

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 29 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560548

研究課題名(和文) 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

研究課題名(英文) Research on the resistivity of port & harbor RC structures using blast furnace slag cement against chloride attack

研究代表者

大即 信明(Otsuki, Nobuaki)

東京工業大学・理工学研究科・教授

研究者番号：40211106

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高炉セメントに着目し、港湾RC構造物の塩害耐久性に対する有効性を検討した。具体的には、高炉セメントを用いた港湾RC構造物の調査、普通セメントを用いた港湾RC構造物の調査、室内試験、実曝露試験を行い、以上をまとめて総合的に検討した。その結果、高炉セメントを用いることで、普通セメントを使用した場合より鉄筋コンクリート部材の腐食発生までの期間を2倍程度、ひび割れ発生までの期間を4倍程度長くできることが分かった。また、これらの効果は、高炉セメントを用いた方が、塩化物イオンの浸透抑制効果が高いこと、並びに鉄筋腐食の腐食反応に必要な酸素の透過を抑制できることに起因すると考えられた。

研究成果の概要(英文)：This research investigated the effectiveness of blast furnace cement in port structures. In order to achieve the above objective, (1) field surveys of port RC structures with blast furnace cement, (2) field surveys of port RC structures with Ordinary Portland cement, (3) laboratory test, and (4) exposure test were conducted. From the results of this study, the chloride ion diffusivity and corrosion speed of steel bar in concrete were largely depending on the kinds of cements. The incubation periods and the lifetime of reinforced concrete with blast furnace cement was 2 and 4 times longer than that with ordinary Portland cement respectively against chloride attack. It was considered that these effects were provided by the chloride immobilization and low Oxygen permeability of concrete with blast furnace cement.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：高炉セメント 港湾RC 塩害抵抗性

1. 研究開始当初の背景

当該研究の申請時点においても「高炉セメントを用いると、普通ポルトランドセメントを用いた場合よりも、鉄筋コンクリートの塩害抵抗性がよい。」ということは広く知られていた。しかしながら、以下の2つの事項についての検討が不十分であった。

実際の港湾（厳しい塩害環境下にある）におけるRC構造物での実績や実態調査に関する報告が数少ない。

高炉セメントを使用した場合の塩害に対する効果の定量的評価およびその理由に関する知見が不足している。

上記を明らかにすることで、高炉セメントの塩害に対する抵抗性に関する詳細な知見を得て、高炉セメントを使用することによる厳しい塩害環境下にある港湾構造物等の長寿命化の一助となると考えられるため本研究で実施することとした。

2. 研究の目的

本研究における目的は、激しい塩害環境下における港湾構造物等に高炉セメントを使用した場合の塩害耐久性を明らかにすることである。そのために、以下の項目を実施した。

(1) 高炉セメント(BFC)を使用した建設後15年経過した港湾RC構造物の調査

BFCを使用した港湾RC構造物にて劣化調査を行い、調査時点における構造物の健全性を検討する。さらに、実構造物からコンクリート供試体を数本採取し、室内にて塩化物イオン濃度の分析を行う。

(2) 普通ポルトランドセメント(OPC)を使用した建設後30年経過した港湾RC構造物の結果整理

すでに取得している OPC を使用し建設後30年経過した港湾RC構造物のデータを整理し、上記(1)の調査結果と比較する

(3) 室内実験によるBFCの塩害抵抗性に関する検討

BFCおよびOPCを使用した鉄筋入りモルタル試験体を作製し、塩水噴霧装置に曝露して、内部鉄筋の腐食状態を定期的に測定する。また所定の期間に試験体を取り出し、試験体内に浸透した塩化物イオン濃度と実際に鉄筋に付着した塩分量との関係を考察したり、鉄筋の腐食減量等を測定し、両者のセメントに対する腐食発生限界塩化物イオン濃度や腐食速度を比較検討する。

