

미소변형 전단파 속도를 고려한 선행압밀하중 산정

Evaluation of Preconsolidation Stress Considering Small-Strain Shear Wave Velocity

윤 형 구¹ Yoon, Hyung-Koo

이 창 호² Lee, Chang-Ho

김 준 한³ Kim, Joon-Han

이 중 섭⁴ Lee, Jong-Sub

Abstract

Preconsolidation stress is one of the important design parameters in soft soils because the behavior of saturated soft soils changes dramatically at the preconsolidation stress. For the estimation of preconsolidation stress, the global vertical settlement without considering micro strain behavior has been considered. The purpose of this study is to propose and verify a new method called the "shear wave velocity method" for determination of the preconsolidation stress reflecting on particle behavior at the small-strain. In this study, the undisturbed soft soils obtained at Busan, Incheon and Gwangyang in Korea were used. The oedometer cell incorporated with the bender elements is used for the consolidation tests under the K_0 condition. The preconsolidation stress determined by the proposed method is compared with that estimated by Casagrande (e -log p'), Sridharan ($\log(1+e)$ -log p'), and Onitsuka ($\ln(1+e)$ -log p') methods. This study suggests that the shear wave velocity method may determine simply the preconsolidation stress with considering the small-strain behavior.

요 지

포화된 연약지반의 거동 특성은 선행압밀하중을 기점으로 다양하게 변하기 때문에 정확한 선행압밀하중 산정은 연약지반 평가시 상당히 중요한 설계정수이다. 선행압밀하중 평가를 위한 기존 방법들은 하중에 따른 침하량만을 산정할 뿐 입자의 미소변형 거동에 따른 입자 자체의 특성은 고려되지 않았다. 본 논문의 목적은 입자의 미소변형 거동 특성을 반영한 전단파 속도를 이용하여 선행압밀하중을 산정하기 위한 방법을 제안하고 검증하는 것이다. 본 연구에서는 부산, 인천, 광양 지역에서 채취된 비교란 시료를 이용하였다. 횡방향 구속(K_0 조건)하에서 축 하중을 증가 시키며 전단파 속도를 측정 할 수 있는 벤더 엘리먼트가 설치된 압밀 셀을 이용하였다. 선행압밀하중은 기존에 널리 사용되고 있는 Casagrande (e -log p') 방법, Sridharan ($\log(1+e)$ -log p') 방법, 그리고 Onitsuka ($\ln(1+e)$ -log p') 방법으로 산정하여 본 논문에서 제시된 방법으로 산정된 선행압밀하중과 비교하였다. 본 연구는 전단파 속도를 이용하여 선행압밀하중을 평가 할 수 있는 새로운 방법을 제안하였으며, 이는 미소변형 거동 특성을 고려한 새로운 방법으로 적용되기를 기대한다.

Keywords : Bender element, Consolidation, Preconsolidation stress, Shear wave velocity, Small strain

1 고려대학교 건축·사회환경공학부 박사과정 (Ph.D. Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

2 정희원, 조지아공대 토목환경공학과 박사 후 연구원 (Member, Postdoctoral Fellow, School of Civil and Environmental Engrg., Georgia Institute of Technology)

3 고려대학교 건축·사회환경공학부 석사과정 (Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

4 정희원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 부교수 (Member, Associate Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea Univ.; jongsub@korea.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

점토 및 실트 성분으로 구성되어 있는 연약지반 및 준설 매립 지역에 구조물을 시공할 경우, 상부 구조물의 안정성을 높이기 위해 대상 지반의 정확한 지지력 및 침하량 산정은 상당히 중요하다. 따라서 지반의 압밀 특성을 평가 하기 위해 실내 압밀 실험이 수행되고 있으며, 이를 통해 포화 점토의 압축성, 투수성 및 그 외의 압밀 특성을 결정하고 있다. 여러가지 압밀 특성 중 선행압밀하중은 대상 지반이 과거에 받았던 최대 응력이나 시료의 탄성구간과 소성구간을 나누는 응력에 해당한다(Casagrande 1936; Holtz and Kovacs 1981; Dias Junior and Pierce 1995). 일반적으로 점토지반의 압축성은 선행압밀하중을 기점으로 과압밀과 정규압밀구간에서 약 10배 이상 차이가 발생한다. 따라서 선행압밀하중은 현장 침하량 추정 및 지반의 다양한 거동특성을 분석하는데 중요한 설계 정수로 평가된다(김선형 2007; 이창호 외 2007),

선행압밀하중은 현장 실험, 실내 실험, 그리고 압밀해석 프로그램을 이용하여 평가되며, 분석 방법으로는 Casagrande(1936), Janbu(1969), Becker(1987), Burland(1990), Sridharan(1991), Onitsuka(1995) 등 다양한 방법들이 제안되었다(Burmister 1951; Schmertmann 1955; Butterfield 1979; Grozic 2003; Wang and Frost 2004; 백원진 외. 2008). 특히, 체적 변형과 압밀 하중을 선형 관계로 유지하기 위해 이중층(Double-layer) 이론과 극소 변형 메카니즘(micromechanism) 이론에 의한 분석 방법도 제안되었다(Nagaraj and Srinivasa Murthy 1983; Houlsby and Sharma 1999). 이는, 압밀현상이 극소변형 메카니즘(micromechanism) 현상으로 시료 압축에 따른 시료 변형 및 입자 자체의 변형이 발생하여 단순 간극비로 표현하는 것보다 미소변형의 거동을 반영하는 상수로 표현되어야 한다는 것을 의미한다.

본 논문에서는 압밀 중 발생하는 입자의 미소 거동을 고려한 전단파 속도를 측정하여 선행압밀을 평가하는 방법을 제시하였다. 기존에 사용되고 있는 분석 방법들을 비교 분석한 후, 입자의 미소변형 거동을 고려한 전단파 속도 분석 방법, 실험 장비, 그리고 기존 방법과의 데이터를 비교하여 새로운 분석 방법을 평가하였다.

2. 선행압밀하중 분석 방법

2.1 현장 실험을 이용한 분석 방법

현장 계측 값을 이용한 선행압밀하중 산정방법으로는 응력 - 변형률 해석법, 함수비 분석 방법, 과잉간극수압 해석 방법, 제방에 대한 침하 해석 방법, 그리고 경사진 제방에 대한 침하 해석 방법 등이 있다(Morin et al 1983; 김진섭 외 1999). 응력 - 변형률 해석 방법은 현장 침하계와 간극수압 계측을 통해 측정된 유효 연직 응력과 수직 방향 변형률의 관계를 통해 선행압밀하중을 산정하는 방법으로 현재 현장에서 가장 많이 사용되고 있는 방법이다. 함수비 분석 방법은 성토에 따른 깊이별 함수비 계측 데이터를 이용하여 함수비의 변화가 없는 깊이를 파악한 후, 측정된 전응력 및 간극수압의 관계를 이용하여 유효응력, 즉 선행압밀하중을 도출한다. 과잉간극수압 해석 방법은 성토층이 형성된 직후에 측정된 초기 과잉간극수압과 전응력을 이용하여 선행압밀하중을 도출한다. 그리고 제방 및 경사진 제방에 대한 침하 해석 방법은 침하량을 발생시키는 경계면을 활용하여 침하량과 유효응력간의 관계를 이용하여 선행압밀하중을 분석하는 방법이다.

2.2 실내 실험을 이용한 분석

실내 실험의 경우 각 대상 지반의 선행 압밀 하중을 결정하기 위해 많은 연구들이 진행되어 왔으며, 주로 압밀 해석 프로그램과 실내 압밀 실험이 많이 이용되고 있다. 대표적인 압밀 해석 프로그램은 Primary consolidation, Secondary compression, and Desiccation of Dredged Fill(PSDDF)로서 유한변형률 압밀이론의 수학적 모델을 사용하여 압밀상태를 평가하였으며 현재 많은 연구자들에 의해 개선되고 있다. 실내 압밀 실험은 주로 하중 단계를 조절하여 실험을 진행하는 표준 압밀 실험(Standard Consolidation Test: SCT), 연직 방향의 변형률을 일정속도로 조절하여 실험을 진행하는 일정변형률 실험(Constant Rate-of-Strain Consolidation: CRSC), 그리고 초연약지반의 압밀 특성을 파악하기 위한 침투 압밀 실험(Hydraulic Consolidation Test: HCT) 등으로 나뉜다. 침투 압밀 실험의 경우 초연약지반에만 국한되어 다양한 지반의 적용성이 떨어지며, 실험 자체의 공기압 불안정과 그에 따른 공시체의 변형에 의한 한계점이 있

어 주로 표준압밀실험과 일정 변형률실험이 사용된다 (Imai 1979). 각 실내 실험의 명칭은 서로 다르나, 실험에 의해 도출된 결과값에 대한 분석 방법 및 대상 지반 특성 평가 기법은 거의 동일하며, 다음과 같이 분류한다(Grozic et al. 2003).

