

戦-18 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、現場で問題となることが多い覆工コンクリートの浮き・はく落に着目し、浮き・はく落が生じる原因となる現象を抽出してその細分化を行い、実際の現場における点検や試験を通じて、細分化された現象に対して、定性的な判定区分と点検や試験結果から得られた定量的な指標との関連性を検討した。その結果、シュミットハンマー試験の結果や打音試験の方法と定性的な判定区分の間に一定の相関が見られた。

キーワード：トンネル，維持管理，健全度，点検，判定区分，打音試験

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浮き・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試験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、その評価指標や覆工の残存耐力と、トンネル構造の安定性および覆工コンクリートの浮き・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。特に本年度は、道路トンネルにおける健全度の評価手法を検討するにあたって、これまでの既往の点検や調査に関する内容の分析を行うとともに、より定量的な健全度の評価に資する指標の検討を、実際の試験を通じて得たデータをもとに行った。

2. 研究方法

2.1 道路トンネルにおける健全度評価手法に関する知見の整理と定性的分析

道路トンネルの健全度を評価するためには、健全度に影響を及ぼす要因を把握するとともに、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。これまでの知見によれば、健全度に影響を及ぼす要因には支保構造に外力が作用した場合によるひび割れ等の変状や、覆工コンクリートの浮き・はく落といった材質劣化による変状、さらには漏水の発生による変状等のそれぞれが発生している程度に大別できると考えられる。本年度は、特に現場で問題となることが多い覆工コンクリートの浮き・はく落に着目し、道路トンネル維持管理便覧¹⁾(以下「便覧」)や道路トンネル定期点検要領(案)²⁾(以下「点検要領」)等の既往の基準類の分析を行い、浮き・はく落が生じる原因となる現象を抽出してその細分化を行い、浮き・はく落の形態や規模の内容の定義付けを行った。さらに、その定義を元にその形態や規模が、覆工コンクリートに発生しやすい部位を考慮し、定性的にどのような判定区分に相当するかの分析を行った。

2.2 定量的な健全度評価指標項目の検討

健全度を評価できる定量的な指標の項目の検討を行うためには、これまで実施されている点検や調査結果の判定がより定量的に行われる必要がある。本年度は、実際に変状が発生している廃道となった道路トンネルを使

用して、実際のトンネルで行われている内容と同様の手法による点検を行い、ひび割れ等といったトンネルの変状に関するデータを収集した。その際に、通常の点検より詳細な打音試験を実施するとともに、覆工コンクリート面におけるシュミットハンマー試験を追加で実施し、変状の度合いや、判定がより定量的に実施できるための数値値を検討するためのデータを収集した。

対象としたトンネルは、延長が1220mの廃道となった道路トンネルである。覆工コンクリートのひび割れや浮き・はく落といった変状が既に発生している箇所やその可能性がある箇所を対象とした合計536mにおいて、高所作業車による近接目視による点検、打音試験およびシュミットハンマー試験を行い、それらの結果とこれまでの知見や既往の定性的な判断に基づいた判定区分との比較を行った。

3. 研究結果

3.1 道路トンネルにおける健全度評価手法に関する知見の整理結果

我が国の直轄道路トンネルにおける点検や調査は、便覧と点検要領に基づいて実施されており、それらでは覆工コンクリートの浮き・はく落に関する変状現象が取り上げられている。これらの現象について、変状の現象とその区分、変状現象から考えられる浮き・はく落の形態と規模、およびその発生部位との関係を分析した結果を表-1に示す。浮き・はく落を生じさせる変状現象としては、大別してひび割れの発生に起因する場合、覆工材の劣化に起因する場合、鉄筋等の腐食に起因する場合、遊離石灰等の溶脱物に起因する場合、そして補修材の劣化に起因する場合が考えられる。特にひび割れの発生については、浮き・はく落がひび割れに沿って生じる場合やコールドジョイントに沿って生じる場合、外力によって圧ざやせん断破壊等の損傷が生じる近傍といった箇所

発生する場合等が考えられる。また、浮き・はく落の形態を整理すると、浮き・はく落を生じる材料としては、小規模のコンクリート片、中規模以上のコンクリートの塊状片(ブロック化した塊状片)、粗骨材、モルタル分、補修コンクリート片、発錆した鋼材片等が挙げられる。

