

V-23

外力推定手法の導水路トンネルへの適用性

北海道電力株式会社 正会員 工藤 正彦
北電興業株式会社 正会員 工藤 雄一
同上 正会員 能登谷 勇人

1. はじめに

現在、北海道電力(株)では、水力発電設備の効率的な維持管理、適正な老朽化対策を図っていくことを目的として、一定の健全度評価基準を設けて設備診断を実施している。

なかでも、導水路トンネルに関しては、その設置条件から構造物外観を点検、評価することが困難なため、初期診断(ひび割れ、洗掘・摩耗などによる点数評価)のほかに、精密診断(精密調査、外力推定結果からの構造的安定性の評価)も実施することとしている(図-1参照)。しかしながら、トンネル周囲に作用する外力の推定や、地山の諸物性の計測、評価が難しいことから、その診断手法は確立されていないのが現状である。

そこで、本検討では精密診断手法の確立に向けて、これまでに研究してきた精密診断手法の現地への適用性^{1), 2)}を検証するために、既設導水路トンネルを対象としたケーススタディを実施した。

以下、その結果について、初期診断、精密診断手法の概要も含めて報告する。

2. 診断手法

2.1. 初期診断手法の概要

初期診断は、劣化状態を判定する

項目として、ひび割れ、洗掘・摩耗、凍害、剥離・剥落を選択し、項目毎に劣化程度に基づく点数付けによるランク分けで、相対的な評価を行うものである。

具体的には、導水路トンネル1ブロック(軸方向に10m)をアーチ部、

側壁部、インバート部の3部位に分類し、劣化程度により4段階にランク分けを行っている(表-1参照)。

また、総合評価としては、項目別に評価された評価項目毎の評価点を総計し、その点数により健全度を4段階にランク分けを行っている(表-2参照)

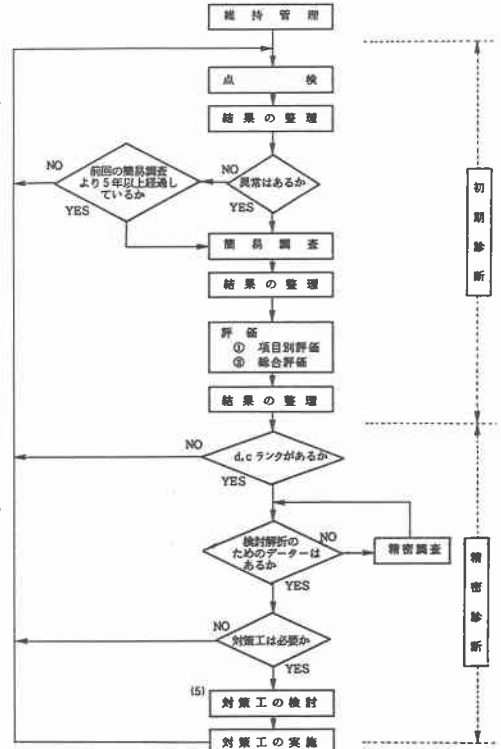


図-1 導水路維持管理の流れ図

表-1 項目毎の評価基準

評価 ランク	評価 点	導水路の安全性 機能性に及ぼす影響	劣化の程度
a	0	影響なし	軽微、またはなし
b	2	将来脅かす可能性あり	進行すればcになる
c	5	近い将来重大となる可能性あり	やや大きい、進行性
d	10	重大	著しく大きい

2.2. 精密診断手法の概要

現状における精密診断は、図-2の流れ図に従い実施することとしている。

2.2.1 現地計測項目

精密診断（外力推定）に必要な諸元、計測方法は以下の通りである。

1) トンネル断面形状
コアボーリング、電磁波レーダー探査を行い、覆工巻厚、背面空洞形状を把握する。

2) 諸物性（覆工コンクリート、地山）

室内試験より引張強度、圧縮強度、弾性係数、ポアソン比を計測する。

3) 周方向応力

応力解放法の原理を利用した壁面ひずみ法により、覆工コンクリート内壁表面の周方向応力を計測する。

2.2.2 逆解析³⁾

既設トンネルの作用外力を求めることは、地山の不連続性、ゆるみ領域の不明確さからきわめて困難であり、孔壁ひずみ法等により覆工コンクリート内部の詳細な応力状態を直接求めることも、経済性、作業性の面からも実用的ではない。

