

論文 ポリマーコンクリート永久型枠を用いた塩害防食効果に関する研究

山崎竹博*¹・高山俊一*²・松下博通*³・出光 隆*¹

要旨：近年コンクリート構造物の早期劣化の問題対策として，高耐久性材料であるポリマー含浸コンクリート（PIC）やレジンコンクリート（REC）パネルを永久型枠として用い，塩分などの外的劣化因子を遮断する方法が試行されている。本工法における施工上の問題点は永久型枠目地部の一体性確保にあると考えられる。そこで，本研究では厳しい塩害環境にある永久型枠の目地材について剛接合と柔軟接合を行い，耐久性に関する 5 年間の暴露実験から性能を照査した。

キーワード：PIC，REC，永久型枠，耐久性，目地材，接着剤，塩害防食

1. まえがき

ポリマーコンクリートの一種である不飽和ポリエステル樹脂を結合材に用いたレジンコンクリート（REC）や，脱気したコンクリートにメチルメタクリレート（MMA）を含浸した樹脂含浸コンクリート（PIC）は高強度と不透水性を兼ね備えた耐久性材料と考えられる。これらのポリマーコンクリートでパネルを作製し，永久型枠に使用することによって省力化と塩分遮断による塩害防食効果が期待できる。¹⁾

一般に，コンクリート部材を覆う永久型枠はコンクリートと十分に付着しているため，硬化発熱に伴う温度ひび割れや，補強材の拘束によるコンクリート硬化時の収縮ひび割れの伝播を受け易い。また，直射日光を受ける場合には熱膨張係数の相違により，コンクリートとの付着界面に拘束応力を発生することになる。

本研究では，これらの問題点を改善するため，パネルの継目に剛性の異なる目地や，安定した施工が可能な形状の目地などを設けた永久型枠パネルで被覆供試体を作製し，実際に感潮帯およびしぶきがかからず飛来塩分の最も多いと考えられる地帯に暴露して，その材料の劣化状況や塩分浸透状況などを 1，3，5 年で測定した。

2. 実験概要

2.1 供試体の暴露環境

永久型枠で被覆した供試体を写真 - 1 に示す海浜の感潮帯および橋台部分に位置する防波堤裏側 5m の内陸に暴露した。以下，暴露場所をそれぞれ感潮帯，内陸沿岸と呼ぶ。

2.2 供試体の種類

供試体は図 - 1 のように，中央部断面に種々の接合材料を使用した試験目地を設けている。

パネル供試体の試験目地以外は強度の高いエポキシ樹脂で接着した。供試体の種類はパネルの材種から普通コンクリート，PIC パネル被覆供試体，REC パネル被覆供試体の 3 種類とし，目地の種類としてエポキシ系（剛接合），シリコ



写真 - 1 供試体の感潮帯暴露状況

*1 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 工博（正会員）

*2 九州共立大学教授 工学部土木工学科 工博（正会員）

*3 九州大学大学院教授 工学研究院建設デザイン部門 工博（正会員）

表 - 1 暴露供試体一覧

型枠種類	供試体名	目地	暴露環境	試験材齢
PIC 型枠 (記号 P)	P-E-潮-n	エポキシ	感潮帯	n = 1, 3, 5 年
	P-S-潮-n	シリコン		
	P-B-潮-n	空目地		
	P-E-陸-n	エポキシ	内陸沿岸	
	P-S-陸-n	シリコン		
REC 型枠 (記号 A)	A-E-潮-n	エポキシ	感潮帯	
	A-S-潮-n	シリコン		
	A-B-潮-n	空目地		
	A-E-陸-n	エポキシ	内陸沿岸	
	A-S-陸-n	シリコン		
型枠無し (記号 C)	C-潮-n	無	感潮帯	
	C-陸-n	無	内陸沿岸	

