

観測データの有効利用及び数値解析による 落石の予測についての検討

伊藤 孝^{1*}・曹 増延¹・鳥羽瀬 孝臣²

¹株式会社 JP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）

²電源開発株式会社 技術開発センター 茅ヶ崎研究所（〒253-0041 神奈川県茅ヶ崎市茅ヶ崎1-9-88）

*E-mail: takashi_itou@jpbs.co.jp

本研究は、落石災害の予防のために、落石に関する観測データの有効利用方法を検討し、現場観測と数値解析の組合せによる落石の予測手法を提案した。この手法は、落石の落下前のクリープ変形に関して採集した観測データを即時に利用し、DDA逆解析手法により落石および周辺岩体の変形状態などを推定する。推定した変形状態を初期条件として、Manifold法解析手法により落石の有無およびその緊迫性を予測する。適用事例として、青森県279号国道易国間地点の観測データを用い、地震による落下の可能性およびその緊迫性を評価し、落石の予測が可能であることを示した。

Key Words : rockfall, observation data, DDA backward analysis, manifold method, predication

1. はじめに

近年、地震、大雨などの自然現象に伴い、落石や斜面すべりなどの自然災害が頻発している。特に08年5月に発生した岩手・宮城内陸地震での落石と斜面すべり現象は激甚であり、我々の岩盤工学の技術者に大きな課題を直面させている。

一方、道路・鉄道などの重要な社会基盤施設の近傍の斜面に様々な計測・監視・警報システムが構築され、斜面変形、落石情報に関する貴重な、かつ膨大な量の観測データが蓄積されてきている。

このような観測データをいかにして、落石や斜面すべりによる災害の予防に役に立てるかは大きな課題である。本研究は、防災のための観測データの有効利用を目的として、現場観測と数値解析の組合せ手法に基づき落石の有無およびその緊迫性の予測を試みた。

本論文は、具体的な事例を介して、提案した予測手法を説明し、落石に関する観測データの有効利用に参考になることを図る。

2. 予測手法の概要

図-1には現場観測と数値解析の組合せによる落石予測手法の概要を示し、図-2には落石予測の手順を示す。

本手法は、岩塊のクリープ変形が観測されていることを前提とする。例えば、図-1に示す観測範囲で、ある時刻までの岩塊の変形時刻歴が得られている。これに対して不連続体解析手法の一つであるDDA¹⁾²⁾逆解析手法を用いて、これまでの変形過程を再現し、変形の発生メカニズムを推定する。さらに現状の変形状態を初期状態とし、推定されたクリープ変形の発生メカニズムを考慮して、図-1の予測範囲で示すようにこれからの岩塊の変形傾向や落下の可能性・緊迫性をManifold法(MM)³⁾解析により予測する。

落石の予測に用いる解析手法については、Manifold法は岩塊の弾性変形を考慮でき、観測された岩塊のクリープ変形の逆解析から落下の予測解析までこの手法を用いるべきであるが、逆解析ではできるだけ未定パラメータを絞りたいため、引数の比較的に少ないDDAを選んだ。

