

# 낙석 시뮬레이션 해석을 이용한 효율적인 낙석 방지에 대한 연구

## A Study on Efficient Prevention of Rockfall using Rockfall Simulation Program

이종현\* · 구호본\*\* · 김진환\*\*\* · 손영진\*\*\*\*1)

Rhee, Jong Hyun · Koo, Ho Bon · Kim, Jin Hwan · Son, Young Jin

### Abstract

This study analyzed activity of rockfall and its effect factor by the shape and mass. We performed research on the kinetic energy distribution, velocity and bounce height according to the rockfall characteristics using rockfall simulation program in cut-slope. In addition, this study discussed how to utilize kinetic energy and bounce height of rockfall for efficient establishment of rockfall prevention fence which is a countermeasure to cut-slope.

**key words** : rockfall, rockfall characteristics, the analysis of rockfall simulation

본 연구에서는 형상과 규모에 따른 낙석의 특성별로 그 운동과 영향 요인을 분석하였다. 선정된 대상 사면에 대해 낙석 시뮬레이션 프로그램을 수행하여 낙석 특성별 운동에너지 분포와 낙하속도, 도약높이 등에 대한 분석과 연구를 수행하였다. 또한, 연구대상 절토사면의 대책 방안인 낙석방지울타리의 효율적인 설치를 위해 낙석의 운동에너지와 도약높이 등을 활용하는 방안을 검토하였다.

## 1. 서론

지난 수 십 년 동안 국내·외에서 산사태나 암반사면안정에 관한 연구들이 활발하게 진행되어 왔으며, 이에 따라 괄목할 만한 성과를 거두고 있다. 특히, 암반사면의 파괴형태 등에 관한 연구가 많이 진행되었으나, 이는 붕괴 발생으로 장시간에 걸쳐 교통에 지장을 줄 수 있는 규모의 붕괴에 초점이 맞추어져 있어 발생 낙석에 대한 연구는 국내에서 거의 진행되고 있지 않은 실정이다. 따라서, 최근 각 도로에서의 교통량이 급속도로 늘어나고, 낙석의 피해가 증가하는 상황에서 낙석에 대한 관심과 연구의 필요성이 증대되고 있다.

현재 국내에서 주로 시공되고 있는 낙석방지시설은 낙석방지망과 낙석방지울타리가 주를 이루고 있으나, 이들 구조물에 대한 기능이나 효율성에 관한 연구는 전무한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 연구대상 절토사면을 선정하고, 낙석 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 낙석의 운동에너지 분포와 낙하속도, 도약높이 등에 대한 분석과 연구를 수행하였으며, 연구대상 절토사면의 대책 방안인 낙석방지울타리의 효율적인 설치를 위해 낙석의 운동에너지와 도약높이 등을 고려하는 방안을 검토하였다.

## 2. 낙석의 운동과 영향 요인

낙석은 암반내의 불연속면이 확대되고, 암편 등이 떨어져 나오거나 표층 퇴적물, 화산 분출물, 고결도가 나쁜 층내의 암편 등이 표면에 드러나 사면에서 낙하되는 현상을 의미한다. 암석에서 주로 발생하는 붕괴는 낙석과 유사하며 확실히 구분되지 않으나, 낙석은 개수로 표현될 수 있는 소량의 것을 의미하며, 소규모의

\* 비회원 · 한국건설기술연구원 지반방재환경연구실 · 연구원 · E-mail : jhrhee@kict.re.kr  
\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 지반방재환경연구실 · 책임연구원  
\*\*\* 비회원 · 한국건설기술연구원 지반방재환경연구실 · 연구원  
\*\*\*\* 비회원 · 한국건설기술연구원 지반방재환경연구실 · 연구원

암석 붕괴는 대책을 고려할 경우 낙석과 동일하게 취급되는 경우가 많다.

초기 운동이 시작된 낙석은 절토사면 및 낙석의 특성에 따라 자유낙하(free falling), 도약(bouncing), 회전(rolling), 미끄러짐(sliding)과 같은 운동 형태를 보인다. 낙석 운동에 영향을 미치는 요인들은 사면과 암체의 기하학적인 특성과 역학적인 특성으로 구분할 수 있다. 암체와 사면의 기하학적 특성은 암체의 규모나 사면의 경사 및 높이를 의미하며, 역학적인 특성은 쉽게 측정되거나 계산되어지지 않으나 낙석의 에너지 손실로부터 추정할 수 있는 계수들로부터 표현될 수 있다.

