풍화에 따른 퇴적암의 강도 변화

배우석† · 이봉직* · 오세욱 · 이종규
충북대학교 토목공학과 · *충주대학교 건설도시공학과
(2002. 8. 12. 접수 / 2003. 1. 26. 채택)

The Variation of Sedimentary Rock Strength due to Weathering

Woo-Seok Bae† · Bong-Jik Lee* · Se-Wook Oh · Jong-kyu Lee
Department of Civil Engineering, Chungbuk National University
*Department of Construction and Urban Engineering, Chungju National University
(Received August 12, 2002 / Accepted January 26, 2003)

Abstract : The failure of rock slopes were influenced by weathering, which causes change in the shear strength. The weathering is also directly related to slaking and swelling characteristics.
In the paper, the core of diameter 10cm was obtained by digging on rock slope of Kong-ju in Korea and then EDX (Energy Dispersive X-ray spectrometer) analysis was carried out to verified element of chief rock-forming minerals. Uniaxial compression tests, slaking tests, and point load test are performed to study engineering characteristics of conglomerate and red shale.
As a results of slaking test, slaking index of conglomerate indicate range of 85.11-99.58 and shale indicate 58.37-99.23. Therefore, it is recognized that the resistance of shale to weathering decreases in shallow depth and it greatly influences the strength of rock.
The result of uniaxial compression test and point load test show that the strength of sedimentary such as conglomerate and red shale has an influence on both weathering and saturation.
Key Words : weathering, strength, slaking, conglomerate, shale

1. 서 론

암석은 거시적으로 볼 때 균질 등방체인 것처럼 보이나 수많은 입자와 여러 종류의 광물로 구성되어 있으며, 비균질, 비등방성을 지니고 있어 역학적 성질이 매우 복잡하다. 또한, 암석의 변형은 암석의 종류와 구성 광물, 내부 불연속면의 상태, 응력 조건과 온도, 습도의 함수비 등과 같은 다양한 요소에 의해 영향을 받게 된다[1]. 이러한 변형거동은 국내의 지질 분포상 25%를 차지하고 있는 퇴적암의 경우 두드러지게 나타나고 있으나 국내 암석의 변형 특성에 관한 연구는 화강암에 편중되어 있는 상황이다.

따라서, 본 연구에서는 쇄설성 퇴적암 중 공주지역에 부분적으로 분포하고 있는 각력역암과 세일을 대상으로 NX 크기의 암석 코아를 이용하여 EDX (Energy Dispersive X-ray spectrometer)시험과 slaking 시험을 실시하였으며, 풍화와 흡수에 대한 역학적 특성의 변화를 규명하기 위해 일축압축시험과 점하중시험을 실시하였다. 각각의 시험은 자연상태와 노건조상태, 포화상태의 경우에 대해 실시하여 각각의 상태에 대한 강도비를 산정하여 비교하였다.

2. 에너지 분산형 X선 회절시험

광물의 구성 성분 분석을 위해 자연상태의 각력역암과 적색세일에 대해 EDX 분석과 편광현미경분석을 실시하였으며 그 결과를 Fig. 1,2에 나타냈다. 각력역암에서는 Si가 거의 대부분을 차지하고 있으며, 적색세일에서는 Si이외에 Fe, K의 Lal, La2, Kal, Kb2이라는 궤도 안에서 수치로 표현되고 있다. 분석결과 각력역암은 석영을 주성분으로 하는 력과

