

トンネルの変状対策工の選定手法

角湯克典* 真下英人**

1. はじめに

道路トンネルにおける変状対策は、定期点検等で得られたデータから変状の発生原因を推定し、ひび割れ等の変状が顕著に現れている箇所等に対して過去の事例や経験に基づいて補修・補強等の対策工の必要性や規模を検討し、対症療法的に実施しているのが現状である。今後、高度経済成長期に大量に建設された道路トンネルの老朽化による覆工コンクリート等の劣化の進展が懸念されることや、社会資本整備に投入できる財源の制約が見込まれることから、トンネルの変状の発生原因を適切に推定し、各変状状態に対して効果が最も効率的に発揮できる時期に適切な補修・補強工を実施する維持管理手法を確立する必要がある。

本報文では、現場で採用されることの多いトンネルの変状対策工に関して施工実績の収集・分析を行うとともに、一部の対策工について実大規模の載荷実験を行い、変状対策工の効果と選定の考え方についてとりまとめた結果について報告する。

2. 変状対策工の選定

トンネルの変状対策工は、覆工コンクリートの材質劣化等により覆工コンクリート等にうき、はく離、はく落等が発生しているのを防止するはく落対策工と覆工に外力が作用し覆工の変形やひび割れ等が生じている場合に覆工の耐荷力性能の向上等を目的とする外力対策工に分けることが出来る。

2.1 はく落対策工の選定方法

2.1.1 はく落対策工の設計方法

はく落対策工は大きくは金網・ネット工と当て板工に分類できる。さらに、金網・ネット工は金網工と樹脂ネット等のネット工に分類でき、当て板工は形鋼系の当て板工、鋼板やパネル系の当て板工と繊維シート系の当て板工に分類できる。本研究ではこれら5つのはく落対策工について現場での施工実績を調査し、設計の基本的な考え方、

設計式、概ねの適用範囲についてとりまとめた。とりまとめ結果を表-1に示す。ここで、金網・ネット工の設計保有耐力は、金網・ネット材によっては覆工への固定方法に応じて予め値が求められているが、覆工への固定状況を模擬した試験により確認することとしている。また、繊維シートの設計はく離耐力は、繊維シートの材質や覆工コンクリートの物性や表面状態等によって異なるが、一般に繊維シートの引張剛性から、あらかじめ準備されているノモグラフを用いて求めることができる。

表-1によると設計の考え方は大きく2つに分けられる。1つは、金網・ネット工や形鋼系当て板工に適用されるものであるが、金網・ネット工等の設計保有耐力はく落塊の落下荷重以上の耐力を有するにするとともに、これらはく落対策工を覆工コンクリートに固定するためのアンカーの引抜き耐力を想定しているコンクリートのはく落塊の重量より大きな耐力を有するにするとという考え方である。

もう1つは、鋼板接着工や繊維シート接着工に適用されるものであるが、これらはく落対策工の設計はく離耐力が想定しているコンクリートのはく落塊の重量より大きな耐力を有するにするとという考え方である。

2.1.2 はく落対策工の適用範囲

はく落対策工の適用範囲については、これまでの施工実績から金網・ネット工や形鋼系当て板工は周長約6~16m程度までの比較的小さなはく落に対して、鋼板接着工や繊維シート接着工は金網・ネット工等よりやや大きく周長約17~35m程度までのはく落に対して適用していることがわかった。しかしながら、はく落塊の厚さによってははく落対策工が適用できる周長が異なるため、繊維シート接着工の一種である2方向炭素繊維シートの適用範囲について、表-1に示した設計式をもとに試算した結果について図-1に示す。網掛けした部分が繊維シート接着工の適用可能範囲を示している。なお、適用可能範囲の周長の上限は

