

神戸大学大学院

学生会員 ○柿原 満

神戸大学都市安全研究センター

正会員 芥川真一

神戸大学工学部

正会員 櫻井春輔

(株)川崎重工業

武山真樹

1. はじめに

大規模地下空洞の掘削中において、岩盤の物性を正しく評価し、応力・ひずみ分布を正確に推定することは、地下空洞の安全性を評価するために非常に重要である。しかし、複雑な地質構造や種々の要因による非線形性を含む変形挙動などを、対象とする岩盤内の広範囲に渡って把握することは非常に困難である。著者らはこれまでに、解析パラメータの設定や、変形状態の予測が難しい場合に、変位計測結果を用いた逆解析手法を適用することにより、特に非線形挙動が見られる場合にも効率的に変位場の同定を行なう手法を開発してきた¹⁾。しかし、これまでの手法では、各掘削段階までに計測された変位が一括して生じたとの仮定に基づき、掘削初期段階からの全変位に基づく定式化を用いていた。そのため、計測の開始時刻が異なる変位計からのデータを同時に考慮する際に問題があった。そこで本研究では、初期応力、弾性係数などについては現位置岩盤試験などの結果から仮定し、各掘削段階における計測変位から増分形式に基づく逆解析を実施し、応力、ひずみなどを随時、更新してゆく定式化を行なった。また、同時にPS工の軸力についても考慮できるようにアルゴリズムを改良した。本文は、この改良された増分形式の逆解析によって実際の空洞掘削時に計測された変位データを分析し、その結果から本手法の利点、および問題点について考察するものである。

2. 定式化の基本的概念

ある掘削段階において生じる増分のひずみを $\Delta\epsilon$ 、また、その内、弾性成分、非弾性成分をそれぞれ $\Delta\epsilon_e$ 、 $\Delta\epsilon_p$ とすると、次式が成り立つ。

$$\Delta\epsilon = \Delta\epsilon_e + \Delta\epsilon_p \quad (1)$$

フックの法則より、 D_e を弾性応力・ひずみマトリクスとすれば、応力増分とひずみ増分の関係について

$$\Delta\sigma = D_e(\Delta\epsilon - \Delta\epsilon_p) \quad (2)$$

掘削の際のつり合い条件を考え、非弾性ひずみを含む項を外力とみなして移項すると、 σ を掘削の直前に存在している応力、 B を変位ひずみマトリクス、 v を解析場全体、 v_{exc} を掘削領域、 v_p を非弾性変形を生じている領域とすれば、ひずみ増分を掘削相当外力と非弾性ひずみの線形関数として、以下のように表現することができる。

$$\int_v B^T D_e \Delta\epsilon dv = \int_{v_{exc}} B^T \sigma dv + \int_{v_p} B^T D_e \Delta\epsilon_p dv \quad (3)$$

式(3)を有限要素離散化し、各ガウスポイントにおける非弾性ひずみが1のときに変位計測点に現れる変位を計算しておけば、実際の変位計測値からノルム最小化法¹⁾により非弾性ひずみを求めることができる。また、各段階での増分形式のひずみ・応力を累積・更新することにより、全体の挙動が各段階でどのように変化してゆくかを追跡することが可能となる。

3. 現場への適用例

兵庫県大河内町に建設された地下発電所空洞^{2), 3), 4)}は、掘削量120,000m³で、幅24m、高さ46.6m、長さ134.5mである。本文では、本体空洞において取得された計測結果のうち、C断面におけるものを用いて、掘削の13段階における非弾性ひずみを求める逆解析を増分形式で行った結果の一部を示す。Fig.1に後半の掘削段階における非弾性ひずみ分布の推移を示す。空洞の右肩部から底部にかけて最大せん断ひずみが増加してゆく様子がわかる。掘削の各段階で得たひずみ分布を用いて、これを限界ひずみの管理基準⁵⁾と比較することにより、空洞の安定性をほとんどリアルタイムで評価することが出来る。また、Fig.2は空洞右肩部の2本のPS工の軸力について、その推移を実測値と逆解析結果について比較したものである。CP-2については軸力の変化をある程度再現出来ているが、CP-4については実際に生じた軸力の変化量の半分ほどが逆解析によって求められており、この点については、さらに岩盤の基本的な変形挙動のモデル化の精度を向上させるなどの改良が必要であると思われる。

