

3D-DDAによる北浜岩盤・転倒崩壊機構の検討

島内哲哉¹・清水順二²・中村公一³・大西有三⁴・西山哲⁵

¹正会員 明治コンサルタント株式会社 技術統括部 (〒333-0801 埼玉県川口市東川口1-22-4)

E-mail:shimauchi@meicon.co.jp

²正会員 明治コンサルタント株式会社 北海道支社 (〒064-0807 札幌市中央区南7条1-13)

³正会員 長岡技術科学大学建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

⁴正会員 京都大学大学院 工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁵正会員 京都大学大学院 工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

2004年5月、北海道知床の海岸道路沿いの覆道坑口脇で岩盤転倒崩壊が発生した。崩壊規模は、高さ20m、幅5～10m、厚さ5～8mで、崩壊岩塊は約500m³である。崩壊した岩塊は、一辺が2～8mのおよそ3つの巨大なブロックに分離して、道路擁壁の裏側ポケット沿いに崩落した。この崩壊機構について、調査結果を基に推定された機構を基に、不連続変形法(DDA)による機構と崩壊方向に対する検討を行った。

Key Words : rock mass failure, toppling, DDA

1. はじめに

岩盤斜面で発生する崩壊は、地形やそれに深く関わる断層や層理、節理などの不連続面によって発生する。このような岩盤崩壊のメカニズムを解析する方法として、近年、不連続変形法(DDA)¹⁾が用いられる。複雑なブロック間の動きを、小さな変位から落下後の挙動まで追跡可能なこの方法は、岩盤の崩壊現象を解明するうえで有効な方法といえる。しかし、そのモデル化には、複雑なブロック形状や方向の異なる主要な不連続面の情報を必要とし、解析対象によっては二次元解析では対応が難しいケースも少なくない。

本論文では、崩壊後の観察結果からその機構が比較的明らかな事例に対して、三次元DDA²⁾を適用した事例について報告する。

2. 北浜岩盤崩壊の概要

2004年5月、北海道東部に位置する海岸沿い道路の覆道坑口脇で岩盤崩壊が発生した。崩壊規模は高さ約20m、幅5～10m、厚さ5～8mで崩壊規模はおよそ500m³である。崩壊形態は、覆道天端付近を支点とする転倒崩壊であり、倒壊した岩塊は1辺が5～8m規模の3つの巨大岩塊に分離して、道路脇の擁壁裏のポケット沿いに並んだ(図-1)。落下地点はN値=5程度の盛土であり、最初の落下でエネルギーのほとんどを失ったものとみられ、道路擁壁への

影響はほとんどなかった。崩壊前の写真からは、崩壊部は大きく山側に傾くオーバーハング地形であったことがわかるが、今回の崩壊を予見させるような分離面や段差などはみあたらない。

崩壊地の地質は、新第三紀鮮新世の安山岩と凝灰角礫岩であり、本崩壊は凝灰角礫岩側で発生している。堆積構造は約10°程道路側に緩く傾くがほぼ水平である。

一方、崩壊発生前に、顕著な豪雨や地震などはなく、崩落前10日間の累計雨量は30mmに過ぎない。崩壊直後の面にも濡れたような跡は見られず、地下水が関与した可能性は低い。地震も、2003年9月に震度4(十勝沖地震)を記録しているがそれ以後有感地震の記録はない。

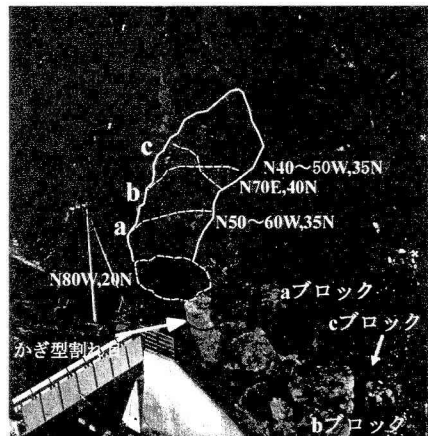


図-1 崩壊地の崩壊直後の状況

3. 不連続面の観察結果に基づく崩壊機構の推定

(1) 崩壊ブロックの復元

全体が大きく3つの岩塊に分かれた崩壊後の状態からは、岩体全体がほぼ一体となって倒壊したことが伺える。崩壊ブロックは、a岩塊を除けばいずれも原型を保っており、また本崩壊では復元前の写真が残っていたことから崩壊前地形の復元は比較的容易であった。

調査から明らかとなった不連続面と崩壊方向との関係を図-2に、また復元された崩壊前地形断面を図-3に示す。この図から、b岩塊がオーバーハングにより大きく山側に張り出した特異な地形を示していたこと、その重心位置がa,b岩塊ともに、最下段のc岩塊脚部より前にあることなどがわかる。倒壊した岩塊は、その崩壊形態そのままに転倒モードにあったことになる。

