

셰일의 강도이방성 특성 및 RQD결정에 관한 연구

A Study on Strength Anisotropy characteristic and Suggested Methods for Determining RQD as for Shale

이종규¹⁾, 장서만¹⁾, 이수곤²⁾, 손경철²⁾
¹⁾단국대학교 ²⁾서울시립대학교

1. 서론

본 지역의 전반적인 지질 현황을 한국 자원연구소에서 1993년에 발간한 지질도를 토대로 개괄하면 다음과 같다. 본 조사 지역은 행정구역상 경남 진주시 진성면 및 이반성면 일원으로서 지형은 대부분 200~300m내외의 고도를 갖는 산릉들과 그사이에 발달하는 비교적 넓은 계곡들로 형성된 노년기의 특징을 잘 나타내며 평원 내지 준평원을 형성하여 범람원의 소택지 등이 발달되어 있다. 본 지역의 수계는 낙동강 본류가 흐르고 있고 북서부에서 북동류하여 범수면에 이르러 낙동강에 합류하는 낙동강의 지류인 남강이 흐르고 있다. 한편, 본 지역은 중생대에 속한 퇴적암류와 이를 관입 혹은 분출한 화성암류로 주로 구성되어 있는데 조사된 지역 및 인접지의 지층의 층순 및 암질로 보아 경상계(백악기)낙동통의 상부 신라통에 해당된다고 추정된다. 본 지역 지층의 주향은 N20E, N70E 및 N30E 정도를 나타내며, 경사는 남쪽 방향으로 10. 내외를 보이는 것으로 확인된다. 습곡이나 단층은 확인되지 않고 지층은 평은 상태를 유지한 것으로 나타나는데, 화성암류의 관입 후 분출은 퇴적암후에 이루어진 것으로 본 지역의 북측보다 동남측이 우세하며 관입의 형태로는 암맥, 암상 및 암반을 형성한 것으로 나타난다. 관입시 세력은 강하지 못한 것으로 추정된다. 본 지역에 분포하는 퇴적암류는 함안층(적색사질 셰일 및 이암과 회색 셰일층의 호층)으로 구성되어 있는데 함안층의 층리주향은 NS 내지 N30E가 지배적이며 10SE의 경사를 이루고 있다. 층리면은 셰일질 포층으로 되어 있어 이러한 누층이 반복되어 지층을 이루고 있는데 이러한 지층은 그 층후가 수 10m 내지 100 여m 되는 것도 있어 판상인 셰일층 및 사암층과 호층을 이루어 본 함안층의 대부분을 구성하고 있다. 주절리의 주향은 NS~N30E이며 제2절리는 N70W로 나타난다. 연구대상지역의 지질도는 그림 1.과 같고 대표적인 전경은 그림 2.와 같다.

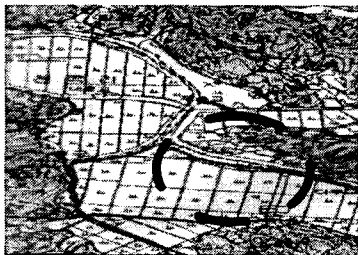


그림 1. 연구대상지역의 지질

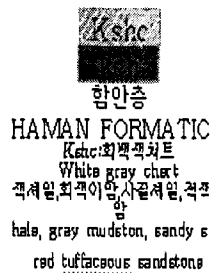


그림 2. 연구지역 대표전경 사진

2. 암석의 기본적인 특성을 위한 실험

본 실험은 현장에서 시추된 코아 30BOX이상의 시료 중 본 지역을 대표할 수 있는 적색의 셰일과 회색의 셰일을 크게 분류하고 풍화정도에 따라 풍화암등급에서부터 경암수준에까지 다수의 암석을 선택하여 실험하였다.

실험종류는 기본물성실험, 일축압축강도실험, 점하중강도시험, 풍화인내도시험을 주로 수행하였으며 이로 통하여 전형적인 퇴적암의 특성을 가지고 있는 셰일에 대하여 다시 한번 이해하고 접근할 수 있는 기회를 가지고자 하였다.

