

論文 凍害を考慮した護岸に適用する中流動コンクリートの諸特性

野村 晃平*1・鶴田 浩章*2

要旨：近年,海岸線領域では越波被害が発生しており,対策としてフレア型護岸の整備が進んでいる。フレア型護岸は西日本を中心に施工されており,優れた越波抑制能力を有しているが,特異な形状をしているため施工効率に課題がある。そのため,施工効率とコストを考慮した増粘剤一液型高性能 AE 減水剤を使用した中流動コンクリートを採用した。また今後,寒冷地域などの東日本での施工が予想されることから膨張材ではなく耐凍害性の向上効果のある収縮低減剤を使用した中流動コンクリートがフレア型護岸に適用できるかを評価した。その結果,耐凍害性,耐塩害性が優れており,寒冷地域において適用できる可能性が示唆された。

キーワード：中流動コンクリート, 収縮低減剤, 護岸, 凍害, 寒冷地域

1. はじめに

近年, 海岸線領域や湖岸地域において台風による高波や高潮により越波被害が起きている。その対策として写真-1 に示すフレア型護岸の整備が進められている。フレア型護岸は鋼・コンクリート合成構造物であり, 高い越波抑制能力を有し, 直立護岸と比べ天端高を低くすることができるため, 景観に優れているという利点がある。また, 現在の施工状況としては西日本を中心に施工が進められている。

しかし, 特異な形状によりコンクリートの頻繁な振動締固めが必要であり, 施工労力が大きく, 施工効率に課題がある。そこで課題を改善するため,従来使用していた高性能 AE 減水剤(以下,SP)の代わりに, 施工性とコストのバランスを考慮した増粘剤一液型高性能 AE 減水剤(以下,SP-USV)を用いた中流動コンクリート(以下,SSC-USV)の使用が期待されている。

フレア型護岸は前述した通り,西日本を中心に施工されており,今後は東日本にも整備が進むと考えられる。また合成構造物であるため,収縮ひび割れの発生が懸念され,対策として膨張材(以下,HE)が使用されている。しかし,HE を使用したコンクリートは寒冷地域では凍害などで耐久性が低下するという報告¹⁾もあるため,従来の配合では適用できない懸念がある。そこで HE は使用せず,従来の収縮低減剤と比べ, 耐凍害性を向上させる効果のある収縮低減剤²⁾(以下,SRA)を用い,基本的性質を従来のコンクリートと比較し,SRA を用いた SSC-USV がフレア型護岸に適用できるかを評価した。

2. 使用材料および計画配合

実際に使用した材料およびその特性値を表-1 に, 計画配合を表-2 に示す。NC-12 の配合は, 実施工で使用さ

れている配合を基に目標スランプ 12±1cm, 目標空気量 4.5±1.5%, W/C(W/B) は 45%と決定した。一方 SSC-USV は過去の研究³⁾から目標スランプフロー525±25mm, 目標空気量 4.5±1.5%, W/C(W/B)は 45%と決定した。HE はセメント重量に対して内割で使用しており,本研究では SRA の効果を確認するため HE は使用せず SRA を外割で添加し,標準使用量 2kg を使用した。



写真-1 フレア型護岸

表-1 使用材料と特性値

材料	種類	記号	特性値
水	上水道	W	密度1.00(g/cm ³)
セメント	普通ポルトランドセメント	OPC	密度3.15(g/cm ³), 比表面積3350cm ² /g
	高炉セメントB種	BB	密度3.04(g/cm ³), 比表面積3950cm ² /g
細骨材	川砂	S	表乾密度2.58(g/cm ³), 吸水率1.10(%)
粗骨材	碎石	G	表乾密度2.68(g/cm ³), 吸水率0.75(%)
混和材	膨張材	HE	石灰系
混和剤	収縮低減剤	SRA	炭化水素系化合物とグリコールエーテル系誘導体
	高性能AE減水剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系化合物
	増粘剤一液型高性能AE減水剤	SP-USV	ポリカルボン酸エーテル系化合物
	消泡剤	AE-1	ポリアルキレングリコール誘導体