そこで著者らは、かねてより、これらの問題を解決するために「壁面ひずみ法」を利用した逆解析手法を提案している。

以下、その概要について述べる。

1) 解析の仮定

図-3に示すように、トンネル周辺を大きな地山の一要素と仮定し、その要素の主応力状態を水平成分、鉛直成分、せん断成分に分け、それを作用外力とした。

2) 逆解析の定式化

本解析は覆工内壁表面の実測応力を入力データとして与え、作用外力を推定していくものである。まず、図-3に示すような外力が作用したとき、覆工内壁表面の実測点位置における推定（解析）応力は次式で表すことが出来る。

表-2 総合の評価基準

評価ランク	評価内容	評価基準
a	現状で問題なし。	最高評価点、合計評価点ともに0点
b	定期的に監視する必要がある。	最高評価点が2点か、または合計評価点が2点～4点
c	安定性が低い、または変状がある。	最高評価点が5点か、または合計評価点が6点～10点
d	安定でない、または重大な変状がある。	最高評価点が10点か、または合計評価点が12点以上

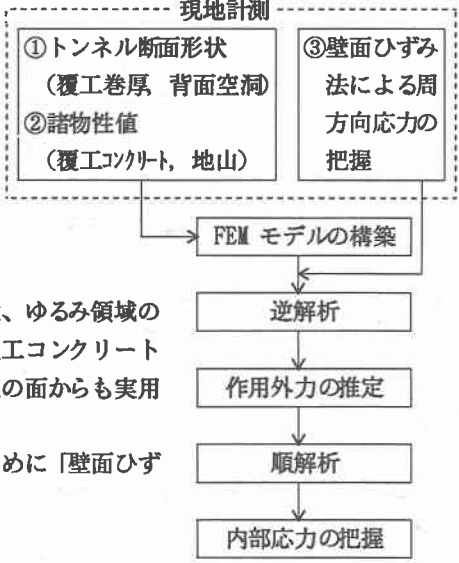


図-2 解析全体の流れ図

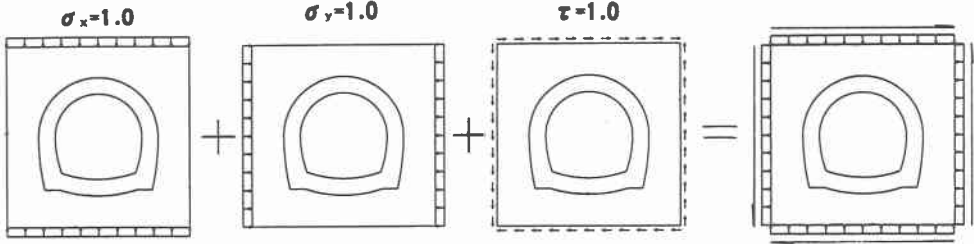


図-3 単位荷重載荷状況

$\{\sigma\} = [V] \{q\}$ $\{\}$ はベクトル表示

ここで、 $\{\sigma\}$ ：実測点位置の推定応力、 $\{q\}$ ：トンネル周囲の作用外力、 $[V]$ ：トンネル周囲に単位荷重（ $\sigma_x, \sigma_y, \tau=1.0$ ）を載荷した3回の事前順解析により得られる応力（実測点位置）から構成されるマトリックス。

