

Footwall 비탈면의 ploughing 파괴에 미치는 영향인자 분석

문준식* · 박우정**

Moon, Joon-Shik*, Park, Woo-Jeong**

Analysis of Influential Factors on Ploughing Failure of Footwall Slope

ABSTRACT

The limit equilibrium method (LEM) is commonly used for slope design and stability analysis because it is easy to simulate slope and requires short calculating time. However, LEM cannot adequately simulate ploughing failure in a footwall slope with a joint set dipping parallel with slope, e.g. bedding joint set. This study performed parametric study to analyze the influence factors on ploughing failure using UDEC which is a commercial two-dimensional DEM (Distinct Element Method)-based numerical program. The influence of joint structure and properties on stability of a footwall slope against ploughing failure was investigated, and the factor of safety was estimated using the shear strength reduction method. It was found that the stability of footwall slope against ploughing failure strongly relies on dip angle of conjugate joint, and the critical bedding joint spacing and the critical length of slab triggering ploughing failure are also affected by dip angle of conjugate joint. The results obtained from this study can be used for effective slope design and construction including reinforcement.

Key words : Footwall slope failure, DEM analysis, Buckling failure, Ploughing failure

초록

풋월 비탈면 설계 시 해석시간이 짧고, 간편하여 한계평형법을 주로 이용하였으나, 쟁기형태파괴를 모사하기에는 어려움이 따른다. 따라서, 본 연구에서는 2차원 DEM (Distinct Element Method) 해석프로그램인 UDEC을 이용해 수치해석을 수행하여 풋월 비탈면에서 발생되는 쟁기 형태파괴에 미치는 영향인자를 분석하였다. 매개변수분석은 암반절리(층면절리, 공액절리, 비탈면의 하단에 위치한 절리)의 구조 및 암반절리 상태 등을 변경하여 수행하였으며, 비탈면의 안전율은 강도감소법(Strength Reduction Method)을 이용하여 산정하였다. 수치해석 결과를 통해 쟁기형태파괴는 공액절리(conjugate joint)의 경사각에 주로 의존하고 있음을 확인할 수 있었으며, 층리의 한계간격 및 슬래브의 한계길이가 공액절리의 경사각에 영향을 받는 것으로 나타났다. 본 연구결과는 비탈면 보강을 포함한 풋월 비탈면의 최적설계 및 시공에 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

검색어 : 풋월 비탈면 파괴, DEM 해석, 좌굴파괴, 쟁기형태파괴

* 중신회원·경북대학교 건설환경에너지공학부 조교수 (Kyungpook National University · j.moon@knu.ac.kr)

** 교신저자·(주)삼보기술단 지반사업본부 기사 (Corresponding Author · Sambo Engineering Co., Ltd. · parkfriend1@naver.com)

Received January 12, 2016/ revised March 1, 2016/ accepted June 7, 2016

1. 서론

풋월 비탈면(footwall slope)은 주로 노천광산(open-pit mine)에서 흔히 발견되며, 불연속면이 비탈면의 경사와 평행하게 발달하는 특징을 가진다(Fig. 1). 풋월은 지질학적인 용어로는 단층면을 기준으로 위에 있는 지반을 상반(hanging), 아래에 있는 지반을 하반(footwall)이라고 지칭하기도 하며, 소-대규모 단층을 따라서 광화작용(mineralization)이 수반되어 생겨난 유용한 광물들이 존재하고, 대부분 퇴적암의 층리나 변성암의 엽리로 구성되어 있다. 노천광산은 많은 단(bench)과 채굴을 위한 광상(mineral deposit)을 폭파 또는 굴착하여 다양한 절리면이 형성되므로 항상 비탈면의 불안정성을 지니고 있다. 풋월 비탈면은 주로 불연속면과 비탈면의 경사방향이 평행하게 발달하여 불연속면을 따라 슬라이딩을 일으키기 쉬운 취약한 지질구조를 띄기 때문에 안전하고 경제적인 채굴을 위해 비탈면의 안정성 분석이 요구된다. 이러한 지질구조를 지니는 비탈면에서는 불연속면의 하단이 비탈면에서 보이는 daylight 조건을 만족하여 평면파괴로 쉽게 판단할 수 있지만, daylight 조건을 만족하지 않는 경우에는 평사투영법으로 파괴여부를 판단하기가 어렵다. 풋월 비탈면에서는 좌굴파괴(buckling failure)가 흔히 발생하고, 비탈면과 평행한 불연속면에 직교하는 절리 여부에 따라 평면파괴(plane failure), 쟁기형태파괴(ploughing failure)와 3힌지파괴(three-hinge failure)로 구분할 수 있다.

