

응력유도 및 고유 이방성에 따른 전단파 속도 특성

Characteristics of Shear Wave Velocity as Stress-induced and Inherent Anisotropies

이 창 호¹ Lee, Changho

이 종 섭² Lee, Jong-Sub

윤 형 구³ Yoon, Hyung-Koo

쥡 흥 쑹³ Truong, Hung Quang

조 태 현³ Cho, Tae-Hyeon

Abstract

Shear wave velocity of uncemented soil can be expressed as the function of effective stresses when capillary phenomena are negligible. However, the terms of effective stresses are divided into the direction of wave propagation and polarization because stress states are generally anisotropy. The shear wave velocities are affected by α parameters and β exponents that are experimentally determined. The β exponents are controlled by contact effects of particulate materials (sizes, shapes, and structures of particles) and the α parameters are changed by contact behaviors among particles, material properties of particles, and type of packing (i.e., void ratio and coordination number). In this study, consolidation tests are performed by using clay, mica and sand specimens. Shear wave velocities are measured during consolidation tests to investigate the stress-induced and inherent anisotropies by using bender elements. Results show the shear wave velocity depends on the stress-induced anisotropy for round particles. Furthermore, the shear wave velocity is dependent on particle alignment under the constant effective stress. This study suggests that the shear wave velocity and the shear modulus should be carefully estimated and used for the design and construction of geotechnical structures.

요 지

비고결화된 흙의 전단파 속도는 모세관 현상을 무시할 수 있는 경우 유효응력의 함수로 표현할 수 있다. 그러나 지반에서의 응력상태는 등방성인 경우보다는 이방성인 경우가 대부분이므로 이러한 유효응력은 파가 전파되는 방향과 입자가 움직이는 방향의 두 가지로 나뉜다. 또한, 전단파 속도는 입자 특성에 따라 실험적으로 결정되는 α 계수와 β 지수에 영향을 받는데 β 지수의 경우 입상 매질(particulate material)의 접촉 특성(입자크기, 입자모양, 입자들의 구조)에 따라 결정되며, α 계수는 패킹(packing)의 형태(즉, 간극률과 coordination number), 입자를 만드는 재료의 특성, 입자간의 접촉 거동, 구조의 변화에 따라서 변화 한다. 본 연구에서는 입자구조의 특성이 다른 점토, 모래, mica 등의 재료로 압밀시험을 실시하고 벤더 엘리먼트를 통하여 유효응력 방향과 입자 이방성에 따른 전단파 속도를 측정하였다. 연구 결과, 둥근 입자로서 입자자체가 등방성인 경우에는 응력이방성에 의하여 전단파 속도의 크기가 달라지는 것으로 나타났다. 또한 전단파 속도는 동일한 응력 하에서 입자 배열에 의존하는 것으로 나타났다. 이번 연구는 지반구조물의 설계와 시공 시 전단파 속도와 전단탄성계수는 매우 신중하게 계산되고 사용되어야 함을 제시하고 있다.

Keywords : Bender elements, Effective stress, Inherent anisotropy, Shear wave velocity, Stress-induced anisotropy

1 정희원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 박사과정 (Member, Ph. D. Student, Dept. of Civil & Environ. Engrg., Korea Univ.)

2 정희원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil & Environ. Engrg., Korea Univ., jongsub@korea.ac.kr, 교신저자)

3 고려대학교 사회환경시스템공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil & Environ. Engrg., Korea Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

일반적인 퇴적 과정을 거친 흙 입자가 지반을 형성하는 경우 1차원적 퇴적과 중력 등의 작용으로 입자의 수평적 배열이 발생하여 고유이방성(inherent anisotropy)이 나타나며, 이후 지반의 응력상태는 정지토압상태인 K_0 상태로 압밀이 진행되어 응력유도이방성(stress-induced anisotropy)이 발생한다(Lade 1985). 비고결화된 흙(uncemented soil)의 전단파 속도는 모세관 현상을 무시할 수 있는 경우 유효응력의 함수로 표현할 수 있다(Roesler 1979). 지반에서의 응력상태는 응력유도이방성에 의해 이방성인 경우가 대부분이므로 이러한 유효 응력은 전단파가 전파되는 방향과 입자가 움직이는 방향의 두 가지로 나누어 고려해야 한다. 또한, 전단파 속도는 입자 구조 이방성 특성에 따라 실험적으로 결정되는 α 계수와 β 지수에 영향을 받는데 β 지수의 경우 입상 매질(particulate material)의 접촉 특성(입자크기, 입자모양, 입자들의 구조)에 따라 결정되며, α 계수는 패킹의 형태(즉, 간극률과 coordination number), 입자를 만드는 재료의 특성, 입자간의 접촉 거동, 구조의 변화에 따라서 변화한다(Santamarina et al. 2001). 본 연구에서는 입자 구조의 특성이 다른 점토, 모래, mica 등의 재료로 압밀 시험을 실시하면서 벤더 엘리먼트를 이용하여 전단파 속도를 측정하여 유효응력의 크기와 입자 이방성에 따른 미소변형 거동 특성을 규명하고자 한다.

2. 흙의 이방성 및 전단파 속도

2.1 흙의 이방성

자연 상태에 존재하는 흙은 퇴적 조건과 응력 이력에 따라 토립자 배열과 입자 상호관계에 특정한 방향성을 띠는 입자배열의 이방성 또는 흙의 구조 이방성(structural fabric anisotropy)을 가지며, 이러한 이방성은 강도 및 변형 성질을 통해 나타난다. Casagrande & Wilson(1952)에 의해 흙의 강도 이방성이 고려된 이후, Duncan & Seed(1966)는 흙의 이방성을 고유이방성(inherent anisotropy)과 응력유도이방성(stress-induced anisotropy)으로 구분하였다.

