

해석적-수치해석적 방법을 통한 낙석방지울타리에 작용하는 에너지 분석

Integrated Analytical-Numerical Approach to Compute the Energy on Rock-fall Protection Fence

김 희 수¹⁾ · 황 영 철²⁾ · 장 현 익³⁾ · 반 호 기[†]

Hee Su Kim · Youngcheol Hwang · Jang, Hyun-ick · Hoki Ban

Received: November 7th, 2019; Revised: November 12th, 2019; Accepted: November 25th, 2019

ABSTRACT : A man-made slope has been increased due to the construction of road. This slope lies at risk of rock falling, induced mostly by heavy rainfall. The MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport) recommends the specific dimension of rockfall protection fence (post, wire-rope, and mesh) which should resist 48~61 kJ. However, the energy absorption capacity of each component of rockfall protection fence is not clearly presented. Hence, this study made an effort to compute the energy absorption capacity of each component in analytical and numerical method, and compared with each other.

Keywords : Rock-fall protection fence, Rockfall, Analytical and numerical method

요 지 : 우리나라의 국토는 약 70% 이상 산악지형으로 산업화와 도시화로 인한 도로의 확장과 연장으로 인해 사면을 변형시키는 규모가 매년 증가하고 있다. 이렇게 변형된 사면은 집중호우와 지진 등의 자연재해로 인해 낙석발생의 위험이 높아지고 있다. 국토교통부(2016) 도로안전시설 설치 및 관리지침 중 낙석방지시설 편에는 48~61kJ에 상응하는 와이어로프, 지주, 망의 규격 등이 제시되어 있으나 낙석방지울타리의 흡수에너지와의 상관관계는 명확하게 제시되어 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 해석적, 수치해석적 방법을 통해 낙석방지울타리에 작용하는 에너지를 계산하고 비교 분석하였다. 그 결과 낙석방지울타리 흡수에너지의 경우 지주의 형태가 H형강인 경우 1경간과 3경간일 때 수치해석의 경우가 2.3, 4.4kJ 정도 크게 계산되었다. 지주의 형태가 각형강관인 경우는 3경간인 경우 오히려 해석적 방법이 34.4kJ 정도 크게 계산되었다. 이는 수치해석에서는 중간지주 부분은 각형강관이 아닌 H형강을 사용하여 수행되었기 때문에 상대적으로 작은 흡수에너지를 보여주고 있다. 향후 각형강관으로 이루어진 3경간에 대해 추가적으로 수치해석을 수행 예정이며, 이들을 검증하기 위한 실험낙석시험을 실시할 예정이다.

주요어 : 낙석방지울타리, 낙석, 해석적-수치해석적 방법

1. 서 론

우리나라의 국토는 약 70% 이상이 산악지형으로 산업화와 도시화로 인한 도로의 확장과 연장으로 인해 사면을 변형시키는 규모가 매년 증가하고 있다. 하지만 변형시킨 사면은 집중호우와 지진 등의 자연재해로 인해 낙석발생의 위험이 높아지고 있다. 이러한 낙석의 위험을 방지하고자 낙석방지울타리에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 낙석방지울타리의 흡수에너지 시험방법은 대표적으로 실제사면낙석시험(Koo et al., 2001; Hwang, 2002), 펜듈럼시험(Buzzi et al., 2013), 런칭시험(右城 猛, 2009a; 2009b), 수직낙하시험(Han et al., 2016)이 있다. Koo et al.(2001)은 진주-통영간 고속도로 공사현장의 사면 3곳에 대해 사면낙석시험을 실시하였다. 낙석방지울타리의 경우 총 연장 10~60m로 제

작하였다. 시험결과 32.4, 33.7kJ의 충격에너지는 파손 없이 모든 에너지를 흡수하였으나, 일부 구조가 파손된 상태에서 64.2kJ로 타격한 결과 낙석방지울타리가 에너지를 흡수하지 못함을 보고하였다. Hwang(2002)은 대구-포항간 고속도로 공사현장의 사면에 대하여 사면낙석시험을 실시하였다. PVC코팅망을 이용하여 낙석방지울타리를 제작하여 25kJ 이하의 충격에너지로 총 49회의 낙석 낙하 시험 중 지지하지 못하는 경우는 6회로서 0.05ton의 낙석이 1회, 0.1ton의 경우 5회임을 보고하였다. PVC코팅망 대신 Ex-Metal을 이용하여 낙석방지 울타리를 제작한 경우 PVC코팅망 시험과 동일하게 총 49회를 진행하였으며, 시험결과 모든 경우에 낙석 불을 지지함을 보고하였다. Buzzi et al.(2013)은 펜듈럼 시험을 통해 낙석방지울타리 성능평가를 진행하였다. 낙석 불의 밀도와 모양은 ETAG-027(EOTA, 2008)의 지침에 따

1) Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Kangwon National University

2) Professor, Department of Civil Engineering, Sang Ji University

3) Senior Research Engineer, Korea Expressway Corporation

† Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Kangwon National University (Corresponding Author : hban@kangwon.ac.kr)

라 제작하였다. 낙석 볼의 충격에너지의 경우 35kJ로 총 4회 진행하였으며, 시험결과 낙석방지울타리가 모든 시험에서 방호가 가능함을 보고하였다. 2009년 일본 후지산 신설 주차장에서 낙석의 직경 1.2m, 무게 약 1t의 낙석이 해발 3,000m 부근에서 약 600m 아래의 주차장까지 굴러떨어지는 사고가 발생하였다. 右城 猛(2009a; 2009b)은 이러한 낙석사고를 모사하기 위해 런칭시험을 진행하였다. 시험결과 55kJ의 흡수энер지를 가지는 낙석방지울타리가 88kJ에 파손됨을 확인하였으며, 이를 통해 토목구조물은 2~3배의 안전성을 가지도록 설계가 되어야 하나 낙석방지울타리의 경우 약 1.6배로 안전성을 가지지 못함을 보고하였다. Han et al.(2016)은 유한요소 프로그램인 LS-DYNA를 사용하여 흡수에너지가 50kJ인 기존 낙석방지울타리를 개선하여 100kJ의 낙석충돌 에너지를 견딜 수 있는 낙석방지울타리를 설계하였다. 설계된 낙석방지울타리에 대해 2회 성능평가 시험을 진행하였으며, 낙석방지울타리의 방호능력 평가는 ETAG-027에 제시된 성능평가기준을 적용하였다. 시험결과 충격에너지 100kJ에 대해 방호능력을 보유하고 있음을 보고하였다. Moon et al.(2003)은 LS-DYNA3D를 이용하여 기존의 낙석방지울타리에 대한 모의시험을 수행하였다. 수행방법은 낙석방지울타리의 상단부, 하단부에 400kg의 낙석 볼을 사용하여 낙석의 충돌속도를 달리함으로써 낙석방지울타리의 지지 능력을 평가하였다. 모의시험결과 상단부에 충돌 시 28.8kJ, 하단부에 충돌 시 20~51.2kJ의 충돌에너지를 흡수함을 보고하였으며, 이를 통해 새로운 낙석방지울타리를 제안하였다. 제안한 낙석방지울타리는 상부 충돌 시 28.8kJ, 하단부 충돌 시 51.2~80.0kJ의 충돌에너지를 흡수함을 보고하였다.

이와 같이 실제사면낙석시험, 펜듈럼시험, 런칭시험, 수직낙하시험, 수치해석을 통한 모의시험 등을 통한 낙석방지울타리의 흡수가능에너지에 대한 선행연구는 진행되었지만 국내의 경우 국토교통부(2008) ‘도로안전시설 설치 및 관리 지침 중 낙석방지지설 편’에는 48~61kJ에 상응하는 와이어로프, 지주, 망의 규격 등이 제시가 되어있으나 낙석방지울타리의 흡수에너지와의 상관관계는 명확하게 제시되어 있지 않다. 하지만 국외의 경우 ETAG-027(2008), NCHRP (Ben et al., 2015)에 제시된 낙석시험방법, 지주의 변위측

정, 낙석의 충돌위치, 각도, 속도 등이 제시가 되어 국내보다 정확한 낙석방지울타리 설계가 가능하다. 따라서 본 연구에서는 낙석방지울타리를 구성하는 와이어로프, 지주, 망의 흡수가능에너지에 대한 상관관계를 해석적방법과 수치해석방법으로 분석하였다.

2. 수치해석적 방법을 통한 낙석방지울타리 흡수가능에너지 분석

2.1 수치해석적 방법

낙석방지울타리를 구성하는 와이어로프, 지주, 망의 흡수가능에너지에 대한 상관관계를 분석하고자 상용수치해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석에 사용된 물성치는 한국도로공사 낙석방지울타리 50kJ 표준규격을 사용하였다(Table 1). 이때 낙석방지울타리의 와이어로프, 지주, 망은 3차원 2절점 보요소(B31)를 사용하여 모델링 하였다. 낙석 볼의 경우 낙석 실험시험에서 사용 중인 ETAG 027(2012)에서 제안한 형상(400kg)을 사용하였다. 낙석 볼은 울타리 구성요소들에 비해 강도가 크기 때문에 4절점 강체요소인 R3D4(ABAQUS)를 사용하여 변형이 되지 않는 강체로 모델링하였다. 낙석방지울타리의 와이어로프와 중간지주는 x 방향(Fig. 1)에 대해 구속이 되어있지 않기 때문에 와이어로프와 중간지주는 x 방향에 대해서 자

