

崩壊した岩盤斜面の変形挙動に関する一考察

AN INTERPRETATION OF A LARGE SCALE ROCK SLOPE FAILURE

芥川真一*・臼井ひとみ**

Shinichi AKUTAGAWA and Hitomi USUI

A large scale rock slope failure, with an estimated collapse volume of 2,700,000m³, occurred at a site where the deformational behavior had been monitored over several years. The characteristics of the behavior were in that the deformation was recorded not only during excavation of the slope, but also between excavations. This paper presents a summary of an investigation on the deformational mechanism both during and between excavations. In particular, a finite element procedure used herein has introduced a new method of modeling deformation between excavations as that associated with a reduction of material strength parameters. The results of this investigation suggest that a sign of a large scale collapse might have been seen in a relatively early stage of the slope excavation procedure.

Key Words: rock slope failure, deformation monitoring, finite element analysis, reduction of strength parameters

1. はじめに

斜面の情報化施工における分野において、櫻井らは掘削斜面の変形挙動計測から斜面の安全率を推定する方法論を提案している^{1,2)}。これらの方法においては、計測される変形挙動は掘削の影響によるものであるとの前提があったため、掘削が停止している間に進行する斜面の変形挙動を説明することが困難であった。降雨、地盤材料の強度劣化など、様々な理由で掘削に無関係な変形挙動が発生することは稀ではなく、特にそのような状態で変形が発生し続けることは斜面が安定した状態に無いことを明示するものであり、注意深く分析されなければならない情報であるといえる。本研究では、この点に注目して櫻井らの手法を改良することを試みた³⁾。具体的には、掘削に無関係に発生する変形について、これは釣り合い状態から斜面のすべり面において材料の物性が低下することによって発生するものと考えた。この仮定に基づいた有限要素解析プログラムを新たに開発して実際に大崩壊を起こした斜面の変形挙動^{4,5)}を各段階ごとに分析し、時間の経過と共に潜在的すべり面における物性がどのように変化したか、また最終段階においてどのような物性値に至った時に崩壊を起こしたと考えられるかについて検討を加えた。

2. 斜面の変形挙動解析手法

本研究では、斜面で実際に観測される変形挙動を再現するために、通常の 1)「荷重-変位関係」をモデル化できる理論的枠組みに加え、荷重変化が無い場合に、2)「物性低下-変位関係」のモデル化を可能とする有限要素解析プログラムを作成した。1)の関係は斜面掘削時に変形が生じることを、また 2)の関係は掘削が行われていない期間に変形が生じることをモデル化するのが目的である。以下に、その理論的背景の概略を示す。

* 正会員 Ph.D. 神戸大学工学部建設学科 (土木系教室)

** 正会員 修士 (工学) (株) アーバンエース

(1) 異方弾性体の構成式

本解析で用いる基本的な構成式は櫻井ら^{1,2)}が提案した異方性損傷パラメータ m を用いるものである。この構成式においては材料のせん断剛性がひずみの増加と共に低下することが前提条件となっている。また、せん断剛性の低下は指数関数で表現され、構成式が定義される方向は斜面の潜在的なすべり面の方向に一致するようにとられる。

(2) 潜在的すべり面における応力状態の修正

また、ここで用いた手法では潜在的すべり面において Mohr-Coulomb の摩擦則に基づく応力修正を行う。ここで、潜在的すべり面とは最小主応力の作用方向と $45^\circ \pm \phi/2$ (ϕ は内部摩擦角) の角度をなす共役な 2 面であり、斜面のグローバルな意味でのすべり面とは異なるものである。応力修正に伴って生じる不釣り合い力は、次の荷重ステップに持ち越す非線形繰り返し計算のアルゴリズムを採用した。

(3) 物性変化に対応する解析アルゴリズム

掘削が行われていないときに生じる変形は様々な理由によるものと思われるが、ここでは簡単のために、1) 材料の変形係数が低下する、と 2) 材料の強度定数が低下する、の 2 つの原因をモデル化することを可能にするアルゴリズムを組み込んだ。これらの方法はどちらについても、材料定数の変化に伴って生じる応力の修正分を等価な荷重ベクトルに置き換えて繰り返し計算をおこなうことを原則としている³⁾。

