한국지반환경공학회 논문집
제8권 제2호 2007년 4월 pp. 11~18

다중 파괴면을 이용한 강우시 사면의 안정성 해석

Slope Stability Analysis under Rainfall Condition by Using Multiple Slip Surfaces

김 민 석[1)] · 사 공 명[†] · 김 수 삼[2)]
Kim, Minseok · Sagong, Myung · Kim, Soosam

ABSTRACT : Slope failure triggered by rainfall produces severe effects on the serviceability and stability of railway, Therefore, slope stability problem is one of the major concerns on the operation of railway. In this study, the rainfall conditions triggering slopes failure adjacent to railroads are investigated and the numerical analysis approach in consideration of infiltration and limit equilibrium method based upon multiple slip surfaces are proposed. The rainfall conditions triggering slope failure are as follow: cumulative rainfall is in the range of 150~500 mm, and duration is from 3 to 24 hours. Base upon the rainfall conditions, infiltration analysis and limit equilibrium method for infinite slope condition are carried out. The depth of infinite slope is assumed as 2 m and the multiple slip surfaces modeled with 16.7 cm interval from the bottom slip surface located at the 2 m depth. The assumed bottom slip surface is the location at which factor of safety is converging. The proposed approach shows more reasonable results than the results from the general codes assuming water table at slope surface. In addition, three dimensional plot of cumulative rainfall, rainfall duration, and factor of safety shows that slope stability analysis in consideration of rainfalll must account for cumulative rainfall (rainfall duration).

Keywords : Slope stability, Infiltration, Limit equilibrium method, Infinite slope condition

요 지 : 철도 연변 사면의 활동은 열차 노선의 사용성과 안전성에 상당한 영향을 미치고 있다. 따라서 사면안정 문제는 철도 노선 운용에 있어 큰 관심사항이다. 본 연구에서는 철도연변 사면의 활동이 발생하는 조건에서의 강우정보를 분석하였으며 침투해석과 한계평형해석을 통하여 강우를 고려한 사면의 안정성 분석 기법을 제시하고자 한다. 강우량 분석결과 사면활동이 발생하기까지 누적강우량은 150~500mm 사이에 분포하고 있었고 강우지속시간은 3~24시간으로 나타났다. 분석된 강우량을 바탕으로 무한사면 조건에서의 침투해석과 강체거동 분석을 수행하고 무한사면의 심도는 2m를 가정하였으며 다중의 파괴면은 2m 심도로부터 16.7cm 간격으로 모델링이 되었다. 한계파괴심도인 2m는 안전율이 수렴하는 심도이다. 해석결과 기존의 사면안정성 평가 기준에서 고려하고 있는 우기시 해석조건의 결과보다 현실적인 안전율을 보였다. 또한 누적강우량, 강우지속시간, 안전율을 축으로 하는 3차원 공간상에 안전율 변화 추이를 도시한 결과 강우를 고려한 사면의 안전성 분석 시 일반적으로 고려하는 강우강도 뿐만 아니라 누적강우량(강우지속시간) 또한 고려되어야 할 것으로 판단되었다.

주요어 : 사면안정, 침투, 한계평형해석, 무한사면 조건

1. 서 론

강우로 인한 사면의 활동은 복잡한 과정을 거치며 발생하는 현상으로서 여러 연구자들을 통하여 다양한 방법으로 연구가 수행되어 왔다. 현재까지 강우로 인한 사면의 활동에 대한 연구를 살펴보면 크게 두 분류로 구분해 볼 수 있을 것이다. 그 첫 번째가 강우로 인한 소성활동에 대한 연구(Crosta와 Prisco, 1999; Chen과 Lee, 2002) 이며 두 번째가 강체 파괴거동에 대한 연구(Crosta, 1998; Iverson, 2000; Cho와 Lee, 2002; Collins와 Znidarcic, 2004)이다.

소성활동의 경우는 토석류의 흐름을 의미하는 것으로서 강우가 사면의 흙과 혼합되면서 원래 흙의 조직이 연약화되는 과정에서 발생한다 할 수 있을 것이다. 일반적으로 불포화조건에서 흙은 음의 간극수압 상태이나 강우의 침투와 더불어 간극수압의 분포가 양의 방향으로 증가 할 것이다. 이때 지속적인 강우가 재현된다면 사면의 표층 상부층에서는 침투수로 인하여 완전히 포화된 조건을 구성될 수 있으며, 포화된 층을 따라서 사면의 방향으로 물의 흐름이 발생한다. 결국 흐름의 발생으로 인하여 침투력이 발생할 것이다. 사면의 경사방향으로 침투력이 발생하게 되면 간극사이에 위치한 세립분의 이탈(그림 1 참조) 및 사면 하단부에서의 퇴적이 예상되며 이러한 현상은 현장 및

1) 정회원, (주)동일기술공사 사원
† 정회원, 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 선임연구원(E-mail : rockcore@krri.re.kr)
2) 비회원, 한양대학교 토목환경공학과 교수

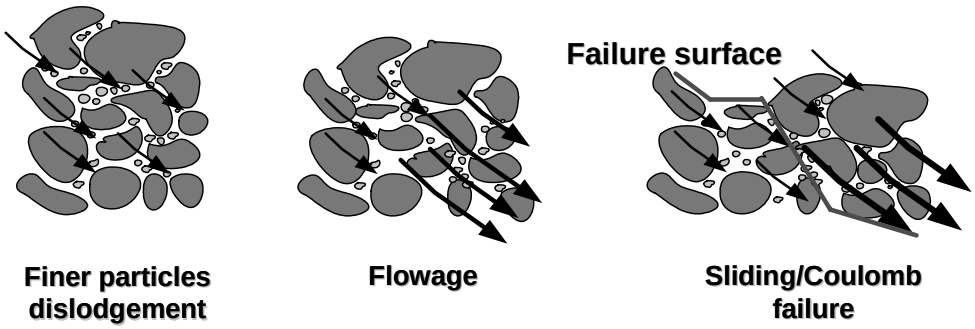


그림 1. 침투에 의한 침식모델(Crosta와 Prisco, 1999)

실험상에서도 관측이 되었다(사공명 등, 2005; 김민석 등, 2005; 사공명 등, 2006).

