

직접단순전단시험기의 소개 및 이를 이용한 흙의 구성모델 검증



박 성 식
원광대학교
토목환경도시공학부 조교수
(sspark@wku.ac.kr)

1. 머리말

지반공학 구조물 중에서 우리가 자주 설계 및 시공하는 옹벽, 연속기초, 댐 등에 작용하는 응력에 따른 변형을 거동은 평면변형률(plane strain) 조건으로 볼 수 있다. 이와 같은 지반공학 구조물의 응력-변형률 거동을 시뮬레이션 하기 위해서는 평면변형률 조건하에서 실시되는 실험이 필요하다. 흙으로 만들어지거나, 흙 위 또는 흙으로 둘러싸인 지반공학 구조물의 내부에서 응력 변화가 일어남에 따라 어떤 요소에 작용하고 있는 주응력의 방향이 바뀌게 된다. 이와 같은 평면변형률 조건과 주응력 방향의 연속적인 변화를 모두 만족하는 시험 중의 하나가 직접단순전단시험(direct simple shear test)이다. 하지만 지반공학을 전공한 대부분의 연구자나 기술자들은 전자 혹은 후자의 조건을 만족하지 못하는 삼축시험 결과를 이용하여 토질정수를 구하고 흙의 구성모델을 검증하고 있다. 본 논문에서는 국내에서 잘 알려지지 않은 직접단순전단시험에 대하여 소개하고, 캐나다 University of British Columbia(UBC)

대학에서 실시한 실험 결과를 어떻게 흙의 구성모델 검증에 사용하였는지 설명하고자 한다.

2. 직접단순전단시험기

2.1 특징 및 종류

지진이 자주 발생하는 북미 서해안에 위치하고 있는 캐나다 UBC 대학의 Finn 교수와 Vaid 교수는 70년대부터 지진으로 인한 모래의 거동을 실내실험과 진동대실험을 이용하여 활발히 연구하였다. 그 중에서 실내실험에서 자주 사용한 장비가 지반을 좌우로 흔드는 지진하중을 가장 잘 시뮬레이션할 수 있는 그림 1과 같은 직접단순전단시험기이다. Peacock과 Seed(1968), Silver와 Seed(1971), Ishihara와 Yamazaki(1980) 등과 같은 연구자들도 해안 구조물에 작용하는 파도와 같이 일정하게 반복되는 하중, 좌우로 반복되는 전단파에 의해 발생하는 지진하중을 가

직접단순전단시험기의 소개 및 이를 이용한 흙의 구성모델 검증

장 잘 시뮬레이션할 수 있는 직접단순전단시험기를 이용하여 다양한 연구를 하였다. Ishihara와 Li(1972)는 삼축시험과 직접단순전단시험의 중요한 차이는 주응력방향의 회전 여부, 등방 또는 비등방 상태인 초기응력, 시료 내의 응력분포에서 차이가 있다고 지적하였다. 그림 2는 직접단순전단시험에서 시료에 작용하고 있는 초기응력에서 반복전단응력($\pm\tau_{xy}$)이 작용함에 따라 주응력의 방향이 좌우로 $\pm\alpha_0$ 만큼 회전하는 과정과 Mohr의 응력원을 나타내고 있다.

직접단순전단시험기는 크게 두 종류로 나눌 수 있다. 하나는 Cambridge대학에서 개발한 Cambridge형(Roscoe, 1953)이며, 또 다른 하나는 노르웨이 NGI(Norwegian

Geotechnical Institute)에서 개발한 NGI형(Bjerrum과 Landva, 1966)이다. 그림 3은 직접전단을 비롯하여 Cambridge형과 NGI형의 특징을 나타내었다. Cambridge형은 시료가 육면체 형태로 되어 있으며 내부에 로드셀이 장착되어 작용하고 있는 응력을 측정할 수 있다. 하지만 장비의 복잡한 구조와 사용법으로 현재는 거의 사용되지 않고 있다. NGI형은 멤브레인 속에 철사가 감겨져 있는 특수 제작된 멤브레인을 사용하여 수평방향의 변위를 억제시킨 상태로 실험을 실시하는 것이 특징이다. 하지만 일반 멤브레인의 외부에 여러 개의 얇은 링을 끼워 수평방향 변위를 억제 또는 고정시키는 방법도 있으며, 시료는 원형이다. Budhu(1984)는 두 장비를 비교하기 위한 실험을 실시하였

