

공진주/비틀전단시험을 이용한 화강풍화지반의 동적변형특성

Dynamic Deformation Characteristics of Granite Weathered Soils Using RC/TS Tests

김동수* · 고동희** · 윤준웅***

Kim, Dong-Soo · Ko, Dong-Hee · Youn, Jun-Ung

Abstract

In Korea, around one - third of the country is occupied by granite , and granite weathered soils are widely distributed. Most of the research on this soil has been performed using reconstituted specimens because of the extreme difficulty of undisturbed sampling due to the sensitive particle structures. Therefore, the comparisons of deformational characteristics, which is expressed in terms of shear and Young's moduli and damping ratio, obtained from the undisturbed and reconstituted specimens are important for the reliable understanding of soil behavior. In this study, the resonant column and torsional shear tests were performed on granite weathered soils in Korea, and the deformation characteristics of undisturbed and reconstituted soil on granite weathered soils were evaluated and compared.

Keywords : Granite weathered soil, Resonant column/Torsional shear test, Shear modulus, Damping ratio

요 지

화강암질은 우리나라의 3분의 1을 차지하고 있으며, 특히 화강풍화지반은 우리나라 전역에 걸쳐 널리 분포하고 있다. 화강풍화지반은 민감한 입자 구조를 가지고 있어 비교란시료를 채취하기가 매우 어려우며 이로 인해 대부분의 연구는 재성형 시료로 수행되어 지고 있는 실정이다. 그러므로 비교란 또는 재성형 시료로 부터 얻어지는 탄성계수와 감쇠비 등의 변형특성을 비교하는 것은 신뢰성 있는 지반 거동을 이해하는데 중요하다. 본 논문에서는 국내 화강풍화지반에 대해 다양한 공진주/비틀전단시험을 수행하였다. 그리고 화강풍화지반에 있어 비교란, 재성형 시료 각각의 탄성계수와 감쇠비 등의 변형특성이 비교되고 평가되었다.

주요어 : 화강풍화지반, 공진주/비틀전단시험, 전단탄성계수, 감쇠비

* 정회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수(dskim@kaist.ac.kr)
** 비회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정(landscape@kaist.ac.kr)
*** 비회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정(sayme43@kaist.ac.kr)

1. 서론

화강풍화토 및 풍화암은 화강질 암석이 풍화되어 생긴 지반으로서 우리나라 전역에 걸쳐 광범위하게 분포하고 있으며 도로, 지하철, 건물의 기초 등의 공사가 화강풍화토 지반에서 빈번히 행해지고 있는 등 현장에서 가장 쉽게 접하게 되는 건설재료이다. 흔히 현장에서 화강풍화지반은 성토재료나 기초지반으로서 양호하다고 인정되고 있으나 조성광물의 함유량과 풍화의 정도에 따라 그 공학적 성질이 크게 달라지는 형태를 보이고 있다. 화강풍화토는 겉보기에 고결 상태에 있고 단단해 보이지만 충격이나 기타의 교란작용을 받으면 쉽게 입자가 분리되는 구조적 불안정 상태에 있다(Onitsuka 등, 1985). 그리고 화강암의 구성 성분과 풍화작용의 종류, 정도에 밀접한 관계가 있으므로 이들 요소를 공학적 성질과 연관시키는 것이 필요하다.

이러한 화강풍화지반의 특수성과 연구의 필요성에 의해 근래 많은 연구가 진행되고 있으나 특수특성 및 강도특성의 연구가 많이 이루어진데 비해 미소변형률 영역의 변형특성과 동적물성에 관한 연구는 미비한 실정이다. 더구나 정적시험에서의 계측의 정확도의 증가로 인하여 정적물성치와 동적물성치 사이의 통념적 차이가 줄어들고 하중이 정적, 혹은 동적, 어떤 방식으로 유발되든 변형률의 크기가 지반의 거동을 예측하는 중요한 변수임이 확인되었으므로(김동수 등, 1997), 저변형률 ($10^{-5}\% < \gamma < 10^{-3}\%$) 및 중간변형률($10^{-3}\% < \gamma < 10^{-1}\%$) 하에서 화강풍화토 지반의 신뢰성 있는 변형특성의 측정은 실제 건설현장의 토목구조물의 동적해석 뿐 아니라 정적해석에서도 중요한 역할을 한다.

또한 화강풍화토는 충격에 민감한 구조로 되어있어 비교란 화강풍화토 지반의 특성과 다짐 화강풍화토 지반의 특성에 큰 차이가 보일 수 있다. 그럼에도 불구하고 비교란 시료를 채취하여 실험하기가 어렵기 때문에 현업에서는 교란된 시료를 채취하여 이로부터 물성치를 구하고 있다. 따라서 비교란 시료와 재성형된 시료와의 변형특성의 차이 또한 정확히 알 필요가 있다.

본 연구에서는 Stokoe식의 공진주/비틀전단(RC/TS) 시험기를 이용하여 저변형률 및 중간변형률에서의 화강풍화토 및 풍화암의 변형특성을 연구하였다. 또한 비교란

시료와 재성형 시료의 변형 특성을 비교하였다. 저변형률에서 정밀한 응력-변형률 관계를 얻었으며 동적시험인 공진주시험과 반복시험인 비틀전단시험을 동일한 공시체로 수행하여 넓은 전단변형률 영역($10^{-5}\% \sim 10^{-1}\%$)에서 비교하였다.

2. 시험시료 및 시험방법

2.1 시험시료

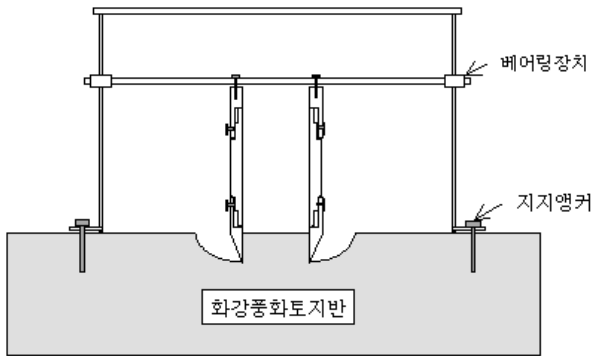
화강풍화토 지반의 가장 큰 특징은 불균질하고 불연속적이라는 것이다. 극단적으로 깊이 1~2m에서 암반과 토사의 차이를 보이는 경우도 있으며 불규칙하게 존재하는 무수한 불연속면이 지반의 거동에 결정적인 영향을 미치는 경우가 있다. 또한 시료의 교란정도에 따라서 강도 및 변형특성이 매우 민감하게 영향을 받으므로 교란되지 않은 시료의 채취가 필수적이며 현장에서의 시험도 필요하다.

