

スリムクリート®の現場打設による護岸構造物のリニューアル

平田 隆 祥 石 関 嘉 一

武 田 篤 史 浜 地 克 也

(本土木本部)

Renewal of the Shore Protection Structure by “SLIM-Crete®” Placement

Takayoshi Hirata Yoshikazu Ishizeki

Atushi Takeda Katsuya Hamachi

Abstract

This paper describes the renewal of shore protection structures made of reinforced concrete using ultrahigh-strength fiber-reinforced concrete (SLIM-Crete®). Shore protection structures require durability against salt damage. The use of steel bars with SLIM-Crete® is unnecessary, especially for thin structures and when the material itself is highly durable. Moreover, because renewal construction has many constraints, a material that can be placed onsite is suitable. This paper presents the design and example renewal of a shore protection structure that had been damaged by salt using normal-temperature hardening-type SLIM-Crete®.

概 要

本稿は、高強度かつ高じん性の超高強度繊維補強コンクリート「スリムクリート®」を使用した護岸構造物のリニューアルについて報告する。護岸構造物は、塩害に対する耐久性の向上が必要不可欠である。特に、かぶりの増加による対策が困難となる薄肉の構造物では、無筋でかつ材料自体の耐久性が高い超高強度繊維補強コンクリートの使用が適している。また、リニューアル工事は制約条件が多いため、現場打設が可能な材料の利点大きい。本稿は、常温硬化型の超高強度繊維補強コンクリートを用いて、塩害劣化を受けた護岸構造物をリニューアルした事例の設計および施工について報告する。

1. はじめに

護岸構造物は、飛来塩分のみならず海水飛沫を直接受けるため、塩害に対して非常に厳しい条件であり、耐久性を向上させる方策が不可欠である。例えば、鉄筋位置まで塩分が浸透することを低減するために、かぶりを大きくすること¹⁾や、塩分浸透性が小さい高強度コンクリート¹⁾が利用されている。また、鉄筋自体の腐食抵抗性を向上するために、エポキシ樹脂塗装鉄筋²⁾の利用も有効である。

しかし、波返しのように薄肉の部材においては、かぶりを大きくすることは部材厚に占めるかぶりの割合が著しく大きくなってしまい、自重の増加から基礎の変更となり合理的な設計とは言い難い。高強度コンクリートを用いたとしても、その程度は改善されるものの、部材厚に占めるかぶりの割合が大きくなることの改善は困難である。また、エポキシ樹脂塗装鉄筋は、鉄筋組立後にエポキシ樹脂の損傷を確認しタッチアップによる補修を行わなければならないが、薄肉部材においては確認・補修作業が困難であり、施工性に劣ると言わざるを得ない。

これらの方策に対し、超高強度繊維補強コンクリート (Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete, 以下UFCと称す) により構築すれば、その引張強度を用いること

で無筋構造とすることが可能である。UFCとは、2004年に土木学会から発刊された超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案) (以下、UFC指針と称す)³⁾において、超高強度モルタルと高強度鋼繊維で構成されており、 150N/mm^2 以上の圧縮強度と 5N/mm^2 以上の引張強度を持つ材料と定義されている。内部に鋼材を用いる際にも、かぶりを20mm設けることで100年以上の耐久性を有するとされており、薄肉の護岸構造物に非常に適していると考えられる。

しかし、UFC指針に記載されるUFCは、熱養生が不可欠であるため工場生産が必要となり、設計や施工において大きな制約となっている。そこで、常温でも硬化し、設計や施工において通常のコンクリートと同様に扱うことができる現場打設が可能なUFCとして、常温硬化型UFCのスリムクリートを開発した⁴⁾。

本稿は、スリムクリートの概要を示すとともに、塩害劣化を受けた波返しを有する護岸構造物を、スリムクリートを用いて現場打設によりリニューアルした事例について設計および施工の内容を報告する。

