

道路トンネルの変状要因分析と維持管理データベースの構築

Deformation Analysis and Database Development for Road Tunnel Maintenance

蒋 宇静* ・ 棚橋由彦* ・ 藤井崇博**

Yujing JIANG, Yoshihiko TANABASHI and Mituhiro FUJII

The exfoliation accident of the concrete in tunnels has occurred in recent years, and it argues about the state of maintenance management. Although it is necessary to understand the performance of tunnel that is contributed by the designers, the rational maintenance management has not been clarified due to the indefinite factors in the design stage. In this study, a database for the management of road tunnels in Nagasaki is developed by using GIS which is linked with the deformation prediction system. Based on the numerical simulations considered the time-dependent deterioration of strength of the lining and the surrounding rocks, the rational maintenance time and reinforcement method have also been proposed.

Key Words : Geographic Information System, maintenance management, road tunnel, data base, deformation prediction

1. はじめに

近年, 山岳トンネル内の覆工コンクリート塊の剥落事故が発生しており, 既設トンネルの維持管理のあり方が議論されている. 交通に供するトンネル内で事故が発生した場合, 道路利用者に与える影響が極めて大きいため日々の点検による変状の早期発見が非常に重要となる. 山岳トンネルは, 地盤中に構築される線状構造物のため, 通常は過去の施工実績に基づいた分析により得られた支保構造を用いて設計が行われており, さらに施工中に切羽での地盤・地質状況により設計を変更しているのが一般的である. 一方, 維持管理では設計者が寄与したトンネルの性能を理解してその保持にあたる必要があるものの, 設計段階等での不確定な要因から適切な維持管理手法が確立されていないのが現状である.

また, 高度成長期に造られた多くの社会基盤施設が建設後数十年を経過し, 維持管理・更新が必要となってきた. 今後はこれらの維持管理費が公的建設投資額の半分を占めるであろうと言われており, 維持管理を効率的に行い, 管理費を抑えることが重要な課題となっている¹⁾.

このような背景を踏まえ, 現在維持管理に関する研究が進められているが, 特に山岳トンネルにおいては設計段階において不確定要因を多く含んでいる上に, 点検・調査においても問題点(坑内が暗い, アーチ部

キーワード: GIS, 維持管理, 道路トンネル, データベース, 変位予測

* 正会員 長崎大学工学部社会開発工学科

** 学生会員 長崎大学大学院生産科学研究科

が高いため変状を見逃すことがある、判定に個人差が生じる等）がある。また、地山とトンネルとの相互作用を考慮して、変状の発生メカニズムを検討している事例は少ないのが現状である。道路舗装のように的確な維持管理時期を算出するためには、こうした現状把握のための維持管理データベースの構築と的確な変状予測が必要である。

本研究では、長崎県内の道路トンネルについて、維持管理情報の検索、現状の閲覧、情報提供を簡便にする GIS を用いたシステムを開発し、トンネル維持管理における現状把握可能なデータベースの構築を行う。また変状予測の一例として、岩盤強度の経時的変化と覆工劣化を考慮したトンネル変状シミュレーションを用い、変状と経過時間の関係から、維持管理コストを加味した最適維持管理時期（補修時期）を算出し、合理的維持管理手法の提案を試みるものである。

2. トンネル維持管理データベースの作成

2.1 データベース作成概要

本データベースの GIS エンジンとして、ArcDesktop ArcInfo を用いる。ArcInfo は ArcDesktop 内のソフトの全機能を持ち合わせており、高度な空間データ処理機能が豊富である。また、変状メカニズム解析システムとリンクさせ、データベース内の情報を用いた解析が可能である。

本データベースでは、国土地理院が発行しているデジタルマップ「数値地図 25000（空間データ基盤）」を基盤としており、精度は国土地理院 25000 分の 1 地形図と同等である。

文字情報である数値地図 25000（空間データ基盤）を、「数値地図データ変換ツール」を用いて、道路中心線・行政界・水涯界を地図として表示できるように変換（シェープファイル）する。これを道路トンネル維持管理データベース内でフォルダ（「長崎県シェープファイル」）に保存する。さらに ArcInfo 内 ArcMap で表示させ、道路中心線から道路トンネルをエクスポート機能を用いて抽出する。これを『長崎県道路トンネル』とする。