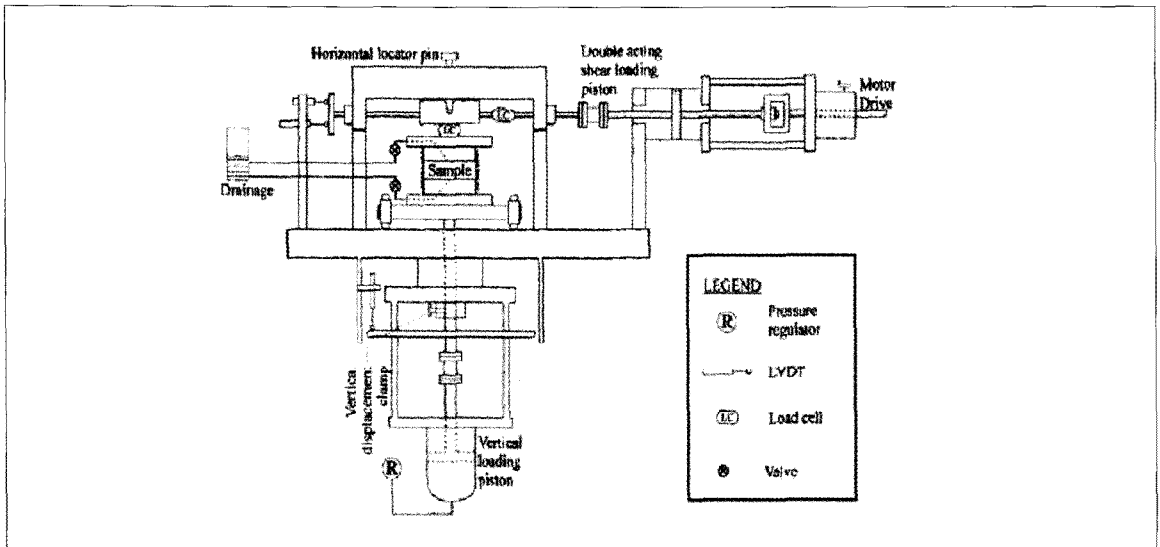


그림 1. UBC에 있는 직접단순전단시험기(Sriskandakumar, 2004)

