

(30) 岩盤斜面に掘削された立坑の数値解析

— 平面ひずみと3次元モデルによる比較 —

名古屋大学工学部

正員 尾原 祐三

学員 京谷 孝史

正員 市川 康明

正員 川本 勝万

1. 緒言

土木構造物の設計において用いられている有力な解析手法は2次元有限要素解析であるが、実際には構造物は3次元であるため厳密な意味では3次元解析を行なわなければならない。岩盤斜面に掘削される円形立坑の場合のように地表面が傾斜を持つ場合あるいは地質状態が複雑な場合など特に必要であると思われる。従来、このような場合でも平面ひずみ状態での解析が行なわれてきたが、正確にはこの解析はトレンチに対するものであり、3次元の効果は表わされていない。このため、平面ひずみ状態に対する有限要素解析に3次元効果を考慮することにより、3次元状態での応力・変形状態を推定しようとする試みがなされてきている。この場合、平面ひずみ状態と3次元状態における応力状態や変形状態が相似であると認められる場合には、応力や変形の量的な補正によって2次元解析結果から3次元状態を推定することも可能であろう。しかし、一般的には応力状態・変形状態は異なり、したがって塑性域・発生位置や最小局所安全係数の位置まで正しく推定することは困難である。

本報告は、岩盤斜面に掘削された円形立坑について、平面ひずみ、3次元モデルで、さらに、モデルの要素分割の粗さを変えて線形解析を行ないそれらの結果について、立坑周辺の変形状態、安全率分布等と比較検討を行ったものである。

2. 解析モデルおよび解析方法

岩盤斜面に直径50m、深さ100mの円形立坑が深さ50, 75, 100mの3ステップで掘削される場合を、平面ひずみ、3次元モデルを用いて有限要素解析を行なった。それぞれのモデルを示すとFig. 1のようである。モデルの分割は実線のみのも、実線と破線で示されているものそれぞれ2種類、合計4ケースであり、3次元のモデル寸法は、断面は平面ひずみと同様で奥行きは300mである。なお、解析に用いた材料定数はTable 1のようである。

全てのケースに対して、最初に自重の作用のもとで初期応力状態を求め、つぎに各ステップごとの深さに応じた掘削相当外力を与えることによって掘削をシミュレートした。なお、解析は全て線形計算であり、立坑は素掘状態を仮定している。

解析結果として立坑周辺岩盤の局所安全係数を求めたが、これはつぎのように定めた。岩盤材料の破壊基準はFig. 2のようであり、平面ひずみ状態に対してMohr-Coulombの基準、3次元状態に対してDrucker-Pragerの基準を用いた。このとき、前者は後者の平面ひずみ状態のものであるから、せん断強度特性としては同じ状態になっている。これらの破壊基準と各点で定まる応力状態を用いて局所安全係数 S_f をつぎのように定義した。

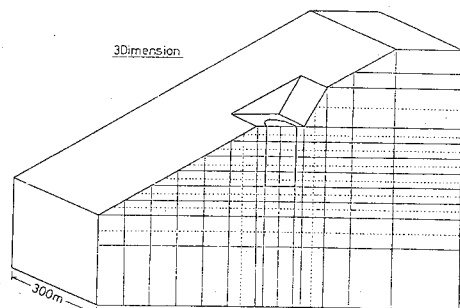
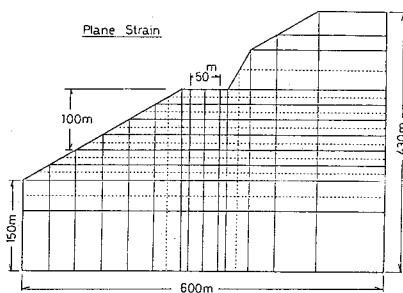


Fig. 1 解析モデルの有限要素分割

i) 平面ひずみ状態

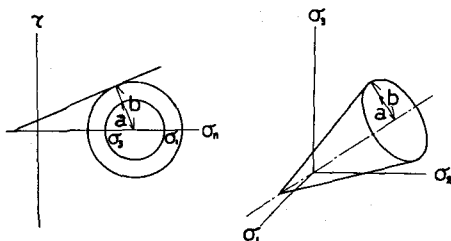
Mohr-Coulombの基準 $f = \tau + \sigma \tan \phi - C$

