

채취방법과 성형방법이 화강 풍화토의 응력-변형률 거동에 미치는 영향

조 완 제

단국대학교 토목환경공학과
(2010. 2. 22. 접수 / 2010. 4. 12. 채택)

Influence of Sampling and Preparation Method on Stress-Strain Behavior of Weathered Granite Soils

Wanjei Cho

Department of Civil and Environmental Engineering, Dankook University
(Received February 22, 2010 / Accepted April 12, 2010)

Abstract : Since various weathered soils are encountered in many domestic construction sites, it is necessary to estimate characteristics of natural weathered soils. However, the remolded sample of weathered soils are commonly used to estimate their characteristics because it is very difficult to sample weathered soils in undisturbed states. However, it is well known that the behavior of remolded sample is different from that of the undisturbed sample particularly in the dynamic response, because the particle structure of undisturbed sample maintains its original structure from the mother rock. Thus, to evaluate the influence of sampling method and preparation method on stress-strain behavior, the resonant column tests were performed on the block, tube samples, remolded samples with static compression and remolded samples with tamping of the weathered granite soils. The shear modulus of the remolded sample with tamping is larger than the other samples presumably due to the high tamping pressure enough to induce particle breakage. The tube samples show larger damping ratios than other samples. Furthermore, one-dimensional ground response analysis was performed to compare the results qualitatively.

Key Words : weathered granite soils, sampling method, shear modulus, damping ratio

1. 서론

국내의 건설 현장에서 광범위하고 다양한 형태로 접하게 되는 화강풍화토는 우리나라 전역에 걸쳐 광범위하게 분포하는 흙으로 화강암질 암석이 풍화된 잔적토를 의미하며, 넓게는 이에 의해 형성된 붕적토를 포함시키기도 한다¹⁾. 불교란 시료의 채취가 어려워 대부분의 연구에서 채취된 교란 시료의 재성형 시료로써 그 역학적 특성을 파악하고 있는 실정이다. 하지만 화강풍화토는 그 조성광물의 함유량과 풍화의 정도에 따라 그 공학적 성질이 크게 달라지는 특성이 있고, 또한 겉보기에 고결 상태에 있고 단단해 보이지만 충격이나 기타의 교란 작용을 받으면 쉽게 입자가 분리되는 구조적 불안정 상태에 있다^{1,2)}. 또한 충격에 민감한 구조로 되어 있어 불교란 화강풍화토 지반의 특성과 재성형 화강풍화토 지반의 특성에 큰 차이를 보일 수 있다^{2,6)}.

국내에서는 우리나라 전 지역에 가장 넓게 분포하는 화강풍화토의 특수성과 연구의 필요성에 비해 밝혀진 특성이 적다. 최근에 화강풍화토의 입자과쇄 및 강도특성 등에 대한 연구가 활발히 진행 중이나, 미소 변형률 영역의 변형 특성, 응력-변형률 특성에 관한 연구는 미미한 실정이다⁸⁻¹¹⁾. 특히 불교란 화강풍화토에 대한 연구가 미비한 실정이며, 여러 연구자들이 화강풍화토의 불교란 시료 채취를 위한 장비개발에 주력하여 몇몇 우수한 방법들이 개발되었으나 삼축압축시험 및 공진주 시험을 위한 원통형 시료를 얻거나 블록샘플을 성형하기는 매우 어려운 실정이다¹²⁾.

최근 들어 국외는 물론 국내에서도 지진의 발생 빈도가 높아지고 있고 지진에 대한 피해는 대비태세의 유무에 따라 극명하게 달라져 내진설계에 대한 필요성이 부각되고 있다. 내진설계시 구조물에 작용하는 하중은 구조물이 들어서는 지역, 구조물의 중요도 및 하부지반조건 등에 의해 결정이 되

는데, 지역 및 중요도는 구조물의 설계 이전에 모두 결정되는 요소이므로 결국 지반조건이 최종 결정에 가장 큰 영향을 미치게 된다¹³⁾. 일반적인 내진설계에서는 지표면 최대가속도와 구조물의 고유주기에 따른 응답 스펙트럼 가속도 값의 산정이 가장 중요하다. 이를 위해 부지 고유의 응답해석을 수행하게 되는데, 현업에서는 설계지반운동 수준을 결정할 경우 주로 1차원 등가선형해석을 많이 사용하고 있다. 반복하중이나 동하중을 받는 지반-구조물계의 설계에서 전단탄성계수 및 감쇠비로 표현되는 지반의 동적변형물성은 매우 중요한 입력정수이다. 선형한계변형률 이하의 저변형률 영역에서의 전단탄성계수와 감쇠비는 기본적으로 변형률의 크기에 무관하여 일정한 값을 가지고, 전단탄성계수는 최대값인 최대전단탄성계수로서 감쇠비는 최소값인 최소 감쇠비로서 고려된다. 지진하중이 작용할 경우 변형률의 크기가 커져서, 변형률 크기에 따른 전단탄성계수와 감쇠비 값의 변화를 어떻게 산정하느냐가 중요해진다. 특히 등가선형 지반응답해석에서 전단탄성계수와 감쇠비의 변화가 중요한 설계 입력변수가 된다⁶⁾. 특히, 풍화토와 같은 조립토에서의 교란 효과는 미소변형률 수준의 변형 특성과 동적 강도 특성에서 그 영향이 극명하게 나타나므로, 원지반의 변형 및 강도 정수 산정시 불교란 시료의 활용이 바람직하다고 할 수 있다.