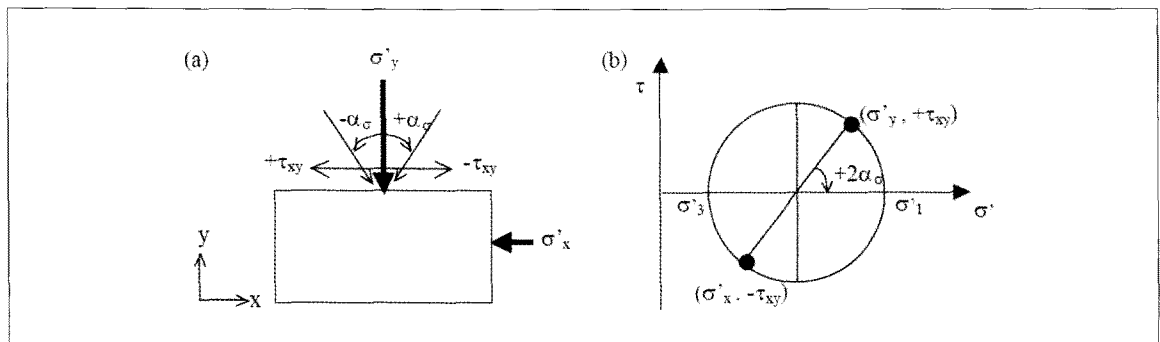


그림 2. 직접단순전단시험에서 작용하는 응력

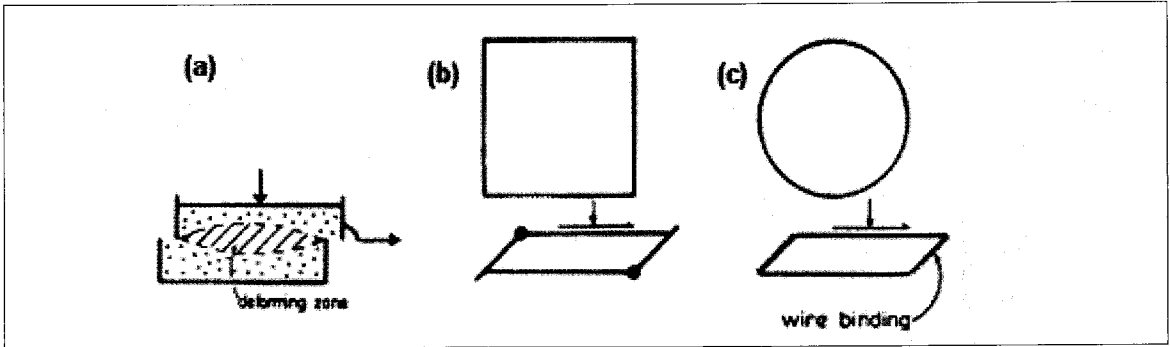


그림 3. (a) direct shear box, (b) Cambridge simple shear, (c) NGI simple shear(Airey 등, 1985)

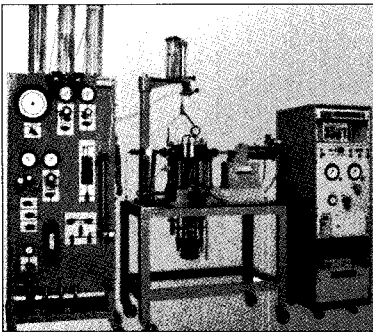


그림 4. 일본 Seikensha 직접단순전단시험기

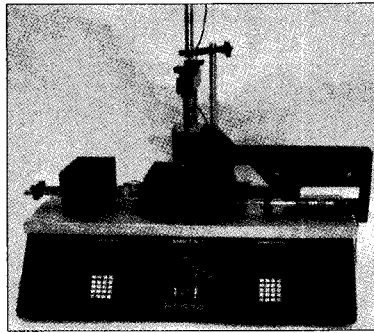


그림 5. 미국 Geocomp 직접단순전단시험기

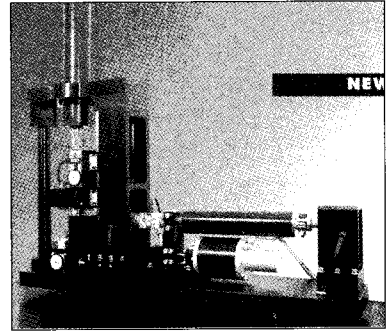


그림 6. 노르웨이 Geonor 직접단순전단시험기

으며, 정적(monotonic) 실험은 Cambridge형의 결과가 더 정확하지만 동적(cyclic) 실험에서는 두 장비가 비슷한 결과를 보였다. 현재 직접단순전단시험기를 시판하고 있는 회사는 일본 Seikensha(그림 4), 미국 Geocomp(그림 5), 노르웨이 Geonor(그림 6) 등이 있으며, 부산대학교는 Geocomp회사의 장비를 보유하고 있다. UBC는 일본 Seikensha 제품과 유사하게 설계된 장비를 보유하고 있으며, 본 논문에서는 이 장비를 이용한 실험 결과를 소개한다.

2.2 수평응력 및 전단응력

그림 2는 직접단순전단시험 시의 응력 상태를 나타내었다. 철사가 들어간 멤브레인을 사용하는 NGI형은 수평응력 σ_x 를 알 수 없다. 일반적으로 K_0 상태에서 수평응력 σ_x 는 수직응력의 50%정도이므로 이 값을 수치해석에 사용하는 경우가 많다. 그림 7은 시료에 작용하는 전단응력을 나타내고 있다. 그림 7(a)는 좌우측면에 전단응력

(complementary shear stress)이 작용하고 있는 이상적인 전단실험을 나타낸다. 하지만 simple shear라는 용어에서 알 수 있듯이 이 장비는 고안 초기부터 측면에는 전단응력이 작용하지 않도록 고안되었다. 즉 실제 실험에서는 고무로 된 멤브레인인 모래 사이에 전단응력이 발생하지 않아 그림 7(b)와 같이 상, 하부에만 전단응력이 작용하게 된다. 이와 같이 측면에서 전단응력이 작용하지 않을 경우 상부와 하부의 모서리 부분에서 전단응력의 집중 현상이 발생하게 된다. Dounias와 Potts(1993), DeGroot 등(1994)과 같은 연구자들이 이와 관련된 실험 및 해석 논문을 발표하였으며, 탄성이론을 이용한 수치해석 연구에 의하면 시료의 높이에 대한 직경비가 커질수록 응력집중은 감소한다고 하였다. 하지만 Vucetic과 Lacasse(1982)의 정적 실험 연구에 의하면 시료 높이에 대한 직경비는 실험 결과에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 아직도 서로 상반된 의견이 존재하지만 시료 높이가 짧기 때문에 측면의 전단응력 부재가 전체적인 실험 결과에는 크게 영향을 미치지

