

현장조사를 통한 강우로 인한 철도연변 사면의 활동 특성분석 Analysis on the characteristics of rainfall driven landslides through field study

사공명¹⁾, Myung Sagong, 황선근²⁾, Seon Keun Hwang, 이수형¹⁾, Su-Hyung Lee, 김현기³⁾, Hyun-Ki Kim, 김민석⁴⁾, Minseok Kim

¹⁾한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 선임연구원, Senior Researcher, Dept. Track. Civil. KRRI

²⁾한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 책임연구원, Chief Researcher, Dept. Track. Civil. KRRI

³⁾한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 주임연구원, Researcher, Dept. Track. Civil. KRRI

⁴⁾한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 연구원, Researcher, Dept. Track. Civil. KRRI

SYNOPSIS : Landslides triggered by rainfall produces severe effects on the serviceability and stability of railway operation. Since small amount of soil mass slipped on the rail can cause derailment which will cause severe danger on the human and trains, slope stability problem is one of the major concerns on the operation of railway. In this study we investigate the some of characteristics of rainfall driven landslide near railroad. A total of 23 sites were visited. From the results four types of landslides based upon the morphology of the slipped slope triggered by rainfall were classified. From the analysis dimensions of slopes (height, length and slope) do not show particular correlation with the types of landslides. In addition, morphological and geological features of slope influence on the occurrence of different types of landslides.

Key words : slope stability, rainfall, slope morphology, railroad

1. 서 론

최근 들어 이상기후의 영향으로 인하여 태풍과 동반하는 폭우와 강풍 등은 토목구조물의 안전성을 크게 위협하는 인자로 대두되고 있다. 특히 2002년과 2003년에 발생한 태풍 루사 및 매미의 영향은 토목기술자에게 토목구조물의 설계에 있어 강우의 영향을 필수적으로 고려해야할 사항임을 강조하는 결과를 낳았다. 그중 철도분야에 있어 강우로 인한 지반 분야의 영향은 선로유실, 옹벽파괴, 교대배면의 파괴, 철도사면의 활동 등을 들 수 있다. 강우로 인한 최근 5년간 발생한 선로유실 및 사면의 활동은 표 1과 같다.

표 1. 최근 5년간 발생한 선로유실 및 사면활동 건수 및 인명피해(철도청, 1999~2003)

연도	총 발생건수	인명피해
1999	10	2명 사망
2000	3	1명 부상
2001	2	-
2002	4	1명 부상
2003	3	51명 부상

피해사례를 분석해 보면 토사면의 활동 및 낙석의 발생은 강우가 집중되는 시기에 많이 발생하였으나 다행히도 인근주민의 신고활동으로 인해 대형사고를 면하였던 경우가 상당수 조사되었다. 따라서 표 1

에 나타난 사고사례는 주로 육안관측이 힘든 야간이나 집중강우가 발생하는 경우에 발생한 것임을 알 수 있다. 철도노선에서는 선로유실 뿐만 아니라 소량의 사면활동으로 인하여 흙이 철로로 이송된 경우 기차의 탈선으로 이어질 수 있으며, 결국에는 대형사고로 발생된 가능성이 있으므로 철저한 점검 및 조사가 필요하다. 이같이 강우로 인한 사면의 활동은 철도분야 뿐만 아니라 도로 및 일반 사면에서도 재산 및 인명상의 피해를 발생시킨 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 철도 연변 사면중 다수를 차지하고 있는 절토사면의 활동양상을 조사하였으며 사면의 활동결과를 각 패턴별로 구분하였다. 철도뿐만 아니라 도로에서도 성토사면보다는 절토사면에서 보다 많은 활동이 관측되었으므로 성토사면보다는 절토사면이 보다 많은 문제를 발생시키는 것을 알 수 있다. 현장조사는 2002년과 2003년에 강우로 인한 사면의 활동이 빈번히 발생한 영동선과 태백선을 중심으로 하였으며 대상은 토사사면을 중심으로 하였다. 본 연구에서 토사사면이라고 지칭하는 것은 강우로 인한 흙의 활동 양상을 보인 사면을 대상으로 한다.