국내에서는 풋월 비탈면 안정에 대한 연구가 거의 없으나, 국외에서는 영국, 캐나다, 브라질 등 광산산업이 활발한 국가에 한해서 많은 연구가 진행되어 왔다(Cavers, 1981; Cruden, 1985; Hawley et al., 1986; Froldi and Lunardi, 1995; Stead and Eberhardt, 1997; Pant and Adhikary, 1999; Qin et al., 2001; Alejano et al., 2011; Havaej et al., 2014). 또한, 광산에 국한되지 않고, 자연비탈면에서의 풋월 비탈면 파괴 사례에 대한 연구가 최근까지 진행되고 있다(Crudén, 1985; Hu and Cruden, 1993; Wang et al., 2003; Seijmonsbergen et al., 2005; Tommasi et al., 2008, 2009; Pereira and Lana, 2013; Qi et al., 2015). 자연비탈면에서 발생된 산사태 파괴 사례들은 대부분 변성암의 엽리(foliation)구조

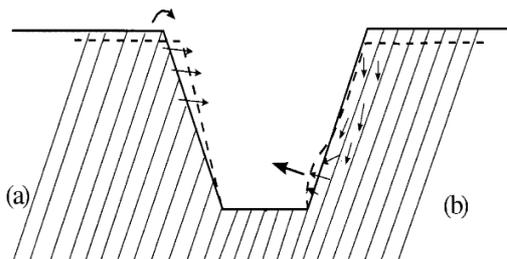


Fig. 1. Failure Mechanisms in Foliated Rock Slopes. (a) Flexural Toppling. (b) Flexural Buckling (Adhikary et al., 2001).

가 습곡작용(folding)을 받아 비탈면의 경사와 평행하게 발달하는 특징을 보였다. 이러한 연구 사례들을 통해 알 수 있듯이 기존의 비탈면 파괴와는 다른 지질구조에 크게 영향을 받는 비탈면으로 판단할 수 있다.

최근에는 2차원 FEM (Finite Elements Method)을 이용하여 지반물성에 따른 좌굴파괴의 거동에 대한 수치해석 연구가 수행되어왔다(Adhikary et al., 2001; Pereira and Lana, 2013; Silva and Lana, 2014). 그러나 좌굴파괴가 아닌 쟁기형태파괴나 3힌지파괴의 경우에는 불연속체 거동을 보이므로 FEM을 이용하여 모사하기에는 어려움이 따른다.

본 연구에서는 2차원 DEM (Distinct Element Method) 해석프로그램인 UDEC을 이용하였으며, 쟁기형태파괴에 미치는 영향요인을 분석하기 위해 절리경사각, 절리마찰각, 층리의 간격, 슬래브의 길이를 고려하였고, 수치해석적 매개변수 연구를 수행하여 비탈면의 안전율을 통해 비교분석하였다.

2. Footwall 비탈면 파괴메커니즘

풋월 비탈면의 파괴는 지질구조에 의해 발생되며 좌굴파괴, 3힌지파괴, 쟁기형태파괴 등으로 구분된다. 본 논문에서는 쟁기형태파괴에 대해서만 수치해석을 수행하였으나, 이해를 돕기 위해 좌굴파괴, 3힌지파괴, 쟁기형태파괴에 대한 메커니즘을 추가적으로 설명하였다.

2.1 Buckling failure

좌굴파괴는 Fig. 2(a)와 같이 자중에 의해 불연속면을 따라 슬라이딩이 발생하고, 비탈면의 하단부가 볼록하게 휘어지며 파괴가 진행된다. 주로 불연속면이 비탈면의 경사와 평행하게 발달하고 층리의 간격이 작을수록 발생하기 쉽다(Giani, 1992). 좌굴파괴에 미치는 요인은 불연속면의 전단력과 마찰각, 간극수압, 비탈면의 높이, 비탈면의 곡률 등 많은 요인들이 존재한다.

Cavers (1981)는 평면비탈면, 곡면비탈면의 좌굴파괴를 오일러 공식을 이용하여 풋월 비탈면 디자인 차트를 제안했다. Cavers (1981)가 수행한 모형실험에서는 얇은 슬래브의 경우에는 L_o/L (여기서, L =전체 슬래브길이, L_o =하부 슬래브길이)이 0.46이하, 두꺼운 슬래브의 경우에는 L_o/L 이 0.36이하일 때 좌굴파괴가 발생하였으나, 유도한 공식에서는 슬래브의 한계길이를 $0.5L$ 로 산정하여 비탈면의 한계높이가 과대평가되었다. Adhikary et al. (2001)은 Cavers (1981)의 간편법을 지적하고 유한요소법을 이용해 비탈면의 안정성을 평가하여 수정된 디자인 차트를 제시하였다. 또한, Pereira and Lana (2013)는 유한요소해석을 수행하여 축압계수 K_o 가 클수록 큰 변위가 발생하는 결과를 얻었으며, 엽리와

