

공학석사 학위논문

점토의 동적지반계수 산정에 관한
실험적 연구

지도교수 정 두 회

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함



2002년 2월

부경대학교 대학원

토 목 공 학 과

김 태 효

김 태 효의 공학석사 학위논문을 인준함

2001년 12월 26일

주 심 공학박사 정 진 호



위 원 공학박사 손 인 식



위 원 공학박사 정 두 회



차 례

차 례	v
그림 및 표차례	vii
Abstract	ix
1. 서 론	1
1.1 배경	1
1.2 연구목적과 범위	2
1.3 연구동향	2
2. 이론적 고찰	4
2.1 동적지반계수	4
2.2 고변형률 시험	5
2.3 반복삼축시험	6
2.4 반복하중을 받는 흙의 응력-변형률 거동	8
2.4.1 흙입자 거동에 관한 기본사항	8
2.4.2 등가선형모델	11
3. 시험장비	20
3.1 자동화 삼축시험기	20
4. 시험방법	22
4.1 시험시료의 특성	22
4.2 시료의 설치	22
4.3 반복전단과정	23

5. 시험결과	24
5.1 축차응력의 변화	24
5.2 축변형률의 변화	26
5.3 축차응력과 축변형률 관계	28
5.4 전단탄성계수와 감쇠비	33
5.5 기존의 연구자료와 비교	39
6. 결 론	41
참고문헌	42

그림 및 표 차례

그림차례

그림 2.1 일반적인 흙의 응력-변형률 관계	4
그림 2.2 지반의 전단탄성계수-대수 변형률($G-\log \gamma$) 관계	5
그림 2.3 축차응력의 시간이력과 응력경로	7
그림 2.4 연직응력 σ , 전단응력 τ 를 받는 입방체 구의 조합	10
그림 2.5 전단탄성계수와 감쇠비의 정의	12
그림 2.6 전단변형률에 따른 G_{sec} 의 변화를 나타내는 뼈대곡선	13
그림 2.7 소성지수의 변화에 따른 변형률 의존곡선	16
그림 2.8 전단탄성계수의 변형률 의존곡선에 대한 평균유효구속압의 영향	17
그림 2.9 전단변형률과 소성지수에 따른 감쇠비 변화	18
그림 3.1 자동화 삼축시험기	20
그림 3.2 시험기의 실제모습	21
그림 3.3 Cell의 구조 및 명칭	21
그림 4.1 시험에 적용된 하중조건	23
그림 5.1 시간에 따른 축차응력의 변화 (A 지역)	24
그림 5.2 시간에 따른 축차응력의 변화 (B 지역)	25
그림 5.3 시간에 따른 축차응력의 변화 (C 지역)	25
그림 5.4 시간에 따른 축변형률의 변화 (A 지역)	26
그림 5.5 시간에 따른 축변형률의 변화 (B 지역)	27
그림 5.6 시간에 따른 축변형률의 변화 (C 지역)	27
그림 5.7 최종하중단계에서 축차응력과 축변형률 관계 (A 지역)	28
그림 5.8 최종하중단계에서 축차응력과 축변형률 관계 (B 지역)	29
그림 5.9 최종하중단계에서 축차응력과 축변형률 관계 (C 지역)	29
그림 5.10 하중단계별 축변형률 변화 (A 지역)	30

그림 5.11 하중단계별 축변형률 변화 (B 지역)	30
그림 5.12 하중단계별 축변형률 변화 (C 지역)	31
그림 5.13 뺨대곡선 (A 지역)	31
그림 5.14 뺨대곡선 (B 지역)	32
그림 5.15 뺨대곡선 (C 지역)	32
그림 5.16 전단변형률 vs. 전단탄성계수/감쇠비 (A 지역)	33
그림 5.17 전단변형률 vs. 전단탄성계수/감쇠비 (B 지역)	34
그림 5.18 전단변형률 vs. 전단탄성계수/감쇠비 (C 지역)	34
그림 5.19 전단변형률 vs. 전단탄성계수/감쇠비 (D 지역)	35
그림 5.20 전단변형률 vs. 전단탄성계수/감쇠비 (E 지역)	35
그림 5.21 전단변형률 vs. G/G_{max} (A 지역)	36
그림 5.22 전단변형률 vs. G/G_{max} (B 지역)	36
그림 5.23 전단변형률 vs. G/G_{max} (C 지역)	37
그림 5.24 전단변형률 vs. G/G_{max} (D 지역)	37
그림 5.25 전단변형률 vs. G/G_{max} (E 지역)	38
그림 5.26 G/G_{max} 변화	39
그림 5.27 감쇠비 변화	40

표차례

표 2.1 과압밀비 지수, k	14
표 2.2 간극비와 상대밀도에 따른 $K_{2,max}$	15
표 2.3 G_{max}/S_u^a 값	15
표 2.4 점토의 변형특성에 대한 영향요소	19
표 4.1 대상지반 점토의 기본 물성치	22
표 4.2 시험의 제반조건	23

An Experimental Study on the Evaluation of Dynamic Shear Modulus and Damping Ratio for Clay

Tae-Hyo Kim

*Department of Civil Engineering, Graduate School,
Pukyong National University*

Abstract

Deformational characteristics of soils, often expressed in terms of shear modulus and damping ratio, are important parameters in the design of soil-structure systems subjected to cyclic and dynamic loadings. The dynamic triaxial test has been performed to evaluate deformational characteristics of clay distributed in Moolgeum area. Dynamic shear moduli and damping ratios were determined from the dynamic triaxial test. Relationships of shear modulus versus shear strain and damping ratio versus shear strain showed a locality. Shear strains were estimated from 0.001% to 0.1%. This range of shear strain corresponds to the level of strain induced from a strong ground motion. Within the range of strain estimated in the test, the shear modulus was decreased as the shear strain increases, whereas the damping ratio showed a tendency to increase with an increasing shear strain. The shear modulus was estimated to be lower and the damping ration was estimated to be higher compared to the data reported in the literature.

Key words : ATTS, damping ratio, dynamic shear modulus, dynamic triaxial test, shear strain

1. 서론

1.1 배경

최근 세계 도처에서 지진에 의한 사회기반시설의 피해사례가 증가함에 따라 지반진동에 대한 관심이 높아지고 있다. 뿐만 아니라, 인간의 산업활동이 고도화됨에 따라 도심지에서 차량하중에 의해 유발되는 교통진동, 도심지 개발에 의해 발생하는 건설진동 등에 의한 구조물의 피해사례도 증가하고 있으며, 원자력 발전소, 첨단산업시설 등 진동 및 지진에 민감한 구조물의 건설 또한 증가하는 추세이다.

이러한 동적하중을 받는 구조물의 설계를 위해서는 지반-구조물 상호작용에 대한 안정해석이 필수적이며 이를 위해서는 전단탄성계수 및 감쇠비로 표현되는 동적지반계수의 결정이 매우 중요하다. 이 경우 동적지반계수는 지반에 전달되는 변형률의 크기에 따라 변형특성이 달라질 수 있다. 최근들어 정적시험에서 계측의 정확도 향상으로 인하여 정적물성치와 동적물성치 사이의 통념적 차이가 줄어들고, 정적 또는 동적하중으로 인해서 유발되는 변형률의 크기가 지반의 거동을 예측하는 중요한 매개변수로 인식되고 있다. 전단탄성계수와 흙의 감쇠비는 지진시 지반의 동적거동을 지배하는 중요한 매개변수이다. 전단탄성계수는 과거 수십 년간에 걸쳐 광범위한 실내 및 현장의 연구대상이었다. 이러한 노력으로 다양한 측정기술이 발전되어 중요한 변수의 확인, 아주 다양한 자연 및 실험조건하에서의 대표적인 값들을 충분히 축적해왔다. 하지만 감쇠비에 영향을 주는 기본적인 메카니즘의 복잡성과 실내/현장에서의 정확한 측정의 어려움으로 인해 흙의 감쇠비는 큰 관심을 받지 못해왔다.

대부분의 진동 및 지진해석시 변형률 $10^{-4}\%$ ~ 1% 영역에서의 동적변형특성이 필요하며 이러한 변형특성을 평가하기 위해 공진주/비틀전단시험기나 진동삼축압축시험기 등을 이용한다. 본 연구에서는 점토의 동적지반계수를 평가하기 위해 현장에서 채취한 불교란 점토 시료를 대상으로 자동화 삼축시험기

를 이용하여 실내시험을 수행하였다.

1.2 연구목적과 범위

본 연구의 목적은 동적하중을 받는 지반-구조물 상호작용에 대한 안정해석에 필수적인 동적지반계수로서 전단탄성계수와 감쇠비를 결정하는데 있다. 이를 위해서 본 연구에서는 경상남도 양산시 물금의 여러지역에서 채취한 점토시료에 대해 진동삼축시험을 수행하여 전단탄성계수 및 감쇠비의 변형률 의존곡선을 작성하였다. 또한 본 연구대상지역 점토의 동적변형특성을 기존의 Seed와 Idriss, Vucetic과 Dobry, 일본항만국에 의해 제안된 변형특성과 비교함으로써 지역적인 경향을 분석하고자 한다.

1.3 연구동향

동적하중을 받는 지반-구조물 시스템에 대한 중요성이 대두됨에 따라, 지반의 동적특성을 나타내는 전단탄성계수, 감쇠비 등의 동적지반계수 산정에 관한 다양한 연구가 진행되어 왔다.

하광현(1986)은 연약점토에 대한 반복삼축시험을 실시하고 다음과 같은 결론을 제시하였다. 하중반복횟수가 증가함에 따라 전단탄성계수는 감소하고, 감쇠비는 다소 증가하며, 축변형률의 증가에 따라 전단탄성계수는 감소하고 감쇠비는 증가하는 경향을 나타냈다.

김동수(1995)는 공진주/비틀전단시험기를 이용하여 저변형률 및 중간 변형률 하에서 점성토의 변형특성을 실험적으로 연구하였다. 선형한계변형률 (γ^e) 이하에서 전단탄성계수는 하중반복횟수와 변형률의 크기에 영향을 받지 않았으며, 선형한계변형률은 구속압과 소성지수에 따라 증가하였다. 선형한계변형률 이상에서는 점성토의 전단탄성계수는 하중반복횟수에 따라 감소하였다. 그러나 점성토의 감쇠비는 하중반복횟수에 영향을 받지 않았다.

박종관(1998)은 실트질 모래에 대한 진동삼축시험을 수행하였다. 등방압밀

된 시료의 경우 반복횟수가 증가함에 따라 축변형률 및 과잉간극수압은 증가하고, 축차응력은 감소하는 경향을 보였으며 비등방압밀된 시료의 경우도 등방압밀된 시료와 같은 경향을 나타냄을 보였다.

Hardin과 Drnevich(1972)는 여러 가지 공시체를 사용한 단순전단시험을 통해서 흙의 전단탄성계수와 감쇠비에 영향을 주는 매개변수의 효과에 관해 설명하였다. 변형률이 증가함에 따라 전단탄성계수는 감소하고 감쇠비는 증가하지만 많은 변수에 영향을 받으며 전단탄성계수 또는 감쇠비와 변형률의 관계만으로는 설명이 어렵다는 것을 설명했다. 전단탄성계수의 초기 감소율과 감쇠비의 증가율은 평균유효응력이 낮을수록, 간극비가 클수록, 그리고 하중반복횟수가 낮을수록 크다.

Marcuson과 Wahls(1972)는 특정한 kaolinite와 bentonite에 대한 공진주 시험을 통해 점토의 전단탄성계수에 대한 시간, 간극비, 압력의 영향을 평가하였다. 일정한 유효응력하에서 전단탄성계수는 시간에 따라 증가하며 간극비가 감소함에 따라 증가하는 경향을 나타내지만 전적으로 간극비에 영향을 받지 않는다. 간극비가 일정한 비배수시험에서 전단탄성계수가 시간에 따라 증가하는 경우도 발생한다.

Machy와 Saada(1984)는 이방성 점토의 동적특성을 평가하기 위해 공진주 시험을 통한 연구를 수행하였다. 낮은 반복하중에서 G/G_{max} 는 변형률이 증가할수록 감소하며, 전단변형률이 약 0.05%에 도달할 때 재료의 강성이 약 50%로 작아지는데 이러한 경향은 주응력에 영향을 받는다. 감쇠비 또한 주응력 및 변형률에 영향을 받지만 반복횟수에는 크게 영향을 받지 않는다.

2. 이론적 고찰

2.1 동적지반계수

지반동역학 및 지진공학에서 필요로 하는 동적지반계수는 탄성계수(E), 전단탄성계수(G), 구속탄성계수(M) 등과 같은 동적변형계수, 포아송비(ν), 감쇠비(D)와 감쇠상수(α), 액상화 관련계수와 변형속도에 따른 전단강도 등이 있다. 이들 동적지반계수들은 지진하중, 파랑하중, 폭발하중, 건설 및 기계진동에 의한 지반의 동적거동해석 및 지반-구조물 상호작용의 연구에 사용되고 있다.

그림 2.1은 흙의 대표적인 응력-변형률 관계로, 전단변형률의 크기에 따라 변형계수가 감소하는 비선형 거동을 함을 나타내고 있다. 지반동역학 및 지진공학에서는 흙거동의 비선형성을 그림 2.2와 같이 변형계수-대수 변형률의 관계로 나타내어, 선형영역과 비선형영역을 명확하게 구분한다. 선형한계변형률(γ'_e) 이하에서는 전단탄성계수(G)가 변형률 크기에 관계없이 일정한 값을 유지하며 변형률 크기가 선형한계변형률을 초과하면 비선형거동을 나타낸다. 일반적으로 흙의 선형한계변형률은 0.001%~0.01% 범위에 존재한다.