設計に関しては、現場条件を示したのち、補修と再構築を比較検討するとともに、現場条件に即した構造計画および設計方法を示す。施工に関しては、施工手順およびスリムクリートの品質管理について記載する。

Table 1 スリムクリートの標準配合
Mixed Proportion of SLIM-Crete

W/B* (%)	単位量 (kg/m ³)				補強繊維 (kg)
	水	プレミックス	細骨材	減水剤	
15.5	230	1830	330	32	157

*B：結合材量



Photo 1 高強度鋼繊維
High-strength Steel Fiber

Table 2 フレッシュ試験項目および判定基準
Fresh-concrete Test Items and Criterion

試験項目	判定基準
モルタルフロー(mm)	260 mm ± 30 mm(落下なし)
空気量(%)	3.5%以下



Photo 2 モルタルフロー
Mortar Flow

2. スリムクリートの概要

2.1 構成材料

スリムクリートのモルタル部分は、セメント等の反応性微粉末と微粉細骨材を混合したプレミックス粉体、水、細骨材、および特殊高性能減水剤（SP）で構成されている。また、空気量は消泡剤を用いて、3.5%以下に調整した⁴⁾。このモルタルは熱養生等の特殊な養生を行わなくても常温で所定の強度特性を発現できるものである。配合をTable 1 に示す。

Table 3 スリムクリートの特性値
Characteristic Value of SLIM-Crete

試験項目	特性値	試験方法
圧縮強度	180N/mm ²	JIS A 1108
ひび割れ発生強度	8.0 N/mm ²	JIS A 1113
引張強度	8.8 N/mm ²	JSCE127-3.2.3
ヤング係数	4.6×10 ⁴ N/mm ²	JIS A 1149
ポアソン比	0.2	ゲージ貼り付けにより測定
熱膨張係数	10.7×10 ⁻⁶ /°C	JCI「マスコングリートのひび割れ制御指針2008」に準拠
クリープ係数	0.7	指針に準拠

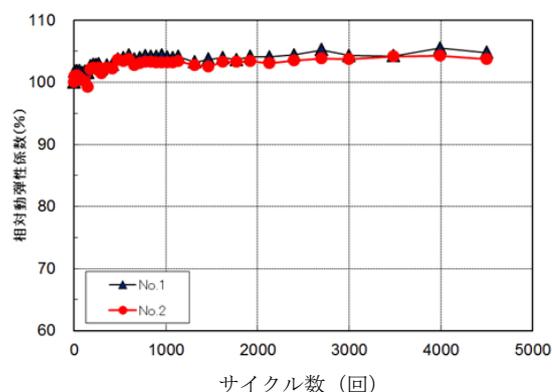


Fig. 1 凍結融解サイクル数と相対動弾性係数
Result of Freezing and Thawing Test

鋼繊維には一般建設用鋼繊維とは異なる高強度鋼繊維を使用した。使用した鋼繊維をPhoto 1 に示す。

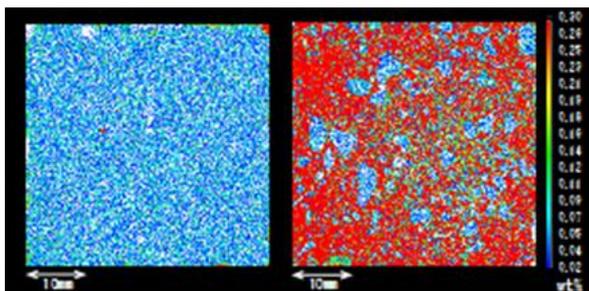
高強度鋼繊維は、延伸製法により製造された自動車タイヤに使用するスチールコードである。表面は真ちゅうでメッキされており、一般の建設用鋼繊維の引張強度1,000N/mm²に対して引張強度は2,000N/mm²以上で、形状は直線状である。

