

현장실험을 통한 낙석방지울타리 설계기준 제시 연구

Study for the Proposal of Design Specifications for Rockfall Protection Fences by Full Scale Tests

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

¹⁾ 한국건설기술연구원 선임연구원, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Division, KICT

²⁾ 한국건설기술연구원 연구원, Researcher, Geotechnical Engineering Division, KICT

SYNOPSIS: Rockfall protection fence is one of the most common rockfall protection measures in Korea. The fences have been constructed in almost every hazardous cutslopes along national highway in Korea. However, the capability and performance of the fence as rockfall protection system are seldom known since no field test which can provide information on the response and the behavior of fence was carried out. This is the first full scaled rockfall test in Korea. The objectives of the test are to provide the information on the behavior and the capability of fence and to propose the design specifications for the fence. In this test, four different systems have been selected and tested. For each test, the rockfall impact energy was analyzed and the response and behavior of the system were investigated.

Key Words: 낙석현장실험, 낙석방지울타리, 흡수가능에너지, 낙석시뮬레이션

1. 서론

낙석방지사설은 낙석으로 인한 재해로부터 도로 이용자와 도로 시설을 지키기 위한 목적으로 설치되는 시설이다. 낙석은 복합적인 요소가 연관되어 발생하는 자연 현상으로 현재로서는 구체적으로 예측하기 힘들고 그 발생기구를 정확히 규명하기 힘든 상황이다. 따라서 얼마나 많은 양의 낙석이 언제, 어디에서 발생할 것인가를 예측하기란 매우 어려운 일이며 낙석에 의한 피해를 최소화하기 위해 설치되는 낙석방지사설의 선정도 다양한 현장조건을 고려해야하는 어려움이 있다.

낙석방지사설은 크게 낙석 예방공과 낙석 보호공으로 구분된다. 낙석 예방공은 낙석 발생이 예측되는 절개면 내의 뜬돌이나 전석 등을 제거하거나 특정시설을 이용하여 절개면에 고정시키는 시설을 의미하며 낙석 보호공은 절개면으로부터 낙하하는 암편이 도로로 유입되지 못하도록 낙석의 이동을 막는 시설을 의미한다. 낙석 예방공은 주로 낙석예상 암괴를 대상으로 시행하는 대책이며 그 종류로는 절취, 면정리, 슛크리트, 록 앵커, 록 볼트, 배수공 등이 있다. 이에 반해 낙석 보호공은 이미 발생한 낙석이 도로로 유입되는 것을 방지하는 방법으로 낙석방지망, 낙석방지울타리, 낙석방지옹벽, 피암터널 등이 있다.

현재 국내에서 주로 사용되는 낙석방지사설은 낙석방지망과 낙석방지울타리로 전체 시행 공법 중 70% 이상을 차지하고 있으며(한국건설기술연구원, 1999) 본 연구의 대상인 낙석방지울타리의 경우, 소규모의 낙석에 효과적인 대책으로 국내에서 보편적으로 사용되고 있다. 그러나, 이러한 낙석방지울타리는 절개면의 특성에 상관없이 표준도에 의한 단일 모델이 시공되고 있어 시설의 효용성에 자주 의문이 제

기되어 왔다. 따라서 본 연구에서는 현장실험을 통해 국내에서 사용중인 낙석방지울타리의 기능을 검토해 보고 설계기준을 제시하는 데 목적을 두고 있다.

2. 기본적인 개념

2.1 낙석의 정의

낙석은 암반내의 불연속면이 이완되어 암편이 떨어져 나오거나 풍화가 심한 암반으로부터 암편이 드러나 절개면으로부터 낙하되는 현상을 의미한다. 이에 반해 사면붕괴는 일반적으로 대량의 토사 및 암석이 절개면으로부터 대규모로 파괴되어 무너져 내리는 현상을 의미한다. 암반에서 주로 발생하는 붕괴는 낙석과 유사하여 확실히 구분되어지지 않으나 낙석은 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. Krynine and Judd(1957)에 의하면 낙석은 절개면으로부터 떨어져 나온 여러 크기의 암편들이 자유 낙하하는 현상으로 미끄러짐이 발생하는 면이 없다는 점에서 암반붕괴와 구분된다고 정의하였다.

2.2 낙석의 원인

낙석의 발생은 주로 절개면의 지형과 지질에 의해 좌우되어진다. 낙석이 발생되기 쉬운 지질 조건으로는 암반 자체의 강도는 강하지만 암반 내에 불연속면이 잘 발달되어 동결융해나 강우와 같은 요인으로 불연속면의 이완이 발생하여 암탈락이 발생하는 경우와 talus, 화산성 파쇄물, 풍화 화강암류 등과 같은 지질조건으로, 이러한 조건 하에서는 기질(암, 자갈 등의 주위를 충전하는 토사 등 상대적으로 연약한 물질)이 풍화, 침식에 대한 저항력이 약해 기질 사이에 있던 암이 탈락하는 현상이 발생한다. 지형적으로는 경사가 급한 절개면과 오버행(overhang)과 같은 지형의 형상에 좌우되어 진다.

