

3.7 経年変化の影響に関する調査

— 目 次 —

3.7.1 応力振幅に影響を与える要素（中日本高速道路（株）報告資料）	334
3.7.2 長期耐久性（材料劣化）に関する調査（化学調査）	337
3.7.3 電子顕微鏡による接着剤の断面観察	353

3.7.1 応力振幅に影響を与える要素(中日本高速道路(株)報告資料)

応力振幅について影響を与える代表的な要素(換気運転、車両通過による風圧)について検討した。

3.7.1.1 笹子トンネル換気運転による影響

(1) 笹子トンネル換気運転状況(東換気所上り線)



西換気所	上り線	排風機	2台
		送風機	2台
	下り線	排風機	2台
		送風機	2台
東換気所	上り線	排風機	2台
		送風機	2台
	下り線	排風機	2台
		送風機	2台

※東換気所と米沢川換気所は同一箇所の呼称である。

(2) 笹子トンネル換気運転回数の推測(東換気所上り線)

1. 1990年(平成2)年から(21年間)の換気運転時間

	1990 (H2)	1991 (H3)	1992 (H4)	1993 (H5)	1994 (H6)	1995 (H7)	1996 (H8)	1997 (H9)	1998 (H10)	1999 (H11)	2000 (H12)	2001 (H13)	2002 (H14)	2003 (H15)	2004 (H16)	2005 (H17)	2006 (H18)	2007 (H19)	2008 (H20)	2009 (H21)	2010 (H22)	平均
東換気所 運転時間(h)	2,784	3,882	4,887	8,147	7,918	8,411	5,522	6,197	5,295	4,274	4,504	4,718	4,160	1,777	1,325	1,348	2,007	3,073	2,188	984	1,618	4,048

年平均運転時間 4,048時間

2. 2004年(平成16)年から(7年間)の換気運転時間と運転回数

	2004 (H16)	2005 (H17)	2006 (H18)	2007 (H19)	2008 (H20)	2009 (H21)	2010 (H22)	平均	運転1時間当たりの 運転回数
東換気所運転時間(h)	1325	1348	2007 (1858)	3073	2188 (1631)	983.5	1615.9	1,691	1.51※
東換気所運転回数(回)	2230	2729	2984	3675	1588	1430	3185	2,546	
平均運転時間(分)	36	30	37	50	62	41	30	41	

※運転時間の記録の欠損はなかったが、運転回数の記録は、2006年の1ヵ月分、2006年の4ヵ月分の欠損があった。よって、運転1時間当たりの運転回数の算出に当たっては、運転回数と運転時間の条件を合わせるために、運転回数のデータ欠損月の運転時間を補正(運転回数データ欠損月の運転時間を減じた)した。

3. 開通(1977(S52)年)からの換気運転回数の推測

経過年数(年) × 年平均運転時間(h/年) × 運転1時間当たりの運転回数(回/h)

$$35 \times 4,048 \times 1.51 \div \underline{\underline{214,000 \text{ 回}}}$$

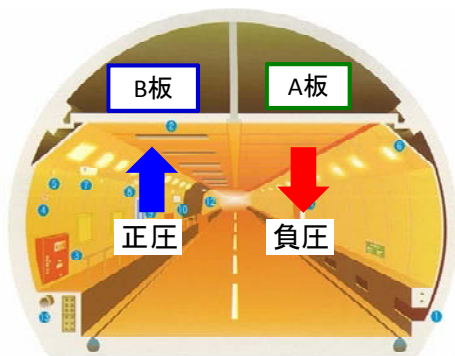
3.7.1.2 車両通過で発生する風圧による作用荷重に対する照査

トンネルの換気設計における長大トンネルの換気制御、火災時の風速ゼロ化制御、排気ガスの漏れ出し制御等の検討において、十分な実績を持つ換気用シミュレーター※1を用いて、車両通過で発生する風圧を計算した。

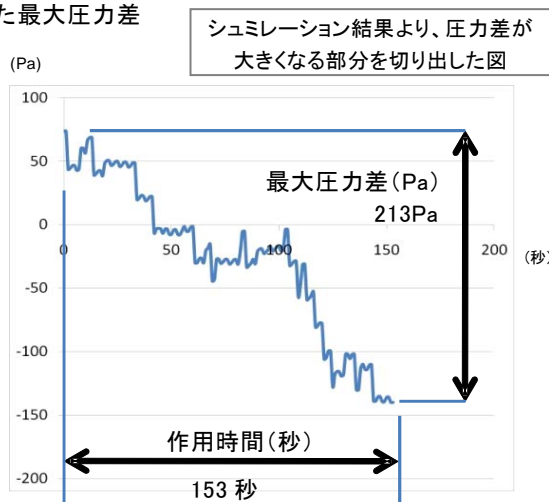
(1) 車両通過で発生する事故地点の風圧シミュレーション結果

ケース※2	最大圧力差 (Pa) ※3	作用時間 (秒) ※4
大型車が多い時の交通量	106.6	140
平日平均昼間交通量	213.7	153
平日平均夜間交通量	146.5	66
休日平均昼間交通量	158.8	44
休日平均夜間交通量	145.9	78

- ※1 大型車・小型車を区別して車両1台ずつの走行の影響を再現するマイクロ交通モデルを採用したトンネル換気用シミュレーター。
- ※2 中央道(大月～勝沼)の2008(平成20)年12月の実測交通量
- ※3 実測交通量からシミュレーションした際に生じた最大圧力差
- ※4 最大圧力から最小圧力までの経過時間



正圧: 天井板を押し上げる風圧
負圧: 天井板を押し下げる風圧



(2) 平日平均昼間交通量が継続して通過すると仮定した場合の試算

供用後35年間で、通過交通により発生する風圧により、接着系ボルトに作用した繰返し作用力の概略を把握することを目的に、以下の条件を設定して試算を行った。

- ・風圧は天井板全面に均一に作用すると仮定。
- ・シミュレーション結果の最大圧力差と最長作用時間を用いて試算。
- ・作用力の上下方向の向きが変わる回数を繰返し回数と設定。

〈荷重の試算〉

$$\text{一枚当たり荷重} : 214 \times 10^9 \text{ (kN/mm}^2\text{)} \times 5010\text{mm} \times 1200\text{mm} \doteq 1.29\text{kN}$$

$$\text{CT鋼1本 (6m) 当たり荷重} : 1.29\text{kN/枚} \times 10 \text{ 枚 (A板・B板5枚ずつ)} = 12.9\text{kN}$$

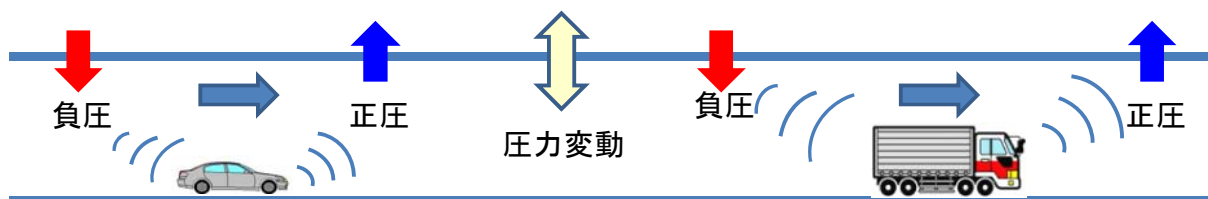
$$\text{接着系ボルト1本当たり荷重} : 12.9\text{kN} \div 16 \text{ 本} \doteq \mathbf{0.81\text{kN}}$$

⇒車両通過の風圧を考慮しない場合の作用力 12.2kN に対して約 6.6%の荷重振幅

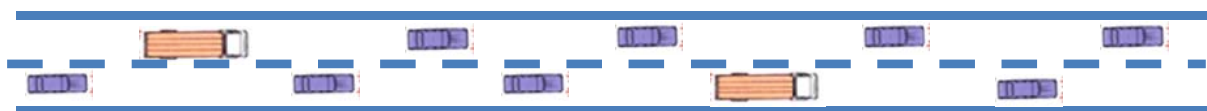
〈繰返し回数の試算〉

$$\Rightarrow 35\text{年} \times 365\text{日} \times 24\text{h} \times 60\text{min} \times 60\text{秒} / 153\text{秒} \doteq \mathbf{7,220,000\text{回}}$$

シミュレーションの概要(参考)

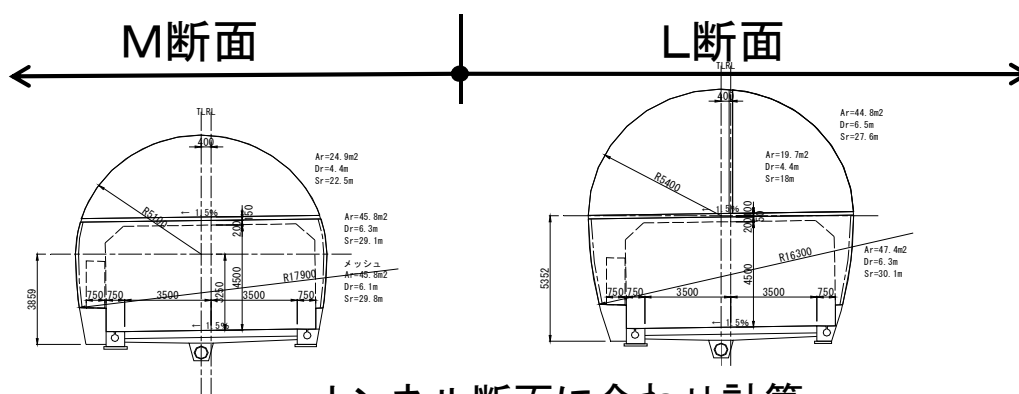


トンネル内の風速・風圧等の時間変動を、交通状況に応じてシミュレーションしたもの。具体的には、トンネル内に存在する車両を1台1台個別に再現(大型車 or 小型車、位置、車速)して計算し、その影響を全て加味して事故地点の圧力の時間変動を計算した。



- ・大型車混入率により大型車を配置し車種別の前面投影面積を用いて計算した。
- ・壁面摩擦損失係数、トンネル入口係数などの計算に必要な諸数値はNEXCO設計要領(第三集 トンネル換気(2012(平成24)年))を使用した。

係数名	値
壁面摩擦損失係数	0.02
トンネル入口係数	0.600
トンネル出口係数	1.000
空気密度	1.20(kg/m ³)



3.7.2 長期耐久性(材料劣化)に関する調査(化学調査)

3.7.2.1 実験概要

(1) 接着剤採取による試験

現地の接着系ボルトの接着剤成分の劣化、変質、物性などに着目した化学分析を行う。

実施機関	地方独立行政法人 東京都立産業技術研究センター		
実施時期	2013（平成25）年1月～2013（平成25）年2月		
試験内容	赤外線分光分析	赤外線分光スペクトルにより接着剤の種類を判定し、加水分解の有無について確認する。	
	熱重量測定	サンプル中の無機成分(セメント, 砂等)と有機成分(樹脂等)の含有量を把握する。	
実施数量	調査箇所	引抜強度	赤外線分光分析
	その他区間	12.2kN未満	16
		12.2kN以上	3
		熱重量測定	0

接着剤採取箇所

接着剤採取位置		採取場所
ボルト	a. ボルト表面	引抜き後のボルトに付着した接着剤の表面から採取
	b. 試料内部	引抜き後のボルトに付着した接着剤の内部から採取
孔内	c. 孔内試料	アンカーボルト孔内に残存した接着剤を採取

