



“지반진동”강좌를 시작하면서

박 종 관^{*5}

이번호부터 본 학회 지반진동위원회가 주관하여 “지반진동과 내진설계”이라는 제목을 가지고 앞으로 7회에 걸쳐 지상강좌를 연재하고자 합니다.

최근 고베(일본), 그리스, 타이완, 터키등을 비롯하여 전세계에서 크고 작은 지진들이 빈번히 발생하여 많은 사상자가 생기고 사회기반시설이 파괴되었습니다. 국내의 경우에도 지진에 대한 우려하는 기술자들이 늘어감에 따라 지진을 대비하기 위하여 토목구조물에도 내진설계를 도입하고 있습니다. 그러나 많은 실무기술자들의 경우 동역학의 이론에 대한 이해와 설계경험의 부족으로 내진설계방법이 확고히 정립되지 못한 실정입니다. 본강좌는 실무기술자들에게 지반에 관련된 동적성질, 내진설계기준과 방법 그리고 방진대책에 대한 이해를 조금이나마 돕기 위하여 시작합니다.

지반진동분야에서는 동하중(Dynamic loading)이 지반과 토구조물에 미치는 미치는 영향을 공학적으로 규명하여 궁극적으로 동적하중으로부터 안전한 구조물을 설계하고 시공하기 위한 이론적 바탕을 다루고 있습니다. 진동을 발생하는 동적하중으로는 크게 지

진, 파랑 및 바람과 같은 자연적인 동하중 그리고 발파, 항타, 동다짐, 차량 및 기계진동등과 같은 인위적인 진동하중으로 나눌수 있습니다. 지진하중은 지반진동과 관련된 가장 대표적인 동하중으로 1960년부터 본격적으로 지진과 관련하여 많은 연구를 하고 있습니다. 지진과 같은 동하중과 관련된 대표적인 지반분야는 동하중의 특성을 연구하여 구조물의 설계에 필요한 즉 설계진동하중의 규모와 형태를 규명하는 설계지반운동분야 그리고 이를 바탕으로 실험적, 해석적 및 수치해석적인 방법으로 안전한 토구조물을 설계하기 위한 설계방법분야가 있습니다.

본 강좌에서는 실무에 종사하고 이는 토목기술자들에게 지반진동에 대한 이해를 돕기 위하여 최근에 실무에서 관심이 있는 분야를 중심으로 동적특성치를 구하기 위한 시험과 토구조물의 해석적을 위한 이론적 내용을 예제를 통하여 다루고자 합니다. 본 강좌를 통하여 지반진동분야에 가까이 갈수 있는 기회가 되기를 바라며, 강좌가 진행되는 동안 또는 그 이후에도 지반진동분야에 대한 조언을 기다리고 있습니다. 항상 이 분야에 관심을 가지고 있는 분들과 강좌의 준비를 위하여 바쁜신 중에도 시간을 내주신 집필진 여러분들께 감사를 드립니다.

*1 정회원, 중앙대학교 건설대학 토목공학과 조교수

*2 정회원, 한국철도기술연구원 책임연구원

*3 정회원, 경희대학교 공과대학 토목공학과 부교수

*4 정회원, 전일지오컨설턴트 대표이사

*5 정회원, 서울산업대학교 토목공학과 교수

지반진동강좌 계획(안)

1. 지반의 동적성질	목영진, 조성호, 황선근, 장찬수	2000. 6
2. 내진설계		
2.1 설계지반운동 및 토구조물	박종관, 박인준, 박용호	2000. 8
2.2 말뚝기초	김명모, 최용규	2000. 10
2.3 액상화현상	김수일, 황대진, 박인준	2000. 12
3. 지반/구조물 상호작용	전준수, 황성춘	2001. 2
4. 지반진동 및 방진대책	유태성, 황선근, 이병식	2001. 4
5. 지반진동분야의 방향	강병희, 김동수, 김진원	2001. 6

I 지반의 동적 물성치 특성과 실내실험에 의한 측정

1. 개요

지반의 동적 물성치는 과거 40여년 동안 광범위하게 연구되어온 분야로서, 매우 포괄적이고 많은 의미를 포함하고 있다. 본 고에서 언급하고자 하는 동적 물성치는 지진하중과 같이 지반에 진동하중이 가해졌을 때 지반의 동적 거동을 결정하기 위해 요구되는 지반의 물성치라고 할 수 있다. 지진하중에 대한 지반의 자유장 (free-field) 거동을 결정하기 위한 지반의 동적물성으로 전단파속도, 전단탄성계수, 재료감쇠비 등이 있다. 이들 동적 물성치는 전단변형률의 크기에 따라서 특성이 달라지는데, 하중의 크기가 매우 작을 때에는 선형의 특성을, 하중의 크기가 매우 클 때에는 비선형적인 특성을 보인다.

지반 동적 물성치의 측정을 위해서는 크로스홀 시험, 다운홀 시험, SASW 실험 등과 같은 현장실험과 공진주 실험, 비틀전단 실험, 진동삼축압축 실험 등과 같은 실내실험 등을 수행한다. 현장에서 측정할 수 있는 지반 동적 물성치는 전단파속도와 전단탄성계수로서 대부분의 경우 10³%보다 낮은 전단변형률에서 결정된다. 실내실험으로는 전단파속도, 전단탄성계수, 재료감쇠비 등의 지반 동적 물성치를 모두 측정할 수

있으며, 측정하게 되는 흙의 전단변형률 범위가 10³%보다 작은 선형거동을 보이는 저전단변형률 대역(10³%보다 작은 전단변형률)에서부터 비선형 거동을 나타내는 고전단변형률(10³%보다 큰 전단변형률)에 이르기까지 넓은 전단변형률 범위에 걸쳐서 측정할 수 있다.

지반의 동적 물성치를 측정하는 현장실험에 관해서는 지반공학회 월간지 {지반}의 기술강좌 (조성호 등, 2000)에 의해서 상세히 소개되었기에, 본 고에서는 실내실험에 의해 지반의 동적 물성치를 측정하는 방법만을 소개하고, 지반 동적 물성치의 특성에 관하여 언급하였다. 특히, 지진하중과 같은 동하중에 대한 지반의 응답을 해석하는데 매우 중요한 흙의 동적 거동 특성, 즉, 재료감쇠비에 대한 주파수의 영향, 전단탄성계수와 재료감쇠비의 비선형 관계에 대한 유효구속 응력의 영향 등에 관하여 중점적으로 설명하였다.

2. 실내실험에 의한 지반의 동적물성 평가

2.1 저전단변형률 실험

지반이 선형-탄성으로 거동하게 되는 저전단변형률(10³%보다 작은 전단변형률)에서 흙의 저전단변형률 물성치를 평가할 수 있는 실내실험은 불과 몇 가지로 국한되며, 이 들 방법으로는 공진주/비틀전단 실험 (Resonant Column/Torsional Shear test, RCTS), 초음파 펄스실험 (Ultrasonic Pulse test), 국소변형을 측정하는 LDT(Linear Displacement Transducer)를 이용한 진동삼축실험(Cyclic Triaxial test), 그리고 압전식 휨요소 실험 (Piezoelectric Bend Element test) 등이 있다.

2.1.1 공진주/비틀전단 실험 (Resonant Column/Torsional Shear Test, RCTS)

공진주/비틀전단 실험 (Resonant Column/Torsional Shear Test, RCTS)은 지반의 저전단변형률 동적 물성치를 구하기 위하여 가장 널리 사용되는 실내실험 방법으로서, 전단변형률이 10³%보다 작은

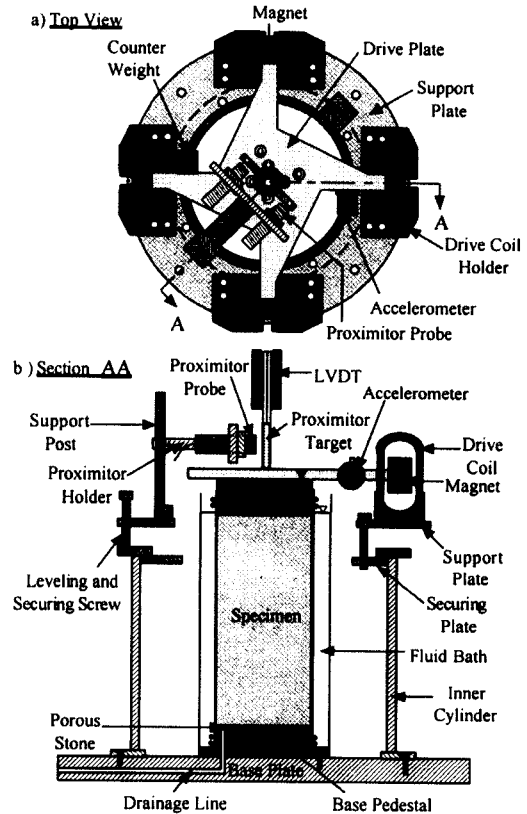
전단변형을 영역에서 흙의 전단탄성계수, 재료감쇠비를 측정하는 실험법이다. RCTS 실험을 위한 실험방식은 다수 있지만, 본 고에서는 1970년대 후반 Stokoe에 의해서 개발된 Stokoe 식 RCTS 실험을 위주로 설명하였다. Stokoe식 RCTS 시스템의 개념도는 그림 1(a)에 도시한 바와 같으며, RCTS 시스템의 실제 모습은 그림 1(b)와 같다. 그림 1(b)의 RCTS 시스템은 중앙대학교에서 자체 제작한 시스템이다.

RCTS을 위한 하드웨어는 그림 1(a)의 개념도에서 보듯이, 시료의 하단부는 고정되어 있고 상단부는 비틀진동이 가해지는 고정단-자유단 (fixed-free)식이다. 그림 1의 하드웨어는 두 가지 중요한 기능을 가지고 있다. 첫째는 공진주 실험과 비틀전단 실험을 동시에 수행할 수 있는 기능을 가지고 있어서, 두 실험을 실험기기 외부에서 간단한 조작으로 상호 전환하여 수행할 수 있다는 것이다.

따라서, 하나의 동일한 시료에 대해서 두 가지 서로 다른 실험 즉, 동적실험 (가진주파수 범위를 20~500 Hz로 취하는 공진주 실험)과 정적실험(가진주파수 범위를 0.01~10 Hz로 취하는 비틀전단 실험)을 수행할 수 있기 때문에, 두 실험결과를 비교함으로써 실험장비의 정확성을 검증할 수 있으며, 더욱이 기술자들 사이에 혼돈을 주고 있는 정·동적 전단탄성계수에 대한 명확한 규명을 할 수 있다. 둘째는 비틀전단 실험에서 가진주파수를 0.01 Hz~10 Hz의 범위에서 용이하게 변환할 수 있어서, 주파수나 재하 진동횟수 등의 영향을 조사할 수 있는 기능이 있다. 아래에 공진주 실험과 비틀전단실험의 원리와 지반 동적 물성치를 구하는 방법들에 관하여 구체적으로 언급하였다.

