네트형 토석류 방호시설에 작용하는 충격에너지에 따른 앵커부 인장력 산정

Estimation of Anchor Capacity According to Impact Energy on Net Protection System for Debris Flow

김성태* · 유한규**

Kim, Sungtae*, and Yoo, Hankyu**

Abstract

In order to ensure the stability of net protection system for debris flow, not only the design of net but also the design of anchor which is supporting whole system is of equal importance. However, as the tensile forces acting in the anchor vary according to the net types and the energy absorption, it is not easy to design the anchor capacity for this protection system. The guidelines for anchor design are also not established yet in Korea. In this study, a specific brake frame was developed for this system and the energy absorption by the brake frame was estimated based on static load test. Based on full scale impact tests, the deformation of net protection system and tensile forces in the anchors were analysed according to impact energy level. Generally, as the impact energy increases, not only the maximum displacement of the protection system and the energy absorption by the brake frame increase, but the tensile forces acting in the anchor also increase. Based on the experimental results, an empirical relationship between the impact energy and tensile force was established which can be used in anchor design. The results obtained from this study are planned to be utilized for design of anchor in the future.

Key words : Net Protection System, Brake Frame, Debris Flow, Anchor Capacity, Impact Energy, Full Scale Impact Test

요 지

네트형 토석류 방호시설의 안정성을 확보하기 위해서는 네트부의 설계뿐 아니라 전 시스템을 지지하는 앵커부의 설계도 중요하다. 그러나 설계된 네트의 형태와 에너지 흡수율에 따라 앵커에 작용하는 인장력이 달라지기 때문에 설계하기 어려울 뿐만 아니라 국내에서는 앵커설계에 대한 지침이 제시되어 있지 않다. 이에 본 연구에서는 정재하 실험을 통해 개발된 브레이크 프레임에 대한 에너지흡수율을 평가하고, 실험을 통해 방호시설의 변형과 충격에너지에 따른 앵커부 인장력을 분석하였다. 일반적으로 충격에너지가 증가함에 따라 방호시스템의 최대 변위가 증가하고, 브레이크 프레임의 에너지 흡수율도 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 앵커부에 작용하는 인장력도 증가하였다. 본 연구에서는 앵커설계 시 사용할 수 있는 충격에너지-인장력 간의 경험식을 실험결과를 바탕으로 제안하였다. 이는 향후 앵커설계 시 유용한 자료로 활용될 것으로 판단된다.

핵심용어 : 네트형 방호시설, 브레이크 프레임, 토석류, 앵커 인장력, 충격에너지, 실험

1. 서 론

최근 지구온난화의 영향으로 인한 기상변화는 우리나라에 큰 영향을 미치고 있다. 장마와 태풍으로 인한 피해뿐만

아니라 국지성 집중호우가 발생하고 있으며 그에 따른 산지 토사 및 유목 등에 의한 인명 및 재산 피해가 매년 반복되고 있다(Ryu et al., 2017). 이러한 변화는 지속적으로 발생할 것으로 보이며, 그에 따른 대책으로 다양한 토석류 방호시설

*교신저자, 정회원, ¹한양대학교 건설환경공학과 박사과정

²대흥미래기술 대표(Tel: +82-31-608-9596, Fax: +82-31-624-9599, E-mail: kst@dhft.co.kr)

Corresponding Author, Member, ¹Ph.D. Candidate, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

²President, Daeheung Future Technology

**한양대학교 건설환경공학과 교수(E-mail: hankyu@hanyang.ac.kr)

Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

이 개발되어 설치되고 있다.

토석류 방호시설은 크게 불투과형과 투과형으로 나뉘며, 주로 불투과형은 중력식 콘트리트댐이 사용되고, 투과형은 강재스크린 형태의 버틀러스댐이 사용되고 있다. 그러나 이러한 형식은 구조상 기초콘크리트를 견고히 해야하는 방식으로써 현장적용에는 한계가 있다. 즉, 경사가 급하거나 중장비의 진입이 어려운 현장에 적용하기에는 부적절하다. 그래서 최근에는 유연성 원리를 이용한 네트형식의 토석류 방호시설이 많이 설치되고 있다. 네트형 토석류 방호시설은 토석류 발생이 우려되는 계곡사면의 암반부에 앵커를 설치하고 앵커에 충격흡수장치를 포함한 와이어로프를 거치하여 토석류를 포착하면서 충격을 흡수하는 형식이다.