また、点検や調査結果の判定にあたっては、これまでの点検・調査方法の中で説明できる指標として示されているものが一部ある。例えば、コンクリート片やブロック化した塊状片、覆工材の劣化や補修材の劣化に関しては、これまでの点検等の実績により、定性的な判定区分が示されて評価が行われているものがある。表-2に分析した判定区分例を示す。これらの区分の多くは、これまでの点検や調査における知見の蓄積によるものが多く、これらの区分を参考に、観察者の目視や打音検査等に基づいて、浮き・はく落の判定が行われていることが多いと考えられる。しかしながら、調査結果の判定等を通じて、定量的なトンネルの健全性の評価を可能とするためには、これまでの点検による知見の蓄積を踏まえ、また、点検等の実施時における現場の制約を考慮し、簡易な手法で評価の定量的な判定が可能となる指標が必要になる。

3.2 定量的な健全度評価指標項目の検討結果

前節の分析ではこれまでの知見を基に浮き・はく落の現象を抽出し、その形態や規模を設定した。これらに対して、より定量的な指標や判定区分を検討する必要がある。その場合、例えば、通常の点検等で実施されている「打音検査」は、覆工コンクリートに人力によって打撃エネルギーを与え、その時の反発する音を判断する手法である。打音検査によって得られる結果を定量化するための試み³⁾などもなされているが、適用可能なコンクリートの状態の提示等が困難であったり、結果の解釈に時間等を要する点等が課題とされている。

打音検査に類似し、コンクリートに打撃エネルギーを

表-1 変状現象から考えられる浮き・はく落の形態や規模

	浮き・はく落に関する変状現象		変状現象より考えられる浮き・はく落の形態・規模		部位			
	大区分	小区分	形態	規模の想定	アーチ	側壁	横断目地	水平打継目
a-①	ひび割れの発生	ひび割れ沿い、コールドジョイント沿い	コンクリート片	数~100cm ² 程度	○	○	○	○
a-②		圧ざ、せん断破壊の近傍	塊状片(ブロック)	100cm ² 程度以上	○	○		
a-③		ひび割れ、コールドジョイント、目地との複合			○	○	○	○
a-④		目地ずれ、目地沿い	コンクリート片	数cm ² 程度以上			○	○
b-①	覆工材の劣化	豆板、スケーリング、ポップアウト	粗骨材	数cm×数cm程度	○	○	○	○
			モルタル分	薄片	○	○	○	○
			塊状片(ブロック)	100cm ² 程度以上	○	○	○	○
c-①	鉄筋等の腐食	ひび割れ	コンクリート片・鋼材片	数cm×数cm程度以上	○	○		
d-①	溶脱物	遊離石灰等		規模は問わない	○	○	○	○
e-①	補修材の劣化	セメント系材料	補修コンクリート片	規模は問わない	○	○	○	○
e-②		鋼材系材料	鋼材片(発錆しているものも含む)	規模は問わない	○	○	○	○
e-③		FRP系材料	FRPの浮き(たわみも含む)	規模は問わない	○	○	○	○
e-④		漏水対策用材料	ゴム、樹脂	規模は問わない	○	○	○	○
e-⑤		追め部化粧モルタル	コンクリート片、塊状片	規模は問わない				○
f-①	その他							

表-2 浮き・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	
	打音検査	ハンマー打撃で落下する(叩き落として完全に除去できない)		ハンマー打撃で落下しないが、不安定化する恐れがある	ハンマー打撃で落下しない。不安定化する恐れは少ない	
コンクリート片補修モルタル	打音検査	ハンマー打撃で落下する(叩き落として完全に除去できない)		ハンマー打撃で落下しないが、不安定化する恐れがある	ハンマー打撃で落下しない。不安定化する恐れは少ない	

与えて定量的数値データが得られ、かつ普遍的で簡易に行われる試験方法としては、シュミットハンマー試験の利用が考えられる。さらに、若干定性的な側面はあるが、簡便な方法としては打音検査時の打撃による損傷の程度(以下、打撃の程度)を目安にすることが方法として考えられる。これらは簡易な手法ではあるが、結果は定量的に得られると考えられることから、これまでの点検や調査結果との関連性を分析するために、これらの手法による結果を、調査結果の判定区分3A~Sに対応させ、新たな敷居値の設定について検討を実施した。

