

戦-40 既設トンネルの定量的な健全度評価手法に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 20～平 22

担当チーム：道路技術研究グループ(トンネル)

研究担当者：角湯克典，砂金伸治

【要旨】

道路トンネルの健全度を適切に評価するためには、健全度に影響を及ぼす要因を予め把握するとともに、点検や調査結果の判定がなるべく定量的な指標を用いて行われる必要がある。本研究では、道路トンネルの変状の発生に対する定性的な判定区分をより明確にするために、うき・はく落が発生している場合、およびトンネルに外力が作用する場合のトンネルの健全度を定量的に評価する手法に関して検討を行い、両者の場合において評価方法の確立に一定の可能性を示した。

キーワード：トンネル，維持管理，健全度，点検，判定区分，打音検査

1. はじめに

現在、既設の道路トンネルの点検や調査により、トンネルにひび割れや巻厚不足などの変状や構造的欠陥が発見された場合、対策の必要性や対策の実施時期の判断は、主として過去の経験や実績に基づいた定性的な評価により行われている。今後、公共投資財源が制約される中で、供用中の道路トンネルの維持管理を効率的に実施するためには、点検や調査を通じて得られるトンネルのひび割れの発生状況、背面空洞の有無、巻き厚等の情報から工学的な根拠に基づいて、覆工コンクリートのうき・はく落に関する状態と、トンネル構造の安定に関する状態の両者を踏まえた判定を行って健全性を評価し、対策の必要性や実施時期を定量的に判定する方法の確立が必要である。

本研究では、トンネルの点検や調査時に行われるひび割れ等の観察や打音検査等から得られる情報をもとに、健全度の評価に有効と考えられる評価指標の抽出を行い、その評価指標と覆工の残存耐力、トンネル構造の安定性および覆工コンクリートのうき・はく落との関係を実験や解析を通じて明らかにし、トンネルの健全度を定量的に評価する手法の検討を行うものである。具体的には、道路トンネルの点検データを使用し、これまでに得られたうき・はく落に対する健全度の定量的な評価手法に関する検討の深度化を実施するとともに、トンネルに外力が作用する場合に発生する覆工のひび割れに着目し、ひび割れ幅と既存の基準類に基づく判定区分との比較を通じて、健全度の評価手法について検討を行った。

2. うき・はく落に対する定量的な健全度評価手法の検討

2.1 概要

トンネルにうき・はく落が生じる場合において、より定量的な健全度の判定を可能とするためには、それらの変状に対して評価すべき指標を設定し、その状態を客観的に判断したうえで、定量的な基準をもとに評価する手法を確立する必要がある。本節では過年度までに実施した点検や調査の事例をもとに、主としてうき・はく落に対する定量的な健全度評価手法に対して、事例を踏まえた深度化を行った。

2.2 研究方法

健全度の定量的な評価手法では、以下に示す式(1)により健全度評価点数を求めることにした。表-1に評価式に使用する評価指標の対象を示す。これらは、表-1に示した項目のうち、打音検査から直接得られる情報として、A.打音の音質と B.ハンマー打撃による落下の状態に加え、C.ひび割れ形態、材質劣化状態の両者を近接目視によって得られるひび割れの情報として選定した。

$$Y = \sum_{i=1}^{11} W_i \cdot X_i \quad (1)$$

ここに、Y：健全度評価点数

W_i：評価指標 i に対する重み係数

X_i：評価指標 i に対する評価の基準点(X_i=0～1)

