

トンネル覆工の打音点検仕様検討

Specification Examination of Hammering Inspection in Tunnel Lining Concrete

馬場弘二¹・下田哲史²・佐野信夫³・山田隆昭⁴

Koji Baba, Akifumi Shimoda, Nobuo Sano and Takaaki Yamada

¹正会員 工博 中日本高速道路(株) 中央研究所 トンネル研究室 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1))

E-mail:k.baba.aa@c-nexco.co.jp

²正会員 中日本高速道路(株) 中央研究所 トンネル研究室 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1))

³正会員 工修 中日本高速道路(株) 中央研究所 トンネル研究室 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1))

⁴正会員 中日本高速道路(株) 中央研究所 トンネル研究室 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1))

When executes Tunnel evaluation by human power inspection, differences between individuals of inspection member produce non-uniform result. Therefore the examination to begin to find appropriate hammering method in Tunnel inspection had to execute it. As a result, it wasn't able to get the index of concrete hammering method. Thus experience of an expert of tunnel inspection was useful for gathering the specification proposal of hammering inspection.

Key Words : tunnel lining concrete, hammering inspection, specification

1. はじめに

無筋コンクリート構造として一般的に施工されるトンネル覆工コンクリート（以下、覆工コンクリート）においては、種々の要因によって生じたひび割れが、その形状や程度によっては剥落事故をもたらす可能性があり、ひび割れ等に対する定期的な点検業務の重要性がますます高くなってきている。

現在、覆工コンクリートにおける変状点検の手法は、人力に依存しない打音診断の自動化¹⁾や弾性波の応答による評価法²⁾、あるいはレーザー光線や3CCDデジタルビデオカメラによるひび割れ調査技術^{3),4)}など、様々な手法が提案・実用化されている。しかしながら、多くの人手と労力を要する近接目視・打音点検が、決して採用されなくなるというのではなく、打継目やひび割れに沿ったコンクリート片の角欠け・剥落の危険性など不確実要素の存在に関しては、現状の技術レベルでは最終的に人力での確認が必要となるものである。

今後も重要な点検手法のひとつとなる「打音点検」であるが、これまでも指摘されているように人的誤差も評価結果に含まれることから、トンネル全体を複数人によって均一の精度で評価することが難しいという短所を有している。その要因のひとつとして、

各点検員の感覚により打診範囲、間隔、打撃方法（強さ）が決定され、一部には打撃の間隔例を示したマニュアル⁵⁾はあるものの、同一評価が可能な統一仕様が未整備な現状である。したがって、統一した具体的な仕様の構築のための検討を実施した。

2. 従来の打音点検

人力による打音点検は、覆工コンクリートの浮き・剥離または背面空洞を把握する最も簡便な手法として以前から広く活用されている。これは、ハンマーで覆工コンクリートを打撃し、ハンマーの跳ね返り方や打撃音により異常の有無を調べる方法で、経験的、感覚的に評価する手段である。一般的には、健全部で打撃音が清音を、劣化または背面に空洞がある場合などは濁音を発することで判断される。打音に使用する点検ハンマーは重量230g（約1/2ポンド）程度のものを使用⁶⁾するのが一般的であり、重いハンマーほど深い位置の空洞を把握することが可能ではあるが、点検においては深い位置の空洞の把握まで求めるものではなく、今後調査が必要かどうかを判断できればよい。打音にあたっては、コンクリート表面にマイクロクラックの発生などの損傷を与

えることの無いよう留意することが必要である。なお、打音点検において浮き・剥離箇所を発見した場合は、ハンマー等で応急措置として撤去⁵⁾し、利用者被害を防ぐこととなる。

表-1 検討内容

検討項目	要求性能	収録データ				
		打撃圧	打撃力 (加振力)	加速度 & 波形	打撃音	コンクリートの強度
1 打点当りの捕捉範囲の明確化	測定間隔の設定	—	○	○	—	—
コンクリート表面状態の違いによる検査精度の確認	適用可能なコンクリート状態の提示	○	○	○	○	○

