

동적 및 정적 실험 방법으로 평가한 지반의 초기 강성 비교

Comparison of dynamic and static methods in the measurement of the initial stiffness of soil

주진현¹⁾, Jinhyun Choo, 정영훈²⁾, Young-Hoon Jung, 정충기³⁾, Choong-Ki Chung

¹⁾ 서울대학교 건설환경공학부 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Eng. Seoul National University

²⁾ 한국건설기술연구원 선임연구원, Senior Researcher, Underground Structure Research Division, Korea Institute of Construction Technology

³⁾ 서울대학교 건설환경공학부 교수, Professor, Dept. of Civil and Environmental Eng., Seoul National University

SYNOPSIS : A comparative study on dynamic and static measurement of initial stiffness was conducted. Because soil stiffness decreases even at very small strains, the initial stiffness has been measured by dynamic tests using shear wave velocity measurement. On the other hand, due to the advance of local strain measurement, the triaxial testing device is capable of measuring the static initial stiffness. It has been known that initial stiffness measured by static triaxial tests is generally lower than that measured by dynamic tests possibly due to the limitation of static measurement of displacement at very small strains. This study presents experimental results indicating that the elastic shear moduli could be the same both in dynamic and static measurements owing to the soil anisotropy induced by anisotropic stresses.

Keywords : Initial stiffness, Elastic modulus, Shear wave, Bender element, Triaxial test

1. 서론

지반의 초기 강성(initial stiffness)은 변형 발생 초기에 나타나는 선형 탄성 영역에서의 강성을 말한다. 초기 강성은 지진, 기계 기초, 말파 등에 의해 지반에 발생하는 동적 하중에 대한 지반의 거동 평가를 위해 필수적인 물성치이며, 흙의 기본 상태와 구조와 밀접한 관련이 있기 때문에 이를 이용하여 지반의 다양한 특성을 평가할 수 있다.

일반적으로 지반의 강성 평가 시 사용하는 삼축시험과 같은 정적 실험 방법은 시료 외부에서 변형을 측정하기 때문에, 미소변형률 영역의 변형 측정 시 측정 한계가 존재하고 그 결과 통상적으로 초기 강성을 과소평가하게 된다. 따라서 초기 강성은 일반적으로 지반 내 전단파 속도를 측정하는 동적 실험 방법을 통하여 평가해왔다. 그러나 삼축시험에서도 선형 탄성 영역의 미소변형을 신뢰성 있게 측정할 수 있는 국부변형 측정 장치(local strain measuring system)가 개발된 이후, 정적 삼축시험을 통해서도 지반의 초기 강성 평가 및 관련 연구를 수행하고 있다.

그러나 국부변형을 측정된 기존의 실험 결과에서도 정적 실험으로 평가한 지반의 초기 강성은 동적 방법의 결과보다 여전히 작은 값이 나타났다(Smith et al., 1992; Callisto and Calabresi, 1998). 그 이유로 정적 실험 방법의 계측 정확도 문제가 계속 제기되지만, 흙의 이방성에 의해서도 그 차이가 발생할 수 있다는 이론적 연구 결과 역시 발표된 바 있다(Yimsiri and Soga, 2002). 본 연구에서는 벤더 엘리먼트와 국부변형 측정 장치를 부착한 삼축시험기를 이용하여 다양한 정규압밀 및 과압밀 응력 상태에서

비배수 삼축압축시험을 총 8회 수행하였고, 전단 직전 벤더 엘리먼트 시험을 통해 측정된 전단파 속도를 이용하여 구한 동적 초기 강성과 응력-변형률 곡선으로부터 계산한 정적 초기 강성을 서로 비교하였다. 전단 전 초기 유효응력 상태를 K_0 및 등방 응력 조건으로 달리하면서 실험을 수행하여 여러 응력 상태에서의 정적 측정과 동적 측정 강성의 차이를 비교 분석하였다.

2. 지반의 초기 강성 평가 방법

지반은 전체 변형률 영역 중에서 초기에 가장 큰 강성을 나타내며 흔히 그 값을 초기 전단탄성계수 (G_{max}) 혹은 초기 탄성계수(E_{max})로 나타낸다. 본 절에서는 동적 및 정적 실험 방법을 통하여 초기 탄성계수를 평가하는 방법을 설명하였다.

2.1 동적 실험 방법

동적 실험 방법은 지반 내에서 전단파 전달 속도를 측정하고 그 값으로부터 식 (1)을 이용하여 초기 전단탄성계수를 계산한다. 지반을 반무한 등방성 연속체로 가정하면, 파동 방정식으로부터 전단파 속도와 초기 전단탄성계수 G_{max} 에 대한 다음 관계식을 유도할 수 있다.

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad (1)$$

여기서 ρ 는 흙의 밀도, 그리고 V_s 는 전단파 속도이다. 등방 탄성체에 대해서 초기 전단탄성계수 G_{max} 와 초기 탄성계수 E_{max} 는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$G_{max} = \frac{E_{max}}{2(1+\nu)} \quad (2)$$

여기서 ν 는 포아송비(Poisson's ratio)이다.

