한국지반공학회논문집 제31권 9호 2015년 9월 pp. 17 ~ 27
JOURNAL OF THE KOREAN GEOTECHNICAL SOCIETY
Vol.31, No.9, September 2015 pp. 17 ~ 27

ISSN 1229-2427 (Print)
ISSN 2288-646X (Online)
http://dx.doi.org/10.7843/kgs.2015.31.9.17

전단파 속도를 통한 모래의 전단강도 예측

Shear Strength Estimation of Clean Sands via Shear Wave Velocity

유 진 권[1] Yoo, Jin-Kwon
박 두 희[2] Park, Duhee

Abstract

We perform a series of experimental tests to evaluate whether the shear strength of clean sands can be reliably predicted from shear wave velocity. Isotropic drained triaxial tests on clean sands reconstituted at different relative densities are performed to measure the shear strength and bender elements are used to measure the shear wave velocity. Laboratory tests reveal that a correlation between shear wave velocity, void ratio, and confining pressure can be made. The correlation can be used to determine the void ratio from measured shear wave velocity, from which the shear strength is predicted. We also show that a unique relationship exists between maximum shear modulus and effective axial stress at failure. The accuracy of the equation can be enhanced by including the normalized confining pressure in the equation. Comparisons between measured and predicted effective friction angle demonstrate that the proposed equation can accurately predict the internal friction angle of granular soils, accounting for the effect of the relative density, from shear wave velocity.

요 지

벤더엘리먼트가 장착된 삼축압축시험장비를 이용하여 모래에 대한 일련의 압밀배수시험을 수행하였다. 상대밀도 및 유효구속응력 조건을 달리하여 각각의 조건별 응력-변형률 관계를 측정하였으며, 압밀이 종료된 시점에서의 전단파 속도를 측정함으로써 전단파 속도와 간극비, 유효응력, 그리고 전단강도와의 상관관계를 분석하였다. 분석 결과, 미소변형률에서의 전단파 속도로부터 계산된 최대전단탄성계수와 파괴 시의 축응력과 압밀 시의 구속응력의 합으로 정의되는 유효수직응력간에는 고유한 상관관계가 존재하는 것으로 나타났다. 도출된 전단탄성계수와 유효수직응력간의 상관관계는 유효구속응력을 정규화시킴으로써 정확도를 향상시켰다. 본 연구를 통해 제시된 상관관계를 통해 전단강도 및 내부 마찰각을 예측하였을 시, 실제 실내 시험을 통해 산출된 내부 마찰각을 정확하게 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 이는 미소변형률에서의 전단파 속도를 기반으로 신뢰성 높은 파괴 시 전단강도, 나아가 내부 마찰각까지 예측이 가능하다는 것을 의미하며 기존 SPT-N value와 경험식을 통해 내부 마찰각을 예측하여 설계에 적용하는 방식의 불확실성을 개선해 줄 수 있는 매우 유용한 방법이라고 판단된다.

Keywords : Shear strength, Shear wave velocity, Shear modulus, Effective vertical stress, Internal friction angle

1 비회원, 한양대학교 건설환경공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Hanyang Univ.)
2 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 부교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Hanyang Univ., Tel: +82-2-2220-0322, Fax: +82-2-2220-4322, dpark@hanyang.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2016년 3월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2015 by the Korean Geotechnical Society
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.

1. 서 론

현장 채취 시료의 교란 여부는 실내 시험결과의 정확성에 큰 영향을 줄 수 있는 매우 중요한 요소 중의 하나이다. 하지만 경제적, 기술적인 이유에서 원위치(in-situ) 상태 그대로의 현장 모래를 채취하는 것은 매우 어렵다. Yoshimi et al.(1994)에 의해 점착성이 없는 모래에 동결(freezing)공법을 적용하여 교란되지 않은 모래 시료를 획득할 수 있는 방법이 제시된 바 있으나 경제적인 측면에서 효율적이지 못한 것으로 나타났다. 따라서 대부분의 경우에는 낙사, 다짐, 그리고 두드림 등의 방법을 적용하여 재성형된 시료로 실내 시험을 수행하거나 SPT, CPT 등의 현장시험을 통하여 원위치 상태의 지반 물성을 예측하는 것이 일반적이다. 하지만 이와 같은 관입형 현장시험으로는 지반물성의 2차원 및 3차원 공간적 변이성을 예측하기 어려울 뿐만 아니라 대상지반 전체를 대표하는 지반물성을 산출하기란 쉽지 않다. 반면 탄성파 탐사와 같은 현장 지구물리탐사기법은 기존에 널리 수행되고 있는 SPT나 CPT와는 달리 지반을 교란시키지 않는 범위 내에서 연속된 지반정보의 획득이 가능하다는 큰 장점을 지니고 있어 최근 측정된 탄성파 정보를 통하여 지반정수를 산출하려는 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 측정된 전단파 속도(최대전단탄성계수)와 유효응력을 기반으로 전단강도를 산출하고 나아가 내부 마찰각을 직접적으로 추정하기 위한 보다 개선된 방법을 제시하고자 하였다. 이를 위해 벤더엘리먼트를 통해 전단파 속도의 측정이 가능한 삼축압축시험장비를 자체 제작하였으며, 상대밀도 및 구속응력 조건을 달리한 각각의 압밀배수시험이 진행되는 전 과정에서의 응력-변형률 관계를 측정하는 한편, 압밀이 종료된 시점에서의 전단파 속도를 측정함으로써 전단파 속도와 간극비, 유효응력, 그리고 파괴 시 전단강도와의 상관관계를 분석하였다. 이를 통해 측정된 전단파 속도를 기반으로 한 전단강도 및 강도정수의 직접적인 예측 가능성을 평가하였다.

2. 이론적 배경

일반적으로 전단파 속도는 간극비, 유효응력, 포화도, 흙의 고유한 특성(입자의 크기, 입자의 형상, 거칠기), 그리고 세립분의 함유량 등에 영향을 받는다고 알려져 있다. 특히 간극비와 유효응력은 전단파 속도에 가장 큰 영향을 주는 요소(Hardin and Drnevich, 1972; Richart et al., 1970)로써 여러 연구자를 통해 각각의 상관관계에 관한 연구가 진행되어 왔다. Hardin and Richart(1963)는 공진주 시험(resonant column test)을 수행하여 획득한 결과를 바탕으로 등방조건(isotropic)에서의 전단파 속도와 간극비, 그리고 유효응력과의 상관관계를 다음과 같이 제시하였다.

$$V_S = (m_1 - m_2 e)(p')^n \tag{1}$$

여기서 V_s는 전단파 속도(m/s), e는 간극비, p'은 유효응력(kPa), 그리고 m_1과 m_2는 실험적 상수로써 흙의 종류에 따라 서로 다른 값을 나타낸다고 제안하였다. Hardin and Drnevich(1972)는 입자의 형상을 고려하여 둥근 입자와 모난 입자 형상에 대해 다음과 같이 전단파 속도와 간극비, 그리고 유효응력간의 상관관계를 제시한 바 있다.

$$V_S = \alpha \left(\frac{\sigma_0'}{1kPa}\right)^{\beta} \tag{2}$$

여기서 $\alpha(=A \cdot F_e)$와 β는 흙의 종류에 따라 다르게 나타나는 실험적 상수를 의미하며, 둥근 입자 형상에 대해 $F_e = \frac{(2.17-e)^2}{(1+e)}$, 모난 입자 형상에 대해 $F_e = \frac{(2.97-e)^2}{(1+e)}$로 각각 제안하였다. α는 하중이 1kPa인 상태에서의 초기 탄성파 속도로써 초기 간극비 및 입자 구성에 따라 변화하며 β는 입자 간 접촉 상태, 입자 형상, 그리고 하중에 따라서 변화한다고 제시되었다. 실험적 상수인 α와 β의 상관관계는 Santamarina et al.(2001)에 의해 차트로 제시된 바 있다. Roesler(1979)는 기존의 Hardin and Richart(1963) 및 Hardin and Drnevich(1972)에 의해 제시된 연구 결과를 바탕으로 정육면체 시료에 독립적인 응력을 가해줌으로써 비등방 조건(anisotropic)에 대한 연구를 수행한 바 있으며, Chiang and Chae(1972)와 Saxena et al.(1988)은 세립분 함량에 따른 전단파 속도와 간극비, 그리고 유효응력간의 상관관계에 관한 연구 결과를 제시하였다. 최근에는 기존 수행되었던 연구 결과를 바탕으로 현장에서의 간극비 및 강도정수를 예측하기 위한 연구 또한 진행되고 있다. Lee and Yoon(2014)

