

水路トンネル管理支援システムの開発と運用

DEVELOPMENT AND OPERATION OF SUPPORTING MANAGEMENT COMPUTER SYSTEM OF WATERWAY TUNNEL IN HYDROELECTRIC PLANT

吉田典明*・上月 浩**・鈴木正樹***・今野正雄***

Noriaki YOSHIDA , Hiroshi KOUZUKI , Masaki SUZUKI and Masao KONNO

Tokyo Electric Power Company, Inc. manages 160 hydroelectric power stations with the total length of waterway tunnels approximately reaching 770km. About 40% of them are aged 60 years or more, and 70% of them 40 years or more.

Inspection from inside for these waterway tunnels usually is carried out once every two years after draining them. For the tunnels with substantial damage, the width and length of cracks, water inflow, degree of damage and other items are inspected either visually or using simple instruments. Then experienced civil engineers would estimate the possible causes of damages, judge whether remedial measures are necessary, and if yes, select the methods for remedy, all based on the knowledge obtained through their long year experience.

However, these inspections and investigations have been performed under arduous working conditions. Furthermore, it has been difficult to take quantitative measurement, and to clarify the various conditions pertaining to the tunnel including tunnel properties, topography of the region, and geological conditions.

In order to improve the maintenance and management, an assessment and management system including a waterway tunnel expert system has been constructed, aiming at the tunnel integrity assessment.

Key Words: waterway tunnel, maintenance, expert system

1. はじめに

東京電力(株)では総延長が約770kmに及ぶ水路トンネルの維持管理を行っている。この水路トンネルの建設時期は図-1に示すとおりであり、平均経過年数は約60年、建設のピークは大正末期から昭和初期で、水路延長の50%近くは大正以前に建設されたものである。

これら水路トンネルでは、基本的には3年に1回程度実施している断水(発電停止)を伴う水路内部点検時に、目視並びに簡易測定により変状の有無、進行性等の状況を確認し、設備の健全度を評価している。しかし、水路トンネルは建設年代が古く、線状の地下構造物であるがゆえに設

