

## 점토질 암반에서 발생하는 암반사면의 불안정성 문제

### Slope Instability Problem in Claystone Area

박혁진, Hyuck-Jin Park

세종대학교 지구정보공학과 교수, Professor, Department of Geoinformation Engineering, Sejong University

**SYNOPSIS :** slaking은 굴착에 의해 노출된 암반에서 발생하는 강도저하 및 입자간의 결합력 약화에 의해 암반이 세립화하는 현상이다. 이러한 slaking은 특히 퇴적암으로 구성된 암반사면의 안정성에 영향을 미치는 중요한 인자로 작용한다. slaking에 의한 암반사면의 불안정성은 신생대의 이질암이나 미고결 응회암에서와 같이 암반 자체의 강도 저하 및 결합력 약화에 의해 발생하는 붕괴현상과 차별풍화에 의해 이암 등이 급속도로 쇄굴 및 풍화되어 상부에 놓여 있는 암석이 낙석 등의 형태로 붕괴되는 현상으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 이암의 차별풍화에 의해 사면의 불안정성이 유발되는 연구지역을 대상으로 풍화 및 쇄굴 속도와 slake의 상관관계를 밝히고자하였다. 이를 위하여 slake test와 slake durability test를 수행하였으며 slake durability index를 획득하였다. 실험을 통해 획득된 slake durability index를 연간 쇄굴속도와 비교하여 상관관계를 검토하였으며 기존의 연구결과와 비교하여 slake durability index를 활용하여 쇄굴 정도를 예측할 수 있는 가능성을 제시하였다.

## 1. 서론

신생대의 이암이나 미고결 응회암은 절토후 고결도가 급속도로 감소하면서 강도저하가 발생하는 경우가 많다. 이것은 절토에 의해 응력이 해방되고 흡수팽창 및 절토 후의 건조습윤이나 동결융해의 반복 작용에 의해서 풍화가 빠른 속도로 진행되는 것이 그 원인이라고 판단된다. 이러한 강도 저하는 그림 1에서와 같이 인공사면의 천부와 심부에서 각각 다르게 나타난다. 즉, 굴착 전 ①의 강도위치에서 굴착 직후 심부의 경우에는 ②의 위치로, 천부의 경우에는 ③의 위치까지 응력해방이 발생하지만 굴착 직후이므로 급격한 강도저하는 발생하지 않는다. 시간경과와 함께 흡수팽창이 발생하게 되고 이때 심부에서는 ④의 위치, 천부에서는 ⑤의 위치까지 강도가 저하되며 특히 천부에서는 건조 습윤과 동결융해 등의 반복 작용에 의해 강도가 ⑥의 위치까지 저하하게 된다.

건조습윤의 반복에 의해 세립화되는 현상인 슬레이킹(slaking) 현상은 절토에 의한 응력해방 후 흡수 팽창에 의한 급속도의 고결도 저하 및 강도 저하를 유발하며 이에 따라 절토사면 붕괴의 중요한 원인으로 작용한다. 일본의 경우 전체 사면 붕괴의 2/3가 신생대층에서 발생하며 특히 절토후의 급속한 변화가 발생하는 미고결층과 풍화대에서 붕괴가 많은 것으로 보고되고 있다(윤지선, 2000). 이러한 슬레이킹 현상은 이암에서 공통적으로 나타나는 현상 중의 하나로 특히 신생대의 미고결 퇴적암 등 연암에서 많이 발생한다. 특히 굴착 후 시간경과와 함께 강도 저하가 발생하여 6 - 8시간 후 강도의 20%, 16시간 후 40%가 손실되는 경우도 보고되고 있으며 일부 사암층에서는 1년간 70cm까지의 두께까지 강도저하가 발생하는 경우도 있다(윤지선, 2000). 슬레이킹에 수반된 흡수팽창의 정도는 건조습윤의 반복시험에서 흡수

