

## ◇論文◇

海岸擁壁の補修工事に適用した  
繊維補強PFCパネルの製造と性能Fabrication and Performance of  
Fiber Reinforced Pore-free Concrete Panels  
for Coast Retaining Wall Repair

河野 克哉\*, 森 香奈子\*,  
安田 瑛紀\*, 多田 克彦\*\*

KONO, Katsuya\*; MORI, Kanako\*;  
YASUDA, Eiki\*; TADA, Katsuhiko\*\*

## 要 旨

最近、流し込み成型によるコンクリートとしては、もっとも高い圧縮強度を発現することができるPFC(無孔性コンクリート)が開発された。本研究は、このPFCを繊維で補強することで、海岸擁壁補修パネルに対して適用することを検討したものである。この検討の結果、UFC(超高強度繊維補強コンクリート)に繊維補強PFCを部分的に埋め込んだハイブリッドパネルを製造し、激しい浸食を受けた黄金道路(北海道)における海岸擁壁の補修工事に試験適用できた。また、水中における繊維補強PFCの圧縮強度の安定性を確認するとともに、繊維補強PFCの曲げ強度ならびにすり減り抵抗性を測定し、いずれもUFCとくらべて向上できることがわかった。

**キーワード:** 無孔性コンクリート, 超高強度繊維補強コンクリート, 海岸擁壁, 補修パネル, 曲げ強度, すり減り抵抗性

\*中央研究所 第2研究部 高機能コンクリートチーム Multi-Function Concrete Team, Central Research Laboratory

\*\*中央研究所 第2研究部 高機能コンクリートチーム リーダー

Manager, Multi-Function Concrete Team, Central Research Laboratory

## ABSTRACT

Pore-free concrete (PFC) was developed recently for the purpose of achieving the highest possible level of compressive strength in cast molded concrete. This study was performed to examine the applicability of fiber reinforced PFC to repair panels for coast retaining walls. Composite panels of ultra high strength fiber reinforced concrete (UFC) partially embedded with the fiber reinforced PFC were fabricated and successfully applied to the repair of severely eroded coast retaining walls in Hokkaido. It was also verified by measurements that the fiber reinforced PFC was stable in water in terms of compressive strength and had higher flexural strength and abrasion resistance compared to UFC.

**Keywords:** *Pore-free concrete(PFC), Ultra high strength fiber reinforced concrete(UFC), Coast retaining wall, Repair panel, Flexural strength, Abrasion resistance*

## 1. はじめに

最近、筆者らは流し込み成型で世界最高強度を発現するコンクリートの開発に成功した<sup>1)</sup>。このコンクリートは、材料・配合・製造方法の工夫によって内部空隙を極限まで減らすことで、きわめて高い強度を発現させるもので、PFC(無孔性コンクリート)と呼んでいる<sup>2)</sup>。本研究は、このPFCを繊維で補強して、激しい浸食を受けた海岸擁壁の補修工事に適用することを検討したものである。この補修工事で用いた繊維補強PFCを埋め込んだ超高度繊維補強コンクリート(以下、UFC)製パネルの製造ならびに設置工事の概要について述べるとともに、パネルに用いた繊維補強PFCの圧縮強度特性、曲げ強度特性およびすり減り抵抗性について検討した。

## 2. 海岸擁壁補修工事の概要

### 2.1 擁壁の洗掘状況

Fig.1は、国道336号(北海道浦河郡浦河町から同道釧路市に至る一般国道)において黄金道路と呼ばれている太平洋に面した区間に建設された覆道ならびに擁壁の状況を示したものである。この黄金道路は、日高山脈の南端部(最南端部は襟裳岬)に位置し、海岸沿いの断崖絶壁を切り開く難工事によって開通

したものである。山側からは急斜面が崩落して落石が起り、海中に落下した石は波によって運ばれ、海岸擁壁に衝撃や磨耗を与えている。これら以外に海水が作用する下での凍結融解なども加わって、Fig.2に示すように擁壁は激しい洗掘を受けている。この擁壁は、1970年ごろに施工されたものと推定されているものの、浸食が顕著になったのは2003年9月26日に発生した十勝沖地震(マグニチュード7.1)以降と考えられている。この地震によって、海底地形が変動したこと、消波ブロックが流失したことなどから、波による擁壁の洗掘が急激に進行するようになったとの説がある。

### 2.2 擁壁補修の概要

Fig.3は、黄金道路の海岸擁壁補修の概要について示したものである。既存擁壁のコンクリートの前方に超高度繊維補強コンクリート(以下、UFC)製のパネルを、鋼製アングルとのボルト接合ならびに既存擁壁とのアンカー鉄筋定着にて斜めに設置したうえで、パネルと擁壁との間に裏込め材としてレディーミクストコンクリートを打ち込んで固定する補修工法が採用されている。また、パネルに用いるコンクリートの設計基準圧縮強度は $180\text{N/mm}^2$ 、パネルに用いたコンクリートの断面減少を想定した設計耐用年数は15年となっている。

