

## 모형실험을 통한 암반사면의 파괴거동분석 및 파괴시기예측

신미경((주)지오체니컨설턴트)

엄정기, 조태진(부경대학교)

### 1. 서론

암반사면을 설계하고 안정성을 평가함에 있어서 가장 중요한 요소들 중 하나는 절취면 배면을 이루는 암반의 지질특성과 절리, 층리 또는 단층과 같은 불연속면 구조이다. 이는 암반사면의 불안정 요인이 주로 불연속면의 방향, 크기, 연속성 등의 기하학적 특성과 거칠기 및 충전물 등의 역학적 특성에 좌우되기 때문이다. 이 외에도 사면붕괴는 강우와 지하수위에 의해 크게 영향을 받는데(Lollino et al., 2002), 강우에 의한 사면의 파괴 사례는 전 세계적으로 매년 관찰·보고되고 있으며, 우리나라에서도 매년 집중호우로 인해 수많은 사면재해에 따른 인적·물적 피해가 발생하고 있다. 이러한 사면재해를 방지하기 위해서는 사면의 거동을 예측하는 것이 중요하므로 사면의 거동양상에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

사면 거동의 연구방법으로는 현장에서 계측시스템을 구축하여 장기적으로 데이터를 수집하여 분석하는 방법, 모형실험을 통하여 파괴거동을 분석하는 방법 등이 있다. 국내의 경우 사면을 대상으로 계측시스템을 구축하고 장기간에 걸쳐 파괴 시까지의 모니터링 데이터를 이용하여 파괴거동을 분석한 사례가 드물며, 모형실험이 주로 토사면에 국한되어 있어 암반사면의 파괴거동에 관한 연구가 부족한 실정이다. 따라서 암반사면 붕괴의 실질적인 예방 및 대책 수립을 위해서는 암반의 공학적 특성에 따른 사면의 거동양상 파악 및 파괴시기 예측 등의 기초적 요소이론에 대한 연구가 더 많이 이루어져야 한다.

이 연구는 모형실험을 통하여 절리면의 거칠기, 충전물, 수압조건 등의 공학적 특성을 고려한 사면의 파괴거동 양상을 분석하였다. 모형실험은 수압을 일정하게 증가시키는 방법과 정수압을 유지하는 방법을 이용하여 거칠기, 충전물 두께 등의 조합을 변화시켜 진행하였다. 이 연구에서는 실험에서 측정된 자료를 바탕으로 Fukuzono(1985)의 파괴시기 예측법을 적용하여 암반사면에서의 파괴시기 예측 가능성에 대해서도 연구하였다.

### 2. 모형실험

평면파괴 조건을 구현한 모형실험 장치는 기존의 모형실험 장치(석재옥, 2007)를 기초로 하였다. 전체적인 모형실험 장치는 그림 2.1과 같이 사면경사재현장치, 수압재현장치, 모형사면, 사면거동측정장치로 구성되어 있다.