2.2 정적 실험 방법

지반의 탄성계수는 정적 실험 결과로 얻은 응력 - 변형률 관계를 통해 식 (3)와 같이 계산할 수 있다. 이 때 초기 미소변형률 영역에 나타나는 일정한 값이 지반의 초기 탄성계수이다.

$$E_{sec} = \frac{\Delta q}{\epsilon_v} \quad (3)$$

여기서 E_{sec} 는 할선 탄성계수(secant Young's modulus), Δq 는 축차응력, 그리고 ϵ_v 는 연직방향 변형률이다. 전단탄성계수는 지반이 등방 탄성체임을 가정하면 응력 - 변형률 관계로부터 다음 식으로부터 계산할 수 있으며, 역시 초기 미소변형률 영역에 나타나는 일정한 값이 초기 전단탄성계수이다.

$$G_{sec} = \frac{\Delta q}{3\epsilon_s} \quad (4)$$

여기서 전단변형률은 $\epsilon_s = (2/3)(\epsilon_v - \epsilon_h)$, G_{sec} 는 할선 전단탄성계수 (secant shear modulus), Δq 는 축

차응력, ϵ_v 는 연직변형률, 그리고 ϵ_h 은 수평변형률이다. 비배수 상태에서는 전단 시 체적 변화가 발생하지 않으므로 $\epsilon_v + 2\epsilon_h = 0$ 이고, 따라서 전단탄성계수(shear modulus)와 비배수 탄성계수(undrained Young's modulus) 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$G_u = \frac{\Delta q}{3\epsilon_s} = \frac{\Delta q}{2(\epsilon_v - \epsilon_h)} = \frac{\Delta q}{3\epsilon_v} = \frac{1}{3}E_u \quad (5)$$

여기서 G_u 는 비배수 전단탄성계수, Δq 는 축차응력, ϵ_s 는 전단 변형률, ϵ_v 는 연직변형률, ϵ_h 은 수평변형률, 그리고 E_u 는 비배수 탄성계수(Young's modulus)이다. 본 연구에서 동일한 응력 조건의 비배수 상태에서 동적 및 정적 실험 방법으로 평가한 초기 강성 비교 시, 앞서 설명한 방법으로 초기 비배수 전단탄성계수 $G_{u(\max)}$ 를 각각 계산하여 비교하였다.

3. 비배수 응력경로의 기울기와 재료 이방성의 관계

비배수 전단 시험 응력경로의 기울기는 재료의 이방성과 간접적인 관계가 있다(Parry, 1995). 본 연구에서는 동적 또는 정적으로 측정된 초기 강성 간의 차이에 대한 이방성의 영향을 알아보기 위하여 응력경로의 초기 기울기를 구하였다. 일반적으로 삼축시험의 응력경로는 식 (6)으로 정의된 $p' - q$ 평면에 표시한다.

$$p' = \frac{\sigma'_v + 2\sigma'_h}{3}, \quad q = \sigma'_v - \sigma'_h \quad (6)$$

여기서 σ'_v 는 연직유효응력, 그리고 σ'_h 은 수평유효응력이다. 재료의 응력-변형률 관계가 직교 이방성을 따른다면,

$$\epsilon_a = \frac{\Delta\sigma'_v}{E'_v} - 2\nu'_{hv} \frac{\Delta\sigma'_h}{E'_h} \quad (7)$$

$$\epsilon_r = -\nu'_{vh} \frac{\Delta\sigma'_v}{E'_v} + \frac{\Delta\sigma'_h}{E'_h} - \nu'_{hh} \frac{\Delta\sigma'_h}{E'_h} \quad (8)$$

가 성립한다. 여기서 ν'_{vh} 는 연직하중에 대한 수평변형에 대한 포아송비, ν'_{hv} 는 수평하중에 대한 연직변형에 대한 포아송비, E'_v 는 연직탄성계수, E'_h 는 수평탄성계수, $\Delta\sigma'_v$ 는 연직유효응력 변화량, $\Delta\sigma'_h$ 는 수평유효응력 변화량이다. 포아송비와 탄성계수는 다음의 관계를 가진다.

$$\frac{\nu'_{hv}}{\nu'_{vh}} = \frac{E'_h}{E'_v} = n \quad (9)$$

여기서 n 은 탄성계수비이다. 비배수 조건에서는 부피변화가 발생하지 않으므로 $\epsilon_v + 2\epsilon_h = 0$ 이고, 이를 식 (7)와 (8)에 대입하여 정리하면, 비배수 응력경로의 기울기는 다음과 같이 포아송비와 탄성계수비의 향으로 표현할 수 있다.

$$\frac{\Delta q}{\Delta p'} = \frac{6\nu'_{hh} + 12n\nu'_{vh} - 3n - 6}{2\nu'_{hh} - 2n\nu'_{hv} + 2n - 2} \quad (10)$$

여기서 $\nu'_{hh} = \frac{1}{2}(\nu'_{vh} + \nu'_{hv}) = \frac{1}{2}\nu'_{vh}(1+n)$ (Henkel, 1971), 그리고 $\nu'_{hh} = 0.2$ 라 가정한다면, 식 (10)를 통해 계산한 응력경로의 기울기와 탄성계수비(n)의 관계를 그림 1과 같이 구할 수 있다. 그림 1에서 알 수 있는 바와 같이, 재료가 등방이면(즉, $n=1$), 비배수 응력경로의 기울기는 90° 이다. 실제로 비배수 응력경로의 기울기 값만으로 흙의 탄성계수비 값을 정확히 계산하는 것은 어렵다. 이는 탄성체와 포아송비에 대한 가정 조건이 실제와 다를 뿐 아니라, 흙과 같이 입자로 구성된 물질일 경우 같은 조건에서도 입자 간 접촉력의 종류에 따라서 비배수 응력경로에 따른 탄성계수비 값이 달라지기 때문이다(Yimsiri and Soga, 2002). 본 연구에서는 정확한 이방성의 값이 아닌 이방성 차이에 따른 영향만을 살펴보기 때문에, 이방성 여부를 비배수 전단 시험 응력경로의 초기 기울기로 판정하였다.

