

V-21

導水路トンネルの設備診断技術の高度化に関する研究

北海道電力(株) 正員 志水 義彦
 北海道電力(株) 松原 高司
 北電興業(株) 正員 能登谷 勇人

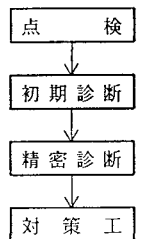
1. はじめに

北海道電力(株)では、水力発電所の主要な設備に関する設備診断技術の研究・開発を進めており、その一つに導水路トンネルがある。当社における導水路トンネルの維持管理は、図-1に示すフローに基づいて実施することになっており、このうち初期診断(ひびわれ、磨耗等の外観調査記録による点数評価)までについては、既にマニュアルとして基準化され、データの蓄積を図っているところである。

精密診断は初期診断において健全度が低いと判断されたものについて、さらに詳しく調査、検討を加え、対策工の必要性の有無等について判断を下すものであり、その判断基準は定量的、客観的なものが要求される。

今回は、研究開発中にある精密診断手法の現状の成果について報告する。

図-1 フロー



2. 精密診断手法の現状の成果

精密診断においては対象となる地点の覆工の強度・巻厚、地山物性等を把握し、覆工コンクリートの耐荷力(内的要因)と作用する外力(外的要因)を適切な手法で評価することによって、構造的安定性を検討することが必要と考えられる。さらに、ひびわれについては劣化の程度とともに、対策工等を考慮した場合、その発生原因を知ることも重要である。以上の観点から、現在検討を進めている設備診断のフローを示すと図-2のようになる。なお、将来的には精密診断結果のフィードバックによる初期診断の見直し(評価項目、評価点数)を行い、これを用いた運用を考えている。

以下に各項目ごとに研究開発の現状の成果を報告する。

(1) 精密調査手法の絞り込み

構造的安定性の検討を行うためには、現場の状況を再現した解析モデルを作成する必要がある、このためには覆工コンクリートおよび地山の形状・物性等を的確に把握しなければならない。

これらの精密調査手法は数多く提案されているが、実際の導水路トンネルを対象にした場合の適用例は少なく、手法の適用性、作業性についてはあまり明らかになってい

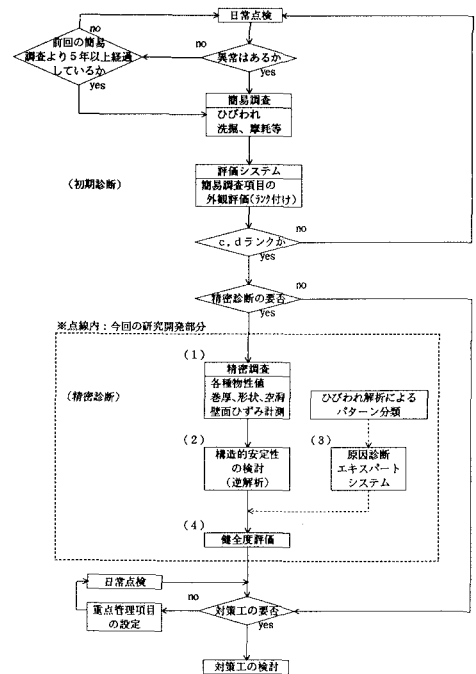


図-2 設備診断フロー(案)

