

벤더엘레먼트와 단순전단시험에 의한 비소성실트의 강성 비교

Stiffness Comparison of Non-plastic Silt due to Bender Element and Direct Simple Shear Test

송 병 응[†] · 야스하라 카즈야¹⁾ · 사카모토 와타루²⁾ · 이 제 우³⁾

Song, Byungwoong · Yasuhara Kazuya · Sakamoto Wataru · Lee, Jeewoo

ABSTRACT : Recent investigations into earthquake-induced damage have reported that liquefaction may take place on not only sands but also fine-contained soils or non-plastic silts. Although not a few study has been performed to understand the liquefaction of sands, relatively little effort has been devoted to improving our understanding of the liquefaction characteristics for non-plastic soils. Given that liquefaction strength is largely associated to shear wave velocity, bender element test as well as direct simple shear test is employed to examine the stiffness of non-plastic silt more precisely. Through the soil tests, the stiffness of non-plastic silts from the bender element tests is identified as slightly greater than that from the direct simple shear test. Further, the stiffness of non-plastic silts appears to be smaller than that of clay.

Keywords : Non-plastic silt, Bender element, Direct simple shear test, Stiffness

요 지 : 최근 지진에 의한 액상화 피해를 입은 지역에서의 조사결과에 의하면 모래지반 뿐만 아니라 세립분을 함유한 흙 또는 비소성실트 지반에서도 액상화 피해사례가 보고되고 있으나, 지금까지 액상화는 느슨한 포화 모래지반에서 발생하는 것으로만 알려져 비소성실트의 액상화특성에 대하여 거의 알려져 있지 않다. 특히, 액상화강도는 전단탄성파속도와 밀접한 관계가 있어 현장에서는 PS검층 등을 이용하여 원위치에서 흙의 강성을 조사하며, 실내 실험에서는 정확한 흙의 강성을 조사하기 위하여 벤더엘레먼트를 이용한다. 본 연구에서는 단순전단시험기에 벤더엘레먼트를 장착하여 비소성실트의 강성을 조사하였으며 단순전단시험 결과와 비교하였다. 그 결과 벤더엘레먼트에 의한 비소성실트의 강성은 단순전단시험결과보다 약간 크게 나타나지만 그 차이는 적으며, 점토의 강성보다 작은 것을 알 수 있었다.

주요어 : 비소성실트, 벤더엘레먼트, 단순전단시험, 강성

1. 서 론

1964년 일본 니이가타(新潟)현에서 큰 지진이 발생하여 느슨한 포화 모래지반에서 발생하는 “액상화”라는 단어가 세상에 널리 알려지는 사건이 있었다(濱田 등, 1986; Song, 2003a; 송병응, 2004). 이 사건을 계기로 전 세계의 학자와 기술자들이 포화모래지반에서의 액상화 메커니즘과 대책 등에 관한 연구를 수행하게 되었고 많은 연구 결과들이 알려지게 되었다.

1964년 니이가타현 지진이후 포화모래지반에서의 액상화 대책은 모든 토목구조물 설계에 있어서 필수검토 항목으로 반영되었는데, 1995년 일본 효고(兵庫)현남부지진(일명 한신대지진)이 발생하면서 좀 더 복잡한 사건이 발생하였다. 효고현남부지진은 수많은 인명 및 재산 피해를 일으킨 사건이지만 지반공학자 입장에서 가장 놀라운 일은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데

하나는 모래지반이 아닌 화강풍화토(일본명 마사토)에서 액상화 피해가 발생하였다는 점이고, 또 다른 하나는 지진에 의한 액상화 발생 후 완만한 경사지나 항만 매립지에서 수평지반이동이 작게는 수 cm, 크게는 10m 이상 발생하여 추가 재산 및 인명 피해를 일으킨 사건이 보고되었다(Hamada 등, 1996; Song, 2003a). 1995년 효고현 남부지진 발생 이전까지는 “영구변위(long-term displacement)”라고 하였던 표현을 이 대 사건 이후 “측방유동(lateral flow)”라고 정의하였다(地盤工学会, 1998).

1964년 니이가타 지진과 1995년 효고현남부지진 이후 느슨하게 포화된 모래 또는 화강풍화토에서의 액상화 및 측방유동에 관한 수많은 연구가 이루어졌지만 최근에 또 다른 형태의 액상화 피해가 주목 받기 시작하였다. 2000년 일본에서 톳토리현(鳥取)서부지진이 발생하여 타케노우찌공단(竹内工團)에서 비소성실트의 액상화가 보고되었다(地盤工学会, 2002). 2000년 톳토리현서부지진 피해를 계기로

† 정회원, WASEDA University 이공학술원 외국인특별연구원(E-mail : iac05105@kurenai.waseda.jp)

1) 비회원, IBARAKI University 도시시스템공학과 교수

2) 비회원, East Japan Railway Company, Ltd. 사원

3) 비회원, Kajima 건설 기술연구소, 주임연구원

문헌 조사한 결과, 1989년 미국 Loma Prieta 해양연구소에서 세립분을 함유한 흙의 액상화 및 그 후의 측방유동 피해 및 1994년 미국의 Northridge 지진의 경우에는 실트질 모래에서 액상화 후의 측방유동과 같이 점토지반에서 반복응력 후 지반변위가 발생한 것으로 보고된 것을 알 수 있었다(Boulanger 등, 1998; Holzer 등, 1999).