†To whom correspondence should be addressed.
oldscent@netian.com

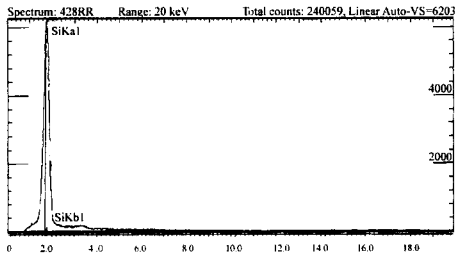

Fig. 1. Energy dispersive x-ray spectrometer analysis on conglomerate

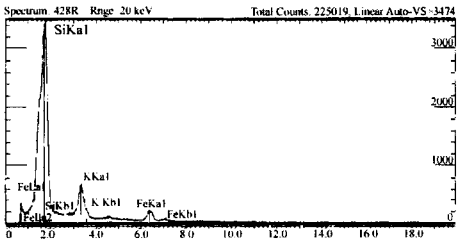

Fig. 2. Energy dispersive x-ray spectrometer analysis on red shale

점토광물이 고결되어 암을 구성하고 있으며, 적색세일은점토광물과 석영, 방해석, 운모, 사장석 등으로 구성되어 있고 또한, 육안관찰결과 셰일이 뚜렷한 층상구조를 지니고 있는 것으로 관찰되었다.

3. Slaking 시험

모든 암석은 지하수위 변동, 응력의 해방, 흡수팽창, 풍화 등에 의해 점착력이나 마찰력을 잃어 강도나 고결력이 저하되는 현상을 보이며 구성조직이 연약한 암석에서는 건조, 습윤의 반복에 의하여 파괴되는 slaking 현상이 현저하게 나타나며, 셰일이나 각력역암과 같은 퇴적암에서는 이러한 현상이 두드러지게 된다[2]. 따라서, 본 논문에서는 열화나 건조·수축 등 풍화에 대한 내구성을 파악하기 위해 Slaking 시험을 시행하였다.

내구도의 측정을 위해 중량을 정확히 측정한 40~60g의 대표적인 암괴 10개를 2mm 표준철망으로 된 길이 100mm, 직경 140mm의 드럼에 넣고 105℃의 온도로 2~6시간 노건조한 후 드럼을 수조에 장착한 후 회전축 아래 20mm까지 물을 넣고 총 200rpm의 속도로 10분간 회전시킨다. 그 후 드럼을 수조로부터 꺼내고 105℃의 온도로 노건조시켜 냉각한 후 중량을 측정하여 대상시료의 내구성지수(I_d)를 산정하였다.

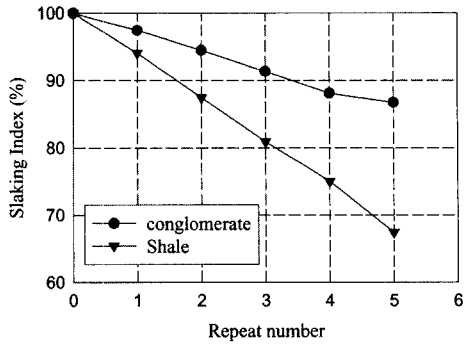

Fig. 3. Comparison of slaking index with rock types

실험결과 각력역암의 경우 건습의 2회 반복으로 0.42~14.89%의 손실량을 보이고 있으며 세일의 경우는 0.77~41.62%의 손실량을 나타내고 있다. 손실량이 넓은 범위를 나타내는 것은 각각의 시료가 가지는 강도에 따라 각기 다른 손실을 보이고 있기 때문이며 세일이 비교적 큰 손실량을 나타내고 있음을 관찰할 수 있다.

각력역암 시료는 표면 노출 시료로서 건습의 반복에 따라 85.11~91.49%의 값을 보여 풍화에 대해 중간이상의 내구성을 나타내고 있다. 또한, 세일 시료 역시 강도가 약한 표면 노출 시료로써 58.37~83.01%의 slaking 지수를 보이므로 풍화에 대해 상당히 영향을 받고 있다는 것을 관찰할 수 있으며, 건습이 반복됨에 따라 50%이하의 범위로까지 저하되는 현상을 나타내고 있다. 이러한 실험결과는 암석의 내구성이 암석자체의 강도와 주변환경에 크게 영향을 받고 있음을 보여주고 있다.

4. 일축압축강도시험

본 시험은 시료에 한 방향의 압축응력을 가하여 암석의 일축압축강도를 구하는 것으로 일축압축시험에 사용된 시료는 NX 코아비트를 사용하여 시추된 것으로 지름이 5.4㎝, 높이는 직경의 2~2.5배가 되도록 성형하였다. 또한, 시료는 상하면이 평행이 되도록 하였으며, UTM을 사용하여 실험을 실시하였다.

