

平成22年度（財）港湾空港建設技術サービス センター研究開発助成報告書

助成番号：平成22年 2月 2日付 第09—1 号

研究開発項目：（番号）⑧公共施設の維持・管理に関するもの

高炉セメントを使用した港湾RC構造 物の塩害耐久性に関する研究

平成23年4月30日

東京工業大学 理工学研究科 国際開発専攻教授
大即信明

1. 背景

近年、我が国では、温室効果ガス削減目標を達成するために、国家的な対策が進められている。その一環として、近年、グリーン購入法が制定され、公共工事分野における指定品目として、銑鉄製造時の産業副産物である高炉セメントの利用が推進され、特に港湾構造物においては積極的な利用が行われている。

そのため、高炉セメントを用いた港湾構造物の適切な維持管理が課題となっている。港湾構造物において早期劣化の主な原因は塩害であり、ライフサイクルコストを抑えた維持管理のためには、塩害劣化の正確な予測と、的確な処置が欠かせない。

塩害照査に用いる塩化物イオンの浸透予測は一般にフィックの第二法則（式1）¹⁾に基づいて行われている。

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

$C(x,t)$: 表面からの深さ x 、年数 t における塩化物イオン量(kg/m^3)

C_0 : 表面塩化物イオン量(kg/m^3)

D_{ap} : 見掛けの拡散係数(cm^2/year)

$\operatorname{erf}(y)$: 誤差関数

近年、環境面の配慮や、対塩害耐久性への期待から、港湾構造物に高炉セメントコンクリートが使用される事例が多くなっており、普通ポルトランドセメントを用いた場合とは異なる塩害照査が必要とされている。

高炉セメントコンクリートの対塩害耐久性に関する研究は次の2つの分野に大別できる。

①高炉セメントコンクリート中における塩化物イオンの浸透性状についての研究

②高炉セメントコンクリート中における塩化物イオン量と鉄筋腐食の関係についての研究

①においては多くの研究がなされている。高炉セメントは普通ポルトランドセメントコンクリートに比べ、緻密な空隙構造をしているため、塩化物イオンが浸透しにくいとされている。また、セッコウ量の調整と高炉スラグ中のアルミナ成分により、塩化物イオンを固定化出来る生成物であるフリーデル氏塩の生成量が多くなり、塩化物イオンの拡散を抑えるとされている²⁾。既往の研究には高炉セメントを使用した実港湾コンクリート構造物からのデータも存在する^{3) 4)}が、コアの採取位置を考慮して普通ポルトランドセメントを使用した構造物からのデータと比較したものはまれである。同一構造物内でも、塩化物イオン浸透の程度は場所により大きな差があるため、コアの採取位置を考慮しなければ、高炉セメント使用による対塩害耐久性向上への寄与に関して十分に検証することができない。

このような背景のもと、本研究では、

①実海洋環境にある供用中の高炉セメントコンクリート構造物から、塩化物イオンの浸透性状を調査し、海水面からの高さや構造物内の位置によって表面塩化物イオン量、拡散係数を整理すること。

②①の結果を普通ポルトランドセメントを用いた実港湾コンクリート構造物のデータと比較検討すること。

を目的としている。

2. 実験概要

本研究では、君津市内にある、供用中の2つの実港湾コンクリート構造物からコア抜きを行った。

①消波設備

護岸に衝突する波力を低減する設備であり、コンクリート製の板を水中に斜めに設置した構造となっている。(写真1) 高炉セメントB種を用いており、供用期間は20年、W/Cは0.49である。この構造物から、満潮時海面（以下H.W.L）からの高さを-0.24m、-1.72m、-3.14mと変化させコアを採取した。この地域の干満差は2mであるため、H.W.L.-0.24m、-1.72mは干満帯、-3.14mは海中と判断した。また、各高さにおいて、長手方向にも位置を変え、合計8か所で調査を行った。



写真1 消波設備

②出荷護岸

この施設は屋根のついたドックである。(写真2) 一部、早強ポルトランドセメントを使用しているが、大半の場所では高炉セメントB種を使用している。供用期間は15年、水セメント比は0.48である。この構造物において、海側の4か所（H.W.L+0.9m：1か所、+1.5m：2か所、+2.2m：1か所）からコアを採取した。内側では4か所（H.W.L+0m：早強ポルトランドセメントを使用。2か所、+1m：2か所）からコアを採取した。