비록 각 입자간의 상호작용으로 인하여 흙의 골격이 유지된다 하더라도 원 상태의 흙의 조직에서 공극사이에 있는 세립분이 이탈하게 되면서 흙의 조직 상태가 변하게 되며 재료 자체는 연약화 과정을 거치면서 침식이 발생하게 된다. 이러한 현상을 모사하기 위하여 흙과 물의 혼합체를 비뉴턴 유체로 가정하여 해석하는 사례도 있다(Chen and Lee, 2002). 따라서 이러한 연구는 흙과 물의 혼합체를 소성체로 가정하여 해석한다. 다만 이러한 접근방법에 있어 한계는 소성상태로 변화하는 흙의 공학적 물성값에 대한 파악이 쉽지가 않다는 점이다. 따라서 얼마만큼의 강우가 흙과 결합된 경우 어떤 정도의 흐름을 보이는지에 대한 명확한 이론적인 모델이 정립되지 않았다.

이에 반해 강체거동을 가정으로 수행된 연구는 불포화토 이론을 접목하여 사면내 간극수압의 분포를 계산하고 그에 따라 사면의 활동을 강체거동으로 가정하여 사면을 해석하는 경우이다. 이와 같이 강체거동을 바탕으로 하는 해석은 기존 연구에서(이수형 등, 2005) 보고한바와 같이 해석상에서 발생하는 조건을 재현할 수 없는 단점이 있다. 예를 들면 해석상에서 예측되는 파괴심도 및 파괴면은 실제 현장에서 발생하는 조건과 일치하지 않는다는 점이다. 이러한 점은 앞서 소성거동에서 살펴본 바와 같이 흙과 강우의 혼합체가 단순 강체의 거동을 하지 않기 때문으로 판단된다. 그럼에도 불구하고 이러한 방법이 사용되는 이유는 강체의 거동으로 가정할 경우 해석이론과 계산과정이 단순하며 이러한 이론을 바탕으로 하는 상용화된 프로그램이 존재하므로 많은 경우 강체거동을 바탕으로 하는 해석 방법이 사용되고 있다.

따라서 본 연구에서는 기존의 강체거동을 바탕으로 하는 해석방법을 확대하여 현장에서 발생하는 천층활동을 가급적 재현할 수 있는 해석기법을 제시하고 관측된 강우자료를 기준으로 누적강우량과 강우강도에 따른 안전율을 산정하였다.

2. 강우자료 분석 및 생성

국내 철도연변 사면의 붕괴시 발생하는 강우량의 분석을 위하여 이미 사면파괴가 발생한 위치 및 시간을 조사하여 대상지역에서 가장 가까운 기상대와 관측소에서 강우자료를 입수하였고 입수한 강우자료를 분석하였다. 기상청으로부터 사면활동이 발생한 총 161곳에 대하여 사면파괴 발생 24시간 전부터 사면파괴 발생시점까지의 시간당 강우량 자료를 입수하여 분석하였다. 시간당 강우자료를 분석한 결과 사면활동이 발생하기 전 24시간 동안의 누적강우량은 150～500mm사이에 분포하고 있었고 강우지속시간은 3～24시간으로 나타났다. 그리고 대부분의 경우 사면파괴시점에서 강우량이 많은 것으로 나타났으나 일부 구간에서는 강우종료 10시간 후에 사면파괴가 발생한 경우도 있었다. 이러한 개소는 활동발생과 관측 시점이 상이한 것으로 판단하여 해석상에서 제외하였다. 또한 대체로 24시간 동안 균등한 강우분포를 나타내는 경우도 있었다. 그림 2는 사면파괴를 유발할 수 있는 누적강우량의 분포를 도시한 그래프인데 누적강우량의 분포는 200～300mm일 때가 약 51.3%로 가장 높은 것으로 나타났다.

이러한 실제 강우자료를 바탕으로 해석을 위한 강우 입력자료는 그림 3과 같이 누적강우량 200mm, 400mm, 600mm, 800mm를 바탕으로 12시간, 24시간, 36시간, 48시간 지속