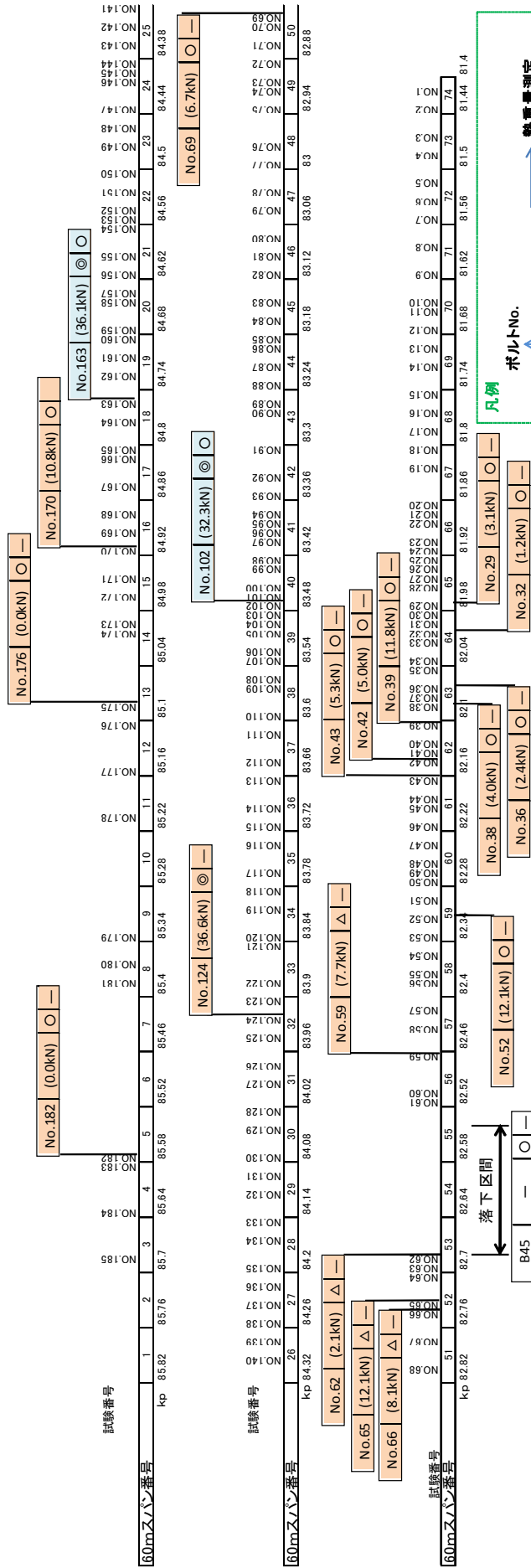


a. 表面試料

表面試料を切削する。

b. 内部試料

c. 孔内試料

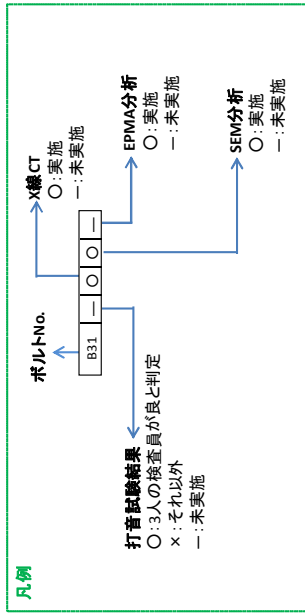
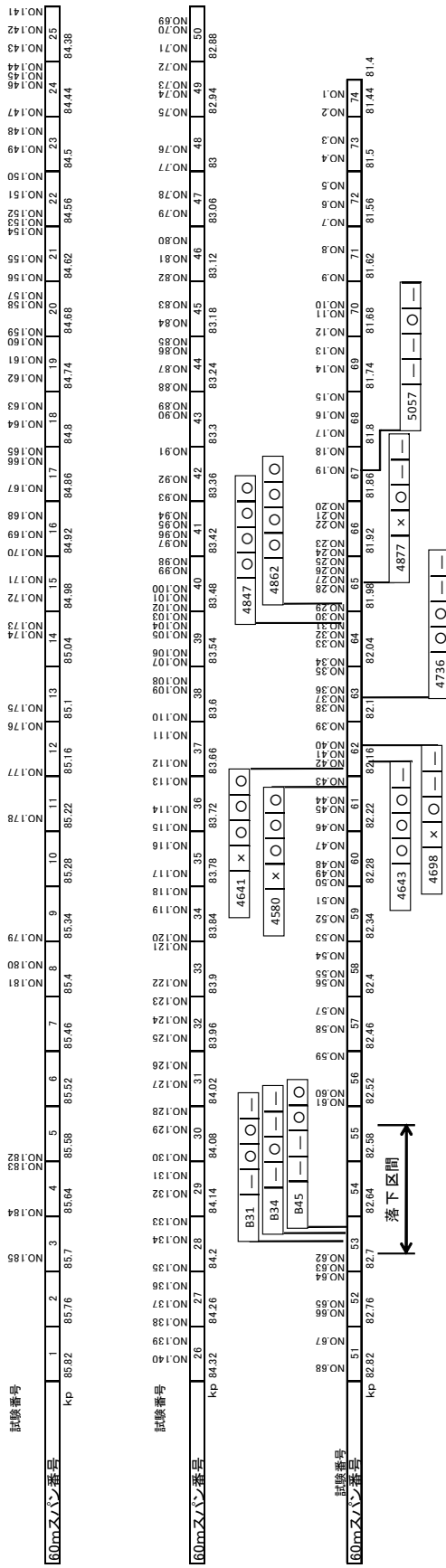


(2)コア採取による試験

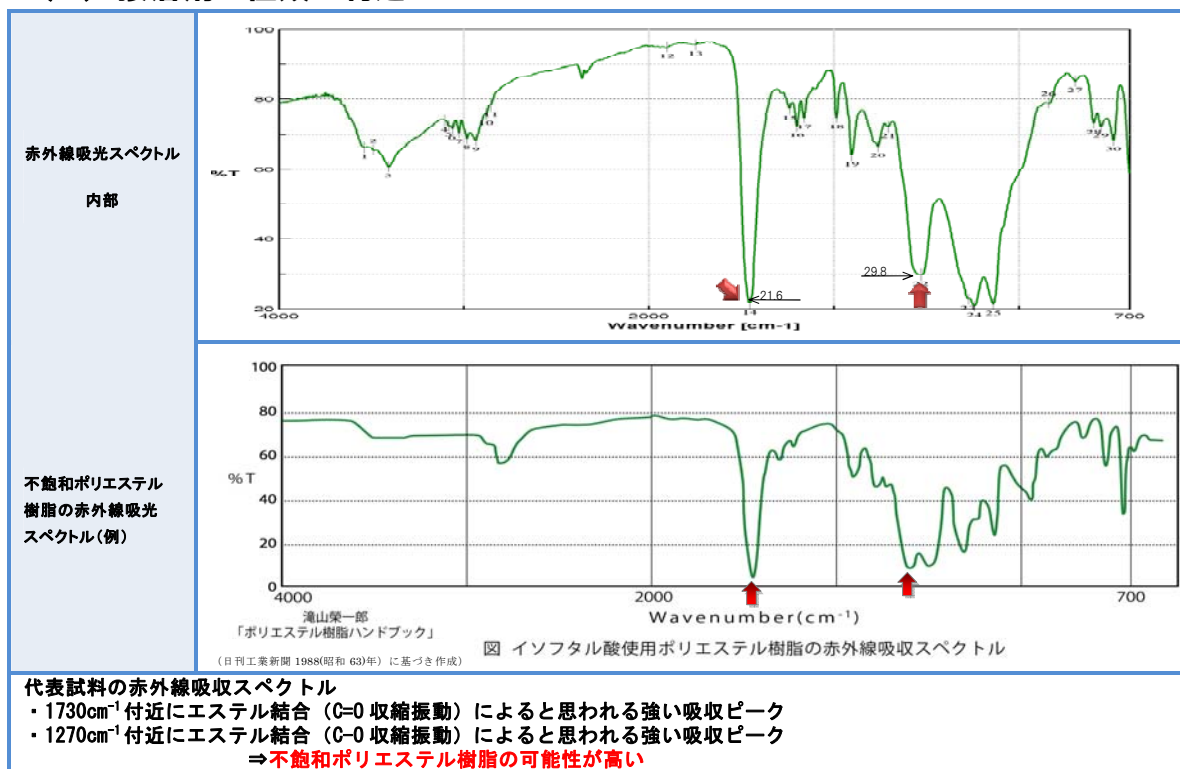
引抜試験を実施していない接着系ボルトについて、接着系ボルトを残したままコア抜きを行い、接着剤の化学分析を行う。

実施機関	地方独立行政法人 東京都立産業技術研究センター(X線CT分析、SEM/EPMA分析) 独立行政法人 土木研究所(赤外線顕微鏡観察)					
実施時期	2013(平成25)年1月~2013(平成25)年2月					
試験内容	X線CT分析 (3.5.4参照)	接着系ボルトの埋込み状態、接着剤の付着状況、コンクリート部の状態を観察				
	赤外線顕微鏡観察	接着剤の化学劣化が起きている部位の劣化の範囲・深さなどを確認する。				
	SEM/EMPMA分析	SEM画像により接着剤とアンカーボルト・コンクリートとの界面や接着剤内部の、微細な亀裂の有無を調査する。また、EPMAではナトリウム、カルシウムなどの元素の分布を調べ、劣化状況を調査する。				
実施数量	調査箇所	打音試験結果	X線CT分析	赤外線顕微鏡分析	SEM	EPMA
	天井板落下箇所	—	2	1	2	—
	その他区間	○	4	—	3	2
		×	4	—	2	2
		—	—	—	1	—

コア採取箇所

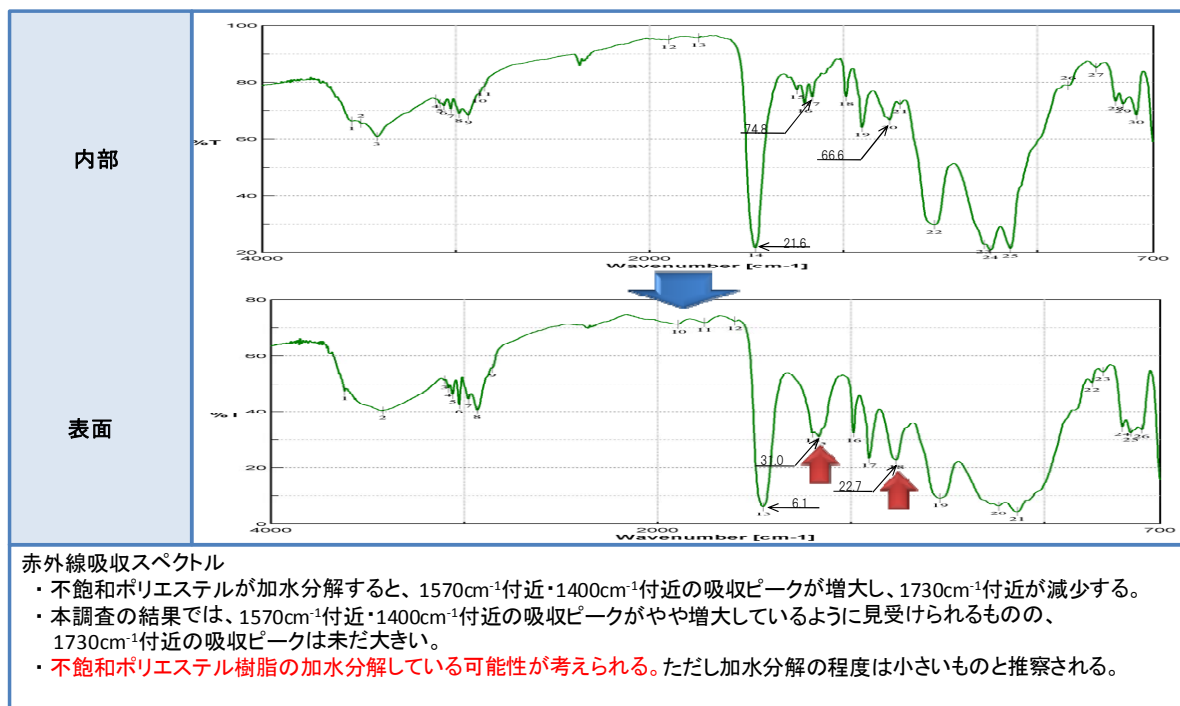


3.7.2.2 赤外線分光分析 (1) 接着剤の種類判定



(2) 化学的変化の有無

分析結果例 (引抜強度 32.3kN)

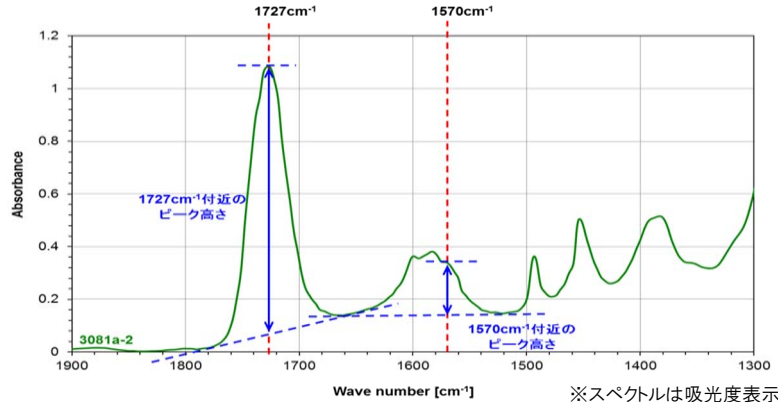


(3) 加水分解度合の定量分析方法

不飽和ポリエステル樹脂の劣化（加水分解）による赤外線スペクトルの変化が特定できたことから、これらを使った劣化の度合の定量分析（解析）が可能と考えられる。

実施手順

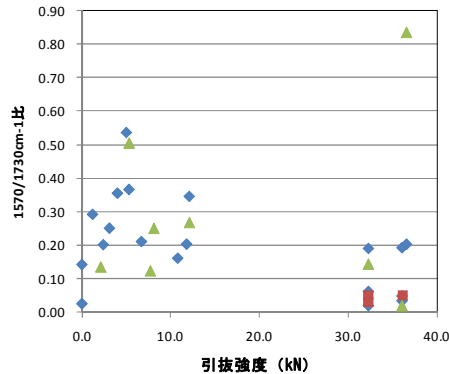
- ①1570 cm^{-1} 付近および1730 cm^{-1} 付近の吸収ピークそれぞれについて、ベースラインからピークトップまでの高さを求める。



