

침투수를 고려한 사면 안정성 평가 방법

백 응^{*1}, 구호본^{*2}, 배규진^{*3}

1. 서언

매년 강우기에 반복되어 발생하는 사면 붕괴로 인한 지반공학 전문가의 관심은 날로 증대되고 있는 실정이다. 본 기사는 일본에서 개발된 우수 침투를 고려한 사면 안정성 평가법에 대한 기사를 정리한 것이다. 지난 2002년 집중호우로 인한 사면 붕괴 분석 결과에 의하면 대부분이 표층유실 및 쇄굴작용으로 피해가 발생하였다. 붕괴 규모면에서 살펴보면 대규모 붕괴보다는 소규모의 붕괴가 많았고 발생원인도 집중호우에 의한 붕괴가 대부분인 것으로 보면 침투수 및 우수에 관한 연구는 앞으로 지속적으로 연구해 나아가야 할 것으로 사료된다.

본고에서는 침투수를 고려한 사면의 정량적 안정성 평가방법에 대하여 기술한다. 사면의 안정성 저하는 주로 빗물의 침투에 의해 발생하는 현상이므로 안정성 평가시 빗물의 침투거동을 이해하는 것이 필요하다. 그러나 취급대상이 자연물이며 사면의 초기 침투범위의 불명확성, 사면 구성재료인 토질의 불균질성, 식생영향 등의 토질특성을 가진 경우, 사면안정 해석결과에 큰 영향을 미치는 다양한 변수를 고려하여 안정성 해석은 이루어져야 한다.

본고에 기술한 안정성 평가 시험방법은 아직 초기 연구단계이며 결과의 정밀도 검증 작업에 대하여 아직 연구단계에 있으므로 평가결과는 신중이 취급할

필요가 있다.

먼저 침투수를 고려한 사면 안정성 해석의 평가 흐름은 그림 1과 같다. 기본적으로 다음의 3단계 순서에 따라 안정성을 평가한다.

① 현장 상황 모델링

측량 및 원위치 시험 등의 현장조사 결과, 채취한 시료를 이용한 실내토질시험결과, 현장에서 측정된 토양수분 특성 등의 모니터링 결과를 이용하여, 해석 변수를 결정하고, 침투수 해석을 행한다. 목적은 현장사면 침투현상을 재현할 수 있는 해석모델을 구축하는 것이다. 결국 현장과 동일한 강우상황(우량계 자료)을 모델화 할 때 현장과 동일한 침투현상(토양 수분계 자료)이 발생할 수 있도록 해석모델을 구축한다.

② 현장사면의 안정성 평가

측량 및 원위치 시험 등의 현장 조사결과 및 실내 토질시험 결과 등을 이용, 해석 변수를 결정, 안정해석(원호파괴 해석)을 행한다. 강우의 침투로부터, 사면토양(풍화토)의 포화도 상승, 흙의 중량 증가, 점착력, 내부마찰각 저하가 발생하는 점에서, 포화도가 어느 정도 되면 붕괴가 발생하는가를 결정한다. 이 해석에는 포화도의 상승으로부터 안정성 저하를 구하는 것이 목적이므로, 단순한 모델을 이용하고, 포화도, 붕괴심도 등의 변수에 의한 해석 결과의 특성을 파악한다.