2.2 フレッシュ性状

モルタルのフロー値は260±30mm、スランブフローは800±100mmと流動性が良好であり、間隙が30mm以下の狭隘部においても閉塞することなく充填が可能である³⁾。なお、フレッシュ試験の品質管理項目および判定基準をTable 2 に、モルタルフローの状況をPhoto 2 に示す。

2.3 硬化特性

スリムクリートは高強度かつ高じん性で、圧縮強度180N/mm²以上、引張強度8.8N/mm²以上の材料強度を有している⁴⁾。スリムクリートの特性値をTable 3 に示す。



スリムクリート (左) 高強度コンクリート (右)
(断面寸法: 40×40 mm, 赤色: 元素 Cl)
Photo 3 EPMA による塩化物イオンの浸透状況
Chloride Ion Distribution by EPMA



Photo 4 促進期間 52 週の中酸化深さの状況(n=3)
Accelerated Carbonation Depth (52weeks:n=3)

2.4 耐久性

凍結融解試験(JIS A 1148に準拠)における2試験体の相対動弾性係数をFig. 1 に、温海水乾湿繰返し試験におけるスリムクリート(左)と高強度コンクリート(圧縮強度 94N/mm², W/C30%) (右) との塩化物イオンの浸透状況の EPMA画像をPhoto 3 に、促進中性化試験 (JIS A 1153に準拠) における促進期間52週のスリムクリートの中酸化深さの状況をPhoto 4 に示す。

凍結融解試験4500サイクル終了時における相対動弾性係数は、2試験体ともほぼ100%で低下が認められなかった。また、温海水乾湿繰返し試験30回において、高強度コンクリートは、全体に塩化物イオンが浸透しているのに対して、スリムクリートは塩化物イオンが浸透せず、塩化物イオンの浸入に対して高い抵抗性があることが確認できた⁴⁾。

促進中性化試験の促進期間52週 (1年) における割裂面は表層部に至るまではほぼ赤紫色で、中性化深さは0.01mm以下となり、中性化に対して高い抵抗性を有していることが確認できた⁴⁾。

これらの結果より、スリムクリートは通常のコンクリートと比較して、高い耐久性を有していることが分かる。

2.5 耐摩耗性

スチールロッド式摩耗試験装置を用いた常温硬化型 UFCスリムクリートの摩耗試験結果および普通コンクリート (圧縮強度18N/mm², 21N/mm²) と高強度コンクリート (圧縮強度88N/mm²) の摩耗試験結果⁵⁾をFig. 2 に示す。

