不連続変形法による地震時の斜面崩壊解析

サンコーコンサルタント（株）　正会員　○萩原　育夫
同　正会員　佐々木　猛
同　正会員　佐々木　勝司
同　堀川　滋雄
京都大学大学院　正会員　西山　哲
同　正会員　大西　有三

１．目　　的

わが国では斜面崩壊事故の約 30%以上が地震動に関連して発生しており [1]，各種の防災対策を講ずる上で地震時の斜面の挙動特性を把握することが重要な検討項目の一つとなっている．斜面の地震時解析では応答特性等を考慮した安定解析に加え，2004 年新潟県中越地震で問題となった崩壊土砂による河道閉塞等のように，崩壊土塊の到達距離等の影響把握も重要な予測事項である．本発表では，地震時における岩盤斜面の挙動予測手法の確立を目的として，不連続変形法(DDA)による崩壊事例解析を行って崩壊モードの再現性や解析結果に影響する解析パラメータ等について検討した結果について報告する．

２．解析手法

不連続変形法（DDA）は解析対象をブロックの集合体として表し，ブロック内部の弾性変形とブロック間の接触等の大変形をモデル化した手法であり，運動方程式は最終的に式(1)のようになる [2]．

$$M\ddot{u}^{t+\Delta t} + C\dot{u}^{t+\Delta t} + Ku^{t+\Delta t} = R^{t+\Delta t} \quad , \quad C = \eta M$$

ここに，M：質量マトリックス，C：粘性マトリックス，K：剛性マトリックス，R：外力マトリックス，η：粘性係数，$\ddot{u}$：重心加速度，$\dot{u}$：重心速度，u：重心変位，t：任意時刻，Δt：時間刻みである．DDAは落石や岩盤崩落といった斜面崩壊現象に対して既に適用例があり，粘性係数は岩盤ブロックの内部減衰及び崩落運動中に作用する植生や樹木等による運動速度の減衰に対応した概念として位置づけられている[3]．本検討では，落石・崩落現象に適用されている解析コード[4]に，地震時の外力条件（加速度時系列データ）の入力機能等を付加したものを使用して岩盤斜面の崩壊解析を実施した．

３．解析モデル

事例箇所は 2004 年新潟県中越地震の震源(本震)から約 8km の位置にあり，周辺には軟岩相当の新第三紀堆積岩類が 25 度程度の傾斜（当該斜面では流れ盤構造）で分布する．崩壊土塊は数 m～10m 規模の岩塊と岩屑等からなり，崩壊土塊の中央からやや前方（移動方向側）は凸状の形状を呈し，崩壊前の斜面末端(想定)から 100m（最大 150m）程度の位置まで到達した．検討箇所周辺では流れ盤構造をなす斜面でのすべり崩壊が報告されており [5]，当該箇所においても同様の崩壊形態が想定された．図-1 及び表-1 に解析モデルを示す．現地状況等から斜面地形の末端部付近に地質構造を考慮したすべり面を想定するとともに，不連続面の露頭観察結果等をもとに 5m 規模の岩盤ブロックの集合体として斜面をモデル化した．地震動条件としては気象庁が公開している近傍丘陵部での加速度波形記録を用い（図-2），ブロック接触時のエネルギー減衰比をパラメータ化して解析を行った．

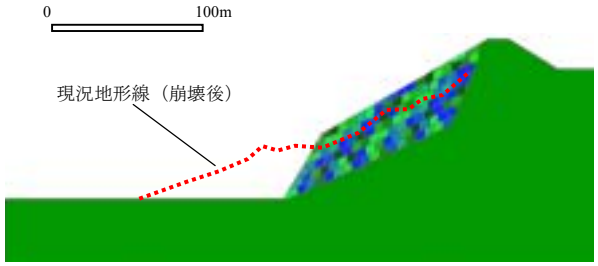

図-1　解析モデル形状

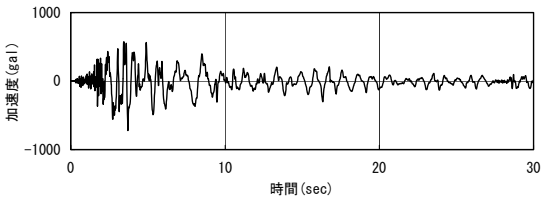

図-2　地震動波形(SITE=25014)[6]

キーワード：不連続変形法　岩盤すべり崩壊　崩壊挙動解析
連絡先：〒136-8522 東京都江東区亀戸 1-8-9 ｻﾝｺｰｺﾝｻﾙﾀﾝﾄ㈱　TEL 03-3683-7123　E-Mail:i.hagiwara@suncoh.co.jp

4. 解析結果

接触時エネルギー減衰比が 0.95(岩盤 vs 岩盤)・0.40(岩盤 vs 未固結堆積物)の場合に，崩壊土塊の到達位置が概ね現地状況と同様となった．上記の条件における解析結果を図-3 に示し，解析結果における崩壊挙動の特徴を以下に示す．

