

論文 50年間供用された海水練りプレパックドコンクリートの健全性調査

片野啓三郎^{*1}・西田孝弘^{*2}・羽瀨貴士^{*3}・山路徹^{*4}

要旨：海洋環境で供用されるプレパックドコンクリートには、昭和30年代頃まで練混ぜ水として海水が用いられていた記録がある。この際、施工性に関する検討は報告されているが、供用後の構造物に対する調査事例は希少である。そこで、本研究では、鳥取県田後港防波堤に現存する海水練りプレパックドコンクリートからコアを採取し、同時期に併設された水道水練りプレパックドコンクリートと比較することにより、その健全性を評価した。その結果、充填状況、塩化物イオン濃度分布、圧縮強度および水和物の観点から練混ぜ水の影響は小さく、海水練りプレパックドコンクリートは50年間の供用後も水道水練りと同程度の健全性であることを示した。

キーワード：プレパックドコンクリート、健全性評価、海水練り、圧縮強度、水和物、塩化物イオン浸透

1. はじめに

海水中に含まれる塩化物イオンによる鋼材の腐食やコンクリート自体の物性への影響が懸念されることから、コンクリート用の練混ぜ水として海水を使用することは土木学会規準(JSCE-B 101-2010)などで制限されている。しかしながら、世界的な「水不足時代」を勘案すると、地域によっては海水をコンクリート材料として使わざるを得ない状況が将来的に予想され、コンクリート用練混ぜ水としての海水利用の可能性を現段階から検討しておくことが肝要である。

上記に関して、我が国では、昭和30年代までに施工されたプレパックドコンクリート用モルタルには、比較的海水が練混ぜ水として利用されていることが多く、日本セメント技術協会(現セメント協会)の「プレパックドコンクリート」(1964年)¹⁾および土木学会の「プレパックドコンクリート施工例集」(1965年)²⁾に詳しい記載がある。中でも海水を用いた事例として、鳥取県田後(たじり)港防波堤、秋田県秋田港南防波堤、北海道での防波堤工事などが挙げられている。また、文献1)には、「海水については、港湾工事で淡水が得難いときに責任技術者の承認を得て使用し、施工作业ならびに施工後のコンクリートに異常な点が認められなかった例があり、また汚濁されていない海水が淡水と比較して特に悪いという条件もないことを示す実験結果も報告されている」との記述があることから、少なくともプレパックドコンクリートの施工性に関しては、海水を練混ぜ水として用いても大きな弊害は確認されていないことが伺える。一方で、供用後の構造物に対する調査は希少であり、長期間経過した後のプレパックドコンクリートの物性を報告した事例は皆無である。

本研究では、上記の海水練りプレパックドコンクリートのうち、鳥取県田後港に現存する海水練りプレパックドコンクリート(1962年建設)からコアを採取し、その物性を調査した。当時のプレパックドコンクリートの施工例を表-1に示す。調査項目は、コアの外観観察、塩化物イオン濃度分布、圧縮強度および水和物であり、これらに基づきモルタルの充填性や安定性をプレパックドコンクリートの健全性として評価した。なお、健全性の評価は、同時期(1967年以降)に併設された水道水練りプレパックドコンクリートと比較することにより行った。

表-1 プレパックドコンクリートの施工例²⁾

港名	田後
施設名	防波堤
施工年度	1955～1963 (S.30～S.38)年
セメントの種類	高炉セメント2種
粗骨材	川砂利
最大寸法(mm)	150
最小寸法(mm)	30
細骨材	海岸砂
水の種類	海水
配合	配合比(重量)C:F:S 1:0.053:1.053
	C(kg) 755
	F(kg) 40
	S(kg) 795
	W/(C+F) (%) 55
	D/(C+F) (%) 0.25
	AI/(C+F) (%) 0.01

但し、C：セメント、F：フライアッシュ、S：細骨材、W：海水、D：セメント分散剤、AI：発泡剤(アルミニウム粉末)

*1 株式会社大林組 技術本部技術研究所 生産技術研究部 修士(工学) (正会員)

*2 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 特定准教授 博士(工学) (正会員)

*3 東亜建設工業株式会社 技術開発センター 博士(工学) (正会員)

*4 独立行政法人港湾空港技術研究所 構造研究領域 博士(工学) (正会員)

