

堆積層の伝播衝撃力に関する DEM 解析

名古屋工業大学	学生会員	○羽柴 寛文
名古屋工業大学大学院	学生会員	湯浅 知英
名古屋工業大学	正会員	前田 健一
(株)構研エンジニアリング	正会員	刈田 圭一
(株)構研エンジニアリング	正会員	牛渡 裕二

1. 背景

現在、落石規模の変化や落石対策工の劣化などによって安全余裕度に低下がみられるものの、対策の新設が困難な斜面が各所に存在する。そのような斜面では、既存の対策工であるロックシェッドの上部に敷砂や礫などの緩衝材を設置したり、擁壁と道路との空き空間（ポケット）に堆積層を設置するといった補強対策を施す必要が生じている。しかし、これら堆積層は、効果が期待される一方で、落石エネルギー低減効果をどの程度見込めるのか評価することが難しく、落石対策分野において大きな課題となっている。

本研究では、ロックシェッド上面の堆積層に着目し、その重要な評価項目となる落石衝突時に生じる落石並びに伝播衝撃力を、個別要素法（DEM）と呼ばれる離散体的解析手法を用いて明らかにすることを目的とする（図-1）。

2. 2次元 DEM による伝播衝撃力の推定方法

落石が堆積層に貫入する際、落石に働く大きな衝撃力は分散しながら堆積層内を伝播し、底面に到達する。ここでは、こうして底面に到達する衝撃力の合計を「伝播衝撃力」と呼ぶことにする。ここで、面的に伝播していく伝播応力を把握するため、以下のような処理が有効であると考えた。

2.1 地盤のメッシュ処理による応力算定

まず、地盤を適当な領域（メッシュ領域）で分割したのち、粒子に作用する接点力をメッシュ内の粒子が占める面積で平均化することで応力を算出した。図-2 はこうして求めた応力をメッシュ間でデータ補完し可視化した一例である。応力が底面に向かって伝播していく様子が観察できる。メッシュ領域が小さいほど繊細な観測が可能となるが、メッシュサイズは DEM では最大粒径の制約を受ける。そこで今回は最大粒子半径の4倍を一辺とする正方形メッシュを用いた。これにより、粒子単位ではなく地盤内応力を捉えることが可能となる。なおこれは DEM の解析結果をマルチスケールで解釈する一例である。

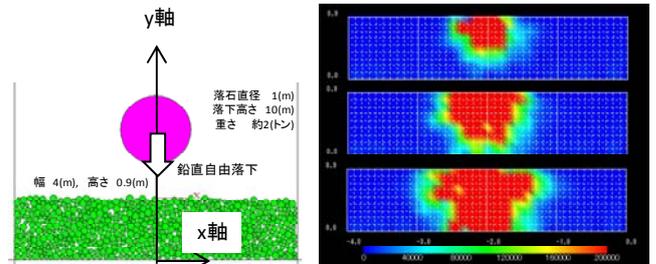


図-1 解析概要

図-2 応力伝播過程の可視化

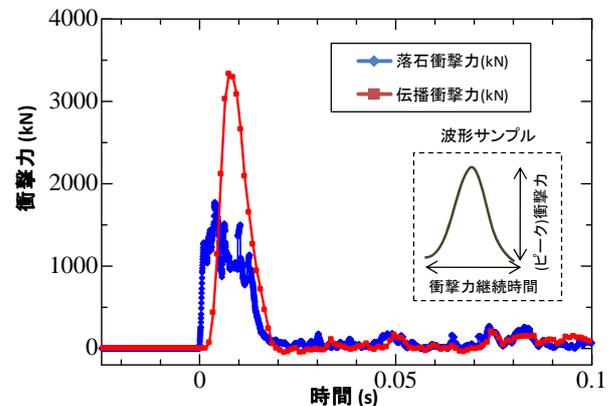


図-3 解析によって得られた衝撃力波形

2.2 伝播衝撃力の3次元拡張

底面の各メッシュ領域に働く応力から伝播衝撃力を算出することができる。しかし実験結果と解析結果を比較するためにも2次元DEMの解析結果を基に、3次元空間における応力伝播を予測できることが望ましい。そのため、以下のような方法を検討した。

まず、2次元DEMで得られた底面の各メッシュ応力をブーシネスクの理論解に基づき点載荷で得られるであろう応力に補正する。ただし、ブーシネスク解は等方均質な半無限線形弾性体という仮定に基づいており、この点かなり厳しい仮定である点を理解しておく必要がある。次に、補正後の応力をy軸中心（図-1参照）に同心円状に一様に分布しているとみなす。これは第2の仮定である。その後、同心円で作られる領域に各メッシュ応力をあてはめ、最後に3次元空間に展開された応力を合計することで伝播衝撃力を算出する。こうして算出された結果を、落石衝撃力と合わせて、図-3に示す。

3. DEMパラメータの違いによる衝撃力の影響

落石並びに伝播衝撃力における基礎検討として、境界サイズや DEM パラメータ変更時のピーク衝撃力の影響を調査した。その結果を以下に紹介する。

3.1 粒子サイズによる影響

堆積層を構成する粒子サイズの影響を調査した。粒子サイズの影響は、未だ解明されていない大きな問題である。解析の結果、R/D (落石直径 D に対する堆積層の粒子半径 R の比) を小さくすることで、衝撃力も指数的に小さくなり、最終的にある一定の値に収束していくことが分かった。(図-4) これは別途行った実験の値に近い値であることを確認している。また、粒子サイズが大きい程、より大きな衝撃力となるのは、粒子の拘束によって支持力問題でみられるような地盤の破壊ができず、エネルギーロスが少ないまま応力が伝播するためだと考えられる。