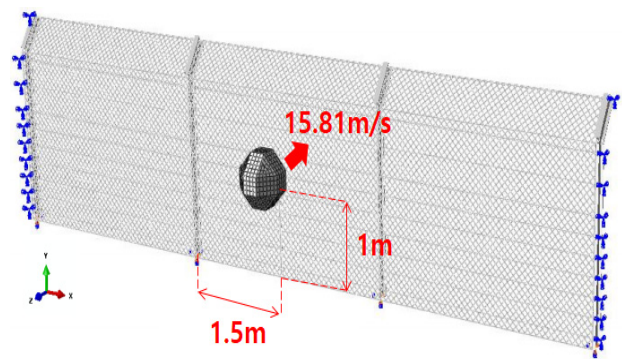


Fig. 1. Finite element mesh and boundary conditions for the simulations

Table 1. Physical properties used for simulations

	Wire rope	Post (H-beam, □-beam)	Mesh
Elastic modulus, E (Mpa)	55,400	205,000	205,000
Yield stress, fy (MPa)	1,470	245	290
Cross section area, A (mm ²)	131.9	-	-
Contact	Verticality=hard contact, Horizontality=Slip coefficient 0.2		
Collision speed (m/s)	15.8114		
Collision location (m)	1		

유롭게 이동할 수 있으며, y, z 방향에 대해서는 동일한 변형을 가지도록 경계조건을 설정하였다. 단부의 경우 와이어로프가 체결되어있으므로 x, y, z 방향을 와이어로프와 단부가 같이 움직일 수 있도록 설정하였다. 철망의 경우 와이어로프와 분리가 되지 않도록 지주와 지주사이의 1/3, 2/3 지점에 고정하였다. 충격에너지의 경우 Fig. 1과 같이 50kJ의 충격에너지를 가하기 위해 낙석 볼의 속도를 15.81m/s로 설정하였다. 또한 General contact 옵션(ABAQUS)를 사용하여 부재간의 접촉을 모사하였으며, 마찰계수는 0.2를 사용하였다. 수치해석은 지주의 형태와 설치구간에 따라 총 3가지의 형태로 1)H형강으로 이루어진 3경간인 경우, 2)H형강으로 이루어진 1경간인 경우, 3)각형강관으로 이루어진 3경간인 경우에 대하여 수행하였다.

2.2 H형강으로 이루어진 3경간에 대한 흡수가능에너지 분석

수치해석 수행결과는 Fig. 2와 같다. 그림에 보듯이 망의 최대변위는 1.36m임을 확인하였다. Fig. 3은 낙석방지울타리

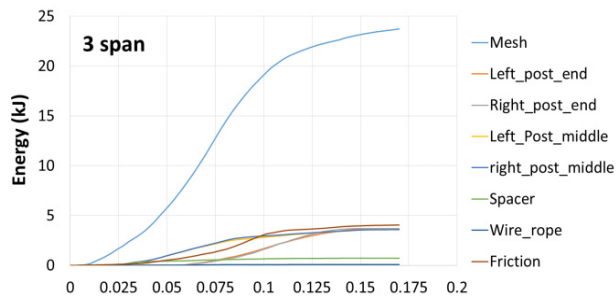


Fig. 3. Absorbable energy of wire rope, post, mesh (H-beam, 3 span)

Table 2. Summary of absorbed energy at each component of rock-fence (H-beam, 3 span)

Wire rope (Wire rope, Spacer, Friction)	Post	Mesh
10kJ	16kJ	24kJ

리에 충격을 가함에 따라 시간별 흡수에너지양이다. 이때, 낙석방지울타리의 최대 흡수가능에너지는 Table 2에 나타내었다. 표에 보듯이 와이어로프(Wire rope)은 10kJ, 지주(Post)은 16kJ, 망(Mesh)은 24kJ로 낙석방지울타리의 총 흡수에너지가 50kJ이다. 따라서 충격에너지 50kJ를 모두 흡수함을 확인하였다. 이때, 와이어로프는 Wire rope, Spacer, Friction을 합친 흡수에너지로 계산을 하였다. 낙석방지울타리의 경우 크게 망, 지주, 와이어로프로 구성되어있지만 실제로는 이보다 복잡하게 구성되어있다. 따라서 수치해석을 통해 이를 모사하고자 하였으며, 해석적 방법을 통한 흡수가능에너지와 분석하고자 와이어로프의 흡수가능에너지를 Wire rope, Spacer, Friction을 합친 흡수에너지로 계산하였다.

