

論文 波浪制御を目的とした前垂れによる栈橋上部工への表面塩化物イオン濃度の低減効果

花岡 大伸^{*1}・山路 徹^{*2}・下迫 健一郎^{*3}・網野 貴彦^{*4}

要旨：本研究では、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、前垂れ設置高さの違いによる栈橋下面でのコンクリート部材中への塩分供給量の低減効果を定量的に把握した。その結果、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の距離が短いほど大きくなり、本研究の範囲では、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確認された。また、前垂れの影響を考慮した表面塩化物イオン濃度の評価手法について考察した。

キーワード：栈橋上部工、前垂れ、表面塩化物イオン濃度、海水面からの距離

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⁾。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。また既往の研究³⁾では、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ることで、コンクリート部材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、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、前垂れ設置高さの違いによる栈橋下面でのコンクリート部材中への塩分供給量の低減効果を定量的に把握した。また、前垂れの影響を考慮した表面塩化物イオン濃度の評価手法について考察した。

2. 実験概要

2.1 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)⁴⁾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することで前垂れの設置を行った。図-1 に前垂れの設置状況を示す。

前垂れは、横須賀市に位置する栈橋上部工の前面に設置した。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-2 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。

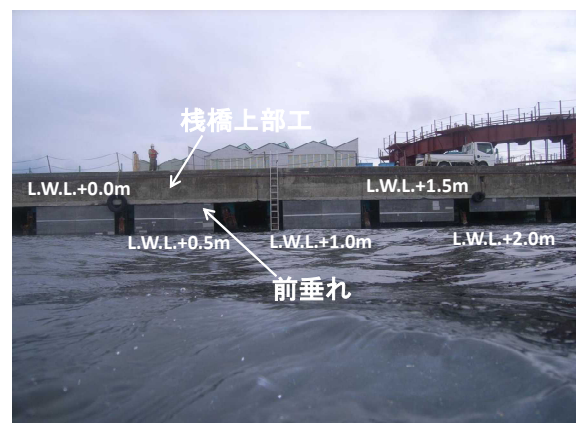


図-1 前垂れの設置状況

*1 東亜建設工業（株） 技術研究開発センター 新材料・リニューアル技術グループ 博（工）（正会員）

*2（独）港湾空港技術研究所 構造研究領域 材料研究チーム 領域長 博（工）（正会員）