화강풍화토는 약한 충격에도 구조가 쉽게 흐트러지므로 타입에 의한 시료채취가 어렵다. 화강풍화토의 비교란 시료 채취를 위한 연구가 진행되고 있으며 몇몇의 우수한 방법이 개발되었으나, 아직은 실내시험에 필요한 시료를 쉽게 얻을 수 있는 방법은 거의 없는 상태이다. 못타설법(nail sampler)이라고 부르는 블록샘플링법이 개발되었으며, 기존의 블록샘플링법에 비해 시료의 교란이 적고 안정적인 작업이 가능하나 실내시험에 필요한 시료로 성형하는 것은 여전히 큰 과제로 남는다(Nishida 등, 1987).

최근에는 액체질소를 이용하여 지반을 일시적으로 동결시켜서 시료를 채취하는 방법도 개발되었고, 블록샘플링법으로 시료를 채취한 후 동결시켜서 성형하는 방법도 사용되고 있다. 그러나, 동결에 의하여 발생하는 체적변화와 유발된 응력이 입자구조에 미치는 영향에 대해서는 아직까지 규명되지 않은 상태이다.

위와 같은 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 직경 50mm 시료의 공진주/비틀전단시험을 할 수 있는 비교란 시료를 얻기 위한 화강풍화토의 비교란 시료채취

기(정순용 등, 1997)를 사용하였다. 그림 1은 비교란 시료채취기로 시료를 채취할 때의 단면과 실제 현장에서의 비교란 시료채취 모습이다. 채취한 시료는 실험실로 운반하여 아래와 윗부분의 불필요한 부분을 제거하고 시험기에 거치하여 실험을 하였으며 제거된 흙을 이용하여 함수비를 측정하였다.



(a) 비교란 시료채취기의 개요도



(b) 비교란 시료의 현장 채취 모습

그림 1. 비교란 시료 채취방법

본 연구에서 대상으로한 화강풍화토 시료는 충청남도 홍성 지역의 화강풍화토로서 홍성남부 우회도로 축조 및 포장공사 현장 사면절토부에서 비교란 시료와 교란 시료를 채취하였다(고동희, 2001). 풍화암의 경우 신고리 원전 3, 4호기 부지의 화강풍화암 시료를 이용하여 실험을 수행하였다. 시험 시료는 신고리 원전 3, 4호기 건설을 위한 지반조사과정에서 시추공 GR-13에서 삼중관 시료채취기(triple tube sampler)를 이용하여 채취되었다.

시추공에서 채취된 시료 중 RS(Residual Soil) 및 CW(Completely Weathered) 등급의 시료는 샘플링 과정 등에서의 교란 및 풍화정도가 심하여 시료가 코어 형상을 유지하지 못하였고, HW(Highly Weathered)등급의 시료는 코어 형상이 유지되어 비교란 상태의 실험이 가능하였다(윤준용, 2003). 채취한 시료의 기본적인 물성은 표 1과 같다.

표 1. 화강풍화지반 시료의 기본물성

| 구 분 | 시료 1 | 시료 2 | 시료 3 | 시료 4 |
|---|------|------|------|------|
| 비중(G_s) | 2.65 | 2.64 | 2.65 | 2.65 |
| 자연함수비(W_n , %) | 18.4 | 13.3 | 1.3 | 1.0 |
| 현장단위중량(γ_v , t/m ³) | 1.77 | 1.73 | 2.42 | 2.35 |
| 통일분류법(USCS) | ML | SM | - | - |
| 시료분류(ISRM, 1978) | - | - | HW | HW |

2.2 시험장치

공진주/비틀전단시험은 지반의 동적물성치(탄성계수, 감쇠비 등) 규명에 사용되는 대표적인 실내시험장치로서 본 연구에서는 화강풍화지반의 변형률 크기에 따른 탄성계수와 감쇠비의 변화 등, 동적변형 특성을 알아보았다.

본 연구는 Stokoe식 공진주/비틀전단시험기를 이용하여 수행되었다. 본 시험기는 지반재료를 원통형으로 성형하여 바닥을 고정시키고, 상단부를 자유조건으로 유지하면서 비틀력을 재하하는 방식을 취한다. 이 시험기는 다음과 같은 장점을 가지고 있다. 첫째, 동적시험인 공진주 시험과 반복재하시험인 비틀전단시험을 동일한 공시체에 대하여 수행하기 때문에 두 시험결과의 효율적인 비교가 가능하다. 둘째, 순응도(compliance) 문제없이 저변형률($\gamma < 10^{-3}\%$) 이하에서의 비틀전단시험이 가능하다. 마지막으로, 비틀전단시험에서 하중주파수를 자유로이 조절할 수 있어서 주파수 변화에 대한 지반의 변형특성을 효과적으로 규명할 수 있다(김동수, 1995(a)).

2.3 시험방법

비교란 시료를 공진주/비틀전단시험기에 거치시킬 때 시료와 top cap 또는 base pedestal사이의 bedding error를 줄이기 위해 석고를 바른다. 석고를 바르고 1시간 이상 기다린 후 가진판(drive plate)에 시료를 연결하였다.

재성형 시료는 현장지반의 함수비와 단위중량을 맞추어 시료를 5층의 과소다짐법(under-compaction method)으로 성형하여 시험기에 거치하고 시험하였다. 과소다짐법은 여러층으로 나누어 다지는 경우 동일한 다짐높이를 목표로 다지면 아래층이 더 조밀하게 다져지므로 각 층의 동일한 시료 무게를 서로 다른 다짐높이로 성형하여 시료 전체에 균일한 건조단위중량을 확보하는 시료성형 방법이다(Ladd, 1978).

풍화암 시료의 경우에는 비교란 시험시편의 단위중량을 측정 후 시험을 수행하였고, 시험을 수행 후 부수어 비교란 시험 시편과 동일한 함수비 조건에서 비교란 시료의 단위중량에 근접한 단위중량을 갖도록 재성형하여 시험을 실시하였다. 하지만 원지반과 같은 밀도로 성형하는 것은 사실상 불가능하므로 비교란 시료와의 동일비교에는 어려움이 따른다.

