

## 基盤 8 表面被覆工法の塩分環境下の凍害に対する耐久性に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 21～平 25

担当チーム：寒地保全技術研究グループ（耐寒材料）

技術開発調整監付（寒地技術推進室）

研究担当者：田口史雄、島多昭典、嶋田久俊、内藤 勲、  
田畑浩太郎、吉田 行、遠藤裕丈、  
野々村佳哲、水田真紀、川村浩二、村中智幸、  
渡辺 淳、鈴木 哲

### 【要旨】

塩分環境下において凍害を受けるコンクリート構造物への有効な対策として、種々の表面被覆工法が適用されているが、被覆材料等の積雪寒冷地における耐久性等は明らかになっていない。本研究では、塩分環境下の凍害に対する表面被覆工法の適切な設計施工法の確立に向けて、表面被覆工法のうち埋設型枠工法、ウレタン被覆工法およびシート工法を対象に、各種工法の耐久性試験・調査ならびに設計・施工に関する検討を行った。

その結果、埋設型枠に関しては、目地材の劣化により、埋設型枠版と母材コンクリートの界面の付着強度の低下や母材コンクリートへの塩分浸透が生じることを確認した。また、埋設型枠工法は、目地部から劣化が生じやすく、適切な目地材の選定の重要性とともに、埋設型枠の端部は付着が低下しやすい箇所であるため、入念な施工が重要なことを確認した。さらに、耐候性に優れる目地材の選定にあたっての現場マニュアルを示すとともに、実際の状況を想定した試験条件などを考慮して、目地材と埋設型枠版の付着強度を事前に確認する必要があることを確認した。

ウレタン被覆工法に関しては、施工時のコンクリートの表面水分率が高い部材ではウレタンとコンクリートの付着強度が小さいこと、ウレタンとコンクリートの界面に水分が多く供給されやすい部材ではウレタンの浮きや剥がれが生じやすいことを確認した。また、塩水と凍結融解の複合作用が付着強度に及ぼす影響が大きいこと、ウレタン端部へのシラン系表面含浸材の施工がウレタン端部の剥がれの抑制に有効であることを実験的に明らかにした。さらに、実橋の床版において、シラン系表面含浸材を活用したウレタンの剥がれ防止技術の試験施工を行い、良好な施工性を確認した。

シート工法に関しては、北海道内の施工現場 52 箇所を調査した結果、約 6 割の構造物で浮き変状が発生し、全体の 5 割の構造物で変状が経年的に拡大していくことを確認した。また、室内試験の結果、シート工法は保護層や上塗り剤を取り除いた FRP 部（繊維シート+接着含浸樹脂）のみでも十分な遮水性を有することを確認した。遮水性は、外からの水分を防ぐだけでなく、内部の水分を保持することにもなるため、実構造物のコンクリートが飽水し、凍結融解によって劣化していくケースがあることを確認した。対策として、水抜き孔の設置や、格子貼りの採用、透気性の高い樹脂の採用など、コンクリート内部の水分が抜けるような配慮が必要である。

これらの成果を包括的にとりまとめて「表面被覆工法の設計、施工マニュアル（案）」を作成・提案した。

キーワード：埋設型枠工法、ウレタン被覆工法、シート工法、塩分環境下、凍害、付着性

### 1. はじめに

積雪寒冷地のコンクリート構造物は、塩分環境下で凍害を受けやすく、通常の凍害に比べて耐久性が著しく低下する等の深刻な問題を抱えており、有効な対策が求められている。この対策として、現在、主に塩害対策として開発された種々の表面被覆工法が適用されているが、補修後に変状を来している事例もあり、塩分環境下での凍害に対する耐久性等を確保できる被覆材料の選定基準や変状を防止するための留意点を明らか

かにすることが大切である。

本研究では、表面被覆工法のうち、実構造物での劣化や変状が確認された埋設型枠工法、ウレタン被覆工法およびシート工法を対象に、塩分環境下の凍害に対する表面被覆工法の設計、施工マニュアル（案）の提案に向けての耐久性試験・調査ならびに設計・施工に関する検討を行った。埋設型枠工法は目地材の剥離やひび割れ、ウレタン被覆工法はウレタン端部の剥がれ、シート工法は浮きに着目した種々の評価を行った。以

下、個々の工法の研究結果について述べる。

## 2. 埋設型枠工法

### 2.1 概要

埋設型枠工法は、通常の仮設の型枠の代わりに高強度・高耐久なプレキャストコンクリート版（以下、「埋設型枠版」と記す）をコンクリート構造物表面の保護層として設置する工法である。新設では埋設型枠内にコンクリートを打設、既設補修では無収縮モルタル等を充填させて、既設コンクリート（母材コンクリート）と表層の埋設型枠を一体化することによって、母材コンクリートへの劣化因子の侵入を抑制する工法である。写真-2.1 は寒冷地における塩分環境下の埋設型枠工法の、北海道の日本海沿岸部における適用事例を示している。本工法は、埋設型枠版の継目からの劣化因子の侵入を防ぐため、継目（以下「目地部」と称す）には接着剤やシーリング材（以下「目地材」と称す）が充填される（図-2.1）。目地材として一般に用いられているエポキシやシリコン等の有機系樹脂は紫外線等により劣化するため弱点となりやすく、埋設型枠工法として耐久性を確保するには、埋設型枠自体の耐久性だけでなく目地部を含めた検討が必要不可欠である（写真-2.2 に埋設型枠の目地部に充填した目地材の劣化事例）。写真-2.3 は目地材の劣化が誘因となり生じたと考えられる埋設型枠の剥離事例である。

このような背景から、本章では、埋設型枠版及び目地材の強度・耐久性データを収集した結果と、埋設型枠工法を適用した寒冷地沿岸部のコンクリート構造物を対象として実施した現地調査結果を報告する。また、併せて室内における埋設型枠工法の耐久性に関する試験の概要を報告する。

### 2.2 埋設型枠に関する資料調査

#### 2.2.1 埋設型枠版の強度・耐久性データ

積雪寒冷地である北海道内において施工実績のある2種類の埋設型枠版（A、B）を対象とし、その強度および耐久性に関するデータを収集した。

表-2.1 に各埋設型枠版の強度・耐久性データを示す。埋設型枠版Aは、セメントの代わりに熱硬化性樹脂を使用したプレキャストレジコンクリート版であり、埋設型枠版Bは、ポリマー樹脂を含浸させたプレキャストセメントコンクリート版である。各項目の試験方法が異なるため、直接的な比較はできないものの、いずれの埋設型枠版も一般的なコンクリートに比べて高い耐久性を示しており、特に、積雪寒冷地での適用にあたり重要となる耐塩害性および耐凍害性についても



写真-2.1 埋設型枠工法の適用事例（橋脚）

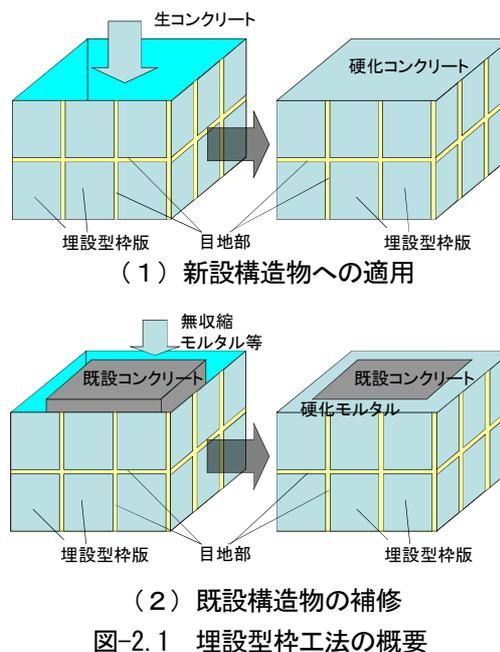


図-2.1 埋設型枠工法の概要



写真-2.2 目地材の劣化事例



写真-2.3 埋設型枠の剥離事例

高い性能を有していることを確認した。

表-2.1 埋設型枠版の強度・耐久性データ

種類		埋設型枠版A		埋設型枠版B	
原料・製法	分類	レジンコンクリート		ポリマー含浸セメントコンクリート	
	骨材寸法	5~10mm		10mm	
	裏面の仕様	立体金網埋込または種石埋込		碎石埋込	
	部材厚	10、20、25、30mm		17、22、25、30mm	
	補強材	FRP(t10)、金網(100mm メッシュ)		硬鋼線(φ0.3)	
強度・耐久性	部材強度	圧縮強度=800kgf/cm <sup>2</sup> 以上 曲げ強度=200kgf/cm <sup>2</sup> 以上 引張強度=100kgf/cm <sup>2</sup> 以上		圧縮強度=1,300kgf/cm <sup>2</sup> 以上 曲げ強度=200kgf/cm <sup>2</sup> 以上 引張強度=80kgf/cm <sup>2</sup> 以上	
	耐塩害性	塩害促進試験: 飽和食塩水の散水・乾燥繰り返し試験(7日/1サイクル)を30サイクル実施	EPMAによる 塩分浸透量測定 塩分の浸透=0mm (比較試験体:普通コンクリート=20mm 深さで塩分量 2%)	塩害促進試験: 飽和食塩水の散水・乾燥繰り返し試験(7日/1サイクル)を30サイクル実施	試験体 25mm 位置に可溶性塩分量が0.12%浸透(比較試験体:普通コンクリート=1.8%)
	耐凍害性	凍結融解試験: ASTM C 666 に準じた試験を400 サイクル実施	相対動弾性係数=97%保持	凍結融解試験: ASTM C 666 に準じた試験を1000 サイクル実施	相対動弾性係数=98%保持
	化学抵抗性	15%硫酸乾湿繰り返し試験を300 サイクル実施	重量変化率=0% (普通コンクリート=-7%)	5%塩酸に12週間浸漬	重量変化率=-2.5% (普通コンクリート=-10%)
	耐摩耗性	スリヘリ試験: 奥田式スリヘリ試験機で8時間実施	スリヘリ係数=19.6mm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> (普通コンクリート=1040mm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> )	スリヘリ試験: スパイクタイヤ回転式試験器で50000回実施	平均スリヘリ深=1.4mm (普通コンクリート=3.0mm)
	中性化抵抗性	中性化促進試験: 20°C、40%RH+10%CO <sub>2</sub> で270日間放置	中性化深さ=0mm (普通コンクリート=75mm)	中性化促進試験: 40°C、40%RH+10%CO <sub>2</sub> で90日間放置	中性化深さ=0mm (普通コンクリート=27mm)

表-2.2 目地材の強度データ

養生条件	エポキシ変性シリコーン樹脂						エポキシ樹脂
	①1液型		②2液型		③2液型		①2液型
	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	破断時の 伸び(%)	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	破断時の 伸び(%)	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	破断時の 伸び(%)	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
	JIS K 6251		JIS K 6251		JIS K 6251		JIS K 6911
標準①(23±2°C、14日間)	1.63	100	2.94	130	-	-	13.70
標準①→氷点下(0±3°C、16時間)	3.48	80	-	-	-	-	-
標準①→加熱(80±3°C、14日間)→標準①	3.48	48	3.19	120	-	-	-
標準②(20±2°C、7日間)	-	-	-	-	2.60	125	-
標準②→耐候性試験 (サンシャインカーボンアーク灯式、1600時間)	-	-	-	-	2.40	105	-

### 2.2.2 目地材の強度

埋設型枠工法の目地材として使用実績のある4種類の樹脂(エポキシ変性シリコーン樹脂3種類、エポキシ樹脂1種類)について、その強度データを収集した。表-2.2に各目地材の強度データを示す。

エポキシ変性シリコーン樹脂は比較的引張強度は低いものの硬化体は弾性体であり、伸びがある点に特徴がある。一方のエポキシ樹脂は、引張強度は比較的高いものの硬化体は硬く、伸びがない点に特徴がある。

また、1液型のエポキシ変性シリコーン樹脂①については、氷点下での引張強度試験を実施しており、引張強度は常温に比べて高くなる傾向が見られたものの、破断時の伸び率が常温に比べて低下することから、低温環境で埋設型枠工法の目地材にエポキシ変性シリコーン樹脂を使用した場合、伸び率の低下に伴い、埋設型枠版の温度変化等に伴う伸縮に追従出来なくなる可能性がある。

## 2.3 暴露供試体の耐久性調査

### 2.3.1 暴露供試体の概要

北海道の日本海沿岸部に、実際の橋梁（橋脚）に適用された埋設型枠工法と同様のものを用いて作製された暴露供試体（以下「模型供試体」と記す）が設置されている。この模型供試体は、実際の橋梁が海上や海中にあり経年的な耐久性を直接的に評価することが困難なため、間接的に経年的な耐久性等を評価するために設置されたものであり、本調査は設置後約4年が経過している。この模型供試体を対象に実施した。

図-2.2 に模型供試体の寸法および目地構造を示す。模型供試体は、表-2.1 に示すレジコンクリート製の埋設型枠版Aを使用した供試体と、ポリマー含浸セメントコンクリート製の埋設型枠版Bを使用した供試体の2種類であり、母材コンクリートにはいずれも実橋梁橋脚と同じコンクリート（高炉セメントB種使用、水セメント比40%）が使用されている。

埋設型枠版Aは一般的なコンクリートに比べて線膨張係数が2倍程度大きいいため、温度変化等に伴う膨張や収縮を考慮して、目地構造は通し目地（貫通目地）となっており、目地材には変形に対して追従性があるエポキシ変成シリコーン樹脂が使用されている。また、目地材の3面接着によるひび割れを防止するため、型枠版背面側には2種類のバックアップ材が施工されている。埋設型枠版Bは一般的なコンクリートと線膨張係数が同一であるため、突き合わせ目地となっており、目地材には追従性が無いエポキシ樹脂が使用されてい

る。

### 2.3.2 調査内容

前述した通り埋設型枠版自体は非常に高強度・高耐久な材料であり、埋設型枠版自体の劣化や、埋設型枠版中央部直下の母材コンクリートの劣化が進行することは考えにくいだが、埋設型枠版の継目に施工されている目地材より劣化因子（水・塩化物イオン）が侵入する可能性がある。このため、本調査においては、各模型供試体の目地部の劣化状況を観察するとともに、目地が無い埋設型枠版の中央部（以下、「型枠部」と記す）と、目地直下のバックアップ材（連続気泡）の影響を受けない目地近傍（以下、「目地部」と記す）を対象とし、引張接着性試験と採取コアによる超音波伝播速度測定およびEPMA 面分析を実施し、目地の有無による埋設型枠版と母材コンクリートの付着性および母材コンクリートの健全性の違いを調べた。

#### (1) 目地部の目視観察

各模型供試体について、目地部の目視観察を実施し、目地材のひび割れ・剥離等の劣化の有無を確認した。調査面は、飛来塩分の影響を最も受けやすいと考えられる海側面とした。なお、(2)~(4)に示す試験はこの観察対象の範囲で実施した。また、特に目地部における試験は、この目視観察の結果、目地に変状が確認された箇所を実施することとした。

#### (2) 引張接着性試験

埋設型枠版と母材コンクリートの付着性を検討するため、各模型供試体の型枠部と目地部よりそれぞれ

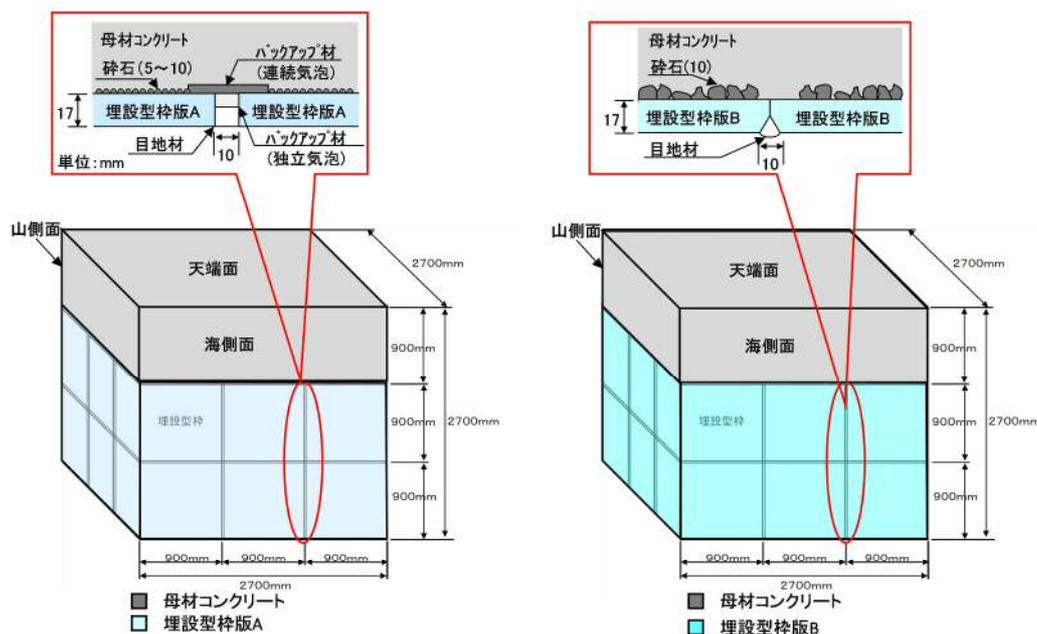


図-2.2 模型供試体の諸元と埋設型枠の目地構造

2 カ所を選定し、建研式引張試験器による引張接着性試験を実施した。図-2.3 に引張試験方法の概要を示す。

模型供試体の試験位置に埋設型枠版の厚さまでφ10cmの切り込みをいれ、φ10cm鋼製治具をエポキシ樹脂で接着して引き抜き試験を行い、母材コンクリートと埋設型枠の付着性を試験した。なお、前述したとおり、埋設型枠版Aを使用した模型供試体には、目地の背面にバックアップ材が取り付けられており、この部分は埋設型枠版と母材コンクリートの付着が弱いことから、目地部における引張接着性試験を目地直上で実施した場合、付着力を正しく評価出来ない恐れがあった。このため、いずれの模型供試体についても、目地部における引張接着性試験は、バックアップ材の影響がない目地近傍の位置で行うこととした。

### (3) 超音波伝播速度測定

母材コンクリートの劣化の有無を調べるため、各模型供試体の型枠部と目地部から各1本ずつφ10×20cmのコアを採取し、透過法による超音波伝播速度測定を実施した。なお、目地部におけるコアは、目地部直上から採取した。図-2.4 に超音波伝播速度の測定概要を示す。採取したコアの深さ方向に1cmピッチで超音波伝播速度測定器の端子をあて、速度を測定した。同測定は、直行するX方向、Y方向の2測線で実施した。なお、目地を有するコアにおいては、目地を挟み込む方向(目地直行)をX方向、目地に沿った方向(目地並行)をY方向とした。

### (4) EPMA 面分析

母材コンクリートへの塩化物イオンの侵入の有無を調べるため、超音波伝播速度測定後のコアのうち、目地部より採取したコアを対象にEPMA(電子線マイクロアナライザー)により、塩化物イオンの分布を分析した。

図-2.5 に分析試料の採取位置を示す。分析試料の寸法は幅40mm×厚さ20mmとし、埋設型枠と母材コンクリートの界面から40mmまでの深さを分析することとした。また、各コアより目地部に沿った方向(目地並行)と目地を挟み込む方向(目地直交)から2試料作製した。なお、分析面はいずれも40×40mmの面とし、目地平行方向の試料については目地材側を、目地直交方向の試料についてはコア中央側を分析面とした。

試料を切り出した後、鏡面研磨を行い、試料の分析面に導電性を持たせるために金を蒸着し、EPMAによる面分析を実施した。面分析結果の画像から、 $18.0\text{mass}\% \leq \text{CaO} \leq 42.5\text{mass}\%$ 、 $8.0\text{mass}\% \leq \text{SiO}_2 \leq 30.0\text{mass}\%$ の条件に当てはまるピクセルのみを選択す

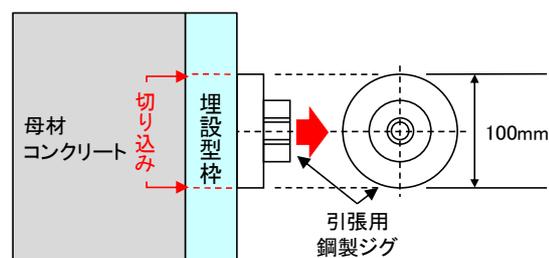


図-2.3 引張接着性試験の概要

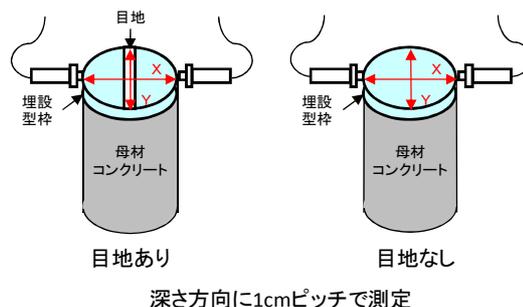


図-2.4 超音波伝播速度測定の概要

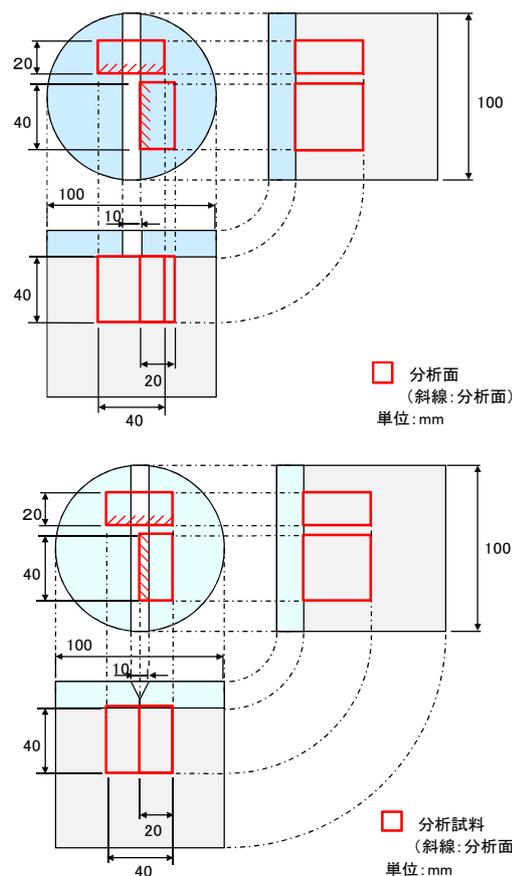


図-2.5 分析試料の採取位置  
(上：埋設型枠版A使用 下：埋設型枠版B使用)

ることにより、塩分浸透が生じない骨材部分を除去したセメントペーストに相当する部分のみを表示した。

### 2.3.3 暴露供試体の調査結果

#### (1) 目地材の劣化状況

写真-2.4 に各模型供試体の目地部の観察結果を示す。

埋設型枠版Aを使用した模型供試体では、目地材の表層が紫外線劣化等によって硬く変質し、目地部の 8 割程度の範囲で埋設型枠版と目地材の界面に剥離が生じており、その幅は最大で 0.25~0.30mm 程度であった。これは、紫外線等による目地材の硬化に伴い、埋設型枠版の温度変化による伸縮に目地材が追従出来なくなり、剥離が生じたと推察される。また、目地の剥離が生じていない箇所では、目地中央部にひび割れが生じており、その幅は最大で 0.15~0.2mm 程度であった。ひび割れの原因は、上記と同様に、目地材表層が紫外線劣化等により硬化し、埋設型枠の伸縮に追従出来なくなったためと考えられるが、埋設型枠版と目地材の付着が比較的強かったため、界面剥離せずに目地材中央部にひび割れが生じたものと推測される。

一方、埋設型枠版Bを使用した模型供試体では、埋設型枠版と目地材の界面剥離は確認されず、1 割程度の範囲ではあるが、目地材の目地幅中央部に最大 0.1mm 程度のひび割れが生じていた。このことから、埋設型枠版Bの目地部はAの目地部に比べて健全な状態を保持していることを確認した。

#### (2) 埋設型枠版と母材コンクリートの付着性

図-2.6 に埋設型枠版と母材コンクリートの引張接着強度を、写真-2.5、2.6 に各供試体の引張接着性試験後の破壊面をそれぞれ示す。

埋設型枠版Aの目地部の引張接着強度は、型枠部よりも小さかったが、その差は最大引張接着強度の 1/20 程度 ( $0.1\text{N}/\text{mm}^2$ ) と小さく誤差の範囲と考えられ、目地部は型枠部とほぼ同等の引張接着強度を保持しているものと考えられる。また、試験後の破壊状況を見ると、いずれの部位も、埋設型枠版と母材コンクリートの付着を改善するために埋設型枠版の裏面に埋め込まれている碎石の破壊が多く（破壊状況写真中の黒色の部分）、付着が確保されていることを確認した。

一方、埋設型枠版Bの目地部の引張接着強度は、型枠部よりも大きく、目地部は型枠部と同等の引張接着強度を保持していると言える。また、試験後の破壊状況を見ると、埋設型枠版Aと同様の埋設型枠版の裏面に埋め込まれた碎石の破壊（破壊状況写真中の黒色の部分）に加え、母材コンクリートで破壊が生じている部分（写真-2.6 の赤丸部分）が確認された。特に目地

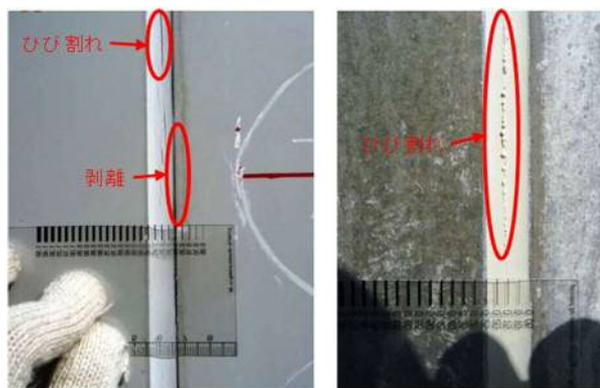


写真-2.4 目地部の観察結果  
(左：埋設型枠版A、右：埋設型枠版B)

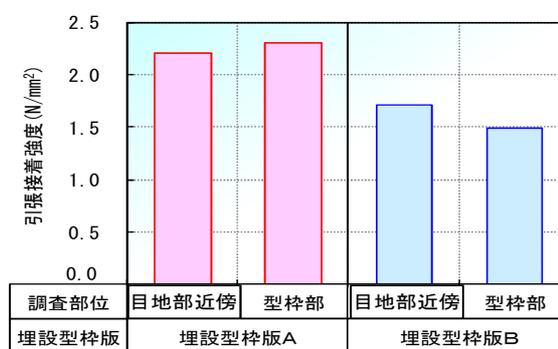


図-2.6 埋設型枠版と母材コンクリートの引張接着強度

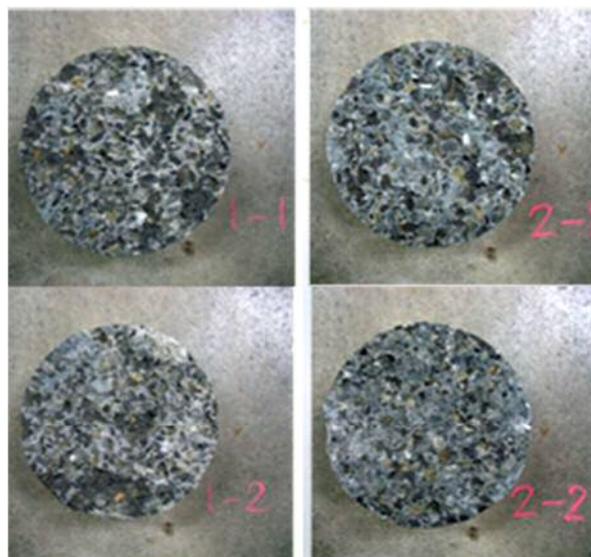


写真-2.5 引張接着性試験後の破壊状況  
(埋設型枠版A 左：目地部、右：型枠部)

部の大半は母材コンクリートで破壊していた。埋設型枠版Bは、型枠版Aに比べて裏面の碎石の分布に偏りがあり、碎石が少ない部分が多いが、このような部分

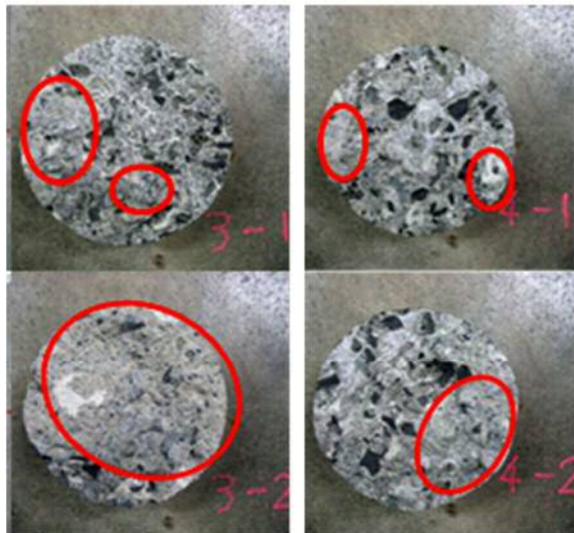


写真-2.6 引張接着性試験後の破壊状況  
(埋設型枠版 B 左：目地部、右：型枠部)

においても付着が良好なため、母材コンクリートでの破壊が生じたものと推測される。以上より、目地部と型枠部における引張付着強度は同等であり、埋設型枠版と母材コンクリートの付着が確保されていることを確認した。なお、埋設型枠の違いで比較すると、いずれの部位においても、埋設型枠版Aの方がBよりも引張接着強度が高かった。これは、埋設型枠版Aは裏面の砕石の粒径が比較的小さく高密度で分布しているのに対し、埋設型枠版Bは前述のように裏面の砕石が少ない部分が多く、砕石による機械的な付着強さが影響したものと考えられる。

(3) 母材コンクリートの劣化の有無

図-2.7 に埋設型枠版Aを使用した模型供試体より採取したコアの外観と超音波伝播速度測定結果を、図-2.8 に埋設型枠版Bを使用した模型供試体より採取したコアの外観と超音波伝播速度測定結果をそれぞれ示す。なお、目地が無い埋設型枠版中央部から採取したコアを「型枠部コア」、埋設型枠版と目地を含めて目地材直上から採取したコアを「目地部コア」と記す。

埋設型枠版Aの型枠部コアの超音波伝播速度は、測定方向の違いで差は無く、母材コンクリート部分（深さ2~20cm）は深さ方向でもほぼ均一（4.0km/sec程度）であり、劣化の傾向は確認できなかった。なお、埋設型枠と母材コンクリートの境界面に相当する深さ2cmの部分の速度が母材コンクリート内部より若干低下しているが、この部分は埋設型枠裏面に埋め込まれた砕石との付着部分であり、型枠部分（表層0~1cm）の超音波伝播速度が3.6km/sec程度と母材より若干小さく、

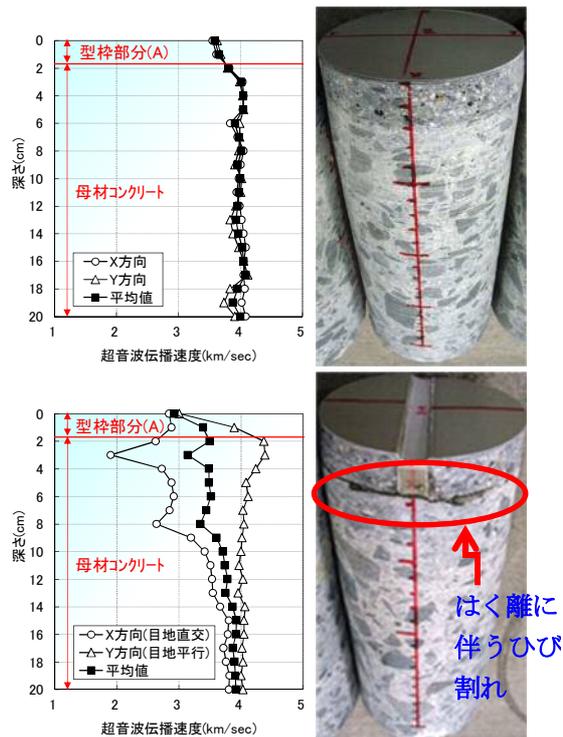


図-2.7 超音波伝播速度とコアの外観  
(埋設型枠版 A 上：型枠部コア、下：目地部コア)