3. 対象とした斜面の概要^{4,5)}

(1) 地質構造と変状の推移

本研究で対象とした斜面の地質構造を図-1、図-2 に示す。掘削は 1975 年 12 月に開始された。掘削面に亀裂が発見された 1980 年 4 月以降、光波測定による表面変位、傾斜計等による計測が開始された。1991 年 11 月 29 日以降、数カ所で落石が見られた。1991 年 12 月 2 日 20 時から落石・肌落ちが頻発し、23 時 15 分に、幅約 300m、高さ約 300m の範囲が突然崩壊した。崩壊量は約 2,700,000m³ と推定されている。

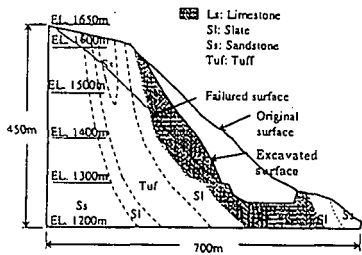


図-1 斜面の断面図 (23 側線)⁵⁾

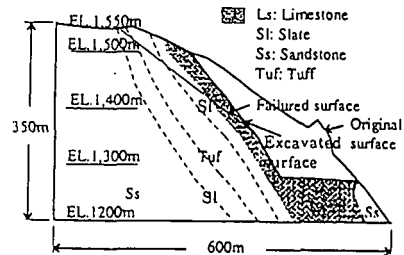


図-2 斜面の断面図 (26 側線)⁵⁾

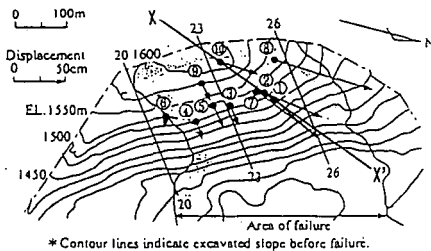


図-3 変位ベクトル図 (平面)⁵⁾

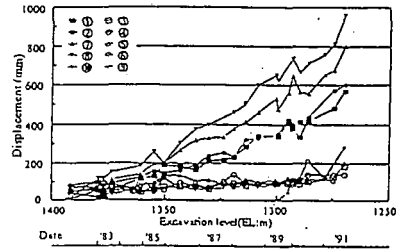


図-4 掘削標高・掘削時期と累積変位量⁵⁾

(2) 変形のメカニズム

1982 年から崩壊の 1 ヶ月前半までも光波測量による変位計測結果を、図-3 および図-4 に示す。変位の傾向は、中央より北西 (NW) 側と南東 (SE) 側で異なる。南東側の斜面は、掘削の進捗に伴う変形は、掘削標高に対してほぼ直線状の推移を示す。一方、北西側の各点は、掘削標高 1330m 付近以降、グラフの傾きが急になり、崩壊直

前には変位が加速度的に進行した。北西側斜面と南東側斜面の挙動の差異は、図-1、図-2 に示した地形、掘削量、残壁形状の違いによる影響が大きいと考えられる。また、崩壊直前の 1991 年 8~10 月の雨量は約 1600mm で、平均の約 2 倍である。このことも、崩壊の要因としてあげられる⁵⁾。

4. 数値解析による崩壊事例の分析

(1) 掘削と解析の段階設定

まず、対象斜面において変位が計測されてから崩壊が起こるまでの期間を 5 期（第Ⅰ期：掘削を開始してから変位計測を開始するまでの期間、第Ⅱ期～第Ⅴ期：計測開始後の変位量の増加量べつに 3 段階に分けた期間、第Ⅴ期：崩壊後の期間）に分けた。それらの期を基に、実際の解析段階を 9 段階（ステージ 1：斜面全体に重力をかける、2：第Ⅰ期の掘削を行う、3：第Ⅱ期の掘削を行う、4：すべり面の地山物性値を低下させる、5：第Ⅲ期の掘削を行う、6：すべり面の地山物性値を低下させる、7：第Ⅳ期の掘削を行う、8：すべり面の地山物性値を低下させる、9：崩壊するまですべり面の地山物性値を低下させる）で行った。