表-1 はく落対策工の設計方法と適用範囲

	金網・ネット工		当て板工		
	金網工	ネット工 ¹⁾	形鋼系当て板工	鋼板接着工	繊維シート接着工 ¹⁾
設計の考え方	①金網の設計保有耐力が設計落下荷重以上の耐力を有する ②アンカー1本の引抜耐力が設計落下荷重以上の耐力を有する	①ネットの設計保有耐力が設計落下荷重以上の耐力を有する ②アンカー1本の引抜耐力が設計落下荷重以上の耐力を有する	①形鋼の許容応力度が設計落下荷重により発生する応力度以上である ②アンカー1本の引抜耐力が設計落下荷重以上の耐力を有する	①鋼板の設計はく離耐力が設計落下荷重以上の耐力を有する	①繊維シートの設計はく離耐力が設計落下荷重以上の耐力を有する ②繊維シートの設計引張強度がはく離発生時の応力度以上である
設計式	① $\gamma_i \cdot W_d / P_{ud} \leq 1.0$ W _d : 設計落下荷重 P _{ud} : 金網の設計保有耐力 γ _i : 構造物係数(通常1) ② $W_d \leq P_o$ W _d : 設計落下荷重 P _o : アンカー1本あたりの引抜耐力	① $\gamma_i \cdot W_d / P_{ud} \leq 1.0$ W _d : 設計落下荷重 P _{ud} : ネットの設計保有耐力 γ _i : 構造物係数(通常1) ② $W_d \leq P_o$ W _d : 設計落下荷重 P _o : アンカー1本あたりの引抜耐力	① $\sigma_b \leq \sigma_a$ $\sigma_b = M/Z$ σ _a : 形鋼の許容応力度 M: 曲げモーメント Z: 形鋼の断面係数 ② $W_d \leq P_o$ W _d : 設計落下荷重 P _o : アンカー1本あたりの引抜耐力	① $W_d \leq S_{po} \times L$ W _d : 設計落下荷重 S _{po} : 鋼板の単位はく離強さ L: はく離周長	① $\gamma_i \cdot W_d / P_{ud} \leq 1.0$ W _d : 設計落下荷重 P _{ud} : 繊維シートの設計はく離耐力 γ _i : 構造物係数(通常1) ② $\rho_m \cdot \sigma_{po} / f_{ud} \leq 1.0$ σ _{po} : はく離発生時の繊維シートの応力 f _{ud} : 繊維シートの設計引張強度 ρ _m : 修正係数(通常3)
適用範囲	はく落周長※9mまでの実績(クリンプ金網)	はく落周長※16mまでの実績(GFRC格子筋#4)	はく落周長※5.6mまでの実績(L-75×75×6)	はく落周長※35mまでの実績	はく落周長※17mまでの実績
備考	アンカーの引張りにより健全な覆工が破壊されないこと	アンカーの引張りにより健全な覆工が破壊されないこと	覆工に十分な強度(18N/mm ² 以上)があること		覆工に十分な強度(15N/mm ² 以上)があること

※はく落周長とは、はく落範囲の外縁部を矩形断面で囲ったときの周長のことであり、対策工の周長とは異なる

現場での施工実績の最高値より設定した。

これによると、繊維シート接着工の適用可能範囲の周長は、はく落塊の厚さや形状により影響を受け、はく落塊の厚さが10cm程度であればはく落塊の周長は14~20m程度まで、厚さが30cm程度であれば周長は5~7m程度までであると考えられる。なお、ここでは繊維シート接着工の試算例を示したが、他のはく落対策工についても表-1に示した設計式をもとに試算すれば、はく落塊の厚さに応じた周長を求めることが出来る。

2.2 外力対策工の選定方法

2.2.1 外力対策工の効果

土圧の作用により変状が発生したトンネルに対して採用される外力対策工は、大きくは変状の発生原因となっている作用外力を軽減するものと、変状が発生したトンネルの耐荷力を向上させるものの2つに大別される。これら外力対策工は、過去の事例や実績に基づいて適用されているものの、その効果等については、定量的に十分確認されているわけではない。

本研究では耐荷力を向上させる外力対策工の一種である内巻補強工(場所打ちコンクリート)、補強セントル工、内面補強工(鋼板接着工、繊維シート補強工)の適用による耐荷力の向上効果等を確認するため実大規模の供試体を用いた載荷実験を行った。実験はトンネル変状対策工の効果

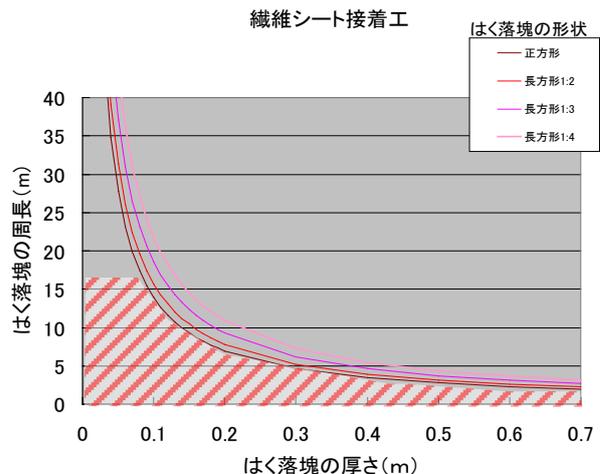


図-1 繊維シート接着工の適用可能範囲

を確認するため、予め載荷により損傷を与えた実大規模(外径9.7m、厚さ30cm、高さ1m)の覆工コンクリートをその内空側から対策工で補強した供試体に対してジャッキで直接載荷することにより行った(図-2参照)。対策工としては、内巻きコンクリート(厚さ125mm)、H鋼による補強セントル(H-150×150c.t.c85cm)、鋼板(厚さ4.5mm)、繊維シート(厚さ0.167mm)を配した場合の4ケースを実施した。また、比較のために対策工を配さず損傷を与えた供試体に再度載荷を行うケースについても実施した。鋼板接着工、補強セントル工を配したケースの実験概要を図-2に示す。

