
암반사면의 낙석방책 적정성에 관한 연구

장 용채¹⁾, 오 전 경수²⁾, 김 상균³⁾

개요(synopsis)

The seed spary, the rock fence and the shotcrete are usually used to protect the falling rock on the excavated slope face. The purpose of this paper is to predict the motion route of the falling rock and to examine the site and the height of the rock fence. The rock fence should be designed by the consideration of the angle of slope face, the dips of discontinuity planes, the shape of the falling rock and the strength of the rock slope and the falling rock. The 3 sites in the field are adopted for experiments. 50 rocks are used to make experiments to study the effect on the route of falling rock in each slope. The restitution coefficient between falling rock and rock slope face, the rock shape(length ratio), the slope angle and the dip of discontinuity plane have influence on the route of falling rock.

1. 서론

도로주변의 절토사면에서는 대규모의 사면 붕괴 가능성은 없으나 사면의 표면에서 작은 크기의 낙석이 발생되는 경우가 있다. 도로를 고속으로 주행하는 차량에게는 작은 낙석이라도 안전에 매우 위험적인 요소가 될 수 있다. 이러한 사면에는 통상 낙석방책을 설치하여 낙석이 도로에 떨어지는 것을 예방한다. 그러나 낙석방책은 낙석의 운동경로에 대한 예측없이 위치 및 높이 등을 결정하여 시공되므로 낙석방책이 실제 발생되는 낙석에 비해 지나치게 높거나 또는 너무 낮거나 설치 위치가 부적절하여 낙석이 도로에 떨어지는 것을 제대로 억제시키지 못하는 경우가 종종 있다.

현재 기존의 낙석방지 공법인 식생공, 철망공 및 낙석방책 등의 공법을 설계시 이에 대한 설계지침 등의 기준이 형성되어 있지 못해 과잉의 설계 또는 비효율적인 공법의 선정으로 인해 낙석 예방효과를 제대로 얻지 못하는 경우가 많이 발생되고 있는 실정이다. 낙석방지 대책을 설계하기 위해서는 먼저 낙석의 운동경로에 대한 예측을 하여 각 경우 별로 설계지침을 작성해야 한다. 그러나 낙석의 운동경로는 사면의 형상, 낙석의 형상, 암종 등에 따라 매우 복잡하고 불규칙적인 운동을 하여 신뢰성 있는 예측모델의 개발이 매우 어려우므로 먼저 실험을 통한 낙석의 운동경로를 분석코자 한다.

본 연구에서는 사면의 절취가 완료되고 낙석방책이 설치되어 있는 사면 3지점을 선정하여 현장 실험을 통해 낙석의 운동경로 및 기존의 낙석방지대책에 대한 적정성 여부를 검토하였다. 낙석은 암종에 따라 충돌시 반발계수가 다르며 사면의 형상 및 낙석의 형상이 낙석의 낙하 경로에 큰 영향을 미친다는 것을 고려하여 낙석 경로에 대한 실험을 실시하였다.

1) 한국도로공사 선임연구원

2) 한국도로공사 연구원

3) 한국도로공사 연구원

2. 본론

2-1. 일반적인 낙석의 운동형태

낙석의 운동경로는 사면의 경사, 절리면의 경사 및 낙석의 공학적 성질, 낙석의 모양 등에 따라 다르게 나타난다. 일반적으로 낙석은 미끄럼운동(sliding), 구르는 운동(rolling), 낙하 운동(falling) 그리고 자전운동(spin) 등을 복합적으로 하게 된다.

본 연구에서는 암석의 운동을 크게 미끄럼운동, 평면운동 그리고 낙하운동의 3가지로 분류하여 검토하였으며 실험을 통하여 각 운동 특성을 연구하였다.

2-1-1. 미끄럼 운동

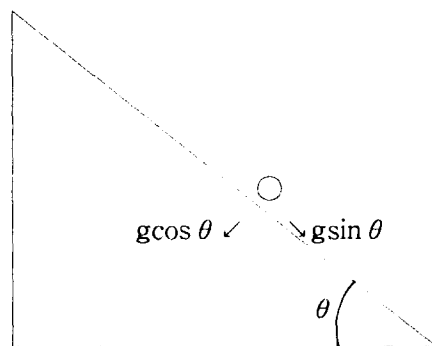
미끄럼 운동은 암석의 사면방향 자중이 사면과 암석의 마찰력 한계를 넘어서 미끄러지는 운동을 말한다. 이러한 운동은 낙석이 사면에서 처음 낙석이 사면으로 부터 떨어져 나가기 시작할 때 발생하는 운동형태로 사면의 기울기, 사면의 암반조건, 낙석의 형상 등에 따라 결정된다.

낙석의 모양을 원형이라고 가정하여 다음과 같이 낙석의 속도 예측식을 유도하였다.

중력가속도 : g ,

낙석과 사면의 내부마찰각 : ϕ

사면의 기울기 : θ ,



사면의 접선방향 가속도 :

$$a_t = g \sin \theta - g \cos \theta \cdot \tan \phi$$

사면의 연직방향 가속도 : $a_n = g \cos \theta$

초기속도 : u

시간 : t

접선방향 가속도 : a_t

이동거리 : s

이라 하면

S 만큼 미끄러진 후 암석의 속도 v는 다음과 같이 구한다.