2.2.1 e - log p' 분석 방법

Casagrande(1936)에 의해 제안되었으며, 현재 가장 많이 사용되고 있는 방법이다. 간극비와 수직 방향의 대수 유효 응력(e - log p')간의 관계를 이용하여 선행압밀하중을 도출하는 방법으로 e - log p' 곡선의 최대 곡률 지점에서 수평선, 접선의 이등분선과 직선 구간 연장선의 교차점을 통해 선행압밀하중으로 평가하는 방법이다. 이 방법은 분석 방법이 상당히 간편한 장점이 있지만, 정규 압밀 구간을 산정하기 위한 최대 곡률 지점을 결정하는 부분에서 분석자들에 따른 주관적 판단에 의해 각기 다른 값을 도출할 수 있다는 단점이 있다. 또한 이 분석 방법은 시료교란 효과로 선행압밀하중을 약 15-50% 정도 과대평가하는 것으로 알려져 있다(Jose et al. 1989).

2.2.2 구속계수(M) 분석 방법

Janbu(1969)는 구속계수(Constrained modulus: $M = 1/m_v$, 여기서 m_v 는 체적 압축 계수)를 통해 선행압밀하중이 결정된다는 이론을 제안하였다. 이 방법은 구속계수와 축방향 하중의 그래프를 이용하여 구속계수와 하중의 선형관계에서, 구속계수가 급격하게 변하는 지점의 하중을 선행압밀하중으로 판단한다. 이 방법은 구속계수를 매번 산정해야 하는 번거로움과 주로 예민비가 높은 시료와 과압밀비(OCR)가 낮은 시료에 적용되는 한계점이 있다(Grozic et al. 2003).

2.2.3 Work method 의한 분석 방법

Becker(1987)는 기존 분석 방법들에서 발생하는 문제점 중 정규압밀구간이 직선(linear) 형태가 아닌 곡선 형태로 도출되어 분석자들에 따른 주관적 오차를 최소화하기 위해 work method 를 제안하였다. 이 방법은 식 1과 같이 유효응력과 변형률의 관계를 통해 계산되는 일(work)과 실험에 따른 유효응력을 이용하여 압밀곡선을 도시한다. 항복 전(pre-yield) 구간의 직선과 항복 후(post-yield) 구간의 직선 교차점을 이용하여 선행압밀하중을 추정한다.

$$\Delta W_{oed} = \left(\frac{\sigma'_{i+1} + \sigma'_i}{2} \right) (\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i) \quad (1)$$

여기서, σ'_{i+1} , σ'_i 는 응력 증가에 따른 유효 응력, 그리고 ε_{i+1} , ε_i 는 응력 증가에 따른 변형률이다.

2.2.4 Log e-Log p' 방법

기존의 사용되던 Casagrande 방법에서 착안하여 Jose (1989)에 의해 제안되었다. 대수축의 유효 과재하중(log p') 항에만 대수를 사용하여 선행압밀하중을 평가하는 Casagrande 방법에서 하중에 따른 간극비의 감소 역시 대수축으로 표현해야 신뢰할 만한 값을 얻는다고 하였다. 따라서 각 축의 값들을 모두 대수축을 이용하여 도해하였으며, 그래프를 통해 낮은 응력구간에서 그려진 항복 전(pre-yield) 구간의 직선과 항복 후(post-yield) 구간의 교차점을 이용하여 선행압밀하중을 추정하였다. 그 이후, Sridharan(1991)는 log(1+e)-log p' 방법을 Onitsuka (1995)는 ln(1+e)-log p' 방법을 제안하여 과압밀구간과 정규압밀구간이 직선적인 분포를 통해 선행압밀하중을 손쉽게 산정할 수 있도록 하였다.

2.2.5 ICL(Intrinsic Compression Line) 방법

Burland(1990)가 제안한 방법으로, 압축성과 강도 특성에 따른 점토 시료의 거동 특성을 분석하였다. 입자의 고유한 특성 및 구조에 대한 영향이 적은 재성형 시료를 이용하였으며, 식 (2)를 통해 새로운 상수인 void index 를 제안하였다. Void index는 다양한 점토 시료의 압축적인 특성을 반영하며, 하중과의 관계를 통해 선행하중 압밀을 분석할 수 있다고 제안하였다.

$$I_v = 2.45 - 1.285x + 0.015x^3 = \frac{(e - e_{100}^*)}{(e_{100}^* - e_{1000}^*)} \quad (2)$$

여기서, $x = \log \sigma'_v$, e_{100}^* 는 유효응력이 100kPa 일 때의 간극비, 그리고 e_{1000}^* 는 유효응력 1000kPa 일 때의 간극비이다. 또한 Void index는 선행압밀하중 뿐만 아니라 샘플 시료의 교란효과 추정에도 이용되어 점토 시료에 다 방면으로 적용되고 있다(Hong and Han 2007).

3. 전단파 속도(Shear wave velocity)를 이용한 선행압밀하중 평가법

포화된 점토지반에 과재하중이 가해지면 과잉간극수

압이 발생된다. 시간 경과에 따라 과잉간극수압은 점차 소산되며 외부하중은 흙입자를 수축시켜 압밀침하가 발생한다. 이와 같은 현상을 모사하기 위해 일반적으로 가해진 하중에 따라 발생한 침하량을 측정하여, 이를 간극비로 정량화 시킨 후 하중에 따른 연직방향 변형 관계를 도출한다. 기존에는 선행압밀하중을 평가하기 위하여 간극비 변화 폭이 작은 곳과 상대적으로 큰 부분을 이용하였다. 이들 방법은 연직 하중에 따른, 전체시료(global)의 수직 방향의 단순한 침하량만 고려하는 방법으로서, 흙 입자의 재배열, 구조 변화 및 입자간 내력 등에 따른 전단변형 특성 변화 등과 같이 국부적(local) 및 미소변형을 고려하지 못하는 단점이 있다. 압밀 현상은 각 입자들의 접촉면이 증가하여 발생하는 입자의 구조 변화로서 시료의 미소변형 거동에 따른 강도를 증가시킨다(Santamarina et al. 2001). 따라서 미소변형을 고려하여 압밀 특성을 분석하기 위해 단순 간극비 변화가 아닌 미소변형상태에서 입자의 거동 특성을 반영한 새로운 방법이 요구된다.

탄성파(elastic wave)는 입자의 결합에 따른 접촉면을 통과하여 다양한 신호를 이용해 시료의 정확한 정보를 제공하는데 효율적인 기법이다. 그러므로 미소변형 상태에서 입자들의 거동 특성을 반영하는데 상당히 유용할 것으로 판단된다. 탄성파는 압축파(P-wave) 및 전단파(S-wave)로 구성되며 각 파의 전달 특성 및 입자의 움직임에 따라 식 (3) 및 (4)와 같이 유효응력의 함수로 표현된다(Santamarina et al. 2001).

$$V_p = \alpha(\sigma'_p)^\beta \quad (3)$$

$$V_s = \alpha \left(\frac{\sigma'_p + \sigma'_m}{2} \right)^\beta \quad (4)$$

여기서, V_p , V_s = 압축파, 전단파 속도, α , β 는 packing 형태(간극률, 입자간의 접촉 거동) 및 접촉 특성(입자크기, 입자모양, 입자 구조)에 의해 결정되는 상수, 그리고 σ'_p , σ'_m 은 파의 전파 방향과 입자 움직임 방향의 유효응력이다.

