

地下構造物の要求性能と健全度評価に関する一考察

A study on relation of health evaluation and required performance of underground structures

池尻 健¹・笹尾春夫²

Takeshi IKEJIRI・Haruo SASAO

We have to make the required performance of tunnels clear so that we realize rational maintenance. And establishment of the health evaluation of tunnels that can evaluate the required performance of tunnels precisely is expected. In the last study, we extracted required performance of tunnels from some phenomena of deteriorations and examined some items to evaluate them. In this study, we investigate the present health evaluation of mountain tunnels and examine whether they can evaluate required performance of tunnels. And we give a problem to establish the health evaluation of tunnels that can evaluate the required performance of tunnels precisely

Key words : mountain tunnel, health evaluation, required performance, maintenance

1. はじめに

合理的な維持管理を実施するためには、構造物の要求性能を明確し、それらを的確に照査可能な健全評価法の確立が望まれる。これまでの研究では、変状実績や維持管理に係わる事例を踏まえ、トンネルの要求性能を抽出し、それらを評価するための照査項目および照査内容について検討した¹⁾。

本研究は、トンネルの現状の健全度評価法を調査し、それらがトンネルの要求性能を照査可能か否か検討する。そして、検討結果から、トンネルの要求性能を的確に照査可能な健全度評価法を確立するための検討課題を抽出する。なお、ここで対象とするトンネルは、山岳トンネル（道路および鉄道トンネル）である。

2. トンネルの要求性能と照査項目

山岳トンネル（道路および鉄道トンネル）を対象とした要求性能を、KJ法（川喜田二郎氏による創造的問題解決法）を用いて抽出した¹⁾。その結果、トンネルの要求性能を「耐久性能」、「安全性能」、「利便・快適性能」、「周辺環境への影響性能」、「維持管理性能」および「経済性」の6項目に大別した。以下に、各要求性能の詳細を示す。なお、ここでは、「経済性」のようにトンネルの機能には直接関連性はないものの、要求性能としては重要と考えられる項目についても、検討項目として抽出した。

- ・耐久性能 : 内空変位, 耐荷性, 周辺地山安定, 排水性, 耐久性
- ・安全性能 : 剥離なし, 避難路, 耐火性, 消火可能
- ・利便・快適性能 : 走行性, 閉塞感, 照度, 換気
- ・周辺環境への影響性能 : 景観性, 振動・騒音, 地下水への影響

キーワード : 山岳トンネル, 健全度評価, 要求性能, 維持管理

¹正会員 株式会社セントラル技研 地盤技術部

²フェロー会員 鉄建建設株式会社 エンジニアリング本部 土木技術部

表-1 山岳トンネルにおける要求性能を評価するための照査項目¹⁾を一部加筆

要求性能		必要な指標													
		内空形状 ・寸法	内空変位 ・沈下量	地形 ・地質	緩み 領域	覆工 残余耐力	覆工 ひび割れ	覆工 強度	防災設備 の規模	避難通路 の規模	照度	騒音振動 レベル	漏水量・ 水圧・水質	覆工内装 の耐火性	線形 ・視距
耐久性性能	内空変位が無い	○	○	○	○	○	○								
	荷重に対し覆工 が安定		○	○	○	○	○	○					○		
	周辺地山が安定		○	○	○	○	○								
	排水が良い												○		
	耐久性がある	○		○	○	○	○	○					○		
安全性能	覆工が剥離しない		○	○	○	○	○	○					○		
	非常時避難路 の確保														
	耐火性がある					○	○							○	
	消火活動が可能														
利便 ・快適性能	走行性が良い	○	○								○				○
	閉塞感が無い														
	必要な照度がある										○				
周辺環境への 影響性能	換気が良好														
	周辺景観と調和														
	騒音振動が無い											○			
	地下水への 影響は無い												○		
維持管理性能	点検が容易								○	○					
	補修・補強 が容易	○		○	○	○	○	○					○		
経済性	建設費が安価	○		○					○					○	
	LCCが安価	○							○	○			○		