(2) 仮定とパラメータスタディの方法

まず、1)全体を包括する主すべり面が一つ存在し、大局的な運動は主すべり面に支配されるものとする、2)すべり層の地山物性値はどの位置においても一様に低下する、3)すべり層を除いて、それぞれの岩種において地山物性値は一定とする、との仮定を設けた。その上で、先に示した 9 ステージの各段階で斜面が安定していたか、していなかったかをよりどころにして、安定していた場合の限界の強度定数、あるいは最適な変形係数などをトライアル&エラー方式で求め、それらの値が、斜面崩壊の最終段階に向かってどのように変化して行くかを調べた。

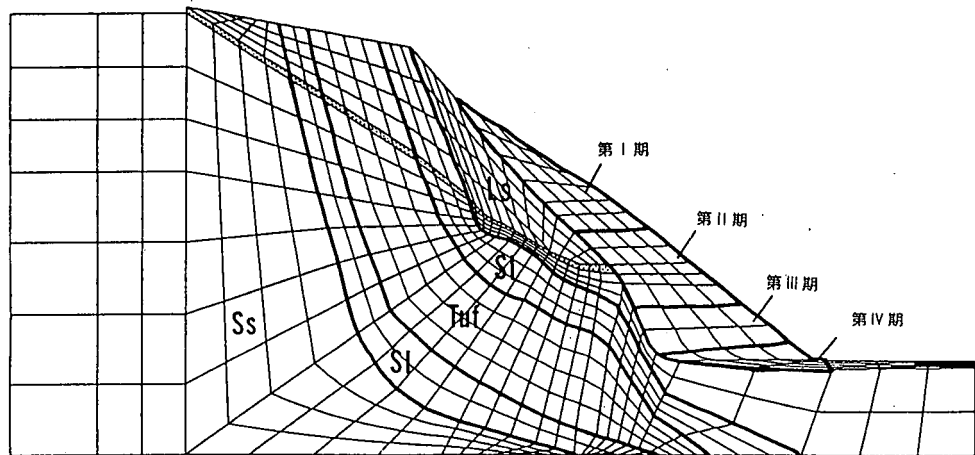


図-5 有限要素解析メッシュ図

表-1 解析に用いた岩層別地山物性値

地山物性値	Tuff	Ss	Slate	Ls
ヤング率(MPa)	3920	3920	980	2940
ポアソン比	0.25	0.25	0.25	0.25
単位体積重量 (kN/m ³)	25.5	25.5	25.5	25.5
粘着力(MPa)	1000000	1000000	1000000	1000000
内部摩擦角(°)	30	30	30	30

表-2 すべり層に関して用いた入力データ

地山物性値	入力データ
ヤング率 E (MPa)	3100
ポアソン比 ν	0.25
単位体積重量 (kN/m ³)	25.5
粘着力 c とその残留値の初期値(MPa)	1000 1000
内部摩擦角 ϕ とその残留値の初期値(°)	30 30
異方性角(°)	-30
$m \sim \gamma$ 関係を決定する α の初期値	1
$m \sim \gamma$ 関係におけるせん断ひずみ γ_0	0
$m \sim \gamma$ 関係における異法性パラメータ m の残留値	0.0000001

(3) 入力データ

本解析では、計測ポイントを最も多く通り、また、変位の方向と断面の方向が比較的良好に一致しているという点から選んだ解析対象断面を図-5 のような有限要素メッシュとして用意した。ここで、すべり面は図中に示すように厚さ 5-6m 程度の要素とした。すべり層以外のそれぞれの岩層における地山物性値は表-1 に示すとおりである。ただし、斜面のすべり層以外の要素においては崩壊が起こらないものとしている。したがって、それらの場所においては粘着力 c をかなり大きい値に固定した。すべり層に関しては、解析に用いた入力データの初期値を表-2 に示す。