2.3 낙석의 발생 형태

낙석은 크게 탈락형 낙석과 뜬돌형 낙석의 두 종류로 구분되어지며 이는 지질조건과 밀접한 연관성을 가지고 있다. 탈락형 낙석은 기질부분이 지표수나 지하수에 의해 침식되어 기질에 포함되어 있던 암석이 균형을 잃어 떨어지게 되는 경우의 낙석으로 주로 talus 퇴적물, 역암층, 파쇄대, 화산 쇄설물, 풍화 화강암류에서 발생한다. 한편, 뜬돌형 낙석은 불연속면이 잘 발달된 단단한 암반절개면에서 불연속면의 작용으로 발생하는 낙석형태로 불연속면이 발달한 암반 내에 지표수가 침투하거나 지하수의 작용으로 인해 불연속면의 결합력이 저하되어 암블럭이 탈락하며 발생한다.

앞서 설명된 바와 같이 낙석이 발생하는 구조와 원인은 각각 다르며 구조와 원인에 따른 구분은 낙석의 위험성을 판단하거나 대책을 계획하기 위한 기초가 된다.

2.4 낙석의 운동 형태

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

- ① 자유낙하(free falling)

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

② 도약(bounce)

낙하하는 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 암편은 절개면과 접촉하면서 회전하거나 절개면 상에서 미끄러지기 시작한다. 그러나 이 두 운동은 쉽게 구분되어지지 않으며 따라서 대개 구분없이 함께 표현되어 진다. Giani(1992)는 절개면의 굴곡보다 암블럭의 크기가 클 경우 암은 약간의 도약을 수반하며 미끄러지는 경향을 보이고 굴곡의 크기가 더 클 경우 절개면과 암체의 접촉면에서 약간의 미끄러짐과 함께 회전하는 경향을 보이는 것으로 관찰하였다. 대개 낙석 분석을 위한 수학적 모델에서는 미끄러짐을 고려하지 않음으로서 복잡한 운동을 단순화하여 표현한다.

낙석의 운동형태는 낙석의 형태나 규모, 암질과 함께 절개면의 지형, 지질, 식생 등에 따라 좌우되며 위에서 설명된 운동형태 중 한 가지 또는 두 가지 이상의 조합으로 발생한다. 따라서 현장상황에 대한 충분한 조사가 필수적으로 이루어져야 하며 이를 기초로 운동 형태를 파악하고 적절한 대책을 세우는 것이 바람직하다.

2.5 낙석의 도약 높이

낙석은 절개면의 평단면 내에서 관찰할 때 절개면의 최대 경사도를 따라 등고선의 직각방향으로 낙하하며 절개면의 횡단면 내에서는 그림 1과 같이 운동한다. 이 때 낙석의 도약 높이 h 는 절개면의 직각방향으로부터 추정되어 진다. 따라서 낙석방지시설의 설계시, 낙석의 운동에너지가 시설에 작용하는 위치로 h 값을 사용할 수 있다. 이전의 실험 및 연구 결과에 따르면 낙석의 도약 높이는 일반적으로 낙석의 형상에 관계없이 2m 이하이지만 절개면의 돌기가 있을 경우 이것을 넘는 경우가 발생할 수 있는 것으로 보고되고 있다. 특히, 국내 절개면의 경우, 일반적으로 발파에 의해 절개면의 시공이 이루어지고 있어 절개면의 표면부가 매우 굴곡이 심하며 따라서 낙석의 도약 높이가 4 - 5m 까지 도달할 가능성이 있다. 따라서, 낙석방지시설의 설계 시 절개면에 대한 충분한 조사가 선행되어야 하며 특히 낙석의 도약 높이를 추정하기 위해서는 절개면 표면의 거칠기에 대한 조사가 필수적으로 이루어져야 한다.

