

국내 낙석방지울타리의 적정성 파악을 위한 현장 실물 실험 및 설계기준 제시 In Situ Rockfall Tests for Evaluation of Rockfall Protection Fences

구호본¹⁾, Hobon Koo, 박혁진¹⁾, Hyuck-Jin Park, 이경미²⁾, Kyung-Mi Lee, 김규한²⁾, Kyu-Han Kim, 이재욱³⁾, Jae-Wook, Lee

¹⁾ 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원, Senior Researcher, Civil Engineering Division, KICT

²⁾ 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원, Researcher, Civil Engineering Division, KICT

³⁾ 유신코퍼레이션, Yooshin Corporation

SYNOPSIS : Rockfall protection fence which is used for mitigation of rockfall hazard, has been constructed without consideration of lithology, height and dip angle of rock slope. However, those factors should be considered for the construction of the protection fence. In addition, the protection fence should be evaluated its performance by in-situ test in order to utilize the fence effectively. This is the first full sized rockfall test in Korea. For this test, the rock cut slope whose height is about 20 m and dip angle is 65° has been chosen. Based on the preliminary simulation procedure, four different concrete balls (0.5 ton, 1.0 ton, 2.0 ton and 5.0 ton) were prepared and four different types of protection fence were constructed. The results of this test will be utilized in the establishment of rockfall protection fence construction manual.

Key Words : in-situ rockfall test, rockfall protection fence, preliminary simulation

1. 서론

낙석방지시설은 도로 이용자 및 도로 시설을 낙석 등으로 인한 재해로부터 지키기 위한 목적으로 설치되는 시설이다. 낙석의 발생은 복합적인 요소가 연관되어 발생하는 현상으로 현재로서는 구체적으로 예측하기 힘들고 그 발생기구를 정확히 규명하기 힘든 상황이다.

현재 낙석 등에 의한 재해 방지를 위하여 설치되는 방지시설은 낙석 발생이 예측되는 사면 내의 뜬돌이나 전석 등을 제거하거나 사면에 고정하는 낙석 예방공과 사면으로부터 낙하하는 낙석을 도로 위에 설치한 시설로 방호하는 낙석 방호공이 있다. 낙석 예방공은 주로 낙석예상 암괴를 대상으로 직접 발생원에 대하여 시행하는 대책이므로 효과적이며 그 종류로는 절토, 슛크리트, 록 앵커, 배수공 등이 있다. 이에 반해 낙석 보호공은 이미 발생한 낙석에 대하여 낙석이 도로로 유입되는 것을 방지하는 방법으로 낙석 방지망, 낙석 방지 울타리, 낙석방지 옹벽 등이 있다.

현재 국내에서 주로 사용되는 낙석방지시설은 낙석방지망과 낙석방지울타리로 전체 시행 공법 중 70% 이상을 차지하고 있으며 본 연구의 대상인 낙석방지 울타리의 경우 전체 시공 중 20%를 차지하고 있다(한국건설기술연구원, 1999). 낙석방지울타리는 소규모의 낙석에 효과적인 대책으로 국내에서 보편적으로 사용되고 있으나 절개면의 특성에 상관없이 표준도에 의한 단일 모델이 시공되고 있어 시설의 효용성에 자주 의문이 제기되어 왔다. 따라서 본 연구에서는 현장실물실험을 통해 국내에서 사용중인 낙석방지시설의 기능을 검토해 보고 이를 이용하여 설치기준을 제시하는 데 목적을 두고 있다.

2. 본론

2.1 낙석에너지의 산정

낙석 방지시설을 에너지 계산에 따라 설계하는 경우에는 낙석의 운동 에너지의 계산은 필수적이다. 낙석의 운동 에너지는 낙석의 경로를 상세하게 추적 계산하여 추정할 수 있으나, 그 최종적인 운동 에너지는 낙하 도중의 사면 형태에 크게 좌우된다. 따라서 일반적으로는 실험으로 증명된 낙석의 속도 추정식을 통해 운동 에너지를 추정하는 편이 보다 용이하다고 할 수 있다.

낙석 속도는 잔존 계수 α 와 자유 낙하 속도를 이용하여 (1)식처럼 나타낼 수 있다(일본도로협회, 2000).

$$V = \alpha \cdot \sqrt{2gH} \quad (1)$$

이 때, V : 낙석의 속도
 α : 잔존계수
 H : 낙하 높이
 g : 중력가속도

잔존 계수는 사면의 토질, 암질, 요철(凹凸), 구배 및 낙석 형상에 따라 다르다. 따라서, 사면의 등가 마찰 계수, μ 를 이용하여 나타낸 잔존 계수 α 는 다음의 식으로 표시할 수 있다.

$$\alpha = \sqrt{\left(1 - \frac{\mu}{\tan \theta}\right)} \quad (2)$$

이 때, θ : 사면 구배

(2)식을 (1)식에 대입함으로써, 낙석 속도는 등가 마찰 계수 μ 를 사용하여 다음 식과 같이 나타나게 된다.

$$V = \sqrt{2g\left(1 - \frac{\mu}{\tan \theta}\right)H} \quad (3)$$

설계에 주로 사용하는 등가 마찰 계수 μ 의 값은 표1에 제시되어 있다.