지반공학적인 관점으로 볼 때, 구조물의 기능적 및 경제적 성공 여부는 시공될 자연 지반의 역학적 특성을 얼마나 정확하게 평가하고, 설계 단계에서 이를 얼마나 합리적으로 반영할 수 있는가에 달려 있다. 이와 같은 공학적 목적을 달성하기 위해서는 원지반의 역학적 특성을 정확히 파악하여야 할 뿐만 아니라, 기존의 지반 특성 평가 기법에 관한 명확한 고찰과 이해가 선행되어야 하며, 이를 통해서만이 가장 합리적인 지반의 변형 및 강도 특성 평가 기법이 정립될 수 있다. 따라서 원지반의 공학적 특성을 명확히 파악하기 위한 기법을 합리화하기 위해서는 국내 풍화토의 형성 및 분포 특성에 적합한 시료 채취법의 개발이 요구되며, 이러한 개발 채취법이 적용된 시료와 기존 채취법으로 얻은 시료의 교란도 비교를 통하여, 각각의 시료채취법에 의한 시료들의 원지반 대표성을 평가하고 정량화 하는 연구가 반드시 필요하다.

이러한 연구의 일환으로 본 연구에서는 기존의 풍화토에 대한 채취방법들과 시료 성형방법을 이용

하여 성형된 시료와 블록 시료 채취법을 이용하여 채취한 시료와의 응력-변형률 관계의 비교를 통하여 각 방법의 특징과 문제점들을 알아보고자 한다. 기존에 연구된 불교란 및 교란의 최소화를 위한 시료 채취법을 사용하여 채취된 시료들과 일반적으로 사용하는 재성형 방법들을 적용하여 준비된 시료들의 응력변형률 관계를 비교하였다. 여기서, 응력-변형률 관계는 Stokoe식의 공진주 시험기를 이용하여 저변형률에서의 변형특성을 파악하고, 전단탄성계수와 감쇠비의 강성 지수들을 비교함으로써 각 시료의 차이를 평가하였다. 결과적으로, 강성 차이가 실제 지반공학적인 문제에서 어떤 영향을 미치는지 알아보기 위해 각각의 방법으로 얻어진 지반정수들을 이용하여 일차원 지반 응답해석을 수행하였다.

2. 시험 개요

2.1. 시험시료

본 연구에서 시료가 채취된 대상 지반은 인천시 송도 굴착 현장의 화강암을 모암으로 한 지반으로, 채취심도는 지표면 아래 45m이고, 채취심도에서 수행한 표준관입시험의 N 값은 50 정도로서 현재 국내에서 일반적으로 적용되고 있는 풍화잔류토의 N 값 범위(15/30~50/15 또는 50/10) 이내였다.

풍화잔류토 시료채취를 위한 수정 토괴 시료 채취법, 권오순¹⁵⁾이 제안한 황동관 향타후 동결 추출하는 방법을 사용하여 비교적 교란이 적은 시료를 채취하였고, 현장에서 교란 상태의 시료를 채취하여 정적인 다짐을 이용하여 현장의 단위중량을 재현한 재성형 시료와 탬핑을 이용하여 현장의 단위중량을 재현한 재성형 시료를 사용하여 총 4종류의 시료에 대하여 공진주 시험을 수행하였다.

각 시료의 기본물성치는 Table 1에 정리되어있고, 체분석 결과는 Fig. 1에 나타내었다. 단위중량, 비중 및 통일분류법에 의한 분류에서는 시료별 차이가 거의 없는 것으로 나타났으나 입도분포에서는 약간의 차이를 보였다. 수정토괴시료 채취법을 이용하여 채취한 토괴시료(block)를 기준으로 황동관으로 채취하여 동결하여 추출한 시료(tube), 정적인 하중을 가하여 성형한 시료(static)는 유사한 입도분포를 보였으나, 탬핑을 이용하여 재성형한 시료(tamping)의 경우, 전반적인 입자의 파쇄를 보였으며 이로 인하여 200번체(0.075mm) 통과량이 약 10% 증가하였음을 알 수 있다.

Table 1. Basic properties of tested specimens

구분	현장 단위중량, $\gamma_t(t/m^3)$	비중, Gs	통일 분류법(USCS)	함수비, w(%)	간극비, e	포화도, S(%)
불교란 시료(block)	1.84	2.67	SW	8.2	0.44	49
황동관 시료(tube)	1.82	2.68	SW	12	0.46	69
탬핑을 이용한 재성형 시료(tamping)	1.83	2.67	SW	13	0.45	88
정적 압축 재성형 시료(static)	1.84	2.67	SW	10	0.44	60

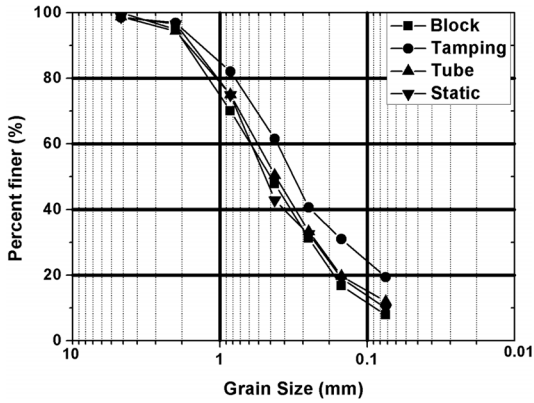


Fig. 1. Grain size distribution of tested specimens.

2.1.1. 수정토괴 시료채취법을 이용한 불교란 시료

일반적으로 풍화토 지반에서 불교란 시료의 채취가 어려운 이유는 풍화토의 취성적 특성으로 인해 시료 추출시 부서지는 현상이나 시험기에 맞는 규격으로의 가공이 불가능하기 때문이다. 하지만