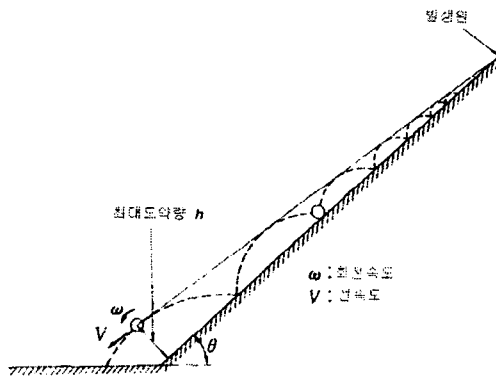


그림 1 낙석 궤적 모식도

2.6 낙석의 운동에너지

낙석현상을 이해하고 낙석방지시설을 에너지 개념에 의해 설계하기 위해서는 낙석의 운동에너지에 대한 계산이 선행되어야 한다. 낙석의 운동에너지는 낙석의 경로를 상세하게 추적하여 구하는 것도 가능하지만, 일반적으로 수학적 모델들이 많이 제시되어 사용되고 있다. 특히, 컴퓨터의 발달로 이러한 수학적 모델들은 그 이용 가능성과 정확도가 증가하고 있다. 현재 사용되고 있는 수학적 모델들은 크게 두 가지의 종류로 나누어 질 수 있는데 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 모양을 갖는 것으로 가정하는 모델(Spang and Rautenstrauch, 1988)이 있다. 이들 중 암체의 질량과 부피 및 모양을 고려하는 모델이 현장에서 관찰되는 조건을 정확하게 표현할 수 있으며 따라서 더욱 정확한 결과를 기대할 수 있어 폭 넓게 쓰여지고 있다. 이들 시뮬레이션 프로그램 중 독일의 Dr. Spang에 의해 개발된 ROCKFALL(Spang and Sonser, 1995)과 미국 Colorado Highway Department에 의해 개발된 CRSP(Pfeiffer and Bowen, 1989)가 가장 폭 넓게 사용되고 있다. 이러한 프로그램을 사용하여 낙석에너지를 추정하는 방법은 절개면의 거칠기, 낙석의 형태 등 낙석에너지에 영향을 줄 수 있는 많은 변수를 고려할 수 있는 장점이 있으며 따라서 현장에서 실제로 발생하는 낙석에너지에 매우 가까운 수치를 얻을 수 있다. 그러나, 이 방법은 수학적 모델을 기초로 프로그램을 개발해야하거나 필요에 따라 개발된 프로그램을 구매할 경우 단가가 매우 비싸다는 점과 시뮬레이션을 위한 실내작업이 필수적으로 요구되고 현장으로부터 획득하여 고려해야 할 변수가 너무 많아 낙석에너지를 얻기까지는 많은 시간이 걸린다는 단점이 있다. 따라서, 실험에 의해 뒷받침된 낙석 속도 추정식으로부터 운동에너지를 추정하는 간단한 계산방식이 제안되어 사용하기도 한다(일본도로협회, 2000). 이 방식은 절개면의 경사도, 낙석의 중량, 낙하높이, 그리고 절개면과 낙석의 특성을 고려한 마찰계수 등의 변수를 고려하고 간단한 계산을 통해 낙석에너지를 추정할 수 있다는 장점이 있으나 낙하하는 암석의 속도를 운동형태와 상관없이 평균적으로 감소하는 것으로 고려함으로써 복잡한 운동형태를 지나치게 단순화시켜 낙석현상을 정확히 표현한다고 보기 어려운 단점이 있다.

3. 국내 낙석방지시설의 문제점

낙석방지울타리는 소규모 낙석에 효과적인 대책으로 전체 시공의 20%를 차지할 정도로 국내에서는 폭 넓게 사용되고 있으나 절개면의 특성이나 낙석의 규모와 형상, 낙하높이 등과 같은 현장여건에 대한 고려없이 동일한 형식의 울타리가 시공되고 있으며 시설의 구조강도에 대한 자료도 전혀 없어 시설의 효용성과 기능에 관한 여러 문제점들이 제기되어 왔다. 특히, 현재 국내에서 사용중인 낙석방지울타리가 어느 정도 규모의 낙석까지 막아내야 하는 가하는 에너지 기준에 대한 고려와 방지울타리의 성능을 평가할 수 있는 현장실험이 거의 없는 실정이다. 즉, 국내에서 시공중인 낙석방지울타리는 구조강도기준의 미비와 현장실험자료의 부족으로 인해 일정 낙석규모에 대해 울타리의 효과 여부를 판단할 수 있는 근거가 없는 실정이다. 선진국의 경우, 현장실험을 통해 모든 낙석방지시설의 강도에 대한 자료를 수집하여 현장여건에 따라 다르게 요구되는 구조강도와 흡수가능에너지에 적합한 낙석방지시설이 설치될 수 있도록 하고 있어 낙석에 대한 효과적인 대응이 이루어지고 있다.

이러한 국내 낙석방지시설의 문제점은 1999년 한국건설기술연구원에서 도로이용자 및 전문가를 대상으로 실시한 설문조사에서 제기된 문제점과 개선사항에서도 지적되고 있다(그림 2). 그림 2에서와 같이 낙석방지시설의 문제점에 대해서는 주로 기능상의 문제점, 특히 낙석방지시설의 강도가 부족하다는 점이 주로 지적되었다. 이는 앞서 설명된 바와 같이 국내낙석방지시설의 구조강도나 흡수가능에너지에 대한 지침이 명확하지 않으며 사용중인 시설의 강도를 평가할 수 있는 방법이 전혀 존재하지 않아 예상

되는 낙석의 규모와 에너지에 대한 적절한 대응없이 일률적인 형식이 설치되기 때문인 것으로 보인다. 그 결과 낙석이 발생할 경우 낙석방지울타리는 필요한 기능을 수행하지 못하고 파손되어 암블럭들이 도로로 유입되는 사고가 빈번히 발생하고 있다. 그밖에 현장여건에 맞는 시설형식과 규격이 필요하다는 의견이 개선사항에서 지적되었으며 이 역시 현재 사용되고 있는 낙석방지시설이 현장여건에 맞는 다양한 형식이 아닌 획일적인 모델이 사용되고 있음으로 비롯된 것으로 보인다.