네트형 토석류 방호시설은 앵커부, 충격흡수부, 네트부로 구분할 수 있으며, 모든 구성요소에서 토석류의 충격하중에 의해 시스템이 파괴될 수 있기 때문에 설계에 주의해야 한다(Fig. 1). 앵커부는 계곡 사면에 앵커를 설치하여 전체 시스템을 지지하는 역할을 수행한다. 충격흡수부는 토석류가 계곡을 따라 유하하면서 생기는 운동에너지를 흡수하여 앵커에 전달되는 하중을 줄이는 역할을 수행한다. 그리고 네트부는 일종의 그물망 형태로 구성되어 암석 및 유목 등을 감싸듯이 포착하여 하류로의 이동을 저감시키는 역할을 수행한다. 많은 연구들이 충격흡수부 및 네트부에 집중되어 있고, 앵커부의 파괴에 대해서는 연구가 미흡한 실정이다. 앵커에 작용하는 충격하중은 적용된 방호시스템에 따라 다르며, 정적하중을 고려한 일반적인 방법으로는 한계가 있기 때문에 국외의 선행연구들이(Sasiharan et al., 2005; Muhunthan et al., 2005; Sasiharan et al., 2006) 충격하중과 네트형식을 고려하여 수행되었다. 앵커에 작용하는 인장력을 설계하기 위해서는 토석류와 방호시스템의 상호작용을 고려해야 하며, 이를 위해서는 충격하중에 따른 방호시스템(충격흡수부와 네트부)의 거동특성을 정확하게 분석하여야 한다. 다양한 선행연구들(Gentilini et al., 2012; Gentilini et al., 2013; Cho et al., 2016)이 실험형 충격실험과 축소모형 실험을 통해 네트형식에 따른 방호시스템의 거동특징을 분석하였다.

본 연구에서는 개발된 브레이크 프레임(Kim et al., 2017)

의 에너지흡수 특성을 분석하고자 정재하 실험을 수행하였다. 그리고 실험형 실험(Full scale impact tests)을 통해 개발된 네트형 토석류 방호시설의 성능을 검증하고, 가해진 충격에너지 정도에 따른 방호시설의 인장력을 분석하여 설계 시 사용가능한 경험식을 제안하고자 한다.

2. 토석류 방호시스템의 앵커설계

앵커설계는 토석류 방호시스템의 안정성에 핵심적인 부분을 담당하고 있다. Sasiharan et al.(2005)는 다음 Eq. (1)과 같이 한계평형해석(Limit equilibrium analysis)에 따라 방호시스템의 안전율을 산정하였다. 여기서는 토석류의 정적인 하중에 대한 앵커의 인장력을 산정하고, 방호시스템 구성요소와 앵커 간격에 따른 앵커하중을 수치해석을 통해 선형적인 관계식을 제안하였다. 충격에 의한 모멘트 하중은 적용되지 않았으며, 안전율과 토석류 하중은 Eqs. (1) 그리고 (2)와 같다.

$$FS = \frac{f_a + f_w + f_d}{f_{dm} + f_{wm}} \quad (1)$$

여기서, FS는 안전율, f_a 는 앵커의 인장력, f_w 는 매쉬무게에 의한 표면저항, f_d 는 암석에 의한 무게저항, f_{dm} 은 토석류에 의한 활동력, f_{wm} 는 매쉬무게에 의한 활동력이다.

$$f_{dm} = 0.5H_d^2\gamma_d w_d \sin\beta(\cos\phi_{cs} - \cot\beta) \quad (2)$$

여기서, H_d 는 축적된 토석류의 높이, γ_d 는 토석류의 단위중량, ϕ_{cs} 는 축적된 토석류 사면의 각도, w_d 는 축적된 토석류의 폭이다.

워싱턴주 교통부에서는 비탈면의 조건에 따라 낙석방어를 위한 앵커의 설치간격에 대한 지침을 다음 Table 1과 같이 제안하였다(Sasiharan et al., 2006). 그러나 워싱턴주에서는 토석류에 의한 앵커의 인장파괴를 경험했기 때문에 앵커부 설계에 대한 연구의 필요성을 느꼈다.

