

루프형 낙석방지안전시설의 구조적 안전성 검토 연구

박철우[†] · 이학용

강원대학교 건설공학부 토목공학전공
(2009. 4. 7. 접수 / 2009. 6. 8. 채택)

Structural Safety Analysis of Newly Developed Roof-Typed Falling Rock Protection System

Cheolwoo Park[†] · Hak-Yong Lee

Department of Civil Engineering, Kangwon National University
(Received April 7, 2009 / Accepted June 8, 2009)

Abstract : Road is typically constructed along ridge area of mountain because of topographical and economic reasons. Therefore, road may face lots of open cut slope which can easily cause rock falling. This study evaluates the structural safety of newly developed falling rock protection system which has a roof deck plate. The structural performance under self-weight, snow load and load from falling rock was investigated using a finite element numerical analysis method. From the analysis results, the H-beam space was limited not to exceed 2.2m. The deck plate was also safe under the examined loading condition. A hinge and connection in the system were investigated through detailed numerical modelling and analysis. The results showed that the hinge was safe enough and that the connection should strengthened with appropriate stiffeners.

Key Words : falling rock protection system, structural safety, numerical analysis

1. 서론

도로건설은 지형적 조건과 이로인한 경제성을 고려하여 건설되므로 산악지대의 능선을 따라 시공되어지는 경우가 빈번히 발생한다. 따라서 도로의 사면에는 절개에 의한 인공사면과 자연사면이 많이 존재하고 있으며, 이러한 사면은 자연현상에 노출되어 있어 강우 등에 의한 풍화의 진행, 설계 당시와는 다른 환경 조건 등의 원인으로 낙석·산사태의 우려가 상존하고 있다. 특히, 이러한 사면은 암반 또는 암석의 파괴 등에 의해 소·중·대 규모의 낙석이 돌발적으로 발생할 수 있다. 낙석은 암반내(절리, 편리, 층리 등의 갈라진 틈) 불연속면 등으로인한 이완현상에 의해 암편이 모암으로부터 분리되어 낙하하는 현상으로서 예상하지 못한 낙석이 발생하는 경우 통행하는 차량이나 인명에 막대한 피해를 유발할 수 있다^{1,2)}. 지난 2007년 12월 3일 경상북도 울릉군 서면 남양리 일대에서 발생한

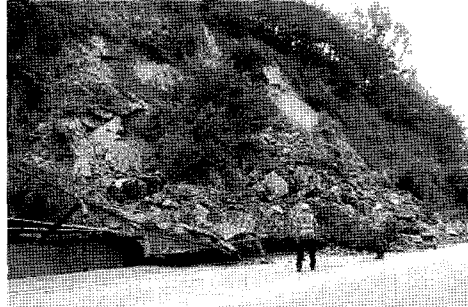
400여ton 규모의 낙석에 의한 경찰관 사망피해사고는 그 대표적인 예라고 할 수 있다. Fig. 1은 국내에서 발생한 주요 낙석관련 사고사례를 보여주고 있다.

이러한 암반사면에서 발생된 낙석은 주행하는 차량 등에 대하여 인적·물적 피해를 가져올 수 있으며, 직접적으로 차량 등에 피해를 주지 않더라도 도로의 운전규제 및 장기간의 운행 중지를 가져올 수 있다. 이러한 이유로 낙석에 의한 재해로부터 도로를 보호하는 낙석방지 안전시설의 필요성이 요구되고 있다. 일반적으로 낙석대피시설은 크게 낙석방지망, 방지울타리, 피암터널 등의 형태로 널리 적용되고 있다. 낙석방지망과 울타리의 경우 시공이 간단하고 경제적이기는 하지만 파손 등의 구조적으로 성능에 한계가 있다. 피암터널은 대형낙석에 유리한 구조를 가지고 있지만 지형 및 지질조건을 고려하여 점토면의 높이가 높은 지역에 주로 시공된다³⁾. 하지만, 시공비가 비싸고 기초굴삭 공사중 추가적인 붕괴우려가 있으며 시공후의 경관이 이를 통과하는 운전자에게 답답함을 줄 수 있다. 따라서 기존의 낙석방지시설의 단점을 보완하고 구조적으