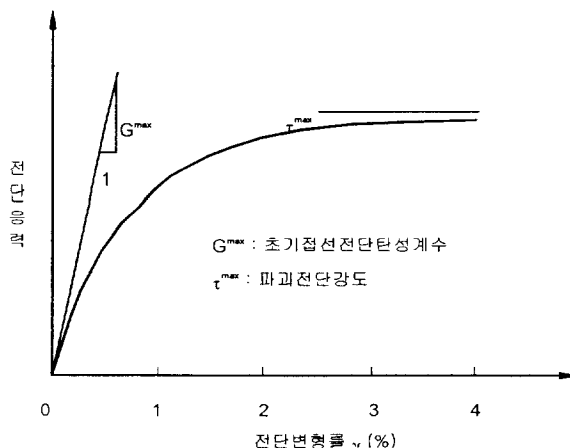


그림 2.1 일반적인 흙의 응력-변형률 관계

저변형률 하에서 지반의 선형거동을 측정하기 위해서 크로스홀 시험(cross-hole test), 다운홀 시험(down-hole test), 표면파기법 등의 현장시험이 자주 사용되지만 이들 현장시험은 흙의 비선형거동 및 감쇠비 측정이 불가능하므로 변형률 변화에 따른 전단탄성계수의 비선형성과 감쇠비 측정을 위해서는 실내시험이 필요하다. 대표적인 실내시험으로는 진동삼축시험과 공진주/비틀전단(RC/TS) 시험이 널리 사용된다.

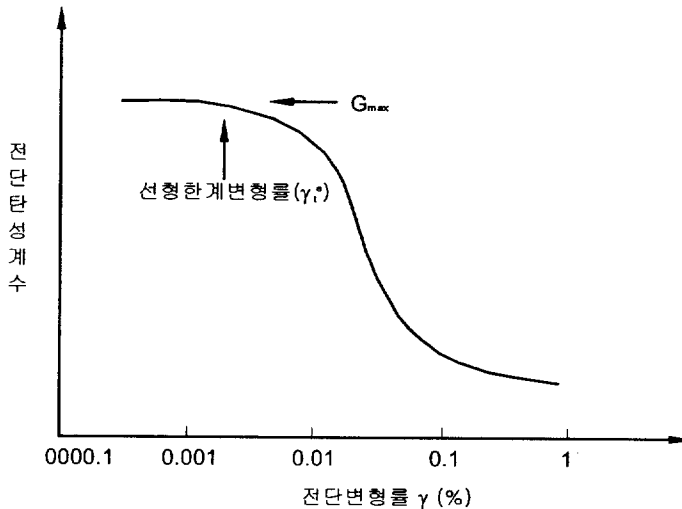


그림 2.2 지반의 전단탄성계수-대수 변형률($G-\log \gamma$) 관계

2.2 고변형률 시험

흙은 일반적으로 전단변형률이 큰 영역에서는 체적변화를 나타낸다. 흙의 이러한 경향은 배수조건하에서는 체적변화로 비배수조건하에서는 간극수압의 변화로 나타난다. 흙의 거동은 유효응력에 따라 결정되므로 고변형률에서 행해지는 모든 시험은 간극수의 배수를 제어할 수 있어야 하고 체적변화와 간극수압을 정확하게 측정할 수 있어야 한다.

일반적으로 행해지는 고변형률 시험에는 반복삼축시험(cyclic triaxial test),

반복단순전단시험(cyclic direct simple shear test), 반복비틀림전단시험(cyclic torsional shear test)등이 있다.

2.3 반복삼축시험

삼축압축시험이 정적하중을 받는 흙의 성질을 파악하기 위해 행해지는 가장 일반적인 실내시험인 것과 같이 반복삼축시험(cyclic triaxial test)은 높은 변형을 수준에서 흙의 동적성질을 규명하기 위해 행해지는 가장 일반적인 시험이다. 삼축시험에서 원통형의 시편은 상, 하부 하중판 사이에 위치하게 되고 얇은 고무막으로 둘러싸인다. 시편은 수평방향과 축방향 응력을 받는데 대부분의 경우 공기의 작용에 의한 응력을 받는다. 이러한 경계조건의 영향으로 인해 시편에 작용하는 주응력은 항상 수직과 수평방향을 향하게 된다.

축방향 응력과 수평방향 응력간의 차이를 축차응력(deviator stress)이라 하는데, 반복삼축시험에서 축차응력은 응력제어조건, 변형률제어조건의 하중제어 방식에 상관없이 반복적으로 적용된다. 수평방향 응력을 일정하게 유지한 상태에서 약 1Hz의 주기로 축방향 응력을 반복적으로 적용하는 시험이 가장 일반적으로 사용되는 반복삼축시험법이다.

정적삼축시험과 같이 반복삼축시험 또한 등방압밀 또는 비등방압밀 조건하에서 수행이 가능하며 그림 2.3과 같은 응력경로를 나타낸다. 그림 2.3(a)는 등방압밀된 시편에 있어 반복축차응력 및 전응력경로를 보여준다. 등방압밀시험(isotropically consolidated tests)은 초기전단응력이 존재하지 않는 지표면 또는 수평면을 나타내기 위해 사용된다.

시험은 전단응력 0(점 A)에서 시작되고 초기에 축차응력이 증가된다. 축방향 응력이 수평방향 응력보다 크기 때문에 최소, 최대 주응력 축은 각각 연직방향과 수평방향이다. 축차응력은 최대값(점 B)에 도달한 후에는 감소하게 되고 0값(점 C)으로 수렴한다. 축차응력이 0값에 수렴하기 직전에 최대주응력축은 여전히 연직방향이지만 0값을 지난 직후에는 회전하여 축차응력은 음(-)의 값이 된다. 점 C에서 시편에 작용하는 전단응력은 0이다. 이러한 응력의 전

이과정은 시험이 수행되는 동안 반복되고 주응력축이 90° 회전하면서 축차응력은 0을 지난다.

초기 전단응력이 존재하는 사면 등에서의 조건을 재현하기 위해서는 비등방 압밀 조건의 삼축시험이 수행된다. 그림 2.3(b)는 압밀이 일어나는 동안 반복 축차응력진폭(cyclic deviator stress amplitude)이 축차응력보다 큰 비등방압밀 시편의 응력경로를 나타낸다. 비록 반복축차응력이 p축에 대해 대칭이 아니지만 이 경우에도 응력전이는 존재한다. 압밀동안 반복축차응력진폭이 축차응력보다 작은 경우에 더 이상의 응력전이는 일어나지 않는다(그림 2.3(c) 참조). 이 경우 주응력축이 회전하지 않으므로 시편의 전단응력이 0에 도달하는 경우는 발생하지 않는다. 그림 2.3에 나타난 응력경로들은 초기 응력조건, 응력경로, 주응력축의 회전에 따라 명백한 차이를 나타낸다.

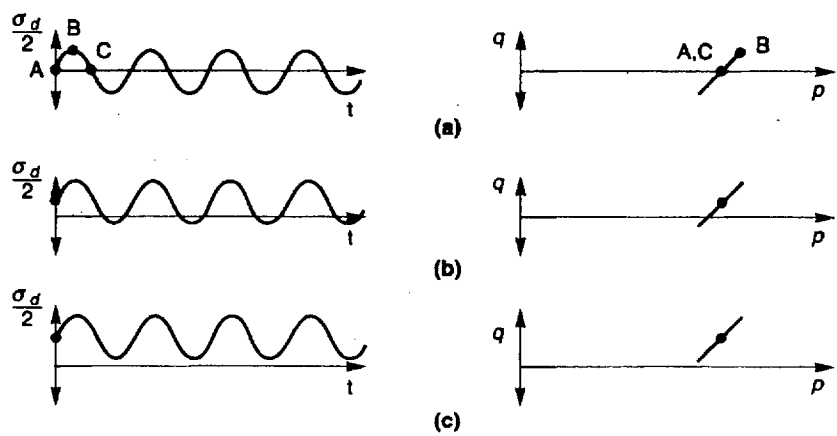


그림 2.3 축차응력의 시간이력과 응력경로

반복삼축시험을 통해 얻어진 응력과 변형률은 전단계수와 감쇠비를 산정하는데 이용된다. 반복삼축시험은 상/하부에 응력집중이 일어나긴 하지만 응력이 일정하게 적용되고 배수조건도 정확하게 제어된다. 반복삼축시험은 기존의 삼축시험장치에 약간의 수정을 가함으로써 수행이 가능한 반면에 대부분의 실

제 지진과 전달문제에 존재하는 응력조건을 정확히 나타내기는 어렵다.

2.4 반복하중을 받는 흙의 응력-변형률 거동

동적하중이 작용하는 흙의 역학적 거동은 매우 복잡하기 때문에 지반공학자들은 가장 단순하고도 합리적인 모델을 사용하여 흙의 반복거동을 정확하게 규정짓고자 끊임없는 노력을 해오고 있다. 이러한 목적으로 사용되는 모델에는 등가선형모델(equivalent linear models), 반복비선형모델(cyclic nonlinear models)과 구성모델(advanced constitutive models) 등이 있다. 가장 단순하고 일반적으로 많이 사용되는 모델은 등가선형모델이지만 반복하중조건에서 흙의 거동에 관한 특성을 나타내는데는 한계가 있다. 반면에 구성모델은 흙의 동적 거동을 잘 나타낼 수 있지만 측정이 복잡하고 어렵기 때문에 일반적인 지반의 지진공학적인 문제에 있어 실용적이지 못하다. 이러한 단점을 가졌음에도 불구하고 각각의 모델들은 흙의 반복거동에 관한 중요한 정보를 제공한다.

2.4.1 흙입자 거동에 관한 기본사항

저변형률하에서 흙의 거동은 흙을 탄성입자의 조합으로 고려함으로써 설명이 가능하다. Hertz(1881)는 연직력 N 으로 서로 압축되어 있는 반경이 동일한 구의 거동을 연구한 결과 G 와 ν 는 상수이고 δ_N 은 구의 중심간 거리에 따라 변하는 변수임을 보였다. 한 축을 따라 하중이 부과된 입방체 구의 배열에서 평균연직응력은 식 (2.1)과 같다.

$$\sigma = \frac{N}{(2R)^2} = \frac{N}{4R^2} \quad (2.1)$$

일축하중에 대해 접선계수는 식 (2.2)와 같이 얻어진다.

$$E_{\tan} = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{dN/4R^2}{d\delta_N/2R} = \frac{1}{2R} \frac{dN}{d\delta_N} = \frac{3}{2} \left[\frac{2G}{3(1-\nu)} \right]^{2/3} \sigma^{1/3} \quad (2.2)$$

접선력 T가 작용했을 때, 탄성비틀림에 의해 구의 중심은 원축에 대해 수직 방향으로 변형을 일으킨다.

$$\delta_T = \left[1 - \left(1 - \frac{T}{fN} \right)^{2/3} \right] \left\{ \frac{3fN}{4E} (2-\nu)(1+\nu) \left[\frac{3(1-\nu^2)NR}{4E} \right]^{-1/3} \right\} \quad (2.3)$$

$$T \leq fN$$

식 (2.3)에서 f는 구 사이의 마찰력을 나타낸다. T가 fN과 같아질 때, 입자의 접촉점에는 활동이 일어난다. 이러한 활동이 일어나기 위해서는 입자의 재배열이 이루어져야 한다. 즉, 활동이 발생하지 않을 때에는 체적변화(배수조건)는 일어나지 않으며 과잉간극수압(비배수조건) 또한 발생하지 않는다. 활동의 초기에 해당하는 전단변형률을 초기체적전단변형률(volumetric threshold shear strain)이라 하고, 식 (2.4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma_{tv} = \frac{\delta_T(T=fN)}{2R} = 2.08 \frac{(2-\nu)(1+\nu)f}{(1-\nu^2)^{1/2} E^{2/3}} \sigma^{2/3} \quad (2.4)$$

석영의 특성치($E = 11 \times 10^6 \text{ psi}$ ($7.6 \times 10^7 \text{ kPa}$), $\nu = 0.31$, $f = 0.50$)를 식 (2.4)에 대입하면 초기전단변형률은 다음과 같다.

$$\gamma_{tv}(\%) = 0.000175 \sigma^{2/3} \quad (2.5)$$

25~200 kPa의 구속압에 대해 식 (2.4)에 의한 초기전단변형률은 0.01~0.04%의 범위에 있다. 물론 실제 흙입자의 배열이 규칙적으로 이루어져 있지

않지만 초기전단변형률은 식 (2.4)에 의해 예측된 값과 매우 근사함이 모래에 대한 배수(Drnevich and Richart, 1970; Youd, 1972; Pyke, 1973) 및 비배수 (Park and Silver, 1975; Dobry and Ladd, 1980; Dobry et al., 1982) 하중조건 하의 시험을 통해 관측되었다.

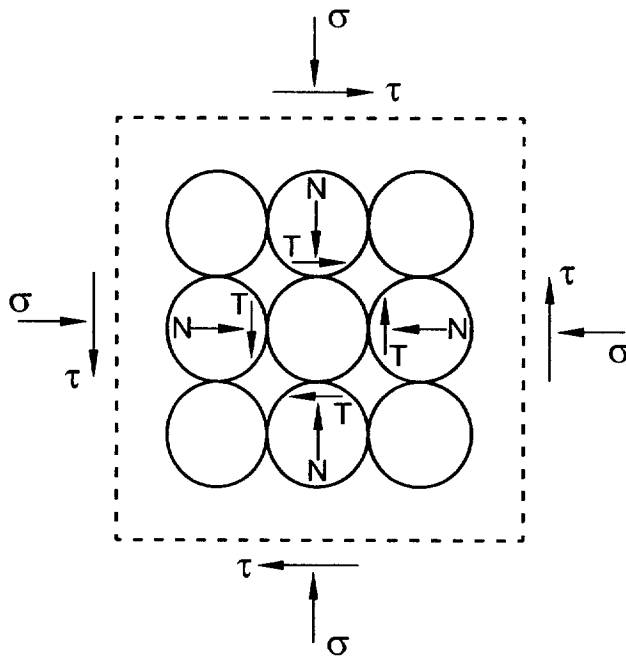


그림 2.4 연직응력 σ , 전단응력 τ 를 받는
입방체 구의 조합 (N, T : 입자간 접촉력)

흙입자의 역학적 모델이 단일 흙입자의 상호작용을 설명해주기 때문에 전체적인 구성모델에 관한 필요성이 제기되고 있다. 입자의 형상 및 크기, 입자의 운동학과 접촉거동에 대해 다양한 제한성을 가진 계산모델들이 개발되어 왔다 (Cundall and Strack, 1979; Ting et al., 1989; Ng and Dobry, 1994). 비록 개개의 입자운동을 추적함으로써 얻어진 계산결과가 너무 커서 복잡한 경계조건을 가지는 실용적인 문제에 사용하는데는 제한적이지만 흙의 거동에 관한 여러 가지 유용한 정보를 제공한다.