포화된 시료의 경우 압축파는 입자의 매질뿐 아니라 액체를 통해 파가 전달되는 반면 전단파는 입자의 매질만을 통해 파가 전달되므로, 포화된 시료의 정확한 응력 특성을 파악하기 위해 전단파가 이용된다. 전단파는 건조 시료뿐만 아니라 포화된 시료의 거동 특성을 정확하게 평가할 수 있어 많은 연구자들에 의해 상관관계식이

제안되었으며, 전단파를 통해 지반의 다양한 거동 특성을 예측할 수 있다(Mayne and Rix 1993; Robertson and Fear 1995; Hegazy and Mayne 2006).

전단파는 시료의 압축성뿐만 아니라, 미소 변형 상태에서 시료의 접촉면 증가로 인해 발생하는 회전, 미끄러짐과 같은 입자 구조 변화 및 입자들의 거동 특성을 평가할 수 있다. 압밀 실험 중 산정된 유효응력-전단파속도 관계에서 유효응력에 따라 전단파 속도가 완만하게 증가하는(pre-yield) 구간과 급격하게 증가하는(post-yield) 구간의 직선교차점을 이용하여 선행압밀하중을 산정할 수 있다. 전단파 속도를 이용하는 방법은 간단한 분석 방법을 통해 시료의 응력 및 압밀 특성에 따른 입자 거동 특성을 반영하며 과재하중에 따라 도출된 전단파 속도는 현장의 응력 수준과 비교할 수 있어 대상 지반의 동적 특성 및 다양한 거동 예측 등이 가능한 방법이라 할 수 있다.

4. 실험 방법

4.1 시료 특성

제안된 방법의 효율적인 검증을 위해 서로 다른 조건에서 형성되어 다양한 물리적 특성을 보이는 국내 대표적 점토 지역인 남해안과 서해안 지역에서 채취된 자연 시료를 이용하였다. 남해안은 부산 신히 지역과 광양 지역, 그리고 서해안은 인천의 송도 지역과 청라 지구에서

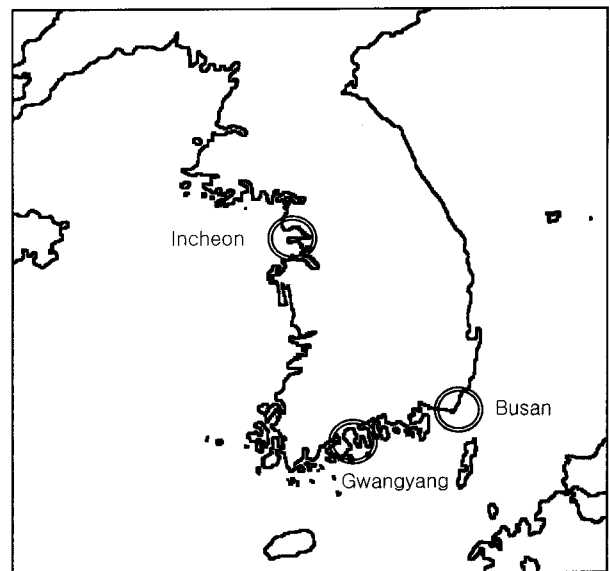


그림 1. 시료 채취 지역

표 1. 채취된 시료의 대표적인 물성치

위치	심도 (m)	함수비 (%)	비중	단위중량 (kN/m^3)
인천 송도(인천 A)	6	40.6	2.67	16.6
인천 청라(인천 B)	6	38.0	2.67	16.6
부산 신항 지역	10	67.2	2.64	17.9
광양 지역 A	3	45.9	2.78	17.7
광양 지역 B	11	84.0	2.61	16.2

시료를 채취하였다. 시료 채취 지역은 그림 1과 같다. 시료 채취, 실험실 운반, 그리고 실험 준비 과정에서 발생 할 수 있는 시료 교란 영향을 최소화 시키도록 노력하였다. 채취된 시료 특성을 확인하기 위해 기본 토성 실험을 수행하였으며, 점토 시료의 대표적 물성치는 표 1과 같다. 시료의 함수비는 38~84% 정도이며, 비중은 2.61~2.78, 그리고 단위중량은 $16.2\sim 17.9\text{kN/m}^3$ 이다.

4.2 압밀 실험

ASTM D2435-04에 제안된 표준 실험과정에 따라 횡방향 변형 구속 하에서 응력 증가비가 1이 되도록 축하중을 증가시켰으며 그에 따른 침하량을 측정하였다. 침하량을 측정하기 위하여 0.001mm(1/1000) 해상도의 디지털 게이지(Mitutoyo 사)를 사용하였다. 또한 하중재하 속도에 따라 서로 다른 특성을 보이는 점토의 압축성을 (Crawford 1964) 고려하기 위해 과잉간극수압이 완전히 소산된 후 재하 하중이 시료의 유효응력으로 완전히 전환 될 수 있도록 시료에 따라 최소 24시간에서 최대 48 시간 동안 하중을 유지하였다. 시료에 따라 결정된 재하 시간은 압밀 실험 완료 시까지 매 단계 동일하게 적용하였다.

4.3 압밀셀

침하량과 전단파 속도를 각 하중 단계 및 시간에 따라 동시에 측정할 수 있도록 그림 2와 같은 압밀셀을 적용하였다(자세한 내용은 Lee et al. 2008 참조). 압밀셀의 재질은 황동이며 치수는 내경 74mm, 높이 63mm, 그리고 두께 16mm이다. 흙 시료의 높이는 37mm 정도이다. 전단파 측정용 트랜스듀서는 압밀 현상에 따른 대상 시료의 전단파 속도를 정확히 측정할 수 있도록 상부(top - bottom)와 측면(horizontal - horizontal)에 각각 설치하였다.

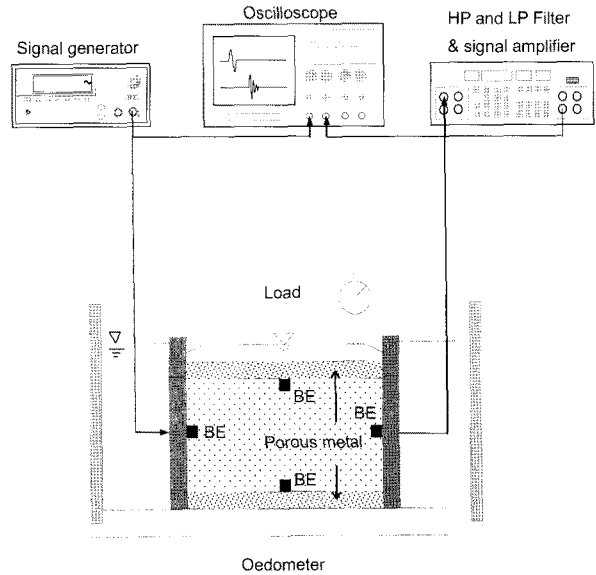


그림 2. 전단파 측정 압밀셀. 그림 내 BE는 벤더 엘리먼트를 표시함

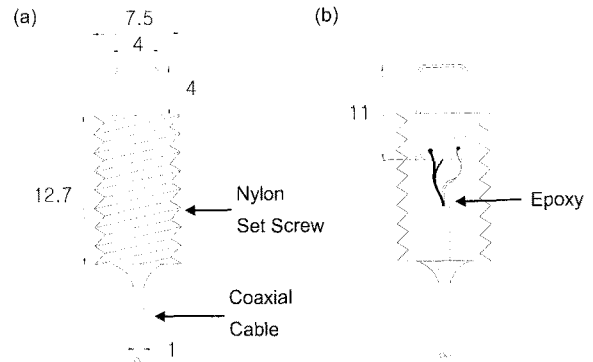


그림 3. 벤더 엘리먼트: (a) 정면도(0°); (b) 투영도(0°). 그림 내 숫자의 단위는 mm 임

4.4 전단파 측정 시스템

본 연구에서 사용된 전단파 측정용 트랜스듀서는 벤더 엘리먼트(bender element)로써 벤더 엘리먼트의 변위 증가에 따른 전단파 에너지 증폭을 위해 Piezo Systems 사의 병렬 형식 벤더 엘리먼트를 이용하였다. 사용된 벤더 엘리먼트는 그림 3과 같으며 치수는 $11.0 \times 4.0 \times 0.6$ (길이 × 너비 × 두께, mm)이며, 시료 속으로 돌출된 길이는 4mm이다. 전단파는 시료의 상·하부를 통하여 $V_s(VH)$, 측면을 통하여 $V_s(HH)$ 를 측정하도록 위해 압밀셀의 상·하부와 벽면에 벤더 엘리먼트를 설치하였다.