①地震動とともに想定すべり面上の土塊全体の変形が始まる．

②崩壊初期段階では，全体の滑動に加えて斜面先端部におけるすべり～崩落状のブロック運動が卓越する．

③崩壊初期～中間段階では，滑落崖付近においてすべり状の変形より崩落～バックリング状のブロック運動が卓越する．

④中間段階では，上位のブロックほどすべり変形が相対的に進展する．これに伴って崩壊土塊中の小規模凹地形の形成や岩盤ブロックの重畳的な崩積が進む．

⑤終期段階では，崩壊土塊先端付近のブロック崩落が継続しながら全体の変形が収束し，中央付近でブロックが集積する．

上記の③～⑤については，現地の崩壊土塊の特徴（立木を伴う残丘状ブロック，樹幹の山側への転倒等）との対応関係が認められた．一方，上部斜面における土塊の崩積形状については解析結果と現地状況とで差違が認められ，解析では上部土塊の移動量が現地状況に比べて大きい結果を示した．

表-1　主要解析パラメータ

設定項目		新第三紀堆積岩類（斜面構成岩盤）	未固結堆積物（平坦地構成地盤）
ブロック表面の内部摩擦角	度	30	30
ブロック表面の粘着力	kN/m^2	20	0
崩壊ブロックの単位体積重量	kN/m^3	20	－
崩壊ブロックのヤング率	kN/m^2	3,000,000	－
崩壊ブロックのポアソン比		0.35	－
粘性係数		0.05	
接触時エネルギー減衰比		岩盤vs岩盤　：0.6～1.0 岩盤vs未固結堆積物：0.2～0.6	
地震動条件		気象庁による水平加速度記録(30sec) 最大振幅=576gal	

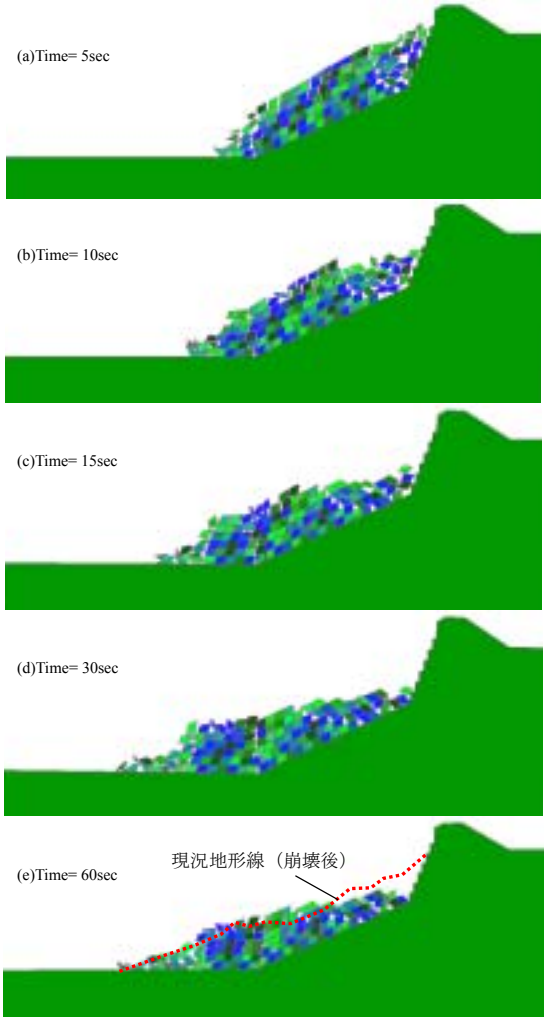

図-3　解析結果例

5．検　　討

大規模岩盤崩壊では岩盤ブロックの形成（断裂）・崩落・破砕など，様々な形態の変形が複雑に組み合わさって崩壊が進展するものと想定される．今回の解析は岩盤斜面を平均的規模のブロックの集合体としてモデル化したものであるが，解析結果のブロック挙動と現地状況には対応関係が認められ，不連続変形法によって岩盤斜面崩壊時の概略的な崩壊モードが再現されたと捉えられる．一方，不連続変形法による落石解析では岩盤ブロックの形状・規模が解析結果に大きく影響することが指摘されており [7]，斜面上部の崩積形状に関する解析結果と現地状況の差違の原因として，崩壊土塊中の巨大な岩塊や破砕された小規模岩塊の影響が考えられる．岩盤斜面の崩壊挙動予測の精度向上に関連し，岩盤ブロックの形状のモデリング手法やモデリングのための調査手法の検討が今後の課題としてあげられる．

6．参考文献

1)土木学会岩盤力学委員会：岩盤斜面の調査と対策，土木学会，1999
2)G.H.Shi,R.E.Goodman : Two Dimensional Discontinuous Deformation Analysis , Int. J. Anal. Methods Geomech., Vol.9,pp.541-556,1985
3)萩原育夫他：不連続変形法(DDA)による植生斜面の落石解析事例，第 39 回地盤工学会研究発表会講演集，1086，2004
4)不連続性岩盤研究会：DDA version6.02 ユーザーズマニュアル，2002
5)地盤工学会・土木学会合同調査団：平成 16 年新潟県中越地震第一次調査団調査速報(Ver.1)，土木学会，2005
6)気象庁ホームページ(http://www.jma.go.jp/JMA_HP/jma/index.html)
7)日本道路協会：落石対策便覧に関する参考資料，日本道路協会，2002