시료를 공진주/비틀전단 시험기에 거치하고 시험준비가 완료되면 구속응력을 가하여 시험을 수행하였다. 시료 내에 균일한 구속응력분포를 위하여 각 구속압단계에서 구속을 재하한 후 4시간을 기다린 후, 변형률 크기를 증가시키며 배수상태에서 시험을 수행하였다. 50kPa, 100kPa, 150kPa, 200kPa, 300kPa, 400kPa 순으로 구속압을 재하하면서 시험을 수행하였고, 150kPa과 300kPa에서는 저변형률에서 고변형률까지 변형률을 증가시키면서 공진주시험만을 수행하였고, 나머지 구속압단계에서는 반복하중의 영향을 보기 위해 비틀전단시험을 먼저 수행한 후 공진주시험을 수행하고 다시 비틀전단시험을 수행하였다.

비틀전단시험은 먼저 하중주파수의 영향을 검토하기 위하여 저변형률 상태에서 입력하중을 일정하게 하면서 하중주파수를 0.05Hz, 0.1Hz, 0.5Hz, 1Hz, 5Hz,

10Hz로 증가시키면서 시험을 실시하였고, 저주파통과필터(low-pass filter)의 cut-off 주파수는 하중주파수의 10배 이상으로 하였으며, 간격측정기 신호와 입력하중 신호 모두를 필터를 통과시켜 신호를 획득하였다. 하중주파수의 영향시험이 끝나면 하중주파수를 0.5Hz로 입력하중을 변화시켜서 저변형률에서 고변형률까지 변형률을 증가시키면서 시험을 실시하였다. 각 단계별 반복재하 회수는 10회로 하였다.

본 연구에서는 홍성지역의 비교란, 교란 화강풍화토 및 고리지역의 풍화암 시료에 관하여 공진주/비틀전단시험을 수행하였으며 전체 수행된 실험의 종류는 표 2와 같다.

표 2. 시료의 종류와 실험방법

| 시료의 종류 | | 간극비, e | 시험명 | 실험방법 | 구속압 단계 (kPa) |
|------------|-----|--------|--------|-------|-----------------------------|
| 시료 1 (풍화토) | 비교란 | 0.91 | uw1-rt | RC/TS | 50, 100, 150, 200, 300, 400 |
| | 재성형 | 0.90 | dw1-rt | RC/TS | 50, 100, 150, 200, 300, 400 |
| 시료 2 (풍화토) | 비교란 | 0.73 | uw2-rt | RC/TS | 50, 100, 150, 200, 300, 400 |
| | 재성형 | 0.74 | dw2-rt | RC/TS | 50, 100, 150, 200, 300, 400 |
| 시료 3 (풍화암) | 비교란 | 0.10 | uw3-rt | RC/TS | 100, 200, 300, 400 |
| | 재성형 | 0.27 | dw3-rt | RC/TS | 100, 200, 300, 400 |
| 시료 4 (풍화암) | 비교란 | 0.13 | uw4-rt | RC/TS | 110, 220, 330, 440 |

3. 시험결과

동적변형특성인 전단탄성계수와 감쇠비는 변형률 크기에 큰 영향을 받는다. 그러나, 저변형률(10^{-4} %이하)에서 측정되는 변형특성은 변형률 크기에 관계없이 일정한 값을 보인다. 이때, 전단탄성계수는 최대값을 가지며 이를 최대전단탄성계수(G_{max})라 하고, 감쇠비는 최소값을 가지며 최소감쇠비(D_{min})라 한다. 반면 변형률이 커짐에 따라 전단탄성계수는 감소하고 감쇠비는 증가하는 비선

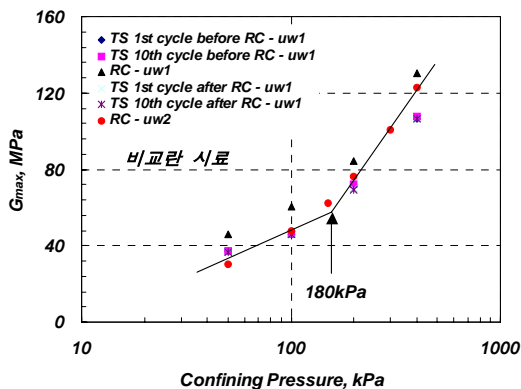
형 거동을 보인다. 이러한 현상 때문에 전단탄성계수와 감쇠비는 저변형률($10^{-4}\%$ 이하)과 고변형률($10^{-4}\%$ 이상)로 나누어 고려되며, 본 논문에서도 저변형률 특성과 고변형률의 비선형거동으로 나누어 결과를 분석하였다.

3.1 저변형률영역의 동적변형특성

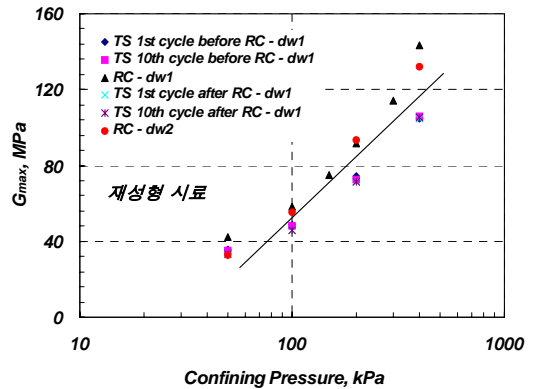
3.1.1 최대전단탄성계수

그림 2는 공진주/비틀전단시험에 의한 비교란 시료와 재성형 시료에 대한 최대전단탄성계수와 구속압과의 관계를 나타내는 그림이다. 각 시료에 대해 최대전단탄성계수의 구속압 의존성을 추세선으로 나타내었다. 비교란, 재성형 화강풍화토 모두 최대전단탄성계수가 구속압에 따라 증가하는 경향을 보이며 특히 비교란 화강풍화토의 전단탄성계수-구속압 대수 관계에서는 구속압의 기울기가 꺾인 직선의 형태로 약 180kPa 정도에서 마치 과압 밀된 듯한 걸보기 선행압밀하중이 나타났다. 이에 반해 재성형 시료의 경우는 전체적으로 증가하는 경향을 보이거나 비교란 시료와 같은 뚜렷한 걸보기 선행압밀하중은 나타나지 않았다.

이는 다짐에 의해 본래의 화강풍화토의 구조가 붕괴되고 새로운 입자의 배열이 이루어진 것으로 추정된다. 또한 입자파쇄가 일어나 화강풍화토의 구성입자가 바뀌는 것도 하나의 이유로 생각되어질 수 있다.

