報告　常温硬化型 UFC の現場打設による護岸構造物のリニューアル

平田　隆祥[*1]・石関　嘉一[*2]・武田　篤史[*3]・小澤　武史[*4]

要旨：海岸構造物は，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が大きい。本稿は常温硬化型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と，その設計および施工について報告する。

キーワード：常温硬化型 UFC，護岸構造物，現場打設，耐久性，凍結融解，摩耗，ベッセル

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，塩分が鉄筋位置まで浸透することを低減するため，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，鉄筋の腐食抵抗性を向上するため，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，かぶりを大きくと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り，自重の観点からも合理的な設計とは言い難い。高強度コンクリートを用いると，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や補修作業が困難な場合があり，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となる。UFC 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，150N/mm^2 以上の圧縮強度と 5N/mm^2 以上の引張強度とを持つ材料と定義されている。内部に鋼材を用いる際も，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，薄肉の海洋構造物に非常に適している。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主となり，設計や施工において大きな制約となっている。そこで，通常のコンクリートと同様に常温で硬化し，設計や施工を行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 を開発し，土木学会の技術推進ライブラリー（以下，ライブラリーと称す）[4)]で報告した。

本稿は，常温硬化型 UFC 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，常温硬化型 UFC を用いて現場打設によりリニューアルした事例と，その設計および施工について報告する。設計に関しては，現場条件を示した後，補修と再構築と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，施工手順および常温硬化型 UFC の品質管理について記載する。

2. 常温硬化型 UFC の概要

2.1 構成材料

常温硬化型 UFC 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，および高性能減水剤で構成される。

このモルタルは給熱養生等の特殊な養生を行わなくても，ライブラリーに示す常温で所定の強度特性を発現する。配合を**表−1** に示す。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 2.0vol.%使用した。使用した鋼繊維を**写真−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，表面は真ちゅうでメッキされている。一般の建設用鋼繊

表-1　配合

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

*1　(株)大林組 技術研究所 生産技術研究部　主任研究員　博士（工）　(正会員)
*2　(株)大林組 技術研究所 生産技術研究部　副主任研究員　博士（工）　(正会員)
*3　(株)大林組 技術研究所 構造技術研究部　副主任研究員　修士（工）　(正会員)
*4　(株)大林組 名古屋支店　工事長

写真-1　高強度鋼繊維

表-2　フレッシュ試験項目および判定基準

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

写真-2　モルタルフロー

表-3　常温硬化型 UFC の特性値

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}/℃	JCI「ﾏｽｺﾝｸ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

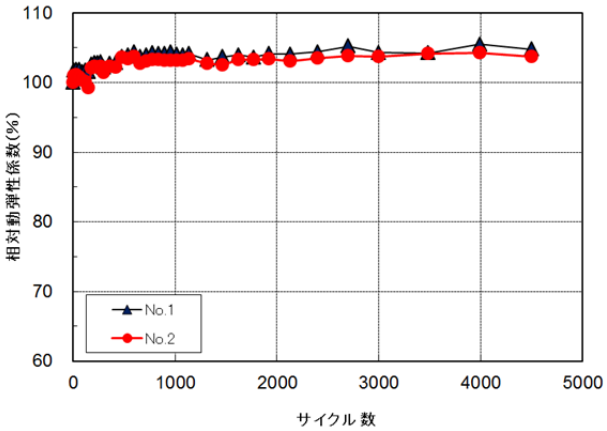

図-1　凍結融解サイクル数と相対動弾性係数

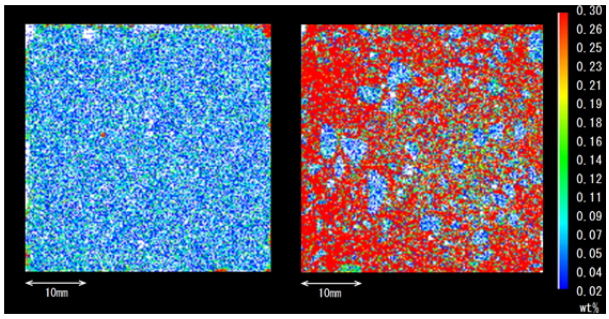

写真-3　EPMA による塩化物イオンの浸透状況

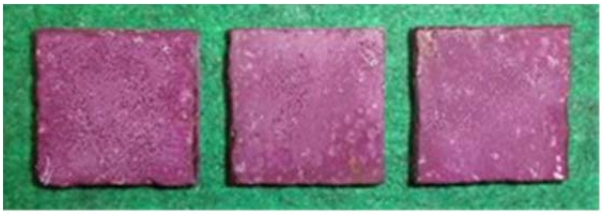

写真-4　促進期間 52 週の中性化深さの状況 (n=3)