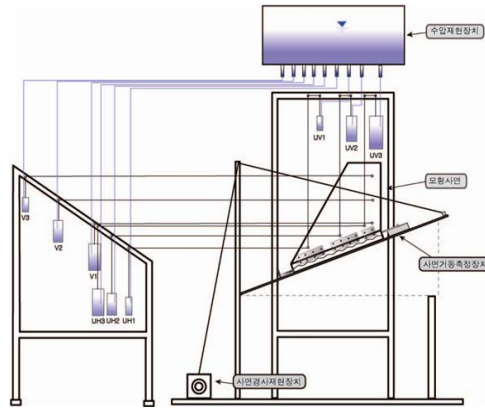


그림 2.1 Illustration of laboratory test equipment for physical model study

## 2.1 수압재현장치

수압재현장치는 수압하중이 인장균열에서 임의의 높이까지 작용할 수 있도록 고안하였다 (그림 2.2). 이 경우는 지하수위가 인장균열면의 일정높이까지 채워져 있는 경우로 이때는 인장균열과 활동면에 모두 수압이 작용하고 활동면 최하부에 노출된 지점으로 지하수가 유출된다. 이 연구에서 활동면에 작용하는 수압하중  $U$ 는 활동면을 3등분하여 각 면적에 해당하는 수압하중  $U_1, U_2, U_3$ 으로 분할하였고, 이를 다시 수직방향 수압하중( $UH_1, UH_2, UH_3$ )과 수평방향 수압하중( $UV_1, UV_2, UV_3$ )으로 분할하였다. 또한 인장균열면 수압하중  $V$ 는 인장균열면을 3등분하여 각 면적에 해당하는 수압하중  $V_1, V_2, V_3$ 으로 분할하였다. 수위상승에 따른 수압하중의 증가는 물의 무게로 환산하여 끌어당기는 방식으로 간접적으로 구현할 수 있으며, 수압하중을 일정하게 증가시키기 위하여 유량제어기를 이용하였다. 실험에서의 수압하중은  $z_w$ 가  $z$ 까지 이를 때의 수압하중을 100%로 하여  $z$ 에 대한  $z_w$ 의 비(%)로 표현하였다.

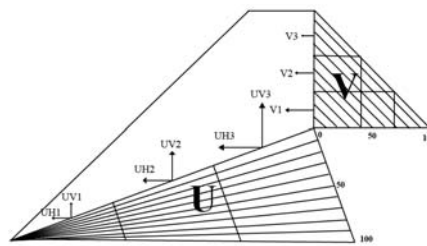


그림 2.2 Visualization of water force

## 2.2 모형사면

모형사면은 스테인리스 스틸프레임과 시멘트 모르타르를 이용하여 제작하였다. 모형사면의 형상은 평면파괴를 모사할 수 있도록 성형하였으며, 길이, 너비, 인장균열 깊이는 각각 300, 200, 220mm이다. 현장압반을 모사하여 모형실험을 수행하는 경우 사용되는 모형재료의

강도정수가 모사대상의 강도정수와 어느 정도 유사성을 갖는 것이 요구되는데 여러 실험을 통해 구한 모형 재료의 강도정수의 비율이 실제 무결암의 범위에 속하는 것으로 보아 이 모형사면은 암반사면의 거동특성양상을 파악하고자 하는 이 실험에 적합할 것으로 판단된다.



그림 2.3 Photographs of model slope

### 2.3 절리거칠기블록

모형사면은 거칠기 블록이 하부에 탈부착이 가능하도록 제작하여 거칠기 변화를 고려할 수 있다. 거칠기 블록의 재료는 모형사면과 같은 시멘트 모르타르를 이용하였고, 절리면의 형상은 거칠각(roughness angle,  $i$ )이 각각 0, 7, 11°가 되도록 길이 300mm, 너비 200mm, 높이 60mm의 블록을 제작하였다. 이 때 돌출부의 높이는 거칠각( $i$ )에 따라 다르지만 돌출부의 최고점에서 최저점까지의 너비를 16mm로 일정하게 하여 각각의 블록에서 돌출부의 수는 일정하게 유지하였다. Tse and Cruden(1979)이 제안한 JRC식을 적용하여 JRC를 산정한 결과 각각 0, 2.87, 8.59로 계산되었다.

### 2.4 인공충전물

충전물의 전단강도 저감 효과를 고려하기 위하여 모래와 점토를 혼합한 인공충전물을 제작·사용하였다. 모래의 유효경은 0.3~0.45mm이며, 점토는 경남 밀양 지역에 위치한 암반사면에서 채취한 것으로 점토광물 식별을 위한 재처리 과정을 거친 후 XRD 분석 결과 kaolinite가 다량 함유되어 있는 것으로 나타났다. 실험에 적합한 인공충전물의 배합비율은 다양한 혼합비의 인공충전물에 대한 경동시험을 통하여 모래 : 점토 : 물 = 2 : 1 : 0.6 으로 채택하였다. 절리면 사이에 존재하는 인공충전물이 거동양상에 미치는 영향을 분석하기 위하여 충전물의 두께비(FR) 개념이 적용되었다. FR은 각각의 절리면 돌출부높이( $a$ )에 대한 충전물 두께( $f$ )의 비로 정의한다. 이는 Phein-wej et al.(1990)이 제안한 한계두께비의 개념을 적용한 것이다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