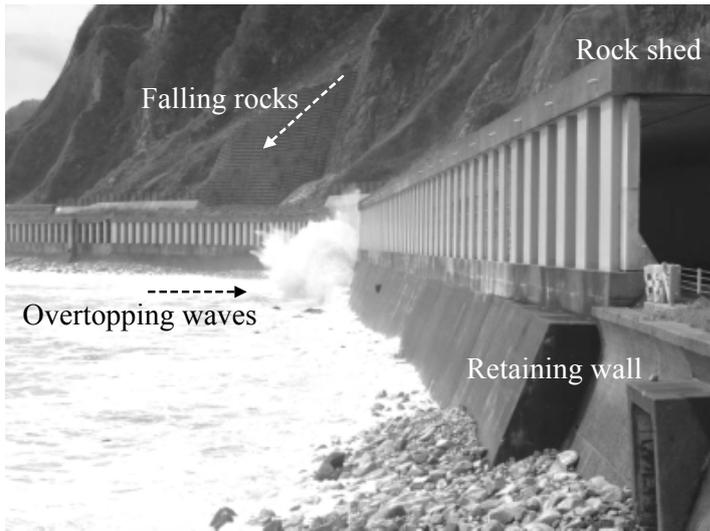


Fig. 1 Falling rocks and overtopping waves on Ougon road (黄金道路における落石と越波)

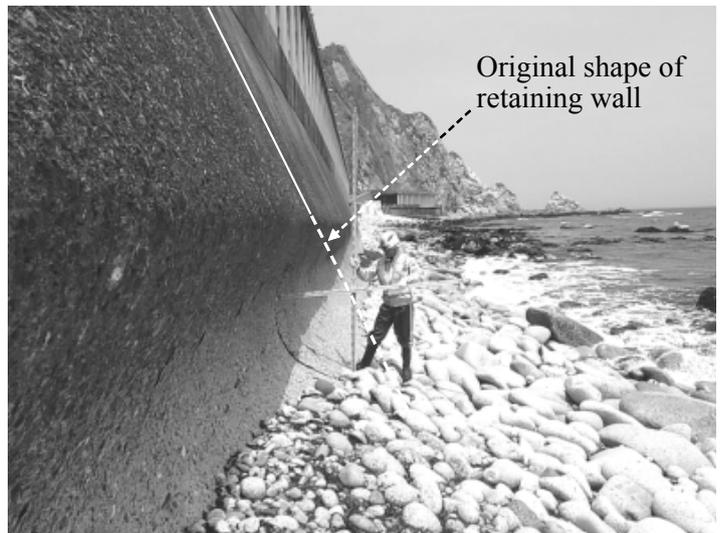


Fig. 2 Deeply eroded coast retaining wall (深く浸食した海岸擁壁)

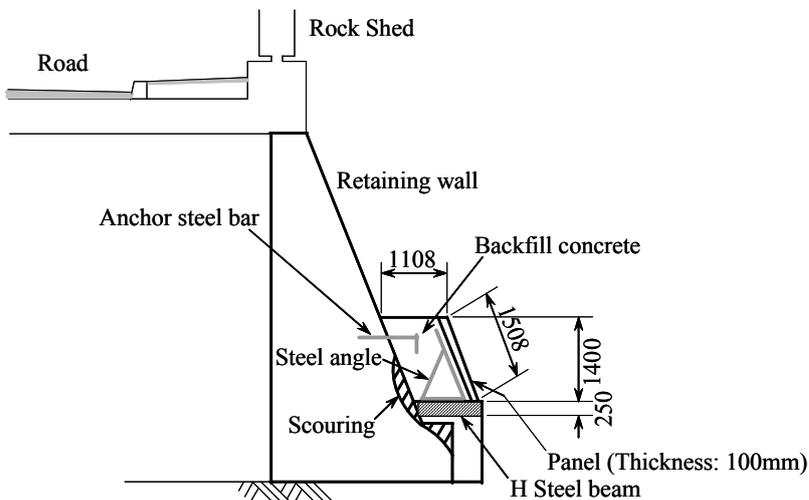


Fig. 3 Outline of retaining wall repair (擁壁補修の概要)

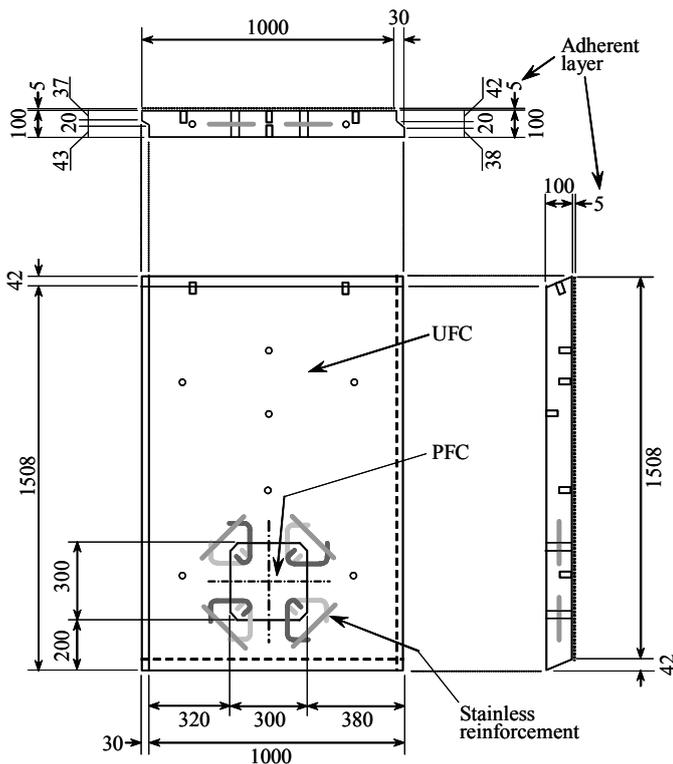


Fig. 4 Outline of panel used for repairs  
(補修用パネルの概要)

