

## 戦-29 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状況を分析したうえで、これまでに得られた定性的な判定区分をより明確にする検討を実施するとともに、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を実施し、評価手法の確立に一定の可能性があることを示した。

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、効率的に供用中の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。

本年度は、一部の道路トンネルの点検データを使用し、変状の発生状況をトンネルの施工経過年数毎に分析し、その傾向を把握することを試みた。また、これまでに得られた点検に際して用いられる判定項目の定性的な判定区分をより明確にする検討を実施したとともに、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を実施した。

### 2. 研究方法

#### 2.1 トンネルの変状の発生状況の分析

平成 14 年度以降に実施されたトンネル定期点検結果のうち、東日本の 148 本の道路トンネルのデータを収集し、変状の発生状況等に関する分析を行った。図-1 に分析の対象としたトンネル数の施工年代別の推移を示す。分析の対象としたトンネルでは 1966～1980 年に施工されたものが多く、それらは全て矢板工法により施工されている。なお、延長に関しては 250m 以下のトンネルが最も多く、延長 1000m 以下のトンネルで全体の約 9 割を占めていた。また、これらのトンネルの定期点検の回数 は 2 回実施されているものが最も多く、全体の約半数程度という状況であった。

本研究で用いた道路トンネルの判定区分は、道路トンネル定期点検要領(案)<sup>1)</sup>によるものとなっており、A, B,

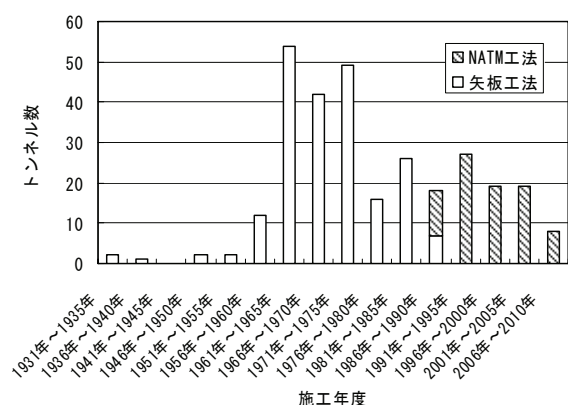


図-1 分析対象トンネル数の施工年代別推移

Sの3段階で判定されている。これらのトンネルに対して、定期点検でA判定およびB判定とされた変状に対して、トンネル1m当たりの変状箇所数を変状発生率と定義し、施工後経過年数との関係を分析した。また、これらのトンネルの中で定期点検が3回実施されたトンネルを取り上げ、全てのスパンを対象として判定結果の傾向を分析した。

## 2.2 トンネルの健全度評価の判定項目に関する検討

トンネルの点検や調査においては、その変状の判定を定量的に行い、健全度を評価することが望ましい。そのためには、評価に使用する判定項目の判定区分が明確であることが不可欠である。表-1に過年度の研究等により得られたうき・はく落の定性的な判定区分の例を示す。本年度は、覆工コンクリートの材質劣化による変状事例を収集し、文献<sup>1)</sup>や道路トンネル維持管理便覧<sup>2)</sup>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いつつ、判定区分がより明確となるように判定項目の相互の結果の加味について検討した。

具体的には、変状事例として実際に現地に於いて健全度の判定を行った10本のトンネルの計114事例を取り上げ、これまでの検討で得られた表-1の打音検査の判定項目のうち、濁音や清音といった『打音の音質』、さらに、当該箇所の覆工コンクリートが「軽打で落下」「強打で落下」「強打しても落ちない」といった『はく落区分』の両者を加味した判定区分の深度化について検討した。表-2に検討に使用したうき・はく落物の種類とその箇所数を示す。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、変状現象の内訳については、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。

## 2.3 定量的な健全度評価手法の検討

前節までうき・はく落の定性的な検討を実施したが、より定量的な健全度の判定を可能とするためには、うき・はく落といった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判定できる手法を確立する必要がある。本節では過去に実施した点検や調査の判定結果を参考に、健全度評価を行うための評価指標の設定と、それらを用いて評価を行った場合の変状の程度を区分するための敷居値の算定を行うことにより、健全度の定量化を試みた。定量化に際しては、うき・はく落に対する変状の健全度の

