

미소변형률 및 대변형률 조건에서 불교란 풍화토의 구성거동에 관한 연구 A Study on the Constitutive Behavior of Undisturbed Weathered Soils at Small-to-Large Strain Conditions

오세봉¹⁾, Seboong Oh, 이영휘²⁾, Young-Huy Lee, 안영대³⁾, Young-Dae An

¹⁾ 영남대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Yeungnam Univ.

²⁾ 영남대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Yeungnam Univ.

³⁾ 영남대학교 공업기술연구소 연구원, Researcher, Institute of Industrial Technology, Yeungnam Univ.

SYNOPSIS : Undrained triaxial tests were performed for a weathered soil, which includes local measurement using LVDT. The behavior from small to large strain conditions could be evaluated consistently through a triaxial test. The stress-strain relationship of undisturbed samples were compared with the disturbed and the shear moduli in the small strain level had the almost same values. Especially the shear moduli were mostly affected by the initial condition of water contents. An anisotropic hardening model based on the total stress concept could predict the stress-strain relationship accurately, which makes it possible to analyze the geotechnical problem reasonably for the weathered soil.

Key words : stress-strain relationship, weathered soil, local measurement, undisturbed samples

1. 서론

지반공학문제 해석시에는 대상문제에 따라 미소변형률 영역 및 대변형률영역의 거동을 합리적으로 모델하는 것이 요구된다. 특히 국내에 널리 분포된 풍화토의 경우, 응력해석시 미소변형률에서 파괴에 도달한 대변형률까지의 거동을 모델할 수 있는 구성관계가 필요한 실정이다. 이러한 연구에서 핵심적인 부분은 (1) 불교란 풍화토 시료의 채취, (2) 미소변형률 측정의 정확도 확보, (3) 실제 조건에 적합한 실내시험 수행에 있다고 여겨진다.(이승래 등, 1997)

본 연구는 이러한 부분의 기초연구로서 풍화토의 비배수 거동을 중심으로 연구하고, 오세봉 등(2000)에 의해 제안된 구성관계를 검증하고자 LVDT를 이용한 국부변위측정 삼축압축시험을 수행하였다.

2. 시험 장치 개요

통상적인 삼축압축시험에서 수행하는 외부변위측정법은 양단의 안착오차(bedding error), 단부구속등으로 인한 시료변형의 불균일성을 제거하기 어렵다. 이로 인하여 실제 축변형을 과대평가하며 표 1에 나타난 오차요인을 완전히 배제할 수 없다. 특히 미소변형률 영역의 변형률 및 변형계수를 신뢰성있게 측정하기 위해서는 단부구속으로부터 상대적으로 자유로운 시료 중앙부의 국부변위측정을 적용하는 것이 합리적이다. 한편 기존의 내부측정 또는 국부측정 장치들은 대체로 미소변형률에서 중간변형률까지의 측정을 수행할 수 있도록 개발되었으며 1%이상의 대변형률범위에서는 적용하기 힘들었다. 그러나 본 연구에서는 미소변형률수준에서 정확한 변위 계측을 확보할 뿐만 아니라 파괴규준을 포함하는 대변형률까지의 변형률 측정을 위해서 LVDT를 이용한 시스템 및 자체 프로그램을 개발하였다.

표 1. 외부변위측정에 내포된 오차요인(Goto등, 1991 ; 고동희, 2001)

측정오차	오차요인	오차제거방법
시스템 컴플라이언스	로드셀, 셀, 피스톤, 상부캡 등의 처짐	상부캡의 움직임을 모니터링함으로써 회피
시료의 경사	-	tilting 방지 캡 사용
안착오차	성형과정에서 시료양단의 교란	국부변위측정
시료변위의 불균일성	단부구속	시료의 양단에 단면마찰 경감층사용
휨전단	strain localization	이상적인 경계조건일 때조차도 회피할 수 없음

국부변위는 그림 1과 같이 시료의 양쪽 힌지에 설치된 LVDT에서 측정된다. 힌지는 안착오차 및 단부 구속등을 피하기 위하여 시료 상·하부로부터 약 1cm정도 이격시켜 설치하였다. 또한 변위에 따라 발생하는 아날로그신호는 16bits A/D converter에서 디지털화되어 그림 2와 같이 자체 개발한 데이터 획득 프로그램에 의해서 0.05초 간격으로 저장된다. 저장된 데이터는 20개씩 평균, 시간간격조절에 의해서 최종적인 데이터로 획득된다.

