

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE

OF

THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1306 June 2015

波浪制御を目的とした前垂れ設置による
栈橋上部工への塩分供給量低減効果に関する研究

山路 徹
下迫健一郎
花岡 大伸
武田 将英
網野 貴彦
羽瀨 貴士
津田 宗男

国立研究開発法人 港湾空港技術研究所

National Research and Development Agency,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
2. 前垂れに期待する効果の整理	4
3. 現地実験の方法	7
3.1 前垂れの構造と設置場所	7
3.2 塩分供給量の調査方法	9
3.3 波浪観測の方法	9
4. 前垂れ設置による塩分供給量の低減効果	10
4.1 ガーゼ法による付着塩分量の調査結果	10
4.2 塩化物イオンの浸透分布	10
4.3 表面塩化物イオン濃度	10
4.4 表面塩化物イオン濃度と潮位の関係	13
5. 数値シミュレーションによる波浪制御効果	14
5.1 数値シミュレーションの概要	14
5.2 波浪条件の設定	14
5.3 数値シミュレーション	15
5.4 シミュレーション結果と現地結果の比較	16
6. 前垂れを設置した栈橋上部工における表面塩化物イオン濃度の評価手法	20
6.1 前垂れによる効果の整理	20
6.2 表面塩化物イオン濃度の評価手法	21
7. 前垂れの適用性の検討	21
7.1 概要	21
7.2 既設構造物の場合	21
7.3 新設構造物の場合	23
7.4 適用における今後の課題	23
8. おわりに	23
参考文献	24
付録	25

Reduction Effect of Supplied Amount of Chloride Ions to Superstructures of Pier by Installation of Curtain Wall for Wave Control

Toru YAMAJI*
Kenichiro SHIMOSAKO**
Daishin HANAOKA***
Masahide TAKEDA***
Takahiko AMINO***
Takashi HABUCHI***
Muneo TSUDA***

Synopsis

The superstructure of a pier, which is a typical port concrete structure, is located in a very severe environment prone to chloride attack. The supply of chloride ion is considered to be reduced by the existence of curtain wall at the berthing side. However, the reduction effect is not estimated quantitatively. In this study, some curtain walls with heights of the different lower end were set in front of the existing superstructure on pier in order to estimate the reduction effect of the chloride ion supply to the concrete under a pier. Also, the concrete specimens were set on the concrete superstructure behind curtain walls, and the chloride ion in concrete was investigated after a few years.

In the range of this study, it was confirmed that the amount of chloride ion supply to pier superstructure can be reduced by setting the curtain wall lower end height more deeply than L.W.L. +0.5m. By the existence of curtain wall, it was supposed that the short-period wave was reflected partially and the wave height was reduced inside the pier. As this result, the seawater spray was hard to affect the concrete superstructure inside the pier, and the supply of chloride ion was considered to be reduced.

Key Words: Superstructure of Pier, Curtain wall, Surface chloride content, Transmitted wave, Breaking wave

* Director, Structural Engineering Division
** Director, Coastal and Ocean Engineering Division
*** Toa Corporation
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5042 Fax : +81-46-841-3888 e-mail:yamaji-t@pari.go.jp

波浪制御を目的とした前垂れ設置による 栈橋上部工への塩分供給量低減効果に関する研究

山路 徹*・下迫 健一郎**・花岡 大伸***・武田 将英***
網野 貴彦***・羽瀨 貴士***・津田 宗男***

要 旨

港湾構造物の中でも栈橋上部工は、塩害による早期劣化が維持管理上の大きな問題になっている。また既往の研究では、栈橋上部工への塩分供給量は構造条件や波浪条件等によって大きく異なることが明らかとなっている。特に、栈橋上部工に「前垂れ」が存在する場合は、栈橋下面への波の進入が抑制され、コンクリート中への塩分供給量も抑制される傾向があることが確認されている。しかし、前垂れの存在による栈橋上部工の塩分供給量低減効果（表面塩化物イオン量の低減効果）は定量的に評価するまでは至っていない。

そこで、本研究では「前垂れ」に着目し、「現地実験に基づく表面塩化物イオン濃度の低減効果」、「数値シミュレーションによる波浪抑制効果」等について調べた。その結果、前垂れ下端高さをある位置（今回条件では L.W.L.+0.5m）より深く設定することで、栈橋上部工への塩分供給量を低減できることが確認された。また、上記の結果は、前垂れによって短い周期の波が部分反射されることや栈橋内部の波高が小さくなることにより、海水飛沫が部材に到達する回数と飛沫の影響度が少なくなるためと考えられた。

キーワード：栈橋上部工，前垂れ，表面塩化物イオン濃度，伝達波，砕波

* 構造研究領域 領域長
** 特別研究官（海洋・水工部門）
*** 東亜建設工業（株）
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5042 Fax：046-841-3888 e-mail:yamaji-t@pari.go.jp

1. はじめに

港湾構造物は、我が国の国際競争力や地域ごとの経済活動を支える重要な役割を担っている。しかしながら、過去に建設された港湾構造物が、今後一斉に老朽化を迎えることが懸念されており、適切に維持管理することが求められている。また、国や地方の厳しい財政事情、人口減少と少子高齢化などの社会情勢を踏まえ、施設ごとに維持管理計画や長寿命化計画を策定することになってきつつある。

港湾構造物のうち、特に塩害が問題となる構造物として栈橋上部工が挙げられる¹⁾²⁾。海洋環境下に位置する鉄筋コンクリート（RC）構造物は、陸上のRC構造物と比較して劣化の進行がきわめて速い。大即らの調査では、1980年代に全国の約500の係船岸を対象とした目視調査を行い、港湾のコンクリート構造物では、栈橋上部工の塩害による劣化が著しいと報告している¹⁾²⁾。このように、栈橋上部工は海水から供給される塩分によって塩害劣化が生じやすく、維持管理上の大きな問題となっている。

一般に、塩害に対する環境作用の指標として、表面塩化物イオン濃度の値が用いられることが多いが、既往の研究³⁾によると、栈橋上部工への塩分供給量は部材の空間的な位置や構造条件、波浪条件等によって大きく異なることが明らかとなっており、栈橋の係船面に配置される上部工の梁下端よりもさらに垂下した部材「前垂れ」が存在する場合は、栈橋下面への波の進入が抑制され、栈橋上部工への塩分供給量も抑制される傾向があることが確認されている。しかしながら、前垂れの存在による栈橋上部工への塩分供給量の低減効果を定量的に評価するまでは至っておらず、前垂れの設置高さ（海水面から前垂れ下端までの距離）の影響については整理されていない。

そこで、本研究では、「前垂れ」の存在による表面塩化物イオン濃度の低減効果に着目し、下記の検討を行った。

- (1) 現地実験に基づく表面塩化物イオン濃度の低減効果、
- (2) 数値シミュレーションによる波浪抑制効果、(3) 前垂れを設置した栈橋上部工における表面塩化物イオン濃度の評価手法、そして最後に(4) 前垂れを設置した際の適用性の検討を行った。

2. 前垂れに期待する効果の整理

「前垂れ」とは、栈橋の係船面に配置される上部工の梁下端よりもさらに垂下した板部材を指し、主に防舷材を取り付けるためや栈橋下への漂流物の侵入を防ぐため

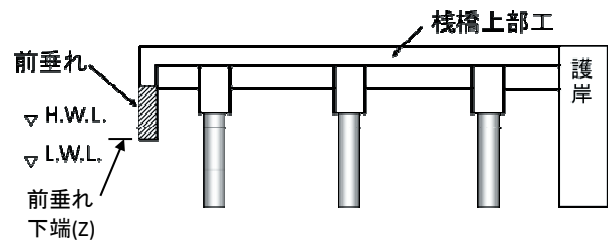
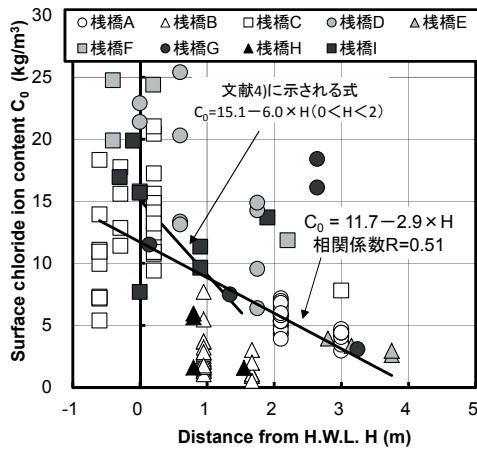


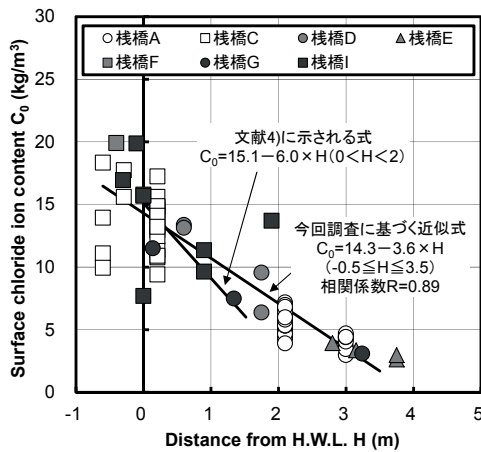
図-2.1 前垂れのイメージ

などに設置される。図-2.1に前垂れのイメージを示す。文献3)では、図-2.2(a)に示すように、太平洋側に位置する9つの栈橋から得られたデータを用いて、表面塩化物イオン濃度（ C_0 ）と海水面（H.W.L.）からの各調査位置までの距離（ H ）の関係を整理した結果の例が示されている（同図には、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」の既往の研究成果にならって、 C_0 値と海水面と調査箇所までの距離（ H ）の関係を直線として近似している）。この図によれば、 H が大きくなるにつれ C_0 値が小さくなる傾向が見られるが、非常にばらつきが大きくなっている。そのため、まず、前垂れはないが、栈橋の設置環境からみて、波を受けにくいところにある栈橋のデータを抽出したのが図-2.2(b)である。これを見るとデータのばらつきが小さくなっていることがわかる。それ以外の部材データのみを抽出したもの（波の作用の影響を受けた部材データを前垂れの有無で分けてプロットしたもの）を図-2.2(c)に示す。その結果から、栈橋前面に前垂れが存在すると、前垂れ部に近い部材の C_0 値が小さくなる可能性があることを示唆している。

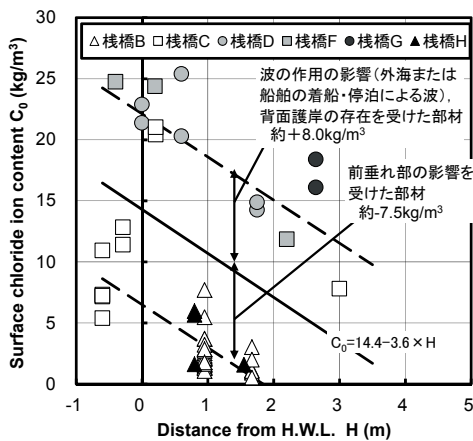
この結果を踏まえ、H16年度に実施した表面塩化物イオン濃度の調査結果⁴⁾をもとに前垂れの効果について再整理を行った。対象港を図-2.3に、調査情報の一覧を表-2.1に示す。なお、P港については、H23年度に入手した1箇所の栈橋のデータを追加した。今回、前垂れ下端（前垂れが無い場合は最前列の梁下端）の位置 Z （図-2.1参照）に関する情報を追加して、再整理を実施した。現地調査の結果から、表面塩化物イオン濃度は、単に前垂れの有無だけではなく、前垂れと海水面の位置関係も大きく影響していると考えられるため、まず「前垂れと海水面の位置関係」に着目して、過去の調査結果を整理した。また、前垂れが無い場合は最前列の梁下端の位置を前垂れの下端と仮定した。図-2.4に、H16年度の調査時に得られたH.W.L.からの距離と表面塩化物イオン濃度の関係を示す（後述するが、前垂れの影響を表す指標 Y 毎に整理している）。ここで、各 C_0 の値は各栈橋の梁やスラブにおけるデータを示している。 C_0 値はばらつきを持ちながら、H.W.L.



(a) 全データ



(b) 前垂れが存在せずかつ波の作用の影響を受けていない部材データをプロットした場合



(c) 波の作用の影響を受けた部材データを前垂れの有無で分けてプロットした場合

図-2.2 C₀値とH.W.L.から調査位置までの距離の関係

からの距離が大きくなるとともに低下する傾向がある。この結果から得られた回帰式，すなわち平均的な表面塩

化物イオン濃度の値が，現在の「港湾の技術上の基準・同解説」における表面塩化物イオン濃度の評価式（式(2.1)）のベースとなっている。

$$C_0 = -6.0X + 15.1 \quad (2.1)$$

ここで，X：H.W.L.からコンクリート下面までの鉛直距離(m)である。Xの適用範囲としては， $0 \leq X \leq 2$ m程度の範囲としている。

今回，図-2.4のばらつきの要因として，「前垂れ」の影響に着目して考察を進める。ここで，前垂れがある場合に，実測値が評価式(2.1)を下回るものが多ければ，前垂れが表面塩化物イオン濃度の低減に寄与していることを裏付けるものと考えられる。また，単に前垂れの有無だけではなく，「前垂れと海水面の位置関係」に着目する。前垂れによる影響を表す指標として，ここでは「H.W.L.と前垂れ下端Zの差 $Y (= H.W.L. - Z)$ 」を選定した。そして，以下の方法により，上記のYの値が評価式の推定精度に及ぼす影響について検討を行った。

- 1) 表-2.1中のYの値を5段階に分類する。なお，分類の際には，それぞれの範囲の幅がある程度同じになるように，データ数が極端に異ならないように区分した。
- 2) 1)で区分した範囲毎に，実測値が計算値を下回る割合を調べた。

ここで，実測値<計算値となるものが多いほど，平均的な栈橋下の環境よりも穏やかな環境であることになる。栈橋周辺での波浪状況が元々穏やかであったこと，あるいは前垂れ等の影響により波浪が低減され，栈橋内部で波浪状況が穏やかであったこと，等が理由として考えられる。その結果として表面塩化物イオン濃度が抑制されたと考えられる。

図-2.4は，H.W.L.と表面塩化物イオン濃度の関係をYの分類ごとに分けて表記したものである。なお，表-2.2は実測値<計算値となったデータの個数および割合を示す。また，図-2.5は，表面塩化物イオン濃度に及ぼす前垂れの影響例として，同一港で得られた値を比較したものである。

表-2.2において， $Y \geq 1$ の場合に，実測値が式(2.1)を下回るものが多い。図-2.5(a)はP港の前垂れがある栈橋の例($Y=1.16$)であり，図-2.5(b)はP港で同じような設置環境にある前垂れのない栈橋の例($Y=-0.14$)である。両者を比較すると，前垂れの影響により，表面塩化物イオン濃度が低くなっている可能性が示唆される。一方， $Y \leq -0.5$ の場合には， $Y \geq 1$ の場合と同様に，実測値が式(2.1)を下回るものが多い。この原因としては，そもそも栈橋上部工の