③ 붕괴 위험성 강우 평가

①의 모델에 가정된 강우 조건을 설정하고, ②의 붕괴 조건에 적합한가 여부를 평가한다. 가상 강우

*1 정희원, 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원

*2 정희원, 한국건설기술연구원 토목연구부 수석연구원

*3 정희원, 한국건설기술연구원 토목연구부 연구위원

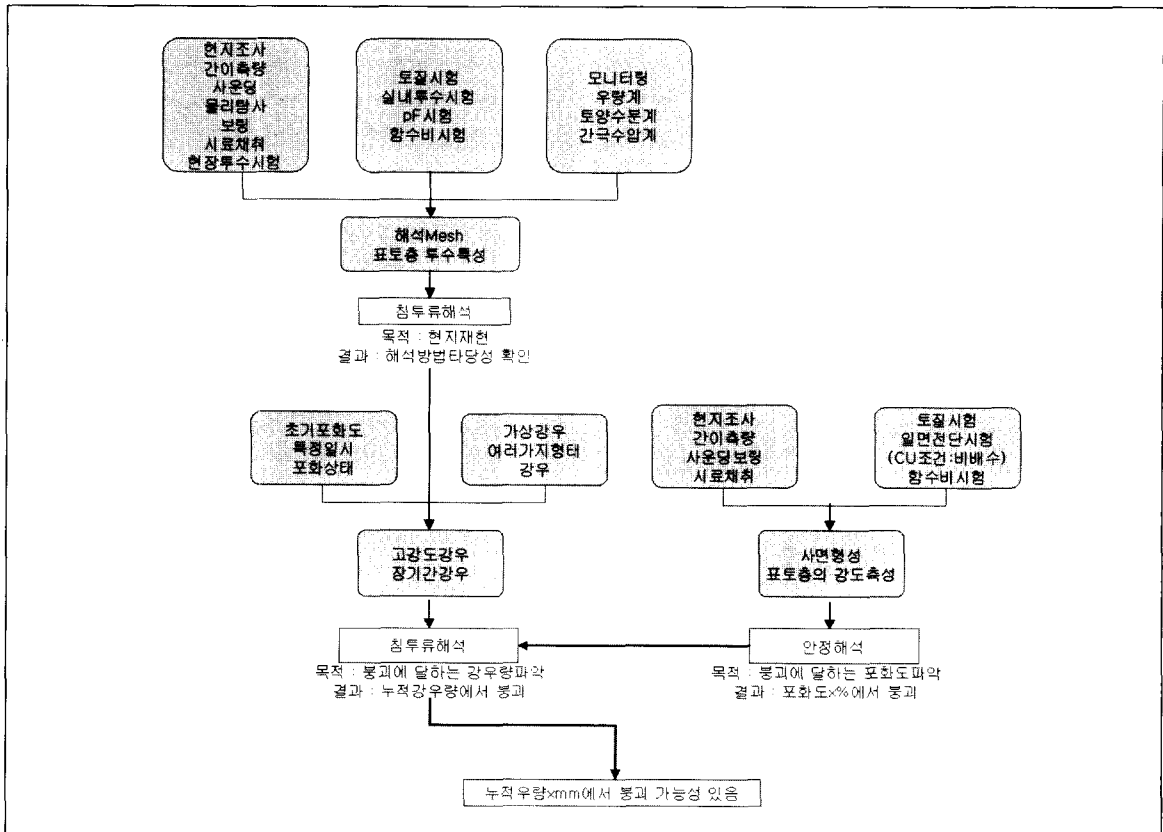


그림 1. 침투수 안정해석에 의한 사면 안정성 평가 체계

는, 우량강도 1~50mm정도 연속우량, 선행강우를 설정 장마철 자료, 임의 계측 우량자료 등을 이용한다. 붕괴 발생 위험성이 있는 강우량이 누적우량, 선행강우가 어느 정도 일 때 붕괴 발생에 영향을 주는가 등에 대하여 평가할 수가 있다.

2. 침투수 해석

침투수 해석은 강우에 의하여 사면에 어느 정도 침투현상이 발생하는가를 추측하기 위한 목적으로 실시한다. 기본적으로 현장조사, 토질시험, 모니터링 등으로 얻은, 사면형상, 풍화심도, 침투계수, 초기포화도, 수분특성곡선, 비투수계수, 강우상황 등을 해

석프로그램에 입력하고, 지반내의 각 포인트에 따른 수분량 증감을 구한다. 해석 목적은 현장상황을 재현하는 해석모델의 구축에 있으므로, 해석결과는 모니터링결과와 조합하여, 현장의 상황을 충분히 재현가능한가를 확인하는 것이 중요하다.

다음으로 침투수 해석에 필요한 입력변수에 대하여 살펴보면 다음과 같다.

1) 사면형상, 풍화심도

현장조사에서 실시한 간이측량결과와 사운딩 결과를 이용하여 입력한다. 사면형상은 표면적 사면의 기복형상이며, 간이측량결과를 이용하여 단면화 한다. 간이측량은 클리노미터, 줄자 등을 이용한 간단한 측량이며, 사면의 경사도, 연장, 축선의 경사도, 기복

을 측정하는 것이다.

풍화심도는 사면에 퇴적한 풍화토의 두께, 각종 사운딩, 물리탐사결과를 이용하여 단면화 한다. 기본적으로 풍화심도는 土研式 간이관입시험결과를 중심으로 검토장(간이토층검사장비), 각종 물리탐사방법(고밀도전기탐사방법, 전자파반사법)을 병행하여 구한다.

전술한 것과 같이 단면화된 사면형상, 풍화심도도는 침투수 해석프로그램에 해석 메쉬(mesh)로 입력된다(그림 2). 통상, 사면의 침투수 해석은 해석 대상이 크고, 연직방향으로 침투상황을 자세하게 파악해야 할 필요성이 있으므로, 해석 메쉬를 세분화하게 되고 요소수는 매우 많게 된다. 해석 메쉬는 계산시간과 연계되므로, 해석정밀도가 요구되는 표층 메쉬는 세분화하여야 하고, 해석정밀도가 다소 떨어지는 심층부의 메쉬 간격은 넓게, 효율성을 높이는 것이 중요하다.

