

10．既設トンネルの健全度評価手法と長寿命化技術に関する調査

10.1 はじめに

北海道内における道路トンネルは、昭和30年代後半から整備が進み、今や350箇所以上のトンネルが供用中である。これらのトンネルの内、今後老朽化の時期を迎えるものは増加の一途をたどることとなる。トンネルは供用下での改修や改築が困難であることから、近い将来膨大な維持更新費用が発生するものと考えられる。

しかしながら維持管理等の充実化により長寿命化を図ることができれば、維持更新の財政負担を大幅に抑制することができる。トンネルの長寿命化方策としては、既設トンネルの計画的な維持管理と延命対策を行う予防保全（図10-1のB点→D点）、新設トンネルの耐久性の向上等を行ういわゆるストックマネジメントの考え方に立つことが重要である。

このような背景を踏まえ、当グループでは、既設道路トンネルの健全度評価に有効な手法と合理的な長寿命化技術の検討を行い、今後の維持更新費の低減に資するトンネルの予防保全法について調査する。

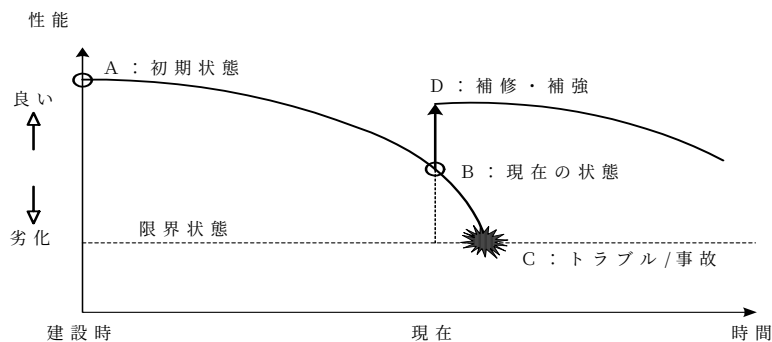


図10-1 トンネルの性能劣化曲線の概念図

10.2 資料調査と検討の方向性

10.2.1 主な機関におけるトンネル健全度評価の技術動向

（a）国土交通省（含北海道開発局）

平成12年10月に出版された「道路トンネル定期点検要領（案）」が最新のものである。内容的には「道路トンネル維持管理便覧」（日本道路協会、平成5年11月）をベースにし、JRの考え方も取り入れながら評価判定方法を示している。

北海道開発局では平成11,12年度に「トンネル台帳システム」を開発し、道内の国道トンネルの、基本諸元、補修履歴、点検データなどのデータベースを作成している。

（b）（財）鉄道総合技術研究所

一連の剥落事故により、きめ細かな部位毎の判定指標に基づいて健全度判定を行っている。特に変位速度や剥落に対して優先的な判定をしており、ある程度の定量化が図られている。しかしながら、その他のひび割れ、漏水、劣化等についての定量化はみられない。

（c）日本道路公団

基本的に（財）鉄道総合技術研究所と同じ内容である。

（d）東京電力

水路トンネルの健全度を評価、変状原因推定と対策工選定を行う「健全度診断システム」と既往調査データ・構造諸元、改築経歴などの各種データを管理する「水路トンネルデータベースシステム」から構成される「水路トンネル管理支援システム」を開発している。

10.2.2 事例調査

現在、各機関で行われている維持管理の中で、トンネルに関する健全度評価がどのように実施されているのか、事例調査を行い、各手法の現状を把握するとともに健全度評価手法の検討へ向けての課題を抽出する。以下の3事例を対象に取り上げ比較した。

- (a) 事例－1：「トンネル台帳システム」（北海道開発局、平成11,12年度）
 - (b) 事例－2：「道路トンネル維持管理便覧」での健全度評価（日本道路協会）
 - (c) 事例－3：「水路トンネル管理支援システムの開発」（東京電力）
- 各事例の特長と課題については以下の表に示すとおりである。

表10-1 各事例における健全度評価法の特長と課題

	事例－1	事例－2	事例－3
	トンネル台帳システム	道路トンネル維持管理便覧	水路トンネル管理支援システム
特 長	・市販ソフトによる簡便なシステム。 ・点検記録等追加データのリンクが可能。 ・GISを導入可能。	・本体から付帯設備まで評価対象が広範囲。 ・判断基準が単純で分かりやすい。	・変状原因の推定と対策工の選定が可能。 ・残余耐力や荷重増大の可能性など、寿命予測の考え方を導入。 ・幾つかの評価結果から総合評価する決定法を明示。
技術課題	・MICHI等既存の大容量DBと結合することは困難。	・判定基準が定性的。 ・地質性状、設計・施工の評価が不明確。 ・被災履歴・補修履歴の評価が不明確。 ・総合判定の優先順位の決定法が不明確。 ・打音検査結果の評価法が不明確。	・変状の着目点が外力による覆工のひび割れのみで、漏水などその他の視点は今のところ含まれていない。

10.2.3 評価手法検討の方向性

以上の結果から、今後健全度評価手法の検討を進める上での方針をまとめると、以下のとおりである。

- ・「道路トンネル維持管理便覧」（日本道路協会）の考え方を基本ベースとする。
- ・同便覧の技術課題を踏まえ、極力客観的、定量的な健全度評価の考え方を取り入れる形で検討を進める。
- ・「水路トンネル管理支援システム」（東京電力）の手法は、残余耐力や荷重増大の可能性など、寿命予測の考え方を検討する上で参考となる点が多い。
- ・使用データベースおよび運用システムとしては「トンネル台帳システム」（北海道開発局）上に載せるのが実用上もっとも効率が良いと考えられる。
- ・寒冷地の特質については、既往の研究成果などについてさらに調査する。

10.3 健全度評価手法の試作

10.3.1 定量的評価法

(a) 数値化

点検結果を変状の種類ごとに以下の6種類に分類し、評価項目とする。

- ①ひび割れ、②浮き・剥離、③漏水、
④目地ズレ・開き、⑤豆板・空洞、⑥遊離石灰

これら6種類の変状種類について、変状展開図等の点検表をもとに変状量（長さ・面積）を求める。なお、アーチ部と側壁部に分けて数値化を行う。

(b) 区間比の算出

変状量を施工目地間（上半）の覆工面積や長さで除し、「区間比」を算出する。ここで単位面積または単位長あたりの変状密度を「区間比」と称した。「区間比」は各評価項目の評価点における桁のオーダーを合せることを考慮して決定した。

(c) 補正係数の算出

以下の式により補正係数を算出する。

$$\text{補正係数} = (\text{ウエイトⅠ}) \times (\text{ウエイトⅡ}) \times (\text{打音ウエイト})$$

ここに、ウエイトⅠ－変状種類別の係数(重み付け)

ウエイトⅡ－発生原因・位置・状態による係数

打音ウエイト－打音検査による係数

(d) 変状種類別評価値の算出

以下により評価値を算出する。

$$\text{「評価値」} = \text{「区間比」} \times \text{「補正係数」}$$

(e) スパン評価値の算出

各評価項目別の「評価値」の合計をそのスパンの「評価値」とする。

(f) 補正係数の設定

複数のベテラン専門技術者の知見を取り入れ以下のように補正係数を設定した。

i) ウエイトⅠ－ 変状種類別の係数

- ①ひび割れ 1. 0、②浮き・剥離 2. 0、③漏水 1. 5、
④目地ズレ・開き 1. 0、⑤豆板・空洞 1. 0、⑥遊離石灰 1. 0

ii) ウエイトⅡ－ 発生原因・位置・状態による係数

① ひび割れ

外 力 2. 0、材料劣化 1. 5、施 工 等 1. 5

② 浮き・剥離、⑤ 豆板・空洞

アーチ部 2. 0、側 壁 部 1. 0

(漏水を伴うもの → 上記+0. 5)