$$v = u + a_t \cdot t \quad \text{-----①}$$

$$s = u \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a_t \cdot t \quad \text{-----②}$$

$$\text{①에서 } t = (v - u) / a_t \quad \text{-----③}$$

③을 ②식에 대입하면

$$s = u\{(v-u)/a_t\} + \frac{1}{2} \cdot a_t \cdot \{(v-u)/a_t\}^2 \\ = 1/(2 \cdot a_t) \cdot (v^2 - u^2) \quad \text{-----④}$$

$$\text{④} \times 2a_t \text{ 는 } 2as = v^2 - u^2 \text{ 이므로}$$

$$v = (u^2 + 2 \cdot a_t \cdot s)^{1/2} \quad \text{-----⑤}$$

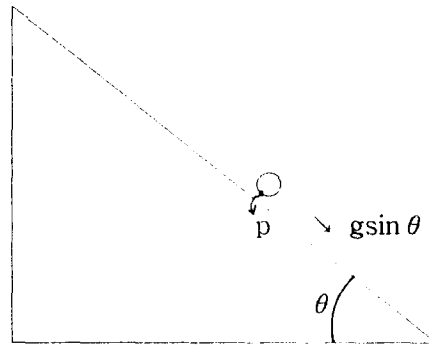
2-1-2. 평면운동

낙석이 사면에서 떨어지는 초기에는 미끄럼 운동을 하나 어느 정도 미끄러진 후에는 구르는 운동인 평면운동을 하는 경우가 대부분이다.

평면운동의 경우 구르는 운동은 낙석의 세장비에 따라 낙석의 각속도는 다르게 발생하여 운동형태가 달리 나타나게 된다. 구르는 운동으로 인한 낙석의 속도 관계식은 다음과 같다.

낙석의 회전반경 : r, 낙석의 각속도 : ω

낙석의 각 가속도 : α 라 하면



$$v_p = \omega \times r, \quad \text{-----⑥}$$

$$a_p = v_p' = \alpha \times r + \omega \times r' \quad \text{-----⑦}$$

암석을 구형으로 가정하였으므로

$$a_p = v_p' = \alpha \times r,$$

$$a_p = \alpha \times r = g \sin \theta \quad \text{-----⑧}$$

$$\text{⑧에서 } \alpha = g/r \cdot \sin \theta$$

$$\begin{aligned}
v &= v_0 + g/r \cdot \sin \theta \cdot r \cdot t \\
&= v_0 + g \cdot \sin \theta \cdot t \\
s &= v_0 \cdot t + \frac{1}{2}g \cdot \sin \theta \cdot t^2
\end{aligned}$$

2-1-3. 낙하운동

미끄럼운동 또는 평면운동을 하는 낙석은 운동속도가 빨라지면서 사면의 경사가 커지는 지점을 만나면 낙하 운동을 시작하게 된다. 평면운동을 하는 낙석은 자전(spin)을 수반하면서 낙하하게 되고 이 낙석은 사면에 부딪쳐서 다시 반발하게 된다.

사면경사가 θ 인 구간에 자유낙하 하기 시작하는 암석의 운동경로는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
&\text{수평방향 초기속도 : } v_{xi}, \quad \text{연직방향 초기속도 : } v_{yi} \\
&\text{암석의 사면방향 속도 : } v_t \\
&\text{수평방향 이동거리 : } s_x \quad \text{연직방향 이동거리 : } s_y \\
v_{xi} &= v_t \cdot \cos \theta \\
v_{yi} &= v_t \cdot \sin \theta
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
V_x &= v_{xi} \\
V_y &= v_{yi} + a \cdot t \\
&= v_t \cdot \sin \theta + g \cdot t \quad \text{이므로}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
s_x &= v_{xi} \cdot t \\
s_y &= v_{yi} \cdot t + \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2
\end{aligned}$$

2-2. 낙석의 반발계수

낙하하는 낙석은 사면의 암종 및 충돌시 사면과 낙석의 충돌면의 각도 등에 따라 다양한 반발 형태를 갖는다. 즉 낙석과 사면의 암종에 따라 반발계수가 변화하게 되며 암석의 충돌각도는 연직 및 수평방향의 운동량에 큰 영향을 미치게 된다.

$$\begin{aligned}
&\text{낙석의 질량 : } m_1 \quad \text{사면의 질량 : } m_2 \\
&\text{충돌전 낙석의 속도 : } v_{1i}, \text{ 충돌후 낙석의 속도 : } v_{1f} \\
&\text{충돌전 사면의 속도 : } v_{2i}, \text{ 충돌후 사면의 속도 : } v_{2f}
\end{aligned}$$

운동량 보존의 법칙에 의하여

$m_1 \cdot v_{1i} + m_2 \cdot v_{2i} = m_1 \cdot v_{1f} + m_2 \cdot v_{2f}$
 반발계수 (e) = $-(v_{2f} - v_{1f}) / (v_{2i} - v_{1i})$ 이다.
 여기서 사면의 질량 (m_2) = ∞ 이므로 $v_{2f} = 0$

∴ 낙석의 반발계수 (e) = $-v_f / v_i$

낙석이 사면에 부딪히는 경우 사면의 연직방향 및 접선방향의 반발계수는 암종별로 다르게 나타나며 낙석의 운동경로 예측시 표1 과 같은 반발계수를 기존의 문헌에서 추천하고 있다.

| 사면조건 | 반발계수 | | 비고 |
|--------------|---------|-----------|----|
| | 연직방향 | 접선방향 | |
| 경암 | 0.9-0.8 | 0.75-0.65 | |
| 커다란 암편이 섞여있음 | 0.8-0.5 | 0.65-0.45 | |
| 작은 암편이 섞여있음 | 0.5-0.4 | 0.45-0.35 | |
| 식생으로 덮여 있음 | 0.4-0.2 | 0.3-0.2 | |
| 토사, 약간의 식생 | 0.3 | 0.8 | |

표1. 낙석의 반발계수

2-3. 현장실험

2-3-1. 조사사면

현장조사 사면은 ○ ○ 고속도로 상의 3개 사면을 대상으로 하였으며 선정된 사면은 절리면을 따라 발생할 수 있는 대규모의 붕괴가능성은 없는 지점으로 다만 사면의 표면에서 작은 크기의 낙석 만이 발생할 수 있는 지역이다. 3개사면 모두 낙석에 대한 대책으로 낙석방책만을 사용한 지점으로 조사대상사면은 표 2와 같다.

