

사면붕괴 토괴의 이동거리 예측

Prediction of Travel Distance of Failed Slope Mass

신동훈¹⁾, Dong-hoon Shin, 오병현¹⁾, Byung-hyun Oh, 원희영²⁾, Hee-young Won, 황정규³⁾, Jung-kyu Hwang

요약 (Abstract)

산사태를 포함한 사면붕괴의 위험성을 평가하고 예지, 방지하는데 있어서 붕괴토괴의 이동거리를 예측하는 것은 재해방지의 차원에서 매우 중요하다. 본 연구에서는 지금까지 제안된 사면붕괴 토괴의 이동거리 예측을 위한 이론적, 경험적 방법들을 고찰하였으며, 주로 절취사면 등에서 발생한 사면붕괴 사례를 토대로 붕괴토괴의 이동거리에 미치는 주요 요소에 대하여 고찰하였다.

In assessment, prediction and prevention of the risk of slope failures including landslides it is very important to predict the travel distance of failed slope mass, because of disaster prevention. This paper reviews theoretical and empirical approaches for calculation of the run-out distance of a slide mass, especially for cut slope failures. The main factors affecting the travel distance are evaluated as well, based on the field data.

Key words : slope, travel distance, slide mass, disaster prevention

1. 서론

산사태를 포함한 사면붕괴의 위험성을 평가하고 예지, 방지하는데 있어서 붕괴토괴의 이동거리를 예측하는 것은 재해방지의 차원에서 매우 중요하다. 즉, 붕괴토괴의 이동거리를 예측함으로써 피해가 우려되는 지역에 대한 경계 및 피난, 필요시의 방호대책 등을 마련할 수 있다. 실제로 Hong Kong에서는 그림 1과 같이 시설물에 영향을 미칠 가능성이 있는 사면을 대인명 중

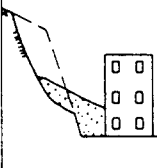

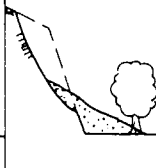
High (Category 1)	Low (Category 2)	Negligible (Category 3)
Occupied Building	Road	Country Park
		

그림 1. Hong Kong의 대인명 중요도의 분류 예

요도(Consequence-to-life)에 따라서 3개의 범주로 나누어서 새로운 사면을 설계하거나 차후 그 중요도가 변경된 사면에 대하여 서로 다른 안전율을 적용하고 있다.

한편, 사면붕괴 토괴의 이동은 사면운동의 하나로서 그 원인 및 형태는 각 나라와 기관에 따라서 분류방법을 달리하고 있다. 따라서 본 연구에서는 먼저 사면운동의 원인 및 형태를 살펴본 후, 지금까지

1) 한국수자원공사 수자원연구소 선임연구원

Senior Researcher, Water Resources Research Institute, KOWACO

2) 한국수자원공사 수자원연구소 부장

Chief, Water Resources Research Institute, KOWACO

3) 홍익대학교 토목공학과 교수

Professor, Dept. of Civil Engineering, Hongik University

제안된 사면붕괴 토괴의 이동거리 예측을 위한 이론적, 경험적 방법들을 고찰하였으며, 주로 절취사면 등에서 발생한 사면붕괴 사례를 토대로 붕괴토괴의 이동거리에 미치는 주요 요소에 대하여 고찰하였다.

2. 사면운동의 분류

사면운동의 원인은 Varnes 등(1995)에 따르면 표 1과 같이 지질적인 요인, 지형학적인 요인, 물리적 요인 및 인간활동 등의 4가지로 분류하였다. Terzaghi(1950)은 내적인 요인과 외적인 요인으로 분류하였다. 즉, 내적인 요인으로는 지진, 발파, 강우 및 건조수축의 반복 등에 의한 전단강도의 감소, 외적인 요인으로는 건설작업 또는 지진 등에 의한 전단응력의 증가 등을 들었다. 실제로는 한 가지 요인에 의해 사면운동이 발생하지는 않으며 대개 내외적인 요인이 복합되어 일어난다.