表-3 に廃道のトンネルを利用した試験対象区間における変状の発生部位を示す。変状はアーチ、横断目地に多く、一部は水平打継目に発生していた。また、

表-3 変状の発生部位

部位	箇所数
アーチ	36
側壁	0
横断目地	30
水平打継目	3
計	69

表-4 にその区間で得られた変状の種類を示す。ひび割れに起因する浮き・はく落の発生、覆工材の劣化および補修材の劣化による浮き・はく落の発生が大半である。また、浮き・はく落が見られた部分における材料構成としては覆工コンクリートに関係するものが大半であり、一部は補修材という状況となっていた。

表-4 浮き・はく落の変状現象

	浮き・はく落に関する変状現象		箇所数
	大区分	小区分	
a-①	ひび割れの発生	ひび割れ沿い、コールドジョイント沿い	17
a-②		圧さ、せん断破壊	0
a-③		ひび割れ、コールドジョイント、目地との複合	15
a-④		目地ずれ、目地沿い	0
b-①	覆工材の劣化	豆板、スケーリング、ポップアウト	18
c-①	鉄筋等の腐食	ひび割れ	0
d-①	溶脱物	遊離石灰等	1
e-①	補修材の劣化	セメント系材料	14
e-②		鋼材系材料	1
e-③		FRP系材料	0
e-④		漏水対策用材料	2
e-⑤		締め部化粧モルタル	0
f-①	その他		1

このうち、ひび割れ等の変状が発生して、覆工コンクリートがブロック化した箇所に対して、シュミットハンマーを使用することとし、浮き・はく落等の箇所と、その箇所から十分に離れた部分との反発度の差異の検証を実施した。以降、「変状部」として実際に浮き・はく落が発生している箇所、「健全部」として、その変状部からひび割れ等の影響がないと考えられる相応に離れた箇所と定義する。なお、覆工コンクリートがブロック化している箇所以外の変状、例えばコンクリート片や骨材等が局所的に浮いている箇所等に関してはシュミットハンマーの反発度が安定しなかったため、データの収集を行うことが不可能であった。シュミットハンマー試験では、覆工コンクリート面をそのまま打撃して反発度を算定した。なお、試験をする際には打撃方向の影響が生じないようにトンネルの軸方向に極力同一の高さの部分を対象として試験を実施した。

本研究におけるシュミットハンマー試験の結果の評価は、反発度比率(=変状部反発値/健全部反発値)を定義して行った。

表-5 にこれまでの定性的な判定区分に基づく点検による判定区分とシュミットハンマー試験の結果との比較表を示す。なお、表中の点数とは、シュミットハンマーの打撃点数を示す。また、図-1 に反発度比率と定性的な判定区分との関連を示す。図中では反発度比率の最大値および最小値を示し、またグラフ中の帯部分は反発度比率の平均値 μ と標準偏差 σ とした場合の $\mu \pm \sigma$ の部分を示している。

なお、本研究では浮き・はく落の部分为主体としたコンクリートのブロック化が生じていると判断した箇所ではシュミットハンマー試験を実施しており、判定区分が B

表-5 変状部におけるシュミットハンマー試験結果

No	判定区分	シュミットハンマー試験結果				反発度比率
		反発度				
		健全部		変状部(はく落が発生)		
平均値	点数	平均値	点数			
1	A	42.5	2	33.0	2	0.78
2	2A	50.7	3	42.5	2	0.84
3	2A	50.0	3	29.3	3	0.59
4	3A	51.2	4	42.0	4	0.82
5	2A	55.7	3	50.7	3	0.91
6	2A	58.0	1	49.0	2	0.84
7	2A	55.7	3	50.7	3	0.91
8	3A	57.3	3	38.3	3	0.67
9	3A	60.5	4	37.3	4	0.62
10	3A	54.0	3	46.7	3	0.86
11	3A	53.5	2	40.3	3	0.75
12	3A	54.0	1	32.0	1	0.59
13	3A	44.5	2	31.0	2	0.70
14	3A	53.0	3	45.0	1	0.85
15	3A	61.0	3	57.3	3	0.94
16	2A	62.0	3	40.7	3	0.66
17	2A	56.3	4	39.3	4	0.70
18	A	53.7	3	44.7	3	0.83
19	A	45.7	3	43.3	3	0.95

