

모형실험을 통한 암반사면의 파괴거동에 대한 연구

조태진¹ · 석재욱¹ · 이성암² · 엄정기^{1*}

¹부경대학교 환경탐사공학과, ²지오제니 컨설턴트 자원사업부

Investigation of Rock Slope Failures based on Physical Model Study

Taechin Cho¹, Jae Uk Suk¹, Sung Am Lee², and Jeong-Gi Um^{1*}

¹Dept. of Environmental Exploration Engineering, Pukyong National University

²Resource & Business Dept., GeoGeny Consultants Group Inc.

절리면의 거칠기, 충전물 등의 공학적 특성과 활동면 경사, 수압하중을 고려하여 암반사면의 파괴거동을 고찰하고 파괴시기를 예측하기 위하여 모형실험이 수행되었다. 절리면 거칠기는 폭, 길이, 높이 등을 고려하여 톱니형으로 제작하였다. 충전물은 거칠기의 돌출부 높이에 대하여 일정한 충전물두께를 유지하는 방식으로 0에서 돌출부 높이의 1.2배까지 증가시켰다. 수압증가에 따른 사면의 거동양상을 파악하기 위해서는 인장균열에 완전히 가해질 수 있는 수압을 100%로 하여 0.5%/min 및 1%/min의 속도로 0%에서 파괴 시 까지 수압하중을 증가시켰다. 모형실험은 활동면 경사각 30°와 35°에서 각각 거칠기, 충전물 두께, 수압하중증가 등의 조합을 변화시키면서 총 50회 수행하였다. 모형실험결과 절리면의 거칠기가 없는 경우의 파괴거동 양상은 수압하중 증가 조건과 충전물의 유무에 관계없이 선형 변위거동으로 나타나는 것이 특징적이다. 거칠기가 존재할 경우에는 충전물 두께가 거칠기 높이보다 낮을 때 계단형 변위거동이, 거칠기 높이 이상일 때 지수형 변위거동이 특징적이다. 이는 충전물 두께가 거칠기의 높이를 넘어서면 절리면의 거동특성이 충전물의 공학적 특성에 좌우되기 때문인 것으로 판단된다. 파괴를 유발하는 수압하중의 크기는 절리면의 거칠기가 증가함에 따라 증가한다. 충전물의 두께가 증가할수록 거칠기의 영향이 작아져 파괴 시 수압하중은 감소한다. 파괴가 임박한 시점에서 3차 크립 형태의 변위거동을 보이는 지수형의 경우에는 inverse velocity를 이용한 파괴시기 예측이 가능한 것으로 판단된다. 다만 실험에서 나타난 거동특성이 완전한 지수형이 아니고 계단형과 지수형의 중간형태로 나타나는 경우가 대부분이므로 정확한 파괴시기 예측을 위해서는 다수에 걸친 파괴시간 추정이 필요할 것으로 사료된다.

주요어 : 모형실험, 암반사면, 모니터링, 파괴시기 예측

Laboratory tests for single plane sliding were conducted using the model rock slope to investigate the cut slope deformability and failure mechanism due to combined effect of engineering characteristics such as angle of sliding plane, water force, joint roughness and infillings. Also the possibility of prediction of slope failure through displacement monitoring was explored. The joint roughness was prepared in forms of saw-tooth type having different roughness specifications. The infillings was maintained between upper and lower roughness plane from zero to 1.2 times of the amplitude of the surface projections. Water force was expressed as the percent filling of tension crack from dry (0%) to full (100%), and constantly increased from 0% at the rate of 0.5%/min and 1%/min upto failure. Total of 50 tests were performed at sliding angles of 30° and 35° based on different combinations of joint roughness, infilling thickness and water force increment conditions. For smooth sliding plane, it was found that the linear type of deformability exhibited irrespective of the infilling thickness and water force conditions. For sliding planes having roughness, stepping or exponential types of deformability were predominant under condition that the infilling thickness is lower or higher than asperity height, respectively. These arise from the fact that, once the infilling thickness exceeds asperities, strength and deformability of the sliding plane is controlled by the engineering characteristics of the infilling materials. The results obtained in this study clearly show that the water force at failure was found to increase with increasing joint roughness, and to decrease with increasing filling thickness. It seems possible to estimate failure time using the inverse velocity method for sliding plane having exponential type

*Corresponding author: jum@pknu.ac.kr

of deformability. However, it is necessary to estimate failure time by trial and error basis to predict failure of the slope accurately.

Key words : physical model study, rock slope, monitoring, prediction of failure time

서 론

절리에 의한 사면의 거동 및 붕괴는 주로 강우와 지하수위에 의하여 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다 (Lollino *et al.*, 2002). 특히 집중호우 기간과 직후에 나타나는 사면암반의 파괴사태가 전 세계에서 매년 수없이 보고되고 있으며, 우리나라에서도 매년 7, 8월의 장마철과 집중호우 기간에 산사태나 사면붕괴가 빈번히 발생하고 있는 실정이다.

사면의 파괴거동에 대한 연구는 국내의 연구자들에 의하여 지속적으로 이루어지고 있는데, 실제 현장에서 측량프리즘, 강우량계, 간극수압계, 신축계, 지중경사계 등의 모니터링 시스템을 구축하여 데이터를 수집하여 분석하는 방법(Miller, 1964; Hendron and Patton, 1985; 조태진 외, 2006)과 축소모형사면을 이용한 실험을 통하여 사면 안정성에 영향을 주는 여러 가지 조건을 적용하고 사면의 거동을 분석하는 방법(Fukuzono, 1985, 1990)이 주를 이룬다. 그러나 실제 사면을 대상으로 모니터링 시스템을 구축하고 장기간에 걸친 데이터를 이용하여 파괴 시까지의 파괴거동을 분석한 사례가 드물며 모형실험 또한 주로 토사면을 대상으로 하여 암반사면의 파괴거동에 대한 연구는 부족한 편이라 볼 수 있다. 이에 실제 현장에서 모니터링 시스템을 구축하여 사면의 파괴거동 양상을 파악할 수 있을 만큼의 충분한 자료를 수집하는데 어려움이 따르며 파괴활동이 예상되는 경우 보강조치로 인하여 사면활동이 억제되기 때문이기도 하다. 최근에 상시계측과 관련된 사면안정에 대한 연구가 수행되기도 하였지만 대부분의 경우 사면 모니터링 측면에 치중되어 있다. 절리성 암반사면의 붕괴에 대한 실질적인 예방 및 대책 수립을 위해서는 암반의 공학적 특성에 따른 거동양상 파악 및 파괴시기 예측 등의 기초적인 요소이론에 대한 연구가 더 많이 이루어져야 한다.