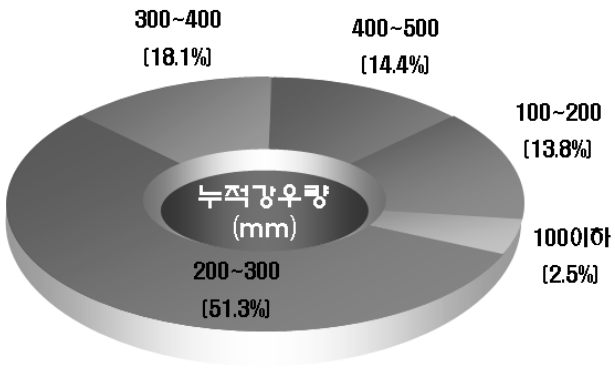
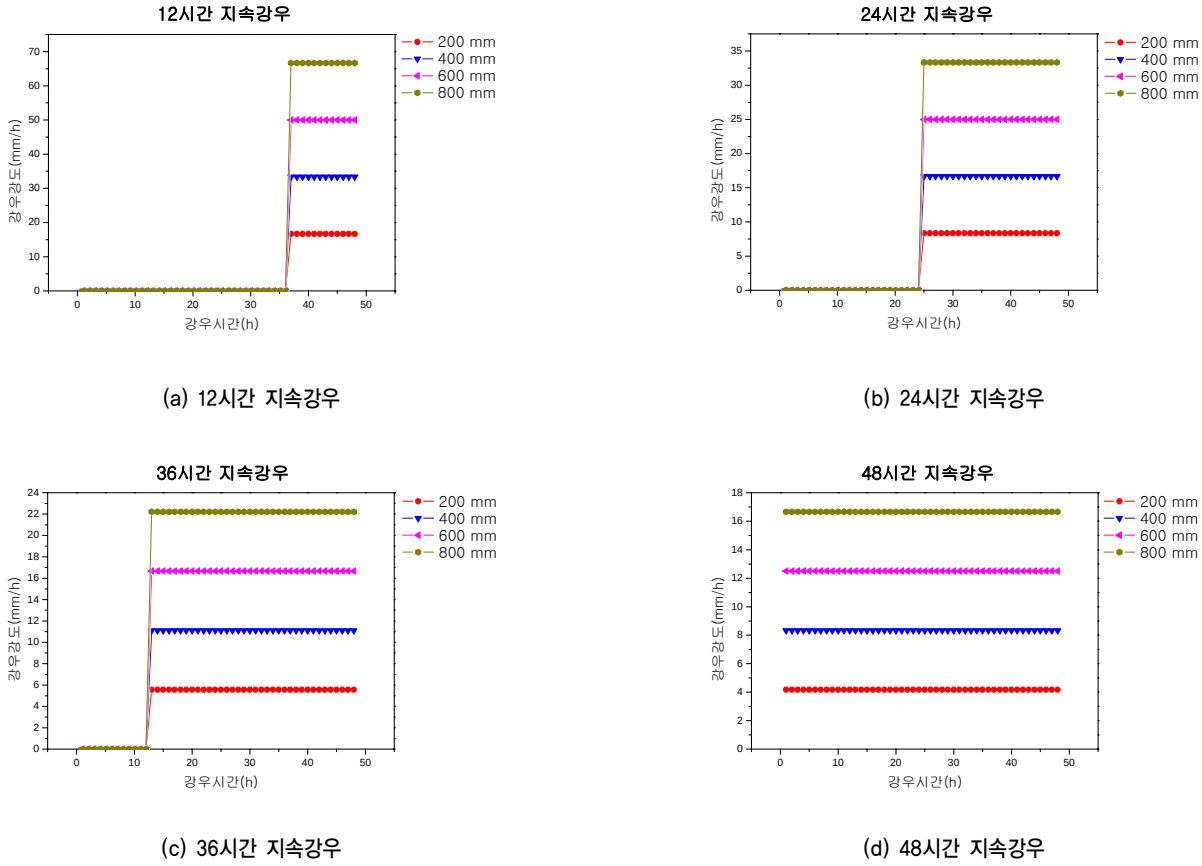


그림 2. 누적강우량 분포



(a) 12시간 지속강우

(b) 24시간 지속강우

(c) 36시간 지속강우

(d) 48시간 지속강우

그림 3. 해석을 위해 생성한 강우상황

강우로 가정하였다. 이러한 가정은 충분히 가능성이 있는 강우분포로서 2005년 9월에 발생한 태풍 나비에 의해 동해남부선 일부구간에서 선로매몰, 선로유실의 피해가 발생하였으며 이 때 울산지역에서는 600mm이상의 누적강우량을 기록되었다. 따라서 본 연구에서는 위에서 언급한바와 같이 4개의 누적강우량을 바탕으로 4개의 지속시간을 가정하였으므로 생성된 강우상황은 총 16가지 경우이다.

3. 수치해석을 통한 사면 해석

3.1 SEEP/W를 이용한 사면침투해석

본 연구에서는 침투해석과 사면의 강체거동에 대한 해석을 바탕으로 하므로 일반적으로 많이 사용하고 있는 SEEP/W와 SLOPE/W 프로그램을 사용하여 해석을 수행하고자 한다. 그림 4는 SEEP/W를 사용하여 침투해석을 수행하기 위해 생성한 무한사면조건의 유한요소망을 나타내고 있다. Rahardjo 등(1995)은 강우로 인한 사면파괴는 파괴면이 사면의 표면과 평행하고 상대적으로 얕은 층에서 발생한다고 주장하였다. 이러한 현상은 철도 연변사면에서도 관측

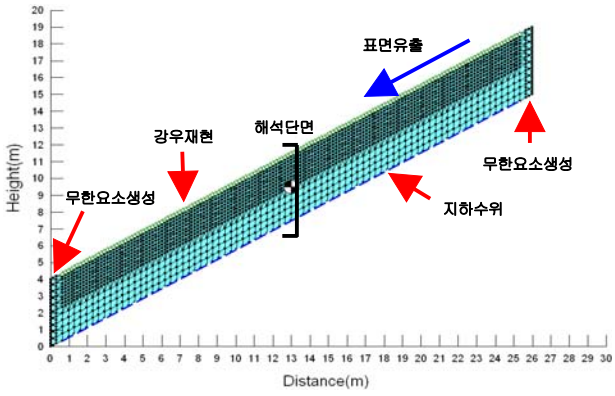
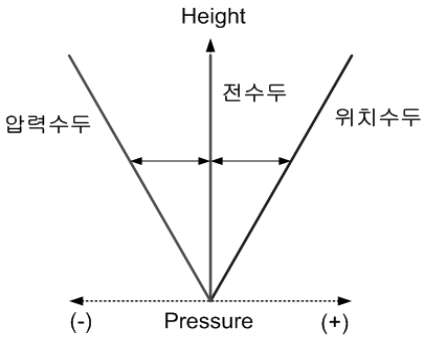


