

# トンネル覆工コンクリートのひび割れ変状とその点検評価

伊藤幸恒<sup>1</sup>・伊藤哲男<sup>2</sup>・原 昌信<sup>3</sup>・吉武 勇<sup>4</sup>・中川浩二<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 日本道路公団 九州支社八代工事事務所(〒866-0826 熊本県八代市本野町池端 662-1)

<sup>2</sup>正会員 日本道路公団 試験研究所 トンネル研究室(〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1)

<sup>3</sup>正会員 日本道路公団 中国支社 保全部(〒730-0017 広島県広島市中区鉄砲町 7-18)

<sup>4</sup>正会員 博(工) 山口大学助手 工学部社会建設工学科(〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

<sup>5</sup>フェロー会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科(〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

本研究は、高速道路トンネル覆工コンクリートの変状に対する点検評価システムの構築を目的としたものである。点検評価にあたり、従来から行われている定性的な目視点検によらず、覆工1スパンごとにレーザー光による撮影画像を用いたVTR画像解析を実施し、ひび割れ(変状)の客観的評価を行った。さらに、変状の著しいものには詳細な解析を行い、以後の補修・補強計画に対する判定基準を設定した。このような点検手法をとりまとめ、点検評価システムの体系化を試みた。また老朽化等によって変状をきたしたトンネルに対して同システムを適用し、中国地方における変状トンネルの現状をとりまとめ、評価を行った。

**Key Words** : crack deformation, concrete lining, crack evaluation, image analysis, crack density

## 1. はじめに

トンネル2次覆工コンクリート(以下、単に覆工コンクリートと略す)の多くは、無筋構造が多いことから、生じたひび割れが3次元的に繋がった場合、崩落する可能性が生じる。覆工コンクリートのひび割れ・剥落は、トンネル構造を直ちに崩壊させるものではないものの、コンクリート片の剥落はその大小に依らず、高速で通行する車輛にとって事故等の危険をもたらす可能性を有する。この第三者被害を防止することは、道路管理者の責務であり、そのための覆工コンクリートの変状調査・点検作業は極めて重要な役割を担うものと思われる。

これまで覆工コンクリートの変状調査に関する研究およびそれらの診断システム手法の提案等は個々には複数例みられる<sup>1),2)</sup>。しかしながら、各々の調査手法の特徴を考慮して、組み合わせ体系化を図った点検評価システムについてはあまり報告がなされておらず、検討の余地があるものと思われる。さらに、覆工コンクリートに生じるひび割れのうち、有害・無害を基準化し点検評価システムを構築することは、経済性ならびに作業効率性の観点から有効な手段になるものと考えられる。

本研究は、変状をきたした道路トンネルの覆工コンクリートに対して、経済的かつ効率的に調査点検

を行うシステムの確立を目指したものである。研究を進めるにあたり、日本道路公団中国支社管内における覆工コンクリートのひび割れ変状トンネルの現状をとりまとめ、これらのトンネルに対する点検評価システムの構築およびその適正について検討を試みた。本報は、変状をきたしたトンネルの点検評価システムの考え方を示すとともに、それに基づくこれらのトンネルの現状について報告するものである。

## 2. 覆工コンクリートの点検評価方法

### (1) 従来の点検評価方法について

従来のトンネル定期詳細点検は、日常の点検で確認できないようなトンネル細部にわたって行うものであり、点検計画に基づいて目視あるいは必要な点検機器を用いて実施されていた<sup>3)</sup>。しかしながら、この点検手法に用いられる目視点検は定性的判断であるとともに、その評価結果も点検者の個人差による相違が生じやすく、客観的評価が困難であった。さらにトンネル変状の程度によらず、同一の点検頻度・点検手法が用いられるとともに、中国支社ではトンネル延長約500mごとのランク付けと比較的大まかな評価が行われていたことから、より詳細且つ効率的な調査観測手法の確立が望まれていた。