次に、覆工内壁表面の実測応力を $\{\sigma_o\}$ とすると、各実測点位置における推定（解析）応力と実測応力がもっとも近似するように最小自乗法を利用して $\{q\}$ について整理すると、最終的にトンネル周囲の想定応力ベクトル $\{q\}$ は

$$\{q\} = [[V]^T [V]]^{-1} [V]^T \{\sigma_o\}$$

として得られる。

2.2.3 構造的安定性評価基準

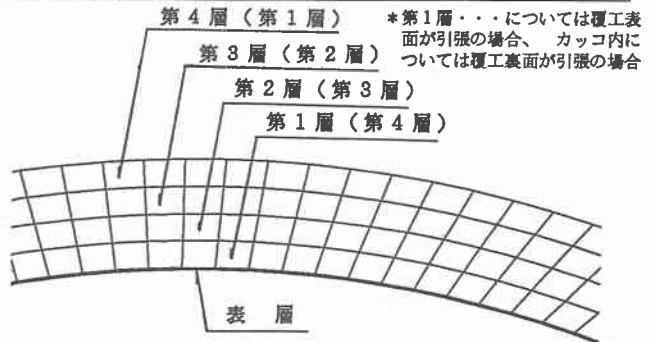
「逆解析」により得られ

表-3 評価基準(案)

た作用外力による「順解析」で、覆工内部の応力状態を把握することが出来るが、本検討では、外力により発生する「引張応力の分布状況（引張強度を越える領域）」に着目し、表-3に示すような評価基準(案)を作成した。

なお、表中の表層、第1層・・・については、図-4に示すメッシュ分割された覆工コンクリートについて、表現したものである。

評価ランク	発生応力の分布状況
I	引張強度を全く超えていない。または越えている箇所が表層
II	引張強度を越えている箇所が覆工厚の1/4程度（第1層）
III	引張強度を越えている箇所が覆工厚の1/2程度（第2層）
IV	引張強度を越えている箇所が覆工厚の1/2以上（第3層以上）



3. 既設導水路トンネルへの適用（ケーススタディ）

図-4 覆工コンクリート部メッシュ図

2章まで得られた手法を用いて、導水路トンネルの健全度を評価し、初期診断へのフィードバックを行うために、既設導水路トンネルを対象として平成2年度より6つの発電所、計17断面でケーススタディを行ってきた。

以下に解析条件、結果等を示す。

3.1. 解析条件

解析は逆解析、順解析とも2次元有限要素法（線形解析）を基本として行い、要素種類は4角形アイソパラメトリック要素を用いた。分割数は覆工については600要素とし、測定周方向応力を与える導水路内壁の表面要素の厚さは、最大主方向応力と周方向応力の作用方向を一致させるために実スケールで5mmとした。地山についても600要素とし、トンネル構造物を対象としていることから、平面ひずみ問題として解析を行った。

また、覆工厚は5カ所で実測しており、計測ポイントが少ないことから他の部分については、スプライン補間を行いメッシュを作成した。図-5に解析に用いたメッシュ図を示す。

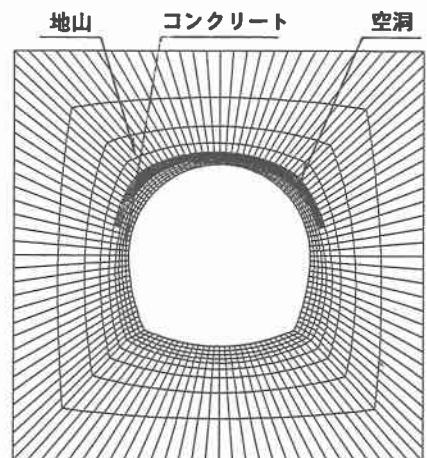


図-5 代表的なメッシュ図

3.2. 解析結果

これまでに実施してきたケーススタディ結果を基に、ここでは測定により得られた周方向応力と解析値の比較検討を行った。
なお、図-6に計測ポイントを示す。

代表的な例として、図-7には比較的変状の大きいA発電所、図-8には比較的変状の少ないF発電所導水路の検討結果を示す。
A発電所に関しては現地の変状は大きく、ひび割れも多数発生していることから、数値的に若干のばらつきが見られるが、周方向応力については、ほとんどのケースにおいて、その傾向は一致している。また、F発電所導水路については現地にお