2)투수계수

표토층 투수계수는 실내시험에 의하여 구하는 방법과 원위치시험에 의하여 구하는 방법이 있다. 혹은 중력이나 퇴적 과정에 의하여 형성되어, 투수계수가 연직방향과 수평방향의 차이가 발생하기도 하고, 토질에 따라 10배 이상의 차이가 나는 경우도 있다. 사면을 대상으로 침투수 해석을 행할 경우, 강우에 기인하는 연직침투 재현이 중요하기 때문에, 연직방향의 투수계수 중요성이 높다고 할 수 있다. 이를 위해, 실내투수시험을 실시하여 투수계수를 측정하던

지, 표층의 투수계수를 측정하는 것이 좋다.

단 보링공을 이용하여 행한 투수시험은, 주로 수평방향 투수계수를 측정하는 것이므로, 전술한 것과 같이 연직방향의 투수계수를 구한 후, 보충적으로 취하는 정도가 좋다.

한편, 기저층의 투수계수는, 기본적으로 불투수층에 해당되어야 하나 완전히 불투수가 되면 사면 끝부분에 침투수가 집중되고, 사면 끝부분이 완전히 포화하는 거동을 보이는 경우가 많다. 이것을 위해 모니터링 결과와 조합하여 부자연스럽지 않은 결과가 나오도록 기반암층에는 약간의 투수계수를 조절해 주는 것이 좋다. 실제에 주어지는 투수계수는 $k=10^{-5}$ cm/sec 정도이다.

3)초기포화도

초기포화도 해석시에는 수분분포 초기 조건으로 각 요소에 따라 포화도를 설정하는 것이 가능하다. 그러나, 실제 포화도를 각 요소당 자연스럽게 설정하는 것이 어렵기 때문에 구축한 사면모델에 적합한 수위조건을 가정하고, 정상 침투수 해석을 행하며 자연적 포화도 분포를 해석하고 초기 포화도로 설정하는 경우가 많다.

사면해석시 현장조사에 의하여 사면 끝부분 수위를 파악해 두고, 입력시 참고하는 것이 좋다. 구체적으로 살펴보면 하천일 경우 하천수의 높이를 통상 수위로 한다. 또, 사면 중간부분에서도 상시 용수 등을 볼 수 있는 개소는 해당부분을 수위로 한다.