*3（独）港湾空港技術研究所 海洋研究領域 耐波研究チーム 領域長 博（工）（非会員）

*4 東亜建設工業（株） エンジニアリング事業部 シビルリニューアル室 博（工）（正会員）

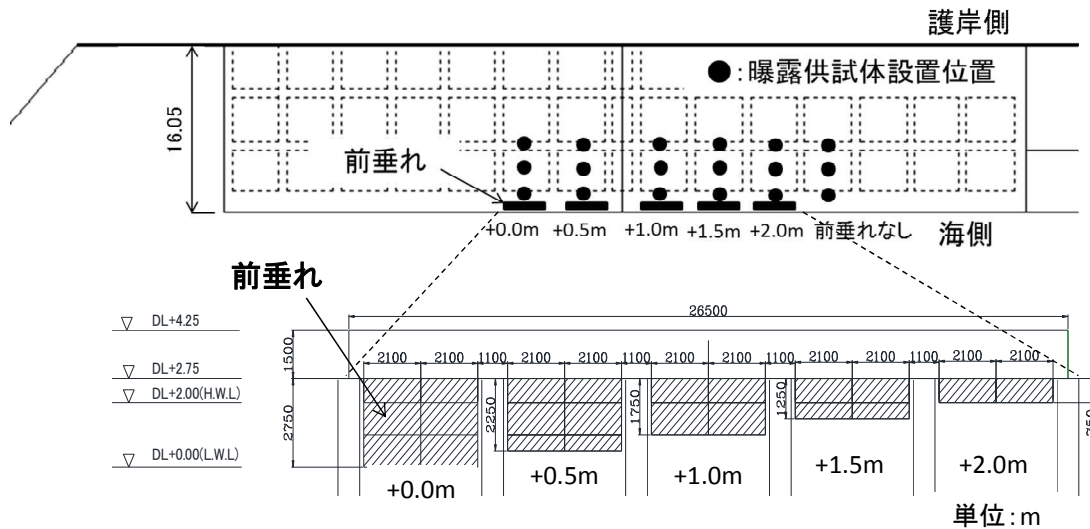


図-2 前垂れおよび暴露供試体の設置位置図

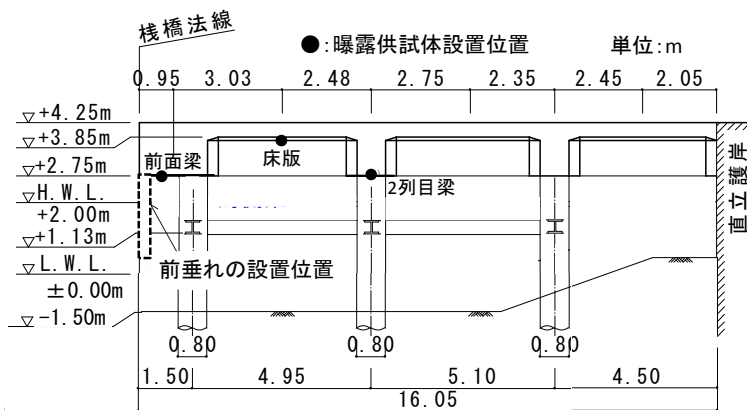


図-3 前垂れおよび暴露供試体の設置位置図

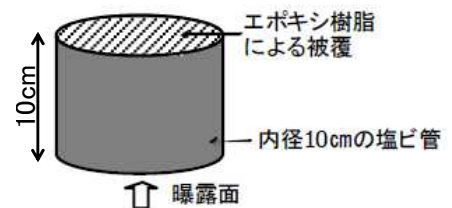


図-4 暴露供試体

表-1 暴露供試体の配合

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 種を仕様

2.2 暴露試験体の概要

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栈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) を暴露し、暴露 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把握した。また暴露供試体は図-2および図-3に示す 1 箇所に対し、9 個設置した。

実験に用いた暴露供試体を図-4 に、配合を表-1 に示す。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図-5 に示す。



図-5 供試体の曝露状況

2.3 塩化物イオンの測定方法

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。また、各深さの全塩化物イオン濃度を式（1）により近似させ、塩化物イオンの見かけの拡散係数と、表面塩化物イオン濃度を推定した。

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

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する。

3. 前垂れが塩化物イオンの浸透状況に及ぼす影響

3.1 塩化物イオンの浸透分布

図-6 に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(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。また、表-2 には表面塩化物イオン濃度と拡散係数の平均値（3 体/箇所の平均値）を示す。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^{5),6)}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