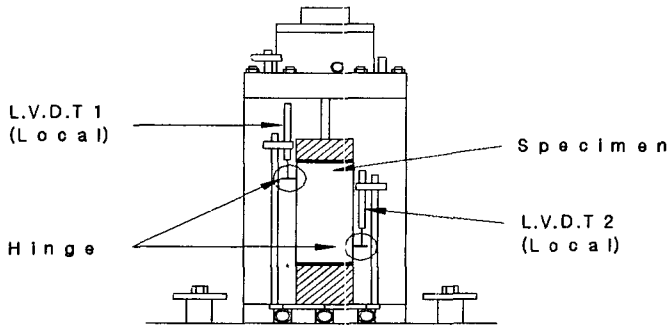


그림 1 셀(Cell) 구조도

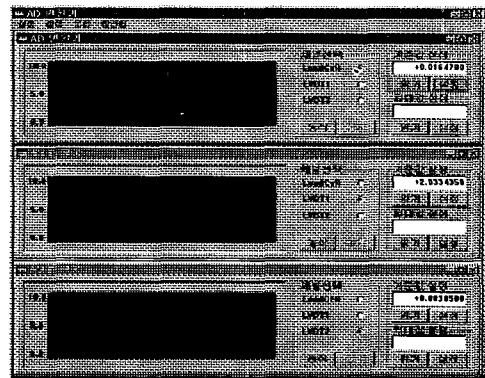


그림 2 데이터획득프로그램 초기화면

국부변위에 사용된 센서는 출력전압과 외부물리량 사이의 관계를 알아야 하며, 본 연구에서는 LVDT의 경우 0.001mm까지 측정이 가능한 마이크로미터를 이용하여 검증하였다. 그림 3은 LVDT의 검증결과이며, 모든 출력전압은 외부물리량에 대하여 1차함수를 띄었고, 회귀분석 결과 데이터의 오차는 미미하였다. 그리고 센서는 시간의 경과에 따라 안정된 출력전압을 가져야 한다. 그림 4는 물리량을 가하지 않은 상태에서 출력전압의 변화를 0.05초 간격으로 약 30분간 기록한 결과이며, 측정치의 범위가 0.5 mV정도로 안정하였다.

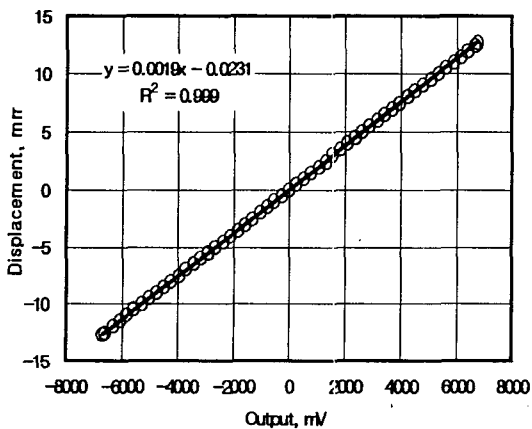


그림 3 LVDT 검증결과

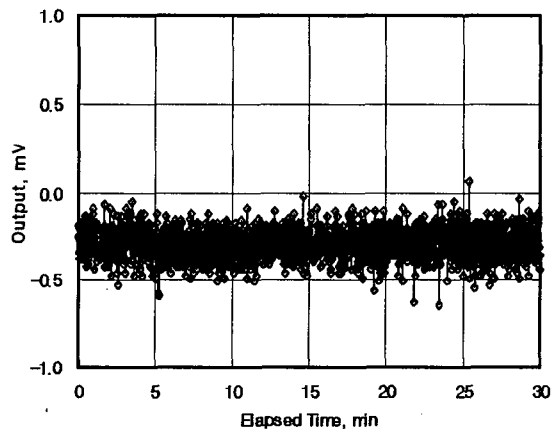
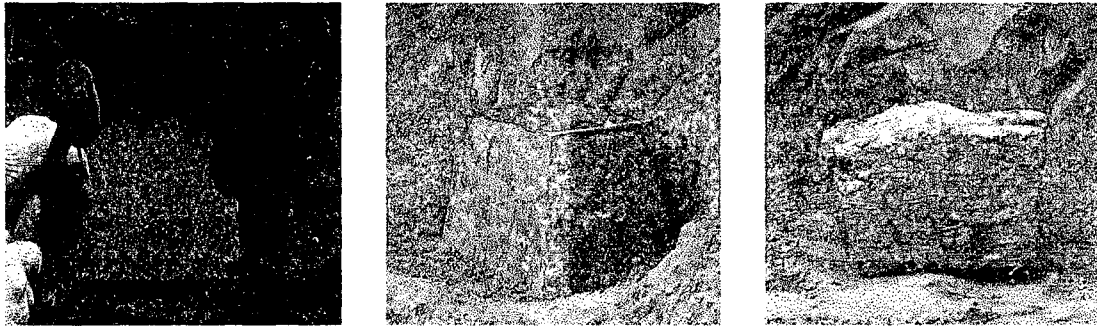


