

불연속면을 고려한 암반 사면의 안정성 해석

이 상수¹⁾, 박 연준²⁾, 유 광호²⁾

¹⁾새길엔지니어링, ²⁾수원대학교 토목공학과

초 록

암반사면의 안정성은 암반 내에 발달한 불연속면의 방향성과 파괴특성에 지대한 영향을 받는다. 두 조의 연속성이 좋은 절리가 발달한 암반의 거동을 해석하기 위해 FLAC의 FISH 언어로 작성된 편재 절리모형을 사용하여 절리암반사면의 안정성을 평가하였다. 해석 결과는 절리의 간격과 방향성을 달리하면서 수행된 UDEC 해석과 저면 마찰 모델 시험결과와 비교하였다.

UDEC 해석과 저면 마찰 모형시험 의해 발생된 파괴면의 형상은 유사하였으며, 이 결과로부터 편재절리모형에 의한 FLAC 해석에서의 파괴면은 두조의 교차하는 절리를 따라 계단식으로 파괴면이 발생함을 추정할 수 있었다.

1. 서 론

우리나라는 국토가 좁고 산지가 차지하는 비율이 70% 이상이므로 토목공사가 진행되는 과정에서 사면을 절취해야 하는 경우가 자주 발생한다. 또한 암반이 지표로부터 깊지 않은 곳에 위치하여 암반 사면의 비중이 크지만 흙사면에 비해 안정하다는 생각이 지배적이어서 흙사면에 비해 사면경사가 급하게 시공되고 있다.

그러나 암반사면의 파괴는 불연속면의 방향성과 파괴특성에 의해 지배되므로 사면 설계시에는 불연속면의 영향이 고려되어야 한다. 흙사면의 경우에는 임의의 활동면을 가정하여 안전율이 최소가 되는 활동면을 찾는 방법인 한계평형법을 적용한 해석이 보편화되어 있다. 암반사면의 안정해석방법으로는 평사투영법과 개별요소법 등이 있고 Goodman(1976)에 의해 수행된 저면 마찰 모형실험이 있다. 저면 마찰 모형실험은 중력의 효과를 나타내는 저면 마찰력에 의해 암반사면의 파괴형태를 정성적으로 모사할 수 있다. 평사투영법은 불연속면의 방향성을 입력하여 암반사면의 파괴 가능성 여부만을 판별하는 방법으로 정량적인 평가 방법이 아니라 정성적인 평가 방법이며, 개별요소법은 암반을 작은 블록들의 집합체로 보고 블록들이 외력에 의해 움직이는 과정을 해석하는 기법이다. 그러나 개별요소법과 같은 불연속체 모델의 사용은 현재의 지반조사 기술수준으로는 지반내의 절리발달 상황을 정확히 파악하기가 매우 어려워 정확한 지반의 모델링이 어려우며, 컴퓨터의 계산용량이 과다해지는 단점이 있다.

이에 따라 암반 불연속면의 변형 및 파괴거동을 암반의 거동에 흡수시킨 등가 연속체 모델이 Morland(1974), Zienkiewicz and Pande(1977), Thomas(1982), Blanford et al(1987), Chen(1989) 등에 의해 연구 개발된 바 있으며 국내에서는 이연규(1994), 박연준과 Dawson(1997) 등이 비등방 탄소성 모델을 개발하여 발표한 바 있다. 또한, 박연준과 유광호(1998)는 2조의 절리군을 가진 암반사면의 해석에 편재절리모형을 사용한 결과를 발표한 바 있다.

본 연구에서는 암반사면의 안정성 해석에 연속체 모델인 편재절리모형을 이용하여 직교하는 2조의

절리면을 가진 암반사면에 대한 안정해석을 수행하여 안전율을 구하였으며, 개별요소법과 저면 마찰 모형실험을 통하여 이를 검증하였다.

2. 편재절리 모델

편재절리모델(ubiquitous joint model)은 등가 연속체 모델(equivalent joint model) 혹은 compliant joint model이라고도 일컬어지는데, 근본적인 원리는 불연속면에 의해 블록으로 나누어진 불연속 암반을 불연속면의 특성이 반영된 물성을 가진 균질 연속체로 간주하여 해석하는 것이다. 본 모델에 관한 사항은 박연준과 유광호(1998)에 상세히 기술되어 있으므로 본 논문에서는 개념적인 부분만을 간략히 기술하고자 한다.

불연속면을 따른 미끄러짐과 파괴를 고려한 탄소성 등가연속체 모델은 근본적으로 비등방 소성모델로, 해석대상 물질이 절리와 같은 불연속면 방향으로 수많은 미끄러짐 면을 가진 것으로 가정한 것이다. 본 논문에서는 박연준과 유광호(1998)가 제안한 편재절리모델을 사용하여 해석을 수행하였다. 이들에 의하면, 절리의 소성 미끄러짐은 다음과 같은 Coulomb의 파괴거동을 따르는 식으로 가정할 수 있다.

$$|\sigma_s| \leq -\sigma_n \tan \phi + c \quad (1)$$

여기서 ϕ 는 절리의 마찰각이며, c 는 절리의 점착강도이다.

