

## 강우에 의한 침투를 고려한 철도 절개 토사 사면의 안정해석

### Stability analyses of railroad cut-off soil slopes considering rainfall infiltration

이수형<sup>1)</sup> Su-Hyung Lee, 황선근<sup>2)</sup> Seon-Keun Hwang, 김현기<sup>3)</sup> Hyun-Ki Kim, 사공명<sup>1)</sup> Myung Sagong

<sup>1)</sup> 한국철도기술연구원 선임연구원, Senior Researcher, Korea Railroad Research Institute

<sup>2)</sup> 한국철도기술연구원 책임연구원, Chief Researcher, Korea Railroad Research Institute

<sup>3)</sup> 한국철도기술연구원 주임연구원, Researcher, Korea Railroad Research Institute

**SYNOPSIS** : Stability analyses on the 17 railroad cut-off soil slopes were carried out. The influences of rainfall infiltration on the slope stabilities were taken into account by seepage analyses using finite element method and by assuming ground water tables to be located adjacent to soil surface. The validity of those analyses were evaluated by comparing the slope failure characteristics between analysis results and the past failure records. The analyses were not appropriate to estimate the failure surface and the method considering only the increase of pore-water pressure (reduction of matric suction) as the influence of rainfall cannot appropriately estimate the surficial failures that occurred most of the cut-off soil slopes. For the better estimation of the surficial failure, the influence of water flows over slope surface which erode soil mass and/or increase driving force, should be evaluated and considered.

**Key words** : Cut-off soil slope, rainfall infiltration, failure characteristics, matric suction, surficial failure

## 1. 서론

최근 태풍과 지구온난화로 인한 장마철 국지성 호우 등으로 해마다 철도 수송이 지연됨으로써 막대한 인적·물적 손실을 가져오고 있다. 이러한 강우로 인한 재해 중 가장 큰 비율을 차지하는 것이 사면 붕괴이며, 따라서 강우로 인한 침투에 따른 사면의 안정성 저하를 합리적으로 평가할 수 있는 기법의 개발이 필요하다.

강우에 의한 침투로 인해 사면안정이 저하되는 원인은 크게 두 가지로 여겨지고 있다.

- 1) 포화도의 증가에 따른 간극수압 증가(모관흡수력 감소)로 인한 지반의 강도 저하
- 2) 포화도의 증가로 인한 흙의 중량 증가

이러한 원인을 고려하기 위해서는 불포화 지반의 투수 및 강도 특성에 대한 명확한 규명, 규명된 특성을 반영할 수 있는 합리적인 해석모델의 개발 등이 요구되고 있으나, 이는 매우 어려운 과정으로 현재 연구 진행 중에 있으며, 불포화토의 특성 계측이 매우 어렵기 때문에 앞으로도 많은 시간과 노력이 필요할 것으로 판단된다. 가장 이상적인 것은 Alonso 등(1988), Kim (2000), 조성은과 이승래(2000) 등이 시도한 바와 같이 불포화토에서 물의 흐름에 대한 지배방정식과 응력 및 변형에 대한 지배방정식을 연관(coupling)시켜 동시에 해석을 수행하는 것이지만, 현재까지는 연구단계로 이 해석 방법의 실제

적용은 이루어지지 못하고 있는 상태이다.

따라서 강우의 침투에 의한 사면 안정성의 저하를 정량적으로 평가하기 위해서는 다음의 두 종류의 해석을 단계적으로 적용할 수 있다.

- 1) 강우 등에 의해 사면의 침투현상을 예측하기 위한 침투해석
- 2) 사면의 안정을 검토하기 위한 사면안정해석

이러한 해석 방법이 현재로서는 신뢰성면에서 가장 적절한 방법이나 역시 결과의 정밀도 검증작업에 대하여 아직 연구단계에 있으므로 평가결과는 신중히 취급할 필요가 있는 것으로 평가되고 있다.(백용 등, 2003)