모형실험은 거칠각, 충전물 두께와 같은 절리면의 공학적 특성을 달리하여 정속도의 수압 증가 조건 및 정수압 조건에서 각각 15회 및 12회 실시하였다. 정속도 수압증가 조건에서는

수압하중의 크기를  $z_w/z$  (%)로 표현했을 때 1분간 1%씩  $z_w/z$ 를 증가시키는 방법을 사용하였고, 정수압 조건에서는 정속도 수압증가 실험의 결과를 토대로 파괴수압의 약 97%를 유지하며 파괴 시까지 거동양상을 관찰하는 방법을 사용하였다.

### 3.1 정속도 수압증가 조건에서의 파괴거동

#### 3.1.1 절리의 공학적 특성에 따른 파괴수압의 변화

절리의 공학적 특성에 따른 파괴수압의 변화에 대한 고찰은 암반사면의 파괴거동 메커니즘을 이해하는 데에 유용한 정보를 제공한다. FR과  $i$ 의 변화에 따른 파괴 시 수압하중이 그림 3.1에 나타나있다. 파괴를 유발하는 수압하중은  $i$ 가 증가할수록 또는 FR이 감소할수록 증가한다. 이는 절리면의 거칠기 크기가 작을수록, 충전물의 두께가 클수록 비교적 낮은 수압에서 사면의 파괴 가능성이 크다는 것을 의미한다. 이로 보아 개발된 모형장치는 암반의 공학적 특성에 따른 사면의 거동양상 파악에 적합한 프로토타입이라 사료되며 이를 바탕으로 더욱 현실성 있는 모형장치가 개발될 수 있으리라 기대된다.

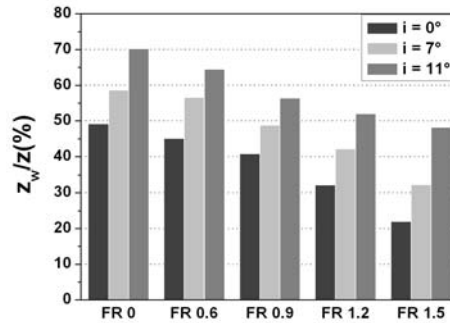


그림 3.1 Results obtained from laboratory experiments of the model slope

#### 3.1.2 사면의 파괴거동 양상

그림 3.2는 FR 및  $i$ 의 변화에 따른 사면 거동 변위를 나타낸다. 모형사면 변위거동형태는 전체적으로 거칠기와 충전율에 따라 선형과 지수형 거동이 결합된 양상을 보이는데, 선형거동이 나타나다가 거칠기가 커지거나 충전율이 커질수록 파괴 임박시 3차 크립 형태의 지수형 거동양상이 뚜렷이 나타난다. 특히 거칠기가 커질수록 파괴 시까지의 전체 변위가 크게 관찰됨을 알 수 있다. 이로보아 현장 사면에서 강우 등에 의해 수압이 증가함에 따라 사면의 거동이 발생할 경우 변위특성은 거칠기와 충전율에 따라 선형과 지수형의 조합으로 나타날 수 있다는 유추가 가능하다. 특히 거칠기가 커질수록 파괴 시까지의 전체변위가 크게 관찰되는 것으로 보아 거칠기가 큰 사면에서 계측을 실시하면 파괴 시까지의 사면 거동변위를 잘 관찰할 수 있을 것으로 보인다.

### 3.2 정수압 상태에서의 파괴거동

사면이 한계평형상태에 도달하지 않아 파괴위험성이 매우 낮아도 사면의 자중과 수압에 의해 시간에 따른 변위가 발생하여 파괴가 발생할 수 있으므로, 사면의 안정성을 평가하기

위해서는 강우 등에 의한 사면의 단기적인 변위양상뿐만 아니라 사면의 자중과 수압에 의한 장기적인 변위양상을 파악하는 것도 중요하다. 이 연구에서는 비교적 짧은 시간동안 거동이 발생할 수 있도록 하기 위하여 3.1절의 정속도 수압증가 조건에서 산정된 파괴 시 수압하중의 약 97%를 정수압으로 유지하여 모형실험을 수행하였다.

