

사면에서 발생하는 낙석에너지와 낙석방지울타리 적용성에 관한 연구 A Study on Rockfall Energy and Rockfall Protection Fence Applications on the Slope

김남호¹⁾, Nam-Ho Kim, 신운섭²⁾, Yun-Sup Shin, 박윤재³⁾, Yoon-Jea Park, 조종석⁴⁾, Jong-Serk Cho

¹⁾ 유신코퍼레이션 지반공학부 이사, Director, Geotechnical Department, Yooshin Engineering Corporation

²⁾ 유신코퍼레이션 지반공학부 대리, Assistant Manager, Geotechnical Department, Yooshin Engineering Corporation

³⁾ 도로공사 설계처 박윤재 과장, Section Chief, Highway Design Division, Korea Highway Corporation

⁴⁾ 도로공사 설계처 조종석 대리, Assistant Manager, Highway Design Division, Korea Highway Corporation

SYNOPSIS : Recently, while rockfall occurs very frequently, a lot of researches on the rockfall protection fence is in process. But the rockfall protection fence has been installed unrelated to slope characteristics, rockfall shape and rockfall height. Therefore, in this study we suggested the effective protection fence model considering about rockfall energy and energy absorbing capacity and we verified the model by field test.

According to these results, it is more reasonable to evaluate rockfall energy based on the results of simulation program, which can be consider effects of energy decrease, than use the simplified method proposed by Japanese road association. And rockfall energy is affected by the size of supports and wire rope and the space of supports. As the results of comparing rockfall energy with energy absorbing capacity, type①(the space of supports is changed to 3.0m)can be available for generally expected rockfall except the rock slope over 30m heights. But rockfall protection fence installed at the field, it should be partially reinforced after consideration of slope particularities and construction conditions.

Key words : Rockfall protection fence, Rockfall energy, Energy absorbing capacity, Simplified method, Simulation program .

1. 서 론

최근 강우시 도심지 및 산간지역에 낙석의 발생 빈도수가 증가하고 있으며 그 규모도 점차로 커지면서 낙석방지 시설에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 낙석은 암반 자체의 강도는 강하지만 암반 내에 불연속면이 잘 발달 되어 동결융해나 강우로 인해 암 탈락이 쉽게 발생하는 경우나 절토고가 높은 대절토 지형의 경우 주로 발생하며 지형과 지질특성에 따라 발생 규모와 빈도가 결정되어진다.

기존에 국내에 설치되어 있는 낙석방지시설 중 가장 일반적인 낙석방지울타리는 절개면의 특성이나 예상 낙석의 규모와 형상, 낙하높이 등과 같은 현장여건에 대한 고려 없이 동일한 형식의 울타리가 시공되고 있으며 구조물의 강도에 대한 기준도 전혀 없어 구조물의 효용성과 기능에 대한 여러 문제점들이 제기되어 왔다.

따라서, 본 연구에서는 다양한 지형조건에 따라 발생 가능한 낙석에너지에 대하여 검토하고 낙석방지울타리의 에너지 흡수과정에 대한 평가를 수행하여 다양한 지질 및 지형특성에 따라 효과적으로 적용할 수 있는 낙석방지울타리 모형을 제안하였으며 이를 현장시험을 통해 검증하였다.

2. 기본이론

2.1 평가 과정

낙석방지울타리는 지주, 와이어로프 및 철망이 일체가 되어, 발생하는 낙석에너지를 흡수하는 구조물로서 소규모의 낙석 저항에 효과적이라고 알려져 있다. 그러나 낙석방지울타리가 흡수할 수 있는 에너지 규모에 대한 기준이 부족하고, 낙석방지울타리의 성능에 대한 분석 및 현장시험자료가 부족한 상태이다. 그러므로 본 연구에서는 일본 도로협회에서 제시한 간편법과 독일 Dr. Spang에 의해 개발된 Simulation program(Rockfall)을 이용하여 지형 조건에 따라 발생 가능한 낙석에너지를 산정하고, 낙석방지울타리의 규격에 따른 흡수 가능한 에너지를 비교하여 지형특성에 따라 적절한 낙석방지울타리 모형을 제안하였으며 이를 현장시험을 통해 검증하였다.