따라서 비등방 소성 항복조건은 절리면을 따른 미끄러짐 발생 조건으로부터 구해질 수 있다.

이러한 모델들의 기본적인 가정은 절리에 작용하는 응력이 연속체 모델에 내재하는 절리면에 작용하는 응력과 같다는 것이다. 이러한 가정 하에서 절리면에 작용하는 법선응력 σ_n 과 접선응력 σ_s 는 다음과 같다.

$$\sigma_n = \sigma_{ij} n_j n_i, \quad \sigma_s = \sigma_{ij} n_j t_i \quad (2)$$

여기서 n_i 와 t_i 는 절리면의 단위 법선 및 단위 접선 벡터의 성분들이며, σ_{ij} 는 등가연속체 모델의 응력텐서이다. 이 법선 및 접선응력들은 식 (1)의 절리항복조건에 의거 등가연속체 모델의 항복조건으로 사용된다.

3. 저면 마찰 모형 실험

저면 마찰법은 암반 구조물의 이차원 모델에서의 중력의 효과를 관찰하기 위한 시험법으로서, 중력 하중을 나타내기 위해 모델재료의 저면에 마찰 전단력(frictional shear force)을 가함으로써 모델의 변형 거동 및 파괴형태를 모사할 수 있다.

Goodman(1976)은 저면 마찰 시험기를 이용하여 전도파괴 중 넓은 간격의 직교절리가 발달한 경암 암반에서 각 암주가 블록으로 분리되면서 사면 전방으로 붕괴되는 형태인 블록 전도(block toppling)

파괴에 대해 모형실험을 하였고, 국내에서는 김영근(1989)에 의해 모형실험이 수행된 바 있다.

본 실험에서는 연속벨트가 일정한 속도로 움직이도록 제작된 저면 마찰 시험기를 사용하여 절리간격의 변화와 절리각의 변화에 따른 암반사면의 파괴형태를 정성적으로 고찰하였다. 불연속면을 따른 변형은 무결암의 변형에 비하여 매우 크므로 암반의 변형은 불연속면을 따라 발생하고 각 절리군에 의해서 나누어진 무결암은 자체 변형이 없는 강성체로 가정하여 해석을 시도하였다.

4. 저면 마찰 모형 시험의 원리

그림 1과 같은 연속체 모델을 생각해 보자. 고정된 틀에 의해 움직임이 제한 받는 모델의 저면을 따라 벨트가 움직이면, 모델은 저면 마찰력을 받게 된다. 이 때 모델 내의 미소체적 $t' dX dz$ 에 작용하는 견인력(drag force) 증분 dT 는 식 (3)으로 표현된다.

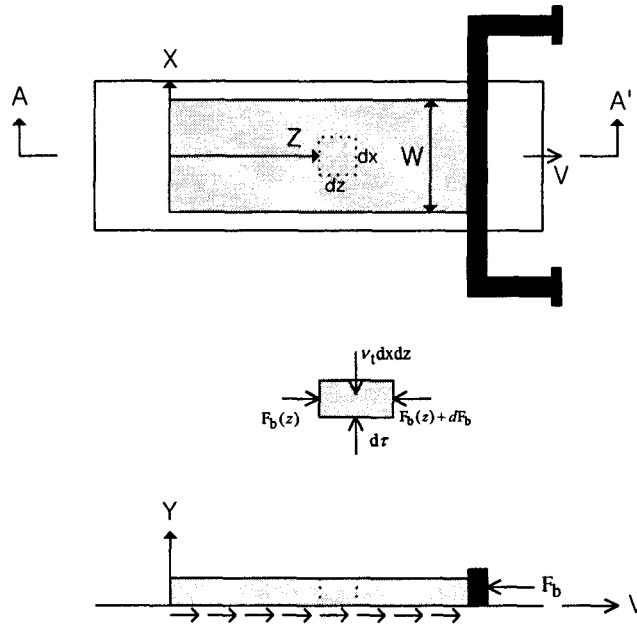


Figure 1. Schematic diagram of base friction model test.

$$dT = \mu_b' \gamma' t' dX dz \quad (3)$$

여기서 μ_b' : 모델과 벨트사이의 마찰계수

γ' : 모델재료의 단위체적중량

t' : 모델재료의 두께이다.

실제 중력 하에서, 각 요소의 면적에 작용하는 물체력 (body force) dF 는 식(4)로 표현할 수 있다.

$$dF = \gamma t dX dZ \quad (4)$$

여기서 γ : 원형의 단위체적중량, t : 원형의 두께이다.

벨트의 이동시, 고정벽에 대한 반발력으로 모델 저면에 생기는 마찰력은 다음과 같다.

$$dF_b = \int_0^z dT \quad (5)$$

또한 폭 w , 심도 z' 인 모델에 대한 마찰력은

$$F_b(z') = \mu_b' \gamma' t w z' \quad (6)$$

로 표현할 수 있다. 따라서 벨트가 이동하는 방향의 수직응력 σ_z' 는

$$\sigma_z' = \mu_b' \gamma' z' \quad (7)$$

가 된다. 식 (7)은 중력 하에서 실제 수직응력 σ_z 와 저면 마찰 모델에서의 수직응력 σ_z' 의 유사성을 보여준다.