사면의 안정성에 영향을 미치는 강우 인자 중 특히 누적강우량과 시간당 강우강도는 흙사면의 안정성에 영향을 미친다. 강우가 침투되기 이전 상태에서 사면 내 흙은 불포화상태이므로 흙의 간극수압(모관 흡입력)을 나타낼 것이나, 강우가 시작되면서 침투가 발생하며 이에 따라 체적함수량과 간극수압이 증가한다. 이때 강우강도가 지반의 침투능보다 큰 경우 일부 강우는 표면유출수가 되어 지표면을 따라 흐르게 되며, 일부는 지중으로 침투할 것이다. 이러한 침투과정으로 인하여 지반의 전단강도는 결국 감소하게 되며, 사면내 흙의 공학적 특성과 강우패턴에 따라 천층의 토석류의 흐름에서부터 심층의 고전적인 사면활동 양상까지 서로 다른 활동패턴이 발생할 수 있다. 따라서 강우로 인한 사면의 거동은 사면의 제원과 공학적 특성 그리고 수문학적 특성에 의존한다. 결국 사면의 안정성 평가 시 앞에서 언급한 강우로 인한 간극수압의 증가나 흙의 자중의 증가뿐만 아니라, 표면 유출수로 인한 토체에 작용하는 활동력의 증가나 침식에 의한 표면유실 등에 대한 고려도 필요하다.

본 연구에서는 철도 연변의 17개 절개 토사사면(표 1)에 대하여 강우의 영향을 고려한 안정해석을 수행하였다. 강우에 대한 침투를 고려하기 위하여, 유한요소법을 이용하여 불포화토에 대한 침투해석을 수행하고 그 결과로 산정된 간극수압 분포를 적용한 경우와, 국내 현행 설계방법에 따라 지하수위를 지표면 근처로 가정한 경우에 대하여 극한평형해석을 수행하였다. 안정성 해석결과로 산정된 안전율, 파괴 규모 및 형태 등을 이전의 파괴 이력과 비교함으로써 현행 강우를 고려한 사면 안정해석의 토사 절개사면에 대한 적용성 및 합리성을 평가하였다.

표 1. 각 노선별 사면 분포 및 지반조사 상황

노 선	역구간	조사 및 시험 실시수량							
		시추 (공)	현장시험			실내시험			
			시추공 전단	감마선 밀도검층	현장투수	삼축압축	실내투수	불포화토 함수특성	
영동선	분천-승부	2	2회	-	2회	-	-	-	
	승부-석포	2	3회	1공	2회	3회	3회	3회	
	춘양-녹동	2	2회	1공	2회	2회	2회	2회	
호남선	몽탄-일로	1	2회	1공	1회	1회	1회	-	
	일로-임성리	1	1회	1공	1회	-	-	1회	
전라선	미평-여수	2	4회	1공	1회	3회	3회	3회	
경전선	낙동강-한림정	2	4회	1공	2회	1회	1회	1회	
	덕산-창원	1	2회	2공	2회	1회	1회	1회	
	북천-횡천	2	4회	1공	2회	2회	2회	2회	
남부선	송정-기장	1	2회	1공	1회	1회	1회	1회	
우암선	우암-신선대	1	2회	1공	1회	1회	1회	1회	
경부선	안양-부곡	1	2회	1공	1회	2회	2회	2회	
	부곡-수원	1	2회	1공	1회	2회	2회	2회	
	원동-물금	1	2회	1공	1회	1회	1회	1회	
경춘선	평내-마석	1	2회	1공	1회	1회	1회	1회	
장항선	판교-서천	1	2회	1공	1회	1회	1회	1회	

## 2. 해석 방법

### 2.1 지반조사 및 실내시험

모두 17개소의 대상 사면에 대하여 지반조사 및 실내시험을 수행하였다. 각 사면의 대표적인 단면에 대하여 1공 내지 2공의 NX 직경의 시추 조사가 실시되었다. 지반의 지층구조, 강도 및 투수 특성을 파악하기 위하여, 현장시험으로 표준관입시험, 감마선 밀도검증시험, 시추공전단시험, 현장투수시험 등을 수행하였으며, 실내 토질 시험으로 기본 물성시험, 압밀비배수 삼축압축시험, 실내 투수시험 등을 수행하였다. 또한 토사층에 대하여 불포화토의 SWCC(Soil-Water Characteristic Curve)를 결정하기 위한 불포화토 함수특성 시험을 수행하였다. 표 1은 각 노선별 사면 분포 및 지반 조사 상황을 나타낸다.

### 2.2 강우에 대한 고려

강우에 의한 침투로 인한 사면안정성 저하를 평가하기 위하여, 불포화토에 대한 유한요소 침투해석 결과로 산정된 간극수압 분포를 적용한 경우와, 통상적인 설계방법을 따라 지하수위를 지표 부근에 가정한 경우에 대하여 각각 사면 안정해석을 수행하였다(표 2).