Study on rational diagnostic technology of Headrace Tunnel

by Yoshihiko SHIMIZU, Takashi MATSUBARA and Hayato NOTOYA

表－1 適用性試験の結果

調査項目	調査手法	調査手法の概要	適用性	作業性	備 考	問 題 点
地山状況	地質確認	電動ロータリーマシンにより地山を掘削し、地質を把握する。ボーリングコアは各種試験に利用される。	◎	△	地山の地質状況を知るうえで、必ず実施すべき調査である。	作業性を向上させるためには、水路用専用マシンの開発が必要。
	ボアホールテレビ	ボーリング孔にソンドを挿入し、孔内画像をビデオに収録する。この画像より、クラック・節理等の情報を得る。	○	△	クラック等の観察により、ゆるみ領域の判定ができる。P波検層との併用が有効である。	画像の読みとりには熟練を要す。
	P波検層	覆工表面を打撃して発生させたP波をボーリング孔内で受振する。トンネル周辺の地山物性を弾性波速度で把握する。	○	○	トンネル周辺のゆるみ領域の判定および破砕部の検出に効果がある。	軟質でボーリング孔が自立しない地山には適用できない。
	孔内載荷試験	ボーリング孔にゴムチューブを装着したソンドを挿入し、ゴムチューブの加圧膨張（圧力の変化量と地盤の変形量）により、地盤の変形特性を把握する。	○	○	地山の変形特性を知るうえで有効な調査である。コアが採取できず、室内岩石試験ができない場合は、特に重要である。	〃
	室内岩石試験	ボーリングコアを用いて、強度・変形特性等の諸特性を把握する。	◎	○	地山物性を知るうえで必ず実施すべきである。	地質が悪く、コア採取ができない場合は適用できない。
	ジオトモグラフィ	ボーリング孔間でP波速度あるいは比抵抗を計測し、トンネル周辺の地山物性を2次元（横断面）で把握する。	◎	▲	ゆるみ領域や破砕部の方向・範囲の検出に有効である。地質が複雑な場合にはより適用性が高い。	現段階では極めて作業性が悪い。
覆工コンクリートの状態	AE-D法	カイザー効果等を利用して、地山の応力状態を推定する。	△	△	地山の応力状態を知るうえでの1資料となる。	現状の応力状態を表しているかは疑問である。コア採取ができない場合は不可。
	削孔・内視鏡観察	覆工コンクリートをコアドリルで削孔し、覆工巻厚を調べる。覆工背面の空裂の有無・大きさは内視鏡で観察する。得られたコアは各種試験に利用される。	◎	○	直接確かめることができる重要な調査である。地下レーダー探査との併用が望ましい。	数多く調査を行うことが望ましいが、覆工を傷めることになる。
	地下レーダー探査	電磁波の反射波から、覆工巻厚、背面空洞の有無、崩落地山等を把握する。	◎	△	非破壊で覆工巻厚等を把握する手法の中では、最も有力な手法の一つである。	現状ではアンテナ走査が手作業のため作業性は良くない。
	シュミットハンマー	一軸圧縮強度と基準硬度の相関性から、覆工コンクリートの圧縮強度を推定する。	○	◎	データのばらつきはあるが、概略的な圧縮強度を把握することが可能。	表面劣化が激しいところでは表面を研磨する必要がある。
	簡易打撃装置	打撃応答量との相関性から、覆工コンクリートの圧縮強度、弾性係数を推定する。	○	◎	圧縮強度、弾性係数の概略と簡易に把握できる。	打撃方向等の影響を考慮したデータの蓄積が必要。
	コンクリートの室内試験	覆工コンクリートのコアを用いて、強度・変形特性等の諸特性を把握する。	◎	○	覆工コンクリートの物性を知るうえで必ず実施すべき試験である。	――
応力状態	壁面ひずみ法	トンネル覆工表面にひずみゲージを貼り、オーバーコアリングして解放ひずみを測定する。これより覆工表面の応力状態を把握する。	◎	○	覆工表面に生じている応力を比較的簡易に把握でき、適用性は高い。	接着面の広いゲージを使用し、骨材の影響を除去する必要がある。
	AE-D法	カイザー効果等を利用して、覆工コンクリートの応力状態を推定する。	△	△	覆工の応力状態を知るうえでの1資料となる。	引張応力が生じている覆工には適用できない。