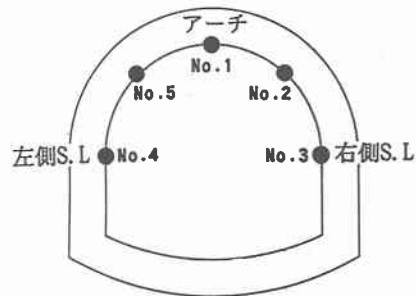


図-6 計測ポイント

○実測値
□解析値

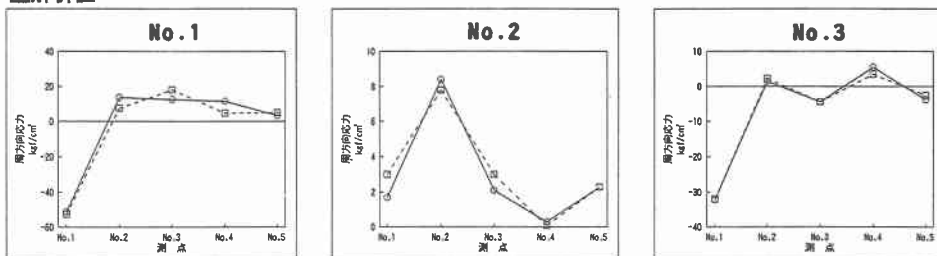


図-7 測定値と解析値の比較 (A発電所)

○実測値
□解析値

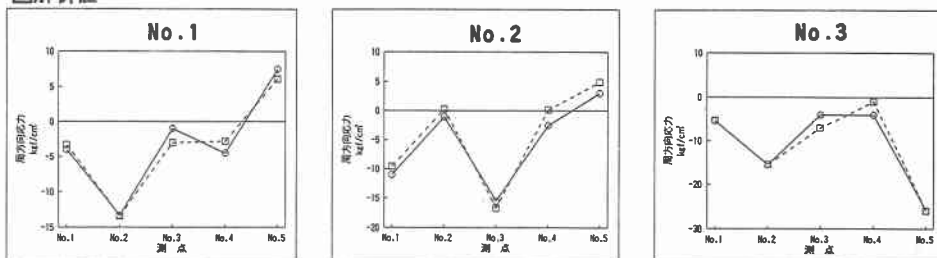


図-8 測定値と解析値の比較 (F発電所)

るトンネルの変状、ひび割れも少なく、測定値と解析値は、ほぼ一致している。

これらのことから、解析モデルと現場条件との差を考慮すれば、本手法の妥当性が確認できたといえる。

次に、図-9、図-10にA発電所の No. 3断面の導水路展開図(図中の実線がひび割れを示す)と最大主応力の解析結果を示す。

これらより、現場でひび割れが多数発生している右左アーチ45°付近に、解析でも引張応力が集中している様子がわかる。

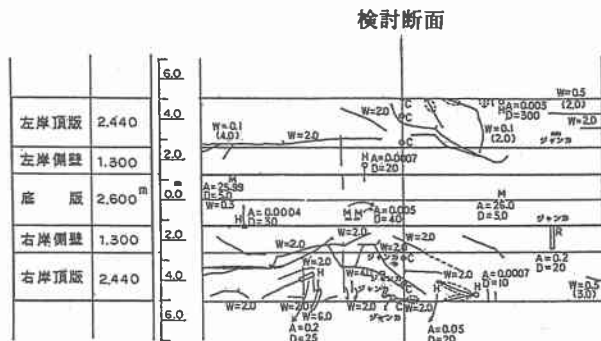


図-9 導水路展開図 (A発電所 No. 3断面)

