

현장 낙석실험을 통한 낙석방지울타리의 특성 및 성능 평가

Characteristics and Energy Absorbing Capacity for Rockfall Protection Fence from In-Situ Rockfall Tests

구 호 본*¹ Koo, Ho-Bon
박 혁 진*² Park, Hyuck-Jin
백 영 식*³ Paik, Young-Sik

Abstract

Rockfall protection fences are used for diminishing rockfall damage in roads side slopes. In order to install the fences in effective way, the conditions of rock slopes and total predicted impact energy of falling rock should be considered. However, the fences have been constructed without any consideration for lithology, height and slope angle of rock slope in Korea. In addition, the information about the performance of the protection fences, which should be evaluated by in-situ test or laboratory test in order to check out the practical use in the field, is not available. Therefore, in design manual for the rockfall protection fence, the specific details for the installation of this type of fence are not provided yet. The full sized rockfall in situ test was carried out for the calculation of falling energy of rock and the evaluation of the maximum energy absorbing capacity of fence. For this test, the rock slopes whose heights are about 20 m and dip angle of 65 degree, have been chosen. This is because those geometries are mean height and slope angle of most road cut slopes along Korean national highway. Based on the preliminary simulation procedure, four different sizes of concrete ball (0.7, 1.3, 2.3 and 4.3 ton) were prepared and four different types of protection fence were constructed. The results of this test provide information about the maximum energy absorbing capacity of the fence, kinetic energy of rockfall and restitution coefficient, and these results can be utilized in the establishment of rockfall fence design and construction manual.

요 지

낙석방지울타리는 도로절개면 상부에서 발생한 낙석의 도로 유입을 차단하기 위하여 설치되는 구조물로 국내 국도 절개면 중 70%이상 시공되어 있다. 이와 같이 도로 절개면의 재해예방을 위하여 범용적으로 사용되는 시설물로서 그 중요성이 매우 강조될 수 있으나 국내의 경우 아직까지 설계 및 시공에 대한 기준이 미흡하고 절개면의 높이, 경사도 등 특성을 고려하지 않은 단일 표준단면도에 의해 설계, 시공되어 이의 효율성에 한계가 있는 것이 사실이다. 따라서, 본 연구에서는 현장실험을 통해 낙석방지울타리의 흡수가능에너지를 파악하였다. 실험을 위하여 높이 20m, 경사 65도의 절개면을 선정하여 4개 규모의 콘크리트 볼(0.7, 1.3, 2.3, 4.3 톤)을 절개면 상부로부터 낙하시켜 낙석방지 울타리의 성능을 평가하였다. 본 논문은 시공완료된 절개면을 대상으로 현장실험을 통해 낙석운동에너지, 암반의 반발계수, 낙석방지울타리의 흡수에너지 등을 산정하여 절개면 특별형 낙석방지울타리의 설계에 필요한 기초 자료를 제공하고자 하였다. 현장실험을 통해 획득한 낙석방지울타리의 흡수가능에너지는 약 50kJ로 이는 약 0.4톤의 낙석이 10m의 높이에서 낙하할 때 발생하는 에너지와 동일하다.

*1 정회원, 한국건설기술연구원 지반구조물그룹 그룹장 (Member, Research Fellow, Civil Engrg., Division, Geo-Structure Group, KICT)

*2 정회원, 한국건설기술연구원 지반구조물그룹 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Civil Engrg., Division, Geo-Structure Group, KICT)

*3 정회원, 경희대학교 토목공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil Engrg., KyungHee Univ.)

1. 서론

낙석방지시설은 크게 낙석 예방공과 낙석 보호공으로 구분된다. 낙석 예방공은 절개면 안정해석에 의한 안전율이 절개면 설치 기준에 미달될 때 안전율 증대를 목적으로 상재하중제거, 절개면내 보강재 삽입 등을 시행하는 공법으로 절취, 락 앵커, 락 볼트 등을 들 수 있다. 낙석 보호공은 안전율이 기준에 상회하나 암반풍화에 의한 열화(deterioration), 소규모 낙석 재해 등을 차단하는 것으로 낙석방지망, 낙석방지울타리 등이 있다.

현재 국내에서 주로 사용되는 낙석 보호공은 낙석방지망과 낙석방지울타리로 크게 구분되며 특히 낙석방지울타리의 경우, 소규모의 낙석에 효과적인 대책으로 전체 국토 절개면 대책 적용 공법 중 70% 이상을 차지하고 있다(한국건설기술연구원, 1999). 그러나, 국내 낙석방지울타리는 절개면 및 예상 낙석의 특성에 대한 고려없이 단일 표준도에 의해 설계, 시공되고 있어 구조물의 효용성에 의문이 제기되어 왔다. 따라서 본 연구는 현장실험을 통해 국내에서 사용중인 낙석방지울타리의 기능을 파악하였으며 현장여건과 절개면 특성에 따라 적합한 낙석방지울타리의 설계기준을 제시하고자 한다.

본 연구에서는 국내 평균규모(높이 20m, 경사 1:0.5)의 절개면을 선정하고 낙석운동을 재현하기 위하여 콘크리트볼을 크기별로 제작하여 현장실물실험을 통한 낙석운동에너지, 암반의 반발계수, 울타리의 흡수에너지 등을 산정하여 절개면 특성별 낙석방지울타리의 설계에 필요한 기초자료를 제공하고자 하였다.

2. 낙석의 정의 및 특성

2.1 정의

낙석은 암반내 불연속면의 이완이나 차별적 풍화에 의해 돌출된 암편 등이 외적요인에 의해 중력방향으로 낙하되는 현상을 의미한다. 이에 반해 사면붕괴는 일반적으로 대량의 토사나 암석이 절개면으로부터 파괴되어 무너져 내리는 현상을 의미한다. 암반에서 발생하는 붕괴는 낙석과 유사하여 확실히 구분되지 않으나, 낙석은 이동암편의 갯수로 그 규모를 표현할 수 있는

소량의 것을 의미하는 데 반해, 붕괴는 떨어져 쌓인 암석의 체적으로 표시되는 대량의 것을 의미한다. 소규모의 암반 붕괴는 그 대책을 고려할 경우 낙석과 동일하게 취급되는 경우가 많다.