実験はまず損傷したトンネル覆工を再現するため、覆工コンクリートに荷重し、ひび割れや**圧ざ***を発生させた（損傷荷重）。荷重はひび割れ発生後の最大荷重を確認するまで続行した。その後、一旦除荷し、覆工コンクリートの内空側に対策工を配し、再度、損傷荷重と同じ荷重方式で最終破壊となるまで荷重を行った。

荷重形式としては、背面空洞に裏込注入工等が実施され背面拘束が高い状態で覆工に緩み土圧が作用している状態を想定し、 $\theta = 80$ 度、 90 度、 100 度の3箇所位置で油圧ジャッキにより荷重し、それ以外のジャッキ位置においては、油圧ジャッキを設置し覆工の外側への変位の拘束を図った。

損傷荷重時の作用荷重Pと天端 $\theta = 90$ 度外側面位置での内空側への変位 δ の関係と、再荷重時の作用荷重Pと天端 $\theta = 90$ 度外側面位置での内空側への変位 δ の関係を荷重変位曲線として整理した。補強セントル工を配した例を図-3に示す。このようにして得られた、荷重変位曲線における最大荷重を破壊荷重と、直線部の傾きを変形剛性と定義し、対策工によるこれらの向上効果を表-2に示す。覆工コンクリートと対策工の破壊形態から、内巻補強工においては覆工と内巻きコンクリートの両方が破壊するが、その他の対策工においては覆工コンクリートは破壊するが補強材は覆工からはく離したりするものの、ほとんど変状が発生していないことがわかった。このことから内巻補強工の

