

[기술보고]

Field Velocity Probe를 활용한 연약지반 압밀 평가

이종섭¹ · 김영석² · 홍승서² · 윤형구^{3*}

¹고려대학교 건축사회환경공학과, ²한국건설기술연구원, ³대전대학교 지반방재공학과

[Technical Report]

Estimation of Consolidation in Soft Clay by Field Velocity Probe

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

Field Velocity Probe (FVP)는 관입형 진단과 탐사 장비로 다양한 현장의 적용성이 날로 증가하고 있다. 본 연구에서는 FVP의 활용성을 증대시키는 측면으로 FVP를 이용하여 연약지반의 압밀 특성을 평가하는 것이다. 대상지반은 국내 대표 연약지반인 인천 송도 지역이며 실내압밀 실험을 수행하기 위하여 시료를 3 m와 6 m에서 채취 하였다. 채취한 시료는 개량된 압밀 시료기에 안착시켜 유효응력 변화에 따른 진단과 속도 경향성을 분석하였다. 현장의 진단과 속도는 FVP를 이용하였으며 매 심도 20 cm 간격으로 상세한 속도 주상도를 도출하였다. 동일 유효응력 조건에서 도출한 실내 진단과 속도와 현장 진단과 속도를 비교하여 연약지반의 압밀 상태를 평가 하였으며 3 m 구간은 과압밀 그리고 6 m 지역은 압밀 진행중인 상태로 나타났다. 본 연구에서는 FVP가 연약지반의 압밀 평가에도 활용될 수 있음을 보여주며 기존 방법의 대체 방법으로 활용성 될 것으로 판단된다.

주요어 : 실내 압밀 실험, 압밀, 진단과, Field Velocity Probe

The Field Velocity Probe (FVP) has been widely applied to determine the various characteristics of soils. This study seeks to estimate soil consolidation characteristics using an FVP and to increase its application in the field. The specimens were extracted from depths of 3 and 6 m at the study site, an area of soft clay in Incheon. In laboratory testing, the specimens were placed in an improved oedometer cell to measure shear wave velocity, and statistical analysis was performed to compare the results of effective stress and shear wave velocity. FVP enables increased resolution in the field because it measures the shear wave velocity every 20 cm. To estimate the condition of consolidation, we compared the results of shear wave velocities between those obtained in the laboratory and those in the field. The field conditions are used to analyze overconsolidated and normally consolidated soils at depths of 3 and 6 m, respectively. The results show that FVP is a suitable method for estimating the degree of consolidation.

Key words : Oedometer test, Consolidation, Shear wave, Field Velocity Probe

*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

지반의 내부 혹은 외부에 시공되는 구조물은 안정성과 사용성이 중요한 인자로 작용하며 이는 지반의 변형과 밀접한 연관이 있다. 연약지반은 압축성이 큰 점토 및 실트로 구성되어 있어 변형에 대한 피해가 상당히 크다(Gibson et al. 1981; Mesri and Choi 1985; Almeida et al. 2000). 따라서 구조물 시공시 변형(침하)에 대한 안정성을 사전에 평가하고 방지 해야 한다. 하중에 의한 지반의 침하량은 흙의 삼상 구조에서 간극의 감소량과 같으며 공기의 경우 즉시 배출되지만 물은 투수계수에 기인하므로 지층에 따라 다양한 침하 특성을 보이게 된다.

지반의 간극수는 일반적으로 정수압(hydrostatic) 상태의 조건하에 정상흐름(steady flow) 거동을 보인다. 하지만 지반에 하중이 가해지면 추가의 간극수압이 발생하여 정상흐름 상태의 수압보다 더 큰 수압이 작용하게 된다. 이를 과잉간극수압(hydro excess pore water pressure)이라고 하며 과잉간극수압의 소산 정도에 따라 연약지반의 압밀진행 정도를 나타낼 수 있다. 즉, 압밀도는 소산된 과잉간극수압과 초기과잉간극수압간의 관계를 통하여 정의된다(Holtz and Kovacs 1981). 따라서 압밀도를 나타내기 위해서는 일반적으로 간극수압 측정계기를 이용하여 현장에서 측정한 값으로 결정할 수 있다. 또한 정규압밀 및 과압밀의 압밀 상태를 파악하고 그에 따른 설계정수수를 확보하고자 다양한 연구도 수행되고 있다. Kim et al. (2002)과 Kwon et al. (2002)는 과압밀 점토를 이용하여 다양한 압밀 특성을 분석하였으며 Ha et al. (2005)는 피에조 콘을 활용하여 대상 지반의 압밀특성을 평가하였다.

