

# トンネルの健全度診断と維持管理支援システムの開発

日本工営（株）松山公年  
日本工営（株）太田資郎

## 1. はじめに

日本の電力会社が所有する水力発電所は約 1,200 箇所あり、その発電所の落差を得るための導水路トンネルの延長は約 3,700km に達する。経年別には 60 年以上を経過したものが約 40% で、40 年以上を経過したものは 70% を占める。これらの水路トンネルの保守管理は、2 年に 1 回放水して水路内部の点検を行うのが一般的である。変状の著しいトンネルは、クラックの幅・長さ、湧水量、変状の進行性等を目視あるいは簡単な器具を用いて測定し、熟練土木技術者の経験によって変状原因を推定し、対策工の要否判定と選定を行う。これらの点検・調査は作業環境が劣悪であり、定量的な計測・評価や変状の経時的な変化の把握が困難な状況である。

そこで、よりの確な水路トンネルの保守管理を行うため、トンネルの変状データを定量的・連続的かつ短時間に測定できる非破壊検査法として「レーザ計測システム」と「レーダ計測システム」を開発した。また、定量的なデータに基づく変状トンネルの補修・補強要否判定や対策工選定を的確に行うための「トンネル維持管理支援エキスパートシステム」、「覆工コンクリート耐力評価システム」を開発した。これらのシステムは図-1 に示すように連携して運用するものである。

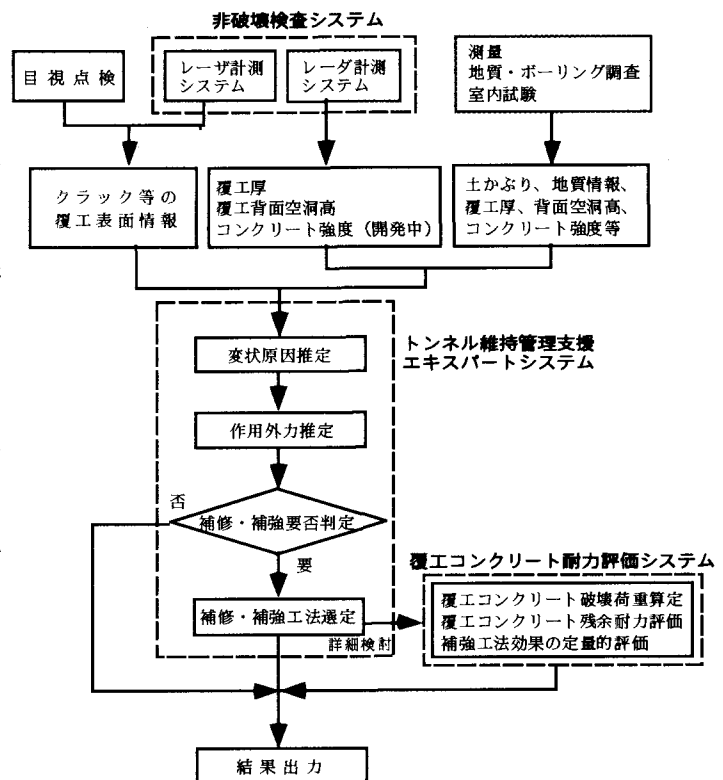


図-1 トンネル維持管理システムの構成

## 2. 水路トンネル維持管理支援エキスパートシステム

本システムは、土木学会エネルギー土木委員会が構築した「水路トンネルの維持管理支援エキスパートシステム」<sup>1)</sup>を参考に、筆者らが Windows95 で再構築したものである。

### (1) システムの構成と処理手順

本システムの構成および処理手順を図-2 に示す。本システムの特徴は、図-3 に示すような水路トンネルで発生する変状を予めパターン化しておいて、実際の変状を入力する際にパターンマッチング法を採用したことにある。知識ルール群の特徴は、変状レベルから作用外力を推定するなど定量化を目指したことにある。定性的なルールに定量的な数字である作用外力を加えることでシステムの高度化を図り、複雑なトンネルの変状過程を作用外力で表現した。