*1 関西大学大学院 理工学研究科 環境都市工学専攻 (学生会員)

*2 関西大学 環境都市工学部 都市システム工学科教授 (正会員)

表-2 計画配合

	W/C(%)	W/B(%)	単位量(kg/m ³)											
			W	OPC	BB	HE	S	G	(g/m ³)			AE-I(%)		
									SRA	SP	SP-USV	C×%		
NC-12 OPC	45		160	336	-	20	795	1005	-	1956	-	-		
SSC-USV OPC (HE)			170	358			-	868		881	2000		-	9256
SSC-USV OPC (SRA)				378				-		-			7556	
NC-12 BB	45		160	-	336	20	769	1022	-	1778	-	0.001		
SSC-USV BB (HE)			170		358		-	857		881	2000	-	4156	0.001
SSC-USV BB (SRA)					378			-		-		3778	0.002	

3. 実験概要

3.1 圧縮強度試験

本研究では日本港湾協会の「港湾の施設の技術上の基準・同解説」⁴⁾を基に材齢 28 日における設計基準強度を 30N/mm²とした。フレア型護岸はこの条件を満足する必要がある。供試体作製は JIS A 1132「コンクリート強度試験用供試体の作り方」に準拠し、φ100×200mm の圧縮強度試験 1 材齢につき 3 体作製した。強度試験は JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に従った。養生方法は 20℃の水中養生で試験材齢は 7 日, 28 日, 91 日とした。

3.2 長さ変化試験

乾燥収縮試験を JIS A 1129-3 に準拠して行った。打込み時にダイヤルゲージ法専用の型枠にゲージプラグを差し込み、練り上がったフレッシュコンクリートを 2 層に分け打ち込んだ。打込みの翌日に脱型し、材齢 7 日まで水中養生した後、ダイヤルゲージを使用し乾燥収縮ひずみの測定を行った。

3.3 凍結融解試験

フレア型護岸は寒冷地域で施工することを想定しているため、凍害に対する劣化抵抗性を把握する必要がある。凍結融解試験は JIS A 1148 の A 法に準拠して行った。30 サイクル毎に供試体の質量とたわみ振動の一次共鳴振動数を測定した。測定した質量から質量減少率を算出し、一次共鳴振動数から相対動弾性係数を算出した。また、相対動弾性係数を基に耐久性指数も算出した。相対動弾性係数および耐久性指数(DF)の算出式を式(1)⁵⁾および式(2)⁵⁾に示す。試験は 300 サイクル完了もしくは、相対動弾性係数が 60%未満で試験終了とした。

$$P_n = \left[\frac{f_n^2}{f_0^2} \right] \times 100 \quad (1)$$

ここで、 P_n は凍結融解 n サイクル後の相対動弾性係数(%), f_n は凍結融解 n サイクル後のたわみ振動の一次共鳴振動数(Hz), f_0 は凍結融解 0 サイクル後のたわみ振動の一次共鳴振動数(Hz)を表す。

$$DF = P \times N / M \quad (2)$$

ここで、 P は N サイクルのときの相対動弾性係数(%), N は相対動弾性係数が 60%になるサイクル数, または 300 サイクルのいずれか小さいもの, M は 300 サイクルを表す。

3.4 塩分浸透抵抗性試験

フレア型護岸は海岸線領域に設置される構造物であるため、塩害の被害が懸念される。そのため塩分浸透抵抗性が高いコンクリートが必要である。塩化物イオン浸透抵抗性試験および供試体の作製は、JIS A 1154「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」、JSCG-G 572-2010「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法」に準拠した。φ100×150mm の円柱供試体を 1 種類につき 4 体作製し、4 体中の 3 体を浸せき試験用、残りの 1 体を初期に含まれる塩化物イオン調査用とした。供試体は 1 面浸せきとし、その他の面はエポキシ樹脂を塗布し、20±2℃、濃度 10%の塩化ナトリウム水溶液に浸せきした。浸せきした期間は 3, 6, 9, 12 ヶ月とした。浸せき終了後、供試体 1 体を割裂し、割裂面に 0.1mol/l の硝酸銀を噴霧し、乾燥後に計測した。計測範囲は、浸漬面から白色に呈色した部分まで計測した。