2.4.2 등가선형모델

인근의 구조물로부터 멀리 떨어진 지표면 아래에서 반복하중을 받는 흙의 거동은 그림 2.5와 같은 형태의 이력곡선(hysteresis loop)을 나타낸다. 이력곡선은 두 가지 방법으로 묘사될 수 있는데, 첫째는 루프(loop) 자체의 실제 경로로써이고, 둘째는 루프의 일반적인 형상을 나타내는 변수로 묘사할 수 있다. 일반적으로 이력곡선 형상에 있어 두 가지 중요한 특성은 곡선의 기울기와 폭이다. 곡선의 기울기는 흙의 강성에 영향을 받는데 하중을 받는 과정의 한 점에서 접선전단계수(tangent shear modulus), G_{tan} 로 나타난다. G_{tan} 는 반복하중을 받는 동안 변화하지만 전체 곡선의 평균값인 할선전단계수(secant shear modulus)로 나타낼 수 있다.

$$G_{sec} = \frac{\tau_c}{\gamma_c} \quad (2.6)$$

식 (2.6)에서 τ_c 와 γ_c 는 각각 전단응력과 전단변형률이다. 이와 같이 G_{sec} 는 이력곡선의 일반적인 기울기를 나타낸다. 이력곡선의 폭은 에너지 소산과 관련이 있는 곡선의 면적으로 대표될 수 있으며 감쇠비로 간단하게 표현할 수 있다.

$$\xi = \frac{W_D}{4\pi W_S} = \frac{1}{2\pi} \frac{A_{loop}}{G_{sec} \gamma_c^2} \quad (2.7)$$

식 (2.7)에서 W_D 는 소산에너지, W_S 는 최대변형에너지, A_{loop} 는 이력곡선의 면적이다. 매개 변수 G_{sec} 와 ξ 를 등가선형변수라 한다. 특정한 지반응답해석에 있어 이들 등가선형변수는 흙의 거동을 묘사하는데 직접적으로 사용된다. 이러한 등가선형변수가 사용되는 응답해석 이외의 해석에 있어서는 반복비선형 또는 구성모델에 의해 묘사되는 이력곡선의 실제경로가 요구된다.

a. 전단탄성계수

흙의 강성은 반복변형을 진폭, 간극비, 평균주응력, 소성지수, 과압밀비 그리고 하중반복횟수 등에 영향을 받는다는 사실을 실내시험을 통해 알 수 있다. 흙 요소의 할선전단계수는 반복전단변형을 진폭에 따라 변화한다.

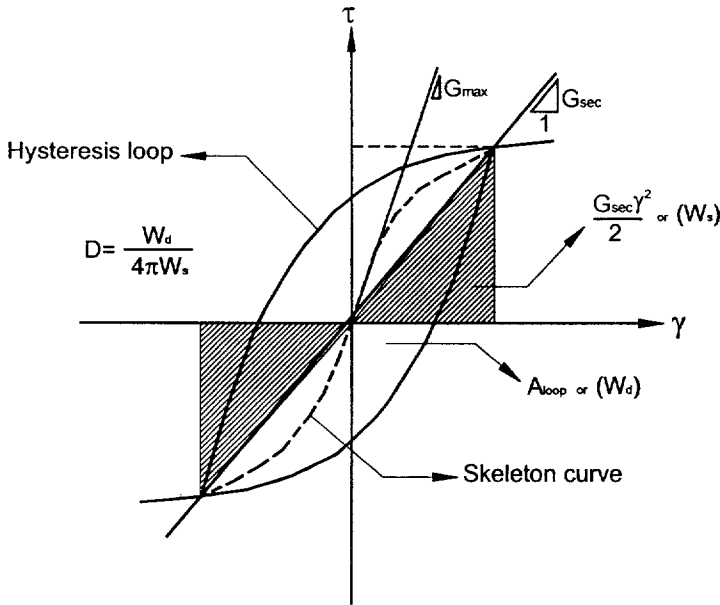


그림 2.5 전단탄성계수와 감쇠비의 정의

할선전단계수는 변형을 진폭이 증가함에 따라 점차 감소하게 된다. 다양한 반복변형을 진폭에 대한 이력곡선의 꼭지점에 해당하는 점들이 이루는 궤적을 뼈대곡선(backbone or skeleton curve)이라 한다.

뼈대곡선의 원점(반복변형률 진폭=0)에서의 기울기는 최대전단탄성계수 G_{max} 를 나타낸다. 반복변형률 진폭이 커지면 탄성계수비 G_{sec}/G_{max} 는 1보다 작은 값을 나타낸다. 따라서 흙요소의 강성을 나타내기 위해서는 G_{max} 와 더불어 반복변형률 진폭 및 매개변수의 변화에 따른 탄성계수비 G/G_{max} 를 고려하여야 한다.

전단변형률에 따른 탄성계수비의 변화는 계수감소곡선(modulus reduction curve)에 의해 나타낼 수 있다. 계수감소곡선은 뼈대곡선과 동일한 정보를 나타내기 때문에 상호간의 연관성을 통해 설명될 수 있다.

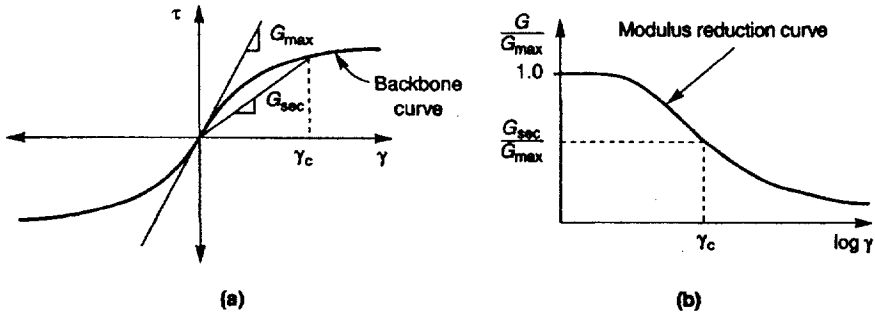


그림 2.6 전단변형률에 따른 G_{sec} 의 변화를 나타내는 뼈대곡선

b. 최대전단탄성계수, G_{max}

지진에 관한 물리적인 시험의 대부분이 약 $3 \times 10^{-4} \%$ 이하의 전단변형률에서 행해지기 때문에 측정된 전단파속도는 G_{max} 를 계산하는데 사용될 수 있다.

$$G_{max} = \rho v_s^2 \quad (2.8)$$

특정한 토층에 대해서 현장 G_{max} 를 측정하는데 있어 전단파속도의 사용은 일반적으로 가장 신뢰할만한 수단이다. 이러한 전단파속도를 평가하는데는 주의가 요구되며 특히, 비등방 응력조건을 가진 현장의 경우 파의 전달과 입자의 운동에 따라 전단파속도가 다양하게 측정될 수 있다(Roesler, 1979; Stokoe et al., 1985; Yan and Byrne, 1991).

전단파속도의 측정이 불가능할 경우, G_{max} 는 몇 가지 다른 방법에 따라 평

가될 수 있다. 실내시험 자료로부터 최대전단탄성계수를 평가하는 다음과 같은 식들이 제안되었다.

$$G_{\max} = 625F(e) (OCR)^k P_a^{1-n} (\sigma'_m)^n \quad (2.9)$$

식 (2.9)에서 $F(e)$ 는 간극비의 함수, OCR은 과압밀비, k 는 과압밀비 지수, σ'_m 은 평균유효응력 [$\sigma'_m = (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)/3$], n 은 응력지수, 그리고 P_a 는 평균유효주응력 및 $G_{\max}$ 와 같은 단위를 가지는 대기압이다. Hardin(1978)은 $F(e) = 1/(0.3 + 0.7e^2)$, Jamiolkowski et al.(1991)은 $F(e) = 1/e^{1.3}$ 을 제안하였다. 응력지수는 흔히 $n = 0.5$ 를 사용하지만 유효구속압의 변화에 따른 실내시험 결과로부터 개개의 흙에 대해 계산할 수 있다. $G_{\max}$, P_a , σ'_m 은 같은 단위로 표현되어야 한다.

표 2.1 과압밀비 지수, k

소성지수(PI)	k
0	0.00
20	0.18
40	0.30
60	0.41
80	0.48
≥ 100	0.50

특정한 흙에 대해 또 다른 경험식이 제안되어왔는데 Seed와 Idriss(1970)는 여러 가지 시험을 통해 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$G_{\max} = 1000K_{2, \max} (\sigma'_m)^{0.5} \quad (2.10)$$

$K_{2, \max}$ 는 간극비와 상대밀도(표 2.2 참조)로부터 계산되며 σ'_m 의 단위는 lb/ft^2 이다(Seed and Idriss, 1970).

표 2.2 간극비와 상대밀도에 따른 $K_{2, \max}$

간극비	$K_{2, \max}$	상대밀도(%)	$K_{2, \max}$
0.4	70	30	34
0.5	60	40	40
0.6	51	45	43
0.7	44	60	52
0.8	39	75	59
0.9	34	90	70

세립토의 경우 소성지수, 과압밀비, 비배수강도 등을 이용해서 최대전단탄성 계수의 예비평가가 가능하다(표 2.3 참조).

표 2.3 $G_{\max}/s_u^a$ 값

소성지수(PI)	과압밀비(OCR)		
	1	2	3
15-20	1100	900	600
20-25	700	600	500
35-45	450	380	300

^a s_u : 삼축압축(CU)시험에서 측정된 비배수강도

c. 전단탄성계수의 변형률 의존곡선(Modulus reduction), $G/G_{\max}$

지반지진공학의 초창기에 조립토와 세립토에 대한 전단탄성계수의 변형률 의존곡선은 개별적으로 취급되었다(Seed and Idriss, 1970). 그러나 최근의 연

구에서 비소성의 조립토와 소성의 세립토간의 전단탄성계수의 변형률 의존곡선에 있어 단계적인 변화가 밝혀졌다.

Zen et al.(1978)과 Kokushu et al.(1982)은 전단탄성계수의 변형률 의존곡선의 형상에 흙의 소성지수가 미치는 영향에 대해 처음으로 언급하였다. 소성지수가 높은 흙의 전단탄성계수의 경우 소성지수가 낮은 흙에 비해 전단변형률에 따른 감소율이 더 작은 것으로 관측되었다.

Dobry와 Vucetic(1987), Sun et al.(1988)은 광범위한 시료에 대한 시험결과를 고찰한 후에 전단탄성계수의 변형률 의존곡선의 형상은 간극비보다 소성지수에 더 큰 영향을 받는다고 결론을 내리고, 그림 2.7과 같은 곡선을 제시했다.

그림 2.7에서 $PI=0$ 인 전단탄성계수의 변형률 의존곡선은 조립토와 세립토가 개별적으로 취급되었을 때 사질토에 일반적으로 사용되었던(Seed and Idriss, 1970) 전단탄성계수의 변형률 의존곡선과 매우 유사하다. 이러한 유사성은 그림 2.7의 전단탄성계수의 변형률 의존곡선이 조립토와 세립토에 모두 적용이 가능하다는 것을 의미한다.

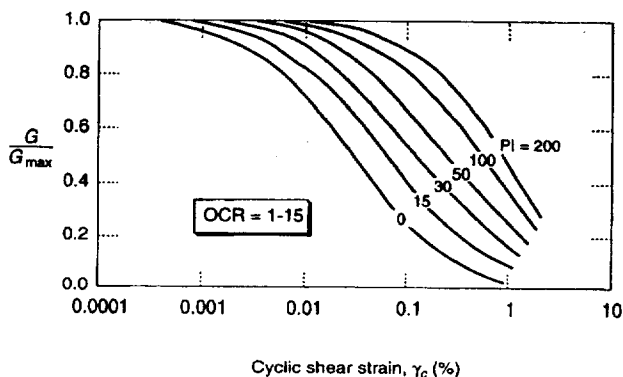


그림 2.7 소성지수의 변화에 따른 변형률 의존곡선

전단탄성계수는 특히 소성지수가 작은 흙의 경우 유효구속압에도 영향을 받는다(Iwasaki et al., 1978; Kokoshu, 1980). 선형반복 초기전단변형률, γ_{tl} 은

유효구속압이 작을 때 보다 유효구속압이 큰 경우 더 크게 나타난다. Ishibashi와 Zhang(1993)은 전단탄성계수에 대한 유효구속압과 소성지수의 영향을 다음과 같이 나타내었다.

$$\frac{G}{G_{\max}} = K(\gamma, PI)(\sigma'_m)^{m(\gamma, PI) - m_o} \quad (2.11)$$

$$K(\gamma, PI) = 0.5 \left\{ 1 + \tanh \left[\ln \left(\frac{0.000102 + n(PI)}{\gamma} \right)^{0.492} \right] \right\}$$

$$m(\gamma, PI) - m_o = 0.272 \left\{ 1 - \tanh \left[\ln \left(\frac{0.000556}{\gamma} \right)^{0.4} \right] \right\} \exp(-0.0145 PI^{1.3})$$

$$n(PI) = \begin{cases} 0.0 & \text{for } PI = 0 \\ 3.37 \times 10^{-6} PI^{1.404} & \text{for } 0 < PI \leq 15 \\ 7.0 \times 10^{-7} PI^{1.976} & \text{for } 15 < PI \leq 70 \\ 2.7 \times 10^{-5} PI^{1.115} & \text{for } PI > 70 \end{cases}$$

전단탄성계수에 대한 유효구속압의 영향은 그림 2.8과 같이 나타난다.

