

論文 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

鶴田 浩章*1・村上 真*2・上田 尚史*3・安藤 圭*4

要旨：近年、越波被害対策としてフレア型護岸の設置が進められているが、現在使用している普通コンクリートでの施工では充填させにくく、ワーカビリティの改善が課題となっている。そこで本研究では、フレア型護岸の品質を向上させるために中流動コンクリートの適用を検討した。中流動コンクリートと普通コンクリートのフレッシュ性状、強度、乾燥収縮、すりへりに対する抵抗性の比較を行った結果、中流動コンクリートは普通コンクリートよりも充填性が高く、乾燥収縮ひずみ量は同等で、すりへり抵抗性も同等あるいはやや優れていることが明確となり、フレア型護岸への適用が期待できることが明らかとなった。

キーワード：中流動コンクリート、増粘剤一液型高性能 AE 減水剤、乾燥収縮、耐摩耗性、ASTM C 1138

1. はじめに

海岸線領域や風の強い湖岸地域において台風による高波や高潮によって水位が上昇し、波が護岸を超え、護岸背後の通行人や走行車だけでなく近隣の家屋にまで波が及ぶ越波被害が発生している。そこで、直立護岸や消波ブロックでは抑制できない越波への対策としてフレア型護岸の設置が進められている。フレア型護岸は前面がくぼんだ独特な円弧形状によって波を護岸背後に越波させることなく滑らかに海に返すことができる構造となっており、低天端高で防災に優れた護岸となる^{1), 2)}。しかし、そのような特殊形状であるために、護岸下部にコンクリートを充填させにくく、施工が困難となっている。

現在の施工では、スランブ 15cm の普通コンクリート（以下、NC-15 と表記）が使用されているが、多くの時間と手間をかけて施工しているにも関わらず充填不良が発生している。そこで、NC-15 よりも充填性、流動性に優れ、高流動コンクリートよりも安価な中流動コンクリート（以下、Semi-Self compacting Concrete : SSC と表記）で施工を行うことができれば現場のニーズを満たし、より高品質なフレア型護岸を施工することができるようになると考えられる。

ここで、締固め作業を行うことを前提としている SSC は、「締固め作業を行うことなく、型枠等の隅々まで材料分離を生じることなく充填できる自己充填性を有するコンクリート」と「高流動コンクリートの配合設計・施工指針 [2012 年度版]」に定義されている高流動コンクリートと区別して考える必要がある。その指針中に示されている図を基にした SSC の概念図を図-1 に示す。SSC は現在建築の分野では、準高流動コンクリートとして研究されており³⁾、土木の分野では SSC としてトンネル覆工用コンクリートに用いられている⁴⁾。しかし、トンネ

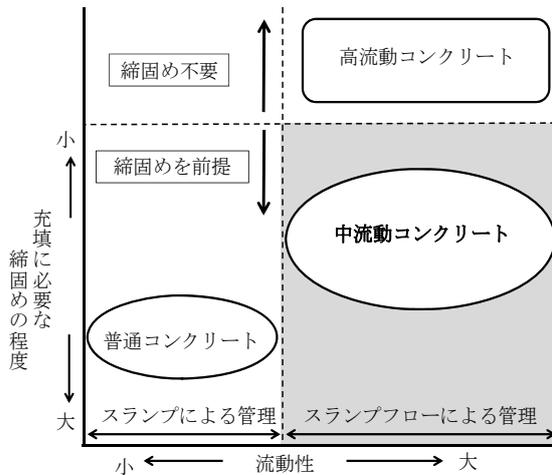


図-1 SSC の概念図

ル覆工用コンクリートと比較すると、フレア型護岸ではコンクリート製品としてより優れた表面美観が求められ、このような条件下での SSC の適用は検討されていない。

セルロース系増粘剤を使用したコンクリートは温度依存性が高いと言われているため、本研究では、温度依存性が低いコンクリートを比較的容易に得ることができるという特徴を有する増粘剤一液型高性能 AE 減水剤を使用した SSC（以下、SSC-USV (SSC with unifying SP and viscosity agent) と表記）を採用し、フレア型護岸に要求される性能に関わるフレッシュ性状、強度、乾燥収縮、波の作用によるすりへりに対する抵抗性に着目し、SSC-USV と NC-15 の各種性状の比較を行った。そして、SSC-USV の護岸構造物としての適用性を明確にし、SSC-USV を使用することで高品質なフレア型護岸を施工することが可能となるかを検討した。