写真2 出荷護岸

③実験方法

コア供試体を深さ方向にスライスし、JISA1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準拠して全塩化物イオンの浸透性状を調査した。また、得られた塩化物イオン量を縦軸に、表面からの深さを横軸にして散布図を作成し、フィックの第二

法則（式1）を用いた曲線近似により C_0, D_{ap} を算出した。さらに、質量差法によって密度・真密度・空隙率を測定した。さらに、フェノールフタレイン1%を用いて中性化の影響を判断した。

3. 高炉セメント構造物における塩化物イオンの浸透性状

塩化物イオンの浸透性状の実測のデータを図1に示す。

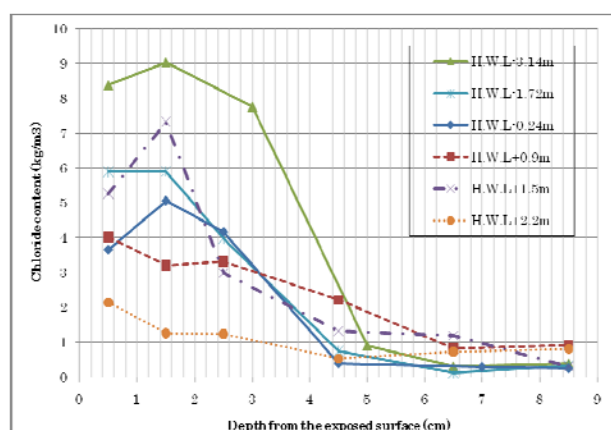


図1 実測による塩化物イオンの浸透性状

表面付近において、満潮時海水面からの高さが高いものほど塩化物イオン量は小さい値になった。この傾向は表面から約3cmの領域で見られた。

また、図中の実線は供用期間20年の消波設備を、点線、破線は供用期間15年の出荷護岸を表している。出荷護岸では深さ2.5cm～6.5cmにかけて塩化物イオン量が緩やかに減少したのに対し、消波設備では深さ2.5～5cmで急激に減少し、5cm以降は出荷護岸よりも小さい値となっていた。

表面付近には、塩化物イオンの分布が拡散方程式によっては表現出来ない乱れが存在した。このような乱れは中性化や硫酸化物イオンの影響で説明されている。²⁾ 表面塩化物イオン量、拡散係数の算出の際は、比較対象とした普通ポルトランドセメントを使用した実港湾構造物での調査⁵⁾と同様に、乱れ領域内のデータは使用しなかった。

これらの浸透性状のデータをもとに、表面塩化物イオン量と拡散係数を算定した。その結果、表面塩化物イオン量が大きくなるほど拡散係数が小さくなるという強い相関が見られた（図2）。図1に見られるように、表面からの深さが約5cmより深い領域では塩化物イオン量は一樣に小さかった。そのため、表面側の塩化物イオン量が大きい場合、近似曲線の曲率が大きくなり、算出される拡散係数の値が小さくなったと考えられる。逆に、表面側の塩化物イオン量が小さい場合は算出される拡散係数の値が小さくなるため、表面塩化物イオン量と拡散係数に相関が出たと考えられる。

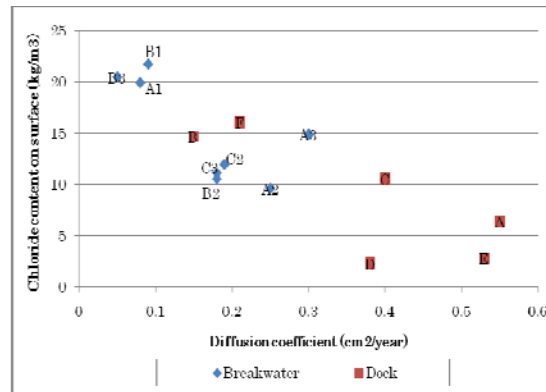


図2 表面塩化物イオン量と拡散係数の相関

4. OPC製構造物における浸透性状との比較

以上の実験で得られたデータを普通ポルトランドセメントを用いた実港湾コンクリート構造物のデータと比較した。以下に比較対象となった資料を示す。

①普通ポルトランドセメントを使用した栈橋

網野らによる、普通ポルトランドセメントを用いた複数の栈橋での調査結果を比較材料にした⁵⁾。比較対象にした4つの栈橋は、調査時点で約30年間供用されており、建設当時の慣例から水セメント比はすべて、0.5程度と推察された⁵⁾。