Fig. 1. Elements of Net Protection System

Table 1. Empirical Guidelines for Anchor Spacing (Sasiharan et al., 2006)

Slope condition	Anchor spacing (m)
slopes < 22.86 m	15.24
slopes > 22.86 m	7.62
Beyond active brow	3-10

Fig. 2는 와이어로프에 토석류 하중이 균등하게 작용했을 때 와이어로프의 변형된 모습이다. 토석류 하중이 작용할 때 와이어로프에 작용하는 인장력은 Eq. (3)과 같이 표현할 수 있다. 또한 와이어로프 항복강도를 기준으로 한계 토석류 하중(p)을 Eq. (4)를 통해 Eq. (5)와 같이 산정할 수 있다 (Muhunthan et al., 2005). 위에서 언급한 설계식을 바탕으로 앵커부에 작용하는 인장력을 산정할 수 있지만 토석류의 동적하중 및 형태를 고려할 수 없고, 네트형 토석류 방호시설의 특징을 반영하기에는 부족하여 수치해석 등을 통해 발전시켜야 한다.

$$T = p \times r \quad (3)$$

$$\frac{\alpha}{2} = \sqrt{6 \left(1 - \frac{L_s}{A} \right)} \quad (4)$$

$$p = \frac{T \sin \left(\sqrt{\frac{6T}{SE+T}} \right)}{L_s} \quad (5)$$

여기서, p 는 토석류의 분포하중, r 은 토석류 하중에 변형된 후 와이어로프를 원호로 한 반경, α 는 원호의 중심각, T 는 와이어로프에 작용하는 인장력, S 는 와이어로프의 단면적, E 는 와이어로프의 탄성계수, L_s 은 변형전 와이어로프의 길이, A 는 변형후 와이어의 길이이다.

Fig. 2. Schematic Diagram of Top Horizontal Wire Rope Under Mesh Load (Sasiharan et al., 2006)

3. 네트형 토석류 방호시설의 성능검증을 위한 실험

3.1 개발된 브레이크 프레임의 설계 및 성능

브레이크 프레임은 충격에너지를 흡수하여 앵커부에 작용하는 하중을 감소시킴으로써 중요한 역할을 수행한다. 본 연구에서 개발된 브레이크 프레임은 Fig. 3(a)와 같이 와이어로프, 가이드로프, 강재 링 그리고 U클립으로 구성되어 있다. 와이어로프는 IWRC로프(Independent wire rope core)를 사용하여 직경 16 mm로 제작되었으며, 인장강도 805.72 MPa로 설계하였다. 강재 링에 20 mm짜리 4개의 구멍을 뚫어 약 2,900 mm의 와이어로프를 교차시켜 연결하고, 강재 링의 바닥부에 총 4개의 U볼트로 와이어로프와 강재 링이 밀착하도록 제작하여 와이어로프의 인장력이 강재 링에 효율적으로 전달되도록 설계하였다. 강재 링은 SS400 강재를 사용하였다. 폭 50 mm의 강판을 원형($D=30$ mm)으로 가공하였고, 두께는 4 mm로 제작하였다. 브레이크 프레임이 인장력을 받았을 때 강재 링이 먼저 파단되어 와이어로프가 크게 변형하면서 충격에너지를 흡수하기 위하여 파단유도부를 설계하였다. 파단유도부는 강판을 양쪽 폭 방향으로 10 mm씩 홈을 내어 인장력이 작용하면 파단이 발생하도록 유도하였다. 와이어로프와 1,500 mm 길이의 가이드로프는 3개의 U클립을 사용하여 체결하였다.

이 브레이크 프레임의 하중전달 메카니즘은 다음과 같다. 첫 번째로는 브레이크 프레임의 좌·우 측(①) 혹은 Fig. 1에서와 같이 시스템의 네트부에 충격이 발생하여 방호시설에 인장력이 발생할 경우 브레이크 프레임에 결합된 와이어로프가 앵커부 방향(외측)으로 당겨져 강재 링이 Fig. 3(b)와 같은 모양으로 변형하면서 변위가 동반되고, 강재 링의 인장강도를 초과할 경우 파단이 발생하여 와이어로프에 더 큰 변위가 동반된다. 이후 와이어로프의 인장강도를 초과할 때 까지 변형된다. 두 번째로는 브레이크 프레임에 중앙(②)에 직접적으로 충격이 발행할 경우 브레이크 프레임이 역시 Fig. 3(b)와 같은 모양으로 변형하면서 충격이 가해진 방향으로 변위가 동반되어 에너지를 흡수하게 된다.