은 현장에서 획득한 탄성파 속도를 이용하여 기존에 제시되었던 Wood method, Gassmann method, 그리고 Foti method를 통해 현장의 간극비를 예측하였다. Yoon and Lee(2010)는 탄성파 측정이 가능한 측정장비(FVRP) 개발을 통해 탄성파로 예측한 간극비가 체적을 기반으로 계산된 간극비와 서로 유사한 경향을 나타낸다는 것을 증명하였으며, Cunning et al.(1995)과 Robertson et al.(1995)은 원위치 상태의 간극비와 한계평형상태(critical steady state)에서의 간극비와의 차이를 의미하는 상태 매개변수(ψ) 개념을 도입하여 측정된 전단파 속도로부터 원위치 상태의 간극비를 예측하였다. 이에 반해, 전단파 속도와 강도정수의 상관관계에 대한 연구는 활발히 수행되지 못하였다. 이는 전단파 속도가 미소변형률(small strain)에서 나타나는데 비해 전단강도는 이와는 반대로 대변형률(large strain)에서 측정되기 때문이다. 전단파 속도와 강도정수와의 상관관계는 Cha and Cho(2007), Sharma et al.(2011), Guadalupe et al.(2013), 그리고 Yoo and Park(2014)에 의해 연구된 바 있다. Cha and Cho(2007)는 현장에서 채취한 시료를 e_{max}, e_{min} 상태를 포함한 다양한 상대밀도로 재성형하여 오이도미터 압축시험(oedometric compression test) 및 직접전단시험(direct shear test)을 수행하였다. 벤더엘리먼트가 설치된 오이도미터 압축시험기로 측정한 전단파 속도 결과를 바탕으로 현장토에 대한 전단파 속도-간극비-유효응력간의 상관관계를 유추하였으며, 다음의 식 (3)과 같이 e_{max}, e_{min} 상태에서의 측정된 전단파 속도(V_{s_emax}, V_{s_emin})와 현장에서 측정된 전단파 속도(V_{s_field})를 통해 원위치 상태에서의 간극비(e_{field})를 예측할 수 있는 경험식을 제안하였다.

$$e_{field} = e_{\max} - (e_{\max} - e_{\min}) \frac{V_{S_field} - V_{S_e\max}}{V_{S_e\min} - V_{S_e\max}} \quad (3)$$

또한, 직접전단시험을 수행하여 e_{max}, e_{min}에서의 간극비와 내부 마찰각간의 상관관계를 도출함으로써 측정된 전단파 속도로부터 내부 마찰각을 간접적으로 예측할 수 있는 순서도를 제시하였다. Sharma et al.(2011)은 cemented silty sand를 이용해서 압밀배수(consolidated isotropic draind test, CID) 시험을 수행함으로써 전단 시 전단 변형률에 따른 전단파 속도(전단탄성계수)의 변화를 측정하였다. 측정된 전단탄성계수는 파괴점에 도달하기 직전까지 지속적으로 증가하는 경향을 보였으며, 이를 바탕으로 팽창성 시료에 대해 미소변형률에서의 초기 전단탄성계수와 파괴 시의 유효응력간의 고유한 상관관계를 다음과 같이 제시하였다.

$$G_{\max} / \sigma'_{1f} = constant \quad (4)$$

여기서 G_{max}는 초기 전단탄성계수, s'_{1f}는 파괴 시의 유효수직응력을 의미하며 cemented silty sand에 대해 G_{max}/s'_{1f}의 비가 약 190의 일정한 상수로 표현된다고 제시하였다. Guadalupe et al.(2013)은 기존에 수행되었던 cemented silty sand 외에 quartz sand와 non-plastic silt에 대한 추가적인 시험을 수행하여 Sharma et al.(2011)의 가설을 입증하였다. 또한, Yoo and Park(2014)에 의해서도 미소변형률에서의 G_{max}와 파괴 시 s'_{1f}의 상관관계가 연구되었다. Yoo and Park(2014)은 오타와 샌드를 이용하여 동일한 유효구속응력 조건에서 압밀배수시험을 수행하였으며, 동일한 유효구속응력 조건에서 상대밀도에 관계없이 G_{max}/s'_{1f}가 일정한 상수로 표현 가능함을 제시하였다. 나아가 제시된 경험식을 통해 탄성파 탐사 결과로부터 전단강도의 직접적인 예측 가능성을 제시한 바 있다.

3. 시험 개요

3.1 시험 시료

본 연구에는 북미 지역의 대표적인 실험용 표준사로써 비중(G_s)이 2.65, e_{max}가 0.742, 그리고 e_{min}이 0.502인 오타와 샌드(ASTM C778)와 2.65의 비중, 0.98의 e_{max}, 그리고 0.605의 e_{min}을 갖는 국내의 대표적인 실험용 표준사인 주문진 표준사가 사용되었다. Table 1에는 오타와 샌드와 주문진 표준사의 기본 물성치를 정리하였으며, Fig. 1에는 각각의 입도분포곡선을 도시하였다.

Table 1. Properties of tested soils

Property	Ottawa sand	Jumunjin sand
G_s	2.65	2.65
C_u	1.15	1.46
D_{50} (mm)	0.72	0.56
e_{max}	0.742	0.98
e_{min}	0.502	0.605

3.2 시료 조성

삼축압축시험을 위한 시료는 직경 70mm, 높이 140mm의 크기로 직경과 높이의 비가 1:2의 비를 이루도록 (ASTM D7181, 2011) 습윤다짐법(moist tamping)과 건조낙사법(air pluviation)을 각각 적용하여 제작하였다. 습윤다짐법은 시료 조성 시 시료의 무게 대비 약 5~8%의 물을 혼합하여 시료를 조성하는 방법으로 본 연구에서는 무게 대비 약 8%의 함수비에 해당하는 내부 공기가 제거된 물(de-aired water)이 사용되었다. 습윤다짐법 적용 시에는 시료의 균질성 확보를 위해 Ladd and Foott(1974) 및 Ladd(1978)가 제안한 과소다짐법(under compaction)이 동시에 적용되었다. 건조낙사법은 오븐 건조시킨 시료를 일정한 높이에서 낙사시켜 층의 구분 없이 시료를 제작하는 방법으로써 시료의 제작 시에는 7mm 직경(질량 유량: 6.92g/sec)의 튜브가 사용되었다. 시료의 낙사 높이가 증가할수록 제작되는 시료의 상대밀도가 선형적으로 증가(Vaid and Negussey, 1988)하는 점을 고려하여 사전에 결정된 낙사 높이에 따라 시료를 낙사시켰다. 건조낙사법으로 제작된 시료의 균질성은 Cresswell et al.(1999)과 Frost and Park(2003)에 의해 입증된 바 있다. 본 연구에서는 실내 시험에 사용된 모든 시료에 대해서 동일하게 상대밀도 30%의 시료 조성 시에는 습윤다짐법을, 상대적으로 높은 상대밀도인 60%, 90%의 시료 조성 시에는 건조낙사법을 적용하였다. 각각의 재성형 방법을 통해 조성된 시료에는 10kPa 미만의 진공압을 가해줌으로써 입자의 구조 변화 없이 시료가 자립할 수 있도록 하였다(ASTM D7181, 2011). 자립한 시료에는 5kPa 미만의 이산화탄소를 시료 내부로 통과시켜 내부 공기를 이산화탄소로 치환하고, 수두차를 이용하여 공기가 제거된 물을 시료 내부에 순환시키는 과정을 반복 수행하였다.