[†] To whom correspondence should be addressed.
tigerpark@kangwon.ac.kr



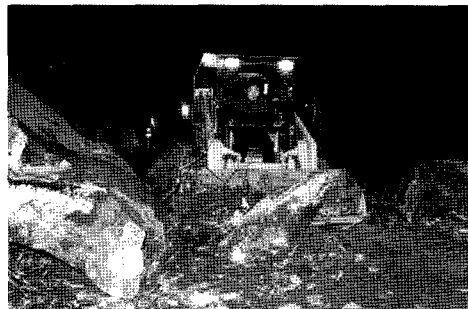
(a) 2007. 12. 2 경상북도 울릉군



(b) 2007. 8. 14. 88고속도로



(c) 2007. 7. 15. 강원도 고성군



(d) 2007. 3. 5 경기도 가평군

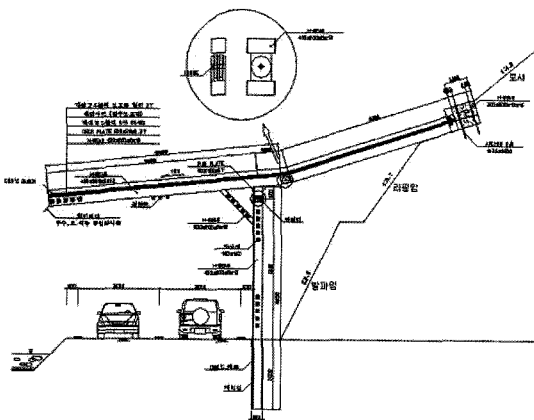
Fig. 1. Falling rock accidents in Korea.

로 안전한 새로운 낙석보호안전시설의 개발이 필요하며 본 연구에서는 최근 새롭게 개발된 루프형의 구조를 가지는 낙석방지안전시설의 수치해석적 검토를 수행하여 이의 안전성과 현장적용성을 분석하고자한다.

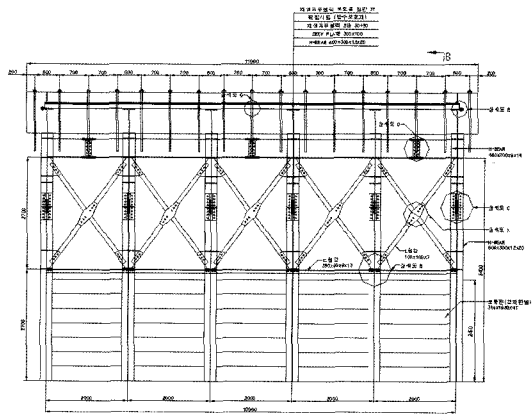
2. 루프(Roof)형 낙석방지안전시설의 개요

개발된 루프형 낙석방지안전시설은 Fig. 2와 같

으며, 기존 피암시설에 비하여 시공이 간편할 뿐 아니라, 공사비가 타 시설에 비하여 저렴하여 보다 많은 지역을 효과적으로 보호할 수 있을 것으로 기대되며, 매년 장마철 마다 반복되는 산간지역 도로의 유실 및 낙석으로 인한 도로 차단 사로를 예방할 수 있을 것으로 기대된다. 낙석의 운동은 일반적으로 자유낙하운동, 도약운동, 회전운동, 미끄러짐운동 그리고 충돌로 이어지는 형태를 취하게 되는데⁴⁾ 개발된 낙석방지안전시설은 이러한 다양한



(a) Front view



(b) Side view

Fig. 2. Design of roof-typed falling rock protection system.