### 3. 補修用パネルの製造と設置

#### 3.1 補修用パネルの概要

Fig. 4は、補修工事に適用したパネルの概要を示したものである。パネルの寸法は幅 1000mm×高さ 1508mm×厚さ 100mmとなっており、パネル背面には裏込めのコンクリートとの接着性を勘案して凸型の付着層(厚さ 5mm)が設けられている。パネルに用いるコンクリートの種類は、UFC(商品名: Ductal® FM)となっているものの、砂礫による磨耗と衝撃がもっとも激しいと想定されるパネル下部に幅 300mm×高さ 300mm×厚さ 100mm(付着層厚さ 5mm)の寸法となる繊維補強 PFC 部材を埋め込んだハイブリッドパネルとすることで、新材料の実環境における暴露評価を行う計画とした。

#### 3.2 埋込み部材の材料、配合、製造および仕様

##### (1) 部材の材料ならびに配合

Table 1は埋込み部材に用いた材料を、Table 2は埋込み部材に用いた配合をそれぞれ示したものである。PFCの結合材(以下、 $B_{pfc}$ )には低熱ポルトランドセメント(以下、 $C$ )、石英微粉末(以下、 $Q$ )および

シリカフューム(以下、 $SF$ )を、UFCの結合材(以下、 $B_{ufc}$ )には市販のプレミックス標準配合粉体を用い、細骨材はいずれの場合にも珪砂(以下、 $S$ )を用いた。また混和剤(以下、 $Ad$ )は、PFCならびにUFCのそれぞれに適した高性能減水剤(以下、それぞれ  $SP_{pfc}$ 、 $SP_{ufc}$ )を用い、PFCの場合には消泡剤(以下、 $DF$ )も併用した。なお、PFCの結合材は、既往の研究<sup>2)</sup>にしたがって、最密粒度となる処方になっている。

PFCと組み合わせる繊維は鋼繊維(以下、STE)ならびに海水による腐食を生じない新開発の集束PBO繊維(以下、PBO)<sup>3)</sup>の2種類とし、UFCと組み合わせる繊維はSTEの1種類とした。なお、いずれの配合においても、繊維混入率(以下、 $V_f$ )を2%で一定とした。

Table 2中の配合の名称は、結合材の種類、繊維の種類、圧縮強度の順で表示しており、PFC-STE-350の場合は、PFC結合材と鋼繊維を用いて圧縮強度 350N/mm<sup>2</sup>を発現するコンクリートのことを示している。

また、Table 2中には、フロー(無振動)ならびに空気量(空気室圧力法)の測定値を併記しており、いずれの配合においても、流し込み成型における繊維の分離などを生じないコンシステンシーを有している。ただし、他の配合にくらべて、PFC-PBO-200の場合には、PBOフィラメントを集束させているため、練混ぜにおける解繊によってフローの低下と空気量の増加を生じる傾向となった。

##### (2) 部材の製造

Table 3は、埋込み部材の各配合に対する養生手順を示したものである。配合名 PFC-STE-350の場合は、材齢 2dで脱型直後に i) 吸水処理、つづいて ii) 蒸気養生ならびに iii) 加熱養生の2段階の熱養生を実施した。それ以外の配合では、いずれも材齢 2dで脱型した後、iii) 蒸気養生のみを実施した。各養生の方法は、以下のとおりである。

- i) 吸水処理(脱気吸水法) : Fig. 5に示すように、脱型直後の硬化コンクリートを密閉容器中で脱気下に供し、真空になったところで水を滴下して完全に水没させてから30分間ほど外部から内部に水分を補給した。
- ii) 蒸気養生 : 昇温速度 15°C/h、最高温度 90°C、最高温度保持時間 48h、降温速度 15°C/h、1 atm の条件とした。
- iii) 加熱養生 : 昇温速度 60°C/h、最高温度 180°C、最高温度保持時間 48h、降温速度 60°C/h、1 atm の条件とした。

Table 1 Materials  
(使用材料)

Material	Type	Symbol	Characteristics
PFC Binder ( $B_{pfc}$ )	Low heat Portland cement	$C$	Specific surface area: 3330cm <sup>2</sup> /g, Density: 3.22g/cm <sup>3</sup>
	Quartz fine powder	$Q$	Density: 2.69g/cm <sup>3</sup>
	Silica fume	$SF$	Specific surface area: 20m <sup>2</sup> /g, Density: 2.24g/cm <sup>3</sup>
UFC Binder	Premix powder	$B_{ufc}$	Commonly-marketed standard compounded powder
Fine aggregate	Silica sand	$S$	Maximum particle size: 0.3mm, Density: 2.61g/cm <sup>3</sup>
Reinforced fiber ( $F$ )	Steel fiber	$STE$	Diameter: 0.2mm, Length: 15mm, Density: 7.84g/cm <sup>3</sup> , Tensile strength: 2800N/mm <sup>2</sup> , Tensile modulus: 200kN/mm <sup>2</sup>
	Twisted PBO fiber bundle	$PBO$	Diameter: 0.23mm, Length: 15mm, Density: 1.51g/cm <sup>3</sup> Tensile strength: 3500N/mm <sup>2</sup> , Tensile modulus: 141kN/mm <sup>2</sup>
Chemical admixture ( $Ad$ )	PFC superplasticizer	$SP_{pfc}$	Polycarboxylic type
	UFC superplasticizer	$SP_{ufc}$	Polycarboxylic type
	Deforming agent	$DF$	Polyalklene glycol type