②海中に沈設された普通ポルトランドセメントを用いたコンクリート塊

「鹿島港の海中に沈設されていたコンクリート塊の化学試験結果」⁶⁾より塩化物イオンの浸透分布のデータを得た。立方体のコンクリート塊のそれぞれの面から中心に向けて塩化物イオンの浸透性状を調査している。沈設されていた深さが不明なので、海水面からの高さでの整理は行わなかったが、表面塩化物イオン量、拡散係数を劣化予測に用いた。

③高炉セメントを用いたコンクリート製供試体

本研究室の小崎氏⁷⁾による、2年間海洋環境に曝露した高炉セメントコンクリート製供試体のデータを用いた。高炉セメントB種を用いており、水セメント比は0.56である。

表面塩化物イオン量を海水面からの高さをもとに整理した(図3)。普通ポルトランドセメントを使用した実港湾コンクリート構造物、高炉セメントコンクリート製供試体、本研究の構造物のいずれにおいても、満潮時海水面から約-1mより高い領域において、高さが高くなるにつれて表面塩化物イオン量が減少する傾向が見られた。この関係を、高炉セメントコンクリート製構造物と供試体については(式2)により、普通ポルトランドセメントを使用した実港湾コンクリート製構造物については(式3)によって近似した。

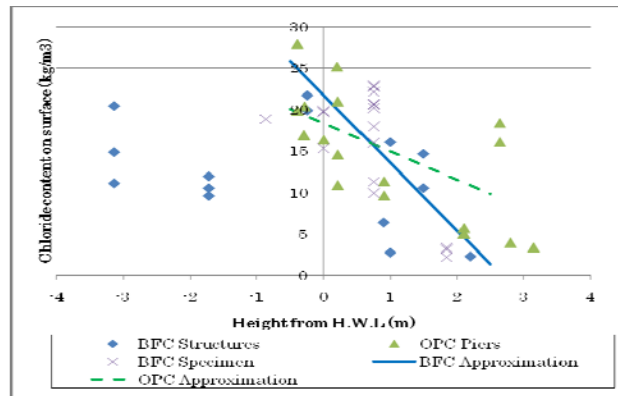


図3 表面塩化物イオン量の高さによる整理

高炉セメントコンクリート

$$C_0 = 21.76 - 8.15H$$

式2

OPC構造物

$$C_0 = 18.34 - 3.91H$$

式3

これは、満潮時海水面付近では高炉セメントコンクリートの表面塩化物イオン量が、海水面からの高さが高い領域では普通ポルトランドセメントの表面塩化物イオン量が大きくなることを示している。

また、拡散係数を海水面からの高さで整理した（図4）。

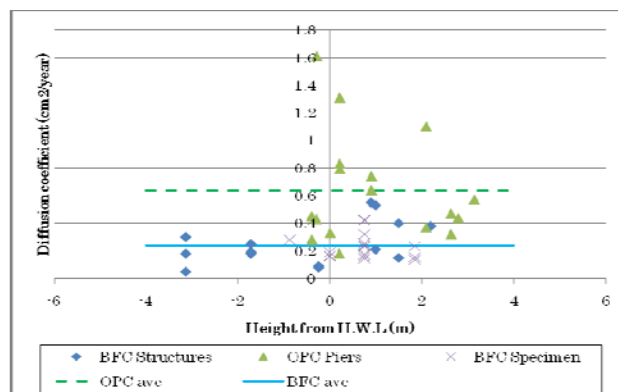


図4 拡散係数の海水面からの高さによる整理

高炉セメントコンクリートの拡散係数は、海水面からの高さに関わりなく、普通ポルトランドセメントのものよりも小さかった。普通ポルトランドセメントの拡散係数の平均が0.64(cm²/year)だったのに対し、高炉セメントコンクリートの拡散係数は0.24(cm²/year)と、約3分の1であった。