(4) すべり面の物性値の推定

まず、 $m-\gamma$ 関係を決定する α についての検討を行うために、第 II 期掘削終了時において、粘着力 c および内部摩擦係数 ϕ による規制を受けない状態で α を変化させ解析を行い、その最適値を 50 とした。それ以後の解析では α を固定し、ステージごとにそのときの計測変位が得られるまで地山物性値を順次低下させるパラメトリックスタディを行った。このとき、計測変位を最も良く再現し、斜面の安定性を保証できるすべり面の限界物性値として表-3 のような結果を得た。また、その時の計算変位と計測変位を図-6 に示す。

表-3 パラメトリックスタディの結果として推定されたすべり面の物性値

	第 II 期	第 III 期	第 IV 期	第 V 期 (崩壊)
弾性係数 E (MPa)	300	299	250	200
粘着力 c (MPa)	3	12	12	12

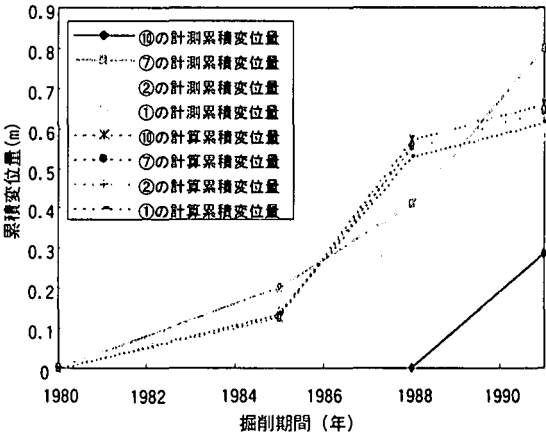


図-6 最適化された物性値を用いて計算された変位（破線）と計測結果（実線）の比較

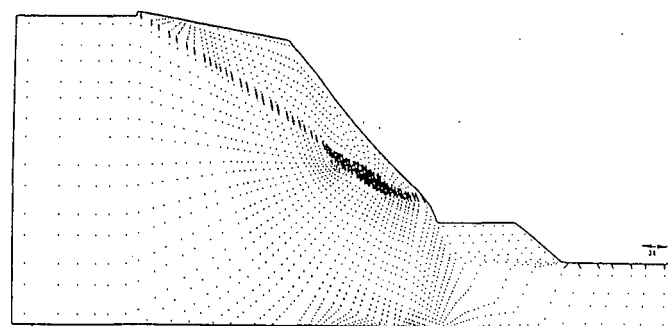
これより、実際に斜面が崩壊に至る直前の地山物性値はヤング率が 250MPa、粘着力が 12 MPa 程度であったことが推定された。また、最後に変位計測を行ってから実際に斜面が崩壊するまでにさらに約 13cm の変形が生じ得たことが分かった。安全率に関しては、これらの結果はどの段階においても安定であるための限界値としているため、常に 1 を少し上回る程度になっていると考えられる。

(5) 斜面に発生した応力、ひずみ状態から推定できる崩壊のメカニズム

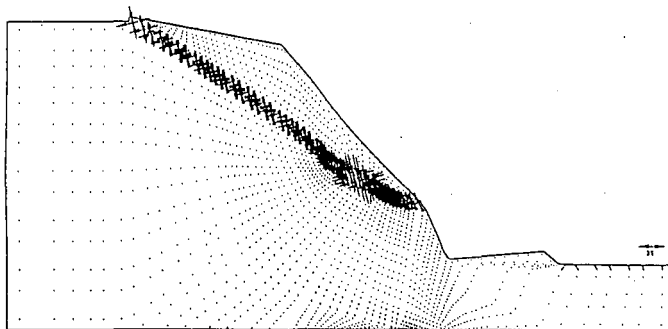
図-7 に第 II 期～第 IV 期の主ひずみ図を示す。これらより、すべりブロック全体が大きく変形しているのに対し、第 III 期掘削終了時から第 IV 期掘削終了時にかけてはほとんど状態が変化していないことが分かる。また、第 II 期掘削終了時から第 III 期掘削終了時にかけては、ヤング率がほとんど低下していないにもかかわらず、計算変位が増大し、粘着力を大きく引き上げなければ崩壊に至ってしまうという非常に不安定な状態であった。これらの事実から、この斜面において崩壊を決定付ける主要因となった変形挙動の兆候は、第 II 期から第 III 期に移り、掘削直後から変形が持続的に増加した期間であったことが推定できる。

