온도와 포화도의 변화에 의한 표면장력이 전단파 속도에 미치는 영향

The Effect of Surface Tension on Shear Wave Velocities according to Changes of Temperature and Degree of Saturation

박정희* · 강민구** · 서선영*** · 이종섭****

Park, Jung-Hee · Kang, Min-Gu · Seo, Sun-Young · Lee, Jong-Sub

Abstract

The surface tension, which is generated in the unsaturated soils, increases the stiffness of the soils. The objective of this study is to estimate the effect of the surface tension, which varies according to the temperature, on the shear wave velocity. Nine specimens, which have the different degree of saturation (0%, 2.5%, 5%, 10%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%), are prepared by using sand-silt mixtures. Experiments are carried out in a nylon cell designed for the measurement of shear waves. A pair of bender elements, which are used for the generation and detection of shear waves, is installed as a cross-hole type. The shear waves are continuously monitored and measured as the temperature of specimens decreases from 15°C to 1°C. The results show that shear wave velocities of the fully saturated and fully dried specimens change a little bit as the temperatures of specimens decrease. However, the shear wave velocities of the specimens with the degree of saturations of 2.5%, 5%, 10%, 20%, 40%, 60% and 80% continuously increase as temperature decreases from 15°C to 1°C. Furthermore, a fully saturated specimen is dried at the temperature of 70°C in order to observe the shear waves according to degree of saturation. The shear wave velocities measured at the temperature of 70°C are generally lower than those measured at temperature of 15°C. This study demonstrates that the dependence of shear wave velocities on the temperature according to the degree of saturation should be taken into account in both laboratory and field tests.

Keywords : *apparent cohesion, degree of saturation, shear waves velocity, surface tension, temperature*

요 지

표면장력에 의한 겉보기 점착력은 적절한 함수비를 가지고 있는 흙의 경우 생성되며 지반의 강도를 증가시킨다. 본 연구의 목적은 온도에 따라 변화하는 표면장력이 전단파 속도에 미치는 영향을 파악하는 것이다. 표면장력의 발생 유무를 조절하기 위하여 모래-실트 혼합토를 이용하여 포화도가 다른 아홉 가지의 시료 (0%, 2.5%, 5%, 10%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%)를 조성하였다. 전단파 속도를 측정하기 위해 나일론 재질의 셀을 제작하였으며 전단파 트랜스듀서인 벤더 엘리먼트를 크로스 홀 형상으로 부착하였다. 시료의 온도가 15°C에서 1°C까지 변화하는 동안 포화도가 다른 각 시료의 전단파 신호를 연속적으로 측정하였다. 실험결과, 포화도 0%인 시료와 포화도 100%인 시료는 온도변화에 의한 전단파 속도 변화가 미비하였으나, 표면장력이 발생하기에 적절한 포화도를 가진 시료는 온도가 감소함에 따라 전단파 속도는 증가하였다. 또한 완전 포화된 시료를 70°C에서 건조시키면서 포화도에 따른 전단파 속도를 측정한 시료의 경우, 15°C에서 측정된 시료의 전단파 속도보다 더 낮은 전단파 속도가 측정되었다. 본 연구는 특정한 포화도에서 온도변화에 따라 전단파 속도가 변화하는 원인을 실험을 통해 분석하였으며, 미소변형구간에서의 전단탄성계수 측정과 같은 실내 및 현장실험 시, 온도를 동시에 평가해야 함을 보여준다.

핵심용어 : 겉보기 점착력, 포화도, 전단파 속도, 표면장력, 온도

1. 서 론

지반공학 및 도로공학에서 탄성계수(modulus)는 중요한 설계정수 중 하나이며 지반의 강도 및 변형특성을 대변한다(Sawanguriya et al., 2008). 동적하중 하에서 전단탄성계수

(G_{max})는 기초의 설계, 액상화(liquefaction) 등을 포함한 다양한 동적설계에 관련되는 유용한 토질정수이다(이종섭과 이창호, 2006). 탄성계수는 흙의 종류, 응력상태, 포화도 등에 영향을 받는 것으로 알려져 있으며(Kramer, 1996; Cho and Santamarina, 2001) 변형률의 크기에 의존하는 탄성계수는

*정회원 · 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정 (E-mail : chdl34@korea.ac.kr)

**고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정 (E-mail : windforest@korea.ac.kr)

***고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정 (E-mail : oacis354@korea.ac.kr)

****정회원 · 교신저자 · 고려대학교 건축사회환경공학부 교수 (E-mail : jongsub@korea.ac.kr)

변형률이 작을수록 크게 평가된다. 이와 같은 이유로 다양한 조건에 영향을 받는 탄성계수를 정확히 측정하는 것은 지반 구조물 설계에 있어 매우 중요한 사항이다.