次に浸せき面から深さ 1cm 間隔で供試体を切断し、0.15mm 以下に粉砕した。その後、電位差滴定装置を用い、作製した試料から塩化物イオン量を測定した。求めた塩化物イオン量から拡散方程式(式(3))の解を用いて⁶⁾、浸せき試験によるコンクリート表面の全塩化物イオンおよび塩化物イオンの見掛けの拡散係数を算出し、式(4)を用い⁷⁾劣化予測を行った。

$$C(x, t) - C_i = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{ap} \times t}} \right) \right\} \quad (3)$$

$$C(x,t) = \gamma_{cl} C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{ap} \times t}} \right) \right\} + C_i \quad (4)$$

ここに、 x ：暴露面から全塩化物イオンを測定した箇所までの距離(cm)、 t ：浸せき期間(年)、 $C(x,t)$ ：距離 x (cm)浸せき期間 t (年)において測定されたコンクリートの単位質量あたりの全塩化物イオン濃度(kg/m³)、 C_i ：初期に含有される全塩化物イオン濃度(kg/m³)、 erf ：誤差関数、 γ_{cl} ：安全係数(=1.0)を表す。

3.5 流体エロージョン試験

フレア型護岸は海岸線領域に設置されるため、波と砂れきによる侵食を受ける可能性がある。したがって波の作用に対する抵抗性を有している必要がある。しかし、液体と固体による複合的なすりへりに対する抵抗性を評価した知見⁸⁾は少ないのが現状である。そこで、波のすりへり現象は液体と固体の複合的なすりへりであるため各コンクリートのすりへり抵抗性を比較し、液体と固体による複合的なすりへりを再現した流体エロージョン試験を行い、それぞれの耐摩耗性について検討した。流体エロージョン試験は、ASTM C1138「Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete (Underwater Method)」に準拠して行った。流体エロージョン試験の供試体と試験装置を図-1に示す。供試体はφ300×100mmの円盤供試体を1種類につき3体作製し、材齢28日まで水中養生を施した後、打込み時の底面を試験面として試験を行った。試験期間中は湿潤状態を保つため、水中養生を行い、供試体毎の試験結果の差を小さくするため、3体の供試体の全てが12時間の試験を終了してから、次の12時間の試験を行うというローテーションで試験を行った。

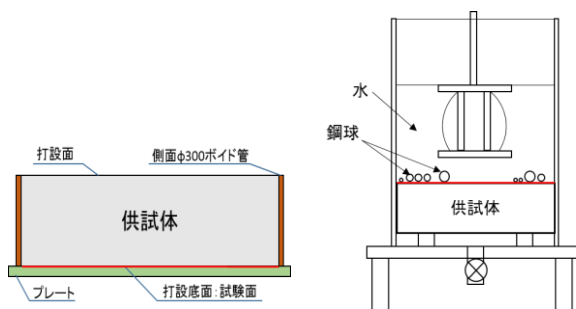


図-1 供試体と試験装置

$$V_t = (W_{air} - W_{water}) / G_w \quad (5)$$

$$V_{Lt} = V_i - V_t \quad (6)$$

$$ADA_t = V_{Lt} / A \quad (7)$$

ここに、 W_{air} は求める時間における気中での供試体質量(g)、 W_{water} は求める時間における水中での供試体質量

(g)、 G_w は水の単位体積質量、 V_i は試験前の供試体の体積(cm³)、 V_t は求める時間における供試体の体積(cm³)、 V_{Lt} は求める時間における摩耗損失体積(cm³)、 A は供試体上面の面積(cm²)