표 2. 강우에 의한 침투 고려에 따른 해석 종류

건 기	우 기 (강우에 의한 침투 고려)		
강우에 의한 침투 미고려	침투해석 결과 산정된 간극수압 분포 적용	지하수위가 GL-3m에 위치	지하수위가 지표에 위치

#### 2.2.1 침투해석 결과의 적용

강우에 의한 침투에 대해서 지반의 불포화특성을 고려한 이차원 유한요소해석을 수행하였으며, 해석 프로그램은 상용프로그램인 GEO-SLOPE의 SEEP/W (Ver. 5.0)을 사용하였다. 침투 해석에 사용된 지반의 포화 상태에서의 투수계수는 정밀조사에서 실시한 현장 및 실내 투수시험 결과를 적용하였다. 모관흡입력에 대한 투수계수의 변화는 불포화토 함수특성시험으로 산출된 모관흡입력에 대한 부피함수비의 변화 관계로 부터 Fredlund와 Xing(1994)이 제안한 방법을 통해 예측하였다. 초기 지하수위는 사면 선단으로 가정하였다.

현재까지의 침투해석에서는 지반의 침투능보다 큰 강우강도로 인해 유발되는 유출에 의한 사면 안정성의 감소를 고려할 수 없기 때문에 지반의 침투능에 비해 큰 시간 강우강도에 따른 침투해석은 의미가 없다. 따라서 본 해석에서는 누적강우량에 대해서만 고려하였으며, 열차운행 규제 기준을 토대로 하여 24시간 동안 누적강우량이 200mm인 경우(강우강도 8.3 mm/hr의 강우가 24시간 지속)에 대하여 침투해석을 실시하였다. 사면안정해석은 강우의 사면 내부로의 침투 소요시간을 고려하기 위하여 강우 종료 후 12시간 경과 후의 간극수압 분포를 적용하여 수행하였다. 침투해석에서 산정된 간극수압 분포는 사면안정해석에 적용되어 강우에 의한 침투를 고려하였다. 침투해석 시 모관흡입력은 실제 지반의 강도에 영향을 줄 수 있는 범위를 고려하여 -10kPa로 제한하였다.

#### 2.2.2 현행 설계 기준의 적용

강우에 의한 침투를 고려하기 위해서 현행 설계에 적용하고 있는 각 기관의 우기시 지하수위 적용기준에 따라 극한평형 해석을 수행하였다. 현행 설계 기준은 침투해석 결과와 무관하게 지하수위가 지표

부근에 존재한다고 가정하여 안정해석을 수행한다. 본 연구에서는 한국도로공사의 도로설계실무편람(1996) 및 도로설계요령(2001), 건설교통부의 국도건설공사설계실무요령(2004) 등을 따라 지하수위가 지표에 위치한 경우와 지표 아래 3m에 위치한 두 가지 경우에 대하여 사면안정해석을 수행하였다.

## 2.3 사면안정해석

사면안정해석은 극한평형해석 방법 중 모멘트 평형조건에 의한 안전율 산정방법인 Bishop의 방법을 적용하였으며, 상용프로그램인 GEO-SLOPE사의 SLOPE/W를 사용하여 수행하였다. 표 2와 같이 침투해석 결과로 부터 산정된 간극수압 분포를 적용한 경우와 지하수위를 지표면 부근에 가정한 경우에 대하여 각각 해석을 수행하였다. 침투해석 결과를 적용한 경우 모관흡입력에 의한 전단강도 증가를 고려하기 위한 마찰각( $\phi_B$ )는 Ho와 Fredlund(1995)가 제시한 불교란 화강풍화토(undisturbed decomposed granite)에 대한 값 15.3°를 적용하였다.

