한국지반공학회논문집 제21권 6호 2005년 8월 pp. 137 ~ 146

철도연변 절취 토사사면에 대한 강우에 의한 침투를 고려한 사면안정해석법의 적용성 평가

Adequacy Evaluation of Stability Analyses Considering Rainfall Infiltration on Railroad Cut-off Soil Slopes

이 수 형[1] Lee, Su-Hyung　　황 선 근[2] Hwang, Seon-Keun
사 공 명[3] Sagong, Myung　　김 현 기[4] Kim, Hyun-Ki

Abstract

299 railroad slopes were investigated and the failure characteristics and reinforcement patterns were analyzed. Stability analyses on the 14 cut-off soil slopes were carried out. Surficial failures were predicted by infinite slope analyses assuming the temporarily perched ground water table at soil surface during rainfall period. Limit equilibrium analyses were also carried out and 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 adequacy of those analyses was evaluated by comparing the slope failure characteristics between analysis results and the past failure records. From the comparison results, it was deduced that the limit equilibrium analyses were not appropriate to estimate the shallow failure that occurred at most of the railroad cut-off soil slopes. For the better estimation of the surficial failure, not only the increase of pore-water pressure (reduction of matric suction), but also the influence of water flows over slope surface which erode soil mass, should be evaluated and considered.

요 지

본 연구에서는 전국의 299개 철도연변 사면에 대한 현장 조사를 통해 사면의 파괴 유형 및 보강 실태를 분석하고, 조사된 사면 중 절취 토사사면으로 분류된 14개의 사면에 대하여 강우의 영향을 고려한 안정성 해석을 수행하였다. 표층유실 형태의 얕은 파괴를 검토하기 위해 강우에 의해 지표에 임시적으로 형성되는 지하수위를 가정한 무한사면해석을 수행하였으며, 유한요소법을 적용한 침투해석 결과와 지하수위를 지표 근처로 가정하는 방법을 통해 강우를 고려한 한계평형해석을 수행하였다. 기존의 파괴 기록과 안정성 해석으로 예측된 파괴 형태를 비교함으로써 적용된 해석방법들의 적합성을 평가하였다. 철도연변의 절취 토사사면에서는 얕은 깊이의 표층파괴가 주로 발생하였으나, 한계평형해석법으로는 이를 적절히 예측할 수 없었다. 강우에 의한 표층파괴를 보다 합리적으로 예측하기 위해서는 강우에 의한 안정성 저하 효과로서 모관흡입력의 감소로 인한 간극수압의 증가뿐만 아니라, 지반의 침투능보다 큰 강우로 인해 발생하는 표면 유출수에 의한 침식을 고려할 수 있는 새로운 해석기법의 개발이 요구된다.

Keywords : Cut-off soil slope, Failure characteristics, Matric suction, Rainfall infiltration, Surficial failure

1 정회원, 한국철도기술연구원 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Korea Railroad Research Institute, geoxlee@krri.re.kr)
2 정회원, 한국철도기술연구원 책임연구원 (Member, Chief Researcher, Korea Railroad Research Institute)
3 정회원, 한국철도기술연구원 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Korea Railroad Research Institute)
4 정회원, 한국철도기술연구원 주임연구원 (Member, Researcher, Korea Railroad Research Institute)

1. 서 론

지구온난화 등으로 인한 장마철 국지성 호우와 폭설은 해마다 철도 수송을 지연시킴으로써 막대한 인적·물적 손실을 가져오고 있다. 우리나라의 철도 관련 지반재해 중 대표적인 것은 사면 붕괴로, 이로 인해 연평균 26명의 인명피해와 6,000억원의 재산피해가 발생하였고, 피해규모가 급격히 증가하는 추세이다(철도청, 1999-2003). 특히, 철도노선에서는 선로유실 뿐만 아니라 소량의 사면활동으로 인하여 토사가 철로로 이송될 경우 기차의 탈선을 유발할 수 있으며, 결국에는 대형사고로 발전될 가능성이 있으므로 철저한 점검 및 조사가 필요하다. 또한, 강우에 의한 침투로 인한 사면의 활동은 철도분야뿐만 아니라 도로 및 일반 사면에서도 재산 및 인명상의 피해를 발생시키고 있으며, 따라서 강우로 인한 침투에 따른 사면의 안정성 저하를 합리적으로 평가할 수 있는 기법의 적용이 필요하다.

강우에 의한 침투로 인해 사면안정이 저하되는 원인은 아래와 같이 분류할 수 있다.

1) 포화도의 증가에 따른 간극수압 증가(모관흡입력 감소)로 인한 지반의 강도 저하
2) 포화도의 증가로 인한 흙의 자중 증가
3) 침투력에 의한 활동력의 증가
4) 지표 유출수로 인한 침식

이러한 원인을 고려하기 위해서는 불포화 지반의 투수 및 강도 특성에 대한 명확한 규명과 규명된 특성을 반영할 수 있는 합리적인 해석모델의 개발 등이 요구되고 있으나, 이는 매우 어려운 과정으로 현재 연구 진행중에 있으며, 불포화토의 특성 계측이 매우 어렵기 때문에 앞으로도 많은 시간과 노력이 필요할 것으로 판단된다. 가장 이상적인 것은 Alonso 등(1988), Kim (2000) 등이 시도한 바와 같이 불포화토에서 물의 흐름에 대한 지배방정식과 응력 및 변형에 대한 지배방정식을 연관(coupling)시켜 동시에 해석을 수행하는 것이지만, 이와 같은 해석 방법은 현재까지는 연구단계로 실제적인 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 해석 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 사면의 안정성에 영향을 미친다. 강우가 침투되기 이전 상태에서 사면 내 흙은 불포화상태로 음의 간극수압(모관흡입력)이 작용하고 있으나, 강우가 시작되면 침투가 발생하여 체적함수량이 증가하고 모관흡입력이 감소하여 간극수압이 증가한다. 이때 강우강도가 지반의 침투능보다 큰 경우 일부 강우는 표면유출수가 되어 지표면을 따라 흐르게 되며, 일부는 지중으로 침투할 것이다. 이러한 침투과정으로 인한 유효응력의 감소로 인해 지반의 전단강도는 감소하게 되며, 사면 내 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 강우로 인한 간극수압의 증가나 흙의 자중 증가뿐만 아니라, 침투수로 인한 토체에 작용하는 활동력의 증가나 침식에 의한 표면유실 등에 대한 고려도 필요하다.