본 연구에서는 기존에 개발된 Field Velocity Probe (FVP)를 이용하여 측정한 전단파 속도로 연약지반의 압밀 특성을 평가할 수 있는 방법을 제시하고자 한다. 이는 실내 및 현장 실험에서 측정한 전단파 속도를 활용하는 방법으로 실내 실험과 현장 실험에 대한 내용으로 구성된다. 뿐만 아니라 고찰 부분을 별도로 구성하여 압밀도 평가 방법의 원리와 결과를 추가적으로 서술하고자 하였다.

전단파 속도를 이용한 압밀도 평가

압축파가 입자와 유체를 동시에 전파하는 특성과 달리 전단파는 입자의 접촉면만을 통과하는 특징이 있어

전단파는 입자의 특성을 관찰하기 위하여 효율적인 신호로 알려져 있다. 또한 전단파는 전파시 10⁻³% 범위 내의 (미소변형 구간) 변형을 발생시켜 국부적인 영역의 거동 특성을 반영할 수 있는 장점이 있다 (Lee and Santamarina 2005; Yoon et al. 2011).

전단파 속도는 다음의 식 (1)과 같이 유효응력의 함수로 구성되어 있으며 선형적인 관계는 아니지만 전단파 속도와 유효응력은 거의 비례관계로 설명되고 있다. 이와 같은 이유는 전단파 속도가 직접적으로 강도와 연관되는 단순한 선형 관계가 아닌 지반의 특성 그리고 이력 등의 다양한 특성에 영향을 받는 것을 암시한다. 연약지반의 압밀현상은 외부하중에 의하여 발생한 과잉간극수압이 소산되면서 유효응력이 증가되는 과정으로 설명할 수 있다. 따라서 압밀 진행과정은 유효응력의 지속적인 모니터링으로 예측할 수 있으며 본 연구에서는 유효응력의 함수인 전단파 속도를 이용하여 압밀 특성을 평가하고자 하였다.

$$V_s = \alpha \left(\frac{\sigma'_p + \sigma'_m}{2} \right)^\beta \quad (1)$$

여기서, V_s 는 전단파 속도, α 와 β 는 각각 packing 형태 및 접촉 특성에 의해 결정되는 상수를 의미한다. 또한 σ'_p , σ'_m 은 각각 파의 전파 방향과 입자 움직임 방향의 유효응력을 나타낸다(Santamarina et al. 2001). 일반적으로 유효응력을 파의 전파 방향과 움직임 방향을 구별하기 어려워 식 (1)은 다음 식(2)와 같이 일반화시켜 활용되고 있다.

$$V_s = \alpha (\sigma'_v)^\beta \quad (2)$$

여기서, 각 기호들은 식 (1)과 동일하며 σ'_v 는 연직유효응력을 의미한다.

실내 실험

본 연구는 실내 실험을 통하여 결정된 탄성과 속도와 현장에서 획득한 탄성과 속도를 상호 비교하여 대상지반의 압밀 진행 정도를 평가하는 것이다. 따라서 하중 증가에 따른 탄성과 변화 특성을 관찰하고 기준 값을 결정하기 위하여 실내실험을 수행하였으며 탄성파를 측정하기 위하여 기존의 압밀실험 셀을 수정하였다. 압밀 실험에 관한 자세한 내용은 다음과 같다.

압밀 실험

일반적으로 국내의 압밀실험은 ASTM D2435-04에서 제안된 표준 방법을 이용하여 횡방향 구속 하에 응력 증가비가 1이 되도록 하중을 증가시키고 침하량을 측정한다. 본 연구에서는 침하량과 동시에 전단파 속도를 측정할 수 있도록 압밀 셀을 다소 개량하였으며(Fig. 1 참조) 실험 방법은 기존의 양면배수 조건하에 제시된 방법을 준수하였다. 개량된 압밀 셀의 제원은 내경 74 mm, 높이 63 mm 그리고 두께는 16 mm 이다. 또한 하중 재하 시 압밀 셀 자체의 변형에 의한 오차를 최소화 시킬 수 있도록 재질은 황동을 활용하였다. 압밀 셀 측면에는 탄성과 측정 센서를 장착 할 수 있도록 하였으며, 시료의 수평 방향으로 전파하는 탄성과 특성을 도출하고자 하였다.

