

경기도 여주지역 미고결 이암의 공학적 특성

Engineering Properties of Uncemented Mudrock from Yeosu Area, Gyeonggi-Do

반 호 기¹⁾ · 이 희 연²⁾ · 배 규 진³⁾ · 조 완 제[†]

Hoki Ban · Huiyoun Lee · Kyujin Bae · Wanjei Cho

Received: October 23rd, 2015; Revised: October 30th, 2015; Accepted: November 16th, 2015

ABSTRACT : Engineers should take great care of characterizing the engineering properties of mudrock, because the uncemented mudrock can be considered as a hard rock in appearance. Therefore, the mudrock samples obtained from the cut slope in Gyeonggi-do were tested to evaluate the strength characteristics of uncemented mudrock in this study. The performed tests are index properties, slake durability, and swelling tests for the classification of the mudrock for engineering practice. To evaluate the effect of water on the engineering properties of the uncemented mudrock, resonant column, triaxial compression and direct shear tests with various water contents were performed. With the increasing water contents, stiffness at very small to small strain region and the cohesion value of the strength parameters decrease. Based on the test results, engineers should take great care of evaluating the engineering properties of uncemented mudrock.

Keywords : Uncemented mudrock, Shear strength, Stiffness, Slake durability

요 지 : 미고결 이암은 쉽게 풍화되어 고결도 및 강도가 급속히 감소하는 성질을 가지고 있어 사면 붕괴 등의 문제를 일으킬 수 있고, 외관상으로는 단단한 암반으로 보이는 경우가 많아 지질조사 시 착각하기가 쉽다. 따라서 이암지반에서의 구조물 설계 시 이암 암반층에 강우가 흡수되어 변화하는 공학적 특성을 이해하는 것은 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 경기도 여주지역 일대의 사면 절토 현장에서 채취한 자연 상태의 미고결 이암 시료를 대상으로 공학적 특성을 파악하기 위한 실내 시험을 수행하였다. 자연 상태의 미고결 이암 시료의 기본적인 성질을 파악하기 위한 기본 물성 실험, 변형 특성을 확인하기 위해 슬레이크 내구성 지수 결정 시험과 흡수팽창 지수 결정 시험을 수행하고, 슬레이크 사이클 횟수에 따라 전자 주사 현미경(SEM) 촬영을 통하여 시료 표면의 변형을 관찰하였다. 이와 더불어 미고결 이암의 전체 변형률 영역에서 물에 대한 영향을 살펴보기 위해서 직접전단시험, 공진주시험을 수행하였다. 함수비의 증가에 따른 역학적 변화를 확인할 수 있었으며, 따라서 미고결 이암이 넓게 분포하는 지역에서는 강우 유입에 따라 강도저하 및 변형이 발생할 수 있으므로 구조물 설계 시에 각별한 주의가 필요한 것으로 판단된다.

주요어 : 미고결 이암, 전단 강도, 강성, 슬레이크 내구성

1. 서 론

우리나라는 전체의 70% 이상이 산지로 구성되어 있다. 이러한 특성상 국내 곳곳에서 자연사면을 쉽게 접할 수 있고, 더불어 많은 건설 부지를 통해 산을 절취하여 인공사면도 급속도로 증가하였다. 따라서 국내의 사면 붕괴에 의한 재난 방재 준비는 국토해양부, 국민안전처, 산림청 등의 국가기관에서 지속적으로 진행되고 있다. 그러나 최근 이상기후로 인한 집중강우, 태풍 등에 의해 사면 붕괴가 매년 증가하고 있으며 2011년 서울 우면산 산사태 사례에서 볼 수 있듯이 사면에 의한 재해가 산악지뿐만 아니라 도심지로도 확대되고 있는 추세이다. 이 같은 사면 붕괴에 의한 피해를

저감시키기 위해서는 무엇보다 우리나라 지질 및 지반의 특성을 이해하는 것이 중요하다.