(2) 提案する点検評価システム

a) 点検評価システムフローの概略

日本道路公団では、定性的な人力作業によらず、効率的且つ高精度なひび割れ検出を行う目的から、覆工コンクリートをアルゴンレーザー光線で走査し、その反射波の強弱に基づく調査方法(レーザー法)を推奨している<sup>4)</sup>。また覆工コンクリートの変状に対するより詳細且つ的確な評価を行うため、ひび割れ密度に基づく補修ランクの判定基準を組み込んだ設計要領<sup>5)</sup>を定めている。同設計要領では、レーザー法が可能となる幅0.2mm程度以上のひび割れに対して、ひび割れ密度を求める対象を覆工1スパン(一般に9~12m)ごとに定めており、各々のスパンの変状に応じた評価が行われる。

本研究で提案する点検評価システムは、上記の調査方法および設計要領を基に構築を図ったものである。なおここで用いるレーザー法では、5段階にひび割れ幅が区分され求まることから、覆工1スパン内における各幅のひび割れ延長の総和を覆工表面積で除することにより、ひび割れ密度が求まる。ここで、式(1)にひび割れ密度の定義を示す。現状では、式(1)に示されるひび割れ密度は、それぞれのひび割れ幅に対して一律の重みづけ( $a_1=a_2=a_3=a_4=a_5=1$ )で評価されているが、ひび割れの幅および深さ、形状などを考慮したひび割れ密度による評価法の確立は今後の検討課題となろう。

$$CD = \frac{a_1L1 + a_2L2 + a_3L3 + a_4L4 + a_5L5}{A} \quad (1)$$

CD : ひび割れ密度 (cm/m<sup>2</sup>)

L1 : 幅0.2~0.5mmのひび割れ総延長 (cm)

L2 : 幅0.6~1.0mmのひび割れ総延長 (cm)

L3 : 幅1.1~2.0mmのひび割れ総延長 (cm)

L4 : 幅2.1~3.0mmのひび割れ総延長 (cm)

L5 : 幅3.1mm以上のひび割れ総延長 (cm)

A : 覆工1スパンの表面積 (m<sup>2</sup>)

ここで、本研究の提案するところの点検項目・頻度を表-1に示すとともに、点検評価システムのフローを図-1に示す。同点検評価システムの覆工レーザー計測では、調査範囲が複数の管理事務所間の広範囲に及ぶとともに、計測そのものに特殊な技術を要することから支社レベル担当とし、その他の日常あるいは臨時的点検は管理事務所レベルが補うものとした。この点検評価システムを用いることで、覆工コンクリートの変状に関する点検作業のスリム化が図れ、ひいては経済的且つ効率的な点検が可能にな

表-1 提案システムにおける点検項目および頻度

覆工に対する点検項目	定期詳細点検	
	支社	管理事務所
ひび割れ, 角落ち 漏水, 遊離石灰	1回/4年	B1・B2と判定されたスパン 1回/2年
浮き, 剝離, 漏水 抜け落ち 目地の異常		清掃点検時 1回/1年

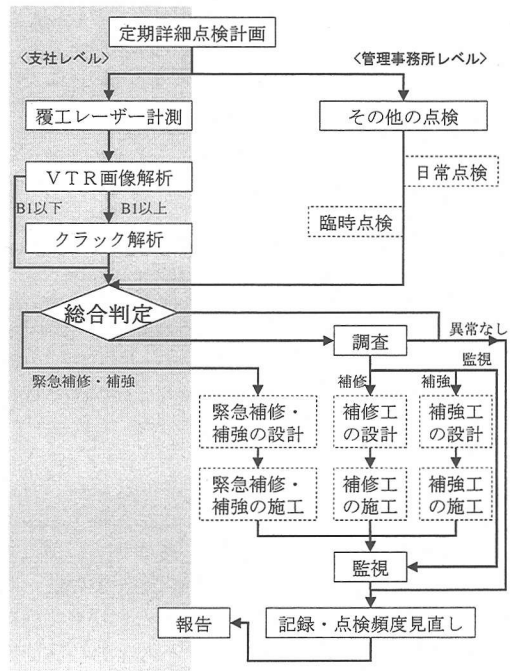








図-1 点検評価システムのフロー

るものと思われる。なお本報はこの点検評価システムのうち、変状の評価を行う覆工レーザー計測~VTR画像解析~クラック(詳細)解析~総合判定といった一連の流れ(点検評価システム)について報告するものである。以下のb)~d)にかけて点検評価システムの各パートの詳細について説明する。