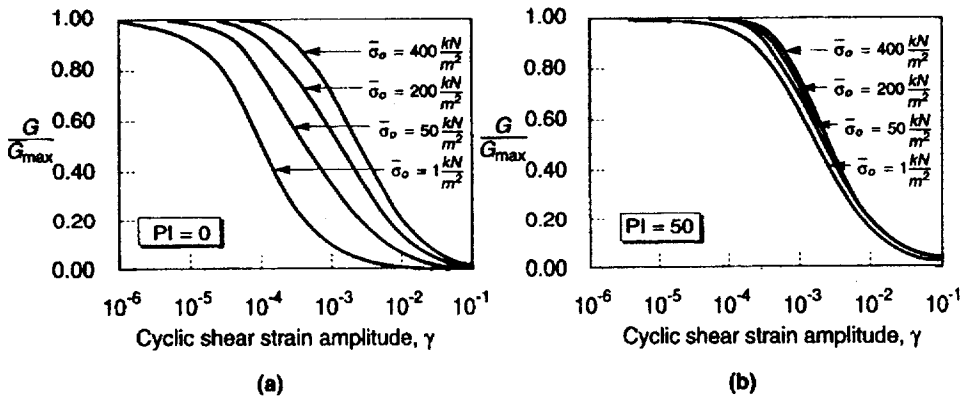


그림 2.8 전단탄성계수의 변형률의존곡선에 대한 평균유효구속압의 영향

d. 감쇠비

이론적으로는 선형반복 초기전단변형률 이하의 변형률에서는 어떠한 에너지 소산도 발생하지 않는다. 하지만 실제로는 아주 낮은 변형률 수준에서도 에너지의 일부가 소산되며 따라서 감쇠비는 절대로 0이 될 수 없다. 초기변형률 이상에서 이력곡선의 폭은 반복변형률 진폭이 커짐에 따라 증가하며, 이는 변형률이 증가함에 따라 감쇠비가 증가함을 의미한다.

전단탄성계수와 같이 감쇠비도 흙의 소성특성에 영향을 받는다. 동일한 반복변형률에서 소성지수가 높은 흙의 감쇠비는 소성지수가 낮은 흙에 비해 상대적으로 작게 나타난다(그림 2.9 참조).

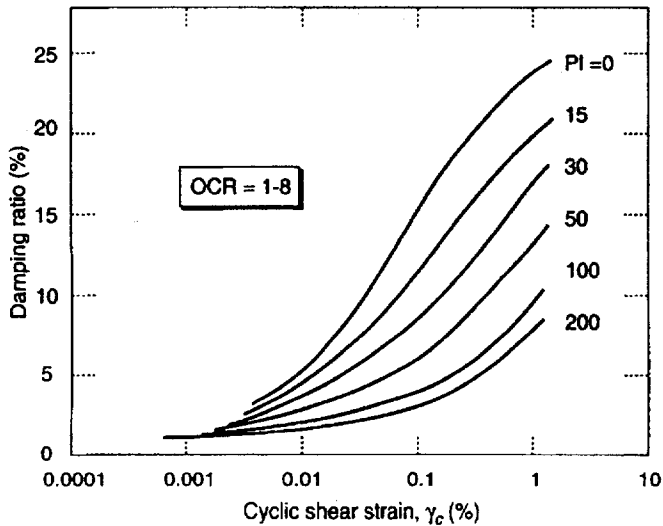


그림 2.9 전단변형률과 소성지수에 따른 감쇠비 변화

소성지수가 낮은 흙의 감쇠비 또한 유효구속압의 영향을 받는다. Ishibashi와 Zhang(1993)은 소성/비소성인 흙의 감쇠비에 대한 경험식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\xi = 0.333 \frac{1 + \exp(-0.0145 PI^{1.3})}{2} \cdot \left[0.586 \left(\frac{G}{G_{\max}} \right)^2 - 1.547 \frac{G}{G_{\max}} + 1 \right] \quad (2.12)$$

e. 전단탄성계수와 감쇠비의 변형률 의존특성

점성토의 $G_{\max}$, $G/G_{\max}$, D 에 대한 영향요소(Dobry and Vucetic, 1987)는 표 2.4에 나타난 바와 같다.

표 2.4 점토의 변형특성에 대한 영향요소

영향요소	$G_{\max}$	$G/G_{\max}$	D
구속압	증가	일정 또는 증가	일정 또는 증가
간극비	감소	증가	감소
과압밀비(OCR)	증가	-	영향없음
소성지수(PI)	증가(OCR>1) 일정(OCR<1)	증가	감소
변형률 속도	증가	G 는 증가	일정 또는 증가
하중반복횟수	큰 반복변형률에서는 감소하지만 시간이 지난 후 회복	큰 반복변형률에서는 감소	일반적인 반복변형률 크기 및 반복재하 횟수에서 큰 영향 없음

3. 시험장비

3.1 자동화 삼축시험기

본 연구에서는 그림 3.1과 그림 3.2에 나타낸 바와 같이 C. K. Chan이 개발한 자동화 삼축시험기(Automated Triaxial Testing System, ATTS)를 사용하였다. 자동화 삼축시험기는 각각의 압력과 변위 및 체적변화를 5개의 변환기(transducer)로 측정하여 컴퓨터로 자동 저장시키는 자료저장 부분과 얻어진 자료값에 따라 다시 컴퓨터에서 압력을 조절하여 구속압과 축차응력을 제어하는 부분, 그리고 실제로 시험이 실시되는 실행부분으로 구성되어 있다. 본 자동화 삼축시험기는 모든 제어를 컴퓨터로 수행하며, 결과를 자동으로 저장하는 자동화시스템이며 등방 및 K_0 압밀시험, 반복하중 및 동하중시험, 응력경로 시험 등을 배수 및 비배수, 응력제어 및 변형률제어로 실시할 수 있는데, 본 시험에서는 등방압밀, 반복하중시험을 비배수, 응력제어 조건으로 수행하였다.

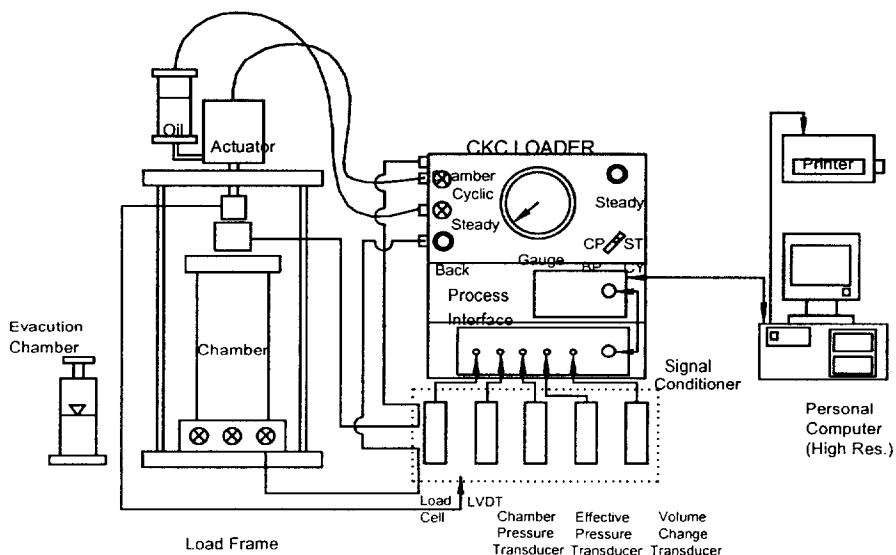


그림 3.1 자동화 삼축시험기

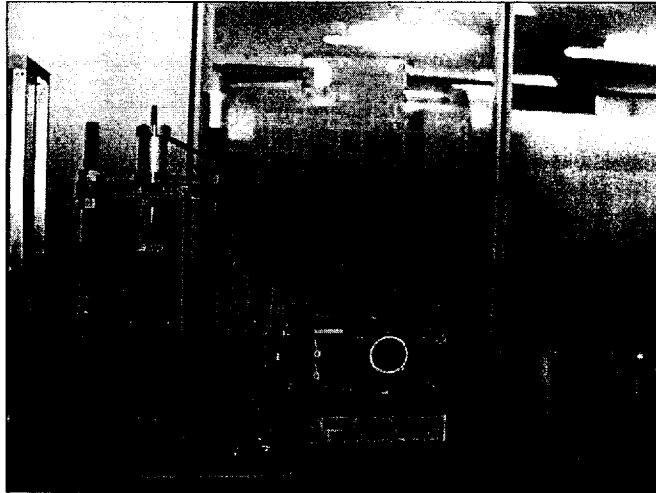
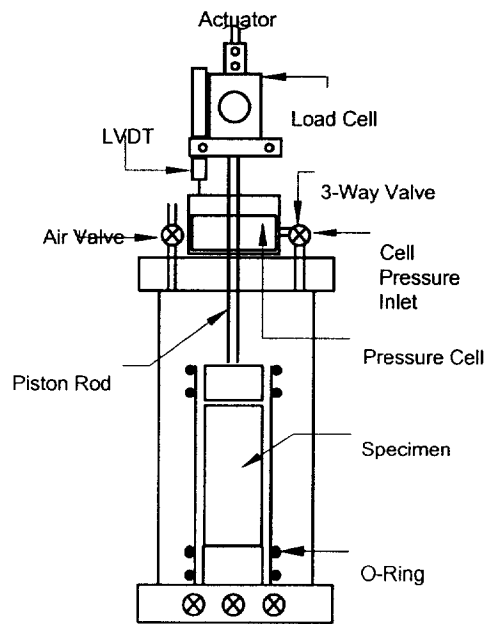


그림 3.2 시험기의 실제모습



F D C

그림 3.3 Cell의 구조 및 명칭

4. 시험방법

4.1 시험시료의 특성

본 연구에서 사용된 시료는 경상남도 양산시 물금지역에 분포하고 있는 퇴적층에서 채취한 시료를 대상으로 하였다. 조사지역에 분포하는 퇴적층은 점토층과 모래층이 호층으로 나타나고, 점토층 내에 함유되어 있는 모래 함유량에 따라 통일분류법상 대부분 CH, CL로 분류된다. 채취된 시료의 No. 200체 통과량은 CH점토에서 94~100%, CL점토에서는 60~99%의 범위로 나타났다.

조사지역별 시료의 기본물성치를 정리하면 표 4.1과 같다.

표 4.1 대상지반 점토의 기본 물성치

조사지역	A지역	B지역	C지역	D지역	E지역
통일분류법상의 분류	CH	CH	CH	CL	CH
No.200체 통과량	99%	94%	99%	99%	99%
습윤단위중량, $\gamma_t(t/m^3)$	1.601	1.665	1.587	1.671	1.673
간극비, e_0	1.752	1.447	1.664	1.379	1.397
액성한계, $W_L(\%)$	57.9	68.2	63.3	43.4	51.3
압축지수, C_c	0.82	0.27	0.68	0.58	0.67
소성지수, I_p	26.1	38.6	36.1	22.7	26.2

4.2 시료의 설치

시료를 직경 5cm, 길이 10cm로 핸드트리밍하고 진공펌프를 이용하여 멤브레인으로 감싼 후 설치한다. 시료가 설치된 셀내부에 물을 채운 후 압을 가하여 포화를 시키며, 이 때 B 값을 측정하여 0.97이상이 될 때까지 포화과정을 실시한다. B값이 0.97이상으로 포화가 완료되면 시료에 적당한 압밀압력을 가하여 압밀을 시키는데 시료가 등방압밀상태를 유지하도록 한다.

4.3 반복전단과정

반복전단중 진동시험은 공기 Actuator를 이용한다. 시험은 응력제어방식으로 이루어지며 적용파는 정현파로 주기는 1Hz, 초기 유효구속압은 150kPa를 적용하였다. 그림 4.1과 같이 축차응력을 점차적으로 증가시키면서 시험을 반복수행하였으며, 각 하중단계별 반복횟수는 11회로 하였다.

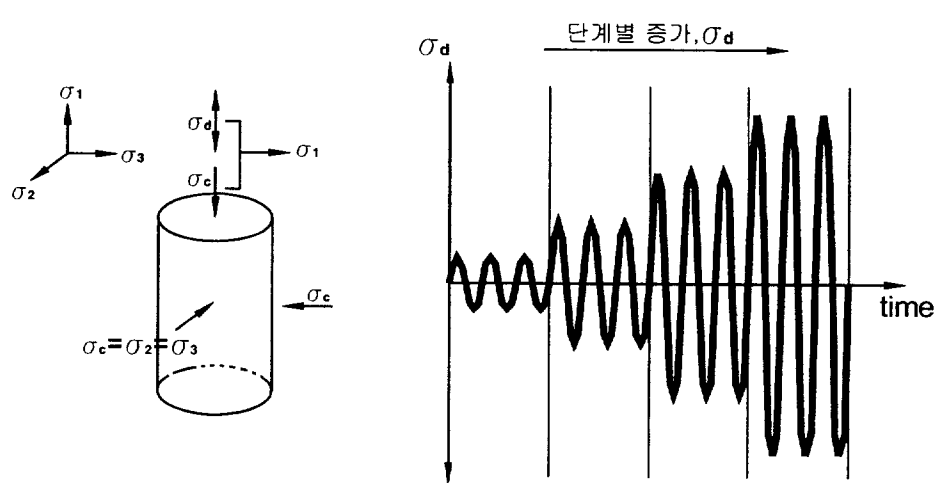


그림 4.1 시험에 적용된 하중조건

표 4.2 시험의 제반조건

초기 유효구속압	진동수	하중종류	시료조건	하중제어방식
150kPa	1Hz	정현파(단계별 증가)	포화비배수	응력제어

5. 시험결과

5.1 축차응력의 변화

조사대상지반의 하중단계별 시간에 따른 축차응력의 변화를 그림 5.1~5.3에 나타내었다.