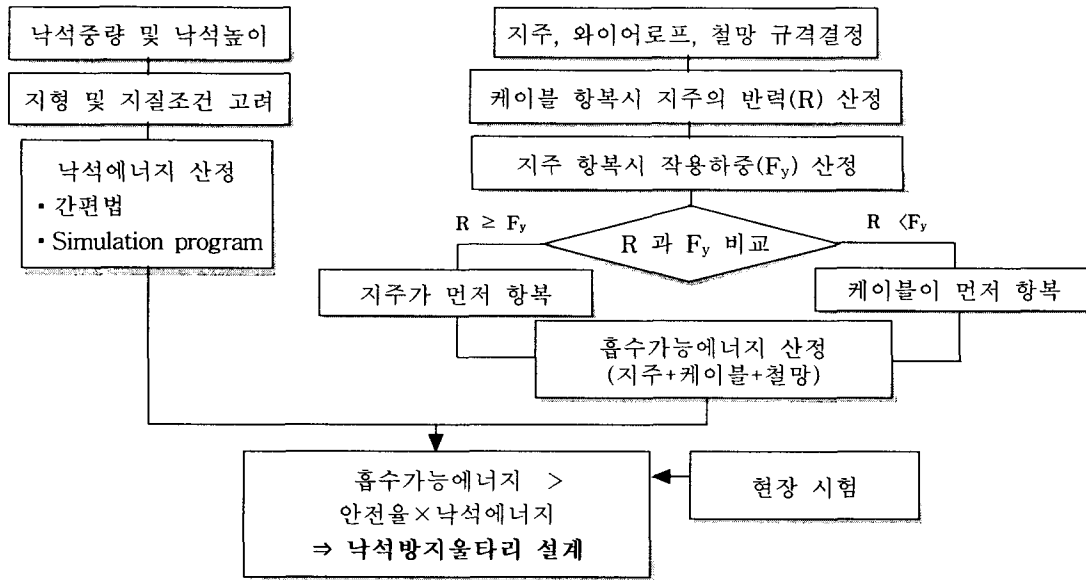


그림 1. 낙석방지울타리 설계과정

2.2 낙석 에너지

낙석에너지 산정시에는 낙석의 크기 및 형태, 절개면의 거칠기, 반발계수 등 많은 매개변수를 고려해야 하는데 일본도로협회에서는 절개면의 경사, 낙석중량, 낙하높이, 절개면 특성을 고려한 등가마찰계수를 이용하여 낙석에너지를 간편히 계산할 수 있는 간편법을 제시하였다. 이러한 간편법은 절개면의 반발계수 및 낙석의 운동형태에 따른 에너지 감소효과를 고려할 수 없기 때문에 실제적으로 발생하는 낙석에너지와는 차이가 있다는 단점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 현장여건을 고려한 Simulation program(Rockfall)을 이용하는데 절개면의 특성 및 낙석의 운동형태 등 낙석에너지에 영향을 줄 수 있는 요소들을 고려할 수 있으므로 보다 정확한 낙석에너지를 예측할 수 있다.

표 1. 낙석에너지 산정 방법

구분	간편법 (일본도로협회)	Simulation program(Rockfall)
낙석에너지	<ul style="list-style-type: none"> $E = (1 + \beta) \cdot (1 - \mu / \tan \phi) \cdot m \cdot g \cdot h$ μ: 등가마찰계수, ϕ : 절개면 경사도 β : 회전각속도에 의한 에너지 비 m : 낙석질량, g : 중력가속도, h : 낙하고 	<ul style="list-style-type: none"> $E_i = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_i^2 - E_{fric}$ m: 낙석질량 v_i : 반발계수 E_{fric} : 낙석마찰에너지

2.3 흡수 에너지

낙석방지울타리는 지주, 와이어로프, 철망으로 구성되며 각각 낙석에너지를 흡수하는 역할을 한다. 낙석방지울타리의 흡수에너지를 산정하기 위해서는 다음과 같은 몇 가지 가정사항이 있다.

- 낙석이 지주에 충돌할 경우와 지주간의 케이블에 충돌했을 경우 에너지를 비교하면 낙석이 지주간 케이블에 충돌했을 경우 흡수 가능 에너지가 작으므로 이 상태를 설계에 적용한다.
- 지주의 허용 최대변위각은 15° 로 하며, 케이블의 최대 신장량은 5%로 한다.
- 낙석의 충돌위치는 낙석방치책 높이의 $2/3$ 지점이며, 낙석의 충돌방향은 낙석 방지책과 직각이다.
- 낙석의 하중은 2개의 와이어로프에 동시에 작용한다.

