The Journal of Engineering Geology, Vol.21, No.1, March, 2011, pp. 57-64

이종지질 분포사면에서의 3차원 사면안정해석

서용석[1]* · 이경미[1] · 김광염[2]

[1]충북대학교 지구환경과학과, [2]한국건설기술연구원 지반연구실

Three-dimensional Slope Stability Analysis of a Dual-lithology Slope

Yong-Seok Seo[1]*, Kyoung-Mi Lee[1], and Kwang-Yeom Kim[2]

[1]Department of Earth and Environmental Sciences, Chungbuk National University
[2]Geotechnical Engineering and Tunnelling Research Div., Korea Institute of Construction Technology

화강암과 안산암질 암맥이 공존하고 있는 붕괴사면을 대상으로 지질에 의한 전단강도의 차이를 반영한 3차원 사면안정해석을 수행하였다. 지질이 서로 다른 두 종류의 파괴면에 대한 전단강도를 파악하기 위하여 흙-암 경계면 직접전단시험을 수행하였고, 또한 상부 풍화토층에 대한 실내토질시험을 실시하였다. 시험결과 풍화토층에 비하여 흙-암 경계면의 전단강도가 낮게 나타났다. 사면내 지질분포의 차이가 안정성해석 결과에 영향을 주는 것을 알아보기 위하여 한계평형법을 이용한 2차원사면안정성 해석을 대표단면에서 실시하였으며, 사면내 분포지질에 따라 입력치를 다르게 할 수 있는 3차원사면안정성해석을 실시하여 2차원안정성해석과 그 결과를 비교하였다. 해석결과에 의하면 안전율이 건기시 0.92와 포화시 0.32로 모두 불안정하게 나타난 2차원해석결과와는 달리 3차원해석결과에서는 건기시에 안전율이 1.26, 포화시에 0.55로 나타났다. 이러한 결과는 사면내 지질분포를 고려할 경우 안정성 해석의 결과가 달라질 수 있음을 보여주고 있으며, 우기 직후 붕괴가 일어났던 점을 고려하면 3차원해석결과가 보다 현실적인 것으로 판단된다.

주요어 : 흙-암 경계면, 직접전단시험, 3차원 사면안정해석, 2차원 사면안정해석, 안전율

Three-dimensional slope stability analysis was applied to a failed dual-lithology slope containing both granite and an andesitic dyke, taking account of the differences in shear strength of the different lithologies. A direct shear test of the soil-rock boundary was performed to examine the shear strength of two different types of failure surfaces within different lithologies, and a laboratory test was performed on an upper, weathered soil layer. The test results indicate that shear strength was lower at the soil-rock boundary than within the weathered soil layer. A representative geological section was subjected to two-dimensional slope stability analysis using a limit equilibrium method to assess whether the distribution of lithologies upon the slope influences the results of stability analysis. The results were then compared with those of three-dimensional slope stability analysis, for which input parameters can be varied according to the distribution of lithologies upon the slope. The three-dimensional analysis yielded safety factors of 1.26 under dry conditions and 0.55 under wet conditions, whereas the two-dimensional analysis yielded unstable safety factors of 0.92 and 0.32, respectively. These findings show that the results of stability analysis are affected by the distribution of different lithologies upon the slope. Given that the studied slope collapsed immediately after rainfall, it is likely that the results of the three-dimensional analysis are more reliable.

Key words : Soil-rock boundary, Direct shear test, Three-dimensional slope stability analysis, Two-dimensional slope stability analysis, Safety factor

서 론

사면에 대한 안정성해석은 활동면, 강도, 지하수요소, 안정해석영역 등의 설정이나 계산방법에 따라 해석결과가 달라진다. 지금까지 일반적으로 사용되는 사면안정해석법은 지반의 대표단면을 대상으로 수행되는 2차원 한계

*Corresponding author: ysseo@cbu.ac.kr

평형 해석법이다. 한계평형법을 이용한 2차원 사면안정 해석은 사용의 편리성과 모델의 단순성 때문에 많이 이용되고 있지만 일반적으로 사면은 3차원적인 형상과 지질구조로 구성되어 있어 3차원적인 거동을 하므로 2차원 해석은 한계점을 가질 수밖에 없다. 해석에 있어서도 2차원해석은 단위층에 대하여 단일 강도값을 적용하게 된다. 특히 활동면과 비활동면의 경계부는 활동면의 중심부에서 멀어질수록 활동심도가 달라지는데, 2차원 해석은 이를 고려할 수 없으므로 도출되는 안전율이 일반적으로 보수적이다(서용석 등, 2004). 2차원 사면안정해석의 문제점을 해결하기 위해 1960년대부터 3차원 사면안정해석이 꾸준히 연구되어 왔다. 하지만 개발된 프로그램의 적용조건이 일반화되어 있지 못하고, 사면모델 작성 및 입력치 결정 등이 상대적으로 복잡하여 범용적으로 사용되지는 못하고 있다(Stark and Eid, 1998; Xie et al., 2004). 최근에는 컴퓨터 기술의 발달로 계산의 양이나 시간적 제약이 거의 없어져서 복잡한 계산모델을 간단하게 작성하게 되었으며 여러 가지 공학적 적용성의 문제점도 개선이 이루어져 많은 연구들이 진행되었다. 특히 안전율을 계산할 수 있는 가장 일반적인 3차원 해석법은 한계평형이론을 적용하는 것이기 때문에 많은 연구사례가 있다(Lam and Fredlund, 1993; Stark and Eid, 1998; Kimura and Itou, 2003; Wei et al., 2009).

