

新たなトンネル補修工の耐荷力特性と劣化特性

森本 智・日下 敦・島袋智尋・新田弘之

1. はじめに

山岳トンネル工法（いわゆるNATM）により建設された道路トンネルに発生するうき・はく離の面積は、1箇所あたり0.1m²未満が約92%、0.2m²未満が約95%を占めており小規模のものが多いことが報告されている。トンネル補修工の開発においては、うき・はく離等の実態を踏まえて対象とするはく落塊の規模に応じた工法を選定することにより経済性や施工性等の向上が期待される。一方、補修に使用する材料の強度特性や繊維の編込み構造等によっては、作用荷重に対する変位特性や破壊形態、劣化特性等について、従来の補修工とは異なる特徴を有する可能性が考えられる。

土木研究所では、主として、トンネルの変状実態やそれを踏まえた補修工に求める耐荷力特性などトンネルチームで蓄えてきた知見と、様々な材料が有する劣化特性などiMaRRCで蓄えてきた知見を活かして、両チームが連携し、合理的なトンネルの補修工に関する取り組みを行っている。本報告では、新たな補修工の耐荷力特性・劣化特性を把握する観点から、押抜き試験・室内促進劣化試験を実施した結果について紹介する。

2. 押抜き試験による耐荷力評価

本章では、炭素繊維を用いた従来工法と比較して低強度の材料を用いた新たな補修工を対象に、はく落抵抗性能を評価するための基礎資料を得ることを目的として押抜き試験を実施し、荷重－変位特性や破壊形態の分析を行った結果を報告する。

2.1 押抜き試験の実施

押抜き試験は、図-1に示すように、はく落塊を模した押抜き部を設けたコンクリート供試体に補修工を設置し、ジャッキを用いて変位制御により荷重した。対象とした補修工は、表-1に示すように、Case1はオレフィン系樹脂繊維を編込み構造とした補修工（以下「網状シート」という。）、Case2は施

工性に優れたウレタン樹脂を素材とする補修工（以下「塗布シート」という。）、Case3は炭素繊維を素材とする従来から適用実績が多い補修工（以下「従来工法」という。）の3種類とした。表-1に示したように、網状シート・塗布シートの引張強度・引張弾性係数は、従来工法と比較して十分に小さい特性を示す。計測項目は、押抜き荷重による変位（変位（mm））、押抜き荷重に対する抵抗荷重（荷重（kN））とした。荷重速度は、変位量2mmまでは0.2mm/minとし、変位量2mm以降は1.0mm/minとした。また、変位の増加に伴うはく離状態等を観察した。

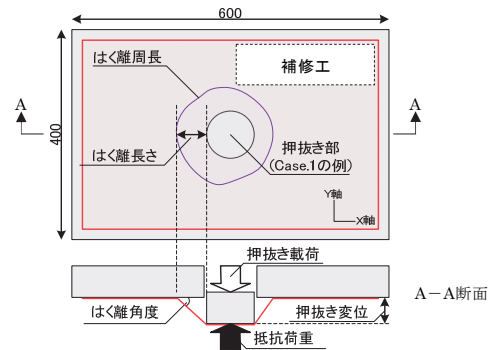


図-1 試験状況

表-1 材料特性

	Case1	Case2	Case3
材料	網状シート	塗布シート	従来工法
素材	オレフィン系樹脂繊維	ウレタン樹脂	炭素繊維
引張強度 (N/mm ²)	35	40	4,124
引張弾性係数 (N/mm ²)	409	14	262,000
シート厚さ (mm)	0.33	0.16	0.0556

2.2 押抜き試験の結果

2.2.1 補修工の荷重－変位特性

図-2に荷重と変位の関係を示す。Case1の抵抗荷重は変位の増加に伴い増加し変位18mmにて最大1.47kNとなった。その後、荷重は低下し変位20mmにて0.94kN程度となった。Case2の抵抗荷重は変位の増加に伴い増加し変位9.2mmにて最大0.70kNとなった。その後、荷重は低下し変位