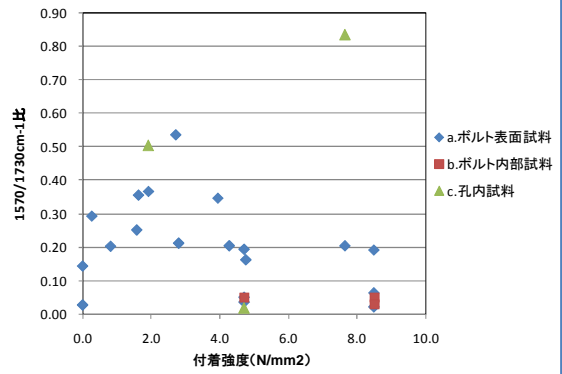
- ②吸収ピーク高さの比（1570 cm^{-1} 付近／1730 cm^{-1} 付近）を当該スペクトルの加水分解度合の指標とする。
（1570 cm^{-1} 付近／1730 cm^{-1} 付近比が大きいほど加水分解が進んでいることになる。）

分析結果

③加水分解度合の定量分析結果



ボルトの引抜強度と接着剤樹脂の赤外スペクトルにおける1570/1730 cm^{-1} 吸光度比との関係



ボルトの付着強度と接着剤樹脂の赤外スペクトルにおける1570/1730 cm^{-1} 吸光度比との関係


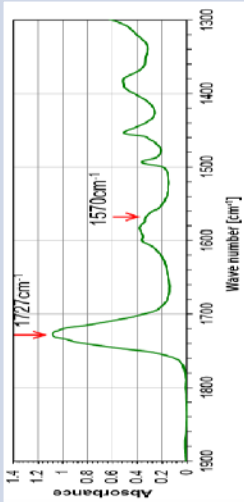
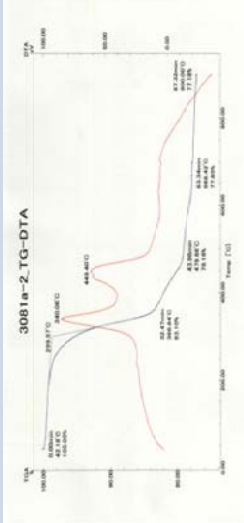

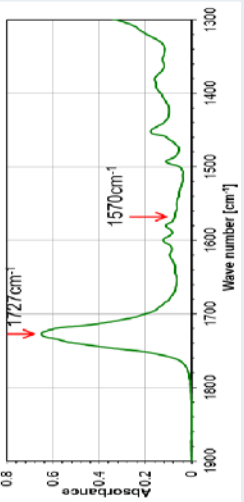
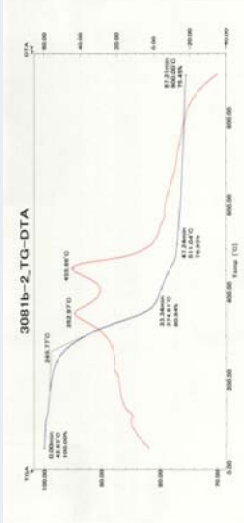

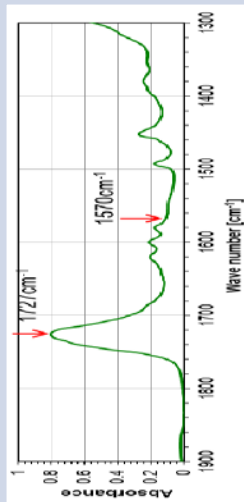
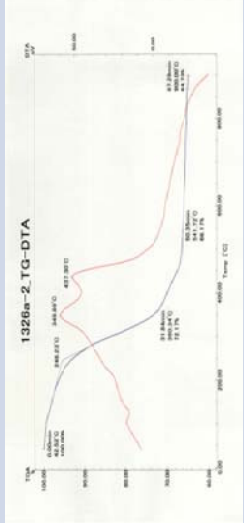
注) 1570/1730 cm^{-1} 比が大きいほど加水分解が進んでいる

加水分解度合の定量分析における考察

- ・ a試料（引抜き後の接着系ボルトに付着した接着剤の表面から採取）の分析によれば、付着強度が低いものでは加水分解の進行度が大きくなっている可能性が認められた。
- ・ a・c試料（接着系ボルト孔内に残存した接着剤を採取）とb試料（引抜き後の接着系ボルトに付着した接着剤の内部から採取）のデータを比較すると、樹脂と覆工コンクリートの界面付近で樹脂の加水分解が進行していることがわかる。

3.7.2.3 熱重量測定

(1) 測定結果

試料No.	赤外線分光分析による 樹脂の劣化状況	TG/DTAチャート ※1
<p>①</p>  <p>表面試料</p>		
<p>②</p>  <p>内部試料</p>		
<p>③</p>  <p>表面試料</p>		

各試料共に樹脂に相当する常温から600°C程度までの質量減少は、約22%~34%。セメント分に相当する温度領域(450~500°C及び500~800°C)で吸熱を伴う質量減少は見られなかった。

①では樹脂の劣化を示す、1727 cm^{-1} 付近の吸光度の減少、1570 cm^{-1} 付近の吸光度の増大が認められた。②、③では樹脂の劣化は見られなかった。

※1 TG/DTAチャート TG(熱重量測定値)とDTA(示差熱分析値)を基にグラフを描き、重量の変化とそれに伴う吸熱・発熱反応を把握する

(2) まとめ

分析したどの試料からも、有機成分（樹脂など）と無機成分（骨材など）の双方が検出された。

セメント成分は含まれていないものと推察される。

有機／無機成分の含有率は接着剤樹脂の劣化の有無にかかわらずほぼ同じであったが、③の試料のみ、他に比べて有機成分の含有率が高かった。

これは、③の接着系ボルトを施工する際に、樹脂／骨材の攪拌が他に比べて不十分であった可能性がある。

質量減少の開始／終了温度や分解（燃焼）温度を左右する因子は様々であり、今回のTG/DTAの結果と接着剤の劣化とを直接結びつけて議論することはできない。

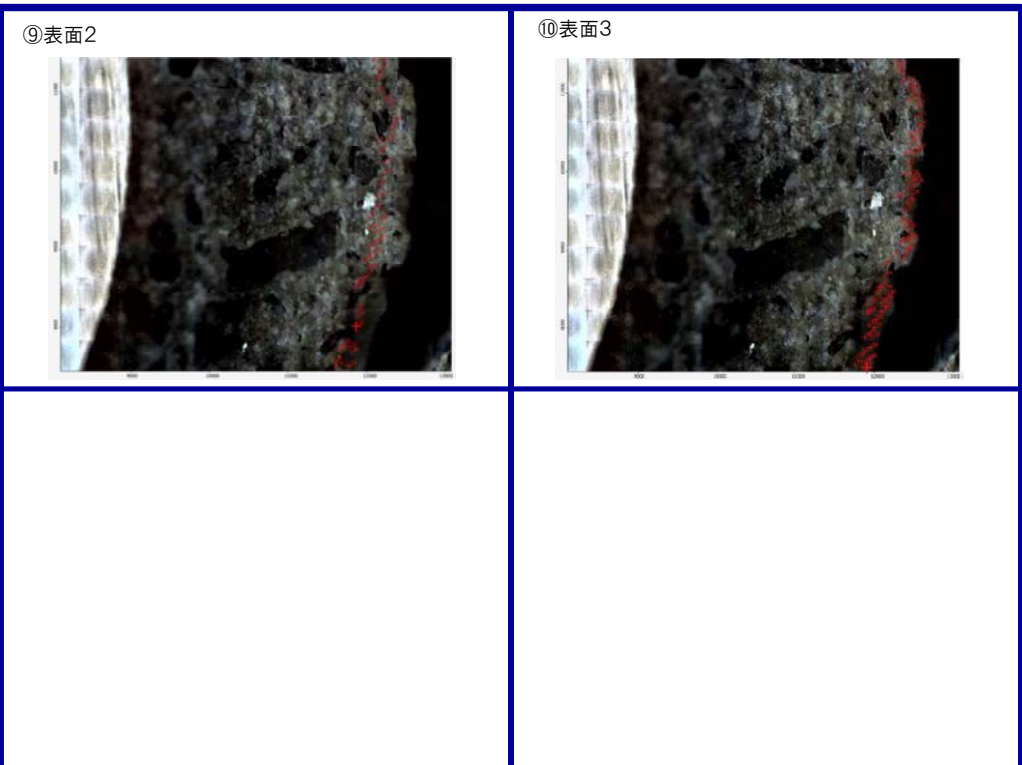
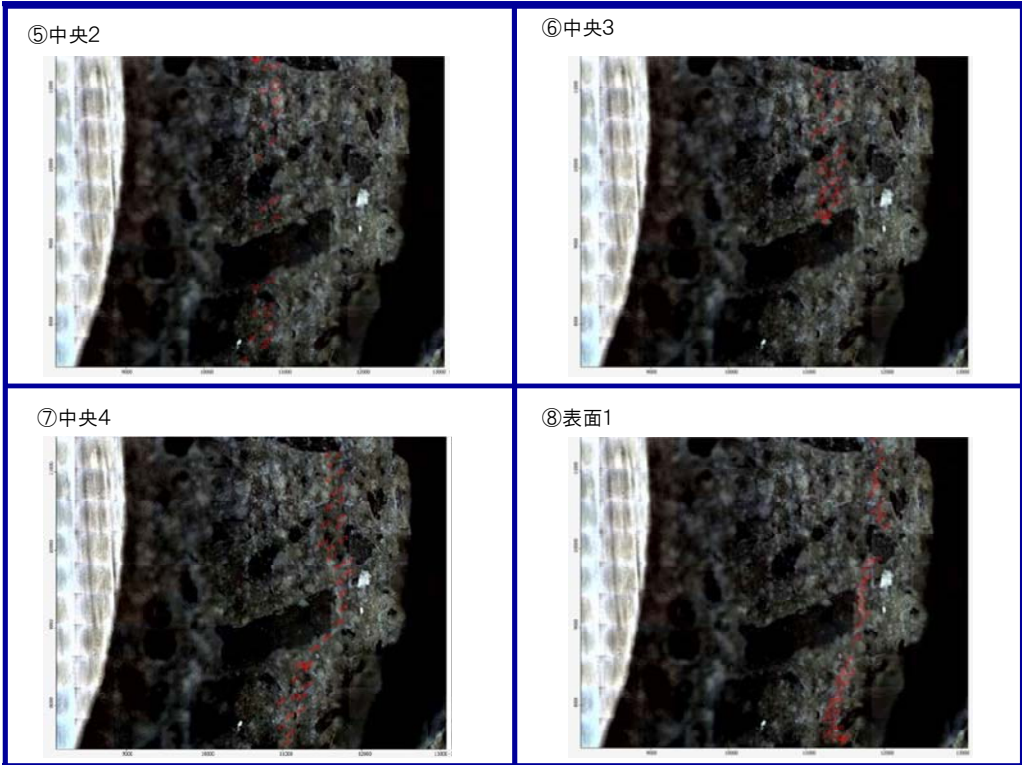
3.7.2.4 赤外線顕微鏡観察

(1) 観察範囲と分析方法(B45)

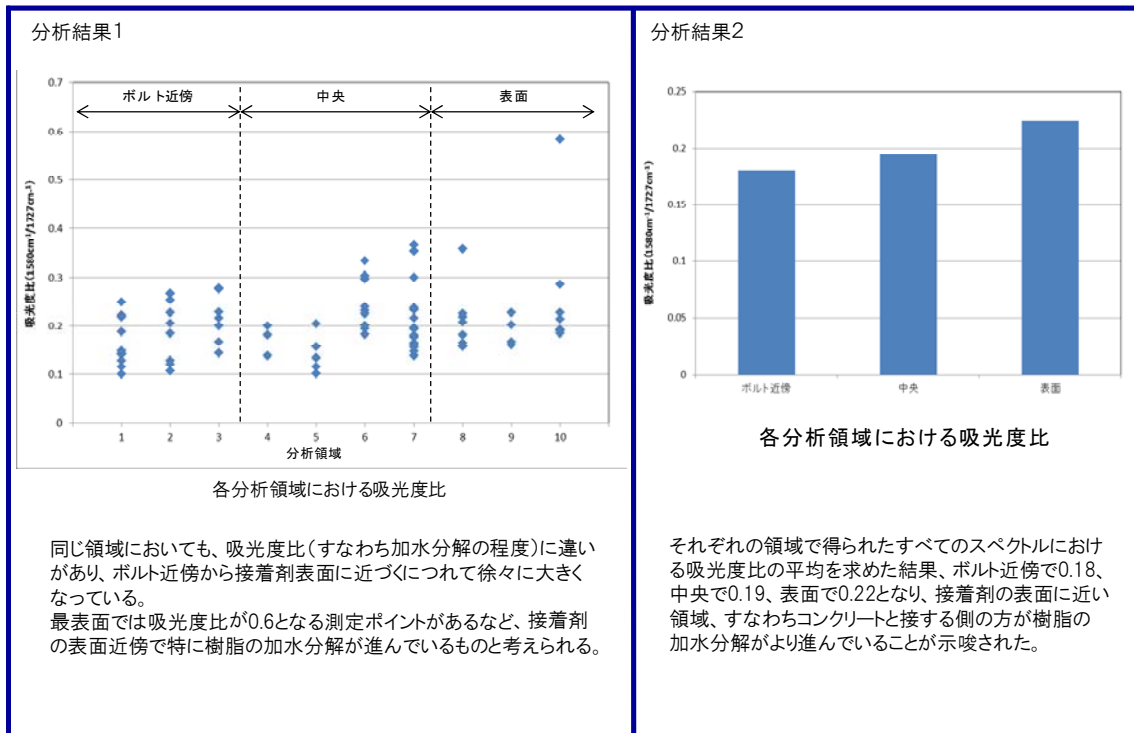
<p>切り出し範囲</p>	<p>ボルトの横断方向の断面について分析</p>
<p>分析箇所</p>	<p>◆分析方法◆</p> <p>◎試料採取 試料表面は研磨はせず、純水で軽く洗浄した後に分析に供した。ボルト/接着剤界面から接着剤/コンクリート界面まで、接着剤部分をボルトの直径方向に10か所(ボルト近傍1~3、中央1~4、表面1~3)の領域に区切り、領域ごとにそれぞれ15~30か所の測定ポイントについて顕微ATR法による赤外吸収スペクトルの測定</p> <p>◎顕微ATR(減衰全反射)法 先の尖ったATR結晶(Geなど)と試料とを密着させ、赤外線を結晶/試料界面で全反射させたときの反射スペクトルを測定する</p>