시험은 자연 상태의 함수비를 보존하기 위하여 3일 이내에 시행하였다. 시편에 가하는 하중은 응력비가 5~10㎏/㎠/sec의 한계이내에서 파괴가 5~10분 이내에 일어나도록 일정한 응력비로 연속적으로 적용하였다. 또한, 노건조나 포화시의 강도변화 특

성을 파악하기 위하여 시료를 각각 60±2℃에서 48시간 동안 건조하였으며, 22±2℃에서 48시간 수침시킨 후 동일한 방법으로 시험을 실시하였으며 퇴적암의 풍화에 따른 강도 특성의 변화를 파악하기 위해 시추 심도에 따라 실시되었다. 또한, 암석의 풍화나 흡수에 따른 강도 특성의 변화를 검증하기 위해 노건조상태/포화상태의 강도비를 이용하였다.

각력역암에 대한 자연상태의 일축압축강도 시험결과 0.5~3m에 이르는 심도에서 348.40~516.08 kg/cm^{2}에 이르는 강도를 보이고 있으며 3~11.5m의 심도에서 444.90~1101.70 kg/cm^{2}의 범위에 걸쳐 나타나고 있다. 일축압축강도의 다양한 분포는 시료에 내포된 불연속면에 기인하고 있다.

Fig. 4에서 볼 수 있듯이 자연상태 각력역암의 일축압축강도는 대체적으로 일정심도 이상인 경우 강도가 증가되는 경향을 나타내고 있으며 심도가 얕은 경우 풍화의 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

각력역암에 대한 건조상태의 일축압축 시험결과 0.5~3m에 이르는 심도에서 329.57~466.10kg/㎠에 이르는 강도를 보이고 있으며 3~11m의 심도에서 414.4~847.46kg/㎠의 범위를 나타내고 있다.

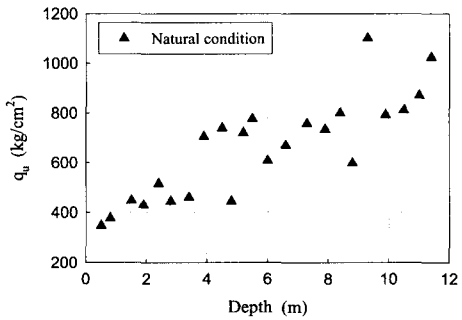

Fig. 4. Variation of q_u with depth on conglomerate (natural condition)

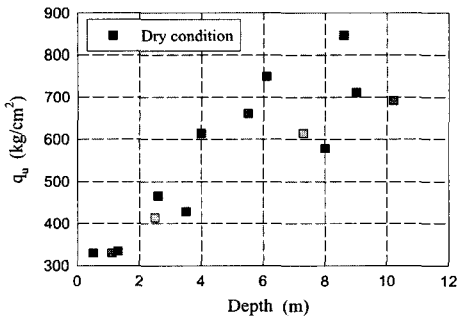

Fig. 5. Variation of q_u with depth on conglomerate (dry condition)

각력역암에 대한 포화상태의 일축압축시험 결과 일정심도 이상의 경우 거의 동일한 강도를 보여주고 있으나 얕은 심도의 경우 310.73~494.35kg/㎠의 범위로 자연상태, 건조상태에 비해 강도가 현저히 저하되는 현상을 보이고 있다. 이러한 강도저하 특성은 표면에 가까울수록 두드러지며, 심도가 깊은 시료에서는 두드러진 강도의 저하는 보이고 있지 않음을 관찰할 수 있다. 이러한 현상은 암석 내에 존재하는 공극 내 함수비의 증가로 인한 압력의 증가에 기인한 것으로 판단된다.

포화상태의 각력역암 시료는 노건조상태에 대해 약 11%의 강도 저하를 보이며 노건조/포화의 강도비는 1.12의 값을 나타내고 있다.

