

수치해석을 이용한 육각 낙석방지망의 성능 평가

Performance Estimation of Hexagonal Rockfall Protection Net by Numerical Analysis

오 세 옥¹⁾ · 박 수 범²⁾ · 권 영 철[†]
Sewook Oh · Soobeom Park · Youngcheul Kwon

Received: July 30th, 2014; Revised: September 18th, 2014; Accepted: October 6th, 2014

ABSTRACT : It has been generally recognized that the conventional rockfall protection nets have several problems to actual field application in the aspect of shock absorption, lack of pullout bearing capacities, and net damages. Because of the recognition, authors have tried to develop a new rockfall protection system consisted of shock absorption parts and hexagonal net configuration. In the previous research by the authors, the performance of the newly developed rockfall protection system has been investigated through the laboratory tests and the full-scale testing. In this study, subsequently, numerical analysis program is organized to make a confirmation of the structural stability and performance. For the correct design procedure of the hexagonal net system, it is essential to understand the various mechanical behavior of the entire system. It is also important to be reproduced the systematic characteristics of the system acquired by laboratory and full-scale testing by numerical analysis in order to carry out the numerical experiment to understand various mechanical behavior of the system. As a conclusion, the hexagonal net has better performance in mechanical and physical behavior compared with that of the rectangular net. Furthermore, due to the hexagonal net shows a good performance in aspect of the load distribution, it gives a good alternative in long-term management of the rockfall protection net.

Keywords : Hexagonal net, Rock fall protection net, Wire mesh, Numerical analysis

요 지 : 낙석방지망에 대한 기존 연구 결과에 의하면 종래의 낙석방지망에서 발생하는 대표적인 문제점으로 이완성이 없는 횡방향 와이어로프에 의해 발생하는 낙석 중량의 누적현상, 지반과 낙석방지망의 결합지점 부족으로 인한 인발지지력 부족, 낙석의 과도한 충격으로 인한 철망의 빈번한 파손, 낙석방지망의 유지관리 시 철망의 재사용의 어려움 등이 보고되고 있다. 선행 연구를 통해 실내에서의 인장력과 현장실험이 실시되어 새로운 낙석방지망의 효과를 검증한 바 있다. 선행연구에 이어 본 연구에서는 기존의 사각 낙석방지망과 비교하여 충격 완화형 육각 낙석방지망의 전체적인 구조적 안정성과 성능을 수치해석적 방법을 통해 점검하는 것에 그 목적이 있으며, 이를 충분히 검토하고 결과를 얻을 수 있도록 수치해석 프로그램이 설정되었다. 수치해석 결과를 종합해볼 때 동일한 단일 셀 간격 뿐만 아니라 동일한 면적비로 비교하더라도 육각 낙석방지망이 사각 낙석방지망에 비해 하중분배 효과가 우수한 것으로 나타났으며, 육각 낙석방지망은 낙석하중이 작용할 경우 이를 효율적으로 분산시킴으로써 과도한 하중 집중이 발생하는 것을 피할 수 있어 장기적인 안정성 확보에 유리할 것으로 판단된다.

주요어 : 육각 낙석방지망, 낙석방지망, 와이어메쉬, 수치해석

1. 서 론

낙석은 사면 내 암석이 자연현상 및 인위적인 조건 등의 다양한 원인에 의해 하부로 낙하하는 현상을 말하고 이로 인한 인명과 재산의 손실 방지를 위하여 절취면내 설치되는 철망 형태의 안전시설을 낙석방지망이라 한다. 현재 적용되고 있는 낙석방지망은 와이어로프와 철망이 주 구성요소이며 철망을 절토 사면에 씌우고 그 위에 2 m × 5 m ~ 3 m × 3 m의 간격으로 중·횡와이어로프를 시공하도록 되어 있다. 상기와 같은 낙석방지망은 구조적 특성상 낙석방지망으로서 요

구되는 기능을 확보하는데 많은 어려움이 있으며 이로 인해 크고 작은 낙석사고가 발생하고 있다. 이러한 낙석방지망의 손상은 낙석발생 메카니즘이 점진적 하중에 의한 파괴보다는 충격에 의한 다양한 파손이 발생하기 때문인 것으로 파악되고 있으며 일단 한 번 파손이 발생하게 되면 낙석보호시설로서 기능을 상실하게 되는 것으로 보고되고 있다(Brawner, 1994; Bertolo et al., 2009).

낙석방지망에 대한 기존 연구 결과에 의하면 종래의 낙석방지망에서 발생하는 대표적인 문제점으로 이완성이 없는 횡방향 와이어로프에 의해 발생하는 낙석 중량의 누적현

1) Department of Construction & Disaster Prevention Engineering, Kyungpook National University

2) Department of Civil Engineering, Chungbuk National University

† Department of Construction System Engineering, Korea Soongsil Cyber University (Corresponding Author : kyc@mail.kcu.ac)

상, 지반과 낙석방지망의 결합지점 부족으로 인한 인발지력 부족, 낙석의 과도한 충격으로 인한 철망의 빈번한 파손, 낙석방지망의 유지관리 시 철망의 재사용의 어려움 등이 보고되고 있다(Hungr & Evans, 1988; Koo et al., 2001; Hoek, 2007; Lee et al., 2008).