また、この時期に遷移した応力状態を確認したところ、まず、第 II 期から第 III 期にかけてすべり層の上部でせん断破壊が、岩層境界付近で部分的に生じていることが分かった。それが要因となって、斜面下部ではすべり面上部岩塊の重量を下端部のごく限られた領域における抵抗力で支えざるを得ない状況に陥ったことが考えられる。最

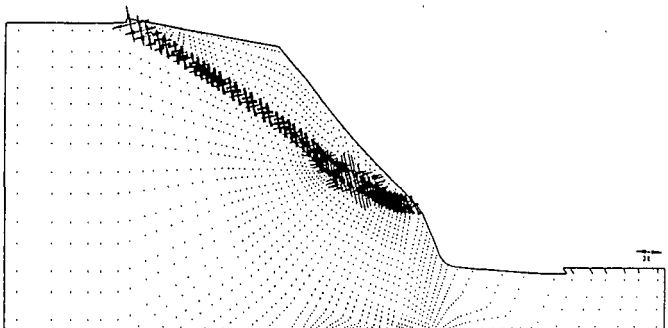
終的には、この下端部における応力集中が限界状態に達し、すでに破壊していたと思われる上部のすべり面が下端まで到達することにより、大規模な斜面崩壊が生じたと推定することができる。



(a) 第II期終了時



(b) 第III期終了時



(c) 第IV期終了時

図-7 ひずみ分布の推移

5. おわりに

本研究では、異方性損傷パラメータを用いた斜面の変形挙動解析手法を実際に大規模な崩壊が起こった長大岩盤斜面に適用した。その結果、掘削に伴う変形挙動、物性変化に伴う変形挙動のどちらに対しても適応できる解析プログラムによって、応力集中などが原因と思われる崩壊挙動の前兆を特定できたと共に、時間の経過と共にすべり面の物性値の限界値がどの程度であったかを推定することが出来た。これらの成果を総合的に分析すると、まず、掘削を伴わない段階において、変形が持続的に進行していたこと、またそれが物性低下に関連付けられる可能性を特定できたことは十分に考えられる。即ち、ここで示したような解析手法の適用によって、斜面の変形挙動を直接分析するだけでなく、変形挙動のメカニズムを特定することができるため、今後の斜面の変形挙動管理においては有用な方法論を提示できたものと考ええる。今後は、さらに多くの実際斜面において本方法を適用し、より高い実用性、有効性を実証する必要がある。

参考文献

- 1) Sakurai, S., Hiraoka, A. and Hori, K. : Strain-induced Damage of rocks, International Conference on Mechanics of Joined and Faulted Rock, Vienna, pp.21-27, 1998.
- 2) 奥田庸, 安部敏夫, 櫻井春輔: 土被りの浅い未固結時山トンネルの非線形解析, 土木学会論文集, No.638/Ⅲ-49, 383-388, 1999.12.
- 3) 芥川真一, 臼井ひとみ: 長大岩盤斜面崩壊事例の数値解析的検討, 建設工学研究所報告, 第42-A号, 2000.11
- 4) 吉中龍之進, 佐々木猛, 田部井和人, 萩原捷男: 長大岩盤掘削斜面の安定性検討, 第34回地盤工学会研究発表会論文集, pp.1137-1138, 1999.7.
- 5) Yoshinaka, R., Kido, K., Sasaki, T. and Hagawara, K. : Stability and long-term monitoring of large excavated rock slopes, Proc. ISRM Congress, Paris, pp.1443-1446, 1999.