표 1. 사면운동(산사태)의 원인

1	Geological causes	①weak materials, ②sensitive materials, ③weathered materials, ④sheared materials, ⑤adversely oriented mass discontinuity(bedding, schistosity, etc.), ⑥adversely oriented structural discontinuity(fault, unconformity, contact, etc.), ⑦contrast in permeability, ⑧contrast in stiffness(stiff, dense material over plastic materials)
2	Morphological causes	①tectonic or volcanic uplift, ②glacial rebound, ③fluvial erosion of slope toe, ④wave erosion of slope toe, ⑤glacial erosion of slope toe, ⑥erosion of lateral margins, ⑦subterranean erosion(solution, piping), ⑧deposition loading slope or its crest, ⑨vegetation removal(by forest fire, drought)
3	Physical causes	①intensive rainfall, ②rapid snow melt, ③prolonged exceptional precipitation, ④rapid drawdown(of floods and tides), ⑤earthquake, ⑥volcanic eruption, ⑦thawing, ⑧freeze-and-thaw weathering, ⑨shrink-and-swell weathering
4	Human causes	①excavation of slope or its toe, ②loading of slope or its crest, ③drawdown (of reservoirs), ④deforestation, ⑤irrigation, ⑥mining, ⑦artificial vibration, ⑧water leakage from utilities

한편, 植村(1975)는 사면운동의 분류기준을 정리하였는데, 운동에 관한 기준으로서 운동형식, 운동의 시간적 특성, 운동의 공간적 특성, 이행형태 및 발전과정 등을 제시하였다. Varnes는 사면의 운동형식을 크게 낙하(fall), 전도(topple), 활동(slide), 측방신장(lateral spread), 유동(flow) 및 그 복합형으로 분류하였으며, 표 2는 사면운동의 분류 예를 나타낸 것이다.

표 2. 사면운동의 분류 예

운동의 타입	재료의 타입		
	기암	공학적 흙	
		암설	흙
낙하	낙석	암설의 붕락	흙의 붕락
전도	기반암의 전도	암설의 전도	흙의 전도
활동	회전	기반암의 슬럼프	암설의 슬럼프
	평면	기반암의 평면활동	암설의 평면활동
측방신장	기반암의 측방신장	암설의 측방신장	흙의 측방신장
유동	암반 크리프	토석류 등	흙의 크리프
복합	2~3개 타입이 복합된 것		

3.사면붕괴 토괴의 이동거리 평가방법

사면붕괴 토괴의 이동거리 평가방법으로는 (1)물리모형에 의한 해석적 방법, (2)수치모의에 의한 수치해석적 방법, (3)경험적 방법, (4)실험적 방법 등이 있다. 첫째, 해석적 방법은 Sassa(1988), Fang & Zhang(1988) 및 Aydan 등(1991) 등에 의하여 제시된바 있으며, 이중 Sassa의 썰매모델(sled model)이 간편한 방법으로서 실용적으로 널리 사용되고 있다. 둘째, 수치해석적 방법은 사면의 형상, 절리 등에 의한 불연속면 특성, 구성재료의 복잡한 응력-변형률 관계 등을 비교적 다양하게 반영할 수 있는 장점이 있으나 구성모델에 대한 입력정수의 선정이나 모델링 등에 상당한 경험을 쌓지 않으면 신뢰할 수 있는 결과를 얻기 힘든 단점이 있다. 셋째, 경험적 방법은 Wong & Ho(1996)에 의하여 제시된 바 있으며, 현장 데이터를 토대로 통계분석을 실시하여 해석적 방법이나 수치해석적 방법에 의해 얻은 결과의 검증값으로 이용하는 등 어느 정도 구체적이고 좋은 결과를 얻을 수 있으나 이동거리에 영향을 미치는 요소들을 파악하기 위해서는 신뢰할 수 있는 데이터를 가능한 한 많이 수집할 필요가 있다. 넷째, 실험적 방법은 이동거리에 영향을 미치는 주요인을 분석하는데 유용하지만 아직 연구가 활발하지 않은 실정이다. 본 연구에서는 해석적 방법인 Sassa의 썰매모델과 경험적 방법인 Wong & Ho의 방법에 의한 이동거리 평가방법을 중심으로 기술하고자 한다.

