6.62	4.21	2.96	14.87	0.32	89	3135.5	2531.0	-168
45	6.10	4.13	2.93	1.55	12.19	0.24	88	2937.5	2731.5	-179
46	7.46	5.21	3.84	2.20	14.07	0.27	84	2443.5	2835.5	-217
47	4.81	2.91	1.75	1.02	10.97	0.18	79	2036.5	2933.5	-236
48	8.00	6.24	4.50	2.37	15.74	0.27	86	2837.0	3036.5	-185
49	9.50	6.78	3.65	3.27	18.60	0.25	79	2333.5	3228.0	-230
50	8.87	6.95	5.71	2.83	15.62	0.35	88	3039.0	3228.0	-224
51	1.86	0.99	0.97	0.41	3.69	0.22	78	2242.0	339.0	-176
52	4.14	2.85	1.61	0.32	10.36	0.16	95	3549.0	339.0	-212
53	1.33	0.67	0.39	0.32	3.26	0.15	81	2837.0	632.0	-180
54	1.24	0.90	0.46	0.39	2.53	0.23	82	2837.0	1232.0	-115
55	1.61	0.81	0.58	0.41	3.58	0.17	78	3652.5	1328.5	-138
56	0.81	0.39	0.35	0.28	1.50	0.24	77	2136.0	1432.0	-131
57	0.94	0.48	0.44	0.39	1.56	0.30	85	2443.5	1738.5	-126
58	1.27	0.64	0.39	0.23	3.24	0.14	88	2837.0	1931.5	-112
59	1.43	0.62	0.48	0.23	3.75	0.13	88	3135.5	2034.0	-103
60	2.12	1.27	0.58	0.32	5.63	0.14	81	2136.0	2138.5	-134
61	6.10	4.74	3.24	1.70	11.72	0.28	91	3436.0	2437.5	-178
62	5.87	5.36	3.59	2.42	10.09	0.42	99	2136.0	2633.5	-204
63	5.11	3.11	2.02	1.13	11.21	0.19	86	2639.5	2682.5	-178
平均値	4.32	3.17	2.19	1.40	8.64	0.25	86	-	-	-