표 3. 대상사면 개요 및 파괴이력

노 선	역구간	사면 개요					파괴규모(m)	
		사면고/사면길이	경사(°)	사면 지층구성	집수형태/횡단형상	파괴형태	폭×길이	심도
영동선	분천-승부	12m/67m	45	붕적층, 풍화대, 연암	비집수/불록형	표층유실	확인곤란	
	승부-석포	124m/23m	25	붕적층, 풍화대	집수/오목형	토석류	23×198	1.5
	춘양-녹동	15m/200m	30	표토층, 붕적층	집수/오목형	표층유실	8×2.5	1.5
호남선	몽탄-일로	13m/42.5m	44	풍화토	비집수/직선형	표층유실	4.5×22.5	1.5
	일로-임성리	22.6m/150m	40	풍화토, 풍화암	비집수/직선형	표층유실	11×4.8	2.0
전라선	미평-여수	17m/161m	43	풍화토, 풍화암	비집수/불록형	표층유실	4×17	1.4
경전선	낙동강-한림정	24.5m/116m	75	붕적층, 연암	비집수/불록형	표층유실	10×12	1.2
	덕산-창원	15m/177m	40	붕적층, 풍화대, 연암	비집수/직선형	표층유실	15×10	0.5
	북천-횡천	9.3m/180m	40	붕적층, 풍화대	집수/직선형	토석류	15×12	2.0
남부선	송정-기장	11.7m/90m	43	매립층, 풍화대	비집수/직선형	표층유실	4.5×7.3	0.4
우암선	우암-신선대	21m/260m	55	매립층, 풍화대	비집수/직선형	표층유실	4×17	0.5
경부선	안양-부곡	10m/200m	35	표토층, 풍화토	비집수/직선형	표층유실	확인곤란	
	부곡-수원	5m/126m	36	붕적층	비집수/직선형	표층유실	확인곤란	
	원동-물금	17.6m/150m	55	표토층, 풍화대	비집수/직선형	표층유실	10×8	1.0
경춘선	평내-마석	8.2m/150m	45	붕적층, 풍화토	비집수/직선형	표층유실	5×2	0.5
장항선	판교-서천	11.4m/200m	35	붕적층	집수/직선형	토석류	162.5×11.4	2.0

## 3. 해석결과 및 분석

### 3.1 대상사면 개요 및 파괴이력

표 3에는 대상사면의 규모, 경사, 지층구성, 집수형태 등의 특성과 이전의 파괴이력을 정리하여 나타내었다. 조사된 파괴 형태에 의하면, 사면파괴를 발생시키는 내·외적요인들 중 외적인 요인인 강우가 토사사면의 안정성을 좌우하는 가장 주된 요인으로 나타났으며, 토사사면 파괴유형 중 강우(특히 집중호우 및 태풍 시)에 의해 발생하는 표층유실 및 토석류가 가장 높은 빈도로 발생하였다. 또한, 조사가 이루어진 토사 및 암반 사면을 포함한 총 154개의 철도절개사면에 대하여 위험요소별로 분류한 결과, 사면위험요소의 약 29%가 표층유실이었으며, 3%가 토석류에 의한 붕괴로 나타났다.

기존의 연구에 의하면 우리나라 일반적인 활동면의 깊이는 2m 이하이고 대부분 1m 이하에서 발생하는 것으로 알려져 있다(최경, 1986; 박용원, 1993). 표 3에 나타난 파괴 규모에도 이러한 경향이 잘 나타나고 있으며, 활동면의 심도가 모두 2m 이하인 얇은 깊이의 표층유실이 발생하였다.

### 3.2 침투해석 결과

그림 1은 전형적인 침투해석 결과이며 송정-기장 구간의 사면에 대한 것으로, (a)는 24시간 동안 200mm 강우가 내린 직후, (b)는 강우 종료 후 12시간 경과 후의 흐름 벡터를 나타낸다. 그림 1에 나타난 바와 같이 강우에 의한 침투로 인해 시간이 경과할수록 침투가 발생하여 사면 내부의 포화도가 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 강우에 의한 침투가 지하수위 상승에는 거의 영향을 미치지 못 하였다. 본 연구의 해석에서는 사면 근접부만을 고려한 국부적인 경계영역에 대하여 비교적 단기간의 강우에 대하여 모델링하였기 때문에 정확한 지하수위의 변화를 예측할 수 없었다. 강우에 의한 정확한 지하수위 변화를 산정하기 위해서는 장기간의 강우에 대하여 해당 사면을 포함한 유역 전체를 모델링하는 지하수문학적 해석이 필요한 것으로 판단된다. 또한 대부분의 사면에서 설정된 강우강도가 지반의 침투능에 비해 크기 때문에, 강우의 일부만이 침투되는 것으로 나타났으며, 실제로는 침투되지 않은 강우가 사면의 표면을 따라 저류되거나 흘러내려 사면의 안정성을 저하시키게 된다. 표면 유출수로 인한 사면안정성의 저하를 평가하기 위해서는 강우 시 표면 저류로 인한 사면 내 간극 수압의 증가(모관흡입력의 소멸)와 함께 표면 흐름으로 발행하는 침식 또는 토체에 대한 활동력 증가를 고려할 수 있는 해석 기법의 적용이 필요하다. 표면 저류로 발생하는 간극수압의 증가를 고려하기 위해 Iverson(2000)은 사면의 심도별 압력수두를 제공하는 모델을 제공하였으며, Cho와 Lee(2003)는 Green-Ampt(1911)의 일차원 침투이론과 일정한 강우강도에 의해 발생하는 ponding에 대한 Mein과 Larson(1973)의 해를 이용하여 침투로 인한 포화심도를 산정할 수 있는 모델을 제안하였다. 또한 사공명(2004)은 Iverson(2000)의 압력수두 확산모델과 Manning의 공식을 결합하여 강우로 인해 저류가 발생할 시 표면침식을 고려한 사면의 안정 해석기법을 제시하였다. 그러나 제안된 해석기법들의 실제 문제에 적용을 위해서는 2, 3차원 모델의 개발, 파괴 형태의 명확한 구분, 실험적 연구를 통한 정량적인 검증 등의 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

