

# 論文 ポリウレア樹脂で被覆されたトンネル覆工の力学特性に関する解析的研究

影山 幹浩\*1・園田 佳巨\*2・奥石 正己\*3・井出 一直\*4

**要旨：**高い伸び能力を持つポリウレア樹脂がトンネル覆工の剥落防止工法の一つとして注目されている。本研究では、山岳トンネルの無筋コンクリート覆工におけるポリウレア樹脂の剥落防止効果を解析的に把握するために、ひび割れの進展に伴う破壊現象を容易に再現できる利点を持った SPH 法を用いて、ポリウレア樹脂で被覆されたトンネル覆工模型に対する静的載荷実験の再現を行った。その結果、荷重-変位関係やひび割れ分布を解析的に概ね再現できることを確認した。

**キーワード：** SPH 法, ポリウレア樹脂, トンネル覆工, 剥落防止

## 1. 緒言

ポリウレア樹脂はコンクリートの 1/100 程度のヤング率であるが、引張強度 25MPa、破断歪み 300%以上の破断強度を持ち、高い伸び能力を生かして様々な構造物の被覆材として利用されている。

その高い変形能力により、ポリウレア樹脂は様々な RC 防護構造物に利用されており、RC 構造部材のエネルギー吸収性能を大幅に増加させることが既往の研究によって確認されている。その他にも、防水性、耐薬品性、耐摩耗性、耐熱性など様々な能力に優れていることが分かっている。

現在、中小鉄道事業者の閑散線区のトンネルを対象とし、簡易・低コストにトンネル覆工片の剥落を防止できる工法の開発が行われており、工法の一つとして高い剥落防止性能を持ったポリウレア樹脂によるトンネル覆工剥離対策工法に着目した実験的研究が行われている。この実験ではひび割れや荷重の傾向などは調べることができるが、安全性を考慮して完全に破壊するまでの実験は行われておらず、終局状態における耐荷力を十分に調べることができないため、数値解析による検討が必要とされている。数値解析的な研究例としては、野城ら<sup>1)</sup>は離散化解析法の一つである FEM を用いて無筋トンネル覆工の解析方法について検討を行っている。しかしながら、FEM では大変形問題の取り扱いが困難であり、終局状態の解析精度については疑問が残る。そこで、本研究では大変形問題に適用可能な SPH 法<sup>2)</sup>を用いて、ポリウレア樹脂を被覆したトンネル覆工および無対策のトンネル覆工への載荷実験の解析を行った。

一般に、SPH 法は引っ張り不安定性をもつことから、ポリウレア樹脂のような高い伸び能力を有する材料のモ

デル化は困難である。この引っ張り不安定性を解消するため、本研究では新たにポリウレア樹脂用のカーネル関数を提案している。

## 2. 試験概要

**写真-1** に示す大型トンネル覆工模型実験装置を用いて、**図-1** に示す寸法のトンネル覆工模型への載荷実験が行なわれた。



写真-1 大型トンネル覆工模型実験装置

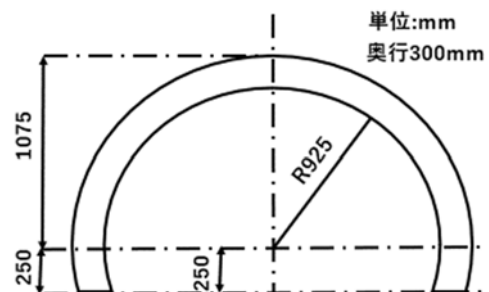


図-1 トンネル覆工模型寸法

\*1 九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻 修士課程学生 (学生会員)

\*2 九州大学大学院 工学研究院社会基盤部門 教授 工博 (正会員)

\*3 清水建設 (株) 土木技術本部開発機械部 工博 (非会員)

\*4 三井化学産資 (株) 環境資材事業部建築資材部 (非会員)

