

[기술보고]

부산 신항 점토의 전단파 특성 연구: 전단파 속도 계수 추정 사례

이종섭¹ · 김영석² · 홍승서² · 윤형구^{3*}

¹고려대학교 건축사회환경공학과, ²한국건설기술연구원, ³대전대학교 지반방재공학과

[Technical Report]

Characterization of Shear Waves in Busan New Port Clay: Estimation of the Coefficients of Shear Wave Velocity

Jong-Sub Lee¹, Youngseok Kim², Seungseo Hong², and Hyung-Koo Yoon^{3*}

¹School of Civil and Architectural Engineering, Korea University

²Korea Institute of Construction and Technology

³Department of Geotechnical Disaster Prevention, Daejeon University

전단파 속도는 그 자체로 지층의 구조적인 특성을 확인할 수 있으며 상관관계 식들을 활용하면 타 공학적인 지표로 도출할 수 있다. 본 연구에서는 전단파 속도의 활용성에 발맞춰 부산 점토의 전단파 속도 관련 계수를 산정하는 것이다. 계수를 산정하기 위하여 실내 실험이 수행되었다. 실내 실험은 10 m, 12 m, 15 m, 20 m, 22 m, 25 m, 30 m 그리고 31 m에서 채취한 시료를 활용하였으며 압밀실험으로 유효응력과 전단파 속도 간의 관계를 도출하였다. 그 관계는 선형적으로 제시된 연구와 유사하게 비선형적인 특성을 보여주었으며 최종적으로는 전단파 속도에 활용 가능한 계수 값들을 도출하였다. 도출된 상수 값은 일정한 범위내에 속하는 것으로 나타났으며 두 상수 간의 관계도 제시하였다. 본 연구에서 제시한 계수 값들은 부산 점토의 참고 값이 될 것으로 판단되며, 향후 전단파 속도를 이용하여 공학적인 지표 전환 시 다양하게 활용 될 것으로 판단된다.

주요어 : 부산점토, 계수, 압밀 실험, 유효응력, 전단파 속도

Shear wave velocity is widely used as an parameter for investigating subsurface characteristics and for obtaining the design parameters based on theoretical equations. This study seeks to estimate the coefficient of shear wave velocity in Busan clay via laboratory tests. Eight specimens were extracted at depths of 10, 12, 15, 20, 22, 25, 30, and 31 m. The specimens were subjected to the consolidation test to determine the relationship between effective stress and shear wave velocity. The relationship shows a non-linear trend and is similar to the results of a previous study. The coefficient shows constant coverage and a relationship between α and β is suggested. The results demonstrate that this coefficient could be used as a reference value to determine engineering parameters based on the shear wave velocity.

Key words : Busan clay, Coefficient, Consolidation test, Effective stress, Shear wave

*Corresponding author: hyungkoo@dju.ac.kr

© 2013, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

탄성파는 압축파와 전단파로 구분되며 포화된 매체의 경우 압축파는 입자 매질 뿐만 아니라 액체를 함께 전파하는 특성을 가지고 있어 대상체 평가에 부적합한 것으로 알려져 있다. 하지만 전단파는 포화된 매체라도 입자의 매질만을 전파하므로 포화된 시료의 특성 관찰에 다양하게 활용되고 있다(Ohta and Goto 1978; Castagna et al. 1985). 전단파는 파의 전파 방향과 입자의 움직임이 서로 직각인 특성을 보이며, 이와 같은 특성으로 대상 매질의 밀도 값을 이용하여 미소변형을 구간($\gamma < 10^{-3}\%$)의 전단탄성계수를 쉽게 유추할 수 있다(Sasitharan et al. 1994; Robertson et al. 1995; Shibuya et al. 1997). 전단탄성계수는 동하중에 따른 구조물 변형을 간접적으로 예측할 수 있는 설계상수로 활용되고 있다. 또한 전단파 속도는 유효응력과 밀접한 관계를 가지고 있어 지반조사를 통하여 현장의 유효응력 분포를 산정할 수 있으며 이론값과의 비교를 통하여 현장의 비이상적인 구조적 특성을 검토할 수 있다. 따라서 다음과 같은 연구자들에 의하여 전단파 속도 관련된 다양한 연구가 수행되고 있다.