2. 調査の概要

2.1 構造物の概要

田後港は鳥取砂丘から西へ約 10km の位置にある漁港である。調査箇所の緒元は表-2 に示す通りである。調査対象とした港湾施設の位置図を図-1 に、調査箇所を写真-1 および写真-2 に示す。

調査箇所 A および B はそれぞれ第 4, 第 5 防波堤の基礎コンクリートであり、プレパックドコンクリート工法により構築されている。練混ぜ水として A は海水を、B は水道水をそれぞれ使用したとの記録がある。調査箇所 A のコンクリートは施工年度が 1962 年であることから、表-1 に示す配合であると考えられる。調査箇所 B は施工年度が 1967 年以降であり、当時の仕様書には表-3 に示すモルタルと最大寸法 150mm, 最小寸法 15mm の粗骨材を使用したプレパックドコンクリートであることが明記されている。

調査箇所 C は第 4 防波堤に併設された資材置き場が存置された部位であり、現場打ちの練混ぜコンクリートで施工されている。練混ぜ水は施工年代から推定すると海水と考えられるが、明確な記録は残されていない。

2.2 調査位置

調査箇所 A および B はいずれも干満部から海中部にかけて斜め 45 方向に図-2 に示すようにコアを採取した。一方、調査箇所 C については、大気部であり、鉛直方向に図-3 に示すように採取した。採取するコアの直径は 100mm とした。

表-2 コア採取箇所の緒元

調査箇所	位置	練混ぜ水	コンクリートの種類	曝露環境	施工年度(年)
A	第 4 防波堤	海水	プレパックドコンクリート	干満部 ~ 海中	1962 (S.37)
B	第 5 防波堤	水道水		干満部 ~ 海中	1967 (S.42)以降
C	第 4 防波堤	海水	現場打ちコンクリート	大気部	1962 (S.37)以前

表-3 調査箇所 B のプレパックドコンクリート用モルタルの示方配合(仕様書より)

W/C	単位量 (kg/m ³)				
	C	S	W	D	AI
52%	800	831	416	2	0.080

但し、C:セメント(高炉セメントB種)、S:細骨材、W:水、D:セメント分散剤、AI:発泡剤(アルミニウム粉末)