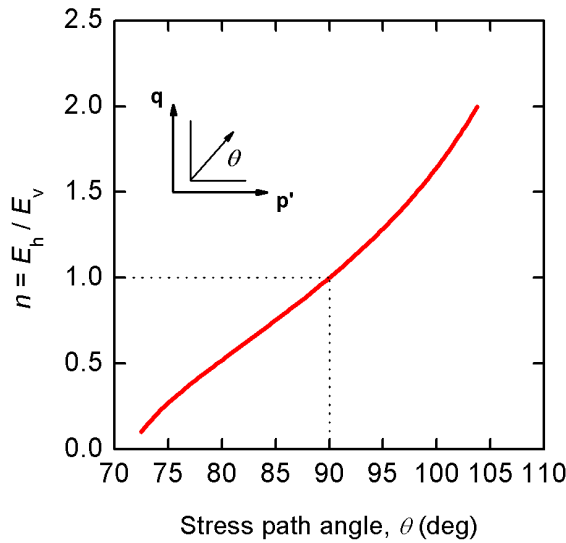


그림 1. 비배수 응력경로 기울기 θ 와 재료의 탄성계수비 n 의 관계 ($n = 0.1 \sim 2.0$, $\nu'_{hh} = 0.2$)

4. 실험 설명

본 연구에서는 동일한 응력 조건에서 동적 및 정적 방법으로 초기 강성을 평가하기 위하여 벤더 엘리먼트와 국부변형 측정 장치를 동시에 부착한 삼축시험기를 사용하였다.

4.1 삼축시험기

실험에 사용한 삼축시험기는 GDS Instruments 제품으로 그림 2와 같이 컴퓨터를 통하여 자동으로 시료에 하중 및 변위를 가하여 응력경로를 조절할 수 있는 재하 시스템이다. 시험 시 축하중은 바닥판의 변위로 가해지며, 마찰에 의한 오차를 최소화 할 수 있는 내부 로드셀을 통하여 변위 제어 중 시료에 가해지는 축하 응력을 측정하였다.

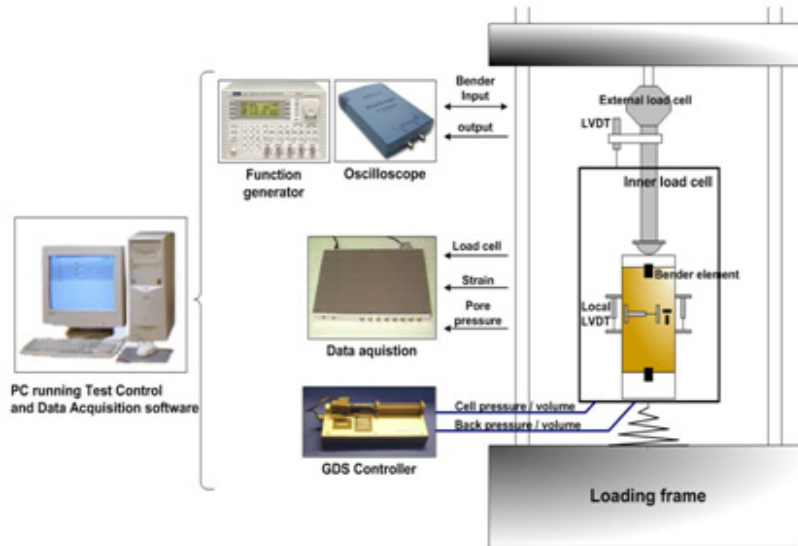


그림 2. 삼축시험 시스템 개요

4.1.1 벤더 엘리먼트

벤더 엘리먼트(bender element)는 압전(piezoelectric)현상을 이용하여 흙에서 전단파 속도를 측정할 수 있는 작은 세라믹 판으로 구성되어 있으며, 삼축시험기에서는 벤더 엘리먼트 시험을 통해 동적 방법으로 초기 강성을 평가할 수 있다. 본 연구에서는 GDS Instruments에서 제작한 2개의 벤더 엘리먼트를 삼축 시료의 상부 및 하부에 삽입하여 전단파 속도를 측정하고 연직방향 전단탄성계수를 산정하였다. 또한 전단탄성계수 이방성을 평가하기 위하여 자체 제작한 캔틸레버 방식의 수평방향 벤더 엘리먼트를 추가로 시료에 부착하였다.

전단파는 TT Instruments Ltd.의 TGA 1240 Function Generator를 사용하여 발생시켰다. 벤더 엘리먼트의 길이에 따라 흙에서의 공진 주파수가 다르기 때문에, 길이 2.25 mm의 연직방향 벤더 엘리먼트에서는 주파수 10 kHz 그리고 길이 5 mm의 수평방향 벤더 엘리먼트에서는 주파수 5 kHz를 설정하였다. 발생한 전단파는 반대편 벤더 엘리먼트에서 송신 후 전기적 신호로 변환되어 Pico Technology 사의 ADC-212 오실로스코프를 통해 기록된다.