일반적으로 사면 파괴의 요인으로는 내적 요인(잠재적 소인)과 외적 요인(직접적 유인)의 두 가지로 크게 나눌 수 있으며 이들 두 요인이 함께 구비되었을 때 산사태가 발생된다. 즉 내적으로 취약한 지질구조를 가지고 있는 사면에 강우 및 절토 등의 외적 유인이 가하여질 경우 산사태가 발생되기 쉽다. 이암과 같이 풍화에 취약한 암반층이 주로 사면 파괴를 일으키는 지질구조라고 할 수 있다.

점토를 주성분으로 한 퇴적암의 일종인 이암으로 이루어진 암반층은 고결도가 낮아 흡수율이 크고 암질의 강도도 다른 암석에 비해 연약하기 때문에 지표로부터 상당한 깊이

1) Department of Civil Engineering, Kangwon National University

2) Department of Civil & Environmental Engineering, Dankook University

3) Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology

† Department of Civil & Environmental Engineering, Dankook University (Corresponding Author : jei0421@dankook.ac.kr)

까지 풍화 작용을 받게 된다. 그러나 암반절취 사면, 지하굴착, 터널 등의 설계와 시공에 절대적인 영향을 미치는 암석의 공학적 특성에 관한 연구는 화강암이나 화산암에 편중된 경향이 있다(Noh, 2006).

이암으로 이루어진 암반층은 사면 절취 등에 의해서 노출되면 급속도의 풍화가 진전될 뿐만 아니라 장마철에 비가 내려 물을 흡수하게 되면 건조 상태에서의 강도를 잃어 흙과 유사한 공학적 성질을 보이게 되며 이로 인하여 산사태와 같은 재해를 발생시키는 원인이 되기도 한다. 국내 건설 현장에서 간혹 사면 절취 후 노출된 이암은 쉽게 풍화되어 고결도 및 강도가 급속히 감소하는 성질을 가지고 있어 문제를 일으키는 경우가 보고되고 있다.

이러한 이암은 외관상으로 단단한 암반으로 보이는 경우가 많아 지질조사 시 착각하기가 쉽다. 토사지반보다는 경도가 높고 다른 암종에 비해 풍화 정도를 착각하기 쉬워 암반의 강도가 과대평가되어 더 신선한 상태로 판단하기 쉬우므로 육안 판단에만 의존하지 말고 이에 대한 정확한 지질 공학적 특징을 이해하고 적합한 실험법을 통해 지반조사와 평가를 실시해야 한다(Korean Geotechnical Society, 2009).

이암과 관련한 국내 연구는 이암 분포가 다른 지역에 비해 상대적으로 넓은 포항지역에 분포하고 있는 이암을 대상으로 연구가 주로 수행되었다. 포항지역의 이암의 슬레이크 내구성 및 흡수팽창 지수 특성을 파악하는 연구(Kim et al., 1996; Lee et al., 2007; Lee et al., 2010; Lee, 1996)가 주를 이루었다. 국외 연구 동향을 살펴보면 주로 이암의 일반적인 내구성 및 팽창특성에 초점을 맞추고 있는 것을 볼 수 있다. Dhakal et al.(2002)은 주로 일본지역에 분포하고 있는 화산 쇄설암이나 퇴적암 등의 슬레이크 내구성과 광물학적인 특성에 대해서 연구하였다.

Anwar et al.(2000)은 물의 침투에 따라 매우 예민해지는 팽창 가능성이 있는 이암들을 대상으로 Swelling 시험과 Slaking 시험을 실시하여 각 이암의 시간에 따른 팽창과 슬레이크 내구성 지수를 파악하는 연구를 수행하였다. 더불어 Pejon & Zuquette(2002), Gokceoglu et al.(2000), Olgaard et al.(1997) 등의 국외 연구자들도 주로 이암의 일반적인 내구성 및 팽창특성에 초점을 맞춘 연구를 수행하였다.