次に、『長崎県道路トンネル』から長崎県庁管轄のトンネル（100 本）を抽出する。この際各トンネルのレイヤが作成されるため、マージ機能を用いて長崎県庁が管轄しているトンネルを一つのレイヤにまとめる。これを『長崎県庁管轄トンネル』とする。

『長崎県庁管轄トンネル』から補修・変状の資料のあるトンネルをエクスポート機能により抽出、エディタ機能によりスパン（施工目地間）で分割し、『補修・変状資料有りトンネル』とする。『長崎県庁管轄トンネル』と『補修・変状資料有りトンネル』に関しては、属性データ及び資料をリンクしている。属性データ（基本情報）には、延長・供用開始年・幅員等のトンネル全体に関する情報を入力しており、属性データ（詳細情報）にはスパン（施工目地間）ごとにスパン No、健全度判定等といった情報を入力している。

抽出した『長崎県道路トンネル』、『長崎県庁管轄トンネル』、『補修・変状資料有りトンネル』はデータベース内で保存し、また ArcInfo 内 ArcMap での作業を同時にデータベース内で保存を行う。

2.2 データベースの基本機能

（1）基本情報からの検索

検索項目はデータベース作成時に入力した基本情報となる。図-1 は長崎市付近を表示しており、長崎土木事務所が管轄しているトンネルという検索条件式で検索を行うと長崎土木事務所が管轄しているトンネルを地図上に表示することができる（図中黒色の太線）。そのほか基本情報から検索条件式を作成し検索を行うことが可能である。例えば、トンネル延長が 500m 以上のトンネルといった条件での検索も容易である。

（2）トンネル全体資料の表示

図-2 にトンネル全体資料の表示例を示す。本データベースでは補修・変状資料があるトンネルに関して一本のトンネルを二本に分割し、表示している（図中右側の二本の線がトンネルを示している）。左側には全

体資料とリンクしており、右側には詳細資料とリンクしている。全体資料をリンクしている線上（左側）をクリックすることで図中左側のような断面図などの全体資料を閲覧することが可能である。

(3) 詳細情報からの検索

図-3 に詳細情報からの検索の一例を示す。詳細情報を入力しているトンネルについてはスパンごとに分割しており、各スパンに変状、地質、健全度等の維持管理に関するデータを入力している。図中太く強調されている部分は「ひび割れ延長が1スパン当たり49.8m以上かつ剥離判定が3A」という条件で検索したスパンである。この他、詳細情報を組み合わせて多種多様な検索条件式を作成し検索を行うことが可能であり、これにより変状の傾向や地質等との関係把握が可能である。

(4) 詳細情報の表示

図-4 にトンネル詳細資料の表示例を示す。これは図-3 の黒い四角部分を拡大したものである。詳細情報より検索した結果から、各スパンで生じている変状を、スパン上（矢印で示す強調している線上）をクリックすることで図中左側に示すような変状写真として閲覧することができる（図-4 の写真は鉄筋露出の状態を表示している）。