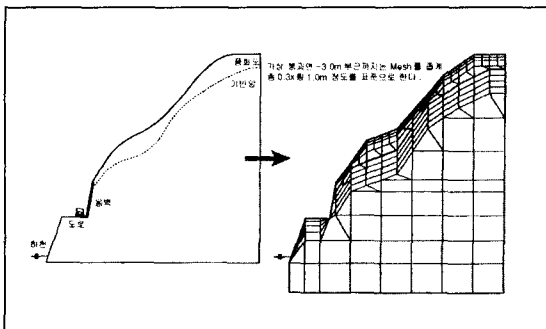


그림 2. 사면형태, 풍화심도를 기본으로 한 해석 Mesh작성

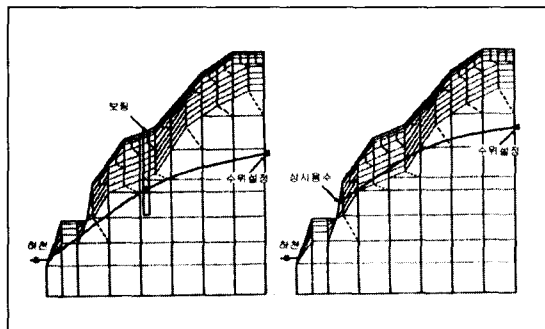


그림 3. 수위 설정법

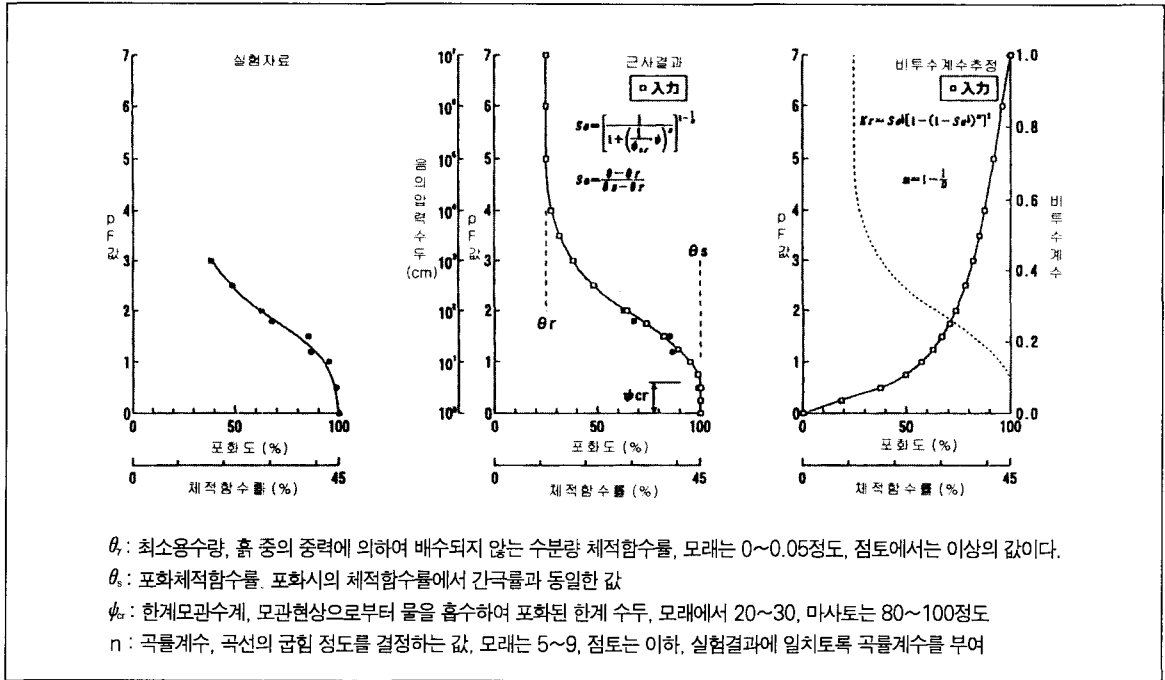


그림 4. 수분특성곡선 입력법

한편, 산지의 수위 위치는 파악하는 것이 매우 어려우며, 상당한 심도까지 보링을 실시하여도 수위가 관측되기 어려운 경우가 많다. 수위가 발견된 경우 그 높이를 참고하고, 발견되지 않을 경우는 법면의 수위위치와 자연스럽게 수위를 설정하고 정상 침투수 해석을 행하고, 초기 포화도를 결정하는 것이 좋다(그림 3).

4) 수분특성곡선(pF곡선), 비침투계수

수분특성곡선(pF곡선)은, 흙의 포화도와 흡입력(수분의 흡입력)의 변화를 그래프로 표시한 것으로써 횡축은 포화도(0~100%), 종축은 흡입력(pF 0~7, $pF = \log_{10}(\phi)$, $\phi = 0 \sim 1,000,000 \text{ cm H}_2\text{O}$)를 가진, S자 커브를 가진 곡선이다.

통상, 수분특성곡선은 현장에서 블록 샘플된 불교란시료를 대상으로 4~10점의 pF시험을 실시하고, 그래프상에 점을 plot하고 구한다.

대부분 경우, 해석프로그램은 bi-linear model(굴

절된 그래프상의 다수의 선형 자료로부터 얻은 관계 모델)에 의한 $S_r - \phi$ (포화도-흡입력)의 관계에서 구하던가, 실험자료를 그대로 입력하지 않고, Van-Genuchten 모델(수분특성곡선의 근사모델)을 이용하여 부드러운 곡선에 근사한 자료를 입력하는 것이 좋다. 이때, 고정밀도 근사를 행하기 위하여 해석에서 큰 의미를 가지고 있는 pF값의 부분(pF 0.0~2.0 부근)에서 많은 시험을 실시 정밀도가 높은 자료를 얻는 것이 중요하다.

한편, 비투수계수는 흙이 포화상태에 있을 때의 투수계수를 1로 한 상태에서 각 포화도에서 투수계수 크기 비율을 0~1로 표시한다. 비투수계수는 종래, 실제 흡시료를 각 포화도 상태로 조정하고, 불포화투수시험으로 구하였지만, 시험시 많은 시간이 소요되며 일반적으로 잘 알려지지 않았으므로, 실제에는 Van-Genuchten 모델을 이용하여 산정한 비투수계수를 이용하는 것이 좋다.

이상의 항목을 정리한 것으로 그림 4에 표시하였다.

5) 강우상황

해석프로그램에 부여하는 강우상황은 시간-강우 강도의 형태이고, 조사지역에 설치한 우량계 자료를 이용하여 입력한다. 현장 부근에 기상관측소가 있고 우량자료를 얻을 수 있는 환경일 경우에는 이것을 이용하는 것이 좋다.

강우자료 입력시에는 시간-강우강도를 그대로 입력하지 않고, 강우량이 같은 양이 되도록 간략화하여 입력하는 것이 좋다(그림 5). 이것은 해석시의 안정성을 증가하는 효과와 입력작업이 간편화 되는 의미가 있다.

3. 사면 안정 해석

강우에 의하여 표토층에 수분이 포화됨에 따라 흙의 중량 증가, 전단응력의 저하가 발생하고, 극한상황에 도달하여 붕괴가 발생한다. 사면안정해석은 붕괴가 발생하는 극한상태, 표토층의 포화도를 구하기 위하여 실시한다.

