

강우로 인한 철도 연변사면의 활동분석 : 실내모형실험

Analysis on the Rainfall Driven Slope Failure Adjacent to a Railway : Flume Tests

사 공 명¹ Sagong, Myung

김 민 석² Kim, Min-Seok

김 수 삼³ Kim, Soo-Sam

이 인 용⁴ Lee, In-Yong

Abstract

Recently, the intensive rainstorm possibly induced by global warming plays a key role on the instability of railway adjacent slopes. The instability of slopes results as covering and loss of railway lines induced by slided soil mass. According to the site investigation on the failed slopes triggered by rainfall, four types of slope failure were observed: shallow, intermediate, gully erosion, and soil-rock interface failures. The observation reveals the different characteristics of slope failure depending on the thickness of soil layer, morphological features of slope, etc. Based upon the observations, flume tests were conducted to analyze the sliding mechanism of each failure. The variables of flume test are soil layer thickness, rainfall intensity, and morphology of slope under the constant condition of the percentage of fine, initial soil moisture content, slope angle and compaction energy. Test results show that shallow failure was mostly observed from the surface of the slope and caused by the soil erosion; in addition, compared to the other types of failure, the occurrence of initial erosion is late, however, the development of erosion is fast. In gully erosion failure, the collected water from the water catchment area helps erosion of the upper soil layer and transfer of residual corestone, which impedes the erosion process once the upper soil layers are eroded and corestone are exposed. The soil-rock interface failure shows the most fast initial erosion process among the failure types. Interestingly, the common feature observed from the different types of failure was the occurrence of the initial deformation near the toe of slopes which implies the existence of subsurface flow along the downslope direction.

요 지

최근 지구온난화현상으로 인해 발생하는 국지성 호우는 철도 연변사면 활동 및 활동 토체로 인한 선로매몰 그리고 선로유실 등의 불안정성을 초래하는 요인으로 대두되고 있다. 강우로 인한 사면의 거동에 대한 현장조사 결과 토층의 두께 및 사면의 형태적 특성 등에 따라 서로 다른 활동특성이 관측되었다. 이와 같은 활동특성을 천층 활동타입, 중간층 활동타입, 우곡부 활동타입, 암반 경계부 활동타입 4가지로 분류하였다. 이러한 관측과 관련하여 각 타입의 활동메커니즘을 규명하고 강우시 사면의 거동특성을 분석하고자 실내모형실험을 수행하였다. 실내모형실험은 미립분 함량, 초기함수비, 경사각, 다짐에너지를 고정 변수로 취하고 토피고, 강우강도, 사면표면의 형태를 변화시키는 조건으로 수행되었다. 실내모형실험의 결과 천층 활동은 주로 표층에서 발생하며 침식에 의한 활동임을 알 수 있었다. 또한 초기 침식이 상대적으로 다른 활동타입에 비해서 늦게 발생하였으나 침식의 진행은 빨랐다. 우곡부 활동타입은 우곡부로 집수된 빗물로 인하여 침식 정도가 더 심하게 진행되었으며 사면내 위치하는 전석이 드러날 정도였다. 전석층까지 침식이 발생한 후 전석의 존재로 인하여 추가적인 침식이 상대적으로 그 이전보다 느리게 발생하였다. 암반 경계부 활동타입의 경우 본 실험에서 가장 빨리 초기 활동 발생이 관측되었다. 각 활동타입에서 공통적으로 관측된 사항은 사면의 하단부에서 초기 변형이 관측되었으며 이러한 관측은 사면내 침투수의 사면방향의 흐름을 의미한다.

Keywords : Gully flow, Infiltration, Rainfall-driven slope failure, Run off flow, Slope morphology

1 정희원, 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, KRRI, rockcore@krri.re.kr, 교신저자)

2 정희원, (주)동일기술공사 철도부 사원 (Member, Engineer, Dong-il Eng. Consultants Co., Ltd.)

3 정희원, 한양대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Depart. Civil. Environ. Engrg. Hanyang Univ.)

4 정희원, (주)동일기술공사 철도부 전무 (Member, Executive Director, Dong-il eng. Consultants Co., Ltd.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2006년 11월 30일까지 그 내용을 확화로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근 들어 이상기후의 영향으로 인한 토목구조물의 붕괴 및 그로인한 인명손상의 피해는 늘어가는 추세이다. 특히 강우로 인한 사면의 활동과 그로인한 피해는 주기적으로 발생하고 있다(철도위원회, 2003; Berti 등, 1999; Crosta와 Prisco, 1999; Lin 등, 2002; Wang 등, 2002). 지난 2002년, 2003년 그리고 2005년 발생한 태풍 루사, 매미, 나비의 영향으로 인하여 국내에서도 일부 철도노선에서 선로 유실 및 선로매몰의 피해가 발생하였다. 이러한 현상의 발생으로 인하여 국내외적으로 강우로 인한 사면의 거동에 대한 다양한 접근이 이루어졌다.