전단탄성계수 (G_{max})는 벤더 엘리먼트를 통해 산출한 전단파 속도로부터 산정할 수 있다. Christ and Park(2011)은 전단파를 이용하여 모래-고무 혼합입자의 탄성계수 등을 평가하였다. 이세현 등(2006)은 벤더 엘리먼트를 이용하여 전단파 속도를 산정한 후, 함수비 변화에 따른 노상토의 탄성계수를 평가하였다. Sawangsuriya et al.(2008)은 전단파 및 압축과 속도와 일축압축실험을 통해 변형률에 따라 큰 차이를 나타내는 탄성계수의 특성을 파악하고자 하였다. 한편, 전단파 속도는 유효응력에 영향을 받으며, 불포화토의 유효응력은 포화도 및 모관흡수력(matric suction)에 의존한다. 모관흡수력은 표면장력의 함수이며 표면장력은 온도에 영향을 받으므로 온도에 따라 탄성계수가 다르게 평가될 수 있음을 보여준다. 상온에서 온도가 감소함에 따라 전단파 속도가 증가한다는 연구가 수행되었지만 그 원인은 명확히 파악되지 않았다(박정희 등, 2012). 계절적 온도변화에 따른 지반의 동적물성치 변화를 구조물 설계과정에서 반영하는 것이 합리적이므로 이에 대한 추가적인 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 온도가 감소함에 따라 표면장력이 증가한다는 사실에 근거하여, 포화도가 다른 아홉가지 시료를 조성하여 표면장력의 발생정도를 조절하고자 하였다. 즉, 표면장력이 발생하지 않는 조건(포화도0%, 100%)과 표면장력이 발생하기에 적절한 포화도를 가지는 시료를 조성하였다. 전단파 측정용 셀을 제작하여 시료를 조성한 후, 열전대(thermocouple)를 설치하여 시료의 온도변화를 측정하였다. 전단파 트랜스듀서로서 벤더 엘리먼트를 사용하여 시료의 온도가 감소하는 동안 연속적으로 전단파의 변화양상을 관찰하였다. 또한 완전히 포화된 시료를 건조시키면서 포화도에 따른 전단파 속도를 측정하였다.

본 연구의 목적은 상온에서 온도가 감소할수록 전단파속도가 증가하는 원인을 실내실험을 통해 파악하는 것이다. 본 논문에서는, 흙 입자에 작용하는 표면장력의 이론적 배경을 시작으로 실험에 사용된 시료 특성, 각기 다른 포화도를 가지는 시료 조성방법 및 전단파 측정을 위해 제작된 셀의 특징을 설명하였다. 또한 온도가 감소함에 따라 포화도가 다른 시료에서 측정된 전단파의 변화를 토대로 전단파 속도변화의 원인 및 분석에 대해 기술하였다.

2. 표면장력에 대한 이론적 배경

2.1 흙 입자에 작용하는 표면장력

흙 입자사이에 물이 불포화 상태로 존재할 경우, 물의 표면장력으로 인하여 흙 입자간의 당김 현상이 발생하게 된다. 그림 1과 같이 흙 입자를 구로 가정하면, 두 흙 입자의 접촉점은 간극수로 둘러싸여 있고 각 구의 접선을 따라 표면장력이 작용한다. 이 표면장력에 저항하여 압축력이 발생하며 이 힘은 흙 입자간의 유효응력을 증가시킨다.

모래에 수분이 적당히 존재한다면 표면장력 때문에 흙 입자를 서로 밀착시키려는 힘이 생기지만 완전건조상태이거나 포화상태에서 이 힘은 소멸된다. 모래가 적절한 함수비를 가

그림 1. 흙 입자에 작용하는 표면장력(T_s : 표면장력, R : 흙 입자의 반지름, r_1 : 매니스커스 내부 곡률반경, r_2 : 매니스커스 외부 곡률반경)

지고 있는 조건에서 표면장력에 의해 흙 입자를 밀착시키려는 현상이 발생하며 이를 겉보기 점착력(apparent cohesion)이라고 한다.

2.2 온도변화에 따른 표면장력 변화

표면장력은 포화도 또는 함수비에 따라 발생하며 온도가 변함에 따라 그 힘의 크기가 변한다(IAPWS, 1994). 그림 2와 같이 상온에서 온도가 감소함에 따라 표면장력은 증가하며 온도와 표면장력의 관계를 다음과 같이 나타낼 수 있다(Gittens, 1968; Kayser, 1975; IAPWS, 1996).

$$\text{Gittens: } T_s = 76.05 - 0.148T - 1.619 \cdot 10^{-4} T^2 \quad (1)$$

$$\text{Kayser: } T_s = 76.24 - 0.137T - 3.124 \cdot 10^{-4} T^2 \quad (2)$$

$$\text{IAPWS: } T_s = B \tau^\mu (1 + b \tau) \quad (3)$$

T_s 는 표면장력, 식 (1), (2)에서 T 는 온도($^{\circ}\text{C}$)를 의미하며, 식 (3)에서 τ 는 $1 - T_k/T_{kc}$, T_k 는 절대온도(K), T_{kc} 는 647.096K, B 는 235.8mN/m, $b = -0.625$, μ 는 1.256이다. 식 (1)과 (2)는 표면장력이 온도에 대한 2차 지수승의 함수라고 가정한 것

그림 2. 온도변화에 의한 표면장력의 변화

이며, 식 (3)은 표면장력이 온도에 대한 2.256 지수승의 함수라고 가정한 것으로 거의 유사한 경향을 보인다.

3. 실험 구성

3.1 시료구성

3.1.1 시료의 기본특성

본 연구에서는 30번체와 50번체 사이의 입경을 가지는 주문진 표준사($D=0.30\sim0.60\text{mm}$, $D_{50}=0.45\text{mm}$)와 200번체를 통과한 crushed limestone을 이용하여 시료를 조성하였다. 모래시료 무게에 대한 실트시료의 무게비(% of silt= $W_{\text{silt}}/W_{\text{sand}}\times100\%$)가 10%가 되도록 모래와 실트를 균일하게 혼합하였다. 모래-실트 혼합토의 비중은 2.57(ASTM, D854-05)이며 최대간극비는 0.74(ASTM, D4253-00), 최소간극비는 0.47(D4254-00)이다. 실험에 사용된 모래 및 모래-실트 혼합토의 재료적 특성을 표 1에 나타내었다.