기본적으로 현장에서 얻은 사면 경사각, 풍화심도, 포화도 변화에 따른 흙의 중량, 점착력, 내부마찰각 변화 관계 등을 해석프로그램에 입력하고, 각 상태에서 안정성을 평가하는 것을 목적으로 한다.

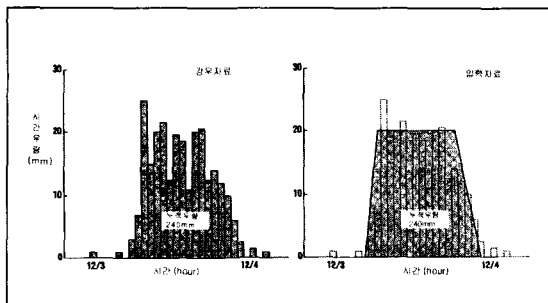


그림 5. 강우상황 입력법

3.1 사면경사각, 풍화심도

현장조사에서 실시한 사면측량결과로부터 구한다. 기본적으로 안전측에서 계산을 행하기 위하여, 가장 경사가 급한 부분이나 풍화층 두께가 두꺼운 부분 등, 안전율이 낮다고 생각되는 부분을 모델화하고 안전성계산을 행한다. 단, 노출암 등 노출부분이 거의 수직인 구간 등은 제외하는 것이 좋다. 이것은 토사 붕괴를 대상으로 하지 않기 위한 것이다.

안정계산모델은 그림 6과 같다. 그림에서 보듯이 매우 단순한 모델에서 계산하는 것이 좋다. 이때 실제의 측량결과를 직접이용하지 않고, 단순한 모델을 이용하는 이유는, 자연사면은 불균일성이 매우 높고, 정밀하게 사면형상을 입력하여도 안전율 변화가 크지 않으며, 연차붕괴*가 발생하는 경우는 계산과 같이 안전율이 다른 점, 각 포화도별 계산을 실시하기 위하여 계산비용을 최소화 할 수 있기 때문이다.

3.2 포화도변화에 따른 흙의 중량, 점착력, 내부마찰각 변화 관계

흙재료는 흙입자와 간극으로 크게 구분되고, 간극에는 물과 공기가 있는 비율로써 구분된다. 물이 간극을 완전히 채운 상태를 포화상태라 부르고 이외의 상태를 불포화상태라 부른다.

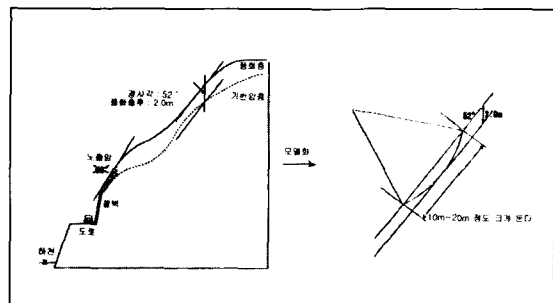


그림 6. 안정해석 모델화 구축

*연차붕괴 : 사면 끝부분 일부에 작은 붕괴가 발생, 상부의 토체가 연속적으로 붕괴하는 것과 같이 연속성의 붕괴를 말함. 사면 전체를 대상으로 큰 모델을 구축한 안정해석의 경우, 소규모 붕괴는 계산되지 않는 경우가 많다.

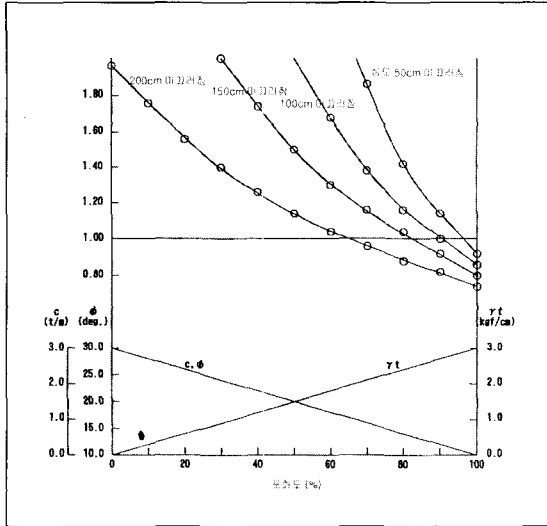


그림 7. 안정해석 결과 정리법

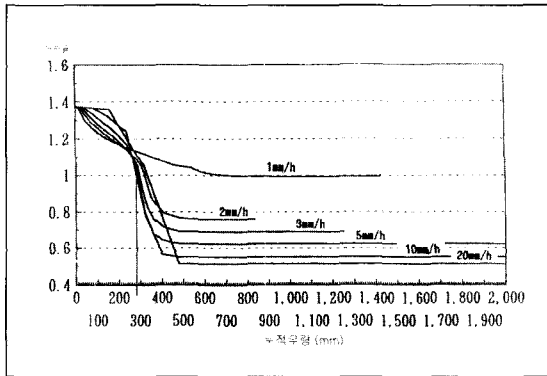


그림 8. 누적우량과 안전율 변화

흙의 중량은 간극을 점하고 있는 물의 비율 증가에 따라 증가한다. 또 흙의 강도는 간극이 점하고 있는 수분의 비율이 증가할수록 저하한다. 흙의 중량 증가, 흙의 강도저하는 안정성 저하에 직결되고 포화상태일 경우 안전율이 최저가 된다.