측정방법은 ASTM D2435-04의 기준을 참고하였으며, 하중 재하 시간은 점토의 압축성을 고려하여 최대 24시간이 되도록 하였다. 즉 과잉간극수압 생성 후 완전히 소산 된 후 재하한 하중이 유효응력으로 전환될 수 있도록 하였으며 침하량과 전단파 속도는 다음 하중의 재하 직전에 측정하였다. 또한 결정된 재하 시간은 실험 완료시 까지 모두 동일하게 적용하였다.

침하량 및 전단파 측정

투수계수가 작은 점토는 재하된 하중에 의한 침하가

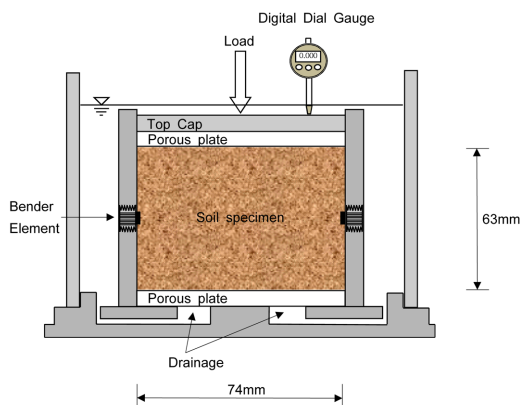


Fig. 1. Oedometer for measuring shear wave velocity in the laboratory.

상당히 작은 범위부터 나타난다. 이와 같은 특성을 반영하기 위하여 침하량은 0.001 mm (1/1000)의 고해상도를 가지고 있는 디지털 게이지(Mitutoyo 사)를 이용하였다.

전단파 측정은 최근 지반공학에서 다양하게 활용하고 있는 벤더 엘리먼트(Bender Element)를 이용하였다. 벤더 엘리먼트는 사용자의 목적에 맞게 크기와 형태를 조절 할 수 있어 다양한 실험에 활용되고 있는 전단파 측정용 센서 이다. 벤더 엘리먼트의 구조와 원리등의 특성에 대한 내용은 Lee and Santamarina (2005)를 참조하기 바란다. 본 연구에서는 전단파 에너지 증폭을 위하여 Piezo Systems 사의 병렬 형식의 벤더 엘리먼트를 이용하였다. 개량된 압밀 셀에 장착하기 위하여 벤더 엘리먼트는 길이 11 mm, 너비 4 mm 그리고 두께는 0.6 mm 로 제작되었다. 이를 압밀 셀에 장착하게 되면 시료 속으로 돌출 된 길이는 4 mm가 되며 캔틸레버보 형태의 충분한 에너지가 발현되고 수신 할 수 있도록 고려하였다. 전단파 측정 시스템은 크게 3가지 부분으로 구성된다. 발신용 벤더 엘리먼트에 신호를 가할 수 있는 신호 발생기(Agilent 33220A), 수신용 벤더 엘리먼트의 에너지 증폭 및 잡음을 제거 할 수 있는 필터-신호 증폭기(Krohn-Hite 3364) 그리고 이와 같은 신호를 확인 할 수 있는 오실로스코프(Agilent 54624A) 이다.

시료 특성

본 연구는 국내 대표 연약지반인 인천 송도 지역에서 수행하였으며, 시료는 대상 지반에서 쉘비 튜브(Shelby tube)를 이용하여 획득하였다. 동일한 시추공에서 각각 3 m와 6 m의 심도에서 시료를 채취하였으며 시료의 기본 물성치는 Table 1과 같다.

현장 실험

Field Velocity Probe (FVP)는 현장의 전단파 속도를 측정하기 위하여 개발된 장비로 그동안 다양한 지반의 전단파 속도 측정에 활용되어 왔다(Yoon et al. 2008; Lee et al. 2010). 또한 최근에는 전단파 속도 뿐만 아니라 압축과 속도와 전기저항을 동시에 측정할 수 있도록 개량되어 지층의 다양한 특성을 반영하고 해석하

Table 1. Physical properties of the specimens.