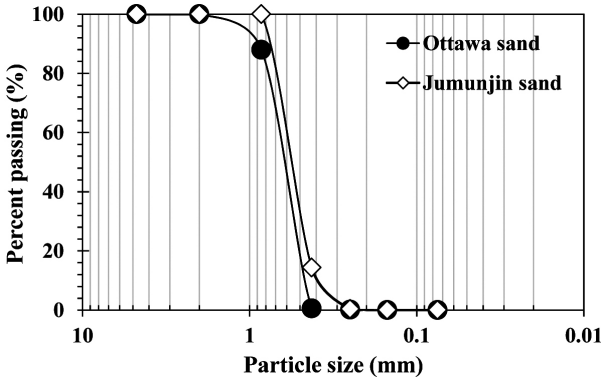


Fig. 1. Grain size distribution curve of tested soils

3.3 압밀배수(consolidated isotropic drained test, CID) 시험

본 연구에서 사용된 삼축압축시험기는 Geocomp corporation에서 제작된 자동화 삼축압축시험기로써 수직응력을 발생시키고 수직 방향의 변위를 측정하는 load frame, cell pressure와 back pressure를 컨트롤하는 2개의 flow pump로 구성되어 있다(Fig. 2).

시험에 사용된 모든 시료는 일정한 유효응력을 유지하면서 배압(back pressure)을 20kPa단위로 증가시켜

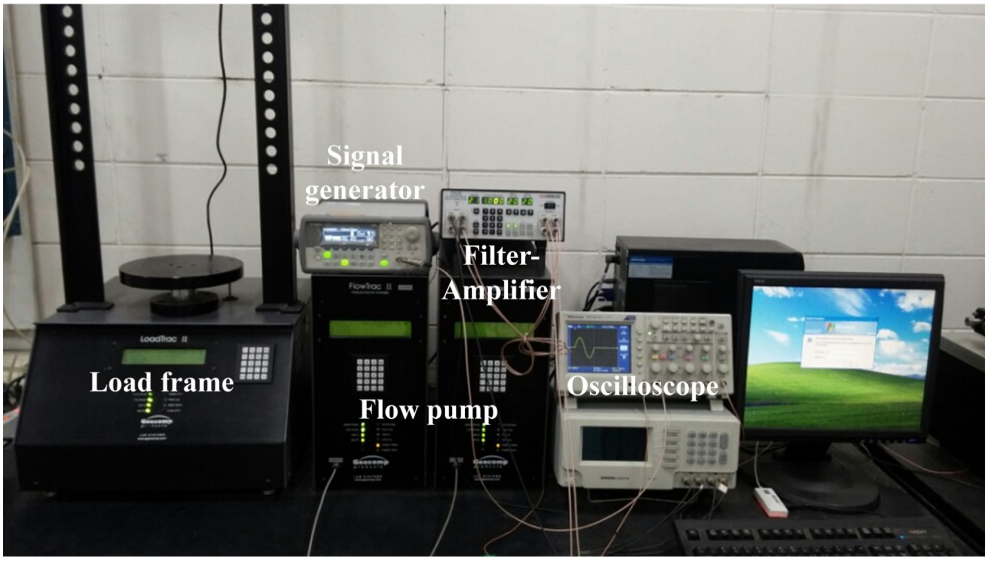


Fig. 2. Triaxial test and shear wave velocity measurement test equipment

포화시켰으며, 이 때 Skempton(1954)의 간극수압계수(B-value)가 0.95 이상의 수치에 도달하였을 때를 완전히 시료가 포화된 것으로 간주하였다. 압밀 시에는 정해진 시험 조건에 따라 50, 100, 150, 200, 250, 그리고 300kPa의 일정한 유효응력을 등방조건으로 가하였으며 체적 및 수직 변위가 더 이상 발생하지 않는 시점을 압밀이 종료된 시점으로 판단하였다. 압밀 종료 후에는 배수 조건하에서 축방향 변형률(ε_a)이 0.1%/min이 되도록 strain control을 통하여 전단시켰다. 오타와 샌드와 주문진 표준사에 대해 각각 18회, 총 36회의 압밀배수 시험이 수행되었으며, Table 2에는 본 연구에서 수행된 시험 조건을 매트릭스의 형태로 나타내었다.

3.4 전단파 속도 측정

전단파 속도 측정에는 미국의 Piezo system, INC.에서 제작된 벤더엘리먼트를 가로 4mm, 세로 12.7mm, 그리고 두께 0.66mm의 크기로 가공하여 사용하였다. 전단파 속도 측정에 사용된 벤더엘리먼트는 별도의 차폐나 접지 없이도 전기적 간섭 문제(cross-talk)를 최소화할 수 있는 병렬 타입으로 연결하였다. 병렬 타입은 벤더엘리먼트를 구성하고 있는 세 개의 층 중, 중심부에 위치한 메탈 심(metal shim)을 기준으로 위, 아랫 면(piezoelectric material)에는 그라운드를 연결하여 접지시키고, 중심부의 메탈 심에는 전압을 가해주도록 연결하는 방법으로써 Lee and Santamarina(2005)에 의해 우수성이 입증된 바 있다. 병렬 타입으로 연결된 벤더엘리먼트는 에폭시로 코팅하여 삼축압축시험 시 포화로 인한 간극수와의 접촉을 차단하였으며 전도성 도료(conductive paint)로 벤더엘리먼트 전체를 코팅함으로써 이중으로 누화를 방지하였다(Lee and Santamarina, 2005). 제작된 벤더엘리먼트는 전단파 속도의 측정을 위해 시료의 하부 캡과 상부 캡에 각각 설치하였다. 전단파 속도의 측정은 송신기(transmitter)의 역할을 담당하는 하부 캡의 벤더엘리먼트에 신호발생기(signal generator, Agilent 3320A)로 sine burst 신호를 발생시켜 시료를 통해 상부 캡의 수신 벤더엘리먼트(receiver)에 전달함으로써 이루어졌다. 수신기로 전달된 신호는 필터(filter-amplifier, Krohn-hite 3944)를 통해 주파수의 컷오프(cut-off) 및 증폭되었으며, 신호 데이터의 저장 및 도시에는 오실로스코프(oscilloscope, Tektronix TDS 2014c)가 사용되었다. 이 때, 보다 정확한 신호의 획득을 위해 총 128회의 스태킹(stacking)을 수행하였다. 전단파 속도 산출을 위한 거리는 벤더엘리먼트의 끝단간의 거리(tip-to-tip)를 적용하였으며, 신호가 전달되는 시간은 첫 번째 bump가 발생한 이후에 다시 원점을 통과하는 시간을 최초 도달시간으로 선정하는 것이 적당하다는 기존의 연구(Lee and Santamarina, 2005)를 참고하여 최초 도달시간을 선정하였다. Fig. 3에는 실내 시험을 통해 측정된 전단파의 wave trace를 도시하였으며, Lee and Santamarina(2005)가 제시한 바와 같이 전단파의 도달시간은 B점과 C점 사이(C점에 가까운 위치)에서 선택하였다. 측정된 전단파 속도는 밀도와의 상관관계를 통해 전단탄성계수(G)의 산출에 적용하였다.

