

(56) 三次元境界要素法による初期地圧評価に基づく立坑NATMの解析

日本道路公団福岡建設局八代工事事務所 平本千年志

フジタ工業(株)技術研究所 ○門田俊一

同 上 石井武美

同 上 鎌田正孝

1. はじめに

地盤構造物の掘削解析を精度よく実施するためには、地盤物性を正確に把握すると同時に、解析の初期条件として初期地圧を適切に評価する必要がある。初期地圧は、地形・造構運動等の影響により、複雑な分布を示すことが多いが、その評価方法としては、1) 実測による方法、2) 地形の影響を考慮し数値解析にて求める方法等がある。これらの方法のうち、実測による方法は、多大な費用を要することから、比較的大規模なプロジェクトを除き実施される機会は少なく、通常の実務レベルでは、数値解析による方法が多用される。

数値解析にて初期地圧を求める場合、一般には、二次元有限要素法による自重解析を実施する。一方、現実の地盤は、二次元問題としてモデル化することが困難なケースも多く、地形の影響を忠実に考慮した初期地圧を求めるためには、三次元有限要素解析を実施する必要がある。ただし、解析に要するコストの問題から、実際に実施される機会は極めて少ない。このため、最近では、前記した自重解析等地盤問題の三次元解析に、境界要素法の適用がさかんに試みられつつある。これは、境界要素法等境界型の解析手法では、対象とする領域表面の幾何学的条件・境界条件のみで問題の解を得ることができるため、有限要素法等領域型の解析手法に比較して、主としてデータ作成時のコストダウンが可能であるためである。

本報告では、初期地圧を数値解析にて評価するに際し、二次元モデルの適用が困難であった立坑NATMの事例を取り上げ、地形の影響を忠実に考慮するとともに解析の経済性を考慮するために、三次元境界要素法を用いて初期地圧を求める方法について述べる。さらに、これらの初期地圧を用いて二次元掘削解析を実施し、内空変位・ロックボルト軸力と比較することで、三次元的に初期地圧を評価することの妥当性を論ずる。

2. 三次元境界要素法による初期地圧の評価

事例として取り上げた立坑は、粘板岩と砂岩の互層で構成される岩盤斜面下に掘削されたものであり、立坑諸元・支保規模は図-1に示す通りである。また、周辺地形を図-2に示すが、この図は境界要素法による自重解析のための要素分割図であり、詳細は後述する。図-2(2)の平面図中、①、②兩地点に図-1とほぼ同様な立坑が掘削されたが、今回の報告では①に示す立坑を主たる対象とした。

図-2に従い、立坑掘削地点の初期地圧を二次元平面ひずみ条件にて求めるとすれば、図-2(3)のA-A断面で示すモデルを用いることになると考えられる。しかしながら、このようなモデルを採用した場合、1) 完全なV字地形を表現することとなり現地形と一致しない、2) 計算された地圧は、斜面の影響を大きく受け過大に評価される、等の問題点が指摘できる。

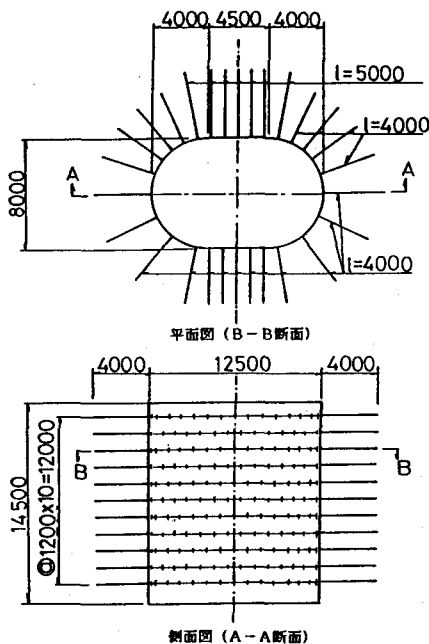


図 - 1 立坑概要

そこで、ここでは、地形の三次元的影響を忠実に考慮すると同時に解析の経済性を考慮するために、三次元境界要素法による自重解析を実施した。今回用いた自重解析手法は、弾性基礎方程式の基本解としてガラークンテンソルを用いることにより体積積分を面積積分に変換する形式のものであり、解の精度については既に報告した。解析モデルは、図-2(1)の側面・底面図、および、(2)の平面図で示されるように、立坑周辺地盤を閉領域として表現し、全領域を308の一定要素に分割したものをを用いた。図-2で示されるように、境界要素法では対象とする領域表面の要素分割のみで解析可能なため、ここでは、三次元解析に必要なデータと、極めて短時間のうちに作成することができた。