ただし、供試体名の潮は感潮帯、陸は内陸沿岸。

ン系(柔軟接合),空目地の3種類とした。また,比較のためパネルのない供試体を標準養生および暴露養生した。供試体の種類と暴露環境を表-1に示している。この他,強度試験用円柱供試体(10×20cm)も同時に暴露した。

2.3 永久型枠パネルの形状および強度

1) 永久型枠に使用した PIC パネルの内側には図-2(a)に示すように安定した付着強度を得る目的で粒子径 15mm の粗骨材を表面に埋め込んでいる。PIC パネル出荷時の圧縮強度は 160N/mm² で付着破壊はすべて中詰コンクリート側で発生することを確認している。

2) REC パネルは表面が滑らかで機械的付着力が小さいため,図-2(b)に示すエポキシ塗装したジベル金網を中詰コンクリート側に設け,微小なずれ変形を許容することでコンクリートひび割れがパネルに伝達しない構造とした。REC パネルの圧縮強度は 90.5N/mm² である。

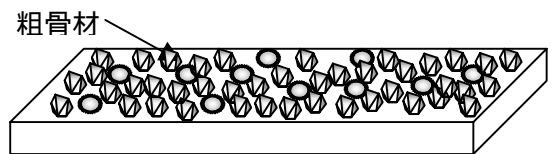
2.4 パネル接合目地材と構造

パネル目地にはエポキシ樹脂とシリコン樹脂の作業性や長期の遮塩性能などを期待して図-3(a)および図-3(b)のような構造とした。目地材には2成分系エポキシ,2成分系シリコン,バックアップ材には両面ブチルゴムシール,遮塩処理剤には伸縮性ポリマーセメントモルタルなどを用いた。

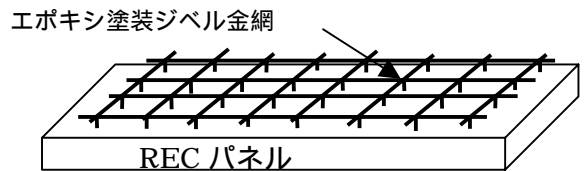
シリコンを使用した伸縮目地構造にはパネルの目地の開きを吸収できる変形性を与えるため,10mm のシリコン目地幅を確保した。

2.5 中詰コンクリートの配合

永久型枠に打設するコンクリートの配合ならびにフレッシュ時の性質を表-2および表-3



(a) PIC パネルの裏面の状態



(b) REC パネル裏面の状態

図 - 2 永久型枠パネル裏面の状況

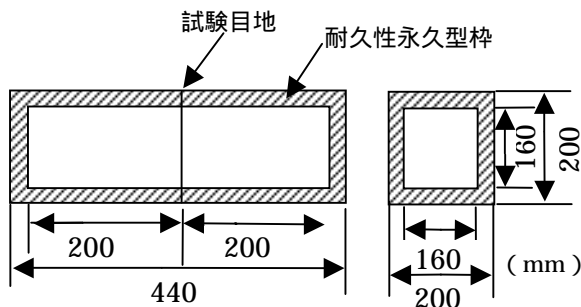
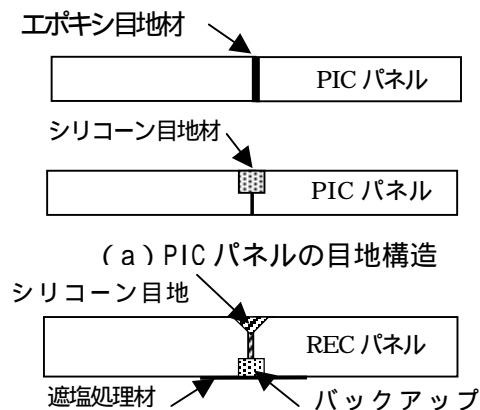