2.2 발생 원인

낙석의 발생은 주로 절개면의 지형과 지질에 의해 좌우된다. 낙석이 발생되기 쉬운 지질 조건으로는 암반 내에 불연속면이 발달되어 동결융해나 강우와 같은 외적요인으로 불연속면의 이완에 의해 확대되어 암탈락이 발생하는 경우와 애추(talus), 화산성 파쇄물, 풍화 화강암류 등과 같은 지질조건으로, 이러한 조건 하에서는 기질(암, 자갈 등의 주위를 충전하는 토사 등 상대적으로 연약한 물질)이 풍화나 침식에 대한 저항력이 약해 기질 사이에 있던 암이 탈락하는 현상이 발생한다. 지형적으로는 경사가 급한 절개면과 오버행(overhang)과 같은 형상에 좌우된다.

2.3 운동 형태

일단 초기 운동이 시작된 낙석은 절개면과 암편의 특성에 따라 자유낙하, 도약, 회전 그리고 미끄러짐과 같은 운동형태를 보인다.

① 자유낙하(free falling)

낙하 암편이 절개면과의 접촉없이 중력에 의해 하부로 낙하하는 운동을 의미하며, 이때 공기와의 마찰은 무시되며, 낙석의 운동궤적은 이차원의 방정식 곡선에 의해 표시된다.

② 도약(bounce)

낙하 암편이 절개면과 충돌할 경우 발생하는 운동으로 암반의 특성에 따라 일정 규모의 에너지 손실이 발생하며 튀어 오르게 된다.

③ 회전(rotation)과 미끄러짐(sliding)

여러 번의 도약으로 에너지 손실이 많이 발생한 낙석은 절개면과 접촉하면서 회전하거나 절개면 상에서

미끄러지기 시작한다. 그러나 이 두 운동은 쉽게 구분되지 않으며 따라서 대개 구분없이 함께 사용된다. Giani (1992)는 회전과 미끄러짐의 구분에서 절개면의 굴곡보다 암편의 크기가 클 경우 약간의 도약을 수반하며 미끄러지는 경향을 보이고, 굴곡의 크기가 더 클 경우 절개면과 암체의 접촉면에서 약간의 미끄러짐과 함께 회전하는 경향을 보이는 것으로 관찰하였다. 낙석 운동형태와 에너지 분석을 위한 수학적 모델에서는 미끄러짐을 고려하지 않음으로서 복잡한 운동을 단순화하여 표현한다.

2.4 낙석 운동에너지 분석

낙석의 발생은 암편이 절개면 상부에서 절개면을 따라 운동하는 것으로 낙석의 위치에너지가 운동에너지로 바뀌게 되며, 따라서 이에 대한 피해를 감소시키기 위한 낙석방지울타리의 설계는 낙석의 운동형태와 에너지에 대한 분석이 이루어져야 한다. 낙석의 운동형태 및 에너지 분석은 낙석의 경로를 상세하게 추적하여 구하지만, 일반적으로 수학적인 모델들이 많이 사용하고 있다. 특히, 컴퓨터의 발달로 이러한 수학적인 모델들은 이용 가능성과 정확도가 증가하고 있다. 이들 모사(simulation) 프로그램 중 독일의 Dr. Spang에 의해 개발된 ROCKFALL(Spang and Sonser, 1995)과 미국 Colorado Highway Department에 의해 개발된 CRSP(Colorado Rockfall Simulation Program)(Pfeiffer and Bowen, 1989)가 비교적 많이 사용되고 있다. 이러한 프로그램을 이용한 낙석 운동형태와 에너지 예측 방법은 절개면의 거칠기, 낙석의 형태 등 낙석 운동에너지에 영향을 줄 수 있는 많은 변수를 고려할 수 있는 장점이 있으며 따라서 현장에서 실제로 발생하는 낙석 운동에너지에 매우 가까운 수치를 얻을 수 있다. 그러나, 이들 방법은 상업용으로 개발된 프로그램으로 모사(simulation)을 위한 실내 작업에서 현장의 매개변수가 너무 많아 낙석 운동에너지를 산정하는데 많은 시간이 소요된다는 단점이 있다.

따라서, 실험에 의해 뒷받침된 낙석 속도 추정식으로부터 운동에너지를 예측하는 간단한 계산방식이 제안되었다(일본도로협회, 2000).

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

이때, μ 는 등가마찰계수, β 는 회전에너지 계수, θ

는 절개면 경사도를 의미하며 m, g, h 는 각각 낙석의 중량, 중력가속도, 낙석의 낙하 높이를 의미한다.

이 방식은 절개면의 경사도, 낙석의 중량, 낙하높이, 그리고 절개면과 낙석의 특성을 고려한 등가마찰계수 등의 변수를 고려하고 간단한 계산을 통해 낙석 운동에너지를 추정할 수 있다는 장점이 있으나 낙하 암블록의 속도를 운동형태와 상관없이 평균적으로 감소하는 것으로 고려함으로써 복잡한 운동형태를 지나치게 단순화시켜 낙석현상을 정확히 표현한다고 보기 어려운 단점이 있다.

3. 국내 낙석방지울타리설치의 문제점

낙석방지울타리는 지주, 와이어로프 및 철망이 일체로 발생하는 낙석 운동에너지를 흡수하는 시설물이다. 국내에서 일반적으로 사용하는 울타리는 2.5m 높이의 H형강을 지주로 하여 매 2m간격으로 설치하고, 지름 18mm의 와이어로프를 울타리 지주의 직선부에 30cm 간격으로 설치한다. 또한 망눈치수 50×50mm이상인 PVC 코팅 철망을 부착하는 형식이다(그림 1).