*1 関西大学 環境都市工学部都市システム工学科准教授 博士（工学）（正会員）

*2 関西大学大学院 理工学研究科ソーシャルデザイン専攻

*3 関西大学 環境都市工学部都市システム工学科助教 博士（工学）（正会員）

*4 (株)神戸製鋼所 エンジニアリング事業部門鉄構・砂防部 工修

表-2 コンクリートの配合表

配合	G.max (mm)	W/C (%)	air (%)	s/a (%)	単位粗骨材量 (m³/m³)	単位量(kg/m³)								AE-1 (%)
						W	BB	OPC	HE	S	G	(g/m³)		
												SP	SP-USV	
NC-15	20	48	4.5±1.5	50.0	0.339	164	322	0	20	876	913	2050	0	0.001
SSC-USV				50.1	0.330	170	358	0	20	854	884	0	2833	0.000
SSC-USV NE		45		50.1	0.330	170	378	0	0	853	888	0	3778	0.000
SSC-USV OPC				51.1	0.325	170	0	358	20	871	877	0	3778	0.000

表-1 使用材料

種類	物性	記号
上水道水	密度 1.00(g/cm³)	W
普通ポルトランドセメント	密度 3.15(g/cm³)	OPC
高炉セメント B種	密度 3.04(g/cm³)	BB
川砂	表乾密度 2.58(g/cm³), 吸水率 1.20(%) F.M. 2.52	S
碎石	表乾密度 2.69(g/cm³), 吸水率 1.25(%) F.M. 6.54	G
膨張材	表乾密度 3.16(g/cm³), 石灰系	HE
高性能 AE減水剤	ポリカルボン酸系エーテル化合物	SP
増粘剤一液型高性能 AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル化合物と増粘性高分子化合物の融合体	SP-USV
消泡剤	ポリアルキシレングリコール誘導体	AE-1

2. 使用材料および配合とフレッシュ性状の検討

2.1 使用材料

本研究に使用した材料と各材料の物性値を表-1 に示す。流動性の高いコンクリートは材料分離を抑えるために適度な粘性を持たせる必要があるため、本研究では増粘剤一液型高性能 AE 減水剤を SSC に採用した。セメントは、護岸構造物であるため塩害対策を考慮し、高炉セメント B 種（以下、BB）を採用した。また、乾燥収縮ひび割れ対策として膨張材（以下、HE）を使用した。

2.2 配合およびコンクリートの作製方法

NC-15 の配合は実際の現場で使用されているコンクリートを基に目標スランプが 15±1.5cm、目標空気量が 4.5±1.5%となるように決定した。SSC-USV はフレア型護岸の配筋等を考慮し目標スランプフローを 525±25mm とし、目標空気量は NC-15 に合わせて 4.5±1.5%と設定しコンクリートの配合を決定した。W/C については、NC-15 は現場で使用されているコンクリートと同じ 48%とし、SSC-USV は材料分離抵抗性を確保するために 45%と設定した。各配合を表-2 に示す。また、本研究では乾燥収縮ひび割れ対策として HE と塗布型収縮低減剤（以下、CS）を使用している。したがってそれぞれの効果を比較するため、HE 無し（SSC-USV NE）と普通ポルトランドセメントを使用したもの（SSC-USV OPC）の配合も併せて記載する。