2. 도로사면에서 관측된 강우로 인한 사면의 활동 특성

도로사면의 경우 한국도로공사와 한국건설기술연구원에서 조사한 내용을 정리하였으며 이 결과는 철도사면에서 관측된 내용과 비교되었다. 유 등(2004)의 발표에 따르면 태풍 루사로 인한 고속도로 사면의 피해는 영동고속도로, 동해고속도로, 88고속도로의 단절을 불러일으켰다. 영동고속도로의 경우 절토사면 4곳과 성토사면 4곳, 동해고속도로는 절토사면 6곳 성토사면 4곳 그리고 88고속도로의 경우에는 성토사면 1곳에서의 활동이 관측되었다(유 등, 2004). 절토사면의 경우 활동의 발생이 지질구조선 및 지반이 취약한 곳에서 발생하는 경우와 상부 계곡부에서 발생한 토석류의 흐름이 도로에 영향을 주는 경우로 구분하였다. 그리고 성토사면의 경우에는 도로측부에 설치한 집수정이 막혀서 월류가 발생하면서 붕괴로 이어지는 현상이 관측되었다. 이러한 현상은 철도에서 관측되는 선로유실과 유사한 메커니즘을 따르는 것으로 판단되었다. 태풍 매미에 대한 한국도로공사에서 관측한 사면의 피해개소는 총 73개소였다. 이때 사면의 유실은 비교적 소규모적인 경우가 많았으며(표 2 참조) 절토사면의 활동이 성토사면의 활동에 비해 약 5배 정도 많이 관측되었다. 결국 이러한 결과는 절토사면의 불안정성을 단적으로 보이는 것이라 할 수 있다. 활동의 발생 원인으로서의 집중호우로 인한 지반의 전단강도 저하, 사면내 배수시설의 용량 부족 및 기능저하, 집수시설의 막힘, 산불 등을 들었다. 매미로 인하여 활동이 발생한 사면의 제원은 아래와 같다.

표 2. 매미로 인하여 활동한 고속도로사면의 제원(유 등, 2004)

높이	절토부	성토부	터널갱구부
20m 이상	76	3	2
20m 이하	127	38	3

한국건설기술연구원(2003)은 2002년 태풍 루사로 인한 전국 국도변에서 발생한 절개사면의 활동에 대한 조사를 실시하였다. 그중 20개소에 대하여 정밀조사를 수행하였으며 관측된 사면의 붕괴특성 및 제원의 분석은 다음과 같다(평균값은 표 3 참조). 정밀조사가 수행된 개소에서 사면의 연장 27~220m, 높이 8~74m, 경사 40~68°가 관측되었다. 각각의 제원에 대한 평균값은 사면의 연장 91m, 높이 25m, 경사각 54°이다. 활동이 발생한 사면의 연장에 대한 사면의 길이는 0~20%로서 국부적인 활동임을 알 수 있다. 또한 사면의 활동심도와 활동길이에 대한 비를 살펴보면 0~20%내외로서 천층의 활동이 발생했음을 알 수 있다. 사면내에서 활동이 발생한 구간은 약 40~60%의 범위가 50%이상이므로 역시 국부적인 활동이 발달했음을 알 수 있다. 활동이 관측된 사면의 높이가 10~30m인 경우가 전체의 약 70%를 차지하고 있으며, 사면의 경사는 45°이상의 경우가 전체의 95%이상을 차지하고 있었다. 마지막으로 암반과 토사가 혼재된 사면의 비율이 붕괴사면의 70%에 해당하였다.

표 3. 태풍루사로 인하여 활동한 국도사면의 제원

관측항목		관측값
사면의 연장(평균)		91m
사면의 높이(평균)		25m
사면의 경사각(평균)		54°
활동심도/길이		0~20%
사면연장/길이		0~20%
주 활 동 발 생	사면내 활동구간	사면길이의 40~60%
	사면의 높이	10~30m
	사면의 경사	45°

이상의 결과를 바탕으로 분석 결과를 살펴보면 강우로 인한 사면의 활동은 사면내에서 국부적으로 발생함을 알 수 있다. 마지막으로 한국건설기술연구원(2003)에 따르면 국내 강우로 인한 사면의 활동특성을 다음과 같이 정리하였다.