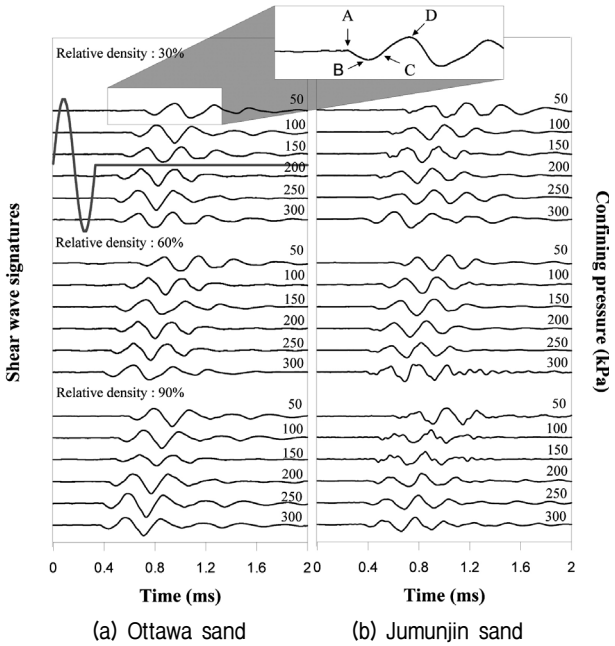


Fig. 3. Measured Shear wave traces for tested soils: (A) first deflection, (B) first bump maximum, (C) zero after first bump, and (D) major first peak

Table 2. Triaxial test matrix

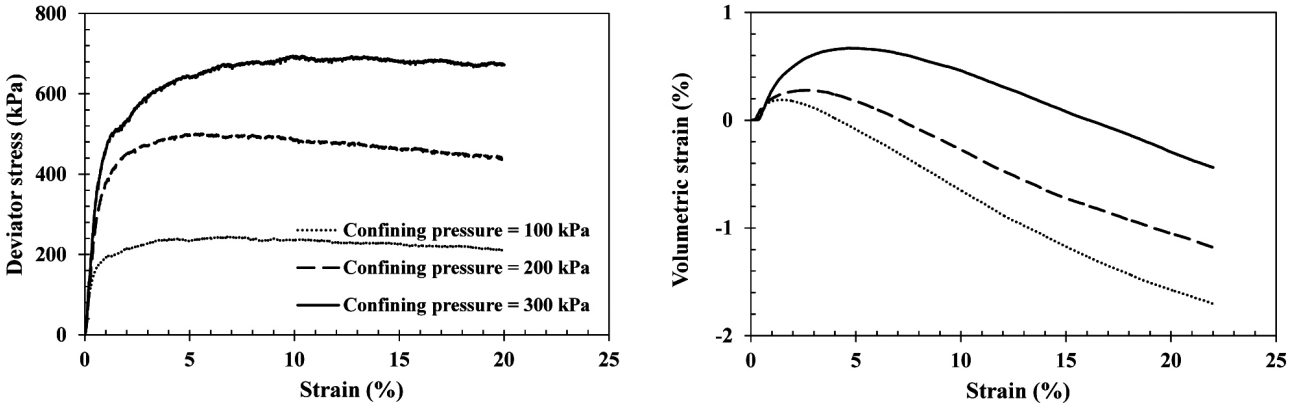
	Sample preparation method	Relative density (D_r) [%]	Confining pressure (σ'_3) [kPa]
Ottawa sand / Jumunjin sand	Moist tamping	30	50, 100, 150 200, 250, 300
	Air pluviation	60 90	

$$G=\rho V_S^2 \tag{5}$$

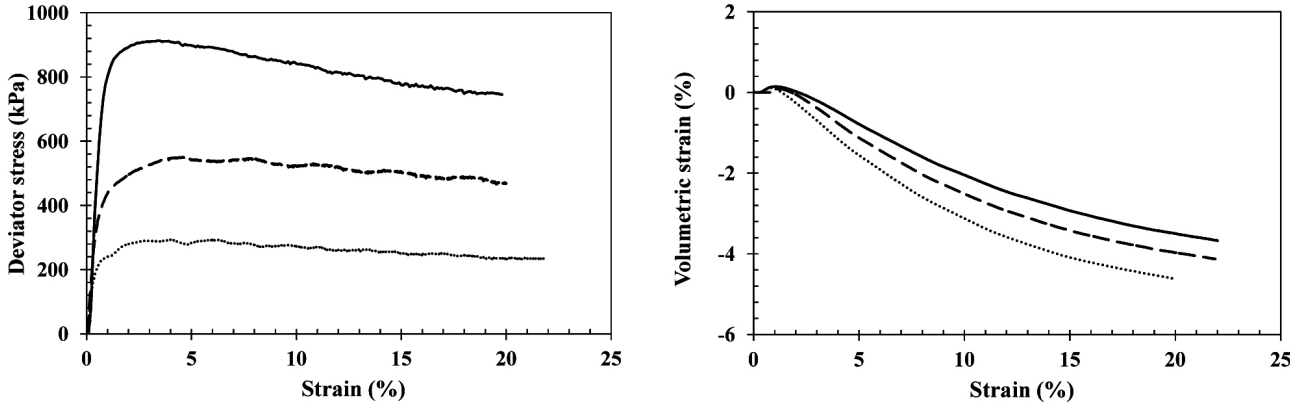
여기서 ρ는 밀도를 나타내며 V_s는 전단파 속도를 의미한다.

4. 시험결과 및 분석

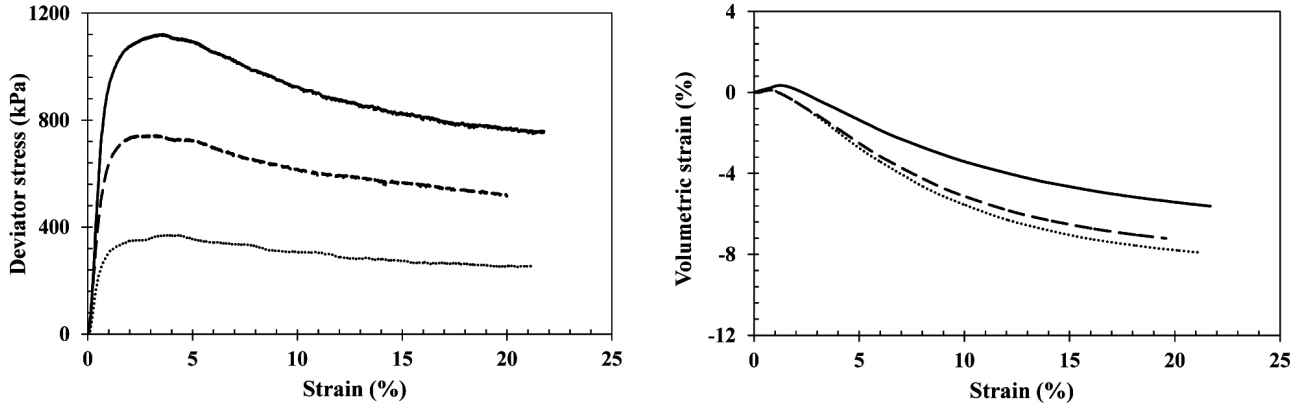
Fig. 4와 Fig. 5에는 본 연구에서 수행된 압밀배수 시험 결과를 시료 별로 각각 도시하였다. 오타와 샌드와 주문진 표준사 모두에서 상대밀도가 높을수록 뚜렷한 파괴점이 나타났으며 전단 시 압축보다는 팽창이 발생하는 경향을 보였다. 상대적으로 느슨한 상태에 해당하는 상대밀도 30%의 시료에서는 대변형률(≒ 15%)에 이르기까지 시료의 압축이 발생하였으며, 상대밀도 60%, 90% 시료에서는 초반 압축 현상이 발생하다 이후에는 지속적으로 시료의 팽창이 발생하였다.



