

I-28

導水路トンネルに作用する外力の推定について

北海道電力㈱ 正員 志水 義彦
 北海道電力㈱ 正員 坂本 容
 北電興業㈱ 正員 能登谷 勇人
 室蘭工業大学 正員 岸 徳光

1. はじめに

電力施設構造物うち、送電鉄塔、水圧鉄管、ゲート等外観を点検できる施設については、変形や劣化の状況はある程度把握することが可能であり、その維持管理も比較的容易であると考えられる。しかし、トンネルやダム構造物のような場合には、施工後の地山の状態、基礎地盤の点検の困難さ等からその管理も一層難しいものとなっている。中でも導水路トンネルにおいては、アーチ作用を期待した無筋コンクリート構造が多いことから、コンクリートのひび割れは構造的に好ましいものでなく、材料の劣化、損傷の程度と共に、その原因となる作用荷重を評価し、適切な補修、補強を行うことが必要である。

ここでは、導水路トンネルの効率的な劣化診断手法を確立するための基礎資料を得ることを目的として、覆工コンクリートの表面応力を用いて作用外力およびトンネル周辺の応力状態を推定する方法を数値解析的に検討した。

2. 解析方法

導水路トンネルは、延長が数十kmにもおよぶ細長い構造物であるため、その軸方向の挙動も無視できないものと考えられるが、ここでは平面歪状態と仮定し、2次元有限要素法を用いて解析している。作用外力の推定では、有限個の覆工コンクリートの表面応力を用いて、覆工コンクリートの各要素に作用する地山圧力をそれぞれ推定することは精度的に不可能と考えられる。そこで、地山圧力の概略的な分布状態を把握することを第一の目的と考え、覆工コンクリートを大まかに8分割し、各ブロックに作用する平均圧力を求める形で評価することとした。また、トンネル周辺の応力状態の推定では、トンネル周辺を大きな地山の1要素と考え、その要素の応力状態を求めることにした。

さらに、覆工コンクリート表面の応力値に関しては、設定地圧分布および設定周辺応力に対する有限要素解析結果を用いて手法の妥当性を検討することとした。有限要素解析結果を用いた数値シミュレーションにおいては、その解析値を設定有効桁に丸めて用い、設定有効桁数と推定値の精度を比較し、適用性の検討を行っている。なお、本検討では、アイソパラメトリック四辺形要素を採用した。

(1) 最小自乗法による地山圧力の推定

実測データに相当する応力ベクトルを $\{\sigma_o\}$ 、実測点位置における推定された応力ベクトルを $\{\sigma\}$ とすると、両者の残差ベクトル $\{\delta\}$ は

$$\{\delta\} = \{\sigma_o\} - \{\sigma\} \quad (1)$$

各ブロックに単位地山圧力(今回の場合は1 kgf/cm²)を載荷した場合の実測点位置の応力ベクトルから構成されるマトリックスを $[V]$ 、各ブロックの想定荷重ベクトルを $\{q\}$ とくと、 $\{\sigma\}$ は次式のように示される。

$$\{\sigma\} = [V] \{q\} \quad (2)$$

(2) 式を(1)式に代入すると

$$\{\delta\} = \{\sigma_0\} - [V] \{q\}$$

最小自乗法により残差 $\{\delta\}$ の自乗和 E が最小になるように $\{q\}$ を求める。

$$E = \sum \{\delta\}^2$$

$$= \{\delta\}^T \{\delta\}$$

$$= (\{\sigma_0\}^T - \{q\}^T [V]^T) (\{\sigma_0\} - [V] \{q\})$$

$$= (\{\sigma_0\}^T - \{q\}^T [V]^T) (\{\sigma_0\} - [V] \{q\})$$

$\{\sigma_0\}^T [V] \{q\} = \{q\}^T [V]^T \{\sigma_0\}$ の関係を用いて

$$E = \{\sigma_0\}^T \{\sigma_0\} - 2 \{q\}^T [V]^T \{\sigma_0\} + \{q\}^T [V]^T [V] \{q\}$$

上式を $\{q\}$ で偏微分すると

$$\frac{\partial E}{\partial \{q\}} = -2 [V]^T \{\sigma_0\} + 2 [V]^T [V] \{q\}$$