“국내 지반특성상 토층의 두께는 그리 두껍지 않으며, 기반암 상부에는 약 2~3m의 토층이 존재한다. 이 두 층의 수리학적 특성은 뚜렷이 구분이 되므로 결국 두 층간의 경계면에서 발생하는 간극수압의 증가는 해당 사면의 붕괴로 이어지는 메커니즘을 보인다. 결국, 얇은 토층과 지하수의 유입 기반암과 토층의 경계면에서의 유로 형성 등이 주원인이 됨을 알 수 있다.”

한국건설기술연구원(2003)에는 보다 자세한 기술이 제공되지 않고 있으나, 강우로 인한 사면의 활동타입이 결국은 토층/기반암의 경계부에서 발생하는 것으로 이해된다.

3. 철도사면에서 관측된 강우로 인한 사면의 활동 특성

도로와 철도사면은 시공 당시의 특성으로 인해 큰 차이를 보이고 있다. 도로의 경우에는 철도에 비해 상대적으로 최근에 시공된 경우가 많으므로 사면에 대한 설계 및 유지관리 기준이 상대적으로 잘 정비된 조건하에서 시공된 경우가 많다. 이에 반해 현재 운행되고 있는 기존 철도노선의 선정 및 시공은 훨씬 이전으로 거슬러 올라가서 제대로 된 설계기준 및 시공관리가 도입되지 않은 시기에 이루어졌다. 특히 영동선, 태백선과 같은 노선은 철도노선의 시공시 최소한의 절토로 철도연변의 사면은 거의 자연상태의 사면과 유사한 경우가 많다.

철도와 고속도로 사면의 또 다른 차이점은 각각의 노선폭인데 고속도로의 경우에는 철도에 비해 상당히 넓은 노선폭을 차지하고 있으므로 요구되는 절토량 또한 많을 것이다. 그리고, 고속도로 사면에 대한 접근성 및 보수보강에 대한 시공성이 철도사면에 비해 우수하므로 적용 가능한 보수보강 공법이 다양하다. 결국, 근본적으로 철도사면은 자연상태의 조건에 가까운 경우가 많으며 사면내 절토부 자체는 상대적으로 적다. 따라서 사면의 활동이 발생하더라도 소규모로 발생할 가능성이 높다. 그러나 철도의 운행에 있어 소량의 토양유실이나 활동도 열차탈선의 위험을 내포하고 있으므로 보다 엄밀한 활동방지 대책과 사면의 설계 및 유지관리 대책이 필요한 실정이다.

본 절에서는 현장에서 관측된 철도사면의 붕괴특성에 대하여 기술하고자 하며, 전국철도 노선 중 태풍 루사와 매미로 많은 피해가 발생한 영동선, 태백선 그리고 경부선 일부 구간을 중심으로 살펴보고자 한다.

3.1 철도사면 현장조사 현황

철도 연변 사면중 흩사면 총 23개소에 대한 현장조사를 실시하였다. 그 중 영동선 10 개소, 태백선 5 개소, 경부선 3 개소, 경전선 3 개소, 온산선과 전라선 각각 1 개소에 대한 현장조사를 통하여 흩사면의 붕괴 제원 및 특성을 관측하였다. 조사 위치 및 사면의 제원과 붕괴 특성은 아래 표 4에 정리하였다.

현장조사를 실시한 구간은 영동선과 태백선이 가장 많은 개소를 포함하고 있었다. 이는 2002년과 2003년에 발생한 태풍 루사와 매미로 인하여 손해가 가장 많이 발생한 탓에 기인한다. 표 4는 각 노선 별 구간과 위치, 사면의 횡방향 연장, 경사각, 사면의 길이를 포함하고 있다. 또한 활동타입은 위에서 언급한 사면의 활동 후 활동단면의 상세를 관측한 후 흩사면에 있어서의 활동타입을 정리한 것이다. 일부 상세한 사면의 제원에 대한 내용이 기입되지 않은 곳은 여러 가지 이유로 인하여 측정이 불가능한 곳이었다. 예를 들어 마차리-신기 123k7 지점은 피암터널이 상부에 위치한 곳에서 관측되었으며 안인-강릉 185k97, 추전-태백 91k915, 북천-횡천 129k8 지점은 터널의 갱구부에서 활동이 관측된 현장이었다.