16mmにて0.40kNとなり以降の荷重は微増あるいは横ばいとなった。一方、Case3の荷重は、網状シート・塗布シートと比較して十分に大きく変位の増加に伴い荷重が増加し、変位20mmにて最大11.3kNとなった。ここで、はく落塊の作用荷重を仮定すると、覆工厚(300mm)と単位体積重量(22.5kN/m³)に表面積を乗じて算出すると、表面積が0.1m²の場合は0.68kN、0.2m²の場合は1.35kNとなる。

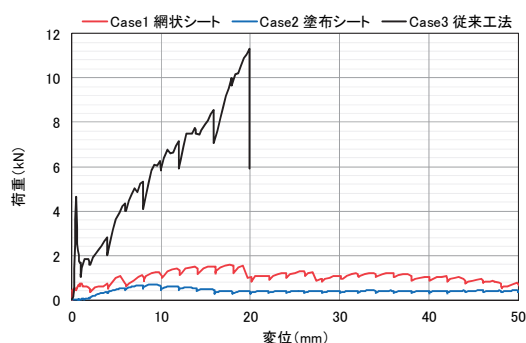


図-2 荷重と変位

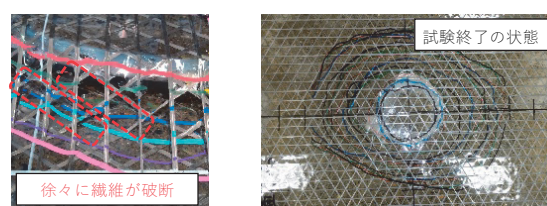
2.2.2 補修工の破壊形態

図-3に観察結果を示す。図-3(a)に示したCase1では変位の増加に伴いはく離が進行するものの各層の繊維が独立した挙動を示し、徐々に繊維が破断した。図-3(b)に示したCase2ではシートのはく離と比較して変形が進行し変位32mmで寸法2mm程度の部分的な破断が確認され変位50mm程度で破断が拡大しはく離の進展は停止した。一方、図-3(c)に示したCase3では変位の増加に伴うはく離の進展が供試体端部に到達するまで繊維の破断は確認されなかった。

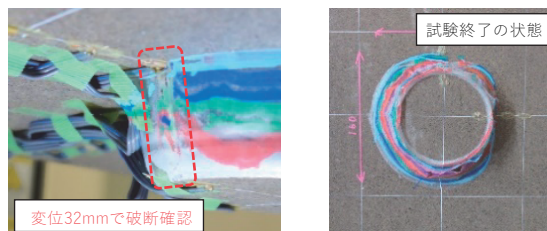
ここで、既往の研究²⁾では、炭素繊維を用いた従来工法の場合、変位の増加により繊維が破断することなくはく離が概ね全方向に均等に進展し、はく離周長に比例して荷重が増加する結果が得られており、その耐力は単位はく離強さ(荷重/はく離周長)をもとに評価できるとしている。本実験結果について、荷重とはく離周長の関係を図-4に示す。Case3の場合、既往の研究の結果と同様に、はく離の進展(=はく離周長の増加)に伴い荷重が一定の割合で増加していることがわかる。一方、Case1の場合、はく離は進展するものの荷重の増加は限定的であり、Case2の場合、はく離の進展が限定的で荷重の増加も限定的となった。