풍화도에 따라 풍화토는 사질토와 같은 성질을 지니는 것부터 점성토와 같은 성질을 가지는 것까지 다양한 형태로 존재하게 된다. 본 연구에서 채취된 대상지반은 화강암을 모암으로 한 풍화토지반으로, 국제 지질학회¹⁶⁾에서 제안한 풍화토의 분류방법에 따르면 Highly Weathered(HW)로 규정될 수 있다. HW 등급의 경우, 석영을 제외한 대부분의 입자들이 풍화되어 토양화 되어 있으며 절리면 구조에서 상당히 깊은 곳까지 풍화되어 있으며 시추 코어의 형상이 그대로 유지되는 상태를 지칭한다. 이러한 HW 등급 풍화토의 특성을 이용하여, 굴착 저면에서의 시료 채취방법 중 가장 교란이 적은 상태로 시료를 채취할 수 있는 방법인 토괴(block)시료 채취법을 다소 수정하여 불교란 시료 채취법으로 선택하였다. 일반적인 토괴시료 채취법의 대상 지반이 점성토 지반인데 비하여, 본 연구에서 사용된 수정 토괴 시료 채취법은 토괴를 이용하여 시료를 채취하지만, 채취방법이나 채취 후 보관, 추출하는

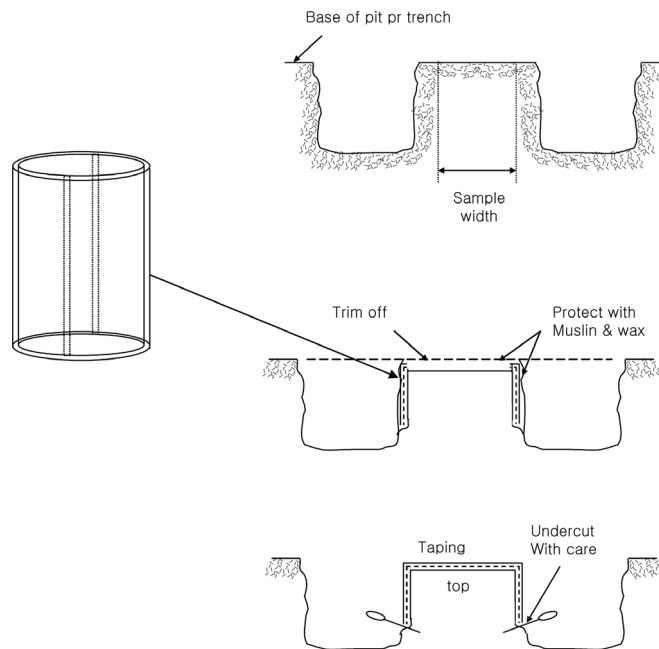


Fig. 2. Modified block sampling equipments and procedures.

과정에서 풍화토의 특성을 고려하여 일반적인 방법을 수정하여 적용하였다. Fig. 2에서 나타난 것처럼, 시료의 채취과정에서 일반적인 토괴시료 채취법과는 채취기를 대상지반에 직접 압입하지 않고 채취할 곳 주변을 깎으면서(trimming), 교란이 최소화될 수 있도록 천천히 원통형의 시료채취기를 압입하였다. 이러한 시료 채취과정 후 함수비의 손실을 막기 위하여 채취기의 양단을 테이핑한 후 파라핀으로 밀봉하였다. 아크릴 재질의 원통형 시료채취기는 길이 방향으로 분리될 수 있게 제작하여 추출시 입자들이 부서져 흩어지는 것을 막았으며, 트리밍을 하지 않고 시료를 시험기에 거취시켜 공진주 시험을 할 수 있도록 하였다.

2.1.2. 황동관 타입을 이용한 시료 채취법

수정된 토괴시료 채취법의 경우, 제한된 대상지반과 채취 과정에서 시료의 파쇄로 인한 실패율이 높고 그 채취 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다. 권오순¹⁵⁾은 황동관을 타입하여 굴착이 진행된 이후의 저면에서 시료를 채취하는 방법을 제안하였다. 이 경우 관의 압입에 의한 교란 가능성은 있지만, 현장의 단위중량을 유지하고 있으며, 굴착이전 시료 채취가 곤란한 경우 교란을 최소화하여 적용할 수 있는 현실적인 방법이다. 황동관에서 시료를 추출하는 과정에서는 황동관으로 채취된 시료를 동결시켜 추출하여 그 강도 및 변형 특성을 평가하였으며 그 동결 효과가 시료의 강도에 미치는 영향은 미미하다는 결과를 얻었다. 이 방법의 경우, 굴착 저면에 황동관을 타입하여 시료를 고정시키고 그 주변 지반을 걷어내어 시료를 채취한다. 채취된 시료는 시험전 동결하여 추출하게 되는데, 이는 사질토를 불교란 상태로 채취하기 위해 개발된 동결 시료 채취법을 응용한 것으로서, 사질토가 추출시 분쇄되는 것을 막기 위하여 입자속의 간극수를 동결시켜 시료를 고형화 한 후 시료를 추출하였다. 본 연구에서는 -3℃로 24시간 시료를 동결시켜 추출하고 시험기에 거취시킨 후 상온에서 융해시켜 시험하였다.

2.1.3. 탬핑을 이용한 재성형 시료

대상 시료가 사질토일 경우 일반적으로 사용되는 시료 성형 방법이며, 탬핑을 이용하여 현장 밀도를 재현하여 대상지반의 물성치를 평가하게 된다. 탬핑을 이용하여 시료를 성형하는 방법은 건조시료에 현장상태의 함수비에 따라 탬핑을 하여 현장의 단

위중량을 맞추어 시료를 재성형하는 방법으로 현장 상태의 단위 중량은 토괴시료의 단위중량으로 하였다. 탬핑에 의한 입자파쇄를 최소화하기 위해 플라스틱 재질의 탬퍼를 사용하였다.

재성형 시료는 현장지반의 함수비와 단위중량을 맞추어 시료를 5층의 과소다짐법(under-compaction method)으로 성형하여 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 방법이다¹⁷⁾.

