

풍화토의 비배수 삼축압축시험시 전체 변형률 영역의 거동에 관한 연구

The Behavior of Overall Strain Range in Undrained Triaxial Compression Tests for a Weathered Soil

안 영 대 ^{*1}	An, Young-Dae	오 세 봉 ^{*2}	Oh, Se-Boong
고 동 희 ^{*3}	Ko, Dong-Hee	김 동 수 ^{*4}	Kim, Dong-Soo

Abstract

In order to evaluate the behavior of overall range from small strain to failure, the triaxial compression tests with LVDTs were performed for local displacement measurements. According to the result it was possible to evaluate the total range behavior from 0.001% to 10% and both secant moduli of undisturbed and disturbed weathered soils had a similar result in the small strain level. The normalized shear moduli(G/G_{max}) in the undrained triaxial compression tests were similar to those of resonant column tests but the maximum shear moduli(G_{max}) were strongly affected by the ratio of saturation. As a result of parametric study a constitutive model with anisotropic hardening could predict the behavior of total strain range.

요 지

본 연구에서는 미소변형률에서 파괴규준을 포함하는 대변형률에 이르는 전체 변형률 영역의 거동을 획득하기 위하여, LVDT를 장착하여 국부변위를 측정된 삼축압축시험을 수행하였다. 이러한 결과 미소변형률(0.001% 수준)에서 대변형률까지(10%)의 거동을 합리적으로 구할 수 있었으며, 불교란 및 교란 풍화토 시료에서의 변형계수가 미소변형률 영역에서 유사하게 나타났다. 그리고 공진주(RC)시험과 비배수 삼축압축시험에서 구한 정규화 전단변형계수(G/G_{max}) 곡선이 일치한 반면 최대전단변형계수(G_{max})는 포화도에 따라 상이하게 나타났다. 또한 비등방경화 구성모델의 계수 연구를 통하여 전체 변형률 영역 거동을 합리적으로 예측할 수 있음을 확인하였다.

Keywords : Constitutive model, Local measurements, Shear moduli, Small strain, Weathered soils

1. 서 론

정적인 실내시험에 있어서 계측기술의 발달로 인하여 미소변형률 영역의 거동을 측정하는 것이 가능할 뿐만 아니라, 전통적인 실내시험에서도 미소변형률 거동을 획득하는 것이 일반화되는 추세이다(Burland, 1989 ;

김동수 등, 1997). 그러나, 미소변형률 거동에 초점을 두면 파괴거동을 포함한 대변형률 영역의 거동을 무시할 수 있다. 이는 미소변형률 측정시 변형률 측정의 범위가 0.1%내지 1%정도까지인 경우가 대부분이기 때문이다.

국내 내륙에 널리 분포하는 화강풍화토의 경우에는

*1 (주)SOC 건설엔지니어링 (SOC Eng. & Construction. CO., LTD.)

*2 정희원, 영남대학교 공과대학 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Professor, Dept. of Civil Engrg., Yeungnam Univ., sebungoh@yu.ac.kr)

*3 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정 (Member, KAIST)

*4 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 부교수 (Member, KAIST)

대상문제에 따라 미소변형률 영역의 거동이 주요한 경우와 파괴에 도달할 정도의 대변형률 거동이 주요한 경우가 다양하게 나타난다. 또한 동일한 문제에 대하여 미소변형률 거동이 발생하는 영역과 그렇지 않은 경우가 혼재되어 있고, 해석이나 계측이 이루어진 후에야 판단하는 것이 가능한 경우도 존재한다. 따라서 미소변형률에서 대변형률에 이르는 전체 변형률 영역의 거동을 실험적으로 획득하고, 해석이나 설계를 위하여 모델링을 하는 것이 요구된다.

한편 풍화토의 거동을 실험적으로 획득하는 과정에서 퇴적토와는 달리 불교란시료의 채취 및 성형, 포화도의 영향에 따른 거동의 차이는 분석에 있어서 어려움을 자아내는 요소들이다. 그리고 구성관계를 모델링하는 과정에서도 전체변형률 영역에 대한 풍화토의 거동을 표현하는 것이 주된 관심사로 떠오르고 있다(오세봉 등, 2000).

본 연구는 이러한 부분의 기초적인 연구로서 국내 풍화토를 대상으로 (1) ‘미소변형률 영역의 거동’과 파괴규준을 포함한 ‘대변형률 영역의 거동’을 하나의 삼축압축시험을 통하여 관찰하는 것이 목적이며 이를 위하여 (2) 미소변형률 측정장치를 구현하여 파괴에 도달할 때까지의 시험을 수행하였다. 그리고, (3) 포화조건이 상이한 경우에 따라 응력-변형률 관계를 획득하였으며, (4) 오세봉 등(2000)의 제안된 미소변형률에서 대변형률까지의 탄소성 거동에 대한 구성관계의 적용성을 비교·검증하였다.

2. 시험 장치

통상적인 삼축압축시험에서 수행하는 외부 변위측정법은 양단의 정착오차(bedding error), 단부구속등 표 1에 나타난 요인들로 인하여 시료변형의 균일성을 구현하기 어렵다. 이로 인하여 축변형을 과대평가하여 실제 변형계수를 과소평가하게 된다. 특히 미소변형률 영역의 변형률 및 변형계수를 신뢰성있게 측정하기 위해서

는 단부구속으로부터 상대적으로 자유로운 시료 중앙부의 국부 변위측정을 적용하는 것이 합리적이다.

한편 기존의 내부측정 또는 국부측정 장치들은 대체로 미소변형률에서 중간변형률까지의 측정을 수행할 수 있도록 개발되었으며, 1%이상의 대변형률 범위에서는 적용하기 힘들었다. 그러나, 본 연구에서는 미소변형률수준에서 정확한 변위 계측을 확보할 뿐만 아니라, 파괴규준을 포함하는 대변형률까지의 변형률 측정을 위해서 LVDT를 이용한 변위 측정시스템 및 자체 프로그램을 개발하였다. 시스템에 사용된 Load Cell과 LVDT의 sensitivity는 각각 3.143mV/V/lb, 30mV/V/mm이며, 국부변위는 그림 1과 같이 시료의 양쪽 힌지에 설치된 LVDT에서 측정된다. 아연도금강판으로 제작된 힌지는 정착오차 및 단부구속등을 피하기 위하여 시료 상·하부로부터 약 1cm정도 이격시켜 멤브레인에 순간접착제를 사용하여 고정하였으며, 멤브레인에서의 미세한 처짐이 상·하부 동일하다고 간주하였다. 그리고, 변위에 따라 발생하는 아날로그신호는 16bits A/D converter에서 디지털화되어 자체 개발한 데이터 획득 프로그램에 의해서 0.05초 간격으로 저장된다. 저장된 데이터는 20개씩 평균, 시간간격조절에 의해서 최종적인 데이터로 획득된다.