(2) 崩壊面の特徴

転倒破壊した岩体背後の崩壊面は、その上と下とでは風化の状態が大きく異なり、滑ったような跡は全くみられない。すなわち、c岩塊の背面には、風化による茶褐色化した面がまったくみられず新鮮な岩盤色を示す。B岩塊背面もほぼ同様に近いが、c岩塊近くは新鮮な岩盤色を示す部分が多いのに対し、下に行くほど茶褐色化した部位が増える。そして、一番下のa岩塊背面の風化は著しく進み、面の一部はハンマーで割れるほどに劣化している。

一方、各ブロック間の割れ目面は、崩壊面とは異なりいずれの面にも滑った跡が確認できる。まず、一番上の

a-b岩塊間の面は、面に沿って薄く板状に割れるとともに、そのいずれにも滑ったような跡がみられる。また、b-c岩塊間の面には、その全面に滑った跡が明瞭である。これらの面は、a-b岩塊間の面が $N50^{\circ} W/35^{\circ} N$ か $N70^{\circ} E/40^{\circ} N$ のいずれか、またa-b岩塊間の面が $N50^{\circ} W/35^{\circ} N$ であることが、連続する背後の面の観察と各岩塊の復元過程から判明している。これに対し、a岩塊下側の面、すなわち崩壊岩体脚部の面にはわずかに滑った跡がみられるものの背後の崩壊面への連続性はなく、崩壊時に生じたとみられる脚部前面の階段状の割れ目が特徴的である。この階段状の割れ目は、その形状や位置と崩壊形態から、根岸等(1994)³が、柱状岩体の転倒崩壊機構の考察に際して報告した“鍵型割れ目”に相当するものと考えられる⁴。この点から、この階段部は上部岩塊が転倒する際に引きはがされるようにして発生したものと考えられる。ただし、風化の状態からみると、鍵部付近を除く背面側の割れ目については、崩壊のかなり以前から生じていた可能性がある。

(3) 割れ目の状態からみた崩壊機構の推定

復元形状と割れ目の観察結果から推定される崩壊過程は、次のようなものである。

まず、a岩塊背後の崩壊面は、その成因や伸展時期は不明だが、風化した面の状態からみて最も古いことは明らかである。このようななか、崩壊した全岩体の半分近くを占め、谷側に大きく張り出したb岩塊は、その存在自体が持続的な駆動力となって、b岩塊背後の割れ目の伸展を助長させ、c岩塊脚部の割れ目の伸展にも影響したものと推察される。

このような、不安定化の進行がどのくらいの期間続いたのかは不明である。しかし、このような岩盤内部の不安定化の進行が、やがてb岩塊からc岩塊にかけての背面の引張破壊につながったものと考えられる。その後は、a岩塊脚部前面の転倒による破壊(鉤型割れ目の発生)から全体の転倒へと進み、結果として図-1のような状態になったものと想定される。

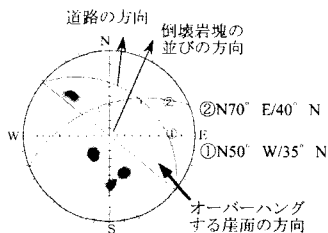


図-2 落下岩塊方向と崩壊に関与した不連続面

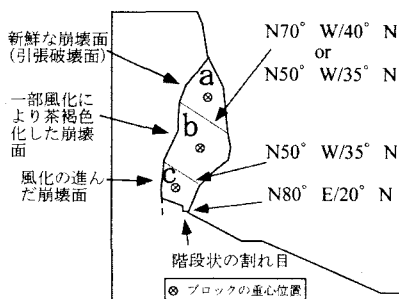


図-3 崩壊前地形断面と崩壊に関わる不連続面

4. 3D-DDAによる崩壊シミュレーション

本崩壊では、崩壊機構解明を目的として最初に倒壊方向断面において二次元DDAによる解析を行っている⁴。その結果、①a岩塊脚部前面の鉤型割れ目をモデル化しなければ転倒を再現できないこと、②a-b間割れ目面とb-c間割れ目が、解析断面上で平行でなければ一体となった転倒が生じないことなどが明らかとなっている。しかし、解析を行った倒壊方向断面がa-b割れ目の最大傾斜