이와 같은 현상을 안정성 해석에 반영하기 위하여 각 포화도에 있어서, 포화도 중량, 점착력, 내부마찰각을 구할 필요가 있다. 구체적으로 각 포화도별, 흙의 습윤 밀도시험, 일면전단시험(비배수:정체적), 삼축압축시험(CU조건)을 실시한다. 또, 시험시 주의

점으로 가수조정을 실시하여 즉각적 실험을 실시하지 않고 약간 포화도가 높은 가수상태, 즉, 하루밤 정도 둔 상태에서 시료를 정형하여 실험을 행하는 것이 좋다. 이것은 흙의 가수과정과 배수과정에서 강도 차이가 발생하며 배수과정이 수분의 균일성이 높은 시료가 제작가능한 점에 기인한다.

최종적으로 이와 같은 그래프가 작성되고, 포화도가 50%이상의 영역에 대하여 포화도 10%부터 100%시점까지 안정해석을 실시하면 좋다.

4. 최종진단

이상의 해석결과를 이용하여 최종진단을 행한다. 강우조건을 시간우량 1mm~50mm정도 연속적으로 설정하고, 각 포화심도의 변화를 그래프로 정리한다.

안정해석시에 심도별 안전율-포화도의 관계는 구하였기 때문에, 안전율에 변화하는 종축으로 설정하고 횡축은 누적우량으로 한다. 그림 8은 작성 예를 나타내고 있다.

이상으로 붕괴의 위험성이 있는 누적강우량을 얻을 수 있다. 또, 필요에 대응하고 사전강우가 있는 경우, 강우 패턴의 변화에 따른 안전율의 변화를 조사해도 좋다.

5. 해석사례

5.1 현장 상황(그림 9 참조)

현장은 높이 25m, 경사 45° 정도이고 소단이 설계되어 있는 절토사면이다. 상부에서 하부에 걸쳐 서서히 풍화심도가 얕아지는 전형적인 사면이며 암질은 마사토계이다.

주로 상부 풍화층 붕괴를 가정하고 토양수분계 및 지반경사계에 의한 모니터링, 불교란 시료에 의한 토질시험을 행하였다.

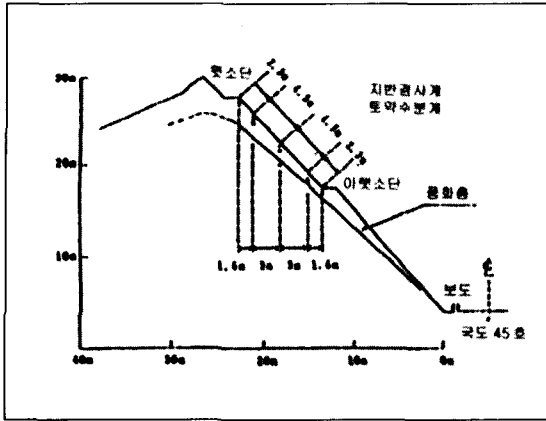


그림 9. 현장상황

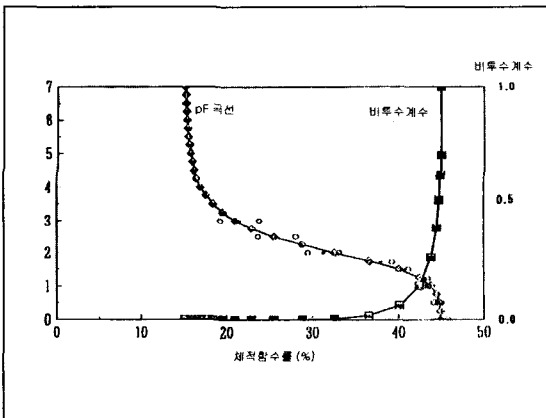


그림 10. 입력 변수(수분특성 곡선)

