

비배수 조건에서 반복하중을 받는 사질토의 B값(간극수압계수)에 따른 P파, S파 속도 및 간극수압 측정

Determinations of P, S-Wave Velocities and Pore Water Pressure Buildup with B-value for Nearly Saturated Sands

이 세 현¹ Lee, Sei-Hyun

추 연 옥² Choo, Yun-Wook

윤 준 웅³ Youn, Jun-Ung

김 동 수⁴ Kim, Dong-Soo

Abstract

Liquefaction resistance depends strongly upon the degree of saturation, which is expressed in terms of the pore pressure coefficient, B. The B-value has been widely used to quantify the state of saturation of laboratory samples. However, it is practically impossible to determine in situ state of saturation by using the B-value. So, P-wave velocity can be alternatively used as a convenient index for evaluating the in situ state of saturation. In this paper, the Stokoe type torsional shear (TS) testing system was modified to saturate the specimen, with which it is also possible to measure P (V_p), S-wave velocity (V_s) and the excess pore water pressure buildup in order to examine the effect of B-value for nearly saturated sands. A series of the tests were carried out at 3 relative densities (40%, 50% and 75%) and various B-values using Toyoura sand. Based on the test results, the variations of V_p and V_s with B-value were analyzed and compared with a existing theoretically derived formula. The normalized pore water pressure, du/σ'_0 and cyclic threshold shear strain, γ_{th}^c with B-value were also analyzed. Additionally the test results related to pore water pressure were analyzed by V_p to apply to the field seismic analysis.

요 지

사질토의 액상화에 대한 저항강도는 포화도를 나타내는 B값(간극수압계수)에 크게 의존한다. P파 속도(V_p)는 현장에서 비교적 쉽게 측정이 이루어지고 B값에 따라 값이 크게 변하기 때문에 지하수위 아래에 위치한 지반의 포화도를 예측하고자 할 때 효율적으로 사용될 수 있다. 본 연구에서는 포화가 가능하도록 개선된 Stokoe식 비틀전단(Torsional Shear, TS) 시험 시스템에 벤더엘리먼트(BE)와 가속도계를 부착하여 동일한 시험시편에 대하여 S파와 P파 속도를 측정할 수 있도록 하였고, 또한 비배수 비틀전단 시험에서 유발되는 과잉간극수압을 동시에 측정할 수 있도록 하였다. 일본의 토요라 모래를 사용하였고, 3가지 상대밀도(40%, 50%, 75%)에서 B값을 달리하여 비틀전단 시험을 수행하였다. 시험결과를 바탕으로 B값에 따른 S파 속도와 P파 속도를 기존의 이론식과 비교·분석하였고, 반복하중에 의한 과잉간극수압의 증가 및 이를 이용하여 획득한 반복하중 전단변형률의 B값에 대한 영향을 평가하였다. 또한 추후 현장에서 B값이 고려된 간극수압 및 반복하중 전단변형률의 직접적인 예측을 위해, 시험이 수행된 각 B값을 대응하는 P파 속도로 변환하여 분석하였다.

Keywords : B-value, Pore water pressure, P-wave velocity, S-wave velocity, Undrained torsional shear test

1 정희원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정 (Member, Graduate student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., KAIST)

2 정희원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 연수연구원 (Member, Post-Doc., Dept. of Civil and Environmental Engrg., KAIST)

3 정희원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정 (Member, Graduate student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., KAIST)

4 정희원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., KAIST, dskim@kaist.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

사질토의 액상화 저항강도는 진동삼축시험과 같이 비배수 조건에서 반복하중에 의해 유발되는 과잉간극수압을 측정하거나, SPT나 CPT와 같은 현장시험 결과를 바탕으로 경험적으로 작성된 도표로부터 예측하게 된다. 또한 액상화 저항강도는 포화도(S_r)에 상당히 의존하여 포화도가 감소할수록 증가하는 경향을 보인다. Yoshimi 등(1989)은 사질토의 포화도를 변화시켜가며 반복삼축시험을 수행하였고 포화도 70%일 때의 액상화 저항강도는 100% 포화되었을 때의 값보다 약 3배가량 크다는 연구결과를 발표하였다. 그러나 포화도는 간극내 물이 차지하는 부피를 나타내는 흙의 기본 물성으로 90% 이상 거의 포화된 시험 시편의 포화도를 직접적으로 정확하게 측정하는 것은 쉬운 일이 아니다. 반면, Skempton(1954)에 의해 제안된 B값(B-value)은 식 (1)과 같이 비배수 조건에서 시편에 가해진 구속압 증분($\Delta\sigma$)에 대한 간극수압 증분(Δu)으로 표현된다. B값은 0에서 1사이의 값을 가지게 되고 시편의 포화도가 증가할수록 1에 가까운 값을 가지게 되며, 실내에서 비교적 쉽게 측정이 이루어져 널리 이용하고 있다. 그러나 현장에서 직접 지반의 포화도를 평가하기 위해 B값을 측정하는 것은 현실적으로 불가능하다.

$$B = \Delta u / \Delta \sigma \quad (1)$$

S파 속도(V_s)와 P파 속도(V_p)는 지반조사 과정에서 수행되는 다운홀, 크로스홀, 업홀 등의 여러 현장시험에서 어렵지 않게 측정되고 있다. V_s 는 주로 흙 입자로 이루어진 골격(skeleton)의 전단강성과 밀도 등에 의존하며 포화상태에 크게 영향을 받지 않아 흙의 특성파악에 선호된다. 반면, V_p 는 공극 내 공기방울의 존재 여부에 따라 민감하게 변하기 때문에 지표면 근처의 흙이 완전히 포화되어 있는지 판단하는데 효과적이다(조계춘 등, 2002). Kokusho(2000)와 Tsukamoto 등(2002)은 지하수위 몇 미터 아래에 위치한 지반의 V_p 가 대부분 완전 포화된 지반의 V_p 인 1500m/s 보다 작은 800m/s ~ 1300m/s 임을 현장시험 결과를 바탕으로 발표하였다. 이는 지하수위 밑에 위치한 지반이라 해도 완전포화(fully saturated)상태가 아닌 거의 포화(almost saturated)상태로 존재한다는 것을 의미한다. 실제 내진설계에서 이와 같은 개념을 고려할 경우, 지하수위 아래에서도 지금까지의 액상화 저항강도보다 큰 결과를 도출하게 되

어 경제적인 이익을 기대할 수 있다.

본 연구에서는 종래의 Stokoe식 비틀전단(Torsional Shear, TS) 시험 시스템을 개선하여 포화도(B값)에 따른 사질토의 V_s 와 V_p 측정 및 비배수 조건에서 반복하중에 의해 유발되는 과잉간극수압을 측정할 수 있도록 하였다. 개선된 장비를 이용하여 B값과 파속도 사이의 관계를 실험적으로 평가하여 이를 선행연구자들(Kokusho, 2000; Tsukamoto 등, 2002)에 의해 제안된 이론식과 비교·분석하였다. 또한 동적변형특성(G, D) 및 유발된 과잉간극수압을 바탕으로 산정된 반복한계 전단변형률(γ_{th})에 미치는 B값의 영향을 평가하였다.

2. 비틀전단 시험 시스템의 개선

반복 비틀전단 시험은 시편의 주응력 방향을 축으로 연속적인 비틀력을 가하여 미소변형률부터 중간변형률($10^{-4}\% \sim 0.1\%$) 범위의 지반 변형특성을 측정하기 위해 수행한다. 시편을 시료저치대(bottom pedestal)에 고정시키고 시편 상부와 연결된 가진 시스템에 10Hz 미만의 고정된 주파수로 반복 비틀력을 가하여 시편에 가해진 비틀력-비틀각(torque-twist angle) 관계를 측정하고 이로부터 응력-변형률 이력곡선(stress-strain hysteresis loop)을 획득한다. 응력-변형률 이력곡선으로부터 전단변형률(γ_c), 전단탄성계수(G), 감쇠비(D)를 결정한다(Kim, 1991).

본 연구에서는 추가로 비배수 조건에서 시편의 B값

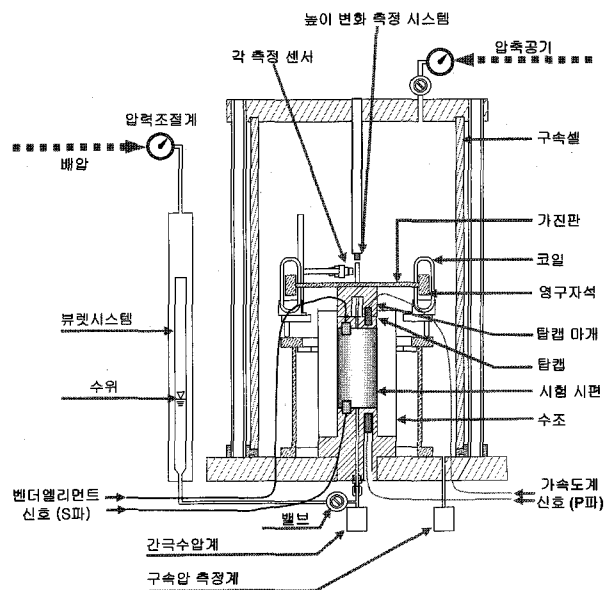


그림 1. 개선된 Stokoe식 비틀전단 시험 시스템의 개략도

에 따른 V_s , V_p 및 전단변형률에 따라 유발되는 과잉간극수압을 측정하고자 다음과 같이 비틀전단 시험 시스템을 개선하였다. 개선된 시험 시스템의 개략도는 그림 1과 같다.