(2) 試料表面の顕微鏡画像と各分析領域(①~⑩)における測定ポイント

<p>①ボルト近傍1</p>	<p>②ボルト近傍2</p>
<p>③ボルト近傍3</p>	<p>④中央1</p>

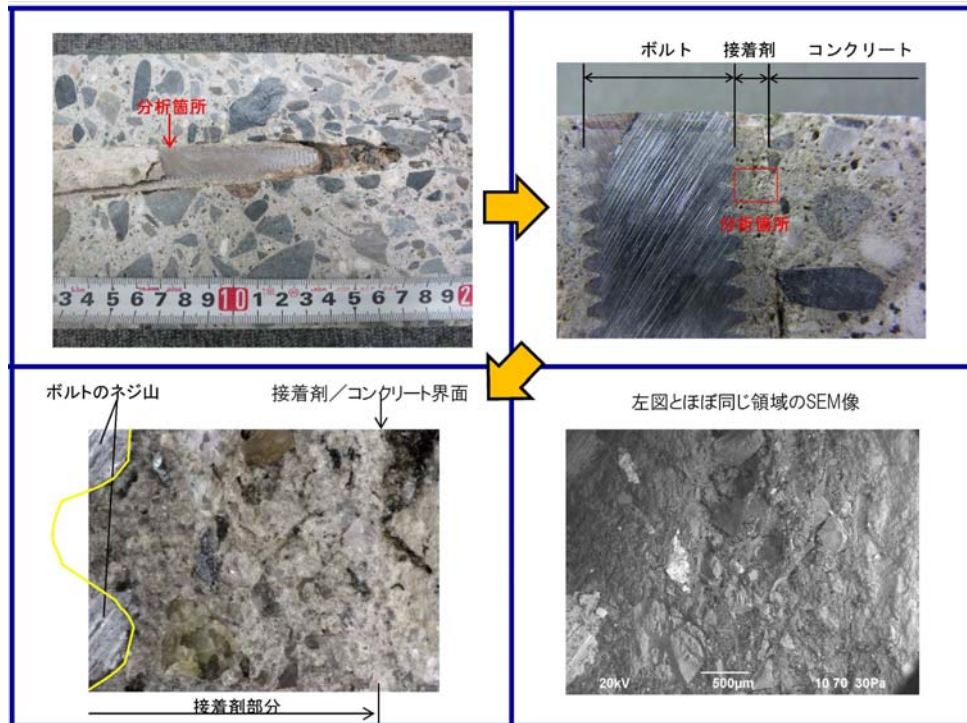


(3) 赤外線顕微鏡による接着剤断面の分析結果




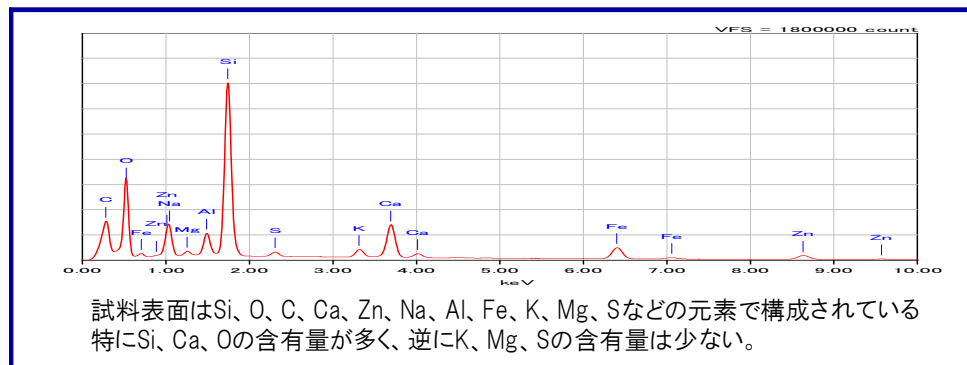
3.7.2.5 SEM(走査型電子顕微鏡)/EPMA (X線マイクロアナライザ)分析

(1) 観察範囲 (下段左)光学顕微鏡、(下段右)走査型電子顕微鏡(SEM)

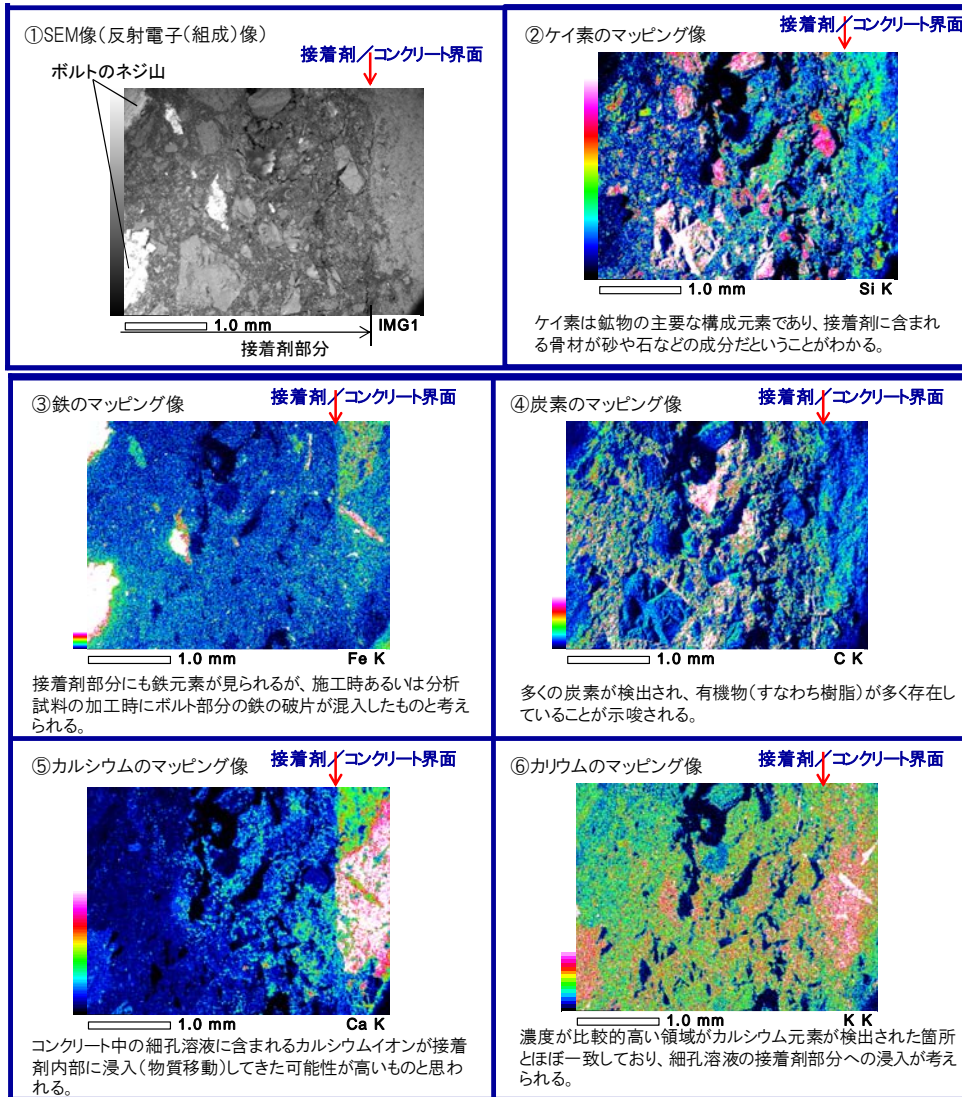


(2) EDS による接着剤近傍の元素分析果例(B45)

※ 図中のSEM像は、TN内空側が上側 

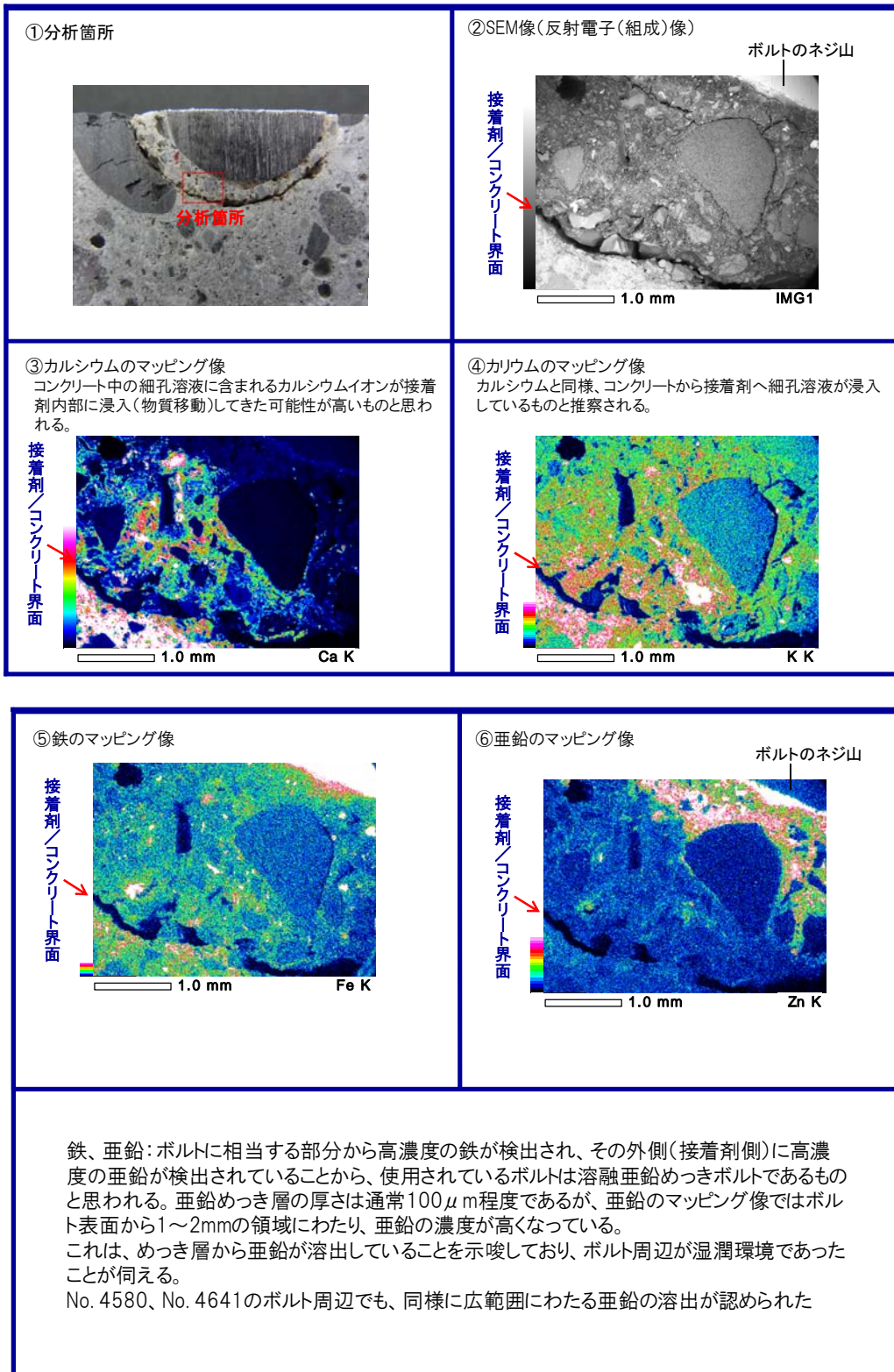


(3) 試料表面での濃度分布(EPMA)(B45)