Specimen	Water Content (%)	Specific Gravity	Void ratio (e_v)	Unit weight (t/m^3)
NA-13 3 m	17.3	2.638	0.785	1.89
NA-13 6 m	26.3	2.581	0.709	1.93

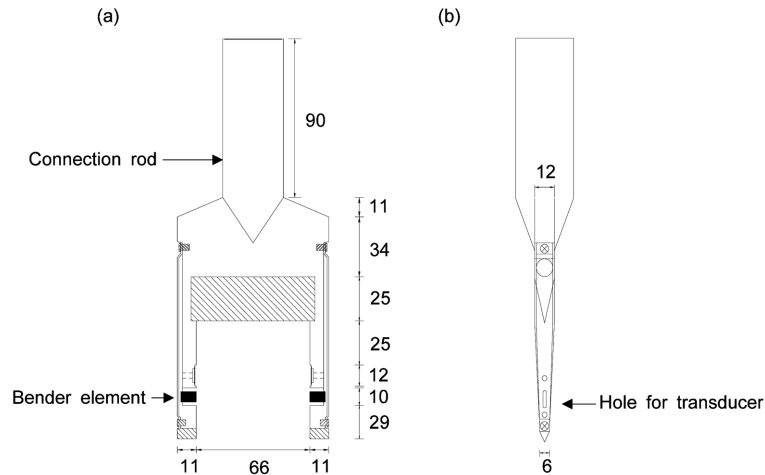


Fig. 2. Field Velocity Probe (FVP): (a) side view (0°); (b) side view (90°). The unit is mm.

는데 이용되고 있다(Yoon and Lee 2010). FVP 장비의 특성과 측정된 전단파 속도 값의 신뢰성은 이미 기존 논문에서 자세하게 설명하고 있어 본 논문에서는 다음과 같이 간략하게 설명하고 참고문헌으로 대체하고자 한다.

FVP는 기존의 현장 전단파 탐사 장비의 비경제적이고 난해한 분석 과정 등의 단점을 개선하고 시추공 없이 관입 실험을 수행할 수 있는 장비이다. 또한 관입 심도는 매 심도 20 cm 내외로 지반의 상세한 전단파 속도를 도출할 수 있는 장점이 있다. FVP는 다양한 실내 실험과 현장 실험을 통하여 여러 형태의 크기 및 형상으로 개발되어 왔다. 본 논문에서는 Fig. 2와 같이 전단파 만을 측정할 수 있는 포크 블레이드 타입 FVP를 활용하여 지층의 특성을 평가 하였다.

현장 실험이 수행된 지역은 인천 송도 지역으로 연약 지반은 약 30 m 이상 분포하고 있으며 심도 2 m까지는 장비의 안전한 관입이 이루어 질 수 있도록 선 굴착과 공벽 붕괴를 방지하기 위하여 케이싱을 설치하고 관입 실험을 수행하였다. 대상지반의 지하수위는 약 2 m에서 나타났으며 FVP 실험은 심도 2 m~11 m까지 20 cm 간격으로 실시하여 대상지반의 상세한 전단파 속도 주상도를 획득하였다.

결 과

실내 압밀 실험과 현장 전단파 탐사 실험을 수행하여 도출한 결과는 다음과 같으며 각각의 데이터 매칭 및 자세한 분석은 고찰 부분에 수록하였다.

실내 실험 결과

인천 송도 지역에서 획득한 시료 중 3 m는 총 8단계(6.7 kPa~629.6 kPa)의 하중을 재하 하였으며 6 m의 시료는 총 9단계(6.7 kPa~1257 kPa)를 가하였다. 상대적으로 상재하중이 큰 심도 6 m의 시료는 한 단계 더 큰 하중을 재하하여 전단파 속도의 변화 양상을 더욱 정밀하게 파악하고자 하였다. 각각의 시료에서 측정된 전단파 주상도는 Fig. 3과 같으며 유효응력이 증가 할수록 초기도달 시간이 점차 앞으로 이동하는 것으로 나타났다. 압밀 셀에 장착한 벤티 엘리먼트의 거리(이동거리)를 이용하여 전단파 속도를 계산하였으며 결과 값은 Table 2에 나타내었다. 얇은 깊이의 3 m 시료의 경우 전단파 속도는 초기 35.4 m/s에서 나타났지만 상대적으로 심도가 깊은 6 m의 시료는 다소 증가된 48.7 m/s로 나타났다. 이와 같은 이유는 시료 채취시 시료 내부에 잔존하는 구속 응력에 기인한 것으로 판단되며 동일한 최종 하중에서는 하중에 의한 입자 재배열 등의 packing 현상으로 속도 차이가 발생한 것으로 판단된다. 또한 심도 3 m에서 측정된 전단파 속도 값은 6 m에서 측정된 값과 달리 L5 단계에서 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 동일 유효응력 상태하에서 고결되는 특성이 상이한 것을 의미하며 Yoon et al. (2011) 결과를 토대로 분석하면 선행압밀하중의 차이에 의한 것으로 판단된다.