4.1.2 국부변형 측정 장치

정적 삼축시험을 수행하여 초기 강성을 평가하기 위해서는 미소변형률 영역에서의 신뢰성 있는 변형 측정이 필수적이다. 일반적인 삼축시험은 시료의 변형을 셀 외부에서 측정하는데, 외부 측정의 경우 배열 문제(bedding error) 등에 의한 내재적 오차가 발생하기 때문에 약 0.1% 변형률까지는 측정된 시료 변형 결과가 신뢰성이 없다. 이러한 문제를 극복하기 위해 시료에 직접 변형 측정 장치를 부착하여 국부변형을 측정하는 방법 등이 제안되었으며(Jardine et al., 1984), 본 연구에서도 국부변형 측정 장치를 사용하여 미소변형을 정밀하게 측정하여 초기 강성을 구하였다.

시료에 부착한 국부변형 측정 장치는 GDS Instruments의 LVDT 방식 제품으로 2개를 서로 마주하게 설치하여 시료 중앙부에서 발생하는 연직방향 변형률을 측정하였다. 결과 해석에서는 2 개의 LVDT에서 측정된 변형률을 평균하여 사용하였다. 그림 3은 벤더 엘리먼트 및 국부변형 측정 장치를 부착한 삼축 시험 시료의 모습이다.

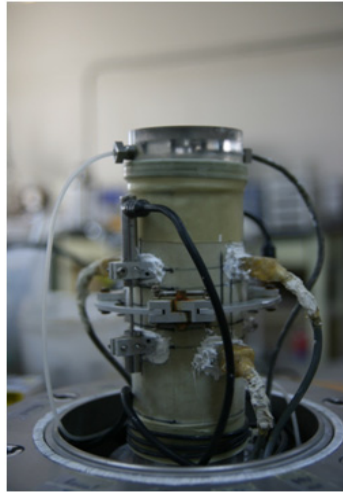


그림 3. 벤더 엘리먼트 및 국부변형 측정 장치를 부착한 시료의 모습

4.2 실험 개요

4.2.1 사용 시료

본 연구에서는 재성형한 카올리나이트 시료에 대해 실험을 수행하였다. 실험실에서 카올리나이트를 액성한계의 2 배의 함수비를 갖는 슬러리 상태로 만든 후 약 3일 간 진공 상태에서 교반시켜 균일하게 조성하였다. 이후 슬러리 상태의 시료를 자중압밀 및 단계 재하 시키면서 연직응력이 140 kPa에 도달할 때까지 압밀시켰다. 삼축시험 시료는 지름 70 mm, 높이 140 mm로 원통형으로 제작되었다. 표 1에 시험에 사용한 재성형 카올리나이트의 기본 물성치를 요약하였다.

표 1. 재성형 카올리나이트의 기본 물성치

비중	액성한계 (%)	소성지수 (%)	200번 체 통과량 (%)	초기 함수비 (%)	초기 간극비	선행압밀압 (kPa)	통일분류
2.59	53	20	98	46	1.19	140	MH

4.2.2 시험 절차

트리밍한 재성형 카올리나이트 시료에 벤더 엘리먼트와 국부변형 측정 장치를 부착한 후 삼축시험을 실시하였다. 먼저 250 kPa의 배압을 가하여 시료를 포화시킨 후 B-value가 0.98 이상임을 확인하였다. 포화 후에는 연직 유효응력을 선행압밀압의 1.5배 이상인 220 kPa로 K_0 조건 혹은 등방 응력 조건에서 압밀시켰다. 이후 각 시험 별로 재하 혹은 제하 단계를 수행하여 K_0 조건 혹은 등방 응력 조건에서 과압밀비 1, 2, 4 상태로 만든 후 비배수 삼축압축시험을 총 8회 수행하였다. 이 때 전단 직전에 벤더 엘리먼트로 전단파 속도를 측정함으로써 동적 방법으로 초기 강성을 산정하였고, 전단 시 내부 로드셀 및 국부변형 측정 장치로 측정된 응력 - 변형률 관계로부터 정적 초기 강성을 계산하였다. 표 2에서는 비배수 전단 시험의 시험조건을 정리하였고, 그림 4는 전단 초기부터 0.1% 전단변형률 발생 시점까지의 응력경로를 나타낸다.

표 2. 비배수 전단 시험 정보

No.	시험명	전단 전 시험 조건				
		과압밀비	응력조건	연직유효응력 (kPa)	수평유효응력 (kPa)	유효응력비
1	CK ₀ U-NC (1)	1	K ₀	221.39	112.82	0.51
2	CK ₀ U-NC (2)	1	K ₀	594.33	328.16	0.55
3	CK ₀ U-OCR2 (1)	2	K ₀	203.95	152.11	0.75
4	CK ₀ U-OCR2 (2)	2	K ₀	111.36	79.12	0.71
5	CK ₀ U-OCR4	4	K ₀	86.55	74.28	0.86
6	CIU-NC	1	등방	217.20	207.69	0.96
7	CIU-OCR2	2	등방	247.06	236.97	0.96
8	CIU-OCR4	4	등방	82.15	75.19	0.82