Table 2 Mix proportions of PFC and UFC  
(UFC ならびに FRC の配合)

No.	Name	$V_f$ (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )										Flow (mm)	Air content (%)	
			$W$	$B_{pfc}$			$B_{ufc}$	$S$	$F$		$Ad$ *				
				$C$	$Q$	$SF$			$STE$	$PBO$	$SP_{pfc}$	$SP_{ufc}$			$DF$
1	PFC-STE-350	2.0	193	836	349	97	—	934	157	—	$B_{pfc} \times 1.7\%$	$B_{pfc} \times 0.02\%$	—	285	2.6
2	PFC-STE-300										$B_{pfc} \times 1.7\%$	$B_{pfc} \times 0.02\%$			
3	PFC-PBO-200										$B_{pfc} \times 2.5\%$	$B_{pfc} \times 0.02\%$			
4	UFC-STE-200										—	—			

\* Replacement as a part of unit water content, and addition to mixing water.

Table 3 Procedures for curing of concrete  
(コンクリートの養生手順)

No.	Name	Procedures for curing of concrete
1	PFC-STE-350	Removal of mold → Pre-soaking (Deairing, 30m) → Steam curing (90°C, 48h) → Heat curing (180°C, 48h)
2	PFC-STE-300	Removal of mold → Steam curing (90°C, 48h)
3	PFC-PBO-200	Removal of mold → Steam curing (90°C, 48h)
4	UFC-STE-200	Removal of mold → Steam curing (90°C, 48h)

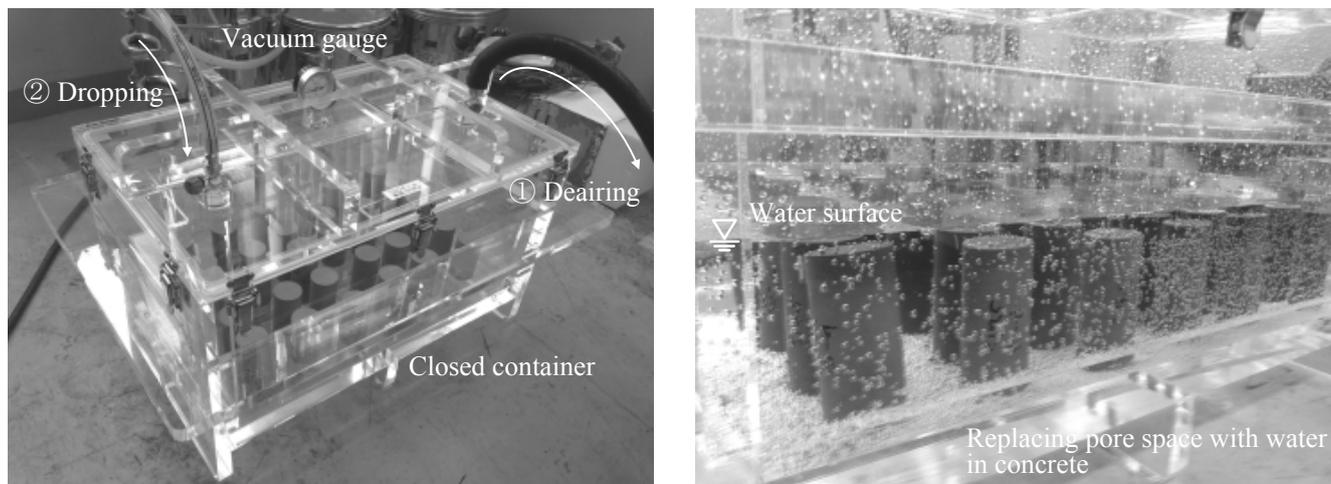


Fig. 5 Method of deairing water absorption  
(脱気吸水処理の方法)

### (3) 部材の仕様

パネルの一部に埋め込む部材は、それぞれ所定の材料・配合・養生方法で製造し、その概要は Fig. 6 に示すとおりである。埋込み部材の外形寸法は幅 300mm×高さ300mm×厚さ100mmとし、その形状は周囲のUFCがUFC自体の養生中における収縮によってひび割れることを防止する観点から、四つの隅角部を面取りした八角柱とした。また、埋込み部材には、周囲のUFCと十分に定着させるため、曲げ加工したD10のステンレス鉄筋(SUS304 SD390)を配置し、側面には凹形状の付着層を設けた。さらに施工時の裏込めのコンクリートとの定着を図るために、埋込み部材の背面には凸形状の付着層を設けた。