국내·외로 이암의 강도특성 및 압밀특성 등의 여러 특성들에 대해 평가하기 위해 전반적인 연구가 시도되었지만, 사면 설계 등에 적용될 수 있는 물의 침투에 의한 강도 특성을 분석하거나 내진 설계와 관련된 동적 물성치의 특성을 확인하기 위한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 실제 사면 설계 및 내진 설계에 적용하고, 물의 영향에 따른 이암의 변형특성을 파악하기 위해서는 전체 변형률 영역을 파악할 수 있는 연구가 필요한 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 경기도 여주지역 일대의 사면 절토 현장에서 채취한 자연 상태의 미고결 이암 시료의 공학적 특성을 확인하는 각종 실내 시험을 수행하였다.

2. 시험 시료 및 방법

2.1 시험 시료

본 연구에서 사용된 시료는 자연상태 미고결 이암 시료로 시료의 액성한계 및 소성한계를 확인하기 위해 흙의 액성한계·소성한계시험(KS F 2303), 시료의 입자 밀도를 확인하기 위해 흙의 밀도 시험(KS F 2308), 시료의 점토 함유량을 확인하기 위해 흙의 씻기 시험(KS F 2309)을 수행하였다.

기본 물성 시험을 수행하여 얻은 결과를 정리하면 Table 1과 같다. 본 연구의 이암 시료의 비중은 2.76, 200번체 통과율은 40.47%이고, 단위중량은 2.13g/cm³로 다른 암종과 비교해볼 때 단위중량이 약간 낮게 나타나는 쇄설성 퇴적암의 특징을 보여준다.

슬레이크 내구성 시험과 흡수팽창 시험의 경우 자연상태의 시료를 사용하였으며 공진주시험과 삼축시험의 경우 함수비를 조절하여 단위중량을 자연 시료와 균일하게 재성형하여 사용하였다.

2.2 시험 방법

국제암반공학회(ISRM) 기준에 따라 미고결 이암의 풍화 내구성을 확인하기 위해 슬레이크 내구성 지수 결정 시험을 통해 슬레이크 내구성 지수를 측정하였으며, 흡수에 의한 팽창률 특성을 규명하기 위해 흡수팽창 지수 결정 시험을 수행하였다. 슬레이크 사이클 횟수(1회, 2회, 3회)에 따른 전자 주사 현미경(SEM, Scanning Electron Microscope) 촬영을 통하여 미고결 이암의 변형 특성을 확인하였다.

미소변형 영역에서의 변형률 및 동적거동 특성을 파악하기 위한 공진주시험과 대변형 영역에서의 변형 거동을 파악하기 위한 삼축압축시험을 수행하였다.

3. 시험 결과

3.1 슬레이크 내구성 지수

본 연구의 미고결 이암 시료의 슬레이크 내구성 시험 결과

Table 1. Index properties

Specific gravity	Finer than No. 200 (%)	Unit weight (g/cm ³)	Liquid limit	Plasticity index
2.76	40.47	2.13	24.19	1.58

사이클 2회에 해당하는 내구성 지수는 30 이하로 매우 낮은 내구성 지수를 보인다. 사이클의 증가에 따른 내구성 지수의 감소추세는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 변화를 보이고 있다. 슬레이크 내구성 지수는 1회에서 2회로는 약 63%가 감소했고, 2회에서 3회로는 약 37%가 감소했다. 시료는 전체적으로 손으로 쉽게 부술 수 있을 정도의 약한 내구성을 가졌다.

슬레이크 내구성 지수가 작은 경우에는 흙에 가까운 성질을 가지는 것으로 생각하여 Gamble(1971)이 제안한 흙에 대한 Atterberg 한계 시험을 통하여 얻어지는 소성지수와 2차 슬레이크 내구성 지수(I_{d2})를 이용하여 분류하기도 한다. 본 연구 시료를 분류한 결과 “Very low durability-Low plasticity”로 나타났다.