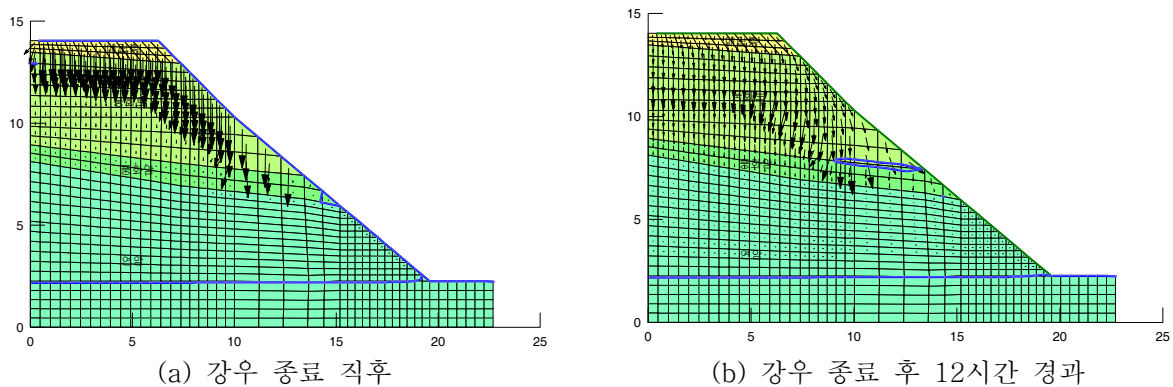


그림 1. 송정-기장 구간 침투해석 결과

### 3.3 사면안정해석 결과

그림 2는 전형적인 사면안정해석 결과로 송정-기장 구간의 사면에 대한 것이다. 그림 2의 (a), (b), (c), (d)는 각각 강우에 의한 침투를 고려하지 않은 경우, 24시간 동안 200mm 강우가 내린 후 12시간이 경과한 경우, 지하수위가 지표에 있다고 가정한 경우, 지하수위가 GL-3m에 있다고 가정한 경우에 대하여 극한평형해석법으로 결정된 최소안전율이 발생하는 활동면이다. 예상 활동면은 강우에 대한 고려 조건에 상관없이 유사한 형태로 발생하는 것으로 나타났으나, 최소안전율의 경우는 강우 고려 조건

에 따라 변화하였다.

