

2차원 유한요소법과 3차원 한계평형법을 이용한 테일러스 사면안정성 해석

이경미¹ · 김성권¹ · 서용석^{1*} · 이선복² · 김동현³ · 김도식³

¹충북대학교 지구환경과학과, ²동부건설(주), ³(주)삼보기술단

Analysis of Talus Slope Stability using 2D FEM and 3D Limit Equilibrium Method

Kyoung-Mi Lee¹, Sung-Kwon Kim¹, Young-Seok Seo^{1*}, Sun-Bok Lee², Dong-Hyun Kim³, and Do-Sik Kim³

¹Department of Earth & Environmental Sciences, Chungbuk National University

²Deputy SM, Civil Design Team, Dongbu Corporation

³Executive Director, Dept. of Geotech., Sambo Engineering Co., LTD

본 연구에서는 2차원 유한요소법과 3차원 한계평형법을 함께 이용하여 테일러스 분포사면의 안정성을 해석하였다. Phase2를 이용한 유한요소해석에서는 발생응력의 분포를 이용하여 파괴심도를 추정하였다. 파괴면은 테일러스층 하부에 약 3-10m의 두께로 분포하는 붕적층 내에서 발생하였다. 유한요소해석 결과와 지질조사결과를 바탕으로 3차원 모델을 작성하여 한계평형해석을 실시하였다. 3차원 한계평형해석결과를 보면 건조시에는 모든 사면에서 안정한 것으로 나타났으나, 집중호우에 의해 지하수면이 붕적층을 포화시킬 때에는 급격히 불안정해지는 것으로 나타났다.

주요어 : 테일러스, 붕적층, PHASE2, 3차원 사면안정해석

A series of talus slope stability analyses were carried out using 2D FEM and 3D limit equilibrium methods for this study. The FEM analyses on Phase 2 were performed to delineate failure depths based on stress distributions for each slope. The results revealed that the failure surface exist in the colluvium layer of about 3-10 m thickness. Three dimensional models, derived from the FEM analyses and geological field survey, were made for the use in a 3D limit equilibrium analysis. The result shows that all the talus slopes are stable under dry condition, but unstable under saturated condition due to heavy rain.

Key words : talus, colluvium, PHASE2, 3D slope stability analysis

서 론

우리나라의 산악지형에서 흔히 관찰되는 현상 중의 하나는 테일러스(talus)이다. 테일러스의 발달은 대부분 주거지나 생활기반시설과 상당히 떨어진 곳에 분포하며, 만일 시설물이 시공될 경우 테일러스를 회피하는 방식으로 설계 및 건설이 이루어지므로 위험도 측면에서 낮은 평점이 주어질 수 있다. 그러나 도로의 선형개량이나 터널시공 등으로 불가피하게 테일러스 구간을 포함하는 경우 이들의 불안정성에 대한 영향은 주의 깊게 해석되

어야 하고, 테일러스 사면의 적절한 안정화 방안이 마련 되어야 한다.

테일러스에 대한 연구는 국외의 경우 초기에는 암설의 거동에 관한 연구(Behre, 1933)를 필두로 암설사면의 발생원인(Judson, 1949), 암설사면의 운동에 대한 모델링(Caine, 1969) 등 역학적인 메커니즘 규명에 중점을 두어 이루어져 왔고, 최근에는 붕적층의 일부로써 토석류에 의한 붕괴가능성을 파악하거나 테일러스 구간의 시험법 및 타당한 시공법에 대한 연구(Turner, 1996)도 이루어지고 있다. 국내의 경우는 지리지형학에서 1980년

*Corresponding author: ysseo@cbu.ac.kr

대 이후 지속적으로 테일러스의 형태와 구조, 발생시기 및 형성과정에 관해 연구되어왔다. 특히 이정우(1985)는 주절리 발달과 테일러스의 분포양상을 관련시켜 지질공학적 해석을 시도한 점이 두드러진다.

본 연구는 태백-미로간 선형개량을 위한 도로건설 예정구간 내에 테일러스를 일부 포함하고 있고 이들이 기존 도로와 민가에 인접하여 분포하고 있어 이에 대한 안정성 검토를 위해 수행되었다. 해석에 있어서 테일러스의 형태적 특성과 붕적층의 심도 추정은 물리탐사와 시험시추자료를 이용하였고, 기본적인 물성치와 지반정수는 현장에서 시험하거나 실내시험을 통하여 산정하였다. 안정해석은 PHASE2 프로그램을 이용하여 변위와 전단면(slip face)을 추정한 후 3차원사면안정 해석프로그램인 3D Slide Software를 통해 안정성을 확인하였다.

테일러스의 이론적 배경

테일러스는 단애면(斷崖面)의 기저에 쌓여있는 암설(Fairbridge, 1968) 또는 경사면이나 지형의 일부(Monkhouse and Small, 1978)로 정의되는데, 외형상 암설력이 산지의 급경사 사면을 따라 중력에 의해 낙하하거나 굴러서 기저부에 쌓여있는 지형을 말하며, 입경의 크기가 기저부로 갈수록 커지는 특징이 있다. 테일러스의 발생원인은 크게 미기후(micro climate), 지질조건(geologic conditions), 기계적인 힘(mechanical force)으로 구분된다. 이는 지질학에서 빙하기와 관련한 동결융해현상으로 해석될 수 있다.

