

既設トンネルの変状対策工の選定手法に関する研究

研究予算：運営費交付金（道路整備勘定）

研究期間：平 17～平 19

担当チーム：道路技術研究グループ（トンネル）

研究担当者：真下英人、角湯克典

【要旨】

本研究は、トンネルの定期点検・調査データ等から変状の発生原因を推定する手法を検討するとともに、トンネル覆工載荷実験および数値解析などにより定量的に変状対策工の効果を評価し、変状状態に応じて必要となる対策工の種類と規模を選定する方法について検討するものである。本年度は本研究の最終年度にあたることから、ひび割れ発生原因フローチャート（案）を作成するとともに、数値解析によりひび割れ発生状況からトンネルに作用している荷重を推定し、覆工のおかれている荷重状態を評価した。また、変状対策工のうちはく落対策工の適用範囲、補強対策工（外力対策工）の効果および適用の考え方についてとりまとめた。

キーワード：トンネル、ひび割れ原因推定、はく落対策、外力対策

1. はじめに

既設の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急速な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。

本研究では、トンネルの変状事例の分析等によりトンネルの定期点検・調査データから変状の発生原因を推定する手法を検討するとともに、現場での施工実績の収集・分析やトンネル覆工載荷実験等により定量的に変状対策工の効果を評価し、変状状態に応じて必要となる対策工の種類と規模を選定する方法について検討するものである。本年度は最終年度であることから、道路管理者が点検・調査結果を見てトンネルに発生している変状の原因を推定するためのツールとしてひび割れ発生原因推定チャート（案）を作成し、数値解析によりひび割れ発生状況からトンネルに作用している荷重を推定し、覆工のおかれている荷重状態を評価した。また、はく落対策工の現場での施工実績の収集・

分析を行い、その設計方法を取りまとめるとともに、実大規模の載荷実験によりトンネル補強工の効果と適用の考え方をとりまとめた。

2. ひび割れ発生原因の推定

2. 1 ひび割れ発生原因推定チャートの作成

道路管理者が点検・調査結果を見てトンネルで起きている変状の原因を推定するためのツールとしてひび割れ発生原因推定チャート（案）（以下、原因推定チャート（案））を作成した。この原因推定チャート（案）は、点検結果と既存資料から概ねの発生原因を推定（一次選定）する部分と、その結果を踏まえひび割れ発生原因をより正確に推定（二次選定）するために必要な追加調査とその調査結果の判断指標の部分から構成される。原因推定チャート（案）のうち、トンネル縦断方向の一条のひび割れから変状の原因を推定する部分を図-1に示す。

一次選定を行う部分の作成にあたっては、まず、文献および実際の変状事例を調査し、変状発生原因と変状の発生位置、形態、性状等との関係を整理し、ひび割れパターンと想定される変状発生原因を関連づけた。さらに、変状発生原因と発生原因の絞り込みに活用した既存資料（施工記録、点検記録等）等との関係を整理し、変状発生原因を絞る込みに至った既存資料等と判断指標を追加した。

二次選定を行う部分の作成にあたっては、文献および実際の変状調査事例から変状発生原因と原因を推定

図-1 ひび割れ発生原因推定チャート（案）（トンネル縦断方向ひび割れ）

方向	ひび割れの分類			
	位置 変状展開図	性状 変状模式図(変状位置・形態) 変形モード	ひび割れ発生状況	
縦断方向 	天端、肩部、側壁 	引張り 	 開口ひび割れ	・スパンをまたがない開口ひび割れ
	天端、肩部 	引張り、圧縮、せん断 要注意 開口または段差 	 開口ひび割れ 段差	・天端に開口ひび割れ(変状が進行すると両肩に圧力が生じる場合あり)