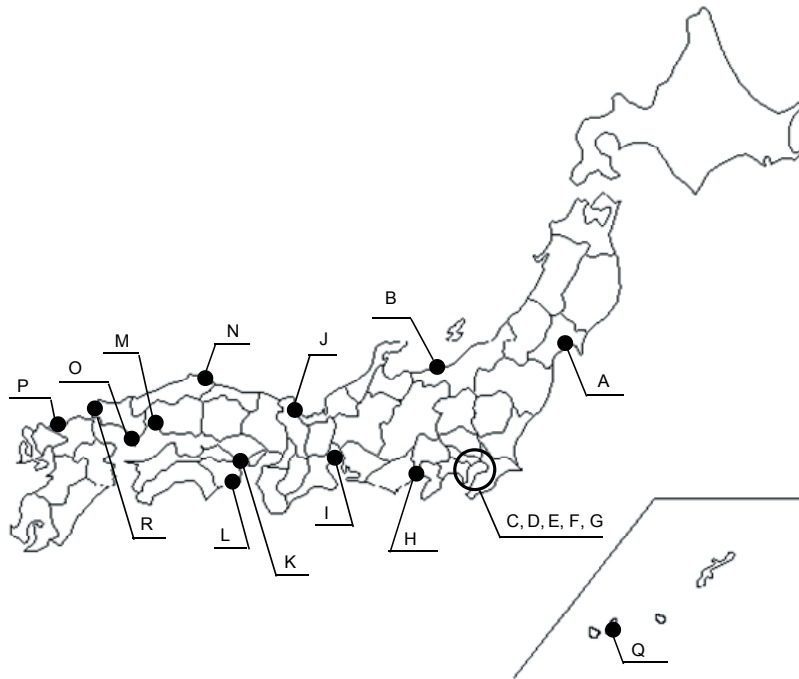


図-2.3 調査対象港

表-2.1 対象港一覧

港名	H.W.L.(m)	岸壁天端(m)	前垂れの有無	前垂れ下端:Z(m)	法線はり下端:Z(m)	Y* (m) (=H.W.L.-Z)
A	1.60	2.30	×	-	0.80	0.80
B	0.65	2.40	○	0.50	-	0.15
C	2.00	3.60	○	1.57	-	0.43
D	2.10	3.50	○	1.65	-	0.45
E	2.10	4.10	○	1.65	-	0.45
F	2.00	3.51	○	2.50	-	-0.50
G	2.00	3.80	×	-	2.50	-0.50
H	2.00	3.80	×	-	2.70	-0.70
I	1.70	3.00	×	-	1.94	-0.24
J	1.70	3.10	×	-	1.85	-0.15
K	2.61	4.50	○	2.70	-	-0.09
L	2.60	4.80	○	3.30	-	-0.70
M	0.30	1.63	○	0.32	-	-0.02
N	0.30	1.80	○	0.43	-	-0.13
O	1.80	3.00	○	1.50	-	0.30
P	1.80	3.50	○	0.50	-	1.30
Q	3.79	4.82	○	3.36	-	0.43
R	0.30	1.80	○	0.30	-	0.00
	3.04	4.00	×	-	2.45	0.59
	2.16	3.40	×	-	2.30	-0.14
	2.16	4.00	○	1.00	-	1.16
	1.90	3.00	○	1.85	-	0.05
	2.86	3.40	×	-	2.05	0.81

*前垂れによる波浪の制御効果を表す指標

位置（例えば岸壁天端高）が高く、H.W.L.と部材の距離が遠いため、前垂れの有無に関係なく、表面塩化物イオン濃度が小さくなりやすかったことが考えられる。

これらの結果より、表面塩化物イオン濃度 C_0 の評価においては、現在の技術基準における評価式にあるパラメータX (= H.W.L.から部材までの鉛直距離)が大きく影響す

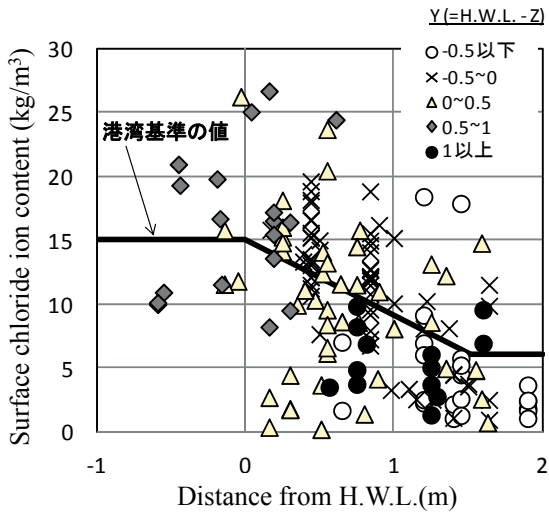


図-2.4 C₀とH.W.L.からの距離の関係

表-2.2 港湾基準式の精度に及ぼす前垂れの影響
(実測値<計算値の割合)

Yの区分	実測値<計算値 となるデータ	全数	実測値<計算 値となる割合
-0.5以下	19	22	0.86
-0.5~0	22	62	0.35
0~0.5	27	47	0.57
0.5~1	7	18	0.39
1以上	11	13	0.85

ること、さらには前垂れ等の影響を考慮した、栈橋内の波浪状況を把握することが重要であると考えられる。

3. 現地実験の方法

横須賀市に位置する供用中の栈橋上部工に水面からの高さが異なる前垂れを複数設置し、前垂れによる栈橋下面での波浪抑制効果およびコンクリート部材中への塩分供給量を調査した。本章では、現地実験の方法について述べる。

3.1 前垂れの構造と設置場所

栈橋に設置する前垂れは、海水の作用による材料劣化や漂流物による損傷を受けやすいため、強度と耐久性に優れた材料UHP-SHCC (Ultra High Performance-Strain Hardening Cementitious Composite: 超高強度繊維補強モルタル)⁵⁾を用いて製作した(厚さ30mmのプレキャスト板)。また、製作したプレキャスト板に鋼製のブラケットを取付け、ブラケットを栈橋上部工の下面にアンカーで固定

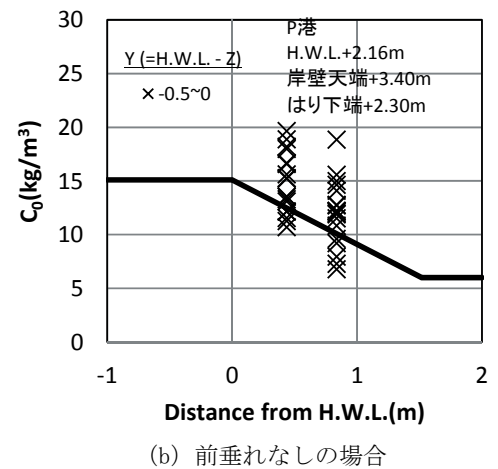
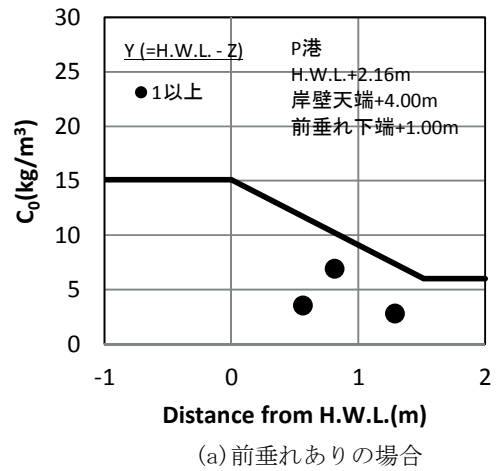


図-2.5 表面塩化物イオン濃度に及ぼす前垂れの影響例 (同一港での比較)

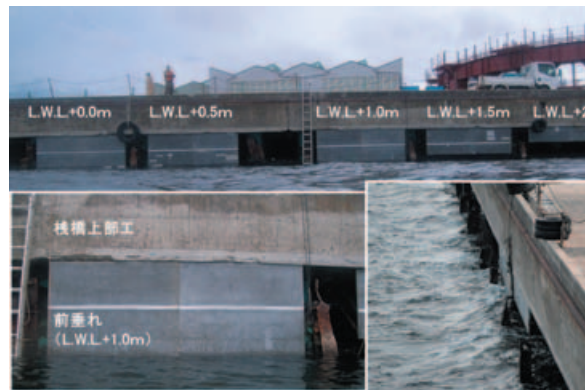
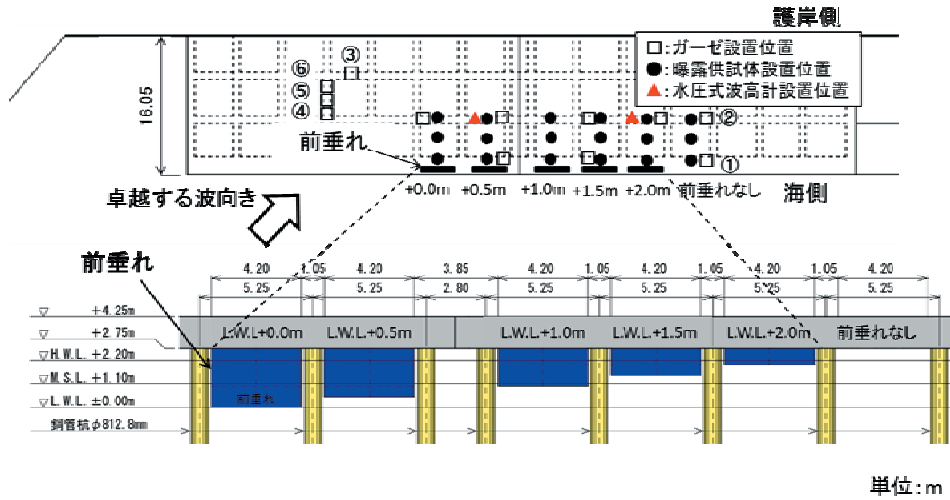


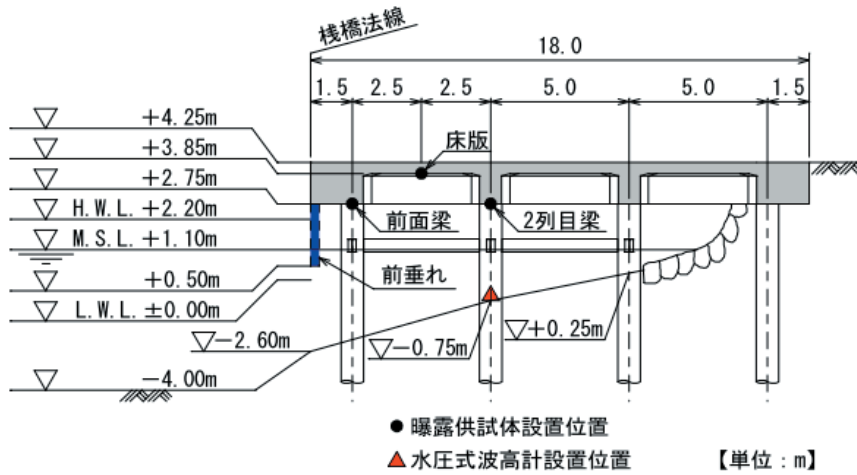
写真-3.1 前垂れの設置状況

することで前垂れを設置した。前垂れの設置状況を写真-3.1に示す。

現地実験は、神奈川県横須賀市追浜にある栈橋(延長139.7m)で行った。本栈橋は、海から栈橋を見て、左側の栈橋(延長78.15m, 前面水深4.0m)、右側の栈橋(延長61.55m, 全面水深5.0m)の2種類でいずれも構造形式は



(1) 平面図および正面図



(2) 断面図

図-3.1 前垂れおよび曝露供試体の設置位置図

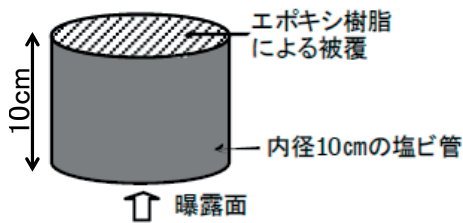


図-3.2 曝露供試体の概要

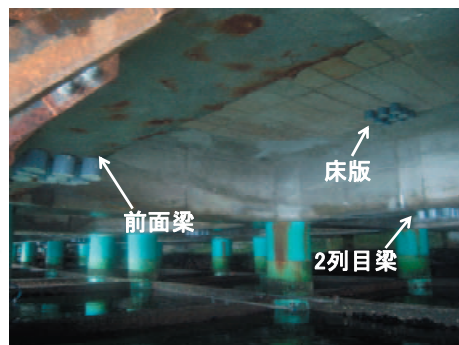


写真-3.2 供試体の曝露状況

表-3.1 曝露供試体の配合

W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	単位量 (kg/m ³)				
			W	C	S	G	AE 減水剤
55.0	43.7	4.5	165	300	806	1040	C×0.4%

* 普通ポルトランドセメント, AE 減水剤標準型 I 種を使用

直杭式の横棧橋である。今回の実験では、左側の棧橋の図-3.1に示す位置に、棧橋上部工の前面に前垂れを設置した。また、前垂れの設置高さ（海水面から前垂れ下端までの高さ）による塩分供給量の違いを把握するため、前垂れの下端高さは、図-3.1に示すように、L.W.L.より+0.0m (L.W.L.), +0.5m, +1.0m, +1.5m, +2.0m (H.W.L.)の5ケースとした。なお、隣り合う前垂れの間は1.1m離れているが、この間には鋼管杭φ812.8mmが存在する。ただし、前垂れ設置高さL.W.L.+0.5mとL.W.L.+1.0mの間には、同径の鋼管杭が2本存在し、その杭間には1.2m程度の前垂れがない開口部が存在する。また、図-3.1には、以降に説明するガーゼ及び曝露供試体の設置位置、並びに波高計の設置位置もあわせて記載してある。

3.2 塩分供給量の調査方法

(1) ガーゼ法による海水飛沫量の調査

前垂れの有無による海水飛沫量を調べるため、2012年3月1日～9日（8日間）、3月9日～19日（10日間）の2回にわけて、図-3.1に示す位置にドライガーゼを設置し、前垂れ背後の梁部材への海水飛沫量を調査した。海水飛沫量の測定は、「JIS Z 2382 大気環境の腐食性を評価するための環境汚染因子の測定 7.ドライガーゼ法による塩化物の測定」方法に準拠した。捕集面は下面からの1面とし、梁に飛沫した海水がコンクリート面を伝わってガーゼ上面から染みることのないように0.2mmのプラスチック板を介して捕集器具を設置した。また、海水の塊がガーゼに作用した場合、ガーゼの吸水性能が小さいと、ガーゼが全ての海水を吸収できない可能性も懸念されたため、ガーゼ2枚を二つ折りにした4層のものを各曝露位置に設置した。

(2) 曝露供試体による塩分供給量の調査

本研究では前垂れを設置した背面および前垂れを設置していない棧橋上部工の所定の位置に同一配合のコンクリート供試体（W/C=0.55、普通ポルトランドセメント使用）を曝露し、曝露1年毎に供試体を回収し、供試体中に浸透した塩分量を測定することで、前垂れ設置による塩分供給量の低減効果を調査した。曝露供試体は図-3.1に示す1箇所に対し、9個設置した。実験に用いた曝露供試体の配合を表-3.1に、図-3.2に供試体の概要を示す。なお、供試体は、曝露面以外からの塩分供給を防ぐようにするため、内径10cm、高さ10cmの塩ビ管の中にコンクリートを打設し、上面をエポキシ樹脂で被覆した。供試体の曝露状況を写真-3.2に示す。

一般に、塩害に対する環境作用の指標として、式(3.1)に示されるフィックの拡散方程式の解における表面塩化

物イオン濃度 C_0 が用いられることが多い。そこで本研究では、コンクリート中の深さ方向の全塩化物イオン濃度の分布を測定し、式(3.1)に近似させることで各調査箇所における表面塩化物イオン濃度と塩化物イオンの見かけの拡散係数を算出した。塩化物イオンの測定は、曝露試験体の曝露面から深さ3cmまでを1cm幅でスライスし、各々のスライス片に含まれる全塩化物イオン濃度を、「JIS A 1154 硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法：硝酸銀滴定法」に準じて測定した。

$$C(x,t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right) \quad (3.1)$$

ここに、 $C(x, t)$: 深さ x (cm)、時刻 t (年)における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)、 C_0 : コンクリート表面における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)、 D : 見かけの塩化物イオン拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)、 erf : 誤差関数を表す。なお、材料などから混入する初期塩化物イオン量はここでは考慮しないものとした。

3.3 波浪観測の方法

前垂れの設置高さによって、棧橋下の波浪諸元がどのように変化するかを調べるため、図-3.1の三角の位置の海底（水深L.W.L.-0.75m）に水圧式波高計を設置して、2012/9/15-11/29の期間における波浪観測を1時間に1回の割合で実施した。サンプリング間隔0.05s、1回あたりの観測時間は20分とした。水圧式波高計を採用したのは、水深がL.W.L.-0.75mと極めて浅く超音波式は不向きであること、特に容量式の場合に必要な漂流物や付着物の対策がほぼ不要であること、バッテリー式で常時電源が不要であることなどの理由から、今回の棧橋下での波浪観測において確実にデータを取得できる可能性が最も高かったためである。その代り、得られた水圧データから表面波に適切に変換する必要がある。水圧データから表面波への変換は、「(財)沿岸開発技術研究センター：沿岸波浪・海象観測データの解析・活用に関する解説書(2001)」を参考に以下で行った。1回の観測で得られた水圧データ(24000個)は、ノイズの除去を行った後、最小二乗法による直線トレンドを除去して水圧変動データにした。その後、フーリエ変換により周波数領域のデータに変換したのち、水圧の平均値より求めた水深に対応した波浪伝達関数の逆数を各周波数に乗じた。ただし、深海波となる短周期側の成分波の波浪伝達関数は、事前に造波水路でキャリブレーションを行い、観測時の水深で深海波となる最小周期における波浪伝達関数を一定値で与えた。代表的な水深における水圧式波高計で計測可