Mayne and Rix (1993)은 전단파 속도를 이용하여 미소변형을 구간의 최대 전단탄성계수를 도출하였으며 동일 지역에서 측정한 콘 관입 실험의 선단저항력과 관계를 비교 및 고찰하였다. Andrus and Stokoe (2000)는 액상화 평가 기법에 전단파 속도를 활용하여 더욱 정밀하게 액상화를 예측할 수 있는 방법을 제시하였다. Robertson et al. (1986)과 Hegazy and Mayne (2006)은 현장 데이터를 활용하여 전단파 속도와 콘 관입 실험의 저항력을 매칭 시켰다. 또한 Yoon and Lee (2010)은 관입형 전단파 탐사 프로브를 개발하여 연약지반에 10 cm 내외의 상세한 전단파 속도 주상도를 도출하였다. 이와 같이 현장에서 측정한 데이터들 간의 상관관계 혹은 단순한 주상도 제시를 벗어나 전단파 속도를 이용하여 설계계수 획득 및 입자 매질의 거동에 관한 연구도 수행되었다. Truong et al. (2009)는 전단파를 이용하여 지반이 고결화 되어 가는 특성을 예측하고 분석하였다. Lee et al. (2010)은 모래의 대체 물질을 연구하고자 모래에 페타이어 재질의 고무를 섞어 함량에 따른 특성을 전단파 속도로 고찰하였다. 또한 Yoon et al. (2011)은 전단파 속도를 이용하여 연약점토의 선형압밀 추정 방법에 대해 연구하였으며 기존의 Casagrande 방법외에 대체 방법이 될 수 있는 가능성을 시사하였다.

본 연구에서는 현재 지반공학적인 관점에서 전단파 속도 관련 연구가 활발히 진행되고 있는 것을 고려하여 전단파 속도와 유효응력간의 관계를 고찰하고자 한다. 전단파 속도와 유효응력간의 관계를 연결시키기 위해서는 기본적으로 2개의 상수 값이 필요하며 이는 대상 매질의 특성에 따라 서로 다른 특성을 보인다. 따라서 본 논문에서는 부산 점토 지역을 연구 대상으로 결정하였으며 현장에서 채취한 시료를 이용하여 실내 압밀 실험을 수행하였다. 수행한 결과를 토대로 부산 지역의 상수 값을 도출하였으며 이론적으로 결정되어 있는 값과 비교 및 고찰하여 본 연구의 신뢰성을 검증하였다.

전단파 속도와 유효응력의 관계

연속체의 경우 매질을 구성하는 흙 입자의 강성은 유효응력으로 결정되며 이때 강성은 전단파 속도의 함수로 이루어진다. 결국 강성과 유효응력의 관계 및 강성과 전단파 속도 관계를 활용하면 최종적으로 식 (1)과 같은 전단파 속도와 유효응력 간의 관계를 도출할 수 있다.

$$V_s = \alpha(\sigma_v')^\beta \quad (1)$$

여기서, V_s 는 전단파 속도, α 와 β 는 각각 packing 형태 및 접촉 특성에 의해 결정되는 계수 그리고 σ_v' 는 대상 매질의 연직 유효응력을 의미한다. 식 (1)은 전단파 속도와 유효응력의 관계가 비례적인 선형 관계가 아닌 α 와 β 에 의해 좌우된다는 것을 보여준다.

전단파 속도 계수

α 는 매질의 패킹(packaging)에 의하여 결정되는 상수로 주로 간극률, 입자를 구성하는 재료적인 특성, 입자간의 접촉 거동 그리고 구조의 변화등에 의하여 영향을 받는다. 반면에 β 는 입상매질(Particulate material)의 특성 즉, 입자 크기, 입자 모양 그리고 입자들의 구조적인 변화 양상에 기인한다. 유효응력의 변화와 관계없이 일정한 전단파 속도가 나타나는 이상적인 고체의 경우는 β 값이 0으로 알려져 있다. 이는 유효응력 증가가 더 이상 입자사이의 접촉면을 변화시키지 못해 전단파 속도의 영향이 작은 것을 의미하며 실제적으로 고결된 흙의 경우 β 는 거의 0에 가까운 값을 보인다. 또한 등가유효응력은 입자간의 전기적인 힘을 발생시켜 전기적인 힘을 무시할 수 있는 탄성적 구형입자 보다 β 값은 더욱 커지게 된다. Santamarina et al. (2001)은 β 값을

Table 1. Soil properties estimated from β values (Santamarina et al. 2001).