表-1 うき・はく落の定性的な判定区分例

形態	判定項目	判定区分				
		3A	2A	A	B	S
塊状片 (ブロック)	落下の可否	直ちに落下	落下する	落下する恐れがある	落下する恐れはない	異常なし、軽微
	ブロック化の程度	ひび割れ等で閉合		完全に閉合していない		
	ひび割れ等の段差	段差あり	段差は顕在化していない			
	ひび割れ等の開口	数mm以上		数~0.3mm程度	0.3mm程度以下	
	シュミットハンマー試験による反発度比率	0.9程度以上にならない		0.8程度未満にならない		
コンクリート片 補修モルタル	打音検査	ハンマー打撃で落ちる(叩き落として完全に除去できない)		ハンマー打撃で落ちないが、不安定化する恐れがある	ハンマー打撃で落ちない、不安定化する恐れは少ない	異常なし、軽微
		濁音(薄さを感じる)				
		濁音(鈍い音)				
		強打・軽打で落ちる(落ちる恐れがある)		強打の連打で落ちない		

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

評価を行うことを前提とし、外力による変状に関してはここでは対象外とした。また、検討に使用した収集事例は近接目視と打音検査による点検から得られた事例であることから、本節で定量化する評価指標等も近接目視・打音検査により得られる情報に基づくものとした。言い換えれば、遠望目視等で検討に用いられる定量的な評価手法に関しては別途検討する必要があることを示している。

健全度の定量的な評価にあたっては、以下の評価式(1)により健全度評価点数を求めることとした。表-3に評価式に使用する評価指標として対象としたものを示す。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、近接目視によって得られるひび割れの情報に着目して選定した。

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

ここに、Y：健全度評価点数

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)

ここで重み係数の決定は、AHP 法で利用される重み付けの方法を用いた。今回はトンネル専門技術者の9名が上記の評価指標のそれぞれに対して1対1評価を実施して評価指標に対する重み係数 Wi を決定した。具体的な決定方法は各技術者に対して表-3 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としている。

### 3. 研究結果

#### 3.1 トンネルの変状の発生状況の分析結果

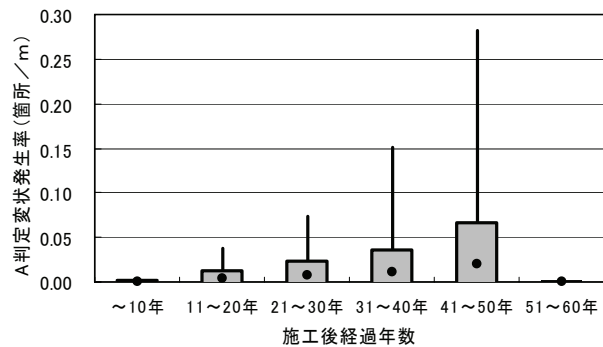
図-2 に A 判定および B 判定の変状発生率を示す。なお、グラフ中の直線部が変状発生率の最大値と最小値、黒丸は平均値、長方形部分はデータの ±σ (σ：標準偏差) の領域を示す。図より施工経過年数が大きい場合、変状発生率が高い傾向がある。なお、施工経過年数が 51 年以上であった 4 トンネルでは現在は A 判定となる変状は存在していなかったが、既に補修や補強が行われていた。

また、これらのトンネルのうち、3 回の定期点検が実施された 5 トンネルの 362 スパンに対して、スパン毎での判定の傾向を分析した。表-4 に対象とした 5 トンネルの諸元を示す。分析は各スパンに発生したひび割れ、うき、はく落などの変状に対する判定結果を集計し、最もランクの高い変状、すなわち相対的に健全度が低いと考えられる変状をもって該当するスパンの判定を代表させることにより実施した。

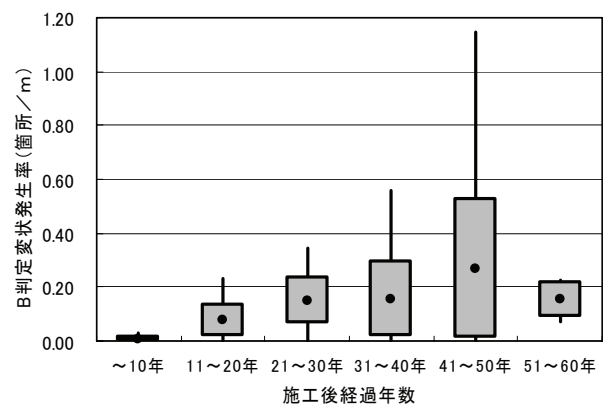
図-3 に 3 回の定期点検におけるスパン判定区分の割合を示す。全体的に A 判定や B 判定の割合は増減しているが、その変化に関しては明確な傾向が見られない。また、図-4 に点検毎のスパン判定区分のうち、ランクアップ、すなわち、点検の結果、変状等が発生したり、劣化が進行したと判断された場合の内容を示す。なお、ランクアップした理由として①判定見直し、②変状の新たな発生や発見、③打音異常、④補修材劣化に分類した。この中では②による理由が最も多く、その要因を分析すると漏水によるものが約 4 割、ひび割れの新たな発見によるもの、およびうき・はく離の発生によるものがともに約 3 割程度であった。また、中には 2 段階のランクアップ、