A 사면의 경우 풍화정도가 HW 정도이고 절리간격이 약 5 - 15cm 정도로 조밀하며 절리면의 경사는 25° - 45° 정도 분포하고 있어 사면의 경사와는 약 20° - 40° 의 차이를 보인다. B 사면의 경우 풍화상태가 제1구간 및 제2구간에서는 MW 정도이

고 제3구간은 HW정도이며 제4구간은 CW정도로 분포되어 있다. 제2, 3구간의 절리면 경사는 35° - 45° 정도의 분포를 하고 있어 사면의 경사와는 약 30° - 40° 정도의 차이를 보인다. C 사면의 경우 제1구간의 풍화상태는 MW-HW정도이며 절리간격은 0.5 - 1m 정도이고 제2구간의 풍화상태는 HW정도이고 제3구간의 풍화상태는 CW정도이다. 제2구간의 절리면의 경사는 40° - 55° 정도로 사면경사와는 약 25° - 10° 정도의 차이를 보인다.

| 사면 구분 | 사면경사, 높이, 일축압축강도(추정치) | | | | 낙석 방책 | ditch 길이 |
|----------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|----------|-------------|
| | 제1구간 | 제2구간 | 제3구간 | 제4구간 | | |
| A | 64° ,9.62m, 200kg/cm ² | - | - | - | 유 | 1.5m |
| B | 64° , 4.5m, 510kg/cm ² | 50° , 4.5m, 510kg/cm ² | 60° , 6.9m, 300kg/cm ² | 48° , 13m, 20kg/cm ² | " | 1.0m |
| C | 68° ,7.5m, 300kg/cm ² | 50° , 7.0m, 200kg/cm ² | 60° ,5.5m, 20kg/cm ² | - | " | 1.0m |

표 2. 조사대상사면

조사대상 사면의 단면도는 그림1 와 같다.

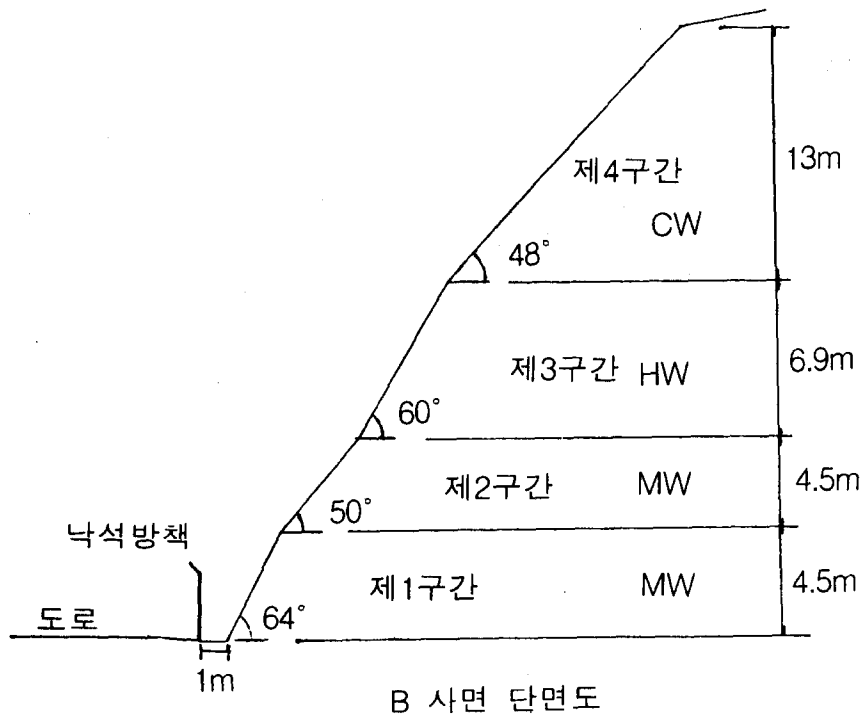
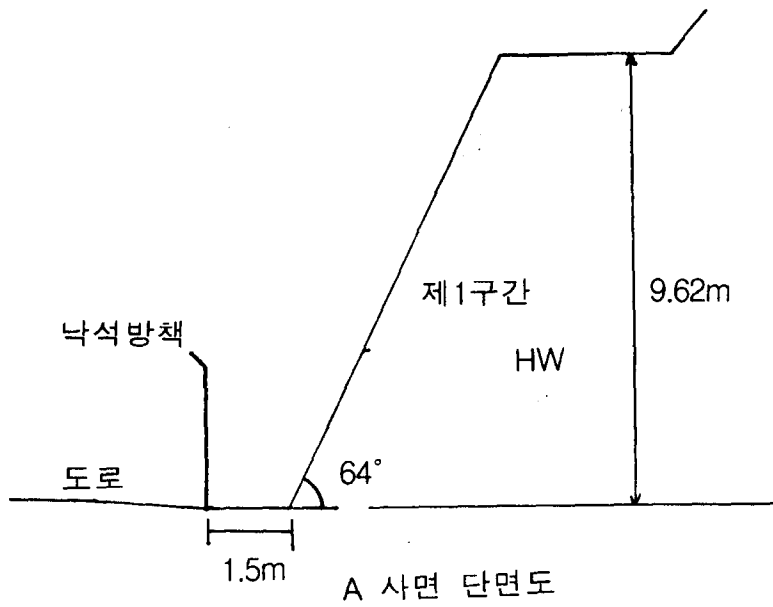