3.1.2 시료 조성

균일하게 혼합된 모래-실트 혼합토의 상대밀도가 70%($\gamma_d=16.3\text{kN/m}^3$)가 되도록 시료를 준비한 후, 포화도에 따른 표면장력의 발생을 조절하기 위하여 다음 식을 통해 포화도가 다른 이흠가지 시료(0%, 2.5%, 5%, 10%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%)를 조성하였다.

$$S = \frac{\omega G_s}{e_{(70\%)}} \quad (4)$$

여기서, S 는 포화도, ω 는 함수비, G_s 는 모래-실트 혼합토의 비중, $e_{(70\%)}$ 는 상대밀도 70%에 해당하는 간극비를 의미한다. 모래와 실트가 혼합된 시료를 4개의 층으로 나눈 후 탬핑(tamping)방법을 이용하여 시료를 조성하였으며 탬핑에 사용된 다짐추의 무게는 1.1kg이다.

3.2 전단파 측정 셀

시료의 온도가 낮아지는 동안 전단파를 측정하기 위해 그림 3과 같이 셀을 제작하였다. 나일론재질의 셀은 내측의 가로 및 세로의 길이가 100mm인 정사각형이고 높이가 70mm인 시료를 조성할 수 있다. 그림 3(a)의 점선으로 표시된 것과 같이 셀을 통해 직접 전단파가 전달되는 것을 방지하기 위해 셀의 옆면을 분리형으로 제작하여 조립하였다. 또한 전단파 트랜스듀서인 벤더 엘리먼트를 크로스 홀(Cross-hole)형상으로 배치할 수 있도록 셀을 제작하였다. 전단파 트랜스듀서로 벤더 엘리먼트를 사용할 경우 흡과 트랜스듀서간의 결합효과가 뛰어나다고 알려져 있다(이종섭과 이창호, 2006; Lee and Santamarina, 2005-a). 또한 그림 3과 같이 벤더 엘리먼트가 설치된 위치 중앙에 열전대를 설치

표 1. 모래 및 모래-실트 혼합토의 재료적 특성

Property	Sand	Sand-silt mixture
G_s	2.62	2.57
$D_{50}(\text{mm})$	0.45	-
e_{max}	0.82	0.74
e_{min}	0.56	0.47

그림 3. 전단파 측정 셀: (a) 평면도; (b) 측면도(a-a' 단면); (c) 측면도 b-b' 단면(BE와 Tc는 각각 벤더 엘리먼트와 열전대를 의미하며 Tc에 연결된 직선은 열전대 케이블을 의미함)

치하여 온도변화에 따른 전단파 변화를 측정할 수 있도록 하였다. 본 실험에 사용된 온도센서의 종류는 K-type으로 시료의 온도를 측정하기 전에 보정과정을 통해 정확도를 확인하였으며 온도측정장치(thermometer CENTER-309)를 통해 시료의 온도를 측정하였다.

3.3 실험과정

3.3.1 온도변화

포화도가 0%, 2.5%, 5%, 10%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%인 시료를 조성한 후, 추가적인 상재하중을 가하지 않은 상태에서 각 시료의 온도가 15°C에서 1°C까지 변화하는 동안 전단파를 측정하였다. 셀에 시료를 조성한 후, 크로스 홀(cross hole)형상으로 벤더 엘리먼트를 설치하였으며 그림 3과 같이 벤더엘리먼트와 같은 깊이에 열전대(thermocouple)를 고정하여 시간경과에 따라 시료의 온도변화를 측정하였다. 시료의 온도를 조절하기 위하여 냉동고를 사용하였으며, 냉동고의 내부온도는 -30°C로 설정하여 시료의 온도를 강하시켰다. 냉각공기에 의해 셀의 옆면이 동결되는 것을 방지하기 위하여 시료의 상부단면을 제외한 셀의 옆면을 단열재를 이

용하여 밀봉하였다.

3.3.2 포화도 변화

Tamping 방법에 의해 조성된 시료와 동일한 모래-실트 혼합토를 수중강사법으로 조성하였으며 상대밀도가 70%(건조 단위중량: $\gamma_d=16.3\text{kN/m}^3$)가 되도록 하였다. 조성된 시료는 그림 4와 같이 오븐에 설치한 후, 일정한 온도에서 시료의 포화도를 변화시키기 위해 시료를 건조기 내부에서 건조시켰다. 실험 초기에 측정된 시료의 무게와 건조과정에 따른 시료의 무게차이를 이용하여 포화도를 계산하였으며 포화도가 100%에서 0%까지 변하는 동안 연속적으로 전단파를 측정하였다. 건조기 내부의 온도는 70°C로 일정하게 유지하였다.

3.4 전단파 측정 시스템

본 연구의 전단파 측정시스템은 신호발생기(function generator)에서 단일 정현파를 발신용 벤더 엘리먼트로 보내고, 시료를 통과한 전단파는 수신 벤더엘리먼트로 전달된다. 필터-증폭기(filter and amplifier)는 수신된 신호의 잡음을 제거하고 신호를 증폭시킨다. 필터-증폭기를 거친 신호는 오실로스코프(oscilloscope)를 통해 육안으로 관찰할 수 있으며 측정된 데이터를 컴퓨터로 저장할 수 있다.