이 연구는 절리면의 거칠기, 충전물, 활동면 경사 및 수압하중 등의 공학적 특성을 고려하여 암반사면의 파괴거동 양상을 파악하기 위한 모형실험장치를 개발하고 모형사면에 대한 실험을 수행하여 절리의 공학적 특성에 따른 암반사면의 파괴거동 양상을 분석하였다. 또한

Fukuzono(1985)가 제시한 inverse-velocity를 이용한 암반사면의 파괴시기 예측기법의 적용성에 대해서도 고찰하였다.

모형실험

모형실험장치

암반사면의 파괴거동을 재현하기 위하여 개발된 모형실험장치는 Fig. 1과 같이 사면경사재현장치, 수압재현장치, 사면거동측정장치, 모형사면으로 구성되어 있다. 사면경사재현장치는 수평을 유지할 수 있는 경사판, 수준계, 각도기, 도르레 등으로 구성되어 경사를 조절할 수 있도록 제작하였다. 사면경사재현장치를 통하여 모형사면의 활동면은 임의의 일정한 경사 (ψ_p)를 유지할 수 있다.

수압재현장치는 Fig. 2와 같이 인장균열과 활동면에 수리적으로 연속적인 수두가 인장균열(z)에서 임의의 높이(z_w)까지 작용할 수 있도록 고안하였다. 이와 같은 수압하중이 모형사면에 직접적으로 작용하도록 구현하는 것은 매우 어려우며 이 연구에서는 인장균열면의 수압하중 V와 활동면에 작용하는 수압하중 U를 물의 무게로 환산하여 간접적으로 구현하는 방법을 고안하였다.

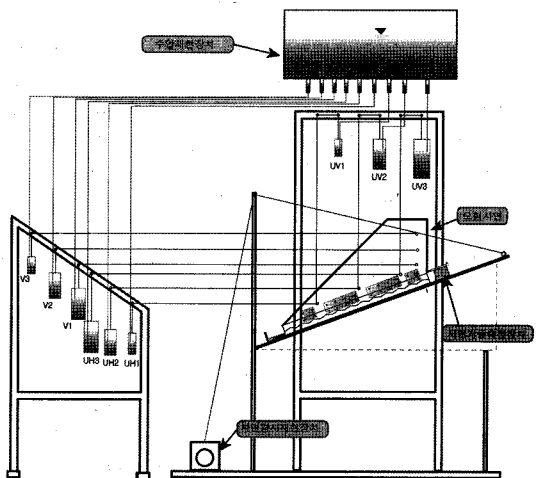


Fig. 1. Illustration of test equipments for physical model study of slope failures.

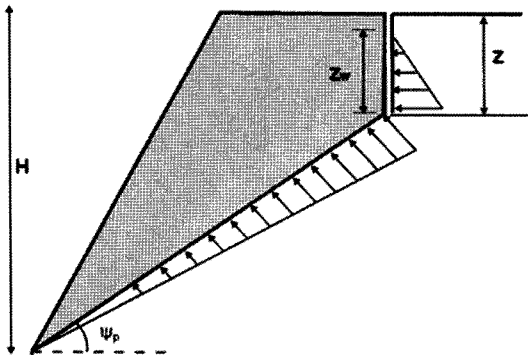


Fig. 2. Illustration of water pressure acting on both sliding plane and tension crack.

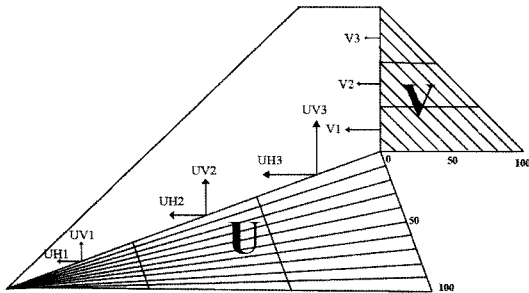


Fig. 3. Visualization of water pressure loading.

V는 인장균열을 3등분하여 각 면적에 해당하는 수압하중 V1, V2, V3로 분해하고 U는 수직방향의 수압하중(UV1, UV2, UV3)과 수평방향의 수압하중(UH1, UH2, UH3)으로 분해하였다(Fig. 3). 수압을 일정하게 증가시키기 위해서는 유량제어기를 이용하였다. 실험에서의 수압하중은 z_w 가 z 까지 이를 때의 수압하중을 100%로 하여 z 에 대한 z_w 의 비율(%)로 표현하였다.

사면거동측정장치는 모형사면의 거동에 따른 변위를 측정하기 위해 모형사면의 활동면과 평행하게 거치대를 만들어 미끄러짐 방향으로 모형사면의 변위를 측정하기 위한 전자프로브(electronic probe)를 설치하였다. 사용된 전자프로브는 정밀도가 1 μm이며 측정범위는 10 mm이다. 측정된 자료는 초당 5회 측정·기록이 가능한 데이터로거를 이용하여 PC로 전송하였다.

모형사면은 석고로 제작하였으며 Fig. 4와 같이 길이, 너비, 인장균열 깊이가 각각 600 mm, 200 mm, 200 mm이다. 모형사면의 활동면에서 거칠기 변화를 고려하기 위하여 모형사면 하부에 착탈식으로 거칠할 수 있는 거칠기 블록을 제작하였다.