그림 1. 조사대상 사면의 단면도

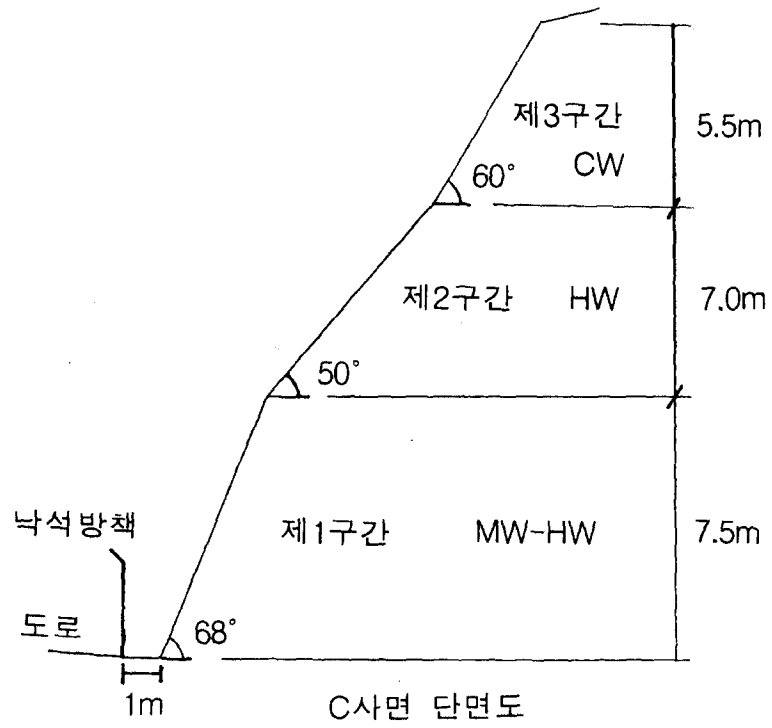


그림 1. 조사대상 사면의 단면도

2-3-2. 낙석방책

본 연구에서 선정된 사면은 높이는 2.85m로 형식이 모두 동일하며 단면도는 그림 2. 와 같다.

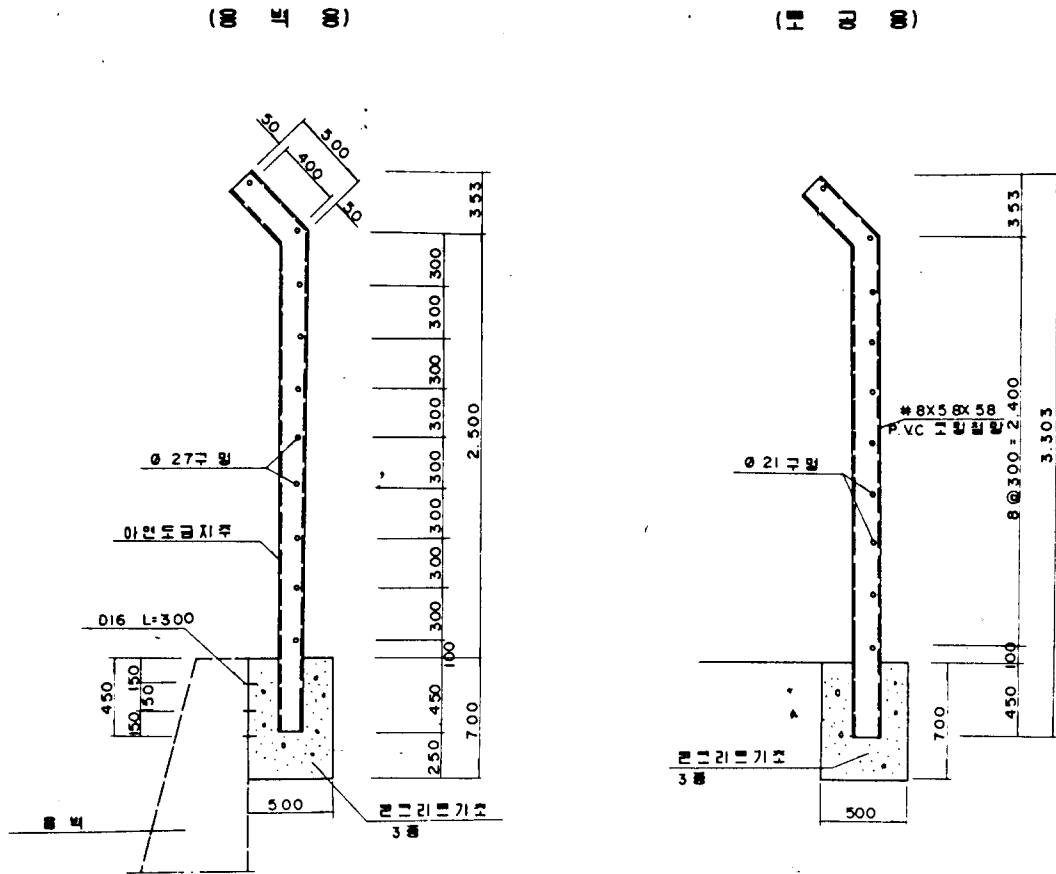


그림 2. 낙석방책 측면도

2-3-3. 낙석의 종류

낙석은 사면의 낙석발생 부위 주변의 암석을 선택하였으며 암석의 무게, 형상 및 세장비 등을 조사하였다. 각 사면별로 각 50개씩의 암석을 선택하였으며 실험에 사용된 암석은 표3과 같다.

