

## 海水練り・海砂コンクリート(人工岩塩層)の開発

竹田 宣典 石関 嘉一  
青木 茂 入矢 桂史郎

(本社技術本部  
ビジネス・イノベーション室)

### Development of Concrete Made with Sea Water and Un-washed Sea Sand

Nobufumi Takeda Yoshikazu Ishizeki  
Shigeru Aoki Keishiro Iriya

#### Abstract

We developed high-density and hard concrete using sea water and unwashed sea sand. The internal organizations of that concrete was denser compared with normal concrete, and it was clear that the water-tightness, early strength, and long-term strength of sea water and unwashed sea sand concrete were increased. Reinforced concrete structures that used a non-corrosive reinforcing bar were durable in the long term. Sea water and unwashed sea sand concrete construction could be used on remote islands or on the coast to reduce CO<sub>2</sub> emission and construction costs. This paper describes the properties of sea water and unwashed sea sand concrete and the examination about application to the concrete structures.

#### 概 要

コンクリートの使用材料として海水や未洗浄の海砂を用いることにより、高い緻密性をもつ“海水練り・海砂コンクリート(人工岩塩層)”を開発した。海水練り・海砂コンクリートは、真水を用いた通常のコンクリートに比べて内部組織が緻密になり、水密性の向上、早期強度および長期強度が増大することが明らかになった。鉄筋コンクリート構造物に適用する場合には、非腐食性補強材を用いることにより、長期的な耐久性を確保できることを確認した。また、真水や陸砂の入手が困難な離島や沿岸地域でのコンクリート工事に適用した場合、材料の地産地消化を図ることができ、建設時のCO<sub>2</sub>排出量と建設コストを削減できることを確認した。本文では、海水練り・海砂コンクリートの性質およびコンクリート構造物への適用に関して検討した結果について述べる。

#### 1. はじめに

コンクリート用材料として、海水と未洗浄の海砂を用いることにより、高い緻密性をもつ“海水練り・海砂コンクリート(人工岩塩層)”を開発した。米国における低レベル放射性廃棄物処分場(例えばニューメキシコ州カールズパッドの廃棄物隔離パイロットプラント WIPP; 1983~1985 年当社施工)は、物質の低拡散性が強く求められていることから、遮水性に優れる岩塩層内に建設されている。我が国には岩塩層は存在しないが、原子力関連施設などのエネルギー関連施設は沿岸部に立地することが多く、海水や海砂を容易に入手できる場合が多い。

このような背景から、海水を練混ぜ水として用い、未洗浄の海砂を細骨材として用いることにより、岩塩層と同等の緻密性をもつコンクリートを開発目標とした。

海水、海砂、高炉スラグ微粉末および特殊混和材料を組み合わせることで用いることにより、コンクリートの緻密化を図った。海水を練混ぜ水として使用した場合、初期強度が若干増加するとして既往の報告<sup>1), 2)</sup>があるが、海水や未洗浄の海砂を使用し、多量の塩化物イオンやその他の海水由来のイオンを含むコンクリートの性質は十分

に明らかにされていない。

現行の国内規準では、鉄筋腐食による劣化を防止する観点から、コンクリート中の塩化物イオン量の最大値が定められており、用心鉄筋を用いない無筋コンクリートを除き、鉄筋コンクリート構造物に対して海水や未洗浄の海砂を用いることは許されていない。しかしながら、近年、エポキシ樹脂塗装鉄筋、ステンレス鉄筋、炭素繊維ロッドなどの非腐食性補強材が開発され、高濃度の塩化物イオンが侵入しても、鉄筋コンクリートの耐久性を確保できることが確認されている。

また、離島や沿岸地帯において、真水や陸砂の入手が困難な地域でコンクリートを製造する場合、海水や海砂を有効に活用できれば、材料の運搬工程を短縮でき、建設工事のCO<sub>2</sub>排出量の削減やコストダウンを図ることができると考えられる。

本報告では、海水と海砂を使用したコンクリートの物性、補強材の腐食や変質の評価、離島工事におけるCO<sub>2</sub>排出量と建設コストの試算結果、および構造物への適用方法について述べる。

## 2. 試験概要

### 2.1 使用材料および配合

試験に用いたコンクリートの使用材料をTable 1に示す。練混ぜ水には水道水あるいは海水を用い、結合材として、普通ポルトランドセメント (OPC)、高炉スラグ微粉末 (BFS)、フライアッシュ (FA)、シリカフューム (SF) を用いた。また、混和剤として特殊混和剤 (AN) を使用したものも検討した。試験はモルタルとコンクリートについて実施した。