2.3 H형강으로 이루어진 1경간에 대한 흡수가능에너지 분석

수치해석 수행결과는 Fig. 4와 같다. 그림에 보듯이 망의 최대 변위가 1.47m로 낙석방지울타리가 충격에너지 50kJ를 흡수하지 못하여 처짐을 확인하였다. Fig. 5와 Table 3에 보듯이 와이어로프는 11kJ, 지주는 18kJ, 망은 13kJ로 충격에너지 50kJ 중에 42kJ만을 흡수함을 확인하였다. 따라서 낙석방지울타리 표준규격의 충격에너지 50kJ를 견디지 못함을 확인하였다.

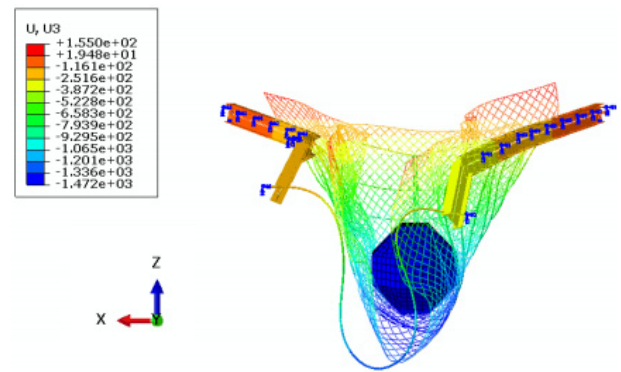


Fig. 4. Results of numerical analysis (H-beam, 1 span)

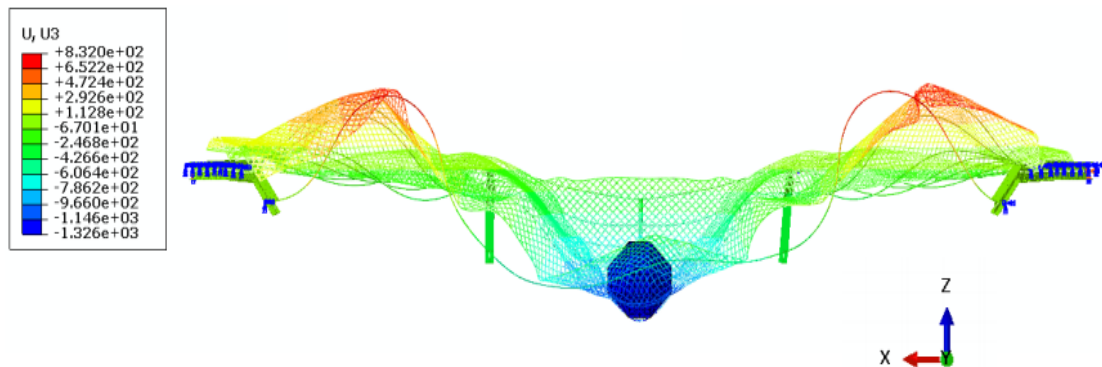


Fig. 2. Results of numerical analysis (H-beam, 3 span)

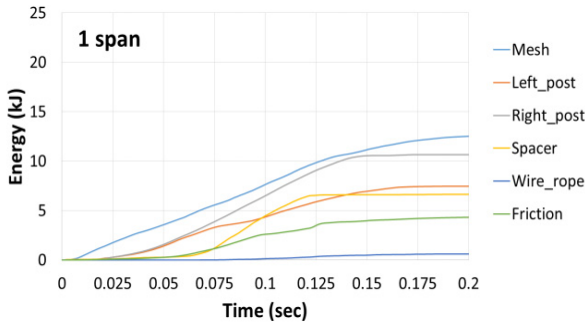


Fig. 5. Absorbable energy of wire rope, post, mesh (H-beam, 1 span)

Table 3. Summary of absorbed energy at each component of rock-fence (H-beam, 1 span)

Wire rope (Wire rope, Spacer, Friction)	Post	Mesh
11kJ	18kJ	13kJ

2.4 각형강관으로 이루어진 3경간에 대한 흡수가능 에너지 분석

수치해석 수행결과는 Fig. 6과 같다. 그림에 보듯이 땅의 최대변위는 0.77m임을 확인하였다. 동일한 3경간일 때 각형관의 경우 H형강에 비해 땅의 최대변위가 0.59m 작음을 확인하였다. 흡수에너지의 경우 Fig. 7과 Table 4에 보듯이 와이어로프는 4kJ, 지주는 37kJ, 망은 9kJ로 모든 충격에너지(50kJ)를 흡수함을 확인하였다. 동일한 3경간일 때 각형관의 경우 H형강에 비해 지주가 21kJ를 더 흡수함을 확인하였다. 이는 지주에서 더 많은 충격에너지를 흡수하였기 때문에 땅의 변위가 작음을 확인하였다. 따라서 각형강관으로 설치된 3경간의 경우 H형강으로 설치된 3경간보다 더 많은 충격에너지를 흡수할 것으로 예상된다.