그림 4 경과시간에 대한 출력전압범위

3. 시료채취 및 성형

본 연구의 대상지반은 충북 홍성에 위치한 도로축조 및 포장공사를 수행하는 현장으로 화강암을 기반암으로 하고 있다. 시료채취는 GL-2m에서 그림 5와 같이 못타설법으로 블록시료를 채취, 파라핀으로 완전히 밀봉하여 현장조건으로 보존한 후 실험실로 운반하여 불교란시료채취기(이승래 등, 1997)를 사용하여 그림 6과 같이 실내에서 불교란 시료를 성형하였다. 그리고 교란시료의 경우에는 그림 7과 같이 입자파쇄를 최소화하는 정적다짐으로 삼축압축시험용 시료를 성형하였다.



(a) 못타입장면 (b) 지반을 건어낸 장면 (c) 파라핀으로 밀봉된 장면

그림 5 못타설법(nail sampling)에 의한 불교란 블록시료 채취 과정(西田一彦, 1986)

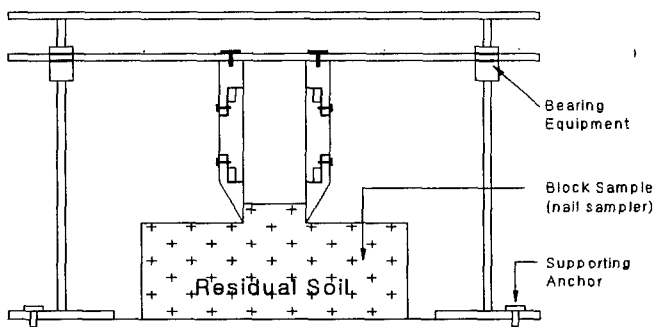


그림 6 실내에서 불교란 시료의 성형

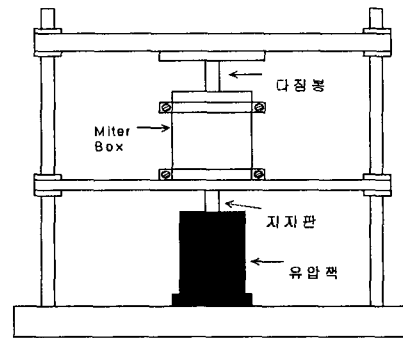


그림 7 교란시료의 성형

4. 실험 결과 및 분석

4.1 기본물성시험 및 등방압밀 시험

불교란시료를 성형한 후 남은 시료로 기본적인 물성시험을 실시하였고, 결과는 표 2에 나타내었다.

표 2. 풍화토의 기본 물성시험 결과

구분	G_s	USCS	LL(%)	PL(%)	w_p (%)	γ_s (t/m^3)	e_0
기본물성치	2.65	ML	32.4	NP	22.56	1.67	0.95

국제지질학회기준의 풍화토 분류로서는 상당한 풍화가 진행되어 토립자 암석의 구조적인 특성이 거의 남아있지 않는 RS등급에 해당하였고, 삼축압축시험에 있어서 응력수준을 구분하고, 압밀시간을 산정하기 위하여 등방압밀을 실시하였다. 압밀항복하중(σ_y)은 약 180kPa이며 예비시험 결과 압밀도(U) 90%에 도달하는 시간이 대략 15분정도 소요되기 때문에 압밀시간은 180분이면 충분한 것으로 판단하였다.

4.2 변위측정 위치에 따른 거동

변위 측정 위치에 따른 영향을 분석하기 위하여 불교란시료에 대하여 국부 및 외부변위측정을 동시에 실시하였다. 동일한 초기조건에도 불구하고 국부변위측정에 비하여 외부변위측정장치로 측정된 변위가 동일한 하중에 대하여 실제보다 과대평가되어 변형계수를 과소평가하게 된다. 그림 8은 각각의 측정위치에서 나타난 응력-변형을 관계이고, 그림 9는 할선변형계수-대수변형을 관계이며 측정위치에 따라서 변형계수가 상당한 차이가 나타나며, 대략 변형을 범위가 0.1~1% 사이에서 할선탄성계수가 같아짐을 알 수 있었다. 이러한 차이는 시료와 캡사이에서 발생하는 안착오차 및 단부구속에 의한 변형의 불균일성에서 기인하는 것으로 판단된다.