국부변위측정에 사용된 센서는 출력전압과 외부물리량 사이의 관계를 보정해야 하며, 본 연구에서는 LVDT의 경우 0.001mm까지 측정이 가능한 마이크로미터를 이용하여 검증하였다. 그림 2(a)는 LVDT의 검증결과이며, 모든 출력전압은 외부물리량에 대하여 1차함수를 띄었고, 회귀분석 결과 데이터의 오차는 거의 없었다. 그리고, 이론상 각 센서의 해상도(resolution)는 $\pm 0.305 \times 10^{-3}V$ 이며 LVDT의 경우 약 0.0004mm, Load Cell의 경우 0.007kg까지 측정이 가능하나, 약 30분간 시간의 경과에 따른 출력전압의 범위를 물리량을 가하지 않은 상태에서 측정한 결과 측정치의 범위가 0.5mV 정도로 이론치보다 약간 높은 값을 나타내었다(그림 2(b)).

표 1. 외부 변위측정에 내포된 오차요인(Goto등, 1991)

측정오차	오차요인	오차제거방법
시스템 컴플라이언스	로드셀, 셀, 피스톤, 상부캡 등의 처짐	상부캡의 움직임을 모니터링함으로써 회피
시료의 경사	—	tilting 방지 캡 사용
정착오차 (bedding error)	성형과정에서 시료양단의 교란	국부 변위측정
시료변위의 불균일성	단부구속	시료의 양단에 단면마찰 경감층사용
휨전단	strain localization	이상적인 경계조건일 때조차도 회피할 수 없음

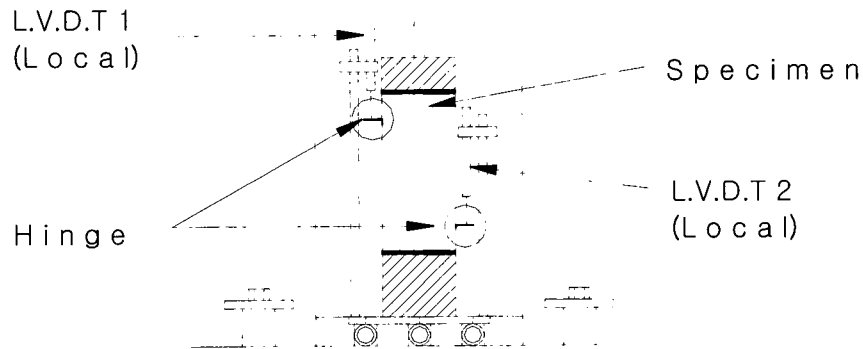
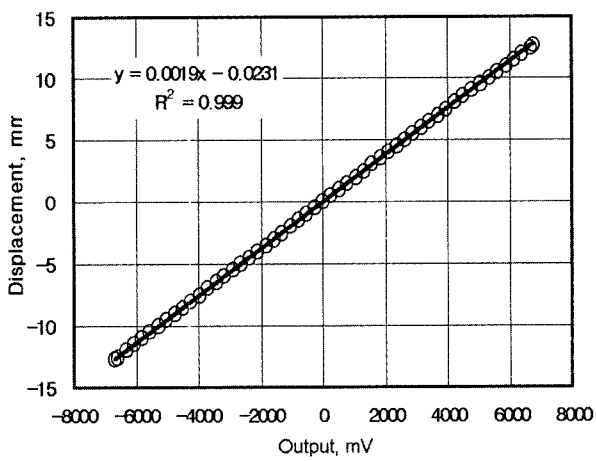
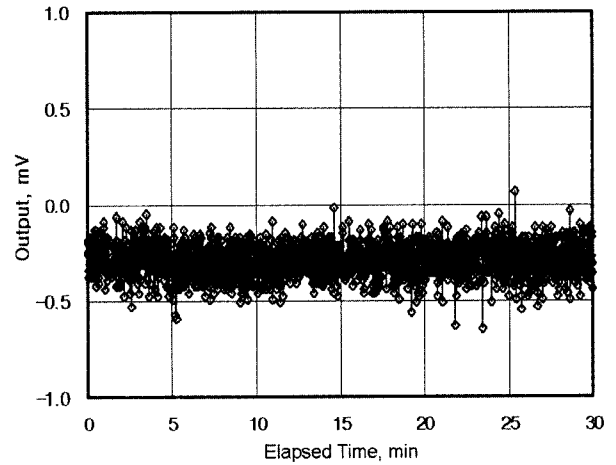


그림 1. 셀(Cell) 구조도



(a) LVDT 검증결과



(b) 경과시간에 대한 출력전압범위

그림 2. 센서 검증결과

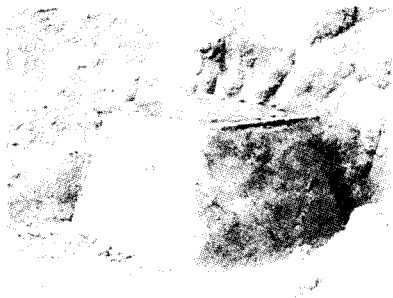
3. 시료채취 및 성형

본 연구의 대상지반은 충남 홍성의 도로공사 현장에 있는 화강풍화토이다. 시료채취는 GL-2m에서 못타설법

으로 블록시료를 채취하였다. 그림 3은 못타설법으로 시료를 채취하는 과정을 나타낸 것으로, 먼저 18cm 지름으로 배치된 공을 포함한 철판(20cm×20cm)을 채취지점에 수평으로 놓는다. 그리고 길이 17cm인 못을 대각



(a) 못타입장면

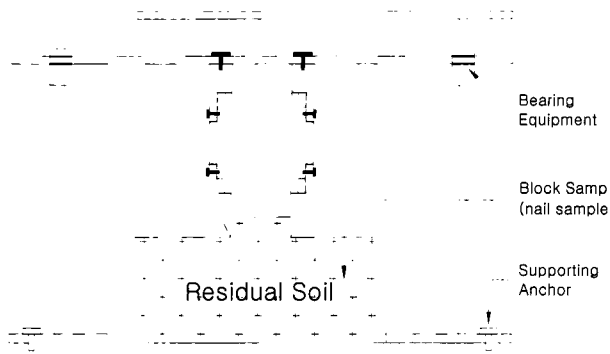


(b) 지반을 걷어낸 장면

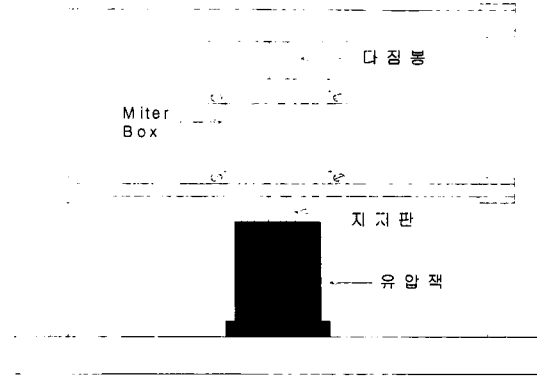


(c) 파라핀으로 밀봉된 장면

그림 3. 못타설법(nail sampling)에 의한 불교란 블록시료 채취 과정(西田一彦, 1986)



(a) 실내에서 불교란 시료의 성형



(b) 교란시료의 성형

그림 4. 삼축압축시험용 시료의 성형

선 방향으로 나무망치나 고무망치등으로 철판에 충격이 가하지 않도록 조심스럽게 타입하여 흙을 구속한 후, 주위의 흙을 걷어낸다. 마지막으로 파라핀으로 완전히 밀봉하여 현장조건으로 보존한 후 실험실로 운반하였다. 실험실에서는 불교란 시료채취기(정순용 등, 1997)를 사용하여 그림 4(a)와 같이 시료 중앙부를 직경 50mm, 높이 100mm로 성형하였다.