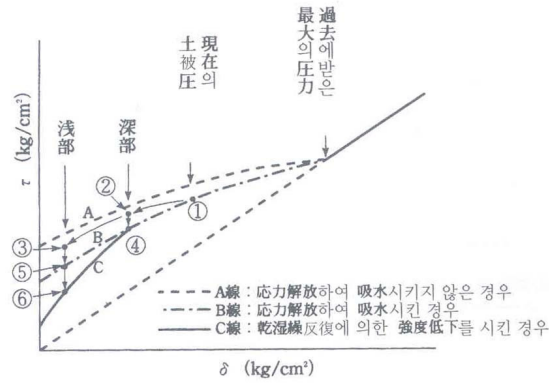


그림 1. 건조습윤의 반복에 의한 강도저하(윤지선, 2000)

후의 함수비 증가와 상관 관계를 보이나 흡수팽창을 구속하는 정도에 따라 슬레이킹의 정도도 달라지는 것으로 보고되고 있다. 이암이나 셰일로 구성된 암반사면의 경우 슬레이킹에 의한 강도저하로 인해 사면 자체의 안정성이 영향을 받을 뿐만 아니라 사암과 이암이 교호하여 나타나는 경우 이암의 차별 풍화에 의해 안정성이 영향을 받는 경우도 보고되고 있다. 본 연구에서는 국내에서도 많은 사례가 보고되고 있는 슬레이킹에 의한 차별풍화로 사면의 안정성이 영향을 받는 경우를 중심으로 논의하고자 한다.

## 2. 슬레이킹(slaking) 현상

공학적인 관점에서 셰일이나 이암은 두 가지의 그룹으로 분류될 수 있다(Goodman, 1993). 먼저 실제 거의 암에 가까운 특성을 가지는 그룹으로 다른 암석에 비해 쉽게 변형되기는 하지만 콘크리트 정도의 강도를 보이며 장기간 대기에 노출되어 풍화를 받는 경우를 제외하면 그 특성이 유지되는 종류의 셰일이나 이암이다. 이러한 종류의 암석은 퇴적물들이 속성작용(diagenesis)에 의해 암석화된 경우로 단순한 밀도 증가가 아닌 퇴적물의 공극사이로 silica나 carbonate 퇴적물들이 침전되어 암석화된 경우이거나 점토가 운모류로 재결정되는 과정에 의해 형성된다. 이러한 그룹의 셰일을 cemented shale(Mead, 1936)이라고 한다.

반면 compaction shale(Mead, 1936; Underwood, 1967) 또는 clay shale(Peterson, 1958)이라고 불리는 그룹의 암석들은 암석보다는 흙에 가까운 공학적인 특성을 보인다. 이러한 그룹의 암석은 대기 중 단기간 노출에 의해서도 쉽게 풍화가 진행되며 구조물의 기초로 사용될 경우 압축되거나 쉽게 변형이 발생한다. 대개 이러한 그룹의 특징은 심각한 산사태나 사면 붕괴의 원인이 되며 특별한 설계나 대책을 필요로 하는 매우 낮은 전단강도의 층이 포함되기도 한다. 그러나 현장에서 셰일 등의 암석이 어떠한 그룹에 속하는지를 간단하게 판단하기는 어려운 실정이다. 그럼에도 불구하고 이 두 암석의 특성은 암석과 흙의 특성 차이와 같이 매우 뚜렷한 차이를 보이고 있으므로 쉽게 판단할 수 있는 객관적인 근거가 필수적으로 필요한 실정이다. 현재 cemented shale과 compaction shale을 구분할 수 있는 가장 객관적인 판단근거로 활용될 수 있는 것이 slaking 현상이다. 즉 compaction shale은 노출된 상태에서 slaking 현상이 쉽게 발생하며 이로 인해 강도 저하가 발생한다. 또한 compaction shale은 포화되었을 때 매우 높은 함수



그림 2. 연구대상 사면의 전경

량을 보이며 함수량에 의해 공학적인 특성 변화를 파악할 수 있다.