3. 小型試験体を用いた人力打音の定量評価

(1) 試験目的

打音点検における測定間隔の設定および適用可能な覆工コンクリート状態の提示を行うことを目的として、表-1に示す検討を実施した。

(2) 試験体概要

試験体の詳細を図-1に示す。試験体に用いたコンクリートの配合は、設計強度 18N/mm^2 、スランプ $15 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ 、水セメント比 62.5% を基本とし、水セメント比を $\pm 5\%$ 変化させて強度の異なる3つの試験体を作成した。なお、今回の試験では施工性を考慮する必要がなかったため、水セメント比のみを変更し、混和剤は水セメント比 62.5% の時に調整し、3配合一律とした。供試体表面は右半面をディスクサンダーや、ワイヤーブラシを用いて表面を粗し、実際のトンネルで見られる骨材が露出している程度の粗面を表現した。また、コンクリート打設時に、一軸圧縮試験用供試体（直径 100mm 、高さ 200mm ）を異なる水セメント比毎に3種類 $\times 9$ 本（ $\sigma_7, \sigma_{28}, \sigma_{91}$ 用各3本）、計27本作成した。

(3) 計測機器

本試験で用いた計測機器を表-2に示す。

(4) 試験方法

試験の流れを図-2に示す。[1] 強度測定は、試験体打設時に作成した供試体を用いて一軸圧縮試験を実施した。[2] 打撃圧測定は、圧力測定フィルムを用いて測定した。圧力測定フィルムは、顕色剤と発色剤により構成されており、発色剤層のマイクロカプセルが圧力によっては破壊され、その中の発色剤が顕色剤に吸着し、化学反応で赤く発色する仕組みである。打撃方法は、ハンマーの振り幅（ハンマーと打撃面との距離）を10、30、50cmの3種類設けた。

[3] 打撃試験は、インパルスハンマを用いて打撃し、打撃力（加振力）、加速度、打撃音を計測した。図-3

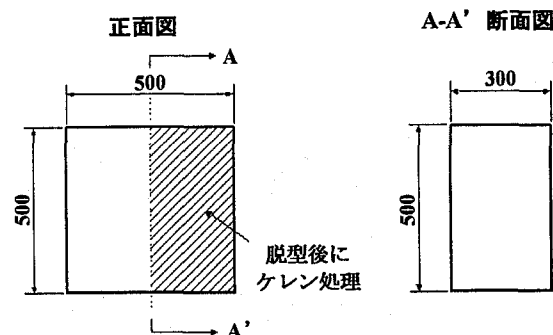


図-1 小型試験体の詳細

表-2 使用機械一覧

機器名	概要
基準ハンマー	重さ 230g, 約 1/2 ポンド程度の片手ハンマー
圧力測定フィルム	- 精度$\pm 10\%$以下（温度：23 度、湿度 65%） - 使用推奨温度：20℃~35℃ - 使用推奨湿度：35%~80% - 測定範囲：50~130MPa - 加圧条件：5 秒（瞬間圧）
インパルスハンマ	- 周波数範囲：5 kHz - 振幅レンジ：22 kN - 感度：0.22 mV/N - ハンマ重量：320g
波形記録装置	- 入力感度：10 mHz~100 kHz - 周波数レンジ：1m Vr~31.6 Vr - ch：2ch - 入力：5mV~20mV - ch：8ch
加速度計	- 周波数範囲：1~25000Hz、 - 測定可能レンジ：0.1~1000G
騒音計（打撃音）	- 精密騒音計<JIS C 1505> - デュアル計測（A 特性、C 特性同時計測） - 計量範囲：A 特性 28~130 db - C 特性 33~130 db - 誤差：0.7 db 以下 - 普通騒音計<JIS C 1502> - 計量範囲：A 特性 28~130 db - C 特性 33~130 db - 誤差：1.0 db 以下
シュミットハンマー	- 衝撃エネルギー：0.225mkg - 強度測定範囲：150~600kg/cm²

に示すように、打撃位置は加速度計から10 cmの距離に複数点設定した。打撃方法は、振り幅10cmを1回、30cmを3回測定した。打撃音の計測はJIS Z 8731に規定されている周波数特性（A特性、C特性）と動特性（Fast特性）を計測した。図-4に打撃位置と加速度計および騒音計の計測位置を示す。