본 연구에서는 슬레이크 사이클 횟수에 따른 자연상태 미고결 이암 시료의 표면을 분석하기 위하여 전자주사 현미경(Scanning Electron Microscope)으로 1,500배 확대하여 살펴 보았다. Fig. 2는 1,500배 확대 사진으로 SEM 관찰결과, 슬레이크 시험 전 자연상태의 이암 시료는 일반적인 점토광물에

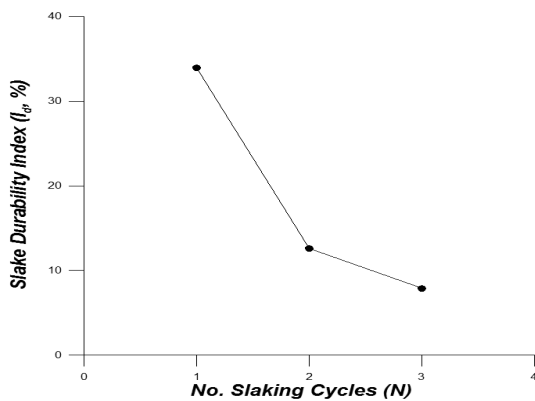


Fig. 1. Slake durability test results

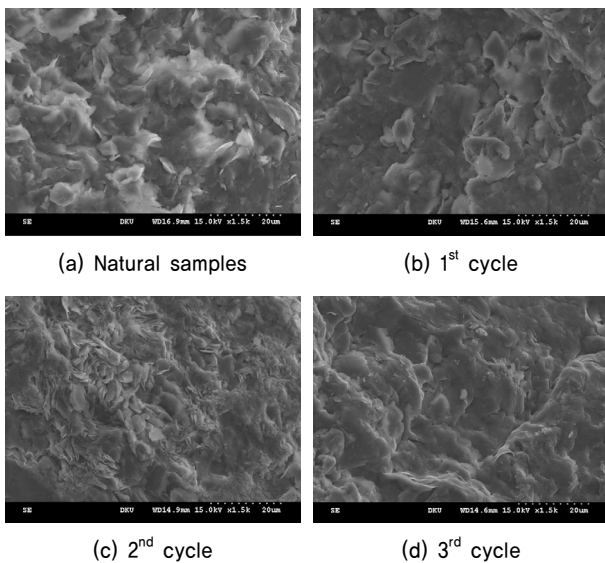


Fig. 2. SEM image (x1500)

서 나타나는 판형 구조이다. 슬레이크 사이클이 진행됨에 따라 시료의 구조를 이루고 있는 판들이 파쇄됨을 파악할 수 있다.

3.2 흡수팽창 지수

Fig. 3은 횡방향 구속 상태에서 축방향의 변형률 값이 일정할 때까지 측정된 시간의 경과에 따른 흡수팽창변형률 그래프이다. 흡수팽창변형률은 초기 약 10시간 이내에 급속한 증가를 보이다가 그 이후로는 증가속도가 점진적으로 둔화되었다. 미고결 이암 시료의 최대흡수팽창변형률 지수는 12.68%로 나타났다.

본 연구에서 사용된 시료는 암석이지만 흙과 매우 유사한 경향을 보이고, 팽창변형률에 대한 암석의 정확한 기준이 없기 때문에 흙의 관점에서 팽창 잠재성 기준과 비교하였다. 흙의 팽창 가능성을 나타내는 팽창 지수, EI(Expansion Index)는 Eq. (1)을 이용하여 구할 수 있다.

$$EI = \text{swell}(\%) \times \text{fraction passing No. 4} \quad (1)$$

Eq. (1)에 흡수팽창변형률 지수 12.68%와 4번체 통과율 95.91%를 적용하여 흙의 관점에서 자연상태 미고결 이암 시료의 팽창 지수 $EI=12.16$ 을 구할 수 있다. 미고결 이암 시료의 팽창 지수는 12.16의 낮은 팽창 지수를 보이며, 이는 Uniform Building Code(1968) 기준에 따라 분류하면 very low 등급에 해당된다. 팽창 잠재성은 매우 낮음으로 구분되어 팽창 자체가 문제를 야기하지 않을 것으로 판단되나, 이 암은 물을 흡수하게 되면 팽창하면서 입자 구조가 변하며 본연의 암의 성질을 잃어버리기 때문에 문제를 일으킬 수 있는 것으로 판단된다.