2.1 실내실험을 통한 기본적 물성

본 실험에서 연구대상지역의 암석의 특성을 분석하기 위한 기본적인 단계로 시추공 번별로 대표적인부분들을 선별하고 건조/습윤시료를 구분하여 건조실험과 습윤상태실험을 수행했으며 기본물성을 최대한 확보하기 위하여 건조와 습윤시료 모두로부터 암석물성을 구하였으며 그 항목은 비중, 흡수율, 탄성파속도의 범위로 결정하였다. 각종 물성결정과정은 표준시험규정인 KSF, ISRM, ASTM의 규정에 적합하도록 실시하였다.

2.2 실험결과 및 고찰

기본적인 물성에 대한 실험결과는 아래의 표 1.과 같다.

표 1. 기본적인 암석물성

No	Rock Type	Depth (m) & Water condition	Specific Gravity	Absorption (%)	Seismic Velocity(km/sec)	
					P-wave(건조) (습윤)	S-wave(건조) (습윤)
BH-1	Gray Shale	5.0m & dried	2.62	0.60	1.63	1.02
					1.79	1.24
BH-1	Gray Shale	5.0m & saturated	2.66	0.83	1.97	1.37
					2.21	1.41
BH-1	Reddish Shale	10.4m & dried	2.63	0.65	1.75	1.11
					1.83	1.16
BH-1	Reddish Shale	10.4m & saturated	2.67	0.86	1.47	0.98
					1.61	1.04
BH-2	Gray Shale	15.5m & dried	2.65	0.48	1.80	1.11
					1.97	1.15
BH-2	Gray Shale	15.5m & saturated	2.67	0.58	1.71	1.25
					1.88	1.36
BH-3	Reddish Shale	35.0m & dried	2.62	0.92	5.15	3.03
					5.80	3.45
BH-3	Reddish Shale	35.0m & saturated	2.67	0.20	5.55	3.68
					5.92	3.95
BH-4	Gray Shale	10.0m & dried	2.64	0.10	5.03	3.22
					5.92	3.62
BH-4	Gray Shale	10.0m & saturated	2.67	0.19	4.91	3.19
					5.78	3.47
BH-5	Reddish Shale	24.3m & dried	2.62	0.86	1.66	0.84
					1.72	0.91
BH-5	Reddish Shale	24.3m & saturated	2.67	1.04	1.42	0.81
					1.48	0.83

Specific Gravity은 전체적으로는 2.62~2.67의 범위를 보이고 있으며 회색과 적색과 회색셰일간의 차이에는 큰 차이를 발견할 수는 없었다. Absorption은 0.1~1.04(%)정

도의 범위를 가지고 있는데 흡수율 또한 적색셰일과 회색셰일간의 현저한 차이점은 발견하지 못했다. 또한 탄성파속도의 분석결과 전체적으로 습윤상태에서 빨라지는 경향이 발견되나 탄성파의 속도가 층리들에 의해 단절되어 통과율이 너무 미약하여 탄성파의 초동이 불분명한 경계를 보이는데 이런 결점으로 인해 기존의 연구자료에 언급되어 있는 Gray shale과 red shale간의 차이(김영수의 1998)를 아쉽게도 확인하기 힘들었다.

3. 일축압축강도시험에서의 함수율 변화에 대한 강도저하특성연구

암석의 강도는 일반적으로 포화시 건조시보다 많이 강도가 약한 것으로 우리는 알고 있다. 셰일 또한 이러한 함수정도에 따라 강도가 현저히 낮아지는데 본 실험에서는 많은 시료를 통한 실험이 어려운 관계로 다양한 포화상태에 따른 강도변화는 차후 계속적인 연구에 맡기고 금번실험에서는 완전건조상태와 완전포화상태의 두 시료를 위주로 실험함으로써 완전포화시료와 건조시료의 강도변화특성을 파악해 보았다.

3.1 시료의 준비

본 실험에 적용된 시료는 하중을 조금만 작용하더라도 부서질 수 있는 fissility에 의한 미세균열면을 미리 제거하기 위하여 손으로 부서진 나머지 부분으로 실험을 수행하였는데 이는 강도특성이 기존 층리면등에 함께 발달한 미세크랙들의 영향을 최대한 받지 않고 흡수에 의한 변화를 살펴보기 위한 것이다.