解析に用いた地山物性値を表-1に示すが、この値は地山の岩石コアによる室内試験、原位置平板載荷試験等から定めた。これらの物性値は後述する掘削解析においても使用するが、自重解析におけるポアソン比は、以下の理由により $\nu=0.45$ を用いた。

- (1) 斜面形状に応じた応力状態や応力の流れが再現できる。
- (2) 初期地圧が安全側に評価される。

表-2に解析結果を示すが、この表には、図-2(3)の二次元モデルを用いた有限要素解析を実施した場合の地圧も示した。なを、求めた地圧は、地表部より $h=8\text{m}$ 地点のものであり、この断面では内空変位等の計測が実施された。この表より、二次元モデルでは、斜面の影響を大きく受け地圧が過大に評価されることが理解できる。表-2に示した初期地圧の妥当性を厳密に検討するためには実測値との比較が必要である。しかしながら、本事例においては初期地圧の実測がなされなかったため、ここでは、以下に示すように、評価した初期地圧に基づく掘削解析を実施し、解析値と実測される内空変位等を比較することにより、間接的に妥当性を検討することとした。

3. 二次元立坑掘削解析モデルの設定

立坑の挙動は本来三次元的であり、2. で評価した初期地圧に基づく掘削解析は、本来三次元問題として処理する必要がある。筆者らは、初期地圧を評価すると同時に掘削解析をも境界要素法で実施する方法も検討中であるが、ここでは、有限要素法による二次元平面ひずみ解析モデルを用いることとした。用いたモデルは、立坑を

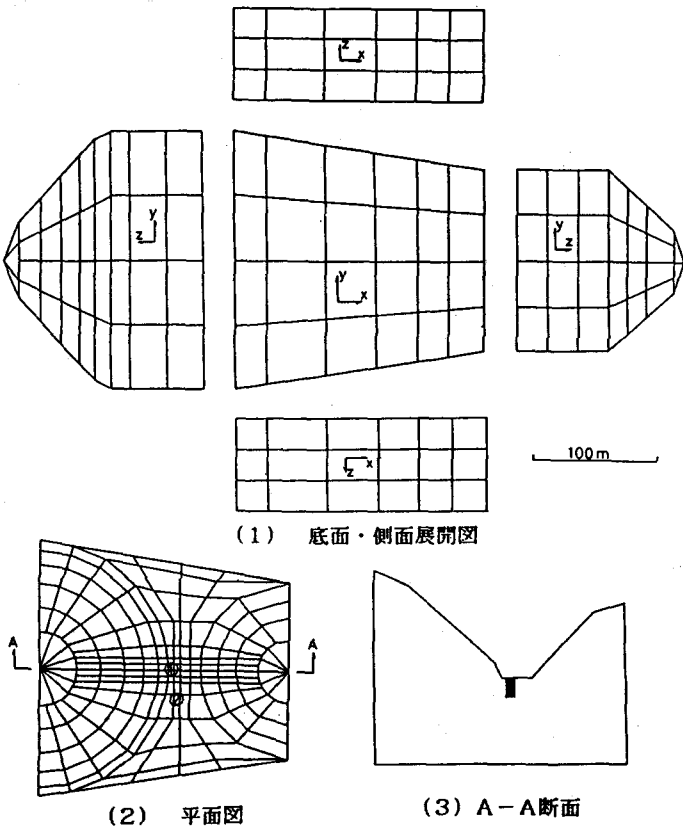


図 - 2 境界要素法による三次元自重解析要素分割図

表 - 1 地山物性値			
単位体積重量	γ	2.6	(tf/m ³)
ヤング率	E	100,000	(tf/m ²)
ポアソン比	ν	0.25	
内部摩擦角	ϕ	40.0	(度)
粘着力	C	4.0	(tf/m ²)

含む周辺地盤をX-Y面で水平に切断し、三次元的に算出される掘削相当外力のうち、水平分のみを断面に作用させるものである。このモデルによれば、鉛直変位等の算出は不可能であるが、内空変位・ロックボルト等の実測値と解析値の比較は近似的に可能であると考えられる。