테일러스의 경사각은 40°를 넘지 않는 것으로 보고되고 있는데(Miner, 1934), Strahler(1971)는 34°-37°인 것으로 보고하였다. 이러한 사면 경사는 암설의 크기에 영향을 받는 것으로 인식된다(전영권, 1996). 일반적으로 암설의 크기가 클수록 운동량이 커서 멀리까지 이동하므로 상부에서 기저부로 갈수록 크기가 커지는 경향이 있다. 만일 암설의 크기가 고도에 상관없이 불규칙하게 나타나는 경우는 테일러스 물질의 이동으로 인해 암설이 재분포된 것으로 추정할 수 있다. 테일러스의 종적인 배열방식 즉, 단면형상은 초기에는 직선적으로 배열하지만 시간이 경과할수록 요형으로 변하게 된다. 이는 테일러스의 발달 메커니즘으로 설명될 수 있다. 테일러스 발생 초기에 작은 암설들은 큰 암설을 통과하여 기존의 표토부에 퇴적이 되어 붕적층을 이루고 현생 기후에서 암설의 공급이 중단된 후 붕적층의 상부에서 발생하는 solifluction이나 frost creep 현상으로 인해 형태가 변화

게 되며, 지하수 또는 지표수에 의해 세립질의 제거와 재집적이 이루어진다(전영권, 1998). Fig. 1과 Fig. 2는 이를 모식적으로 표현한 것이다. 특히 Fig. 1은 테일러스 하부층의 심도별 내부구조를 나타낸 것으로 시추주상도를 참고로 하여 추정한 것이다. 테일러스의 심도가 깊어질수록 기질의 함량이 증가하는 붕적층 형태를 보이다가 일정심도를 넘어서면 토양층과 풍화암층이 나타나는 것으로 관찰되었다. 횡방향으로는 테일러스의 중앙부에서 주변부로 갈수록 각 층후가 감소하는 경향을 보인다. Fig. 2는 강우에 의해 형성되는 가상의 지하수위면과 잠재적인 파괴면을 나타낸 것으로 기질부가 우세한 테일러스층과 잔류토양으로 구성된 붕적층의 공학적인 특성을 잘 보여준다.

Gardner(1969)는 암중에 따라 암설의 크기가 달라진다고 보고한 바 있다. 즉, 규암질사암과 같은 암석은 셰일이나 석회암보다 암설의 규모가 큰 것으로 조사하였다. 이정우(1985)는 절리발달 양상이 암설의 크기에 영향을 미치는 것으로 조사하였는데, 절리간격과 절리의 경사각이 암설의 규모와 각진 정도(angularity)를 결정하

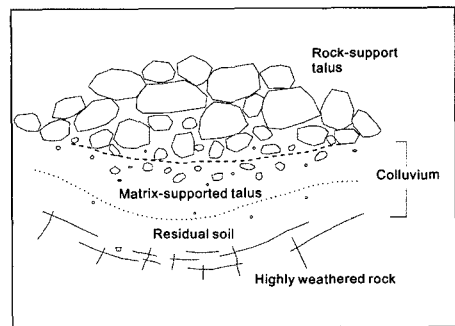


Fig. 1. A typical cross-section of a talus area.

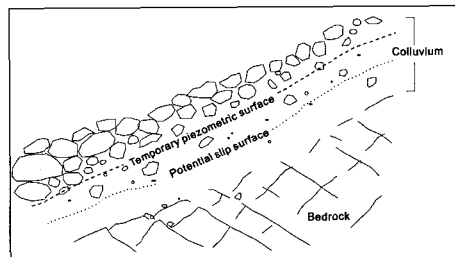


Fig. 2. Buildup of perched water table in colluvium during heavy rainfall(Campbell, 1975).

며, 암설이 방향성 없이 무작위로 분포되어 있다면 낙하 후 단순한 rolling과 sliding 운동만 있었다고 보고 있다.

연구지역의 지형 및 지질

연구지역은 태백-미로간 도로건설공사 구간 중 테일러스가 일부 분포하는 OO 지역으로 도로예정노선이 테일러스의 하부를 통과하도록 설계되어 있는 구간이다 (Fig. 3, Fig. 4). 테일러스층은 총 3개 영역으로 노출되어 있으며, 상부에 1지점(TA-3), 하부에 2개(TA-1, TA-2)의 지점으로 분포한다. 하부의 테일러스 구간은 이미 임도가 시공되어 있는 상태이고, 상부와 하부 테일러스 층간에도 등산로 정도의 소로가 형성되어 있다.

테일러스의 구성물질은 유백색-암회색 및 일부 적색을 띠는 퇴적기원의 변성암으로 셰일에서 사암, 역암까지 다양하게 나타난다. 삼척-고사리도폭(한국지질자원연구원, 1994)에 따르면 연구지역은 옥천지향사대의 동북

부 및 영남 육괴의 복단에 위치하고 있어 지질분포가 다양하고 지질구조에 있어서도 매우 복잡하다. 이 지역 일대의 광역지질은 석탄기-트라이아스기의 평안층군으로서 함백산층 및 조선누층군을 부정합으로 덮고 있는 적각리층에 해당한다. 연구지역에서 테일러스를 이루는 기반암은 사질 성분이 우세한 퇴적변성암으로 장석질 사암이 기원이며, 대체로 중립 내지 조립질이다.

테일러스 사면의 평균 경사는 TA-1 지점이 약 38°, TA-2, TA-3 지점이 각각 40°, 42°를 이룬다. 이들의 단면형상은 대체로 완만한 요형을 이루고 있으며, 한 단면 내에서 상부에서 기저부로 갈수록 암설의 크기가 점차 커지고, 중심부에서 주변부로 갈수록 작아지는 경향성을 보인다. TA-1 지점과 TA-3 지점의 테일러스 구성물질은 규암에 가까운 사암과 셰일로 구성되어 있지만 이들에 비해 TA-2 지점의 테일러스 물질은 역암이 우세한 특징을 보인다. 역은 평균 $0.2 \times 0.1 \text{ cm}^2$ 의 크기를 갖는다. TA-3 지점의 테일러스는 사면의 경사가 약간 큰 이유로 인해 하부의 테일러스층에 비해 두께가 상대적으로 얇은 것으로 관찰되었다. 암편의 크기도 이론상 하부에 비해 적어야 함에도 불구하고 큰 크기의 입자가 다양하게 분포하는데, 이는 하부의 테일러스층에 비해 지표수에 의한 붕적층의 얇은 침식으로 인해 사면이동현상이 적어서 암설의 재분포가 활발히 이루어지지 않은 것으로 판단된다.

