

A Study on The Engineering Characteristics of Corestone Ground Mass.

1), Su-Gon Lee, 2), Dong-eun Kim, 3), Chun-Young Lee,
4), Jae-Heun Kim, 5), Hong-Suk Yang

- 1) , Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Seoul
2) , Member, MSc Course, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Seoul
Seoul
3) , Division director, Korea Forest Research Institute(KFRI)
4) , Senior researcher, Korea Forest Research Institute(KFRI)
5) , PhD Course, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Seoul

SYNOPSIS : Corestone ground mass has complicated characteristics as it is made up of hard and stiff corestone in a relatively weak and soft matrix. Model corestone ground mass which is physically identical with the stiff corestone in weak matrix were tested in uniaxial compression. The tests show that the increase of the corestone proportion brought the gradual increase of the elastic modulus as well. The ground mass was weaker when the corestone proportion was low while it was stronger in higher corestone proportion. The size of the corestone had no influence on the strength and elastic modulus as long as the proportion of the corestone remains same.

Key word : Corestone weathering, Engineering characteristics, Uniaxial compression test, elastic modulus

1. 서론

1.1 연구목적

암석이 파괴되거나, 세분화되는 물리적 과정과, 암석의 광물구조가 바뀌는 화학적 과정을 통틀어서 풍화작용(weathering)이라고 정의 할 수 있다. 풍화작용이 일어남에 있어서 판상의 수평 및 수직절리가 서로 교차하는 암괴들이 지하나 지상에서 존재하게 되면, 각이 진 모서리 부분이 주변보다 풍화작용이 빠르게 진행되어 둥그런 모습으로 형태가 바뀌게 된다. 이러한 암괴는 절리의 간격과 형태, 풍화에 대한 저항력의 차, 풍화가 진행된 기간 등에 따라 다양한 형태를 갖게 되지만 대체적으로 타원형의 모습이나 구형의 모습을 띄게 된다. 이러한 암괴는 생성과정 및 형태에 따라 다양한 이름을 가지고 있지만, 본 연구에서는 역학적인 관점에서 상대적으로 매트릭스에 비해 강한 강도 및 탄성계수를 갖는 암괴를 총칭하여 ‘핵석(core stone)’, 이러한 핵석이 발견되는 지반을 ‘핵석지반’이라고 명명한다.

핵석이 발견되어지는 지반은 강도 및 탄성계수를 포함한 기타 특성들의 차이가 발생하는 핵석과 풍화층이 같이 존재하기 때문에 그 역학적 성질을 파악하는 데에는 상당한 어려움이 뒤따른다. 따라서 본 연구에서는 이와

같이 복잡한 성질을 가진 핵석 기반에서의 강도정수를 추정하고자 핵석지반의 형태에 대한 관찰 및 분석 결과를 이용하여 실제지반과 유사하면서도 실내시험을 할 수 있는 인공적인 시료를 제작하여, 그 강도 및 변형 특성을 파악하고자 하였다.

1.2 연구방법

핵석지반을 실내시험이 가능하도록 시료를 제작함에 있어서 중요한 점은, 일단 두 개의 서로 다른 강도 특성을 갖는 재료들이 암석시험이 가능하도록 성형이 가능해야 한다는 것이다. 이러한 점을 고려하여 재료선정을 위해 석고나 일반 시멘트등 여러 물질을 시도해 보았으나 여러 가지 문제점들이 발견되어 최종적으로 특수시멘트 중에서 초속경시멘트를 선정하였다.

이 시멘트들로 물 배합비의 차이에 따른 강도 변화를 이용하여 두 종류의 강도 및 변형성의 차이를 보이는 재료를 제작하였는데, 상대적으로 강도가 강한 재료로 핵석을 제작하고, 강도가 약한 다른 하나는 핵석 주위를 감싸는 풍화층물질(매트릭스(matrix) : 본 논문에서는 핵석지반에서 상대적으로 약한 풍화층을 나타내는 총칭)로 제작하였다. 본 연구에서는 핵석이 차지하는 체적비에 따른 강도 및 변형특성을 규명하기 위하여 하나의 시료군은 같은 크기의 핵석을 이용하여 체적비를 서로 다르게 하고, 또다른 시료군은 핵석의 체적비는 동일하지만, 핵석의 크기를 다르게 제작하였다. 즉, 첫 번째 경우는 동일한 크기의 핵석이 전체에서 차지하는 체적비(0%, 15%, 30%, 45%, 65%, 100%)에 따라 달라지는 강도 및 탄성계수의 차이를 알아보고, 두 번째 경우에는 동일한 체적비일 경우에 핵석의 크기가 시료의 강도 및 탄성계수에 어떤 영향을 미칠 것인가를 알아보는 것이다.