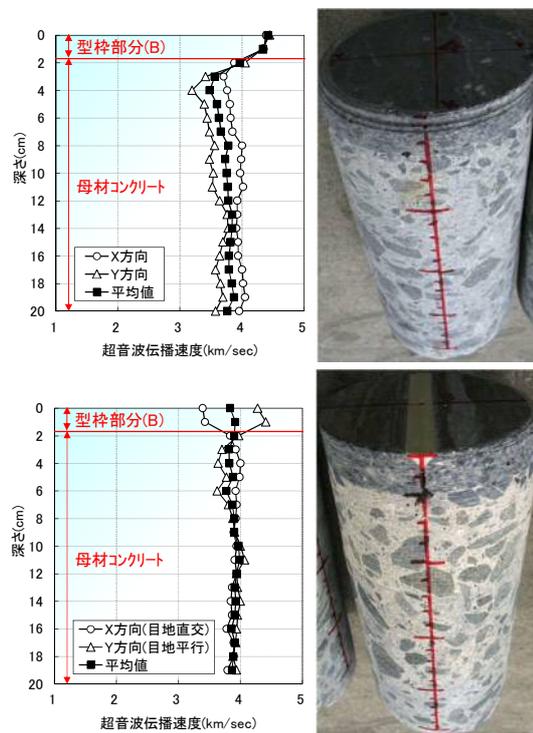


図-2.8 超音波伝播速度とコアの外観  
(埋設型枠版 B 上：型枠部コア、下：目地部コア)

この部分の速度は埋設型枠と母材のほぼ中間値であることから、境界面の劣化による速度の低下ではなく、埋設型枠と母材の付着が良好なため、両者の中間値と

なつたと考えられる。一方、目地部コアでは、目地平行方向の母材コンクリート部の超音波伝播速度は、型枠部コアと同等で劣化の傾向は確認できなかった。しかし、目地直交方向の超音波伝播速度は、母材コンクリート部に相当する深さ2~14cm程度の速度が大きく低下した。なお、型枠部分（深さ0~1cm）でも速度が低下しているが、これは中央部の目地材の影響と考えられる。

母材コンクリート部の深さ2~4cmの速度の大きな低下については、目地部コア採取時にバックアップ材部分の付着が小さいため埋設型枠と母材の界面にはく離に伴うひび割れが生じており、この影響を受けたものと考えられる。また、写真-2.7は同コアの深さ7cm位置の切断面であり、この断面を吸水後に乾燥させたものであるが、目地平行方向に大きなひび割れが確認された。このことから、母材コンクリートの深さ4cm以深の速度の低下は、このひび割れの影響と考えられる。なお、コア採取時のひび割れは、図-2.7（下）に示したように型枠と母材の境界面に集中しており、ひび割れの方向が写真-2.7で確認されたものと異なる。また、目地材の剥離部から水分が侵入して凍害劣化が生じていたとしても、表層から層状にひび割れが生じると考えられ、写真-2.7に示すような深さ方向に卓越するひび割れが生じるとは考えにくい。以上から、写真-2.7に示すひび割れは、暴露供試体作製時の締め固め不足、あるいは硬化後の収縮等の作用により生じたものと推測される。

一方、埋設型枠版Bのコアの超音波伝播速度は、コア採取位置によらずほぼ均一な値であり、測定方向の違いによるバラツキも少なく劣化の傾向は確認できなかった。

以上より、埋設型枠版Aを使用した模型供試体の母材コンクリートは施工不良・収縮等の影響を受けて超音波伝播速度が下がっている可能性があるものの、劣化が集中しやすいと考えられる埋設型枠版との界面付近は健全な状態を保っており、目地部への水分の侵入による凍害劣化等は発生していないものと考えられる。また、埋設型枠版Bを使用した模型供試体の母材コンクリートと埋設型枠版との界面付近はいずれの型枠を用いた場合でも健全な状態を保っており、目地部からの水分の侵入による凍害劣化は発生していないことを確認した。

#### (4) 母材コンクリートへの塩化物イオンの侵入

図-2.9に埋設型枠版Aを使用した模型供試体の母材コンクリートのEPMA面分析結果を、図-2.10に埋設



写真-2.7 目地部コアのひび割れ  
(埋設型枠版A目地部コア断面)

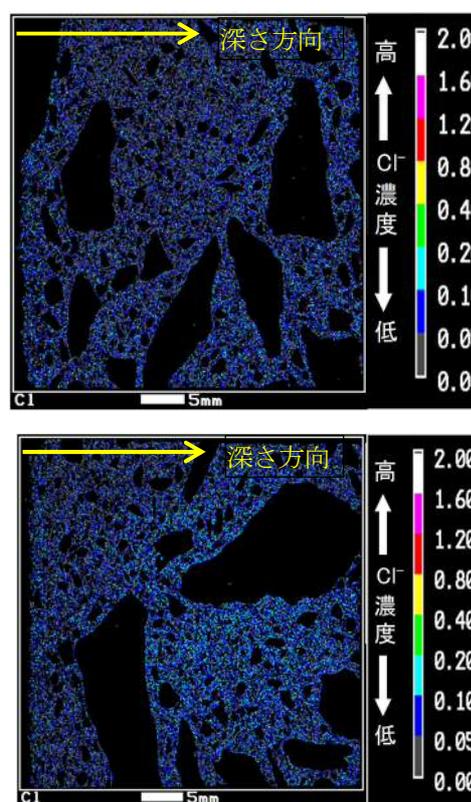


図-2.9 EPMA面分析結果 (埋設型枠版A)  
上：目地直交方向 下：目地平行方向

型枠版Bを使用した模型供試体のEPMA面分析結果をそれぞれ示す。なお、図の左端が埋設型枠版と母材コンクリートの境界面であり、図の右方向は母材コンクリートの深さ方向である。

埋設型枠版Aの分析結果を見ると、目地直交方向および目地平行方向のいずれの分析試料においても、界面からの塩化物イオンの浸透は確認できない。一方、埋設型枠版Bの目地直交方向の分析結果を見ると、図中赤丸で示す位置において塩化物イオン濃度の変化が

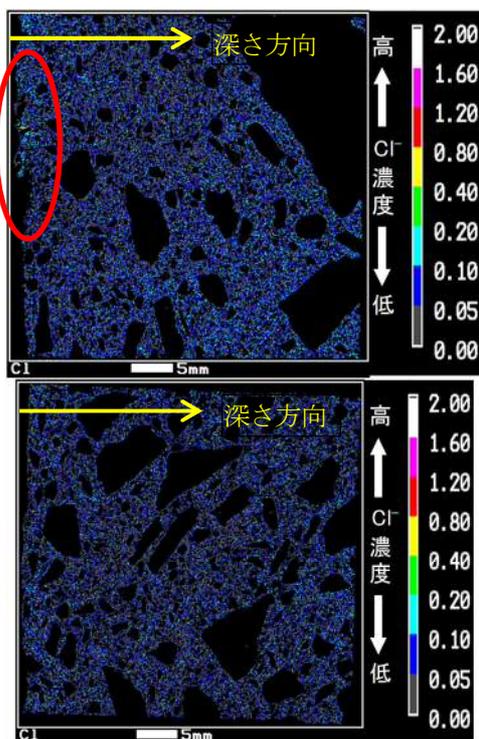


図-2.10 EPMA 面分析結果 (埋設型枠版B)  
上：目地直交方向 下：目地平行方向

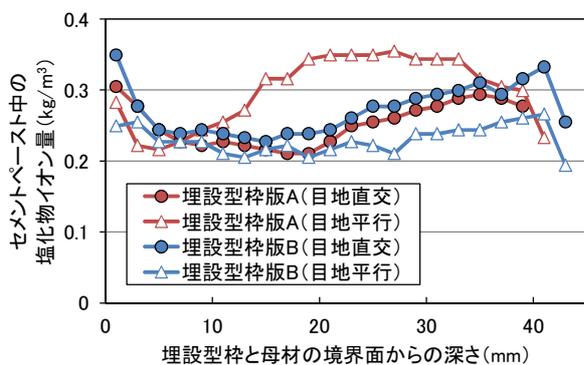


図-2.11 塩化物イオンの分布

若干みられたが、その他の部位では塩化物イオンの浸透は確認できない。

図-2.11 に EPMA 面分析の結果より求めた単位セメントペーストあたりの塩化物イオン量の分布を示す。界面から深さ 1 mm の位置で塩化物イオン濃度がわずかに高いが、いずれも大きな差は無い。他方、界面からの深さ 10mm 以深での塩化物イオン量が比較的高いが、2.3.2(4)に示したように、図の塩化物イオン量は EPMA の面分析画像から、 $18.0\text{mass}\% \leq \text{CaO} \leq 42.5\text{mass}\%$ 、 $8.0\text{mass}\% \leq \text{SiO}_2 \leq 30.0\text{mass}\%$  の条件に該当する部分を骨材と仮定し、その部分を除去したセメントペーストに換算した塩分量であるため、分析結果に

は誤差が含まれる。また、図の塩化物イオン量はセメントペーストに対する値であり、実際の生コンクリートの規制値は、骨材も含めたコンクリート中の塩化物イオン量での規制であるため、コンクリート中の塩化物イオン量としては  $0.3\text{kg/m}^3$  を下回る。このことから、図-2.11 に示された塩分量は、コンクリート材料由来の微量の塩分と判断でき、外来塩分は母材コンクリートに侵入していないことを確認した。

## 2.4 埋設型枠工法の耐久性(小型供試体による耐久性の評価)

目地部を含めた埋設型枠工法の耐久性の検証を目的として、目地部を含む形で埋設型枠版と一体化させたコンクリート供試体を作製して耐候性試験および凍結融解試験を実施し、埋設型枠版と母材コンクリートの付着性および母材コンクリート中への塩化物イオンの侵入の有無を検討した。併せて目地材自体の紫外線劣化による引張強度や伸び率の変化についても検討した。

### 2.4.1 型枠の作製

表-2.3 に室内試験で使用した埋設型枠版、目地構造、目地材の組み合わせを、図-2.12 に目地構造の詳細を示す。埋設型枠版には、表-2.1 に示すレジコンクリート製の埋設型枠版Aとポリマー含浸セメントコンクリート製の埋設型枠版Bの2種類を使用した。

埋設型枠版Aの目地構造は通し目地とし、埋設型枠版背面には打設時のコンクリートの流出を防止するための連続気泡型のバックアップ材と、目地材の3面接着によるひび割れを防止するための独立気泡型のバックアップ材の2種類を取り付けた。また、目地材には、現場での使用実績があるエポキシ変成シリコーン樹脂2種類に加え、伸び率が高く追従性に優れたシリコーン樹脂と複数の樹脂を組み合わせる高耐久な複合目地を使用した。埋設型枠版Bの目地構造は、目地部を型枠版表面に設ける表目地と、目地部を型枠版裏面に設ける裏目地の2種類とし、目地材には現場に

表-2.3 埋設型枠版、目地構造、目地材の組合せ

埋設型枠版	目地構造	目地材
A (レジコンクリート)	通し目地	エポキシ変成シリコーン樹脂①
		エポキシ変成シリコーン樹脂②
		シリコーン樹脂 複合目地
B (ポリマー含浸セメントコンクリート)	表目地	エポキシ樹脂
	裏目地	



- ・ケース4 : 耐候性試験(紫外線照射 1000 時間)→ 一面凍結融解試験(100 サイクル)→ 引張接着性試験+EPMA 面分析
- ・ケース5 : 耐候性試験(照射 1000 時間)→ 一面凍結融解試験(300 サイクル)→ 引張接着性試験+ EPMA 面分析

**(1) 耐候性試験**

供試体の目地部に劣化作用を与えるため、ケース 4 と 5 の供試体について、紫外線の照射と乾湿繰り返しによる耐候性試験を実施した。試験条件は JIS A 1415 「高分子系建築材料の実験室光源による暴露試験方法」を参考に 表-2.5 に示す通り決定し、照射時間は 1000 時間とした。

**(2) 一面凍結融解試験**

ケース 2~4 の供試体について ASTM C 672 に準拠し、試験水を供試体表面に張り、凍結工程 (-18℃、16 時間) と融解工程 (+23℃、8 時間) を繰り返す方法で一面凍結融解試験を実施した。なお、試験水には濃度 3% の NaCl 水溶液を使用した。また、凍結融解による劣化状況把握の目安とするため、図-2.15 に示す位置において透過法による超音波伝播速度を併せて測定した。

**(3) 引張接着性試験**

埋設型枠版と母材コンクリートの付着性を検討するため、埋設型枠版に目地部を中心として φ10cm の切り込みを入れ、鋼製ジグを接着し、建研式接着力試験器を用いて埋設型枠版と母材コンクリートの引張接着強度を求めた。また、母材コンクリート自体の表層強度を調べるため、材齢 28 日と 91 日で、母材表層強度検証用コンクリート版の 3 箇所と同様の試験を行った。

**(4) EPMA 面分析**

一面凍結融解試験後の母材コンクリートへの塩化物イオンの侵入の有無を調べるため、図-2.16 に示すように目地部を含んだ断面が 30×30×10mm の試料を切り出し、鏡面研磨および金の蒸着を行って分析面を作製し、EPMA による塩化物イオンの分布の分析を実施した。対象は、埋設型枠版 A で目地材にエポキシ変成シリコン樹脂①、②およびシリコン樹脂を使用した供試体と、埋設型枠版 B で目地構造を表目地とした供試体とした。

**2.4.4 小型供試体による耐久性試験結果および考察**

**(1) 目地部の耐久性**

図-2.17 に、ケース 4 の各供試体を対象に実施した耐候性試験前後の目地部の外観の変化を示す。

いずれのケースも目地材と埋設型枠の間に隙間は生じなかったが外観上の変状が一部で確認され、エポ

表-2.5 耐候性試験の試験条件

光源	照射時間	放射照度		雰囲気温度 (°C)
UVB 紫外線蛍光灯	16 時間照射	~270nm	0.0W/m <sup>2</sup>	20°C
		270~300nm	5.2W/m <sup>2</sup>	
		300~320nm	13.1W/m <sup>2</sup>	
		320~360nm	12.1W/m <sup>2</sup>	
	360~400nm	1.1W/m <sup>2</sup>		
	8 時間湛水	暗黒		

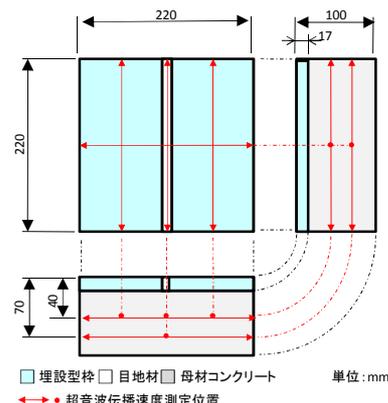


図-2.15 超音波伝播速度測定位置

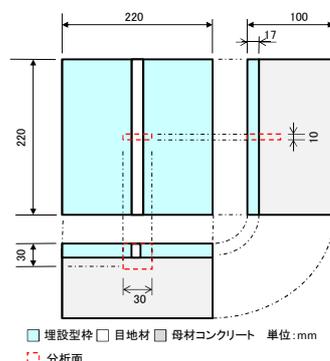


図-2.16 EPMA 面分析用試料の採取位置



写真-2.11 目地部のひび割れ状況 (エポキシ変成シリコン樹脂①)

キシ変成シリコン樹脂①は、紫外線照射直後(16 時間後)に黄色に変色が生じており、また、紫外線照射 500 時間後には、写真-2.11 に示すような亀甲状のひび割れが発生し、1000 時間後にはひび割れの密度が増加

埋設型枠 目地構造	埋設型枠版A 通し目地		
目地材	エポキシ変成シリコン樹脂①	エポキシ変成シリコン樹脂②	シリコン樹脂
0 時間			
1000 時間			
埋設型枠 目地構造	埋設型枠版A 通し目地	埋設型枠版B 表目地	—
目地材	複合目地	エポキシ樹脂	—
0 時間			/
1000 時間			

図-2.17 耐候性試験前後の目地部の外観（ケース4 供試体）

した。エポキシ変成シリコン樹脂②は、紫外線照射約 100 時間後から端部の白亜化（チョーキング）が生じ、紫外線照射時間の経過に伴って白亜化した範囲が拡大し、1000 時間後には、全体の 2/3 程度となった。エポキシ樹脂は、照射直後（16 時間後）に黄色に変色したが、それ以降は大きな変化は見られなかった。また、シリコン樹脂および複合目地については、外観の目立った変状は見られなかった。

以上のように、一部の目地材については、紫外線の照射によって変状が生じており、特にエポキシ変成シリコン樹脂については、変状の形態は異なるものの、紫外線照射前後の変化が顕著であった。

## (2) 一面凍結融解試験後の変状

紫外線照射後に一面凍結融解試験 300 サイクルを終了した場合、埋設型枠版Aではいずれのケースにおいても埋設型枠自体にスケーリングの発生は認められなかったが、埋設型枠版Bでは、写真-2.12 に示したように、埋設型枠版自体に極軽微なスケーリングが発生した。これは、埋設型枠版Bはコンクリート版を製作した後に樹脂を含浸させて製造しているため、樹脂の含浸が十分でない部分があった可能性があり、この影響により部分的に軽微なスケーリングが生じたことが考えられる。

写真-2.13 にエポキシ変成シリコン樹脂①の一面

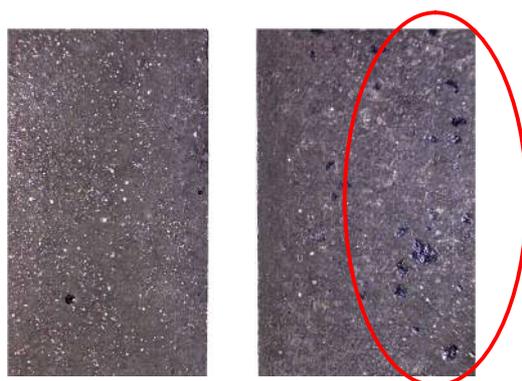


写真-2.12 埋設型枠版Bの軽微なスケーリング



写真-2.13 一面凍結融解試験後の目地材の状況

凍結融解試験後の目地材の拡大写真を示す。エポキシ変成シリコン樹脂①については、写真に示すように目地材表面に多数の細かいひび割れが確認できるが、

これは写真-2.11 に示したように紫外線照射 1000 時間経過時点で既に確認されており、目地材表面は凍結融解試験 300 サイクル後でも大きな変状は確認されなかった。また、他の目地材については、紫外線照射 1000 時間+凍結融解 300 サイクル後においても、型枠からのはく離やひび割れ等は確認できなかった。

### (3) 超音波伝播速度

図-2.18 にケース5の各供試体の透過法による超音波伝播速度を示す。いずれも母材コンクリートは同一配合であるが供試体や測定箇所により超音波伝播速度は上下しており、目地部を含まない型枠直下の深さ 4cm の速度が比較的小さい傾向がみられるが、各供試体の

測定位置や深さによる違いに一定の傾向はみられない。

図-2.19 に各供試体の相対超音波伝播速度 (0 サイクル時点における超音波伝播速度を 100%とした場合の超音波伝播速度の変化割合) を示す。全体としては、多少の上下はあるものの凍結融解 300 サイクル後においても相対超音波伝播速度の大きな低下はみられず、ほぼ横ばいか若干増加の傾向もみられ、凍結融解作用による劣化の兆候はみられない。なお、凍結融解作用後に相対超音波伝播速度が 100%以上となっているものについては、コンクリートの水和が進行し、組織が緻密化したことが考えられる。

### (4) 引張接着強度

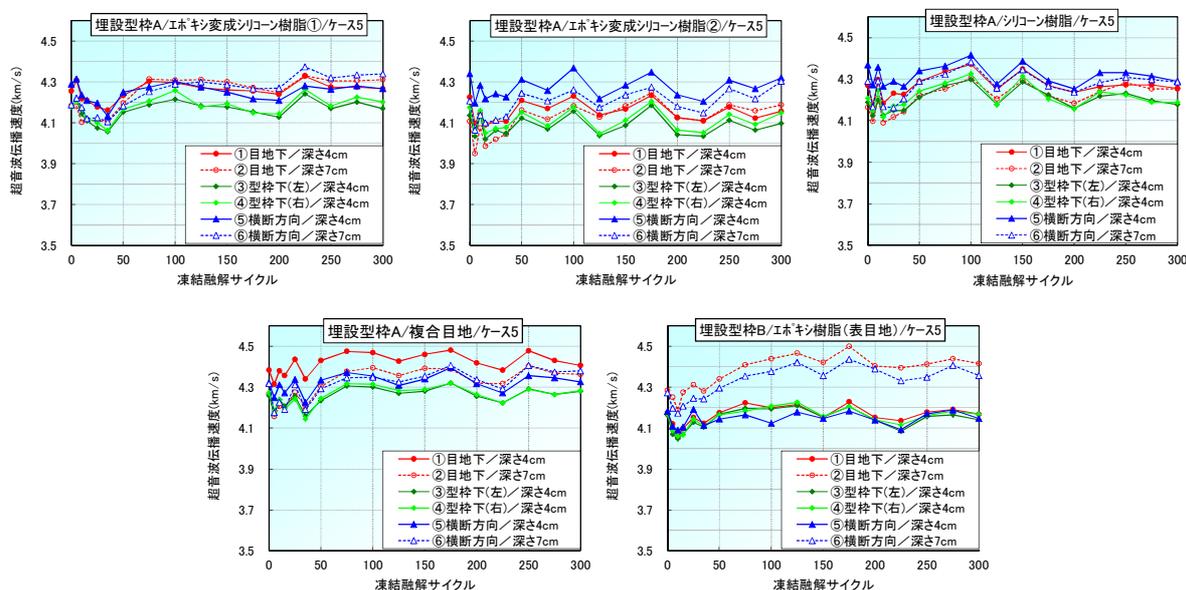


図-2.18 超音波伝播速度 (ケース 5)

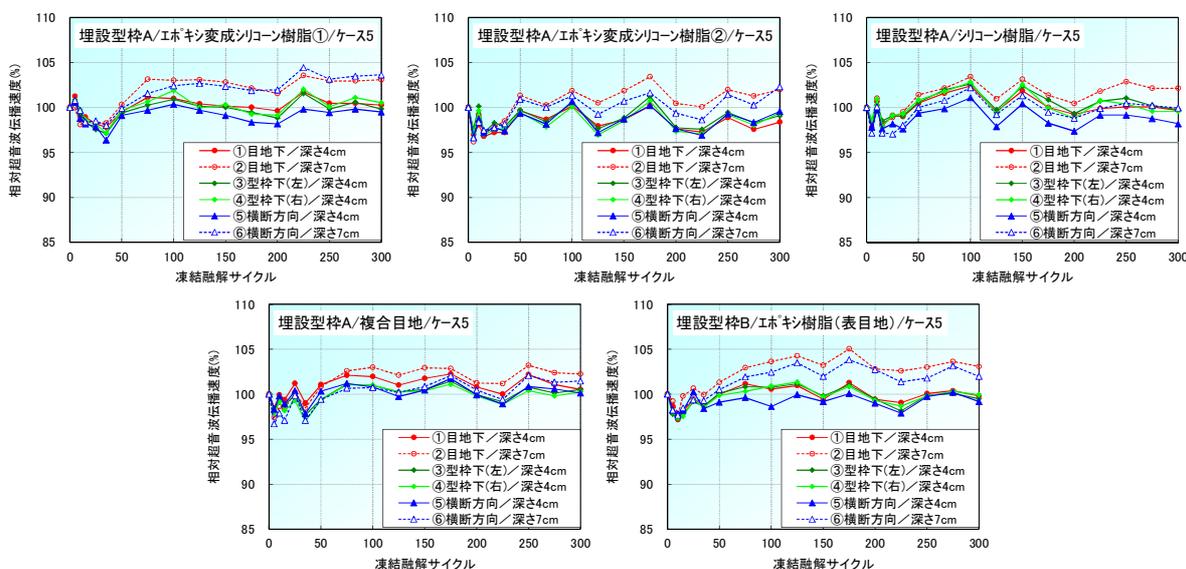


図-2.19 相対超音波伝播速度 (ケース 5)

紫外線照射後に一面凍結融解試験 300 サイクルを終了したケース5の供試体の引張接着強度を図-2.20に示す。比較のため、ケース1から4の結果も合わせて表示し、埋設型枠版の一面凍結融解後のプルオフ強度と母材コンクリート表層部のプルオフ強度（凍結融解試験開始材齢 28 日以降）をそれぞれ示している。なお、埋設型枠版Aを用いた場合については、目地部に幅 3cm のバックアップ材を取り付けており、中央部 3cm 部分は埋設型枠版と母材コンクリートの付着がないため、付着面積を 70%として引張接着強度を補正計算している。また、埋設型枠版Bを使用した場合については、母材コンクリートとの付着を高めるために型枠裏面に埋め込まれた砕石の分布密度が、特に目地付近の型枠端部で低かったため、実際の試験後の写真画像を用いて付着が無い領域をパソコン上で確認しながらその面積を実測し、平均的な付着面積率を 50%として引張接着強度を補正計算している。

埋設型枠版Aを使用した供試体のケース 1~4 における付着強度は、いずれの試験ケースにおいても、劣

化を与えていない母材コンクリートの表層強度と同等であり、埋設型枠版と母材コンクリートの付着強度は低下していないと考えられていたが、ケース5では特にシリコン樹脂目地材および複合目地の付着強度が大きく低下した。これについては、付着強度試験は 1 配合当たり 3 供試体で実施しているが、いずれも供試体ごとのばらつきが大きかった。写真-2.14 に目地材としてシリコン樹脂を用いた供試体の、写真-2.15 に複合目地を用いた供試体のうち最も付着強度が小さかった供試体の埋設型枠版と母材の付着状況をそれぞれ示す。各写真の左側は母材コンクリート側、右側は埋設型枠側である。シリコン樹脂を用いた供試体については、右側の埋設型枠側写真の右半断面には母材コンクリートの付着がみられるが、左半断面には母材コンクリートの付着はなく、埋設型枠の表面面がほぼそのまま確認された。また、埋設型枠裏面に付着を高めるために埋め込まれている砕石は母材側にあり、取れた骨材の跡をみると、くぼみがほとんどみられなかった。このことから、埋設型枠版の砕石の埋め込みが十分で

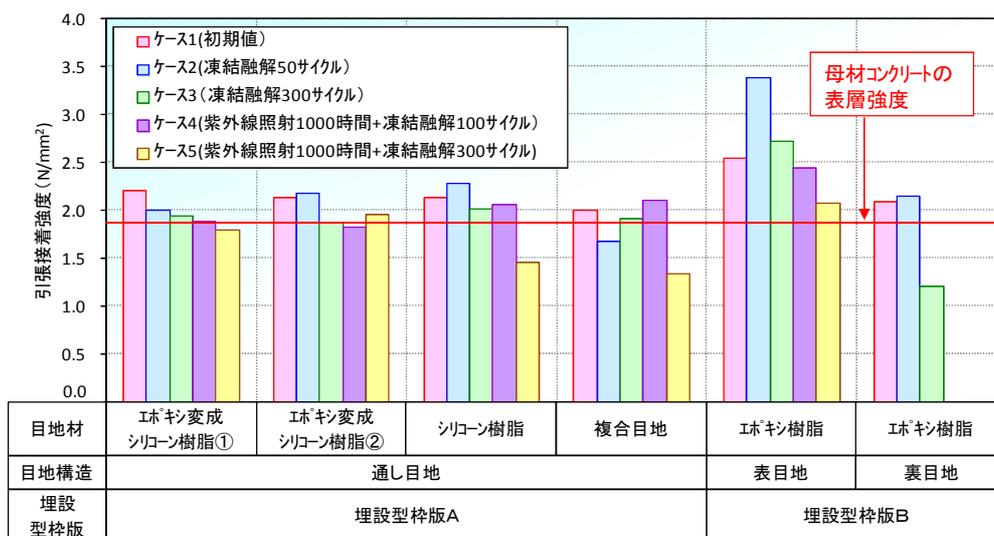


図-2.20 引張接着強度

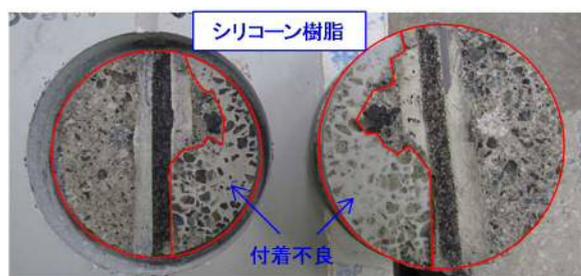


写真-2.14 埋設型枠版と母材の付着状況  
(目地材：シリコン樹脂)

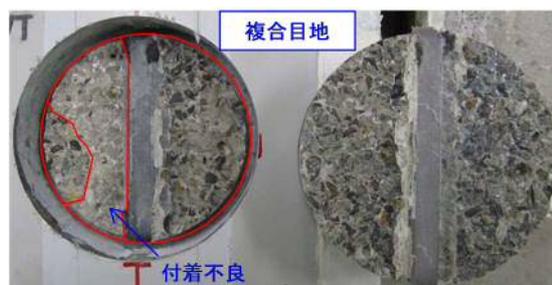


写真-2.15 埋設型枠版と母材の付着状況  
(目地材：複合目地)

なかったことが影響したものと考えられる。一方、複合目地を用いた供試体については、母材コンクリート側の写真から、左半断面には母材コンクリートのはく離がほとんど無く、埋設型枠との付着が部分的に不良だったことが確認できる。その原因は明らかではないが、コンクリート打設時の締固め不足等の影響が考えられる。なお、目地材と埋設型枠版は隙間無く接着していることを試験後の供試体により直接確認しており、一面凍結融解試験中に試験水が目地材と埋設型枠版の隙間から侵入し、凍結融解作用により付着が低下したのではないと判断される。

以上から、接着強度を単純に平均値のみで評価することは不適切であり、これらのケースについては埋設型枠および目地材の劣化が確認されていないことを考慮すると、凍結融解作用による大きな劣化が生じたとは考えにくく、埋設型枠の付着を高めるために埋設型枠に埋め込まれた砕石や供試体作製時の締固めなどが影響したものと考えられる。このため、製品の品質や施工のバラツキも含めて評価する必要があることを確認した。

一方、埋設型枠版Bを使用したケース5の供試体は、凍結融解のみを与えたケース3と比べると、付着強度が低下する傾向もみられたが、母材コンクリートの表層強度と大きく変わらなかった。

### (5) 塩化物イオンの分布

図-2.21にケース5の供試体の分析面の実態画像と塩化物イオンの分布を示す。画像左側が埋設型枠版側(表面側)であり、表面から16mm程深い箇所が埋設型枠と母材コンクリートの付着部に該当する。なお、塩化物イオン濃度の高い順に白→黒の色で表示している。また、塩分濃度分布は、併せて実施した酸化カルシウムおよび二酸化ケイ素の面分析結果より骨材部分を除いたセメントペースト分に対する塩化物イオン濃度を示している。

埋設型枠版Aについては、いずれも塩化物イオンの浸透は見られなかった。一方、埋設型枠版Bを用いた供試体において、埋設型枠表層部、目地材界面および埋設型枠の突き合わせ部で塩化物イオンの浸透がみられたが、母材内部までの塩化物イオンの浸透は確認されなかった。図-2.22にEPMA面分析の結果から試料表面からの塩化物イオンの濃度分布を算定したものを示す。埋設型枠版Bを使用したものは、埋設型枠部分の表層5mm程度まで塩化物イオンが浸透しているが、それ以深には浸透していないことがわかる。なお、母材コンクリートの部分が他のケースよりも若干高く