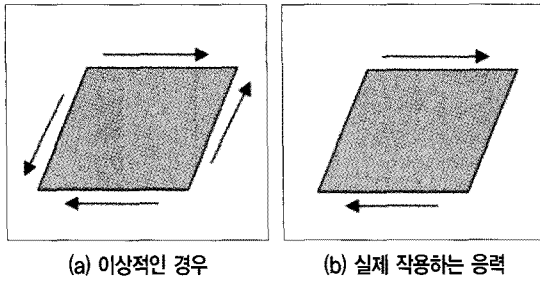


그림 7. 직접단순전단시험에 작용하는 전단응력

지 않는 것으로 알려져 있다. 앞서 언급한 두 가지 특징 또는 단점 때문에 아직도 많은 연구자들이 삼축시험을 더욱 선호하고 있지만, 지진과 같은 반복하중을 시뮬레이션할 때 직접단순전단시험이 가장 적절한 실내실험이라고 할 수 있다.

3. 실험 방법

3.1 시료성형 방법

NGI형 직접단순전단시험기의 시료는 그림 3(c)와 같이 직경이 7cm이고 높이는 약 2cm정도인 원기둥 형태이다. 시료성형 방법은 삼축시험과 거의 동일하나 시료의 높이

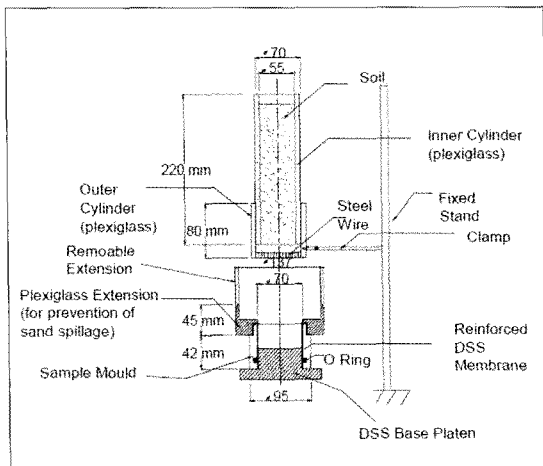


그림 8. 모래를 뿌려서 시료를 성형하는 장치와 몰드 (Sriskandakumar, 2004)

가 2cm 정도로 짧다는 것이 그림 3(a) 직접전단시험과 유사하다. 점토를 사용할 경우는 시료를 적당한 크기로 잘라서 멤브레인에 넣으면 된다. 모래를 사용할 경우 그림 8과 같은 모래를 뿌릴 수 있는 원기둥 형태의 장치를 이용하여 모래의 낙하높이를 조절함으로써 다양한 상대밀도를 가진 시료를 성형할 수 있다. 이와 같이 만들어진 시료는 모래의 분리현상(segregation)으로 높이에 따라 시료가 불균질하게 성형될 수 있으므로 다음과 같이 확인할 수 있다. 완성된 시료의 전체 높이를 3개 구간으로 나누어 각 구간별로 밀도를 알아보면 된다. 그림 9와 같이 진공을 이용하여 해당 구간의 모래를 빨아들인 후에 각 구간의 밀도를 계산할 수 있다. 그림 10은 멤브레인 안에 시료가 완성되어 좌우로 전단응력을 가하기 직전의 상황이다.

3.2 일정체적(constant volume) 실험

모래로 성형한 시료의 비배수 전단실험에서는 과잉간극수압이 발생하며 이를 간극수압계(pore pressure transducer)를 이용하여 측정한다. 하지만 시료의 체적을 일정하게 유지하면서 실시하는 실험 즉 일정체적(constant volume) 실험은 간극수압계가 필요없는 편리한 비배수 실험이라 할 수 있다. 일정체적을 유지시킨 상태에서 시료에 전단응력을 가하면 그림 2(a)에 있는 초기수직응력 σ'_v 가