한편, 낙석의 운동 에너지는, 선 속도 에너지와 회전 에너지의 합으로 나타낸다. 즉,

$$E = E_v + E_r \quad (4)$$

이 때, E : 낙석 운동 에너지
 E_v : 낙석의 선 속도 에너지 ($= \frac{1}{2} mV^2$)
 E_r : 낙석의 회전 에너지 ($= \frac{1}{2} Iw^2$)
 m : 낙석의 질량
 I : 낙석의 관성 모멘트
 w : 낙석의 회전각 속도 (rad/s)

과거의 실험 결과에 의하면, 회전 에너지 E_r 은 선 속도 E_v 의 40%정도까지 이르는 경우도 있지만, 대부분은 회전 에너지 E_r 은 선 속도 E_v 의 10%정도라고 볼 수가 있다. 따라서, (3)식을 (4)식에 대입시킴으로서, 낙석의 운동 에너지는 다음 식으로 구할 수가 있다.

$$E = (1 + \beta) \left(1 - \frac{\mu}{\tan \theta} \right) \cdot m \cdot g \cdot H \quad (5)$$

이 때, $(1 + \beta) \left(1 - \frac{\mu}{\tan \theta} \right) \leq 1.0$

- E : 낙석의 운동 에너지
- β : 회전 에너지 계수 (0.1 사용)
- μ : 등가 마찰 계수 (표 1)
- θ : 사면 구배
- m : 낙석의 질량
- g : 중력가속도
- H : 낙석의 낙하 높이

2.2 실험방법

본 연구를 위해 수행된 현장 실험은 절개면으로부터 각각 다른 크기로 제작된 콘크리트 볼을 낙하시켜 절개면 하부에 설치된 낙석방지시설에 충격을 가해 낙석방지시설의 기능을 평가해 보기 위한 목적으로 수행되었다. 이를 위하여 0.5톤, 1.0톤, 2.0톤 그리고 5.0톤의 콘크리트 볼을 제작하였으며 이를 높이 약 20 m 의 절개면으로부터 낙하시켜 낙석의 궤적을 디지털 캠코더와 사진기를 이용하여 촬영하였다. 이때 이들 카메라는 절개면의 다른 각도로부터 촬영하였으며 1개는 사면의 정면에서, 1개는 사면으로부터 45도 정도의 각도로, 나머지 한 개는 사면의 측면에서 각각 촬영하였다. 각각 다른 크기의 낙석을 이용하여 이를 낙하시켜 낙석방지시설에 가해지는 에너지를 다양하게 조절함으로써 낙석방지시설의 구조강도를 추정할 수 있다. 각 실험 후 낙석방지시설의 파손 규모 등을 자세히 기록하고 사진을 촬영하여 낙석방지시설의 기능을 추정하며 현장실험자료를 통해 낙석의 낙하 속도, 운동에너지를 파악하고 설치된 낙석방지울타리의 파손 여부로부터 와이어 로프와 철망, 그리고 지주의 흡수 가능에너지를 파악하여 낙석특성에 따른 낙석방지시설의 효용성을 규명하고자 하였다.

2.3 실험 현장

실험 대상 절개면은 진주-통영간 고속도로 현장으로 높이 약 20 m, 연장 약 30-40 m 규모의 절개면이 4개로 구성되어 있다. 각 절개면은 구배 1:0.5로 절취되어 있으며 주 구성암은 퇴적암으로 되어 있다. 현장 실험 후의 실험 결과 분석을 위하여 실험 대상 절개면의 경사, 상세 단면, 구성 암석, 절개면의 거칠기 등을 조사하였으며 이를 바탕으로 낙석 시뮬레이션을 위한 절개면의 단면을 구성하였다.

2.4 실험 대상 구조물의 설치

현장에 설치된 낙석방지시설은 4개의 절개면에 대해 각각 다른 형식으로 설치하였다. 이를 위하여 Rockfall 시뮬레이션 프로그램(1988, 1995)을 이용하여 현장에서 조사한 절개면의 단면과 구성암 특성 등을 이용하여 낙석의 궤적과 낙석에너지를 시뮬레이션 해 보았으며 이를 바탕으로 낙석방지시설의 위치와 필요 형식 등에 대한 설계를 수행하였다(그림 1).