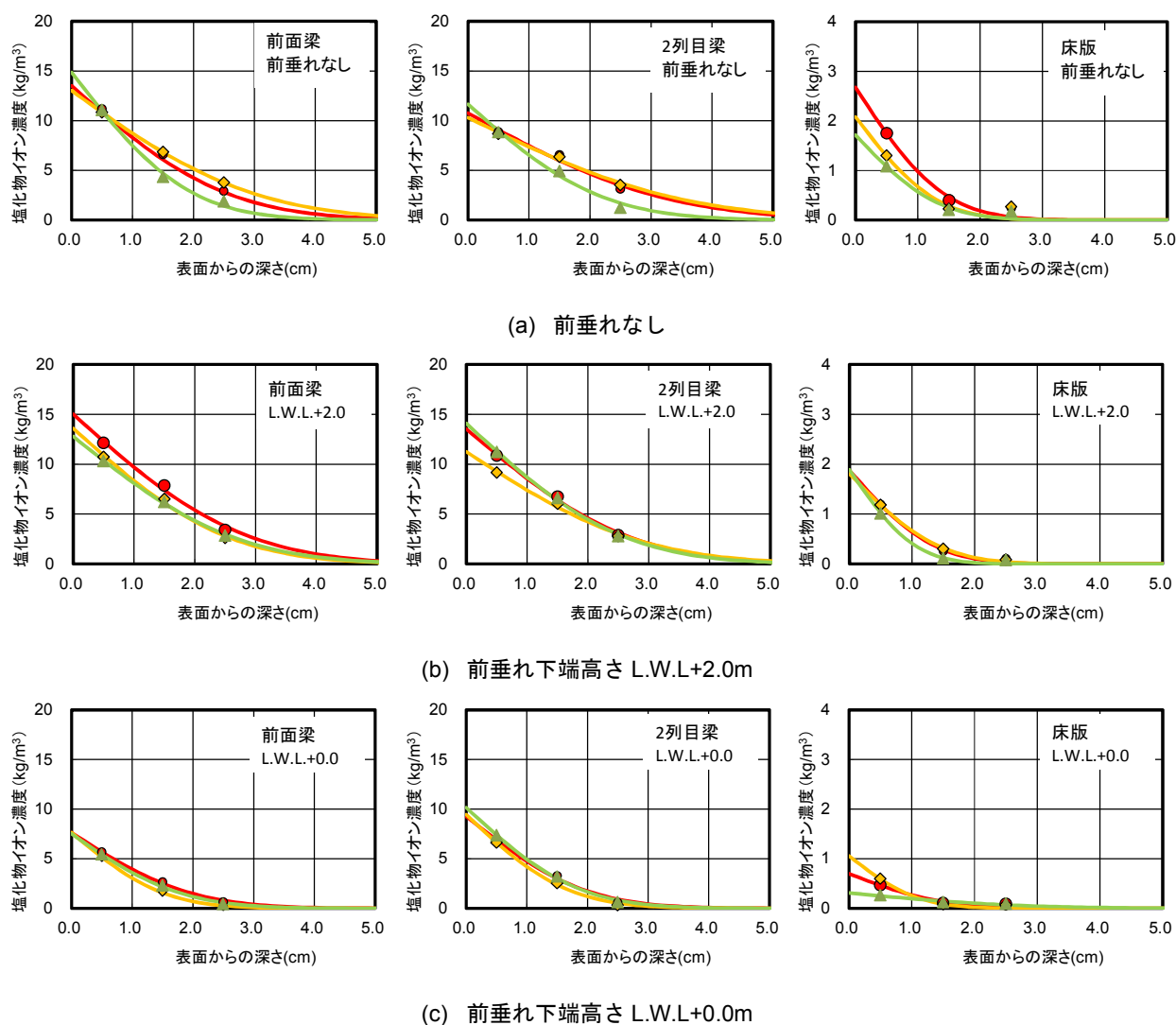


図-6 塩化物イオン濃度分布の例（曝露期間2年目の結果）

表－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

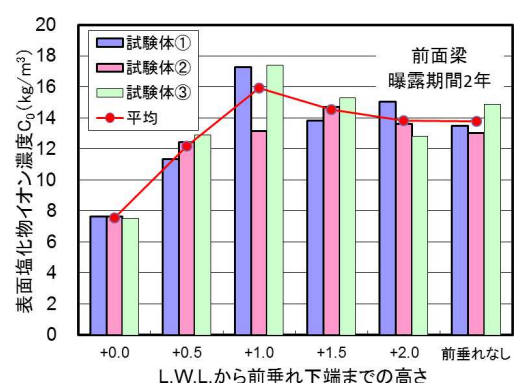
著に表れている。一方、前垂れ下端高さが L.W.L.+1.0m 以上のケースは、前垂れを設置していないケースとほぼ同等な塩化物イオン濃度の浸透分布であった。なお、拡散係数については、床版に曝露したものが小さい値となっており、床版の平均値は 0.31cm²/年、梁の平均値は 0.99 cm²/年であった。