4. 실험 결과

4.1 온도변화에 따른 전단파

모래-실트 혼합토를 이용해 포화도가 다른 시료를 조성한 후, 각 시료의 온도변화에 따른 전단파의 변화과정을 측정하였다.

4.1.1 전단파 신호

포화도가 다른 아홉가지 시료의 온도가 15°C에서 1°C까지 변하는 동안 포화도가 0%, 5%, 10%, 20%, 60% 및 100%인 시료에서 연속적으로 전단파를 측정하였으며 포화도가 5%, 20%, 100%인 시료에서 측정된 전단파 신호를 그림 4에 나타내었다. 온도가 감소함에 따라 포화도가 0%인 시료와 포화도가 100%인 시료의 전단파 초기도달시간은 거의 일정하였다. 반면에 포화도가 5%, 10%, 20%, 60%인 시료의 초기도달시간은 감소하였으며 포화도에 따라 전단파의 초기도달시간이 감소하는 경향이 다르게 나타났다. 포화도가 5%인 시료의 전단파 초기도달시간은 실험초기에 감소한 후 일정하였으며 포화도가 10%, 20%, 60%인 시료의 전단파 초기도달시간은 연속적으로 감소하였다.

4.1.2 전단파 속도

그림 4에 나타난 전단파 신호를 이용하여 다음 식을 통해 전단파 속도를 산정하였다

$$V_s = \frac{L_{tip-tip}}{t_s} \quad (5)$$

여기서, $L_{tip-tip}$ 은 벤더 엘리먼트의 끝단 간 거리를 의미하며 t_s 는 전단파의 초기도달시간(Lee and Santamarina, 2005a; Lee and Santamarina, 2006)을 의미한다. 시료의 온도가 15°C에서 1°C까지 변하는 동안 포화도가 다른 각 시료의 전단파 속도를 그림 5에 나타내었다. 실험초기 15°C에서는 상대적으로 포화도 낮은 시료(0%, 2.5%, 5%, 10%, 20%)들의 전단파 속도가 포화도가 높은 시료(40%, 60%, 80%, 100%)에 비해 빠르게 나타났다. 실험이 종료된 1°C에서는 포화도 5%인 시료의 전단파 속도가 185m/s로 가장 크게

그림 4. 온도변화에 의한 시료의 포화도 별 전단파 신호: (a) 5%; (b) 20%; (c) 100%. 화살표는 전단파의 초기도달시간을 의미함

그림 5. 온도변화에 의한 tamping 방법으로 조성된 시료의 포화도 별 전단파 속도

나타났으며 포화도가 2.5%인 시료의 전단파 속도는 약 180m/s를 나타내었다. 포화도 10%, 20%, 40%, 60%인 시료는 약 170m/s의 전단파 속도를 보였으며 다음으로 포화도 80%, 0%, 100% 순서로 전단파 속도가 크게 나타났다. 온도가 감소함에 따라 포화도가 0%인 시료와 100%인 시료의 전단파 속도는 거의 일정한 반면, 포화도가 2.5%, 5%, 10%, 20%, 40%, 60%, 80%인 시료의 전단파 속도는 증가하였고 포화도에 따라 전단파 속도가 증가하는 경향이 다르게 나타났다. 포화도가 2.5%, 5%인 시료의 전단파 속도는 온도가 15°C에서 10°C까지 변하는 동안 빠르게 증가한 후 거의 일정한 속도를 보였으며 온도변화에 따른 두 시료의 전단파 변화양상은 매우 유사한 경향을 나타내었다. 포화도가 10%, 20%, 40%, 60%, 80%인 시료의 전단파 속도는 온도가 감소함에 따라 지속적으로 증가하였으며 위 다섯 가

지 시료의 전단파 속도가 증가하는 경향 또한 유사하게 나타났다. 포화도가 80%인 시료의 초기 전단파 속도가 15°C와 14°C에서 포화도 0%인 시료의 전단파 속도보다 약간 작게 측정되었으나 그 차이는 매우 작은 값이다.

4.1.2 전단파 속도-포화도

그림 5에서 산정한 전단파 속도를 통해 일정온도(1°C, 5°C, 10°C, 15°C)에서 포화도에 따른 전단파 속도를 산정하였으며 이를 그림 6에 나타내었다. 1°C, 5°C, 10°C, 15°C에서 포화도에 따른 전단파 속도의 변화양상이 유사하게 나타났다. 포화도에 따라 대략적으로 세 개의 구간으로 구분된다. 첫번째 구간은 포화도 100%~80%인 구간으로 전단파 속도가 포화도가 감소함에 따라 크게 증가하였으며 두번째 구간은 포화도 80%~20%인 구간으로 전단파 속도가 비교적 일정한 구간이다. 마지막으로 세번째 구간은 포화도 20%~0%인 구간으로 포화도 5%에서 전단파 속도가 가장 크게 나타나며 포화도 5%이하에서는 전단파 속도가 급속하게 감소한다.

4.2 포화도에 따른 전단파 (건조과정)

모래와 실트가 혼합된 시료를 포화시킨 후, 일정한 온도(70°C)에서 시료를 건조시킴으로써 변화하는 포화도에 따라 전단파의 변화과정을 측정하였다.