절개지 사면에서 발생하는 붕괴유형은 주로 쐐기파괴, 평면파괴, 전도파괴, 원호파괴 등으로 분류될 수 있다. 이들 중 암반의 붕괴를 제외하면 일반적으로 흙사면 내지 혼합사면에서 토층 자체가 파괴되거나 기반암과 그 위의 풍화토층과의 경계면에서 붕괴가 발생한다. 이러한 종류의 붕괴는 토층의 물성과 흙-암 경계면에 대한 전단강도 특성을 파악하는 것이 매우 중요하며, 실내 시험을 통해 결정된 지반정수를 사용하여 사면안정성을 해석할 필요성이 있다. 흙의 물성시험이나 전단시험은 그 시험방법과 해석에 대하여 이미 규정화되어 있으나, 흙-암 경계면에 대한 시험은 이수곤과 김백순(2005)과 이경미 등(2009)에 의해 이루어진 바 있다. 본 연구에서는 동일사면내에 암맥의 관입으로 두 종류의 지질이 분포하는 붕괴사면현장에서 시료를 채취하여 흙-암 경계면 전단시험을 수행하여 전단강도를 획득하였으며, 불교란 흙시료를 대상으로 한 실내토질시험을 실시하여 풍화토의 전단강도를 결정하였다. 시험결과는 3차원 한계평형해석을 통하여 사면의 안전율을 구하였다. 사면안정성해석은 유사FEM해석이 가능한 PHASE2 프로그램을 이용하여 2차원적인 응력분포를 파악하였고, TALREN 97을 이용하여 2차원 한계평형해석을 실시하였으며, 3차원적인 지질분포를 고려 할 수 있는 3차원 한계평형해석을 위하여 3D slide software (Ohta and Hayashi, 1998; Ohta et al., 2000)를 이용하였다.

지질 및 사면현황

연구지역은 청원군 남일면 석판리에 위치하는 절개지 사면으로 반복적인 원호파괴가 발생한 현장이다. 사면은 망일산 말단부의 절개지로서 상부 해발고도 108 m, 하부 90 m 내외의 능선이 이어지는 구릉지이며, 돌출된 급경사지의 형태를 가진다. 사면의 전방과 상부에는 각각 지방도와 임도가 개설되어 있으며, 상부사면의 일부구간은 경작지로 이용되고 있다. 석판리 일대의 지질은 시대미상의 흑운모편암과 이를 관입한 쥬라기 반상 화강암으로 대별될 수 있다(Fig. 1). 흑운모편암은 퇴적기원 변성암으로 열접촉변성작용을 받아서 생성된 것으로 판단되며, 쥬라기 반상 화강암

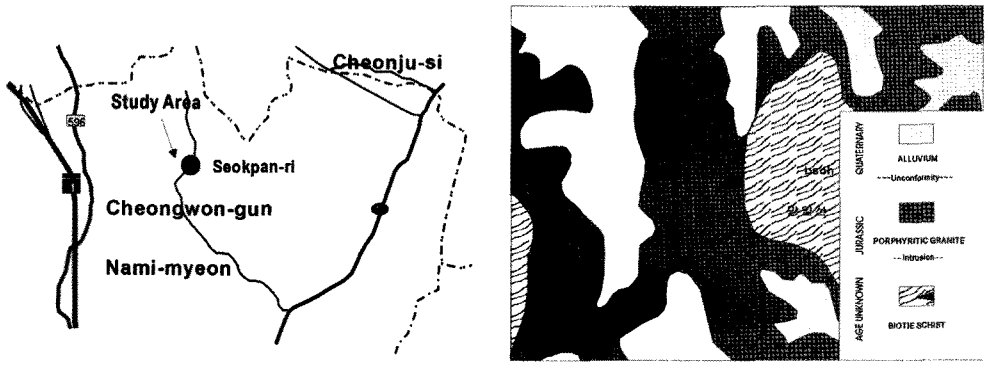

Fig. 1. Location (a) and geological map (b) of the study area.