図 - 1 永久型枠暴露供試体の概要図



(a) PIC パネルの目地構造

(b) REC パネルの目地構造

図 - 3 パネルの目地構造

に示す。セメントには普通ポルトランドセメント、細骨材には海砂を使用し、配合は土木用コンクリートとして一般的に用いられるスランプ8 cm、目標圧縮強度 30N/mm^2 、空気量4%が得られるよう表-2のように実験的に定めた。

打設時に測定したコンクリートのフレッシュ性状を表-3に示している。

2.6 強度および塩化物イオン量の測定方法

- 1) 圧縮強度は $10 \times 20\text{cm}$ を用い、7, 28日, 3, 6ヶ月, 1, 3, 5年の各材齢で測定した。
- 2) 塩分量の測定は JCI-SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」に規定される「全塩分定量方法」および「可溶性塩分定量方法」に従った。

材齢1ヶ月(初期値), 1, 3, 5年での塩分測定試料は、永久型枠供試体では図-4に示すように目地部のパネル内側から3cm刻みに表層、中間、中心の3箇所を採取した。なお、パネルを使用しない標準供試体は表層から3cm、中央部、両者の中間点から採取した。また、Cl⁻イオンの分布は図-4に示すように、供試体目地部から $7 \times 7\text{cm}$ に切り取った試料のEPMAによる原子分布から測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 暴露に伴う外観の変化

本暴露実験で使用した不飽和ポリエステルレジンコンクリートパネルは5年間の直射日光による紫外線劣化および加水分解は僅少であり、光沢が失われた部分も布などの表面払拭により写真-2のように再光沢化した。また、同写真に比較されるように、レジンコンクリートでは暴露後5年程度では、牡蛎やフジツボなどの海洋生物の付着が普通コンクリート供試体に比べて著しく少ない結果となった。

3.2 圧縮強度の経年変化

材齢28日まで水中で標準養生を行い、その後暴露環境に置いた供試体の圧縮強度試験結果を図-5に示した。標準養生供試体は材齢28日で目標圧縮強度 30N/mm^2 を超え、5年後に

表-2 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m ³)				
		W	C	S	G	混和剤
55	44.7	160	291	804	1039	0.728

表-3 フレッシュコンクリートの諸性質

スランプ値 (cm)	8.0
空気量 (%)	4.1
材料温度 (°C)	21.5
単位容積質量 (kg/m ³)	2,350
Cl ⁻ 含有量 (kg/m ³)	0.163

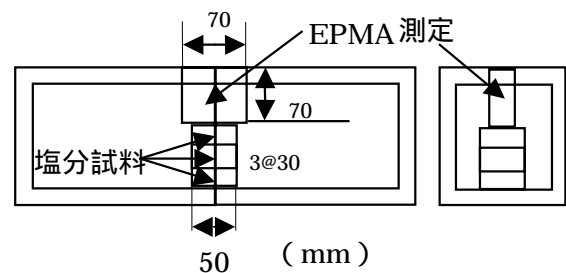


図-4 塩分測定用試料の採取位置

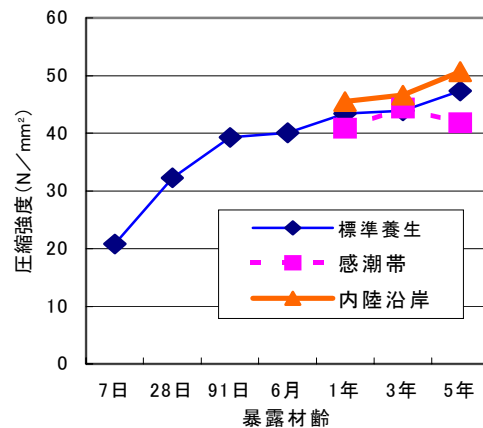


図-5 暴露コンクリートの圧縮強度変化



(a) RECパネル (b) パネル無し供試体
写真-2 5年間暴露した供試体の外観

は46%増の47.3N/mm²となった。一方、感潮帯に放置した供試体は、5年後には標準養生供試体に比べて11%の強度低下となった。

3.3 供試体目地部の塩素イオン濃度分布

(a) 全塩化物イオン量

供試体目地部から5×5×3cmのコンクリート試料を表層部，中間部，中心部ごとに乾燥状態で切り出し，コンクリートに含まれる全塩化物イオン量の5年間における測定値を表-4にまとめて示した。表中の記号E，Sはパネルの目地をエポキシ，シリコンで接着した場合，Bはパネル接合部を空目地，Cはパネル無しの場合のコンクリート供試体を指す。

