

이암과 셰일의 지질공학적 특성
Engineering Geological Properties of Mudstone and Shale

박 형 동¹⁾

1) 서울대학교 지구환경시스템공학부 조교수

이암과 셰일의 지질공학적 특성

Engineering Geological Properties of Mudstone and Shale

박형동¹⁾

1) 서울대학교 지구환경시스템공학부 조교수, Assistant Professor, School of Civil, Urban & GeoSystem Engineering, Seoul National University

요약(ABSTRACT) : 이암 및 셰일은 점토를 함유하고 있어 풍화작용을 받을 경우 공학적 성질이 급격히 변화하여 강도 저하, 내구성저하현상 및 토사와 유사한 거동을 보이는 등 토목공사에 위험한 요소가 되고 있다. 풍화된 시료에 대한 실험용 시료 가공이 어렵고 적용 가능한 실험법이 적어 공학적 특성이나 거동을 정량적으로 파악하는 기법이 다른 암종에 비해 극히 제한된다. 현재까지 강도측정과 같은 일반적인 물성의 단순측정보다는 내구성을 분석하는 슬레이킹 내구성 시험 (Slake durability test), Modified Jar test, 팽창율 측정시험 (Swelling test) 등의 정량화 시험법이 주로 사용되고 있으며 국내 현장에서도 적용을 권장할 수 있다. 이러한 실험치의 해석에서 단일 실험치 (예: 팽창율)만으로 지질공학적 특성을 파악하는 경우 잘못된 판단을 할 수도 있으므로, X선 회절분석시험 (XRD: X-Ray Diffraction Test), TG-DTA분석, 주사전자현미경 (SEM: Scanning Electron Microscope) 이미지 분석, 투수계수 측정실험 등도 함께 수행하여 실험결과를 종합적으로 해석하는 것이 바람직하다.

주요어(Key words) : 슬레이킹, 팽창률, 차별풍화, XRD, SEM

1. 서론

국내 건설현장에서 일부 지역에 국한하여 나타나고 있는 이암(mudstone), 셰일(shale) 등의 이질암은 점토를 주성분으로 한 퇴적암의 일종이다. 풍화작용을 받은 이후에는 흙과 유사한 공학적 성질을 보이는 특징이 다른 암종에 비해 가장 치명적인 공학적 성질이다. 국내 현장에서도 간혹사면 절취후 노출된 이암, 셰일 암반이 쉽게 풍화되어 문제를 일으키는 경우가 보고되고 있다. 이암, 셰일암반은 외관상 단단한 암반으로 보이는 경우가 많아 초보자들이나 비전문가의 지질조사시 착각하기 쉽고, 토사지반보다는 경도가 높아 야외지질조사시 암반의 강도가 과대평가 되는 위험성이 높다. 그동안 화강암류 지반에 대한 경험이 풍부한 국내 지질조사자들이나 토목시공자에게는 가장 오판하기 쉬운 암종에 해당되므로 이에 대한 정확한 지질공학적 특성을 이해하고 적합한 실험법을 통해 지반조사와 평가를 실시할 필요가 있다.

본 논문에서는 최근까지 논의되고 있는 적합한 시험법, 그동안 국내에서 조사된 몇몇 시험 자료에 대한 분석 등을 통해 국내 이암, 셰일 지반에 대해 가장 적합한 지질공학적 조사와 분석에 대한 가이드라인을 제시하고자 한다.

2. 지질학적 분류와 공학적 특성의 관계

이암, 셰일은 기존 암석의 풍화에 의한 입자, 파편의 퇴적작용으로 생성된 쇄설성 퇴적암이다. 따라서 쇄설성 퇴적암의 성인상 분류나 공학적 특성 분석에 가장 중요한 기준이 되는 구성입자의 지름크기로 분류하는 방식을 따라 이암과 셰일도 분류되고 있다 (그림 1). 다른 암종과 비교해 볼 때 밀도는 약간 낮게 나타나는 퇴적암의 전형적인 특징을 보여주고 있다 (그림 2).