③ 漏水

に じ み 1. 0、滴 水 1. 5、流下・噴出 2. 0

(濁りを伴うもの → 上記+0. 5)

iii) 打音ウエイト－ 打音検査による係数

清音・反発 1. 0、鈍 い 音 1. 5、こもる音 2. 0

(g) 判定区分

現行の判定区分は3段階となっているが、本評価法では第三者被害発生の可能性が高い変状種にウエイトを大きくした。またA、Bの判定についてはその変状程度が多様であるため、それぞれ(AA, A)、(B+, B)の2つに細分類した。

本評価法の判定区分毎の評価点範囲を表10-2に、各判定区分の内容を表10-3に示す。

表 10-2 判定区分と評価点範囲

判定区分	評価点範囲
AA	6.0 以上
A	4.0 以上 ～ 6.0 未満
B+	2.5 以上 ～ 4.0 未満
B	1.0 以上 ～ 2.5 未満
S	1.0 未満

表 10-3 判定区分の内容

判定区分		経時変化の監視	判 定 の 内 容
AA		経時変化監視グラフを用い、ラインの勾配（＝変状速度）を監視する。	変状が著しく通行車輛の安全を確保できないと判断され、応急対策を実施した上で補修・補強対策の要否を検討する標準調査が必要な場合。
A	重点監視区分		変状があり、応急対策は必要としないが補修・補強対策の要否を検討する標準調査が必要な場合。
B＋	定期監視区分		
B			
S	日常パトロール区分		変状はないか、あっても軽微で応急対策や標準調査の必要がない場合。

※ 経時変化監視グラフの勾配（＝変状速度）が急激なものについては、判定区分の別を問わず、留意項目として検討を要するものとする。

10.3.2 従来の評価結果との比較

本評価法は構造面での健全度の経時変化の監視をおもな目的とし、既設トンネルの定量的な健全度評価を行い、変状量の数値化を図るものである。平成 12 年度実施された実トンネルにおける点検データを用いて評価を試みた。点検データの内、変状が認められかつ判定済みの 95 スパンについて、その判定結果と本手法における評価点との照合を行った。

表 10-4 に判定結果を示す。3 段階の判定区分ごとに評価点の全体平均値および全体平均値から 2 倍以上・半分以下の値を除いて決定した 2 次平均値を算出し、専門家による判定結果と比較した。表より、全体平均値および 2 次平均値でとらえると、専門家による判定結果と同様に、

$B+ > B > S$

となっているが、個々のブロック毎に着目すると、多くのブロックで結果に大きなばらつきのあることが分かる。

表 10-4 定量的評価法による判定結果

現行の判定区分		定 量 的 評 価										全体平均	2次平均
区分	箇所数	評 価 点											
B+	42	0.35	2.46	2.46	4.25	0.62	2.97	7.32	3.14	4.87	126.68 42 =3.0	77.39 23 =3.5	
		6.26	4.90	7.50	0.51	1.72	0.59	1.91	3.20	0.58			
		2.01	0.84	2.55	1.05	1.12	1.16	0.44	2.16	2.54			
		1.07	5.91	5.57	3.09	6.06	4.35	5.77	2.63	3.32			
		2.73	2.88	0.62	1.18	0.90	11.12						
B	35	1.85	1.60	0.60	0.40	0.52	0.70	2.89	2.78	2.55	54.8 35 =1.5	44.69 23 =2.0	
		2.84	4.37	2.26	2.87	0.96	0.47	0.64	0.71	0.66			
		1.18	1.16	0.86	0.43	2.01	2.68	1.40	0.81	0.11			
		0.50	2.35	1.33	2.29	0.91	2.58	1.53	3.00				
S	18	0.10	0.40	0.15	0.02	0.17	0.13	0.17	2.22	0.26	8.09 18 =0.5	4.95 10 =0.5	
		0.18	0.26	0.89	0.77	0.31	0.70	0.33	0.67	0.36			

10.4 健全度評価手法の改良検討

10.4.1 定量的評価法の課題と改良点

(1) 定量的評価法の優位点と問題点

点検データを点数化することにより、トンネルの健全度を定量的に評価する方法を試み、トンネルの専門技術者による従来の判定結果と比較検討した。その結果、本手法には以下のような優位点のあることが分かった。

- ① トンネルの専門技術者でなくとも判定が可能で、個人の経験に依存しないことから、従来の方法に比べ客観性が向上する。
- ② 補修や補強などの対策工法との関連づけが容易となる。
- ③ 定期的に評価を実施することによりトンネルの劣化を経時的に把握することができる。
- ④ 多くのデータを集積することにより劣化の予測に役立てることが可能である。

このように今回試作した定量的評価法には多くの優位点があることが分かった。その反面、以下のような問題点を有していることも判明した。

- ① 結果のばらつきが大きい。
- ② 補正係数の設定の仕方により結果が大きく変わる。

(2) 定量的評価法の課題

以上を踏まえ、本手法を道路トンネルの健全度評価法として実用するに際し、解決しなければならない技術課題は以下のとおりである。

(a) トンネルの必要機能と評価基準の検討

今回の手法は多くの評価点を合算することにより全体の評価としたため、ばらつきが多い結果となった。このため構造安定性や第3者被害に対する安全性など、トンネルの必要機能を明らかとし機能別に評価項目を分類し、それぞれの機能に対して評価することを検討する必要があると考えられる。

(b) 地域の特殊性の反映

積雪寒冷地という北海道の特殊性を考慮に入れ、つららの発生状況など冬期において必要な調査を行い、評価点に反映させることが必要である。

(c) 経時変化の把握

健全度評価では、トンネルの状態変化を追跡し、技術者が健全度を判定する際の支援を行うものである。今後は、亀裂や漏水などの変状の進行性などにに基づき、健全度を評価する手法の確立が求められる。

(d) トンネルレーザ探査結果の活用

北海道開発局においては、レーザ探査によるひび割れ調査が幾つかのトンネルにおいて実施されている。今後は探査画像を解析し、亀裂の長さ・密度・開口度等の数値データを取得し、今回の評価手法に取り込むことにより、より客観的で精度の高い評価が可能になると考える。

(e) 詳細調査および力学的手法による変状原因の推定

定量的評価手法を検証するため、覆工コンクリートのコア採取、背面地山の地質性状調査等の詳細調査を実施するとともに、覆工の応力解析等を実施し、材料学的および力学的な面からの評価も合わせて行うことが必要と考える。

(3) 手法の改良点

以上の課題を踏まえ、今回試行した定量的評価法の改良点を以下のとおりとした。

- ①道路トンネルに求められる要求性能などの必要機能を明らかとし、機能別に評価項目を絞り込み、それぞれの機能に対して評価する。当面、トンネルの構造面に関する「安全性能」および一般車両などへの安全性に関する「第三者影響度に関する性能」の2項目に着目して再評価を試みる。
- ②アーチと側壁など対象とする部位の違いにより、第三者被害に対する影響度などが異なると考えられることから、部位の違いにより重み付けを変化させる。