이러한 낙석방지망 시설의 문제점에서 볼 수 있듯이 대부분의 낙석방지망 파손 및 기능손상은 낙석방지망의 비효율적인 구조에 기인하고 있으며, 문제점을 해결하기 위하여 다양한 낙석방지망의 개선이 시도되고 있다(Paronuzzi, 1989; Spang, 1995). 그중 본 연구에서는 최근 들어 그 적용이 증가하고 있는 충격완화장치를 이용한 육각 낙석방지망을 연구의 대상으로 하고 있다. 충격완화장치를 이용한 육각 낙석방지망은 와이어로프로 육각 형상의 낙석방지망을 형성시켜 강도를 향상시키고 낙석 발생에 따른 에너지를 효율적으로 흡수하여 낙석방지 효과를 극대화할 수 있는 신기술, 신공법으로 두 가닥의 와이어로프를 관통시켜 합체하거나 분리하는 상하 한 쌍의 가이드구와 상하 한 쌍의 가이드구 사이에 설치하여 가이드구를 탄력 설치하는 한 쌍의 압축스프링과 한 쌍의 압축스프링 사이에서 와이어로프를 결합하여 지중에 고정시키는 중앙지지구로 구성되어 있다.

또한 하측 가이드구의 하향으로 통과한 합체 상태의 와이어로프를 좌우 대각선상으로 분리하고, 분리된 각각의 와이어로프를 측방에서 합체되어 분리된 와이어로프와 함께 상측 가이드구로 다시 합체시킴으로써, 상기의 작업을 연속적으로 반복하여 육각 형상의 낙석방지망을 형성시켜 낙석방지망을 구성한 것이다(Youn et al., 2014).

본 연구에서는 기존의 사각 낙석방지망과 비교하여 충격완화형 육각 낙석방지망의 전체적인 구조적 안정성과 성능을 점검하는 것에 그 목적이 있다. 따라서 이를 충분히 검토하고 결과를 얻을 수 있도록 수치해석 프로그램이 설정되었다. 육각 낙석방지망 및 사각 낙석방지망의 전체적인 구조적 안정성을 검토하기 위해 육각 낙석방지망에서 충격완화장치 설치 유무에 로프 지지성능 평가, 실내실험 및 실제 시공조건을 반영한 낙석방지망의 성능 평가, 마지막으로 단위셀 면적비에 따른 육각 낙석방지망의 성능 평가를 수치해석을 통해 검토하였다.

2. 충격완화장치 설치 유무에 따른 와이어로프의 지지성능 평가

2.1 해석 개요

먼저 육각 낙석방지망에서 충격완화장치인 스프링 설치의 유무에 따라 발생하는 로프의 최대 응력 등을 알아보기

위한 수치해석이 진행되었다. 이 해석에서는 기존 사각 낙석방지망의 단점으로 지적되고 있는 충격에너지의 흡수 및 적층하중의 해소 등에 충격완화장치가 어느 정도 성능을 발휘하는지를 검토하는 것이 해석의 주요한 목적이다. 본 해석을 위해서 낙석 발생 시 충격완화를 위해 고정부에 설치하는 스프링에 의한 로프의 지지성능을 검토하였으며, 스프링 재료에 의한 완충효과를 구현할 수 있는 범용 구조해석 프로그램인 Strand7을 이용하여 수치해석을 수행하였다.

Fig. 1은 각각 고정부에 스프링과 핀으로 모델링한 기하형상을 나타내고 있다. 기존 낙석방지망의 경우에는 충격완화장치가 별도로 설계되어 있지 않으므로 본 해석에서 적용한 Fig. 1(b)의 핀 모델에 해당되며, 본 연구를 통해 검토된 충격완화형 육각 낙석방지망은 Fig. 1(a)의 스프링 모델에 해당한다. 스프링의 영향을 검토하기 위해 두 모델에 동일하게 최소 10 kN에서 최대 100 kN까지 하중을 재하하여 이때 발생하는 스프링의 응력을 산출하였다. 또한 해석 시 사용한 스프링 정수(K)는 Eq. (1)과 같다.

$$K = \frac{G \times d^4}{8 \times N_a \times D^3} \quad (1)$$

여기서 G 는 재료의 횡탄성 계수로 와이어로프의 재료인 경강선을 사용한 스프링의 경우에는 78.45 GPa이 주로 사용되고 있으며 본 연구에서도 이 값을 횡탄성계수로 적용하였다. d 는 강선의 직경을 의미하며 본 연구에서는 3.0 mm의 와이어를 상정하여 적용하였다. N_a 는 재료의 유효 권수이며,