시험초기에 20kPa의 축차응력을 가하여 시험을 실시하고 다음단계 하중적용 시 점차적으로 축차응력을 증가시키면서 시험을 수행한 결과 각 하중단계에서 시간에 대한 축차응력은 그림 5.1~5.3과 같이 일정하게 나타났다. 이러한 결과는 시험의 하중제어방식이 응력제어방식으로 이루어졌으므로 각 하중단계에서 시간에 따른 축차응력이 일정하게 나타나고 있음을 보여주는 것이다.

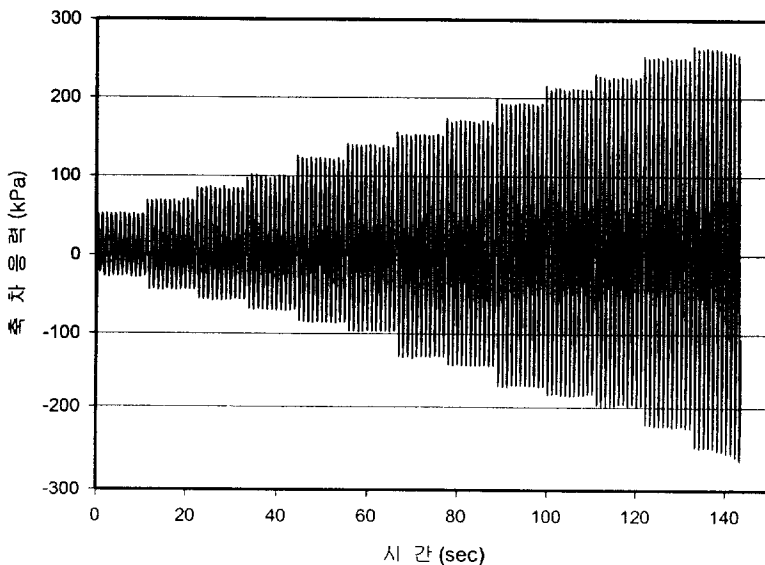


그림 5.1 시간에 따른 축차응력의 변화 (A 지역)

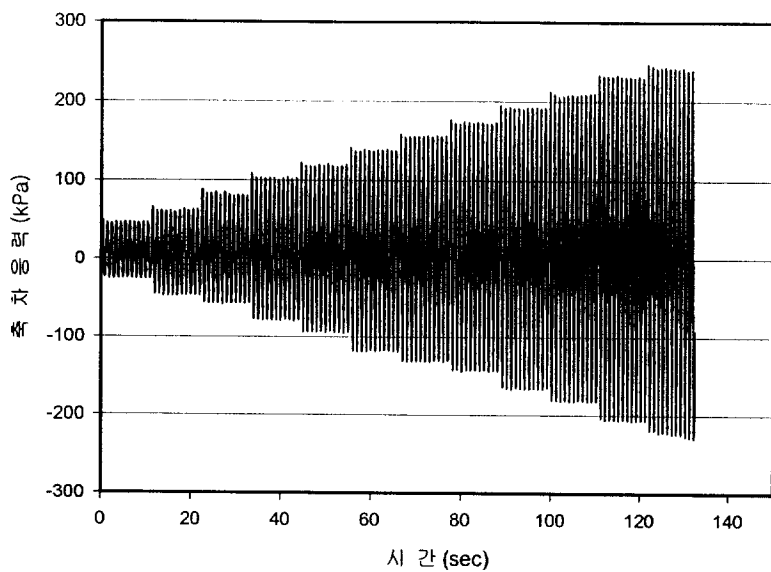


그림 5.2 시간에 따른 축차응력의 변화 (B 지역)

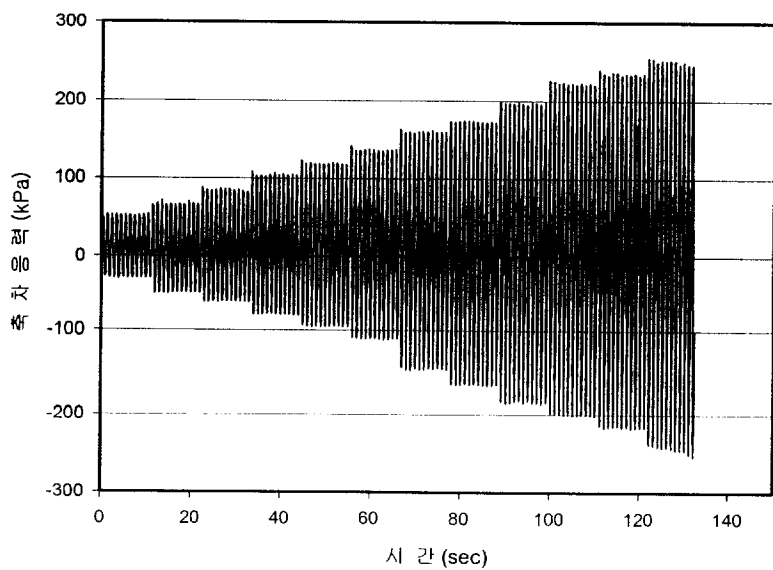


그림 5.3 시간에 따른 축차응력의 변화 (C 지역)

5.2 축변형률의 변화

각 시료의 시간에 따른 축변형률의 변화를 그림 5.4~5.6에 나타내었다. 그림 5.4~5.6은 각 시료에 축차응력을 단계별로 증가시켰을 경우에 시간에 따른 축변형률이 증가되는 경향을 나타낸다. 본 시험에서 사용된 진동수가 1Hz이므로 1초당 1회의 반복하중이 가해지게 된다. 반복횟수가 11회까지 증가함에 따라 축변형률도 증가하는 경향을 볼 수 있으며 본 연구에서 대상으로 한 지역의 축변형률은 약 4~6% 범위로 나타났다.

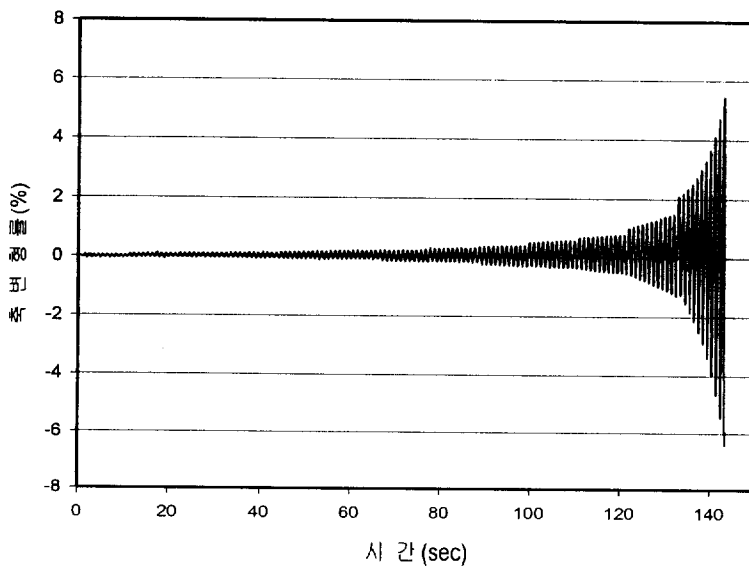


그림 5.4 시간에 따른 축변형률의 변화 (A 지역)

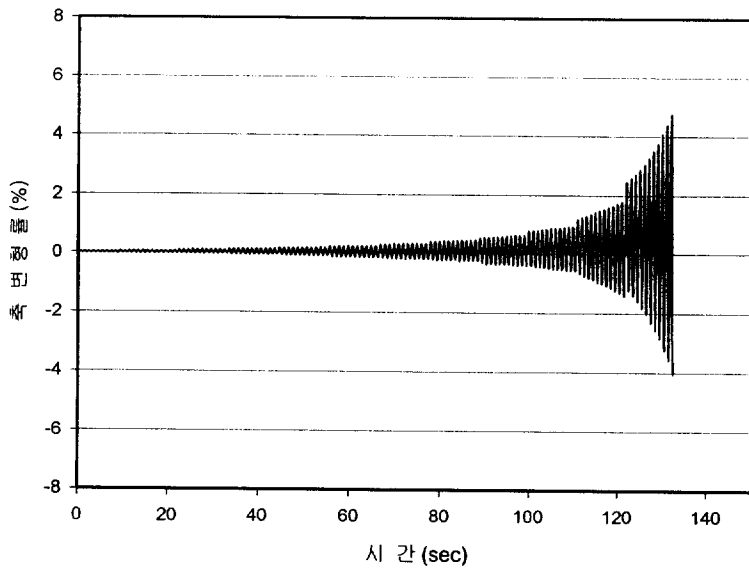


그림 5.5 시간에 따른 축변형률의 변화 (B 지역)

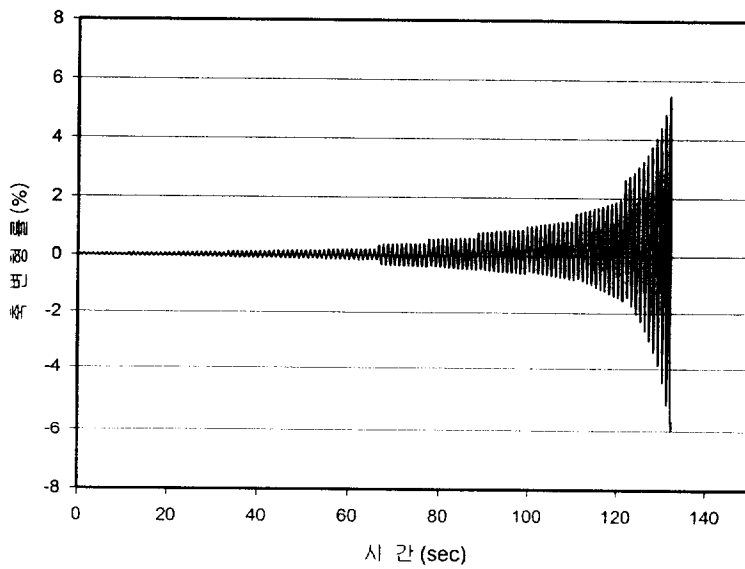


그림 5.6 시간에 따른 축변형률의 변화 (C 지역)

5.3 축차응력과 축변형률 관계

조사대상지역에서 채취한 시료에 대한 시험결과인 축변형률-축차응력의 관계를 그림 5.7~5.9에 나타냈다. 그림 5.7~5.9는 각 시료에 250~260kPa의 축차응력이 반복적용된 최종하중단계에서의 관계를 도시한 것으로 축차응력은 일정하게 유지되지만 축변형률이 증가함으로써 루프(loop)의 형태가 변화되는 것을 볼 수 있다. 대상시료의 축변형률은 약 4~6%정도로 나타났다. 그림 5.10~5.12는 축차응력을 100kPa에서 250~260kPa까지 단계적으로 증가시켜가면서 시험한 결과 각 하중단계별 반복횟수 10회에 해당하는 축차응력에 대한 축변형률의 변화를 보여준다. 축차응력이 커질수록 축변형률이 증가하여 루프의 폭이 점차적으로 커지다가 파괴 시점에 이르러서는 루프의 폭이 갑자기 확대되는 것으로 나타났다. 그림 5.10~5.12는 하중단계별 이력루프의 변화과정을 나타낸 것이고, 그림 5.13~5.15는 각 하중단계에 대한 루프의 정점을 연결한 뼈대곡선을 나타낸 것이다.

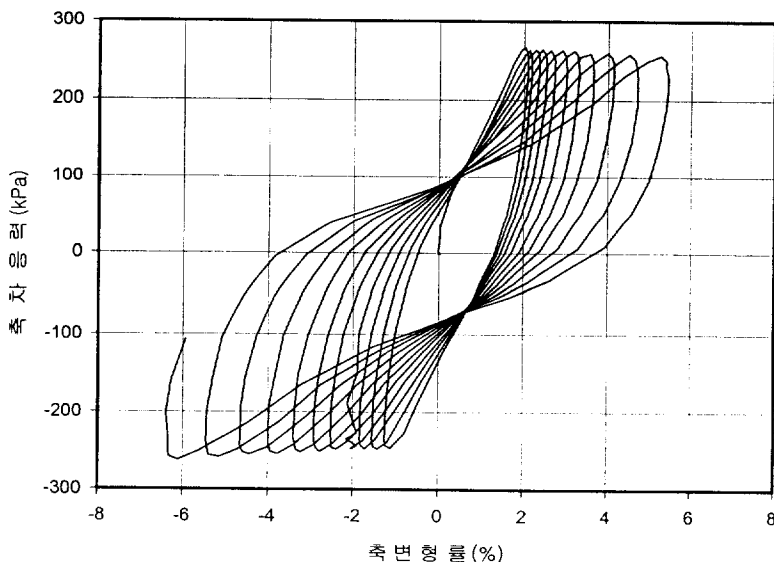


그림 5.7 최종하중단계에서 축차응력과 축변형률 관계 (A 지역)

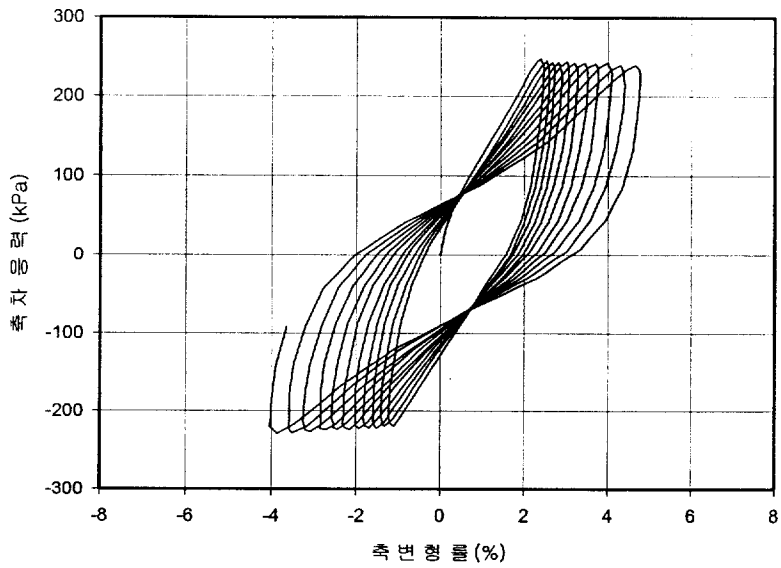


그림 5.8 최종하중단계에서 축차응력과 축변형률 관계 (B 지역)