◎適用性大、作業性良好 ○適用可能、作業性普通 △適用性小、作業性悪い ▲作業性極めて悪い

いのが実状である。そこで、2箇所の手導水路トンネル（ひびわれ等の変状が大きい所と小さい所）を対象に、幾つかの手法を抽出し、これらの適用性試験を実施した。

試験結果を総括したものを表－1に示す。適用性、作業性の検討は各手法間の対比により行ったが、この結果をもとに精密診断に必要と思われる調査手法を抽出すると、

地山を対象にしたものでは、

①ボーリング ②室内岩石試験

場合により、

③P波検層 ④孔内載荷試験、

また、覆工コンクリートを対象にしたものでは、

①削孔・内視鏡観察 ②地下レーダー ③室内試験 ④壁面ひずみ法

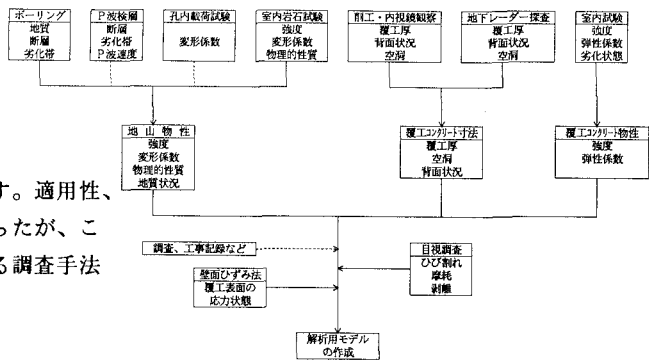
となる。

なお、精密調査から解析モデル作成までをフローで示すと図－3のようになる。

（2）構造的安定性の検討（逆解析手法）

導水路トンネルの構造的安定性は、作用外力による覆工コンクリート内部の応力状態と覆工コンクリート自身の耐荷力の関係から決まると考えられる。覆工自身の耐荷力はコアの強度試験等により、容易に求めることができる。しかしながら、作用外力については、地山の不連続性、ゆるみ領域の判定の難しさ等から、これを正確に把握することは極めて困難であろう。

この問題を解決するため、比較的測定が容易な覆工表面に生じている応力状態に着目し、この応力値から作用外力を推定する方法（逆解析手法）を定式化した。この方法によれば、数個の覆工表面の応力値から作



図－3 解析モデル作成までのフロー

用外力の推定が可能であり、また、作用外力による順解析で覆工内部の詳細な応力状態を知ることができる。

逆解析手法の妥当性については、数値解析的に検討し、十分な精度が得られたため¹⁾、今回は既設導水路トンネルを対象に、実測データ（壁面ひずみ法による覆工表面応力値）を用いて作用外力を推定し、推定された外力による順解析結果と同一箇所に埋設された計器による観測結果を比較することにより、本手法の適用性について検討した。

a. 実測箇所の概要

対象とした導水路トンネルは、昭和20年代後半に竣工したもので、昭和62～63年にかけて200m区間で覆工巻き直しによる全面改修を実施した。その際、図-4に示すように各種計器を埋設した。

b. 覆工表面応力の測定

測定は覆工コンクリートの壁面にひずみゲージを貼り付け、コアドリルでひずみゲージを貼り付けた部分のコンクリートをくり抜き、周辺のコンクリートと縁切りすることにより生じる解放ひずみを測定する方法（壁面ひずみ法）を用いた。測定箇所を図-5に示す。

c. 解析手法の適用性の検証

覆工表面応力（壁面ひずみ法）を入力データとした逆解析・順解析を行い、埋設計器位置での解析値と実測値（ひずみ計による応力値）との比較検討を行った。

既往調査資料により定めた解析対象断面を図-6、各物性値を表-2に示す。なお、有限要素は2次元アイソパラメトリック要素とし、その分割数は、1680（周方向要素数120、半径方向要素数14）とした。

解析値と実測値の比較を図-7に示す。これによると各測点ごとに多少ばらつきが見られるが全体の傾向は一致し、解析モデルと現場状況の若干の差異（粘土層の範囲、天端空洞の有無等）を考慮すると、十分に適用性があると判断される。