4.2.1 전단파 신호

모래-실트 혼합토가 완전히 포화된 상태에서 완전건조상태에 이를 때까지 포화도에 따른 전단파 신호를 측정하였으며

그림 6. 일정 온도에서의 포화도 별 전단파 속도: (a) 1°C; (b) 5°C; (c) 10°C; (d) 15°C

이를 그림 7에 나타내었다. 그림 7은 전단파와 신호의 변화 양상이 세 단계로 구분되어짐을 보여준다. 첫번째 단계는 포화도 100%~90% 구간으로 전단파의 초기 도달시간이 급격히 감소하는 구간이며 두번째 단계는 포화도 90%~20% 구간으로 전단파의 초기 도달시간이 비교적 일정한 구간이다. 마지막으로 세번째 단계는 포화도 20%~0% 단계로 전단파의 초기 도달시간이 급격히 감소하는 구간이다.

전단파와 신호와 유사하게 전단파의 공진주파수 변화 또한 세 단계로 구분된다. 포화도 100%~90% 구간에서는 1kHz 이하의 공진주파수를 나타내었으며 포화도 90%~20% 구간에서는 약 2kHz, 마지막으로 포화도 20%~0% 구간에서는 약 6kHz의 공진주파수를 나타내었다. 그림 7은 전단파의 속도 변화와 공진주파수의 변화는 밀접한 관계가 있음을 보여준다.

4.2.2 전단파 속도

그림 7에 나타낸 전단파와 신호에서 초기 도달시간을 산정하고 식 (3)을 통해 전단파 속도를 계산하여 포화도에 따른 전단파 속도를 그림 8에 나타내었다. 건조조정에 의해 시료

그림 7. 건조과정에 의한 포화도 별 전단파 신호

그림 8. 노건조된 시료와 tamping 방법에 의해 조성된 시료의 포화도 별 전단파 속도

의 포화도를 조절하면서 측정된 전단파 속도의 변화과정은 세 단계로 구분된다. 첫번째 단계는 포화도 100%~90% 구간으로 포화도가 감소하면서 전단파 속도가 증가하였다. 두번째 단계는 포화도 90%~20% 구간으로 불포화도의 거동을 보이며 전단파 속도는 완만한 기울기를 나타내면 증가하였다. 세번째 단계는 포화도 20%~0% 구간으로 전단파 속도가 급격히 증가하였으며 가장 큰 속도변화를 보여주었다.

5. 토의 및 분석

5.1 온도-표면장력-유효응력-전단파 관계

온도가 감소함에 따라 포화도가 0%인 시료의 경우 전단파 속도가 약간 증가하였으며 이는 공기중에서 미량의 수분을 흡수함에 따른 유효응력의 영향인 것으로 판단된다. 포화도 100%인 시료의 경우, 온도가 감소하더라도 전단파 속도는 거의 일정하였다. 즉, 표면장력이 발생하지 않는 시료의 전단파 속도는 온도에 의한 영향이 미비한 것으로 나타났다. 한편, 포화도가 2.5%, 5%, 10%, 20%, 40%, 60%, 80%인 시료의 전단파 속도는 온도가 감소함에 따라 증가하였다. 전단파 속도는 유효응력에 영향을 받으며 다음과 같이 유효응력의 함수로 표현할 수 있다(Roesler, 1979; Yu and Richard, 1984).

$$V_s = \alpha \left(\frac{\sigma'_o}{Pa} \right)^\beta = \alpha \left(\frac{\sigma'_w + \sigma'_m}{2Pa} \right)^\beta \quad (6)$$

여기서, σ'_w 는 전단파의 진행 방향의 유효응력, σ'_m 는 입자의 이동 방향의 유효응력, σ'_o 는 σ'_w 와 σ'_m 의 평균값, Pa는 σ'_o 와 같은 단위의 대기압, 그리고 α 및 β 는 실험적으로 결정되는 상수로써, 실험결과를 curve fitting 하여 얻을 수 있다(Santamarina 등, 2001).

Bishop과 Blight(1963)는 불포화토에서 흙 입자들 사이의 유효응력에 영향을 주는 모관흡수력(matric suction, $u_a - u_w$)을 하나의 응력상태 변수(stress state variable)로 파악하여 포화토 영역에서의 유효응력을 다음 식과 같이 표현하였다.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (7)$$

여기서, σ 는 전응력, u_a 는 물-공기 경계면에서의 공기압, u_w 는 수압, χ 는 포화도에 따라 변하는 Bishop계수이다. 불포화토의 유효응력을 구성하는 모관흡수력은 다음 식을 통해 표현된다.

$$(u_a - u_w) = T_s \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (8)$$

여기서 T_s 는 표면장력, r_1 , r_2 는 공기압과 수압의 차이로 발생하는 물-공기 경계면의 곡률반경으로써 그림 1에 나타내었다. 표면장력은 식 (1), (2), (3)에 표시한 것처럼 온도에 대한 함수로 나타낼 수 있으며 위에서 언급한 식 (1), (2), (3), (6), (7), (8) 이 의미하는 바는 다음과 같다. 전단파 속도는 유효응력의 함수이며 모관흡수력을 포함하고 있는 불포화토의 유효응력은 표면장력으로 나타낼 수 있다. 표면장력은 온도에 따라 변하기 때문에 전단파 속도 역시 온도의 함수라고 할 수 있다. 즉, 온도가 감소하면 표면장력이 증가

하기 때문에 불포화도의 유효응력이 증가하므로 포화도가 2.5%, 5%, 10%, 20%, 40%, 60%, 80%인 시료의 전단파 속도가 증가하였다고 판단된다.