備や周辺地山に関して不確定な要素が多いことに加え、目視判定による要素が多いため、客観的かつ適切に健全度を評価することが難しい。

そこで、水路トンネルに関する保守管理業務の的確化、

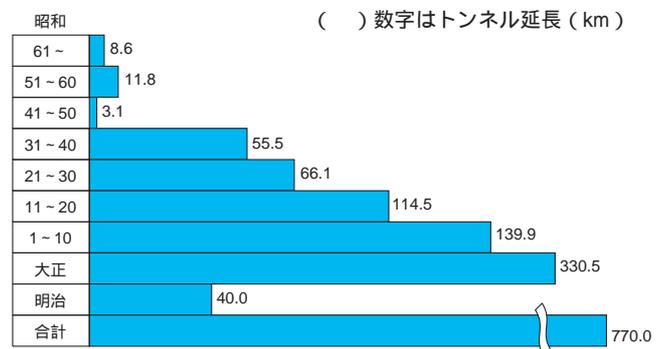


図-1 水路トンネル建設の推移

* 首都圏事業部 河川水工部
 ** 首都圏事業部 情報システム部
 *** 中央研究所 開発研究部

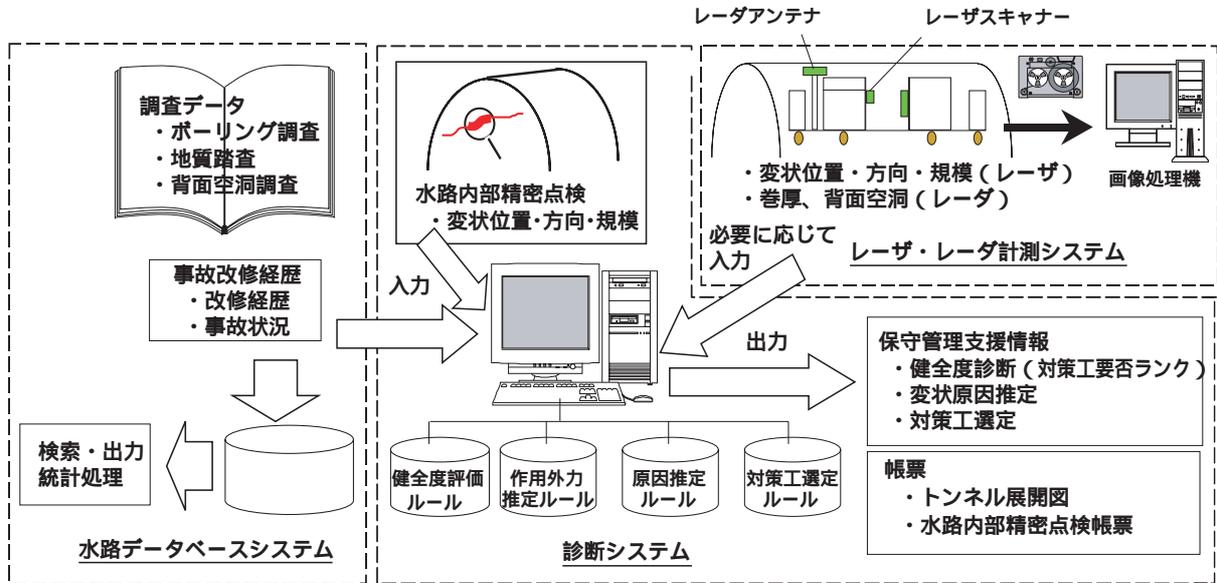


図 - 2 水路トンネル管理支援システム全体概要

効率化を図ることを目的として、健全度評価業務などを支援する水路トンネル管理支援システムを開発し、実運用を行っている。

当社は、本システムの開発を東京電力㈱からの委託により実施した。

2. 水路トンネル管理支援システムの概要

水路トンネル管理支援システムの全体構成は図 - 2 に示すとおりであり、水路トンネルの健全度を評価し、その結果をもとに変状原因推定と対策工の選定を行う診断システムと、既往の調査データ・構造諸元、改修経歴などの各種データを管理する水路データベースシステムから構成されている。また、水路の点検、調査業務を支援する非破壊調査システムのレーザ計測システム、レーダ計測システムとも関係を図っている。

レーザ計測システムは、覆工に発生しているクラック等の変状位置・規模を計測し、レーダ計測システムは、覆工の巻厚と背面空洞高を計測するものである。

3. 健全度診断システム

水路トンネルの変状に対する対策工としては、クラックが発生して構造上問題がある区間に対応する補強対策工と、コンクリートの磨耗等に見られる劣化区間に対応する補修対策工に大別される。ここでは、前者の構造上の問題に対する健全度評価について概要を記述する。

本システムでは、無筋コンクリートのトンネルを対象としており、水路トンネルの耐力を推定するとともに、変状の進行性、荷重増大の可能性を考慮して健全度を評価して

いる。

水路トンネルの耐力評価については、クラックの発生パターンから残余耐力を推定する方法、応力解析的に残余耐力を推定する方法の2手法を採用して推定精度の向上を図っている。

変状の進行性評価は、クラックが進行しているか否かによる評価であり、荷重増大の可能性評価は地形、地質条件を考慮した将来的な荷重増大の可能性を評価するものである。

構造上問題のある区間の補強対策工の要否判定フローを図 - 3 に示す。

(1) クラックに基づく定量的評価ルールの作成

トンネル覆工に発生しているクラックは、覆工耐力と作

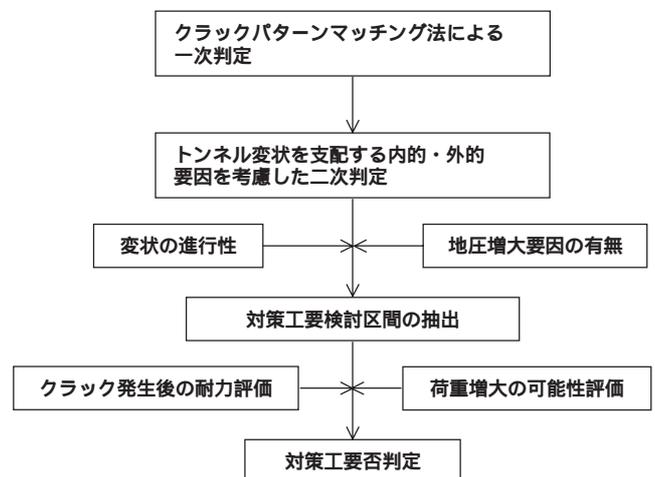


図 - 3 構造上問題のある区間の補強対策工の要否判定フロー

用外力とのバランスが損なわれた場合に見られるため評価の指標となること、さらに、各水路は3年もしくは1年に1回の目視による水路内部点検が行われ、変状に関するデータが蓄積している。そこで、このクラックの発生パターンに着目して、クラックパターンと変状規模から覆工に発生する応力状態と終局破壊荷重を推定し、構造的な耐力評価を行い、トンネルの健全度診断を定量的に行う評価ルールを作成した。

1) 健全度診断一次判定ルール

トンネルに発生するクラックに関する文献調査、覆工コンクリート実物大破壊実験の実施(図-4)、東京電力株の水路調査結果報告書の分析、および二次元FEMモデルによる数値計算をもとにしてクラックのパターンの分類を行った。また、クラックの発生 進行 トンネルの破壊に至るまでの覆工の挙動に関する知見を整理し、トンネルの構造的安定性とクラックパターンの関連付けを行い、図-5に示すようなクラックパターン進行図を作成した。