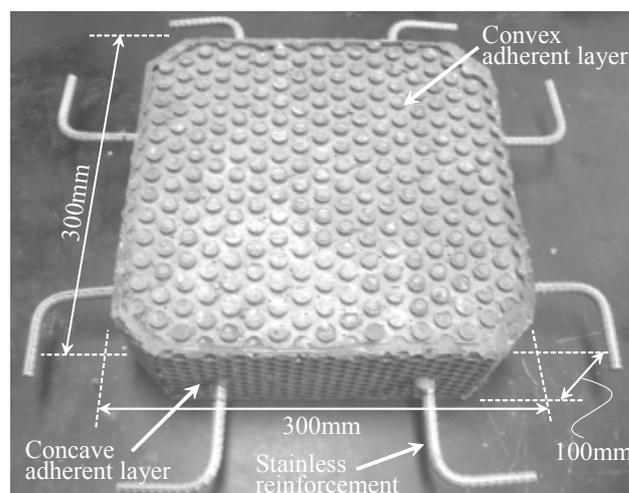


Fig. 6 Outline of embedded member  
(埋込み部材の概要)

## 3.3 PFC-UFCハイブリッドパネルの製造と設置

### (1) パネルの製造

Fig. 7は、PFC部材を埋め込んだUFCとのハイブリッドパネル製造の状況について示したものである。PFC埋込み部材を型枠内の所定の位置に設置してUFCを打ち込んで(Fig. 7(a))、表面を均してから開孔されたゴム板を圧着することで凸形状の付着層を形成した(Fig. 7(b))。その後、一次養生として最高温度40℃の蒸気養生を行ってから材齢1日で脱型した(Fig. 7(c))。さらに、脱型したPFC-UFCハイブリッドパネルは、二次養生として最高温度90℃の蒸気養生を48時間行った。

### (2) パネルの設置

Fig. 8は、PFC-UFCハイブリッドパネルを用いた海岸擁壁補修工事の状況を示したものである。パネルをクレーンにて吊り上げて海岸まで降ろし(Fig. 8(a))、所定の位置に設置した(Fig. 8(b))。型枠を組み立てた後、裏込め材としてレディーミクストコンクリートをポンプ車のブームを延ばして圧送し(Fig. 8(c))、表面仕上げを施してから(Fig. 8(d))、現地にて養生ならびに供用を開始した。

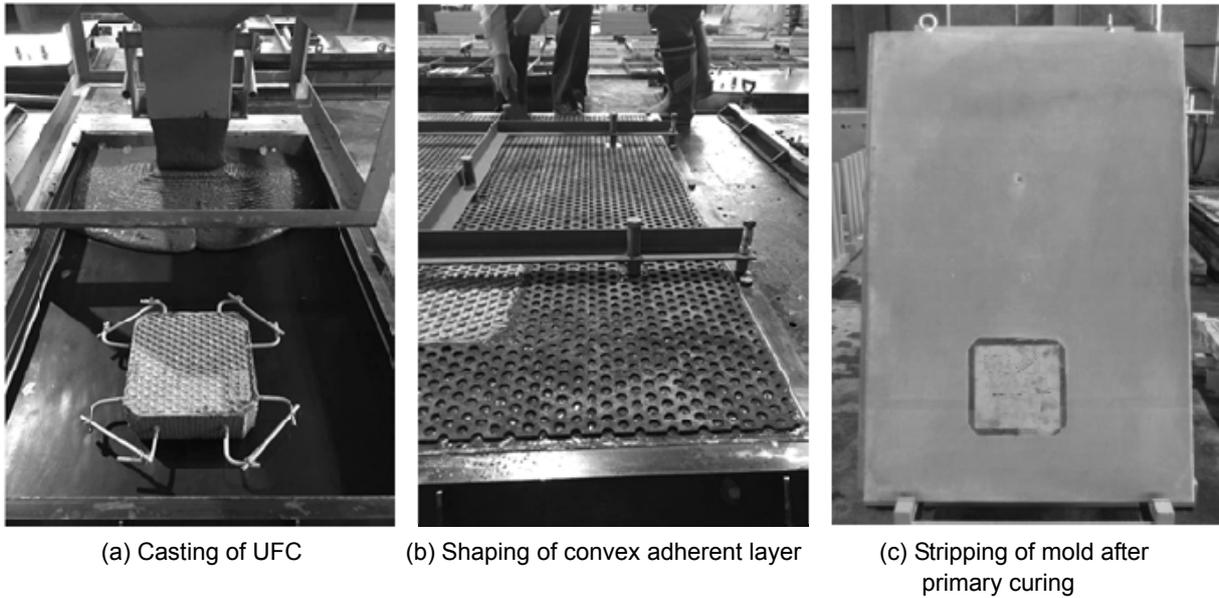


Fig. 7 Manufacturing of PFC-UFC hybrid panel  
(PFC-UFCハイブリッドパネルの製造)