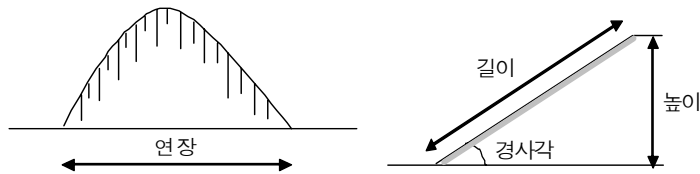


그림 1. 사면조사에 적용된 사면의 제원

표 4. 전국 철도연변 절개지 실태조사 현황

노선	번호	역구간	위 치	연장(m)	길이(m)	높이(m)	경사(도)	활동패턴
영동선	1	승부-석포	69.65	10	약 200	약 100	30	I
	2	도계-고사리	116.25	15	12.1	9.3	30.0	III
	3	마차리-신기	123.7	55				IV
	4	마차리-신기	125.2		24.0	18.5	27.0	I
	5	동해-목호	150.5	50	31.0	15.1	36.0	II
	6	목호-옥계	157.44	120	3.7	1.7	35.0	I
	7	옥계-정동진	171.575	65	5.0	3.8	50.0	I
	8	안인-강릉	185.39	10	10.9	7.0	40.0	I
	9	안인-강릉	185.94					I
	10	안인-강릉	186.35	60	23.6	16.7	45.0	I
		평균			15.8	10.3	37.6	
태백선	1	추전-태백	91.915	10				IV
	2	추전-태백	93.85					III
	3	태백-문곡	96.2	20	7.1	5.0	45.0	I
	4	문곡-백산	101.47	10	13.0	8.3	40.0	III
	5	문곡-백산	102.2	10	16.5	12.5	49.0	I
		평균			12.2	8.6	44.7	
경부선	1	삼성-남성현	353.7	200	23.3	11.7	30.0	I
	2	남성현-청도	354.78	80	41.0	27.0	41.0	I
	3	삼랑진-원동	399.56	60	24.6	11.9	29.0	III
		평균			29.6	16.9	33.3	
경전선	1	낙동강-한림정	5.225	75	18.3	15.4	53.0	IV
	2	덕산-창원	28.9	30	12.8	8.0	40.0	IV
	3	북천-횡천	129.8	100				III
		평균			15.6	11.7	46.5	
온산선	1	남창-온산	5.255	75	8.9	4.5	30.0	I
전라선	1	미평-여수	186.45	20	8.1	7.3	65.0	III

3.2 관측된 토사면의 활동타입

본 연구에서는 표 4에서 분류한 바와 같이 사면의 활동을 4가지의 타입으로 구분하였다. 각각의 활동

타입은 흙의 심도, 사면의 경사 그리고 강우조건 등 여러 가지 요인에 따라 변할 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서 적용한 활동의 분류는 활동 후 노출된 사면 표면의 형태 외 주변지형을 기준으로 분류하였다.

그림 2에 나타낸 활동타입 I은 천층과파괴가 흙의 상부층에서만 관측된 경우로서 활동심도가 얕으며 판상의 사면활동을 보이는 경우이며 그림 3의 활동타입 II는 중간깊이 활동타입이다. 활동타입 I과 II의 구분은 우선 활동 타입 I은 판상으로의 활동을 한다는 것이다. 이에 반해 활동타입 II는 활동구간중 상부에서는 어느 정도 원호파괴의 형상을 보이거나 하단부로 활동이 진행될수록 활동 타입 I과 같은 판상의 활동타입을 보인다. 활동타입 II는 Wang 등(2003)이 예측하는 히로시마에서 발생한 대규모 사면활동의 거동과 유사할 것으로 판단된다.

