

うき・はく落を生じるトンネルの健全度評価

砂金伸治* 角湯克典**

1. はじめに

供用中の道路トンネルでは各種の基準類^{1)~2)}に基づいて点検や調査が実施されている。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点検等によって発見された場合、対策工の必要性や実施時期の判断は基準類やマニュアル³⁾等を参考としつつ、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ることが多い。今後財源が制約される中で効率的に道路トンネルの維持管理を実施するためには、点検や調査等を通じてトンネルのひび割れの発生状況、空洞の有無、覆工厚等の情報を的確に得る必要がある。同時に、それらの情報から変状の発生原因をなるべく正確に推定し、適切な対策を実施することが重要である。そのためには変状の状態を客観的に判断できると同時にトンネルの健全度を定量的に評価できる手法の確立が望まれる。

トンネルの変状には、大別して材質劣化による変状とトンネル構造の安定に関わる外力による変状の両者があると考えられる。筆者らはこれまでに実施されてきた点検結果等の分析⁴⁾を進めている。その結果、変状が進行していると疑われる変状には前者によるものも多く、トンネルの健全度を評価するためにはその状態を評価する手法が必要であると考えている⁵⁾。

そこで本報では覆工の材質劣化によって引き起こされることが多いうき・はく落に対して、定量的に健全度を評価できると考えられる評価指標を抽出し、それに基づき変状の状態を判定する手法に関する考察を行った結果について述べる。

2. うき・はく落に対する健全度評価指標の抽出

2.1 評価指標抽出の対象とした変状事例

うきやはく落に対する健全度を評価するための指標を抽出するために、既往のトンネルの点検や

調査結果をもとに覆工コンクリートのうき・はく落に関連した変状事例を収集し、文献^{1)~2)}に示されている点検や調査の判定区分を参考に変状の程度の判定を行った。表-1に検討に使用したうき・はく落が生じている場合のうき・はく落物の種類とその事例数を示す。変状事例は10本のトンネルの計114事例である。うき・はく落物の種類はコンクリートの塊状片(ブロック)、コンクリート片、コンクリート粗骨材、補修材料が多数を占める。また、変状現象はひび割れの発生や覆工材料の劣化、補修材料の劣化が多数を占めていた。

2.2 評価指標の抽出

うき・はく落に対する健全度評価を行うための手法の構築であることから、評価に必要な情報を得るための手法は基準類¹⁾に位置づけられた近接目視と打音検査が基本になる。前者からは覆工コンクリートに直接触れることにより、また、後者からはトンネル坑内のある程度の距離からの外観の観察により必要な情報が得られるものと言える。なお、遠望目視により定量的に評価を行う手法に関しては別途検討する必要があることに注意を要する。

前節の事例に対して、上述の点検手法による点検を行うことで種々のデータを収集し、その結果を用いて点検者が着目することが多いと考えられる指標を抽出した。表-2に抽出した合計11の評価指標を示す。その際、打音検査では打音による判定の目安が示されている¹⁾ことから打音の音質に着目した指標を使用するとともに、応急措置で行われることが多いたつき落とし作業の内容に関連

表-1 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	事例数
片状コンクリート	21
塊状(ブロック化)コンクリート	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(セメント系)	25
補修材(非セメント系)	4
溶出物	2
その他	3
合計	114

づけ、ハンマー打撃による落下の状態に着目した指標を抽出した。また、近接目視からはひび割れや材質劣化の情報が得られることから、この両者の状態に着目した指標を抽出した。特に、ひび割れの状態に関しては、その特徴を代表できるひび割れや分離面に関する情報や、ある領域が発生したひび割れによって閉合されている状況、ひび割れの派生や段差の有無、はく離等の情報に細分化するとともに、材質劣化の状態に関しては骨材・異物等の情報や漏水の凍結、表層の劣化に関する情報に着目した。また、表-2に示すように抽出したそれぞれの評価指標に関してその状態を説明するために2～3段階に状態を区分した。

