

보다는 최대 강우강도에 더 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 이는 지속적으로 내리는 비보다는 집중강우에 의해 발생하는 사면붕괴빈도가 높음을 의미한다.

지질적 요인에 의한 붕괴원인은 주로 단층, 파쇄대, 습곡, 암맥, 절리, 엽리, 층리, 편리 등의 불연속면에 의한 것과 특정광물에 의한 약대나 풍화에 취약한 암질이 원인이 된다.

끝으로, 인위적 요인으로는, 불충분한 지반조사로 인해 현지 지반강도에 대한 부적절한 단면설계경사 적용의 문제점, 사면 위치에 따른 지형, 지질 및 수리조건을 고려하지 못한 설계·시공상의 요인과 다른 토목구조물과 달리 그 변화의 감지가 어려운 절토사면을 방치할 경우 붕괴에 이를 수 있다는 유지관리상의 요인이 있다.

2.2 붕괴 유형

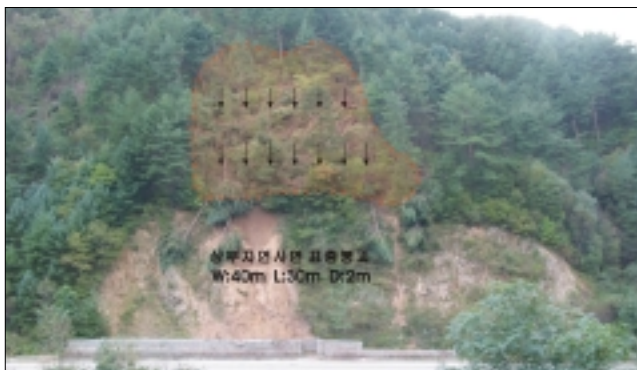
위에서 언급한 붕괴 원인에 의해서 여러 형태로 사면의 붕괴가 발생된다. 불연속면 등과 같은 단열구조에 의한 붕괴 유형으로서, 2개조의 불연속면 조합에 의해 발생하는 썩기파괴는 지질적인 요인에 의한 파괴형태중 가장 쉽게 현장에서 관찰되는 파괴형태이다. 썩기파괴의 특수한 경우로서 1면 활동에 의해 발생하는 평면파괴는 퇴적암의 층리면, 화강암의 판상절리(sheeting joint) 등과 같이 연장성이 우수한 불연속면의 경사가 사면방향에 불리하게 분포하는 경우 넓은 영역에 걸쳐 대규모의 평면파괴를 일으킨다. 전도파괴는 암석 블록들이 어떤 기준축을 중심으로 하여 중력에 의해 회전하면서 사면의 붕괴를 발생시키는 유형이다. 그리고 시공불량 및 발파균열에 의한 낙석, 퇴적암의 차별풍화에 의한 낙석, 봉적층이나 화강암 또는 변성암에서의 핵석 지반에 의한 낙석, 상부자연사면의 낙석 등이 낙하(fall), 미끄러짐(slip), 구름(roll), 튕(bounce) 등의 형태로 낙석이 발생한다.

또한 활동파괴는 연속체적 거동에 의한 붕괴양상을 말하며 토사사면, 혼합사면 및 절리의 빈도가 매우 높은 파쇄암반의 활동에 대해서 사용된다. 활동면은 토사사면의 경우 사면 내에서 활동을 하며, 지반물성이 변하는 혼합사면 등과 같은 경우에는 경계부를 따라 활동하기도 한다.

3. 사례 연구

3.1 연구 지역

연구대상 절토사면은 행정구역상으로 경상북도 봉화군 소천면 분천리에 속하며, 경상북도 봉화군에서 울진군 방향의 국도 36호선 상에 위치하고 있다. 대상 절토사면의 규모는 연장 약 95m, 최대높이 약 10m, 경사 50~60°(경사방향 : 047~062°), 상부자연사면은 30~40°의 경사로 이어진다. 본 절토사면은 암반사면으로서 사면을 구성하고 있는 암석은 화강암류 및 화강편마암으로 구성되어 있으며, 전경 및 측면사진은 그림 1이며, 연구 지역의 지형도는 그림 2와 같다.