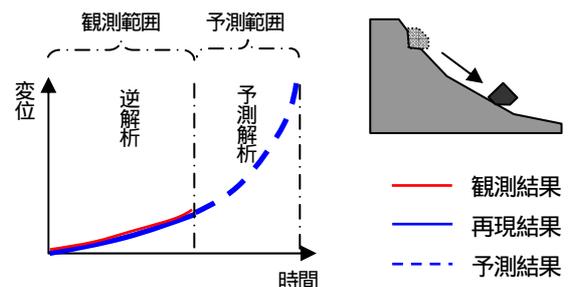


図-1 落石予測手法の概要

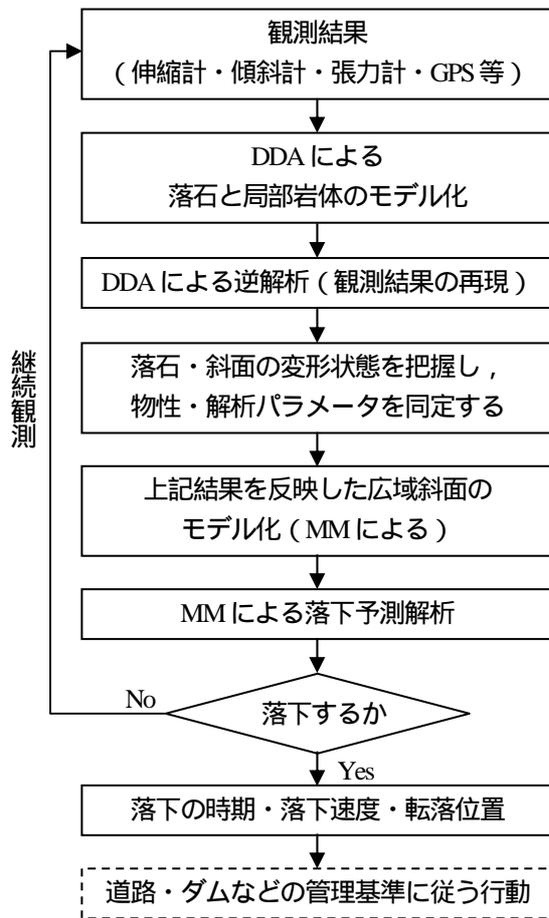


図-2 落石予測手順

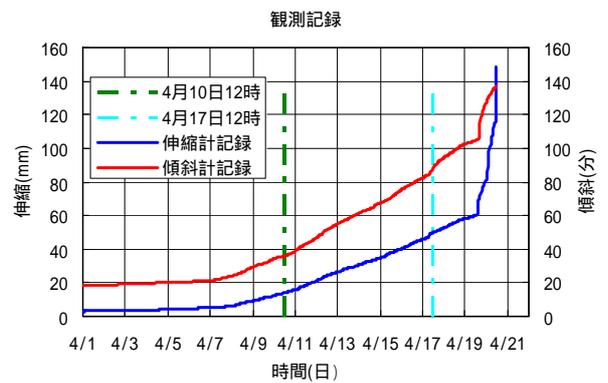


図-3 観測された落石のクリープ変形時刻歴

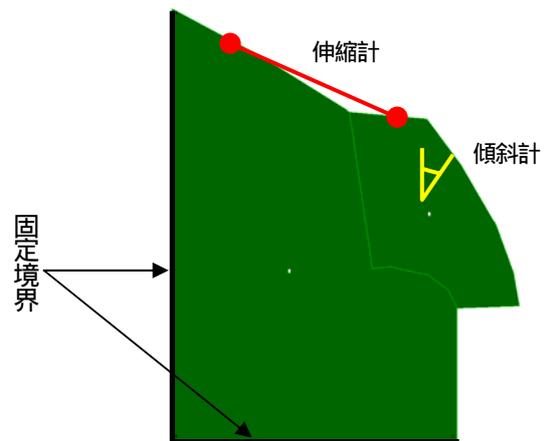


図-4 解析モデル

3. 落石予測解析

落石の予測に当たっては、着目している岩塊の現状確認、変形のメカニズムの推測、これからの変形に対する影響要因などを考慮する必要がある。本研究では、現状確認は現場観測で計測された個別点の変位記録に基づき DDA 逆解析手法⁴⁾により当該岩塊と周辺岩体との接触状態を解析し、解析結果を分析することにより行う。変形メカニズムの推定は現場調査および計測された変位の再現解析により行う。そして、現場地質・地形条件、地震・大雨などの岩塊の変形に対する影響要因を予測解析に適切に反映する。

(1) 解析条件

a) 観測記録

図-3 に青森県 279 号国道易国間地点で 2005 年 4 月 20 日に発生した落石事例に関する現場観測の記録を示す。4 月 7 日より 4 月 20 日落下直前まで当該岩塊にクリープ変形が発生していることが明らかである。ここで、落下前の 4 月 10 日 12 時および 4 月 17 日 12 時までの観測データを用いて、それぞれの時点で落石発生の可能性、緊迫性を予測して試みた。

b) 解析手順

それぞれの時点において、観測データを用いて DDA 逆解析により岩塊の変形状態、特に岩塊と周辺岩体との接触状態を再現することにより確認する。そして、現状を初期状態としてこれからの当該岩塊の挙動を Manifold 法解析により検討する。荷重としては、まず自重のみを考慮し、自然落下の可能性がなければ、地震・突風・大雨などのトリガーを受けることとする。

c) モデルの設定

図-4 に解析モデルを示す。今回の検討は落下の可能性があるかどうかに着目し、落下の速度および落下位置の予測はしないため、解析モデルは落石岩塊およびその周辺岩体のみとする。

クリープ変形の再現性について、図-4に示すように岩塊頭部と背後岩体の 2 点間の直線距離の変化を解析し実際の同位置に設置されている伸縮計の記録と比較することにより考察する。同時に、岩塊の中心部に測量点を設け、測量点の回転変位と実際の傾斜計の記録と比較する。

d) 物性値

解析モデルの物性値は材料試験および別途実施した落石の再現解析⁴⁾により定められ、表-1にまとめる。

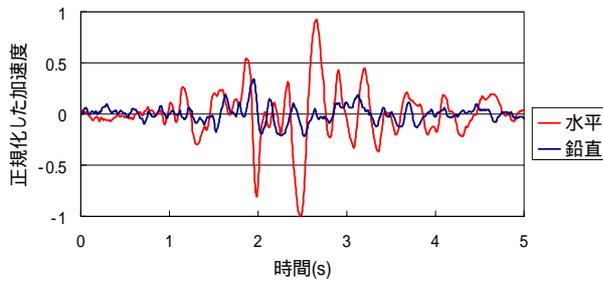


図-5 落石予測解析に用いた地震波形

表-1 DDA 逆解析に用いるパラメータ

項目	値	根拠
単位体積重量	2.55 gf/cm ³	室内試験結果
ポアソン比	0.26	
接触面の粘着力	0	
接触面の摩擦角	25度	
ペナルティ係数	20,000 N/mm ²	経験値