현장 실험 결과

FVP는 건설현장에 시추기로 이용되는 장비를 활용하

Table 2. Measured shear wave velocity with effective stress in the consolidation test.

Step	Vertical Stress [kPa]	Shear wave velocity with a depth of 3 m V_s (hh), [m/s]	Shear wave velocity with a depth of 6 m V_s (hh), [m/s]
L1	6.7	35.4	48.7
L2	11.6	39.9	52.0
L3	21.4	50.2	56.7
L4	41.0	62.9	64.5
L5	80.3	81.0	75.2
L6	158.8	115.8	95.8
L7	315.7	135.0	128.2
L8	629.6	183.3	179.3
L9	1257	-	237.0

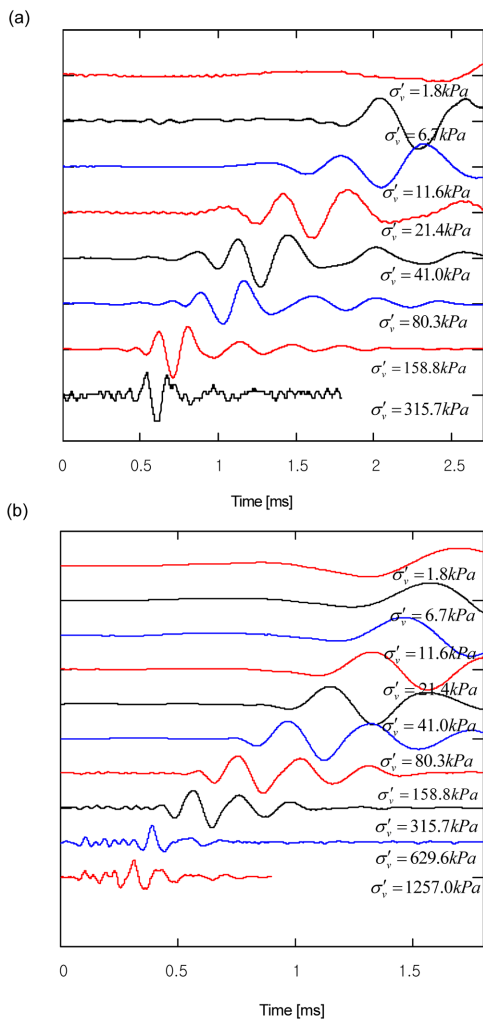


Fig. 3. Profiles of shear waves measured in the laboratory for samples from depths of (a) 3 m and (b) 6 m.

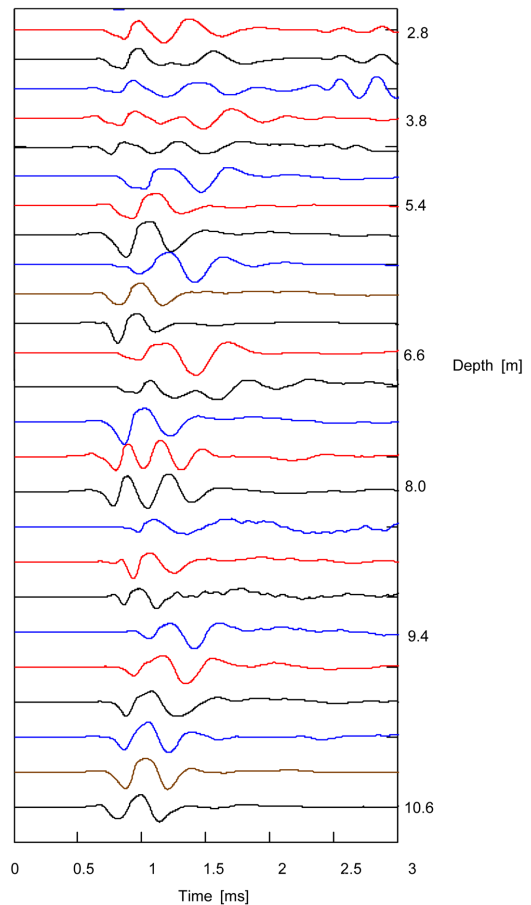


Fig. 4. Shear wave profiles measured in the field.