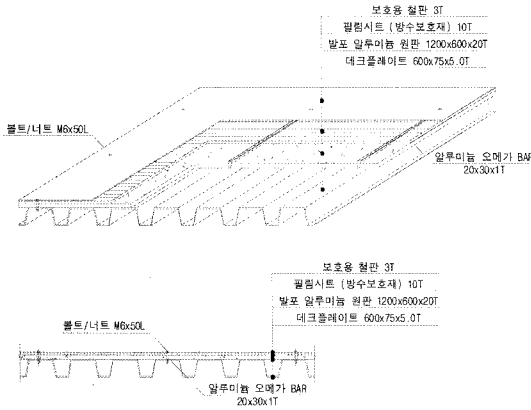


Fig. 3. Detail of deck plate.

형태의 낙석운동에 대하여 사용자의 안전을 충분히 보장하기 위하여 개발되었다. 또한 Fig. 2에서 보는 바와 같이 지붕의 루프부분에는 힌지를 적용하여 배경사면과의 위치의 영향을 최소화할 수 있도록 하였다. 상판이 끝나고 사면과 접촉하는 부분은 콘크리트 앵커블록을 설치하여 낙석방지안전시설의 구조적인 안정성을 추가적으로 확보하였다. 종방향의 주부재인 H-beam의 크기는 구조적인 안전성과 경제성을 위하여 400×200×8×13으로 결정하였다. 또한 상판의 deck plate 단면의 치수를 5t를 사용하는 것으로 가정하였다. 이는 현장에서 2.5t 두께의 상판을 두 겹으로 겹쳐놓는 식으로 시공할 예정이다. 상판의 deck plate 철판이외에도 낙석의 충격을 감소하기 위한 장치로서 발포알루미늄 원판을 사용하고 그위에는 누수로 인한 안전시설의 부식등의 피해를 최소화하기 위하여 방수시트를 설치하였다(Fig. 3 참조). 최종적으로 맨 위에는 낙석으로 인한 직접적인 파손을 최소화하기 위한 3t 두께의 철판을 설치하는 것으로 설계하였다. 사용강재는 SS900(허용인장응력 190MPa)을 사용한다.

3. 구조적 안전성 검토

3.1. 낙석방지안전시설에 작용하는 하중

본 연구에서는 낙석방지시설의 구조적 안전성을 검토하기 위하여 범용구조해석 전용프로그램을 활용하여 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 하중은 고정하중, 설하중, 그리고 낙석충격하중으로 구분하였으며, 이를 도로교설계기준⁵⁾에 적합하도록 하중을 재하하였다. 작용하는 설하중의 크기는 압축된 눈의 두께를 약 15cm로 고려하여 1kN/m²로 가정하였다. 낙석에너지는 주로 이동암석의 규모에

좌우되므로 정확한 낙석 중량 추정이 이루어져야 한다⁴⁾. 낙석의 중량 추정은 낙석의 체적(m³) × 2.65 tonf/m³을 이용하여 간단하게 추정할 수 있다. 이때 2.65tonf/m³은 통상적으로 사용되는 암석의 단위 중량이다. 그러나 만일 현장에서 낙석의 중량에 대한 추정이 불가능할 경우에는 국내 낙석의 평균 중량인 0.4톤을 대신하여 사용할 수 있다. 평균 중량(0.4톤)은 지난 1년간 국도 주변의 낙석발생지점 275개소로부터 관찰된 낙석 중량의 평균값으로서, 낙석에너지, E_i는 일반적으로 다음의 식으로 계산된다⁶⁾.

$$E_i = (1 - \frac{\mu}{\tan \theta}) \cdot (1 + \beta) \cdot m \cdot g \cdot H$$

- 여기서, E_i = 낙석에너지(kJ)
- θ = 절개면의 경사도
- μ = 낙석의 등가마찰계수(Table 1 참조)
- β = 회전에너지 계수(대개 0.1을 사용)
- m = 낙석의 중량(tonf)
- H = 낙석의 낙차(m)
- g = 중력가속도(보통 9.8m/s²)

식에서 사용되는 절개면의 종류와 낙석의 등가 마찰계수는 다음의 Table 1과 같다.