3. 山岳トンネルの変状現状の分析

ここでは本データベースを用い、『補修・変状資料有りトンネル』に関して変状現状の把握・分析を行う。



図-1 全体情報からの検索

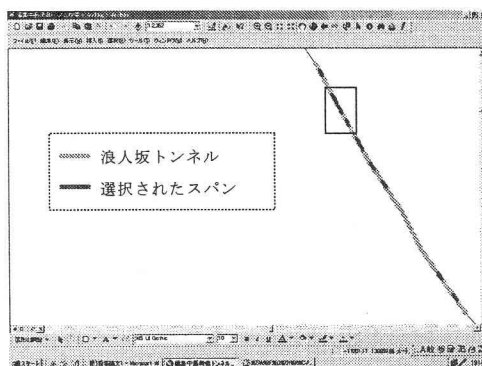


図-3 詳細情報からの検索

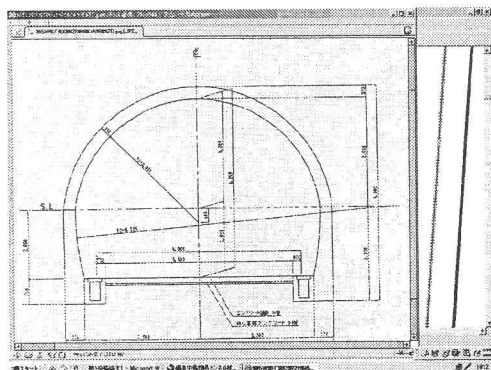


図-2 全体資料の表示

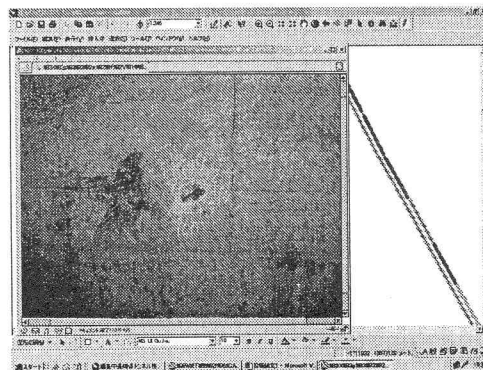


図-4 詳細資料の表示

3.1 対象トンネルの概要

対象トンネルは、長崎県内において2000年に鉄道トンネルの剥落事故に伴い、全トンネル(100本)を対象に緊急点検が行われた内の、補修済3本、調査済14本の計17本(A~Q)であり、その調査及び補修データの分析を行った。図-5に17本に関する概要を示す(A~Sはトンネル名)。経過年数10年未満の3本(A, B, Q)はNATMで、残り14本は矢板(在来)工法で施工されたものである。地質については、トンネル毎に異なるが多くは第三紀層の地山(砂岩・頁岩等)で、変状の発生しやすい地質となっている。

3.2 発生変状とその割合

A~Pトンネルの変状について、ひび割れ、背面空洞、浮き、漏水の判定項目毎のトンネル延長に対する発生割合の分析を行った。一例として覆工背面空洞のトンネル延長に対する発生割合を図-6に示す。ここでは、施工スパン毎の健全度判定をもとに分類を行っており、判定基準は日本道路協会の『道路トンネル維持管理便覧(H5.11)』に基づき行われている。

NATMで施工されたものには空洞は確認されていないが、在来工法のものの一部を除き経過年数に関わらず発生割合が高い。レーダー探査による空洞調査では、空洞発生箇所はアーチ部を中心に全周的な広がりをみせており、最大で1mを超える空洞厚が確認されたトンネルもあった。また、経過年数25年以上になると、判定2A以上の占める割合が大きくなっている。ひび割れについても同様の傾向が見られることから、供用から25年以上経過すると変状が大きくなる傾向が見られた。

4. データベースを用いた変状予測

ここでは第2章で述べたデータベースを用いた変状予測の一例として、図-7に長崎県滑石トンネルの外力判定と劣化判定、漏水判定の3項目による健全度判定に基づいて図中の表のように点数化し、3項目の合計点を可視化したものを示す。トンネルの変状要因には、外力のほかに、材料劣化、地質、工法等が考えられるので以下の式を用いてトンネルの変状を定量的に評価することを提案する。