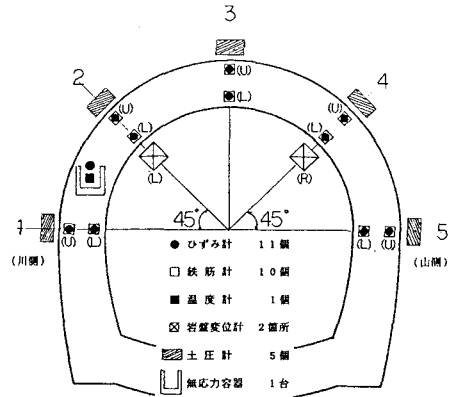


図-4 埋設計器の配置、数量

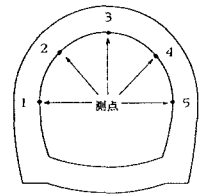


図-5 測点

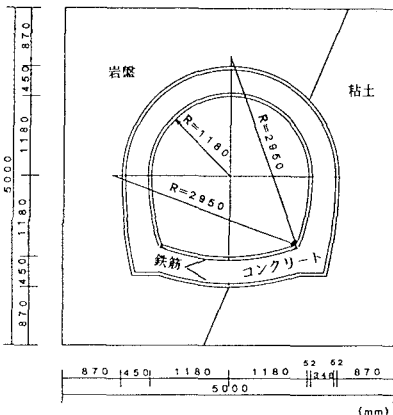


図-6 解析対象断面

表-2 各物性値の一覧

	静弾性係数 (kgf/cm ²)	ポアソン比
コンクリート	275,000	0.20
鉄筋	2,100,000	0.30
岩盤	30,000	0.25
粘土	150	0.30

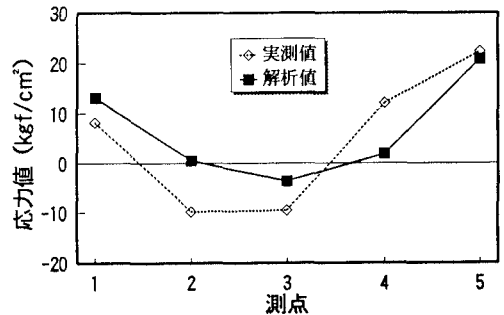


図-7 解析値と実測値の比較

(3) ひびわれ原因診断エキスパートシステム

ひびわれの発生原因を、外観の状態(ひびわれ形状、ひびわれ幅等)および環境条件等の比較的簡易に求められるデータから推定するためのエキスパートシステム(プロトタイプ)の開発を行った。

a. システムの概要(診断フロー)

エキスパートシステムの診断フローを図-8に示す。

このシステムは、まず現地調査から得られるひびわれ形状を幾何学的な模様でとらえ、予め検討した形状パターンの中から該当するものを選定するとともに、ひびわれの原因追求のための一般的な情報となる事象(レベル1;規則性、ひびわれ幅、発生時期、環境条件等)を与えて推論を行い、ひびわれの上位仮説(曲げ、乾燥収縮等の応力レベルまでの発生原因)を推定する。

次に上位仮説の推定結果が構造ひびわれ(曲げ、せん断、ねじりひびわれ)であれば、更にその直接原因を把握するために、導水路トンネル固有の情報となる事象(レベル2;土被り、地山の地質条件、ひびわれ発生位置等)を与え、下位仮説(上位仮説を発生させるような外力の種類、自然現象等の発生原因)を推定していくというものである。