一次判定は、調査したトンネルのクラック状況がクラックパターンの進行図のどのパターンとマッチングするかを



図-4 破壊実験による変状発生パターンの検証

判定することにより健全度評価を行うものである。

2) 健全度診断二次判定ルール

二次判定は一次判定結果の精度向上を図るものである。一次判定でクラックパターンごとに想定されているトンネルの変状発生を支配する要因の標準的な状態と対象とする水路トンネルの変状要因の実際の値の差を定量的に健全度に評価反映させるために、トンネルの変状を支配する内的・外的要因から決まる補正係数を乗ずる方法を採用した。

二次判定結果 = 一次判定結果 × f(i_1 , i_2)

f(i_1 , i_2) : 一次判定の想定クラックパターンに対するウエイト(補正係数)

i_1 : 従属要因(外的要因)

i_2 : 独立要因(内的要因、特記事項)

さらに f(i_1 , i_2) = b1・Y1 + b2・Y2 + b3・Y3 + b4・Y4

b1~4 : 各要因に対するウエイト

Y1~4 : クラックパターンから予想された要因状態と実際の要因状態との比

ここで添字番号は以下の項目を示す。

- 1 : 従属要因(地山強度比、土被り、空洞)
- 2 : 断面形状
- 3 : 巻厚
- 4 : コンクリート強度

(2) 対策工要検討区間の判定

「二次判定結果」、「変状(クラック)の進行性」、「地圧

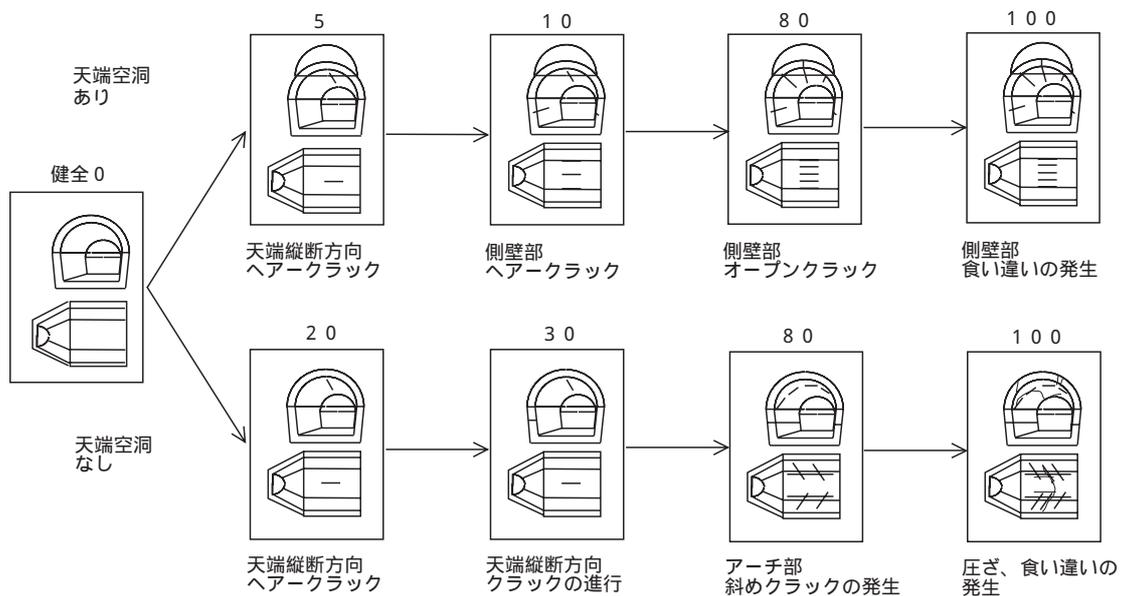


図-5 クラックパターンの進行図の一例(図中の数字は破壊荷重に対する作用荷重の比)

増大の要因の有無」を判定項目として対策工要検討区間を抽出する。

(3) 対策工要否の判定

「対策工の要否判定」は抽出した要検討区間に対して、地山状況等の詳細な調査データを入力することにより「クラック発生後の耐力評価」、「荷重増大の可能性評価」を加えて行う。

1) 覆工の残余耐力評価

無筋コンクリートの水路トンネルの終局耐力を、コンクリートの破壊力学に基づいた非線型形ひび割れ弾塑性解析手法¹⁾を適用して推定した。

コンクリートの応力-ひずみ関係は、図-6に示すように、圧縮側では弾塑性材料、引張側では脆性破壊材料と考えられる。このため、圧縮側の応力-ひずみ関係はコンクリート標準示方書に規定されている2次曲線タイプを用い、引張側は引張強度を超えると脆性破壊してひび割れが生じるものとし、引張軟化を組み込んだ分布ひび割れモデルを用いて評価した。(引張軟化特性とは、「ひび割れの生じていない弾性領域と完全なひび割れ部分との中間にある破壊進行領域において、引張ひずみの増大に伴って、伝達される引張応力が減少するいわゆる引張軟化現象が生じる現象」である。)