実験に用いられた供試体は、新幹線標準断面の 1/5 スケール模型で、矢板工法のトンネルを想定した無筋コンクリート製の単芯円アーチとなっており、1.35mm のポリウレア樹脂を被覆したものと、無被覆のものが実験に用いられている。ジャッキや反力ばねの遊びを無くす目的で、載荷用油圧ジャッキ、反力用油圧シリンダの両方を用いて一様にそれぞれ 1 本あたり 9kN(載荷版の載荷圧力 0.1MPa)の初期荷重が与えられている。

載荷は鉛直下向きに載荷板の押し込み量 40mm までは、0.1mm/min で、40mm 以降は 0.5mm/min の速度で載荷が行われた。

この実験の結果として、無被覆供試体は変位 48mm あたりから荷重の大幅な低下がみられたが、樹脂を被覆した供試体は荷重が低下することなく変位 70mm 以降も安定して変形し続ける高い靱性を有することが認められた。

### 3. 解析概要

#### 3.1 SPH 法の概要

本研究では、代表的な粒子法である SPH 法を用いた。SPH 法による固体の離散化のイメージを図-2 に示すが、固体を粒子の集合体としてモデル化し、各粒子の応答は影響半径内に存在する他の粒子の物理量を用いて kernel 関数による重み(図中の赤線)付き平均によって求める。

SPH 法の基礎式<sup>2)</sup>を式(1)、式(2)に示す。

$$\langle f(x_i) \rangle = \int_{\Omega} f(x_j) W(x_i - x_j, h) dx_j \quad (1)$$

$$\langle \nabla f(x_i) \rangle = \int_{\Omega} f(x_j) \nabla W(x_i - x_j, h) dx_j \quad (2)$$

ここに、W : kernel 関数、h : 影響半径(適切な重み付き平均が行われることを確認して粒子直径の 2.3 倍とした)、 $\langle \rangle$  : SPH 近似された関数、 $\Omega$  : 影響範囲領域

一般に、SPH 法は引張不安定性を有する<sup>2)</sup>ことが知られている。通常の土木材料(鋼・コンクリートのような弾性限界 0.2%程度、終局歪み 10%以下)であれば、その性質が問題になることは少ないが、ポリウレア樹脂のような 400%近い伸び能力を有する材料の挙動解析には何らかの改良を行う必要がある。そこで、本研究では 3.3 で後述するポリウレア樹脂専用の kernel 関数を提案し、挙動解析を行うことにした。

#### 3.2 トンネル覆工模型解析モデル

トンネル覆工の解析モデルを図-3(a)(b)に示す。ここでは、力学的な対称性と計算時間を考慮して 1/4 領域を解析モデルとした。実験は 0.1mm/min の速度で静的載荷を行っているが、SPH が時間積分を用いた手法であることから、解析時間を短縮させるため 0.1m/s の載荷速度で解析を行った。この載荷速度が解析結果に与える影響として、計算上の耐力に慣性力が付加されることと材料のひ

ずみ速度効果が挙げられるが、どちらも影響は小さい(特に、ひずみ速度の影響は非常に小さい)と考えられる。なお、実験条件としてトンネルに作用する土圧相当の拘束圧を表現した反力ばね(トンネル覆工外周の 4 箇所)については、野城ら<sup>1)</sup>の研究で用いられていたばね値と