キーワード：水路トンネル、レーザ、レーダ、エキスパートシステム

連絡先：〒300-1259 茨城県稲敷郡茎崎町稲荷原 2304、TEL0298-71-2030、FAX0298-71-2022

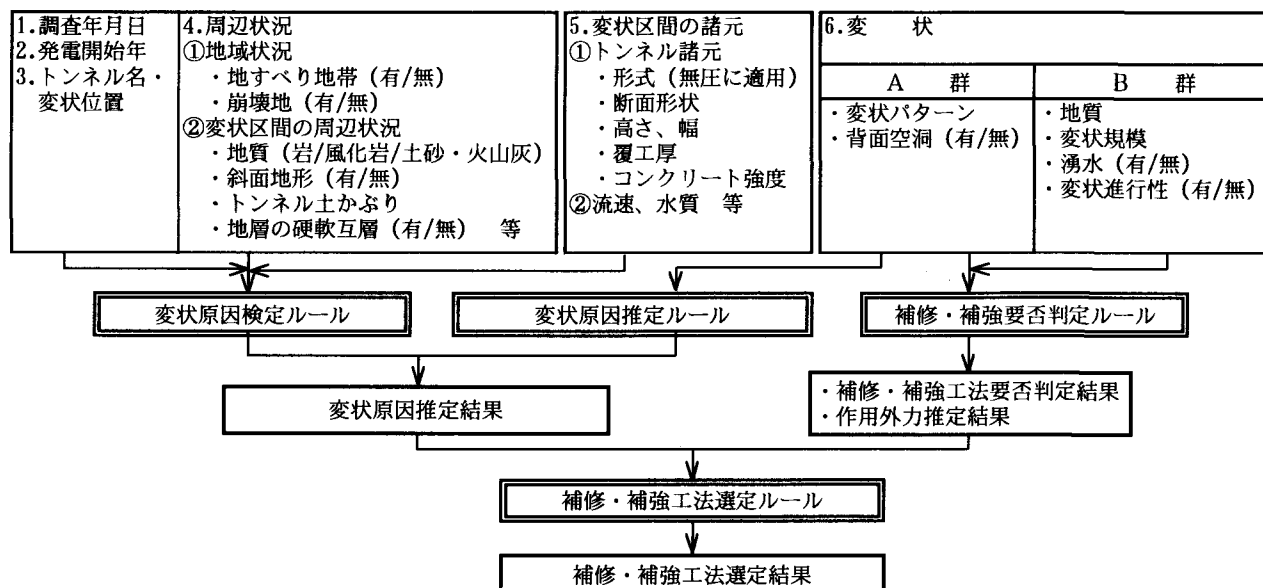


図-2 水路トンネル維持管理支援エキスパートシステムの構成と処理フロー

## (2) 変状パターンと変状レベル

水路トンネルの構造的安定性は、作用外力と覆工コンクリート耐力のバランスの問題であり、このバランスが失われた時に、覆工コンクリートにクラック等の変状が発生する。トンネルの周辺環境要因である土かぶり、地質、覆工背面空洞、トンネル形状、覆工厚、コンクリート強度等が相互に関連し、その結果として発生するクラックの発生位置、規模、進行は、一定のルールに沿うものと考えた。

クラックの幅等の規模による変状レベルの区分は、トンネルの破壊が図-4に示す過程を経るとして、表-1に示す3区分とした。

## (3) 変状原因推定・検定ルール

変状原因推定ルールは、トンネルの内部点検結果（変状パターン、覆工背面空洞有無）からトンネルの変状原因を推定するルールである。一方、変状原因検定ルールはトンネルの諸元、トンネルの通過地点の地形、地質状況などの各種条件から、推定ルールによる原因が当該地点で実際に考え得るか否かを照合し、絞り込みを行うルールである。したがって、変状原因は推定ル