사면의 활동은 기후, 지질, 지형, 식생 조건등 다양한 원인에 의해서 발생하며 사면활동은 그 양상에 따라 “낙하(fall)”, “전도(topple)”, “활동(slide)”, “흐름(flow)”, “측방유동(lateral spread)”과 “혼합형(composite)”로 구분된다(Cornforth, 2005). 특히 국내에서 강우로 인한 토사면의 활동 유형은 상당부분이 활동과 흐름의 형태를 보이는 것으로 판단되며 흐름의 경우에는 흙과 자갈이 혼재된 이른바 토석류(debris flow)가 발생하는 것으로 관측되었다(사공 등, 2005; 철도위원회, 2003).

비가 내리면 빗물의 일부는 증발하고 나머지는 흙으로 침투한다. 침투가 지속적으로 진행되면 흙의 침투능은 감소하며 이에 따라 일정한 강우강도 조건에서 침투량은 시간이 진행됨에 따라 감소하게 된다(Rahardjo 등, 2005). 침투되지 못한 비는 지표면을 따라 흘러 표면유출수(runoff water)가 되며 이때 사면의 형상 특성에 따라 흐름의 특성은 포상류(布狀流, sheet flow) 형태가 되거나 우곡류(雨谷流, gully flow)의 형태가 될 수 있다. 포상류의 발생은 주로 넓고 평평한 땅에서 빗물이 넓게 퍼지면서 발생하며 토양이 노출된 경사지에서는 가느다란 물길을 형성하면서 릿류(rill flow)로 흐르는 것이 일반적이다(권혁재, 2002). 그러나 국내 기존 철도선 연변에 위치하는 사면의 형태는 평평한 형상이기 보다는 자연사면에 가까운 형태이므로 사면내에서의 경사가 일정하지 않고 우곡을 형성하므로 우곡류의 흐름이 보다 자주 발생한다고 할 수 있을 것이다. 특히, 우곡부에서는 배후의 우수지역으로 부터 우곡부로 집수되는 빗물의 영향으로 인하여 빗물에 의한 침식이 발생할 가능성이 상당히 높으며 이러한 부분들이 사면의 안정성 계산에 일부 고려되어야 할 것이다(사공과 임, 2005). 이러한 사면의 거동은 현장조사를 통하여 관측된 여러 사면의 거

동 중 한 부분으로서 각 패턴 별 사면의 활동 메커니즘은 서로 상이할 것으로 예상되는 바이다(사공 등, 2005).

기존의 연구중에는 실내실험을 통하여 강우로 인한 사면내 흙의 연약화 및 사면활동 과정에 대한 연구가 수행된 사례가 있다(Eckersley, 1990; Nishigaski 등, 1999; Okura 등, 2002; Wang과 Sassa, 2003; Gachet 등, 2003). 각각의 실험 내용들을 살펴보면 일정한 강우강도 조건에서 사면내 흙의 함수비 및 간극수압의 변화에 대한 분석을 수행하였다. 그러나 상당수의 연구결과는 다양한 조건에서의 강우로 인한 사면의 거동을 재현하고 있지 않으며 특히 현장에서와 같이 여러 경계조건을 가진 상황에 대한 재현이 거의 없는 편이다. 따라서, 본 연구에서는 현장에서 관측된 사면의 거동을 실내실험을 통하여 재현하며 각 패턴별 상세 거동에 대한 분석을 수행하고자 한다. 본 논문은 기존 철도노선에 인접한 사면에서 관측된 내용을 중심으로 수행하였다.

2. 철도 연변사면에서 관측된 강우로 인한 사면의 활동 특성

태풍과 동반된 국지성 호우로 인하여 많은 피해가 발생한 강원도 영동선과 태백선 구간에 있는 철도 연변사면은 자연사면의 조건에 가까운 경우가 많으며, 사면내 절토부 자체는 상대적으로 적다. 따라서 사면의 활동이 발생하더라도 소규모로 발생할 가능성이 높다. 그러나 철도의 운행에 있어 소량의 토양유실이나 활동도 열차 탈선의 위험을 내포하고 있으므로 활동의 메커니즘을 분석하고 엄밀한 활동방지 대책이 필요한 실정이다. 사공 등(2005)은 23개소의 현장조사를 통해 강우로 인한 철도 연변사면의 활동타입을 활동 후 노출된 사면 표면의 형태와 주변지형을 기준으로 4가지로 분류하고 사면의 제원과 활동패턴의 상관성을 분석하였다.

그림 1은 영동선 안인-강릉 구간에서 발생한 사면의 활동 양상을 나타내는 그림으로 “천층 활동타입”으로 분류되었다. 천층 활동타입은 천층파괴가 사면의 표면에서만 관측된 경우로서 활동심도가 얕으며 판상의 사면활동을 보이는 경우이다. 여기서 의미하는 판상의 사면활동이란 기존의 원호파괴 형태와 비교하였을 경우 그 활동면이 어느 정도 평평한 것을 의미할 뿐 활동면 자체가 평탄한 것은 아니다.