コンクリートの作製は JIS A 1138 「試験室におけるコ

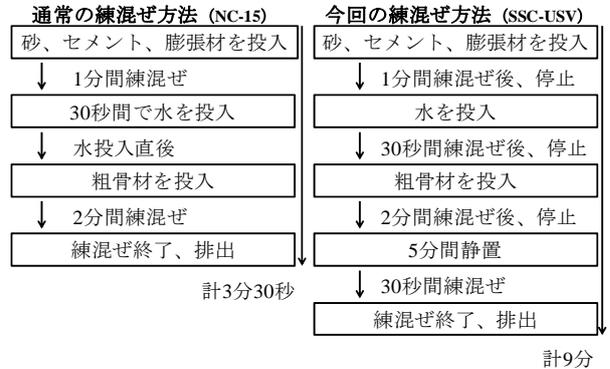


図-2 コンクリートの練混ぜフロー

ンクリートの作り方」に準拠して行った。なお、本研究では、コンクリートに混和剤を馴染ませるために、3種の SSC-USV については通常の練混ぜ方法から練混ぜフローを変更した、新たな練混ぜ方法を採用した。

NC-15 および 3 種の SSC-USV の練混ぜフローについて図-2 に示す。今回の練混ぜ方法と通常の練混ぜ方法の大きな違いは、練混ぜ後の静置時間の有無である。今回の練混ぜ方法では練混ぜ後、低量で混和剤の効果を最大限引き出すために 5 分間の静置時間を設けた。

2.3 フレッシュ性状試験の概要

フレア型護岸に適用するコンクリートに求められる性能として充填性、流動性が挙げられる。3種の SSC-USV のフレッシュ性状に関する各種試験を行い、充填性、流動性を評価しフレア型護岸への適用性を検討した。

スランプフロー試験は JIS A 1150 「コンクリートのスランプフロー試験方法」、空気量試験は JIS A 1116 「フレッシュコンクリートの単位容積質量試験方法及び空気量の質量による試験方法」に準拠して行った。これらの試験においては、コンクリート温度の調整を行わず、季節ごとにコンクリート温度が 10~30℃になる環境で打設を行い、コンクリートの温度依存性を確認した。なお、温度以外の条件は、すべて等しいコンクリートで検討を行った。

SSC の充填性、流動性の評価として JSCE-F 511-2011 「高流動コンクリートの充填試験方法（U 型間隙通過性試験）」、JSCE-F 512-2011 「高流動コンクリートの漏斗を用いた流下試験方法（V 型漏斗流下試験）」の 2 つの試験を行った。しかし、本試験は本来高流動コンクリートに用いる試験であり、SSC に用いられる試験ではないため、

本試験が SSC の充填性，流動性を評価する指標として用いるのに有効な試験であるのかの検討も行った。また，SSC は施工において締固めを前提としているため，実施工を想定し棒型パイプレータを用いて振動を加えながら試験を行った。加振は U 型間隙通過性試験では試験開始から両室のコンクリートの高さが同一となるまで，V 型漏斗流下試験では試験開始からコンクリートが全て排出されるまでとし，それぞれの加振時間を試験の測定時間とした。

2.4 フレッシュ性状試験結果と考察

SSC-USV のコンクリート温度とスランプフローとの関係を 図-3 に示す。現在主流となっているセルロース系増粘剤を使用したコンクリートの場合，コンクリート温度の低下とともに流動性も低下するが，今回検討した 3 種のうち SSC-USV は一般的なコンクリートと同様にコンクリート温度の低下とともに流動性が増している。また，コンクリート温度が暑中コンクリートの上限（コンクリート温度 35℃）に近い 30℃の場合でも大部分のスランプフローは目標値の範囲内（黒の破線の枠内）に収まっている。