5. 편재절리모델을 사용한 FLAC 해석 및 결과

연속체 해석에 사용된 모델 및 해석결과는 박연준과 유광호(1998)가 제안한 편재절리모델의 해석결과를 사용하였다. 그림 2는 수치해석에 사용된 모델로 높이 20m, 경사 60° , 단위중량 $25,975 \text{ N/m}^3$ 의 사면으로 Chen(1975)의 극한해석에 의한 표 1에 의해 내부마찰각 ϕ 가 20° 일 때의 무차원 안정수 (stability factor) $N_s = 10.39$ 를 사용하였다. $N_s = \frac{\gamma H}{c}$ 의 관계에서 점착력 $c = 50 \text{ kPa}$ 를 얻었다.

그림 3은 안정해석을 수행한 대표적인 결과이다. 여기서 파괴면은 속도로부터 계산된 변형률 속도 (strain rate)의 contour로 속도가 아닌 속도의 변화량이 가장 큰 부분을 나타내는 것이므로 활동면의 위치와 동일하게 된다.

Table 1 Stability factor by limit analysis(Chen. W F., 1975)

마찰각 $\phi(^\circ)$	사면각							
	90	85	80	75	70	65	60	55
0	3.83	4.08	4.33	4.56	4.80	5.03	5.25	5.46
5	4.19	4.50	4.82	5.14	5.47	5.81	6.16	6.53
10	4.58	4.97	5.37	5.80	6.25	6.73	7.26	7.84
15	5.02	5.50	6.01	6.57	7.18	7.85	8.63	9.54
20	5.50	6.10	6.75	7.48	8.30	9.25	10.39	11.80
25	6.06	6.79	7.62	8.58	9.70	11.05	12.74	14.97
30	6.69	7.61	8.67	9.94	11.48	13.44	16.04	19.71
35	7.42	8.58	9.97	11.68	13.86	16.77	20.94	27.45
40	8.29	9.77	11.61	13.97	17.15	21.72	28.91	41.89

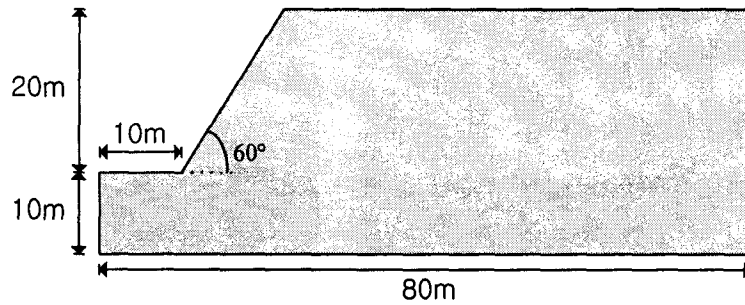
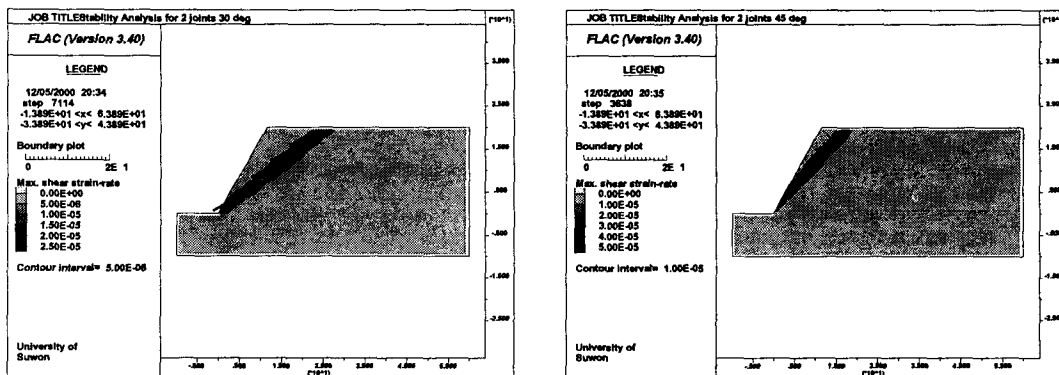


Figure 2. Model slope used in numerical analysis.

그림 3(a)는 절리 'a'의 경사가 30o 인 경우의 파괴상태를 보여주는데 활동면의 각도는 40° 로 절리 'a'의 경사보다 크게 나타났다. 또한 그림 3(b)는 절리 'a'의 경사가 45° 인 경우의 파괴상태를 나타낸 것인데 활동면의 각도는 50o 로 역시 절리 'a'의 경사보다 크게 나타났다. 이는 그림 3(a)에 표시한 바와 같이 2조의 직교하는 절리를 따라 계단식으로 활동면이 형성된 것으로 추정할 수 있다.