이상 기존 문헌에 따르면 지진에 의한 액상화 피해는 더 이상 모래지반에 국한된 문제가 아니며 다른 종류의 지반에서도 액상화 발생가능성을 내재하고 있는 것을 알 수 있다. 흙의 액상화 발생 가능성 여부를 현장 및 실내시험을 통하여 조사하고자 할 경우에는 액상화 강도가 흙의 강성과 밀접한 관계를 갖고 있는 점을 이용한다. 지금까지 많은 연구자와 기술자들이 보다 정확한 흙의 강성을 알아내기 위하여 개발하고 제안한 방법들을 보면, 현장에서는 여러 가지 종류의 탄성파탐사 등을 통하여 최대한 현장에 부합하는 값을 얻고자 하며, 실내에서는 최대한 현장조건과 부합되는 공시체를 만들어 삼축시험, 공진주시험, 비틀림 시험 및 단순전단시험 등이 있다. 일반적으로 삼축시험이나 단순전단시험기는 중~대변형을 범위 내에서 이루어지는 실내시험으로 이들 시험을 통하여 얻은 흙의 강성은 과소평가될 가능성이 크다. 이를 보완하기 위하여 Gap sensor나 벤더엘레먼트(Bender element) 등을 이용하여 미소변형을 범위 내에서 흙의 강성을 구하려는 시도를 하고 있다.

본 연구에서는 벤더엘레먼트를 이용하여 비소성실트의 강성을 구하고자 하였으며, 이 시험결과는 NGI형 단순전단시험으로부터 얻을 수 있는 강성과 비교 수행하였다. 한편, 문헌조사로부터 구한 점토와 카올린 등의 재료들과의 비교를 통하여 비소성실트의 액상화 발생 가능성에 대하여 검토하였다.

2. 실험방법 및 비소성실트의 특성

본 연구에서는 NGI형 단순전단시험기에 벤더엘레먼트

를 부착하여 두 종류의 시험장치에서 구한 강성을 비교하고자 한다. 단순전단시험기와 벤더엘레먼트 시험장치의 개요와 비소성실트의 강성을 구하는 방법과 본 연구에서 사용한 비소성실트의 특성에 대한 설명을 하고자 한다.

2.1 실험개요

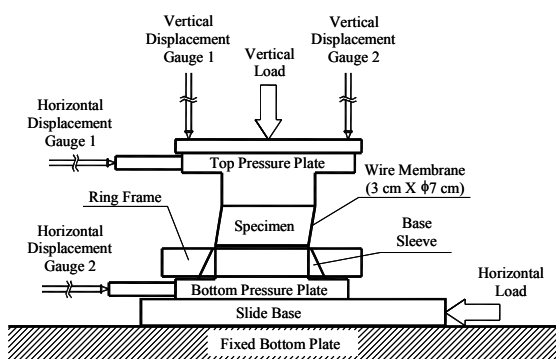
본 연구에 이용한 시험장치는 일본 이바라키(茨城) 대학에 있는 NGI형 단순전단시험장치를 사용하였다(그림 1(a)). 실험은 직경 7cm, 높이 3cm의 원형공시체를 K_0 압밀조건 하에서 구속 시킨 후, 정제적조건에서 연직응력을 조절해서 전단시험을 행하였다. 과잉간극수압은 전단응력을 가한 전후의 연직유효응력의 차로 결정하였다(Song, 2003a; Song, 2003b; Song 등, 2003; 송병웅 등, 2004; 宋炳雄 등, 2004; Song 등, 2004).

한편, 그림 1(b)는 단순전단시험기에서 공시체를 설치하는 상하 플레이트 정중앙에 구멍을 뚫고 벤더엘레먼트를 설치하였다. 전단파는 상부에서 발견되어 공시체를 통과하고 하부 수신기를 통하여 데이터가 저장되는 방식을 채택하였다. 이 벤더엘레먼트의 강성은 크지 않아 전단시험 중 부러지기 때문에 전단시험 중 벤더엘레먼트 시험은 수행할 수 없었다.

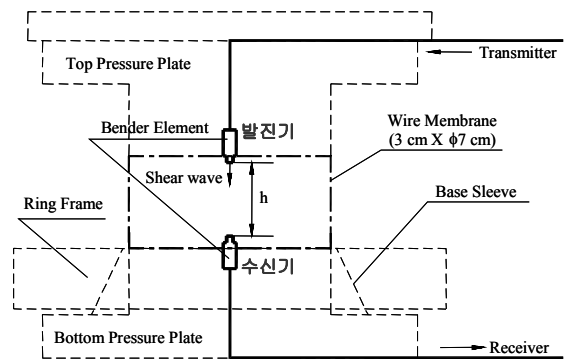
본 연구에 사용한 모든 시료는 재성형 후 일정한 구속압을 가한 상태에서 전단시험을 수행하였다(地盤工学会, 2000). 본 연구에서 수행한 전단시험은 연직구속응력을 98kPa이나 196kPa까지 가한 후 체적이 일정한 상태를 유지하며, 시간당 196kPa의 압력으로 전단변형률 20%까지 수평하중을 가하였다(Song, 2003a; Song 등, 2003).