주변지역에서 단면이 노출된 노두를 조사하여 붕적층의 형태와 기반암을 파악하였다(Fig. 5). 노두상에서 붕적층은 크게 3개의 층후가 존재하는데, 이를 상부로부터 제1층(top soil)과 제2층(soil + rock fragment), 제3층(residual soil)으로 구분해 보았다. 특히 제2층과 제3층은 붕적층으로 분류될 수 있다. 제2층은 두께가 30~50 cm 정도 되고, 기반암이 식생이나 기타 작용으로 잘게 쪼개진 형태를 가지며, 암편의 크기가 $2 \times 5 \times 4 \text{ cm}^3$ 를 이룬다. 제3층은 쓸려 내려온 암편이 사질토의 잔류토양에 박혀있는 상태이며, 일부에서 지하수가 누수되기도 한다. 기반암은 규칙적인 암블록을 형성하는 역질암 내지 사질암으로 블록의 크기는 최소 $7 \times 5 \times 7 \text{ cm}^3$ 이며, 최대 $45 \times 15 \times 25 \text{ cm}^3$, 평균 $10 \times 12 \times 15 \text{ cm}^3$ 이다. 테일러스 주변의 식생은 직경 20 cm의 도토리나무가 $1.5 \times 1.5 \text{ m}^2$ 의 밀도로 분포하고 있고, 직경 1 cm 내외의 가시나무 등의 관목이 $0.3 \times 0.3 \text{ m}^2$ 의 밀도로 분포한다. 참고로 테일러스 사면에 시공되어 있는 임도는 상부의 철탑으로 이어지고 있다.

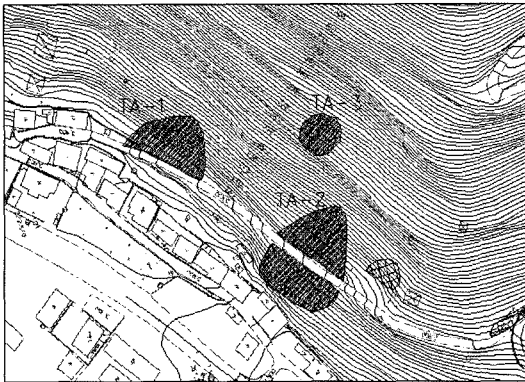


Fig. 3. Taluses distributed in the study area.

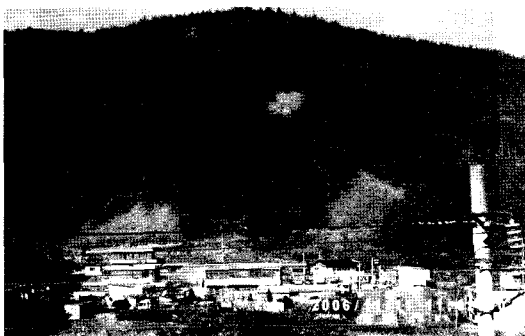


Fig. 4. Landscape showing talus slopes in the study area.

테일러스의 물리적 특성

입경분포

테일러스 암편의 크기는 최대 장경 60 cm × 단경 50 cm, 최소 장경 3 cm × 단경 1 cm, 평균 장경 12 cm × 단경 7 cm로 조사되었고, 특히 하부의 TA-2 지점이 상대적으로 큰 것으로 관찰되었다(Fig. 6, Fig. 7). 평균값에 관한 비대칭의 방향과 정도를 나타내는 비대칭도(skewness)는 장경이 +0.21, 단경이 +0.39로 산정되었다. Fig. 8은 각 측선별 테일러스 암편의 입경분포를 나타낸 것으로 장경이 단경의 1.5~3배 정도 됨을 보여준다.

물성

테일러스는 대규모의 공극을 가지는 하나의 큰 박스로 가정할 수 있다. 박스 내의 공극을 산정할 수 있다면 해석에 필요한 단위중량이 얻어진다. 따라서 현장에서 할 수 있는 간편한 방법으로 테일러스의 공극을 직접 산정해 보았다.

시험방법은 먼저 원통형의 용기를 준비하고, 현장에서 직접 채취한 테일러스 암편들을 가득 채운 후 일정 규격의 물통을 이용해 물을 채우는 방식으로 진행한다. 실제 현장에서 사용된 우레탄 원통용기의 크기는 직경 62 cm, 높이 32 cm였고, 사용된 물의 양은 42 l였으며,

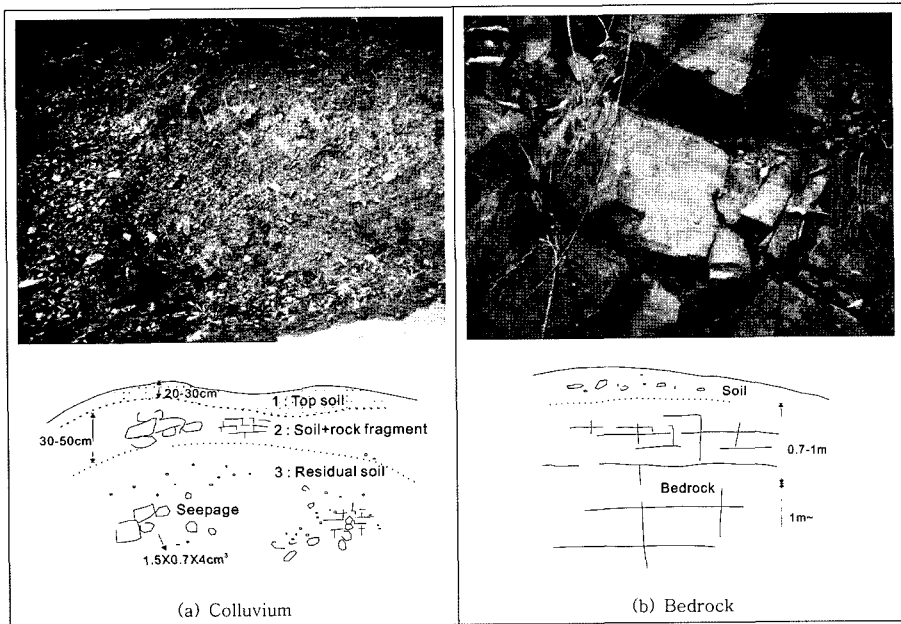


Fig. 5. Cross-sections of colluvium and bedrock.