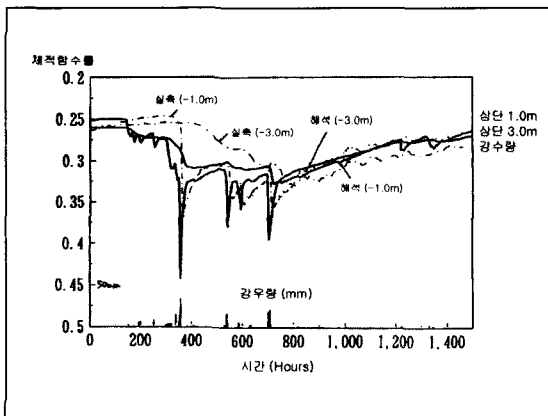


그림 11. 침투수 해석 결과

5.2 입력 변수(그림 10 참조)

실내시험으로부터 구한 pF값, 투수계수, UU 삼축 압축시험결과를 입력한다. pF시험은 많은 시험회수와 van-Genuchten모형을 이용하여 쉽게 도출이 가능하였으며 pF값은 그대로 입력값으로 하였다.

실내투수시험으로부터는 $k=3.5\sim 5.0\times 10^{-3}$ (cm/s) 정도 결과를 도출하였으나 $k=2.0\times 10^{-3}$ (cm/s)값이 모니터링 결과와 잘 일치하여 적용 입력값으로 사용하였다.

UU 삼축압축시험은 많은 시험이 수행되었으며, 저구속압하에서 시험 결과는 분산정도가 심하고 신뢰성이 낮았다. 실제 사면에서 활동면은 깊이 3m 정도에서 발생하였으며 0.6kg/cm^2 이하의 c, ϕ 값을 일면전단시험으로부터 구하는 것이 좋다.

*저구속압하의 c, ϕ 는 고구속압하에서 c, ϕ 와 다르고 선형관계가 아닌 경우가 대부분이다. 이를 위해 현장에서 흙이 파괴된 상태에서 구속압에서의 τ 를 그대로 이용하는 것이 좋다고 생각된다.

5.3 침투수 해석결과(그림 11 참조)

모니터링 결과로부터 비교적 적절한 결과를 도출하였으며 검증에 위해 상단의 텐서 메타(심도 1.0m, 심도 3.0m)와 해석결과를 중첩해 보았다.

해석결과 거동은 계측결과보다도 약간 민감(약간 저하됨, 빠른 회복)하게 반응하였지만, 비교적 양호하게 현장의 거동이 표현되었다. 또, 해석결과에는 소량의 강우에 반응이 민감한 경향을 볼 수 있었지만, 해석에는 실제 사면에 현존하는 식생 등이 반영되지 않고 나대지로 취급된 것이 원인이라 생각할 수 있다.

* 소량의 강우시, 전부 식생에 미치지 않고, 강우 후 기상의 회복에 의하여 빗물이 나뭇잎으로부터 그대로 증발하기 때문에 전체 지면에 침투하지 않는 경우도 생각할 수 있다.

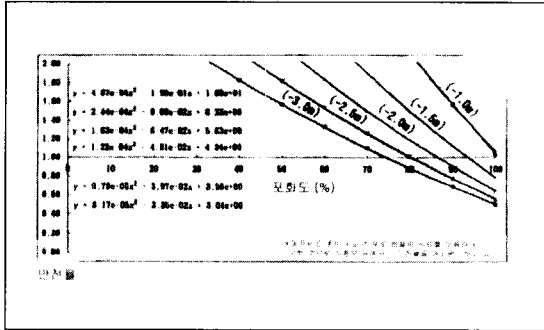


그림 12. 안정해석 결과

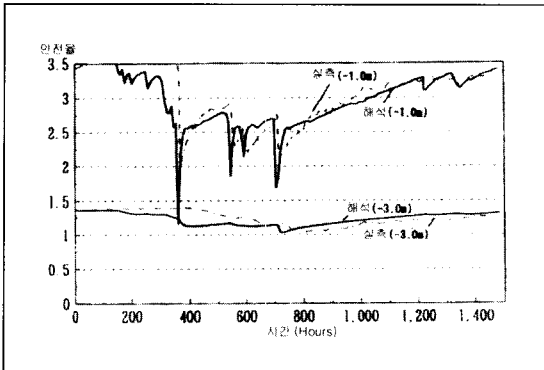


그림 13. 현지사면의 안전을 평가

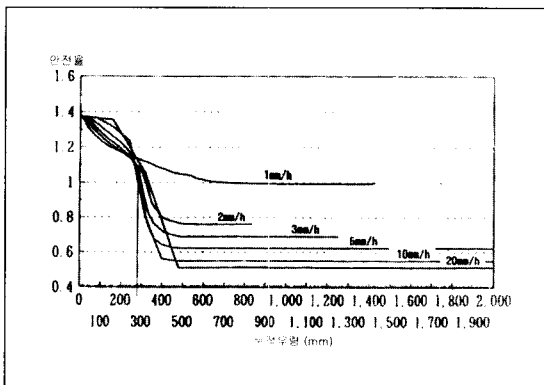


그림 14. 붕괴에 이르는 강우량 평가

5.4 안정해석 결과(그림 12 참조)

UU 삼축압축시험결과로부터 구한 c , ϕ -Sr(점착력, 내부마찰각-포화도)의 관계를 이용하여 평면파

괴 계산을 행하고, 각 심도의 미끄러짐 안전율을 포화도별로 그래프화 하였다.