2.1.4. 정적 압축을 이용한 재성형 시료

흙을 성형하여 시험할 경우, 현장 단위중량과 입도 분포가 현장 상태의 재현에 매우 중요한 요소가 된다. 교란된 풍화토를 사용할 경우 그 고유 구조가 파괴되는 문제도 있지만, 또 다른 중요한 문제점은 현장 단위중량과 입도 분포를 동시에 만족하는 시료의 구현이 어렵다는 점이다. 다시 말하면, 풍화토의 높은 단위 중량에 도달하기 위해 과도한 재하 하중인 탬핑 압력을 적용하게 되면 입자 파쇄의 정도가 심화되고, 입자파쇄를 최소화하기 위해서는 현장 단위중량에 도달하기 어렵다는 것이다. 따라서 본 연구에서는 탬핑을 이용하여 재성형한 시료와 더불어 탬핑을 이용하여 시료를 성형할 경우 발생할 수 있는 입자 파쇄를 최소화할 수 있는 정적인 압축 방법을 이용하여 시료를 성형하였다. 시료는 5개의 층으로 나누어 다지는 복층 다짐을 실시하였으며, 탬핑을 이용하여 재성형한 시료와 마찬가지로 과소다짐법을 사용하였고, 700kPa의 구속압으로 성형하였다.

2.2. 시험장비

본 실험에서는 1960년 이후 흙의 동적 특성을 평가하는데 널리 활용되고 있는 공진주(Resonant Column) 시험기를 사용하였다. 공진주 시험은 전단변형률의 크기에 따른 지반의 동적 특성치(전단탄성계수, 감쇠비 등)의 변화를 측정하는 시험으로, 일반적으로 많이 사용되는 Stokoe식 공진주 시험기를 사용하였다. 이 시험기는 일단고정-타단자유 시스템으로서, 코일-자석 시스템을 통해 시료의 상부에 비틀 자극을 가하며, 한 시료에 대해 10⁻⁴~10⁻¹%에 이르는 전단변형률의 범위에서 시험을 연속적으로 수행할 수 있다. 시험 시에는 진동수를 바꿔가면서

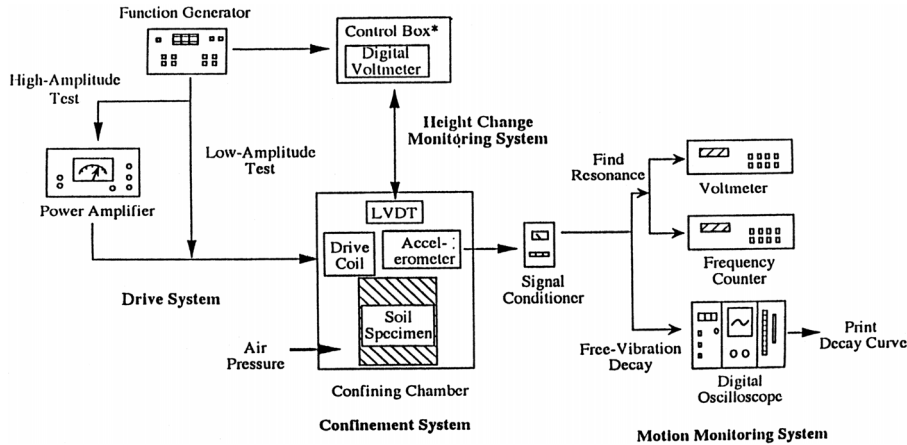


Fig. 3. Systematic diagram of the sub-system of resonant column test.

상부에 조화 비틀 자극(harmonic torsional excitation)을 가하고 진동반응곡선을 구하게 된다. 진동반응곡선으로부터 일차 모드 공진 진동수를 측정하고 탄성과 전파 이론을 사용함으로써 전단탄성계수를 구한다. 또한 시료의 감쇠특성은 자유진동쇠퇴곡선을 이용하거나 점성 감쇠를 가정한 진동수반응곡선을 통해 측정한다. Fig. 3은 공진주 시험의 가동네트워크를 간략히 나타낸 것이다.

시료를 공진주 시험기에 거취 시킨 후, 시험기를 세팅하고 압력을 가하여 시료를 압밀 시킨다. 파발생기에서 드라이브 시스템으로 공급되는 전압의 크기를 변화시킨 다음 AC 전압계의 출력이 최대가 될 때의 공진 진동수를 찾아 출력전압과 함께 기록한다. 감쇠비를 얻기 위해 Control box의 trigger로 드라이브 시스템에 공급되는 전원을 차단시켜 자유진동쇠퇴곡선을 얻는다.

3. 결과

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

본 연구에서는 채취방법과 성형방법이 화강풍화토의 응력-변형을 관계에 미치는 영향을 알아보기 위하여 각각의 시료들을 공진주시험을 수행하여 구

속압별 전단탄성계수와 감쇠비를 살펴보았다.

3.1. 전단탄성계수

공진주 시험에서 얻어진 각 시료의 구속압별(100, 200, 300kPa) 전단탄성계수 감쇠곡선(Shear modulus degradation curves)은 Fig. 4에 도시하였다.

구속압에 상관없이 탬핑에 의해 재성형된 시료의 전단탄성계수 값이 제일 크게 나타났으며, 그 차이는 구속압이 커짐에 따라 작아짐을 알 수 있다. 상대적으로 작은 구속압인 100kPa에서는 60%, 200kPa에서는 45%, 300kPa에서는 25% 크게 나타났으며 나머지 다른 시료들의 값은 전반적으로 유사한 값들을 나타내었다. 탬핑을 이용하여 재성형한 시료의 경우, 탬핑에 의한 세립분의 증가로 인하여 저구속압에서도 그 값이 크게 나타난 것으로 추정되며, 구속압에 대한 영향이 다른 시료에 비해 적게 나타났다.

최대전단탄성계수에서 감쇠하기 시작할때의 변형률인 한계변형률(threshold strain)과 전단탄성계수의 감쇠 특성을 살펴보기 위하여, Fig. 4의 최대전단탄성계수로 각각을 정규화하여 Fig. 5에 나타내었다.