2.2 강성 결정 방법

벤더엘레먼트 시험을 통하여 비소성실트의 강성을 결정하는 방법은 다음과 같다. 우선 식 (1)에서와 같이 벤더엘



(a) NGI형 단순전단시험기



(b) 벤더엘레먼트

그림 1. 벤더엘레먼트를 장착한 단순전단시험기

레먼트 시험을 통하여 전단파속도를 파악하고 그 후 식 (2)와 같이 흙의 밀도와 전단파속도와의 관계를 통하여 비소성실트의 강성을 구할 수 있다(荻野 등, 2001).

$$v_s = \frac{d}{t} \quad (1)$$

여기서, d 는 이동거리(mm)를 나타내며 본 연구에서는 그림 1(b)에서 거리 h 와 같으며, t 는 시간(sec)을 나타낸다.

$$G = \rho_t \cdot v_s^2 \quad (2)$$

여기서, ρ_t 는 흙의 밀도(Mg/m^3)를 나타낸다.

한편, 단순전단시험으로부터 구한 비소성실트의 강성은 그림 2와 같이 단순전단시험에서 최대강성을 결정하는 방법을 나타내었으며, 전단변형률 γ 이 0.01%일 때 전단응력 τ 과의 관계에서 강성을 구하였다.

2.3 비소성실트의 특징

그림 3은 본 연구에서 이용한 비소성실트의 입도분포곡선을 나타내고 있다. 본 연구에서 이용한 비소성실트는 공장에서 생산되는 제품명은 “DL clay”이지만, 그림 3과 토질시험결과 입자의 크기가 점토보다 크고 소성이 없어 소성한계를 구할 수 없는 비소성실트로 판명되어 본 연구에

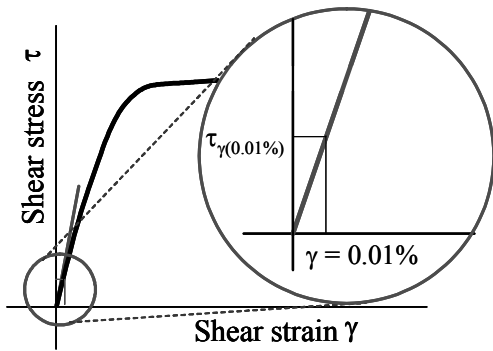


그림 2. 단순전단시험에서 강성결정 방법

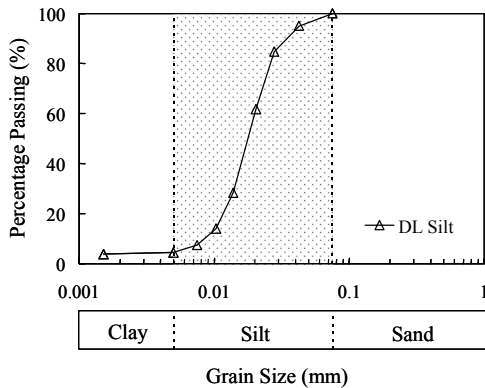


그림 3. DL 실트의 입도분포곡선

서 사용하였다. 한편, 토질시험을 통하여 DL실트의 토입자의 밀도는 $2.64Mg/mm^3$, 유효내부마찰각은 23° , 최대 및 최소 간극비 e_{max} 및 e_{min} 는 각각 1.47, 0.71인 것으로 나타났다.

3. 결과분석

벤더엘레먼트 시험결과로부터 식 (1)에서 필요한 도달시간을 얻고자하지만, 아직까지는 벤더엘레먼트 시험에서 도달시간을 결정하는 방법에 대한 규정이 명확하게 설정되어 있지 않다. 이와 함께 아직까지 벤더엘레먼트 시험에 대한 규격화된 시험방법이 없는 관계로 본 연구에서 벤더엘레먼트를 이용하여 전단파의 도달시간을 결정하기 위한 시험을 수행하였다. 시험결과에 따르면 입력된 주파수의 크기에 따라 비소성실트의 강성의 차이가 나타나 이에 대한 분석이 이루어졌다. 아울러 단순전단시험결과에서 나타난 비소성실트의 강성과 비교분석을 통하여 벤더엘레먼트 시험으로부터 구한 비소성실트의 강성이 검토되었다.

3.1 도달시간의 결정

본 연구에서 도달시간의 위치를 결정하기 위하여 그림 4와 같이 세 가지 경우에 대한 도달시간을 비교·검토하였다. 벤더엘레먼트 시험에서 발전기에서 사용되는 입력파는 정현파인데 첫 번째 경우는 입력파가 발전되는 순간부터 수신기에서 신호가 입력되는 순간(A-a)의 시간차(time 1)를 구하였다. 두 번째 경우는 입력파가 최고치에 도달하는 순간에서 수신기에서 출력파가 최저치에 도달하는 순간(B-b)의 시간차(time 2)를, 세 번째 경우는 입력파가 최고치에 도달할 순간에서 수신기에서도 출력파가 최고치에 도달하는 순간(B-c)의 시간차(time 3)를 구하였다.

