

# 遺伝的アルゴリズムを活用した 斜面における損傷位置の推定手法に関する研究

庄路 友紀子<sup>1\*</sup>・高島 正治<sup>1</sup>・鈴木 隼人<sup>2</sup>

<sup>1</sup>電源開発株式会社 技術開発部 茅ヶ崎研究所 (〒253-0041 神奈川県茅ヶ崎市茅ヶ崎1-9-88)

<sup>2</sup>株式会社 J P ビジネスサービス 社会環境部 (〒135-8451 東京都江東区深川 2-2-18)

\* E-mail: Yukiko\_Shouji@jpower.co.jp

発電設備の周辺斜面は、ダム貯水池・調整池の周辺を含めると広大な領域であり、それらの斜面の地すべり規模を把握するためには、近年、測量精度が向上している航空レーザ測量から得られる地表面変位を活用することが有効であると考えられる。本研究では、地表面変位から斜面の物性値を推定する逆解析手法に着目して、斜面内部におけるすべり線や弱部などの損傷位置を遺伝的アルゴリズムで推定することを考案した。そして、仮想斜面モデルを用いて損傷位置の推定解析を行った結果、推定した損傷位置の情報に加えて、斜面内部における変形状態や応力分布を確認することで、地表面変位のみですべり線を推定できる可能性を見出した。

**Key Words :** *displacements measured, back analysis, genetic algorithm, damaged zones, slip line*

## 1. はじめに

近年、未曾有の豪雨や大規模地震の発生により日本各地で斜面崩壊が多発しており、全国に発電設備を有する当社にとっても、発電設備の周辺斜面における安定性は発電所の安定的な運転と公衆災害リスクの低減の観点から重要な課題となっている。

万一の災害に備えて、斜面崩壊による影響を予測するためには、地すべり規模を把握しておく必要がある。地すべり規模を把握するためには、従来から地質調査や土質試験を行い、それらの結果から得られた弱面をつなぎ合わせて、すべり線形状を設定してきた。しかしながら、発電設備の周辺斜面は、ダム貯水池・調整池周辺を含めると広大な領域となり、各斜面を調査して地すべり規模を把握するには多大な時間を要することが考えられる。

一方、近年は航空レーザ測量による測量精度は向上しており、斜面地形の数cm～数mm程度の僅かな変状も容易かつ広範囲に捉えることが可能になっている<sup>1)</sup>。

そこで、著者らは、この航空レーザ測量から得られる地表面変位を活用することで広域斜面の地すべり規模を簡易的に把握することを考えた。

地表面変位を活用して地すべり規模を推定する手法としては、(独)土木研究所と民間企業6社による地すべり線の形状推定法<sup>2)</sup>があり、すべり線推定プログラムは

一般公開されている。この手法は、地すべり活動域への立ち入りに危険が伴う場合や早急な応急対策を実施する必要がある場合に、すべり線の上部と下部の位置をあらかじめ指定した上で、地表面変位ベクトルの方向からすべり線を推定することができる。そのため、実務上、簡便にすべり線を推定できるという利点がある反面、すべり線の上部と下部の位置をあらかじめ指定した上ですべり線を推定するため、すべり線を一義的に定めてしまうことになる。

このような背景を踏まえ、本研究では、地表面変位から物性値を推定する逆解析手法に着目し、地表面変位のみを活用して、斜面内部におけるすべり線や弱部などの損傷位置を遺伝的アルゴリズム<sup>3)</sup>で推定することを考案した。具体的には、損傷が生じる可能性のある領域の物性値を仮定した上で、計測変位とFEMで計算した変位との差の二乗和からなる評価関数が最小となるように、遺伝的アルゴリズムで健全な位置と損傷位置のどちらかを推定することを試みた。

本報告では、まず、本研究で考案した損傷位置の推定手法について提案した後に、自然斜面への適用可能性について確認するために、仮想斜面モデルを用いて検証解析を行った。そして、検証解析から確認した課題について検討解析を行い、それらの結果をもとに本手法の有効性について考察している。