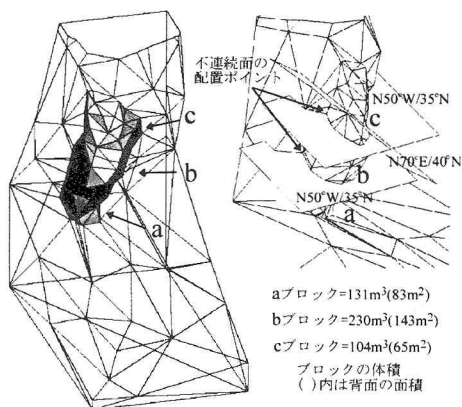


図-4 解析モデルと不連続面の配置

表-1 3D-DDAの解析条件

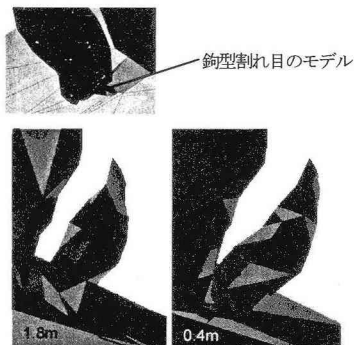
	項目	入力値
解析 パラメータ	タイムステップ	0.006
	接触バネ kn(MN/m)	5.0~8.0
	単位体積重量 (kN/m³)	26.0
岩体	ポアソン比	0.20
	弾性係数 (GPa)	500
	摩擦角 (°)	37
不連続面	粘着力 (MPa)	0
	引張強度 (MPa)	0

方向より山側にずれていることや、倒壊したcブロック山側に落ちた理由などは、二次元では解析が困難であった。この問題を解決する目的で、本論文では三次元DDA(3D-DDA)による解析を行った。

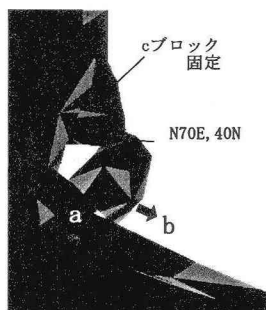
解析に用いたモデルと入力定数を、図-3及び表-1に示す。ここでは、鍵型割れ目の影響とブロックの挙動が倒壊方向に与えた不連続面の役割について述べる。

4.1 鉤型割れ目の影響

解析モデル作成時には、どこまで形状を細かく再現するかという点が常に問題となる。実際、本解析でも当初は鉤型割れ目を無視して解析していた。しかし、この部



(a) 鉤型割れ目なし (b) 鉤型割れ目あり
図-5 鉤型割れ目の有無による
初動の違い



(a) cブロックを固定した時のa, b
ブロックの動き (2.5sec)



(b) b-c面 N50W/35N
(1.8sec)



(c) b-c面 N70E/40N
(1.8sec)

図-6 c岩塊を固定した場合のa, b岩塊の動き

位を無視すると、 ϕ を 40° としても岩体全体の滑りだしが先行するため転倒が送れ、逆に、鉤型割れ目を考慮すると ϕ が 30° でも全体が一体となった転倒が先行する。転倒崩壊時に生じる鉤型割れ目のモデル化は重要である。

二次元解析結果と異なるのは、滑りだしによって転倒のタイミングがずれると、二次元では上部岩塊の落下地点のみに影響するのに対し、三次元では落下地点だけでなく各岩塊の落下方向にも影響するという点である。

4.2 不連続面の倒壊方向への影響

不連続面の倒壊方向への影響を調べるために、ここではcブロックを固定して調べた。この状態は、崩壊発生直前の状態を想定したものである。解析条件は、上側のb-c間割れ目を $N50^\circ W/35^\circ N$ と $N70^\circ E/40^\circ N$ とした場合の2ケースで、下側のa-b間割れ目は $N40^\circ W/35^\circ N$ とした。c岩塊を固定し、a-b間割れ目とb-c間割れ目をともに $N50^\circ W/35^\circ N$ 方向とすると、b岩塊はすぐに動き出す。しかし、その方向は設定する摩擦角によって $N30^\circ E$ 方向から $N15^\circ E$ 方向の間で変化する。すなわち、 $\phi=0^\circ$ とするとほぼ最大傾斜方向へ、 ϕ を高くするほどbブロックは、その重心の方向へと偏芯しながら動く。一方、b-c間割れ目を $N70^\circ E/40^\circ N$ にすると $N17^\circ E$ 方向に向かって動き出す。この $N17^\circ E$ 方向は、a-b間割れ目とb-c間割れ目のみかけの傾斜がほぼ平行になる方向であり、b岩塊の山側への動きを規制する方向でもある。

これらの結果から、b-c間割れ目は、b岩塊の重心方向とその最大傾斜方向の間で、摩擦によって動きの方向を決定する役割を持っていたこと、またa-b岩塊割れ目は $N70^\circ E/40^\circ N$ の時、b岩塊の動きを道路側へと規制する役割を持っていたことなどがわかる。