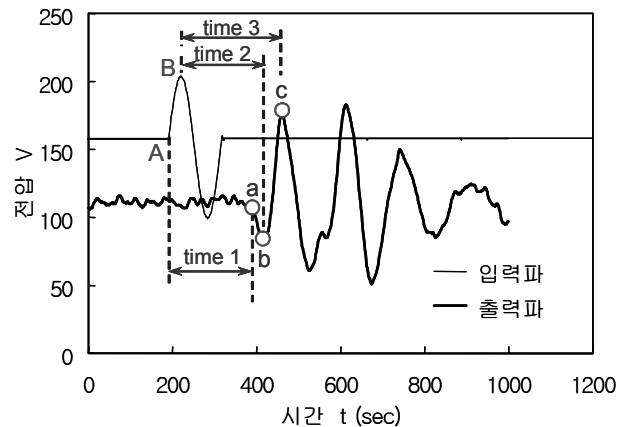


그림 4. 도달시간의 결정 방법

그림 5는 입력파의 주파수가 3kHz와 5kHz의 경우에 대하여 구속응력의 증가에 따른 강성의 변화를 나타내었다. 구속압은 49, 98, 147, 196, 294, 392kPa의 경우를 설정하였다. 시험결과는 그림 5와 같이 나타났으나 입력파의 주파수가 5kHz의 경우에는 구속압이 작은 범위에서 입력파와 출력파와의 도달시간차가 거의 나타나지 않아 비교·검토 대상에서 제외하였다(그림 5(b) 참조).

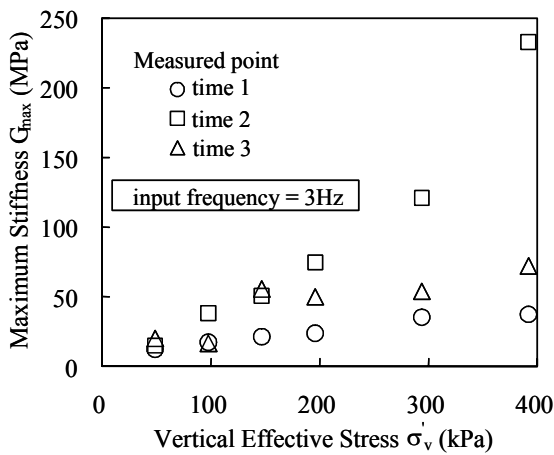
그림 5(a)와 (b)를 비교하여 보면 벤더эле먼트로부터 구한 비소성실트의 강성이 매우 큰 폭으로 차이가 남을 알 수 있다. 특히, 그림 5(a)에 의하면 구속압력이 크면 클수록 세 가지 경우에 대한 강성의 차이가 크게 나타나는데 그 이유는 다음과 같다.

전단파의 도달시간은 그림 4에서와 같은 시험결과를 근거로 판정하게 되는데 입력파의 주파수 크기가 3kHz의 경우에는 입력파의 크기가 작은 관계로 출력파의 진폭이 작게 나타나게 되어 4와 같은 그림에서 도달시간을 결정하기가 매우 곤란하였다. 특히 구속압력이 크면 클수록 출력파의 진폭은 더욱 파약하기 어려웠다. 이러한 이유로 구속

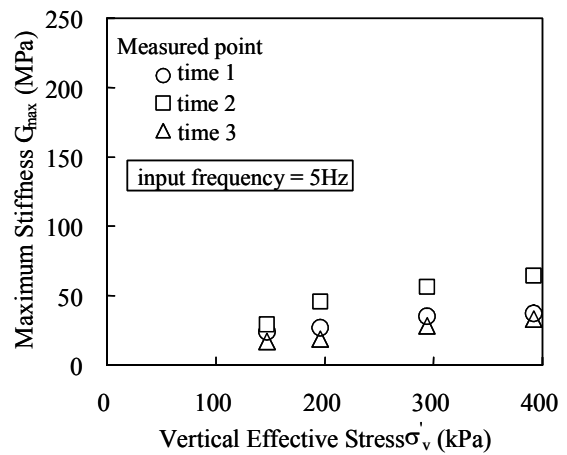
압력이 큰 경우에는 입력파의 주파수 크기가 큰 것이 보다 정확한 강성을 구할 수 있는 것을 알았다.

한편, 도달시간의 결정을 위한 세 가지 방법에 대하여 입력파의 주파수가 3kHz와 5kHz인 경우 모두 전체적으로 입력파가 최고치에 도달하는 순간에서 수신기에서 출력파가 최저치에 도달하는 순간(B-b)의 시간차(time 2)에서의 강성이 크게 나타났으나 특히 입력파의 주파수가 3 kHz의 경우에서 구속압력이 큰 경우 강성이 다른 시험 조건에 비하여 매우 크게 나타나 그 신뢰성은 매우 떨어진다.

