

CS 42

変形・破壊のメカニズムを取り入れた逆解析

運輸省 正員 鎌田一郎
 東京大学 正員 山口栄輝
 東京大学 正員 堀井秀之

1. はじめに

地下構造物の建設においては情報化施工の考えが広く取り入れられている。情報化施工中に計測された変位等のデータを積極的かつ合理的に活用するには逆解析が有力な手段と考えられ、活発な研究活動が行われている[1]。しかしながら、岩盤工学の分野では、弾性係数や初期応力等を求めるための研究は数多く行われているものの、非弾性挙動を対象とし、実際の工事にも適用可能な逆解析法の研究は少なく、まだまだ解決すべき課題が残されている。

岩盤の力学性状を正確に把握するのは困難であるが、予備調査等によりジョイントの密度や配置に関する情報はある程度得られており、それをもとに岩盤の変形や破壊のメカニズムを推測することは可能である。この点に鑑み、本研究では岩盤の非弾性挙動を対象とした、変形・破壊のメカニズムを取り入れた一般性のある逆解析法を提案する。

2. 定式化

情報化施工の際に測定される変位を用いて、次のような目的関数 I を考える。

$$I(\alpha, k) = \sum_i \left(1 - \frac{U_i}{\bar{U}_i}\right)^2 \quad (1)$$

ここに、 $\bar{U}_i$ は計測点 i での測定変位、 U_i は計算値である。 α 、 k はそれぞれ求めるべき非弾性ひずみ、材料パラメータであり、 U_i はこれらの値に依存する。本逆解析法では、目的関数 I を最小化する α 、 k を計算し、非弾性領域や材料パラメータ等を定める。

ところで、非弾性ひずみは、材料の変形・破壊のメカニズムに応じたある条件を満たす時にのみ生じる。例えば、弾塑性体においては降伏条件、破壊するジョイントを含む岩盤の場合には破壊の条件[2]がこれに当たる。

ここでは、変形・破壊のメカニズムに関連したこのような条件を制約条件として取り入れ、式(1)の最小化問題を考える。すなわち、本研究では、制約条件付き最小化問題として破壊・変形のメカニズムを取り入れた逆解析を行う。但し、一般には、非弾性ひずみを生じる条件式が完全に既知である場合は多くない。しかしながら、予備調査で得られた情報からある程度の推測は可能であり、いくつかの材料パラメータは未知であるにしても、少なくとも条件式の形は推測できるものと考えられる。そこで、未知パラメータを含んだままの条件式を制約条件として用い、それらの未知パラメータも逆解析により決定することを考える。

なお、制約条件はペナルティ法で取り扱い、解析に際しては有限要素法を用いる。その際、各要素内での非弾性ひずみ分布は一定とする。

3. 解析例

解析例として、一辺が200mの正方形岩盤内に存在する直径20mの円形空洞を取り上げる(図-1)。この岩盤には水平方向のジョイントが多数存在しており、その挙動は次式を降伏関数とする完全弾塑性体で表されるものとする。

$$f = |\tau_{xy}| + \sigma_y \tan \phi_f - c \quad (2)$$

ここに、 c は粘着力、 ϕ_f は摩擦角であり、それぞれ49kPa、30°を仮定する。またヤング率は196MPa、ポアソン比は0.3とする。この構造物の順解析を有限要素法で行い、その結果を正解値とする。またこの順解析で得られた空洞上の節点変位を測定変位とし、それをもとに逆解析を行う。この解析では対称性を利用して1/4の領域のみを解析するが、離散化には8節点四角形要素を60個用いる。この場合、空洞上に位置する節点の数は13である。