은 대보화강암으로 불리는 화성암체로서 흑운모 편마암과 화강암질 편마암을 관입하였다(권영일과 진명식, 1974).

사면상에는 개비온이 시공되어 있으며, 붕괴로 인해 사면상에 식생공이 시공된 흔적이 있고, 강우의 침투를 방지하기 위한 부직포로 된 천막이 덮여 있는 상태이다. 기반암은 붕괴로 인해 노출된 면에서 일부 관찰되며, 대부분 쓸려 내려온 토사로 덮여있다. 또한 붕괴부의 좌측에는 중성질 암맥이 관입하여 있으며, 이는 하부에서 상부로 갈수록 넓어지는 경향이 있다. 불연속면은 일부구간에서 블록의 크기로만 나타나고 있어 그 특성을 관찰하기는 어려우며, 암맥 또한 파쇄대의 영향으로 매우 심한 풍화를 받은 상태이고, 부분적으로 누수 및 세굴이 진행되고 있다.

붕괴구간의 폭과 길이는 각각 19.3 m와 13.7 m이고, 파괴심도는 최대 1.5 m로 조사되었다(Fig. 2). 파괴면의 경사는 상부에서 31°, 중간부에서 43°, 하부에서는 39°의 변화양상을 보이며, 원호형태의 파괴양상을 보인다. 1차 붕괴가 발생된 후 개비온과 식생공이 시공되었으나(Fig. 3(a)와 (c)), 2차 붕괴의 발생으로 임시적인 사면보호 상태에 있다(Fig. 3(b)).

실내시험

토질시험

토층시료의 물리적 및 공학적인 특성을 파악하기 위하여 실내토질시험을 수행하였다. 불교란 시료는 원호파괴가 발생한 사면의 하부와 측부에서 채취하였고, 이를 이용하여 비중, 함수비, 간극비, 공극률, 밀도 등을 구하였다. 균등계수와 곡률계수는 입도분석시험을 통해 구하였고, 전단강도는 포화된 시료에 대한 직접전단시험을 통해 도출하였다. 직접전단강도의 시험결과는 Fig. 4와 같으며, 흙시료의 분석결과를 나타내면 Table 1과 같다.

물성시험결과, 함수비는 8.9%로 나타났으며, 간극비와

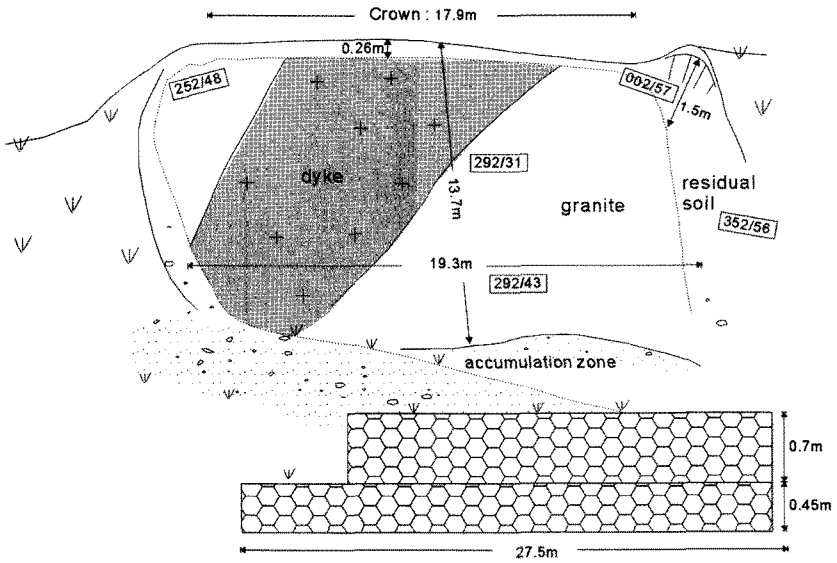

Fig. 2. Face map of the study area, compiled after the second slope failure.

Fig. 3. Photographs of slope failures: (a) after the first failure, (b) after the second failure, and (c) lateral view after the second failure.

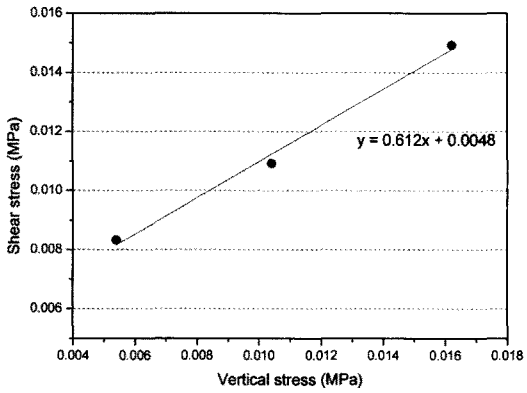

Fig. 4. Result of direct shear test of a soil sample.