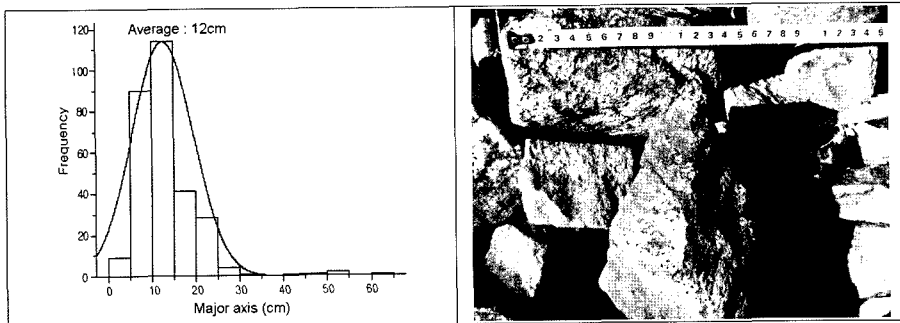


Fig. 6. Distribution of the major axis in rock fragment.

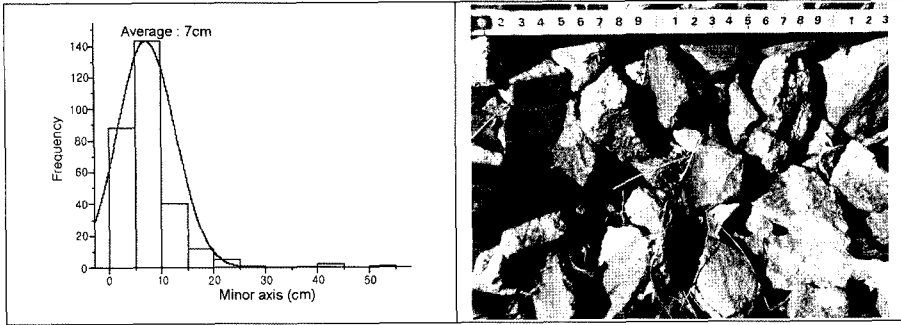


Fig. 7. Distribution of the minor axis in rock fragment.

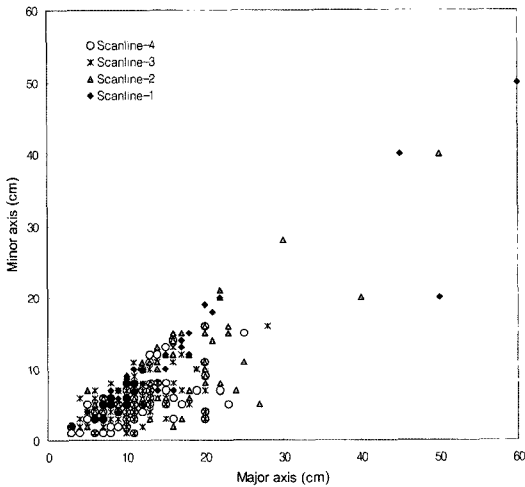


Fig. 8. Distribution of rock fragment size.

측정된 공극율은 약 42%였다.

현장에서 채취한 테일러스 암편의 단위중량은 실내시험을 통해 산정하면 평균 2.267 g/cm³가 된다. 다음 식 (1)을 이용하여 공극을 포함하는 테일러스층의 단위중량을 계산하면 평균 1.315 g/cm³가 된다.

$$\frac{W_s}{V} = \frac{G_s}{1+e} \gamma_w, \quad e = \frac{n}{1-n} \quad (1)$$

여기서 W_s=Weight of soil, V=Volume, G_s=Specific gravity, e=Unit weight of water, n=Void ratio, γ_w=Porosity이다. 테일러스의 내부마찰각은 현장 시험을 통해 약 37°로 얻어졌으며, 점착력은 0으로 가정하였다.

테일러스를 지지하고 있는 붕적층은 기반암이 풍화된

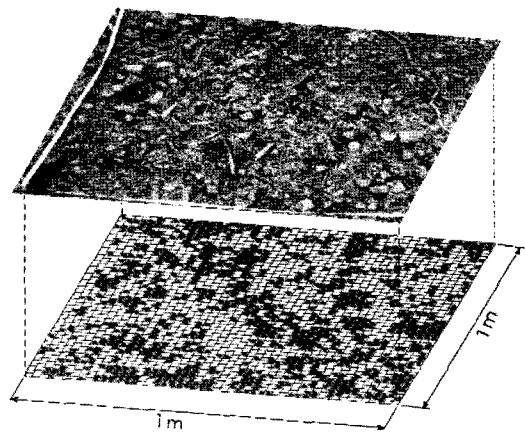


Fig. 9. Mesh method for calculating unit weight of colluvium.

잔류토양과 암편 및 토양이 혼재된 테일러스의 기저층을 모두 통합하여 하나의 단위로 설정하였다. 즉, 테일러스의 공극을 토양이 채우는 구간부터 기반암까지를 붕적층으로 정의하였다. 붕적층의 단위중량은 Fig. 9와 같이 현장에 노출되어 있는 붕적층을 1×1m²의 격자를 이용하여 사진촬영 후 실내에서 메쉬가 짜여진 레이어에 증착하여 하나의 단위격자 내에 암편이 2/3이상의 면적을 차지하면 칸을 채우는 방식으로 계산하였다. 메쉬법의 결과는 암편이 약 53%, 토양이 47%를 차지하는 것으로 나타났다.

암편의 단위중량은 앞서 계산한 결과를 이용하였고, 흙의 단위중량은 인접한 자연사면에서 채취한 흙을 이용하여 실내시험을 통해 구한 결과, 건조시 1.50 g/cm³, 포화시 1.94 g/cm³였다. 붕적층의 단위중량은 아래 식 (2)를 이용하여 구하였다.

$$\text{붕적층의 단위중량} = \text{암편의 단위중량} \times 0.53 + \text{흙의 단위중량} \times 0.47 \quad (2)$$

붕적층의 건조시 단위중량은 19.06 tf/m³이며, 포화시 는 21.13 tf/m³으로 계산되었다. 붕적층의 점착력과 내부 마찰각은 급속압밀배수법에 의한 전단시험으로 구하였 으며, 결과는 10 tf/m², 35°로 산정되었다.