이암과 셰일은 쪼개짐 (fissility)의 존재 여부에 따라 나누어지며, 특히 석회질 (calcareous) 성분이 함께 있는 경우 이회암 (marl)으로 구분한다 (그림 3). 현미경상으로 구분이 어려울 정도로 입자가 작은 편이므로 주사전자현미경을 통한 이미지 분석도 필요하게 된다.

퇴적암의 생성 특성상 퇴적환경의 변화에 따라 다른 종류의 퇴적암이 교대층으로 나타나는 경우가 많아 이암, 셰일, 사암, 이회암, 석회암 등이 함께 층을 이루는 경우도 흔하다. 유네스코 문화유산으로 널리 알려진 이집트의 스펅크스나 피라밋을 구성하고 있는 암석도 돌로마이트질 석회암, 셰일, 사암, 이회암, 이회암질 석회암 등으로 구성된 현지지층에서 채취되었다. 따라서 각 암종별 풍화특성과 공학적 특성이 다르게 나타나므로 보존대책 수립을 위한 암반 특성 평가, 보강대책 등의 수립에 어려움을 겪고 있다 (그림 4).

퇴적암은 내부적으로 공극을 가지고 있으며 이를 측정하는 방법 중 Void index는 건조 암석시료를 1시간 동안 물에 담근 후 흡수된 물의 양을 건조질량에 대한 비로 표시한다. 따라서 아주 일반적으로 볼 때 퇴적작용 후 다짐작용이 더 오래 일어난 오랜된 지층의 이질암석은 Void index가 낮은 값을 보이게 된다 (그림 5). 개별 암석에 대해서는 각 암석의 생성시기 외에도 생성 이후 노출된 환경에 의한 풍화정도에 따라서도 영향을 받으므로 단순히 지질연대만으로 물성을 획일적으로 대응시키는 것은 곤란하다.

일축(또는 단축)압축강도의 경우 다른 암종과 마찬가지로 수분 함량의 증가에 따라 강도치가 낮아지는 경향을 뚜렷이 보여주고 있다 (그림 6).

시료를 대상으로 측정한 탄성과 속도는 Void index와 반비례하는 퇴적암의 전형적인 특징을 보이고 있다 (그림 7).

비교적 단단한 이암의 경우 투수계수는 $6 \times 10^{-7} \sim 2 \times 10^{-6}$ (cm/s) 정도의 값을 보이고 있으나 풍화가 진행된 경우 균열 및 공극의 확장과 함께 투수계수는 급격하게 증가하게 된다.

Particles (or Grains)		Detrital (terrigenous) >50% Grains of Rock & Silicate Minerals			
Size(mm)	Name	Unconsolidated raw Material	Geological Term		Consolidated as rock
200	Boulder	Storm beach Colluvium (scree, or talus) Glacial boulder beds			Conglomerate Breccia
60	Cobble				Tillite
4	Pebble	↑ gravel Coarse-alluvium (e.g. wadi)	rudaceous	mainly rock fragments	Conglomerate
2	Granule	↓ Fine-alluvium Deltaic grits and sands			Grit
0.06	Sand	↑ sand ↓ Sand beach Desert sand & dust	arenaceous		Sandstone (arkose, greywacke, and other varieties) Loess
0.002	Silt	↑ silt ↓ Estuarine silt Glacial silts & clays			argillaceous
	Clay	↑ clay ↓ clay ooze			

그림 1. 입자크기에 따른 퇴적암 분류 (based on Blyth & de Freitas, 1984)

Rock Type	Density Range (kg/m ³)
Granite	2,516 ~ 2,809
Quartz diorite	2,680 ~ 2,960
Gabbro	2,850 ~ 3,120
Sandstone	2,170 ~ 2,700
Limestone	2,370 ~ 2,750
Shale	2,060 ~ 2,660
Gneiss	2,590 ~ 3,060
Shist	2,700 ~ 3,030
Slate	2,720 ~ 2,840

그림 2. 암석의 밀도 (after Clark, 1966; Daly et. al., 1966)