그림 2는 영동선 동해-묵호 구간에서 발생한 사면의 활동 양상을 나타내는 그림으로 천층파괴가 사면의 표

면에서만 관측되는 점은 천층 활동타입과 유사하나 활동구간 중 상부에서 중간층 파괴형상이 나타난다는 점에서 천층 활동타입과 구분되어 “중간층 활동타입”으로 분류되었다. 중간층 활동의 경우에는 사면의 활동분류에 있어 “활동”에 해당하는 형태로서 사면상부에 활동으로 인한 주 비탈면(main scarp)가 형성된 것을 알 수 있다. 중간층 활동타입의 경우에는 강우로 인한 사면내 흙의 포화도 증가로 자체 중량이 커져 전단응력이 흙의 전단강도보다 더 커지면서 발생하거나 부유지하수대(perched ground water table)의 상승으로 인하여 지하수대 자체가 연약대 역할을 하여 발생될 것으로 판단되었다.

그림 3과 4의 활동타입은 “우곡부 활동타입”과 “암반 경계부 활동타입”으로 분류된 현장사진인데 두 활동타입은 원지반의 지층 특성과 상관이 있다는 점에서 공통점을 가지며 사면 표면의 형태적 특성에서 차이점을 보였다. 우곡부 활동타입의 경우는 표면유출수가 사면 배후 경사지에서 집수되는 지형조건이었다. 따라서 우곡

부 침식현상은 우곡부를 따라 흘러가는 집수된 빗물의 소류력에 의한 것인 것으로 예측된다. 특히 이러한 가정은 그림 3에 퇴적된 자갈들을 살펴보면 알 수 있다. 그림 3에 퇴적된 자갈들은 상부에서 이송된 토석류의 일부로서 토석류가 퇴적되는 곳의 주변에서는 자갈이 쓸려내려 간 흔적이 보이지 않는다. 퇴적부에서 자갈이 관측되는 것은 아마도 사면 상부의 얇은 표토층이 침식이 되면서 모암에서 풍화된 자갈층들이 드러나게 되었으며 자갈층마저 빗물에 쓸려 이송된 것으로 판단되었다. 따라서 이러한 잔류토층 중에서 자갈과 흙이 혼재된 층에서 발생하는 사면의 활동은 상당히 복잡하며 그 예측이 어렵다. 그 이유는 비록 동일한 재료로 구성이 되어 있더라도, 층을 구성하는 입자의 입도분포가 영향을 미칠 수 있으며 풍화 패턴에 따라서도 개별 재료의 강도가 상당히 차이가 나기 때문이다.

그림 4에서와 같이 암반 경계부 활동타입의 경우는 기반암 상부에 얇은 토피가 존재하는 지형조건에서 관

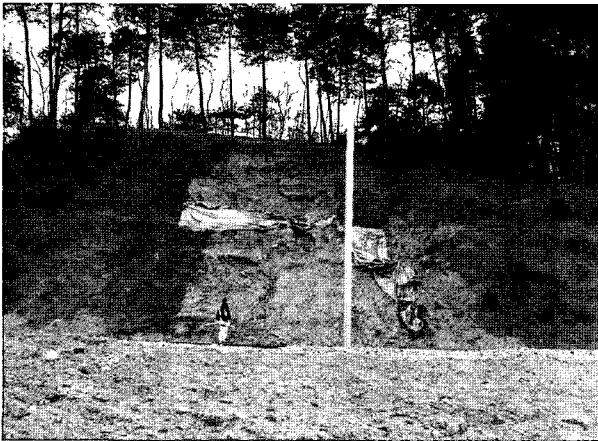


그림 1. 천층 활동타입(영동선, 안인-강릉 186k350)



그림 2. 중간층 활동타입(영동선, 동해-목호 150k500)



그림 3. 우곡부 활동타입(태백선, 추전-태백 93k900)



그림 4. 암반 경계부 활동타입(경전선, 낙동강-한림정 5k225)

측되었다. 이러한 활동타입은 기반암의 존재로 인하여 수리학적 불연속면이 흙과 기반암의 경계면 사이에 형성되어 활동이 발생한 것으로 이해된다. 만일 모암상에 얇은 토피고의 흙이 있다면 어느 정도 흙이 쉽게 쓸려내려 갈 것이므로 암반 경계부상에서의 활동은 그리 빈번하지 않을 수도 있다. 그러나 다른 사면활동 타입과 연계해 보면, 특히 우곡부 활동타입과 연계해 본다면, 강우로 인한 흙의 침식이 진행되면서 모암 상부에 위치한 토피고가 감소하면서 암반 경계부 활동타입이 유발될 수도 있을 것으로 예측된다.

3. 실내 모형실험

현장조사를 통하여 분류된 강우시 철도 연변사면의 활동타입을 검증하고 강우로 인한 사면의 거동 특성을 분석하기 위해 실내모형실험을 실시하였다. 실내모형실험 장비로는 강우재현장치, 경사형 토조, 다짐기 등을 사용하였고 시료로는 주문진표준사와 미립분(카울린)을 배합한 시료를 사용하였다.