slaking은 굴착에 의해 노출된 암반에서 발생하는 강도 저하 및 입자간의 결합력 약화에 의해 암반이 세립화되는 현상을 의미한다. 대개 slaking은 균열과 팽창현상이 먼저 관찰된 후에 발생하며 암석이 shale 일 경우 박리(fissility)가 확대되면서 공간이 발생하고 마치 책이 낱장으로 분리되는 형태와 같은 분리현상이 발생한다. 이암의 경우 새로운 균열이 발생하고 이것이 서로 교차하기 시작하면서 암석이 분리되어 덩어리로 떨어져 나간다. slaking된 암석은 점토가 물에 풀어지는 형태와 같이 분리되어지며 사면 상에 놓여 있을 경우 그 조각들이 구르거나 미끄러져 내리거나 아래로 쓸려 내려가게 된다. 시간이 지남에 따라 암석의 조직이 분리되고 slaking이 진행되는 깊이도 깊어지게 된다.

slaking의 정도는 한 조각의 암편을 물에 넣어 두었을 때 붕괴되는 암석 조각의 크기에 따라 결정되는데 slaking이 발생하지 않는 암석의 경우 전혀 변화가 발생하지 않으나 slake potential이 증가함에 따라 작은 조각으로 부서진다. 극단적인 경우 팽창성이 강한 셰일이나 이암은 암편을 물에 넣은 지 수 분 내에 점토성분이 완전히 풀어져 암편의 형태가 사라지게 된다.

### 3. 연구대상 사면

slaking에 의해 발생하는 사면의 불안정성 현상을 파악하기 위해 선정된 연구대상 사면은 미국

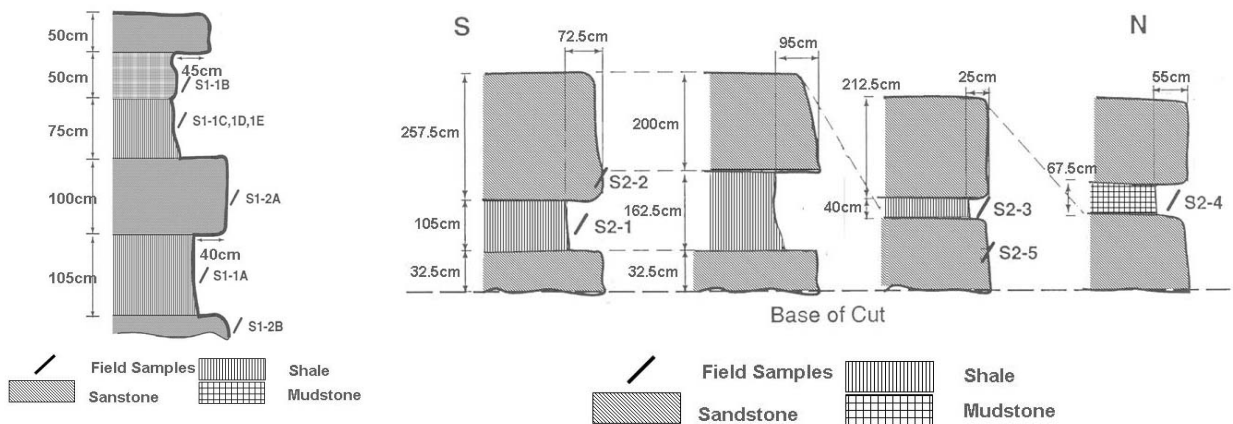


그림 3. 조사 대상 사면의 차별풍화

Indiana State Road 37번 국도상에 위치하는 사면으로 1970년대에 건설되었다. 연구대상 사면은 수평으로 층리가 발달한 해성 기원의 퇴적암으로 구성되어 있으며 사면의 총 연장은 약 180m, 사면의 높이는 약 6m이다. 사면의 경사는 약 80도로 약 1 - 1.5m 간격으로 pre-splitting hole이 사면의 법면에 남아 있다.