교란시료의 경우에는 불교란시료의 현장상태와 동일한 조건을 갖추며 입자파쇄를 최소화하고, 표 2에 명기된 현장함수비와 단위중량의 평균치를 비교적 정확히 조절하기 위하여 그림 4(b)와 같이 정적으로 복층(5층) 다짐을 실시하여 불교란시료와 동일한 크기로 재성형하였다. 단 정적다짐기로 시료 성형시 가해지는 응력을 조절할 수는 없었다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 기본물성시험 및 등방압밀 시험

불교란시료를 성형한 후 남은 시료로 기본적인 물성시험을 실시하였다. 대상 재료는 국제지질학회기준의 풍화도 분류에 따르면 상당한 풍화가 진행되어 토립자 암석의 구조적인 특성이 거의 남아있지 않는 RS(residual soil)등급에 해당한다(geological society, 1990). 기본적인 물성시험 결과는 표 2에 나타내었다. 또한, 삼축압축 시험시 구속응력 수준을 구분하고, 압밀시간을 산정하기 위하여 등방압밀시험을 실시하였다. 그림 5는 등방압밀 시험결과이며 압밀항복하중(σ_y)은 약 180kPa이며 예비시험 결과 압밀도(U) 90%에 도달하는 시간이 대략

15분정도 소요되기 때문에 압밀시간은 180분이면 충분한 것으로 판단하였다. 그리고 대상시료의 압축지수(Cc)는 0.411이며 팽창지수(Cr)은 0.045이다.

본 연구는 미소변형률에서 대변형률에 이르는 전체 변형률 영역의 거동을 획득하기 위한 실험으로 포화시

표 2. 풍화토의 기본 물성시험 결과

구 분	기본물성치(평균값)
비중(Gs)	2.65
자연함수비(w_n , %)	18.61 ~ 26.46(22.56)
현장단위중량(γ_t , t/m ³)	1.58 ~ 1.74(1.67)
액성한계(LL, %)	32.4
소성한계(PL, %)	NP
초기간극비(e_0)	0.88 ~ 1.04(0.95)
#200체통과량(%)	51.45
통일분류법(USCS)	ML
유효경(D_{10} , mm)	0.013
최대입경(mm)	2.0
D_{50} (mm)	0.058

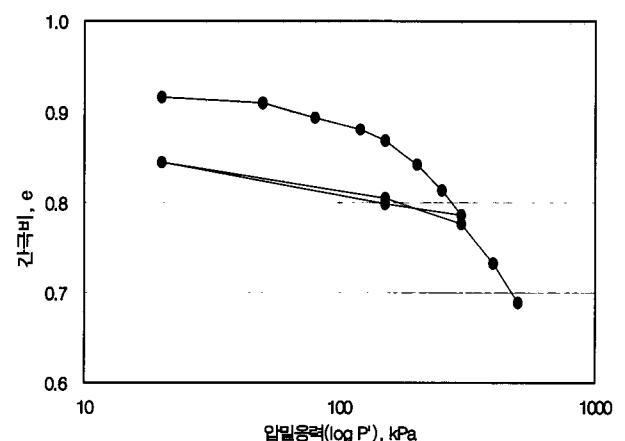


그림 5. 등방압밀시험결과(불교란풍화토)

료의 비배수 전단 삼축압축시험에 초점을 두었다. 시료를 포화시키기 위해서 진공법과 배압법을 사용하였고, 간극수압계수 B 값이 0.95 이상일 때 포화된 것으로 간주하여 180분 동안 등방압밀을 실시한 후 전단을 실시하였다. 전단은 3장에서와 같이 재성형된 교란시료와 불교란 시료로 구분하여 다양한 구속압에 대하여 변형을 제어방식의 비배수조건으로 전단속도 0.08%/min으로 축변형률이 15%에 도달할 때까지 실시하였다(Head, K. H., 1982).

4.2 변위측정 위치에 따른 거동

지반공학문제에서 대상 시스템이 겪는 주요한 변형을 수준은 다양하다. 때로는 현장에서 겪는 공용하중 상태에서의 지반 변형률은 0.1% 이하이다. 이러한 미소변형률 수준의 응력-변형률 거동조차 비선형성을 보이며, 이러한 거동을 획득하는 것이 중요하게 인식되고 있다. 이를 위하여 외부변위 측정시 오차요인을 배제하고 정확한 변위를 측정하는 것이 핵심적이며 국부변위 측정법이 널리 이용되고 있다(김동수 등, 1997).

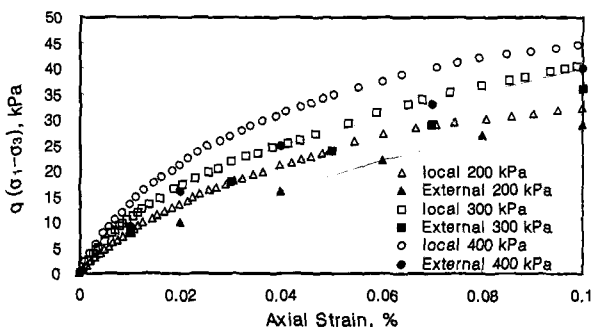
본 연구에서는 변위 측정 위치에 따른 영향을 분석하기 위하여 불교란시료에 대하여 국부 및 외부 변위측정을 동시에 실시하였다. 그림 6(a)는 각각의 측정위치에서 나타난 응력-변형률 관계이고, 그림 6(b)는 할선변형계수-대수변형률 관계이며 측정위치에 따라서 변형계수가 상당한 차이가 나타나고 있다. 그리고, 대략 변형률 범위가 0.1~1% 사이에서 할선변형계수가 갈아짐을 알 수 있었다. 이러한 차이는 시료와 캡사이에서 발생하는 정착오차(bedding error) 및 단부구속에 의한 변형의 불균일성에서 기인하는 것으로 판단된다. 따라서 동일

한 시료에 대하여 국부 변위측정보다 외부 변위측정장치로 측정한 변위가 과대평가되어 변형계수를 과소평가하게 하였다(Tatsuoka 등, 1992).