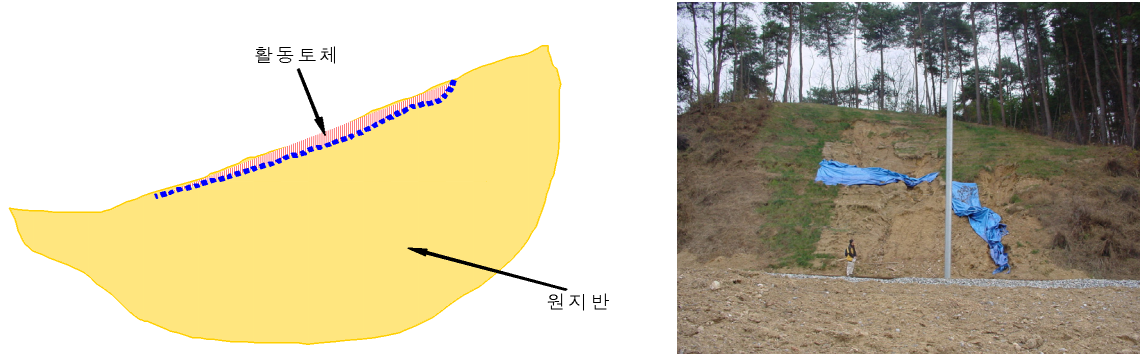


그림 2. 타입 I 천층 활동타입

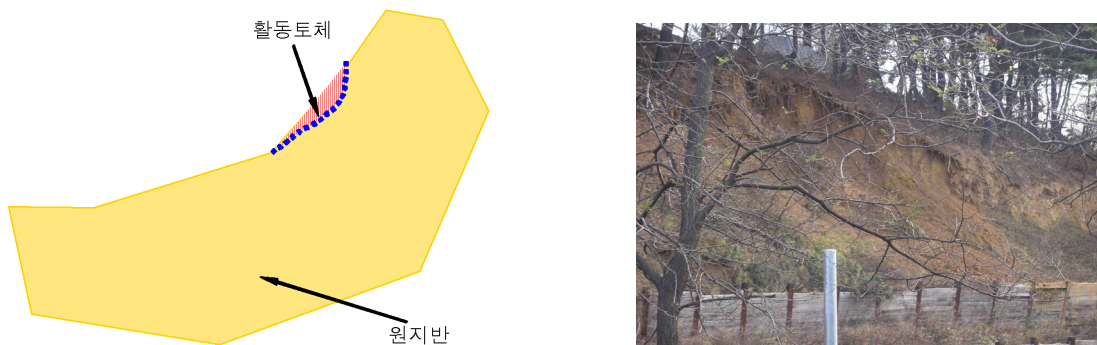


그림 3. 타입 II 중간깊이 활동타입

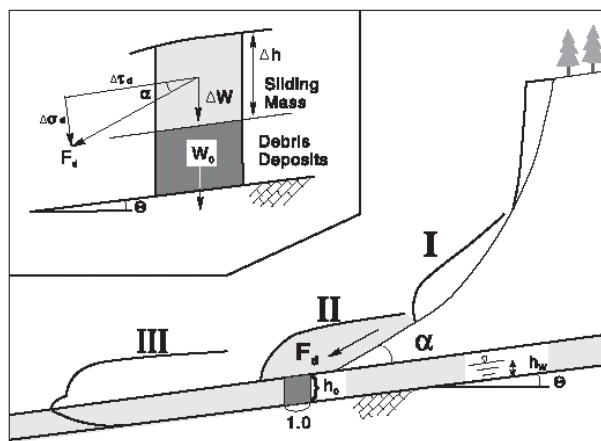


그림 4. 제안된 히로시마에서 발생한 사면활동 모드(Wang 등, 2003)