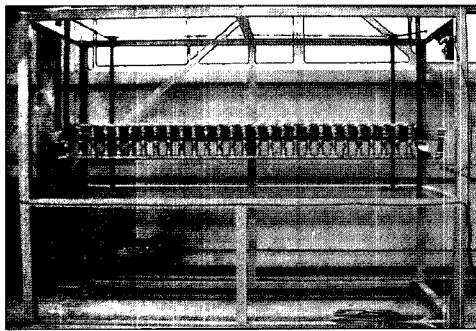
3.1 실내모형실험장비의 소개

실내모형실험장비는 크게 강우재현장치, 경사형 토

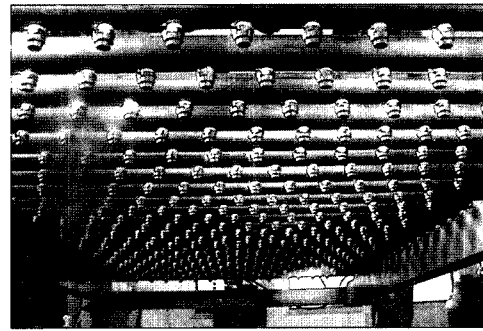
조, 다짐기로 구성되어 있다. 강우재현장치는 그림 5에 나타나 있는데 다양한 강우강도를 재현할 수 있다. 강우재현장치(그림 5(a))는 초소직경의 노즐(그림 5(b)), 수조에서 물의 공급을 위한 수조와 관로, 균등한 강우강도를 위한 구동모터가 장착된 강제프레임 그리고 이물질을 걸러낼 수 있는 필터하우징 장치로 구성되어 있다. 노즐은 15cm*15cm 간격으로 구성하였는데 토조에 균등한 강우가 재현될 수 있도록 지그재그로 배치되었으며 구동모터에 의해 전후로 이동 가능하다.

그림 6은 경사형 토조의 회전 전의 모습과 회전 후의 모습을 나타내고 있는데 전체 토조의 길이는 2.2m이다. 토조는 사면의 경사부분을 재현할 수 있는 경사부(150cm)와 사면의 토우(toe)부분을 재현할 수 있는 고정부(70cm)로 구성되어 있다. 토조의 측면과 후면 그리고 고정부의 전면은 두께 1cm의 강판으로 구성되었으며 경사부의 전면부는 흙의 이동을 관찰하기 위하여 두께 1cm의 아크릴 판으로 구성되었다. 토조의 경사는 2ton 용량의 전용 호이스트로 제어할 수 있다. 그리고 토조의 하단은 토조 자체가 이동이 가능하도록 바퀴를 부착하였으며 토조 측면부의 강제판은 탈착이 가능하게 설계하여 실험이 끝난 후 시료의 제거가 용이하도록 하였다.

원하는 다짐도의 사면을 조성하기 위해 임의적으로



(a)



(b)

그림 5. 강우재현장치

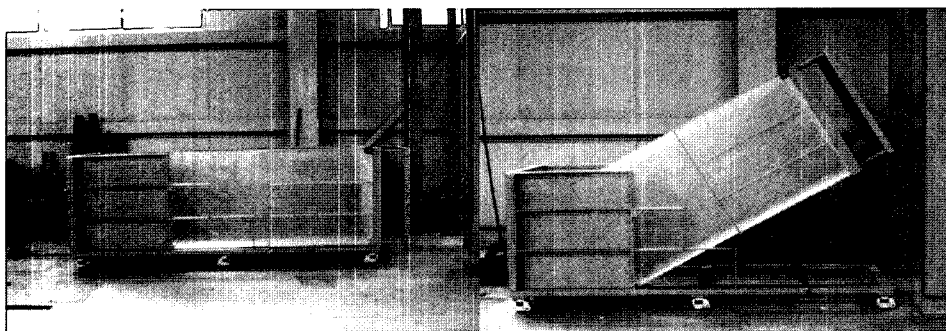


그림 6. 경사형 토조

다짐에너지를 가할 수 있는 다짐기를 제작하였다(그림 7). 다짐기는 전체적으로 강재로 제작되었으며 자체 이동이 가능하도록 바퀴를 달았다. 다짐기를 이용하여 흙을 다지는 원리는 다짐판이 일정한 높이에서 낙하하는 자유낙하방식이며, 다짐판을 올릴 때는 전동장치를 이

용하도록 하였다. 다짐판의 무게가 너무 가벼울 경우 다짐판이 시료를 다질 때 반동이 발생하며 너무 무거울 경우 과도한 에너지와 장비의 제어가 곤란하므로 적절한 무게인 16.5kg으로 설계되었다.

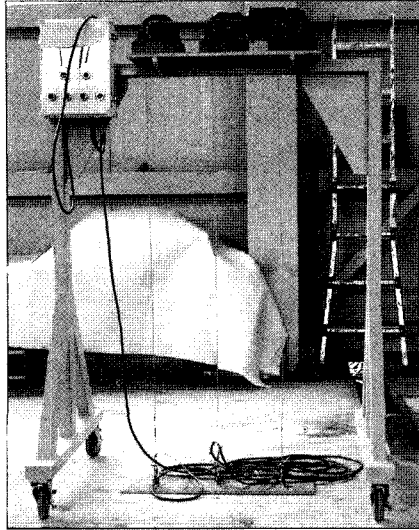


그림 7. 다짐기

3.2 실내실험 조건 및 실험방법

현장조사를 통해 분류된 사면의 활동패턴을 검증하고 강우로 인한 사면의 거동특성을 분석하고자 표 1의 실험조건에 의해 실내모형실험을 실시하였다. 전석층 유무와 표면처리의 유무는 우곡부 활동에 대한 실험조건을 구성하기 위한 것이다.