となり $\frac{\partial E}{\partial \{q\}} = 0$ のとき E は最小になる。

したがって

$$\{q\} = [[V]^T [V]]^{-1} [V]^T \{\sigma_0\} \quad (3)$$

として求まる。

なお、本解析で用いた覆工コンクリートの表面応力は、実測により比較的容易に求めることのできる周方向応力（最大あるいは最小主応力）である。

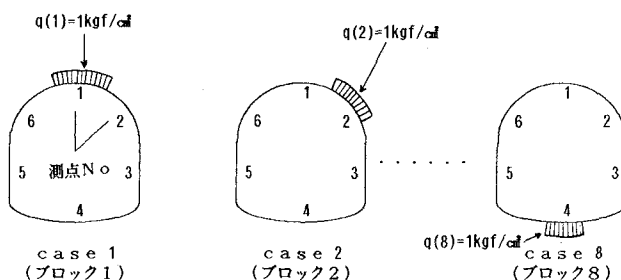


図-1. 外力推定用のモデル

具体的には図-1に示すように、ケース x での各測点 i での応力を

$$\sigma_i = f_i(X) \text{ とすると}$$

各ブロックに単位荷重を与えたときに導水路トンネルの応力ベクトルからなるマトリクスを $[V]$ とおくと、通常のFEM解析を8回実施すると $[V]$ は

$$[V] = \begin{bmatrix} f_1(1) & f_1(2) & \dots & f_1(8) \\ f_2(1) & f_2(2) & \dots & f_2(8) \\ f_3(1) & f_3(2) & \dots & f_3(8) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_6(1) & f_6(2) & \dots & f_6(8) \end{bmatrix}$$

また、各ブロックの推定荷重強度ベクトル $\{q\}$ により、各点の推定応力ベクトル $\{\sigma\}$ は次式のようになる。

$$\{\sigma\} = [V] \{q\} \quad \text{ここで} \quad \{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \vdots \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} \quad \{q\} = \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ \vdots \\ q_8 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ここで実測データに相当する応力ベクトルを $\{\sigma_o\}$ とおくと、推定応力ベクトル $\{\sigma\}$ との残差ベクトル $\{\delta\}$ は以下になる。

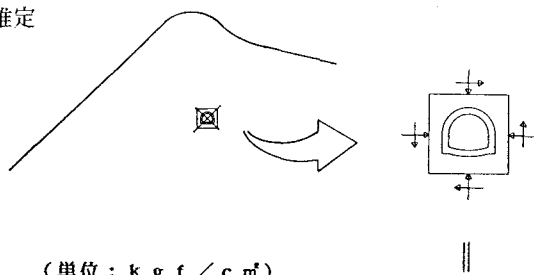
$$\{\delta\} = \{\sigma_o\} - \{\sigma\} \quad \text{ここで } \{\sigma_o\} = \begin{Bmatrix} \sigma_{o1} \\ \sigma_{o2} \\ \sigma_{o3} \\ \vdots \\ \sigma_{on} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここで(3)式に $[V]$ 、 $\{\sigma_o\}$ を代入し荷重 $\{q\}$ を推定する。

$$\{q\} = [[V]^T [V]]^{-1} [V]^T \{\sigma_o\} \quad (3)$$

(2) 最小自乗法によるトンネル周辺の応力状態の推定

図-2に示すように、トンネル周辺に単位応力 (σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} 、おののおの 1 kgf/cm^2) を載荷した場合の実測点位置の応力ベクトルを $[V]$ 、トンネル周辺の想定応力ベクトルを $\{q\}$ 、実測データに相当する応力ベクトルを $\{\sigma_o\}$ とおき、(1)と同様な手法で $\{q\}$ を推定する。



(単位: kgf/cm^2)

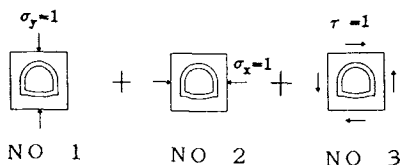


図-2. トンネル周辺の応力のモデル化

3. 解析結果

(1) 数値解析A (地山圧力)

数値シミュレーションは既設トンネルの一断面 (3r馬蹄形、 $r=1.0\text{m}$) を採用した。図-3に解析用断面の概略図を示す。寸法は、内空の高さ・幅が 2.0m であり、コンクリート厚さは側壁部・アーチ部が 40cm 、敷部が 30cm である。解析は、地山の