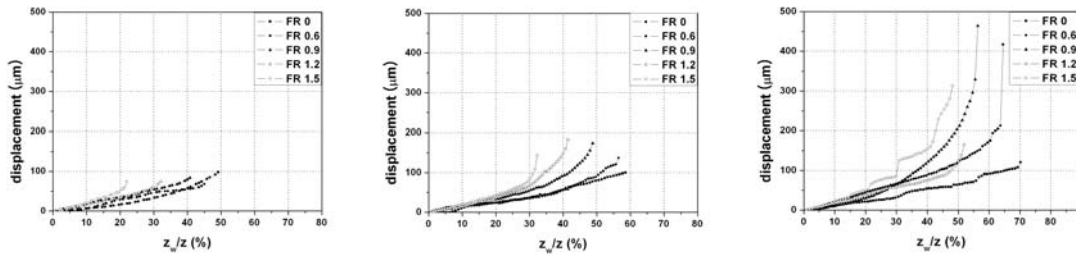


그림 3.2 Displacement vs. water pressure head for increasing head condition

### 3.2.1 사면의 파괴거동양상

FR 및  $i$ 의 변화에 따른 사면의 파괴거동 양상이 그림 3.3에 나타나있다. 모형실험 결과로 나타난 크립 형태의 거동은 변위증가속도가 일정한 2차 크립 형태와 변위증가속도가 시간이 경과할수록 증가하는 3차 크립 형태의 조합으로 나타났는데, 모형사면은 변위거동이 2차 크립 형태를 유지하다 충전율에 따라 급격히 파괴가 발생하거나 혹은 3차 크립 형태가 발생한 후 파괴에 이르는 것을 알 수 있다. 충전물의 두께가 작은 경우는 2차 크립 형태의 거동을 보이다 갑자기 파괴가 발생하는 취성파괴의 형태를 띤다. 또한 3차 크립 형태의 거동이 발생하는 경우는 거칠기가 존재하고 충전율이 0.9이상일 때로, 이는 두꺼운 충전물로 인하여 거칠기 효과가 감소되기 때문인 것으로 사료된다. 이 결과로 보아 충전물의 두께가 작아 거칠기의 영향이 파괴에 주요인으로 작용하는 사면은 3차 크립 형태의 거동이 발생하기 시작함과 동시에 파괴가 일어나는 경향이 있고, 충전물의 두께가 돌출부 이상으로 존재하여 거칠기의 효과가 감소된 사면에서 3차 크립 형태의 거동이 발생한 경우에는 3차 크립 형태의 거동 유지 기간이 상대적으로 길어짐을 알 수 있다.

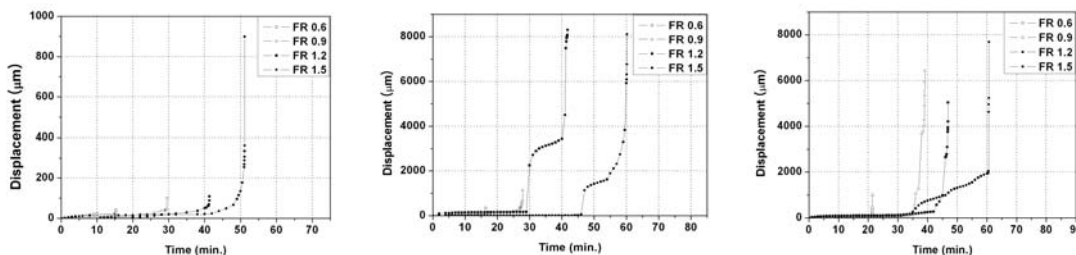


그림 3.3 Displacement vs. time for constant head condition

### 3.2.2 파괴 시까지의 거동변위

표 3.1은 같은  $i$ 에서 FR에 따른 파괴 시까지의 거동변위를 평균한 값이다. 전체적으로  $i$ 가 증가할수록 파괴 시까지의 거동변위는 증가한다. 실험에서 정수압 상태의 변위는 시간에 따라 서서히 증가하기 때문에 수압이 증가하여 빠르게 파괴가 발생하는 경우에 비해 거동변

위가 크게 관찰된다. 거칠기가 커질수록 파괴 시까지의 전체변위가 큰 것으로 보아 거칠기가 큰 사면의 경우 계측을 실시하면 사면의 거동변위를 잘 관찰할 수 있을 것으로 보이므로 계측 자료의 효용성이 클 것으로 사료된다.