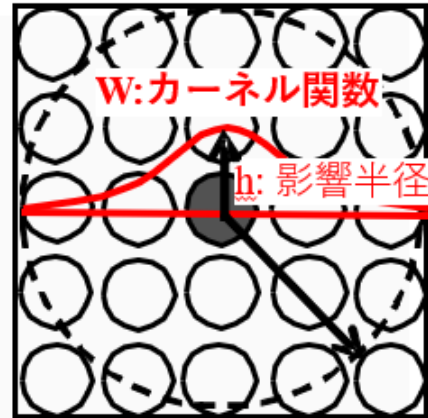


図-2 SPH 粒子による固体の離散化

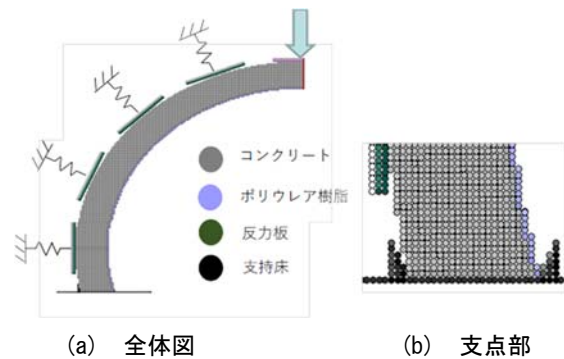


図-3 解析モデル

表-1 材料特性

	密度	静弾性係数	ポアソン比	圧縮強度	引張強度
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[GPa]		[MPa]	[MPa]
コンクリート	2160	18.633	0.193	21	2.1
ポリウレア樹脂	1000	0.11	0.1	-	24

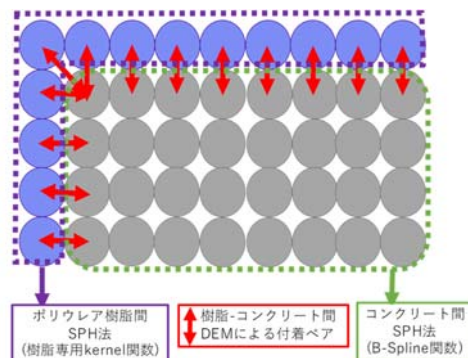


図-4 材料ごとの力学モデル

同じ 1.5MN/m を用い、実験でジャッキや反力ばねの遊びを無くすために 9kN の初期荷重が与えられていることを考慮して、本解析にも 9kN の初期荷重を与えた。覆工脚部の支持は、実験が脚部の水平変位を拘束（回転による浮き上がりは許容）している状態を再現するために、床との接触解析を行い、回転により床と離れて上方に変位する場合には拘束力が生じないようにした。

### 3.3 トンネル覆工材料の力学モデル

本研究で用いたコンクリートとポリウレア樹脂の材料定数を表-1 に示すが、弾性限界以降の力学特性については以下のようにモデル化した。

#### 1) コンクリートの力学モデル

コンクリートの降伏条件には図-5 に示すような非線形 Drucker-Prager の降伏関数<sup>4)</sup>を用いた。この条件は、線形 Drucker-Prager 降伏関数より高静水圧条件下で塑性化しやすい特徴を有し、より実際のコンクリートの挙動に近いものである。さらに、単軸換算で表記した応力-歪み関係を図-6 に示すが、圧縮および引張領域で軟化を考慮している（圧縮側は体積ひずみが 0.06 に達したときに完全な圧壊が生じたものとみなし、全応力を解放している）。また、コンクリートのひび割れによる剛性低下を考慮するため、図-7 のような損傷変数を導入し、異方性を考慮した剛性の評価を行った。本研究では、ひび割れによる有効断面の減少を損傷変数で表し、弾性剛性を低減させ、塑性変形による剛性低下と区別している。

#### 2) ポリウレア樹脂の力学モデル

ポリウレア樹脂の応力-ひずみ関係を得るため、図-8 に示す JIS A 6021 ダンベル型試験体(3号形)を用いた単軸引張試験を行った結果を図-9 に示す。本研究では、この応力-ひずみ関係を、図-10 のようなバイリニアモデルに簡易化して利用した。通常の SPH 解析では、図-11 に示す B-Spline 関数を用いるが、前述のように 100% 以上の伸び能力を有するポリウレア樹脂の変形解析においては引張不安定性の問題が生じてしまう。そこで、本研究では図-12 に示すカーネル関数（一次導関数の値が一定値のため安定した計算が可能）を用い、影響範囲内の参照粒子に関する更新を行わないことにした。これらの効果について、検証するために図-13 に示す解析モデルを用いて単軸引張試験のシミュレーションを行った。この解析による最大主ひずみ分布を図-14(a)(b)に、評点間距離と評点間内にある粒子の最大主ひずみの平均を用いて出した応力ひずみ関係を図-15 に示す。この図より通常の B-Spline 関数を用いた SPH 解析では、3%のひずみで破断が発生したのに対してここで提示した改良を行うことで、300%まで安定した挙動を再現できることが認められた。