낙석방지울타리는 소규모 낙석에 효과적인 대책방안으로 전체 낙석방지시설 시공의 70%를 차지할 정도로 국내에서 폭 넓게 사용되고 있다. 그러나, 낙석방지울타리의 설치는 절개면의 특성이나 예상 낙석의 규모와 형상, 낙하높이 등과 같은 현장여건에 대한 고려없이 동일한 형식의 울타리가 시공되고 있으며 구조물의 강도에 대한 기준이 전혀 없어 구조물의 효용성과 기능에 관한 여러 문제점들이 제기되어 왔다. 특히, 현재 국내에서 사용중인 낙석방지울타리가 어느 정도 규모의 낙석까

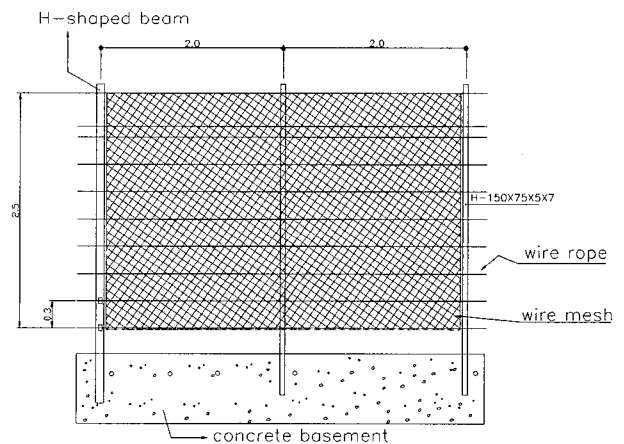


그림 1. 국내에서 보편적으로 사용되는 낙석방지울타리 형식

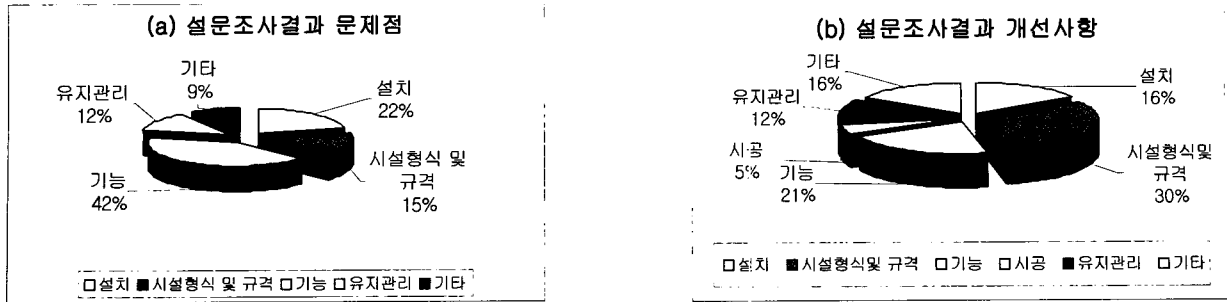


그림 2. 낙석방지시설의 문제점과 개선사항

지 막아내야 하는 가에 대한 에너지 기준과 방지울타리의 성능에 대한 현장실험 자료가 전무한 실정이다. 즉, 국내에서 시공중인 낙석방지울타리는 구조강도기준의 미비와 현장실험자료의 부족으로 인해 낙석규모에 대한 울타리의 성능효과 여부를 판단할 수 있는 근거가 없는 실정이다. 또한, 낙석방지울타리의 설계 및 설치에 대한 명확한 기준이 미흡하여 울타리의 기능이 제대로 발휘되기 힘들며 울타리의 뒷부분이 뒷채움으로 시공되어 낙석이 낙하할 경우 낙석 운동에너지를 흡수할 수 있는 여유공간이 제대로 확보되지 않으며 울타리가 직접 낙석의 충격을 받는 문제점을 가지고 있다.

선진국의 경우는 현장실험을 통해 낙석방지울타리의 강도 특성 규명과 함께 현장여건에 따라 흡수가능에너지를 고려한 낙석방지울타리가 설치될 수 있도록 하여 낙석에 대한 효과적인 대응이 이루어지고 있다.

이러한 국내 낙석방지울타리의 문제점은 한국건설기술연구원(1999년)에서 도로이용자 및 전문가를 대상으로 실시한 설문조사에서 제기된 문제점과 개선사항에서도 지적되고 있다(그림 2). 낙석방지울타리의 문제점은 주로 기능상의 문제점, 특히 낙석방지울타리의 강도가 부족하다는 점이 주로 지적되었다. 이는 국내 낙석방지울타리의 구조강도나 흡수가능에너지에 대한 지침이 명확하지 않으며 사용중인 구조물의 강도를 평가할 수 있는 방법이 전혀 없어 예상되는 낙석의 규모와 에너지에 대한 적절한 대응없이 일률적인 형식으로 설치되는 것에 기인하는 것으로 사료된다. 그 결과, 낙석이 발생할 경우 낙석방지울타리가 파손되어 암편들이 도로로 유입되는 사고가 빈번히 발생하고 있는 실정이다. 그밖에 현장여건에 맞는 구조물형식과 규격이 필요하다는 의견이 개선사항에서 지적되었으며 이 역시 현재 사용되고 있는 낙석방지울타리가 현장여건에 맞는 다양한 형식이 아닌 획일적인 모델이 사용되고 있으므로 비롯

된 것으로 보인다.

4. 현장실험

국내 낙석방지울타리의 설계기준을 정립하기 위하여 절개면의 경사도, 높이, 암반강도, 풍화도 등을 고려한 절개면을 대상으로 현장실물 실험을 통한 낙석의 궤적, 운동에너지, 마찰계수 등을 도출하고자 하였다.

4.1 실험현장

실험현장은 진주~통영간 고속도로 공사현장으로 높이가 약 20m, 연장 30~40m 규모인 암반절개면이 도로양쪽으로 위치하고 있다. 각 절개면은 경사도 1:0.5(65도)로 절취되어 있으며, 퇴적암인 사암과 세일로 구성되어 있다. 이러한 절개면의 기하학적 특성은 1998년부터 2000년까지 한국건설기술연구원에서 조사한 전국 국도변에 분포한 약 1,000개소 절개면의 경사도와 높이의 평균값에 해당하는 것으로 대표 절개면을 반영한다고 볼 수 있다. 각 실험대상 절개면에 대하여 낙석운동경로와 에너지 산정을 위한 모사(simulation)와 결과분석을 위해 절개면의 경사, 상세 단면, 구성암석, 절개면 거칠기 등을 정밀하게 조사하였다. 또한, 절개면 암반의 강도 측정과 낙석이 절개면과 충돌하여 도약할 경우의 반발계수 추정을 위하여 현장 암반의 슈미트 햄머 반발 수치를 측정하였다.

