

三次元有限要素法による地山の応力～ ひずみ関係と支保効果に関する解析的検討

A Study on the Stress-Strain Relationship and the Effect of Tunnel Support
by 3D Finite Element Analysis

瀧治雄¹・亀村勝美²・山本亮太³

Haruo Taki, Katsumi Kamemura and Ryota Yamamoto

¹正会員 工修 大成建設株式会社 土木設計部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1)
E-mail:taki@ce.taisei.co.jp

²フェロー会員 工博 大成建設株式会社 土木設計部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1)

³正会員 工修 大成建設株式会社 土木設計部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1)

In the numerical analysis of mountain tunnel, analyzed results cannot often explain the field measurement results in detail. In this paper, the influence of stress-strain relationship of ground to the analyzed results is discussed using 3D finite element analysis considering non-linearity, dependency of confining pressure and elasto-plastic behavior of ground. Numerical results show that the stress-strain relationship does not affect so much the effect of tunnel supports as long as ground does not reach the failure state.

Key Words : tunnel, stress-strain relationship, support, 3D finite element method

1. はじめに

山岳トンネルの掘削を対象として、有限要素法等の数値解析により予測あるいは事後解析を実施した場合、解析結果は計測結果を十分には説明できないことも多い。ここで、計測結果に対して解析結果が示す問題点としては、内空変位の縮小・拡大傾向においてモードすら異なる場合があること、下半掘削時における天端沈下増分を過小評価すること、支保部材に発生する応力を過大評価すること、ならびにトンネル周辺地山の変形に対する支保効果を過小評価すること等が挙げられる。特に、都市部における未固結地山を対象とした山岳トンネルの掘削においては、これらの計測結果と解析結果の相違が顕著となる傾向にある。このような背景を踏まえ、本報告においては、計測結果と解析結果の相違を解消し、予測あるいは事後解析の精度向上を図るための一助とすることを目的として検討を実施した。

これまでに、計測結果と解析結果の相違の原因として、解析における支保部材のモデル化の不備が指摘されてきているが、ここでは、支保部材のモデル

化に着目する以前に、地山の応力～ひずみ関係についても検討を加える必要があるものと考えた¹⁾。そこで、地山の応力～ひずみ関係における特徴として、非線形性、拘束圧依存性、弾塑性挙動に着目し、山岳トンネルの掘削を対象とした数値解析において、これらの特徴が支保効果に及ぼす影響について検討することとした。この検討を通して、トンネル掘削を対象とした場合に考慮すべき地山の応力～ひずみ関係の特徴が明らかになるものと考えた。

なお、本検討においては、三次元有限要素法による逐次掘削解析を実施することとした。これは、非線形な応力～ひずみ関係を取扱う場合、その変形特性は応力状態に依存して決定されるため、切羽進行に伴う三次元的な応力状態の変化を正確に評価する必要があると考えたものである。また、地山の応力～ひずみ関係については、Duncan-Chang モデル^{2),3)}を構成則として採用することとした。本構成則は基本的には非線形弾性モデルであるが、パラメータを適宜設定することにより、線形弾性から拘束圧依存性を有する非線形弾性まで、各種の応力～ひずみ関係を本構成則にて再現可能である。