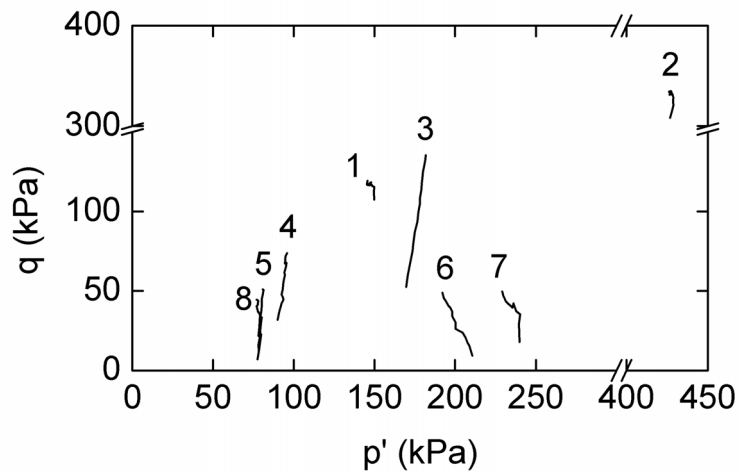


그림 4. 비배수 전단 시험 응력경로

4.3 초기 강성 결정 방법

4.3.1 벤더 엘리먼트를 사용한 동적 방법

동적 방법에서는 식 (1)과 같이 전단파 속도와 흙의 밀도로부터 초기 전단탄성계수를 산정한다. 벤더 엘리먼트를 이용한 전단파 속도 계산 시 고려해야 할 가장 중요한 요소는 1) 전단파의 이동 거리와 2) 전단파 도착 시점 결정이다. 본 연구에서는 전단파의 이동 거리로는 Viggiani and Atkinson(1995)이 추천한 벤더 엘리먼트 끝단 간 거리(tip-to-tip distance)를, 전단파 도착 시점은 그림 5와 같이 Lee and Santamarina(2005)가 추천한 둔덕 후 첫 번째 영점(zero after first bump) 방법을 채택하였다. 재하 및 제하 시 변하는 시료의 밀도는 시험 중 시료의 부피 변화를 측정하여 계산하였다.

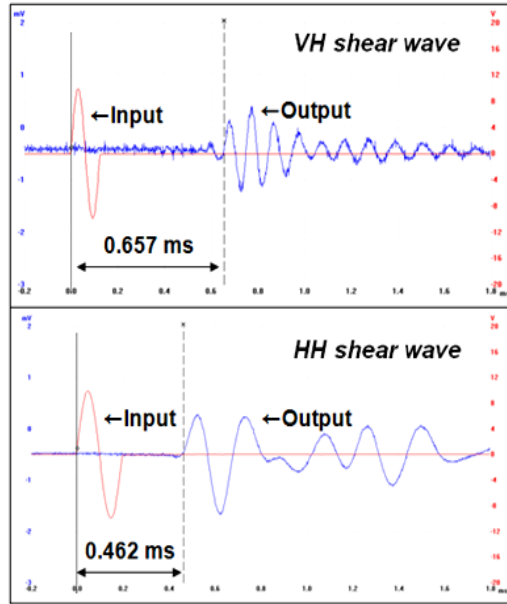


그림 5. 벤더 엘리먼트로 측정된 전단파 시험 결과와 도착 시간 산정

4.3.2 국부변형 측정 장치를 사용한 정적 방법

정적 실험에서 강성은 전단 시 나타난 응력 - 변형률 곡선으로부터 계산할 수 있으며 초기에 일정한 값을 나타내다가 탄성 구간 이후로 감소하기 시작한다. 그러나 실제로 측정된 강성 값은 그림 6과 같이 초기 미소변형률 영역에서 일정하지 않고 전기 노이즈로 인한 오차 때문에 다소 산재되어 있다. 본 연구에서는 분산된 초기 강성 값 중 최대값을 비배수 초기 탄성계수 $E_{u(max)}$ 로 결정한 후 식 (5)를 이용하여 초기 전단탄성계수 $G_{u(max)}$ 로 변환하였고, 이를 벤더 엘리먼트로 측정된 전단탄성계수와 비교하였다.

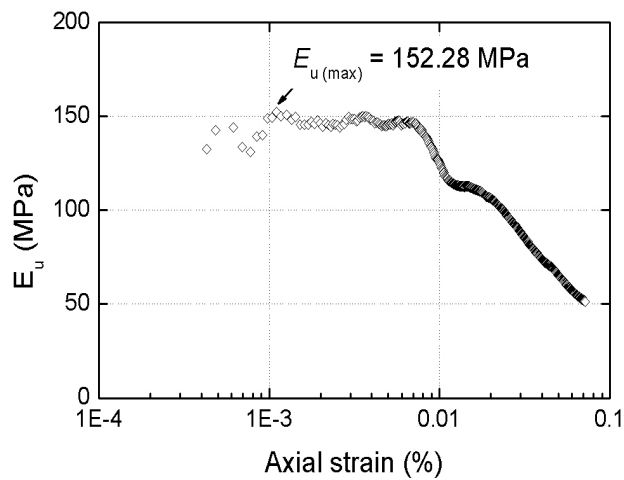


그림 6. 삼축시험으로 측정된 변형률에 따른 강성과 초기 강성 결정

5. 결과 및 분석

비배수 전단 시험을 수행하면서 동적 및 정적 실험으로 구한 초기 전단탄성계수를 표 3에 정리하였다. 여기서 전단 직전에 연직방향 벤틀러 엘리먼트로 측정된 동적 초기 전단탄성계수를 $G_{u(dyna)}$, 비배수 전단 시 국부변형 측정 장치로 구한 정적 초기 전단탄성계수를 $G_{u(stat)}$ 로 표시하였으며, 두 값의 비교를 위하여 동적 초기 강성에 대한 정적 초기 강성의 비율($G_{u(stat)}/G_{u(dyna)}$)을 계산하여 나타내었다.