局所安全係数 $S_f = a/b$

$$a = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$$

$$b = [(\sigma_1 + \sigma_3)/2 + c \cot \phi] / \cos \phi$$

C ; 粘着力, ϕ ; 内部摩擦角



ii) 3次元状態

Drucker-Pragerの基準 $f = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - K$

局所安全係数 $S_f = a/b$

$$a = \sqrt{J_2}, \quad b = \alpha I_1 - K$$

I_1 ; 応力の1次の不変量, J_2 ; 偏差応力の2次の不変量

$$\alpha = 2 \sin \phi / \sqrt{3} (3 + \sin \phi), \quad K = 6 \cos \phi / \sqrt{3} (3 + \sin \phi)$$

Mohr-Coulombの基準

Drucker-Pragerの基準

Fig. 2 破壊基準

Table 1 材料定数

E	100 000	t/m ²
ν	0.25	
γ	2.5	t/m ³
C	20	t/m ²
ϕ	30	degree

3. 解析結果および考察

立坑, 地下空洞などの地下構造物を掘削する際の有限要素解析では, 初期地圧の与え方によって結果は著しく異なる。一般に, 水平地盤に対する解析においては初期地圧として鉛直応力 $\sigma_v = \gamma H$, 水平方向応力は側圧係数 K_0 を用いて $\sigma_H = K_0 \sigma_v$ で与える。ここで, γ は地盤の単位体積重量, H は深さである。しか

し, 本来は地殻運動による偏圧, 地質構造等がこれに大きく影響を与えているため, 実際の設計に資する場合は, 現場で初期応力測定を行ない得られた値をインプットすべきである。斜面に対する初期地圧の評価も地質構造等によって異なるが, 急斜面では最大主応力は斜面に平行となり, その値は覆り重量圧よりかなり小さくなる^{1), 2)}ことが知られている。有限要素解析で取り扱う場合, 初期地圧測定を行なうことができればよいが, 例えば, 風化岩のような材料が斜面を構成している場合はこの測定は不可能であり, 過去に受けた応力履歴も風化により解放されているであろうから, 一般には自重を作用させて初期地圧とすることが多い。しかし, このような材料はすでに非線形応力-ひずみ関係を有しているため, 単に自重を作用させて線形計算を行なうべきではなく, 厳密には自重の作用のもとで非線形計算を行ない, この結果を初期地圧とする方法が最適であると考えられる。今回は, 簡単のため自重による線形解析の結果を初期地圧とした。

粗い分割, 細かい分割における平面ひずみ, 3次元モデルの立坑周辺の变形状態を示すと Fig. 3, 4 のようである。粗い分割では, それぞれのモデルの变形は掘削が進むにつれて増加するが, 平面ひずみの方が大きな变形量となっている。平面ひずみでは山側の坑口は沈下, 谷側の坑口は湧き上りを示し, 最大変位は谷側に生じるのに対し, 3次元では山側, 谷側ともに沈下を示し最大変位は山側の坑口で生じる。これらの差違はモデルによって掘削相当外力の受け持ち方が異なるためと考えられる。すなわち, 平面ひずみでは掘削荷重を平面要素のみで受け持ち, 特に谷側では掘削坑外部の台形部分が受けもたなければならず, この部分の剛性は山側より小さいため谷側の变形量は大きくなる。3次元では, 奥行き方向に存在する要素も掘削荷重を受けもち, また奥行き方向に応力が存在するため要素は拘束されることになるので, 変形量は3次元の方が小さくなると思われる。細かい分割になるとこの差違は一般に増すことになる。3次元では1ステップの掘削の後, 側壁の变形はほとんど変化は見られないが, 平面ひずみでは反対に大きくなる傾向にある。しかし, 全体の变形モードは分割の粗さによる差違は見られない。以上要するに, 分割を細かくすると両者の差は一般に明確になり平面ひずみ解析を用いて設計に資するならば, 变形に対しては過剰設計となるであろう。

分割の粗い場合, 細かい場合の100m掘削時の安全率の分布を示すとそれぞれ Fig. 5, 6 のようである。各ケースも安全率が1.0を割る部分が広範囲にわたっており, 特に斜面の深部にそのような領域が現われている。こ