表-1 検討の対象とした評価指標と重み係数

評価項目		説明	基準点 Xi	重みWi (%)	
大区分	小区分				
A	打音の音質	濁音(濁きを感じる)	10	340	
		濁音(鈍い音)	05		
		清音	00		
B	ハンマー打撃による落下の状態	軽打で落ちる	10	460	
		強打で落ちる	05		
		強打しても落ちない	00		
C	aひび割れおよび材質劣化の状態	ひび割れ・分離面が鋭角	鋭角のひび割れ 不明	10 05	100
		ひび割れ・分離面が開口	ひび割れが開口(1mm程度以上)	10	
		ひび割れ等が閉合	ひび割れが開口してない(1mm程度未満)	00	
		ひび割れ等が閉合	ひび割れ等で完全に閉合	10	
		ひび割れ等が閉合	ひび割れ等で完全に閉合	05	
		ひび割れ等が閉合	ひび割れ等で閉合してない	00	
	b材質劣化の状態	派生するひび割れがある	主ひび割れから派生するひび割れがある 変状を重要視する	10	100
		派生するひび割れがある	主ひび割れから派生するひび割れがある 変状を重要視しない	00	
		ひび割れに段差がある	せん断による段差がある せん断による段差がない	10 00	
		ひび割れに沿って剥離	ひび割れに沿って剥離が見られる変状を優先する	10	
		ひび割れに沿って剥離	ひび割れに沿って剥離が見られる変状を優先しない	00	
		骨材・異物等が露出	骨材が露出する変状を重要視する 骨材が露出する変状を重要視しない	10 00	
b材質劣化の状態	漏水凍結	漏水が凍結膨張する環境を重要視する 漏水が凍結膨張する環境を重要視しない	10 00	100	
	表面劣化剥離	表層剥離、補修材浮きを重要視する 表層剥離、補修材浮きを重要視しない	10 00		
	表層劣化剥離	表層剥離、補修材浮きを重要視する 表層剥離、補修材浮きを重要視しない	10 00		

表-2 検討に使用したうき・はく落物の種類

うき・はく落物の種類	箇所数
コンクリート片	21
塊状(ブロック)	32
コンクリート粗骨材	20
コンクリートモルタル分	7
鋼材(支保工・鉄筋)	0
補修材料	25
溶出物	2
補修材(非セメント系)	4
その他	3
合計	114

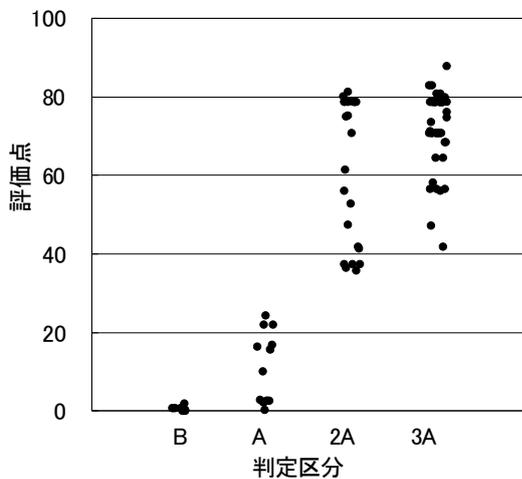


図-1 評価点の分布

ここで重み係数の決定は、今回はトンネル専門技術者の9名が表-1の評価指標のそれぞれに対して評価を実施して評価指標に対する重み係数 W_i を決定する AHP 法による方法を用いた。具体的な決定方法は各技術者に対して表-1に示したA~Cの大区分毎で重み係数を算定し、引き続きCに対してaおよびbの小区分それぞれに対して重み係数を算定し、全ての評価指標の重み係数の総

和が100となるようにした。なお、最終的には9名の回答者から得られた重み係数の平均を算定したものを重み係数 W_i とした。また、表-2に示した10本のトンネルの計114のうき・はく落が発生している事例に対して、式(1)と W_i によって算定した健全度評価点の分布を図-1に示す。これより、判定区分が2AとAの敷居値が30点程度に分布しており、敷居値を30点に設定すれば、両者を区分できる可能性があることが分かった。

しかしながら、実際の点検等では打音検査が用いられていることから、打音検査による内容AおよびBの着眼点と外観によって求められる内容Cの着眼点における重み係数に大きく齟齬が生じると適正な点検結果とならない可能性がある。そこで、この影響を最小とし、重み係数 W_i の妥当性を検討する目的で、得られた重み係数 W_i を点検データおよびAHP法による評価の観点から見直すこととした。