3.1 Sassa의 썰매모델에 의한 방법

이 방법은 붕괴된 mass의 강제운동과 에너지 보존법칙에 근거한 것으로서 이동토괴의 운동 중 에너지는 모두 마찰에 의하여 손실된다는 가정하에 붕괴토괴의 이동거리를 계산한다. 즉, 이동토괴의 운동을 질점(point mass)의 운동으로 파악하고 중력의 영향 및 토괴와 사면간에 생기는 마찰의 영향을 받는 질점의 운동을 고찰한다. 그림 1과 같이 높이 h 의 위치에 있는 중심 A의 토괴가 활동하여 사면상을 수평거리 x 만큼 이동하여 C의 위치에서 정지하는 것으로 하면 운동방정식은 식(1)로 표현된다.

$$m \frac{dv}{dt} = mg(\sin i - f_r \cdot \cos i) \quad (1)$$

여기서, m : 토괴의 질량,
 dv/dt : 토괴의 가속도,
 g : 중력가속도,
 i : 사면구배,
 f_r : 토괴와 사면 사이의 운동시의 마찰계수(등가마찰계수)

f_r 은 등가마찰계수(Hsü, 1975), 평균마찰계수(Scheidegger, 1973)라 하며, A점과 C점의 기하학적인 관계로부터 식(2)와 같이 정의된다.

$$f_r = \frac{h}{x} = \tan \alpha = \tan \phi_\alpha \quad (2)$$

식(1)과 (2)로부터 붕괴토괴의 이동거리는 등가마찰계수의 함수임을 알 수 있다. 한편, α 는 절보기 마찰각(Sassa, 1988) 또는 이동각(travel angle)(Cruden & Varnes, 1996)이라 하며 물리

적인 의미는 아직 불명확하다. 그림 2는 등가마찰계수(겉보기 마찰각 또는 이동각)와 토괴의 용적과의 관계를 나타낸 것으로서 활동토괴의 용적이 클수록 등가마찰계수는 작아짐을 알 수 있다.