공극률은 각각 0.87, 46.4%로 산정되었다. 사질토에서 균등계수가 6이상이고, 곡률계수가 1에서 3사이의 값을 가질 때 흙의 입도가 양호한 것으로 분류되는데, 연구지역의 토층은 균등계수와 곡률계수가 26과 2.4의 값을 가지므로 입도가 양호함을 알 수 있다. 흙은 통일분류법에 따라 SM으로 분류된다. 투수계수는 모래질 실트에 해당하는 것으로 불량한 배수상태임을 보여주며, 액소성한계 시험에서 액성한계는 32.9%, 소성한계는 20%, 소성지수는 12.9로 나타났다. 마찰각과 점착력은 31.5°, 0.0048 MPa로 도출되었다.

흙-암 경계면 시험

흙-암 경계면 시험을 위해 암석시료는 파괴가 발생한 영역에 분포하는 화강암과 암맥을 각각 채취하여 NX 사이즈의 코어로 천공하였다. 코어에서 파괴면을 보존하기 위해 반대편을 전단상자의 하부링과 같은 높이로 절단하였다. 시험절차는 토질 전단시험과 동일하지만 Fig. 5와

Table 1. Physical and mechanical properties of a soil sample.

Sample name	Specific gravity	Moisture content (%)	Grain size (%)					USCS
			Gravel	Sand	Silt/clay	Cu	Cg	
CW-3	2.67	8.9	3.8	85.8	10.4	26	2.4	SM

Sample name	Void ratio	Porosity (%)	Degree of sat. (%)	Unit weight (g/cm^3)			Shear strength	
				Dry	Wet	Sat.	Cohesion (MPa)	Friction angle (°)
CW-3	0.87	46.4	0.27	1.43	1.55	1.89	0.0048	31.5

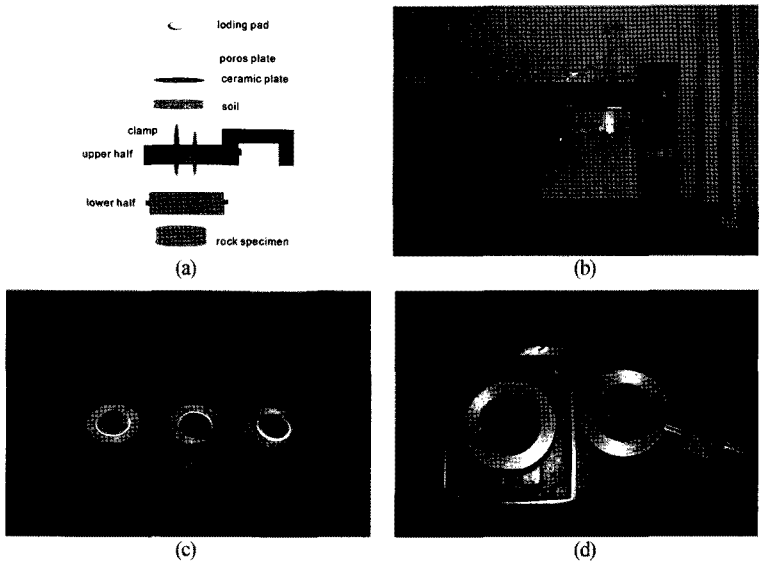

Fig 5. Direct shear apparatus for the soil-rock boundary test. (a) Detailed drawings of the shear box, (b) direct shear apparatus, (c) shear box before a test, and (d) shear box after a test.

같이 하부링에 암석시료를 고정시키고 상부링에 흙 시료를 넣는 점이 다르다. 전단상자의 직경은 6 cm이며 시험시 적용한 전단속도는 1 mm/min이다. 시험도중 암석시료가 움직이지 않도록 하기위해 하부링과 암석시료의 틈에 초속경 모르타르를 사용하여 고정하였으며, 상부링과 하부링간의 마찰을 최소화하기 위해 그리스를 바른 후 조립하였다. 전단시 현장의 응력상태를 고려한 수직하중을 주어 포화 및 압밀하였으며, 동일 시료의 공시체로 수직응력을 3단계로 달리 적용하여 최대 전단응력을 구하였다. 시험결과는 Fig. 6과 같으며, Table 2는 화강암과 암맥의 흙-암 경계면 시험으로 구한 점착력과 내부마찰각이다. 화강암은 흙 전단시험과 비슷한 32.5°를 보이나 암맥은 상대적으로 낮은 값인 21.2°로 나타났다.