고유이방성(inherent anisotropy)이란 흙 구조(soil structural fabric)의 차이에 의해 발생하는 이방성이며, 이는 흙이 퇴적될 당시에 특정한 방향성을 가지면서 퇴적되

기 때문에 발생하는 이방성이다. 따라서 고유이방성은 흙이 하중을 받아서 변형되기 이전부터 발휘되는 이방성이며 대부분의 흙은 고유이방성을 띠게 된다. 사질토는 점성토와 달리 표면에 띠고 있는 전기적 힘이 적어 퇴적될 때 입자 간에 작용되는 전기적 상호작용보다는 입자에 작용하는 중력의 영향에 의해서 흙 입자의 거동이 결정된다. 자연 상태의 사질토 입자는 완전한 구체(球體)가 아니기 때문에 부분적 또는 전체적으로 고유이방성을 가지나 그 크기는 점성토에 비해 아주 작아 일반적으로 사질토의 고유이방성은 무시되어 균질(homogeneous)하다고 본다.

응력유도이방성이란 흙이 퇴적된 이후 하중을 받으면서 발생하는 후천적인 이방성을 말한다. 즉, 흙 입자들이 퇴적된 이후 받게 되는 응력체계가 변화하게 되면 흙 입자들은 가해지는 주응력에 가장 잘 저항할 수 있는 구조로 배열을 바꾸게 되며, 압밀응력비 ($K_0 = \sigma'_h / \sigma'_v$), 중간주응력 및 중간주응력의 회전 등으로 인하여 퇴적당시에 발달되었던 구조가 새로운 응력체계에 의해 변화하게 된다. 이로 인해 비배수 상태에서 가해지는 전단 응력에 의해 발생하는 과잉간극수압은 흙 입자의 배열에 따라 달라지며, 발생하는 과잉간극수압의 크기의 차이는 유효응력의 차이를 가져오게 된다.

이러한 흙 구조의 이방성은 흙의 역학적 성질에 대한 이방성을 가져오는 원인이며, 자연 상태의 지반은 퇴적될 당시 고유이방성뿐만 아니라 K_0 이방압밀상태가 추가적으로 가해져 이로 인해서 발생된 응력 유도 이방성을 포함한 복합이방성(combined anisotropy)을 가지고 있다.

2.2 전단파 속도

응력상태가 등방성인 경우(isotropic state of stress)의 경우, 탄성파의 polarization plane에서 평균 유효응력(σ'_o)을 이용하여 탄성파의 전파속도는 다음과 같이 표시할 수 있다(P파와 S파 포함).

$$V = \alpha \left(\frac{\sigma'_o}{1kPa} \right)^\beta \quad (1)$$

여기서 α 와 β 는 실험적으로 결정되는 값이다.

그러나 지반에서의 응력상태는 등방성인 경우보다는 이방성인 경우가 대부분이다. P파의 경우는 전파방향과 입자의 움직임이 평행하므로 식 (1)에서 σ'_o 에 σ'_p (전파방향 및 입자의 움직임 방향)를 대입하고, S파의 경우는 σ'_o 에 σ'_p (전파방향)와 σ'_m (입자의 움직임 방향)를 대입

하여 다음과 같이 표시할 수 있다(Roesler 1979; Knox et al. 1982; Yu and Richart 1984; Santamarina et al. 2001).

$$\text{P-wave : } V_p = \alpha \left(\frac{\sigma'_p}{1kPa} \right)^\beta \quad (2)$$

$$\text{S-wave : } V_s = \alpha \left(\frac{\sigma'_p + \sigma'_m}{2kPa} \right)^\beta \quad (3)$$

파의 전파방향이 수직방향이요($\sigma'_p = \sigma'_v$), 입자의 이동 방향이 수평방향($\sigma'_m = \sigma'_h$)인 경우 S파의 전파 속도는 $V_s(VH)$ 라고 표시할 수 있다(그림 1 참조).

$$V_s = \alpha \left(\frac{\sigma'_v + \sigma'_h}{2kPa} \right)^\beta = \alpha \left(\frac{1+K_o}{2kPa} \sigma'_v \right)^\beta = V_s(VH) \quad (4)$$

여기서, K_o 은 수평토압계수이다. 한편 파의 전파방향이 수평 방향이고($\sigma'_p = \sigma'_h$), 입자의 이동 방향이 수직방향($\sigma'_m = \sigma'_v$)인 경우 S파의 전파 속도는 $V_s(HV)$ 라고 표시할 수 있다.

$$V_s = \alpha_1 \left(\frac{\sigma'_h + \sigma'_v}{2kPa} \right)^{\beta_1} = \alpha_1 \left(\frac{K_o + 1}{2kPa} \sigma'_v \right)^{\beta_1} = V_s(HV) \quad (5)$$

고유이방성을 갖는 재료의 경우, 식 (4)와 식 (5)의 α 와 α_1 이 서로 다른 값을 나타내며, β 와 β_1 도 서로 다른 값을 나타내므로 $V_s(VH)$ 와 $V_s(HV)$ 가 달라질 수 있다. 그러나 입자가 등근 경우 입자 형상에 영향을 받지 않아 식 (4)와 식 (5)는 동일한 식이 된다. 또한 파의 전파 방향이 수평이고 입자의 이동방향도 수평인 경우 식은 다음과 같이 표시된다(그림 1 참조).