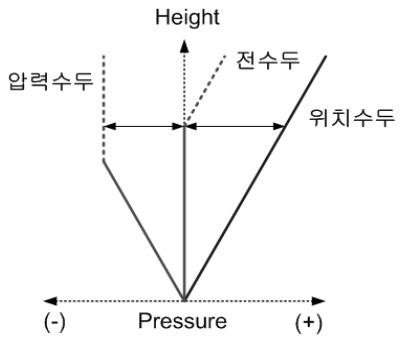
그림 4. 침투해석을 위한 유한요소망의 생성(경사각 30°)

되었다(사공명 등, 2005). 따라서 본 연구에서는 강우시 사면의 안정성을 평가하기 위해서는 무한사면을 해석 단면으로 하는 것이 적합하다고 판단하여 무한사면을 해석단면으로 하였다. 해석에 적용한 사면은 높이가 4m, 경사각이 30°, 45°, 60°이고 2174개의 Node와 2112개의 요소로 구성되어 있다. 요소는 정사각형을 주로 쓰되 필요에 따라 삼각형을 사용하였으며 강우의 영향이 가장 많은 상부면의 Mesh는 조밀하게 설정하였다.

본 연구에서는 사면의 높이를 4m로 가정하고 초기 간극



(a) 선형적으로 감소



(b) 표면에서 일정

그림 5. 초기 압력수두의 가정

수압분포는 사면의 깊이에 따라 선형적으로 감소하게 가정하여 해석을 수행하였다. 그 이유는 첫째, 사면의 높이가 4m이상인 경우 초기 선형적으로 감소하는 간극수압의 가정(그림 5(a))으로 인해 지표면에서의 부의 간극수압이 과도하게 평가되어 과도한 안전율이 도출되기 때문이다. 둘째, 초기 간극수압분포를 깊이에 따라 일정하게 가정할 경우(그림 5(b)) 표면에 재현한 경계조건과 관계없이 사면 내에서 위치수두와 압력수두의 차가 발생(전수두 발생)되어 침투가 발생하기 때문이다.

해석을 수행하기 위해 다양한 경계조건을 설정하였는데 앞서 생성한 강우상황을 표면에 설정하여 강우를 재현하였으며 좌, 우측은 무한요소를 생성하여 무한사면을 재현하였다. 그리고 지하수위는 사면의 하부에 위치하는 것으로 설정하였으며 흙의 포화투수계수 보다 큰 강우량은 표면에서 유출하도록 설정하였다. 앞서 생성한 강우정보를 바탕으로 시간에 따른 간극수압의 변화를 살펴보고자 Transient 해석을 수행하였다.

해석에 사용된 시료는 국내에 분포된 사면을 구성하고 있는 재료 중 그 비율이 가장 높은 화강풍화토를 대상으로 하였다. 강우로 인한 사면의 침투특성을 규명하기 위해서는 흙의 불포화 특성인 압력에 따른 체적함수비의 변화와 압력에 따른 투수계수의 변화를 규명해야 한다. 따라서 본 연구에서는 김윤기(2003)의 실험결과를 토대로 화강풍화토의 불포화 특성을 규명하여 그림 6과 그림 7에 나타낸 함수특성곡선과 투수계수함수곡선을 사용하였다.

이상의 입력변수를 바탕으로 수행한 침투해석의 결과는 그림 8과 9에 나타내었다. 그림 8과 9는 강우지속시간이 24시간과 48시간인 경우 사면내 간극수압의 분포를 나타낸 것으로 강우지속시간이 12시간과 36시간인 경우는 지면상의 제약으로 인하여 생략하였다. 전반적으로 강우로 인하여 사면내 간극수압의 분포는 부의 간극수압조건에서 정의 간극수압 방향으로 증가하며 동일한 강우지속시간 동안 강우강도가 클수록(누적강우량이 많을수록) 깊은 심

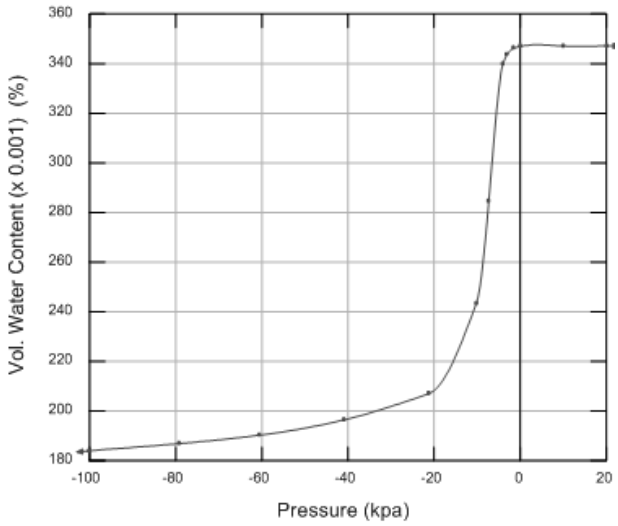


그림 6. 함수특성곡선(화강풍화토)