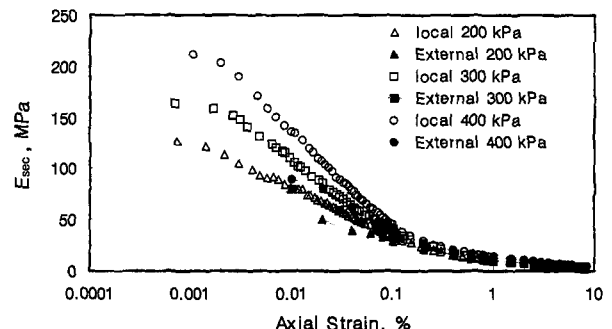
본 연구에서 사용된 변형계수는 기존의 지반동역학 분야에서 사용하는 정규화 전단탄성계수 감소곡선을 이용한 RC시험과의 비교를 위하여 할선계수를 사용하였다. 그림 6(b)에서 보여지듯이 LVDT를 이용한 시험장치를 통하여 삼축압축시험시 축변형률을 $10^{-3}\%$ 정도까지 측정하는 것이 가능하며 파괴를 야기하기에 충분한 10% 변형률 수준까지 자료를 일관되게 획득할 수 있었다. 하지만 본 연구에서 사용된 국부 변위측정 장치는 하중제어를 기존의 C. K. Chan 장비에 의존하기 때문에 미소변형구간을 측정할 때 몇가지 시스템상의 문제점을 야기하였다. 첫째, 축하중을 제어하는 Oil Actuator 내부의 공기로 인한 미세한 진동이 미소변형구간에서의 시료 거동에 영향을 주며, 둘째, 하중측정을 위한 Load Cell이 셀 외부에 설치되어 하중을 가하는 로드(rod)와 부상부분의 마찰을 배제할 수 없었다. 이로 인하여 자료분석에 어려움을 겪었고, 반복적인 시험을 통하여 자료의 양을 늘리고, 그 중에서 전체 거동에 일관된 자료를 추출하였다.

4.3 불교란 및 교란 시료의 거동 비교

대변형률 수준에서는 불교란시료에서와는 달리 교란시료에서 변형률 연화현상이 다소 나타난다(그림 7 (a)). 이러한 원인은 교란시료의 다짐 성형과정에서 풍화토 내의 조직이 흐트러져 세립토보다는 조립토의 특성이 전체 거동에 주요한 역할을 하는 것으로 여겨진다. 그리고 각각의 구속압에 대하여 교란시료의 최대축차응력



(a) 응력-변형률 관계 비교(불교란시료)



(b) 할선변형계수-대수변형률 관계 비교(불교란시료)

그림 6. 변위측정 위치에 따른 불교란 시료의 거동 비교

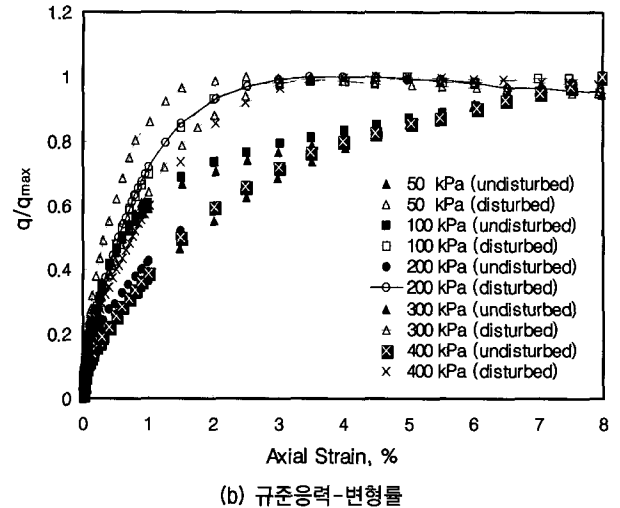
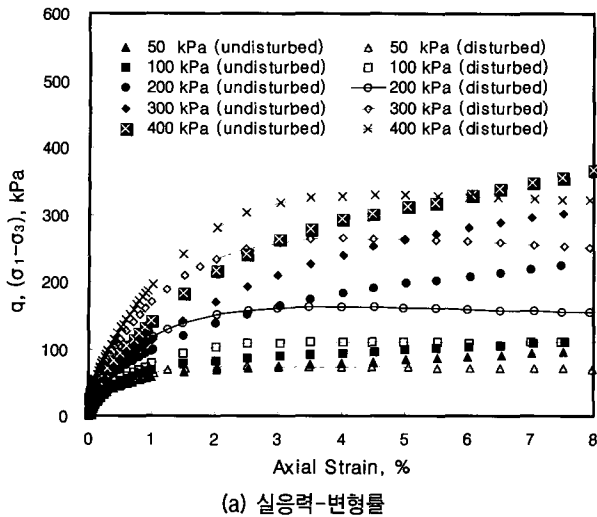


그림 7. 불교란 및 교란시료에서 응력-변형률 관계 비교

은 불교란시료보다 더 작게 나타났다.

그림 7(b)는 최대축차응력(q_{max})으로 규준화한 응력-변형률 관계를 보여주고 있다. 불교란 시료에서는 구속압 수준이 낮은 50, 100kPa 일 경우의 거동이 나머지와 구분되어 나타남을 알 수 있다. 즉 압밀항복하중(σ_y , 180kPa)을 기준으로 구속압에 따라 준 정규압밀상태와 준 과압밀상태의 거동이 상이하게 나타났다. 이로부터 퇴적토의 응력이력과 유사하게 압밀항복하중(σ_y)이 풍화토에도 영향을 끼치고 있음을 알 수 있었고, 교란시료에서는 시료교란으로 인하여 불교란시료에서 나타나는 압밀항복하중의 효과가 없어짐을 알 수 있다. 대체적으로 교란시료에서는 구속응력에 따른 경향을 발견할 수 없었지만, 구속압이 50kPa의 경우 다짐으로 인하여 다소 무리한 압력이 가해졌으리라 판단된다.