3.3 미소변형률 응력-변형률 거동

미고결 이암 시료의 동적 거동 특성 및 미소변형 영역에

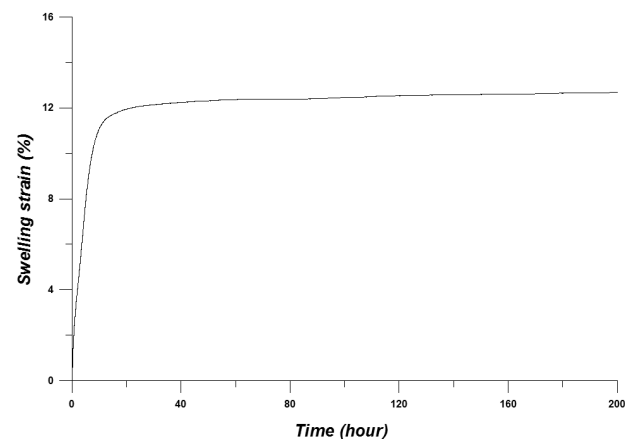


Fig. 3. Swelling test results

서의 변형률 거동을 확인하기 위해 자연상태의 시료를 함수비 5%, 10%, 11.38%로 각각 재성형하여 공진주시험을 수행하였다. 이때 구속압은 100kPa, 200kPa, 300kPa로 재하하였고, 각 구속압을 60min 동안 재하하여 압밀 후 실험을 실시하였다. Fig. 4는 각 함수비 및 구속압에 따른 전단탄성계수를 나타낸 것이다.

Fig. 5와 Fig. 6은 각각 함수비 및 구속압에 따른 전단탄성계수의 경향을 살펴보기 위한 그림이다. 동일한 함수비의

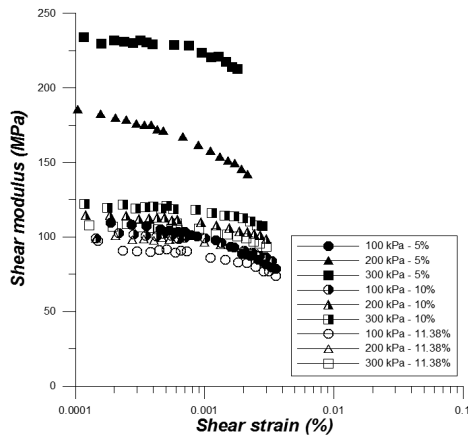


Fig. 4. Shear modulus with shear strain

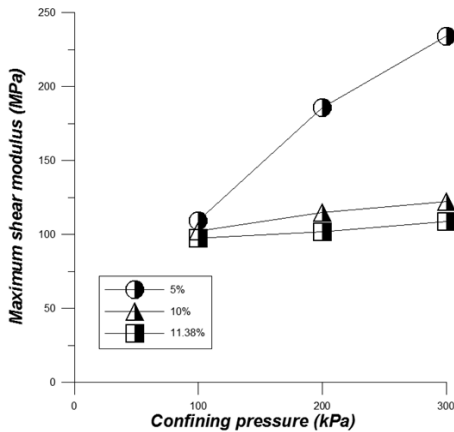


Fig. 5. Max. Shear modulus with confining pressures

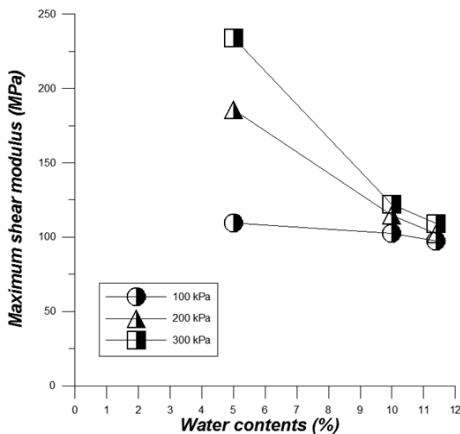


Fig. 6. Max. Shear modulus with water contents

경우 구속압이 증가함에 따라 전단탄성계수는 증가하는 경향을 보이지만, 동일한 구속압의 경우에는 함수비가 증가함에 따라 전단탄성계수가 감소하는 것을 확인할 수 있다.