$$V_s = \alpha_2 \left(\frac{\sigma'_h + \sigma'_h}{2kPa} \right)^{\beta_2} = \alpha_2 \left(\frac{K_o \sigma'_v}{1kPa} \right)^{\beta_2} = V_s(HH) \quad (6)$$

β 지수는 입상 매질(particulate material)의 접촉 특성(입자크기, 입자모양, 입자들의 구조)에 따라 결정된다. 이상적인 고체의 경우는 $\beta = 0$ 을 나타내는데 이는 유효응력에 관계없는 전단파 속도를 가진다는 것을 의미한다. 또한 고결된 흙(cemented soil)의 경우도 유효응력의 증가에 따른 입자사이의 접촉면의 증가가 없으므로 유효응력의 영향을 거의 받지 않아 $\beta \approx 0$ 의 값을 보인다. 일찍이 Hertz는 낮은 구속응력하의 탄성체에서 $\beta = 1/6$ 으로 보았다. 이를 Hertzian 모델이라고 하며, 이 모델은 20세기 중반에 연구했던 변형률보다 더 작은 미소변형률을 만들어낸다. 반면, 입자간의 전기적인 힘은 더욱 큰 등가유효응력을 만들어 내고 전기적인 힘을 무시할 수 있는 탄성 구형입자의 경우보다 더 큰 유효접촉면적을 만들어낸다. 따라서 쿨롱의 힘 또는 DLVO 힘(이중층 척력(double layer repulsion)과 van der Waals 인력(attraction)의 조합)과 같은 전기적인 힘에 의해 영향을 많이 받는 입자의 β 값은 탄성적 구형입자를 가진 β 값보다 더 큰 값을 나타낸다. β 는 접촉효과에 의해 제어되기 때문에 이론적으로 β 의 값을 예상할 수 있다(Santamarina et al. 2001; Lee et al. 2005; Lee and Santamarina 2005).

α 계수의 의미는 regular packing에 대한 식으로부터 유추할 수 있다. 전단파 속도 식에서 응력을 제외하고 다른 요소들은 모두 α 를 구성한다. 따라서 α 계수는 패킹의 형태(즉, 간극률과 coordination number), 입자를 만드는 재료의 특성, 입자간의 접촉 거동, 구조의 변화

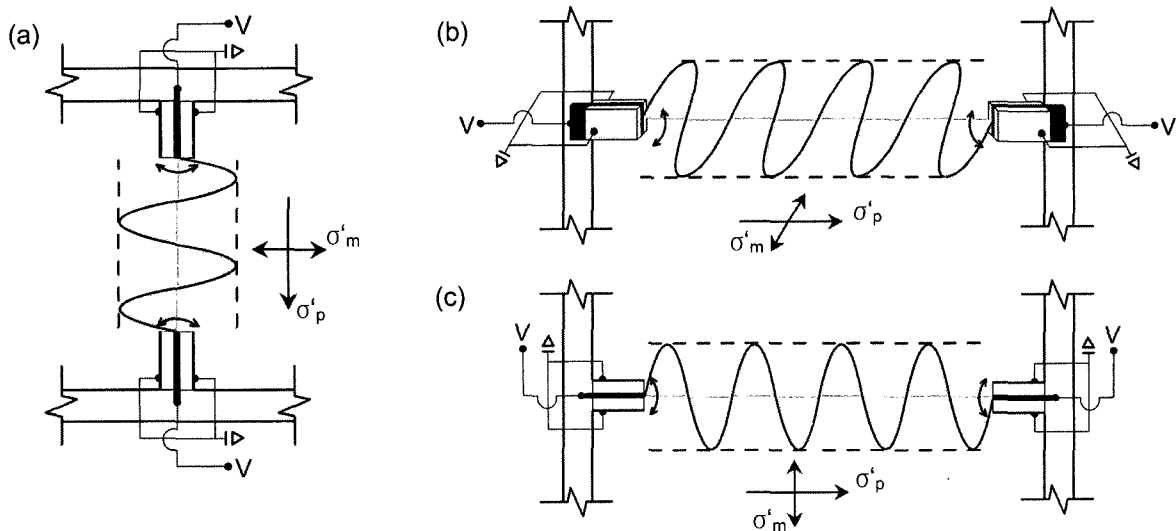


그림 1. 파의 전파 방향과(σ'_p), 입자의 이동 방향(σ'_m)에 따른 전단파: (a) $V_s(VH)$; (b) $V_s(HH)$; (c) $V_s(HV)$

에 따라서 변화함을 알 수 있다.

일반적으로 입자들이 더 단단해지고 다짐 정도가 커질수록, 고결화(cemented)가 될수록 α 의 값은 커지며 β 의 값은 작아진다. 또한 소성지수가 증가할수록, 입자가 부서지기 쉬울수록 β 의 값은 커지고 α 의 값은 감소한다. 선행하중(preloading)이나 에이징(aging)은 반대의 효과를 가져 온다.

3. 응력유도이방성(Stress-induced anisotropy)

벤더 엘리먼트를 이용하여 전단파 속도의 응력유도 이방성을 평가하였다. 입자 구조적 고유이방성을 피하기 위하여 둥근 입자(round particle)가 주류를 이루는 Ottawa F-110시료를 이용하였다. Ottawa F-110시료의 기본 물성치(index properties)는 다음 표 1과 같으며 Ottawa F-110시료의 입자 사진은 그림 2와 같다.