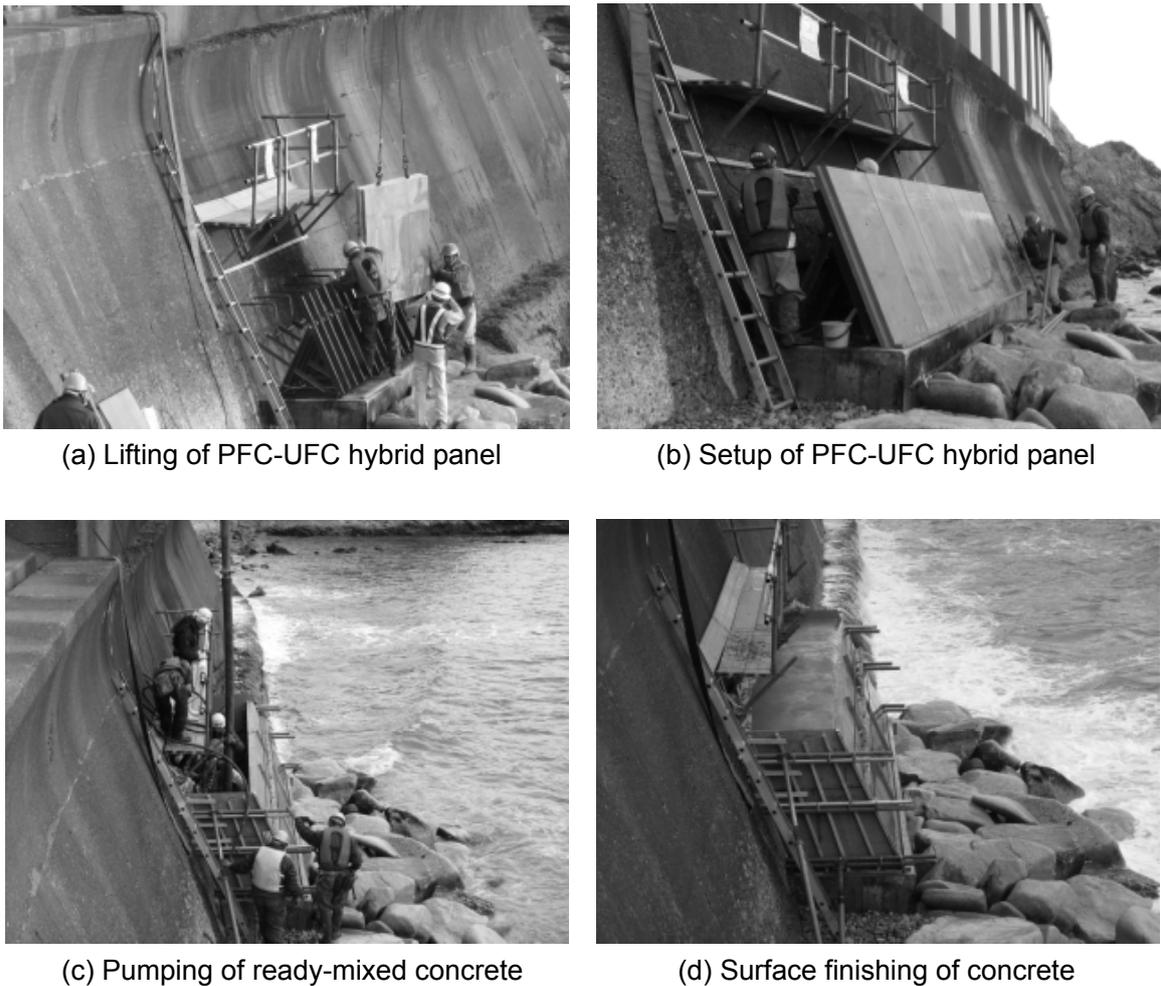


Fig. 8 Coast retaining wall repair using PFC-UFC hybrid panel  
(PFC-UFCハイブリッドパネルを適用した海岸擁壁の補修工事)

## 4. 補修用パネルに用いた繊維補強 PFC の特性

### 4.1 繊維補強 PFC の試験方法

#### (1) 圧縮強度特性

圧縮強度(以下,  $f_c'$ )は, 寸法  $\phi 50 \times 100$ mm の円柱供試体を用いて JSCE-G-505- に準じて測定した. なお, 埋込み部材に用いた各コンクリートは, パネルに埋め込んだ後に再度  $90^\circ\text{C}$  の蒸気養生に供されることになるため, 部材製造養生後ならびにパネル製造養生後の  $f_c'$  を測定した. また, PFC-STE-350 の場合には, 水中  $20^\circ\text{C}$  (相対湿度100%), 気中  $20^\circ\text{C}$  で相対湿度 80% および気中  $20^\circ\text{C}$  で相対湿度 60% の各条件で約 1 年間保管したときの  $f_c'$  の変化も測定した.

#### (2) 曲げ強度特性

曲げ強度(以下,  $f_b$ )は, 寸法  $40 \times 40 \times 160$ mm の角柱供試体を用いて JIS A 1106 に準ずる形で行った. なお, 万能試験機(荷重容量 100kN)を用いて, 支点間距離 120mm, 等曲げモーメント区間距離 40mm の 4 点曲げ試験(3 等分点曲げ試験)を行い, 荷重とともに試験機のクロスヘッド変位を測定した.

#### (3) すり減り抵抗性

埋込み部材に用いた各コンクリートで平板(寸法  $30 \times 30$ cm, 厚さ 6 cm)を作製し, Fig. 9 に示した回転ディスクを用いてすり減り作用を与える試験機に供した. すり減り抵抗性試験は, ASTM C779 「Standard Test Method for Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surfaces」に準じる形とし, 固定した UFC 平板に対して一定荷重を作用させた磨耗板との間に磨耗材を定量供給しながら回転(自転 280rpm)させ, さらにこれを円周運動(公転 12rpm)させることで表面に平行な磨耗を与えた. Fig. 9 に示すように PFC ならびに UFC 平板の削り取られた深さをマイクロメータにて測定し, その平均値をすり減り深さとした. すり減り試験は 60 分間継続して行い, 試験開始から試験終了まで 10 分経過ごとにすり減り深さを測定した.