付録 B. YH 港における塩化物イオン濃度測定結果等

B.1 床版採取位置

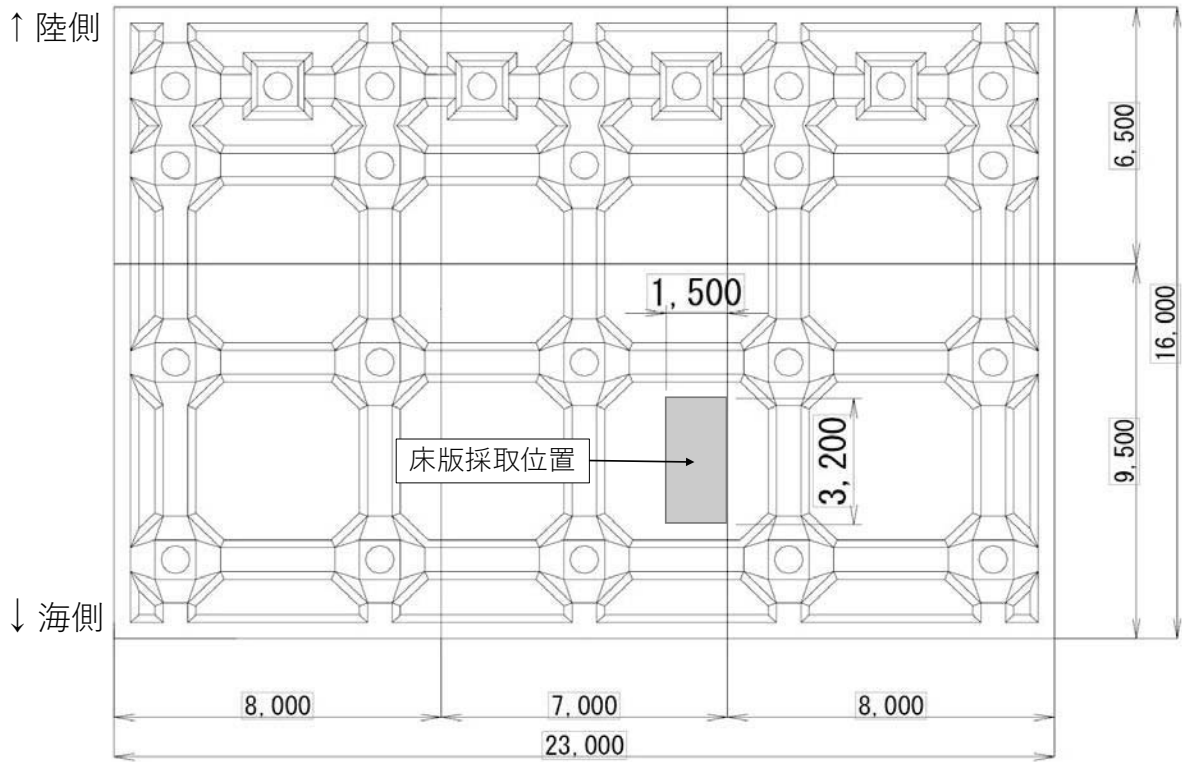


図-B.1 床版採取位置

B.2 コンクリートコア採取位置

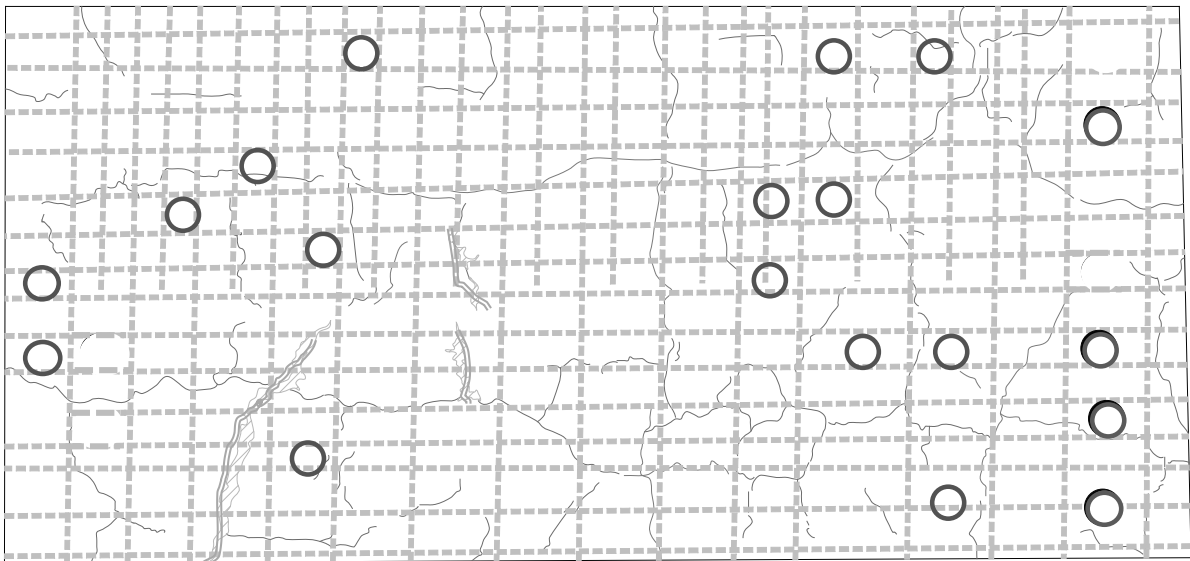


図-B.2 コンクリートコア採取位置

B.3 塩化物イオン濃度測定結果一覧

表-B.1 塩化物イオン濃度測定結果一覧

コア番号	塩化物イオン濃度 [kg/m ³]					C_0	D_{ap}
	5 mm	25 mm	45 mm	65 mm	90 mm	[kg/m ³]	[cm ² /year]
1	3.74	1.85	0.81	0.33	0.12	4.20	0.14
2	2.01	1.19	0.50	0.28	0.12	2.23	0.19
3	1.97	2.32	1.33	0.69	0.33	3.75	0.30
4	2.16	2.82	1.40	0.59	0.24	5.13	0.21
5	2.01	1.11	0.21	0.02	0.05	2.36	0.11
6	1.71	1.73	0.62	0.33	0.14	3.55	0.15
7	3.01	2.01	0.71	0.26	0.09	3.45	0.18
8	3.06	2.49	1.00	0.43	0.19	3.54	0.26
9	2.37	2.39	1.04	0.43	0.14	4.69	0.17
10	2.37	1.40	0.92	0.33	0.12	2.57	0.25
11	2.30	1.19	0.90	0.28	0.12	2.45	0.23
12	2.16	0.57	0.26	0.05	0.05	2.63	0.06
13	2.92	1.16	0.83	0.40	0.14	3.12	0.16
14	1.49	1.71	0.81	0.50	0.21	2.85	0.25
15	2.87	1.28	0.57	0.28	0.14	3.21	0.13
16	3.10	2.80	1.26	0.47	0.19	3.67	0.30
17	3.03	1.47	0.55	0.17	0.05	3.46	0.12
18	2.54	1.61	0.78	0.36	0.09	2.82	0.22
19	2.06	1.54	0.78	0.31	0.09	2.34	0.27
平均値	2.47	1.72	0.80	0.34	0.14	3.26	0.20

付録C. 生存時間解析で対象とした施設一覧

表-C.1 栈橋の諸元および環境条件等の詳細

施設名	地域	設計水深 [m]	建設年	点検年	経過年数	最頻度風向*1	施設の向き*2	風速*1 [m/s]	平均気温*3 [°C]	L.W.L. [m]	H.W.L. [m]	施設延長 [m]