적색 셰일에 대한 일축압축 시험 결과 건조상태에서 532.41~733.05kg/㎠의 범위를 보이고 있으며 포화상태에서 433.15~517.89kg/㎠의 범위를 보이고 있다.

시료의 상태에 따라 뚜렷한 강도 변화를 보이고 있지는 않으나 평균적으로 27.47%의 강도 저하 현상을 보이고 있으며 노건조/포화의 강도비는 1.38로 각력역암에 비해 민감한 경향을 나타내고 있다.

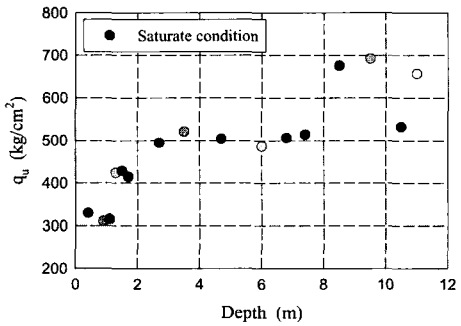

Fig. 6. Variation of q_u with depth on conglomerate (saturate condition)

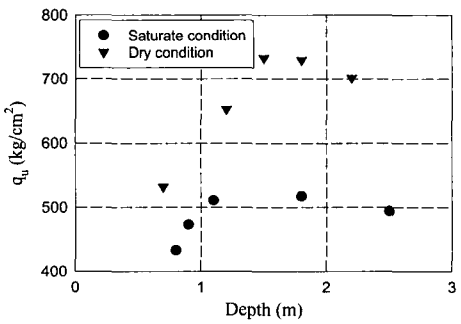

Fig. 7. Variation of q_u with depth on red shale

5. 점하중시험

점하중시험은 암석 코아의 파괴시 하중을 측정하고, 해당 코아시료의 직경에 따른 점하중지수 $I_{s(50)}$을 산출하여 일축압축강도와의 상관관계를 파악하기 위하여 직경 52mm의 정형시료와 부정형시료를 대상으로 실시하였으며, 풍화에 따른 강도특성의 변화를 파악하기 위해 심도에 따라 실시하였다. 또한, 노건조 상태/포화상태의 강도비를 이용하여 풍화나 홉수에 의한 강도특성의 변화를 관찰하였다.

점하중시험은 2점으로 암석시료를 끼우고 재하하여 최대하중으로 점하중강도를 산출하는 것으로 시료는 양단면의 영향을 배제하기 위해 하중 작용점에서 각 단면까지의 거리를 코아의 직경방향으로 하중을 가할 때는 최소 0.7D 이상 유지하였으며, 축방향인 경우 D/L =1.1±0.05로 부정형시료인 경우 D/L=1.0~1.4를 유지하여 수행하였다.

각력역암에 대한 자연상태의 점하중 강도는 부정형 시료 및 0~2m의 심도에서 112.83~826.80kg/㎠의 값을 보이고 있어 풍화에 대한 영향을 크게 받고 있음을 알 수 있다. 일축압축시험 결과에 비해 낮은 값을 보이는 것은 암석의 이방성구조의 방향성에 기인한다. 그 외의 심도에서는 497.52~1854.72kg/㎠의 값을 보여 대체적으로 일정한 강도를 나타내고 있으며 다양한 범위를 나타내는 결과는 시료내의 불연속면과 암의 특성상 재하시 력에 재하된 것에 기인한다.

Fig. 8은 자연상태 각력역암에 대한 점하중 지수를 보이고 있다. 부정형시료와 낮은 심도의 시료에 대해 4.72~34.45의 점하중 지수를 나타내고 있으며 일정심도 이상에서는 거의 일정한 값을 나타내고 있다. 건조상태에 대한 시료의 환산일축압축강도는 284.0 ~1696.08kg/㎠의 범위에 걸쳐 다양한 값을 보이고 있다. 건조에 의한 공극내 압력의 감소로 전반적으로 높은 강도를 보이고 있으며 심도에 관계없이 일정한 값을 나타내고 있다.