본 연구에서는 299개소의 철도 연변 사면에 대한 현장조사를 통해 사면의 파괴 유형 및 보강 실태를 조사하였으며, 그 중에 이전에 파괴가 발생한 14개 절취 토사사면에 대하여 정밀조사를 수행하고 강우에 의한 침투영향을 고려한 안정해석을 수행하였다. 강우 시 표층에 형성되는 지하수위(ponding)를 가정한 무한사면해석을 통해 얕은 표층파괴에 대한 안정성 검토를 수행하였다. 또한, 유한요소법을 이용하여 불포화토에 대한 침투해석을 수행하고 그 결과로 산정된 간극수압 분포를 적용한 경우와 국내 현행 설계방법에 따라 지하수위를 지표면 근처로 가정한 경우에 대해서 각각 한계평형해석을 수행하였다. 안정성 해석결과로 산정된 안전율, 파괴 심도 및 형태 등을 이전의 파괴 이력과 비교함으로써 현행 강우를 고려한 사면 안정해석의 철도연변 토사 절취사면에 대한 적용성 및 합리성을 평가하고, 그 개선 방향을 제시하였다.

2. 조사 및 시험

2.1 철도 연변 사면 현황 조사

현황 조사는 일반철도의 재해 우려 절취사면 204개소와, 2004년 4월 개통된 고속철도(KTX) 구간의 95개소 사면에 대해서 이루어졌다. 일반철도의 경우 철도청 자체조사 결과 산사태 및 낙석 등 재해발생 위험이 높아 시급히 보강이 필요할 것으로 판단되는 90개소와, 현장 실무자들의 의견을 수렴하여 결정된 안전점검이 요구되는 개소 109개소로 조사 대상 사면이 결정되었다. 고속철도의 경우는 개통 전 안전 점검으로서 44개소의 대규모 절취사면 및 51개소의 성토사면에 대한 조사가 이루어 졌다.

2.2 절취 토사사면에 대한 정밀조사

강우로 인한 기존의 파괴 이력이 있는 14개 절취 토사사면에 대해서는 정밀조사를 수행하였다. 각 사면의 대표적인 단면에 대하여 1공 내지 2공의 NX 직경 시추조사를 실시하여 지반의 지층구조를 파악하였으며 교란 및 불교란 시료를 채취하였다. 현장시험으로 표준관입시험, 감마선 밀도검층시험, 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 1에는 정밀 조사로 결정된 14개 절취 토사사면의 규모 및 지층 구조, 기존 파괴의 형태 및 심도, 토사층의 강도 및 투수특성 등을 정리하여 나타내었다.

3. 안정성 해석 방법

3.1 무한사면해석을 통한 표층파괴의 검토

표 1에 정리된 철도연변 절취 토사사면의 파괴 특성은 파괴면의 깊이가 얕아서 대부분 지표로 부터 깊이 수 m 내외의 표층에서 파괴가 발생하였다는 점이다. 이와 같이 파괴면의 심도/길이 비가 작은 평면파괴의 경우 무한사면해석을 통해 그 안정성을 평가할 수 있다. 본 논문에서는 강우에 의한 침투를 고려하기 위하여, 강우시 표층에 임시로 지하수위(ponding)가 형성되어, 파괴면 보다 깊은 침윤선 후면이 완전히 포화되어 모관흡입력이 상실되고 정수역학조건으로 간극수압이 증가되며, 지표 높이와 동일한 수두차로 사면과 평행한 침투가 발생한다고 가정하였다. 이러한 가정을 전제로, 경사가 i인 반무한 사면에서 예상 파괴면이 사면과 평행하다고 가정하면 깊이 z에서의 안전율과 파괴가 발생하는 임계깊이 z_{cr}은 각각 아래의 식 (1)과 (2)를 이용하여 계산할 수 있다.