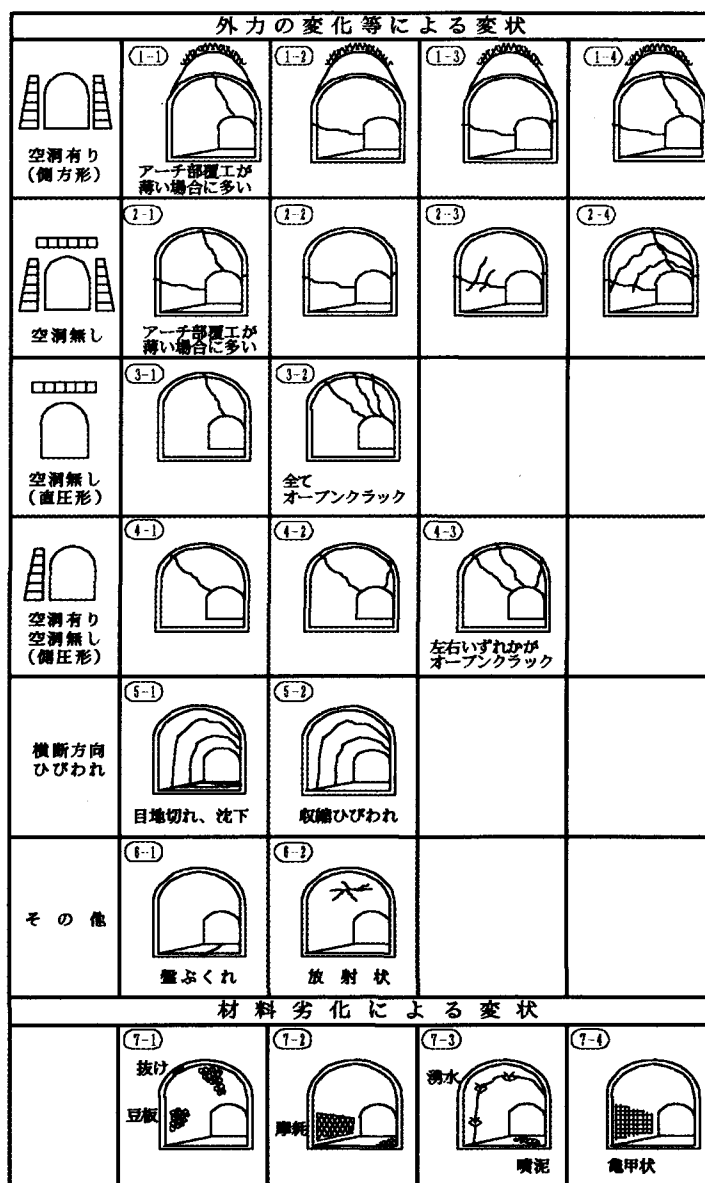


図-3 トンネルに発生する変状パターン

ールならびに検定ルールを同時に満足する場合に確定することになる。

変状原因推定ルールは、表-2 に示すように 21 種類の変状パターンと 13 種類の変状原因の関係の有無を、○あるいは空白で示している。検定ルールについては、参考文献1)を参照されたい。

(4) 補修・補強要否判定ルール

補修・補強要否判定ルールは図-5、表-3 に示すようなツリー方式で作成した。

即ち、①地質区分（岩、風化岩、土砂・火山灰）、②変状パターン（21 種類）、③変状規模（3 レベル）、④湧水の有無、⑤変状の進行性の有無を順次選定して補修・補強要否判定を行う。トンネルの補修・補強要否は、表-4 に示すように A～S までの 5 段階評価とした。同時に、変状パターンおよび変状規模から、各変状を発生させる作用外力の推定値を出力する。

(5) 補強工法選定ルール

変状パターン（1-1）～（4-3）、（5-1）、（6-1）について補強工法選定ルールを適用する。

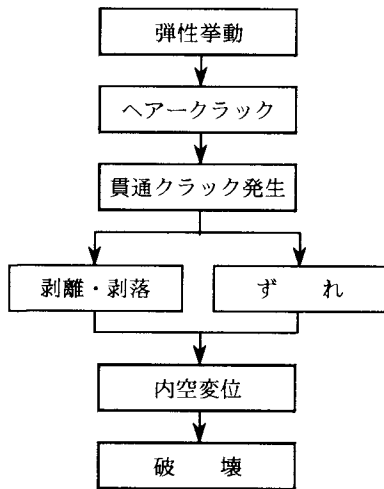


図-4 覆工コンクリートの変状過程

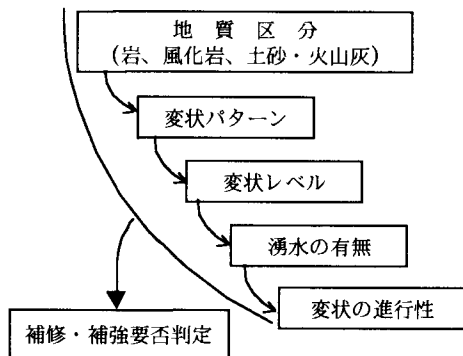


図-5 補修・補強の要否判定において考慮すべき項目

表-1 ひびわれ、目地切れの変状レベル

区分	ひびわれ、目地切れ規模		
I	幅 1mm未満（ヘアークラック）		
II	幅 1mm以上（オープנקラック）		
III	剥離・剥落を伴う	ずれを伴う	内空変位を伴う

表-2 変状原因推定ルール

変状パターン	空洞	塑性地圧	偏圧	地すべり	異常外水圧	衝撃圧力	掃流作用	酸性水	アルカリ骨材	中性化	断面厚不足	形状不適合	コン強度不足	コン乾燥収縮
1-1	○	○			○						○	○	○	
1-2	○	○			○						○	○	○	
1-3	○	○			○						○	○	○	
1-4	○	○			○						○	○	○	
2-1		○			○						○	○	○	
2-2		○			○						○	○	○	
2-3		○			○						○	○	○	
2-4		○			○						○	○	○	
3-1		○									○	○	○	
3-2		○									○	○	○	
4-1	*		○	○							○	○	○	
4-2	*		○	○							○	○	○	
4-3	*		○	○							○	○	○	
5-1	*	○		○							○		○	
5-2	*													○
6-1	*	○			○						○	○	○	
6-2	○					○					○		○	
7-1	*													○
7-2	*						○	○						○
7-3	*	○		○	○									
7-4	*							○	○	○				

表-3 補修・補強要否判定表 変状パターン：1-1  
(地質区分：土砂・火山灰の例)

変状パターン	変状レベル	湧水の有無	変状の進行性	要否判定区分
1-1	I	有	有	B
		無	無	C
	II	有	有	C
		無	有	D
		有	無	B
		無	無	C
	III	有	有	A
		無	有	B
			無	C

表-4 要否判定区分

判定区分	措 置
A 危険	早急に対策工が必要
B 将来危険	近々対策工が必要
C 要注意	対策工不要であるが、変状の進行性に注意
D 影響無し	点検
S 変状無し	点検

補強工法については、補修・補強要否判定ルールにより「要」と判断されたものについて、作用荷重と耐力の関係から妥当と考えられる工法を選定する補強工法選定ルールを作成した。補強工法の選定ルールの作成にあたっての基本的な考え方は、図-6 に示すように補強工法に優先順位を付け、変状パターンおよび変状レベルから推定した変状原因を解消し、さらに覆工への作用外力を順次低減する方法を採用した。