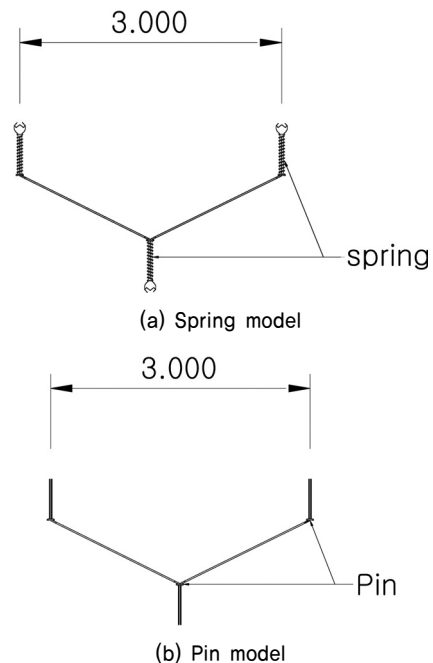
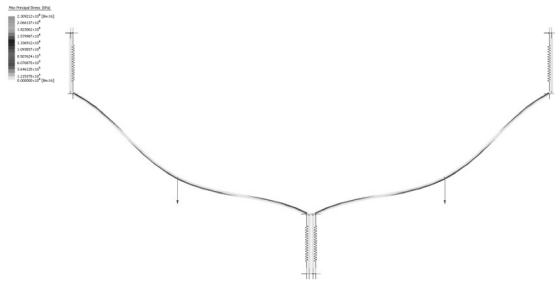


Fig. 1. Geometrical modeling of the wire rope with spring and pin

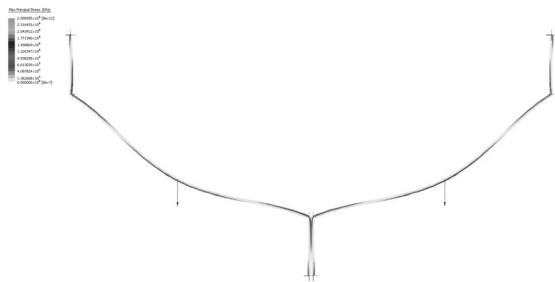
스프링이 실제 작동하는 부분의 감김 횟수로 본 연구에서는 24회의 스프링으로 설정하였다. 마지막으로 D 는 스프링의 중심경으로 내경과 외경의 중간을 의미한다. 본 연구에서는 35 mm를 적용하였다. 이와 같은 조건에서 Eq. (1)에 적용하여 산정한 스프링 정수는 0.8 kN/m로 나타났다.

2.2 해석 결과 및 분석

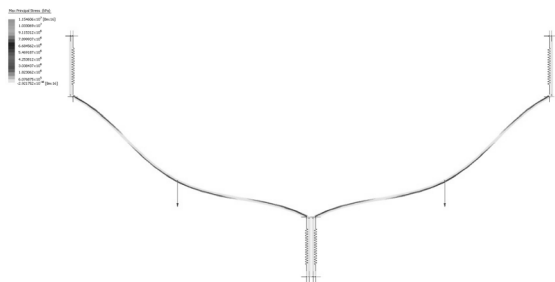
하중은 로프의 중앙에 작용시켰으며, 이때 하중을 10 kN



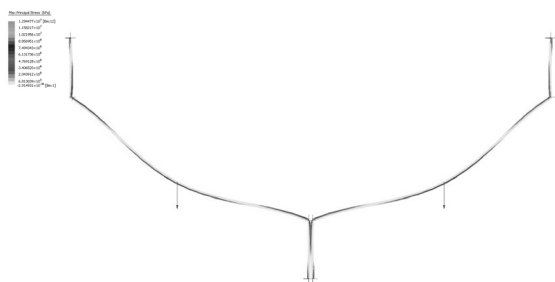
(a) External loading of 10 kN with shock absorber



(b) External loading of 10 kN without shock absorber



(c) External loading of 50 kN with shock absorber



(d) External loading of 50 kN without shock absorber

Fig. 2. Analytical results on distribution of stresses

~100 kN까지 10 kN씩 점증적으로 작용하중을 증가시키면서 로프의 변형에 따른 작용 응력을 평가하였다. 대표적인 결과로 최소 하중인 10 kN과 중간 하중인 50 kN을 재하한 결과를 Fig. 2에 도시하였다. 두 하중 조건 하에서 스프링에 의한 완충장치가 설치된 경우와 스프링이 설치되지 않은 경우로 나누어 해석을 실시하였다.

해석 결과 외부하중이 10 kN이 작용한 경우 스프링이 설치된 경우에는 최대 응력이 2.31E+6 kPa로 나타났으며, 스프링에 의한 완충장치가 없는 경우에는 2.58E+6 kPa의 최대 응력이 계산되었다. 외부하중이 10배 정도 차이 나는 100 kN의 경우에도 스프링이 없는 설치된 경우에는 1.15E+7 kPa, 완충장치가 설치되지 않은 경우에는 1.29E+7 kPa로 나타났다.

Fig. 3은 재하 하중의 증가에 따라 발생하는 최대 응력의 추이를 나타내고 있는 그림이다. 수치해석 결과 얻어진 낙석 발생 시 스프링 유무에 따라 발생하는 응력의 추이를 분석해 보면 스프링장치를 설치하지 않았을 경우 스프링을 설치하였을 때보다 로프에 작용하는 최대 응력이 12.1% 증가하는 경향을 보이고 있어 정착구에 스프링을 적용하였을 경우 충격감소효과가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 낙하에 에너지를 유지하고 있는 상태에서 낙석방지망에 직접 충격에 에너지가 전달되는 상황을 상정하면 위의 결과 차이가 더욱 커지리라 판단된다. 따라서 향후 연구에서는 직접 충격하중을 가하여 충격하중에 의한 완충효과 측면에서 육각 낙석방지망의 역학적 거동에 대한 검토가 이루어져야 할 것으로 생각한다.