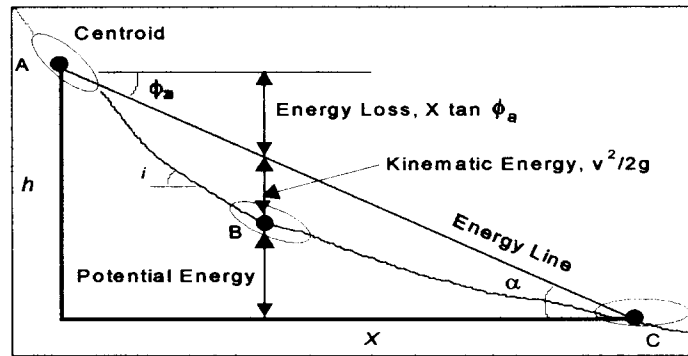


그림 1. Sassa의 썰매모델

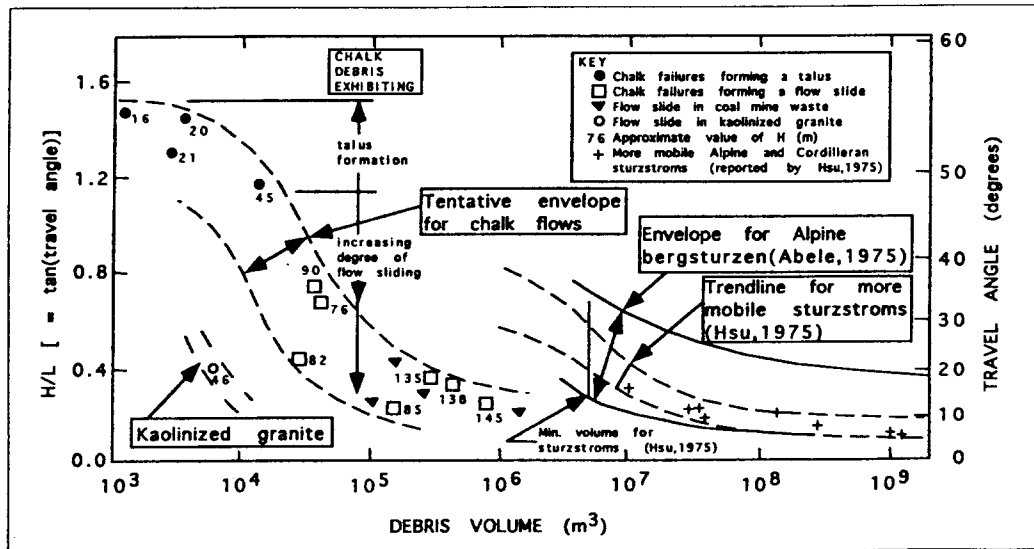


그림 2. 붕괴 토괴의 용적과 등가마찰계수의 관계

3.2 경험적 방법

Wong & Ho는 1993년에 Hong Kong에서 발생한 도로변의 250개 절취사면에서 발생한 사면 붕괴 중 42개의 사면에 대하여 붕괴토괴의 이동거리(L)와 절취사면의 높이(H)의 관계, 붕괴토괴의 체적과 겉보기 마찰각과의 관계, 사면 하단부 지표면의 평균경사의 영향 등을 조사분석 하였으며, 붕괴토괴의 이동거리에 영향을 미치는 주요소로서 (1)붕괴 매커니즘(강우에 의한 사면붕괴, 느슨한 성토의 액상화, 집수흐름에 의한 수세작용 등), (2)붕괴된 사면의 기울기, (3)하단부 지표면의 평균경사 및 (4)붕괴토괴의 체적 등을 들었다.

Wong & Ho의 방법은 분석에 필요한 인자(L, H, θ)가 매우 단순하여 적용하기 쉽고 사면 붕괴 시나리오를 구성하기 위한 기초자료로서 유용할 것으로 판단되나 반면에 토괴의 이동속도 및 구성재료의 특성 등에 따른 영향이 고려되지 않았고 조사자료의 수가 부족하여 향후 보

다 많은 자료에 의한 조사분석이 필요하다.

4. 사례

본 연구에서는 1996년 6월에 전라남도 여천 두암단지 조성공사 현장의 절취사면에서 발생한 사면붕괴 기록을 토대로 Sassa의 썰매모델과 Wong & Ho의 경험적 방법에 의한 붕괴토포의 이동거리에 영향을 미치는 요소들을 분석하였다.

그림 3은 두암단지 절취사면의 단면을 나타낸 것으로서, 사면선단에 설치한 옹벽 위로 2개의 소단이 있고, 이중 제1소단 하부에는 연암 정도의 암반으로 구성되어 있어 비교적 안정한 상태를 보이고 있으나 제1소단 위쪽으로는 泥岩계통의 해성 점토퇴적층으로 구성되어 있다. 이 해성 점토퇴적층은 굴착 당시에는 매우 단단하지만 일단 굴착되어 공기와 물에 노출되고 나면 강우 또는 계절적인 건습반복작용에 의하여 급격하게 풍화와 침식이 진행되어 전단강도가 급감하는 특성을 지니고 있다. 붕괴 무렵의 강우기록에 따르면 97년 6월24일부터 7월12일 까지 약 20일 동안에 누적강우량이 506.1 mm에 달했으며, 붕괴 당일에도 86.7 mm의 집중강우가 내려 본 사면을 포화시킨 것으로 판단된다. 한편, 사면의 앞쪽으로는 공장부지가 넓게 조성되어 있어 붕괴당시 흘러내린 토사가 사면 하단부에 있는 옹벽으로부터 거리 약 55 m, 폭 약 60 m, 두께 약 50~70 cm 정도로 넓게 퍼졌다.