표 3. 동적 및 정적 방법으로 측정된 초기 전단탄성계수 비교

No.	시험명	동적 초기 강성 $G_{u(dyna)}$ (MPa)	정적 초기 강성 $G_{u(stat)}$ (MPa)	$G_{u(stat)} / G_{u(dyna)}$
1	CK ₀ U-NC (1)	54.69	54.61	1.00
2	CK ₀ U-NC (2)	115.98	113.66	0.98
3	CK ₀ U-OCR2 (1)	79.93	79.43	0.99
4	CK ₀ U-OCR2 (2)	45.23	46.05	1.02
5	CK ₀ U-OCR4	48.55	45.55	0.94
6	CIU-NC	68.51	58.86	0.86
7	CIU-OCR2	103.19	93.98	0.91
8	CIU-OCR4	55.06	50.76	0.92

기존 연구자들의 결과와 유사하게 본 연구의 실험에서도 정적 삼축시험으로 구한 초기 전단탄성계수가 대부분의 경우 벤틀러 엘리먼트로 측정된 동적 초기 전단탄성계수보다 더 작았다. 그러나 그림 7과 같이 실험 결과를 압밀 응력 조건에 따라 구별해서 살펴보면, 압밀 응력 조건이 동적 측정과 정적 측정된 초기 전단탄성계수의 차이에 영향을 주고 있음을 확인할 수 있다. 즉, 등방 응력조건에서는 정적으로 측정된 초기 전단탄성계수는 동적 초기 전단탄성계수와 비교할 때 약 90% 내외의 값을 갖는데 반해, K₀ 응력조건에서는 대부분 정적 초기 전단탄성계수가 동적 초기 전단탄성계수와 일치하였다. 그림 8은 비배수 전단 시험 전 유효응력 비를 나타낸 그래프이며, 이를 그림 7과 비교해보면 두 그래프는 OCR 증가에 따라 서로 반대 경향을 보이고 있다.

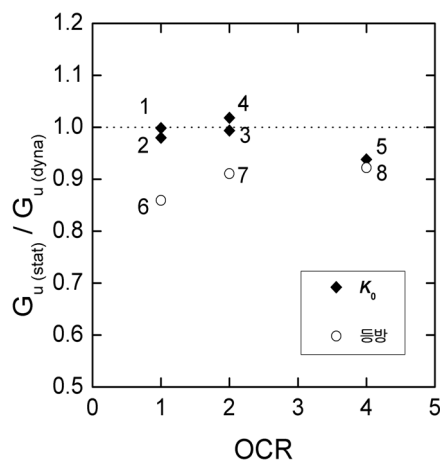


그림 7. 동적 및 정적 방법으로 평가한 초기 전단탄성계수비 $G_{u(stat)}/G_{u(dyna)}$

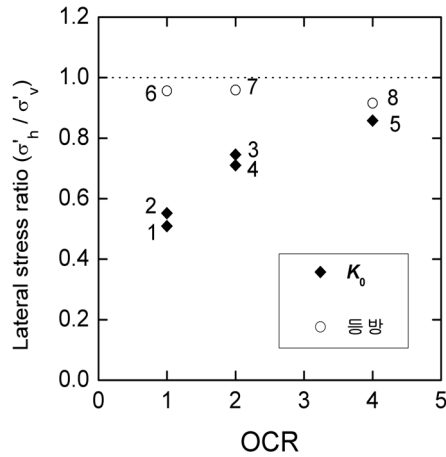


그림 8. 비배수 전단 시험 전 유효응력비 σ'_h / σ'_v

동적 실험과 정적 실험의 결과 차이가 압밀 응력 조건에 따라 다른 경향을 보이는 것은 응력 조건에 따른 흙의 이방성 변화에 의해 설명할 수 있다. 흙과 같이 입자로 이루어진 매질에서는 방향에 따른 작용력의 차이가 발생하면 이에 따른 입자 배열의 변화가 발생하며, 그 결과로 매질 전체의 이방성이 변화하며 이러한 현상을 응력 유도 이방성이라 부른다. Yimsiri and Soga(2002)는 미시역학 기반의 수치 모델을 이용하여 흙과 같이 입자로 이루어진 매질의 경우 비배수 전단 시 초기 전단탄성계수의 차이는 매질 전체의 이방성에 영향을 받는다고 제시하였다. 이들의 연구 결과에 따르면, 수평방향 강성이 커질수록 비배수 정적 삼축시험으로 구한 초기 전단탄성계수가 직교이방성 재료의 연직방향 전단탄성계수의 값보다 점점 작아진다. 축방향으로 설치한 벤더 엘리먼트의 동적시험결과로부터 재료의 연직방향 전단탄성계수를 구하므로, 이방성의 영향으로 비배수 전단 시 정적 및 동적 측정 전단탄성계수 간의 차이를 설명할 수 있다.

시료에 발생한 이방성을 확인하기 위해 응력경로의 초기 기울기를 계산하였다. 앞서 설명하였듯이 비배수 삼축시험 시 응력경로의 초기 기울기는 재료의 이방성을 간접적으로 보여주며, 연직방향의 강성이 더 큰 경우 기울기가 90° 보다 작고 수평방향의 강성이 더 큰 경우 기울기가 90° 보다 크다. 그림 9에 K_0 및 등방 응력 조건에서 수행한 비배수 전단 시험의 응력경로 및 초기 기울기의 각도를 나타내었다. K_0 조건에서 응력경로의 초기 기울기는 OCR=4 상태를 제외하고는 모두 90° 이하로 나타났으며, 과압밀비가 증가할수록 90° 에 가깝게 나타났다. 이는 K_0 조건에서는 정규압밀 상태에서 연직방향으로 큰 강성을 나타내다가 과압밀될수록 등방에 가까워졌다는 것을 의미한다. 이와 반대로 등방 응력 조건에서는 초기 응력경로 기울기가 정규압밀 상태에서 수평방향 강성이 더 큰 상태였으며 과압밀될수록 연직방향 강성이 커지는 경향을 나타내었다.