(a) 전경



(b) 측면

그림 1. 분천지구 절토사면의 전경 및 측면



그림 2. 연구 지역의 지형도

2003년 9월경 태풍 매미로 인하여 집중 강우에 의한 상부자연사면에서 표층붕괴가 발생하였으며, 총 붕괴규모는 폭 40m, 길이 30m, 높이 15m, 두께 2m 내외이다. 절토사면에는 상단부에서 소규모 원호파괴가 발생했으나 상부자연사면에서 대규모 표층파괴가 발생하였다. 상부자연사면의 표층은 자갈과 사질토가 섞여있고 수분이 많이 포함되어 있으며 두께는 약 2m 내외이다. 또한 수목이 조밀하게 분포하고 있으며 전도된 수목을 관찰한 결과 뿌리가 넓게 퍼져있는 형태로서 상부자연사면에 분포한 수목은 표층에 뿌리를 내리고 있는 것으로 판단된다.

본 절토사면의 1차적 붕괴 원인은 원지반의 절토로 인하여 하부 지지력이 상실되었으며, 심한풍화~완전풍화의 풍화 양상을 나타내는 절토사면의 상단부에서 지속적인 표층유실 및 원호파괴가 발생함으로써 상부자연지반의 응력이 개방되어 지반변형이 발생한 것으로 판단된다. 2차적 원인은 집중강우로 인한 지하수의 급격한 상승과 이에 따른 지반강도의 저하에 의한 붕괴 원인을 찾을 수 있다. 따라서 원지반의 절토로 인한 응력 개방이 지반 내의 절리 이완과 새로운 절리의 생성을 유발시켰으며 이러한 붕괴 변화는 상부자연사면의 상대적으로 느슨한 토층을 더욱 더 교란시킨 것으로 판단된다. 또한 교란된 토층이 집중 강우로 인하여 포화됨으로써 지반의 유효응력이 감소하고 토층의 활동력이 증가하는 등 여러 불안정성 요인이 작용함에 따라 지반의 붕괴가 발생한 것으로 판단된다.

3.2 전산해석을 통한 원지반 절취 전·후의 안정성 비교

조사대상 절토사면의 상부자연사면에서 표층붕괴가 발생하였으므로 이에 대한 원인을 분석해 보고자 Canada의 RocScience사에서 개발한 Slide v.5.0을 이용하였다. 프로그램을 운영하기 위해서 필요한 지반의 물성값은 단위중량, 내부마찰각, 점착력이다. 조사대상 절토사면의 암반은 화강편마암으로서 NAVFAC(1971)분류에 의하면 편마암의 단위중량을 $2.70(t/m^3)$, 절토사면 내 불연속면의 조사에 의한 RMR값을 근거로 경험식을 통하여 내부마찰각과 점착력을 각각 24° , $19.4(t/m^2)$ 로 결정하였다. 또한 상부자연사면의 표층은 자갈이 섞인 모래로 분류하여 도로설계요령 제3권을 참고하여 강도 정수를 결정하였다. 하층은 단위중량이 $2.1(t/m^3)$, 내부마찰각은 40° 로 결정하였으며, 상층은 단위중량이 $1.9(t/m^3)$, 내부마찰각은 35° 로 결정하였다. 그러나 자연사면의 표층은 완전한 사질토로만 구성된 것이 아니며 어느 정도 점토질이 함유된 상태이기 때문에 점착력이 전혀 없는 상태는 아니다. 따라서 밀실한 사질토의 점착력을 고려하여, 상층은 점착력을 $1(t/m^2)$, 하층은 점착력을 $3(t/m^2)$ 로 결정하여 전산해석을 시행하였다.

붕괴 유형은 상단부에서 원지반과의 경계에서 표층파괴가 발생하였으므로 non-circular type에서 path search option을 사용하였으며 3000회 반복하여 계산한 후 최소 안전율을 결정하였다.