範囲をコンクリート厚さの約3倍まで考慮し、地山底部を固定としている。有限要素解析における分割の程度は、総節点数が1320、総要素数が1200 (周方向要素数120、半径方向要素数10) である。

実測データに対応する応力値の有効桁数と測点数を変化させた場合の荷重推定値の変動について、様々な設定地山圧力を想定し、検討を行った。以下にシミュレーション結果の1例を示す。

図-4は設定した地山圧力分布 (実際の場合はこの値は未知の値) を示しており、ブロック1~8に変動圧力が作用するものとした。また、図-5はブロックの基本地山圧力分布である。

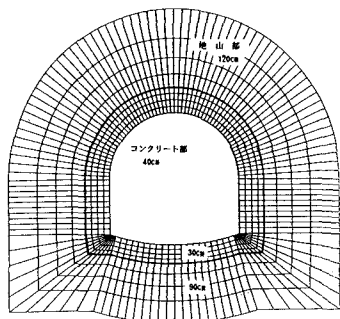


図-3. 解析用断面 (解析A)

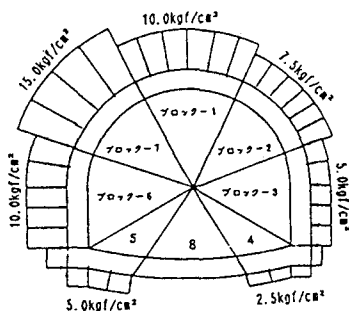


図-4. 設定地山圧力分布

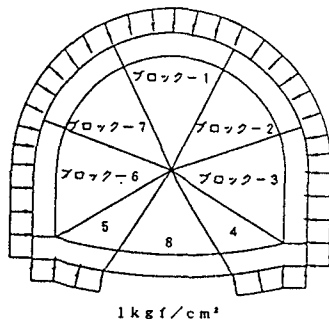


図-5. 基本地山圧力分布

測点設定ケースは以下の2ケースである。(図-6参照)

- ケース1 覆工コンクリート表面応力測定点を断面全体に等間隔に配したもの
- ケース2 覆工コンクリート表面応力測定点をアーチのみに等間隔に配したもの

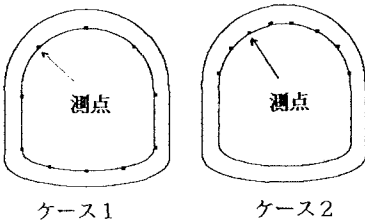


図-6. 測点のケース

図-7は、ケース1のシミュレーション結果を示したものである。これらの結果を見ると、有効桁数2桁、測点数10点程度でほぼ設定圧力を推定できるものと考えられる。また、有効数字としての測定精度よりも、測定点数の影響を大きく受ける傾向が認められ今回のようにコンクリート表面応力から外力を推定する場合、実際の測定に当たって個々の測定精度を上げるよりも多くの測点を設けることがより有効のようである。

図-8はケース2のシミュレーション結果を示したものである。測点をブロック1、2、7のアーチ部の3ブロックに集中して配したものであるが、測点10点でインパクトを除く部分の外力を良く表現している。

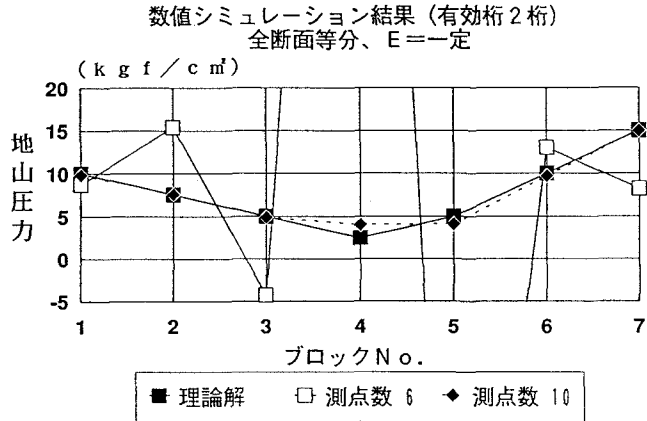
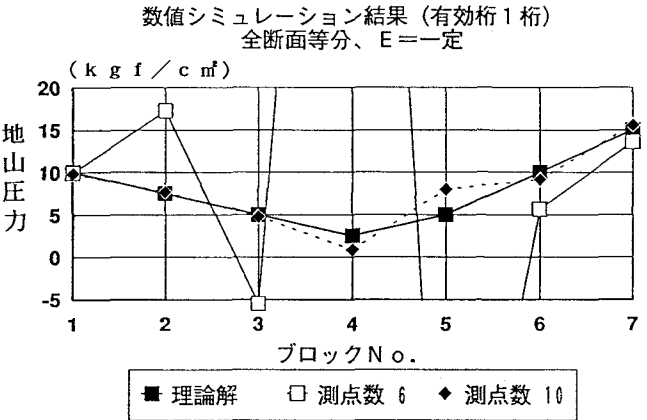