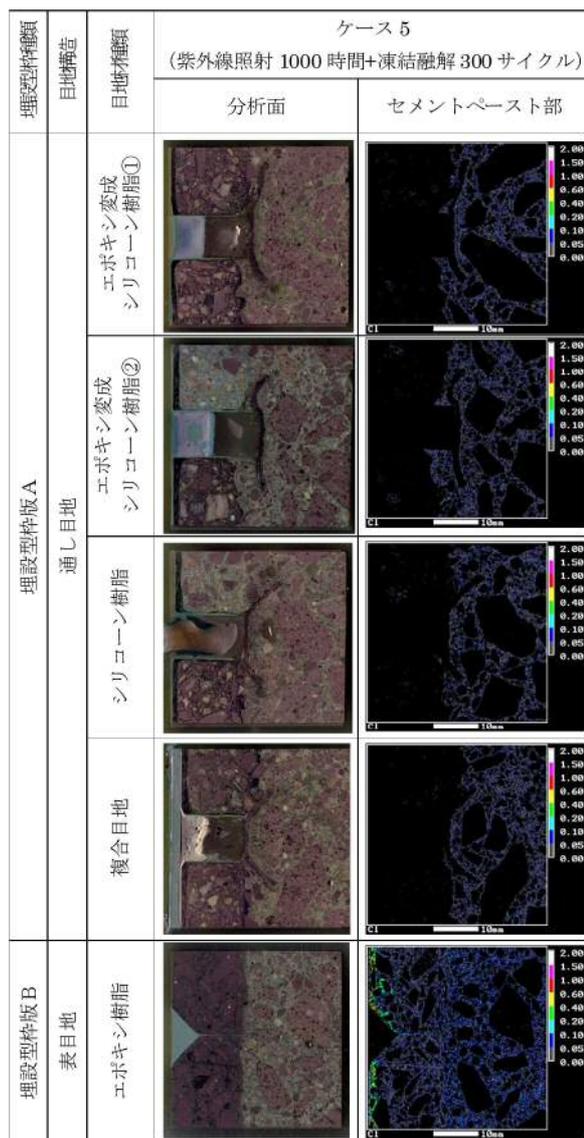


図-2.21 塩化物イオンの分布 (ケース5)

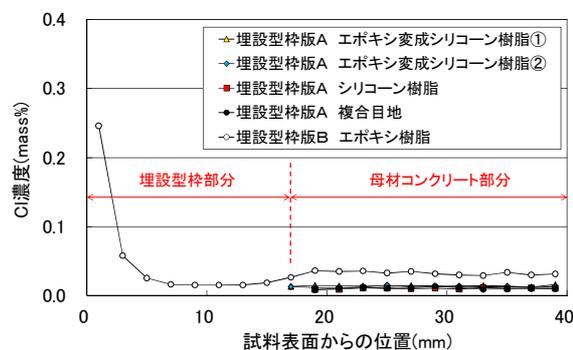


図-2.22 塩化物イオンの分布 (ケース5)

なっているが、深さ方向の濃度差がみられず平坦な傾向を示していることから、試験溶液の塩化物イオンが浸透したとは考えにくく、母材コンクリートまでは影

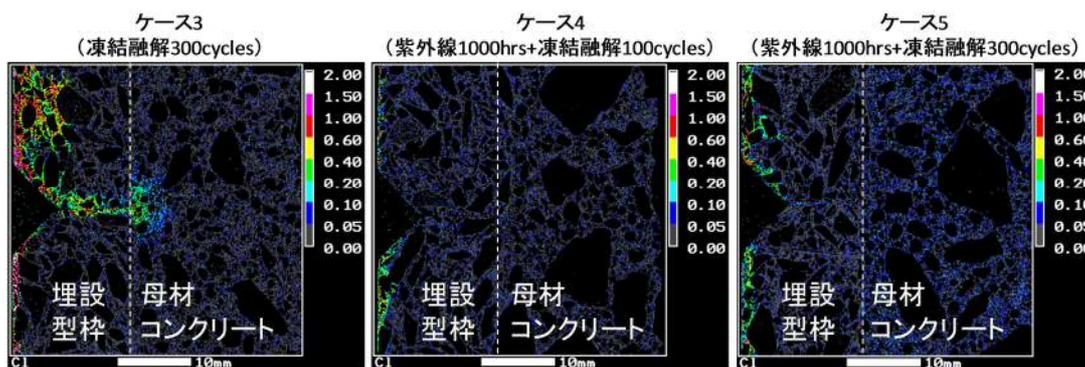


図-2.23 埋設型枠版Bの塩化物イオンの分布（試験ケース比較）

響が無いものと判断される。

このように、埋設型枠版Bについては、埋設型枠表層部と目地材界面に沿って塩化物イオンが浸透している状況が確認され、ケース3およびケース4においても塩分の浸透が確認されている。

図-2.23に埋設型枠Bを用いた供試体のケース3からケース5における塩化物イオンの分布状況を示す。図中の白線（点線）より左は埋設型枠部、右は母材コンクリートである。ケース3は紫外線照射を行わずに凍結融解を300サイクル実施したものであるが、劣化作用後は埋設型枠表層部にも若干のスケリングが確認されており、埋設型枠表層部や目地材に沿う形で塩分が浸透し、埋設型枠の突き合わせ目地材を通して母材コンクリートにも塩化物イオンが浸透する状況であった。これに対して、紫外線を1000時間照射した後に凍結融解作用を与えたケース4と5でも、埋設型枠表層部と目地材に沿う形で塩化物イオンが浸透しているが、ケース3と比べると塩化物イオンの浸透は少ない。紫外線照射1000時間後の目視観察では、目地材自体の劣化は確認されていないことから、ケース4と5で確認された埋設型枠中への塩分浸透に対する紫外線の影響は小さいと考えられ、紫外線照射を行っていないケース3で塩分浸透やスケリングが確認されていることを考慮すると、埋設型枠の樹脂の含浸の程度のみによる凍害の程度が影響していることが考えられる。

## 2.5 埋設型枠工法の耐久性(大型供試体による耐久性の評価)

写真-2.2に示したように、実際に確認されている目地材の変状として、埋設型枠版と目地材の剥離があるが、これは目地材の紫外線劣化により硬化し、埋設型枠版の温度変化に伴う伸縮に追従出来なくなり、剥離が生じたものと考えられる。他方、2.4で検討してきた供試体は寸法が小さい(□22×10cm)ため、温度変

化により伸縮作用が生じたとしても目地部にかかる収縮量は実際の構造物や現地の模型供試体に比べて小さいことから、上記のような変状を再現することは困難である。このため、別途大型の室内試験用供試体を作製して耐久性の評価を行った。

### 2.5.1 供試体作製

大型供試体の埋設型枠版には、現地模型供試体において目地部の劣化が顕著であった表-2.1の埋設型枠版Aタイプのみを使用し、目地材には2.4でも検討した2種類のエポキシ変成シリコーン樹脂①、②と、シリコーン樹脂の3種類について耐久性を調べた。供試体の形状を図-2.24に示す。寸法は660×440×100mmであり、中央部に目地を設ける形状(目地間隔10mm)とし、440×325mmの埋設型枠版2枚を表面に配置した。コンクリートの配合および養生方法は小型供試体と同一とした。養生後、目地材を施工し、試験水を湛水するための土手を埋設型枠面に取り付け、試験面以外をエポキシ樹脂でコーティングした。

### 2.5.2 試験概要

大型供試体の耐久性試験は、紫外線照射3000時間+

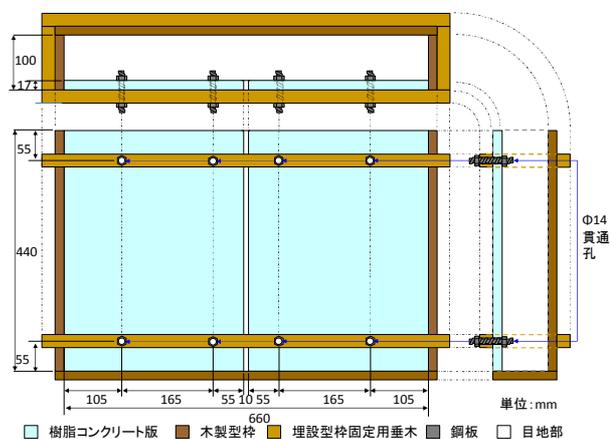


図-2.24 大型供試体の形状

一面凍結融解試験 300 サイクルの最も厳しい条件で実施した。耐久性の評価は、目地部を含めた埋設型枠版表面の目視観察と、一面凍結融解試験時の目地間や母材コンクリートの温度変化に伴う変位を測定するために、紫外線照射 1000 時間終了時点で図-2.25 に示すように長さ変化を測定するためのコンタクトゲージプラグを貼り付け、凍結時と融解時の変位をコンタクトゲージにより測定した。

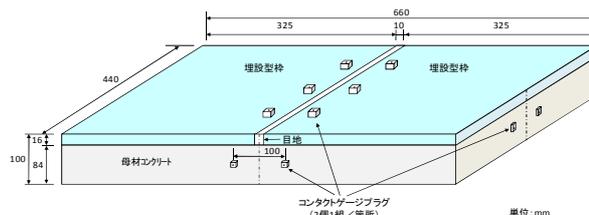


図-2.25 大型供試体の長さ変化測定箇所

### 2.5.3 大型供試体の耐久性試験結果および考察

#### (1) 目視による評価

小型供試体と同様、エポキシ変成シリコーン樹脂①は紫外線照射後 1000 時間程度で目地材表面に亀甲状の微細なひび割れが生じ、2000 時間で密度が増加したが、それ以降は大きな変化は無かった。その他の目地材については、大きな変状は確認できなかった。また、紫外線照射 3000 時間後、一面凍結融解試験を 300 サイクル行ったが、目地材表面の劣化や埋設型枠版からの剥離はみられず、埋設型枠版や母材コンクリート自体にも変状は確認できなかった。このため、一面凍結融解試験 300 サイクル終了後、目地材と埋設型枠の付着部の一部にカッターで切込み（埋設型枠の片面側、供試体の半分程度）を入れ、人工的に目地材が剥離した状況を再現し、さらに一面凍結融解試験を 150 サイクルまで実施した。しかし、その後 150 サイクル終了した時点においても、目視上の変状は確認できなかった。

#### (2) 長さ変化測定結果

各部位における長さ変化は、凍結時に収縮、融解時に膨張の傾向を規則的に繰り返し、凍結融解 300 サイクルでは大きな変化が確認されなかった。図-2.26 は各部位における凍結と融解時の長さ変化の絶対量の平均値を示している。横軸ラベルの「型枠目地間」は、図-2.25 の埋設型枠上面の目地越しの変位、「型枠部」は目地を挟まない埋設型枠部の変位、「母材(目地またぎ)」は供試体側面母材コンクリートの目地直交方向の変位、「母材(目地なし)」は母材コンクリートの目地平行方向の変位をそれぞれ示している。型枠部と母材コンクリートに大別してみると、型枠部の方がわずかに変位が大きい傾向があるが、これは線膨張係数の違いによるものと考えられる。結果的に、埋設型枠と母材コンクリートは拘束し合い、型枠間の変位が目地材の伸び能力の範囲内であったことが確認された。

#### (3) 埋設型枠と母材の引張接着強度

上述のとおり、目視上の変化が確認できなかったことから、劣化試験終了後に埋設型枠目地部と目地の無い埋設型枠部でプルオフ試験を行い引張接着強度を確

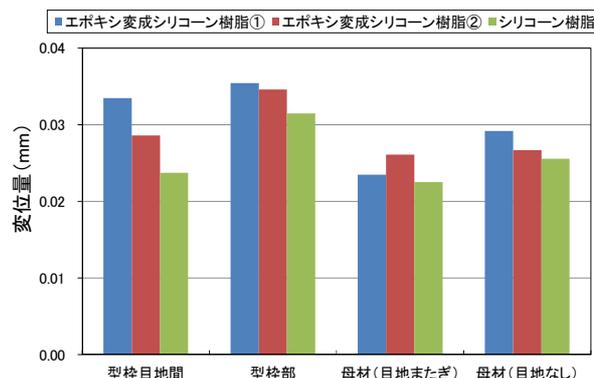


図-2.26 各部位における長さ変位量の絶対値

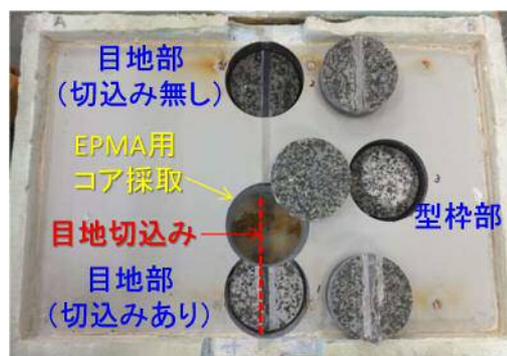


写真-2.16 引張接着試験後の状況例

認した。写真-2.16 に引張接着試験後の状況例を示す。なお、コア採取箇所は後述する EPMA 試験用のものであり、引張接着試験後にコアを採取している。

図-2.27 に型枠部の強度を基準とした埋設型枠と母材の引張接着強度比を示す。なお、目地部の引張接着強度については、2.4.4(3)でも述べたように、バックアップ材による付着の低下があるため、付着面積を70%として補正した値を用いている。図中の型枠部のグラフに付記した数値は引張接着強度であり、シリコーン樹脂を用いた供試体で比較的小さい値となったが、試験後の破断面に劣化の兆候は見られなかった。

目地部は型枠部より強度が小さい傾向があり、特に切込み有りの方が強度が低下する傾向が確認された。また、エポキシ変成シリコーン樹脂①は比較的強度比

が小さい傾向を示した。目地材にカッターで切り込みを入れた際、いずれの目地材も表面以外の内部は弾性を保持しており、切込みを入れても見た目上は切込み箇所が塞がる状態であった。他方、エポキシ変成シリコン樹脂①は、紫外線照射後より目地材表層に微細なひび割れが生じており、他の目地材に比べて追従性が低下していた可能性があることを考慮すると、目地材に切込みを入れた後、内部に水が浸入し、その後の凍結融解作用で母材との付着が低下した可能性がある。なお、エポキシ変成シリコン樹脂②の目地部切込み無しで強度比が大きく低下したが、試験後の破断面をみると、埋設型枠裏面に埋め込まれている砕石の突起が少なく、型枠の樹脂と思われる部分が破断面の半分程度を占めていたことから、これにより強度が小さくなったと考えられる。

#### (4) EPMA 面分析による塩化物イオンの浸透量

供試体内部への塩化物イオンの浸透の有無を確認するため、EPMA 面分析を行った。写真-2.16 に示したように、引張接着試験後に目地材に切込みを入れた箇所からφ10cmのコアを採取し、目地に直交する方向に幅4cm×深さ4cm（埋設型枠部の厚さを含む）×厚さ1cmの試料を切り出し（切り出しイメージは図-2.16 参照）、分析面の鏡面研磨およびアルミニウムの蒸着を行って、塩化物イオンの分布を調べた。分析の対象は、エポキシ変成シリコン樹脂①とシリコン樹脂を使用した供試体とした。

図-2.28 に EPMA 面分析結果を示す。分析試料中央上部の白色部分が目地材であり、いずれも左側に切れ込みが入っている。いずれの試料においても埋設型枠と母材コンクリートの界面に塩分の侵入が認められ、塩化物イオンは、切れ込み位置によらず左右に、バックアップ材を回り込む形で母材コンクリートへ浸透している。また、エポキシ変成シリコン樹脂①の方がシリコン樹脂よりも塩化物イオンの浸透量が多く、より深く浸透していることが確認できる。図-2.29 に EPMA 面分析結果から算出した単位コンクリートあたりの塩化物イオン濃度を示す。コンクリートの単位容積質量を  $2.3t/m^3$  として計算したものであるが、エポキシ変成シリコン樹脂①では、塩化物イオンが相当量浸透していることが確認できた。目地材に変状が無い場合には、図-2.21 に示したように、内部に塩化物イオンが侵入していないことから、ここで確認された塩化物イオンは目地材の切り込みから侵入したものと推測でき、紫外線等により劣化が大きい場合には、より塩化物イオンの侵入が大きいことが確認できた。また、

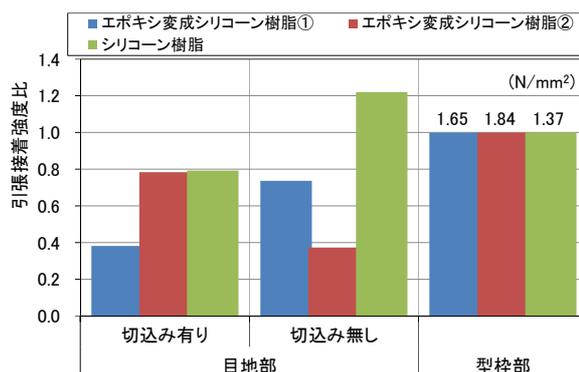


図-2.27 埋設型枠と母材の引張接着強度比 (型枠部強度に対する比)

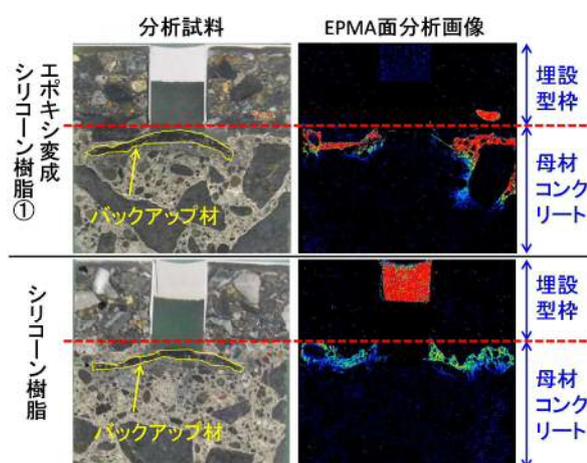


図-2.28 EPMA 面分析結果

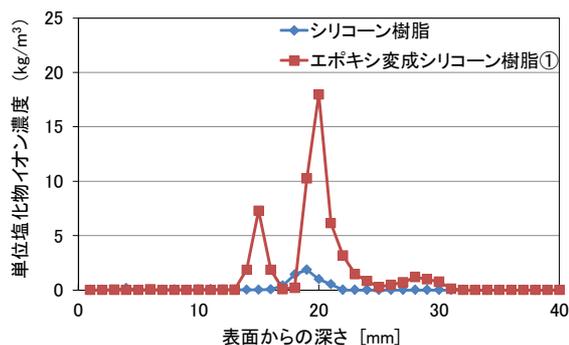


図-2.29 EPMA 面分析より算出した塩化物イオン濃度

図-2.27 で目地部の特に切込み有りで引張接着強度が低下したのは、目地部からの塩水の浸入により凍結融解作用が生じた可能性が高いことが確認できた。

以上から、埋設型枠工法は、目地部から劣化が生じやすく、適切な目地材選定の重要性が明らかとなった。また、目地部は埋設型枠の端部であり、型枠端部は母

材コンクリートとの付着を高めるために埋め込まれる碎石の分布にバラツキが多いことに加え、コンクリート打設時の漏れ防止のバックアップ材の影響など、付着が低下しやすい箇所であるため、母材コンクリート打設時には入念な施工が重要である。さらに、埋設型枠の種類によっては、型枠端部のポリマー含浸等が不足することも考えられ、製品製造時に留意が必要なほか、構造物に要求される性能に応じて、埋設型枠の種類を適切に選定する必要があることが明らかとなった。

## 2.6 目地材の耐久性試験

### 2.6.1 試験概要

埋設型枠工法の目地材は、温度変化等による埋設型枠版の変位に対して追従する必要があり、積雪寒冷地での適用を考慮した場合、低温環境下でも優れた追従性が必要である。また、紫外線劣化に対しても優れる耐久性を有する材料を選定する必要がある。このため、表-2.3 に示した目地材のうち、エポキシ変成シリコン樹脂①・②、シリコン樹脂、エポキシ樹脂を対象とし、低温環境下および紫外線劣化による引張特性の変化に関して検討を行った。

### 2.6.2 試験体の作製

試験体の作製は、エポキシ変成シリコン樹脂①・②、シリコン樹脂については、まず 2mm 厚の樹脂シートを作製し、温度 23℃、湿度 50%の環境下で 4 週間養生後、試験体打抜刃を用いて図-2.30 に示すダンベル形に成形した。また、エポキシ樹脂については、硬化体が硬く、打抜刃による成型が困難であったことから、上述のシリコン樹脂シートのダンベル形の打抜部分に、剥離材（シリコンスプレー）を塗布した後にエポキシ樹脂を充填してダンベル形に成型し、温度 23℃、湿度 50%の環境下で 4 週間養生した。

### 2.6.3 目地材の耐久性評価

引張試験は、以下に示す 5 条件下において、JIS K 6251「加硫ゴム物理試験方法」に準拠して実施している。なお、紫外線照射は、サンシャインウェザオメーターを用いて実施し、JIS A 1415「高分子系建築材料の実験室光源による暴露試験方法」WS-A 法に準拠し、ブラックパネル温度は 63℃とし、48 分間紫外線照射を行った後、暗黒環境で 12 分間水噴霧を行った。

- ・標準：養生→23℃で引張試験
- ・氷点下：養生→0℃(1日)→0℃で引張試験
- ・低温：養生→-20℃(1日)→-20℃で引張試験
- ・紫外線照射 1000 時間：養生→サンシャインウェザオメーター1000時間→23℃(1日)→23℃で引張試験
- ・紫外線照射 3000 時間：養生→サンシャインウェザオ

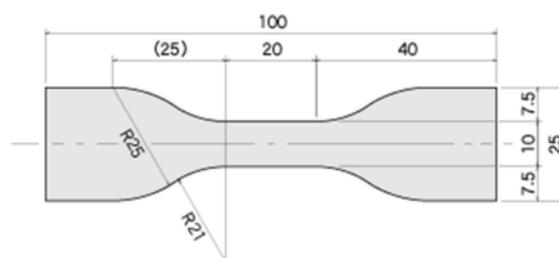


図-2.30 目地試験体の形状

メーター3000 時間→23℃(1日)→23℃で引張試験

サンシャインウェザオメーターによる耐候性試験と 2.4.3(1)耐候性試験に示したコンクリート供試体で実施している紫外線蛍光灯による劣化試験法（試験条件は表-2.5 参照）を比較するため、紫外線蛍光灯 1000 時間と 3000 時間後の試験片について引張試験を実施した（23℃で引張試験）。以下に、各試験条件における目地試験体の引張強度と伸び率について述べる。

#### (1) 引張強度

図-2.31 に目地試験体の引張強度を示す。左図は引張強度を、右図は「標準」の試験値に対する相対比を示している。なお、エポキシ樹脂は他の目地材に比べ引張強度が極めて大きいため実測値の 1/10 で表記し、同一図で各試験条件下における差を評価しやすいようにしている。したがって、エポキシ樹脂の引張強度の実測値は左図の縦軸の目盛りを 10 倍した値となる。

紫外線蛍光灯照射後の引張強度は、エポキシ変成シリコン樹脂②とシリコン樹脂では、サンシャインウェザオメーターによる紫外線照射後の試験値よりも低下したが、他の目地材ではサンシャインウェザオメーターによる劣化後の方が低下した。これらの試験は紫外線波長の違いがあり<sup>2)1)</sup>、サンシャインウェザオメーター試験は、UVA 紫外線のため比較的波長領域が大きく（315～400nm）、一方の紫外線蛍光灯は UVB 紫外線のため短波長（280～315nm）である。既往の研究<sup>2)1)</sup>によると、短波長の方が劣化促進効果が高いとされているが、紫外線による樹脂材の劣化は芳香族系の樹脂構造を有するものほど大きく、反対に脂肪族系の樹脂構造が主体のものでは劣化促進作用が強調されないとされており、詳細には樹脂の構造も含めた評価が必要である。本研究においては、紫外線蛍光灯による劣化促進作用は、サンシャインウェザオメーターによる試験とほぼ同等か若干小さい傾向であった。なお、エポキシ変成シリコン樹脂②およびシリコン樹脂は、いずれの紫外線作用後も引張強度の低下は「標準」の 80%程度と紫外線による劣化の程度は比較的小さかつ

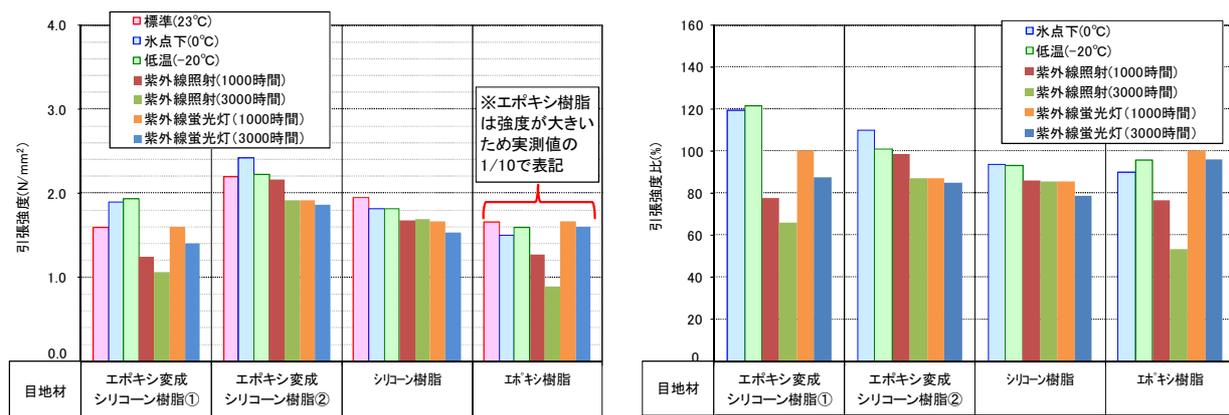


図-2.31 目地材の引張強度

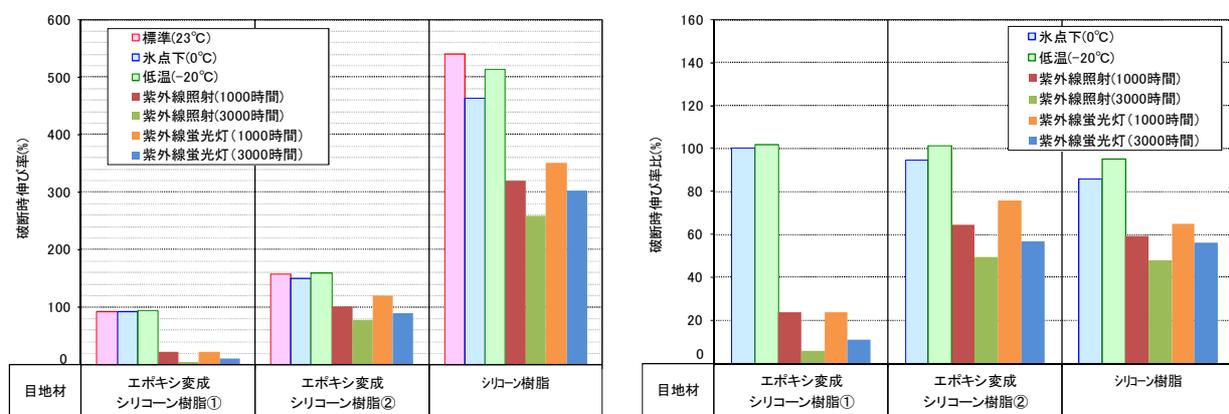


図-2.32 目地材の破断時伸び率

た。

## (2) 伸び率

図-2.32 に破断時の伸び率を示す。左図は破断時の伸び率を、右図は「標準」の試験値に対する相対比を示している。なお、エポキシ樹脂は伸びがないため除外している。

紫外線蛍光灯と紫外線照射を比較すると紫外線照射の方が伸び率はわずかに低下する傾向がみられ、紫外線蛍光灯 3000 時間後の劣化程度は、サンシャインウエザオメータ 1000 時間と 3000 時間の中間程度であった。これらのことから、上述のコンクリート供試体による耐候性試験として行った紫外線蛍光灯 1000 時間の劣化促進作用は、促進性の観点からは比較的小さく、結果として目地材に大きな劣化が生じなかったものと考えられる。しかし一方で、エポキシ変成シリコン樹脂①に着目すると、紫外線蛍光灯 1000 時間でも伸び率は 20%まで低下し、「標準」試験値に対しても 20%程度しかないことから、コンクリート供試体において目地材表面にひび割れが発生していたのは、紫外線劣

化による伸び率の低下が原因と考えられる。一方、その他の目地材は、「標準」に対する相対比としては、紫外線の影響により 50%程度まで低下するが(右図)、伸び率の絶対値(左図)は、エポキシ変成シリコン樹脂②で 90%程度、シリコン樹脂では 250%以上の伸び率を示しており、引張強度を考慮してもこれらの目地材は比較的耐候性に優れた材料と判断できる。

### 2.6.4 耐候性に優れた目地材選定条件の整理

実環境下における目地材の変状としては、主に目地材自体にひび割れ(亀裂)が発生するケースと、目地材と埋設型枠の付着が切れ隙間が生じるケースの二通りが考えられる。過年度に実施した埋設型枠版Aを適用した現地模型供試体の調査結果によると、ひび割れは目地材の表面部分に限定されており、変状の主な形態としてはむしろ付着切れの形態であった。図-2.33に現地模型供試体で調査した季節変動に伴う埋設型枠版間の変位を示す。測定は8、10、12月に実施し、埋設型枠版間にコンタクトゲージプラグを貼付け、コンタクトゲージにより測定を行った。測定は複数箇所で実

施したが、気温の低下により型枠版間の開きが大きくなっており季節変動が確認された。このため、目地材と型枠の間に隙間が生じた主な要因は、温度変化に伴う埋設型枠版の伸縮と考えられる。なお、変位の絶対値は線膨張係数による理論計算値よりも大きく、測定精度については検討が必要である。

図-2.34 に紫外線照射 3000 時間後の伸び率と伸び率あたりの引張強度の関係を示す。当然ではあるが、伸び率が高いほど伸び率あたりの引張強度は小さくなる。言い換えれば、伸びる材料ほど、実際に変位が生じた場合に目地材にかかる力は小さくなるため、材料自体の亀裂や型枠との付着に対しても有利になることを意味している。これを考慮すると、目地材の選定にあたっては、伸び率（追従性）が極めて重要な特性になる。なお、低温環境下での引張特性については、図-2.31 および図-2.32 に示したように、いずれの目地材も低温下で大きく低下しないことを確認している。

図-2.35 に紫外線照射時間と伸び率の関係を示す。なお、各マークは実験値のプロット、実線はその回帰直線である。また、左図は横軸を対数目盛として対数近

似したもの、右図は横軸を普通軸として直線近似したものである。

左図の対数近似した場合、実測値と近似直線は良好な相関を示し、近似直線からの予測ではエポキシ変成シリコン樹脂①では紫外線照射 3000 時間弱で伸び率がほぼ 0 となっているのに対し、エポキシ変成シリコン樹脂②およびシリコン樹脂では 1000 万時間程度まで伸び率が確保出来ることになる。

一方、エポキシ変成シリコン樹脂①を使用した現地模型供試体においては、暴露 3 年で目地材の剥離が確認されたことから、この時点でエポキシ変成シリコン樹脂①の伸び率が 0 になっていたと仮定すると、紫外線照射 3000 時間が実環境下での 3 年間に相当するとみなすことが出来る。これから、単純に紫外線照射 1000 時間を実環境下 1 年と仮定すると、エポキシ変成シリコン樹脂②およびシリコン樹脂は半永久的に目地材の伸び率が確保されることとなる。しかし、図-2.36 示すように、試験装置の関係上、室内試験では紫外線照射後に引張試験を行ったのに対し、実環境下においては紫外線が常に照射され続けている状況で、埋