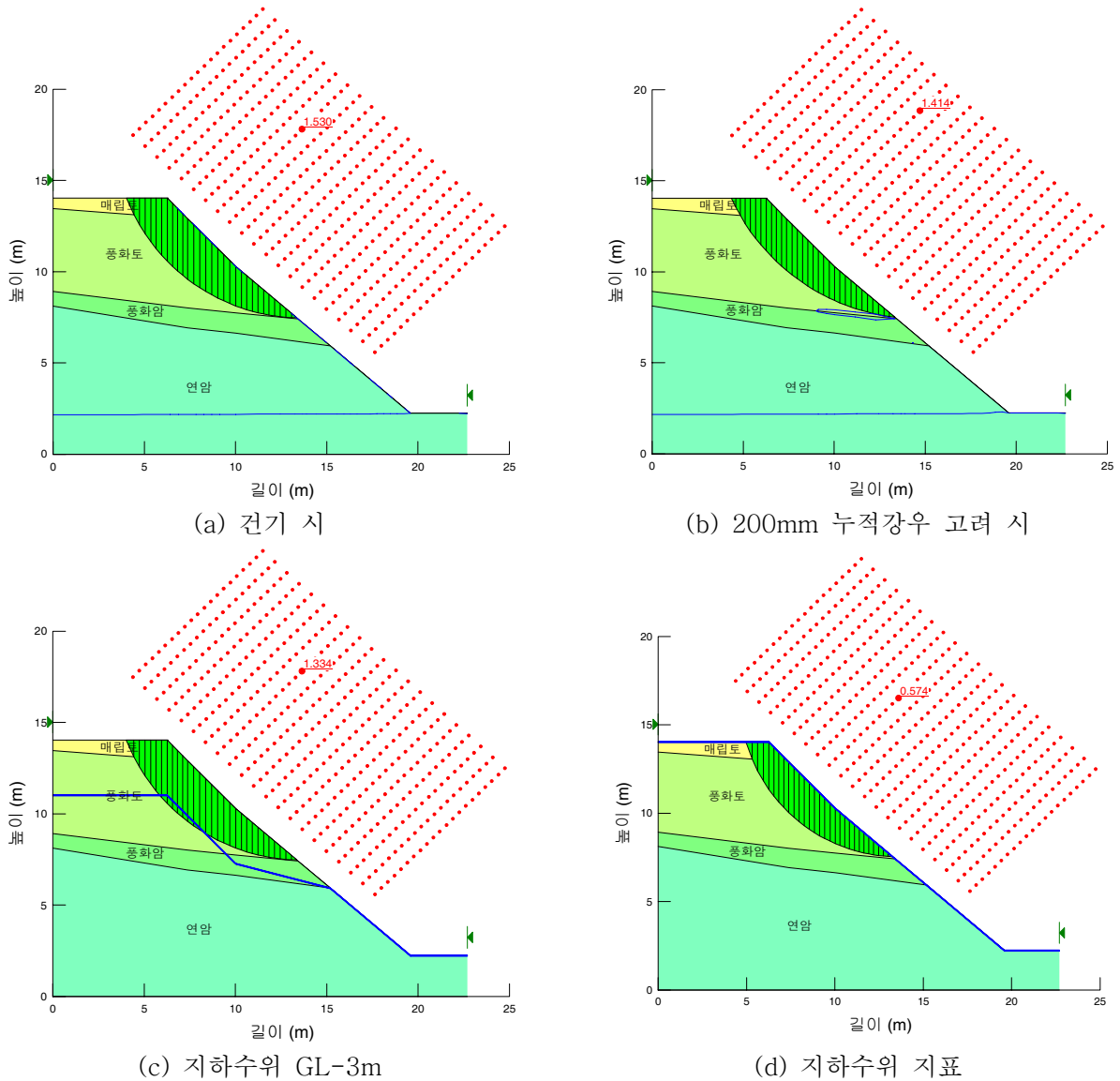


그림 2. 송정-기장 구간의 사면안정해석 결과

표 4에는 17개 대상 사면에 대하여 산정된 안전율을 정리하여 나타내었다. 본 해석에서 강우를 고려한 경우 사면안전성의 저하는 두 가지 형태로 나눌 수 있다. 첫 번째는 강우에 대하여 침투해석 결과를 적용한 경우로 지반 내의 포화도 증가에 의한 모관흡수력의 감소가 고려된 것이다. 두 번째는 지하수위를 GL-3m 또는 지표로 가정한 경우로 간극수압의 증가(유효응력 감소)로 인한 전단강도 감소가 고려된 것이다. 강우에 대한 고려에 따른 안전율의 감소는 각각 침투해석 결과를 적용한 경우 0.01~0.47(평균 0.14), 지하수위를 GL-3m로 가정한 경우 0.00~0.48(평균 0.22), 지하수위를 지표로 가정한 경우 0.50~1.11(평균 0.83)로 나타났다.

일반적인 절개사면에 대한 기준안전율이 우기시 1.1~1.2인 것을 감안하면 침투해석을 적용한 경우나 지하수위를 GL-3m로 가정한 경우 대부분의 사면이 안정한 상태로 평가되어, 실제로 파괴 이력이 있는 사면의 안정성을 적절히 평가하지 못하고 있는 것을 알 수 있다. 또한 예상 활동면도 그림 2에 나타난 바와 같이 심도가 상당히 깊은 원호파괴 형태로 결정되어 실제 조사된 파괴 상황과는 규모나 형태 측면에서 매우 상이한 것으로 나타났다.