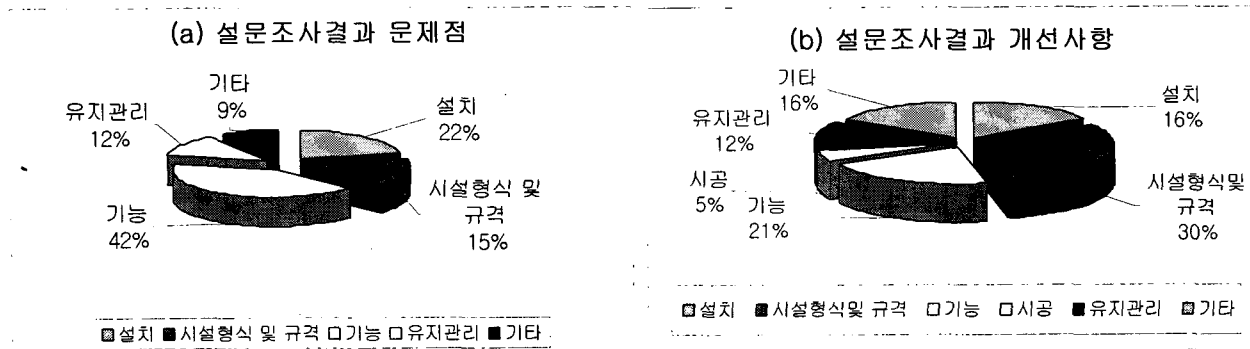


그림 2 낙석방지시설의 문제점과 개선사항

4. 현장실험

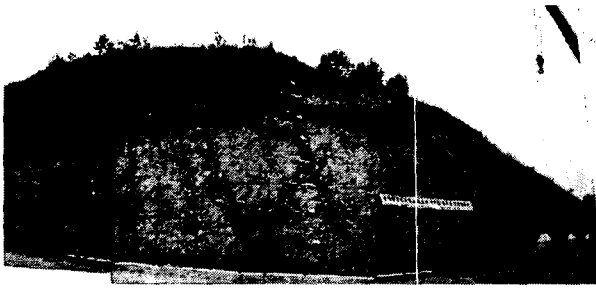
본 연구에서 수행된 현장실험은 현장에서 제작된 콘크리트 불을 절개면 상부로부터 절개면 하부에 설치된 낙석방지울타리로 낙하시켜 낙석방지울타리의 기능수행여부와 파손여부를 검토함으로써 국내에서 사용되고 있는 낙석방지울타리의 설치 적정성 여부와 문제점을 파악하기 위한 목적으로 실시되었다. 이를 위하여 각각 다른 중량의 콘크리트 불을 제작하여 약 20m 높이의 절개면으로부터 낙하시키고 낙석방지시설의 파손여부와 낙석의 도로유입가능성을 평가하였다.

4.1 실험현장

실험현장은 진주-통영간 고속도로공사현장내의 절개면으로 높이 약 20m, 연장 30 - 40m 규모인 암반 절개면이 도로양쪽으로 위치하고 있다. 각 절개면은 경사도 1:0.5(65도)로 절취되어 있으며 퇴적암인 사암과 셰일로 구성되어 있다. 각 실험대상 절개면에 대하여 현장실험 후의 결과 분석과 시뮬레이션을 위해 절개면의 경사, 상세 단면, 구성암석, 절개면 거칠기 등을 정밀하게 조사하였으며 이러한 조사 결과를 바탕으로 절개면의 단면과 각 단면의 특성을 구성하였다. 또한, 구성 암석의 강도 추정과 낙석이 절개면과 충돌하여 도약할 경우의 반발계수 추정을 위해 현장에서 슈미트 햄머 반발 수치를 측정하였으며 이로부터 추정된 암의 일축압축강도는 약 90MPa 정도였다.

4.2 실험 대상 구조물의 특성

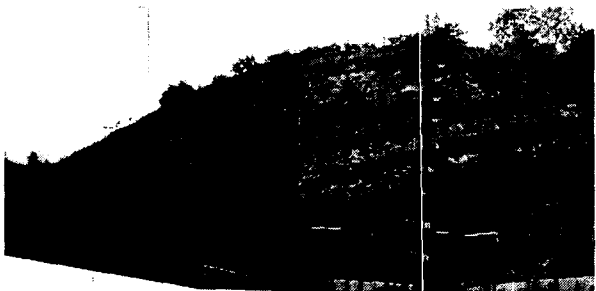
본 실험을 위하여 현장의 4개 절개면에 대하여 각각 다른 형식의 시설을 설치하였다(그림 3). 낙석방지울타리의 설치 위치와 이격거리 등을 결정하기 위해 현장조사자료를 기초로 구성된 절개면 단면도와 ROCKFALL 프로그램을 이용하여 낙석궤적, 낙석에너지와 낙석도약높이에 대한 모의 실험을 수행하였으며 모의 실험의 결과를 바탕으로 낙석방지울타리의 특성에 따라 설치 위치 등을 결정하였다. 현장의 4개 절개면에 설치된 낙석방지울타리의 특성은 표 1과 같다.