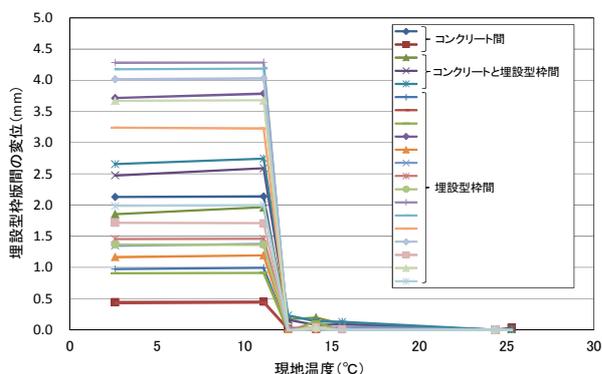


図-2.33 現地模型供試体の型枠版間の変位

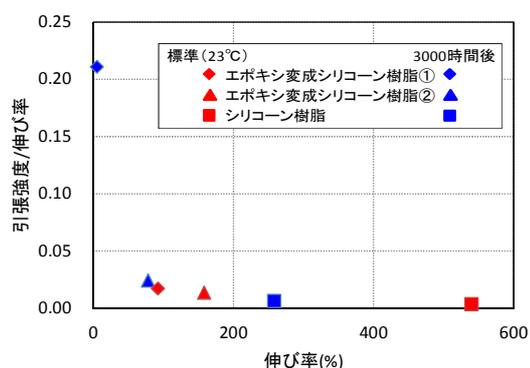


図-2.34 目地材の伸び率と伸び率あたりの引張強度

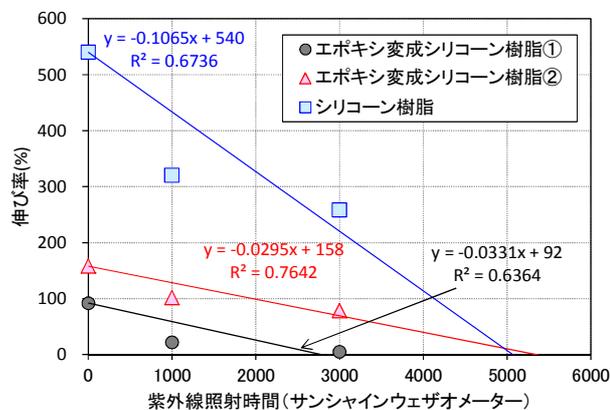
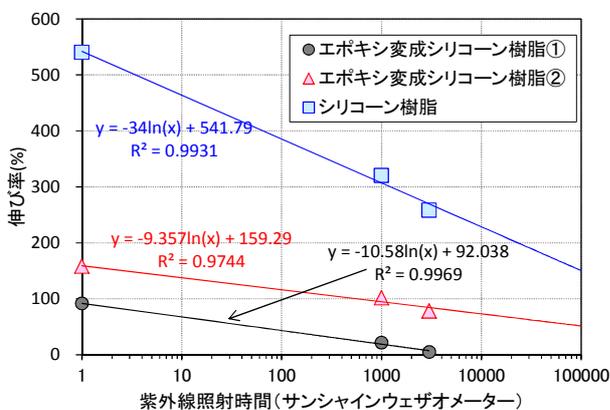


図-2.35 紫外線照射時間と伸び率の関係

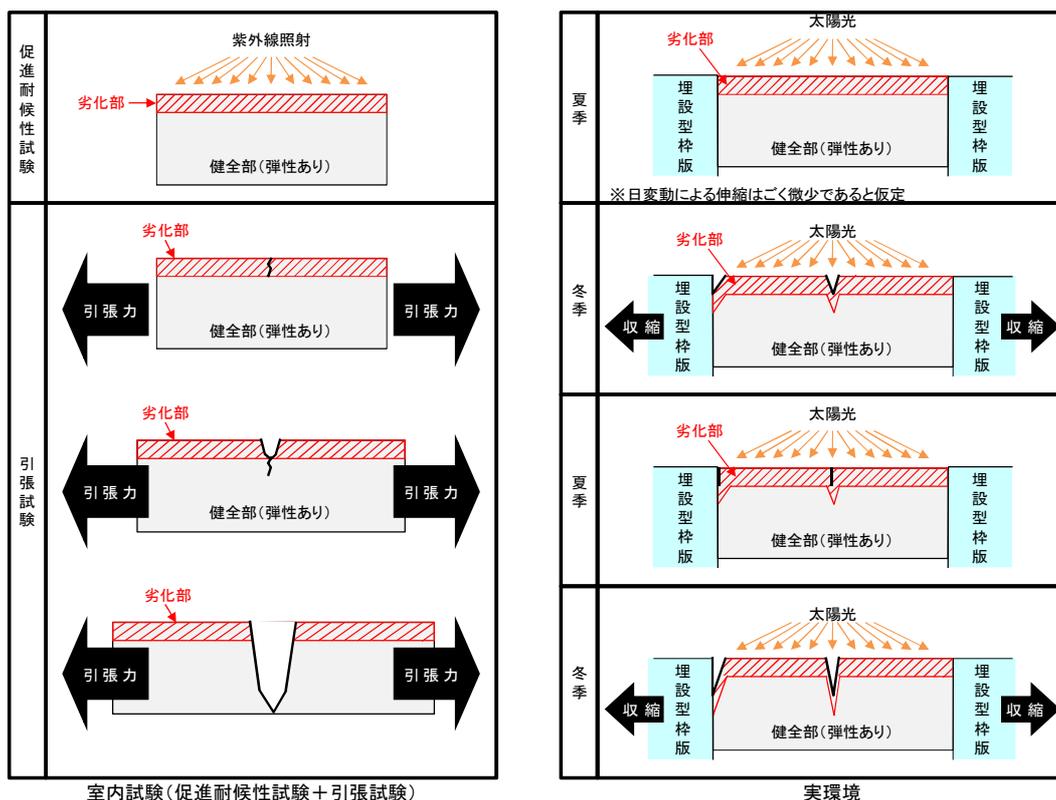


図-2.36 室内試験と実環境での劣化形態のイメージ

設型枠版の伸縮によって目地材に引張・圧縮力が複合して作用するため、疲労により表層劣化部にひび割れ・剥離が発生した場合、その部分が紫外線劣化を受けることで、紫外線劣化が深さ方向に進行しやすくなることに加えて目地材が繰り返しの引張・収縮を受けると考えられる。このため、室内試験で求めた実測値を対数近似して推定した供用年数に比べ、より短期間で劣化が生じる可能性があることから、安全側に評価する必要がある。このことから、図-2.35 右図は、実測値を直線近似したものであるが、これによると、エポキシ変成シリコン樹脂①は、紫外線照射約 3000 時間で伸び率がほぼ 0 となり、エポキシ変成シリコン樹脂②およびシリコン樹脂では紫外線照射約 5000 時間で伸び率がほぼ 0 となる。エポキシ変成シリコン樹脂①はいずれの近似でも変わらないため、上述のように紫外線照射 1000 時間を実環境下 1 年と仮定すると、エポキシ変成シリコン樹脂①は耐用年数 3 年程度、エポキシ変成シリコン樹脂②およびシリコン樹脂は耐用年数 5 年程度となる。

このように、安全側を考慮すれば、現地の劣化状況を加味した片対数の直線近似により推定される耐用年数で評価するのが良いと考えられるが、エポキシ変性シリコン樹脂②やシリコン樹脂については実環境

下での耐久性が確認されていないことから、その予測精度は不明でさらに検討が必要であり、また、目地部の耐久性が本埋設型枠工法の耐久性に大きく影響することから、定期的な点検を行いながら維持管理を行う必要がある。なお、耐用年数の予測について今後精度向上の必要性はあるが、2 液型のエポキシ変成シリコン樹脂②およびシリコン樹脂は、耐候性に優れていると判断できる。

## 2.7 目地材と埋設型枠の付着強度

目地材に要求される性能として、2.6 で述べた材料自体の物性や耐久性に加え、埋設型枠との付着強度が重要であり、追従性が高い材料でも型枠との付着強度が小さければ剥離が生じることになる。このため、埋設型枠と各種目地材の付着強度について調べた。

### 2.7.1 使用した目地材の物性値

表-2.6、2.7、2.8 に付着強度試験で使用した各目地材の代表的な物性値 (カタログ値) を示す。なお、表-2.6 に示したエポキシ変成シリコン樹脂①と②、表-2.7 に示したシリコン樹脂③は、2.6 で検討したものと同一であり、番号にダッシュ記号を付した①'、②'、③' はそれらとメーカーが異なる同等品である。また、表-2.8 に示したエポキシ樹脂は、水中でも硬化が可能なタイプであり、埋設型枠が水中部に施工され、水中部

表-2.6 エポキシ変成シリコーン樹脂の物性値 (カタログ値)

試験条件 JIS K 6251	エポキシ変成シリコーン樹脂							
	1液型				2液型			
	①		①'		②		②'	
	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	破断時の 伸び(%)						
常温: 23±2°C、湿度50%、養生7-14日間	1.63	100	2.5	215	2.94	130	2.2	180
低温: 常温養生(7-14日)→0±3°C16時間	3.48	80	3.3	290	-	-	-	-
極低温: 常温養生(7-14日)→0°C以下	-	-	5.3(-30°C)	350	-	-	2.6(-10°C)	290

表-2.7 シリコーン樹脂の物性値 (カタログ値)

被着体	試験条件 JIS A 1439準拠	シリコーン樹脂						
		1成分型						
		③			③'			
		50%引張応力 (N/mm <sup>2</sup> )	最大引張応力 (N/mm <sup>2</sup> )	最大荷重時の 伸び(%)	50%引張応力 (N/mm <sup>2</sup> )	最大引張応力 (N/mm <sup>2</sup> )	最大荷重時の 伸び(%)	
モルタル板	標準養生: 23±2°C、湿度50%、養生14日間	23°C	-	-	-	0.31	0.5	160
		-10°C	-	-	-	0.29	0.74	300
		50°C温水浸せき後	23°C	-	-	-	0.3	0.49
アルミニウム板	標準養生: 23±2°C、湿度50%、養生14日間	23°C	0.45	1.8	496	0.31	0.52	170
		-10°C	-	-	-	0.32	0.73	270
		50°C温水浸せき後	23°C	0.43	1.74	505	0.28	0.49
ガラス板	標準養生: 23±2°C、湿度50%、養生14日間	23°C	0.45	1.72	454	0.28	0.45	160
		-10°C	-	-	-	0.29	0.71	280
		50°C温水浸せき後	23°C	0.43	1.69	417	0.28	0.5

表-2.8 エポキシ樹脂の物性値 (カタログ値)

試験項目	養生条件	試験条件	エポキシ樹脂		
			水中硬化可(パテ状)	可とう性(ガン打ち可)	
			④	④'	
			(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	破断時の伸び(%)
引張強さ JIS K 7113	養生23°C、7日	23°C	20以上	2.8	43
曲げ接着強さ (モルタル/モルタル) JIS A 6024	養生23°C、7日	乾燥面接着/気中養生	6.0	-	-
		乾燥面接着/水中養生	5.6	-	-
		湿潤面接着/水中養生	4.5	-	-
		水中接着/水中養生	4.0	-	-
引張接着強さ (モルタル/モルタル) JIS A 1439	気中23°C、7日	被着体乾燥面、23°C	-	2.6	37
	気中23°C、7日	被着体乾燥面、5°C	-	3.9	17
	気中10°C、7日	被着体乾燥面、10°C	-	2.9	27
	気中5°C、7日	被着体乾燥面、5°C	-	3.0	22
	気中23°C、7日	-	-	2.1	29
	気中23°C、98%RH、7日	被着体湿潤面、23°C	-	1.6	19
	水中23°C、7日	-	-	1.3	20

の目地材に変状がみられた場合に適用することを想定して選定したものである。なお、エポキシ樹脂④はパテ状で強度は高いが伸びが無く、④'は可とう性があり、水中でもコーキングガンによる施工が可能なタイプである。目地材の種類により性質が異なるため試験の評価項目が異なっているが、同等品でも材料自体の引張強度や伸び率が異なることや、可とう性があるエポキシ樹脂でも、エポキシ変成シリコーン樹脂やシリコーン樹脂に比べると伸び率は小さいことが確認できた。

### 2.7.2 引張接着試験用供試体の概要

図-2.37に引張接着試験用の供試体を示す。供試体の作製は、JIS A 1439 建築用シーリング材の試験方法で示されている耐久性試験体のH型試験体を参考にした。被着体は埋設型枠版Bタイプとし、小型供試体作製時

にも使用した(図-2.13参照)幅110mm×長さ440mmの型枠版の表面を被着体の台座とした。対面する被着体は、同じ大きさの型枠版から長さ50mmに切断したものを3個切り出し、目地材1種類あたり3回の試験が可能ないように供試体を作製した。作製手順は、目地材の注型用型枠を作製して被着体とテープで固定した後、各目地材を注型した。供試体は、23°C気中で2週間養生を行い、目地材の硬化を確認した後に取り外した。なお、目地材注型箇所には、実施工を想定し、事前に各目地材に対応する専用プライマーを塗布した。

### 2.7.3 引張接着試験の概要

引張接着試験は、図-2.37に示したように、切断した埋設型枠版に建研式の引張試験用治具を接着し試験を行う予定だったが、図中の写真にあるように、治具を接着する面は埋設型枠版の裏面で碎石が埋め込まれて

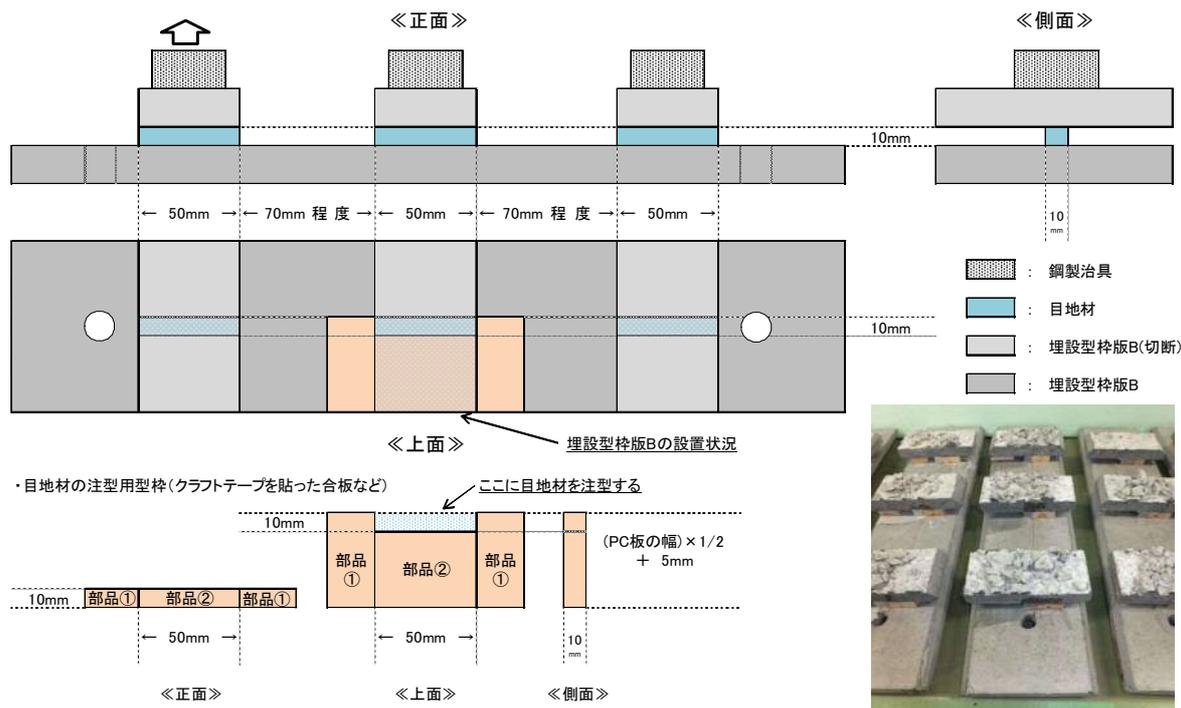


図-2.37 埋設型枠と目地材の付着強度試験用供試体の概要

おり、この部分に治具を接着しても砕石がはく離して測定できないことが想定された。このため、写真-2.17に示すように、精密万能試験機に台座の型枠版を固定し、上側の型枠版の両端に鋼製のワイヤーを掛け、直接引張試験を行った。

#### 2.7.4 引張接着強度

図-2.38 に埋設型枠版と目地材の引張接着強度を示す。引張接着強度は、1液型のエポキシ変成シリコン樹脂が比較的小さく、2液型のエポキシ変成シリコン樹脂とシリコン樹脂は同程度だった。また、2液型のエポキシ樹脂はいずれも他の目地材よりも引張接着強度は大きかったが、可とう性のある④'は④と比べると若干低下した。供試体の破壊形式は、②'と④は埋設型枠面との付着境界ではく離し、それ以外は目地材自体が凝集破壊した。なお、試験方法や試験条件の違い等により直接的な比較はできないが、本試験における接着強度は、表-2.7や2.8に示した接着強度よりかなり小さな値であることから、絶対的な評価はできないが、相対的にみるとカタログ状の物性値と必ずしも一致する傾向にはなっていない。また、本試験では、常温における試験しか実施していないが、実際には、湿潤面に対する施工や低温状況下での接着強度がより重要となる。このため、埋設型枠の種類や目地材の種類に応じて、実際の状況を想定した試験条件などを考慮して、付着強度を事前に確認する必要



写真-2.17 引張接着試験の状況

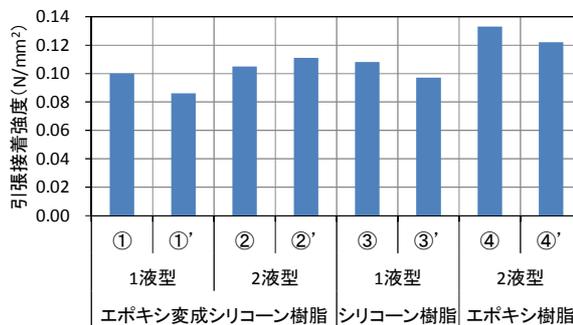


図-2.38 埋設型枠版と目地材の引張接着強度

があることが確認された。

### 3. ウレタン被覆工法

沿岸のコンクリート部材や道路橋の床版など、凍結融解と塩化物の複合作用による劣化に加えて、大きな水圧や侵食が懸念される環境下では、コンクリートの劣化抑制対策としてウレタンのような厚手の樹脂系の被覆材が施工されることがある<sup>3.1), 3.2)</sup>。一例として、沿岸構造物の施工事例を写真-3.1 に示す。これらの材料は耐水性と伸び性能に優れる長所を有している。しかし、写真-3.2 に示すように、供用期間中に表面被覆材に浮きや剥がれなどの損傷が発生し、部材を保護する機能が途中で部分的に失われた事例も確認されている。このため、寒冷地でのウレタンの適用性および効果を評価し、適切な耐久性設計法を確立する必要がある。そこで、本研究ではウレタンの剥がれに着目し、ウレタンの剥がれに及ぼす環境の影響の整理およびウレタン剥がれを防止する技術の提案に向けての調査・実験を行った。

#### 3.1 実構造物での資料調査・耐久性調査

##### 3.1.1 施工から 10 年を経たウレタンでの調査

(ウレタンの基本的な物性・効果の把握)

はじめに、無溶剤型ポリウレタン樹脂防水材料を試験施工して 10 年が経過した北海道日本海沿岸のコンクリート部材を対象に調査を行った。

調査は、北海道神恵内村の海岸に面する一般国道 229 号（小樽開発建設部管内）の直立型消波擁壁の脚柱（1988 年建設、以下、脚柱と記す）で行った。図-3.1 に調査箇所的位置、写真-3.3 に全景、図-3.2 に脚柱の一般図を示す。消波擁壁は、幅 500mm、奥行き 700mm の脚柱が 700mm 間隔で設置されたスリット状の構造となっており、打ち寄せられる波を擁壁内部に吸収することで越波による路面冠水を防ぐ役割を担っている。これらの脚柱は、塩分環境下の凍結融解と波浪などによる衝撃を頻繁に受ける非常に厳しい環境下に曝されている。

##### (1) 当時の施工状況<sup>3.3)</sup>

ウレタン施工は、脚柱が建設されてから 11 年経過後の 1999 年 8 月 18 日に行われた。表-3.1 に施工に用いた材料の仕様、写真-3.4 に施工当時の状況を示す。施工面は満潮時も海面上に位置しているが、荒天および時化時は波しぶきを受ける環境下で、特に冬期における波浪を強く受ける。施工当時の天候は曇りで、気温は 22℃、湿度は 76%であった。当日は明け方まで時折小雨が降っていた関係もあり、素地調整は雨を避けるために脚柱をブルーシートで覆い、シート内で行われた。素地調整の後、コンクリートの表面が乾くまで 2 時間



写真-3.1 ウレタンの施工事例  
(沿岸の道路橋・橋台)



写真-3.2 ウレタンの剥がれの事例



図-3.1 神恵内村の位置

放置してから、脚柱の海側・内側面（施工面積は両者ともに 500×1000mm）および側面（施工面積は 700×1000mm）にプライマーを塗布し、吐出速度 2.5 l/min で 4 本の脚柱へ鉢巻き状にウレタンが吹き付け施工された。なお、各脚柱には、工程 3 に示す No.1、2、3、4 の脚柱番号を付した。ウレタンの施工厚は一般に数十 μm～数 mm（数値は適用の目的や構造物の管轄機関によって異なる）とされている<sup>3.4)</sup>が、この施工



(右下は消波擁壁の内側で、波の吸収によって越波の抑制が図られている様子がわかる)

写真-3.3 調査箇所全景

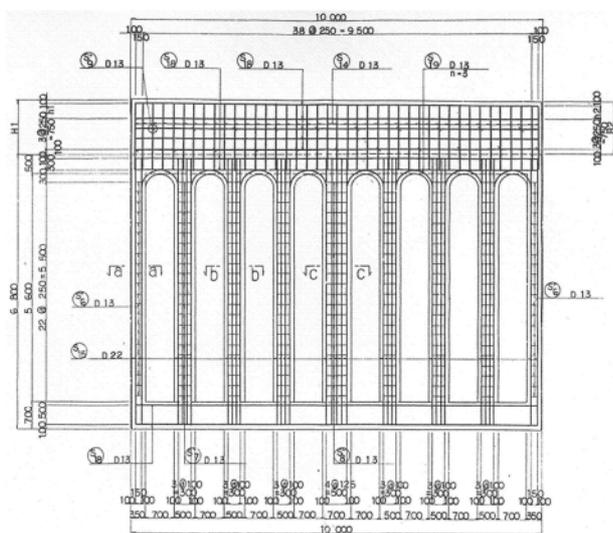


図-3.2 脚柱の一般図 (海側から見た図)

表-3.1 施工に用いた材料の仕様

名称	仕様
プライマー	材料：エポキシ樹脂 施工：ローラー 塗布量：100～135g/m <sup>2</sup>
ウレタン	材料：ポリウレタン樹脂 施工：吹き付け (2.5 ㎖/分) 厚さ：10mm (2本)、15mm (2本)
トップコート	材料：アクリルウレタン樹脂 施工：ローラー 厚さ：0.8mm

ではウレタンの耐候性や侵食抑制効果などを詳しく調べる理由により、厚目の10mm (No.1、2) および15mm (No.3、4) に設定されている。

表-3.2 は高周波容量式の表面水分計で調べたウレタン施工時の脚柱コンクリートの表面水分率を示してい

工程 1 素地調整 (ケレン)	
工程 2 プライマー 塗布	
工程 3 ウレタン 吹き付け	
工程 4 トップ コート塗布	

(施工脚柱には向かって左から順に No.1、2、3、無施工脚柱を1本とばしてNo.4の番号を付した)

写真-3.4 施工状況

る。

表面水分率は、海側面は3.6～4.5%であるのに対し、内側面は5.7～8.8%で、通気性が小さく、日射を受けない内側面の方が高い値となっている。当日は雨天の影響でウレタンの表面が濡れていた関係で、トップ

表-3.2 ウレタン施工時の脚柱の表面水分率<sup>3.3)</sup>

脚柱番号	No.1 (10mm)	No.2 (10mm)	No.3 (15mm)	No.4 (15mm)
海側面	4.1%	4.0%	3.6%	4.5%
内側面	7.4%	5.7%	6.7%	8.8%

カッコ内の数値はウレタンの施工厚

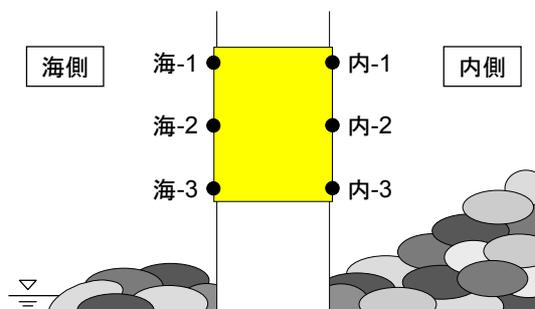


図-3.3 測定箇所の記事 (側面から見た図)

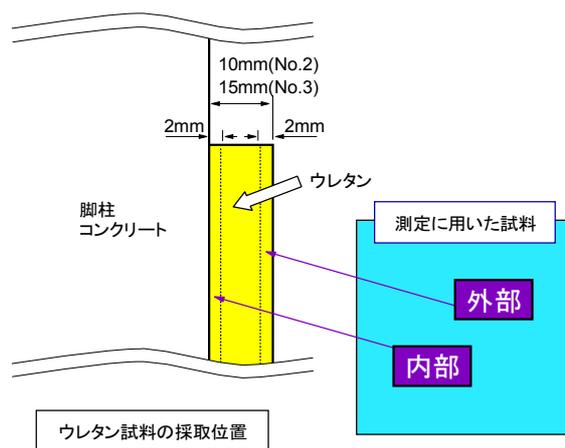


写真-3.5 付着強度の測定状況  
(脚柱番号 No. 2、内-2)

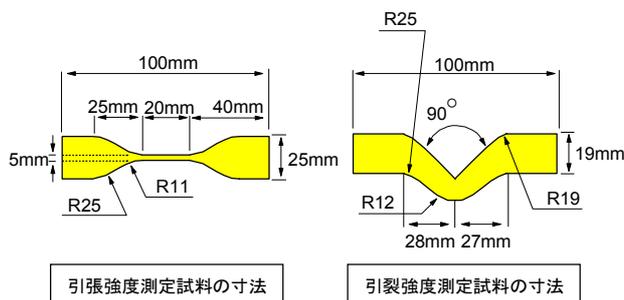
コート (アクリルウレタン樹脂塗料) はウレタンを吹き付けてから 1 ヶ月後に施工された。以降、10 年間、当該環境下に曝されている。

## (2) 調査概要

調査は、ウレタンの施工から 10 年経過後に行った。ここでは No.2、No.3 の 2 本の脚柱を対象に、①10 年経過後のウレタン組織の様子を把握するためのデジタルマイクロスコープによるウレタン組織の観察、②コンクリートとの付着性能を評価する目的で付着強度の測定、③ウレタンの品質を評価する目的で JIS K 6251 に準じたウレタンの引張強度 (規定の試験片を引き裂くのに要する最大の力) および波浪によって運ばれてくる石との衝突等に起因する破断・損傷が発生しやすい周辺環境 (写真-3.3) に鑑みて JIS K6252 に準じたウレタンの引裂強度 (破断させるのに要した最大の引張



ウレタン試料の採取位置



引張強度測定試料の寸法

引裂強度測定試料の寸法

図-3.4 引張・引裂強度に用いた  
試料の位置・寸法<sup>3.5)</sup>

力) の測定、④ウレタンによる塩害抑制効果を評価する目的で脚柱コンクリートの塩化物イオン量の測定を行った。

## 1) デジタルマイクロスコープによるウレタン組織観察

図-3.3 に示す海-2、内-2 の位置からウレタン片を採取し、外気と接している面の組織の様子をデジタルマイクロスコープで観察した。

## 2) 付着強度の測定

φ10cm のコアスリットをウレタンと脚柱の界面まで切り込んだ後、ウレタンの表面に φ10cm の鋼製ジグをエポキシ樹脂で接着し、プルオフ試験装置を使用して鋼製ジグを接着面に対して垂直方向へ引っ張り、付着強度を求めた。測定は図-3.3 に示す海-1、海-2、海-3、内-1、内-2、内-3 で行った。写真-3.5 に測定状況を示す。

## 3) ウレタンの引張・引裂強度の測定

図-3.3 に示す海-2 と内-2 の位置から 12×12cm 寸法でウレタンを採取し、図-3.4 に示すように外気に接しているウレタン表面からの距離が 2mm の範囲 (以下、外部と記す) と、脚柱からの距離が 2mm の範囲 (以下、内部と記す) にカッターでスライスして切り分け



写真-3.6 施工から10年経過後の現場の状況

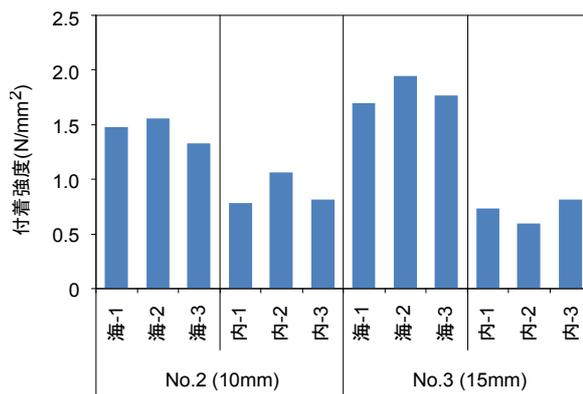


図-3.5 付着強度の測定結果

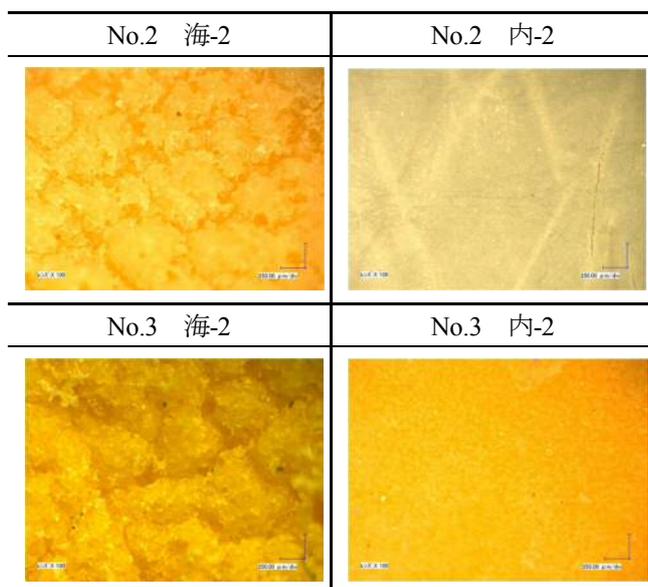


写真-3.7 デジタルマイクロスコープで観察した外気と接しているウレタン表面の組織 (倍率100倍)

た後、ダンベルカッターを用いて図に示す所定の寸法に成形し、引張強度および引裂強度を測定した。

#### 4) 塩化物イオン量の測定

ここでは、No.2 脚柱の海側面を評価の対象とした。コアボーリングマシンを用いて脚柱から φ10×5cm のコンクリートコアを採取した後、コンクリートカッターを用いて表面から1cm 毎にコアをスライスし、電位差適定法によって塩化物イオン量を測定した。コアは、図-3.3 の海-1、海-2、海-3 とウレタンで被覆されていないウレタン上端から10cm 上方の位置 (以下、上方と記す) および下端から10cm 下方の位置 (以下、下方と記す) の計5箇所から採取した。

### (3) 調査結果・考察

#### 1) 施工から10年経過後の現場の状況

写真-3.6に施工から10年経過後の現場の状況を示す。No.1～No.4のいずれの脚柱においても、目視調査の結果、ウレタンには破れなどの顕著な損傷が見受けられなかった。しかし、海側面ではトップコートが全面的に剥がれていることが確認された。側面と内側面では、トップコートの剥離が認められなかった。トップコートの剥離の要因として打ち寄せられる波や石の衝撃、あるいはトップコートの品質や施工性の影響が疑われる。

写真-3.7は、デジタルマイクロスコープで観察したNo.2とNo.3の海-2および内-2の外気と接しているウレタン表面組織の画像を示している。No.2、No.3とも、内-2は平滑で緻密な組織状態であった。それに対し、海-2は内-2に比べると黄色みが強く、表面組織は荒々しく傷んでいる様子が確認された。海-2は、トップコートの剥離によってウレタンに紫外線などの環境因子が直接的に作用したことで表面組織が脆弱化し、損傷に至った可能性が高い。

#### 2) 付着性能の評価

図-3.5に付着強度の測定結果を示す。No.2、No.3のいずれの箇所もコンクリートとウレタンの界面で付着切れが生じた。ウレタンと脚柱の付着強度は、紫外線などの環境因子によってウレタンの表面組織が傷んでいる海側面に比べて、ウレタンの表面組織が比較的健全な内側面の方が小さい結果が示された。図-3.6はウレタン施工時の脚柱の表面水分率 (表-3.2) と付着強度の関係を示している。表面水分率が大きいほど、付着強度は小さい傾向にあった。本調査の範囲では、付着強度は紫外線などの環境因子より、施工時のコンクリート表面に存在する水分の影響を大きく受けることが明らかとなった。既往の文献には、付着強度の判定