2.1 시편의 포화와 간극수압의 측정

시편의 포화도와 간극수압을 측정하기 위해 두 가지 사항을 개선하였다. 첫째로 탐캡(top cap)에 퀵커넥터(quick connector)를 설치하였다. 퀵커넥터는 male part(SS-QM2-D-2PM)와 female part(SS-QM2-B-200)로 구성되어 두 개의 분리되어 있는 튜브를 손쉽게 연결하고 분리 시에는 완전히 닫혀있는 상태가 되도록 한다. 낙사 방법을 이용하여 시험시편을 성형한 후 퀵커넥터를 이용하여 CO_2 및 물 순환(circulation)을 위한 튜브를 구성하고, 순환 과정들이 완료되면 퀵커넥터를 분리한 후, 가진판 체결을 위해 탐캡에 덮개를 씌운다. 탐캡에 퀵커넥터가 설치되어 있는 모습과 건조상태로 성형된 시편과 함께 순환과정을 위해 퀵커넥터를 이용하여 순환라인이 연결되어 있는 모습을 사진 1에 나타내었다.

또 하나의 개선사항으로 시편에 배압(back pressure)을 가하여 공극 내에 존재하는 공기방울의 크기를 감소시키고 물에 용해되어 시편의 B값을 조절할 수 있도록 하는 배압시스템을 구축하였다. 배압시스템은 압력조절계(Fairchild M 10 regulator), 뷰렛시스템, 간극수압계(RDP FDW 150psi)로 구성된다. 압력조절계를 거친 공

기압은 뷰렛에 채워진 일정량의 물을 통해 수압으로 전환되고 시편 공극 내에 존재하는 간극수로 전달된다. 또한 배압이 가해진 후 또는 전단 하중이 가해진 후 뷰렛 내 물의 변화량을 체크하고, 이를 통해 시편의 부피 변화를 측정하게 된다. 간극수압계는 그림 1에서와 같이 시료거치대에 설치되어, 가해진 배압과 비배수 조건에서 반복하중에 의해 유발되는 과잉간극수압을 정확히 측정하게 된다.

2.2 S파 속도(V_s) 측정

시편의 V_s 를 측정하기 위해 벤더엘리먼트(bender element)를 탐캡과 시료거치대에 설치하였다. 벤더엘리먼트는 삼축시험기, 압밀시험기 등 다양한 실내시험 장비에 부착되어 다양한 시험 조건에서 비교적 간단하게 시편의 전단파 속도를 측정하고 이를 바탕으로 미소 변형률 레벨($\gamma < 10^{-4}\%$)에서의 지반 강성을 평가하기 위해 사용된다. 본 연구에서 사용된 벤더엘리먼트(PZT 5H, Piezocrystal bender elements, Morgan Matroc Inc., Bedford, Ohio, USA)는 가로 12.7mm, 세로 8mm, 두께 0.7mm를 가지고, 절연을 위해 폴리우레탄으로 이중코팅하였으며 이후 에폭시를 이용하여 탐캡과 시료거치대에 약 4mm 정도 돌출된 상태에서 캔틸레버 형식으로 고정하였다. 또한 본 연구에서 사용된 모든 시편은 물에 의해 거의 포화된 상태에서 시험이 수행되므로 수신 신호에서의 누화(cross-talk)현상을 방지하기 위해 전도성물질(silver

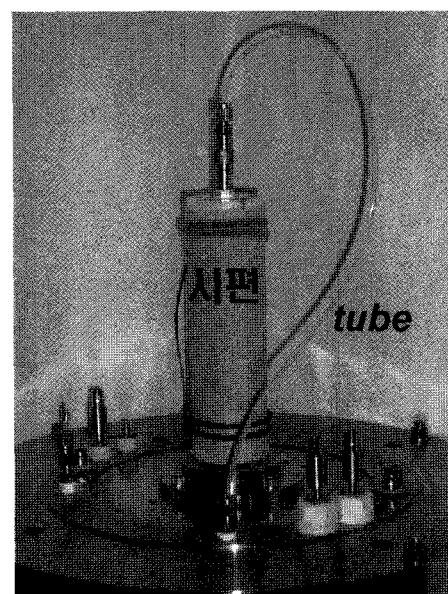
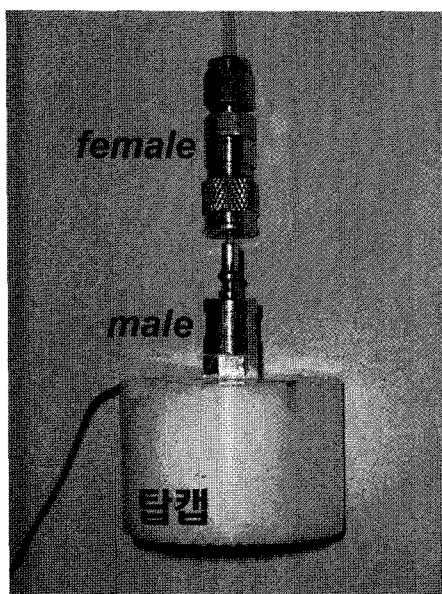


사진 1. 퀵커넥터(Quick connector)와 튜브 연결 모습

conductor)을 폴리우레탄 코팅위에 재코팅하고 이를 그라운드에 연결하였다(Santamarina 등, 2001). 시험 시스템에 설치된 벤더엘리먼트의 개략적인 모습은 그림 2와 같다.

탐캡에 설치된 벤더엘리먼트에 다양한 하중주파수의 사각파(rectangular)를 입력신호로서 주기 위해 신호발생기(HP 33120A)를 사용하였고, 시료거치대에 설치된 벤더엘리먼트에 의해 감지된 신호는 고분해능 오실로스코프(HP 54624A)를 통해 128번 쌓인 신호들의 평균값을 2MHz의 샘플주파수로 플로피 디스크 내에 저장하여 분석을 수행하였다.

2.3 P파 속도(V_p) 측정

본 연구에서는 시편의 V_p 를 측정하기 위해 압전식 가속도계(accelerometer)를 벤더엘리먼트와 마찬가지로 탐캡과 시료거치대에 그림 3과 같이 설치하였다. 사용된 압전식 가속도계는 PCB Piezotronics사의 모델명 353B16으

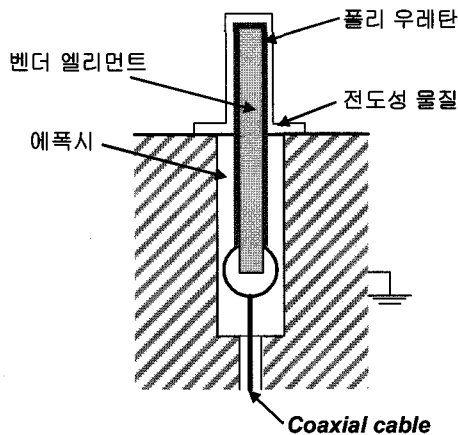


그림 2. 시험 시스템에 설치된 벤더엘리먼트의 개략도

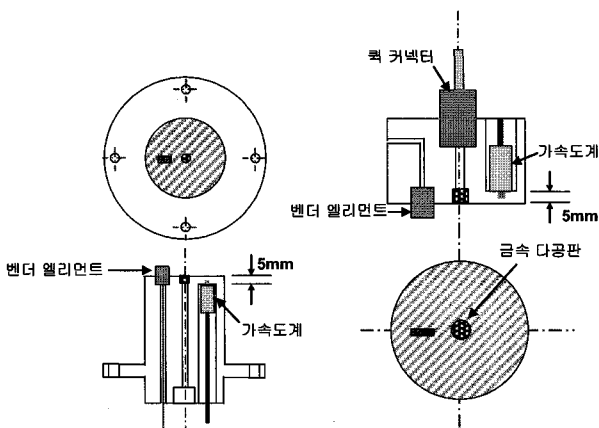


그림 3. 탐캡과 시료거치대에 설치된 벤더엘리먼트와 가속도계

로 높이 14.5mm, 너비 7.1mm, 무게 1.5g의 소형으로 공진주파수가 70kHz, 사용 주파수 대역은 0.7Hz에서 18000Hz로서 본 연구에서 필요로 하는 고주파수의 진동을 정밀하게 측정하는데 적합한 감지기이다. 가속도계에 의해 감지된 신호를 획득하기 위해 S파 측정의 경우와 동일한 획득 시스템을 이용하였다.