전단파 속도의 응력이방성을 평가하기 위해 다음의 순서로 시험장치를 준비하였다. 첫째, Ottawa F-110 모래를 강사법으로 이방적 응력 체제인 $\sigma_3 = K_o \sigma_1$ 상태 ($K_o \approx 0.51 = \sigma'_3 / \sigma'_1$)로 조성한 후 동일한 크기의 연직 유효응력 하($\sigma_1 \approx 5kPa, \sigma_3 \approx 2.5kPa$)에서 시험하기 위하여 동일한 깊이에 벤더 엘리먼트를 설치하였다. 둘째, 6쌍의 벤더 엘리먼트를 파의 진행방향은 σ_3 방향으로, 입자 움직임(particle motion) 방향은 σ_1 방향($\theta = 0^\circ$)부터 σ_3 방향($\theta = 90^\circ$)까지 변화도록 설치하였다. 즉, 그림 3에 나타낸 것과 같이 $\theta = 0^\circ$ 는 파의 진행 방향과 입자 움직임

표 1. Ottawa F-110의 기본 물성치

Sand (% fine)	D_{50} (mm)	C_u	e_{max}	e_{min}
Ottawa F-110(4%)	0.12	1.6	0.848	0.535

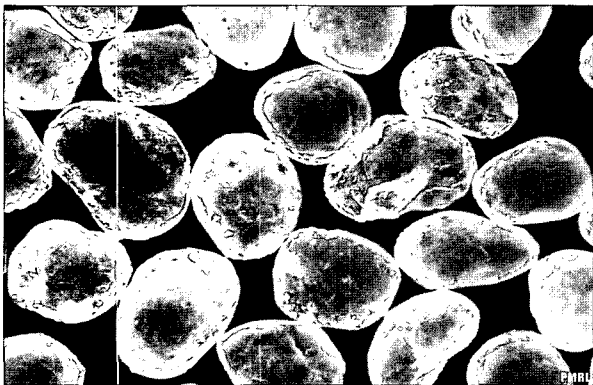


그림 2. Ottawa F-110시료의 입자 사진

방향이 90° 인 $V_s(HV)$ 이며, $\theta = 90^\circ$ 는 파의 진행 방향과 입자 움직임 방향이 0° 인 $V_s(HH)$ 를 의미한다.

그림 4(a)는 시험 결과 측정된 전단파의 파형이며 입자 이동 방향에 따른 전단파 속도는 $V_{s\theta} [m/s] = 88 + 4\cos(2\theta)$ 로 계산되어 전단파 속도의 최대 응력 이방성은 약 9%로 나타났다. 이러한 전단파 속도의 최대 응력 이방성은 α 계수와 β 지수에 영향을 미치는 입자 구조적 이방성의

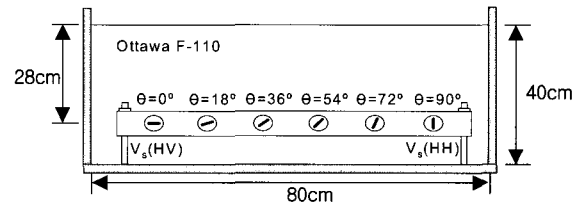


그림 3. 전단파 속도의 응력유도 이방성 평가를 위한 시험장치

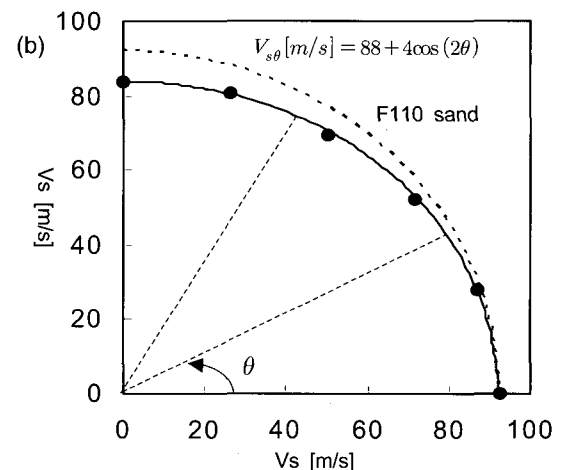
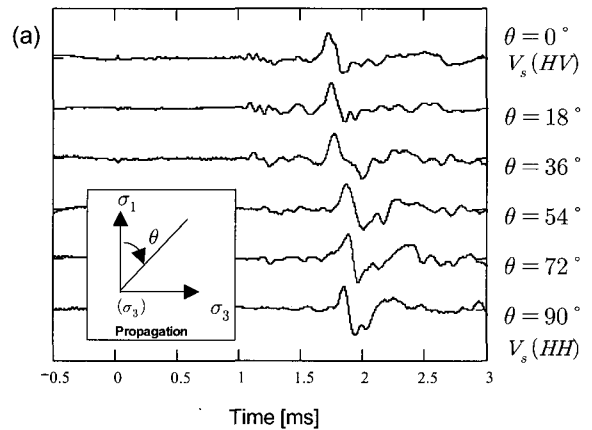


그림 4. 전단파 속도의 응력유도이방성(stress-induced anisotropy). 파의 진행방향은 σ_3 . 입자 움직임(particle motion) 방향은 σ_1 방향($\theta = 0^\circ$)부터 σ_3 방향($\theta = 90^\circ$)까지 변화: (a) 측정된 전단파 signal과 입자 이동 방향(travel time 결정은 이종섭 및 이창호(2006)에 근거함); (b) 입자 이동 방향에 따른 전단파 속도 ($V_{s\theta} [m/s] = 88 + 4\cos(2\theta)$)

영향이 무시되는 경우 식 (4), (5) 및 (6)과 같이 K_0 값에 따라 달라지며, K_0 값이 1보다 큰 경우는 동일한 크기의 구속응력 아래에서 $V_s(HH)$ 가 $V_s(VH)$ 및 $V_s(HV)$ 보다 크며, K_0 값이 1보다 작은 경우는 반대의 경향을 보인다.