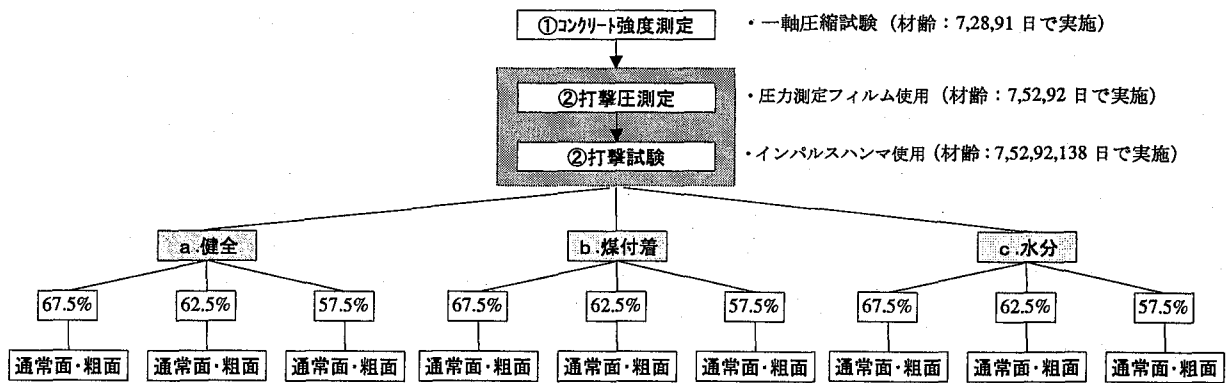


図-2 モデル試験の流れ

なお、[2] 打撃圧測定、[3] 打撃試験は、図-2に示すように、水セメント比を変え強度の異なる3種類の試験体について、通常面と粗面のそれぞれを a. 健全、b. 煤付着、c. 水分の3種類にコンクリート表面の状態を変化させて試験を実施している。ここで a. 健全とは、b. 煤付着、c. 水分の状態にする前の状態をいう。b. 煤付着とは、コンクリート表面に JIS Z 8901 試験用粉体で規定される汚染物質を用い、旧日本道路公団規格の試験方法 JHS732「トンネル内装材料の表面反射率洗浄回復確認試験方法」に示されている煤の配合(表-3)による試験用煤を付着(500g/m²)させたものである。c. 水分とは、b. 煤付着状態の試験終了後、ナイロンブラシを用いて煤を洗い流し、コンクリート表面が十分湿ったことを確認した後、一度水分を取り除き、打撃面に水を霧吹きにて散布(26.4g/m²)したものであり、常にコンクリート表面に水分が付いた状態をいう。

(5) 試験結果

a) コンクリート強度

一軸圧縮試験の結果を図-5に示す。これより、水セメント比の低下に応じて強度が増加していることがわかる。強度の相関は水セメント比と材齢について、一次相関が認められるため、本試験では水セメント比の違いを強度の違いととらえて以降の検討を行った。

b) 打撃圧測定

表-4に圧力測定フィルムから得られた打撃圧の結果を示す。試験結果は、材齢7, 52, 92日で実施した各1回の試験結果を平均して値を示している。ふり幅が大きくなると、打撃圧も大きくなることが確認できた。