표 1 사면의 종류와 등가 마찰 계수 μ 의 값

구분	낙석 및 사면의 특성	설계에 사용하는 μ	실험을 통해 얻을 수 있는 μ 의 범위
A	경암, 둥근 모양 ; 요철 小, 입목(立木) 없음	0.05	0 ~ 0.1
B	연암, 각상~둥근 모양 ; 요철 中~大, 입목(立木) 없음	0.15	0.11 ~ 0.2
C	토사·애추, 둥근 모양~각 ; 요철 小~中, 입목(立木) 없음	0.25	0.21 ~ 0.3
D	애추, 큰 자갈이 섞인 애추, 각상 ; 요철 大~中, 입목(立木) 없음~있음	0.35	0.31 ~

각각의 절개면에 설치된 낙석방지시설의 형식은 1)고정 장착구를 이용하여 낙석방지옹벽 위에 방지울타리가 설치된 형식, 2)낙석방지옹벽 위에 방지울타리가 설치되었으나 옹벽 뒤의 뒷채움을 하지 않은 경우, 3)표준시방서에 제시된 고정구를 사용하여 단부의 설치없이 60 m 길이의 방지울타리 형식, 4)유연성 원리를 이용한 flexible barrier system 이다.

2.5 실험 결과의 분석

2.5.1 입력자료

상세 단면

절개면의 상세 단면도는 낙석운동에 영향을 미치는 절개면의 경사변화를 표현할 수 있는 자료이다. 절개면의 경사는 낙석의 이동거리와 운동에너지에 영향을 미치며 따라서 실험 현장에 대한 상세 단면이 필수적으로 요구되어진다.

낙석의 크기

낙석의 크기는 지름과 질량으로 표현된다. 낙석의 형태는 대개 구형의 형태로 추정하여 시뮬레이션이 수행된다.

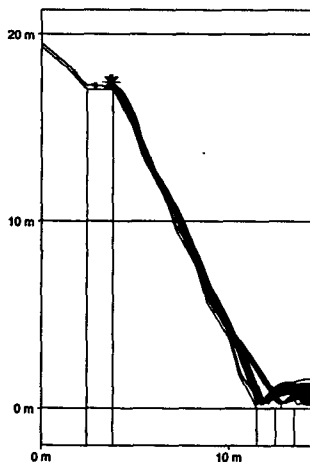


그림 1 현장 시험을 위한 사전 시뮬레이션의 예

절개면의 구성물질

절개면의 구성물질은 낙석운동에 영향을 미치는 여러 변수들을 좌우하는 요소로 반발계수와 마찰계수 등의 변수를 좌우한다. 암사면인 경우 토사면과 비교할 때 낙석이 반발하는 높이와 충돌에 의해 흡수되는 에너지의 양 등에서 크게 차이가 발생한다.

2.5.2 해석 결과

시뮬레이션의 수행결과는 절개면내에서 발생하는 낙석의 도약 높이와 낙하속도의 추정치가 통계적으로 처리되어진다. 시뮬레이션 결과물로는 그림 2, 3, 4에서와 같이 낙석의 도약 높이와 낙석에너지의 분포가 분석되어지며 평균값으로도 제시되어진다. 또한, 낙석방지시설이 설치된 지점에서의 낙석의 도약 높이와 낙석에너지를 계산할 수 있으며 이를 활용하여 낙석 방지시설의 위치를 결정할 수 있다.

2.5.3 결과의 분석

그림2는 현장의 절개면 상세 단면을 이용하여 높이 약 20 m에서 0.5 톤의 콘크리트 볼을 낙하할 때 발생한 최대 낙석에너지와 최대 도약높이를 절개면의 각 지점에서 나타낸 것이다. 예상되는 바와 같이 절개면 하부로 가면서 낙석의 에너지가 증가하여 절개면 하부에 도달했을 때 약 110Kj의 에너지를 보이고 있으며 낙석의 도약 높이는 약 1.2 m 이하의 값을 보이고 있다. 그림3과 그림4는 절개면의 하부로 부터 약 1 m 의 이격 거리를 두고 낙석방지시설을 설치하였을 경우 낙석방지시설에 가해지는 낙석 에너지와 낙석의 도약 높이이다. 낙석에너지는 최소 16.67 Kj에서 최대 43.17 Kj까지의 분포를 보이며 평균 29.95 Kj의 낙석에너지를 보이고 있다. 한편 낙석의 도약량은 0.18 m부터 0.40 m 까지의 분포로 평균 0.3 m의 도약높이를 보이고 있다. 현장 실험을 통해 이 경우 낙석방지시설은 낙석을 막아냈으며 따라서 이 정도 규모의 낙석에너지는 충분히 흡수가 가능한 것으로 보인다.