사면 안정성해석

본 연구에서는 3차원 사면안정해석과 함께 대표단면에서 2차원 사면안정해석을 실시하였다. 2차원 사면안정해석에는 실제 해석사면에 이종의 암층이 분포함에도 해석프로그램의 한계로 흙과 암층에 유일한 대푯값만을 각각 적용할 수 있어 암층의 경우 분포범위가 넓고 상대적으로 강도가 높은 화강암의 중량과 강도정수를 이용하였다. 3차원 사면안정해석의 경우 모델 내에서 암맥과 화강암의 영역을 지정하고 강도정수를 설정하였으며, 사면의 3차원적인 형상을 고려하여 해석을 수행하였다.

2차원 수치해석

한계평형해석에 앞서 사면붕괴 구간에 유발되는 변위 분포범위와 최대응력집중구간을 알아보기 위해 유한요소해석 프로그램인 PHASE2 (Phase2 hybrid-finite element model)를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 해석은 사면에서 길이가 가장 긴 구간을 대표단면으로 선정하여 이용하였다. 해석에는 탄소성모델에 Mohr-Coulomb의 파괴기준이 적용되었으며 해석에 사용된 입력치는 Table 3과 같다. Fig. 7은 PHASE2의 해석결과를 나타낸 것이다. 본 그림에서 사면 표층부와 아평행하게 나타나는 옅은 색의 곡선이 암반층과 풍화토층의 경계이다. Fig. 7은 붕괴전 사면의 최대전단변형률(a)와 총변위(b)를 나타내는데, 흙과 암층의 경계부에서 최대전단변형률을 보이고 있으며, x와 y방향의 변위를 합친 총변위가 나타나는 영역도 최대전단변형률의 분포범위와 거의 일치하고 있어 해석대상 사면에서의 파괴는 풍화토층과 암반의 경계면 상부에 있는 풍화토층 내에서 붕괴되었음을 나타내고 있다. 또한 변위는 사면표층부에서 상대적으로 많이 발생하고 암반의 경계부로 갈수록 줄어드는 경향을 보인다.

Table 2. Results of soil-rock boundary tests.

Sample no.	Soil	Rock	Shear strength	
			Cohesion (MPa)	Friction angle (°)
CW-3-1	CW-3	granite	0.0076	32.5
CW-3-2	CW-3	dyke	0.001	21.2

Table 3. Input parameters used in two-dimensional slope stability analysis.

Geo-materials		Unit weight (g/cm^3)	Cohesion (MPa)	Friction angle (°)
Soil	Dry	1.43	0.0048	31.5
	Saturated	1.89		
Rock		2.65	0.0002	36.6

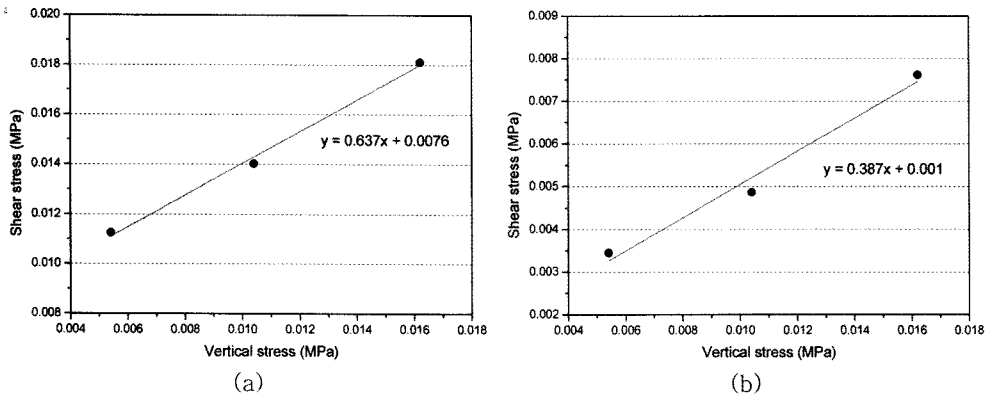

Fig. 6. Results of a direct shear test conducted at the soil?rock boundaries of (a) granite and (b) an andesitic dyke.