4.3 全体の崩壊シミュレーション

以上の検討結果をもとに、全体の崩壊シミュレーションを行った結果を図-8に示す。

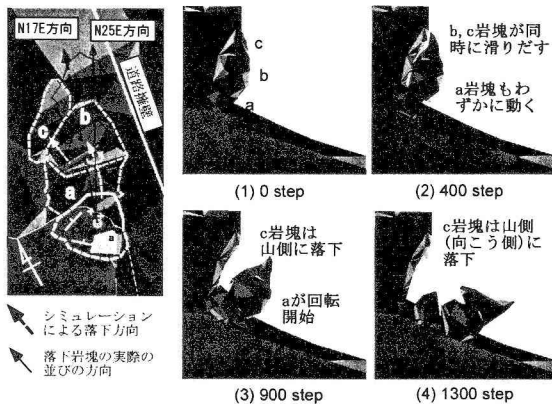


図-8 全体のシミュレーション

シミュレーション開始と同時に、b、およびcブロックが滑るように動き出す。b-c岩塊間のせん断跡はこの時についたものと考えられる。b岩塊は、最初は流れ盤方向であるN25°～30° E方向に飛び出すが、すぐにb岩塊の重心方向である山側へと偏芯していく。一方、c岩塊は、最初はb岩塊と一体で動くが、すぐにN70° E/40° Nの最大傾斜方向である山側へと落下し始める。このようにして、b岩塊とc岩塊がb-c間の割れ目面上を1mあまり滑り出したところで、今度はa岩塊を引っかけるようにして全体の回転が始まる。この時の倒壊方向はN17°～20° E方向である。a岩塊脚部の鍵型割れ目は、この転倒過程で生じたものと考えられる。落下方向は、観察される岩塊の並びの方向(N25° E)よりやや山側であり、落地点で衝撃のほとんどが吸収され、最後にわずかに姿勢を変えることで観察される位置で停止したものと想定される。

以上の解析結果から、崩壊の原因は大きなオーバーハングを形成するb岩塊と背後の割れ目の上への伸展であり、崩壊方向を決定したのは山側に大きく傾くb岩塊とa-b間割れ目の存在であることがわかる。

5. まとめ

北海道知床半島の海岸沿いの崖斜面で発生した北浜岩盤の転倒崩壊事例について、不連続面の特徴を基に、その崩壊挙動を三次元不連続変形法で再現した。三次元解析法を用いると、二次元では難しい崩壊方向に関する考察が可能となることを示した。不連続面の方向によって、その挙動が大きく異なる岩盤崩壊の解析に対し、3D-DDAはきわめて有効な解析法といえる。

謝辞: 本論文をまとめるにあたって、資料の使用を許可いただいた、北海道釧路土木現業所の各位に、ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) shi Gen-Hau: Tree Dimensional Discontinuous Deformational Analyses, Proc ICADD-4, 2001.
- 2) 呉建宏, 大西有三, 門間敬一, 西山哲三: 次元不連続変形法(3D DDA)による岩盤崩落シミュレーション, 材料, Vol.52, No.5, pp.488-pp.493, 2003.
- 3) 根岸正充, 中島巖: 層雲峡要訣凝灰岩における長柱状岩体のトップリング機構-寒冷地における岩盤斜面崩壊に関する研究(第2報), 応用地質, Vol.135, No.1, 1999.
- 4) 清水順二, 島内哲哉: 北浜岩盤・転倒崩壊機構に関する考察, 応用地質学会北海道支部例会後援論文集, 2005.

STUDY ON BLOCK TOPPRING FAILURE IN KITAHAMA USING BY 3D-DDA

Tetsuya SHIMAUCHI, Junzi SHIMIZU, Kouichi NAKAMURA, Yuzo OHNISHI and Satoshi NISIYAMA

In May 2004, there occurred the toppling of the cliff beside the pit of rock shed along the coast road of Shiretoko in Hokkaido. The scale of the toppling is: Height 20 m, Width 5 – 10 m, Thickness 5 – 8 m. Big blocks with one side of 5 – 8 m were separated from the toppling block forming a line nearly parallel to the road. First of all, we restored those toppling blocks to the original state based on our investigation results. Furthermore, we investigated the mechanism of the toppling by using DDA. From the analytical results, the toppling mechanism was estimated as follows:

1. The toppling occurred by developing the joint at the back part from the lower part to the upper part.
2. The cause of the toppling was due to the gravity acting on the over-hanging block at the center of the toppling block.

In addition, from the result of the three-dimensional DDA, it is evident that the toppling direction is in the direction of the discontinuity surface developed in that block. The 3D-DDA is effective for the rock mass failure, especially for the analysis of the toppling direction due to the discontinuity surface.