절개면 A



절개면 B



절개면 C



절개면 D

그림 3 실험 대상 절개면 전경

4.3 콘크리트 낙석의 제작과 자료 수집

다양한 낙석운동에너지에 대한 낙석방지울타리의 반응과 흡수가능에너지를 파악하기 위해 현장에 대한 사전 시뮬레이션을 실시하였고 그 결과를 기초로 0.7톤, 1.3톤, 2.3톤, 그리고 4.3톤의 콘크리트 볼을

표 1 현장에 설치된 낙석방지울타리의 특성

구분		Site A	Site B	Site C	Site D
절개면 특성	암상	퇴적암	퇴적암	퇴적암	퇴적암
	높이	21m	35m	25m	19m
	경사	65°	62°	65°	65°
특징	<ul style="list-style-type: none"> • 지주 정착구 사용 • 옹벽 위에 울타리 설치 • 배면 뒷채움 • U형 볼트 사용 	<ul style="list-style-type: none"> • 유연성 원리를 이용한 울타리 • 절개면상 또는 도로변에 설치 가능 • 지표에서 4m 높이의 절개면에 부착 	<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 뒷채움 • 단부 없음 • 60m 연장 설치 	
시설연장	10m	30m	각 10m	60m	
콘크리트 볼 규모	0.7톤, 1.3톤, 2.3톤	1.3톤, 2.3톤, 4.3톤	0.7톤, 1.3톤, 2.3톤	0.7톤, 1.3톤, 2.3톤	

제작하였다. 이러한 과정을 거쳐 제작된 콘크리트 볼을 높이 약 20m의 절개면으로부터 낙하시키고 이를 디지털 캠코더로 촬영하였다. 낙석의 궤적을 촬영하기 위해 사용된 디지털 캠코더는 다양한 각도에서의 궤적추적을 위해 절개면의 정면과 측면 그리고 절개면으로부터 45도의 각도를 갖는 위치에서 촬영하였으며 촬영된 자료는 낙석의 속도와 궤적을 추정하는 데 사용되었다. 각각 다른 크기의 콘크리트 볼을 이용하여 여러 차례 반복 실험함으로써 낙석방지시설에 가해지는 에너지를 다양하게 조절하였으며 낙석방지울타리의 기능 수행 여부로부터 낙석방지울타리의 구조강도를 추정하였다. 각 실험 후 낙석방지시설의 파손정도 등을 자세히 기록하고 사진을 촬영하여 실험 결과의 분석에 사용하였으며 계산된 낙석의 속도와 운동에너지로부터 낙석방지시설의 흡수가능에너지를 파악하였다.

4.4 자료의 분석

디지털 캠코더로 촬영한 낙석운동의 궤적은 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 낙석방지울타리에 작용한 낙석에너지의 계산에 사용되었다. 비디오 테이프 자료의 분석을 통해 현장실험 시 낙하된 콘크리트 볼의 운동 형태와 속도, 절개면과의 충돌위치 그리고 운동궤적 등을 파악하였으며 이러한 자료들을 이용하여 ROCKFALL 프로그램에서 실제 현장에서의 낙하운동과 동일한 형태의 운동궤적을 모사하였다. 이러한 시뮬레이션 분석을 통해 현장실험 시 낙석방지울타리에 작용했던 낙석에너지와 도약 높이를 획득하였으며 이 분석결과와 현장에서 관찰된 낙석방지울타리의 파손여부를 정리한 결과는 표 2와 같다. 따라서, 각 실험에서 발생한 낙석에너지와 울타리의 파손여부로부터 낙석방지울타리의 흡수가능에너지를 추정하였다.

4.4.1 A 절개면

A 절개면에 설치된 낙석방지울타리는 독립기조를 사용하지 않고 L형옹벽 위에 설치된 형식으로 옹벽 뒤에 뒷채움을 한 상태와 유사한 상황을 만들기 위해 옹벽을 약 1.0m 깊이로 파고 설치하였다. 지주는 지주 정착구를 사용하여 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 낙석에너지는 각각 32.4kJ과 33.7kJ이었다. 1차 실험에서는 낙석방지울타리의 파손 없이 낙석에너지가 모두 방지울타리에 흡수되었으며 1.3톤의 콘크리트 볼이 낙하되었던 2차 실험에서는 울타리의 일부 구조가 파손되었으나 콘크리트 볼이 울타리에서 정지되어 더 이상 도로방향으로 이동하지 못했다. 따라서 이때 발생되었던 33.7kJ까지의 낙석에너지는 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 도로방향으로 유입되었다. 그러나, 이 실험이 울타리의 일부 구조가 파손된 상태에서 실시되어 울타리의 최대 기능이 발휘되지 못했을 것이라는 판단아래 시설을 재설치하고 동일한 규모의 콘크리트 볼을 낙하시켰다. 이 실험에서 발생한 낙석에너지는 약 66kJ로 콘크리트 볼이 낙석울타리에 의해 정지되어 이 울타리 형식으로 약 66kJ까지의 운동에너지를 흡수할 수 있을 것으로 판단된다.