2.3 研究結果

重み係数の適正化を図るにあたって、従来の点検手法の内容と照らし合わせて、以下の観点で検討を行った。

第一に、打音以外の評価指標の妥当性の検証を行った。図-1に示した結果において、打音に関する評価点であるAとBを除外し、Cに示した9つの特徴的な変状項目のみでの評価点を検討したところ、判定区分が2Aや3Aであっても評価点がAやB程度になるものが散見された。これらの変状を実際に検証したところ、写真-1に挙げられる「骨材・異物等が露出」のみの変状であることが分かった。この重みが非常に小さく、「表層劣化剥離」に関する重みが高く扱われているため、「骨材・異物等が露出」のみの変状の評価点が著しく低い結果になったと推定した。そこでアンケート等で用いたAHP法による内容を検討し、改めて9つの特徴的な変状項目のみでの評価点を算出した。

上記の結果に基づき、Cに対して評価点を修正した結果を図-2に示す。これより、概ね健全度が悪化すると評価点も高い値となり、実際の現象に見合った評価ができているものと考えられる。ただし、このCに示した項目のみを用いても、判定区分の2AとAの境界を区分できない。この点は特徴的な変状項目を外観のみで判断する限界もあることも予想されるため、将来にわたってデータの蓄積を行った上での見直しが必要である。

第二に、打音検査がはく落の状態を判定するための主要な方法であることから、打音の音とハンマー打診のみに着目した場合、はく落の判定の可能かどうかに関す

る検証を行った。併せて評価の基準点の値の設定の妥当性の検証も行った。これまでは評価指標の説明を2~3段階程度に分け、1, 0.5, 0といった基準点を割り当てているが、結果の整合を踏まえた上で基準点を変更する必要があると考えられる。

上述の着眼点により、表-1のAとBの指標を基本とし、その上にCによって得られる9つの特徴的な変状項目の配点を上積みする方法を考えた。その理由は9つの特徴的な変状項目に該当する変状現象が生じていない場合でも、濁音とハンマー打診で不安定化する(落下する)ケースでは、必ず2A以上と判定されるのが望ましいと考えたためである。

ここで、表-4に打音検査の判定区分の考え方の例として、打音の音とハンマー打診の組合せと判定区分の関連性の考え方の例を示す。表-4をもとに、打音検査で判定区分が決定され、さらに実務上で安全性を考慮し、B→A、A→2A~3A等に判定区分を変更する、すなわち9つの特徴的な変状項目のみの加算でランクアップすることを想定する。この場合、以下のルールを適用するものと考えた。

- ・判定がAの変状では、打音異常が認められる変状であり、9つの特徴的な変状項目の「ひび割れ等の状況」または「材質劣化・漏水」の多くの項目が該当するような変状が発生しているケースでは、はく落の危険度が高まっているものと予想されることから、判定をランクアップする
- ・判定がBの変状では、9つの特徴的な変状項目の該当項目があったとしても、打音が清音で強打でもはく落しない程度の変状であることから、BからAへのランクアップは行わない
- ・9つの特徴的な変状項目において「①ひび割れ・分離面が鋭角」の「鋭角のひび割れ」または「不明」という判別に關しては、実務上判別に混乱をきたすため表-1の「不明」は除外する

以上の観点から、特に打音検査の基準点で0.5を配していた「X1:濁音(鈍い音)」「X2:強打で落ちる」について、上述のランクの変更されるケースを検討した。ランクの変更されるケースは、Cによって得られる9つの特徴的な変状項目の配点をさまざまなケースで組み合わせる形で考え、判定Aの上限値と判定2Aの下限值との差がどのような値になるかによって考えることにした。ここで、ランクが変更になるのは、最大10以下となる組合せである。その理由はCの「a.ひび割れの状態」または「b.材質劣化の状態」のそれぞれの最大評価点が10



写真-1 骨材が露出している変状例

表-3 重み係数の再検討結果

評価指標	骨材異物露出	漏水凍結(凍結膨張環境)	表層劣化・補修材浮き	幾何平均	修正後重みW	当初重み
⑦ 骨材異物露出	1	0.3333	3	1.00	3.30	0.81
⑧ 漏水凍結(凍結膨張環境)	3	1	0.2	0.84	2.79	1.88
⑨ 表層劣化・補修材浮き	0.3333	5	1	1.19	3.91	7.31
				3.03	10.00	100