가진원으로는 점하중의 충격하중을 발생하는 직경 2mm의 강철구를 사용하였다. 시료거치대 밑 부분에 충격하중을 가하여 발현된 P파는 시편을 통해 탐캡까지 전파되고, 시료거치대와 탐캡에 설치되어 있는 각각의 가속도계 의해 감지된 신호의 초동 시간 차이($\Delta t_{measured}$)를 이용하여 V_p 를 측정하게 된다. 그러나 가속도계가 직접적으로 시편과 접촉하고 있지 않기 때문에 측정된 전파시간은 보정이 필요하다. 보정 계수(t_c)는 시편 없이 시료거치대와 탐캡을 맞닿게 한 상태로 측정한 전파시간으로, 본 시험 시스템에서는 약 0.0000285sec(28.5 μ s)의 값을 가지며, 이를 식 (2)와 같이, 시험시 두 감지기에서 획득한 신호의 초동시간 차이에서 감하여 시편만을 통한 P파 전파시간(Δt)을 결정하게 된다.

$$\Delta t = \Delta t_{measured} - t_c \quad (2)$$

2.4 높이 변화 측정 시스템

압밀 과정과 배압이 가해지는 동안 시편의 높이가 변하게 된다. 이를 측정하기 위해 그림 1에 나타낸 바와 같이 압력셀에 근접센서(proximity system, Bently Nevada)를 설치하여 시편과의 접촉 없이 시편의 높이 변화를 측정하도록 하였다. 사질토이기 때문에 높이 변화가 많이 발생하지는 않더라도 이는 S파 및 P파의 전파길이에 직접적으로 영향을 주는 요소이므로 보다 신뢰성 있는 속도를 획득하기 위해 필수적으로 고려되어야 한다. 또한 시험이 수행되는 동안 시편의 간극비와 전체 단위중량 변화의 계산을 위해 시편의 높이변화를 이용하게 된다.

3. 시험시료와 시험절차

3.1 시험시료

본 연구에서는 일본에서 채취된 토요라 모래를 시험시료로 사용하였고, 시험시료에 대한 입도분포곡선 및

표 1. 시험시료의 기본물성치

시 료	토요라 모래
지반분류(USCS)	SP
최대간극비(e_{max})	0.982
최소간극비(e_{min})	0.617
비중(Gs)	2.65
곡률계수(C_c)	1.00
균등계수(C_u)	1.29
소성지수(PI)	NP
D_{50} , mm	0.199

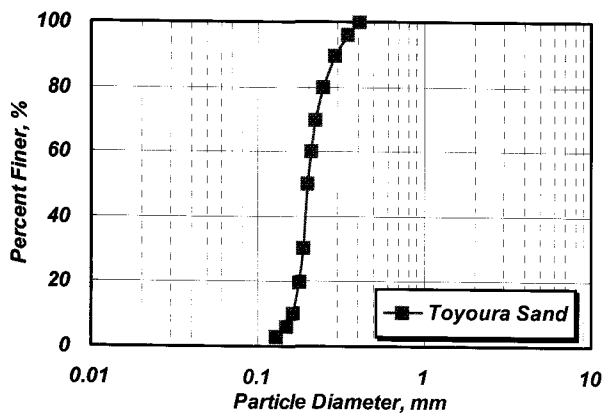


그림 4. 시험시료의 입도분포곡선

기본물성치를 표 1과 그림 4에 각각 나타내었다. 토요라 모래는 소성지수(PI)가 NP인 깨끗한 모래로서 유효입경(D_{50})이 약 0.2mm, 균등계수(C_u)가 1.29로 입자가 세립질이며 매우 균등한 모래이다.

3.2 시험절차

V_s , V_p 측정 및 비틀전단(TS) 시험을 수행하기 위한 모래시편은 지름 50mm, 높이 100mm의 원통형 시편으로 건조낙사법(air-pluviation method)을 적용하여 성형하였다. 이 방법은 자연 건조된 모래시료를 1.5mm×10mm의 직사각형 내부단면을 가진 노즐을 이용하여 몰드 안으로 부어 넣으면서 노즐 끝부터 모래시료가 낙하하는 거리를 일정하게 유지하여 성형하는 방법으로 본 연구에서는 상대밀도 40%, 50%, 75%의 시편을 성형하기 위해 각각 10cm, 15cm, 30cm의 낙하고를 유지하며 낙사를 수행하였다. 낙사 후 몰드를 제거하기 전에 10kPa의 진공압을 가해주었고, 몰드를 제거한 후 본 연구의 목표 유효구속압인 30kPa보다 작은 20kPa의 진공압을 가하여 시편을 자립시켰다. 높은 B값($B \geq$

0.8)을 가진 시편을 성형하기 위해 CO_2 순환을 수행함으로써 시편안의 공기를 CO_2 로 치환하였고, 이후 치환된 CO_2 를 물에 녹이기 위한 내부공기가 제거된 물(de-aired water)을 이용하여 물 순환(water circulation) 과정을 수행하였다. 반면 비교적 낮은 B값($B < 0.8$)을 가진 시료 성형의 경우, CO_2 순환은 수행하지 않고, 물 순환만을 수행하였다. 이후 시편의 초기 직경과 높이를 측정하고, 가진 시스템을 체결하였으며 압력셀을 설치하였다. 본 연구의 모든 시험의 유효응력(σ'_0)은 30kPa을 유지하면서, B값의 변화를 주기 위해 배압의 크기를 달리하였고, 이에 따라 구속압의 크기도 함께 변화를 주었다. 일반적으로 배압의 크기를 증가시키면 시편 간극내의 공기방울이 압축되고, 간극수의 양이 증가함으로 B값은 증가하게 된다. 미리 정해놓은 배압과 구속압(배압+30kPa)을 약 1시간정도 가한 후 B값을 측정하고 목표 B값에 도달 되었을 경우 시료의 높이변화와 부피변화를 측정한다. 이후 벤더엘리먼트 시험을 통한 V_s 측정, 강철구와 가속도계를 이용한 V_p 측정, 마지막으로 비배수 비틀전단(TS) 시험을 수행하였다. 만약 목표 B값에 도달하지 않았다면 데이터 축적을 위해 V_s 및 V_p 측정을 수행한 후 구속압과 배압을 변화시켜 목표 B값에 도달하도록 하였다.

비배수 비틀전단(Undrained TS) 시험의 경우 시편에 가해지는 입력전압의 크기를 조절하여 전단 변형률 크기가 대략 0.0002%~0.1%까지 증가시켜가며 반복 수행하였다. 각 변형률 단계의 시험에서는 하중반복회수 11회, 하중주파수 0.5Hz의 정현파 입력하중이 사용되어 시편의 전단탄성계수, 감쇠비, 비배수 상태에서 반복하중에 의해 유발되는 과잉간극수압을 측정하였다. 각 변형률 단계에서 11회의 하중 반복이 완료되면 시편의 밸브를 열어 간극수압을 소산시킨 후, 다음 변형률 단계의 시험을 수행하였다. 모든 시험에서 유효 구속압은 30kPa로 일정하게 유지시켰고, 대략 전단변형률 0.1%까지 시험이 수행되므로 시험시편은 입자구조의 변화로 인해 초기와 다른 간극비를 갖게 되므로, 본 연구에서는 한 시편에서 하나의 B값에 대해서만 비배수 비틀전단 시험을 수행하였고, 이후 배압을 올려 B값을 증가시킬 수 있다 해도 다단계 시험은 수행하지 않았다.

시편의 성형조건, 시험조건 및 시험절차를 표 2에 정리하였다.

표 2. 시편의 성형조건, 시험조건 및 시험절차

시료명		토요라 모래(Toyoura Sand)							
시료성형		건조낙사법(air-pluviation) → (CO ₂ 순환) → 물 순환(water circulation)							
시험	S-파 속도 (벤더엘리먼트시험)	가진신호		Rectangular 파					
		Averaging 횟수		128					
	P-파 속도	가진원		강철구					
		Averaging 횟수		10					
	비배수 비틀전단(TS) 시험	하중형태		sinusoidal					
		하중주파수		0.5Hz					
		하중반복횟수		11					
전단변형률		2×10 ⁻⁴ %~10 ⁻¹ %이상							
유효응력 σ ₀ '=30kPa	D _r (%)	39.8	40.0	44.0	43.5	39.9	39.7	42.0	-
	B-value	0.24	0.32	0.40	0.60	0.69	0.80	0.97	-
	D _r (%)	52.4	48.9	49.6	47.6	50.9	52.2	53.0	50.6
	B-value	0.01	0.28	0.40	0.67	0.83	0.90	0.97	0.99
	D _r (%)	75.6	79.0	76.3	76.6	76.5	74.7	-	-
	B-value	0.16	0.36	0.46	0.56	0.77	0.93	-	-
시료성형 → 구속압, 배압 → B값 측정 → V _s 측정(BE 시험) → V _p 측정 → 비배수 TS 시험									

4. 시험결과 및 분석

4.1 B값 및 상대밀도에 따른 S파 속도(V_s)

벤더엘리먼트 시험을 통해 획득한 S파의 가진 및 도달 신호의 대표적인 예를 그림 5에 나타내었다. 시편의 B값이 0.97로 거의 포화된 상태이므로 S파 도달 이전에 물을 타고 전파되는 P파의 영향을 확인할 수 있다.