암체 규모는 부피에 의해 표현되는 낙석운동에 영향을 미치는 중요한 요인 중의 하나이다. 또한, 사면의 기하학적인 특성과 거칠기 역시 낙석의 운동에 영향을 미치는 중요한 요인 중의 하나로 고려되어진다. 그밖에 낙석의 초기속도와 사면의 거칠기 각도 등이 중요한 요인으로 고려되어진다(Spang and Sonser, 1995).

### 3. 낙석 시뮬레이션 해석

연구대상으로 선정된 절토사면의 연장은 180m이며, 높이는 15m로 1:0.5의 구배로 절취되어있다. 이는 국내 국도 주변 암반 절토사면의 일반적인 형성 높이가 10~20m이고 1:0.5(63°)로 절취된다는 점을 고려한다면, 본 연구대상 절토사면은 국도 주변에서 쉽게 관찰되어지는 전형적인 규모라 할 수 있다(한국건설기술연구원, 1999). 정밀 현장조사로부터 획득한 불연속면의 방향성을 하반구 등면적 투영망에 도시하여 평면 및 쉐기과괴에 대한 안정성을 검토한 결과, 평면과괴와 쉐기과괴의 파괴가능 영역 내에 도시된 절리군은 관찰되지 않았다. 따라서 불연속면을 따라 발생하는 대규모의 파괴에 대해서는 안정한 것으로 판단되나, 절토사면의 일부 구간에서 과발파로 인해 평균 0.1m<sup>3</sup> 규모의 낙석(약 260kg)이 탈락할 가능성이 관찰되고 있어 낙석방지울타리가 사면 보호공법의 일환으로 제안되었다.

현재 국내에서 주로 사용되고 있는 낙석방지울타리는 약 50kJ까지의 낙석에너지를 흡수 가능한 것으로 보고되고 있다(한국도로공사, 1992). 따라서, 50kJ를 국내에서 시공중인 낙석방지시설의 흡수 가능 에너지로 보고, 낙석 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 본 연구대상 절토사면에서의 낙석의 형상 및 규모별 운동에너지, 낙하속도 및 도약높이에 대한 분석을 실시하고, 대책방안인 낙석방지울타리의 효율적인 설치를 위한 검토를 실시해 보았다.

#### 3.1 낙석 에너지의 추정

사면으로부터 낙하하는 낙석의 에너지를 추정하고 낙석 현상을 이해하기 위하여 여러 수학적 모델이 제시되었으며, 컴퓨터의 발달로 이러한 수학적 모델들은 그 이용 가능성과 정확도가 증가하고 있다. 현재 사용되고 있는 수학적 모델들은 크게 두 가지의 종류로 나누어 질 수 있는 데 중량을 고려하지 않거나 암체 중심부의 한 점에 질량이 집중되어 있는 것으로 가정하여 낙하운동을 고려하는 모델(Hoek, 1987; Paronuzzi, 1989)과 암체를 질량, 부피 및 특정 형상을 갖는 것으로 가정하는 모델(Spang and Rautenstrauch, 1988)이 있다. 이들 중 암체의 질량과 부피 및 형상을 고려하는 모델이 현장에서 관찰되는 조건을 보다 더 정확하게 표현할 수 있으며, 따라서 더욱 정확한 결과를 기대할 수 있어 폭 넓게 쓰여지고 있다. 본 연구에서 사용된 RockFall 프로그램 역시 이 모델을 기본으로 제작되었다. 이러한 낙석모델은 낙석운동의 결과로 발생하는 낙석의 낙하속도, 도약높이 그리고 낙석의 운동에너지를 추정하는 데 사용되며, 낙석의 발생으로 예상되는 낙석의 도로 내 유입여부를 판별할 수 있다.

#### 3.2 낙석 운동의 분석

연구대상 절토사면은 주로 암반으로 구성되어 있으며, 구배가 일정하지 않고 굴곡이 심한 편이다. 따라서, 반발계수와 회전 마찰계수는 암반의 특성을 나타내는 수치를 선정하였으며, 그 값은 각각 0.93, 0.02이다. 시뮬레이션에 사용된 낙석은 구형(sphere), 원통형(cylinder), 판형(plate)의 형상을 이용하였으며, 초기속도는 0.1m/sec로 회전하면서 굴러 떨어지기 시작한 것으로 추정하였다.