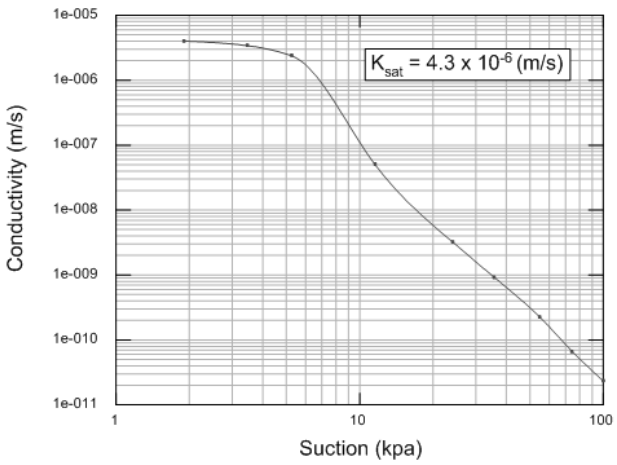
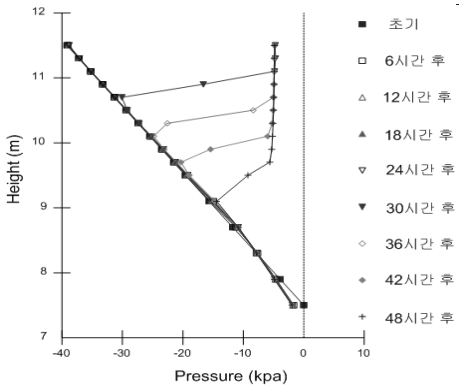
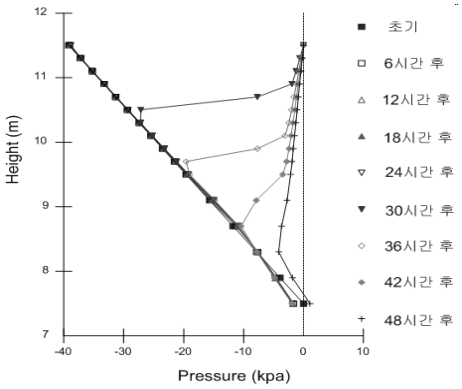


그림 7. 투수계수함수 곡선(화강풍화토)

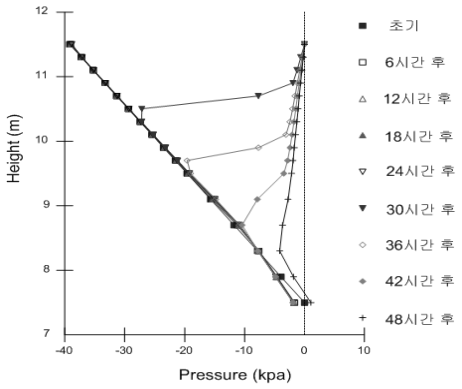
도까지 침투가 발생하여 간극수압의 분포가 변하는 것을 알 수 있다. 또한 간극수압의 변화를 통하여 강우강도가 포화투수계수보다 작을 경우에는 사면의 표면이 완전 포화되지 않음을 알 수 있으며, 강우강도가 포화투수계수보다 클 경우에는 사면의 표면이 완전 포화되고 그 이상의 유량은 유출됨을 알 수 있다. 마지막으로, 충분한 강우지



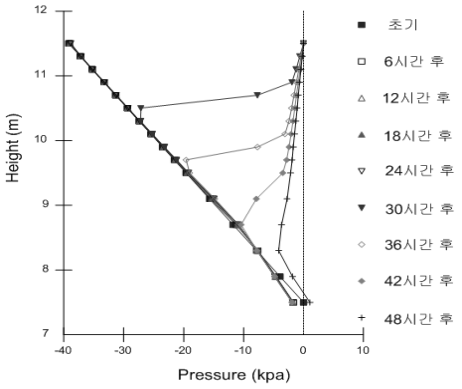
(a) 누적강우량: 200mm, 강우강도: 8.33mm/h



(b) 누적강우량: 400mm, 강우강도: 16.67mm/h

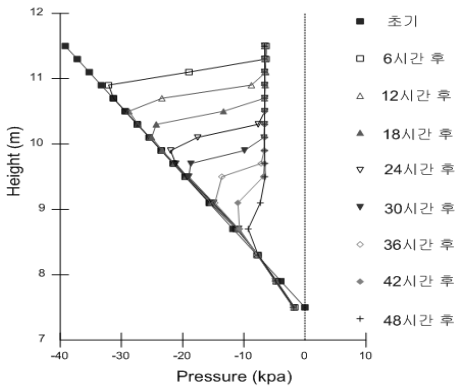


(c) 누적강우량: 600mm, 강우강도: 25mm/h

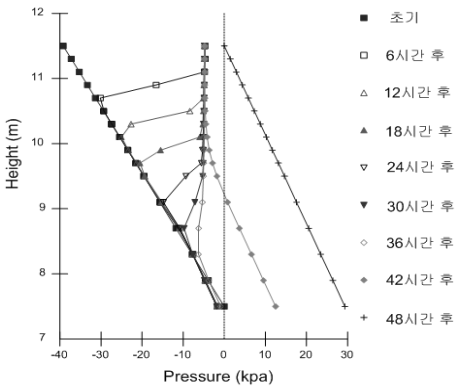


(d) 누적강우량: 800mm, 강우강도: 33.33mm/h

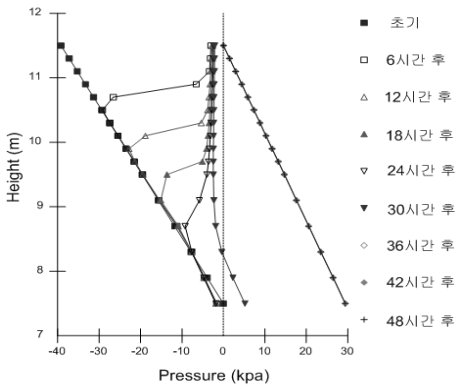
그림 8. 시간에 따른 간극수압 변화(24시간 지속강우)