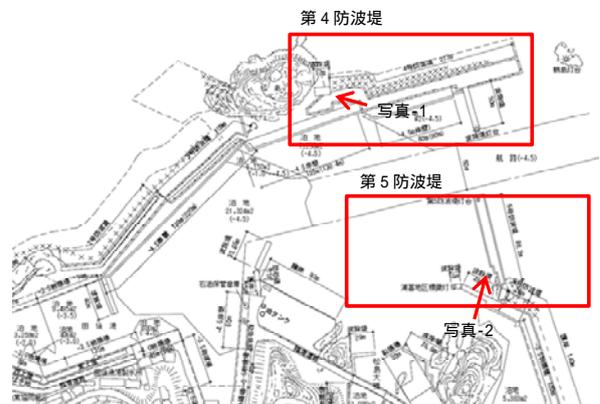


図-1 田後港内の施設位置図

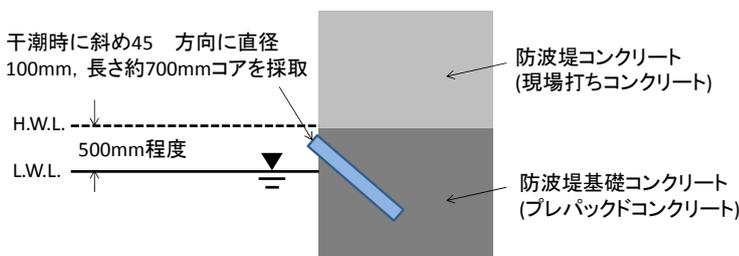


図-2 調査箇所 A および B のコア採取方法

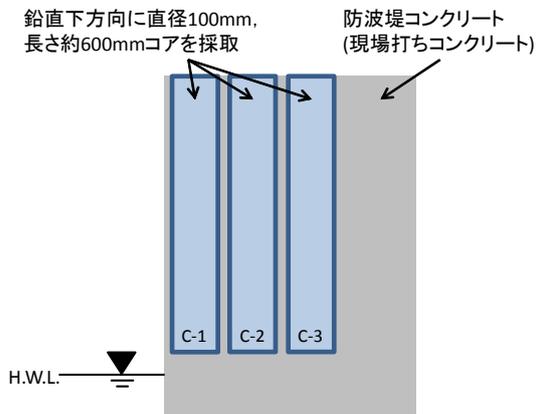


図-3 調査箇所 C のコア採取方法



写真-1 第 4 防波堤



写真-2 第 5 防波堤

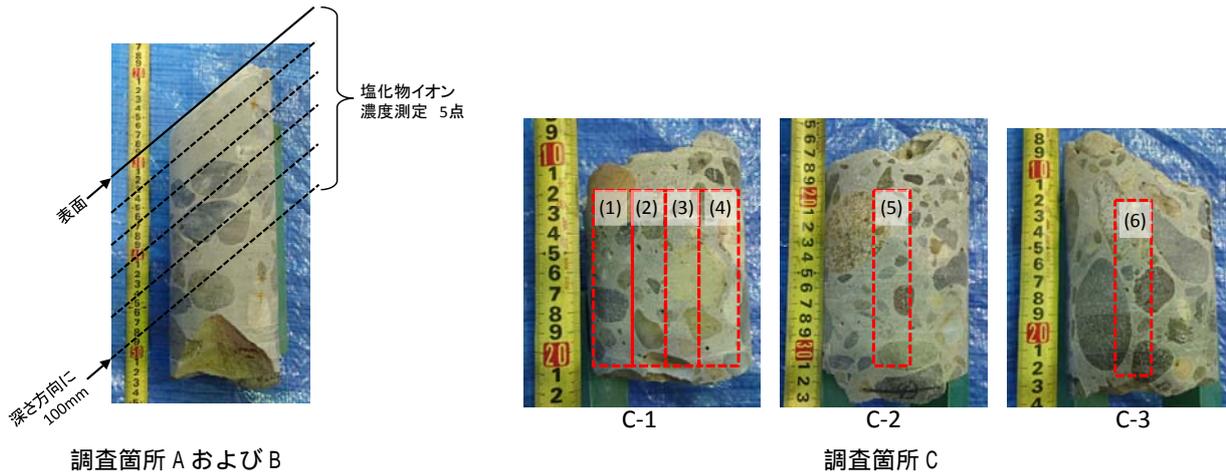


図-4 塩化物イオン濃度測定位置(調査箇所 A, B)