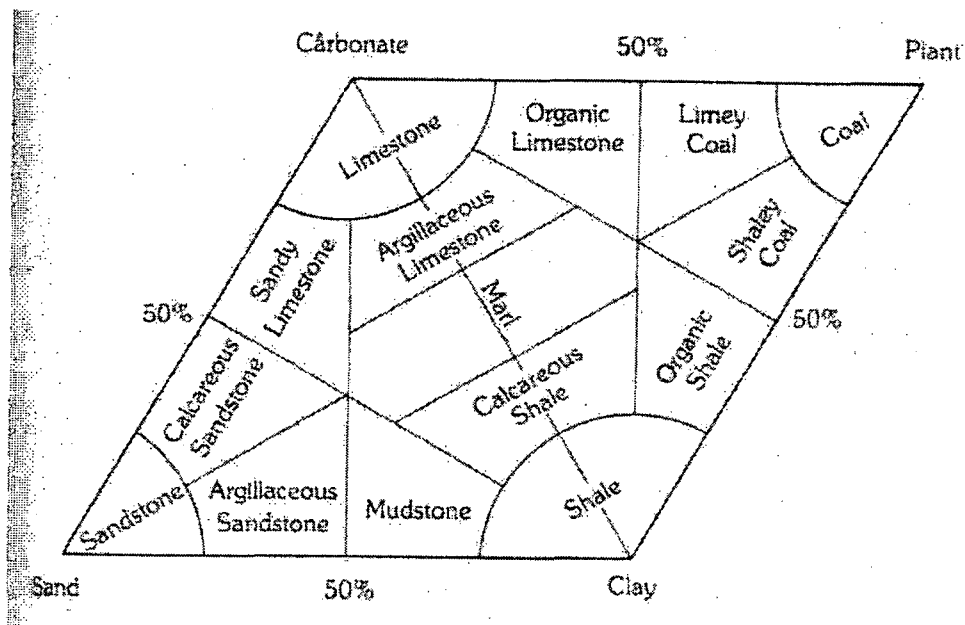


그림 3. 구성성분에 따른 퇴적암의 분류 (Mathewson, 1981)