본 연구대상사면은 사암과 이암이 교대로 교호하면서 나타나고 있으며 풍화에 약한 이암의 특성에 의해 이암이 차별적으로 풍화를 받아 사면의 안정성에 문제가 있는 것으로 보고되고 있다. 그림 2는 연구대상 사면의 전경으로 차별 풍화에 의한 낙석 및 사면의 불안정성을 보이고 있다. 차별 풍화는 사암 등과 같이 강도가 높은 암석과 이암이나 셰일과 같이 낮은 강도를 보이는 암석 등이 교대로 나타날 경우 낮은 강도를 보이는 셰일이나 이암 등이 사암에 비해 먼저 풍화가 진행되는 현상을 의미한다. 따라서 이러한 암석들이 교대로 나타나는 사면의 경우 차별 풍화에 의해 undercutting이 발생하게 되고 강도가 높은 암반이 하부에 지지력을 잃으면서 낙석이나 평면 또는 췌기파괴가 발생하는 등 사면의 불안정 현상이 발생하게 된다. 이러한 undercutting에 의해 발생한 사면 붕괴의 경우 높은 속도와 갑작스러운 움직임, 그리고 경우에 따라서는 대규모의 암편이 무너지는 등 다른 종류의 사면 붕괴에 비해 심각한 피해를 초래할 수 있다(Shakoor and Weber, 1988; Shakoor, 1995; Dick and Shakoor, 1995). 유병욱(1997)에 의하면 우리나라의 경우 퇴적암 지대에서 발생하는 사면 붕괴중 23.2%가 이러한 차별 풍화에 의해 발생하는 것으로 보고되고 있다.

#### 4. 실내 실험

실내실험을 수행하기 위해 연구대상 사면의 두 곳으로부터 셰일, 이암 그리고 사암의 시료를 획득하였으며 연구대상사면에서 획득한 시료에 대하여 slake test와 slake durability test 두 가지의 실내시험을 수행하였다.

slake test는 건조와 습윤이 반복되는 과정동안 암석의 변화를 관찰함으로써 풍화의 효과를 재현하기 위한 목적으로 개발되었다. slake test의 시험 과정과 결과에 대하여서는 여러 저자들에 의해 논의되었으며(Wood and Deo, 1975; Champman et al, 1976; Hopkins and Deen, 1984) 그 과정은 다음과 같다.

1. 약 50 - 60g 정도 질량의 시료를 105°C에서 일정한 질량을 보일 때까지 건조시킨 후 건조질량을 측정한다.
2. 상온에서 약 30분간 시료를 냉각시킨 후 증류수가 담긴 병에 넣어 10분후 그리고 각각 1시간 후, 2시간, 4시간, 8시간 그리고 16시간 후의 시료의 상태를 관찰한다.
3. 시료를 병에서 꺼낸 후 일정한 질량이 획득될 때까지 건조시킨다.
4. No. 10의 체(2 mm opening)를 사용하여 체에 남은 시료의 질량을 얻는다.
5. 이러한 과정을 5회 반복한 후 slake index( $S_I$ )를 계산한다.

$$S_I = \frac{(original\ weight - final\ weight)}{original\ weight} \times 100$$

이 간단한 시험은 특히 신생대의 미고결층이나 compaction shale에서 매우 효과적인 것으로 알려져 있으나 cemented shale와 같이 어느 정도의 강도를 보이는 암석에서는 활용도가 떨어지는 것이 사실이다.

표 1. slake test 결과

Sample	Lithology	Before slake test (g)	After slake test (g)	Change of weight (g)	%
S1-1A	shale	53.3	53.0	0.3	0.56
S1-1B	mudstone	57.4	57.3	0.1	0.17
S1-1C	shale	57.3	56.8	0.5	0.87
S1-1D	mudstone	70.1	68.1	2.0	2.85
S1-1E	shale	69.5	67.2	2.3	3.31
S1-2A	sandstone	61.6	61.6	0	0
S1-2B	sandstone	49.5	49.5	0	0
S2-1	mudstone	61.6	61.5	0.1	0.16
S2-2	sandstone	68.3	68.2	0.1	0.15
S2-3	shale	61.7	61.1	0.6	0.97
S2-4	mudstone	62.3	61.1	1.2	1.93
S2-5	sandstone	69.4	69.4	0	0

slake durability test

slake durability test는 10번 채(2mm opening)로 만들어진 드럼 안에 암편을 넣고 드럼의 절반정도를 물속에 담근 후 회전시켜 암석의 풍화를 급속히 진행시켜 풍화에 대한 인내도를 측정하는 시험방법이다. 시험과정은 ASTM D 4644-87와 ISRM(1979)에 의해 규정되어 있으며 따라서 자세한 시험과정은 본 논문에서 생략하기로 한다. 두 차례의 cycle을 수행한 후 다음과 같은 계산을 통해 durability index를 획득한다.