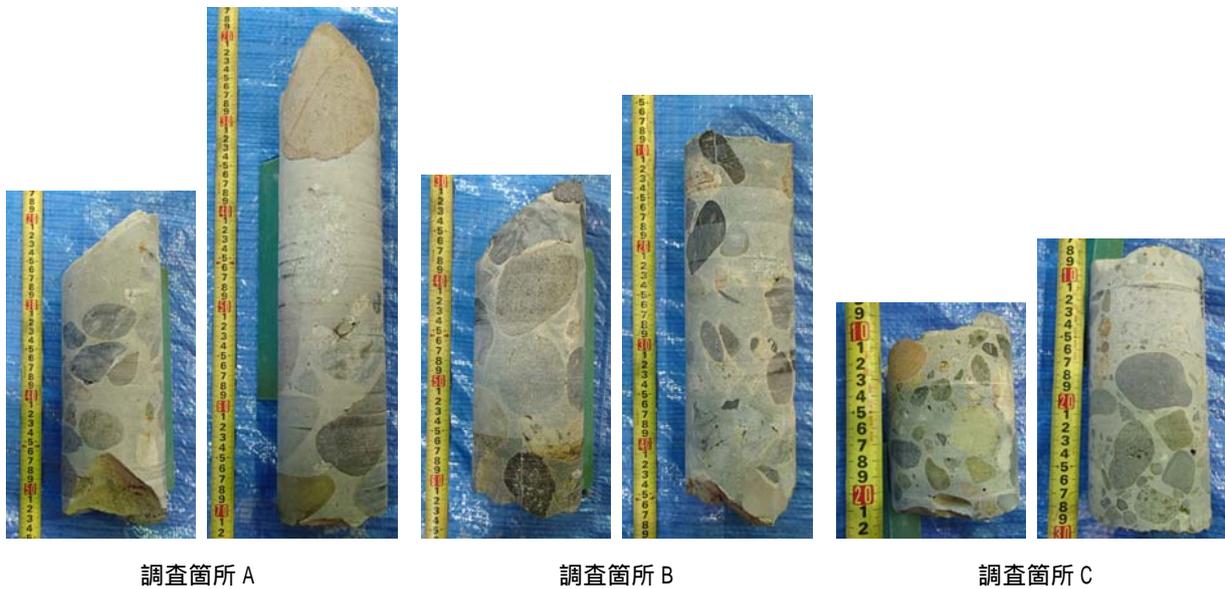


写真-3 コアの外觀

2.3 調査項目および方法

(1) コアの外觀観察

採取したコアの断面について、骨材周辺へのモルタルの充填状況および間隙の有無等を目視によって確認した。

(2) 圧縮強度

圧縮強度試験は JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠して行った。端部に破損がある場合は、必要に応じて石膏を充填して試験を行った。

(3) 塩化物イオン濃度

塩化物イオン濃度の測定は JIS A 1154「硬化コンクリートに含まれる塩化物イオンの試験方法」に準拠し、全塩化物イオンおよび可溶性塩化物イオンについて行った。測定用試料はコア試料から粗骨材を取り除くことで採取し、モルタル中の塩化物イオン濃度として算出した。なお、モルタルの単位容積質量は $2000\text{kg}/\text{m}^3$ と仮定した。調査箇所 A および B のコアは、図-4 のように表面からの深さ 20mm ごとに切断して 5 点で測定し、さらに表面から 200mm および 400mm の 2 点で測定した。調査箇所

C のコアは、図-4 のように切断し、6 点で測定した。

(4) 水和物

水和物の同定は、粉末 X 線回折により行った。コア試料の表層部から 10mm 毎にモルタル部分を採取し、粉砕により $150\ \mu\text{m}$ のふるいを全通させた粉砕試料とした。粉砕試料をプロモホルムとエタノールの混合溶液(比重 $2.35\text{g}/\text{cm}^3$)に加え、遠心分離機(3000rpm)で細骨材とセメントを分離した。上記のセメント分試料に対し、内部標準試料として Al_2O_3 を試料重量の内割で 10% 加え、エタノールを用いて湿式混合し 24 時間 60 の炉乾燥させたものを分析試料とした。X 線回折の条件については、ターゲットとして CuK を使い、走査範囲 $5\sim 70\text{deg.}2$, 走査速度 $2.0^\circ/\text{min}$ で測定した。

3. 物性の調査結果

3.1 コアの外觀観察

コアの外觀を写真-3 に示す。写真から明らかなように、コアには大きな間隙やモルタル未充填部分は存在しな



図-5 圧縮強度試験結果と試験体の破壊状況

った。また、モルタルの充填状況は施工年度や練混ぜ水の種類にかかわらず一定であった。

粗骨材は、すべてのコアにおいて川砂利が使用されており、岩種および骨材の寸法は様々であった。プレバックドコンクリートの粗骨材の最小寸法は調査箇所 A で 30mm 程度、調査箇所 B で 15mm 程度であった。調査箇所 A は特に粗骨材の寸法が大きいものが多い、100mm を超えるものがあった。

3.2 圧縮強度

圧縮強度試験結果と、圧縮強度試験後の破壊状況を図-5 に示す。調査箇所 A には試験体の寸法と比較して大きい粗骨材（寸法 100mm 以上）が含まれていたため、モルタルと粗骨材の界面で破壊が生じ、圧縮強度は 13 ~ 15N/mm² と比較的小さい結果となったと考えられる。調査箇所 B については、最大で 70mm 程度の粗骨材が試験体内部に含まれており、圧縮強度は 20N/mm² 以上であった。また、調査箇所 C の試験体の圧縮強度は、平均で 25.5 N/mm² であり、海水で練り混ぜたコンクリートが 50 年後においてもある程度の強度を有することが示された。

3.3 塩化物イオン濃度

モルタル中の塩化物イオン濃度分布を図-6 ~ 図-8 に示す。なお、ここでは固定化塩化物イオン濃度を全塩化物イオン濃度と可溶性塩化物イオン濃度の差として定義している。

調査箇所 A では、表面からの深さ 10mm における塩化物イオン濃度が最も高く、全塩化物イオン濃度は約 20kg/m³ であった。表面からの深さが大きくなるにつれ