## 2. 地表面変位を活用した逆解析手法の概要

斜面内部における損傷位置の推定にあたっては、現場計測変位から斜面の物性値を推定する逆解析手法に着目した。

櫻井ら<sup>4)</sup>は、切り取り斜面を対象に、すべり層に平行な方向に主軸の1つをもつ異方性モデルを用いて、異方性材料のヤング率とせん断弾性係数との比で表される異方性パラメータという指標を導入し、損傷が生じる領域の物性値を逆算している。また、奥井ら<sup>5)</sup>は、櫻井らの手法をもとに、自然斜面を対象とした逆解析手法を提案している。以下に、2つの手法について詳細を示す。

### (1) 櫻井らの手法（切り取り斜面を対象とした検討）

図-1に示す局所座標系 ( $x'-y'$ ) と全体座標系 ( $x-y$ ) において、すべり線に平行に局所座標系をとり、次のような増分形式の応力-ひずみ関係式を用いることによって、斜面のすべり変形挙動を表すことができるとしている。

$$\{\Delta\sigma'\} = [D']\{\Delta\varepsilon'\} \quad (1)$$

ここで、

$$[D'] = \frac{E}{1-\nu-2\nu^2} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & m(1-\nu-2\nu^2) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$E$ 、 $\nu$  はそれぞれヤング率およびポアソン比である。 $m$  は、ヤング率とせん断弾性係数の比で表され、異方性パラメータと呼ぶ。

等方性の場合（材料に損傷がない場合）は、

$$m = \frac{G}{E} = \frac{1}{2(1+\nu)} \quad (3)$$

となる。櫻井らは、砂および軟岩に対して室内実験で異方性パラメータ  $m$  と最大せん断ひずみの関係を求めており、最大せん断ひずみが増加し、材料内に損傷が発生すると、異方性パラメータ  $m$  は小さくなる傾向を示している<sup>6)</sup>。

なお、式(1)は次式によって全体座標系に変換できる。

$$\{\Delta\sigma\} = [D]\{\Delta\varepsilon\} \quad (4)$$

ここで、

$$[D] = [T][D'][T]^T \quad (5)$$

$[T]$  は、次に示す変換マトリックスである。

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

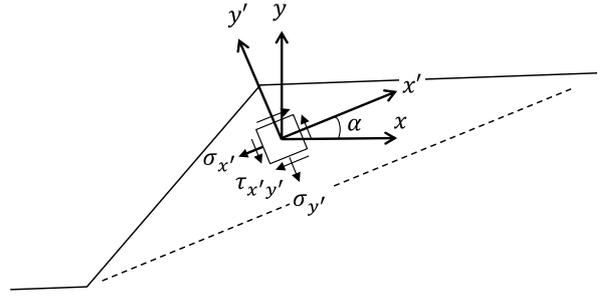


図-1 局所座標系と全体座標系の関係<sup>4)</sup>

ここで、 $\alpha$  は全体座標系の  $x$  軸とすべり面の方向との角度である。

以上の構成式に基づいて、櫻井らは損傷が生じる可能性のある領域を決めた上で、それらの領域における異方性パラメータ  $m$  とヤング率  $E$  を、斜面掘削中に発生した現場計測変位と応力-ひずみ関係式(4)を用いてFEMで計算した変位が次式に示す評価関数  $f$  を最小にするように逆算している。

$$f = \sum_{i=1}^N (u_i^c - u_i^m)^2 \rightarrow \min. \quad (7)$$

ここで、 $N$  は計測変位の数、 $u_i^c$  は計算変位、 $u_i^m$  は計測変位を表す。

### (2) 奥井らの手法（自然斜面を対象とした検討）

自然斜面の地すべり挙動に対しては、切り取り斜面のように外力項を仮定することが困難である。そのため、奥井らは、自然斜面の変形挙動を引き起こす力を地山自身の自重であると仮定し、すべり層の強度低下によって計測される変位増分、つまり、式(7)における計算変位  $u_i^c$  を次のように求めて、異方性パラメータ  $m$  とヤング率  $E$  を逆算している。

$$u_i^c = u' - u_0 \quad (8)$$

ここで、 $u'$  はすべり層の変形を考慮した場合の計算変位、 $u_0$  は地山の自重のみが作用した場合の計算変位を表す。

## 3. 斜面内部における損傷位置の推定手法の概要

### (1) 推定手法の概要

従来の方法（2章参照）では、地表面変位から損傷が生じる領域における物性値を逆算している。一方、斜面内部における損傷位置を推定する際には、損傷が生じる可能性のある領域の物性値（異方性パラメータ  $m$  とヤング率  $E$ ）は仮定した上で、図-2に示すモデルの各メッシュを未知数として健全な位置と損傷位置のどちらか