表-3 検討の対象とした評価指標

評価指標		説明	基準点Xi	
大区分	小区分			
A. 打音の音質		濁音(薄さを感じる)	1.0	
		濁音(鈍い音)	0.5	
		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	
		強打で落ちる	0.5	
		強打しても落ちない	0.0	
		不明	0.5	
C. ひび割れ形態、材質劣化状態	a ひび割れの状態	ひび割れ・分離面が鋭角	1.0	
		ひび割れ・分離面が開口	不明	
		開口している(1mm程度以上)	1.0	
		開口していない(1mm未満)	0.0	
		ひび割れ等が閉合	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	ひび割れ等で閉合していない	0.0	
		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場合	1.0	
		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場合	0.0	
		せん断による段差がある	1.0	
		せん断による段差がない	0.0	
		ひび割れ沿いに剥離が見られる変状を優先する場合	1.0	
ひび割れ沿いに剥離が見られる変状を優先しない場合	0.0			
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場合	1.0	
	骨材が露出する変状を重要視しない場合	0.0		
	漏水凍結	漏水が凍結膨張する環境を重要視する場合	1.0	
	漏水が凍結膨張する環境を重要視しない場合	0.0		
表層劣化剥離	表層剥離、補修材浮きを重要視する場合	1.0		
表層剥離、補修材浮きを重要視しない場合	0.0			



(a) A 判定の変状発生率



(b) B 判定の変状発生率

図-2 変状発生率の傾向

表-4 検討の対象としたトンネル諸元

トンネル名	延長	工法区分	施工年度	スパン数	点検年度
A トンネル	360m	矢板工法	S48 (37年)	41	H15, H18, H20
B トンネル	194m	矢板工法	S47 (38年)	21	H15, H18, H20
C トンネル	700m	矢板工法	S50 (35年)	100	H14, H18, H20
D トンネル	700m	矢板工法	S45 (40年)	100	H14, H18, H20
E トンネル	790m	矢板工法	S38 (47年)	100	H14, H18, H20

( ) 内は、2010年時点の経過年数を示す

すなわちS判定からA判定に変化したスパンが全部で4スパンあったが、それらの要因は目地部のうき・はく離によるもの、漏水による路面凍結、補修材劣化によるものであった。

### 3.2 トンネルの健全度評価の判定項目に関する検討結果

図-5に打音検査の判定項目である『打音の音質』、『はく落区分』と判定区分の関連性を示す。これより、濁音といった現象に見られる打音異常が存在し、かつ、「軽打で落下」もしくは「強打で落下」するものは判定区分では3A~2Aと判定されるものが大半であることが分かる。なお、一部で「強打で落下」するものがA判定となったが、その場合の音質は清音である。また、ごく一部で「強打して落ちない」と判定されても2Aとなっているものもあったが、ほとんどの事例でA~Bの判定となっている。表-1の判定区分では、落下の可否に対しては、3Aで「直ちに落下」、2Aで「落下する」となっており、道路トンネル維持管理便覧<sup>2)</sup>においては、3Aの判定区分は危険で、対策の緊急度が著しく高く、「直ちに対策」となっており、また、2Aでは早晚危険となることから、対策の緊急度が

高く、「早急に対策」となっている。3Aおよび2Aの判定では同程度の変状であっても変状の発生している位置の違いによっても判定が異なることにも注意を要するが、図-5に示すように、『打音の音質』と『はく落区分』の両者を加味して検討した場合、3Aとなる「直ちに落下」するは、落下の可能性が高く即座の応急対策が必要なもの、2Aとなる「落下する」は、即座の応急対策が必要ではない可能性があるが、次回の定期点検までの間までには、はく落する可能性があることから早急に対策を行う必要があるものと判定されることになる。このことから、両者を加味することによって、同様に図-5に示した検討より、Aとなる「落下する恐れがある」は、次回の定期点検までは落下する可能性は高くはないが、重点的に監視が必要となると想定されるもの、Bは「落下しない」に判定される可能性が高いことになる。このことから、表-1の判定項目である打音検査に対しては表-5のように深度化することができる。これらの考え方から、判定が3A~Aとなる場合には次回点検までの最小期間としては2年程度と考えられるが、変状の進行や監視の考え方、トンネルの置かれる条件等も含めてさらなる検討が必要である。