유한요소해석

테일러스 구간에 유발되는 응력과 변형의 정도를 알 아보기 위해 유한요소해석 프로그램인 PHASE2(Phase² hybrid-finite element model)를 이용하여 해석을 수행하

였다. 해석을 위해 먼저 3개 지점의 테일러스 사면에서 분포 길이가 가장 긴 구간을 대표단면으로 선정하였으 며, 시추자료 및 현장조사결과를 이용하여 테일러스층, 붕적층, 기반암 등 3층으로 구분하고 수치지형도에서 추 출한 2차원 단면을 이용하여 모델을 작성하였다. 여기 서 붕적층은 앞서 언급한 바와 같이 상한경계인 테일러 스의 공극이 토양으로 채워지는 부분부터 기반암과의 경 계부까지로 하였다. 해석에 사용된 각 층의 물성 및 역 학치는 Table 1에 나타내었다. 해석시 테일러스층은 공 극률이 너무 높아 지하수위를 형성할 수 없기 때문에, 붕적층의 최상부를 포화시의 지하수면으로 가정하여 실 시하였다.

Table 1. Physical and mechanical properties of each layer in the study area.

Layer	Unit weight (tf/m ³)	Cohesion (tf/m ²)	Friction angle (°)	Deformation modulus (MPa)	Poisson's ratio (ν)
Talus	13.15	0	37	15	0.35
Colluvium	21.13(sat.)	10	35	30	0.35
Bedrock	23.0	300	34	2700	0.27

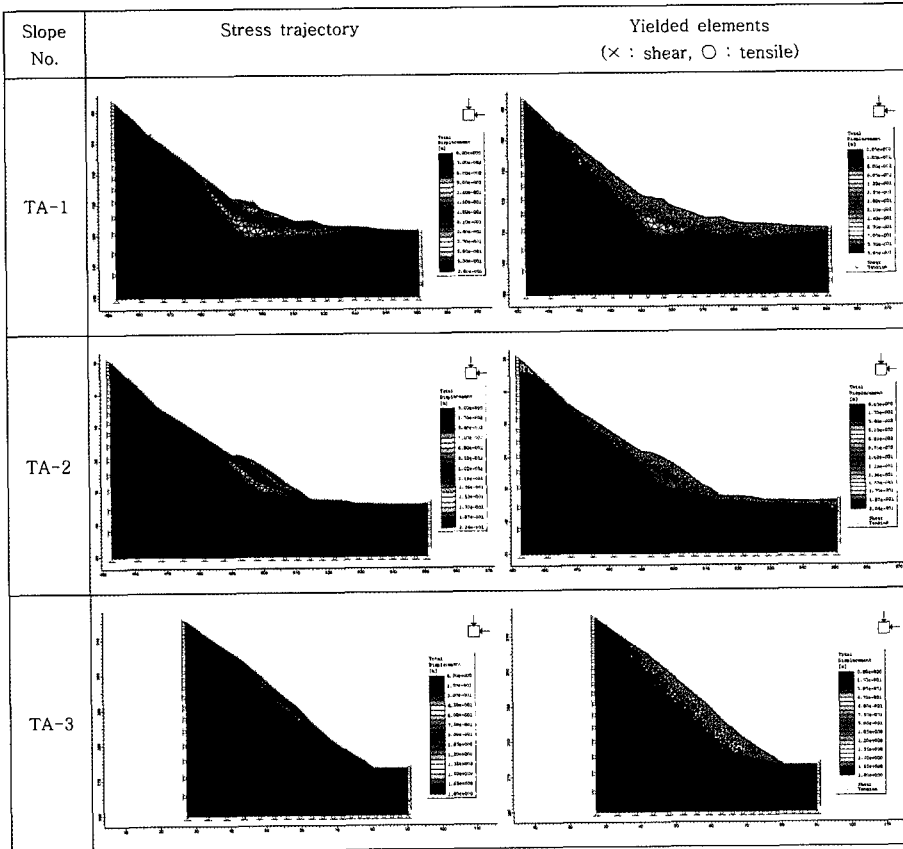


Fig. 10. 2D FEM stability analyses showing stress trajectories and failure types of each slope.

Fig. 10은 각 사면의 응력분포와 파괴형태를 나타내는 해석결과이다. 해석결과에 따르면 봉적층 상부에서 전단에 의한 파괴면이 집중적으로 분포하는 것을 알 수 있다. 이로 미루어 볼 때 파괴면은 공극이 토양으로 채워진 테일러스층의 기저면과 기반암의 상부에 잔류하고 있는 봉적층과의 경계면에서 형성되는 것으로 추정된다. 이는 Campbell(1975)이 제시한 집중강우시 봉적층에 형성되는 지하수위면(Fig. 2)의 개념과 잘 일치한다고 볼 수 있다. 다시 말해서 집중강우시 실제 테일러스 자체가 활동하기 보다는 기저면을 형성하는 토양의 함수비가 일시적으로 증가했다가 물이 배수되면서 입자들이 이동함으로써 상부의 테일러스층에 영향을 주게 되는 것으로 생각된다. 테일러스층의 파괴형태는 주로 인장파괴가 집중적으로 발생한다. 활동면을 형성하는 봉적층은 상부의 지속적인 하중작용과 중력에 의해 전단면을 형성하지만, 테일러스층은 점착력이 거의 없는 암편들이 상당한 공

극을 포함하며 쌓여 있으므로 내부요인에 의해 활동이 발생되면 각각의 암편들이 개별 운동을 하며 이동하기 때문에 인장성 붕괴로 나타난다. 테일러스 사면의 경사도와 응력과의 관계를 살펴보면, TA-3 사면은 하부의 다른 두 사면에 비해 경사도가 42°로 상대적으로 다소 높다. 이 때문에 응력이 전체 봉적층에 걸쳐서 골고루 분포하며, 파괴면도 봉적층과 기반암과의 경계면에서 형성되는 것을 볼 수 있다. 그러나 현재 TA-3사면은 붕괴되지 않고 비교적 안정화되어 있는데, 이는 봉적층을 구성하는 물질이 사질암에서 파생되어 투수성 및 배수성이 좋으므로 강우에 의한 영향을 덜 받기 때문인 것으로 생각된다.