이 브레이크 프레임의 에너지흡수율을 평가하기 위하여 명지대학교 하이브리드구조실험센터에서 실험을 수행하였다. 3,500 kN의 인장력을 가할 수 있는 5,000 kN Static Actuator를 사용하였으며, 피스톤 이동속도를 250 mm/min로 설정하여 실험을 수행하였다(Fig. 4(a)). Fig. 4(b)와 같이 3개의 U클립으로 연결된 브레이크 프레임의 에너지 흡수율은 1,190 mm가 변형되었을 때 74.4 kJ로 계산되었다.

3.2 실험 계획 및 조건

본 실험의 목적은 개발된 네트형 토석류 방호시설의 성능평가 및 작용하는 충격에너지 정도에 따라 앵커부에 작용하는 인장력과 네트형 토석류 방호시설의 변형을 분석

(a) Brake frame developed for this study(before loading)

(b) Deformed brake frame(after loading)

Fig. 3. Illustration of Brake Frame Before and After Impact Load

(a) Illustration of static load test

(b) Load-displacement curve obtained after static load test on brake frame

Fig. 4. Performance and Results of Static Load Test

하는 것이다. 실험은 한양대학교 ERICA 캠퍼스에서 실시되었다. 실험부지는 낙하 실험 시 발생하는 소음과 진동에 관계 문제가 발생하지 않는 장소로 선정하였으며, 낙하 시 발생할 수 있는 도로포장 균열 및 상하수도관 파열의 문제가 없는 장소에서 진행되었다. 실험용 구조물은 와이어로프와 브레이크 프레임이 설치되어 있는 상부구조물과 H형강 프레임으로만 제작된 하부구조물로 나누어 제작되었다. 실험 후 상부구조물에 설치되어 있는 와이어로프와 브레이크 프레임이 변형되거나 파괴되어 재사용할 수 없기 때문에 상부구조물을 하부구조물과 분리하여 재조립하는 방식으로 실험을 진행하였다.

Fig. 5(a)와 같이 실험을 위한 구조물은 H형강(규격: 500×500 mm, 가로×세로) 기둥 10개로 구성되어 있으며, 기둥의 높이는 3 m, 기둥간의 횡방향 간격은 2 m, 그리고 종방향 간격은 1.5 m로 제작되었다. 구조물의 높이는 충격에너지 의한 방호시설물의 최대변형을 고려하여 설계하였다. Fig. 5(b)와 같이 상부구조물은 H형강(규격: 250×250 mm)의 사각

구조물의 경계로 네트형 토석류 방호시설을 구축하였다. 실험의 사용된 방호시설의 와이어로프를 0.5 m 간격으로 총 5개의 와이어로프를 종방향으로 설치하였다. 5개의 와이어로프에는 브레이크 프레임이 설치되었고, 중간 와이어로프를 기준으로 정면에 먼 3개의 와이어로프에 로드셀을 설치하였다(Fig. 5(b)). 로드셀 위치에 따라 번호를 1부터 3까지 정하였다. 이 후 12개의 와이어로프를 0.5 m의 횡방향 간격으로 설치하여 네트형 토석류 방호시설을 구축하였다. 와이어로프는 고정구(조립구)를 통해 연결하였다.

낙하추(Impact block)의 무게는 10 kN으로 제작하였고, 위치에너지를 운동에너지로 변환함으로써 네트형 토석류 방호시설에 충격을 가하도록 설계하였다. Fig. 5(a)와 같은 모양으로 제작하여 면적 충격을 가할 수 있도록 설계하였다. 낙하체를 들어올리기 위한 장비로 110 kN급 크레인을 이용하였으며, 낙하고와 동일한 길이로 제작된 로프를 매달아 팽팽하게 당겨 낙하고를 맞춘 뒤 낙하하였다.

(a) Front view of protection system and impact block

(b) View of net system and position of load cells

Fig. 5. Protection System Developed for Full Scale Impact Tests

Table 2. Experimental Cases According to Energy Level

Cases	Weight of test block (kN)	Fall height (m)	Energy level (kJ)
1	10	5	50
2	10	10	100
3	10	15	150
4	20	10	200

실대형 실험은 Table 2와 같이 충격에너지를 주요변수로 총 4번 수행되었다. 3번의 실험케이스까지는 10 kN의 낙하추가 사용되었고, 4번째 실험케이스는 10 kN의 낙하추를 2개 사용하였다.