정규화된 전단탄성계수 감쇠곡선에서 한계변형률은 구속압에 대한 영향을 받는 것으로 나타났으며 구속압이 커질수록 한계변형률은 커짐을 알 수 있었고, 전체적인 감쇠 경향은 시료별 큰 차이는 없으나 황동관타입을 통해 채취된 시료의 경우 동일한 구속압의 경우 감쇠되는 경향이 다른 시료에 비해 적은 것으로 나타났으며, 최대전단탄성계수에서 차이를 보였던 탬핑을 이용한 시료의 경우 큰 차이를 보이지 않은 것으로 나타났다.

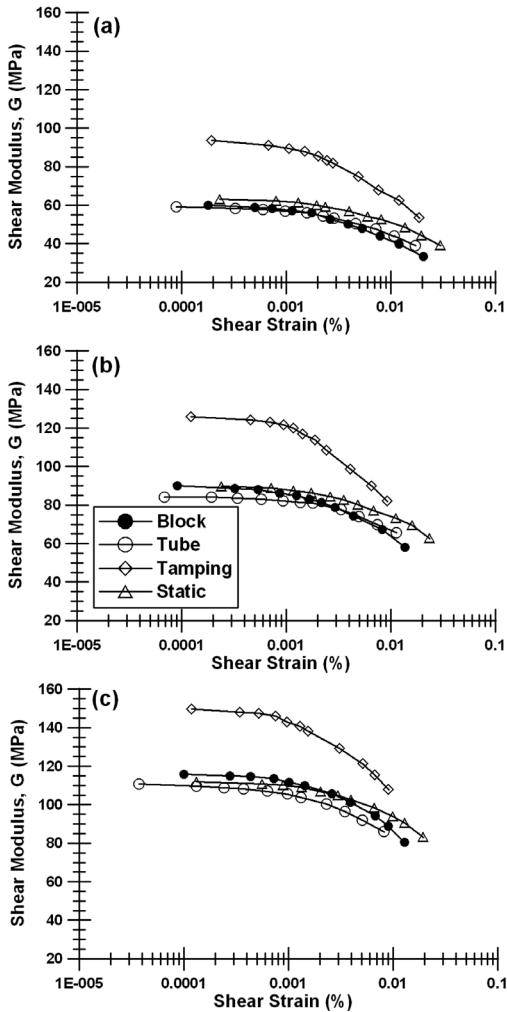


Fig. 4. Stiffness degradation curves of tested specimens with various confining pressure; (a) 100kPa (b) 200kPa and (c) 300kPa.

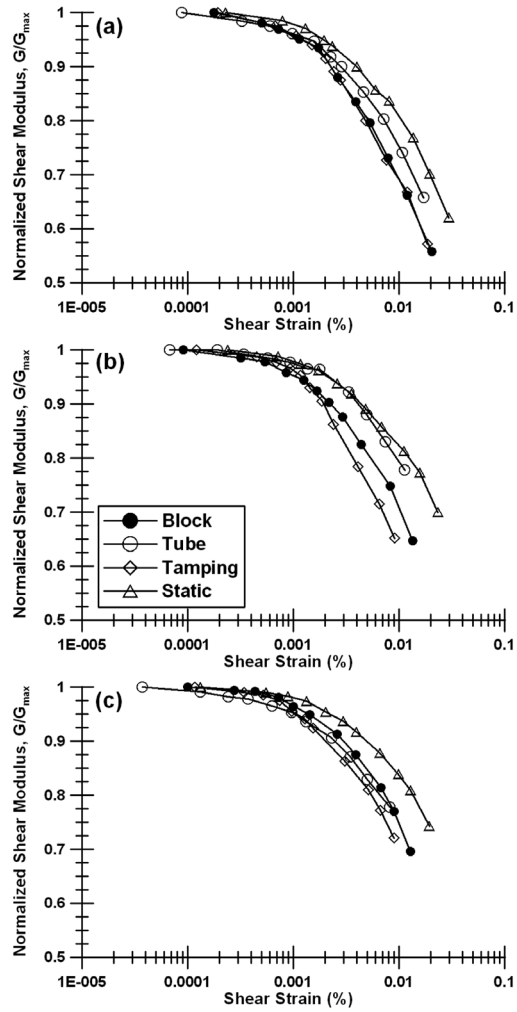


Fig. 5. Normalized stiffness degradation curves of tested specimens with various confining pressure; (a) 100kPa (b) 200kPa and (c) 300kPa.

구속압이 전단탄성계수에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 구속압에 따른 최대전단탄성계수의 값을 Fig. 6에 나타내었다. 최대전단탄성계수는 간극비, 과압밀비, 구속응력, 지질학적 연도, 소성 지수 등의 다양한 요소들의 영향을 받는 것으로 알려져 있다^{18,19}. Hardin과 Richart²⁰는 사질토의 경우 구속응력과 간극비의 영향을 주로 받는다고 발표하였고, 최대전단탄성계수에 대한 실험식을 식 (1)과 같이 제안하였다.

$$G_{max} = A \cdot F(e) \cdot OCR^k \cdot Pa^{1-n} \cdot (\sigma'_0)^n \quad (1)$$

여기서, A는 무차원계수, n은 구속압영향상수,

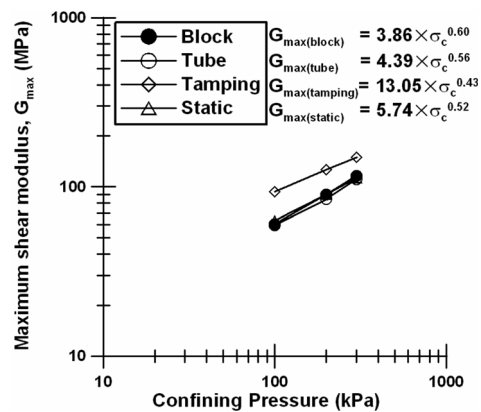


Fig. 6. Maximum shear modulus(G_{max}) of tested specimens against confining pressure.