(a) Relative density 30%

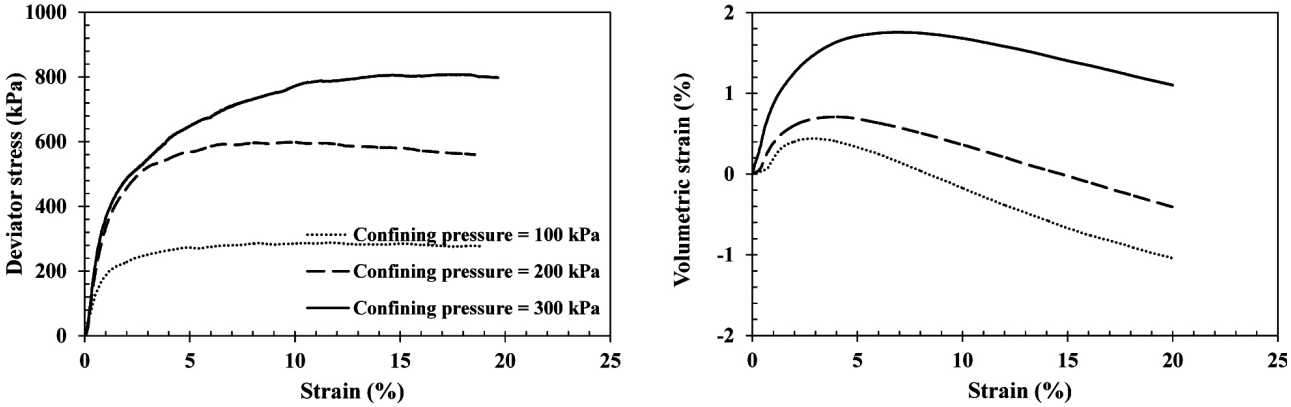


(b) Relative density 60%

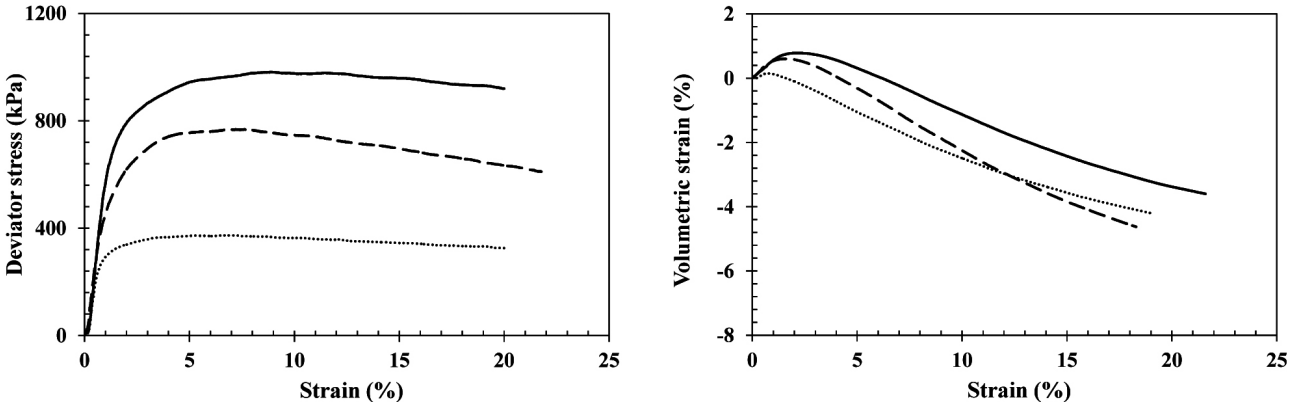


(c) Relative density 90%

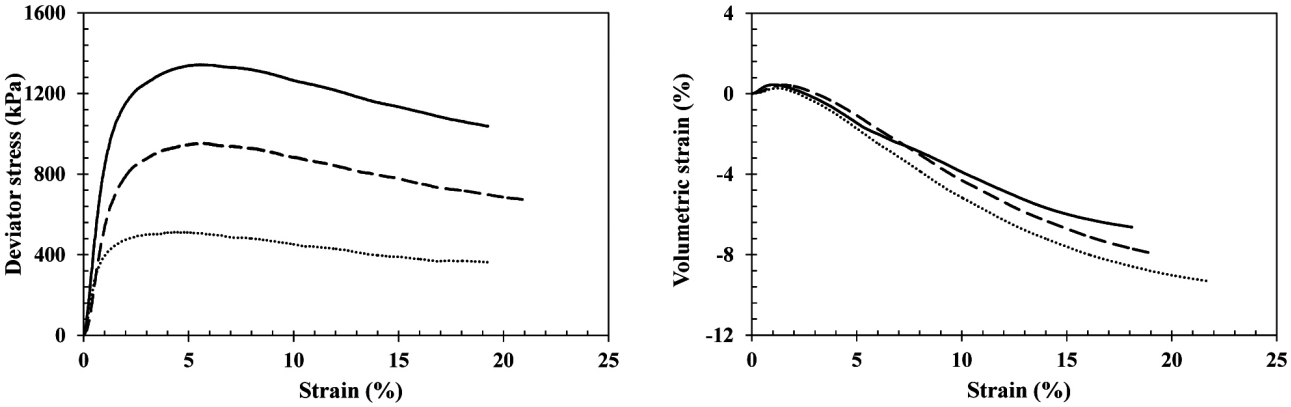
Fig. 4. Stress-strain and volumetric strain-strain responses for Ottawa sand