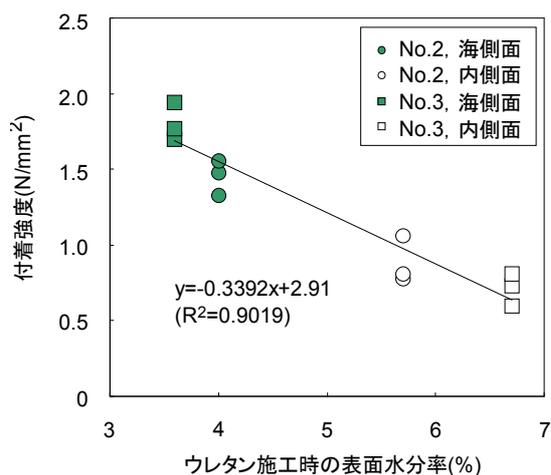


図-3.6 ウレタン施工時の表面水分率と付着強度の関係

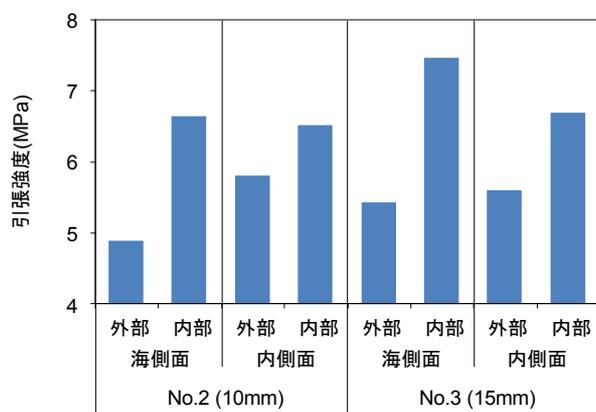


図-3.7 ウレタンの引張強度の測定結果

基準について、一般環境下では  $1.0\text{N/mm}^2$  以上、没水環境下では  $1.5\text{N/mm}^2$  以上が要求されることが記載されている<sup>36)</sup>。写真-3.6 で示したように、調査したウレタンは常時没水する環境下にはないものの、波浪の影響を受けやすい。このような環境下では安全側の設計を行う観点から、ウレタン施工時の表面水分率は 4.0% 以下に管理することが望ましいと考えられる。

また、図-3.5 をみると、No.3 の内側面を除いて、付着強度はウレタンの中央位置（海-2、内-2）に比べ、上下端部位置（海-1、海-3、内-1、内-3）の方がやや小さい値となっている。この結果から、さらに端部の付着強度は端部から供給される水分などの影響で経年的に低下が進行していることが疑われ、脚柱ならびにウレタンの機能保持の重要性に鑑みると、端部の付着強度の低下を抑える対策を講ずることが望ましいと考えられる。

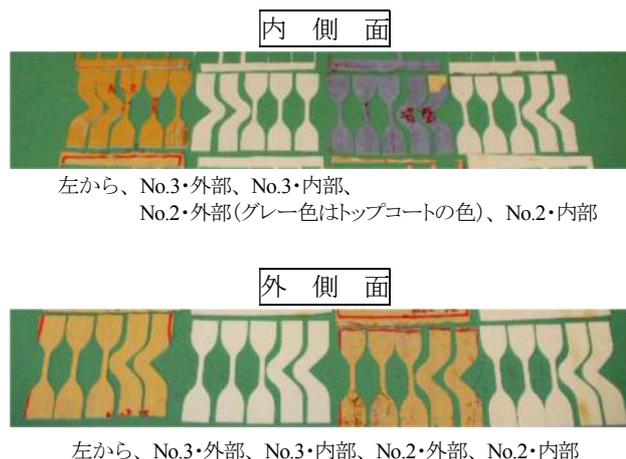


写真-3.8 ウレタンの引張強度測定試料（3枚）と引裂強度測定試料（2枚）の外観

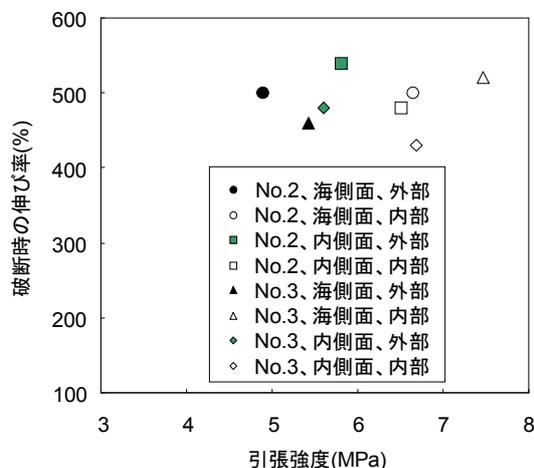


図-3.8 引張強度と引張破断時の伸び率の関係

### 3) ウレタンの品質評価

図-3.7 にウレタンの引張強度の測定結果を示す。引張強度は、海側面、内側面を問わず、内部に比べて、外部の方が小さい結果が示された。写真-3.7 で示したように、海側面の外部では紫外線などの環境因子による表面組織の損傷が発生しているものの、内側面の外部に関しては表面組織の損傷が見受けられないことから、外部の引張強度が小さかった結果の原因が紫外線の環境因子だけとは一概に特定できない。写真-3.4 の工程 3 で示したように、施工直後のウレタンはクリーム色を呈している。写真-3.8 をみると、内部の試料はいずれもクリーム色で変色が生じていないことがわかる。すなわち、外気に接する機会がない内部では安定した品質が形成、保持されやすいために引張強度は相対的に高い値を示したと言える。

図-3.8 は引張強度と引張破断時の伸び率の関係を示

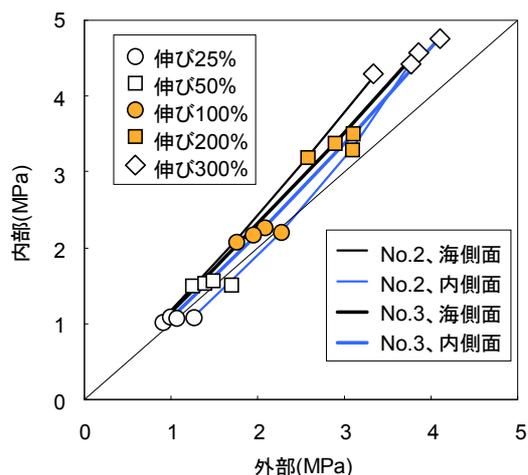


図-3.9 外部と内部における所定の伸び率に達するまでに要した引張応力の比較

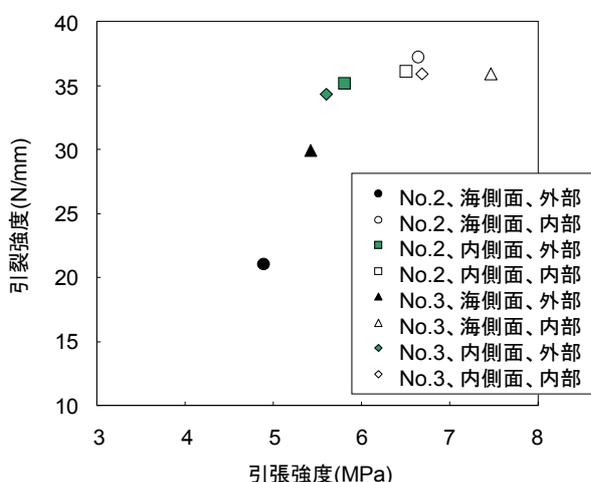


図-3.10 引張強度と引裂強度の関係

している。引張強度とは対照的に、破断時の伸び率は採取位置を問わず、いずれの試料も 500%前後の値を示し、ウレタンの特徴である伸び性能の著しい低下は認められなかった。しかし、図-3.9 に示す外部と内部における所定の伸び率 (25%、50%、100%、200%、300%) に達するまでに要した引張応力の比較からわかるように、外部のウレタンは内部に比べて全体的に変形しやすい品質性状を呈しており、弾性の低下が認められることから、伸び性能の長期持続性については今後も詳しく調べていく必要がある。

図-3.10 は引張強度と引裂強度の関係を示している。引張強度が 6MPa 以下の外部の試料では、引張強度が小さいほど、引裂強度は小さくなる傾向が示された。特に No.2 と No.3 の海側面の外部は、他の試料に比べ

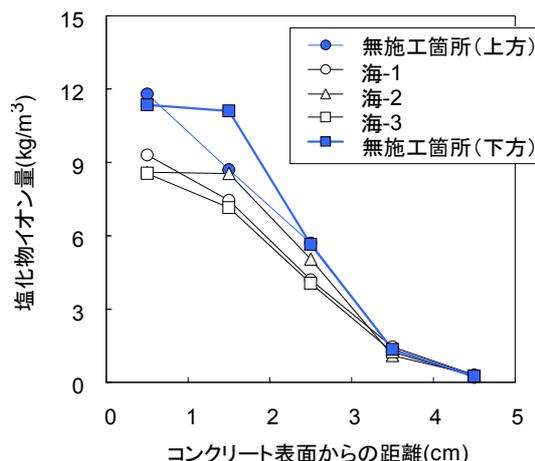


図-3.11 塩化物イオン量の分布 (No. 2、海側面)

ると引裂強度が低いことが見て取れる。この 2 試料は、写真-3.7 で示したように、紫外線などの環境因子の影響で表面組織が脆弱化し、損傷に至った試料である。本調査の範囲では、ウレタンの引裂強度を保持するにはウレタンの引張強度が 6MPa を下回らぬよう、紫外線などの環境因子による損傷を防止する対策を適切に講ずる必要があることがわかった。

#### 4) 塩化物イオンの浸透性の評価

図-3.11 に No.2 の海側面で測定したコンクリートの塩化物イオン量の分布を示す。無施工箇所と比べると、建設から 11 年後の施工ではあるが、ウレタンを施工した箇所の方が塩化物イオン量は小さく、ウレタンによる塩化物イオンの浸透抑制効果が表れていることが確認された。

次に、海-1、海-2、海-3 の測定値の平均をウレタン施工箇所の塩化物イオン量、無施工箇所の上方、下方の 2 箇所の測定値の平均を無施工箇所の塩化物イオン量とし、この値を用いて塩化物イオンの浸透予測を行う。一般に、塩害に対するコンクリートの耐久性の評価では、コンクリート表面における塩化物イオン量と塩化物イオンの拡散係数が常に一定で、塩化物イオンの浸透挙動が Fick の拡散方程式に従うと仮定し、Fick の拡散方程式の第 2 法則の解である式(3.1)によって鉄筋位置の塩化物イオン量の将来予測が行われる<sup>3.7)</sup>。

$$C(x,t) = C_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right) \quad (3.1)$$

ここに、 $C(x,t)$  は時間  $t$  (年) における深さ  $x$  (cm) の塩化物

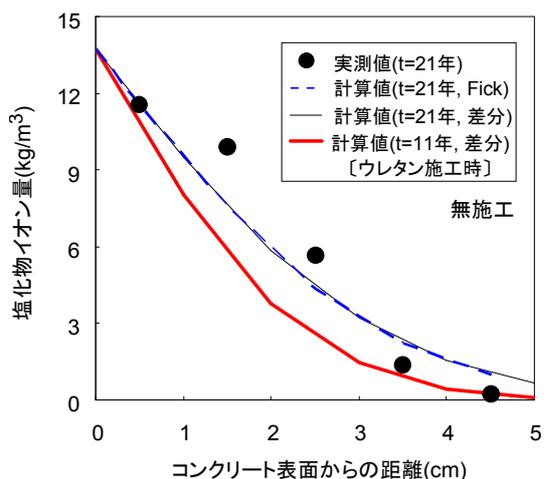


図-3.12 無施工箇所での塩化物イオン量

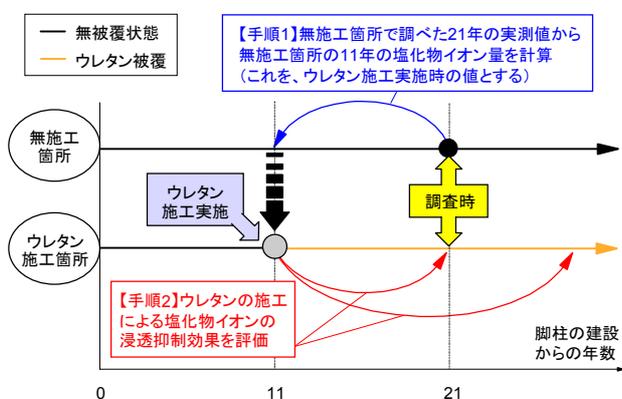


図-3.13 塩化物イオン量の浸透予測の評価の手順

イオン量( $\text{kg/m}^3$ )、 $D$  は塩化物イオンの拡散係数( $\text{cm}^2/\text{年}$ )、 $C_0$  はコンクリート表面における塩化物イオン量( $\text{kg/m}^3$ )、 $\text{erf}$ は誤差関数である。

しかし、今回の試験施工のように、脚柱の建設から一定期間が経過した後にウレタンを施工すると、コンクリート表面の塩化物イオン量が増加するため計算条件の設定が複雑となり、式(3.1)による計算は難しくなる。このような場合、式(3.2)に示す差分方程式を用いて予測する方法が有効とされている<sup>3.8)</sup>。

$$\begin{cases} C_{m,n+1} = Dr(C_{m+1,n} + C_{m-1,n}) + C_{m,n}(1 - 2Dr) \\ r = \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \quad (\text{ただし } r \leq \frac{1}{2}) \end{cases} \quad (3.2)$$

ここに、 $C_{m,n}$ は時間 $t_n$ (年)における深さ $x_m$ (cm)の塩化物イオン量( $\text{kg/m}^3$ )、 $r$ は係数、 $\Delta t$ は時間 $t$ のきざみ幅( $t = n\Delta t$ )、 $\Delta x$ は深さ $x$ のきざみ幅( $x = m\Delta x$ )である。

図-3.12 は無施工箇所における塩化物イオン量の実測値(脚柱の建設から21年経過)と式(3.1)および式(3.2)から算出した塩化物イオン量の計算値をプロットしたものである。コンクリートにおける塩化物イオンの拡散係数(見かけの値)は実測値から $0.148\text{cm}^2/\text{年}$ とし、式(3.2)の $\Delta t$ 、 $\Delta x$ は、繰返し計算の回数を極力少なくする観点から仮に $\Delta t = 0.5$ 年、 $\Delta x = 1\text{cm}$ としたところ、脚柱の建設から21年経過時における式(3.1)と式(3.2)の計算値はほぼ一致し、多少のばらつきは見られるものの、実測値とも概ね対応する結果が示された。これを踏まえて、ここでは $\Delta t = 0.5$ 年、 $\Delta x = 1\text{cm}$ とし、図-3.13に示す手順に従い、脚柱の建設から11年経過時すなわちウレタン施工時における塩化物イオン量を式(3.2)より求め(結果は図-3.12に示している)、その時点からの塩化物イオン量の経時変化を同じく式(3.2)より計算した。なお、実際は凍害との複合劣化の影響で無施工箇所の塩化物イオン量の増加速度はさらに早まると考えられるが、ここでは効果を安全側に評価したい理由から凍害の影響は考慮せず、塩化物イオンの拡散係数は将来的に変化しないと仮定して計算を行った。また、表面被覆材の塩化物イオン浸透性に関する既報の知見<sup>3.9)</sup>を参考に、コンクリートに供給される塩化物イオン量は $0\text{kg/m}^3$ (遮塩状態)とした。

図-3.14に結果を示す。ウレタンの施工によってコンクリート表面の塩化物イオン量は経年的に減少し、一方でコンクリート内部の塩化物イオン量は経年的に増加する計算結果が得られた。これは、脚柱建設後、ウレタンを施工するまでの間に脚柱の表層に既に供給・蓄積された塩化物イオンが内部へ拡散移動していることを示している。

次に、鉄筋腐食に及ぼす影響を評価するため、鉄筋位置(かぶり厚は $10\text{cm}$ 、図-3.2)における塩化物イオン量の経時変化を調べた。図-3.15に予測結果を示す。かぶり厚が大きいこともあって、無施工箇所の脚柱では建設から100年を上回る115年経過時に発錆限界量に達する計算結果が示された。ただし、これはコンクリートの品質が将来的に変化しないと仮定した場合の予測である。実際は無施工箇所の脚柱では波による侵食や玉石の衝撃による欠損および塩分環境下の凍害によるスケールや組織のルーズ化が確認されている(写真-3.9)。これらの状況に鑑み、仮に侵食が $1\sim 5\text{cm}/100$ 年( $0.1\sim 0.5\text{mm}/\text{年}$ )の一定ペースで進行ならびに建設から21年目(調査時)に欠損が $1\sim 2\text{cm}$ 発生すると想定して予測を行った。

図-3.16に結果を示す。発錆限界量に達するまでの年

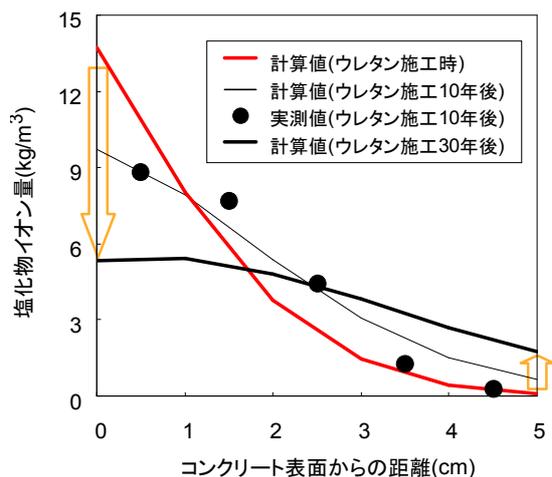


図-3.14 ウレタン施工箇所での塩化物イオン浸透状況

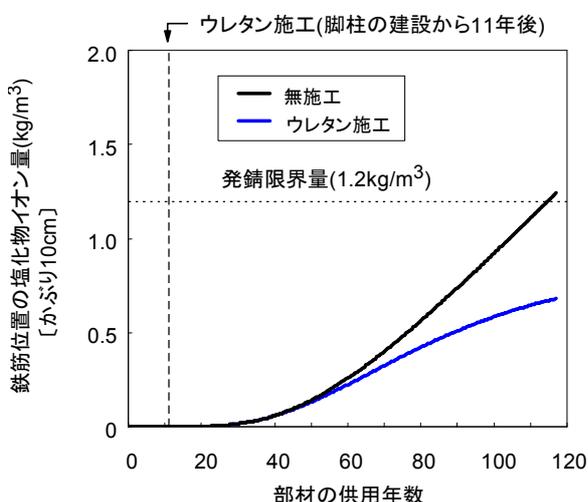


図-3.15 鉄筋位置 (かぶり 10cm) における塩化物イオン量の将来予測

数は前述した予測よりも約 10～30 年短くなる結果が示された。さらに前述したように、この計算では凍害の影響を考慮していない。近傍の脚柱では現段階で既に錆汁も確認されていることから (写真-3.5)、発錆限界量に達するまでの期間はさらに早まるように思われる。

これに対してウレタン施工箇所では、図-3.15 に示すように、拡散移動に伴う塩化物イオンの増加は生じているが、外気からの塩化物イオンの供給や欠損の進行がないため、無施工箇所と比べると増加の割合は小さく、脚柱の建設から 115 年経過時においても発錆限界量に達していない。さらに、無施工箇所は塩化物イオン量が増加し続けているのに対し、ウレタン施工箇所



写真-3.9 脚柱の損傷状況の一例

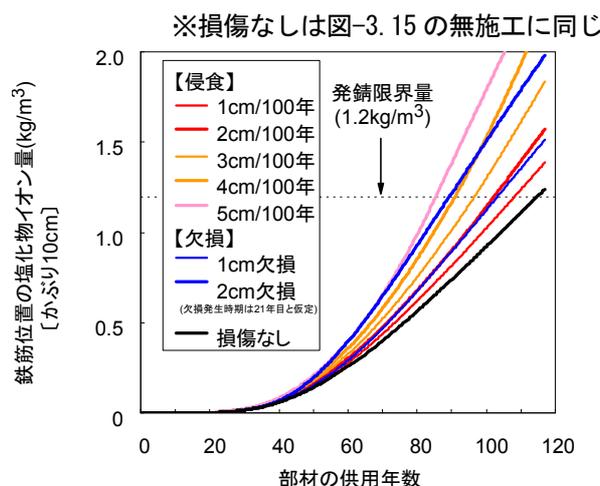


図-3.16 侵食および欠損の影響を考慮した場合の予測 (無施工箇所)

では塩化物イオンの増加挙動が収束に向かう兆候を示している。これは、拡散移動が進んだことで、表面からの塩化物イオンの濃度勾配が殆どなくなったことを示している。

以上の結果から、塩化物イオンの蓄積量やかぶりなどの部材条件や現場の環境条件にもよるが、ウレタンの適用によって塩害に対する耐久性が向上し、部材の機能保持が長期に亘って期待されることが実証的に示された。

### 3.1.2 施工から約 20 年を経たウレタンでの調査 (ウレタンの損傷に及ぼす環境の影響の把握)

3.1.1 では、ウレタンによる塩害に対する耐久性向上効果を確認できた一方で、施工時のコンクリートの表面水分率が大きい部材では付着強度が比較的小さかったことや、ウレタン端部では水分供給に起因する付着強度の低下が疑われる等の知見を得た。

このことに鑑み、剥がれに及ぼす環境の影響をさらに詳しく把握するため、3.1.1 の調査箇所の近傍に位置



写真-3.10 調査対象のウレタン（施工約 20 年経過）の位置（白線で囲っている部分）

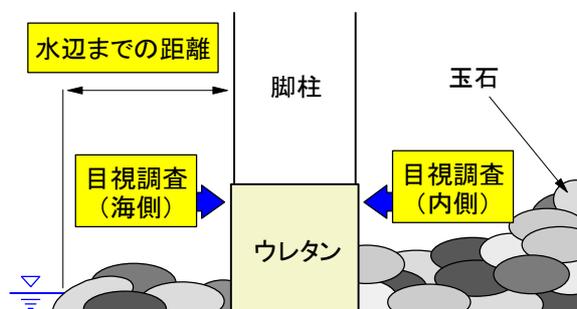


図-3.17 調査内容

する施工から約 20 年経過した別のウレタン施工箇所でも調査を行った。写真-3.10 に調査対象のウレタンの位置を示す。これらのウレタンは、凍・塩害に加えて、波による侵食および石による損傷の防止を目的に、脚柱の建設から3年後の1991年12月12日に波の作用を最も受けやすい海面近傍（白線で囲った範囲）に施工されている。なお、当時の工事記録は残されておらず、施工時のコンクリート表面の状態やウレタンの施工手順の詳細は不明である。

### (1) 調査概要

調査に先立ち、大天狗覆道に近い脚柱から順に1から192の脚柱番号を付けた。次に、脚柱の海側と内側（図-3.17）においてウレタンの損傷状況を目視で調べた。ここでは損傷の度合ではなく損傷の形態について調査を行った。ウレタンの損傷形態を①健全、②端部剥がれ、③浮き、④裂き、⑤消失に分類し（写真-3.11）、目視で確認した結果を現場で調査用紙に書き込んだ。1箇所のウレタンに複数の損傷が確認された場合（例えば、浮きと裂き）は調査用紙の浮きと裂きの双方の欄



写真-3.11 損傷の形態（右側が海側）

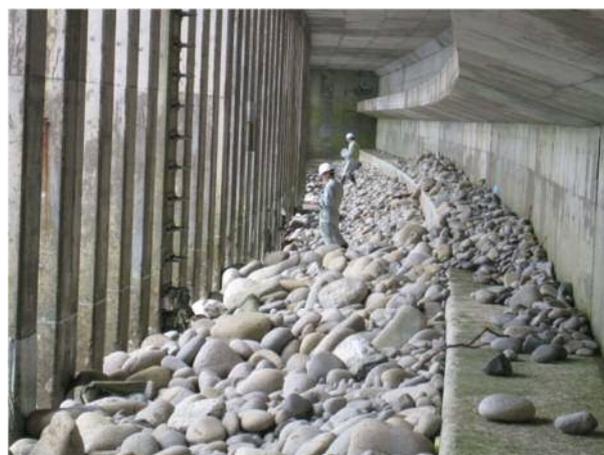


写真-3.12 内側での目視調査の様子（梯子が設置されている脚柱の番号は132）

にチェックマークを入れた。写真-3.12は目視調査の様子を示している。

また、脚柱の周囲には海から打ち寄せられた石が多く堆積しており、写真-3.10からもわかるように脚柱から水辺までの距離も位置によって異なる。そこで、脚柱周囲の状況を把握するため、脚柱から水辺までの距離についてもあわせて調べた。水辺までの距離は潮汐によって変動するが、ここでは2011年9月26日14時30分に測定した値を用いて考察することとした。図-3.18に水辺までの距離の測定結果を示す。

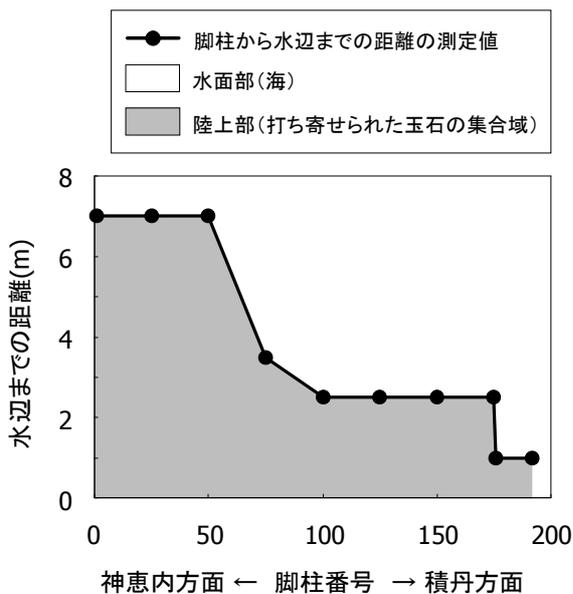


図-3.18 水辺までの距離の測定結果  
(2011年9月26日14時30分測定)

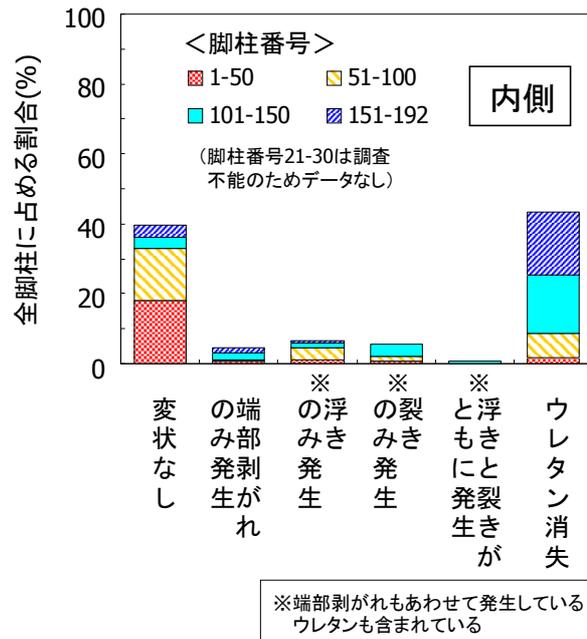


図-3.20 内側のウレタンの目視調査の結果

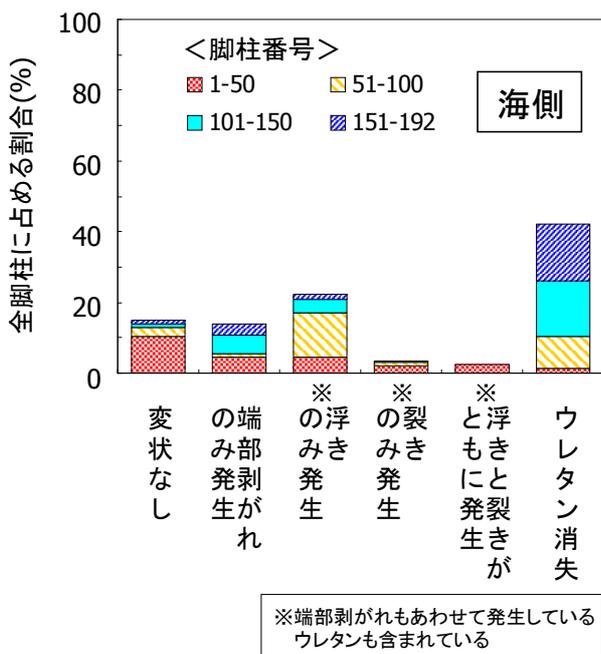


図-3.19 海側のウレタンの目視調査の結果

(2) 調査結果・考察

1) 目視

図-3.19 は海側の目視調査の結果を整理したものである。脚柱全体に占めるウレタンに変状がみられなかった箇所、端部剥がれのみ発生していた箇所、浮きのみ発生していた箇所の割合はそれぞれ約15~20%であった。裂きのみ発生していた箇所、浮きと裂きとも発生していた箇所の割合は約3%で、端部剥がれや浮きのみ発生に比べると割合は小さいものの、ウレタン

が消失していた脚柱は約40%と高い値が示された。ウレタンは脚柱に鉢巻き状に施工されているため、端部剥がれや浮きの進展だけではなく、裂きが発生しないと消失には至らない。このため、現場ではウレタンに裂きが発生した後、裂きが進展し、消失に至る現象が起きていたと考えられる。また、特徴的な傾向として、変状なしの箇所は水辺までの距離が長い脚柱番号1~50、消失していた箇所は水辺までの距離が比較的短い脚柱番号101~192に多く集中しており、波浪の影響の受けやすさが関係していると思われる。

図-3.20 は内側の目視調査の結果を整理したものである。脚柱番号21~30については、ウレタンが玉石で完全に覆われており、目視による観察が困難であったため調査は行っていない。脚柱全体に占めるウレタンに変状がみられなかった箇所の割合は約40%で、海側よりも多かった。端部剥がれのみ発生していた箇所、浮きのみ発生していた箇所はともに約5%で、より波浪の影響を受けやすい海側に比べると明らかに小さい。このことは、波浪などの厳しい作用によるウレタン端部の損傷ならびに端部からの海水など劣化因子の侵入に起因するウレタンとコンクリートの付着力の低下が、端部剥がれや浮きに至ったプロセスの一つであることを示唆している。裂きのみ発生、浮きと裂きとも発生していた箇所の割合は1~5%程度で全体的には少なかったものの、消失が確認された脚柱は海側と同様に高かった。

海側と内側の結果を比べると、変状なしは内側、端



写真-3.13 海側から撮影した現場の状況の一例（脚柱番号 30 は、向かって左側の面が海側）

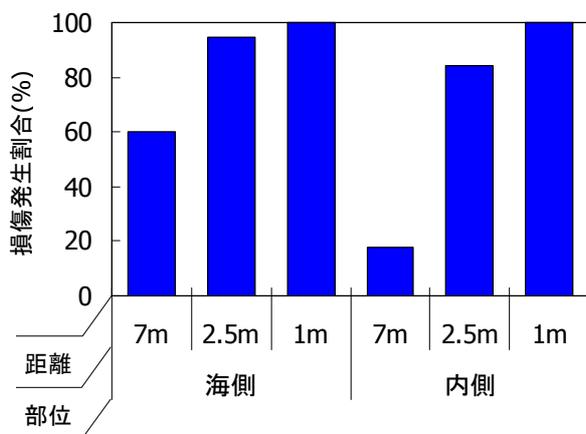


図-3.21 水辺までの距離・部位と損傷発生割合の関係

部剥がれや浮きは海側の方が割合は多く、内側の方が比較的緩やかな外部環境で損傷は進行しにくいと考えられる。なお、消失もかなり多いことから、現場では、海側で発生した激しい引き裂き傷が側面を経由して内側にも伝播し、ウレタン全体が消失に至る現象が起きていることが考えられる。

## 2) 水辺までの距離と損傷の関係

写真-3.13 に現場の状況の一例を示す。脚柱番号 30 では、波浪や打ち寄せられた玉石の衝撃によると思われる欠損がウレタンで覆われていない範囲のコンクリートに観察されたが、ウレタンで覆われている範囲は凹みが見受けられず、脚柱の形状が保たれていた。脚柱番号 6 は、ウレタンは大きく裂かれていた（目視の評価は「消失」）ものの、ウレタンで覆われていた範囲のコンクリート表面には外見上、損傷がみられなかった。これらの脚柱においては、ウレタンによるコンクリートの損傷抑制（かぶり厚さ保持）効果が約 20 年間続いていたと評価できる。しかしながら、脚柱番号 85 のようにウレタンが消失し、さらにはウレタンで覆われていた範囲のコンクリートが顕著に摩耗してい