$$y = \sum A_i a_i \quad (1)$$

ここに、 y は変状評価点で、 A は地質や土かぶり厚、地山強度、工法等トンネル変状要因を点数化したもので、 a は A に対するウェイト(重み)を表す。

上式より、影響要因とそのウェイトを明らかにすれば、供用年に伴うトンネルの変状予測を的確に行って

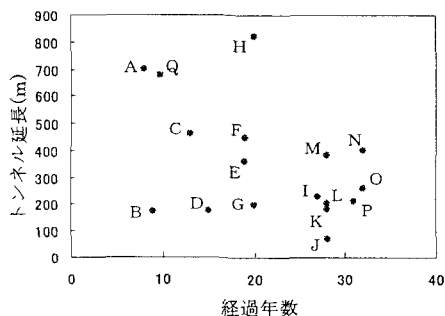


図-5 調査トンネルの概要

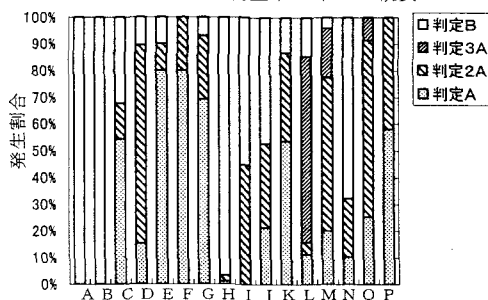


図-6 覆工背面空洞発生割合と経過年数

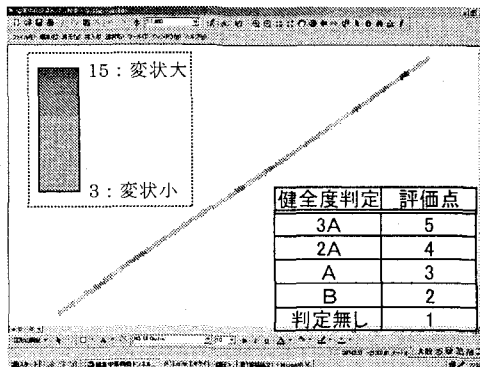


図-7 健全度判定からの評価

変状対策を講じることが可能となる。そこで、材料強度低下による影響に着目して変状評価を試みる。詳細資料がある 16 トンネルから覆工コンクリートの一軸圧縮強度と供用開始からの経過年との関係を長崎県庁が管轄しているトンネルに適用すると、図-8 に示すように、材料強度低下による変状の程度が評価される。

5. 変状シミュレーションに基づく合理的維持管理時期の提案

5.1 提案手法の概要

変状トンネルの補強対策では、覆工の内空変位の進行を抑制し必要な内空断面（建築限界等）を確保することが最も重要な条件となる²⁾。また、一般に補強工の施工後は、内空変位計測などでの変位の経時変化を実測することにより補強効果が確認される。この内空変位は主に地圧と覆工の劣化が原因で発生しており、ひび割れや剥離等を引き起こす。それらの対策として用いられているのが「覆工補強対策」及び「ひび割れ対策」である。

ここでは、地山強度の経時的劣化と覆工劣化を考慮したトンネル変状シミュレーションを行い、補修施工時期ごとの内空変位の経時変化を把握する。また、「覆工補強対策費」の経年変化式を考慮することで、最適維持管理時期の提案を試みる。

5.2 覆工補強手法

覆工補強対策は表面を補修する『表面補強』、覆工表面に引張材を定着させ、現有の覆工耐荷力を増加させる『内巻補強』、現有の覆工に代わって新たな覆工を内巻する（現覆工の劣化は放置する）『改築』の3つに分けることができる。

ここでは炭素繊維シート工と内巻きコンクリートを覆工劣化の対策工としてとりあげる。

(1) 内巻補強-内巻きコンクリート工（内巻工）

鋼繊維補強コンクリートの設計基準強度は、施工実績とコンクリートへの定着を考慮して $30 \sim 36 \text{ N/mm}^2$ を標準とする。ただし、覆工には構造上大きな軸力が発生するため内巻工の脚部には足つけを設けなければならない。