c) 打撃試験

① 加振力と受振加速度の関係

得られたデータのうち、加振力と受振加速度を用いて、表面状態の違いが結果に及ぼす影響について検討した。図-6に小型試験より得られた加振力と受

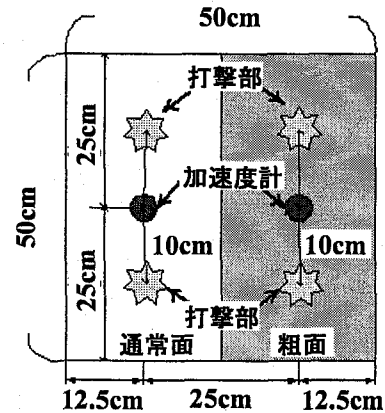


図-3 加速度計および打撃部の配置

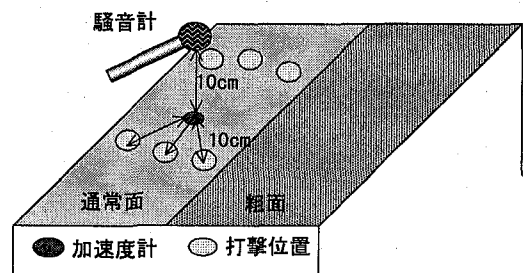


図-4 加速度計、騒音計、打撃位置の関係

表-3 煤の配合

名称	重量比率 (%)
けい砂 (3種)	32.0
関東ローム (11種)	28.0
カーボンブラック (12種)	40.0

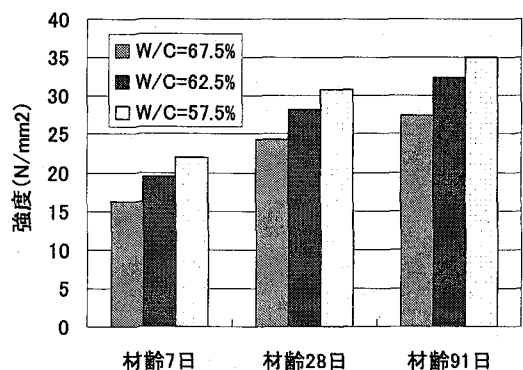


図-5 コンクリート強度試験結果

表-4 ふり幅による打撃圧力測定結果

ふり幅	打撃圧(N/mm ²)
10 cm	114
30 cm	144
50 cm	158

振加速度の関係の一例を、図-7に7日、138日での加振力と受振加速度の関係から直線近似式の傾き（加速度／加振力）を求め、表面状況、水セメント比毎に整理したグラフを示す。[1] 材齢7日の試験より得られた傾きと、材齢138日の試験より得られた傾きの値について比較すると、材齢138日の傾きの方が大きいことがわかる。傾きが大きいということは、打撃力（加振力）が一定の場合に得られる加速度が大きくなる、つまり打撃による影響範囲が広いことに繋がる。[2] 材齢7日の試験では、表面の状況と傾きについて、表面状況ごとの傾きの大きさや、水セメント比の違い、通常面と粗面の違いなど、いずれの場合においても顕著な相関はみられない。

[3] 材齢138日では、他の表面状況と比較して、水分もしくは通常面が大きくなる傾向がある。[4] 煤の影響により、加速度が小さくなることが予想されたが、明確な影響は確認できなかった。また、[5] 通常面と粗面を比較すると、概ね粗面の傾きが小さくなっていることがわかる。これは、コンクリート表面を荒らした凹凸部分がクッションとなり、打撃のエネルギーが吸収されていると推測される。[6] 水セメント比（強度）の違いについて着目すると、材齢138日の結果では、水セメント比の小さい試験体（強度の高い試験体）のほうが、傾きが大きくなる傾向がみられた。

② 加振力と音圧の関係

加振力と音圧の関係の一例を、図-8に材齢138日の水セメント比62.5%の結果について表面状況ごとに示す。ここで、音圧はA特性を用いて検討を行った。A特性音圧は人間の周波数特性を模擬したものであるため、打音点検手法の検討に対して適当であると考えた。図-9に138日の加振力と音圧の関係から直線近似式の傾き（音圧／加振力）を求め、表面状況、水セメント比毎に整理したグラフを示す。これより、

[1] 煤の付着や、粗面では打撃音が小さくなることが予想されたが、顕著な影響は確認できない。また、水セメント比と傾きとの間にも顕著な相関性は認められない。[2] コンクリート強度が大きくなると、生じる打撃音が大きくなることが予想されたが、強度と音圧との間に相関性は見られなかった。ただし、強度が変化することで、生じる音圧が異なることが確認された。