4.2 실험 대상 구조물 특성

본 실험을 위하여 현장의 3개 절개면에 대하여 각각 다른 형식의 낙석방지울타리를 설치하였다(그림 3). 낙석방지울타리의 설치 위치와 이격거리 등을 결정하기 위해



절개면 A



절개면 B



절개면 C

그림 3. 실험 대상 절개면 전경

현장조사자료를 기초로 절개면 단면도와 ROCKFALL 프로그램을 이용하여 낙석궤적, 낙석 운동에너지, 낙석 도약 높이 등에 대한 실내 모사를 수행하였으며 모사 결과를 바탕으로 낙석방지울타리의 특성에 따라 설치 위치 등을 결정하였다. 현장의 3개 절개면에 설치된 낙석방지울타리의 특성은 표 1과 같다.

표 1. 현장에 설치된 낙석방지울타리의 특성

구 분	절개면 A	절개면 B	절개면 C	
절개면 특성	암상	퇴적암	퇴적암	
	높이	21m	25m	19m
	경사	65°	65°	65°
특징	<ul style="list-style-type: none"> • 옹벽 위에 울타리 설치 • 배면 뒷채움 • U형 볼트 사용 	<ul style="list-style-type: none"> • 옹벽 위에 울타리 설치 • 뒤채움 없음 • 이격거리 1구간: 1m 2,3구간: 2m 	<ul style="list-style-type: none"> • 독립기초 사용 • 배면 뒷 채움 • 단부 없음 • 60m 연장 설치 	
시설연장	10m	각 10m	60m	
콘크리트 볼 규모	0.7톤, 1.3톤, 2.3톤, 4.3톤	0.7톤, 1.3톤, 2.3톤	0.7톤, 1.3톤, 2.3톤	

4.3 콘크리트 낙석 제작 및 낙석 궤적 자료 수집

국내에서 발생하는 다양한 크기의 낙석규모를 반영하기 위하여 0.7톤, 1.3톤, 2.3톤, 그리고 4.3톤의 콘크리트 볼을 제작하였다. 콘크리트 볼을 높이 약 20m의 절개면으로부터 낙하시키고 이를 디지털 캠코더로 촬영하였다. 디지털 캠코더는 낙석의 궤적추적을 위해 절개면의 정면과 측면 그리고 절개면으로부터 45도의 각도 등 3곳에 설치하였다. 촬영된 자료는 낙석의 속도와 궤적을 추정하는 데 사용되었다. 다양한 크기의 콘크리트 볼을 이용하여 여러 차례 반복 실험함으로써 낙석방지울타리에 가해지는 에너지를 다양하게 조절하였으며 낙석방지울타리의 기능 수행 여부로부터 낙석방지울타리의 구조강도를 추정하였다. 각 실험 후 낙석방지울타리의 파손정도 등을 자세히 기록하고 사진을 촬영하여 실험 결과 분석에 사용하였으며 계산된 낙석의 속도와 운동에너지로부터 낙석방지울타리의 흡수가능에너지를 분석하였다.

4.4 반발계수(coefficient of restitution)의 추정

반발계수(coefficient of restitution)와 회전마찰계수(rolling friction coefficient)는 낙석의 운동궤적과 운동에너지에 영향을 미치는 중요한 매개변수들이다. 반발계수는 절개면을 따라 낙하하는 낙석이 절개면 표면과 충돌하면서 발생하는 에너지의 손실을 고려하는 인자로 낙석운동 모사나 낙석 운동에너지의 계산에 중요한 영향을 미치는 변수이다. 반면, 회전마찰계수는 낙하하는 낙석이 회전운동을 하며 절개면 표면과 마찰할 때 발생하는 에너지의 손실을 나타내는 매개변수이다.

본 연구에서 사용된 반발계수는 현장실험을 통해 확

득된 실험값으로부터 역해석을 이용하여 계산해냈으며 회전마찰계수는 이전의 연구와 문헌을 통해 현장절개면과 유사한 암질과 현장여건을 이용하여 추정하였다 (Azzoni et al., 1991).

5. 현장 실험 결과 및 분석

5.1 낙석 궤적 모사 및 에너지 분석

디지털 캠코더로 촬영한 낙석운동의 궤적은 컴퓨터 모사 프로그램을 이용하여 낙석방지울타리에 작용한 낙석 운동에너지의 계산에 사용되었다. 낙석 궤적의 모사를 위하여 먼저 현장에서 획득한 절개면의 높이, 경사와 특성을 이용하여 실험 대상 절개면을 구성하였다. 현장에서 촬영한 비디오 자료를 분석하여 최초 낙하높이, 낙하하는 콘크리트 볼이 절개면과 운동하는 위치 및 운동 궤적을 파악하고 ROCKFALL 프로그램을 이용하여 실제 현장에서의 낙하운동과 동일한 형태의 운동 궤적을 모사하였다. ROCKFALL 프로그램에서는 각 입력변수의 수치를 임의의 범위 내에서 변동할 수 있도록 허용하고 있으며 따라서 여러 차례의 반복 모사가 가능하도록 하고 있다. 따라서 본 연구에서는 50회의 반복 모사를 통해 일정 범위내의 운동에너지 분포를 획득하였으며 평균값을 사용하여 실험 결과 분석을 수행하였다(그림 4). 낙석궤적의 모사시 사용된 입력변수는 표 2와 같다. 이러한 모사 분석을 통해 현장실험 시 낙석방지울타