(2) 表面補強-炭素繊維シート工

炭素繊維シート工は非常に厚みの薄い繊維シートを接着する工法であるので、覆工劣化対策のうち最も内空断面の減少が少ない工法である。

5.3 トンネル変状数値シミュレーション

ここではまず粘弾塑性モデルの定式化およびシミュレーションモデルの概要について述べる。次に覆工を

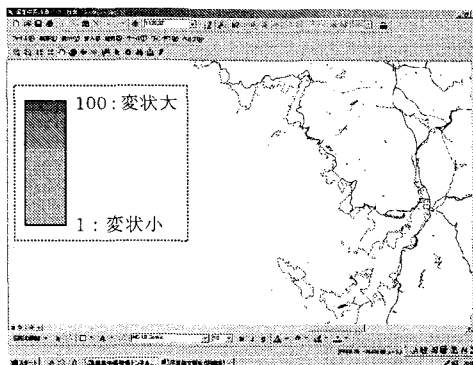


図-8 材料強度劣化による評価

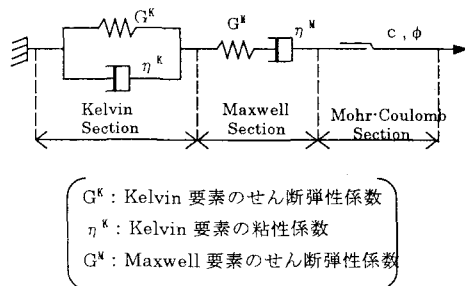


図-9 粘弾塑性モデル

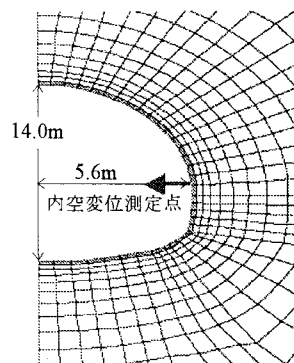


図-10 シミュレーションモデル

弾性体とする場合と経時的劣化が生じる場合とを比較することで、内空変位量にどれほどの違いが生じるかを把握する。また補強工の施工タイミングをずらすことで、供用から50年経過した場合の変位量の差および最終的な施工費用の違いを比較する。

軟岩地山に施工された道路トンネルを想定するため、提案する粘弾塑性モデル³⁾は、図-9に示すようにKelvinモデル、Maxwellモデルとスライダを直列に結合したものである。これは粘弾性と塑性が共存していることを意味する。粘弾性モデルにおけるMaxwellモデルとKelvinモデルの直列は、Burgersモデルとも呼ばれている。ここで、応力とひずみの関係を偏差成分と体積成分に分けて考えると、粘性挙動は偏差成分のみに起因して発生し、塑性挙動は偏差成分と体積成分の両方に起因して発生するものとする。偏差応力テンソル S_{ij} 及び偏差ひずみテンソル e_{ij} を式(2)～(4)で表す。ここで、 δ_{ij} はクロネッカのデルタを表す。

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_m \delta_{ij} \quad (2)$$

$$e_{ij} = \varepsilon_{ij} - \frac{\varepsilon_{vol}}{3} \delta_{ij} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{vol} = \varepsilon_{kk} \quad , \quad \sigma_m = \frac{\sigma_{kk}}{3} \quad (4)$$

対象とするトンネルの断面形状および寸法を図-10に、地山および覆工の物性値を表-1に示す。地山は、日本道路公団⁴⁾のDⅠクラス程度の軟岩を想定した。Burgereクリープ粘弾塑性モデル、標準粘弾性(Maxwell物質)の物性値は、平松・西原⁵⁾の頁岩および本四公団を参考に想定した。覆工の各物性値及び補強工として想定した炭素繊維シートの物性値には、日本道路公団の示方書設計要領⁴⁾を参考にした。地山の強度低下については、吸水膨張による強度低下において膨潤ひずみの進行と強度低下の関係を示した植本ら⁶⁾の研究を参考に図-11のように想定した。

5.4 内空変位の経時変化

地山強土が経時的に低下するとし、覆工の状態を変化させた場合の内空変位量の違いを図-12に示す。無支保では50年経過すると25cm程度の内空変位増加がみられるが、覆工を弾性体とすると変位がほとんど生じていない。現在実務で行われている解析では多くが地山と覆工を弾性体と仮定、又は地山のみが劣化現象をしめすと仮定するため時間が経過しても変位がほとんど生じないという結果を得ることとなる。一方覆工の強度劣化を考慮したものは、変位が約15cm程度生じている。覆工の効果によりある程度の抑制効果がみられるものの、やはり30年を経過すると変位増加がみられる。実現場において供用後の内空変位発生は数多く報告されており、地山及び覆工の強度劣化を考慮した解析を行う必要があることがわかる。次に地山・覆工

表-1 解析に用いた各物性値

【地山】		
Burgere クリープ粘弾塑性モデル	カルビンせん断弾性係数[MPa]	247.2
標準粘弾性(Maxwell物質)	せん断弾性係数[MPa]	173.1
Mohr Colombモデル	粘着力[MPa]	1e20
	内部摩擦角[°]	80.0
体積弾性係数[MPa]		1488.1
密度 [10 ³ kg/m ³]		2.2e-3
重力加速度		9.81
土被り 200m 加算		4.3164
【覆工】		
吹付けコンクリート	ヤング率[MPa]	4119.0
鋼アーチ	ヤング率[MPa]	2.3e5
二次覆工 インプット	ヤング率[MPa]	25000.0
【補強工】		
内巻工	ヤング率[MPa]	1.9e5