(a) Relative density 30%



(b) Relative density 60%



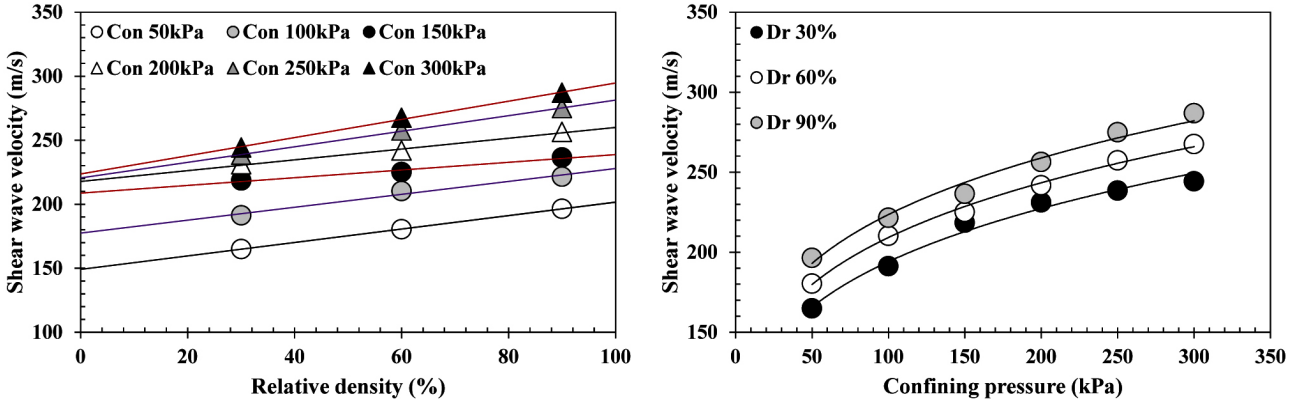
(c) Relative density 90%

Fig. 5. Stress-strain and volumetric strain-strain responses for Jumunjin sand

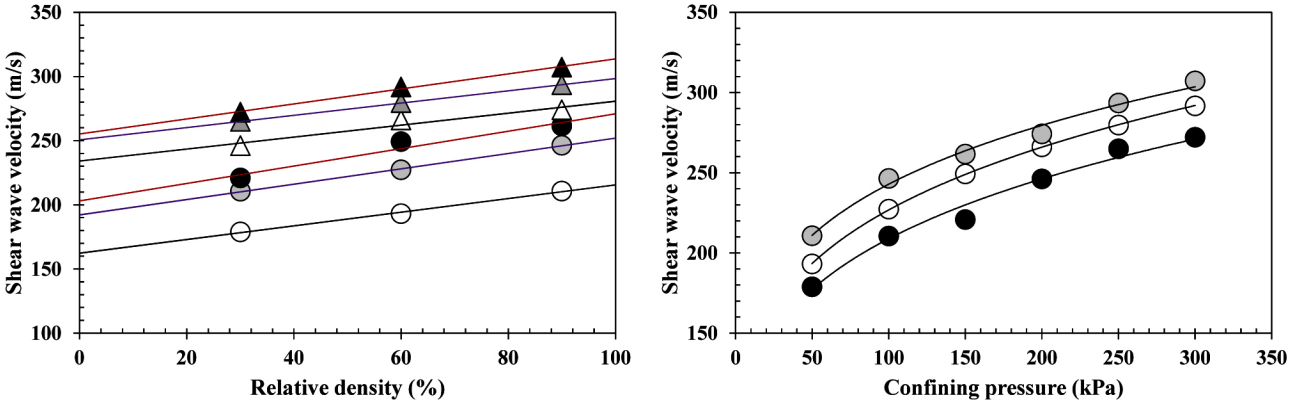
4.1 전단파 속도-간극비-유효응력간의 상관관계

Fig. 6에는 오타와 샌드와 주문진 표준사에 대해 서로 다른 유효구속응력 조건에서 각각의 상대밀도 별로 측정된 전단파 속도의 변화 경향을 도시하였다.

기존 여러 연구자에 의해 입증된 바와 같이 상대밀도와 유효구속응력이 증가할수록 전단파 속도 또한 함께 증가하였으며, Hardin and Richart(1963)와 Bryan and Stoll(1988)이 제시한 이론과 동일하게 간극비에 따른 전단파 속도의 변화 경향은 선형 또는 거의 선형의 형태로 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 6을 통해 도출된 전단파 속도와 간극비, 유효구속응력에 대한 각각의 상관관계를 바탕으로 전단파 속도, 간극비, 그리고 유효구속응력의 고려가 동시에 가능한 경험식은 Robertson et al.(1995)이 제안한 경험식의 형태로써 다음과 같이 산출하였다.



(a) Ottawa sand



(b) Jumunjin sand

Fig. 6. Shear wave velocity - Relative density - Confining pressure correlation

$$V_S = (280 - 130e)\left(\frac{\sigma_3'}{p_a'}\right)^{0.26} \quad \text{(for Ottawa sand)} \quad (6)$$

$$V_S = (300 - 110e)\left(\frac{\sigma_3'}{p_a'}\right)^{0.25} \quad \text{(for Jumunjin sand)} \quad (7)$$

여기서 e는 간극비, σ_3'는 유효구속응력, 그리고 p_a'는 대기압($p_a' \fallingdotseq 100$ kPa)을 나타내며 산출되는 전단파 속도의 단위는 m/s이다. 지수로 표현된 오타와 샌드의 0.26과 주문진 표준사의 0.25는 실측 데이터와의 매칭(fitting)을 위한 지수로써 Hardin and Richart(1963)가 제시한 0.25~0.29의 범위와 유사하게 나타났다. 도출된 경험식으로 예측된 전단파 속도는 오타와 샌드의 경우 7.81, 주문진 표준사에 대해 7.45의 RMSE(root mean square error)를 나타냈으며, 평균 오차는 오타와 샌드, 주문진 표준사에 대해 각각 3.4%, 2.6%로 실제 측정된 전단파 속도를 비교적 정확하게 예측하는 것으로 나타났다. 따라서 제시된 경험식을 통해 간극비 및 심도에 따른 유효구속응력을 가정한다면 원하는 심도에서의 전단파 속도를 비교적 정확하게 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 전단파 속도와 간극비, 그리고 유효구속응력과의 분석을 통해 도출된 경험식은 추후 전단강도와의 상관관계 유추를 통해 내부 마찰각을 예측하는데 적용되었다.

4.2 G_{max} - σ'_{1f} 상관관계

측정된 미소변형률에서의 전단파 속도와 파괴 시 유효수직응력을 Sharma et al.(2011)과 Guadalupe et al.(2013)에 의해 제안된 이론에 적용한 결과를 Fig. 7에 도시하였다. 분석 결과, 기존 Sharma et al.(2011)과 Guadalupe et al.(2013)에 의해 제시된 최대전단탄성계수(G_{max})와 파괴 시의 유효수직응력(s'_{1f})간의 선형 상관관계는 일정한 상수로 제시되었다는 점에서 분명한 장점을 지니고 있지만 예측되는 s'_{1f}의 정확성은 다소 떨어지는 것으로 확인되었다. 130MPa의 G_{max}를 전후로 하여 보다 낮은 G_{max}에서는 s'_{1f}가 과소 예측되고, 이보다 높은 G_{max}에서는 s'_{1f}가 과대 예측되는 경향이 뚜렷하게 나타났다. 반면, G_{max}와 s'_{1f}의 상관관계를 비선형으로 분석할 경우

단순선형으로 분석하는 경우보다 정확성이 크게 향상되는 것으로 나타났다.

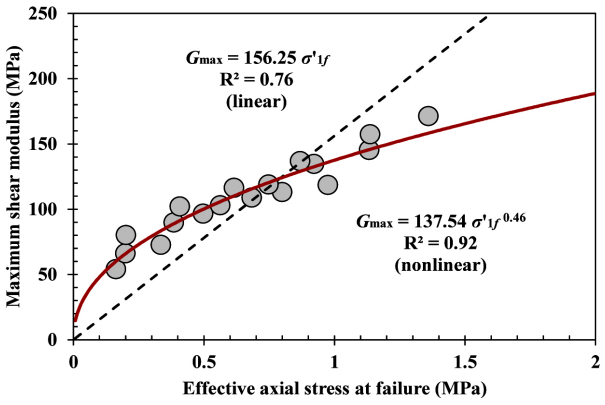
G_{max}와 s'_{1f}가 비선형의 상관관계를 보이는 것은 일정한 구속응력 조건에서는 D_r - V_s, D_r - s'_{1f}, 그리고 D_r -내부 마찰각(φ')이 선형의 상관관계를 나타내지만(Bolton, 1986; Cha and Cho, 2007), 일정한 상대밀도 조건에서 유효구속응력(σ'_3)과 G_{max}가 비선형의 상관관계를 보이고 σ'_3의 G_{max}와 s'_{1f}에 대한 영향 정도가 서로 다르기 때문이다. 비선형분석을 통해 산출된 오타와 샌드와 주문진 표준사의 G_{max}와 s'_{1f}의 상관관계는 다음과 같다.

$$G_{max} = 137.54(\sigma'_{1f})^{0.46} \quad \text{(for Ottawa sand)} \qquad (8)$$

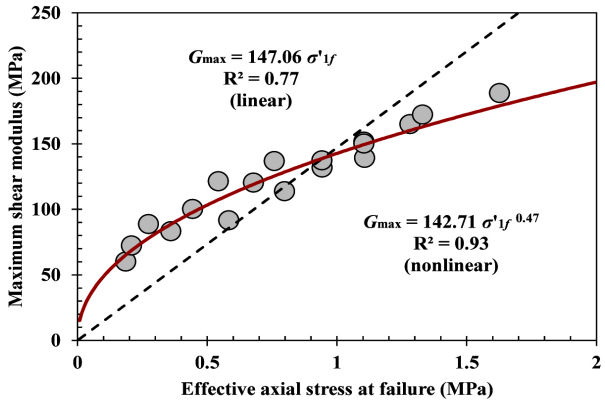
$$G_{max} = 142.71(\sigma'_{1f})^{0.47} \quad \text{(for Jumunjin sand)} \qquad (9)$$

Fig. 8에는 단순선형분석과 비선형분석을 통해 예측된 내부 마찰각을 실제 실내 시험으로부터 산출된 내부 마찰각과 비교하여 도시하였다. 이 때, 내부 마찰각은 파괴 시의 유효구속응력을 통한 Mohr-circle로부터 산출하였으며 점착력은 0으로 가정하였다. 파괴 포락선의 형상이 뚜렷한 비선형성을 나타내는 점을 고려하여 상대밀도별 내부 마찰각이 아닌 각각의 시험 조건에 대한 내부 마찰각을 산출하였다.