F(e)는 간극비 함수, OCR은 과압밀비, k는 소성지수계수, Pa는 대기압, σ'_0 은 평균 유효응력이다. 사질토의 경우 OCR과 소성지수의 영향을 무시할 수 있고 대기압, Pa는 상수이므로, 식 (2)와 같이 단순화 할 수 있다.

$$G_{max} = A \cdot F(e) \cdot (\sigma'_0)^n \quad (2)$$

이는 최대전단탄성계수와 구속응력은 대수-대수 관계에서 n의 기울기와 A · F(e)의 절편을 갖는 직선관계임을 의미한다. 현실적으로 현장에서 간극비의 결정에 어려움이 많이 존재하므로, 간극비 함수, F(e)를 포함하여 A · F(e)를 하나의 상수로 고려하고, 기울기로부터 결정된 n값을 포함하여 식 (2)의 경험식을 간략화 할 수 있다. 각 시료에 대한 간략화된 식들이 Fig. 6에 포함되어 있다. 시료의 종류별 최대전단탄성계수의 구속응력에 대한 영향을 보면 다른 시료들에 비해 탬핑에 의해 재성형된 시료의 계수가 다른 시료들에 비해 크게 나타나며, 상대적으로 유효응력에 대한 영향은 작게 나타났음을 알 수 있다. 이에 반해, 다른 시료들의 경우, 김동수와 추연욱²¹⁾의 구속압에 따른 풍화토의 최대탄성계수 경험식($G_{max} = 79.33 \cdot (\sigma'_0)^{0.52}$)와 매우 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

3.2. 감쇠비

감쇠비의 경우, 자유진동 감쇠 곡선을 이용한 방법과 주파수 반응 곡선을 이용하는 방법을 사용하여 산정하였다. 자유진동 감쇠곡선을 이용하는 방법의 경우, 시료가 공진주파수로 진동하는 동안 가진력을 차단하면 자유진동 감쇠곡선이 오실로스코프에 기록되고, 이 곡선에서 각 사이클의 진폭을 측정하여, 대수적 감소를 결정하며, 이를 통해 감쇠비를 결정한다. 저변형률 하에서 이 방법으로 측정하는 경우, 주변 잡음으로 인해 측정 결과에 상당한 영향을 미친다. 이에 비해 주파수 반응 곡선을 이용하는 방법은 공진점 근처에서 주파수 반응곡선의 폭을 측정하여, 대수적 감소를 결정하고 이를 통해 감쇠비를 결정하게 된다. 이 방법의 경우, 고변형률 하에서는 주파수 반응 곡선이 대칭성을 상실하여 감쇠비 측정에 상당한 오차를 유발하기 때문에 저변형률 하에서는 두 방법을 사용하여 잡음으로 측정오차를 제거하며, 고변형률 하에서는 자유진동 감쇠곡선을 이용하여 감쇠비를 산정하였다. 다음 Fig. 7은 각 시료의 구속압별 감쇠비를 나타낸 것이다.

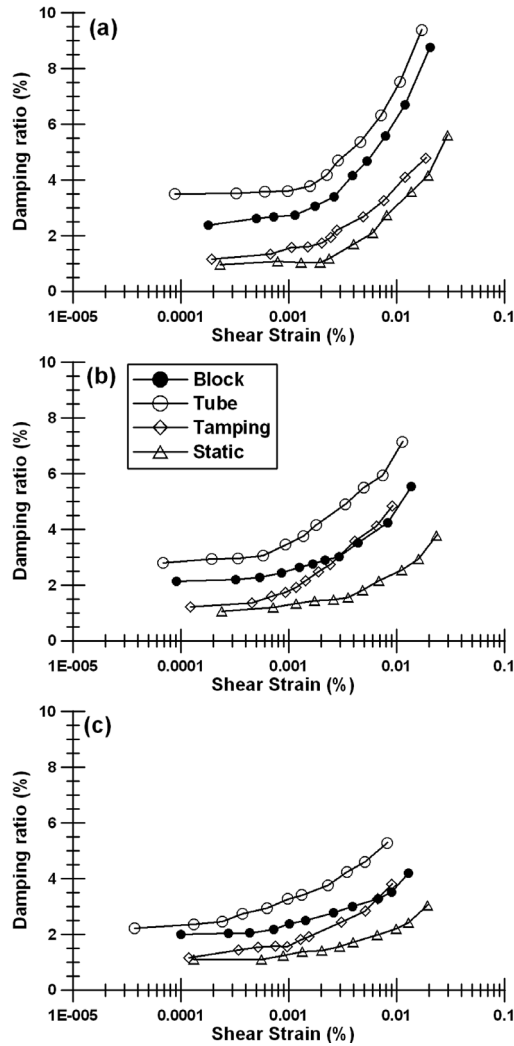


Fig. 7. Damping ratio of tests specimens with various confining pressure; (a) 100kPa (b) 200kPa and (c) 300 kPa.

전단탄성계수 결과와는 달리, 감쇠비의 경우 각 시료들의 차이가 분명히 나타났다. 성형 방법과는 상관없이 정적·동적 다짐을 이용한 재성형 시료들이 황동관 시료나 토괴시료보다 작은 감쇠비를 나타내고 있다. 이는 시료의 재성형시 입자들의 재배열로 인하여, 상대적으로 약하게 결합되어 있는 부분들이 사라졌기 때문으로 판단된다. 또한 재성형 시료들과는 달리 황동관 시료의 경우 토괴시료보다 감쇠비가 크게 나타났는데, 이는 튜브의 삽입과 동결·용해에서의 교란으로 인한 것으로 추정된다.

화강풍화토의 경우 교란의 영향이 그 응력-변형률 관계에 미치는 영향이 크지 않다고 발표된 연구

결과들이 있으나^{22,23)}, 교란의 영향은 정규화 전단탄성계수보다는 감쇠비가 더 민감할 것으로 판단되어 불교란 시료를 중심으로 많은 연구가 수행될 필요가 있다고 판단된다²²⁾.