表中で全塩化物イオン量が0.3kg/m³を超える値には網掛けをした。

感潮部に暴露したパネルを使用しない供試体は，表層3cmの全塩化物イオン量は暴露1年で1.1kg/m³，5年後には7.77kg/m³にも達した。その浸透状況を図-6に示す。

一方，内陸部では3年後まで塩分の浸透は見られず，5年目夏の台風により防波堤が決壊して以後，塩化物イオン量が上昇した。しかし，同じ内陸部に暴露したパネル供試体は，目地からの塩分浸透は僅少で，一過性の塩分付着に対してはパネル被覆による遮塩効果が見られた。

(b) 可溶性塩化物イオン量

全塩化物イオン測定試料と同じ微粉を温水抽出して可溶性塩化物イオン量を測定した。

可溶性塩分の初期値は0.13kg/m³であった。また，5年間の各測定値は表-4の全塩化物イオン測定値と極めて高い相関を示し，全塩化物イオンに対する可溶性塩化物イオンの比は平均0.64倍であったので，ここでは塩化物イオンの浸透性状を全塩化物イオンの値から考察した。

(c) EPMAによるCl原子分布の測定

写真-3から写真-14に供試体接合部を測定した塩素原子のEPMA写真を示す。写真は上部が供試体表面，下部が中心部で，写真の濃淡は塩素原子分布の相对比较を示すもので数値を表すものではない。塩化物イオン量は表-4の測

表-4 全塩化物イオン量 (Cl⁻kg/m³)

材種	暴露	目地	位置	初期値	1年	3年	5年
P I C パネル	感潮帯	E	表層	0.20	0.25	0.26	0.50
			中間	-		0.21	0.37
			中心	0.19	0.27	0.27	0.37
		S	表層	0.20	0.25	0.26	0.33
			中間	-		0.22	0.26
			中心	0.19	0.22	0.25	0.27
	内陸	B	表層	0.20	0.24	0.42	0.37
			中間	-		0.22	0.24
			中心	0.19	0.24	0.26	0.27
		E	表層	0.20	0.23	0.26	0.26
			中間	-		0.24	0.23
			中心	0.19	0.25	0.23	0.28
S	表層	0.20	0.26	0.24	0.26		
	中間	-		0.26	0.26		
	中心	0.19	0.30	0.27	0.26		
R E C パネル	感潮帯	E	表層	0.20	0.25	0.23	0.26
			中間	-		0.27	0.23
			中心	0.17	0.27	0.24	0.26
		S	表層	0.20	0.28	0.23	0.32
			中間	-		0.24	0.24
			中心	0.17	0.28	0.29	0.30
	内陸	B	表層	0.20	0.35	0.43	0.82
			中間	-		0.27	0.34
			中心	0.17	0.28	0.26	0.31
		E	表層	0.20	0.28	0.24	0.25
			中間	-		0.24	0.27
			中心	0.17	0.28	0.28	0.27
S	表層	0.20	0.28	0.23	0.28		
	中間	-		0.23	0.23		
	中心	0.17	0.34	0.30	0.32		
パネル無し	感潮	C	表層	0.21	1.10	1.32	7.77
			中間	-		0.26	2.18
			中心	0.17	0.25	0.25	0.27
	内陸	C	表層	0.21	0.24	0.22	5.42
			中間	-		0.24	0.40
			中心	0.17	0.24	0.23	0.25