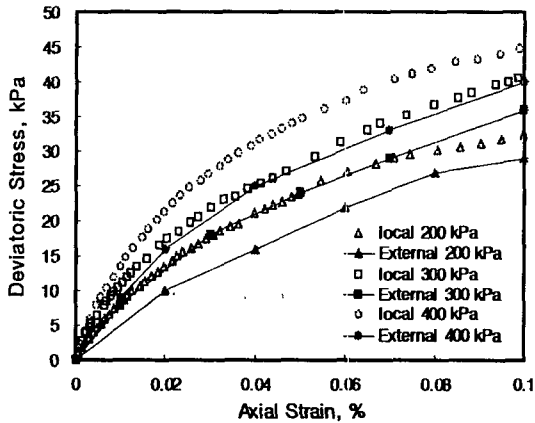


그림 8 변위측정위치에 따른 응력-변형을 관계 비교

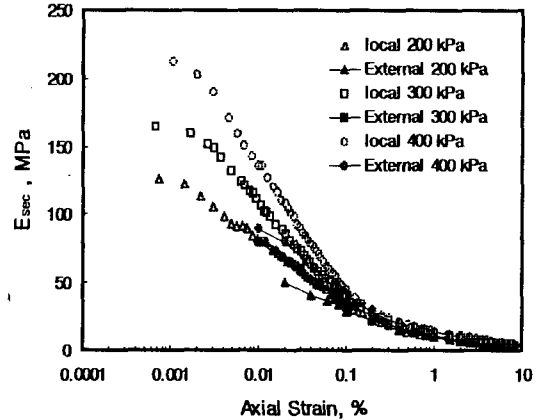


그림 9 변위측정위치에 따른 할선탄성계수-대수변형을 관계 비교

4.3 불교란 시료의 거동

못타설법으로 채취한 블록시료를 실내에서 성형한 후 다양한 구속압 조건하의 비배수 시험을 실시하였다. 그림 10은 국부변위측정에서 구한 할선탄성계수-대수변형률관계이며 구속압이 커질수록 동일한 변형률에서 할선탄성계수가 커짐을 알 수 있다. 본 실험에서는 축변형률 0.001% 수준까지 측정이 가능하였으며 비선형구간에서 선형구간으로 전이되는 과정을 확인하였다. 그림 11은 최대축차응력(q_{max})로 표준화한 것으로 압밀항복하중(σ_y)을 기준으로 구속압에 따라 준 정규압밀상태와 준 과압밀상태의 거동이 상이하게 나타남을 알 수 있다. 이로부터 퇴적토의 응력이력과 유사하게 압밀항복하중이 풍화토에도 영향을 끼치는 것으로 판단된다.

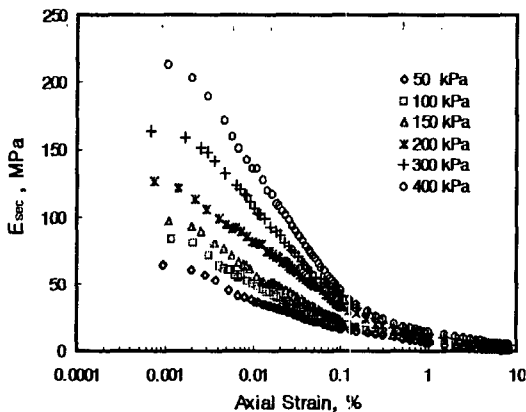


그림10 할선계수-대수변형률관계(불교란시료)

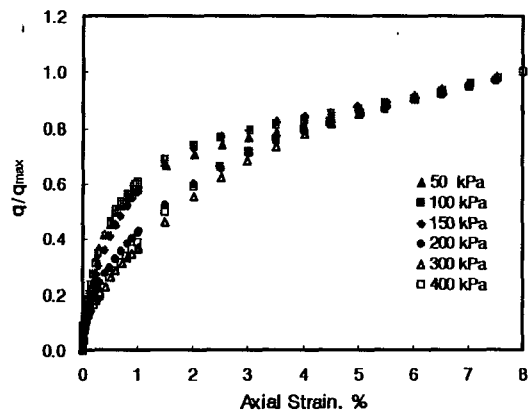


그림 11 표준응력-변형률 관계(불교란시료)

그림 12는 외부변위측정장치로부터 측정된 응력경로를 나타낸 것인데, 압밀항복하중보다 낮은 수준으로 갈수록 과압밀 경향을 띄며 한계상태에 도달한 후 평균주응력(p') 및 축차응력(q)이 커지고 있다. 그리고, 그림 13에서는 정규화 변형계수의 실험치에 대하여 기존의 Seed & Idriss(1970)의 비소성(NP) 흙에 대한 모델과 비교하였으며 두 결과가 매우 유사하게 나타남을 알 수 있었다(김동수 등, 1997). 그러나, 시험에 적용된 시료는 하나의 현장을 대상으로 하기 때문에 국내 풍화토에 대한 일반적인 결과로 적용하기 위해서는 보다 다양한 풍화도를 가지는 시료에 대한 실험적인 연구가 추가되어야 할 것이다.