그림 8은 실내모형실험의 개략적인 순서를 6단계로 나타내었다. 첫 번째 단계는 시료를 원하는 배합비에 맞추어서 배합하는 작업이다. 두 번째 단계는 원하는 다짐 에너지의 사면을 조성하기 위해 시료를 다지는 작업이다. 다짐작업을 실시할 때 주의해야 할 점은 다짐판이 기울어지지 않게 해야 하고 공기 중으로 미립분의 손실을 방지하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 토조 상부에 비닐을 설치함으로써 미립분의 손실을 최소화 하였고

표 1. 실내모형실험 조건

활동타입	미립분 함량 (%)	초기 함수비 (%)	경사각 (°)	다짐 에너지 (kgf/cm ²)	토피고 (cm)	강우강도 (mm/h)	전석층 유무 (심도, cm)	표면처리
천층	10	5	30	0.5	20	50	무	무
중간층	10	5	30	0.5	20	15	무	무
우곡부	10	5	30	0.5	30	50	유(10, 20)	계곡부
암반 경계부	10	5	30	0.5	5	50	무	무

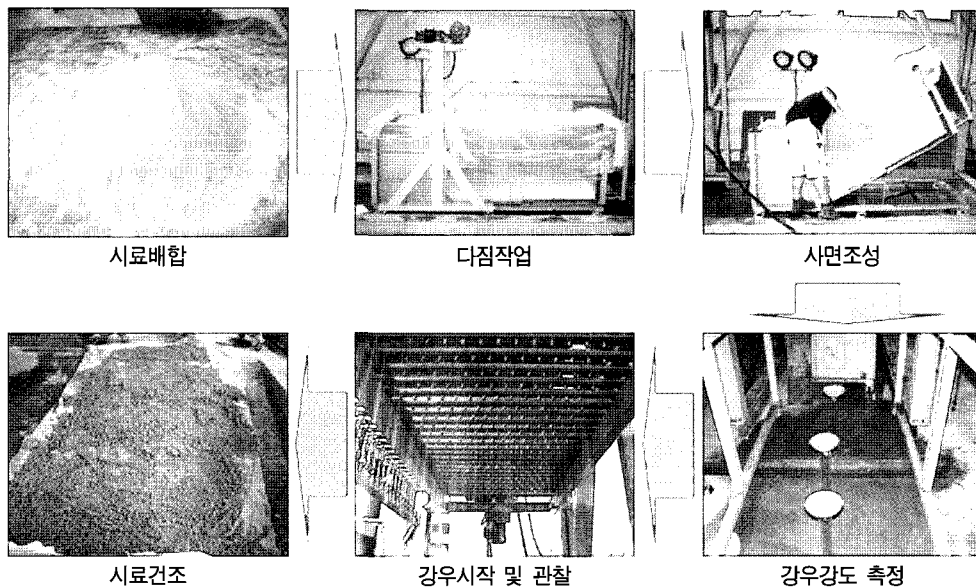


그림 8. 실내모형실험 순서

다짐판이 기울어지지 않은 상태에서 다짐을 실시하였다. 세 번째 단계는 호이스트를 이용하여 원하는 각도의 사면을 조성하는 작업이다. 네 번째 단계는 강우재 현장치를 이용하여 원하는 강우강도를 조정하는 작업이다. 강우강도 측정시 유의해야 할 점은 토조내 균등한 강우가 적용되어야 한다는 점과 물방울이 너무 커서 표면에 심각한 침식이 발생하지 않아야 된다는 것이다. 다섯 번째 단계는 강우시작과 함께 디지털카메라와 비디오카메라를 이용하여 사면의 거동을 관찰하는 단계이다. 본 연구에서는 디지털카메라를 일정한 위치에 고정하여 실험 후 해석이 용이하게 하였고 파괴시 중요한 시점은 비디오카메라로 촬영하였다. 마지막 단계는 시료를 건조하는 단계로 다음 실험을 준비하는 단계이다. 시료를 건조할 때는 다른 흙과 섞이지 않게 주의해야 한다.

3.3 실내모형실험 결과

그림 9는 천층 활동타입을 실내모형실험으로 재현한 결과를 나타내고 있다. 천층 활동타입의 활동 메커니즘은 초기 사면이 습윤되고 얇고 폭이 좁은 수로가 형성되

어 그 수로들이 점차적으로 확대되며 침식이 발생한다. 침식 발생시 흙은 상당히 연약한 거동을 보였으며 완전히 포화된 조건에서의 흐름 상태를 보였다. 초기 사면의 성형시 국부적으로 경사가 발생한 곳을 중심으로 소규모의 침식이 발생하며 추가 강우가 지속되면서 그 부분이 확대 되는 양상을 보인다. 사면 하단(toe)부분에서는 침식 후 퇴적된 미립분이 관측되었는데 이는 Crosta 등(1999)이 주장하는 바와 같이 사면 표층에서 미립분이 침식후 퇴적으로 인하여 발생된 것으로 판단된다(그림 10 참조). 이러한 관측이 의미하는 바는 현재 강우를 고려한 사면의 안정성 평가 시 적용되는 사면내 흙의 포화 전단강도의 적용에 대한 한계를 나타낸다. 강우로 인한 흙의 액상화와 미립분이 이탈한 조건에서의 전단강도는 실내 삼축압축실험을 통해 구한 전단강도와 다른 특성을 보일 것으로 판단된다.