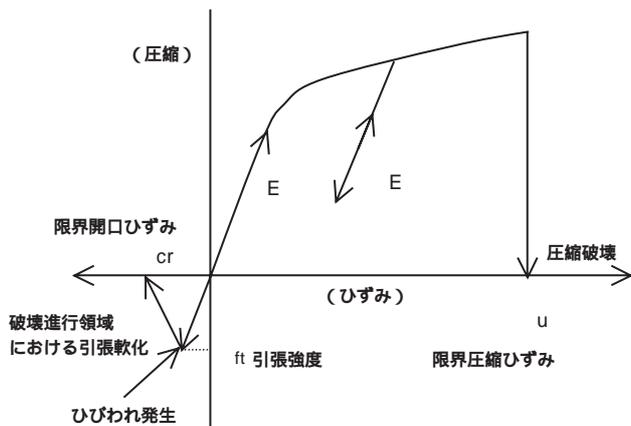


図-6 コンクリートの一軸応力-ひずみ曲線

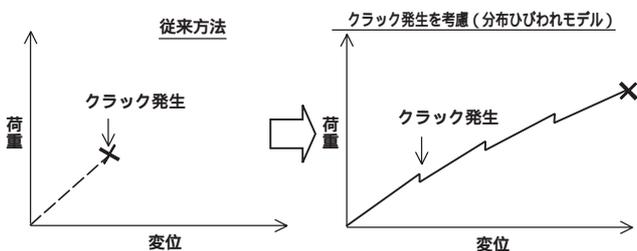


図-7 クラック引張軟化現象評価後の耐力評価の概念

本手法を適用することにより、従来方法に比してクラック発生位置やその進展さらには覆工耐力の関係の評価が可能となっている(図-7)。

クラック発生後の耐力評価ルールのはり曲げ破壊実験によるクラック進展過程の確認(図-9)。

2) 荷重増大の可能性評価²⁾⁻⁴⁾

過去に発生した水路トンネル事故について、陥没・落盤等の地形・地質に起因して発生したものを整理・分析する

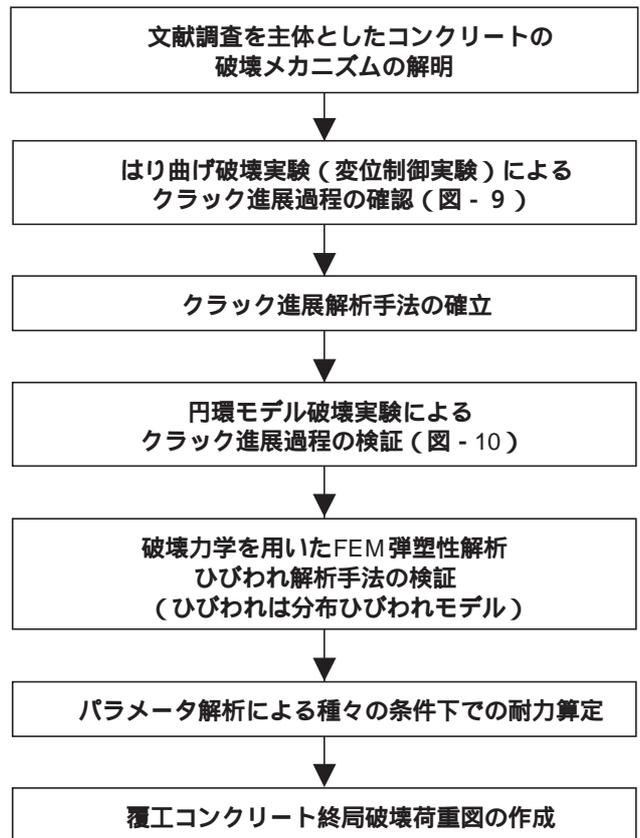


図-8 クラック発生後の耐力評価ルール検討フロー

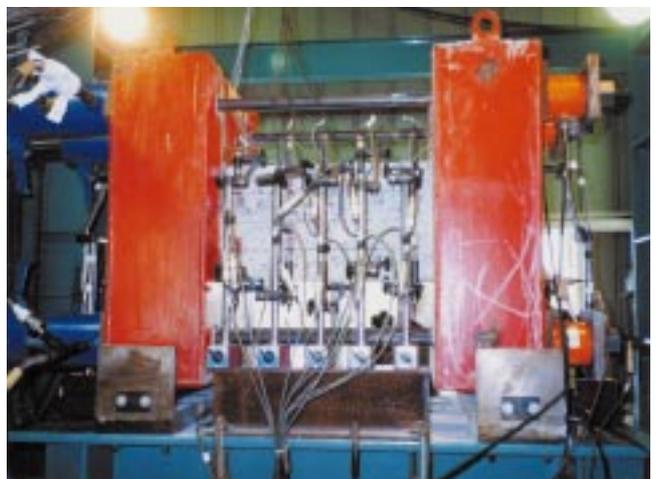


図-9 はりの曲げ破壊実験



図 - 10 円環モデル破壊実験

など、荷重増大の可能性があるトンネルの周辺地形・地質について検討した。その結果、変状発生の地質モデルとして、陥没型、地すべり型など8モデルを抽出した。

さらに地質モデルごとにその機構分析を行い、荷重増大の可能性を表 - 1 に示すとおり、4ランクに区分した。

陥没型の機構分析、荷重増大の可能性の評価の例を表 - 2、3 にそれぞれ示す。

3) 対策工の要否判定

対策工の要否判定は表 - 4 に示すように二次判定結果、クラックの進行性、荷重増大の可能性および覆工の残余耐力の4項目からなる対策工要否判定表を作成した。

二次判定結果、覆工の残余耐力評価の指標は

$$\frac{\text{推定作用荷重}}{\text{推定破壊荷重}} \times 100$$

表 - 1 荷重増大の可能性評価区分

a	荷重増大の地質的素因・誘因がある。荷重発生の可能性が高い。特に荷重増大の進行性が大きい。
b	荷重増大の地質的素因・誘因がある。荷重発生の可能性はある。荷重増大の進行性はある。
c	荷重増大の地質的素因・誘因がある。荷重発生の可能性は小さい。荷重増大の進行性は小さい。
d	荷重増大の地質的素因・誘因がない。荷重発生の可能性はない。荷重増大の進行性はない。

表 - 2 変状発生地質モデルの機構分析 (陥没型)

名称	陥没型	
イメージ図		
機構分析	地質	未固結段丘堆積物
	地質現象	① 背面空洞 ② 空洞上部の地山緩み・崩落 ③ がけ崩れによる細粒分流出 ④ 空洞の上方発達 (漏斗現象)
	トンネル位置	土被りが比較的薄い (5D-10D) 注 D: トンネル内径
	地質的進行性	大 (固結程度弱いため、ゆるみ・崩落の進行早い)
	地質以外の要因可能性	施工後の背面空洞への対処

表 - 3 陥没型における荷重増大の可能性評価

トンネル上半部の地質	崩積土の有無	空洞高 (天端平均)	(坑内)湧水	グラウト施工	荷重増大の可能性評価
未固結層	有り	有り (10cm以上)	有り	—	a
			無し	—	a
		無し (10cm未満)	有り	—	a
			無し	—	a