これらの表面塩化物イオン量、拡散係数を用いて、日本コンクリート工学協会の発行した長期性能シュミレーションプログラム LECCA2 により、劣化予測を行った。かぶりは海洋環境下にある柱部材の基本かぶりである70mmとし、鉄筋の直径は20mmとした。また、初期条件として、ひび割れなし、内在塩化物イオン量0と設定した。鉄筋に腐食が発生するまでの年数と、腐食ひび割れ発生年数を、構造物ごとに（表1）にまとめた。普通ポルトランドセメントを使用した実港湾コンクリート構造物内の鉄筋は5年

以内に腐食し始めるが、高炉セメントコンクリート内では、25 年後にも健全な状態が保たれるという予測になった。また、普通ポルトランドセメントコンクリート製構造物では 20 年以内に腐食ひび割れが生じるが、高炉セメントコンクリートでは 40 年以上の間、腐食ひび割れは発生しないという予測になった。

表 1 かぶり 70mm における鉄筋腐食と腐食ひび割れ発生年数の年数

構造物	OPC 製 栈橋	OPC 製 コンクリート塊	BFC 製 港湾構造物	BFC 製供 試体
腐食発生 (年)	4.5	3	48.5	25.5
腐食ひび 割れ発生 (年)	19.1	17.7	62.8	40.2

さらに、表面から 70mm の深さにおける塩化物イオン量の経年変化を予測した。(図 5) 高炉セメントを使用した場合の方が、普通ポルトランドセメントを用いた場合よりも塩化物イオンの浸透が遅いことが分かる。

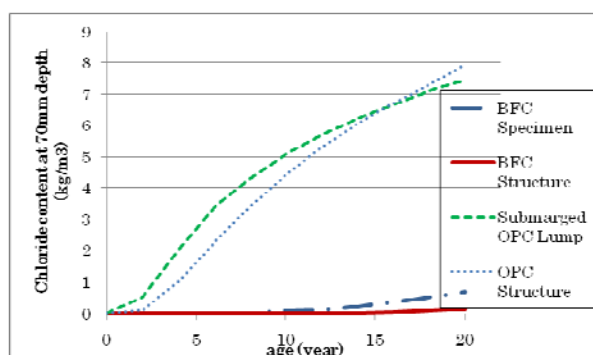


図 5 70mm における塩化物イオン量の経年変化

5. 結論

本研究で以下の結論を得られた。

- ①調査対象になった高炉セメントコンクリート製の実海洋港湾構造物において、海面からの高さが高くなるにつれて、表面塩化物イオン量は減少した。
- ②高炉セメントコンクリートの表面塩化物イオン量は普通ポルトランドセメントコンクリートのものと比較し、満潮時海水面付近では大きい値に、海面からの高さが高い場所では低い値になった。
- ③高炉セメントコンクリートの拡散係数は、海水面からの高さによらず普通ポルトランドセメントコンクリートの拡散係数よりも小さく、その値の約 3 分の 1 であった。
- ④得られた表面塩化物イオン量、拡散係数により、海洋環境下の柱部材の基本かぶりであるかぶり 70mm で、直径 20mm の鉄筋について劣化予測を行った。普通ポルトランドセメントコンクリート製構造物内の鉄筋は 5 年以内に腐食し始めるが、高炉セメントコンクリート内では、25 年後にも健全な状態が保たれるという予測になった。また、普通ポルトランドセメントコンクリート製構造物では 20 年以内に腐食ひび割れが生じるが、高炉セメントコンクリートでは 40 年以上の間、腐食ひび割れは発生しないという予測になった。