3차원 사면안정해석

테일러스 사면의 안정성 해석을 위해 3D Slide Software를 이용한 3차원 사면안정해석을 수행하였다. 3

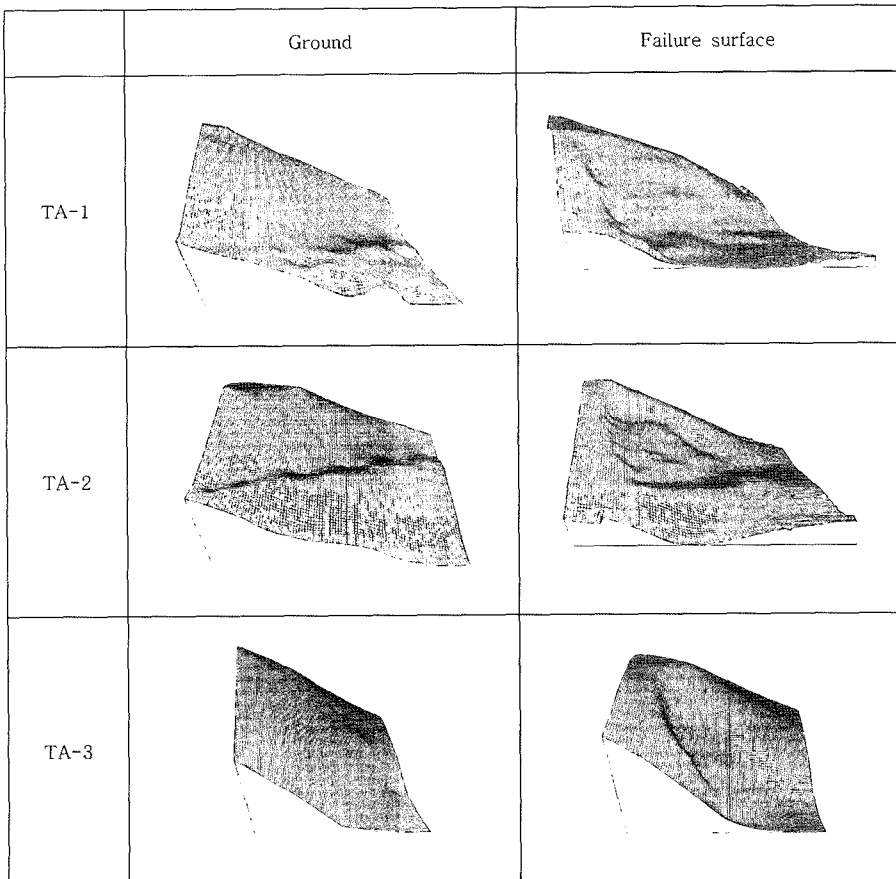


Fig. 11. 3D configurations of the ground and failure surface of each slope.

차원 사면안정해석은 실제 사면형상과 가깝게 모델링할 수 있는 장점이 있으며, 각 요소주의 단위중량 및 경사각을 달리하여 파괴면을 입체적으로 해석함으로써 더 정확한 안전율을 구할 수 있다(서용석 외, 2004). 해석결과는 안전율, 활동력 벡터(크기와 방향) 및 원으로 표시된다.

테일러스 사면의 해석모델은 각 지점에 대해 건조시와 포화시로 가정하여 작성하였으며, 포화시의 조건은 지하수위가 붕적층의 최상부가 되도록 설정하였다. 또한 파괴면은 PHASE2에 의한 해석의 결과를 바탕으로 TA-1과 TA-2 사면에서는 테일러스층하부에서 -3m, TA-3 사면에서는 붕적층하부에서 +1m 지점으로 설정하였다. 해석을 위해 작성된 테일러스 사면의 지형과 파괴면의 3차원 모델은 Fig. 11과 같고, 해석에 사용된 지반정수는 Table 2에 나타내었다.

각 사면에서 수행된 3차원 사면안정 해석 결과는 Table 3과 같다. 건조시의 테일러스 사면은 안전율이 약 1.3을 넘는 것으로 계산되었고, 이는 현재의 안정화된 사면 상태를 반영한다. 포화시는 안전율이 0.6~0.8로 산정되어 집중강우와 같이 급속한 지하수위 상승이 발생하는 경우 사면이 불안정해질 수 있음을 보여준다. 특히 만수위로 가정된 지하수면에서 1m씩 수위를 떨어뜨려 해석한 결과, TA-3 사면을 제외하면 테일러스 하한경계에서 -1m ~ -2m에 지하수위가 위치할 때 안전율이 1이상이 되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 테일러스 사면의 안정성이 강우에 의한 지하수위의 급격한 변화에 민감하게 반응하는 것을 보여준다.

Fig. 12-14는 각 사면의 활동방향과 크기를 나타낸 것이다. 여기서 좌측그림은 모델 작성 시 설정한 파괴면의 각 요소주 별 활동력의 벡터를 나타낸 것으로서, 붉은색 벡터는 사면의 주 활동방향과 동일한 방향을 의미하며, 푸른색 벡터는 주 활동방향과 반대방향, 즉 저항력을 나타낸다. 우측그림은 설정된 파괴면에 작용하는 힘의 상태를 보여주는 것으로 활동력과 저항력을 합한 응력의 크기를 표현한 것이다. 붉은색 원은 활동력이 우세하게 작용하는 요소주이며, 푸른색 원은 저항력이 우세하게 작용하는 요소주이다. 화면상단에 스케일로 표시되어 있는 반원은 활동력(sliding force : 10 t/m²)의 상대적인 크기를 나타낸다.