下図左端に続く

既存資料	選定条件		【一次選定】資料から推定する発生原因 ※2)	追加調査		【二次選定】発生原因 ※3)
	判断指標			調査項目	判断指標	
上図右端より続く 【資料調査】 ・設計図書 ・施工記録 ・点検記録 ・変状調査	★施工時の変位(天端沈下、内空変位等)が小さい ★NATMである ★硬岩である ★ひび割れ箇所に段差、圧がない ★同じようなひび割れがトンネル全体にある ★過去の点検記録から判断して、ひび割れ開口幅、長さの進行性がない	★内空断面が大きい	乾燥収縮 温度応力	①ひび割れ形状変化調査 ②覆工厚、背面空洞調査 ③気象条件調査	★ひび割れ開口幅、長さの進行性がない ★ひび割れが貫通している ★外気と地山の温度差が大きい	乾燥収縮 温度応力
	—	★ひび割れ箇所に段差を確認 ★過去の点検記録から判断して、ひび割れ開口幅、長さの進行性がある ★施工時の変位(天端沈下、内空変位等)が大きい	緩み土圧、 偏土圧、 膨張性土圧	③気象条件調査	★ひび割れ開口幅、長さの進行性がある ★ひび割れが貫通していない	緩み土圧、 偏土圧、 膨張性土圧
	★施工時の変位(天端沈下、内空変位等)が小さい ★NATMである ★硬岩である ★ひび割れ箇所に段差、圧がない ★同じようなひび割れがトンネル全体にある ★過去の点検記録から判断して、ひび割れ開口幅、長さの進行性がない	★内空断面が大きい	乾燥収縮 温度応力	①覆工厚、背面空洞調査 ②ひび割れ形状変化調査 ③覆工応力及び背面土圧 ④地山挙動調査 ⑤気象条件調査	★ひび割れが貫通している ★ひび割れ開口幅、長さの進行性がない ★外気と地山の温度差が大きい	乾燥収縮 温度応力
	★矢板工法である ★地質が悪い ★ひび割れ箇所に段差、圧を確 認 ★過去の点検記録から判断して、ひび割れ開口幅、長さの進行性がある	★建設後5年以上経ってからひび割れが発生している ★連続した位置に新しいひび割れの確認	緩み土圧	⑤気象条件調査	★ひび割れ開口幅、長さの進行性がある ★アーチ部の地山が脆弱で空洞あり ★覆工が薄く空洞が大きい場合は緊急度大 ★地山にゆるみ範囲を確認 ★ひび割れが貫通していない ★覆工の応力が増加している ★土圧が増加している	緩み土圧 ＜覆工が薄く空洞が大きい場合は緊急度大＞

※本来は横長の図であるが、途中で分割し上下二段で示す

※1) 既存資料から発生原因を特定する場合は、枠内の全ての判断指標を満足する必要がある。

※2) 既存資料の情報がない、もしくは判断できない場合は、枠内全ての発生原因を疑い、追加調査を実施する。

※3) 発生原因を特定する場合は、既存資料の情報も踏まえて判断する必要がある。

係を整理しとりまとめた。

この原因推定チャート（案）により、対策に緊急性を要する外力によるトンネル変状とそれ以外の材質劣化等によるトンネル変状とを区別することができる。同時に、発生原因に応じた効果的かつ効率的な変状対策工の選定に資するものと考えられる。

2.2 数値解析による作用外力の推定

次に、トンネル覆工内面のひび割れ発生状況からトンネルに作用している荷重を推定し、覆工のおかれている荷重状態を評価するために数値解析を行った。数値解析には、過年度の研究において外力により発生し

ている覆工内面のひび割れの発生位置や状況を再現することができた数値解析モデルを用いた。

トンネルに作用している荷重を推定し覆工のおかれている荷重状態を評価する対象としたひび割れパターンは、縦断方向に発生する2条のひび割れのうち、

①天端に引張りひび割れ（開口）が発生した後、肩部に圧縮ひび割れ（圧ざ）が発生している、②肩部に引張りひび割れ（開口）が発生した後、天端に圧縮ひび割れ（圧ざ）が発生している、③肩部に引張りひび割れ（開口）が発生した後、反対側に圧縮ひび割れ（圧ざ）が発生しているパターンを対象とした（図-2参