る事例も確認された。

脚柱から水辺までの距離は、脚柱番号 6 と 30 が 7m であるのに対し、損傷が大きかった脚柱番号 85 は 3m で前者に比べると石と砂まじりの海水を被りやすい環境下にある。そこで、ウレタンの損傷に及ぼす波浪と被水の影響に着目し、図-3.18 で示した調査結果をもとに、脚柱から水辺までの距離を 7m（対象は脚柱番号 1～50 の 50 本）、2.5m（対象は脚柱番号 100～175 の 76 本）、1m（対象は脚柱番号 176～192 の 17 本）の 3 区間に分類して、目視調査結果の比較を行った。図-3.21 に結果を示す。この図では全ての損傷形態（写真-3.11）を一緒に整理した。距離 1m における損傷発生割合は 100%で、損傷の形態は全て消失であった。損傷発生割合は水辺までの距離が長いほど、また、海側よりも内側の方が小さく、損傷に及ぼす波浪の影響が大きいことが定量的に明らかとなった。

## 3.2 実験室での耐久性試験

### （ウレタンの剥がれ防止技術の提案に向けての検討）

3.1.2 で述べた現地調査において、残存するウレタンの損傷形態の多くは、裂きよりも剥がれや浮きであったことが確認された。また、損傷の割合は水辺までの距離が小さいほど、さらに、内側より海側の方が高く、水分の影響が大きいことがわかった。写真-3.13 の脚柱番号 30 で示したように、ウレタンは部材の欠損抑制に有効な材料で、これによって遮塩性も期待できることは 3.1.1 の図-3.15 や図-3.16 から明らかであり、部材の耐久性保持効果を長期にわたって期待するにはウレタン端部からの損傷の進展を誘発する剥がれの防止対策を講ずることが望ましいと言える。ウレタンの剥がれを防止するための水分の供給抑制方法は種々存在すると考えられるが、本研究ではその一つとして、剥がれの一要因であるウレタンの背面への水分の供給を抑えるねらいで、ウレタン端部背面のコンクリート組織

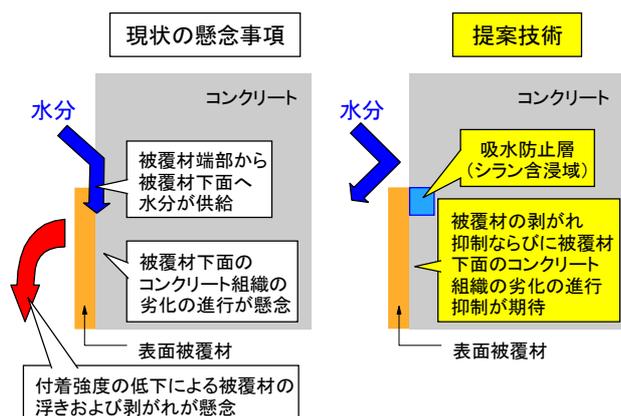


図-3.22 シランによるウレタンの剥がれ防止技術のイメージ

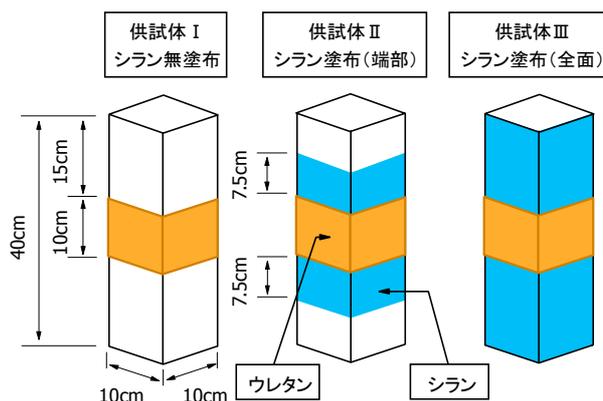


図-3.23 供試体

表-3.3 コンクリートの配合

水セメント比	使用セメント	単位量(kg/m <sup>3</sup> )			
		水	セメント	細骨材	粗骨材
50%	高炉 B	140	280	856	1081

に吸水抑制機能を有するシラン系表面含浸材（以下、シランと記す）を含浸させることで背面への水分の浸透を抑え、剥がれを抑制する技術を考案し、その効果について実験的に調べた（図-3.22 に対策のイメージを示す）。

### 3.2.1 実験概要

#### (1) 供試体

表-3.3 にベースコンクリートの配合を示す。一般的に多く用いられているコンクリート配合を参考に、水セメント比は50%に設定した。セメントは高炉 B 種、細骨材は除塩処理済みの海砂（表乾密度 2.69g/cm<sup>3</sup>、吸水率 1.16%）、粗骨材は砕石（表乾密度 2.67g/cm<sup>3</sup>、吸水率 1.92%、最大寸法 25mm）とした。

図-3.23 に供試体、写真-3.14 に供試体の作製状況を示す。10×10×40cm 寸法の型枠にコンクリートを打設し、翌日に脱型して材齢 7 日まで湿潤養生を施した後、材齢 14 日に現場の脚柱を模した形で図に示す位置にウレタンを吹き付けた。次に、北海道開発局の道路設計要領<sup>3.10)</sup>の規格を満たす無溶剤系のシランを材齢 21 日に塗布し、その後は材齢 28 日まで温度 20℃、湿度 60%の気中に静置した。ここではシラン無塗布の供試体にはⅠ、シランの塗布範囲をウレタンの端部近傍に限定したものにはⅡ、シランを全面に塗布したものにはⅢの供試体記号を付した（以下、それぞれ、供試体Ⅰ、供試体Ⅱ、供試体Ⅲと記す）。

#### (2) 実験方法

供試体を作製した後、材齢 28 日より表-3.4 に示す 3 種類の環境下に供試体を曝した（以下、例えば表中の環境記号 1 は環境 1 と記す）。環境 2 は写真-3.1 のようにウレタンが常時水中に浸かりやすい環境下、環境 3 は写真-3.6 のように水分は供給されるものの気中で凍結融解を受けるような環境下を想定したものである。環境 1 は環境 2、3 の比較用として設けたもので、凍結融解を与えていない。環境 2、3 における凍結融解の温度および時間は水中方式（環境 2）、気中方式（環境 3）とも ASTM C 672 を準用して、-18℃で 16 時間、23℃で 8 時間の 1 日 1 サイクルとした。環境 2 では JIS A 1148 で用いられるゴム製の容器を使用し、容器に供試体を挿入して、その中に 3%濃度の塩化ナトリウム水溶液を注ぎ、温度が自動制御される室内に容器を曝すことで供試体に凍結融解作用を与えた。

所定の環境に概ね 50、100、200、300 日曝した後、図-3.24 に示すようにプルオフ試験装置によるウレタンの引き剥がし試験と高周波容量式的水分計によるコンクリートの表面水分率の測定（写真-3.15）および供試体の質量の測定を行った。引き剥がしと表面水分率の測定は供試体の 4 面で行い、その平均を実験結果とした。表面水分率の測定はウレタン端部近傍のコンクリート面で行った。

また、ウレタン下面への塩化物イオン浸透抑制効果を評価するため、300 日曝して引き剥がし試験を終えたシラン無塗布と全面塗布の供試体を用いてウレタン端部近傍のコンクリート断面の EPMA（Electron Probe Micro Analyzer）面分析を行った。分析面は表面から深さ 4cm、ウレタン端部からウレタンで覆われている領域の 3cm と覆われていない領域の 1cm をあわせた 4cm の範囲（4×4cm）とした。分析面をメタクリル樹脂で



プライマー施工 (ローラー)

ウレタン施工 (吹きつけ)

シラン施工 (刷毛)

写真-3.14 供試体作製の様子 (シラン施工の写真は、供試体Ⅲのもの)

表-3.4 供試体に与える環境条件

環境記号	環境条件
1	供試体を 3%濃度の塩化ナトリウム水溶液に浸漬させて常温下に静置する。
2	供試体に水中凍結融解作用を与える。試験水は 3%濃度の塩化ナトリウム水溶液を使用する。
3	供試体を 3%濃度の塩化ナトリウム水溶液に浸漬させて常温下に 3 日間静置する → 水溶液から取り出して気中凍結融解作用を 4 日間与える → ... (以降、水溶液浸漬 (3 日) と気中凍結融解 (4 日) を繰り返す)

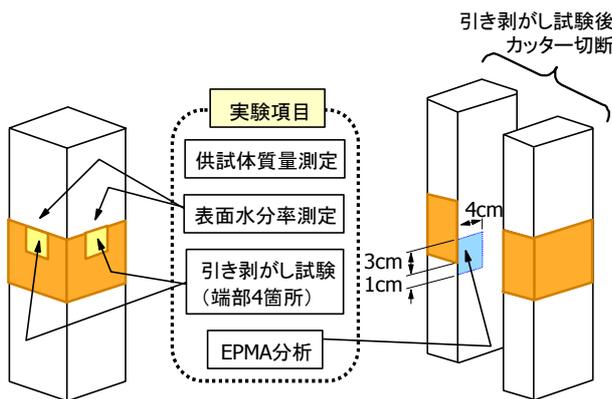


図-3.24 実験項目

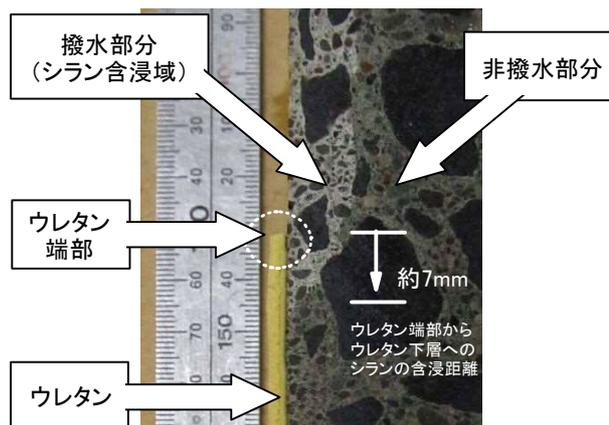


写真-3.16 ウレタン端部下層へのシランの含浸状況



プルオフ試験装置

高周波容量式的水分計

写真-3.15 測定の様子の一例

補強して研磨し、金蒸着を施して分析を行った。分析条件は加速電圧 15kV、試料電流 100nA、プローブ径

50μm、測定時間 40msec/ピクセルとした。

### 3.2.2 実験結果・考察

#### (1) シランの含浸状況

写真-3.16 はシランの含浸状況を調べる目的で、材齢 28 日すなわち所定の環境 (表-3.4) に曝す前の供試体Ⅲをコンクリートカッターで長手方向に切断し、切断面に水を噴霧した時の様子である。端部から約 7mm 範囲のウレタン下層のコンクリートにシランが含浸していることを確認した。

#### (2) 引き剥がし試験および質量の測定結果

表-3.5 に材齢 28 日 (ウレタン吹付け後 14 日) におけるプルオフ試験装置による引き剥がしおよび表面水分率の測定の結果を示す。プルオフ試験の測定値は無

表-3.5 材齢 28 日におけるプルオフ試験装置による引き剥がしおよび表面水分率の測定の結果

供試体	I	II	III
プルオフ試験の測定値 (MPa)	2.17	1.71	1.56
表面水分率 (%)	4.8	4.6	4.6

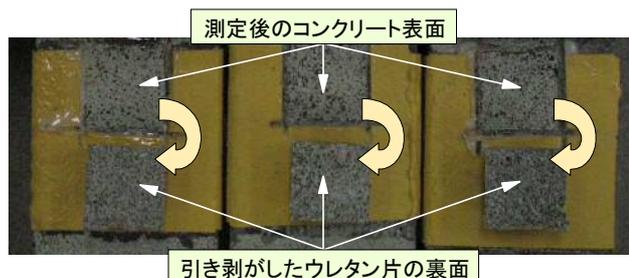


写真-3.17 プルオフ試験装置による測定後の供試体 (左から材齢 28 日の I、II、III)

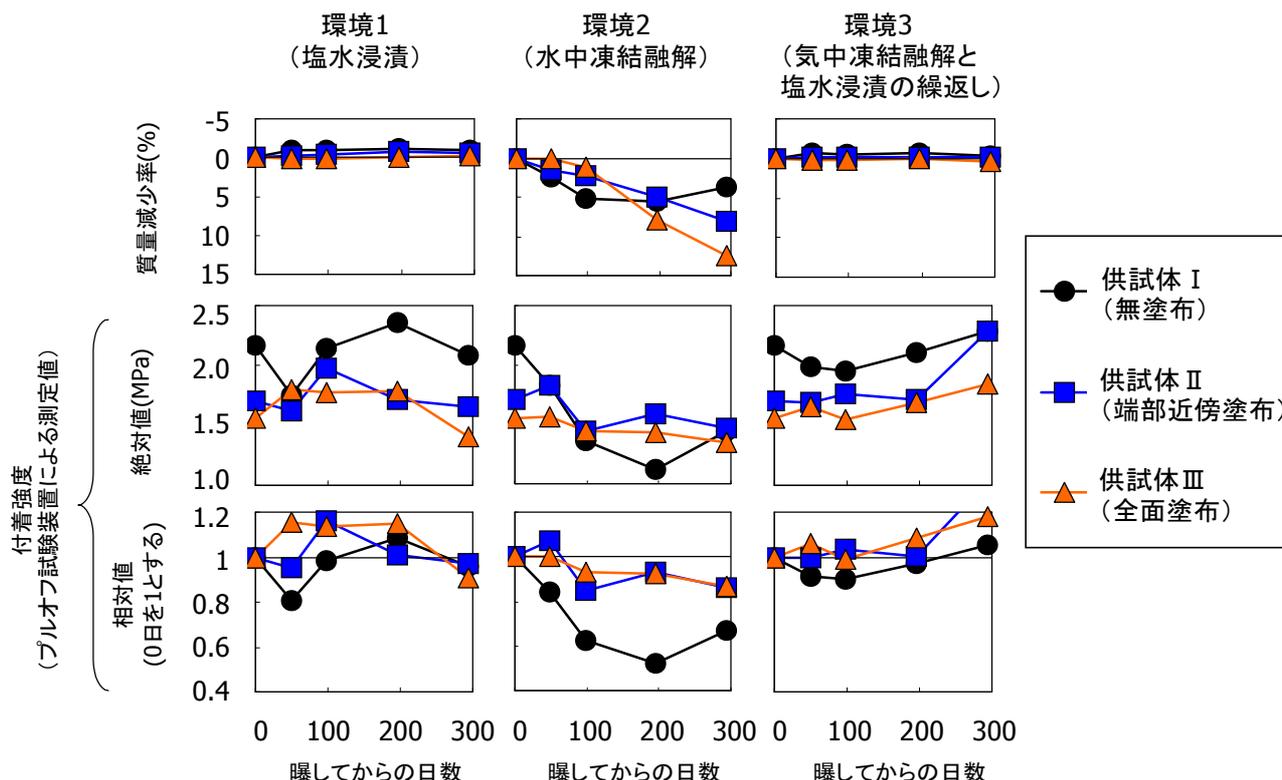


図-3.25 質量減少率および付着強度の経時変化

塗布の供試体 I が比較的大きく、表面水分率は僅かではあるが供試体 I が若干高い傾向にあった。写真-3.17 はプルオフ試験装置による測定を終えた後の供試体の状況を示している。試験装置で引き剥がしたウレタン片の裏面にはコンクリートが付着していた。これは、付着切れが供試体 I、II、IIIのいずれもウレタンとコンクリートの界面ではなくコンクリート表層で発生していることを意味しており、ウレタンとコンクリートの接着の強さはコンクリートの引張強度以上で、表-3.5 に示す値よりも高いことを示している。表面水分率がやや大きかった供試体 I は、コンクリートの水和反応が供試体 II、III よりもやや促進されたために強度が増進したと考えられる。なお、この結果については、

水和反応が十分進行していない若材齢の段階で塗布したことが影響していることも考えられ、水和反応が十分に進行した後に塗布を行うことで、初期の測定値のバラツキの問題は解決できると思われる。

表-3.4 に示す所定の環境に曝した供試体の質量減少率およびプルオフ試験装置による測定の結果（以下、「付着強度」と記す）の経時変化を図-3.25 に示す。質量については、環境1と環境3では殆ど変化が認められず、環境2ではスケーリングによる質量の減少が確認された。環境2のシランを塗布した供試体 II、III の質量減少率は 98 日までは無塗布の供試体 I よりも小さい値で推移したものの、98 日以降から急速に増加に転じた。これは、長時間の強制的な水中凍結融解の繰

り返しによってシラン含浸域に多くの水分が押し込まれ、さらに凍結時に発生する未凍結域への凍結余剰水の移動が細孔壁面に固着している疎水基によって阻害されることで移動時に発生する圧力が高まり、これによってコンクリート表層の凍結水圧が増幅し、大きなスケーリングに至った<sup>3.11)</sup>ことが考えられる。

次に、付着強度について述べる。付着切れはいずれの供試体も写真-3.17に同じく、コンクリート表層で発生していた。環境1と環境3の付着強度の相対値はシランの塗布有無に関わらず、概ね1前後で推移した。中には1よりも高い値を示した供試体もあった。これは付着切れがコンクリート表層で発生していることから、材齢の進行に伴うコンクリートの水和の促進が要因と考えられる。一方、環境2では、供試体Iは2.17MPaから最小で1.1MPaまで低下し、付着強度は約40%減少した。これに対して供試体IIとIIIは、Iに比べると相対値の低下の割合は小さく、シランによって付着強度の低下が抑制されていることが明確に示された。なお、環境2の300日経過時の付着強度の絶対値は、供試体Iの付着強度の初期値が高かったためにいずれの供試体も概ね同値を示してはいるが、相対値のグラフから3つの供試体の品質は同等ではなく、損傷の程度はII・IIIよりもIが大きいと判断される。

図-3.26は水分計で調べた所定の環境に曝す前と曝した後の表面水分率の比較である。図には全ての経過日数のデータを一括プロットした。全体的に無塗布の供試体Iの表面水分率の上昇傾向は供試体II、IIIに比べると大きい傾向にあった。しかしながら、付着強度の低下が認められたのは環境2のみである(図-3.25)。水中凍結融解作用を与えた環境2の無塗布は、大きな凍結水圧に起因してウレタンの背面へ水分が過剰に押し込まれ、背面と接着しているコンクリート組織の凍害損傷が大きく進行したことが要因と考えられる。このことは、適切な管理の下で施工されたウレタンの付着強度は単純な水分供給のみでは低下しにくいものの、付着強度は水分供給と凍結融解の同時作用に起因するコンクリートとウレタンの界面もしくはコンクリート組織の損傷の影響を受けることを示している。図-3.25の環境2では、300日経過時における質量減少率が大きかった供試体II、IIIの付着強度の相対値の低下の割合は、供試体Iよりも小さい結果が示されている。これはウレタンで覆われていない範囲のコンクリートについては凍害で損傷したものの、ウレタン端部の下層に含浸させたシランの効果によってウレタン下層への水分浸透が抑えられたことで、ウレタン下層の品質保

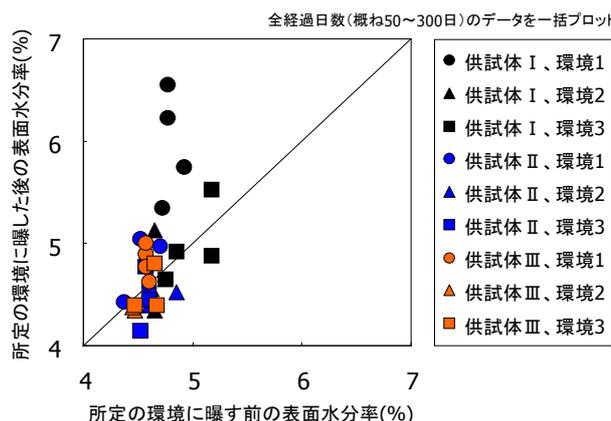


図-3.26 所定の環境に曝す前と曝した後の表面水分率の比較

持ならびに付着強度の低下抑制が図られたことを示している。

### (3) EPMA 面分析 (塩化物イオンの浸透状況)

写真-3.18にシラン無塗布(供試体I)と全面塗布(供試体III)の300日経過後のEPMA画像を示す。切断面の写真から、環境2の無塗布はウレタンの浮きが顕著に生じており、それ以外の供試体は浮きがさほど生じていないことが見て取れる。

環境1におけるウレタンで覆われていない部分の塩化物イオン浸透深さは、無塗布が10~20mmであるのに対し、塗布は数ミリ程度にとどまっていた。また、無塗布はウレタン端部から同心円状に広がる形でウレタン下面へも塩化物イオンが浸透していた。一方、塗布ではこのような傾向が殆どみられなかった。このことから、ウレタン端部へのシランの塗布はウレタン下面への塩化物イオンの浸透抑制に有効と言える。環境2の無塗布はウレタン下面へ塩化物イオンが広範囲にわたって浸透していた。この供試体ではウレタンの浮きが顕著に生じており、ウレタン端部から損傷が生じているウレタン下面へ塩化物イオンが多く浸透していることが確認された。シランを塗布した場合、環境1の塗布とは対照的にウレタンで覆われていない部分は塩化物イオンが深さ10~20mmまで浸透していた。これは、スケーリングによって吸水防止層が欠損したことが影響していると考えられる。一方、ウレタン下面は無塗布とは対照的にウレタン端部からの距離が長くなるにつれて塩化物イオン濃度が減少している傾向がみられ、吸水防止層が欠損するまでの間、シランによるウレタン下面への塩化物イオン浸透抑制効果が発揮されたことが見て取れる。

		切断面 (分析面)	EPMA画像
環境 1	シラン無塗布		
	シラン全面塗布		
環境 2	シラン無塗布		
	シラン全面塗布		
環境 3	シラン無塗布		
	シラン全面塗布		

シラン無塗布 ... 供試体 I、シラン全面塗布 ... 供試体 III

写真-3.18 所定の環境に曝して 300 日経過した後の塩化物イオンの分布を示した EPMA 画像 (凡例の数値は塩化物イオン濃度で単位は質量%)



図-3.27 豊頃町の位置

環境 3 は、気中ながら凍結作用を与えているものの、塩化物イオン濃度分布は環境 1 に近い傾向が示された。

以上の結果から、寒冷環境下でも吸水防止層の損傷・欠損に至らないような場合は、シランによるウレタン下面への塩化物イオン浸透抑制効果が期待できることが明らかとなり、寒冷環境下のコンクリート構造物に施工されるウレタンの剥がれを未然に抑制する技術の一つとして、ウレタンの端部にシランを塗布・含浸させて、ウレタン下層への水分の供給を抑える方法が有効であることがわかった。なお、環境 2 のように大きな凍結水圧が作用する環境下でも、図-3.25 に示したように付着強度の低下の進行を遅らせる効果、また、写真-3.18 に示したようにウレタン背面への塩化物イオンを含む水分の侵入を遅らせる効果が期待できるように思われる。

### 3.3 設計・施工の検討

#### (ウレタンの剥がれ防止技術の施工性の検証)

次に、シランを活用したウレタンの剥がれ抑制技術の施工性を検証するための試験施工を行った。実際の施工では厳しい現場条件の下での作業が要求されることに鑑み、ここでは交通規制や作業時間など施工に際して種々の制約を受けやすい道路橋の床版を試験対象に選定した。

#### 3.3.1 試験施工概要

試験施工は、北海道豊頃町内の道路橋 (以下、本橋と記す) の RC 床版で行った。図-3.27 に位置を示す。平成 22 年度の道路交通センサス<sup>3.12)</sup>によると、本橋における 24 時間交通量は 8167 台、大型車の混入率は 36% である。本橋から最も近い池田のアメダス<sup>3.13)</sup>によると、2011 年 11 月～2012 年 3 月の日最低気温は平均 -12.1℃、最小 -25.5℃ である。最低気温がコンクリートの凍結温度とされる -2℃<sup>3.14)</sup> 以下で、最高気温が -2℃ よりも高い日を凍結融解 1 日とすると、凍結融解日数は

計 84 日、最低・最高気温ともに-2℃以下の凍結持続日数は計 51 日である。本橋は 1983 年 9 月に架設された橋長 984m、幅員 8.5m の鋼橋で内陸部に立地し、冬期は凍結防止剤の散布が行われている。

本橋では 2012 年 10 月下旬に路面の補修工事が予定されていた。補修前のジョイント付近の床版のシュミットハンマー強度を調べたところ 10~15MPa 程度で、中には脆弱で測定不能の箇所もあった。ジョイントからの距離が 20cm までの範囲の床版は塩化物イオンが多く浸透しやすい<sup>3.15)</sup>ことに鑑み、ジョイントから 30cm までの範囲については床版での実績を有し<sup>3.2)</sup>、床版防水に必要な性能を有する<sup>3.16)</sup>ウレタンの適用、ならびにウレタン下面への水の侵入に起因するウレタンと床版の付着の消失<sup>3.17)</sup>を防ぐ観点から、本研究で検討したウレタンの剥がれ抑制のためのウレタン端部へのシランの塗布を端部立ち上がり部に施工することを道路事務所の工事で試験的に実施した。図-3.28 に試験施工の流れを示す。施工手順は、以下のように計画した。

- 1) はじめに、既設舗装を切削・撤去してジョイント近傍の脆弱な床版をはつり取り、その範囲をジェットセメントを使用したコンクリートで補修する。
- 2) 次に、ジョイントから 30cm の範囲にウレタンを施工する。今回選定したウレタンの可使用時間（材料を混合してからの使用可能な時間）は 35 分、初期硬化時間（次の工程を開始できる時間）は 5 時間である。
- 3) ウレタンの施工から 4 時間後にシランをウレタン端部近傍のコンクリート（ジョイント）に塗布する。
- 4) シランを塗布してから 1 時間後に基層ならびに仮舗装スロープを施工する。その際、シランの揮発を抑え、コンクリートへのシランの含浸を促進させるための養生シートをシラン塗布面に貼り付ける。
- 5) 数日後に仮舗装スロープと養生シートを撤去して、表層を施工する。

試験施工はジョイントが路面に露出している P-3、P-6、P-7、P-10 を対象に 1 ピアあたり 4 箇所（L、R 側の起点側と終点側、1 箇所の施工範囲は  $(30+7) \times 850 / 2 \text{cm}^2$ ）、計 16 箇所で行った。施工は 2012 年 10 月 22 日~11 月 9 日に行った。池田のアメダス<sup>3.13)</sup>によると、施工期間の平均気温は 5.0~10.8℃である。

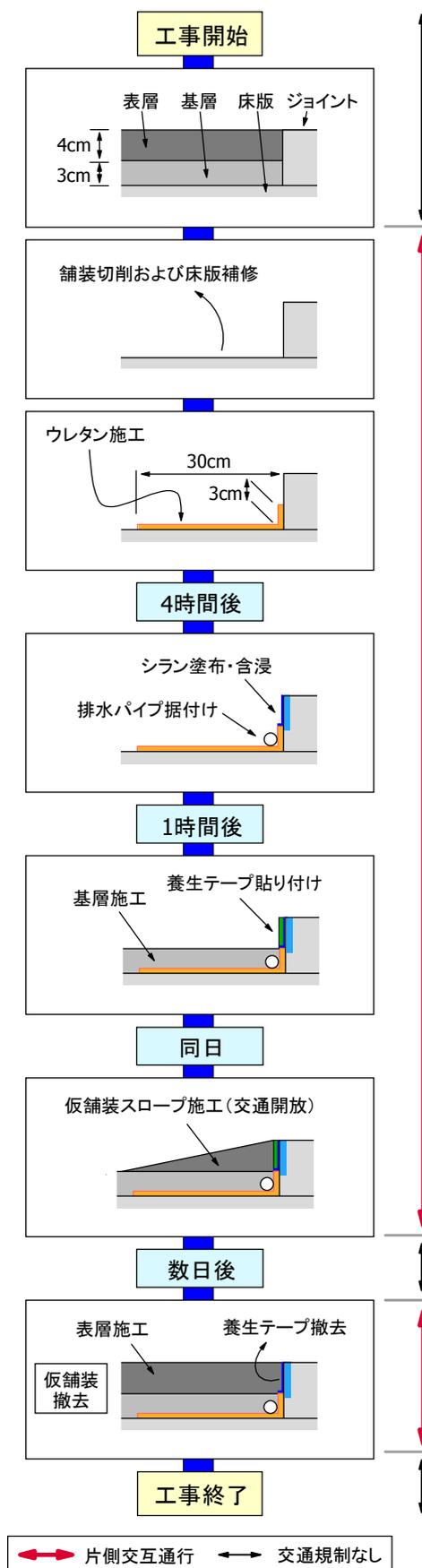


図-3.28 試験施工の手順



脆弱部の打換え



プライマー塗布



ウレタン施工



ウレタン端部へのシラン塗布

写真-3.19 施工の状況 (P-7)

なお、本技術の施工範囲以外の床版には加熱型塗膜系防水材料が施工された。

### 3.3.2 試験施工結果・考察

#### (1) 施工性の評価

写真-3.19 に施工状況 (P-7) を示す。道路橋床版において施工性を検証した結果、大きなトラブルもなく、

表-3.6 1箇所あたりの所要時間

作業項目	施工面積	所要時間
プライマー塗布	(30+3)×	3分30秒
ウレタン施工および珪砂散布	425cm <sup>2</sup>	9分15秒
シラン塗布	4×425cm <sup>2</sup>	6分30秒
合計		19分15秒

床版工 (撤去) と舗装工 (撤去・施工) の時間ならびに準備時間は含まず

表-3.7 床版防水工費の比較

施工方法	費用
<p>床版全面に加熱型塗膜系防水材料</p>	1.000
<p>加熱型塗膜系防水材料 ウレタン 30cm 7cm</p>	1.052
<p>加熱型塗膜系防水材料 ウレタン シラン 30cm 4cm 3cm</p>	1.048

<条件>

- ・橋長：984m
- ・幅員：8.5m
- ・ウレタン施工箇所：A-1、P-3、P-6、P-7、P-10、A-2 (今回の試験施工では A-1、A-2 での施工は行っていないが、この表では A-1、A-2 でも施工を行うと仮定して積算)
- ・ウレタン施工箇所以外の床版には、加熱型塗膜系防水材料を施工

交通開放に支障をきたすことなく施工が行えることが確認された。表-3.6 は 1 箇所あたりの所要時間を示している。1 箇所あたりの作業は 19 分 15 秒、16 箇所ですべて 5 時間 8 分を要した。なお、実際はウレタン施工後、シランの塗布を開始するまで 4 時間待機する必要があり、作業員の拘束時間はこれよりも長くなる。作業員

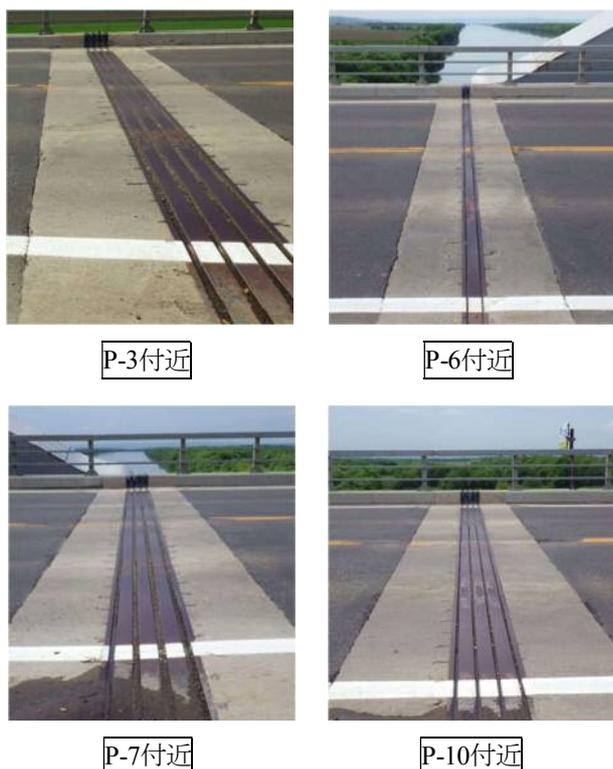


写真-3.20 施工後1冬経過後の現場の路面の状況

の拘束時間の縮減に資する効率的な施工システムについては今後の検討課題としたい。

## (2) コストの評価

今回の試験施工の範囲で床版防水工費の比較を行った。表-3.7 に費用を示す。今回考案した技術を道路橋床版のジョイント近傍に適用すると床版全面に加熱型塗膜系防水材料を施工する場合に比べると初期の施工費のみの比較では約 5%のコストアップとなるものの、床版の性能保持効果や維持管理および更新を含めたライフサイクルコストの評価も大切であり、追跡調査を継続して検証を行っていく必要がある。