### (6) 作用外力推定ルール

補強工法選定ルールでは、定量的な判断を導入した。即ち、変状パターン、変状レベル、断面形状、地質等の条件から決定される作用外力推定図を作成した。作用外力推定図の一部を 図-7 に示す。解析には ABAQUS を使用し、計算結果の妥当性は、破壊実験結果との比較により検証した。

### 3. 水路トンネルにおける非破壊検査技術

水路トンネルの維持管理支援エキスパートシステムには、地形・地質・土かぶり等のトンネルの周辺状況、断面形状・覆工厚・コンクリート強度等のトンネル諸元、クラックの幅・位置・方向ならびに湧水等の変状情報を入力する。これらの変状情報等は、これまで目視観察やボーリング調査(写真-1)によって得ていたが、近年、非破壊検査技術のコンクリート分野への適用が行えるようになり、定量的・連続的・短時間かつ安全に調査ができるレーザ・レーダ計測システムを開発した(写真-2、図-8)。レーザとレーダによって表-5 に示すデータの収集が可能であり、水路トンネル維持管理支援エキスパートシステムの診断結果の精度を向上させている。

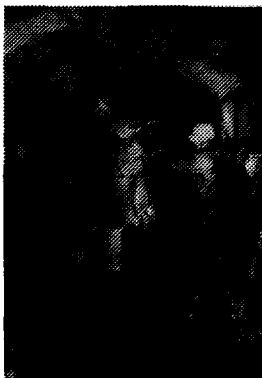


写真-1 ボーリング調査



写真-2 レーザ・レーダ計測システム

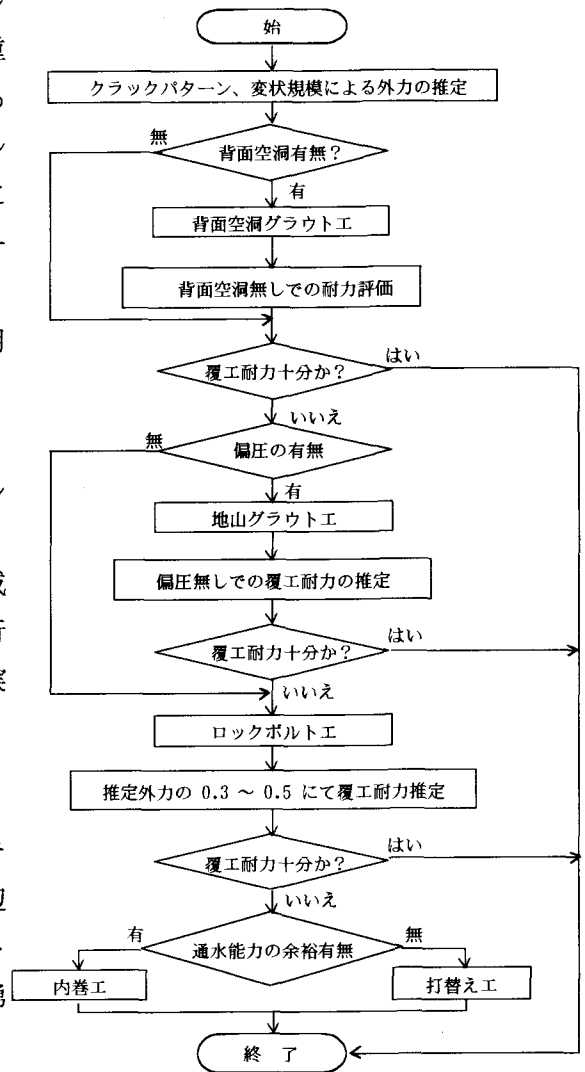


図-6 補強工法選定ルール

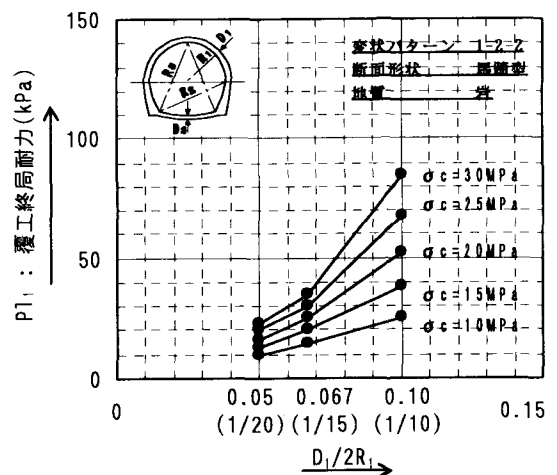


図-7 覆工終局耐力推定図(ABAQUS を使用)

表5 レーザ・レーダ計測システムで得られる情報

レーザ計測	クラック等の覆工表面情報
レーダ計測	覆工厚、覆工背面空洞高、コンクリート強度 (開発中)