(4) 実曝露実験によるBFCの塩害抵抗性に関する検討：

(2)と同様のBFCおよびOPCを使用したコンクリート試験体を海洋実環境下に曝露し塩化物イオンの浸透性状を評価した。

(5) 総合評価

(1)-(4)の結果の整合性を確認し、得られた情報を踏襲した港湾RC構造物の耐久性評価等を行うことで、BFCを港湾RC構造物へ適用したときの優位性を議論する。BFCを使用した港湾RC構造物の調査を実施し、BFCを使用した港湾構造物の耐久性の実態を把握する。

3. 研究の方法

本研究では、大きく分けて、(A)実構造物における調査、(B)室内試験、(C)曝露試験に分けられる。また以上の結果に基づいて(D)総合評価を実施した。それぞれの実施方法は以下に示す通りである。

(A)実構造物における調査

本調査では、高炉セメント(BFC)を使用して建設後15年経過した港湾RC構造物および普通ポルトランドセメント(OPC)を使用して建設後30年経過した港湾RC構造物を対象として調査を実施した。

具体的には、劣化調査(目視調査、かぶり、内部鋼材の腐食状況の調査)を行い、調査時点における構造物の健全性を検討した。さらに、実構造物からコンクリートコアを採取し、室内にて塩化物イオン濃度の分析を行った。コアの分析は、10~20mm幅で100mmまでの全塩化物イオン量をJISA1154の方法で測定した。特にここでは、BFCとOPCの結果を比較することにより、コンクリートへの塩化物イオン浸透性を評価する際に重要となる表面塩化物イオン濃度や塩化物イオン拡散係数に及ぼすセメント種類および海水面からの距離の影響を把握するとともに、上記を考慮した劣化予測を実施し高炉セメントの塩害耐久性に関する優位性を明らかにした。

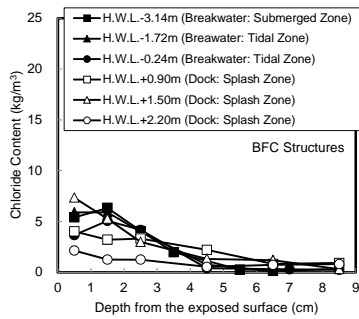
(B)室内試験

BFCおよびOPCを使用した鉄筋入りモルタル試験体を作製し、塩水噴霧装置に曝露して、内部鉄筋の腐食状態を定期的に測定した。また所定の期間に試験体を取り出し、鉄筋に付着した塩分量と腐食性状の関係を考察した。さらに、鉄筋の腐食減量等を測定し、両者のセメントに対する腐食発生限界塩化物イオン濃度や腐食速度を比較検討した。

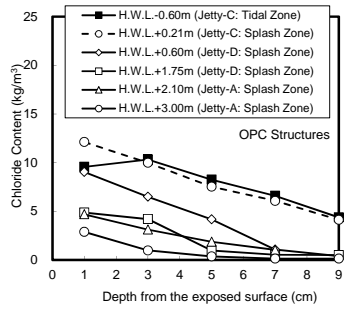
腐食に関する測定の測定においては、分極抵抗から測定される腐食電流密度、動電位分極曲線(カソードおよびアノード)を非破壊的に測定するとともに、試験終了後の鉄筋を取出し、腐食性状を観察した。また、供試体中のイオン測定に関しては、粉末にして硬化体内に存在する塩化物イオンを抽出し、その抽出溶液から塩化物イオン濃度を測定した(JCI-SC4に準拠)。

(C)実環境への曝露試験

海洋環境に供試体を曝露し、BFCおよびOPCを使用した場合の塩害抵抗性について検討した。曝露供試体は上記(A)と同様の環境に



(a) BFC



(b) OPC

図-1 実構造物から採取したコアにおける塩化物イオン濃度分布

曝露した。加えて、27年間鹿児島港の干満帯に曝露した供試体を手し、その分析も実施した。鹿児島港で曝露した供試体の分析はJSCE-G574に準拠した方法で実施した。