3.3 계측계획

본 연구의 계측계획은 3가지로 분류할 수 있다. 첫 번째로는 충격에너지에 따른 부재별 인장력을 측정하는 것이다. 이를 위해 3개의 로드셀(HTS)을 사용하였다. 로드셀의 인장력 측정범위는 최대 9.81 kN에서 150 kN까지 측정이 가능하다. 본 실험에 앞서 Fig. 6(a)와 같이 UST(Universal testing machine) 시험기를 이용하여 측정값의 신뢰도를 검증하였

다. Fig. 5(b)에서와 같이 3개의 로드셀을 설치하였다. 4채널 GreenTech 사의 데이터 로거를 사용하였고, 데이터 측정은 1,000회/sec(Hz)를 사용하였다. 두 번째로는 시간에 따른 네트형 토석류 방호시설의 변형을 측정하고자 CR-3000x2 모델의 고속카메라를 사용하였다(Fig. 6(b)). 최대 해상도는 1000×800로 설정하고, 초당 촬영은 1,500 FPS(Frame per second)로 설정하였다. 측정범위는 네트형 토석류 방호시설을 전범위로 설정하였다. 마지막으로 브레이크 프레임의 와이어로프와 가이드로프의 상대적 이동거리를 부재별로 측정하였다. Fig. 6(c)에서와 같이 1개의 브레이크 프레임 당 6개의 U클립 위치에 따라 상대적 이동거리를 측정하였다.

(a) Reliability test of load cells

(b) Superhigh speed camera installed for taking measurements

(c) Top view of location of brake frames at 200 kJ

Fig. 6. Measurement Features for Full Scale Testing

4. 충격에너지에 따른 네트형 토석류 방호시설의 거동 및 앵커부 인장력 산정

4.1 충격에너지에 따른 브레이크 프레임의 거동 및 에너지 흡수율

Fig. 6(c)에서와 같이 중앙에 위치한 브레이크 프레임의 강재 링이 가장 변형이 심하며, 이는 큰 에너지를 흡수한 것으로 판단할 수 있다. 본 실험결과에서는 강재 링에 파단이 발생하지 않았다. 좌·우 3개의 U클립의 위치에서 와이어로프와 가이드로프의 상대적 변위를 구하여, 정재하 실험결과와 비교하여 에너지 흡수율을 산정하였다. Fig. 7에서 확인할 수 있듯이, 네트형 토석류 방호시설에 가해진 충격에너지가 클수록 모든 와이어로프에서 상대적 변위(와이어로프와 가이드로프)가 증가하는 것을 알 수 있다. 그 중에서도 중앙 와이어로프 A가 큰 상대변위를 나타내었다. 50 kJ의 충격에너지가 방호시설에 가해졌을 때, 와이어로프 A에서는 185 mm, B에서는 135 mm, C에서는 1.7 mm의 상대적 변위가 발생하였다. 그리고 최대 200 kJ의 충격에너지가 방호시설에 가해졌을 때, 와이어로프 A에서는 531.7 mm, B에서는 450 mm, C에서는 376.7 mm의 상대적 변위가 발생하였다. Fig. 7의 상대적 변위를 바탕으로 충격에너지 정도에 따른 네트형 시스템의 에너지 흡수율(%)을 분석하였다. 에너지가 증가함에 따라 네트형 토석류 방호시설의 에너지 흡수율도 증가하는 경향을 나타냈다. 50 kJ의 에너지에서는 11.98%의 작은 에너지 흡수율을 보였지만 200 kJ에서는 47.4%의 충격 에너지를 흡수한 것으로 나타났다.

4.2 충격에너지에 따른 네트형 토석류 방호시설의 변위 및 앵커부 인장력 분석

Figs. 8(a)-(d)는 에너지 정도에 따른 네트형 토석류 방호시설의 최대 변위를 나타내었다. 에너지 정도가 50 kJ에서 200 kJ로 증가함에 따라 네트 중앙에서의 최대 변위는 각각 0.559 m, 0.768 m, 0.938 m, 그리고 1.092 m로 분석되었다. 실험에서는 충격에너지에 따른 와이어로프의 파괴는 발생하지 않았다.

Fig. 9는 시간(초)에 따른 네트형 방호시스템의 변위 및 각 로드셀에 작용하는 인장력을 나타내었다. 왼쪽 y축은 네트형 방호시스템의 변위분포를 나타내며, 양의 값은 아래로 처짐을 음의 값은 위로 처짐을 나타낸다. 오른쪽 y축은 인장력을 나타내었으며, 양의 값은 인장력을 음의 값은 압축력을 나타낸다.