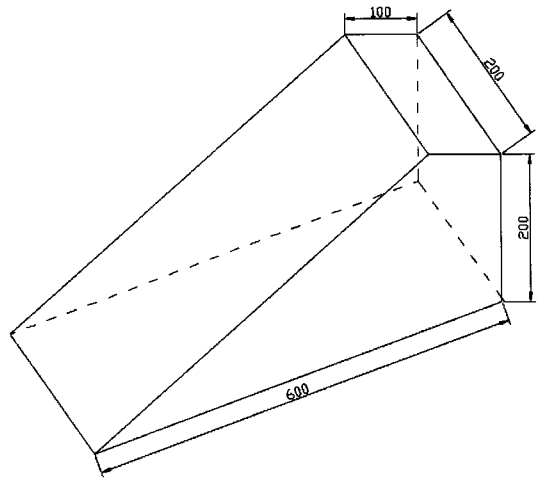
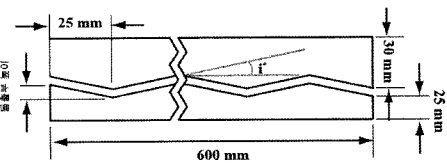


Fig. 4. Geometry of model slope having fixed dimensions.



너비(mm)	높이(mm)	i	JRC
-	0	0°	0
25	3	7°	2.3
25	7	16°	14.2

Fig. 5. Specifications of joint roughness block.

절리의 거칠기 및 충전물

활동면으로 작용하는 거칠기 블록의 형상은 거칠기(roughness angle, i)가 각각 0, 7, 16°가 되도록 Fig. 5와 같이 석고로 성형하였다. 완성된 각각의 거칠기 블록은 모형사면 하부에 탈부착하는 방식으로 제작하여 하나의 모형사면에서 여러 종류의 거칠기를 가진 절리면을 구현할 수 있도록 하였다.

거칠기 블록의 i 를 JRC(joint roughness coefficient)로 나타내기 위해서는 Tse and Cruden(1979)의 Z_2 를 적용할 수 있다. Tse and Cruden은 Barton(1973)이 제시한 JRC 기준형상을 사용하여 JRC와 Z_2 의 관계를 제시하였는데, 이를 적용하여 각각의 거칠기 블록에서 추정된 JRC 값이 Fig. 5에 수록되어 있다.

충전물의 효과를 고려하기 위해서는 모형사면에서 절리의 전단 강도를 저하시킬 수 있도록 모래와 현장점토를 혼합한 인공충전물을 제작·사용하였다. 모래의 유

효경은 0.3~0.45 mm 이며 현장점토는 부산지역에 분포하는 화산암류의 열수변질대에서 채취한 것으로 XRD 분석 결과 석영, 사장석, 녹니석 등이 다량 함유되어 있고 알카리장석, 및 팽윤성 점토광물인 스멕타이트, 비미클라이트 등을 함유하고 있는 것으로 나타났다. 점토 내에 함유되어 있는 스멕타이트, 비미클라이트는 수화 시 팽창되어 사면의 전단강도를 감소시키고 사면의 안정성을 저해하는 대표적인 팽윤성 광물로 알려져 있다. 실험에 적합한 인공충전물 배합을 위해서는 다양한 혼합비의 인공충전물에 대한 경동시험(tilt test)을 실시하고 전단강도를 고려하여 모래 : 점토 = 4 : 1(부피비)를 채택하였다.

이 연구에서는 충전물의 종류보다는 거칠기 정도에 대한 충전물의 두께가 절리의 파괴거동에 미치는 영향을 분석하는데 주안점을 두었다. 충전물 두께는 절리면 돌출부 높이(a)에 대한 충전물 두께(f)의 비로 식 (1)과 같이 두께비(FR)로 정의하여 적용하였다.

$$\text{두께비}(FR) = \text{충전물 두께}(f) / \text{절리면 돌출부높이}(a) \quad (1)$$

실험에서 사용된 절리면의 돌출부의 높이는 i의 크기에 따라 각각 0, 3, 7 mm이다. 돌출부 높이가 0 mm인 평탄한 절리면의 경우에는 두께비를 산정할 수 없으므로 3 mm일 때와 동일한 충전물 두께를 유지시켰다.

실험조건

모형실험은 FR 및 i 등의 공학적 특성을 달리하며 수압하중의 증가속도를 고려하여 ψ_p 가 30° 및 35°에서 각각 30회와 20회를 실시하였다. 실험에서 수압하중의 증가조건은 수압하중의 크기를 $z_w/z(\%)$ 로 표현하여 Table 1과 같이 분당 0.5% 및 1% 씩 증가하도록 구현하였으며 사용된 FR, i, ψ_p 의 값이 Table 2에 수록되어 있다.

Table 1. Conditions of water force.

Conditions of water force	
case 1	0.5% increment per min.
case 2	1% increment per min.

Table 2. Engineering characteristics of the model slope.

Engineering characteristics	Experimental conditions
ψ_p	30°, 35°
i	0°, 7°, 16°
FR	0, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2

실험결과 및 고찰

사면의 파괴거동 양상

모형사면에서 ψ_p 가 30°이고 수압조건이 case1과 case2 일 때, FR 및 i의 변화에 따른 활동면 경사 방향으로의 변위가 Fig. 6에 나타나 있다. 활동면의 경사각이 30°인 경우 모형사면의 파괴거동 양상은 크게 2차 크립 형태의 선형, 계단형, 계단형과 지수형의 중간형태 및 3차 크립 형태의 지수형 등으로 분류할 수 있다. 거칠기의 크기에 관계없이 FR이 0.6이하일 경우에 변위거동형태는 선형 및 계단형 거동형태로 나타난다. 거칠기가 존재하고 FR이 0.9 이상일 경우에는 계단형과 지수형의 중간형태 및 지수형의 거동형태가 주로 나타나는데, 특히 수압조건이 case2일 때 특징적으로 나타난다. FR이 0.9 이상인 경우의 변위 거동형태는 충전물의 두께가 커져서 돌출부의 영향이 작은 파괴거동으로 볼 수 있다. 또한 이와 같은 지수형의 거동형태는 수압하중의 증가가 비교적 빠른 조건(case 2)에서 더 뚜렷하게 나타나는 것으로 보아 수압하중 증가속도 역시 사면파괴의 거동형태에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

ψ_p 가 35°, 수압조건이 case1과 case2일 때, FR, i의 변화에 따른 모형사면의 파괴거동 양상이 Fig. 7에 나타나 있다. 여기서 i가 0°이고 충전물이 존재하는 경우에는 ψ_p 가 34°에서 파괴됨으로 인하여 실험이 불가하며 이를 제외한 i = 7°, 16°인 거칠기 조건에서만 실험을 수행하였다.