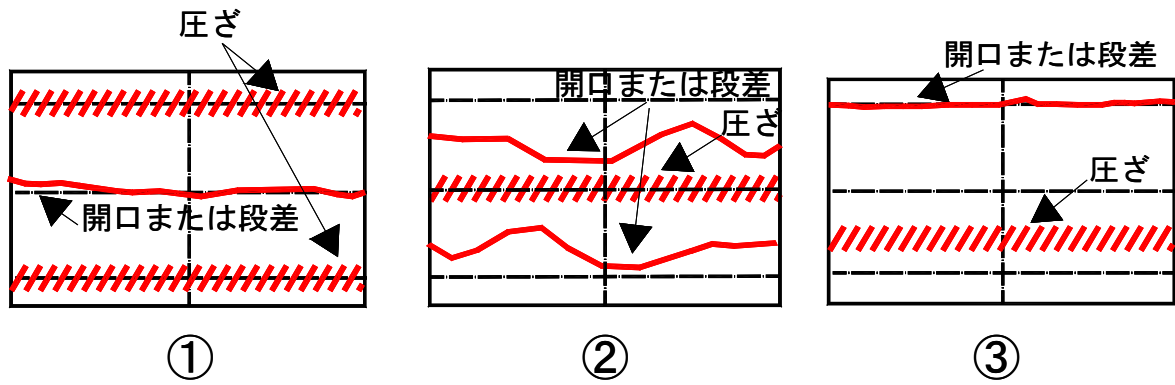


図-2 覆工の荷重状態を評価するのに用いたひび割れパターン

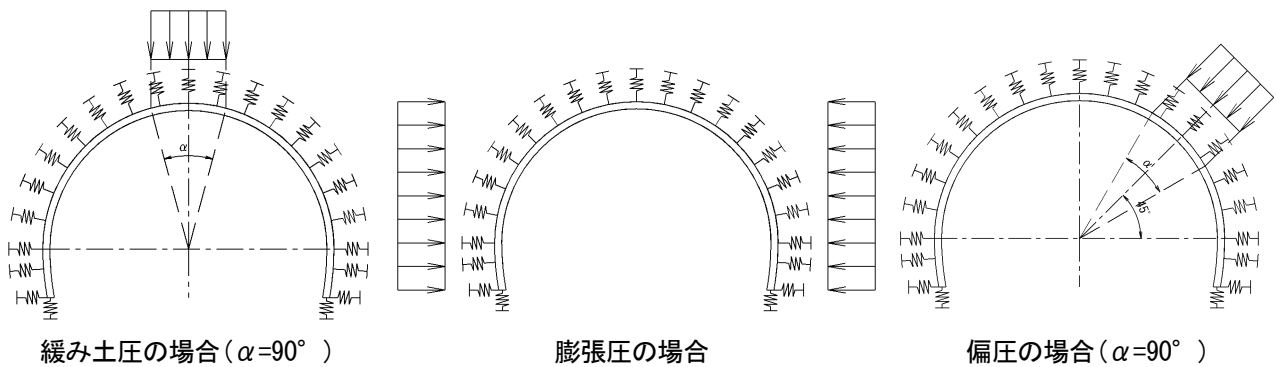


図-3 想定した外力の荷重形態

照)。

想定した外力は、外力によるひび割れの主な発生原因である偏圧、緩み土圧、膨張圧とした(図-3参照)。解析ケースとしては、トンネル条件は覆工厚 30cm、荷重条件は図-3の荷重範囲とし、地山条件はトンネル地山等級区分でC I相当の地盤とした。また、コンクリートはプレーンコンクリートを想定し、表-1の入力物性値を用いた。解析結果については、覆工内面に発生するひび割れの位置、最初のひび割れ(以下、第1ひび割れ)と2番目のひび割れ(以下、第2ひび割れ)が発生する荷重、および破壊荷重に着目して分析した(図-4参照)。ここで、破壊荷重とは圧縮側の終局圧縮ひずみが 3500 μ に達したときの荷重値と規定した。なお、数値解析では覆工外側(地山側)にもひび割れが発生するが、トンネルの点検等により現場で確認されるひび割れは覆工内面のひび割れであるため、解析で着目、抽出したひび割れは覆工内面のひび割れのみとした。

1) 緩み土圧

緩み土圧によるひび割れ解析においては、ひび割れは、緩み土圧が作用している荷重中心点から第1ひび割れ(引張り)が発生、その後両肩部に第2ひび割れ(圧縮)が同時に発生した(図-5参照)。これは覆工

表-1 コンクリート解析入力物性値

内容		備考
設計基準強度: σ_{ck} (MPa)	18	
圧縮強度: f_c (MPa)	15.3	$0.85 \sigma_{ck}$
引張強度: f_t (MPa)	1.58	$0.23 \sigma_{ck}^{(2/3)}/1.3$
破壊エネルギー: G_f (N/m)	15.8	$1/2 \times f_t \times 0.02/1000$
弾性係数: E(MPa)	15,300	$2 \times f_c/0.002$
ポアソン比: ν	0.2	