표 1. 14개 정밀조사 절취 토사사면의 특성 및 파괴이력

노 선	역구간	사면 형상				파괴형태	파괴규모(m)		토층특성				
		사면고 (m)	경사 (°)	사면 지층구성	집수형태/ 횡단형상		폭×길이	심도	분류	토층 깊이 (m)	점착력 (kN/m^2)	내부마찰각 (°)	포화 투수계수 (cm/sec)
영동선	분천-승부	12	45	붕적층, 풍화대, 연암	비집수/볼록형	표층유실	확인곤란	-	SM	1.8	7.5	26	5.0×10^{-5}
	승부-석포	124	25	붕적층, 풍화대	집수/오목형	토석류	23×198	1.5	SM	2.8-3.7	5.7	32	3.1×10^{-5}
	춘양-녹동	15	30	표토층, 붕적층	집수/오목형	표층유실	8×2.5	1.5	SC, SM	4.5-6.0	9.0	31	5.4×10^{-5}
호남선	몽탄-일로	13	44	풍화토	비집수/직선형	표층유실	4.5×22.5	1.5	SM	2.8-11.0	14.4	29	3.3×10^{-5}
	일로-임성리	23	40	풍화토, 풍화암	비집수/직선형	표층유실	11×4.8	2.0	SM	1.0-5.0	11.7	28	6.1×10^{-5}
전라선	미평-여수	17	43	풍화토, 풍화암	비집수/볼록형	표층유실	4×17	1.4	ML, SM	7.4-11.5	16.7	27	2.3×10^{-5}
경전선	북천-횡천	9	40	붕적층, 풍화대	집수/직선형	토석류	15×12	2.0	SC, SM	5.5-5.7	7.1	30	1.1×10^{-5}
동해선	송정-기장	12	43	매립층, 풍화대	비집수/직선형	표층유실	4.5×7.3	0.4	SM	0.9-5.7	5.8	33	3.4×10^{-5}
우암선	우암-신선대	21	55	매립층, 풍화대	비집수/직선형	표층유실	4×17	0.5	SM	10.8	8.0	31	5.4×10^{-5}
경부선	안양-부곡	10	35	표토층, 풍화토	비집수/직선형	표층유실	확인곤란	-	SM	12.5	13.0	23	2.7×10^{-5}
	부곡-수원	5	36	붕적층	비집수/직선형	표층유실	확인곤란	-	CL, SM	5.8	13.0	23	1.3×10^{-5}
	원동-물금	18	55	표토층, 풍화대	비집수/직선형	표층유실	10×8	1.0	SC, SM	11.7	1.8	35	3.3×10^{-5}
경춘선	평내-마석	8	45	붕적층, 풍화토	비집수/직선형	표층유실	5×2	0.5	SM	6.6	5.9	29	1.7×10^{-5}
장항선	판교-서천	11	35	붕적층	집수/직선형	토석류	162.5×11.4	2.0	CL, ML	6.0	14.7	25	2.0×10^{-5}

$$F_s = \frac{c' + \gamma_b z \cos^2 i \tan\phi'}{\gamma_t z \sin i \cos i} \quad (1)$$

$$z_{cr} = \frac{c'}{\gamma_t} \frac{1}{\cos^2 i [\tan i - (\gamma_b/\gamma_t)\tan\phi']} \quad (2)$$

여기서, F_S는 안전율, γ_t, γ_b는 각각 흙의 전체단위중량 및 수중단위중량, c'와 ϕ'는 흙의 유효 점착력과 내부마찰각을 나타낸다.

본 연구에서는 식 (1)을 이용하여 기존에 관측된 파괴깊이에서의 안전율을 산정하였다. 또한 식 (2)를 이용하여 임계깊이를 산정함으로써 실제 발생한 파괴면의 깊이와 무한사면해석으로 예측된 파괴면의 깊이를 비교하였다.

3.2 강우를 고려한 한계평형해석

한계평형해석을 통해 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.

3.2.1 강우에 대한 고려 방법

(1) 유한요소법을 적용한 침투해석

강우에 의한 침투에 대하여 지반의 불포화특성을 고려한 이차원 유한요소해석을 수행하였으며, 해석 프로그램은 상용프로그램인 GEO-SLOPE의 SEEP/W(Ver. 5.0)를 사용하였다. 침투 해석에 사용된 지반의 포화 상태에서의 투수계수는 정밀조사에서 실시한 현장 및 실내 투수시험 결과를 적용하여 결정하였으며, 그 값은 표 1에 나타내었다. 모관흡입력에 대한 투수계수의 변화는 불포화토 함수특성시험으로 산출된 모관흡입력에 대한 부피함수비의 변화와 포화 시 투수계수로부터 Fredlund 등(1994)이 제안한 방법을 통해 예측하였다.

강우를 고려하기 위해서 사면 표면에 강우 강도에 해당하는 일정한 유량이 유입되도록 경계조건을 설정하였으며, 강우 강도는 열차운행 규제 기준을 토대로 하여 24시간 동안 누적강우량이 200mm(강우강도 8.3mm/hr의 강우가 24시간 지속)가 되도록 결정하였다. 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 초기 모관흡입력은 실제 지반의 강도에 영향을 줄 수 있는 범위를 고려하여 -10kPa로 하였다.

(2) 현행 설계 기준의 적용

강우에 의한 침투를 고려하기 위해서 현행 설계에 적용하고 있는 각 기관의 우기 시 지하수위 적용기준에 따라 한계평형 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 3m(GL-3m)에 위치한 두 가지 경우에 대하여 각각 한계평형해석을 수행하였다.

3.2.2 한계평형해석

안정해석은 한계평형해석 방법 중 해석방법의 이해가 쉽고, 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있는 모멘트 평형조건에 의한 안전율 산정방법인 Bishop의 간편법을 적용하였으며, 상용프로그램인 GEO-SLOPE사의 SLOPE/W를 사용하여 수행하였다. 강우에 대한 고려를 위하여 침투해석 결과로부터 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(ϕ_B)은 Ho와 Fredlund(1995)가 제시한 불교란 화강풍화토(undisturbed decomposed granite)에 대한 값 15.3°를 적용하였다.

4. 사면 조사 결과

4.1 철도연변 사면 현황

그림 1은 현황 조사가 이루어진 사면 중에 분류가 가능한 154개 철도 사면을 위험요소별로 분류한 결과를 나타낸다. 분류 결과 사면 위험요소의 약 70%가 절리에 의한 파괴와 표층붕괴로 나타났으며, 사면활동, 풍화, 낙석, 토석류 등의 순으로 나머지를 차지하였다. 그림 2는 분류가 가능한 132개 철도 사면의 보강대책을 조사한 결과이다. 가장 많이 적용되는 사면 보강대책은 옹벽으로 전체의 24%를 차지하였으며, 그 다음으로 방호책, 링네트, 와이어네트, 록앵커, 숏크리트 콘크리트피복,