활동면의 경사각이 35° 일 때 파괴 시까지 측정되는 변위는 활동면의 경사각이 30° 일 때보다 상대적으로 작게 나타나는 것으로 확인되었다. 이에 는 활동면의 경사가 높은 경우 수압 증가에 따라 급격한 파괴 거동이 일어나기 때문이며 본 실험에서 사용된 데이터로거가 거동변위를 정밀하게 측정하고 파괴시기를 추정하는데 어려움이 있을 수 있음을 시사한다. FR이 높은 조건에서는 계단형 거동과 지수형 거동의 중간 형태와 지수형 거동형태가 30° 일 때보다 뚜렷하게 나타나는 경향을 보인다.

이 모형사면에서의 변위거동 형태를 정리하면 Fig. 8의 모식도에 나타난 바와 같이 크게 선형, 계단형, 지수형으로 분류할 수 있다. Table 3은 실험조건에 따라 나타나는 변위거동의 형태를 분류한 것이다. 선형거동은 수압하중 조건에 관계없이 절리면의 i가 0°인 평탄한 경우에 나타난다. i가 7°, 16°인 경우에는 FR이 낮을 때 선형거동이 나타난다. 계단형 거동은 i가 7°, 16°인 경우, 즉 거칠기가 존재하는 경우에 주로 나타나는데, 특

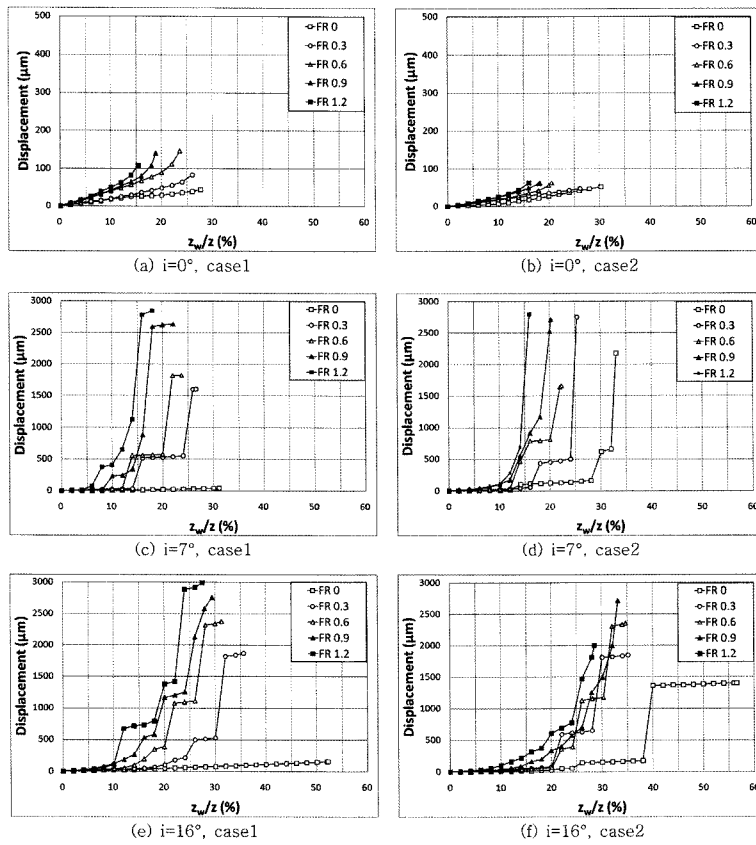


Fig. 6. Displacement vs. water force at 30° of sliding plane.

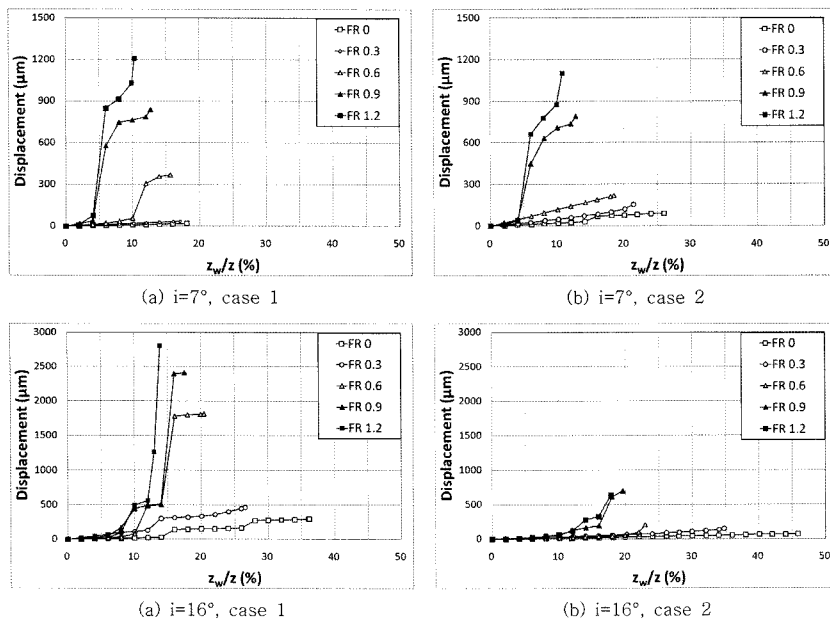


Fig. 7. Displacement vs. water force at 35° of sliding plane.

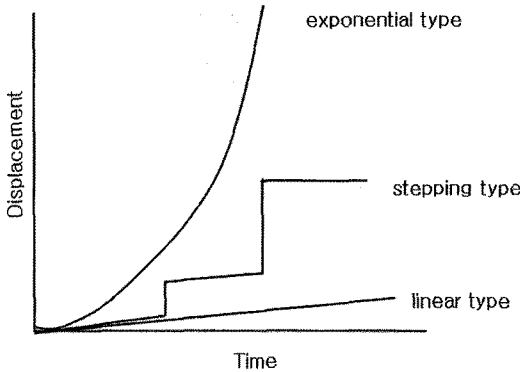


Fig. 8. Types of slope deformability.