Fig. 8에 나타난 바와 같이 단순선형분석을 통해 내부 마찰각을 예측하는 경우, 실제 측정된 내부 마찰각과는 큰 오차를 보였으며 예측되는 내부 마찰각의 산포도 또한 매우 큰 것으로 나타났다. 이는 단순선형분석을 통한 G_{max}와 s'_{1f}의 상관관계를 내부 마찰각 산출에 적용하는 것이 적절하지 않음을 의미한다. 반면 비선형분석(식 (8), 식 (9))을 통해 예측된 내부 마찰각을 실제 실내 시험으로부터 산출된 내부 마찰각과 비교하였을 경우, 예측된 내부 마찰각은 실측된 내부 마찰각을 기준으로 오타와 샌드의 경우 3.2°, 주문진 표준사의 경우 2.8°의 평균오차를 나타냈으며, 단순선형분석을 통해 산출된 결과보다 예측 정확성을 크게 향상 시킬 수 있는 것으로 나타났다.

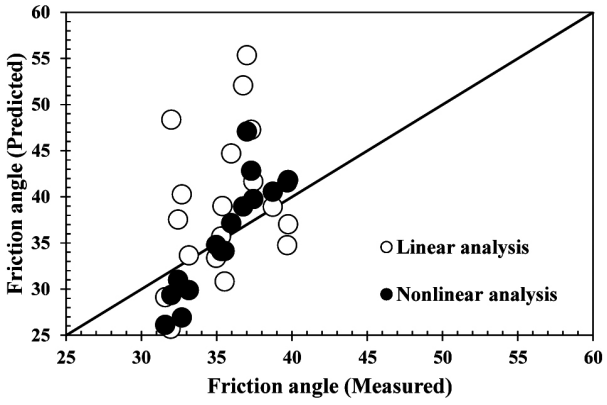


(a) Ottawa sand

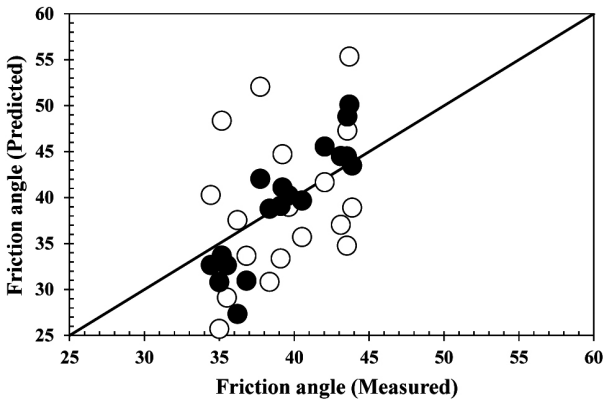


(b) Jumunjin sand

Fig. 7. Comparison between linear and nonlinear analysis for G_{max} - σ'_{1f} correlation



(a) Ottawa sand



(b) Jumunjin sand

Fig. 8. Comparisons between measured and predicted friction angle from linear and nonlinear analysis

4.3 G_{max} /σ'$_{1f}$ - σ'$_3$/p'_a 상관관계

앞 절에서 설명한 바와 같이 G_{max}와 s'_{1f}의 상관관계는 기존의 연구를 통해 수행되었던 단순선형분석을 비선형분석으로 대체 수행함으로써 상대적으로 정확성을 향상시킬 수는 있지만, 신뢰성 높은 내부 마찰각 예측은 어려운 것으로 나타났다. 보다 정확성이 향상된 경험식은 G_{max}/s'_{1f}와 유효구속응력(s'_3)의 상관관계로 제시하였다. 이 때, s'_3는 대기압을 통해 정규화시켰으며, Fig. 9에는 새롭게 제시된 G_{max}/s'_{1f} - s'_3/p'_a 상관관계를 도시하였다. 제시된 G_{max}/s'_{1f} - s'_3/p'_a 상관관계는 전단탄성계수 산정에 있어 상대밀도와 유효구속응력의 개별적인 영향 고려가 가능하여, 기존 Fig. 7의 G_{max}와 s'_{1f}의 상관관계를 통한 분석 결과에 비해 데이터간의 산포도를 크게 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다. 분석을 통해 산출된 경험식은 다음과 같다.

$$\frac{G_{max}}{\sigma'_{1f}} = 236.5\left(\frac{\sigma'_3}{p_a}\right)^{-0.57} \quad \text{(for Ottawa sand)} \qquad (10)$$

$$\frac{G_{max}}{\sigma'_{1f}} = 222.1\left(\frac{\sigma'_3}{p_a}\right)^{-0.57} \quad \text{(for Jumunjin sand)} \qquad (11)$$

여기서 p'_a는 대기압, 각각의 상수는 흙의 종류에 따라 다르게 나타나는 실험적 상수를 의미한다.

Fig. 10에는 새롭게 제시된 식 (10)과 식 (11)을 통해 산출된 내부 마찰각을 실내 시험을 통해 측정된 내부 마찰각과 비교하였다. 분석 결과, 기존의 Fig. 7을 통해 산출된 경험식(식 (8), 식 (9))으로부터 계산된 내부 마찰각에 비해 정확성이 크게 향상된 것으로 나타났으며 각각의 평균오차는 오타와 샌드의 경우 0.8°, 주문진 표준사의 경우 0.9°로 나타났다. 이는 새롭게 제시된 G_{max}/s'_{1f} - s'_3/p'_a 상관관계를 통해 신뢰성 높은 내부 마찰각의 예측이 가능하다는 것을 의미한다.

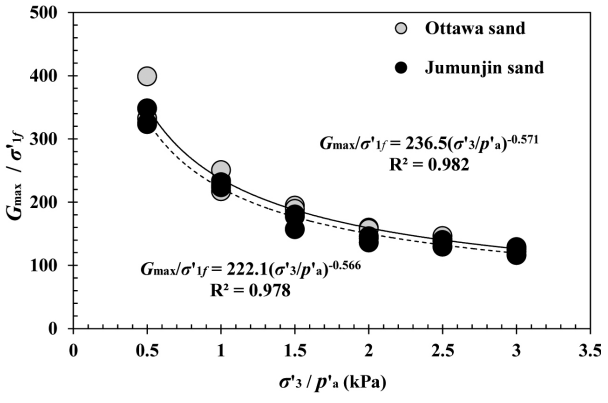


Fig. 9. Proposed G_{max}/σ'_{1f} - σ'_3/p'_a correlation

5. 결 론

본 연구에서는 전단파 속도를 통한 전단강도의 직접적인 예측 가능성 평가를 위해 일련의 압밀배수시험을 수행하였다. 이를 위해 시료의 상부와 하부 캡에 벤더엘리먼트를 설치하여 각각의 시험 조건에 따른 전단파 속도를 측정하였다. 미소변형률에서 측정된 전단파 속도를 이용하여 간극비, 유효응력, 그리고 파괴 시 전단강도와의 상관성을 분석하였다. 분석 결과, 기존 연구를 통해 제시된 바와 같이 최대전단탄성계수와 파괴 시의 유효수직응력간에는 고유한 상관관계가 존재함이 확인되었으며, 단순선형분석보다는 비선형분석을 통해 보다 신뢰성 높은 전단강도의 예측이 가능한 것으로 나타났다. 본 연구을 통해 새롭게 제시된 경험식은 기존에 제