採用したモデルの妥当性を検討するために、擬似的な三次元モデルと考えられる軸対称立坑を用い、軸対称モデルと上述した二次元掘削解析モデルによる解析を実施し両者の結果を比較することとした。用いた軸対称立坑モデルは、今回対象とした立坑を直径 $D=8$ m、深さ $h=16$ mの円柱立坑に置き換え、地表面が水平半無限な地盤中に掘削されるものとした。図-3に軸対称モデル、図-4に二次元モデルを示す。なお、検討した水平断面は、地表部より $h=8$ mの地点であり、使用した地盤物性値は、ヤング率 $E=50000\text{tf/cm}^2$ ポアソン比 $\nu=0.25$ 、単位体積重量 $\gamma=2.5\text{tf/m}^3$ とした。実施した解析は以下の二ケースであり、いずれも弾性解析である。

CASE 1 軸対称モデルによる解析

step 1で初期地圧を評価するための自重解析を実施した後、step 2で掘削部を瞬時的に取り去る解析。

CASE 2 二次元モデルによる解析

CASE 1, step 1で評価した $h=8$ mの水平地圧成分を初期地圧とし、円形断面を一度に取り去る掘削解析。

解析結果として、検討断面壁面の水平変位比較を以下に示す。

軸対称モデル	0.055 (cm)
二次元モデル	0.061 (cm)

この結果より、二次元モデルは、軸対称モデルに比較してやや大きめの値を示しているものの、ほぼ妥当な値を与えることが理解できる。

4. 立坑挙動にたいする実測値と解析値の比較

ここでは、2.で評価した初期地圧の妥当性を検討する目的で、3.で検討した二次元立坑モデルを用い、対称性を利用して作成した図-5に示す要素分割に従い掘削解析を実施し、内空変位等の実測値と比較した。なお検討した水平断面は、2.で求めた初期地圧が作用する断面とし、地表部より $h=8$ mの地点とした。実施した解析は、表-1に示す物性値を用い、モール・クーロンの降伏基準を仮定した弾塑性解析であり、初期地圧を二次元にて評価した場合も含め以下の二ケースとした。

CASE 1 2.の三次元境界要素法にて求めた初期地圧による掘削解析

CASE 2 2.の二次元有限要素法にて求めた初期地圧による掘削解析

表-2 初期地圧

注) 引張を正とする。

解析次元	二次元解析	三次元解析
σ_{x0} (tf/m ²)	-80.0	-54.5
σ_{y0} (tf/m ²)	-150.0	-99.3
σ_{z0} (tf/m ²)	-56.0	-48.0

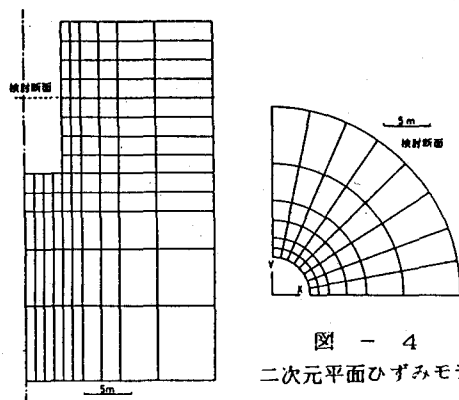


図 - 3 軸対称モデル

図 - 4
二次元平面ひずみモデル

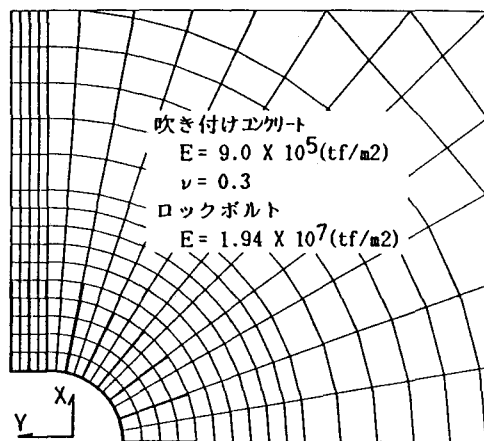


図 - 5 二次元掘削解析要素分割図

なお、ここで実施した解析は施工段階を考慮できるものであり、解析の初期に全領域一様な初期地圧を設定した後、step 1で掘削相当外力の4割を開放し、step 2で、吹き付けコンク

リート・ロックボルト等の支保を設置するとともに掘削相当外力の6割を解放した。設定した掘削相当外力分担率は、通常のNATMトンネル解析にて採用されている値をそのまま用いたが、立坑掘削解析にこの種の解析法を採用する場合、その値の決定法については今後の課題である。

解析結果として、内空変位・ロックボルト軸力に関する実測値との比較を図-6に、また、ロックボルト軸力分布に関するCASE 1と実測値の比較を表-3に示す。なお、図-6の変位比較は、計測開始時からの実測値と解析値を一致させるために、解析におけるstep 2の増分変位と実測値で実施した。