モルタルの配合をTable 2に示す。いずれも水結合材比 (W/B) を0.5、細骨材結合材比 (S/C) を3.0とし、①水道水、②海水、③海水+特殊混和剤を使用した場合の3種類の配合とし、それぞれの配合について、Table 3に示す結合材の混合比率の組合せについて試験を行なった。特殊混和剤は単位水量の一部とした。なお、モルタル試験において、細骨材に陸砂を用い、練混ぜ水に海水を用いた場合のモルタル中の総塩化物イオン量は4.6kg/m<sup>3</sup>であった。

コンクリートの配合とフレッシュコンクリートの試験結果をTable 4に示す。いずれも、結合材の混合比は、OPC50%、BFS50%の割合とし、水セメント比は50%とし、①水道水、②海水、③海水+特殊混和剤、④海水+特殊混和剤+シリカフュームを使用した場合の4ケースについて試験を行なった。未洗浄の海砂に含まれるNaCl量を0.3%と仮定し、これに相当する塩化物イオン量 (1.5kg/m<sup>3</sup>) をNaClとして添加した。コンクリート中の総塩化物イオン量は4.7kg/m<sup>3</sup>であった。

### 2.2 試験項目・試験方法

試験項目、試験方法をTable 5に示す。圧縮強度試験は、材齢7日、28日、91日において実施した。コンクリートの透水試験は、直径100mm、長さ200mm円柱供試体を用い、材齢28日よりインプット法 (水圧1.0MPa、48時間) により、水の浸透深さより透水係数を求めた。また、モルタル中の水和生成物の確認は、電子顕微鏡 (SEM) により行なった。補強材の腐食および変質は、オートクレーブ養生 (180℃、10気圧、8時間保持) と常圧・常温の繰り返し試験を33サイクル (海洋環境の100年間に相当) 行った後<sup>3)</sup>、補強材の腐食程度および変質状況を確認した。

Table 1 使用材料  
Materials

材 料	種 類	記号	諸元
水	水道水	WP	東京都水道局
	海水	WS	静岡県駿河湾 Cl <sup>-</sup> 濃度: 1.83%
結合材 B	普通ポルトランドセメント	OPC	密度3.16g/cm <sup>3</sup>
	高炉スラグ微粉末	BFS	密度2.89g/cm <sup>3</sup>
	フライアッシュ	FA	密度2.17g/cm <sup>3</sup>
	シリカフューム	SF	密度2.20g/cm <sup>3</sup>
細骨材	陸砂	S	密度2.62g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	碎石	G	密度2.65g/cm <sup>3</sup>
混和剤	AE減水剤	AE	密度1.05g/cm <sup>3</sup>
	特殊混和剤	AN	密度1.29g/cm <sup>3</sup>

Table 2 モルタルの配合  
Mix Proportion of Mortar

	W/B	S/B	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
			水		結合材	細骨材	特殊混和剤AN
			水道水	海水			
①	0.5	3.0	255	0	510	1518	0
②			0	255	510	1518	0
③			0	242	510	1518	17

Table 3 結合材の混合比率  
Mixed ratio of the Binder Material

試験条件	OPC	BFS	FA	SF
B30	70	30	0	0
B50	50	50	0	0
B70	30	70	0	0
F20	80	0	20	0
B50SF15	42.5	42.5	0	15
F20SF15	68	0	17	15

Table 4 コンクリートの配合  
Mix Proportion of Concrete

試験条件	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )									フレッシュコンクリートの性質	
			水		結合材			細骨材	粗骨材	AE減水剤	特殊混和剤(AN)	スランプ (cm)	空気量 (%)
			水道水	海水	OPC	BFS	SF						
①水道水	50	45.0	170	0	170	170	0	794	985	0.85	0	16.5	4.7
②海水		45.0	0	170	170	170	0	794	985	0.85	0	15.0	3.8
③海水+AN		45.0	0	157	170	170	0	794	985	0.85	17	14.0	4.0
④海水+SF+AN		47.5	0	157	152	152	34	782	985	0.85	17	17.5	3.3