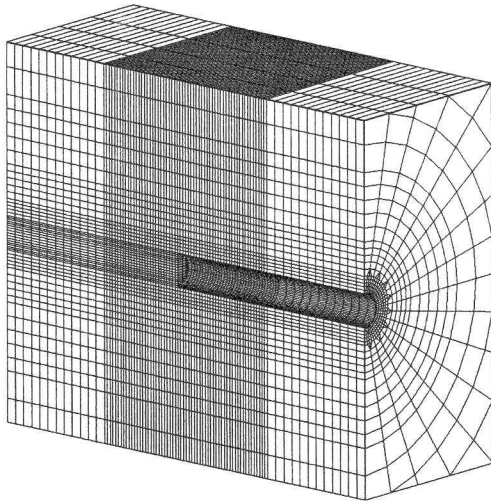


図-1 解析モデル

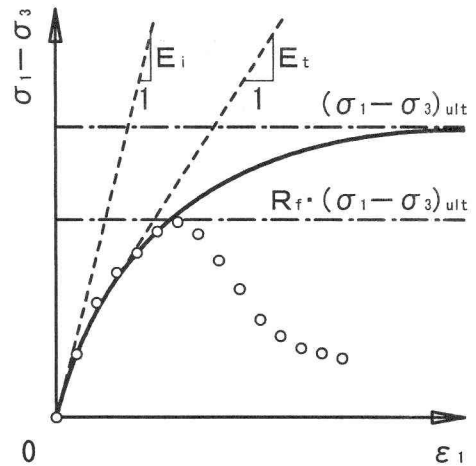


図-2 Duncan-Chang モデルにおける双曲線近似

2. 解析条件

(1) 解析手法

山岳トンネルの掘削を対象として、三次元有限要素法による逐次掘削解析を実施した。ここで、三次元有限要素法を採用した理由は、切羽進行に伴う三次元効果を直接的に評価可能であること、ならびに実施工における支保部材の設置状況を忠実に再現可能であることによる。

(2) 解析モデル

本検討に用いた解析モデルを図-1 に示す。解析モデルの作成にあたり、トンネル半断面のみをモデル化することとした。解析領域については、トンネル壁面から境界までの距離を鉛直・水平方向ともに5D (D: トンネル直径) とし、トンネル縦断方向については、境界からモデル中央に配置した逐次掘削区間 (要素分割: 1m ピッチ) までの距離を3D 以上とした。ここで、単純化のために、トンネルの断面形状を直径10m の円形トンネルとし、掘削工法についても全断面掘削として設定した。

また、解析手順については、一掘進長を1m とし、掘削および支保打設のサイクルを再現することとした。なお、本検討においては、支保部材として吹付けコンクリートのみをモデル化することとした。

(3) 地山の応力～ひずみ関係

地盤・岩盤材料は、その応力～ひずみ関係において、非線形性、拘束圧依存性、弾塑性挙動、ひずみ

軟化挙動、ダイレタンスー、時間依存性等の特徴を示す。ここでは、上記のうち、非線形性、拘束圧依存性、弾塑性挙動に着目し、これら特徴を表現可能な構成則として、Duncan-Chang モデルを三次元有限要素法プログラムに導入した。なお、本報告においては、初期接線変形係数が拘束圧に依存して変化する現象を拘束圧依存性と呼び、さらに処女荷重過程とその後の除荷・再荷重過程における非可逆的挙動を弾塑性挙動と呼ぶこととする。

本構成則は、地盤・岩盤材料の三軸圧縮試験から得られる非線形な応力～ひずみ関係を双曲線にて近似する非線形弾性モデルである。本構成則において、任意の応力状態における接線変形係数 E_t は強度特性と応力状態の関数として下式により与えられる (図-2 参照)。

$$E_t = \left\{ 1 - \frac{R_f (1 - \sin \phi) (\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos \phi + 2\sigma_3 \sin \phi} \right\}^2 \cdot E_i \quad (1)$$

式(1)において、 E_i は初期接線変形係数であり、拘束圧 σ_3 の関数として下式 (ここで、 P_a は大気圧) により与えられる。

$$E_i = K \cdot P_a \cdot \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (2)$$