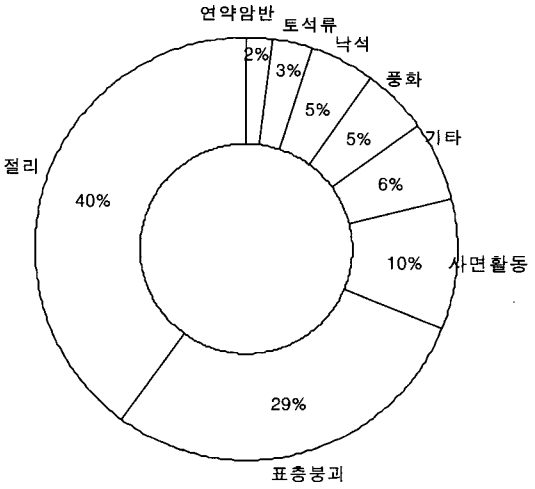


그림 1. 철도 연변 사면의 위험요소별 분포

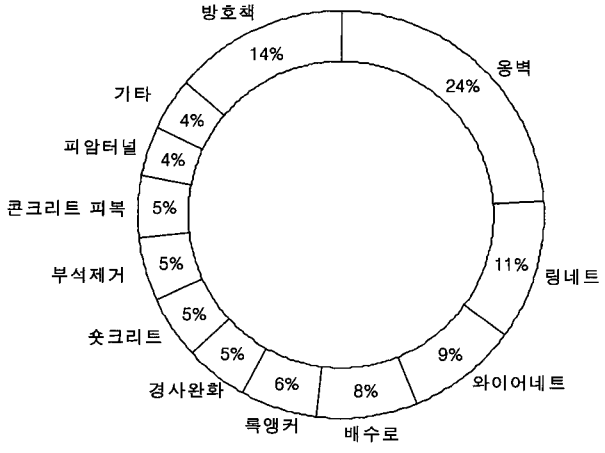


그림 2. 철도 연변 사면의 보강공법별 분류

피암터널 등의 순이었다. 사면 보강대책은 사면 위험요소의 종류와 지질 및 지형조건 등을 고려하여야 하기 때문에 비교적 다양한 대책들이 적용되고 있다.

도로와 철도사면은 시공 당시의 특성으로 인해 많은 차이점을 나타낸다. 도로의 경우에는 철도에 비해 상대적으로 최근에 시공된 경우가 많으므로 사면에 대한 설계 및 유지관리 시스템이 상대적으로 잘 정비된 조건하에서 시공된 경우가 많다. 이에 반해 현재 운행되고 있는 철도노선의 선정 및 시공은 훨씬 이전으로 거슬러 올라가서 제대로 된 설계기준 및 시공관리가 도입되지 않은 시기에 이루어졌다. 특히 영동선, 정선선과 같은 노선은 시공 당시 기술의 낙후로 가급적 원지반을 절취하지 않고 시공을 수행함으로서 철도연변의 사면은 자연 상태인 경우가 상당수이다.

철도와 도로의 또 다른 차이점은 노선폭인데 고속도로의 경우에는 철도에 비해 상당히 넓은 노선폭을 차지하고 있으므로 요구되는 절토량 또한 많다. 그리고, 도로사면에 대한 접근성 및 시공성이 철도 사면에 비해 우수하므로 적용 가능한 보수보강 공법이 다양하다. 결국, 근본적으로 철도 사면은 자연 상태의 조건에 가까운 경우가 많으며 절취부가 그렇게 크지 않아서 사면의 활동이 발생하더라도 소규모로 발생할 가능성이 높다. 그러나 철도의 경우 운행에 있어 소량의 토사유실이나 활동도 탈선의 위험을 내포하고 있으므로 보다 엄밀한 활동방지 대책과 설계 및 유지관리 대책이 필요한 실정이다.

4.2 절취 토사사면의 파괴 특성

표 1에는 정밀조사가 이루어진 14개 절취 토사사면의 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 주된 요인으로 나타났으며, 토사사면 파괴유형 중 강우(특히 집중호우 및 태풍 시)에 의해 발생하는 표층파괴 및 토석류가 가장 높은 빈도로 발생하였다. 기존의 연구에 의하면 우리나라 사면의 일반적인 파괴면 깊이는 2m 이하이고 대부분 1m 이하에서 발생하는 것으로 알려져 있다(최경, 1986; 박용원, 1993). 표 1에 나타낸 파괴 규모에도 이러한 경향이 잘 나타나고 있으며, 파괴면의 심도가 모두 2m 이하인 얕은 깊이의 표층유실이 발생하였다.

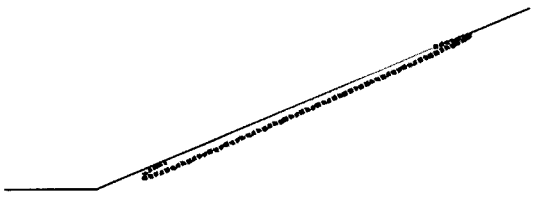
철도연변에서 관측되는 절취 토사사면의 활동은 그림 3에 나타낸 4가지 형태로 구분되었다. 토사사면의 활동 형태는 흙의 심도, 사면의 경사 그리고 강우조건 등 여러 가지 요인에 따라 영향을 받는 것으로 알려져 있다(최경, 1986; 박용원 등, 1993; 사공명, 2004). 그러나 본 연구에서의 활동의 분류는 활동후의 노출된 사면의 특성을 기준으로 분류하였다. 활동패턴 I은 천층파괴가 흙의 상부층에서만 관측된 경우이며 활동패턴 II는 중간 깊이 활동패턴이다. 활동패턴 I과 II의 구분은 우선 활동패턴 I은 판상으로의 활동을 한다는 것이다. 이에 반해 활동패턴 II는 활동구간 중 상부에서는 어느 정도 원호파괴의 형상을 보이나 하단부로 활동이 진행될수록 활동패턴 I과 같은 판상의 활동패턴을 보인다. 활동패턴 III과 IV는 지형의 풍화정도 및 지질학적인 특성과 상관이 있을 것으로 판단이 되는데 우선 활동패턴 III은 전석층 경계부에서의 활동이 관측되는 경우를 의미한다. 마