본 연구에서 적용된 낙석하중은 0.6×0.6×0.6m³ 크기의 낙석(W = 0.6³ × 2.65 = 0.57tonf)이 10m 낙하하는 경우인 60kJ로 예상하였으며, 이때 발생하는 등가의 충격에너지인 60kJ에 대하여 낙석의 무게와 낙하높이의 상관관계는 다음의 Table 2와 같다. 구조해석에서는 단위높이의 낙석하강이 발생하는 경우에 해당하는 60kN의 하중이 작용하는 경우를 가정하여 재하였다. 또한 작용하는 각 하중에 대하여 하중계수는 도로교설계기준⁵⁾에 준하는 값을 사용하였다.

Table 1. Shape of rocks and equivalent friction coefficient

낙석의 특성	절개면의 특성	등가마찰계수, μ
둥근 모양	경암, 굴곡이 작고 나무 없음	0.05
모 나거나 둥근 모양	연암, 굴곡 중대, 나무 없음	0.15
모 나거나 둥근 모양	풍화암, 굴곡 소-중, 나무 없음	0.25
모난 모양	낭떠러지, 굴곡 대-중	0.31

주) 절개면의 굴곡은 절개면 1.0m 당 굴곡의 높이가 0.1m 이하를 소, 0.1 - 1.0m를 중, 1.0m 이상을 대로 표시한다.

Table 2. Weight and falling height relationship corresponding to 60kJ

하중		낙하높이
kN	tonf	m
100	10.2	0.6
90	9.2	0.7
70	7.1	0.9
60	6.1	1.0
50	5.1	1.2
20	2.0	3.0
10	1.0	6.0
5	0.5	12.0
3	0.3	20.0

3.2. 구조해석 모델 및 낙석하중 작용위치별 H-beam 간격에 따른 거동 분석

구조해석에 사용된 모델은 다음의 Fig. 4와 같으며 Fig. 5는 앵커부의 상세해석을 위한 모델을 보여주고 있다. 앵커 부분의 경우 앵커볼트의 응력을 고찰하기 위하여 단부와 H-beam 사이의 rigid body type의 link를 설정하여 하중 및 변위를 전달하도록 하였다.

고정하중 및 설하중에 추가적인 낙석하중은 낙

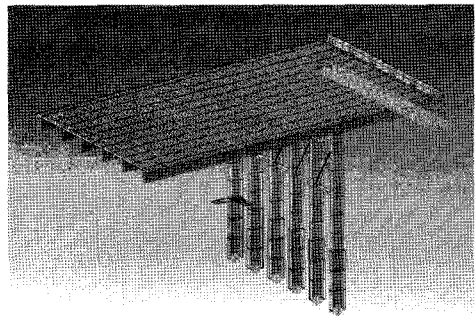


Fig. 4. Model and boundary conditions for structural analysis.

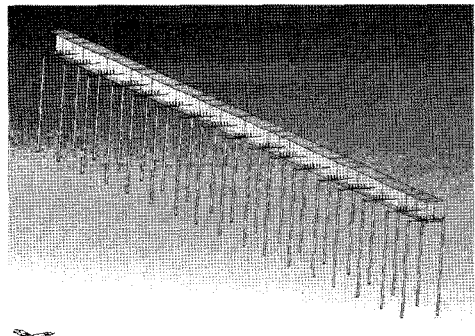
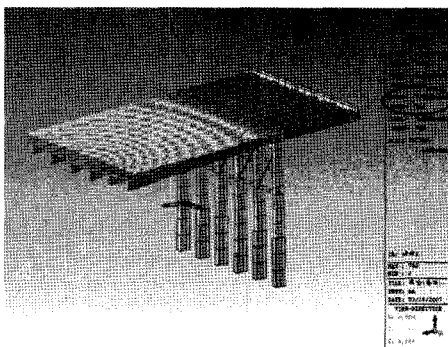
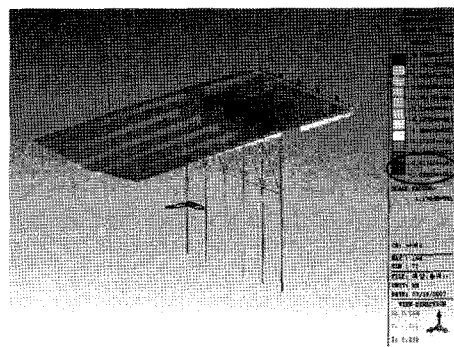