次に，スランプフローと U 型間隙通過性試験（以降，U 型試験）および V 型漏斗流下試験（以降，V 型試験）結果との関係を表したものを 図-4 に示す。図中に記す赤の実線は U 型試験，点線は V 型試験において NC-15 で最も良好な結果となったものの測定時間であり，NC-15 はスランプで管理しているため線で表記している。V 型試験は流動性を，U 型試験は充填性の良し悪しを表しており，それぞれ測定時間が短いほど施工性が良好であると判断できる。U 型試験はフレア型護岸の内部鋼材のあきに合わせて，試験条件をランク 2 とした。図中の黒の破線の枠内が今回設定したスランプフローの範囲で，参考として設定値から外れたものも図中に示す。 図-4 より，NC-15 と比較して，SSC-USV は流動性，充填性に優れていると言える。しかし，SSC-USV のスランプフローと各試験との関係において，各試験の測定時間はばらついており，相関性は低いと言える。また，スランプフローが設定値よりも 20mm 程度下回った場合でも V 型試験，U 型試験ともに測定時間が約 5 秒と短いものになっており，ここからもスランプフローと各試験は相関性が低いと言える。相関性が低い要因として，試験時に振動を与えたことによりスランプフローの違いによる充填性，流動性への影響が低減されたことが考えられる。また，スランプフロー約 530mm のもので U 型試験の測定時間が長いものがあるが，これは粗骨材の詰まり等が原因と考えられる。

図-5 に SSC-USV の空気量と V 型および U 型試験結果との関係を示す。図中の赤の実線，点線，黒の破線の枠

は 図-4 と同様である。 図-5 においても目標空気量の設定範囲から外れたものの結果も示す。表-3 に目標空気量範囲内でのスランプフローおよび空気量と V 型試験，U 型試験結果との相関係数を示す。 図-5 および表-3 より，目標空気量範囲内において空気量はスランプフローよりも V 型試験との相関性が高いことが分かるが，範囲外のデータも含めると相関性は低くなる。U 型試験との関係では，スランプフローと比べると相関性は高いが，ばらついている。