### 3. 試験結果および考察

#### 3.1 圧縮強度

材齢7日, 28日, 91日におけるモルタルの圧縮強度を Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3に示す。高炉スラグ微粉末(BFS)を使用(置換率30~70%)した場合, 海水を用いた場合, 水道水に対して材齢7日で30~60%, 材齢28日で3~20%増加した。材齢91日においては, 置換率が30%場合, 海水の使用により15%程度増加するが, 置換率が50%以上の場合, 海水使用による強度増加は認められなかった。

フライアッシュ(FA)を使用(置換率20%)した場合は, 海水を用いた場合, 水道水に対して材齢7日で14%, 材齢28日および91日で6%増加した。シリカフェーム(SF)を使用(置換率15%)した場合は, 海水を使用した場合, 水道水に対する圧縮強度の増加率は, 材齢7日においてBSFで37%, FAで18%, 材齢28日では, BSFで14%, FAで17%, 材齢91日では, BSFで3%, FAで2%程度であった。混和材を用いた場合, 練混ぜ水に海水を使用することにより, 材齢28日までの強度は増大するが, 材齢91日においては大きな強度の増大は認められなかった。

練混ぜ水に海水を用い, 特殊混和剤(AN)を添加した場合の圧縮強度は, BFSを使用した場合, 水道水に対する強度は材齢7日では置換率に伴い大きくなり1.5~2.5倍程度であり, 材齢28日では約1.5倍, 材齢91日は1.2倍程度となった。FAを使用した場合は, 水道水に対して材齢28日で約20%, 材齢91日で約30%増加し, SFを使用した場合は, 材齢28日および材齢91日において, 水道水に対してBSFでは約30%, FAでは約20%増加した。

これらより, BFSやFAを結合材として使用する場合は, 練り混ぜ水として海水を使用し, 特殊混和剤やシリカフェームを添加すると, いずれの結合材を使用した場合にも, 初期強度(材齢7日)は著しく増加し, 長期強度(材齢91日)も増大することが確認された。この理由は, 特殊混和剤を添加することにより細孔溶液中のOH<sup>-</sup>濃度が上昇し, 混和材に対するアルカリ刺激作用が増加し, 水和反応が促進したものと推察される。

BFSを結合材の50%混入したコンクリートの圧縮強度の推移をFig. 4に示す。材齢7日においては, 水道水を用いた場合に比べて, 海水を使用した場合は約60%, 特殊混和剤およびシリカフェームを添加したものは約70%強度が増大した。材齢28日では, 海水を使用した場合は, 約30%, 特殊混和剤およびシリカフェームを添加したものは約60%増加した。材齢91日では, 海水を使用した場合の強度増加は少ないが, 特殊混和剤およびシリカフェームを添加したものは約20%の強度増加が認められた。

これまでに, コンクリートに塩化物を混入すると初期強度は増加するが, 長期強度の伸びは少ないことが知られている。しかし, 海水, 海砂, 高炉スラグ微粉末, フライアッシュなどのポゾラン, 特殊混和剤を組合せることによって, 高炉スラグ微粉末やポゾランの水和反応が促進され, 初期強度のみならず, 長期強度も増進するも

Table 5 試験項目・試験方法  
Test Items and Methods

試験項目	試験方法	モルタル	コンクリート
圧縮強度	JIS A 1108	○	○
水密性	透水試験(インプット法)		○
内部組織	電子顕微鏡(SEM)	○	
凍結融解抵抗性	JIS A 1148		○
凝結速度	JIS A 6204		○
長さ変化	JIS A 1129-1		○
鉄筋腐食	JCI SC2(オートグラフ法)		○

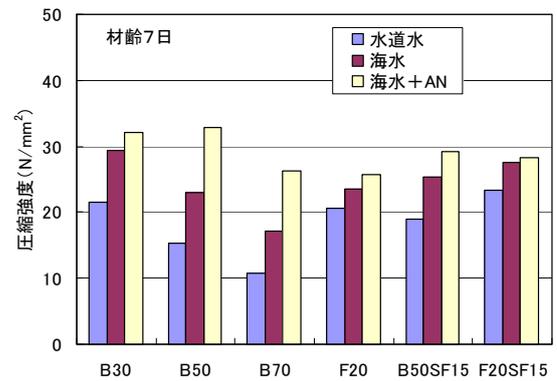


Fig. 1 モルタルの圧縮強度(材齢7日)  
Compressive Strength of Mortar(Age:7days)