ただし，網掛け太字は，全塩化物イオン量0.3kg/m³以上

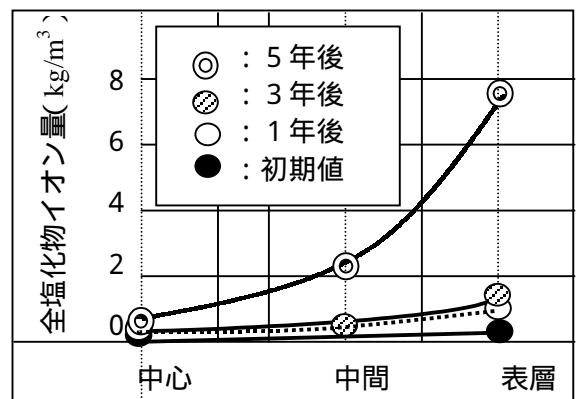


図-6 感潮帯に暴露したパネル無し供試体の塩化物イオン量

定値と照合されたい。

3.4 パネルの塩化物イオン耐久性能

(a) PIC パネルの耐久性能

写真 - 3 ~ 5 は感潮帯に暴露した PIC パネル供試体で、表面にわずかに塩化物イオンの蓄積層が見られる。しかし、写真 - 6, 7 に示す内陸暴露ではパネル表面には蓄積は見られない。

ここで、写真 - 3 ~ 5 を用いて厚さ 20mm の PIC パネルの塩化物イオン浸透深さを求めると、5 年間で最大 5mm 程度、平均では 2mm 程度となった。これらの測定値から式(1)を用いてパネル厚さ 20mm の耐久年度を求めた。ここで式(1)の塩分浸透に関する係数 a を求めると最大で $a = 2.24$ 、平均深さで $a = 0.894$ となり、パネル厚さ 20mm の遮塩抵抗性は最小で 80 年、平

$$X = a \sqrt{t} \quad (1)$$

均値で 500 年と計算される。

ただし、 X ：塩化物浸透深さ (mm)、

a ：塩分浸透に関する係数、 t ：暴露時間(年)

(b) REC パネルの耐久性能

写真 - 8 ~ 12 に示す REC パネルでは表面塩化物イオンの蓄積は見られない。すなわち、表面光沢のある見かけの吸水率が無い被覆材では塩化物イオンは洗浄され、蓄積は生じ難い。

3.5 パネル接合目地の遮塩性

(a) PIC パネル接合目地

防食パネルの遮塩性能はパネルが耐久的な場合、接合部目地の一体性に依存する。写真 - 3 ~ 7 に見られる PIC パネルはコンクリートおよび接着剤との付着が良好であり、コンクリートと PIC パネルとの境界に塩分の浸透は見られない。写真 - 5 に示す空目地接合の場合でも打設時に充填されたモルタルによって、目地部の浸透塩化物イオンは 5 年間でわずかに 0.2kg/m^3 程度であった。また、パネル裏面の付着が良いことから、浸透した塩化物の周囲への拡散は小さいことが分かる。これらの性質は写真 - 6, 7 および表 - 4 に見られるように、飛来塩分などの遮塩性に効果的と考えられる。

(b) REC パネル接合目地

写真 - 8 ~ 写真 - 12 に示す REC パネル供試体では、パネル表面に塩化物イオンの分布見られない。しかし、写真 - 10 のように空目地でパネル接合部や裏面に剥離が見られる場合は、接合面に沿う塩水浸透が生じたと考えられる。

REC パネルは温度や自己収縮ひずみをパネルに伝達しないよう、網状ジベルでずれを許容する構造にしている。このような構造では、接合目地にバックアップ材や、遮塩処理材を併用することが必要である。これらの配慮を行った供試体では塩化物の浸透は極めて少なかった。