4. 입자 구조적 고유이방성(Structural fabric anisotropy)

전단파 속도의 입자 구조적 이방성을 시험하기 위하여 대표적인 이방 재료인 mica(운모)와 해상 점토를 이용하였다. Mica는 비늘 모양의 알루미늄계 천연광물로 광물함유 성분에 따라 백운모(muscovite), 금운모(phlogopite), 흑운모(biotite) 등으로 나뉘며 본 연구에는 그 중 백운모를 사용하였다. 대표적인 조성식은 $K_2Al_4(Si_3Al)_2 O_2O(OH)_4$ 와 같으나 실제의 조성은 광물의 산지에 따라 많은 차이가 있을 수 있다. 점토는 서해안에서 채취한 해성 점토를 사용하였다. 각 시료의 비중, 초기간극비 등을 표 2와 3에 정리하였다. Mica 시료는 자연 건조된 시료를 압밀 셀(cell)을 5개 층으로 나누어 다짐(tamping)방법에 의하여 조밀한 시료를 조성하였다. 각각의 층은 동일한 무게의 시료로 나누었다. 또한 입자 구조적 이방성을 묘사하기 위하여 mica 입자를 횡방향으로 배열하였다.

그림 5와 같이 전단파 속도를 측정하기 위하여 고안된 압밀셀을 이용하였다. $V_s(VH)$ 를 측정하기 위하여 상부와 하부 캡에, $V_s(HV)$ 를 측정하기 위하여 압밀 셀의 벽면에 각각 1쌍의 벤더 엘리먼트를 설치하였다. 즉, $V_s(HV)$ 용 벤더 엘리먼트와 $V_s(HH)$ 용 벤더 엘리먼트는 압밀셀 벽면에서 직각을 이루고 있다. 각 벤더 엘리먼트의 전기적 간섭(cross-talk)을 방지하기 위하여 전기적 차폐(electrical shield)를 하였다. 폭 4mm, 길이 11mm의 y-poled PZT5H4E를 병렬방식으로 연결하여 사용하였으며 압밀 셀에서 돌출된 길이는 4mm이다. 모든 벤더 엘리먼트는 방수를 위하여 에폭시로 코팅하였다.

주변 장치로는 발신 벤더 엘리먼트에 입력신호를 주기 위한 Function generator(Agilent 33220A), 수신 벤더 엘리먼트에서 받은 신호의 노이즈제거와 증폭을 위한 Filter-Signal Amplifier(Krohn-Hite Model 3364, low-pass filter $f=50kHz$, high-pass filter $f=500Hz$) 및 디지털 오실로스코프(Agilent 54624A 100MHz)로 이루어져 있다. 입력 신호로는 single sinusoidal wave($5V_{pp}$)를 이용하였으며, 고주파수의 잡음을 제거하기 위하여 stacking

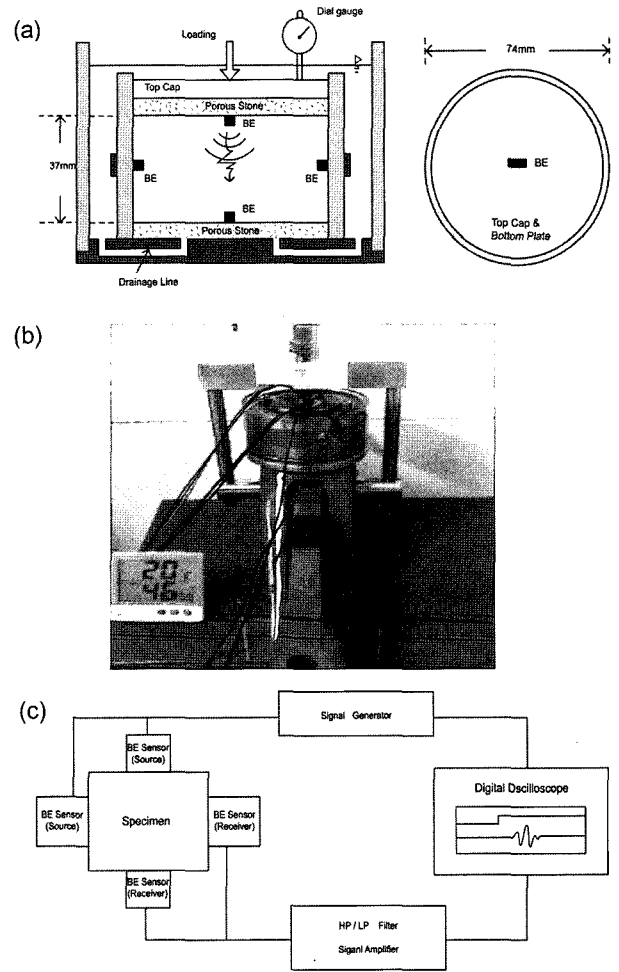


그림 5. 압밀 시험 장치: (a) 벤더 엘리먼트가 장착된 압밀셀 개요도; (b) 압밀셀 사진; (c) 주변 장치

표 2. Mica의 기본 물성치

종류	평균 Flake 직경(μm)	평균 Aspect 비	비중	탄성계수(ton/m^2)	초기간극비(e_0)
S 20	1,400	90	0.212~0.219	1,750	2.82

표 3. 점토의 기본 물성치

시료 번호	함수비(%)	비중	Atterberg Limits			초기간극비(e_0)	습윤단위중량(t/m^3)
			PL	LL	PI		
BE-4 6.0m	38.0	2.674	38.3	19.6	18.7	0.96	1.883

(1024개 신호적용)을 실시하였다.