이러한 가정사항을 바탕으로 각각의 구성요소가 흡수할 수 있는 에너지를 계산하여 전체 낙석방지울타리의 흡수 가능에너지를 산정한다.

$$E_{total} = E_1 + E_2 + E_3 \quad (1)$$

여기서, E_1 , E_2 , E_3 은 각각 와이어로프, 지주, 철망의 흡수가능에너지를 나타낸다. 지주가 항복응력에 도달하면 그 이상의 하중을 작용하여도 응력은 더 이상 변화하지 않는다는 소성변형 이론을 적용하여 지주가 받을 수 있는 최대 힘을 산정할 수 있다. 지주가 받을 수 있는 최대힘은 그림 2(a)와 같이 소성모멘트 $M_p = F_y \cdot h_2 = \sigma_y \cdot Z$ 이므로 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_y = \sigma_y \cdot Z/h_2 \quad (2)$$

여기서 h_2 는 하중작용높이, Z 는 단면계수, σ_y 는 지주의 항복응력을 의미한다.

와이어로프가 항복에 도달했을 때 지주에 작용하는 반력(R)은 그림 2.(b)와 같은 정역학적 평형조건($\sum F_y=0$)을 이용하여 산정하여야 하며 작용하는 하중 $P = 2T_y \cdot \sin \beta$ 이고 낙석이 두 개의 와이어로프에 동시에 작용하는 것으로 가정하였으므로 발생하는 지주의 반력은 다음 식 (3)과 같다.

$$R = 2T_y \cdot \sin \beta \quad (3)$$

여기서, T_y 는 와이어로프 항복장력이며 β 는 와이어로프 변형각을 나타낸다. 와이어로프의 변형각은 그림 2.(c)에 나타낸 바와 같이 $\cos^{-1}(0.5B/(0.5B+0.5\delta))$ 로 나타낼 수 있으며 δ 는 와이어로프 변형량 ($T_y L/EA$)을 의미한다.

이와 같이 산정한 지주의 저항 가능한 최대 하중(F_y)과 와이어로프가 항복시 지주 반력(R)을 비교하여 지주가 먼저 파괴를 일으키는 경우와 와이어로프가 먼저 파괴를 일으키는 경우로 나누어 지주 및 와이어로프의 흡수에너지를 산정 할 수 있다.

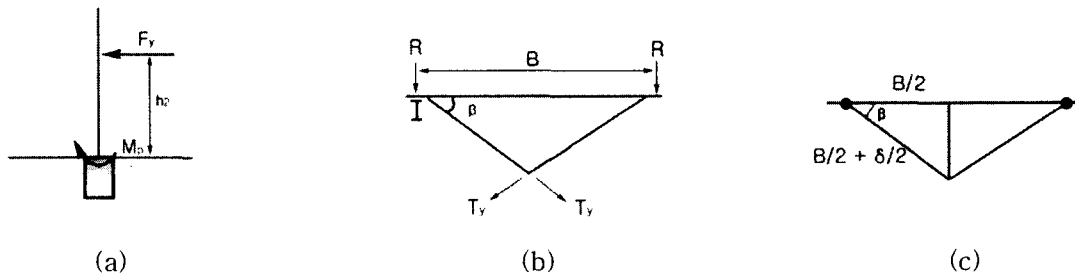


그림 2. 흡수에너지 산정

(1) 지주가 먼저 파괴 일으키는 경우 : ($R \geq F_y$)

와이어로프에 항복장력(T_y) 작용 시 지주 반력(R)이 지주가 받을 수 있는 최대 하중(F_y) 보다 크다는 것은 낙석방지울타리가 낙석에 저항할 때 와이어로프가 항복에 이르기 전에 지주에서 먼저 파괴가 일어나는 경우를 의미한다. 이때 흡수가능한 에너지를 산정하기 위해서 내부에너지의 변화량을 산정하여야 하며 순간하중이 작용하는 부재는 지속하중으로 인한 처짐의 2배인 점을 고려할 때 부재의 내부에너지는 다음 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$U = 1/2P \cdot \delta \times 2 = P \cdot \delta \quad (4)$$

여기서, P는 작용하중이며 δ 는 변형량을 나타낸다. 그러므로 그림 3.(a)에서 나타낸 바와 같이 지주 2분에서 흡수할 수 있는 에너지는 지주의 허용 최대변위각을 15° 로 산정했을 때 다음 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E_1 = 2 \times F_y \times h_2 \times \tan 15 \quad (5)$$

여기서, F_y 는 지주가 받는 최대 힘이며 h_2 는 하중 작용 높이를 나타낸다.