Fig. 9는 건조상태 각력역암에 대한 점하중 시험결과로 일부시료를 제외하고는 0~9m의 심도에서 거의 일정한 범위의 값을 보이고 있다. 풍화에 따른 강도변화의 특성을 보이고 있지는 않으나 자연 상태에 비해 약간 높은 강도를 나타내고 있다.

포화상태의 경우 시료에 대한 점하중지수는 5.66~39.58kg/㎠의 범위로 환산일축압축강도는 135.8~1244.2kg/㎠의 다양한 범위를 나타내고 있다.

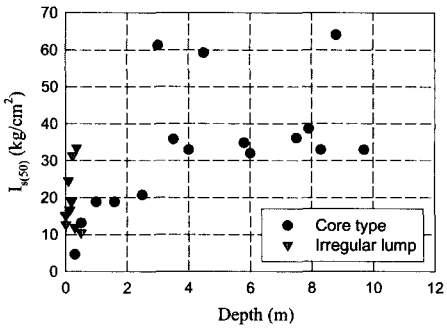

Fig. 8. Point load index on conglomerate (natural condition)

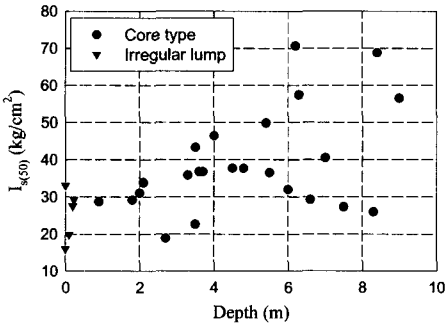

Fig. 9. Point load index on conglomerate (dry condition)

포화상태의 경우 일축압축시험결과와 같이 자연상태, 건조상태에 비해 강도가 저하되는 현상을 보이고 있다. 이러한 강도저하 특성은 부정형시료와 표면에 가까울수록 두드러지며, 심도가 깊은 시료에서는 두드러진 강도의 저하는 보이고 있지 않음을 관찰할 수 있다. 이러한 현상은 암석 내에 존재하는 공극을 통한 함수비의 증가로 인한 압력의 증가에 기인한다.

Fig. 10은 포화상태의 각력역암에 대한 점하중시험 결과를 보이고 있다. 부정형 시료 및 낮은 심도에서 현저한 강도 저하 특성을 나타내고 있으며 일정심도 이상의 경우 거의 동일한 강도를 보여주고 있다.

암석 내에 존재하는 약면의 영향도 배제할 수 없으나 대체적으로 자연 · 건조상태에 비해 강도 저하 현상을 보이고 있다. 노건조상태에 대해서는 약 23.64%의 강도 저하를 보이며 노건조/포화의 강도비는 1.31을 나타내고 있다. 이러한 현상은 앞서 밝힌 바와 같이 암석내 공극의 함수비 증가로 인한 압력의 증가로 강도가 저하하는데 기인한다.

이러한 강도의 저하는 궁극적으로 풍화에 의한 slaking이나 함수비의 증가로 인한 swelling 현상에 기인한다. 각력역암의 경우 역들을 고결시키는 점토

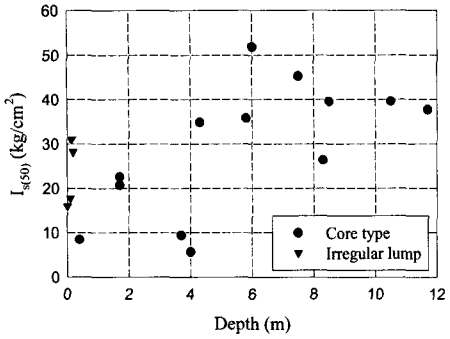

Fig. 10. Point load index on conglomerate (saturate condition)

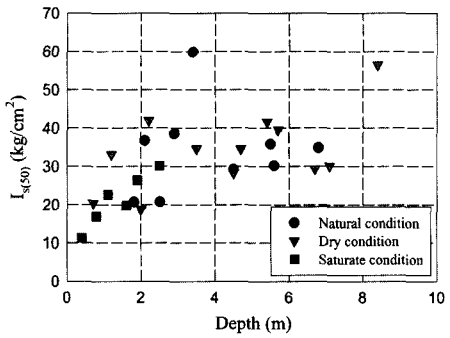

Fig. 11. Comparison of point load index on shale

성 충전물이 이러한 현상에 의해 상당한 영향을 받고 있는 것으로 보인다.