$$I_D = \frac{\text{original weight of drum} - \text{weight of sample remaining inside drum}}{\text{original weight of drum}} \times 100$$

## 5. 결과의 해석

실내 실험의 결과와 현장에서 나타나는 풍화와의 상관관계를 밝히기 위해 먼저 현장조사를 통하여 세일 및 이암층의 차별 풍화정도를 파악하였다(그림 3). 현장조사를 통해 사암층의 표면에 pre-split 발파 시

표 2. slake durability test 결과

Sample	Lithology	Before test (g)	After test (g)	Change of weight (g)	%	slake durability index (I <sub>a</sub> )
S1-1A	shale	477.8	462.3	15.5	3.2	96.8
S1-1B	mudstone	475.8	436.6	39.2	8.2	91.8
S1-1C	shale	456.8	420.7	36.1	7.9	92.1
S1-1D	mudstone	315.7	291.7	24.0	7.6	92.4
S1-1E	shale	326.0	291.1	34.9	10.7	89.3
S1-2A	sandstone	457.5	453.8	3.7	0.8	99.2
S1-2B	sandstone	507.4	503.9	3.5	0.7	99.3
S2-1	mudstone	466.4	392.5	73.9	15.8	84.2
S2-2	sandstone	441.9	438.5	3.4	0.8	99.2
S2-3	shale	449.9	421.8	28.1	6.2	93.8
S2-4	mudstone	490.6	439.4	51.2	10.4	89.6
S2-5	sandstone	447.2	442.9	4.3	1.0	99.0

표 3. 쇄굴속도와 slake durability index

Sample	Erosion (cm/yr)	Slake durability index
S1-1A	1.78	96.8
S1-1B	2.26	91.3
S1-1C	2.06	92.1
S1-1D	2.36	92.4
S1-1E	2.49	89.3
S2-1	2.94	84.2
S2-3	1.47	93.8
S2-4	2.97	89.6

표 4. 풍화인내도와 사면의 불안정성

Durability	Slope Instability			
	Excessive Erosion	Slump	Debris flow	Undercutting (cm/yr)
High	Unlikely	Unlikely	Unlikely	2 - 3
Medium	Unlikely	Potential	Potential	3 - 5
Low	Probable	Probable	Probable	5 - 10

사용되었던 hole의 관찰되었으며 이는 사암이 사면 개설 당시와 비교하여 거의 풍화되지 않았음을 지시한다. 따라서 이러한 사실을 바탕으로 셰일이나 이암층이 사면 개설이후 얼마나 풍화를 받았는가를 쉽게 판단할 수 있으며 사면개설 시점으로부터 현재까지의 시간을 따져 연간 풍화 및 쇄굴 속도를 계산하였다. 그림 3에서와 같이 쇄굴된 정도는 암종에 따라 각각 차이를 보이고 있으며 최소 25cm에서 최대 95cm까지의 쇄굴을 보이고 있다.

앞 서 설명한 바와 같이 각각 셰일, 이암 및 사암 시료에 대해 slake test와 slake durability test를 수행하였으며 실내실험의 결과는 표 1과 2에 제시하였다. 표 1은 slake test의 결과로 사암뿐만 아니라 이암과 셰일에서도 질량의 변화는 거의 없거나 매우 소량의 변화만 관찰되었다. 이는 본 실험의 대상 암석들이 대개 중생대 시기의 암석으로 신생대에 형성된 암석과는 달리 어느 정도의 고결도를 보이기 때문으로 보인다. 표 2는 두 cycle의 slake durability test를 수행한 결과를 보이는 표이다. 일부 암석에서 약 84.2%를 보이고 있으나 대부분의 셰일과 이암에서는 89%에서 96%까지의 값을 보이고 있다.

이러한 결과는 Shakoor(1995)와 Dick and Shakoor(1995)의 연구결과와 비교해 볼 때 높은 내구성(high durability)을 보이는 암석( $I_d$  85% 이상)에 속하는 것이며 ISRM(1979)에 의하면 약간 높은 내구성을 보이는 결과( $I_d$  85% - 95%)이다.