표 3.1 전산해석을 실시하기 위해 결정된 조사지역 지반의 강도정수

	단위 체적 중량 (t/m ³)	내부 마찰각 ϕ (도)	점착력, C (t/m ²)
자연지반(상층)	1.9*	35*	1*
자연지반(하층)	2.1*	40*	3*
기반암	2.70**	24	19.4

* : 토공재료의 개략적인 토질정수(도로설계요령 제3권 , 1992 한국도로공사) 참조

** : 암석에 따른 지반공학적 물성값(NAVFAC, 1971) 참조

3.2.1 원지반 절취 전의 건조 및 포화 상태에서의 안전율

조사대상 절토사면의 상부자연사면 경사가 약 30~40°이므로, 절취전 원지반의 경사를 30~40°로 설정하여 자연사면을 결정하였다. 그림 3, 그림 4와 같이 건조시 최소 안전율은 1.869이며 포화시 최소 안전율은 1.100으로서 비교적 안정한 상태를 나타내고 있다.

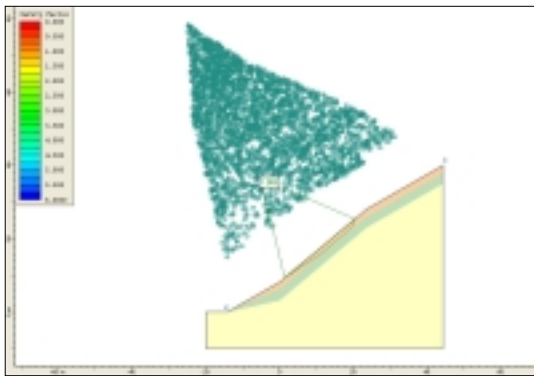


그림 3. 절취 전 건조시 자연사면의 최소 안전율

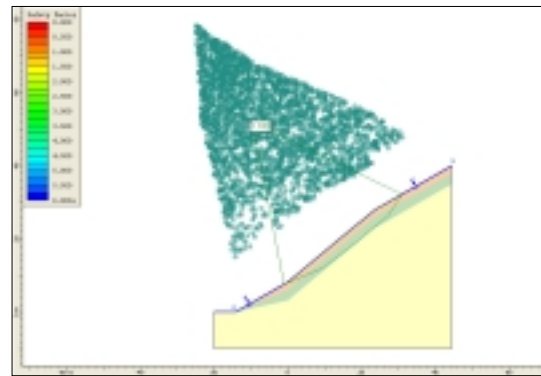


그림 4. 절취 전 포화시 자연사면의 최소 안전율

3.2.2 절취 후의 건조 및 포화 상태에서의 안전율

자연사면의 절취 후 절토사면의 안전율을 구한 결과, 그림 5, 그림 6과 같이 건조시 최소 안전율은 1.617이며 포화시 최소 안전율은 0.880으로서, 건조시 절토사면은 안정한 상태라고 판단할 수 있으나, 집중강우에 의해서 지반이 포화될 경우 안전율이 1보다 낮기 때문에 상부자연사면에서 붕괴가 발생할 수 있다는 결과를 나타내고 있다.