(a) dip of joint 'a' = 30°

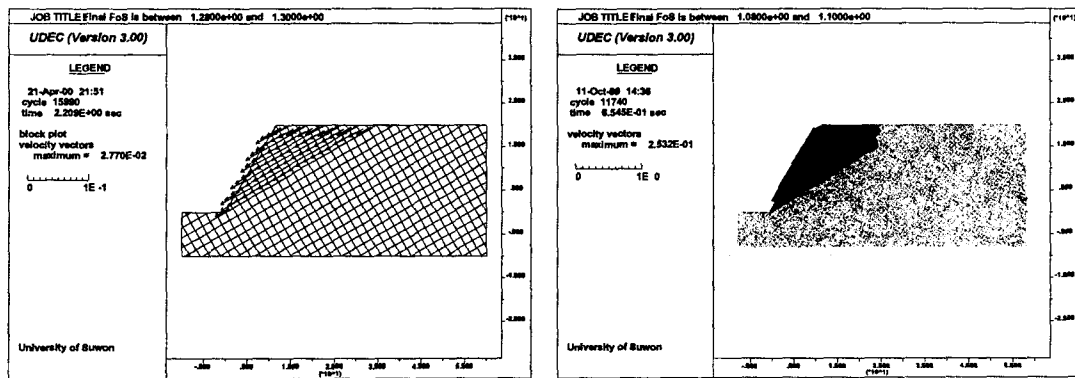
(b) dip of joint 'a' = 45°

Figure 3. Failure plane developed by FLAC analyses and inferred failure plane.

6. UDEC 해석 및 결과

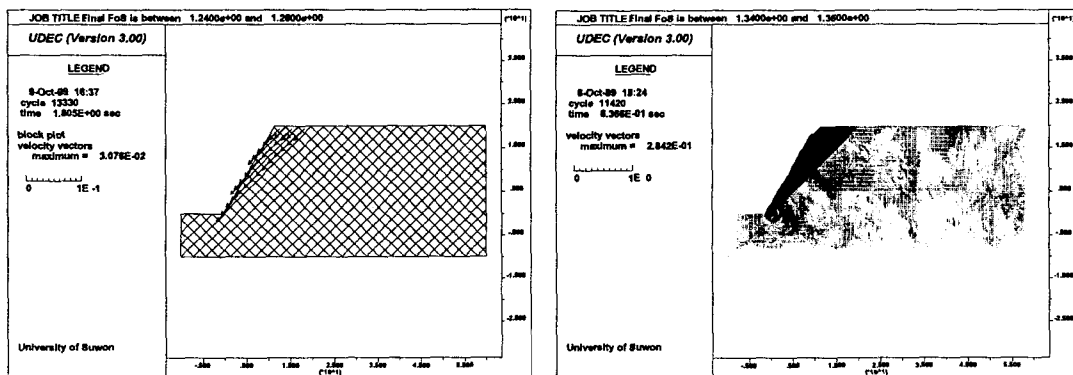
편재절리모델은 절리 간격의 변화를 고려하지 못하므로, 절리 간격의 변화에 따른 사면파괴 양상의 변화를 알아보기 위하여 UDEC 해석을 수행하였다. 편재절리모델을 사용한 FLAC 해석 결과와 비교하기 위하여 동일한 절리 물성을 사용하였다.

그림 4(a)는 절리간격이 2.0m이고 사면 방향의 절리 경사가 30° 인 경우의 해석 결과이다. 사면의 규모에 비해 절리간격이 넓어 활동면 상부의 암반은 한 덩어리로 사면 방향 절리를 따라 파괴되고 있다. 그림 4(b)는 절리간격이 0.25m인 경우에 대해 수행한 해석 결과로 사면 하단에서는 파단면이 사면 방향 절리를 따라 발생하지만, 사면 상단 부근에서는 이에 수직한 절리의 인장파괴가 발생되고 있다. 이 파괴 양상은 편재절리모델을 사용한 연속체 해석과 동일하지는 않으나 매우 유사한 파괴거동임을 알 수 있다. 그림 4의 (c)(d)는 사면 방향 절리의 경사가 45° 인 경우로 절리간격과 관계없이 파단면은 사면 방향의 절리면을 따라 발생하였다. 즉 절리간격이 큰 경우에는 편재절리모델에 의한 해석이 잘 맞지 않으나 절리간격이 0.25m 이하인 경우에는 편재절리모델에 의한 해석이 불연속체 해석과 유사한 결과를 나타낸다고 말할 수 있다. 절리 간격 및 절리의 각도에 따른 안전율의 변화는 박연준과 유광호(1998)에 상세히 기술되어 있으므로 관심 있는 독자들은 참조하기 바란다.