표 3.1 Displacement at failure with respect to different asperity angle for constant pressure head condition

	$i = 0^\circ$	$i = 7^\circ$	$i = 11^\circ$
Displacement ( $\mu\text{m}$ )	287.3	4222.3	5033.75

### 3.3 파괴시기 예측

#### 3.3.1 수압증가 조건에서의 파괴시기 예측

파괴예상시간은 수압이 일정하게 증가하는 조건에서의 실험결과를 사용하여  $v^{-1}-t$  그래프를 도시한 후 Fukuzono(1985)가 제시한 inverse velocity method를 적용하여 추정하였다. 수압증가조건에서 나타난 거동양상은 선형거동양상과 지수형 거동양상으로, 전체적으로 수압이 증가함에 따라 변위가 규칙적으로 증가하여 파괴가 발생하기 전  $v^{-1}$ 가 진동하는 형태를 보인다. 선형거동 형태에서  $v^{-1}$ 값은 파괴 직전에 급격히 감소하는 형태로 나타나는데 이는 취성거동형태와 흡사한 결과로 inverse velocity method를 이용한 파괴시기 예측은 어려울 것으로 판단된다. 따라서 이 연구에서는 실험결과 중 3차 크립 형태의 지수형 거동형태를 대상으로 파괴시기를 예측하였다(그림 3.4).

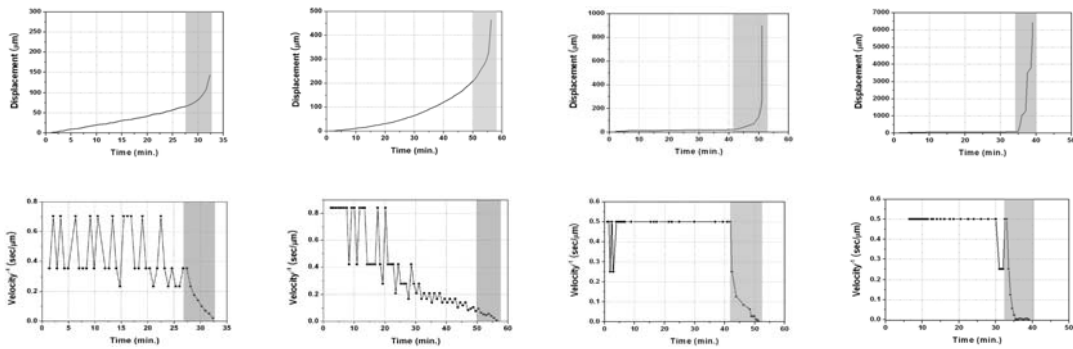
$v^{-1}$ 값이 3회 이상 선형적으로 감소할 경우 파괴 위험영역으로 설정하였고 그 결과 거동형태에 따라 1~3회 위험영역이 발생하였다. 위험영역에서의 추정파괴시간은 실제 파괴시간과 매우 유사하게 나타났다.

#### 3.3.2 정수압 상태에서의 파괴시기 예측

정수압 상태에서의 사면 파괴 시 발생하는 변위거동은 2차 크립 형태의 구간 직후 파괴, 3차 크립 형태의 구간을 보인 후 파괴 등의 두가지 변위거동 형태로 나타났다. 2차 크립 형태의 구간 직후 파괴가 발생하는 경우는  $v^{-1}$ 가 감소하는 구간이 매우 짧아서 파괴시기를 예측하기 어렵지만 3차 크립 형태의 구간을 보인 후 파괴가 발생하는 경우는  $v^{-1}$ 가 파괴 임박시 서서히 감소하므로 파괴시기 예측이 가능하다(그림 3.4).

