

切土斜面の情報化施工管理手法に関する一提案（第二報）

徳島大学大学院 学生員 ○山部 哲
 徳島大学工学部 正員 山上拓男
 ㈱阪神コンサルタンツ 正員 植田康宏

1. まえがき

切土斜面は地山物性の複雑・多様性に起因して事前設計が不可能に近い。そのため大規模工事に際しては、工事の進捗に伴う観測変位と計算変位の照合に基づいて安全性を確認しつつ作業を進める方法、すなわち情報化施工が唯一の管理標準を提供する手段となっている。これまで第一報¹⁾では、切土斜面の情報化施工管理手法を開発することを目的に、地山を線形直交異方性材料とみなして逆解析を行った。本文は、第二報として地山を非線形直交異方性弾性材料とみなした場合について述べるものである。

2. 切土斜面の逆解析手法

一般に、情報化施工では施工時の動態観測に基づいて設計パラメータを同定し、得られた物性値をもとに以後の掘削段階における安定性の検討を行う。したがってこの手法の成否は、地山を数値解析上どのようにモデル化するか、また施工途上の観測変位に基づいて設計パラメータをいかに精度よく同定できるかにかかっている。まず前段の問題点に対して、最もリアルに地山を表現するには弾塑性構成則を導入すべきであろうが、このことは大変煩雑な作業を伴うため、ここでは地山を非線形直交異方性弾性材料としてモデル化した。この場合、弾性係数およびポアソン比が共に応力依存性の変数であると仮定して非線形性を考慮することにした。すなわち、弾性係数、ポアソン比をそれぞれ等価弾性係数 E_i^* 、等価ポアソン比 ν_i^* として次式のように表す²⁾。

$$E_i^* = E_i' + \alpha_i \exp[-a_i \bar{\sigma}] \quad (1)$$

$$\nu_i^* = \kappa_i + \phi_i \exp[-b_i \bar{\sigma}] \quad (2)$$

ここに、 $\bar{\sigma}$ は相当応力であり(3)式で表される。

$$\bar{\sigma} = \left[\frac{1}{2} \{ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6\tau_{xy}^2 \} \right]^{1/2} \quad (3)$$

ただし、 E_i' 、 α_i 、 a_i 、 κ_i 、 ϕ_i 、 b_i ($i = 1, 2$) は非線形パラメータである。また、添字1, 2は材料の主軸の方向を意味する。(1)式、(2)式で表される弾性係数およびポアソン比を、次に示す直交異方性材料の応力～ひずみマトリックスに導入する。

$$[D] = [T][D'][T]^T \quad (4)$$

ここに

$$[D'] = \frac{E_2}{(1+\nu_1)(1-\nu_1-2n\nu_2^2)} \begin{vmatrix} n(1-n\nu_2^2) & n\nu_2(1+\nu_1) & 0 \\ n\nu_2(1+\nu_1) & (1-\nu_1^2) & 0 \\ 0 & 0 & m(1+\nu_1)(1-\nu_1-2n\nu_2^2) \end{vmatrix} \quad (5)$$

$$[T] = \begin{vmatrix} \cos^2\beta & \sin^2\beta & -2\sin\beta\cos\beta \\ \sin^2\beta & \cos^2\beta & 2\sin\beta\cos\beta \\ \sin\beta\cos\beta & -\sin\beta\cos\beta & \cos^2\beta - \sin^2\beta \end{vmatrix} \quad (6)$$

$[D']$: 局所座標系(直交異方性材料の主軸方向)に関する応力～ひずみマトリックス、 $[T]$: 座標変換マトリックス、 $n = E_1/E_2$ 、 $m = G_2/E_2$ 、 E_i ($i = 1, 2$) : 弾性係数、 ν_i ($i = 1, 2$) : ポアソン比、 β : 全体座標系と局所座標系のなす角(反時計回りを正)

次に、非線形直交異方性弾性材料を支配する式(1)～(6)のパラメータは実験的に決定する手立てがなんら存在しないので、これらパラメータを逆解析によって推定するのである。すなわち、非線形計画法の援用のもとに観測変位と計算変位の誤差の二乗和で表される目的関数の最小化を行う方法である。なお、非線形計画法には修正Marquardt法を採用した。