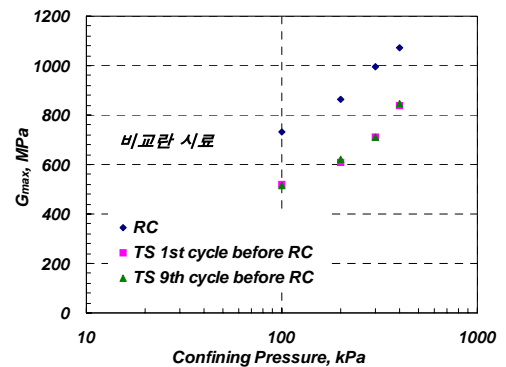


(a) 비교란 시료(uw1-rt, uw2-rt)

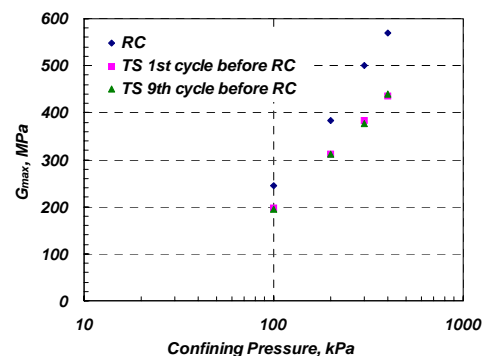


(b) 재성형 시료(dw1-rt, dw2-rt)

그림 2. 화강풍화토의 최대전단탄성계수와 구속압과의 관계



(a) 비교란 시료(uw3-rt)



(b) 재성형 시료(dw3-rt)

그림 3. 풍화암의 최대전단탄성계수와 구속압과의 관계

그림 2에서 보면 공진주시험의 전단탄성계수값이 비틀전단시험결과 보다 크게 나타났는데 이는 비틀전단시험의 전단탄성계수 값이 진동주파수 0.5Hz에서 구한 반면

공진주시험에서의 화강풍화토의 공진주파수는 이보다 훨씬 크기 때문이다. 이 차이의 보정을 위해 진동주파수의 영향에 대한 고려가 필요하다고 생각되어진다.

그림 3은 풍화암에 대한 최대전단탄성계수와 구속압과의 관계를 나타내는 그림이다. 비교란 풍화암 시료의 경우 겔보기 선행압밀하중을 보이지 않고 있는데 이는 재하한 구속응력이 선행압밀하중 상태에 도달하지 않았기 때문으로 판단된다.

Hardin(1978)이 제안한 최대전단탄성계수의 실험식을 OCR과 소성지수의 영향이 무시되는 사질토에서 단순화시키면 식 (1)과 같다.

$$G_{max} = S_m F(e) P_a^{1-n} (\sigma'_m)^n \quad (1)$$

여기서, S_m = 물질 강성계수(material stiffness coefficient)

$$F(e) = \frac{1}{0.3 + 0.7 e^2} \quad (\text{간극비 함수})$$

P_a = 대기압 (무차원 계수)

σ'_m = 평균 유효구속응력

n = 구속압 영향계수

여기서 S_m 과 n 은 각각 구속응력을 달리한 실내시험 결과로부터 대수-구속응력과 대수-최대전단탄성계수 관계의 절편과 기울기로부터 계산하였다.

본 연구에서 시험을 수행한 풍화토 및 풍화암의 최대전단탄성계수에 대해 좀 더 고찰하여 보기 위하여, 식 (1)을 이용하여 구한 물질 강성계수, S_m 및 구속압 영향계수, n 값을 비교하여 보았고, 이를 표 3에 나타내었다.

표 3. 풍화토 및 풍화암 시료에 대한 S_m 및 n 값

| 시료 종류 | 성형 조건 | 시험명 | S_m | n |
|-------|-------|---------------------|-------|-------|
| 풍화토 | 비교란 | RC/TS 겔보기 선행압밀 전 | 1350 | 0.328 |
| | | 겔보기 선행압밀 후 | 664 | 0.612 |
| | 재성형 | RC/TS | 855 | 0.472 |
| 풍화암 | 비교란 | uw3-rc | 2205 | 0.281 |
| | | uw3-ts | 1538 | 0.342 |
| | 재성형 | dw3-rc | 864 | 0.618 |
| | | dw3-ts | 694 | 0.587 |

재성형 풍화암 시료의 경우 구속압 영향계수, n 값이 다른 풍화토 시료에 대한 값과 비슷한 값을 가지지만, 비교란 풍화암 시료의 경우 n 값이 상당히 작은 것을 확인할 수 있다. 비교란 풍화암 시료의 n 값은 겔보기 선행하중 이전의 값과 유사하며, 이는 아직 겔보기 선행하중에 도달하지 않아 구속압 영향이 작은 것으로 판단된다.

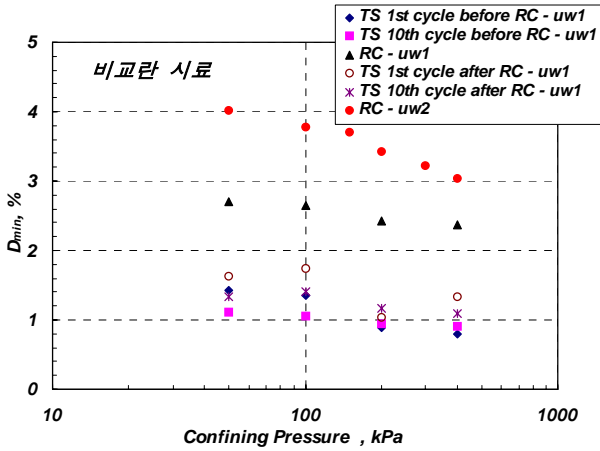
S_m 값의 절대적인 크기를 비교하여 볼 때, 비교란 풍화암시료의 경우 재성형 풍화토 및 풍화암 시료와 비교하여 S_m 값이 상당히 큰 값을 나타내고 있다. 이는 비교란 풍화암 시료의 경우 흙입자간의 결합력이 매우 크게 존재하기 때문이라 생각된다.