表-2 予測解析ケース

	DDA 逆解析用 入力データ	MM 落下解析用荷 重 (最大加速度)
Case-1	05/04/10 12:00 までの 伸縮計及び傾斜計の クリープ変形の記録	0.1G, 0.2G, 0.3G
Case-2	05/04/17 12:00 までの 伸縮計及び傾斜計の クリープ変形の記録	0.1G, 0.2G, 0.3G

e) 落下トリガー

落石の誘因は、自重の以外に、地震、大雨、地下水、突風、風化、人間活動などが考えられるが、本研究では落石予測の可能性およびその手順を検討するため、比較的明瞭に設定しやすい地震荷重を用いる。図-5に兵庫県南部地震の際に一庫ダムの岩盤面で計測された地震波形を最大値で正規化したものを示す。この波形に0.1G, 0.2G, 0.3G, …をかけて加速度振幅を逐次に増大させ、水平動および鉛直動を同時に入力し、落石がどういう条件で落下するかを解析・検討した。なお、入力した地震動は直接に岩塊の慣性力計算に用いた。

表-2に解析ケースを示す。Case-1では4月10日12時までの観測データを用いてDDA逆解析を行い、その時点の落石岩塊および隣接する岩体の変形状態を求める。現状条件を把握した上で、落石岩塊に最大加速度振幅0.1G, 0.2G, 0.3Gの地震荷重を与え、地震による落下の可能性を検討する。そして、Case-2では4月17日12時までの観測データを用いてCase-1と同様な解析・検討を行う。

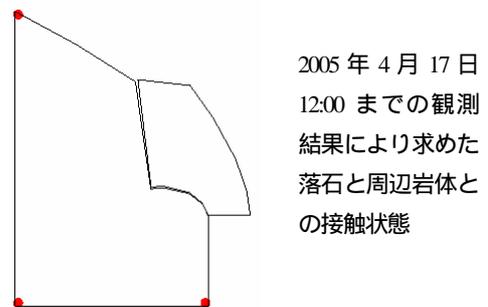
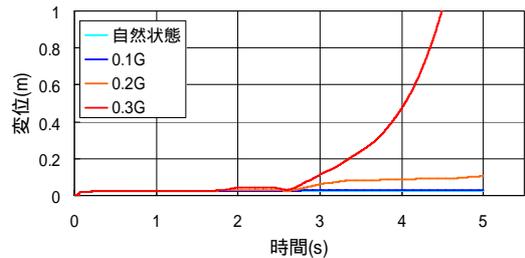


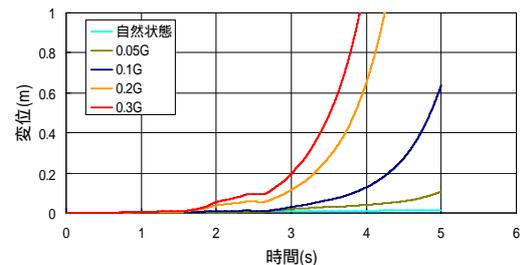
図-6 DDA 逆解析による変形解析結果の一例

落石重心の変位時刻歴



(a) Case-1 の結果

落石重心の変位時刻歴



(b) Case-2 の結果

図-7 観測データを用いた予測解析変位結果

(2) 解析結果

例として、図-6にDDA逆解析により得られた4月17日12時の落石ブロックと周辺岩体との接触状態を示す。これらの状態を初期条件として、それぞれの時点で自重による自然落下の可能性があるかどうかを解析した。

両ケースともに自重による自然落下は発生しなかった。以下は主に地震荷重による挙動について述べる。

Case-1では最大0.1G加振した時、岩塊がほとんど移動せず、安定している。0.2G加振した場合でも水平方向に最大約10cm移動したものの、岩塊が地震後も安定している。そして、0.3G加振した場合、図-7に示すように最大振幅の発生時刻(2.5秒頃)から岩塊が安定性を失い、ピーク振幅が過ぎても岩塊が加速的に移動し続き、最終的に落下した。図-8には0.2Gと0.3G加振時の計算終了時の変形を示す。一方、Case-2では0.1G加振した時でも、岩塊が安定性を失った。そして、振動荷重を0.05Gに低減して再度解析したところ、地震中は落下しなかったが、時間の経過に伴い、自重により岩塊が徐々