여 관입하였으며 로드(rod)를 결합하여 매 심도 20 cm 간격으로 전단파를 측정하였다. 측정된 전단파 주상도는 Fig. 4와 같으며 이동거리를 고려하여 도출된 전단파 속

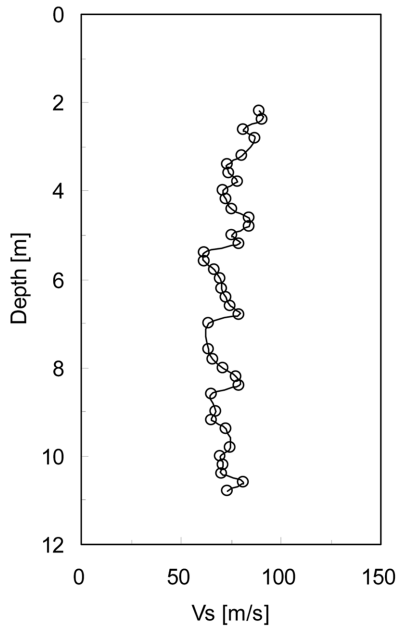


Fig. 5. Shear wave velocity measured by FVP in the field.

도는 Fig. 5에 도시하였다. 대상 지반의 전단파 속도는 대체적으로 50 m/s~100 m/s 범위에 위치하는 것을 알 수 있다. 또한 심도 약 5 m, 7 m 그리고 9 m 부근에서는 상대적으로 연약한 지층이 나타나 속도가 감소하는 것으로 나타났다.

고 찰

Fig. 6은 실내 압밀 실험으로 도출한 결과를 이용하여 도시한 내용으로 유효응력 - 전단파 속도의 관계를 보여준다. 앞서 언급하였듯이 유효응력과 전단파 속도 관계는 초기 유효응력 조건에서는 급격한 전단파 속도의 변화를 보이다 구속응력이 증가할수록 전단파 속도의 변화 폭은 다소 작아지는 비선형 상태를 보여준다. 식 (3)과 (4)는 각각 심도 3 m와 6 m에서 유효응력과 전단파 속도간의 관계를 매칭 시킨 결과이며 분석은 수학적으로 널리 사용되고 있는 MathCad 프로그램을 이용하였다.

$$V_s = 16(\sigma_v')^{0.38} \quad (3)$$

$$V_s = 12.5(\sigma_v')^{0.42} \quad (4)$$

여기서, σ_v' 는 식 (1)과 동일하게 연직 유효응력을 의미

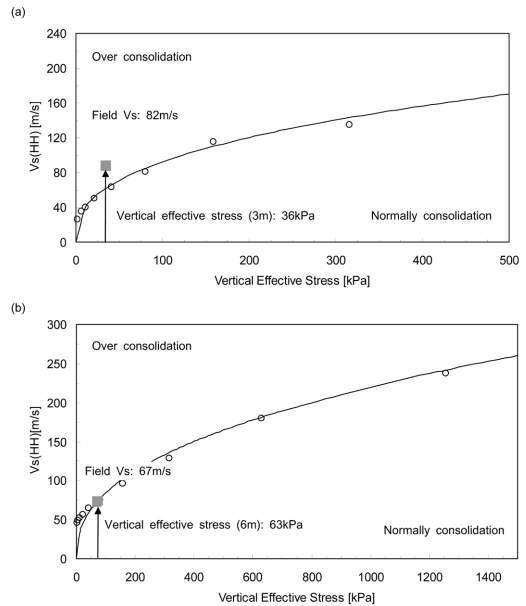


Fig. 6. Relationship between shear wave velocity and vertical effective stress (non-linear curve) at depths of (a) 3 m and (b) 6 m.

한다. 식 (3)과 (4)에서 알 수 있듯이 대상지반의 Packing에 의하여 결정되는 α 와 β 상수는 각각 12.5~16 그리고 0.38~0.42 범위로 나타났다.