- ・維持管理性能 : 点検が容易, 補修・補強が容易
- ・経済性 : 建設費, 維持管理費, 湧水処理費, LCC

また, 要求性能の照査項目(照査するために必要な指標)をそれぞれ抽出し, それらと要求性能の関係を表-1 にまとめた¹⁾。同表より, 今回整理した要求性能の大部分は, 道路トンネルと鉄道トンネルで大きな差異が認められない。ただし, 「利便・快適性能」に関しては, 道路トンネル特有の要求性能を示していると考えられる。

3. トンネルの健全度評価法

トンネルにおける一般的な維持管理のフローを図-1 に示す²⁾。同図に示すように, 維持管理においてトンネルの健全度は, 一次点検および二次点検の結果に基づいて評価されている。一次点検は, 変状を早期に捉えその状態を的確に把握する目的で実施されている。二次点検は, 一次点検を実施しても健全度評価が困難な場合や変状原因の推定, 変状状況の把握, 対策工の必要性の評価等の目的でさらに詳細な調査が必要とされた場合に実施されている。

ここでは, 前述で要求性能を検討した際と同様, 道路トンネル(一般国道³⁾⁴⁾, 高速道路⁵⁾⁶⁾) および鉄道トンネル⁷⁾を対象に, 現状のトンネルの健全度評価法をまとめる。ただし,

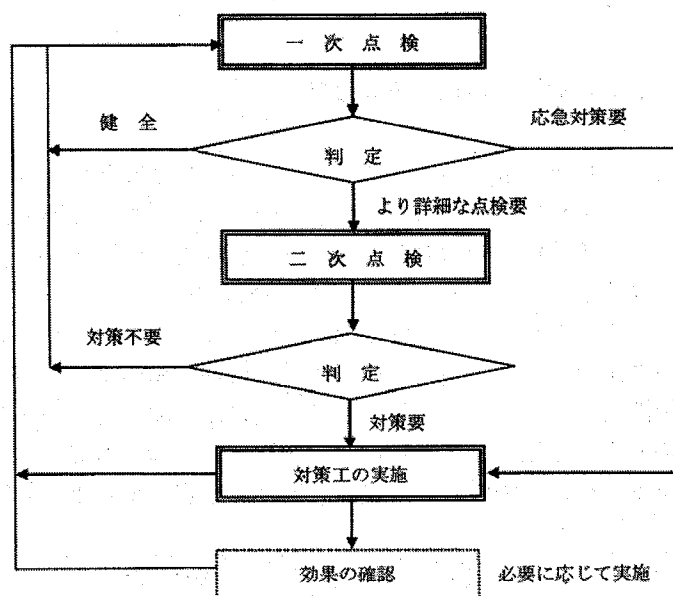


図-1 トンネルにおける一般的な維持管理のフロー²⁾

現状で実施されている点検の名称が、各事業者により大きく異なっている。そこで、各事業者における維持管理のフローを考慮し、図-1に示した一般的な維持管理のフローとの整合性を持たせるため、表-2に示すように、各事業者の点検名称を一次点検および二次点検に分けて整理した。

表-3～表-5に、各事業者の点検手法および点検結果に基づく健全度評価法を示す。

表-2 各事業者における点検名称

名称	一般国道トンネル	高速道路トンネル	鉄道トンネル
一次点検	初期点検	初期点検	初回検査
	日常点検	日常点検	通常全般検査
	定期点検	定期点検	特別全般検査
	異常時点検	詳細点検	随時検査
	臨時点検	臨時点検	
二次点検	調査	調査	個別検査