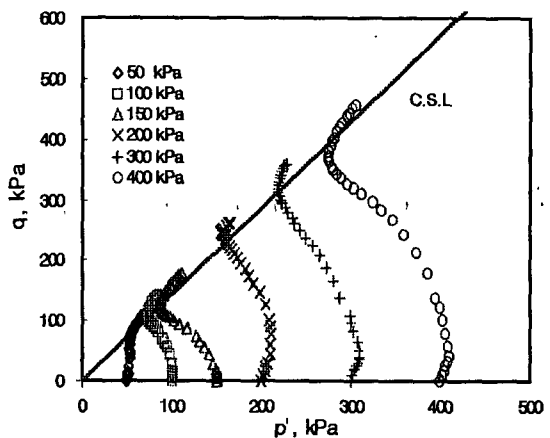


그림 12 불교란시료의 비배수 응력경로

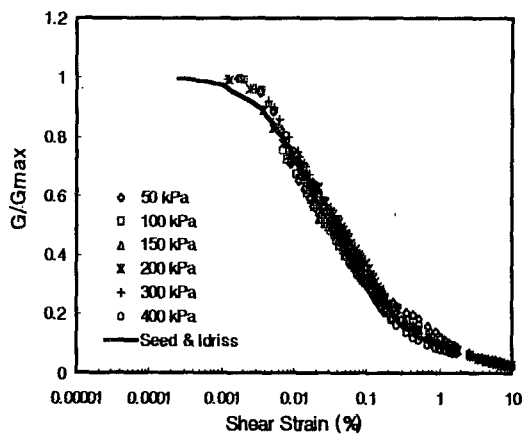


그림 13 불교란시료의 정규화 변형계수

4.4 교란 및 불교란 시료의 거동 비교

시료의 교란효과가 거동에 미치는 영향을 분석하기 위하여 교란시료를 정적다짐으로 성형하여 비배수 삼축시험을 수행하였다. 그리고, 그림 14에서 보여지듯이 불교란시료의 응력-변형을 관계와 비교하였다. 불교란시료에서와 달리 교란시료에서는 변형을 연화현상이 다소 나타난다. 이러한 원인은 교란시료의 다짐 성형과정에서 풍화토 내의 조직이 흐트러져 점성토보다는 사질토의 특성에 가까운 거동을 하는 것으로 여겨진다. 그리고 각각의 구속압에 대하여 교란시료의 최대축차응력이 불교란시료보다 더 작게 나타난다. 한편 그림 15는 할선탄성계수-대수변형을 관계를 비교한 것으로 풍화토의 경우 초기변형계수 및 미소변형을 영역에서의 응력-변형을 관계는 교란시료로서 불교란시료의 거동을 획득하는 것이 가능할 정도로 유사하게 나타났다. 상당한 풍화가 진행된 풍화토의 미소변형을 조건에서의 거동은 채료내부 조직이 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 여겨진다.

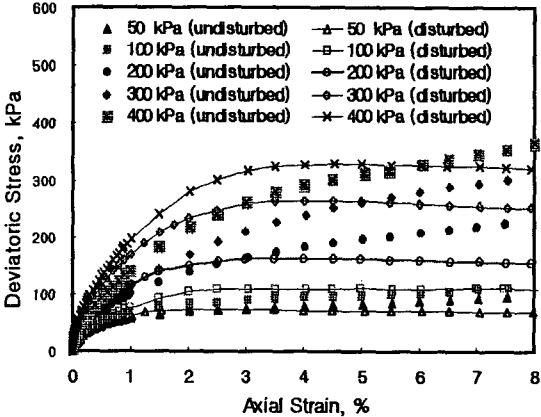


그림 14 교란 및 불교란 시료에서 응력-변형률 관계

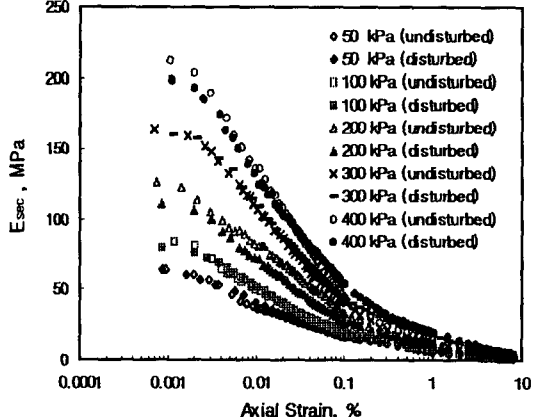


그림 15 교란 및 불교란 시료에서 할선계수 관계

또한 그림 16은 정규화탄성계수를 비교한 것이며 대부분의 지반재료에서 정규화된 탄성계수의 변화가 시료교란의 영향을 별로 받지 않는다는 결과에 부합한다(Hatanaka 등, 1995). 그림 17은 시료교란에 의한 구속압에 대한 최대전단탄성계수(G_{max})와의 관계를 나타낸 것이며 교란영향에 상관없이 유사하게 나타나며 상당히 풍화가 진행된 흙에서는 입자의 조직보다는 그외의 속성이 초기 변형계수에 더 큰 영향을 끼친다고 사료된다.