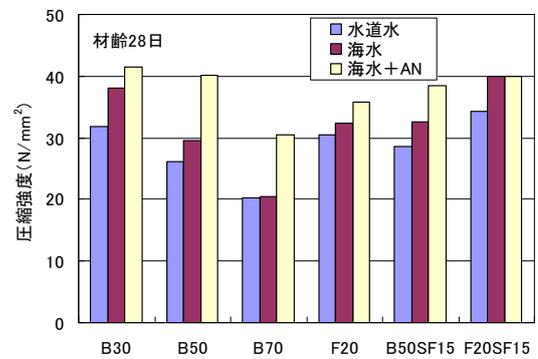


Fig. 2 モルタルの圧縮強度(材齢28日)  
Compressive Strength of Mortar(Age:28days)

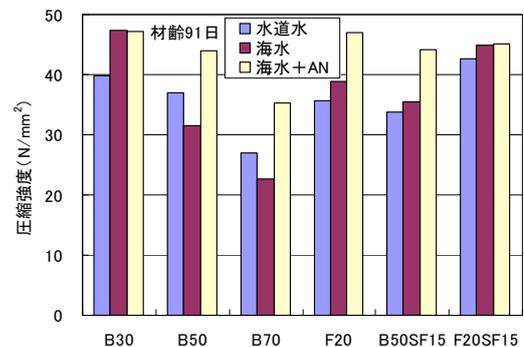


Fig. 3 モルタルの圧縮強度(材齢91日)  
Compressive Strength of Mortar(Age:91days)

のと推察される。

### 3.2 凝結時間

コンクリートの凝結試験結果をFig. 5に示す。海水を用いた場合は水道水を用いた場合と比較して、始発において1時間30分程度、終結において2時間15分程度早くなる。

### 3.3 水密性

コンクリートの透水係数をFig. 6に示す。練混ぜ水に水道水を用いた場合の透水係数 $8.0 \times 10^{-12} \text{m/sec}$ に対して、海水使用の場合は約1/2、特殊混和剤を使用した場合は約1/4、特殊混和剤とシリカフュームを使用した場合の透水係数は、 $1.2 \times 10^{-13} \text{m/sec}$ となり約1/70となった。このように、海水、特殊混和剤およびシリカフュームを併用することによって、著しく水密性が向上し、自然界に存在する岩塩層の透水係数( $1 \times 10^{-11} \text{m/sec} \sim 1 \times 10^{-14} \text{m/sec}$ )に匹敵する緻密度となることが確認された。

モルタルの電子顕微鏡(SEM)画像をPhoto 1に示す。水道水を用いたコンクリートと、海水、特殊混和剤およびシリカフュームを使用したコンクリートの内部組織を比較したものである。海水を使用したコンクリート中の空隙には、多数の針状結晶(エトリンガイト)が生成されており、この結晶が大きな空隙を埋めることによって、緻密化していると考えられる。この針状結晶は、通常のコンクリートにおいても生成されるが、高炉スラグ微粉末などの結合材中のカルシウムやアルミニウムを含む成分と海水に豊富に含まれる硫酸イオンとの化学反応によって、生成が助長されたと考えることができる。

### 3.4 凍結融解抵抗性

凍結融解試験における相対動弾性係数の変化をFig. 7に示し、質量減少率の変化をFig. 8に示す。この試験におけるコンクリート中の塩化物イオン量は、海水から混入する量の $3.1 \text{kg/m}^3$ とした。いずれの配合も空気量を3.4%以上としたものは、凍結融解繰り返し300回において、相対動弾性係数は85%以上であり、質量減少率の低下は少なく、凍結融解繰り返しによる劣化は生じなかった。したがって、海水を練混ぜ水として使用した場合においても、普通コンクリートと同様に空気量を3.5%以上とすることにより、凍結融解抵抗性は確保できると考えられる。

### 3.5 乾燥収縮

乾燥収縮による長さ変化率をFig. 9に示す。海水から混入する塩化物イオンが $3.1 \text{kg/m}^3$ を含むコンクリートは、水道水を使用した場合に比較して、いずれの配合においても $50 \times 10^{-6} \sim 70 \times 10^{-6}$ 程度小さい結果となった。