β	Soil properties
$\beta=0$	Ideal solid
$\beta \approx 0$	Cemented soil
$\beta=1/6$	Hertzian contact
$\beta=1/4$	Cone-to-plane contact
$\beta=3/4$	Contact governed by Coulombian force
$\beta=$ variable	Variable with interparticle distance for contact varying with electrical DLVO force

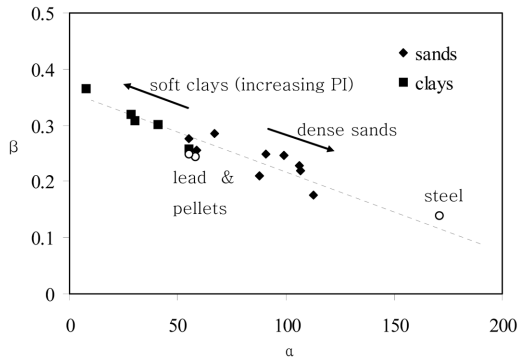


Fig. 1. Relation between coefficients α and β according to Santamarina et al. (2001).

다음과 같이 Table 1로 정리하여 활용하고 있다.

Santamarina et al. (2001)은 Nevada 모래를 이용하여 Fig. 1과 같이 α 와 β 값의 관계를 도시하였다. 두 계수의 관계는 일정한 값의 y절편을 가지고 있는 1차 함수로 구성되는 것을 알 수 있으며 입자들이 단단하고 다짐 정도가 클수록 α 값은 커지며 β 값은 작아지는 경향을 보인다. 또한 모래와 점토의 실험값을 이용하여 소성이 증가할수록 β 값은 커지고 α 값은 작아지는 경향도 함께 보여준다. 국내 지역에서는 Chang (2005)가 인천 지역에서 α 와 β 값이 각각 70~102 범위 그리고 0.169~0.274 범위라고 제시하고 있다.

시료 채취

부산지역은 경상분지의 밀양지괴 내 남동단부에 해당되며, 비행성 퇴적층인 경상누층군인 퇴적암과 관입 분출한 유천층군의 화산암류가 분포하고 있다. 또한 백악기 최후인 심성암인 불국사 화강암류 및 맥암류 그리고 제 4기의 퇴적층과 함께 이루어져 있다.

부산지역의 전단파 속도 계수의 경향을 알기 위하여 Fig. 2와 같이 부산 신항 북컨테이너 현장을 본 논문의



Fig. 2. Study area.

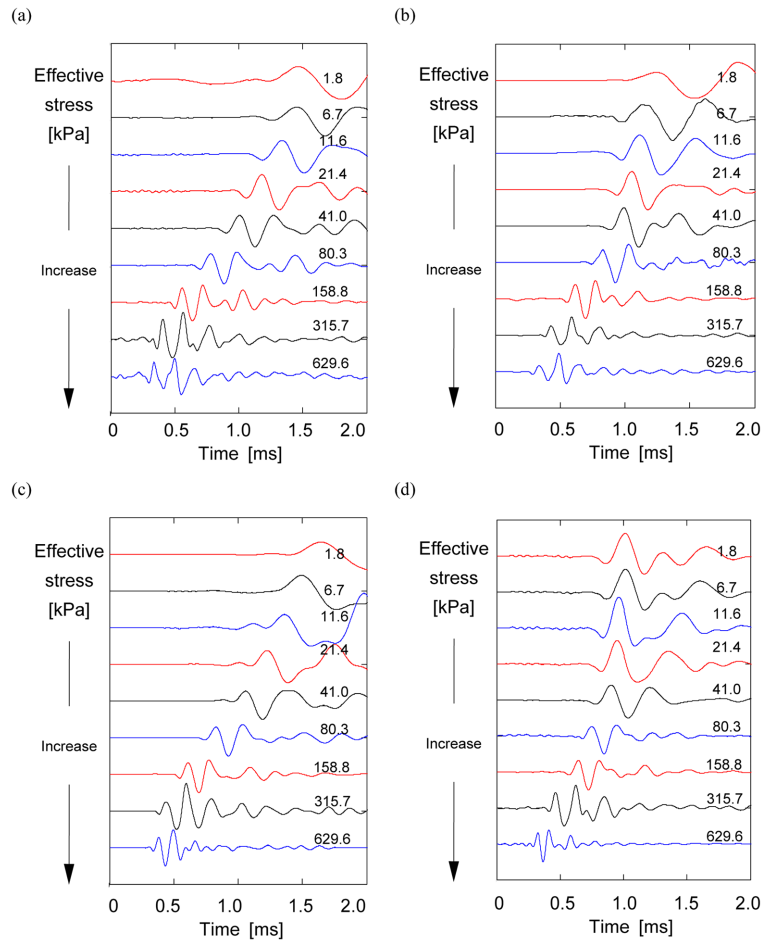
대상 지역으로 선정하였다. 시료 채취는 지역의 다양성을 반영하고자 서로 다른 시추공에서 획득하였으며 채취한 지역은 모두 5 m 내외의 반경에 포함된다. 결국 채취한 시료 깊이는 각각 10 m, 12 m, 15 m, 20 m, 22 m, 25 m, 30 m 그리고 31 m이며, 연약지반 시료 채취에 활용되고 있는 쉘비 튜브를 이용하였다. 시료 채취 후에는 간극수의 증발 및 시료 교란을 방지하도록 파라핀을 이용하여 밀봉하였으며, 시료를 안착 시킬 수 있는 전용 시료 보관통을 제작하여 운반중에도 시료 교란의 효과를 최소화시킬 수 있도록 유도하였다. 실험실로 운반한 시료는 먼저 기본 물성치 실험을 진행하였으며 결과값은 Table 2에 정리하였다.