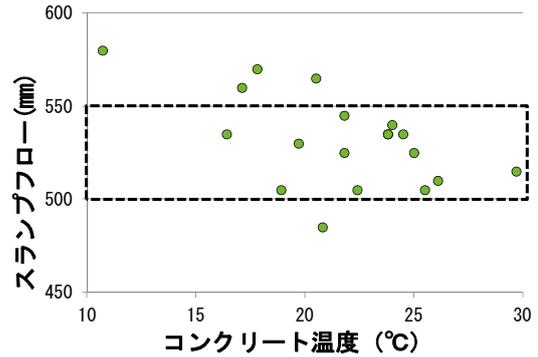


図-3 SSC-USV の温度依存性評価

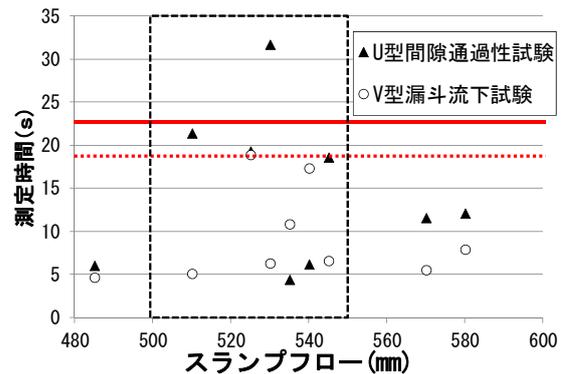


図-4 スランプフローと V 型，U 型試験結果の関係

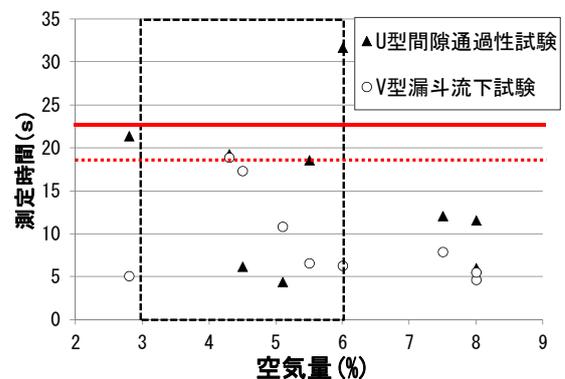


図-5 空気量と V 型，U 型試験結果の関係

表-3 V 型試験および U 型試験と各性状との相関係数

	相関係数(R ²)	
	スランプフロー	空気量
U型試験の測定時間	0.152	0.349
V型試験の測定時間	0.042	0.937

目標空気量範囲内のコンクリートの空気量とV型試験の測定時間の相関性が高い要因として、適度な空気が連行されることにより、流動性が高くなったことが考えられる。これら2つの試験において、目標空気量範囲外も含めた空気量との相関性が低い原因としては、加振による影響、粗骨材の詰まりの発生等が考えられる。

以上から、SSC-USVは従来のSSCと比較して温度依存性が低く、普通コンクリートと同様に扱うことができると言える。また、V型試験、U型試験によりSSC-USVはNC-15よりも流動性だけではなく、充填性にも優れていることが明らかとなった。しかし、V型試験、U型試験をSSCの流動性・充填性の評価の指標として用いるには今後データを蓄積し、SSCのスランプフロー等の各性状と試験結果との相関性を明確にしていく必要があると考えられる。

3. コンクリートの強度特性の検討

3.1 コンクリートの圧縮強度試験の概要

フレア型護岸は海岸に設置される護岸構造物であるため、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」をもとに設計基準強度には材齢28日の時点において 30N/mm^2 を採用した。フレア型護岸に適用するには、これ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、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の圧縮試験用円柱供試体を1種類につき3体作製した。試験はJIS A1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠して行い、養生方法は 20°C の水中養生で、試験材齢は28日とした。

3.2 コンクリートの圧縮強度試験結果と考察

コンクリートの圧縮強度試験の結果を図-6に示す。

NC-15 1及びSSC-USV 1は乾燥収縮ひずみ試験を行った供試体と同じバッチのもので、NC-15 2及びSSC-USV 2は流体エロージョン試験を行った供試体と同じバッチのものである。全ての種類において材齢28日の時点で設計基準強度を上回る結果となった。SSC-USVとNC-15の試験結果は同等であり、強度に関する問題はないと考えられる。

4. コンクリートの乾燥収縮特性の検討

4.1 コンクリートの乾燥収縮試験の概要

鋼コンクリート合成構造物であるフレア型護岸は、コンクリート製品としての表面美観を維持するために乾燥収縮等によるひび割れの発生を抑制する必要がある。本章ではSSC-USVに適した乾燥収縮対策について乾燥収縮試験を用いて検討した。

コンクリートの乾燥収縮試験はJIS A 1129-3「モルタル

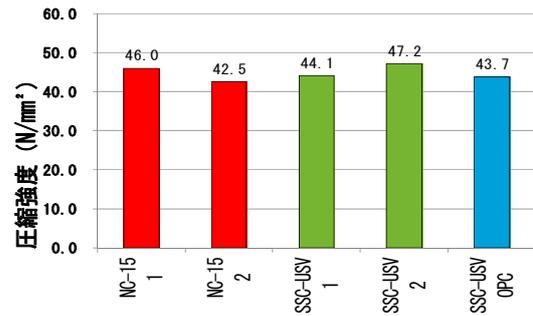


図-6 圧縮強度試験結果

及びコンクリートの長さ変化試験方法-第3部:ダイヤルゲージ方法」に準拠して行った。脱型後材齢7日まで水中養生を行い、その後は室温 20°C 、湿度65%の恒温恒湿室に静置して測定を行った。材齢7日目を乾燥材齢0日目とし、初期値とした。試験に用いる供試体のサイズは $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ で、両端の2面を乾燥面とした。本研究では乾燥収縮ひび割れ対策としてHEとCSを使用した。HEは単位コンクリート体積あたり 20kg/m^3 をセメントに置換して使用し、CSは水中養生終了の材齢7日目に乾燥面に規定量塗布して、HE、CSの有無の影響を比較、評価した。また、過去に試験を重ねた結果、高炉セメントを使用したコンクリートでは期待していた程CSの効果を得られなかったため、本研究ではOPCを使用したSSC-USV OPCでも試験を行いCSの効果の比較を行った。