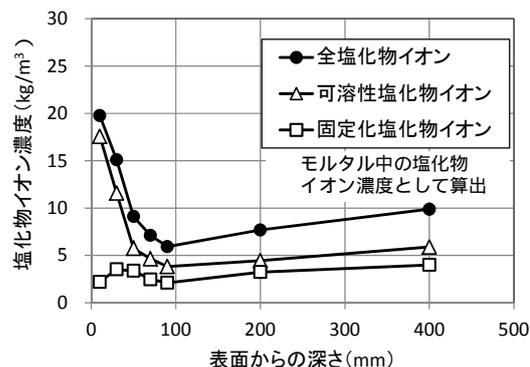


図-6 調査箇所 A における塩化物イオン濃度分布

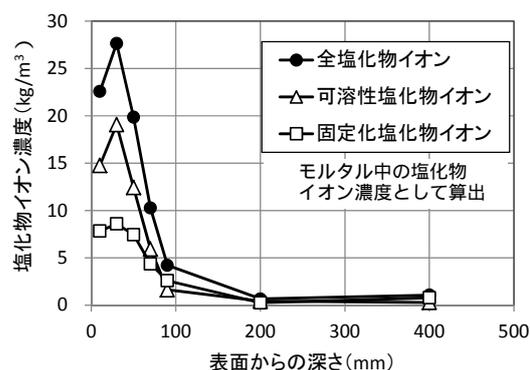


図-7 調査箇所 B における塩化物イオン濃度分布

て塩化物イオン濃度は低くなっていることから、干満帯において外来塩分が侵入したものと考えられる。しかし、50mm 以深（深さ 50 ~ 400mm）における全塩化物イオン濃度は約 6 ~ 10kg/m³ の範囲で推移しており、深さ 400mm においても約 10kg/m³ と高かった。調査箇所 A のモルタルには練混ぜ水として海水を使用したとの記録より、50 年間の供用後においてもコンクリート内部に練混ぜ水由来の塩化物イオンが残存していたと考えられる。

調査箇所 B では、表面からの深さが大きくなるにつれて塩化物イオン濃度が低くなり、深さ 200mm 以深では全塩化物イオン濃度が 1 kg/m³ 程度となった。調査箇所 B はモルタルの練混ぜ水が水道水であることから、製造時のモルタル中の塩化物イオンは極めて低いが、干満帯における供用中に外来塩分が侵入したものと考えられる。

また、調査箇所 A（海水練り）の表面付近（深さ 10mm）の全塩化物イオン濃度が約 20kg/m³ であったのに対し、調査箇所 B（水道水練り）では 23 ~ 28kg/m³ と比較的高い結果が得られた。調査位置によって曝露環境（塩分の供給量）が異なる可能性もあり、供用年数も異なるので明確な比較は困難だが、水道水練りでは初期におけるコンクリート内外のイオン濃度勾配が大きいいため、より多くの塩化物イオンが侵入したと推察される。室内における浸漬試験でも水道水練りのコンクリートの方が海水練りよりも表面の塩化物イオン濃度が高くなるといった知見³⁾もあり、海水で練り混ぜることで組織が緻密化し、

塩化物イオン拡散係数が小さくなる可能性もあると考えられる。

調査箇所 C では、深さ方向に塩化物イオン濃度の大きな変化はなく、全塩化物イオン濃度は約 9~12 kg/m³ と高い値であった。調査箇所 C は調査箇所 A および B と比較して供用年数は長いですが、海水面からの距離が大きいため、外来塩分の侵入は少なかったものと考えられる。以上より、調査箇所 C のコンクリートは、海水の使用により製造時に塩化物イオンが多く含有されていたことを裏付けるものと考えられる。

全塩化物イオン濃度と固定化塩化物イオン濃度の関係を図-9 に示す。調査箇所 A および調査箇所 C では、全塩化物イオン濃度によって固定化塩化物イオン濃度は大きく変化せず、約 2~4kg/m³ で推移している。一方、水道水を使用した調査箇所 B では、全塩化物イオン濃度と固定化塩化物イオン濃度はほぼ比例関係にあった。ここで、それぞれのコンクリートに使用されたセメントに着目する。調査箇所 A では高炉セメント 2 種（現在の高炉セメント C 種に相当）、調査箇所 B では高炉セメント B 種が使用されている。高炉スラグ微粉末の置換率が 40~55% とすると塩化物イオンの固定化能力が最大となり、置換率が 70% の場合には材齢初期から長期にかけて低い固定化能力を示すとの知見⁴⁾があることから、高炉セメント B 種を使用したために調査箇所 B の固定化塩化物イオン濃度が高く、置換率 60~70% 前後の高炉セメント 2 種を使用したために調査箇所 A の固定化塩化物イオン濃度が低い結果になったと考えられる。したがって、セメントの種類が塩化物イオンの固定化能力に影響を及ぼすとするれば、本調査の条件で練混ぜ水の違いによる影響を比較することは困難であると考えられる。