3.2 表面塩化物イオン濃度の比較

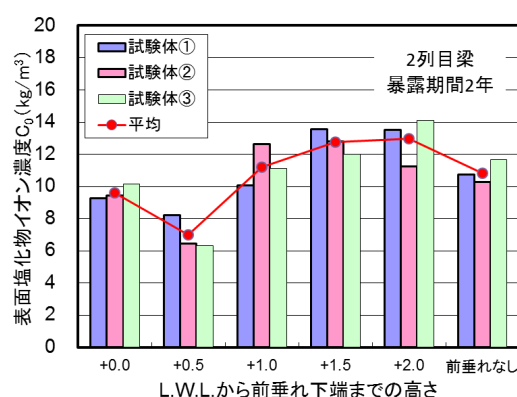
図－7 に L.W.L.から前垂れ下端までの高さを横軸として表面塩化物イオン濃度を比較した結果を示す。前面梁（前垂れ直背後）に曝露した供試体の結果をみると、前垂れ下端高さが L.W.L.+1.0～+2.0m のケースでは、前垂れなしのケースとほぼ同等の表面塩化物イオン濃度であったが、前垂れ下端高さが L.W.L.+0.0m, +0.5m の順で表面塩化物イオン濃度が小さくなる傾向が確認された。一方、2 列目梁に曝露した供試体の結果をみると、前面梁と同様に、前垂れ下端高さが L.W.L.+1.0～+2.0m のケースでは、前垂れなしのケースとほぼ同程度の値であることが分かる。しかし、2 列目梁では、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－2 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ない条件となっていたため、前垂れのな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、波の回折の影響を受けにくい前垂れ直背後の前面梁の供試体において L.W.L.+0.0m の方が L.W.L.+0.5m よりも表面塩化物イオン濃度が小さかったことから裏付けられるものと考えられる。

床版に曝露した供試体の結果は、梁下のものに比べて表面塩化物イオン濃度が全体的に小さくばらつきも大きい、前垂れ下端高さが L.W.L.+0.0m, +0.5m のケースで値が小さくなっていることが確認された。

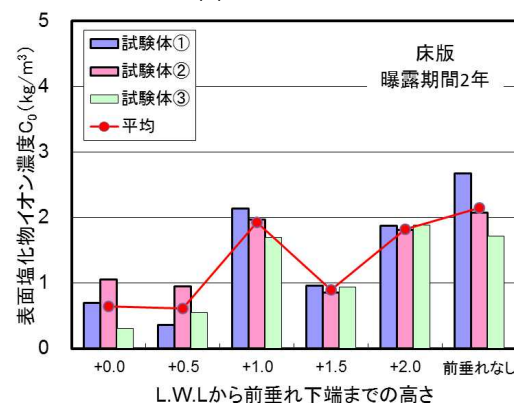
前垂れにより塩分供給量が低減された理由は、前垂れがあることで波の周期が変化し、栈橋下で波が碎波しにくくなり、海水飛沫の発生頻度が減ったためと考えられる。