3.3. 1차원 지반 응답해석

지반구조물의 내진설계시 요구되는 설계응답스펙트럼, 액상화 피해 예측을 위한 동적 응력 및 변형률, 지반구조물에 작용하는 지진하중 또는 변위 등을 결정하기 위하여 지반응답해석(Ground response analysis)을 수행하게 된다. 이 중, 1차원 지반응답해석기법은 모든 지층의 경계가 수평하며 지반의 응답은 기반암으로부터 수직 전파되는 수평전단파에 지배받는다라는 가정을 기본으로 한다. Idriss와 Seed²³⁾는 지진파 전파는 3차원 현상이지만 1차원 해석기법은 실제로 여러 사례에 있어서 지진시 지표면 자유장 운동을 비교적 잘 예측한다는 결론을 얻었다. 1차원 해석은 주파수영역으로 해석하여 입력물성치가 적으며 계산이 빠른 장점이 있으나 지반거동을 선형 탄성으로 가정하여야하는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하여 지반응답에 큰 영향을 미치는 지반의 비선형성을 고려하기 위한 등가선형해석기법을 이용하여 전응력 해석을 수행하였다.

지반조건은 각각의 시료들의 특성을 가진 단일한 가상의 지층으로 가정하였으며, 해석에 사용된 입력 지진파는 내진 해석에 광범위하게 사용되는 지진파중 El Centro(1940 North South component, Peknold version) 지진의 가속도-시간 이력을 사용하였다. 사용된 지진의 최대 가속도는 0.33g이지만, 본 연구에서는 국내의 여건을 고려하여 0.11g로 감소시켜 사용하였다.

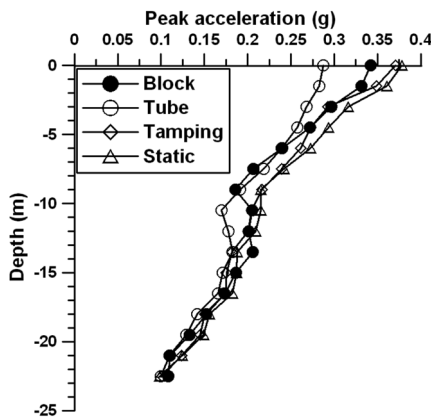


Fig. 8. Peak acceleration profiles of tested specimens from 1D ground response analysis.

1차원 지반응답 해석에서는 각 시료의 전단탄성계수와 감쇠비의 차이가 실제 지반공학적인 문제에서 미치는 영향을 알아보기 위하여 지표면 최대가속도를 비교하였다. 지표면 최대가속도는 지진발생시 사면과 옹벽의 안정성 평가를 위한 등가정적 해석시 사용된다. Fig. 8은 깊이에 따른 최대가속도를 비교한 것이다.

각 시료들의 특성으로 대표되는 지반들의 전반적인 최대가속도의 깊이에 따른 분포는 지표면에 가까워질수록 최대가속도가 증폭되는 유사한 경향을 보이고 있다. 깊이가 15m 보다 깊은 곳에서의 거동은 모든 시료에서 매우 유사하게 나타났으며, 지표면에 가까워짐에 따라 시료별 차이가 나타났다. 황동관을 타입하여 얻은 시료로 대표된 지반의 경우 지표면 최대가속도가 0.28g로 0.34g의 토괴시료보다 최대가속도를 과소평가하고 있으며 다른 정적·동적 재성형 시료로 대표된 지반의 경우는 0.375g로 과대평가하고 있다. 이는 앞 절에서 언급한 감쇠비의 차이에 의한 것으로 황동관을 타입하여 얻은 시료로 대표된 지반의 경우, 다른 시료들보다 상대적으로 큰 감쇠비로 인하여 최대가속도의 증폭 특성을 과소평가하는 것으로 나타났다.

4. 결론

불교란 시료의 채취가 매우 제한적인 화강 풍화토에서 시료채취방법과 시험시 시료 준비 과정이 지반재료 자체의 강성 특성에 미치는 영향을 알아보기 위해, 본 연구에서는 토괴 시료, 황동관을 타입하여 시료를 채취하고 동결 추출법을 적용한 시료, 정적인 다짐으로 재성형한 시료와 탬핑을 사용하여 재성형한 시료를 공진주 시험을 통하여 비교하여 보았다. 또한 시험 결과에서 나타난 시료의 차이가 실제 지반공학적인 문제에서 어떠한 영향을 미치는지 일차원 지반응답해석을 통하여 확인하였으며 본 연구의 결과로서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 탬핑을 사용하여 재성형한 시료의 경우, 그 입자들이 높은 단위중량을 맞추기 위해 과도한 압력을 경험하여 입자들이 부서지는 현상이 나타났다. 이러한 현상으로 인해, 토괴 시료와 다른 재성형 시료와 비교하여 볼 때, 200번체(0.075mm) 통과량이 10% 증가하였다.
- 2) 탬핑을 사용하여 재성형 시료가 다른 시료들에 비해 전단탄성계수를 저구속압(100kPa) 하에서

최대 60% 과대평가하는 것을 제외하고, 전단탄성계수의 크기에는 각 방법에 대한 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 또한, 구속압의 증가에 대한 전단탄성계수의 증가는 탬핑시료를 제외할 경우, 기존의 연구와 유사한 결과를 나타내었다. 탬핑을 사용한 재성형 시료의 경우, 구속압의 증가에 대한 전단탄성계수의 증가가 다른 시료에 비해 적음을 알 수 있었다. 이는 탬핑에 의해 형성된 세립분의 증가로 인하여 구속압의 효과가 상대적으로 적게 발현된 것으로 판단된다.

3) 정규화된 전단탄성계수 감쇠곡선을 살펴보면 각각의 방법들이 변형률에 따른 비선형성에는 영향을 미치는 것으로 나타났다. 정적 재성형 시료의 경우, 한계 변형률이 제일 큰 것으로 나타났다.