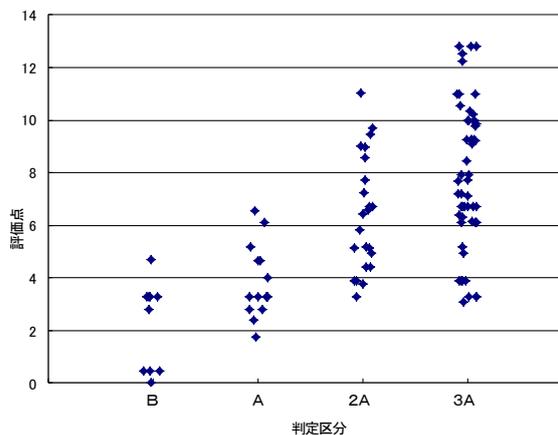


図-2 9つの特徴的な変状項目のみの評価点(再評価後)

表-4 打音検査の判定区分の考え方の例

	濁音(薄さを感じる)	濁音(鈍い音)	清音
軽打で落ちるまたは不安定化する	(3A)	-	-
強打で落ちるまたは不安定化する	3A~2A		-
強打しても落ちないまたは不安定化しない	A		B ^注

注) 清音であってもひび割れが閉合する場合はAとする

点であるためである。これらのうち代表的な組合せを設定して評価点を算出し、条件次第では打音検査のみの判定で判定Aとされた変状が判定2Aにランクアップされるものとした。また、逆に、打音検査のみの判定で判定Aとされた変状が判定2Aにランクアップされる必要が

ある最小評価点が3.0になったことから、「X1:濁音(鈍い音)」「X2:強打で落ちる」それぞれの基準点を0.5を中心に±0.1点ずつ変動させ、ランクアップがなされる組合せを検討したところ、以下の基準点に修正することが望ましいと考えた。

- X1 : 濁音(鈍い音)=0.4
- X2 : 強打で落ちる=0.5

以上の検討によって得られた重み係数を表-5に、変状に対する評価点の傾向を図-3に示す。

今回のはく落に関する評価式の導入によって、2AとAの定量的な数値を設定できる可能性があるものと考えられる。ただし、基準点の変更については、実際の変状例に照らし合わせ、工学的な判断によって点数の区分を変更したことから、さらに事例等の詳細な分析を行い、その妥当性も含めてさらなる検討が必要である。

表-5 うき・はく落に対する評価点修正案

大区分	評価項目	小区分	説明	基準点 Xi	重み Wi (%)	
A	打音の音質		濁音(薄さを感じる)	1.0	34.0	
			濁音(鈍い音)	0.4		
			清音	0.0		
B	ハンマー打撃による落下の状態		軽打で落ちる	1.0	46.0	
			強打で落ちる	0.5		
			強打しても落ちない	0.0		
C	ひび割れおよび材質劣化状態	a.ひび割れの状態	ひび割れ・分離面が鋭角	鋭角のひび割れ	1.0	0.48
			ひび割れ・分離面が開口	ひび割れが開口(1mm程度以上)	1.0	1.39
			ひび割れ等が完全に閉合	ひび割れ等で完全に閉合	1.0	3.83
			ひび割れ等が不完全閉合	ひび割れ等で閉合が不完全	0.5	
			派生するひび割れがある	主ひび割れから派生するひび割れがある変状を重要視する	1.0	0.54
		b.材質劣化の状態	ひび割れに段差がある	段差(せん断)のあるひび割れ	1.0	1.22
			ひび割れ沿いに剥離	ひび割れ沿いに、剥離が見られる変状を優先する	1.0	2.54
			骨材・異物等が露出	骨材が露出する変状を重要視する	1.0	3.30
			漏水凍結	漏水が凍結膨張する環境を重要視する	1.0	2.78
			表層劣化剥離	表層剥離、補修材浮きを重要視する	1.0	3.91