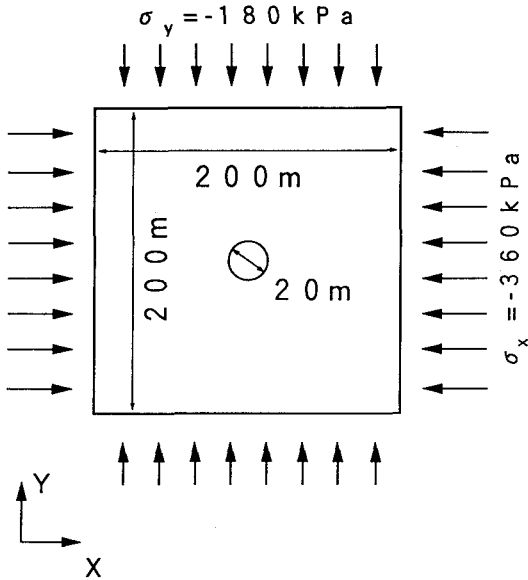


図-1 円形空洞

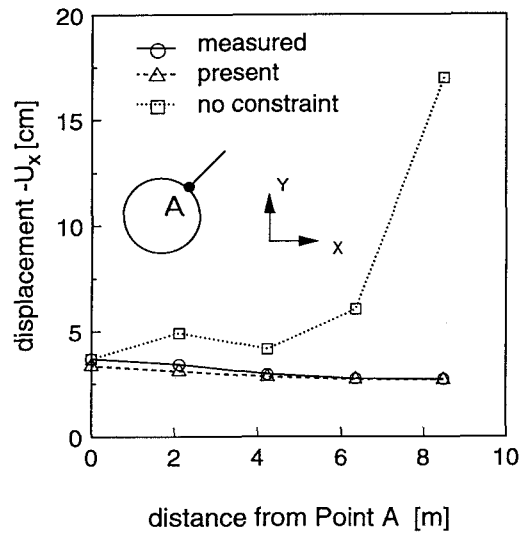


図-2 地中変位分布

岩盤内に水平方向のジョイントが多数存在していることが既知であれば、 c あるいは ϕ_i の値がたとえ未知であるとしても、この岩盤の挙動が式(2)の形をした降伏関数を有する弾塑性体で表されると推測することはできる。そこで、 c あるいは ϕ_i は未知のまま、式(2)を制約条件として用い、目的関数を最小化することにより、この未知変数を塑性領域および変形状態とともに求める。ただし、ヤング率、ポアソン比は既知であるとする。

解法手順としては次のものを採用した。1) 弾性解析により塑性領域を推定する、2) 塑性領域には制約条件を課した上で目的関数 I を最小化するような塑性ひずみ分布、未知の材料定数を求める、3) 前段階で得られた解を用いて応力状態を計算し、先に仮定した塑性領域との間に矛盾がないかチェックする。もし矛盾がなければ計算を終了するが、矛盾があれば、塑性領域を変更した上で2)に戻り、あらためて計算する。なお、2)では非線形形の連立方程式を解くことが必要となる場合があるが、その際にはニュートン・ラプソン法を用いる。

以上で述べた逆解析法により、 ϕ_i が未知の場合の解析を行った。逆解析により得られた ϕ_i の値は 29.3° であり、誤差は 2.4% に過ぎなかった。また得られた変形状態として、水平から 45° 方向のラインに沿った地中変位分布を図-2に示す。この図には正解値(measured)も記しているが、両者はよく一致している。さらに変形・破壊のメカニズムを考慮しない、すなわち制約条件を課さない逆解析も行った。その結果も図-2に示しているが、目的関数に取り入れる空洞上の変位を除けば、解析結果は正解値からかけ離れたものになっている。これより、変形・破壊のメカニズムを取り入れることの重要性が理解される。

4. まとめ

破壊・変形のメカニズムを制約条件として取り入れた逆解析法を提案し、その有効性を解析零により示した。本解析法は、特定の降伏条件や破壊条件には依存しない一般性のある逆解析手法である。今後は、より複雑な力学性状を有する岩盤について検討を行う予定である。

参考文献

- [1] 清水則一：地下空洞における現場計測変位の逆解析，土質工学会関西支部「逆解析を身近に考える」，pp.35～52，1992。
- [2] 吉田秀典・堀井秀之：破壊するジョイントを含む岩盤の構成式とFEM解析，土木学会第25回岩盤力学に関するシンポジウム，pp.91～95，1993。