삼축압축시험중 시료의 간극수압은 기존의 시험장치에서 측정하였다. 그림 8에서는 외부변위 측정장치로부터

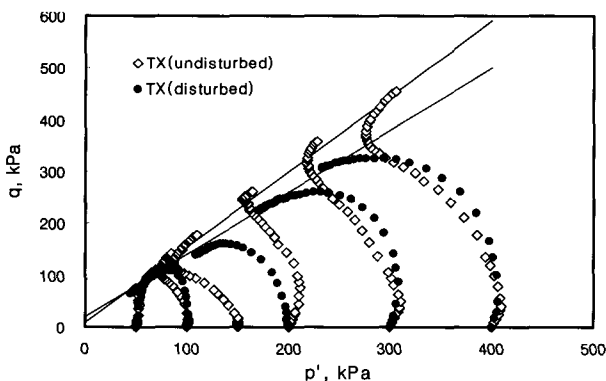


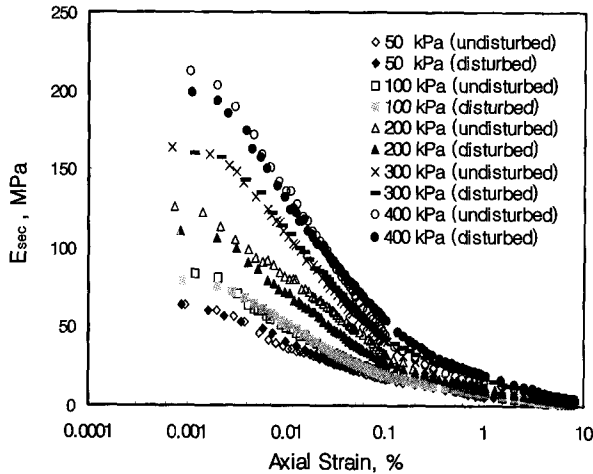
그림 8. 비배수 응력경로 비교

터 구한 응력경로를 보여주고 있다. 불교란 시료에서는 압밀항복하중(180kPa)보다 낮은 초기응력 수준에서는 과압밀거동의 경향을 띠고있다. 또한 한계상태에 도달한 후 평균주응력(p') 및 축차응력(q)이 커지고 있다. 반면 교란 시료에서는 그 반대의 경향을 보이며 교란시료에 비하여 불교란시료의 최대축차응력이 크게 나타나며, 불교란시료와 교란시료의 내부마찰각은 각각 35.7°, 30.0°, 점착력은 4.96kPa, 9.62kPa이다. 그러나, 내재된 조직이 교란되어 전체적인 거동이 상이하게 나타나지만 미소변형률 영역의 거동에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단하였다.

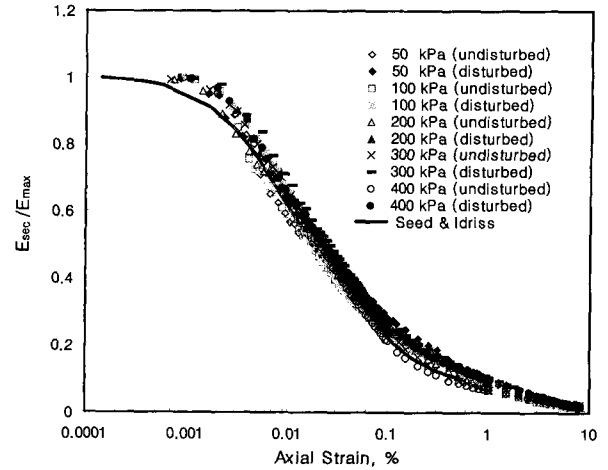
그림 9(a)에서는 불교란 및 교란 시료에 대하여 국부 변위측정에서 구한 할선변형계수-대수변형률관계를 보여주고 있다. 본 실험에서는 축변형률 0.001% 수준까지 측정이 가능하였으며 비선형구간에서 선형구간으로 전이되는 과정을 확인할 수 있었고, 구속압이 커질수록 할선변형계수가 커짐을 알 수 있다.

한편, 대상 풍화토의 경우 초기변형계수 및 미소변형률 영역에서의 응력-변형률 관계는 교란시료와 불교란 시료의 거동이 대체로 유사하게 나타났다. 이러한 결과는 상당한 풍화가 진행된 풍화토의 경우, 재료내부 조직이 미소변형률 거동에 큰 영향을 끼치지 않기 때문인 것으로 판단된다.

그리고, 그림 9(b)에서는 정규화 변형계수의 실험치들에 대하여 기존의 Seed와 Idriss(1970)의 비소성(NP) 흙에 대한 모델과 비교하였다. 시험결과들은 매우 유사하게 나타났으며, 대부분의 지반재료에서 정규화된 변형계수가 시료교란의 영향을 별로 받지 않는다는 결과



(a) 할선계수 - 변형률 관계



(b) 정규화 변형계수 - 변형률 관계

그림 9. 불교란 및 교란시료에 대한 할선계수, 정규화변형계수 관계

에 부합한다(Hatanaka 등, 1995). 그러나, 시험에 적용된 시료는 하나의 현장을 대상으로 하기 때문에 국내 풍화도에 대한 일반적인 결과로 적용하기 위해서는 보다 다양한 풍화도를 가지는 시료에 대한 실험적인 연구가 추가되어야 할 것이다.

4.4 공진주(RC)시험 결과와의 비교

동일한 대상지반의 동적물성치와 비교하기 위하여 공진주(RC)시험과 비교를 하였다(고동희, 2001). 공진주(RC)시험은 자연함수비 및 배수조건으로 실시되었다. 본 연구에서의 시험조건(포화, 비배수)과는 상이하기 때문에 직접적인 비교는 곤란하였으나, 정규화전단변형계수-전단변형률의 관계는 비교할 수 있었다(그림 10).

삼축압축시험과 공진주(RC)시험의 변형률 조건은 상이하게 발생한다. 이는 응력 또는 변형률이 단면에 따라

변하는 물리량이기 때문이며, 삼축압축시험과 공진주(RC)시험을 비교하기 위해서는 변형률 불변량(invariant)으로 표준화하여 비교하여야 한다. 공진주(RC)시험을 기준으로 변형률을 표준화하기 위하여 등가 전단변형률(equivalent shear strain)을 $\hat{\gamma} \equiv \sqrt{2/3} \{ (\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy})^2 + (\epsilon_{yy} - \epsilon_{zz})^2 + (\epsilon_{zz} - \epsilon_{xx})^2 + 3/2 (\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2) \}^{1/2}$ 으로 정의하였다(오세봉 등, 2000).

위 식을 이용하여 비배수 삼축압축시험 결과에서 나타나는 변형률을 표준화하여 공진주시험 결과와 그림 10에 비교하였다. 시험결과 나타나는 정규화 전단변형계수-변형률 관계가 대체적으로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 다소간의 차이는 응력경로(배수조건) 및 시료의 초기 함수비(포화도)에 원인이 있다고 판단된다. 반면 응력경로나 초기 함수비조건이 G/G_{max} 곡선에 큰 영향을 끼치지 않는 것에 주목할 수 있다.

비배수조건의 삼축압축시험에서는 포아송비(ν)가 0.5 이므로 전단변형계수는 다음 식과 같이 유도된다.

$$G = \frac{E}{3} \quad (1)$$

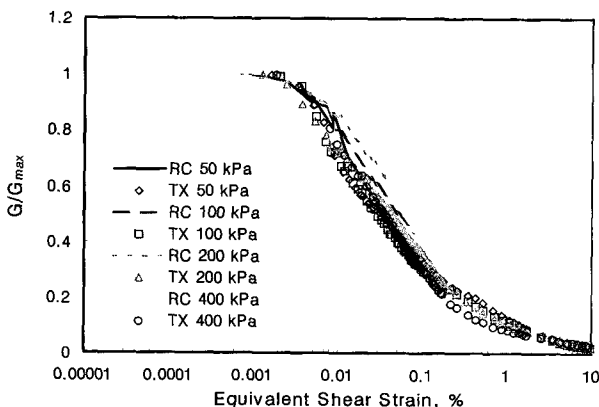


그림 10. 삼축압축시험과 공진주시험과의 비교(불교란시료)