維の引張強度 1,000N/mm^2 に対して，引張強度は 2,000N/mm^2 以上で，形状はすべて直線状である。

2.2 フレッシュ性状

JIS R 5201（落下なし）のモルタルフロー値は 260±30 ㎜で，スランプフローは 800±100 ㎜と流動性が良い。間隙が 30 ㎜以下の狭隘部にも閉塞することなく充填できる [3]。なお，フレッシュ試験項目および判定基準を**表-2** に，モルタルフローを**写真-2** に示す。

2.3 硬化特性

常温硬化型 UFC は高じん性高強度であり，圧縮強度 180N/mm^2 以上，引張強度 8.8N/mm^2 以上の材料強度を有している [4]。特性値を**表-3** に示す。

2.4 耐久性

凍結融解試験（JIS A1148 に準拠）における 2 試験体の相対動弾性係数を**図-1** に， UFC 指針に記載される温海水乾湿繰返し試験における常温硬化型 UFC（左）と高強度コンクリート(圧縮強度 94N/mm^2 W/C30%)（右）との塩化物イオンの浸透状況の EPMA 画像を**写真-3** に，促進中性化試験（JIS A1153 に準拠）における促進期間 52 週の中性化深さの状況を**写真-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 100%を保ち，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，常温硬化型 UFC 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された [4]。

これらの結果より，常温硬化型 UFC 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判る。

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 の摩耗試験結果および普通コンクリート（圧縮強度 18N/mm^2，21N/mm^2）と高強度コンクリート（圧縮強度 88N/mm^2）の摩耗試験結果[5]を**図-2** に示す。

常温硬化型 UFC と普通コンクリートの摩耗量を比較すると，常温硬化型 UFC の摩耗量は普通コンクリートの摩耗量に対して 15%程度，高強度コンクリートの摩耗量に対して 37%程度であり，常温硬化型 UFC の耐摩耗性が非常に高いことが判る。

3. 護岸構造物の設計

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，**図-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飛沫から保護することを目的としており，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，5000mm 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。この 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，切り回しも困難であった。

リニューアル前の状況を**写真-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。

このような本構造物のリニューアルに対して，以下のような要求性能が設定された。

(1) 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。

(2) 防風壁はそのまま利用することとする。

(3) 背面のインフラ管類への影響は最小限にする。

(4) 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 20 ㎜毎の 5 試料(深さ 100 ㎜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，最小二乗法により各個所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。得られた表面塩化物イオン量 C_s(平均値：C_s=8.06～20.01kg/m^3)および拡散係数 D_c (D_c=0.44×10^{-8}～1.48×10^{-8}cm^2/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**図-4** に示す。発錆限界