### 4.2 繊維補強 PFC の性能

#### (1) 圧縮強度特性

Table 4 は, 繊維補強 PFC ならびに UFC の力学特性についてまとめたものである. ハイブリッドパネル

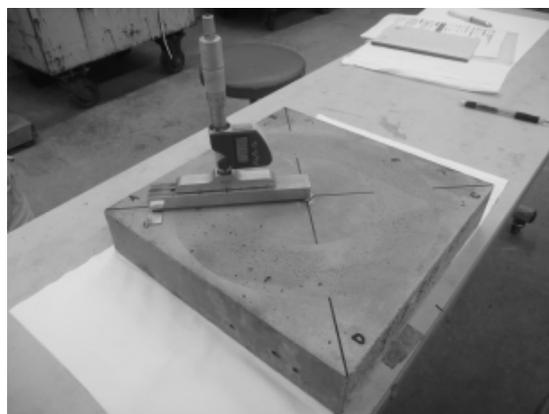
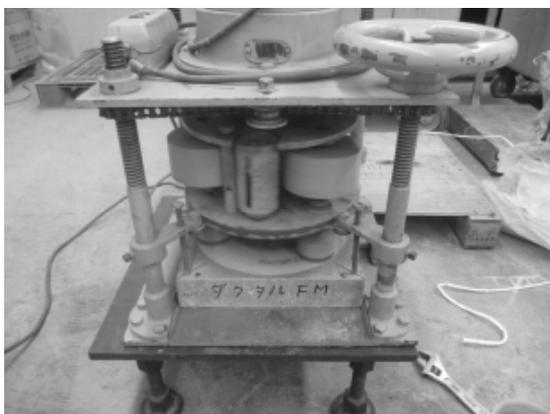


Fig. 9 Measurement method for abrasion resistance of PFC  
(PFC のすり減り抵抗性に対する測定方法 (ASTM C779))

Table 4 Mechanical properties of fiber reinforced PFC and UFC  
(繊維補強 PFC ならびに UFC の力学特性)

Name	$f_c'$ (N/mm <sup>2</sup> )		$f_b$ (N/mm <sup>2</sup> )
	After manufacturing embedded member	After manufacturing hybrid panel	After manufacturing hybrid panel
PFC-STE-350	340	344	52
PFC-STE-300	250	279	40
PFC-PBO-200	188	194	40
UFC-STE-200	216	—	44

$f_c'$  : Compressive strength,  $f_b$  : Flexural strength

製造完了時において、PFC-STE-350の場合には約 $350\text{N/mm}^2$ 、PFC-STE-300の場合には約 $280\text{N/mm}^2$ 、PFC-PBO-200ならびにUFC-STE-200の場合にはいずれも約 $200\text{N/mm}^2$ の $f'_c$ を発現した。いずれの配合の $f'_c$ においても、埋込み部材製造時ならびにハイブリッドパネル製造時ともに設計基準圧縮強度である $180\text{N/mm}^2$ を上回ることが確認できた。

Fig. 10は、相対湿度が異なる条件下で保管した繊維補強PFC(PFC-STE-350)の $f'_c$ の経時変化を示したものである。相対湿度が60%ならびに80%の場合や、水中の場合(相対湿度100%)においても、繊維補強PFCの $f'_c$ は $350\text{N/mm}^2$ 程度で1年間に渡ってほぼ一定であった。このことから、PFCは製造工程において $180^\circ\text{C}$ の加熱養生で水分逸散を生じているものの、供用中にPFCの内部に水分が浸透して強度変化を生じさせることはなく、長期的に強度が安定しているものと推察できる。

### (2) 曲げ強度特性

Fig. 11は、繊維補強PFCならびにUFCの曲げ応力-たわみ関係について示したものである。 $f_b$ は、PFC-STE-350の場合がもっとも高く、次にUFC-STE-200の場合が高くなった。また、PFC-STE-300の場合ならびにPFC-PBO-200の場合の $f_b$ は同程度であり、UFC-STE-200の場合の $f_b$ よりもやや低い結果となった。ポストピークの挙動は、STEを用いた場合にはほぼ同じ勾配で応力低下を生じているものの、合成繊維であるPBOを用いた場合には、STEを用いた場合に比べて急激に応力低下する傾向が認められた。

### (3) すり減り抵抗性

Fig. 12は、繊維補強PFCならびにUFCのすり減り抵抗性試験の結果を示したものである。試験時間60分におけるすり減り深さは、PFC-STE-350の場合がもっとも小さく、次にPFC-STE-300の場合が小さくなった。このように、同じ鋼繊維を用いたとき、すり減り抵抗性はマトリクス部分の強度レベルに依存することがわかった。また、合成繊維を用いたPFC-PBO-200の場合には、同じPFC粉体を同じ養生条件として鋼繊維を用いたPFC-STE-300の場合よりもすり減り深さは大きいものの、UFC-STE-200の場合と同程度以上のすり減り抵抗性を確保することがわかった。