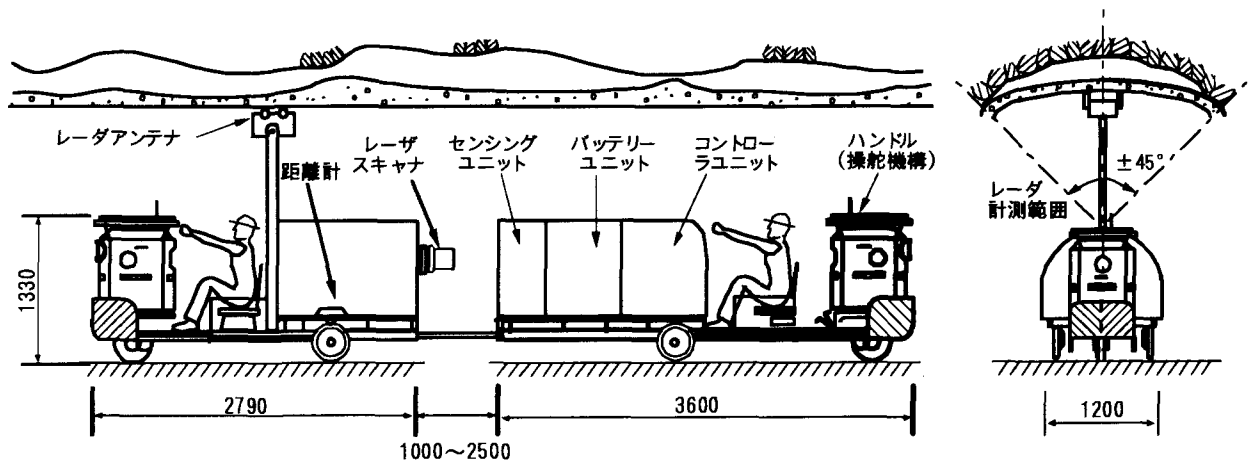


図-8 レーザ・レーダ計測車概念図

#### 4. レーザ計測システム

トンネル全周方向に対して、幅約 1mm のレーザ光を螺旋状に高速で走査させ、トンネル壁面の変状を精度良く短時間に計測するシステム<sup>2)</sup>である。対話型画像処理機によってトンネル変状展開図を作成することが可能である。

写真-3 はコンクリート巻立てトンネル壁面の縮尺 1/4 画像 (4m×4m)、写真-4 はライナープレート張りトンネル壁面全周画像で縮尺は 1/8 画像である。



写真-3 コンクリート巻きたて壁面画像(縮尺 1/4)

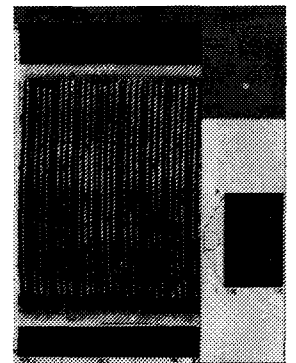


写真-4 ライナープレート張り壁面画像(縮尺 1/8)

##### (1) レーザ計測法の原理と特徴

レーザ計測法の原理は図-9 に示すとおり、幅約 1mm のレーザ光をトンネル壁面に照射し、その反射光量の強弱を光検出器で捕えることにより、クラック等の情報を検出するものである。トンネル壁面に照射されたレーザ光は、クラック内で乱反射し、反射光量が減少する。その反射光量を連続的に計測記録することにより、クラックの幅・位置・方向・長さが検出される。レーザ計測法の特長として以下の項目が挙げられる。

- ①照明設備が不要
- ②計測速度が速い (1 km/h)
- ③画像の継ぎ合せが不要
- ④画像の歪みの補正が容易

##### (2) 技術開発概要

レーザ計測システムのトンネル適用高は 1.5m~5.0m とした。水路トンネルにレーザ計測法を適用するために行った主な技術開発は以下のとおりである。

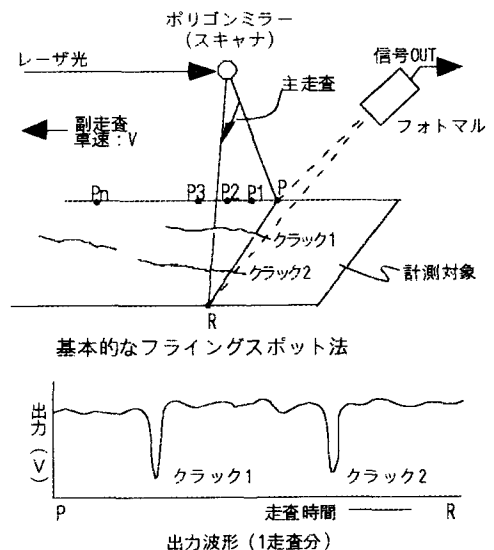


図-9 レーザ計測法の原理(1)