表-3.2 水圧式波高計で計測可能な最小周期 T_{min}

水位の状態	現地潮位 (m)	波高計設置水深 (m)	水深 h (m)	周期 T_{min} (s)	相対水深 h/L_{min}	波長 L_{min} (m)
H.W.L.	2.20	-0.75	2.95	1.95	0.50	5.90
M.S.L.	1.10	-0.75	1.85	1.54	0.50	3.70
L.W.L.	0.00	-0.75	0.75	0.98	0.50	1.50

能な最小周期を表-3.2に示す。また、潮位の違いによって、解析有効周波数が異なるのを避けるため、周期0.5～30sのバンドパスフィルターを実施した。その後、逆フーリエ変換により表面波の水位変動データに変換し、ゼロ・ダウncross法で波別解析を実施した。

4. 前垂れ設置による塩分供給量の低減効果

4.1 ガーゼ法による付着塩分量の調査結果

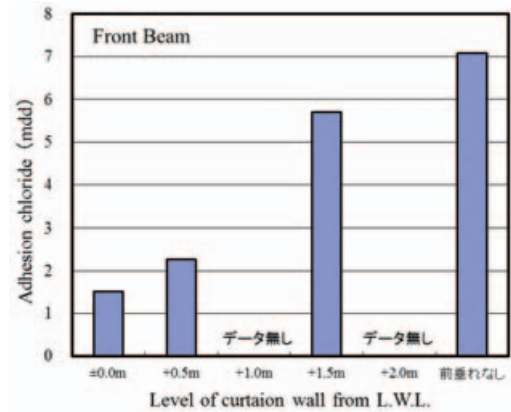
表-4.1にガーゼ法による付着塩分量の測定結果を示す。これによると、前垂れ背面の梁で測定した付着塩分量は、前垂れがない箇所で測定した付着塩分量よりも小さい傾向にあった。図-4.1にガーゼ法による付着塩分量と前垂れ下端レベルの関係を示す。図-4.1によれば、前面梁では前垂れ下端レベルが低いほど付着塩分量も小さくなった。また、2列目梁では前面梁よりも付着塩分量が少なく、さらに前垂れ下端レベルが1.5mより低いと付着塩分はほとんどなくなる傾向が見られた。

4.2 塩化物イオンの浸透分布

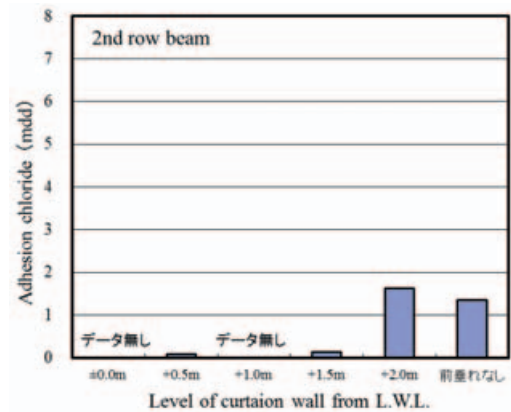
表-4.2に曝露期間2年目における表面塩化物イオン濃度と塩化物イオン拡散係数の平均値（3体/箇所の平均値）を示す。また、図-4.2には曝露供試体中の塩化物イオン濃度分布の例を示す。図中の点プロットは全塩化物イオン濃度を、実線は式(3.1)に示すフィックの拡散方程式の解による近似線を示している。梁下に設置したものと（前面梁・2列目梁）と床版に設置したものを比較すると、前垂れの有無によらず、梁下の方が床版よりも塩分の浸透が多いことが分かる。これは既往の研究^{6), 7)}でも確認されているように、梁下の方が海水面からの距離が近いと推測される。また、前垂れの影響についてみると、前垂れ下端高さがL.W.L.+0.0mのケースは前面梁の結果において塩分浸透の低減効果が顕著に表れている。一方、前垂れ下端高さがL.W.L.+1.0m以上のケースは、前垂れを設置していないケースとほぼ同等な塩化物イオン濃度の浸透分布であった。なお、拡散係数については、床版に曝露したものが小さい値となっており、床版の平均値は $0.31\text{cm}^2/\text{年}$ 、梁の平均値は $0.99\text{cm}^2/\text{年}$ であった。

表-4.1 ガーゼ法による付着塩分量の調査結果

曝露位置		前垂れ下端レベル または記号	ガーゼ法による付着塩分量 (NaCl換算:mdd)
前垂れあり	前面梁	+0.0	1.51
		+0.5	2.26
	2列目梁	+1.5	5.70
		+0.5	0.09
		+1.5	0.13
前垂れなし	前面梁	①	7.08
	2列目梁	②	1.35
	3列目梁	③	5.41
	法線直角方向梁	④	2.02
		⑤	0.36
		⑥	4.94



(1) 前面梁



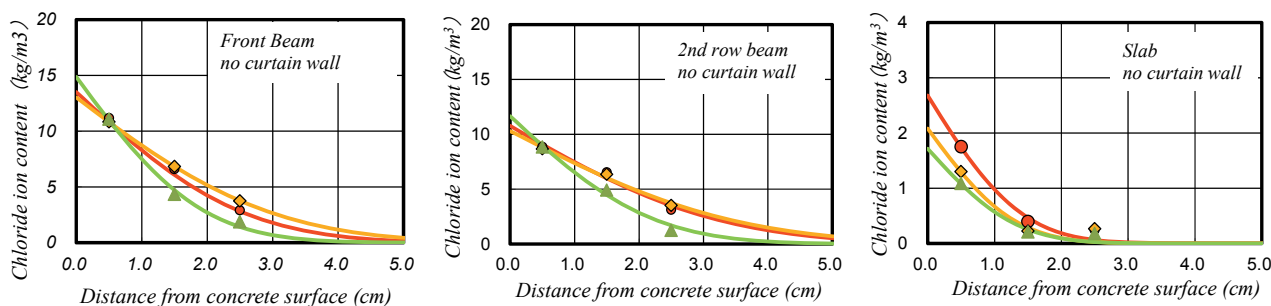
(2) 2列目梁

図-4.1 L.W.L. から前垂れ下端までの高さ と付着塩分量の関係

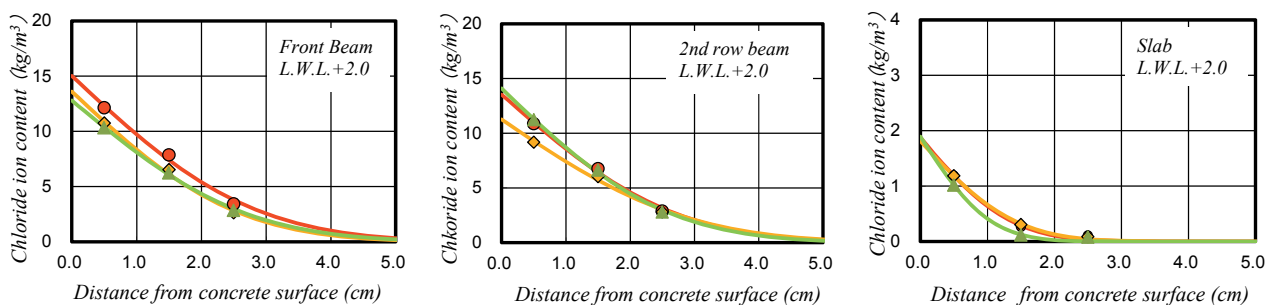
表-4.2 表面塩化物イオン濃度と拡散係数の平均値

L.W.L.から前垂れ下端までの高さ	表面塩化物イオン濃度 (kg/m ³)			塩化物イオンの見かけの拡散係数 (cm ² /年)		
	前面梁	2列目梁	床版	前面梁	2列目梁	床版
+0.0m	7.55	9.61	0.65	0.49	0.52	0.35
+0.5m	12.16	6.98	0.61	1.07	0.82	0.35
+1.0m	15.91	11.18	1.93	1.17	0.85	0.21
+1.5m	14.54	12.78	0.90	1.28	1.02	0.37
+2.0m	13.80	12.95	1.83	1.13	1.15	0.26
前垂れなし	13.79	10.82	2.15	0.97	1.35	0.29

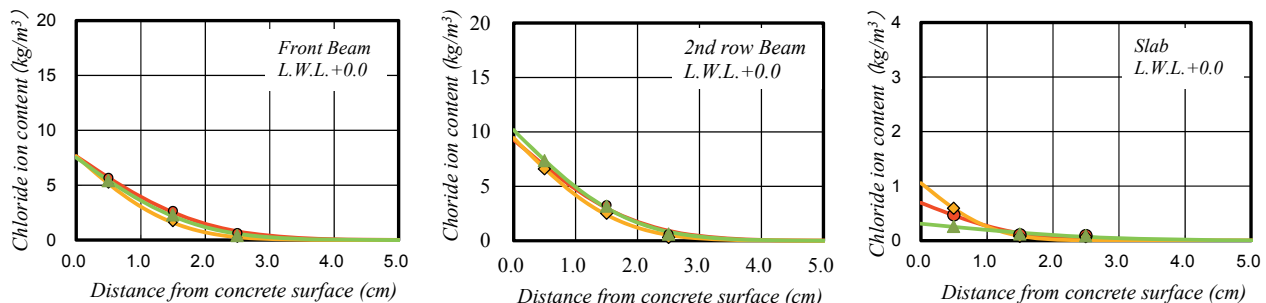
*曝露期間2年の結果, 各箇所3体の平均値



(a) 前垂れなし



(b) 前垂れ下端高さ L.W.L.+2.0m



(c) 前垂れ下端高さ L.W.L.+0.0m

*3体/箇所 of データ

図-4.2 塩化物イオン濃度分布の例 (曝露期間2年目の結果)

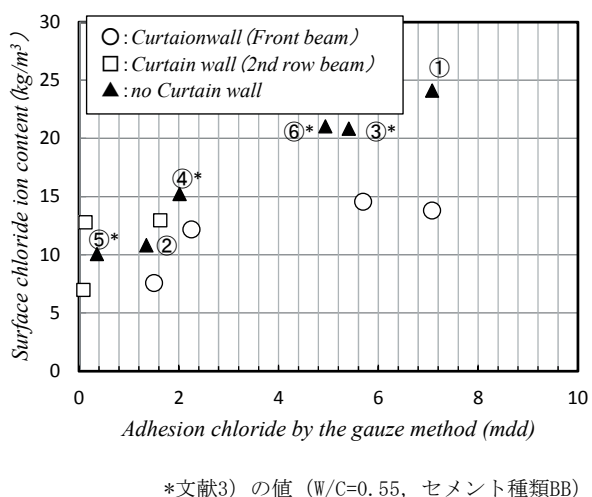
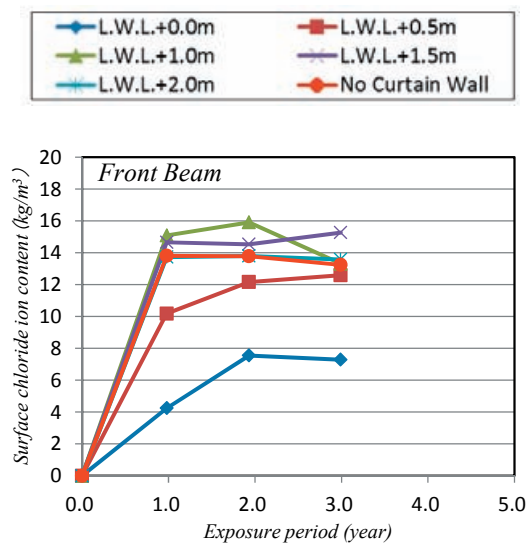


図-4.3 ガーゼ法による付着塩分量と曝露コンクリート試験体における表面塩化物イオン濃度の関係

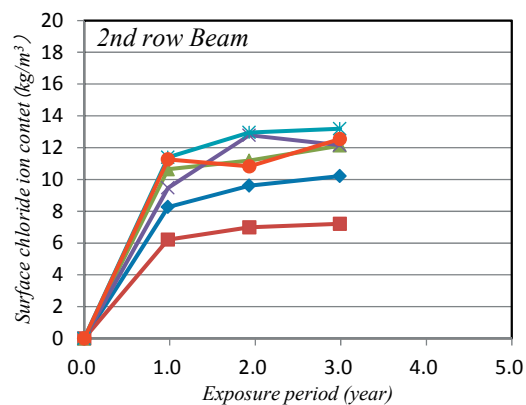
4.3 表面塩化物イオン濃度

図-4.3にガーゼ法による付着塩分量と曝露コンクリート供試体における表面塩化物イオン濃度（曝露2年目の値）の関係を示す。なお、前垂れがないケースの表面塩化物イオン濃度の一部の値は、過去に同じ栈橋で調査を行った結果を示す。図-4.3をみると、ガーゼ法による付着塩分量が大きくなるほど、曝露試験体の表面塩化物イオン濃度も大きくなる傾向が見られるが、ガーゼ法による付着塩分量がほぼ零の場合であっても表面塩化物イオン濃度が5~10kg/m³程度の値となっていた。ここで、付着塩分量のほとんどは、外気中の湿気を含む程度のガーゼがやや湿った状態での計測値であったため、ガーゼ法で測定された付着塩分量は、空気中の海塩粒子や少量の波しぶきの飛沫により供給された塩分と推測された。すなわち、栈橋上部工コンクリートに供給される塩分は、空気中に含まれる海塩粒子の影響よりも、波しぶきがコンクリート表面に直接当たる影響の方が卓越していると考えられる。このことから、栈橋上部工コンクリートに供給される塩分を少なくするには、栈橋下での波しぶきの発生を抑制することや、波しぶきがコンクリートに直接当たらないようにするため、栈橋下の波高を小さくすることが有効であると考えられる。

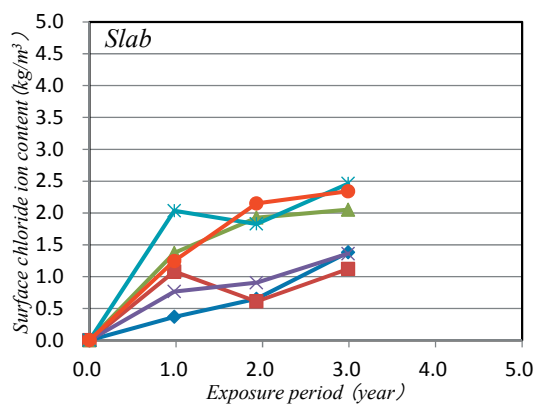
次に表面塩化物イオン濃度は時間とともに変化することが指摘⁸⁾されているため、表面塩化物イオン濃度の経時変化について整理した。図-4.4に表面塩化物イオン濃度の経時変化を示す（曝露3年目の値は、1つの供試体での測定値）。これによると、表面塩化物イオン濃度の値は、