TA-1 사면은 지형특성상 사면의 경사도가 비교적 완만하며, 붕적층 및 테일러스층의 유역면적이 상대적으로 넓게 나타나고 있어 활동력 또한 특정방향으로 집중되기 보다는 사면의 지형등고선을 따라서 넓게 분포하는

Table 2. Geomechanical properties for 3D Slide.

Layer	Unit weight (tf/m ³)	Cohesion (tf/m ²)	Friction angle (°)
Talus	13.15	0	37
Colluvium	19.06(dry) 21.13(sat)	10	35

Table 3. Safety factors of each slope.

Slope No.	Elevation of water table	Factor of safety
TA-1	Dry	1.374
	Saturated	0.658
	-1m below the low limit of talus	1.000
	-2m below the low limit of talus	1.33
TA-2	-3m below the low limit of talus	1.222
	Dry	1.779
	Saturated	0.882
	-1m below the low limit of talus	0.928
TA-3	-2m below the low limit of talus	1.370
	-3m below the low limit of talus	1.622
	Dry	1.039
	Saturated	0.463
TA-3	-1m below the low limit of talus	0.560
	-2m below the low limit of talus	0.659
	-3m below the low limit of talus	0.757

특징을 보인다. 건조시와 포화시로 구분하여 해석하면 건조시는 사면의 저부에서 저항력이 크게 나타나고, 포화시는 활동력이 사면의 상부에서 중심부까지 크게 나타난다. 이는 붕적층의 심도와 관련이 있는 것으로 생각된다.

TA-2 사면은 테일러스 사면 내에 임도가 통과하는 특성을 반영한 것으로 응력의 집중구간이 사면 저부층과 부분적으로 단절되어 있고 벡터의 방향도 임도구간에서 분산되는 특징을 보여준다. 건조시 응력은 전체적으로 저항력이 우세한 것으로 나타나 안정한 상태를 보여주고 있으며, 부분적인 응력분포의 불균질성은 지형의 영향을 많이 받은 것으로 보인다. 포화시 응력분포를 보면 사면의 상단에서 저항력이 많이 떨어져 안전율이 0.882로서 불안정한 상태를 보여주고 있다. 또한 임도의 존재로 인하여 임도 하단에서 저항력이 크게 작용하여 부분적으로 저항력이 활동력보다 크게 분포함을 알 수 있다.

TA-3 사면은 경사가 42°로서 비교적 고각을 이루고 있으며, 전반적인 응력의 방향은 사면의 중심에서 하향으로 분포하고 있다. 건조시의 활동력과 저항력의 분포를 보면 사면의 상단부분은 활동력이 우세하고, 하단부분은 저항력이 우세한 것으로 나타났다. 우기시는 전반적으로 활동력이 매우 우세하여 불안정 상태를 보이고

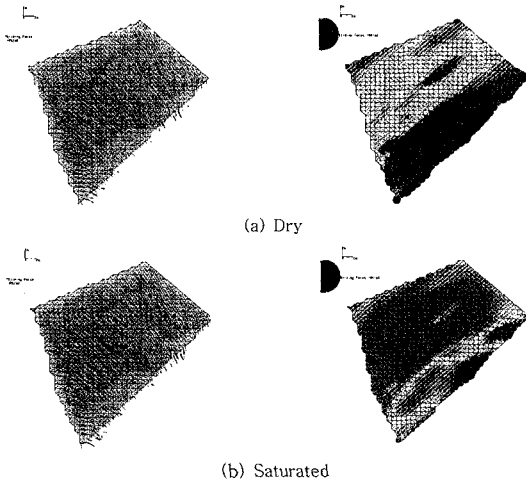


Fig. 12. Results of slope stability analysis using 3D Slide for TA-1.

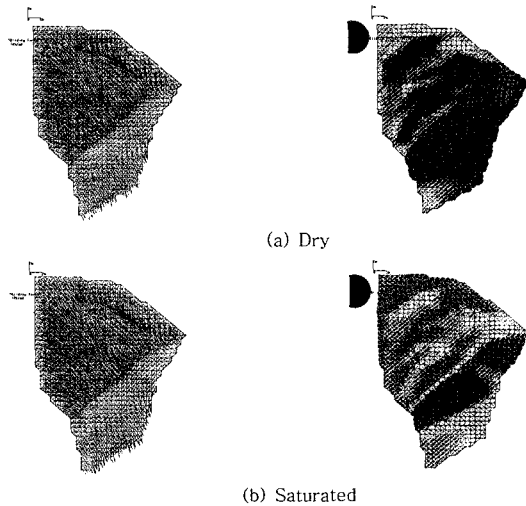


Fig. 13. Results of slope stability analysis using 3D Slide for TA-2.

있다. 파괴면에서의 활동력은 건조시 또는 포화시의 차이가 크지 않으나 저항력은 포화시에 급격하게 떨어지

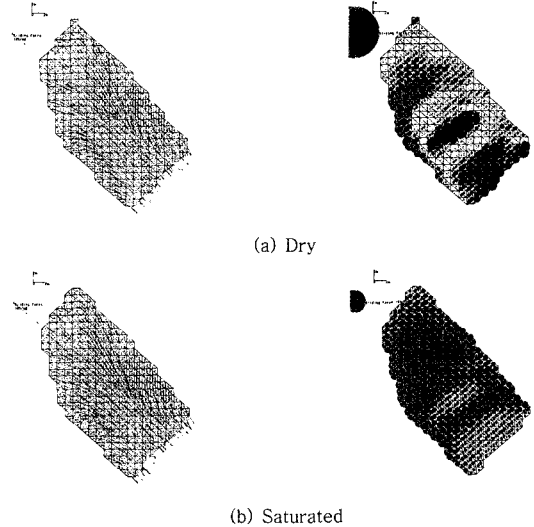


Fig. 14. Results of slope stability analysis using 3D Slide for TA-3.

는 것으로 나타났다. 상기의 결과를 종합해 볼 때 현재의 사면각은 거의 임계안각에 가까운 것으로 보인다.