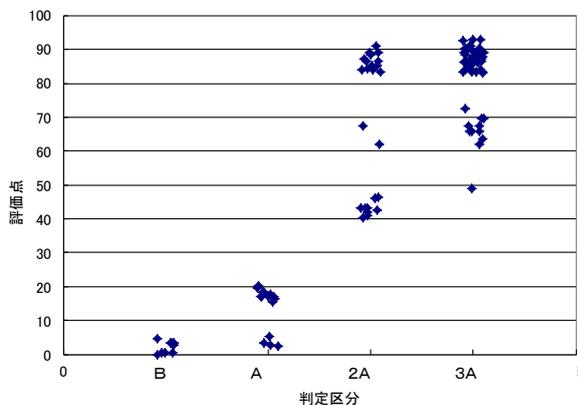


図-3 はく落に対する評価点の分布

3. 外力に対する定量的な健全度評価手法に関する検討

3.1 概要

トンネルに変状が生じる場合として、前章で述べたうき・はく落が生じる場合といった材質の劣化による変状に加え、外力の作用によって変状が生じる場合がある。この場合においても、より定量的な健全度の判定を可能とするためには、定量的な基準をもとに評価する手法を確立する必要が求められている。そこで、本章ではトンネルに外力が作用する場合に発生する覆工のひび割れに着目し、外力の作用を想定した数値解析によるひび割れ幅と既存の基準類に基づく判定区分との比較を通じて、健全度の評価手法について検討した結果について述べる。

3.2 研究方法

外力の作用によって発生するひび割れ幅の算定は、ひび割れの進展を考慮できる有限要素解析¹⁾により行った。なお、ひび割れ幅については覆工に関する実大実験²⁾で得られたひび割れ幅と解析によって得られた結果が比較的よい相関を示していることを確認している。図-4にコンクリートの圧縮側と引張側の材料特性を示す。圧縮側の特性はコンクリート標準示方書を参考にひずみが0.002までは2次曲線、以降0.0035までは応力が一定で

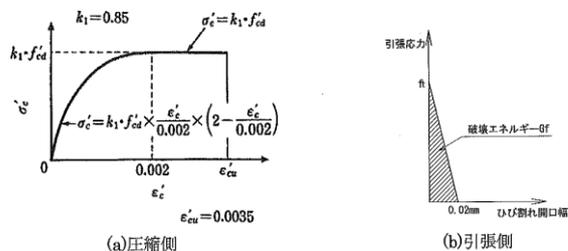


図-4 コンクリートの材料特性

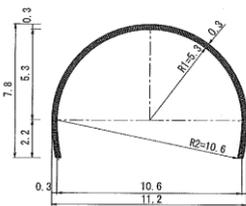


図-5 解析対象断面

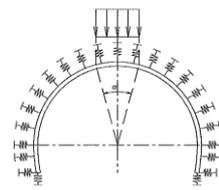


図-6 荷重の形態

表-3 ひび割れ幅と判定区分

ひび割れ幅	判定区分
5mm以上	3A~2A
3~5mm	2A
~3mm	A~B

ひずみが増加すると仮定した。引張側の特性はひび割れの発生までは線形弾性体、発生後は引張軟化曲線で定義される引張応力とひび割れ開口幅の関係に基づいて挙動するものとした。なお、本解析では局所的にひずみが集中し、見かけの引張ひずみが増大しても圧縮ひずみがある断面で0.0035に達するまでを解析の対象とした。

図-5に解析対象とした断面図を示す。解析はNATMによって施工されたトンネルに対して地山等級がCIとDIIの場合を想定し、それぞれで地山の变形係数が2000または500MPaと仮定したうえで地盤反力係数を算出して地盤反力ばね定数を求めた。なお、地盤反力ばねは引張の剛性を0とし、全周に同一のばね定数で配した。