그림 6(a)는 도달시간의 결정을 위하여 상기의 세 가지 경우에 대한 벤더эле먼트 시험 결과와 단순전단시험 결과와 비교하였다. 비교 검토 결과 도달시간은 첫 번째 경우(time 1)와 가장 비슷한 것으로 나타났다. 한편, 그림 6(b)는 time 1의 경우에 구한 벤더эле먼트 시험결과와 단순전단시험결과를 비교하여 보았다. 그림 6(b)에 따르면 구속응력의 증가에 따른 비소성실트의 강성의 증가 경향은 비선형 형태로 나타날 것으로 예상된다. 한편, 비소성실트에 대한 자세한 단순전단시험 결과는 기존 문헌을 참조하였

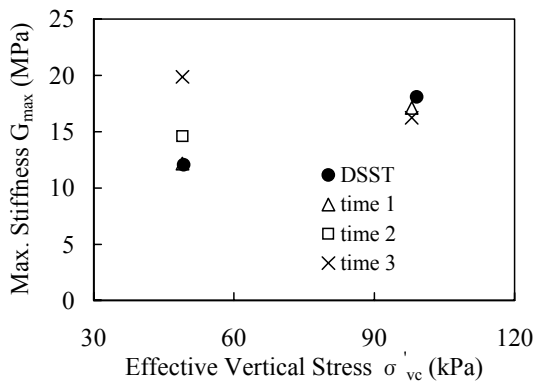


(a) 주파수 = 3kHz

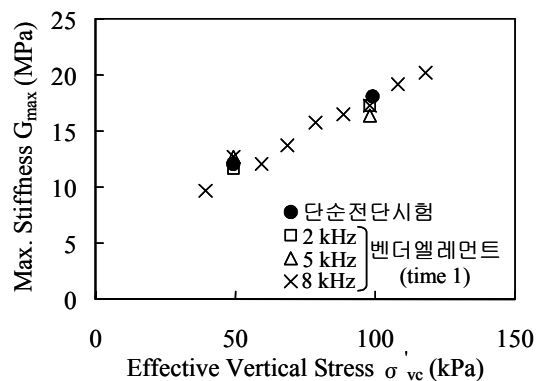


(b) 주파수 = 5kHz

그림 5. 도달시간 결정을 위한 강성비교



(a) 시간결정을 위한 비교



(b) 구속응력 증가에 따른 강성 증가(time 1)

그림 6. 벤더эле먼트 시험과 단순전단시험 결과 비교

다(Song, 2003a; Song, 2003b; Song 등, 2003; 송병용 등, 2004; 宋炳雄 등, 2004; Song 등, 2004).

3.2 주파수 크기에 따른 강성의 차이

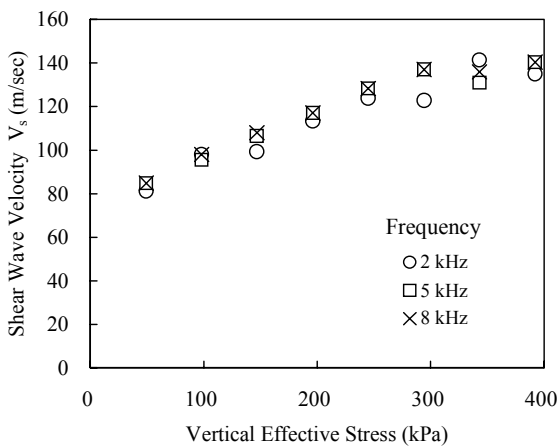
그림 6에서 강성의 도달시간을 결정하였는데 주파수의 크기에 따른 강성의 차이가 우려되어 이에 대한 비교 검토가 이루어졌다. 우선 공시체의 구속응력을 49kPa에서 392kPa 까지 점진적으로 증가시키면서 주파수를 2, 5, 8kHz와 같이 세 종류를 선택하여 비소성실트의 강성을 비교 검토하여 보았다.

그림 7은 입력파의 주파수 크기에 따른 전단파속도와 비소성실트의 강성을 비교한 결과를 나타내고 있다. 그림 7(a)에 의하면 입력 주파수가 2kHz는 구속압이 작은 경우에 다른 주파수보다 강성이 약간 작게 평가되는데 구속압이 300kPa을 넘은 경우에 오히려 다른 주파수에서 얻은 전단파속도보다 매우 작거나 오히려 크게 평가 되었다. 이

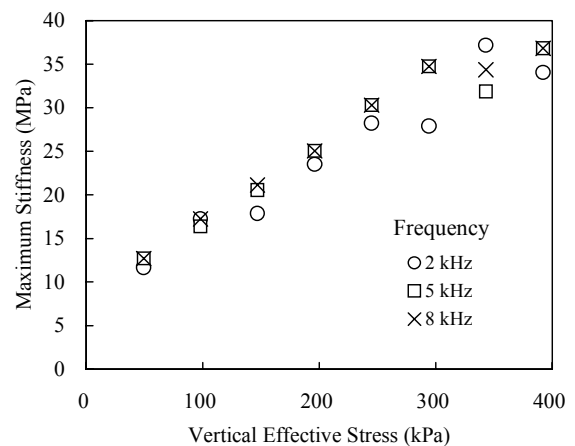
현상은 그림 5에서 나타난 결과와 같이 주파수 크기가 작고 구속압이 크면 도달거리를 관측하기가 매우 곤란한 것이 주원인이다.