(D) 耐久性評価

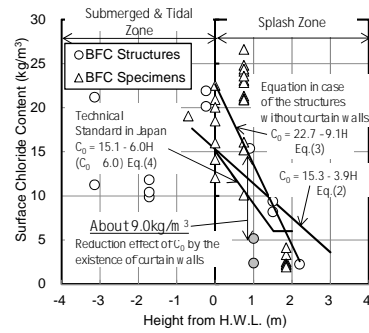
最後に、以上の(A)～(C)の結果の整合性を確認し、得られた情報を踏襲した港湾RC構造物の耐久性評価を行った。

4. 検討結果

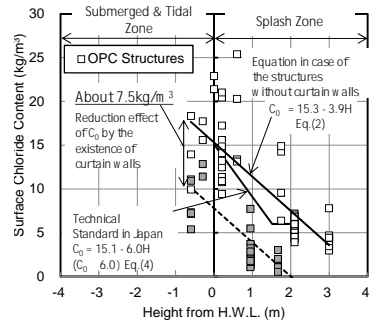
(A) 実構造物における調査

図-1にBFCおよびOPCを使用した場合の実構造物から採取したコンクリート中における塩化物イオンの濃度分布を示す。曝露年数は、BFCが15年、OPCが30年である。

これらの分布に基づいてFickの拡散式により算出した表面塩化物イオン濃度および塩化物イオン拡散係数の結果を図-2, 3にそれぞれ示す。これらより、表面塩化物イオン濃度に関しては、海水面からの高さが0～1.5m程度の場合、BFCの方がOPCと比較して表面塩化物イオン濃度が高くなるが、1.5m以上となるとOPCの方がBFCと比較して低くなる傾向が確認された。一方で、表面塩化物イオン濃度は上記のようにセメント種類の影響を受けるが、海水面からの高さや前垂れの有無、船舶の停泊頻度等に起因した海水のかけり具合に大きく依存することが確認された。さらに、塩化物イオン拡散係数については、海水面からの高さの影響は小さく、セメント種類に大きく依存することが確認された。本検討で得られた拡散係数の平均値によると、

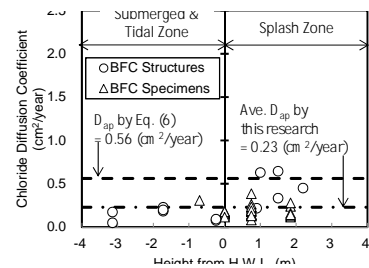


(a) BFC

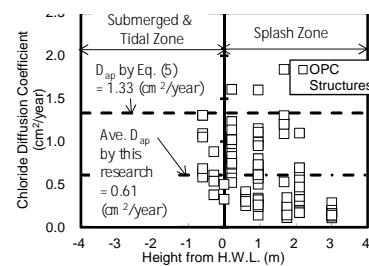


(b) OPC

図-2 表面塩化物イオン濃度と海水面からの高さの関係



(a) BFC



(b) OPC

図-3 塩化物イオン拡散係数と海水面からの高さの関係

BFCの場合は0.23cm²/year、OPCの場合は0.61cm²/yearとなり、BFCの塩化物イオン拡散係数はOPCのその約3分の1となることが確認された。

(B) 室内試験

図-4にモルタル中に埋設した鉄筋の腐食

電流密度の経時変化を示す。OPC は普通ポルトランドセメントを用いた場合、B40、B50 はそれぞれ普通ポルトランドセメントに対し、高炉スラグ微粉末を 40%および 50%の割合で置換したセメントを用いた場合の結果を示している。なお、これらの供試体は練混ぜ水として水道水あるいは海水を用いた。これらより、普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を置換することにより、腐食速度が低くなる傾向が確認される。特に、ヨーロッパコンクリート委員会で提案されている腐食速度の閾値(図中の破線)へ到達する期間を比較すると、高炉セメントを使用した方が普通ポルトランドセメントを使用した場合より長くなることが確認される。