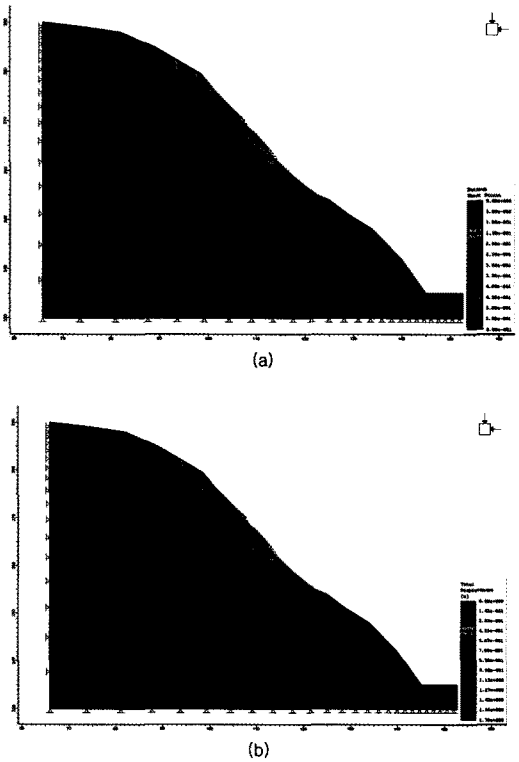

Fig. 7. Two-dimensional FEM slope stability analysis by PHASE2, showing (a) the maximum shear strain and trajectory, and (b) the total displacement.

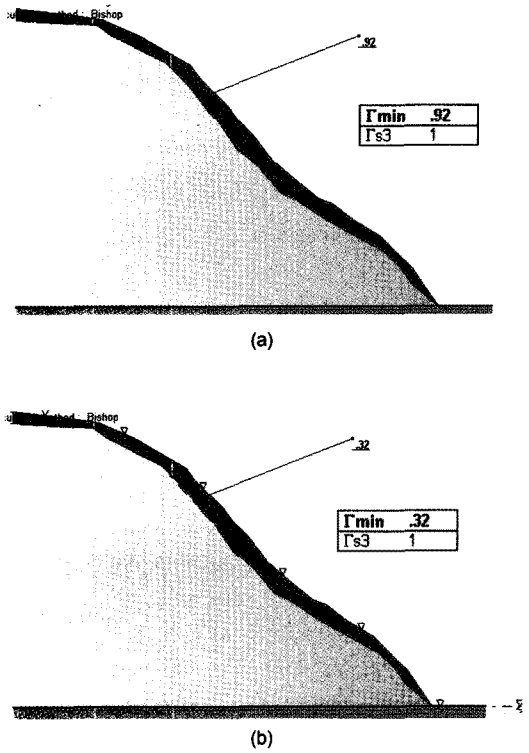

Fig. 8. Results of 2D slope stability analysis by TALREN97 under (a) dry conditions and (b) saturated conditions.

2차원 한계평형해석

2차원 사면안정해석에는 한계평형상태에서 지반 파괴면을 고려하여 평가할 수 있는 TALREN 97을 사용하였다. 해석시 지형 조건은 앞서 실시한 FEM해석의 모델과 동일하며, Bishop법을 사용하였으며, 포화시의 지하수위는 지표면으로 가정하였고, 파괴면은 앞서 실시된 FEM해석의 변위발생구간을 참조하여 파괴원호를 설정하였다. 해석시 사용된 입력치는 Table 3과 같다. 해석결과는 Fig. 8과 같으며, 건조시와 포화시의 안전율은 모두 1 미만의 불안정한 사면으로 나타났다(Table 4). 이러한 안전율은 지형단면선의 위치에 따라 서로 다른 값을 보여줄 수 있다.

3차원 한계평형해석

2차원 사면안정해석은 계산단면에 따라 서로 다른 안전율을 보이며, 해석시 입력되는 활동면의 강도는 단일평균 강도가 이용되는 것이 일반적이다. 그러나 복잡한 지질구조와 지형을 포함하는 활동면의 경우 다양한 강도정수를 반영할 수 없는 한계가 있다. 특히 연구지역과 같이 파괴면이 두 종류의 지질로 구성되는 경우, 이를 반영할 수 있는 안정성해석이 필요하다. 3D Slide Software (Ohta and Hayashi, 1998; Ohta et al., 2000)는 3차원적인 모델을 작성하여 구간별로 별도의 물성 및 역학성을 반영할 수 있는 해석프로그램이다(서용석과 윤운상, 2004; 서용석 등, 2004). 본 해석을 위한 원지형모델은 국토지리정보원에서 발간한 1 : 5000 수치지형도를 이용하여 작성하였으며, 파괴면에 대한 모델은 현장측량을 통하여 실측현황도에 표고속성을 부여한 후 3차원 데이터로 변환하여 작성하였다(Fig. 9). 지하수위 모델은 지형데이터를 기초로 하여 모든 구간에 동일한 심도로 분포하도록 작성하였으며, 건조시에는 지하수위가 활동면의 표고보다 낮게 분포하도록 구성하였고, 포화시에는 지표면과 일치하도록 구성하였다. 해석영역은 활동

Table 4. Safety factors calculated for a 2D slope stability analysis using TALREN97.