以上の結果より、本手法を用いることで、地山の作用外力、覆工内部の応力分布を把握することが出来る

ものと考えられる。

3.3. 比較検討

表-4に初期診断結果と構造的安定性評価結果の比較を示す。これより、以下のよう
なことが言える。

- 1) 初期診断ランク aに対しては解析評価
ランク Iが適合している。
- 2) 初期診断ランク bに対しては解析評価
ランク IIが適合している。
- 3) 初期診断ランク cに対してはデータ数
が1個と不足し、傾向を確定するこ
ろまでは至らないが、今回のデータに
限って言えば解析評価ランク IIIが適
合している。
- 4) 初期診断ランク dに対してもデータ数
が2個と不足し、これも傾向を確定す
るところまでは至らないが、解析評価
ランクは初期診断ランクほど厳しくな
く、評価ランク IIに留まっている。

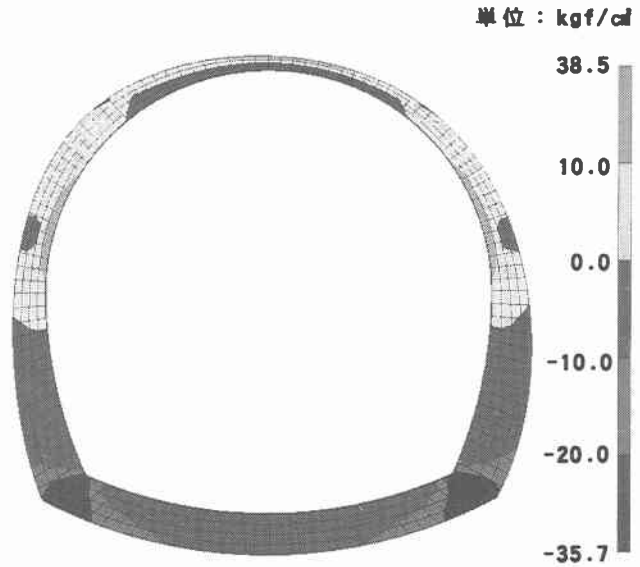


図-10 最大主応力コンター図

このようにケーススタディを重ねて来た結果、初期診断ランクの工学的な意味合いを明らかにすることが
でき、初期診断ランクの妥当性が裏付けられたものと考えられる。

表-4 初期診断結果と解析値の比較

4. おわりに

本検討により、外力推定手法の導水路トンネルへの適用性が明らかとなり、作用外力の推定、覆工内の応力分布を把握できるようになった。

また、構造的安定性評価基準と組み合わせることで、既設導水路トンネルの健全度の定量的な評価が可能となるものと考えられる。

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。

<参考文献>

- 1) 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
- 2) 志水, 松原, 能登谷: 導水路トン

		初期 診断	解析 結果	覆工の引張 強度kgf/cm ²	解析によるメッシュの引 張破壊状況
A発 電所	No. 1	c	Ⅲ	22.0	1層3ヶ所、2層1ヶ所
	No. 2	b	I	22.0	破壊なし
	No. 3	d	Ⅱ	19.0	1層3ヶ所、表層3ヶ所
B発 電所	No. 1	b	Ⅱ	36.5	1層1ヶ所
	No. 2	b	Ⅱ	28.0	1層2ヶ所
	No. 3	b	Ⅱ	19.5	1層2ヶ所
C発 電所	No. 1	b	Ⅱ	25.0	1層3ヶ所
	No. 2	a	I	25.0	表層1ヶ所
	No. 3	b	Ⅱ	25.0	1層2ヶ所、表層1ヶ所
D発 電所	No. 1	d	Ⅱ	26.5	1層2ヶ所
	No. 2	a	I	22.0	表層1ヶ所
	No. 3	b	Ⅱ	26.5	1層2ヶ所
E発 電所	No. 1	a	Ⅱ	15.0	1層2ヶ所、表層1ヶ所
	No. 2	a	I	8.0	破壊なし
F発 電所	No. 1	a	I	25.0	破壊なし
	No. 2	a	I	21.0	破壊なし
	No. 3	a	I	25.0	破壊なし

ネルの設備診断技術の高度化に関する研究, 土木学会北海道支部論文報告集 第49号, 1993

- 3) 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