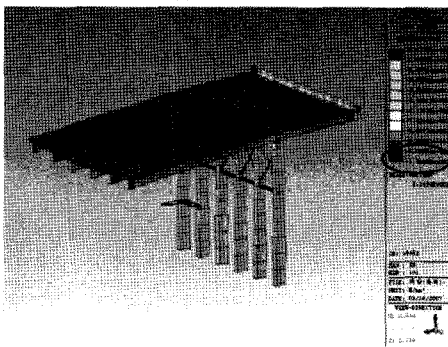
Fig. 5. Detailed model view of anchor system.



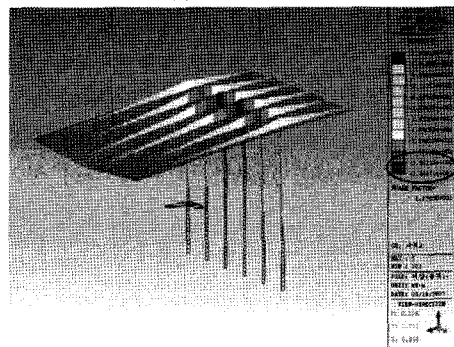
(a) deflection



(b) shear force



(c) beam-stress



(d) moment

Fig. 6. Results of structural analysis.

석하중 발생 지점에 대하여 가장 안정적인 중앙지간 충격하중 발생의 경우와 가장 불리한 상황인 외측빔에 충격하중이 작용할 경우에 대하여 H-beam (400×200×8×13) 지주간격을 달리하여 발생응력 및 거동을 분석하였다. Fig. 6은 구조해석 수행결과와 예시를 나타내고 있다.

H-beam 지주간격의 변화에 따른 해석수행의 결과는 하중의 작용이 외측빔인 경우와 중앙지간인 경우에 대하여 각각 다음의 Table 3과 4와 같다. 결과에서 보는 바와 같이 외측빔에 하중이 작용하는 경우에 구조적으로 취약한 것으로 나타났으며 이에 따라 H-beam 지주의 최대 경간장은 2.2m 이하로 하여야 할 것이다.

해석 결과 Table 3과 Table 4와 같이 중앙지간에 충격하중이 작용할 경우 지주 경간장 2.9m까지 안전한 것으로 나타났으나 외측빔에 충격이 작용할 경우 최대 지주 경간장 2.2m까지 안전한 것으로 나타났다. 따라서, 개발된 루프형 낙석방지안전시설의 최대 지주 경간장은 2.2m를 넘지 말아야 한다.

3.3. 상판 Deck plate 거동 분석

상판 Deck plate의 구조적안전성을 검토하기 위하여 Fig. 4의 상판 deck plate를 아래의 Fig. 7과 같

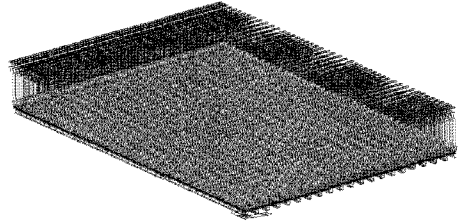


Fig. 7. Roof deck plate structural analysis model.

Table 5. Stress occurred at roof deck plate

구 분	휨응력(MPa)				지압응력(MPa)		비 고
	발생응력		허용응력		발생응력	허용응력	
	최대	최대	인장	압축			
지주간격 2.2m	89.7	-137	190	-190	119	280	OK
지주간격 2.9m	137	-171	190	-190	115	280	OK

이 모델을 구성하여 구조해석을 수행하였다. Fig. 8은 구조해석의 결과를 예시하고 있다. 해석 조건은 H-beam의 지간거리를 2.2m를 기준으로 하였으며 최대 2.9m의 경우에 대하여도 추가적으로 해석을 수행하였다.