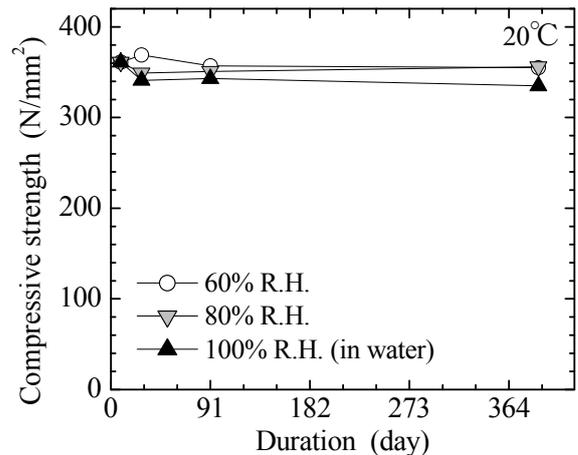


Fig. 10 Change in compressive strength of fiber reinforced PFC under various humidity (さまざまな湿度下における繊維補強PFCの圧縮強度の変化)

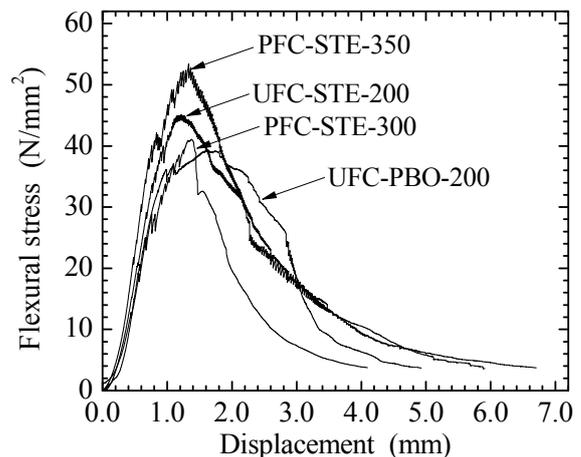


Fig. 11 Relationships flexural stress and displacement of fiber reinforced PFC (繊維補強PFCの曲げ応力-たわみ関係)

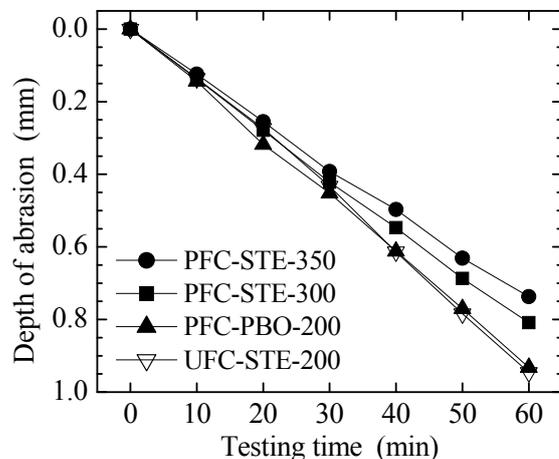


Fig. 12 Abrasion resistance of fiber reinforced PFC (繊維補強PFCのすり減り抵抗性)

## 5. ま と め

繊維補強 PFC 部材を埋め込んだ UFC とのハイブリッドパネルの製造ならびに海岸擁壁補修工事への適用にあたって、以下のような知見が得られた。

- (1) 鋼繊維ならびに集束 PBO 繊維を用いて養生条件を変化させた PFC は、いずれも設計基準圧縮強度  $180\text{N/mm}^2$  を超える強度発現を示した。
- (2) 鋼繊維を用いて吸水処理ならびに 2 段階の熱養生を行った PFC は約  $350\text{N/mm}^2$  のきわめて高い圧縮強度となった。
- (3) 鋼繊維を用いて吸水処理ならびに 2 段階の熱養生を行った PFC はもっとも高い曲げ強度を示した。
- (4) 繊維補強 PFC のすり減り抵抗性はいずれも UFC と同等以上の性能を示しており、鋼繊維を用いて吸水処理ならびに 2 段階の熱養生を行った PFC のすり減り抵抗性がもっとも高くなった。

## 謝 辞

繊維補強 PFC を適用したパネルによる海岸擁壁の補修工事にあたっては、国土交通省北海道開発局帯広開発建設部広尾道路事務所、株式会社構研エンジニアリング、共和コンクリート工業株式会社および宮坂建設工業株式会社の関係者の皆様にご協力をいただきとともに、東洋紡株式会社から集束 PBO 繊維を、愛知製鋼株式会社からステンレス鉄筋をご提供いただきました。ここに記して深謝致します。

## 参 考 文 献

- 1) KONO, Katsuya; NAKAYAMA, Risa; TADA, Katsuhiko. Development of the World's Highest Strength Cementitious Material. 太平洋セメント研究報告. 2015, 169, p. 20-29.
- 2) 河野克哉, 森 香奈子, 多田克彦, 田中敏嗣. 世界最高強度を発現するコンクリートの開発ならびに更なる性能向上の可能性. コンクリート工学. 2016, 54(7), P. 702-709.
- 3) 河野克哉, 森 香奈子, 奥山幸成, 川口哲生, 榎本弘. 超高強度繊維補強コンクリートに対する集束型ポリパラフェニレンベンズビスオキサゾール繊維の適用. 太平洋セメント研究報告. 2012, 163, p. 26-37.