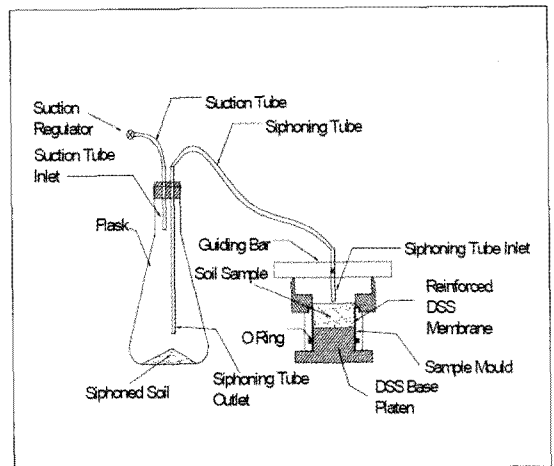


그림 9. 진공을 이용하여 모래를 빨아들이는 장치 (Sriskandakumar, 2004)

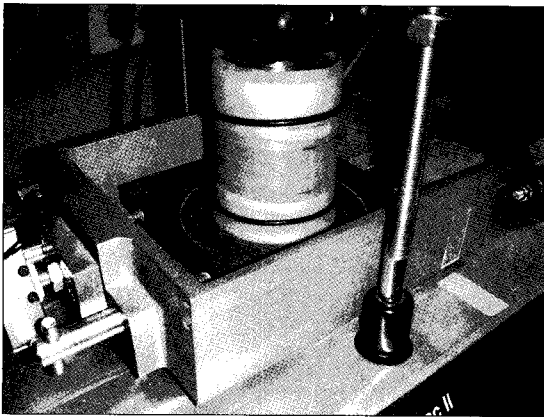


그림 10. 전단시험 시작 전의 상황

점점 감소하게 되는데 이때 감소하는 응력이 간극수압에 해당한다. 일정체적은 수평방향이 고정된 상태이므로 시료의 높이를 기계적으로 고정시키거나(Seikensha 방식) 또는 제어적으로 일정하게 유지시켜(Geocomp 방식) 일정체적이 되도록 한다. 이와 같은 일정체적 실험은 시료를 포화시킬 필요가 없어 건조시료를 사용한다. 따라서 시료성형시간이 단축되고 반복시험이 가능하며 포화 정도에 따른 간극수압의 오차와 같은 문제가 발생하지 않아 아주 편리한 실험 방법이다. UBC Void교수는 모래를 이용하여 동일한 응력조건하에서 비배수 실험과 일정체적 실험의 차이를 연구하였으며, 두 실험 방법에서 동일한 결과를 얻을 수 있었다. Dyrvik 등(1987)은 점토를 이용하여 두 실험 방법의 결과가 동일하다는 결론을 얻었다.

4. 직접단순전단시험 결과 및 구성모델의 검증

4.1 UBC 실험 결과

그림 1에 있는 UBC시험기를 이용하여 두 종류(100, 200kPa)의 초기수직응력을 가한 다음 세 종류의 반복전단 응력(cyclic shear stress)을 가하여 실험을 실시하였다. 실험에 사용한 모래는 D_{50} 이 0.26mm인 Fraser River 모래이며, 상대밀도는 느슨한 상태의 시료를 재현하기 위하여

약 40%정도로 성형하였다. 초기수직응력이 100kPa인 실험 결과는 그림 11~13과 같으며 굽은 실선이 실험 결과이다. 반복전단응력은 각각 10, 12, 15kPa이며 해당하는 반복전단응력비(cyclic shear stress ratio, CSR)는 0.1, 0.12, 0.15이다. 각각의 반복전단응력비에 대하여 실험 결과를 세 가지 방법으로 나타내었다. 첫 번째는 전단응력-유효수직응력 관계, 두 번째는 과잉간극수압비(excess pore pressure ratio, PPR)-반복전단횟수 관계, 세 번째는 전단응력-전단변형을 관계를 나타내었다. 삼축시험에서는 축변형률을 기준으로 액상화를 정의하는 것이 일반적이나, 본 논문에서는 과잉간극수압비가 0.95이상일 때를 액상화로 정의하였다. 반복전단응력비가 0.1, 0.12, 0.15로 커짐에 따라 액상화가 발생하는 횟수는 각각 5회, 3회, 1회로 점점 감소하였다. 반복전단응력의 재하횟수가 증가함에 따라 시료의 유효응력은 거의 0에 가까워지며 액상화되었다. 이와 같은 실험 결과는 흙의 거동을 예측하는 구성모델을 검증하는 기본 자료로도 사용된다.