작용 연직유효응력은 각 하중단계에서 2배로 증가시켰으며, 최대 작용 연직유효응력은 각 재료의 특성을 고려하여 Mica의 경우 158kPa, 점토의 경우 629kPa까지 가하였다. Mica의 경우 건조시료이므로 하중 재하 후 30분 이후 다음 단계의 하중을 재하하였으며, 점토의 경우 재하 하중에 의해 발생한 과잉간극수압 소산시간을 고려하여 다음 단계의 하중을(약 24시간 소요) 재하하였다. 전단파 속도의 측정에는 작용 연직응력이 모두 유효응력으로 전환되었다고 판단되는 다음 단계 하중 재하 직전에 측정하였다. 제하(unloading)과정도 동일한 방법으로 실시하였다.

측정된 전단파 신호의 초동(first arrival)은 근접장 효과(near field effect)를 고려하여 선택하였으며(Sánchez-Saliner et al. 1986), 전단파의 이동거리 L은 두 벤더 엘리먼트의 tip-to-tip간 거리로 하였다(Dyvik and Madshus 1985; Viggiani and Atkinson 1995; Fernandez 2000). Mica와 점토의 하중 재하 및 제하 시 측정된 전단파 신호를 그림 6에 나타내었다. 두 시료 모두 재하 하중이 증가함에 따라 전단파의 이동 시간은 줄어들며, 하중 제하 시에는 반대의 경향을 보인다.

하중 재하에 따라 침하가 발생하므로 $V_s(VH)$ 의 경우 전단파의 이동거리 L은 두 벤더 엘리먼트의 tip-to-tip간

거리에서 침하량을 뺀 거리가 되며, $V_s(HV)$ 는 침하에 영향을 받지 않으므로 초기 두 벤더 엘리먼트의 tip-to-tip간 거리와 동일하다. 두 시료의 전단파의 이동거리, 유효응력 및 초동 시간을 고려하여 계산한 전단파 속도는 그림 7과 같다. 그림 7에서 평균 점은 $V_s(VH)$ 를, 삼각점은 $V_s(HV)$ 를 나타내며 solid point는 하중 재하단계를, open point는 하중 제하 단계를 나타낸다. $V_s(VH)$, $V_s(HV)$ 모두 유효응력의 증가에 따라 증가하는 경향을 보이며, 하중 제하 시에는 유효응력의 감소에 따라 $V_s(VH)$, $V_s(HV)$ 모두 감소하는 경향을 보인다. 또한, 하중 제하 시 전단파 속도가 하중 재하 시의 전단파 속도보다 빠르는데, 이것은 횡방향 응력 구속현상 때문으로 판단된다.

식 (4), (5)에 따라 전단파 속도는 유효응력의 함수이므로 동일한 유효응력 크기 아래의 전단파 속도는 동일해야 한다. $V_s(VH)$ 와 $V_s(HV)$ 는 각각 파의 진행 방향과 입자 움직임 방향의 차이가 있을 뿐 유효응력의 크기는 동일하다. 따라서 고유이방성을 무시할 수 있는 완전 구체는 β 지수와 α 계수가 동일하여 $V_s(VH)$ 와 $V_s(HV)$ 가 같다. 그러나 그림 8에 나타난 바와 같이 mica와 점토 두 시료 모두 입자 구조적 고유이방성 가진 재료이므로 각 재하 및 제하 단계에서 $V_s(VH)$ 와 $V_s(HV)$ 는 다르며, $V_s(HV)$ 가 $V_s(VH)$ 보다 더 큰 경향을 보인다. Mica의 경우 $V_s(HV)$ 와 $V_s(VH)$ 의 최대 차는 약 47m/s이며 점토의