4. 実験結果および考察

4.1 圧縮強度試験

圧縮強度試験の結果を図-2に示す。図-2よりSRAを使用したSSC-USVはHEを使用したSSC-USVに比べOPCでは圧縮強度が8%程増加する傾向が見られるが、BBでは4%程低下する傾向が見られる。しかし、材齢28日の時点で圧縮強度30N/mm²以上を超えているため、強度条件を満足していることが確認できた。

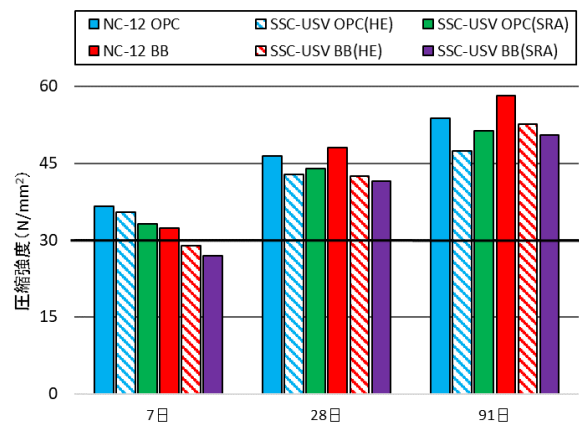


図-2 圧縮強度試験結果

4.2 長さ変化試験

長さ変化試験の結果を図-3に示す。SRAを使用したSSC-USVはHEを使用したものと比較し、OPCよりもBBの方が同等の収縮抑制効果を有していることが分かった。しかし、この原因は明確になっていない。OPCのHEとSRAを使用したものの収縮ひずみの差は 100×10^{-6} より大きいいため、HEを用いたSSC-USVと同等の収縮抑制効果を確認することはできなかった。

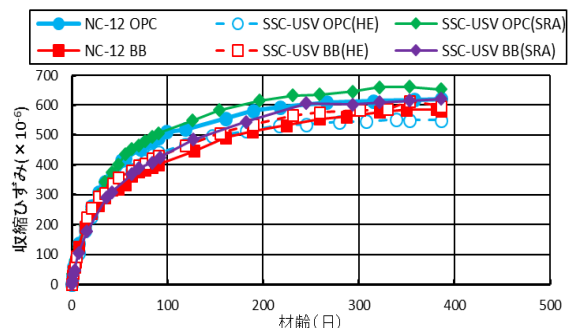


図-3 長さ変化試験結果

4.3 凍結融解試験

凍結融解試験結果、混和剤の使用量と耐久性指数の関係、混和剤の使用量と空気量の関係および消泡剤の使用量と耐久性指数の関係を図-4～図-7に示す。図-4を

見ると、SRAを使用したSSC-USVBBの300サイクル後の相対動弾性係数が最も大きく、耐凍害性に優れていることが分かった。一方、HEを用いたSSC-USVは、著しく耐凍害性が低いことが分かった。次に図-5について、NC-12に使用しているSPとSSC-USVに使用しているSP-USVは、使用量の増加につれて、耐久性指数は低下する傾向が見られた。

また図-6よりSP・SP-USV使用量が増えるにつれて空気が低下する傾向が見られる。図-7より消泡剤の使用量が増加にするにつれて耐久性指数は増加する傾向が見られた。既往の研究⁹⁾では消泡剤を用いることで、凍害に対して有効な微細な気泡が減少するという報告があるが、今回の試験は反対の結果となった。

次に、HEを用いたSSC-USVの耐久性指数が低いのは図-5、図-6より、BBを用いたSSC-USVの混和剤の使用量や空気がほぼ同等であるのに、HEを用いたものの耐久性指数が67%低下している。この理由は消泡剤の影響も考えられるが、HEの影響により耐凍害性が低下した¹⁰⁾と推察される。しかし、今回の試験の供試体は無拘束状態であり、今後は実際の構造物を想定した拘束状態で試験を行う必要がある。また、今回はセメントペースト中の気泡性状を検討していないため、気泡間隔係数や詳細なセメントペーストの検討も行う必要がある。