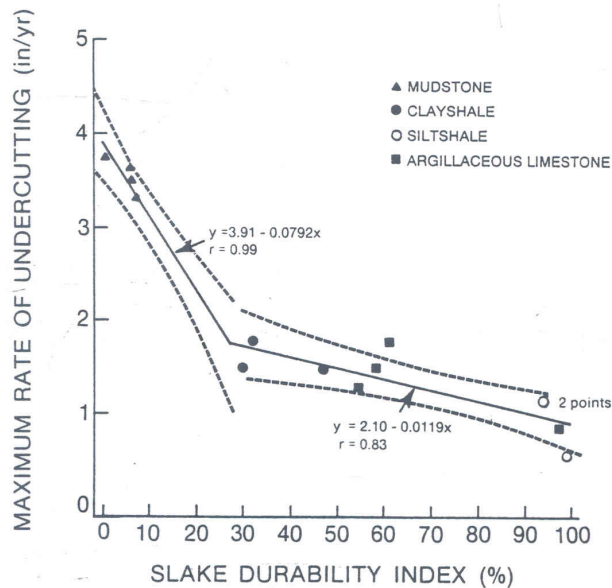


그림 4. 쇄굴속도와 slake durability

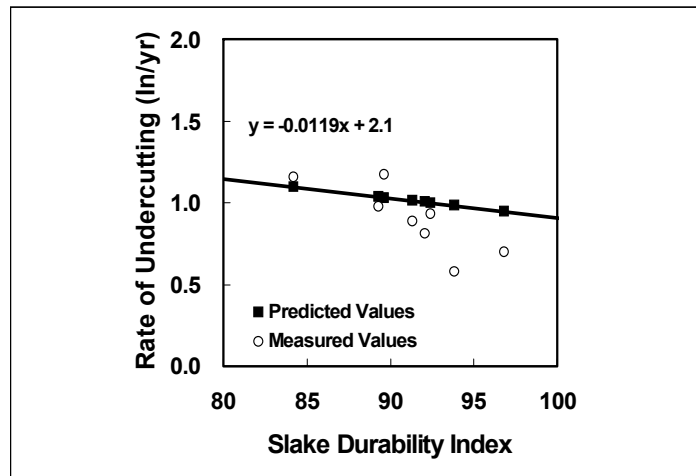


그림 5 쇄굴 속도와 slake durability index의 상관관계

이러한 결과를 앞서 계산한 연간 쇄굴 속도와 비교해 보았다(표 3). Shakoor(1995)에 의하면 높은 내구성을 보이는 암석은 약 2-3 cm/yr의 쇄굴속도를 보이는 것으로 보고하고 있으며 이것은 본 논문의 실험 결과와도 잘 일치하는 것이다. 쇄굴속도와 slake durability index와의 연관성은 Shakoor(1995)에 의해 제안되었는데 Shakoor(1995)는 쇄굴속도와 slake durability test의 결과를 비교하여 회귀분석을 수행한 후 slake durability test에 따른 쇄굴속도의 예측식을 제안하였다(그림 4). 그 결과에 따르면 30%이상의 slake durability index 값을 보이는 암석에 대하여서는 수식  $y = 2.10 - 0.0119x$  을 제안하였으며 30%이하의 slake durability index의 경우에는  $y = 3.91 - 0.0792x$ 를 제안하였다. 이때 y는 쇄굴의 속도(in/yr)이고 x는 slake durability index이다. 따라서 본 연구의 실험을 통해 획득된 결과를 그림 4의 회귀선과 함께 도시하여 보았다(그림 5). 그 결과 Shakoor(1995)에 의하여 제시된 회귀식과 어느 정도 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 이러한 결과로부터 Shakoor(1995)와 Dick and Shakoor(1995)에 의해 제안된 쇄굴속도의 예측 방법이 현장에서 어느 정도 활용 가능할 것으로 보이며 slake durability test를 통해 사면이 개설된 이후 얼마나 빠른 속도로 풍화 및 쇄굴이 진행될 것인가 하는 것을 예측 가능할 것으로 보인다. 또한 Dick and Shakoor(1995)은 slake durability index와 이암 또는 세일의 암석학적 특징을 비교하였으며 사면의 붕괴사태와 slake durability index 그리고 암석학적 특성을 바탕으로 slake durability index와 사면의 붕괴 형태와의 연관성을 제안하였다(표 4).