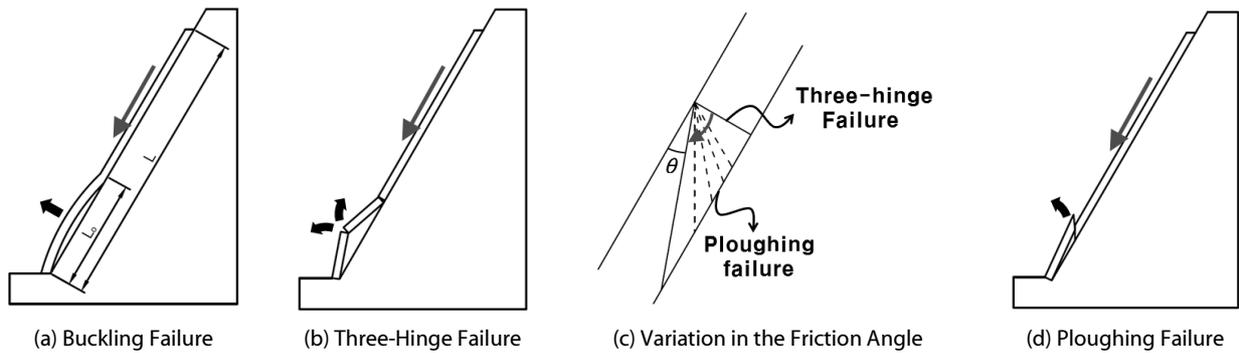


Fig. 2. Mechanisms of Footwall Slopes Failure

습곡으로 구성된 지질 단면에 대해 비탈면의 안정성 연구를 수행하였다.

2.2 Three-hinge failure

3힌지파괴는 비탈면과 평행한 불연속면에 직교하는 공액절리로 구성된 풋월 비탈면에서 나타나는 파괴형태이며, 슬래브에 작용하는 외부압력(external load or water pressure)에 의해 2개의 작은 슬래브가 비탈면 바깥쪽으로 향하며 파괴가 진행된다(Fig. 2(b)). 따라서 주로 수압에 의해 발생되며, Seijmonsbergen et al. (2005)은 자연비탈면에 형성된 빙하기의 지하수가 비탈면에 높은 수압이 작용하여 3힌지파괴가 발생했음을 관찰하였다. 또한, Kutter (1974)는 비탈면 내 인장균열의 점진적인 형성이 3힌지파괴에 더 큰 영향을 미친다고 분석하였다. Cavers (1981)는 유도한 공식을 이용해 디자인 차트를 제시하였으나, 수압 등에 의해 발생하는 3힌지파괴의 경우 더 복잡한 메커니즘을 가지므로 비탈면의 안정성을 검토하기에는 어려울 것으로 사료된다.

2.3 Ploughing failure

쟁기형태파괴는 3힌지파괴와는 다르게 공액절리의 경사가 변화에 의해 발생하는 파괴로 Fig. 2(c)와 같다. 공액절리를 기준으로 위 블록은 상부슬래브(active slab), 아래 블록은 하부슬래브(passive slab)로 구분 하였으며, 상부슬래브는 활동력(driving force)을 가지는 블록으로 슬라이딩 발생과 동시에 하부슬래브가 비탈면 바깥쪽으로 회전되거나 슬라이딩하여 파괴가 진행된다(Fig. 2(d)).

Stead and Eberhardt (1997)는 캐나다 서부의 비탈면 관찰을 통해 상부슬래브의 슬라이딩은 하부슬래브의 회전에 의해 발생한다고 하였다. 또한, 쟁기형태파괴는 회전운동에 의해 발생하므로 일반적인 한계평형법이나 유한요소법으로는 파괴상태를 모사하기 어려우며, 개별요소법을 이용한 해석이 불가피하다(Serra de Renobales, 1987). Dawson et al. (1995)은 캐나다 석탄광산 사례연구를 통해 쟁기형태파괴는 일반적으로 슬래브의 두께가 5m 이하인 경우 발생

하며, 하부슬래브의 한계높이는 전체 비탈면 높이의 40~60%로 제한하였다. Alejano et al. (2011)은 한계평형법, 모형실험, 수치해석을 비교분석하여 강도감소법이 풋월 비탈면의 안전율을 추정하는데 가장 적절한 방법이라고 주장하였다.