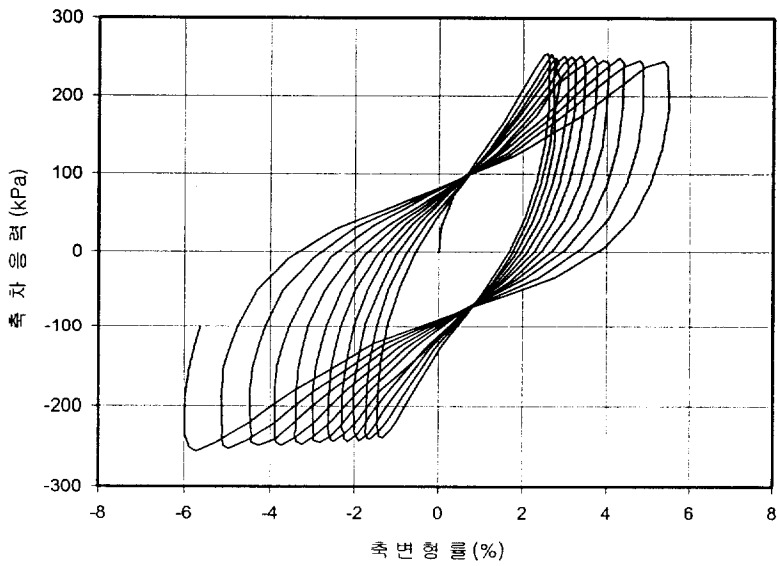


그림 5.9 최종하중단계에서 축차응력과 축변형률 관계 (C 지역)

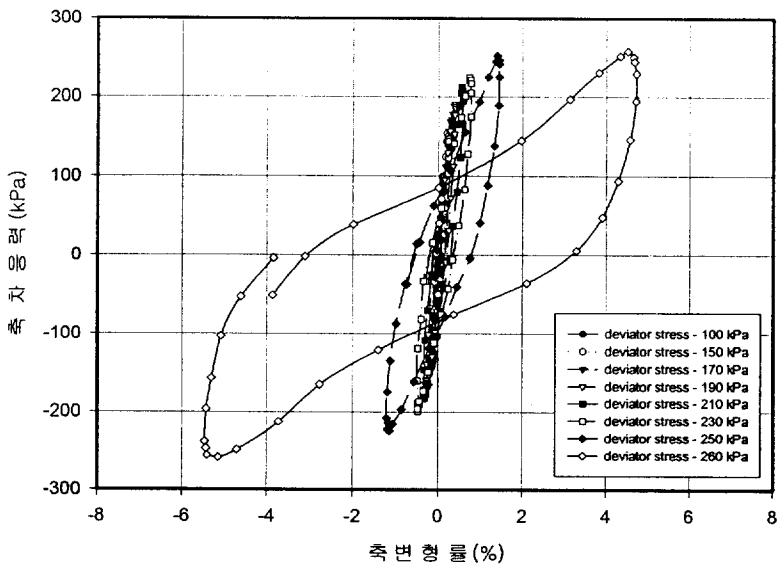


그림 5.10 하중단계별 축변형률 변화 (A 지역)

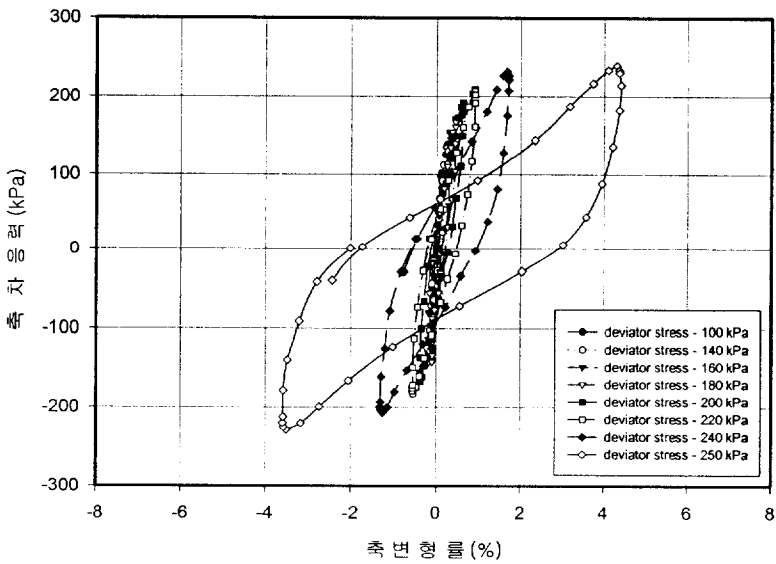


그림 5.11 하중단계별 축변형률 변화 (B 지역)

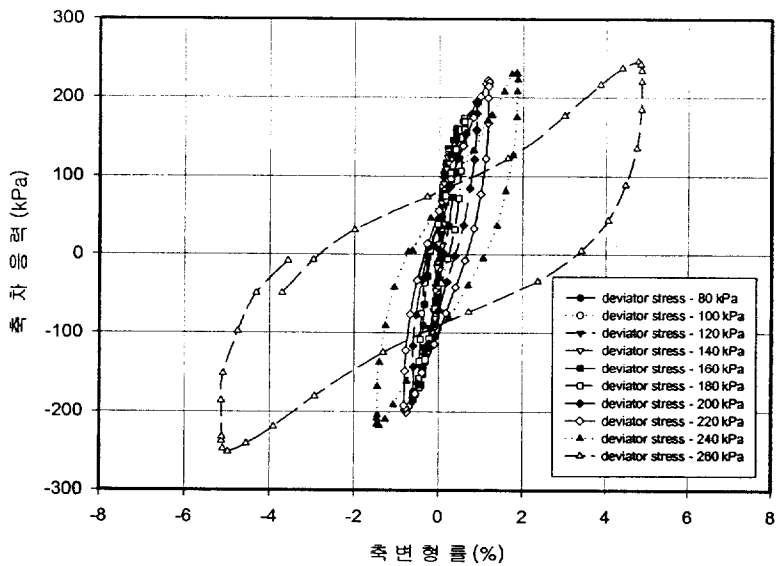


그림 5.12 하중단계별 축변형률 변화 (C 지역)

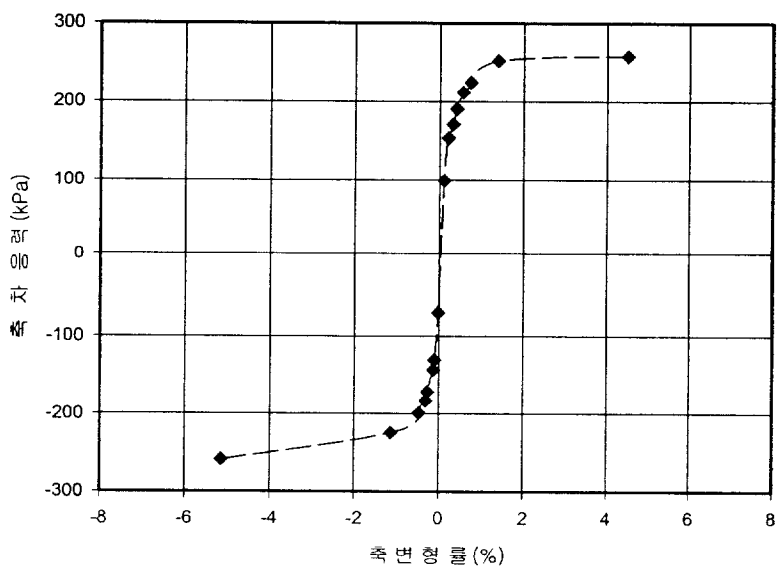


그림 5.13 뼈대곡선 (A 지역)

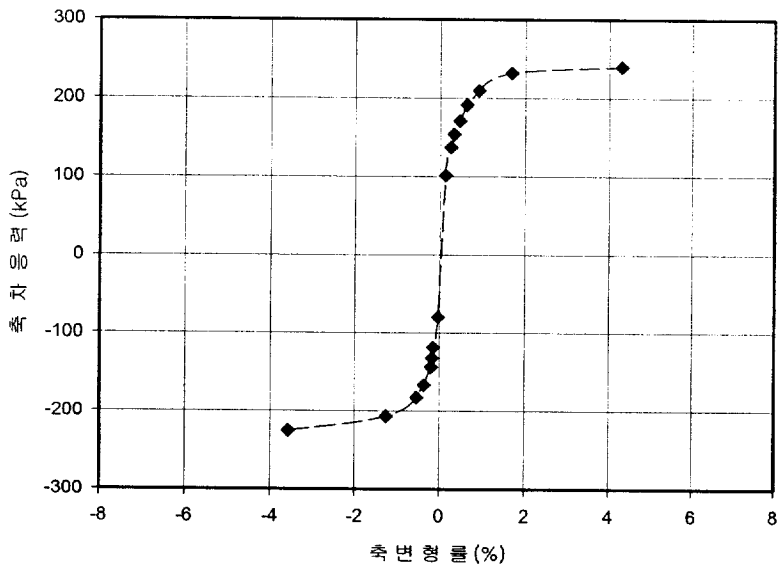


그림 5.14 배대곡선 (B 지역)

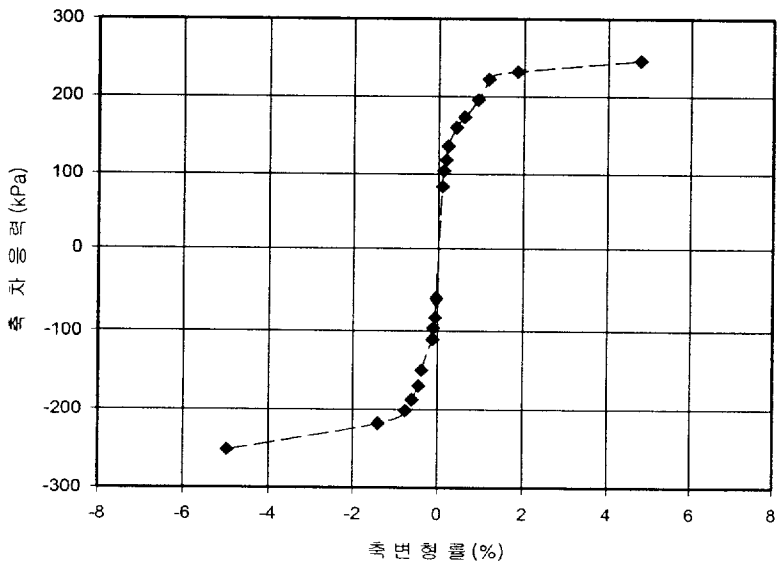


그림 5.15 배대곡선 (C 지역)

5.4 전단탄성계수와 감쇠비

축차응력의 변화에 따른 전단변형률과 전단탄성계수, 전단변형률과 감쇠비의 관계를 그림 5.16~5.30에 나타내었다. 대상시료의 전단변형률은 0.001~0.1%의 범위로 나타났으며, 이는 지반에 강진운동(Strong groundshaking)이 작용했을 때 발생하는 변형률과 동일한 범위의 변형률에 해당한다. 전단변형률은 축차응력이 증가함에 따라 증가하였고 전단탄성계수의 경우 전단변형률이 증가할수록 감소되는 경향을 나타내었다. 이는 점토에 반복하중이 작용하는 경우에 나타나는 점토의 반복연화(cyclic degradation) 특성을 보여주는 것이다. 감쇠비의 경우 전단변형률이 증가할수록 다소 증가하는 경향을 보였다.

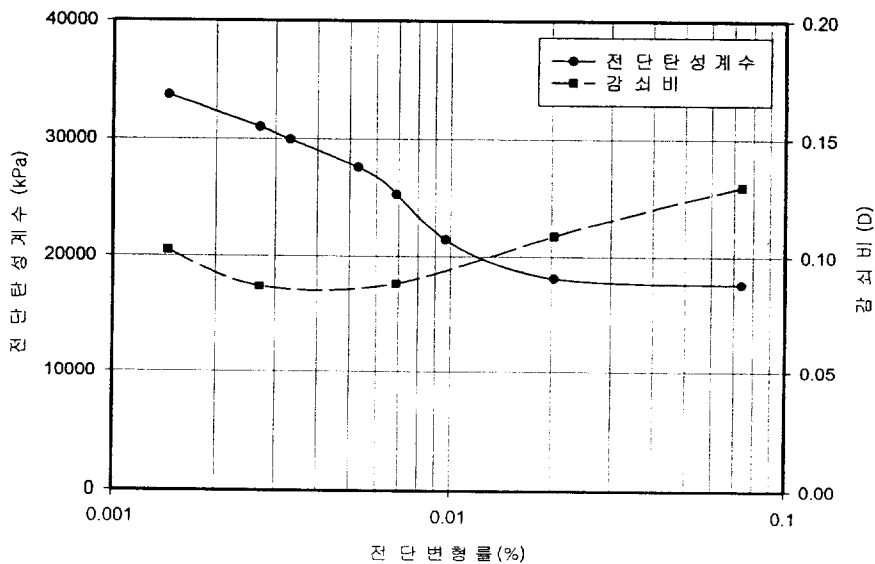


그림 5.16 전단변형률 vs. 전단탄성계수/감쇠비 (A 지역)