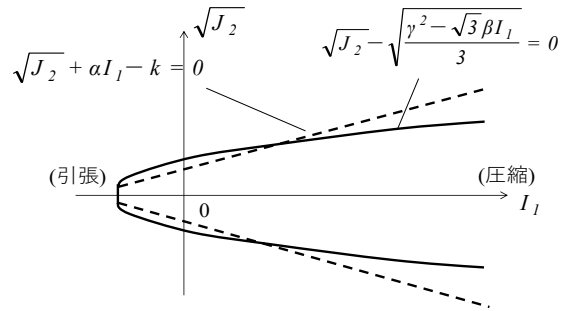


図-5 線形および非線形 Drucker-Prager の降伏条件

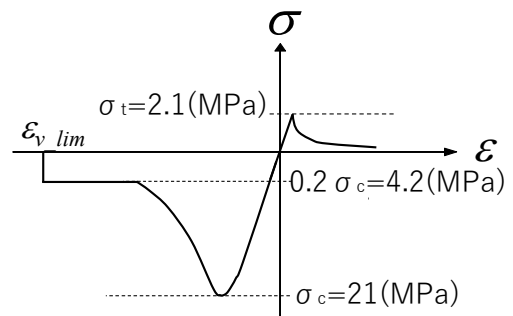


図-6 コンクリートの応力歪み関係

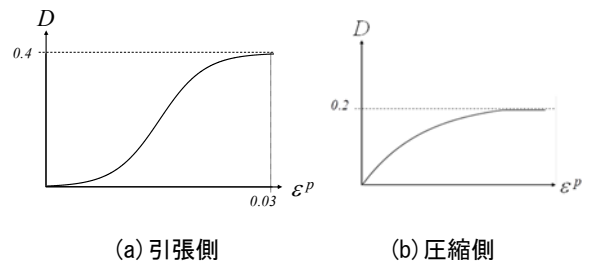


図-7 損傷度—累積塑性歪み関係

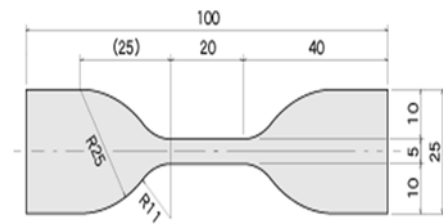


図-8 ダンベル型供試体

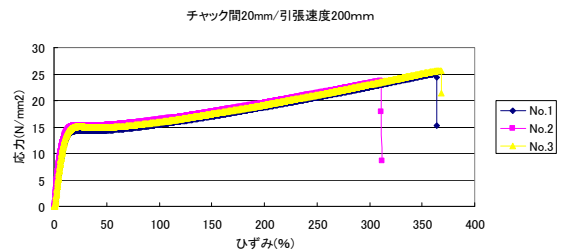


図-9 一軸引張試験によるポリウレア樹脂の応力-ひずみ関係

#### 3) ポリウレア樹脂-コンクリート間の力学特性

同種材料粒子（ポリウレタ樹脂，コンクリート）の相互作用についてはSPH法で力学的な計算を行うが，異種材料であるポリウレタ樹脂とコンクリートの間については，個別要素法（以後，DEMと称する）的な取り扱いを行うことにした．すなわち，異種材料の境界面では最近傍の粒子間に付着力特性として，法線方向および接線方向にDEM法による力のやり取りを考慮した．なお，粒子間力が付着強度を上回った場合には，付着切れが発生したものとみなし，以後の力の伝達は行わないようにした．付着強度については，写真-2に示すようなポリウレタ樹脂の引き剥がし試験を行い，得られた付着強度1.0(N/mm)を用いることにし，図-16に示すように数値解析においてもポリウレタ樹脂層の剥離を再現できることを確認した．