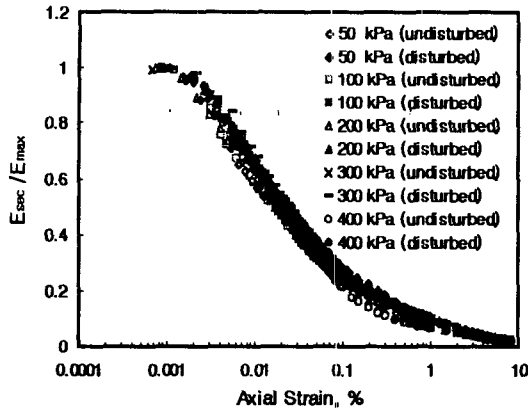


그림 16 정규화 변형계수(E/E_{max})에 대한 비교

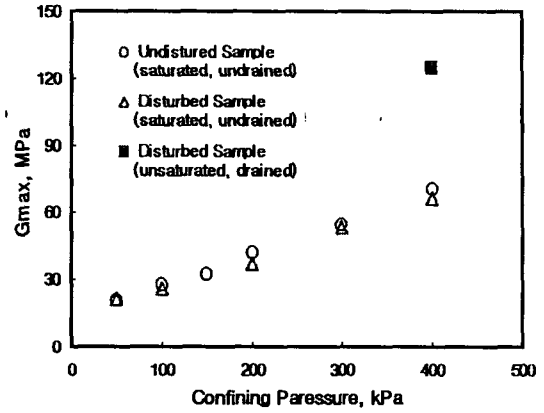


그림 17 최대 전단탄성계수(G_{max}) 비교

5. 전응력 개념에 근거한 구성모델

응력텐서 $\sigma = p\mathbf{1} + s$ 로 분해될 때 그림 18에 나타난 경계면과 항복면의 식은 다음과 같다.

$$F = (\bar{s} - b) : (\bar{s} - b) - R^2 = 0, \quad f = (s - \beta) : (s - \beta) - r^2 = 0 \quad (1)$$

여기서 $a = a_v\mathbf{1} + b$, $\alpha = \alpha_v\mathbf{1} + \beta$ 로 경계면과 항복면의 중심응력텐서를 나타내며 r 과 R 은 항복면과 경계면의 반경이다. 변형률텐서 및 상등응력텐서는 각각 $\epsilon = \frac{1}{3}\epsilon_v\mathbf{1} + e$, $\xi = \xi\mathbf{1} + \eta$ 로 분해된다.

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

$$\hat{\epsilon}_d^p = \Psi(r), \quad \Psi(r) = a \frac{(r/R)^b}{(1 - r/R)^c} \quad (2)$$

이때, $\hat{\epsilon}_d^p = \sqrt{\frac{2}{3}} \int \|de^p\|$ 이며, 적분범위는 하나의 재하과정에서 이루어지며, a , b 및 c 는 재료계수로 실험결과로서 도출되며, 구성관계를 von Mises 형태의 항복기준과 파괴기준을 적용해 단순화하였다. 초기구속압 σ_i 는 상등응력 ξ 가 되며, 경계면과 항복면의 중심응력, 현재응력과 사상응력간의 거리비 r/R 로부터 소성변형률을 계산한다. 변형률 증분형태의 탄소성응력-변형률관계를 구하기 위하여 (1) 항복면과 경화함수에 대해 일관조건(consistency condition)을 적용하고, (2) 관련유동법칙(associative flow rule)을 가정하면 소성변형률 증분텐서는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_d^p = \frac{1}{H} \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma} : \dot{\sigma} \right) \frac{\partial f}{\partial \sigma} \quad (3)$$

여기서, H (plastic modulus)는 다음과 같다.

$$H = - \left(\frac{\partial f}{\partial r} + \frac{\partial f}{\partial \beta} : \frac{\partial \beta}{\partial r} \right) \frac{\partial r}{\partial e^p} : \frac{\partial f}{\partial s} \quad (4)$$

따라서 탄소성 응력-변형률 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다. 자세한 유도과정은 오세봉 등 (2000)의 논문을 참조할 수 있다.