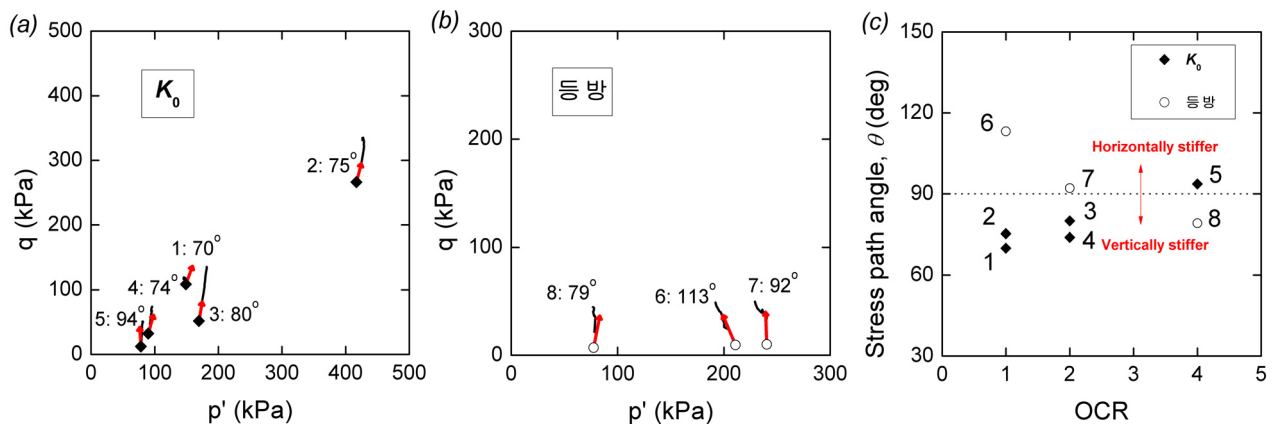


그림 9. 비배수 전단 시험 응력경로 및 초기 기울기: (a) K_0 조건 (b) 등방 응력 조건 (c) 전체 비교

미시역학 모델을 이용한 연구 결과에 응력경로의 초기 기울기로 평가한 이방성을 적용하면, 실험 결과 차이에 대한 응력 조건의 영향을 설명할 수 있다. K_0 조건에서 정규압밀 점성토는 연직방향 유효응력이 수평방향에 비해 약 2배 정도인 상태에 있는 반면($K_{0(NC)} \approx 0.5$), 등방 응력 조건에서는 연직 및 수평방향 유효응력이 유사한 상태에 있다($K \approx 1$). 따라서 같은 연직 유효응력에 대해 등방 응력 조건은 수평방향의 유효응력이 K_0 조건보다 증가된 상태이므로 수평방향 강성이 상대적으로 증가하게 된다. 그러므로 정규압밀 점성토는 등방 응력 조건에서 K_0 조건보다 등방성을 갖는다. 또한 정규압밀 점성토를 K_0 조건에서 제하하는 경우, 연직방향 유효응력이 감소하는 정도에 비해 수평방향 유효응력이 감소하는 정도가 작다. 따라서 점성토가 과압밀되면서 K_0 조건에서의 유효응력비가 등방 응력 조건에 근접해지고 그 결과 두 조건에서 동적 초기 전단탄성계수에 대한 정적 삼축시험 결과의 비율이 점점 유사해진다.

시료의 이방성은 또한 연직(VH) 및 수평(HH)방향 벤더 엘리먼트로 측정된 각 방향의 전단탄성계수를 비교하여 확인할 수 있다. 그림 10과 같이 K_0 조건에서는 연직방향과 수평방향 강성 차이가 뚜렷이 나타난 반면, 등방 응력 조건에서는 방향에 따른 강성 크기 차이가 거의 없어 앞에서와 마찬가지로 등방 응력 조건에서 재료는 등방적 강성을 갖고 있음을 확인할 수 있다. 또한 K_0 조건에서 과압밀 시 상대적으로 수평방향 강성의 비율이 증가하는 경향이 일치하였다. 그러나 벤더 엘리먼트로 측정된 이방성과 비배수 응력경로의 초기 기울기로 평가한 이방성의 크기는 서로 상이하었는데, 본 연구에서는 그 원인을 규명할 수 없었다. 이를 해결하기 위해서는 연직방향 및 수평방향 벤더 엘리먼트 시험 결과의 해석에 대해 심층적인 재검토가 필요할 것이라 판단된다.