측정 시스템은 그림 2와 같이 벤더 엘리먼트의 입력 신호를 위해 신호발생기(Agilent 33220A)에서 발생된 단일 정현파 사용하였다. 발신된 전단파는 시료 특성을 반영하도록 전파된 후 수신 벤더 엘리먼트를 통해 획득된다. 수신된 전단파 신호는 필터-신호 증폭기(Krohn-

Hite 3364)를 통해 고주파와 전기회로 자체(DC-component)에서 발생한 잡음을 제거하고 신호를 증폭시킨 후 오실로스코프(Agilent 54624A)와 노트북을 이용하여 전단파를 측정 및 저장하였다.

기존의 방법들을 이용하여 산정된 선행압밀하중을 비교하였다.

5. 실험 결과 및 분석

국내의 대표 연약지반인 인천, 부산, 광양 지역에서 채취한 비교란 시료를 이용하여 압밀실험을 진행하였다. 침하량과 전단파를 동시에 측정하여 제안된 방법과

5.1 전단파 신호

매 하중 재하 직전 간극수압이 완전히 소산된 후 전단파 속도를 측정하여 그림 4와 같이 수직 유효응력에 따른 전단파 신호를 나타내었다. 잡음에 따른 신호 왜곡 없는 양질의 데이터를 통해 전단파 속도를 쉽게 도출할 수 있었다. 재하 하중이 증가됨에 따라 전단파의 초

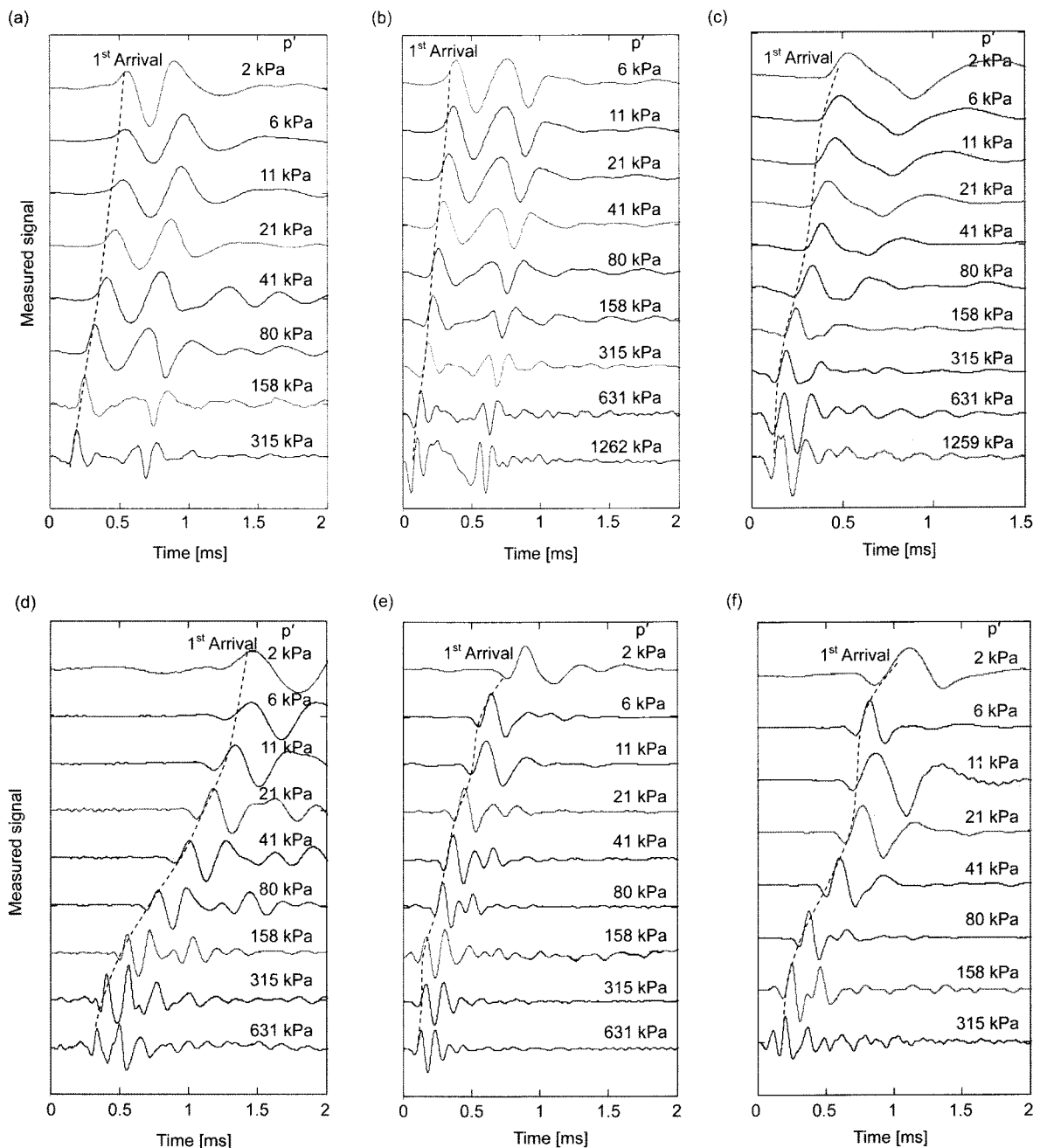


그림 4. 측정된 전단파 주상도: (a) 인천 6m-A (b) 인천 6m-A(재 하중); (c) 인천 6m-B; (d) 부산 10m; (e) 광양 3m; (f) 광양 11m

동 시간이 줄어들어 결과적으로 전단파 속도가 증가되는 것을 확인 할 수 있다. 또한 그림 4의 (b)는 하중 제하 후 재재하한 시료로서 전단파의 초동 시간이 재하만을 한 다른 시료보다 작게 측정되었으며, 이는 유효응력의 증가로 식 (4)와 같이 전단파 속도가 증가하는 것을 나타낸다. 따라서 제안된 전단파 속도를 이용하여 압밀 현상을 분석하는 방법은 압축에 따른 미소변형 특성과 유효응력에 대한 영향까지 고려하여 선행압밀하중을 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

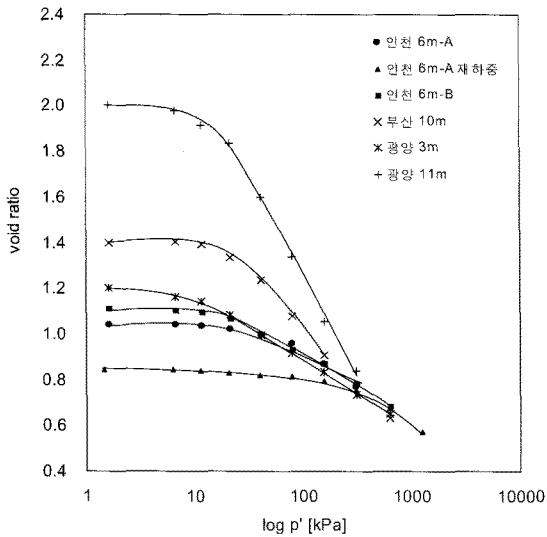


그림 5. 수행된 압밀실험의 전체적인 $e - \log p'$ 곡선

5.2 Casagrande 방법

Casagrande 방법은 선행압밀하중 평가에 가장 대표적인 분석 방법으로, 제안된 방법의 신뢰성 검증을 위하여 Casagrande 방법을 통해 선행압밀하중을 추정하였다. 전체적인 실험 결과는 그림 5와 같으며, 선행압밀하중 산정 과정은 그림 6(a), 7(a), 8(a), 9(a), 10(a), 11(a)에 나타내었다. 또한, 산정된 선행압밀하중 값을 표 2에 요약하였다.