| 구 분 | | 낙석 갯수 | | | 비고 |
|---------------|-----------------|-------|------|------|----|
| | | A 사면 | B 사면 | C 사면 | |
| 세 장 비 | 1-2 | 9 | 3 | 5 | |
| | 2-3 | 18 | 9 | 26 | |
| | 3-4 | 11 | 14 | 14 | |
| | 4-5 | 9 | 5 | 5 | |
| | 5이상 | 3 | 19 | 0 | |
| 무 게 (g) | 0-500 | - | 8 | 3 | |
| | 500- 1,000 | 8 | 24 | 29 | |
| | 1,000- 1,500 | 18 | 11 | 9 | |
| | 1,500- 2,000 | 12 | 7 | 4 | |
| | 2,000 이상 | 12 | - | 5 | |

표 3. 낙석 실험에 사용한 암석

2-3-4. 낙석의 최종 낙하지점

낙석의 운동경로는 형상 및 세장비와 사면과 낙석의 충돌각도 그리고 반발계수에 따라 다르게 나타난다. 또한 낙석의 무게는 낙석의 운동경로에는 별로 영향을 미치지 못하는 것을 낙석경로의 이론식 및 실험을 통하여 확인 되었다.

본 연구에서 시행한 실험 결과 각 사면별 세장비와 낙석의 최종 운동경로 높이와의 관계를 그림 3. 에서 그림 5. 까지 나타내었고 각 사면별 낙석의 세장비에 대한 낙석의 낙석방책 충돌비율을 그림 6. 에 나타내었으며 낙석의 무게와 최종 반발 높이와의 관계를 그림 7. 에서 그림 9. 까지 나타내었다.

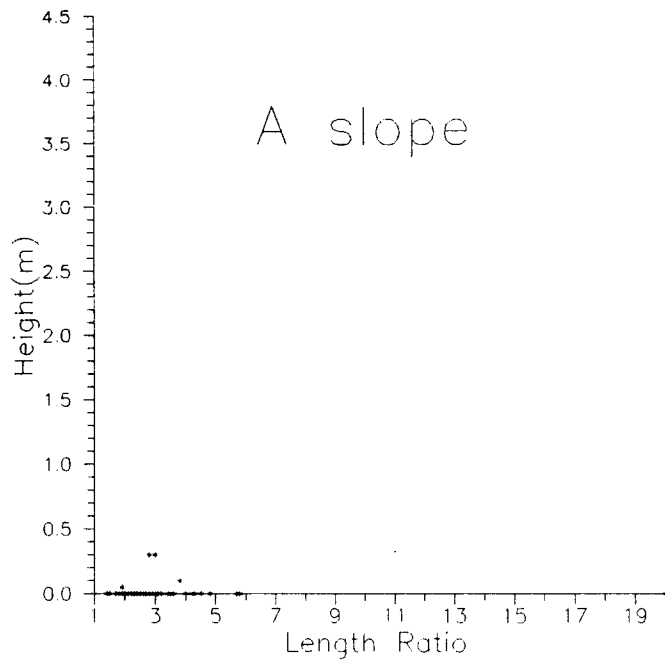


그림3 최종 반발 높이와 세장비 (A사면)

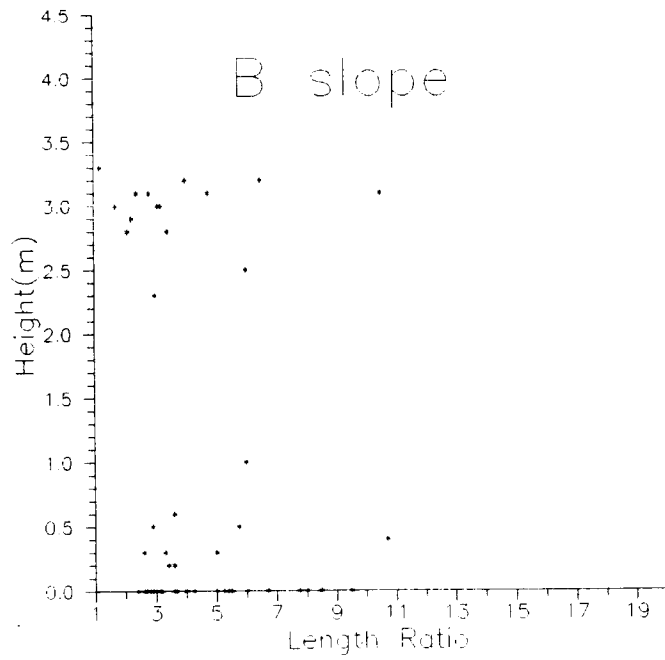


그림4 최종 반발 높이와 세장비 (B사면)

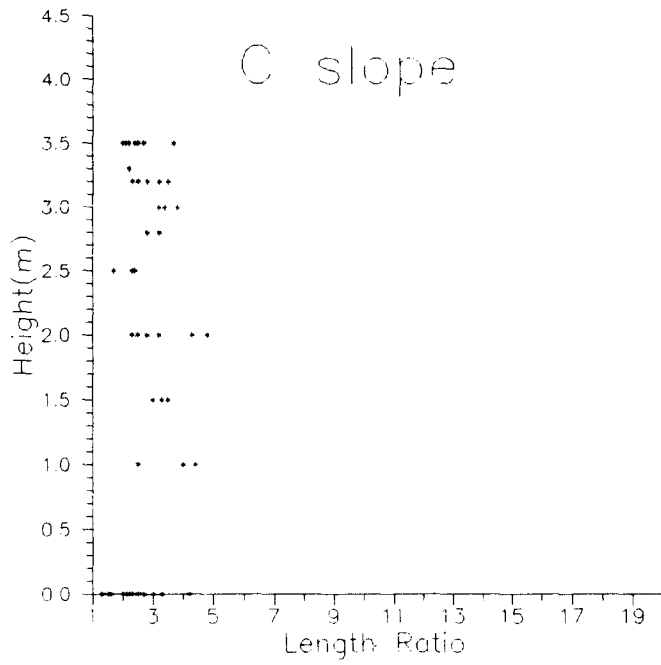


그림 5 최종 반발 높이와 세장비 (C사면)