4.4.2 B 절개면

B 절개면에 설치된 시설은 flexible barrier system으로 유연성을 이용한 낙석방지울타리이다. 이 시설은 지표면으로부터 4m 떨어진 높이의 절개면 상에 앵커를 이용하여 고정하였으며 절개면의 수직방향

으로부터 15도 가량 기울어져 설치되었다.

표 2 현장 실험 결과

절개면 I.D	Test No.	콘크리트 볼 중량(t)	낙하 높이(m)	운동 형태	낙석에너지 (kJ)	도약높이 (m)	기능수행 여부
Slope 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
Slope B	1	4.3	20	자유낙하@20 충돌@13 자유낙하	532.5		낙석 방어
	2	2.3	18	자유낙하@18 충돌@13 자유낙하	222.8		낙석 방어
	3	1.3	13.5	자유낙하@13.5	92.7		지주 파손 낙석 방어
Slope C	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
Slope D	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.

4.3톤의 콘크리트 볼이 낙하된 1차 실험에서 발생한 낙석에너지는 약 532kJ로 낙석의 중량으로 인해 울타리의 그물망 부분에 이완이 많이 발생하였으나 낙석에너지는 시설의 파손 없이 울타리에 의해 거의 흡수되었다. 큰 규모의 낙석이 발생한 후 울타리에 걸려있는 낙석을 제거하지 못한 상태에서 2차 낙석이 발생하는 경우의 울타리 기능수행여부를 점검하기 위해 4.3톤의 콘크리트 볼이 울타리에 걸려 있는 상태에서 다른 쪽 그물망 부분에 2.3톤의 콘크리트 볼을 추가로 낙하시켰다. 시뮬레이션을 통해 추정된 낙석에너지는 222kJ로 낙석에너지를 흡수하는 기능을 가진 brake ring의 지름이 약 30%정도 감소하였으나 그외의 시설은 파손되지 않았다. 3차 실험에서는 지주부분의 성능 평가를 위해 1.3톤의 콘크리트

볼을 지주부분에 자유낙하시켰다. 이때 지주에 작용한 에너지는 92.7kJ로 지주의 앵커부위가 파손되어 절개면으로부터 떨어져 나왔으나 콘크리트 볼은 울타리에 의해 정지되었다.

4.4.3 C 절개면

C 절개면에 설치된 낙석 방지 울타리는 독립기초를 사용하지 않고 L형 옹벽 위에 설치된 형식으로 옹벽 뒤쪽에 뒷채움을 하지 않아 콘크리트 볼이 낙하할 때 주머니의 역할을 하게 함으로써 낙석의 에너지를 감소시키는 효과와 함께 옹벽이 낙석에너지를 흡수하도록 했다.

1·2 차 실험에서 1.3톤의 콘크리트 볼로부터 발생된 낙석에너지는 각각 32.2kJ과 51.1kJ 이었다. 동일한 중량의 콘크리트 볼이 낙하하면서 발생시킨 낙석에너지에 약 20kJ의 차이가 발생한 것은 콘크리트 볼이 각각 다른 운동형태에 의해 낙하했기 때문으로 보인다. 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 모두 콘크리트 볼은 낙석 방지 울타리의 기초 옹벽부와 충돌하였으며 낙석에너지는 콘크리트 옹벽부에 의해 흡수되어 콘크리트 볼은 도로 방향으로 유입됨 없이 정지되었다.

그러나 51.1kJ이 발생한 2차 실험의 경우 콘크리트 옹벽의 상단부가 일부 파손되었으며 다른 부분에도 균열이 발생하여 더 이상 기능을 발휘할 수 없을 것으로 보인다. 따라서, 3차 실험에서는 장소를 이동하여 동일한 형식으로 설치된 낙석방지울타리와 낙석방지옹벽에 대해 2.3톤의 콘크리트 볼을 15.5m의 높이에서 낙하시켰다. 이 때 발생한 낙석에너지는 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 에너지는 흡수된 것으로 보인다.

4.4.4 D 절개면

이 구간에 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 지주에 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 낙석에너지를 흡수했다. 2차 실험에서 1.3톤의 콘크리트 볼이 17m에서 낙하되어 약 54kJ의 에너지가 발생되었다. 콘크리트 볼은 울타리와 충돌 후 시설을 뚫고 약 20m가량 도로 방향으로 이동되었다. 울타리의 파손은 와이어 로프와 철망이 낙석에너지를 흡수하지 못하고 와이어 로프가 고정구로부터 이탈되어 발생하였으며 다른 부분의 손상은 전혀 없는 것으로 보아 와이어 로프의 흡수가능에너지가 부족했던 것으로 보이며 특히, 와이어 로프와 지주사이의 결속력이 부족했고 단부가 설치되지 않아 와이어 로프에 충분한 인장이 작용하지 않았던 것으로 보인다.

