

フジタ工業(株)・技術研究所 正員 ○ 門 田 俊 一
同 上 正員 石 井 武 美
同 上 正員 鎌 田 正 孝

1. はじめに

境界要素法は、境界の幾何学的条件、境界条件のみで問題の解を得ることが出来るため、三次元問題に適した解析手法である。本報告は、このような境界要素法の特色を生かし、地盤掘削問題、すなわち、ガラーキンテンソルを用いた自重解析・段階掘削解析に三次元境界要素法を適用したものである。

2. ガラーキンテンソルを用いた自重解析

地盤掘削問題では、事前に初期地圧を求めたための自重解析を実施する場合が多い。このような自重解析にしても、短時間で簡単にデータを作成でき、三次元的幾何形状の地圧を求めることができれば、実務上便利である。

一般に、境界要素法による線形弾性問題は、平衡方程式にHookeの法則、ひずみ・変位関係を考慮して導出されるNavier-Chauchyの方程式で、変位・応力に関する境界条件のもとで解く境界値問題である。この問題の基本解としてKelvin解を用いた場合、自重等物体力を考慮すると領域積分が必要となる。一方、ガラーキンテンソルを用いて基本解を表現すれば、自重一定の条件下でGaussの発散定理を用いることにより、領域積分を境界積分に変換することが出来る。このような導出過程については、文献(1)が詳しい。ここでは、複雑な幾何形状も比較的少数の要素で表現することが出来る高次要素(八節点四面形)を用いて解の精度を検証する。実施した解析は、半無限地盤より取り出した30m立方の領域(図-1参照)に自重を作用させ、領域中央部の鉛直圧・側圧について理論解との比較を行なったものである。なお、変位に関する境界条件は、下端部を完全固定、側面部を水平方向固定とした。理論解と解析解の比較を図-2に示すが、両者はよく一致を示している。

3. 段階掘削解析

境界要素法のみによる掘削解析は、主たる解析領域が線形弾性場に限定されるため、有限要素法との耦合解析に比較して汎用性には劣るものの、比較的簡単なデータ作成で三次元解析を実施できることから、実務上使用価値の高い解析手法であると考えられる。以下では、段階掘削解析の解析方法および、解の精度について検討する。

本報告で提案する段階掘削解析手法を説明するために、掘削により外向主単位法線ベクトルが与えられた面を考慮する(図-3参照)。点Pでの応力テンソルを σ とすると、掘削前、この点は $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ なる応力ベクトルのもとで周囲の平衡を保っている。この面が掘削により境界面となる場合、掘削を表現するためには面上の応力ベクトルをゼロにする必要がある。これは、 $\sigma_{ij} = -\sigma_{ji}$ なる応力ベクトル面に作用させることに等価である。本報告では、この起る掘削相当応力ベクトルと名付けることにする。つまり、段階掘削解析の手順は

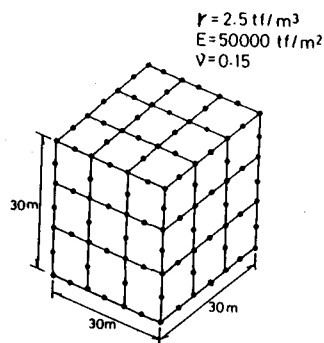


図-1. 自重解析モデル図

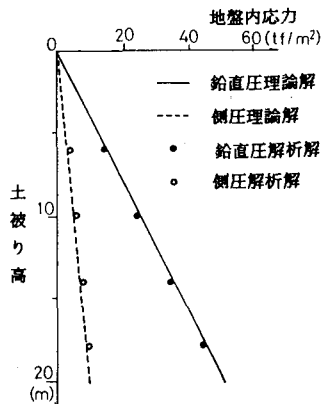


図-2. 理論解比較

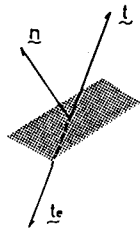


図-3. 掘削相当
応力ベクトル

示すが、赤字iは内点を、赤字Bは境界面を示すものとし、応力テンソル σ 、変位ベクトル u の求め方を中心の説明する。なお、本解析では一定要素を使用している。

1) 通常のデータ入力と同時に、事後掘削面となる要素を入力する。これらの要素については、境界面として評価されるまで、内点として u 、 σ を求めておく。

2) 初期地圧を算定する。このとき、前節で述べた方法を有効に利用できる。

3) 掘削により現段階で新たな境界面となった要素については u の応力境界とし、また、すでに境界面となっている掘削面については応力ベクトルゼロの応力境界とし、通常の境界要素解析を実施する。この段階で Δu 、 $\Delta \sigma$ 、 Δu_B が求まる。