한편 지주에서 소성파괴가 발생할 때 2개의 와이어로프가 흡수할 수 있는 에너지는 다음 식 (6)과 같다.

$$E_2 = 0.5 \times T \times \delta \times 2 = T \times \delta = (T^2 - t^2) \cdot L/EA \quad (6)$$

여기서, T는 $F_y/2 \times \sin \gamma$ 이며, δ 는 TL/EA , t는 초기장력(0.5tf) 그리고 γ 은 와이어로프에 장력이 작용할 경우 와이어로프의 굴절각을 의미한다.

철망의 흡수에너지(E_3)는 실험결과를 적용하여 $2.5 \text{ tf} \cdot \text{m}$ 을 사용할 수 있다.

(2) 와이어로프가 먼저 파괴 일으키는 경우 : ($R < F_y$)

와이어로프에 항복장력(T_y) 작용 시 지주 반력(R)이 지주가 받을 수 있는 최대 하중(F_y)보다 작다는 것은 낙석방지울타리가 낙석에 저항할 때 와이어로프에서 먼저 파괴가 일어나는 경우를 의미한다. 와이어로프에서 파괴가 발생하는 경우 내부에너지는 그림 3.(b)에서 나타낸 바와 같이 부재의 굽힘 변형으로 인한 미소면적의 내부에너지 dU 를 구하여 전체연장에 대하여 적분함으로써 산정하며 식 (7)과 같다.

$$U = \int dU = \int M^2 dx / 2EI = P^2 L^3 / 6EI \quad (7)$$

여기서, 미소면적의 내부에너지 dU 는 $1/2 \times M d\theta$ 이며 $M^2 dx / 2EI$ 와 같이 나타낼 수 있으므로 지주 2분이 동시에 흡수할 수 있는 에너지는 식 (8)과 같다.

$$E_1 = \int M^2 dx / 2EI = 2 \times R^2 L^3 / 6EI = R^2 h_2^3 / 3EI \quad (8)$$

여기서, I는 지주의 단면 2차 모멘트, E는 지주의 탄성계수이며 $L=h_2$ 와 같다.

반면 와이어로프가 항복하면서 흡수할 수 있는 에너지는 식 (9)와 같다.

$$E_2 = 2 \times T_y \cdot L \cdot S \quad (9)$$

여기서, S는 와이어로프의 장력이 T_y 일 때 와이어로프의 신장률이며 최대 5%까지로 가정한다.

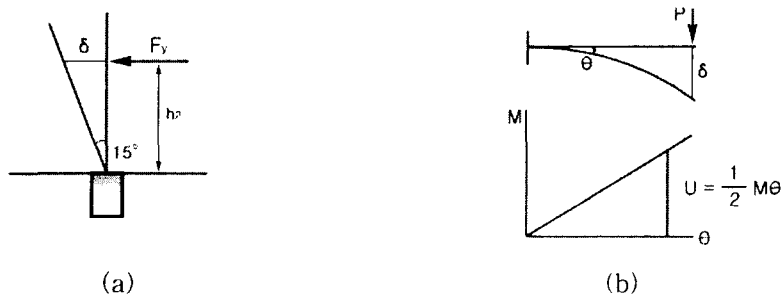


그림 3. 흡수에너지 산정(계속)

3. 낙석방지울타리 설계

3.1 낙석에너지 산정

낙석에너지를 산정하기 위해서는 발생 가능한 낙석의 중량을 결정하여야 한다. 낙석의 중량을 미리 예측한다는 것은 매우 어려우나 다년간 연구 조사된 자료를 바탕으로 설계에 이용할 수 있는 중량을 산정할 수 있다. 국내에서도 도로안전시설 설치 및 관리지침(낙석방지시설 편)에 의하면, 국내 국도주변 275개소에 대한 최근 낙석을 조사한 결과 평균 400kg정도의 낙석이 가장 많이 발생하는 것으로 분석하고 있다.