공진주시험을 통해 자유진동감쇠비와 Half-power bandwidth 법을 이용하여 감쇠비를 획득할 수 있다. 본 연구에서는 Half-power bandwidth 법을 사용하여 감쇠비를 획득하였고, Fig. 7에 전단변형률에 따른 감쇠비의 변화를 나타내었다. 전단변형률에 따른 감쇠비의 변화는 전단변형률의 증가에

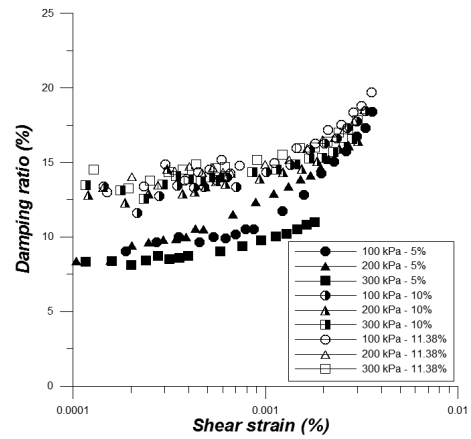


Fig. 7. Damping ratio with shear strain

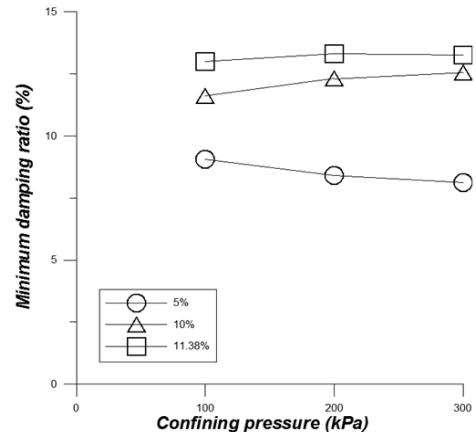


Fig. 8. Min. Damping ratio with confining pressure

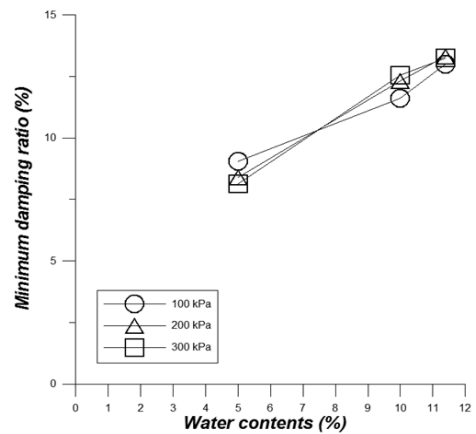


Fig. 9. Min. Damping ratio with water contents

따라 증가하는 양상을 나타낸다.

Fig. 8과 Fig. 9는 각각 함수비 및 구속압에 따른 감쇠비의 경향을 살펴보기 위한 그림이다. 동일한 함수비의 경우 구속압이 증가함에 따라 감쇠비는 뚜렷한 경향을 보이지 않지만, 동일한 구속압의 경우에는 함수비가 증가함에 따라 감쇠비가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

공진주시험 결과를 통하여 미소변형영역에서의 전단탄성계수와 감쇠비의 함수비 영향을 파악할 수 있었으며 이러한 영향이 미고결 이암지반의 사면 및 내진 설계 시 충분히 고려되어야 할 것으로 판단된다.

3.4 건조-습윤 하에서의 강도 특성

미고결 이암 시료의 건조-수침 사이클에 따른 강도 특성을 확인하기 위해 직접전단시험을 수행하였다. 자연상태로 채성형한 시료를 전단 후 1시간 수침, 1시간 건조 후 건조-수침 첫 번째 사이클의 2차 전단을 수행하였고, 2차 전단 수행 후 1시간 수침, 1시간 건조를 반복한 후 건조-수침 두 번째 사이클의 3차 전단을 수행하였다. 이때 수직응력은 100kPa, 200kPa, 300kPa로 하였다. 직접전단시험을 실시한 후 전단응력에 대한 수직응력을 도시하여 미고결 이암의 내부마찰각 ϕ 와 점착력 c 를 얻었고, 전단변위에 대한 전단응력을 측정하였다.