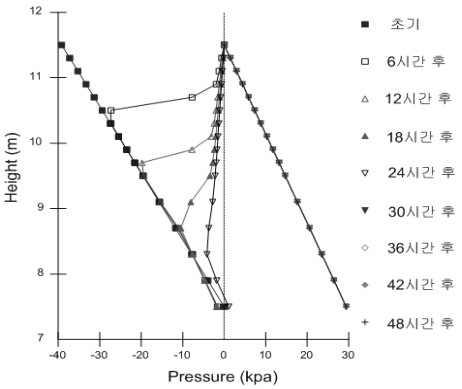
(a) 누적강우량: 200mm, 강우강도: 4.16mm/h



(b) 누적강우량: 400mm, 강우강도: 8.33mm/h



(c) 누적강우량: 600mm, 강우강도: 12.5mm/h



(d) 누적강우량: 800mm, 강우강도: 16.67mm/h

그림 9. 시간에 따른 간극수압 변화(48시간 지속강우)

속기간, 강우강도, 누적강우량 조건에서 사면이 완전 포화됨을 알 수 있었다.

3.2 SLOPE/W를 이용한 사면안정해석

본 연구에서는 무한사면을 해석단면으로 무한사면파괴를 재현하여 사면의 안정성을 평가하고자 하였다. SLOPE/W 해석 프로그램을 이용하여 무한사면 조건으로 가정하여 해석 할 경우 가장 중요한 요소는 파괴면의 가정이다. 실제로 발생하는 해석 사면의 파괴심도를 사전에 알 수 없는 관계로 정확한 파괴심도의 예측은 불가능 한 상황이다. 비록 Collins와 Znidarcic(2004)가 1차원 침투해석결과와 무한사면에서의 한계평형방정식을 사용하여 강우시 사면의 파괴심도를 예측하는 방법을 제안하기는 하였으나 현장에서 관측된바와 같이 사면의 활동은 침식의 진행에 의해서 진행성 파괴의 양상을 띠고 있으며 사면의 3차원 형상과도 밀접한 관계가 있다. 따라서 이상의 현상들을 충분히 고려할 수 있는 해석 방법이 제안되지 않은 상황에서 설계에서 상용으로 자주 사용하고 있는 SLOPE/W를 바탕으로 다중의 예상 활동면을 가정하여 각 면에서의 안전율을 도출하여 최소 안전율이 발생하는 위치를 예상 활동면으로 가정하는 방법을 적용하였다. 특히 본 연구에서는 현장에서 관측된 강우로 인한 사면활동 특성을 반영하여 무한사면조건에서 사면의 활동파괴면을 가정하였다. 따라서 본 연구에서 적용하는 사면의 심도가 4m임을 고려하여 표면에서 2m깊이까지 16.7cm 간격으로 11개의 파괴심도를 가정하여 안전율을 도출한 후 그 최소값을 안전율로 사용하였다. 안전율의 변화는 가정한 파괴면의 심도에 따라 차이가 발생하긴 하나 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보였으며 11개의 파괴심도를 바탕으로 수행한 해석 결과중에서 최소값을 사용하여 해당 단면의 안전율을 산정하였다. 한계 활동심도 2m의 설정은 주어진 입력변수를 기준으로 여러 심도에 대해서 해석을 수행한 결과 최대 파괴면 심도를 2m로 적용하였을 경우에 여러 파괴면의 해석안전율이 수렴하는 거동을 보이는 것으로 관측되었다. 비록 활동심도가 더 깊어지더라도 안전율의 변화는 미미한 것으로 관측되었다.

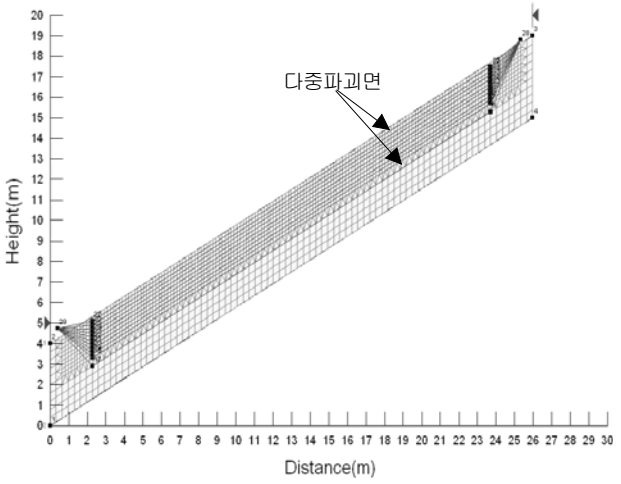


그림 10. 사면안정해석을 위한 해석단면

해석에 사용된 시료는 국내에 분포된 사면을 구성하고 있는 재료 중 그 비율이 가장 큰 화강 풍화토를 대상으로 하였으며 표 1에서 나타낸 3가지 강도정수를 적용하였다.

그림 10은 SLOPE/W를 이용하여 사면의 안정성을 평가하기 위해 구성한 해석단면을 나타내고 있다. 해석방법은 OMS(Ordinary Method of Slice), Bishop, Janbu의 방법을 적용하였으며 SEEP/W에서 계산한 침투결과와 연계해석을 실시하였다. 안전율은 적용한 해석방법의 평균값으로 도출하였다. 침투해석과 사면안정해석의 연계해석방법은 SEEP/W를 이용한 침투해석결과로 도출된 각 절점의 전수두를 SLOPE/W에 적용하는 것이다. 결국 강우특성을 고려한 침투해석 결과가 사면안정해석시 반영되기 때문에 지하수위의 위치나 변화를 가정하지 않고 침투를 고려한 사면안정해석이 가능하게 되는 것이다.