普通コンクリートの摩耗量と比較すると、スリムクリートの摩耗量は15%程度と小さかった。また、高強度コ

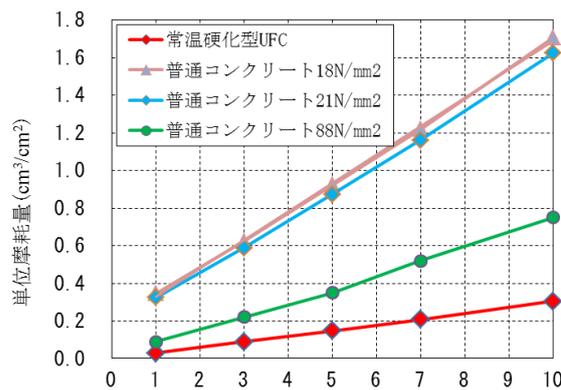


Fig. 2 摩耗試験結果
Result of Abrasion Test

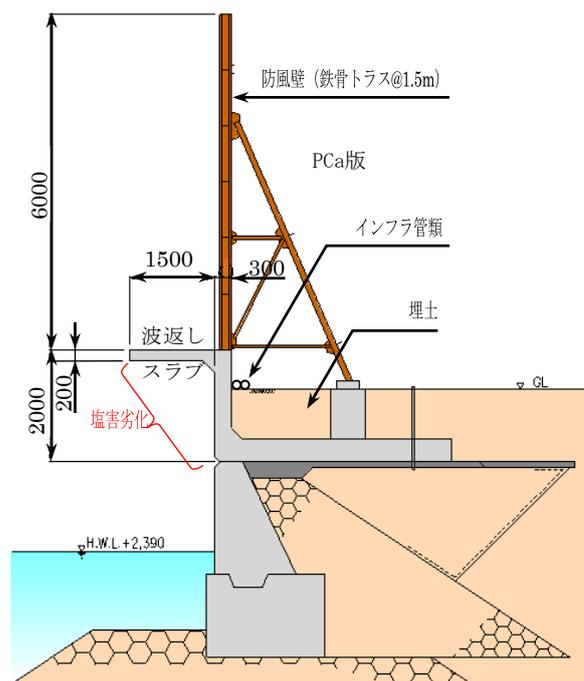


Fig. 3 護岸構造物の断面図 (リニューアル前)
Cross Section (Before Renewal)

ンクリートの摩耗量に対しても37%程度であり、スリムクリートの耐摩耗性が非常に高いことが分かる。

3. 護岸構造物の設計方法

3.1 対象構造物と要求性能

対象構造物は民間工場施設に設置された岸壁の護岸構造物であり、Fig. 3 に示すように波返しおよび防風壁を有している。本工事における施工延長は265mである。護岸としての機能だけでなく、背面のヤードを越波した飛沫から保護するため、工場の事業において重要な構造物となっている。

防風壁は、1500mm間隔の鉄骨トラス(柱断面H150)によりPCa版が支持されている構造である。PCa版や鉄骨トラスに大きな劣化は見当たらなかった。

壁部の背面は埋土となっており、防風壁支持トラス基



Photo 5 リニューアル前の状況
Shore Protection Structure before Renewal

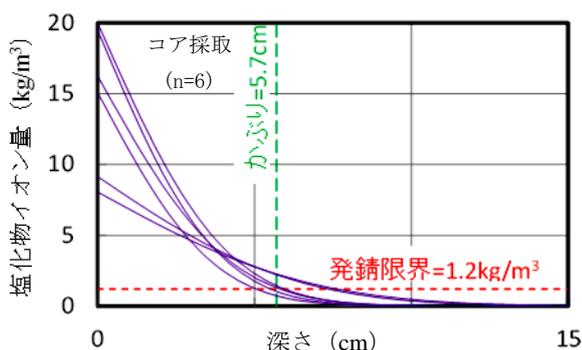


Fig. 4 既存躯体の塩化物イオン量調査結果
Chloride Ion Distribution of the Depth Direction

礎のほか各種のインフラ管類が設置されている。このインフラ管類は工場の事業において重要な役割を果たしているため、損傷のリスクを小さくする必要があるとともに、迂回や移設も困難であった。

リニューアル前の護岸構造物の状況をPhoto 5 に示す。かぶりが剥落し、露出した鉄筋が腐食している状態であった。このような構造物のリニューアルに対して、以下の要求性能が設定された。

- 50年の延命を目標として、20年間はメンテナンスを最小限とする。
- 防風壁はそのまま利用する。
- 背面のインフラ管類への影響は最小限にする。
- 越波飛沫に対して現況と同程度の性能を確保する。

3.2 補修によるリニューアルの検討

既存躯体の状況を調査するために、かぶりの剥落や浮きが観察されないスラブ4点、壁部2点においてコアを採取し、塩化物イオン量を同定した。

塩化物イオン量の分布の同定は、以下の手順により行った。表面から深さ方向に20mm毎の5試料(深さ100mmまでの塩化物イオン量を「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(硝酸銀滴定法)」により測定した。塩化物イオン量分布はFickの拡散方程式¹⁾($t=30$ 年)が適用できるとし、最小二乗法によりそれぞれの表面塩化物イオン量 C_s および拡散係数 D_c を算定した。