(1) 前面梁



(2) 2列目梁



(3) 床版

図-4.4 表面塩化物イオン濃度の経時変化

曝露2年目の段階で概ね収束する傾向が見られた。このことから、以降、曝露2年目における表面塩化物イオン濃度の値を比較するものとした。

図-4.5にL.W.L.から前垂れ下端までの高さを横軸とし

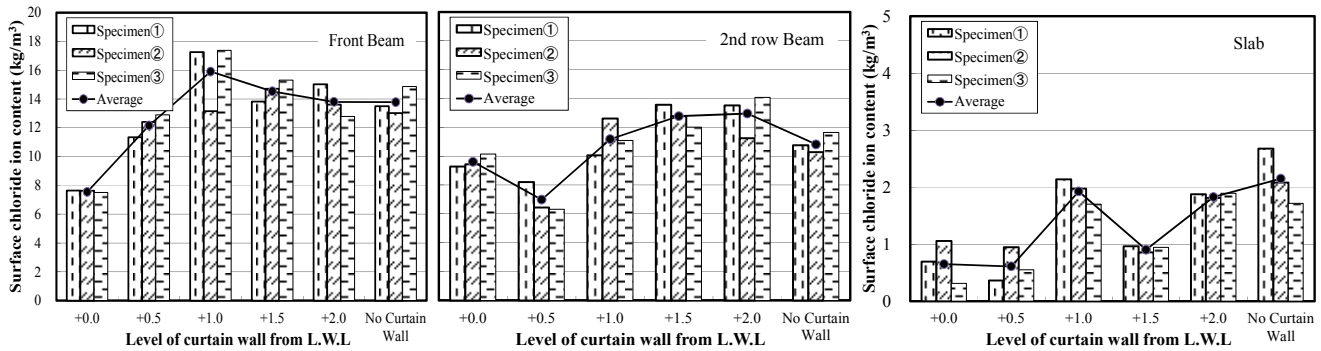


図-4.5 L.W.L. から前垂れ下端までの高さ と表面塩化物イオン濃度の関係（曝露期間2年の結果）

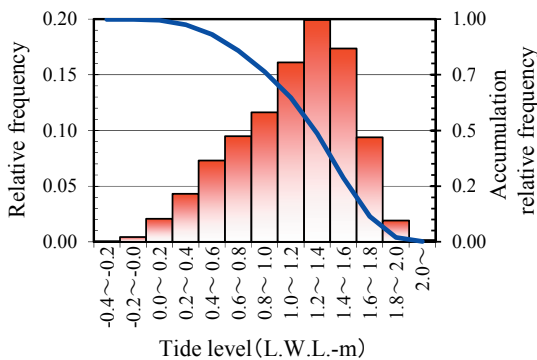


図-4.6 観測潮位の相対度数と累積相対度数

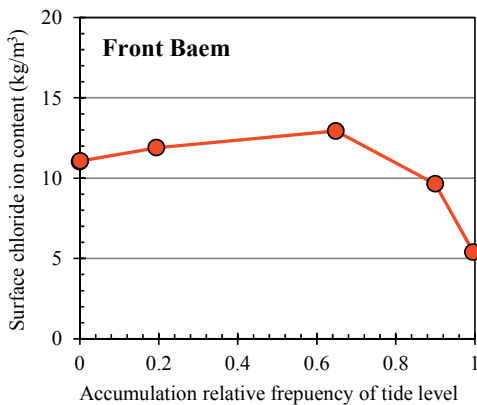


図-4.7 潮位の累積相対度数と表面塩化物イオン濃度（前面梁）

て表面塩化物イオン濃度を比較した結果を示す。前面梁（前垂れ直背後）に曝露した供試体の結果をみると、前垂れ下端高さがL.W.L.+1.0～+2.0mのケースでは、前垂れなしのケースとほぼ同等の表面塩化物イオン濃度であったが、前垂れ下端高さがL.W.L.+0.0m, +0.5mの順で表面塩化物イオン濃度が小さくなる傾向が確認された。一方、2列目梁に曝露した供試体の結果をみると、前面梁と同様に、前垂れ下端高さがL.W.L.+1.0～+2.0mのケースでは、前垂れなしのケースとほぼ同程度の値であることが分か

る。しかし、2列目梁では、前垂れ下端高さがL.W.L.+0.0mの表面塩化物イオン濃度が+0.5mの値よりも大きい。これは、図-3.1に示したように、L.W.L.+0.0mの前垂れを設置していた位置の片側が前垂れの無い条件となっていたため、前垂れの無い箇所から進入した波が回折しながら2列目梁に曝露した供試体に影響した可能性が考えられる。

4.4 表面塩化物イオン濃度と潮位の関係

前垂れを設置した栈橋は、L.W.L.とH.W.L.の潮位差が約2.0mある。このことは、前垂れの設置高さが塩分供給量に与える影響と密接に影響を与えるものと考えられる。そこで、横須賀における5分ごとの観測潮位データ（2003年～2011年）を、0.2m区間ごとの相対度数と累積相対度数に整理したものが図-4.6である。ここで、累積相対度数とは、前垂れの下端が没水していた時間割合を示す。この図より、観測潮位の累積相対度数が、L.W.L.+1.5m以下では0.0～0.3とあまり前垂れ下端が没水しておらず、前垂れによる効果（短い周期の波の部分反射などを想定）が有効に働かない。一方、L.W.L.+0.5m以下では観測潮位の累積相対度数が0.9～1.0とほとんどの時間で前垂れ下端が没水しており、前垂れによる効果が有効に働いていたと考えられる。また、L.W.L.+1.0mでは、観測潮位の累積相対度数が0.65と観測期間の半分以上は前垂れの下端が没水しているものの0.35の時間は下端が没水していないことが理解できる。また、潮位の累積相対度数と表面塩化物イオン濃度の関係を図-4.7に示す。これによると、今回の実験の範囲では、概ね累積相対度数を0.8より大きくすれば、前垂れ設置による塩分供給量の低減効果が得られることが分かった。

次に図-4.8に波の波高と周期の相関図（L.W.L.+0.5mと+2.0mの比較）を示す。これによると、今回の条件では前垂れの設置高さによって波高はほとんど変化しないことが分かる。この原因の1つとして、今回前垂れの延長が短かったことも影響していると考えられる。一方、波の周期

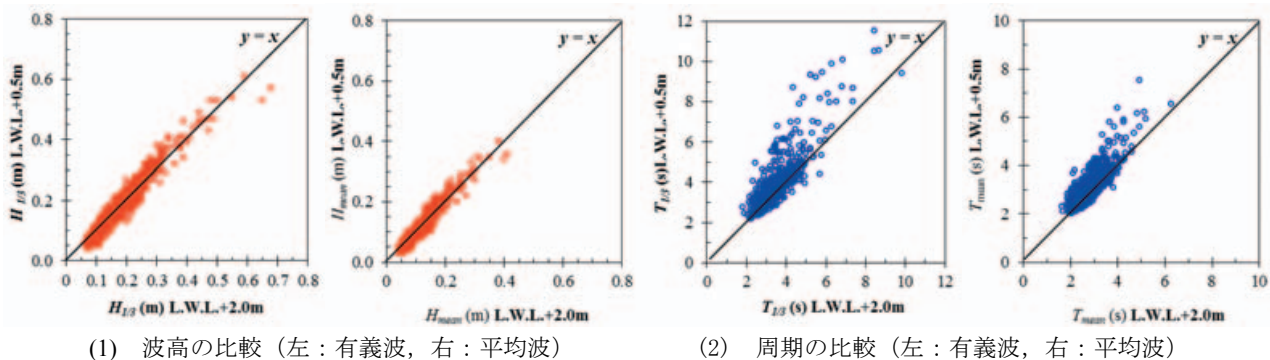


図-4.8 前垂れの設置高さによる波浪諸元（波高と周期）の変化

は前垂れ下端高さがL.W.L.+0.5mの方がL.W.L.+2.0mに比べて長い周期に変化しているケースが多いことが分かる。これは水深が一定の条件では周期の短い波ほど小さい波高で砕波しやすいため⁹⁾、前垂れが深く根入れされている方が波の短周期成分を部分反射し、栈橋下における波の砕波の発生回数を減らすことで、コンクリート中への塩分供給量が低減できる可能性が考えられる。

現地実験の結果から、前垂れによる塩分供給量の低減効果は、海水面(L.W.L.)から前垂れ下端の距離が短いほど大きくなることが確認された。前垂れによる塩分供給の低減効果は、波浪や干満の条件によっても異なると考えられるが、今回の条件においては、前垂れ下端高さをL.W.L.+0.5mより深く設定することで、栈橋上部工への塩分供給量を低減できることが現地実験の結果から確認された。

5. 数値シミュレーションによる波浪抑制効果

5.1 数値シミュレーションの概要

栈橋上部工への塩分供給量は、波作用による水塊および飛沫をどの程度受けるかによって異なる。したがって、前垂れの設置によって水塊および飛沫の作用範囲を変えることにより、栈橋上部工への塩分供給量を少なくできると考えられる。こうした影響を定量的に把握するためには、各部材において、供用期間中にどの程度の波作用を受けるかを明らかにする必要がある。波作用の累積の影響を明らかにするため、栈橋上部工の下面を対象として、前垂れの効果も考慮した供用期間中の波作用を計算するプログラムを作成し、水塊および飛沫の作用頻度に関する検討を行った。計算モデルの模式図を図-5.1に示す。

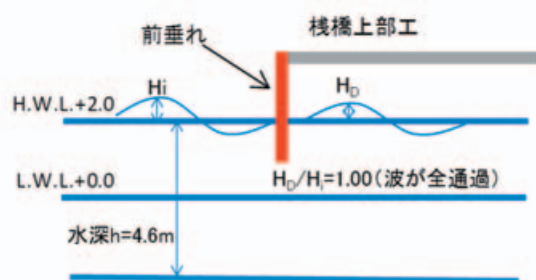


図-5.1 計算モデルの模式図

5.2 波浪条件の設定

波作用の影響を検討するためには、何らかの波浪データが必要である。たとえば、ナウファス等の波浪データなどが利用できる場合、波浪計測点と構造物位置の波浪の関係を別途求めることにより、必要な期間の波作用の入力データとして使用が可能である。

今回の検討では、現地実験を行った箇所に最も近い「東京湾・第二海堡」におけるナウファスの観測データを用いた。ナウファスデータはもともと2時間ごとに20分の観測を行っていたが、最近では20分ごとの連続観測を行っている地点もあり、第二海堡も連続観測となっている。観測された有義波高および有義波周期をもとに、構造物位置での波浪データに変換して入力データを作成した(2010年のデータを使用)。

有義波高と有義波周期で代表される20分間の波浪(以下、1波群のデータと呼ぶ)に対して、レーリー分布を仮定して1波ごとの波高を算出する。今回の計算では1波群中の波の周期はすべて有義波周期に等しいものとして、有義波高と有義波周期の組み合わせごとに1波群分の波高の頻度分布を求め、これに各組み合わせの出現頻度を乗じることによって、必要な期間全体での波高と周期の頻度分布を与えた。

表-5.1は、第二海堡における波高・周期別の出現頻度

表-5.1 第二海堡における波高・周期別出現

第二海堡 波高・周期別出現頻度統計											2010年1月～12月(連続観測)	
波高・周期別度数分布表(有義波)											観測地点: 第二海堡	
波高(cm)	周期(s)	～3	3～4	4～5	5～6	6～7	7～8	8～9	9～10	10～11	合計	
251～300											0	
201～250											0	
176～200				1	2						3	
151～175				3	7						10	
126～150			3	18	1						22	
101～125			31	80	8	1					120	
76～100			546	218	30	1	4	2			801	
51～75		25	2665	415	134	18	21	8	2		3288	
26～50		625	11127	2295	372	67	7	2			14495	
～25		27	3741	710	48	4					4530	
合計		677	18113	3740	602	91	32	12	2	0	23269	

表-5.2 構造物前面における波高・周期ランク別出現頻度

波高(cm)	0～10	10～20	20～30	30～40	40～50	50～60	60～70	70～80	80～90	90～100	100～110	110～120	120～130	130～140	140～150	150～160
周期(s)																
～3	200452	197255	44127	4330	560	86	9	1	0	0	0	0	0	0	0	0
3～4	3438794	2380028	743020	188461	57359	16796	4831	1375	379	104	29	9	3	1	0	0
4～5	530996	378603	121870	37194	15877	7050	3107	1351	581	249	107	46	20	9	4	2
5～6	57231	55726	20250	6549	2486	1036	510	285	170	102	61	35	19	10	5	3
6～7	7447	7757	2431	597	171	50	17	7	3	1	0	0	0	0	0	0
7～8	1295	2128	1350	592	196	54	14	3	1	0	0	0	0	0	0	0
8～9	397	685	464	213	74	22	6	1	0	0	0	0	0	0	0	0
9～10	52	104	78	33	9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10～11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11～12																
合計	4236664	3022287	933588	237970	76731	25096	8494	3023	1133	456	198	90	42	20	9	4
出現確率	0.49576	0.35366	0.10925	0.02785	0.00898	0.00294	0.00099	0.00035	0.00013	0.00005	0.00002	0.00001	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

波高(cm)	160～170	170～180	180～190	190～200	200～210	210～220	220～230	230～240	240～250	250～260	260～270	270～280	280～290	290～300	合計	出現確率
周期(s)																
～3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	446820	0.05229
3～4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6831189	0.79936
4～5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1097067	0.12837
5～6	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	144480	0.01691
6～7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18480	0.00216
7～8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5632	0.00066
8～9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1864	0.00022
9～10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	278	0.00003
10～11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00000
11～12																0.00000
合計	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8545809	1.00000
出現確率	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.00000	

を示したものである。2011年のデータの取得率は約88.5% (23269 / (365 × 24 × 3)) である。波浪条件は比較的穏やかであり、有義波高で1.76～2.0mの波浪が3回発生したのが年間で最大である。

ナウファスデータと現地での波高計測結果によれば、構造物位置での有義波高は平均するとナウファスデータの1/2程度であった。表-5.2は、表-5.1のデータをもとに、構造物位置の波高を第二海堡の1/2と仮定し、レーリー分布に基づいて、1年間の1波ごとの波高頻度分布を計算した結果を示したものである。表-5.1とは、縦と横(波高と周期)が逆になっている。構造物位置での波高としては、1.7～1.8mの波高が最大で、全波高中の約99.5%が波高50cm以下である。

5.3 数値シミュレーション

上記で求めた波高データを用い、栈橋下面に作用する水塊および飛沫に関して、Microsoft Excelを用いたシミュレーションプログラムを作成し検討を行った。計算条件は以下のとおりである。

(1) 構造条件等

現地実験の条件を参考に、水深はDL (L.W.L.) -2.6m、栈橋下面のスラブ天端高はDL (L.W.L.) +4.25m、梁下面高はDL (L.W.L.) +2.75mとした。また、前垂れ下端位置は、L.W.L.+0.0～+2.0mまで、0.5mピッチの5段階である。

(2) 潮位変動

天文潮はL.W.L.+0.0m、H.W.L.+2.0mとし、高潮等による潮位の変化は考慮しない。潮位の発生頻度はL.W.L.と

H.W.L.で最小、中間で最大となる三角形分布とする。

(3) 水面の到達高さ（波頂高）

波高に対する最大水位（波頂高）は、水深に対して波高が十分小さければ微小振幅波理論により波高の半分となるが、実際には波の有限振幅性により、波高の0.7倍程度まで大きくなる。プログラムでは、波頂高の波高に対する値を任意に入力できるようにしているが、今回の検討では簡便のため0.7倍で一定とした。計算の結果で波頂高がスラブまたは梁の下端高さを上回った場合に、水塊が部材に到達したものとみなす。

(4) 前垂れの効果による波高の減衰

栈橋内部の波高は、前垂れの効果により栈橋前面の波高に比べて小さくなると考えられる。今回は、カーテン防波堤の波高伝達率に関する森平らの実験結果¹⁰⁾をもとに、前垂れの深さに応じて低減させた。森平らによれば、波高伝達率は水面からカーテン下端までの深さ d と水深 h の比 d/h および水深と波長 L の比 h/L によって変化する。今回の検討条件では、水深は2.6m(L.W.L.)～4.6m(H.W.L.)、周期については3～4sの波が全体のほぼ8割を示しており、 $h/L=0.15\sim 0.34$ 程度である。森平らの実験結果¹⁰⁾によれば、この範囲であれば波高伝達率は d/h にほぼ比例していることから、今回は波高伝達率 K_t を以下のように定義する。

$$K_t = 1 - d/h \quad : 0 < d < h \quad (\text{前垂れ下端が水面より下})$$
$$K_t = 1 \quad : d < 0 \quad (\text{前垂れ下端が水面より上})$$

この場合、前垂れ下端がL.W.L.+2.0mのケースについては、常に波高伝達率は1となり、波高の減衰効果はなく前垂れがないのと同じことになる。また、森平らによれば、 d/h が同じであれば周期が長いほうが波高伝達率がやや大きくなり、 h/L が0.2程度以下の場合には波高低減効果を過大に評価することになるが、今回観測された波浪データでは周期の長い波の割合はきわめて小さく、計算結果への影響はほとんどないと考えてよい。

(5) 飛沫の作用高さ

飛沫がどこまで作用するかについては、現地調査や模型実験等により検討することが望ましいが、実際にはさまざまなパラメータを考慮する必要があり、正確に求めるのは非常に難しい。今回は、護岸における波の打ち上げに関する既往の実験結果¹¹⁾を参考に、飛沫の作用高さ（到達高さ）を単純に波頂高の2倍、2.5倍、3倍（波高の1.4倍、1.75倍、2.1倍）と仮定して、その影響を検討した。