本構成則においては、強度定数 (c , ϕ) の他に、

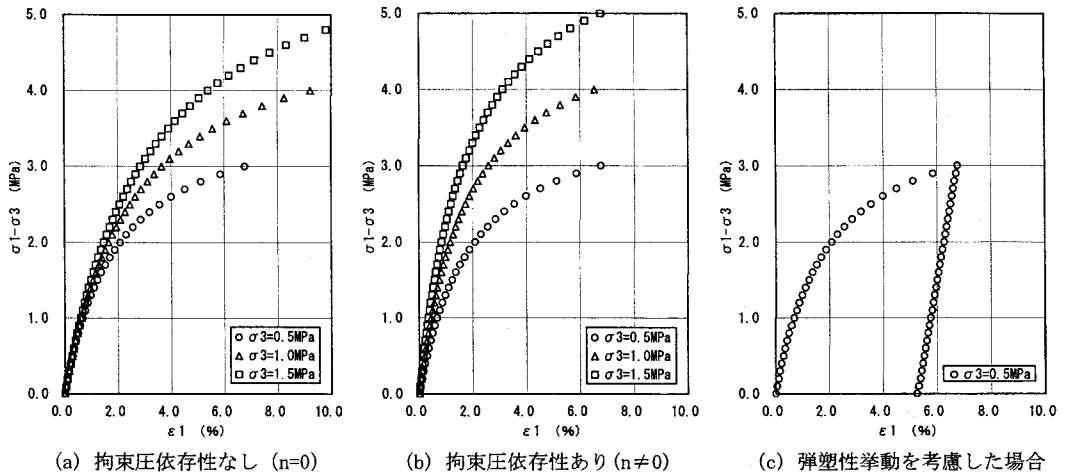


図-3 Duncan-Chang モデルによる三軸圧縮試験のシミュレーション

R_f , K , n の三つの材料定数が必要となる。ここで、定数 n は拘束圧依存性の程度を表すパラメータであり、 $n=0$ とした場合には、初期接線変形係数は拘束圧によらず一定値となる。また、 $n=0$ かつ $R_f=0$ とした場合には、本構成則は線形弾性体へと帰着するものである。なお、本来の Duncan-Chang モデルにおいては、ポアソン比の拘束圧依存性までも考慮されているが、本検討においてはこれを考慮しないこととした。

なお、本構成則は非線形弾性モデルであるため、本構成則にて弾塑性挙動を説明することはできない。そこで、本構成則にて弾塑性挙動を考慮する場合には、下式に示す降伏関数 f を導入することとした。

$$f = (\sigma_1 - \sigma_3)_y - (\sigma_1 - \sigma_3)_y \quad (3)$$

ここで、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_y$ は過去に経験した偏差応力の最大値であり、 $f > 0$ となる場合には E_t にて、 $f \leq 0$ となる場合には E_i にて変形係数を算定することとした。

図-3 に、本構成則を導入した有限要素法プログラムを用いて、三軸圧縮試験をシミュレートした結果を示す。同図より、非線形性、拘束圧依存性、ならびに弾塑性挙動までの応力～ひずみ関係における特徴をひとつの構成則にて表現可能であることが分かる。

(4) 解析ケース

本検討においては、地山の応力～ひずみ関係における特徴がトンネル掘削時の挙動に及ぼす影響とし

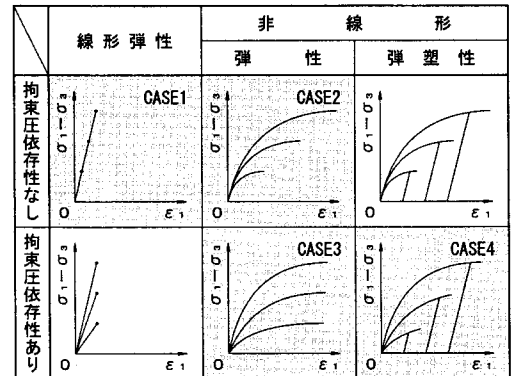


図-4 解析ケース

て、特にトンネル周辺地山の変形に対する支保効果について考察を加えるものである。そこで、地山の応力～ひずみ関係について 4 ケース (図-4 参照)、吹付け厚について 3 ケース ($t=0, 10, 20\text{cm}$)、これらの組合せとして計 12 ケースの解析ケースを設定した。

(5) 解析用物性値

地山の応力～ひずみ関係に関する解析ケースに応じて、表-1 に示すように地山の解析用物性値を設定した。ここで、地質としては未固結地山から軟岩程度を想定したうえで、変形・強度特性を設定している。

まず、変形特性については、初期応力状態における拘束圧 σ_3 のもとで、前述の式 (2) に示した初期接線変形係数が各解析ケースともに $E_i = 200\text{MPa}$ となるように定数 K を設定した。次に、強度特性につ