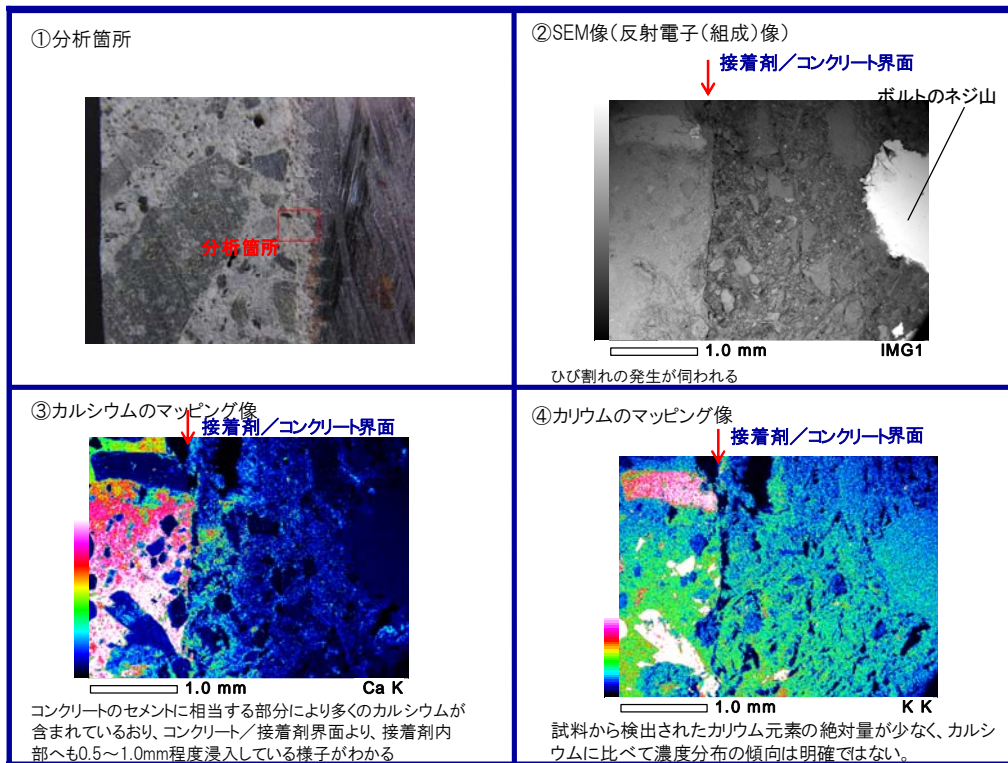
(4) 試料表面での濃度分布(EPMA)(4580)

※ 図中のSEM像は、TN内空側が上側



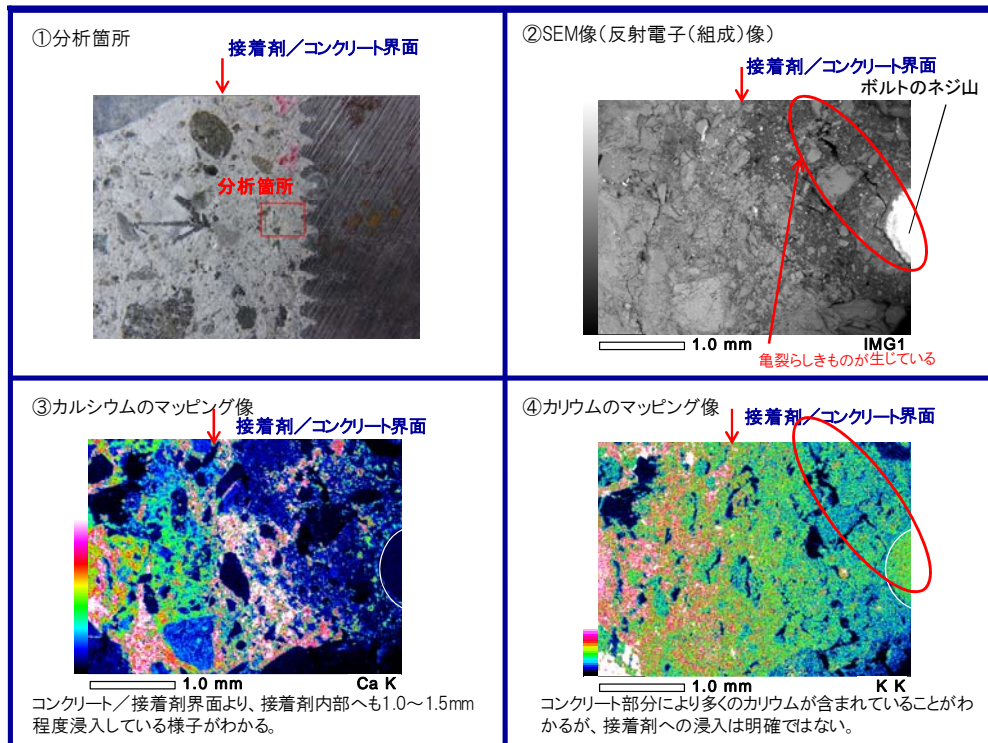
(5) 試料表面での濃度分布(EPMA)(4641)

※ 図中のSEM像は、TN内空側が上側



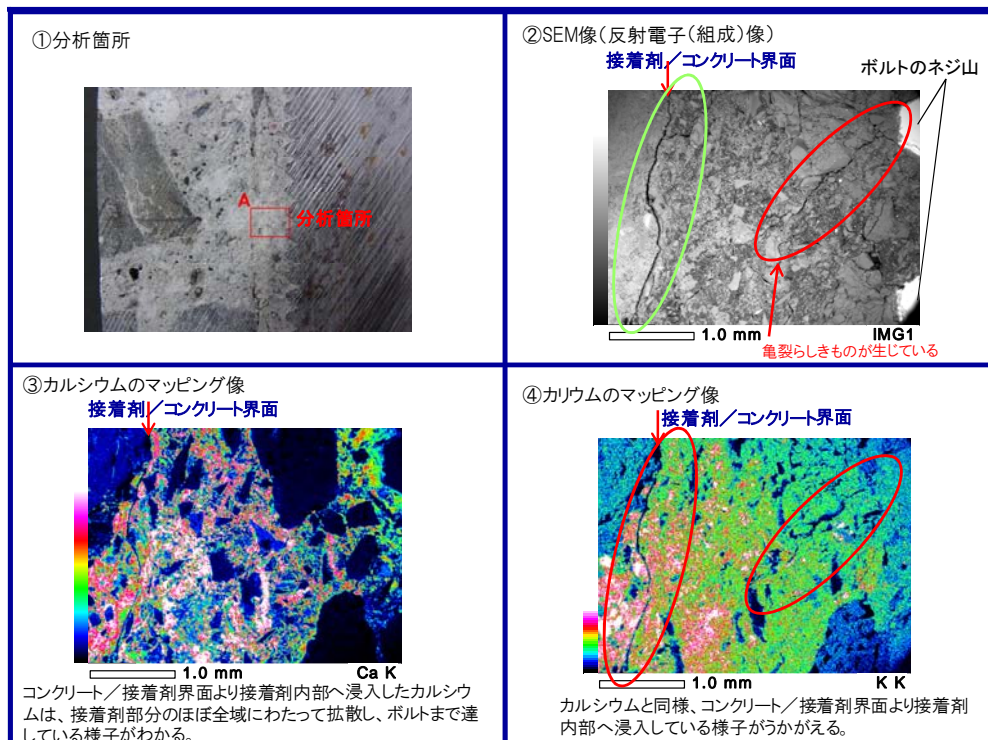
(6) 試料表面での濃度分布(EPMA)(4847)

※ 図中のSEM像は、TN内空側が上側



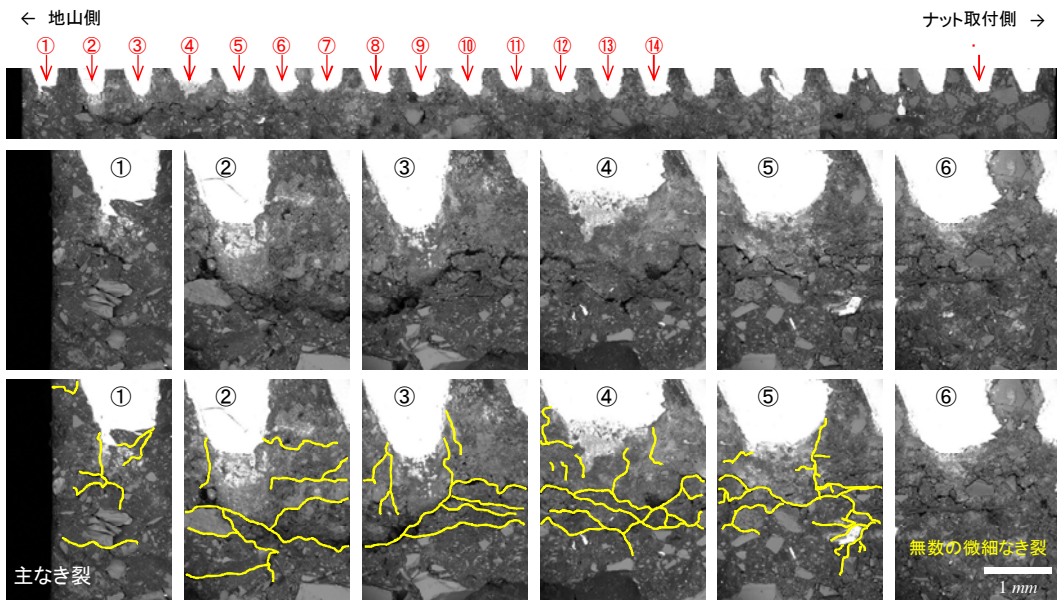
(7) 試料表面での濃度分布(EPMA)(4862)

※ 図中のSEM像は、TN内空側が上側



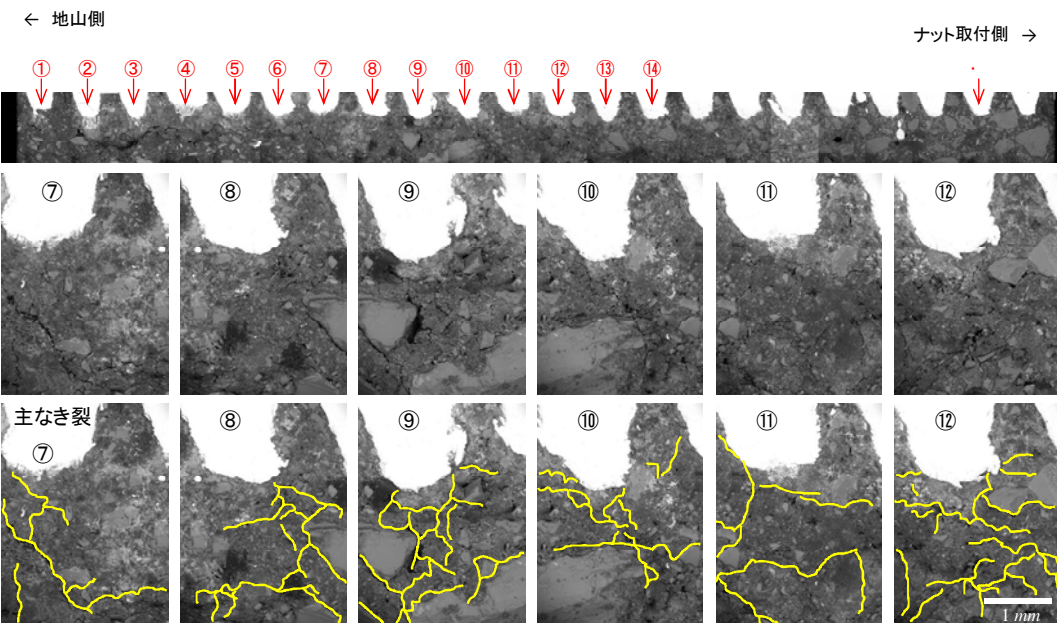
赤い矢印箇所のねじ山付近で接着剤にき裂が見られた。(ねじ山 22 個のうちの 15 個)

反射電子(組成)像

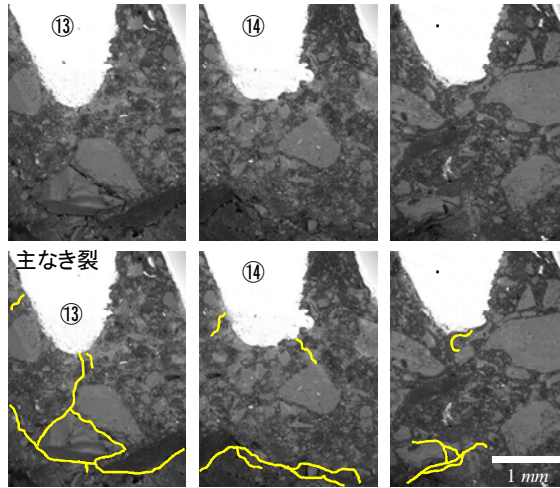
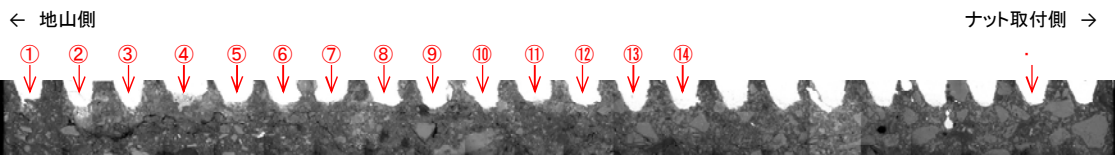