## 6. 결론

slaking은 굴착에 의해 노출된 암반에서 발생하는 강도저하 및 입자간의 결합력 약화에 의해 암반이 세립화되는 현상을 의미한다. 따라서 slaking은 암반사면의 안정성에 영향을 미치는 중요한 인자중의 하나로 작용하며 slaking에 의한 사면의 붕괴도 빈번하게 발생하고 있다. 기존의 연구 결과에 따르면 slake durability 차이는 사면의 붕괴형태에도 영향을 미치는 것으로 보고되고 있으며 excessive erosion, slump나 debris flow 등과 같은 사면 붕괴는 slake durability의 영향을 받는 것으로 보인다. 또한 사면 내에 사암과 이암 또는 세일이 교호하여 나타나는 경우 발생하는 이암과 세일의 차별 풍화 역시 사면의 안정성에 영향을 미치는 조건 중 하나이다. 본 연구에서는 차별풍화로 인해 발생하는 사면 안정성의 문제를 고려하

기 위하여 slake durability index와 undercutting rate의 상관관계를 비교해 보았다. 본 연구의 결과는 기존의 실내 실험 결과와 비교하여 잘 일치하는 것으로 밝혀졌으며 이러한 연구결과를 바탕으로 slake durability index를 활용하여 undercutting의 가능성을 파악할 수 있을 것으로 보이며 사면의 설계나 계획에 활용할 수 있을 것으로 보인다.

## 참고문헌

1. 유병옥(1997), *암반 절취면의 안정성 평가 및 대책에 관한 연구*, 한양대학교 박사학위 논문, pp.335.
2. 윤지선(2000), *토목지질공학*, 구미서관, pp. 388.
3. Champman, D. R., Wood, L. E., Lovell, C.W. and Sisiliano, W. J. (1976), " A comparative study of shale classification tests and systems", *Bull. Assoc. of Eng. Geol.* Vol. 13, pp. 247-266.
4. Dick, J. C. and Shakoor, A. (1995), "Characterizing durability of mudrocks for slope stability purposes", *Clay and Shale Slope Instability*, Review in Engineering Geology, pp. 121-130.
5. Goodman, R. E. (1993), *Engineering Geology; Rock in Engineering Construction*, John Wiley & Sons. pp. 412.
6. Hopkins, T. C. and Deen, R. C. (1984), "Identification of shales", *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol. 7, pp. 10-18.
7. ISRM (1979), "Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption, and related properties and swelling and slake durability index properties", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol. 16, pp. 141-156.
8. Mead, W. J. (1936), "Engineering geology of damsite", *Transactions, 2nd International Congress on Large Dams*, International Committee on Large Dams, pp. 171 - 192.
9. Peterson, R (1958), Rebound in the Bearpaw Shale, Western Canada", *Bull. Geol. Soc. Amer.* 69, pp. 1113-1124.
10. Shakoor, A. (1995), " Slope stability considerations in differentially weathered mudrocks", *Clay and Shale Slope Instability*, Review in Engineering Geology, pp. 131-138.
11. Shakoor, A. and Weber, M. W. (1988), "Role of shale undercutting in promoting rock falls and wedge failures along Interstate 77", *Bull. Assoc. of Eng. Geol.* Vol. 25, pp. 219-234.
12. Underwood, L. B., Thorfinnson, S.T. and Black, T.W. (1967), "Rebound in redesign of Oahe Dam hydraulic structures", *J. Soil Mech. Fdtns. Div.*, ASCE 90, pp. 65-86.
13. Wood, L. E. and Deo, P. (1975), " A suggested system for classifying shale materials for embankments", *Bull. Assoc. of Eng. Geol.* Vol. 12, pp. 39-55.