낙석의 규모는 각 형상별로 7종류를 선정하였으며, 절토사면 하부로부터 1m의 이격거리를 가지고 2.5m의 낙석방지울타리가 설치된 것으로 가정하여 모사를 수행하였다. 본 연구에서 사용된 낙석 시뮬레이션 프로그램

랩인 RockFall은 각각의 입력변수에 대하여 지정된 범위 내에서 여러 값들을 변화시켜 가며 입력하여 통계적으로 처리가 되어진다. 따라서, 각각 입력변수의 특성에 따라 10~30%까지의 범위 내에서 변화시켜가며 100회의 시뮬레이션을 반복하였다.

먼저, 낙석 형상별 운동에너지와 낙석 무게의 관계에 대한 분석을 실시한 결과, 그림 1과 같이 유사한 낙석 규모를 보일 때, 낙석 형상별 운동에너지는 원통형이 가장 크며, 그 다음이 구형, 마지막으로 판형의 순으로 분석됨을 확인할 수 있다. 국내 낙석방지울타리의 흡수 가능 운동에너지를 50kJ로 보았을 때, 모든 형상의 약 700kg 이하의 낙석에 대해서는 낙석방지울타리의 기능을 충분히 발휘할 수 있는 것으로 분석되었다.

낙석의 형상별 낙하속도와 낙석 규모의 관계에 대한 분석을 실시한 결과, 그림 2와 같이 유사한 낙석 규모를 보일 때, 낙석 형상별 낙하속도는 원통형이 가장 크며, 그 다음이 구형, 마지막으로 판형의 순으로 분석됨을 확인할 수 있다. 또한, 각 낙석 형상별 규모에 따라 낙하속도 변화에 대한 추세선이 거의 일정한 간격으로 감소하고 있음을 알 수 있다.

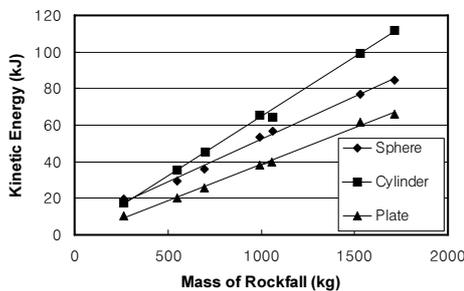


그림 1. 낙석 형상에 따른 낙석 무게별 운동에너지의 변화

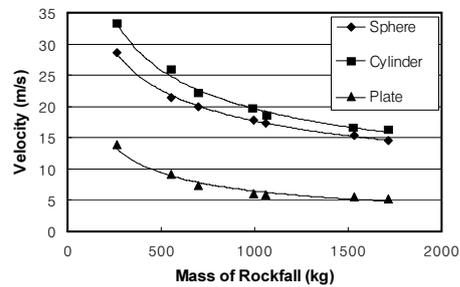


그림 2. 낙석 형상에 따른 낙석 무게별 이동속도의 변화

낙석의 형상별 도약높이와 낙석 무게의 관계에 대한 분석을 실시한 결과, 그림 3과 같은 경향을 보이고 있는 것이 확인되었다. 유사한 낙석 규모를 보일 때, 낙석 형상별 도약높이는 구형이 가장 크며, 그 다음이 판형, 마지막으로 원통형의 순으로 분석된 것을 확인할 수 있다. 또한, 각 낙석 형상별 규모에 따라 도약높이의 변화에 대한 추세선이 거의 일정함을 알 수 있으며, 본 연구대상 절토사면에서는 원통형의 낙석만이 2.5m 이하의 도약높이를 보여 낙석방지울타리 내에 잔류할 수 있을 것으로 분석되었다.

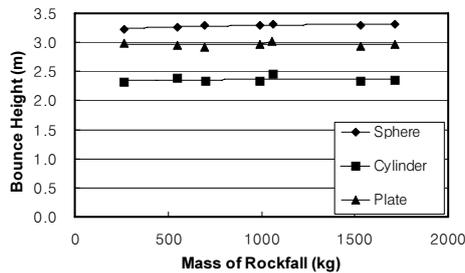


그림 3. 낙석 형상에 따른 낙석 무게별 도약높이의 변화

앞서의 분석 결과에서 구형과 판형의 낙석은 모든 낙석 규모에서 낙석방지울타리의 설치 높이인 2.5m를 상회하여 도로로 유입되는 것으로 분석되었다. 따라서, 낙석방지울타리의 설치 위치를 1.2m, 1.5m, 2.0m 거리로 이동 설치하여 낙석 시뮬레이션 해석을 반복 실시하였다.