■ 공진주 실험에 의한 전단탄성계수의 측정

공진주 실험의 기본원리는 원주형 시료에 비틀진동을 주어 기본 모드의 공진이 발생하도록 하는 것이다. Stokoe식 RCTS 시스템의 경우, 주어진 시료에 대한 공진주파수의 결정은 가진주파수를 일정하게 변화시키면서 시료에 진동을 가하는 스위핑(sweeping) 방



(a) 정면도와 측면도 (Hwang, 1997)



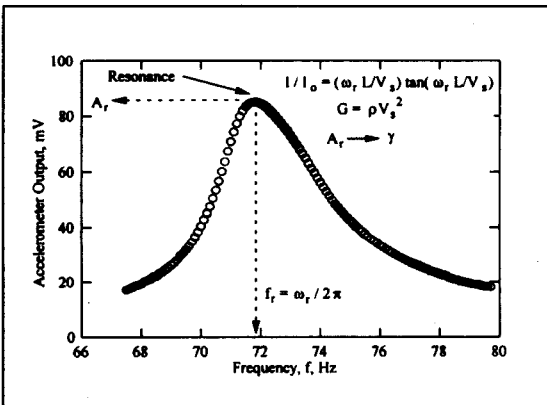
(b) 실제 RCTS 하드웨어 (조성호, 2000)

그림 1. 공진주 실험과 비틀전단 실험을 위한 하드웨어

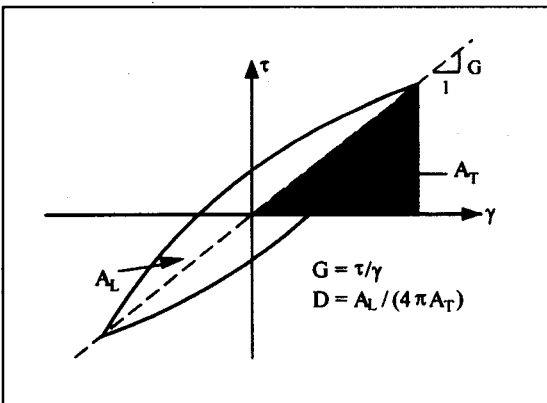
식으로 진행하며, 이에 대한 자세한 설명은 그림 2(a)에 예시되어 있다. 스위핑에 의해 일단 시료의 기본 공진주파수가 결정되면, 식 1에 의해서 시료의 전단파속도(v_s)가 결정되고, 전단파속도와 시료의 질량(ρ)에 의해 식 2로부터 전단탄성계수(G)를 결정할 수 있다.

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\omega_h h}{v_s} \tan \frac{\omega_h h}{v_s} \quad (1)$$

여기서, I, I_0 는 각각 시스템과 시료의 관성이차모멘트, h 는 시료의 높이, ω_h 는 시료의 자연공진주파수이다.



(a) 공진주 실험으로 측정된 주파수응답곡선



(b) 비틀전단 실험으로 수행한 Hysteresis Loop

그림 2. 공진주 실험과 비틀전단 실험으로 수행한 측정에 (Hwang, 1997)

$$G = \rho v_s^2 \quad (2)$$

그리고, 식 2의 전단탄성계수가 결정될 때 시료에 발생하는 전단변형률은 공진주파수의 진동이 시료에 가해질 때의 시료의 진동크기로부터 결정되어진다.

■ 공진주 실험에 의한 재료감쇠비의 측정

공진주 실험에 의한 재료감쇠비의 결정은 자유진동 감쇠법 (free-vibration decay method)과 하프-파우어 대역폭법 (half-power bandwidth method) 등 두 가지 방법에 의해서 가능하다. 각각의 방법은 전단 변형률의 크기에 따라 병행하여 또는 선택적으로 사용할 수 있다. 우선적으로 자유진동감쇠법에 의한 재료감쇠비의 측정(그림 3)을 살펴보면 다음과 같다.

시료에 공진주파수로 정현파 하중을 정상상태 (steady state)까지 재하하다가 어느 순간에 하중재하를 정지하였을 때, 그 때 시료에는 자유진동이 발생하게 된다. 자유진동의 크기는 시료의 재료감쇠비의 크기에 따라 시간에 따른 진동감소 정도가 달라지게 되는데, 이러한 특징을 이용하여 재료감쇠비를 측정하는 방법을 자유진동감쇠법이라고 한다. 자유진동시 시간에 따른 진동감소 정도는 식 3의 로그감소(logarithmic decrement) 형태로 표현할 수 있다.

$$\delta = \ln \left(\frac{z_1}{z_2} \right) \quad (3)$$

여기서, z_1, z_2 는 자유진동에 있어서 인접한 진동 사이클 (cycle)의 최대진폭이고, 이를 이용하여 재료감쇠비(D)를 구하면 식 4와 같이 된다.

$$D = \sqrt{\frac{\delta^2}{4\pi^2 + \delta^2}} \quad (4)$$

혹의 재료감쇠비는 자유진동감쇠법 이외에 하프-파우어 대역폭법으로도 측정 가능하다(그림 4). 스위핑 방식에 의해 수행된 공진주 실험으로부터 주파수 응답곡선이 결정되는데, 주파수 응답곡선의 최대진폭이 발생하는 공진주파수를 중심으로 하여 하프-파우어

점 (변위가 최대점의 $1/\sqrt{2}$ 배 되는 점)에서의 주파수 응답곡선의 폭을 측정하면, 그 폭의 넓고 좁은 정도에 따라 흙의 재료감쇠비를 측정하는 것이 가능하다. 이렇게, 주파수 응답곡선의 넓고 좁은 정도를 이용하여 재료감쇠비를 결정하는 방법을 하프-파우어 대역폭법이라고 한다. 특히, 재료감쇠비가 작은 경우 ($D \leq 10\%$)는 식 5와 같은 간편식으로 용이하게 재료감쇠비를 결정할 수 있다.

$$D \cong \frac{(f_2 - f_1)}{2f_r} \quad (5)$$

여기서, f_1 , f_2 는 그림 4에 설명되어 있는 것처럼, 각 주파수에서의 진폭이 공진주파수 f_r 에서의 진폭의 $1/\sqrt{2}$ 배

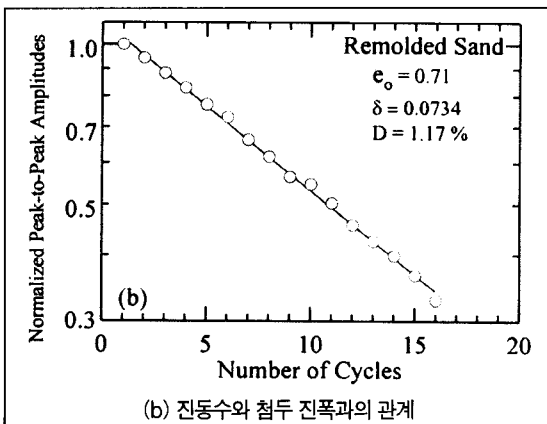
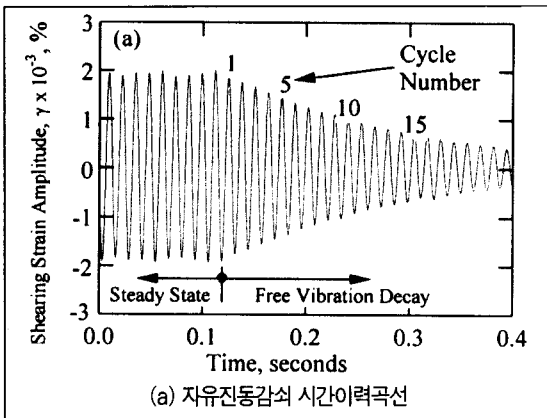


그림 3. 공진주 실험에서 자유진동감쇠법을 이용한 재료감쇠비의 측정 (Hwang, 1997)

에 해당하는 주파수를 지칭한다.

이상과 같이 공진주 시험에 있어서 흙의 재료감쇠비를 측정하는 방법은 자유진동감쇠법과 하프-파우어 대역폭법 두 가지가 있는데, 각각의 방법은 전단변형률의 크기에 따라 구별되어 사용되어야 한다. 즉, 흙 시료에 발생하는 전단변형률의 크기에 따라, 재료의 선형성 및 비선형성이 달라지게 되고, 또한 주변 환경진동이 측정결과에 미치는 영향이 상대적으로 달라지게 때문에, 시료에 발생하는 전단변형률의 크기에 따라 적합한 재료감쇠비 측정방법이 선정되어야 한다. 일반적으로 적용되는 재료감쇠비 측정방법의 선정기준은 다음과 같다.

전단변형률이 0.002% 보다 작은 저전단변형률에서는 주변진동으로 인해서 주파수 응답곡선보다 자유진동 감쇠곡선의 품질이 일반적으로 더 낫다. 따라서, 0.002% 보다 큰 고전단변형률에서는 식 5를 유도하기 위해 가정된 조건들이 유효하지 않아서 하프-파우어 대역폭법으로 재료감쇠비를 측정하게 되면 심각한 오류가 도입될 수 있다. 따라서, 일반적으로는 전단변형률이 0.002%보다 작은 경우 두 가지 방법을 모두 사용하여 재료감쇠비를 측정하는 것이 바람직하고, 전단변형률이 0.002%보다 큰 고전단변형률에서는 자유진동감쇠법만을 적용하여야 한다.

그리고, 자유진동감쇠법으로 재료감쇠비를 측정하

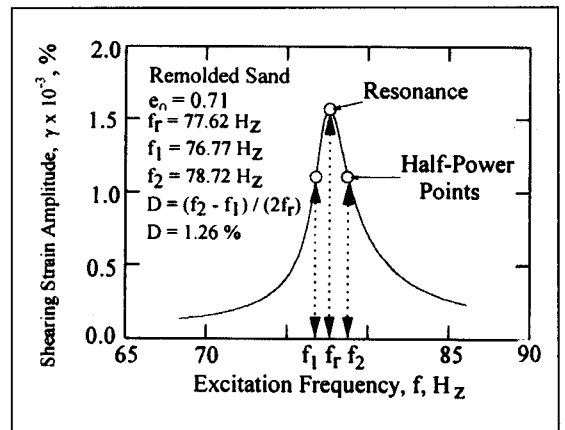


그림 4. 공진주 실험에서 하프-파우어 대역폭법을 이용한 재료감쇠비의 측정 (Hwang, 1997)

는 경우에 유의할 점은, 측정된 감쇠비에 해당하는 전단변형률은 자유진동이 시작한 시점에서부터 처음 세 개의 진동수(three cycles)에 해당하는 전단변형률의 평균치로 가정하도록 하는 것이 적합하다.

■ 비틀전단 실험에 의한 전단탄성계수의 측정

비틀전단 실험에서는 공진주 실험과 동일한 하드웨어를 사용하여 전단탄성계수와 재료감쇠비를 측정하지만, 공진주 실험의 경우보다는 작은 고주파수를 사용하여 비틀전단하중을 가하게 된다. 그림 2(b)에 도시한 바와 같이, 공진주 실험의 경우처럼 공진주파수를 결정하지 않고, 시료에 가해진 비틀력과 이에 대한 시료의 변형인 비틀각을 측정하여, 전단응력-전단변형률 히스테리시스 루프(hysteresis loop)를 형성하고 이로부터 전단탄성계수와 재료감쇠비를 측정한다.