4.2 コンクリートの乾燥収縮試験結果と考察

コンクリートの乾燥収縮試験結果を図-7、図-8に示す。図-7は乾燥材齢0日目を基準とした気中養生開始からの乾燥収縮試験結果を示したもので、図-8は水中養生開始の材齢1日目を基準とした水中養生期間を含む乾燥収縮試験結果を示している。図-7より、SSC-USVはNC-15と比較して単位水量が多いため収縮量は増加すると予測されたが、同等の乾燥収縮ひずみ量という結果になった。これは、単位コンクリート体積当りのセメントペーストの割合に着目した場合、SSC-USVが29%、NC-15が28%と同等であることが要因と考えられる。また、NC-15、SSC-USVはSSC-USV OPCと比較してこれまで同様CSの収縮抑制効果があまり得られていない。BBを使用したSSC-USVで収縮抑制効果が得られなかったのは、CSとの関係上何らかの原因があるようであるが、今のところ不明である。

次に図-8より、SSC-USV NEに対してSSC-USVは水中養生期間中に大きく膨張しており、その期間での膨張の影響により長期的にも収縮抑制効果を発揮していることが分かる。また同じHEの使用量でもSSC-USV OPCと比べBBを使用したSSC-USVの方が膨張効果を得られている。これは高炉スラグ中のセッコウによる影響⁵⁾と考えられる。この水中養生期間での膨張量の差により、

BBを使用していないSSC-USV NE以外は最大 100×10^{-6} 程度のひずみ差であり、トータルでの収縮量ではほぼ同等の結果と考えられる。以上よりSSC-USVはNC-15と同様に扱うことが可能であると言える。またBBを使用する場合はCSを使用するのではなく、HEを使用し確実に養生を行うことで長期的な収縮抑制効果を得ることが有効であると考えられる。

5. コンクリートのすりへり抵抗性の検討

5.1 コンクリートの流体エロージョン試験の概要

護岸構造物であるフレア型護岸は常に波による浸食を受けるため、波の作用によるすりへりに対する抵抗性を有している必要がある。本章では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用いてSSC-USVとNC-15のすりへり特性を比較、評価した。

コンクリートの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。脱型後材齢28日まで水中養生を行い、**図-9**の試験装置を用いて、水中環境下での液体と固体による複合的なすりへりを再現した試験を行った。供試体1体につき12時間の試験を6回、計72時間の試験を行い、式(1)を用いて供試体の平均摩耗深さ(mm)を算出した。

$$\gamma = \frac{W_d - W_{step}}{\rho \times A} \quad (1)$$

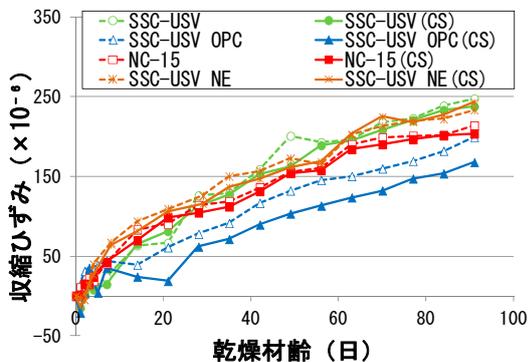


図-7 乾燥収縮試験結果

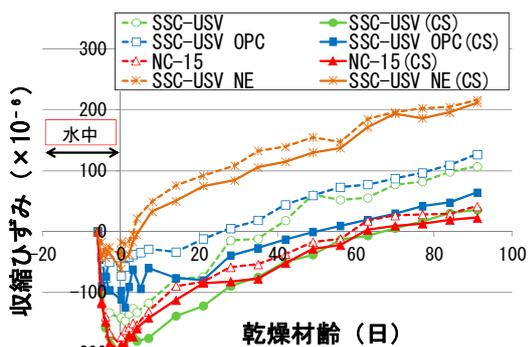


図-8 乾燥収縮試験結果 (水中養生含む)