충격에너지 50 kJ의 낙하추가 네트에 접촉하면서 지속적으로 인장력과 변위가 증가하는 가운데 0.08초 경과 후에 최대 인장력 72.15 kN가 로드셀 1에 작용하였다(Fig. 9). 그리고 낙하추가 네트에 접촉 0.08초 경과 후 최대 인장력 63.45 kN가 로드셀 2에 작용하였다. 로드셀 3의 경우는 최대 인장력 52.12 kN이 0.125초에 작용하였다. 네트 중앙에서의 변위는 0.11초(Braking time)에 최대 0.559 m가 발생하였고, 영구적으로 변위 0.468 m가 발생하였다.

충격에너지 100 kJ의 낙하추가 네트에 접촉하면서 지속적으로 인장력과 변위가 증가하는 가운데 0.120초 경과 후에 최대 인장력 83.3 kN가 로드셀 1에 작용하였다(Fig. 10). 그리고 낙하추가 네트에 접촉 0.045초 경과 후 최대 인장력

Fig. 7. Energy Absorption Ratio Obtained from Relative Movement of Brake Frame According to Energy Level

Fig. 8. Maximum Displacement of Net Protection Systems According to Various Energy Levels (images captured by superhigh speed camera)

Fig. 9. Displacement and Tensile Load Profiles in Protection System at 50 kJ

Fig. 10. Displacement and Tensile Load Profiles in Protection System at 100 kJ

76.85 kN가 로드셀 2에 작용하였다. 충격에너지 100 kJ의 경우는 로드셀 2에서 먼저 최대 인장력이 발생하였고, 0.075 초 후 로드셀 1에서 최대 인장력이 발생하였다. 이번 경우에는 와이어로프 A와 와이어로프 B에서 거의 균등하게 하중을 분담하였다. 로드셀 3의 경우는 최대 인장력 64.42 kN이 0.09초에 작용하였다. 네트 중앙에서의 변위는 0.135초 (Braking time)에 최대 0.768 m가 발생하였고, 영구적으로 변위 0.688 m가 발생하였다. 충격에너지 50 kJ과 비교하여, 변위가 약 1.4배 증가한 이유는 에너지 크기가 2배 증가함에

따라 충격 시 브레이크 프레임에 변위가 크게 발생하게 되어 에너지 흡수율이 증가하고, 이에 따라 시스템에 큰 변위가 발생하였다. 낙하체가 네트에 접촉 후 약 0.17초 후 모든 부재에 걸리는 인장력은 급격히 줄어들며, 최대 9.13 kN의 잔류 인장력만이 와이어로프 C에 작용하게 된다.

충격에너지 150 kJ의 낙하체가 네트에 접촉하면서 지속적으로 인장력과 변위가 증가하는 가운데 0.120초 경과 후에 최대 인장력 150 kN가 로드셀 1에 작용하였다(Fig. 11). 그리고 낙하체가 네트에 접촉 0.056초 경과 후 최대 인장력

Fig. 11. Displacement and Tensile Load Profiles in Protection System at 150 kJ

61.07 kN가 로드셀 2에 작용하였다. 충격에너지 150 kJ의 경우는 로드셀 1에 작용하는 최대 인장력이 로드셀 2에 비하여 2.5배 크게 작용함으로써 대부분의 충격에너지가 로드셀 1에 작용하였다. 로드셀 3의 경우는 최대 인장력 57.57 kN이 0.135초에 작용하였다. 네트 중앙에서의 변위는 0.113초(Braking time)에 최대 0.938 m가 발생하였고, 영구적으로 변위 0.835 m가 발생하였다. 낙하체가 네트에 접촉 후 약 0.16초 후 인장력은 급격히 줄어들어 0에 수렴하였으나, 낙하체가 다시 충격을 가함으로써 약 0.91초에 최대 59.82 kN의 인장력이 작용한 것을 확인하였다.