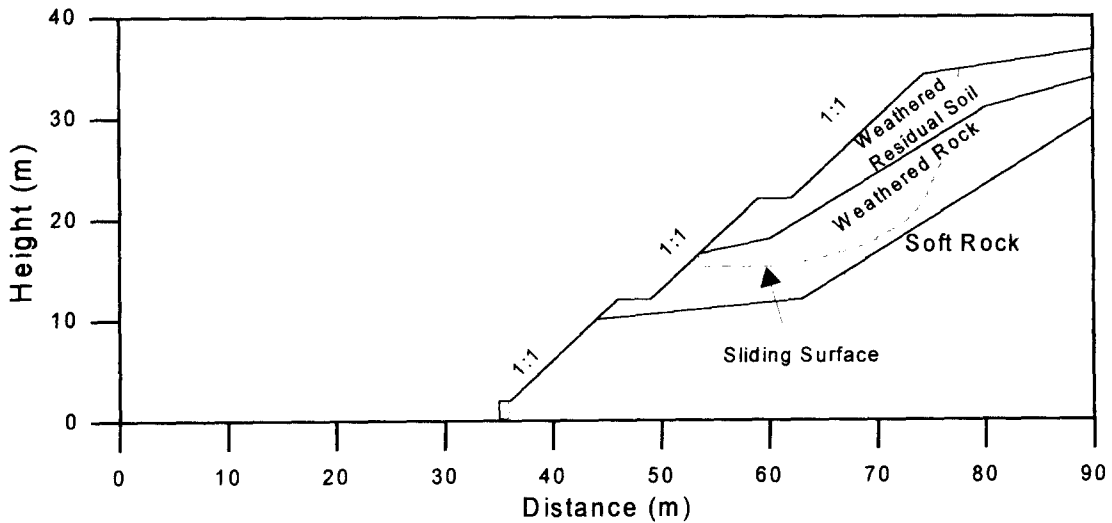


그림 3. 두암단지 절취사면 붕괴 단면도

Sassa의 썰매모델에 의한 붕괴토포의 이동거리는 식(1)과 (2)를 이용하여 산정할 수 있다. 식 (1)과 (2)를 변형하여 토포의 이동거리 x 에 대하여 정리하면 식(3)을 얻을 수 있다.

$$x = g \cdot h \cdot \frac{dt}{dv} \quad (3)$$

식(3)으로부터 토포의 이동속도와 이동시간을 알면 토포의 이동거리를 계산할 수 있다. 본 사면의 경우 이동거리 $x \approx 100$ m, 사면의 높이 $h = 36$ m로서 중력가속도 $g = 9.8 \text{ m/sec}^2$ 일때 이동시간 $dt = 3.528/dv$ 가 된다. 한편, Cruden & Varnes(1996)이 제안한 사면(산사태)의 운동 속도등급(그림 4)에 따른 토포의 속도등급 5이상인 경우의 이동 소요시간을 나타내면 그림 5와 같다.

Velocity Class	Description	Velocity (mm/sec)	Typical Velocity
7	Extremely Rapid	5×10^3	5 m/sec
6	Very Rapid	5×10^1	3 m/min
5	Rapid	5×10^{-1}	1.8 m/hr
4	Moderate	5×10^{-3}	13 m/month
3	Slow	5×10^{-5}	1.6 m/year
2	Very Slow	5×10^{-7}	16 mm/year
1	Extremely Slow		

그림 4. 사면운동의 속도등급(Varnes, 1996)