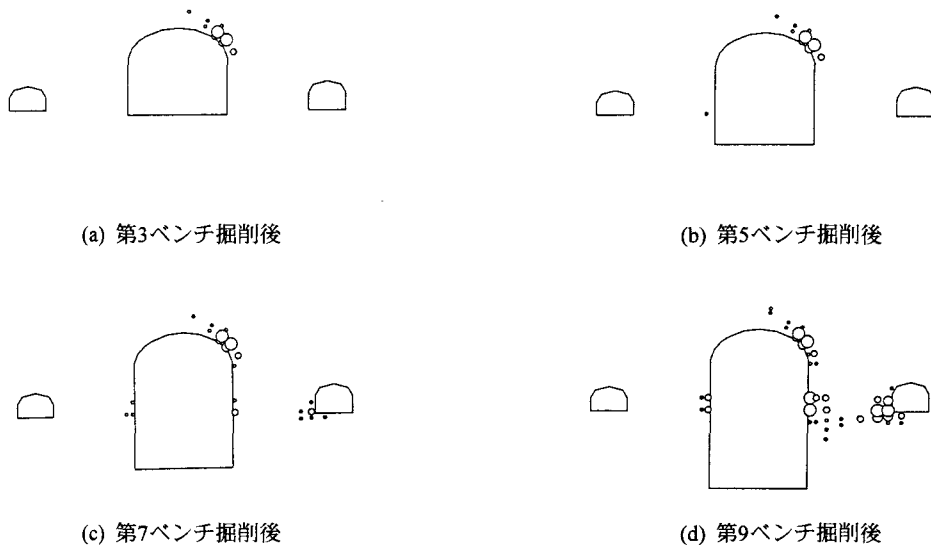


Fig.1 最大せん断ひずみ分布の推移

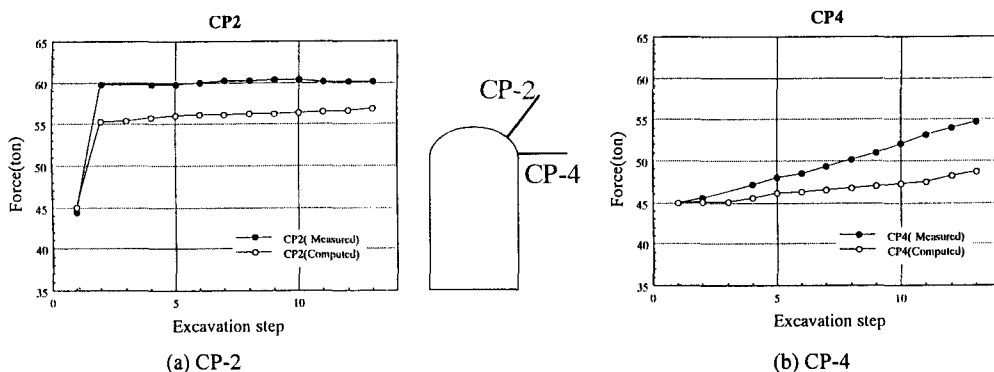


Fig. 2 PS工軸力の解析値と計測値の比較

4. おわりに

空洞周辺に生じる非弾性ひずみを各掘削段階において求める増分形式の逆解析手法は、これまでの手法に比べて、より实际的であり、全ひずみのモニタリングによる安全性管理を実施する上からは良好な現場での適用性を有すると考えられる。ただし、本手法で得られる結果から変形挙動の詳細なメカニズム（特に岩盤の不連続面の挙動に関するもの）を把握することはまだまだ困難であり、PS工軸力変化の再現性についても改良すべきであることが判明した。これらの点については、岩盤の不連続面に関する既知の情報を逆解析に取り入れるることによって改良が可能であると考えられる

謝辞：本文の発表にあたって、大河内水力発電所のデータを提供して下さった関西電力（株）に深く感謝の意を表します。

参考文献：1) 桜井、芥川、徳留：ノルム最小化法に基づく非弾性ひずみの逆解析、土木学会論文集、No.517/III-31, pp.197-202, 1995. 2) 片山、矢田、平川：大河内水力発電所地下発電所空洞掘削時の情報化施工、電力土木、No.237, pp.97-207, 1992. 3) 吉田、堀井：マイクロメカニクスに基づく岩盤の連続対モデルによる大河内発電所地下発電所空洞掘削の解析と計測値との比較、土木学会論文集、No.547/III-36, pp.39-56, 1996. 4) 打田、吉田、浦山、平川：ポアホールテレビによる亀裂観察結果から見た大規模空洞掘削時の岩盤挙動の検討、土木学会論文集、No.517/III-31, pp.33-41, 1995. 5) 桜井：トンネル工事における変位計測結果の評価法、土木学会論文報告集、No.317, pp.93-100, 1982.