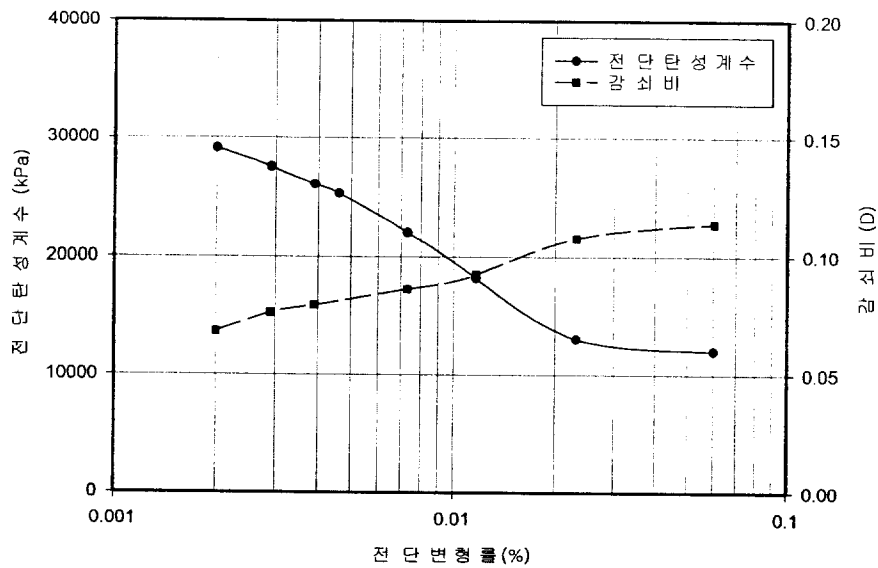


그림 5.17 전단변형률 vs. 전단탄성계수/감쇠비 (B 지역)

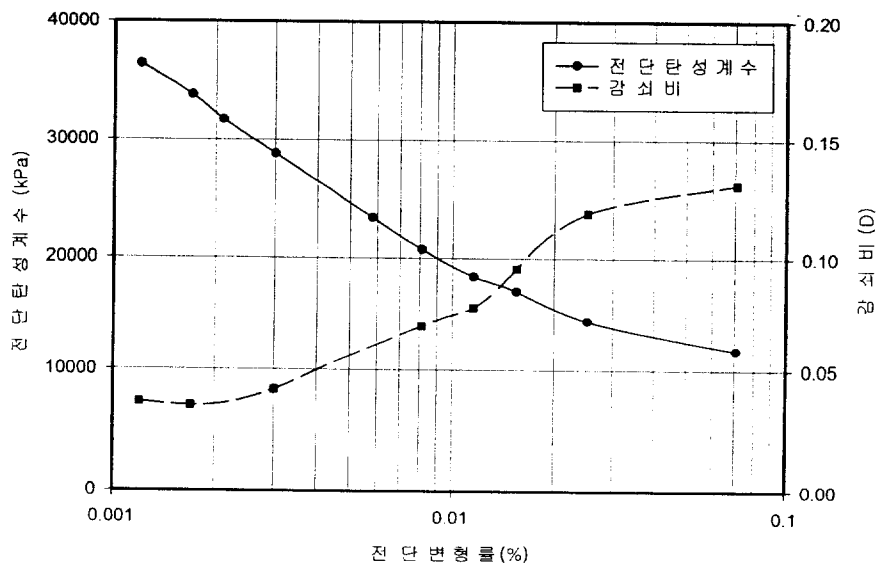


그림 5.18 전단변형률 vs. 전단탄성계수/감쇠비 (C 지역)

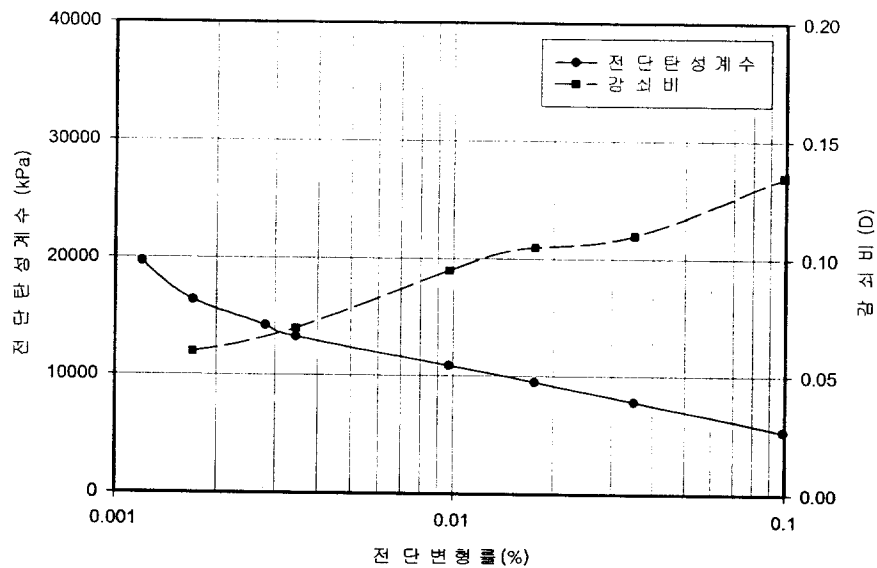


그림 5.19 전단변형률 vs. 전단탄성계수/감쇠비 (D 지역)

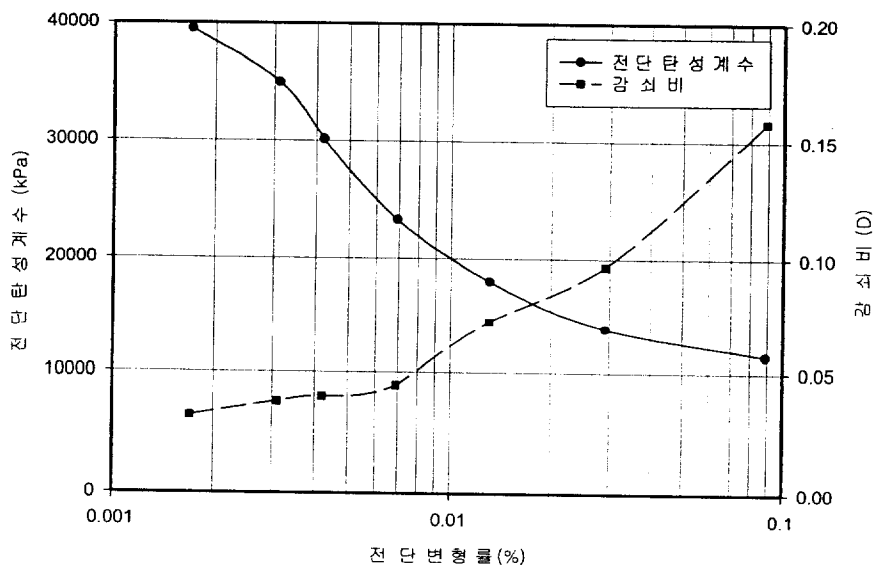


그림 5.20 전단변형률 vs. 전단탄성계수/감쇠비 (E 지역)

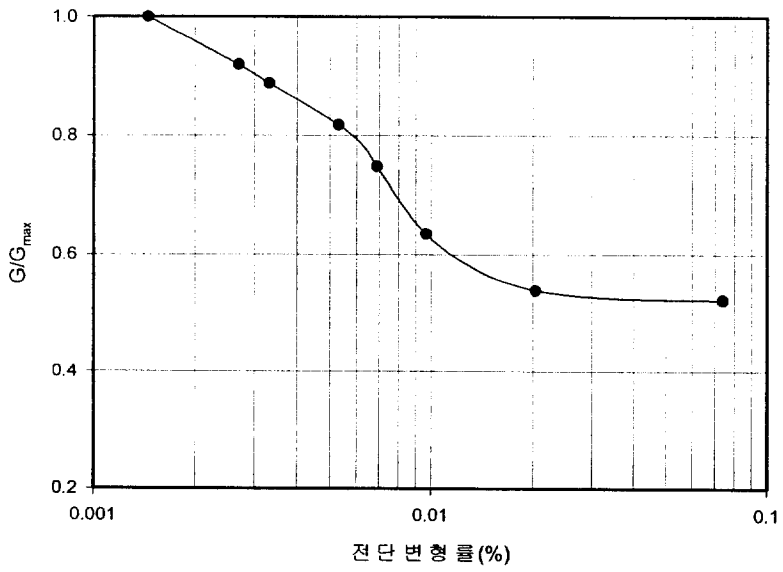


그림 5.21 전단변형률 vs. G/G_{max} (A 지역)

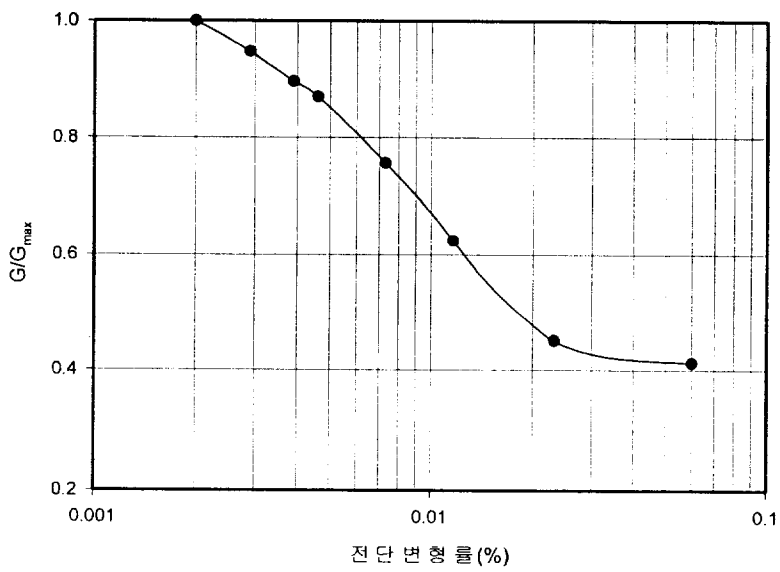


그림 5.22 전단변형률 vs. G/G_{max} (B 지역)

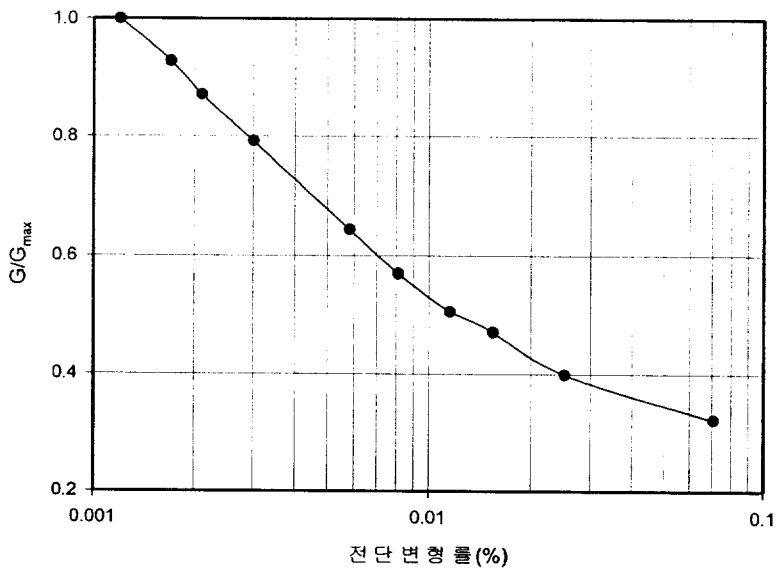


그림 5.23 전단변형률 vs. G/G_{max} (C 지역)

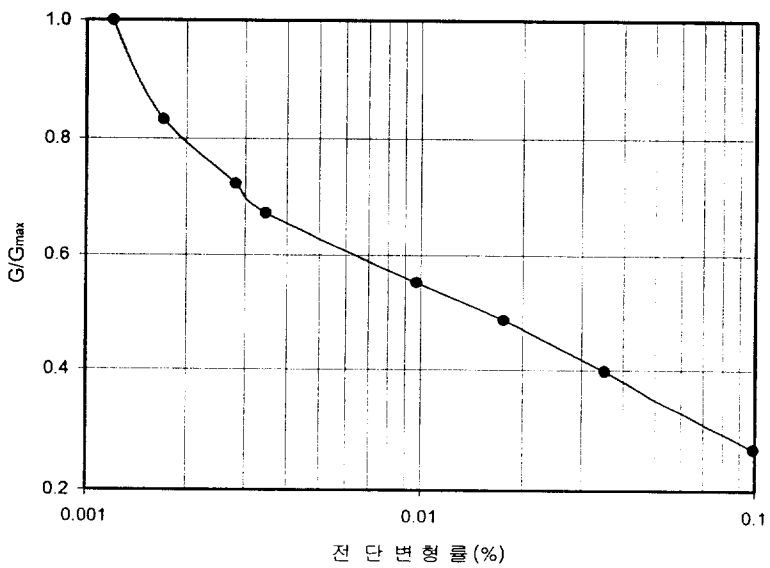


그림 5.24 전단변형률 vs. G/G_{max} (D 지역)

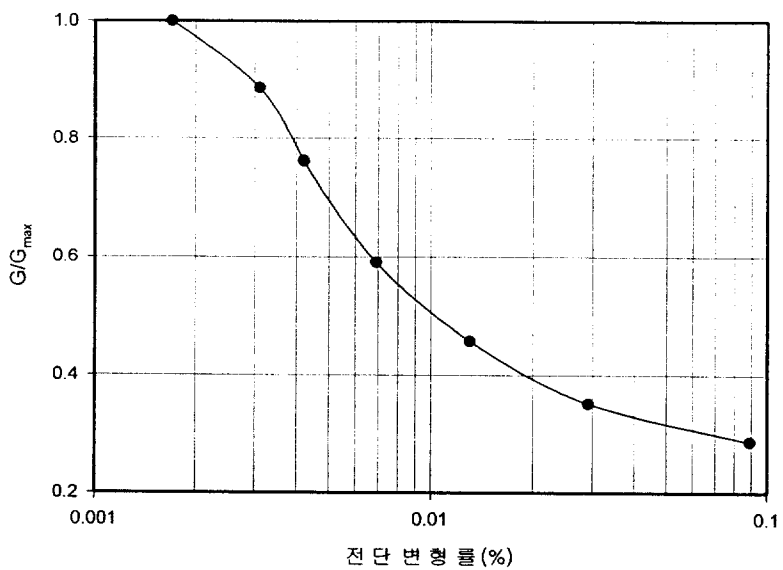


그림 5.25 전단변형률 vs. $G/G_{\max}$ (E 지역)

5.5 기존의 연구자료와 비교

일본항만국, Seed and Idriss 및 Vucetic and Dobry에 의해 제안된 전단탄성계수 및 감쇠비에 대한 변형률 의존곡선과 본 연구에서 평가한 변형률 범위 0.001~0.1%에 해당하는 전단탄성계수 및 감쇠비를 그림 5.31~5.32에 비교하여 나타내었다. 그림 5.31에 나타낸 바와 같이 본 연구에서 평가한 전단탄성계수의 경우 지역에 따라 일본항만국, Seed and Idriss 및 Vucetic and Dobry에 의해 제안된 값에 일치하는 경우도 있었지만 전체적으로 낮게 평가되었다.