그림 7(b)에 의하면 입력주파수가 5kHz와 8kHz인 경우에 얻어지는 비소성실트의 강성은 거의 같은 결과로 나타나, 입력주파수가 클수록 비소성실트의 강성을 보다 정확하게 얻을 수 있는 것을 알 수 있었다.

그림 8은 구속압을 20kPa에서 392kPa까지 증가시킨 경우에 대하여 벤더엘레먼트를 이용하여 비소성실트의 전단파 속도와 강성 변화를 측정된 결과이다. 그리고 그림 8(b)은 단순전단시험으로부터 구속압이 49kPa과 100kPa의 경우에 얻은 비소성실트의 강성과 비교하였다. 비교 결과 입력파가 8kHz인 경우 벤더엘레먼트 시험결과와 단순전단시험결과가 거의 일치하는 것으로 나타나, 벤더엘레먼트 시험을 수행할 경우 입력주파수가 클수록 유리한 것을 알 수 있었다.

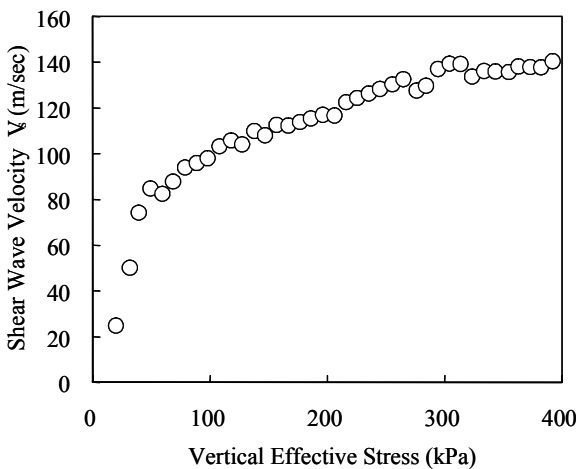


(a) 전단파 속도 비교

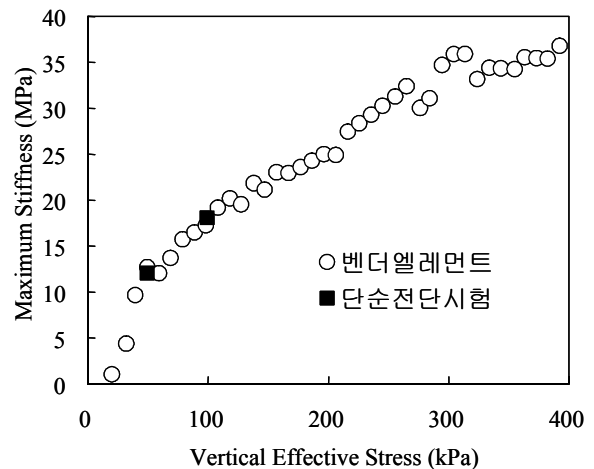


(b) 강성 비교

그림 7. 주파수 크기에 따른 전단파속도와 강성 비교



(a) 구속압 증가에 따른 전단파 속도



(b) 구속압 증가에 따른 강성

그림 8. 입력파가 8kHz인 경우의 전단파속도와 강성

3.3 다른 종류 흙과의 비교

지금까지는 비소성실트의 전단파 속도 및 강성에 대하여 설명하였다. 본 연구에서는 기존 문헌 조사를 통하여 다른 종류 흙의 전단파 속도 및 강성을 구하여 비교분석하였다. 그림 9는 점토와 모래의 강성과 전단파 속도를 각각 구하여 비소성실트와 비교하여 나타내었다.

그림 9(a)에서 三野 등(1994, 1995)은 삼축압축시험기에 벤더엘레먼트를 부착하여 카올린과 점토에서의 강성을 조사하였다. 三野 등(1994)에 의하면 삼축압축시험기에 벤더엘레먼트를 부착하여 카올린에 대하여 조사한 결과, 공시체의 높이가 클수록 강성이 삼축압축시험 및 비틀림전단시험 결과보다 크게 평가 되는 것을 알았다. 한편 三野 등(1995)이 점토에 대하여 벤더엘레먼트와 반복삼축압축시험에 의한 강성을 비교한 결과는 구속압이 작은 경우에 별다른 차이가 나타나지 않았지만, 구속압이 커질수록 벤더엘레먼트에 의한 값이 크게 평가되었다. 한편, 비소성실트와 공시체의 초기조건 및 시험 방법이 다른 점을 고려하여도 같은 구속압 조건하에서 비소성실트의 강성은 카올린이나 점토 보다 작게 평가되는 것을 알 수 있다.