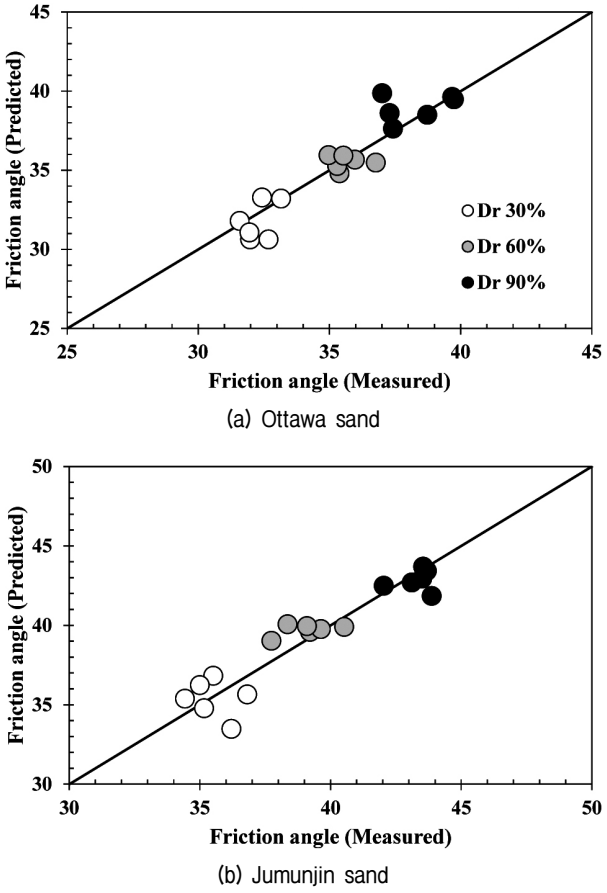


Fig. 10. Comparisons between measured and predicted friction angle from proposed empirical correlation

시되었던 경험식과는 달리 전단탄성계수 산정 시 상대밀도와 유효구속응력의 영향을 개별적으로 고려할 수 있도록 제안되었다. 제시된 경험식을 통해 대표적 강도정수인 내부 마찰각을 예측 할 경우, 실내 시험을 통해 측정된 내부 마찰각을 정확하게 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 이는 현장에서 측정된 SPT-N value와 경험식을 통해 내부 마찰각을 산출하는 기존의 방식보다 신뢰성 높은 내부 마찰각을 제시할 수 있을 것으로 판단되며, 현장에서 측정된 전단파 속도 토모그래피를 통해 공간적으로 연속적인 지반의 전단강도 예측이 가능할 것으로 판단된다. 추후, 전단파 속도 및 전단강도에 영향을 주는 흙의 고유한 특성(입자의 크기, 입자의 형상, 거칠기) 및 세립분 함유량, 그리고 흙의 이방성이 고려된 연구가 추가로 수행된다면 다양한 지반 조건의 고려가 가능한 대표 매개 변수의 산출이 가능하리라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(*No*. 20133010021770).

참고문헌 (References)

1. ASTM D7181 (2011), “Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils”, West Conshohocken, PA: ASTM International.
2. Bolton, M.D. (1986), “The Strength and Dilatancy of Sands”, *Geotechnique*, Vol.36, No.1, pp.65-78.
3. Bryan, G. and Stoll, R. (1988), “The Dynamic Shear Modulus of Marine Sediments”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.83, No.6, pp.2159-2164.
4. Cha, M. and Cho, G.-C. (2007), “Shear Strength Estimation of Sandy Soils Using Shear Wave Velocity”, *ASTM geotechnical testing journal*, Vol.30, No.6, pp.484-495.
5. Chiang, Y.-C. and Chae, Y.S. (1972), *Dynamic properties of cement-treated soils*, Hwy. Res. Rec., Washington, D.C.
6. Cresswell, A., Barton, M.E., and Brown, R. (1999), “Determining the Maximum Density of Sands by Pluviation”, *ASTM geotechnical testing journal*, Vol.22, No.4, pp.324-328.
7. Cunning, J., Robertson, P., and Sego, D. (1995), “Shear Wave Velocity to Evaluate in Situ State of Cohesionless Soils”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.32, No.5, pp.848-858.
8. Frost, J. and Park, J.-Y. (2003), “A Critical Assessment of the Moist Tamping Technique”, *ASTM geotechnical testing journal*, Vol.26, No.1, pp.57-70.
9. Guadalupe, Y., Baxter, C.D., and Sharma, M.S.R. (2013), “Measuring Shear Wave Velocity in Laboratory to Link Small-and Large-Strain Behavior of Soils”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol.2335, No.1, pp.79-88.
10. Hardin, B. and Richart, J., FE (1963), “Elastic Wave Velocities in Granular Soils”, *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, Vol.89, No.Proc. Paper 3407.
11. Hardin, B.O. and Drnevich, V.P. (1972), “Shear Modulus and Damping in Soils: Measurement and Parameter Effects”, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*, Vol.98, No.SM6, pp.603-624.
12. Ladd, C.C. and Foott, R. (1974), “New Design Procedure for Stability of Soft Clays”, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol.100, No.Gt7, pp.763-786.
13. Ladd, R. (1978), “Preparing Test Specimens Using Undercompaction”, *ASTM geotechnical testing journal*, Vol.1, No.1, pp.16-23.
14. Lee, J.-S. and Santamarina, J.C. (2005), “Bender Elements: Performance and Signal Interpretation”, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, Vol.131, No.9, pp.1063-1070.
15. Lee, J.-S. and Yoon, H.-K. (2014), “Porosity Estimation Based on Seismic Wave Velocity at Shallow Depths”, *Journal of Applied Geophysics*, Vol.105, pp.185-190.
16. Richart Jr, F., Hall Jr, J., and Woods, R. (1970), “Vibration of Soils and Foundations”: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
17. Robertson, P., Sasitharan, S., Cunning, J., and Sego, D. (1995), “Shear-wave Velocity to Evaluate in-situ State of Ottawa Sand”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.121, No.3, pp.262-273.
18. Roesler, S.K. (1979), “Anisotropic Shear Modulus due to Stress Anisotropy”, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol.105, No.7, pp.871-880.
19. Santamarina, J.C., Klein, A., and Fam, M.A. (2001), “Soils and Waves: Particulate Materials behavior, Characterization and Process Monitoring”, *Journal of Soils and Sediments*, Vol.1, No.2, pp.257.
20. Saxena, S.K., Avramidis, A.S., and Reddy, K.R. (1988), “Dynamic Moduli and Damping Ratios for Cemented Sands at Low Strains”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.25, No.2, pp.353-368.
21. Sharma, R., Baxter, C., and Jander, M. (2011), “Relationship between Shear Wave Velocity and Stresses at Failure for Weakly Cemented Sands during Drained Triaxial Compression”, *Soils and foundations*, Vol.51, No.4, pp.761.
22. Skempton, A. (1954), “The Pore-pressure Coefficients A and B”, *Geotechnique*, Vol.4, No.4, pp.143-147.
23. Vaid, Y. and Negussey, D. (1988), “Preparation of Reconstituted Sand Specimens”, *Advanced triaxial testing of soil and rock, ASTM STP*, Vol.977, pp.405-417.
24. Yoo, J.-K. and Park, D. (2014), “Evaluation of Characteristics of Shear Strength and Poisson’s Ratiothrough Triaxial and Bender Element Tests”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 30, No.5, pp.67-75.
25. Yoon, H.-K. and Lee, J.-S. (2010), “Field Velocity Resistivity Probe for Estimating Stiffness and Void Ratio”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.30, No.12, pp.1540-1549.
26. Yoshimi, Y., Tokimatsu, J., and Ohara, A. (1994), “In Situ Liquefaction Resistance of Clean Sands Over a Wide Density Range”, *Geotechnique*, Vol.44, No.3, pp.479-494.

Received : April 14th, 2015
Revised : July 7th, 2015
Accepted : August 27th, 2015