4.4 塩分浸透抵抗性試験

供試体に0.1mol/lの硝酸銀溶液を噴霧した塩化物イオン浸透深さ試験結果、電位差滴定試験結果(浸漬期間6ヶ月)および鋼材位置における鋼材腐食の劣化予測を図-8~図-11に示す。図-8の塩化物イオンの浸透深さはNC-12よりもHEを用いたSSC-USVの方が大きかった。この理由はモルタルの体積率がSSC-USVの方が高いためと考えられる。また、SRAを用いたSSC-USVはNC-12やHEを用いたSSC-USVより浸透深さが小さい傾向にある。次に図-9よりSRAを用いたSSC-USVはHEを用いたSSC-USVと比べOPCの方では約22%拡散係数を低下させ、BBの方では12%拡散係数を低下させていることが分かる。このことからSRAを用いたSSC-USVは塩化物イオン浸透に対する抵抗性に優れていることが分かった。

次に図-10、図-11において拡散係数により式(4)を用いて鋼材位置における鋼材腐食までの劣化予測を行った。また、塩害の劣化を予測する上で必要な鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度はセメントの種類と水セメント比の関係により決まる。OPCおよびBBを式(8)、式(9)を用いることにより鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度はそれぞれ2.05kg/m³、1.93kg/m³と算出した¹¹⁾。