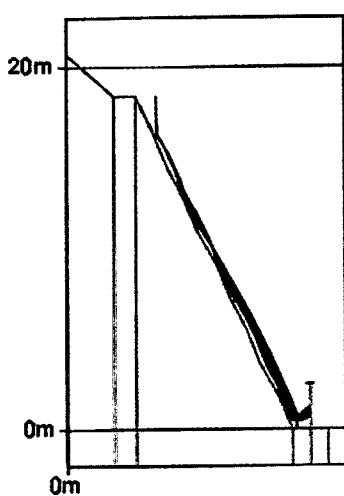
표 2. 모사 시 사용된 입력변수의 값

입력변수	사용된 값
반발계수	0.86
회전마찰계수	0.08
절개면 표면의 거칠기	0.5m/m
낙석의 초기 속도	0 m/sec

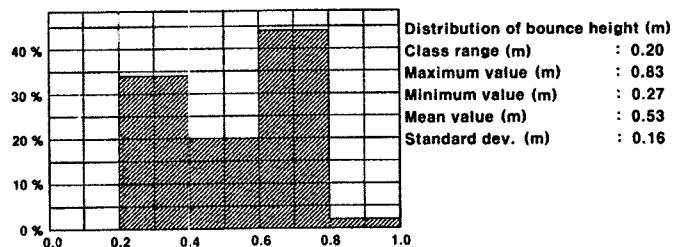
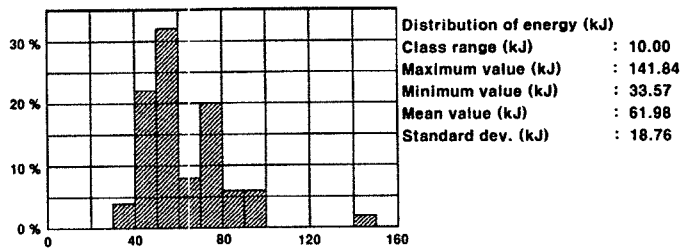
리에 작용했던 낙석 운동에너지와 도약 높이를 획득하였으며 이 분석결과와 현장에서 관찰된 낙석방지울타리의 파손여부를 정리한 결과는 표 3와 같다. 따라서, 각 실험에서 발생한 낙석 운동에너지와 울타리의 파손 여부로부터 낙석방지울타리의 흡수가능에너지를 추정하였다.

절개면 A에 설치된 낙석방지울타리는 독립기초를 사용하지 않고 L형옹벽 위에 설치된 형식으로 옹벽 뒤에 뒷채움을 한 상태와 유사한 상황을 만들기 위해 옹벽 배면에 약 1.0m 깊이의 도랑(ditch)을 설치하였다. 지주는 옹벽 위에 설치하였으며 U형 볼트를 사용하여 와이어 로프와 지주를 결합시켰다.

1차 실험과 2차 실험에서 낙하시킨 콘크리트 볼의 중량은 각각 0.7톤과 1.3톤으로 이때 발생한 낙석 운동에너지는 각각 32.4kJ과 33.7kJ이었다. 1차 실험에서는 낙석방지울타리의 파손 없이 낙석 운동에너지가 모두 방지울타리에 흡수되었으며, 1.3톤의 콘크리트 볼이 낙하되었던 2차 실험에서는 울타리의 일부 구조가 파손되었으나 콘크리트 볼이 울타리에서 정지되어 더 이상 도로 방향으로 이동하지 못했다. 따라서 이 때 발생되었던



(a) 낙석의 궤적



(b) 낙석 에너지

그림 4. 프로그램 해석에 의한 낙석의 궤적과 낙석 에너지

표 3. 현장 실험 결과

절개면	Test No.	콘크리트 볼 중량(t)	낙하 높이(m)	운동 형태	낙석에너지(kJ)	도약높이(m)	기능수행 여부
절개면 A	1	0.7	18	회전	32.4	0.6	낙석 방어
	2	1.3	16	자유낙하@16 회전@14	33.7	0.5	낙석 방어
	3	2.3	16	자유낙하@16 회전@14	64.2	0.65	시설 파손 낙석방어 못함
	4	2.3	17	자유낙하@17 회전@14	66.2	0.65	낙석 방어
절개면 B	1	1.3	15.3	자유낙하@15.3 충돌@10 자유낙하	32.2	0.6	낙석 방어
	2	1.3	16	회전	51.1	0.8	낙석 방어
	3	2.3	15.5	자유낙하@15.5 충돌@11.5 자유낙하	95.3	0.7	시설 파손 낙석방어 못함
	4	0.7	14	회전	25.0	0.4	낙석 방어
절개면 C	1	0.7	17.2	자유낙하@17.2 회전@9.4	22.1	0.5	낙석 방어
	2	1.3	17	회전	54.7	0.6	시설 파손 낙석방어 못함

주) 자유낙하@16은 16m 높이에서 자유낙하하였음을 의미한다.

33.7kJ까지의 낙석 운동에너지는 흡수 가능한 것으로 평가되었다. 연이어 실시된 3차 실험에서 일부 구조가 파손된 상태에서 2.3톤의 콘크리트 볼을 낙하시켜 64.2kJ의 에너지가 발생되었으며 울타리가 콘크리트 볼의 에너지를 흡수하지 못하고 파손되며 볼이 약 5m 가량 도로 방향으로 유입되었다. 그러나, 이 실험이 울타리의 일부 구조가 파손된 상태에서 실시되어 울타리의 최대 기능이 발휘되지 못했을 것이라는 판단아래 울타리를 재설치하고 동일한 규모의 콘크리트 볼을 낙하시켰다. 이 실험에서 발생한 낙석 운동에너지는 약 66kJ로 콘크리트 볼이 낙석울타리에 의해 정지되어 이 울타리 형식으로 약 66kJ까지의 운동에너지를 흡수할 수 있을 것으로 판단된다.

절개면 B에 설치된 낙석 방지 울타리는 독립기초를 사용하지 않고 L형 옹벽 위에 설치된 형식으로 옹벽 뒤쪽에 뒷채움을 하지 않아 콘크리트 볼이 낙하할 때 포켓(pocket) 역할을 하게 함으로써 낙석의 에너지를 감소시키는 효과와 함께 옹벽이 낙석 운동에너지를 흡수하도록 했다.

1·2차 실험에서 1.3톤의 콘크리트 볼로부터 발생한 낙석 운동에너지는 각각 32.2kJ과 51.1kJ 이었다. 동일한 중량의 콘크리트 볼이 낙하하면서 발생시킨 낙석 운동에너지에 약 20kJ의 차이가 발생한 것은 콘크리트 볼이 각각 다른 운동형태에 의해 낙하했기 때문으로 보인다.

다. 즉, 1차 실험에서는 자유낙하하던 콘크리트 볼이 한 차례 절개면과 충돌한 후 다시 자유 낙하하였으나 2차 실험에서는 16m 높이로부터 회전하면서 낙하하여 상대적으로 회전운동에 의해 발생한 에너지가 컸기 때문에 발생한 차이로 보인다. 두 실험에서 콘크리트 볼들은 낙석 방지 울타리의 기초 옹벽부와 충돌하였으며, 낙석 운동에너지는 콘크리트 옹벽부에 의해 흡수되어 콘크리트 볼이 도로 방향으로 이동되지 않고 정지되었다.