4) 前段階までの応力テンソル・変位ベクトルを σ_0 、 u_0 とすると、現段階までの全応力テンソル・変位ベクトルは、 $\sigma_i = \sigma_0^i + \Delta \sigma_i$ 、 $u_i = u_0^i + \Delta u_i$ 、 $u_{Bi} = u_{B0}^i + \Delta u_{Bi}$ で求めることができる。

段階掘削解析の解の精度を調べる目的で、図-4に示すような静水圧を作用する初期地圧下の円柱領域に、直径 $D=2\text{m}$ の円形トンネルを全断面掘削した場合について解析した。実施した

解析は、1) 掘進長 D より $3D$ まで掘削した場合の境界要素法段階掘削解析、

2) 境界要素法による D 瞬時掘削解析、3) 境界要素法と有限要素法との解

の整合性を調べるために実施した有限要素法 $3D$ 瞬時掘削軸対称解析の3ケースである。なお、ケース1)では、最終的に境界を386の一定要素に分割した。解析結果として、図-5に各ケースの切羽進行に伴う壁面変位、図-6、7に、切羽進後方1.5 D 地点の地盤内変位、および、応力を、境界要素解析について示した。これらの図で、切羽進行壁面変位で切羽前方変位に若干の差が生じたため、瞬時掘削解析と段階掘削解析で多少の差が認められるものの、段階掘削解析で求めらる結果は、実用上無視できる誤差の範囲内にあるものと考えられる。

4. おわりに

本報告では、三次元境界要素法と地盤の自重解析、段階掘削解析に適用した。また、解の精度を検討し良好な結果を得た。今後は、実用問題への適用性について検討を加えて行く予定である。

なお、本研究に対し、御指導賜った名古屋大学工学部川本、市川先生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 Elasticity with Body Forces, Boundary Element Methods, Ed. Brebbia, C.A., Springer-Verlag, Berlin, 1981

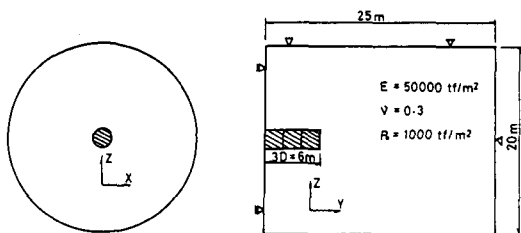


図-4. 段階掘削解析モデル図

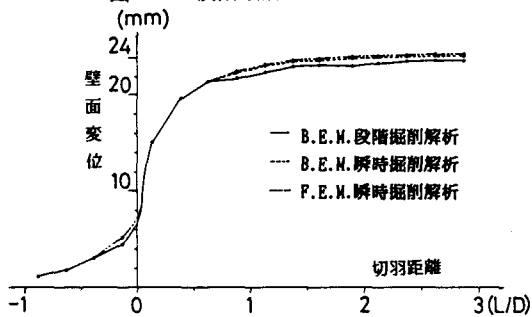


図-5. 壁面変位比較

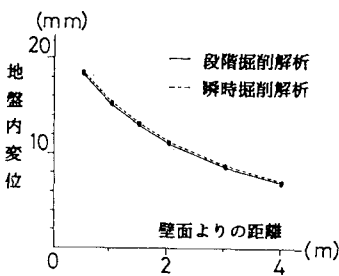


図-6. 地盤内変位比較

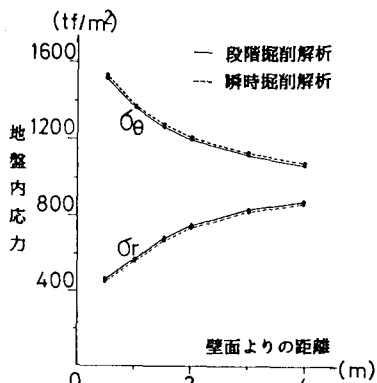


図-7. 地盤内応力比較