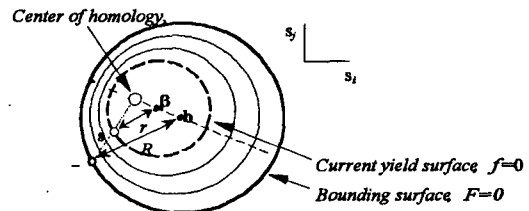


그림 18 경계면과 항복면

$$\dot{p} = K^e \dot{\epsilon}_v, \dot{s} = 2G^e \dot{e} - \frac{(2G^e)^2 \frac{\partial f}{\partial s} \otimes \frac{\partial f}{\partial s}}{2G^e \frac{\partial f}{\partial s} : \frac{\partial f}{\partial s} + H} : \dot{e} \quad (5)$$

항복면의 경화함수는 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Psi \equiv \hat{\epsilon}_a^b (1 - \frac{r}{R})^c = a (\frac{r}{R})^b \quad (6)$$

식(6)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 선형적으로 나타나도록 0.3~0.4 정도가 경험적으로 적당한 것으로 판단된다(오세봉 등, 2000).

등방압밀 조건하에서 경계면 및 항복면의 중심응력텐서는 $b = \beta = 0$ 이고, $q = \sigma_1 - \sigma_3$ 이다. q 의 최대값을

$$q_{max} \text{라 하면, } R = \sqrt{\frac{2}{3}} q_{max}, \frac{r}{R} = \frac{q}{q_{max}} \text{이며 변형률은}$$

아래와 같다.

$$\hat{\epsilon}_a^b = \epsilon_1 - \epsilon_1^e, \epsilon_1^e = \frac{q}{E} \quad (7)$$

이로부터 식 (6)의 $\Psi \sim r/R$ 관계를 실험치로부터 구할 수 있다.

모델에 필요한 초기변형계수는 셀내부의 LVDT를 이용한 국부변위측정으로 구한 최대탄성계수(E_{max})를 이용하였으며, 배수조건이 비배수상태이므로 포아송비(ν)는 0.5를 사용하였다. 그림 19는 재료계수 a, b 를 도출하는 과정을 나타내고 있으며 대수축상의 선형성과 동일한 현상임을 고려하여 재료계수 c 는 0.3을 적용하였다. 표 3은 비교란시료에서 경화함수의 재료계수를 정리한 것이다.

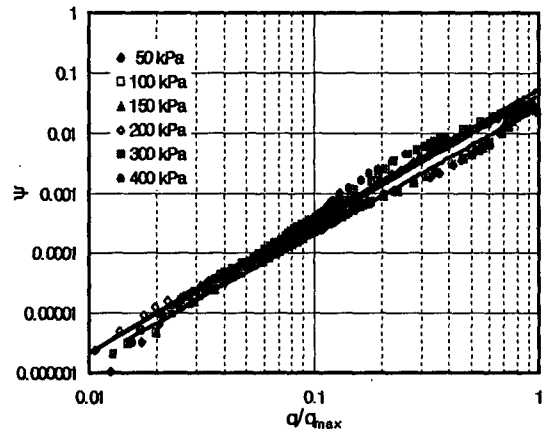


그림 19 재료계수 도출과정(비교란시료)

표 3. 경화함수의 재료계수(비교란시료)

구속압 (kPa)	a	b	c	E_{max} (MPa)	q_{max} (kPa)	구속압 (kPa)	a	b	c	E_{max} (MPa)	q_{max} (kPa)
50	0.0271	2.0725	0.3	64	98	200	0.0421	2.1432	0.3	127	232
100	0.0265	2.1103	0.3	84	113	300	0.0528	2.1837	0.3	165	308
150	0.0265	2.1103	0.3	98	130	400	0.0534	2.1935	0.3	213	367

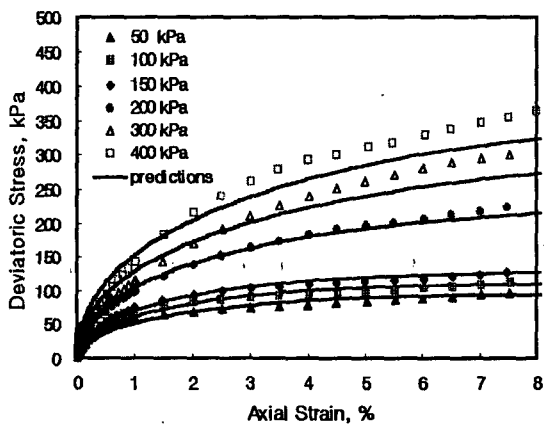


그림 20 응력-변형률 관계의 실험치와 예측치 비교 (비교란시료)