1 A	東北(日本海)	-13.0	2000	2013	13	西	西北西	19.5	11.4	0.00	0.50	275.0
2 B	関東	-12.0	2007	2013	6	北	南東	22.2	16.0	0.00	2.00	130.0
3 C	関東	-12.0	1989	2013	24	北	南東	22.2	16.0	0.00	2.00	240.0
4 D	関東	-7.5	1989	2013	24	北	北	22.2	16.0	0.00	2.00	145.0
5 E	近畿(日本海)	-10.0	1974	2005	31	北	北東	25.1	14.6	0.00	0.30	206.0
6 F	北陸	-10.0	1969	2002	33	西南西	南西	18.1	14.2	0.00	0.65	184.9
7 G	関東	-10.0	1968	1999	31	北	北西	22.2	16.0	0.00	2.00	255.0
8 H	北海道(太平洋)	-7.5	1970	1999	29	南東	南東	21.1	7.7	0.00	1.50	290.0
9 I	中部	-12.0	1973	2003	30	南南東	東	21.5	16.0	0.00	2.60	247.0
10 J	中部	-12.0	1973	2003	30	南南東	東	21.5	16.0	0.00	2.60	247.0
11 K	中部	-14.0	2001	2014	13	北西	北東	12.0	15.4	0.04	2.61	385.0
12 L	中国(瀬戸内海)	-7.5	1987	2013	26	南	北北西	36.0	16.3	0.03	3.76	325.2
13 M	関東	-10.0	1968	2013	45	北	北西	22.2	16.0	0.00	2.00	200.0
14 N	関東	-10.0	1968	2013	45	北	北西	22.2	16.0	0.00	2.00	230.0
15 O	中部	-10.0	1980	2013	33	南南東	東南東	21.5	16.0	0.00	2.60	209.0
16 P	中部	-10.0	1986	2013	27	南南東	東南東	21.5	16.0	0.00	2.60	190.0
17 Q	中部	-10.0	1989	2013	24	南南東	東南東	21.5	16.0	0.00	2.60	220.0
18 R	北海道(太平洋)	-14.6	1996	2008	12	南東	東北東	21.1	7.8	0.00	1.70	330.0
19 S	中部	-12.0	1989	2013	24	北	北東	11.4	16.4	0.04	1.64	240.0