Table 3. Types of slope deformability under different experimental settings.

y_p (degs)	i (degs)	FR	Types of deformability		
			linear	stepping	expon.
	0	0	●○		
		0.3	●○		
		0.6	●○		
		0.9	●○		
		1.2	●○		
30	7	0	●		○
		0.3		●○	
		0.6		●○	
		0.9		●	○
		1.2		●	○
	16	0	●		○
		0.3		●○	
		0.6		●○	
		0.9		●	○
		1.2		●	○
35	7	0	●		○
		0.3	●○		
		0.6	○	●	
		0.9		●	○
		1.2			●○
	16	0	○	●	
		0.3		●	○
		0.6	○	●	○
		0.9		●	○
		1.2			●○

Note; (●: case1, ○: case2)

히 수압하중 조건이 case1 일 때 우세하게 나타난다. 지수형 거동은 거칠기가 존재하고 FR 이 높은 경우, 특히 수압하중의 증가가 빠를 때 우세하게 나타난다.

절리의 공학적 특성에 따른 파괴수압의 변화

절리의 공학적 특성에 따른 파괴수압의 변화에 대한 고찰은 암반사면의 파괴 미케니즘을 이해하는 데에 유용한 정보를 제공한다. Fig 9는 모형사면에서 FR과 i 에 따른 파괴 시 수압하중의 변화를 나타내고 있다. i 에 관계없이 전체적으로 FR이 증가할수록 파괴 시 수압하중은 음지수함수적으로 감소하는 경향을 보인다. 특히 i 가 최대인 16°의 경우 FR의 증가에 따른 파괴 시 수압하중의 감소가 크게 나타나는데, FR이 0에서 0.3으로 증가하는 구간에서 상대적으로 크게 나타났다. 이는 활동면에서 충전물이 없을 경우에 비하여 충전물이 존재할 때 파괴 시 수압하중이 뚜렷하게 감소하고 충전물이 두꺼워 질수록 더욱 낮은 수압하중에서 파괴가 발생할 수 있음을 의미한다. 따라서 사면 파괴를 해석하고 예측하기 위해서는 절리에서 충전물 존재 여부 및 두께와 함께 거칠기에 대한 확고한 기재가 필수적으로 선행되어야 할 것이다.

FR이 같은 조건에서는 i 가 증가함에 따라 파괴 시 수압하중이 지수함수적으로 증가하는 것으로 해석할 수 있다. FR이 0인 경우, 즉, 충전물이 없는 경우에는 i 가 증가함에 따라 파괴 시 수압하중의 증가폭이 크게 나타나고 FR이 증가할수록 i 값 증가에 따른 파괴 시 수압하중 변화 폭이 감소하는 경향을 보인다. 이는 FR 이 증가함에 따라 i 가 사면 파괴에 미치는 영향이 작아짐을 의미한다.

파괴시기의 예측

Fukuzono(1985)의 inverse velocity 파괴시기 추정 방법은 시간(t)과 변위(x)를 이용한 도시적인 파괴시기 추정법으로 Fig. 10(a)에서와 같이 시간에 따른 사면 변위를 도시한 그래프에서 점 P_1, P_2, P_3 을 선정하여 시간 증분에 따른 사면변위 증분 즉, Fig. 10(b)는 변위 속도 v_1 과 v_2 의 역수를 취하고 속도가 산정된 시간구간의 중간지점을 결정하여 P_4 와 P_5 를 도시한 것이다. 파괴시간은 두 점 P_4, P_5 를 지나는 직선이 시간을 나타내는 가로축과 교차하도록 연장하였을 때 가로축과 만나는 t_0 로부터 추정할 수 있다. 이는 사면에서 파괴가 일어난 직후의 속도가 무한이라 가정하면 속도의 역수가 0인 것에 기반을 둔다. 기본적으로 이 방법은 파괴 임박시의 시간-변위 곡선이 3차 크립 형태로 나타나는 변위구간, 즉, 속도가 지수형으로 급격히 증가하는 구간에서만 사용할 수 있다.

전술하였듯이 이 연구에서 모형사면의 파괴 시 발생

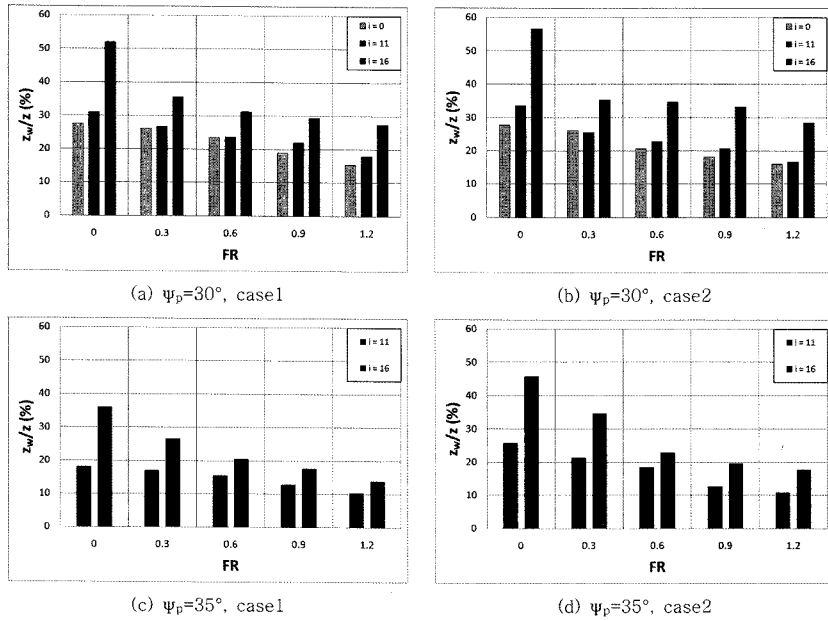


Fig. 9. Results obtained from different experimental settings of model slope.

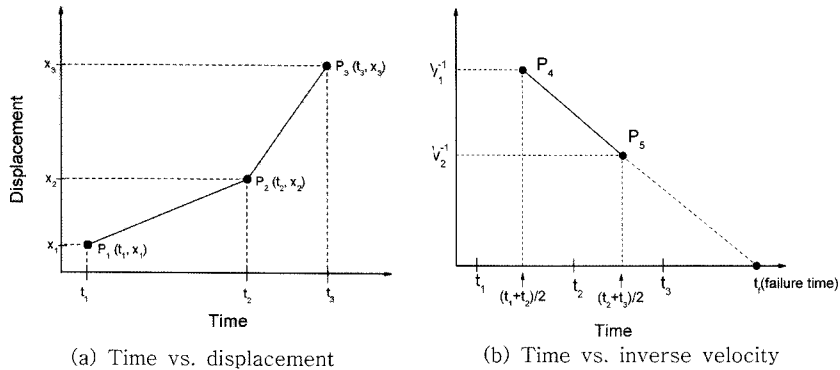


Fig. 10. Estimation of the inverse velocity and prediction of failure time.