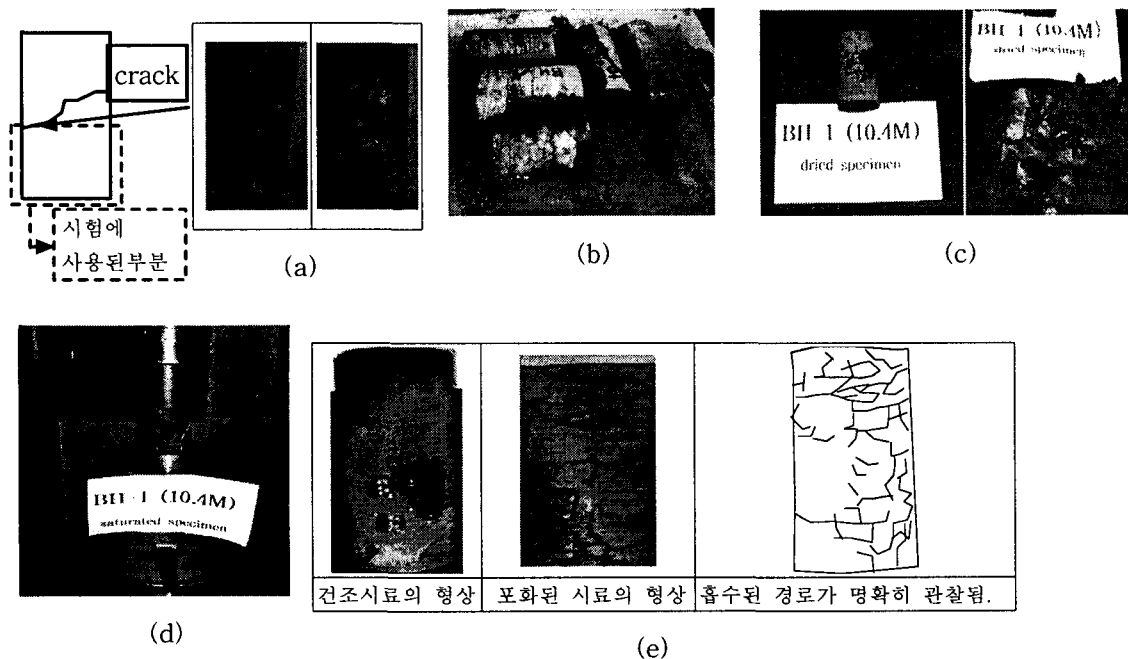


그림 3. 시료준비과정: (a)시료선별 (b) 실험직전까지 포화상태유지 (c) 파괴전후의 시료형상 (d) 일축압축강도시험 e) 포화된 시료내 흡수경로가 잘 포착됨

3.2 실험결과 및 고찰

아래의 표 2.의 실험결과에서 볼 수 있듯이 세일은 포화시 다른 암석과 달리 현저한 강도저하를 보이는 데 이는 약 20~80%까지 강도가 감소되는 것을 볼수 있다. 그중 BH-1(5.0m)의 시료는 다소간 시료내 미세크랙의 영향을 받아 신뢰성이 떨어지나 전체적으로 40~50%정도의 강도저하가 일어난다고 볼 수 있다.

표2. 포화상황에 따른 강도변화

공번	흡수율	강도	강도감쇠비(%)
BH-1(5.0 Gray)	0(건조)	1488	82.45
	0.83	261	
BH-1(10.4 Red)	0(건조)	1087	42.59
	0.86	624	
BH-2(15.5m, Gray)	0(건조)	1026	42.00
	0.58	595	
BH-3(35.0m,Red)	0(건조)	1677	44.3
	0.2	934	
BH-4(10.0m,Gray)	0(건조)	1241	19.5
	0.19	999	
BH-5(24.3m,Red)	0(건조)	1014	55.5
	1.04	451	