V_s를 결정하기 위한 S파의 전파거리는 벤더엘리먼트의 양단 끝 사이의 거리(tip-to-tip)를 적용하였고, 본 연구에서는 약 92mm의 전파거리가 산정되었다. 또한 전파시간은 그림 5에 나타난 바와 같이 가진신호의 가진 시점과 수신신호의 전단파 도달 시점의 차이를 이용하는 Start-to-Start 방법을 적용하였다. S파의 최초 도달 시점은 수신신호에서 P파 및 근접장 효과에 따른 신호를 고려하여 주요한 S파의 도달을 확인한 후, S파 도달 이전에 이들의 영향을 받지 않는 부분의 평균 전압값(DC)과 첫 번째 S파의 측정 전압값이 일치하는 시점(그림 5, "Arrival")으로 결정하였다(김동수 등, 2005).

표 2에 나타난 바와 같이 시험이 수행된 3가지 상대밀도에서 B값을 변화시켜가며 측정된 V_s와 각 상대밀도에서의 평균값을 그림 6(a)에 함께 도시하였다. 흙의 V_s는 오직 흙입자로 이루어진 골격의 전단강성(G_{skeleton})에 의존하며 간극수의 체적계수에 영향을 받지 않는다(조계춘 등, 2002). 본 논문의 시험결과에서도 상대밀도에는

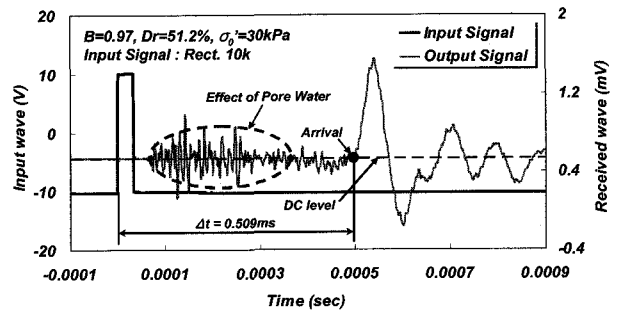
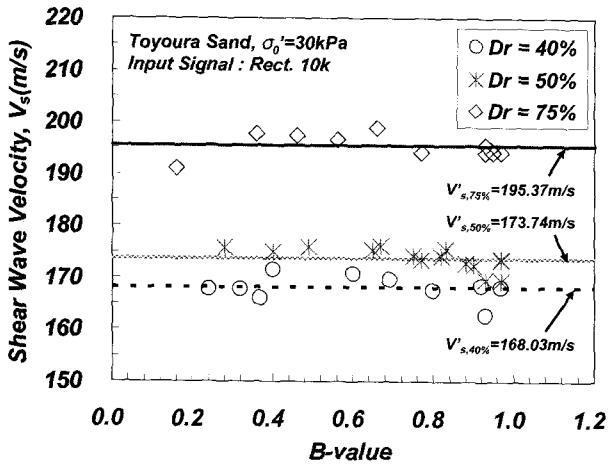


그림 5. 벤더엘리먼트 시험시 S파의 가진 및 도달 신호 예

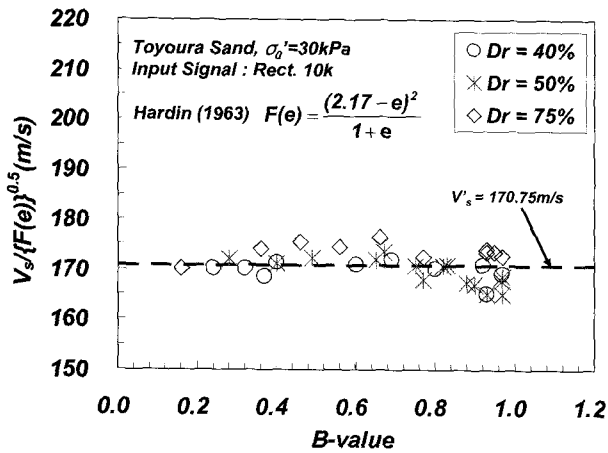
크게 영향을 받는 반면, B값에는 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 상대밀도가 증가할수록 V_s는 증가하는 경향을 보였고, B값의 변화에 대해 상대밀도 40%와 75%의 경우에는 각 평균값에 대해 최대 ±2.5%의 차이, 50%의 경우에는 최대 ±1.5%의 차이만을 나타내었다.

$$F(e) = \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \quad (3)$$

본 연구에서 획득한 V_s에 대해 간극비 영향을 배제하고, 오직 B값의 영향만을 평가하기 위해 Hardin(1963)에 의해 제안된 간극비 함수의 양의 제곱근 값(√F(e))으로 정규화한 결과를 그림 6(b)에 나타내었다. B≤0.6에 대해서는 V_s/√F(e)는 B값에 관계없이 거의 일정한 분포를 보이는 반면, B>0.6에 대해서는 B값이 증가함에 따라 약간 감소하는 경향이 나타났다.



(a) B값에 따른 V_s 측정 결과와 각 상대밀도에서의 평균값



(b) B값- $V_s / \sqrt{F(e)}$ 관계

그림 6. B값과 상대밀도에 따른 V_s 측정 결과

4.2 B값 및 상대밀도에 따른 P파 속도(V_p) 및 이론식과의 비교

사질토 시편의 V_p 측정을 위해 두 개의 가속도계를 이용하여 획득한 대표적인 신호와 도달시간 결정 예를 그림 7에 나타내었다. S파 전파시간 결정과 유사하게 두 가속도계 신호에서 각각 주요한 P파 도달 이전에 측정되는 신호의 평균 전압값과 만나는 점을 각 신호의 초동시간으로 정하고 식 (2)를 이용하여 전파시간을 결정하였다.

일반적으로 공기의 압축성(compressibility)은 비압축성의 특성을 가진 물에 비해 훨씬 작기 때문에 간극수(pore water)내에 아주 작은 양의 공기방울(air-bubble)이라도 포함되어 있는 경우, 물-공기 혼합체(air-water mixture)의 체적계수(bulk modulus)값과 파속도가 급격히 감소하게 된다. 문헌에 의하면, 전체 부피의 0.1%에 해당하는 공기방울이 간극내에 존재하는 시편에 대해 체적계수는 순수한 물의 체적계수에 비해 약 16배정도 작아지고, 이에 따

라 파속도는 약 4배정도 작아지게 된다(Richert et al., 1970). 이러한 사실과 Biot's poro-elasticity 이론을 바탕으로 Kokusho(2000)와 Tsukamoto 등(2002)은 V_s 및 V_p 와 B값과의 관계를 식 (4)와 같이 이론적으로 유도하였다.

$$\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 = \frac{4}{3} + \frac{2(1-\nu_b)}{3(1-2\nu_b)(1-B)} \quad (4)$$

여기서, ν_b 는 흙 골격의 포아송비(skeleton Poisson's ratio)를 의미한다. ν_b 는 일반적으로 알고 있는 포아송비(overall Poisson's ratio, ν)와 다른 의미를 가진다. 둘 사이의 관계식은 Kokusho(2000)에 의해 식 (5)와 같이 유도되었다. 관계식으로부터 ν_b 는 건조상태의 ν 가 아닌, $B=0$ 일 때의 ν 임을 알 수 있다. 또한 파 전파에 의한 지반의 변형은 선형영역에 있으므로 ν_b 는 B값에 관계없이 일정한 값을 가진다.

$$\nu = \frac{3\nu_b + (1-2\nu_b)B}{3 - (1-2\nu_b)B} \quad (5)$$

다양한 ν_b 를 가정하여 식 (4)를 통해 구한 이론적인 V_p/V_s 와 본 연구에서 실험을 통해 획득한 V_p/V_s 를 해당 B값에 대하여 그림 8에 함께 도시하였다. 그림에서 보이