실내 실험

본 연구에서는 부산 지역에서 채취한 시료를 이용하여 전단파 속도 계수를 추정하고 문헌 값과 비교 및 고찰하고자 실내 실험을 수행하였다. 유효응력 변화에 따

Table 2. Soil properties.

Depth [m]	Water content [%]	Specific Gravity	Plastic Limit [%]	Liquid Limit [%]	Plastic Index	Unit Weight [kN/m ³]
10	68.5	2.70	28.5	68.0	39.5	16.8
12	62.6	2.70	26.7	63.6	36.9	16.9
15	58.5	2.70	27.3	53.5	26.2	17.7
20	70.1	2.67	43.2	70.0	26.8	17.4
22	72.3	2.71	31.0	72.1	41.1	17.1
25	64.5	2.70	35.4	65.2	29.8	16.9
30	51.5	2.70	24.9	52.8	27.9	16.8
31	49.5	2.70	26.2	55.2	29.0	18.3

**Fig. 3.** Measured shear wave profiles with effective stress at depths of (a) 10 m, (b) 20 m, (c) 25 m, and (d) 30 m.

른 전단파 속도 변화를 관찰하기 위하여 응력 변화를 효율적으로 가할 수 있는 압밀 실험을 선택하였다. 기존

압밀 실험은 응력변화에 따라 전단파 속도를 측정할 수 없어 압밀 실험 셀을 다소 개량하여 전단파 속도를 측

정할 수 있도록 하였다. 따라서 개량된 압밀 셀의 체원은 내경 74 mm, 높이 63 mm 그리고 두께는 16 mm이며, 상재하중이 모두 유효응력으로 바뀌는 시간을 단축하기 위하여 양면배수 조건을 적용하였다. 일반적으로 압밀 실험은 ASTM에서 규정하고 있는 방법을 준수하지만, 본 실험은 전통적인 압밀 실험과는 거리가 멀고 유효응력 변화에 의한 전단파 속도만을 측정하여 계수값을 분석하고자 하였다. 따라서 불필요한 침하량 측정은 제외하였으며 전단파 속도 측정만을 수행하였다.