지막으로 활동패턴 IV는 모암과 토사의 경계부에서의 활동패턴이다. 이러한 패턴은 주로 상부 토사층이 아주 얕고 모암과 토사층의 분리가 뚜렷한 경우에 관측되었다. 첫 번째와 두 번째 활동패턴은 기반암의 영향을 그리 크게 받지 않고 오히려 흙의 공학적인 특성(함수특성), 강우 및 지하수의 영향이 클 것으로 판단되는 유형이며 세 번째와 네 번째 활동패턴은 기반암과 원지반암의 풍화정도와 밀접한 상관관계가 있을 것으로 판단된다. 관측된 활동 형태의 분포는 활동패턴 I이 57%로 가장 큰 비율을 차지하며, 활동패턴 II가 4%, 활동패턴 III 13%, 활동패턴 IV가 26%의 비율로 분류되었다.

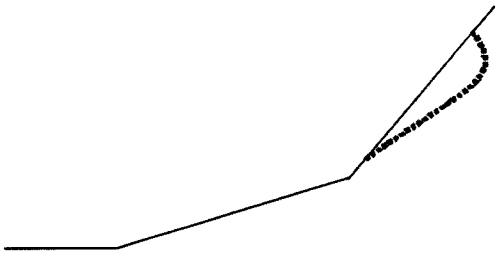
5. 안정성 해석결과 및 분석

5.1 침투해석 결과

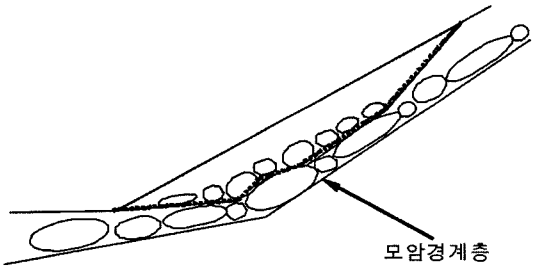
그림 4는 침투해석의 전형적인 결과이며 동해남부선 송정-기장 구간의 사면에 대한 것으로, (a)는 24시간 동안 200mm 강우가 내린 직후, (b)는 강우 종료 후 12시간 경과 후의 흐름 벡터를 나타낸다. 그림 4에 나타난 바와 같이 강우에 의한 침투로 인해 시간이 경과할수록 침투가 발생하여 사면 내부의 포화도가 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 강우에 의한 침투가 지하수위 상승에는 거의 영향을 미치지 못 하였다. 본 연구의 해석에서는 사면 근접부만을 고려한 국부적인 경계영역에 대하여 비교적 단기간의 강우에 대하여 모델링하였기 때문에



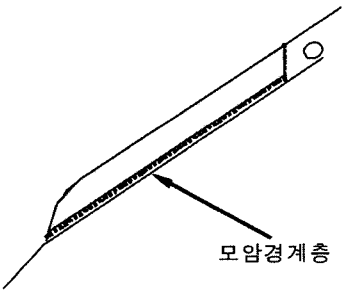
패턴 I 천층 활동타입



패턴 II 중간깊이 활동타입



패턴 III 전석층 경계부 활동타입



패턴 IV 암반경계층 활동타입

그림 3. 절취 토사사면에서 관측된 활동 패턴

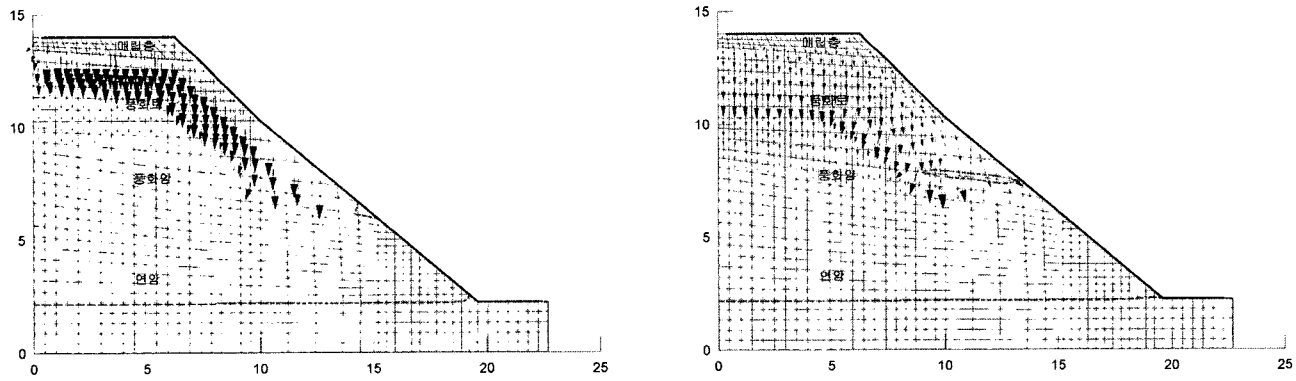


그림 4. 동해남부선 송정-기장 구간 침투해석 결과

정확한 지하수위의 변화를 예측할 수 없었다. 강우에 의한 정확한 지하수위 변화를 산정하기 위해서는 장기간의 강우에 대하여 해당 사면을 포함한 유역 전체를 모델링하는 지하 수문학적인 해석과 실제 사면현장에서 지하수의 변화에 대한 지속적인 관측이 필요한 것으로 판단된다. 또한 대부분의 사면에서 설정된 강우강도가 지반의 침투능에 비해 크기 때문에, 강우의 일부만이 침투되는 것으로 나타났으며, 실제로는 침투되지 않은 유출수는 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 침식을 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.