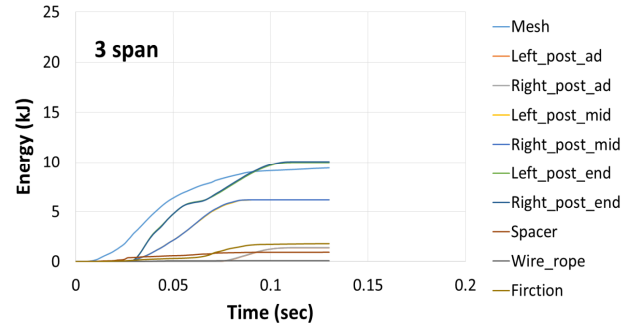


Fig. 7. Absorbable energy of wire rope, post, mesh (□-beam, 3 span)

Table 4. Summary of absorbed energy at each component of rock-fence (□-beam, 3 span)

Wire rope (Wire rope, Spacer, Friction)	Post	Mesh
4kJ	37kJ	9kJ

3. 해석적 방법을 통한 낙석방지울타리 흡수가능에너지 분석

3.1 해석적 방법의 범위

‘도로안전시설 설치 및 관리지침-낙석방지시설 편’(국토교통부, 2008)에 의하면 낙석방지 울타리가 견딜 수 있는 흡수가능 에너지는 다음과 같다.

- ① 낙석방지울타리의 흡수가능에너지(E_T)는 Eq. (1)으로 계산한다.

$$E_T = E_R + E_P + E_N \quad (1)$$

이때, E_R : 와이어로프의 흡수에너지

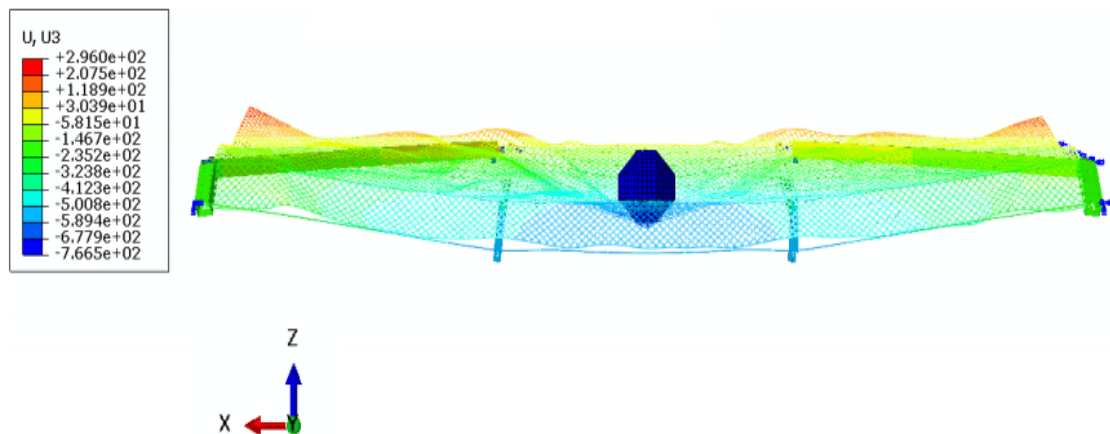


Fig. 6. Results of numerical analysis (□-beam, 3 span)

E_p : 지주의 흡수에너지
 E_N : 철망의 흡수에너지

② 와이어로프에 항복장력(T_y)이 작용하였을 때의 지주
 로 반력(R)은 Eq. (2)와 같다.

$$R = 2T_y \sin\theta_1 \quad (2)$$

이때, T_y : 와이어로프의 항복장력

θ_1 은 Eq. (3)과 같다.

$$\left(\frac{a}{2} + \frac{T_y L}{2E_w A}\right) \cos\theta_1 = \frac{a}{2} \quad (3)$$