3. 실내실험과 실제 시공 조건을 반영한 낙석방지망의 성능 평가

3.1 해석 개요

실내실험과 실제 시공조건을 반영한 수치해석의 목적은

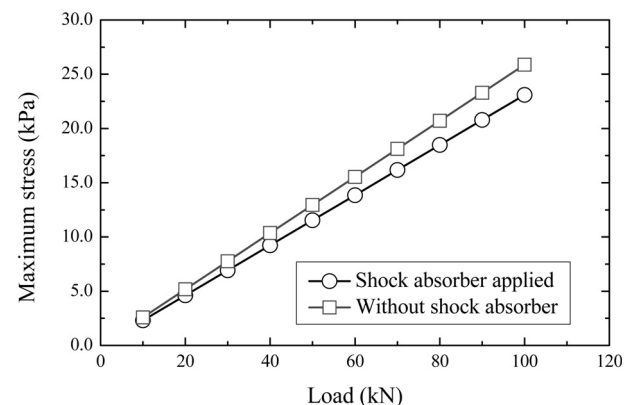


Fig. 3. Load-Max. stress relation

실내 및 현장시험 결과와의 비교·분석 및 현장 적용 시 경제성 및 안정성 확보를 위한 최적의 단위 셀 간격을 제시하는 것이다. 실내시험 결과는 선행연구(Youn et al., 2014)를 참고하였으며 제반 조건은 해석과 동일하게 적용되었다. 수치해석에서는 범용 유한요소해석 프로그램인 MIDAS GTS를 이용하였으며, 해석모델링에서는 재료를 Von Mises 파괴 기준을 따르는 비선형 탄소성 거동을 보이는 것으로 취급하였다.

실내시험 결과와 비교·분석을 위해 실내시험 조건과 동일한 치수를 갖는 육각 낙석방지망과 사각 낙석방지망에 대한 모델링을 수행하였으며, 해석에 적용된 수치해석 모델링은 Fig. 4와 같다. 그림에서 확인할 수 있듯이 실내시험의

조건을 충실히 수치해석으로 도입하고자 하였으며 외곽의 실험 프레임은 변위와 회전에 대해 모두 고정으로 설정하였고 프레임과 와이어가 만나는 지점에는 변위가 자연스럽게 고정되도록 설정하였다. 그 외의 와이어 부분은 외력에 대해 자유롭게 변위와 회전이 이루어지도록 경계조건이 설정되었다. 하중의 재하는 육각 낙석방지망에서는 와이어 간 접촉이 선형으로 이루어지므로 선하중으로 인접 네트와의 경계면에 분포시켰으며, 사각 낙석방지망은 와이어 교차지점에 점하중의 형태로 재하하였다.

실제 시공 시 로프의 하중-변위 양상을 파악하기 위하여 실제 크기의 다셀 구조로 모델링하여 육각 낙석방지망과 사각 낙석방지망의 거동특성을 분석하였다. Fig. 5는 실제 시

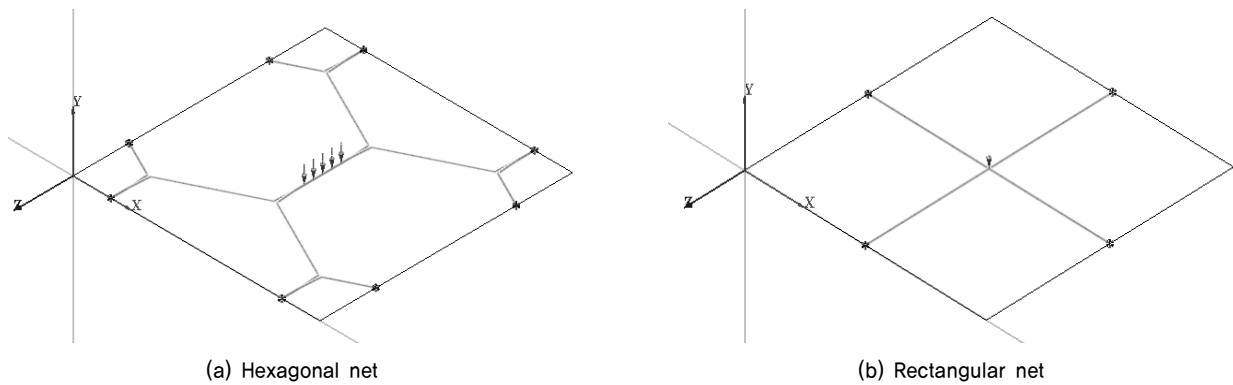


Fig. 4. Geometrical modeling for numerical analysis to investigate the load–displacement characteristics