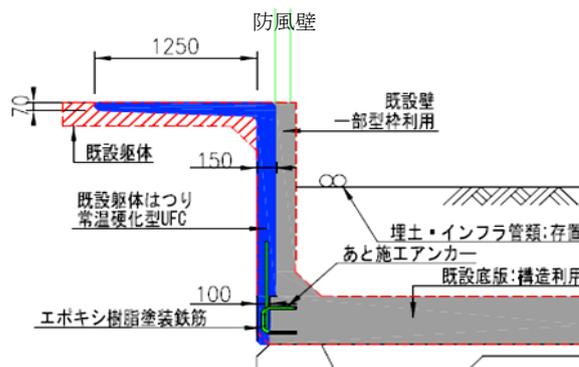


Fig.5 護岸構造物の断面図(リニューアル後)
Cross Section (After Renewal)

得られた表面塩化物イオン量 C_s (平均値： $C_s=8.06 \sim 20.01 \text{kg/m}^3$)および拡散係数 D_c ($D_c=0.44 \times 10^{-8} \sim 1.48 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$)を用いて、再びFickの拡散方程式($t=30$ 年)を適用して分布とした。

同定した塩化物イオン量分布をFig. 4 に示す。発錆限界は既設コンクリートの配合が不明であるため、2010年制定ではなく、2007年制定のコンクリート標準示方書⁶⁾に示される値を示している。鉄筋位置では発錆限界を超えているケースが複数あることが分かる。

補修によるリニューアルの仕様とする場合、使用材料に違いがあっても、かぶりの除去、鉄筋除錆、断面修復、表面被覆という手順が一般的である。しかし、本構造の場合は、かぶりのみを再構築しても、コンクリート中に残される塩化物量が多いため、鉄筋が再び発錆すると想定され、50年の延命を目的とするためには一般的な耐久性の材料によるリニューアルは不適であると判断した。

3.3 構造計画

要求性能を満たし、コストを低減できるように構造計画を行った結果、Fig. 5 に示す構造を採用した。検討内容を以下に示す。

要求性能 a)の耐久性を確保するためには、1章に示す様にかぶりの増加、高強度コンクリートの適用、エポキシ樹脂塗装鉄筋の利用などが考えられるが、かぶりの増加による自重の増加やエポキシ樹脂塗装鉄筋による施工の不確実性を考慮し、100年以上の耐久性がある³⁾とされるUFCによる構造とした。

次に、要求性能 b)の防風壁再利用を考慮し、防風壁を存置したまま施工すると設置が困難となるプレキャスト工法とせず現場打設とすることとした。その結果、材料は既往のUFCではなく常温硬化型のUFCであるスリムクリートとなる。さらに、要求性能 c)の背面のインフラ管類への影響を考慮し、背面埋土の掘削を省略するために、既設壁部の一部を存置して型枠利用することとした。既設壁部は構造体としては考慮しない。

なお、波返し(スラブ)の張出し長は、数値波動水路CADMAS-SURFを用いたVOF法による水理解析⁷⁾により、要求性能 d)の越波飛沫量が現況と同程度という条件を

満足するように1500mmから1250mmに低減を行っている。

3.4 設計方法

設計上考慮した外力は、自重、スラブ部への上載荷重(5.0kN/m²)および風荷重(水平方向:2.5kN/m², 鉛直方向:3.5kN/m²)である。

設計は許容応力度法によることとし、自重+上載荷重を長期、自重+風荷重を短期として考慮した。

UFCの許容応力度は、UFC指針³⁾には定められていないが、限界状態としてひび割れ発生強度を設定して、ひび割れ発生強度の1/3を長期許容応力度、その1.5倍を短期許容応力度とした。