그러나 51.1kJ이 발생한 2차 실험의 경우 콘크리트 옹벽의 상단부가 일부 파손되었으며 다른 부분에도 균열이 발생하여 더 이상 기능을 발휘할 수 없을 것으로 보였다. 따라서, 3차 실험에서는 장소를 이동하여 동일한 형식으로 설치된 낙석방지울타리와 낙석방지옹벽에 대해 2.3톤의 콘크리트 볼을 15.5m의 높이에서 낙하시켰다. 이 때 발생한 낙석 운동에너지는 약 95.3kJ 이며 콘크리트 볼이 옹벽과 낙석 방지 울타리를 무너뜨리고 도로 방향으로 이동되었다. 이동 거리는 약 0.2m로 실제 도로 방향으로 유입된 거리는 매우 적어 대부분의 운동에너지는 흡수된 것으로 보인다.

절개면 C에 설치된 낙석방지울타리는 독립기초를 사용하고 지주를 콘크리트 기초 안에 묻어 방지울타리를 설치한 형식으로 울타리의 뒤쪽에 뒷채움이 시공된 상태와 유사한 상황을 설정했다. 각 지주에는 일반적인 형식의 와이어 로프 고정구를 사용하여 와이어 로프를 지

주에 고정하였으며 단부 지주를 설치하지 않았다. 또한 낙석 방지 울타리가 최대한의 기능을 발휘할 수 있도록 60m 연장을 설치했다.

1차 실험에서 0.7톤의 콘크리트 볼을 17m에서 낙하시켜 22kJ의 운동 에너지가 발생하였으며 울타리는 파손없이 낙석 운동에너지를 흡수했다. 2차 실험에서 1.3톤의 콘크리트 볼이 17m에서 낙하되어 약 54kJ의 에너지가 발생되었다. 콘크리트 볼은 울타리와 충돌 후 와이어나 로프를 뚫고 약 20m가량 도로 방향으로 이동되었다.

5.2 실험 결과

① 현장실험을 통해 파악된 국내 낙석방지울타리의 흡수가능 에너지는 약 50kJ 내외 인 것으로 보이며 이는 낙석대책편람(일본도로협회, 2000)에 제시된 낙석방지울타리의 흡수가능에너지 계산식을 이용하고 국내 낙석 방지 울타리의 형식과 제원을 적용하여 얻은 값과 동일하다. 50kJ은 약 0.4톤의 낙석이 높이 10m의 절개면에 낙하하여 낙석방지도랑(ditch)과의 충돌없이 직접 낙석방지울타리에 충돌할 때의 에너지이다.

그러나, 국내에서 평균적으로 발생하는 낙석을 효과적으로 막기 위해서는 90kJ 정도의 낙석방지울타리 흡수가능 에너지가 요구된다. 이는 지난 2년간 국내 국도 주변의 낙석 발생 지점 275개소 지점으로부터 관찰된 낙석의 평균 규모(0.4톤)와 절개면 경사도 (65도)와 평균높이 (25m)로부터 추정된 값으로부터 계산된 값이다 (한국건설기술연구원, 1998, 1999, 2000). 따라서, 국내에서 발생하는 낙석을 적절히 대처하기 위해서는 현재 국내에서 사용하고 있는 형식의 성능을 보완하거나 이

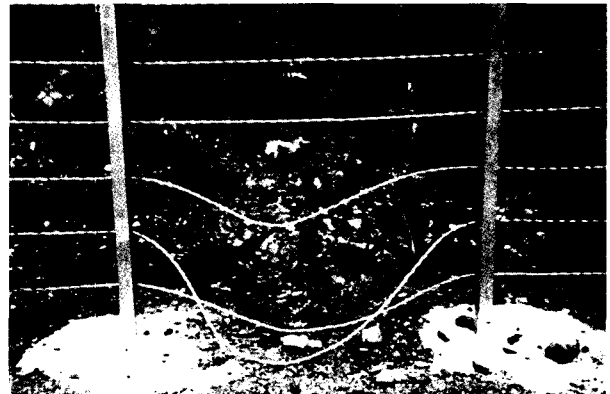
격거리를 조절하여 낙석방지울타리에 작용하는 낙석 운동에너지를 줄여야 한다. 참고로 미국의 경우 낙석 방지 울타리의 기준흡수가능에너지로 200kJ을 요구하고 있으며 또한 울타리의 흡수가능에너지는 현장 실험을 통해 입증되어야 한다.

② 절개면 A의 구조물에서 사용되었던 U형 볼트의 성능은 다른 구조물에 사용되었던 조립구보다 뛰어난 것으로 판단된다. 방지 울타리의 파손 상태를 비교해 보면 A 절개면의 경우, 낙석 에너지를 흡수하기 위해 지주와 와이어 로프가 동시에 기능을 발휘하였으며 따라서 와이어 로프의 파손과 함께 지주도 변형이 발생했다(그림 5(a)). 이것은 지주에 정착된 U형 볼트가 지주와 와이어 로프를 일체화시키는 효과를 했기 때문으로 판단되며 따라서 66kJ의 낙석 에너지까지도 막아낼 수 있었던 것으로 보인다. 반면에 다른 형식의 조립구는 이러한 기능을 하지 못하였으며 결과적으로 지주에는 아무런 변형이 발생하지 않고 와이어 로프만 이탈되어 콘크리트 볼이 방지 울타리를 뚫고 지나가는 현상이 발생했다(그림 5(b)).