表-1 地山の解析用物性値

	線形／ 非線形	拘束圧 依存性	弾性／ 弾塑性	K	ν	c (MPa)	ϕ (°)	Rf	n	Pa (MPa)
CASE1	線形	なし	弾性	2,000	0.3	0.6	30	0.0	0.0	0.1
CASE2	非線形	なし	弾性	2,000	0.3	0.6	30	0.8	0.0	0.1
CASE3	非線形	あり	弾性	894	0.3	0.6	30	0.8	0.5	0.1
CASE4	非線形	あり	弾塑性	894	0.3	0.6	30	0.8	0.5	0.1

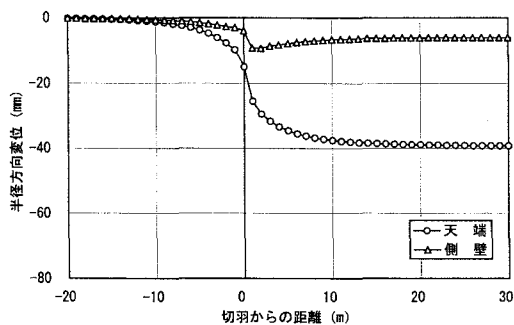


図-5 壁面変位の経距変化 (CASE4(吹付け厚: 20cm))

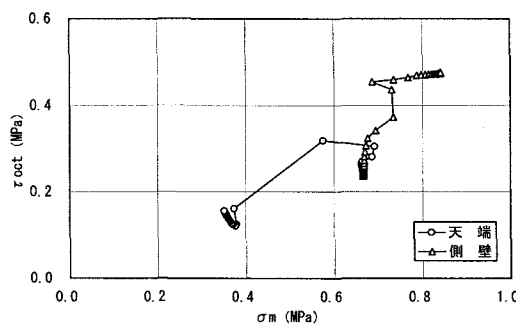


図-6 応力経路 (CASE4(吹付け厚: 20cm))

いては、トンネル掘削時における地山の応力状態が Mohr-Coulomb の破壊規準を超過しないように強度定数および初期応力を設定した。これは、使用した解析プログラムにおいて、要素が破壊に達した後の不平衡応力の再配分までは考慮していないこと、ならびに、Duncan-Chang モデルは双曲線式であることから、図-2 に示した $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ へ応力状態が移行するにつれて変形係数はゼロに漸近するため、数値解析上、安定した解が得られにくくなることによるものである。なお、初期応力の設定においては、トンネルの土被りを 50m 程度、側圧係数を 0.5 と仮定して、鉛直方向初期応力を 1.0MPa、水平方向初期応力を 0.5MPa とした。ここで、初期応力は解析モデル内にて均一とし、深度方向の分布は考慮しないこととした。

また、支保である吹付けコンクリートについては、弾性係数を 4,000MPa、ポアソン比を 0.2 として、シェル要素にてモデル化した。

3. 解析結果

(1) 解析結果の整理方法

解析結果の一例として、図-5 に壁面変位の経距

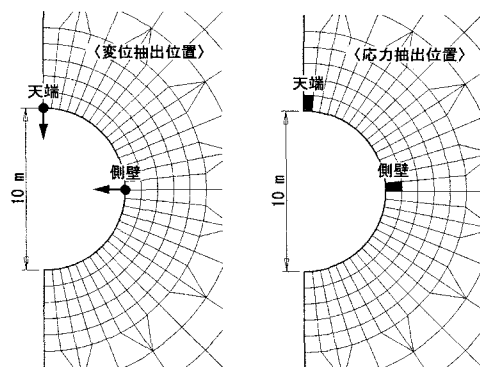
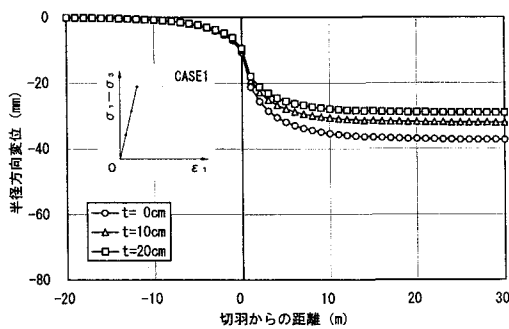