전단파는 시중에 다양하게 판매되고 있는 센서 중 벤더 엘리먼트(Bender Element)를 활용하였다. 벤더 엘리

먼트는 실험 목적에 맞게 적당한 크기로 가공하여 사용할 수 있으며, 시료 내부에 안착시켜 파의 전파 특성을 더욱 효율적으로 조절할 수 있는 장점이 있다. 벤더 엘리먼트는 압전소자의 특성을 가지고 있는 재질로 전기 신호를 물리적인 파형으로 변환 할 수 있으며 그 반대로 가능하다, 따라서 발신한 전기로 시료에 미소변형을 발생시키고 이를 통해 발생한 진동은 다시 전기신호로 수신 할 수 있다. 전기 신호를 가하기 위하여 벤더 엘리먼트에 케이블을 연결하였으며 이때 사용한 케이블은 주변의 전기적인 잡음을 억제 시키도록 그라운드가 함께 구축된 동축(Coaxial cable)을 활용하였다. 포화된 시

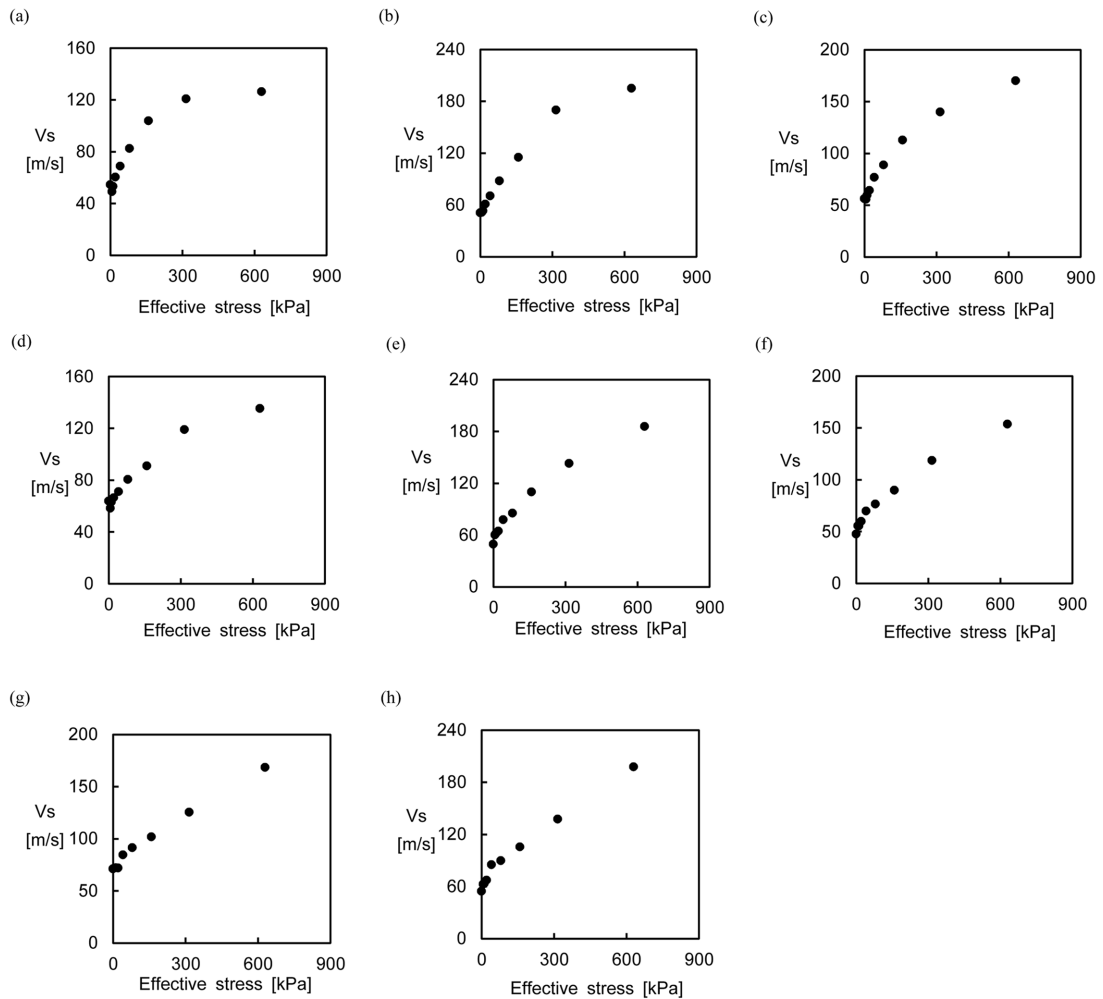


Fig. 4. Results of laboratory tests on samples from depths of (a) 10 m, (b) 12 m, (c) 15 m, (d) 20 m, (e) 22 m, (f) 25 m, (g) 30 m, and (h) 31 m. V_s = shear wave velocity.