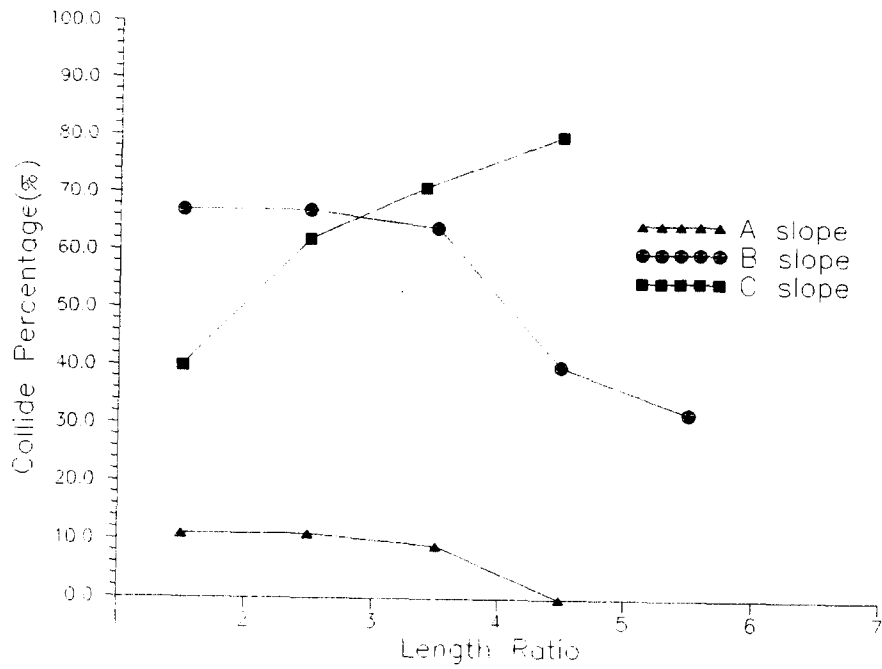


그림 6 세장비와 낙석방책 충돌비율

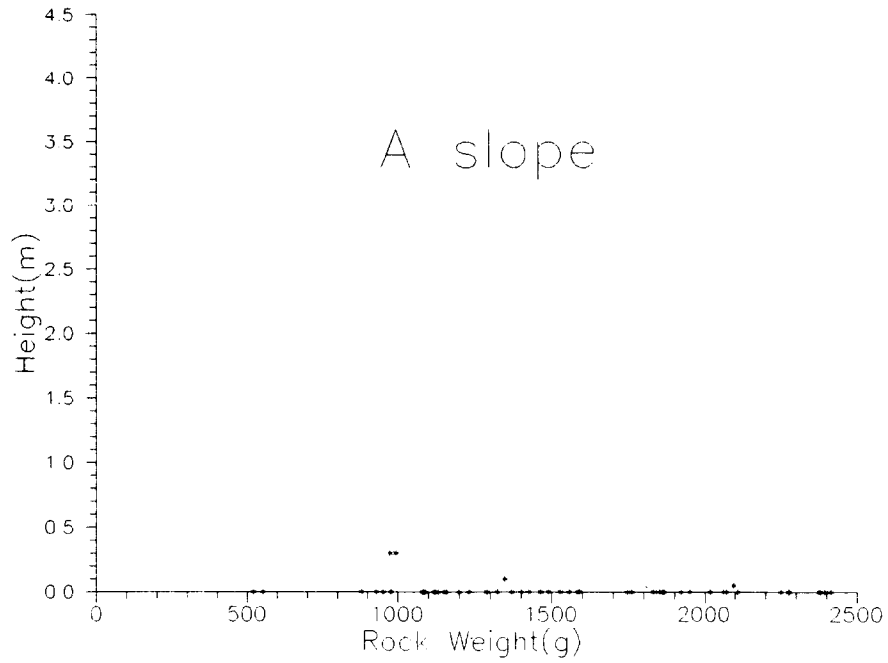


그림 7 최종 반발 높이와 낙석무게 (A사면)