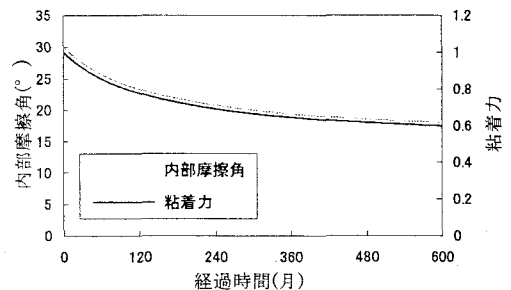


図-11 せん断強度低下の経時変化

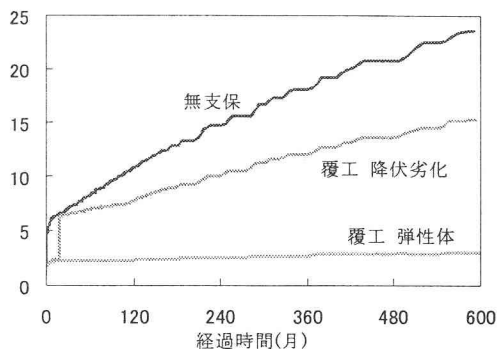


図-12 内空変位の経時変化(覆工状態変化)

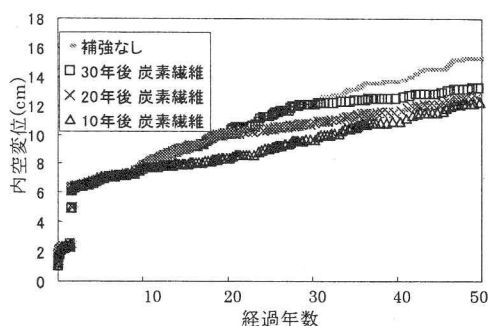


図-14 補修後の内空変位変化(炭素繊維シート工)
表-2 最終変位量と補修コスト

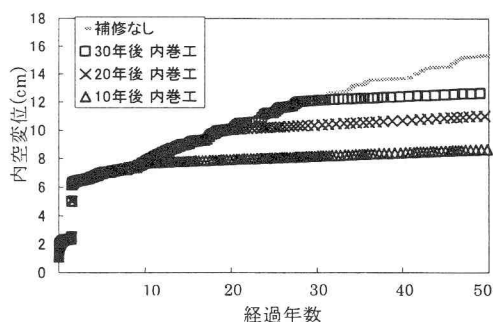


図-13 補修後の内空変位変化(内巻工)

補強工		最終補修 コスト(万円)	最終変位量 (cm)
内巻工	10年後補修	10,010	8.65
	20年後補修	11,100	11.0
	30年後補修	12,135	12.6
炭素繊維 シート工	10年後補修	300	12.3
	20年後補修	1200	12.6
	30年後補修	2250	13.2
炭素×3回			10.1
初期投資型			12.8

ともに経時劣化するとし、どの段階で補修を行えば最も効果的かを判定するための解析結果を図-13、図-14に示す。10年後、20年後、30年後に、それぞれ内空変位への対策である覆工補強工として多く行われている「内巻工」(図-13)及び「炭素繊維シート工」(図-14)を行うとした。施工面積は500㎡とし、地山の物性値は日本道路公団示方書に基づく。設計補強強度の差により、内巻工は補修後ほとんど変位は生じないが、炭素繊維は補修後30年経過すると補強効果がほとんどなくなる。補修時期により補強強度を検討する必要があるといえる。

5.5 補修工ごとの最終コストと最終変位量

次に補修を行った場合のコストに着目する。内巻工は施工単価 66,000 円/㎡、炭素繊維シート工 45,000 円/㎡かかり、調査資料より得られた施工単価の経年変化をグラフ上にプロットし、回帰式を用いてその後の対策費を算出した。経過年数 X (年)、対策費 Y (円)とすると、それぞれの回帰式は以下のように得られる。

$$\text{内巻工: } Y = 972853X + 3,814,410 \quad (5)$$

$$\text{炭素繊維シート工: } Y = 972853X - 6,685,590 \quad (6)$$

先の変状シミュレーションと同様の条件において、上式にあてはめると供用後10年で内巻工を行った場合 1,350 万円、20年後補修工は 2,330 万円、30年後は 3,300 万円かかると算出された。ただしこの工法の