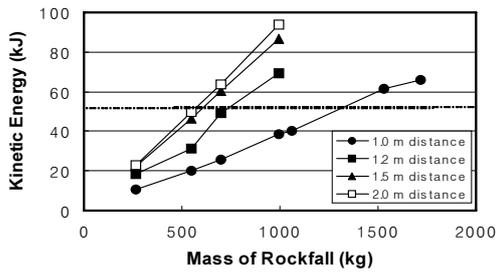


그림 4. 낙석방지울타리 설치 위치에 따른 낙석 무게별 운동에너지의 변화

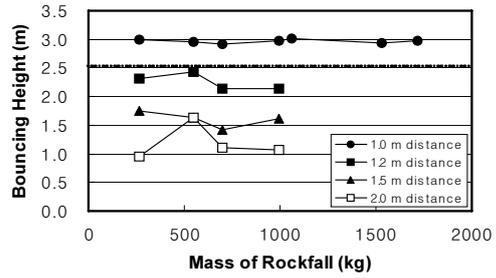


그림 5. 낙석방지울타리 설치 위치에 따른 낙석 무게별 도약높이의 변화

그림 4는 낙석방지울타리의 설치 위치에 따른 낙석 무게별 운동에너지의 변화를 나타내고 있는 그림이다. 이격거리 1.0m 일 때는 낙석 규모 1,000kg 정도까지의 발생 운동에너지가 국내 낙석방지울타리의 흡수 가능 에너지 범위 내에 분포함을 알 수 있으며, 이격거리 1.2m 일 때는 낙석 규모 약 700kg 정도까지의 발생 운동에너지가 낙석방지울타리의 흡수 가능 에너지 범위 내에 분포하고, 이격거리 1.5m와 2.0m 일 때는 낙석 규모 약 500kg 정도까지의 발생 운동에너지가 낙석방지울타리의 흡수 가능 에너지 범위 내에 분포하고 있음을 알 수 있다. 그림 5의 낙석방지울타리 설치 위치에 따른 낙석 무게별 도약높이의 분포를 살펴보면, 이격거리 1.0m 일 때는 낙석의 도약높이가 모든 낙석 규모에서 3m 내외의 값을 보여 본 연구대상 절토사면에 설치기로 한 낙석방지울타리의 높이인 2.5m를 상회하여 낙석의 도로 유입이 가능할 것으로 판단된다. 1.2m 이상의 이격거리를 갖는 낙석방지시설에 낙하하는 낙석은 이격이 증가함에 따라 도약높이가 감소하며, 모두 2.5m 이하의 도약 높이를 가지고 있는 것으로 해석되었다. 또한, 이 때의 낙석운동에너지는 이격거리가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이고 있으나, 본 연구대상 절토사면에서 관찰되는 낙석의 무게가 260kg 정도로 조사되어 발생 운동에너지가 약 20kJ 내외로 1.2m에서 2.0m사이의 이격거리 내에서 충분히 낙석의 피해를 예방할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구를 통해서 낙석의 형상과 규모에 따라 야기되는 운동에너지와 낙하속도, 도약높이 등을 고려하는 것이 효율적인 낙석의 방지에 도움이 됨을 알 수 있었다. 또한, 낙석 시뮬레이션에 의한 분석 결과, 낙석 형상에 따른 운동에너지와 낙하속도는 동일 규모에서 원통형, 구형, 판형의 순으로 크며, 규모가 증가함에 따라 운동에너지는 선형적인 증가 경향을 보임을 알 수 있으며, 낙하속도는 2차원적인 감소 경향을 보임을 알 수 있다. 낙석 형상에 따른 도약높이는 동일 규모에서 구형, 판형, 원통형의 순으로 크며, 규모의 증가에도 거의 일정한 값을 보였다. 또한, 낙석방지울타리나 낙석방지옹벽 등의 설치 시에는 낙석의 형상과 규모에 따라 야기되는 운동에너지와 도약높이 등의 관계를 고려하는 것이 효율적인 낙석 방지를 위해 반드시 필요한 사항임을 확인하였다.

#### 참고문헌

1. 한국건설기술연구원 (1999). 도로절개면 유지관리시스템 개발 및 운용 연구(II), 건설교통부.
2. 한국건설기술연구원 (2000). 도로안전시설 설치 및 관리지침(낙석방지시설, 도로반사경판), 건설교통부.
3. 日本道路協會 (2000). 落石對策便覽, 日本道路協會.
4. Pfeiffer, T. J. and Bowen, T. D. (1989). "Computer simulation of rockfalls", Bull. Ass. Eng. Gel. 26, pp. 135-146.
5. Spang, R. M. and Sonser, T. H. (1995). "Optimized rockfall protection by ROCKFALL", Proc. 8th Int. Congress on Rock Mechanics, Tokyo.