	無し	有り	有り	—	b
			無し	—	c
		無し	有り	—	c
			無し	—	d
			有り	d	

としており、クラックの進行性評価区分は表 - 6 に示すとおりである。

表 - 4 対策工の要否判定

<アーチ・側壁部>
(クラック有の場合)

<アーチ・側壁部>
(クラック有の場合)

二次判定結果	クラックの進行性	覆工の残余耐力評価	荷重増大の可能性評価				荷重増大の可能性評価				荷重増大の可能性評価				荷重増大の可能性評価			
			A				B				C				D(無)			
			a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d	a	b	c	d
60 以上	80 以上		I				I				II				II III			
	60 以上		I				I				II				II III			
	40 以上		II				II				II				II III			
	0~40	II	III	IV	IV	II	III	IV	IV	II	III	IV	IV	II	III	IV	IV	
40~60	80 以上		I				II				II III				V			
	60 以上		I				II				II III							
	40 以上	II	III	IV	IV	II	III	IV	IV	II	III	IV	IV					
	0~40	II	III	IV	IV	II	III	IV	IV	II	III	IV	IV					
40 未満	80 以上		II				II				V				V			
	60 以上	II	III	IV	IV	II	III	IV	IV									
	40 以上	II	III	IV	IV	II	III	IV	IV									
	0~40	II	III	IV	IV	II	III	IV	IV									

表 - 5 対策工の要否判定区分

	直ちに対策 (応急措置も含む)
	次期断水時に対策
	対策工の必要性を検討する
	設備監視
	設備監視

表 - 6 クラックの進行性の評価区分

長さ	幅	3mm 以上	3mm 未満
	5m 以上		A
5m 未満		B	C

4. 水路トンネル管理支援システムの運用

図 - 11は水路トンネル管理支援システムの全体構想を示している。図 - 12には出力帳票の一例を示す。

図 - 12. : トンネル内部の点検・調査結果に基づき作成した変状展開図であり、クラックの幅、位置、方向に代わられる変状データの他、テストモルタル、チャッキバルブ、補修歴等が図化されている。本資料と照合して点検することにより、点検の高度化・迅速化を図ることが可能となった。

図 - 12. : 水路データベースシステム情報の一例としてコンクリートの一軸圧縮強度の室内試験結果と地表踏査結果を示す。データベースは、各種指標ごとの統計・検索等に利用される。

図 - 12. : レーザ・レーダ計測システムによって得られたトンネル覆工表面情報と背面空洞調査画像。この画像を処理して覆工に発生しているクラックの幅、位置、覆工の厚さ、背面空洞高をデータベースシステムに取り込む。