5.3 Sridharan 방법

Sridharan 방법은 선행압밀하중 평가를 위하여 간극비와 유효응력에 모두 대수를 사용하여 분석하는 방법이다. 따라서 $\log(1+e) - \log p'$ 로 제안되며, 이 방법은 김재필(1998)의 선행 연구 결과에서 국내 점토 지반의 신뢰성 높은 선행압밀하중 평가가 가능하여 추천되고 있다. 선행압밀하중 산정 방법은 그림 6(b), 7(b), 8(b), 9(b), 10(b), 11(b)에 나타내었으며, 분석된 값은 표 2에 나타내었다.

5.4 Onitsuka 방법

$\log(e) - \log(p')$ 그래프를 이용하여 선행압밀하중

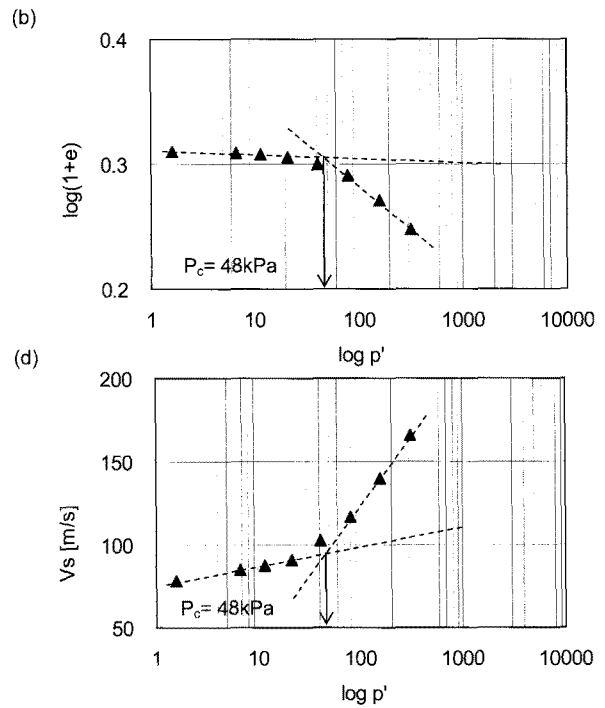
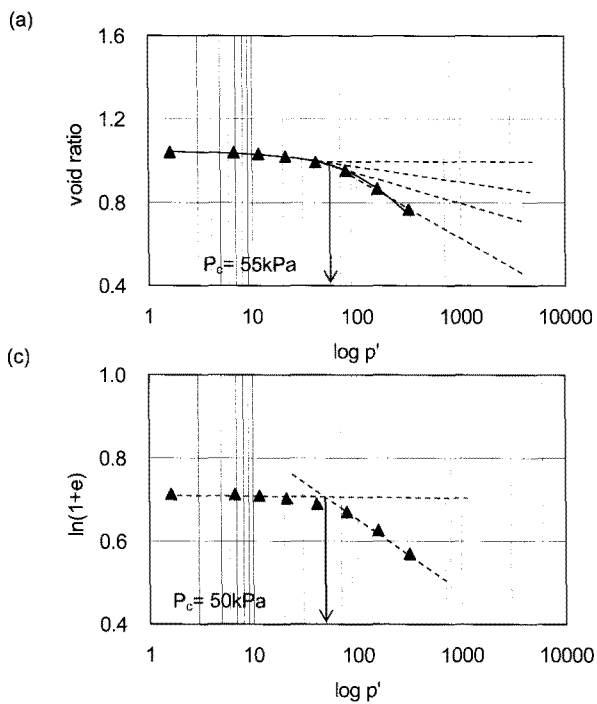


그림 6. 인천 6m-A 지역 점토의 선행압밀하중 평가: (a) Casagrande 방법; (b) Sridharan 방법; (c) Onitsuka 방법; (d) 전단파 속도법

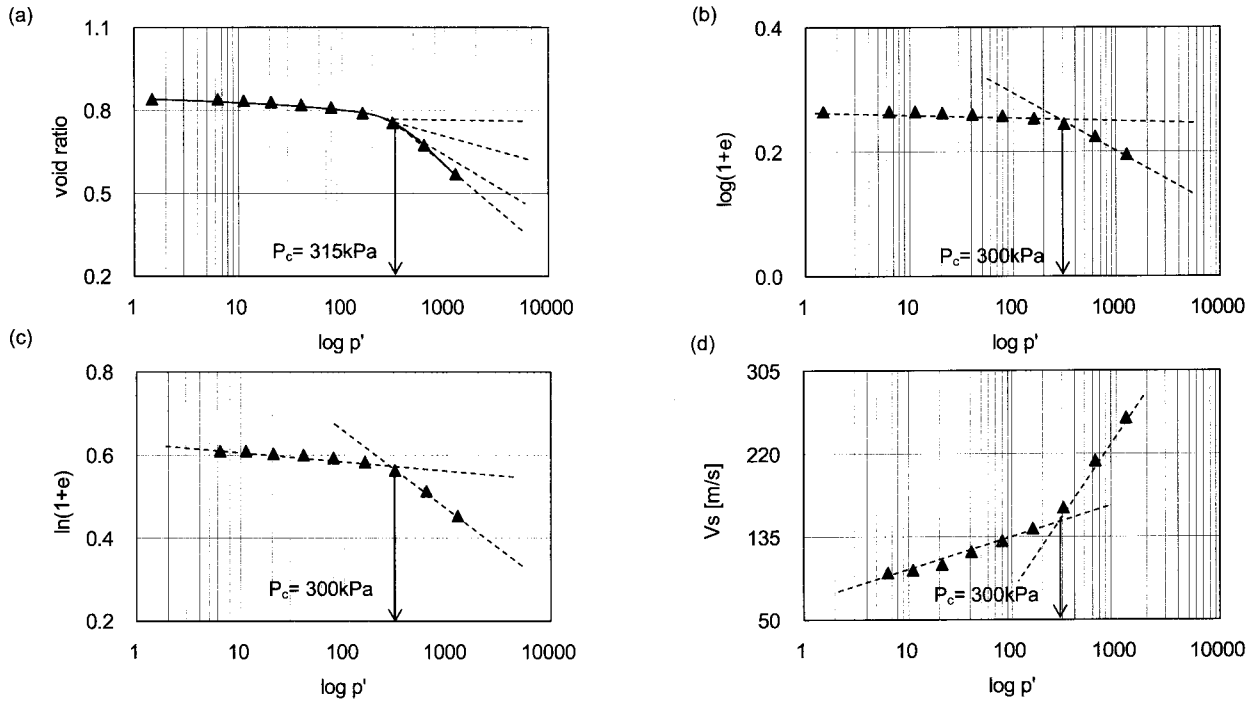


그림 7. 인천 6m-A 지역 점토의 선형압밀하중(재 하중) 평가: (a) Casagrande 방법 (b) Sridharan 방법 (c) Onitsuka 방법 (d) 전단파 속도법