2. 실내시험을 통한 핵석지반의 강도정수 추정

2.1 시료의 제작

2.1.1. 재료의 선정

핵석지반을 모델링 하기 위해서는 강도와 변형성의 차이를 나타내는 핵석과 핵석주위를 둘러싸는 매트릭스를 제작하여야한다. 먼저 실내 절리면 전단시험에 사용하는 석고와 일반포틀랜드 시멘트를 이용하여 시료를 제작해 보았으나, 석고는 일축압축강도가 비교적 낮고 삼축압축 시험시에 연성거동을 보였다. 또한 일반 포틀랜드 시멘트는 양생 기간이 너무 길고 그 양생기간에 따라 강도가 계속적으로 변하는 특성을 가지고 있어서 실험을 하기에 적합하지 않은 것으로 나타났다. 따라서 다양한 검토를 통하여 시료의 제작과 적정 강도의 발현에 문제가 없는 것으로 검증된 초속경 그라우트와 초속경 시멘트를 실험의 재료로써 사용하였다.

먼저 핵석을 제작할 초속경 그라우트(JM)는 초속경 시멘트와 모래로 구성되어 있으며 사용자의 현장배합과 적절한 입도를 가진 골재선정의 어려움을 보완하기 위해 Grouting에 적합하도록 제조되었고, 2시간만에 실용강도를 발현하는 무수축, 초속경성 고강도 몰탈이다. 이 재료의 응결 시간에 따른 압축강도의 변화는 표 1과 같다.

표 1. 응결 시간에 따른 압축강도

구분	standard water content (15%)						
	time of cure	2h	6h	1d	3d	7d	28d
JM	Uniaxial compression strength (kg/cm ²)	325	525	590	620	690	705

위에 보듯이 이 재료의 시험강도는 하루만 지나면 600kg/cm² 정도의 강도를 나타내고 강도에서 크게 변화가 없었지만 일반 암석시험에 사용되는 직경 50mm, 길이 100mm 의 시료로 제작하기 위해서는 위에 나타난 것처럼

럼 15%의 표준수량으로는 성형이 불가능하였기 때문에 약 25%의 물과 섞어서 시료를 성형하고, 약 2주일 이상의 수중양생 후에 일축압축시험을 한 결과, 약 350~400kg/cm² 정도의 강도를 나타내었다.

매트릭스의 제작은 초속경시멘트와 물 25%를 섞어서 시료를 성형하는데 강도시험결과 약 120~200kg/cm² 정도의 강도를 나타내었다. 강도 뿐만 아니라 두 물질의 거동 특성의 차이를 발생시키기 위해서는 탄성계수의 차이가 발생하여야 하는데, 핵석의 경우에는 9.0×10⁶KPa, 매트릭스의 경우에는 4.0×10⁶KPa로써 충분한 탄성계수 차이를 보였다. 이 정도의 차이를 가진 재료라면, 실제 핵석지반을 완벽하게 만족하는 상태는 아니지만 두 재료의 강도차이가 충분한 것으로 판단되었다. 따라서 최종적으로 매트릭스는 [초속경시멘트+물(25%)], 핵석은 [초속경그라우트JM(초속경시멘트+모래) + 물(25%)]로 선정하였다.

2.1.2 핵석 모양결정

실제지반에서 핵석의 형태는 보통 긴 타원형의 형태에서 구의 형태까지 다양하게 발견된다. 처음에는 긴 타원형과 정사각형의 핵석을 제작하여 시험하였는데, 이러한 경우에는 배열각도에 따른 강도의 변화, 실험을 위한 다양한 체적비를 갖는 시료 제작의 어려움, 수치해석의 복잡화 등 여러 가지 문제점이 발견되었다. 따라서, 최종적으로 제작이 용이하며, 방향성등의 다른 변수를 가지지 않는 구의 형태를 띄는 핵석을 제작하였다.