하는 변위거동 형태는 선형, 계단형, 지수형 (계단형과 지수형 형태의 중간 단계 포함) 등의 3가지 변위거동 형태가 나타났다. Fig. 11은 시간-변위 형태로 얻어진 각 실험결과에 대하여 $v^{-1} - t$ 그래프를 도시하고 변위 거동 형태에 따라 분류된 대표적인 $v^{-1} - t$ 유형의 예이다. 선형 거동형태로 나타난 실험결과에 의한 $v^{-1} - t$ 유형은 Fig. 11(a)와 같이 v^{-1} 의 변화가 거의 없다가 어느 순간 급격히 감소하는 형태를 보인다. 계단형 거동형태의 실험결과에 Fig. 11(b)와 같이 변위가 갑자기 증가하여 계단 형태의 변위가 보일 때마다 v^{-1} 의 값이 급격히 감소하게 되어 전체적으로 진동하는 형태로 나타난다.

지수형 거동형태의 실험결과에 Fig. 11(c)와 같이 시간에 따라 변위가 3차 크립 형태로 증가하기 때문에 v^{-1} 는 선형적인 감소형태를 보인다.

파괴시기를 예측함에 있어서 선형 및 계단형 거동 형태는 Voight (1988)가 보고한 취성거동형태와 아주 흡사한 결과로 $v^{-1} - t$ 를 이용한 파괴시기 예측은 어려운 것으로 판단된다. 따라서 이 연구에서는 실험결과 중 지수형 거동형태를 대상으로 파괴시기 예측하였다.

Fig. 12는 $v^{-1} - t$ 를 이용하여 파괴시간을 추정할 수 있는 도이다. v^{-1} 을 나타내는 두 개의 점을 잇는 선을 연장하여 시간축과 교차하였을 때의 시간이 추정파괴시간(t_f)이

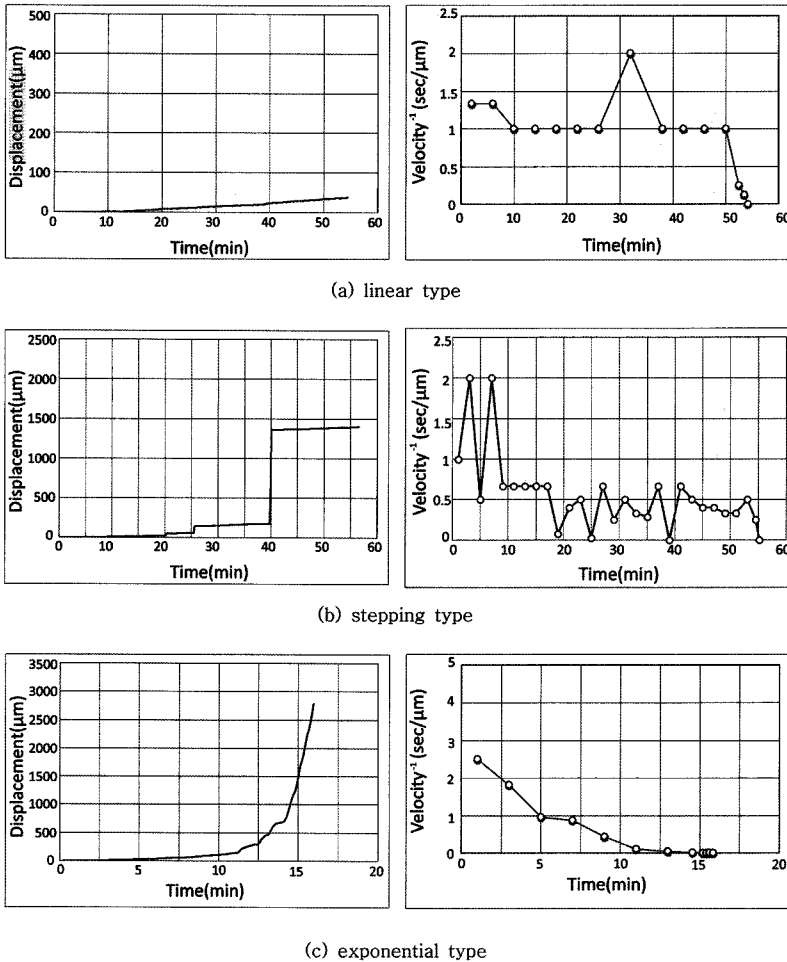


Fig. 11. Selected plots of for three types of slope deformability.

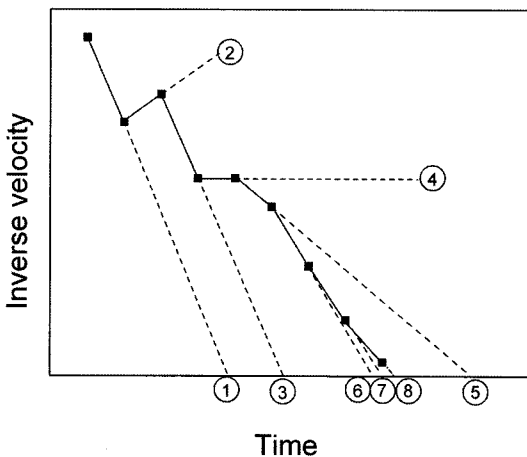


Fig. 12. Monitoring time vs. inverse velocity.