赤い矢印箇所のねじ山付近で接着剤にき裂が見られた。(ねじ山 22 個のうちの 15 個)

反射電子(組成)像



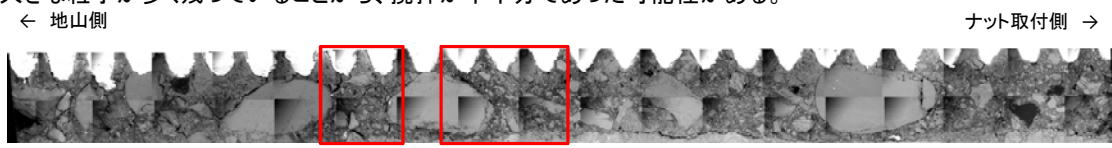
赤い矢印箇所のねじ山付近で接着剤にき裂が見られた。(ねじ山 22 個のうちの 15 個)



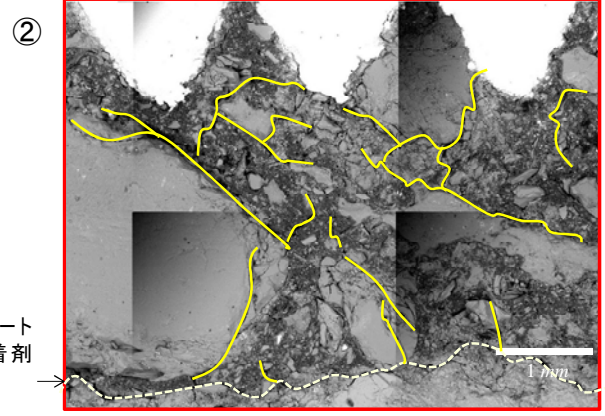
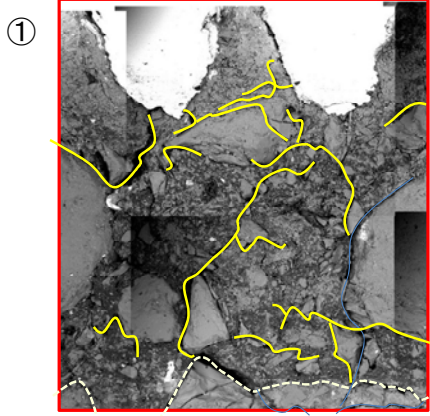
反射電子(組成)像

反射電子(組成)像

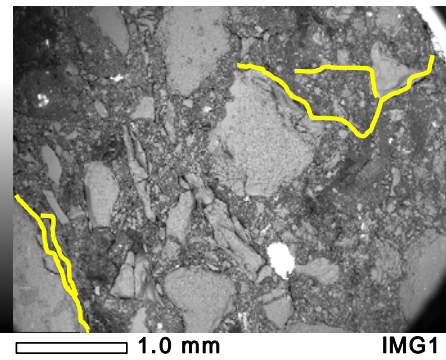
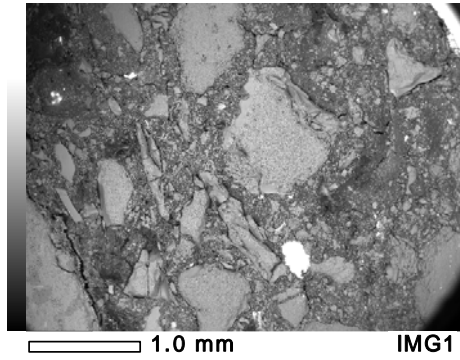
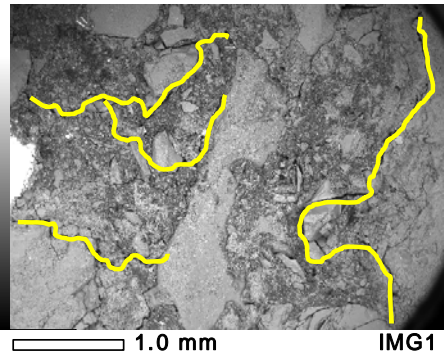
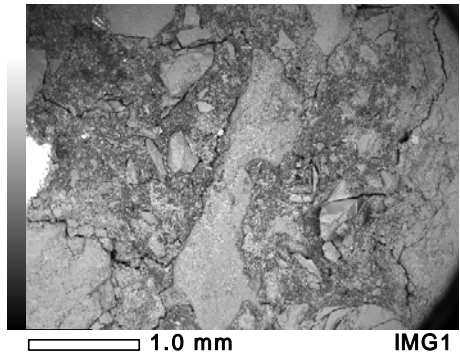
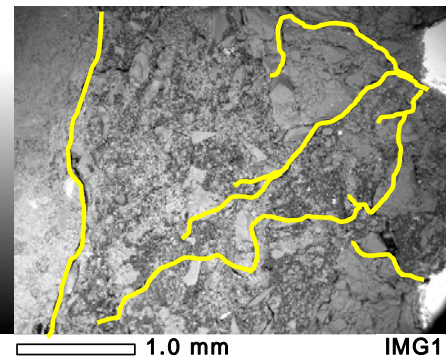
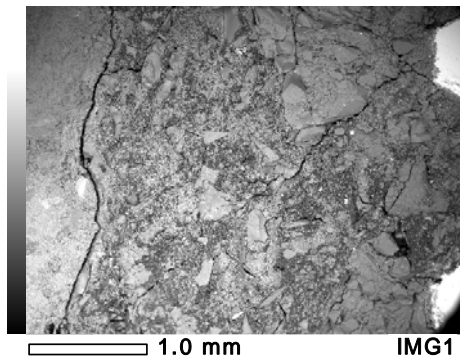
観察した全域において、無数のき裂が確認された。
径の大きな粒子が多く残っていることから、攪拌が不十分であった可能性がある。



(代表的な画像)

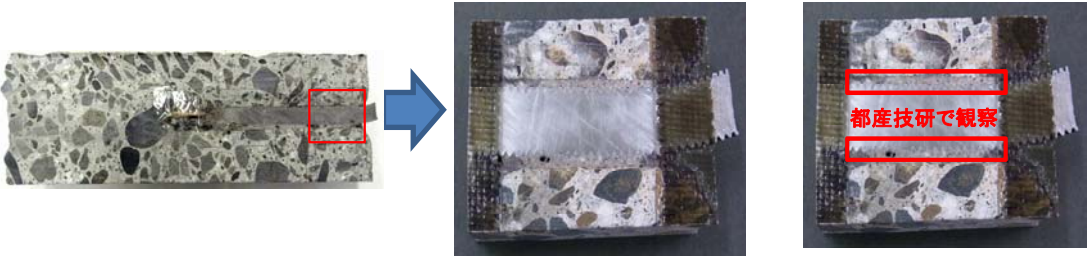
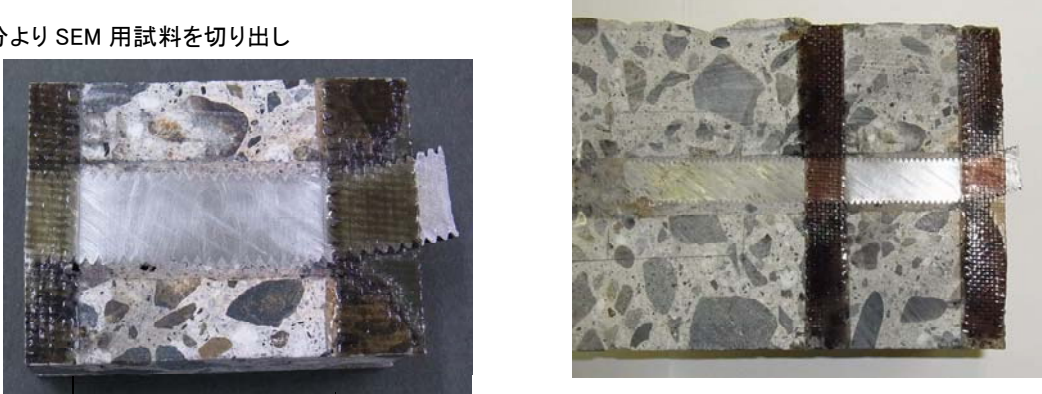
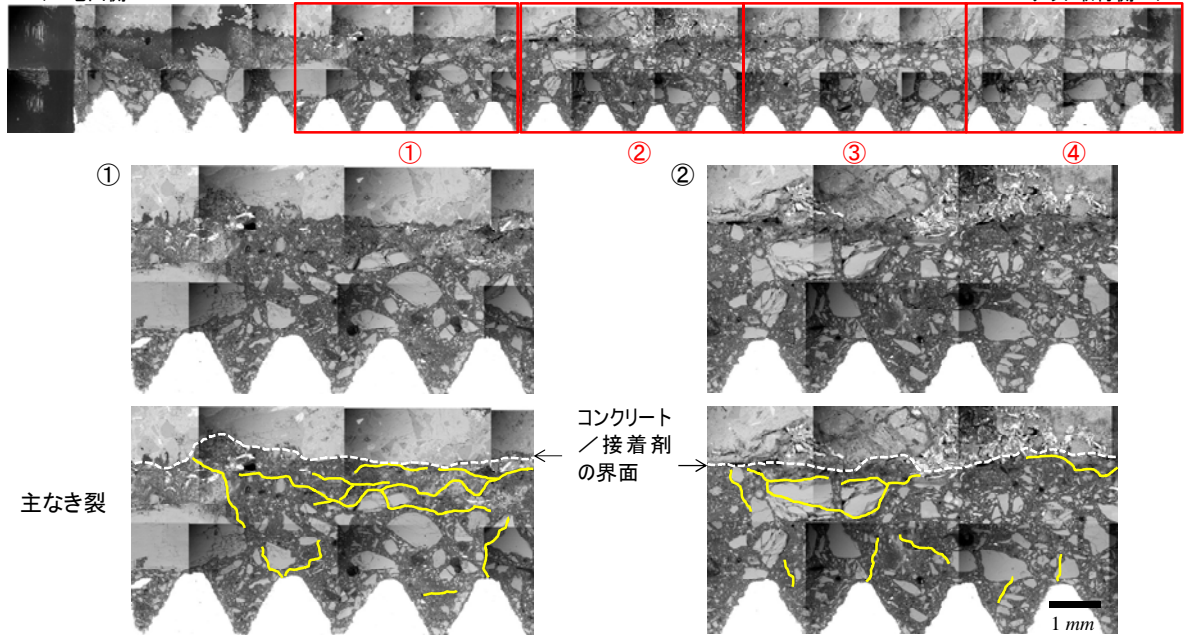


詳細観察

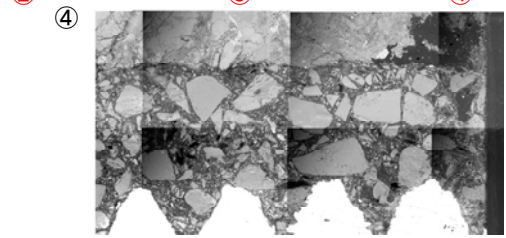
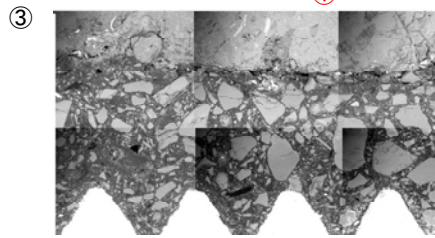
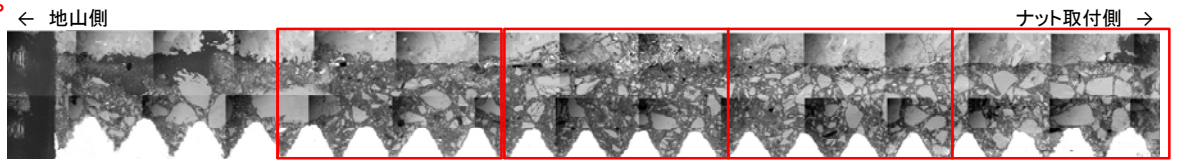


コア No. B31 断面観察結果

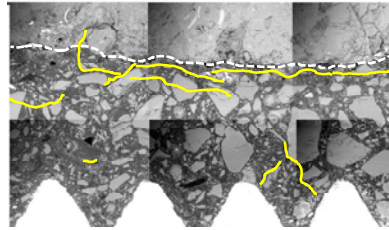
(ネジ山近傍、コンクリート／接着剤界面近傍の双方について SEM 観察)