그 동안 쟁기형태파괴에 대해 많은 연구들이 진행되었으나, 쟁기형태파괴에 미치는 영향인자에 대해서는 명확하게 분석되지 못하였다. 따라서 본 연구에서는 쟁기형태파괴의 영향인자에 대해서 DEM 기반 수치해석을 이용한 매개변수 연구를 통해 분석하였다.

3. 수치해석 모델링 및 조건

본 연구에서는 절리의 거동에 의존하는 쟁기형태파괴를 모사하기 위해 DEM기반 2D UDEC을 이용하여 수치해석적 매개변수 연구를 수행하였다. UDEC은 개별요소법 기반으로 개발된 상용프로그래머이며, 불연속체 모델에 대한 수치해석 시 자주 이용하는 것으로 알려져 있다. 본 연구는 절리면 거동에 의한 파괴이므로 무결점 압의 변형은 크게 영향을 주지 않는다. 따라서 사용성이 편리한 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였으며, 절리면 거동을 위해

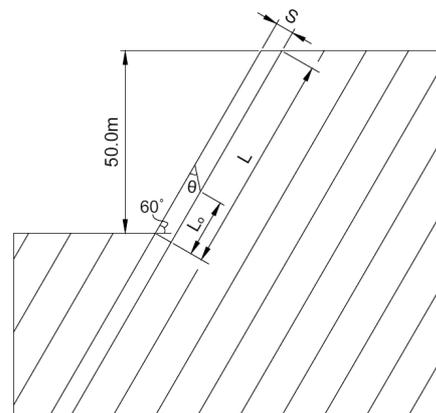


Fig. 3. Numerical Modeling

Table 1. Parameters for Numerical Analysis

Type	Joint spacing, S (m)	Joint friction angle (°)	Conjugate joint angle, θ (°)	L_o/L
Conjugate joint	-	5 ~ 35	20 ~ 60	0.1 ~ 0.5
Basal joint	-	5 ~ 35	-	-
Bedding joint	1.0 ~ 6.0	5 ~ 35	-	-

Table 2. Intact Rock and Discontinuity Strength Parameters

Property	γ_t (t/m^3)	K (GPa)	G (GPa)	ϕ (°)	c (MPa)	t (MPa)	k_n (GPa/m)	k_s (GPa/m)
Rock	2450	10	6	34	5	2	-	-
Joint	-	-	-	5 ~ 35	0	0	10	1

일반적으로 많이 쓰이는 Coulomb slip 모델을 사용하였다.

수치해석에서 사용된 모델은 Fig. 3과 같으며, 비탈면 높이는 50.0 m, 비탈면 경사는 60°이며, 층리의 간격은 해석시간을 고려하여 파괴의 영역에 미치는 범위 내에서 모델링 하였다. 매개변수 연구는 Table 1과 같이 변화를 주어 수치해석을 수행하였다.

지반물성은 문헌을 참고하여, Table 2와 같이 가정하였다(Stead and Eberhardt, 1997; Havaej et al., 2014). 블록의 강체거동을 위해 절리의 강성 k_n 과 k_s 는 다음 Eq. (1)과 같이 계산 될 수 있으나 문헌을 통해 각각 10 GPa/m, 1 GPa/m의 조건으로 부여했다. 초기조건 축압계수 $K_o = 1.0$ 으로 설정한 후 해석을 수행 하였다.

$$k_n = factor \times \max \left[\frac{\left(K + \frac{4}{3} G \right)}{\Delta z_{\min}} \right] \quad (1)$$

여기서, K = 암반의 체적탄성률

G = 암반의 전단변형률

Δz_{\min} = Zone의 최소 높이

본 연구에서는 강도감소법을 이용해 비탈면의 안전율을 산정하였다. 강도감소법은 수치해석을 통한 비탈면 안정해석 시 주로 이용되며, 지반의 강도를 점차 감소시키면서 비탈면이 파괴 될 때의 강도를 통해 안전율을 산정하는 방법으로 다음 Eqs. (2) and (3)와 같다(Dawson et al., 1999).

$$c^{trial} = \frac{1}{F^{trial}} c \quad (2)$$

$$\phi^{trial} = \arctan \left(\frac{1}{F^{trial}} \tan \phi \right) \quad (3)$$

여기서, c^{trial} = 감소된 점착력

ϕ^{trial} = 감소된 마찰각

F^{trial} = 시험안전율

4. 해석 결과 및 분석

4.1 절리마찰각의 영향

Fig. 4는 UDEC을 이용하여 쟁기형태파괴의 변위를 나타낸 것이다. 자중에 의해 상부슬래브의 활동으로 슬라이딩을 일으키고 공액절리가 벌어지면서 하부슬래브가 회전을 하여 변위가 크게 발생하는 것으로 관찰되었다.