공기압과 수압의 차이로 발생하는 모관흡수력은 불포화도의 거동에 큰 영향을 미치는 중요한 요소이며 이에 대해 정량적인 해법을 제시하기 위해 다양한 연구가 수행되었다. 많은 연구자들은 입자의 배열을 단순화(simple cubic packing, tetrahedral packing and packing with binary sized particles)시킨 후, 입자들과 meniscus 사이의 기하학적 관계를 이용하여 포화도에 따른 모관흡수력을 이론적으로 구하고자 하였다(Dallavalle, 1943; Cho and Santamarina, 2001; Molenkenp and Nazemi, 2003; Lechman and Lu, 2008; Likos, 2009). 모관흡수력을 구성하는 표면장력이 온도에 따라 달라지기 때문에 흙-수분 특성곡선(SWCC: soil-water characteristic curve)은 온도에 대한 함수로 표현된다. 기존 연구자들은 이론적으로 예측된 모관흡수력의 이론값과 실험값을 비교하였으며(Hopmans and Dane, 1986; Romero et al., 2001; Bachmann and Ploeg, 2002), 온도변화에 따른 모관흡수력을 실험적 방법으로 직접 구하기도 하였다(Wilkinson and Klute, 1962; Chahal, 1965; Liu and Dane, 1993). 위 실험결과들의 공통점은 이론적으로 예측한 모관흡수력보다 실험적으로 측정된 모관흡수력이 훨씬 더 크게 측정되었으며 온도변화에 따른 모관흡수력 또한 이론값보다 실험값이 더 크게 나타난다는 것이다.

시료의 온도가 15°C에서 1°C까지 변하는 동안 표면장력의 증가량은 약 2%이다. 식 (7)은 표면장력에 의한 유효응력의 증가량은 약 2%임을 의미하며 식 (6)의 β 값은 0.15~0.25 범위의 값을 갖기 때문에 온도변화에 의한 표면장력의 영향으로 이론적으로 예측되는 전단파 속도의 증가량은 2% 미만임을 보여준다. 그림 5는 실험을 통해 구한 전단파 속도의 증가량은 온도가 변하는 동안 포화도에 따라 10%~35%의 증가량을 나타내고 있다. 온도변화에 의한 표면장력의 정량적인 증가량으로부터 예상되는 전단파 속도의 증가량보다 측정된 전단파속도의 증가량이 더 크게 나오는 원인은, 전단파의 속도증가가 표면장력뿐만 아니라, 온도변화에 의한 물의 부피 변화, 온도변화에 의한 공기의 부피 변화, 물에 녹아있는 용질의 영향, 그리고 접촉각(contact angle)의 온도 민감성(Nimmo and Miller, 1986; Lu et al., 1994; Grant and Bachmann, 2002)과 관련된 것으로 판단된다.

그림 5는 포화도에 따라 전단파 속도가 증가하는 경향이 다르게 나타남을 보여준다. 포화도가 2.5%, 5%인 시료는 시료조성과정에서 함유한 수분에 의해 표면장력의 효과가 온도변화 발생 초기에 나타나기 때문에 전단파 속도의 증가율이 서서히 감소하지만, 포화도가 10%, 20%, 40%, 60%, 80%인 시료는 온도변화에 따른 표면장력의 효과가 지속적으로 작용하여 전단파 속도가 증가하였다고 판단된다.

시료의 온도조건이 상이한 경우 산정한 포화도와 전단파 속도와의 관계를 그림 8에 나타내었다. 수증강사법으로 조성된 시료를 70°C의 온도에서 노건조시키면서 측정된 전단파 속도가 포화도 20% 이상에서 tamping 방법에 의해 조성한 시료의 전단파 속도보다 약 40m/s 정도 작게 산정되었다. 고온에서 노건조된 시료는 15°C에서 tamping 방법에 의해

조성된 시료보다 상대적으로 작은 표면장력이 작용하기 때문에 더 작은 전단파 속도가 산정된 것으로 사료된다.

5.2 시료조성영향

그림 8은 포화도에 따라 전단파 속도의 변화양상이 대략적으로 3단계로 구분되어짐을 보여준다. 첫번째는 전단파 속도가 약간 증가하는 포화도 100%~90% 구간이며, 두번째는 전단파 속도가 완만한 증가를 보이는 포화도 90%~20% 구간, 세번째 단계는 포화도 20%~0% 구간이다. 첫번째 단계와 두번째 단계에서는 수증강사 후, 건조시킨 시료와 각 포화도에서 탬핑방법으로 조성한 시료의 전단파 속도 경향은 유사하지만, 세번째 단계인 포화도 20%~0% 구간에서는 시료조성방법에 따라 전단파 속도의 경향이 달라진다. 이는 완전 포화된 시료가 건조되면서 발생하는 입자들의 움직임에 의한 접촉수의 증가와 잔류압축응력의 효과로 인한 강성의 변화 때문(조계춘과 이인모, 2002)인 것으로 알려져 있다. 또한 Tamping 방법에 의해 포화도를 조절한 시료에서 발생 가능한 간극수 및 입자들의 불균등한 분포 역시 시료조성방법에 의한 전단파 속도의 변화양상이 다르게 나타나는 것에 영향을 주었을 것으로 판단된다.