Table 4는 3개 사면의 안정성 해석에 의하여 도출된 활동력, 저항력 그리고 안전율을 정리하여 나타낸 것이다. 건조시에는 안전율이 1이상으로 나타나는데, 이는 현재 3개 사면이 안정한 상태임을 반영한다. 강우에 의해 지하수위가 상승하여 완전포화상태에 도달할 때에는 3개 사면 모두 안전율이 낮아지는 것으로 나타났다.

결론

본 연구는 테일러스가 포함되어 있는 사면의 안정성 해석을 위해 수행되었다. 해석을 위해 현장조사와 시험을 실시하여 계산에 필요한 모델과 각 층의 물성 및 역학을 결정하였고, PHASE2를 이용한 유한요소해석을 통하여 테일러스 사면의 파괴면을 추정하였으며, 이를 근거로 3D Slide를 이용한 3차원 사면안정해석을 실시

Table 4. Driving force, resisting force and safety factor of each slope.

Slope No.	Condition of groundwater	Driving force (ton)	Resisting force (ton)	Safety factor
TA-1	Dry	2.99	4.108	1.374
	Saturated	3.151	2.075	0.658
TA-2	Dry	2.374	4.224	1.779
	Saturated	2.474	2.183	0.882
TA-3	Dry	1.873	1.946	1.039
	Saturated	2.035	0.942	0.463

하여 각 사면의 활동상태와 안전율을 산정하였다. 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

(1) 테일러스 사면은 심도별로 구분하면 테일러스층, 붕적층, 기반암으로 나누어지며, 테일러스의 공극이 토양으로 채워지는 구간부터 기반암까지를 붕적층으로 정의하였다.

(2) ○○지역 테일러스층의 단위중량은 우레탄 원통용기를 이용한 간이 현장시험을 통하여 추정하였고, 평균 1.315 g/cm^3 로 산정되었다. 붕적층의 단위중량은 메쉬법을 이용하여 계산한 결과, 1.315 g/cm^3 으로 산정되었다.

(3) 각 사면의 파괴면은 PHASE2를 이용한 유한요소 해석을 통하여 도출하였다. TA-1과 TA-2 사면은 파괴면이 테일러스층 경계 하부 -3 m로서 붕적층내에서 형성되는 것으로 나타났고, TA-3 사면은 기반암 상부 1 m 내외로 나타났다.

(4) 3D Slide를 이용한 3차원 사면안정해석은 건조시 모든 사면에서 안정한 것으로 나타났으며, 집중강우에 의해 일시적으로 테일러스 하부경계까지 급격히 포화될 경우 불안정해질 수 있음을 보여준다.

참 고 문 헌

- 서용석, 太田英將, 채병곤, 윤운상, 2004, 3차원 사면안정 해석을 이용한 활동지대 가장자리부의 전단저항에 관한 연구, 대한지질공학회, 14(4), 451-460.
- 이정우, 1985, 쌍곡 Talus의 지형과 구조, 지리학연구, 10, 769-784.
- 전영권, 1996, 천황산 Talus의 형성과 지형발달, 한국지리학회지, 2(2), 173-182.
- 전영권, 1998, 의성 빙계곡 일대의 지형적 특성 -테일러스를 중심으로-, 한국지역지리학회지, 4(2), 49-64.
- 삼척-고사리도폭, 1994, 한국지질자원연구원
- Behre, C. H., 1933, Talus behavior above timber in the Rocky Mountains, *Journal of Geology*, 41, 622-635.
- Caine, N., 1969, A Model for Alpine Talus Slope Development by Slush Avalanching, *Journal of Geology*, 77, 96p.
- Campbell, R. H., 1975, Soil Slips, Debris Flows, and Rainstorms in the Santa Monica Mountains and Vicinity, Southern California. U.S., Geological Survey Professional Paper 851, 51p.
- Fairbridge, R. W., ed., 1968, *The Encyclopedia of Geomorphology*, Hutchinson & Ross, Dowden, 1106p.
- Gardner, J. S., 1969, Observations of Surficial Talus Movement, *Z. Geomorph. N.F.*, 13, 318p.
- Judson, S., 1949, Rock-fragment slopes caused by past first action in the Jura Mountains(AIN), France, *Journal of Geology*, 57, 137-142.
- Miner, N. A., 1934, Talus Slopes in the Gaspé Peninsula, *Science*, 79, 230p.
- Monkhouse, F. J., and Small, R.J., 1978, *A Dictionary of*

- the Natural Environment*, Edward Arnold, 261p.
- Strahler, A. N., 1971, *The Earth Sciences*, 2nd ed. Harper & Row, New York, 824p.
- Turner, A. K., 1996, *Landslides*, National Academy Press, 525-549.

2007년 8월 29일 원고접수, 2007년 9월 14일 게재승인

이경미

충북대학교 지구환경과학과
361-763, 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)
Tel: 043-261-2765
Fax: 043-273-9645
E-mail: kmlee924@hanmail.net

김성권

충북대학교 지구환경과학과
361-763, 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)
Tel: 043-261-2765
Fax: 043-273-9645
E-mail: 302bedal@hanmail.net

서용석

충북대학교 지구환경과학과
361-763, 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)
Tel: 043-261-2765
Fax: 043-273-9645
E-mail: yssseo@cbu.ac.kr

이선복

동부건설(주) 토목설계팀 차장
135-523 서울시 강남구 대치동 891-10 동부금
용센터
Tel: 02-3484-2293
Fax: 02-3484-2360
E-mail: leesb111@dongbu.co.kr

김동현

(주)삼보기술단 지반사업부 이사
138-834, 서울시 송파구 방이1동 200-2 삼보빌딩
Tel: 02-3433-3041
Fax: 02-3433-3192
E-mail: k7419@chol.com

김도식

(주)삼보기술단 지반사업부 과장
138-834, 서울시 송파구 방이1동 200-2 삼보빌딩
Tel: 02-3433-3000
Fax: 02-3433-3192
E-mail: dgcivil@naver.com