쟁기형태파괴에 미치는 절리마찰각의 영향을 분석하기 위해 절리 조건을 층면절리(bedding joint), 공액절리, 비탈면 하단에 위치한 절리로 구분하고 매개변수 해석을 수행하여 비교분석하였으며, 점선은 깎기비탈면의 전기 시 기준안전율 F.S = 1.5를 나타낸다(Fig. 5).

Fig. 5(a)는 비탈면 하단에 위치한 절리의 마찰각 변화, 공액절리

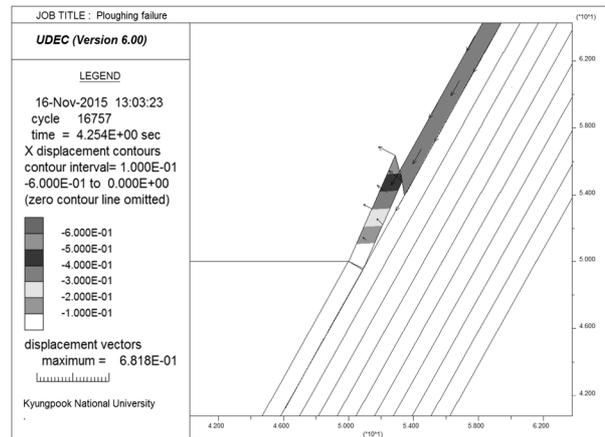


Fig. 4. UDEC Numerical Analysis of Displacement

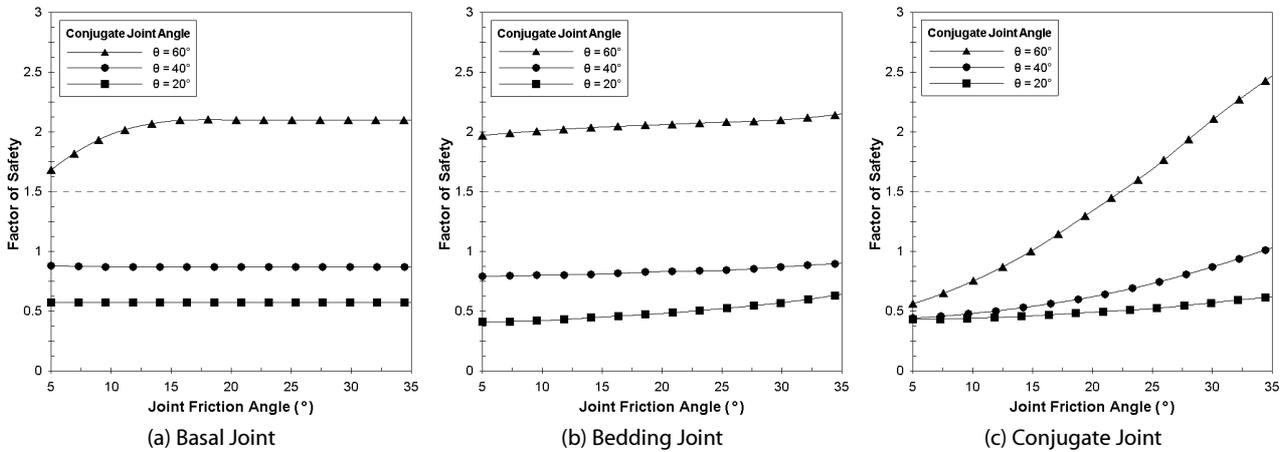


Fig. 5. Factors of Safety Calculated for Different Values of Joint Friction Angle and Conjugate Joint Angle

의 경사각에 따른 안전율을 보여주고 있다. 공액절리의 경사각이 60°이상에서는 기준안전율을 만족하여 안정을 보였으며, 절리마찰각이 15°이상에서는 안전율 변화가 없는 것으로 나타났다. 반면에 경사각 20°와 40°에서는 기준안전율을 만족하지 못하여 불안정한 것으로 나타났다. 대체적으로 비탈면 하단에 위치한 절리는 절리마찰각의 변화에 따른 안전율의 변화가 거의 없는 것으로 판단된다. 또한, 공액절리의 경사각이 60°에서는 20°와 40°에 비해 안전율이 급격하게 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 하부슬래브가 회전하기 위해 상부슬래브의 활동력이나 가파른 경사로 인해 더 깊게 파고들어야 하지만, 공액절리의 경사각이 60°이상부터는 경사가 완만해지기 때문에 하부슬래브의 회전력이 줄어들어 안전율이 급격하게 증가하는 것으로 판단된다.