3.1.2 최소감쇠비

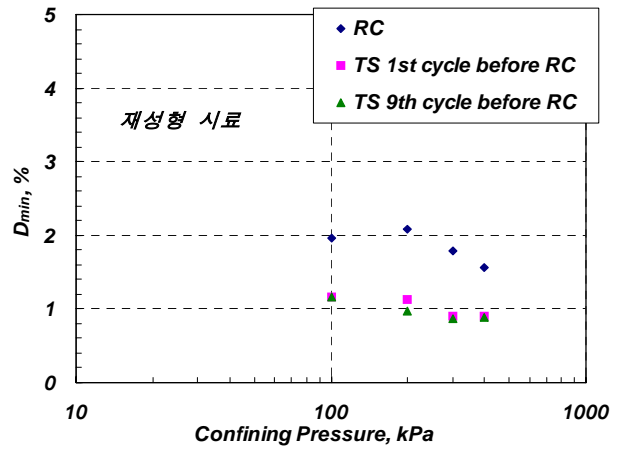
본 논문에서는 감쇠비 산정시 비틀전단시험을 이용한 경우에는 시험 주파수 0.5Hz에서 시스템 감쇠비(equipment damping)가 충분히 작다고 판단하여 보정을 하지 않았으며, RC시험을 통하여 획득한 경우에는 시험결과 감쇠비에서 주파수에 따라 미리 산정되어 있는 시스템 감쇠비를 차감하여 시스템 감쇠에 의한 영향을 보정하였다.

화강풍화토의 최소감쇠비(D_{min})와 구속압의 관계는 그림 4와 같다. 비교란 시료의 경우 구속압이 증가함에 따라 감쇠비가 감소하는 경향을 보였고 재성형 시료의 경우 구속압에 그다지 영향을 받지 않았다. 풍화암의 경우 대체적으로 구속압의 영향을 받지 않는 모습을 나타냈다(그림 5). D_{min} 값은 비교란, 재성형에 큰 차이 없이 풍화토의 경우 0.08~4%의 범위, 풍화암은 0.09~2.1%의 범위에서 분포하였다. 일반적으로 공진주 시험에서 얻은 값이 큰 것은 하중주파수의 영향으로 판단된다.

또한 비교란, 재성형 시료 모두 감쇠비는 하중반복횟수에 따른 영향을 받지 않고 다양한 분포를 보였다.

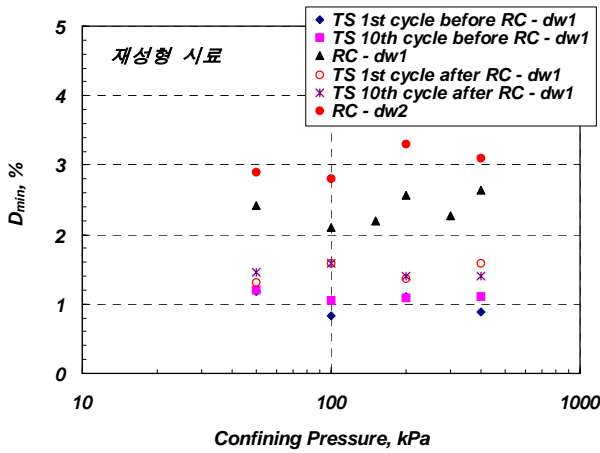


(a) 비교란 시료(uw1-rt, uw2-rt)



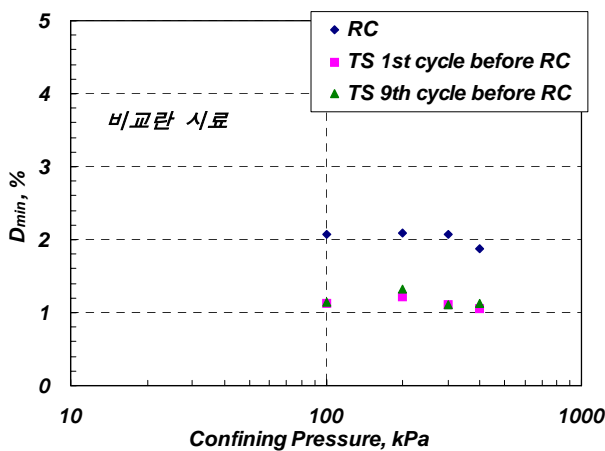
(b) 재성형 시료(dw3-rt)

그림 5. 풍화암의 최소감쇠비와 구속압과의 관계



(b) 재성형 시료(dw1-rt, dw2-rt)

그림 4. 풍화토의 최소감쇠비와 구속압과의 관계



(a) 비교란 시료(uw3-rt)

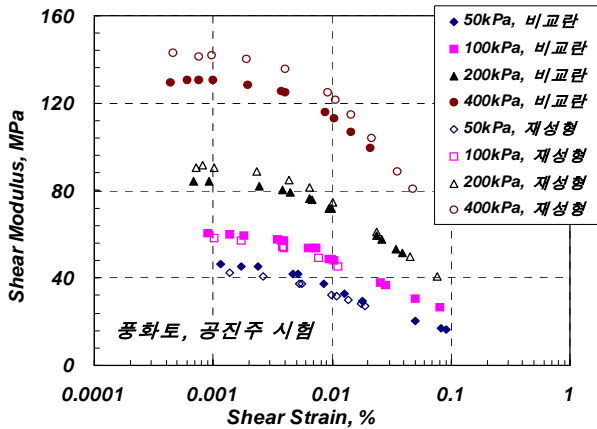
3.2 비선형변형특성

그림 6은 풍화토 및 풍화암의 비교란, 재성형 시료의 구속압별 전단탄성계수 감소곡선을 나타낸 것이고 그림 7은 풍화토 결과에 있어 Ramberg-Osgood 모델(Ramberg and Osgood, 1943)을 이용하여 정규화 전단탄성계수 감소곡선을 fitting한 결과이다. 각 그림은 공진주시험의 결과를 이용하여 나타내었다.

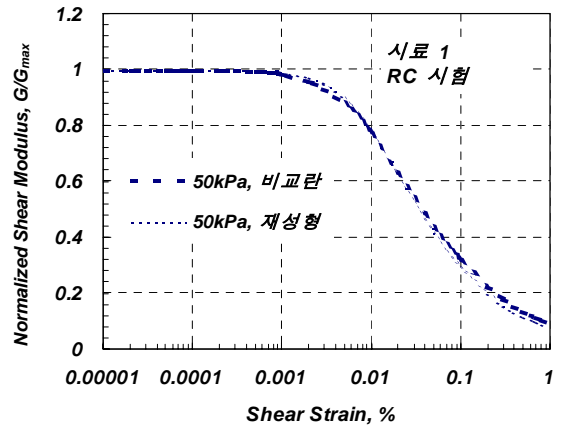
비교란, 재성형 시료 모두 구속압이 증가함에 따라 선형영역이 증가하나 큰 구속압의 영향을 보이지는 않는다.