3.4 水和物

図-10 に X 線回折による分析結果を示す。これより、練混ぜ水について比較すると、(a)および(b)の何れのグラフにおいても同様の水和物のピークが確認され、長期間の供用後の水和物の種類に及ぼす練混ぜ水の影響は小さいと考えられる。また、何れの場合も、深部となるほどフリーデル氏塩の生成量が大きく減少する傾向が確認され、長期的なフリーデル氏塩の生成は主に外部からの塩化物イオンの侵入に由来したものと推察される。さらに、深部の方が Ca(OH)₂ 量が大きくなること、何れも AFm(9.9°)のピークが明確でないことも確認される。以上のことから、50 年経過した後のプレパックドコンクリート中モルタル部の水和物は練混ぜ水の影響が小さいことが推察される。なお、初期に生成する水和物に関しては練混ぜ水を海水とすることにより、アルミネート系水和物量が減少するといった報告⁵⁾もあり、今後更なる詳細分析が必要と考えられる。

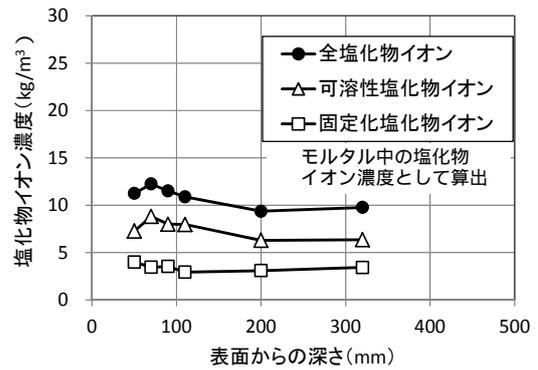


図-8 調査箇所 C における塩化物イオン濃度分布

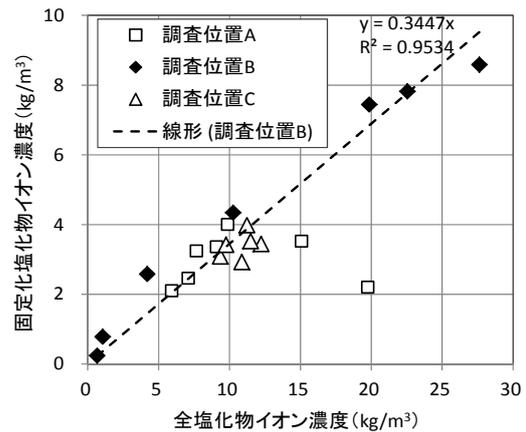


図-9 全塩化物イオン濃度と固定化塩化物イオン濃度の関係

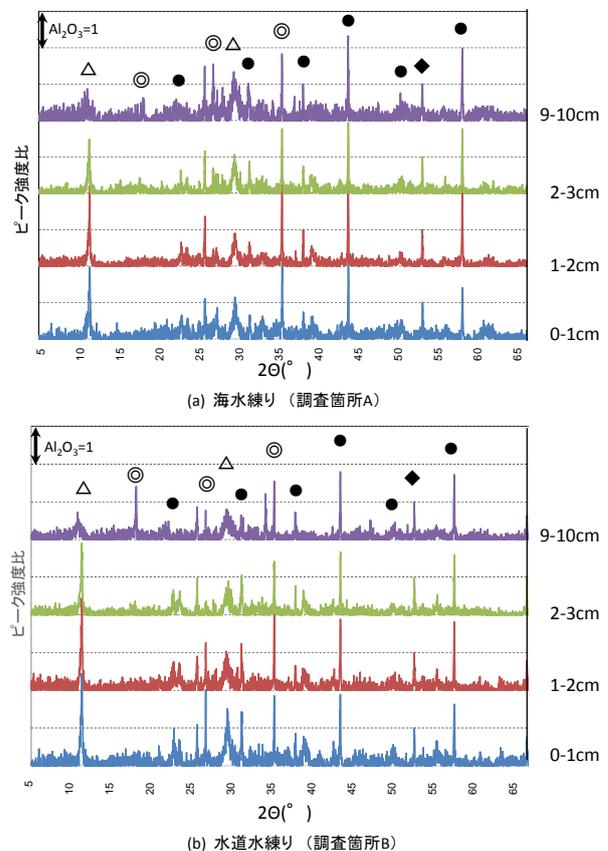


図-10 X 線回折による分析結果

(○ : F 塩, △ : Ca(OH)₂, ◇ : CaCO₃, □ : Al₂O₃(基準))

4. 海水練りプレパックドコンクリートの健全性

コアの外観観察から分かるように、プレパックドコンクリートの断面には目立った間隙は存在せず、練混ぜ水の種類（海水、水道水）にかかわらずモルタルが粗骨材間に密実に充填している。また、プレパックドコンクリートのコアの圧縮強度については、寸法 100mm を超える粗大な骨材を用いた調査箇所 A を除き、 $20\text{N}/\text{mm}^2$ 以上であった。練混ぜ水に海水を使用した現場打ちコンクリート（調査箇所 C）のコアの圧縮強度は平均で $25.5\text{N}/\text{mm}^2$ 以上であり、海水を使用した場合でも、50 年間の供用後にある程度の強度を有していた。

コンクリート中の塩化物イオンについては、練混ぜ水に海水を使用することによって内部に含まれる塩化物イオンは 50 年間の供用後も残存し、さらに環境条件によって表面付近には外部からの塩化物イオンも侵入することが分かった。また、長期間の供用後のフリーデル氏塩を含む水和物の変化についても、海水を使用することによる影響は小さいと考えられる結果が得られた。