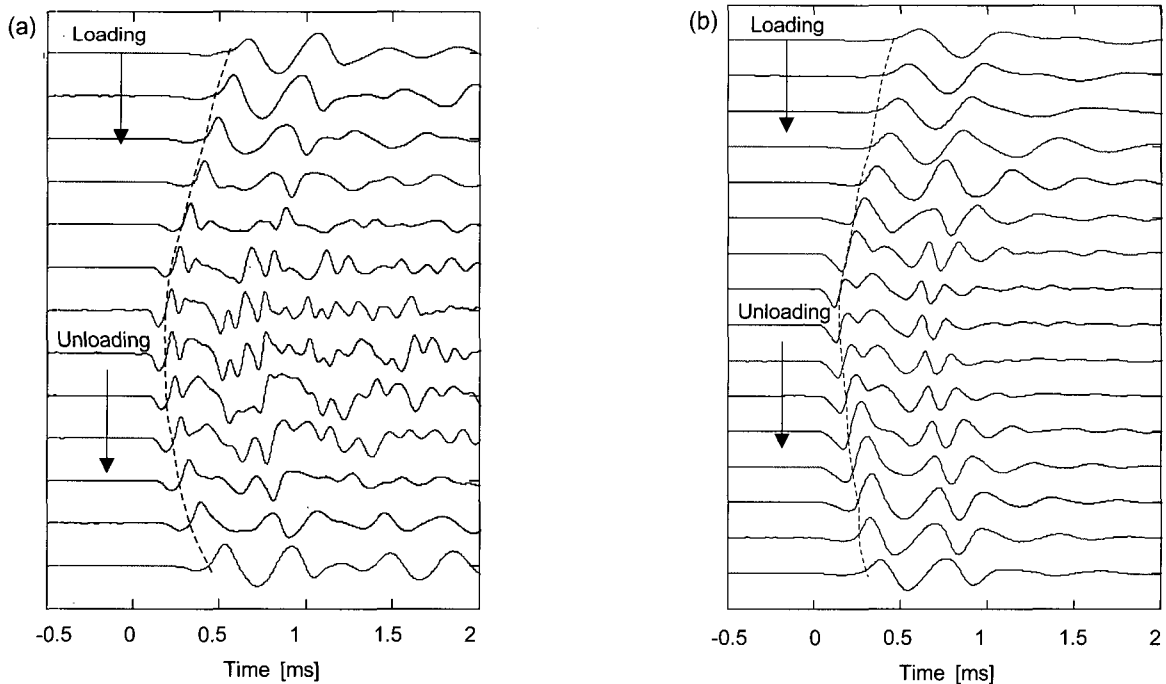
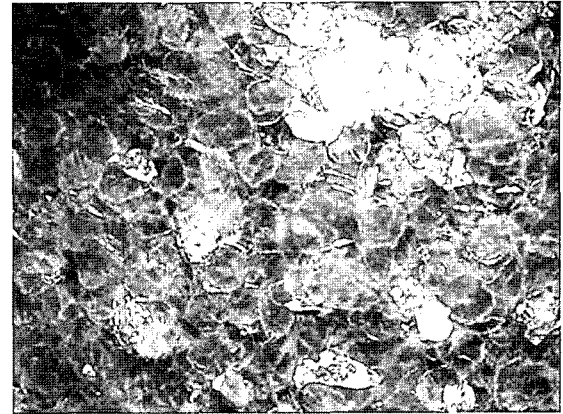
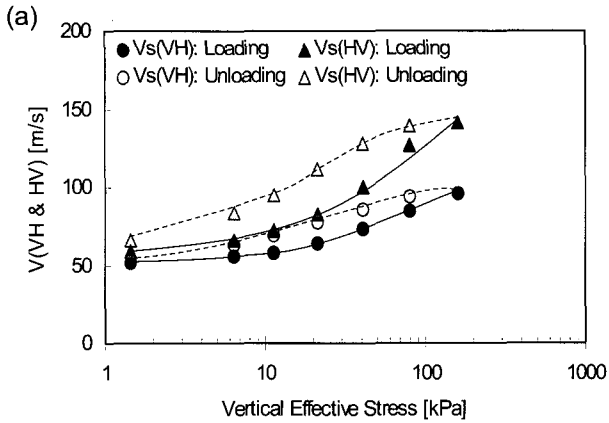
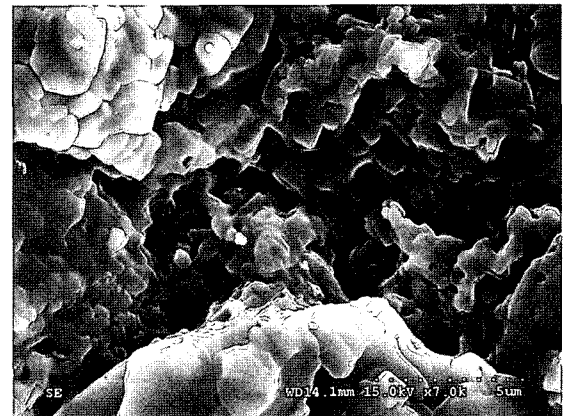
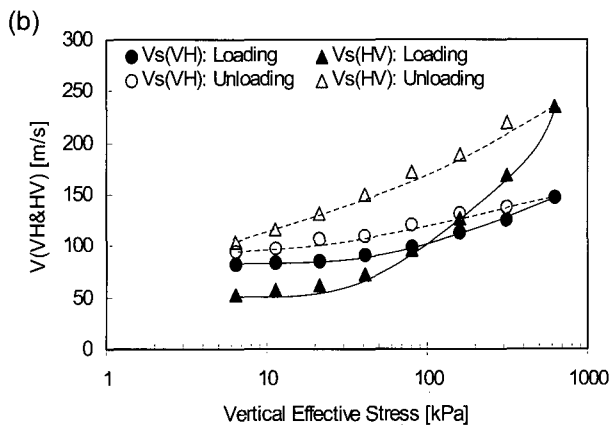


그림 6. 측정된 전단파 신호(VH): (a) Mica; (b) 점토



(a) Mica



(b) 점토

그림 7. 전단파 속도 비교(VH vs HV): (a) Mica; (b) 점토

그림 8. Mica 시료와 점토 시료의 입자 배열

경우 약 90m/s의 차이를 보였다. $V_s(HV)$ 가 $V_s(VH)$ 보다 더 큰 경향을 보이는 이유는 전단파는 입자의 접촉에 의하여 전달되기 때문이다. 자연스러운 퇴적 과정을 거쳐 쌓여진 점토와 가로길이가 세로길이보다 월등히 큰 Mica는 입자 배열이 횡방향 배열을 이루고 이에 따라 전단파 속도도 영향을 받는다(그림 8). 결국, 전단파 속도는 입자 구조 이방성에 영향을 받으며 $V_s(HV)$ 와 $V_s(VH)$ 의 크기 차이는 입자 배열에 의해 좌우되는 것으로 판단된다.