(a) 前面梁



(b) 2列目梁



(c) 床版

図－7 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の関係

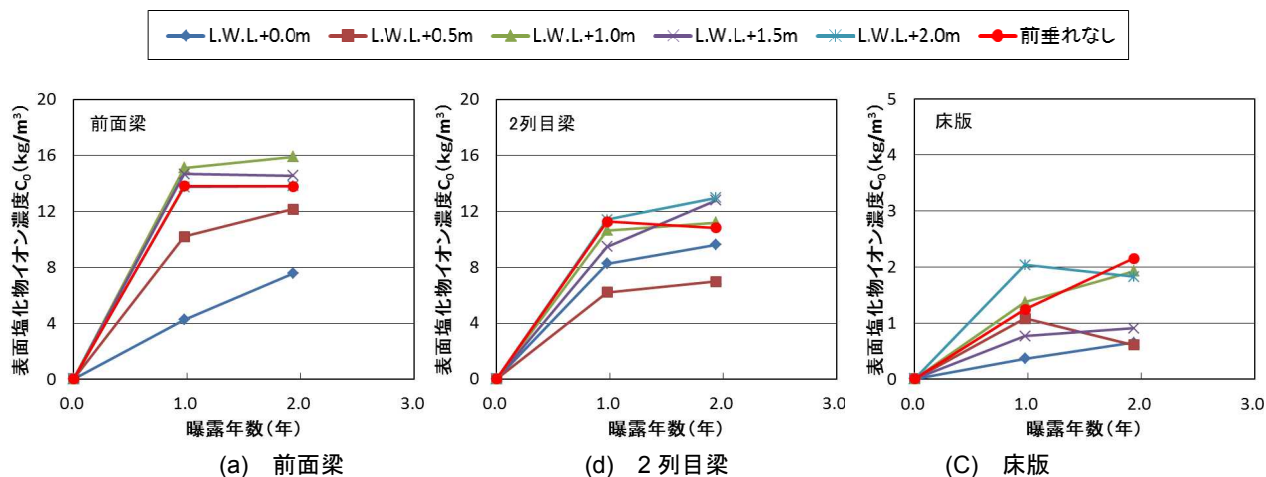


図-8 表面塩化物イオン濃度の経時変化

ここで、表面塩化物イオン濃度は時間とともに変化することも指摘⁷⁾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-8に表面塩化物イオン濃度の経時変化を示す。これによると、前面梁と2列目梁における前垂れがないケースの表面塩化物イオン濃度は、曝露1年目の段階で収束している可能性が考えられる。しかし、前垂れ下端高さがL.W.L.+0.0m、+0.5mのケースの表面塩化物イオン濃度は、曝露1年目～2年目にかけて増加している傾向がみられた。現時点では、表面塩化物イオン濃度の収束値は不明であるが、前垂れを設置することで、表面塩化物イオン濃度の増加速度を抑制できると考えられる。また、床板の前垂れがないケースについても表面塩化物イオン濃度が増加している傾向にあった。

以上のことから、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、本研究の範囲で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確認された。また、前垂れを設置することで、表面塩化物イオン濃度の増加速度を抑制できると考えられる。ただし、現時点では表面塩化物イオン濃度の収束値が不明であるため、長期的な前垂れの効果については、引続き調査を実施して検討を行う予定である。

4. 前垂れの影響を考慮した表面塩化物イオン濃度の評価手法の一考察

図-9にL.W.L.から前垂れ下端までの高ささと前垂れなしに対する表面塩化物イオン濃度の差の関係を示す。なお、2列目梁の結果のうち、前垂れのない箇所から進入した波の影響を受けたと思われる結果は除外した。図-9をみると、前垂れなしに対する表面塩化物イオン濃度