2.1.3 핵석의 크기결정

연구 목적중 하나는 두 가지 크기의 핵석을 똑같은 체적비로 시료를 제작하였을 때, 즉 직경 X mm의 핵석이 차지하는 체적비가 10%인 시료와, 직경이 그 2배인 2X mm의 핵석이 차지하는 체적비가 10%인 시료의 강도 및 변형특성을 비교하는 것이다. 이러한 경우에 핵석은 두 가지 크기로 제작되어야 하고, 시험은 직경 50mm, 길이 100mm의 원통형시료에서 이루어질 것을 감안하여 핵석의 직경을 10mm와 20mm로 결정하였다.

2.1.4 핵석 및 시료의 제작

이렇게 모양과 크기가 결정된 후에, 먼저 [초속경시멘트 + 모래 + 물(+red수성잉크)]를 섞어서 핵석을 제작하였다. 수성잉크는 시험후 파괴형상을 쉽게 파악하기 위하여 첨가하였다. 또한 정확한 10mm, 20mm의 핵석을 제작하기 어렵기 때문에 제작된 핵석에 대하여 체가름 시험을 실시하여 작은 크기의 핵석은 9.50mm~11.2mm의 크기로, 큰 크기의 핵석은 19mm~21.5mm의 크기로 결정하였다. 핵석은 제작후 실온에서 약 1시간정도 양생 후 사포를 이용하여 이물질들을 제거하고 수중에서 양생하는데, 수중에서의 양생은 2주일 이상으로 하였다(그림 1).



그림 1 (a) 제작한 핵석 사진 (b) 양생 사진

시료의 제작은 아크릴을 이용해서 특수제작한 직경 50mm, 길이 110mm의 몰더를 준비하고 접촉할 부분에 구리를 발라 분리가 쉽도록 하였다. 핵석이 100%를 차지하는 시료를 제작하기 위해서, 핵석을 제작할 때와 똑같은 비율로 [물+초속경시멘트+모래]를 준비하여 섞은 후 몰더에 붓고 몰더 안에서 공극이 발생하지 않도록 잘 다져주었고, 몰더에 있는 상태로 약 1시간의 양생후, 수중 양생을 실시하였다. 그리고 핵석이 0%(매트릭스 100%)를 차지하는 시료를 제작하기 위해서는 [초속경시멘트+물]을 준비하고 위와 똑같은 과정으로 시료를 제

작하여 수중에서 양생하였다. 다음은 각 핵석의 체적비 별로 시료를 제작하는데, 매트릭스로 제작할 물질[초속경 시멘트 + 물]을 혼합하고, 미리 제작한 후 2주 정도의 양생을 거친 핵석을 이 매트릭스와 섞어 준비된 몰더에 핵석과 혼합된 매트릭스 물질을 넣었다. 위의 과정을 통해서 10mm의 핵석은 시료에 차지하는 체적비가 15%, 30%, 45%, 65%가 되도록 메스실린더를 이용하여 측정하고, 해당하는 각각의 체적비 별로 6개의 시료를 제작하였고, 20mm의 핵석도 같은 방식으로 15%, 30%, 45%의 체적비로 6개의 시료를 제작하였다. 각 시료에 대한 분류를 손쉽게 하기 위하여 핵석의 직경이 10mm인 시료군은 S10, 직경이 20mm인 시료군은 S20으로 명명하고, 습윤상태에 따라 다시 D와 W로 분류하였으며, 각각의 핵석 체적 % 별로 다시 분류를 실시하였다. 이와 같은 분류를 정리하면 다음 표 2와 같다. 따라서 두 가지 크기의 핵석이 같은 체적비로 시료에 포함되었을 때의 강도 특성의 비교는 체적비 15%, 30%, 45%에 대해서 행해졌다. 체적비에 따른 시험개수는 완전건조상태 일때와 표면건조포화상태 일때로 나누어 세 번씩 실시하였다. 제작된 시료는 핵석의 제작후와 마찬가지로 1시간정도 실온에서 몰더에 있는 상태로 양생 후, 몰더에서 분리하여 2주 정도의 수중 양생을 실시하였다.