場合、30年間維持管理費が8,835万円かかるため施工後も費用が増加する。一方、炭素繊維シート工を行った場合10年後は250万円、20年後は1,270万円、30年後は2,250万円かかると算出された。この工法の場合は、維持管理費はほとんどかからず、点検費用のみである。表-2には補強工として「内巻工」および「炭素繊維シート工」を施工した場合の内空変位とコストの比較を示す。変位抑制の点からみると、10年後に内巻工を行う方法により最も最終変位が抑制されている。しかしコストの観点から見ると、10年後に炭素繊維工を施したほうが最終的な補修コストは安い。

そこで補修方法を変化させた場合の内空変位量をみるために、炭素繊維工を10年おきに計3回繰り返した場合の内空変位量と、設計段階で強度を標準の2倍に設定した場合(初期投資型)の最終変位量を検討した(図-15)。前者の場合、最終変位量は1回のみの補修と比較して抑制されている。しかし、トンネルのおかれている特殊環境を考えると頻繁な調査・補修は行えず、直接的な費用には表れない社会的損失が大きくなる。一方、後者の場合は供用後20年程度は変位が抑制されている。その後は変位増加がみられるものの、変位が発生する前に補修を行うことで大きな変位抑制効果がはかれる。

6. おわりに

本論では、山岳トンネルの維持管理に関するデータベースの作成および地山と覆工の強度低下を考慮した変状予測シミュレーションを用いた合理的補強時期と補強対策工の提案を行った。なお、この変状シミュレーションはデータベースとリンクさせることが可能であり、これと式(1)で表した評価方法を用いることで、維持管理の必要なトンネルや重点点検箇所を予測することが可能となる。しかし一方、ここで用いているコストは長崎県内での資料から得られたものを参考に算出しており、資料数を増やすことで経年の増加量や初期コストが変化する可能性はある。また収集範囲を広げることで変状の地域特性を把握できる可能性がある。変状シミュレーションについては、今回示方書などから得られた物性値などを用いて解析を行ったが、今後は実ケースをフィードバックさせることにより変状予測の適合性を高めていく。

7. 参考文献

- 1) 城処求行：社会資本の維持管理の現状と今後の課題，土と基礎，pp. 213-222，1995
- 2) 土木学会編：トンネル標準示方書（山岳工法編）・同解説書，1996
- 3) 中川光雄，蔣宇静：軟岩トンネル周辺地山の時間依存性を考慮した有限差分解析，土木学会第32回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp. 263-268，2003
- 4) 日本道路公団：設計要領第三集トンネル，トンネル本体工保全編，1997
- 5) 平松良雄，西原正夫：二，三の堆積岩のクリープについて，日本鉱業会誌，Vol. 73，pp. 493-497，1957
- 6) 植本直之，大塚康範，満弘之：膨潤性地山における変形挙動と対策工の効果，土と基礎，Vol. 36，No. 5，pp. 43-48，1988
- 7) 財団法人鉄道総合技術研究所：変状トンネル対策工設計マニュアル，1998
- 8) 日本材料学会：岩の力学（基礎から応用まで），丸善（株），1997
- 9) 里優，竹田直樹，亀村勝美：強度の時間依存性に着目した岩盤の解析，第18回土質工学研究発表会，pp. 817-820，1983

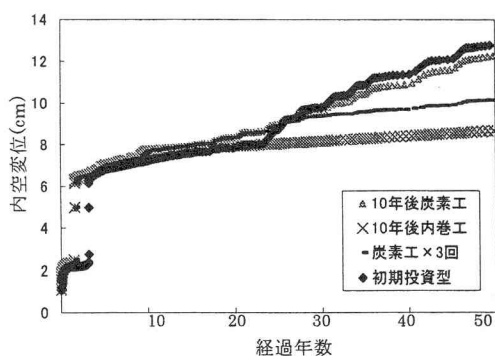


図-15 補修後の内空変位変化(繰り返し補修など)