図 - 12. 、 、 : 診断結果として健全度、変状原因、対策工選定を示す。これらは、結果のみならず診断に至る過程も合わせて表示している。

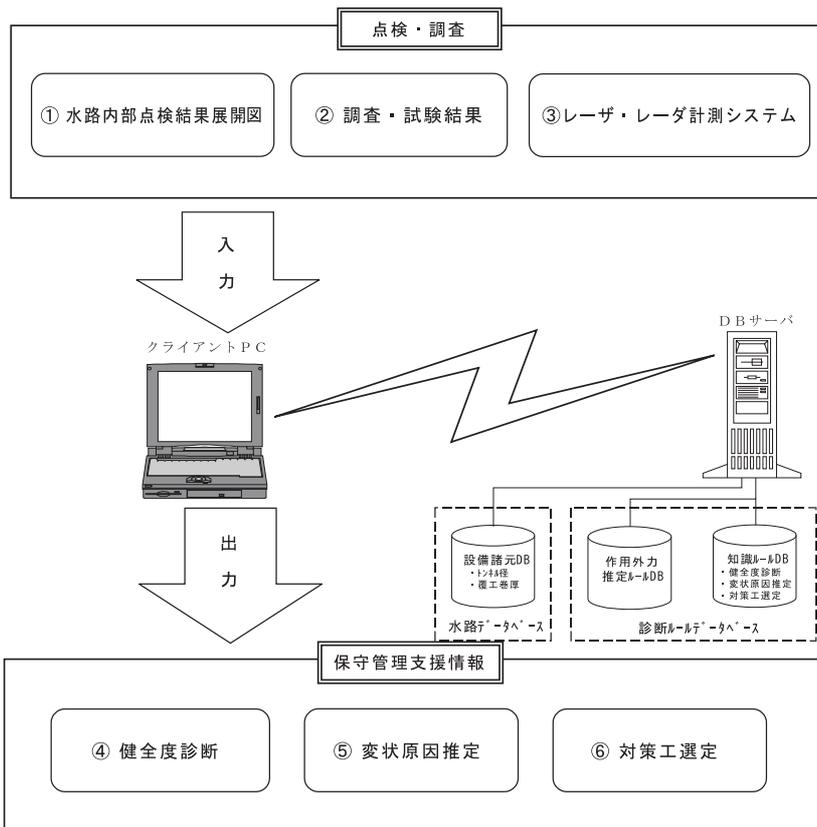


図 - 11 水路トンネル管理支援システムの全体構想

点検・調査

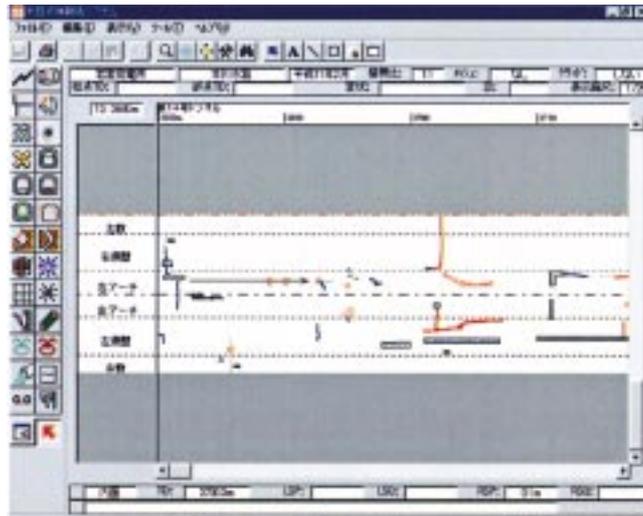


図 - 12. 水路内部点検結果展開図

<コンクリート軸圧縮強度>

<地質踏査>

ID	試験位置	試験箇所	軸圧縮強度 (kg/cm ²)	検出
101	天端	管内部	30.5	○
102	天端	管内部	32.1	○
103	天端	管内部	30.1	○
104	天端	管内部	30.4	○
105	天端	管内部	32.8	○
106	天端	管内部	30.1	○
107	天端	管内部	30.3	○
108	天端	管内部	30.9	○
109	天端	管内部	30.9	○
110	天端	管内部	30.4	○
111	天端	管内部	30.4	○
112	天端	管内部	30.4	○
113	天端	管内部	30.4	○
114	天端	管内部	30.4	○
115	天端	管内部	30.4	○
116	天端	管内部	30.4	○
117	天端	管内部	30.4	○
118	天端	管内部	30.4	○
119	天端	管内部	30.4	○
120	天端	管内部	30.4	○
121	天端	管内部	30.4	○
122	天端	管内部	30.4	○
123	天端	管内部	30.4	○
124	天端	管内部	30.4	○
125	天端	管内部	30.4	○
126	天端	管内部	30.4	○
127	天端	管内部	30.4	○
128	天端	管内部	30.4	○
129	天端	管内部	30.4	○
130	天端	管内部	30.4	○
131	天端	管内部	30.4	○
132	天端	管内部	30.4	○
133	天端	管内部	30.4	○
134	天端	管内部	30.4	○
135	天端	管内部	30.4	○
136	天端	管内部	30.4	○
137	天端	管内部	30.4	○
138	天端	管内部	30.4	○
139	天端	管内部	30.4	○
140	天端	管内部	30.4	○
141	天端	管内部	30.4	○
142	天端	管内部	30.4	○
143	天端	管内部	30.4	○
144	天端	管内部	30.4	○
145	天端	管内部	30.4	○
146	天端	管内部	30.4	○
147	天端	管内部	30.4	○
148	天端	管内部	30.4	○
149	天端	管内部	30.4	○
150	天端	管内部	30.4	○