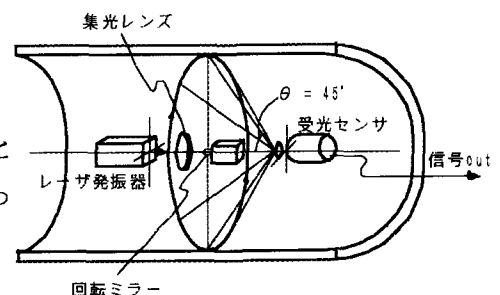


図-10 全周スキャン機構の概念図

### ① 全周スキャンニング（照射）装置の開発

レーザ光によるトンネル全周の計測を可能にするために全周スキャンニング装置を開発した。全周スキャンニング装置の概念は図-10 に示すとおりであり、レーザ発振器より発振したレーザ光は、集光レンズを通過後、回転ミラーにより角度を  $90^\circ$  変え、トンネル壁面に垂直に照射される。さらに車両が前進することにより図-11 に示すようにレーザ光が螺旋状に回転し、トンネル壁面のデータを計測することができる。

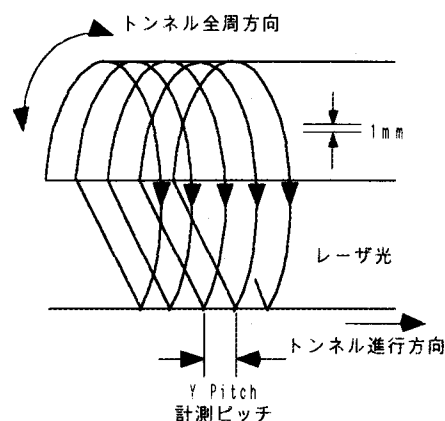


図-11 レーザ計測法の原理(2)

### ② 半導体レーザの採用による計測車の小型化

半導体レーザとガスレーザを比較検討した。ガスレーザに比べ熱効率に優れ、付帯設備のコンパクト化が可能となる半導体レーザを光源にした計測方式を採用した。

半導体レーザによる計測方式は、ガスレーザと比較して光源から放出されるレーザビームが大きな広がり角度を持つことから、画像の鮮明度が低下する。このため、これを矯正しトンネル壁面でのレーザ光の照射幅を 1mm にする目的で図-12 に示す集光レンズを開発した。

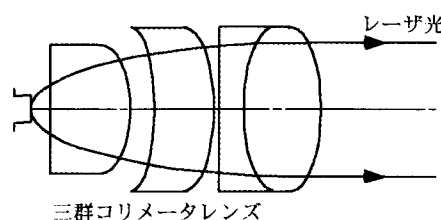


図-12 集光レンズによるビーム広がり角の矯正

### ③ 計測車両走行時における光軸姿勢制御装置の開発

螺旋状にレーザ計測を行うために、レーザスキャナの光軸を水平かつトンネルの中心に一定に保つことが必要である。図-13 は光軸を一定に保つための、ピッチ軸（光軸の前後の傾斜）とヨー軸（光軸の上下動）の制御を行う光軸姿勢制御装置である。図-14 は、姿勢制御装置による姿勢制御概念図を示す。ピッチ軸制御はジャイロにより光軸の前後方向の傾斜角を検出し、ヨー軸制御は、超音波センサにより光軸の上下方向の変化量を検出する。姿勢制御はモータ機構を設け高速度で自動修正が可能とした。センタリングについては、計測車両の左右に超音波センサを設置し、車両運転手が認識かつハンドル操作で修正できるセンタリング機構を採用した。

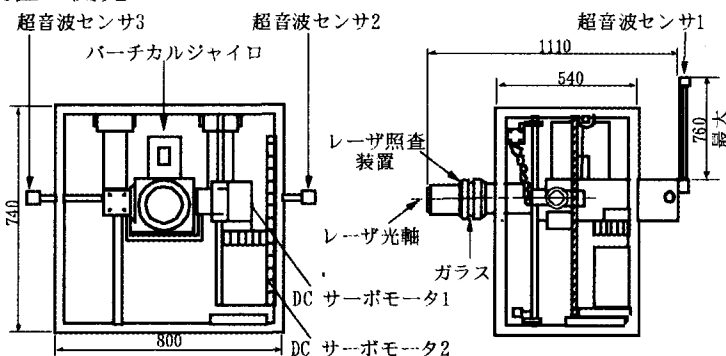


図-13 光軸姿勢制御装置

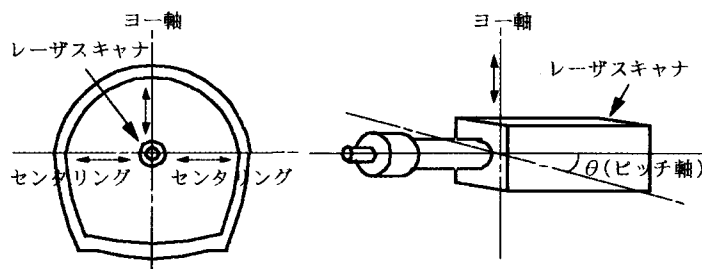


図-14 光軸姿勢制御装置による姿勢制御概念図

### ④ 対話方式によるトンネル壁面情報の画像処理システムの開発

トンネル壁面の画像処理を効率的に行うための画像処理機を開発した。レーザ計測により螺旋状に計測されたデータは、処理機によって並べ替えて、モニタ上に面的な白黒画像として再生する。モニタ上の画像は  $1/1 \sim 1/32$  の縮尺で再生可能である。再生した画像から、クラックの位置・方向・幅、コンクリートの剥離・剥落の広がり、補修跡、湧水位置等の情報を抽出する。画像処理速度は壁面の変状程度に左右されるが、平均的に 40m/h 程度である。