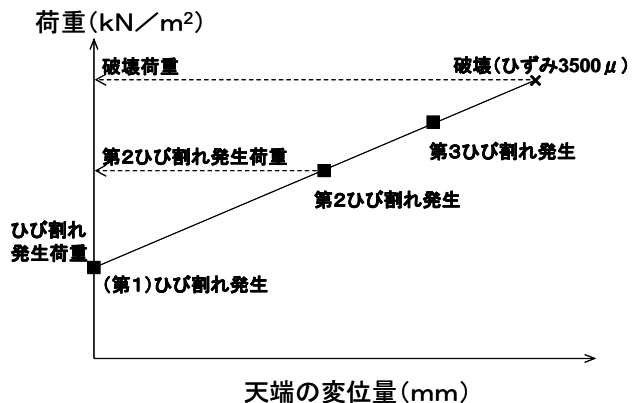


図-4 天端の変位量と荷重載荷値の関係

のおかれている荷重状態を評価する対象としたひび割れパターン①と整合しており、定性的に実際の現場の状況を良く再現しているといえる。また、第1ひび

割れは荷重約 130kN/m²で、第2ひび割れは荷重 548 kN/m²で発生し、土被り換算すると約 6mと約 24m 程度に相当する。破壊荷重は約 568kN/m²となっており、土被り換算すると約 25m程度に相当する。

2) 膨張圧

膨張圧によるひび割れ解析においては、膨張圧が作用している SL 部に第1ひび割れ(引張り)が発生した(図-6参照)。これは覆工のおかれている荷重状態を評価する対象としたひび割れパターンの②の引張りひび割れと整合しているが、天端部の圧縮ひび割れは再現できなかった。これは地山条件を C I 相当としたため天端部の背面拘束が大きくなった等の理由によりひび割れが発生しなかったと考えられる。また、第1ひび割れは荷重約 85kN/m²で発生し、土被り換算すると約 4m程度に相当する。破壊荷重は約 418N/m²となっており、土被り換算すると約 18m程度に相当する。

3) 偏圧

偏圧によるひび割れ解析においては、ひび割れは、偏圧が作用している荷重中心点に第1ひび割れ(引張り)が発生し、その後天端部と SL (スプリングライン) 部に第2、第3ひび割れ(圧縮)が発生した(図-7参照)。これは原因推定チャート(案)の変状展開図や変状模式図と整合しており、定性的に実際の現場の状況を良く再現しているといえる。また、第1ひび割れは荷重約 220kN/m²で、第2ひび割れは荷重約 570 kN/m²で発生し、土被り換算すると約 10mと約 25m程度に相当する。破壊荷重は約 775kN/m²となっており、土被り換算すると約 34m程度に相当する。

以上を総括すると、第1ひび割れは比較的小さな荷重で発生することから、ひび割れが発生したからといってただちにトンネルが危険な状態であるとはいえないと考えられる。また、第2ひび割れの発生荷重は膨張圧を除いて破壊荷重の約 74~96%程度となっていることから、トンネル覆工内面に第2ひび割れが発生すれば覆工自体の耐荷力に至るまでにあまり余裕がないと考えられる。

3. 変状対策工の選定

トンネル変状対策工は、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できる。

3. 1 はく落対策工の適用範囲

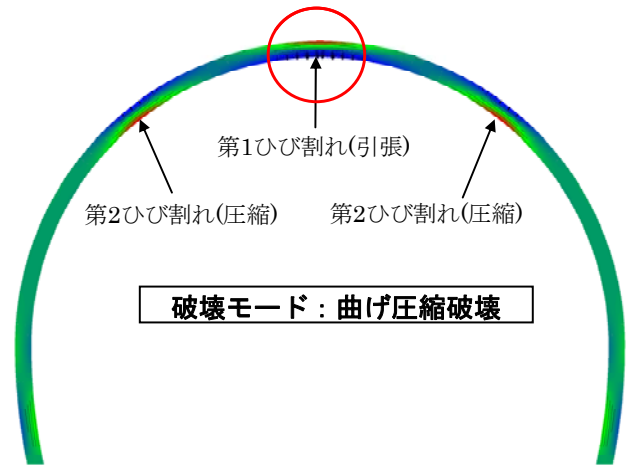


図-5 ひび割れの発生位置(緩み土圧)