상판 deck plate 구조해석 결과 상판 deck plate의 변위는 지주의 간격이 2.2m인 경우, 하향방향으로 -1.829mm에서 상향방향으로 0.048mm 발생하였고, 지주간격이 2.9m인 경우, 하향방향으로 -3.825mm에서 상향방향으로 0.023mm 발생하였다. 각 경우에 대하여 발생응력은 Table 5에서와 같이 휨응력과 지압응력 모두 만족하는 것으로 평가되었다.

3.4. 힌지부 및 까치발부의 거동 분석

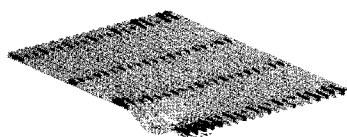
구조물의 현장적용을 위하여 설계에 반영한 힌지부와 지붕과 지주보의 연결부위인 까치발부는 개발된 낙석방지안전시설의 구조상 가장 취약한 부분으로 간주되어 상세 구조해석을 통한 안전성을 검토하였다. 이러한 힌지부에 대한 해석에 있어 하중은 3.2절의 해석의 지주간격 2.2m이고 외측경간에 하중이 작용할 경우에 발생하는 변위를 Fig. 9의 힌지부의 앞면과 뒷면의 강재변위로 간주하여 이에 따른 작용하는 하중을 가정하였다. 발생한 변

Table 3. Stresses when load was applied at outer beam

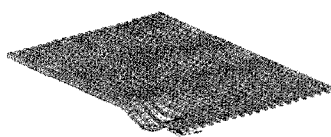
지주 경간장(m)	발생응력(MPa)	허용응력(MPa)	안전도
1.2	163	190	117%
2.0	173	190	110%
2.2	186	190	102%
2.3	193	190	98%
2.4	200	190	95%

Table 4. Stresses when load was applied middle beam

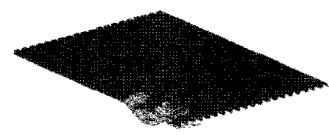
지주 경간장(m)	발생응력(MPa)	허용응력(MPa)	안전도
1.2	95	190	200%
2.0	145	190	131%
2.4	162	190	117%
2.9	188	190	101%
3.0	192	190	99%



(a) deflection



(b) bending stress distribution



(c) bearing stress distribution

Fig. 8. Roof deck plate structural analysis results.

Table 6. Displacements and rotations from structural analysis from Section 3.2 (Unit: m & deg.)

	D(x)	D(y)	D(z)	R(x)	R(y)	R(z)
front side	-0.17	0.000246	0.029465	-0.00739	-0.03049	-0.00562
rear side	-0.17	0.000221	0.033328	-0.01035	-0.011262	-0.00987

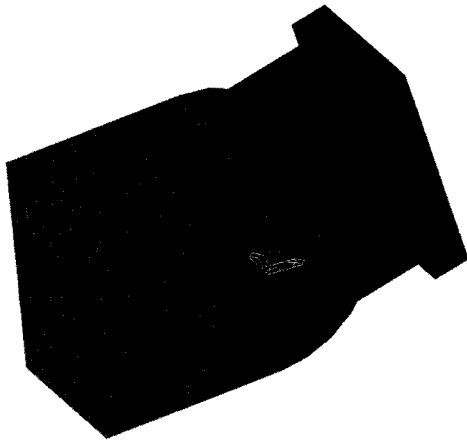


Fig. 9. Detailed model for hinge and pin.

위는 다음의 Table 6과 같다. Fig 9는 힌지부의 상세해석을 위한 모델이며, Fig. 10은 해석결과의 예시를 보여주고 있다.

힌지부 거동 분석결과 힌지를 구성하는 plate에서 발생하는 주응력은 인장 및 압축에 대하여 각각 78.2MPa과 -89.1MPa 그리고 발생 전단응력은 76.3 MPa로서 허용응력인 190MPa과 110MPa에 훨씬 미치지 못하는 것으로 나타났다. 또한 힌지부의 핀은

축력의 작용은 무시할 수 있으며 지배응력은 전단 응력이므로 이는 수평과 수직방향에 대하여 각각 13.2MPa과 48MPa로서 허용응력인 110MPa보다 훨씬 작은 값을 나타내었다. 이로부터, 낙석방지안전 시설의 현장적용 시 배후사면과의 원활한 설치를 위한 힌지를 설치할 경우에도 발생한 응력에 문제가 없는 것으로 판단된다.