## 5. レーダ計測システム

レーダ計測システムは、覆工コンクリート厚と背面空洞高さを連続的かつ短時間に計測するシステム<sup>1)</sup>である。レーダ法によってコンクリート強度を推定する方法を開発中<sup>4), 5)</sup>である。

### (1) 電磁波伝播速度推定方法の開発

今回開発した送受信系を図-15に示す。本技術開発は媒質中のレーダ波の伝播速度と減衰率を推定するためのものであり、送信アンテナから受信アンテナに直接伝わる直接波を測定する事により電磁波伝播速度( $V_g$ )と減衰率( $Ca$ )を求めるものである(図-16)。

電磁波伝播速度( $V_g$ )

$$V_g = D / \{(T_1 - T_r) - (\Delta L / V_c)\} \dots\dots(1)$$

電波減衰率( $Ca$ )

$$Ca = A_1 / A_r \dots\dots\dots(2)$$

### (2) レーダ計測とコンクリートの強度推定式

電磁波を覆工表面から内面に向かって放射すると物質の境界で反射することを利用して、覆工厚および覆工背面空洞高を計測する。電磁波が物質中を伝播する場合の特性は複素誘電率で表現される。電磁波はその物質固有の伝播速度と減衰率で伝播する。表-6にコンクリートの電気特性とその主要因を示す。

コンクリート強度の推定方法は、測定した電磁波の伝播速度と減衰率から、コンクリートの体積水分率と有効間隙率を求めることで強度を推定するものである。図-17は、レーダ計測により推定したコンクリート強度と実測強度の関係を示しており、両者に良い相関が得られ、約 $\pm 2.5\text{MPa}$ でコンクリート強度の推定が可能である。

## 6. 覆工コンクリート耐力評価システム

本システムは、特殊な地形、地質への対応、あるいは大規模な対策工設計における経済性追求等より詳細な検討を行うために構築した数値解析手法である。

師・中野は、コンクリートの破壊過程において、収束性の良い弾性軟化モデルを提案<sup>1)</sup>した。

分布ひびわれ弾性軟化モデルは、覆工コンクリートの破壊過程(クラック幅の進行)を追うことが可能である。そこで、覆工天端背面に空洞があり、側壁に縦断方向の開口ひびわれ(幅1mm)が生じている場合の対策工について検討した。既設トンネル構造は、高さ3.0m、覆工厚30cmの馬蹄形であり、覆工コンクリートの圧縮強度は25MPaである。図-18に現況および対策工断面の解析モデル概念を示す。表-7に現況および対策工を行った後の終局耐力を示し、図-19は側壁ひびわれ

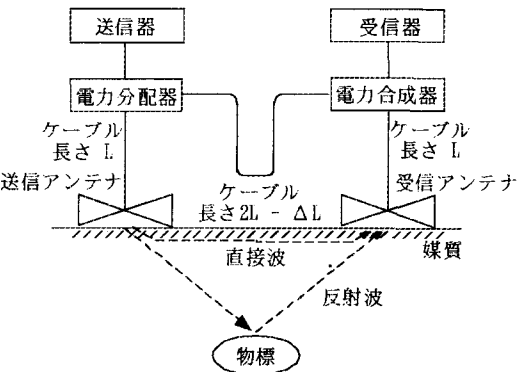


図-15 本技術開発による電磁波伝播速度推定のための電波送受信系

注)  $T_0$  は送信アンテナから電波が放射された時間

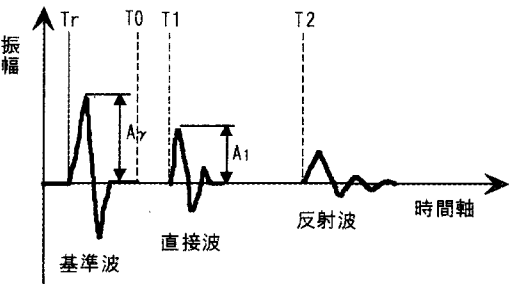


図-16 本技術開発によるモデル受信波形

表-6 コンクリートの電気特性とその主要因

電気特性	電波伝播速度	電波減衰率
対応する誘電率	$\epsilon'$ (実数部)	$\epsilon''$ (虚数部)
主 要 因	体積水分率	有効間隙率、塩分、骨材率
測 定 法	直接波法(特許出願中)	