<p style="writing-mode: vertical-rl;">調査対象</p>	 <p>ナットに近い部分より SEM 用試料を切り出し (ボルトの脱落を避けるため、ガラス繊維シート補強材でボルトを固定)</p>
<p style="writing-mode: vertical-rl;">断面観察結果</p>	<p>ダイヤモンドソーで 5cm 角程度に切り出した後、観察面を純水で軽く洗浄した後、観察した。 (研磨は無し)</p> <p>ナットに近い部分より SEM 用試料を切り出し (切断後)</p>  <p style="text-align: center;">観察範囲</p> <p style="text-align: center;">GFRP補強材 ← → GFRP補強材</p> <p>加工時にボルトが脱落しないよう、あらかじめガラス繊維シート補強材を貼付し、ボルトを固定した。</p> <p>ダイヤモンドソーで 5cm 角程度に切り出した後、観察面を耐水研磨紙 (#360→#600→#800→#1200) で研磨し、純水で軽く洗浄した後、観察した。</p>
<p style="writing-mode: vertical-rl;">反射電子(組成)像</p>	<p>ねじ山付近のき裂は少ない。接着剤／コンクリート界面付近では、広範囲にわたって界面と平行なき裂が確認された。 ← 地山側</p>  <p style="text-align: right;">ナット取付側 →</p> <p>① ② ③ ④</p> <p>主なき裂</p> <p>コンクリート／接着剤の界面</p> <p style="text-align: right;">1 mm</p>

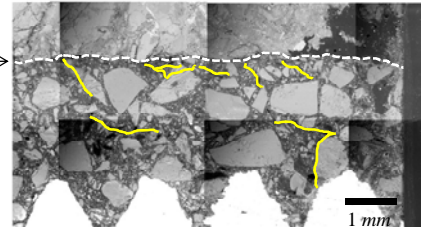
ねじ山付近のき裂は少ない。接着剤/コンクリート界面付近では、広範囲にわたって界面と平行なき裂が確認された。



主なき裂


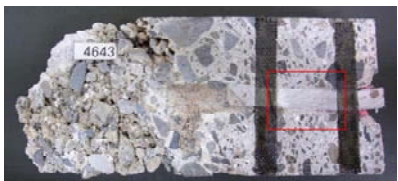

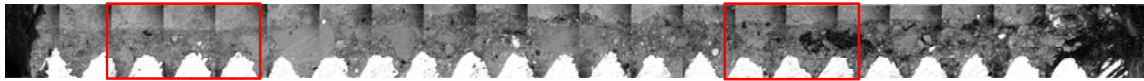
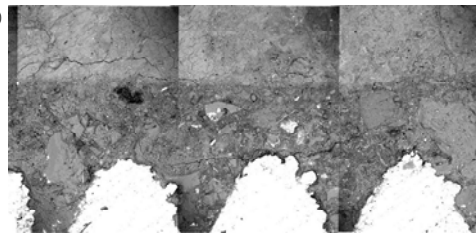
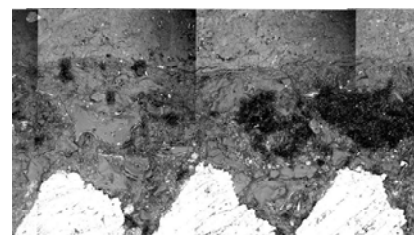
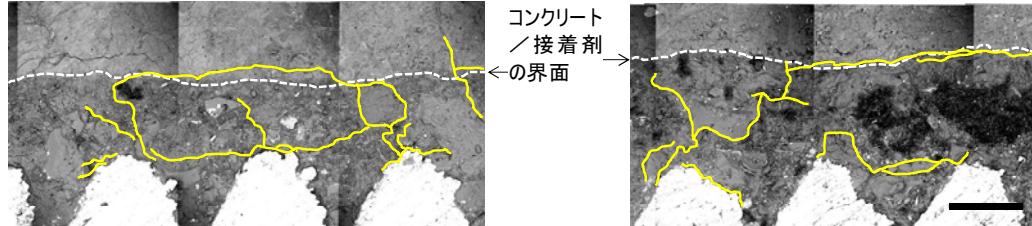
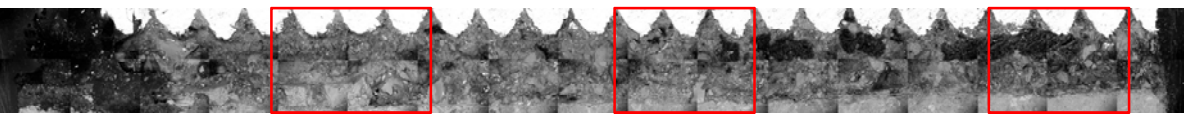
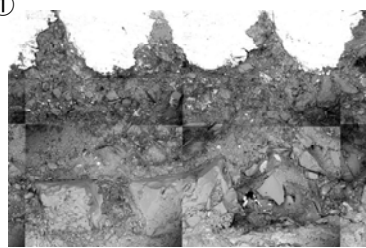
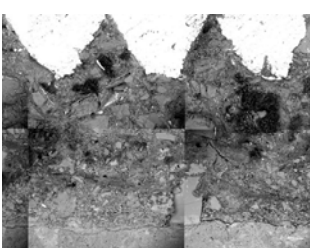
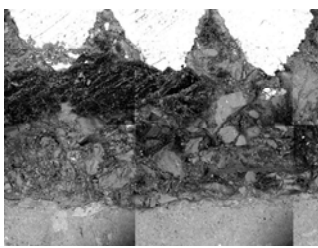
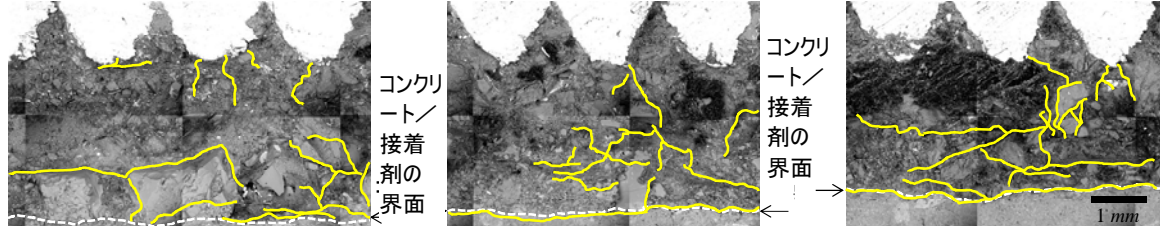


← コンクリート
/ 接着剤
の界面 →

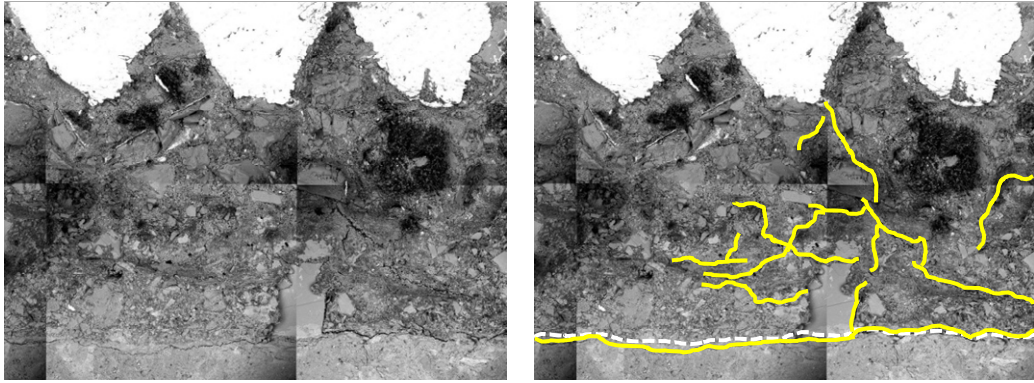


反射電子(組成)像

コア No.4643

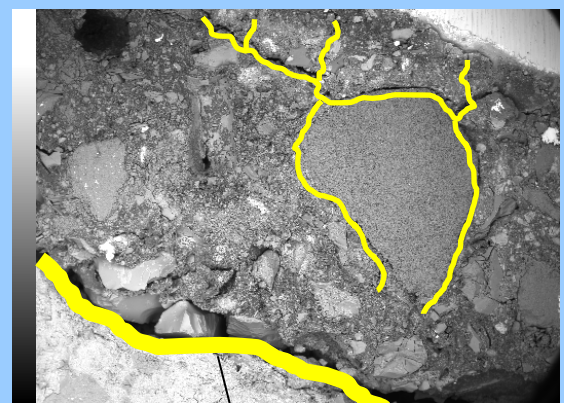
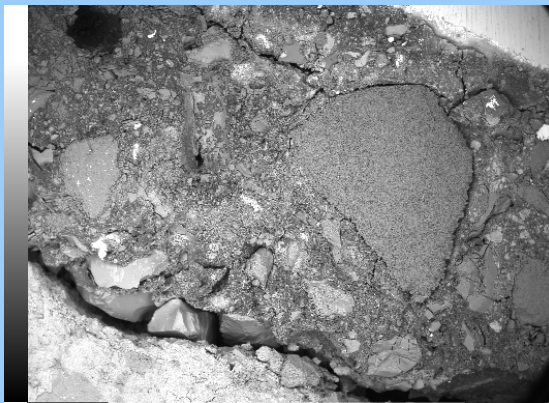
調査対象	<p>コア断面(赤枠箇所から試料を切り出し) ダイヤモンドソーで 5cm 角程度に切り出した後、観察面を純水で軽く洗浄した後、観察した。(研磨はなし)</p>    <p>加工時にボルトが脱落しないよう、あらかじめガラス繊維シート補強材を貼付し、ボルトを固定した。</p> <p>GFRP補強材 観察範囲 GFRP補強材</p>
断面観察結果	<p>ねじ山付近、接着剤/コンクリート界面付近で、多くのき裂が観察された。</p> <p>← 地山側 ナット取付側 →</p>  <p>① ②</p> <p>典型的なき裂</p>    <p>コンクリート/接着剤の界面</p>
反射電子(組成)像	<p>ねじ山付近、接着剤/コンクリート界面付近で、多くのき裂が観察された。</p> <p>← 地山側 ナット取付側 →</p>  <p>① ② ③</p> <p>典型的なき裂</p>     <p>コンクリート/接着剤の界面</p> <p>1 mm</p>

詳細観察



コア No.4580

No.4580

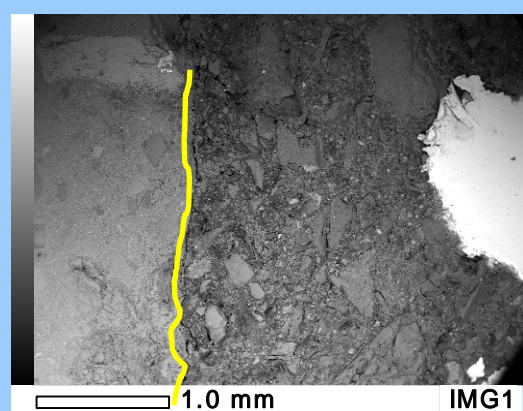
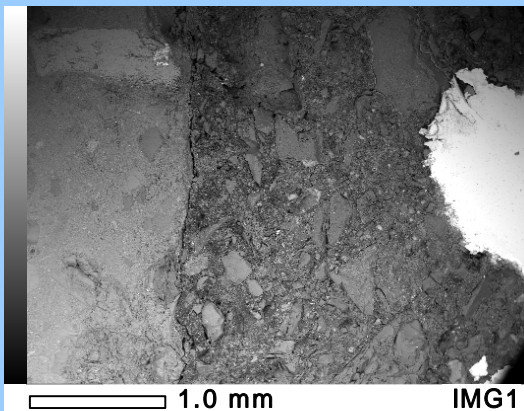


注：この試料はボルトの横断方向断面を観察

この亀裂は加工時のものの可能性が高い

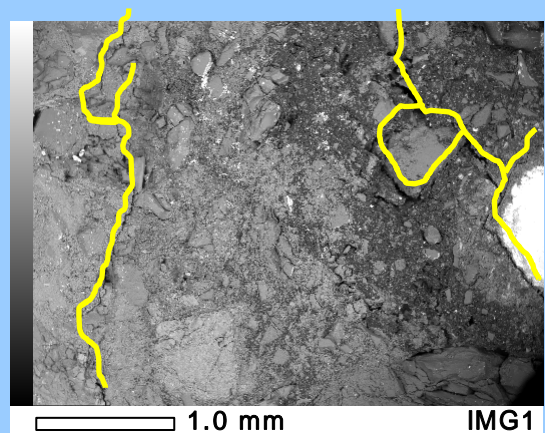
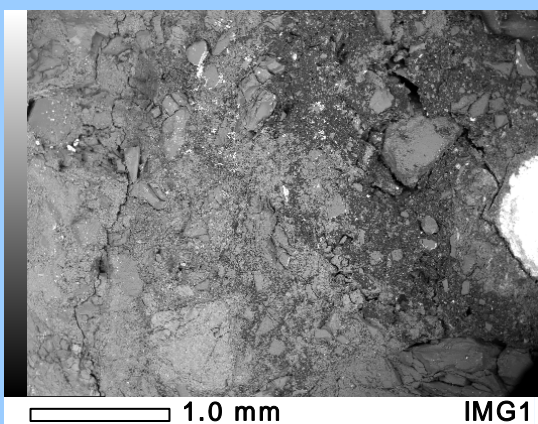
コア No.4641