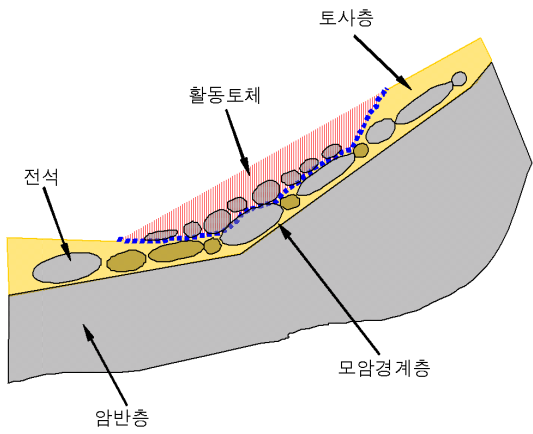


그림 5. 타입 III 전석층 경계부 활동타입

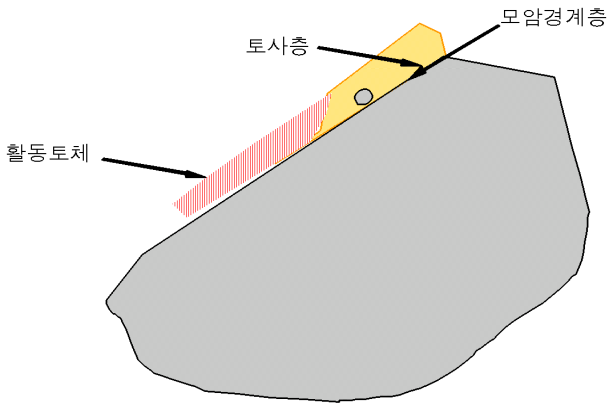


그림 6. 타입 V 암반경계층 활동타입

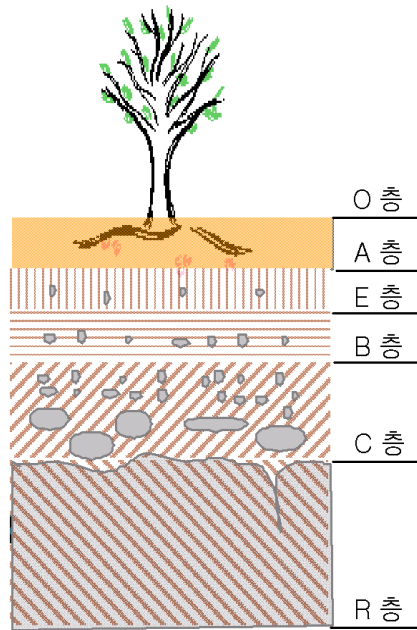


그림 7. 흙의 풍화특성

그림 5와 6의 활동타입 III과 IV는 지형의 풍화정도 및 원지반의 지층의 특성과 상관이 있을 것으로 판단되는데 우선 활동타입 III은 전석층 경계부에서의 활동이 관측되는 경우를 의미한다. 흙의 지층은

물리·화학적인 작용에 의해 풍화가 발생하며 크게 5개 층으로 구분할 수 있다. 최상부에 있어 낙엽이나 유기물이 있는 O층, O층 하단에 위치한 상부표층인 A층, A층 하단에 위치한 잔류퇴적층인 E층, E층 하단에 있는 하층토층 B층, 모암이 풍화하여 자갈등의 전석이 위치한 C층 그리고 모암층인 R층으로 구분할 수 있다(그림 7 참조). 활동타입 III은 B층 혹은 C층에서 활동이 발생하는 타입을 의미한다. 활동타입 III이 관측된 곳에서는 사면의 표면에 전석이 상당수 관측이 되었으며 주변에서는 모암이 노출된 부분이 자주 관측되었다. 그리고 대부분의 활동타입 III이 관측된 현장은 표면유출수가 집수되는 지형조건을 구성하고 있는 곳에서 이러한 형태의 활동패턴이 관측되는 것을 알 수 있다. 마지막으로 활동타입 IV는 모암과 토사의 경계부에서의 활동타입이다. 이러한 타입은 주로 상부 토사층이 아주 얇고 모암과 토사층의 분리가 뚜렷한 경우에 관측되었다.