設計の延長単位は、防風壁の柱間隔から5mとした。

UFC壁部およびスラブ部は、無筋コンクリートとして計算し、型枠利用の既設壁部は構造上考慮しなかった。

底版部は、Fig. 4 に示す塩化物イオン量分布より、コンクリートを10cmはつれば塩化物イオンを含む部分をほぼすべて除去できると考え、10cmはつり取りスリムクリートで再形成することとした。

既設底版とUFCの接合部は、既設底版にあと施工アンカーにより鉄筋を挿入し、鉄筋コンクリートとして設計した。新旧コンクリートの接合部は、塩分環境としては必ずしも厳しくはないが重要な部分であるため、アンカー鉄筋としてエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた。

底版と壁部の接合部は、UFCが連続している幅が50mm少ないため、鉄筋を挿入することとし、鉄筋コンクリートとして設計した。

4. 護岸構造物の施工方法

4.1 施工手順

護岸構造物の施工は後述の手順により実施した。構造物は、Photo 6 に示すように陸側から海側に張り出す形状であるため、作業を行う際、仮設足場等の設置が課題となった。

また、既設壁のはつり面と型枠の間にスリムクリートを打設するため、はつり面の平滑度によりスリムクリートの打設量が変動する。そのため、はつり部の計測を高い頻度で実施し、スリムクリートの打込み数量を決定した。



Photo 6 既設構造物の撤去前状況
Before Removal of a Degradation Part

施工手順を次に示す。

- ① ブラケット足場の設置
- ② 既設構造物のはつりおよび撤去
- ③ はつり面の計測
- ④ 型枠設置
- ⑤ スリムクリートの練混ぜ数量決定
- ⑥ スリムクリートの練混ぜおよび運搬
- ⑦ スリムクリートの打設
- ⑧ 型枠の脱型

4.2 既設構造物の撤去および型枠の設置

既設構造物はスラブ部が海側に突出しているため、作業用の足場が設置できない。そこで、ブラケット足場を設置し、既設構造物にアンカーを打込み、作業足場を設置した。足場の設置後、コンクリートカッターを用いてスラブ部を切断し、クレーンにより陸側に撤去した。その後、壁部を設計深さまでコンクリートブレイカーを用いてはつり、撤去した。はつったコンクリートはクレーンにて陸側に撤去した。壁部の既設コンクリートの撤去状況をPhoto 7 に示す。

既設構造物のコンクリート厚さは設計値と必ずしも一致しないため、スリムクリートの打設量を把握する目的で、既設構造物のはつり面の平滑度を測定した。測定は、設計型枠面に定規を設置して水系を張り、型枠面とはつり面までの距離を200mm間隔で、コンベックスを用いて計測することとした。測定結果はパソコンに入力し、スリムクリートの打設量を算出した。

はつり面の計測後、型枠を設置した。スリムクリートは流動性が高く壁脚部の側圧が上昇するので、型枠の設計は液圧として行った。また、流動性が高いと、型枠の継ぎ目部や既設構造物との接合部より、材料が流出する危険性がある。そこで、流出する危険性が見える箇所にシーリング材を用いてシールを行った。型枠の設置状況をPhoto 8 に示す。

4.3 練混ぜおよび打込み

スリムクリートの練混ぜは市中の生コンプラントで行った。市中の生コンプラントの練混ぜは、通常のコンクリートの出荷に影響を及ぼさない午前5時から午前7時の間に行った。1日の練混ぜ数量は7.0m³程度であり、前日



Photo 7 既設構造物の撤去状況
After Removal of a Degradation Part



Photo 8 型枠の設置状況
Form Timbering



Photo 9 打込み状況
Placement Using Bessel



Photo 10 脱型状況
The Completion of Renewal

までに、はつり面の状況に応じて 0.1m^3 単位で発注した。

運搬は通常のアジテータ車を用いた。スリムクリートの密度は通常のコンクリートの2.3と比較して2.4と若干大きいため、アジテータ1車当たりの積載量は 4.0m^3 以下とした。