Fig. 5(b)는 층면절리의 마찰각 변화, 공액절리의 경사각에 따른 안전율을 보여주고 있다. 전반적으로 층면절리의 마찰각이 커짐에 따라 안전율이 조금씩 증가하는 경향을 보이나 그 수준이 미미하여 비탈면의 안정성에 크게 미치는 수준이 아니라고 판단된다. 이 같은 결과는 2.3절에서 설명한 바와 같이 쟁기형태파괴의 메커니즘을 통해 이해할 수 있다. 상부슬래브가 슬라이딩하면서 층면절리의 마찰에 직접적인 영향을 가지게 되므로 절리마찰각이 클수록 안전율이 점진적으로 상승하게 된다. Fig. 5(a)에서와 같이 층면절리에서도 공액절리의 경사각에 따른 안전율 차가 비교적 큰 폭으로 나타났으며, 공액절리의 경사각이 60°이상부터는 비탈면이 안정한 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5(c)는 공액절리의 마찰각과 경사각 변화에 따른 안전율을 보여주고 있다. 공액절리의 경사각이 20°와 40°에서는 절리마찰각이 커짐에 따라 안전율이 낮은 수준으로 증가하였고, 60°에서는 안전율이 비교적 크게 증가하는 경향을 보여주고 있다. 또한, 경사각의 변화에 따른 안전율이 절리마찰각 5°에서는 0.43~0.56으로

비슷하게 나타났으나, 절리마찰각 커질수록 40°와 60°의 안전율이 약 2배 이상 큰 차이를 보여주고 있다. 또한, 공액절리의 경사각이 20°와 40°에서는 절리마찰각이 커짐에도 불구하고 안전율이 상대적으로 낮게 나타났다. 이와 같은 결과는 공액절리의 경사각이 40°까지는 비교적 가파른(steep)경우에 속하여 상대적으로 큰 활동력과 회전력에 의해 파괴가 발생됨으로 마찰각의 영향이 적은 것으로 판단된다. Fig. 5를 통해 쟁기형태파괴에서 공액절리가 비탈면의 안정성에 큰 영향을 미치는 것으로 판단되었으며, 특히 절리경사각과 절리마찰각에 따라 안전율이 다양하게 변화하는 것을 확인할 수 있었다.

4.2 L_0/L 영향

Fig. 6는 슬래브 총 길이(L)에 대한 하부슬래브 길이(L_0)의 비, 공액절리의 경사각에 따른 안전율 변화를 보여주고 있다. 공액절

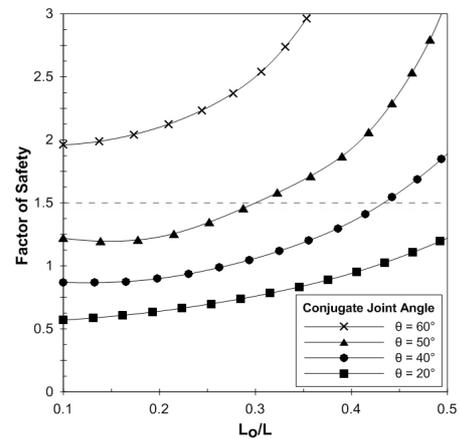


Fig. 6. Factors of Safety Calculated for Different Values of Passive Block Length and Conjugate Joint Angle

리의 경사각이 60°에서는 안전율이 2.0 이상으로 안정을 보였고, 50°에서는 L_o/L 비가 0.3, 40°에서는 L_o/L 비가 0.43 수준에서 기준안전율을 만족하여 안정한 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 L_o/L 비가 증가할수록 상부슬래브의 길이가 짧아짐에 따라 자중이 감소하여 안전율이 상승하는 것으로 판단된다. Dawson (1995)에 따르면 하부슬래브의 한계 높이(L_o/L)를 전체 비탈면 높이의 40~60% 수준에서 비탈면이 안정하다고 했으나, Fig. 6에 의하면 공액절리의 경사각 변화에 따라 기준안전율에 만족하는 것을 확인할 수 있다. 앞서 4.1절에서 설명한 비와 같이 L_o/L 의 영향 분석에서도 공액절리의 경사각 60°와 50°는 안전율이 비교적 큰 차이를 보이고 있으므로, 60°는 완만한 경사를 가져 회전력이 감소하고 안전율이 증가하는 것으로 판단된다.