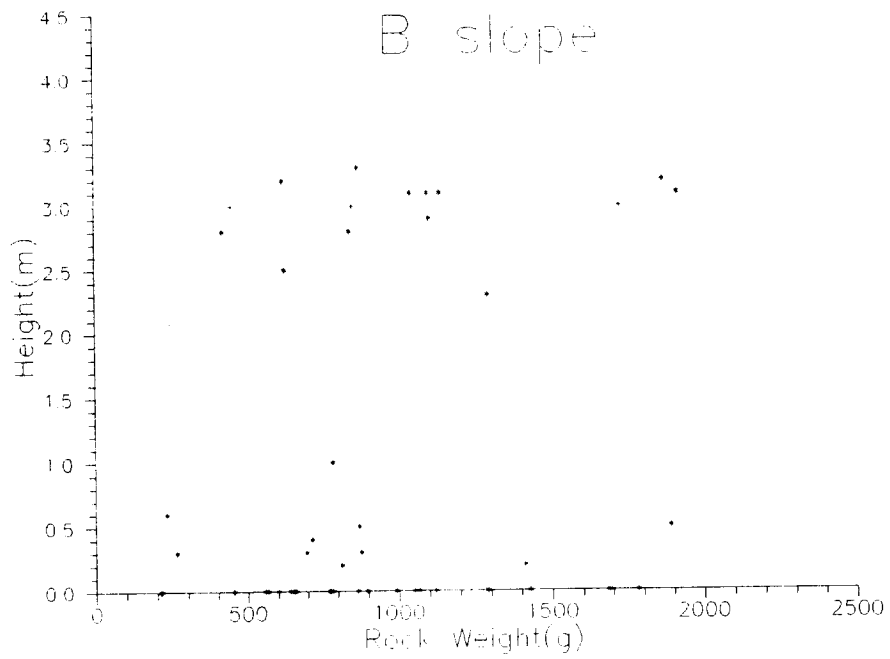


그림8 최종 반발 높이와 낙석무게 (B사면)

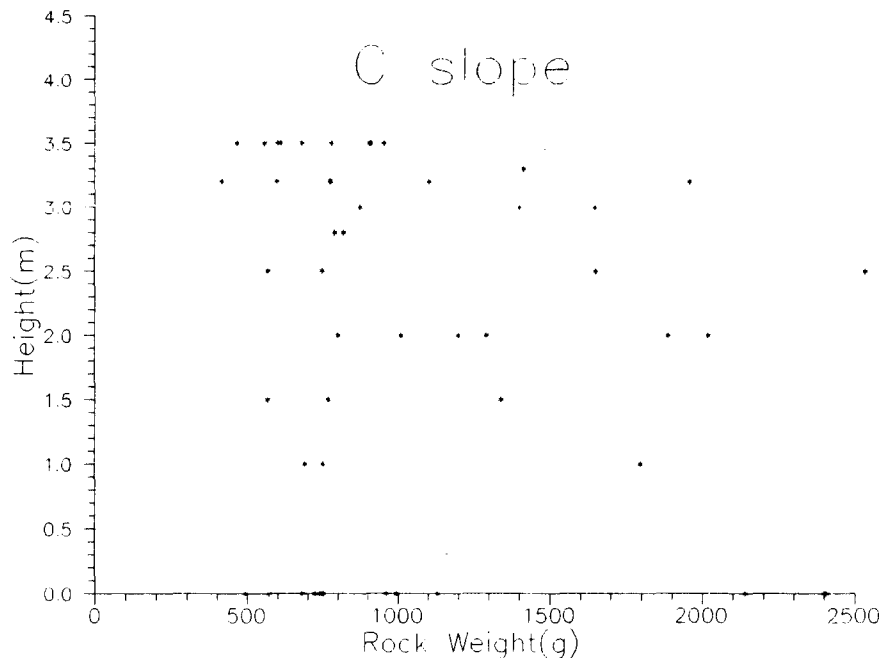


그림 9. 최종 반발 높이와 낙석무게 (C사면)

2-4. 실험결과 분석

2-4-1. 낙석 방책

A사면의 경우 그림3 과 같이 낙석의 최종 반발 높이는 모두 0.5m 미만으로 현재의 낙석방책의 높이는 낙석의 운동경로에 비해 매우 높은 상태이다. B사면 및 C사면 경우 낙석방책을 넘는 낙석이 각각 22% 및 32%에 달하여 사면의 Ditch 길이 조정, 낙석방책의 높이조정 및 철망의 설치 등 추가의 조치가 필요하다.

2-4-2. 세장비의 영향

각 사면별 세장비와 낙석방책에 부딪히는 낙석과의 관계는 그림6 과 같이 나타났다. 즉 A, B사면의 경우 세장비가 작을수록 낙석의 최종 운동경로가 지면에서 부터 높게 나타났다. 이것은 사면의 경사와 절리면의 경사 차이가 20° - 45° 로 분포하여 낙석이 구 모양에 가까울수록 충돌시 연직방향의 운동성분이 커졌기 때문인 것으로 사료된다. C 사면의 경우 세장비가 클수록 낙석의 최종 운동경로가 지면으로 부터 높게 나타났다. 이것은 절리면과 사면의 경사 차이가 10° - 25° 로 분포하여 세장비가 큰 낙석이 사면과 충돌각도가 커서 연직방향의 속도성분이 크게 나타난 것으로 판단된다.

2-4-3. 낙석무게의 영향

그림 7.부터 그림 9. 에서 볼 수 있듯이 낙석의 무게는 낙석의 운동경로에 별로 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. 다만 낙석의 무게가 큰 경우에는 운동에너지가 커서 충돌시 무게가 작은 낙석에 비해 파쇄되는 경우가 많았다.

2-5. 낙석방지 대책

2-5-1. 사면형상과 낙석방책과의 관계

낙석에 대한 효과적인 대책을 세우기 위해서는 사면의 형상, 절리면의 경사, 사면 및 낙석의 암종, 낙석의 세장비 등을 고려하여 결정해야 한다. 사면에 소단은 대개 토사나 식생으로 덮여 있는 경우가 있어 이곳의 반발계수가 표1에 나타난 것과 같이 매우 작아 대부분의 낙석이 소단 부위에 쌓이게 된다. 그러므로 낙석방책의 높이는 낙석이 지면에 도달할 수 있는 위치에서 부터 낙석의 운동경로를 예측하여 방책의 높이나 Ditch의 길이를 조절하는 것이 타당하리라고 판단된다.