비틀전단 시험에서는 전단변형률의 측정을 위하여 공진주 시험에서와는 달리 프록시미터 (proximitor)라고 하는 근접거리 측정센서를 사용하여 비틀각을 측정하게 된다. 그리고, 일단 전단응력-전단변형률의 히스테리시스 루프가 결정되면, 루프의 양 끝단을 연결하는 직선의 기울기를 구하고, 그 기울기를 전단탄성계수라고 한다. 재료 감쇠비의 경우는 히스테리시스 루프 형상으로부터 결정되어지며, 하나의 진동수 만큼 재하하는 동안에 소모된 총 에너지와 동일 진동 재하 동안에 저장된 변형에너지 (strain energy)의 4D π배의 비로 정의된다 (그림 2(b)).

■ 공진주/비틀전단 하드웨어의 Back-EMF에 대한 보정

Stokoe et al.(1994)에 의해서 연구된 바처럼, 코일-영구자석 시스템에 기초한 공진주시험 장비에는 시스템 내에 유도되는 back-EMF (electromotive force) 때문에, 시스템 내부에서 소모되는 에너지가 존재하므로, 실제 시료로부터 측정된 재료감쇠비에서 시스템 소모 부분을 제거할 필요가 있다. 따라서, 시료에 대한 재료감쇠비 측정이전에 실험에서 사용되는 전 주파수 대역에 걸쳐서 RCTS 하드웨어를 보정하

는 것이 선행되어야 한다. 공진주 실험에 있어서 발생하는 시스템 감쇠비는 미국 텍사스대학이 소유하고

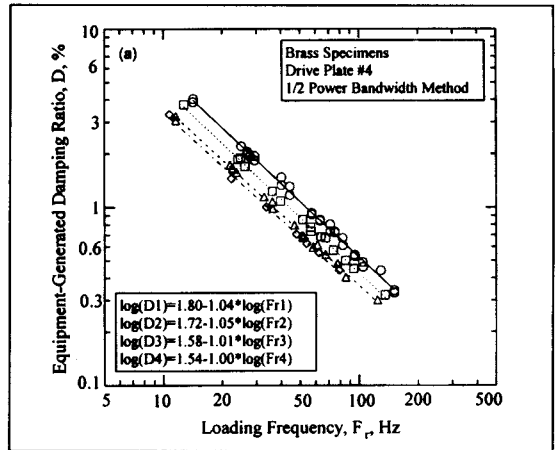


그림 5. 금속시료를 이용하여 측정된 공진주 하드웨어의 시스템 감쇠비 (Hwang, 1997)

있는 RCTS 하드웨어의 경우 그림 5에 보인 바와 같다 (Hwang, 1997).

2.1.2 초음파 펄스 실험 (Ultrasonic Pulse Test)

초음파 펄스실험(Lawrence, 1963)도 실내에서 파동전파 속도를 측정할 수 있는 방법 중의 하나로서, 초음파 발진기와 수신기를 시료의 양끝에 부착한 판에 고정하여 시험을 수행한다. 초음파 발진기와 수신기는 압전소자로서 제작되는데, 압전소자는 전압이 가해질 때 형태가 변하고, 형태를 변화시킬 때 압전소자의 표면에 전압이 발생하는 특징을 가지고 있다. 초음파 발진기 소자에 고주파의 전기 펄스를 가하게 되면 압전소자는 급격히 변하게 되고, 결과적으로 감진기 방향으로 전파되는 응력파를 발생시키게 된다. 응력파가 초음파 수신기에 도달하게 되면, 응력파의 진동으로 초음파 수신기의 변형이 발생하게 되고 결과적으로 수신기에 전압이 유도되게 된다. 이와 같이 초음파 발진기에서 출발한 응력파가 초음파 수신기에 도착하는 전파시간을 측정하고, 또한 초음파 발진기와 감진기 사이의 거리를 측정하게 되면, 응력파가 초

음과 발진기를 출발해서 감진기에 도달하게 되는 속도를 계산할 수 있게 된다. 초음파 펄스 실험은 흙 시료가 시료추출용 튜브 안에 있을 때에도 실험을 수행할 수 있기 때문에, 해저의 퇴적층 시료와 같은 매우 연약한 재료에 특히 유용하게 사용된다.

2.1.3 압전식 휨요소 실험 (Piezoelectric Bender Element Test)

실내에서 흙 시료의 전단파속도를 측정할 수 있는 또 다른 형태의 실험방법으로 압전식 휨요소 실험방법이 있다 (Shirley and Anderson, 1975). 휨요소는 두 개의 압전소자를 서로 결합하여 제작하는 것으로서, 휨요소에 전압을 가하였을 때, 한 압전소자는 수축을 하고, 다른 압전소자는 팽창을 하도록 함으로써 결과적으로 휨요소가 휘어지도록 유도하는 것이다. 그림 6에 이에 대한 개략적인 개념도를 도시하였다. 이와 같은 맥락으로 휨요소에 변형이 발생하면 휨요소의 표면에 전압이 발생되므로, 휨요소를 매질의 전단파속도 측정을 위한 탄성과 발진장치, 수신장치로 사용하는 것이 가능하다.

대부분 실험 구성에 있어서, 휨요소를 흙 시료의 한 쪽 끝에서 관입하여 전압 펄스를 발진기 소자에 가함으로써 전단파를 발생시킨다. 이렇게 발생된 전단파가 시료의 반대쪽 끝에 도달하였을 때, 응력과 감진기 소자를 진동하게 하고 결과적으로 감진기 소자 내에 전압이 발생되도록 한다. 발진기 소자를 출발한 응력파가 감진기 소자에 도착한 전파 시간과 발진기-감진기 간 거리를 이용하여 응력파의 전파 속도를 계산할 수 있다.

압전식 휨요소는 일반 삼축압축 실험, 직접단순전단 실험, 압밀 실험 및 여러 기타 실험 등에 도입되었으며, 압전식 휨요소 실험이 수행된 이후에도 시료가 교란되지 않아서 이어서 다른 실험의 시료로 사용될 수 있는 장점을 가지고 있다.

2.2 고전단변형률 실험

흙에 발생하는 전단변형률이 큰 경우 일반적으로

부피변화 경향을 나타낸다. 배수하중 조건하에서, 이러한 경향은 체적변형률의 형태로 나타나고, 비배수 조건에서는 간극수압 (또는 유효구속응력)의 변화로 귀결된다. 흙의 거동은 유효응력에 의해 좌우되기 때문에, 높은 전단변형률에서의 실험은 간극수의 배수를 조절할 수 있는 기능, 체적변화와 간극수압을 측정할 수 있는 기능을 필요로 한다. 일반적으로 높은 전단변형률에서 흙의 거동을 평가할 수 있는 실험으로 진동삼축 실험 (Cyclic Triaxial Test), 진동직접단순전단 실험 (Cyclic Direct Simple Shear Test), 진동비틀전단 실험 (Cyclic Torsional Shear Test) 등이 있으며, 아래에 각 실험에 관해서 간략히 언급하였다.

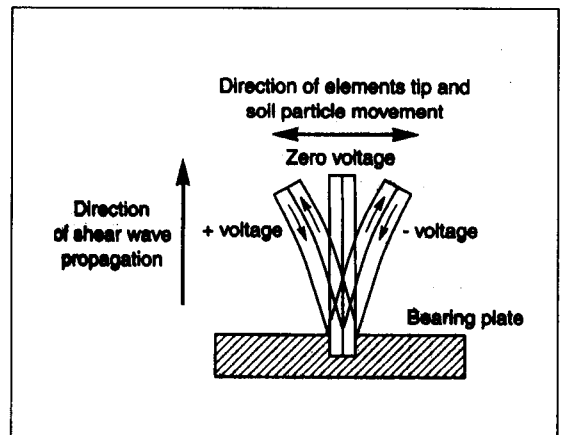


그림 6. 압전식 휨요소 (Kramer, 1996)

2.2.1 진동삼축 실험 (Cyclic Triaxial Test)

일반 삼축압축 실험이 정하중 재하에 대한 흙의 물성을 측정하기 위해 가장 널리 사용되는 실내실험인 것처럼, 진동삼축 실험은(그림 7) 고전단변형률에서 흙의 동적 물성치를 측정하기 위하여 가장 널리 사용되는 실험이다. 삼축압축 실험에서는 상부 재하판 및 하부재하판 사이에 원통형 모양의 시료를 거치하고, 얇은 고무 멤브레인으로 시료를 둘러싼다. 이렇게 시료가 거치된 후에, 시료에 등방구속 압력을 재하하고, 이어서 축응력을 재하하게 된다. 삼축압축 실험의 경계조건에 의해, 시료에서의 주응력은 항상 수직면과

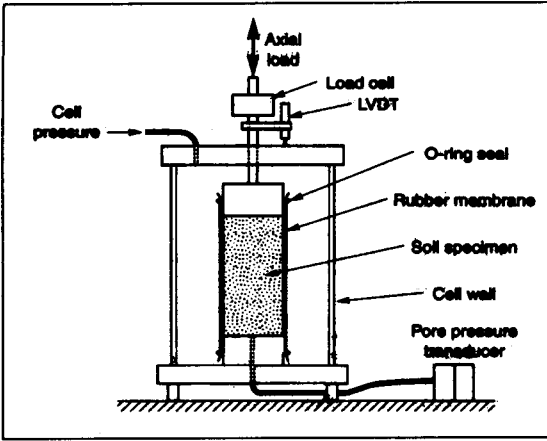


그림 7. 전형적인 삼축압축시험장비 (Kramer, 1996)

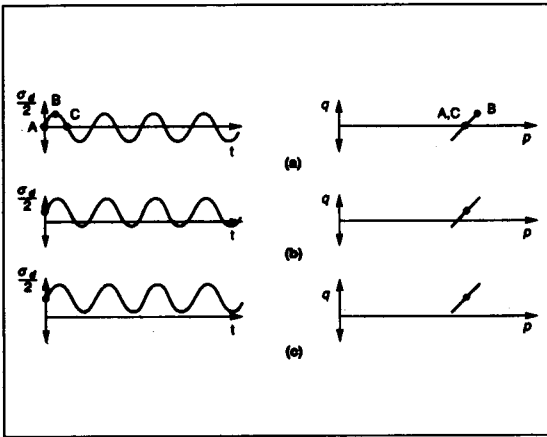


그림 8. 축차응력과 응력경로의 시간이력
(a) 등방압밀조건, (b) 비등방 압밀조건 (진동축차응력) 압밀시 축차응력, 응력반전발생), (c) 비등방 압밀조건 (진동축차응력<압밀시 축차응력, 응력반전미발생)(Kramer, 1996)

수평면이 된다. 축응력과 등방구속 압력의 차이를 축차응력이라고 하고, 진동삼축압축 실험에서는 축차응력을 진동하중 (cyclic loading)으로 가하는데, 하중제하는 응력조절 (stress controlled) 방식이나 변형률조절 (strain controlled) 방식으로 수행된다. 진동삼축압축 실험시 등방구속 압력은 일정하게 유지하고, 축응력을 약 1 Hz 정도 주파수의 진동하중으로 재하하여 시험하는 것이 일반적이다.

