

原子力発電所周辺斜面の地震時崩壊を想定した岩塊衝撃力の DEM 解析

電力中央研究所 正会員 ○栃木 均
 中部電力(株) 正会員 中村 秀樹

1. はじめに

原子力発電所のさらなる安全性向上のため、地震時における周辺斜面の崩壊の影響を考慮することが求められている。岩塊の到達する可能性を否定できない場合は、衝突による影響の検討が問題となってくる。飛来物の衝突によるコンクリートの損傷については、貫入量と裏面剥離等の評価式がいくつか提案されている。本研究では、個別要素法 (DEM) により物性のばらつきを考慮した崩落解析を実施し、法先地盤上に設けたコンクリート外壁への岩塊衝突の検討を行った。解析結果から修正 NDRC 式¹⁾ による損傷評価を試みた。

2. 斜面崩壊を想定した岩塊の衝突解析

(1) 解析方法 岩盤斜面の崩壊によるコンクリート外壁への岩塊の衝突について検討した (図-1)。岩盤斜面の崩壊は、仮の設定として震動法による浅いすべり線を対象とした。前報²⁾ では、このすべり線の崩落解析を実施し、奥行き方向に同じ断面形状が続く場合には、2次元モデルでも適用できることを示した。今回の衝突解析でも2次元モデル (図-2) を用いるものとし、岩塊の衝突による衝撃力、衝突速度の検討を行った。コンクリート外壁の位置は、岩塊の崩落状況を考慮して法先から15mとした。岩塊の衝撃力 P は、Hertz の弾性論による球体の荷重～変形関係 (1) 式を DEM に組み込むことで解析した。

$$P = \kappa \delta^{1.5} \quad (1) \quad \kappa = \frac{3}{4} E_0 \sqrt{R} \quad 1/E_0 = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (2)$$

ここに、 δ は DEM 粒子とコンクリート外壁のオーバーラップ量であり、 R は粒子半径である。 E 、 ν は弾性定数とポアソン比であり、下添え字 1, 2 はそれぞれ岩塊およびコンクリート外壁に対応している。

斜面崩落解析では、ばね定数、反発係数および動摩擦係数等に関して、ラテン方格法 (LHS 法) によるサンプリングを行い物性のばらつきを考慮した。試行回数は 100 としている。物性の中央値と変動係数は前報²⁾ の値を用いた。ここで、ばね定数は、弾性球の変形理論による割線係数とし、ダッシュポット定数は反発係数により定めている。乱数を用いて初期配置を定めた後、自重による安定解析を行い、すべり線上のせん断強度を残留強度まで下げることにより自重により崩落させた。

(2) 解析結果 崩落した岩塊の堆積状況を図-3 に示す。コンクリート外壁に衝突した岩塊のほとんどは D 級であり、その壁面全体の衝撃力の合力を時刻歴として図-4 に示す。岩塊の衝突は崩落開始からおよそ 11~20 秒付近まで続き、その後、静的な土被り荷重となる。コンクリート外壁を高さ 1m 毎に分割して、その分割片 Δh に作用する衝撃力を取出した。その 1 例を図-5 に示す。同図には、最初に単体で衝突したヒゲ状の衝撃力が数回作用した後、岩塊群の衝撃力が次第に高まっていく状況が示されている。衝撃力の大きさは、群の場合よりも、単体の場合の方が大きくなっている。図-6 では、全試行回数における単体と岩塊群の衝突による衝撃力と衝突速度および衝突回数を高さ方向の分布図として整理した。同図から、単体衝突の衝撃力や衝突速度の

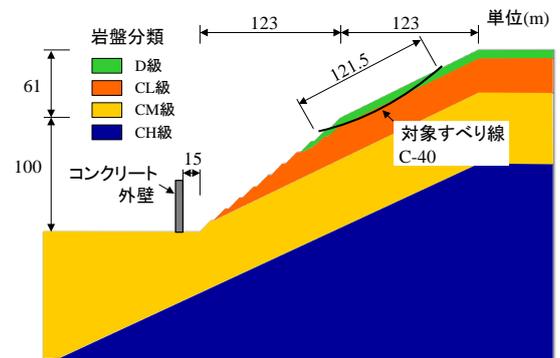


図-1 対象とした硬岩斜面モデル

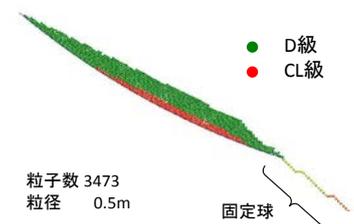


図-2 DEM による 2次元モデル

キーワード 斜面崩壊, 岩塊衝突, 衝撃力, 個別要素法, 数値解析

連絡先 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646 電力中央研究所 地震工学領域 TEL 04-7182-1181

大きさは高さにあまり関係がなく、低い位置で衝突回数が増えていくことがわかる。一方、岩塊群の衝撃力は、3m付近のピークから高さ方向になだらかに減少する傾向にあり、土被り圧の影響を受けた分布形となっている。

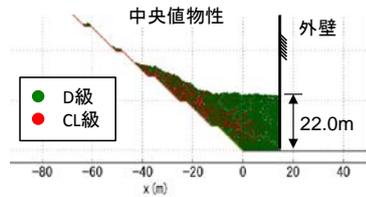


図-3 崩落岩塊の堆積状況

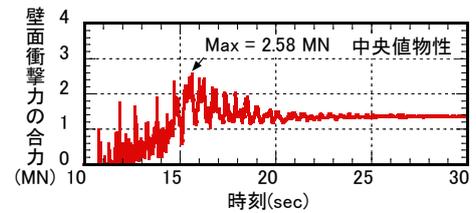


図-4 コンクリート外壁の衝撃力の合力

3. 岩塊衝突によるコンクリート外壁の損傷評価

(1) 検討方法 衝撃力の大きい岩塊単体の衝突について修正 NDRC 式¹⁾による貫入深さと裏面剥離限界厚さの評価を行った。同式は剛な飛来物の衝突を想定しているので岩塊の場合よりもかなり安全側である。図-6 上段に示した単体の衝突速度を用いて(3), (4)式により評価