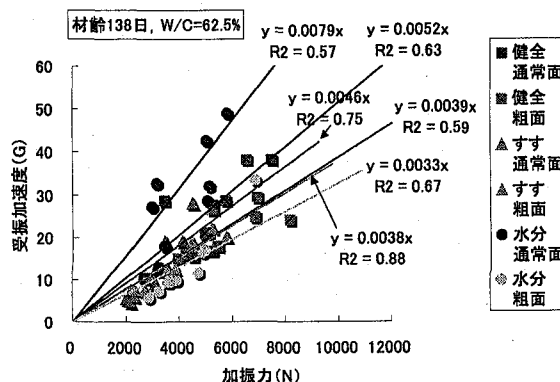


図-6 加振力と受信加速度の一例

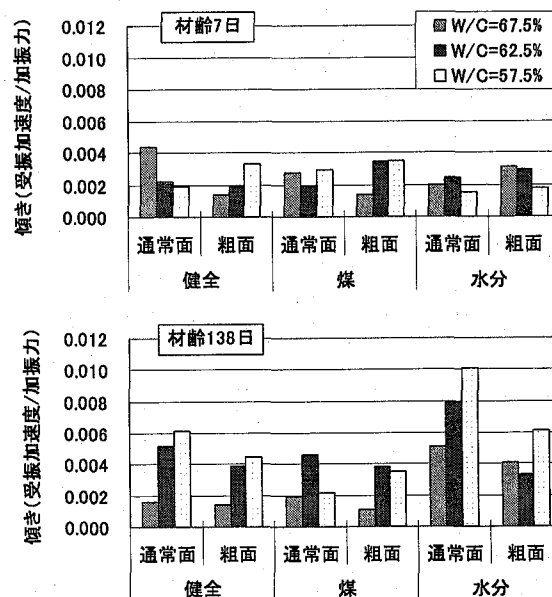


図-7 表面状況と傾き(受振加速度／加振力)

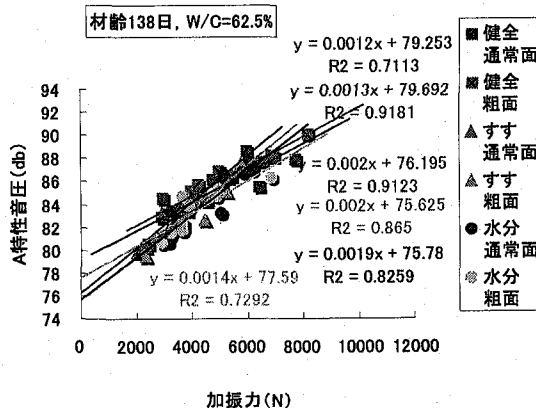


図-8 加振力と音圧 (A 特性) の一例

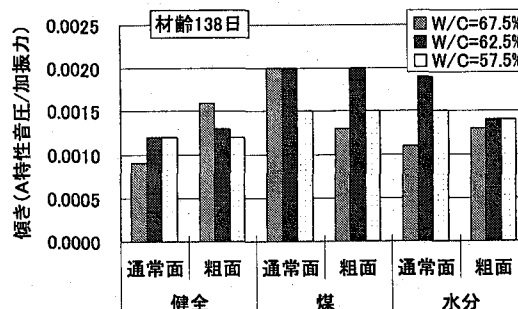


図-9 表面状況と傾き(A 特性音圧／加振力)

③ 打撃試験のまとめ

今回の試験結果からは、実際のトンネルにおいて本試験で対象とした表面状況を超えた煤の付着や、水分の付着があった場合には、打音点検に影響を及ぼす可能性は否定できないものの、コンクリート強度や表面状況の変化により、打音点検に与える明確な影響は得られなかった。したがって、表-1で示した「測定間隔の設定」「適用可能なコンクリート状態の提示」など、トンネル点検時の適切な打撃について指標を提案することはできなかった。

4. 点検員の経験的判断手法の具現化

(1) 検討方針および方法

前章において、人力打音の定量評価を試みたが、具体的な打音点検の指標を得ることができなかったことから、トンネルの点検を専門的に実施している点検員の経験を基に、指標作成を試みた。検討にあたっては、現状の打音点検を把握するとともに、仕様策定のための足掛かりとするため、複数の点検員との意見交換会を実施した。対象とした点検員は、実際に高速道路トンネルの点検に携わっている点検員（8社16名）である。なお、意見交換会に先立ちアンケートを実施し、討議したい内容を事前に参加者に伝え、事前回答を得た。アンケート内容は、①点検員の経験年数および資格、②使用器具、③打音点検の方法、④点検員の教育などである。アンケートの設問の一部を表-5に示す。