지하수위를 지표로 가정한 경우에는 안전율이 평균 0.83 정도로 크게 감소하여 부곡-수원을 제외한

모든 사면에 대해서 매우 불안정한 결과가 산정되었다. 그러나 역시 예상 활동면이 비교적 심도가 깊은 원호파괴 형태로 결정되어 표층유실 형태의 실제 파괴 상황을 전혀 반영하고 있지 못하고 있다. 따라서 지하수위를 지표로 가정하는 것은 비교적 표고가 높고 경사가 급한 토사 절개사면에 대해서는 지나치게 보수적인 가정이며, 과도한 보강 등의 불합리한 결과를 초래할 우려가 있는 것으로 판단된다. 송평현 등(2004)은 수치해석 결과의 분석을 통해 강우의 침투에 의한 지하수의 상승이 지표면에 이른다는 가정은 불합리하다고 주장하였으며, 지하수위가 지표면에 있다는 적용기준을 준용할 경우, 표준구배에 따라 설계가 이루어진 사면도 우기 시 대부분 불안정하게 평가되어 과도한 보강이 이루어지게 되며 표준구배에 대한 사실상의 의미도 상실된다고 지적하였다.

이러한 결과를 토대로 볼 때, 강우로 인한 지반 내 포화도의 증가로 인한 모관흡수력의 감소 또는 지하수위 증가로 인한 간극수압의 증가 모두 실제 토사 절개사면에서 강우로 인해 발생하는 표층 유실 형태의 파괴를 적절히 반영하지 못하는 것으로 판단된다. 따라서 강우로 인한 사면의 활동양상은 일반적으로 사용되는 강체의 거동이 아니라 보다 복잡한 변형과정을 거침을 알 수 있다. 향후에는 사면 내에서 발생한 파괴면에 대한 보다 정밀한 조사를 통하여, 사면의 제원, 강우 특성, 유역 면적을 고려한 표면 유출량 등에 따른 파괴 패턴을 명확히 구분하고, 파괴 패턴에 따라 서로 다른 적절한 해석기법을 적용하기 위한 시도가 필요하다.

표 4. 17개 절개 토사사면에 대한 안정해석 결과 (괄호안은 강우 고려에 따른 안전율의 감소)

구간		건기	강우 고려 시		
			침투해석 결과적용	지하수위 GL -3m	지하수위 GL 0m
영동선	분천-승부	1.58	1.15 (0.43)	1.58 (0.00)	1.08 (0.50)
	승부-석포	1.52	1.50 (0.02)	1.07 (0.45)	0.58 (0.94)
	춘양-녹동	1.54	1.48 (0.06)	1.22 (0.32)	0.82 (0.72)
호남선	몽탄-일로	1.54	1.53 (0.01)	1.29 (0.25)	0.79 (0.75)
	일로-임성리	1.53	1.21 (0.32)	1.44 (0.09)	0.84 (0.69)
전라선	미평-여수	1.75	1.65 (0.10)	1.62 (0.13)	1.01 (0.74)
경전선	낙동강-한림정	0.78	0.67 (0.11)	0.52 (0.26)	0.10 (0.68)
	덕산-창원	0.76	0.74 (0.02)	0.63 (0.13)	0.10 (0.66)
	북천-횡천	1.63	1.46 (0.17)	1.42 (0.21)	0.74 (0.89)
동해남부선	송정-기장	1.53	1.41 (0.12)	1.33 (0.20)	0.57 (0.96)
우암선	우암-신선대	1.51	1.46 (0.05)	1.16 (0.35)	0.62 (0.89)
경부선	안양-부곡	1.54	1.52 (0.02)	1.32 (0.22)	0.63 (0.91)
	부곡-수원	2.15	1.99 (0.16)	2.11 (0.04)	1.42 (0.73)
	원동-물금	1.55	1.33 (0.22)	1.08 (0.47)	0.47 (1.08)
경춘선	평내-마석	1.50	1.48 (0.02)	1.02 (0.48)	0.42 (1.08)
장항선	관교-서천	1.56	1.46 (0.10)	1.37 (0.19)	0.81 (0.75)

#### 4. 결론

본 연구에서는 17개소의 철도 연변 절개 토사 사면에 대한 강우에 의한 침투를 고려한 안정 해석을 수행하고, 그 결과를 이전 파괴이력과 비교함으로써 해석 방법의 적절성을 평가하였으며, 이에 대한 결론은 아래와 같다.