료에 의한 전기적인 합선을 방지하고자 벤더 엘리먼트와 케이블 연결 부분에는 에폭시로 방수를 하였다. 또한 주변의 전기적인 잡음을 추가적으로 제거하고자 전도성 페인트(Silver paint)도 활용하였다. 벤더 엘리먼트에 대한 내용은 본 논문과 다소 거리가 있어 생략하고자 하며 자세한 내용은 Lee and Santamarina (2005)를 참고하기 바란다. 진단파를 측정하기 위한 주변 장치는 노트북을 제외하고 신호 발생기(Agilent 33220A), 필터-신호 증폭기(Krohn-Hite 3364) 그리고 오실로스코프(Agilent 54624A)이다. 입력파와 주파수는 일반적으로 실내 실험에서 사용하고 있는 구형파(Square wave)와 20Hz를 적용하였다. 구형파 적용 후에는 제작한 벤더 엘리먼트와 시료 상태에 적절한 공진주파수(Resonant frequency)를 판단하여 입력파를 사인파(Sine wave)로 재입력하여 진단파를 측정하였다.

결 과

총 8단계 (0~629 kPa)의 유효응력을 변화시키며 수행한 실내실험 결과는 다음과 같다. Fig. 3은 각 단계에서 측정된 진단파 주상도를 보여주며 초동 시간은 유효응력이 증가할수록 점차 작아지는 것을 관찰 할 수 있다. 이와 같은 이유는 식 (1)에서도 언급하였듯이 유효응력이 증가할수록 진단파 속도도 유사한 경향으로 증가하는 것을 보여준다.

Fig. 4는 진단파 주상도에서 도출한 초기도달 시간과 벤더 엘리먼트의 이동거리를 이용하여 계산한 진단파 속도와 유효응력간의 관계를 보여준다. 각 시료는 샘플링에 의한 응력이력 현상과 실험 기구 안착등에 의해서 발생하는 교란 효과로 초기 진단파 속도(유효응력 = 0 kPa)는 다소 차이가 나지만 거의 유사하게 약 50 m/s 부근에서 시작하는 것을 알 수 있다. β는 진단파 속도와 유효응력의 관계가 선형적인 증가가 아닌 시료에 충분한 유효응력이 가해져 고결화가 진행되었을 경우에는 거의 “0”에 가까운 값을 보인다. 따라서 유효응력의 6 단계 이후 부터는 진단파 속도의 증가량이 다소 작아지는 것을 관찰할 수 있다. 심도 22 m, 25 m, 30 m 그리고 31 m의 경우에는 아직 충분한 고결화가 발생하지 않아 (β ≠ 0) 진단파 속도가 증가하는 것으로 나타났으며 이와 같은 이유는 심도가 깊을수록 선행압밀하중이 증가하여 고결화가 발생하기 위해서는 더욱 큰 유효응력 값이 필요한 것을 보여준다.

Table 3. Coefficients (α and β) of Busan clay.

Depth [m]	α	β
10	19.234	0.394
12	17.699	0.415
15	25.430	0.276
20	27.302	0.243
22	18.693	0.384
25	20.402	0.321
30	28.676	0.277
31	23.219	0.325

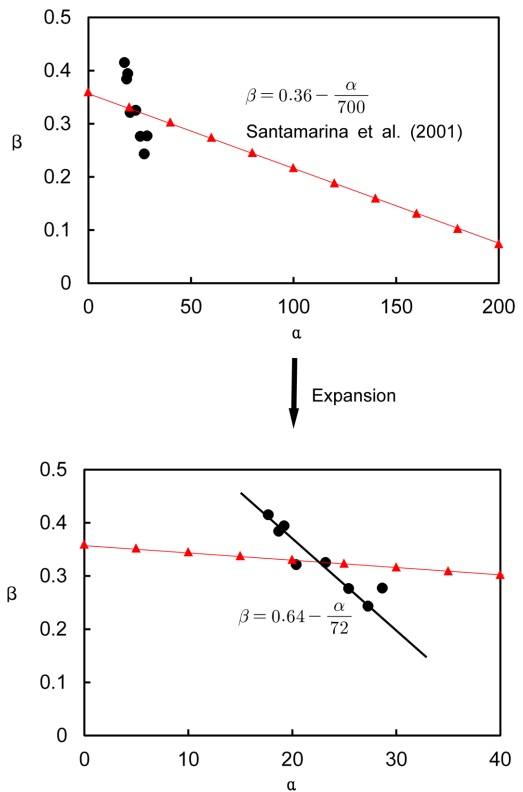


Fig. 5. Relationship between the coefficients α and β. The solid triangles represent the results of Santamarina et al. (2001) and the solid circles indicate the results for Busan clay.