4) 감쇠비의 특성은 시료 채취방법과 준비 방법에 따라 전단탄성계수보다 더 큰 차이를 나타내었다. 저구속압하에서 그 차이가 제일 크게 나타났는데, 토괴시료를 기준으로 황동관 타입법에 의한 시료의 경우 200%의 최소 감쇠비를 산정하였고 탬핑을 이용한 시료와 정적 재성형법을 사용한 시료의 경우는 50%의 최소 감쇠비를 산정하였다.

5) 각 방법으로 채취·준비된 시료의 강성과 감쇠비의 차이가 실제 지반공학적 문제에 끼치는 영향을 파악하기 위해 일차원 지반응답해석을 실시하여 지표면 최대가속도를 산정한 결과, 토괴시료를 기준으로 황동관 타입시료의 경우 80%, 정적 압축과 탬핑을 사용한 시료의 경우 110%로 산정되었다.

각각의 시료 채취법에 대한 정량적인 분석을 위해서는 더 많은 시험 결과가 도출되어야 할 것으로 판단되며, 본 논문에서의 결론들을 바탕으로, 풍화토지반에서 시료를 채취하여 지반공학 설계에서 사용할 경우, 각각의 시료 채취법에 따른 전단탄성계수와 감쇠비의 영향에 대한 고려를 충분히 해야 할 것으로 판단된다.

감사의 글 : 본 연구는 2009년도 단국대학교 대학 연구비의 지원에 의해 이루어진 것으로서 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1) 권오순, 정충기, 풍화에 따른 풍화토의 특성 변화, 한국지반공학회 논문집, 제14권, 제5호, pp. 53~66, 1998.

2) Onitsuka, K., Yositate, S., Nanri, M., "Mechanical Properties and Strength Anisotropy of Decomposed Granite Soils", Soils and Foundations, Vol. 25, No. 2, pp.14~30, 1985.

3) 김동수, 고동희, 윤준웅, "공진주/비틀전단시험을 이용한 화강풍화토의 동적변형특성", 한국지반공학회 논문집, 제5권, 제1호, pp. 35~46, 2004.

4) 고동희, 미소변형 삼축시험과 공진주/비틀전단 시험을 이용한 화강풍화토의 변형특성 연구, 석사 학위 논문, 한국 과학기술원, pp. 61~88, 2001.

5) 김동수, 윤준웅, 이세현, 추연욱, "공진주/비틀전단시험 및 벤더엘리먼트 시험을 이용한 사질토 지반의 최대전단탄성계수 평가", 한국지반공학회 논문집, 제21권, 제10호, pp. 17~25, 2005.

6) 이무철, 이송, 인공신경망을 이용한 풍화토의 강도정수 산정, 구조물진단학회지, 제12권, 제3호, pp. 147~154, 2008.

7) 김진철, 류제수, 김영진, 전우정, 교란화강풍화토에 대한 삼축압축시험방법의 적용, 한국농공학회 학술발표논문집, pp. 211~214, 2003.

8) 안영대, 오세봉, 고동희, 김동수, 풍화토의 비배수 삼축압축시험시 전체변형을 영역의 거동에 관한 연구, 한국지반공학회 논문집, 제18권, 제1호, pp. 29~39, 2002.

9) 최연수, 정충기, 반복재하후 미액상화 풍화토 지반의 변형 거동, 한국지반공학회 학술발표논문집, pp. 485~492, 2001.

10) 이수근, 한국에 분포하는 화강암 풍화토의 토질 공학적 특성, 한국지반공학회 논문집, 제9권, 제3호, pp. 5~22, 1993.

11) 이종규, 김덕용, 세립분 함유량에 따른 화강풍화토의 동적 거동, 대한토목학회 논문집, 제19권, 제3호, pp. 785~793, 1999.

12) 정순용, 이승래, 화강풍화토의 거동 특성 규명을 위한 비교란 시료채취기 개발, 한국지반공학회 논문집, 제13권, 제6호, pp. 13~24, 1997.

13) 지반구조물의 내진설계, 한국지반공학회, pp. 5~12, 2006.

14) Schnabel P.B., Lysmer J., Seed H.B., "SHAKE: a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites", Report No. EERC72-12, University of California, Berkeley, pp. 20~42, 1972.

15) 권오순, 풍화토의 전단강도-변형 특성에 관한 실험적 연구, 박사 학위 논문, 서울대학교, pp. 12~108, 1998.

16) Geological Society, "Tropical Residual Soils, Engi-

- neering Group Working Party Report”, Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol. 23, No. 1, pp. 1 ~ 101, 1990.
- 17) Ladd R.S., “Preparing Test Specimens Using Under-compaction”, Geotechnical Testing Journal, Vol. 1, No. 1, pp. 16 ~ 23, 1978.
 - 18) Hardin, B. O., and Black, W. L., “Vibration modulus of normally consolidated clay”, Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, Vol. 94, No. SM2, pp. 353 ~ 369, 1968.
 - 19) Dorbry, R., and Vucetic, M., “State-of-the-art report: Dynamic Properties and Response of Soft Clay Deposits”, Proceedings of International Symposium on Geotechnical Engineering of Soft Soils, Vol. 2, pp. 51 ~ 87, Mexico City, Mexico, 1987.
 - 20) Hardin, B. O., and Richart, F. E., “Elastic wave velocities in granular soils”, Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, Vol. 891, pp. 33 ~ 65, 1963.
 - 21) 김동수, 추연욱, 공진주 시험을 이용한 국내 비점성토 지반의 동적변형특성, 한국지반공학회 논문집, 제17권, 제5호, pp. 115 ~ 128, 2001.
 - 22) 정순용, 비교란 및 정적다짐 화강풍화토의 응력-변형률관계에 대한 연구, 석사 학위 논문, 한국과학기술원, pp. 15 ~ 34, 1997.
 - 23) Idriss, I. M. and Seed, H. B., “Seismic Response of Horizontal Soil Layers”, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 94, No. SM4, pp. 1003 ~ 1031, 1968.