(c) 空目地接合部の遮塩性能

表 - 4 ならびに写真 - 6, 10 および写真 - 13, 14 から、空目地であってもパネル供試体被覆による遮塩効果が見られ、コンクリートとの付着が完全であれば、目地幅から浸透する塩化物イオンは大幅に減少することが分かる。

4. 結論

PIC および REC 永久型枠の塩化物遮断効果に関する暴露試験結果を以下に列記する。

- 1) 感潮帯に暴露したパネルそのものの塩分浸透はわずかで PIC パネルには 5 年間で最大 5mm、平均 2mm の浸透が見られ、厚さ 20mm の PIC パネルは 80 ~ 500 年の遮塩抵抗性が期待できる。
- 2) 内陸沿岸では PIC パネルの表面にわずかな飛来塩分の濃縮が見られたが、レジンパネルでは洗い流し作用により表面塩分は僅少であった。
- 3) レジンコンクリートパネルの 5 年後の射日光による紫外線劣化は僅少であり、光沢が失われた部分も布などの表面払拭で再光沢化した。
- 4) 暴露後 5 年でコンクリートやアクリル製表示盤には牡蛎やフジツボが密生したが、レジンコンクリート供試体には海洋生物の付着無かった。
- 5) 写真 - 5 のように、空目地であっても PIC パネルのようにコンクリートとの付着が十分であれば周囲への拡散は少ない。
- 6) REC のように付着力が小さいパネルでは、パネル目地部の裏面に遮水対策することで、塩

分の浸透を防止できる。

7) 飛来塩分に対しては空目地接合パネルであっても、ある程度の遮塩効果は期待できる。

謝辞：本論文は新北九州空港海上橋耐久性検討分科会の共同実験を取りまとめたものであり委

員各位、九州電力苅田工場に謝意を表する。

参考文献

1) 新藤竹文, 松岡康訓, ポリマー含浸コンクリートの耐久性に関する研究, JCI 年次論文集, Vol.2, pp.415 ~ 420, 1988.