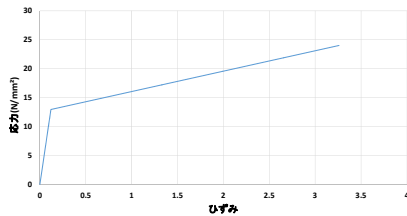


図-10 解析における応力-ひずみ関係

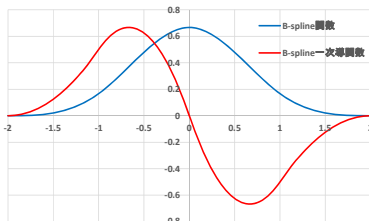


図-11 B-Spline関数

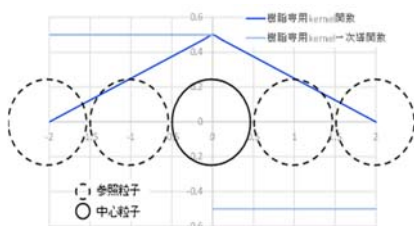


図-12 ポリウレタ樹脂専用 kernel 関数

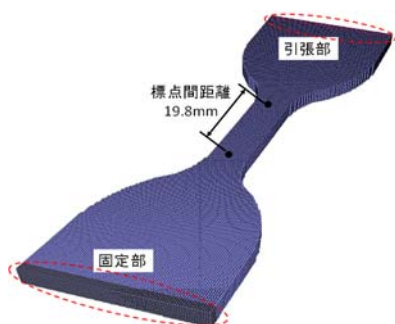
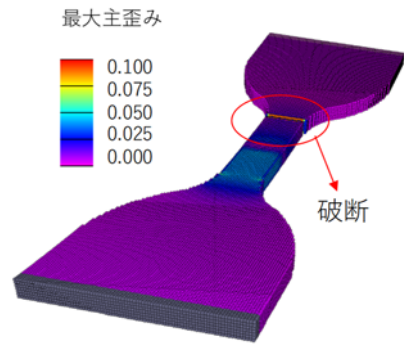
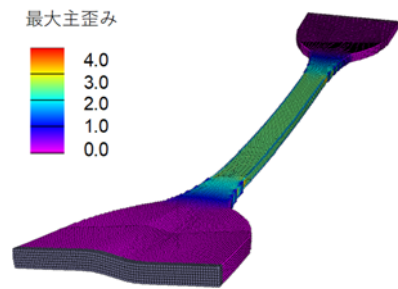