4.5 분석결과

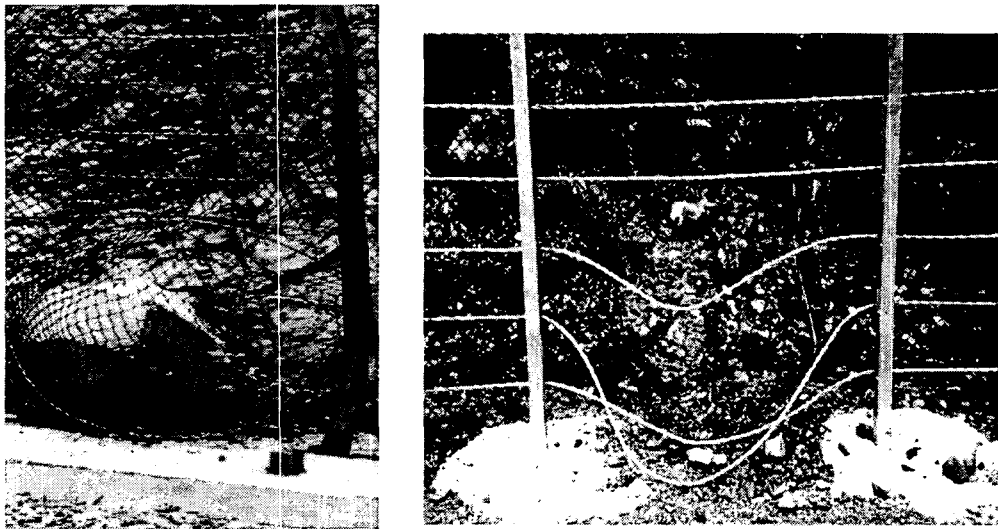
1. 현장실험을 통해 파악된 국내 낙석방지울타리의 흡수가능 에너지는 약 50kJ 내외 인 것으로 보이며 이는 낙석대책편람(일본도로협회, 2000)에 제시된 낙석방지울타리의 흡수가능에너지 계산식을 이용하고 국내 낙석 방지 울타리의 형식과 재원을 적용하여 얻은 값과 동일하다.

그러나, 국내에서 평균적으로 발생하는 낙석을 효과적으로 막기 위해서는 90kJ 정도의 낙석방지울타

리 흡수가능에너지가 요구된다. 이는 지난 2년간 국내 국도 주변의 낙석 발생 지점 275개소 지점으로 부터 관찰된 낙석의 평균 규모 (0.4톤)와 절개면 경사도 (65도)와 평균높이 (25m)로부터 추정된 값으로부터 계산된 값이다(한국건설기술연구원, 1998, 1999). 따라서, 국내에서 발생하는 낙석을 적절히 방어하기 위해서는 현재 국내에서 사용하고 있는 형식의 성능을 보완할 필요가 있다. 참고로 미국의 경우 낙석 방지 울타리의 기준흡수가능에너지로 200kJ을 요구하고 있으며 또한 울타리의 흡수가능에너지는 현장 실험을 통해 입증되어야 한다.

2. A 절개면의 시설에서 사용되었던 U형 볼트의 성능은 다른 시설에 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 4(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 4(b)).

3. 절개면 C의 실험결과와 같이 낙석방지울타리의 기초로 사용되는 L형 옹벽은 약 95kJ의 낙석에너지를 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 일체로 되지 못하고 충격에 의해 분리되는 파괴가 발생했다(그림 5). 따라서, 시공성과 국내 실정을 감안하여 낙석방지옹벽의 강도와 흡수가능에너지를 증가시킬 수 있는 설계기준을 제시하기 위한 연구가 진행 중이다.



(a) 절개면 A

(b) 절개면 C

그림 4 절개면 A와 절개면 C의 울타리 파손 상태



그림 5 2.3톤과 1.3톤의 볼에 의해 파괴된 옹벽 양상

4. 이미 여러 논문과 보고서(Ritchie, 1963; Badger and Lowell, 1992)에서 언급된 바와 같이 이격거리와 낙석방지도랑(ditch)은 낙석방지울타리에 작용하는 낙석에너지와 낙석도약 높이를 감소시키는 데 매우 중요한 역할을 한다. 시뮬레이션 분석에 의하면 A 절개면에서 2.3톤의 콘크리트 볼이 18m 높이에서 낙하할 때 1m의 이격거리에 설치된 낙석방지울타리에 작용한 낙석에너지가 64.2kJ이었으나 2m 이격거리에서는 42.3kJ로 줄어들었다. 도약높이 역시 0.65m에서 0.5m로 감소하였다. 이러한 결과를 바탕으로 현장에서 사용 가능한 설계기준의 제시를 위하여 국내 평균낙석 중량인 0.4톤을 이용하고 각각 다른 절개면과 낙석 특성, 즉 절개면 경사도와 낙하 높이를 고려하여 이격거리에 대한 시뮬레이션 분석을 실시하였다. 이러한 분석 결과를 이용하여 낙석도약 높이에 대한 낙석방지울타리의 기능 수행여부를 판단할 수 있는 기준을 제시했다(표 3).