(a) dip of joint 'a'= 30° , spacing 2.0m

(b) dip of joint 'a'= 30° , spacing 0.25m

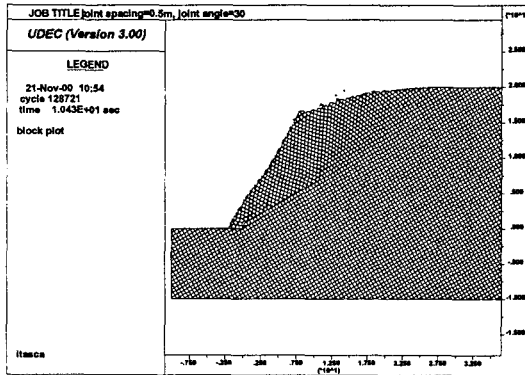


(c) dip of joint 'a'= 45° , spacing 2.0m

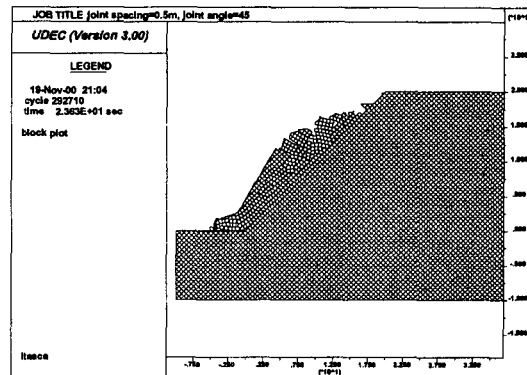
(d) dip of joint 'a'= 45° , spacing 0.25m

Figure 4. Shape of failure planes developed in jointed rock slopes.

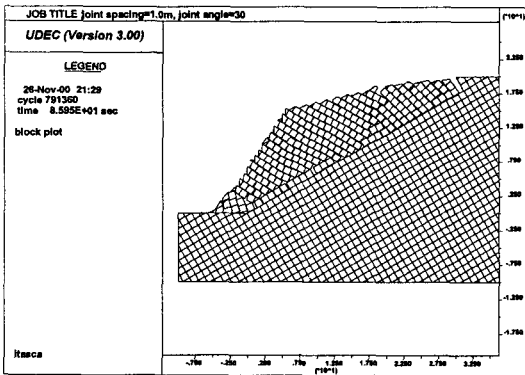
그림 4에 도시한 UDEC 해석 결과는 파괴가 발생하는 순간만을 살펴본 것으로 FLAC 해석 결과와 비교하기에는 적합하지만, 저면마찰시험 결과와 비교하기 위해서는 파괴 후 블록들의 거동을 살펴봐야 한다. 이를 위해서는 파괴 후에도 해석을 계속 진행하여야 하는데, 불연속체 해석에 의해 사면 파괴후의 거동을 살펴보는 것은 계산 시간이 과도하므로 파괴 양상만을 보기 위하여, 안전율이 이미 구하여진 상태에서 절리의 강도정수 c , ϕ 값을 낮추어 적용하여 파괴 형상이 쉽게 나타날 수 있도록 하였다.



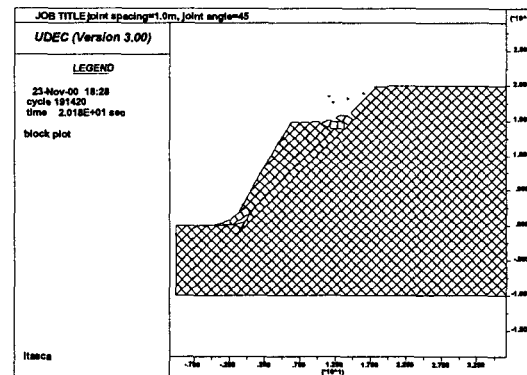
(a) dip of joint 'a'=30°, spacing 0.5m



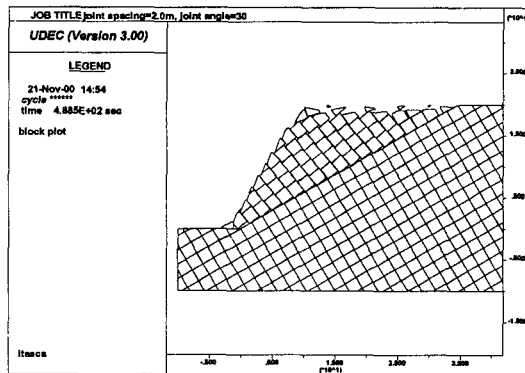
(b) dip of joint 'a'=45°, spacing 0.5m



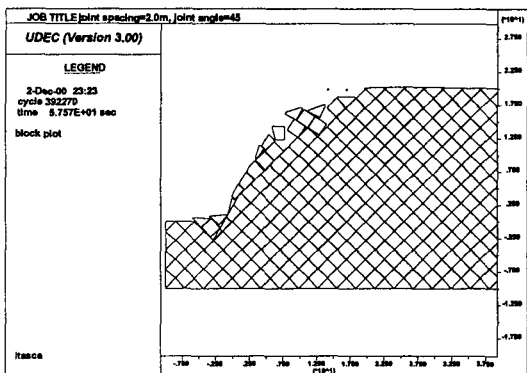
(c) dip of joint 'a'=30°, spacing 1.0m



(d) dip of joint 'a'=45°, spacing 1.0m



(e) dip of joint 'a'=30°, spacing 2.0m



(f) dip of joint 'a'=45°, spacing 2.0m

Figure 5 Various types of failure for different spacings and dips of joints.