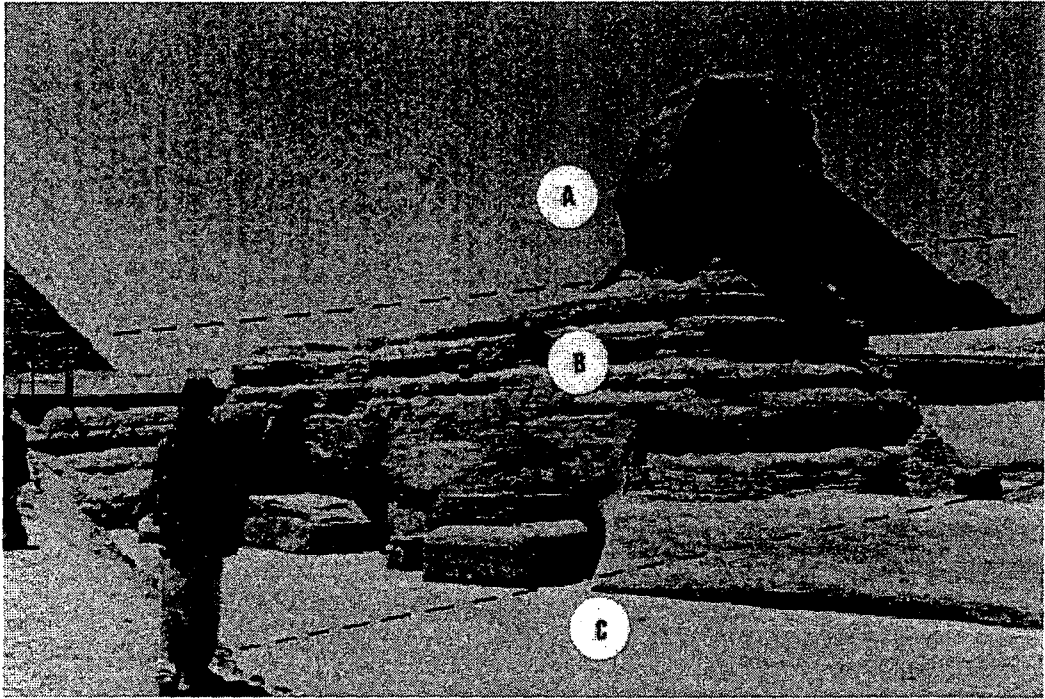


그림 4. 이질암과 석회암으로 구성된 이집트 스피нк스의 차별풍화 문제

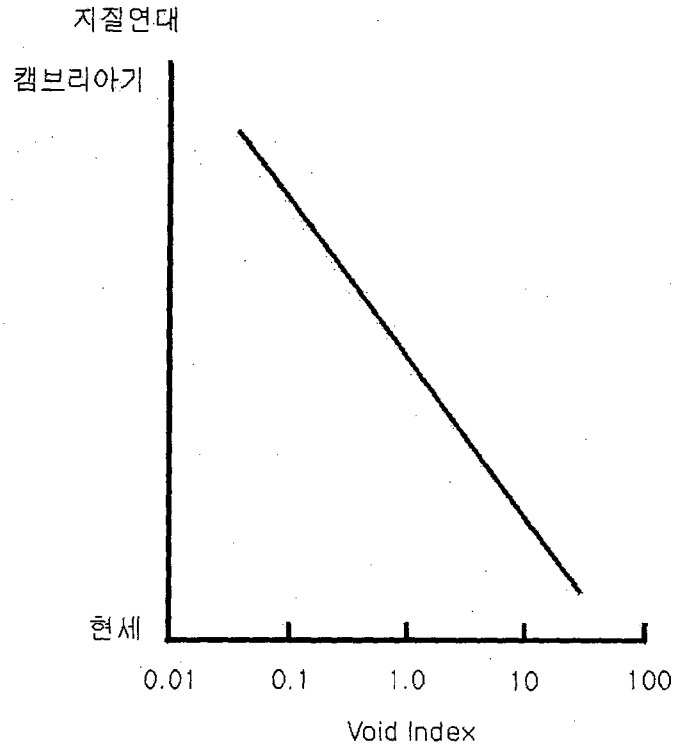


그림 5. 세일, 이암에 대한 지질연대와 Void Index 관계 (after Duncan et al, 1968)