까치발과 H-beam 지주와의 연결부는 구조적으로 가장 취약한 부분으로 간주되어 Fig 11의 상세 A 및 B에 나타난 바와 같이 보강재를 추가적으로 설치하는 것으로 가정하였다. 이는 연결부에서 작용하는 하중으로 인하여 좌굴 등의 구조적인 문제가 발생하지 않도록 하기위한 조치로서 이에 대한 구조적인 안전성 검토는 다음의 Fig. 12의 까치발 부의 상세해석을 위한 모델을 활용하여 구조안전성을 검토하였다. 작용하는 하중은 힌지부의 하중재하 방식과 마찬가지로 3.2절의 해석으로부터 구하여진 변위를 Fig. 11의 (a)의 각 부분의 강제변위로 간주하여 이에 따른 하중을 가정하였다. 3.2절의 구조해석으로부터 발생한 변위는 다음의 Table 7과 같다. Fig. 12와 13은 해석결과의 예시를 나타내고 있다.

Table 7. Displacements and rotations from structural analysis from Section 3.2 (Unit: m & deg.)

	D(x)	D(y)	D(z)	R(x)	R(y)	R(z)
front side	-0.08797	0.014974	-0.0504	-0.00429	-0.02136	-0.00314
rear side	-0.09521	0.002635	0.02338	-0.00301	0.00604	-0.00449
lower side	-0.04586	0.002988	-0.00016	-0.00097	-0.01354	-0.00112

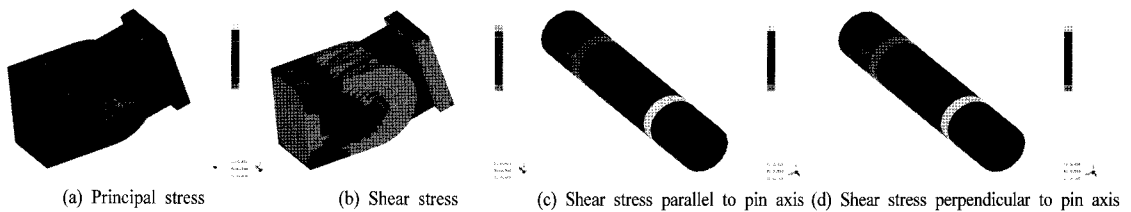


Fig. 10. Results of detailed structural analysis for hinge and pin.

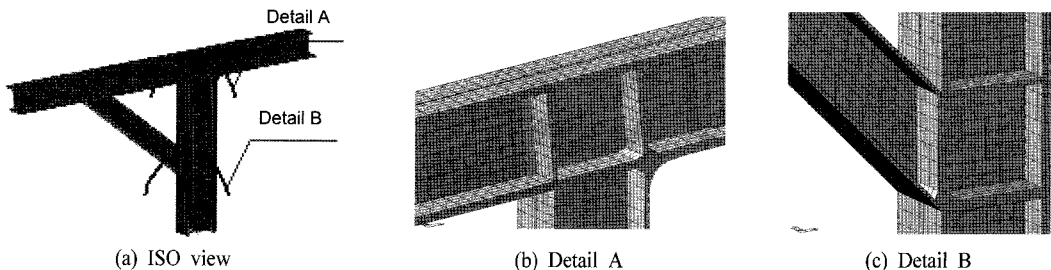


Fig. 11. Detailed model for connection area.

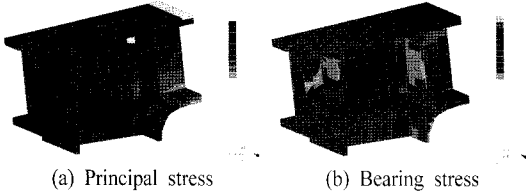


Fig. 12. Results of structural analysis for Detail A in Fig. 11(a).