### 3.6 補強材の腐食および変質

普通鉄筋、エポキシ樹脂塗装鉄筋、炭素繊維ロッドをコンクリート中に設置し、オートクレーブによる促進後の腐食、変質状況をPhoto 2に示す。33サイクルの繰り返し

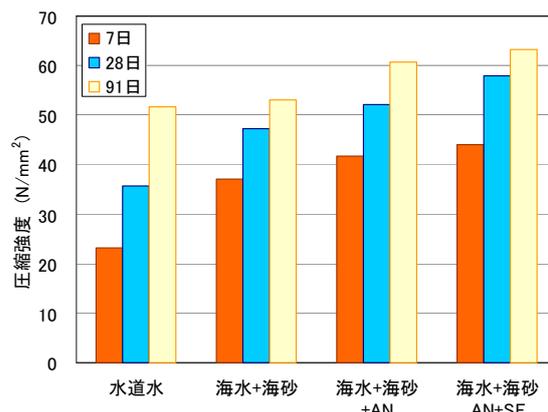


Fig. 4 コンクリートの圧縮強度  
Compressive Strength of Concrete

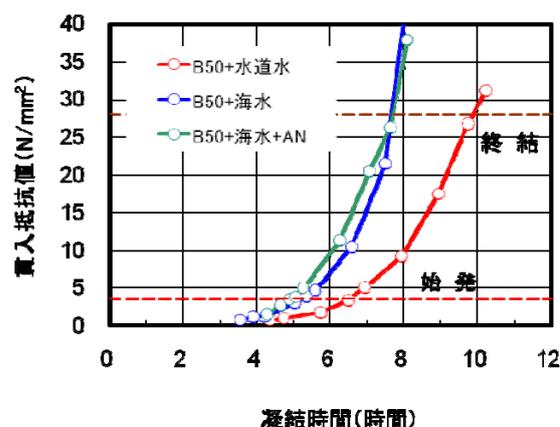


Fig. 5 コンクリートの凝結時間  
Setting Time of Concrete

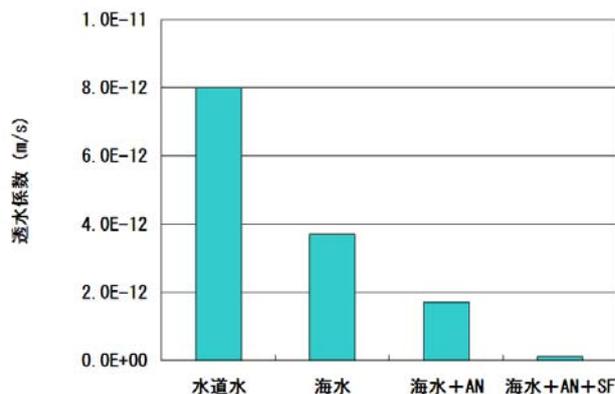


Fig. 6 コンクリートの透水係数  
Coefficient of Permeability

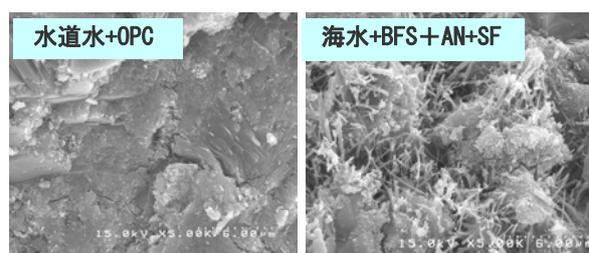


Photo 1 モルタルの電子顕微鏡画像  
SEM Image of Mortar

返し試験(海洋環境100年に相当)の結果、普通鉄筋は全面的に腐食が発生したが、エポキシ樹脂塗装鉄筋、炭素繊維繊維ロッドには、腐食および変質は認められなかった。

#### 4. 海水練り・海砂コンクリート構造物への適用検討

##### 4.1 製造方法

海水練り・海砂コンクリートの製造はFig. 10に示すように、海岸近くにコンクリートプラントを設置し、通常のコンクリートと同様な方法で行うことができる。練り混ぜ水として使用する海水は、沿岸部よりポンプでくみ上げ、ろ過装置により除塵して使用し、海砂は海底あるいは海岸部より採取し、水洗いによる塩分の除去をしないまま使用する。また、結合材および特殊混和剤は、練混ぜ時にプラントのミキサに投入して海水練り・海砂コンクリートを製造する。コンクリートの運搬は、通常のアジテータ車、コンクリートポンプ車を用いて行なうことができる。