*1：気象庁HP過去の気象データにおいて、1986~2015年までの30年間分の最大風速の風向・風速データを使用し、風向の出現頻度が最も高い方向を「最頻度風向」、その風向の最大風速を「風速」とした。

*2：法線直交方向（陸側から海側を見た場合）の向き

*3：気象庁HP過去の気象データにおいて、1986~2015年までの30年間分の年平均気温のデータを使用し、それらの平均気温を「平均気温」とした。

付録 D. 生存時間解析

D.1 はじめに

生存時間解析は、興味のあるイベント（例えば、病気の発症、機械の故障）の発生とイベント発生までの時間について、様々な分析を行う統計手法である。生存時間解析の手法として、①ノンパラメトリック、②セミパラメトリックおよび③パラメトリックな手法があるが、本研究では、①の手法の1つであるカプラン・マイヤー法（以下、KM法と称する。）を用いた。ここでは、KM法による生存関数の推定および異なるグループ間における生存関数の比較について概説する。なお、本解説については文献 D.1)を参考にした。

D.2 KM法による生存関数の推定

(1) 生存時間データの特徴

KM法の説明に先立って、生存時間解析で対象とするデータ（生存時間データ）の特徴について述べる。

生存時間データの最大の特徴は、しばしば不完全な生存時間が観測されることである。この不完全な観測値には打ち切りおよび切断の2つのメカニズムがある。ここでは最も一般的な「右側打ち切り」について説明する。右側打ち切りは、観測期間中にイベントが発生しなかった、もしくは何らかの理由により対象の観測が不完全となったために、正確な生存時間が不明となることである。不完全な観測が時間軸の右裾で生じるため、右側打ち切りと呼ばれる。

生存時間データにはしばしば不完全な観測値が含まれるため、生存時間の平均値や標準偏差等の記述統計量に影響を与える。そのため打ち切りや切断を含む生存時間データを分析する手法として生存時間解析が発展してきた。

(2) KM法による生存関数の推定

本節では本研究で用いた、要因②「施設延長方向の位置」における床版(S)のデータを用いて、KM法による生存関数の推定およびグループ間の生存関数の比較について説明する。なお、栈橋端部をグループ1、栈橋中心部をグループ0とする。

生存関数とは、ある時間 t よりも大きい生存時間 T が得られる確率で、式(D.1)と定義される。

$$S(t) = \Pr(T > t) \quad (D.1)$$

KM法で推定される生存関数の推定量(KM推定量)は、生存と打ち切り時間で定義される階段の推移として表さ

れ、あらゆる時点の生存を考慮することにより、全ての利用できる観測値（打ち切りおよび非打ち切り）の情報を含んでいる。観測データを用いて、各生存時点における生存の条件付き確率を推定し、それらを掛け合わせて全体の生存関数の推定値を得る。

グループ1における生存時間を T_1 、打ち切りに関する指示変数を C_1 とした時、 n 個の独立な観測値 $(t_{1,i}, c_{1,i})$, $i = 1, 2, \dots, n$ の標本を考える。 n 個の観測値のうち、 m 個 ($m \leq n$)の死亡時間と $n - m$ 個の打ち切りが存在すると仮定する。また、順序付けられた生存時間を $t_1 < t_2 < \dots < t_m$ と定義する。時点 t_i での死亡リスク集合にいる人数を $n_{1,i}$ 、観測される死亡数を $d_{1,i}$ とする。時点 t_i での生存関数のKM推定量は、式(D.2)で表される。

$$\hat{S}_1(t) = \prod_{t_i \leq t} \frac{n_{1,i} - d_{1,i}}{n_{1,i}} \quad (D.2)$$