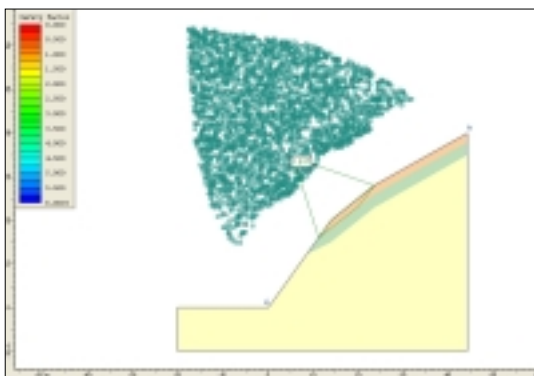


그림 5. 절취 후 건조시 절토사면의 최소 안전율

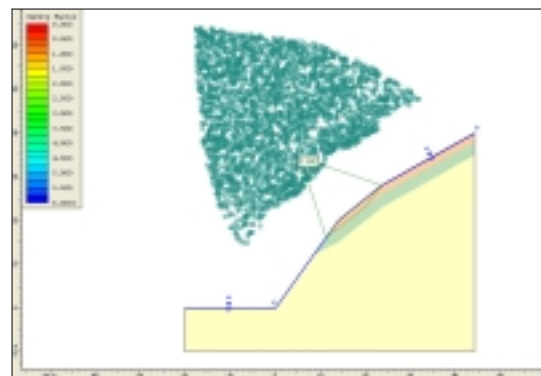


그림 6. 절취 후 포화시 절토사면의 최소 안전율

3.2.3 포화된 절토사면 상부자연지반에 보강 전·후의 안전율

집중 강우에 따른 지반이 포화될 경우, 상부자연사면의 거동에 의한 표층붕괴가 발생할 수 있으므로 이에 대한 보강이 필요하다. 따라서 상부자연사면에 길이 5m의 Soil Nail을 1m 간격으로 절토사면의 정

상부 2m 하부에서 수직으로 약 15m 높이까지 보강한 후, 보강 전·후의 안정성을 검토하였다. 그림 7, 그림 8과 같이 보강 전의 절토사면의 최소 안전율은 0.880이었으나 보강 후에는 최소 안전율이 1.599로서, 보강 후의 전반적인 절토사면은 안정한 상태라고 판단할 수 있다.

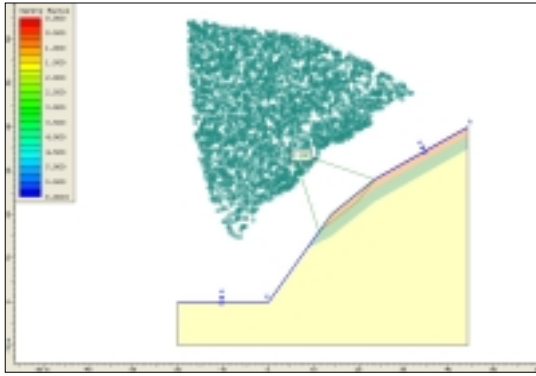


그림 7. 포화시 보강 전 절토사면의 최소 안전율

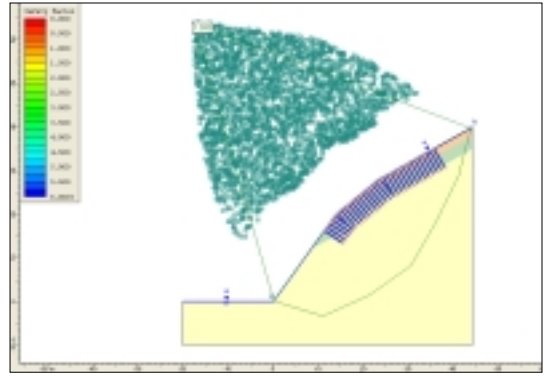


그림 8. 포화시 보강 후 절토사면의 최소 안전율

3.3 포화된 절토사면 상부자연지반에 보강

상부자연지반이 불안정하여 보강이 필요할 경우, 전산해석을 통하여 보강의 정도를 예측 할 수 있다. 그림 9는 상부자연사면에 길이 5m의 Soil Nail을 1m 간격으로 절토사면의 정상부 2m 하부에서 수직으로 약 15m 높이까지 보강한 경우 최소 안전율은 1.559이다. 그리고 그림 10은 절토사면의 정상부 2m 하부에서 수직으로 약 10m 높이까지 보강한 경우 최소 안전율은 1.559가 된다. 따라서 지반을 보강할 경우, Soil Nail의 시공 높이를 낮추어 물량을 줄여도 동일한 안전율을 갖게 된다.