図-7. シミュレーション結果 (ケース1)

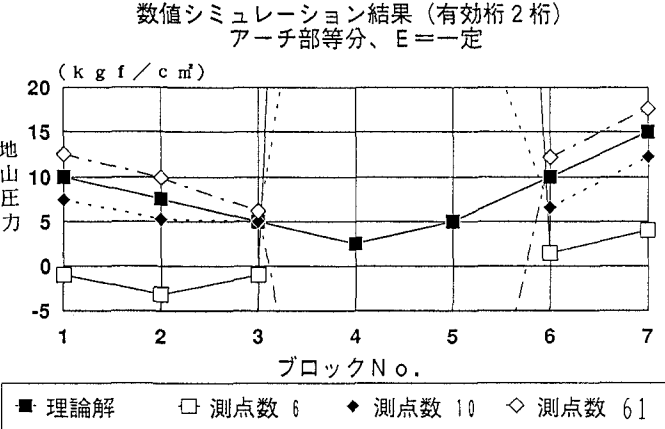


図-8. シミュレーション結果 (ケース2)

(2) 数値解析B (トンネル周辺の応力状態)

図-9に解析用断面の概要を示す。覆工コンクリート断面は(1)と同様とし、地山の範囲は 4×4 mの大きさまで考慮している。有限要素解析における分割の程度は、総節点数が1200、総要素数が1080 (周方向要素数120、半径方向要素数が9)である。

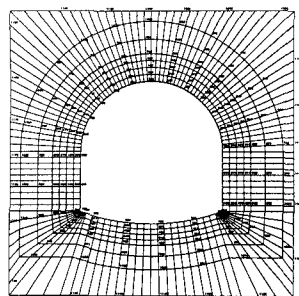


図-9. 解析用断面 (解析B)

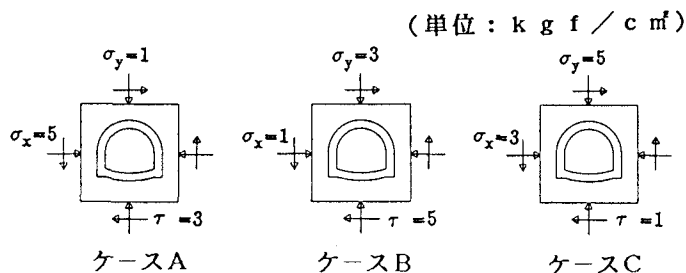


図-10. 周辺応力分布の設定

(1)と同じく実測データに対応する応力値の有効桁数と測点数を変化させた場合の応力推定値の変動について、幾つかの設定周辺応力を想定し、検討を行った。以下にシミュレーション結果の1例を示す。図-10は設定した周辺応力分布を示している。測点設定ケースは(1)と同様の2ケースである。図-11～図-13に測点設定がケース1の場合の周辺応力分布ケースA～Cのシミュレーション結果を示す。何れのパターンにおいても、有効桁2桁、測点数3点程度ではほぼ設定応力を推定できると考えられる。また(1)とは逆に測定点数よりも有効桁数としての測定精度の影響が大きい傾向を示している。

図-14に測点設定がケース2の場合で測点数を3点、5点とした場合の応力分布ケースA～Cのシミュレー

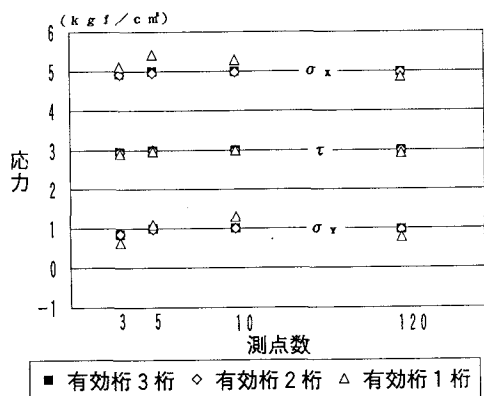


図-11. 解析結果 (ケースA)