수압증가 조건과 마찬가지로  $v^{-1}$ 가 3회 이상 감소할 경우 위험영역으로 설정하였고 거동형태에 따라 1~3회 위험영역이 발생하였다. 위험영역에서 추정된 파괴시간은 실제 파괴시간과 매우 유사하게 나타났다.

이로 보아 inverse velocity method의 적용성은 절리면의 충전물의 특성에 따라 판단하여야 하며, inverse velocity method는 절리면에 충전물이 두껍게 충전되어 있어 거칠기의 영향이 적은 암반사면에서 유용하게 사용될 것으로 보인다.



a)  $i=7^\circ$ , FR1.5      b)  $i=11^\circ$ , FR0.9      c)  $i=0^\circ$ , FR1.5      d)  $i=11^\circ$ , FR0.9  
 <Increasing head condition>      <Constant head condition>

그림 3.4 Estimation of failure time for the slopes showing exponential type in increasing head condition & tertiary creep type in constant head condition

#### 4. 결론

1. 모형사면에서 지속적인 수압 증가에 따라 거동이 발생한 경우의 변위특성은 선형과 지수형이 결합된 거동 양상을 보인다. 활동면의 거칠기가 커질수록 또는 충전율이 커질수록 초기부터 선형거동을 유지하다가 파괴 임박시에는 3차 크립 형태의 지수형 변위거동이 뚜렷이 관찰된다. 이와 같은 결과는 강우 등에 의해 수압이 지속적으로 증가하여 사면거동이 발생할 경우, 사면이 거칠기와 충전율에 따라 선형과 지수형의 결합으로 변위거동이 나타날 수 있다는 것을 시사한다.
2. 모형사면이 한계평형상태에 도달하지 못한 경우에도 사면의 자중과 수압에 의해 크립 형태의 거동을 보인 후 파괴가 발생한다. 충전율이 클수록 3차 크립 형태의 거동이 뚜렷이 관찰되는데, 이는 충전물의 두께가 절리면의 돌출부 높이 이상으로 존재하면 절리면의 거동특성이 충전물의 공학적 특성에 의해 좌우되기 때문인 것으로 사료된다.
3. 충전물의 두께가 충분히 커서 3차 크립 형태의 지수형 변위거동을 보이는 경우에는 inverse velocity method를 이용하여 모형사면의 파괴시간을 비교적 정확하게 예측할 수 있다. 정속도 수압증가 조건과 정수압 조건에서 각각 평균 2분 13초, 2분 10초전에 파괴시기를 추정하였다. 모형실험은 파괴를 일으키기 위한 극단적인 경우를 재현한 것이며 실제 사면에서 3차 크립 형태의 거동을 보인다면 inverse velocity method를 사용하여 파괴시기를 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

1. 이성암, 2007, 절리면의 공학적 특성에 따른 암반사면의 파괴거동 분석, 부경대학교 대학원
2. 석재욱, 2008, 실내모형실험을 통한 평면파괴의 거동분석 및 파괴시기 예측, 부경대학교 대학원
3. 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, pp. 145 - 150.
4. 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*, Vol 27, pp. 1545 - 1550.
  5. Petley, D.N., Mantovani F., Bulmer M.H. and Zannoni A., 2005, The use of surface monitoring data for the interpretation of landslide movement patterns, *Geomorphology* vol 66, pp. 133 - 147.
  6. Phien-vej, N., Shrestha, U.B. and Rantucci, G., 1990, Effect of infill thickness on shear behaviour of rock joints, *Proc International Symposium on Rock Joints*, Loen, 4 - 6 June, pp. 289 - 294.
  7. Rose and Hungr, 2007, Forecasting potential rock slope failure in open pit mines using the inverse velocity method, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, V. 44, pp.308 - 320.
  8. Tse, R. and Cruden, D.M., 1979, Estimating joint roughness coefficients *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, Vol 16, pp. 303 - 307.