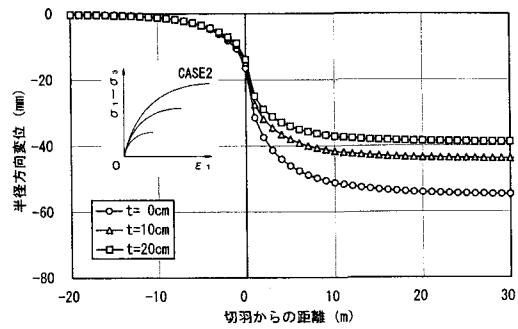
図-7 変位および応力の抽出位置

変化を示す。さらに、図-6 に壁面近傍における応力状態の推移を応力経路として示す。両図より、三次元有限要素法による逐次掘削解析を実施することにより、切羽進行に伴う三次元効果を直接的に評価可能であることが分かる。

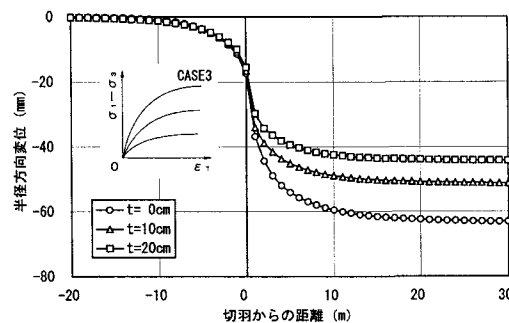
ここで、本検討の目的は、地山の応力～ひずみ関係における特徴と支保効果の関係を明らかにすることにある。したがって、解析結果の整理においては、応力～ひずみ関係に関する解析ケースごとに、吹付



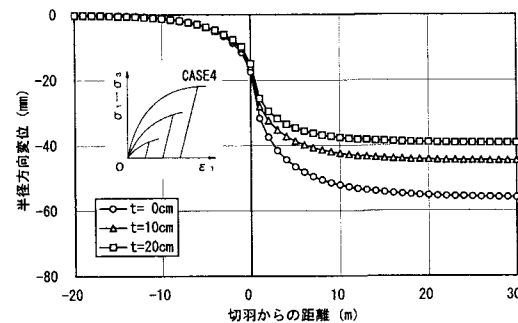
(a) CASE1



(b) CASE2



(c) CASE3



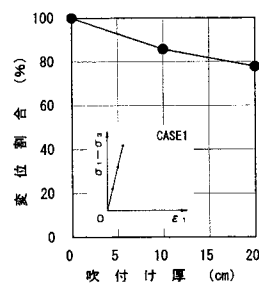
(d) CASE4

図-8 天端沈下の経距変化

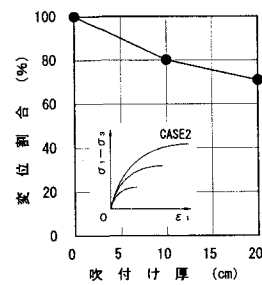
け厚をパラメータとして壁面変位の経距変化を整理することとした。さらに、素掘り時（吹付け厚： $t=0\text{cm}$ ）の最終変位量にて支保を施した場合（吹付け厚： $t=10, 20\text{cm}$ ）の最終変位量を正規化することにより、地山の変形に対する支保効果を整理することとした。

(2) 天端沈下の経時変化

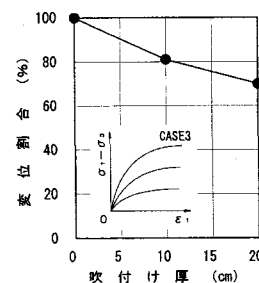
図-8 に、地山の応力～ひずみ関係に関する各解析ケースごとに、天端沈下の経距変化を示す。まず、CASE1 と CASE2 を比較すれば、支保の仕様に関わらず、非線形性を考慮することで沈下量は大きくなることが分かる。これは、非線形な応力～ひずみ関係においては、線形な場合に比較して、同一の応力レベルにおけるひずみが大きくなることから容易に理解される。次に、CASE2 と CASE3 を比較すれば、拘束圧依存性を考慮することで沈下量はさらに大きくなることが分かる。ただし、その増加量は、非線形性を考慮することによる増加量に比較すれば、それほど大きくはない。一方、CASE3 と CASE4 を比較すれば、弾塑性挙動を考慮することで沈下量は逆に小さくなることが分かる。結果的に、CASE4 にお