スリムクリートはベッセルに投入し、クレーンを用いて打ち込んだ。1回の打設量は $0.5\text{m}^3\sim 1.0\text{m}^3$ である。当初、コンクリートポンプ車を用いて打ち込む計画であったが、高さ6mの防風柵を越えて防風柵近傍でブームを操作するため、コンクリートポンプ車は用いなかった。打込みは壁部とスラブ部の2回に分けて実施した。壁部を打ち込み、巻き込みエアが抜けることによる沈下が停止するのを確認したのち、スラブ部を打ち込んだ。打込み状況をPhoto 9 に示す。

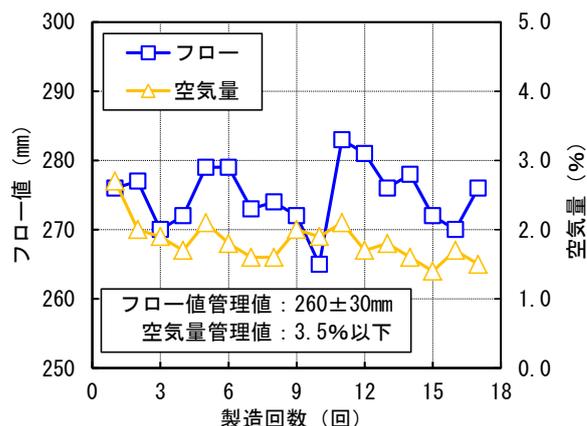


Fig. 6 フロー値と空気量
Flow Value and Air Content

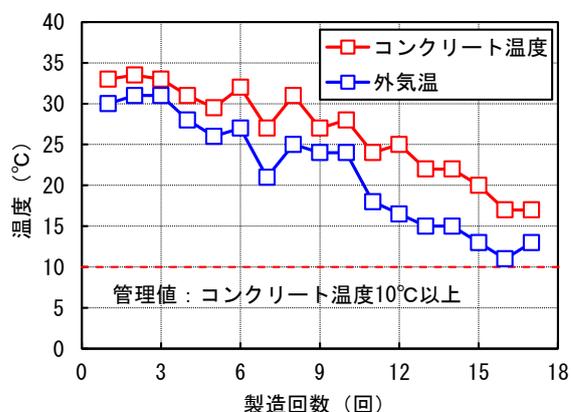


Fig. 7 材料温度と外気温
Material Temperature and Atmosphere Temperature

4.4 脱型

打込み後、表面が乾燥しないように膜養生剤を散布して養生マットを設置し、材齢7日後に脱型を行った。脱型を行った結果、耐久性に影響を及ぼす著しい劣化は認められなかった。脱型状況をPhoto 10 に示す。

4.5 品質管理

スリムクリートの品質管理は、前出のTable 2 に示す方法で荷卸し時のフレッシュ試験を、Table 3 に示す方法で硬化物性の 圧縮強度や引張強度を施工日毎に確認した。

荷卸し時におけるフロー値と空気量の関係をFig. 6 に、スリムクリートの温度と外気温の関係をFig. 7に示す。また、圧縮強度の管理結果をFig. 8 に、UFC指針に示される方法で、曲げ強度の試験結果から算定される推定引張強度をFig. 9 に示す。

フロー値の平均は 275mm ($265\sim 283\text{mm}$) となり、変動係数は1.6%で管理値の範囲内であった。また、空気量は、 $1.5\sim 2.7\%$ の範囲となり管理値の範囲内であった。アジテータ車による運搬中の攪拌により、空気量の増大も懸念されたが、その傾向は認められなかった。