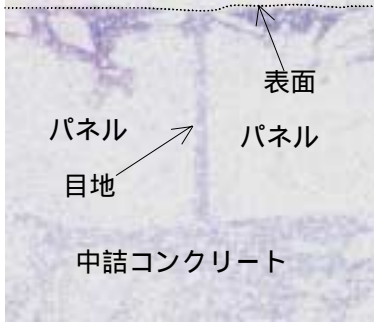


写真 - 3 PIC - エポキシ目地 - 感潮帯暴露供試体

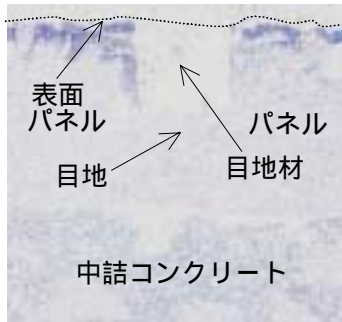


写真 - 4 PIC - シリコン目地 - 感潮帯暴露供試体

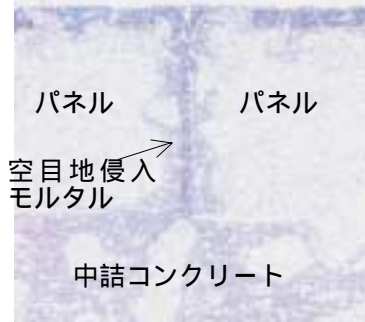


写真 - 5 PIC - 空目地 - 感潮帯暴露供試体

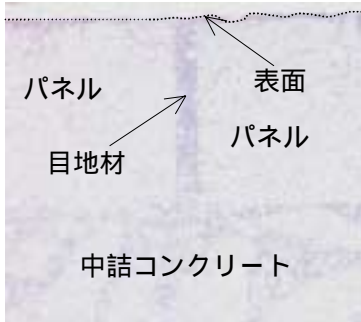


写真 - 6 PIC - エポキシ目地 - 内陸暴露供試体

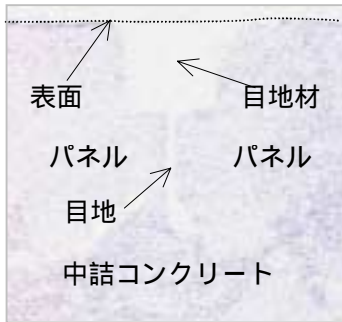


写真 - 7 PIC - シリコン目地 - 内陸暴露供試体

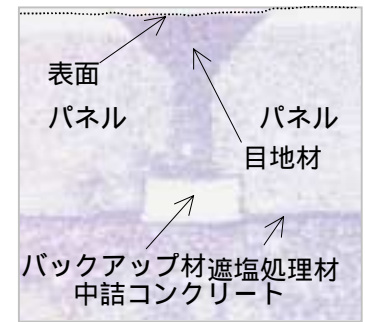


写真 - 8 REC - エポキシ目地 - 感潮帯暴露供試体

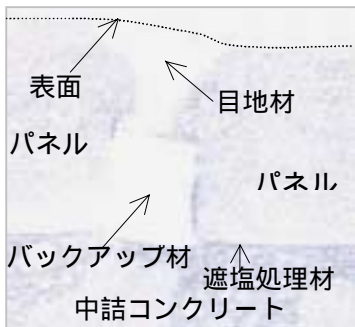


写真 - 9 REC - シリコン目地 - 感潮帯暴露供試体

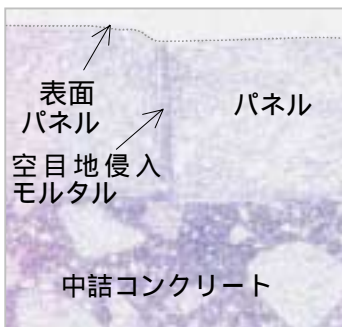


写真 - 10 REC - 空目地 - 感潮帯暴露供試体

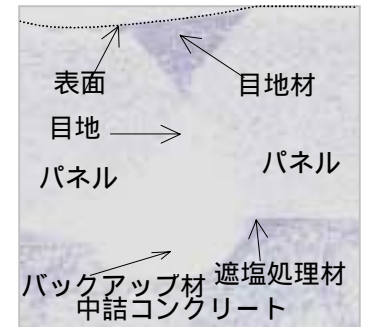


写真 - 11 REC - エポキシ目地 - 内陸暴露供試体

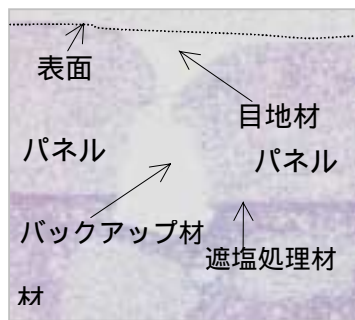


写真 - 12 REC - シリコン目地 - 内陸暴露供試体

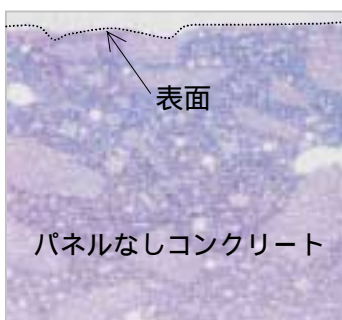


写真 - 13 パネルなし - 感潮帯暴露供試体

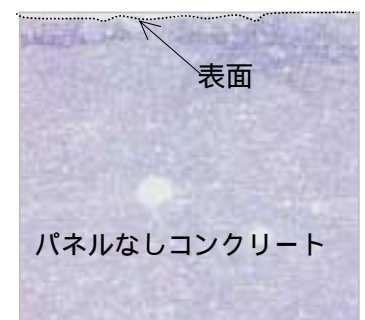


写真 - 13 パネルなし - 内陸暴露供試体