これは現実にはありえないことで、初期地圧の評価が不適当であり、材料定数の選定にも問題があったものと思われる。すなわち、この解析では初期地圧として自重を作用させたが、この勝掘削に対する解析と同様なポアソン比 0.25 を用いて計算したためであり、初期地圧の計算でのポアソン比は大きな値を用いる方が適切であったと考えられる。

粗い分割では最小安全係数は平面ひずみにおいては山側の側壁の中央から下端よりに、3次元においては山側の坑口付近に発生しているが、細かい分割では、平面ひずみでは立坑外部の谷側の斜面表層部に、3次元では坑底へと発生する位置が移動している。これは、解析に定ひずみ要素を用いているため主に、要素の大きさによる掘削相当外力の評価と応力集中の違いによるものと考えられる。平面ひずみモデルではその傾向が顕著で、応力集中を起す部分の要素が大きければ、応力はその要素内で平均化され応力集中の現象として現れないが、要素が小さければ応力集中が発生し、従って最小安全

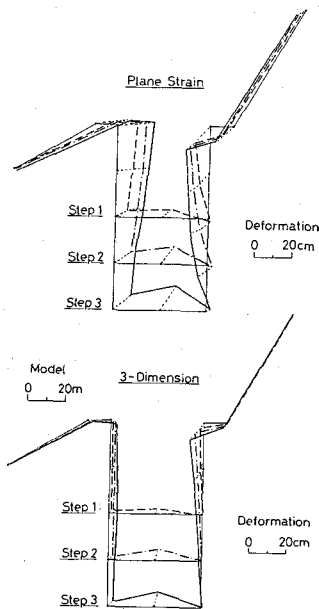


Fig.3 立坑周辺の变形状態 (粗い分割)

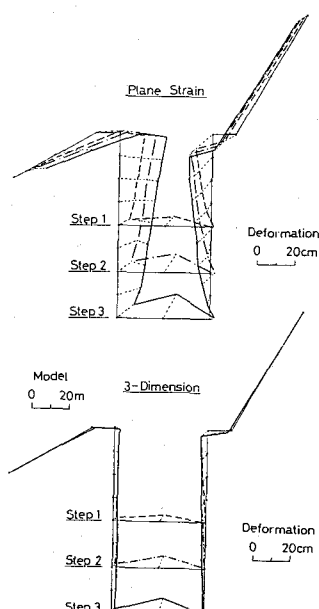


Fig.4 立坑周辺の变形状態 (細かい分割)

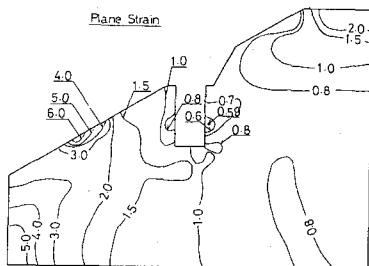


Fig.5 安全率分布 (粗い分割)

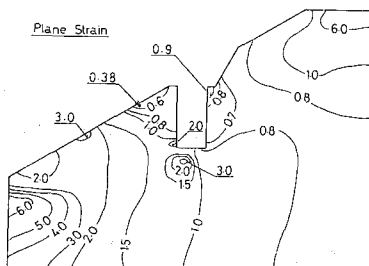
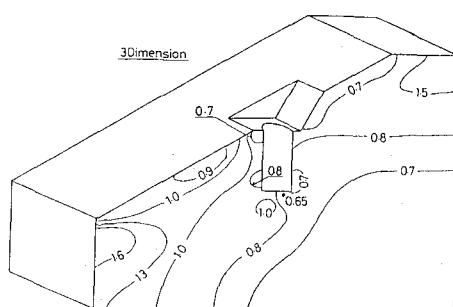
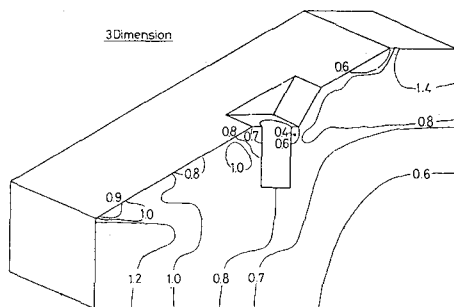