ID	位置	地質名	層厚	試験	試験	試験	試験
101	天端	管内部	30.5	○	○	○	○
102	天端	管内部	32.1	○	○	○	○
103	天端	管内部	30.1	○	○	○	○
104	天端	管内部	30.4	○	○	○	○
105	天端	管内部	32.8	○	○	○	○
106	天端	管内部	30.1	○	○	○	○
107	天端	管内部	30.3	○	○	○	○
108	天端	管内部	30.9	○	○	○	○
109	天端	管内部	30.9	○	○	○	○
110	天端	管内部	30.4	○	○	○	○
111	天端	管内部	30.4	○	○	○	○
112	天端	管内部	30.4	○	○	○	○
113	天端	管内部	30.4	○	○	○	○
114	天端	管内部	30.4	○	○	○	○
115	天端	管内部	30.4	○	○	○	○
116	天端	管内部	30.4	○	○	○	○
117	天端	管内部	30.4	○	○	○	○
118	天端	管内部	30.4	○	○	○	○
119	天端	管内部	30.4	○	○	○	○
120	天端	管内部	30.4	○	○	○	○
121	天端	管内部	30.4	○	○	○	○
122	天端	管内部	30.4	○	○	○	○
123	天端	管内部	30.4	○	○	○	○
124	天端	管内部	30.4	○	○	○	○
125	天端	管内部	30.4	○	○	○	○
126	天端	管内部	30.4	○	○	○	○
127	天端	管内部	30.4	○	○	○	○
128	天端	管内部	30.4	○	○	○	○
129	天端	管内部	30.4	○	○	○	○
130	天端	管内部	30.4	○	○	○	○
131	天端	管内部	30.4	○	○	○	○
132	天端	管内部	30.4	○	○	○	○
133	天端	管内部	30.4	○	○	○	○
134	天端	管内部	30.4	○	○	○	○
135	天端	管内部	30.4	○	○	○	○
136	天端	管内部	30.4	○	○	○	○
137	天端	管内部	30.4	○	○	○	○
138	天端	管内部	30.4	○	○	○	○
139	天端	管内部	30.4	○	○	○	○
140	天端	管内部	30.4	○	○	○	○
141	天端	管内部	30.4	○	○	○	○
142	天端	管内部	30.4	○	○	○	○
143	天端	管内部	30.4	○	○	○	○
144	天端	管内部	30.4	○	○	○	○
145	天端	管内部	30.4	○	○	○	○
146	天端	管内部	30.4	○	○	○	○
147	天端	管内部	30.4	○	○	○	○
148	天端	管内部	30.4	○	○	○	○
149	天端	管内部	30.4	○	○	○	○
150	天端	管内部	30.4	○	○	○	○