(6) 計算結果

水塊や飛沫がスラブまたは梁に何回到達するかを計算する方法は以下のとおりである。

前面波高と潮位をランク別に分割する。波高については表-5.2に示したように300cmまでを10cm間隔、潮位についてはL.W.L.からH.W.L.までを30分割（今回は6.67cm間隔）とした。したがって、波高と潮位の組み合わせは900通り（ただし、実際には180cm以上の波高がないので540通り）である。

波高と潮位の組み合わせごとに、前垂れによる波高減衰効果を考慮した栈橋内部での波頂高および飛沫の到達高さの最大値と最小値を計算する。最大値は分割範囲内における波高、潮位の最大値どうしの組み合わせ、最小値は波高、潮位の最小値どうしの組み合わせにより求める。

上記で求めた波頂高または飛沫の到達高さの最小値がスラブまたは梁の高さよりも高ければ、該当する波高と潮位の組み合わせではすべての波で水塊または飛沫が部材に到達し、最大値がスラブまたは梁の高さよりも低ければすべての波で到達しないものとみなす。部材の高さが最大値と最小値の間にある場合には、一部の波でのみ部材に到達するものとし、到達する波の数については、高さで比例配分して与える。

表-5.3は、栈橋上部工下面に到達する水塊および飛沫が到達する回数（期待値）を、前垂れ下端の高さごとに計算したものである。計算対象とした波の数は、表-5.2に示したように約850万である。水塊自体はスラブには全く到達しておらず、前垂れがL.W.L.+0.5mより深くなると、梁にも到達していない。一方、飛沫に関しては、到達高さを波頂高の2倍とした場合、前垂れ下端がDL+2.0mの場合には600回以上も梁に到達しているが、前垂れが長くなるにしたがって到達回数が減少することが分かる。特に、前垂れ下端がL.W.L.+0.0mの場合、波高低減効果が高く、飛沫の到達回数が大幅に減少している。飛沫の到達高さを波頂高の2.5倍とした場合、梁への飛沫の到達回数は波頂高2倍のときに比べて4～8倍程度、波頂高の3倍とした場合には13～30倍程度に増加している。

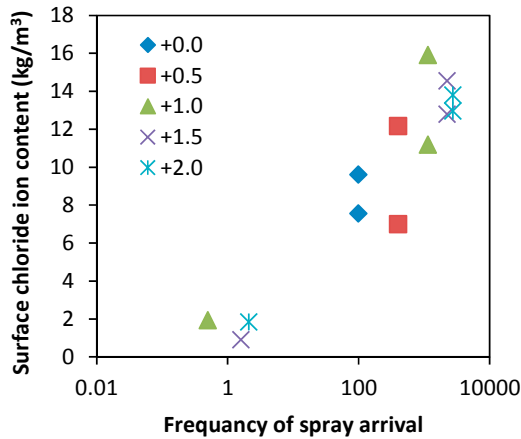
水塊や飛沫の作用による塩分供給量をより精度よく評価するためには、単に水塊や飛沫の作用回数だけでなく、継続時間や体積が重要であるが、実際はこれらを計測することやシミュレーションで再現することは非常に困難である。そこで、今回は水塊および飛沫を定量的に表す指標としての到達強度を、（水塊または飛沫が部材に作用する場合における計算上の到達高さ）－（部材の高さ）の総和で定義した。したがって、部材の高さに比べて計算上の到達高さが高い（すなわち、部材に勢いよくぶつかり、水塊であれば継続時間も長い）と、到達回数が同じでも到達強度は大きくなる。表-5.4は、到達強度に関

表-5.3 栈橋上部工下面に水塊および飛沫が到達する回数

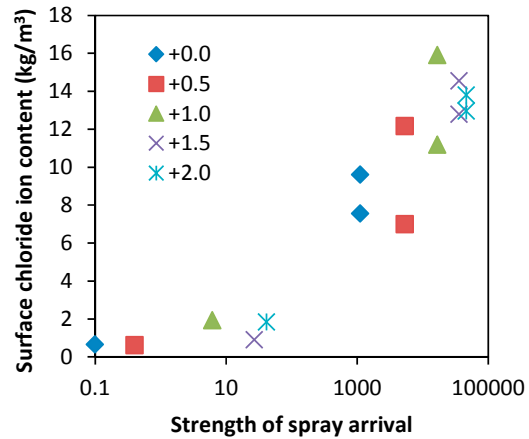
前垂れ下端 (m)	スラブ下面(DL+4.25m)への水塊の到達回数	スラブ下面への飛沫の到達回数(高さ2倍)	スラブ下面への飛沫の到達回数(高さ2.5倍)	スラブ下面への飛沫の到達回数(高さ3倍)	梁下面(DL+2.75m)への水塊の到達回数	梁下面への飛沫の到達回数(高さ2倍)	梁下面への飛沫の到達回数(高さ2.5倍)	梁下面への飛沫の到達回数(高さ3倍)
DL+2.0	0.0	0.1	2.1	16.0	2.0	634.4	2748.4	8111.2
DL+1.5	0.0	0.1	1.6	13.5	1.1	491.2	2257.1	6979.9
DL+1.0	0.0	0.0	0.5	5.9	0.2	218.2	1143.9	3888.4
DL+0.5	0.0	0.0	0.0	1.1	0.0	67.3	401.3	1515.5
DL+0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	13.8	99.7	424.7

表-5.4 栈橋上部工下面に水塊および飛沫が到達する強度

前垂れ下端 (m)	スラブ下面(DL+4.25m)への水塊の到達回数	スラブ下面への飛沫の到達強度(高さ2倍)	スラブ下面への飛沫の到達強度(高さ2.5倍)	スラブ下面への飛沫の到達強度(高さ3倍)	梁下面(DL+2.75m)への水塊の到達回数	梁下面への飛沫の到達強度(高さ2倍)	梁下面への飛沫の到達強度(高さ2.5倍)	梁下面への飛沫の到達強度(高さ3倍)
DL+2.0	0.0	1.3	41.6	404.9	16.2	9151.2	46914.7	158853.1
DL+1.5	0.0	0.6	27.1	310.5	6.7	6639.1	36332.8	128402.0
DL+1.0	0.0	0.1	6.2	110.5	1.1	2695.1	16885.4	66042.2
DL+0.5	0.0	0.0	0.4	15.4	0.1	713.6	5322.7	23255.2
DL+0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	117.1	1120.4	5682.8



(1) 飛沫到達回数との比較



(2) 飛沫到達強度との関係

*表面塩化物イオン濃度は曝露2年目の値

図-5.2 シミュレーションにより求めた飛沫到達回数・強度と表面塩化物イオン濃度の関係 (飛沫の到達高さを波頂高の2.5倍とした場合)

して表-5.3と同様に示したものである。前垂れ下端がL.W.L+0.0mの場合、前垂れ下端がL.W.L+2.0mの場合に比べて梁下端への到達強度は数十分の1以下となっており、前垂れによる飛沫低減効果がきわめて高いことが明らかである。

5.4 シミュレーション結果と現地結果の比較

シミュレーションにより求めた飛沫到達回数および飛沫到達強度と、現地実験により得られた表面塩化物イオン濃度を比較した結果を図-5.2に示す。これによると、飛沫到達回数・到達強度が増加すると、表面塩化物イオン濃度が増加する傾向が見られた。1施設の結果のみであるが、飛沫到達強度と表面塩化物イオン濃度の間には相関が見られた。このことから、前垂れが海中に深く根入れ

されていることで、栈橋内部の波高は栈橋前面に比べて小さくなり、海水飛沫が部材に到達する回数やその影響度が少なくなることで表面塩化物イオンの濃度が低減されると考えられる。

今回の計算条件では水深が2.6mとかなり浅く、前垂れを長くすることによりd/hの値が大きくなるため波高低減効果が大きい、水深が大きい場合には相対的に波高低減効果が小さくなり、水塊や飛沫の低減効果もやや小さくなる。現地実験の条件は比較的波浪が小さいため、波浪の影響よりも潮位変動の影響のほうが相対的に大きいと考えられる。日本海側のように潮位変動が小さいところや波浪条件の厳しいところでは、波浪の影響が大きくなる。なお、現地実験では卓越する周期が3~4sに集中していたため、波高伝達率の周期依存性は考慮しなかつ

たが、周期分布が広範囲になる場合、周期ごとに異なる波高伝達率を定義する必要がある。

そこで水深が深い条件 (-12.0m) における不規則波の数値シミュレーションも行った。入射波と伝達波の表面波形をシミュレートするときの基本式を式(5.3)に示す。

$$\eta(t) = \sum_{k=1}^K K_{tk} \cdot a_k \cdot \cos(2\pi \cdot f_k \cdot t - \varepsilon_k) \quad (5.3)$$

$$a_k = \sqrt{2S(f_k)\Delta f_k} \quad (5.4)$$

$$S(f_k) = 0.205H_{1/3}^2 T_{1/3}^{-4} f_k^{-5} \exp[-0.75(T_{1/3} f_k)^4] \quad (5.5)$$

ここに、 $\eta(t)$: 時刻 t における表面波形、 a_k : 成分波の振幅、 f_k : 成分波の周波数、 ε_k : 成分波のランダム位相角、 $H_{1/3}$: 有義波高 (m) を示す。

なお、入射波のシミュレーションにおける成分波の波高伝達率は、 $K_{tk} = 1$ である。成分波の振幅 a_k は、周波数スペクトル $S(f_k)$ に基づいて、式(5.4)で定めた。不規則波の周波数スペクトルは、港湾分野では一般的な式(5.5)の修正プレットシュナイダー・光易型スペクトル¹⁰⁾を用いた。

数値シミュレーションの条件は、時間間隔 $\Delta t = 0.1s$ 、データ点数 $N = 300T_{1/3}$ 、成分波の周波数範囲 $f/f_p = 0.6 \sim 6.0$ とした。成分波の周波数は、等比級数 1.01 を用いて不等間隔に与え、成分数 $K = 233$ 個とした。成分波の振幅は、式(5.4)を用い、成分波のランダム位相角は、疑似正規分布乱数を使って与えた。不規則波の数値シミュレーションは、各スペクトル形状に対し乱数を変えて 10 回行った。

不規則波の波高伝達率の一例として、水深 $h = 12.0m$ (栈橋水深 10m, 潮位 L.W.L.+2.0m), 前垂れ設置下端 L.W.L. $\pm 0.0m$ における $T_{1/3} = 3.0, 4.0, 5.0s$, $H_{1/3} = 1.0m$ の場合の成分波の波高伝達率を図-5.3に、前垂れによるパワース

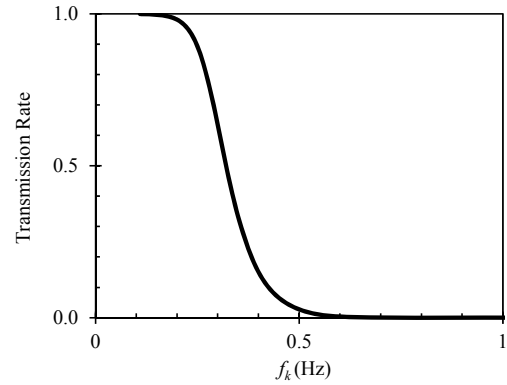


図-5.3 成分波の波高伝達率

ペクトルの変化を図-5.4に示す。 $T_{1/3} = 3.0s$ の例では、ピーク周波数 0.293Hz (ピーク周期 3.41s) の不規則波は、前垂れによってピーク周波数 0.351Hz (ピーク周期 2.85s) の反射波が形成され、ピーク周波数 0.271Hz (ピーク周期 3.69s) の伝達波が栈橋下に伝達される。また、伝達波のスペクトルピークも全体的に小さくなっていることから、伝達波高が小さくなっている。このように、前垂れによって、高周波成分波が反射され、栈橋下への伝達波高が小さくなるのが理解できる。ただし、有義波周期が 4.0s 以上になってくると、ピークスペクトルの値は、入射波と伝達波とでは、大きな違いがみられない。

一方、図-5.5に示した入射波の表面波形と前垂れによる伝達波の表面波形によると、いずれの周期においても高周波成分が除去されており、前垂れによる波浪低減効果があることが理解できる。ここで、前垂れによる波浪低減効果は、潮位変化による水深の変化による影響を受ける。表 5-4 に晴海 (東京港) における潮位の出現相対度数と各潮位における波高伝達率、潮位の出現相対度数から算出した平均波高伝達率を示す。前垂れ下端 L.W.L. $\pm 0.0m$, 栈橋水深-12m の条件下では、0.80~0.97 という

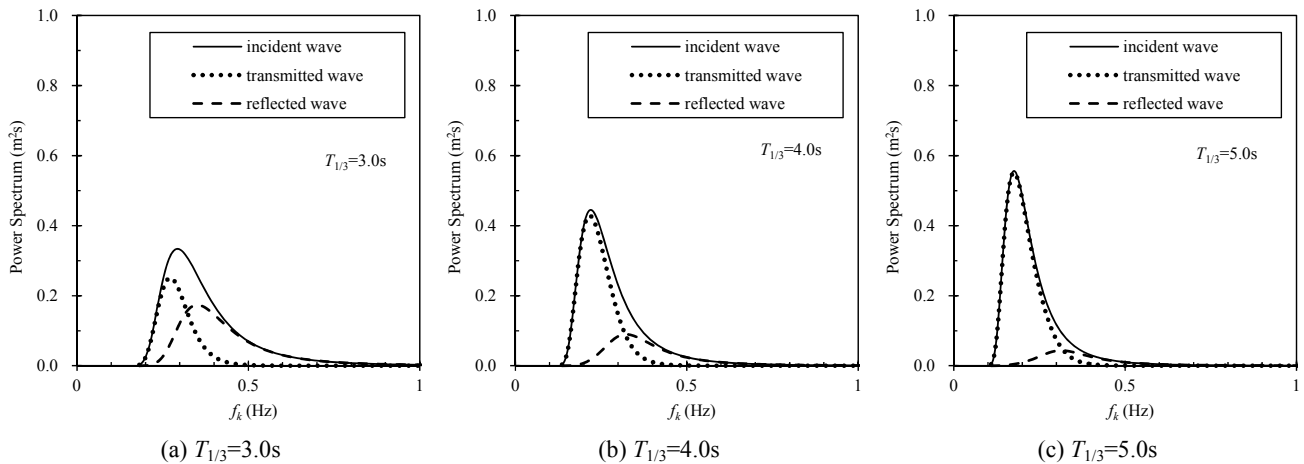
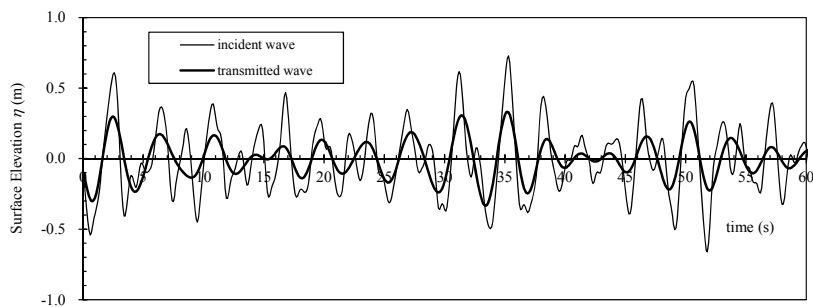