3.3 사면의 제원과 활동특성의 상관성

표 4에서 나타낸 바와 같이 사면의 길이, 높이와 경사각의 분포는 다음과 같다. 사면의 길이는 5~41m, 높이 1.7~27m, 경사각은 29~65°의 분포를 보이고 있다. 그림 8은 사면의 분포에 대하여 나타난 것으로 계측이 가능한 사면중에서 사면의 높이가 10m 미만인 경우가 50%를 넘는 것으로 나타났다. 이처럼 절토부에 있어 소규모 사면의 활동경향은 도로사면에서도 유사하게 관측되었다. 이는 특히 철도절개사면은 자연 상태로 조성되거나 일부 절토가 수행된 곳이 대부분이므로 철도변에서 형성되는 사면의 규모와 활동규모는 그리 크지 않음을 알 수 있다.

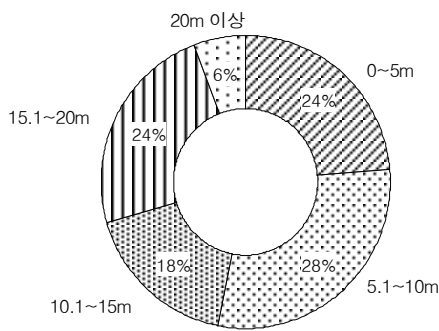


그림 8. 사면의 높이에 대한 분포

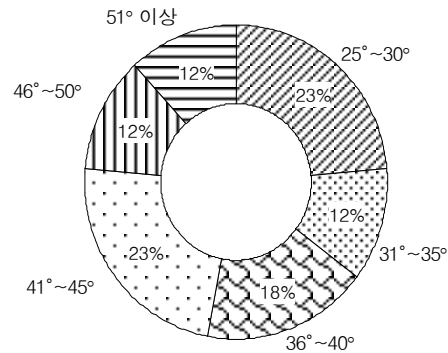


그림 9. 관측 사면의 경사각 분포

그림 9는 관측사면의 경사각을 표시하고 있는데 높이와 특별한 상관성을 보이지는 않는다. 사면의 경사각이 40°미만인 경우가 53%를 차지하고 있으며 특히 25°~30°와 41°~45°의 범위가 가장 큰 분포를 보이고 있다. 이는 평균경사각이 45° 이상이 95% 이상인 국도연변의 사면에 비해 다소 완만한 경우임을 알 수 있다. 그림 10은 관측사면의 활동타입 분포를 보이고 있다. 4가지의 활동타입 중 활동타입 I이 53%로 가장 많이 관측되었다.