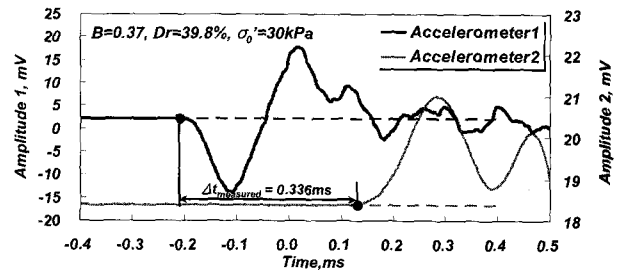


그림 7. V_p 측정을 위한 대표적인 신호와 도달시간 결정 예

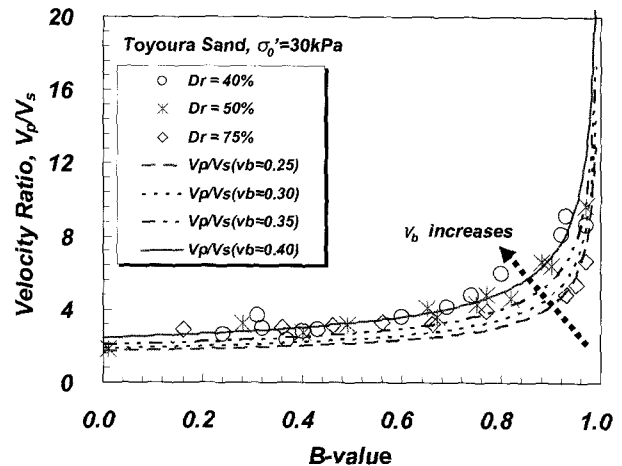


그림 8. B값에 따른 이론적인 속도비(V_p/V_s) 및 실험결과와의 비교

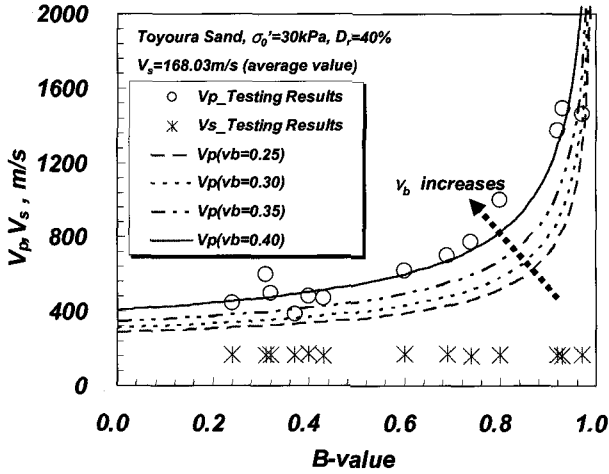
는 바와 같이, 이론식과 시험결과 모두 B값이 증가할수록 V_p/V_s 가 증가하는 것을 알 수 있다. 이론식의 경우, B=0.8을 경계로 V_p/V_s 가 급격히 증가하고 ν_b 가 증가함

에 따라 전체 B값 범위에서 V_p/V_s 가 증가하는 것으로 나타났다. B=0.8이면 이론적으로 포화도는 99.9% 이상이다(Yoshimi 등, 1989). 앞서서도 설명했듯이 간극수내에 포함된 미소량의 공기방울이 지반의 V_p 에 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서 획득한 시험결과는 선행연구에서 제안된 이론식을 어느 정도 잘 따라가는 것을 확인할 수 있다. B=0.6을 경계로 그 보다 작은 B값에서는 상대밀도에 대한 경향성이 명확히 보이지 않지만, 전체적으로 식 (4)의 V_p/V_s 이론식에서 $\nu_b=0.40$ 일 때의 곡선에 근접함을 알 수 있고, B=0.6 이상의 B값에서는 상대밀도가 증가할수록 추정되는 ν_b 값이 약간 감소하는 것을 확인할 수 있었다. Tsukamoto 등(2002)은 본 연구와 동일 시료(토요라 모래)를 이용하여 유효응력을 98kPa로 일정하게 유지하고 상대밀도를 변화시켜가며 시편의 V_s 와 V_p 를 측정된 결과, 상대밀도에 대한 ν_b 의 경향성이 명확히 나타나진 않지만, 평균적인 값으로 $\nu_b=0.35$ 를 선택하였다. 본 연구로부터 추정된 $\nu_b=0.40$ 과의 차이는 각 실험이 수행된 유효 구속응력의 차이라고 판단되고, 이는 추후 유효 구속응력을 변화시켜가며 추가적인 실험을 수행하여 검증할 필요가 있다고 판단된다.

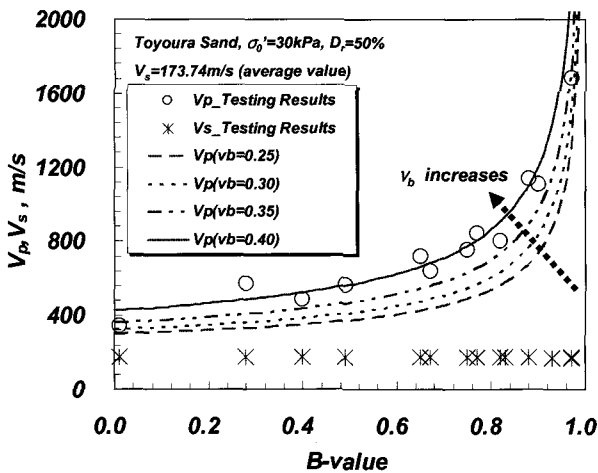
B값에 따른 이론적인 V_p 를 식 (4)에 각 상대밀도에서 실험적으로 평가된 V_s 의 평균값을 적용하여 결정하고, 시험결과와 함께 그림 9에 도시하였다. 그림에서 보듯이 상대밀도 40%와 50%의 시험결과를 통해 $\nu_b=0.40$ 에 합리성을 알 수 있다. 그러나 상대밀도 75%의 시험결과는 분산을 보여, B=0.6이하에서는 ν_b 가 0.40에 합리성을 보이나, B=0.6이상에서는 ν_b 가 0.40보다 작은 값에 근사함을 확인할 수 있다.

4.3 B값 및 V_p 에 따른 정규화 간극수압($\Delta u/\sigma'_0$)

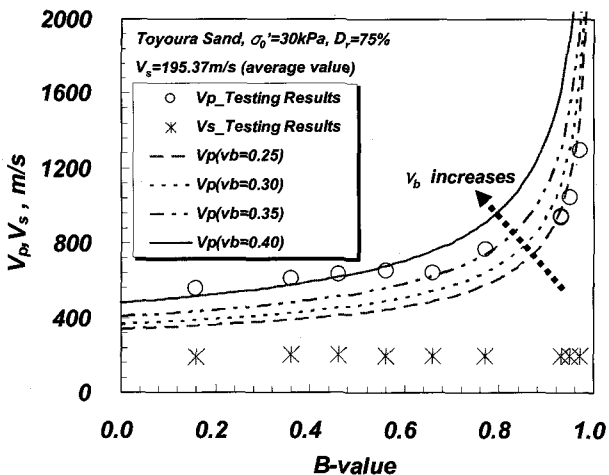
상대밀도 39.7%, B값 0.8인 시편에서 하중 반복에 의해 전단변형률이 0.04%~0.06%까지 커짐에 따라 유발되는 전형적인 과잉간극수압을 그림 10(a)에 나타내었다. 본 연구에서 사용된 비틀전단 시험시스템은 일정한 크기의 비틀력을 시험시편에 반복적으로 가하는 응력조절(stress-control)방식의 시험시스템으로 하중이 반복됨에 따라 전단변형률이 점차적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그림 10(a)와 같이 과잉간극수압의 증가로 시편의 유효응력이 감소하고 이는 하중반복에 따른 시편의 전단탄성계수가 감소하는 반복연화(cyclic degradation) 현



(a) $D_r = 40\%$



(b) $D_r = 50\%$

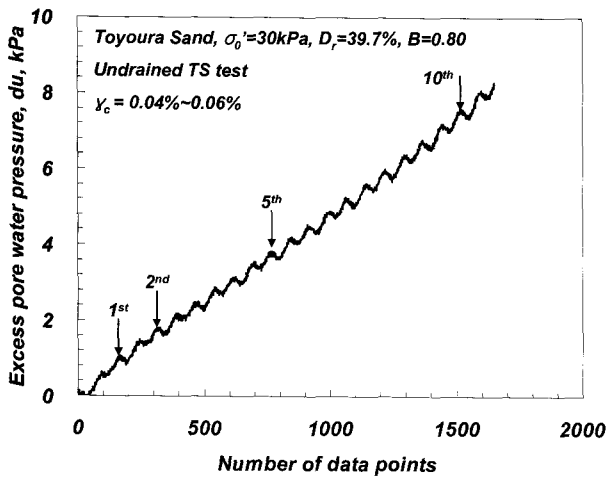


(c) $D_r = 75\%$

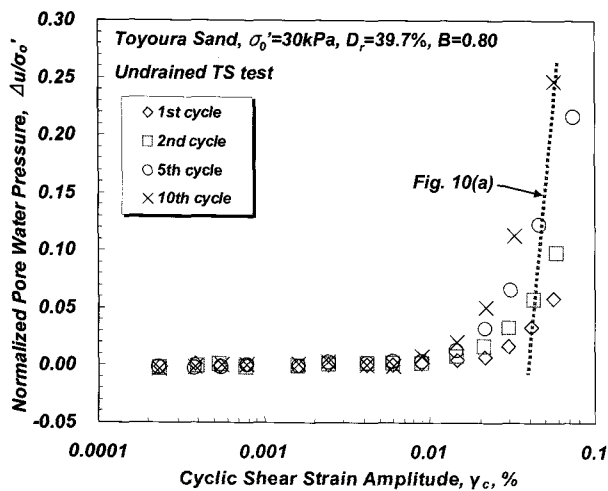
그림 9. 각 상대밀도에서의 B값에 따른 V_p 및 V_s .