10.4.2 トンネルの劣化現象と要求性能

(1) 山岳工法トンネルの劣化特性

トンネルの劣化特性には、橋梁など他の構造物に比較するとまだ多くの明らかにされていない点が残されている。橋梁では荷重と構造系が明確であり、結果としての構造物の応答（変位、特性変化など）も明確に示される。これに対しトンネルでは、荷重が地山と構造物の相互作用によって生じるものであり、評価は難しい。また構造系も、地山と支保、覆工強度はどうなっているのか詳細は不明である。

さらに施工時や施工完了後に、設計において想定した荷重が実際に作用しているのか、施工時の誤差等により不具合は生じていないか、など、性能劣化を考える前の初期条件が曖昧になっているのが現状である。

(2) トンネルの劣化曲線

各機関において整備されつつある点検マニュアルなどに基づき点検や調査を行えば、覆工コンクリートに生じているひび割れや中性化の状況などが明らかになる。しかしながら、単独のデータだけでは劣化特性を評価することはできない。すなわち定められた点検調査間隔とその方法により、対象とするデータを計画的に収集蓄積する必要がある。そしてその経時変化を追跡するとともに、不具合の進行している部位を把握することで、その系全体の耐久性に及ぼす影響の評価が可能となり、具体的な劣化曲線を設定することができる（図10-1）。

劣化曲線は、補修補強による性能回復の程度を明確にして、対策の費用対効果を算定する基礎となるものである。しかしながらトンネルなどの地下構造物の場合、地下という特

異なる環境下に置かれるため、材料特性の変化や構造物の変状などに関する十分なデータが蓄積されていないという問題がある。

(3) トンネルの劣化現象と要求性能

性能の劣化曲線を設定する場合や具体的な維持補修工法を検討する場合、まずその構造物に要求される性能、あるいは機能を明確にしておく必要がある。単一の機能を要求される道具や機械などの性能は簡単に提示することができるが、多くの機能が複合しているトンネルの要求性能を示すことは難しく性能を明示するための確立した手法はまだ確立されていない。

山岳工法の道路トンネルにおいて、一般に対象となる要求性能を列挙すると以下のとおりである。

- (a) 安全性能：
 - ・耐荷性（施工後の付加外力を含む）
 - ・耐震性能
 - ・その他の安全性（構造物の転倒や滑動）
- (b) 使用性能：
 - ・道路として必要な内空断面の保持
 - ・高い防水性の保持
 - ・供用時の機能性を満足
 - ・路面凍結により走行安全性が損なわれない。
- (c) 第三者影響度に関する性能：
 - ・コンクリート片、目地材等の落下防止
 - ・つらら、結氷、側氷の落下による危険がない
- (d) 美観・景観：
 - ・壁面の必要輝度の確保
 - ・ひび割れ、錆汁等による汚れの防止
 - ・視界の確保や心理的圧迫感の軽減
- (e) 耐久性能：
 - ・供用期間中、要求性能を満足する性能

ひび割れや浮き・剥離、漏水などのトンネルの劣化現象が、これらの要求性能に与える影響についてまとめると、表10-5のとおりである。

表10-5 山岳トンネルの劣化現象が要求性能に与える影響度合

要求性能 劣化現象	安全 性能	使用 性能	第三者影響度 に関する性能	美観・ 景観	耐久 性能	総合的 評価	備 考
ひび割れ	◎	◎	○	○	○	◎	
浮き・剥離			◎		◎	◎	
漏水		◎	◎	◎	◎	◎	
目地ズレ・開き	○			○		○	
豆板・空洞	○			◎		○	
遊離石灰				◎	○	○	
変形・沈下	◎	◎				○	
つらら・側氷		◎	◎	◎	○	◎	
路面の沈下・隆起	◎	◎				○	

※凡例：◎ 大きく影響すると考えられる。 ○ 影響すると考えられる。

10.4.3 評価法の改良と検証

(1) 定量的評価法の改良と検証

これまでの検討で点検結果の評価に、客観的な数値指標を導入した結果、専門技術者による判断との間に隔たりがあることが分かった。そこで、トンネルの要求性能の内、構造物面での「安全性能」と道路利用者に対しての「第三者影響度に関する性能」の2つの機能

に着目し、各項目に対し機能別健全度評価を試みる。

定量的評価法による判定データを、安全性能と第三者影響度に関する性能とに関するデータに層別するため、以下のデータを抜き取る。

①第三者影響度に関する性能：ひび割れ、浮き剥離、漏水（北海道では結氷で事故を招く可能性有）

②安全性能指標：ひび割れ、目地ずれ・開き、豆板・空洞

さらに専門技術者による判定結果との隔たりの原因としては、技術者が判断のよりどころとしている何かが、変数として加味されていないことが考えられる。

（２）加点要因の抽出

全データを対象に、再度スケッチ等の資料を見直し、欠落している変数を探った。その結果次の事項が判断に大きな影響を与えていることが明らかになった。

（a）隣接区間と連続性のある変状

亀裂が隣接区間から連続しており、隣接部では開口度・延長等から B 以上と判定されている場合、当該区間でも延長が短くても B 以上としている。

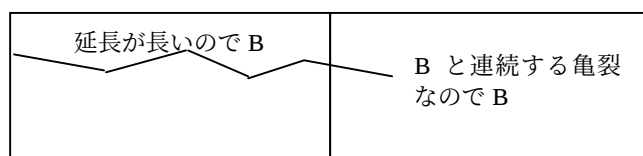


図 10-2 連続性のあるひび割れの一例

（b）目地または補修用のモルタル、線導水の浮き

目地部や補修用に施工されたモルタル、線導水は、浮きがある場合短期に落下する可能性が高いため、規模が小さくても B 以上の判定としている。

（c）閉合している亀裂や亀裂交差部の異音

亀裂が閉合している場合や亀裂の交差部に異音がある場合は、短期に落下する可能性があるため規模が小さくても B 以上の判定としている。

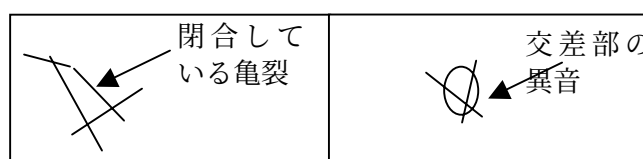


図 10-3 閉合しているひび割れの一例

（d）進行性が疑われる亀裂

本来亀裂の進行性は追跡調査により明らかになるが、供用から数年程度で発生している亀裂は進行性が疑われるので、B 以上の判定としている。

（e）その他の加点要因

- ・巻き出し部において異音は認められないが錆びた鉄筋が部分的に露出しているもの
- ・漏水が路面に滞水しており、路面凍結の可能性があるもの
- ・金網が設置されており打音検査は出来ないが、外観上浮きが認められるもの（応急対策なので追跡が必要との観点）

(3) 加点点要因の数量化の試み

既述の加点点要因は専門技術者の判断に伴うものであり、「定量評価」になじむかは、議論の余地がある。しかしこれらの因子が判定に対しどの程度寄与しているかを明らかにするために、加点点要因をダミー変数として加えて多変量解析を実施した。