본 연구에서는 이러한 자료를 종합하여 낙석방지울타리 검토를 위해 낙석중량을 250kg, 400kg, 500kg으로, 낙석높이를 10m~40m로 구분하여 연구를 수행하였다. 낙석에너지 산정 방법으로는 일본도로협회에서 제시한 간편법과 Simulation program(Rockfall)을 이용하였으며 각각의 산정조건 및 낙석에너지 산정결과는 다음 표 2.와 3.과 같다.

표 2. 낙석에너지 산정 조건

구분	간편법(일본도로협회)	Simulation program(Rockfall)
낙석규모	250kg, 400kg, 500kg	250kg, 400kg, 500kg
낙석높이	10m, 15m, 20m, 25m, 30m	10m, 15m, 20m, 25m, 30m, 35m, 40m
비탈면 구배	리핑암(1:1) : 사면경사 45° 발파암(1:0.5) : 사면경사 63.43°	리핑암(1:1) : 사면경사 45° 발파암(1:0.5) : 사면경사 63.43°
방지울타리 높이	2.5 m	2.5 m

표 3. 낙석에너지 산정결과 (낙석규모 500kg 경우, 등가마찰계수(0.25))

낙석높이	간편법		Simulation program(Rockfall)			
	낙석에너지(tf·m)		낙석에너지(tf·m)		반발높이(m)	
	리핑암	발파암	리핑암	발파암	리핑암	발파암
10m	4.13	4.81	0.51	0.64	0.13	0.88
15m	6.19	7.22	0.57	1.28	0.38	1.13
20m	8.25	9.62	0.45	1.61	0.13	1.13
25m	10.31	12.03	-	-	-	-
30m	12.38	14.44	0.98	1.86	0.63	1.13
35m	14.44	16.84	3.58	10.7	0.88	3.8 이상
40m	16.50	19.25	3.59	10.8	0.88	3.8 이상

일본도로협회에서 제시한 간편법은 낙석의 반발에 의한 에너지 감소와 암반구성상태를 고려하지 않으므로 실제 낙석의 에너지보다 크게 나타난다. 그러므로 낙석에너지 산정시 Rockfall 등에 의한 Simulation 결과를 이용하는 것이 보다 합리적일 것으로 판단된다. Simulation 결과 발파암 35m 이상에서 낙석이 발생할 경우 낙석에너지가 급격히 증가하며, 낙석의 운동 궤적은 비탈면 하부의 2.5m 낙석방지울타리를 넘어가는 것으로 나타났다. 이러한 대 절토구간의 경우는 비탈면 하부에서 낙석에 대한 피해를 막아주기 위해서 비탈면 중간 소단부분에 낙석방지울타리를 설치하는 등 대책공법을 마련하는 것이 바람직하다.

3.2 낙석방지울타리 흡수에너지 산정

흡수가능에너지 산정시 낙석방지울타리를 구성하고 있는 와이어로프 및 지주의 길이, 규격 및 설치간격 등의 변화가 낙석방지울타리 흡수가능에너지에 미치는 영향을 분석하였다.

(1) 와이어로프 변화에 따른 흡수 가능 에너지

와이어로프의 규격과 길이의 변화에 따른 흡수가능에너지 분석을 다음 표 4.와 같은 조건으로 수행하였으며 그 결과는 표 5. 및 그림 4와 같다.

표 4. 와이어로프 및 지주의 적용조건

구 분	와이어로프 조건	적용 지주 조건
평가조건	· 설치 연장 : 30m, 60m, 90m, 120m · 규격 : $\phi 14, \phi 16, \phi 18$	· 규격 : H-150×75×5×7 · 간격 : 2m · 지주높이 : 2.5m

표 5. 와이어로프 규격과 길이 변화에 따른 흡수 가능 에너지

설치연장(m)	와이어로프 규격(ϕ)		
	$\phi 14$	$\phi 16$	$\phi 18$
30	3.77	3.76	3.75
60	3.80	3.79	3.78
90	3.82	3.81	3.80
120	3.84	3.83	3.81

지주를 고정하고 와이어로프의 조건을 달리하여 검토한 결과 와이어로프의 규격은 흡수에너지에 크게 영향을 미치지 못하는 것으로 평가되었다. 계산 결과 평가범위에서는 와이어로프의 규격이 작고 길이가 길수록 흡수에너지가 소량 증가하는 것으로 나타났는데 이는 항복점에 도달하지 않은 와이어로프가 신장률이 증가함에 따라 에너지를 소량 흡수한 것으로 평가된다. 그러나 낙석이 울타리에 충격하중으로 작용하는 점과 도로안전시설 설치 및 관리 지침에서 규정하는 기준 등을 감안하여 사용 와이어로프의 규격을 적절히 조절해 주어야 할 것으로 판단된다.