以上より、無筋コンクリート構造物において、海水練りプレパックドコンクリートの健全性としては、充填性、強度、コンクリート中の物質移動および変化の観点から、水道水を使用した場合と遜色ないと判断することができる。

5. まとめ

本研究では、建設後 50 年が経過した鳥取県田後港に現存する海水練りプレパックドコンクリートからコアを採取し、コアの外観観察、塩化物イオン分布、圧縮強度および水和物に基づきその健全性を調査した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) コアの断面には目立った間隙は存在しなかったため、1962 年当時には練混ぜ水として海水を使用したプレパックドコンクリート用モルタルの材料および施工技術が確立されていたものと推察される。
- (2) プレパックドコンクリートおよび練混ぜ水として海水を使用したコンクリートは、50 年間の供用後でもある程度の圧縮強度を有する。

(3) 練混ぜ水として海水を使用したコンクリートは長期間の曝露後においても深部の塩化物イオン濃度は高く、外来塩分の影響を受ける環境下ではさらに表面部の塩化物イオンは増加する。

(4) X 線回折の結果、練混ぜ水として海水を使用したコンクリートの水和物は、50 年間の供用後において水道水を使用したコンクリートと概ね同様であった。

以上より、練混ぜ水として海水を使用したプレパックドコンクリートは、充填状況、塩化物イオン分布、圧縮強度及び水和物の観点から練混ぜ水の影響は小さく、海水練りプレパックドコンクリートは 50 年間の供用後も水道水練りと同等の健全性であることが明らかになった。

謝辞

本研究は、日本コンクリート工学会「コンクリート分野における海水有効利用研究委員会」での活動の一環として実施し、大即信明委員長、濱田秀則 WG1 主査をはじめ、委員の方々とのディスカッションを通じて取りまとめたものである。また、調査に際しては、国土交通省中国地方整備局鳥取出張所松本次男所長、坂本典之調査官（所属は調査当時）に多大なるご協力をいただいた。

参考文献

- 1) 日本セメント技術協会、プレパックドコンクリート、コンクリートパンフレット、第 75 号、1964
- 2) 土木学会、プレパックドコンクリート施工例集、コンクリートライブラリー第 13 号、1965
- 3) 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
- 4) 大即信明：練混ぜ水に海水を用いた混合セメント中の鉄筋腐食に関する研究、平成 24 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、2013
- 5) 斎藤豪、菊地道生、多田直央、佐伯竜彦：海水練りセメントペースト供試体の水和反応解析、無機マテリアル、Vol.21、No.371、pp.231-241、2014