이때, a : 지주의 간격
 L : 와이어로프의 길이
 E_w : 와이어로프의 탄성계수
 A : 와이어로프의 단면적

③ 지주의 하단이 소성힌지를 형성하는데 필요한 힘 F_y
 는 Eq. (4)와 같다.

$$F_y = \frac{\sigma_y z}{h_2} \quad (4)$$

이때, σ_y : H형강의 항복 응력
 z : H형강의 단면 계수
 h_2 : 힘의 작용점까지의 높이

④ 상기에서 산출한 R 과 F_y 를 비교하여 다음과 같은 조
 건으로 와이어로프 흡수에너지를 계산한다. ($R \geq F_y$)

$$E_R = \frac{L}{E_w A} (T^2 - T_0^2) \quad (5)$$

이때, T : F_y 에 대응하는 와이어로프 장력으로 다음의 Eq.
 (6), (7)을 이용하여 θ_2 의 값을 구할 수 있다.

$$T = \frac{F_y}{2\sin\theta_2} \quad (6)$$

$$\left(\frac{a}{2} + \frac{TL}{2E_w A}\right) \cos\theta_2 = \frac{a}{2} \quad (7)$$

⑤ 철망의 흡수가능 에너지를 계산하는 것은 현 시점에
 서 불가능하므로 시험 값으로부터 $E_N = 25kJ$ 로 한다.

3.2 낙석방지울타리 흡수가능에너지 산정에 사용된 물성치

낙석방지울타리의 흡수에너지를 산정하기 위해 낙석방
 지울타리를 구성하고 있는 와이어로프, 지주, 철망 등의 변
 화로 흡수가능에너지에 미치는 영향을 분석하였다. 이때 사
 용된 H형강과 각형강관, 와이어로프의 물성치는 Table 5와
 6에 나타내었다.

3.3 낙석방지울타리 흡수가능에너지 산정

3.3.1 H형강으로 이루어진 3경간에 대한 흡수가능에너지 분석

H형강으로 이루어진 3경간에 대한 흡수가능에너지를 분

Table 5. Physical properties of H-beam and □-beam

H-beam		□-beam	
Yield stress (kN/m^2)	Section modulus (kN/m^2)	Yield stress (kN/m^2)	Section modulus (kN/m^2)
245×10 ³	88.8×10 ⁶	245×10 ³	38.4245×10 ⁵

Table 6. Physical properties of wire rope

Diameter of wire rope (mm^2)	Cross section (A, mm^2)	Yield tension (T_y, kN)	Breaking load (T_b, kN)	Modulus of elasticity ($E_w, kN/m^2$)
∅ 20	131.9	1,470×10 ³	249	55,400×10 ³

Table 7. Support and wire rope conditions for H-beam, 3 span

Standard post	Standard wire rope
① Standard : H-150×75×5×7 ② Interval : 3m ③ Collision location : 1m	① Standard : ∅ 20 ② Length : 9m

석에 사용된 지주와 와이어로프의 조건은 Table 7에 나타내었다.

H형강으로 이루어진 3경간에 대한 흡수가능에너지를 분석한 결과를 Table 8에 나타내었다. 표에 보듯이 초기장력을 미고려 시 총 40.2kJ의 충격에너지를 낙석방지울타리가 흡수함을 확인하였다. 초기장력 고려 시 총 45.6kJ의 충격에너지를 낙석방지울타리가 흡수함을 확인하였다. 따라서 초기장력을 고려 시 5.4kJ의 충격에너지를 더 흡수함을 확인하였다.

3.3.2 H형강으로 이루어진 1경간에 대한 흡수가능에너지 분석

H형강으로 이루어진 1경간에 대한 흡수가능에너지를 분석에 사용된 지주와 와이어로프의 조건은 Table 9에 나타내었다.

Table 8. Calculation of absorbed energy for H-beam, 3 spans

Division	Absorbed energy without considering initial tension (kJ)	Energy absorbed when considering initial tension (kJ)
Wire rope	3.5	8.9
Post	11.7	11.7
Mesh	25	25
Sum	40.2	45.6

Table 9. Support and wire rope conditions for H-beam, 1 span

Standard post	Standard wire rope
① Standard : H-150×75×5×7 ② Interval : 3m ③ Collision location : 1m	① Standard : $\phi 20$ ② Length : 3m

Table 10. Calculation of absorbed energy for H-beam, 1 spans

Division	Absorbed energy without considering initial tension (kJ)	Energy absorbed when considering initial tension (kJ)
Wire rope	2.4	3
Post	11.7	11.7
Mesh	25	25
Sum	39.1	39.7