다. 변위증가 속도가 빨라지는 구간에서는 v^{-1} 을 시간축과 교차하여 추정파괴 시간을 산정할 수가 있지만 변위증가 속도가 감소하는 구간과 일정한 구간에서는 그림에서 ② 및 ④와 같이 v^{-1} 의 연장선이 시간축과 교차할 수 없으므로 파괴시간을 추정할 수 없다. Fig. 13은 Fig. 12에서 얻어진 추정파괴시간을 t_f-t 공간에 도시한 것이다. 이 때 그래프의 대각선은 추정파괴시간과 변위측정 시간이 같을 때를 의미한다. v^{-1} 가 감소하는 구간은 그래프의 대각선 상부에 도시되며 변위증가 속도가 지속적으로 빨라져 v^{-1} 가 선형으로 감소할수록 대각선에 접근해가는 형태로 나타난다. 그리고 변위증가 속도가 감소하는 구간이나 일정하게 유지되어 파괴시간을 추정할 수 없는 경우에는 이 그래프에 도시되지 않는다. 따라서 그래프의 대각선에 연속적으로 접근하는 형태를 가지는

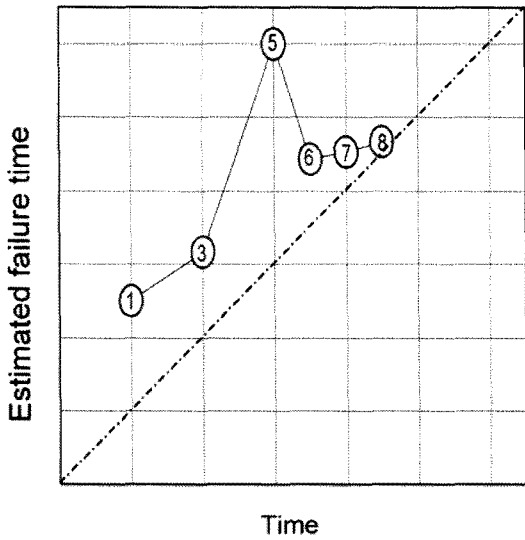


Fig. 13. Monitoring time vs. estimated failure time.

구간이 발생할 경우(⑥, ⑦, ⑧)는 변위증가속도가 빨라져 사면 붕괴로 인한 위험이 초래될 수 있는 시점이 되고 대각선과 떨어져 있거나 연속적으로 도시되지 않는 구간(①, ③, ⑤)은 사면이 비교적 안정된 상태이다.

Fig. 14는 실험조건이 $\psi_p = 30^\circ$, $i = 7$, $FR = 0.9$, case 2 인 실험결과에 대한 시간-변위(Fig. 14(a))와 이를 이용하여 산정된 v^{-1} -t(Fig. 14(b)) 및 파괴시간 추정(Fig. 14(c))이다. 시간-변위 관계에서 실험시간 초기(0-5분)에 낮은 변위를 가지는 구간에 대한 v^{-1} -t 는 진동하는 형태를 보이는데 이는 시간에 따라 발생하는 변위가 규칙적으로 증가하기 때문이다. 시간에 따른 변위가 증가하는 구간(5-12분)은 변위 속도가 증가하여 v^{-1} -t가 감소하는 형태를 가진다. 변위가 급격히 증가하는 구간(12-14, 16-19분)의 v^{-1} -t는 v^{-1} 값이 지속적으로 감소하여 따라 0에 근접하는 형태로 나타난다. 이와 같이 시간-변위의 특성에 따른 v^{-1} -t를 이용하여 전 구간에서

파괴 시간을 추정한 것이 Fig. 14(c)이다. Fig. 14(b)에서 진동하는 구간(0-5분)은 Fig. 14(c)에서 간격이 넓게 도시된다. 또한 변위가 급격히 증가하는 구간(12-14, 16-19분)은 대각선에 근접하여 연속적으로 동정된다. 이는 모니터링 시 측정되는 변위를 이용한 v^{-1} 로 변위가 급격히 증가하는 구간을 인지하여 파괴시기 예측이 가능할 수 있음을 시사한다.

Fig. 15은 모형사면에 대한 실험결과 중 지수형 거동을 보이는 모니터링 자료(Table 3)를 활용하여 파괴시기를 추정한 예이다. 음영 구간은 급격한 변위가 나타나는 구간과 이에 inverse velocity 기법을 이용한 추정파괴시간을 나타낸다. 대부분의 결과에서 급격한 변위가 나타나는 구간에 대한 추정파괴시간은 2회 이상 연속적으로 대각선에 점근하는 형태로 도시됨을 알 수 있다.

모니터링 자료를 활용한 t_f -t 그래프에서 사면의 변위가 급격히 증가하여 사면의 안정성에 위험이 될 수 있는 시기를 추정하기 위해서는 위험영역을 설정하는 것이 중요할 수 있다. 이 연구에서는 위험영역을 t_f -t 그래프에서 변위추정시간과 추정파괴시간이 같은 대각선과 임의의 선으로 만들어진 영역으로 정의하였다. Fig. 15와 같이 지수형 거동을 보이는 실험결과에서 변위추정시간 보다 10% 높은 추정파괴시간을 점선으로 연결하여 도시한 후 위험영역을 설정하였다. 이 위험영역은 모형사면에서 변위가 급격히 증가하는 구간을 포함하고 있으며 실제 사면에서도 같은 방식의 적용을 통해 급격한 변위가 발생하는 구간을 추정하는데 이용할 수 있을 것으로 사료된다. 그러나 파괴거동 형태는 파괴 시까지 2-4회에 걸쳐 변위가 급격히 증가하는 구간을 포함하고 있으므로 잘못된 경고도 간헐적으로 발생할 수 있음을 받아들여야 한다.

결 론

암반사면의 파괴조건을 재현한 석고모형사면에서 활

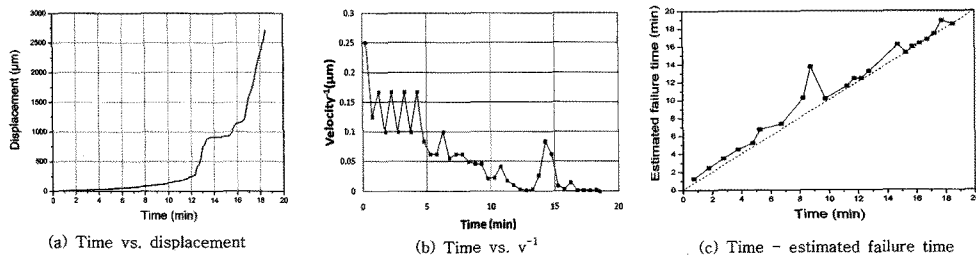


Fig. 14. Prediction of failure time using the inverse velocity method.