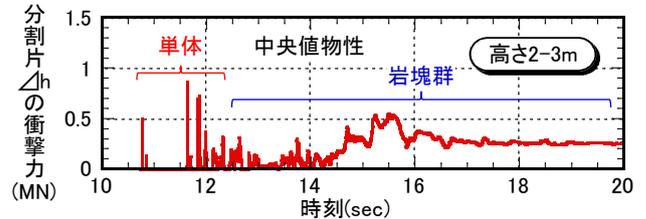


図-5 壁面の分割片Δhに作用する衝撃力

貫入深さ x

$$\frac{x}{d} = \begin{cases} 2 \sqrt{\frac{180}{\sqrt{f'_c}} NDd^{0.2} \left(\frac{V}{1000}\right)^{1.8}} & \left(\frac{x}{d} \leq 2.0\right) \\ \frac{180}{\sqrt{f'_c}} NDd^{0.2} \left(\frac{V}{1000}\right)^{1.8} + 1 & \left(\frac{x}{d} \geq 2.0\right) \end{cases} \quad (3)$$

裏面剥離限界厚さ s

$$\frac{s}{d} = \begin{cases} 7.91 \frac{x}{d} - 5.06 \left(\frac{x}{d}\right)^2 & \left(\frac{x}{d} \leq 0.65\right) \\ 2.12 + 1.36 \frac{x}{d} & \left(0.65 \leq \frac{x}{d} \leq 11.75\right) \end{cases} \quad (4)$$

した。ここに、d:飛来物の径(in), V:衝突速度(ft/sec), f'_c:コンクリートの圧縮強度(lbf/in²), N:形状係数(球の場合、=1.0), D:飛来物の口径密度(=W/d³), W:飛来物重量(lb),である。

(2) 検討結果 壁面に衝突した岩塊単体の貫入量

および裏面剥離限界厚さの評価結果を図-7に示す。同図は、分割片Δhの平均、最大値等の高さ方向の分布を示している。評価結果は衝突速度の大きい高さ2~3m付近で最大となり、岩塊衝突による貫入量は最大55mm程度であった。裏面剥離限界厚さは約400mm程度であり、想定条件の範囲内ではそれ以上の壁厚が条件となることが把握できた。

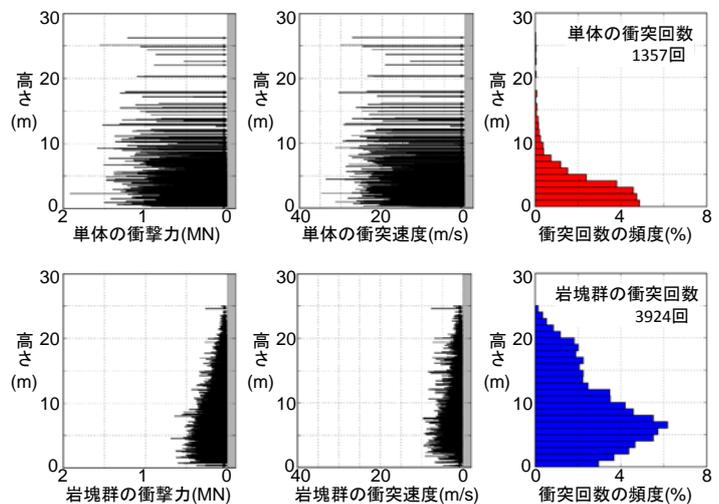


図-6 単体と岩塊群の衝撃力の分布 (試行回数 100回)

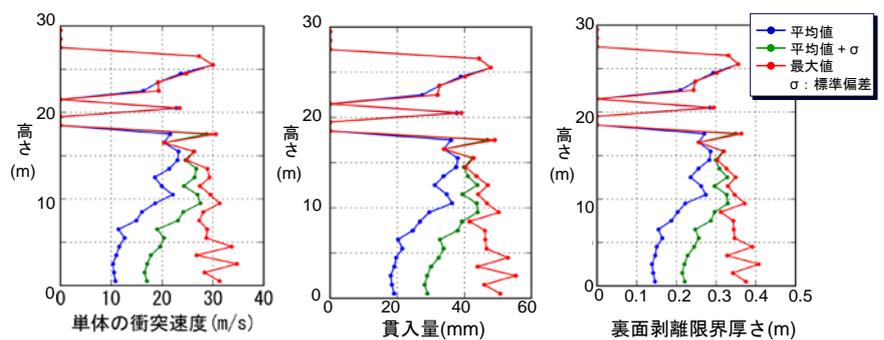


図-7 岩塊単体の衝突によるコンクリート外壁の損傷評価の例

4. まとめ 物性のばらつきを考慮した岩塊の衝突解析と岩塊単体の衝突による損傷評価の事例を示した。

なお、本研究は電力9社、日本原子力発電(株)、電源開発(株)、日本原燃(株)による平成28~29年度原子力リスク研究センター共通研究として実施した。

参考文献 1)木学会 構造工学シリーズ 6: 構造物の衝撃挙動と設計法, pp. 279-280, 1994. 2)栃木, 野村, 小澤: 原子力発電所周辺斜面の地震時崩壊を想定した到達距離のDEM解析, 土木学会第73回年次学術講演会, CS15-020, pp. 39-40, 2018.