충격에너지 200 kJ의 낙하체가 네트에 접촉하면서 지속적으로 인장력과 변위가 증가하는 가운데 0.171초 경과 후에 최대 인장력 120.27 kN가 로드셀 1에 작용하였다(Fig. 12). 그리고 낙하체가 네트에 접촉 0.164초 경과 후 최대 인장력 140.55 kN가 로드셀 2에 작용하였다. 운동에너지 200 kJ의 경우는 로드셀 2에 작용하는 최대 인장력이 1.17배 더 크게 0.007초 이전에 작용함으로써 낙하체의 운동에너지가 와이어로프 B에 먼저 작용하고, 거의 균등하게 와이어로프 A와 와이어로프 B에 하중이 작용함을 알 수 있다. 로드셀 3의 경우는 최대 인장력 63.45 kN이 0.145초에 작용하였다. 네트 중앙에서의 변위는 0.171초(Braking time)에 최대 1.092 m가 발생하였고, 영구적으로 변위 1.057 m가 발생하였다. 낙하체가 네트에 접촉 후 약 0.175초 후 인장력은 급격히 줄어들며, 최대 12.91 kN의 잔류 인장력만이 와이어로프 C에 작용하게 된다. 이 전 실험과는 다르게 네트 시스템의 변위가 충격 후 거의 일정한 것을 알 수 있으며, 이는 200 kJ의 충격에너지에 의해 시스템의 탄성력을 손실했음을 의미한다. 모든 실험 결과를 종합하여 보면, 변형이 많이 생긴 와이어로프 A와 B보다는 상대적 변형이 적은 와이어로프 C에서 가장 큰

잔류 인장력이 나타나는 것을 알 수 있다.

4.3 충격에너지에 따른 네트형 토석류 방호시설의 앵커부 인장력 산정방법 제안

충격에너지 정도에 따른 최대 인장력을 로드셀(와이어로프)별로 나타내어 관계식을 도출하였고, Fig. 13에 나타내었다. 로드셀 1에서 계측된 인장력의 분포도는 결정계수(R^2)가 0.586으로 상대적으로 낮게 평가되었고, 로드셀 2의 경우도 마찬가지로 결정계수가 0.554로 낮게 평가되었다. 로드셀 3의 경우도 이전 로드셀의 결정계수보다 다소 낮게 평가되었지만 와이어로프 C에서는 에너지 정도와 관계없이 거의 일정한 인장력을 가지는 것으로 분석되었다. 상대적으로 낮은 결정계수의 이유는 낙하체가 네트형 토석류 방호시설에 충격을 가하는 위치에 따라 부재별로 하중분담이 달라지기 때문이다. 이상적인 낙하조건에서는 보다 큰 결정계수 도출이 가능할 것으로 판단된다.

Fig. 13과 같이 각 로드셀에 작용하는 인장력의 합으로 관계식을 도출하게 되면 결정계수가 0.90으로 도출되어 뚜렷한 선형적인 관계를 가지게 된다. 예측되는 토석류의 충격에너지에 따른 네트형 토석류 방호시설의 안정성을 확보할 수 있는 앵커부 인장강도 제안식을 다음 Eq. (6)과 같이 제안하였다. 제안된 총 인장강도에 각 부재별 하중분담비와 안전율을 고려하게 되면 네트형 토석류 방호시설에 각 부재별 앵커부 인장강도 설계가 가능할 것이다.

$$T = 1.3928 \times E + 222.08 \quad (6)$$

여기서, T는 네트형 토석류 방호시설을 위한 앵커부 인장강도(kN), E는 예측되는 토석류의 충격에너지이다.

Fig. 12. Displacement and Tensile Load Profiles in Protection System at 200 kJ

Fig. 13. Relationship Between Energy Level and Maximum Tensile Force

5. 결 론

토석류 방호시스템의 안정성에 큰 영향을 미치는 앵커부 인장강도 산정에 대하여 개발된 방호시설의 정재하 실험과 실대형 실험 결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 토석류 방호시설의 앵커부 설계에 대한 선행연구는 매우 부족한 실정이며 적용하기에는 일부 한계가 존재한다. 실제적인 앵커의 인장력을 평가하기 위해서는 충격에너지 조건과 설계된 방호시스템의 상호작용을 분석하고, 이를 바탕으로 인장력을 도출하는 것이 적절하다고 판단된다.
- (2) 본 연구를 통해 개발된 브레이크 프레임은 소정의 인장력이 발생하면 강재 링이 파단되어 최대 1,190 mm까지 변형할 수 있어 한 개당 최대 744 kJ의 충격에너지를 흡수할 수 있는 것으로 성능이 평가되었다. 실대형 실험결과, 충격에너지 정도가 증가함에 따라 개발된 네트형 토석류 방호시설의 에너지 흡수율이 증가하여 고에너지일수록 더 효율적으로 거동함을 알 수 있다. 개발된 브레이크 프레임의 성능결과를 바탕으로 다양한 네트형 토석류 방호시설의 설계가 가능할 것으로 판단된다.
- (3) 충격에너지가 50 kJ에서 200 kJ로 증가함에 따라 네트형 토석류 방호시설 중앙에서의 최대 변위는 0.559 m에서 최대 1.092 m까지 증가하였다. 이에 따라 최대 변위까지 도달하는 시간도 0.11초에서 0.171초로 증가된 경향을 나타냈다. 본 연구에서 사용한 낙하면적으로 인해 와이어로프 A와 B에서 대부분의 인장력을