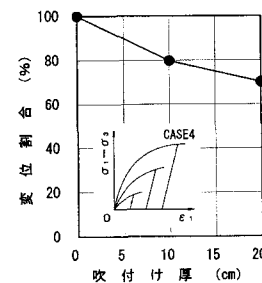
(a) CASE1



(b) CASE2



(c) CASE3



(d) CASE4

図-9 支保の変位抑制効果

る沈下量はCASE2にほぼ等しい値となる。

(3) 地山の変形に対する支保効果

地山の変形に対する支保効果に関して、図-9に解析結果を示す。同図は、図-8に示した解析結果に基づいて、各解析ケースにおける最終変位量を素掘り時を基準として正規化したものである。同図より、CASE1（線形弾性）に比較して、他の解析ケース（CASE2～CASE4）における支保効果は若干大きくなるものの、全体的には、現場にて体感されるほどの支保効果が発現していないように思われる。さらに、CASE2～CASE4を比較すれば、地山の応力～ひずみ関係の特徴によらず、いずれの解析ケースにおいても支保効果に大きな相違は認められない。

以上より、地山の応力～ひずみ関係における特徴が支保効果に及ぼす影響は小さく、特に拘束圧依存性ならびに弾塑性挙動までの特徴を考慮することは、実務上必要ないものと思われる。ただし、本検討に用いた Duncan-Chang モデルは地山の破壊後の挙動を評価できないこと、ならびに、本検討における解析条件として、トンネル掘削後の地山の応力状態が破壊規準を超えないように強度定数および初期応力を設定していることから、上記の検討結果は地山が破壊に至らない範囲において適用されるべきものであることに注意を要する。一方、地山の破壊後の挙動として、ひずみ軟化挙動ならびにダイレタンス特性が拘束圧に依存する⁴⁾ことは周知の事実であり、このような応力～ひずみ関係における破壊後の特徴と支保効果の関係を明らかにすることは一考の価値があるものと思われる。

4. 結論

本検討より得られた知見をまとめれば、以下に示す通りとなる。

- ・地山の応力～ひずみ関係として、非線形性、拘束圧依存性、弾塑性挙動を考慮しても、これらの特徴が支保効果に及ぼす影響は小さく、特に拘束圧依存性ならびに弾塑性挙動までの特徴を考慮することは、実務上必要ないものと思われる。
- ・ただし、本検討においては、地山が破壊しないことを前提として解析条件を設定していることから、上記の検討結果は地山が破壊に至らない範囲において適用されるべきものである。
- ・地山の破壊後の挙動に着目したうえで、応力～ひずみ関係における特徴と支保効果の関係をあらた

めて検討することは一考の価値があるものと思われる。その際には、地山の応力～ひずみ関係として、地山の破壊後の挙動を説明可能な構成則が必要となる。

5. おわりに

本報告では、地山の応力～ひずみ関係における特徴と支保効果の関係を明らかにすることを目的として、三次元有限要素法による検討を実施した。その結果、地山が破壊に至らない範囲においては、地山の応力～ひずみ関係における特徴が支保効果に及ぼす影響は小さいことが判明した。今後は、地山の破壊後の挙動に着目して、応力～ひずみ関係における特徴と支保効果の関係をあらためて検討する必要がある。また、このような地山のモデル化に関する検討とあわせて、支保部材のモデル化、特に地山と支保部材の相互作用についても検討を進める必要がある。

参考文献

- 1) 國村省吾, Petr Kabele, 堀井秀之: 軟岩地山掘削時におけるトンネル支保工の効果について, 地盤工学研究発表会発表講演集, Vol. 34, 2分冊の2, pp. 1753-1754, 1999.
- 2) Duncan, J. M. and Chang, C. Y.: Nonlinear analysis of stress and strain in soils, ASCE, Vol.96, SM5, pp.1629-1653, 1970.
- 3) 川本眺万, 林正夫: 地盤工学における有限要素解析, 培風館, pp.66-70, 1978.
- 4) 足立紀尚, 小川豊和: 堆積軟岩の力学特性と破壊規準, 土木学会論文報告集, 第295号, pp.51-63, 1980.