3.3 강우침투에 의한 사면의 안전율 변화

표 1에서 제시한 화강풍화토의 3가지 강도정수를 사용하여 본 연구에서 제시한 사면안정성해석기법을 수행한 결과를 바탕으로 누적강우량, 강우지속시간, 안전율을 축으로 하는 3차원 공간상에 안전율 변화 추이를 도시하였다(그림 11-13). 안전율 1.3을 기준으로 사면이 안정한 영역과 불안정한 영역으로 구분하였다. 해석결과를 살펴보면 사면의 경사각이 급하고 누적강우량이 증가할수록 안전율은 감소하는 경향을 보임을 알 수 있다. 하지만 누적강우량이 일정한 조건에서 지속시간이 길어질수록 즉 강우강도가 감소할수록 안전율은 감소하는 경향을 알 수 있

표 1. 화강풍화토의 강도정수(한국철도기술연구원, 1999)

구 분		단위중량(kN/m^3)	점착력(kPa)	내부마찰각(°)
화강풍화토	서울시(1996)	16.68	0	25
	설계사례 평균값	18.64	9.8	33
	가평지역	17.85	24.0	37.5

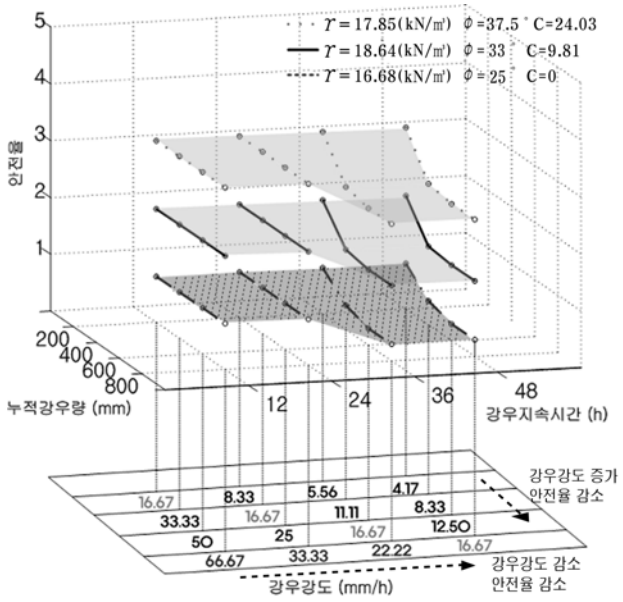


그림 11. 강우로 인한 안전율 변화(30°)

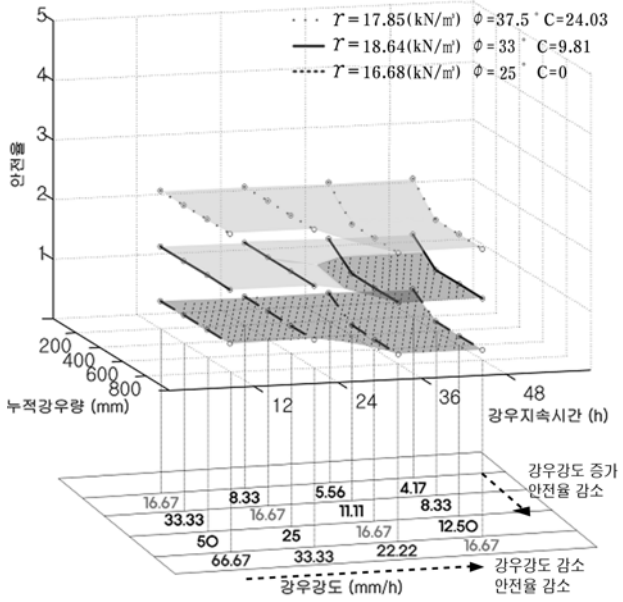


그림 12. 강우로 인한 안전율 변화(45°)

었다. 흙의 침투능력은 투수계수와 상관성이 있는데 침투해석 당시 투수계수 이상의 강우강도 작용시 표면유출이 되도록 설정하였다. 따라서 비록 고 강도의 강우강도가 작용하는 상황이라도 단기간에 내릴 경우 사면의 안전율에 큰 영향을 끼치지 못함을 알 수 있다. 오히려 저강도 조건으로 장기간 연속적으로 강우가 내린 경우가 더욱 사면의 불안정을 초래할 가능성이 높은 조건임을 알 수 있다. 따라서 강우시 사면의 안정성을 평가하기 위해서는 강우강도, 강우지속시간, 누적강우량을 동시에 고려해야함을 알 수 있다.

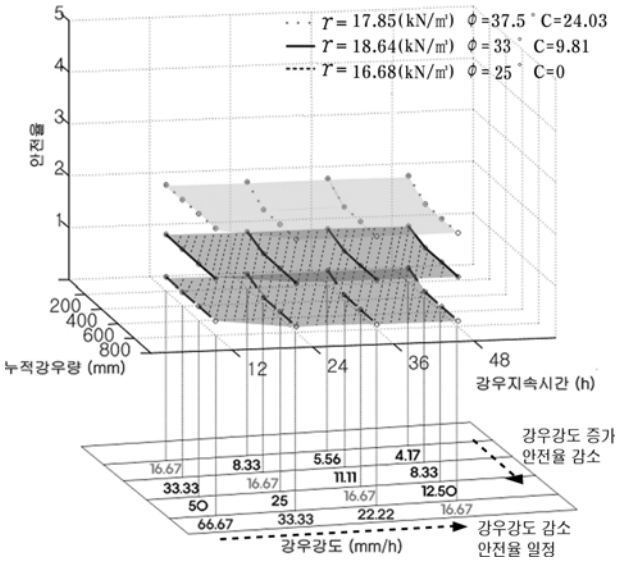


그림 13. 강우로 인한 안전율 변화(60°)

4. 결 론

본 연구에서 기존 철도 사면 붕괴시 발생한 강우량 정보를 분석하여 분석된 정보를 바탕으로 강우시 사면의 침투해석을 통한 안정성 해석의 결과와 기존 설계기준과의 비교를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 철도 연변 사면의 활동은 대략 24시간동안 누적강우량이 150～500mm 사이인 경우이며 강우 지속시간은 3～24시간 이내인 것으로 관측되었다.