또한 이미 시공이 완료되어 개통된 구간에서는 Ditch길이 및 낙석방책의 높이의 조정이 매우 어려우므로 사면에 철망의 설치 및 식생을 시키는 것이 사면의 반발계수를 작게하고 결국 낙석의 운동경로를 작게 하여 낙석을 방지하는 것이 효과적이라고 판단된다.

낙석발생 위치가 매우 높아 낙석방책의 높이나 철망설치 및 식생으로도 낙석을 예방하기 힘든 경우에는 사면의 경사가 커져서 낙하를 시작하는 지점에 낙석방책을 설치하면 매우 효과적이라고 판단된다.

2-5-2. 기타 낙석 방지대책의 공사비 비교

작은 크기의 낙석이 발생하는 사면에서는 씨앗 뿌어 붙이기, 낙석방책, 슛크리트 등의 공법을 적용하는 것이 일반적이며 단위면적당 공사비를 비교하면 표 4. 와 같다.

| 공법 | 단위 | 단가 | 비교 |
|------|-----------------|--------|----|
| 식생공 | 1m ² | 1,300 | |
| 낙석방책 | " | 25,000 | |
| 숯크리트 | " | 17,500 | |

표 4. 낙석방지공 단가 비교

B 및 C 사면에 표 4. 의 공법을 적용할 경우 단위 폭당 공사비 비교는 표 5. 와 같다.

| 구분 | 공법 | 적용구간 | 단가 | 총 공사비 |
|-----|----------|-------------------|--------|---------|
| B사면 | 씨앗뿌어 붙이기 | 제2,3,4구간 | 1,300 | 40,820 |
| | 낙석방책 | 제2구간 높이 1.5m기준 | 25,000 | 37,500 |
| | 숯크리트 | 제3,4구간 | 17,500 | 446,250 |
| C사면 | 씨앗뿌어 붙이기 | 제2,3구간 | 1,300 | 20,150 |
| | 낙석방책 | 제2구간 높이 1.0m기준 | 25,000 | 25,000 |
| | 숯크리트 | 제2,3 구간 | 17,500 | 271,250 |

표 5. 단위폭당 낙석방지공법의 공사비 비교

표 5. 에서 알 수 있듯이 숯크리트 공법은 전반적으로 사면에서 낙석의 양이 다량 발생하여 다른방법으로는 처리하기가 곤란한 경우에 적당할 것으로 사료되고 씨앗뿌어 붙이기 및 낙석방책은 사면의 조건에 따라 경제적인 공법을 채택하여야 할 것으로 사료된다. 특히 낙석방책의 경우 기존의 도로단에 설치하는 것보다 낙석의 운동경로를 중간에서 차단할 수 있도록 사면중간에 설치하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.

3. 결론 및 제언

낙석이 우려되는 사면의 낙석방책 설계는 통상 실시설계시 낙석방책의 높이 및 Ditch의 길이는 토질 주상도만을 참고로 단일한 형태로 설계에 반영하고 있는 실정이다. 그러나 낙석에 대한 방지대책은 각 사면의 높이, 사면의 경사, 절리면 경사, 낙석의 세장비 등을 고려하여 낙석의 운동경로를 효과적으로 차단할 수 있도록 채택되어야 할 것이다. 이를 위해서는 낙석의 운동경로를 예측할 수 있는 기법의 개발이 필요하며 이를 근거로 하여 낙석방책의 높이, Ditch의 길이 또는 기타 낙석방지 공법을 조합하여 효과적이고 경제적인 낙석방지 공법이 설계되어야 할 것으로 판단되며 본 연구에서 도출된 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 낙석의 운동경로는 사면의 절리면 방향 과 낙석의 형상, 낙석과 사면의 반발계수, 사면의 높이에 의해 결정된다.
- (2) 낙석의 무게는 운동경로에 영향을 미치지 못하였다.
- (3) 낙석의 운동경로를 효과적으로 차단하면 경제적이고 확실한 낙석방지 대책을 수립할 수 있다.

본 연구에서는 3지점을 선정하여 낙석실험을 실시하였으나 앞으로 각 지역의 암반특성에 따른 사면의 낙석발생 양태에 대한 연구와 더불어 낙석의 운동경로에 대한 실험자료를 더욱 축적하여 사면의 형상 및 암반의 공학적 성질에 따른 낙석의 운동경로 예측도표 또는 예측모델의 개발이 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 한국도로공사(1994), 고속도로 건설공사 표준도
2. 한국도로공사(1994), 기술자문사례집(지반분야)
3. 한국도로공사(1993), 사면안정처리에 관한 연구
4. 한국도로공사((1992), 도로설계요령 제2권 토공 및 배수
5. F G BELL(1992), "ENGINEERING IN ROCK MASS" , Butterworth-Heinemann Ltd, pp. 217-230
6. A.Azzoni & P.P.ROSI, A.Zaninetti and G.P.Giani(1991), "In site observation of rockfall analysis parameters" Landslides, Balkema, Rotterdam.
7. G.Barison, G.bottino and G.Mandrone(1991), "Correlations among geomechanical characteristics, fracturation degree and stability of rock slopes" Landslides, Balkema, Rotterdam.
8. Berchten, J. D., Anatra, S. and Ackermann, T. (1988) "Protection measures against rockfalls" , Proc. Fifth Int. Symp. Landslide, Lausanne, Switzerland
9. Federal Highway Administration(1989), "ROCK SLOPES" , Publication No. FHWA-TS-89-045 pp. 12.18-12.21
10. Kirsten, H. A. D., Steffen, O. K. H. and Stacey, T. R.(1986) "Discussion on Rockfall protection measures" , Proc. Conf. Rock Engg and Excavation in an Urban Environment, Institution of Mining and Metallurgy, Hong Kong