謝辞

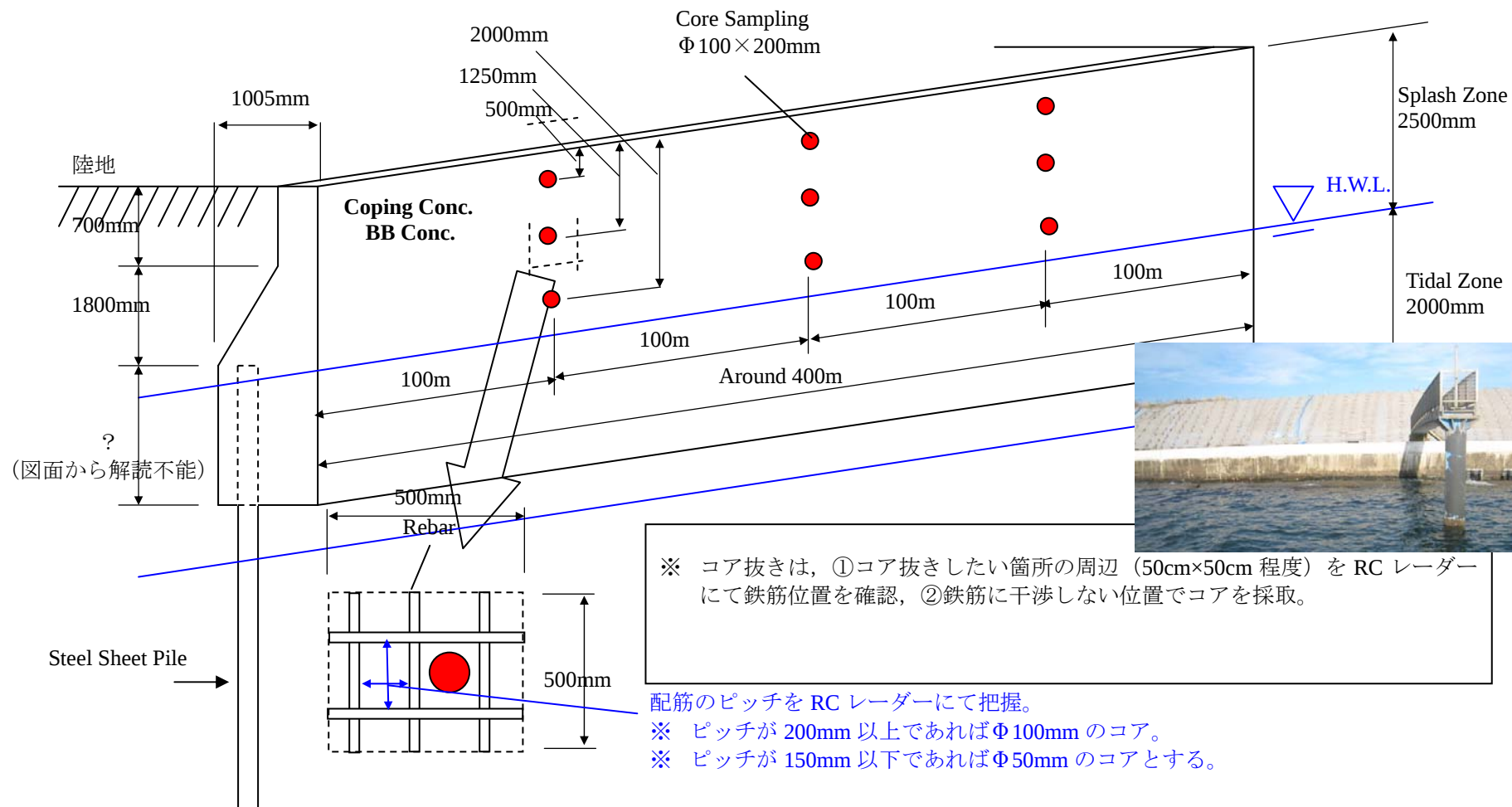
コア供試体の採取に関し、新日本製鐵株式会社富永智矢氏には多大なるご協力をいただいた。ここに付記して謝意を表す。