그림 9에서는 지속적인 강우로 인하여 미세 수로가 형성된 후 각 지류의 침식으로 인한 폭의 확대가 발생하고(그림 9(b)) 최종적으로 판상의 침식을 보인다(그림 9(c)). 그림 9에서 50mm/h의 강도로 3시간 30분 경과 후와 4시간 경과 후의 사면의 거동양상을 비교해 보면 초기 침식이 발생한 후 활동의 진행이 다른 활동타입에

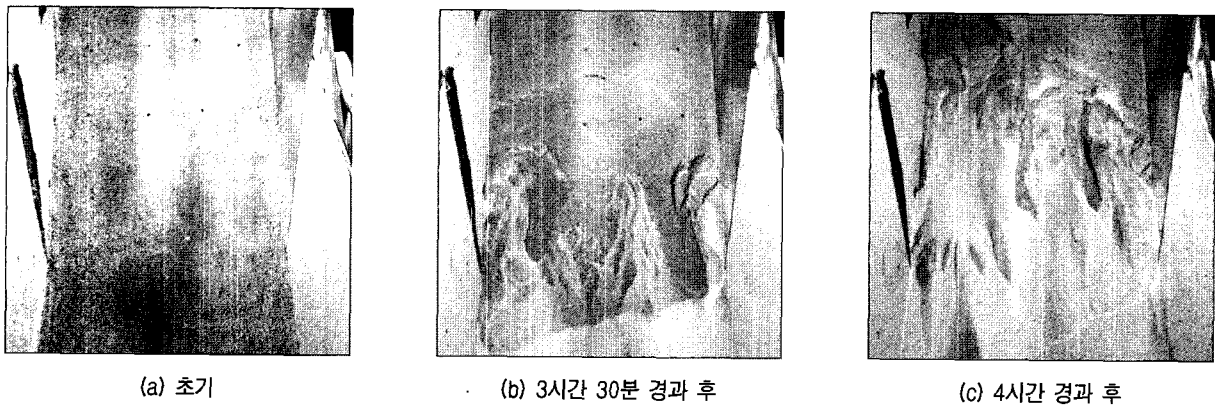


그림 9. 천층 활동타입 재현

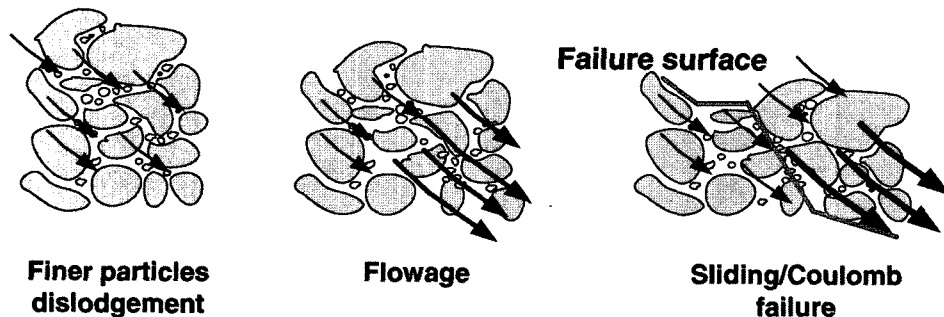


그림 10. 침투에 의한 침식모델(Crosta와 Prisco, 1999)



그림 11. 우곡부 활동타입 재현

비해 아주 빨리 이루어졌다는 것을 알 수 있다. 즉 초기 국부적인 사면내 침식이 발생한 후 전 범위로 확대되는데 걸리는 시간이 짧으므로 침식의 발생여부 및 발생시간을 파악할 수 있다면 전반적인 사면의 침식에 의한 활동피해를 최소화 할 수 있을 것이다. 다만 초기 침식의 발생 후 전체적인 사면활동은 흙의 특성에 따라 다를 수 있을 것이라 판단된다. 국부적인 표면 침식에 의해 사면 파괴의 발생원인은 다짐작업과 정지작업으로 인해 사면이 완전히 균질한 상태가 아니었거나 강우가 일부구간에 집중되어 발생한 것으로 판단된다. 이는 현장에서도 충분히 발생 가능한 상황이므로 결국 현장에서 침식으로 인한 사면파괴가 발생할 경우 가장 취약한 부분에서 국지적으로 발생할 것이라고 예측할 수 있다. 또한 바닥면이 드러나지 않고 토피에서만 활동되는 것은 암반 경계부 활동타입과는 구분할 수 있는 특성이라 생각된다.

중간층 활동타입의 재현을 위하여 저장도 조건(15 mm/h)으로 24시간 이상 동안 강우를 재현하였다. 본 연구에서는 현장에서 관측된바와 유사한 형태의 활동타입을 재현하는데 실패하였다. 주어진 다짐에너지와 미립분 10%로 구성된 흙에 30°의 경사각 조건에서 주어진 강우강도로는 충분한 전단응력이 발현되지 않는 것으로 판단되었다. 향후 다양한 조건의 실험을 통한 검증이 추가되어야 할 것이다.