4.2 구성모델의 검증

본 논문에서는 직접단순전단시험 결과를 UBCSAND모델의 검증에 적용한 사례를 소개한다. 본 논문에서 사용된 UBCSAND모델은 모래의 상대밀도 혹은 표준관입시험치 N_{60} 값만으로 해석이 가능한 실용적인 모델로 자세한 사항은 참고문헌 1. 박성식 등(2005)을 참조하기 바란다. 특히 모든 응력-변형률 관계를 일치시키기보다는 몇 회의 반복전단응력을 가하였을 때 액상화가 발생하는 지에 중점을 두고 개발되었다.

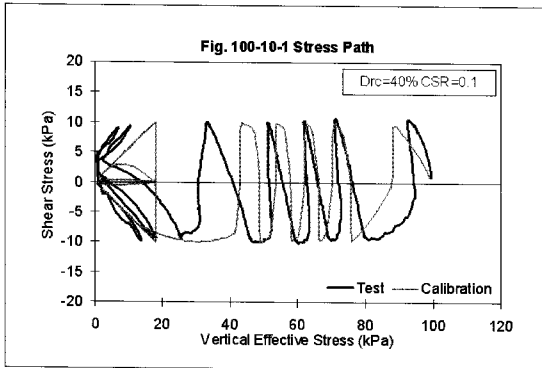
그림 11~13에서 가는 실선은 UBCSAND모델을 이용한 검증 결과이며 전반적으로 실험치와 일치하는 것으로 판단되었다. 그림 14는 반복전단응력비와 액상화가 발생하였을 때의 반복전단횟수를 나타내고 있다. 동그라미 표시는 초기수직응력이 100kPa일 때의 실험 결과이며, 점선은 UBCSAND모델의 검증 결과이다. 네모 표시는 200kPa일 때의 실험 결과이며, 실선은 UBCSAND모델의 검증 결과이다. 전반적으로 실험 결과와 UBCSAND모델의 검증 결과가 잘 일치함을 알 수 있다. 이와 같이 검증된 흙의 구성

직접단순전단시험기의 소개 및 이를 이용한 흙의 구성모델 검증

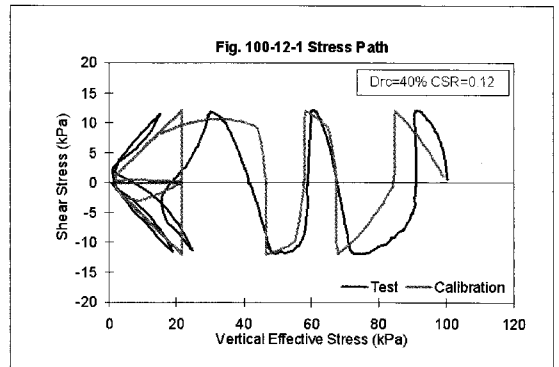
모델은 실제 지반에 지진이 발생하였을 때 어떤 결과가 일어날 것인지 즉 액상화 여부뿐만 아니라 진동으로 인한 유효응력 감소에 따른 지반의 변위도 계산할 수 있다는 것이 큰장점이다.

5. 맺음말

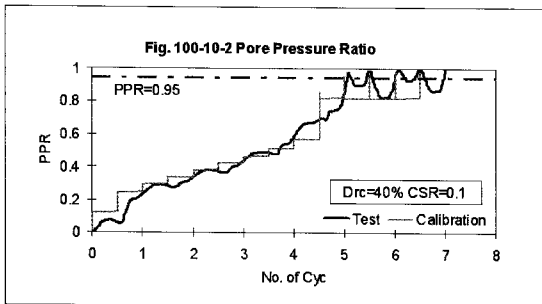
해외에서는 NGI형 직접단순전단시험기가 널리 사용되고 있으며, 아직도 일본, 미국, 캐나다 등에서 이 장비를 이용하여 흙의 액상화와 관련된 많은 연구를 계속하고 있다. NGI형 직접단순전단시험기는 시료에 작용하고 있는 수평 응력을 알 수 없다는 단점이 있지만, 지진과 같은 반복하중과 관련된 흙의 거동 연구에 유용한 것으로 판단된다. 본 논문에서는 국내에서 잘 사용되지 않은 직접단순전단시험에