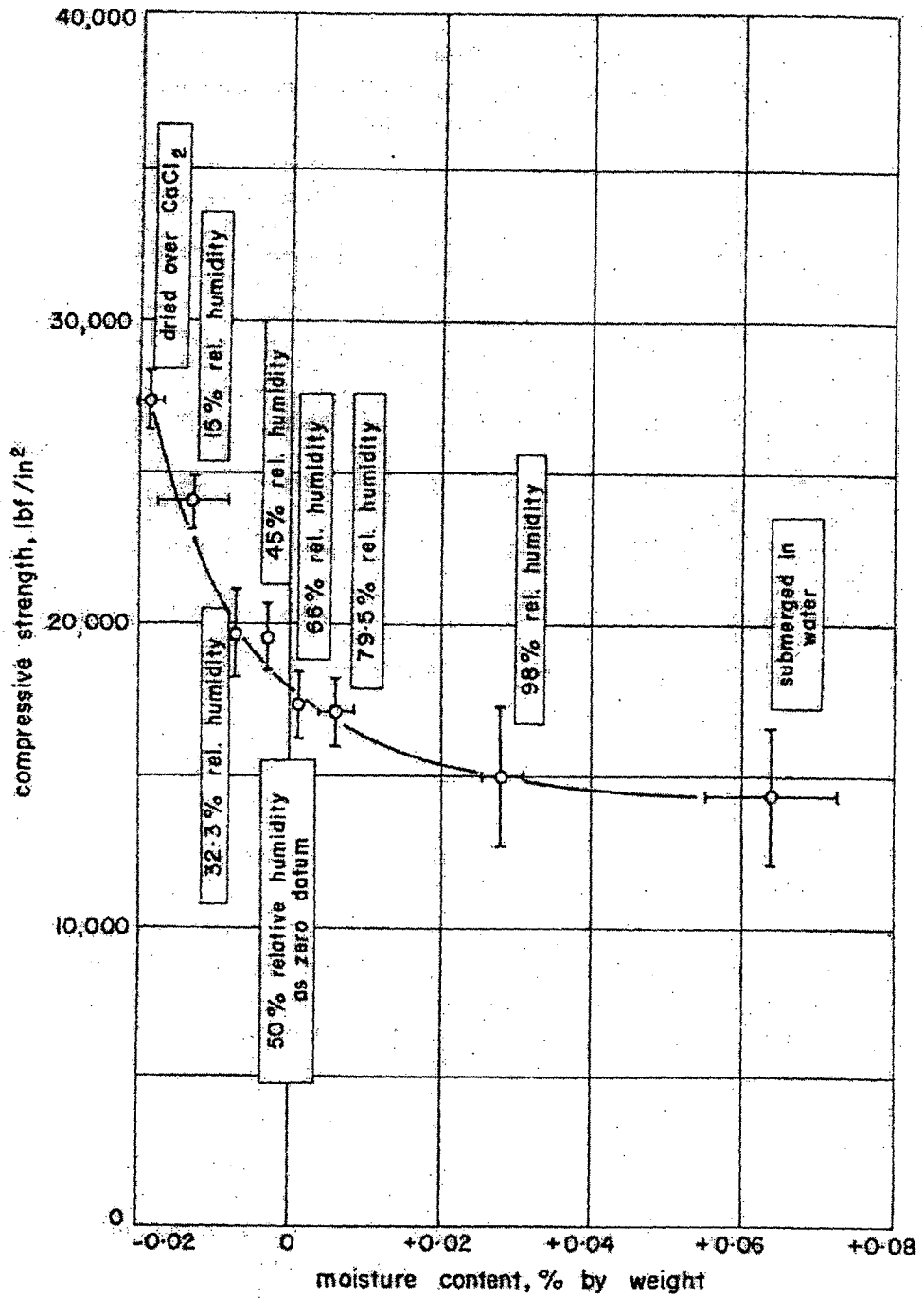


그림 6. 석영함유 세일에 대한 압축강도와 함수율 관계 (after Colback and Wild, 1965)

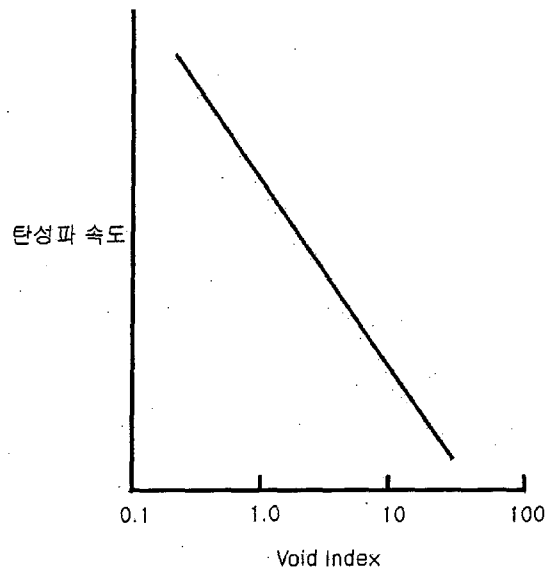


그림 7. 세일/이암에 대한 탄성파와 Void Index 관계 (after Duncan et al, 1968)

3. 공학적 문제점과 이를 고려한 지질공학적 조사시 주의점

이질암의 공학적 문제는 대상이 되는 이질암 자체의 공학적 문제인 슬레이킹, 팽창성, 다른 암종과 지층을 이루어서 발생하는 지층별 차별풍화의 문제로 나눌 수 있다.

3.1 슬레이킹 현상과 내구성 정량적 평가

슬레이킹 현상은 이질암을 이루는 점토질 성분이 수분과 만나면 비교적 짧은 시간에 흐트러지는 현상으로 궁극적으로 시료의 구조적 강도를 잃는 결과를 초래한다. 이는 다른 암종에 비해 아주 두드러진 특징으로 노출된 절취사면이 수분에 노출되어 수개월 안에 토사와 유사한 거동을 보이는 문제점을 야기시키고 있다. 따라서 지질조사시 다른 암종의 경우 경도, 강도, 절리발달 정도 등의 현재 상태에 관한 자료가 중요하게 사용되지만 이질암의 경우 현재 암석의 공학적 상태 외에 특히 향후 풍화 발달 속도 (또는 공학적 내구성)에 관한 정량적 예측이 아주 중요하다.