실내 물성 실험으로 결정된 단위중량을 이용하여 3 m와 6 m의 유효응력은 각각 36 kPa와 63 kPa로 계산되었다. 계산된 유효응력으로 실내에서 측정된 전단파 속도는 약 58 m/s (심도 3 m)와 72 m/s (심도 6 m)이며, 동일 심도에서 FVP로 측정된 현장 전단파 속도는 약 82 m/s (심도 3 m)와 67 m/s (심도 6 m)로 나타났다. 따라서 압밀 실험으로 도출된 전단파 속도와 현장에서 측정된 전단파 속도를 비교하면 대상 지반의 압밀 상태를 간접적으로 유추 할 수 있으며 본 현장의 심도 3 m 지역은 현장의 전단파 속도가 크게 나타나 이미 과압밀된 지반이라 예측할 수 있다. 또한 심도 6 m 구간은 동일 유효응력 조건 하에 현장 전단파 속도가 작게 나타나 아직 압밀 진행 중인 구간으로 결정할 수 있다.

결 론

본 연구에서는 기존에 개발된 FVP 장비의 활용성을 증대시키고자 FVP에서 측정된 데이터를 연약지반의 압밀 상태 평가에 적용하였다. 일반적으로 연약지반의 압

밀은 현장에 설치한 간극수압계 등의 상시 모니터링 계측 시스템을 활용하고 있지만 본 연구에서는 전단파 속도를 이용하여 대체적인 방법을 제시하였다. 연약지반의 압밀 상태는 실내에서 측정된 전단파 속도와 현장에서 측정된 전단파 속도 관계를 비교하여 결정할 수 있으며 본 연구가 수행된 지역은 과압밀과 압밀 진행 중인 구간으로 나타났다. 이와 같은 방법은 상시 모니터링을 수행하기 어려운 지반이나 전단파 속도를 이용하여 지반 조사를 실시 할 경우 추가적인 실내실험 만으로 연약지반의 상태를 평가할 수 있는 점에서 의의가 있다고 판단된다.

감사의 글

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

References

- Almeida, M. S. S., Santa Maria. P. E. L., Martins, I. S. M., Spotti, A. P., and Coelho, L. B. M. 2000, Consolidation of a very soft clay with vertical drains, *Geotechnique*, 50(6), 633-643.
- ASTM D2435-04 2004, Standard test method for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading, *Annual Book of ASTM standard*, 04.08.
- Gibson, R., Schiffman, R., and Cargill, K. 1981, The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays, *Canadian Geotechnical Journal*, 18(2), 280-293.
- Ha, T. G., Kwon, H. M., Cho, S. M., and Chung, C. K. 2005, Jumping phenomenon of piezocone dissipation test in lightly overconsolidated clay, *Conference of Korean Society of Civil Engineers*, 3509-3512.
- Holtz, R. D. and Kovacs, W. D., 1981, *An introduction to geotechnical engineering*, Prentice-Hall Civil Engineering and Engineering Mechanics Series, 380-385.
- Kim, S., Kim, B., Han, S., and Shin, H. 2002, The effects of stress and time history on pore pressure parameter of overconsolidated clay, *Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 14(2), 286-294.
- Kwon, O. Y., Ryoo, Y. K., Park, B. S., and Lee, H. 2002, Postcyclic undrained shear strength of overconsolidated clay, *Korean Society of Civil Engineers*, 22(5), 525-533.
- Lee, J. and Santamarina, J. 2005, Bender elements: Performance and Signal Interpretation, *Journal of Geotechnical Engineering*, 131(9), 1063-1070.
- Lee, J. S., Lee, C., Yoon, H. K., and Lee, W. 2010, Pen-

- etration type field velocity probe for soft soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(1), 199-206.
- Mesri, G. and Choi, Y. K. 1985, Settlement analysis of embankments on soft clays, *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(4), 441-464.
- Santamarina, J. C., Klein, K. A., and Fam, N. A. 2001, *Soils and waves*, John Wiley & Sons, 254-260.
- 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.
- Yoon, H. K., Lee, J. S., Kim, Y. U., and Yoon, S. 2008, Fork blade-type field velocity probe for measuring shear waves, *Modern Physics Letters B*, 22(11), 965-969.

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