(2) 仕様（案）作成

意見交換を経て、様々な意見が収集された。以下

表-5 アンケートの設問

内 容	
使用器具	2-1 点検時に持参するものを記述願います。 【主な点検用具、点検装備、記録用具、その他の機材】
	2-2 通常使用するハンマーの種類と重さを記入願います。
	2-3 点検時に複数のハンマーを使いわけていますか？どのようなとき【例えばたたき落とし時など】に、どのようなハンマーを使っていますか。
	2-4 使用する高所作業車のタイプ【バケット式、ステージ式など】と使用台数を教えてください。
	2-5 照明設備はどのようなものを使用していますか？ 【懐中電灯、投光器、照明車など】
打音点検の方法	3-1 どのようなたたき方をしていますか？一般部と打継目部やひび割れ周辺部、その他変状箇所でのたたき方を変えていますか？対象、打診範囲、打診間隔、使用するハンマー、打撃方法を教えてください。
	3-2 判定の基準はどのように行っていますか？ 【音のみ、音とひび割れや打継目の状況など】
	3-3 3-2 判定の基準を含めた点検全般について、参考としている図書を記述して下さい。【社内基準等も含めて】

に意見交換の一例を記述する。

a)使用器具・・・点検ハンマー重量は、軽すぎると十分な音や感触が得られないので、下限値を設定する必要がある。

b)打音点検の方法・・・[1] 打診間隔を規定しても、実際には狙って打撃するのが難しいので、1m²に叩く回数というような表記が良い。また、[2] 天端付近の打撃において振上げ幅を30cmにすると、持続できないので、手首のスナップ分（20cm程度）が望ましい。[3] 打継目部・ひび割れ部・その他損傷部については、状態に応じた叩きかたをする必要がある。[4] 点検対象には、補修箇所、漏水処理箇所、付属物なども加えるべきである。[5] 判定の目安では、ひび割れの有無についての区分の追加をすることが望ましい。

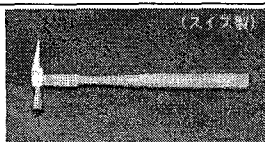
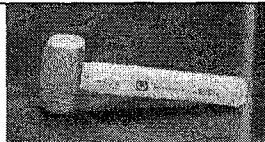
以上のように、点検実務者からの様々な意見を基に、表-6に示す打音点検の仕様（案）を作成した。

表-6 打音点検の仕様（案）

① 使用するハンマー

トンネルの打音点検に用いるハンマーは、表-6-1中に示すような頭部重量200～250gの点検ハンマーを用いる。参考までに、点検時におけるたたき落としに用いるハンマーの一例を同図中に示す。

表-6-1 ハンマーの種類と特徴

項目\種類	点検ハンマー ^{注1)}	石割ハンマー
概要写真		
使用するハンマーの頭部重量	200～250g 程度	0.5～1.0kg 程度
特徴	軽量で打音点検の作業性が良好。コンクリート表面近くの異常しか検知できない。	重量が重く打音点検の作業性は著しく劣る。打撃エネルギーが大きいため、浮き部分のたたき落としに効果がある。
適用	目視で変状が認められない場合で、広範囲の打音異常の有無を短時間に確認する場合	応急措置でコンクリート浮き部分の除去（たたき落とし）を行う場合

注 1) 補修補強材を打診する場合、繊維シート工などの非金属・非コンクリート材料では金属ハンマーの打診によって破損する場合があるため、このような材料に対しては別途プラスチックハンマーを用いる必要がある。