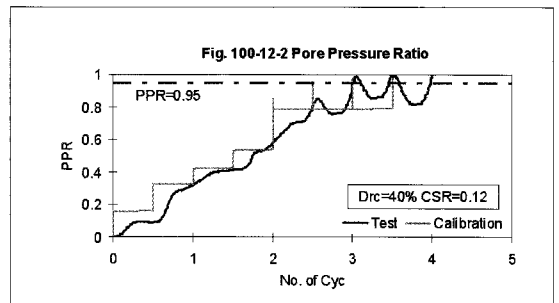
(a) 전단응력-유효수직응력관계



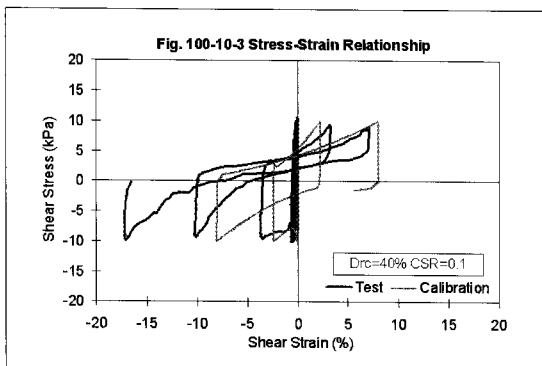
(a) 전단응력-유효수직응력관계



(b) 과잉간극수압비-반복전단횟수

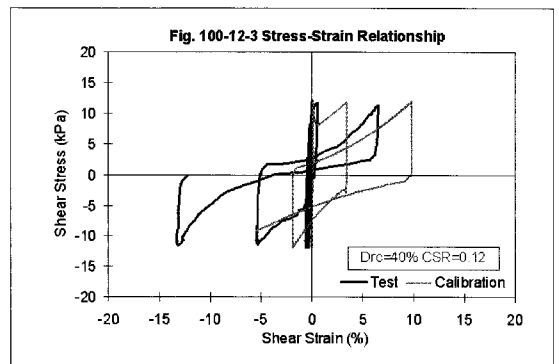


(b) 과잉간극수압비-반복전단횟수



(c) 전단응력-전단변형률관계

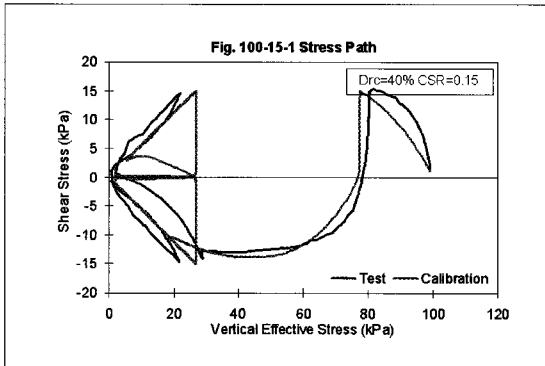
그림 11. 반복전단응력비가 0.1인 경우



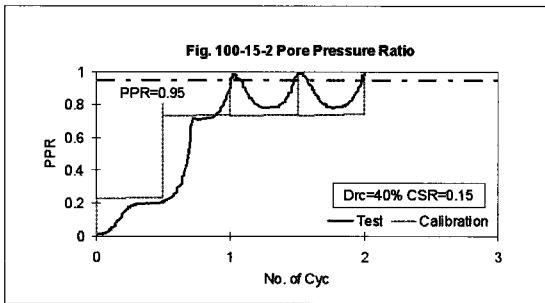
(c) 전단응력-전단변형률관계

그림 12. 반복전단응력비가 0.12인 경우

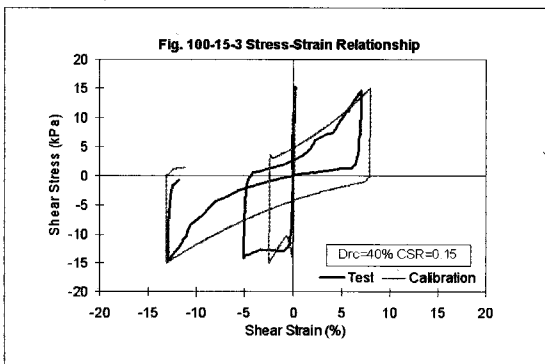
관한 일반적인 사항을 비롯하여 특징에 대해 소개하였다. 또한 NGI형을 이용한 실험 결과를 어떻게 흙의 구성모델의 검증에 사용하였는지 설명하였다. 국내에서도 직접단순전단시험기에 대한 연구뿐만 아니라 장비 개발과 더 많은 관심이 필요하다.