図-10、図-11には鋼材腐食発生限界となる塩化物イオン濃度をOPCおよびBBについて、それぞれ青線と赤

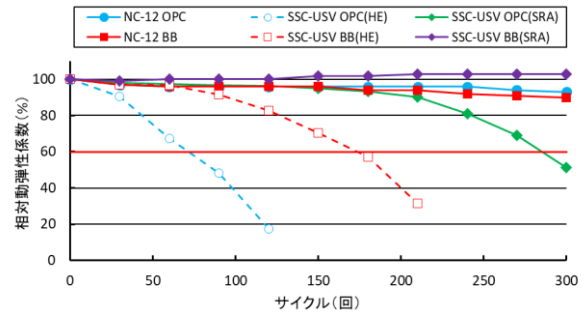


図-4 凍結融解試験結果

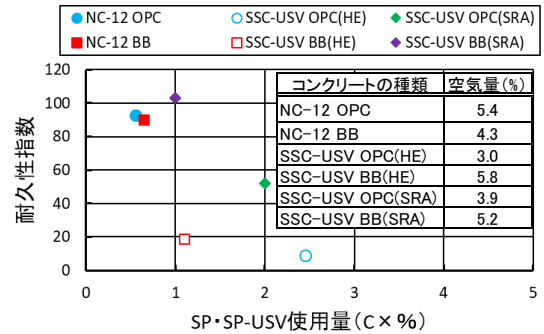


図-5 SP・SP-USV使用量と耐久性指数の関係

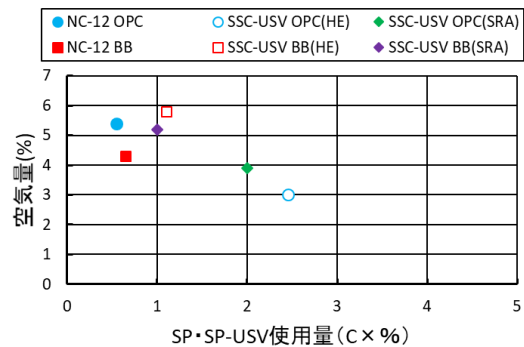


図-6 SP・SP-USV使用量と空気量の関係

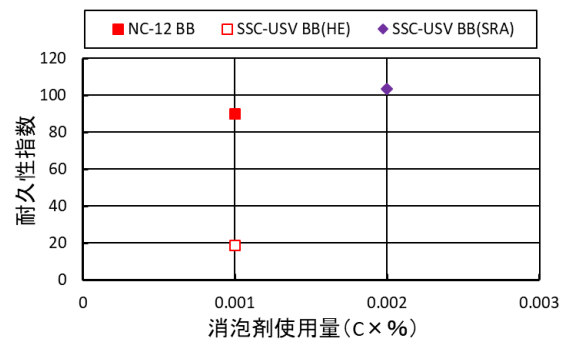


図-7 消泡剤使用量と耐久性指数の関係

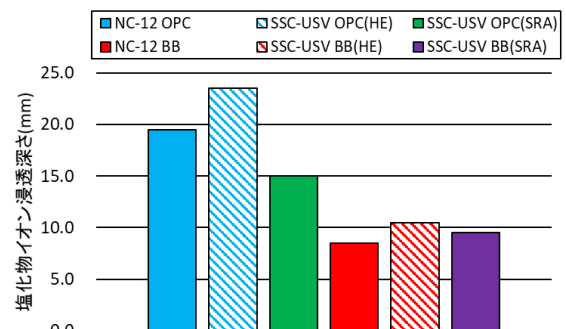


図-8 硝酸銀噴霧試験による塩化物イオン浸透深さ

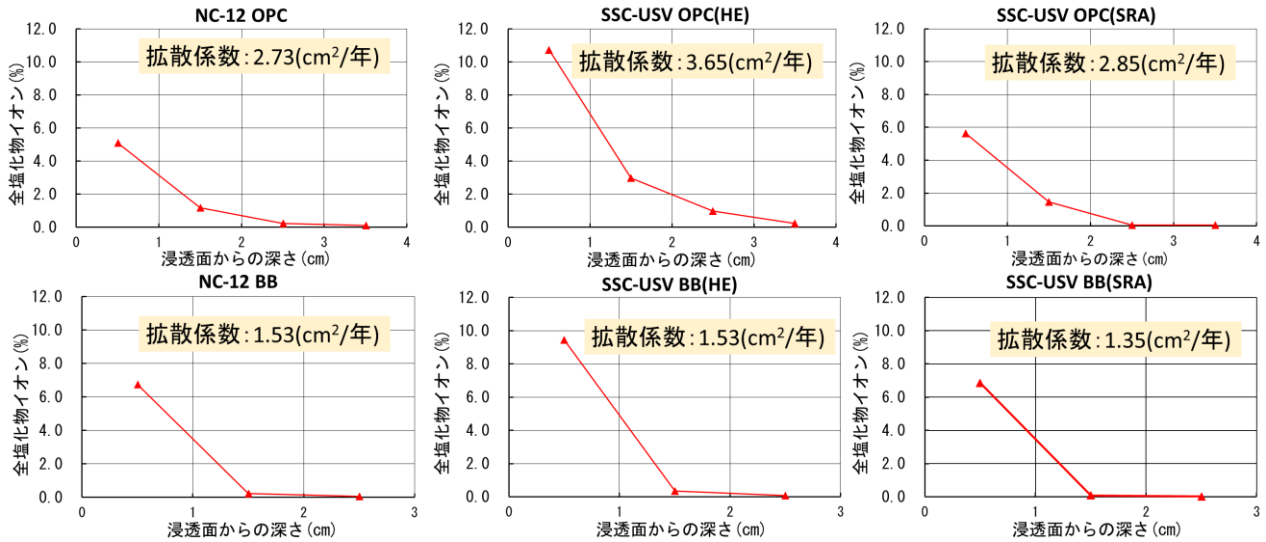


図-9 電位差滴定試験結果と拡散係数

線で示す。SRAを使用したSSC-USVはHEを用いたSSC-USVよりも鋼材腐食発生限界に達するまでの期間を長くすることが分かった。しかしSRAを使用することで塩分浸透抵抗性がなぜ向上するのか明確になっていないため、今後は、コンクリート内部の検討が必要であり、コンクリートの塩分固定化について検討する必要がある。

$$C_{lim} = -3.0(W/C) + 3.4 \quad (8)$$

$$C_{lim} = -2.6(W/C) + 3.1 \quad (9)$$

ここに、 C_{lim} :鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

4.5 流体エロージョン試験

流体エロージョン試験結果、試験開始時および試験終了時の圧縮強度と平均摩耗深さの関係を図-12、図-13に示す。図-12よりSRAを使用したSSC-USVは平均摩耗深さが大きくなる傾向が見られた。しかし、HEを用いたSSC-USVと比較して平均摩耗深さは大幅な差はないためほぼ同等と考えられる。