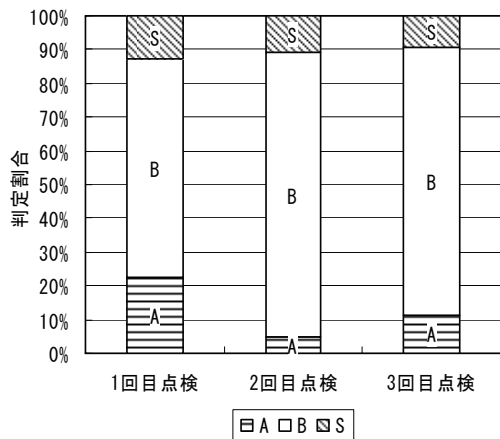


図-3 スパン判定区分割合

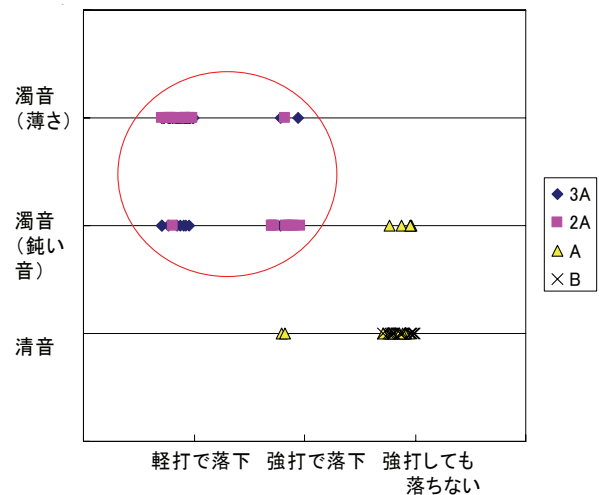


図-5 『打音の音質』と『はく落区分』の関連性

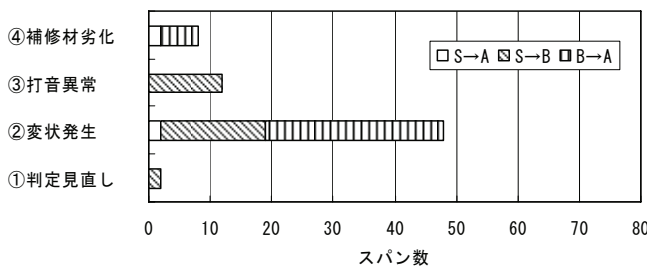


図-4 スパン毎の判定区分のランクアップ

表-5 定性的判定区分の深度化の結果

形態	判定項目	判定区分				
		3A	2A	A	B	S
塊状片(ブロック) コンクリート片 補修モルタル	打音検査	ハンマー打撃で落ちる(叩き落として完全に除去できない)	ハンマー打撃で落ちないが、不安定化する恐れがある	ハンマー打撃で落ちない。不安定化する恐れは少ない	ハンマー打撃で落ちない。	異常なし、軽微
		濁音(薄さを感じる)	濁音(鈍い音)	清音		
		強打・軽打で落ちる(落ちる恐れがある)	強打の連打で落ちない			

3.3 定量的な健全度評価手法に関する検討結果

表-6に重み係数を示す。また、図-6にこの設定した重み係数をもとに、10本のトンネルの計114事例に対して算定した健全度評価点の分布を示す。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、両者の健全度を区分できる可能性があることが分かる。

ただし、今回の算定した重み係数や評価式に基づくうき・はく落の健全度の評価に関しては以下のような課題が考えられる。

第一に重み付けの妥当性の検証が必要である。今回の評価項目の重み付けはAHP法に用いられる重み付けの手法により、トンネル点検に精通する技術者が実施したが、これには判定する人間の主観が反映しており、個人差が生じる性質のものである。なるべくその影響を除去するために経験や専門が若干異なる個人差を考慮し、その妥当性について検証を行ったが、本手法が普遍的に適用できるかについてさらなる検討が必要である。

第二に評価の基準点の値の設定の妥当性の検証が必要である。現時点では、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、この比率や段階分けの程度の妥当性に関する検討が必要である。

第三に評価指標の妥当性の検証が必要である。すなわち、評価指標が表-3に示した内容で過不足がないかどうかの検討が必要である。加えて、今回の評価指標で設定を行うと、「ひび割れ・分離面が鋭角」「派生するひび割れがある」「骨材・異物等が露出」については、重みが1%未満となっており、評価点にほとんど影響を及ぼさない。このような指標を考慮する必要性について検討する必要がある。