その結果 B と B+は分離が悪く、主観的な判断にゆれがある事が分かった。第三者影響度に関する性能についての評価では、ある程度専門家による判定結果に近づいていることが分かったが、安全性能についての評価では専門家の評価との隔たりが依然として大きい結果となった。

(4) 実用化へ向けて

専門技術者の判定結果と定量的評価法との差異は、変状の発生状況等の数量化が困難な要因が大きく影響していることが分かった。これらの要因に数値データを与え、定量化指標とともに再評価すると、専門技術者の判断を再現できる可能性のあることが明らかとなった。

今後実用化に向けて、以下のとおり幾つかの課題を挙げることができる。

- ①今回用いた加点点要因は、単一の専門技術者の判断であり、直ちに一般化することは好ましくないと考えられる。複数の専門技術者から聞き取り調査を行うなど、偏りのない加点点要因を抽出することが必要である。
- ②定量的評価法は、亀裂の長さ等の客観的に数値化されるデータを扱ったものであり、これにカテゴリータイプのデータを加えると経年変化の追跡が困難になる恐れがある。
- ③数値データによる評価に専門技術者による目視点検結果のチェックを加えるなどの総合評価手法の検討が必要と考えられる。
- ④劣化現象の原因が背面地山の劣化などによる場合は詳細調査が必要となる。

10.4.4 総合的健全度評価手法の検討

これまでの改良の結果、トンネルの健全度評価に際しては、亀裂の長さなどに着目した定量化された指標に加え、変状の発生状況などの定量化困難な事象が大きく影響していることが明らかとなった。このため、より実用的な手法とするため専門技術者へのヒアリングを行い、定量化が困難な事象を抽出して総合的な評価法を構築することとした。

(1) 専門技術者へのヒアリング調査

トンネルの健全度判定に際し、技術者が考慮する定量化困難な事象の抽出を目的として、トンネル点検技術者を対象にヒアリング調査を行った。ヒアリング調査は、過去にトンネル点検の実施経験のあるコンサルタントに、聞き取り方式で行った。

ヒアリングの結果、定量化困難な事象として、表10-6に示すものが抽出された。

表 10-6 定量化困難な事象

事 象	内 容
隣接区間と連続性のある変状	隣接区間で B 以上の判定となる変状が、該当区間まで連続している場合、該当区間の変状程度が低くても、隣接区間と同様の判定とする場合がある
目地または補修用モルタルの浮き	目地や補修用モルタルに浮きがある場合、構造的に剥落しやすい。
閉合している亀裂や亀裂交差部の異音	閉合している亀裂や亀裂交差部に異音がある場合、短期間に剥落する可能性がある。
進行性が疑われる亀裂	過去の点検記録がなくても、供用開始直後のトンネルにおける亀裂は、進行性が疑われる等。
異音はないが鉄筋のさびによるコンクリートの変色等が認められる	有筋構造部で、鉄筋腐食が疑われる場合、変状が進行する可能性が高い
冬季に舗装面の不陸などにより滞水がある	冬季の路面滞水は、凍結により走行の支障となる可能性がある。
金網の設置などにより打音はできないが、外観上浮きが認められる	応急対策は実施されているが、追跡調査が必要。
地山由来と思われる土砂の堆積	湧水のあるトンネルで、側溝や側壁付近に地山由来が疑われる土砂が堆積している場合、緩み・背面空洞が疑われる。
坑口部のジャンカ	坑口部のジャンカは、凍結融解によりポップアウトが発生する可能性がある。

(2) 加点要素の抽出・検討

ヒアリングにより抽出された定量化困難な事象は、いずれもトンネルの健全度を下げる因子であり、亀裂の長さ等の定量化された指標に対しては、健全度を下げる加点要素として考えることができる。この加点要素は、点検技術者の経験に基づく主観的な判断であるが、点検技術者が数量化困難と考える事象の特徴について以下で検討する。

既に述べたように、山岳トンネルには安全性能・使用性能などが求められる。これら要求性能と加点要素と関係を表 10-7 に示した。この表からヒアリングにより抽出された加点要素には、次の特徴が認められる。

- ・全ての加点要素は、第 3 者影響度に関する性能と何らかの関連がある。
- ・全ての加点要素は、安全性能か第 3 者影響度のいずれかと大きな関連がある。

よって点検技術者は、要求性能のうち安全性能と第 3 者影響度に関しては、定量化困難な要素についても重視していることが伺える。

表 10-7 加点要素（定量化困難な事象）と要求性能との関連

加点要素	要求性能				
	安全性能	使用性能	第 3 者影響度に関する性能	美観・景観	耐久性能
隣接区間と連続性のあるひび割れ	◎	○	○	○	○
進行性が疑われる亀裂	◎	○	○	○	○
地山由来と思われる土砂の堆積	◎	○	○	○	○
目地または補修用モルタルの浮き			◎		◎
閉合している亀裂や亀裂交差部の異音			◎		◎
鉄筋のさびによるコンクリートの変色	○		◎	○	◎
路面凍結が懸念される漏水		◎	◎		
応急対策完了箇所の、外観上の浮き			◎		○
坑口部のジャンカ		○	◎		○

※凡例： ◎ 大きく関係すると考えられる。 ○ 関係すると考えられる。

またトンネルの変状のうち、定量化を試みたものと加点要素との関係は、表10-8に示したように、浮き・剥離に関係するものが4項目と最も多い。またひび割れと豆板・空洞に関係するもの、および漏水に関係するものがそれぞれ2項目となっており、目地ずれ・開きと遊離石灰に関する項目は抽出されていない。これより、定量化した要素毎に加点要素の特徴をまとめると、概ね次のような傾向が認められる。

(a) ひび割れ

「隣接区間と連続性のあるひび割れ」とは、当該箇所における現状の変状が比較的軽微なものであっても、隣接区間と「変状の原因」が同じであることから、高い評価を与えることを示している。

また「進行性が疑われる亀裂」とは、点検結果など過去の客観的資料がなくても、将来「変状が進行する可能性」が高い箇所には、高い評価を与えることを示している。

このようにひび割れに関して抽出された加点要素は、「変状の原因」と「変状が進行する可能性」について着目している。

(b) 浮き・剥離

「目地または補修用モルタルの浮き」「閉合している亀裂や亀裂交差部の異音」は、このような箇所の場合には、コンクリート片等の落下といった「第3者被害の可能性」が比較的高いために、変状の規模が比較的小さくても高い評価を与えることを示している。

また「鉄筋のさびによるコンクリートの変色」「応急対策箇所の外観上の浮き」は、「変状が進行する可能性」について考慮したものである。

このように浮き・剥離に関し抽出された加点要素は、「第3者被害の可能性」と「変状が進行する可能性」について着目している。

(c) 漏水

「地山由来と思われる土砂の堆積」は、比較的漏水が軽微であっても、「変状の原因」が地山構成物の細粒分の流出であれば、背面空洞や緩みの発生など「変状が進行する可能性」があり、突発的崩壊など「第3者被害の可能性」があることに着目している。

「路面凍結が懸念される漏水」は、路面の不陸により滞水する箇所の場合には、漏水の規模が小さくても路面凍結によりスリップなど「第3者被害の可能性」が高いことに着目している。

(d) 豆板・空洞

「坑口部のジャンカ」は、凍結融解によるポップアウトの発生など、「第3者被害の可能性」が高いことを考慮したものである。

このように、ヒアリングにより抽出された加点要素は、「変状の原因」「変状が進行する可能性」「第3者被害の可能性」について、技術者の経験的な判断が必要であることを示している。