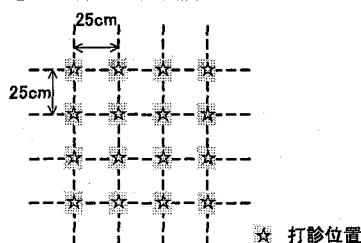
② 打診範囲と打診間隔

打診範囲と打診間隔は表-6-2に示す値を標準とする。

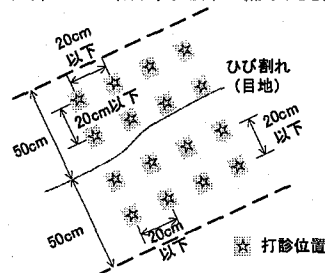
表-6-2 打診範囲と打診間隔の標準

対象		打診範囲	打診間隔	打撃方法	参照図
一般部	覆工などの一般部を広範囲に打音し、異常の有無を把握する場合	打継目部（打継目等の両側で幅 50cm の範囲）を除く対象全面積	25cm 以下 1 m ² 当たり 16 点	ハンマーを 20cm 程度の高さ（手首のスナップ分）から振り下ろし打診	①
打継目部 または ひび割れ 周辺部	打継目部または幅 1mm 程度以上のひび割れ等変状があり、その変状の程度や近傍の異常の有無を確認する場合	変状箇所周囲 50cm 程度の範囲（外側健全部（清音）を確認できるまで）	20cm 以下		②
その他 変状箇所	スケールなどで覆工コンクリート等が面的に劣化している場合、および、豆板、遊離石灰等が発生している場合	変状範囲および、その周囲 20cm 程度の範囲（外側健全部（清音）を確認できるまで）	20cm 以下 骨材が露出する場合は個々の骨材も打診	必ず目視で確認し、変状を進行させることのないよう適度な力で打診する。	③
補修・補強 箇所	補修モルタル、鋼板添接、繊維補強工などの補修・補強が行われている箇所	対象全面積	25cm 以下 1 m ² 当たり 16 点	必ず目視で材料の違いなどを考慮しながら適度な力で打診する。	①
漏水処理 箇所	Vカット止水工などが施工されている箇所	対象全面積	20cm 以下	軽く打診し、はく落しがないか確認する。	②
付属物	内装板や、樋工などの付属物を固定する金具類	全てに対し、固定と緩みがないかを確認する。		ハンマーか手で確認する。	—

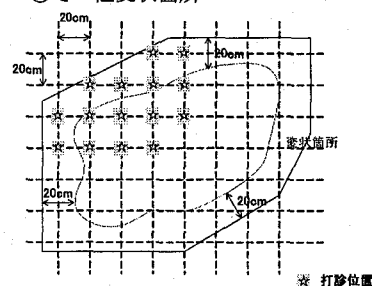
①一般部・補修箇所



②打継目部・ひび割れ周辺部・漏水処理箇所



③その他変状箇所



③ 打音の判別

打音による判定の目安を表-6-3に示す。打音による判定を行う際は、打撃時の振動やハンマーに伝わる感覚も考慮する。

表-6-3 打音による判定の目安

打音区分	状態	ひび割れ	判定
清音	キンキン、コンコンといった清音を発し、反発感がある。	あり／なし	健全である。
濁音	ドンドン、ドスドスなど鈍い音がする。	あり	劣化、表面近くに空洞がある。調査が必要。
		なし	劣化、表面近くに空洞がある。監視が必要。
	ポコポコ、ペコペコなど薄さを感じる音がする。	あり	浮き、はく離している。応急対策が必要。
		なし	浮きがあるが、すぐにはく落する状態ではない。監視が必要。

5. おわりに

今回、小型試験体を用いた人力打音の定量評価においては、トンネル点検時の適切な打撃について指標を提案することはできなかったが、点検実務者の声を整理することで打音点検の仕様（案）を提案した。今後は、この仕様によりどの程度の不具合まで検出できているのかを、模擬供試体を用いるなどして確認していく必要がある。なお、打音ロボットの開発などにあたっては、人力によって知り得る情報のレベルを認知したうえで、機械化の要求性能を決めることが重要である。

参考文献

1) 須田 健, 川上 純: アーム式ロボット利用によるト

ンネル打音診断の自動化, 建設機械, pp.48-52, 2003.12

2) 松井精一, 山田裕一, 長田文博: 低周波弾性波を用いたトンネル覆工コンクリート内部の劣化診断手法, 土木学会論文集, No.746/V-61, pp.13-24, 2003.11.

3) 奥野 昇, 嶋津幸一, 伊藤哲男, 馬場弘二, 吉武 勇, 中川浩二: レーザー光線による覆工コンクリートのひび割れ調査法の高性能化, 土木学会論文集, No.788/V-67, pp.195-200, 2005.5.

4) 鶴窪廣洋, 肥後雅一, 白石匡広: ビデオカメラによるトンネル覆工コンクリートのひび割れ検出システム, EXTEC, No.62, pp.44-47, 2002.9.

5) 鉄道総合技術研究所: トンネル保守マニュアル (案), 2000.5.

6) 国土交通省道路局国道課: 道路トンネル定期点検説明会テキスト, 2002.8.