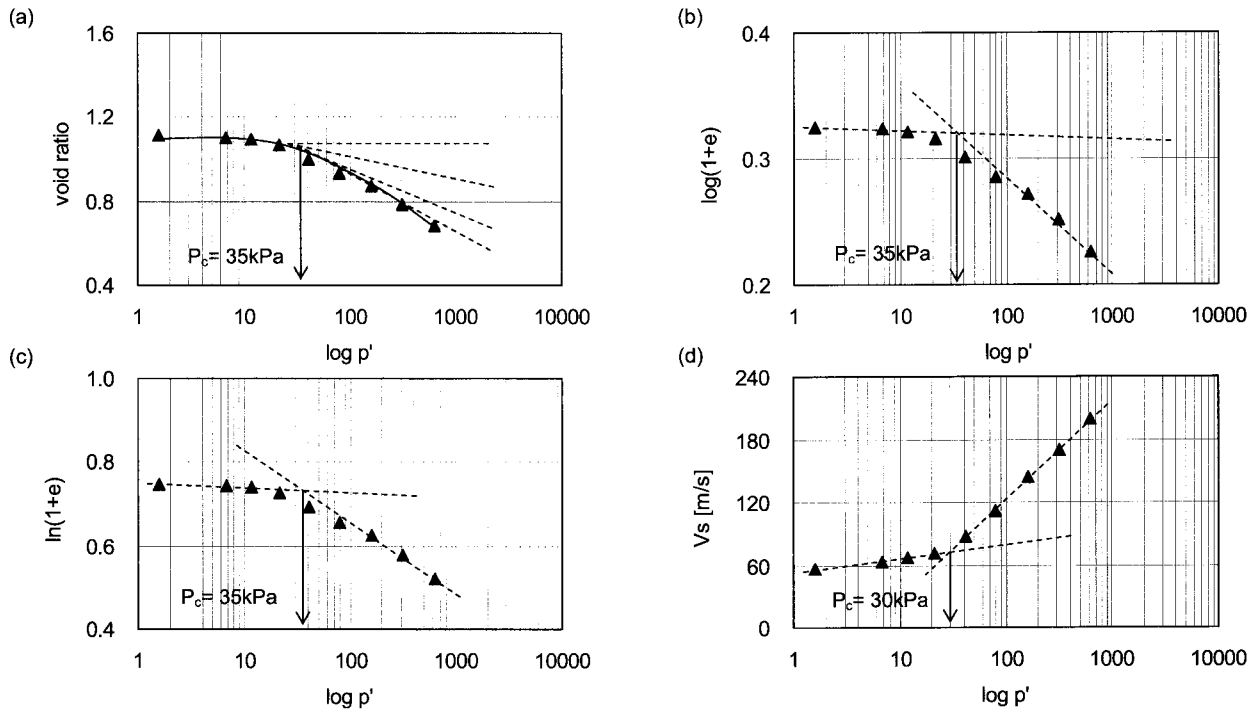


그림 8. 인천 6m-B 지역 점토의 선형압밀하중 평가: (a) Casagrande 방법; (b) Sridharan 방법; (c) Onitsuka 방법; (d) 전단파 속도법

을 분석 하는 방법 중의 하나로서 Onitsuka(1995)는 $\ln(1+e)-\log(p')$ 방법을 제안하였다. 간극비 항에 자연 대수법을 적용하는 것이 특징이며, 음수로 도출되는 것을 방지하기 위해 각 간극비 값을 1만큼 증가시켰다. 유효 응력 항에는 일반적인 대수법을 적용하여 선형압밀하중을 추정하도록 하였다. 이 방법은 work method에서

추론된 것으로 도출된 값뿐 아니라, 이론적인 부분에도 상당히 큰 신뢰성이 있어 선형압밀하중 평가 시 추천되고 있다(Grozic et al. 2003). Casagrande 방법처럼 많은 직선이 불필요하며, 단순하게 항복 전(pre-yield) 구간의 직선과 항복 후(post-yield) 구간의 교차점을 이용하여 선형압밀하중을 결정할 수 있다. Onitsuka 방법으로 선

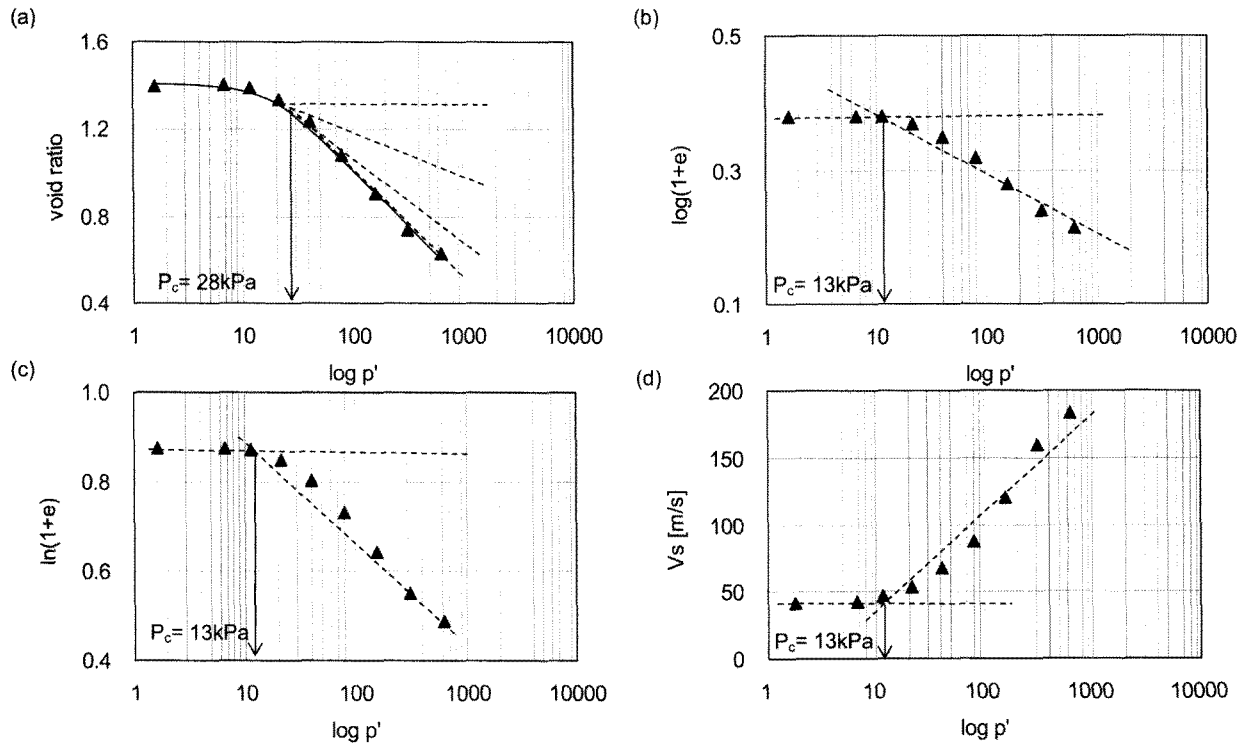


그림 9. 부산 10m 지역 점토의 선행압밀하중 평가: (a) Casagrande 방법; (b) Sridharan 방법; (c) Onitsuka 방법; (d) 전단파 속도법