그림 4와 그림 7은 시료 조성방법에 따라 같은 포화도에서 전단파의 주파수가 다르게 나타남을 보여준다. Tamping 방법에 의해 조성된 포화도 20%인 시료의 공진주파수가 건조과정에 의해 포화도 20%인 시료의 공진주파수보다 작게 나타났다. 포화도 20% 이하에서 전단파의 공진주파수가 급격히 증가한 건조실험의 결과도 입자들의 접촉수 증가와 잔류압축응력의 효과로 인한 강성의 변화 때문인 것으로 판단된다.

6. 요약 및 결론

본 논문에서는 온도가 감소함에 따라 전단파 속도가 변화하는 원인을 분석하기 위해 포화도가 0%에서 100% 사이에 있는 아홉가지 시료를 조성한 후, 시료의 온도가 15°C에서 1°C까지 변하는 동안 전단파를 측정하였다. 시료의 전단파를 측정하기 위해 셀을 통한 직접적인 탄성파의 전파를 방지할 수 있는 셀을 제작하였다. 전단파 트랜스듀서로서 벤더 엘리먼트를 사용하여 크로스 홀 형태로 설치하였다. 벤더 엘리먼트가 설치된 위치와 같은 높이에 온도센서를 설치하여 시료의 온도변화를 측정하였다. 시료의 온도가 15°C에서 1°C까지 변하는 동안 포화도가 다른 각 시료에서 얻은 전단파 신호를 연속적으로 측정하였다. 또한 포화도가 다른 아홉가지 시료에서 측정된 전단파 속도와 비교하기 위해, 포화된 시료를 건조시키는 방법으로 포화도를 조절하면서 전단파를 측정하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

온도가 15°C에서 1°C로 감소함에 따라 포화도가 0%인 시료와 100%인 시료의 전단파 속도는 거의 일정한 반면, 포화도가 2.5%, 5%, 10%, 20%, 40%, 60%, 80%인 시료의 전단파 속도는 증가하였다. 포화도가 작은 시료는 온도변화가 발생하는 실험초기에 전단파 속도가 증가하지만, 포화도가 큰 시료는 표면장력의 효과가 지속적으로 작용하여 전

단과 속도가 넓은 온도범위에서 연속적으로 증가하였다.

포화도가 다른 아홉가지 시료의 전단과 속도를 일정온도에서 도시한 결과와 건조과정에 의해 포화도를 조절하면서 산정한 전단과 속도의 변화양상은 3단계로 구분된다. 1단계는 포화도가 100%~90%인 구간, 2단계는 포화도가 90%~20%인 구간, 3단계는 포화도가 20%~0%인 구간이다. 1단계에서 전단과 속도는 포화도가 감소하면서 증가하며, 2단계는 포화도에 상관없이 전단과 속도가 일정하다. 3단계는 포화도에 따라 전단과 속도가 가장 크게 변하는 구간이다. 3단계 구간에서 tamping 방법으로 조성한 시료의 전단과 속도는 포화도 5%에서 최고값을 나타내며 증가한 후, 포화도가 작아짐에 따라 급속히 감소한 반면, 건조과정에 의해 포화도를 조절한 시료의 전단과 속도는 3단계 구간에서 큰 폭으로 증가하였다. 이는 시료가 건조되면서 발생하는 입자의 움직임과 잔류압축응력의 영향으로 판단된다.

포화도가 20% 이상인 경우, 건조과정에 의해 포화도를 조절한 시료의 전단과 속도는 tamping 방법에 의해 조성한 시료의 전단과 속도보다 더 작게 나타났다. 70°C의 고온에서 시료가 건조되는 과정에서 전단파를 측정하였기 때문에 온도가 감소하면 증가하는 표면장력의 영향으로 tamping 방법으로 조성한 시료의 전단과 속도가 더 크게 나타났다고 판단된다.

온도가 감소함에 따라 표면장력의 영향으로 실험적으로 구한 전단과 속도의 증가량은 온도변화에 의한 물의 부피 변화, 공기의 부피 변화, 간극수에 녹아있는 용질의 영향, 온도에 민감한 접촉각(contact angle) 등의 영향을 받기 때문에, 이론적 방법에 의해 정량적으로 예상되는 전단과 속도의 증가량보다 크게 나타났다. 전단과 속도를 이용하여 미소변형구간에서 불포화토의 전단탄성계수를 산정하는 경우, 이와 같은 여러가지 원인으로 전단과 속도가 온도의 영향을 받기 때문에 이에 대한 영향을 반드시 고려해야한다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2011년도 건설기술혁신사업(11 기술혁신 E01)의 지원과 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2012-0005729)이며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- 박정희, 홍승서, 김영석, 이종섭(2012) 흙의 동결에 의한 모래-실트 혼합토의 탄성과 특성, **한국지반환경공학회 논문집**, 한국지반환경공학회, 제13권 제4호, pp. 27-36.
- 이세현, 서원석, 윤준웅, 김동수(2006) 모관흡수력 조절을 이용한 다짐 후 함수비 변화에 따른 노상토의 탄성계수 평가를 위한 시스템 개발, **한국도로학회 학술발표회**, 한국도로학회, pp. 85-94.
- 이종섭, 이창호 (2006), 벤더엘리먼트 시험의 원리와 고려사항, **한국지반공학회 논문집**, 한국지반공학회, 제22권 제5호, pp. 47-57.
- 조계춘, 이인모(2002) 탄성파를 이용한 흙의 특성연구, **한국지반공학회 논문집**, 한국지반공학회, 제18권 제6호, pp. 83-101.