表-3 道路トンネル（一般国道）における健全度評価法^{3), 4)}

項目	一般国道トンネル
基準	道路トンネル定期点検要領(案) 道路トンネル維持管理便覧
一次点検	点検方法 目視点検(近接・遠望)、打音検査、応急措置、漏水量測定
	点検項目 ひび割れ、段差、うき、剥離、剥落(補修材含む)、傾き、沈下、変形、打継目の目地切れおよび段差、漏水、つらら、側水等
	判定区分 A,B,Sの区分 A:応急措置+調査, B:調査, C:軽微(調査なし)
	判定基準(目安) * ひび割れ、うき、剥落、漏水に着目 ・ひび割れが進行し、ブロック化して落下する恐れあり→A ・アーチ部で幅3mm以上、延長方向の長さ5m以上→B ・剥離、うきの部分が落下する恐れあり→A ・剥落に結びつくうき(圧ざ)→B ・大規模な漏水→A、交通の支障がない大きな漏水→B
	主要調査方法 観察調査、ひび割れ形状変化調査、漏水水質試験、覆工厚・背面地山調査、覆工コンクリート材質試験、覆工断面の形状変化調査、トンネル内測量等
二次点検	判定区分 3A, 2A, A, Bの区分 3A:直ちに対策, 2A:早急に対策, A:計画的に対策, B:監視
	判定基準(目安) * ひび割れ、うき、剥落、漏水に着目 変形速度:10mm/年→3A, 3~10mm/年→2A, 1~3mm/年→A, 1mm/年未満→B ひび割れ(進行あり):3mm以上, 5m以上→3A~2A, 3mm以上, 5m未満→2A~A, 3mm未満→A ひび割れ(進行なし):5mm以上, 10m以上→3A~2A, 5mm以上, 10m未満→2A~A, 3~5mm, 10m以上→2A, 3~5mm以上, 5~10m→2A~A, 3~5mm以上, 10m未満→A, 3mm未満→A~B うき・剥落:アーチ部に落下の恐れあり→3A, 側壁にあり→2A 漏水:噴出→3A, 流下→2A, 滴水→A, にじみ→B

表-4 道路トンネル（高速道路）における健全度評価法^{5), 6)}

項目	高速道路トンネル
基準	道路構造物点検要領(案) 7-4トンネル 設計要領第三集トンネル編トンネル本体工保全編
一次点検	点検方法 目視点検(近接・遠望)、打音検査
	点検項目 ひび割れ、角落、うき、剥離、剥落(補修材含む)、傾き、移動、沈下、打継目の目地切れおよび段差、漏水、遊離石灰
	判定区分 AA, A, B, OKの区分 AA:緊急補修+調査, A:調査, B:継続的観察(調査なし)
	判定基準(目安) * ひび割れ、うき、剥落、漏水に着目 ・密集したひび割れ進行、幅広引張りひび割れ、せん断ひび割れ→AA ・幅0.3mm以上のひび割れ、角落、進行が認められる→A ・幅0.3mm以上のひび割れ、角落、進行が認められない→B ・大規模な剥離、剥落、うき→AA ・厚い剥離、剥落、うき→A, 薄い剥離、剥落、うき→B ・大規模な漏水遊離石灰→AA, 漏水、遊離石灰の流出→B
	主要調査方法 目視調査、ひび割れ調査、トンネル変位調査、トンネル構造調査、背面空洞調査、材料劣化調査、漏水調査、地山変位調査、その他
二次点検	判定区分 A, B, C, D(補強対策) I, II, III(補修対策)の区分 A:早急に補強(危険), B:早急に補強, C:速やかに補強, D:適切な時期に補強 I:早急に補修, II:適切な時期に補修, III:監視または軽微な補修
	判定基準(目安) * ひび割れ、うき、剥落、漏水に着目 変形速度(塑性圧):2mm/月→A, 10mm/年→B, 3~10mm/年→C (偏圧、緩み土圧):10mm/年→A, 3~10mm/年→B, 3mm/年未満→C ひび割れ(密度):50cm/m ² 以上→I, 20~50cm/m ² →II, 20cm/m ² →III うき、剥落:落下して安全を損なう→I, 進行が著しい→II, (材料劣化)進行は緩やか→III 漏水:打継目から地下水が落下(進行車両の安全を損なう)→I 漏水で将来通行の支障となる→II, 漏水で構造物の劣化が促進→III