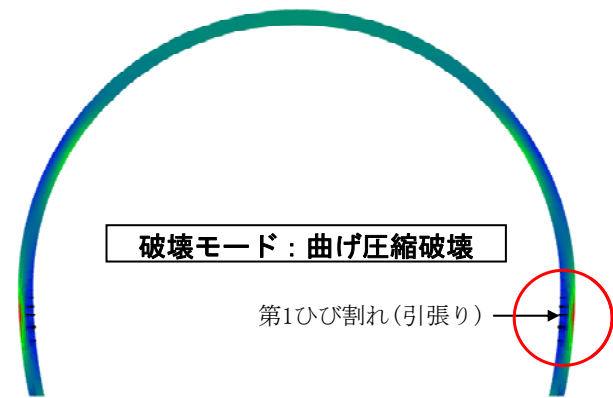


図-6 ひび割れの発生位置(膨張圧)

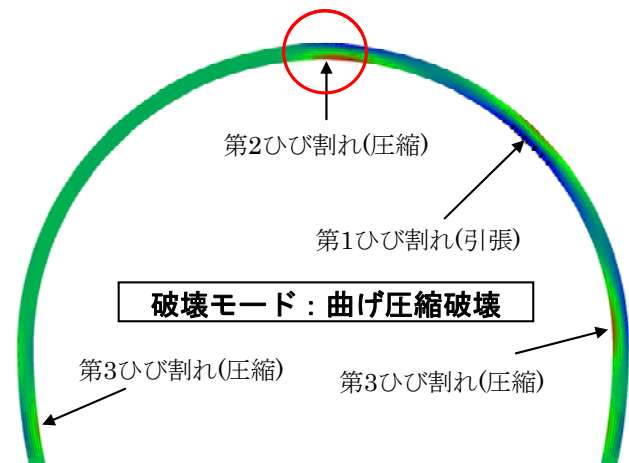


図-7 ひび割れの発生位置(偏圧)

トンネル覆工に発生する変状現象のうちはく落を対象にその対策工の設計方法を取りまとめた。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、当て板工系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

表-2 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	形鋼系当て板工	鋼板接着工	繊維シート接着工
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 $W_d \leq P_0$ W_d : 設計落下荷重 P_0 : アンカー1本当たりの引抜耐力	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 $W_d \leq P_0$ W_d : 設計落下荷重 P_0 : アンカー1本当たりの引抜耐力	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 $W_d \leq n \times P_0$ W_d : 設計落下荷重 P_0 : アンカー1本当たりの引抜耐力 n : 形鋼を固定するアンカーの本数($n=2$ を標準とする)	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

板工に分類できる。今回はこれら5つのはく落対策工について実際の現場での施工事例を調査し、設計の基本的な考え方、設計式、設計パラメータ、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-2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、ノモグラフを用いて求めることができる。

これ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がはく落塊の落下荷重以上の耐力を有するとともに、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ようにする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ようにするという考え方であ

ネット工

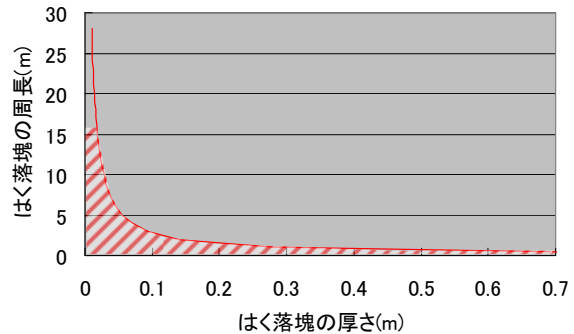


図-8 ネット工の適用可能範囲

繊維シート接着工

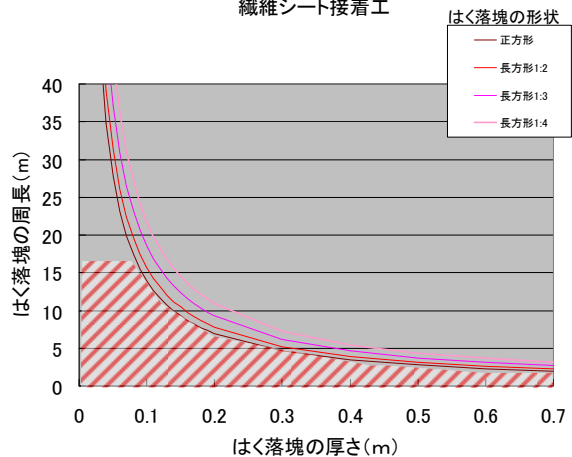


図-9 繊維シート接着工の適用可能範囲

る。

それぞれの落対策工の適用範囲については、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落に対して適用でき、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 程度までの落に対して適用できるものと考えられる。