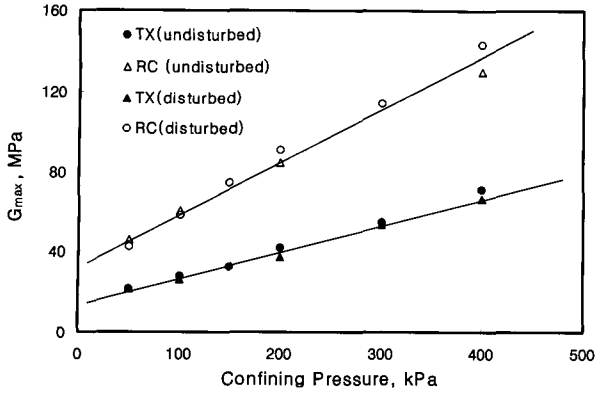


그림 11. 구속압에 따른 최대전단변형계수(G_{max})

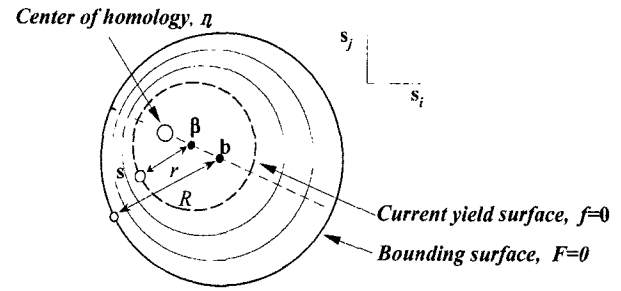


그림 12. 경계면과 항복면

기 변형계수에 큰 영향을 끼치지 않고 있음을 반증한다.

풍화도에 있어서 간극비(e)는 풍화의 정도를 나타내는 지표이다. 그러나, 본 연구에서는 하나의 지반을 대상으로 행해졌으므로 간극비의 영향을 규명하진 못하였고, 추후 다양한 풍화도를 지니는 시료에 대한 연구가 추가 되어야 할 것이다.

불포화도의 포화도에 따른 전단거동은 간극중의 표면장력에 의한 모관성에 지배되며, 불포화 상태에서 측정된 전단변형계수가 완전포화 또는 완전건조상태에 비하여 크게 나타난다고 알려져 있다.(이종규, 1999 ; Wu et al, 1984). 그림 12에서는 비배수 삼축압축시험(포화 시료)에서 최대 전단변형계수가 배수 공진주시험(포화도(S)=53%)에 비하여 약 45.6% 정도로 나타났다. 그러나 응력경로와 함수비 조건에 따른 각 인자들의 영향을 정량적으로 구분하지는 못하였다.

5. 전응력 개념에 근거한 구성모델

오세봉 등(2000)은 미소변형률에서 대변형률 영역까지의 거동을 모델할 수 있는 탄소성 구성관계를 제안하였다. 이 구성모델은 (1) 전응력 개념을 토대로 von Mises 파괴규준을 경계면으로 설정하였고, (2) 비등방 경화규칙을 적용하였으며, (3) 전체 변형률 영역의 소성변형을 모델할 수 있는 경화함수를 제안하였다.

본 연구에서는 전체 변형률 영역의 풍화토 거동을 일관되게 실험하는 동시에 모델하는 데 의도가 있다. 따라서 앞 장에서 획득한 전체 변형률 영역의 거동을 이용하여 기존의 구성모델에 대한 계수연구(parametric study)를 수행하였다.

응력텐서 $\sigma = p1 + s$ 로 분해될 때 그림 12에 나타난

경계면과 항복면의 식은 다음과 같다.

$$F = (\bar{s} - b) : (\bar{s} - b) - R^2 = 0, \\ f = (s - \beta) : (s - \beta) - r^2 = 0 \quad (2)$$

한편, 지반재료는 축차변형에 대하여 매우 연약한 거동을 나타내므로, 재하과정에서 일반등방경화 규칙에 의한 항복면의 크기는 소성축차변형률에 의해 나타난다고 가정하였다(오세봉 등, 2000).

$$\hat{\epsilon}_d^p = \Psi(r), \quad \Psi(r) = a \frac{(r/R)^b}{(1-r/R)^c} \quad (3)$$

이때, $\hat{\epsilon}_d^p \equiv \sqrt{2/3} \{ (\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy})^2 + (\epsilon_{yy} - \epsilon_{zz})^2 + (\epsilon_{zz} - \epsilon_{xx})^2 + 3/2 (\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2) \}^{1/2}$ 이며, a , b 및 c 는 재료계수로서 실험결과로부터 도출된다. 초기에는 초기응력이 상동응력 ξ 로 되며, 항복면과 경계면의 크기비 r/R 로부터 소성변형률을 계산한다. 응력경로가 항복면 내부로 향하는 경우에는 상동응력이 응력제거점에서 새로이 생성되어 비등방경화규칙을 보인다. 변형률 증분형태의 탄소성 응력-변형률관계를 구하기 위하여 (1) 항복면과 경화함수에 대해 일관조건(consistency condition)을 적용하고, (2) 관련유동법칙 (associative flow rule)을 이용하여 탄소성 응력-변형률 관계식을 구할 수 있다. 자세한 유도과정은 오세봉 등(2000)의 논문을 참조할 수 있다.

항복면의 경화함수는 식 (4)와 같이 재구성할 수 있다.

$$\Psi = \hat{\epsilon}_d^p (1 - \frac{r}{R})^c = a (\frac{r}{R})^b \quad (4)$$

식 (4)에서 소성 축차변형률과 항복면 크기를 결정하면 Ψ 와 r/R 의 대수축에서 계수 a , b 를 결정할 수 있으며, 이때 c 는 대수축상에 나타난 실험자료가 선형적으

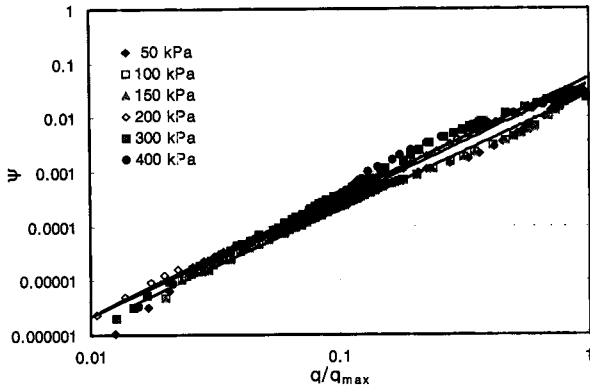


그림 13. 재료계수 도출과정(불교란시료)

로 나타나도록 0.3~0.4 정도가 경험적으로 적당한 것으로 판단된다(오세봉 등, 2000).

등방압밀 조건하에서 경계면 및 항복면의 중심응력 텐서는 $b = \beta = 0$ 이고, $q = \sigma_1 - \sigma_3$ 이다. q 의 최대값을 q_{max} 라 하면, $R = \sqrt{2/3} q_{max}$, $r/R = q/q_{max}$ 이며 변형률은 아래와 같다.

$$\hat{\epsilon}_d = \epsilon_1 - \epsilon_1^e, \epsilon_1^e = \frac{q}{E} \quad (5)$$

이로부터 식 (4)의 $\psi \sim r/R$ 관계를 실험치로부터 구할 수 있다.