(2) 지주설치 간격 변화에 따른 흡수 가능 에너지

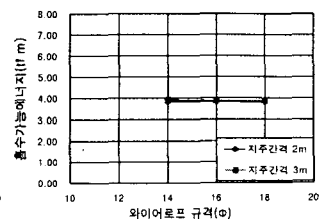
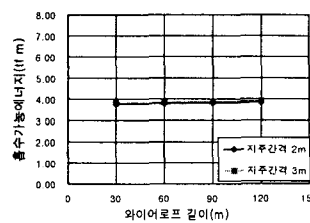
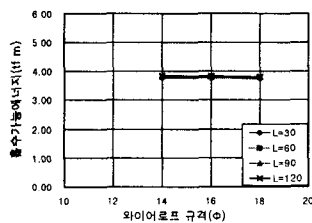
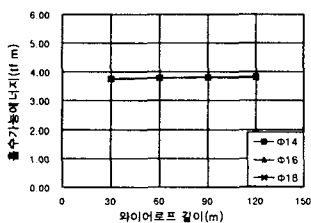
지주설치 간격 변화에 따른 흡수가능에너지 분석을 다음 표 6.과 같은 조건으로 수행하였으며 그 결과는 표 7. 및 그림 5와 같다.

표 6. 와이어로프 및 지주의 적용조건

구 분	와이어로프 조건	적용 지주 조건
평가조건	· 설치 연장 : 30m, 60m, 90m, 120m · 규격 : $\phi 18$	· 규격 : H-150×75×5×7 · 간격 : 2m, 3m · 높이 : 2.5m (하중 작용 높이 : 2.0m)

표 7. 지주간격 변화에 따른 흡수 가능 에너지

구 분	흡수 가능 에너지 (tf·m)							
	지주 간격(m)	와이어로프 길이 (규격 : $\phi 18$)				와이어로프 규격 (길이 : 60m)		
		30m	60m	90m	120m	$\phi 14$	$\phi 16$	$\phi 18$
2	3.77	3.80	3.82	3.84	3.84	3.83	3.81	
3	3.82	3.85	3.89	3.91	3.91	3.89	3.87	



(a) 와이어로프 길이 변화 (b)와이어로프 규격 변화

(a) 와이어로프 길이 변화 (b)와이어로프 규격 변화

그림 4. 와이어로프 규격과 길이 변화

그림 5. 지주간격 변화

지주간격을 조정하여 검토한 결과 지주간격을 2m에서 3m로 늘려도 흡수가능에너지가 감소하지 않는 것을 알 수 있는데, 이는 지주간격을 넓혀도 와이어로프의 인장력이 항복점에 도달하지 않은 상태에서는 에너지를 흡수할 수 있기 때문인 것으로 판단된다. 우리 나라에서는 일반적으로 낙석방지울타리 설치시 지주를 2m간격으로 설치하고 있으나 현장특성 및 시공성을 고려하여 지주간격을 결정하여 시공하는 것이 바람직하다고 판단된다.

(3) 지주규격 변화에 따른 흡수 가능 에너지

지주규격 변화에 따른 흡수가능에너지 분석을 다음 표 8.과 같은 조건으로 수행하였으며 그 결과는 표 9. 및 그림 6과 같다.

표 8. 와이어로프 및 지주의 적용조건

구분	평가조건	
와이어로프 조건	· 설치 연장 : 30m, 60m, 90m, 120m	· 규격 : $\phi 14$, $\phi 16$, $\phi 18$
적용 지주 조건	· Type① : H-150×75×5×7 (SS400)	· Type② : H-200×100×5.5×8 (SS400)
	· Type③ : H-250×125×6×9 (SS400)	· Type④ : H-300×150×6.5×9 (SS400)
	· 간격 : 3m	· 높이 : 2.5m (하중 작용 높이 : 2.0m)