ここに、 γ は平均摩耗深さ(mm)、 W_d は試験前の供試体質量(g)、 W_{step} は12時間毎の供試体質量(g)、 ρ は供試体密度(g/mm^3)、 A は供試体の磨耗面の表面積(mm^2)とする。供試体は $\phi 300 \times 100mm$ の円盤状供試体で、打設時の底面を試験面とし1種類につき3体作製した。試験はNC-15、SSC-USVに対して行い、時間経過を考慮し12時間目の試験をNC-15、SSC-USVの各3体に順番に実施し、次に24時間目の試験を同様に実施して、試験開始から終了まで合計で約3カ月を要したため、試験期間中の供試体は、試験時以外の間、湿潤状態を保つために水中養生を行った。

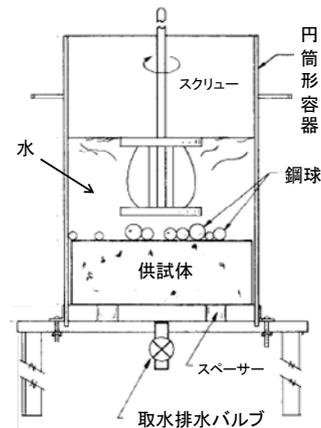


図-9 流体エロージョン試験装置

5.2 コンクリートの流体エロージョン試験結果

図-10に流体エロージョン試験の結果を示す。**図-10**より、最終的なSSC-USVの平均摩耗深さはNC-15と比べて約12%下回っており、SSC-USVはNC-15とほぼ同等、あるいはやや優れたすりへり抵抗性を有すると言える。流体エロージョン試験でのすりへり現象は、まずモルタル部分から削られ、その後に粗骨材が削られるというものである。それ故にすりへり抵抗性にはモルタルの量や特性が大きく関係していると考えられ、このことは既往の研究⁶⁾で検証されている。そこで、**図-11**にモルタル体積率と平均摩耗深さとの関係について示し検討す