写真-3.20は施工から1冬経過後の現場の路面状況を示している。現時点においては路面に変状は見受けられず、状態は安定している。今後も定期的に観察を継続する予定である。

## 4. シート工法

### 4.1 研究背景と目的

老朽化した既存コンクリート構造物が増加しており、様々な補修補強工法が施工されている。中でも、高強度、軽量である繊維シート接着工法（以下、シート工法）は床版や橋脚の補強をはじめとして様々なコンクリート部材に適用されている。また、シート工法は補強のみならず塩化物イオン等の劣化因子の浸入を

防ぐ機能を併せ持っており、表面被覆工法の一つとして表面保護工法指針（案）<sup>4.1)</sup>にも記載されている。しかしながら、凍害・塩害環境下におけるシート工法の劣化作用に対する耐久性については十分に明らかではなく、シートの表面に浮きやひび割れが生じている事例も報告されている。このような背景から、本研究では、凍害・塩害環境下におけるシート工法の適切な設計施工法を提案することを目的に、資料調査、現地調査および室内試験等によってシート工法の耐久性評価を行うものである。

### 4.2 資料調査

#### 4.2.1 調査概要

北海道の国道における橋梁・覆道の道路コンクリート構造物を対象に、2004年度（平成16年度）から2008年度（平成20年度）までの5年間のシート工法施工実績を収集した。主な調査整理内容は、施工年度、適用構造物及び部位、繊維シート（以下、シート）の種類、プライマーなどの使用材料についてである。

#### 4.2.2 調査結果

図-4.1 に適用部位の内訳を、図-4.2 に使用材質の内訳を示す。調査対象としたシート工法の施工箇所は合計46箇所である。図-4.1より、87%（40箇所）が橋梁、13%（6箇所）が覆道であった。施工された部位は橋脚に続き床版が多く、この2つで全体の85%を占めている。なお、覆道における適用部位は、全て柱が対象であった。

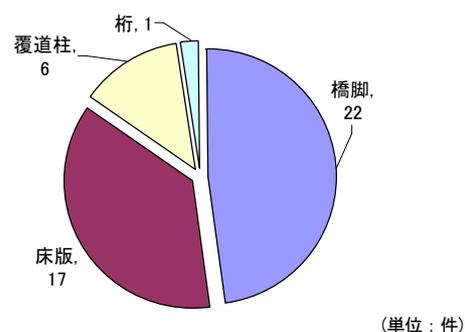


図-4.1 道路構造物におけるシート工法の適用部位の内訳（2004～2008年）

図-4.2(a)に樹脂（プライマー、パテ、接着剤）の種類内訳を示す。樹脂の材質はほとんどがエポキシ樹脂であり、唯一エポキシ樹脂以外で使用実績があったのはアクリル樹脂であった。なお、アクリル樹脂は硬化が早く同日でプライマーから接着剤までの施工が可能であるものの、単価がエポキシ樹脂に比べて1割～3割程度高くなっている。一方、エポキシ樹脂は硬化ま

で1日要するため工期は長くなるものの、アクリル樹脂に比べて安価であることから使用実績が多いものと考えられる。

図4.2(b)に繊維シートの種類内訳を示す。繊維シートは炭素（カーボン）繊維が約8割を占め、次いでアラミド繊維、ガラス繊維、ビニロン繊維の順であった。炭素繊維シートは比較的安価であり、古くから補強材としての施工実績が多い。アラミド繊維やビニロン繊維は、靱性を有し、曲げやすい素材であることから、床版の繰り返し疲労対策や覆道柱などの衝撃対策、および加工が難しい部位に最近施工実績が増えてきている。ガラス繊維は加工し易く、最も安価であるが、耐薬品性が低く、海水に弱いことなどから使用箇所が限定され、今回の調査では剥落防止工としての使用実績のみが確認された。

図4.2(c)に保護材の種類内訳を示す。ポリマーセメントモルタル系は橋脚と覆道柱に使用されており、エポキシ系は床版と桁に使用されていた。ポリマーセメントモルタルは安価であるが、増厚できない部位や橋梁上部の死荷重軽減には高価なエポキシ系が用いられる。保護材の役割は外的要因によるシートの損傷防止であり、車両や河川流下物などの衝突の可能性がある部位や、紫外線劣化し易い繊維シートに直接紫外線が当たらないように保護するために用いられる。

図4.2(d)に、保護材表面の上塗り剤の種類内訳を示す。ウレタン樹脂系の使用が6割を占めていた。一般にウレタン樹脂系は安価であり、顔料による着色が可能で外観上也優れていることから、幅広く使用されていると思われる。フッ素系とエポキシ系は非常に優れた耐久性を有しているが高価であることから、非常に厳しい環境での使用に限定される。

### 4.3 室内耐久性試験

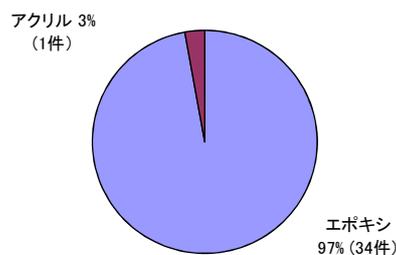
シート工法の現地調査結果を受けて室内耐久性実験を計画・実施した。実験は、凍害・塩害環境下におけるシート工法の凍結融解抵抗性に関する試験と、現地調査において変状が見られた箇所を再現する現場劣化状況再現試験の2種類を実施した。

#### 4.3.1 実験概要

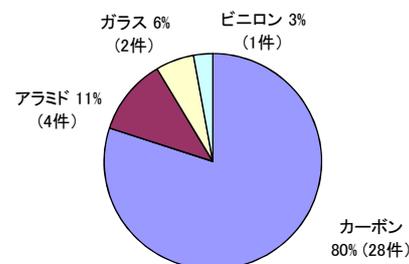
##### (1) 凍結融解抵抗特性に関する基礎試験

シート工法の凍結融解抵抗性に関する基礎データを収集することを目的に、現場で最もよく使用されている炭素繊維シートおよびエポキシ樹脂を用いて、保護材や上塗り材の種類を変化させた一面凍結融解試験

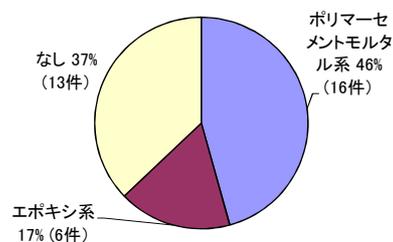
(図4.3)を行った。表4.1に実験ケースの一覧を示す。各ケースとも凍結融解サイクルは300回まで実施し、



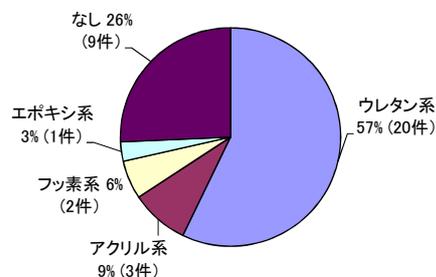
(a) 樹脂（プライマー、パテ、接着剤）の種類



(b) 繊維シートの種類



(c) 保護材の種類



(d) 上塗り剤の種類

図4.2 近年の道路構造物におけるシート工法の使用材質の内訳

目視やサーモグラフィによる外観調査や、付着強度試験（建研式）、透水量試験（JSCE K-571）、コンクリート中の塩化物イオンの分析試験（JISA1154）、透水量試験（JSCE-K571）を行った。

##### (2) 現場劣化状況再現試験

現地調査での変状原因を推定し、現場条件を簡素化して再現した一面凍結融解試験（図4.4）を行う。表4.2に実施する再現試験の一覧を示す。V-F、V-Cシリーズでは床版の下面に浮きが生じた現場を想定し、供試体

にひび割れを模擬したφ5mmの貫通孔を設けて間隙水の影響について実験する。C-Uシリーズでは施工不良を想定し、供試体のシート接着面に□5×1cmの断面欠損や□5cmの接着材不足箇所を設けることで初期不良の影響について実験する。C-Pシリーズでは詳細

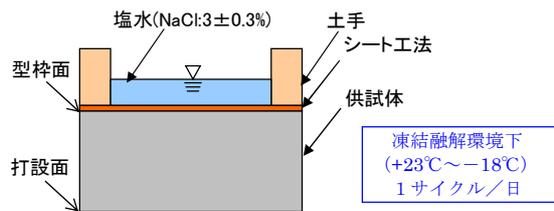


図-4.3 一面凍結融解試験の概要

表-4.1 凍結融解抵抗特性に関する基礎試験ケース一覧

供試体名	シート工法施工仕様				水
	繊維シート	接着剤	表面保護材	上塗り材	
Pk	カーボン (1層)	エポキシ 樹脂	ポリマーセメン トモルタル	カチオン系	塩水 (NaCl: 3%)
Pn			柔軟型フッ素樹脂塗装	ノニオン系	
F				柔軟型ウレタン塗装	
U-C				柔軟型ウレタン吹付け	
U-S					

表-4.2 現場劣化状況再現試験ケース一覧

供試体名	シート工法施工仕様				水	備考
	繊維シート	接着剤	表面保護材	上塗り材		
V-F-C	ビニロン (1層)	エポキシ 樹脂	ウレタン塗料		塩水	ひび割れ孔あり
V-F-N					塩水	含水状態
V-F-N2					なし	乾燥状態
V-C-C					塩水	ひび割れ孔あり(常温)
C-U-U	カーボン (1層)	エポキシ 樹脂	ウレタン塗料		なし	不陸調整
C-U-E					なし	接着剤なし
C-P-S	カーボン (1層)	エポキシ 樹脂	ポリマーセメン トモルタル	—	塩水(少量)	乾湿繰り返し
C-P-N				—	なし	乾燥状態

凍結融解環境下 (+23°C~-18°C : 1サイクル/日)

常温環境下 (+20°C)

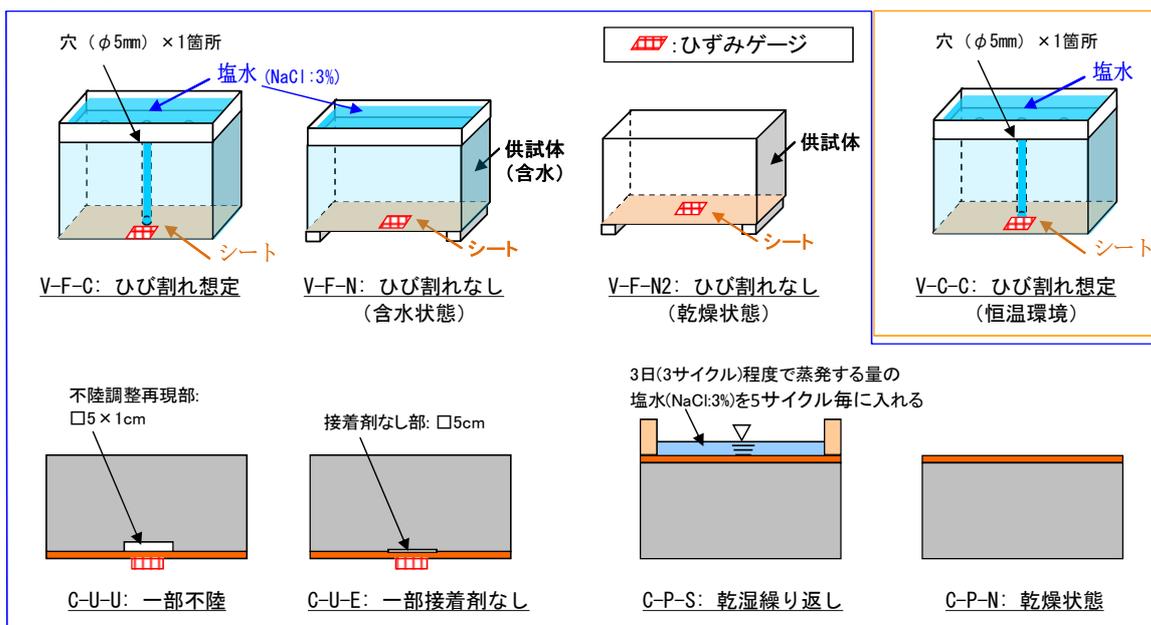


図-4.4 現場劣化状況再現試験の各試験ケースの概要

表-4.3 母材コンクリートの配合表

セメントの種類	粗骨材の最大粒径	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				スランプ (cm)	空気量 (%)
				W	C	S	G		
早強	25mm	40	42	145	363	787	1063	5.7	5.3

調査を行った A 橋を想定し、シート工法表面の保護材が水分供給を受けて乾湿を繰り返す場合の影響について、3 サイクル程度で蒸発する少量の塩水を 5 サイクル毎に供給する実験を行った。

各再現試験とも凍結融解サイクルは 300 回まで実施し、目視やサーモグラフィによる外観調査や、打音による変状検査を行った。

### 4.3.2 使用材料および供試体作成

使用材料および供試体の寸法・作成方法は、基礎試験および再現試験の両者とも同じである。母材コンクリートの配合を表-4.3 に示す。セメントには早強ポルトランドセメントを使用し、粗骨材には小樽見晴産の碎石を、細骨材には苫小牧樽前産の海砂を使用した。コンクリートの水セメント比は 40% とし、目標スランプ 8 ± 2.5cm、目標空気量 4.5 ± 1.0% として配合を決定した。

供試体寸法は □22 × 10cm とした。コンクリートの打設は 2 層打ち込みで、打設面は小手仕上げとした。材齢 1 日で脱型し、材齢 28 日まで水中養生を行った。その後、シートの接着性確保のために表面水分率が 7% になるまで気中乾燥させ、シートを施工した。なお、供試体のコンクリート側面はエポキシ樹脂によるコーティングを行っている。

### 4.3.3 実験結果

#### (1) 凍結融解抵抗特性に関する基礎試験

##### 1) 目視検査、赤外線検査

基礎試験供試体の凍結融解試験 300 サイクル終了後のシート施工の撮影写真（赤外線含む）を図-4.5 に示す。試験体 Pk の上塗り材（カチオン系アクリル樹脂）に剥がれが見られたものの、全ての試験体において、母材コンクリートと繊維シートとの間における浮き変状は生じていなかった。

##### 2) 付着強度試験

付着強度試験の結果を図-4.6 に示す。全ての供試体の強度は 1.5N/mm<sup>2</sup> 以上となっており、シート工法とコンクリートとは十分な付着を有している。なお、繊維シートと母材コンクリートとの付着力を計測するため、ポリマーセメントモルタルによる表面保護材を有している試験体 Pk, Pn においては保護材をはつり除去し、炭素繊維シートに付着治具を接着して試験を行っ

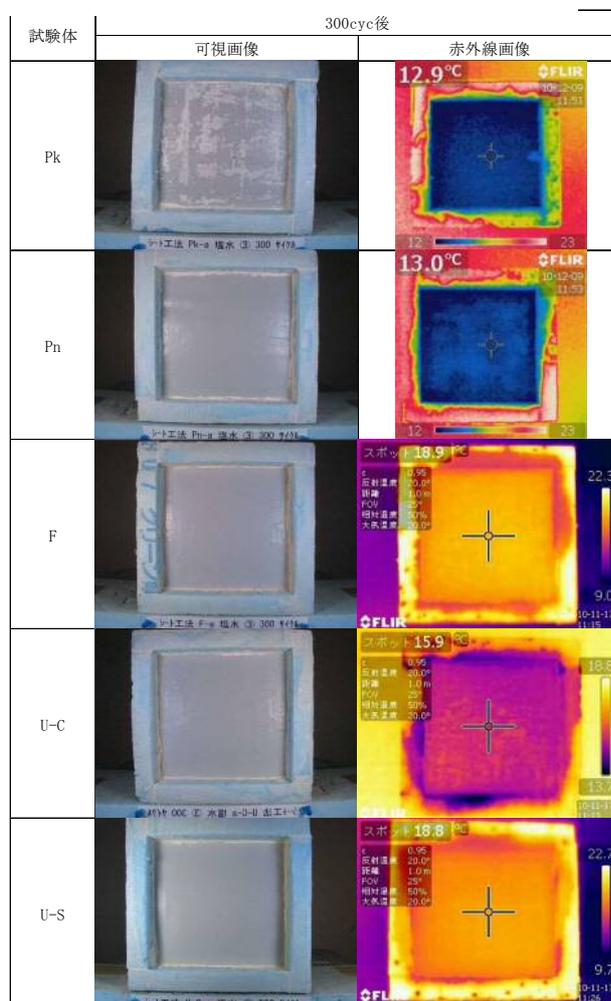


図-4.5 基礎試験供試体凍結融解試験 300 サイクル後のシート面画像（可視・赤外線）

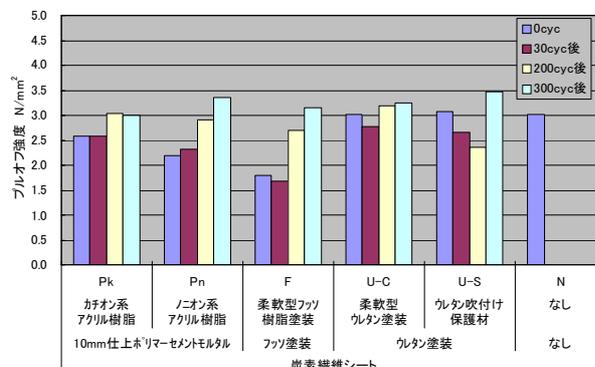


図-4.6 付着強度試験結果



写真-4.1 附着強度試験の破壊面

た。附着強度は各ケースとも凍結融解サイクルの進行に伴って漸増する傾向にあるが、試験体の破壊面がいずれも母材コンクリートであったことから（写真-4.1）、母材コンクリートの強度増進に伴い、附着強度も増加したと考えられる。

### 3) 透水量試験

透水量試験の結果を図-4.7に示す。常圧透水で7日間の変化を観察したが、透水量の変動は使用したメスシリンダーの最小目盛り0.1ml程度であった。透水量が最も大きい試験体は、ポリマーセメントモルタルによる保護層を有する試験体 Pk, Pn で、0.2ml (=6.5 ml/m<sup>2</sup>·day) であった。これらの試験体では、図-4.8に示すシート工法の断面のうち、上塗り材の上にメスピペットを置いて実施したため、水が保護モルタル内に浸透し、繊維シートの奥の母材コンクリートまで浸透していないと考えられる。このため、表面保護材の保護モルタル部をはつり除去して透水量試験を再度行った。その結果、浸透した水量は0.05~0.10mlであり、繊維シート部（炭素繊維シート+エポキシ接着含浸樹脂）は十分な遮水性を有しており、母材コンクリートへの水分浸透は少量であることが確認できた。

### 4) 塩化物イオン量

コンクリート中の塩化物イオンの分析試験の結果を図-4.9に示す。分析にあたってはシート工法部を除くコンクリート表面から深さ2cmまでを試料とした。母材コンクリートの一面凍結融解試験前(0サイクル)の全塩分量は0.05kg/m<sup>3</sup>であった。それに対し、塩水を張った一面凍結融解試験後の各試験体の全塩分量は、同等程度もしくは微増となった。しかしながら、母材コンクリートまで浸透した塩分の絶対量は少なく、各試験体の遮水性の高さが反映された結果となった。

#### (2) 現場劣化状況再現試験

##### 1) 目視検査、赤外線検査、打音検査

300サイクル終了後に目視および赤外線カメラによる外観調査を実施し、また、打音検査による浮きのチェックを行ったが、いずれの試験体でも新たな浮き

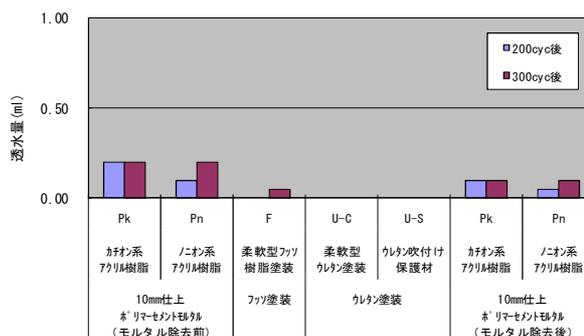


図-4.7 透水量試験結果

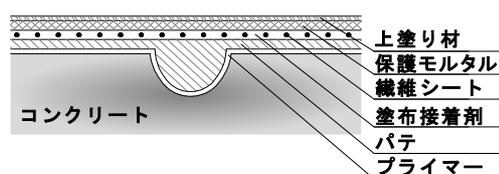


図-4.8 シート工法の断面図

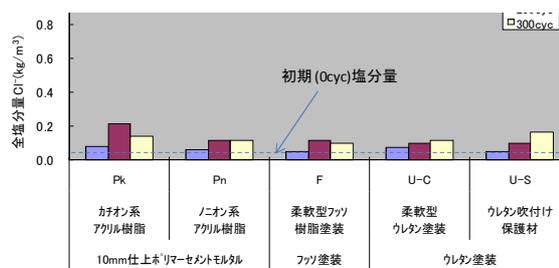


図-4.9 塩化物イオン量試験結果

は発生や拡大は生じなかった。

#### 4.3.4 試験結果考察

室内試験の結果、一面凍結融解のサイクルの進行に伴う表面保護材やシートの浮きは無く、シートの附着強度も高い水準にあった。また、シートの遮水性や遮塩性に対しても十分な機能を有することを確認できた。今回の室内試験では、繊維シートの凍結融解抵抗性を確認するため、母材コンクリートでの凍害劣化が生じないように水セメント比を低く設定していることから、健全なコンクリートに対して適切な施工方法で繊維シートが接着された場合には、シート工法は十分な凍結融解抵抗性を有すると考えられる。

#### 4.4 実構造物の耐久性調査（変状確認調査）

##### 4.4.1 調査概要

資料調査で情報提供のあった当初の46構造物に、さらに9構造物を加えた計55構造物から、現地条件（地形や架橋の高さなど）により調査することができない3構造物を除いた52構造物を対象に現地調査を行った。現地調査では、目視、打音法<sup>4.2)</sup>、サーモグラフィ法<sup>4.3)</sup>

によって浮きなどの変状の有無を調査した。今回の調査では、対象とした 52 構造物のうち、39 構造物で打音調査を、50 構造物でサーモグラフィ調査を実施した。現地調査は 1 構造物あたり 2～3 年に 1 回の頻度で実施し、変状の有無の他、経年変化についても観察した。

#### 4.4.2 変状の種類

調査箇所のうち、何らかの変状が確認された構造物は 35 箇所(67%)であった。このうち、全ての箇所で「浮き」変状が共通して発生していた。本文中で言う浮きとは、シート工法施工箇所の表面に写真-4.2, 4.3 に示すような空気溜まりまたは水溜まりが生じてシート工法を構成する材料が構造物から剥離している状態をいう。なお、写真のように浮き箇所がふくれ、目視でも確認できる状態になっていた構造物は 4 箇所のみで、多くの場合、浮き変状の表面は平滑であった。

浮き以外の変状としては、保護材にポリマーセメントモルタルを使用している大半の橋脚においてひび割れ変状が発生していた。そのうち、施工部位からエフロレンスが発生している箇所もあった(写真-4.3)。また、上塗り剤の塗膜に、はがれやひび割れが発生している構造物も 5 箇所程度確認している。

#### 4.4.3 調査方法の適用性

前述のように、通常、浮き変状の表面は平滑なため、目視調査のみで浮きを発見することは難しい。そのため、打音法<sup>4.2)</sup>やサーモグラフィ法<sup>4.3)</sup>によって変状調査を行う必要がある。

変状箇所のうち、打音調査で検出した浮き変状は翌年以降の経年変化観察でも同様に検出できた一方、サーモグラフィ調査で検出した浮き変状は翌年以降の調査で検出できない場合があった。サーモグラフィ法は写真-4.4 に示すように構造物表面の温度差から浮きを検出するものである。このため、日射や外気温などの影響を大きく受けるが、今回の調査では調査箇所を短時間で巡回し、必ずしも撮影に適した天候や時間帯とはならなかったため、調査年度によって浮きを検出したりしなかったりと不安定な結果となったと考えられる。サーモグラフィ法は、打音検査を実施することが難しい床版下面や高橋脚などであっても、撮影条件さえ整えば容易に浮き変状調査ができる一方、タイミングによっては浮き変状を見逃すケースもあるため、実施に当たっては十分な取扱い知識と余裕を持った調査工程の設定が重要である。

#### 4.4.4 変状の発生要因分析

図-4.10 に調査対象の構造物の種類・部位、位置、シート材質、樹脂材質、上塗り剤材質、シート層数ごとの



写真-4.2 床版下面のシートに生じた浮き



写真-4.3 橋脚のシート工法に生じた浮き  
(保護モルタルのひび・エフロ・浮き)

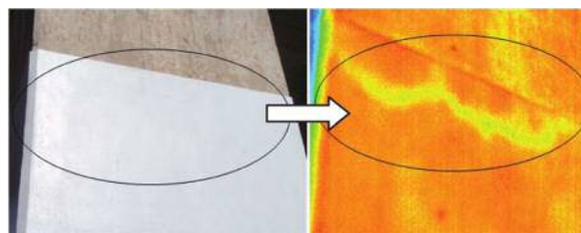


写真-4.4 サーモグラフィを用いた浮きの検出

変状の有無および経年変化(浮きの拡大や増加)の有無を示す。また、各項目ごとの変状が発生した割合(変状率)についても併せて示す。

構造物の種類に着目すると、橋梁上部工や橋脚では変状率が 6 割程度であったのに対し、覆道柱では全ての調査構造物で浮きなどの変状が見られた。調査した覆道は全て海岸線沿いで、塩害による鉄筋腐食に対する補修補強対策として施工されている。箇所によっては施工部位に直接波浪を受けており、他の構造物に比べて非常に厳しい塩害環境下にあった。このため、覆道柱では変状の発生が高くなった可能性が考えられる。また、上部工および橋脚にシート工法を適用した構造物について、構造物の位置に応じて沿岸部と内陸部に分類すると、沿岸部の構造物で変状が発生しやすい傾

向が確認できた。

次にシート工法の使用材質に着目すると、ガラス繊維、ビニロン繊維、アクリル樹脂などの調査箇所数が少ない材質以外ではいずれも 60~70%程度の変状の発生率となっており、繊維シートや接着樹脂、上塗り材の材質による差異は確認できなかった。

繊維シートの層数に着目すると、シートの貼り重ね枚数が少ない場合に変状が多く確認された。シート工法では、繊維シートをエポキシ系の接着含浸樹脂によって硬化させて用いるため、シートの表面はコンクリートと同様に硬い。そのため、シート層数が多い場合には変状が発生していても認識できない可能性がある。

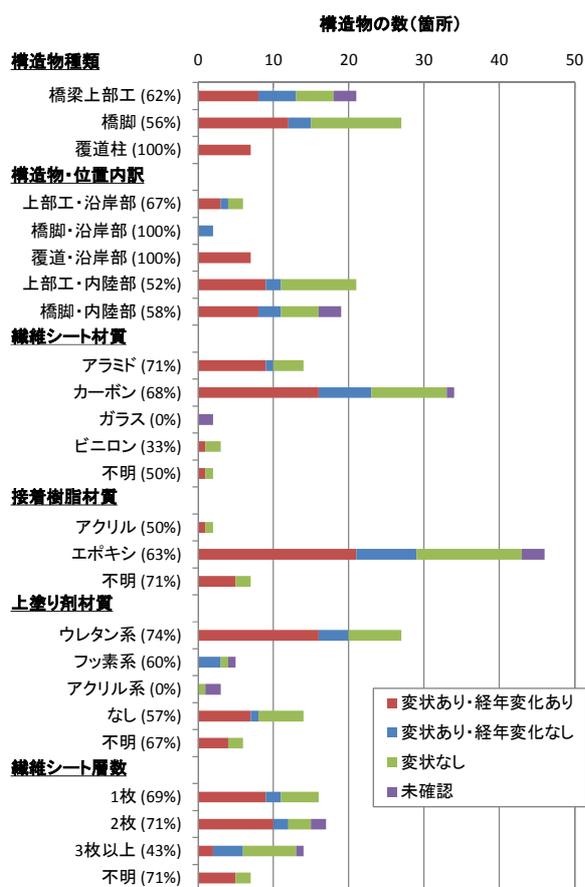
これらのシート工法の浮き変状の原因を解明することを目的として、大きな変状が確認された構造物や、変状の拡大を確認した箇所のうち拡大速度の速かった構造物を対象に、現地詳細調査の実施と設計・施工において改善すべき点を検討する。

#### 4.5 変状詳細調査（その1・橋脚）

##### 4.5.1 調査対象構造物と変状状況

調査した箇所のうち、研究初年度時点で面積が最も大きい浮きが確認された A 橋の P1 橋脚を対象に詳細調査を行った。A 橋は昭和 43 年に架設された橋長 228m の 7 径間の歩道橋で、内陸部に位置している。また、シート工法は平成 16 年に耐震補強を主目的として、橋脚に巻き立てる形態で施工されている。繊維シートの材質は炭素繊維、保護層の主材にはポリマーセメントモルタルが用いられている。A 橋に施工されたシート工法の断面構成を表-4.4 に示す。

P1 橋脚の表面は大きな浮きと多数のひび割れが発生し、最も大きいひび割れ幅は 0.5mm 程度であった（写真-4.5）。また、打音調査により想定される浮きの範囲は幅 60cm 程度、高さ 170cm 程度であった。なお、他の橋脚も同様にシート工法が施工されているが、他の橋脚は変状が確認されないか、確認されてもその範囲は小さいものであった。P1 橋脚では、変状部位に伸



※ 括弧内の数字は、各項目に占める「変状あり」の割合

図-4.10 変状の発生割合

表-4.4 剥落抑制工の断面構成

箇所	材質
プライマー	エポキシ系
パテ (不陸調整)	エポキシ系
下塗り樹脂	エポキシ系
繊維シート	炭素繊維 (2層)
上塗り樹脂	エポキシ系
保護材	ポリマーセメントモルタル
保護塗装	水系ウレタン



写真-4.5 変状状況の外観（点線は浮きの範囲）



写真-4.6 漏水状況



写真-4.7 保護材除去後の状況

縮装置から漏れた融雪水が供給されているのを確認している（写真-4.6）。このため、PI 橋脚の変状が広範囲であることは橋面からの漏水が影響を及ぼしたことによるものと推察される。

#### 4.5.2 調査内容

詳細調査は2回に分けて行った。

最初の調査では変状範囲および原因を特定するため、保護層をはつり、浮き境界面の位置、浮きの高さ、浮きの面積、浮き部除去後の表面状態確認を行った。

2回目の調査では、露出した繊維シートの浮き境界面の位置、浮きの高さの他、繊維シートの引張附着試験を行った。

#### 4.5.3 変状原因に関する調査結果

調査の結果、写真-4.5 に示した大きな浮きの界面はシートと保護層との間であることがわかった。また、その範囲は最大で縦 163cm、横幅 78cm（写真-4.7）であり、浮きの高さは最大で 3mm 程度であった。除去後における保護層のシートとの接着面を観察するとシート表面の凹凸と同様の凹凸が確認されたことから、施工当初は密着していたものと考えられる（写真-4.8）。大きく変状していた保護層であるが、保護層（ポリマーセメントモルタルおよび上塗り剤）はあくまでもシートや接着樹脂を衝突物や紫外線劣化等から保護するために設けられたものである。なお、劣化因子侵入の抑制効果はシートの接着剤にもあることから、保護層の変状だけでは、既設構造物への劣化因子侵入抑制効果が急速に低下するものではないが、保護層の浮き変状に帰因して変状部に滞水しやすくなり、凍結融解作用による劣化が進行することなどが懸念されることから、



写真-4.8 保護材のシートとの接着面の状況

早期の補修が望まれる。

本調査箇所における保護材の浮きは、何らかの原因により局部的な浮きが生じた後、融雪水などの水分の供給による凍結融解作用によって拡大したものと推察される。変状拡大の原因となった局部的な浮きが生じたのは、接着剤の不足やポリマーセメントモルタルの収縮ひび割れの可能性などが考えられる。

#### 4.5.4 繊維シートの変状状況調査結果

保護材をはつり露出させたシートの表面においても、打音調査により 3 箇所直径 5cm 程度の浮きを、サーモグラフィにより 5 箇所直径 2~3cm の狭小な浮き変状が確認された（写真-4.9）。調査日の天候は晴