図-13 ダンベル型試験体解析モデル



(a) B-Spline 関数



(b) 樹脂専用 kernel 関数

図-14 一軸引張試験の再現解析

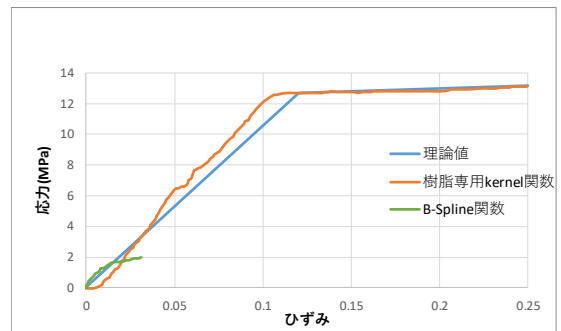


図-15 一軸引張試験解析による応力-ひずみ関係



写真-2 引き剥がし試験

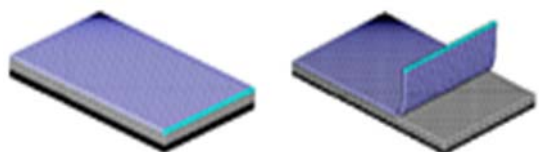


図-16 引き剥がし試験解析



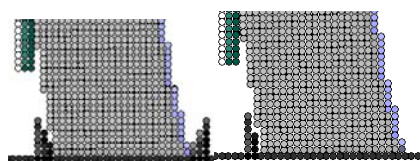
## 4 解析結果

### 4.1 境界条件の影響

野城ら<sup>1)</sup>の解析においては脚部内側への変位を拘束していないようであるが、脚部の境界条件が解析結果に与える影響は明確でない。そこで、**図-17(b)**のように外側のみ固定した場合と、両側固定の場合の比較を行った。両者の荷重-変位関係を**図-18**に示す。ポリウレア無被覆の供試体において、変位 48mm 以降に耐力が急激に低下する現象を再現できており、ポリウレア樹脂が補強効果を発揮していることがわかる。また、ポリウレア樹脂の有無に関わらず、両側固定の場合の方が荷重のブレが小さく、一般的に実験値に近い荷重-変位関係を示すことが認められた。載荷変位 5mm 時点の脚部外側の状態を**図-19**に示すが、外側のみ固定した条件を与えた場合、脚部が内側へ滑动することがわかる。このことから、本研究で対象とするトンネル覆工の挙動を正確に把握するには、脚部の境界条件の適切なモデル化が重要であることが推察された。

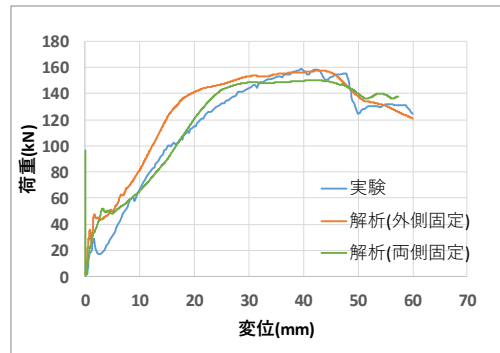
### 4.2 主ひずみ分布

**図-20** に変位 50mm の時点の脚基部の最小主ひずみ（圧縮ひずみ）分布を示す。この図より、ポリウレア樹脂の有無に関わらず、基部全体に塑性域が広がる様子（図中のピンク色の粒子）から、正確なトンネル覆工の弾塑性挙動を把握するには、コンクリートの圧縮破壊に関する適切な取り扱いも重要であることが認められた。**図-21(a)(b)**に变位 40mm におけるひび割れ分布を示すが、本研究で用いた解析手法で、ひび割れの位置や幅などについて概ね再現可能であることが確認できた。最後に、変位 40mm におけるトンネル覆工内側のコンクリートの最小主ひずみ分布を**図-22(a)(b)**に、実験における破壊状況を**写真-3**に示す。なお、**図-22(b)**には樹脂層を表示していない。実験では、無被覆供試体のコンクリート表面には明瞭なひび割れが生じ、この部分で剥落の危険性が認められる。一方、樹脂で被覆された供試体については、樹脂が浮き上がりながらコンクリートの剥落を防止するが、解析結果を用いて樹脂内面のコンクリートの応力状態を調べると、無被覆供試体と同様のひび割れが認められ、コンクリート粒子の剥落を樹脂層が防ぐ様子を再現できることが確認された。