(2) 본 연구에서는 침투해석과 강체해석의 이 단계 해석을 통하여 사면의 안전율을 도출하는 방법을 제안하고 있다. 실제 현장에서 발생하는 사면의 파괴형태를 고려하여 무한사면 조건을 바탕으로 해석을 수행하였으며 토피고의 두께를 해석에 최소 영향이 미치는 조건으로 설정하였다. 토피고의 두께는 결국 사면의 지표면에서 작용하는 부의 간극수압의 크기와 관계가 있으므로 적절한 토피고의 설정이 필요하다. 적절한 토피고란 강우시 침투를 고려한 사면의 안정성 해석시 지반의 불포화 특성을 현실적으로 잘 반영할 수 있는 깊이로서, 본 논문에서는 토피고를 4m로 가정하여 해석하였으며 초기 지표면에 작용하는 압력이 -40kpa로 작용하고 있다.

(3) 해석의 결과를 누적강우량, 강우지속시간, 안전율을 축으로 하는 3차원 공간상에 안전율 변화를 도시한 결과 사면의 경사각 급할수록 강우지속시간이 길어질수록 누적강우량이 증가할수록 안전율은 감소하는 경향을 보였다. 하지만 강우강도가 증가함에 따라 하였지만 안전율은 일정하거나 증가 혹은 감소하는 영역도 존재

하였다. 이는 결국 강우시 사면의 안정성을 평가하기 위해서는 강우강도, 강우지속시간, 누적강우량을 동시에 고려해야함을 알 수 있다.

이상의 결론은 강우로 인한 사면의 활동에 대한 해석의 결론으로서 강우로 인한 천층파괴 조건에서 적용이 가능하다. 강우에 따른 침식 및 소성체의 거동에 대한 고려와 점진적인 파괴 양상에 대한 고려는 하지 않았다. 본 연구에서 제안하는 방법의 적용에 있어 각 경우별 최적의 한계활동심도에 대한 사전 검토를 바탕으로 해석이 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 자체연구사업인 “선로구축물 성능향상 연구”의 연구비 지원에 의해 수행된 연구로서 저자는 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김민석, 사공명, 김수삼(2005), 강우로 인한 철도 연변사면의 파괴특성: 현장사례 및 실내실험, *한국지반환경공학회 2005 학술발표회 논문집*, pp. 151～157.
2. 김윤기(2003), *투수시험결과 해석에 의한 불포화 풍화토의 투수성에 관한 연구*, 한국과학기술원 석사학위 논문, pp. 95～96.
3. 사공명, 황선근, 이수형, 김현기, 김민석(2005), 강우로 인한 철도연변 사면의 활동특성 분석: 현장사례 중심, *한국지반공학회 논문집*, Vol. 21, No. 5, pp. 7～13.
4. 사공명, 김민석, 김수삼, 이인용(2006), 강우로 인한 철도 연변 사면의 활동특성: 실내모형실험, *한국지반공학회 논문집*, Vol. 22, No. 5, pp. 83～91.
5. 서울시(1996), *지반조사편람*, pp. 10, 종합문화출판사.
6. 이수형, 황선근, 사공명, 김현기(2005), 철도연변 절취 토사사면에 대한 강우에 의한 침투를 고려한 사면안정해석법의 적용성 평가, *한국지반공학회 논문집*, Vol. 21, No. 6, pp. 137～146.
7. 한국철도기술연구원(1999), *철도시설의 안정성 강화기술 개발*, pp. 51, 성균사.
8. Collins, B. D. and Znidarcic, D.(2004), Stability Analysis of Rainfall Induced Landslides, *Journal of Geotechnical and Geoenvironment Eng*., Vol. 130, No. 4, pp. 362～372.
9. Chen, H. and Lee, C. F.(2002), Runout Analysis of Slurry Flows with Bingham Model, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 128, No. 12, pp. 1032～1041.
10. Cho, S. E. and Lee, S. R.(2002), Evaluation of Surficial Stability for Homogeneous Slopes Considering Rainfall Characteristics, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 128, No. 9, pp. 756～763.
11. Crosta, G. (1998), Regionalization of Rainfall Thresholds: an Aid to Landslide Hazard Evaluation, Environmental Geology, Vol. 35, No. 2-3, pp. 131～145.
12. Crosta, G. and Prisco, di, C. (1999), On Slope Instability Induced by Seepage Erosion, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol 36, pp. 1056～1073.
13. Iverson, R. M.(2000), Landslide Triggering by Rain Infiltration, Water Resource Research, Vol. 36, No. 7, pp. 1897～1910.
14. Rajardjo, H., Lim, T. T., Chang, M. F., and Fredlund, D. G(1995), Shear Strength Characteristics of a Residual Soil, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 32, pp. 60～77.

(접수일: 2006. 12. 14 심사일: 2006. 12. 18 심사완료일: 2007. 3. 6)