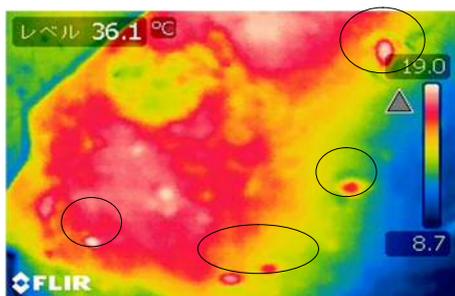


写真-4.9 サーモグラフィによる浮きの検出



写真-4.10 剥離状況



写真-4.11 引張付着性試験位置

表-4.5 引張付着試験結果

	試験No.			平均値
	1	2	3	
目標値	1.5			
施工当初	3.06	2.88	2.56	2.83
上側	3.13	3.13	3.13	3.13
下側	3.13	3.13	3.06	3.11

れ、最高気温は 3℃であった。調査時には直射日光が調査対象部位に当たっていたことから、シート表面の温度が外気温よりも上昇し、特に空気溜まりである浮き変状部の温度が周辺より高く上昇したことで、サーモグラフィによる検出を容易にしたものと考えられる。

露出させたシート表面の浮きを調査した結果、浮きの界面は主に1層目と2層目の間であることがわかった。また、その浮き高さは最大で 2mm 程度であった（写真-4.10）。また、打音では検出できず、サーモグラフィにより検出した部位についても調査した結果、狭小な浮きが生じていることを確認した。通常、シート工法は施工直後に打音調査により浮きの確認を行い、浮きが確認された場合には注入による処置を行う。しかしながら、本調査により、狭小の浮きについては打音のみでは確認しにくいことがわかった。

また、これらの浮きは、主にシートとシートの継ぎ手部に発生していること、浮きの界面が主に1-2層目間であることから、1-2層目間の樹脂量の不足や樹脂が十分に含浸されていないことが原因と考えられる。なお、今回の調査の範囲内では、シート自体の浮きの面積はシートの施工面積と比較して大きな

いため、シート工法の主目的である耐震補強効果への影響はほとんどないものと考えられる。

#### 4.5.5 繊維シートと母材コンクリートとの付着強度

写真-4.11 に引張付着性試験の実施位置を示す。引張付着試験は前述の目的から水が滞水しやすい下側と、滞水しにくい上側の2箇所について各3試験を行った。なお、接着部の検出はサーモグラフィにより行った。

表-4.5 に引張付着性試験の結果の一覧を示す。表には、管理目標値および施工当初の試験結果を併記している。表より、繊維シートとコンクリートとの付着力は、施工当初とほぼ同程度であり、工法の合否判定値である 1.5N/mm<sup>2</sup> を上回っていた。また、表中 3.13 N/mm<sup>2</sup> は試験器の最大荷重であることや、各試験ともに母材コンクリートで破壊していることから、十分な付着力を有していることがわかった。以上のように、調査の時点では、経年や水分の付着等による付着力の低下は確認できなかった。

#### 4.6 変状詳細調査（その2・剥落防止工）

##### 4.6.1 調査対象構造物と変状状況

調査箇所のうち、写真-4.12 に示すような浮きの拡大・進行が確認された B 橋を対象に、浮き原因を確認

するための詳細調査を行った。B 橋は昭和 28 年架橋、橋長 80m の沿岸部に位置する 3 径間ゲルバーRC 橋で、上下線に鋼鈹桁橋の歩道橋が添架されている。橋梁下を通行する遊歩道があり、また、上部構造のコンクリートの劣化が進行していたことから、コンクリート片の剥落防止を目的として、平成 18 年に連続繊維シートによる補強が行われた。剥落防止工は、上部構造の下面側の主桁・床版全体を覆う形で施工されている。また、床版防水工も同時期に施工されている。B 橋に施工されたシート工法の断面構成を表-4.6 に示す。

#### 4.6.2 調査内容

今回の調査では、サイズの大きな浮き箇所を対象に、はつり調査、引張接着性試験（建研式）、中性化測定、塩化物イオン量測定を実施した。また、変状がなく健全と判断した箇所よりコンクリートコアを採取し、中性化測定、塩化物イオン量測定、圧縮強度試験、超音波伝播速度測定を実施し、変状箇所と比較した。

#### 4.6.3 はつり調査による浮き原因の考察

はつり調査では、最初に  $\phi 75 \times 40\text{mm}$  のコアをコンクリートのかぶり部分より採取した後、浮きの周長をベビーサンダーで切断し、浮き部分を分離した。はつり調査箇所の一覧写真を表 4.6 に示す。

浮き変状のうち、表-4.7①および②の浮き箇所では、はつり取ったシートに数 mm~10mm 程度の断面修復材が付着しており、その表面は平滑であった。施工当時の資料を確認したところ、当該箇所では深さ 60mm 程度の断面修復を数層にわけて実施していた。そのため、浮きの界面は断面修復材の層間であると考えられる。当時使用した断面修復材は必要厚さ 10mm 以上とされているのに対して、シートに付着していた断面修復材が 10mm 以下であったことから、複数層で施工した断面修復工のうち、最後の仕上げ層が必要厚さを満たせず、経年によって剥離したものと考えられる。

浮き変状のうち、表-4.7③の浮き箇所は、降雨が 1 週間無い場合でも、浮きの中央部分に空いた小さな孔から水滴の断続的な落下が見られた箇所である。また、表-4.7③および④の浮き箇所のコア削孔前に繊維シートに小さな穴を開けたところ、数リットル規模の出水がみられ、シートの内側に水が貯まっていることが確認できた。また、はつり後に露出したコンクリートは飽水した状態であった。なお、浮き箇所③④では断面補修工は実施されていない。また、どちらの浮き箇所も、RC 桁の下面側に生じた浮きであるが、RC 桁の側面には水みちとなる変状は見当たらなかった。そのため、床版上面側からコンクリート内部を伝わって水が



(1) 床版下面 (60×80cm 程度)



(2) 床版下面 ( $\phi 10 \rightarrow \phi 20\text{cm}$  程度)



(3) 主桁下面 (なし  $\rightarrow 30 \times 60\text{cm}$  程度)

写真-4.12 変状の進展状況

表-4.6 剥落抑制工の断面構成

箇所	材質
断面修復材	無収縮モルタル
プライマー	アクリル系
パテ (不陸調整)	軽量樹脂モルタル
下塗り樹脂	アクリル系
繊維シート	ビニロンメッシュ
上塗り樹脂	アクリル系
保護塗装	ウレタン系



写真-4.13 コンクリートの層状剥離

表-4.7 はつり調査箇所一覧

	はつり前	はつり後	シート片
浮き① (床版)			
浮き② (床版)			
浮き③ (主桁)			
浮き④ (主桁)			
浮き⑤ (床版)			
⑥健全部 (主桁)			

浸透した可能性が大きい。露出したコンクリート表面に着目すると、表-4.7③箇所では、一部が砂利状で、層状剥離も見られた（写真-4.13）。なお、はつり取ったシート側には層状のコンクリート片が付着していた。一方、表-4.7④箇所では、コンクリート表面は平滑であり、コンクリートの層状剥離などはみられず既設コンクリート部は健全な状態であった。どちらの浮き箇所でも早朝にはシート内側の水分の凍結が生じていたことから、既設コンクリート内部を浸透してきた水分が、シート被覆によって外部に抜けることができずに留められてコンクリートが水分飽和状態になり、凍結融解が繰り返されることで表-4.7④の状態からの表-4.7③状態へと徐々にコンクリートが脆弱化した可能性が高いと考えられる。

表-4.7⑤の浮き箇所は、表面保護塗装がシートから剥離して浮いており、その内側には水がたまっていることが確認できた。そのため、浮きの発生要因としては、含浸樹脂不足やピンホールの影響などによりシート工法の遮水性が低下し、繊維シートと表面保護塗装の間に蓄積した水の重量で浮きが拡大していったことが考えられる。

#### 4.6.4 コンクリートの中性化深さ

中性化深さは、採取したφ75×40mmのコアにフェノールフタレイン溶液を噴霧する方法（JISA1152）で確認した。なお、調査箇所③では採取したコアの全長で中性化を確認したため、コアドリル法による追試験を行っている。

測定結果の一覧を表-4.8 に示す。また、表中にはコア掘削孔を利用して測定した鉄筋の純かぶりも併せて示す。調査箇所①②⑤については、断面修復箇所であり、施工後間もないことや、シート工法による被覆によって外的因子から保護されていることから、中性化深さが0cmとなった。また、断面修復を行っていない調査箇所④⑥では2cm程度の中性化深さであり、鉄筋の純かぶり約5cmの範囲内であった。一方、コンクリートが砂利状になっている調査箇所③では、コンクリートコアを採取した深さ4cmまでの範囲で中性化しているため、コアドリル法による追試験を行った。追試験では1cm単位で試料を採取し、フェノールフタレイン溶液によってコンクリートの発色の有無を確認していったところ、表面から6~7cmの試料にてコンクリートの発色が確認され、鉄筋位置よりも深いところまで中性化が進行していることが確認された。

その後、範囲を広げて調査箇所③付近のコンクリートの中性化深さを測定したところ、シート工法の浮き

表-4.8 中性化深さ

箇所	純かぶり		中性化深さ	断面修復
① (床版)	2.5 cm	>	0 cm	あり
② (床版)	未確認		0 cm	あり
③ (主桁)	5.8 cm	<	6~7 cm	無し
④ (主桁)	5.2 cm	>	平均 2 cm	無し
⑤ (床版)	未確認		0 cm	あり
⑥ (主桁)	4.2 cm	>	平均 2 cm	無し

表-4.9 コンクリート中の全塩分量

箇所	塩分量 (kg/m <sup>3</sup> )			
	0-2cm	2-4cm	4-6cm	17-19cm
①	断面修復材のため省略			
②				
③	—	0.02	採取した試料の長さ不足のため未実施	
④	—	0.30		
⑤	0.16			
⑥	0.23	0.25		
	0.37	0.14	0.19	0.14

が見られた主桁下面の 80×200cm の範囲で中性化深さが5~10cmとなっていることが確認された。浮き箇所の表面は連続繊維シートで全面を覆われており、外的劣化要因に対して保護されていたことから、外気(二酸化炭素)を要因とする中性化が広範囲で急激に進行する状態にはなかった。その一方、調査箇所ではコンクリートと繊維シートとの間に多量の滞水があり、またコンクリートも著しく変質していることから、滞水した水の中に水酸化カルシウムなどのセメント水和物が溶脱することで中性化が進行した可能性が最も強く疑われる。一般に、中性化は長い年月をかけて進行するものであるが、冬季に凍結融解作用を受けることによって、コンクリート内部のひび割れや剥離が拡大して水がたまりやすい状態になり、溶脱による中性化が短期間で内部まで進行した可能性がある。

#### 4.6.5 コンクリートの塩化物イオン濃度

調査箇所のコンクリート中の全塩分量を、コンクリートからの深さ毎に整理した結果を表-4.9 に示す。分析にあたってはシート部を除くコンクリートを表面から深さ2cm毎に切断し、コンクリート中の塩化物イオンの分析試験（JISA1154）を実施した。

表-4.9 より、母材コンクリートの初期塩分量とみなせる深い位置（構造物表面から18cm）での塩分量と、表面のかぶり部分付近での塩分量とに大差はなく、どの調査箇所においても発錆限界とされる1.2~2.4kg/m<sup>3</sup>に比べて小さいことから、塩害による鉄筋腐食の心配はなく、また、シート工法が有する塩分遮蔽性能によ

り今後も塩分の増加はないと思われる。実際に、写真-4.14に示すように、今回の調査の際に露出した鉄筋には腐食がほとんど認められなかった。

#### 4.6.6 コンクリートの超音波伝播速度

主桁のコンクリートの健全度を確認するため超音波伝播速度を測定した。測定はコンクリート主桁の両端を挟みこむ形の透過法にて実施した。測定結果を図-4.11に示す。超音波伝播速度は、変状の無かった箇所では4.2~4.4km/sec程度であり、一般的なコンクリートの目安とされる4.0~4.5km/secの範囲内であった。また、変状が無かった調査箇所⑥よりφ10×20cmのコアを採取して圧縮強度試験を行った結果、コンクリートの圧縮強度は32.6N/mm<sup>2</sup>であり、十分な強度を有することを確認した。

一方、中性化が確認された調査箇所③では、主桁下面から10cmの位置の超音波伝播速度が1.3km/secと極端に低くなっている。これはコンクリート主桁内部の脆弱化が原因であり、この箇所のコンクリートについては強度や剛性が低い状態と考えられる。また、主桁下面から15cm以上高い位置の測定点では、変状のない主桁と同程度の超音波伝播速度となっていることから、コンクリートの劣化は、桁全体ではなく、水分が滞水しやすい下面側に集中して生じているものと考えられる。

#### 4.6.7 浮き変状の原因と対策

以上のことから、シート工法に浮き変状が生じた橋梁の詳細調査を行った結果、当該橋梁での浮きの原因は、大きくは下記の2つであったと推察される。

- 1) 断面修復における重ね打ち面
- 2) 橋梁上面からの浸透水

このうち、1)のみを要因とする浮き箇所では、変状の経年変化は確認されなかった一方、2)を要因に含む浮き箇所では、経年による変状の進展・拡大が確認された。橋梁上面からの浸透水は、浮き変状の進展のみならず、見えない所で劣化を促進させ、構造物本体に深刻な影響を与える可能性がある。そのため、早期に橋面防水工などの抜本的な対策を実施するとともに、シート工法の内側に水分を保持しないようするための水抜き孔を設けるなどの対策を実施する必要があると考えられる。

#### 4.6.8 対策工

##### (1) 調査箇所の復旧

今回の調査によってシートを剥がした箇所については、剥落抑制機能を確保するために同じシート工法で再補修した。その際、滞水の見られた箇所について



写真-4.14 鉄筋の腐食状況

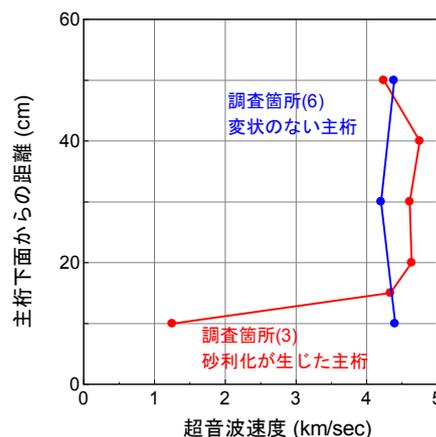


図-4.11 主桁の超音波伝播速度

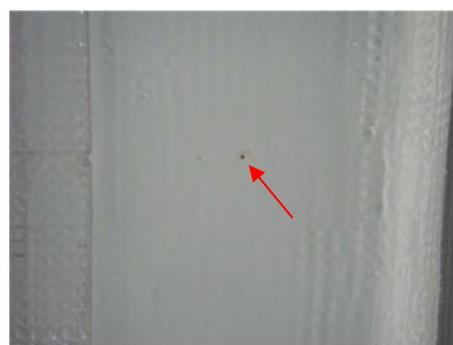


写真-4.15 水抜き孔

は、トンネルの剥落防止工に設置される防湿孔<sup>44)</sup>を参考にφ3mm程度の水抜き孔(写真-4.15)を複数設け、水分の排出を促すことで再度の浮きが生じないように施工した。また、母材コンクリートの劣化が見られた箇所については中性化が進行していた部分を除去した上で、断面修復厚さに留意して施工することとした。

今回の調査箇所のシート工法は剥落抑制を目的とするもので、シート自体は構造部材ではなかったため、繊維シートに水抜き孔を空けることが可能であった。しかしながら、床版の疲労補強を目的に繊維シートを床版下面に全面接着する場合、シートは強度を期待する構造部材であるため、水抜き孔を空けることは難しい。そのため、積雪寒冷地の床版補強において、床版



写真-4.16 スケルトンタイプのシート工法

防水機能の劣化などによる雨水等の浸透を見越した場合、床版下面に全面接着する工法よりも、格子状に接着する工法の方が適していると考えられる。

## (2) 再補修

剥落防止工の施工範囲全体を打音検査し、浮きが確認された箇所の再補修が行われた。なお、補修にあたっては床版防水工の再施工も実施されている。再補修時の剥落防止工には、施工後もコンクリート表面の目視点検が可能なスケルトンタイプのシート工法（ガラス繊維シート+透明特殊コーティング材）が採用された（写真-4.16）。この工法もコンクリート表面全体を覆う工法であるが、接着樹脂自身が高い水蒸気透過性を有しており、シート工法内部の水分が除湿されていくため、水抜き孔は設けていない。

## 5. 表面被覆工法の設計、施工マニュアル(案)の提案

これまで述べてきた埋設型枠工法、ウレタン被覆工法およびシート工法についての調査・実験の成果を総合的にとりまとめ、「塩分環境下の塩害に対する表面被覆工法の設計、施工マニュアル(案)」を作成した。図-5.1 にマニュアルの目次を示す。本マニュアルには、埋設型枠工法の目地材選定や施工、維持管理に関する留意点、ウレタン被覆工法のウレタン継ぎ目の設定位置、コンクリート躯体の含水率など施工に際しての留意点やシラン系表面含浸材を活用したウレタンの剥離抑制技術、シート工法の点検調査で留意すべき事項や防水・排水など水の処置に関する内容が盛り込まれている。

今後は各種講習会を通じて、作成したマニュアルの現場への普及ならびにマニュアルのフォローアップを図っていく予定である。

## 6. まとめ

本研究では、表面被覆工法のうち、実構造物での劣化や変状が確認された埋設型枠工法、ウレタン被覆工法およびシート工法を対象に、塩分環境下の凍害に対

### 塩分環境下の塩害に対する表面被覆工法の設計、施工マニュアル(案)

- 第1編 はじめに
- 第2編 埋設型枠工法
- 第3編 ウレタン工法
- 第4編 シート工法

#### <第2~4編の目次(各編共通)>

- 第1章 工法の概要
- 第2章 設計の留意点
- 第3章 施工の留意点
- 第4章 維持管理の留意点
- 第5章 参考資料

図-5.1 本研究で得た成果をもとに作成した「塩分環境下の塩害に対する表面被覆工法の設計、施工マニュアル(案)」の目次

する表面被覆工法の設計、施工マニュアル(案)の提案に向けての耐久性試験・調査ならびに設計・施工に関する検討を行った。埋設型枠工法は目地材の剥離やひび割れ、ウレタン被覆工法はウレタン端部の剥がれ、シート工法は浮きに着目した種々の評価を行った。本研究で得た知見をまとめると、以下ようになる。

### (1) 埋設型枠工法

- 1) 資料調査の結果、埋設型枠版は高い凍・塩害抵抗性を有していることを確認した。また、一部の目地材は、低温環境下では伸び率が低下する傾向があり、埋設型枠版の温度変化に対する追従性が低下する恐れがあることを確認した。
- 2) 実環境下に暴露4年後の模型供試体の耐久性等を調査した結果、レジンコンクリート製の埋設型枠版に使用した1液性のエポキシ変成シリコーン樹脂は、全体的に埋設型枠版からの剥離や目地材中央にひび割れが発生していた。しかし、暴露模型供試体の埋設型枠版と母材コンクリートの付着強度の低下はみられず、水分の侵入による凍害劣化等は生じていないことを確認した。また、母材コンクリート中への塩化物イオンの侵入は確認されず、埋設型枠工法を適用した暴露模型供試体は、4年経過時点で健全な状態を保持しているこ

とを確認した。

- 3) レジンコンクリート製の埋設型枠を使用した小型供試体による耐久性試験の結果、紫外線照射後にエポキシ変成シリコン樹脂系の目地材表層に微細ひび割れや白亜化が生じたが、内部では埋設型枠と目地材は隙間無く接着しており、目地部からの塩水の侵入による凍害劣化や塩分浸透は確認されなかった。一方、ポリマーを含浸した埋設型枠版を使用した供試体では、埋設型枠表面の軽微なスケリング劣化や埋設型枠表層および目地界面からの塩分の浸透が確認され、埋設型枠端部のポリマー含浸程度のばらつきの影響が考えられることから、埋設型枠製造時に留意する必要があることを確認した。
- 4) 大型供試体による耐久性試験の結果、紫外線等による劣化が目地材表層部に限定されている場合には埋設型枠や母材コンクリートに変状は生じないが、目地材が埋設型枠からはく離するなど大きな劣化が生じ、塩水等の供給が多い場合には、塩分が母材コンクリートに浸透したり、凍害により埋設型枠版と母材コンクリートの付着強度が低下することを確認した。
- 5) コンクリート供試体による試験の結果、埋設型枠工法は、目地部から劣化が生じやすく、適切な目地材の選定が重要であるとともに、埋設型枠の端部は母材コンクリートとの付着を高めるために埋め込まれている砕石の分布にバラツキが多いことに加え、コンクリート打設時の漏れ防止のバックアップ材の影響など、母材コンクリートとの付着が低下しやすい箇所であるため、母材コンクリート打設時には入念な施工が重要なことを確認した。また、埋設型枠の受け取り時には、埋設型枠端部の砕石の埋め込み状況等（砕石の数や突出の程度）に留意する必要がある。
- 6) 目地材自体の耐久性試験の結果、目地材の引張特性は、低温環境下では特に大きな変化は無いが、紫外線照射を受けた場合、紫外線照射により目地材表層部に変状（ひび割れまたは白亜化）が生じたり、引張強度や伸び率が著しく低下することを確認した。また、2液性のエポキシ変成シリコン樹脂およびシリコン樹脂は、紫外線劣化に対する抵抗性が比較的高いことを確認した。
- 7) 目地材の選定にあたっては、特に伸び率が重要であり、紫外線照射後の伸び率の低下状況から、耐候性に優れる目地材の選定にあたっての現場マ

ニユアルとして示した。また、目地材と埋設型枠版との付着は重要であり、埋設型枠の種類や目地材の種類に応じて、実際の状況を想定した試験条件などを考慮して、付着強度を事前に確認する必要があることを確認した。

## (2) ウレタン被覆工法

- 1) 北海道沿岸の直立型消波擁壁の脚柱での調査にて、トップコートの剥離に伴って露出した海側のウレタンの表面組織は紫外線など環境因子の影響によって傷んでいたこと、付着強度はウレタン施工時のコンクリートの表面水分率の影響を受けること、また、ウレタンの損傷発生割合は水辺までの距離が長いほど小さく、石や砂混じりの波浪の影響が大きいことが確認された。一方で、ウレタンの適用によって塩害に対する耐久性が向上し、部材の機能保持・延命効果が期待されることもあわせてわかった。
  - 2) 室内での耐久性試験において、適切な管理の下で施工されたウレタンの付着強度は単純な水分供給のみでは低下しにくいものの、付着強度は水分供給と凍結融解の同時作用に起因するコンクリートとウレタンの界面もしくはコンクリート組織の損傷の影響を受けることがわかった。また、ウレタン端部のコンクリートへのシランの塗布は、水分供給と凍結融解が同時に作用する環境下で懸念されるウレタンとコンクリートの付着強度の低下の抑制ならびにウレタン下面への塩化物イオンの浸透の抑制に有効であることを確認した。
  - 3) 施工性の検証のため、道路橋の床版においてシラン系表面含浸材を活用したウレタンの剥がれ防止技術の試験施工を行い、施工性に問題はないことを確認した。
- ## (3) シート工法
- 1) 健全な新設コンクリート表面に繊維シートを施工した場合、十分な凍結融解抵抗性を有しており、シートの浮き変状は生じない。また、シートの付着強度や遮塩性、遮水性についても十分な機能を保持している。
  - 2) 保護モルタル層をはつり、FRP部（炭素繊維シート+エポキシ樹脂）における透水量測定を行った結果、FRP部のみでも十分な遮水性を有する。
  - 3) 連続繊維シート接着工法（シート工法）が施工された道路構造物 52 箇所を調査した結果、約 7 割の構造物で浮き変状が発生していた。

- 4) 浮き変状のうち目視により確認できる変状は1割程度であり、ほとんどの浮き変状の外観は平滑であることから、浮き変状を検出するためには打音やサーモグラフィによる調査を行う必要がある。
  - 5) サーモグラフィによる調査は、遠距離から広範囲を測定できるという利点があるものの、天候や外気温などの測定条件によっては変状を見逃すケースもあるため、実施に当たっては十分な知識が必要である。
  - 6) 52 構造物の現地調査の結果より、外環境の要因としては飛来塩分の影響を受けやすい海岸線沿いの構造物で変状の発生率が高くなっていた。
  - 7) 炭素繊維による耐震補強工が施工された A 橋の橋脚に生じた浮き変状をはつり調査した結果、浮きの界面は繊維シートと保護材との間であった。変状箇所には伸縮装置から漏れた雪融け水が供給されていたことから、凍結融解作用によって拡大したものと推察される。
  - 8) 上部構造の下面側全体に連続繊維シート工法による剥落防止工を施した B 橋において浮き変状の発生原因の現地調査を行った結果、橋梁上面から浸透する水分の自重およびその水分の凍結融解によって浮きが拡大・進展したものと考えられた。
  - 9) 積雪寒冷地において、橋梁下面全体を覆う形式の表面被覆工法を用いた場合、被覆工法内側の滞水によって内部コンクリートが劣化する可能性があるため、水抜き孔の設置や、格子貼りの採用、透気性の高い樹脂の採用など、コンクリート内部の水分が抜けるような配慮が必要である。
- そして、これらの成果を総合的にとりまとめ、「塩分環境下の塩害に対する表面被覆工法の設計、施工マニュアル (案)」を作成した。

#### 参考文献

- 2.1) 飯田眞司、高柳弘道、矢部政実：促進耐候性試験法、塗料の研究、No.145、2006.3
- 3.1) 平成 24 年度北海道開発局道路設計要領、第 3 集橋梁、第 2 編コンクリート、第 5 章海洋コンクリート
- 3.2) 土木学会：樹脂材料による複合技術の最先端、複合構造レポート 6、pp.199-204、2012.6
- 3.3) 合田裕一、田口史雄、遠藤裕丈、榎茂樹：苛酷環境下におけるコンクリートと無溶剤型ウレタン防水材との付着性能、コンクリート工学年次論文集、Vol.24、No.1、pp.747-752、2002.6
- 3.4) 土木学会：表面保護工法設計施工指針(案)、コンクリートライブラリー119、pp.135-179、2005.4
- 3.5) 日本工業標準調査会：加硫ゴム及び熱可塑性ゴムー引張特性の求め方 (JIS K 6251)、引裂強度の求め方 (JIS K 6252)
- 3.6) 土木学会：表面保護工法設計施工指針(案)[工種別マニュアル編]、p.39、コンクリートライブラリー119、2005.4
- 3.7) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書維持管理編、p.112、2008.6
- 3.8) 朝倉啓仁、田口史雄：差分法による数値解析を用いたコンクリート部材の塩分浸透解析、土木学会北海道支部論文報告集第 61 号、V-15、2005.1
- 3.9) 池津和弘、下村匠、児玉守広、中村昭男、坂田昇、横関康祐：コンクリート用各種表面被覆材の塩化物イオン拡散係数の同定、土木学会第 59 回年次学術講演会、pp.269-270、2004.9
- 3.10) 北海道開発局道路設計要領、第 3 集橋梁、第 2 編コンクリート、参考資料 B「道路橋での表面含浸材の適用にあたっての留意事項」
- 3.11) 遠藤裕丈、田口史雄、宮本修司、村中智幸、後藤浩之、林大介、坂田昇、名和豊春：シラン系表面含浸材による寒地コンクリート構造物の耐久性向上効果、土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造)、Vol. 67、No. 1、pp.69-88、2011.2
- 3.12) 国土交通省：平成 22 年度道路交通センサス
- 3.13) 気象庁：2011.11～2012.3 の池田のアメダス
- 3.14) 日本コンクリート工学協会：コンクリート技術の要点'99、p.155、1999.
- 3.15) 融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会報告書、社団法人日本コンクリート工学協会、pp.5-7、1999.11
- 3.16) 鹿野善則、大橋岳、中井督介、高橋亮：既設橋に用いる床版防水の検討、土木学会第 59 回年次学術講演会、6-228、pp.455-456、2004.9
- 3.17) 澤松俊寿、岡田慎哉、山崎達哉：一般国道 275 号志寸川橋の床版陥没についてー防水層を含めた床版の劣化損傷状況の調査ー、第 56 回 (平成 24 年度) 北海道開発技術研究発表会発表概要集、2013.2
- 4.1) 土木学会：表面保護工法設計施工指針(案) [工種別マニュアル編]、コンクリートライブラリー119、2004.4
- 4.2) 国土交通省 道路局 国道・防災課：橋梁における第三者被害予防措置要領 (案)、p.8、2008.3
- 4.3) 土木研究センター：土木コンクリート構造物のはく落防止用 赤外線サーモグラフィによる変状調査マニユ

アル, 2009.3

- 4.4) 真下英人、石村利明：道路トンネル変状対策工マニュアル（案）、土木研究所資料第 3877 号、独立行政法人土木研究所、p.63、2003.3

# A STUDY ON THE DURABILITY OF SURFACE COATING AS A METHOD TO COMBAT FROST DAMAGE IN SALINE ENVIRONMENTS

**Budget** : Grants for operating expenses, General account

**Research Period** : FY2009-2013

**Research Team** : Cold-Region Maintenance Engineering Research Group

(Materials Research Team)

Cold-Region Technology Development Coordination

(Cold-Region Technology Promotion Division)

**Author** : TAGUCHI Fumio, SHIMATA Akinori, SHIMADA Hisatoshi, NAITOH Isao, TABATA Kohtaroh,

YOSHIDA Susumu, ENDOH Hirotake, NONOMURA Yoshinori, MIZUTA Maki,

KAWAMURA Kohji, MURANAKA Tomoyuki, WATANABE Jun, and SUZUKI Satoshi

**Abstract** : To counter the freeze-thaw deterioration of concrete structures in saline environments, various surface protection methods have been used. However, their durability in cold snowy regions has not been fully clarified. This study aims to establish appropriate design and application methods for surface protection against freeze-thaw damage in saline environments. Of the several surface protection methods, we made durability tests and durability surveys for three: the buried formwork method, the urethane coating method and the sheet application method. We analyzed their design and construction methods.

For the buried formwork method, the results confirmed that the deterioration of the joint material caused weak adherence at the interface between the buried formwork slab and the base concrete, allowing the chloride to penetrate the base concrete. Also for the buried formwork method, we confirmed the importance of appropriate joint material selection, because the joints are prone to deterioration. We confirmed the importance of careful installation of the buried formwork, because adherence at the edges of buried formwork tends to weaken with time. Furthermore, we proposed an onsite manual that contains guidance for selecting weather-resistant joint material. We confirmed that it was necessary to conduct prior confirmation of the adherence between the joint material and the buried formwork slab based on test conditions that reproduced the actual conditions.

For the urethane coating method, we confirmed weak adherence between the urethane and the concrete for members whose moisture content on the concrete surface was high during application of the coating. We also confirmed that urethane flaking can easily occur for members whose urethane-concrete interface tends to receive much water supply. Also, the experiment found that saltwater and freeze-thaw action greatly affect adherence, and that applying a silane surface treatment material to the urethane edges controls flaking at the urethane edges. We confirmed the favorable results of surface protection by test installation of urethane anti-flaking technology with a silane surface treatment material on the floor slab of bridges in service.

For the sheet application method, after an investigation of 52 sites in Hokkaido where the method was applied, we confirmed that about 60% of structures had flaking deterioration and 50% of structures had increases in deterioration with time. The results of laboratory tests of the sheet application method confirmed that even the FRP (the fiber sheet and the impregnating adhesive resin) alone has sufficient water sealing, without the protection layer and over-coating agent. Also, high water-sealing performance was found to prevent moisture absorption, although it was also found to trap internal moisture. We confirmed that there were deterioration cases in existing structures caused by freeze-thaw in water-saturated concrete. To counter freeze-thaw action in water-saturated concrete, the concrete internal moisture needs to be discharged, such as by the installation of drain holes, the application of a grid pattern or the application of air-permeable resin.

We summarized these results comprehensively, and we prepared and proposed the "Design and Construction Manual of Surface Protection Methods (draft)".

**Key words** : Precast Concrete Permanent Forms, Urethane Coating, Sheets, Saline Environment, Frost Damage, Adhesion