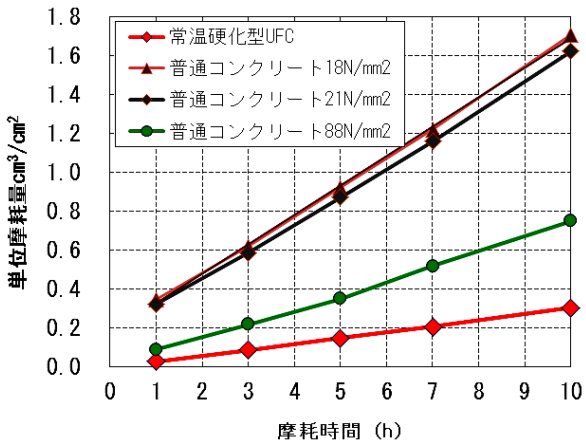

図-2　摩耗試験結果

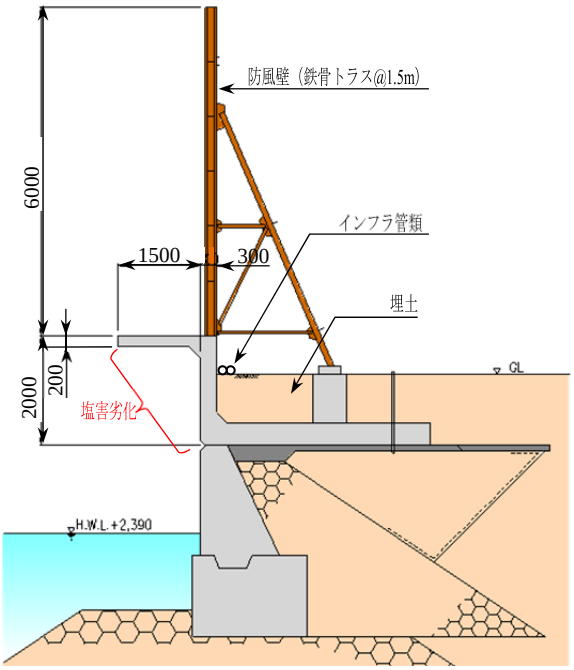

図-3　現場断面図（リニューアル前）

写真-5　リニューアル前の状況

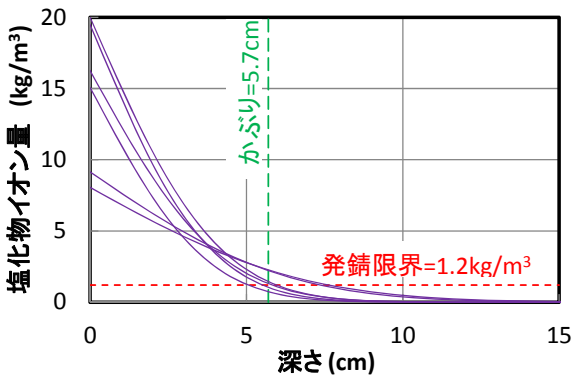

図-4　既存躯体の塩化物イオン量調査結果

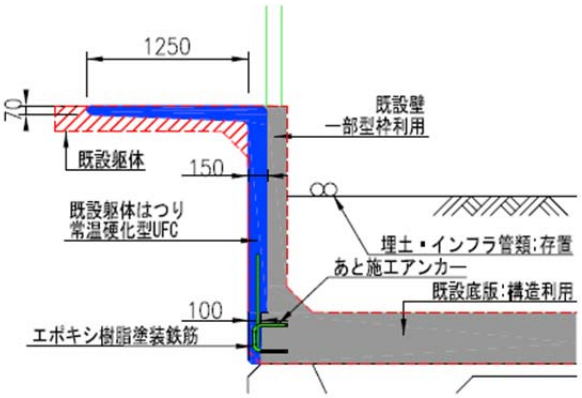

図-5　護岸の構造図

は，既設コンクリートの配合が不明であるため，2012 年制定でなく，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大きく超えていることがわかる。

補修によりリニューアル仕様とする場合，使用材料に違いがあったとしても，かぶりの除去，鉄筋除錆，断面修復，表面被覆という手順によるものが一般的である。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く，50 年の延命を考えると，鉄筋が再び発錆すると想定される。従って，補修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，**図−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(1)の耐久性を確保するためには，1.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を考慮し，耐久性確保の観点から，100 年以上の耐久性があるとされる[3]UFC による構造とした。

次に，要求性能(2)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こと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 となる。

さらに，要求性能(3)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(4)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低減を図っている。

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/m^2)および風荷重(水平方向:2.5kN/m^2，鉛直方向:3.5kN/m^2)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，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。

設計の単位延長は，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。

壁部は厚さ 150mm とし，底版部はコンクリートを 100mm はつれば，**図−4** に示す塩化物イオン量分布より，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，100mm をはつり取り常温硬化型 UFC で再形成することとした。

既設底版と UFC の接合部は，後施工アンカーにより既設底版に鉄筋を挿入し，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重要な部分であるため，アンカー鉄筋に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 小さいため，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

4.1 施工手順

護岸構造物の施工は下記の手順により実施した。構造物が陸側から海側に張り出す形状（**写真−6**）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，既設構造物のはつり面と型枠の間に常温硬化型 UFC を打設するため，はつり面の平滑度により常温硬化型 UFC の打設量が変動する。そのため，はつり面の平滑度を向上させる目的で，はつり部の計測を高い精度で実施し，常温硬化型 UFC の練混ぜ量と打設数量を決定した。

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

写真-6　既設構造物の撤去前状況

写真-8　型枠の設置状況

写真-7　既設構造物の撤去状況

写真-9　常温硬化型 UFC の打設状況

④　型枠設置
⑤　常温硬化型 UFC の練混ぜ数量決定
⑥　常温硬化型 UFC の練混ぜおよび運搬
⑦　常温硬化型 UFC 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，作業用の足場が設置できないため，ブラケット足場を設置した。既設構造物にアンカーを打込み，作業足場を確保した。

足場を設置した後，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，壁部を設計深さの 150 ㎜まで，コンクリートブレーカーを用いてはつり，はつったコンクリートはクレーンにて陸側に撤去した。