表10-8 定量化した要素と加点要素との関係

加点要素	定量化要素	ひび割れ	浮き剥離	漏水	目地ずれ開き	豆板空洞	遊離石灰
隣接区間と連続性のあるひび割れ		○					
進行性が疑われる亀裂		○					
地山由来と思われる土砂の堆積				○		○	
目地または補修用モルタルの浮き			○				
閉合している亀裂や亀裂交差部の異音			○				
鉄筋のさびによるコンクリートの変色			○				
路面凍結が懸念される漏水				○			
応急対策完了箇所の、外観上の浮き			○				
坑口部のジャンカ						○	

(3) 実用的な総合評価法の検討

これまで述べてきたように、トンネル健全度評価に際しては、亀裂の長さ等の定量化可能な指標のほかに、「変状の原因」「変状が進行する可能性」「第3者被害の可能性」等の定量化困難な事象を加味して総合的に判断していることが明らかになった。

よって定量化された指標を主体とした評価法を、より実用的な総合評価法とするためには、

- ①定量化困難な事象を、数量化法などの統計的手法により数値化する
 - ②定量化された指標と、定量化困難な事象をチェックリストなどの方法で並列化し、技術者は両者を見比べて総合的な判断を行う
- などの方法が考えられる。

このうち、統計的手法による数値化については、10.4.3において述べたように、ある程度技術者の判断に近づくことが可能である。しかし、亀裂等の客観的データのみで構成された指標は時系列的な比較が可能であるのに対し、技術者の判断を数値化して取り込むとそれが困難になるといった問題もある。また、定量化困難な要因については、トンネルの施工方法や構築年代等により程度の差があるため、一律に数量化することが困難であると推定される。

よって時系列的な変状の進行度合いを把握でき、トンネルの施工方法や構築年代などの特異な条件を加味するため、表10-9に示す総合評価法を提案する。

表10-9 トンネル健全度総合判定表（案）

トンネル健全度総合判定表（案）						
トンネル名	〇〇トンネル			スパン番号	△△スパン	
①定量的評価						
項目	〇年〇月		×年×月		△年△月	
	実測値	評価点	実測値	評価点	実測値	評価点
ひび割れ						
浮き・剥離						
漏水						
目地ずれ・開き						
豆板・空洞						
遊離石灰						
評価点合計						
定量的評価						
②技術者チェック						
〇年〇月 ×年×月 △年△月						
項目	〇年〇月		×年×月		△年△月	
隣接区間と連続性のある変状がある						
亀裂に進行性が疑われる						
地山由来と思われる土砂が堆積している						
目地または補修用モルタルに浮きが発生している						
亀裂交差部に浮きが発生している						
浮きがブロック化している						
さびによるとと思われるコンクリートの変色がある						
漏水に伴い路面凍結が懸念される						
応急処置が完了しているが外観上浮きがある						
坑口部や凍結融解懸念箇所にジャンカがある						
その他 ()						
その他 ()						
総合評価（①＋②）						

10.4.5 健全度評価手法のまとめと課題

点検技術者のヒアリングの結果、トンネル要求性能に対し「安全性能」と「第3者影響度に関する性能」のうち、「変状の原因」「変状が進行する可能性」「第3者被害の可能性」に関連する事項について、定量化困難な事象があることが明らかになった。これを受け、亀裂の長さ等の定量化した評価と、定量化困難な事象を併記し、総合的に評価するトンネル健全度総合判定表を提案した。

今後トンネル安定度の評価に際して、以下のとおり幾つかの課題を挙げることができる。

- ① 今後とも定量化困難な事象の抽出を続けることにより、点検の精度向上を図ることが望ましい。
- ② 点検技術者に対し、「変状の原因」「変状が進行する可能性」「第3者被害の可能性」について重点的な教育訓練を実施することが望ましい。
- ③ 今回提案した定量化手法に関するデータが数回分蓄積された段階で、施工方法や構築年代による傾向の分析、評価手法の再評価等を行うことが望ましい。

10.5 トンネル長寿命化技術の検討

10.5.1 資料調査等による工法の抽出

変状などトンネルの劣化現象に対する補修・補強対策に関する技術指針類としては、(財)鉄道総合技術研究所が多く鉄道トンネルでの実績に基づき、マニュアルとしてまとめたものが古くから知られている。道路トンネルに関する同様のものとしては、日本道路公団による設計要領第3集保全編がある。

近年覆工のコンクリート片などによる利用者被害を未然に防ぐための円滑な対応が求められるようになり、従来の「道路トンネル維持管理便覧：平成5年 日本道路協会」の中の定期点検の内容を補完する目的で、「道路トンネル定期点検要領(案)：平成14年4月 国土交通省道路局国道課」が作成され、近視目視を主体とした定期点検の方法、内容が規定された。

同要領の発刊を受け、今年度から、国土交通省管轄の道路トンネルの一斉点検が実施されているところである。さらに本要領の内容を受け、独立行政法人土木研究所から「対策マニュアル(案)」が平成14年度中に刊行される予定である。

対策の種類としては、変状等が生じたトンネルの各部分を正常な機能を発揮するように補修を目的に行う工法、変状などが進行し続けた場合やトンネル構造物に悪影響を及ぼす規模や範囲が著しく大きな場合などに用いられる大規模な対策に大別できる。

これらの資料から抽出した道路トンネルにおいて一般に実施される対策工法を、表10-10に示す。

表 10-10 劣化現象に対する主な対策工法

要求性能 劣化現象	安全性能	第三者影響度に関する性能	備 考
ひび割れ	・裏込め注工 ・吹付けコンクリート ・ロックボルト ・内巻きコンクリート ・断熱工 ・インバート工 ・部分改築工 ・地山注工	・はつり落とし工 ・ひび割れ注工 ・当て板工	
浮き・剥離	・裏込め注工 ・吹付けコンクリート ・内巻きコンクリート	・はつり落とし工 ・断面修復工 ・ひび割れ注工 ・当て板工	
漏水	・導水桶工 ・溝切り工 ・止水注工 ・防水パネル工 ・水抜きボーリング ・水抜き孔 ・排水工	・導水桶工 ・溝切り工 ・止水注工 ・防水パネル工 ・水抜きボーリング ・水抜き孔 ・排水工	
目地ズレ・開き	・断熱工		
変形・沈下	・ロックボルト ・断熱工 ・グラウンドアンカー ・インバート工 ・部分改築工 ・地山注工		
路面の沈下・隆起	・ロックボルト ・断熱工 ・グラウンドアンカー ・インバート工 ・部分改築工		

10.5.2 各技術の性能の比較評価

道路トンネルにおける代表的な変状対策工法を抽出し、トンネルに要求される性能との関連性について述べる。特に、走行車両に対する安全性として「第三者影響度に関する性能」とトンネル本体の構造安定性である「安全性能」とに関してまとめ、表 10-11 に示す。