5.2 사면안정해석 결과

5.2.1 무한사면해석을 통한 표층파괴 검토 결과

표 2에는 무한사면해석을 통해 산정된 기존의 파괴면 깊이에서의 안전율과 임계깊이를 나타내었다. 파괴면 깊이의 확인이 가능하였던 11개소의 사면 중 3개소(일로-임성리, 북천-횡천, 원동-물금 구간)에서는 안전율이 1보다 낮은 것으로 나타나 표층파괴의 예측이 가능한 것으로 나타났다. 그러나, 이를 제외한 나머지 8개소에서는 안전율이 1보다 커서, 임계깊이가 실제 파괴면 보다 크게 산정되었다.

산정된 임계깊이는 모든 사면에서 2.5m 이하로 얕은 파괴가 예측되어 어느 정도 표층유실을 예측할 수 있는 것으로 나타났지만, 실제 파괴가 발생하는 메커니즘에 관련해서는 다소 문제점이 있는 것으로 판단된다. 본 연구의 무한사면해석에서는 강우로 인한 침윤선 후면이 완전히 포화되어 모관흡입력이 상실되고 정수역학조건으로 간극수압이 증가되며, 지표 높이와 동일한 수두차로 사면과 평행한 침투가 발생한다는 매우 보수적인 가정을 전제로 하고 있다. 이러한 보수적인 가정에도 불구하고 11개소 중에 8개소에서 실제 파괴면에서의 안전율이 1보다 크다는 사실은 안정을 저해시키는 요소 중 고려하지 못한 부분이 있다는 것을 의미하며, 이는 주로

표 2. 14개 절취 토사사면에 대한 사면안정해석 결과 (괄호안은 예상파괴면의 깊이, m)

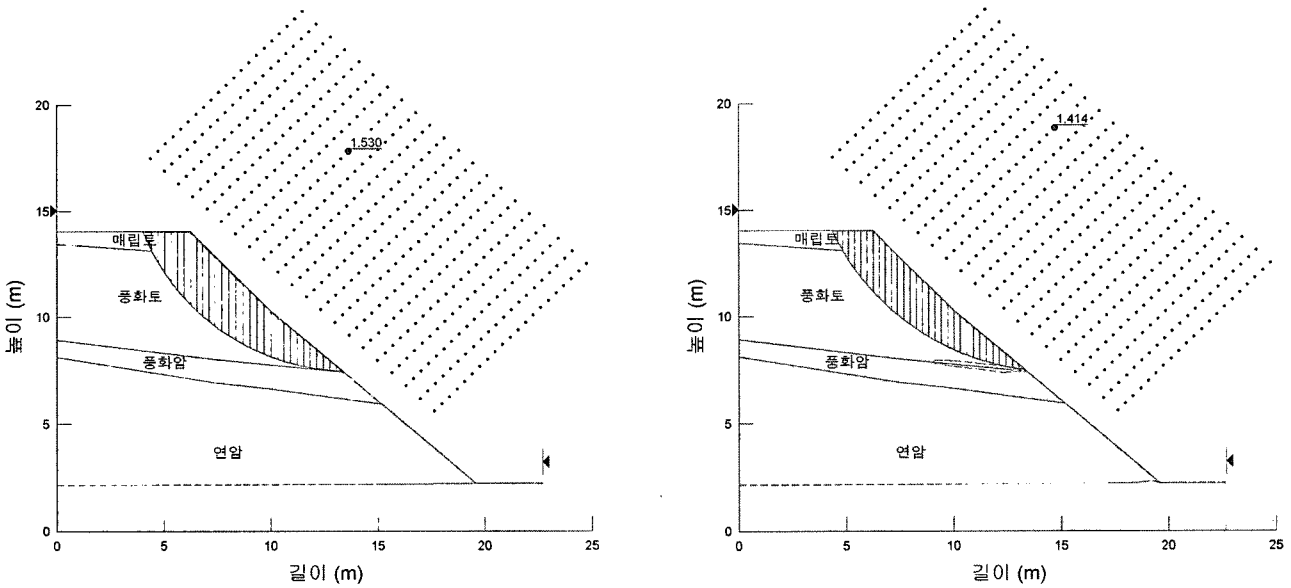
구간		실제 관측된 파괴면 깊이	침투를 고려한 무한사면해석결과		한계평형해석 결과			
			파괴면에서 구한 안전율	임계깊이	건기시 안전율	강우 고려 시 안전율		
						침투해석 결과적용	지하수위 GL -3m	지하수위 GL 0m
영동선	분천-승부	확인안됨	-	1.1m	1.58 (1.4m)	1.15 (1.3m)	1.58 (1.3m)	1.08 (1.3m)
	승부-석포	1.5m	1.15	2.0m	1.52 (7.5m)	1.50 (7.6m)	1.07 (7.4m)	0.58 (7.2m)
	춘양-녹동	1.5m	1.23	2.1m	1.54 (4.9m)	1.48 (4.5m)	1.22 (5.2m)	0.82 (5.0m)
호남선	몽탄-일로	1.5m	1.32	2.2m	1.54 (4.5m)	1.53 (4.3m)	1.29 (5.1m)	0.79 (4.9m)
	일로-임성리	2.0m	0.94	1.8m	1.53 (3.2m)	1.21 (3.2m)	1.44 (3.2m)	0.84 (3.2m)
전라선	미평-여수	1.4m	1.57	2.5m	1.75 (2.8m)	1.65 (2.9m)	1.62 (2.9m)	1.01 (3.2m)
경전선	북천-횡천	2.0m	0.71	1.2m	1.63 (2.2m)	1.46 (2.6m)	1.42 (2.4m)	0.74 (2.5m)
동해남부선	송정-기장	0.4m	1.92	0.9m	1.53 (2.6m)	1.41 (2.4m)	1.33 (2.6m)	0.57 (2.5m)
우암선	우암-신선대	0.5m	2.08	1.2m	1.51 (4.3m)	1.46 (4.5m)	1.16 (4.8m)	0.62 (4.5m)
경부선	안양-부곡	확인안됨	-	2.1m	1.54 (3.1m)	1.52 (3.1m)	1.32 (3.5m)	0.63 (3.8m)
	부곡-수원	확인안됨	-	2.1m	2.15 (2.8m)	1.99 (4.3m)	2.11 (4.3m)	1.42 (4.1m)
	원동-물금	1.0m	0.43	0.3m	1.55 (3.4m)	1.33 (3.6m)	1.08 (4.0m)	0.47 (3.6m)
경춘선	평내-마석	0.5m	1.56	0.9m	1.50 (2.7m)	1.48 (2.7m)	1.02 (3.2m)	0.42 (2.4m)
장항선	판교-서천	2.0m	1.17	2.5m	1.56 (3.7m)	1.46 (3.7m)	1.37 (3.6m)	0.81 (3.8m)