그림 11은 우곡부 활동타입을 재현한 결과를 나타내고 있다. 실험조건에서 알 수 있듯이 우곡부 활동타입의 경우 사면의 표면에 골짜기를 형성하였고 표면으로부터 10cm, 20cm 깊이에 입자의 크기가 다른 전석층을 문었다. 우곡부 활동타입의 파괴메커니즘은 초기 형성한 골짜기로 강우가 집중되고 집중된 부분에서 부터 전석층까지 활동이 확대되는 것이다. 본 연구에서 활동은 상



그림 12. 파괴 후 드러난 전석

부(10cm) 전석층이 존재하는 깊이까지 발생되었으며 활동 후 전석이 드러나 있는 것을 볼 수 있다. 상부 전석층까지 활동이 발생한 후 사면의 표면 침식으로 인한 활동의 진행은 상대적으로 초기 조건보다 완만하였다. 이러한 거동은 그림 9의 천층 활동타입과 비교해 보면 확인될 수 있다. 이러한 관측으로 미루어 볼 때 전석층이 드러난 이후 표면 침식은 이전에 비해 다소 완만하게 진행되는 것을 알 수 있다. 그 이유는 전석의 자중이 흐름을 방해하기 때문이라 판단된다.

그림 12는 파괴 발생 후 드러난 전석을 나타내는 사진이다. 그림 3과 같이 자갈들이 사면의 하단에 퇴적되기 위해서는 강력한 소류력이 필요하며 그와 같은 소류력의 발생을 위해서는 우곡부로의 강우집중이 상당량 발생하여야 함을 이해할 수 있다.

그림 13은 암반 경계부 활동타입을 재현한 결과를 나타내고 있는데 토사층의 심도가 얇기 때문에 바닥면까지 활동이 발생한 것을 알 수 있다. 그리고 다른 활동타



(a) 초기



(b) 1시간 경과 후



(c) 3시간 30분 경과 후

그림 13. 암반 경계부 활동타입 재현

입에 비해 짧은 시간에 활동이 시작된 것을 알 수 있다. 암반 경계부 활동타입의 파괴메커니즘은 얇은 심도의 토사층이 강우침투로 인해 포화도가 증가되고 암반층과 토사층 사이에서 수리학적 불연속면이 형성되어 토사층이 쓸려 내려가는 형태의 파괴가 발생하는 것이다. 바닥면이 강제로 되어 있어 암반의 특성과 차이점은 있으나 흙과 수리학적 불연속면을 형성하며, 강재의 녹이 어느 정도 전단저항을 발현하므로 흙이 암반상에서 활동하는 경우와 같이 바닥면에서의 전단거동을 경험할 것으로 판단되어 암반 경계부 활동 양상을 관찰할 수 있는 실험조건으로 판단된다. 암반 경계부 활동타입과 천층 활동타입은 토사층의 두께만 제외하고 모두 동일한 조건이지만 활동의 발생시점과 활동양상은 상당한 차이점을 보였다. 그림 9와 13을 비교해 보면 암반 경계부 활동의 경우 비록 초기 침식활동이 천층 활동의 경우보다 먼저 발생하였으나 하부 강재와 흙 사이의 전단저항으로 인하여 활동의 진행이 천층 활동의 경우보다 느리게 확대됨을 알 수가 있다.

또한 한 가지 흥미로운 관측은 전 활동 타입의 경우 활동의 개시가 사면의 상단이 아닌 중단 아래에서 발생하였다는 점이다. 이러한 관측은 Rahardjo 등(2005)가 통제된 경계조건에서 실측으로 관측한 함수비의 변화와 연관하여 설명 할 수 있을 것이다. Rahardjo 등(2005)에 따르면 사면내에서 동일한 강우조건인 경우 사면의 하단부에서 더 높은 함수비가 관측된다고 보고하였다. 이러한 관측은 빗물이 침투 후 사면 방향으로 침투수의 흐름이 발생함을 나타낸다. 이러한 현상은 느슨하게 적재한 흙터미에서 잘 관측되는 데 예를 들어 산악지역에 시공되는 고압의 송전선로 공사의 경우 송전탑 시공을 위하여 절취한 흙을 주변에 다지지 않고 쌓는 경우가

많다. 그러한 조건에서 강우가 몇 차례 발생하면서 사면 자체의 변형이 발생하는데 상당 개소가 사면의 하단부에서 배부름 현상이 발생됨을 관측할 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 철도 연변에 존재하는 강우시 사면의 거동 특성을 분석하고자 철도 연변 사면의 현장조사 결과를 바탕으로 실내모형실험을 수행하였다. 현장조사 결과와 실내모형실험의 결과를 통해 다음의 결론을 도출하였다.

강우시 철도 연변사면의 활동은 활동 후 노출된 사면 표면의 형태와 주변지형을 기준으로 천층 활동타입, 중간층 활동타입, 우곡부 활동타입, 암반 경계부 활동타입으로 구분될 수 있었다. 관측된 활동타입의 재현과 상세 분석을 위하여 강우재현장치, 경사형 토조, 다짐기 등의 실내모형실험장비를 구축하였다.