그림 5(a)는 절리 'a'의 경사가 30° 이고 절리간격이 0.5m 인 경우의 사면 파괴 형태를 보여주는 그림으로 사면 선단부에서는 사면 방향 절리면을 따라 파괴면이 형성되지만, 사면 상단부로 올라가면서 파괴면이 대수나선형의 형태로 변화됨을 보여준다. 그림 5(b)는 절리 'a'의 경사가 45° 이고 절리간격이 0.5m 인 경우로 사면 방향 절리면을 따라 미끄러지는 파괴 형상을 보인다. 그림 5(c)는 절리 'a'의 경사가 30° 이고 절리간격이 1.0m 인 경우로 파괴면이 사면 방향 절리면을 따라 발생하다가 사면 선단부에서는 절리 'b'에 의한 인장파괴의 형태를 보인다. 그림 5의 (d)(e)(f)는 파괴면이 사면 방향 절리면을 따라 미끄러지는 파괴 형상을 보인다.

해석 결과를 살펴보면, 절리의 경사와 절리의 간격에 따라 사면 파괴 양상이 다소 달라짐을 알 수 있다.

7. 저면 마찰 모형 실험 결과

실험은 절리의 경사에 따라 정사각형 단면의 블록들을 설치하고, 벨트가 움직이기 시작한 후 300 초까지 60초 단위로 파괴형태를 관찰하였다. 모델 블록의 재료로는 석고시멘트(gypsum cement)의 일종인 하이드로스톤(hydrostone)을 사용하였으며, 두가지 크기의 블록을 사용하여 실험을 수행하였다.

실험 결과 파괴가 절리면에서 발생하기는 하였으나 블록들의 모서리에서 역물림 현상(interlocking)이 발생하여 미끄러짐에 의한 파괴보다는 미끄러짐이 발생하기 전에 블록들이 전도되는 형태를 보였다(그림 6.a). 블록의 역물림 현상을 방지하기 위해 그림 6(b)와 같이, 예상되는 파괴면상에 놓인 블록들을 수 mm 어긋나게 설치하여 실험을 수행하였다. 파괴형상은 주로 미끄러짐에 의해 발생하였으나 일정시간 경과 후에는 전도파괴도 더불어 발생함을 알 수 있었다.

Table 2 Test case I, II (slope angle 60° , slope height 40cm)

Case	block size (length×width×height in cm)	dip of joint 'a'
I	2×2×3	30°, 35°, 40°, 45°
II	3×3×3	

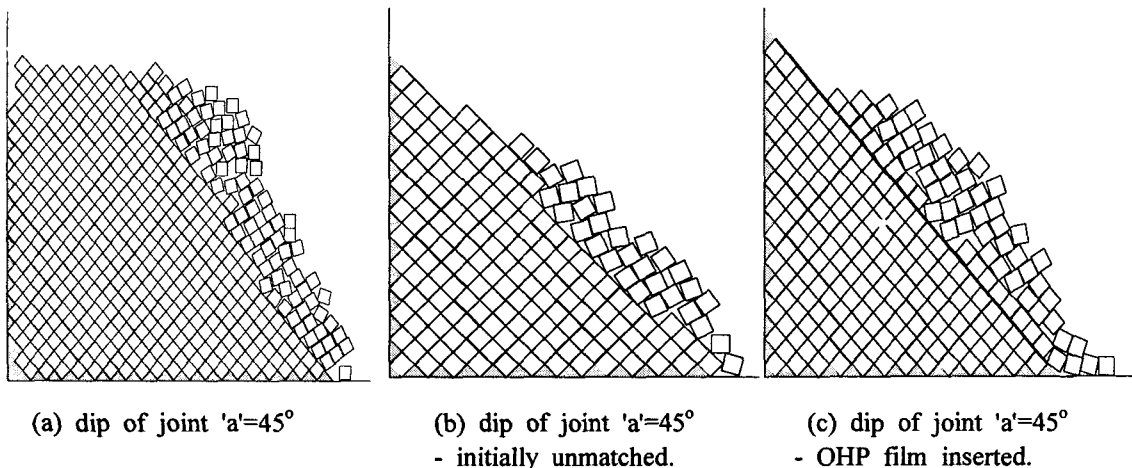


Figure 6. Comparison of failure plane

UDEEC 해석결과와 비교하고자 1개의 절리면을 따른 파괴를 유도하기 위하여 예상되는 파괴면에 OHP Film을 설치하고 파괴면의 양상을 살펴보았다. 그림 6(c)는 이 경우의 파괴면을 보여주고 있는데 미끄러짐에 의해 블록이 사면 선단에 쌓여 가는 모습을 볼 수 있다. 파괴면에 마찰력이 거의 없기 때문에 변형속도는 약간 어긋나게 설치한 경우와는 차이가 있지만 파괴 양상은 거의 유사하였다.

그림 7은 절리 a가 30° 인 경우의 저면 마찰 모형실험 진행과정을 보여준다.