上記の理由を考察するために、モルタル中鉄筋のカソード分極特性を評価した。これらのデータは曝露 140 日経過後の結果である。アノード分極特性については、何れの供試体もほぼ同程度と考えられ、何れの鉄筋も不動態被膜が塩化物イオンに破壊された状態であると考えられた。一方、図-5 に示すようにカソード分極特性については、セメント種類に依存して大きく異なり、BFC を用いた方が OPC を用いた場合より分極傾向が小さくなることが確認された。一般に、アノード分極特性は、鉄筋の不動態の状態を示し、カソード分極特性は鉄筋に到達する酸素量を示すといわれている。したがって、これらの結果を勘案すると、BFC を使用したコンクリート中では、OPC を使用したコンクリートと比較して、酸素透過量が小さくなり、その結果腐食に対する抵抗性が向上したと考えられる。

(C)実環境への曝露試験

上記(A)と同様の環境に曝露した供試体については、図-2 に示した実構造物のデータと一緒に併記している。これらから、供試体で得られたデータは実構造物と同様の傾向となることが確認された。一方、鹿児島港に 27 年間曝露した供試体における塩化物イオン濃度分布を図-6 に示す。これより塩化物イオンの浸透性状について両者を比較すると BFC を用いた方が OPC を使用した場合より何れの深さにおいても塩化物イオン濃度が低くなることが確認される。この結果は、(A)の検討で得られた結果と同等であり、BFC を用いた方が OPC を用いた場合より塩化物イオン浸透抑制効果が高いと考えられる。

(D)耐久性評価

以上の結果から、BFC を用いた場合、OPC を用いた場合より、塩化物イオン浸透抵抗性及び鉄筋腐食抵抗性が向上することが確認された。特に、ここでは、上記の(A)~(C)で得られた塩化物イオン拡散係数や鉄筋の腐食性状に基づいて、耐久性に関する評価を実施した。耐久性評価に際しては、それぞれの物性値を使用して、鉄筋の腐食が開始するま