この結果から、新たな補修工では、荷重-変位特性や破壊形態が従来工法と異なるため、従来の単

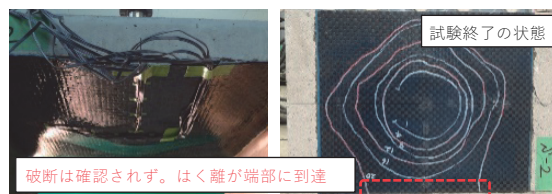
位はく離強さのみでは耐力特性の評価が難しいことがわかる。したがって、耐力特性の評価にあたっては、補修工に使用する材料強度や繊維の編込み構造上の弱点など、最も破壊しやすい箇所を考慮して行うことが重要となる。さらに、施工からの経過年数やトンネル内環境、補修工周辺の状況等により耐力特性は変化することも考えられる。次章では、促進劣化試験による耐久性評価に関する検討について述べる。



(a) Case1 網状シート



(b) Case2 塗布シート



(c) Case3 従来工法

図-3 観察結果

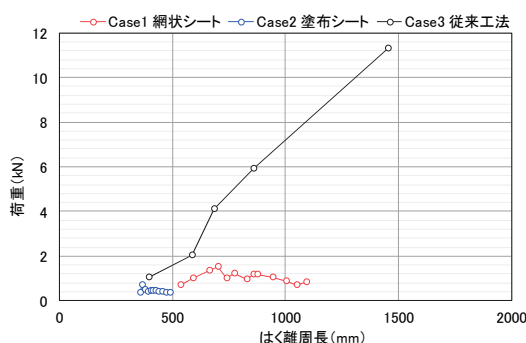


図-4 荷重とはく離周長

3. 室内促進劣化試験の検討

補修工は、供用中に耐力が一定以上保持されなければならないが、長期の耐久性を評価する手法は確立されていない。そのため、補修工の長期耐久性を評価する方法を開発するために、室内における

促進劣化試験と実トンネルにおける暴露試験を実施した。本章では、両試験を比較検討した結果を報告する。

3.1 室内促進劣化試験及び屋外暴露試験の実施

3.1.1 供試体の作製

コンクリート平板（30×30×6 cm）の表面全体に補修工を施工した。今回使用した補修工は、施工性や維持管理性の改善を目的としたタイプの異なる5種類を用いた。繊維が異なるものや、繊維を用いていないもの、樹脂が異なるものであり、従来のものより施工の工程が少なくなるように開発したものである。表-2に5種類の補修工の諸元を示す。

表-2 補修工の諸元

工法	材料の構成	成分	塗布量(kg/m ²)
A	下含浸	エポキシ樹脂	0.4
	連続繊維シート	ガラスクロス	—
	上含浸	エポキシ樹脂	0.2
B	プライマー	エポキシ樹脂	0.1
	中塗り	ウレアウレタン樹脂	0.8
	連続繊維シート	ビニロン製ネット	—
C	上塗り	アクリルウレタン樹脂	0.12
	プライマー	ウレタン樹脂	0.12
	中塗り	ウレタン樹脂	0.6
D	連続繊維シート	PE製ネット・不織布併用	—
	フィラー	エポキシ系ポリマーセメントモルタル	1.0
	プライマー	エポキシ樹脂系水性ウレタン	0.04
	中塗り	ウレタン/ウレア樹脂系塗料	1.4
E	上塗り	ポリウレタン樹脂塗料	0.12
	プライマー	エポキシ樹脂	0.15
	中塗り	エマルジョン樹脂塗料	1.5
	連続繊維シート	ポリエチレンメッシュ	—
	上塗り	シリコン系塗料	0.15

3.1.2 室内における促進劣化試験

室内促進劣化試験は、温度20、40、60℃、湿度90%一定の温湿度に制御した恒温恒湿槽内で、飽和酸化カルシウム水溶液（以下「アルカリ水」という。）中に3.1.1で作製した供試体を半浸漬した状態で実施した。一般的なトンネル環境下では紫外線による影響は少なく、高温にもさらされないが、湿度が高いことやコンクリート面から水分の影響を考慮して、このような方法にした。また、予備試験において、水及びコンクリートの溶出成分を考慮したアルカリ水の浸漬試験を行った結果、アルカリ水の方が促進効果が高かったため、アルカリ水を用いることとした。