고 찰

진단파 속도 계수는 수학 프로그램인 Mathcad의 시행착오 함수를 활용하여 분석하였으며 결과 값을 Table 3에 나타내었다. 입자의 패킹과 밀접한 관련이 있는 α

는 부산 점토 지역에서 약 17.699~28.676의 범위를 보여지며 입상매질에 영향을 받는 β 값은 약 0.243~0.415로 나타났으며 분석된 전단파 속도 계수 값들 간의 관계는 Fig. 5와 같다. 일반적으로 α 와 β 의 관계는 식 (2)와 같이 표현된다(Santamarina et al. 2001).

$$\beta = 0.36 - \frac{\alpha}{700} \quad (2)$$

따라서 Fig. 5에는 본 실험을 통해서 도출한 결과와 기존 관계식도 함께 도시하였다. 하지만 본 연구에서 나타난 결과 값은 식 (3)과 같이 기존 관계식과 달리 기울기가 더욱 커지고 y 절편 값도 증가하는 경향으로 나타났다. 이와 같은 이유는 식 (2)가 국내 지반공학적인 특성이 아닌 타 지역의 거동을 반영하는 것에 기인된다고 판단된다. 물론 국내의 경우도 부산, 인천 그리고 광양 등의 다양한 연약지반의 특성에 맞게 α 와 β 의 관계식이 다소 차이가 있을 것으로 예측되지만 본 연구에서는 국내 연약지반 중 부산 점토에 대표적인 관계식을 제시한 것에 의의가 있다.

$$\beta = 0.64 - \frac{\alpha}{72} \quad (3)$$

Santamarina et al. (2001) 연구에 따르면 소성이 클수록 입자간의 접촉 거동이 작아져 α 값은 감소하고 고결화에 큰 영향을 받는 β 값은 증가하는 것으로 알려져 있다. 본 연구 대상 지역인 부산점토에서도 유사한 경향이 나타났으며 상대적으로 소성지수가 약 30 이상 되는 10 m, 12 m 그리고 22 m 깊이에서는 β 값의 범위가 0.384~0.415로 타 심도에 비해 큰 값을 보이는 것으로 나타났다. 또한 반비례 관계를 보이고 있는 α 값은 10 m, 12 m 그리고 22 m 깊이에서 17.699~19.234 범위를 보이며 타 심도의 α 값이 대략 20 이상인 것을 고려할 때 소성이 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 국내 대표 연약지반인 부산 지역의 전단파 속도와 유효응력 관계를 도출하였으며 이와 같은 결과는 물리탐사 기법인 탄성과 탐사를 활용하여 유효응력을 넘어 다양한 지반 설계정수 예측에 활용될 것으로 판단된다.