ここで、ネット工（種類：GFRP 格子筋#4）と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、設計式をもとに試算した結果について図-8、9 に示す。網掛けした部分がネット工と繊維シート接着工の適用範囲を示している。なお、対策可能範囲の周長の上限は現場での施工実績の最高値より設定した。これによると、ネット工の対策可能範囲の周長は、はく落塊の厚さが 10cm 程度であればはく落塊の周長は 3m 程度まで、厚さが 30cm 程度であればはく落塊の周長は 1m 程度までが対策工適用範囲であると考えられる。また、繊維シート接着工の対策可能範囲の周長は、はく落塊の厚さや形状により影響を受けるが、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 程度であればはく落塊の周長は 5~7m 程度までが対策工適用範囲であると考えられる。

3. 2 外力対策工の適用の考え方

3. 2. 1 外力対策工の効果

トンネル外力対策工の一種である内巻き補強工（場所打ちコンクリート）、補強セントル工、鋼板接着工、繊維シート補強工の適用性を確認するため実大規模の供試体を用いた载荷実験を行った。実験はトンネル変状対策工の効果を確認するため、予め载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载荷することにより行う（図-10 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载荷を行うケースについても実施した。なお、内巻き補強工、繊維シート補強工で補強した供試体および無対策の供試体に対する载荷実験については過年度に実施しており、後述する実験結果の考察はこのとき実施した実験結果を用いて行っている。鋼板接着工、補強セントル工を配したケースの実験概要図を図-10 に補強セントル工を配した供試体設置

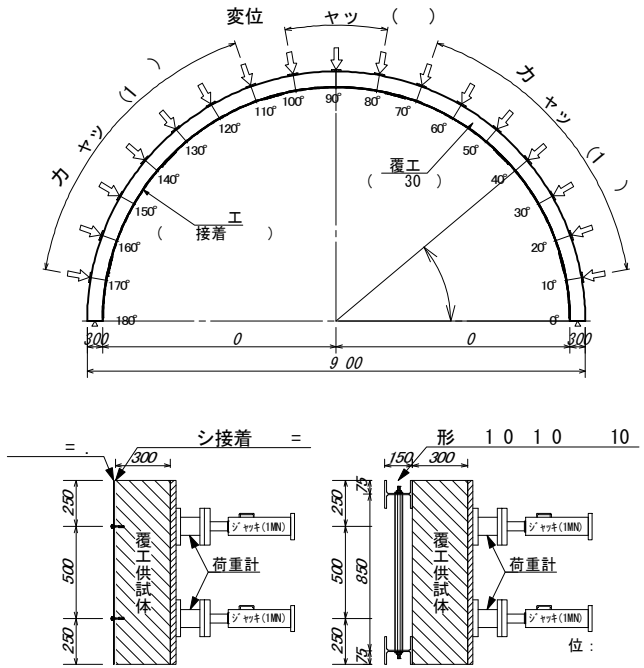


図-10 実要図



写真-1 供試体設置状

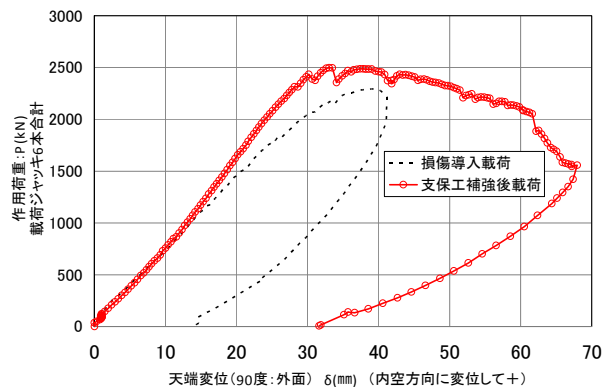


図-11 荷重変位曲（セントル工）の

状況を写真-1 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載荷し、ひび割れや圧ぎを発生させた(損傷載荷)。載荷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、損傷載荷と同じ載荷方式で最終破壊となるまで載荷を行った。