그림 9(b)에서 모래의 전단파속도와 비소성실트의 전단파속도를 비교하여 나타내었다. 横山 등(1998)은 토요우라사(豊浦砂: 일본 표준사)를 이용하여 모래의 반복삼축압축시험기에 벤더엘레먼트를 부착하여 전단파속도를 조사하였다. 제작한 공시체의 높이는 100mm, 초기 평균유효구속압은 98 kPa이었다. 横山 등(1998)은 반복삼축압축시험 중 축차응력 q 가 거의 0인 경우, 축차응력 q 이 압축, 인장 등 세 가지 경우에 있어서 전단파속도의 감소 경향을 조사하여 그림 9(b)와 같이 나타내었다. 본 연구에서는 단순전단시험기에 벤더엘레먼트를 부착하였지만, 단순전단시험 중 수평응력에 의하여 벤더엘레먼트가 부러지는 가능성이 높

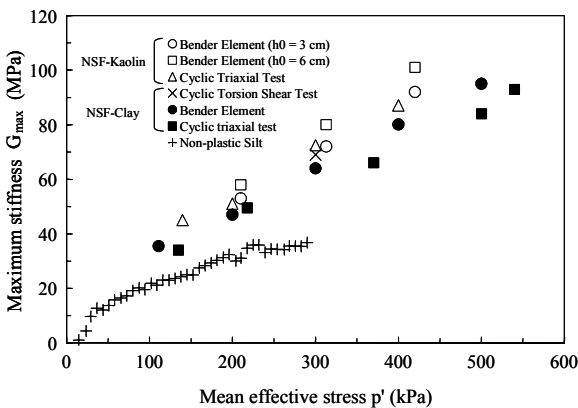
아 시험을 할 수가 없었고 단지 유효연직구속압을 증가시켜 벤더엘레먼트 시험을 수행하여 얻은 시험결과와 비교하였다.

그림 9(b)에서 横山 등(1998)에 의하면 축차응력 q 이 0과 압축응력이 가해지는 경우에서 모래의 강성은 비슷하게 평가되었으며 인장응력이 가해질 경우 모래의 강성은 작아지는 것을 알 수 있다. 그리고 평균유효구속압이 98kPa인 초기 상태에서의 전단파속도는 약 250m/sec이었는데 액상화가 발생한 시점에서는 42kPa로 나타나, 전단파 속도가 거의 1/5 수준으로 저하된 것을 알 수 있었다. 한편, 비소성실트의 구속압 변화에 따른 전단파속도를 측정할 결과는 모래에 비하여 매우 작은 것을 알 수 있으며, 유효구속압이 약 25kPa 정도인 비소성실트의 전단파속도가 액상화가 발생한 모래의 전단파속도와 비슷한 것으로 나타나 모래와 비소성실트의 밀도 차이가 작은 것을 고려하면 비소성실트의 강성은 모래에 비하여 매우 작을 것으로 예상된다.

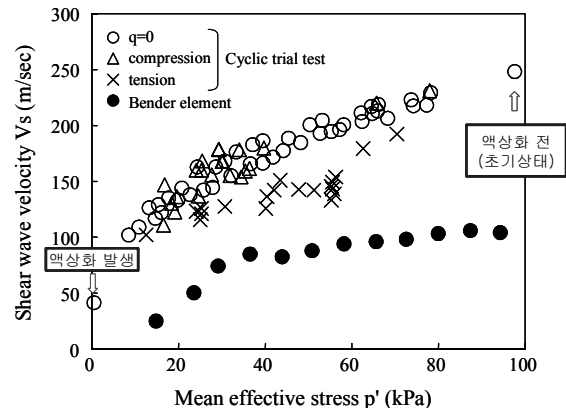
4. 결 론

본 연구에서는 지진에 의한 액상화 피해가 예상되지만, 모래나 점토, 화강풍화토에 비하여 상대적으로 잘 알려져 있지 않은 비소성실트의 강성에 대하여 벤더엘레먼트와 NGI형 단순전단시험을 통하여 조사하였고, 기존 문헌조사로부터 구한 점토, 카올린과 모래 등의 재료들과의 비교를 통하여 비소성실트의 액상화 발생 가능성에 대하여 검토하여 다음과 같이 정리하였다.

- (1) 벤더엘레먼트를 이용하여 전단파 속도를 구할 때에는 전단파의 도달시간을 정확히 얻는 것이 매우 중요하며, 입력파의 주파수가 클수록 출력파의 파형이 명확



(a) 점토, 카올린과의 강성비교(三野 등, 1994; 三野 등, 1995)



(b) 모래와의 전단파속도 비교(横山 등, 1998)

그림 9. 점토 및 모래와의 강성 및 전단파속도 비교

하게 나타나고 입력파의 입력 시점과 출력파의 도달 시점에서 구한 전단파 속도가 단순전단시험결과와 비슷한 것을 알 수 있었다.