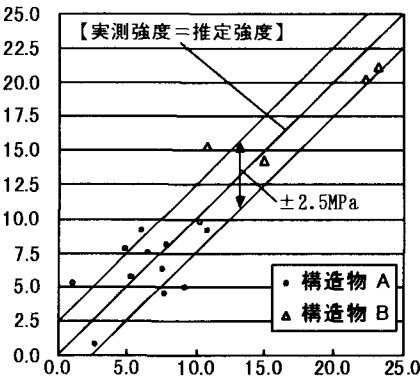


図-17 実測強度と推定強度の関係 (MPa)

開口幅と地圧の関係を示す。現況の幅 1mm の変状状態での作用地圧は 41kPa、さらに地圧が増加して 79kPa に達した時トンネルは破壊に至る。空洞グラウト工によって終局耐力は約 2 倍になり、ロックボルト補強工は 6 倍程度の増強効果がある。また、内巻工の補強工は 3 倍程度になることがわかる。

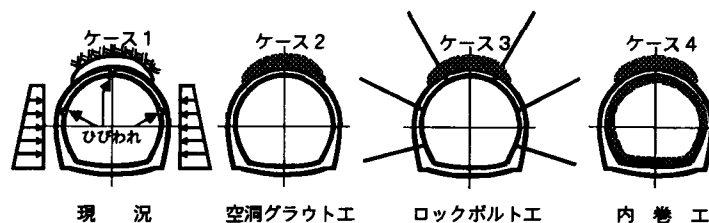


図-18 現況および対策工断面の解析モデル概念

表-7 現況および対策工後の覆工終局耐力一覧表 (kPa)

	ケース1 1mm幅ひびわれ 発生時	ケース1 終局耐力	ケース2 空洞 グラウト	ケース3 ロック ボルト	ケース4 内巻工	ケース5 空洞なし
覆工終局耐力	(41)	79	134	461	237	148
比率	0.5	1.0	1.7	5.8	3.0	1.9

## 7. 今後の研究

本システムの適用実績は発電用導水路トンネル、農業用導水路トンネルおよび地すべり排水トンネル等で、計測延長は約 100km に達する。

今後は、以下の課題を検討し、維持管理の高度化と調査費用の低減を図る予定である。

- ① 画像処理の自動化による運用の効率化と画像のデータベース化によるデータの有効利用
- ② レーダ計測によるコンクリート強度推定法の精度向上
- ③ 離散ひびわれモデル法の開発<sup>1)</sup>による解析方法の簡略化

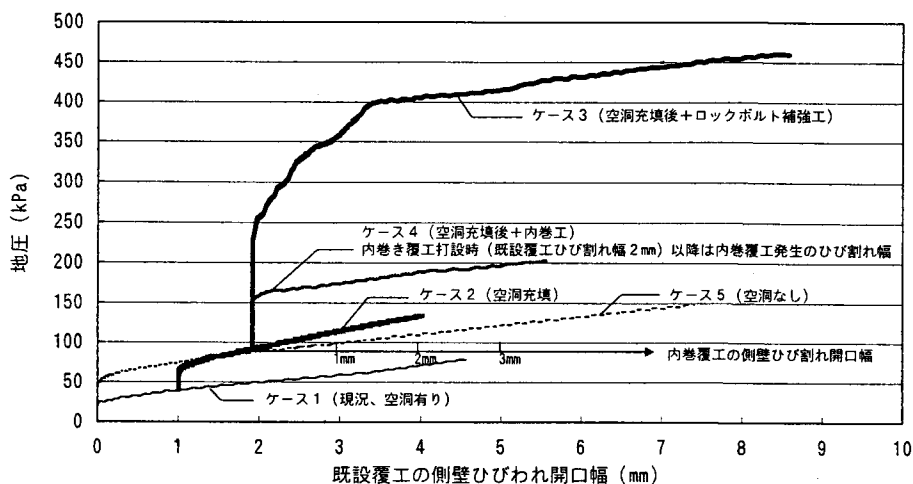


図-19 側壁開口ひびわれ開口幅と地圧の関係

## 参考文献

- 1) 中村秀治・日比野悦久・太田資郎：水路トンネル維持管理支援エキスパートシステム、電力土木、No.259、1995
- 2) 太田資郎・日比野悦久他：Laser scanner for tunnel inspections、International Water Power & Dam Construction、June 1994
- 3) 太田資郎・藤原鉄朗他：レーザ・レーダ法による水路トンネル老朽化調査、構造物の診断に関するシンポジウム論文集（土木学会）、1998.7
- 4) 太田資郎・藤原鉄朗他：経年劣化した水路トンネル覆工コンクリートの強度推定方法の研究、第 53 回土木学会年次学術講演会論文集、1998.9
- 5) 金本康宏・太田資郎他：レーダ法によるコンクリート強度推定法に関する研究、第 54 回土木学会年次学術講演会論文集、1999.9
- 6) 師自海・中野雅章：Numerical Approach Based on The Energy Criterion in Fracture Analysis of Concrete Structures、Proceeding of FRAMCOS- 3、AEDIFICATIO、1998
- 7) 日比野悦久・鈴木正樹、太田資郎他：変状発生トンネルにおける覆工耐力評価手法に関する研究、第 55 回土木学会年次学術講演会論文集、2000.9