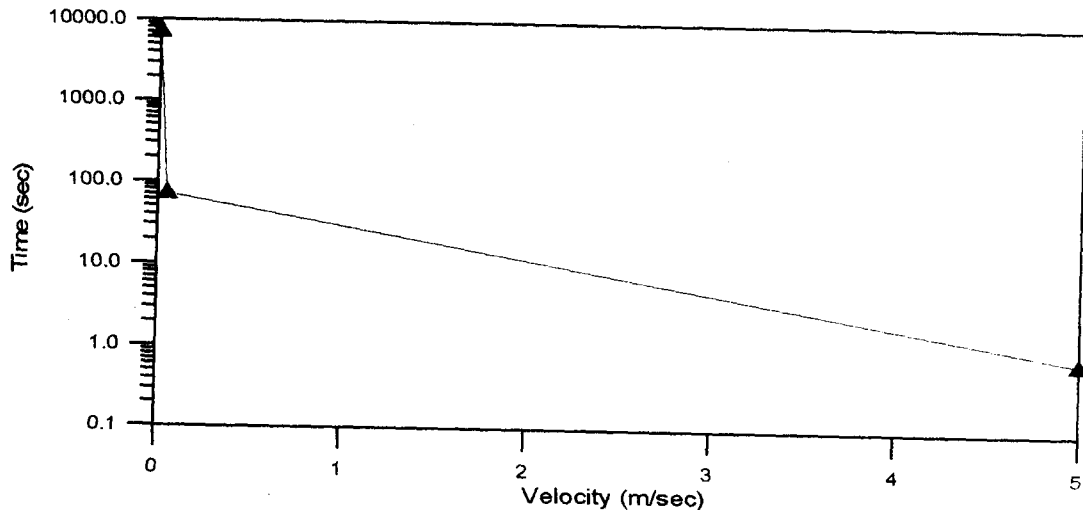


그림 5. Cruden & Varnes의 속도등급에 따른 토괴의 이동 소요시간

토괴의 운동속도가 $v = 1.8 \text{ m/hr}$ 이상인 경우 Rapid로서 속도등급 5에 해당되며, 이 경우 본 사면의 토괴의 이동시간은 7,056 sec로서 약 2시간이 소요된 것으로 계산이 되며, 운동속도 $v = 5 \text{ m/sec}$ 인 속도등급 7인 경우에는 이동시간이 불과 0.76 sec가 소요되어 만일 이동거리 내에 통행인이 있었을 경우 치명적인 피해를 입었을 것으로 사료된다.

한편, Wong & Ho의 이동거리-사면높이 관계도표를 이용할 경우 $H=36\text{m}$, $L=55\text{m}$ 로서 $L=1.52 H$ 로서 그림 6의 점 A로 나타내어져서 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

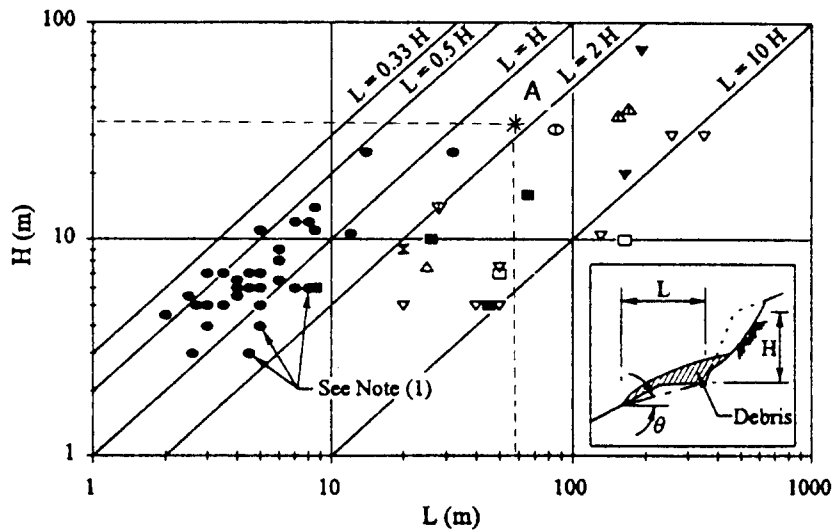


그림 6. 붕괴토괴의 이동거리-사면높이 관계(Wong & Ho, 1996)