수분으로의 노출시간에 따른 공학적 특성 변화를 측정하는 방법은 기존의 강도 측정과 같은 방식으로는 구하기 어려우며 유일하게 Slake durability test를 통해 분석할 수 있다. 이 방법은 이미 국제암반공학회 (ISRM: International Society for Rock Mechanics)에서 제안한 방법을 국내에서도 널리 활용하고 있다.

이 실험법을 통해 구하는 2사이클 후의 슬레이크 지수를 통해 사면의 침식 속도 (즉, 사면의 풍화민감도 또는 내구성)를 정량화하는 연구결과도 나오고 있으며 국내에도 적용 연구가

진행 중이다.

2싸이클을 표준으로 정하게 된 배경에도 비록 과거의 연구결과를 근거로 했으나 (그림 8), 가장 최근의 연구결과와 토의에 따르면 (이상균, 1999; Czerewko & Cripps, 2002), 2싸이클 이상의 반복과정이 더 필요할 것으로 논의가 활발히 진행되고 있어 조만간 국제 표준이 바뀔 추세에 있다.

특히 국내에서 최근 수행하고 있는 풍화민감도의 경우 화학성분 및 광물성분을 기초로 한 방식과 슬레이크 내구성 지수를 기초로 한 방식이 있으나 토목공사에 필요한 공학적 거동 판정을 위해서는 슬레이크 내구성 지수를 기초로 한 풍화민감도를 활용하는 것이 더 타당하다.

이질암 절취사면의 풍화내구성 또는 장기적인 사면 불안정성을 분석하기 위해서는 슬레이크 내구성 지수를 수회 이상의 싸이클까지 진행시키거나 인공풍화를 시킨 시료에 대해 지수 변화를 측정하는 것이 세계적인 추세이므로 향후 국내에 더 활용되면 많은 도움이 될 것으로 판단된다. 또한 풍화가 심한 시료에 대해서는 Modified Jar test가 좋은 결과를 보이고 있어 국내에도 활용이 필요하다.

3.2 팽창성

이질암에서는 점토 성분으로 인한 팽창성이 당연히 나타나고 있어 일축압축강도와 팽창변형율의 관계 (그림 9), Void index와 팽창변형율의 관계 (그림 10) 등이 전형적인 특징으로 관찰된다. 이러한 팽창현상은 터널에 압축력을 작용시키는 문제점을 야기한다. 따라서 팽창변형율, 팽창압을 함께 측정하여 상대적인 위험성을 판단하기도 한다.

그동안 국내외의 측정 자료를 종합해 볼 때 이러한 팽창도만으로 지반의 위험성을 판정하는 것은 무리가 있으며 슬레이크 내구성 자료, XRD 분석자료, 점토광물을 더 정확히 분석하는 TG-DTA 분석자료, SEM 자료 등을 함께 종합 분석하는 것이 바람직하다.

3.3. 다른 암종간의 차별풍화

토목공사의 대상이 되는 암반에서 가장 분석이 어려운 부분으로 대부분의 이질암이 다른 종류의 퇴적암과 함께 나타나며 개별 지층의 두께는 수 mm 내지 수 m에까지 다양하게 나타나고 있어 암반의 공학적 분류, 대표 시료의 채취, 실험 결과의 해석에 상당한 오류를 낳을 수 있다. 따라서 대상 지반에 대한 퇴적암층의 정확한 이해, 지층의 특징을 고려한 대표성 시료 선택과 물성 측정, 그에 따른 종합적 해석이 필수적이다. 앞에서 언급한 이집트 피라밋, 스텍스 경우에도 수 mm의 폭을 가지는 이회암층의 풍화진행으로 인해 전체 석회암 블록이 불안정해지고 이를 통해 구조물 전체의 안정성이 위협을 받고 있다.