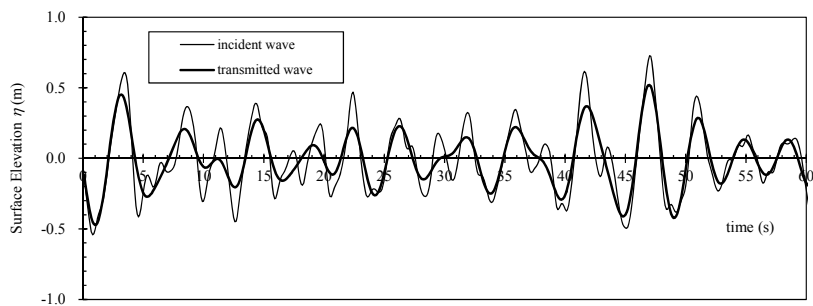
図-5.4 前垂れによるパワースペクトルの変化

表-5.4 潮位の出現相対度数（晴海）と各周期における波高伝達率

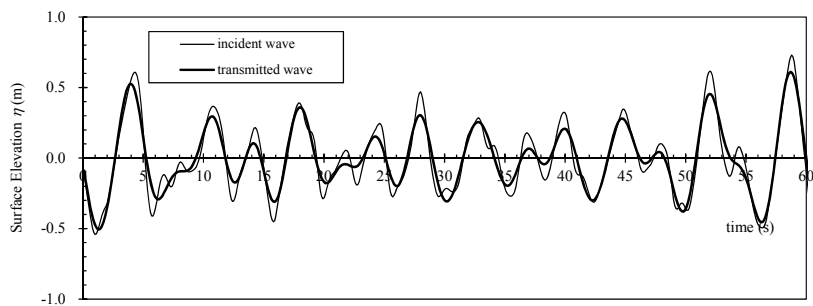
潮位 (L.W.L. m)	潮位出現 相対度数	$T_{1/3}=3s$	$T_{1/3}=4s$	$T_{1/3}=5s$
		伝達率	伝達率	伝達率
2.00 ~ 2.25	0.010	0.550	0.797	0.907
1.75 ~ 2.00	0.105	0.620	0.837	0.926
1.50 ~ 1.75	0.180	0.690	0.877	0.946
1.25 ~ 1.50	0.206	0.765	0.910	0.960
1.00 ~ 1.25	0.185	0.840	0.942	0.974
0.75 ~ 1.00	0.136	0.895	0.963	0.983
0.50 ~ 0.75	0.097	0.950	0.985	0.993
0.25 ~ 0.50	0.055	1.000	1.000	0.999
0.00 ~ 0.25	0.026	1.000	1.000	1.000
伝達率の平均値		0.80	0.92	0.97



(a) $T_{1/3}=3.0s$



(b) $T_{1/3}=4.0s$



(b) $T_{1/3}=5.0s$

図-5.5 入射波の表面波形と前垂れによる伝達波の表面波形

波高伝達率が得られた。このことから、不規則波についても碎波しやすい周期の短い波に対しては、波高低減効果が期待できると考えられる。

今回行ったシミュレーションにより、前垂れによる低減効果が高くなる条件や、低減効果が発揮されるメカニ

ズムなどについて検証を行うことができた。このシミュレーション手法をさらに進めることにより、部材に供給される飛沫量の推測が可能となり、さらに供給される飛沫量と表面塩化物イオン濃度間に相関が確認できれば、表面塩化物イオン濃度を評価する手法の高度化につながることを期待される。

6. 前垂れを設置した栈橋上部工における表面塩化物イオン濃度の評価手法

6.1 前垂れによる効果の整理

これまでの検討において、前垂れ下端高さがある高さ（今回の現地実験ではL.W.L.+0.5m）より深く設定することで、栈橋上部工への塩分供給量を低減できることが確認された。本章では、前垂れの効果を加味した表面塩化物イオン濃度の評価手法の検討を行った。

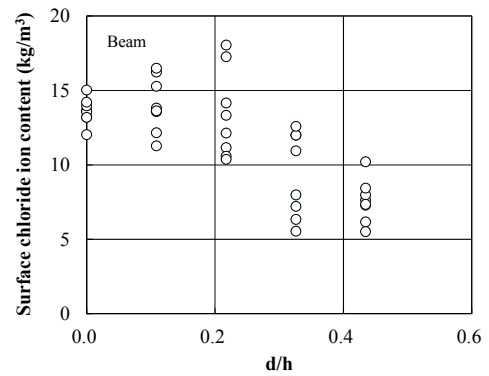
前垂れによる栈橋上部工内の波高の減衰は、5. で述べたように、海水面から前垂れ下端までの深さ（d）と水深（h）の比d/hの影響を受ける。この考え方を基にして実施した数値シミュレーションの結果、飛沫到達回数と表面塩化物イオン濃度の実測値に相関がみられた。したがって、前垂れの効果を表す指標として、d/hを用いることとした。図-6.1に現地実験で得られた表面塩化物イオン濃度とd/hの関係を示す（海水面の位置をH.W.L.とした場合）。これによると、d/hが大きくなるに従って表面塩化物イオン濃度の値が小さくなる傾向にある。つまり、水深h（H.W.L.時：-4.6m）が一定であるため、海水面（ここではH.W.L.）から前垂れ下端までの深さ（d）が大きい程、表面塩化物イオン濃度が小さくなる。

次に図-6.1の結果に基づき、表面塩化物イオン濃度の低減係数を求めた。ここで、表面塩化物イオン濃度の低減係数とは、前垂れが存在する場合の表面塩化物イオン濃度を前垂れがない場合の表面塩化物イオン濃度で除した値である。図-6.2に表面塩化物イオン濃度の低減係数とd/hの関係を示す。また、図-6.2に示すように、前垂れ設置による表面塩化物イオン濃度の低減係数は、式（6.1）により示される。なお、d/hが0.2よりも小さい場合は、前垂れによる表面塩化物イオン濃度の低減効果がみられなかったため、低減係数は1.0（低減効果なし）とした。

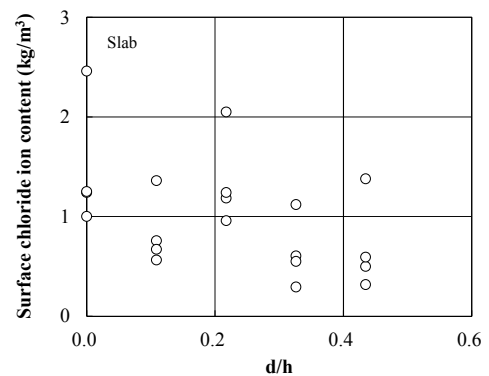
$$y = -1.74 \cdot d/h + 1.348 \quad (0.2 \leq d/h \leq 0.44) \quad (6.1)$$

ここで、y：前垂れ設置による表面塩化物イオン濃度の低減係数、d：海水面から前垂れ下端までの深さ（m）、h：水深（m）を示す。ただし、 $0.2 > d/h$ の場合は $y = 1.00$ とする。

なお、式（6.1）は今回実験を行った条件（ $d/h = 0 \sim 0.43$ 、 $h/L = 0.15 \sim 0.34$ 程度の範囲）に限るものである。森平らの報告¹⁰⁾によると、d/h（海水面から前垂れ下端までの深さ/水深）が大きい程、波高伝達率が小さくなるが、その効果はh/L（水深/波長）によって異なることが示されている。これによると、水深が同じ条件であれば波の周



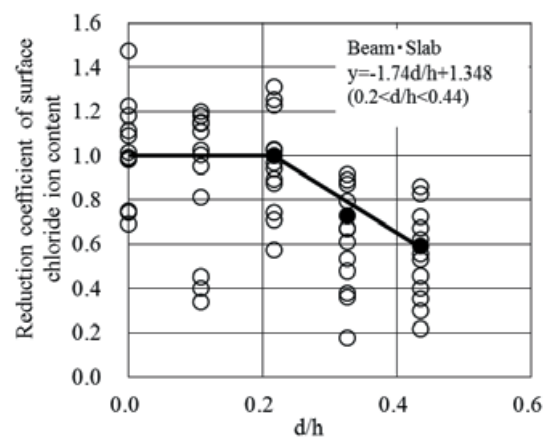
(1) 梁の結果



(2) 床版の結果

* 現地実験のデータは曝露2年目と3年目の結果

図-6.1 現地実験で得られた表面塩化物イオン濃度とd/hの関係（海水面をH.W.L.とした場合）



●：平均値

図-6.2 表面塩化物イオン濃度の低減係数とd/hの関係（海水面をH.W.L.とした場合）

期が短いほど波高伝達率が小さくなり、前垂れの効果がより期待できると考えられる。また、波の周期が同じでも水深が浅くなると前垂れの効果は小さくなると考えられる。

6.2 表面塩化物イオン濃度の評価手法

ここでは、現在の「港湾の施設の技術上の基準・同解説」における表面塩化物イオン濃度の評価式（式（2.1））に前述の塩化物イオン濃度の低減係数 y を乗じることで、前垂れの効果を加味することとした。式（6.2）に前垂れの効果を加味した表面塩化物イオン濃度 C_0 の評価式を示す。

$$C_0 = y(-6.0X + 15.1) \quad (6.2)$$

ここに、 X ：H.W.L.からコンクリート下面までの鉛直距離(m) ($0 \leq X \leq 2.0$ m 程度)、 y ：前垂れ設置による表面塩化物イオン濃度の低減係数（式(6.1)）、である。

図-6.3に提案式（6.2）により求めた計算値と現地実験で得られた表面塩化物イオン濃度の実測値の関係を示す。これによると、計算値の精度を高める必要はあるが、提案式で求めた計算値と現地実験で得られた表面塩化物イオン濃度の値は、概ね一致している。このように、本研究で提案した手法を用いることで前垂れの効果を加味した表面塩化物イオン濃度を評価することが可能になると考えられる。

ただし、6.1でも述べたように、前垂れによる効果は、水深、波の周期・波長によって異なると考えられる。よって、今回提案した手法の精度を高めるためには、今回の現地実験とは異なる条件での検討も必要である。

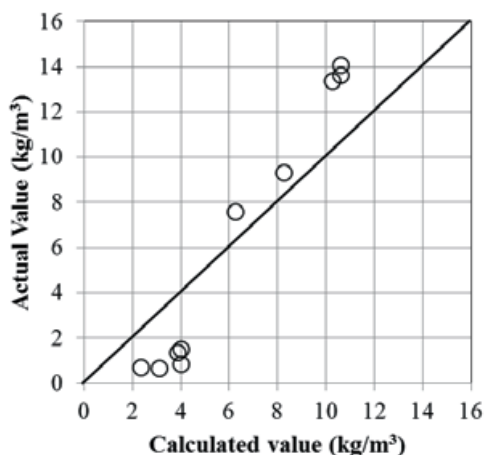


図-6.2 式（6.2）により求めた計算値と現地実験で得られた表面塩化物イオン濃度の実測値の関係

7. 前垂れの適用性の検討

7.1 概要

前垂れを設置する方法として、1) 既設構造物の場合、2) 新設構造物の場合、の2通りが考えられる。ここでは、それぞれのケースについて、前垂れの適用性の検討を行う。

7.2 既設構造物の場合

(1) 適用検討の概要

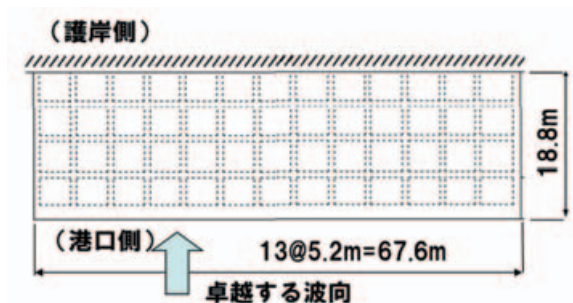
ここでは、栈橋上部工の予防保全対策として、図-7.1に示す栈橋上部工の前面に前垂れを後付けするケースを想定し、塩害に対する耐久性照査とLCC（ライフサイクルコスト）の比較を行った。

なお、現地実験では前垂れの固定は、プレキャスト板にブラケットを取付け、ブラケットを栈橋上部工の下面にアンカーで固定する方法で行ったが、ここでは最も簡易な方法として、栈橋上部工の梁側面に前垂れをあと施工アンカーで直接固定する施工方法を想定した。

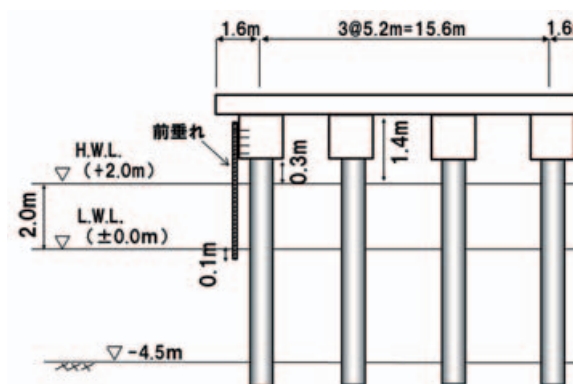
(2) 設計条件

主な設計条件を下記に示す。

- ・波高（有義波高）： $H_{1/3} = 2.0$ m



(1) 平面図



(2) 断面図

図-7.1 検討対象とした栈橋および前垂れの設置方法

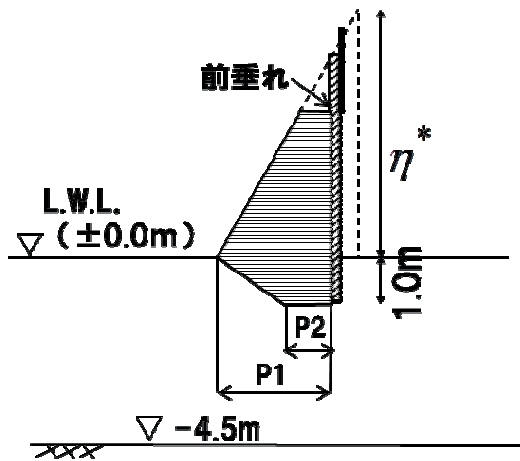
- ・周期： $T_{1/3}=3s$
- ・水深： $-4.5m$
- ・潮位： $2.0m$
- ・前垂れ下端高さ： $L.W.L.-0.1m$

一般に鉛直壁に作用する波力は、合田式で計算されるため、前垂れに作用する波力についても鉛直壁と同様に考える。なお、潮位によって前垂れに作用する波力は変化するが、前垂れに作用する曲げモーメントが最大となるL.W.L.時の波力を外力として考える。図-7.2に前垂れに作用する波力の概念図を示す¹²⁾。

(3) 塩害に対する耐久性照査の例

栈橋上部工の予防保全対策として、前垂れを後付けする場面を想定し、塩害に対する耐久性照査を行った例を示す。なお、設置時期については、建設後5年を設定した。これは、5年程度経過した時期に栈橋上部工に対して詳細点検診断が実施され、将来の劣化予測を行った結果、何らかの予防保全対策が必要となった場合を想定している。

ここで、海水面からの高さが低い位置にある部材（例えば栈橋上部工のはり）は、塩害が生じやすく、建設時から何らかの事前対策（エポキシ樹脂塗装鉄筋の使用等）が求められることが多い。そのため、今回の検討では栈橋上部工の床版のみを対象として、前垂れを設置した場合の耐久性照査を行った。また、表面塩化物イオン濃度は、6章の提案式(6.2)で得られる値を用いた。図-7.3に塩害に対する耐久性照査を行った結果を示す。なお、照査の手法は「港湾の技術上の基準・同解説¹³⁾」に示された手法を用いた。主な計算条件を下記に示す。



- η^* ：静水面上で波圧強度が0となる高さ
- P_1 ：静水面における波圧強度
- P_2 ：前垂れ下端位置における波圧強度

図-7.2 前垂れに作用する波力の概念図

- ・セメント種類：高炉セメントB種
- ・水セメント比W/C：0.53
- ・かぶり：7cm

この結果によると、対策なしの場合は、約35年後に鉄筋位置の塩化物イオン濃度が腐食発生限界塩化物イオン濃度($C_{lim}=2.0kg/m^3$)に到達しており、この時点で鉄筋腐食が発生する。一方、建設5年後に前垂れを設置した場合、鉄筋位置の塩化物イオン濃度は供用50年頃によりやく C_{lim} に到達しており、設計供用期間終了間際まで腐食が生じないこととなる。また、この前垂れによる結果は図-7.3に示した、供用20年後に表面被覆を行う場合と同等の効果であることが分かる。このことから、既設構造物に前垂れを後設置する方法は、予防保全対策としての適用が期待できる。