表-5 鉄道トンネルにおける健全度評価法⁷⁾

項目		鉄道トンネル
基準		鉄道構造物等維持管理・同解説(構造物編):トンネル
一次点検	主な点検方法	目視点検(近接・遠望)、打音検査
	点検項目(分類)	・アーチ・壁・上中版・柱・セグメント:変形、覆工の変状、添架物・補修材の変状、漏水、表面の汚れ、つらら・側氷・氷盤 ・路盤部・下床版:隆起・沈下・移動、覆工の変状、噴泥、土砂流入、排水阻害 ・坑門・立坑との接続部:前傾・沈下・移動、覆工の変形 ・周辺環境
	判定区分	A、B、C、Sの区分・剥落に対する安全性(α 、 β 、 γ) A:二次点検実施、B:必要に応じ監視等、C:次回検査時に必要に応じ重点的検査 *変状が重大で、運転保安・旅客・公衆等の安全を脅かす→直ちに措置(AA、 α)
	判定基準	・トンネル構造の安定性 変形、覆工の変状等(ひび割れ等)に着目し、AA、A、B、Cの判定 ・建築限界と覆工との離隔 変形・隆起・沈下・移動、つらら・側氷、建築限界に着目し、AA、A、B、Cの判定 ・漏水・凍結に対する安全性 漏水、つらら・側氷・氷盤等に着目し、AA、A、B、Cの判定 ・剥落に対する判定 打音(清音、濁音)、変状(ひび割れ等)に着目し、α、β、γの判定
二次点検	主な調査方法(坑内調査)	目視点検、ひび割れ測定、内空計測、覆工内部・背面地山調査、部材ひずみ計測、非破壊検査、軌道変位計測、化学分析、材料劣化調査、漏水・凍結調査等
	判定区分	一次点検でAと判定された健全度を、AA、A1、A2と細分化区分 AA:緊急に措置、A1:早急に措置、A2:必要な時期に措置
	判定基準	- トンネル構造の安定性 ひび割れ、覆工の変形・沈下・移動、覆工の強度低下により照査 *変状の程度と進行性の評価に関する目安 ・変位速度(進行性):10mm/年または2mm/月→非常に大きい、3~10mm/年→大きい、1~3mm/年→小さい*最も大きな内空変位を示す側線 ・圧迫:延長3m以上→大きな圧迫 ・ひび割れ:幅5mm以上・延長10m以上→特に大きな、5mm以上・10m以下→大きな、3~5mm・5m以上→大きな、3~5mm・5m以下→中程度 - 建築限界と覆工との離隔 内空変位および断面計測等を実施し、変位速度、建築限界、覆工との離隔から照査 - 路盤部の安定性 軌道変位計測等を行い、変位速度と軌道管理基準値までの余裕から照査 - 漏水・凍結に対する安全性 架線等への漏水、つららの接触状況により照査

同表より、各評価法とも、何らかの措置が必要なもの、安全なもの、その他にこれらの中間ランクとして、詳細調査が必要なもの、監視を継続するもの等に区分されている。また、変状毎に、変状の状態や進行性等についての判断基準の目安が示されている。なお、各トンネルにおける評価法の差異については、判定区分および着目する各トンネルの要求性能に差異があるため、判定基準(目安)に若干の差異はあるものの、点検方法、点検項目、健全度を判定する際に着目する変状等に大きな差異は認められない。

4. トンネルの要求性能と健全度評価法との関係

現状のトンネルの健全度評価法が、今回着目したトンネルの要求性能を照査可能か否かを検討する。表-6～表-7にトンネルの要求性能と健全度評価法の関係を示す。鉄道トンネルに関しては、本研究と同様、要求性能(安全性、使用性、復旧性)を考慮した健全度評価となっているが、ここでは本研究で着目した要求性能に基づいて検討する。また、前述までの検討結果により、道路トンネルと鉄道トンネルでは要求性能および健全度評価法に大きな差異が認められないことから、ここでは両者をまとめて検討する。ただし、「利便・快適性能」のみ、道路トンネル特有の要求性能として検討する。なお、同表中の「○」は各点検における健全度評価法で要求性能が十分照査可能なもの、「△」は照査可能であるが定性的評価にとどまるもの、「×」は現状の健全度評価法では照査が困難なものを示す。ただし、「維持管理性能」および「経済性」については、健全度評価法による照査が不可能なので「-」で示す。そして、一次点検において「○」の場合も、二次点検は「-」で示す。