- (2) 점토 및 카올린에 대한 반복삼축시험, 반복비틀림시험 및 벤더엘레먼트 시험결과와 비소성실트의 벤더엘레먼트시험을 통한 강성을 비교한 결과 비소성실트의 강성이 작은 것으로 나타났다.
- (3) 단순전단시험기에 벤더엘레먼트를 부착하여 구한 비소성실트의 전단파속도를 반복삼축압축시험기에 벤더엘레먼트를 부착하여 측차응력이 거의 0인 경우, 압축 및 인장인 경우에 있어서 구한 모래의 전단파속도와 비교한 결과 비소성실트의 전단파속도가 작은 것으로 나타나, 모래와 비소성실트의 밀도 차이가 작은 것을 고려하면 비소성실트의 강성도 모래보다 작을 것으로 예상된다.

이상의 시험결과로부터 비소성실트의 강성은 카올린, 점토 및 모래 보다 강성 및 전단파속도가 작은 것으로 나타나 모래 지반에 비하여 입자의 크기는 작지만 비소성실트 지반에서도 지진 시 액상화 피해가 발생할 것으로 예상되어 토목현장에서 구조물 설계 시에 비소성실트 지반의 액상화 판정 시 주의하여야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

The authors would like to thank the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) for their support of this work.

참고 문헌

1. 송병웅(2004), 액상화가 세상에 이름 알린 날, *한국지반공학회지*, Vol. 20, No. 10, 한국지반공학회, pp. 34~38.
2. 송병웅, 야수하라 카즈야(2004), 여유간극비에 의한 흙의 강도저하특성 비교, *2004년도 학술발표회논문집*, 한국지반환경공학회, pp. 275~280.
3. Song, Byung-Woong, Kim, Hong-Taek, Yasuhara, Kazuya, Murakami Satoshi, Park, Inn-Joon(2003), Post-cyclic Degradation

of strength and stiffness for non-plastic silt, *2003년도 학술발표회논문집*, 한국지반환경공학회, pp. 87~93.

4. 荻野俊博, 三田地利之, 澁谷啓, 及川洋(2001), 圧密定積一面専断試験による粘性土の変形・強度特性—バンダーエレメントによるせん断弾性係数の測定—, *土木学会論文集*, No. 676/III-54, pp. 15~26.
5. 宋炳雄, 安原一哉, 村上哲, 小峯秀雄(2004), 余裕間隙比の概念に基づいた比塑性シルトの繰返し強度と剛性低下の評価, *土木学会論文集*, 第764/III-67, *土木学会*, pp. 11~24.
6. 地盤工学会(1998), 地震時の地盤・土構造物の流動性と永久変位に関するシンポジウム発表論文集, *地盤工学会*, pp. 53~70.
7. 地盤工學會(2000), 土質試験の方法と解説, 第一回改訂版, *地盤工学会*, pp. 425~725.
8. 地盤工学会(2002), 平成12年鳥取県西部地震災害調査報告書, *地盤工学会*, pp. 78~87(CD-ROM).
9. 濱田政則, 安田進, 磯山龍二, 恵本克利(1986), 液状化による地盤の永久変位の測定と考察, *土木学会論文集*, 第376号/III-6, pp. 211~220.
10. 三野秀作, 澁谷啓, 三田地利之, 中田洋行(1994), Bender Element試験による弾性せん断波速度の測定方法, *土木学会第49回年次学術講演会*, *土木学会*, III-256, pp. 502~503.
11. 三野秀作, 澁谷啓, 三田地利之, 伊藤善(1995), 各種室内試験による粘性土地盤のGmaxの測定, *土木学会第50回年次学術講演会*, *土木学会*, III-235, pp. 470~471.
12. 横山正利, 森井慶行, 後藤聡(1998), バンダーエレメントによる砂の液状化のせん断波速度の測定, *土木学会第53回年次学術講演会*, *土木学会*, III-A94, pp. 186~187.
13. Boulanger, M. W., Meyers, L. H., Mejia, H. and Idriss, I. M.(1998), Behavior of a fine-grained soil during the Loma Prieta Earthquake, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 35, No. 1, pp. 146~158.
14. Hamada, M., Isoyama, R. and Wakamatsu, K.(1996), Liquefaction-induced ground displacement and its related damage to lifeline facilities, *Special Issue of Soils and Foundations*, Japanese Geotechnical Society, pp. 81~97.
15. Holzer, T. L., Bennett, M., J., Ponti, D. J. and Tinsley, J. (1999), Liquefaction and Soil Failure During 1994 Northridge Earthquake, *Journal of Geotech. and Geoenv.Eng.* ASCE, Vol. 125, No. 6, pp. 438~452.
16. Song, B.(2003a), *Evaluation for lateral flow of non-plastic silt induced by earthquakes*, Doctoral dissertation, Ibaraki University, Hitachi, Japan, pp. 65~98.
17. Song, B.(2003b), The influence of initial static shear stress on post-cyclic degradation of non-plastic silt, *Lowland Technology International*, International Association of Lowland Technology (IALT). Vol. 5, No. 1, pp. 14~24.
18. Song, Byung-Woong, Yasuhara, Kazuya, Murakami, Satoshi (2004), "Direct simple shear testing for post-cyclic degradation in stiffness of non-plastic Silt", *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol. 27, No. 6, pp. 607~613.

(접수일: 2006. 11. 26 심사일: 2006. 12. 11 심사완료일: 2007. 1. 8)