Table 11. Support and wire rope conditions for □-beam, 3 span

Standard post	Standard wire rope
① Standard : □-250×250×5 ② Interval : 3m ③ Collision location : 1m	① Standard : $\phi 20$ ② Length : 9m

Table 12. Calculation of absorbed energy for □-beam, 1 spans

Division	Absorbed energy without considering initial tension (kJ)	Energy absorbed when considering initial tension (kJ)
Wire rope	25.2	9
Post	50.4	50.4
Mesh	25	25
Sum	100.6	84.4

H형강으로 이루어진 1경간에 대한 흡수가능에너지를 분석한 결과를 Table 10에 나타내었다. 표에 보듯이 초기장력을 미고려 시 총 39.1kJ의 충격에너지를 낙석방지울타리가 흡수함을 확인하였다. 초기장력 고려 시 총 39.7kJ의 충격에너지를 낙석방지울타리가 흡수함을 확인하였다. 따라서 초기장력을 고려 시 0.6kJ의 충격에너지를 더 흡수함을 확인하였다.

3.3.3 각형강관으로 이루어진 3경간에 대한 흡수가능에너지 분석

각형강관으로 이루어진 3경간에 대한 흡수가능에너지를 분석에 사용된 지주와 와이어로프의 조건은 Table 11에 나타내었다.

각형강관으로 이루어진 3경간에 대한 흡수가능에너지를 분석한 결과를 Table 12에 나타내었다. 표에 보듯이 초기장

력을 미고려 시 총 100.6kJ의 충격에너지를 낙석방지울타리가 흡수함을 확인하였다. 초기장력 고려 시 총 84.4kJ의 충격에너지를 낙석방지울타리가 흡수함을 확인하였다. H형강, 3경간인 경우 1경간인 경우와 달리 초기장력을 미고려 시 16.2kJ이 더 흡수함을 확인하였다.

4. 해석적-수치해석적 방법을 통한 낙석방지울타리 흡수가능에너지 분석

4.1 H형강으로 이루어진 3경간에 대한 흡수가능에너지 분석

H형강으로 이루어진 3경간에 대한 흡수가능에너지를 해석적-수치해석적 방법을 통해 분석한 결과를 Table 13에 나타내었다. 이때, 낙석방지울타리 설치 시 와이어로프의 초기장력이 생기기 때문에 해석적 방법에서 초기장력 고려한 흡수가능에너지와 분석하였다. 흡수에너지는 수치해석적 방법의 경우 50kJ, 해석적 방법의 경우 45.6kJ로 수치해석적 방법으로 해석 시 흡수가능에너지가 4.4kJ 크게 나타났다.

4.2 H형강으로 이루어진 1경간에 대한 흡수가능에너지 분석

H형강으로 이루어진 1경간에 대한 흡수가능에너지를 해석적-수치해석적 방법을 통해 분석한 결과를 Table 14에 나

타내었다. 흡수에너지는 수치해석적 방법의 경우 42kJ, 해석적 방법의 경우 39.7kJ로 수치해석적 방법으로 해석 시 흡수가능에너지가 2.3kJ 크게 나타났다. 또한 모든 경우의 흡수가능에너지가 50kJ미만으로 낙석방지울타리 표준규격의 충격에너지인 50kJ을 흡수하지 못함을 확인하였다.

4.3 각형강관으로 이루어진 3경간에 대한 흡수가능에너지 분석

각형강관으로 이루어진 3경간 낙석울타리의 흡수가능에너지를 해석적인 방법과 수치해석적 방법을 이용하여 분석한 결과를 Table 15에 나타내었다. Table 15에서 보듯이 해석적인 방법으로 계산된 흡수에너지가 84.4kJ로 수치해석적 통해 얻은 50kJ보다 34.4kJ 더 많은 에너지를 흡수하는 것으로 나타났다. 이는 수치해석에서는 중간지주 부분은 각형강관이 아닌 H형강을 사용하여 수행되었기 때문에 상대적으로 작은 흡수에너지를 보여주고 있다. 따라서 향후 각형강관으로만 이루어진 3경간에 대한 수치해석이 추가적으로 필요하다. 또한 이들을 검증하기 위한 실물낙석시험을 향후 실시할 예정이다.