なお本研究では、うき・はく落に対する変状の健全度の評価を行うことを前提としているため、外力による変状に関しては本検討では対象外としている。

3. うき・はく落に対する健全度評価法の検討

3.1 抽出した評価指標による健全度評価点の試算

前章において抽出した評価指標をもとにした健全度評価点を算定するための評価式の構築を行った。構築にあたっては以下の式(1)によって試算を行った。

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

ここに、Y：健全度評価点

Wi：評価指標iに対する重み係数

Xi：評価指標iに対する評価の基準点(Xi=0～1)

N：評価指標の数(本検討では11)

ここで評価指標に対する重み係数の決定には種々の手法があると考えられるが、本検討では階層分析法※(AHP)による考え方を用い、複数の技術者が上記の評価指標のそれぞれに対して1対1評価を実施し、評価指標に対する重み係数Wiを決定した。具体的には、初めにトンネル専門技術者の9名に対し、表-2に示した(A)～(C)の大区分毎で重み係数を算定した。引き続いて(C)における(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、最後に全ての評価指標の重み係数の総和が100となるようにそれぞれの重み係数を配

表-2 抽出した評価指標

評価指標		
大区分	小区分	
(A)打音の音質		
(B)ハンマー打撃による落下の状態		
(C)覆工の外観の状態	(a)ひび割れの状態	(1)ひび割れ・分離面が鋭角
		(2)ひび割れ・分離面が開口
		(3)ひび割れ等が閉合
		(4)派生するひび割れがある
		(5)ひび割れに段差がある
		(6)ひび割れ沿いにはく離
	(b)材質劣化の状態	(1)骨材・異物等が露出
		(2)漏水の凍結
		(3)表層劣化・はく離

表-3 評価指標の具体的な内容

評価指標	説明	想定する極端な事例
(A) 打音の音質	打音の音が異音である変状を重視する	ひび割れや、材質劣化の有無にかかわらず、打音で異音がする箇所を、より健全度が低いものと判定する
(B) ハンマー打撃による落下の状態	打撃によって、覆工材料が分離、落下する変状を重視する	ひび割れや、材質劣化の有無にかかわらず、点検ハンマーの打撃によって、はく離や落下してしまう状態の箇所を、より健全度が低いものと判定する
(C) (a) ひび割れの状態	ひび割れの状態を重視する	打撃結果に関係なく、ひび割れが密集していたり、せん断ひび割れや、開口したコールドジョイント、ひび割れが閉合している箇所などを、より健全度が低いものと判定する 
(C) (b) 材質劣化の状態	材質劣化の状態を重視する	打撃結果に関係なく、覆工や補修材の表面が劣化している箇所を、より健全度が低いものと判定する 

分した。なお、重み係数は各技術者に対してそれぞれ算定し、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最終的な重み係数とした。また、表-3に示すように、9名の回答者に対しては本検討の目的を明確にするために評価指標の内容とその評価指標が想定している具体的で極端な事例をあらかじめ提示した。これは評価指標それぞれが持つ意味を明らかにし、本検討の目的と異なる意味のばらつきが結果の中に含まれることが極力少なくなるように配慮したためである。

また、それぞれの評価指標の評価結果に対して与える基準点はこの段階では全体の分布を把握するための試算の位置づけとし、機械的に0～1.0として検討し、評価指標が2項目に分類される場合は0または1.0、3項目に分類される場合は0、0.5、1.0と割り振った。

その結果、打音検査による評価指標(A)および(B)の着眼点と、覆工の外観の状態によって求められる(C)の着眼点における重み係数に齟齬が生じていると適正な評価結果とならない可能性があることが分かった。そこで、この影響を最小とし、