수침-건조 첫 번째 사이클 후 점착력은 50.5kPa에서 13.6 kPa로 감소하였다. 수침-건조의 반복에 따라 입자 사이로 물의 침투가 발생하면서 입자 간의 결합력이 약해져 결과적으로 점착력이 감소한 것으로 판단된다. 수침-건조의 두 번째 사이클 후 점착력이 0kPa이 된 것은 입자 간의 결합력을 완전히 잃은 것으로 보인다.

마찰각은 수침-건조 사이클의 반복에 따라 약간씩 상승

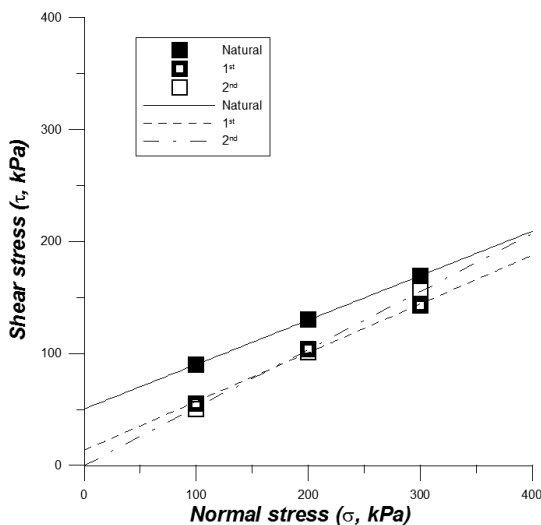


Fig. 10. Shear modulus

하였다. 이것은 입자 간의 결합력이 약해지면서 오히려 입자의 비표면적이 넓어짐에 따라 상승한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 경기도 여주지역 일대의 사면 절토 현장에 서 채취한 자연상태의 미고결 이암 시료를 대상으로 변형 특성을 알아보기 위하여 기본 물성 실험, Slaking 및 Swelling 시험을 수행하였고, 슬레이킹 사이클 횟수에 따른 SEM 촬영을 수행하였다. 또한 미고결 이암 시료의 강도 특성을 확인하기 위한 직접전단시험과 동적거동을 확인하기 위한 공진주시험을 수행하였다. 각각의 시험을 통하여 미고결 이암의 공학적 특성을 확인하고 시험 결과를 토대로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 슬레이크 내구성 시험 결과 Gamble(1971)에 의한 분류에 따르면 Very Low Durability 등급에 해당된다. 전자주사 현미경(SEM) 관찰 결과, 자연상태의 시료 표면은 넓은 판형 구조를 이루고 있다. 하지만 슬레이크 사이클 횟수가 늘어남에 따라 시료 표면의 파쇄 현상이 증가함을 확인하였다.
- (2) Swelling 시험 결과 초기 10시간 이내에 급속한 팽창 변형을 보이다가 그 이후에는 팽창 변형 속도가 수렴하였으며, 흡수팽창변형률 지수를 이용하여 흙의 팽창 가능성을 나타내는 팽창 지수를 구하여 비교하면 low 등급에 해당한다. 이암은 물을 흡수하여 팽창하면 입자 구조가 변하며 암의 성질을 잃기 때문에 문제가 될 수 있다.
- (3) 직접전단시험 결과 수침-건조 사이클의 반복에 따라 점착력은 감소하였고, 마찰각의 경우 약간 상승하였다. 이는 물의 침투에 따라 입자 간의 결합력이 약해지면서 발생하는 것으로 판단된다. 그러므로 물의 침투에 따른 전단강도 감소는 미고결 이암이 분포하는 지반의 구조물 설계 시 매우 주의해야 할 것으로 판단된다.
- (4) 미고결 이암은 동일한 함수비의 경우 구속압이 증가함에 따라 전단탄성계수는 증가하지만, 감쇠비는 뚜렷한 경향을 보이지 않았다. 동일한 구속압의 경우 함수비가 커질수록 전단탄성계수는 감소하는 경향을 보이지만, 감쇠비는 증가하는 경향을 나타내었다.