5. 결 과

본 연구에서는 해석적-수치해석적 방법을 통해 낙석방지울타리에 작용하는 에너지를 살펴보았으며, 이를 통해 다음

Table 13. H-shaped steel, 3 spans of absorbable energy

Division	Absorbed energy in analytical method (kJ)	Absorbed energy in numerical method (kJ)
Wire rope	8.9	10
Post	11.7	16
Mesh	25	24
Sum	45.6	50

Table 14. H-shaped steel, 1 spans of absorbable energy

Division	Absorbed energy in analytical method (kJ)	Absorbed energy in numerical method (kJ)
Wire rope	3	11
Post	11.7	18
Mesh	25	13
Sum	39.7	42

Table 15. □-shaped steel, 3 spans of absorbable energy

Division	Absorbed energy in analytical method (kJ)	Absorbed energy in numerical method (kJ)
Wire rope	9	4
Post	50.4	37
Mesh	25	9
Sum	84.4	50

과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 수치해석 방법을 통해 낙석방지울타리 흡수에너지 분석결과 H형강으로 이루어진 3경간인 경우, 각형강관으로 이루어진 3경간인 경우에 충격에너지(50kJ)를 모두 흡수함을 확인하였다. 하지만 H형강으로 이루어진 1경간일 때 42kJ로 충격에너지를 모두 흡수하지 못함을 확인하였다. 망의 최대변위는 동일한 3경간일 때 H형강보다 각형강관인 경우에 0.59m 작음을 확인하였다. 이는 동일한 충격에너지를 가했을 경우 지주가 형태가 각형강관일 때 더 많은 충격에너지를 흡수가능 함을 확인하였다.
- (2) 해석적 방법을 통해 낙석방지울타리 흡수에너지 분석결과 H형강으로 이루어진 3경간일 45.6kJ, H형강으로 이루어진 1경간일 때 39.7kJ, 각형강관으로 이루어진 3경간일 때 84.4kJ를 흡수함을 확인하였다. 각형강관으로 이루어진 3경간인 경우 H형강으로 이루어진 3경간보다 38.8kJ의 충격에너지를 더 흡수가능 함을 확인하였다.
- (3) 각형강관으로 이루어진 3경간 낙석울타리의 흡수가능 에너지를 해석적인 방법과 수치해석적 방법을 이용하여 분석한 결과 해석적인 방법으로 계산된 흡수에너지가 84.4kJ로 수치해석적 통해 얻은 50kJ보다 34.4kJ 더 많은 에너지를 흡수하는 것으로 나타났다. 이는 수치해석에서는 중간지주 부분은 각형강관이 아닌 H형강을 사용하여 수행되었기 때문에 상대적으로 작은 흡수에너지를 보여주고 있다.
- (4) 향후 각형강관으로만 이루어진 3경간에 대한 수치해석이 추가적으로 수행 예정이며, 이들을 검증하기 위한 실물낙석시험을 실시할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한국도로공사 도로교통연구원에서 지원하는 “낙석방지울타리 설계기법 수립 및 검증 실험 용역” 연구사업과 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업(비탈면 대상 조사·점검 개선 및 보강시설 노후화 대응 기술 개발. 19SCIP-C151408-01)의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

1. 국토교통부 (2008), 도로안전시설 설치 및 관리지침-낙석방지 시설편, pp. 1~71.
2. 右城 猛 (2009a), 富士山新五合目駐車場における落石事故の検証, (株)第一コンサルタンツ, pp. 1~15 (In Japan).
3. 右城 猛 (2009b), 新しく開発した落石防護柵用柵端金具の実証実験, (株)第一コンサルタンツ, pp. 1~15 (In Japanese).
4. Ben, A., Jerry, D. and Paul, T. (2015), Guidelines for certification and management of rockfall fence systems, Transportation Research Board of The National Academies of Sciences, Engineering and Medicine, pp. 1~87.
5. Buzzi, O., Spadari, M., Giacomini, A., Fityus, S. and Sloan, S. (2013), Experimental testing of rockfall barriers designed for the low range of impact energy, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 46, No. 4, pp. 701~712.
6. European Organization for Technical Approvals (2008), Guideline for European Technical Approval of Falling Rock kits, ETAG-027, European organization for technical approvals, pp. 1~59.
7. Han, K., Mon, B., Ko, M. and Kim, K. (2016), Performance assessment of rockfall protection fences for the rockfall energy of 100kJ using ETAG 27, Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 16, No. 2, pp. 247~259.
8. Hwang, Y. C. (2002), Estimation of absorbing capacity from rockfall protection fences, Korean Geo-Environmental Society, Vol. 3, No. 4, pp. 59~66.
9. Koo, H. B., Park, H. J. and Paik, Y. S. (2001), Characteristics and energy absorbing capacity for rockfall protection fence from in-situ rockfall tests, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 17, No. 6, pp. 111~121.
10. Moon, Y. J., Jung, H. J., Park, K. J. and Lee, I. (2003), Characteristics and energy absorbing capacity for new rockfall protection fence, KSCE 2003 Convention program, pp. 1559~1562.