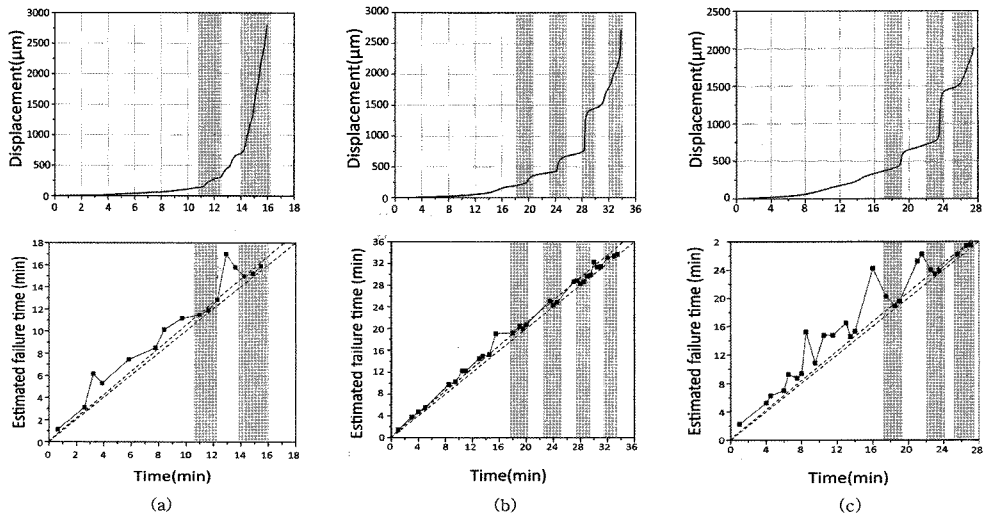


Fig. 15. Selected examples of prediction of failure time for the model slopes showing exponential type of deformability; (a) $\psi_p = 30^\circ, i = 7, FR = 1.2, \text{ case2}$, (b) $\psi_p = 30^\circ, i = 16, FR = 0.9, \text{ case2}$, (c) $\psi_p = 30^\circ, i = 16, FR = 1.2, \text{ case2}$.

동면의 경사각, 절리면의 거칠기, 충전물 및 수압하중 조건에 따른 절리의 거동특성을 고찰하고 파괴시기 예측 기법의 적용을 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 절리면의 거칠기가 없는 경우의 파괴거동 양상은 수압하중 증가 조건과 충전물의 유무에 관계없이 선형의 형태로 나타나는 것이 특징적이다. 거칠기가 존재할 경우에는 충전물 두께가 거칠기 높이보다 낮을 때 계단형 변위거동이, 거칠기 높이 이상일 때 지수형 변위거동이 특징적으로 나타난다. 이는 충전물 두께가 거칠기의 높이를 넘어서면 절리면의 거동특성이 충전물의 공학적 특성에 좌우되기 때문인 것으로 판단된다.

2. 모형사면에서 활동면의 거칠기가 증가함에 따라 파괴 시 수압하중은 증가한다. 충전물의 두께가 증가할수록 거칠기의 영향이 감소하여 파괴 시 수압하중은 감소한다. 개발된 모형장치는 암반의 공학적 특성에 따른 사면의 거동양상 파악에 적합한 프로토타입이라 사료되며 이를 바탕으로 더욱 현실성 있는 모형장치가 개발될 수 있으리라 기대된다.

3. 파괴가 임박한 시점에서 3차 크립 형태의 지수형 변위거동을 보이는 경우에는 inverse velocity를 이용한 파괴시기 예측이 가능한 것으로 판단된다. 다만 실험에서 나타난 거동특성이 완전한 지수형이 아니고 계단형과 지수형의 중간 형태로 나타나는 경우가 대부분이므로 정확한 파괴시기 예측을 위해서는 수회에 걸친 시행착오를 통하여 파괴시간이 추정될 수 있음을 염두에 두어야한다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 2008년도 특정기초연구사업 (R01-2008-000-10720-0)의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

조태진, 박소영, 이상배, 이근호, 원경식, 2006, 개착사면의 구조적 특성과 파괴양상을 고려한 계측해석, 터널과 지하공간, 16(6), 451-466.

Barton, N. R., 1973, Review of a new shear strength criterion for rock joints, Engineering Geology, 8, 287-332.

Fukuzono, T., 1985, A new method for predicting the failure time of a slope, In proceedings of the fourth international conference and field workshop on landslides, Japan Landslide Society, Tokyo, 145-150.

Fukuzono, T., 1990, Recent studies on time prediction of slope failure, Landslide News, 4, 9-12.

Hendron, A. J., Patton, F. D., 1985, A geotechnical analysis based on new geologic observations of the failure surface, The Vajont Slide, US Army Corps. of Engineering, 85, 104.

Lollino, G., Arattano, M. and Cuccureddu, M., 2002, The use of the automatic inclinometric system for landslide early warning, the case of Cabella Ligure (North-Western Italy), Physics and chemistry of the Earth, 27, 1545-1550.

Miller, L., 1964, The rock slide in the Vajont valley, Felsmech Ingenieurgeol, 2, 148-212.

- Tse, R. and Cruden, D. M., 1979, Estimating joint roughness coefficients. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, 16, 303-307.
- Voight, B., 1988, A relation to describe rate-dependent material failure, *Science* 243, 200-203.

2008년 11월 21일 원고접수, 2008년 12월 11일 게재승인

조태진

부경대학교 환경탐사공학과
608-737 부산광역시 남구 대연3동 599-1
Tel: 051-629-6557
Fax: 051-629-6553
E-mail: chotc@pknu.ac.kr

석재욱

부경대학교 환경탐사공학과
608-737 부산광역시 남구 대연3동 599-1
Tel: 051-629-6557
Fax: 051-629-6553
E-mail: stonely@pknu.ac.kr

이성암

지오제니 컨설팅 자회사사업부
137-831 서울특별시 서초구 방배동 807-2
Tel: 02-3472-2261
Fax: 02-3476-8057
E-mail: leccsam@geogeny.biz

엄정기

부경대학교 환경탐사공학과
608-737 부산광역시 남구 대연3동 599-1
Tel: 051-629-6559
Fax: 051-629-6553
E-mail: jum@pknu.ac.kr