표 2. 핵석 체적비에 따른 시료의 분류

volume ratio	10mm		20mm	
	Dry	wet	Dry	wet
0%	S10D-0	S10W-0	S20D-0	S20W-0
15%	S10D-15	S10W-15	S20D-15	S20W-15
30%	S10D-30	S10W-30	S20D-30	S20W-30
45%	S10D-45	S10W-45	S20D-45	S20W-45
65%	S10D-65	S10W-65	-	-
100%	S10D-100	S10W-100	S20D-100	S20W-100

2.2 시험장비

2주 정도의 수중양생을 거친 시료는 절단과 연마의 과정을 거친후 SBEL사의 SERVO 제어 유압시험기를 이용하여 일축압축시험을 실시하고 강도 및 변형특성을 측정하였다. 본 연구에 사용된 일축압축시험 장비는 유압 servo-valve에 의한 feed-back control이 가능하며, 일정 응력비 방식 뿐만 아니라 일정 변형률비 방식으로도 사용될 수 있는 200ton 용량의 A closed-loop servo controlled hydraulic testing machine(by SBEL, Inc)이다. 시험 장비의 상세한 제원이나 시험 방법 등은 기존의 논문들(권성주, 2001 ; 김동은 2002)에 자세히 기술되어 있다.

3. 일축압축시험결과

3.1. 핵석함유 비율에 따른 일축압축강도비의 변화

핵석함유 비율에 따른 일축압축강도비의 변화를 살펴보기 위하여 표 2와 같이 다양한 핵석 체적비에 따른 시료를 각각 총 6개씩 제작하여 3회는 표면건조포화상태에서, 3회는 완전건조상태에서 일축압축시험을 실시하였다. 각각의 조건에 따른 일축압축강도의 변화는 그림 2(a), (b)에 나타나 있다. 본 연구에서는 핵석의 체적비에 대한 일축압축 강도의 변화를 명확하게 표현하기 위하여 핵석 %별 강도와 핵석이 0%일때 강도의 비로 나타내었다.