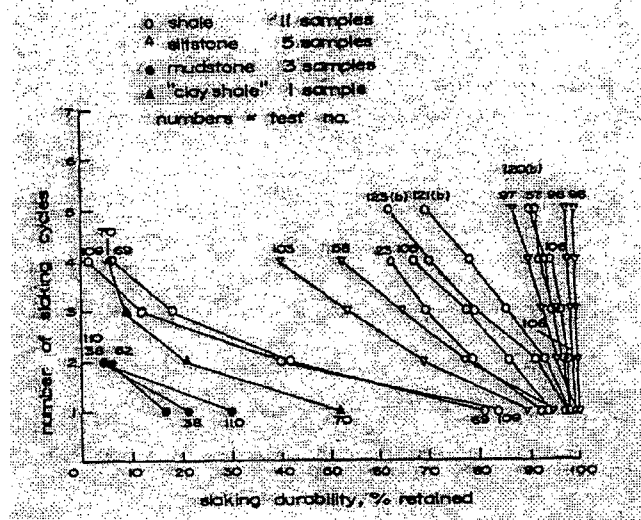


그림 8. 슬레이크 내구성 실험에서 슬레이킹 사이클 횟수의 영향 (after Gamble, 1971)

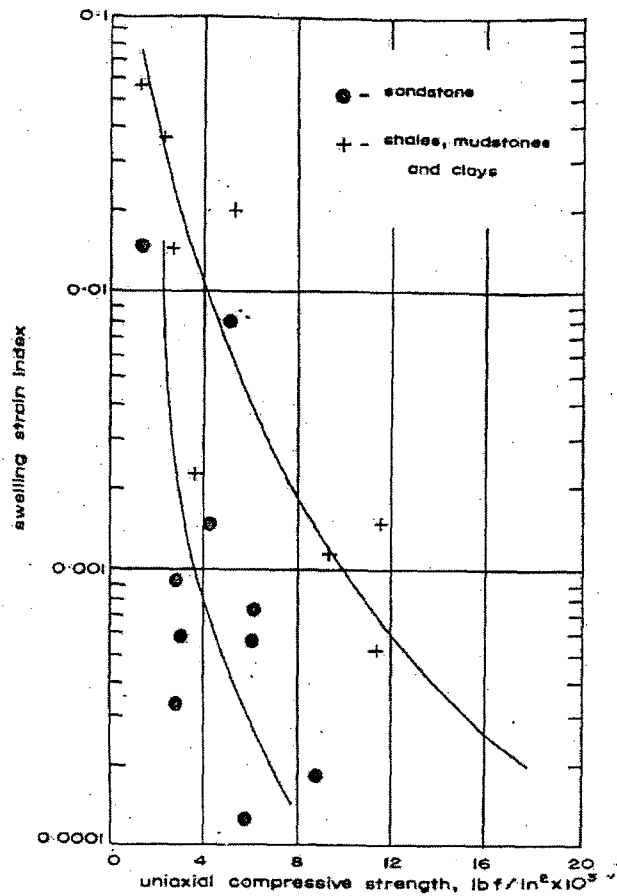


그림 9. 일축압축강도와 Swelling Strain 관계 (after Duncan, 1969)