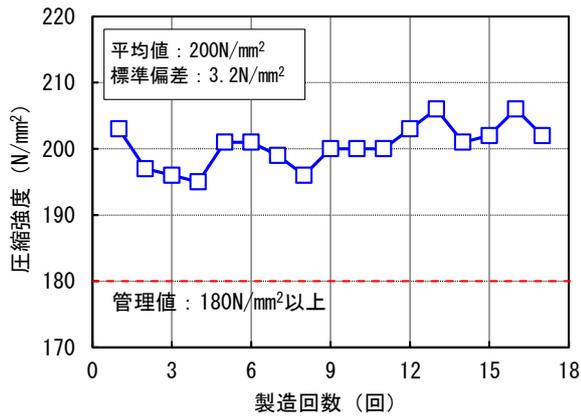


Fig.8 圧縮強度の品質管理結果
The Test Result of Compressive Strength

また、外気温が30℃～10℃の範囲で品質管理を行ったが、フロー値や、空気量への影響は少なく、スリムクリートは、外気温による影響を受けにくいことが明らかとなった。

次に、圧縮強度の平均値は200N/mm² (195 N/mm²～206N/mm²) となり、管理下限値の180N/mm²を上回る結果となった。また、変動係数は1.6%であり、ばらつきが小さいことが確認された。

さらに、UFC 指針に示される方法で引張強度を確認した結果、推定引張強度の平均値は12.7N/mm² (11.5N/mm²～14.5N/mm²) となり、管理下限値である8.8 N/mm²を満足した。

なお、スリムクリートの引張強度が曲げ強度から推定できることは、既往の報告⁴⁾で確認されている。

5. まとめ

本稿は、常温硬化型UFCのスリムクリートを、護岸構造物のリニューアルに適用した事例の設計と施工に関して報告した。

従来のUFCは、その優れた強度特性や耐久性にもかかわらず、工場製作に限るという制約と高価であることから適用が進んでいるとは言いがたい。これに対し、本稿において報告した護岸構造物では、スリムクリートを用いることで工場製作の制約を取り払った。

今回の施工により、スリムクリートの現場施工性が再確認できた。また、薄肉部材に適用することで、優れた強度特性や耐久性というUFCの特長を最大限に活かしている。今後もスリムクリートの適用範囲の拡大が期待できる。

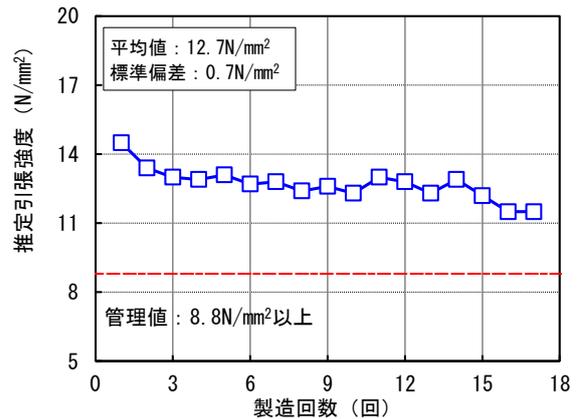


Fig.9 曲げ強度から算定した引張強度の結果
The Estimated Result of Tensile Strength

本稿が、今後、スリムクリートを用いた構造計画や、設計および施工の参考となれば幸いである。

謝辞

宇部興産株式会社との共同研究成果を活用しました。関係各位に深謝いたします。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書・設計編，土木学会，2013.3
- 2) 土木学会：エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針[改訂版]，コンクリートライブラリー112，土木学会，2003.11
- 3) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー113，土木学会，2004.10
- 4) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリート「スリムクリート」に関する技術評価報告書，技術推進ライブラリーNo.10，土木学会，2012.3
- 5) 石関嘉一他：常温硬化型UFCを用いた耐摩耗部材の開発，コンクリート工学，Vol.51，No.11，2013.11
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書・設計編，土木学会，2007.12
- 7) 沿岸開発技術研究センター：数値波動水路の研究・開発 CADMAS-SURF 数値波動水路の耐波設計への適用に関する研究会報告書，沿岸開発技術ライブラリーNo.12，沿岸開発技術研究センター，2001.1