모형실험 결과 총 4가지 활동타입에 대한 재현 중 중간층 활동을 제외한 나머지 3가지 타입이 재현되었으며 각 활동타입별 거동특성은 다음과 같다. 우선 천층 활동타입의 경우 초기 사면이 습윤되고 미세한 수로가 형성되면서 침식에 의해 점진적으로 확대되는 형태의 활동이 발생하였고 표면 침식의 진행속도가 다른 활동타입에 비하여 상대적으로 느린 것으로 관측되었다. 우곡부 활동타입의 경우 표면에 형성된 골짜기를 통해 빗물이 집수되고 집수된 빗물의 영향으로 전석층이 존재하는 깊이까지 침식이 발생하였다. 일단 침식이 발생하여 전석이 드러나면 그 후의 침식은 천층활동에 비하여 상대적으로 급속하게 진행하지 못하였다. 이러한 관측은 사면의 초기 형상, 우곡부의 심도 및 배후 집수유역의 면적 등이 사면의 거동에 큰 영향을 미침을 유추해 볼 수

있다. 마지막으로 암반 경계부 활동타입의 경우 토사층의 깊이가 얇기 때문에 짧은 시간에 바닥면까지 활동이 발생하였는데 이는 흙과 토조 밀면 사이에 형성된 수리학적 불연속면의 영향으로 판단된다. 특히 이 활동타입의 경우에는 바다(원지반의 경우 모암층)과 상부 표토층간의 전단저항이 사면의 침식활동에 큰 영향을 미칠 것이다.

본 연구에서는 실내모형실험을 통하여 현장에서 관측된 활동 타입에 대한 재현을 수행하였다. 강우로 인한 사면의 안정성 평가시 현재 고려하고 있는 강우강도, 강우기간, 사면의 경사, 뿐만 아니라 지형조건, 표면침식, 표면에서의 물의 흐름 등에 대한 검토도 필요하다는 것을 알 수 있었다. 또한 이러한 요인들은 서로 상관관계를 가지고 있을 것으로 판단되며 이러한 요인들을 분석하기 위해서는 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 자체연구사업인 “선로구축물 시스템 핵심기술연구”의 연구비 지원에 의해 수행된 연구의 일부이며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 권혁재 (2002), “지형학”, 법문사.
2. 사공명, 황선근, 이수형, 김현기, 김민석 (2005), “강우로 인한 철도 연변 사면의 활동특성:현장사례 중심”, *한국지반공학회 논문집*, 제 21권, 제 5호, pp.7-13.

3. 사공명, 임경재 (2005), “강우를 고려한 사면내 요부에서의 안정성 해석”, *한국지반공학회 논문집*, 제 21권, 제 9호, pp.77-86.
4. 철도위원회, “태풍 매미로 인한 철도분야 피해조사”, *대한토목학회 학회지*, 제 51권, 제 10호, pp.21-24.
5. Berti, M., Genevois, R., Dimoni, A., and Tecca P. R. (1999), “Field observation of a debris flow event in the Dolomites”, *Geomorphology*, Vol.29, pp.265-274.
6. Cornforth, D. H. (2005), “*Landslide in practice*”, John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey.
7. Crosta G. and Prisco C. Di (1999), “On slope instability induced by seepage erosion”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.36, pp.1056-1073.
8. Eckersley, D. (1990), “Instrumented laboratory flowslides”, *Geotechnique*, Vol.40, No.3, pp.489-502.
9. Gachet, P., Klubertanz, G. Vulliet, L., and Laloui, L. (2003), “Interfacial behavior of unsaturated soil with small-scale models and use of image processing techniques”, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.26, No.1, pp.1-10.
10. Lin, P. -S., Lin J. -Y., Hung, J. -C., and Yang, M. -D. (2002), “Assessing debris-flow hazard in a watershed in Taiwan”, *Engineering Geology*, Vol.66, pp.295-313.
11. Nishigaki, M., Tohari, A. and Komatsu, M. (1999), “Predicting rainfall-induced slope failure from moisture content measurement”, *Proceedings of Slope Stability Engineering*, pp.465-469.
12. Okura, Y., Kitahara, H., Ochiai, H., Sammori, T., and Kawanami, A. (2002), “Landslide fluidization process by flume experiments”, *Engineering Geology*, Vol.66, pp.65-78.
13. Rahardjo, H., Lee, T. T., Leong, E. C., and Rezaur, R. B. (2005), “Response of a residual soil slope to rainfall”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.42, pp.340-351.
14. Wang, F. W., Sassa, K., and Wang G. (2002), “Mechanism of a long-runout landslide triggered by the August 1998 heavy rainfall in Fukushima Prefecture, Japan”, *Engineering Geology*, Vol.63, pp.169-185.
15. Wang, G. and Sassa, K. (2003), “Pore-pressure generation and movement of rainfall induced landslides : effects of grain size and fine-particle content”, *Engineering Geology*, Vol.69, pp.109-125.

(접수일자 2006. 3. 20, 심사완료일 2006. 5. 18)