3.1.3 実トンネルにおける屋外暴露試験

実トンネルにおける屋外暴露試験は、3.1.1で作製した供試体を実トンネル（廃道トンネル）内の側壁に立て掛ける形で実施した。8～9月頃は20～

25℃、12～4月頃は0～5℃であり、季節による温度変化が見られた。

3.1.4 押抜き試験の実施

3.1.2または3.1.3を終えた供試体の耐荷力を測定した。試験は、土木学会の「コンクリート片のはく落防止に適用する表面被覆材の押抜き試験方法（JSCE-K533-2013）」³⁾に準拠して行った。

3.2 室内促進及び屋外暴露の耐荷力評価

押抜き試験の結果を図-5に示す。工法A、C、Eは、室内促進及び屋外暴露ともに最大荷重は時間と

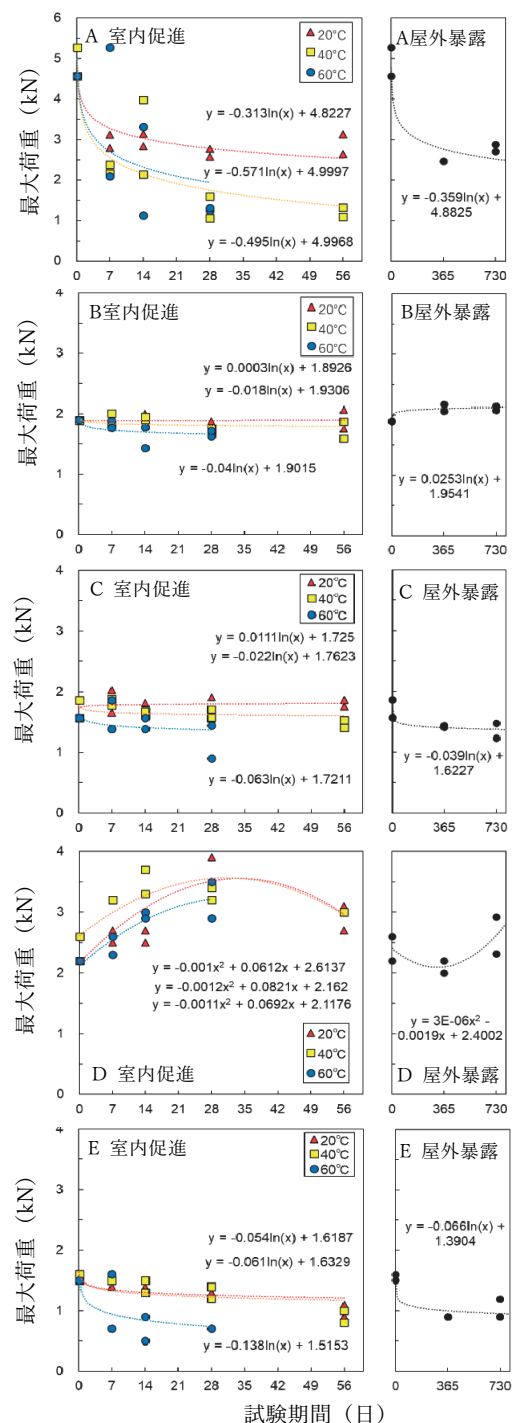


図-5 各工法の押抜き試験結果

ともに低下傾向を示した。一方で、工法Bは屋外暴露で最大荷重がやや増加し、工法Dは室内促進及び屋外暴露ともに増加するという傾向を示し、これは樹脂の硬化によるものと考えられた。この結果から、材料がエポキシ系、ウレタン系、繊維の有無によって最大荷重の変化傾向が異なることが分かった。