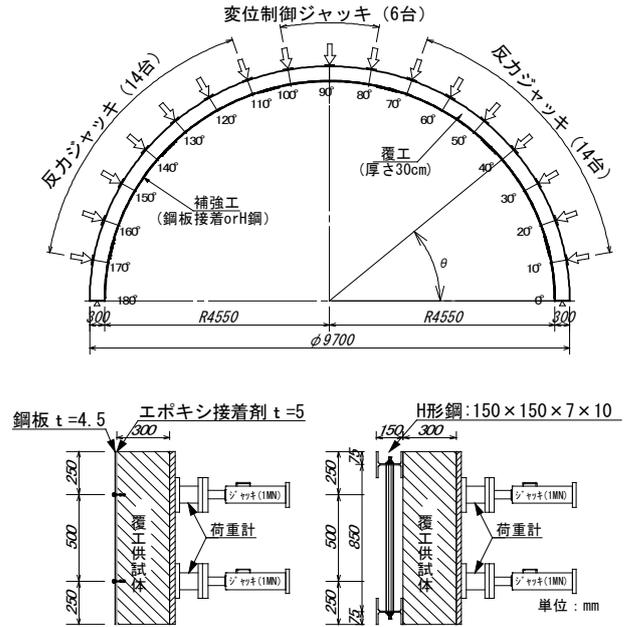


図-2 実験概要図

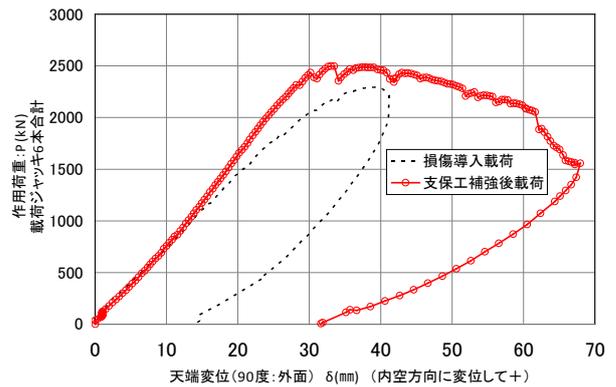


図-3 荷重変位曲線（補強セントル工）

表-2 外力対策工の効果と対策工を配した覆工の破壊メカニズム

	無対策	内巻補強工 (場所打ちコンクリート)	補強セントル工	内面補強工	
				鋼板接着工	繊維シート補強工
破壊形態	・覆工内面(115度付近)コンクリートが圧壊し、はく落	・覆工(115度付近)がせん断破壊 ・内巻き内面が65度、115度付近で圧壊し、はく落	・覆工外面(90~100度)コンクリートが圧壊し、はく落 ・覆工内面(65度、115度付近)コンクリートが圧壊し、はく落 ・破壊荷重以降にH鋼が115度付近で局所的な屈服	・覆工外面(80~90度)コンクリートが圧壊し、はく落 ・鋼板が60~90度、100~120度の範囲ではく離	・覆工外面(90度付近)コンクリートが圧壊し、はく落 ・繊維シートが67度、95~105度、110度の範囲ではく離
変形剛性	-	約43%増加	約19%増加	約11%増加	増加しない (損傷を受けていない覆工とはほぼ同じ)
破壊荷重*	0.76	1.43	1.1	1.15	ほぼ1 (損傷を受けていない覆工とはほぼ同じ)
破壊荷重決定メカニズム	-	破壊荷重は内巻き後の複合部材の破壊により決定されるため、破壊荷重の向上は期待できる	破壊荷重は覆工の再度破壊により決定されるため、破壊荷重の向上はあまり期待できない	破壊荷重は覆工の再度破壊により決定されるため、破壊荷重の向上はあまり期待できない	破壊荷重は覆工の再度破壊により決定されるため、破壊荷重の向上は期待できない

* 破壊荷重は損傷を受けていない覆工の破壊荷重に対する比率を表す

*土木用語解説：圧ざ

表-3 外力の種類別の変状対策工の適用性

	緩み土圧	膨張性土圧	偏土圧	地すべり	支持力不足
作用荷重の軽減	・ロックボルト工	・ロックボルト工 ・アンカー補強工	・ロックボルト工 ・アンカー補強工	・地すべり抑制工(水抜き工、押え盛土工等) ・地すべり抑止工(杭工、アンカー工等)	・地山注入工
トンネルの耐荷力の向上	・裏込め注入工 ・(圧ざ、せん断破壊が生じている場合)内巻補強工 ・(圧ざが生じていない場合)補強センター工、内面補強工	・裏込め注入工 ・インバート補強工 ・内巻補強工	・裏込め注入工 ・インバート補強工 ・(圧ざ、せん断破壊が生じている場合)内巻補強工 ・(圧ざが生じていない場合)補強センター工、内面補強工	・裏込め注入工※1 ・補強センター工※1	・裏込め注入工 ・インバート補強工

※1 地すべりの場合は地すべりが抑制されない限りは抜本的な対策とはならない

効果は補強材の種類や厚さの影響を受けるが、その他の対策工については補強材の規模をむやみに大きくしても耐荷力の向上効果には限界があるものと考えられる。

2.2.2 外力対策工の選定の考え方

今回の実験結果とこれまで現場で得られている知見とから採用実績の多い変状対策工の効果とその特性をまとめると以下ようになる。

ロックボルト：十分な定着力が確保できない土砂地山などを除けば、覆工に作用する土圧を軽減させる効果が期待できる。

裏込め注入工：覆工背面に空洞が存在する場合は空洞を充填することにより、覆工に荷重が作用した場合の地盤反力が確保され、覆工の耐荷力が向上する。

インバート工：側方や底盤から作用する荷重に対しては耐荷力を向上させる効果が期待できるが、施工は容易ではない。

内巻補強工：損傷が発生した覆工の耐荷力を向上させる効果があり、補強材料、厚さなどを適切に選定することにより大幅な耐荷力の向上が期待できる。ただし、施工余裕（最低でも50mm以上）が無い場合は適用できない。

補強センター工：損傷が発生した覆工の耐荷力を損傷が発生していない覆工と同程度まで向上させる効果が期待できるが、それ以上の効果は期待できない。ただし、内面補強工とは異なって最大耐荷力以後の靱性に優れているとともに、施工が容易である。

内面補強工：損傷が発生した覆工の耐荷力を損傷

が発生していない覆工と同程度まで向上させる効果が期待できるが、それ以上の効果は期待できない。また、内巻補強工とは異なって、圧縮力の作用には効果は期待できない。

また、以上のような各外力対策工の特性を踏まえ、外力の種類別に変状対策工の適用性をまとめると表-3のようになる。

3. まとめ

変状対策工のうちく落対策工の設計方法、概ねの適用範囲等を取りまとめるとともに、外力対策工の効果と適用の考え方についてとりまとめた。実際の現場においては、変状発生原因を的確に見極めるとともに覆工の残存耐力を適切に評価し、これらの変状対策工の特性を踏まえ適用する必要がある。

参考文献

- 1) トンネル安全対策工研究会：FRPによるトンネル覆工剥落対策マニュアル、2003



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所道路技術研究グループトンネルチーム 上席研究員
Katsunori KADOYU



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所 道路技術研究グループ長、工博
Dr.Hideto MASHIMO