また，劣化した鉄筋は除去した。壁部の既設コンクリート撤去状況を**写真-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，常温硬化型 UFC 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糸を張り，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，常温硬化型 UFC の打設量を算出した。

はつり面の計測後，型枠を設置した。常温硬化型 UFC は流動性が高く壁部の側圧が大きくなるので，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から，流出する危険性がある。そこで，流出する危険性が予見できる箇所は，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**写真-8** に示す。

4.3 練混ぜおよび打設

常温硬化型 UFC の練混ぜは市中の生コンプラントで行った。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 7.0m^3 程度であり，前日までにはつり面の状況に応じて 0.1m^3 単位で発注することとした。

運搬は通常のアジテータ車を用いて行った。常温硬化型 UFC の比重は通常のコンクリートの 2.3 と比較して 2.4 と若干重いため，アジテータ 1 車当たりの積載量は 4.0m^3 以下とした。

常温硬化型 UFC 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 0.5m^3～1.0m^3 である。当初コンクリートポンプ車を用いて打設する計画であったが，高さ 6m の防風壁を越えて防風壁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

写真-10　脱型状況

込みは壁部とスラブ部に分けて実施した。壁部を打ち込み，巻き込みエアー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。打設状況を**写真-9** に示す。

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。脱型状況を**写真-10** に示す。脱型を行った結果，耐久性に影響を及ぼす劣化は認められなかった。

4.5 品質管理

常温硬化型 UFC の品質管理は，荷卸し時のフレッシュ試験および硬化物性として圧縮強度試験を実施した。フレッシュ試験はモルタルフローおよび空気量を測定した。モルタルフロー，空気量の基準値は 260±30mm，3.5%以下であり，双方とも基準を十分満足する結果であった。また，圧縮強度用の供試体は打込み時に採取し，実躯体と同条件で養生を行い，材齢 28 日で試験した。品質管理試験の結果を**図-6** に示す。すべての打設において，設計基準強度 180N/mm^2 を十分満足する結果となった。

今回の施工により，常温硬化型 UFC の現場施工性が再確認できた。今後，常温硬化型 UFC の適用範囲の拡大が期待できる。

5. まとめ

本稿は，常温硬化型 UFC を護岸構造物に適用した事例と，その設計および施工に関して報告した。

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難い。これに対し，本稿において報告した護岸構造物では，常温硬化型 UFC を用いることで工場製作の制約が無くなった。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有する UFC の特長を最大限に活かすことができた。

本稿が，今後，UFC を用いた構造計画，設計および施工の参考となれば幸いである。

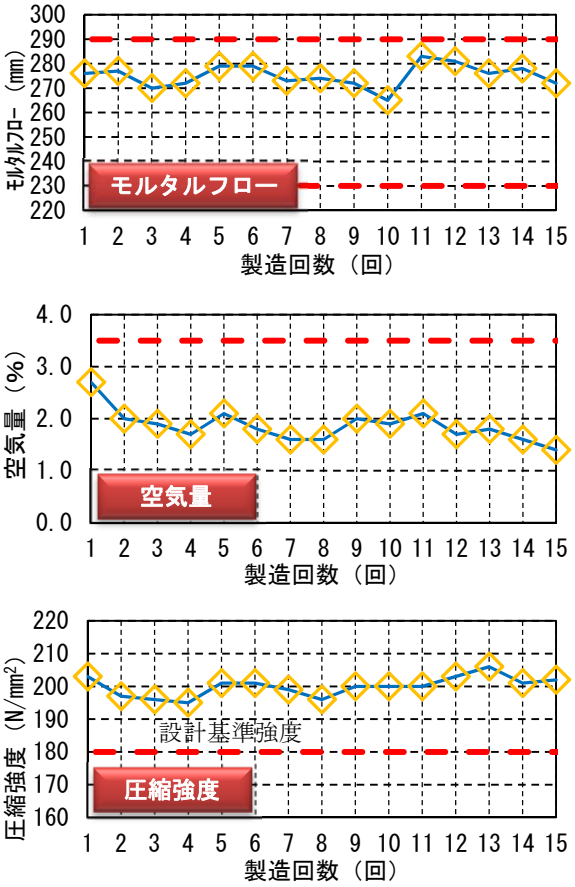

図-6　品質管理試験結果

謝辞　本件の推進にご協力いただいた宇部興産㈱,宇部建設資材販売㈱の担当各位に感謝の意を表します。

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.10，2012.3
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