(4) LCC (ライフサイクルコスト) の比較

図-7.4に建設5年後に前垂れを後設置するケースと供用20年後に床版全てを表面被覆で補修するケースのコスト比率を示す。ここで、LCC算定時において割引率は考

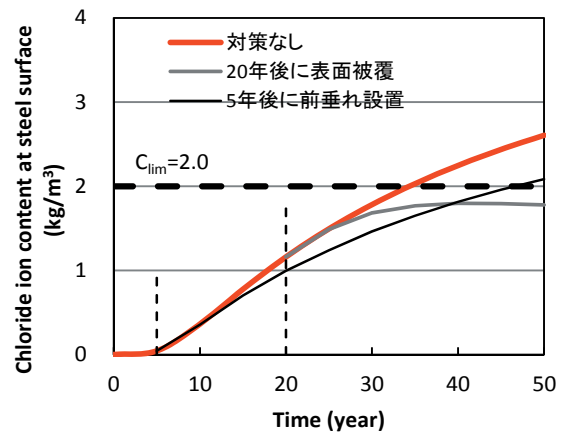


図-7.3 塩害に対する耐久性照査の例

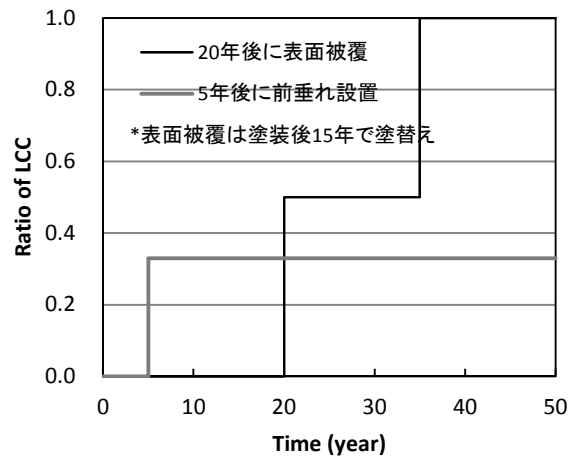


図-7.4 LCC の比較

慮していない。また、表面被覆の塗装費用と耐用年数は文献¹⁴⁾を参考とし、塗装15年後に再塗装するものとした。なお、補修コストの比率は、表面被覆で補修した時の供用50年時の総補修コストを1.0とした場合の比率を示す。図-7.4に示すように、図-7.1の床版全面積に表面被覆を行うケースに比べ、前垂れを設置した方がコストを抑えることが可能となる。

このように、将来的に栈橋上部工において大規模な補修が必要となる（補修対象面積が大きくなる）と予想される場合において、前垂れの設置が予防保全対策として有効であることが示された。

7.3 新設構造物の場合

新設栈橋上部工では、クレーン輪荷重等に抵抗するために着船側に背の高い梁が設計されたり、大型船舶着船用の防舷材取付けのための前垂れが着船側の部材に配置されたりすることがある。これらの部材等の下端位置が海水面付近まで十分に低い場合、設計段階における塩害に対する耐久性照査の際に、本稿で示したような前垂れとしての機能（塩分供給の抑制効果）をこれらの部材に期待する設計も可能である。この場合、前垂れ機能付加に要するコストは既に初期建設費の中に含まれるため、コストの増加を考慮する必要はない。逆に、前垂れによる塩分供給の抑制効果を積極的に期待することにより、過度に水セメント比を小さくしたり、かぶりを大きくする配慮が不要になること、その他対策の併用を省略できることにより、初期建設費を安価にできる可能性も考えられる。また、構造上大きな変更がない範囲であれば、塩分供給の抑制効果を積極的に期待して、上記部材の下端位置をさらに低く設計しておくことも長期の維持管理の省力化においても有効と考えられる。

なお、図-7.1のように、建設時に新設した栈橋上部工部材に前垂れを後付けとして別途設置することも考えられるが、一般に事前対策として採られるエポキシ樹脂塗装鉄筋等の耐腐食性鋼材を使用した場合とのコスト試算比較の結果、後者のエポキシ樹脂塗装鉄筋の場合よりも高価となった。新設時においては、前垂れを別途設置することは適用の可能性が低いと思われる。

7.4 適用における今後の課題

将来的に栈橋上部工において大規模な補修が必要となる（補修対象面積が大きくなる）と予想される場合において、既設構造物への前垂れの設置が予防保全対策として有効であることが示された。しかし、前垂れ部には波力や漂流物の衝突力などが作用するため、損傷しない状

態で長期間供用可能とするためには、設計および施工の両面において配慮が必要となる。実構造物に適用する際においては、前垂れ部材の交換が容易な構造（軽量かつ粘り強い材料の使用、簡易な取付け方法等）の工夫が必要と考えられる。

また、前垂れが存在する場合、栈橋上部工下面における点検・調査において、外部からの進入が困難となる、暗所となり目視確認が行いにくくなる、足場資材等の搬入路が制限される等の課題も考えられるので、維持管理の容易さへの配慮も今後検討する必要があると考えられる。なお、栈橋上部工下面の点検方法については、そもそも点検の実施が困難であり、点検の省力化のため、ROVなどの機器の活用や、モニタリングセンサの設置により、極力人が立ち入らない方法が検討されている。このような新技術の活用により、前垂れが存在する場合においても、点検の実施は対応可能であると考えられる。

8. おわりに

本研究では、前垂れの設置による栈橋上部工への塩分供給量の低減効果を調べるために、現地実験および数値シミュレーションを行った。また、前垂れの効果を加味した表面塩化物イオン濃度の評価手法を提案し、前垂れの適用検討例を示した。本研究により得られた成果を以下に示す。

- (1) 前垂れによる塩分供給量の低減効果は、海水面から前垂れ下端までの距離に左右され、海水面（ここではH.W.L.）からの距離（海中への根入れ長さ）が長くなるほど、大きくなると考えられた。本研究の範囲では、前垂れ下端高さがある高さ（今回の実験ではL.W.L.+0.5m）より深く設定することで、栈橋上部工への塩分供給量を低減できることが確認された。
- (2) (1)の結果は、前垂れによって短い周期の波を部分反射されることや栈橋内部の波高が小さくなることにより、海水飛沫が部材に到達する回数と飛沫の影響度が少なくなるためと考えられた。
- (3) 現地実験の結果を基に、前垂れの効果を加味した表面塩化物イオン濃度の評価手法を提案した。

$$C_0 = y(-6.0X + 15.1) \quad (8.1)$$

$$y = -1.74 \cdot d/h + 1.348 \quad (0.2 \leq d/h \leq 0.44) \quad (8.2)$$

$$y = 1.0 \quad (d/h < 0.2) \quad (8.3)$$

ここで、 X : H.W.L.からコンクリート下面までの鉛直距離(m) ($0 \leq X \leq 2.0$ m程度), y : 前垂れ設置による表面塩化物イオン濃度の低減係数, d : 海水面から前垂れ下端までの深さ (m), h : 水深 (m) を示す。

なお、本研究において、前垂れによる低減効果については、水深や波浪条件によって変わること、前垂れ背後の奥行に対する効果について十分に検討できていないことなど、課題は残されている。また、前垂れを実構造物に適用する際においても、設置方法、維持管理方法についての課題が残されている。上記の点に関して、今後の検討が必要である。

謝辞

本研究は、東亜建設工業（株）との共同研究（2011～2013年の3か年）として実施したものである。ご尽力いただいた関係各位に御礼申し上げます。

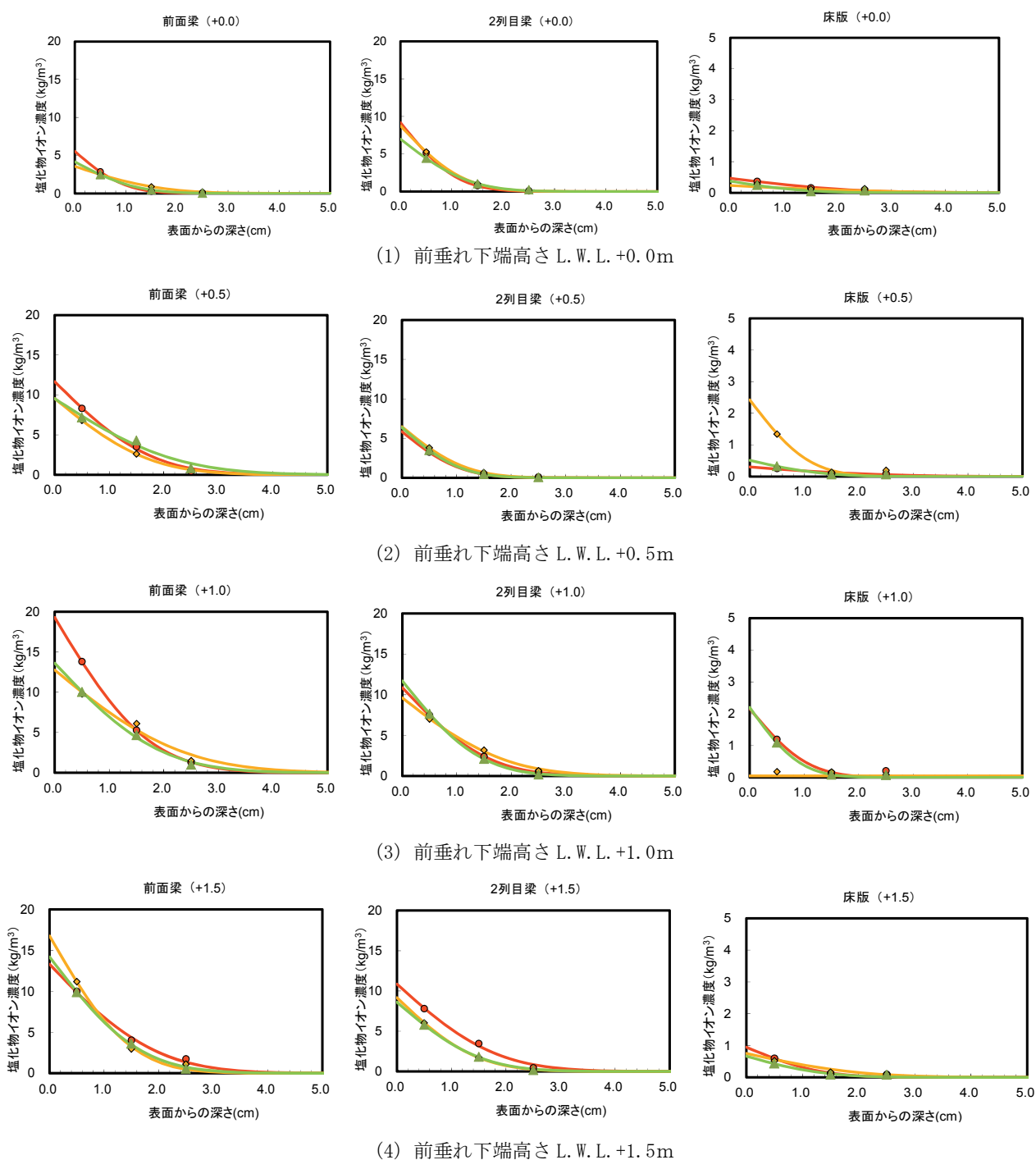
参考文献

- 1) 大即信明, 原茂雅光, 浜田秀則: 栈橋コンクリート上部工劣化実態概略調査報告, 港湾技研資料, No.617, 1988.6
- 2) 大即信明, 原茂雅光, 浜田秀則: 栈橋コンクリート上部工劣化実態詳細調査報告, 港湾技研資料, No.627, 1988.9
- 3) 網野貴彦, 大即信明, 斎藤 豪, 羽瀧貴士: 構造形式や波の作用の影響を考慮した栈橋上部工部材の表面塩化物イオン濃度の推定方法に関する提案, コンクリート工学論文集, Vol.21, No.1, pp.1-11, 2010.
- 4) 山路徹, 中野松二, 濱田秀則: 港湾コンクリート構造物における塩害環境の定量的評価手法に関する検討, 港湾空港技術研究所報告, Vol.44 No.3, pp.39-75, 2005.
- 5) 国枝稔, Kamal,A, 中村光, Bruhwiler,E, : 超高強度ひずみ硬化型セメント系材料の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.315-320, 2007.
- 6) 守分敦郎, 羽瀧貴士, 村松道雄, 北澤真: 栈橋上部工の耐久性照査に用いる表面塩化物イオン量について, 第 44 回日本学術会議材料研究連合講演会講演論文集, pp. 39-40, 2009
- 7) 山路徹, 横田弘, 中野松二, 濱田秀則: 実構造物調査および長期暴露試験結果に基づいた港湾 RC 構造物における鉄筋腐食照査手法に関する検討, 土木学会論文集 E, Vol.64, No.2, pp.335-347, 2008
- 8) 竹田宣典, 十河茂幸, 迫田恵三, 出光隆: 種々の海洋環境条件におけるコンクリートの塩分浸透と鉄筋腐食に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.599/V-40, pp.91-104, 1998.8
- 9) 合田良実: 碎波指標の整理について, 土木学会論文集第 180 号, pp.39-49, 1975
- 10) 森平倫生・柿崎秀作・合田良実: カーテン防波堤とその特性について, 港湾技術研究所報告, 第3巻, 第1号, 1964
- 11) 木村克俊, 藤池貴史, 上久保勝美, 安倍隆二, 石本敬志: 道路護岸における波の打上げ特性と通行障害に関する検討, 開発土木研究所月報, No.541, pp. 60-63, 1998.6.
- 12) 社団法人 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (上), pp.188-192. 2007.
- 13) 社団法人 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (下), pp.486-489. 2007.
- 14) 古玉悟, 田邊俊郎, 横田弘, 濱田秀則, 岩波光保, 日比智也: 栈橋補修マネジメントシステムの開発, 港湾技研資料, No.1001, 2001.6.