- 1) 철도연변 토사 절개 사면에 대한 정밀 조사결과, 문제가 발생한 대부분의 사면에서 파괴면 깊이 2m 이하의 얕은 깊이의 표층유실 또는 집수지형에서의 토석류 파괴가 발생하였다.
- 2) 강우에 대한 고려에 따른 17개 사면의 평균 안전율 감소는 각각 침투해석 결과를 적용한 경우 0.14, 지하수위를 GL-3m로 가정한 경우 0.22, 지하수위를 지표로 가정한 경우 0.83으로 나타났으나, 예상

활동면은 심도가 깊은 원호파괴 형태로 결정되어 실제 조사된 파괴 상황과는 규모나 형태 측면에서 매우 상이한 것으로 나타났다

- 3) 불포화도에 대한 침투해석 결과를 적용하여 모관흡수력의 감소를 고려하거나, 지하수위 상승에 따른 간극수압의 증가를 고려하여 강우의 영향을 고려한 경우, 표층유실이나 토석류 파괴를 예측할 수 없어서 실제 토사 절개 사면의 활동면이나 파괴 형태 등을 적절하게 예측할 수 없는 것으로 평가되었다.
- 4) 특히 지하수위를 지표로 가정하는 경우 안전율의 감소는 매우 커서 비현실적인 형태의 파괴가 발생하는 것으로 예측되었으며, 비교적 표고가 높고 경사가 급한 토사 절개사면에 대해서는 지나치게 보수적인 가정으로 과도한 보강 등의 불합리한 결과를 초래할 우려가 있는 것으로 판단된다.
- 5) 강우에 의한 사면안정성 저하를 보다 정확하게 파악하기 위해서는 사면 내에서 발생한 파괴면에 대한 보다 정밀한 조사를 통하여, 사면의 제원, 강우 특성, 유역 면적을 고려한 표면 유출량 등에 따른 파괴 패턴을 명확히 구분하고, 파괴 패턴에 따라 서로 다른 적절한 해석기법을 적용해야 하며, 특히 강우강도가 지반의 침투능에 비해 큰 경우에 발생하는 지표 유출수로 인한 침식 또는 토체에 작용하는 활동력 증가를 고려할 수 있는 해석 기법의 개발이 필요하다.

## 5. 참고문헌

1. 박용원, 김갑래, 여운관(1993), “1991년 용인-안성 지역 산사태 연구” **한국지반공학회지**, 제9권, 제4호, pp.103-116
2. 백용, 구호본, 배규진(2003) “침투수를 고려한 사면안정성 평가 방법”, **지반**, 제19권, 제3호, pp.18-24
3. 사공명(2004), “강우로 인한 사면의 안정성 평가”, **한국철도학회 추계학술발표회 논문집 CD**
4. 송평현, 김연희, 이춘석, 배규진(2004), “강우시 사면안정해석 기법에 관한 연구”, **(사)한국지반공학회 창립 20주년 기념 지반구조물 설계, 시공 사례집**, pp.471-480
5. 조성은, 이승래(2000), “강우침투에 따른 불포화 토사사면의 안정해석”, **한국지반공학회논문집**, 제16권, 제1호, pp.51-64
6. 최경(1986), “한국의 산사태 발생요인과 예지에 관한 연구”, **강원대학교 농학박사 학위논문**
7. Alonson, E., Battle, F., Gens, A. and Lioret, A.(1988), "Consolidation analysis of partially saturated soils-Application to earthdam construction", *Numerical Methods in Geomechanics*, Innsbruck, pp.1303-1308
8. Cho, S.E. and Lee, S.R. (2002), "Evaluation of surficial stability for homogeneous slopes considering rainfall characteristics," *J. Geotech. Geoenv. Eng.*, Vol.128, No.9, pp.756-763
9. Fredlund, D.G., and Xing, A.(1994), "Equations for the soil-water characteristic curve", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.31, pp.521-532
9. Green, W.H. and Ampt, G.A.(1911), "Studies of soil Physics I. The flow of air and water through soil," *J. Agric. Sci.*, Vol.4, pp.1-24.
10. Ho, Y.F. and Fredlund, D.G.(1982), "Increase in shear strength due to soil suction for two Hong Kong Soils," *Proc. ASCE Geotech. Conf. Eng. and Construction in Tropical and Residual Soils*, Honolulu, pp.263-295
11. Iverson, R.M.(2000), “Landslide triggering by rain infiltration,” *Water Res. Res.* Vol.36, No.17, pp.1897-1910
12. Kim, J.M.(2000), “A fully coupled finite element analysis of water-table fluctuation and land deformation in partially saturated soils due to surface loading”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol.49, No.9, pp.1101-1119
13. Mein R. G. and Larson C. L.(1973), "Modeling infiltration during a steady rain," *Water Resour. Res.*, Vol.9, No.2, pp.384-394