表 10-11 変状対策工と要求性能との関連

劣化現象	対策工法	第3者影響度に関する性能			安全性能	
		延命効果	走行の安全性	美観・景観	延命効果	構造の補強効果
ひびわれ	裏込め注入工				◎	◎
	吹付けコンクリート工	○	◎		○	○
	ロックボルト工	○	○		○	○
	内巻きコンクリート工	◎	◎	◎	◎	◎
	インパート工				◎	◎
	部分改築工	○	○		○	○
	地山注入工				○	○
	内面補強工	◎	◎		◎	◎
	セメントル補強工	○	○		○	○
浮き・剥落	裏込め注入工				○	○
	吹付けコンクリート工	○	◎		○	
	内巻きコンクリート工	○	◎	◎	○	
	内面補強工	○	◎		○	◎
漏水 (つらら)	漏水防止工	◎	◎	◎	◎	
	地山注入工	○	○		○	
	裏込め注入工		○			○
目地ズレ・開き	断熱工		○			○
変形・沈下	ロックボルト工				○	○
	断熱工		○			○
	グラウンドアンカー工				◎	◎
	インパート工				◎	◎
	部分改築工	◎	○		◎	○
	地山注入工				◎	○

(凡例) ◎：大いに関連性あり

10.5.3 長寿命化技術の評価法の検討

長寿命化工法の効果を事前に評価する手法は、我が国で最近試みられはじめたばかりであり、研究が始まったばかりである。ここでは代表的な2事例について紹介する。

(1) 事例－1：(社)土木学会岩盤力学委員会により提案されている方法

①評価手法

トンネル変状予測の解析手法として、「梁ばねモデル」と「地山劣化モデル」の2例を示している。両モデルの比較概要は下表のとおりである。

表 10-12 梁ばねモデルと地山劣化モデルの比較

	梁ばねモデル (骨組構造解析)	地山劣化モデル (有限要素法, 有限差分法など)
地山	地盤反力を(圧縮, せん断)でモデル化	Mohr-Coulomb などの降伏基準で地山劣化をモデル化
覆工	梁部材でモデル化 (ばね切りで背面空洞を評価)	非線形材料でモデル化 (要素間の結合で空洞を評価)
ひび割れ	コンクリートの引張強度で評価, 塑性ヒンジでモデル化	引張強度で評価, 開口をインターフェイス要素でモデル化
圧壊	コンクリートの圧縮限界で評価, 解析を終了	圧縮強度で評価, 材料非線形を考慮
解析結果	変状箇所, 作用地圧と変位	変状箇所, 変位と経過時間, 地山の応力状態

補強工等の長寿命化工法も適切にモデル化することにより、これらの解析手法により評価することが可能となる。

②評価の判定

(a)「梁ばねモデル」

梁ばねモデルの解析の流れは図10-4に示すとおりである。地圧（骨組に対する荷重）を増加させて変状の進展を予想する。図中の「解析・覆工の断面力算出」で長寿命化工法を複合材料等で考慮すれば、その有効性等の評価が応力レベルで直接判定可能となる。ただし、実際の地圧の測定が困難であることや、地山をばねで表現しているため劣化状態が把握できず地山への対策が取り扱えない等の課題がある。

(b)「地山劣化モデル」

建設後地山の強度がピーク強度から残留強度まで時間とともに低下することによりトンネル周辺地山の応力再配分が生じることで、トンネルの経時的な変形挙動を表現する手法である。これにより、覆工における発生応力や変形量とともに、周辺地山の応力状態や劣化状況（塑性領域）等から、覆工の力学的挙動のみならず周辺地山の応力状態も取り扱うことができるため、地山改良等の効果についても評価が可能となる。地山劣化モデルを用いた対策工の比較解析例を図10-5に示す。採用する対策工毎の、経時的な効果が定量的に比較できる結果となっている。

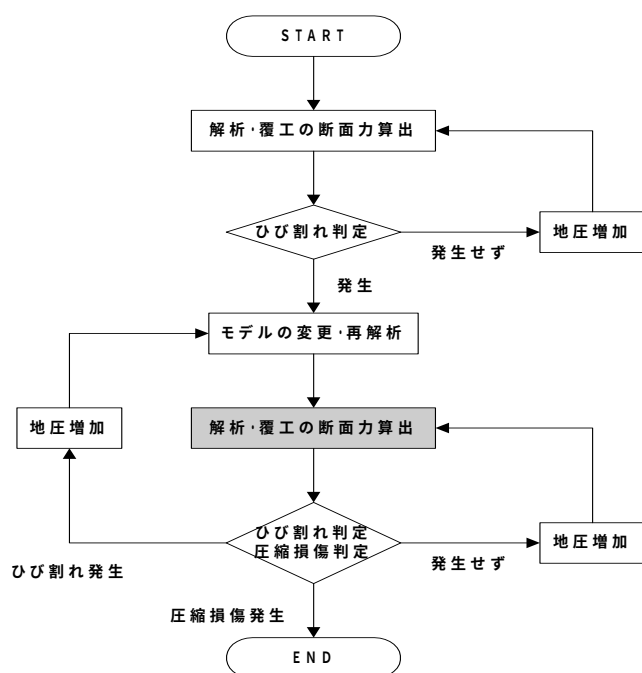


図10-4 梁ばねモデルの解析の流れ

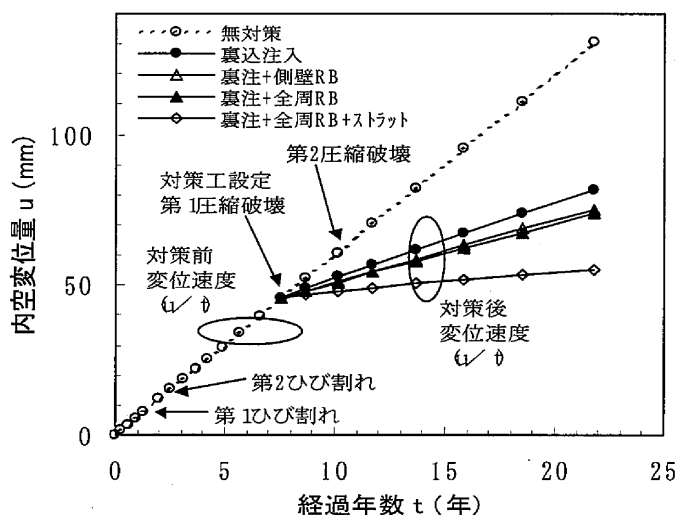
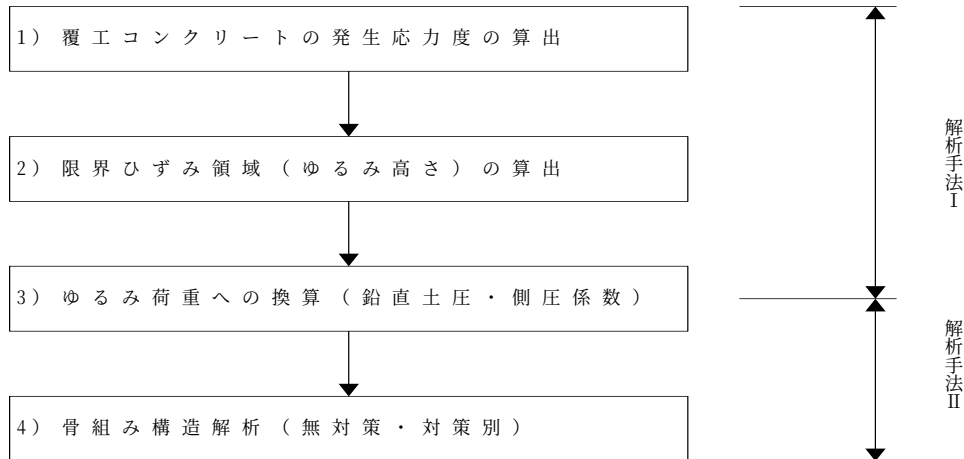