상으로 나타나게 된다. 그림 10(b)는 시험이 수행되는 변형률 크기, 하중반복회수에 따른 정규화 간극수압($\Delta u/\sigma'_0$) 증가를 나타낸다. 저변형률에서는 여러 번의 하중반복에도 불구하고 과잉간극수압이 유발되지 않으나, 변형률의 크기가 커짐에 따라 과잉간극수압의 증가가 시작되고 간극수압의 누적으로 $\Delta u/\sigma'_0$ 이 1에 가까워져 유효응력을 상실하게 되어 시편 붕괴로 이어지리라(액상화 현상) 예상된다.

시험이 수행된 각각의 상대밀도(D_r)에서 다양한 B값에 대한 정규화 간극수압($\Delta u/\sigma'_0$)-전단변형률(γ_c) 곡선을 그림 11에 나타내었고, 도시된 모든 시험결과들은 10회 하중반복 후 유발된 전단변형률과 간극수압을 이용하였다. 각 시험조건마다 간극수압이 발현되기 시작하는 전단변형률이 차이는 있지만 대략 0.01% 이상의 변형률 영역에서 B값이 증가함에 따라 유발된 $\Delta u/\sigma'_0$ 의



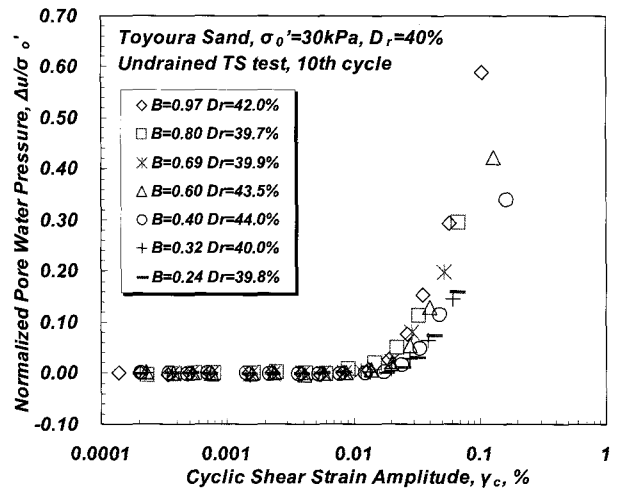
(a) 비틀전단 시험중에 유발되는 과잉간극수압



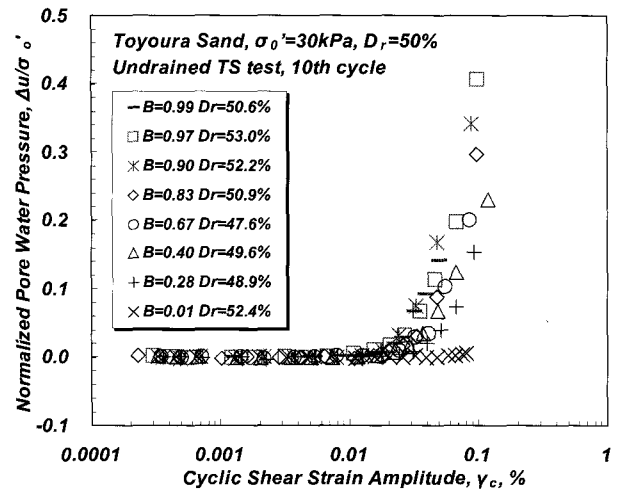
(b) 하중반복에 따른 전단변형률(γ_c) - 정규화 간극수압($\Delta u/\sigma'_0$) 관계

그림 10. 하중반복에 따른 간극수압 변화

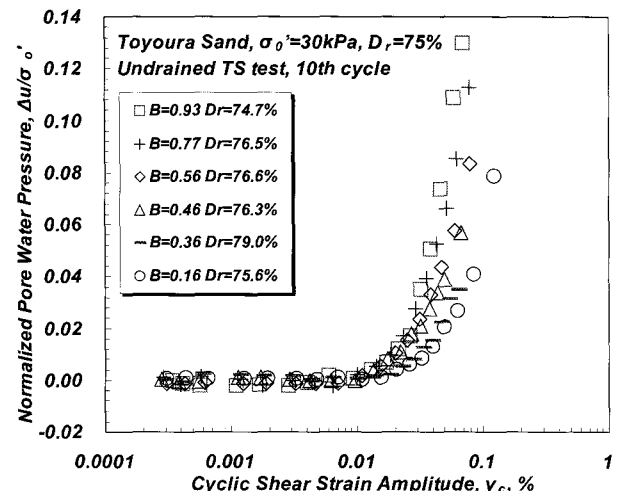
크기가 증가함을 확인할 수 있다. 반면, 그림 11(b)에서 B=0.01에 해당하는 결과는 다른 B값에서의 결과와는 달리 간극수압의 발현이 거의 이루어지지 않은 것을 볼



(a) $D_r = 40\%$



(b) $D_r = 50\%$



(c) $D_r = 75\%$

그림 11. B값에 따른 전단변형률(γ_c)-정규화 간극수압($\Delta u/\sigma'_0$) 곡선

수 있다. B=0.01로 성형된 시험시편은 다른 시편들과는 달리 건조시편 내 공극에 물순환을 통해 물을 채우고, 다시 시편내에 공기압을 가하여 물을 추출한 후 비틀전단 시험을 수행하였다. 공기압을 가할 때 셀압도 함께 가해주면서 시편의 유효응력을 일정하게 유지하였다. 시험이 끝난 후 시편의 함수비를 측정된 결과, 함수비 13.6%, 포화도는 45.7%임을 확인하였다. Lade 등(1977)은 B값과 포화도(S_r)사이의 관계를 식 (6)과 같이 제안하였고, 각각의 정수들에 해당하는 값을 대입함으로써 그림 12에 나타내었다. 그림 12에서 B=0 일 때, 포화도는 0~80%까지 넓게 분포함을 알 수 있다. 따라서 B=0 일 때에는 단순히 B값이 아닌, 포화도를 고려하여 간극수압 증가를 평가하는 것이 바람직하다고 판단된다.

$$B = \frac{1}{1 + nK_s[S_r/K_w + (1 - S_r)/u_a]} \quad (6)$$

여기서, n : 간극률(토요라 모래의 상대밀도 50%에 해당하는 0.444)

K_s : 흙 골격의 체적계수(6.7×10^4 kPa)

K_w : 물의 체적계수(2.23×10^6 kPa)

u_a : 간극유체의 절대압력(부분 포화된 시편의 경우, $1.0 \text{ kgf/cm}^2 = 98 \text{ kPa}$)

일정 변형률에서 상대밀도와 B값에 따른 간극수압의 변화 추이를 관찰하기 위해, 그림 11에서 변형률 크기 0.07%의 결과를 B값에 따라 그림 13(a)에 나타내었고, 각 B값에 대응되는 V_p 에 따른 $\Delta u/\sigma'_0$ 을 그림 13(b)에 나타내었다. B값과 V_p 가 증가함에 따라 그리고 상대밀도가 감소함에 따라 $\Delta u/\sigma'_0$ 이 증가하는 경향을 뚜렷이

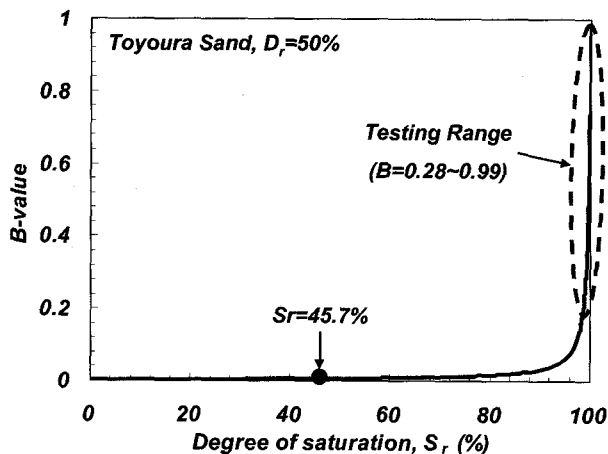
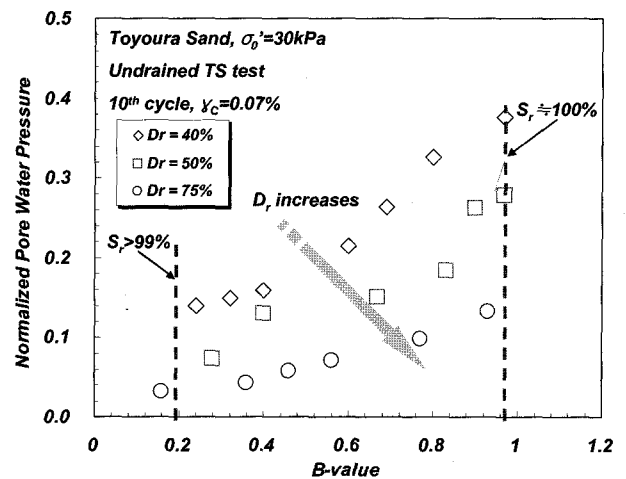
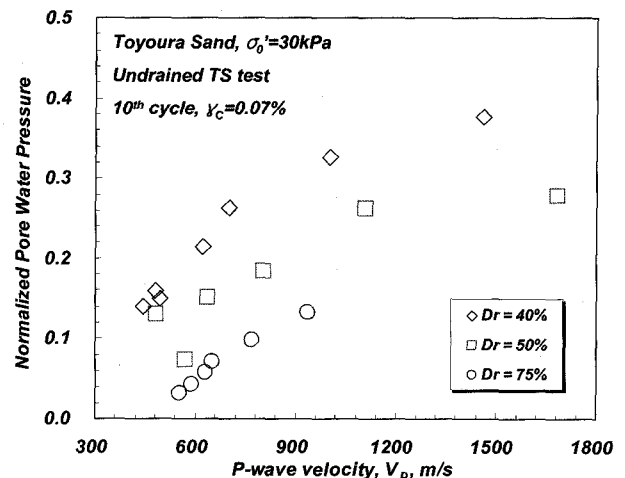