載荷形式としては、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載荷し、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。

損傷載荷時の作用荷重 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、再載荷時の作用荷重 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-11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-3に示す。覆工コンクリートと対策工の破壊形態からは、内巻き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、その他の補強工においては覆工コンクリートは破壊するが補強材が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。このことから内巻き補強工の効果は補強材の種類や厚さの影響を受けるが、その他の補強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。

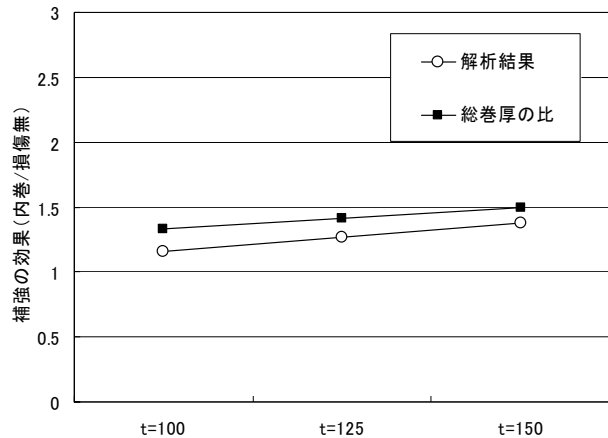


図-12 内き工の効果ときの

内巻き補強工については補強材の種類や厚さによっては大幅な耐荷力の向上が期待できることが明らかになったため、巻厚を大きくすることにより耐荷力がどの程度増加するのかを定量的に評価するために数値解析を行った。数値解析には、過年度の研究において覆工コンクリートの圧壊部を断面欠損とし、その内側に内巻き補強工をモデル化することにより、耐荷力の向上を再現することができた数値解析モデルを用いた。解析ケースとしては、内巻きの厚さを100mm、125mm、150mmの3ケースとした。解析結果を図-12に示す。図-12の縦軸の補強効果は、内巻きを施した覆工の破壊荷重を、損傷を受けていない覆工の破壊荷重で除したものである。これによると、解析結果により得られた補強効果は総巻厚の比に近く、内巻き補強工の補強効果は総巻厚に比例するものと考えられる。

表-3 外力対策工の効果と対策工をした覆工の破壊

	対策	内き工 (場)	ントル工	接着工	繊維シート工
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度付近で局所的な座屈	・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ほぼ同じ)
荷力※	0.76	1.43	1.1	1.15	増加しない (損傷を受けていない覆工とほぼ同じ)
破壊荷重定	—	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、破壊荷重の向上が期待できる	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

※ 荷力は を ていない覆工の 荷力に対する を示す

表-4 外力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)	地山注工
トンネルの耐荷力の向上	裏込め注工 セントル補強工・内面補強工 (圧ざが生じていない場合) 内巻補強工 (圧ざ、せん断破壊が生じている場合)	裏込め注工 インパート補強工 内巻補強工	裏込め注工 インパート補強工 セントル補強工・内面補強工 (圧ざが生じていない場合) 内巻補強工 (圧ざ、せん断破壊が生じている場合)	裏込め注工※ ¹ セントル補強工※ ¹	裏込め注工 インパート補強工

※1 地すべりの場合は地すべりがない場合は本対策とはならない

3. 2. 2 外力対策工の適用の考え方

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に期待する効果は、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。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。

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、内巻き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。

内巻き補強工：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。

セントル補強工：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。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。

インパート工：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。

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-4のようになる。

4. まとめ

本研究で得られた成果を以下に示す。

- 1) 道路管理者が点検・調査結果からトンネルに発生している変状の原因を推定するためのツールとしてひび割れ発生原因推定チャート（案）を作成し、これにより、対策に緊急性を要する外力によるトンネル変状とそれ以外の材質劣化等によるトンネル変状とを区別することができた。
- 2) 数値解析により現場で確認された外力によるトンネル覆工内面のひび割れの発生を再現し、ひび割れが発生したからといってただちにトンネルが危険な状態であるとはいえず、第2ひび割れの有無でトンネルに作用している荷重の状態を評価できることがわかった。
- 3) 変状対策工のうち落対策工について設計の考え方、概ねの適用範囲等を取りまとめた。
- 4) 変状対策工のうち補強対策工について、補強工の効果および適用の考え方を取りまとめた。