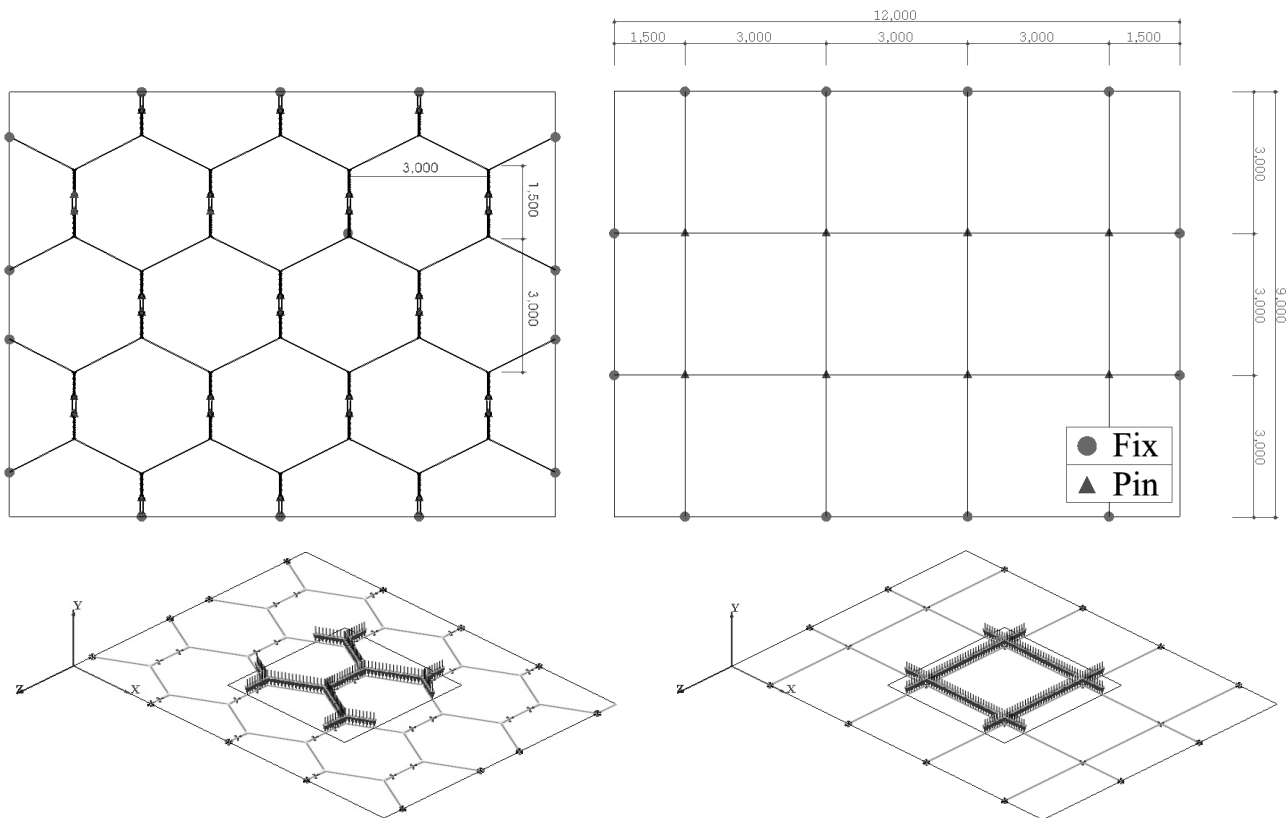


Fig. 5. Geometrical modeling of in-situ condition

공 단면과 이를 모델링한 결과를 보이고 있다. 측면 로프는 법면에 고정되어 있는 것으로 가정하였으며, 육각망의 조립구와 사각 낙석방지망의 종횡 로프 교차구간은 고정된 시공을 고려하여 구속조건을 설정하였다. 하중은 단위 셀에 충분한 하중이 전달되도록 단위 셀보다 큰 4.5×4.5 m의 범위에 균등하게 작용하는 것으로 가정하였다.

3.2 해석 결과와 분석

Fig. 6은 실내시험과 동일한 조건의 Scale과 하중작용 방법을 이용한 수치해석 결과 사각 낙석방지망에서는 21 kN, 육각 낙석방지망에서는 30 kN 정도에서부터 로프의 소성변형이 발생하여 비선형 하중-변위 곡선의 양상을 보이고 있으며, 이때 사각 낙석방지망보다 육각 낙석방지망의 로프 지지성능이 43 % 정도 높은 것으로 나타났다. 따라서 육각 낙석방지망은 낙석하중이 작용할 경우 이를 효율적으로 분산시킴으로써 과도한 하중 집중이 발생하는 것을 피할 수 있어 안정성 확보에 유리할 것으로 판단된다.

단위 셀 간격을 3.0 m \times 3.0 m로 유지한 조건으로 수치해석을 실시한 결과, Fig. 7과 같이 일반 낙석방지망에서는 60 kN, 육각 낙석방지망에서는 120 kN 정도에서부터 로프의

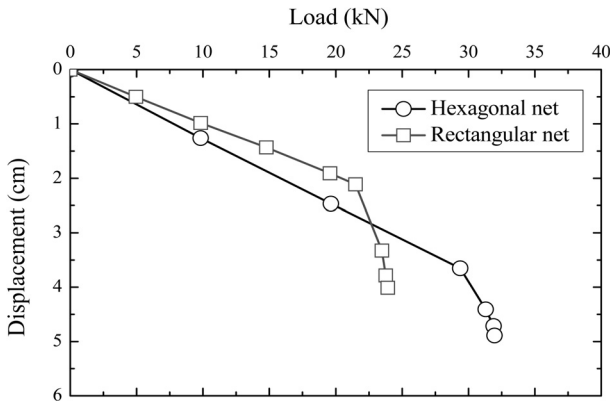


Fig. 6. Load-displacement relationship by numerical analysis under laboratory experiments condition