なお、時点 t_i での死亡リスク集合にいる人数 $n_{1,i}$ は、時点 t_{i-1} における打ち切り数 ($c_{1,i-1}$)、死亡リスク集合にいる人数 ($n_{1,i-1}$) および死亡数 ($d_{1,i-1}$) を用いて、 $n_{1,i} = n_{1,i-1} - (d_{1,i-1} + c_{1,i-1})$ と表される。

表-D.1 および表-D.2 に栈橋端部および栈橋中心部におけるリスク集合にいる部材の数や死亡数等の観測データおよび生存関数のKM推定量を示す。表-D.1における $(t_i, \hat{S}_1(t_i))$ および表-D.2における $(t_i, \hat{S}_0(t_i))$ の組み合わせをプロットし、階段状に線をつなぐことで図-D.1(本文中では図-10(c))の生存曲線が得られる。

(3) 生存関数の比較

グループ間における生存関数の比較は、まず各グループの生存関数のKM推定量をグラフ化することから始める必要がある。一般には、一方の生存関数がもう一方の生存関数よりも完全に上側に存在する状態は、上側のグループが下側のグループよりも生存時間が長い、もしくは生存状況が良いことを意味する。この生存関数の差が有意かどうか、統計学的な問題となる。

2グループ間の生存関数の比較を考える。時点 t_i におけるグループ0とグループ1のリスク集合をそれぞれ $n_{0,i}$, $n_{1,i}$ 、死亡数をそれぞれ $d_{0,i}$, $d_{1,i}$ 、リスク集合の総和を n_i 、総死亡数を d_i と定義する。各時点における検定統計量には、各グループの生存関数が等しいと仮定したもとで計算されるグループ1またはグループ0の期待死亡数が寄与する。グループ1の期待死亡数の推定量は、以下の式(D.3)で表される

表-D.1 栈橋端部（グループ1）における観測データ
および生存関数の KM 推定量

i	t_i	$n_{1,i}$	$d_{1,i}$	$c_{1,i}$	$\hat{S}_1(t_i)$
1	6	2450	0	64	1.000
2	12	2386	0	126	1.000
3	13	2260	5	451	0.998
4	24	1804	3	557	0.996
5	26	1244	0	344	0.996
6	27	900	0	120	0.996
7	29	780	29	61	0.959
8	30	690	14	186	0.940
9	31	490	41	127	0.861
10	33	322	37	165	0.762
11	45	120	15	105	0.667

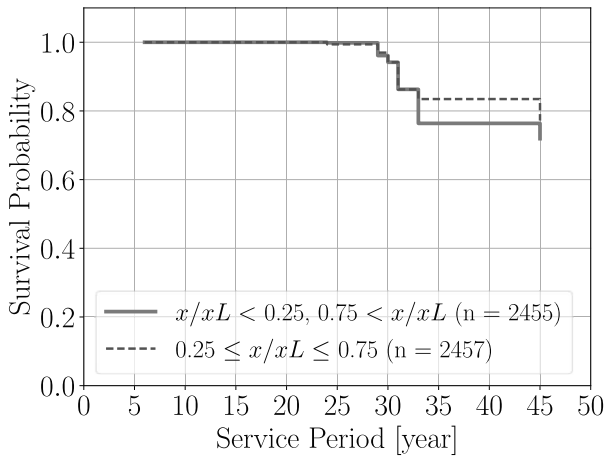


図-D.1 要因②における床版の生存関数の推定結果

$$\hat{e}_{1,i} = \frac{n_{1,i}d_i}{n_i} \quad (D.3)$$

また、 $d_{1,i}$ の分散推定量は、超幾何分布に基づき、以下の式(D.4)で表される。

$$\hat{v}_{1,i} = \frac{n_{1,i}n_{0,i}d_i(n_i - d_i)}{n_i^2(n_i - 1)} \quad (D.4)$$