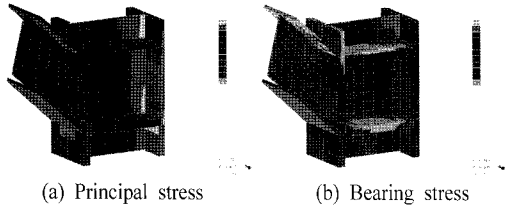


Fig. 13. Results of structural analysis for detail B in Fig. 11(a).

까지발의 상세구조해석 수행결과 힌지부 거동 분석결과 발생하는 주응력은 인장 및 압축에 대하여 각각 184.1MPa과 -189.3MPa 그리고 발생 지압응력은 217.4MPa로서 허용응력인 190MPa과 280MPa에 훨씬 미치지 못하는 것으로 나타나, 낙석방지안전시설물의 위험부인 까지치발의 접합부 역시 발생한 응력에 문제가 없는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 새로운 낙석방지안전시설인 루프형의 낙석방지시설에 대한 정밀구조해석을 수행하여 구조적 안전성을 검토하고 이를 바탕으로 현장 적용 시 발생할 수 있는 문제점을 미리 파악하여 현장시공성을 높이고자 하였다. 구조해석에 적용된 낙석하중은 낙석에너지 60kJ에 해당하는 60kN의 하중이 단위 높이에서 낙하하는 경우를 가정하였다. 이러한 구조해석을 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 단면의 크기가 400×200×8×13인 H-beam 지주를 사용할 경우 이들 지주의 간격은 낙석 발생시 구조물에 가장 불리한 외측보에 낙석하중 발생시 안전성을 확보하기 위하여 최대 2.2m 이내로 하여야 할 것이다.
- 2) 상판 Deck plate의 경우 단면 설계된 단면에 대하여 최소 -1.829mm에서 최대 0.048mm의 변위가

발생하였으며, 그에 따른 휨응력과 지압응력에 대하여 안전한 것으로 평가되었다.

3) 개발된 낙석방지안전시설의 현장적용 시 배후 사면과의 원활한 설치를 위하여 상판 루프에 힌지를 설치할 경우에도 작용하중에 대하여 발생한 응력에 문제가 없는 것으로 판단된다.

4) 구조적으로 취약할 것으로 판단되는 루프의 까지발과 H-beam 지주의 접합부에서 해석에서 제시한 것과 같은 적절한 보강재를 사용한 경우, 작용하는 하중에 대하여 구조적용 문제가 없는 것으로 해석되었다.

따라서, 본 연구에서 수행한 루프형 낙석방지안전시설의 구조안전성의 검토를 통하여 개발된 시설물을 현장에 적용할 경우 H-beam 지주의 최대 설치 간격과 상판 철판의 필요두께 등을 제시하였으며 이에 대하여 구조적으로 안전함을 해석을 통하여 검토하였다. 또한 구조적으로 취약한 부분에 대하여 상세해석을 통하여 적절한 보강재를 사용할 것을 제안하였으며 이를 통하여 충분한 안전성을 획득할 수 있는 것을 확인하였다.

감사의 글 : 본 연구는 2007년 신광웬스에코로 드이엔시(주)의 루프형(T-형) 낙석방지시설 연구과제에 의하여 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 일간건설신문, 2007년 2월 20일 화요일, 제12795호, 2007.
- 2) 강원일보, 2007년 7월 19일 목요일 - 제17879호, 2007.
- 3) 건설교통부, “수해예방을 위한 산악지 도로설계 매뉴얼”, 2007.
- 4) 신민호 외, “철도 시설물의 안전성 강화기술 개발 연구보고서”, 한국철도기술연구원 건설교통부 보고서, 2007.
- 5) 건설교통부, “도로교설계기준”, 한국도로교통협회, 2005.
- 6) 건설교통부, “도로안전시설 설치 및 관리 지침(낙석방지시설편, 도로반사경편)”, 2001.