- ASTM D854-05 (2006) Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, *Annual Book of ASTM Standard*.
- ASTM D4253-00 (2006) Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table, *Annual Book of ASTM Standard*.
- ASTM D4254-00 (2006) Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils Calculation of Relative Density, *Annual Book of ASTM Standard*.
- Bachmann, J. and Ploeg, R. R. (2002) A review on recent developments I soil water retention theory: interfacial tension and temperature effects, *Journal of plant nutrition and soil science*, Vol. 165, No. 4, pp. 468-478.
- Bishop, A. W. and Blight, G. E. (1963), Some aspects of effective stress in saturated and unsaturated soils, *Geotechnique*, Vol. 13, No. 3, pp. 177-197.
- Chahal, R. S. (1965) Effect To Temperature and Trapped Air on Matric Suction, *Soil sciene*, Vol. 100, No. 4, pp. 262-266.
- Cho, G. C. and Santamarina J. C. (2001), Unsaturated particulate materials-particle-level studies, *Journal of Geotech Geoenviron Eng*, ASCE, Vol. 127, No. 1 pp. 84-96.
- Christ, M. and Park, J. B. (2011), Determination of elastic constants of frozen rubber-sand mixes by ultrasonic testing, *Journal of cold regions engineering*, Vol. 25, No. 4, pp. 196-207.
- Dallavalle, J. M. (1943) Micrometric, Pitman, London.
- Gittens, G. J. (1968) Variation of Surface Tension of Water with Temperature, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 30, No. 3, pp. 406-412.
- Grant, S. A. and Bachmann, J. B. (2002), Effect of temperature on capillary pressure, *Geophysical monograph*, Vol. 129, pp. 199-212.
- Hopmans, J. W. and Dane, J. H. (1986), Temperature Dependence of Soil Water Retention Curves¹, *Soil Science Society of America journal*, Vol. 50, No. 3, pp. 562-567.
- IAPWS (1994) International Association for the Properties of Water and Steam Release on Surface tension of Ordinary Water Substance.
- Kayser, W. B. (1975) Temperature Dependence of the Surface Tension of Water in Contact with Its Saturated Vapor, *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 56, No. 3, pp. 622-627.
- Kramer, S. L. (1996) Geotechnical earthquake Engineering, Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River.
- Lechman, J. and Lu, N. (2008) Capillary Force and Water Retention between Two Uneven-Sized Particles, *Journal of Engineering mechanics*, ASCE, Vol. 134, No. 5, pp. 374-384.
- Lee, J. S. and Santamarina, J. C. (2005a) Bender Elements: Performance and Signal Interpretation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 131, No. 9, pp. 1063-1070.
- Lee, J. S. and Santamarina, J. C. (2006) Discussion "Measuring Shear Wave Velocity Using Bender Elements" By Leong, E. C., Yeo, S. H., and Rahardjo, H. (*Geotechnical Testing Journal*, Vol. 28, No. 5), *Geotechnical Testing Journal, ASTM*, Vol. 29, No. 5, pp. 439-441.
- Likos, W. J. (2009), Pore-Scale Model for Water Retention in Unsaturated Sand, *Proceeding of the 6th international conference on Micromechanics of Granular Media*, pp. 907-910.
- Liu, H. H. and Dane, J. H. (1993), Reconciliation between Measured and Theoretical Temperature Effects on Soil Water Retention Curves, *Soil Science Society of America journal*, Vol. 57, No. 5, pp. 1202-1207.
- Lu, T. X., Biggar, J. W., and Nielsen, D. R. (1994), Water Movement in Glass Beads Porous Media, 2., Experiments of Infiltration and Finger Flow, *Water Resour. Res*, Vol. 28, pp. 3283-3290.

- Molenkemp, F. and Nazemi, A. H. (2003) Interactions between two rough spheres, water bridge and water vapor, *Geotechnique*, Vol. 53, No. 2, pp. 255-264.
- Nimmo, J. R. and Miller, E. E. (1986) The temperature dependence of isothermal moisture vs. Potential characteristics of soils, *Soil Science Society of America journal*, Vol. 50, No. 5, pp. 1105-1113.
- Roesler, S. K. (1979) Anisotropic Shear Modulus due to Stress Anisotropy, *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 105 No. 7, pp. 871-880.
- Romero, E., Gens, A., and Llotet, A. (2001) Temperature effects on the hydraulic behavior of an unsaturated clay, *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 19, pp. 311-322.
- Santamarina, J. C., Klein, K. A., and Fam, M. A. (2001) *Soils and Waves - Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring*, Wiley, New York.
- Sawangsurriya, A., Fall, M., and Fratta, D. (2008), Wave-Based Techniques for Evaluating Elastic Modulus and Poisson's Ratio of Laboratory Compacted Lateritic Soils, *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 26, No. 5, pp. 567-578.
- 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.
- Wilkinson, G. E. and Klute, A. (1962) The Temperature Effect on the Equilibrium Energy Status of Water Held by Porous Media, *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 26, No. 4, pp. 326-329.
- (접수일: 2012.8.9/심사일: 2012.9.12/심사완료일: 2012.9.28)