検定統計量 Q は、利用する検定手法によって異なるが、観測された生存関数についての重み付き和の比の形式で表され、式(D.5)で表される。

$$Q = \frac{[\sum_{i=1}^m w_i (d_{1,i} - \hat{e}_{1,i})]^2}{\sum_{i=1}^m w_i^2 \hat{v}_{1,i}} \quad (D.5)$$

表-D.2 栈橋中心部（グループ0）における
観測データおよび生存関数の KM 推定量

i	t_i	$n_{0,i}$	$d_{0,i}$	$c_{0,i}$	$\hat{S}_0(t_i)$
1	6	2462	0	56	1.000
2	12	2406	0	123	1.000
3	13	2283	2	466	0.999
4	24	1815	12	548	0.993
5	26	1255	0	344	0.993
6	27	911	0	130	0.993
7	29	781	19	71	0.968
8	30	691	20	170	0.940
9	31	501	42	122	0.862
10	33	337	11	206	0.833
11	45	120	12	108	0.750

表-D.3 栈橋端部（グループ1）の期待死亡数
および分散推定量等の計算結果

i	t_i	n_i	d_i	$n_{1,i}$	$n_{0,i}$	$\hat{e}_{1,i}$	$\hat{v}_{1,i}$
1	6	4912	0	2450	2462	0.000	0.000
2	12	4792	0	2386	2406	0.000	0.000
3	13	4543	7	2260	2283	3.482	1.748
4	24	3619	15	1804	1815	7.477	3.735
5	26	2499	0	1244	1255	0.000	0.000
6	27	1811	0	900	911	0.000	0.000
7	29	1561	48	780	781	23.985	11.638
8	30	1381	34	690	691	16.988	8.297
9	31	991	83	490	501	41.039	19.029
10	33	659	48	322	337	23.454	11.137
11	45	240	27	120	120	13.500	6.016

ここで、 w_i は検定ごとに変わる重みである。頻用されている検定は、 $w_i = 1$ とするログランク(log rank)検定である。なお、本研究においてもログランク検定を用いた。

2つの生存関数が等しいという帰無仮説のもとで、打ち切りはグループと独立であり、観測された総イベント数と期待イベント数が大きいという仮定をおいたとき、検定統計量 Q が得られる確率 (p 値) は、自由度1のカイ二乗分布の右側確率から求めることができる ($p = \Pr(\chi^2(1) \geq Q)$)。検定で最も検出しやすい対立仮説は、一方の生存関数がもう一方よりも上にあるというような、単調な順序が存在する場合である。一方の生存関数がもう一方の生存関数と交差している場合には、検出力はかなり低く、上記で説明した検定法ではこのタイプの差を検出できないことに注意が必要である。

表-D.3 に時刻 t_i における栈橋端部（グループ1）の期

待死亡数 $\hat{e}_{1,i}$ および $d_{1,i}$ の分散推定量 $\hat{v}_{1,i}$ の計算結果を示す。表-D.3 に示した値を用いて、式(D.5)で表される検定統計量 Q を求めると、3.216 となった。この値が自由度 1 のカイ二乗分布で得られる右側確率 (p 値) は 0.073 であり、有意水準である 5% よりも大きな値であった。そのため、この検定統計量 Q が得られる確率が小さいとは判断できず、2 つの生存関数が等しいという帰無仮説は棄却されず、2 つの生存関数の差が統計的に有意であるとは言えない。

参考文献

D.1) David W. Hosmer, Stanley Lemeshow, Susanne May (五所正彦監訳): 生存時間解析入門, 東京大学出版会, 2014 年, pp.1-70.

港湾空港技術研究所資料 No.1349

2018. 12

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2018) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。