5. 결론

본 연구에서는 지금까지 제안된 사면붕괴 토괴의 이동거리 예측을 위한 이론적, 경험적 방법들을 고찰하였으며, 주로 절취사면 등에서 발생한 사면붕괴 사례를 토대로 붕괴토괴의 이동거리에 미치는 주요 요소에 대하여 고찰하였으며, 그 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 산사태를 포함한 사면붕괴시 붕괴토괴의 이동거리를 예측하는 것은 피해예상지역에 대한 경계 및 피난 등의 재해방지를 위하여 매우 유효하다.

(2) 붕괴토괴의 이동거리 평가방법에는 해석적인 방법, 수치해석적인 방법, 경험적인 방법 및 실험적인 방법이 있으며, 현재로는 Sassa의 썰매모델을 이용한 해석적인 방법과 Wong & Ho의 현장 데이터에 근거한 경험적인 방법이 유효하게 사용될 수 있다. 그러나 썰매모델의 경우 결보기 마찰각의 물리적 의미가 불분명하여 향후 구명하여야 할 것으로 사료된다.

(3) 여천 두암단지 절취사면 붕괴에 대하여 Sassa의 썰매모델과 Wong & Ho의 경험적인 방법을 적용해본 결과 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 단, 향후 현장 데이터를 충분히 수집한 후 통계적인 분석을 실시하여 우리나라 실정에 맞는 붕괴토괴의 이동거리 평가방법을 개발할 필요가 있으며, 가능한한 사면붕괴 매커니즘, 사면구성재료의 특성 및 토괴의 운동특성 등을 고려할 수 있는 새로운 평가방법이 요구된다.

참고문헌

1. 丸井 英明(1997), “地すべりの運動”, 土と基礎, Vol.45, No.6, pp.13~16.
2. Aydan, O., Shimizu, Y. and Kawamoto, T.(1991), “The Reach of Slope failures”, Proceedings of 6th International Symposium on Landslides, Christchurch, Vol. 1, pp.301-306.
3. Cruden, D.M. and Varnes, D.J.(1996), “Landslide Type and Process”, Landslides-investigation and Mitigation-, Special Report 247, TRB, pp.36-75.
4. Hsü, K.J.(1975), “Catastrophic Debris Streams(Sturzstroms) Generated by Rockfalls”, Geol. Soc. of Amr. Bull., Vol.86, pp.129-140.
5. Sassa, K.(1988), “Geotechnical Model for the Motion of landslides”, Proceedings of 5th International Symposium on Landslides, edited by C. Bonnard, Vol. 1, pp.37-55.
6. Sassa, K., Fukuoka, H., Lee, J.K. and Zhang, D.(1994), “Prediction of Land Slide Motion in Lishan, China Based on Self-Undrained loading Theory and Measurement of Geotechnical Parameters Using a New Undrained Ring Shear Apparatus”, East Asia Symposium and Field Workshop on Landslides and Debris flows, Seoul, Korea, pp.143-175.
7. Scheidegger, A.E.(1973), “on the Prediction of the Reach and Velocity of Catastrophic Landslides”, Rock Mechanics, 5, pp.231-236.
8. Terzaghi, K.(1950), “Mechanism of Landslides, Application of Geology to Engineering”, Bulletin of Geol. of America, Engineering Geology, Berkeley Volume, pp.83-122.
9. Winterkorn, H.G. and Fang, H.Y.(1975), Foundation Engineering Handbook, Van Nostrand Reinhold Co., pp.373-401.
10. Wong, H.N. and Ho, K.K.(1996), “Travel Distance of Landslide Debris”, Landslides, Senneset(ed.), Balkema, pp.417-422.