$$\text{일축압축 강도비 } \alpha = \frac{\sigma_x}{\sigma_0} \quad (1)$$

여기에서, σ_x : 각 핵석 %별 일축압축강도

σ_0 : 핵석 0%일때의 일축압축강도

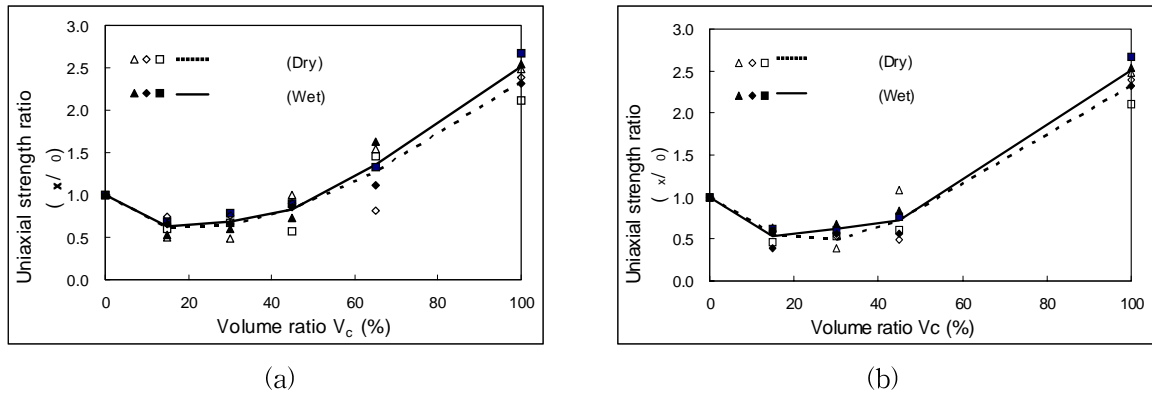


그림 2 일축압축강도비 vs 체적비(Vc) (a) S10 series, (b) S20 series

완전건조상태의 시료는 표면건조포화상태의 시료와 비교해서 시험값의 오차 범위가 큰 것으로 나타났는데, 이것은 수중양생을 거친 시료가 건조되는 동안 시료 외부에 발생한 micro cracks이 암석의 일축압축강도 및 변형성에 영향을 미쳤기 때문으로 판단된다. 두 그래프를 비교해보면 체적비에 따른 일축압축강도비의 변화경향은 비슷함을 알 수 있다. 특히 체적비가 낮은 15%와 30%일 때는 핵석이 전혀 없는 매트릭스만으로 구성된 시료보다 오히려 일축압축강도비가 약 30~50% 정도 감소하는 경향이 나타났는데, 이러한 결과는 핵석과 매트릭스의 경계면이 불연속면으로 작용하기 때문으로 판단된다. 그러나 체적비 45%인 시료에서부터 일축압축강도가 증가하는 경향을 보였다. 이것은 핵석의 체적이 증가하면서, 미소 변형시에는 균열의 확장 및 병합시에 핵석에 의해 크랙의 전파가 지연되는 굴곡(tortuosity) 현상이 발생하고, 그 후에는 각 핵석들간의 맞물림 현상(interlocking)이 발생하기 때문으로 판단된다. 이러한 맞물림 현상과 파단선의 굴곡의 영향은 파괴된 시료에서 확인이 가능하였다. 또한 건조와 습윤상태에 따른 일축압축강도비의 변화에는 큰 차이가 없는 것으로 나타나, 핵석의 포함 여부 및 체적비가 일축압축강도에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로 판단된다.

3.2 핵석함유 비율에 따른 탄성계수비의 변화

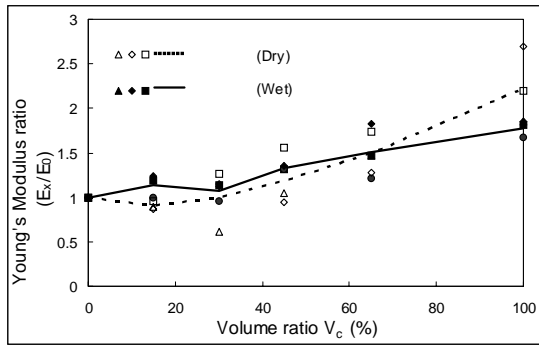
탄성계수 역시 핵석의 체적비에 대한 탄성계수 값의 변화를 명확하게 표현하기 위하여 각 핵석 %별 탄성계수와 핵석이 0%일때의 탄성계수의 비로 나타내었다.

$$\text{탄성계수비 } \beta = \frac{E_x}{E_0} \quad (2)$$

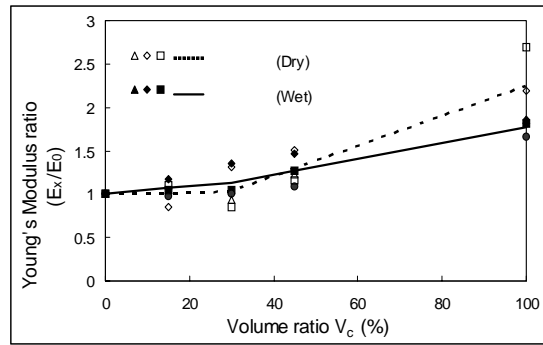
여기에서, E_x : 각 핵석 %별 탄성계수

E_0 : 핵석 0%일때의 탄성계수

각 핵석함유 비율에 따라 제작한 시료의 일축압축시험 결과로 얻은 탄성계수비의 변화는 그림 3 (a), (b)와 같다. 실험 결과를 살펴보면, 건조상태와 습윤상태에서 공통적으로 핵석의 체적이 증가하면 핵석의 탄성계수비도 증가하는 것을 확인할 수 있는데, 체적비가 비교적 낮은 15%와 30% 일 때는 큰 변화가 없지만, 45%와 65% 일 때의 경우에는 확실하게 탄성계수비가 증가함을 알 수 있었다. 또한, 핵석 함유비율이 15~65% 사이에서는 건조시와 습윤시의 탄성계수비에 큰 차이가 없지만, 핵석 100%인 경우에 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 핵석이 포함될 경우에는 전체적인 변형이 핵석과 매트릭스의 경계부의 변형에 더 큰 영향을 받지만, 매트릭스와 핵석이 100%인 각각의 경우에는 재료 자체의 특성이 더 큰 영향을 미치기 때문으로 판단된다. 즉, 본 연구에서 사용된 시멘트 페이스트의 특성상, 습윤시에는 매트릭스 100% 시료와 핵석 100% 시료에서 시멘트 페이스트가 주된 변형을 발생시키기 때문에, 습윤시에는 두 시료 사이의 탄성계수비의 변화가 상대적으로 적은 것으로 판단된다.