그리고 화강풍화토 비교란 시료와 재성형 시료의 정규화 전단탄성계수 감소곡선은 비슷한 모양을 보이지만 재성형 시료의 전단탄성계수 감소정도가 상대적으로 커서 비선형성이 나타나는 중간변형률 부분이 비교란 시료의 아래에 위치한다. 이는 구속압이 낮을 때 보다 높을 때 차이가 더 크다. 자세히 살펴보기 위해 구속압 50kPa과 400kPa의 경우를 그림 8에 나타내었는데 구속압이 클 때 비교란과 재성형 시료의 전단탄성계수 차이가 더 크게 나타남을 알 수 있다.

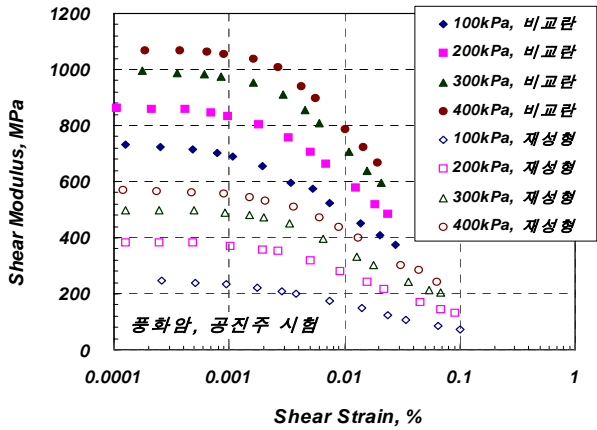
풍화암의 경우 비교란, 재성형 시료의 결과가 거의 일치하였으며 구속압의 영향도 거의 받지 않는 것으로 나타났다(그림 9).



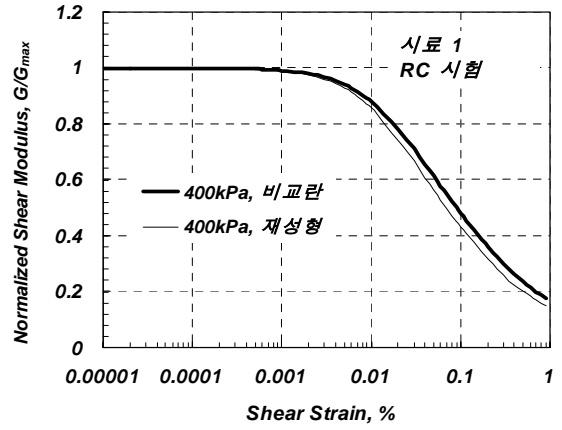
(a) 비교란, 재성형 화강풍화토의 구속압별 전단탄성계수 감소곡선(uw1-rt, dw1-rt)



(a) 낮은 구속압, 50kPa



(b) 비교란, 재성형 화강풍화암 시료의 구속압별 전단탄성계수 감소곡선(uw3-rt, dw3-rt)



(b) 높은 구속압, 400kPa

그림 6. 화강풍화지반의 구속압별 전단탄성계수 감소곡선

그림 8. 구속압별 정규화 전단탄성계수 감소곡선(uw1-rt, dw1-rt)

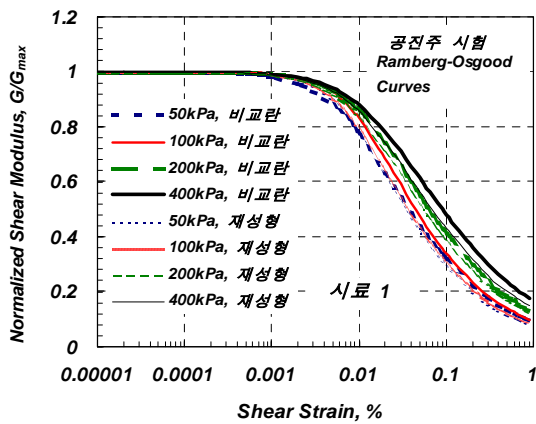


그림 7. 비교란, 재성형 화강풍화토의 구속압별 정규화전단탄성계수 감소곡선(uw1-rt, dw1-rt)

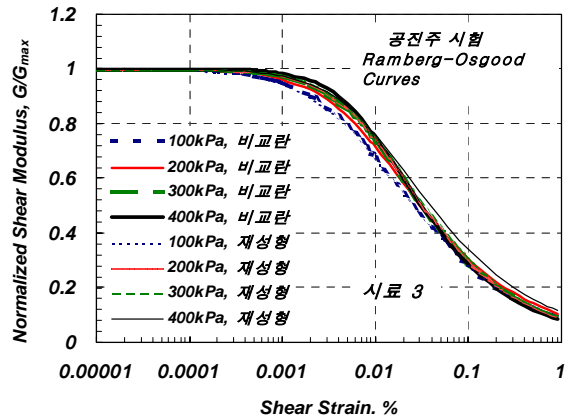
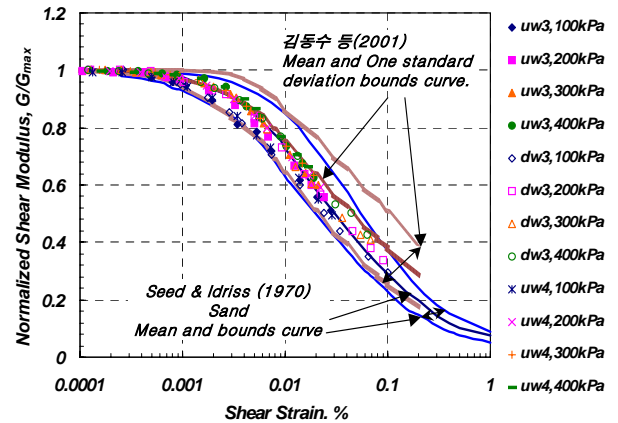


그림 9. 비교란, 재성형 화강풍화암 시료의 구속압별 정규화전단탄성계수 감소곡선(uw3-rt, dw3-rt)