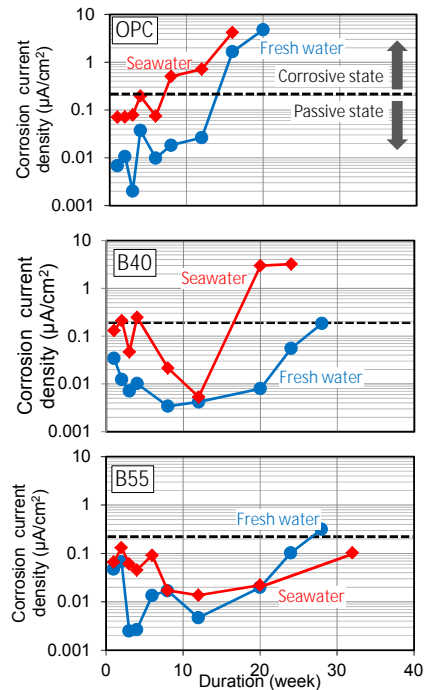


図-4 腐食電流密度の経時変化

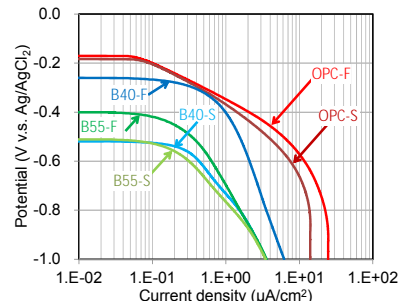


図-5 モルタル中鉄筋のカソード分極特性

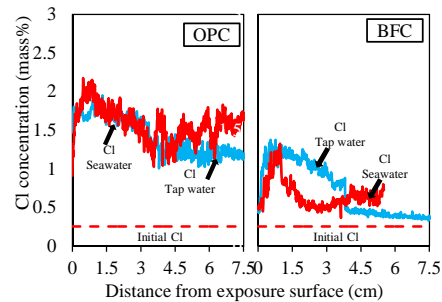


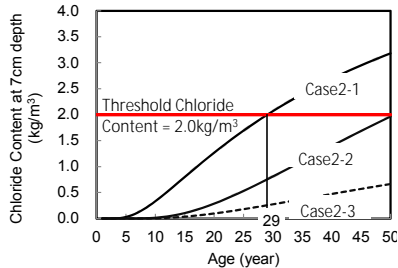
図-6 鹿児島港に曝露した供試体の塩化物イオン濃度分布

での期間および鉄筋の腐食によりひび割れが発生するまでの期間)を評価した。

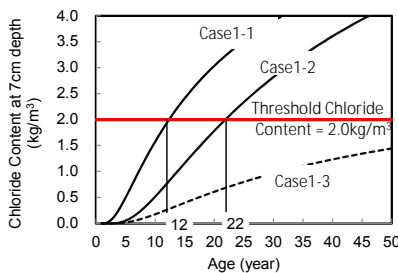
まず、(A)の検討結果を用いて鉄筋の腐食が開始するまでの期間(潜伏期)の予測を行った。分析ケースは表-1 に示す通りであり、セメント種類のほかに、前垂れの有無についても検討を加えた。得られた結果を図-7 に示す。これらの結果から、潜伏期は BFC を使用

表-1 解析条件

| Case Name | Case1-1 | Case1-2 | Case1-3 | Case2-1 | Case2-2 | Case2-3 |
|--|---------|---------|----------|---------|---------|----------|
| Type of Cement | OPC | | | BFC | | |
| Water-cement ratio of conc. | 0.5 | | | 0.5 | | |
| The presence or absence of curtain walls | Absence | | Presence | Absence | | Presence |
| C_0 (kg/m ³) | 9.1 | 11.4 | 3.9 | 9.1 | 13.6 | 4.6 |
| D_{sp} (cm ² /year) | 1.33 | 0.61 | 0.61 | 0.56 | 0.23 | 0.23 |



(a) BFC



(b) OPC

図-7 潜伏期の予測結果

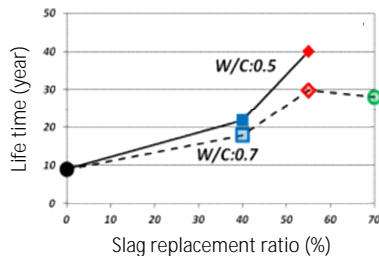


図-8 寿命予測結果

した方が OPC を使用した場合より 2 倍程度長くなることが確認される。したがって、BFC を使用した方が OPC を使用した場合より長期に亘って鉄筋の腐食を防止できると結論付けられる。加えて、前垂れの影響に関して着目すると、前垂れを設置することで、鉄筋腐食の開始時期を 50 年以上とすることができ、より長期に亘り鉄筋腐食を防止できると予測された。

また、(B)の検討結果に基づいて潜伏期、および進展期を足し合わせた寿命の予測について検討を行った。その結果を図-8 に示す。この結果から、高炉スラグの置換率を 55% 程度まで上げることにより、寿命を長期化でき、特に、置換率 55% の場合、0% (OPC) の場合と比較して 4 倍程度長くできると予測された。

5. 研究の成果

本研究では、実構造物の調査、室内試験、実環境での曝露試験を実施し、高炉スラグの港湾 RC 構造物での利用に対する有効性を検討した。その結果、セメント種類により、塩化物イオンの浸透性や鉄筋腐食性状は大きく異なり、高炉セメントを用いることにより、普通セメントを使用した場合より鉄筋コンクリート部材の腐食発生までの期間を 2 倍程度、ひび割れ発生までの期間を 4 倍程度長くできることが分かった。また、これらの効果は、高炉セメントの方が普通ポルトランドセメントに比べ、塩化物イオンの浸透抑制効果が高いこと、並びに鉄筋腐食の腐食反応に必要な酸素の透過を抑制できることに起因すると考えられた。

6. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

- 1) 永田智大, 大即信明, 西田孝弘, 小原弘毅: 練混ぜ水として海水を用いたコンクリートの中性化現象と内部鉄筋の腐食挙動に関する実験的検討, セメント・コンクリート論文集, Vol. 67, pp. 495-500, 2014.03, 査読有, <http://www.jcassoc.or.jp/cement/1jpn/jj3e.html#67>
- 2) 西田孝弘, 大即信明, 小原弘毅: 練混ぜ水として海水を用いたコンクリートの物質移動抵抗性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.685-690, 2013.07, 査読有, <http://www.jci-net.or.jp/>
- 3) Nobuaki. Otsuki, Anita Odchimar, Tsuyoshi SAITO: Influence of the Ions in pore solution and around steel bar on corrosion of steel in BSF and FA mortars, 材料, Vol.61, No.8, pp.736-741, 2012, 査読有, <http://www.jsms.jp/kaishi/61/paper61-8-11.htm>
- 4) 斉藤尚, 正保剛, 椎名宏明, 斉藤豪, 大即信明: 海洋環境下に 20 年間曝露した高炉スラグ微粉末混入コンクリートの諸性質, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 11 巻, pp.31-36, 2011, 査読有, <http://conresin.jsms.jp/>

〔学会発表〕(計 8 件)

- 1) 永田智大, 大即信明, 西田孝弘, 山路徹: 27 年間鹿児島港で曝露した海水練りコンクリートの EPMA による物質浸透性状評価, 第 68 回セメント技術大会講演要旨, Vol.68, pp.292-293, 2014.05.13-15, (東京)
- 2) Z. M. Garba-Say, N. Otsuki, T. Nishida, H. Ohara: Estimation of Initiation and Propagation Periods Related to Steel Corrosion in Concrete mixed with

- Seawater, International Conference on Trends and Challenges in Concrete Structures, Trends and Challenges in Concrete Structures, Indian Concrete Institute, p. 638-646, 2013.12.19-21, (Delhi)
- 3) 大即信明, 西田孝弘: コンクリート中での鋼材腐食に関わる塩化物イオンの影響に関する一考察, 第40回セメント・コンクリート研究討論会論文報告集, Vol.40, pp.45-50, 2013.11.15, (熊本)
 - 4) T. NAGATA, N. OTSUKI, T. NISHIDA, H. OHARA, Z. M. GARBA-SAY, Lifetime Prediction of Concrete Mixed with Seawater Against Chloride Attack and Carbonation, Proceedings of Workshop on Utilization of Waste Materials, Manila, Paper No.B6, 2013.09.5, (Manila)
 - 5) N. Otsuki, T. Amino, T. Nishida, Chloride Penetration Profiles in Existing Harbor Structures, Proceedings of Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies- SCMT3, CD-ROM e054, 2013.08.19-21, (京都)
 - 6) T. Nishida, N. Otsuki, H. Ohara, Z. M. Garba-Say: Some Considerations for the Applicability of Seawater as Mixing Water in Concrete, Proceedings of Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies- SCMT3, CD-ROM e056, 2013.08.19-21, (京都)
 - 7) 大即信明, 斎藤豪: 練混水に海水を使用したコンクリートの可能性について, セメントコンクリート研究討論会, pp25-30, 2011.11.18, (松山)
 - 8) M. Kubota, T. Saito, N. Otsuki, M. Miura: Chloride penetration profiles in existing harbor structures constructed with blast furnace cement concrete, 36th Conference on our world in concrete & Structures, August 14-16, 2011, (Singapore)
7. 研究組織
- (1) 研究代表者
大即 信明 (OTSUKI NOBUAKI)
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 40211106
 - (2) 研究分担者
斎藤 豪 (SAITO TSUYOSHI)
前東京工業大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号: 90452010
現新潟大学工学部建設学科
(2011年度のみ)
西田 孝弘 (NISHIDA TAKAHIRO)
東京工業大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号: 10345458
(2012年度~2013年度)