(a) 전단응력-유효수직응력관계



(b) 과잉간극수압비-반복전단횟수



(c) 전단응력-전단변형률관계

그림 13. 반복전단응력비가 0.15인 경우

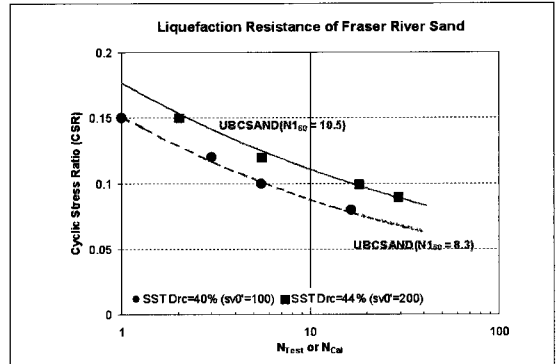


그림 14. 반복전단응력비와 액상화가 발생한 반복전단횟수의 관계

참고문헌

1. 박성식, 김영수, Byrne, P.M., 김대만(2005), 액상화 해석을 위한 간단한 구성모델, 한국지반공학회논문집, 21(8), pp. 27-35.
2. Airey, D.W., Budhu, M. and Wood, D.M. (1985), Some aspects of the behaviour of soils in simple shear, Developments in Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2, pp. 185-213.
3. Bjerrum, L. and Landva, A. (1966), Direct simple-shear tests on a Norwegian quick clay, Geotechnique, Vol. 16, No. 1, pp. 1-20.
4. Budhu, M. (1984), Nonuniformities imposed by simple shear apparatus, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 20, pp. 125-137.
5. DeGroot, D.J., germaine, J.T. and Ladd, C.C. (1994), Effect of nonuniform stresses on measured DSS stress-strain behavior, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 120, No. 5, pp. 892-912.
6. Dounias, G.T. and Potts, D.M. (1993), Numerical analysis of drained direct and simple shear tests, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 119, No. 12, pp. 1870-1891.
7. Dyvik, R., Berre, T., Lacasse, S. and Raadim, B. (1987), Comparison of truly undrained and constant volume direct simple shear tests, Geotechnique, Vol. 37, No. 1, pp. 3-10.

8. Ishihara, K. and Li, S.-L. (1972), Liquefaction of saturated sand in triaxial torsion shear test, Soils and Foundations, Vol. 12, No. 2, pp. 19-39.
9. Ishihara, K. and Yamazaki, F. (1980), Cyclic simple shear tests on saturated sand in multi-directional loading, Soils and Foundations, Vol. 20, No. 1, pp. 45-59.
10. Peacock, W.H. and Seed, H.B. (1968), Sand liquefaction under cyclic loading simple shear conditions, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol. 94, No. SM3, pp. 689-708.
11. Roscoe, K.H. (1953), An apparatus for the application of simple shear to soil samples, In Proceedings of the Third International conference on SMFE, Vol. 1, pp. 186-191.
12. Silver, M.L. and Seed, H.B. (1971), Volume changes in sands during cyclic loading, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol. 97, No. SM9, pp. 1171-1182.
13. Sriskandakumar, S. (2004), Cyclic loading response of Fraser River sand for validation of numerical models simulating centrifuge tests, M.A.Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, University of British Columbia, Canada.
14. Vucetic, M. and Lacasse, S. (1982), Specimen size effect in simple shear test, Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 108, No. GT12, pp. 1567-1585.

한국지반공학회 논문집 정기구독 신청 안내

회원 여러분의 안위를 기원합니다.

1999년 1월부터 우리학회의 간행물이 학회지와 논문집으로 분리 발간되었습니다. 학회지는 매월 무가로 회원 들께 배포되며, 논문집은 유가로 1년에 20,000원의 구독료를 납부하고 받아보실 수 있습니다. 필요하신 회원은 다음 사항을 참고하셔서 논문집 구독 신청을 하시기 바랍니다.

다 음

- 구 독 료 : 1년 12회, 20,000원
- 신청기한 : 수시(단, 신청시점이 구독료 납부 회계시점임)
- 입 금 처 : 국민은행 (예금주: 한국지반공학회) 534637-01-002333
- * 입금 후 반드시 학회 사무국(02-3474-4428, 7865/양윤희 과장)으로 연락하여 확인하시기 바랍니다.