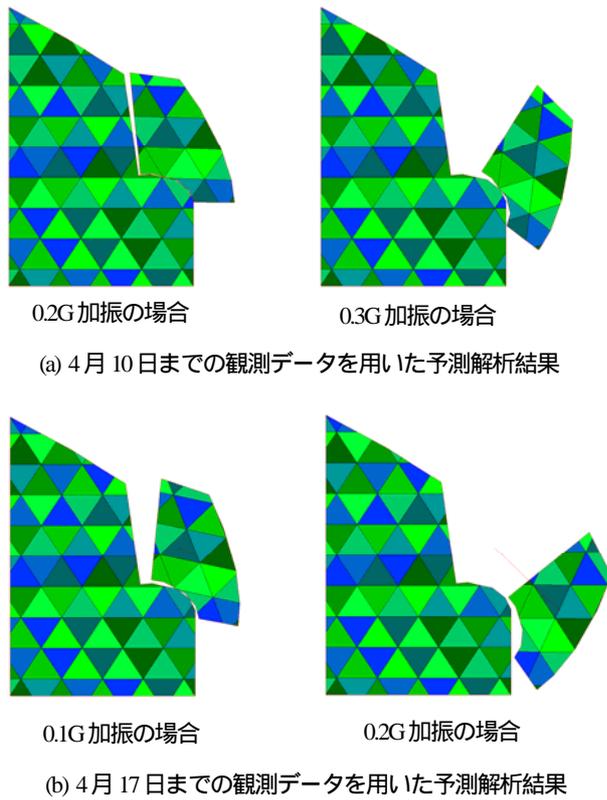


図-8 解析終了時の最終変形

に変形していることが分かる（図-7のCase-2の結果参照）。また、0.1Gと0.2G加振時の計算終了時の変形を図-8に示す。

(3) 解析結果についての考察

Case-1では、最大振幅0.3Gの地震荷重を与える条件で落下したが、それほどの荷重がない限り安定しているから、4月10日の時点で当該岩塊が安定しており、すぐには落下する可能性はないと判断できる。一方、Case-2では、最大振幅がわずか0.1Gの地震荷重を与えた時でも当該岩塊が落下し、地震振幅を0.05Gに下げても地震後は岩塊の安定性が失い、時間の経つに連れて自然落下した。このことから、4月17日時点では、当該岩塊が不安定な状

態になっており、近いうちに落下する恐れがあると判断できる。実際にこの岩塊が4月20日に自然落下したから、ここで行った予測が概ね妥当であると思われる。

4. まとめ

本研究により現場観測と数値解析の組合せによる落石の予測手法について検討した。事例予測により提案した予測手法が概ね妥当であることを検証した。落石のクリープ変形に関する観測データが得られれば、直ちに再現解析に利用し、再現解析で同定した解析モデルを用いてManifold法解析により落石の発生可能性と緊迫性を予測することが可能である。

今後、より多くの観測データを用いて、本研究で提案した予測手法を検証・改善し、落石災害の予防・軽減のために観測データの有効利用方法を検討していく。

謝辞：本研究の実施に当たって、青森県県土整備部道路課には、「道路斜面監視システム」についての貴重な観測データをいただいた。アメリカ DDA カンパニーのDr.SHI から解析手法を中心とした様々なご指導をいただいた。ここで心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Shi, G.H. and Goodman, R.E.: Discontinuous Deformation Analysis, *25th US Symposium on Rock Mechanics*, pp.269-277, 1984
- 2) 大西有三, 佐々木猛, Gen-Hua Shi: 不連続変形法 (DDA), 不連続性岩盤解析実用化研究会, 計算力学レクチャーシリーズ, 丸善株式会社出版, 2005
- 3) Shi, G.H.: Manifold Method of Material Analysis, *Transactions of the 9th Army Conference on Applied Mathematics and Computing*, Report No.92-1, U.S. Army Research Office, 1991
- 4) 鳥羽瀬孝臣, 曹増延, 伊藤孝, 浅賀裕之, 熊崎直樹: 斜面落石挙動を再現する不連続体解析事例, 岩の力学シンポジウム, CD-ROM, 2008

AN APPROACH FOR THE EFFECTIVE UTILIZATION OF OBSERVATIONAL DATA AND THE PREDICTION OF ROCKFALL PHENOMENA

Takashi ITOU, Zengyan CAO and Takaomi TOBASE

For prevention and mitigation of rockfall disasters, an approach for the effective utilization of the observational data and a method for prediction of rockfall phenomena have been studied. With the observed data of creep deformation, the total contact and deformation status as well as the material properties of the monitored block and the abutting blocks can be presumed by DDA backward analysis. Then the future behavior of the monitored block can be predicted with manifold method. The presented method has been proved with a real rockfall event occurred in Ikokuma, Aomori prefecture.