분담하는 것으로 나타났다. 충격에너지가 증가함에 따라 앵커부에 작용하는 인장력도 모두 증가하는 경향을 나타냈다. 최대 인장력은 150 kJ의 충격에너지가 가해졌을 때 와이어로프 A에서 150 kN으로 분석되었다. 이는 낙하위치로 인한 와이어로프 A에 충격하중이 집중되면서 생긴 현상으로 분석되어 앵커부 설계 시 충격하중 조건이 중요한 설계인자임을 판단하였다.

- (4) 본 연구에서 설정한 충격에너지와 하중조건을 바탕으로 네트형 토석류 방호시설의 앵커부 설계 시 사용가능한 경험식을 제안하였다. 낙하위치로 인하여 각 부재별의 경험식은 다소 낮은 결정계수값을 나타냈지만 충격에너지가 증가함에 따라 증가하는 뚜렷한 경향을 나타내었다. 총 인장력의 합계는 충격에너지와 뚜렷한 선형적인 관계($R^2=0.90$)를 나타냈다. 현재 네트형 토석류 방호시설에 관련된 앵커설계의 지침이 부재하기 때문에 도출된 경험식은 네트형 토석류 방호시설 설계 시 중요한 자료로 활용될 것으로 기대한다.

향후 실대형 실험결과를 수치해석과 비교하고, 수치해석 모델과 결과를 검증한 후 연구를 진행할 예정이다. 다양한 충격에너지와 하중조건 그리고 네트형 토석류 방호시설 설계에 따라 수치해석을 수행하여 방호시스템의 하중전달 과정과 앵커부 인장강도에 대한 경험식을 발전시키고자 한다.

감사의 글

본 연구는 2016년 중소기업청 기술혁신개발사업(S2401940)으로 이루어진 것으로 중소기업청에 감사드립니다.

References

- Cho, S.H., Yoo B.S., Kim, J.H., and Lee, K.S. (2016) Performance Assessment for Debris Mitigation Structure by using Scale Model Tests. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 16, No. 5, pp. 247-260.
- Gentilini, C., Gottardi, G., Govoni, L., Mentani, A., and Ubertini, F. (2013) Design of Falling Rock Protection Barriers Using Numerical Models. *Engineering Structures*, Vol. 50, pp. 96-106.
- Gentilini, C., Govoni, L., de Miranda, S., Gottardi, G., and Ubertini, F. (2012) Three-dimensional Numerical Modelling of Falling Rock Protection Barriers. *Computers and Geotechnics*, Vol. 44, pp. 58-72.
- Kim, S.T., Lee, J.H., Yun, J.S., and Kim, Y.J. (2017) Performance Evaluation of Net Type Debris Barrier for High Energy Absortion. *KSCE 2017 Convention*, Korean Society of Civil Engineers, pp. 18-19.
- Muhunthan, B., Shu, S., Sasiharan, N., Hattamleh, O.A., Badger, T.C., Lowell, S.M., and Duffy, J.D. (2005) *Analysis and Design of Wire Mesh/Cable Net Slope Protection*. Report WA-RD 612.1, Washington State Department of Transportation, Seattle, Washington.
- Ryu, J.H., Seo, S.H., and Kim, S.K. (2017) A Study on the Criteria of Risk Assessment for the Vulnerable District to Debris Flows. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 5, pp. 163-171.
- Sasiharan, N., Muhunthan, B., Badger, T.C., Shu, S., and Carradine, D.M. (2006) Numerical Analysis of the Performance of Wire Mesh and Cable Net Rockfall Protection Systems. *Engineering Geology*, Vol. 88, Issues 1-2, pp. 121-132.
- Sasiharan, N., Muhunthan, B., Shu, S., and Badger, T.C. (2005) Analysis of Global Stability, Anchor Spacing, and Support Cable Loads in Wire Mesh and Cable Net Slope Protection Systems. Transportation Research Record: *Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1913, pp. 205-213.

Received	December 22, 2017
Revised	December 28, 2017
Accepted	January 5, 2018