やSでの試験は実施していない。しかし、判定区分が3A～Aである浮き・はく落の部分から、相応に離れた箇所のコンクリートは健全であると見なすことが出来ると考えられる。よって、その箇所において、反発値の最大値に対する最小値の比率が、健全な覆工コンクリートにおける反発度比率となると考え、その値を算定し、図-1中に「健全相当」の箇所の反発度比率として記載した。

図-1より、定性的な判定区分が3A, 2A, Aとなるにしたがって、反発度比率が増加する傾向がある。特に反発度比率が0.8程度を下回った場合は、判定区分がAの場合や、参考として記載した健全相当の箇所ではあまり見られない。また、本研究の範囲内では反発度比率が0.9程度を上回ると、判定区分が3Aや2Aとなる場合があまり見られない。このことから、浮き・はく落を定性的な判定区分と関連づけて定量的に評価する場合、反発度比率は有用な指標となりうるということが分かる。しかしながら、反発度比率が0.8～0.9程度ではすべての判定区分に結果が属することもあり、現時点でシュミットハンマー試験の反発度比率を単独の指標として、定量的に判定区分の決定や健全度の評価を行うには検討の余地が残されている。また、本試験結果によれば、2Aと3Aのそれぞれの敷居値を設定できるような結果は得られていないことも分かる。

また、これまでの打音検査による定性的な判定は、表-2に記載した区分に基づいて実施されていることが多く、打音時の反発音に着目して判定区分を決定しているわけではない。そこで、定性的な判定区分に対する反発度比率と打音時の音の違いの関連性について検討を実施した。図-2にこれらの関係毎に検討した結果を示す。打音時の音の違いは、文献2)に基づいて、清音、濁音(鈍い音)、濁音(薄さを感じる音)を聞き分けることにより判断した。本研究の結果からだけでは標本数が少ないため、さらなる検討が必要であると考えられるが、清音の場合はAまたは2Aの判定、濁音(鈍い音)の場合はAまたは2Aの判定、濁音(薄さを感じる音)の場合は2Aまたは3Aの判定と考えられる。ただし、打音時の音だけからこれら2つの判定区分を分類することは困難であった。また、清音の場合では、3Aとはならない傾向があるが、全般的に標本数が少ないことから、音に着目して判定区分を分類するにはさらなる検討が必要である。

次に、打音試験の打撃の程度と打音時の音の違い、それと定性的な判定区分との関連性について検証した。打撃の程度は軽打と強打を基本とし、それによって覆工コンクリートが落下するかどうかを観察した。また、本検

討では、打撃の程度と打音時の音の違いを検討する観点も含まれていることから、判定区分がBの場合の結果を含めている。図-3にこれらの比較を定性的な判定区分との関係毎に行った結果を示す。これより、1回の軽打ではく落片が落下する場合は、2Aまたは3Aとなる評価が多く、強打の連打ではく落片が落下しない場合については、AやBとなる傾向がある。また、清音であれば1回の軽打では覆工コンクリートは落下しない傾向がある。以上より、打撃の程度に関しても簡易に判断できる定量的な指標となりうることを示唆していると考えられる。しか