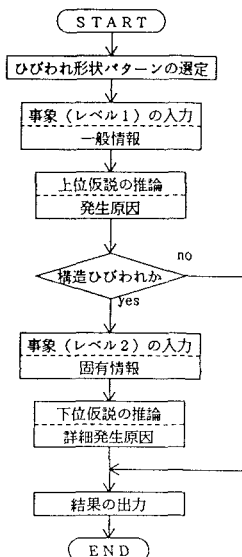


図-8 診断フロー

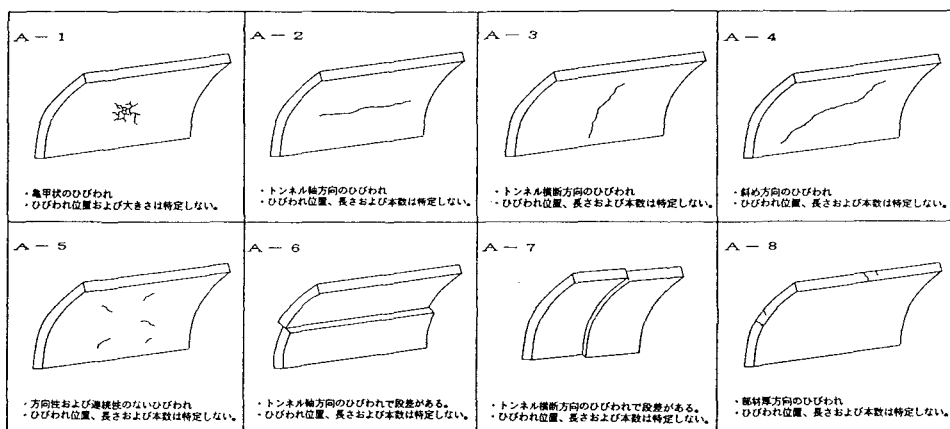


図-9 ひびわれのパターン分類(側壁・アーチ部)

b. ひびわれ形状のパターン化

現地調査、既往文献・資料調査を踏まえ、ひびわれを形状・連続性・方向に着目してインバート部を5つ、側壁・アーチ部を8つの形状パターンに分類した。側壁・アーチ部についてのパターンの詳細は図-9のとおりである。

c. 上位仮説・事象(レベル1)の選定

本検討では、ひびわれの発生が応力に起因するものであるとの考えに基づき、図-10のように応力を分類することにより、上位仮説を以下の12種類とした。

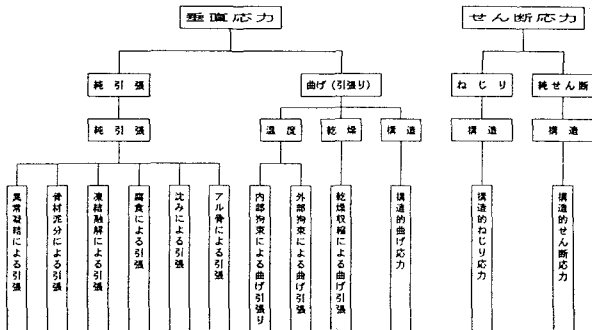


図-10 ひびわれを発生させる応力の分類

- ①曲げひびわれ ②せん断ひびわれ ③ねじりひびわれ ④内部拘束による温度ひびわれ
 ⑤外部拘束による温度ひびわれ ⑥乾燥収縮ひびわれ ⑦アルカリ骨材反応によるひびわれ
 ⑧鉄筋腐食によるひびわれ ⑨凍結融解ひびわれ ⑩沈みひびわれ
 ⑪セメントの異常凝結によるひびわれ ⑫骨材の泥分によるひびわれ

また、ひびわれに関する事象（レベル1）は以下の8種類とした。

- ①規則性 ②ひびわれ幅 ③連続性 ④ひびわれ深さ ⑤ひびわれ部分の状態 ⑥発生時期
 ⑦環境条件 ⑧部材厚

d. 下位仮説・事象（レベル2）の選定

上位仮説の原因、すなわち下位仮説は以下に示す11種類とした。

- ①塑性圧 ②塑性偏圧 ③地山の緩み ④水圧 ⑤水偏圧 ⑥凍上現象 ⑦地盤沈下 ⑧不同沈下
 ⑨地震 ⑩地すべり ⑪設計施工

ここでは、上位仮説にあげた12種類のうち、構造ひびわれ（曲げ、せん断、ねじりひびわれ）についてのみ着目し選定したが、その理由は構造ひびわれの原因については導水路トンネルという構造・設置条件等の特性から、さらに細かく直接の原因となる外力の種類を推定していくことが可能となり、また、そのことが対策工の検討に極めて重要となるからである。これに対し、例えば乾燥収縮等のひびわれについては下位仮説を推論するまでもなく、ある程度、発生原因の推定が容易と考えられる。