셰일에 대한 점하중 시험 결과, 자연상태시료의 경우 거의 일정심도 이상의 시료를 이용하여 산정한 값으로 환산 일축압축강도는 496.86~1196.98kg/㎠의 범위를 보이고 있다. 부정형시료를 이용한 노건조 상태 하에서는 환산일축압축강도는 453.0~1006.8kg/㎠의 값을 나타내고 있으며 포화상태의 경우 271.01~722.7kg/㎠의 범위를 보이고 있다.

셰일의 경우 풍화의 속도가 빨라 일부 시료는 시험이 불가능할 정도의 강도저하를 나타내고 있다. 포화시료의 경우 암성을 잃은 시료도 발견되었으며 일부 약면이 존재하는 시료도 관찰되었다.

Fig. 11은 셰일에 대한 점하중 지수의 변화를 보이고 있다. 셰일의 강도특성은 노건조 시료/포화 시료의 강도비가 1.52를 보이고 있어 풍화나 흡수에 의한 강도저하 특성을 확연히 나타내고 있다.

6. 결 론

쇄설성 퇴적암 중 각력역암과 셰일에 대해 물리·역학 시험을 실시하여 도출한 결과는 다음과 같다.

1) 실험에 사용된 각력역암의 구성광물은 다량의 석영과 점토광물로 이루어져 있으며, 셰일은 석영, 방해석, 사장석, 고령토로 구성되어 있다.

2) Slaking 시험결과 각력역암의 내 slaking 지수는 85.11~99.58의 범위를 보이며, 셰일의 경우 58.37~99.23의 값을 나타내고 있어 셰일이 풍화에 대한 저항력이 약화됨을 관찰할 수 있다. 이러한 경향은 심도가 얕을수록 두드러지므로 암석의 강도에 민감하게 반응함을 알 수 있다.

3) 각력역암에 대한 일축압축시험결과 건조상태, 포화상태의 강도비가 1.12로 강제포화시 11%의 강도저하 성향을 나타내고 있으며, 셰일의 경우에도 강도비가 1.38로 27.47%의 강도저하를 보이고 있다.

4) 점하중시험결과 각력역암에 대해 건조상태, 포화상태의 강도비가 1.31로 나타나고 있으며, 셰일에서는 1.52를 보이고 있다. 이러한 경향은 풍화의 영향을 받는 낮은 심도에서 주로 관찰되었으며 암석내 공극의 함수비 증가로 인한 압력의 증가에 기인한다.

이상과 같은 시험을 통하여 각력역암이나 셰일과 같은 퇴적암은 풍화의 진행이나 함수비의 증가로 인한 강도의 저하현상이 두드러지므로 퇴적암을 대상으로 할 경우 이러한 slaking이나 swelling현상을 충분히 고려해야할 것이다.

참고문헌

1) Hoek, E., and Brown, E. T., "Underground Excavations in Rock," Institution of Mining and Metallurgy, pp. 153~154, 1980.
2) 윤지선, "암의 역학," 구미서관, 1995.
3) 이수곤, 이송, "점하중 강도를 이용한 한국 화강암의 일축압축강도 추정방법," 대한토목학회논문집, 제15권, 제4호, pp. 1015-1027, 1995.
4) 이영휘, "포항이암의 Slaking 및 팽창특성," 한국지반공학회, 학술발표집 제2집, 153~164, 1993.
5) 정형식, 유병옥, "암석의 풍화에 따른 강도변화 특성 및 강도추정에 관한 연구," 한국지반공학회, 제13권, 제6호, pp. 71~93, 1997.
6) 김영수, 이상복, 정성관, "퇴적암 풍화토의 공학적 특성," 한국지반공학회논문집, 제11권, 제4호, pp. 63~74, 1995.