정적인 삼축실험의 경우처럼, 진동삼축 실험은 등

방압밀이나, 비등방압밀 조건에서 수행될 수 있는데, 비등방압밀 조건의 경우, 그림 8에서와 같은 진동하중을 시료에 가할 수 있다. 그림 8(a)는 등방압밀된 시료에 대한 진동축차응력과 전응력 경로를 보여주고 있다. 등방압밀 실험은 지반의 표면이 수평이고, 수평면에 특별히 초기응력조건이 존재하지 않는 경우를 모사하기 위해서 적용하는 실험이다. 등방압밀 실험은 전단응력이 0인 점 (점 A)에서 시작하여 축차응력을 점차 증가시킨다.

축응력이 횡방향 응력보다 크기 때문에, 최대주응력은 수직방향, 최소주응력은 수평방향으로 작용하게 된다. 축차응력이 최대치에 도달할 때 (점 B), 축차응력은 감소하여서 0의 값으로 근접하게 된다 (점 C). 축차응력이 점 C에 도달하기 바로 직전에는, 최대주응력이 여전히 수직방향이지만, 축차응력이 점 C를 통과한 직후에는 순간적으로 주응력이 수평방향으로 전환되고 축차응력은 음의 값이 된다. 이러한 응력 반전 (stress reversal)은 실험진행 동안에 계속 반복되고, 축차응력이 0을 지나게 될 때마다 주응력축이 순간적으로 90° 회전하게 된다.

한편, 초기응력이 존재하는 사면 내부나 사면 하부의 조건을 모델링하기 위해서는, 비등방 압밀 삼축 실험을 수행하여야 한다. 비등방압밀 시료에 대한 삼축압축 실험의 예로 그림 8(b)를 참고할 수 있으며, 이 경우 진동축차응력의 크기가 압밀시 가해졌던 축차응력보다 크게 작용하고 있다. 그림 8(b)의 경우, 진동축차응력이 p-축에 관해서 대칭이 아니지만, 여전히 응력반전 (stress reversal)이 발생하고 있다. 만일 진동축차응력이 압밀시 축차응력보다 작으면 (그림 8(c)), 전혀 응력반전이 발생하지 않는다. 이 경우에 있어서 주응력축은 회전하지 않고, 시료내의 전단응력 또한 0에 근접하지 않고 있다.

그림 8의 응력경로는 초기 응력조건, 응력경로, 주응력축의 회전 측면에 있어서 실제 흙 입자에 파동이 전파될 때 발생하는 응력경로와 다르다. 따라서, 이러한 차이로 인하여 진동삼축 실험으로부터 구한 지반의 물성을 실제 파동전파문제에 적용시키는데는 근본

적인 문제가 있다.

어떤 경우에 있어서는 구속압력의 재하를 진동압력으로(cyclically) 가하는 경우도 있다. 축차응력이 증가하는 것만큼 구속압력을 감소시키고, 축차응력이 감소하는 것만큼 구속압력을 증가시킴으로써, 삼축압축 실험시 발생하는 응력경로를 실제로 수직 전단파(SV)가 유발하는 응력경로와 결과적으로 거의 동일하게 할 수도 있다. 그러나, 삼축압축 실험 중 주응력은 수직과 수평을 유지하고 있어서, 실제 전단파가 매질을 통과할 때처럼 연속적으로 주응력축이 회전하지는 않는다.

진동삼축압축 실험에서 측정되는 응력과 변형률을 이용하여 전단탄성계수와 감쇠비를 계산할 수 있다. 진동삼축압축 실험은 시료의 아래와 윗 부분에 응력집중이 다소 일어나긴 하지만, 전반적으로 균등한 응력재하가 가능하고, 배수조건도 정확하게 조절할 수 있다. 그리고, 진동삼축 실험장비는 기존의 일반삼축압축 실험장비를 부분적으로 수정함으로써 용이하게 제작할 수도 있다. 그러나, 한편으로는 실제 탄성과 파동전파시 발생하는 응력조건을 정확하게 모델링하는데 다소의 문제가 있을 수 있다. 진동삼축압축 실험으로 국부적인 변형률 측정에 의해서 0.0001%까지의 전단변형률 범위까지 정확한 측정을 시도하기는 하지만, 시료의 거치시 발생하는 오차, 시스템 자체의 기계적 문제 등이 존재하기 때문에 약 0.01% 이상의 전단변형률에 대해서만 정확한 측정이 가능하다.

모래나 자갈 등과 같은 조립토에 대한 진동삼축 실험에 있어서는 멤브레인 침투 영향이 중요한 인자로 작용할 수 있다. 압밀이 종료된 후, 얇은 삼축 멤브레인이 모래나 자갈 시료 외주면의 간극 속으로 침투할 수 있어서, 진동재하 중 과잉간극수압이 증가할 때 멤브레인에 작용하는 순 압력은 감소하게 된다. 이러한 현상이 발생할 때, 간극의 유효체적은 증가하고, 과잉간극수압은 체적변화가 없었을 때의 과잉간극수압 수준보다 더 감소하게 된다. 즉, 체적이 일정하게 유지되었을 때 발생할 수 있는 유효응력보다 더 큰 유효응력이 시료에 작용하게 되기 때문에, 멤브레인 침투가

발생하는 경우에 측정된 탄성계수나 재료감쇠비는 부정확한 값이 된다. 이러한 멤브레인 침투에 대한 연구로서 멤브레인 침투의 측정, 최소화, 보정, 실험후 보정 등에 관한 방법들이 제안되어 있다.

2.2.2 진동직접단순전단 실험 (Cyclic Direct Simple Shear Test)

진동직접단순전단 실험은 진동삼축압축 실험보다 지진하중으로 인한 응력조건을 더 정확하게 재현할 수 있기 때문에, 액상화 실험을 위해서 가장 널리 사용되고 있는 방법이다. 진동직접단순전단에서는 높이가 낮은 원통형 시료를 사용하는데, 시료의 방사형 변형을 특별히 고안된 장치에 의하여 구속하고 있다. 방사형 변형을 구속하는 장치를 예를 들면, 철심으로 보강된 멤브레인을 사용하는 NGI 형식, 일련의 등근 고리를 쌓아놓은 방식의 SGI 형식과 무변형 경계를 모델링한 평판식의 Cambridge 형식 등이 있다. 진동직접단순전단 실험은 시료의 상부 또는 하부에 수평방향의 진동하중을 가함으로써, 실제 수직으로 전파하는 전단파를 모사하고 있다 (그림 9).

그러나, 단순전단 장비는 전단응력을 단지 시료의 상부면 또는 하부면에만 작용하기 때문에, 시료의 수직면에 상응하는 전단응력이 가해지지 않는다. 따라서, 수평방향의 전단응력에 의해서 발생한 모멘트는 전단응력과 수직응력을 불균일하게 분포되도록 하며, 이러한 응력의 불균일 효과는 시료의 직경-높이비를 증가시킴으로써 감소시킬 수 있으며, 일반적으로 권장되는 직경-높이비는 8:1보다 큰 수이다 (Kovacs and Leo, 1981). 기존의 단순전단장비는 K_0 상태 이외의 초기하중을 줄 수 없는 문제점을 가지고 있으나, 최근에는 수직방향 및 수평방향의 응력을 별도로 가할 수 있는 장비가 개발되어 있다.

2.2.3 진동비틀전단 실험 (Cyclic Torsional Shear Test)

진동삼축 실험, 진동직접단순전단 실험과 관련된 여러 가지 문제점들은 원통형 시료에 비틀력으로 하

중을 재하함으로써 해결될 수 있다. 진동비틀전단 실험은 등방 또는 비등방 초기응력을 가할 수 있고, 주 응력축을 연속적으로 회전시키면서 수평면에 진동전단응력을 가할 수 있다. 또한, 넓은 범위의 전단변형률에 대해서 탄성계수와 감쇠비를 측정하기 위해 가장 널리 사용되고 있다.

Ishihara와 Li (1972)는 비틀삼축 실험을 개발하였고, Dobry et al. (1985)은 응력조절방식의 축하중 재하와 변형을 조절방식의 비틀하중 재하가 모두 가능한 실험기기를 개발하였다. 속이 차 있는 원통형 시료의 비틀실험의 경우 비틀하중으로 발생하는 전단변형률은 0(원통형 시료 중심의 경우)부터 최대(시료 외곽면의 경우)치로 변하기 때문에, 위치에 따라 전단변형률이 균일하지 않은 단점이 있다. 따라서, 균일한 전단변형률을 발생시키기 위하여 그림 10에 도시

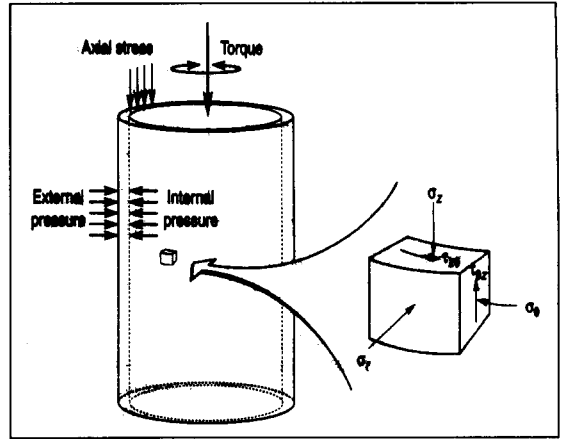


그림 10. 중공(中空)식 실린더형 비틀전단 실험장치 (Kramer, 1996)

응력 및 전단변형률 조건에 관계없이 하나의 선형-탄성 재료로 거동하기보다는, 응력-전단변형률 조건에 따라 거동을 달리하는 비선형 재료라고 할 수 있다. 즉, 동하중의 크기 및 주파수 성분, 지반 내의 지중 응력의 크기, 지반 내에 유발되는 전단변형률의 크기 등 여러 요인에 따라서 지반의 전단탄성계수 및 재료감쇠비가 달라진다. 따라서, 동하중이나 지진하중이 지반에 가해질 때, 그에 따른 지반거동이나 지반에 설치된 구조물의 거동을 예측하고 평가하기 위해서는 적합한 지반의 동적 물성치를 사용하는 것은 필수적이라고 할 수 있다.

본 장에서는 흙의 동적 물성치인 전단탄성계수와 재료감쇠비의 선형 및 비선형 특성과 전단탄성계수와 재료감쇠비에 영향을 주는 영향인자를 살펴보고자 한다. 흙의 동적 특성은 선형-탄성 거동을 보이는 저전단변형률 대역과 비선형 거동을 보이는 고전단변형률 대역에 따라서 다르기 때문에, 저전단변형률에 있어서의 영향과 고전단변형률에 있어서의 영향인자를 분리하여 정리하였다.

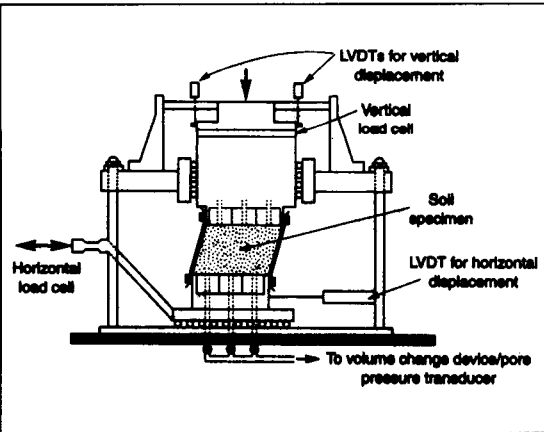


그림 9. NGI 식 진동단순전단 실험장치 (Kramer, 1996)

되어 있는 것처럼, 속이 비어 있는 원통형 시료를 제작하여 진동비틀전단 실험을 수행한 사례도 있다 (Drnevich, 1967).