Groundwater condition	Safety factor
Dry	0.92
Saturated	0.32

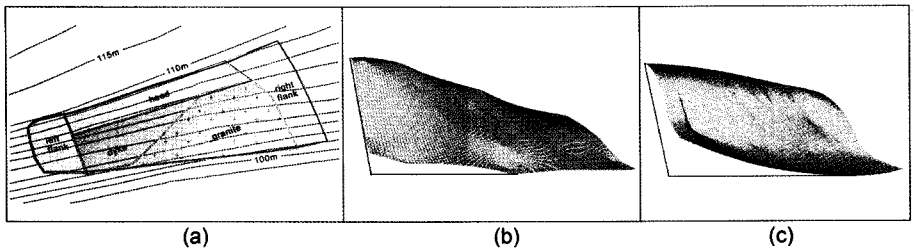

Fig. 9. Three-dimensional configurations of (a) the analysis zone, (b) the original surface, and (c) the failure surface.

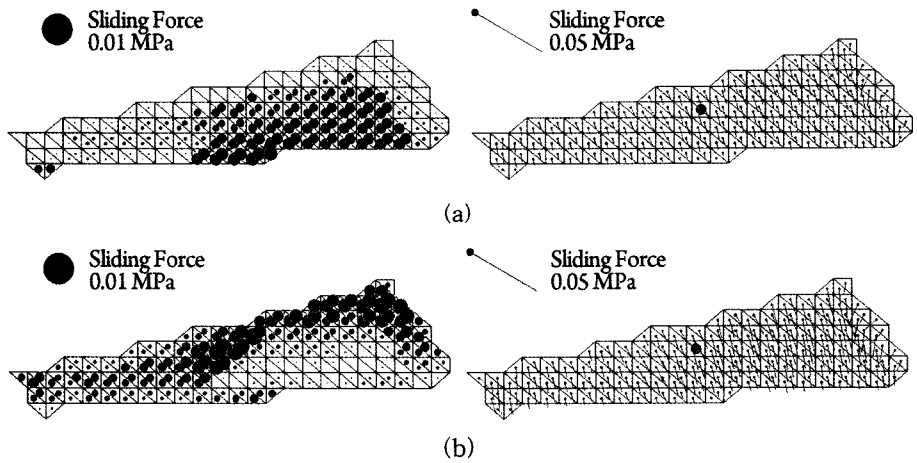

Fig. 10. Results of 3D slope stability analysis using 3D slide, under (a) dry conditions and (b) saturated conditions.

이 일어난 전 구간으로 설정하였으며, 해석에 입력되는 정수는 좌·우 측벽부에 흙 전단시험 결과를 이용하였고, 활동면은 모암과 이를 관입한 암맥을 고려하여 두 구간으로 분할한 뒤 흙-암 경계면 시험결과를 사용하였다.

Fig. 10은 파괴영역에 작용하는 활동력과 활동벡터를 나타낸 것이다. 각 요소에 표시된 원들은 활동력과 저항력의 상대적 크기 차를 의미하며 붉은색의 원은 활동력이, 푸른색의 원은 저항력이 우세하게 작용하는 것을 나타낸다. 선은 작용력의 벡터를 나타낸 것이다. 벡터 한쪽 끝의 작은 점은 벡터의 시작부이다. 해석결과를 살펴보면 활동벡터의 방향성이 사면의 주활동방향과 유사한 방향성을 나타내며, 포화시 활동력의 크기가 건기시 보다 크게 나타난다. 포화시 파괴면의 상단부는 활동력이 우세한 붉은색 원이 집중되며, 이는 매우 불안정한 사면상태를 보여준다. 또한 건조시의 활동력과 저항력의 분포를 보면 전단강도가 상대적으로 낮은 암맥이 분포하는 영역에서 활동력이 많이 분포하고 있고, 포화시에도 전반적으로 활동력이 큰 것으로 나타난다. 화강암이 분포하는 영역에서는 포화시에 상대적으로 경사도가 급한 상단부에 활동력이 크게 분포하고 있다. 3차원 사면안정해석 결과, 건조시와 포화시의 안전율은 각각 1.26과 0.55로 현저한 차이를 보인다 (Table 5).

2D 사면안정해석과 3D 사면안정해석의 차이

본 연구지역은 복합적인 지질이 분포하는 사면으로 지질분포가 사면 붕괴에 미치는 영향이 비교적 크다. 이러한 지역에서 2차원 사면안정해석을 실시하면 지질적 분포특성을 반영하기에 한계가 있다. 3D Slide를 이용한 3차원 사면안정해석은 지형적 기복을 반영할 뿐만 아니라 사면에 분포하는 지질분포를 반영할 수 있다. 해석결과에서도 2차원 해석의 경우 건조시 0.92로 붕괴로 나타났으나, 3차원해석

Table 5. Forces and factor of safety calculated by 3D limit equilibrium analysis.