鉄筋コンクリート構造物に使用する場合には、補強材としてエポキシ樹脂塗装鉄筋、炭素繊維繊維ロッドの他、ステンレス鉄筋や亜鉛メッキ鉄筋などの防食鉄筋を使用する。また、セパレータや埋込み金物などコンクリート中に埋込まれる金属材料には、被覆材料による防食あるいはセラミックス系材料などを用いることが望ましい。

##### 4.2 コストとCO<sub>2</sub>排出量の評価

真水および陸砂の供給が困難な離島(本土より沖合い約100km)の海洋環境における擁壁建設工事(コンクリート打設量:1,000m<sup>3</sup>, 設計耐用年数:100年)をモデルケースとして、コンクリート工事における建設コストおよび

CO<sub>2</sub>排出量の試算を行った。CO<sub>2</sub>排出量の原単位は、土木学会で示されている値を用いた<sup>4)</sup>。本土より真水、陸砂を輸送船により運搬して製造したコンクリートを使用する案(A案)と現地の海水、海砂を使用したコンクリートを使用する案(B案)について比較した結果をFig. 11に示す。両案ともに、現地に設置した簡易プラントで製造

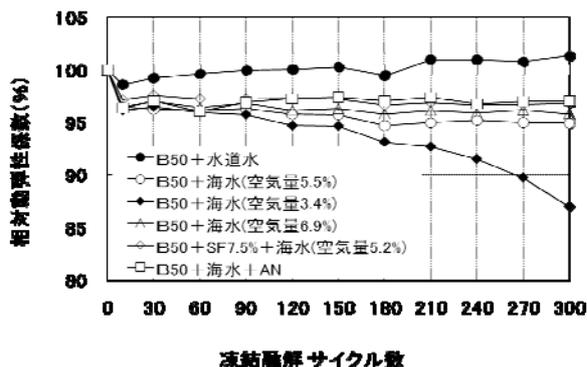


Fig. 7 相対動弾性係数の変化  
Change in Dynamic Modulus

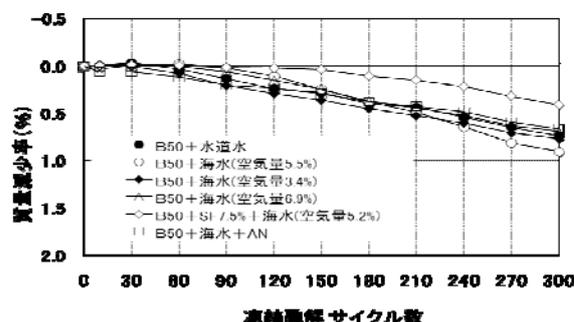


Fig. 8 質量変化率の変化  
Change in Mass Loss

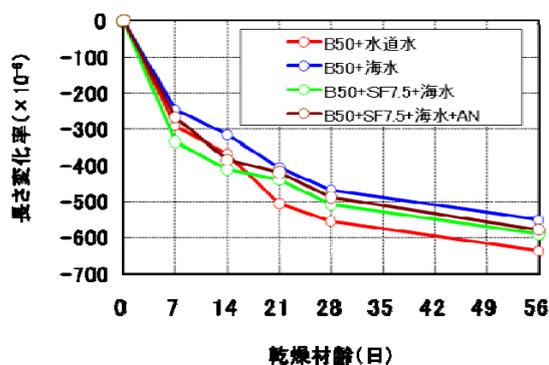
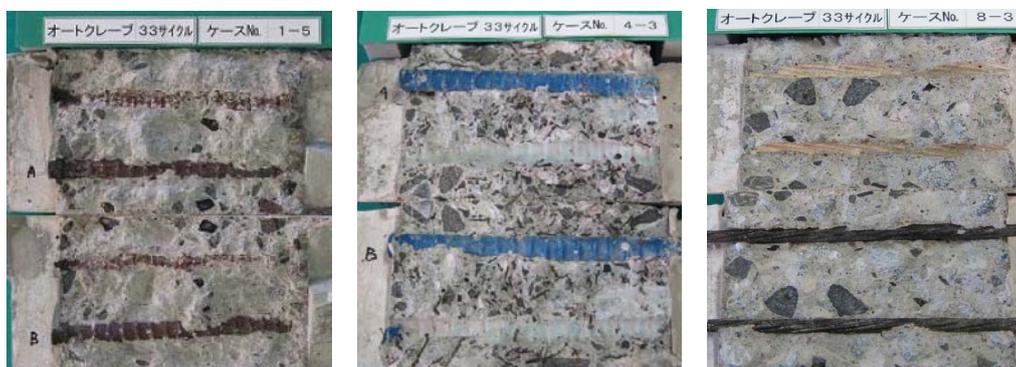