b) VTR画像による簡易評価

本研究の提案するシステムでは、ひび割れ検出の簡易評価という位置づけで、VTR画像解析を実施する。このVTR画像解析は、覆工コンクリートのレーザー計測画像を周長(横断)方向に対して4分割に記録・編集されたVTR画像をもとに、覆工コンクリートの変状状況を調べるものであり、同結果をもとに作製された変状リストから、より詳細なクラック解析の必要性の有無について判定が行われる。従来まで主に目視点検により得ていた情報について、

表-2 VTR画像解析に用いるひび割れ判定区分

区分	特徴	状態
A	早急な対策を要する著しいひび割れ	
B1	連続した2方向ひび割れ	
B2	不連続な2方向ひび割れ	
B3	部分的に2方向ひび割れ	
B4	部分的にひび割れ	
S	健全あるいは軽微なひび割れ	

※ 各区分は従来の判定基準に準ずる。

※ 漏水・遊離石灰がみられない場合は1ランク下げる。

表-3 クラック解析結果の危険度判定区分

ランク	I	II	III
ひび割れ密度	50cm/m <sup>2</sup> 以上	20~50cm/m <sup>2</sup>	20cm/m <sup>2</sup> 以下

VTR画像解析を実施することでトンネル内のひび割れ発生状況を簡易に調べることができ、変状の著しいスパンに対して重点的にクラック解析を行うなど、経済性・効率性に優れるものと考えられる。

表-2にひび割れ判定区分方法およびその状態の詳細を示す。なお、クラック解析を実施するスパンは、連続した2方向ひび割れが顕著にみられる判定区分B1以上とし、該当するスパンを含むトンネルは管理事務所による監視に移行する。また、判定区分B2とされたスパンに対しては、クラック解析は基本的に実施しないが、B1同様に管理事務所による監視とし、1回/2年の頻度にてひび割れ・角落・漏水・遊離石灰等を対象とした覆工コンクリートの点検を実施する。

#### c) ひび割れの詳細な解析(クラック解析)

本研究におけるクラック解析は、覆工コンクリートに生じたひび割れの定量化を目指したものであり、その発生状況や進行状況の評価を行うものである。覆工1スパンごとに整理された変状リストをもとに、幅別ひび割れ延長および横断・斜め・縦断の方向区分されたひび割れ展開図を作製し、危険性(健全度)に対する判定が行われる。

本研究において設定したクラック解析の判定基準

を表-3に示す。この判定基準は、ひび割れ密度を目安として、コンクリート片落下の危険性に応じた3段階のランク付けとしたものである。なお、ひび割れ密度が低い場合においても、ひび割れが集中し部分的な剥落のおそれがある場合には、注意を要する。

クラック解析による評価は、著しいひび割れの定量化のみならず、ひび割れの経年変化の把握も容易となる。さらに危険度判定区分による総合判定の指標を設定することで、ひび割れ変状に応じた調査・補修・補強計画の立案に寄与できるものと思われる。

#### d) 総合判定評価手法

図-1に示すように、変状の生じた覆工コンクリートに対して補修・補強を行うかどうかを判定するため、クラック解析判定結果および管理事務所レベルによる点検結果をもとに総合評価を行う。ここで、クラック解析によってランクIに判定されたスパンに対しては、補修・補強の必要性に対する調査を行い、ランクIIおよびIIIでは、管理事務所点検における監視を要するものと判断した。さらに、管理事務所等の日常の点検において、浮き・剥落や大規模な湧水・路面滞水が認められ、通行車輛にとって危険な状態と判断された場合、直ちに緊急補修・補強を施すものとした。

