Ⅲ－A214　ＤＥＭ（個別要素法）を用いた落石挙動の再現

日本工営株式会社　○正会員　倉岡　千郎
正会員　守随　治雄

１．はじめに

落石の数値解析手法を大きく分けると、落石を円筒か球として取り扱う方法（吉田[1]や古賀[2]の方法）と多角形として取り扱う方法（ＤＤＡ，ＤＥＭ）がある。多角形形状の落石が斜面に衝突した場合に発生する力は落石の角の斜面に対する衝突角度及び速度と方向等によって変化するため、角のない球体の衝突機構とは異なる。例えば角が回転しながら斜面にぶつかると球体の場合に比べて跳躍が高くなる場合がある。

そこで、多角形要素を取り扱えるＤＥＭを用いて、その計算方法を他の手法と比較し、シミュレーションを行なった結果、ＤＥＭは落石形状の影響を反映しうる手法として効果的であることがわかったので、ここに報告する。

２．これまでの落石解析手法の特徴

古賀の手法、吉田の不法、DDA、本研究で用いたDEMの主な特徴について、まとめると表―1のようになる。

表―１　落石解析手法のまとめ

	形状	落石個数	斜面に沿った運動	衝突時の速度変化と跳躍量	すべり運動から跳躍への移行
落石対策便覧（改訂中）	任意	一つ	すべり、回転、衝突を分けることなく、等価摩擦係数を用いた経験式より速度を求める。	考慮しない。跳躍に対する計算式はなく、2mを超えないものとしている。	考慮しない。
吉田 他	任意	一つ	斜面との摩擦、樹木の抵抗力、回転の影響を総合的に考慮した経験式より速度を計算する。	衝突時の速度変化と跳躍量は、反発係数、減衰係数より算定する。	経験に基づく限界速度を超えると、跳躍運動に移行する。
古賀 他	球	一つ	樹木等の抵抗力は考慮せず、すべり運動もモデル化しない。観測される落石運動と合うようにパラメーターを調整する。	垂直方向の速度変化は反発係数より決定し、斜面方向の速度変化は運動量保存則に基づいた式を用いて計算する。	凸型斜面からの飛び出し以外は考慮しない。
DDA[3]	多角形	複数	斜面との摩擦、樹木の抵抗力、回転の影響を総合的に考慮して、重心の速度に働く粘性抵抗を設定。	衝突後の速度は反発係数、減衰係数より算定する。	凸型斜面からの飛び出し以外は明確でない。
DEM[4]	多角形	複数	樹木等の抵抗力は考慮しない。角と斜面との衝突力、摩擦力、回転による遠心力、モーメント、角と斜面とのエネルギー損失を計算して運動を解析する。	運動方程式に基づいて、回転時に発生する遠心力、角と斜面の衝突力、及びエネルギーロスを求めて、速度変化と跳躍を計算する。	遠心力や衝突力によって、跳躍運動が計算される。

３．ＤＥＭの解析パラメーターの検討

DEMの解析パラメーターとしては、斜面垂直方向及び斜面方向のバネ定数、粘性減衰定数（粘性ダンパーの係数）、斜面方向のせん断強度（粘着力、摩擦係数）が挙げられる。

過去の観測や実験より反発係数、等価摩擦係数、摩擦係数などのデータが収集されているが、DEMに用いられるバネ定数、粘性減衰定数などのデータは得られていない。よって既往のデータよりDEMの解析で用いるパラメーターを推定する方法を検討した。

キーワード：落石、個別要素法、DEM、数値解析
日本工営株式会社中央研究所（茨城県稲敷郡茎崎町稲荷原2304、TEL 0298-71-2032、FAX 0298-71-2022）

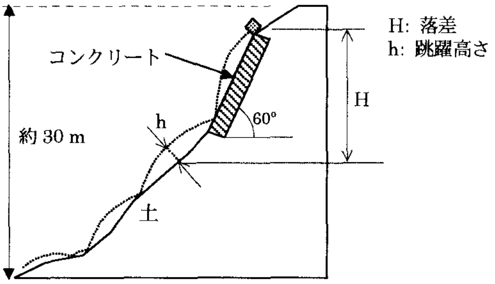
まず、すべりながら斜面に沿って落ちる運動では、摩擦係数が運動速度を支配するが、古賀が実験より求めた摩擦係数や植生や斜面の凹凸の影響を包含したとされる等価摩擦係数を参考にした。次に衝突時の減速機構と跳躍を支配するパラメーターの設定方法については、斜面垂直方向と斜面方向に分けて考えてみた。

なお、本研究では、これらのパラメーターの設定は、現場実験データを参考にして、その傾向とシミュレーションが合うように試行錯誤で推定した。

4．ＤＥＭによる現場実験のシミュレーション

DEM によって既往の現場実験のシミュレーション[5]を行い、その適用性と課題を検討した(図―1)。

落石は正方形の剛体ブロック(対角線の長さ=70 cm)とした。粘性減衰定数と摩擦角を平均値と標準偏差で設定し、モンテカルロ法により繰り返し計算を行なった。



図―1 落石実験現場の概念図

5．結果及び今後の課題

DEM のパラメーターを古賀の用いたパラメーターと同等に設定した結果、跳躍量が観測結果よりも高くなる傾向が認められた。それは古賀の用いた球体モデルと DEM の多角形モデルの相違を表わしている。そこで、簡単な感度解析を行なうと、バネ定数に比べて粘性減衰定数の跳躍量に対する影響の大きいことがわかり、古賀の用いた反発係数の半分程度にすれば、観測結果と概ね合う結果を得た。

一方、速度はいずれの解析ケースでも観測結果と概ね一致しているので、粘性減衰定数及びバネ定数の影響は小さいことが分かった。よって、粘性減衰定数を適切に設定すれば、跳躍量及び速度を実験結果と概ね合わせることが可能である。

ただし、対象とした斜面は植生がない等の特異性があるので、より多くの現場実験の解析を行なう必要がある。また、実験結果と合うようにパラメーターを修正する方法では、現場毎に実験が必要になるので、斜面の粗さ、斜面の強度、斜面の植生、落石の硬さ等よりパラメーターを推定する実用的な方法を考案する必要がある。

今回は、落石形状の影響を分析するに至らなかったが、今後は地質種別による落石形状の影響を解析する予定である。例えば、落石源が段丘礫層であれば落石形状は丸みを帯びた形となり、柱状節理の発達した玄武岩であれば、形状は柱状なので運動形態が異なるものと考えられる。将来的には、地質種別を考慮した対策工の設計法を検討したい。

参考文献

1)吉田博、右城猛、桝谷浩、藤井智弘：斜面性状を考慮した落石復興の衝撃荷重の評価、構造工学論文集、Vol.37A, pp.128-141, 1991.

2)古賀泰之、伊藤良弘、鷲田修三、森下義：落石の運動軌跡の予測法に関する検討、土木技術資料、vol.31, no.8, 1989.

3)大西有三：不連続変形法(DDA)による落石解析、第 31 回地盤工学研究発表会、pp.37-38, 1996.

4)氏平増之、細谷昭悟、小川健太、高貝暢浩：フィールドにおける落石の落下挙動、資源と素材、Vol.112, pp.843-850, 1996.

5)建設省土木研究所：落石防災対策に関する調査報告書、土木研究所資料 2770 号, 1989.