5. 결론

비교결화된 흙의 전단파 속도는 유효응력의 함수이고 입자 구조 이방성 특성에 따라 실험적으로 결정되는 α 계수와 β 지수에 영향을 받는다. 유효응력은 파의 진행 방향과 입자 움직임 방향에 따라 구분되며, β 지수의 경우 매질의 접촉 특성(입자크기, 입자모양, 입자들의 구조)에 따라 결정되며, α 계수는 packing의 형태, 입자 재료의 특성, 입자간의 접촉 거동, 구조의 변화에 따라

서 변화한다.

전단파 속도의 응력이방성 특성은 이방적 응력 상태인 $\sigma_3 = K_0 \sigma_1$ 상태($K_0 = \sigma'_3 / \sigma'_1 \neq 1$) 아래에서 파의 진행 방향과 입자 움직임 방향의 유효응력 크기를 조정하여 평가할 수 있다. 이러한 전단파 속도의 응력유도이방성은 입자 구조적 이방성의 영향이 무시되는 경우 K_0 값에 따라 달라지며, K_0 값이 1보다 작은 경우 $V_s(VH)$ 가 $V_s(HH)$ 보다 크게 측정되었다.

전단파 속도는 유효응력의 함수이므로 고유이방성을 무시할 수 있는 완전 구체인 경우 β 지수와 α 계수가 동일하여 동일한 유효응력 크기 아래의 전단파 속도는 동일해야 한다. 즉, 동일한 유효응력의 크기를 가지는 $V_s(VH)$ 와 $V_s(HV)$ 는 각각 파의 진행 방향과 입자 움직임 방향의 차이가 있을 뿐 전단파 속도는 동일해야 한다. 그러나 일반적인 지반은 흙이 퇴적될 당시에 특정한 방향성을 가지면서 퇴적되기 때문에 발생하는 입자 구조에 따른 고유이방성을 가져 동일한 유효응력 크기를 가지는 $V_s(VH)$ 와 $V_s(HV)$ 가 다른 경향을 보인다. 따라

서 전단파 속도는 입자 구조 이방성에 영향을 받으며 $V_s(HV)$ 와 $V_s(VH)$ 의 속도차이는 입자 배열 방향에 의해 좌우된다.

미소 변형에서의 지반 거동 특성에 대한 중요성이 확대됨에 따라 많은 현장 지반 탐사 시험법들이 개발되었고 현재 수행 중에 있다. 그러나 일반적으로 현장에서 실시하고 있는 현장 전단파 측정 시험법들은 시험지반이 받고 있는 유효응력 크기, 파의 진행방향과 입자 움직임 방향 등을 정확하게 판단하기 힘들다. 따라서 입자 구조에 따른 고유이방성이 큰 지반에서는 측정된 전단파 속도를 이용하여 전단탄성계수 및 흙의 특성을 추정할 때에는 전단파 속도가 이방성에 영향을 받기 때문에 주의가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2005년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(KRF-2005-042-D00315)임을 밝히며 깊이 감사드립니다.

참고 문헌

1. 이종섭, 이창호 (2006), 벤더엘리먼트 시험의 원리와 고려사항, *한국지반공학회 논문집*, 제 22권 5호, pp.47-57.
2. Casagrande, A. and Wilson, S.D. (1952), "Effect of rate of loading on the strength of clays and shales at constant water content", *Geotechnique*, Vol.2, No.3, pp.251-263.
3. Duncan, A.M. and Seed, H.B. (1966), "Anisotropy and stress reorientation in clay", *Journal of Soil Mechanics and Foundation*

- Engineering*, ASCE, Vol.92, No.SM 5, pp.21-50.
4. Dyvik, R. and Madhus, C. (1985), "Lab measurements of G_{max} using bender element", *Proc. ASCE convention on Advances in the art of testing soils under cyclic conditions*, pp.186-196.
5. Fernandez, A.L. (2000), "Tomographic imaging the state of stress", PhD thesis, Civil Engineering, Georgia Institute of Technology, 298p.
6. Knox, D.P., Stokoe, K.H.II., and Kopperman, S.E. (1982), "Effect of state of stress on velocity of low-amplitude shear waves propagating along principal stress directions in dry sand", *Geotechnical Engineering Report GR 82-23*, University of Texas at Austin.
7. Lade, P.V. and Tsai, J.I. (1985), "Effects of Localization in Triaxial Tests on Clay", *Proc of 11th Inter. Conf. on Soil Mech and Found. Eng.*, San Francisco, Vol.2, pp.549-552.
8. Lee, J.S., Fernandez, A.L., and Santamarina, J.C. (2005), "S-wave velocity tomography: Small-scale laboratory application", *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol.2, No.4, pp.336-344.
9. Lee, J.S. and Santamarina, J.C. (2005), "Bender elements: performance and signal interpretation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.131, No.9, pp.1063-1070.
10. Roesler, S. K. (1979), "Anisotropic shear modulus due to stress anisotropy", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.105, No.7, pp.871-888.
11. Sánchez-Salineró, I., Rosset, J.M., and Stokoe, K.H.II. (1986), "Analytical studies of body wave propagation and attenuation", *Report GR-86-15*, University of Texas, Austin. 272p.
12. Santamarina, J.C., Klein, K.A., and Fam, M.A. (2001), "Soils and Waves-Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring", John Wiley and Sons, New York, 488p.
13. Viggiani, G. and Atkinson, J.H. (1995), "Interpretation of bender element tests", *Geotechnique*, Vol.45, No.1, pp.149-154.
14. Yu, P. and Richart, F.E.Jr. (1984), "Stress ratio effects on shear modulus of dry sands", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.110, No.3, pp.331-345.

(접수일자 2006. 4. 24, 심사완료일 2006. 9. 20)