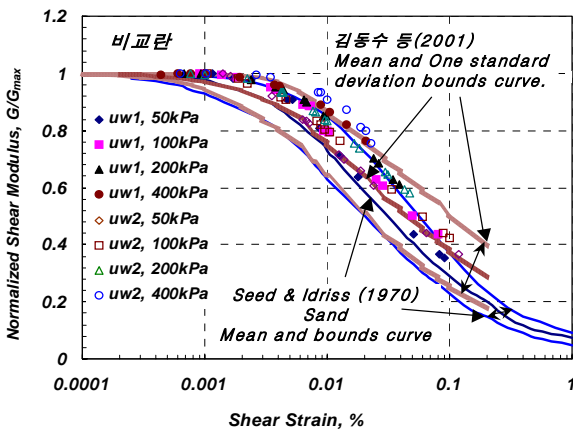
그림 10은 화강풍화토, 풍화암 비교란 시료와 재성형 시료의 정규화 전단탄성계수 감소곡선을 Seed와 Idriss의 모래시료에 대한 대표곡선과 김동수 등(2001)에 의해 제시된 재성형 풍화토 시료에 대한 평균곡선과 비교한 결과이다. 풍화토의 경우 모래에 대한 정규화 전단탄성계수 감소곡선의 상부한계선에 대체로 위치하는 경향을 보이고 풍화암은 Seed와 Idriss의 대표곡선의 mean 값에 분포하는 것을 알 수 있으며, 재성형 및 비교란 풍화토, 풍화암 시료 모두 기존의 재성형 풍화토 시료에 대한 시험결과(김동수 등, 2001)의 범주에 포함되는 것을 알 수 있다. 그리고 풍화토 및 풍화암 시료 모두 정규화 전단탄성계수 감소곡선이 교란, 비교란 여부에 따라 크게 영향을 받지 않는 것을 볼 수 있고, 따라서 풍화지반의 비선형변형특성의 경우 교란 시료를 채취하여 비교란 비선형성 거동을 예측하는 것이 유용하다고 판단된다.



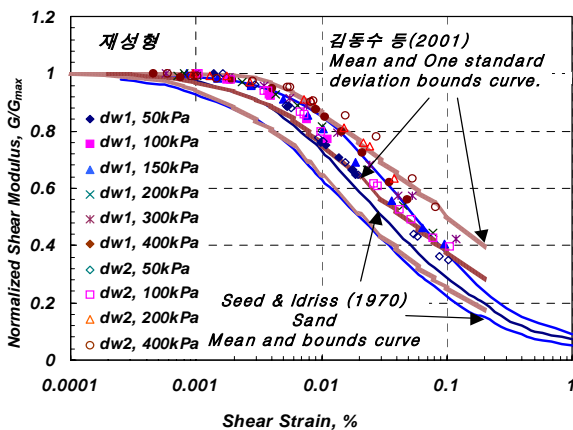
(c) 풍화암 시료(uw3-rt, dw3-rt, uw4-rt)

그림 10. 정규화 전단탄성계수 감소곡선과 Seed와 Idriss 대표곡선의 비교

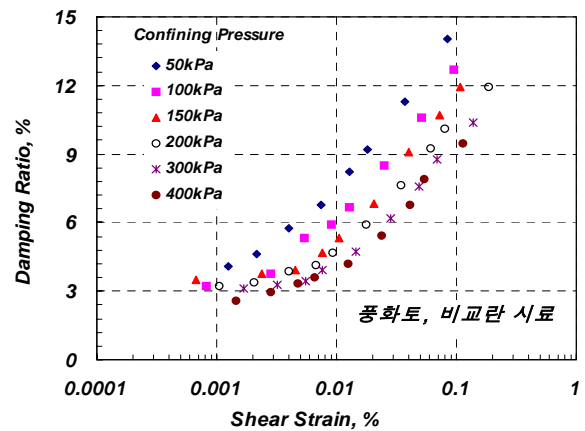
그림 11, 12는 화강풍화지반의 비교란 시료와 재성형 시료의 감쇠비를 비교한 것이다. 각 그림에서 구속압 별로 공진주 시험의 결과를 도시하였다. 풍화토 비교란 시료의 감쇠비는 구속압이 증가함에 따라 감소하였으며 구속압에 따른 감쇠비의 변화폭이 큰 것을 알 수 있다. 비교란 시료가 구속압이 증가함에 따라 감쇠비가 줄어들므로써 구속압에 따라 서로 다른 감쇠비 곡선을 보이는데 반해 재성형 시료는 하나의 곡선으로 대표되어 짐을 알 수 있다. 풍화암의 경우는 비교란, 재성형 시료의 차이가 거의 나타나지 않았으며 비교란 풍화토에 비해 구속압의 영향을 더욱 작게 받는 것으로 나타났다.



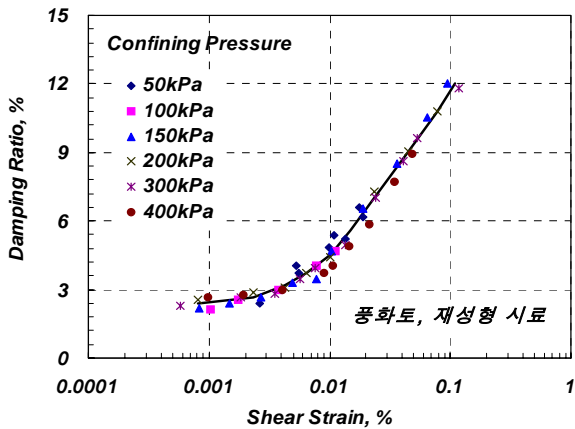
(a) 비교란 풍화토 시료(uw1-rt, uw2-rt)



(b) 재성형 풍화토 시료(dw1-rt, dw2-rt)

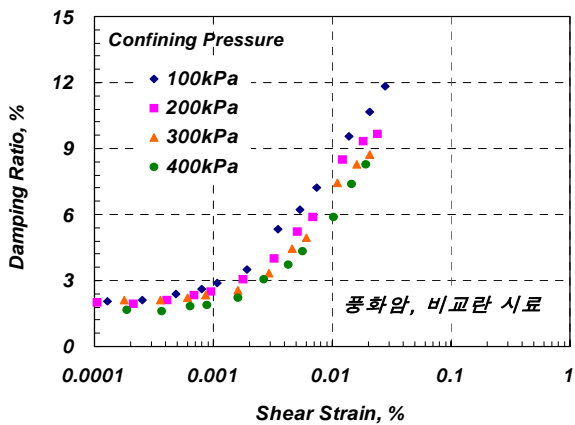


(a) 비교란 시료(uw2-rt)

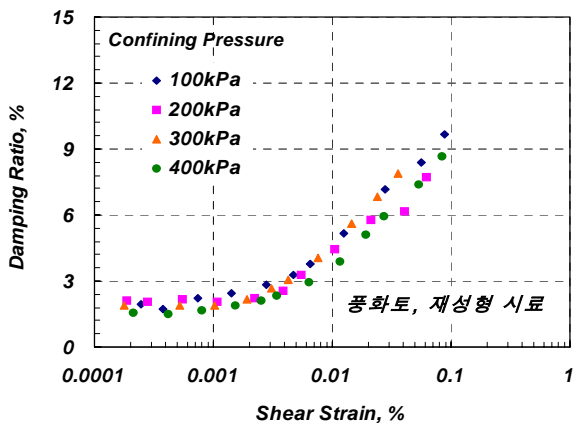


(b) 재성형 시료(dw1-rt)