図-6に解析に使用した荷重の形態を示す。荷重は緩み土圧を想定した分布荷重とし、荷重が載荷される範囲として図-6に示すように天端を中心とした角度 $\alpha=30, 90, 180$ 度の3通りを想定した。解析ではひび割れ帯モデルを使用しており、引張の限界に達した複数の要素でひび割れが発生することになるため、解析によって得られるひび割れ幅は要素の大きさに依存する。しかし、実際のプレーンコンクリートを使用した覆工に外力が作用する状況では、ひび割れはある程度の段階までは1本に集中して発生することが多いと想定される²⁾。よって、ひび割れ幅の算定にあたっては、該当する区間の近傍の各要素に発生したひび割れ幅をまとめた合計の幅として評価した。ひび割れ幅の比較はひび割れの進行性の有無が確認できない場合、かつひび割れの長さが10m以上となる判定の目安²⁾を参考に、表-3に示した値と比較した。なお、本検討では荷重形態からひび割れ幅は天端内縁で最も大きくなることを確認して分析を行っている。

3.3 研究結果

図-7に解析により得られた荷重変位曲線を示す。なお、図中の塗りつぶしの点が圧縮ひずみが0.002の状態である。地山等級によって最大荷重および変位の発生する傾向が異なるが、地山の密度を 2.5g/cm^3 と想定した場合は、荷重が 200kN/m^2 が土荷重高さに換算して8mとなり、地山等級がDIIの場合はこの程度で圧縮ひずみが0.002程度に達することになる。

図-8に天端内縁に発生するひび割れ幅と荷重の関係を示す。地山等級がDIIでは圧縮ひずみが0.002に達する時点でひび割れ幅が3~5mm程度に達し、表-3に示した判定区分では2A相当と評価されることを示している。地山等級がCIでは荷重によって傾向が異なるものの、 $\alpha=30$ 度の場合でひずみが0.002に達する時点で判定区分

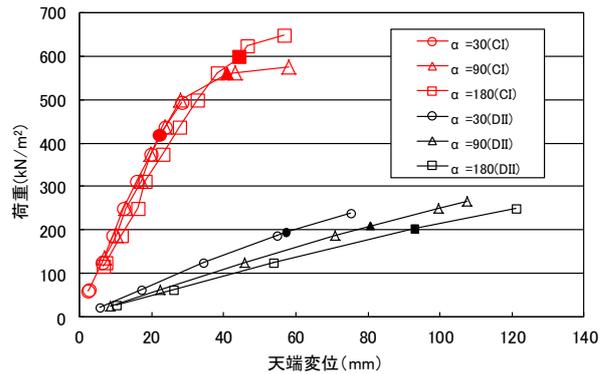


図-7 荷重変位曲線

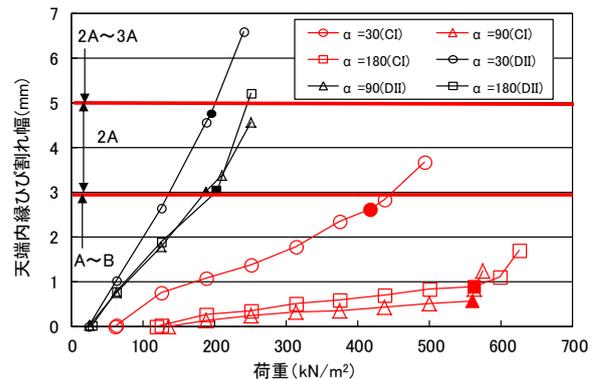


図-8 ひび割れ幅と荷重の関係

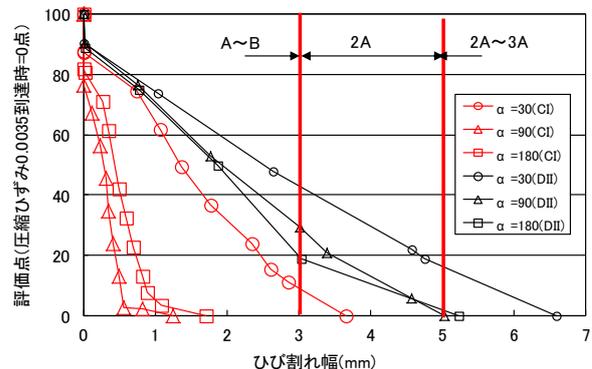


図-9 定量的な評価点の試算例

が2A相当になる。しかし、 $\alpha=90$ 度や 180 度といった載荷範囲が大きい緩み土圧が作用する場合は、ひび割れ幅が小さくても大きい圧縮ひずみが発生している場合もある。このようなケースは地山が良好であり、過大な外力が作用する可能性は低いですが、健全度を判断するためには地山等級を考慮に入れるのが望ましく、また、ひび割れ幅に加え、圧ぎやせん断ひび割れの発生、覆工の変形や移動等の発生の有無についての判断も合わせて必要になると考えられる。