이러한 경향은 본 연구대상지역의 경우 다른 나라에 비해 실트질이 상당히 높게 분포하기 때문인 것으로 판단된다.

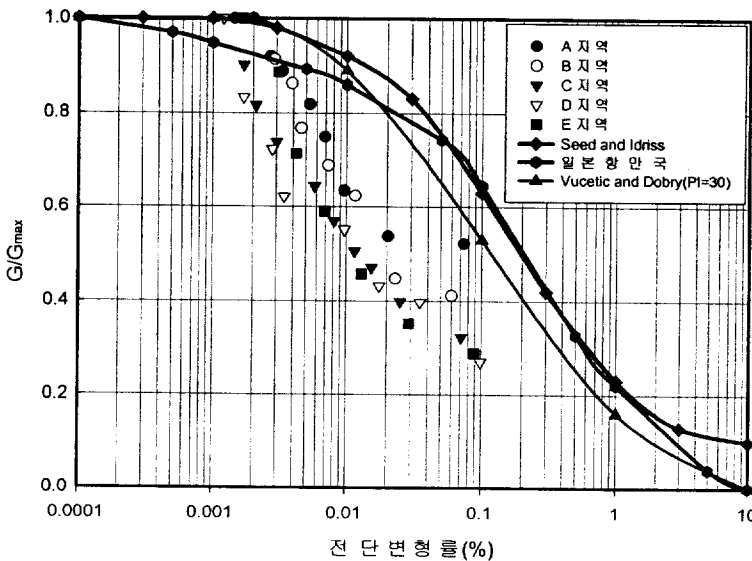


그림 5.26 G/G_{max} 변화

그림 5.32에는 감쇠비의 변화를 나타내었는데 본 연구에서 평가한 감쇠비의 경우 기존의 값들과 비교했을 때 0.001~0.1%의 변형률 범위에서 조사지역에 따라 일치하는 경우도 있었지만 대체적으로 크게 나타났으며, 일본항만국에서

제안하는 값보다 약 2~4%, Seed and Idriss에 의해 제안된 값보다 약 3~6% 정도 크게 나타났다. 이상과 같은 결과는 여러 가지 매개변수의 영향과 지역적인 경향으로 판단되며 정확한 분석을 위해서는 여러 가지 추가적인 시험이 수행되어야 한다.

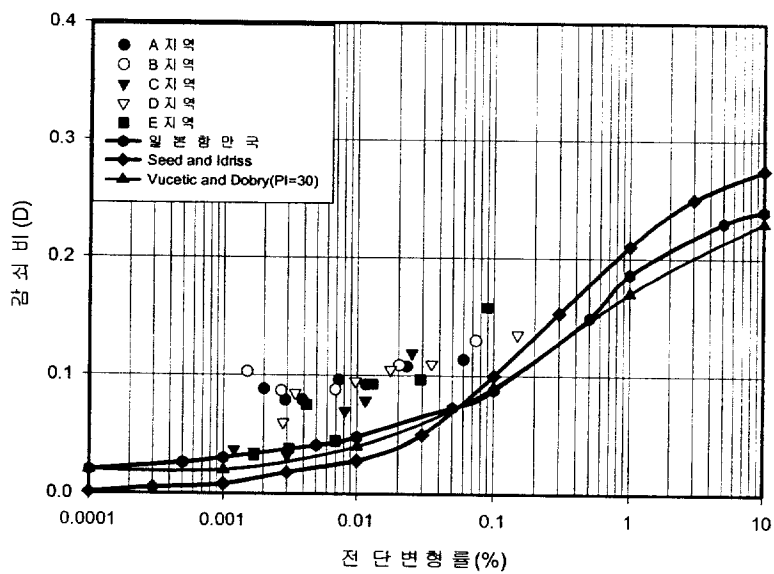


그림 5.27 감쇠비 변화

6. 결 론

본 연구에서는 점토지반의 동적지반계수 평가를 위해 진동삼축시험을 실시하고 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 연구대상 지역의 경우 일정한 유효구속압에서 약 250kPa의 축차응력이 1Hz의 주기로 10회 반복작용시 약 4~6%의 축변형률이 발생했다.
2. 전단변형률은 대체적으로 0.001~0.1%의 고변형률 범위에서 나타났으며 이 범위에서 전단변형률이 증가함에 따라 전단탄성계수는 감소하였으며, 하중이 반복작용함에 따라 전단탄성계수가 감소하는 점토의 반복연화현상을 확인할 수 있었다.
3. 감쇠비는 시료에 따라 전단변형률이 증가할수록 다소 증가하는 경향을 보였다.
4. 기존의 연구자료와 비교했을 때 전단탄성계수의 경우 대체적으로 낮게 평가되었으며, 감쇠비의 경우 일본항만국의 기준에 비해 약 2~4%, Seed and Idriss의 기준에 비해 약 3~6%정도 높게 평가되었다.
5. 본 연구에서 나타나지 않은 변형률 범위에서의 동적변형특성을 파악하기 위해서는 보다 정밀한 시험이 요구되며, 기존의 연구자료와 비교해서 지역적인 경향을 정밀히 분석하기 위해서는 여러 가지 매개변수에 의한 영향을 고려하고 주변지역에 대한 추가적인 연구가 수행되어야 한다.

참고문헌

- 김동수(1995). "공진주/비틀전단(RC/TC) 시험기를 이용한 점성토의 변형특성,"
한국지반공학회지, 한국지반공학회, Vol. 11, No. 1, pp. 113-124.
- 박종관(1998). "진동삼축시험을 통한 실트질 모래의 액상화 강도에 관한 연구,"
한국지반공학회지, 한국지반공학회, Vol. 14, No. 1, pp. 59-67.
- 하광현(1986). "Dynamic Shear Modulus and Damping Ratio of Soft Clay,"
대한토질공학회지, 대한토질공학회, Vol. 2, No. 1, pp. 55-61.
- 한국지반공학회(1997). 진동 및 내진설계, 지반공학시리즈 8권, 구미서관, pp. 1-100.
- Anderson, D. G. and Woods, R. D.(1975). "Comparison of field and laboratory shear modulus," *Proceedings, ASCE Conference on In Situ Measurement of Soil Properties*, Vol. 1, pp. 69-92.
- Anderson, D. G. and Stokoe, K. H.(1978). "Shear modulus : A time-dependent soil property," *Dynamic Geotechnical Testing*, ASTM STP 654, ASTM, Philadelphia, pp. 66-90.
- Cundall, P. A. and Strack, O.D.L.(1979). "A discrete numerical model for granular assemblies," *Geotechnique*, Vol. 29, No. 1, pp. 47-65.
- Dobry, R. and Ladd, R. S.(1980). Discussion to "Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes," by H. B. Seed and "Liquefaction potential : science versus practice," by R. B. Peck, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 106, No. GT6, pp. 720-724.
- Dobry, R., Ladd, R. S., Yokel, F. Y., Chung, R. M., and Powell, D.(1982). "Prediction of pore water pressure buildup and liquefaction of sands during earthquakes by the cyclic strain method," *NBS Building Science Series 138*, National Bureau of Standards, Gaithersburg, Maryland, 150

pp.

- Drnevich, V. P. and Richart, F. E. Jr.(1970). "Dynamic prestraining of dry sand," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 96, No. SM2, pp. 453-469.
- Hardin, B. O. and Drnevich, V. P.(1972). "Shear modulus and damping in soils : Measurement and parameter effects," *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. 98, No. SM6, pp. 603-624.
- Hardin, B. O.(1978). "The nature of stress-strain behavior of soils," *Proceedings, Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, ASCE, Pasadena, California, Vol. 1, pp. 3-89.
- Hertz, H.(1881). " Über die Berührung fester elastischer Körper," *Journal Für die Reine und Angewandte Mathematik*, Vol. 92, pp. 156-171.
- Isenhower, W. M. and Stokoe, K. H.(1981). "Strain rate dependent shear modulus of San Francisco Bay Mud," *Proceedings, International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, St. Louis, Missouri, Vol. 2, pp. 597-602.
- Jamiolkowski, M., Leroueil, S., and Lopresti, D. C. F.(1991). "Theme lecture : Design parameters from theory to practice," *Proceedings, Geo-Coast '91*, Yokohama, Japan, pp. 1-41.
- Mackey, T. A. and Saada, A. S.(1984). "Dynamics of anisotropic clays under large strains," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 4, pp. 487-503.
- Marcuson, W. F. and Wahls, H. E.(1972). "Time effect on dynamic shear modulus of clays," *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. 98, No. SM12, pp. 1359-1373.
- Ng, T. T. and Dobry, R.(1994). "Numerical simulations of monotonic and

- cyclic loading of granular soil," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 20, No. 2, pp. 388-403.
- Park, T. and Silver, M. L.(1975). "Dynamic soil properties required to predict the dynamic behavior of elevated transportation structures," *Report DOT-TST-75-44*, U. S. Department of Transportation, Washington, D. C.
- Pyke, R. M.(1973). "Settlement and liquefaction of sands under multi-directional loading," Ph. D. dissertation, University of California, Berkeley.
- Roesler, S. K.(1979). "Anisotropic stress modulus due to stress anisotropy," *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 105, No. GT7, pp. 871-880.
- Seed, H. B. and Idriss, I. M.(1970). "Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses," *Report EERC 70-10*, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Seed, H. B., Wong, R. T., Idriss, I. M., and Tokimatsu, K.(1984). "Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 112, No. 11, pp. 1016-1032.
- Steven L. Kramer(1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, pp. 184-250.
- Stokoe, K. H., Lee, S. H. H., and Knox, D. P.(1985). "Shear moduli measurements under true triaxial stresses," *Proceedings, Advances in the Art of Testing Soils under Cyclic Conditions*, ASCE, New York, pp. 166-185.
- Ting, J. M., Corkum, B. T., Kauffman, C. R., and Greco, C.(1989). "Discrete numerical model for soil mechanics," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 3, pp. 379-398.

- Yan, L. and Byrne P. M.(1991). "Stress state and stress ratio effects in downhole and crosshole shear wave velocity tests on sands," *Proceedings, 2nd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, St. Louis, Missouri, Vol. 1, pp. 299-306.
- Youd, T. L.(1972). "Compaction of sands by repeated shear straining," *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. 98, No. SM7, pp. 709-725.

감사의 글

지금, 또 하루의 해는 저물어 밤이 깊어가고 있습니다. 늘 맞이했던 밤이지만 이제 얼마남지 않은 연구실의 밤이 자꾸만 그리워집니다. 뒤돌아보니 참으로 많은 시간이 흘렀습니다. 이제 그 시간의 끝에 섰습니다.

깊은 밤, 문득 떠오르는 분이 계십니다. 정두회 교수님. 당신은 토목인으로 살아갈 우리들의 앞날에 큰 길을 내어주셨습니다. 커다란 스승으로, 때로는 가까운 형님으로 또, 아버지처럼.... 당신의 사랑과 관심으로 지금 우리는 큰 세상으로의 문을 열었습니다. 교수님! 감사합니다. 그리고, 좀 더 나은 공부하라고 보잘 것 없는 논문 읽고, 또 읽으시며 세심한 지도를 아끼지 않으신 손인식 교수님, 정진호 교수님, 주야로 깊은 학문에 정진하시면서도 제자들을 위해서라면 시간 내주시는데 인색하지 않으신 토목공학과 여러 교수님들께도 깊은 감사의 마음을 전합니다. 또한, 긴 시간동안 형제처럼 지내며 많은 순간을 함께 한 연구실의 준명 형, 용준 형, 유돈 형, 지금은 의젓한 사회인이 되어 후배들의 길을 닦고 계시는 종철 형, 종태 형, 태완씨, 동기라는 이름으로 뿔뿔 뿔친 우리의 태환, 훈규, 도희, 연구실의 중심에 서고자 마냥 열심인 도영, 재환, 학부생으로서 고생 많이 한 대식이, 유일한 여학생 경은, 그리고 많은 지반공학연구회 선배님들, 모두에게 자랑스럽고 사랑한다는 말을 글로써 전합니다. 늘 바쁘다는 핑계로 함께 해주지 못해도 언제나 웃으며 이해하고 격려해준 사랑하는 나의 벗, 병욱, 주영, 제헌, 그의 유진, 동진, 그의 현정, 영태, 민건, 경배, 못난 선배 항상 형으로 대해준 귀여운 동생 성일, 그의 재은, 너무나 많은 주위 모든 이들에게 감사하다는 말을 전합니다. 늘 기쁘고, 행복한 일만 함께하길 바랍니다.

어려운 형편속에서도 많이 배워야 한다면 등을 떠미시고, 넉넉한 마음으로 공부하도록 당신들 건강 돌아볼 틈도 없이 밤낮으로 고생만 하신 아버지, 어머니, 세심한 관심을 아끼지 않은 하나뿐인 누나, 자형, 사랑하는 조카, 성준, 성욱, 멀리 동해에서 국방의 의무를 다하고 있는 자랑스런 해군중위 동생, 성욱, 멀리 시골에서 고생하시면서도 늘 걱정 많이 해주신 할머니, 작은아버지, 작은어머니, 사촌동생들, 학창시절 내내 교육적인 조언을 많이 해주신 길룡 삼촌 및 여러 친지분들께도 깊은 감사의 마음을 전합니다. 모두들 건강하십시오.