つづいて、室内促進と屋外暴露の結果を比較すると、多くの工法で屋外暴露2年の最大荷重が、室内促進の14日と近い値をとることがわかった。図-6に押抜き試験後の供試体の様子を示す。実トンネル1年と室内促進7日は同様の破壊形態を示しており、最大荷重も同等であった。一方、室内促進56日は、より劣化が進んだことにより、接着が弱まるあるいは材料強度の低下がおこり最大荷重の低下と破壊形態の変化をもたらしたと考えられた。

以上より、室内促進により現場での劣化をある程度予測でき、促進試験条件と目標荷重を設定することで、補修工の長期耐久性が評価できると考えられた。

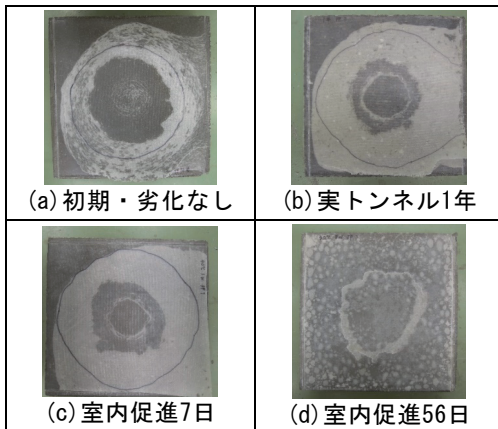


図-6 押抜き試験後の供試体（工法A）

4. まとめ

うき・はく離等の実態を踏まえた新たな補修工を対象に耐荷力特性及び室内促進劣化試験の確立に向

けた促進条件に関して、以下の知見が得られた。

- 1) 新たな補修工の場合、荷重-変位特性や破壊形態が従来工法と異なるため、従来の単位はく離強さのみでは耐荷力特性の評価が難しい。
- 2) 多くの工法で室内促進14日と屋外暴露2年目の最大荷重が近い値であることから、室内促進により現場での劣化をある程度予測できる可能性が示唆され、促進試験条件と目標荷重を設定することで補修工の長期耐久性が評価できると考えられる。
- 3) 材料の違いや促進試験による劣化状況の結果から、設計・施工段階で想定していない破壊形態が生じる可能性が示唆された。そのため、材料強度や繊維の編込み構造等について劣化による影響を考慮するとともに、点検時には経過年数や材料特性、周辺状況（漏水の有無等）等を踏まえて状態の評価を行うことが重要と考えられる。

今後は、新たな補修工の荷重-変形特性や破壊形態等を考慮した性能評価手法の検討や、現場適用の際の留意事項の整理等が必要と考えている。また、実トンネルでの暴露試験はまだ2年目であるため、さらにデータ収集を行い、促進劣化試験から予測される劣化傾向の精度向上を目指すことを考えている。

参考文献

- 1) 森本智、日下敦、吉岡和哉、長谷川慶彦：NATMにより建設された道路トンネルにおける材質劣化に起因する変状の実態、土木技術資料、第61巻、第4号、pp.24～27、2019。
- 2) 石村利明、真下英人、箱石安彦：既設トンネルのはく落防止対策工の耐力評価に関する一考察、土木学会トンネル工学報告集、第14巻、pp.325～330、2004。
- 3) 土木学会：2018年制定コンクリート標準示方書【規準編】「コンクリート片のはく落防止に適用する表面被覆材の押抜き試験方法(JSCE-K 533-2013)」、pp.479～482、2018。

森本 智



土木研究所道路技術研究グループトンネルチーム主任研究員
MORIMOTO Satoshi

日下 敦



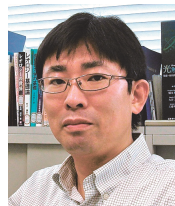
土木研究所道路技術研究グループトンネルチーム
KUSAKA Atsushi

島袋智尋



土木研究所iMaRRC材料資源研究グループ 研究員
SHIMABUKURO Chihiro

新田弘之



土木研究所iMaRRC材料資源研究グループ 上席研究員、博士（工学）
Dr.NITTA Hiroyuki