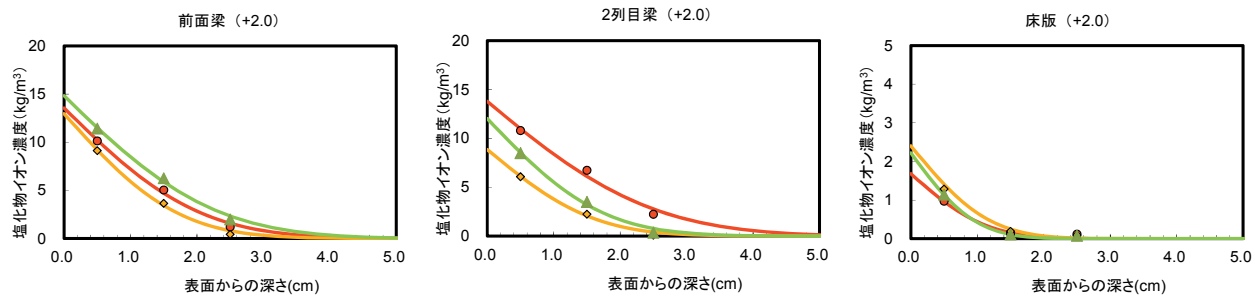
付録 現地曝露試験により得られた塩化物イオン濃度の分布

現地曝露試験により得られた塩化物イオン濃度の分布を以下に示す。なお、曝露期間ごとに示した。

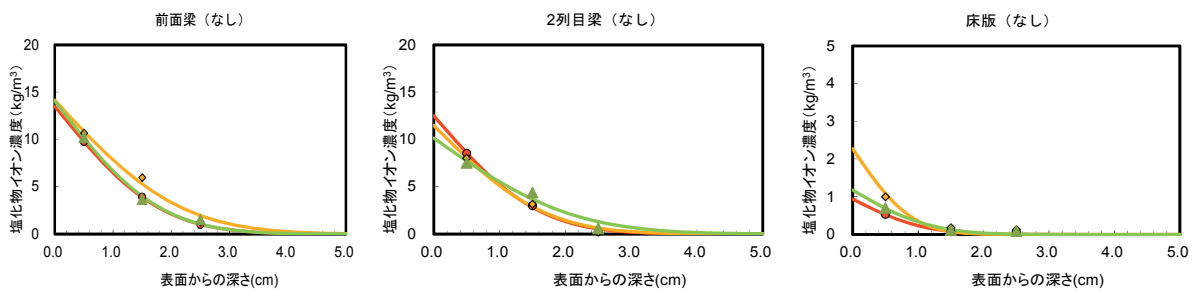
塩化物イオン濃度の分布（曝露期間1年目の結果）



塩化物イオン濃度分布（曝露期間1年目の結果）

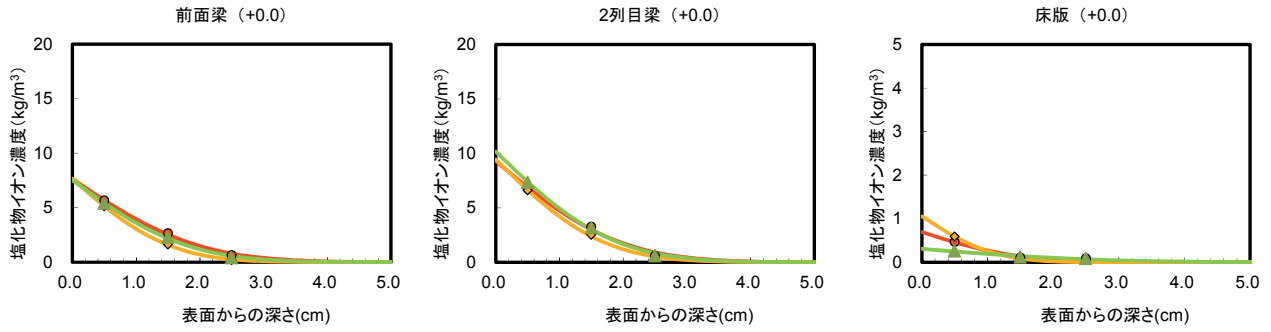


(5) 前垂れ下端高さ L.W.L. +2.0m

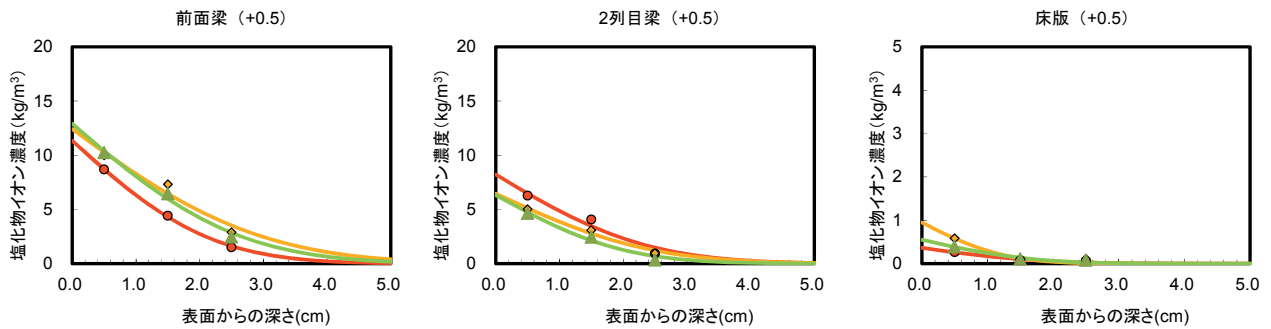


(6) 前垂れなし

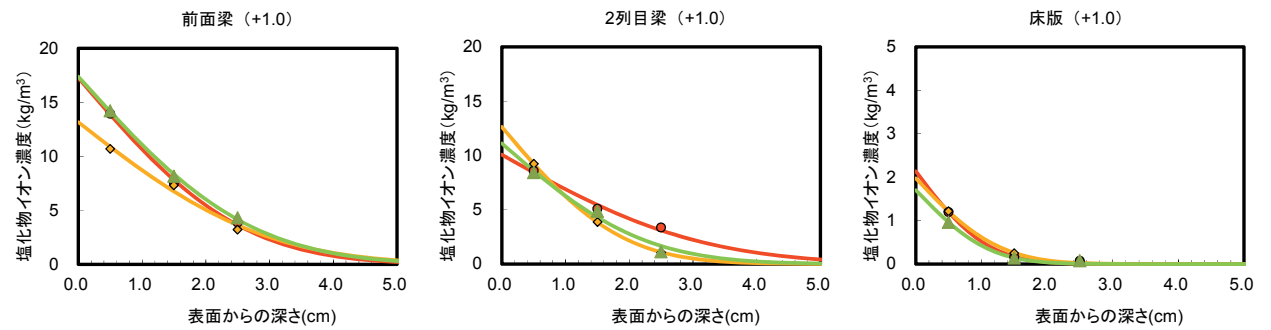
塩化物イオン濃度の分布（曝露期間2年目の結果）



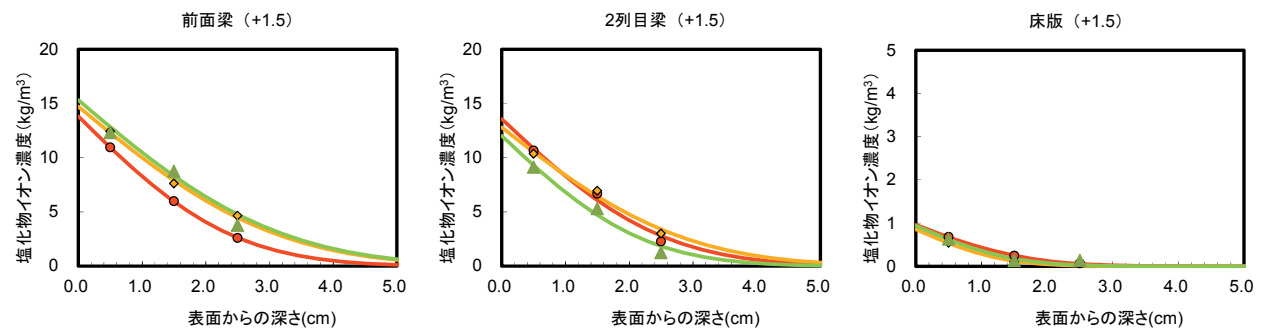
(1) 前垂れ下端高さ L.W.L. +0.0m



(2) 前垂れ下端高さ L.W.L. +0.5m

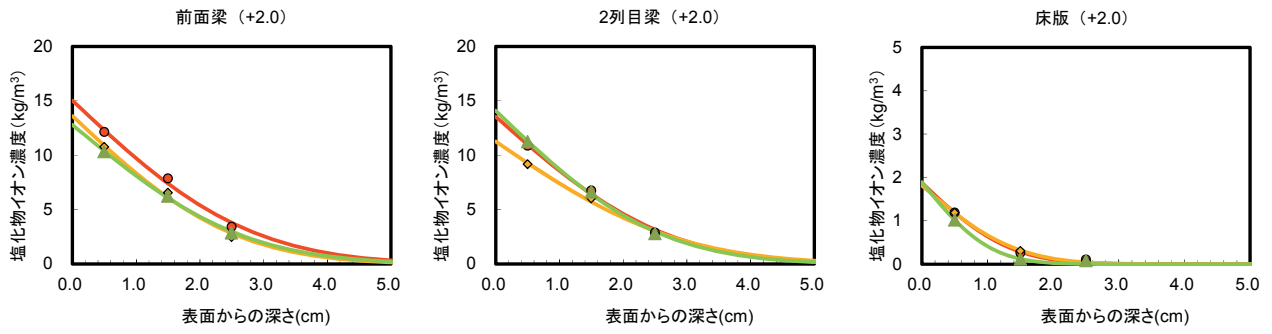


(3) 前垂れ下端高さ L.W.L. +1.0m

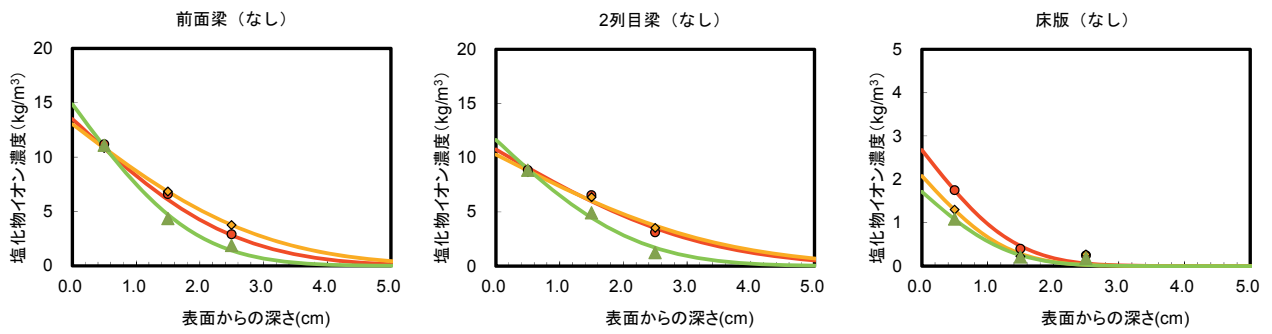


(4) 前垂れ下端高さ L.W.L. +1.5m

塩化物イオン濃度分布（曝露期間2年目の結果）

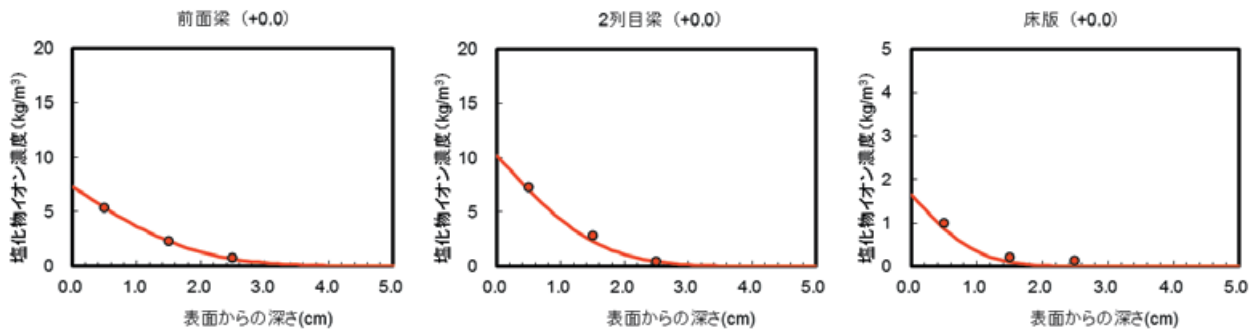


(5) 前垂れ下端高さ L. W. L. +2.0m

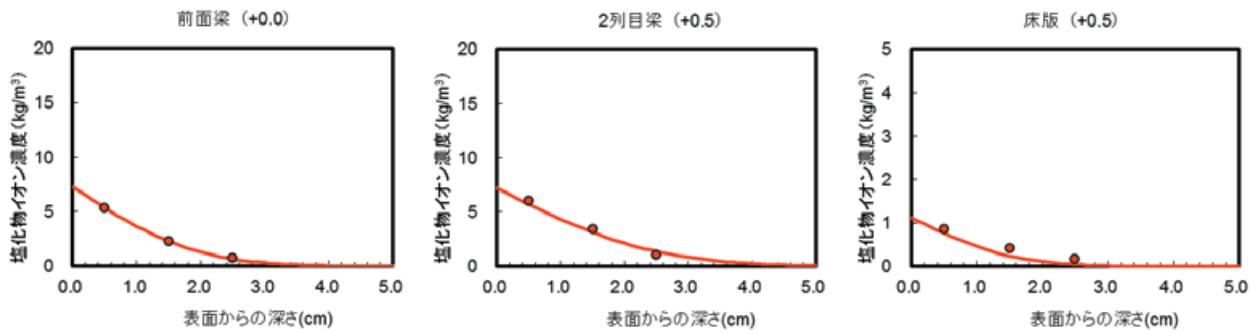


(6) 前垂れなし

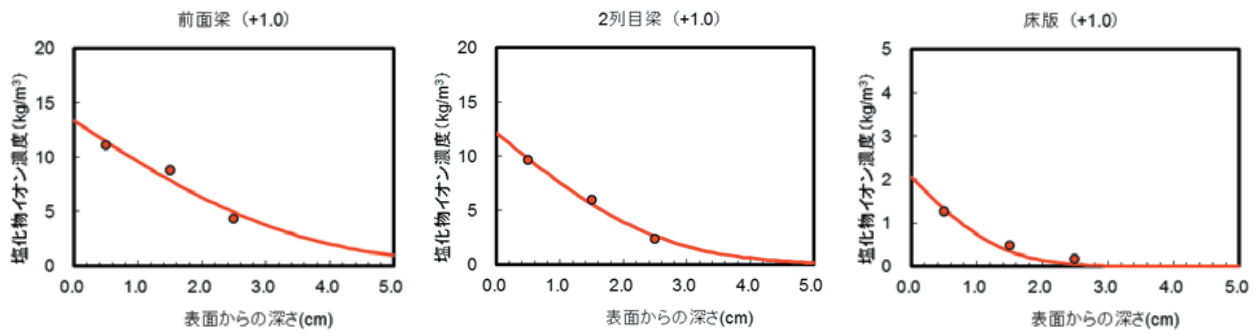
塩化物イオン濃度の分布（曝露期間3年目の結果）



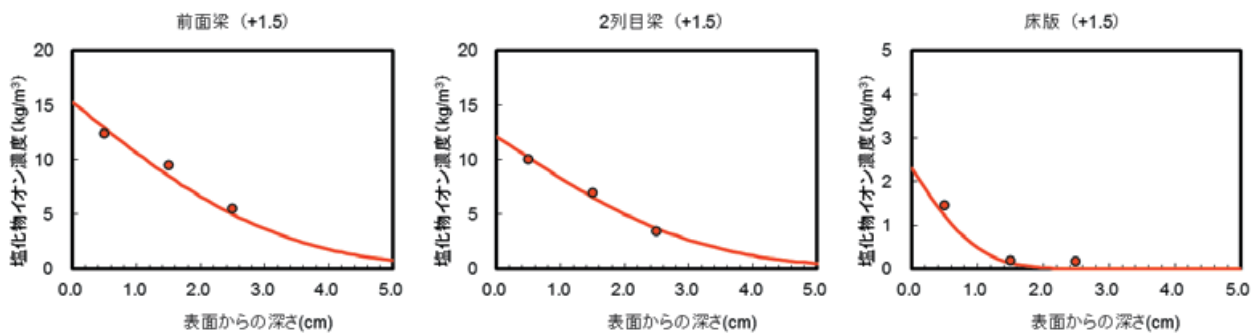
(1) 前垂れ下端高さ L.W.L. +0.0m



(2) 前垂れ下端高さ L.W.L. +0.5m

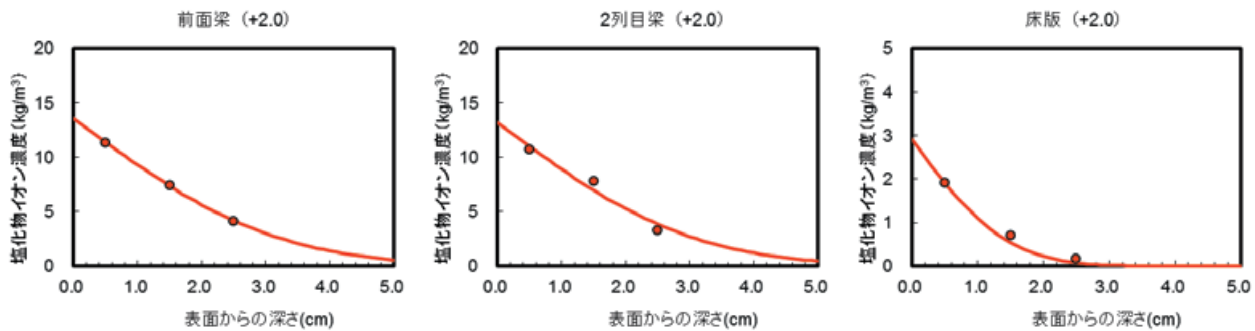


(3) 前垂れ下端高さ L.W.L. +1.0m

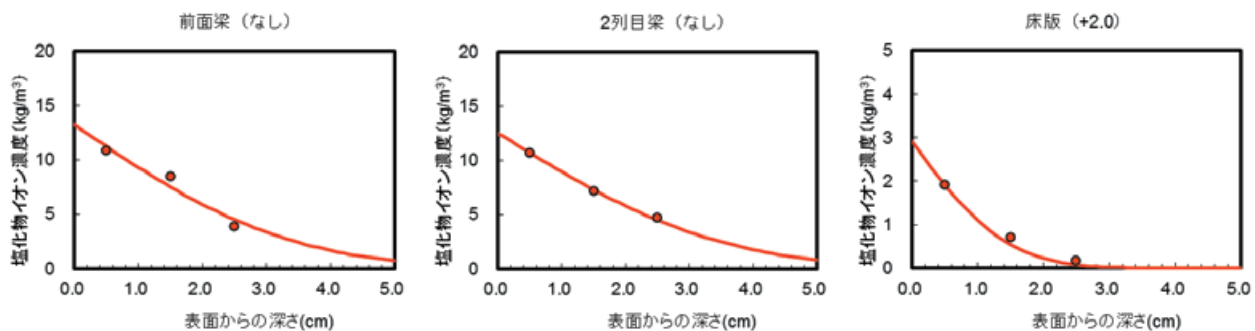


(4) 前垂れ下端高さ L.W.L. +1.5m

塩化物イオン濃度分布（曝露期間3年目の結果）



(5) 前垂れ下端高さ L.W.L. +2.0m



(6) 前垂れなし

港湾空港技術研究所資料 No.1306

2015.6

編集兼発行人 国立研究開発法人 港湾空港技術研究所

発行所 国立研究開発法人 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 © (2015) by PARI

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

この資料は、港湾空港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、複写は港湾空港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。



古紙配合率70%再生紙を使用しています