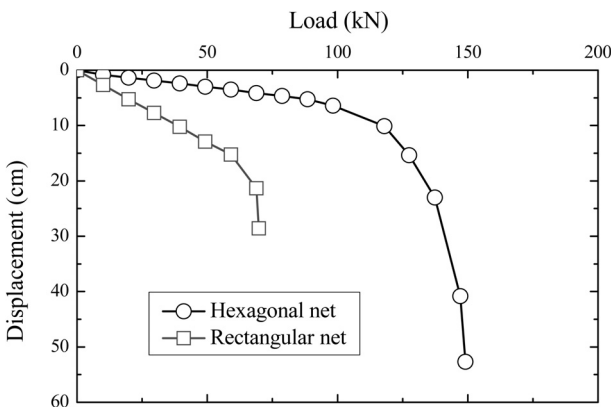


Fig. 7. Load-displacement relationship obtained by numerical analysis under in-situ condition

소성변형이 발생하여 비선형 하중-변위 곡선의 양상을 보이고 있다. 해석 결과에 따르면 육각 낙석방지망의 경우 사각 낙석방지망보다 로프의 지지성능이 100 % 정도 향상되는 것으로 나타나고 있다.

실내시험 조건에 대한 수치해석에서는 43 % 정도의 개선효과가 나타나고 있으나, 실제 시공을 고려한 다중 셀 해석의 경우 실내시험 조건에 비해 2배 이상인 100 %의 개선효과를 보이고 있는데 이는 단순히 하중분배효과에 따른 영향으로 보기에는 상당한 차이를 보이고 있다.

실제 시공 조건의 두 낙석방지망의 단일 셀 간격은 3.0 \times 3.0 m로 동일하지만 면적비로 환산할 경우 1:0.75(사각:육각) 정도로 사각 낙석방지망에 비해 육각 낙석방지망의 하중분담 면적비가 상대적으로 유리할 것으로 판단되는데, 면적비에 따른 낙석하중이 로프의 장력에 미치는 영향을 단위 셀당 동일면적일 경우에 대해 비교하기 위하여 사각 낙석방지망의 로프 설치간격을 기존 3.0 \times 3.0 m에서 2.6 \times 2.6 m로 조정하여 수치해석을 수행하고 육각 낙석방지망(3.0 \times 3.0 m) 결과와 비교·분석을 수행하였다. 이는 동일한 면적비를 유지하여 비교·분석이 가능하도록 하기 위해서이다.

그 결과 Fig. 8과 같이 사각 낙석방지망의 소성변형 발생 하중이 기존 60 kN에서 90 kN으로 향상되었으며, 이 경우 육각 낙석방지망이 사각 낙석방지망보다 로프의 지지성능이 33 % 정도 향상되는 것으로 나타나고 있어 실내시험 조건과 유사한 경향을 보이는 것으로 확인되었다.

이상의 수치해석 결과를 종합해볼 때 동일한 단일 셀 간격 뿐만 아니라 동일한 면적비로 비교하더라도 육각 낙석방지망이 사각 낙석방지망에 비해 하중분배 효과가 우수한 것으로 나타났다. 따라서 육각 낙석방지망은 낙석하중이 작용할 경우 이를 효율적으로 분산시킴으로써 과도한 하중 집중이 발생하는 것을 피할 수 있어 장기적인 안정성 확보에 유리할 것으로 판단된다.

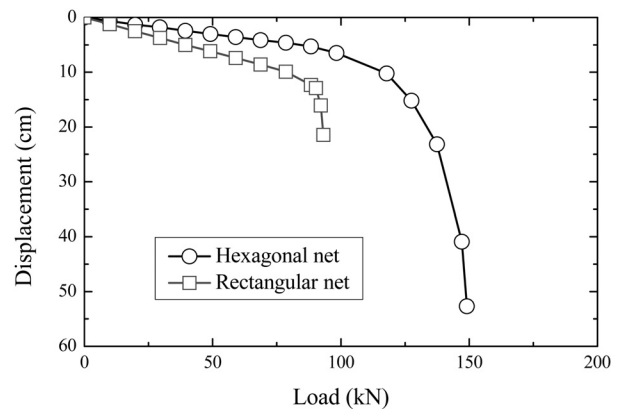


Fig. 8. Comparison of load-displacement relationship of hexagonal nets with that of rectangular net using equivalent area ratio