모델에 필요한 초기변형계수는 셀 내부의 LVDT를 이용한 국부 변위측정으로 구한 최대변형계수(E_{max})를 이용하였으며, 배수조건이 비배수상태이므로 포아송비(ν)는 0.5를 사용하였다. 그림 13은 재료계수 a, b 를 도출하는 과정을 나타내고 있으며 대수축상의 선형성과 동일한 현상임을 고려하여 재료계수 c 는 0.3을 적용하였다. 또한 표 3은 교란 및 불교란시료에서 도출된 경화

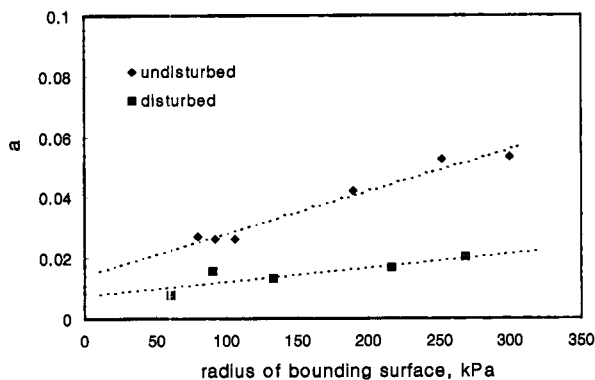
표 3. 경화함수의 재료계수

구속압 (kPa)	a	b	c	E_{max} (MPa)	q_{max} (kPa)	비고
50	0.0271	2.0725	0.3	64	98	불교란 시료
100	0.0265	2.1103	0.3	84	113	
150	0.0265	2.1103	0.3	98	130	
200	0.0421	2.1432	0.3	127	232	
300	0.0528	2.1837	0.3	165	308	
400	0.0534	2.1935	0.3	213	367	
50	0.0078	1.8340	0.3	64	74	교란 시료
100	0.0157	1.9369	0.3	79	111	
200	0.0135	1.8526	0.3	111	163	
300	0.0168	1.9098	0.3	161	265	
400	0.0204	1.9733	0.3	199	329	

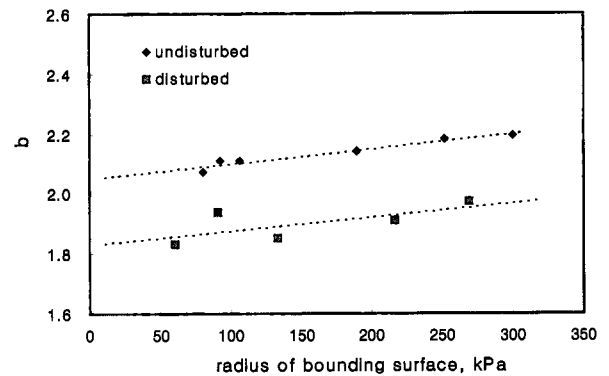
함수의 재료계수를 정리한 것이다.

경계면의 반경(radius of bounding surface)과 재료계수 a, b 의 관계를 그림 14에 나타내었으며 경계면이 커질수록 재료계수가 증가하며, 불교란시료에서의 재료계수가 교란시료의 경우보다 동일한 경계면에 대하여 더 크게 나타나고 있다. 그러나, 재료계수 a 는 경계면의 반경(radius of bounding surface)이 커질수록 교란 시료보다 더 큰 증가율을 가지는 반면에 재료계수 b 는 절대값의 차이는 있으나 증가율은 불교란시료와 비교하여서 거의 유사함을 알 수 있다. 이로부터 재료계수 a, b 도 시료의 교란효과에 영향을 받고 있음을 확인하였으며, 전응력개념에 근거한 구성모델이 시료의 교란에 관계없이 경계면의 크기 및 최대변형계수(E_{max})를 측정하면 대상지반의 미소변형률 및 대변형률 조건에서 응력-변형률 관계를 적절히 예측함을 알 수 있다.

불교란 및 교란된 포화시료의 비배수거동에 대한 모

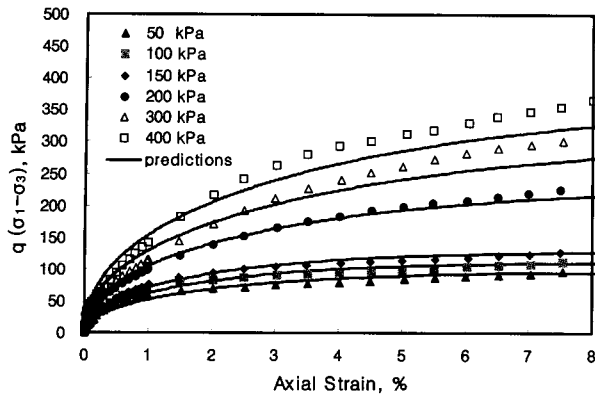


(a) 재료계수 a

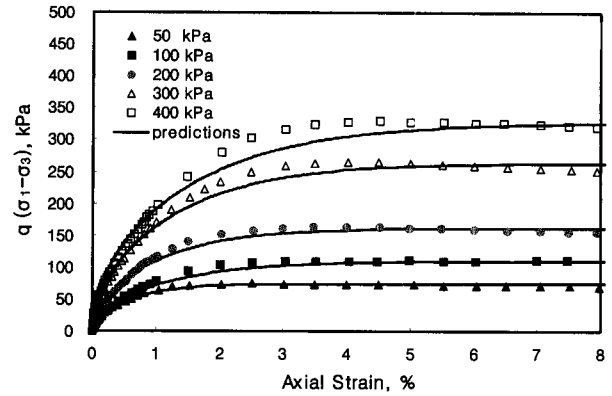


(b) 재료계수 b

그림 14. 경계면의 반경(radius of bounding surface)과 재료계수와의 관계

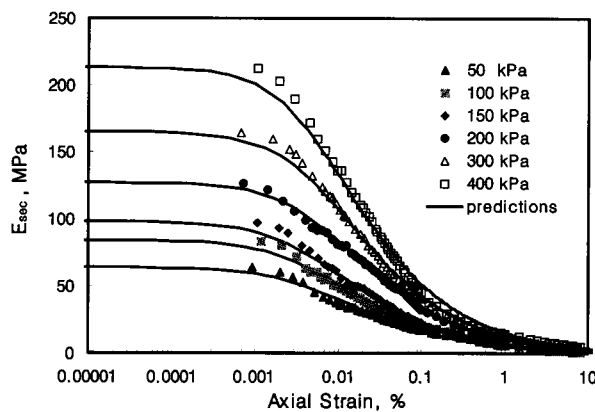


(a) 불교란시료

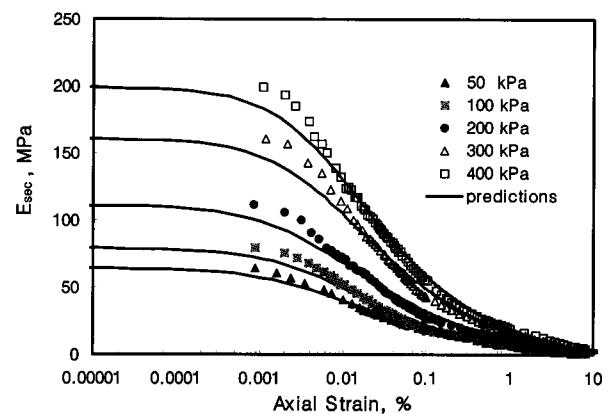


(b) 교란시료

그림 15. 응력-변형률 관계의 실험치와 예측치의 비교



(a) 불교란시료



(b) 교란시료

그림 16. 항선변형계수-대수변형률 관계의 실험치와 예측치 비교

델링 결과를 실험치와 비교하여 그림 15과 16에 나타내었으며 실험상의 오차를 감안하면 제안된 모델이 미소 변형률에서 대변형률까지의 풍화토의 거동을 적절히 예측하고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 대상 모델은 전체 변형률 영역의 거동을 합리적으로 표현할 수 있는 장점을 지니고 있다.