4.3 S/H의 영향

Fig. 7은 비탈면의 높이(H)에 대한 층리간격(S)의 비, 공액절리의 경사각에 따른 안전율 변화를 보여준다. 공액절리의 경사각이 20°에서는 S형태의 곡선을 보이면서 S/H비에 따라 안전율이 증가하였다. 또한, 경사각이 50°이상에서는 S/H비가 0.04까지 안전율이 급격히 증가하는 경향을 보여주었고, 경사각이 클수록 일정 부분에서부터 안전율의 변화가 적은 것으로 나타났다. 이는 절리 경사가 완만해짐에 따라 쟁기형태파괴의 가능성이 현저히 낮아짐으로써 영향력이 줄어드는 것으로 판단된다. Dawson (1995)에 따르면 일반적으로 슬래브의 두께가 5m 이하인 경우에 파괴가 발생한다고 했으나, Fig. 7에 의하면 비탈면의 높이와 층리의 간격, 공액절리의 경사각 등에 의한 층리의 한계간격이 다르게 나타났으며, 공액절리의 경사각이 20°에서는 5m 이상에서도 비탈면 안전기준을 만족하지 못하는 것을 확인할 수 있다.

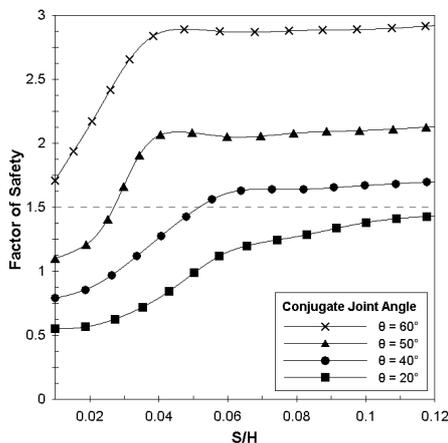


Fig. 7. Factors of Safety Calculated for Different Values of Bedding Joint Spacing and Conjugate Joint Angle

5. 결론

풋월 비탈면에서 발생하는 쟁기형태파괴에 대한 영향인자를 분석하기 위하여 DEM기반 수치해석적 매개변수연구를 수행하였다. 매개변수로는 절리경사각, 절리마찰각을 고려하여 절리조건(층면절리, 공액절리, 비탈면 하단에 위치한 절리), 슬래브 총 길이에 대한 하부슬래브 길이의 비(L_o/L), 비탈면의 높이에 대한 층리간격의 비(S/H)에 대해 수치해석을 통해 수행하였다. 각 해석결과를 비교분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 비탈면 하단에 위치한 절리에서는 절리마찰각의 변화에 따른 안전율의 변화가 거의 없었으며, 층면절리에서도 비탈면 하단에 위치한 절리의 결과와 유사한 거동을 보여주었다. 절리마찰각이 커짐에 따라 안전율이 조금씩 증가하는 경향을 보였으나, 그 수준이 미미하여 비탈면 안정성에 크게 미치는 수준이 아니라고 판단된다. 또한, 공액절리의 경사각이 20°와 40°에서는 절리마찰각이 커짐에 따라 안전율이 미미하게 증가하였고, 60°에서는 안전율이 비교적 크게 증가하였다. 이 결과들을 통해 공액절리의 경사각과 절리마찰각이 쟁기형태파괴에 있어서 직접적인 영향을 미치는 것으로 분석되었다.
- (2) 슬래브 총 길이(L_o)에 대한 하부슬래브 길이(L)의 비 분석에서, 공액절리의 경사각이 60°에서는 안전율이 2.0 이상으로 나타났으며, 50°이하에서는 L_o/L 비가 증가함에 따라 기준안전율을 만족하였다. 이는 슬래브 총 길이에 대한 하부슬래브 길이의 비가 증가할수록 상부슬래브의 길이가 짧아지고 자중이 감소하여 안전율이 상승하는 것으로 판단된다.
- (3) 비탈면의 높이(H)에 대한 층리간격(S)의 비 분석에서, 공액절리의 경사각이 20°이상에서는 S형태의 곡선을 보이면서 S/H비에 따라 안전율이 증가하였다. 또한, 경사각이 50°이상에서는 비탈면의 높이에 대한 층리간격의 비가 0.04까지 안전율이 급격히 증가하였고, 경사각이 클수록 일정 부분에서부터 안전율의 변화가 적은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 절리의 경사가 완만해짐에 따라 쟁기형태파괴의 가능성이 현저히 낮아짐으로써 영향력이 줄어드는 것으로 분석된다.
- (4) 본 연구에서는 한계평형해석으로 검토하기 어려운 풋월 비탈면의 안정성 평가를 DEM 해석을 통해 검토하였으며, 공액절리의 지질조건과 층리의 간격이 풋월 비탈면의 파괴에서 가장 중요한 영향인자로 도출되었다. 본 연구결과를 통해 풋월 비탈면의 최적설계 및 시공, 보강에 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(16AWMP-B079625-03)에 의해 수행되었습니다.