表-6 トンネルの要求性能と健全度評価法（一次点検）の関係

要求性能		一次点検	
耐久性能	内空変位がない	×	目視、打音では把握不可能
	覆工の安定	△	目視、打音によりひび割れ状況、各変状より評価可能
	周辺地山の安定	△	目視によりひび割れ状況、各変状より評価可能
	排水性がよい	△	路面、路盤の滞水状況等から評価可能
	耐久性がある	×	目視、打音のみでは、正確な耐久性の評価不可能
安全性能	覆工が剥落しない	○	目視、打音によりある程度評価可能
	非常時避難路確保	○	現地確認と資料整理で評価可能
	耐火性がある	×	目視、打音では評価不可能
	消火活動が可能	○	現地確認と資料整理で評価可能
利便・ 快適性能 (道路トンネル)	走行性がよい	○	目視により評価可能
	閉塞感がない	○	目視により評価可能
	必要な照度がある	△	目視により定性的に評価可能
	換気が良好	△	目視により透過性等を定性的に評価可能
周辺環境への 影響性能	周辺環境と調和	○	目視(坑門の状況)により評価可能
	騒音・振動がない	△	目視により状況を定性的に評価可能
	地下水の影響がない	-	供用中はあまり問題にならない
維持管理性能	点検が容易	-	一次点検は比較的容易(規制は伴う) 調査費用は安価
	補修・補強が容易	-	変状原因が把握できないため、正確な補強、 補修工法は選択不可能
経済性	建設費が安価	-	-
	LCCが安価	-	点検費用は安価であるが、規制が伴い、変状原因までの把握は不可能であり、より容易に精度を向上させる技術革新が望まれる。

表-7 トンネルの要求性能と健全度評価法（二次点検）の関係

要求性能		二次点検	
耐久性能	内空変位がない	△	内空変位の計測可能であるが、変化を的確に評価困難
	覆工の安定	△	覆工の構造的な安定性の評価困難(外力の評価が困難)
	周辺地山の安定	△	地質調査結果からでは、現状では定量的な評価は困難
	排水性がよい	△	漏水量・漏水経路等の定量的な評価は困難
	耐久性がある	△	ある程度の耐久性の定量的評価は可能
安全性能	覆工が剥落しない	-	一次点検で評価可能
	非常時避難路確保	-	一次点検で評価可能
	耐火性がある	×	現状の調査技術では、耐火性評価は困難
	消火活動が可能	-	一次点検で評価可能
利便・ 快適性能 (道路トンネル)	走行性がよい	-	一次点検で評価可能
	閉塞感がない	-	一次点検で評価可能
	必要な照度がある	○	照度測定により、定量的に評価可能
	換気が良好	○	ガス測定により、定量的に評価可能
周辺環境への 影響性能	周辺環境と調和	-	一次点検で評価可能
	騒音・振動がない	○	騒音・振動測定により、定量的に評価可能
	地下水の影響がない	-	供用中はあまり問題にならない
維持管理性能	点検が容易	-	二次点検は、内容によって大がかりとなり、容易ではない。 調査費用は高価
	補修・補強が容易	-	変状原因がある程度把握可能であり、正確な補強、補修 工法の選択が可能
経済性	建設費が安価	-	-
	LCCが安価	-	点検費用は高価であり、LCCに影響を与える。 調査の必要性を考慮し、最適な維持管理方針の立案が重要