3. 전단탄성계수와 재료감쇠비

흙의 역학적 거동은 정하중 하에서도 그렇지만, 특히 동하중, 지진하중 하에서는 매우 복잡하여 여러 가지 인자에 의해서 영향을 받게 된다. 지반은 단순히

3.1 저전단변형률에서의 전단탄성계수(G_{max})와 재료감쇠비(D_{min})

저전단변형률, 즉 전단변형률이 $10^{-3}\%$ 이하일 때의 전단탄성계수(G_{max})와 재료감쇠비(D_{min})는 응력상

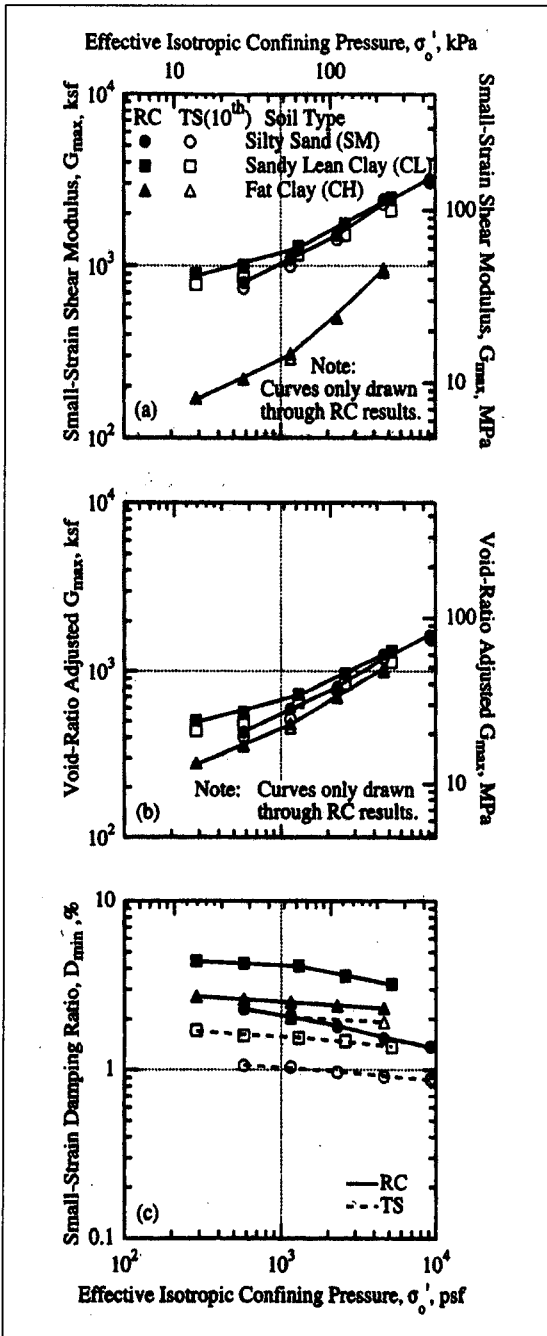


그림 11. 공진주 실험과 비틀전단 실험에 있어서 유효주응력에 따른 지반 동적 물성치의 변화 : (a)저전단변형을 전단탄성계수, (b) 간극비-보정 전단탄성계수, (c) 저전단변형을 재료감쇠비, (Stokoe, et al, 1999)

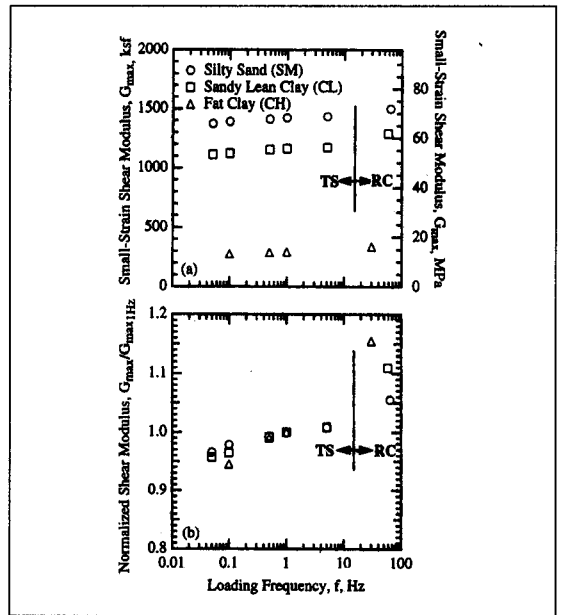


그림 12. 평균유효주응력에서 가진주파수에 따른 전단탄성계수의 변화 (a) 저전단변형을 전단탄성계수, (b) 정규화된 저전단변형을 전단탄성계수(Stokoe, et al, 1999)

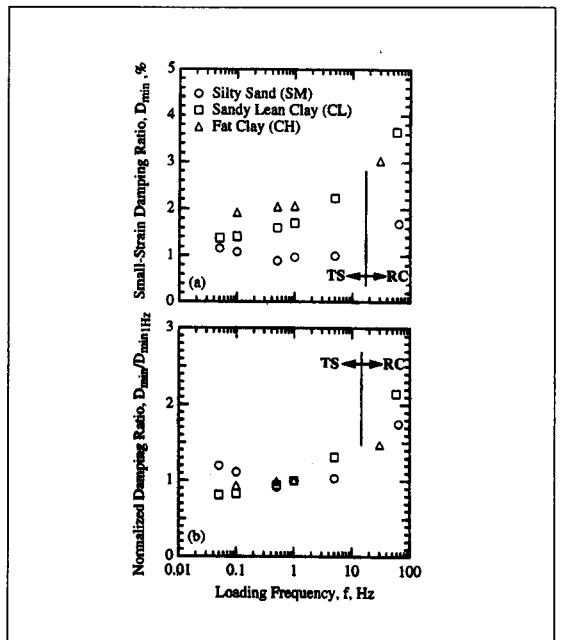


그림 13. 평균유효주응력에서 가진주파수에 따른 재료감쇠비의 변화 (a) 저전단변형을 재료감쇠비, (b) 정규화된 재료감쇠비(Stokoe, et al, 1999)

대, 지반 특성, 진동하중 특성 등에 주로 영향을 받으며, 이러한 영향인자들에 대한 대표적인 실제 실험자료를 그림 11~13에 도시하였다. 응력상태에 대한 영향인자로는 등방구속압력과 과압밀비 등으로 요약되며, 지반 특성에 대한 영향인자로는 흙의 종류, 소성지수(PI) 등이라고 할 수 있다. 진동하중 특성으로서는 가진주파수가 유일한 영향인자로서, 모든 동적 측정이 저전단변형률에 국한되고, 저전단변형률 구간에서는 전단변형률의 크기, 재하진동수(cycles) 등이 중요하지 않은 인자이기 때문이다. 또한, 일정한 유효구속응력(σ'_v)에서 구속시간의 크기도 G_{max} 와 D_{min} 에 대한 영향인자임을 주지할 필요가 있는데, 일반적으로는 구속시간의 증가에 따라서 최대전단탄성계수는 증가하고 최소재료감쇠비는 감소하는 경향을 보이고 있으므로, 구속압이 가해지고 약 1000분 경과하였을 때의 최대전단탄성계수와 최소재료감쇠비 측정치를 사용하고 있다. 1000분 정도의 구속압력 재하시간은 일차압밀시간을 훨씬 초과하는 것이다. 아래에 G_{max} 와 D_{min} 에 대한 응력상태 및 지반특성, 가진주파수의 영향 등을 보다 자세하게 알아보았다.

3.1.1 응력상태 및 지반 특성의 영향

유효구속응력의 최대전단탄성계수와 간극비를 보정한 최대전단탄성계수의 영향이 그림 11(a)와 11(b)에 도시되어 있다. 간극비 보정 최대전단탄성계수는 식 6에서와 같이 Hardin (1978)이 제안한 간극비 항인 $F(e)$ 를 최대전단계수에 곱하여 준 것이다.

$$F(e) = 0.3 + 0.7 e^2 \quad (6)$$

여기서, e 는 각 구속압력 재하상태에서의 간극비이다. Hardin의 간극비항 이외에도 Hwang (1997), Jamiolkowski et al., Shibuya와 Tanaka, Vrettos와 Savidis 등이 제안한 공식을 사용하여 최대간극비를 보정할 수도 있다. 그림 11(a)와 그림 11(b)에서 알 수 있듯이, $\log G_{max} - \log \sigma'_v$ 또는 $\log (G_{max} \cdot F(e)) - \log \sigma'_v$ 의 관계식은 두 개의 직선으로 이루어

어져 있는데, 두 직선의 경계는 최대 선행 현장평균유효응력(maximum previous in situ mean effective stress), 즉, 과거에 재하되었던 평균유효응력 중 최대치인 σ'_{mp} 이 된다.

따라서, 이 관계와 시료의 현장 평균유효응력 상태를 참고하였을 때 현 시료가 정규압밀토인지 과압밀토인지를 추정할 수 있다.

그림 11에서 검은 색 기호는 공진주 실험으로 결정된 값들이고, 흰 색 기호는 비틀전단 실험에서 1 Hz의 주파수로 10회 진동수(cycles) 재하 후에 측정된 값들이다. 공진주 실험과 비틀전단 실험의 결과차이는 재하주파수의 차이로 기인한 것이다. 그림 11(a)와 11(b)를 비교하면, 간극비 보정으로 인하여 저전단변형률의 최대전단탄성계수 관계식의 상관성이 더 높아짐을 확인할 수 있다.

최대전단탄성계수는 일반적으로 현장의 하중조건, 지반조건, 과압밀 상태 등을 이용하여 추정할 수 있으며, 대표적인 식으로는 Hardin과 Drnevich (1972)가 제안한 식 7을 들 수 있다.

$$G_{max} = \frac{A}{F(e)} OCR^k Pa^{(1-n)} \sigma'_v{}^n \quad (7)$$

여기서, A : 무차원 강성계수

OCR : 과압밀비

k : PI에 관련한 지수

P_a : 대기압 (100 kPa)

n : 유효구속응력과 관련한 지수

최소재료감쇠비도 유효구속압력에 의해서 영향을 받는데, 그림 11(c)에 그 추세가 도시되어 있다. 검은 색 기호는 공진주 실험의 결과를 나타내고, 흰 색 기호는 1 Hz 주파수의 진동하중 (cyclic loading)을 10회 가했을 때 수행한 비틀전단 실험의 결과를 보여주고 있다. 그림 11(c)에서 확연히 알 수 있는 것은 유효구속응력이 증가할수록 최소재료감쇠비는 작아지고, 공진주 실험보다 비틀전단 실험에 의한 재료감쇠비가 더 작다는 것이다. 특히 최소재료감쇠비의 구속

응력에 대한 영향은 일반적으로 식 8에 의해서 표현할 수 있다.

$$D_{min} = B P_a^m \sigma'_0{}^m \quad (8)$$

여기서, B와 m은 그림 11(c)에 도시된 시료의 경우 각각 1.9~4.0, 0.04~0.20의 분포를 보이고 있다.