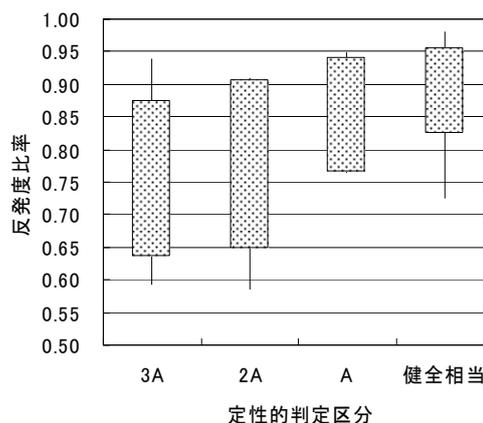


図-1 反発度比率と定性的判定区分の関係

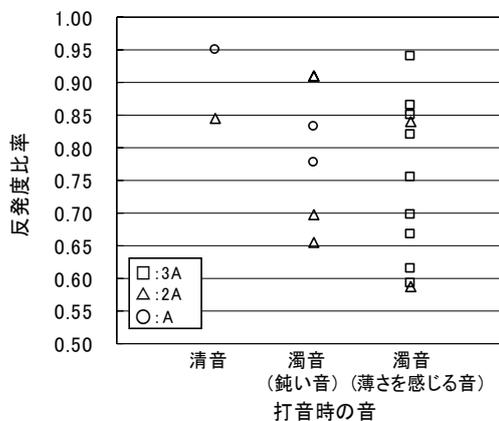


図-2 反発度比率と打音時の音の関係

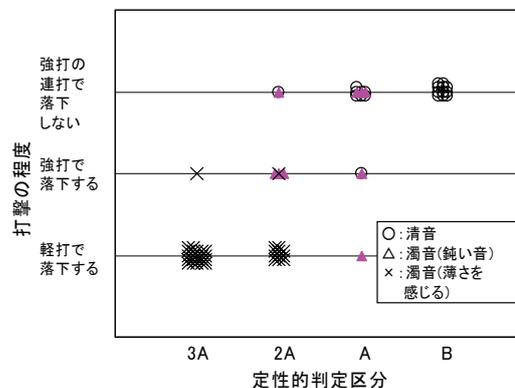


図-3 打撃の程度と打音時の音の関係

し、強打で覆工コンクリートが落下する場合はA~3Aに判定区分が属する傾向にあり、かつ打音時の音の違いについても明瞭な傾向を把握するためには標本数が不足している。加えて強打と軽打の差異も経験に基づくものであることから、現時点ではシュミットハンマー試験による結果と同様に、これまでの試験との組合せで用いるべきであると考えられるとともに、データの蓄積等を踏まえたさらなる検討が必要である。

これまでに得られた結果を整理し、定性的な判定区分がより定量的になるような評価指標を加えた結果を表-6に示す。現時点では標本数が少なく、本表に基づいた指標のみを用いて判定を行うのではなく、表-2と併用する必要があるが、現場においてトンネルに変状が発生した場合の監視・検討・対策等といった実際の対応が現在よりも定量的に実施できる可能性があることが分かる。

4. まとめ

本年度はこれまでの知見に基づき、特に現場で問題となることが多い覆工コンクリートの浮き・はく落に着目し、便覧や点検要領等の既往の基準類の分析を行い、浮き・はく落を生じさせる現象を抽出して細分化を行い、その形態や規模を分類し、さらに実際の現場での点検や試験を通じて、細分化された現象の定性的な判定区分と定量的な指標との関連性を検討した。その結果、シュミットハンマー試験の結果や打音試験の方法とこれまでの定性的な指標との間の相関があることが分かり、これまでの定性的な指標の補完に有用となる可能性があることが分かった。今後は浮き・はく落に関して、ひび割れの

表-6 浮き・はく落の定量的な判定区分例

形態	判定項目	判定区分				
		3A	2A	A	B	S
塊状片 (ブロック)	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		
	打音検査	ハンマー打撃で落下する(叩き落として完全に除去できない)	ハンマー打撃で落下しないが、不安定化する恐れがある		ハンマー打撃で落下しない。不安定化する恐れは少ない	
濁音(薄さを感じる)						
濁音(鈍い音)						
強打・軽打で落下する(落下する恐れがある)				強打の連打で落下しない		

状態との関係を検討するとともに、浮き・はく落の状態からある程度の発生時期を想定する必要があると考えられることから、浮き・はく落に関する時間的な要素の検討と、各判定区分の具体的な事例をもとにした検証、各判定区分と健全性の関連性や、外力性のひび割れの場合に対する残存耐力との関連性を検討する予定である。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧，平成5年
- 2) 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
- 3) 馬場弘二，下田哲史，佐野信夫，山田隆昭：トンネル覆工の打音点検仕様検討，トンネル工学報告集第16巻，土木学会，pp.263-268，2006.11

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 and that the judgment of inspection and investigation should be achieved by quantitative parameters. The phenomena of scaling and spalling of lining concrete were focused on and the detail of their cause was examined. The results showed that certain relations between the result of qualitative judgment, reaction value by Schmidt hammer test and the tone and hammering degree were acquired from hammer test.

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