このような覆工コンクリートの点検評価システムは、安全で円滑な交通を確保すること、および第三者被害を防止することを課題とし、ひび割れ変状の状況を的確に把握するとともに、点検評価業務の実施体制・点検頻度・点検種別・判定区分を明確にすることで、効率的な点検が実施出来るものと考えられる。本研究で示した点検評価システムは、これらの一例に位置づけられるものと思われる。

### 3. 覆工コンクリートの変状調査事例と点検評価システムに基づく評価

#### (1) 中国支社管内における変状トンネルの傾向

本研究では、日本道路公団中国支社管内の62トンネルに対して、VTR画像解析による覆工コンクリートのひび割れ判定を行った。図-2は、各々のトンネルについて全スパン数に対する各判定区分(A,B1,B2,B3,B4,S)のスパンが占める割合を表すものである。中国支社管内には約270本の道路トンネルがあるが、ここで示した62トンネルは、主に供用開始が最も早い中国自動車道におけるトンネルであり、全体の約20%に相当するものである。

図-2より、調査を行った62トンネルでは、変状が著しく早急な対策を要するトンネル(判定Aスパンを含むトンネル)はみられなかった。しかしながら、事

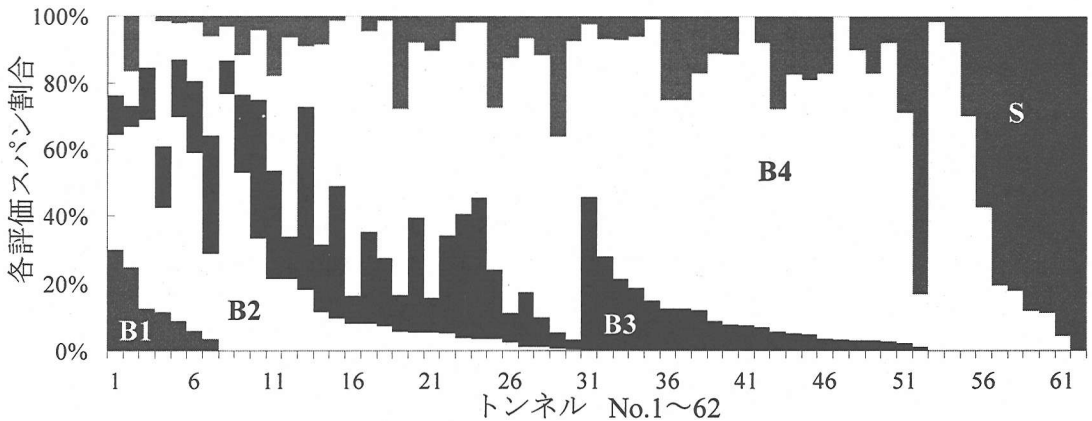


図-2 中国支社管内 62 トンネルにおけるひび割れ判定結果の傾向

務所管理を必要とする判定区分B1あるいはB2スパンを有するトンネルは、ほぼ半数の30トンネルに達した。そのほとんどのトンネルが供用開始より20年を経過したものであり、管内の道路トンネルの老朽化が進んでいることが伺える。この傾向は、年を経るにつれて、いっそう顕著になることが予想され、トンネルの覆工コンクリートの変状に応じて注意して点検を行っていく必要があると考えられる。

全体的な傾向としては、判定区分B1～B2を含むトンネルの多くは、変状が著しいスパンの占める割合が高く、逆にそのようなスパンを含まないトンネルでは、スパンのほとんどがB4あるいはSと判定される変状の程度であった。VTR画像解析の判定区分の中間値にあたるB3を多く含むトンネルはあまり多くはなく、比較的健全あるいは変状が著しいというような両極に位置するトンネルがほとんどであった。ここで次節より、比較的健全あるいはそうでないトンネルの覆工コンクリートの変状について、本点検評価システムの適用事例を示す。