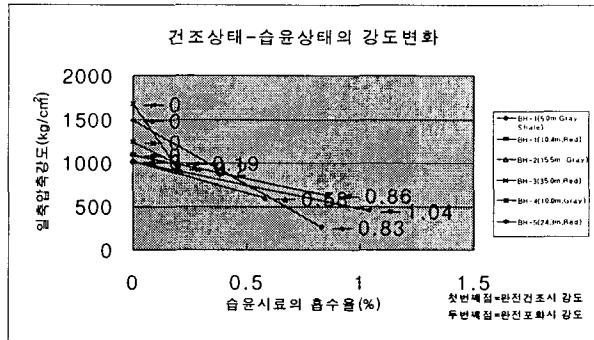


그림 4. 완전건조 · 포화에서의 강도변화그래프

현장시험의 하나인 슈미트해머시험으로 암반의 강도를 측정을 실시하여 비교해 보았는데 슈미트해머 수치는 40~55정도의 값으로 보이며 기존의 슈미트해머와 일축압축강도의 상관관계분석표에서 대략적으로 1300kg/cm²~2000kg/cm²정도로 나왔다. 이 추정된 값은 일축압축강도실험시 완전건조상태의 일축압축강도보다 다소간 크며 포화시료의 일축압축강도보다 훨씬 큰 값으로 설계시 최종 추정하여 적용가능한 일축압축강도는 슈미트해머로 추정한 일축압축강도의 1/2~1/3정도를 사용하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.

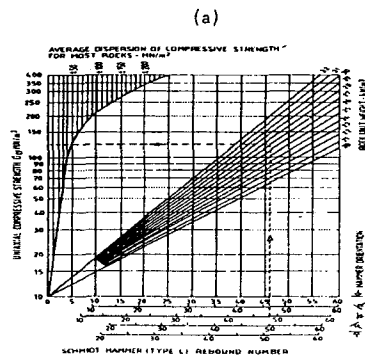


그림 5. 슈미트 해머수치와 일축압축강도의 상관관계

결국 실험결과에서 알 수 있듯이 세일의 건조 포화시 강도차이가 매우 커 자칫 현장에서 건조한 날에 측정된 과평가된 슈미트해머결과로써 적용한다면 위험한 결과를 초래할수 있다고 생각된다.

4. 점하중 강도실험을 통한 강도이방성특성연구

점하중강도시험은 Brock & Franklin(1972)가 최초로 점하중 시험을 고안하였는데 암판정을 정량적으로 쉽고 빠르게 현장에서 수행할 수 있을 뿐만 아니라 일축강도를 비교적 정밀하게 추정할 수 있는 방법으로 사용된다. 점하중 실험은 시료에 점하중을 가하여 시료내에 인장강도가 발생하게 하여서 암석을 깨뜨리는 방법이다. 일반적으로 암석의 인장강도는 압축강도보다도 1/10~1/15정도로 매우 작으므로 간접적인 인장강도를 가하므로써 비교적 적은 Portable한 유압시험기로도 암석의 일축강도를 추정하고자 하는 목적에서 개발된 방법이다. 또한 점하중 강도와 일축강도와는 비교적 상관관계가 좋은 직선의 관계식이 있는 것으로 알려져 있다. (Brock & Franklin, 1972 : ISRM, 1985; Lee, S.G. 1987)

본 실험에서는 점하중강도의 해석방법 중 일반적인 공식인 $I_s = P/D^2$ (kg/cm²)을 사용하지 않고 시료의 크기에 따른 점하중 강도변화를 제거할 수 있는 log-log scale graph에 크기 다양한 시료의 점하중강도수치와 그에 상응하는 최소단면적들을 Plot하여 I_s 와 D_e^2 의 log-log graph에서 최적직선을 그린후 표준시료인 $D_e^2 = 50 \times 50$ mm²인 면적에 상응하는 점하중수치를 찾아내는 방법을 사용하였다. 이 방법으로 층리와 평행하게 하중을 가할때와 층리에 수직으로 하중을 가할때의 점하중강도지수를 구하여 이로써 세일의 이방성강도특성을 다시 한번 고찰해보았으며 아울러 회색 세일과 적색 세일간의 차이를 살펴보고자 하였다. 아래 그래프는 한 시료내에서 크기를 달리하여 수차례 반복한 log-log 그래프로써 점하중지수 $I_s(50)$ 를 구한 것이다.