また、今回のうき・はく落に関する評価式の導入によって、2AとAの定量的な敷居値を設定できる可能性があるものと考えられるが、点検と対策の実務上での対応を考えた場合には以下のような課題がある。

第一に、遠望目視の段階でのスクリーニングに用いる評価項目と評価式の必要性がある。今回の評価式は近接目視と打音検査によるうき・はく落の健全度評価であるが、実際にはまず遠望目視により危険箇所を判別する必要がある。このため遠望目視の段階で使用できる評価項目、評価式を別途検討する必要がある。

第二に、トンネル全線に渡って近接目視や打音検査を行えばよいが、必ずしも実施出来るとは限らない。ま

表-6 算定した重み係数

評価指標		説明	基準点Xi	重みWj(%)
大区分	小区分			
A. 打音の音質		濁音(濁さを感じる)	1.0	34
		濁音(鈍い音)	0.5	
		清音	0.0	
B. ハンマー打撃による落下の状態		騒打で落ちる	1.0	46
		騒打で落ちる	0.5	
		騒打しても落ちない	0.0	
C. ひび割れ形態、材質劣化状態	aひび割れの状態	ひび割れ・分離面が鋭角	1.0	10
		不明	0.5	
		ひび割れ・分離面が開口	1.0	
		開口していない(1mm未満)	0.0	
		開口していない(1mm未満)	0.0	
	b材質劣化の状態	骨材・異物等が露出	1.0	10
		骨材が露出する変状を重視しない場合	0.0	
		漏水凍結	1.0	
		漏水が凍結膨張する環境を重視しない場合	0.0	
		表面剥離、補修材浮きを重視しない場合	0.0	
	cひび割れ等の閉合	ひび割れ等で完全に閉合	1.0	3.8
		ひび割れ等で閉合が不完全	0.5	
		ひび割れ等で閉合していない	0.0	
		派生するひび割れがある	1.0	
		主ひび割れから派生するひび割れがある変状を重視する場合	0.0	
dひび割れ沿いに剥離	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		
	ひび割れ沿いに剥離が見られる変状を優先する場合	1.0		
	ひび割れ沿いに剥離が見られる変状を優先しない場合	0.0		
	骨材が露出する変状を重視する場合	1.0		
e表層劣化剥離	骨材が露出する変状を重視しない場合	0.0	0.8	
	骨材が露出する変状を重視しない場合	0.0		
	漏水が凍結膨張する環境を重視する場合	1.0		
	漏水が凍結膨張する環境を重視しない場合	0.0		
	表面剥離、補修材浮きを重視する場合	1.0		
表面剥離、補修材浮きを重視しない場合	0.0	7.3		

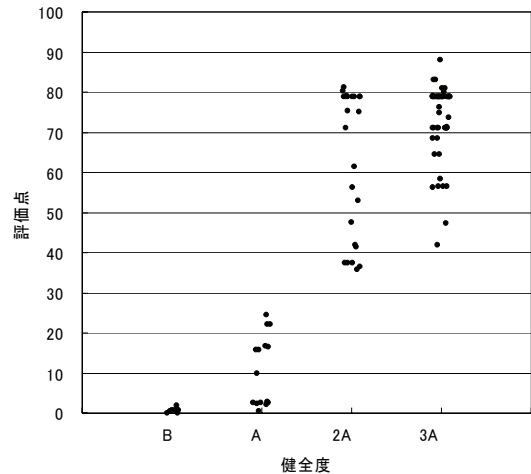


図-6 評価点の分布

た、既に初回定期点検が行われている場合、変状の進行性が認められた場合のみ近接目視と打音検査が行われることになっている。この場合、遠望目視によって変状の進行性を判別する必要がある。今後はこれらに関するさらなる検討が必要である。

4. まとめ

本年度は、道路トンネルの点検データの一部を使用し、変状の発生状況をトンネルの施工経過年数毎に分析し、その傾向を把握することを試みた。また、これまでに得られた定性的な判定区分をより明確にする判定項目の検討を実施するとともに、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を実施し、定量的な評価の確立に一定の可能性があることを示した。

今後はうき・はく落の状態から発生時期をある程度想定する必要があると考えられることから、データの拡充を図りつつ、うき・はく落の発生に対する時間的な要素

に関する検討および対策実施や監視との関連性の検討が必要である。また、各判定区分の具体的な事例をもとにした検証、各判定区分と健全度の関連性や定量的な評価手法の深度化、加えて、外力性のひび割れの場合に対して残存耐力との関連性を検討する予定である。

#### 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

## 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.

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