※土木用語解説：階層分析法

重み係数などの妥当性を検討する目的で、得られた重み係数を変状事例のデータおよび階層分析法による評価結果の観点から精査を行った。

3.2 覆工の外観に関連する評価指標の妥当性の検証

初めに、覆工の外観に関連、すなわち、近接目視に関連する評価指標の妥当性の検証を行った。検証は打音に関する評価指標である(A)と(B)の指標を除外し、(C)に示した外観による9つの特徴的な変状項目のみを用いて写真により114の変状事例の評価点を試算した。その結果、表-4に示す判定区分が2Aや3Aとなった場合でも、試算した評価点はAやBとなるものが散見された。これらの事例を分析したところ、写真-1に見られるような「骨材・異物等が露出」している状況が顕著であることが分かった。そこで実際に回答者から得られた内容をもとに、改めて9つの特徴的な変状項目のみの評価点を再計算し、(b)材質劣化の状態による重み係数を設定し直した。

3.3 打音検査に関連する評価指標の妥当性の検証

次に、(A)打音の音質と(B)ハンマー打撃による落下の状態に着目した場合で、うき・はく落の判定が可能かどうかに関する検証を行った。上述の試算では評価指標の説明および基準点を2~3段階程度に分け機械的に付したが、実務上で結果の整合を図るためには基準点を変更する必要もあると考えたことによる。

ここで、表-5に打音の音質とハンマー打撃による落下の状態の組合せと判定区分の関連性の考え方の仮定を示す。本検討では打音検査で判定区分が決定され、さらに実務上における安全性を考慮し、判定区分を変更する際に(C)に示した9つの特徴的な変状項目の加算で判定区分を変更することを想定した。この場合、以下のルールを適用を仮定した。

- 判定区分が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「ひび割れ等の状態」または「材質劣化の状態」の多くの項目が該当し、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、判定区分を2A~3Aとする
- 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であることから、BからAへの判定区分の変更は行わないものとする

表-4 判定区分が示す変状の影響や対策の緊急度

判定区分	通行者、車両の安全走行に及ぼす影響	対策の緊急度
3A	危険	直ちに対策を施す
2A	早晚脅かす異常時に危険となる	早急に対策を施す
A	将来危険となる	重点的に監視をし、計画的に対策を施す
B	現状では影響がない	監視をする



写真-1 骨材が露出している変状例

表-5 打音検査の判定区分の考え方の仮定

		(A)打音の音質		
		濁音(薄さを感じる)	濁音(鈍い音)	清音
(B)ハンマー打撃による落下の状態	軽打で落ちる	(3A)	—	—
	強打で落ちる	2A~3A		—
	強打しても落ちない	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

表-6 うき・はく落に対する評価点

大区分	評価指標	説明	基準点Xi	重み係数Wi	
(A)打音の音質		濁音(薄さを感じる)	1.0	34	
		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	
		強打で落ちる	0.5		
		強打しても落ちない	0.0		
(C)覆工の外観の状態	(a)ひび割れの状態	ひび割れ・分離面が鋭角である	1.0	10	
		ひび割れ・分離面が鋭角ではない	0.0		
		ひび割れ・分離面が開口している(1mm程度以上)	1.0		
		ひび割れ・分離面が開口していない(1mm程度未満)	0.0		
		ひび割れ等で完全に閉合	1.0		
		ひび割れ等で閉合が不完全	0.5		
	(b)材質劣化の状態	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	3.3
			骨材が露出する変状を重要視しない	0.0	
			骨材が露出する変状を重要視する	1.0	
(c)覆工の外観の状態	ひび割れに段差がある	せん断による段差がある	1.0	1.2	
		せん断による段差がない	0.0		
		ひび割れ沿いにはく離が見られる変状を優先する	1.0		
	ひび割れ沿いにはく離	ひび割れ沿いにはく離が見られる変状を優先する	1.0	2.5	
		ひび割れ沿いにはく離が見られる変状を優先しない	0.0		
		表面のはく離、補修材のうきを重要視する	1.0		
(b)材質劣化の状態	漏水の凍結	漏水が凍結膨張する環境を重要視する	1.0	10	
		漏水が凍結膨張する環境を重要視しない	0.0		
	表面のはく離、補修材のうきを重要視する	1.0	3.9		