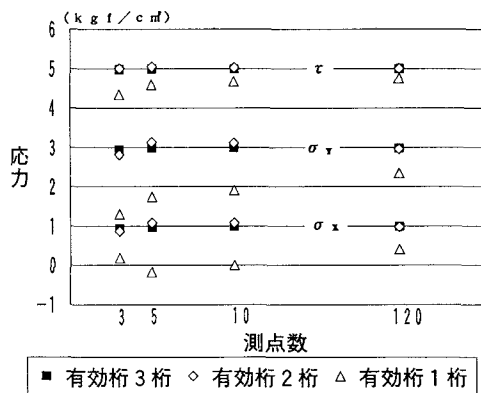


図-12. 解析結果 (ケースB)

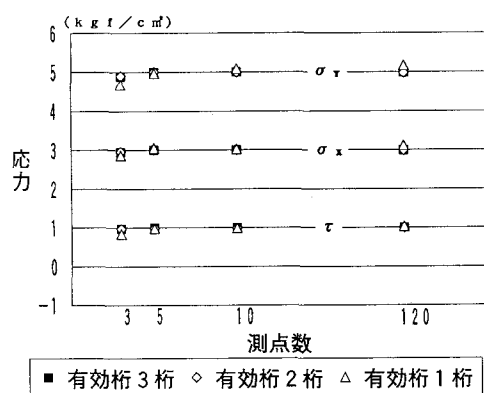


図-13. 解析結果 (ケースC)

ション結果を総括したもの示す。これを見ると測点設定がケース1の場合と同様に有効桁2桁、測点数3点程度でほぼ設定応力の推定が可能であり、精度についても測点設定ケース1と比べて遜色のない結果になっている。

4. まとめ

導水路トンネルの劣化診断手法を確立するための基礎資料を得ることを目的として、覆工コンクリート表面の最大あるいは最小主応力を用いて地山圧力の作用分布、トンネル周辺の応力状態を推定する方法について数値解析的に検討した。

本検討の結果、測点10点以上、有効桁2桁程度の精度で応力の測定が可能であれば、概略的な地圧分布の推定が可能であり、トンネル周辺の応力状態については測点3点以上、有効桁2桁程度の精度で応力が測定

できれば、ほぼ推定することが可能であることが示された。また、測定点をアーチ部に限定した場合でも同様の推定が可能であると考えられる。今後は、覆工コンクリート表面応力の測定法や実測された地山の応力状態との整合性などを考慮し、本手法の適用性を検討していく予定である。

参考文献

- 1) 志水、西村、岸、坂本：導水路トンネルに作用する外力の推定に関する一考察、土木学会第46回年次学術講演会講演概要集（第6部）、PP276-277、1991
- 2) 荻野、水田、佐野、松崎：坑道壁面の応力の解放による3次元岩盤応力測定結果について、日本鉱業会研究業績発表講演会講演要旨集 VOL.1984、PP53-54、1984
- 3) 石島、宋：既設トンネルライニングに作用する背面圧の測定と評価、資源・素材学会研究業績発表講演会講演要旨集 VOL.1989、PP11-12、1989
- 4) 鷺津、宮本、山田他：有限要素法ハンドブック、培風館、1981

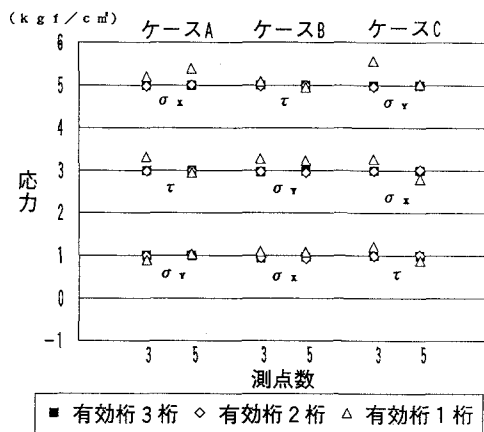


図-14. 解析結果（ケースA～C）