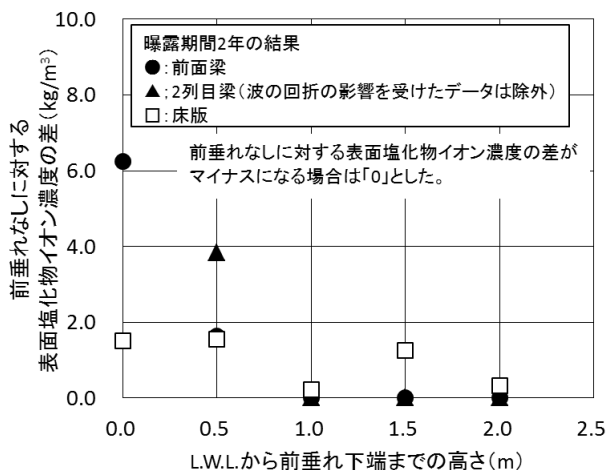


図-9 L.W.L.から前垂れ下端までの高ささと前垂れなしに対する表面塩化物イオン濃度の差の関係

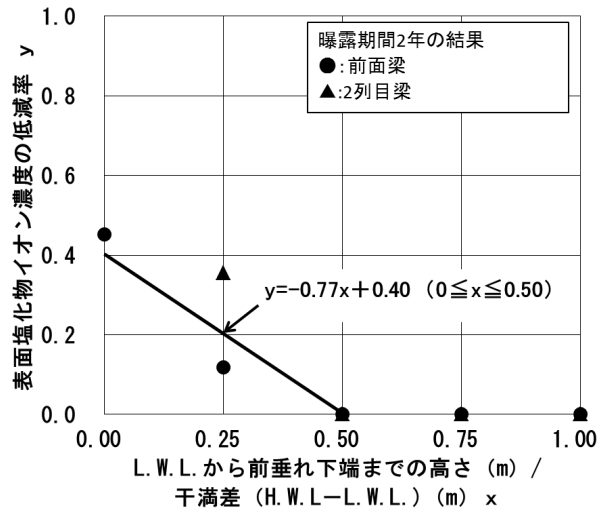


図-10 L.W.L.から前垂れ下端までの高さ/潮位差 (H.W.L. - L.W.L.) の関係

の差は、前垂れ下端高さがL.W.L.+0.0mの場合は1.8～6.1 kg/m^3 程度、前垂れ下端高さがL.W.L.+0.5mの場合は1.8～3.9 kg/m^3 程度であった。

前垂れの影響を考慮する場合、前垂れなしに対する表面塩化物イオン濃度の量を低減させるといった手法も考えられるが、本研究では表面塩化物イオン濃度の低減率で整理することとした。その理由としては、前垂れの影響を考慮した際に、表面塩化物イオン濃度が「0」となる場合があり、危険側の設計になると考えたためである。次に、干満差の影響を考慮するため、L.W.L.から前垂れ下端高さまでの高さを干満差（2.0m）で除して整理することとした。図-10に表面塩化物イオン濃度の低減率を示す。なお、床版の結果については、図-7にも示したように表面塩化物イオン濃度が全体的に小さく、ばらつきも大きかったため、現時点では梁下の結果のみで整理した。図-10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率は、式(2)により示される。

$$y = -0.77 \cdot x + 0.40 \quad (0 \leq x \leq 5.00) \quad (2)$$

ここに、y：前垂れ設置による表面塩化物イオン濃度の低減率、x：L.W.L.から前垂れ下端までの高さ（m）/干満差（m）を示す。

式（2）に示すような低減率を用いることで前垂れの影響を考慮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、式（2）は今回の実験範囲におけるものであるため、長期的な前垂れの効果や、干満条件などの影響も踏まえ、引続き検討を行う予定である。

5. まとめ

本研究で得られた主な知見を以下に示す。

- (1) 栈橋上部工にL.W.L.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コンクリート部材中への塩分供給量の低減効果を定量的に把握することができた。
- (2) 前垂れによる塩分の低減効果は、海水面から前垂れ下端までの距離に左右され、その距離が短くなるほど、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確認された。

謝辞

本研究の実施にあたっては、(独)港湾空港技術研究所構造研究領域構造研究チーム加藤絵万氏、岡崎慎一郎氏、与那嶺一秀氏、東亜建設工業（株）技術研究開発センター羽瀧貴士氏、津田宗男氏、武田将英氏に多大なご尽力を賜った。ここに感謝の意を表す。

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（運輸省港湾技術研究所），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（運輸省港湾技術研究所），No.627，1988.9
- 3) 網野貴彦，大即信明，齊藤豪，羽瀧貴士：構造形式や波の作用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.1-11，2010.1.
- 4) 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
- 5) 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.39-40，2000.9
- 6) 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.335-347，2008.5
- 7) 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