(a)

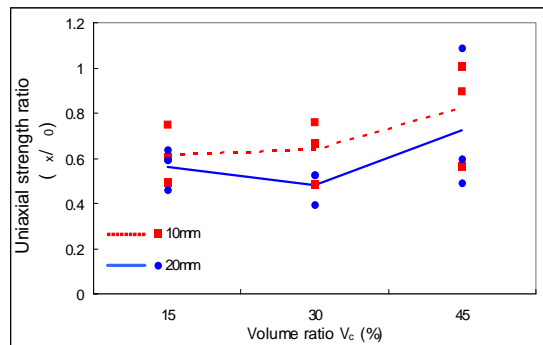
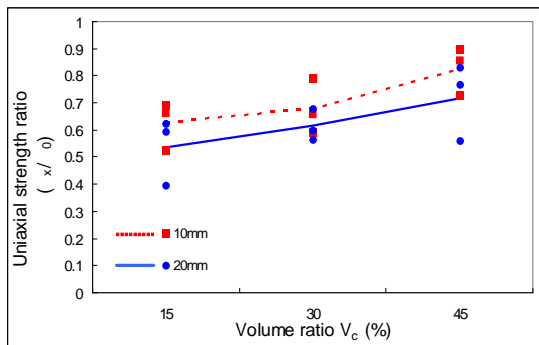


(b)

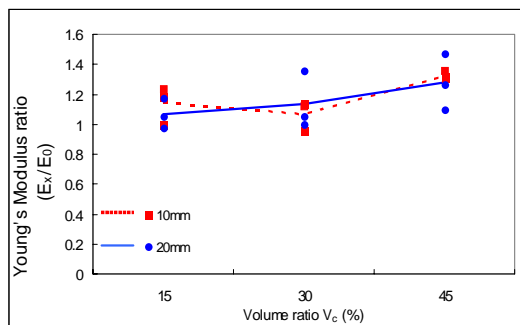
그림 3 탄성계수비(β) vs 체적비(V_c) (a) S10 series, (b) S20 series

3.3 핵석크기에 따른 일축압축강도비와 탄성계수비의 비교

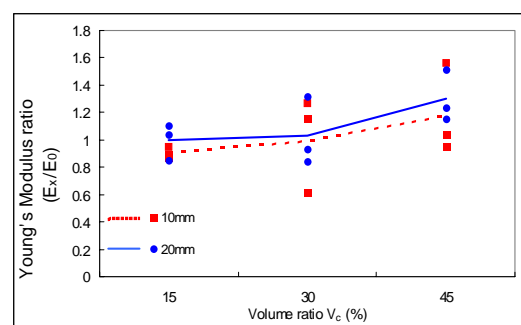
핵석의 직경이 약 2배의 차이가 나고, 시료에서 차지하는 체적은 같을 경우의 일축압축강도비와 탄성계수비의 차이를 파악하기 위하여 핵석의 체적비가 15%, 30%, 45% 일 경우에 그림 4 (a), (b)와 같이 실험 결과를 비교하였다. 실험 결과 핵석의 직경이 20mm일 때 일축압축 강도비는 핵석의 직경이 10mm인 경우에 비하여 10~20% 정도 작게 나타났는데, 이는 핵석 크기의 증가로 인하여 불연속면으로 작용하는 핵석과 매트릭스의 접촉면의 길이가 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

그림 4 핵석 크기에 따른 일축압축강도비(a) vs 체적비(V_c) (a) 습윤상태 (b) 건조상태

탄성계수비는 그림 5 (a), (b)와 같이 핵석의 체적비에 따라서는 결과에 큰 차이가 없는 것으로 나타났는데, 이는 핵석의 크기가 클 경우 일축압축강도가 감소하는 경향을 보이지만 상대적으로 핵석의 개수가 적기 때문에 핵석과 매트릭스 경계부에 의해서 주로 발생하는 전체적인 수직변형은 감소하기 때문인 것으로 판단된다.