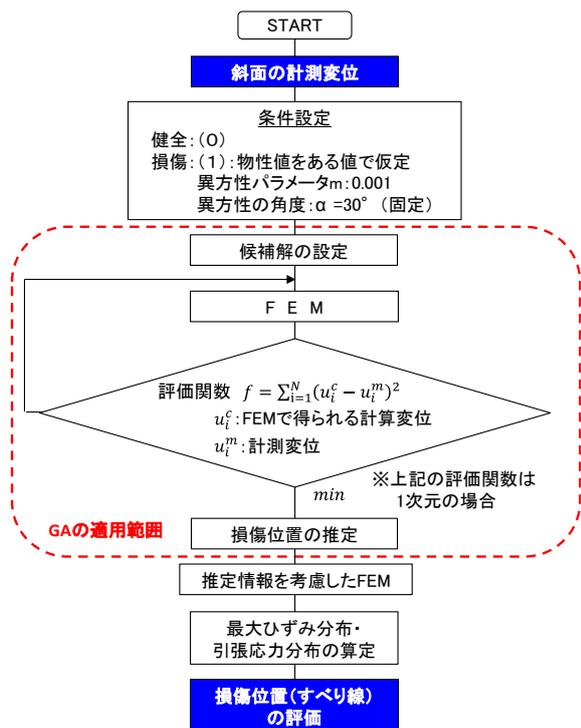


図-3 斜面内部における損傷位置の推定フロー

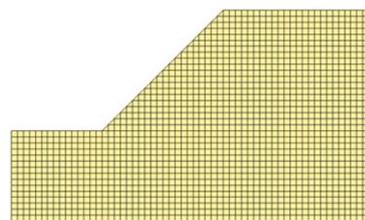


図-2 損傷位置の推定に用いた解析モデル

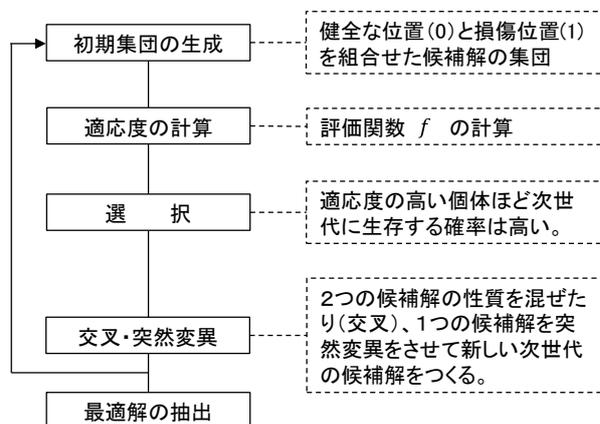


図-4 GAの処理手順

を、式(7)に示す評価関数が最小となるように推定している。図-3に損傷位置の推定フローを示す。

このとき、メッシュ上の健全な位置と損傷位置の組合せは多数あり、それらの解空間から最適な組合せを探索することになるため、遺伝的アルゴリズムというパラメータ推定手法を用いた。

### (2) 遺伝的アルゴリズムによる損傷位置の探索

ここでは、損傷位置の推定において適用した遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: 以下、GAと略す) について述べる。図-4に、GAの処理手順を示す。

GAは生物の進化過程をモデル化したものであり、計算機内に遺伝子に見立てた複数の線列 (ここではメッシュ上の健全な位置(0)と損傷位置(1)の組合せ) を生成させ、生物の進化過程 (選択・淘汰、遺伝子の交叉・突然変異) を適用して、世代を重ねるごとに最適解を探索する手法である。GAを適用することで、比較的短時間かつ効率的に解を求めることができる。

### (3) 推定情報を考慮したFEM解析

本手法では、斜面の損傷状態を1つに限定し推定しているが、実際の斜面における損傷状態は地質や周辺環境によって異なる。これは、損傷状態を区分すると、健全な位置と損傷位置の組合せの数が膨大になり、GAを用いたとしても短時間に最適解を求めることは難しいからである。