3.1.2 가진주파수의 영향

시료에 가해지는 진동의 주파수에 따라서 흙의 동적 특성이 달라질 수 있다. 즉, 가진주파수가 시료의 최대전단탄성계수와 최소재료감쇠비에 미치는 영향도 간과할 수 없는 영향인자인데, 그림 12와 13에 실제 시료에 대한 가진주파수의 영향을 평가한 측정자료가 도시되어 있다. 그림 12와 13중 각각 1 Hz 주파수에서 측정된 G_{max} 와 D_{min} 으로 정규화되어 있는 그림을 참고하여 보면, 가진주파수의 영향이 G_{max} 의 경우는 미미하고, D_{min} 의 경우는 매우 심각함을 알 수 있다. 즉, G_{max} 의 경우는 정규화된 최대전단탄성계수, $G_{max} / G_{max, 1Hz}$ 의 값이 약 0.95~1.15의 범위에 분포되는 한편, D_{min} 의 경우는 $D_{min} / D_{min, 1Hz}$ 의 값이 0.8~2.2의 범위로 넓게 분포되어 있다. 따라서, G_{max} 의 경우는 최대 15%정도의 차이를 가지지만, D_{min} 의 경우는 최대 120%의 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 이러한 가진주파수의 영향은 그림 11(c)에 있어서도 뚜렷하게 나타나는데, 즉, 공진주 실험으로 측정된 D_{min} 이 1Hz의 가진주파수를 이용한 비틀전단 실험의 값들보다 모두 큰 값을 가지고 있음을 보여주고 있다.

이러한 가진주파수의 영향은 흙의 종류에 따라 차이가 있다. 그림 14의 경우와 여러 가지 흙에 대한 실험결과들을 참고하여 볼 때, 최대전단탄성계수의 경우, 일반적으로 흙의 소성지수가 클수록 가진주파수의 영향이 증가하는 경향을 보인다. 그러나, PI와 G_{max} 의 관계는 매우 명료한 관계식으로 표현할 수 있을 정도로 완벽하지는 않다. 최소재료감쇠비의 경우는 흙의 종류에 따라서 최대전단탄성계수의 경우와

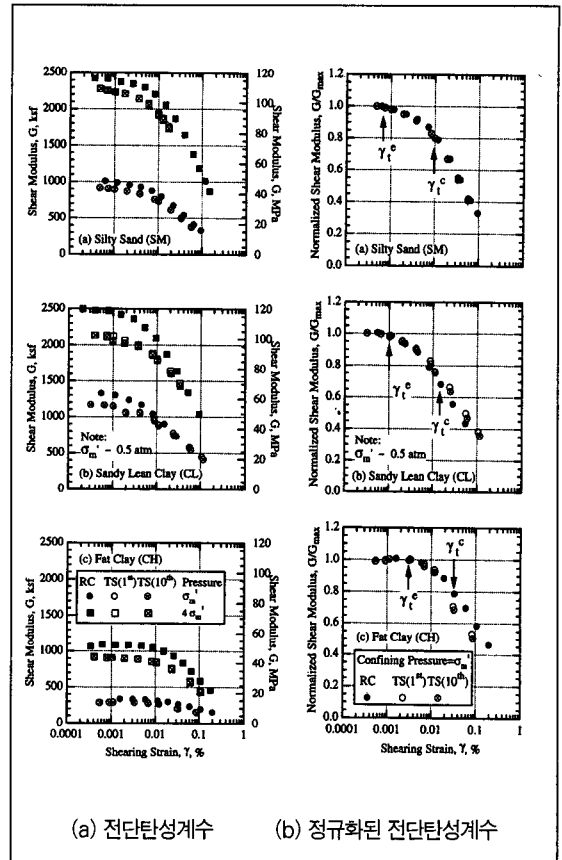


그림 14. 전단변형률, 구속응력, 재하진동수 (cycles) 등에 따른 전단탄성계수와 정규화된 전단탄성계수의 변화 (Stokoe, et al, 1999)

동일한 일반적 관계는 성립이 되지만, 최대전단탄성계수보다 그 관계는 다소 덜 명확하게 나타난다.

저전단변형률에서 흙의 동적 거동 중 특히 최대전단탄성계수에 미치는 요인을 정리하면, 표 1과 같다.

3.2 고전단변형률에서의 전단탄성계수와 전단탄성계수감소곡선 (Modulus Reduction Curve)

일반적으로 흙에 발생되는 전단변형률이 10⁻³%보다 큰 경우에는 비선형 거동을 보이게 되는데, 이 경우를 10⁻³% 보다 작은 전단변형률과 구별하여 고전단변형률 대역이라고 한다. 이 비선형 구간, 즉 고전단

표 1. 정규압밀토 또는 과압밀토의 전단탄성계수에 대한 환경 조건 및 재하 조건의 영향 (Kramer, 1996)

증가 요인	최대전단탄성계수, G_{max}
유효구속응력, σ'_v	σ'_v 의 증가에 따라 증가
간극비, e	e 의 증가에 따라 감소
지질연대, t_g	t_g 의 증가에 따라 증가
cementation, c	c 의 증가에 따라 증가
과압밀비, OCR	OCR의 증가에 따라 증가
소성지수, PI	OCR > 1인 경우 : PI의 증가에 따라 증가 OCR = 1인 경우 : 변화가 없음
전단 변형률 속도, $\dot{\gamma}$	사질토의 경우 : 영향이 없음 점성토의 경우 : $\dot{\gamma}$ 의 증가에 따라 증가
하중재하 진동수, N	점성토의 경우 : 큰 전단변형률의 진동재하 (cyclic loading) 이후 감소 사질토의 경우 : 증가

변형률 구간에서 전단탄성계수에 미치는 전단변형률 크기, 유효구속응력, 재하하중의 진동수 등의 영향을 실제로 측정된 자료를 그림 14에 제시하였다. 검은색 기호는 공진주 실험으로 구한 결과를 의미하고, 흰 색 기호는 비틀전단 실험에서 첫 번째 진동수의 하중재하 직후 측정된 결과를 의미한다. 그리고, × 기호는 비틀전단 시험에서 10번째 진동수의 하중재하 이후에 측정된 결과를 나타낸다. 그림 14(a)에는 두 종류의 측정결과가 도시되어 있는데, 아래의 것은 추정된 유효현장응력 (σ'_m)과 같은 크기의 유효구속응력이 재하되었을 때의 측정치이고, 그 위의 것은 σ'_m 의 4배에 해당되는 유효현장응력이 유효구속응력으로 재하되었을 때의 측정결과이다.

3.2.1 전단변형률의 영향

그림 14(a)를 참조하여, 전단변형률에 따른 흙의 선형, 비선형 거동을 살펴보면 다음과 같다. 전단변형률 범위가 0.001%~0.01%인 부분에서는 전단탄성계수가 거의 일정한 경향을 보이다가 감소하는 추세로 변하게 되는데, 그 경계를 탄성임계전단변형률 (elastic threshold strain, γ_e)이라고 한다. 전단변형률이 σ'_v 이하에서의 흙의 거동을 일반적으로 선형 또

는 탄성이라고 하는데, 실제로는 이 구간에서 대부분의 흙이 재료감쇠현상을 보이고 있어서 진정한 의미의 탄성거동이라고는 할 수 없다. 이러한 취지에서 Vucetic 과 Dobry(1991), Ishihara (1996)는 σ'_v 를 비선형임계전단변형률 (nonlinearity threshold strain)이라고 부르고 있다. 전단변형률이 σ'_v 를 초과하여 증가할 때, 전단탄성계수는 비선형적으로 감소하게 되는데, 이는 공진주 실험이나 비틀전단 실험에서 공히 관찰되는 현상이다.

3.2.2 하중재하 진동수의 영향

하중재하 진동수도 전단탄성계수에 영향을 미치는 하지만, 사이클임계전단변형률 (cyclic threshold strain, γ_c)이라고 하는 전단변형률을 초과하는 영역에서만 전단탄성계수의 변화가 있고, 사이클임계전단변형률 이하의 전단변형률에서는 하중재하 진동수가 전단탄성계수에 영향을 주지 않는다. 따라서, 사이클임계전단변형률 이상의 전단변형률 구간에서 전단변형률이 증가할수록, 하중재하 진동수가 증가할수록 전단탄성계수는 감소하게 된다. 사이클임계전단변형률 또한 탄성임계전단변형률과 같이 소성지수가 증가할수록, 구속응력이 증가할수록 변하게 되며, 대체적으로 0.01%와 0.1%사이의 범위 내에 존재한다. 완전 포화된 시료에 대해서 부피변화를 측정한다면, 부피변화가 시작되는 경계는 γ_c 와 거의 유사하거나 약간 작은 전단변형률이라는 것을 알 수 있다. γ_c 보다 큰 전단변형률 구간에서는 전단탄성계수가 일정한 전단변형률에 대해서 하중재하 진동수가 증가할수록 감소하게 된다. 전단탄성계수에 대한 하중재하 진동수의 이러한 영향은 간극비, 구속압, 포화도 등에 의한 것이라고 할 수 있다. Vucetic 과 Dobry (1991)와 Ishihara (1996)는 γ_c 를 저감임계전단변형률 (degradation threshold strain)이라고도 하였다.

3.2.3 전단탄성계수감소곡선에 대한 소성지수와 유효구속응력의 영향

비교란 시료에 대하여 측정된 전단탄성계수를

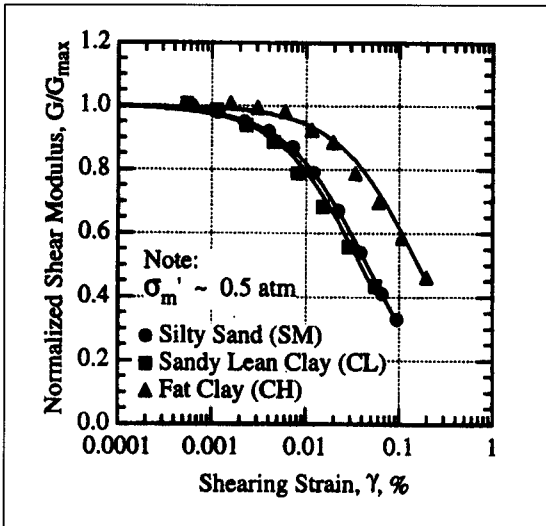


그림 15. 일정 구속응력 하에서 $G/G_{max} - \log \gamma$ 에 대한 흙의 종류의 영향 (Stokoe, et. al, 1999)

G_{max} 로 정규화하여 전단변형률의 크기에 따른 변화 추이, 즉, 전단탄성계수감소곡선을 그림 14(b)에 도시하였다. 그림 14(b)의 $G/G_{max} - \log \gamma$ 관계를 살펴보면, γ_i 와 γ_f 가 더욱 분명히 정의되는 것을 확인할 수 있다. 시료의 소성지수가 증가할수록 γ_i 와 γ_f 이 증가하는 추세가 명확하게 나타나는 것을 알 수 있다. 경우에 따라서는 조립토의 경우에도 세립분이 다소 포함되어 있으면, 소성지수가 낮은 세립토의 경우처럼 거동하는 것을 확인할 수 있다. $G/G_{max} - \log \gamma$ 의 관계에 대한 소성지수의 영향은 그림 15에서 찾을 수 있다. 비소성 흙과 소성이 작은 흙의 경우 매우 유사한 경향을 보이고 있으며, 일반적으로는 PI가 증가할수록 전체적인 추세가 고전단변형률 쪽으로 증가하고 있다. 또한, $G/G_{max} - \log \gamma$ 의 관계에 대한 유효구속응력에 대한 영향은 그림 16에 보인 바와 같다. 그림 16을 참고하면, 유효구속응력이 증가할수록 $G/G_{max} - \log \gamma$ 관계곡선이 오른쪽으로 평행이동하는 경향이 있다. 비소성 흙일수록 이러한 경향은 강하게 나타나지만, PI가 증가할수록 유효구속응력의 영향은 점차 감소한다.