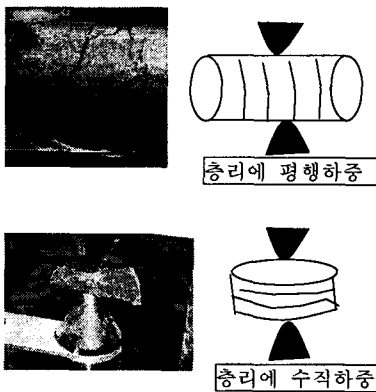
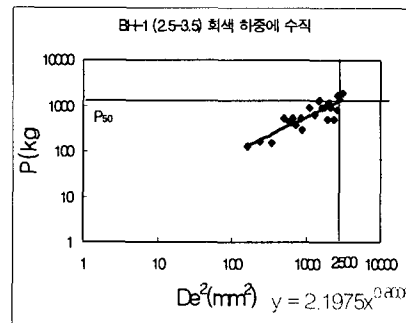


그림 6. 방향성에 따른 점하중시험



$$P_{50} = 1156 \quad I_s(50) = \frac{P_{50}}{50^2} = 46.24$$

그림 7. Log-Log 그래프를 이용한 해석

층리에 수직인 점하중강도지수의 범위가 20.39~46.24의 값을 가지며 층리에 평행으로 하중을 가한경우는 10.06~32.05의 값의 범위는 가지며 이들 평행하중과 수직하중에 대한 점하중강도비는 대략적으로 $I_a(50)$ 은 2.2이다. 이 실험결과에서 알 수 있듯이 세일은 이방성 인장강도특성을 크게 가지고 있다고 볼 수 있으며 방향에 따라 50%강도저하를 보이는 것으로 나타났다.

표 3. 방향성에 따른 점하중 강도지수

공번 & 위치	구분	하중방향	점하중강도지수 Is(50)
bh-1 (0-1.5)	적색	수직	43.06
		평행	11.13
bh-1 (2.5-3.5)	회색	수직	46.24
		평행	10.05
bh-2 (0.4-1.4)	적색	수직	43.37
		평행	15.98
bh-2 (17.0-18.5)	적색	수직	41.99
		평행	32.05
bh-3 (0.0-2.9)	회색	수직	37.39
		평행	21.19
bh-4 (3.8-4.8)	회색	수직	19.46
		평행	10.67
bh-4 (13.0-13.7)	회색	수직	40.18
		평행	23.65
bh-5 (10.5-11.5)	회색	수직	20.39
		평행	10.16
bh-5 (16.4-17.4)	회색	수직	43.62
		평행	20.42

5. 풍화인내도시험을 통한 세일의 풍화특성연구

풍화인내도시험은 건조와 침수의 반복에 의한, 짧은 시간에 걸친 풍화에 대한 암석의 내구성을 측정하는 시험이다. 이 실험은 Franklin과 Chandra(1972)에 의하여 정규화된 슬레이크 내구성 시험으로 제안되었다. 이들은 이암에 대한 슬레이크 지수에 의한 암석의 분류 기준을 만들었으며 또한 Gamble이 이들 결과를 보완하여 또 다른 암석분류기준을 제시하였다. (ISRM,1979) 또한 Lee와 Freitas(1988)는 화강암을 풍화등급에 따라 분류하고 각각에 대한 슬레이크 내구성 시험을 실시하여 슬레이크 내구성시험이 심하게 풍화된 화강암의 판별에 유용하다고 발표하였다.

표 4. 양호한 상태의 암석풍화진행상황

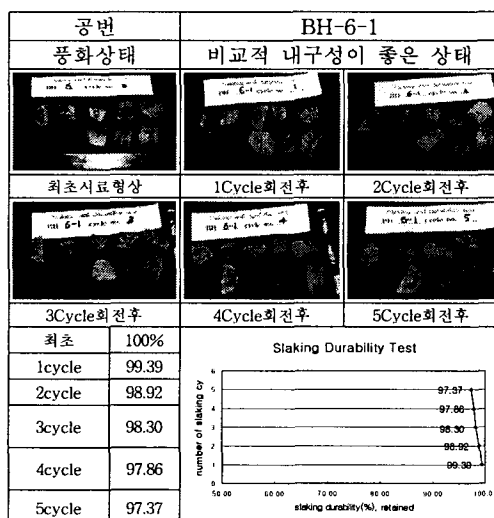
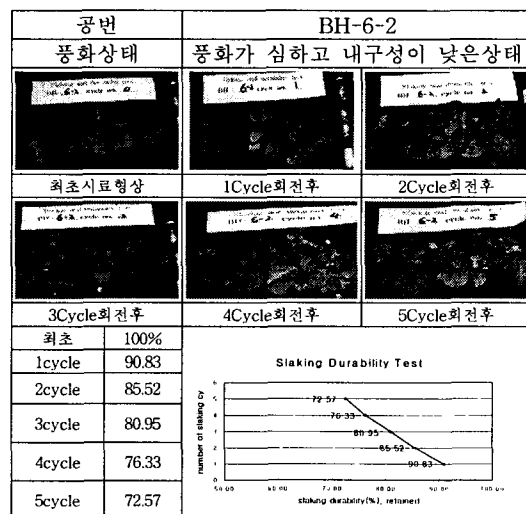