현재 현장에서 수행되었던 다른 규모의 낙석이 발생시킨 낙석에너지와 각기 다른 낙석방지시설의 흡수가능에너지에 대한 분석이 수행 중이며 실험결과와 프로그램의 분석을 통해 낙석의 특성별 낙석방지시설의 요구강도를 계산할 예정이다. 또한, 절개면의 특성(경사, 구성물질, 표면 거칠기)에 따른 낙석의 예상 에너지를 유추하여 절개면의 특성과 낙석의 특성에 따른 설계 및 구조 기준을 제시할 예정이다

본 실험의 결과는 낙석방지울타리의 설계기준을 제시하는 데 활용될 예정이며 또한 낙석방지울타리의 용벽부분에 대한 구조 검토와 아울러 설계기준을 마련하는 데 이용될 예정이다.

3. 결론

낙석방지울타리는 소규모의 낙석이 예상될 때 사용되는 낙석방호공법의 하나로 국내에서 폭 넓게 사용되고 있다. 그러나, 이러한 울타리는 절개면이나 낙석의 특성에 대한 고려없이 표준도에 제시된 단일 형식과 단일 규모의 시설만이 사용되고 있어 낙석방지울타리의 기능이 제대로 발휘되지 못하거나 낙석방지울타리의 흡수가능에너지 이상의 낙석이 예상되는 곳에 설치됨으로 무용지물화 되는 경우가 많다. 본 연구는 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 절개면과 낙석에 특성을 고려한 낙석방지울타리의 설치 및 관리 지침을 마련하기 위해 수행되었다. 본 실험은 이러한 연구의 일환으로 국내에서 사용되는 낙석방지시설의 설치 적정성 여부와 문제점을 파악하고 시설의 특성별 효용성을 규명하기 위하여 수행되었다. 본 실험의 해석 결과는 절개면 높이, 경사도, 암종, 울타리의 이격거리 등을 고려한 설계 및 설치 기준을 제시하는 데 사용될 예정이다.

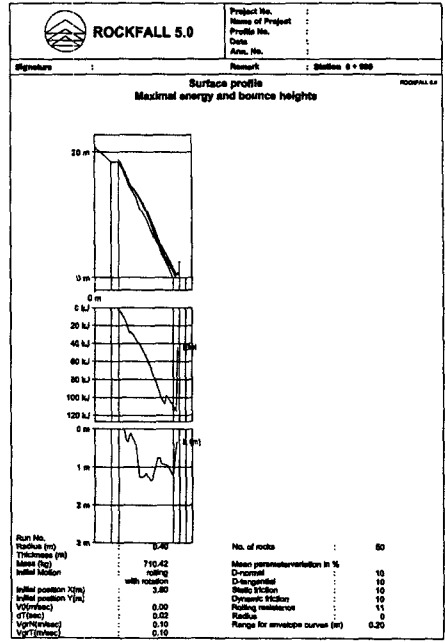


그림 2 0.5톤 낙하시의 에너지 및 도약 높이 분포

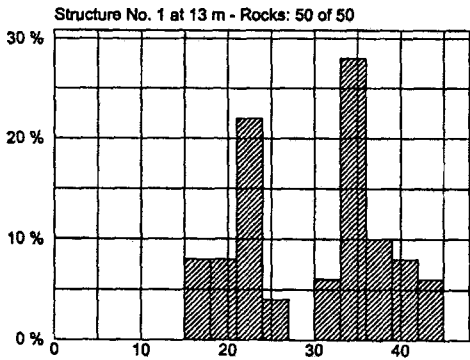


그림 3 이격거리 1.0m 지점에서의 에너지 분포

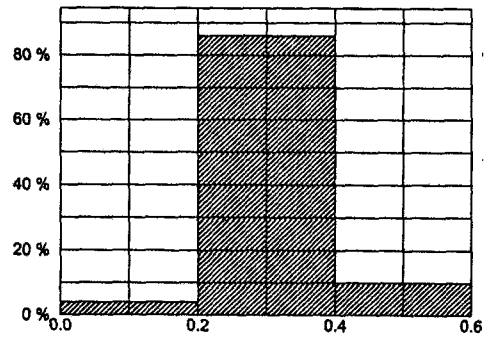


그림 4 이격거리 1.0 m에서의 도약높이 분포

참고문헌

1. 한국건설기술연구원(1999), 도로절개면 유지관리시스템 개발 및 연구
2. 일본도로협회(2000), 낙석대책 편람, pp.10-19.
3. Spang, R. D.(1988), "Empirical and mathematical approaches to rockfall protection and their practical applications", Proceeding of 5th International Symposium on Landslides, Lausanne, pp.1237-1243.
4. Spang, R. D.(1995), "Optimized rockfall protection by 'ROCKFALL'", Proceeding of 8th International Congress of Rock Mechanics, Tokyo, pp.1233-1242.