3. 仮想斜面への適用例

ここでは、本手法の妥当性を検討するために仮想の問題に適用した結果を述べる。まず図-1に示すように高さ10m、法面勾配1:2の斜面を想定し、地山の物性値が既知であるとして順解析を行う。そしてそこで得られた水平変位を観測変位として地山の物性値を逆解析した。図-1において、●印が観測変位を与えた節点である。掘削は5段階で行い、最終掘削段階での水平変位を入力データとした。未知パラメータは、式(1)、(6)にあらわれる E_1' 、 E_2' 、 α_1 、 α_2 、 a_1 、 a_2 、 β の合計7個である。また、他のパラメータは $\kappa_1 = \kappa_2 = 0.2$ 、 $\phi_1 = \phi_2 = 0.0$ 、 $b_1 = b_2 = 0.0$ とした。

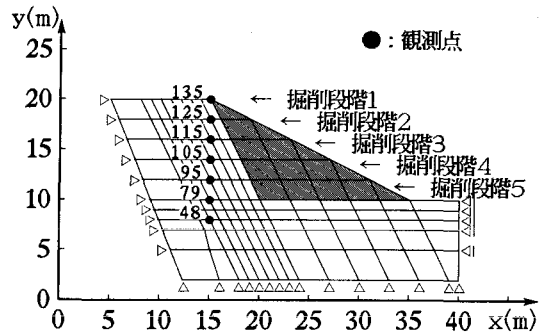


図-1 解析断面

表-1 逆解析結果

一般に非線形計画法で得られる解は局所的な解であり、必ずしも大局的な最適解が得られているとは限らない。したがって、大局的な最適解を得るには独立変数の初期値を種々変化した解析を行わなければならない。本適用例では、初期値を4通り変化させて逆解析を行った。表

パラメータ	真値	Case 1		Case 2		Case 3		Case 4	
		初期値	逆算値	初期値	逆算値	初期値	逆算値	初期値	逆算値
E_1'	50	20	-13.17	80	63.47	5	0.791	500	346.2
E_2'	100	50	80.35	150	138.6	10	10.07	1000	824.5
α_1	300	100	323.5	500	300.0	30	235.55	3000	1883.1
α_2	2000	1000	892.04	3000	2873.3	200	608.46	20000	26474
a_1	0.1	0.05	0.0687	0.15	0.1115	0.01	0.0048	1.0	1.018
a_2	0.1	0.05	0.0492	0.15	0.1296	0.01	0.0068	1.0	1.025
β	330	320	328.09	340	330.5	180	153.3	270	179.4
目的関数		0.177×10^{-6}		0.139×10^{-10}		0.135×10^{-5}		0.133×10^{-2}	
反復回数		15		13		13		9	
CPU time		897min 34sec		772min 31sec		750min 36sec		524min 53sec	

-1に初期値、および逆解析結果として逆算値、目的関数、反復回数、CPU time (計算機はNEC PC-9801DS)を示す。表中、真値とあるのは順解析で用いた値である。図-2に観測変位と計算変位の比較図を示す。これらの結果より、Case1~3は観測変位と計算変位がほぼ一致しているが、逆算値は初期値付近で収束した。すなわち、本報告で紹介した構成則を用いて逆解析を行った場合、大局的な解は得られなかった。

4. まとめ

本文では、FEMを活用した切土斜面の施工管理手法を開発することを目的に、第二報として地山を非線形直交異方性弾性材料とみなした逆解析法を述べた。今後の課題として、大局的な解を得るために、解を安定化させることが挙げられる。そのために、制約条件を導入するなどの工夫が必要である。

【参考文献】

1) 山上、植田、山部: 切土斜面の情報化施工管理手法に関する一提案(第一報)、第44回土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集、pp. 414-415、1992 2) 座古勝著: 数値複合材料力学、養賢堂、pp. 8-14、1989

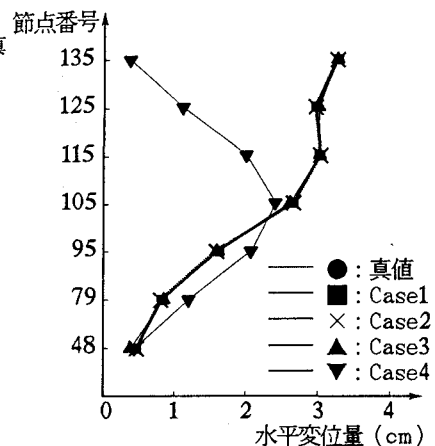


図-2 観測変位と計算変位の比較