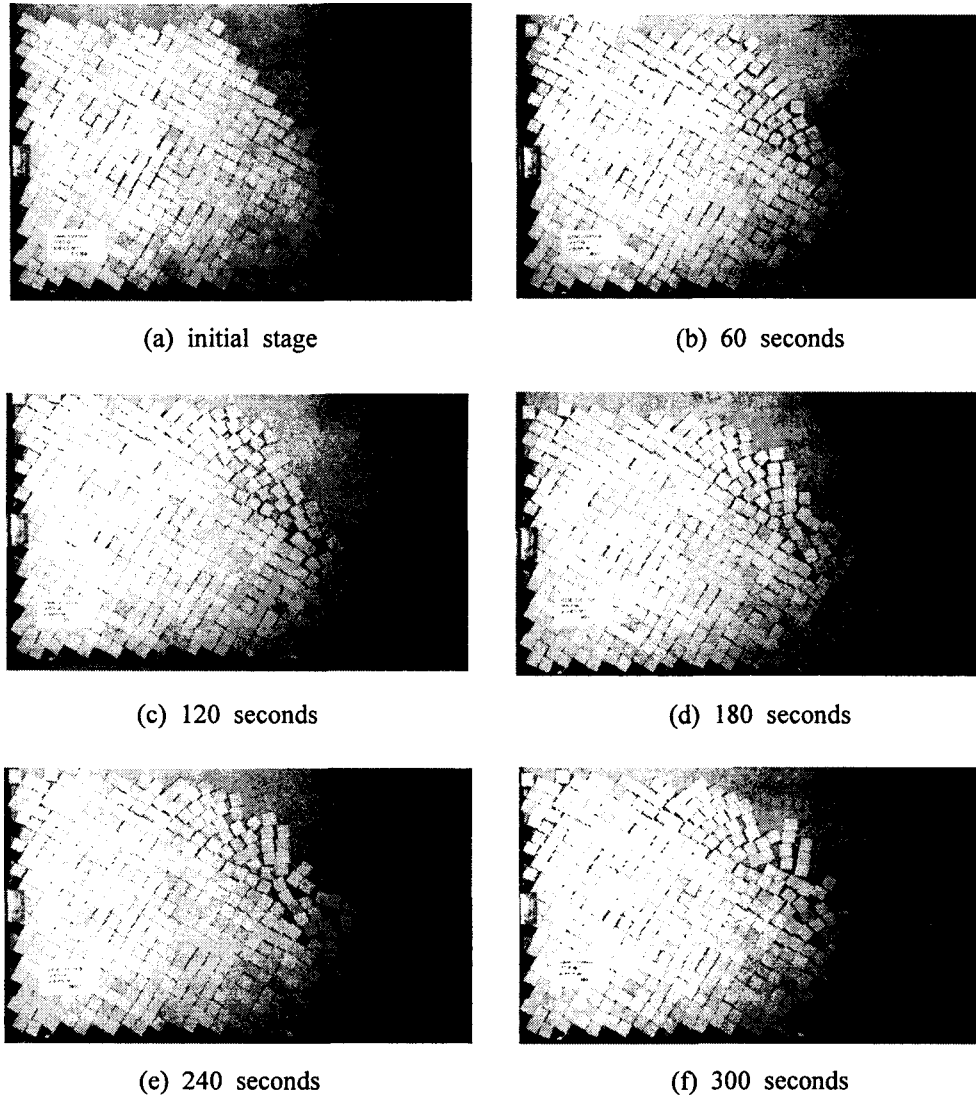


Figure 7. Base friction model test (dip of joint 'a'= 30°).

8. 결과 고찰

그림 8에 도시된 연속체 해석에 의한 파괴 양상은 그림 8(a)의 경우에는 파괴면의 경사각이 40° 이고 그림 3(b)의 경우에는 파괴면의 경사각이 50° 이었다. 이 결과는 그림 8(a)에서 보듯이 사면의 파괴가 계단식(steped)으로 발생함을 의미한다.

저면 마찰 모형실험 결과에 의한 파괴각도 절리 'a'의 경사가 30°인 경우에는 파괴면의 경사가 약 40°이고 절리 'a'의 경사가 45°인 경우에는 파괴면의 경사가 약 50°로 연속체 해석결과와 유사하였다.

불연속체 해석에 의한 사면 파괴 양상은 절리간격이 1.0m 이하인 경우에는 블록들이 절리면을 따라 미끄러지는 파괴양상을 보이다가 전도파괴가 복합적으로 발생하였다. 절리간격이 2.0m 인 경우에는 블록들이 절리면을 따라 미끄러져 내리는 파괴 양상만을 보였다.

저면 마찰 모형실험에서는 사면 파괴의 초기에는 미끄러짐이 발생하나 블록들의 역물림 현상(interlocking)으로 말미암아 후기에는 전도에 의한 파괴가 우세하였다. 블록간의 역물림 현상을 억제하기 위해 예상 파단면에 수 mm의 어긋남을 주어 실험을 수행한 결과 불연속체 해석에서 보인 파괴 양상과 비슷한 미끄러짐에 의한 파괴 형상을 볼 수 있었다. 또한 UDEC 해석결과와 비교하기 위하여 예상 파괴면을 따른 미끄러짐 파괴를 유도하고자 OHP Film을 삽입하여 수행한 실험 결과, UDEC 해석시의 파괴 양상과 비슷한 결과를 얻었다. 즉, 저면 마찰 모형실험에서는 블록간의 역물림 현상을 방지한다면 불연속체 해석에 의한 결과와 정성적으로 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