이상에서 언급한 고전단변형률에서의 전단탄성계

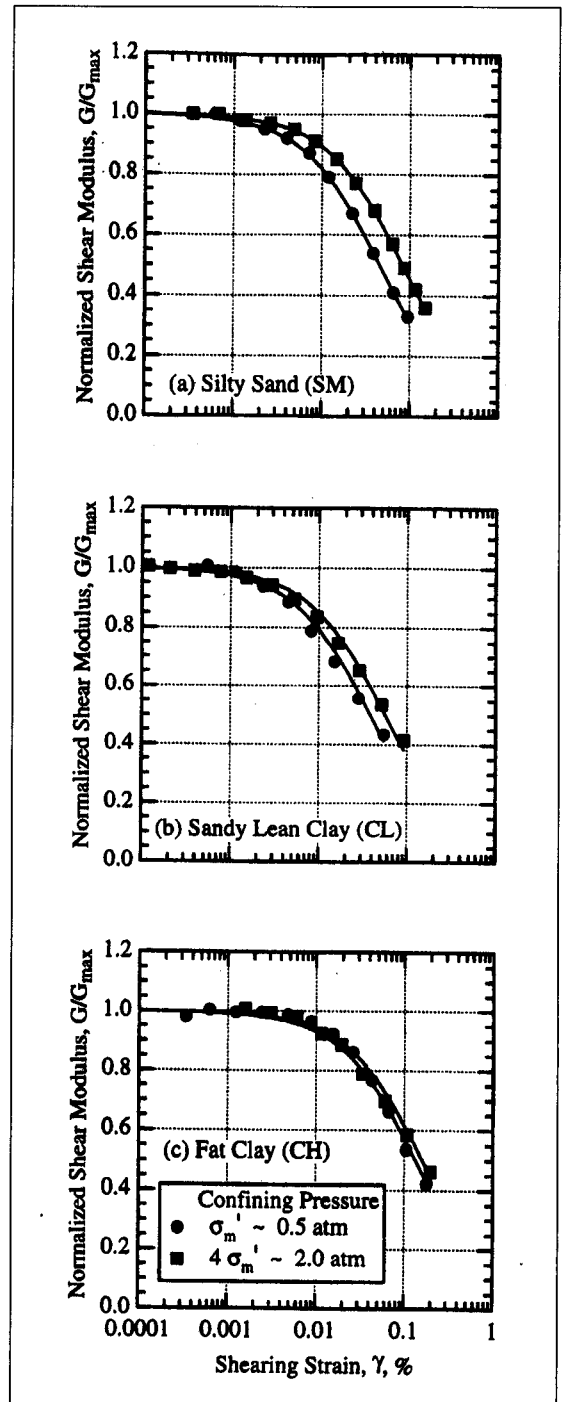


그림 16. $G/G_{max} - \log \gamma$ 에 대한 유효구속응력의 영향 (Stokoe, et. al, 1999)

표 2. 정규압밀토 또는 과압밀토의 전단탄성계수 감소 곡선 특성에 대한 환경조건 및 재하조건 영향 (Kramer, 1996)

증가 요인	전단탄성계수 감소 곡선
유효구속응력, σ'_m	σ'_m 의 증가에 따라 증가; P의 증가에 따라, 영향은 감소
간극비, e	e의 증가에 따라 감소
지질연대, t_g	t_g 의 증가에 따라 증가할 수 있음
cementation, c	c의 증가에 따라 증가할 수 있음
과압밀비, OCR	영향을 받지 않음
소성지수, PI	PI의 증가에 따라 증가
전단 변형률 속도, $\dot{\gamma}$	G는 $\dot{\gamma}$ 의 크기에 따라 증가하지만, 동일한 $\dot{\gamma}$ 에서 G와 G_{max} 를 측정하여 구한 G/G_{max} 는 영향을 받지 않을 수도 있음.
하중재하 진동수, N	큰 전단변형률의 진동재하(cyclic loading) 이후 감소

표 3. 정규압밀토 또는 과압밀토의 재료감쇠비에 대한 환경조건 및 재하조건 영향 (Kramer, 1996)

증가 요인	재료감쇠비
유효구속응력, σ'_m	σ'_m 의 증가에 따라 감소; PI의 증가에 따라, 영향은 감소
간극비, e	e의 증가에 따라 감소
지질연대, t_g	t_g 의 증가에 따라 감소
cementation, c	c의 증가에 따라 감소할 수 있음
과압밀비, OCR	영향을 받지 않음
소성지수, PI	PI의 증가에 따라 감소
전단변형률, $\dot{\gamma}$	$\dot{\gamma}$ 전단변형률의 증가에 따라 증가
전단 변형률 속도, $\dot{\gamma}$	일정하거나, 증가할 수 있음
하중재하 진동수, N	중요하지 않음

수 영향인자 및 기타 영향인자들을 정리하면, 표 2와 같다.

3.3 고전단변형률에서의 재료감쇠비

고전단변형률, 즉, 지반 내에 유발되는 전단변형률이 10^{-3} 보다 큰 경우, 재료감쇠비도 전단탄성계수처럼 전단변형률의 크기, 유효구속응력, 재하진동수 등에 의해 영향을 받는다. 표 3에 재료감쇠비에 대한 영향인자를 요약하여 정리하였으며, 아래에는 이 들 영향인자 중에서 보다 중요하다고 판단되는 영향인자들에 대하여 실제 실험결과를 이용하여 구체적으로 설명하였다.

3.3.1 탄성임계전단변형률 γ_c 과 사이클임계전단 변형률 γ_{ci}

그림 17을 참고하여 보면, 탄성임계전단변형률 γ_c 보다 작은 전단변형률에서는 재료감쇠비가 거의 일정하다가 γ_{ci} 를 초과한 전단변형률에서는 증가하는 것을 알 수 있다. 재료감쇠비의 선형과 비선형을 구별하는 γ_{ci} 의 크기는 대부분의 경우, 전단탄성계수의 γ_c 와 거의 동일하다. 그리고, 재하 진동수 (cycles)에 대한 영향의 유무가 경계가 되는 사이클임계전단변형률 γ_{ci} 도 재료감쇠비 곡선에서 찾아볼 수 있다. γ_{ci} 의 크기는 그림 17의 경우 대체적으로 0.006%에서 0.025%의 분포를 보이고 있다. 즉, 전단변형률이 γ_{ci} 보다 큰 경우에 있어서 재하진동수가 증가할수록 재료감쇠비는 감소하고, 재하진동수가 감소하게 되면 재료감쇠비는 증가하게 된다.

3.3.2 가진주파수의 영향

그림 17에 보인 바와 같이, 높은 가진주파수를 사용하는 공진주 실험에 의해서 측정된 D_{min} 이 낮은 가진주파수를 사용하는 비틀전단 실험에 의해서 측정된 D_{min} 보다 더 크게 측정되는데, 이는 두 실험에서 사용하는 주파수의 차이로 기인한 것이다. 한편, 탄성임계전단변형률 γ_c 를 초과한 고전단변형률에서는 저전단변형률에서보다 가진주파수의 영향이 작으며, 전단변형률이 증가할수록 그 영향은 더욱 감소한다. 이는 전단변형률이 증가할수록 사이클 경화(cyclic stiffening) 현상이 더욱 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

3.3.3 구속응력의 영향

그림 18을 참고하여 보면, 공진주 실험의 경우, 구속응력에 대한 영향을 알 수 있다. 일반적인 추세는 구속응력이 증가하면, $D \sim \log \gamma$ 관계가 고전단변형률 쪽으로 횡방향 이동하고 동시에 약간 하향으로 수직 이동하는 경향을 보이고 있는데, PI가 클수록 이러한 추세는 다소 완화되는 경향이 있다.

3.4 측정방법에 따른 지반 동적 물성치의 비교

지반의 동적 물성치는 앞에서 언급한 바처럼, 응력,

지반특성, 하중특성에 따라 영향을 받기 때문에, 측정 지반의 동적 물성치를 정의할 때에는 응력, 지반특성, 하중특성에 대한 조건이 동시에 규정되어야 한다. 이처럼, 지반의 동적 물성치는 여러 인자에 의해서 영향을 받게 되기 때문에, 측정하는 방법에 따라서 지반 동적 물성치의 크기도 달라진다. 본 절에서는 미국의 텍사스 주립대학(Univ. of Texas at Austin)과 UCLA 대학이 ROSRINE 프로젝트에서 수행한 실험 결과를 참조하여, 지반 동적 물성치 측정방법에 따른 영향을 살펴보았다. 텍사스 주립대학에서는 실내실험인 공진주 실험과 비틀전단 실험, 그리고 현장실험인 크로스홀 실험을 수행하였고, UCLA 대학에서는 DSDSS (Double-Specimen Direct Simple Shear Test) 실험을 수행하였다. 모래질 점토의 동일한 비

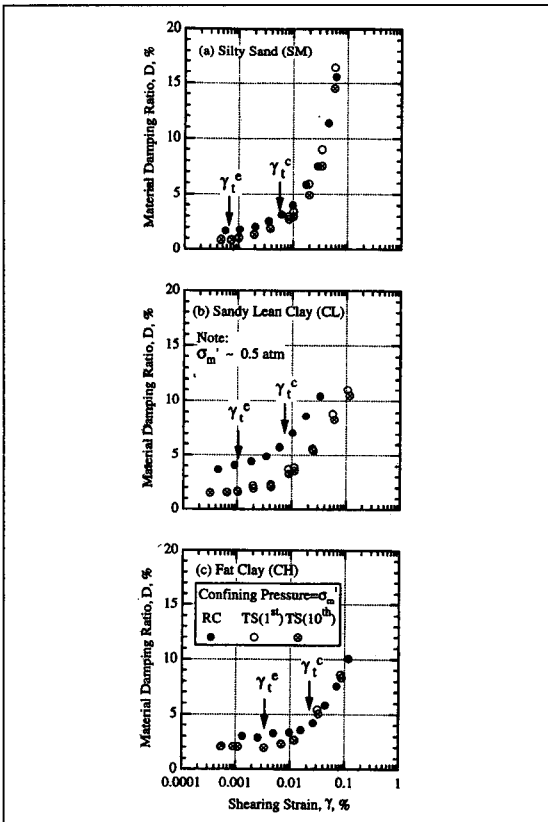


그림 17. 전단변형률과 재하 진동수 (loading cycles)에 따른 비 교란 시료의 재료감쇠비의 변화 (Stokoe, et. al, 1999)