③ 절개면 B의 실험결과와 같이 낙석방지울타리의 기초로 사용되는 L형 옹벽은 약 95kJ의 낙석 운동에너지를 막아내지 못하고 파손되었다. 이는 약 600kJ의 에너지까지 흡수가능하다고 제시된 외국의 옹벽구조물과 비교해 볼 때 매우 작은 수치로 낙석방지울타리의 기초로서 뒷채움없이 낙석을 막아내기에는 무리가 있을 것으로 생각된다. 특히, 낙석방지울타리의 기초에 사용되는 콘크리트 옹벽은 무근으로 시공되어 저판과 벽체가



(a) 절개면 A

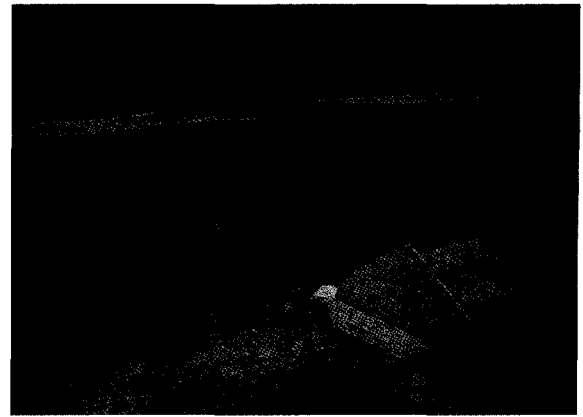


(b) 절개면 B

그림 5. 절개면 A와 절개면 B의 울타리 파손 상태



(a) 2.3톤 낙석 낙하 후



(b) 1.3톤 낙석 낙하 후

그림 6. 2.3톤과 1.3톤의 볼에 의해 파괴된 옹벽 양상

일체로 되지 못하고 충격에 의해 분리되는 파괴가 발생했다(그림 6). 따라서, 국내 실정과 시공성을 감안하여 낙석방지옹벽의 강도와 흡수가능에너지를 증가시킬 수 있는 설계기준을 제시하기 위하여 약 300kJ까지의 낙석 운동에너지를 흡수할 수 있는 낙석방지울타리의 기초 옹벽이 제시되었다(건설교통부, 2000).

④ 절개면 C의 실험 결과, 울타리의 파손은 와이어

로프와 철망이 낙석 운동에너지를 흡수하지 못하고 와이어 로프가 고정구로부터 이탈되어 발생하였으며, 다른 부분의 손상은 전혀 없는 것으로 보아 와이어 로프의 흡수가능에너지가 부족했던 것으로 보인다. 특히, 와이어 로프와 지주사이의 결속력이 부족했고 단부가 설치되지 않아 와이어 로프에 충분한 인장력은 작용하지 않았던 것으로 사료된다.

⑤ 이미 여러 논문과 보고서(Ritchie, 1963; Badger and Lowell, 1992)에서 언급된 바와 같이 이격거리와 낙석방지도랑(ditch)은 낙석방지울타리에 작용하는 낙석 운동에너지와 낙석도약 높이를 감소시키는 데 매우 중요한 역할을 한다. 모사 분석에 의하면 절개면 A에서 2.3톤의 콘크리트 볼이 18m 높이에서 낙하할 때 1m의 이격거리에 설치된 낙석방지울타리에 작용한 낙석 운동에너지가 64.2kJ이었으나 2m 이격거리에서는 42.3kJ로 줄어들었다. 도약높이 역시 0.65m에서 0.5m로 감소하였다. 이러한 결과를 바탕으로 현장에서 사용 가능한 설계 기준의 제시를 위하여 국내 평균낙석 중량인 0.4톤을 이용하고 절개면 경사도와 낙하 높이를 고려하여 이격거리에 대한 모사 분석을 실시하였다. 이러한 분석 결과를 이용하여 이격거리에 따른 낙석방지울타리의 기능 수행 여부를 판단할 수 있는 기준을 제시하였다(표 4).

표 4(a). 이격거리가 0m인 경우 낙석방지울타리의 기능수행가능 여부

절개면높이	절개면 경사도			
	1:1.0	1:0.7	1:0.5	1:0.3
10m	○	○	×	×
20m	○	×	×	×
30m	×	×	×	×

주) ○: 적용 가능, ×: 적용 불가

표 4(b). 이격거리가 1m인 경우 낙석방지울타리의 기능수행가능 여부

절개면높이	절개면 경사도			
	1:1.0	1:0.7	1:0.5	1:0.3
10m	○	○	○	○
20m	○	○	○	×
30m	×	×	×	×

표 4(c). 이격거리가 2m인 경우 낙석방지울타리의 기능수행가능 여부

절개면높이	절개면 경사도			
	1:1.0	1:0.7	1:0.5	1:0.3
10m	○	○	○	○
20m	○	○	○	×
30m	○	×	×	×

5.3 반발계수의 추정

3개의 절개면에서 반복적인 현장실험과 비디오 분석을 통해 낙하하는 콘크리트볼의 속도를 구하였으며 충돌전후의 속도차이를 비교함으로써 반발계수를 구하였