그림 12. 상대밀도 50% 일 때의 B값과 포화도 사이의 관계(Lade 등, 1977)

관찰할 수 있었다. 또한 그림 12에서 보듯이, B=0.2~0.3은 99% 이상의 높은 포화도(S_r)에 해당된다. 거의 100% 포화도 값에 대응되는 시험결과들(B>0.9)과 비교했을 때 1%도 되지 않는 포화도 차이에 의해 $\Delta u/\sigma'_0$ 은 3배가량 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 이는 B값이 액상화 발생가능성(liquefaction potential)에 크게 영향을 주고 있음을 의미하므로 사질토 지반의 비배수 거동을 예측하는데 있어 B값에 따른 영향도 고려되어야 할 것으로 판단된다. 추후 다양한 사질토 시료에 대해 실험을 수행한 후 확보된 D/B를 바탕으로 지반의 기본물성치를 이용하여 그림 13(b)에 대한 모델식을 제안한다면 현장에서 비교적 쉽게 측정할 수 있는 V_p 를 이용하여 현장지반의 간극수압 증가 정도를 예측하는데 도움이 될 것이다.



(a) B값 - 정규화 간극수압($\Delta u/\sigma'_0$) 관계



(b) V_p - 정규화 간극수압($\Delta u/\sigma'_0$) 관계

그림 13. 전단변형률 0.07%에서 B값과 V_p 에 따른 정규화 간극수압($\Delta u/\sigma'_0$)

4.4 B값 및 P파 속도(V_p)에 따른 반복한계 전단변형률(γ_{th}^c)

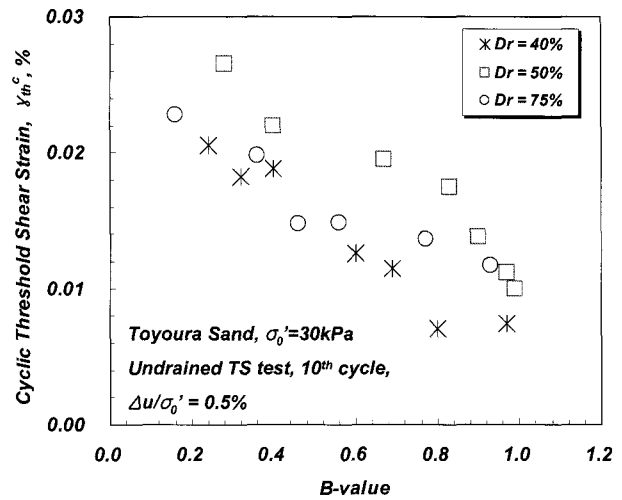
사질토 지반에서 반복하중에 의한 전단변형이 발생하는 경우, 저변형률에서는 하중반복회수의 영향이 없지만, 특정 전단변형률 이상에서는 하중반복이 진행됨에 따라, 배수조건에서는 지반의 체적변화로, 비배수 조건에서는 과잉간극수압이 유발되고, 전단탄성계수(G)와 감쇠비(D)와 같은 변형특성의 변화가 나타나기 시작한다. 이 변형률 크기를 일반적으로 반복한계 전단변형률(cyclic threshold shear strain, γ_{th}^c)이라 칭한다. 이러한 반복한계 전단변형률은 전단탄성계수, 감쇠비, 간극수압과 같은 지반의 동적변형특성에 지진, 파랑하중과 같은 반복하중의 영향이 나타나는 경계점을 의미하며, 지반지진공학 및 지반동역학분야에서 반복하중에 따른 지반거동해석 및 액상화 평가에 있어 매우 중요한 요소가 된다.

많은 선행연구자들로부터 반복한계 전단변형률을 정의하는 방법에 대한 연구 결과들이 발표되어 왔다(Ni, 1987; Kim, 1991). 추연욱(2005)은 포화비배수조건에 경우에 반복한계 전단변형률을 반복하중에 의해 유발되는 과잉간극수압(Δu)을 이용하여 다음과 같이 정의하였다.

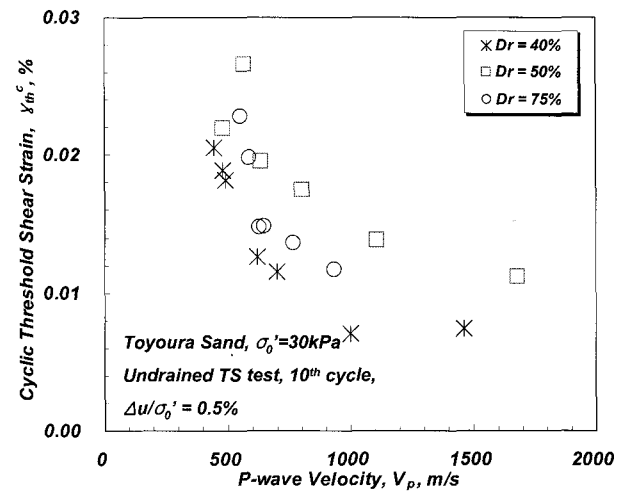
$$\Delta u / \sigma'_0 = 0.2\% \text{ 또는 } 0.5\% \text{ 일 때의 전단변형률}$$

또한 다양한 간극비와 평균유효 구속응력에서 실험을 수행하여 정의에 따른 차이를 규명하고 영향요소에 대한 확인을 수행하였다.

본 연구에서는 반복한계 전단변형률을 $\Delta u / \sigma'_0 = 0.5\%$ 일 때의 전단변형률로 정의하고, 그림 11에 나타낸 모든 실험결과들로부터 γ_{th}^c 을 획득하여 B값 및 이에 대응되는 V_p 에 따라 그림 14에 나타내었다. 상대밀도의 차이에 따라 별다른 경향은 나타나지 않았지만, B값 또는 V_p 가 증가함에 따라 γ_{th}^c 은 감소하는 경향으로 나타났고, 0.008%~0.027%의 비교적 넓은 분포를 보였다. 이는 B값이 증가할수록 동일 변형률에서 유발되는 간극수압이 커지므로, 간극수압의 크기로부터 구해지는 γ_{th}^c 의 값이 작게 나타나게 되는 것으로 설명할 수 있다. 또한 V_p 와 γ_{th}^c 관계 역시 다양한 지반조건을 고려한 D/B구축이 이루어진다면 현장에서 획득한 V_p 를 이용하여 B값을 고려한 γ_{th}^c 의 예측이 가능할 것이다.



(a) B값 - 반복한계 전단변형률(γ_{th}^c) 관계

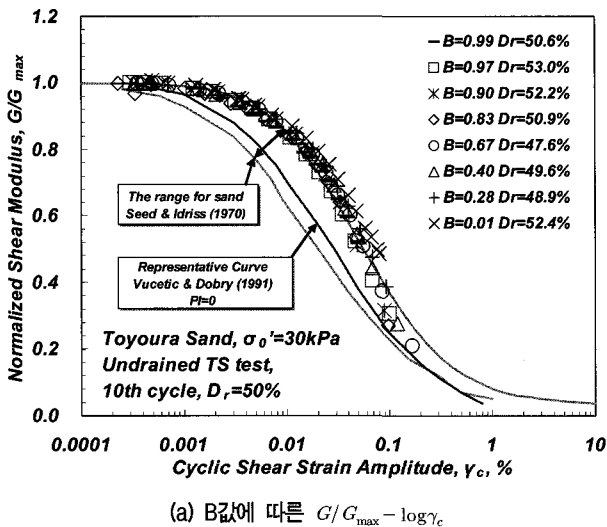


(b) V_p - 반복한계 전단변형률(γ_{th}^c) 관계

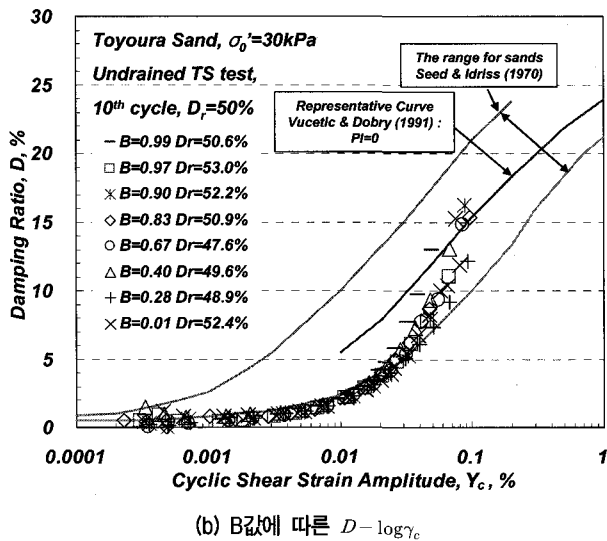
그림 14. B값 및 V_p 에 따른 반복한계 전단변형률(γ_{th}^c)