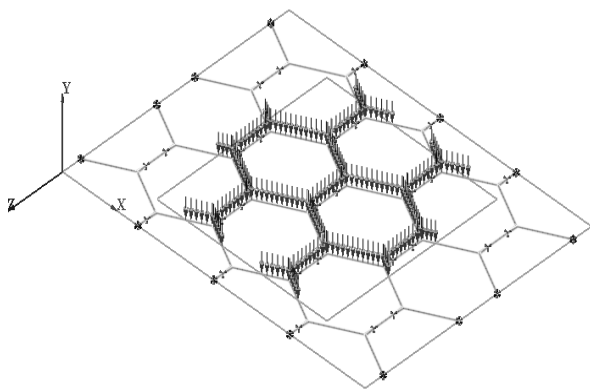
4. 육각 낙석방지망 간격에 따른 하중-변위 영향 평가

4.1 해석 조건

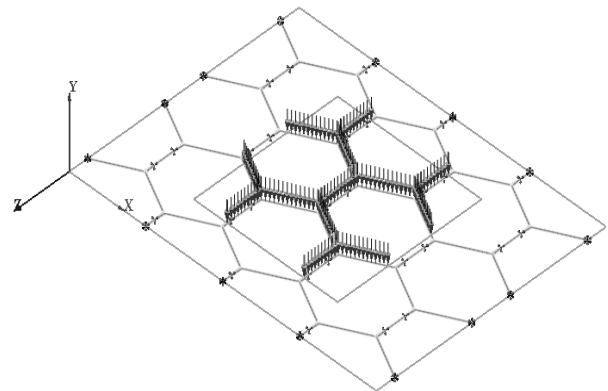
이전의 해석 결과를 통해 확인할 수 있듯이 육각 낙석방지망은 스프링의 영향, 하중분산 효과 등에 의해 사각 낙석방지망에 비해 낙석발생에 대한 지지성능이 우수한 것으로 평가되었다. 이러한 스프링의 영향 및 하중분산 효과 외에 면적비에 대한 영향이 지지성능에 상당한 영향을 미치는 것으로 나타남에 따라 실제 현장 반영 시 시공성 및 경제성을 고려한 효율적인 시공이 이루어질 수 있도록 단위 셀 간격을 결정하는 것이 중요한 요소일 것으로 판단된다. 따라서 본 논문에서는 단위 셀 간격을 조정하면서 각각의 경우에 대한 수치해석을 수행하고 이를 통해 효율적인 셀 간격을

Table 1. Analysis conditions

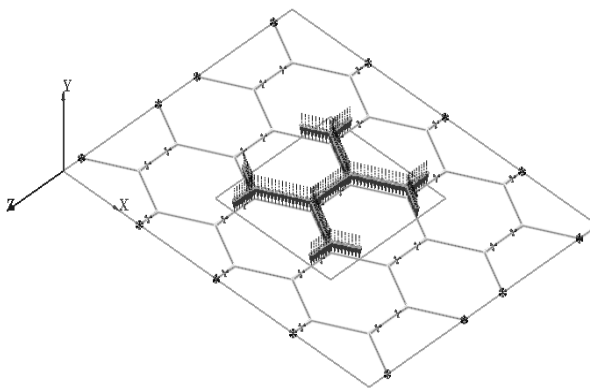
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Cell spacing (m)	2.00	2.40	3.00	4.50
Area ratio	0.67	0.80	1.00	1.20



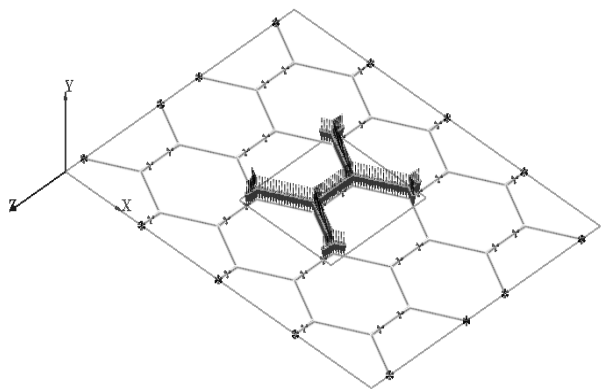
(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3



(d) Case 4

Fig. 9. Geometrical modeling for investigating the effect of cell spacing

제시하고자 한다. 면적비에 따른 지지성능 평가를 위한 해석 케이스 및 해석적용 모델링은 Table 1과 Fig. 9와 같다.

4.2 해석 결과

Fig. 10은 동일한 면적비를 유지하고 있을 때의 변형과 하중의 관계를 나타내고 있다. 하중비가 0.67인 경우가 가장 큰 하중에 대해서 지지하는 결과를 보이고 있으며 네 가지의 해석에서 모두 일정 하중을 넘게 되면 뚜렷한 하중 증가 없이 변형이 발생하는 항복과괴 거동을 보이고 있다. 이러한 관계는 지금까지의 해석에서 일관되게 관찰되고 있으며 수치해석에서 볼 수 있는 관계가 비교적 잘 재현되고 있음을 나타내고 있다고 판단한다.

Fig. 11에서는 단위 셀 간격을 2.0~4.5 m까지 조정하면서 수치해석을 실시한 결과 결과를 나타내고 있으며, 단위 셀 간격이 3.0 m가 넘는 경우 소성변형 발생하중이 완만하게 증가하는 반면 3.0 m 이하에서는 급격하게 증가하는 경향을 보이고 있어 실제 현장 적용 시 단위 셀당 간격은 3.0 m 이하가 되도록 설치하는 것이 효율적인 것으로 평가되었다.