同表より、現状の健全度評価法により、今回対象としたトンネルの要求性能は、耐火性を除いて全て定性的には照査可能である。ただし、耐火性に関しては、経年的な耐火性の変化を的確にかつ簡易に評価可能な調査方法の開発が望まれる。また、同表より、「耐久性能」および「漏水が影響する性能」に関しては、二次点検を実施しても、定量的な照査が困難なものが認められる。耐久性能に関しては、定量的な照査が困難な原因として、トンネルを含む地下構造物は周辺地山の挙動の影響を受けるので、一般的なコンクリート構造物と比較して、地圧等の外力の評価が困難なことが挙げられる。現状では、耐久性能を定量的に評価するための主な二次点検における調査として、各照査項目に対し表-8に示す構造物調査が実施されている。同表には、併せて各調査結果に対する評価基準および評価法を示している。それらの照査項目に関しては、前述表-3～表-5に示すように、各事業者のマニュアル等に判定基準（目安）が示されている。ただし、現状では、様々な定量的な照査手法⁷⁾が提案されているものの、前述の理由等により、照査項目によってはそれらを精度よく定量的に照査することが困難なものも認められる。今後は、特に地圧による変状が問題になるトンネルを対象に、トンネルの変状メカニズムに関する研究成果⁸⁾等を反映させた健全度評価法の確立が望まれる。漏水に関しては、漏水メカニズムや漏水経路を解明し、それらを反映させた調査方法の開発および定量的な漏水量評価法の確立が望まれる。

表-8 照査項目に対応する調査方法（二次点検）

照査内容	照査項目					
	内空形状 ・寸法	内空変位 ・沈下量	緩み領域	覆工 残余耐力	覆工 ひび割れ	覆工強度
調査方法	断面測定	内空変位計測 水準測量 三次元計測システム	背面空洞調査 ボーリング調査	・覆工内部調査 ・覆工厚測定 ・コンクリート 材料試験 ・覆工ひずみ (応力)測定	・ひび割れ調査 ・覆工表面撮影	・テストハンマー ・圧縮強度試験 ・非破壊調査
評価基準・方法	・必要建築限界 の確保 ・軌道検査 の基準値以内 ・走行時間閉塞感 が少ない	・変位速度の基準 ・収束傾向 ・走行に支障がない	・背面空洞の範囲 ・亀裂、岩盤強度等から 緩み領域を推定	・剥落の可否 ・設計巻厚との差 ・残存膨張量 ・許容応力(ひずみ) ・応力履歴の確認	・ひび割れ状況の 進展の有無 ・ひび割れの進行 (幅、長さ)の有無 ・ひび割れ幅の基準 ・閉合ひび割れ (剥離)の有無	設計基準強度 以内

5. おわりに

本研究は、山岳トンネル（道路および鉄道トンネル）を対象に、現状の健全度評価法を調査し、それらが各トンネルの要求性能を照査可能か否か検討した。そして、検討結果から、トンネルの要求性能を的確に照査可能なトンネルの健全度評価法を確立するための検討課題を抽出した。

最後に、本研究は、土木学会 地下空間研究委員会 維持再生小委員会（2002-2004）および維持管理小委員会（2005-）の活動の一環としてとりまとめられたものであり、貴重な資料のご提供およびご助言を頂きました委員の皆様に深く感謝の意を示します。

参考文献

- 1) 岡田正之、藤原康政、山田浩幸：山岳トンネルの要求性能と照査項目に関する一考察，第10回地下空間シンポジウム論文・報告集，Vol.10，pp.213-220，2005.
- 2) 土木学会：トンネルの維持管理 トンネルライブラリー14，2005.
- 3) 国土交通省道路局国道課：道路トンネル定期点検要領（案），2002.
- 4) 日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧，1993.
- 5) 日本道路公団：道路構造物点検要領（案）7-4 トンネル，2003.
- 6) 東・中・西日本高速道路：設計要領第三集トンネル編トンネル本体工保全編，2006.
- 7) 国土交通省鉄道局・鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）トンネル，2007.
- 8) 例えば，土木学会：トンネルの変状メカニズム，2003.