표 9. 지주 규격변화에 따른 흡수 가능 에너지

구분	흡수 가능 에너지 (tf · m)											
	Type①			Type②			Type③			Type④		
지주규격	와이어로프규격											
설치연장(m)	$\phi 14$	$\phi 16$	$\phi 18$	$\phi 14$	$\phi 16$	$\phi 18$	$\phi 14$	$\phi 16$	$\phi 18$	$\phi 14$	$\phi 16$	$\phi 18$
30	3.81	3.80	3.79	5.32	5.30	5.24	7.78	7.68	7.59	10.63	10.45	10.30
60	3.85	3.84	3.83	5.47	5.43	5.37	8.13	7.98	7.87	11.26	10.99	10.78
90	3.89	3.87	3.85	5.57	5.50	5.45	8.40	8.22	8.07	11.74	11.42	11.15
120	3.91	3.89	3.87	5.65	5.58	5.51	8.60	8.41	8.22	12.16	11.78	11.47

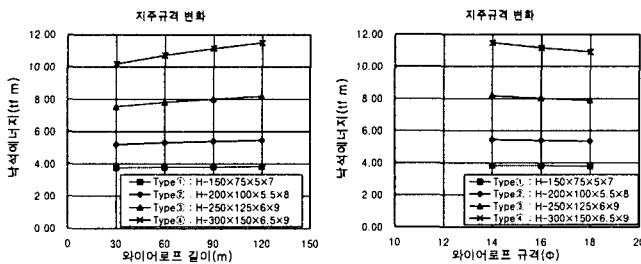
지주의 규격을 변화시켜 흡수가능에너지를 산출한 결과 낙석방지울타리의 구조상 지주가 와이어로프보다 먼저 항복함에 따라 지주의 규격을 키우면 와이어로프의 인장력을 더 항복에 가깝게 유도할 수 있어 흡수가능에너지는 커지고 있으나 지주를 무한정 키우는 것은 비경제적인 설계로 발생 가능한 낙석의 규모에 따라 적절한 규격을 결정하여 시공하여야 한다.

3.3 낙석 방지 울타리 안전을 평가

산정한 낙석에너지와 흡수가능에너지와의 관계를 바탕으로 낙석방지울타리의 안전을 평가할 수 있으며 표 10. 과 같은 적용조건에 따른 안전을평가 결과를 그림 7.에 나타내었다.

표 10. 안전을 평가를 위한 적용조건

구분	발생가능 낙석조건	낙석방지울타리 조건
평가조건	· 낙석중량 : 250kg, 400kg, 500kg · 낙석높이 : 10m~40m · 경사 : 리평암(45°) 발파암(63.43°)	· 지주규격 : Type ①, ②, ③, ④ · 지주간격 : 3m · 와이어로프 규격 : $\phi 18$ · 와이어로프 길이 : 60m



(a) 와이어로프 길이변화 (b)와이어로프 규격변화
그림 6. 지주규격 변화

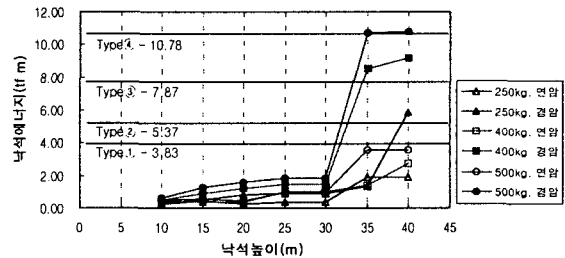


그림 7. 종류별 낙석방지울타리 적용성 평가

낙석에너지는 낙석 중량이 클수록, 절개면의 경사가 급할수록 증가하는 것을 알 수 있으며 30m이상의 대 절토 구간에서는 에너지가 급격하게 증가하는 것으로 나타났다. 이는 낙석이 절개면을 따라 운동하면서 가속도가 발생 하며, 발파암의 경우 20m 소단부분에서 낙석이 반발할 때 에너지가 크게 증가하는 것으로 판단된다.

낙석방지울타리의 흡수에너지는 지주규격을 증가시킴에 따라 급격히 증가하는 것을 알 수 있으며 Type①~④ 까지 나누어 산정한 흡수에너지는 각각 3.8tf · m, 5.37tf · m, 7.87tf · m, 10.78tf · m로 나타났다.