図-13より圧縮強度と平均摩耗深さの関係性を見るため、モルタル体積率が同一のSSC-USVだけを抽出した。これより圧縮強度が大きければ平均摩耗深さが小さくなり、逆に圧縮強度が小さければ平均摩耗深さは大きくなることが分かった。また、各プロットした点から回帰直線を求め、決定係数を算出したところ、試験開始時よ

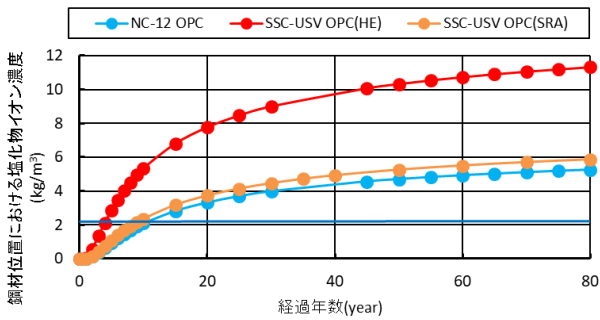


図-10 鋼材腐食の劣化予測(OPC)

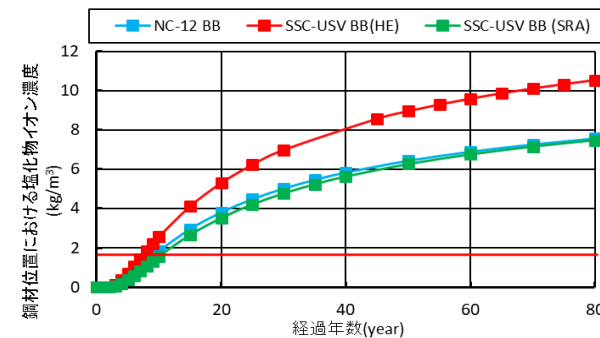


図-11 鋼材腐食の劣化予測(BB)

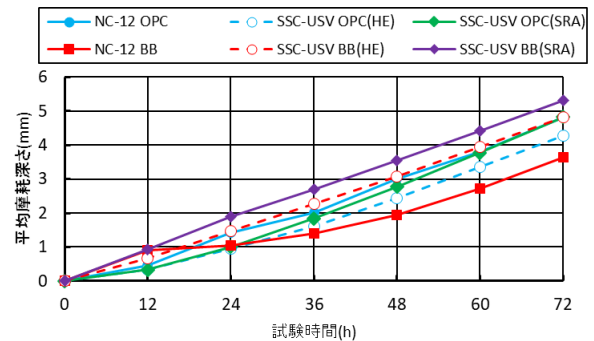


図-12 流体エロージョン試験結果

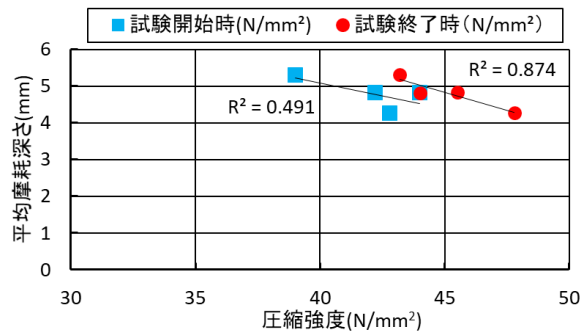


図-13 圧縮強度と平均摩耗深さの関係

りも試験終了時の圧縮強度の方が平均摩耗深さとの相関関係が高いことも分かった。

5. 材料コストの検討

NC-12, SSC-USV(HE), SSC-USV(SRA)それぞれの計画配合(表-2)から材料コストの見積もりを行った。それぞれのコンクリートの材料コストの比較図を図-14に示す。図の右側の四角に囲まれた数字はNC-12 OPCの材料コストを100%とした場合のその他のコンクリートの材料費率を表したものである。図-14からSSC-USVはNC-12と比べ1.1倍~1.2倍までコストが高くなることが分かる。また、SRAを用いたSSC-USVはHEを用いたSSC-USVと比べコストがほぼ同等であることが分かった。いずれにしてもBBを用いたコンクリートはコストを抑えることができ経済性の面で有利である。