## (2) 三谷トンネルに対する点検評価

三谷トンネルは、中国自動車道の戸河内IC～千代田IC間に位置する延長75mの比較的短いトンネルである。同覆工コンクリートの各スパンでVTR画像解析を実施したところ、スパンNo.6,7,10,11において部分的に一方方向のみのひび割れがみられたものの、図-3に示されるように全スパン通じてほぼ健全な状態であるというひび割れ判定結果を得た。このトンネルのようにひび割れ判定がSもしくはB4程度と軽微な変状である場合、安全性が確保されており、本研究に示す点検評価システムを活用することで、覆工コンクリートの変状に関する点検作業のスリム化が図れ、経済的且つ効率的な点検が可能となることから、その有効性が発揮されるものと思われる。

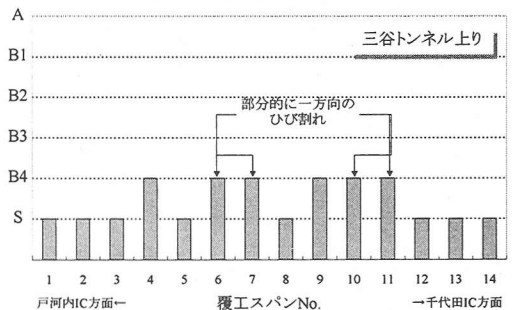


図-3 三谷トンネルにおけるひび割れ判定結果

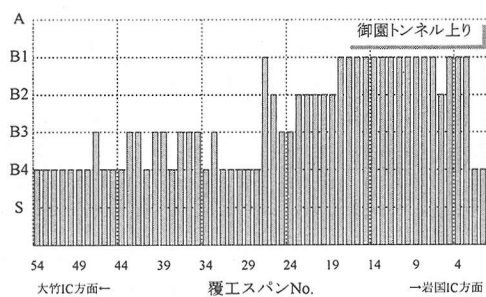
## (3) 御園トンネルに対する点検評価

山陽自動車道の岩国IC～大竹IC間にある御園トンネルは、上り線564mおよび下り線555mの山岳トンネルである。1985年3月から1987年3月にかけてNATMにて建設され、1988年3月から供用の開始がなされている。同トンネルでは、供用開始2年後の1990年において行われた日常点検によって、覆工コンクリート部にひび割れが確認された。ここで、御園トンネルの覆工コンクリートにおける変状の特徴を以下に詳述する。

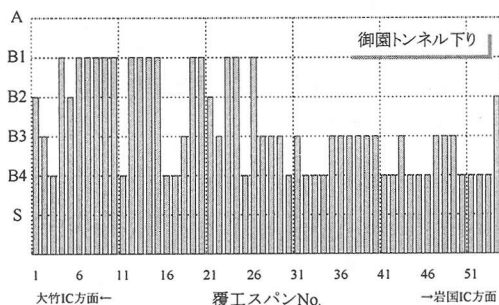
【側壁部】水平ひび割れが顕著であり、そこから上下枝分かれしてひび割れが伸びている。さらに一部では、網目状にひび割れが発生している箇所がある。

【アーチ部】天端部に対して縦断方向に発達したものの、もしくは横断方向に沿うひび割れが顕著であり、下り線大竹IC側の坑口付近部では、ひび割れが密集するケースがみられた。

ここに示されるように御園トンネルは、覆工コンクリート部に様々なひび割れが発生しており、日本道路公団中国支社管内では、比較的変状の大きいトンネルの部類に属するものである。ここで御園トン