표 5. 풍화가 심한 상태의 암석풍화 상태



본 연구에서는 풍화가 심한 등급과 약간풍화정도의 두 종류의 풍화상태를 시험하였으며 단계별로 자세한 관찰을 실시하고 이를 통하여 세일의 풍화특성을 규명하고자 하였다. 실험 결과 비교적 내구성이 큰 약간풍화정도의 암석은 5단계후에 이르기까지도 암석의 풍화의 영향이 적다는 것을 알 수 있고, 이와 반대로 풍화가 심한 암석은 5단계까지 지속적으로 큰 폭으로 무게가 감소하는 것을 볼 수 있었다. 이런 결과로 볼 때 이미 풍화가 심한 암반과 약간풍화인 암반이 혼재하고 있을 때는 전체적으로 풍화가 심한쪽으로 판단하여 설계,시공하여야 한다고 판단된다.

6. RQD적용에 있어서의 세일암의 문제점

본 연구대상지역구간 실시한 시추조사는 원지반 상태의 지층분포, 암반특성 및 지하수 조건을 파악하기 위하여 총 6개소 위치에서 도로 계획고 아래 2m심도까지 수행하였다. 시추시 전 심도에 대하여 암반 코아를 채취하여 심도별로 코아회수율(T.C.R) 및 암질지수(R.Q.D)를 측정하였다. 그런데 본 지역이 현장관찰시에는 암질지수(R.Q.D)는 30%정도였는데 시추 당시 조사된 암질지수는 대부분의 경우 60% 이상으로 일부 구간의 경우 90~100% 정도로 분포하는 것으로 확인되었다. 본 지역의 현장상태로 보아 시추조사된 90~100%의 RQD로 시공할 시 안정상 문제가 될 것으로 판단하여 이를 현장상황에 맞게 암질지수를 평가절하 하는 일련의 과정이 필요하다고 판단되어 수작업으로 fissility를 따라 쉽게 부서지는 시료를 RQD에서 제외하여 재측정하였는데 재측정된 암질 지수는 평균 30%내외로 나타났으며 이는 현장에서 직접측정한 RQD와 거의 유사한 값을 가지는 것으로 나타났다. 깨진 균열 틈새에는 충전물질이 거의 없는 경우도 있으나 대부분 방해석(Calsite, CaCo₃)으로 충전되어 있는 경우가 많았다. 시추시 조사된 암질지수와 재평가된 암질지수를 비교하면 그림 8과 같다.

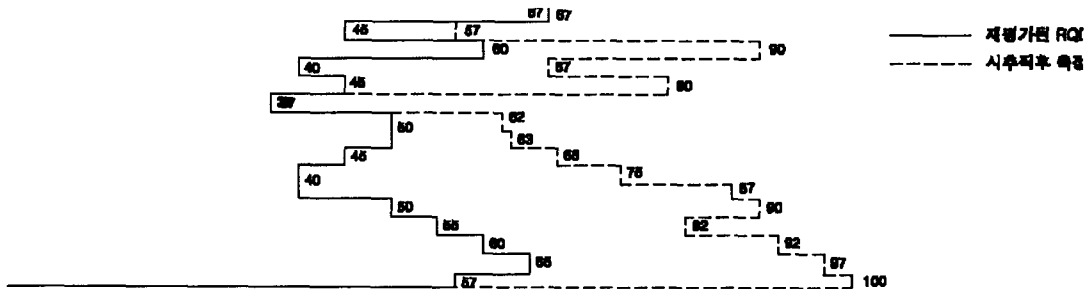


그림 8. 재평가후의 암질지수(R.Q.D)의 변화

본 현장관측과 시추직후 평가측정치와 수작업을 통하여 암질지수를 다시 재측한 것을 종합하여 판단하여 볼때 시추직후 평가된 암질지수의 사용은 암반의 과대평가를 낳을수 있으며 이를 해결하기 위하여 손으로 쉽게 부서지는 암석을 미리 제거하여 암질지수를 판단하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.