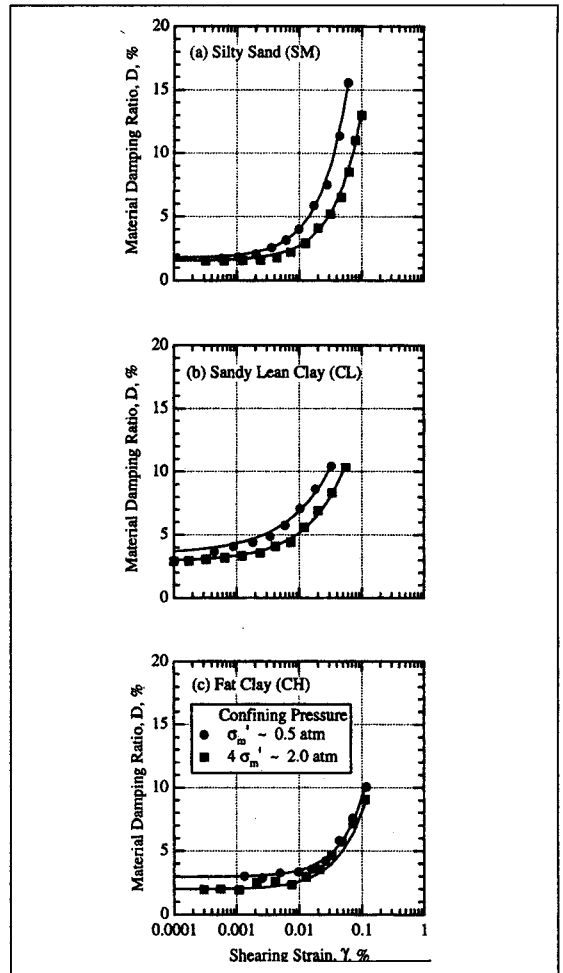


그림 18. D-log γ에 미치는 구속응력의 영향

교란 시료에 대해서 수행한 지반 동적 물성치의 비교가 그림 19에 도시되어 있다. 각 실험은 정지토압계 수를 0.5로 가정하여 구한 등가 유효응력에서 수행되었다. (단, 공진주 실험은 등방·구속압력을 사용하고, DSDSS 실험은 비등방 구속압력을 사용하였다.) 공진주 실험, 비틀전단실험, DSDSS 실험 결과의 비교에서 가장 큰 차이는 전단탄성계수에서 나타나고 있고, 전단탄성계수감소곡선 (modulus reduction curve), 즉, $G/G_{max} - \log \gamma$ 관계는 거의 동일함을 알 수 있다. 그리고, $D - \log \gamma$ 관계는 비틀전단 실험과 DSDSS 실험결과가 거의 동일함을 보이고 있으나,

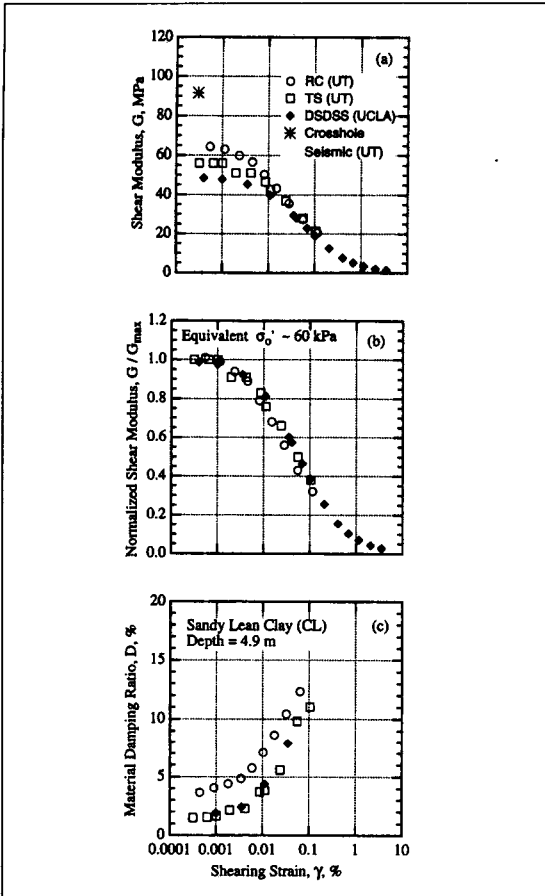


그림 19. 여러 가지 방법으로 모래질 점성토에 대해 측정된 전단 탄성계수와 재료감쇠비 (Stokoe, et. al, 1999)

공진주 실험은 다소 크게 측정되고 있음을 알 수 있다. 그러나, 그림에는 표시되지 않았지만, $D/D_{min} - \log \gamma$ 관계는 세가지 실험 공히 일치하게 된다.

무엇보다도 그림 19에서 두드러지게 나타나는 것은 현장실험인 크로스홀 실험결과와 실내실험 결과의 차이이다. 크로스홀 실험은 γ 가 보다 작은 탄성영역에서 수행되어 크로스홀 실험에 의한 측정치는 G_{max} 에 해당되는데, 실내실험으로 측정된 G_{max} 는 크로스홀의 G_{max} 에 비하여 약 60~70% 수준에 머무르고 있다. 이러한 현장실험에서 구한 G_{max} 와 실내실험으로 구한 G_{max} 의 차이는 현장에서의 시료채취, 시료의 운송 등 여러 단계에서 시료에 교란을 초래한 요인이 있었

거나, 실내실험의 환경이 현장상태와 동일하지 않았기 때문이라고 판단된다. 따라서, 실내실험으로 구하는 G_{max} 는 그림 19로 미루어 볼 때, 그 신뢰성이 높지 않기 때문에, 실제 동하중 및 지진하중에 대한 지반의 거동을 해석할 때에는 현장에서 직접 측정된 G_{max} 를 사용하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

4. 맺음말

본 고에서는 지진하중, 발파진동 및 교통하중과 같은 동하중에 대한 지반의 응답을 해석하는데 필수적인 지반의 동적 물성치의 특성과 실내실험에 의한 측정방법을 간략하게 소개하였다. 특히, 지반의 동적 물성치를 측정하기 위한 실내실험 중에서 최근 널리 사용되는 공진주 실험·비틀전단 실험(RCTS) 방법을 중심으로 실험장비의 특성, 시스템 보정 같은 하드웨어적인 측면과, RCTS 실험에 의한 측정방법 및 지반 동적 물성치의 특성과 같은 소프트웨어적인 측면을 심도있게 언급하였다. 본 고에서 특히 중점적으로 서술한 것으로, 지반 동적 물성치의 측정과 활용에 있어서 유의할 필요가 있는 사항을 요약하면 다음과 같다.

전단탄성계수, 재료감쇠비 등과 같은 지반의 동적 물성치는 전단변형률, 유효주속응력, 응력이력, 동하중의 주파수 특성, 흙의 지반공학적 특성 등 여러 변수에 의해 영향을 받게 되기 때문에, 지반 동적 물성치를 측정할 때 이에 대한 고려가 반드시 이루어져야 하고, 또한, 측정된 지반동적 물성치를 내진해석, 진동영향평가 등에 활용할 때에도 이러한 영향인자와 지반동적물성의 특성을 명확하게 인지한 후 적용하는 것이 요구된다.

크로스홀 시험, 다운홀 시험, SASW 실험과 같은 현장실험 결과와 RCTS 실험과 같은 실내실험 결과의 비교를 통하여, 현장실험의 중요성을 확인하였고, 동하중에 대한 지반의 응답을 보다 정확하게 평가하기 위해서는 실내실험 결과뿐만 아니라 지반변형률에서 수행되는 현장실험결과의 활용도 필요하다.

참고문헌

1. Dobry, R., Vasquez-Herrera, A., Mohammad, R. and Vucetic, M. (1985). "Liquefaction flow failure of silty sand by torsional cyclic tests," *Advances in the Art of Testing Soils under Cyclic Loading Conditions*, ASCE, New York, pp.29-50.
2. Dnevich, V.P. (1967). Effect of strain history on the dynamic properties of sand, Ph.D. Dissertation, University of Michigan, 151 pp.
3. Hardin, B.O. (1978). "The nature of stress-strain behaviour of soils," *Proceedings, Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, ASCE, Pasadena, California, Vol. 1, pp.3-89.
4. Hardin, B.O. and Dnevich, V.P. (1972). "Shear modulus and damping in soils : design equations and curves," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 98, No. SM7, pp.667-692.
5. Hwang, S.K. (1997). Investigation of the Dynamic Properties of Natural Soils, Ph.D. Dissertation, the University of Texas at Austin, 394pp.
6. Ishihara, K. (1996). *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics*, Oxford University Press, Walton Street, Oxford, 350 pp.
7. Ishihara, K. and Li, S. (1972). "Liquefaction of saturated sand in triaxial torsional shear test," *Soils and Foundations*, Vol. 12, No. 2, pp.19-39.
8. Kovacs, W.D. and Leo, E. (1981). "Cyclic simple shear of large-scale sand samples : Effects of diameter to height ratio," *Proceedings, International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, St. Louis, Vol. 3, pp.897-907.
9. Kramer, S.S. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall, New Jersey, 653pp.
10. Lawrence, F.V. Jr. (1963). "Propagation velocity of ultrasonic waves through sand," MIT Research Report R63-8, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.
11. Shirley, D.J. and Anderson, A.L. (1975). "Acoustic and engineering properties of sediments," Report ARL-TR-75-58, Applied Research Laboratory, University of Texas at Austin.
12. Stokoe, K.H., II, Darandeli, M.B., Andrus, R.D. and Brown, L.T. (1999). "Dynamic Soil Properties : Laboratory, field and correlation studies," *Earthquake Geotechnical Engineering*, Balkema, Rotterdam, pp. 811-845.
13. Stokoe, K.H., II, Hwang, S.K., Lee, J. N.-K. and Andrus, R.D. (1994). "Effects of Various Parameters on the Stiffness and Damping of Soils at Small to Medium Strains," *Proceedings, International Symposium on Prefailure Deformation Characteristics of Geomaterials*, Vol. 2, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Sapporo, Japan, pp. 785-816.
14. Vucetic, M. and Dobry, R. (1991). "Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response," *ASCE, Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 117, No. 1, pp.89-107.
15. 조성호, 목영진, 장현삼 (2000). "지반의 동적 물성치 측정을 위한 탄성파 기법과 결과의 이용," *지반, 지반공학회*, Vol. 16, No. 2, pp. 34-42.
16. 황선근 (1998). "Effects of Parameters on the Dynamic Soil Properties of Undisturbed Natural Soils," *대한토목학회 영문논문집*, vol. 2, No. 2, pp. 63-78.
17. 황선근 (1998). "실내실험을 이용한 지반의 동적물성치 측정," *한국지반공학회 '98 가을학술발표회 논문집*, pp. 171-174.