図10-5 地山劣化モデル解析比較例

（２）事例－２：（財）道路保全技術センターにより提案されている方法

① 評価手法

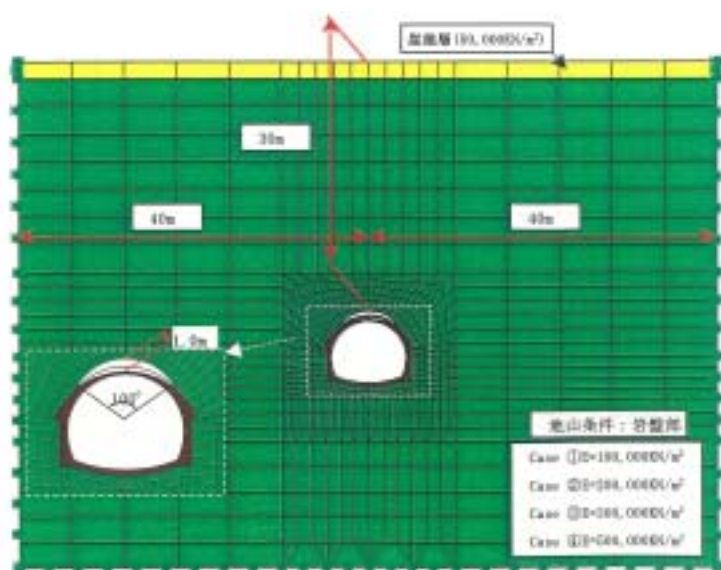
以下に既設トンネルの補修・補強設計に対する解析的手法の流れを示している。



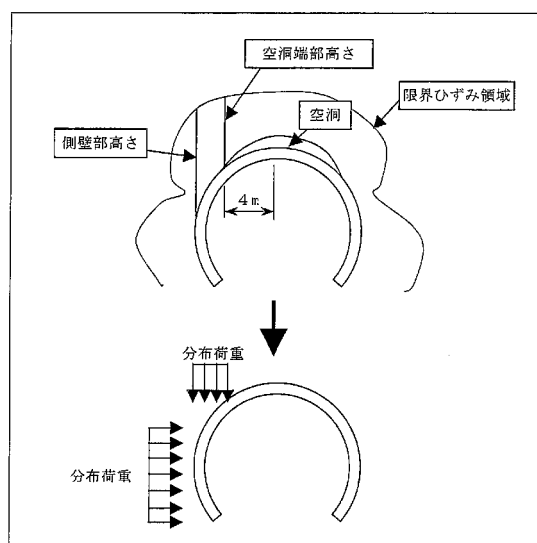
解析手法Ⅰは、有限要素法解析を用いて地山および覆工の現状把握を行い、解析手法Ⅱで解析手法Ⅰの結果から外力を推定し骨組解析により対策工の設計を行う流れとしている。有限要素法および骨組解析のモデル化の比較は表１０－１３の通りである。

表１０－１３ 有限要素法と骨組解析のモデル化の比較

	有限要素法解析	骨組解析
覆工の構造	２次元ソリッド要素（３次元ソリッド要素）	梁要素
非線形解析	応力ひずみ曲線に非線形を考慮することにより可能	基本的に不可能
荷重	地盤要素も含めてモデル化し、自重载荷の方法と、節点に外力として与える方法がある	節点に集中荷重などの外力を与える
ひび割れ部	接触面の要素（ジョイント要素）を用いて、直接的にひび割れを表現することが可能	ヒンジ、塑性ヒンジなどによりモデル化
補強部材	梁要素やシェル要素などでモデル化	梁要素（重ね梁）と層間ばねもしくは部材厚の増加によりモデル化
地盤	地盤要素を配置する方法と、接点に地盤ばねを配置する方法とがある	地盤ばねを節点に配置することによりモデル化



解析手法Ⅰ



解析手法Ⅱ

図 10-6 解析手法概念図

② 評価の判定

(a) 「解析手法Ⅰ（有限要素法解析）」

i) 背面空洞充填・インバート設置の効果

地山変形係数、空洞充填材の強度を変化させ、覆工に発生する応力等の違いから効果の判定を行う。

・ 解析ケース（全 48 ケース）

項 目	ケース数	
地山変形係数	4 ケース	$E=100,000 \cdot 200,000 \cdot 300,000 \cdot 500,000 \text{ kN/m}^2$
覆工形状	4 ケース	覆工厚 45cm・60cm、インバートあり・なし
空洞充填材	3 ケース	なし・発泡ウレタン($E=7,000 \text{ kN/m}^2$)・可塑状モルタル($E=150,000 \text{ kN/m}^2$)

・ 解析による背面空洞充填効果の判定

- ◇地山の変形係数が大きいほど、また、充填材の強度が高いほど覆工応力の低下が大きい。
- ◇充填材の強度は、地山と同程度以上の場合に効果が大きい。恒久対策としては可塑状モルタル程度の材質が有利となる。
(地山変形係数 $E=100,000 \text{ kN/m}^2$ で 1.5～2 倍、 $E=500,000 \text{ kN/m}^2$ で 1.5～3 倍)
- ◇解析上も、インバート有の場合が発生応力が小さくなり、構造的な耐力向上の効果が検証できる。(ただし、覆工断面欠損が覆工厚に比して大きい場合、構造上のバランスから覆工内面応力はインバートの有が大きくなる場合がある。)

ii) 対策工詳細設計（解析手法Ⅱ）の荷重条件を設定

トンネル構造および地山変形係数を変えた、FEM 解析を実施し地山の限界ひずみからトンネルに作用する荷重を推定し、対策工詳細設計に用いる。1) の解析ケースでの限界ひずみ

から推定した、ゆるみ高さは以下のとおりである。

表 10-14 限界ひずみから推定したゆるみ高さ (m)

トンネル構造		着目点	地山の変形係数(kN/m ²)			
			E=100,000	E=200,000	E=300,000	E=500,000
t=60cm	インバートあり	空洞端部分布荷重	5.4	2.4	1.4	0.0
		側壁部分布荷重	6.0	3.2	2.2	1.6
	インバートなし	空洞端部分布荷重	5.0	2.2	1.2	0.0
		側壁部分布荷重	5.4	2.8	2.0	1.6
t=45cm	インバートあり	空洞端部分布荷重	5.2	1.8	0.6	0.0
		側壁部分布荷重	5.8	2.6	0.8	1.0
	インバートなし	空洞端部分布荷重	5.2	1.6	0.6	0.0
		側壁部分布荷重	5.8	2.4	1.0	1.0

(b)「解析手法Ⅱ（骨組解析）」

表 10-14 の、限界ひずみから推定したゆるみ高を土圧に換算し、骨組解析の荷重とする。検討した骨組構造のモデルケースは以下の 4 ケースである。

- ・ モデル 1・・・覆工厚 60cm 一律、側圧係数 $k=1.0$
- ・ モデル 2・・・覆工厚 60cm 一律、側圧係数 $k=0.5$
- ・ モデル 3・・・覆工厚 側壁 60cm、天端 20cm、側圧係数 $k=1.0$
- ・ モデル 4・・・覆工厚 側壁 60cm、天端 20cm、側圧係数 $k=0.5$