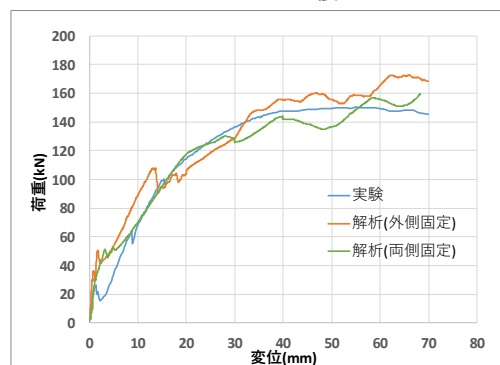


(a) 両側固定 (b) 外側のみ固定

図-17 脚部拡大図



(a) 無被覆



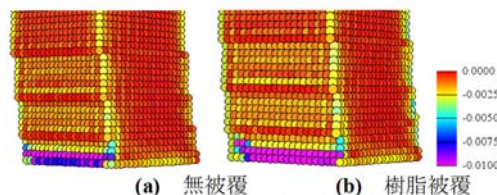
(b) ポリウレア樹脂

図-18 荷重-変位関係



(a) 両側固定 (b) 外側のみ固定

図-19 変位 5mm における脚部外側の状態

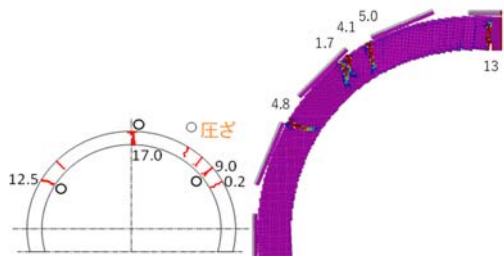


(a) 無被覆 (b) 樹脂被覆

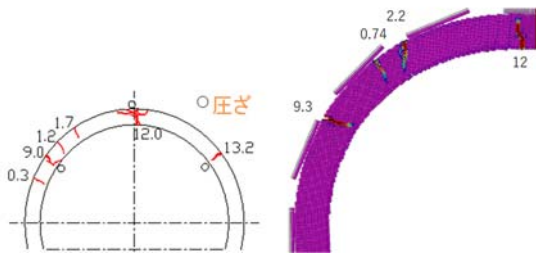
図-20 変位 50mm における脚部外側の最小主ひずみ分布

## 5. 結論

本研究では、トンネル覆工のコンクリート剥落防止が期待されるポリウレア樹脂の被覆効果を解析的に再現するため、SPH法とDEMを併用した手法を提案した。ここでは、野城らが行ったトンネル覆工モデルの載荷実験のシミュレーションを試み、荷重-変位関係やひび割れ分布などを概ね再現できることを確認した。今後、詳細なポリウレア樹脂の被覆効果に関する検討を行う予定である。

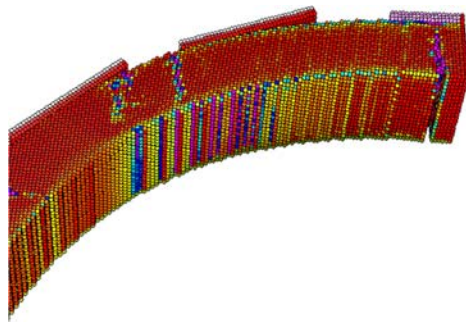


(a) 無被覆供試体

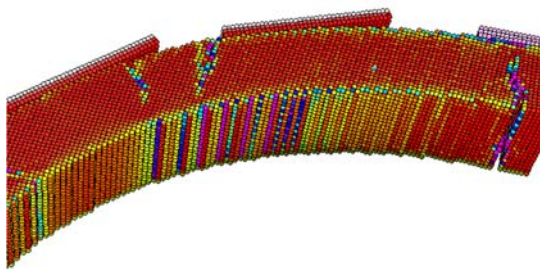


(b) ポリウレア樹脂

図-21 ひび割れ分布比較

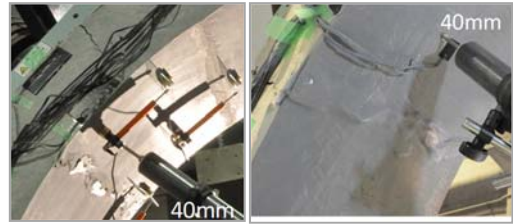


(a) 無被覆供試体



(b) 樹脂被覆供試体

図-22 変位 40mm 時の覆工内側の最小主ひずみ分布



(a) 無被覆

(b) 樹脂被覆

写真-3 変位 40mm における覆工内側の破壊状況

#### 参考文献

- 1) 野城 一栄, 小島 芳之, 新井 泰, 岡野 法之, 竹村 次郎, 圧縮破壊後の軟化を考慮した無筋コンクリート山岳トンネル覆工の数値解析手法に関する研究, 土木学会論文集 C, Vol. 65, No. 4, 1024-1038, 2009. 12
- 2) G.R.Liu, M.B.Liu, Smoothed Particle Hydrodynamics: A Meshfree Particle Method, World Scientific Publishing, 2003
- 3) Rabczuk.T, Eibl.J, Modelling dynamic failure of concrete with meshfree methods: International Journal of Impact Engineering, Vol. 32, pp. 1878-1897, 2006.
- 4) Park.H, Kim.J.Y., Plasticity model using multiple failure criteria for concrete in compression: International Journal of Solids and Structures, Vol. 42, pp. 2302-2322, 2005.