A) 上り線



B) 下り線

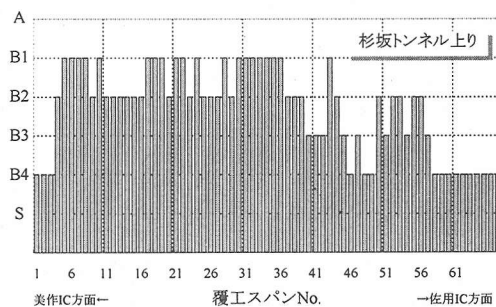
図-4 御園トンネルにおけるひび割れ判定結果

ネルに対して行ったひび割れ判定解析結果を図-4に示す。この結果に基づけば、B4と判定されたスパンが、上下線でそれぞれ20スパンおよび18スパンであり、全スパン数54に対して約1/3程度を占めていた。さらに上下線ともに、健全(S)と判断されたスパンが1スパンもなく、B3と判断されたスパンが(上り線, 下り線)=(11, 17), B2と判断されたスパンが(7, 4)となり、B1に至っては(16, 15)にまで達した。特に上り線の岩国IC側となるスパンNo.3~18までは、ほぼ連続してB1と判定されており、同様に下り線においても大竹IC側にB1となるスパンが集中していることが分かる。

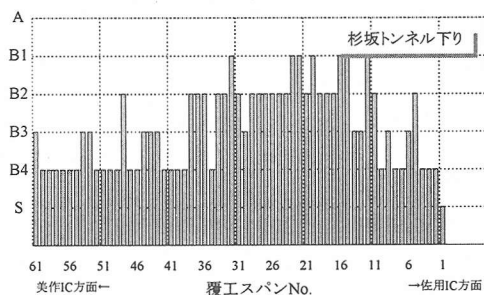
#### (4) 杉坂トンネルに対する点検評価

中国自動車道の美作IC~佐用IC間にある杉坂トンネル(上り:650m, 下り:516m)は、1972~1974年に建設され、供用から20年以上を経過している。ここで、杉坂トンネルについてVTR画像解析によるひび割れ判定を行ったところ、図-5に示される判定結果となった。上り線の結果より、多くのスパンでひび割れ判定がB2となっており、B1に達するスパンも67スパン中20スパンと約30%にまで及んでいる。下り線は、上り線に比べるとその程度は穏やかであるが、それでもなお、ひび割れ判定B1に達するスパンが61スパン中7スパンと約10%を超過している。

図-6に杉坂トンネルにおけるスパン別のひび割れ



A) 上り線



B) 下り線

図-5 杉坂トンネルにおけるひび割れ判定結果

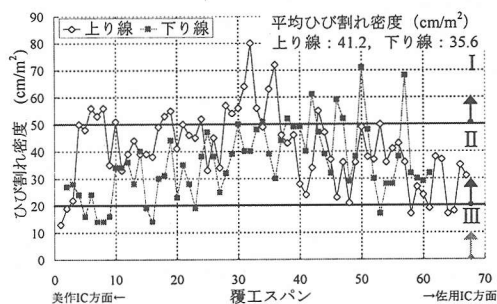


図-6 杉坂トンネルにおけるひび割れ密度

密度の推移を示す。なお、同図における横軸は、美作IC側を起点とした時のスパン数を表すものであり(上り線の覆工スパンNo.と一致)、上下線の各スパンはほぼ同程度の箇所に位置するものである。本研究で示した点検評価システムでは、ひび割れ判定B1以上のスパンにのみクラック解析を実施することになっているが、本トンネルはひび割れ変状が著しく、VTR解析とクラック解析の整合性評価、および本点検評価システムの合理性を確認する目的から、トンネル全スパンに渡ってクラック解析を実施した。

図-6によると、上下線のほとんどのスパンにおいて、表-3の危険度判定II以上に相当するひび割れ密度 $20\text{cm}^2/\text{m}^2$ を超過しており、上下線のそれぞれの平均ひび割れ密度は、 $41.26\text{cm}^2/\text{m}^2$ 、 $35.6\text{cm}^2/\text{m}^2$ であり、危険度判定I(表-3に示されるひび割れ密度 $50\text{cm}^2/\text{m}^2$ 以上)に相当するスパンを多数含んでいることが分か