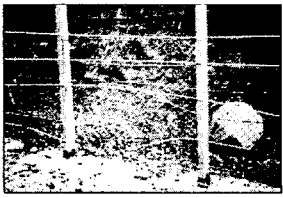
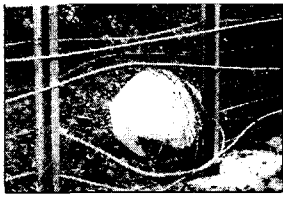
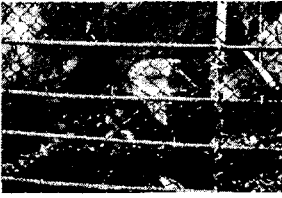
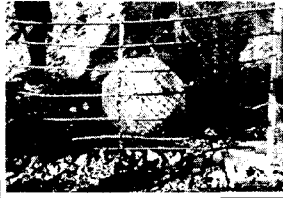
4. 모의 현장 시험

본 시험은 한국도로공사와 함께 실시한 현장시험으로 다양한 하중의 낙석에 대한 낙석방지울타리의 안정성 검토를 수행하였다. 국내에 일반적으로 설치되어 있는 기존 낙석방지울타리에 대한 현장시험결과, 이론식에서는 알 수 없는 여러 가지 파괴원인이 발생하였다. 와이어로프가 최대전단강도를 발휘하기 이전에 좌우의 와이어로프 지지 앵커가 파손되어 낙석방호기능을 상실하며, 대부분의 낙석이 낙석방책 하단 와이어로프에 걸쳐 충돌하므로 하부 와이어로프의 간격이 벌어진다. 그러므로 현장시험을 통해 발견된 문제점을 개선하고, 흡수가능에너지 평가결과를 반영하여 지주간격을 2.0m에서 3.0m로 늘린 Type①에 대한 현장시험도 추가적으로 실시하였다.

표 11. 현장시험 조건

구 분	시 험 방 법	구 분	시 험 방 법	
			기존 낙석방지울타리	개선 낙석방지울타리
사면 조건	발파암(1:0.5)	지주 규격	H - 150×75×5×7	H - 150×75×5×7
사면 높이	30m~40m	지주 간격	2m	3m
낙석 중량	250kg, 500kg, 1000kg	와이어로프 규격	∅ 18	∅ 18
낙하 높이	5m, 10m, 15m, 20m	와이어로프 간격	0.3m	0.2m

표 12. 현장시험 결과

구 분	기존 낙석방지울타리		개선 낙석방지울타리	
	500kg, 15m	1000kg, 10m	500kg, 20m	1000kg, 20m
성 능	파괴	파괴	기능 수행	기능 수행
현 장 시험				

5. 결 론

1. 낙석에너지 산정시 일본도로협회에서 제시한 간편법은 낙석의 반발에 의한 에너지 감소와 암반구성상태를 고려하지 않아 낙석에너지를 과도하게 산정하는 경향이 있으므로 낙석계적에 따른 에너지 감소효과를 반영한 Simulation program 결과를 적용하는 것이 보다 합리적일 것으로 판단된다.
2. 낙석방지울타리의 구성요소인 지주 및 와이어로프 규격의 변화에 따른 흡수에너지 분석결과 와이어로프의 규격이나 지주 간격보다 지주의 규격의 변화가 흡수에너지에 가장 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다.
3. 발생가능한 낙석에너지와 낙석방지울타리의 흡수에너지를 비교한 결과 30m 이상 발파암 구간을 제외하고는 지주간격을 2.0m에서 3.0m로 늘린 Type①의 규격으로 예상되는 낙석에너지를 흡수할 수 있는 것으로 평가되었다. 그러나 실제로 현장에 적용할 때에는 여러 가지 현장여건을 고려하고, 낙석방지울타리의 취약점을 보완하여 낙석방지울타리를 시공하는 것이 필요하다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부(2000), 도로안전시설 설치 및 관리지침 연구(낙석방지시설, 도로반사경 편)
2. 구호본, 박혁진, 백영식(2001), "현장낙석시험을 통한 낙석방지울타리 특성 및 성능평가", 한국지반공학회논문집, 제17권, 6호, pp.111~121
3. 한국도로공사 도로연구소(1999), 낙석에 대한 안전대책
4. 日本道路協會(2000), 落石對策便覽
5. 鐵道綜合技術研究所(1998), 落石對策技術
6. 三上善(1984), 落石防止防護工法