図-9にトンネルの健全度を定量的に評価した試算例を示す。試算は評価点を荷重が0の状態を100点、トンネルの任意の点で圧縮ひずみが0.0035に達する荷重が

作用する状態を0点とし、その間は作用している荷重に対して点数を線形配分することにより行った。このような算定によって得られる評価点はトンネルの残存耐力を与える目安になると考えられる。図-9より一部を除いて評価点が概ね20~40点程度以下となる場合、判定区分が2Aまたは3Aとなる結果が得られた。このような方法により比較的簡易に健全度を定量的に評価できる可能性があるが、一部の条件では評価点が低い場合でも判定区分がAまたはB相当にとどまっている場合も見られたことから、ひび割れ幅以外の情報も踏まえた定量的な評価を行う必要があると考えられる。

4. まとめ

本年度は、道路トンネルの点検データを使用し、これまでに得られたうき・はく落に対する健全度の定量的な評価に関する検討の深度化を実施するとともに、トンネルに外力が作用する場合に発生する覆工のひび割れに着目し、ひび割れ幅と既存の基準類に基づく判定区分との比較を通じて、健全度の評価法について検討した。その結果、両者の場合において定量的な評価方法の確立に一定の可能性を示した。

しかしながら、それぞれの健全度の定量化にあたって、実務に適用する場合の留意点を以下に示す。

うき・はく落に関する評価点については、評価式は、近接目視と打音検査によって得られる評価指標により構成されている。よって、定期点検毎に、近接目視と打音検査を繰り返すことで、うき・はく離に関する変状の進行度合いを定量的に把握でき、データを継続的に取得できれば劣化予測を行える可能性を有している。ただし、評価指標となる現象は点検員によって判断されることか

ら個人差によって評価点にばらつきを生じる可能性はある。また、定期点検を近接目視と打音検査ですべてにおいて実施するのは、必ずしも現実的ではない面も残ることから、今回の評価式を用いた定量的な変状評価については、重点的に監視を必要とするような変状を対象とする場合への適用性が高いと想定される。さらに、今回検討した評価指標のうち、C.に示した9つの特徴的な変状項目に関しては健全度と比較的良好な相関が認められるため、同じ指標を遠望目視に適用できる可能性を有していると想定される。ただし、トンネル内の視認条件の制約や、うき・はく落の正確な評価は打音検査によってしか判別できないといった課題がある。

また、外力性の変状に対しても、今後はトンネルの構造や作用する荷重の形態を考慮し、ひび割れ幅に着目した場合に健全度を定量的に評価できる条件や適用範囲を検討するとともに、変形速度や別の箇所におけるひび割れや圧縮の発生といった他の現象による影響を考慮に入れ、健全度の定量化に関する検討を引き続き行う必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 真下ら：トンネル覆工の耐荷力と設計に関する研究報告書、土木研究所資料第3961号、平成17年3月
- 2) 真下ら：トンネル覆工の破壊メカニズムと補強材の効果に関する実験的研究、土木学会論文集 E, Vol.64, No.3, pp.311-326, 2008
- 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)、平成14年4月
- 4) (社)日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧、平成5年

RESEARCH ON THE QUANTITATIVE METHOD OF HEALTH EVALUATION FOR EXISTING TUNNEL

Abstract : In order to evaluate the health degree of road tunnel properly, it is essential that the factor which influences on the health is grasped in advance and that the judgment of inspection and investigation should be achieved by quantitative parameters. The phenomena of deformation and deterioration occurrence of road tunnel were analyzed firstly and the relation between the qualitative factors to judge the deterioration in inspection was clarified. Also certain possibility was found to establish the quantitative method to evaluate the deformation and deterioration of tunnel, occurred both by material deterioration and action of outer force.

Key words : tunnel, maintenance, health degree, inspection, judgment grouping, hammer test