そのため、推定した損傷位置の情報をもとにFEM解析

を行い、最大せん断ひずみ分布や引張応力分布を求め、斜面内部の変形状態や応力を把握することで、損傷が卓越している箇所を確認することにした。

## 4. 仮想斜面を対象とした検証解析

3章で示した斜面内部における損傷位置の推定手法の適用可能性について確認するために、自然斜面の直線すべりと円弧すべりを想定した仮想斜面モデルを用いて検証解析を行った。

### (1) 入力値とした計測変位の設定

はじめに、直線すべりと円弧すべりを想定した仮想斜面モデルで順解析を行い、計測変位として解析結果の地表面における変位を抽出した。なお、このときの解析条件は、ヤング率、ポアソン比、単位体積重量、異方性パラメータをそれぞれ、200MPa、0.3、16.0kN/m<sup>3</sup>、0.001とした。図-5に計測変位として抽出した地表面変位を示す。

### (2) 損傷位置の推定

この計測変位を入力値とし、図-6に示す推定に用いたメッシュモデルにおいて、モデル内の損傷位置を遺伝的アルゴリズムにより推定した。その際、次式に示す評価関数  $f$  を最小となるように推定した。

$$f = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N [(u_i^m - u_i^c)^2 + (v_i^m - v_i^c)^2]}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N [(u_i^m)^2 + (v_i^m)^2]}} \rightarrow \min. \quad (9)$$

ここで、 $N$  は計測変位の数、 $u_i^m$ 、 $v_i^m$  はそれぞれ計測変位の水平成分、鉛直成分、 $u_i^c$ 、 $v_i^c$  はそれぞれ計算変位の水平成分、鉛直成分を示す。また、自然斜面を対象としているため、奥井ら<sup>5)</sup>の考え方に則り、式(8)から計算変位を求めた。なお、GAの世代数は1,000とした。

図-7に、1,000世代における損傷状態を示す。直線すべりを想定したケース、円弧すべりを想定したケースはともに、はじめに順解析で設定したすべり線（図-5）に近い位置に、推定した損傷位置は集中していたものの、すべり線とは関係ないメッシュにおいても損傷位置が推定される結果となった。

### (3) 推定情報を考慮したFEM解析

次に、損傷状態の推定結果を考慮して、FEM解析を行い、斜面内部における変形状態や応力分布を把握した。物性値は、ヤング率を200MPa、ポアソン比を0.3とし、図-7において損傷と判定された要素については、異方性パラメータ0.001を設定した。境界条件は、側面を鉛直ローラー、底面を水平ローラーとした。

図-8に1,000世代における最大せん断ひずみ分布を、図-9に1,000世代における引張応力分布を示す。直線すべり及び円弧すべりを想定したケースにおいて、ともに、最大せん断ひずみや引張応力が卓越する領域を確認することができる。

詳しくみると、直線すべりに比べて、円弧すべりを想定したケースのほうが、最大せん断ひずみや引張分布が卓越する領域は深くなる傾向がみられた。そして、すべり線の上部付近では引張応力の値が大きく、一方、すべり線の下部付近では最大せん断ひずみが卓越していることがわかる。したがって、図-8と図-9の両結果を確認することで、すべり線を明確に推定できることがわかる。

### (4) 考察

以上の結果から、地表面変位を活用して、すべり線や弱部などの損傷位置を推定するためには、損傷位置の推定解析に加えて、その際の斜面内部における変形状態や応力を把握することで損傷位置を推定できることがわかった。

しかしながら、これらの結果からは、すべり線の位置とは関係のない場所においても損傷位置が推定されており、推定に改善の余地があることを確認した。考えられる改善点を以下に列記する。

1) 検証解析では、式(9)で対象とした入力変位を変位が

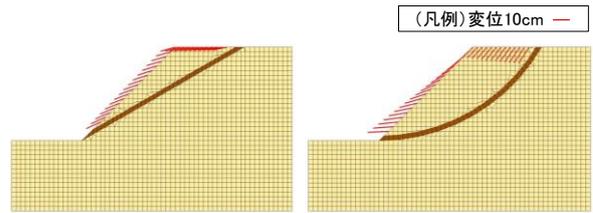


図-5 計測変位として抽出した地表面の変位ベクトル  
(左：直線すべり、右：円弧すべり)

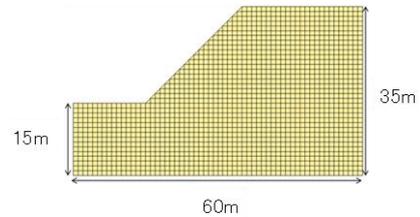


図-6 推定に用いたモデル（縦1m×横1m）



図-7 損傷位置の推定結果（□健全、■損傷）  
(左：直線すべり、右：円弧すべり)