Site No.	Condition of groundwater	Driving force (kgf)	Resisting force (kgf)	Factor of safety
CW-3	Dry	103,225	129,598	1.26
	Saturated	103,225	56,216	0.55

에서는 1.26으로 안정한 것으로 나타났다. 본 지역의 붕괴가 강우직후에 나타났음을 고려할 때 3차원해석의 결과가 좀 더 현실적으로 판단된다. 또한 3차원해석에서는 사면의 각 부분에 작용하는 활동력과 저항력을 파악할 수 있기 때문에 보강시 보다 효과적이고 경제적인 시공을 실시 할 수 있다. 하지만 많은 개선에도 불구하고 3차원해석은 해석툴의 사용이 상대적으로 어렵고, 사면에서의 강도정수를 산정하는 것에 어려움이 있는 것이 현실이다. 앞으로 이러한 단점을 극복할 수 있는 많은 연구가 필요하다.

결 론

1. 실내시험 결과에 의하면 연구지역의 토층은 모래질 실트지반에 해당하며 배수가 불량한 상태를 보여준다. 암맥과 흙의 경계면 전단강도는 화강암과 흙의 경계면 전단강도보다 낮게 나타난다.

2. Phase2 해석결과 최대전단변형률과 총변위가 분포하는 영역이 흙과 암반의 경계면 상부로서 실제 파괴영역과 유사하게 나타났다. 총변위는 표층부에서 가장 크게 나타났으며, 최대전단변형률은 흙과 암반의 경계에서 최대로 나타났다. 한계평형법을 이용한 2차원 사면안정해석결과, 안전율은 포화시와 건기시에 모두 불안정한 사면으로 나타났다.

3. 흙-암 경계면 전단시험 결과를 이용하여 지질별로 각기 다른 강도정수를 적용하여 3차원 해석을 수행한 결과, 건조시에는 안정한 것으로 나타났으나, 포화시 급격히 불안정한 사면상태에 도달하는 것으로 나타났다. 이는 본 검토대상사면이 집중강우시 붕괴가 일어났음을 감안할 때 3차원 사면안정해석이 2차원 사면안정해석보다 붕괴현상을 보다 현실적으로 설명한다고 할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

권영일, 진명식, 1974, 청주 지질도폭, 한국지질자원연구원, pp.2-6.

서용석, 윤운상, 2004, 3차원 사면안정해석에 관한 소고, 지질공학, 14(2), 235-241.

서용석, 太田英將, 채병곤, 윤운상, 2004, 3차원 사면안정해석을 이용한 활동지괴 가장자리부의 전단저항에 관한 연구, 지질공학, 14(4), 451-460.

이경미, 임성빈, 정해근, 서용석, 2009, 충북지역 흙-암 경계면 전단강도 산정, 춘계지질과학기술공동학술대회 논문집, pp.410.

이수곤, 김백순, 2005, 암과 흙 경계면에서의 전단강도 특성 연구, 대한지질공학회 학술발표회, 189-193.

Kimura, T. and Itou, T., 2003, Evaluation by three-dimensional slope stable analysis of tunnel digging in the landslide area, 日本地すべり究表, 181-184.

Lam, L. and Fredlund, D.G., 1993, A general limit-equilibrium model for three-dimensional slope stability method in practice, Can. Geotech. J., 30, 905-919.

Ohta, H. and Hayashi, Y., 1998, A study of three-dimensional analysis of slope stability (part 1), 日本地すべり究表, 441-444.

Ohta, H., Hayashi, Y. and Kokugan, S., 2000, A study of three-dimensional analysis of slope stability (part 2), 日本地すべり究表, 59-60.

Stark, T. and Eid, H, 1998, Performance of three-dimensional slope stability methods in practice, J. of Geotech. and Geoenviron. Engng, 124, 11, 1049-1060.

Wei, W.B., Cheng, Y.M. and Li, L., 2009, Three-dimensional slope failure analysis by the strength reduction and limit equilibrium methods, Computers and Geotechnics 36, 70-80.

Xie, M., Esaki, T. and Cai, M., 2004, A GIS-based method for locating the critical 3D slip surface in a slope, Computers and Geotechincs, 31, 267-277.

2011년 2월 25일 원고접수, 2011년 3월 21일 게재승인

서용석
충북대학교 지구환경과학과
361-763 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410
Tel: 043-261-2765
Fax: 043-276-9645
E-mail: ysseo@cbu.ac.kr

이경미
충북대학교 지구환경과학과
361-763 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410
Tel: 043-261-2765
E-mail: kmlee924@daum.net

김광염
한국건설기술연구원 지반연구실
411-712 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283
Tel: 031-9100-225
E-mail: kimky@kict.re.kr