자연상태의 미고결 이암 시료는 매우 낮은 내구성을 가지고 있고, 흡수팽창변형에 있어 암의 관점에서 문제를 일으킬 수 있다. 또한 물의 침투에 의해 전단강도 및 전단탄성계수는 낮아지고, 감쇠비는 증가하기 때문에 건설 반복에

따른 이암의 공학적 특성을 파악하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 미고결 이암의 시료 채취의 한계로 인하여 직접전단시험, 공진주시험 및 삼축압축시험을 재성형 시료를 사용하여 연구하였기 때문에 자연상태의 불교란 시료로 연구를 하였을 때와 차이가 있을 것으로 판단된다. 따라서 미고결 이암의 불교란 시료의 채취법을 개발하여 자연 시료의 실질적인 거동을 파악하는 것이 중요하다고 생각된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(도심지 재난 대응형 방향성 굴착 시스템 개발)의 지원에 의해 수행되었습니다.

References

1. Anwar, H. Z., Shimada, H., Ichinose, M. and Matsui, K. (2000), Slaking phenomenon of the expandable clay-bearing rock, Proceedings of Indonesian Association of Geologists, Environmental geology & geological hazard, Vol. 3, pp. 65~67.
2. Dhakal, G., Yoneda, T., Kato, M. and Kaneko, K. (2002), Slake durability and mineralogical properties of some pyroclastic and sedimentary rocks, Engineering Geology, Vol. 65, pp. 31~45.
3. Gamble, J. C. (1971), Durability-plasticity classification of shales and other argillaceous rocks, Ph. D. Thesis, Univ. Illinois, USA, pp. 107~110.
4. Gokceoglu, C., Ulusay, R. and Sonmez, H. (2000), Factors affecting the durability of selected weak and clay-bearing rocks from Turkey, with particular emphasis on the influence of the number of drying and wetting cycles, Engineering Geology, Vol. 57, pp. 215~237.
5. Kim, Y. S., Hur, N. Y. and Park, S. H. (1996), Characteristics of slaking and changing of geotechnical properties in mudstone according to stress, Industrial Research Institute of Kyungpook University, Vol. 24, pp. 27~41 (in Korean).
6. Korean Geotechnical Society (2009), Engineering geology and rock engineering for geotechnical engineers, CIR, pp. 81~115 (in Korean).
7. Lee, K. H., Jung, D. S. and Yang, T. S. (2007), A study on the availability of pohang's mudstone as a reclamation material, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 23, No. 8, pp. 149~158 (in Korean).
8. Lee, K. H., Jung, D. S. and Kim, S. W. (2010), Engineering characteristics and pilot rest of pohang area's tertiary mudstone as earth filling material, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 26, No. 1, pp. 63~73 (in Korean).
9. Lee, Y. H. (1996), Slaking, swelling and shear strength characteristics of pohang mudrocks, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 12, No. 2, pp. 33~42 (in Korean).
10. Noh, G. (2006), A study on slaking and residual strength of mudrock, Master's thesis, Yeungnam University, pp. 28~47 (in Korean).
11. Olgaard, D. L., Urai, J., Dell'Angelo, L. N., Nuesch, R. and Ingram, G. (1997), The influence of swelling clays on the deformation of mudrocks, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci., Vol. 34, No. 3~4, pp. 235.e1~235.e15.
12. Pejon, O. J. and Zuquette, L. V. (2002), Analysis of cyclic swelling of mudrock, Engineering Geology, Vol. 67, Issues 1~2, pp. 97~108.
13. Uniform Building Code (1968), UBC standard No.29-2, International Conference of Building Officials, pp. 3~27.