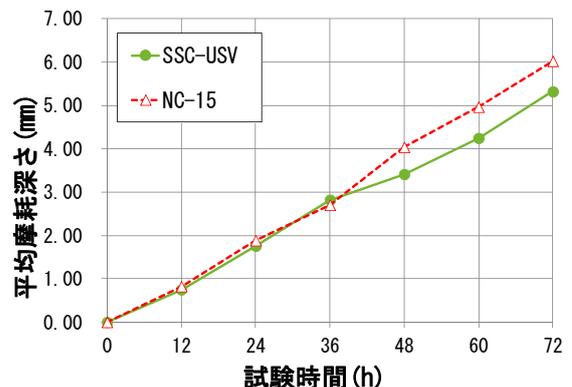


図-10 流体エロージョン試験結果

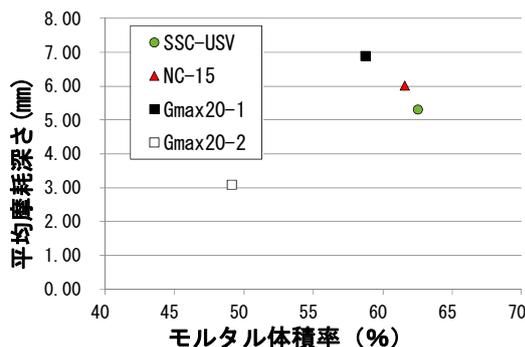


図-11 モルタル体積率と摩耗深さの関係

る。ここでは本研究の結果に加え、既往の研究⁶⁾のうち本研究と同じG.max 20mmでOPCを使用したコンクリートの試験結果も示している。これら2つのケースは、目標スランブが 8 ± 2.5 cm、空気量が 4.5 ± 1.5 %、W/CがGmax20-1で43%、Gmax20-2で39%となっている配合である。図-11より、モルタル体積率がほぼ同じSSC-USV、NC-15、Gmax20-1とGmax20-2の平均摩耗深さが大きく異なることからG.max 20-2のすりへり量が他と比較して非常に小さくなっているのは、G.max 20-2は他よりもモルタル体積率が10%近く小さくなっていることが要因ではないかと考えられる。しかし、今回の試験では単位コンクリート体積当りのモルタル体積の割合がSSC-USVは63%、NC-15は62%と非常に近い値となっているため、摩耗深さに差が出た要因としてはモルタルの特性による影響が考えられる。

モルタル特性の要因として、SSC-USVとNC-15の圧縮強度は同等であるが、約 5 N/mm^2 の差があったことが挙げられる。衝撃摩耗では圧縮強度と摩耗深さの関係が明確にされており⁷⁾、流体エロージョン試験においても同様に圧縮強度の大小が磨耗深さに影響したと考えられる。ただし、今回のコンクリート供試体については、試験開始から約3カ月後の試験終了時のコンクリートやモルタルの圧縮強度を把握できていないため、どの程度強度が変化したかが明確にできていない。よって、強度の違いによるすりへり抵抗性への影響については明確にできず、今後の課題となった。

5. 結論

本研究の範囲で得られた知見を以下に示す。

- (1) 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はスランブ15cmの普通コンクリートと比べて充填性、流動性に優れており、かつ増粘剤成分が混入されているにもかかわらず温度依存性が低く普通コンクリートと同様に扱うことができる。
- (2) 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はスランブ15cmの普通コンクリートと同

等の圧縮強度を有しており、材齢28日の時点で設計基準強度をいずれも満足した。

- (3) 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はスランブ15cmの普通コンクリートと比較して単位水量が多いにも関わらず同等の乾燥収縮ひずみ量となっている。また、膨張材を使用し確実に養生を行うことで長期的な乾燥収縮ひずみを抑制することができた。
- (4) 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はスランブ15cmの普通コンクリートと同等あるいはやや優れたすりへり抵抗性を有していた。

以上より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フレア型護岸に適用することで、従来のスランブ15cmの普通コンクリートを使用した場合よりも施工が容易となり、高品質の構造物を造ることが期待できる。

謝辞

流体エロージョン試験にご協力頂きました共和コンクリート工業の高野智宏氏および共和コンクリート工業の皆様、練混ぜ方法の考慮に関して助言をいただいたBASF ジャパン(株)の皆様にご心から感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 竹鼻直人ほか：新型防波護岸（フレア護岸）の天端高さ設計手法，神戸製鋼技法，Vol.53，No.1，pp.75-79，2003.4
- 2) 片岡保人ほか：新型防波護岸の越波阻止性能と波圧低減のための消波工形式，神戸製鋼技法，Vol.49，No.2，pp.53-56，1999.9
- 3) 三好征夫ほか：分離低減剤を用いた準高流動コンクリートの調合と諸性質，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.2，pp.361-366，1998
- 4) 諏訪菌和彦ほか：増粘剤系中流動コンクリートによるトンネル覆工-南九州西回り自動車道津奈木トンネル（仮称）-，コンクリート工学，Vol.50，No.4，pp.366-371，2012
- 5) 佐川孝広，名和豊春：膨張材を混和した高炉セメントの水和反応，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.181-186，2009
- 6) 高野智宏ほか：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
- 7) 村尾久幸ほか：コンクリートの耐摩耗特性におよぼす各種要因の検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.1，pp.835-840，1993