표 3 이격거리에 따른 낙석방지울타리의 기능수행가능 여부

a) 이격거리 0m

절개면높이	절개면 경사도			
	1:1.0	1:0.7	1:0.5	1:0.3
10m	○(1.93)	○(2.20)	×(3.25)	×(3.97)
20m	○(2.23)	×(3.82)	×(4.14)	×(4.97)
30m	×(3.95)	×(4.18)	×(6.13)	×(9.75)

b) 이격거리 1m

절개면높이	절개면 경사도			
	1:1.0	1:0.7	1:0.5	1:0.3
10m	○(0.5)	○(0.9)	○(1.16)	○(1.2)
20m	○(1.38)	○(1.95)	○(2.54)	×(3.38)
30m	×(4.09)	×(5.06)	×(6.10)	×(7.41)

c) 이격거리 3m

절개면높이	절개면 경사도			
	1:1.0	1:0.7	1:0.5	1:0.3
10m	○(0.0)	○(0.50)	○(0.57)	○(0.94)
20m	○(0.78)	○(0.86)	○(1.38)	×(3.32)
30m	○(1.77)	×(3.43)	×(3.46)	×(4.46)

주) ○: 적용 가능, ×: 적용 불가

()안의 값은 도약 높이(단위:m)

5. 결론

낙석방지울타리는 소규모의 낙석이 예상될 때 사용되는 낙석보호공법의 하나로 국내에서 폭 넓게 사용되고 있다. 그러나, 이러한 방지울타리는 절개면이나 낙석의 특성에 대한 고려 없이 표준도에 제시된 단일형식과 단일 규모만이 사용되고 있어 울타리의 기능이 제대로 발휘되지 못하거나 낙석방지울타리의 흡수가능에너지 이상의 낙석이 예상되는 곳에 설치되어 무용지물화되는 경우가 많다. 특히, 실험을 통해 낙석방지울타리의 성능이나 흡수가능에너지를 평가한 사례가 없으며 따라서 울타리의 강도나 흡수가능에너지에 대한 자료가 전무한 상태에서 낙석방지시설로 사용되어 왔다. 낙석방지시설은 시설의 성능이 직접적으로 인명의 피해와 재산의 손실과 연계되는 것으로 시설의 성능을 확인하는 것이 매우 중요하다. 이런 이유로 선진 외국에서는 이미 1970년대부터 낙석방지시설의 성능을 평가하기 위한 실험이 수행되어 왔으며 이러한 실험의 결과로 각 형식의 흡수가능에너지를 평가하고 이를 이용하여 예상되는 낙석의 규모 등과 같은 현장상황에 적합한 시설을 설치하도록 하고 있다.

본 연구는 절개면과 낙석의 특성을 고려한 낙석방지시설의 설치와 관리에 관한 지침을 마련하기 위해 수행되었다. 연구와 실험을 통하여 국내에서 설치 운용되고 있는 낙석방지시설의 설치 적정성 여부와 문제점을 파악하였으며 이렇게 파악된 방지시설의 특징과 기능을 고려하여 국내실정에 맞는 설치 및 관리 지침을 제시하였다.

6. 참고문헌

1. 건설교통부(1998), 도로부대시설 표준도(배수시설, 안전시설편)
2. 한국건설기술연구원(1998), 도로절개면 유지관리시스템 개발 및 운용 연구(I)
3. 한국건설기술연구원(1999), 도로절개면 유지관리시스템 개발 및 운용 연구(II)
4. 日本道路協會(2000), 落石對策便覽
5. Badger, T. C and Lowell, S. M (1992), "Rockfall controll in Washington State", Transportation Research record, No.1343.
6. Giani, G. P. (1992), *Rock Slope Stability Analysis*, A.A. Balkema
7. Hoek, E. (1987), "A program in Basic for the analysis of rockfalls from slopes", Unpublished note
8. Krynine, D. P. and Judd, W. R. (1957), *Principles of Engineering Geology and Geotechnics*, McGraw-Hill, New York.
9. Paronuzzi, P. (1989), "Probabilistic approach for design optimization of rockfall protective barrier", Quaterly J. Engineering Geology, 22. pp. 135-146.
10. Pfeiffer, T. J. and Bowen, T. D. (1989), "Computer simulation of rockfalls", Bull. Ass. Eng Gel. 26, pp. 135-146.
11. Ritchie, A. (1963), "The evaluation of rockfall and its control", Highway Research Record 17, pp.13-28.
12. Spang, R. M. and Rautenstrauch, R. W. (1988), "Empirical and nathematical approaches to rockfall protection and their practical application", Proc. 5th Int. Symposium on Landslides, Lausanne, pp.1237-1243.
13. Spang, R. M. and Sonser, T. H. (1995), "Optimized rockfall protection by ROCKFALL", Proc. 8th Int. Congress on Rock Mechanics, Tokyo.