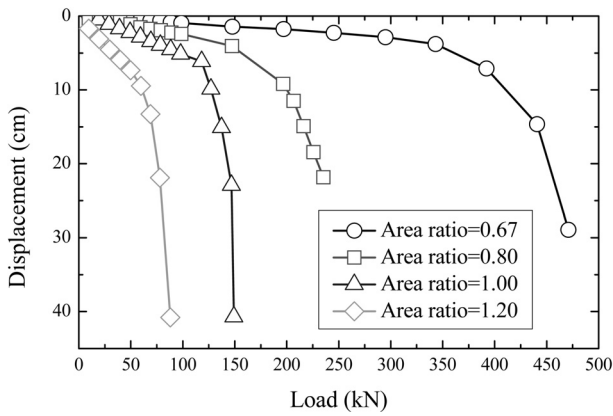


Fig. 10. Load-displacement relationship according to equivalent area ratio

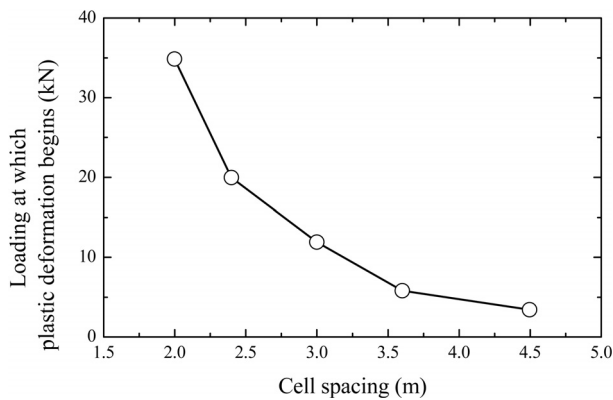


Fig. 11. Loading at which plastic deformation begins-cell spacing relationship

5. 결 론

- (1) 수치해석 결과 정착구의 스프링 유무에 따라 낙석방지망에 작용하는 충격력은 차이가 있는 것으로 나타났으며, 스프링이 없는 경우에는 최대 응력이 12.1 % 증가하였다.
- (2) 실내실험과 동일한 조건에서 수치해석을 실시한 결과 육각 낙석방지망의 로프 지지성능이 기존 사각 낙석방지망에 비해 지지성능이 43 % 정도 상승하는 것으로 나타났다. 따라서 육각 낙석방지망은 낙석하중이 작용할 경우 이를 효율적으로 분산시킴으로써 과도한 하중 집중이 발생하는 것을 피할 수 있어 안정성 확보에 유리할 것으로 판단된다.
- (3) 동일한 면적비에서 성능을 평가한 결과 육각 낙석방지망이 사각 낙석방지망보다 로프의 지지성능이 33 % 정도 향상되는 것으로 나타나고 있어 실내시험 조건과 유사한 경향을 보이는 것으로 확인되었다.
- (4) 육각 낙석방지망의 단위 셀 간격이 3.0 m가 넘는 경우

소성변형 발생하중이 완만하게 증가하는 반면 3.0 m 이하에서는 급격하게 증가하는 경향을 보이고 있어 실제 현장적용 시 단위 셀당 간격은 3.0 m 이하가 되도록 설치하는 것이 효율적인 것으로 평가되었다.

- (5) 이상의 수치해석 결과를 종합해볼 때 동일한 단위 셀 간격 뿐만 아니라 동일한 면적비로 비교하더라도 육각 낙석방지망이 사각 낙석방지망에 비해 하중분배 효과가 우수한 것으로 나타났으며, 육각 낙석방지망은 낙석하중이 작용할 경우 이를 효율적으로 분산시킴으로써 과도한 하중 집중이 발생하는 것을 피할 수 있어 장기적인 안정성 확보에 유리할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2013학년도 경북대학교 학술연구비에 의하여 연구되었습니다.

References

1. Bertolo, P., Oggeri, C. and Pelia, D. (2009), Full-scale testing of draped nets for rock fall protection, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 46, No. 3, pp. 306-317.
2. Brawner, C. O. (1994), Rock fall hazard mitigation methods, Participant workbook: FHWA Report. FHWA-SA-93-085, pp. 345-412.
3. Hoek, E. (2007), *Practical rock engineering*, Rocscience, pp. 115-123.
4. Hungr, O. and Evans, S. G. (1988), Engineering evaluation of fragmental rock fall hazard, *Proceeding of 5th International Symposium on Landslide*, Lausanne, Switzerland, pp. 685-690.
5. Koo, H. B., Park, H. J. and Paik, Y. S. (2001), Characteristics and energy absorbing capacity for rockfall protection fence form in-situ rock fall tests, *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 17, No. 6, pp. 111-121 (in Korean).
6. Lee, Y. J., Na, S. M., Hwang, Y. C. and You, B. O. (2008), Evaluation of absorbing rockfall energy for the rockfall protection fence comprising various arrangements of high carbon steel wire rods, *Proceedings of Annual Conference of KSCE*, Daejeon, Korea, pp. 869-872 (in Korean).
7. Paronuzzi, P. (1989), Probabilistic approach for design optimization of rockfall protective barrier, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, Vol. 22, No. 3, pp. 135-146.
8. Spang, R. M. (1995), Optimized rock fall protection by rockfall, *Proceedings of 8th International Conference on Rock Mechanics*, Tokyo, Japan, pp. 1233-1242.
9. Youn, I. R., Oh, S. W. and Kwon, Y. C. (2014), Laboratory and full-scale testing to investigate the performance of rock fall protection system with hexagonal wire net, *Journal of Korea Geoenvironmental Society*, Vol. 15, No. 9, pp. 69-75 (in Korean).