No.4641



コア No.4847

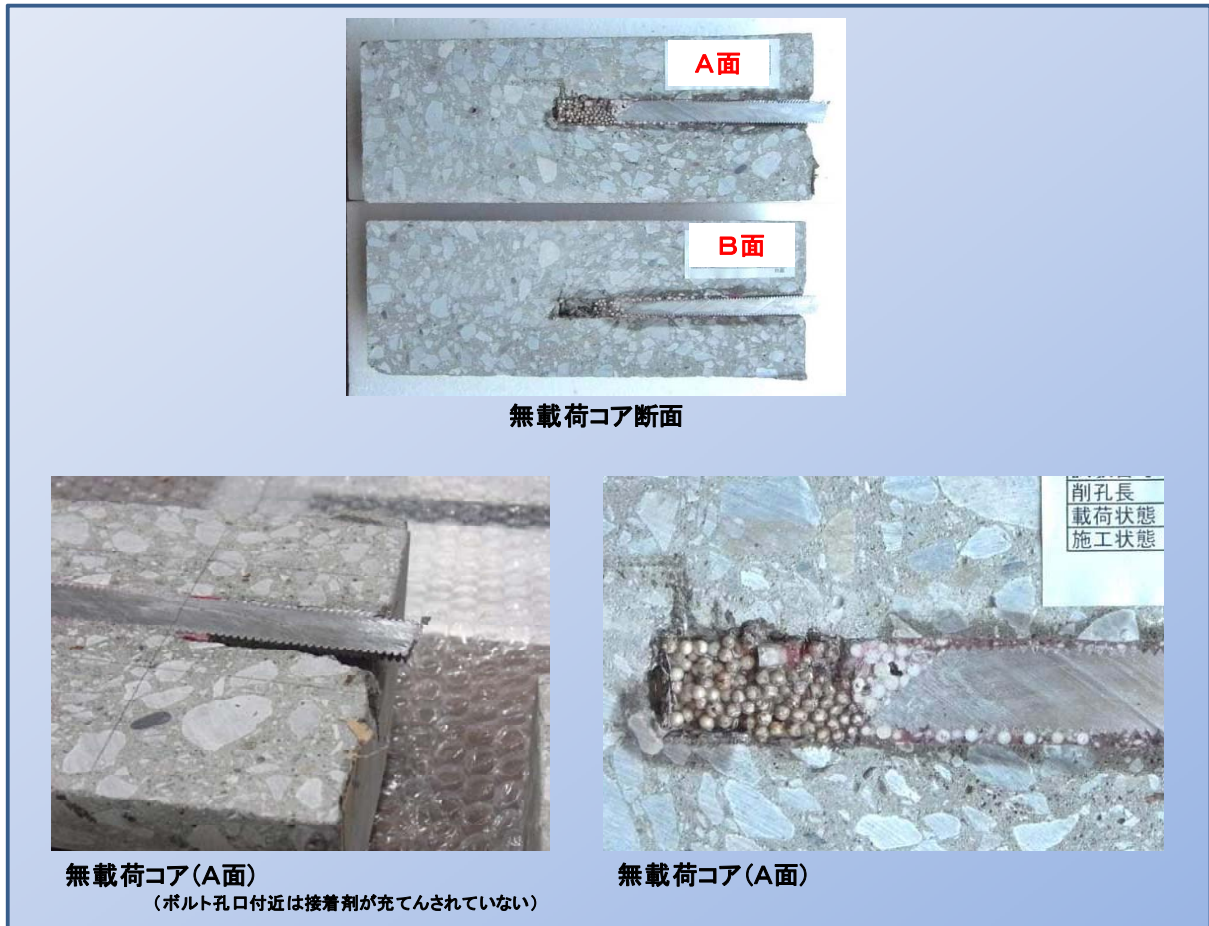
No.4847



(2) 模擬的に作製したコアの断面観察結果

無載荷コア

供試体を作製しアンカーを打設し、無載荷でアンカー一部をコア抜き、切断して、き裂の進展有無を確認し、現地採取により確認されたコアと比較する。



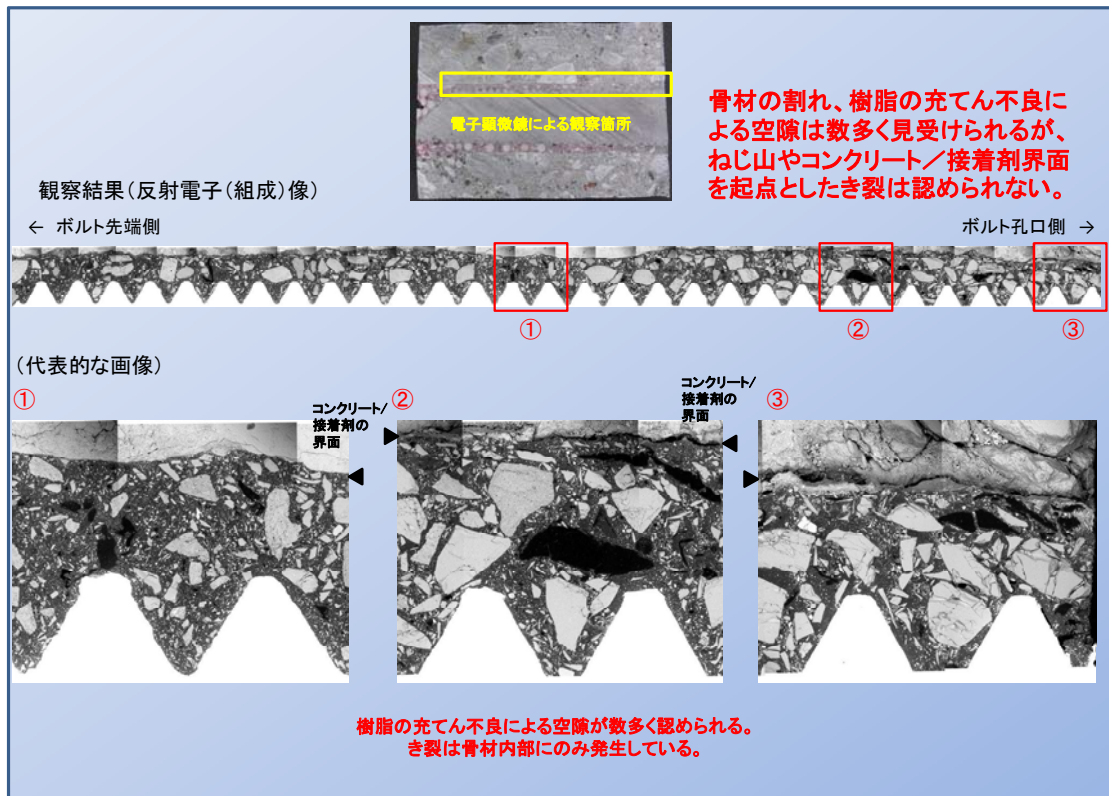
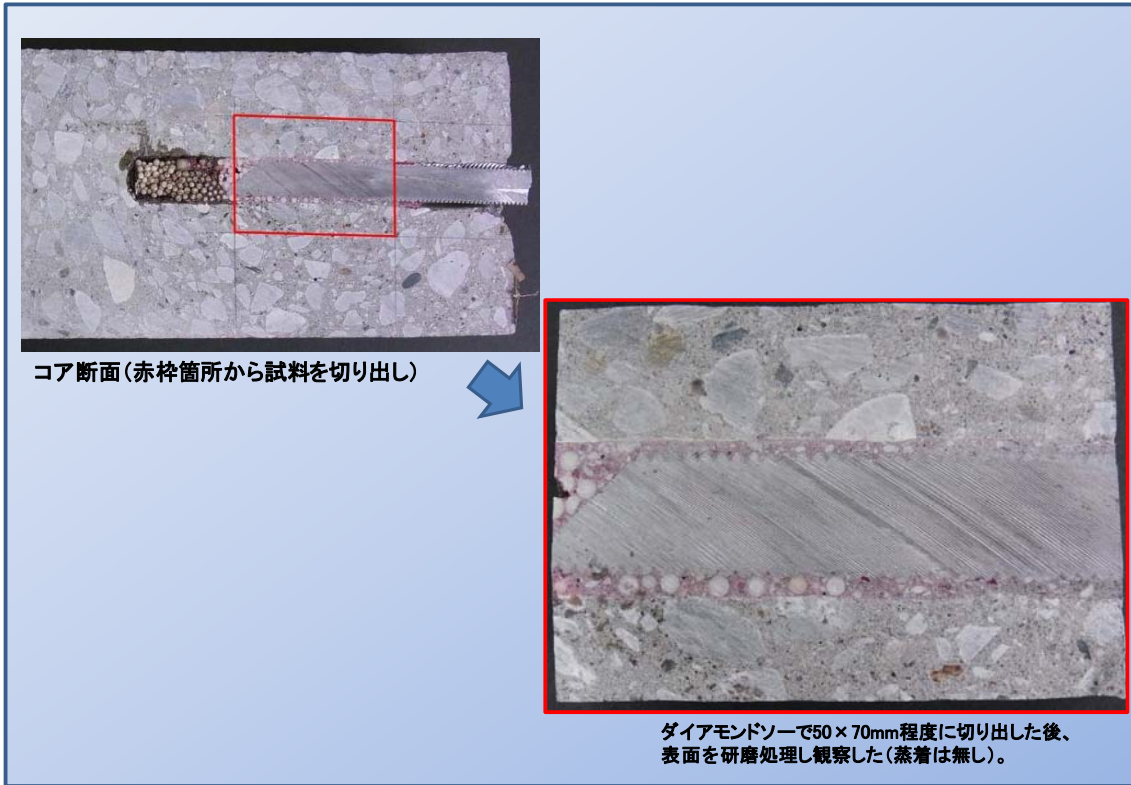
コンクリート設計基準強度：20N/mm²（3日養生後）

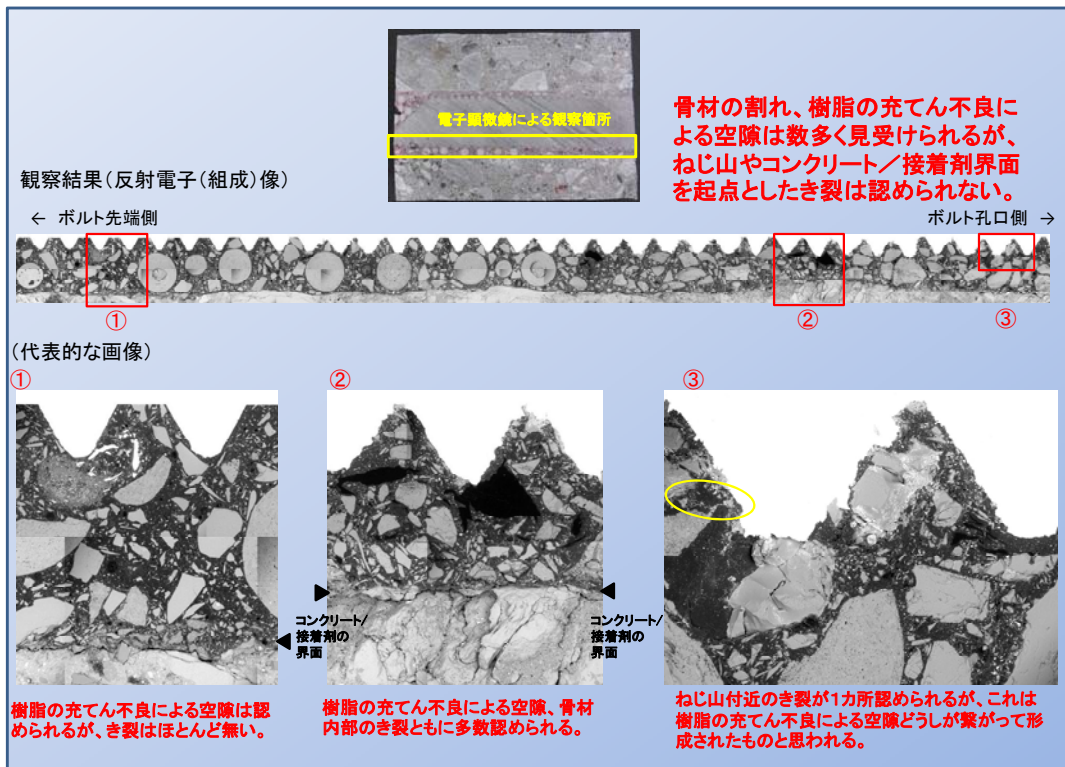
使用ボルト：M16 L=200mm（SS400）

使用接着系アンカー：ケミカルアンカー R-16

削孔深さ：170mm 埋込み長：130mm

断面観察状況





亀裂発生の変因として、供試体切り出し時および研磨時の力の影響の可能性があげられるが、以下の理由により、これらについてはネジ山付近から発する亀裂の変因とは考えにくい。

- ・無荷の供試体にてネジ山付近の樹脂にき裂が認められないこと。
- ・試料加工前に補強を施した試料でも亀裂が認められること
- ・研磨を行っていない試料でも亀裂が認められること。