Fig.6 安全率分布 (細かい分割)



全係数は立坑外部の谷側の斜面表層部に発生することになる。さらに安全率分布も変化し、谷側斜面が立坑内部に向ってすべりような等高線の形を呈する。Fig. 7には立坑周辺の引張応力の発生した要素が示してあるが、要素が小さければ引張応力を生じる領域が広がり、ということになる。

初期地圧の与え方に問題はあるが、平面ひずみに比して3次元の方が解析領域全般にわたって安全率の値が小さな部分の占める割合が大きくなっており、平面ひずみの結果を用いるならば、より危険な評価を与えることになるであろう。

4. 結 言

岩盤斜面に掘削される立坑を平面ひずみ、3次元モデルを用いて線形解析を行ない、モデルおの要素分割の違いによる比較検討を行ないつぎのような結果を得た。

- (1)初期地圧の評価；大型地盤構造物を掘削する場合の有限要素解析においては初期地圧の与え方によつて結果は著しく異なる。本来は初期地圧測定を行ひ、その値をインプットすべきであるが、これが不可能な場合は、水平地盤では鉛直応力 $\sigma_v = \gamma H$ 、水平応力 $\sigma_H = K_0 \gamma H$ で、斜面では自重で与えるべきである。この際のポアソン比は0.45程度が適当であろう。
- (2)掘削相当外力の受け持ち方；平面ひずみでは掘削荷重を平面要素で受け持つが、3次元では奥行き方向にある要素でこれと合理すべきためかなり、掘削荷重が軽減され、立坑内部の変位量は平面ひずみモデルの約0.1～0.4倍程度となる。
- (3)要素の大きさ；応力集中を起さすべき所に大きな要素が存在するならば応力は平均化され応力集中は現われず、また、この平均化のため掘削相当外力の評価の信頼性も小さくなり、安全率分布も異なってくる。したがって、注目すべき部分の分割はできるだけ細かくすることが必要である。
- (4)モデルの違い；2次元平面ひずみモデルの結果から3次元モデルの結果を推定することはかなり困難であり、平面ひずみの結果は、変形に対して過剰評価、安全率分布では過小評価となる。

参考文献

- 1) 矢野礼二、長友成樹；新体系土木工学 70 トンネル(Ⅱ) — 山岳トンネル —、技報堂、7711-18、1980
- 2) Goodman, R.E. ; Introduction to Rock Mechanics, John Wiley & Sons, 7796-109, 1980

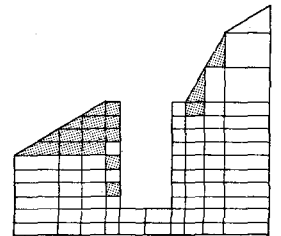
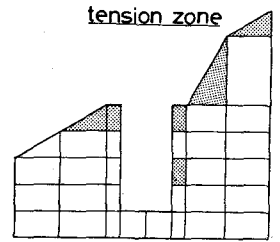


Fig. 7 立坑周辺に発生する引張領域

(30) Numerical Analysis of Shaft Excavated in Rock Slope

Y. Obara, T. Kyoya
Y. Ichikawa, T. Kawamoto
Dept. of Geotechnical Eng.,
Nagoya University

A shaft excavated in a rock slope is numerically simulated by finite elements. Treated models are three and two dimensional (two dimensional one is plane strain), and several mesh patterns are compared. The analyses are linear elastic, and local safety coefficients are checked assuming the Drucker-Prager's criterion for the three dimensional cases, and the Mohr-Coulomb's one for two dimensional cases. Major results obtained are as follows:

1. It is essential to estimate adequately the field of initial stress. For slopes, however, the guess is quite troublesome. If there exist no field data of initial stresses, it may be popular to employ results by finite elements calculated under body force effects. On that case, a nonlinear analysis is preferable, then dominated stresses parallel to the slope are obtained. If a elastic analysis will be inevitable, a large figure of Poisson's ratio should be used, that may account for some chronical tectonic effects.
2. Two dimensional analyses give us overestimated displacements, which result in an unexpected over-design.