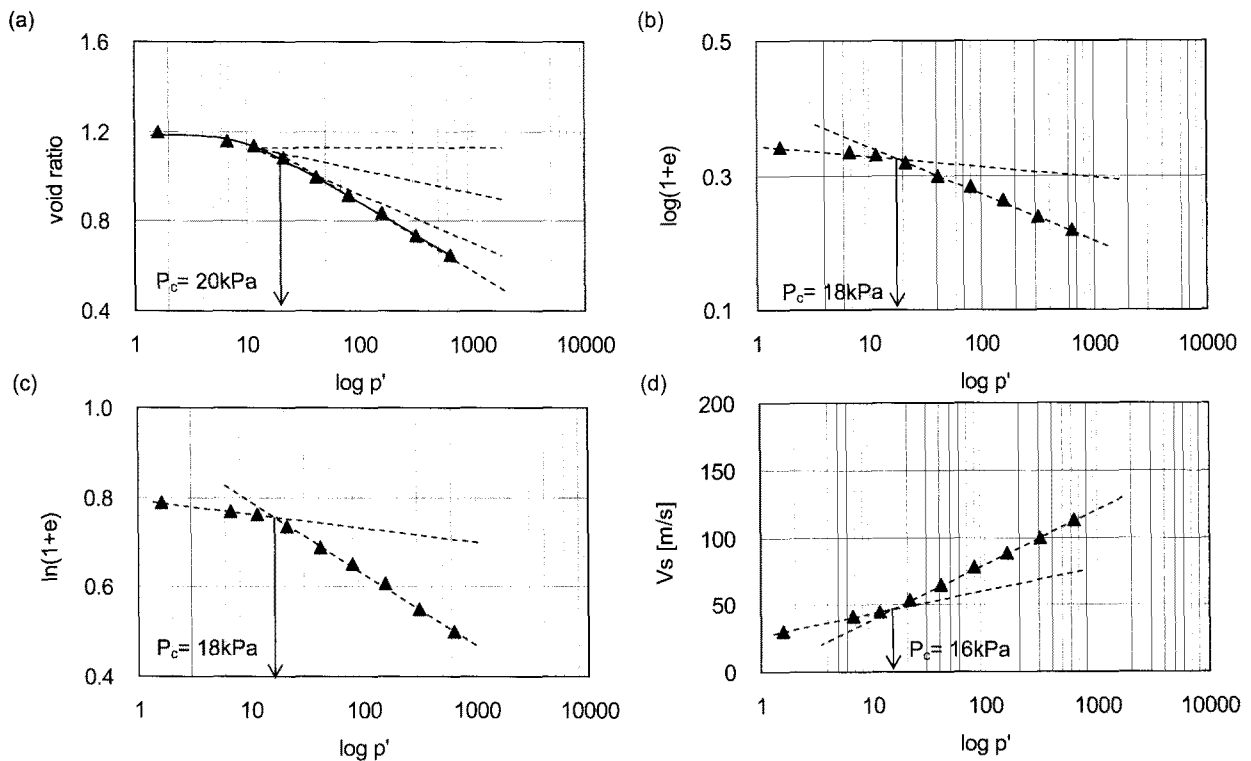


그림 10. 광양 3m 지역 점토의 선행압밀하중 평가: (a) Casagrande 방법; (b) Sridharan 방법; (c) Onitsuka 방법; (d) 전단파 속도법

행압밀하중을 산정하는 방법을 6(c), 7(c), 8(c), 9(c), 10(c), 11(c)에 나타내었다. 산정된 선행압밀하중 값은 표 2에 요약하였다.

5.5 전단파 속도 방법

전단파 속도 방법은 매 하중 재하 직전 간극수압이 소산된 후 시료에 대한 축하중이 모두 유효응력으로 전

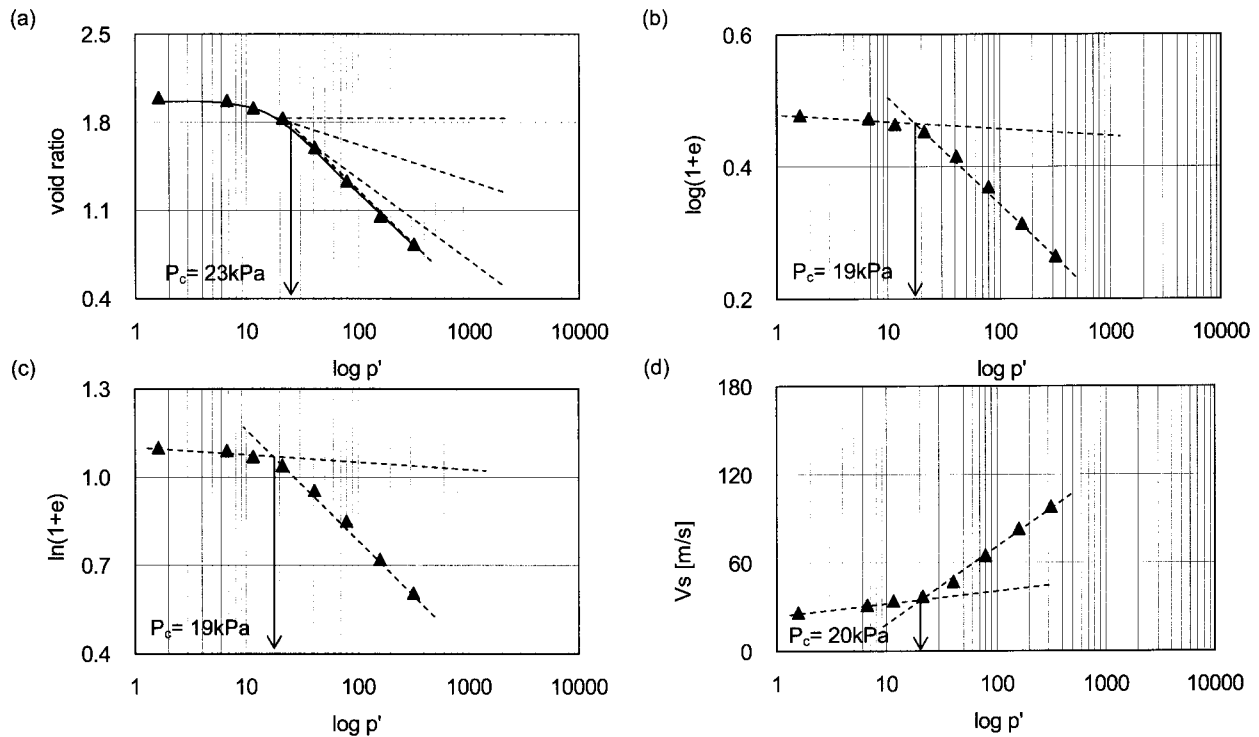


그림 11. 광양 11m 지역 점토의 선행압밀하중 평가: (a) Casagrande 방법; (b) Sridharan 방법; (c) Onitsuka 방법; (d) 전단파 속도법

표 2. 선행압밀하중 비교.

위치	심도(m)	Casagrande 방법	Sridharan 방법	Onitsuka 방법	전단파 속도법
인천 A	6	55 kPa	48 kPa	50 kPa	48 kPa
인천 A(재 하중)	6	315 kPa	300 kPa	300 kPa	300 kPa
인천 B	6	35 kPa	35 kPa	35 kPa	30 kPa
부산	10	28 kPa	13 kPa	13 kPa	13 kPa
광양 A	3	20 kPa	18 kPa	18 kPa	16 kPa
광양 B	11	23 kPa	19 kPa	19 kPa	20 kPa

환 되었을 때 측정된 전단파 속도를 이용한다. 측정된 전단파 속도와 유효응력을 도시한 후 선행압밀하중을 추정하는 방법이다. 하중 증가에 따라 전단파 속도는 항복 전(pre-yield) 구간과 항복 후(post-yield) 구간으로 나뉘며, 항복 후 구간에서 전단파 속도는 급격한 증가를 보인다. 이를 통해 Casagrande에 의해 제안된 도해법이 아닌, 단순한 항복 전 구간의 직선과 항복 후 구간의 직선 교차점을 이용하여 대수 방법과 동일하게 선행압밀하중을 추정 할 수 있다. 이는 Casagrande 방법의 맹점인 분석자에 따라 발생하는 주관적인 오류를 최소화시키며, 분석 방법이 보다 단순해 질 수 있다. 앞서 분석된 결과와 마찬가지로 그림 6(d), 7(d), 8(d), 9(d), 10(d), 11(d)에 전단파를 이용한 선행압밀하중 평가법을 나타내었다. 추정된 선행압밀하중 값은 표 2에 요약하였다.

5.6 선행압밀하중 비교

Grozic(2003)의 연구를 통해 추천되고 있는 Onitsuka 방법으로 산정된 선행압밀하중 값을 이용하여 Casagrande 방법과 전단파 속도방법으로 도출된 선행압밀하중 값(표 2)을 정규화시켜 그림 11에 나타내었다. Casagrande 방법으로 산정된 선행압밀하중은 Onitsuka 방법과 Sridharan 방법으로 산정된 값보다 약 1~2% 크게 평가되었으며 이는 Jose(1989)에 의해 수행된 연구결과와 비슷한 결과를 보여준다. 전단파를 이용하여 산정된 선행압밀하중은 Onitsuka 방법과 Sridharan 방법으로 산정된 값과 대부분 거의 일치하였으며 세계의 시료에서 약 0.8~1% 작게 평가되었다. 이는 압밀 실험 중 발생한 입자의 회전, 미끄러짐 등의 입자거동이 반영되어 과소평가 된 것으로 판단된다. 전단파를 이용한 새로운 분석은 선행압

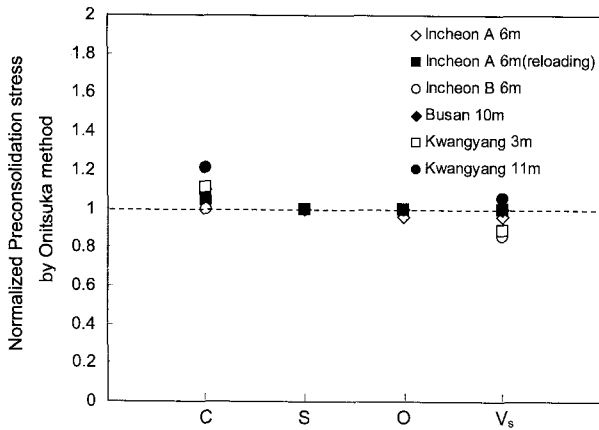


그림 12. 선행압밀하중 비교(C: Casagrande 방법, S: Sridharan 방법, O: Onitsuka 방법, Vs: 전단파 속도 방법).