図 - 12. 調査・試験結果

<レーザ・レーダ計測車>

<トンネル壁面調査画像>

<背面空洞調査画像>



図 - 12. レーザ・レーダ 計測システム

保守管理支援情報

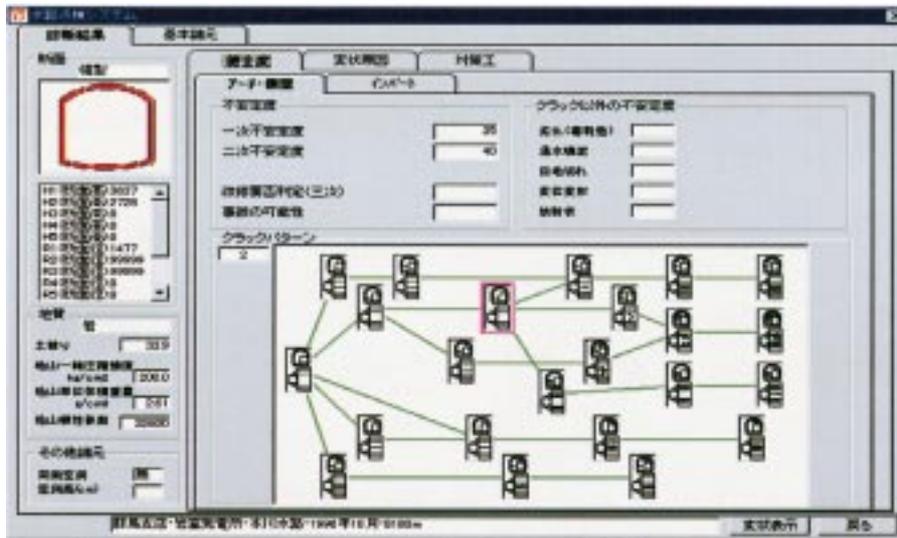


図 - 12. 健全度診断

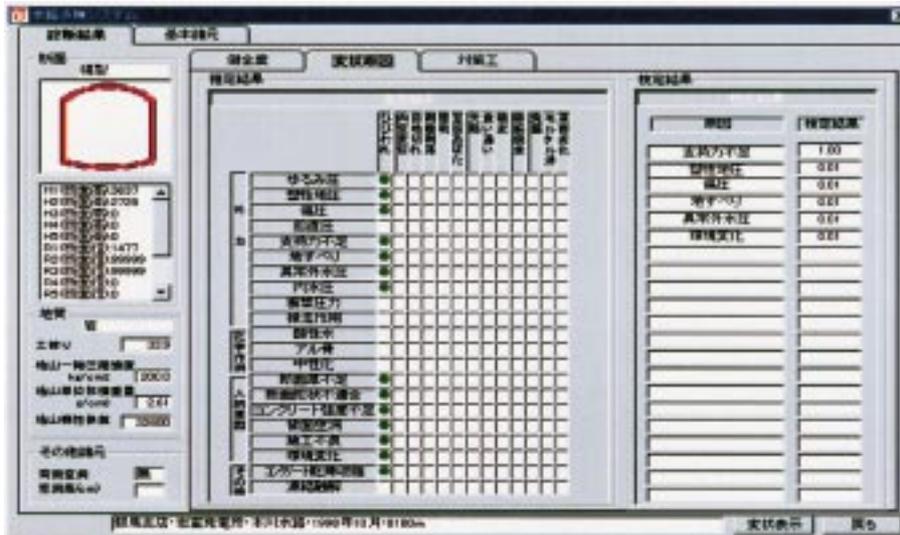


図 - 12. 変状原因推定

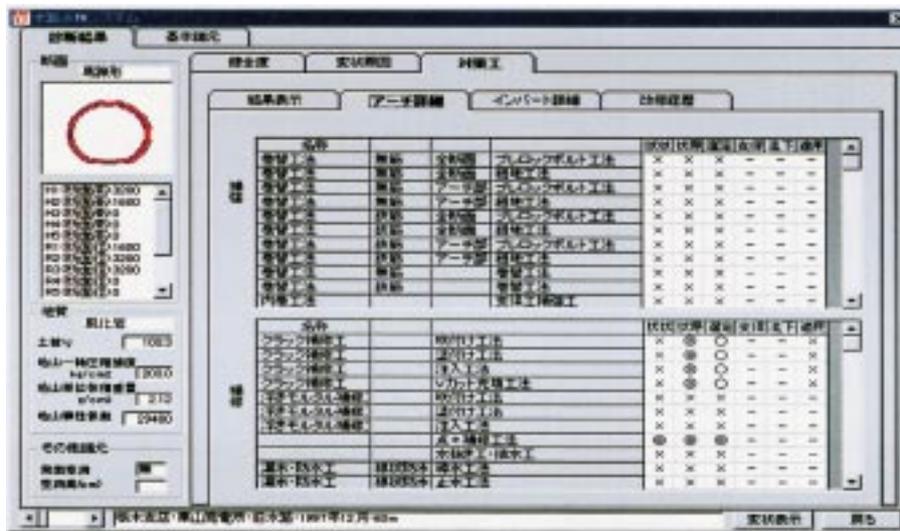


図 - 12. 対策工選定

5. おわりに

本システムは平成6年度に開発を終了したクラックパターンマッチングを主体とした健全度診断システムに、新たに覆工の残余耐力評価、および荷重増大の可能性評価ルールを組み込み、健全度診断結果等システムの信頼度を向上させたものである。これによりトンネルの応力状態を推定し、統一的かつ定量的な健全度評価をより現実に合ったものとして行えることとなった。現在本システムは、水路トンネル修繕工事の中長期計画策定に用いられており、東京電力(株)における水路トンネルの保守管理業務の的確化・効率化および、コストダウンに寄与するものとする。

今後の課題として発生クラック幅から作用外力を推定することを考えている。これは覆工に作用する外力を推定す

ることの困難さを解析的なアプローチにより解決するものである。

これにより、作用外力推定の精度を向上させ、健全度評価の信頼・向上にもつながるものと考えており現在離散ひび割れモデルを用いて検討中である。

参考文献

- 1) 桜井達朗、太田資郎、師自海、中野雅章：ひび割れの生じているトンネル覆工の耐力評価手法に関する研究、第5回地下空間シンポジウム論文・報告集、土木学会地下空間研究委員会、2000.1.
- 2) 高橋彦治、池田和彦、白井慶治、飯塚：トンネルの変状と保守、pp. 15-65、1977
- 3) (社)日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧、pp. 9-58、1993
- 4) 土木学会：トンネル・ライブラリー第5号、山岳トンネルの補助工法、pp. 3-23、1994