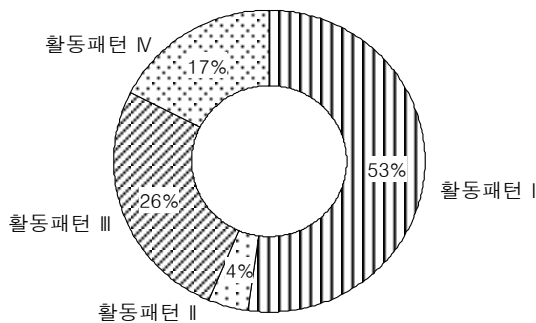


그림 10. 관측된 활동타입분포

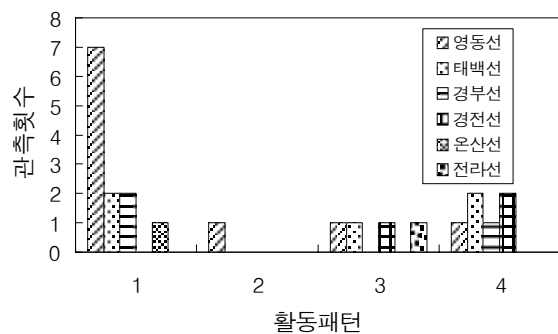


그림 11. 노선별 활동타입 분포

활동타입 I의 경우에는 사면의 경사각이 약 30~50사이에서 관측되며 사면의 높이는 거의 전 구간에서 걸쳐서 관측되므로 활동타입과 사면의 제원과는 뚜렷한 경향을 보이지 않았다. 이는 다른 활동타입의 경우에도 유사한 결과를 보였는데, 결국은 사면의 활동타입은 사면의 제원보다는 사면내 흙의 공학적 성질 혹은 사면의 제원에 의한 독립변수의 결과가 아닌 다른 요인과 결합된 결과임을 유추할 수 있다. 두 번째로 많은 비중을 차지하는 활동타입은 타입 III로서 사면의 3차원상의 형상을 고려한다면 높은 발생빈도가 예상되는 부분이다. 특히 타입 III의 경우 상부에서 토석류의 발생이 진행되어 오는 경우가 있는데 이러한 경우 하단의 모양이 드러난 경우에는 타입 IV와 혼동될 수 있을 것이다. 또한 타입 III의 경우 집수부를 통해서 토석류의 흐름이 발생하는 순간 활동타입이 I과 혼재하여 발생할 수도 있을 것으로 판단되는데 이에 대한 상세 연구가 필요할 것으로 판단된다. 활동타입 IV의 경우에는 터널의 갱구부와 토피가 상대적으로 다른 타입에 비해서 얇은 경우에 주로 발생이 되었다. 마지막으로 타입 II의 경우에는 전체 23개소 중에서 1 개소에서 관측이 되어 발생빈도가 낮으며 타입 I과 비교하여 기본적인 발생 메커니즘의 구분을 위해 추가 조사가 필요하다.

그림 11은 노선별 활동분포를 보이고 있다. 영동선, 태백선, 경부선에서는 활동타입 I 이 가장 많이 관측되었으며 또한 대부분의 노선내에서 반복적으로 관측되는 것으로 활동타입 I이 유일하였다. 이러한 관측결과는 영동선과 태백선 구간내에서 암반과 토사가 혼재된 천층의 토사층으로 빈번히 존재하기 때문으로 판단된다. 결국 철도 절개사면의 경우 자연사면과 유사하므로 인공적인 사면이 아닌 자연 산사태 또한 유사한 거동을 따른다고 추론할 수 있을 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 현장조사를 통하여 실제 현장에서 발생하는 강우로 인한 절개사면의 활동을 분석하였다. 관측에 의하면 강우로 인한 사면의 활동은 천층의 무한사면활동(타입 I), 중간층 활동(타입 II), 표면 유출수의 집수로 의한 전석층에서의 활동(타입 III), 토사-암반 경계층을 통한 활동(타입 IV)으로 4가지 타입으로 구분할 수 있다.

타입 I과 IV는 비록 판상의 형태로 발생하여 최종 활동형태는 유사하나, 활동면 바닥에서의 서로 다른 경계조건으로 인하여 발생하는 활동 메커니즘은 다를것으로 판단된다. 활동타입 III의 경우에는 전석층을 통하여 사면의 활동이 발생하므로 상부 토사와 전석의 활동을 발생 시킬 수 있는 충분한 작용력이 발생하여야 한다. 따라서 이 활동타입의 경우에는 사면내 계곡부 혹은 집수부에서 주로 관측이 되었다. 마지막으로 활동타입 II는 초기 사면의 상단에서 원호파괴의 형태를 보이는 것으로 타 활동타입과의 구분 및 정확한 발생조건에 대한 추가 조사가 필요하다.

본 연구에서는 강우로 인한 사면의 활동타입을 4가지로 구분하였다. 이러한 분류는 각 활동타입에 대한 적용 메커니즘을 달리 적용할 수 있으므로 보다 실질적인 안정성 분석의 기본이 될 수 있을 것으로 판단된다. 향후, 각 타입별로 보다 자세한 거동에 분석을 통하여 이론적인 각 타입별 활동 상황에 맞는 안정성 평가 모델이 개발되어야 할 것이다.

5. 참고문헌

1. 철도청(1999~2003) “철도사고 사례집”
2. 한국건설기술연구원(2003). “2002년도 도로절개면 유지관리시스템 개발 및 운용”
3. 유병옥, 김경석, 전상수, 장현익(2004), “최근 2년간의 태풍 및 집중호우로 인한 고속도로 사면붕괴 및 관리대책”, 한국지반공학회 2004년 사면안정 학술발표회, pp. 113-130.
4. Wang G, Sassa K and Fukuka H(2003). "Downslope volume enlargement of a debris slide-debris flow in the 1999 Hiroshima, Japan, rainstorm" Eng. Geol. 69, pp.309-330.