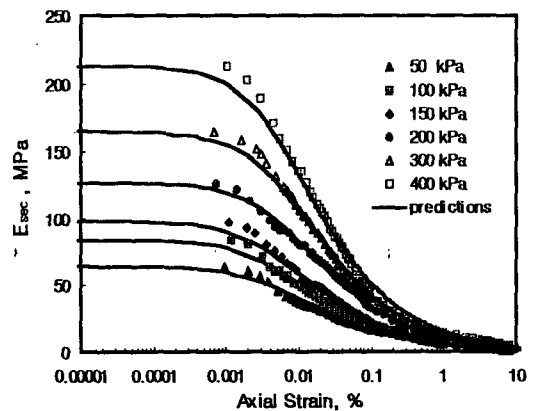


그림 21 할선탄성계수-대수변형률 관계의 실험치와 예측치 비교 (비교란시료)

불교란 풍화시료의 비배수거동에 대한 모델링 결과를 실측치와 비교하여 그림 20과 21에 나타내었다. 실제 지반의 응력해석시에는 대상문제에 따라 초기 함수비조건 및 응력경로(특히 배수조건)가 상이하게 주어진다. 따라서 본 모델은 (1) 풍화토의 초기조건 및 배수조건을 대상문제에 적합하게 설정한 후 (2) 조건에 합당하게 실내시험을 수행하여 모델계수를 설정할 수 있다. 이러한 과정을 통하여 제안된 모델을 이용한 수치해석을 수행하면 지반공학문제의 해를 합리적으로 구할 수 있다고 판단된다.

4. 결론

- (1) 본 연구는 단부구속 및 안착오차(bedding error)등의 시료변형 불균일성으로 야기되는 변형측정 오차를 해결하기 위하여 국부변위측정을 이용한 풍화토의 삼축압축시험을 수행하였다. 불교란시료는 못타설법을 이용하여 블록시료를 채취하였으며 실내에서 합당한 장비를 이용하여 시료를 성형하였고, 교란시료는 입자파쇄를 최소화하면서 현장밀도로 재성형하기 위하여 정적다짐을 이용하였다.
- (2) 풍화토의 비배수시험결과 미소변형률(0.001% 수준)에서 대변형률까지의 거동을 합리적으로 구할 수 있었으며, 압밀항복하중(σ_y)을 기준으로 구속압에 따라 표준화된 응력-변형률 관계가 상이하게 나타났다. 그리고 불교란 및 교란시료에서의 변형계수가 미소변형률 영역에서 유사하게 나타났으며 상당한 풍화가 진행된 풍화토에서는 입자의 조직구조보다는 기타 속성이 재료의 거동에 더 중요한 영향을 미친다고 판단된다.
- (3) 기 제안된 비등방경화 구성모델을 통하여 대상시험결과와 비교를 하였으며, 미소변형률 영역 및 대변형률 영역의 거동을 일관되게 예측할 수 있음을 확인하였다. 또한 풍화토의 지반문제 응력해석시 초기함수비조건 및 배수조건에 상응하도록 모델계수를 도출하면 합리적인 해석을 수행하는 것이 가능하다고 판단된다.

감사의 글

이 연구는 한국과학기술원 토목공학과 김동수 교수님, 고동희씨와 공동 수행한 연구의 일부로 시험장비제작 및 자료분석에 많은 도움을 받았으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 고동희(2001), 미소변형 삼축시험과 공진주/비틀전단시험을 이용한 화강풍화토의 변형특성 연구, 석사학위논문, 한국과학기술원
2. 김동수, 권기철, 정순용, 박재영(1997), "실내시험 및 현장시험을 통한 지반의 비선형 변형특성 평가," 한국지반공학회지, 제13권, 제5호, pp.89~100
3. 오세봉, 권기철, 김동수, 정순용(2000), "미소변형률 및 대변형률 조건의 거동에 대한 비등방경화 탄소성 구성모델," 한국지반공학회지, 제16권, 제1호, pp.65~73
4. 이승래, 김동수, 정순용, 권기철(1997), "화강풍화토의 거동특성 규명을 위한 비교란 시료채취기 개발," 한국지반공학회지, 제13권, 제6호, pp.13~23
5. 西田一彦 (1986), 風化殘積土の工學的性質; 박 춘 식 譯 (1996), 풍화토의 특성, 도서출판 엔지니어즈
6. Goto, S., Tatsuoka, F., Shibuya, S., Kim, Y.S., Sato, T.(1991), "A simple Guage for Local Small Strain Measurements in the Laboratory," Soil and Foundations, Vol.31, No.1, pp.136~151
7. 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
8. 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