지표 유출수로 인한 침식을 고려하지 못하였기 때문에 발생한 문제점으로 판단된다. 따라서, 향후 표층유실 형태의 파괴에 대한 보다 적절한 예측을 위해서는, 간극수압의 증가나 모관흡수력의 소멸로 인한 안정성 감소뿐만 아니라 지표 유출수로 인한 침식을 고려해야 한다.

이와 같이 사면 표층부에서의 파괴는 많은 안정성 저해 요인들이 동시에 복합적으로 작용하여 발생하며, 이들 저해요인의 개별적인 효과를 정량적으로 분리하여 규명하기 위해서는 앞으로 많은 연구가 수행되어야 할 것이다. 이와 더불어 강우로 인한 사면의 표층부에서의 활동양상이 일반적으로 사용되는 강체의 거동이 아니라 보다 복잡한 변형과정을 거침을 예상할 수 있고, 이를 고려할 수 있는 모델의 개발도 필요한 것으로 판단된다.

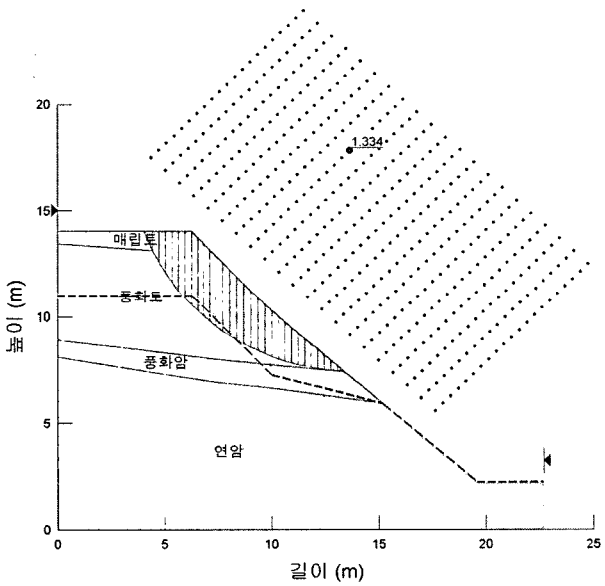
5.2.2 한계평형해석결과

그림 5는 전형적인 사면안정해석 결과로 동해남부선 송정-기장 구간의 사면에 대한 것이다. 그림 5의 (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, 지하수위

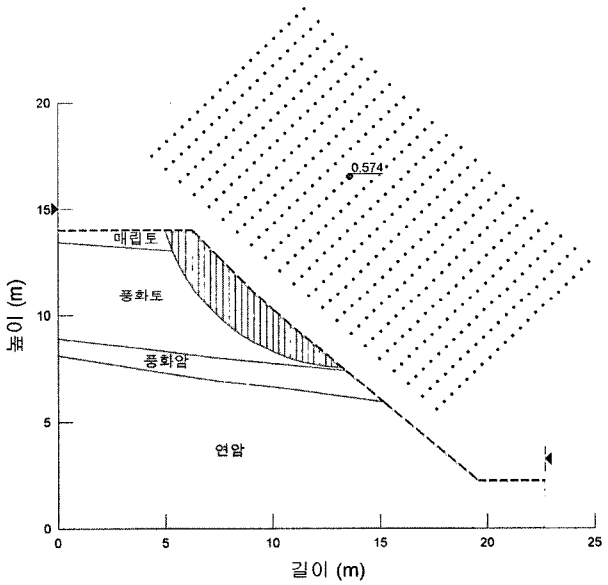


(a) 건기 시

(b) 200mm 누적강우 고려 시



(c) 지하수위 GL-3m



(d) 지하수위 지표

그림 5. 동해남부선 송정-기장 구간의 한계평형해석 결과

가 GL-3m에 있다고 가정한 경우에 대하여 한계평형해석법으로 결정된 최소안전율이 발생하는 활동면이다. 표 2에는 14개 절취 토사사면에 대하여 한계평형해석을 통해 산정된 안전율과 예상 활동면의 깊이를 정리하여 나타내었다.

한계평형해석 결과로 나타난 예상 활동면의 형태 및 깊이는 강우에 대한 고려 조건에 상관없이 유사한 것으로 나타났으나, 최소안전율의 경우는 강우 고려 조건에 따라 변화하였다. 일반적인 절취사면에 대한 기준안전율이 우기 시 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 활동면의 깊이도 표 2에 나타난 바와 같이 실제 파괴면의 깊이에 비해 깊이가 1.2 ~ 7.1m 더 깊게 결정되어 실제 조사된 파괴 상황과는 규모나 형태 측면에서 상이한 것으로 나타났다.