7. 결 론

- ① 본 세일의 포화시 강도와 건조시 강도를 비교하였을 때 포화시 강도가 건조시 강도의 약 1/2정도를 보이며 세일의 경우는 다른 암석에 비해 포화상태에 따른 강도이방성이 특히 크다는 것을 알 수 있는데 우기시나 장기간 지하수에 노출되는 될 때 암반이 급격히 안정성이 떨어진다는 것을 예상할 수 있으며 이를 설계시 주의하여 반영해야 하는 것으로 판단된다.
- ② 점하중을 통한 이방성특성연구에서 볼 수 있듯이 세일의 이방성특성이 매우 크다는 것을 다시 한번 알 수 있었고 이는 “퇴적암의 비등방성 특성에 관한 연구” (김영수의 1998,8)에서 발표되었던 일축압축강도가 수평일때가 수평에서 60°일 때 약 2배인 연구결과와 비슷한 것을 알 수 있었으며 “Strength anisotropy of rocks(Aagaard B, 1976)”에서 micaschist에 관한 점하중 강도특성결과 분석에서의 층리각도별 점하중 강도지수연구결과와 유사한 것을 확인할 수 있었다.
- ③ 풍화인내도 시험에서 이미 어느 정도 풍화가 진행된 암석이 급격히 풍화되는 것을 볼 수 있었는데 이는 풍화가 이미 진행된 세일암반과 양호한 암반이 혼재되어 있을시 심한 차별풍화에 대비한 철저한 설계시공이 되어야 함을 강조 할 수 있다.
- ④ 본 연구에서는 수작업이후 코아의 재측정값이 현장과 유사한 값을 얻을 수 있었던 점과 풍화인내도시험결과를 종합적으로 살펴본 결과 세일 암반의 시추코아 계산시 RQD를 손으로 쉽게 부서지는 암석은 이미 절리가 형성된 것으로 판단하고 신중히 재측하여 설계시 반영하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김영수,허노영,서인식(1998), 퇴적암의 비등방 특성에 관한 연구(대구지역),지반공학회지,제 14권 제 4호.
2. 김영수,허노영외(2000), 세일(혈암)의 이방성 파괴 특성,지반공학회지 제 17권 제2호
3. 박형동(2002),이암과 세일의 지질공학적 특성, 한국지반공학회 암반역학위원회 학술세미나 논문집, p.20~30.
4. Broch E. and Franklin J. A.(1972). The point-load strength test. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 9, pp 669-697.
5. Z.T.BIENIAWSKI(1975), THE POINT-LOAD TEST IN GEOTECHNICAL PRACTICE, Engineering Geology,9: pp1-11.
6. E.BROCH(1983), Estimation of Strength Anisotropy Using the Point-Load Test, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomch. Abstr. Vol.20,No.4,pp181-187.
7. I.R.FORSTER, The Influence of Core Sample Geometry on the Axial Point-load Test, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomch. Abstr. Vol.20, No.6, pp291-295.
8. NORMAN BROOK(1980),Size Correction for Point Load Testing, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomch. Abstr. Vol.17, ,pp181-187.
9. M.GREMINGER(1982) Experimental Studies of the Influence of Rock Anisotropy on size and Shape Effects in Point-Load Testing,Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomch. Abstr. Vol.17, ,pp181-187.
10. Gamble, J. C.(1971) Durability-plasticity classification of shales and other argillaceous rocks,Ph. D., thesis, University of Illinois.
11. Franklin, J. A. and Chandra, R.(1972) The slake durability index, Int. J. Rock Mech. Min.Sci., Vol.9,No.3,pp325-342.