ここで、(A)と(B)のそれぞれの基準点を変動させて評価点の総和を算定し、実際の事例と照合し、(C)に示されたひび割れの状態と材質劣化の状態に対して、実際に現象として観察されている評価項目の組み合わせを分析し、基準点の変動による評価点の変動を検討したところ、(A)の基準点を

変更することにより仮定したルールに適合する結果が得られた。なお、基準点の変動による組合せは無数にあり、組合せによっては重み係数自体の設定にも影響するため本検討では基準点を大きく変えないと考えられる範囲での比較にとどまっている。

3.4 健全度評価点の算定結果

これまでの検討によって得られた基準点と重み係数を表-6に示す。また、これらに基づいて算定したうき・はく落に対する健全度評価点の傾向を図-1に示す。これよりAとB、または2Aと3Aのしきい値の設定が明確にはならないが、2AとAの定量的なしきい値が評価点として30点程度で設定できるものと考えられる。表-4に示すように対策の緊急度の観点で考えると判定区分がAと2Aを境界として大きく変わることから、実際の点検によって得られる情報をもとに本報の評価式を用いることで、定量的な評価点が算定され、対策の緊急度を議論できる可能性があるものと考えられる。

ただし、実際に得られた限られた変状事例に照らし合わせて評価点を検討していることから、さらに事例等の収集や詳細な分析を行い、その妥当性も含めてさらなる検討が必要である。

4. おわりに

本検討ではトンネルの点検や調査時に行われる打音検査や近接目視から得られる情報をもとに、うき・はく落に対する健全度の評価に有効と考えられる評価指標を抽出し健全度の定量的な評価手法の確立に向けた考察を行った。その結果、打音の音質、ハンマー打撃による落下の状態、およびひび割れと材質劣化の状態に着目することによって、うき・はく落が見られる変状に対して定量的に健全度を評価する手法の確立に一定の可能性を示した。本検討で得られる評価式と評価点によって、近接目視と打音検査を繰り返すことにより、うき・はく落に関する変状の進行度合いを定量的に把握できるとともに、データを継続的に取得できれば点検や対策の実施、監視の間隔を決定できる可能性を有している。また将来的には、変状の発生状況の予測と関連づけられる手法の確立につながる可能性もある。

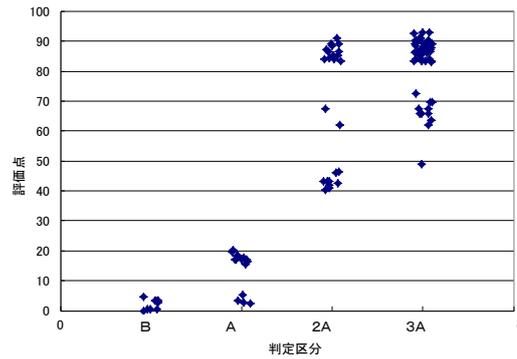


図-1 うき・はく落に対する評価点の分布

今後においては着目した評価指標の種類や重み付けの妥当性の検証、基準点の割り当てや適合性等に関して、現場における試験適用や検証等を踏まえ、これらの課題の解決を図り、合理的な点検・診断方法の確立に関する検討を引き続き行う予定である。

参考文献

- 1) 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
- 2) (社)日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧、平成5年
- 3) 真下英人、石村利明：道路トンネル変状対策マニュアル(案)、土木研究所資料第3877号、2003年2月
- 4) 松岡誠二、砂金伸治、角湯克典：既設トンネルの変状の発生状況に関する一考察、第65回年次学術講演会第VI部門、VI-037、2010
- 5) 砂金伸治、角湯克典、真下英人：うき・はく落による変状の健全度評価に関する考察、トンネル工学報告集、第21巻、pp.195~201、2011

砂金伸治*



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所道路技術研究グループトンネルチーム 主任研究員、博士(工学)
Dr. Nobuharu ISAGO

角湯克典**



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所道路技術研究グループトンネルチーム 上席研究員
Katsunori KADOYU