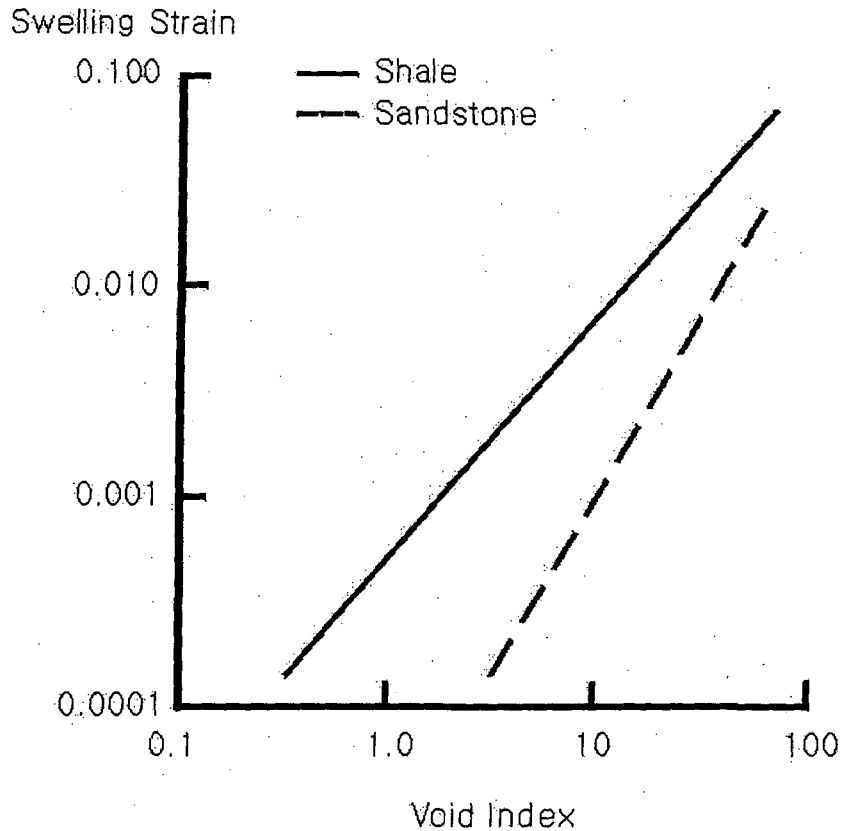


그림 10. Swelling Strain과 Void Index 관계 (after Duncan et al, 1968)

4. 결론

이질암은 다른 암종에 비해 풍화 정도를 착각하여 더 신선한 상태로 판단하기 쉬워 단순한 육안 판단에만 의존하지 않고 반드시 슬레이크 내구성 실험을 통해 판단해야 한다. 또한 슬레이크 실험은 국제적으로 논의되고 있는 2싸이클 이상의 반복과정을 수행하는 것이 그동안의 국내 연구결과에서도 증명되고 있으며 사면의 안정성 등의 판단을 위한 풍화민감도 실험에도 슬레이크 내구성 실험과 인공풍화 실험을 기초로 한 방법이 훨씬 공학적 특성을 잘 반영시키고 있어 사용을 권장한다.

이질암에 대한 특성분석은 결국 슬레이크 내구성 실험, 팽창율 실험, 점토성분 분석 및 공극 구조 파악을 위한 XRD, TG-DTA, SEM, 투수계수 측정등의 실험결과와 지층구조와 암종의 정확한 해석들을 종합하여 기존의 강도와 같은 기초자료의 활용성을 높일 수 있고 현장설계에 바람직한 자료를 제공할 수 있다.

참고문헌

1. 이상균 (1999), "지질공학적 특성에 따른 사면안정성에 관한 연구", *서울대학교 공학석사 학위논문*.
2. Blyth F.G.H. and de Freitas M.H. (1984), "A Geology for Engineers", *Edward Arnold*, 325p.
3. Colback, P.S.B. and Wild, B.L. (1965), "The influence of moisture contents of the compressive strength of rocks", *Pro. 3rd Can. Rock Mech. Symp., Toronto*, pp.65~83.
4. Clark, S.P. (1966), "Thermal conductivity : in Handbook of Physical Constants by S.P. Clark(Editor)", *Geol. Soc. Am. Mem. 97*, pp.459~482.
5. Daly, R.A., Manger, G.E. and Clark, S.P. (1966), "Density of rock : in Handbook of Physical Constants by S.P. Clark(Editor)", *Geol. Soc. Am. Mem. 97*, pp.19~26.
6. Duncan, N., Dunne, M.H. and Petty, S. (1968), "Swelling characteristics of rock", *Water Power*, Vol. 20, pp.185~192.
7. Duncan, N. (1969) "Engineering geology and rock mechanics Vol. 1", *London, Leonard Hill*, 252p.
8. Gamble, J.C. (1971) "Durability-plasticity classification of shales and other argillaceous rocks", *Ph. D. Thesis, Univ. Illinois*.
9. Mathewson Christopher C. (1981), "Engineering Geology", *A Bell & Howell Company*, 450p.