Fig. 9 乾燥収縮による長さ変化率  
Change in Drying Shrinkage



(a) 普通鉄筋

(b) エポキシ樹脂塗装鉄筋

(c) 炭素繊維繊維ロッド

Photo 2 補強材の腐食促進試験結果  
Reinforcing Rod Corrosion Promotion



Fig. 10 海水練り・海砂コンクリートの製造方法  
Production of the Concrete using with Sea Water and Non-washed Sea Sand

し、補強材にはエポキシ樹脂塗装鉄筋を使用する。

試算の結果、海水練り・海砂コンクリートを使用する場合の建設コストは、真水、陸砂を本土より輸送船により運搬する場合に比べて、無筋構造物の場合、約10%縮減でき、鉄筋を有する構造物の場合、約6%縮減できる。

また、海水練り・海砂コンクリートを使用する場合のCO<sub>2</sub>排出量は、真水、陸砂を本土より輸送船により運搬する場合に比べて約40%縮減できる。

このように、海水練り・海砂コンクリートを用いた場合、構造物の品質や耐久性の向上が得られる他に、材料供給が困難な地域の工事においては、建設コストおよびCO<sub>2</sub>排出量の縮減に寄与できる。

#### 4.3 適用対象構造物

海水練り・海砂コンクリートの適用対象としては、特に下記に示す構造物に適用した場合に、その性能を有効に生かせると考える。

- ①放射性廃棄物処分施設、原子力発電所諸施設など高い遮水性が求められる重要構造物
- ②塩害を受けやすい沿岸・海洋の土木構造物(沿岸・港湾・エネルギー施設など)
- ③真水や陸砂の調達が困難な地域の構造物(洋上・離島など)

#### 5. まとめ

海水および未洗浄の海砂を用いたコンクリート(人工岩塩層)の性質とその適用効果に関する検討を行った結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 練混ぜ水に海水を用い、特殊混和剤およびシリカフェームを添加したコンクリートは、初期強度が著しく増大し、長期強度も高く維持できることを確認した。
- 2) 練混ぜ水に海水を用い、特殊混和剤およびシリカフェームを添加したコンクリートの透水係数は、水道水を用いた通常のコンクリートに比べて約1/70となり、岩塩層に匹敵する緻密性が得られた。

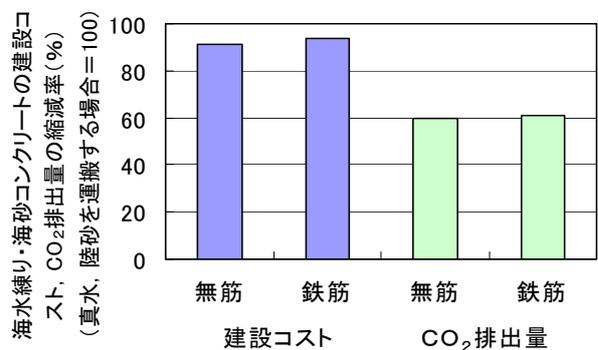


Fig. 11 建設コストおよびCO<sub>2</sub>排出量比較  
Construction Cost and CO<sub>2</sub> Emission

- 3) 練混ぜ水に海水を用いたコンクリートの凍結融解抗性は、空気量を3.5%以上とすることにより確保できる。
- 4) 練混ぜ水に海水を用いた場合の乾燥収縮ひずみは、水道水を用いた場合より小さくなる。
- 5) 海水および未洗浄の海砂を使用することにより、離島などの工事においては、材料の地産地消化、材料の運搬コストの低減によって、CO<sub>2</sub>排出量の削減および建設コストを削減できる。

#### 参考文献

- 1) 伽場重正ほか：練り混ぜ水に海水を使用したコンクリートの諸性質について、材料、第42巻、第260号、pp425～431、(1975.5)
- 2) 大即信明ほか：海洋環境におけるコンクリート中の塩素に関する一考察、土木学会論文報告集、第332号、pp107～118、(1983.4)
- 3) 武若耕司ほか：オートグレーブによるコンクリート中の鋼材の腐食促進試験、第3回コンクリート工学年次講演会論文集、pp.161～164、(1981)
- 4) 土木学会：コンクリートライブラリー125「コンクリート構造物の環境性能照査指針(試案)」、(2005)