4.5 정규화 전단탄성계수 감소곡선($G/G_{max} - \log \gamma_c$) 및 감쇠비($D - \log \gamma_c$) 곡선

$D_r=50\%$ 에서 결정된 변형률 크기에 따른 정규화 전단탄성계수(G/G_{max})와 재료 감쇠비(D)를 그림 15에 나타내었다. 4.3절에서 B값에 따라 비교적 큰 폭으로 변하는 $\Delta u / \sigma'_0$ 과는 달리, $G/G_{max} - \log \gamma_c$ 곡선은 비교적 좁은 범위에 분포하게 되어 B값에 관계없이 거의 일정한 값을 확인할 수 있었고 $D - \log \gamma_c$ 곡선도 마찬가지로 B값의 변화에도 불구하고 거의 일치하는 경향을 나타내었다. 이는 지반의 내진설계를 수행 함에 있어, 층 별 동적 비선형성을 고려할 필요 없이 1회 실험으로 B값의 영향을 받는 모든 층의 동적 비선형 특성을 결정할 수 있는 장점이 있다. 또한 본 연구에서 획득한 시험결과를 기존에 발표된 Seed 등(1970)과 Vucetic(1994)의 연구결과와



(a) B값에 따른 $G/G_{max} - \log \gamma_c$



(b) B값에 따른 $D - \log \gamma_c$

그림 15. B값에 따른 $G/G_{max} - \log \gamma_c$ 과 $D - \log \gamma_c$ 의 변화 및 기존 연구 결과와의 비교

비교하였다. $G/G_{max} - \log \gamma_c$ 곡선은 Seed 등(1970)의 연구 결과의 상한계에 근접하였고, $D - \log \gamma_c$ 곡선은 하한계에 근접하였다. 마찬가지로 Vucetic(1994)의 사질토 지반을 의미하는 $PI=0$ 곡선과 비교해도 약간 오른쪽에 위치하고 있음을 관찰할 수 있었다. $D_r=40\%$, 75% 시험 결과들도 위와 동일한 경향을 나타내고 있음을 확인하였다.

5. 결론 및 요약

본 연구에서 포화가 가능하도록 개선된 Stokoe식 비틀전단 시스템에 벤더엘리먼트와 가속도계를 부착하여 동일한 시험시편에 대하여 V_s 와 V_p 를 측정하였고, 동시에 비배수 조건에서 반복하중에 의해 유발되는 과잉간

극수압을 측정하였다. 토요라 모래에 대해 σ'_0 은 30kPa 로 고정시키고 시편의 상대밀도와 B값을 달리하면서 벤더엘리먼트 시험, 가속도계를 이용한 V_p 측정, 비배수 비틀전단 시험을 수행하여 획득한 시험결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 획득하였다.

- (1) 벤더 엘리먼트 시험을 통해 획득한 사질토 시편의 V_s 는 상대밀도가 증가할수록 증가하는 경향을 보였지만 B값의 변화에 대해서는 각 상대밀도에서 구한 V_s 의 평균값에 최대 $\pm 3\%$ 이내로 거의 동일하게 평가되었다.
- (2) 본 연구에서 획득한 상대밀도와 B값의 변화에 따른 사질토 시편의 V_s 와 V_p 를 이용하여 V_p/V_s 를 계산하고, 이를 Kokusho(2000)와 Tsukamoto 등(2002)에 의해 유도된 이론식에 다양한 ν_b (0.25, 0.3, 0.35, 0.4)를 가정하여 비교하였다. 이론식과 시험결과 모두 B값이 증가할수록 V_p/V_s 가 증가하였고, 특히 $B=0.8$ 이후 급격히 증가하는 것을 확인하였다. 또한 시험결과와 이론식의 비교를 통해 $\sigma'_0=30\text{kPa}$, 상대밀도 40%, 50% 시편에 대해서는 ν_b 값이 0.40에 합리적임을 알 수 있고, 상대밀도 75% 시편에 대해서는 분산을 보이긴 하지만 ν_b 값이 0.4보다 작은 값에 근사함을 확인할 수 있다.
- (3) 시험이 수행된 각각의 상대밀도와 다양한 B값에서 획득한 $\Delta u/\sigma'_0 - \log \gamma_c$ 곡선에서 보듯이, 대략 변형률 0.01% 이후로 B값이 증가함에 따라 유발되는 정규화 간극수압($\Delta u/\sigma'_0$)의 크기가 증가함을 알 수 있다. 일정 변형률 0.07%에서의 B값과 이에 대응되는 V_p 에 따른 정규화 간극수압($\Delta u/\sigma'_0$)의 변화 추이로부터 B값과 V_p 가 증가함에 따라 그리고 상대밀도가 감소함에 따라 정규화 간극수압($\Delta u/\sigma'_0$)이 증가하는 경향을 뚜렷이 확인할 수 있다.
- (4) 본 연구에서 $\Delta u/\sigma'_0 = 0.5\%$ 일 때의 전단변형률로 정의된 반복한계 전단변형률(γ_{th}^c)은 상대밀도에 따라 별다른 경향은 보이지 않았지만, B값 및 V_p 가 증가함에 따라 뚜렷이 감소하는 경향으로 나타났고, 0.008%~0.027%의 비교적 넓은 분포를 보였다.
- (5) $G/G_{max} - \log \gamma_c$ 곡선과 $D - \log \gamma_c$ 곡선은 B값의 변화에 관계없이 거의 일정한 경향을 보였고, Seed 등(1970)과 Vucetic 등(1991)에 의해 제안된 이론식과 비교하였을 때 실험결과가 모두 오른쪽에 치우쳐 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원에서 주관하는 건설핵심기술연구개발사업의 수탁과제인 “불포화 사면 및 다짐지반 최적화 표준설계를 위한 지반정수 산정기술(04핵심기술A01-08)”의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 김동수, 윤준용, 이세현, 추연옥 (2005), “공진주/비틀전단 시험 및 벤더엘리먼트 시험을 이용한 사질토 지반의 최대전단탄성계수 평가”, *한국지반공학회논문집*, 제21권, 제10호, pp.17-25.
2. 조계춘, 이인모 (2002), “탄성파를 이용한 흙의 특성연구”, *한국지반공학회논문집*, 제18권, 제6호, pp.83-101.
3. 추연옥 (2005), *배수조건에 따른 모래 지반의 반복한계 전단변형률 및 전단 변형특성*, 박사학위논문, 한국과학기술원, pp.88-110.
4. Hardin, B. O. and Richart, F. E. Jr. (1963), “Elastic wave velocities in granular soils”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.89, No.1, pp.33-35.
5. Kim, D.S. (1991), *Deformational Characteristics of Soils at Small to Intermediate Strains from Cyclic Tests*, Ph.D. Thesis, University of Texas at Austin.
6. Kokusho, T. (2000), “Correlation of pore-pressure B-value with P-wave velocity and Poisson’s ratio for imperfectly saturated sand or gravel”, *Soils and Foundations*, Vol.40, No.4, pp.95-102.
7. Lade, P.V. and Hernandez, S.B. (1977), Membrane penetration effects in undrained tests, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.103, No.GT2, pp.109-125.
8. Ni, S.H. (1987), *Dynamic properties of sands under true triaxial stress states from resonant column/torsional shear tests*, Ph.D. Thesis, University of Texas at Austin.
9. Richart, F. E. Jr., Hall, J. R. Jr. and Woods, R. D. (1970), *Vibrations of Soils and Foundations*, Prentice-Hall International, Inc., Englewood Cliffs, NJ, pp.129-132.
10. Santamarina, J. C., Klein, K. A. and Fam, M. A. (2001), *Soils and Waves*, John Wiley & Sons, LTD, pp.238-282.
11. Seed, H.B. and Idriss, I.M. (1970), *Soil moduli and damping factors for dynamic response analysis*, Report No. UCB/EERC-70/10, University of California, Berkeley.
12. Skempton, A. W. (1954), “The pore pressure coefficients A and B”, *Geotechnique*, Vol.47, pp.133-147.
13. Tsukamoto, Y., Ishihara, K., Nakazawa, H., Kamada, K. and Huang, Y. (2002), “Resistance of partly saturated sand to liquefaction with reference to longitudinal and shear wave velocities”, *Soils and Foundations*, Vol.42, No.6, pp.93-104.
14. Vucetic, M. (1994), “Cyclic threshold shear strains in soils”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.120, No.12, pp.2208-2228.
15. Yoshimi, Y., Yanaka, K. and Tokimatsu, K. (1989), “Liquefaction resistance of a partially saturated sand”, *Soils and Foundations*, Vol.29, No.2, pp.157-162.

(접수일자 2006. 11. 27, 심사완료일 2007. 2. 9)