また、ひびわれに関する事象（レベル2）は以下に示す9種類とした。

まず、外観等の簡易な調査データから得られるものとして、

- ①作用応力（上位仮説推定結果より決定） ②発生位置 ③分布 ④ひびわれ以外の劣化現象
 ⑤気象・地象

精密調査や設計図書の調査を要するものとして、

- ⑥設計・施工条件 ⑦地質 ⑧設置条件
 ⑨その他（線形、近接施工の影響等）

e. ケーススタディ結果

実際にトンネルに発生しているひびわれの発生原因について、専門家による意見と本システムによる推定結果を比較したものを表-3に示す。これを見ると両者はほぼ一致している。

表-3 ケーススタディ結果

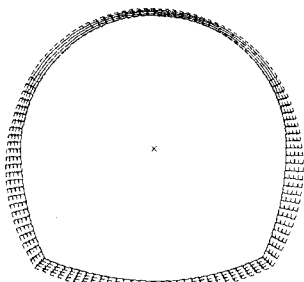
事例	専門家の意見	推定結果
1	①塑性圧 ②覆工背面の空洞	①塑性圧 (0.95) ②地山の緩み (0.90) ③塑性偏圧 (0.56)
2	①地山の緩み ②支持力不足 ③不同沈下	①塑性圧 (0.96) ②地山の緩み (0.90) ③不同沈下 (0.87)

括弧内は確信度

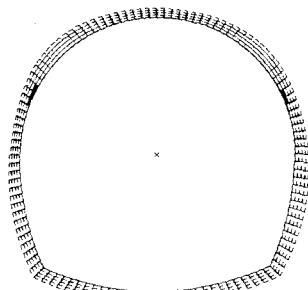
（4）健全度評価

以上の成果により、導水路トンネルの構造的安定性の検討とひびわれ原因の推定が可能となった。次に必要となるのは、どのように健全度の評価し、これを初期診断へフィードバックするかということである。

現在、これらを確立するため実際の導水路トンネルを対象に設備診断フローに基づいた精密診断ケーススタディを行っている。ケーススタディ結果を図-11（初期診断のランク：a）、図-12（同ランク：b）、図-13（同ランク：c）に示す（初期診断結果はa～dのランク分けされ、a→dになるに従い、ひびわれ等の変状が著しいことを表す）。これらの図は精密調査、逆解析手法により求めた覆工内部の応力状態と覆工の耐荷力（コアの強度試験による）を比較し、耐荷力を越える応力が発生している箇所を表現（図中の要素が黒色となっているところ）したものである。この結果によれば初期診断のランクと精密診断による構造的安定性の検討結果は整合がとれている。すなわち初期診断aランクの断面では耐荷力を越える応力が全く発生していないのに対し、bランクの断面では左右アーチ部の2箇所、cランクの断面では左右のアーチ部、天端裏側の3箇所耐荷力を越える応力が発生している。また、b、cランクの断面では実際に左右のアーチ部にひびわれが発生しており（天端裏側については確認不可能）、この点でも良い整合結果となっている。



図一 1 1 精密診断結果（ランク a）

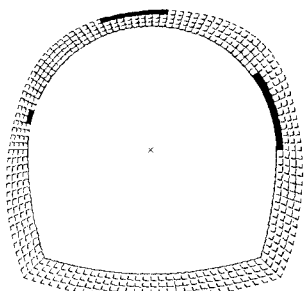


図一 1 2 精密診断結果（ランク b）

5. おわりに

現状の成果により、導水路トンネルの健全度の定量的な評価が可能となった。今後はケーススタディを積み重ね、健全度評価、初期診断へのフィードバックについて検討していく予定である。

最後に本研究を行うにあたり御指導をいただいた室蘭工業大学建設システム工学科岸徳光助教授ならびに関係各位に厚くお礼申し上げます。



図一 1 3 精密診断結果（ランク c）

<参考文献>

- 1) 志水、坂本、能登谷、岸：導水路トンネルに作用する外力の推定について、土木学会北海道支部論文報告集 第48号、1992
- 2) 志水、坂本、能登谷：導水路トンネルの設備診断技術の高度化、電力土木 第245号、1993