(a)



(b)

그림 5 핵석 크기에 따른 탄성계수비(β) vs 체적비(V_c) (a) 습윤상태, (b) 건조상태

4. 결론

본 연구는 핵석지반에서의 합리적인 강도정수를 산정하고자 수행되었다. 우선 실내실험이 가능하도록 실제 핵석지반의 특성을 고려한 형태의 시료를 제작하고 일축압축강도실험을 수행하여 일축압축강도비와 탄성계수비의 변화를 살펴보았다.

1. 실내실험을 통한 핵석의 체적에 따른 일축압축강도비(α)는 핵석이 차지하는 체적비가 작을 경우(15~45%)에는 감소하다가 핵석의 체적비가 45%에서 점차 증가하는 것으로 나타났다. 이 결과는 핵석의 함유량이 적을 경우에는 핵석과 매트릭스의 경계가 일축압축강도를 감소시키는 불연속면으로만 작용하지만 함유량이 증가하면서 핵석 상호간의 맞물림현상과 굴곡의 증가에 의해 일축압축강도를 증가시키는 것이라고 사료된다.
2. 핵석의 체적비에 따른 탄성계수비는, 일축압축강도의 변화와 약간 다른 양상을 보였는데, 핵석이 차지하는 체적이 작을 경우에도 탄성계수비가 $\beta=1$ 과 비슷하거나 약간 큰 값을 나타냈다. 그리고 체적비가 더 커질수록 그 탄성계수비가 서서히 증가하는 경향을 보였다.
3. 핵석의 크기에 따른 일축압축강도비 및 탄성계수비를 비교해 본 결과 핵석 크기의 증가로 인하여 불연속면으로 작용하는 핵석과 매트릭스의 접촉면의 길이가 증가하기 때문에 핵석의 크기가 커지면 강도가 감소하는 것으로 판단되었다. 그러나 탄성계수비는 핵석의 체적비에 따라서는 결과에 큰 차이가 없는 것으로 나타났는데, 이는 핵석의 크기가 클 경우 일축압축강도가 감소하는 경향을 보이지만 상대적으로 핵석의 개수가 적기 때문에 핵석과 매트릭스 경계부에 의해서 주로 발생하는 전체적인 수직변형은 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 핵석의 크기보다는 핵석이 시료 전체에서 차지하는 체적비가 더 많은 영향을 미치는 것으로 사료된다.

5. 참고문헌

1. 권성주(2002), “핵석지반에서의 합리적인 지반강도 정수의 산정”, 서울시립대학교, 석사학위 논문
2. 김동은(2003), “실내실험을 통한 핵석지반의 강도정수 산정연구”, 서울시립대학교, 석사학위 논문
3. 이수곤 외 3명(1999), “핵석 풍화된 절개사면에서의 암판정 연구”, 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp.21-24
4. Hansen, T.C.(1965), “Theories of multi-phase materials applied to concrete, cement mortar and cement paste”, in Brooks, A.E. and Newman, K., eds. The Structure of Concrete(and Its Behavior Under Load), Cement and Concrete Association, London, pp.16-23
5. Hirsch, T.J.(1962), “Modulus of Elasticity of concrete affected by elastic moduli of cement paste matrix and aggregate”, Journal of the American Concrete Institute, 59, pp.427-447
6. Lindquist, E.S and Goodman, R.E (1994), “The Strength and Deformation Properties of Melange”, Ph.D. thesis, The University of California, Berkeley
7. Medley, E.W and Goodman, R.E (1994), “The Engineering Characterization of Melanges and Similar Block-in-Matrix Rocks (Bimrocks)”, Ph.D thesis, The University of California, Berkeley
8. Stock, A. F., Hannant, D. J., Williams, R. I. T.(1979), “Effect of aggregate concentration upon the strength and modulus of elasticity of concrete”, Magazine of concrete research, vol.31, no.109, pp.225-234