これらの図表より、以下が指摘できる。

(1) 内空変位、ロックボルト軸力両者について、解析

値は実測値に比較してかなり大きな値を示している。これは、自重解析におけるポアソン比を0.45と仮定したため、初期地圧が実際より大きく算出されたためと考えられる。

(2) 初期地圧の評価次元の相違と、内空変位等の実測値と解析値の相違の関係を検討してみると、三次元モデルにより初期地圧を評価したケースが実測値に近い。従って、三次元モデルにより評価された初期地圧は、二次元モデルによる値と比較して、実際の値に近いものと考えられる。

(3) CASE 1の解析値は、実測値より大きめに算出されているものの、この種の解析を挙動予測の段階で用いるものとするれば、概略値を把握する上で十分な精度を有しているものと考えられる。

5. おわりに

本報告は、事例として立坑NATMを取り上げ、このような地盤構造物の掘削解析に必要な初期地圧を三次元境界要素法を用いて評価することの有効性について検討した。その結果、以下に示す知見を得た。

(1) 三次元的に初期地圧を求めることで、評価精度が向上する。

(2) データ作成に関する省力化が可能である。

また、三次元モデルにて初期地圧を評価し、3.で検討した二次元立坑解析モデルを用いて掘削解析を実施したところ、良好な結果を得ることができた。従って、今後、このようなモデルを用いて立坑の解析を実施することが可能であると考えられる。

最後になりましたが、本報告を作成するに当たり、有益な御助言を賜った日本道路公団福岡建設局八代工事事務所豊永工事長に深く感謝致します。

(参考文献)

- 1) Danson, D.J., "A Boundary Element Formulation of Problems in Linear Elastic with Body Forces", Boundary Element Methodes, Ed. Brebbia, C.A., Springer-Verlag, Berlin, 1981.
- 2) 門田俊一, 石井武美, 鎌田正孝, "三次元境界要素法の地盤掘削問題への適用", 土木学会第40回年次学術講演会講演概要集(Ⅲ), pp 389-390, 1985.

表 - 3 掘削解析結果

ケース	直線部増分変位 (cm)	アーチ頂部増分変位 (cm)	ロックボルト最大軸力 (t)
CASE 1	-0.53	-0.08	7.5
CASE 2	-0.90	-0.11	13.6
実測値	-0.05	-0.05	2.0 ~ 3.0

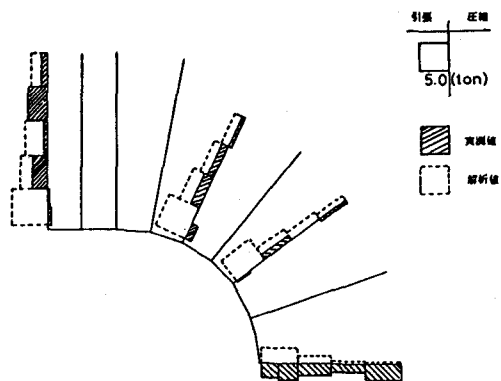


図 - 6 ロックボルト軸力分布に関するCASE 1と実測値の比較

(56) Analysis of Shaft Excavated by NATM
Using Initial Stress Evaluated by
3-D Boundary Element Method

Chitoshi Hiramoto
(Nihon Doro Koodan)
Shunichi Kadota
Takemi Ishii
Masataka Kamata

(Fujita Technical Research Laboratory)

Evaluation of initial stress is required for excavation analysis of geotechnical structures. As the methods to evaluate initial stresses, there exist following two methods.

- 1) Direct measurement of in-situ stress
- 2) Numerical self-weight analysis

In practice, self-weight analysis using 2-D finite element method is commonly adopted because the costs of direct measurements are highly expensive and the costs of 3-D analysis are expensive. On the other hands, there are many cases that are not able to adopt 2-D model.

In this paper, for the purpose of cost-down of self-weight analysis and direct modelling of 3-D configuration of the ground, an application of 3-D boundary element method to evaluation of initial stress is mainly discussed by means of the shaft excavated by NATM. And 2-D stress and displacement analyses for the shaft are executed in order to examine the accuracy of the evaluated initial stresses.

Consequently, following results are obtained.

- 1) 3-D boundary element method is available to evaluate initial stresses of geotechnical structures
- 2) The method that is adopted to analyze the shaft is usefull for other shaft problems.