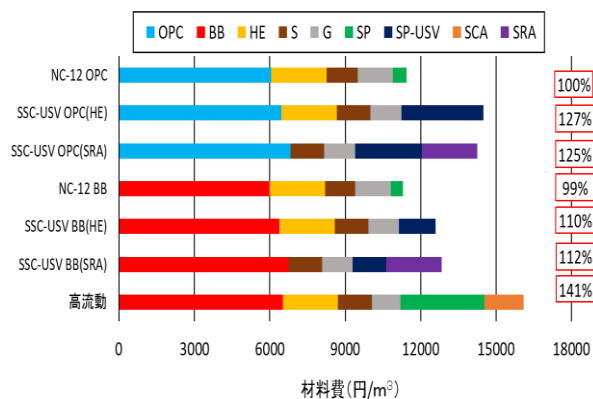


図-14 材料コストの比較

6. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1)収縮低減剤を用いた中流動コンクリートは使用するセメントの種類により収縮抑制効果が異なり、高炉セメントB種を使用したものは膨張材を使用したものと比較して、同等の収縮抑制効果を有していることが分かった。
- (2)収縮低減剤を用いた中流動コンクリートは耐凍害性を有していることが分かった。
- (3)収縮低減剤を用いた中流動コンクリートは耐塩害性に優れており、拡散係数を小さくし、鋼材腐食の発生を遅らせることが可能であると分かった。
- (4)収縮低減剤を用いた中流動コンクリートは強度が低下することにより耐摩耗性が低下するが、膨張材を用いたものとほぼ同等の摩耗抵抗性があることが分かった。
- (5)収縮低減剤を用いた中流動コンクリートのコストは膨張材を用いたものと同等のコストであり、BBを用いた方が経済性の面で優れている。

以上より収縮低減剤を使用したコンクリートは従来のコンクリートと比較して、耐凍害性および耐塩害性が優れていること、耐摩耗性がほぼ同等であること、コストも従来の中流動コンクリートとほぼ同等であることが分かった。

したがって、寒冷地域において耐凍害性を向上させる効果のある収縮低減剤を用いた中流動コンクリートは、上記の耐凍害性、耐塩害性、耐摩耗性の観点に加えて、強度条件も満足していることからフレア型護岸に適用できる可能性が示唆されたと言える。

参考文献

- 1) 竹下永造, 長塩靖祐: 膨張材を混和したコンクリートの凍結融解抵抗性評価に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.817-822, 2015
- 2) 西祐宜, 橋爪進, 名和豊春: 凍結融解抵抗性を改善した収縮低減剤の開発, vol.32, No.1, pp.143-148, 2010
- 3) 鶴田浩章, 村上真, 上田尚史, 安藤圭: 護岸に適用する中流動コンクリートの基礎性状とすりへり抵抗性, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1438-1443, 2014
- 4) 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, pp.446-447, 2014
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書[規準編], pp.597-601, 2013
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書[規準編], pp.372-376, 2013
- 7) 土木学会: コンクリート標準示方書[維持管理編], pp.170-171, 2013
- 8) 高野智宏, 寺田哲美, 山中誠: 水中環境下のコンクリートならびにモルタルの耐摩耗性について, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.709-714, 2009
- 9) 太田宏平, 田畑雅幸, 平野彰彦, 浜幸雄: コンクリートの気泡組織変動に及ぼす各種要因と耐凍害性, 日本建築学会大会学術講演概要集, pp.1139-1140, 2005
- 10) 三宅将, 中村泰誠: 膨張コンクリートの膨張が及ぼす組織構造の変化と凍結融解抵抗性, 寒地土木研究所, コー9, 2006
- 11) 土木学会: コンクリート標準示方書[設計編], pp.148-149, 2013