る。なお、同トンネルは本システムによる点検評価および現地調査結果を受けて、裏込め注入や炭素繊維シート貼付などの補修工事を行っている。

#### 4. あとがき

本研究は、道路トンネルの変状調査の一環として、覆工コンクリートのひび割れに着目した点検評価システムの構築を行ったものである。本研究で示した点検評価システムのベースは、日本道路公団本社の刊行するトンネル変状調査マニュアルである。このマニュアルに対して、より詳細かつ具体的な維持管理計画を立てるにあたり、中国支社管内の現状に合わせた形で取りまとめ、点検評価システムの作成を行った。また本研究成果を取りまとめる過程において、今後検討を要すべき課題も幾つか浮上してきた。今後の検討課題も含めて、本研究のまとめを以下に列挙する。

- ① 覆工コンクリート1スパンごとに、レーザー法を用いたひび割れの検出を行い、VTR画像によって覆工コンクリートの変状に関する簡易解析を実施した。VTR画像解析によって覆工1スパンごとにひび割れ判定区分を行うことで、緊急対策の必要の有無や、点検の重点箇所を抽出し、経済的・効率的な点検計画を立案できる。
- ② ひび割れ判定区分がBI以上と、変状が著しいスパンに限り、クラック詳細解析を実施することから、経済性および作業効率性が向上する。さらにクラック解析結果に対して危険度判定区分を設け、管理者あるいは管理手法に関する総合判定の指標を設定することで、覆工コンクリートの変状程度に応じた調査・補修・補強計画を効率的に立てることができる。なお、現状で求まるひび割れ密度は、その幅によらず一律の重みづけで算出されるが、今後より詳細な管理手法を構築するにあたり、

ひび割れ幅や深さ、形状に応じて重み付けたひび割れ密度算定手法が有用であると思われる。

- ③ 中国支社管内における覆工コンクリートの変状の現状を取りまとめるにあたり、約20%に相当する62トンネルに対して、点検評価システムの適用を行った。その結果、変状が著しいものあるいはそうでないものに区分され、変状トンネルに対して重点的且つシステムチックに補修・補強計画を立てることができた。

本研究は、トンネルの覆工コンクリートの変状に対する点検評価システムの構築を試みたものであるが、今後この成果を踏まえて、調査および補修・補強といった一連のシステムの体系化を図る必要があると考えている。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、岐阜大学名誉教授 小柳 洽 博士をはじめとする「中国支社管内トンネル管理検討会」の委員各位に多大な御協力を頂きました。ここに記して深甚の謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 安田 亨, 谷口親平, 亀和田俊一, 岡野吾一: 老朽トンネルにおけるクラック診断システムの開発, 土木学会論文集, No.435/VI-15, pp.139~144, 1991.9.
- 2) 中本龍治, 菊池英明, 高野金幸, 古川浩平, 中川浩二: 水力発電導水路トンネルの劣化診断基準および変状評価システムに関する研究, 土木学会論文集, No.540/VI-31, pp.145~156, 1996.6.
- 3) 日本道路公団: トンネル変状調査マニュアル, 日本道路公団試験研究所技術資料, 第356号, 1998.10.
- 4) 日本道路公団: トンネル覆工コンクリートのためのレーザークラック調査法マニュアル, 日本道路公団試験研究所技術資料, 第355号, 1997.9.
- 5) 日本道路公団: 設計要領第三集トンネル(1)トンネル本体工保全編(変状対策), 1998.9.

(2001.9.7 受付)

## INVESTIGATION OF DEFORMED TUNNEL LINING CONCRETE AND ITS INSPECTION METHOD

Yukitsune ITO, Tetsuo ITO, Masanobu HARA, Isamu YOSHITAKE  
and Koji NAKAGAWA

This paper presents the crack evaluation system for tunnel lining concrete in JH Chugoku. This crack evaluation system constitutes VTR simplified analysis and crack detailed analysis by using Argon laser beam, not to depend on contact investigation. Tunnel lining was evaluated by 1 span from the crack density result based on this system. In addition, this system set up the classification against maintenance plan for deformed tunnel. This study applied the system to 62 tunnels in JH Chugoku as example, especially, shows crack situation of 3 tunnels containing marked strange.