3.2 層厚、層幅 (境界サイズ) による影響

落石対策便覧でも、層厚が衝撃力に与える影響が指摘されている。そこで、落石直径(D)に対する敷砂の層厚(T)、層幅(W)の条件をいくつか変更し、それらが落石並びに伝播衝撃力に与える影響を調査した。

その結果、図-5 に示す通り、T/D が小さい程、衝撃力は大きくなり、T/D = 1 を超えるあたりから一定値に収束することが分かった。この閾値は落石対策便覧に示されている傾向と一致しており、DEM でもその傾向を確認することができた。

3.3 ばね係数の影響

ばね係数は粒子間の力の伝わりやすさを決める DEM において最も重要なパラメータである。調査の結果、ばね係数が大きいほど衝撃力が大きく、かつ衝撃力の継続する衝撃力継続時間が短くなる傾向が確認できた。また、ばね係数と衝撃力の関係は比較的明瞭であることから、上述した粒子サイズによる影響等を適切に補正するのに有用なパラメータであることが明らかになった。

4. まとめと今後の展望

今回、2次元 DEM で得られた地盤内応力を基に、3次元の底面に伝播する伝播衝撃力を予測することを試みた。また DEM で衝撃力を精度よく予測するには、境界サイズや粒子サイズなど幾何学的な条件をより現実に近付ける必要があることが分かった。一方で、計算可能な粒子数には限界があるが、そうした取り扱えない分は、ばね係数等により補正可能であることも確認できた。

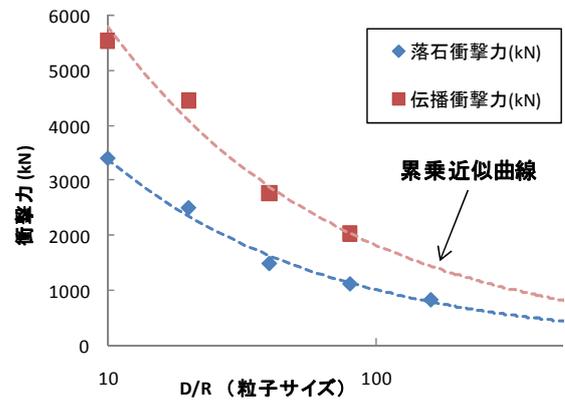


図-4 粒子サイズと衝撃力の関係

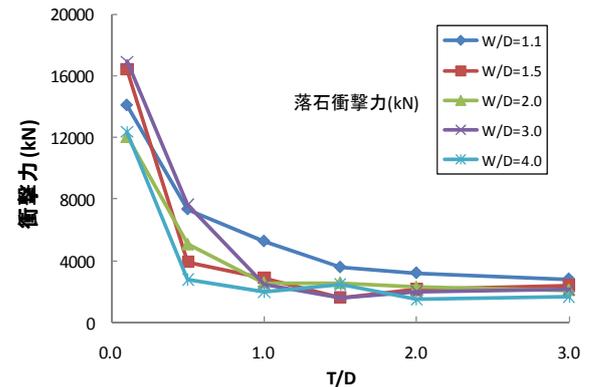


図-5 境界サイズと衝撃力の関係

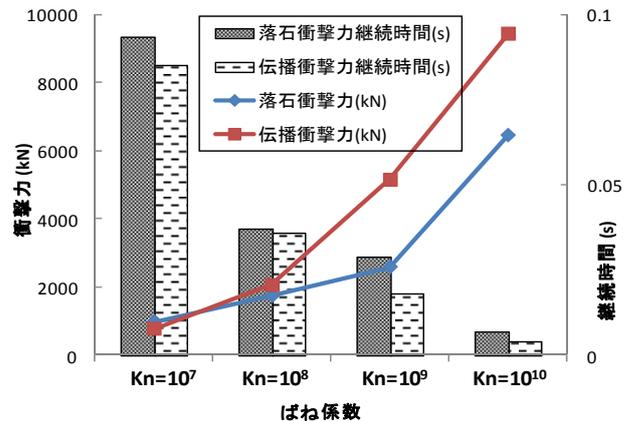


図-6 ばね係数と衝撃力、継続時間の関係

今後は非円形粒子の導入による貫入量の予測や、異なる種類の堆積層が組み合わせられた二層緩衝構造を持つ堆積層のモデル化とその評価、3次元解析結果との比較などに着目し研究を進める予定である。

参考文献

- 1) Cundall, P.A. and O.D.L. Strack. : A Discrete Models for Granular Assemblies, Geotechnique, Vol.29, No.1, pp.47-65, 1979
- 2) Maeda, K. and Yuasa, T. : Performance estimation of countermeasures for falling rock using DEM, IS-KYOTO, pp.193-199, 2009
- 3) 日本道路協会：落石対策便覧，2000
- 4) 榎谷 浩，中田 吉彦，梶川 康男：個別要素法の衝撃問題への適用に関する一考察，構造工学論文集，Vol.38A, 1992
- 5) 湯浅 知英ら：落石挙動のばらつきを考慮した堆積層の衝撃吸収効果，第21回中部地盤工学シンポジウム，2009
- 6) 吉田 博，榎谷 浩，今井 和昭：個別要素法による敷砂上への落石の衝突特性に関する解析，土木学会論文集，Vol.392/I-9, 1988