그림 11~그림 14는 Soil Nail의 간격을 각각 1.5m, 2m, 3m, 4m로 시공한 후 안전율을 나타낸 것이다. Soil Nail의 간격이 2m 까지는 안전율이 1.599로서 변화가 없었으나, 3m, 4m는 안전율이 1.519, 1.455로 낮아지기 시작하였다. 따라서 Soil Nail의 최대 공간격을 2m로 시공하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

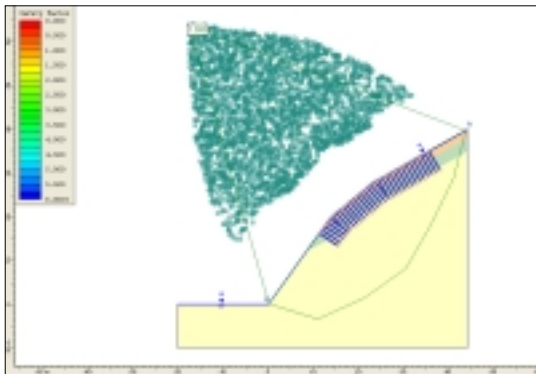


그림 9. 높이 15m를 보강한 후 최소 안전율

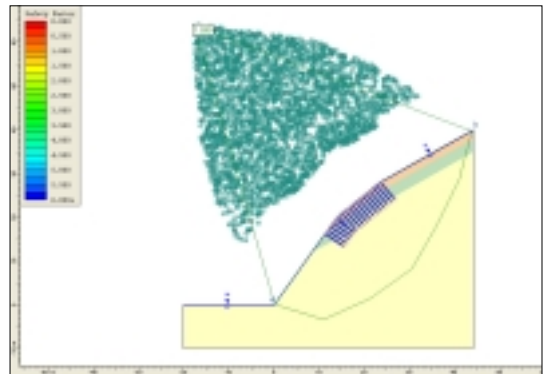


그림 10. 높이 10m를 보강한 후 최소 안전율

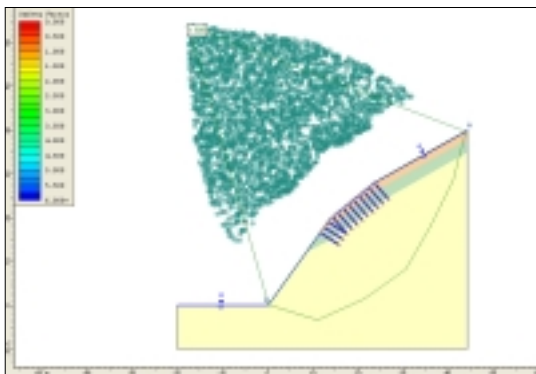


그림 11. 1.5m 간격으로 보강한 후 최소 안전율

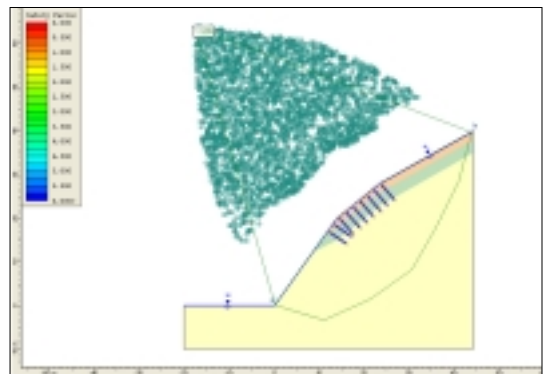


그림 12. 2m 간격으로 보강한 후 최소 안전율

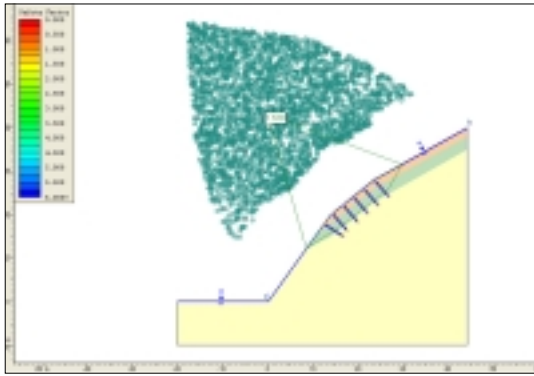


그림 13. 3m 간격으로 보강한 후 최소 안전율

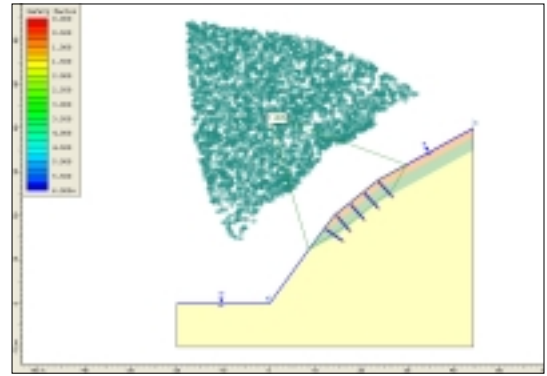


그림 14. 4m 간격으로 보강한 후 최소 안전율

4. 결론

본 연구는 태풍으로 인한 집중강우에 의하여 상부자연지반이 붕괴된 사례를 통하여, 일반적인 사면의 붕괴가 절취된 사면에 국한된 것이 아니라 상부자연사면에서도 발생될 수 있음을 인식하고 이에 대한 붕괴 발생 원인을 고찰해 보았다. 태풍에 의한 집중강우에 의해서 발생된 붕괴된 사면의 전산해석을 통하여 사면의 절취 전·후의 안정해석을 실시하였으며, 절취 후 상부자연사면 보강 전·후의 안정해석도 실시하였다. 그 결과 절취 전 자연사면의 경우에 건조사면과 포화사면은 안전율이 각각 1.869와 1.100으로서 안정한 상태였으나, 절취 후 건조 및 포화된 절토사면의 안전율은 각각 1.617과 0.880으로서 포화된 절토사면은 매우 불안정한 상태임을 나타내었다.