해석결과, 표층부 평면파괴 안전율은 건조시와 높은 포화도 상승과 동시에 급격히 저하하고, 심층부 평면파괴는 건조시와 낮은 포화도 상승에 따라 완만하게 저하하는 양상을 보여준다.

본 사면은 1.0m 심도에서 붕괴가 발생하지 않고, 3.0m 심도에서 74%를 초과할 때 붕괴가 발생하는 결과를 얻었다.

* 같은 심도의 미끄러짐을 생각할 경우, 원호파괴 안전율은 원호의 반경이 크게 되면 될수록(미끄러짐 규모가 크게 되는 정도) 낮아지고 결국 평면파괴 계산 값에 수속하기 때문에 평면파괴 계산이 최고 안전측을 본 안정계산 방법이 된다.

5.5 현장사면 안전율평가(그림 13 참조)

침투수 해석과 안정해석을 조합하여 현장 대상사면의 9~10월의 사면 안정도 추이를 정리하여 그래프화 하였다.

해석 결과, 심도 1.0m, 3.0m 양자에서 안전율이 1.1을 넘는 시기가 인정 되었지만 1.0을 초과하지는 않았다. 그러나 해당시기 모니터링 결과를 이용한 안정해석에서 안전측에 있는 것으로 급회 침투수 해석이 좀더 위험측으로 평가된 것으로 확인되었다. 또, 심도 3.0m 심도에서 미끄러짐 발생 가능성은 희박하고 실제 사면은 안전한 것으로 생각할 수 있다 (UU 삼축압축실험을 1~2m 심도 시료를 이용하여 행한 것도 이런 요인에 있다).

5.6 붕괴 발생 강우량 평가(그림 14 참조)

이상의 결과로부터, 침투수 해석 모델이 현장사면을 다소 위험측으로 표현하는 것을 확인할 수 있었기 때문에 가상 강우를 부여한 상태에서 자연사면 강우에 대응하는 안정성을 평가하여 보았다. 사면의 초기조건

은 비교적 무강우가 연속된 건조상태로 가정하고, 주어진 가상 강우는 연속우량으로 1~200mm/hr로 하였다.

해석의 결과, 10mm/hr의 연속우량을 가한 경우, 누적우량 280mm 정도에서 안전율이 1.00을 가로지르는 거동을 보여주고 이 시점에서 붕괴가 발생할 가능성이 있는 것으로 알 수 있다.

대부분인 점을 감안하여 최근 연구가 진행되고 있는 외국의 사례를 정리하였다. 국내 사면의 경우, 침투수에 대한 해석이 아직 초기 연구단계에 있으므로 선진 기술의 현주소를 재조명하는 기회로 삼고자 한다. 향후 침투수 및 지하수를 고려한 사면 안정 기술 개발로 인하여 사면 붕괴로 인한 재해가 없는 국가를 기대한다.

6. 맺음말

국내 사면 붕괴 유형 분석 결과, 소규모의 붕괴가

(일본 건설성 토목연구소, 토목연구자료 제 3646호, 강우침투에 의한 표층붕괴대상 사면 조사 및 모니터링 방법)

2003 봄 토목섬유 학술발표회 개최 안내

한국토목섬유학회(KGSS)와 한국지반공학회 토목섬유기술위원회에서는 오는 4월 23일(수)에 아래와 같이 2003 봄 토목섬유 학술발표회를 공동으로 개최하고자 하오니 많은 회원들의 적극적인 참여를 부탁드립니다.

- ☑ 주 제 : 토목섬유를 사용한 지반 보강 및 개량 기술
- ☑ 일 시 : 2003년 4월 23일(수) 09:30~18:00
- ☑ 장 소 : 한국교총회관 2층 세미나실 (서울 서초구 우면동)
- ☑ 등록비 : 회원 20,000원 (대학원생 10,000원), 비회원 30,000원

☑ 학술발표회 프로그램

- | | |
|-------------|--|
| 09:30~10:00 | 등 록 |
| 10:00~10:20 | 개회식 |
| 10:20~11:20 | 초청강연(Prof. Aboshi, 일본 히로시마대)
주제 : Development of PVD in Japan during the last four decades with special attention on the intrinsic problem concerning PVD |
| 11:20~12:20 | 정기총회 (KGSS) |
| 12:20~13:20 | 점 심 |