실제 지반의 응력해석시에는 대상문제에 따라 초기 함수비조건 및 응력경로(특히 배수조건)가 상이하게 주어진다. 따라서 본 모델은 (1) 풍화토 층의 초기조건 및 배수조건을 대상문제의 각 지층에 따라 적합하게 설정한 후, (2) 조건에 합당하게 실내시험을 수행하여 모델 계수를 설정할 수 있다. 이러한 과정을 통하여 제안된 모델을 이용한 수치해석을 수행하면 지반공학문제의 해를 합리적으로 구할 수 있다고 판단된다.

6. 결 론

본 연구는 전체 변형률 영역의 거동을 획득하기 위하

여 국부 변위측정을 통한 풍화토의 삼축압축시험을 수행하였다. 불교란시료는 못타설법을 이용하여 블록시료로 채취하였으며 실내에서 불교란 시료채취기를 이용하여 시료를 성형하였고, 교란시료는 정적다짐으로 재성형하였다. 이러한 시료들을 포화 후 비배수 삼축압축 시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 풍화토 포화시료의 비배수 삼축압축시험결과 미소 변형률(0.001% 수준)에서 대변형률까지의 거동을 합리적으로 구할 수 있었다. 불교란 시료에서는 압밀항복하중(σ_y)을 기준으로 구속압에 따라 표준화된 응력-변형률 관계가 응력수준에 따라 상이하게 나타나고 있었다.
- (2) 시험의 종류에 상관없이 불교란 및 교란시료에서의 변형계수가 미소변형률 영역에서 유사하게 나타났으며 상당한 풍화가 진행된 풍화토에서는 내재된 조직이 교란되어 전체적인 거동이 상이하게 나타나지만 미소변형률 영역에서의 거동에는 큰 영향을 끼치

지 않는 것으로 판단된다.

- (3) 동적 배수시험인 공진주(RC)시험과 정적 비배수 삼축압축시험에서 구한 정규화 전단변형계수(G/G_{max})-변형률 곡선이 대체적으로 잘 일치하였으며, 비소성 흙에 대한 Seed-Idriss(1970)의 시험결과와도 잘 부합하였다. 반면 최대전단변형계수(G_{max})는 불포화시료의 공진주(RC)시험의 경우에 포화시료의 삼축압축시험결과에 비하여 대략 2배 정도 크게 나타났으며, 이로서 불포화토의 거동은 포화도에 따른 표면장력에 의한 모관현상에 영향을 받고 있다는 것을 확인하였으나, 응력경로(배수조건)나 함수비조건에 따른 각 인자의 영향을 정량적으로 구분하지는 못하였다.
- (4) 기 제안된 비등방경화 구성모델의 계수 연구를 통하여 전체 변형률 영역 거동을 일관되게 예측할 수 있음을 확인하였다. 또한 풍화토의 전응력해석시에는 지층에 따라 초기함수비조건 및 배수조건에 상응하도록 모델계수를 도출하면 합리적인 해석을 수행하는 것이 가능하다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2001학년도 영남대학교 학술연구조성비 지원에 의한 것으로 이에 감사드립니다. 또한 이 연구는 영남대와 한국과학기술원의 공동연구로 추진되었으며, 여러 조언을 해주신 관계자 여러분께도 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- 고동희(2001), 미소변형 삼축시험과 공진주/비틀전단시험을 이용한 화강풍화토의 변형특성 연구, 석사 학위논문, 한국과학기술원.
- 김동수, 권기철, 정순용, 박재영(1997), "실내시험 및 현장시험을 통한 지반의 비선형 변형특성 평가," 한국지반공학회지, 제13권, 제5호, pp.89~100.
- 오세봉, 권기철, 김동수, 정순용(2000), "미소변형률 및 대변형률 조건의 거동에 대한 비등방경화 탄소성 구성모델," 한국지반공학회지, 제16권, 제1호, pp.65~73.
- 이종규(1999), "화강풍화토의 동적 거동," 한국지반공학회지, 제15권, 제1호, pp.175~183.
- 정순용, 김동수, 이승래, 권기철(1997), "화강풍화토의 거동특성 규명을 위한 비교란 시료채취기 개발," 한국지반공학회지, 제13권, 제6호, pp.13~23.
- 西田一彦(1986), 風化殘積土の工學的性質; 박춘식 譯(1996), 풍화토의 특성, 도서출판 엔지니어즈.
- Burland, J. B.(1989), "Small is Beautiful - the Stiffness of Soils at Small Strains," Canadian Geotechnical Journal, Vol.26, pp.499~516.
- Geological Society(1990), "Tropical Residual Soils, Engineering Group Working Party Report," Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol.23, pp.1~101.
- Goto, S., Tatsuoka, F., Shibuya, S., Kim, Y.S., Sato, T.(1991), "A simple Gauge for Local Small Strain Measurements in the Laboratory," Soil and Foundations, Vol.31, No.1, pp.136~151.
- Hatanaka, M. and Uchida, A.(1995), "Effects of Test Methods on the Cyclic Deformation Characteristics of High Quality Undisturbed Gravel Samples," Statics and Dynamic Properties of Gravelly Soils, ASCE Geotechnical Engineering Division, an Diego, California, pp.136~151.
- Head, K. H.(1982), manual of soil laboratory testing, Vol.3 : Effective stress tests, Routine Effective Stress Triaxial Tests.
- Seed, H. B. and Idriss, I. M.(1970), "Soil Moduli and Damping Factors for Dynamics Response Analysis," Report No.EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley.
- Tatsuoka, F. and Shibuya, S.(1992), "Deformation Characteristics of Soils and Rocks from Field and Laboratory Tests," Vol.37, No.1, Report of the Institute of Industrial Science, the University of Tokyo.
- Wu, S., Gray, D. H., and Richart, F. E. Jr.(1984), "Capillary Effects on Dynamic Modulus of Sands and Silts," Geotechnical Engineering Division, ASCE Vol.110(9), pp.1188~1203.

(접수일자 2001. 7. 26, 심사완료일 2001. 12. 10)