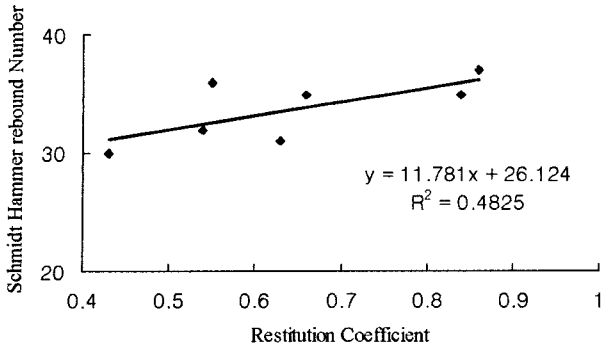


그림 7. 반발계수와 슈미트햄머 반발값과의 상관관계

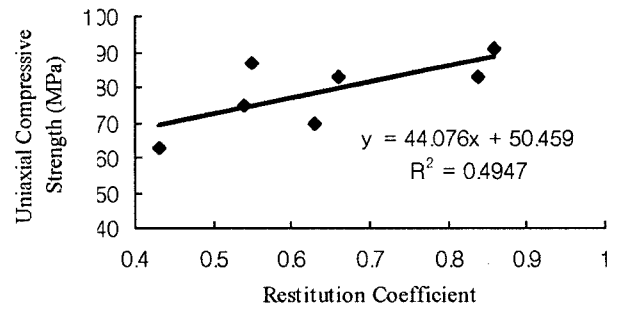


그림 8. 반발계수와 일축압축강도와의 상관관계

다. 본 현장실험으로부터 획득된 반발계수의 값은 0.48에서 0.86까지의 범위를 가지며, 이러한 값들은 Bozzolo and Pamini(1986)과 Azzoni and de Freitas(1995)에 의해 제시된 값들과 동일한 범위의 값을 보이며 대부분의 낙석분석프로그램에서 사용되는 수치와도 일치한다. 이렇게 획득된 반발계수와 암반의 강도와의 연관성을 파악하였으며 현장으로부터 시료를 채취하기 어렵고 실내 실험이 용이하지 않은 점을 고려하여 현장으로부터 슈미트햄머를 이용하여 각 절개면에 대해 슈미트햄머 반발 값(rebound number)을 측정하였으며(그림 7) 이로부터 암반의 일축압축강도를 추정하였다. 그림 8은 각 절개면으로부터 측정된 반발계수와 슈미트햄머 반발 값으로부터 획득한 일축압축강도의 상관관계를 나타낸 것이다. 그림 7, 8과 같이 반발계수는 암반의 일축압축강도와 비례하고 있으며 따라서 암반의 일축압축강도로부터 반발계수를 추정할 수 있을 것으로 보인다. 그러나 반발계수는 낙하하는 암편의 크기와 모양, 절개면 표면의 거칠기 등에 의해서도 좌우되며, 따라서 암반의 일축압축강도로부터 반발계수를 추정하기 위해서는 이러한 변수를 충분히 고려해야 한다. 또한, 이 상관관계는 현장절개면의 주 구성암석인 퇴적암으로부터 획득된 결과로 다른 암석으로 구성된 절개면에서 반발계수를 추정하기 위해서는 각각 구성암석에 따른 반발계수와 일축압축강도와의 상관관계에 대한 검토가 수행되어야 한다.

6. 결론

도로절개면의 낙석피해방지를 위하여 국내에서 범용적으로 적용되는 낙석방지울타리의 특성과 성능을 평가하고 향후 이를 설계기준으로 도출하기 위하여 현장

실험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 현장실험을 통해 획득한 낙석방지울타리의 흡수가능에너지는 약 50kJ이었으며, 이는 약 0.4톤의 낙석이 높이 10m의 절개면에 낙하하여 낙석방지도랑(ditch)과의 충돌없이 직접 낙석방지울타리에 충돌할 대의 에너지이다. 현장실험을 통해 획득된 결과는 낙석대책편람(일본도로협회, 2000)에 제시된 낙석방지울타리의 흡수가능에너지 계산식을 이용하고 국내 낙석 방지 울타리의 형식과 재원을 적용하여 얻은 값과 유사하다.
- (2) 국내에서 발생하는 낙석의 평균규모(0.4톤)와 절개면의 평균 높이(20m)에 의해 추정되는 낙석 운동에너지는 약 90kJ로 국내에서 사용되는 형식의 흡수가능에너지보다 크며 따라서 보다 큰 에너지를 흡수할 수 있는 낙석방지울타리의 개발 또는 절개면과 낙석방지울타리사이의 이격거리를 조절하여 설계하여야 한다. 즉, 절개면의 높이와 예상낙석의 규모를 고려하여 낙석방지울타리의 규격, 설치지침 등을 결정하여야 한다.
- (3) 낙석방지울타리의 설계 및 시공시 낙석방지도랑과 이격거리는 낙석의 에너지나 도약높이를 저하시키는 기능을 함으로서 매우 중요한 역할을 수행한다. 본 연구에서는 절개면의 경사도와 낙하높이를 고려하여 0.4톤의 낙석이 낙하하는 것으로 가정하여 모사 분석을 실시하였으며 이 결과를 이용하여 이격거리에 따른 낙석방지울타리의 기능수행여부를 판단할 수 있는 기준을 제시하였다.
- (4) 본 연구에서는 낙석의 운동 궤적과 운동에너지에 영향을 미치는 중요한 매개변수인 반발계수와 암반의

일축압축강도의 상관관계를 파악하였으며, 상관관계가 있는 것으로 판단하였다. 이러한 연구 결과는 각 암반 절개면에 대한 현장실험의 수행없이 암반의 일축강도를 통하여 반발계수를 선정하여 낙석 운동 에너지를 산정할 수 있다.

본 연구는 퇴적암을 대상으로 현장실험 및 분석을 수행하였으며 화성암과 변성암을 기반암으로 하는 절개면에 대하여서는 추가적인 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 과제의 수행을 위하여 재정적인 지원과 도움을 주신 건설교통부 도로관리과 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부(1998), 도로부대시설 표준도(배수시설, 안전시설편).
2. 건설교통부(2000), 도로안전시설 설치 및 관리지침(낙석방지시설, 도로반사경편).

3. 한국건설기술연구원(1998), 도로절개면 유지관리시스템 개발 및 운용 연구(I).
4. 한국건설기술연구원(1999), 도로절개면 유지관리시스템 개발 및 운용 연구(II).
5. 한국건설기술연구원(2000), 도로절개면 유지관리시스템 개발 및 운용 연구(III).
6. 日本道路協會(2000), 落石對策便覽.
7. Azzoni, A. and de Freitas, M.H. (1995), "Experimentally gained parameters, desicive for rockfall analysis", *Rock Mech. Rock Eng.* 28(2): 111~124.
8. Azzoni, A., Drigo, E., Giani, G. P., and Zanintti, A. (1991), "In field observation of rockfall analysis parameters", *Proc. 6th International Symp. on Landslides*, 307~314.
9. Badger, T. C and Lowell, S. M (1992), "Rockfall controll in Washington State", *Transportation Research record*, No.1343.
10. Bozzolo, D. and Pamini, R. (1986), "Simulation of rockfalls down a valley side" *Acta Mech.* (63):113~130.
11. Giani, G. P. (1992), *Rock Slope Stability Analysis*, A.A. Balkema
12. Krynine, D. P. and Judd, W. R. (1957), *Principles of Engineering Geology and Geotechnics*, McGraw-Hill, New York.
13. Pfeiffer, T. J. and Bowen, T. D. (1989), "Computer simulation of rockfalls", *Bull. Ass. Eng. Gel.* 26, pp.135~146.
14. Ritchie, A. (1963), "The evaluation of rockfall and its control", *Highway Research Record* 17, pp.13~28.
15. Spang, R. M. and Sonser, T. H. (1995), "Optimized rockfall protection by ROCKFALL", *Proc. 8th Int. Congress on Rock Mechanics*, Tokyo.

(접수일자 2001. 8. 8, 심사완료일 2001. 12. 11)