그림 11. 풍화토의 구속압별 감쇠비-변형률 곡선



(a) 비교란 시료(uw3-rt)



(b) 재성형 시료(dw3-rt)

그림 12. 풍화암의 구속압별 감쇠비-변형률 곡선

4. 결론

본 연구에서는 Stokoe식의 공진주/비틀전단시험기를 이용하여 저변형률 및 중간변형률하에서 화강풍화토 및 풍화암의 변형특성을 실험적으로 연구하였다. 비교란, 재성형 시료를 사용하였으며 공진주 및 비틀전단시험을 동일한 시료로 시험하였다. 본 연구의 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 화강풍화토, 풍화암의 비교란 시료 및 재성형 시료의 최대전단탄성계수는 구속압이 증가함에 따라 증가하는 경향을 뚜렷이 보였다. 풍화토 비교란 시료의 경우 약 180kPa의 겉보기 선행압밀하중을 발견할 수 있었으나 재성형 시료에서는 그러한 현상을 보이지 않았다. 비교란 화강풍화암 시료는 재성형 화강풍화암 및 화강풍화토 시료에 비해 확연히 큰 최대전단탄성계수를 가졌고, 이는 비교란 풍화암 시료의 경우 입자간 결합력이 크게 존재하기 때문이라 판단된다. 또한, 비교란 화강풍화암 시료는 재성형 화강풍화암 및 풍화토 시료와 비교하여 구속압에 의한 영향정도가 작음을 볼 수 있다.
2. 화강풍화토 비교란 시료의 최소감쇠비는 구속압이 증가함에 따라 감소하였으나 재성형 시료의 경우 구속압의 영향을 받지 않았다. 풍화암의 경우 비교란, 재성형 모두 구속압의 영향을 받지 않았다.
3. 화강풍화지반 시료의 비선형 변형특성은 구속압의 영향을 받았으나 사질토와 같은 큰 차이를 보이지 않았다. 풍화토의 경우 비교란, 재성형 시료 모두 Seed-Idriss의 모래시료 대표곡선의 상부한계선에 위치하였으며 풍화암의 경우 대표곡선의 mean 값과 거의 일치하였다. 그리고 풍화토 및 풍화암 시료 모두 정규화 전단탄성계수 감소곡선이 교란, 비교란 여부에 따라 크게 영향을 받지 않았고, 따라서 풍화지반의 비선형변형특성의 경우 교란 시료를 채취하여 비교란 비선형성 거동을 예측하는 것이 유용하다고 판단된다.
4. 화강풍화토 비교란 시료의 감쇠비-변형률 곡선은 구

속압의 영향을 받아 구속압이 커질수록 같은 변형률에서 감쇠비가 줄어들었으나 재성형 시료의 경우 구속압의 영향을 받지 않고 하나의 곡선으로 대표되었다. 풍화암의 경우 비교란, 재성형의 결과가 거의 일치하였으며 구속압의 영향이 풍화토에 비해 매우 적게 나타났다.

5. 전체적인 연구 결과로 보아 화강풍화토는 사질토와 점성토의 중간적인 성격을 갖는 것으로 판단되어진다. 또한 비교란 시료와 재성형 시료 사이에 변형특성의 차이가 발생하였는데 이는 주로 구성입자의 구조적 결합의 파괴로 인한 cementation 효과의 감소와 입자 재배열로 인한 것이라 생각된다. 풍화암의 경우 비교

란, 재성형의 결과가 유사했으며 풍화토에 비해 구속압의 영향을 적게 받았다. 하지만 풍화암 재성형 시료의 경우 똑같은 밀도로 성형이 불가능하므로 단순비교는 무리가 있다고 생각된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2001-000-00482-0) 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

(접수일자 : 2003년 7월 25일)

참 고 문 헌

1. 고동희(2001), 미소변형 삼축시험과 공진주/비틀전단시험을 이용한 화강풍화토의 변형특성 연구, 석사학위논문, 한국과학기술원.
2. 김동수(1995), 공진주/비틀전단(RC/TS)시험을 이용한 건조사질토의 변형특성, 한국지반공학회 논문집 제11권 제1호, pp. 101~112.
3. 김동수, 권기철, 정순용, 박재영(1997), 실내시험 및 현장시험을 통한 지반의 비선형 변형 특성 평가, 한국지반공학회, 제13권, 제5호, pp. 89~100.
4. 김동수, 추연욱(2001), 공진주시험을 이용한 국내 비점성토 지반의 동적변형특성, 한국지반공학회 논문집 제17권 제5호, pp. 115~128.
5. 윤준웅(2003), 공진주/비틀전단 시험과 미소변형 삼축시험을 이용한 화강풍화지반의 변형거동특성 연구, 석사학위논문, 한국과학기술원.
6. 정순용, 이승래, 김동수, 권기철(1997), 화강풍화토의 거동특성 규명을 위한 비교란 시료채취기 개발, 한국지반공학회지, 제13권, 제6호, pp. 13~23.
7. ISRM(1978), Suggested Methods for Determining in Situ Deformability of Rock, September.
8. Hardin, B. O.(1978), The nature of Stress-Strain Behaviour for Soils, Proceedings, Earthquake Engineering and Soil Dynamics, ASCE Pasadena, California, Vol. 1, pp. 3~89.
9. Ladd, R. S.(1978), Preparing Test Specimens Using Undercompaction, Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 1, No. 1, March, pp. 16-23.
10. Nishida, K. and Aoyama, C.(1987), Permeability of undisturbed decomposed soil, Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Eng., 8(2), pp. 115-126.
11. Onitsuka, K., Yositate, S., Nanri, M.(1985), Mechanical Properties and Strength Anisotropy of Decomposed Granite Soil, Soil and Foundations, Vol. 25, No. 2, pp. 14~30.
12. Ramberg, W. and Osgood, W. R.(1943), Description of stress-strain curves by three parameters, Technical Note 902, National Advisory Committee for Aeronautics, Washington, D. C.

13. Seed, H. B. and Idriss, I. M.(1970), Soil Moduli and Damping Factors for Dynamics Response Analysis, Report No. EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley, Sept., p. 37.
14. Seed, H. B., Robert, T. W., Idriss, I. H., and Tokimatsu, K.(1984), Moduli and Damping Factors for Dynamic Analysis of Cohesionless Soils, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, UCB/EERC-84/14.