결 론

전단파는 압축파와 달리 입자 자체의 거동 특성을 반영하는 장점이 있어 다양한 지반공학적인 측면에 활용

되고 있다. 따라서 전단파와 다른 계수들간의 상관관계 식들이 제시되고 있으며 본 논문에서는 전단파와 유효응력간의 관계에 초점을 맞춰 연구를 진행하였다. 전단파 속도와 유효응력 간의 관계는 실험적으로 도출해야 하는 α 와 β 상수가 존재한다. 이 상수는 지반을 구성하는 입자 형상과 구조적인 특성에 따라 상이한 값을 보이는 것으로 알려져 있으며 국내 지반에 적합한 상수 값을 제시하고자 실내 실험을 진행하였다. 대상 지반은 국내 대표적 연약지반인 부산 점토를 활용하였으며 심도 10 m, 12 m, 15 m, 20 m, 22 m, 25 m, 30 m 그리고 31 m에서 채취한 시료를 이용하였다. 실내 실험결과 전단파 속도와 유효응력간의 관계를 제시하였으며 수학 프로그램인 Mathcad를 이용하여 α 와 β 상수 값을 제시하였다. 도출된 α 와 β 값은 일정한 범위 값을 보였으며 이를 통해 전단파 속도로 유효응력 평가의 가능성을 제시하였다. 또한 α 와 β 값 간의 상관관계도 함께 도시하여 기존 연구결과와 비교하였다. 비교 결과 국내 지반은 기존 연구결과 식에 비하여 기울기는 크고 절편 값은 작게 나타났다. 본 연구에서 수행된 결과는 부산 지역의 점토 지반에 적합한 α 와 β 값을 제시하였으며, 추후 이를 활용한다면 전단파 속도와 타 지반 설계 정수와의 상관관계 분석에 초석이 될 수 있음에 의의가 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(극한지 지반 평가 및 극한환경 모니터링 시스템 개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Andrus, R. and Stokoe, K., 2000, Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity, *Journal of Geotechnical Geoenvironmental Engineering*, 126(11), 1015-1025.
- Castagna, J., Batzle, M., and Eastwood, T., 1985, Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks, *Geophysics*, 50(4), 571-581.
- Chang, I. H., 2005, Evaluation of the consolidation state and strength of soft clay using shear waves, Master's thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 669.
- Hegazy, Y. A. and Mayne, P. W., 2006, A global statistical correlation between shear wave velocity and cone penetration data, *Site & Geomaterial Characteriza-*

- tion (GSP 149), Proceeding of Geoshanghai, ASCE, 243-248.
- Lee, C., Truong, Q. H., and Lee, J. S., 2010, Cementation and bond degradation of rubber-sand mixtures, *Canadian Geotechnical Journal*, 47(7), 763-774.
- Lee, J. S. and Santamarina, J. C., 2005, Bender elements: Performance and Signal Interpretation, *Journal of Geotechnical Engineering*, 131(9), 1063-1070.
- Mayne, P. W. and Rix, G. J., 1993, G_{max} - q_0 relationship for clays, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 16(1), 54-60.
- Ohta, Y. and Goto, N., 1978, Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristic soil indexed, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 6(2), 167-187.
- Robertson, P., Campanella, R., Gillespie, D., and Rice, A., 1986, Seismic CPT to measure in situ shear wave velocity, *Journal of Geotechnical Geoenvironmental Engineering*, 112(8), 791-803.
- Robertson, P., Sasitharan, S., Cuning, J., and Sego, D., 1995, Shear-wave velocity to evaluate in-situ state of Ottawa Sand, *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(3), 262-273.
- Santamarina, J. C., Klein, K. A., and Fam, N. A., 2001, *Soils and Waves*, John Wiley & Sons, 254-260.
- Sasitharan, S., Robertson, P. K., and Sego, D. C., 1994, Sample disturbance from shear wave velocity measurements, *Canadian Geotechnical Journal*, 31(1), 119-124.
- Shibuya, S., Hwand, S. C., and Mitachi, T., 1997, Elastic shear modulus of soft clays from shear wave velocity measurement, *Geotechnique*, 47(3), 593-601.
- Truong, Q. H., Eom, Y. H., Byun, Y. H., and Lee, J. S., 2009, Characteristics of elastic waves according to cementation of dissolved salt, *Vadose Zone Journal*, 9(3), 662-669.
- Yoon, H. K. and Lee, J. S., 2010, Field velocity resistivity probe for estimating stiffness and void ratio, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(12), 1540-1549.
- Yoon, H. K., Lee, C., Kim, H. K. and Lee, J. S., 2011, Evaluation of preconsolidation stress by shear wave

velocity, *Smart Structures and Systems*, 7(4), 275-287.

원고접수일: 2013년 10월 11일

수정본채택: 2013년 11월 5일

게재확정일: 2013년 11월 8일

이종섭

고려대학교 건축사회환경공학부

136-701 서울시 성북구 안암로 145 고려대학교

Tel: 02-3290-3325

E-mail: jongsu@korea.ac.kr

김영석

한국건설기술연구원 Geo-인프라 연구실

411-712 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283

Tel: 031-910-0371

E-mail: kimys@kict.re.kr

홍승서

한국건설기술연구원 Geo-인프라 연구실

411-712 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283

Tel: 031-910-0403

E-mail: sshong@kict.re.kr

윤형구

대전대학교 지반방재공학과

300-716 대전시 동구 용운동 96-3

Tel: 042-280-2578

E-mail: hyungkoo@dju.ac.kr