밀하중을 신뢰성 있게 평가하고 있는 것으로 나타나고 있다.

6. 요약 및 결론

압밀 현상에 따른 입자 거동 특성을 반영하기 위해 전단파 속도를 이용하여 선행압밀하중을 평가할 수 있는 방법을 제안하였다. 제안된 방법의 검증에 위해 다른 조건에서 형성된 대표적인 국내 연약지반에서 채취한 비교란 시료를 이용하였다. 응력 증가비가 1인 표준 압밀 실험과 전단파 측정이 가능한 압밀셀을 이용하여 실험을 진행하였다. 침하량은 표준 압밀 실험과 동일한 시간 간격에 따라 측정하였으며, 전단파 속도는 매 하중의 재하 직전 측하중이 유효응력으로 전환되었을 때 측정하였다. 측정된 침하량과 전단파 속도를 이용하여 Casagrande 방법, Sridharan 방법, Onitsuka 방법, 그리고 전단파 속도 방법으로 선행압밀하중을 추정하여 이들을 비교하였다. Casagrande 방법에 의해 추정된 선행압밀하중은 다른 방법에 의해 추정된 값보다 다소 크게 산정되었으며, 이는 Jose(1989)에 의해 수행된 연구 결과와 동일한 결과를 보여주었다. 또한 선행압밀하중 결정 시 Grozic(2003)에 의해 추천된 Onitsuka 방법으로 도출된 값과 전단파 속도를 이용하여 분석된 값이 거의 일치하는 것으로 나타나 제안된 전단파 속도법은 상당히 신뢰성 있는 방법이라고 판단 된다. 이 방법은 현장에서 측정된 전단파 속도와 실내 압밀 실험을 이용하여 얻어진 전단파 속도 관계를 비교하여 현장의 압밀 상태 평가에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(KRF-2008-311-D00603)이며 이에 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 김선형 (2007), *현장계측과 선행압밀하중에 의한 침하예측*, 석사 학위논문, 토목공학과, 서울시립대학교, 서울.
2. 김재필 (1998), *선행압밀하중 결정방법에 관한 비교 및 분석*, 석사학위논문, 토목공학과, 동국대학교, 서울.
3. 김진섭, 이대명, 이남기, 정성교 (1999), “낙동간 삼각주에서 성토에 따른 압밀침하량의 역해석”, *대한토목학회 학술발표회*, pp.439-442.
4. 백원진, 이승, 정용은, 노태길, 양태선, 김주현 (2008), “준설 매립지반의 선행압밀하중 산정”, *한국지반공학회논문집*, 24(8), pp.61-79.
5. 이창호, 윤형구, 유정동, 이충호, 이종섭 (2007), “전단파 속도를 이용한 선행압밀하중 평가”, *2007 대한토목학회 정기학술대회*, pp.809-812.
6. ASTM D2435-04, 2004, “Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading”, *Annual Book of ASTM Standard*, Vol.04.08.
7. Becker, D. E., Crooks, J. H. A., Been, K. and Jefferied, M. G. (1987), “Work as a criterion for determining in situ and yield stresses in clays”, *Canadian Geotechnical Journal*, 24, pp.549-564.
8. Burland, J. B. (1990), “On the compressibility and shear strength of natural clays”, *Geotechnique*, 40(3), pp.329-378.
9. Burmister, D. M. (1951), “The applications of controlled test methods in consolidation testing”, In *Symposium on Consolidation Testing of Soils*. American Society for Testing and Materials, Special Technical Publication STP 126, pp.83-97.
10. Butterfield, R. (1979), “A natural compression law for soils (an advance on $e-\ln p$)”, *Geotechnique*, 29(4), pp.469-480.
11. Casagrande, A. (1936), “The determination of the pre-consolidation load and its practical significance”, In *proceedings of the 1st International Soil Mechanics and Foundation Engineering Conference*, Cambridge, Mass., 22-26 June 1936. Edited by A. Casagrande. Graduate School of Engineering, Harvard University, Cambridge, Mass. 3, pp.60-64.
12. Crawford, C. B. (1964), “Interpretation of the consolidation test”, *Journal of the soil mechanics and foundations division*, SM5, 90(5), pp.87-102.
13. Dias Junior, M. S. and Pierce, F. J. (1995), “A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves”, *Soil Technology*, 8, pp.139-151.
14. Grozic, J. L. H., Lunne, T. and Pande, S. (2003), “An oedometer test study on the preconsolidation stress of glaciomarine clays”, *Canadian Geotechnical Journal*, 40(5), pp.857-872.
15. Hegazy, Y. A. and Mayne, P. W. (2006), “A Global Statistical Correlation between Shear Wave Velocity and Cone Penetration Data”, *Site and Characterization*, pp.243-248.
16. Holtz, R. D. and Kovacs, W. D. (1981), *An introduction to Geotechnical Engineering*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ.
17. Hong, Z. and Han, J. (2007), “Evaluation of Sample Quality of Sensitive Clay Using Intrinsic Compression Concept”, *Journal of*

- Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(1), pp.83-90.
18. Houlby, G. T. and Sharma, R. S. (1999), "A conceptual model for the yielding and consolidation of clays", *Geotechnique*, 49(4), pp.491-501.
 19. Imai, G. (1979), "Development of New Consolidation Test Procedure Using Seepage Force", *Soils and Foundations*, 19-3, pp.45-60.
 20. Janbu, N. (1969), "The resistance concept applied to deformation of soils", In Proceedings of the 7th International Soil Mechanics and Foundation Engineering Conference, Mexico City, August 1969. A. A. Balkema, Rotterdam, Boston. Vol.1, pp.191-196.
 21. Jose, B. T., Sridharan, A. and Abraham, B. M. (1989), "Log-log method for determination of preconsolidation pressure", *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 12(3), pp.230-237.
 22. Lee, C., Lee, J. S., Lee, W. and Cho, T. H. (2008), "Experiment setup for shear wave and electrical resistance measurements in an oedometer", *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 31(2), pp.149-156.
 23. Mayne, P. W. and Rix, G. J. (1993), " G_{max} - q_c Relationships for Clays", *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 16(1), pp.54-60.
 24. Morin, P., Leroueil, S. and Samson, L. (1983), "Preconsolidation pressure of Champlain clays", Part 1. In-situ determination. *Canadian Geotechnical Journal*, 20, pp.782-802.
 25. Nagaraj, T. S. and Srinivasa Murthy, B. R. (1983), "Rationalization of Skempton's compressibility equation", *Geotechnique*, 33(4), pp. 433-443.
 26. Onitsuka, K., Hong, Z., Hara, Y. and Yoshitake, S. (1995), "Interpretation of oedometer test data for natural clays", *Soils and Foundations*, 35(3), pp 61-70.
 27. Robertson, P. K and Fear, C. E. (1995), "Liquefaction of sands and its evaluation", IS TOKYO '95", First International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Keynote Lecture, November 1995.
 28. Santamarina, J.C., Klein, K.A. and Fam, N.A. (2001), *Soils and Waved*, John wiley & Sons.
 29. Schmertmann, J. H. (1955), "The undisturbed consolidation behavior of clay", *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 20, pp.1201-1233.
 30. Sridharan, A., Abraham, B. M. and Jose, B. T. (1991), "Improved technique for estimation of preconsolidation pressure", *Geotechnique*, 41(2), pp.263-268.
 31. Wang, L. B. and Frost, J. D. (2004), "Dissipated strain energy method for determining preconsolidation pressure", *Canadian Geotechnical Journal*, 41(4), pp.760-768.

(접수일자 2008. 8. 11, 심사완료일 2009. 5. 18)