References

- Adhikary, D. P., Mühlhaus, H. and Dyskin, A. V. (2001). "A numerical study of flexural buckling of foliated rock slopes." *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 25, No. 9, pp. 871-884.
- Alejano, L. R., Ferrero, A. M., Ramírez-Oyanguren, P. and Álvarez Fernández, M. I. (2011). "Comparison of limit-equilibrium, numerical and physical models of wall slope stability." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 48, No. 1, pp. 16-26.
- Cavers, D. S. (1981). "Simple methods to analyze buckling of rock slopes." *Rock Mechanics Felsmechanik Mécanique des Roches*, Vol. 14, No. 2, pp. 87-104.
- Cruden, D. M. (1985). "Rock slope movements in the Canadian Cordillera." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 22, No. 4, pp. 528-540.
- Dawson, E. M., Roth, W. H. and Drescher, A. (1999). "Slope Stability Analysis by Strength Reduction." *Geotechnique*, Vol. 49, No. 6, pp. 835-840.
- Dawson, R. F., Bagnall, A. S. and Barron, K. (1995). "Rock anchor support systems at Smoky River Coal Limited." *CIM Bulletin*, Vol. 88, No. 992, pp. 60-65.
- Froldi, P. and Lunardi, P. (1995). "Buckling failure phenomena and their analysis." *Mechanics of Jointed and Faulted Rock*, Balkema, pp. 595-604.
- Giani, G. P. (1992). *Rock slope stability analysis*, CRC Press (in USA).
- Havaej, M., Stead, D., Eberhardt, E. and Fisher, B. (2014). "Characterization of bi-planar and ploughing failure mechanisms in footwall slopes using numerical modelling." *Engineering Geology*, Vol. 178, pp. 109-120.
- Hawley, P. M., Martin, D. C. and Acott, C. P. (1986). "Failure mechanics and design considerations for footwall slopes." *CIM Bulletin*, Vol. 79, No. 896, pp. 47-53.
- Hu, X. and Cruden, D. M. (1993). "Buckling deformation in the Highwood Pass, Alberta, Canada." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 30, No. 2, pp. 276-286.
- ITASCA consulting Group, Inc. (2014). Universal distinct element code, user's manual, Version 6.0, Minneapolis, Minnesota (in USA).
- Kutter, H. K. (1974). "Mechanism of slope failure other than pure sliding." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics*, Vol. 13, No. 5, p. 54.
- Pant, S. and Adhikary, D. (1999). "Implicit and explicit modelling of flexural buckling of foliated rock slopes." *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 32, No. 2, pp. 157-164.
- Pereira, L. C. and Lana, M. S. (2013). "Stress-Strain Analysis of Buckling Failure in Phyllite Slopes." *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 31, No. 1, pp. 297-314.
- Qi, S., Lan, H. and Dong, J. (2015). "An analytical solution to slip buckling slope failure triggered by earthquake." *Engineering Geology*, Vol. 194, pp. 4-11.
- Qin, S., Jiao, J. J. and Wang, S. (2001). "A cusp catastrophe model of instability of slip-buckling slope." *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 34, No. 2, pp. 119-134.
- Sejmonsbergen, A. C., Woning, M. P., Verhoef, P. N. W. and de Graaff, L. W. S. (2005). "The failure mechanism of a late glacial sturzstrom in the subalpine molasse (Leckner Valley, Vorarlberg, Austria)." *Geomorphology*, Vol. 66, No. 1, pp. 277-286.
- Serra de Renobales, T. (1987). "Strata buckling in footwall slopes in coal mining." *Proc. of 6th Int. Conf. on Rock Mechanics.*, ISRM, Montreal, Canada, pp. 527-531.
- Silva, C. H. C. and Lana, M. S. (2014). "Numerical modeling of buckling failure in a mine slope." *Revista Escola de Minas, Escola de Minas*, Vol. 67, No. 1, pp. 81-86.
- Stead, D. and Eberhardt, E. (1997). "Developments in the analysis of footwall slopes in surface coal mining." *Engineering Geology*, Vol. 46, No. 1, pp. 41-61.
- Tommasi, P., Campedel, P., Consorti, C. and Ribacchi, R. (2008). "A discontinuous approach to the numerical modelling of rock avalanches." *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 41, No. 1, pp. 37-58.
- Tommasi, P., Verrucci, L., Campedel, P., Veronese, L., Pettinelli, E. and Ribacchi, R. (2009). "Buckling of high natural slopes: The case of Lavini di Marco (Trento-Italy)." *Engineering Geology*, Vol. 109, No. 1-2, pp. 93-108.
- Wang, W., Chigira, M. and Furuya, T. (2003). "Geological and geomorphological precursors of the Chiu-fen-erh-shan landslide triggered by the Chi-chi earthquake in Central Taiwan." *Engineering Geology*, Vol. 69, No. 1-2, pp. 1-13.