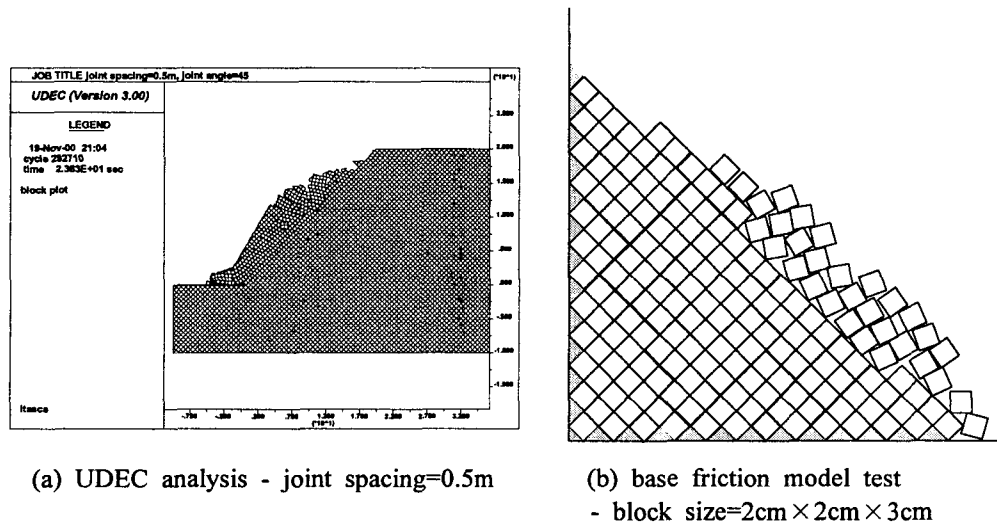


Figure 8. Comparison of UDEC analysis and base friction model test(dip of joint 'a'=45°)

9. 결론

본 연구에서는 서로 직교하는 2조의 절리군을 갖는 암반 사면에 대한 안정성을 평가하기 위하여, 편재 절리 모델을 이용한 연속체 모델 해석을 수행하고, 불연속체 모델 해석과 저면 마찰 모형실험을 수행하여 파괴 양상을 비교하였다.

서로 직교하는 2조 절리군이 발달한 암반 사면에 대한 해석결과, 편재절리모델을 이용한 연속체 해석은 절리간격이 0.25m 이하인 경우에 불연속체 해석 결과와 유사한 결과를 보였다. 따라서 편재절리 모델을 이용한 암반 사면의 안정성은 절리의 간격이 0.25m 이하인 경우에는 유용할 것으로 판단되었다. 또한, 편재절리모델을 이용한 연속체 해석에서 보인 사면의 파괴각과 저면 마찰 모형실험을 수행한 결과 얻은 사면의 파괴각이 서로 유사한 결과를 주므로, 연속체 해석에 의한 암반사면의 안정성 해석 결과 얻은 사면의 파괴 형태가 정성적으로 검증되었다. 따라서 편재절리모델은 절리가 발달한 암반사면의 설계 및 해석에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단되었다.

참 고 문 헌

1. 김영근(1989), 저면 마찰모형실험과 수치해석에 의한 불연속 암반에서의 사면 안정성 해석, 서울대학교 공학석사논문, pp. 1~73.
2. 박연준, E.M. Dawson.(1997), 편재절리모델의 유용성과 한계성, 한국암반공학회지, Vol. 7, No. 3, pp. 202~207
3. 박연준, 유광호(1998), 편재절리모델을 이용한 절리 암반 사면의 안정성 해석, 한국암반공학회지, Vol. 8, pp. 287~295
4. Blanford, M. L., S. W. Key & J. D. Chieslar (1987), A general 3-D model for a jointed rock mass. In C. S. Deasai et al., editor, Proceedings, Second International Conference on Constitutive Laws for Engineering Materials: Theory and Application, 35-46, University of Arizona, Tucson, Arizona.
5. Chen W.F.(1975), Limit analysis and soil plasticity, Amsterdam, Elsevier, pp. 58~63.
6. Chen, E. P.(1989), Computational model for jointed media with orthogonal sets of joints, J. Appl. Mech. Trans. ASME, Vol. 56, pp. 25~32.
7. Dawson, E. M., Roth, W. H. & Drescher, A.(1999), Slope stability Analysis by strength reduction, Geotechnique 49, No. 6, pp. 835~840.
8. Goodman, R. E.(1980), Rock mechanics, John Wiley & Sons. pp. 265.
9. Hoek E. and J.W. Bray.(1981), Rock slope engineering, 3rd ed., The Ins. of MIn. and Metallurgy.
10. J. W. Bray and R. E. Goodman.(1981), The theory of base friction models, Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech., Abstr., Vol. 18., pp. 453~468.
11. Morland, L. W. (1974), Continuum model of regularly jointed mediums, J. Geophys. Res., 79(2): 357-362.
12. Thomas, R. K. (1982), A Continuum Description of Jointed Media. Technical Report SAND81-2615, Sandia National Laboratories, Albuquerque.
13. Zienkiewicz, O. C & Pande, G. N. (1977), Time dependent multilaminate model of rocks-a numerical study of deformation and failure of rock masses. Int. J. Numer. Anal. Methods in Geomech., 1: 219- 247.