지하수위를 지표로 가정한 경우에는 안전율이 매우 크게 감소하여 부곡-수원 구간을 제외한 모든 사면에 대해서 매우 불안정한 결과가 산정되었다. 그러나 역시 예상 활동면이 비교적 심도가 깊은 원호파괴 형태로 결정되어 표층유실 형태의 실제 파괴 상태를 적절히 반영하지 못하였다. 따라서 지하수위를 지표로 가정하여 한계평형해석을 수행하는 방법은, 비교적 표고가 높고 경사가 급한 토사 절취사면에 대해서는 지나치게 보수적인 가정인 것으로 판단된다. 송평헌 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. 본 연구의 침투해석 결과에도 나타난 바와 같이 비교적 가파른 철도 절취사면에서는 지하수위 상승의 영향은 매우 작은 것으로 판단되며, 따라서 전체 사면이 완전히 포화되었다고 가정하고 한계평형해석을 수행하는 방법을 적용하면 실제와 다른 큰 규모의 파괴면이 예측되어 비경제적이고 비합리적인 결과를 초래할 수 있다.

이러한 결과를 토대로 볼 때, 원호파괴를 가정한 한계평형해석을 적용하는 경우는 강우로 인한 실제 토사 절취사면에서 강우로 인해 발생하는 표층 유실 형태의 파괴를 적절히 반영하지 못하는 것으로 판단된다. 따라서 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 연구가 필요하다.

6. 결 론

본 연구에서는 299개 철도 연변 사면에 대한 현황 조사를 수행하고, 이전에 파괴가 발생한 14개소의 철도 연변 절취 토사사면에 대하여 강우에 의한 침투를 고려한 안정 해석을 수행하였으며, 그 결과를 이전 파괴이력과 비교함으로써 적용된 해석 방법의 적절성을 평가하였다. 철도 연변 토사사면의 파괴 형태는 ① 파괴면 깊이 2m 이하의 얕은 깊이의 표층파괴가 중점적으로 발생하였으며, ② 계곡부 토석류에 의한 재해 발생 가능성이 높은 것으로 나타났다. 또한 ③ 사면 횡단 및 사면 하부 배수불량에 의한 재해발생확률이 매우 높은 것을 알 수 있었으며, ④ 터널 갱구부 측벽 상단부(계곡부 배수로)에서의 국부적 유실 발생의 가능성이 상존하고 있는 것으로 분석되었다.

또한, 강우를 고려한 안정성해석 결과와 기존의 파괴형태를 비교한 결과 아래와 같은 결론을 도출할 수 있었다.

(1) 강우에 의해 지표에 임시적으로 형성되는 지하수위를 가정한 무한사면해석을 통해 표층파괴에 대한 안정성을 검토한 결과, 실제 파괴면에서의 안전율이 1보다 크게 나타나고, 임계깊이도 실제 파괴면보다 더 깊게 예측되는 경향이 나타났으며, 이는 지반의 침투능보다 큰 강우로 인한 표면 유출수의 침식으로 인한 사면 안정성 저하 효과가 고려되지 않았기 때문인 것으로 판단된다.

(2) 원호파괴면을 가정한 한계평형해석의 경우 침투해석 결과를 적용하여 모관흡입력의 감소를 고려하거나, 지하수위 상승에 따른 간극수압의 증가를 고려하여 강우의 영향을 고려한 경우, 표층유실이나 토석류 파괴를 예측할 수 없어서 실제 철도연변 토사 절취 사면의 파괴 형태나 파괴면 깊이 등을 적절하게 예측할 수 없는 것으로 평가되었다.

(3) 지하수위를 지표에 위치시켜 전체 사면이 포화되었다고 가정하고 한계평형해석을 수행하는 경우 안전율의 감소는 매우 크게 나타나고, 실제보다 큰 규모

의 파괴가 발생하는 것으로 예측되었으며, 비교적 표고가 높고 경사가 급한 철도연변 토사 절취사면에 대해서는 지나치게 보수적인 가정으로 과도한 보강 등의 불합리한 결과를 초래할 우려가 있는 것으로 판단된다.

향후, 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 구분할 수 있는 추가적인 연구가 필요하다. 또한, 파괴 패턴에 따라 서로 다른 적절한 해석기법을 개발 및 적용해야 하며, 특히 표층유실 형태의 얕은 파괴에 대한 정확한 예측을 위해서는 지반의 침투능에 비해 큰 경우에 발생하는 지표 유출수로 인한 침식을 고려할 수 있는 해석 기법의 개발이 요구된다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부 (2004), *국도건설공사 설계 실무요령*.
2. 박용원, 김갑래, 여운관 (1993), "1991년 용인-안성 지역 산사태 연구", *한국지반공학회지*, 제9권, 제4호, pp.103-116.
3. 백용, 구호본, 배규진 (2003), "침투수를 고려한 사면안정성 평가 방법", *지반*, 제19권, 제3호, pp.18-24.
4. 사공명 (2004), "강우로 인한 사면의 안정성 평가", *한국철도학회 추계학술발표회 논문집*, CD.
5. 송평현, 김연희, 이춘석, 배규진 (2004), "강우시 사면안정해석 기법에 관한 연구", *(사)한국지반공학회 창립 20주년 기념 지반구조물 설계, 시공 사례집*, pp.471-480.
6. 최경 (1986), *한국의 산사태 발생요인과 예지에 관한 연구*, 강원대학교 농학박사 학위논문.
7. 철도청 (1980~2003), *철도통계연보*.
8. 한국도로공사 (1996), *도로설계실무편람*.
9. 한국도로공사 (2001), *도로설계요령*.
10. Alonso, 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.
11. 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.
12. Fredlund, D.G., Anqing Xing, A., and Huang, S. (1994), "Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.31, pp. 533-546.
13. 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.
14. 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.
15. Iverson, R. M. (2000), "Landslide triggering by rain infiltration", *Water Res. Res.* Vol.36, No.17, pp.1897-1910.
16. 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.
17. Mein R. G. and Larson C. L. (1973), "Modeling infiltration during a steady rain", *Water Resour. Res*, Vol.9, No.2, pp.384-394.

(접수일자 2005. 5. 6, 심사완료일 2005. 8. 20)