조사대상 사면의 경우, 상부자연사면의 표층은 자갈과 모래 및 점토질이 뒤섞인 조밀하지 못한 지반으로서, 원지반의 절토에 의해 지지력이 상실되었으며 절토사면의 상단부에서 표층유실 및 소규모의 원호 파괴가 지속적으로 발생하였다. 따라서 상부자연지반의 응력이 개방되어 결국 조밀하지 못한 지반을 더욱 교란시켜 체적의 증가를 가중시켰다. 또한 이러한 지반에 집중강우로 인한 지하수위의 급격한 상승으로 토층의 유효응력 감소, 지반의 단위중량의 증가 및 지반의 활동력 증가 등 여러 불안정성 요소의 증가에 의해서 결국에는 지반의 붕괴가 발생한 것으로 판단된다.

본 연구의 결과를 통하여 볼 때 원지반을 절토하여 사면을 생성할 경우, 지반의 특성에 따라 절토로 인한 상부자연지반의 변형에 의한 사면 붕괴가 발생할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 절토 후 상부자연지반의 상태 및 물성에 대한 조사가 필요하다고 판단되며, 조사된 결과에 의해서 수리적, 역학적으로 불안정한 요소를 갖고 있을 경우 절토된 사면의 보강과 더불어 상부자연사면에 대한 보강을 시행한다면 소규모의 보강으로 대규모의 붕괴를 예방할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 전산해석을 통하여 보강이 필요한 구간 및 보강의 정도를 추정하여 적절한 물량을 결정할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 건설교통부(2003), “도로절토사면 유지관리지침”, pp.31~54
2. 전성기(1998), “실무자를 위한 사면안정화 설계실무편람”, 도서출판 과학기술, pp.13
3. 장현식, 박혁진(2002), “태풍 루사에 의해 발생한 사면재해의 특성”, 자원환경지질학회, 가을학술발표회 논문집
4. 한국도로공사(1992), “도로설계요령 제3권”