また、想定した対策工と構造の骨組モデル条件を表 10-15、モデル図を図 10-7 に示す。

表 10-15 対策工種と骨組モデル条件

対策種別		梁要素剛性	側壁条件	天端空洞部 バネ	ロック ボルト
無対策		覆工コンクリートのみ	剛結	なし	—
裏込め注入	ウレタン	覆工コンクリートのみ	ピン	ウレタン バネ	—
	モルタル	覆工コンクリートのみ	ピン	モルタル バネ	—
炭素繊維＋ 裏込め	ウレタン	覆工コンクリートのみ	剛結	ウレタン バネ	—
	モルタル	覆工コンクリートのみ	剛結	モルタル バネ	—
鋼板＋裏込め	ウレタン	覆工コンクリートと 鋼板の剛性	剛結	ウレタン バネ	—
	モルタル	覆工コンクリートと 鋼板の剛性	剛結	モルタル バネ	—
鋼板＋裏込め＋ロックボルト		覆工コンクリートと 鋼板の剛性	剛結	ウレタン バネ	バネ支点

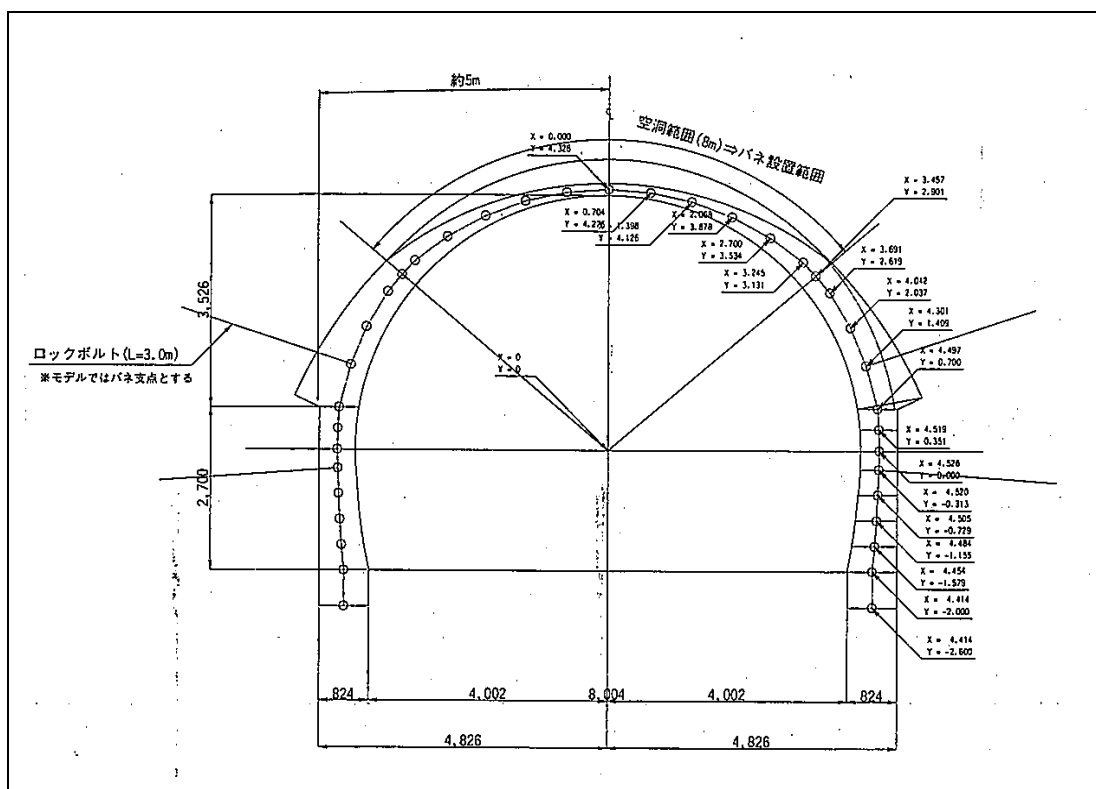


図10-7 骨組解析モデル図

骨組解析結果と、コンクリート覆工および対策工補強材の許容応力とを比較した検討結果のまとめを表10-16に示す。

表10-16 骨組解析結果のまとめ

覆工厚	側圧係数 k	地山変形 係数 E (kN/m ²)	無対策	裏込注入		炭素繊維＋裏込		鋼板＋裏込		裏込(ウレタン)＋ 鋼板＋ロックボルト
				ウレタン	モルタル	ウレタン	モルタル	ウレタン	モルタル	
標準 t=60cm 欠損部 t=20cm (天端)	1.0	100,000	×	×	○	×	×	×	○	○
		200,000	×	○	○	×	○	○	○	—
		300,000	×	○	○	×	○	○	○	—
		500,000	×	○	○	×	○	○	○	—
	0.5	100,000	×	×	○	×	○	○	○	—
		200,000	×	○	○	×	○	○	○	—
		300,000	×	○	○	○	○	○	○	—
		500,000	○	○	○	○	○	○	○	—
標準 t=60cm	1.0	100,000	×	×	○	×	×	×	○	○
		200,000	×	×	○	×	○	○	○	—
		300,000	×	×	○	×	○	○	○	—
		500,000	×	×	○	×	○	○	○	—
	0.5	100,000	×	×	○	×	○	○	○	—
		200,000	○	○	○	○	○	○	○	—
		300,000	○	○	○	○	○	○	○	—
		500,000	○	○	○	○	○	○	○	—
照査方法			コンクリート引張強度照査			コンクリートおよび補強材許容応力度照査				

凡 例 ○：許容値以内 ×：許容値超過 —：未検討

10.5.4 長寿命化技術のまとめと課題

国内のマニュアル等を調査し、代表的な長寿命化工法を抽出した。選択された工法は比較的小規模なものから大規模な対策まで多岐に渡る。従って、その性能を実績や実験から一律に評価することは困難である。

一方、最近では力学的に地山の劣化や覆工の変状を評価し、長期的なトンネルの健全度についてシミュレーションしようとする試みが行われている。代表的な手法として、「有限要素法解析」と「骨組解析」がある。前者は地山の長期的な劣化をモデル化して地山の挙動や変位を経時的に評価するものである。後者は覆工を梁部材でモデル化し、変状によるひび割れをばね要素で表現したものであり、作用地圧の方向や大きさなどが、比較的簡便に評価することが出来る。

今後、長寿命化工法を評価する上で、このような力学的評価法は有効な手法であると考えられるが、実用に際しては以下のような課題を解決する必要がある。

- ①地山強度劣化を推定するためには、長期間にわたる変位計測データが必要となる。できれば建設当初からトンネルの変形挙動把握のための計測を行っておくことが望ましい。
- ②覆工背面の空洞の有無が、覆工コンクリートに生じる断面力や応力状態に大きな影響を及ぼすことが知られている。したがって背面空洞の有無とその範囲を把握することは、覆工の健全度や補強対策の効果を評価する上で重要である。
- ③覆工の残存耐力を評価するためには、変状状況から覆工に作用する地圧の大きさと分布を予測する必要があるが、この方法は確立されていない。したがって地山の作用と覆工との相互作用を表現した解析方法を構築することが望まれる。