参考資料

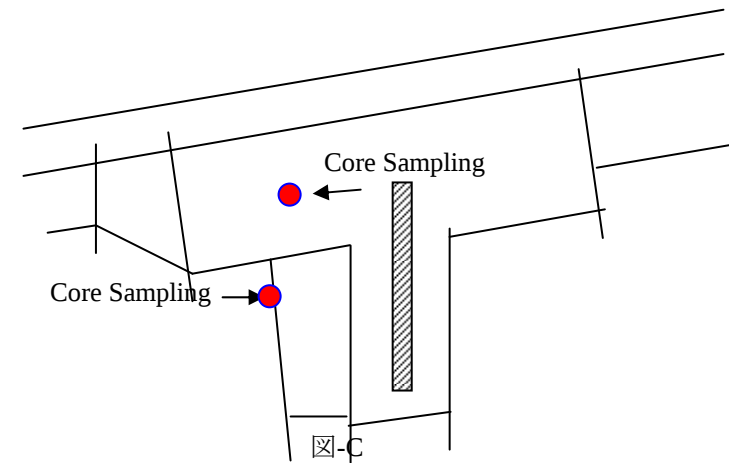
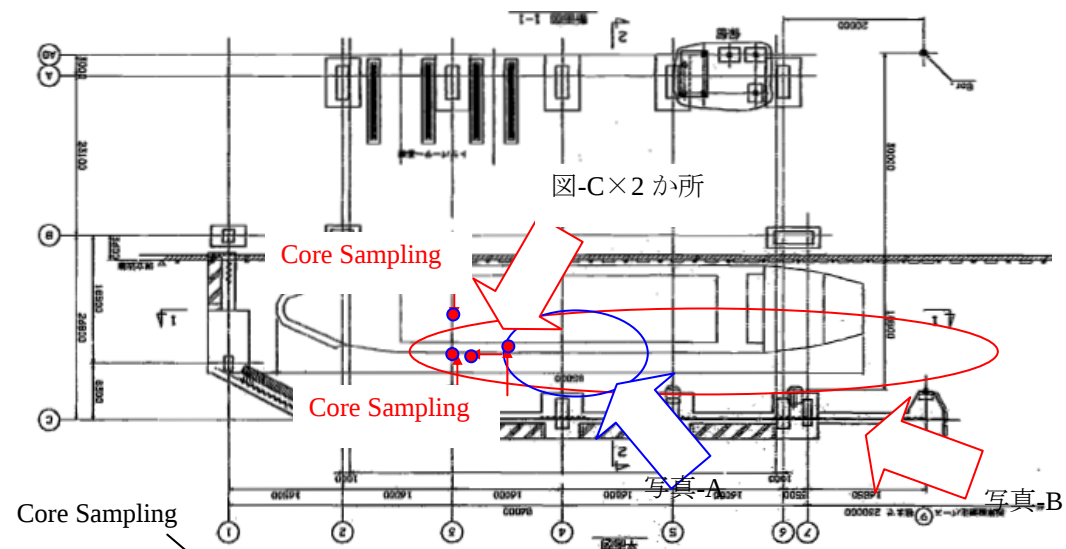
- 1) 2007 年度制定 コンクリート標準示方書 設計編、土木学会
- 2) 混和材料を使用したコンクリートの物性変化と性能評価研究小委員会(333 委員会) 報告書ならびにシンポジウム講演概要、コンクリート技術シリーズ 74
- 3) 濱田秀則、山路徹：30 年間常時海水に曝露されたコンクリートの諸性質について
- 4) 神谷昌文、國田淳、関口信一郎、下林清一：海洋環境下に 30 年間曝露されたコンクリートの物理化学的評価、土木学会論文集、Vol39,No.592,pp.131-145,1998
- 5) 網野貴彦、「空間的位置を考慮した栈橋上部工の塩害劣化要因の定量評価と劣化予測に関する研究」，東京工業大学博士論文,2010
- 6) セメント協会 セメント化学専門委員会、鹿島港の海中に沈設されていたコンクリート塊の化学試験結果
- 7) 小崎堯史、海洋暴露した高炉セメントコンクリートの水和生成物、空隙構造および塩化物浸透性状に関する研究，東京工業大学修士論文,2010

参考 コンクリートコアの概要

(西岸壁：サンプリング箇所 9 箇所×2：18 箇所)



(出荷岸壁：サンプリング個数 8 箇所×2：16 箇所)



Core Sampling

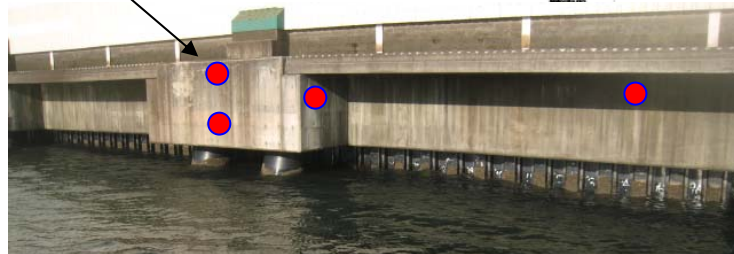


写真-A



写真-B