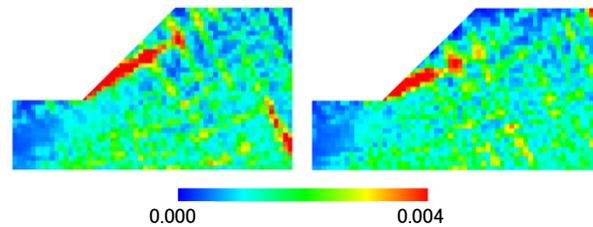


図-8 最大せん断ひずみ分布  
(左：直線すべり、右：円弧すべり)

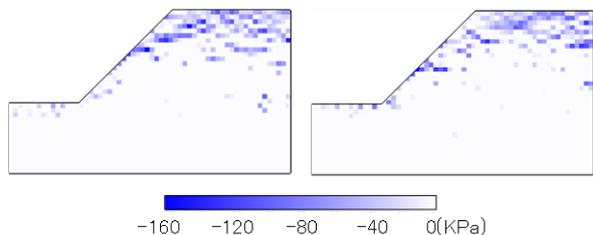


図-9 引張応力分布  
(左：直線すべり、右：円弧すべり)

発生した部分としたが、変位が発生していない部分についても入力変位の対象とする。

- 2) 検証解析では、対象としたモデル領域すべてを推定範囲としたが、あらかじめ地形や地質情報を考慮して損傷位置の推定範囲を限定する。

## 5. 損傷位置の推定改良に向けた検討解析

4章(4)に示した課題解決に向けて、検証解析で用いた直線すべりの自然斜面を対象に検討解析を行った。

### (1) 検討ケースの概要

表-1に検討ケース内容を示す。CASE-1では、地表面変位が発生していない部分についても評価関数の対象として推定解析した。また、CASE-2では、斜面の基盤は損傷しないとして、推定範囲を限定して解析した。最後に、CASE-1とCASE-2と合わせた影響を把握するために、CASE-3では、推定範囲を限定した上で、地表面変位が

発生していない部分も考慮した条件で解析した。なお、他の条件については、3章に示した検証解析条件と同様にした。

### (2) 検討結果

図-10に各ケースの最大せん断ひずみ分布を、図-11に引張応力分布図を示す。いずれのケースにおいても、検証解析と同様、すべり線の上部付近では引張応力の値が大きく、すべり線の下部付近では最大せん断ひずみが卓越しており、すべり線は概ね推定できていることがわかる。

また、CASE-1では、変位が発生していない部分も考慮に入れることで、検証解析では、すべり線の位置とは関係ない場所に損傷推定されていたところが、健全な位置として推定されており、やや改善した結果となっている。また、CASE-2とCASE-3で損傷の推定範囲を限定すると、すべり線の位置を除く場所は、ほぼ健全な位置として推定される結果となった。

表-1 検討ケース内容

条件 内容	対象変位		推定範囲	
	発生した部分のみを考慮	発生していない部分も考慮	全領域	範囲を限定
検証解析	○	—	○	—
CASE-1	—	○	○	—
CASE-2	○	—	—	○
CASE-3	—	○	—	○

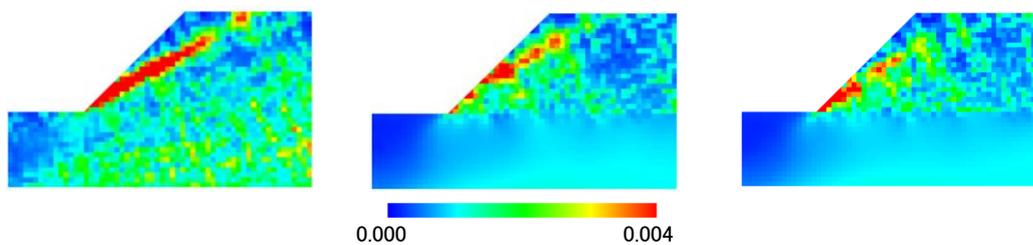


図-10 各ケースの最大せん断ひずみ分布 (左: CASE-1, 中: CASE-2, 右: CASE-3)