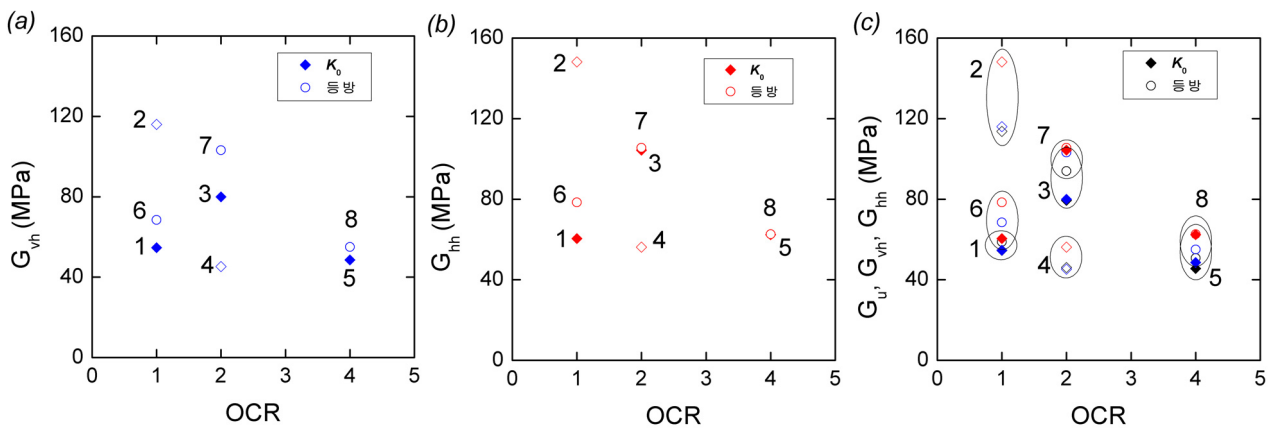


그림 10. 방향 별 초기 전단탄성계수: (a) 연직방향 동적 초기 강성 G_{vh} (b) 수평방향 동적 초기 강성 G_{hh} (c) 연직방향 정적 초기 강성 $G_{u(stat)}$, 연직방향 동적 초기 강성 G_{vh} , 수평방향 정적 초기 강성 G_{hh}

6. 결론

본 연구에서는 재성형 카올리나이트에 대해 K_0 및 등방 응력 조건에서 과압밀비를 1, 2, 4로 변화시키며 비배수 삼축압축시험을 수행하였고, 벤더 엘리먼트 시험(동적 측정)과 국부변형 측정 장치로 구한 응력-변형률 관계(정적 측정)의 두 가지 방법을 이용하여 구한 초기 전단탄성계수를 비교하였다. 본 연구의 실험 결과로부터 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 기존 연구자들의 실험 결과와 유사하게 정적 삼축시험으로 측정된 초기 전단탄성계수는 동적측정방법인 벤더 엘리먼트로 측정된 결과보다 90% 내외의 낮은 값이 나타났으나, 특정 응력 상태에서는 두 값이 매우 유사하게 나타났다. 등방 응력의 정규압밀 상태에서 정적 측정으로 구한 비배수 전단탄성계수는 동적 측정으로 구한 초기 전단탄성계수의 86% 정도였으며, 과압밀비가 증가할수록 동적 전단탄성계수의 값에 가깝게 나타나 탄성계수비 $G_{u(stat)}/G_{u(dyna)}$ 의 값이 92%에 도달하였다. 반면 K_0 조

건의 정규압밀 및 과압밀비 2의 응력 상태에서 정적 비배수 전단탄성계수는 동적 전단탄성계수와 거의 일치하였으나, 과압밀비 4인 경우 $G_{u(stat)}/G_{u(dyna)}$ 의 값이 약 94%로 감소하여 등방 응력 조건의 값인 92%와 큰 차이가 나타나지 않았다.

- 2) 미시역학 모델을 이용한 기존 연구 결과에 따르면, 동적 및 정적 방법으로 구한 초기 전단탄성계수의 관계는 흙의 이방성에 따라 달라질 수 있다. 흙의 이방성은 유효응력 조건에 따라 변화하므로, 초기 응력 조건에 따른 영향을 분석하기 위해 각 비배수 전단시험에서 나타난 초기 응력 경로의 기울기를 통해 시료의 이방성을 평가하였다. K_0 와 등방 응력 조건에서 나타난 이방성의 변화 양상은 서로 상이하였으며, 이를 통해 동적 측정과 정적 측정 방법 간의 초기 전단탄성계수의 차이를 이방성 변화로 설명할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 SIR BK21 (안전하고 지속가능한 사회기반건설)사업단의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

1. Callisto, L., and Calabresi, G.,(1998), "Mechanical behavior of a natural soft clay," *Geotechnique*, Vol. 48, No. 4, pp. 495-513.
2. Henkel, D.J.(1971), "The relevance of laboratory measured parameters in field studies," *Proceedings of Roscoe Memorial Symposium*, Foulis, pp. 669-675.
3. Jardine, R.J., Symes, M.J., and Burland, J.B.,(1984), "The measurement of soil stiffness in the triaxial apparatus", *Geotechnique*, Vol. 34, No. 3, pp. 323-340.
4. Lee, J.-S., and Santamarina, J.C.,(2005), "Bender elements: Performance and signal interpretation," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131, No. 9, pp. 1063-1070.
5. Parry, R.H.G.,(1995), *Mohr Circles, Stress Paths and Geotechnics*, Spon Press, pp. 131-131.
6. Smith, P.R., Jardine, R.J, and Hight, D.W.,(1992), "The yielding of Bothkennar clay," *Geotechnique*, Vol. 42, No. 2, pp. 257-274.
7. Viggiani, G. and Atkinson, J.H.,(1995), "Interpretation of bender element tests," *Geotechnique*, Vol. 45, No. 1, pp. 149-154.
8. Yimsiri, S. and Soga, K.,(2002), "Application of micromechanics model to study anisotropy of soils at small strains," *Soils and Foundations*, Vol. 42, No. 5, pp. 15-26.