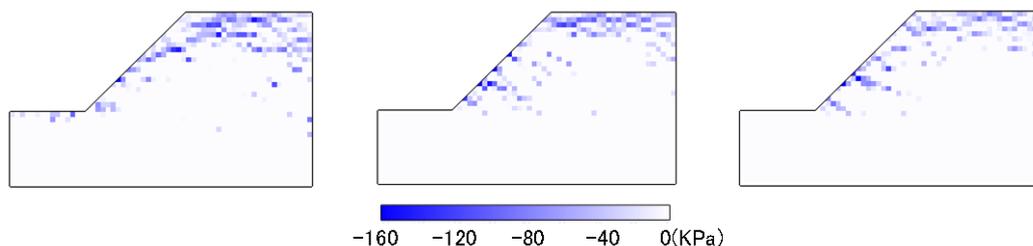


図-11 各ケースの引張応力分布 (左: CASE-1, 中: CASE-2, 右: CASE-3)

## 6. まとめ

本研究では、地表面変位のみを活用して斜面内部におけるすべり線などの損傷位置を推定する手法を考案し、仮想斜面モデルを用いて検証解析を行った。得られた結論を以下に列記する。

- (1) 仮想斜面モデルの各メッシュにおいて、逆解析手法と遺伝的アルゴリズムにより健全な位置と損傷位置のどちらかを推定解析した結果、すべり線に近い位置に損傷位置は集中していることがわかった。
- (2) (1)で推定した損傷位置の情報を考慮してFEM解析を行った。その結果、モデル斜面のすべり線上部に近い位置では引張応力の値が大きく、すべり線下部付近では最大せん断ひずみが卓越していることがわかった。したがって、損傷位置の推定に加えて、その際の変形状態や応力分布を把握することで損傷位置を推定できる。
- (3) 一方、すべり線とは関係のない場所においても損傷位置が推定されていることについては改善点を挙げて検討解析を行った。その改善点とは、①変位が発生していない部分についても入力変位の対象とすること、②損傷位置の推定範囲を限定することである。

検討解析の結果、これらの改善点を考慮すると、すべり線の位置を除く場所は、ほぼ健全な位置として推定される結果となった。

- (4) 以上を踏まえ、本報告では、直線すべりと円弧すべりの仮想斜面モデルを用いて損傷位置の推定解析を行い、地表面変位のみを活用してすべり線を推定できる可能性を見出した。今後、層状すべりなどの他のすべり形状を想定した推定解析を行い、有効性や課題について評価することに致したい。

## 参考文献

- 1) 菊池輝行, 秦野輝儀, 千田良道, 西山哲: 航空レーザ測量を用いた斜面動態モニタリング技術の試み, 第 51 回地盤工学研究発表会, 2016.
- 2) 独立行政法人土木研究所他: 地すべり線の形状推定法, pp.11-25, 鹿島出版会, 2013.5.
- 3) 古田均, 杉本博之: 遺伝的アルゴリズムの構造工学への応用, pp.1-15, 森北出版株式会社, 2011.10.
- 4) 櫻井春輔, 清水則一: GPS による切取り斜面の変位測定と計測結果の逆解析に基づく安定性の評価, 地盤と建設, vol.11, No.1, pp.129-138, 1993.
- 5) 奥井祐三, 徳永理, 進士正人, 森誠一郎: 現場計測結果に地すべり挙動の逆解析手法, 岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, vol.28, pp.92-96, 1997.
- 6) 櫻井春輔: 情報化施工における逆解析, 土木学会論文集, No.652, pp.1-10, 2000.6.

## STUDY ON ANALYSIS METHOD TO ESTIMATE DAMAGED ZONES OF SLOPES BY USING GENETIC ALGORITHM

Yukiko SHOJI, Masaharu TAKABATAKE and Hayato SUZUKI

Target areas of this study are surrounding slopes of power generation facilities, which are wide including around dam reservoirs. In order to estimate landslide size of these slopes, it is considered to be effective to use ground surface displacement data measured. In this study, a new approach is proposed for estimating damaged zones such as a slip line or fragile part by back analyzing from only displacements measured. Then, since there are many combinations of damaged parts on a model, they are searched by Genetic Algorithm. As a result of analysis on virtual slope models, a slip line could be estimating by outputting strain and tensile stress not only analyzing damaged zones.