

## 비압밀비배수 삼축압축시험에 의한 보강화강풍화토의 전단강도 특성 Shear strength characteristics of reinforced decomposed granite soil by unconsolidated-undrained triaxial compression test

조용성<sup>1)</sup>, Yong-Seong Cho, 구호본<sup>2)</sup>, Ho-Bon Goo, 박인준<sup>3)</sup>, Inn-Joon Park, 김유성<sup>4)</sup>, You-Seong Kim

- 1) 한국건설기술연구원 지반연구부 선임연구원, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Research Department, Korea Institute of Construction Technology.
- 2) 한국건설기술연구원 지반연구부 수석연구원, Senior Researcher in Chief, Geotechnical Engineering Research Department, Korea Institute of Construction Technology.
- 3) 한서대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanseo Univ.
- 4) 전북대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Chonbuk National University.

**SYNOPSIS :** When enforced earth is used for the retain wall and four walls, the most important thing would be how to maximize the land utilization. Accordingly, in case of enforced earth, we pile up the minimal height of earth(20~30cm) and harden the earth using a static-dynamic hardening machine. In this paper, we tried to analyze and compare the stress-transformation characteristics of reinforced weathered granite soil with geosynthetics when repetitive load is added to the enforced earth structure and when static load is added. The purposes of the study are as follows; 1) To compare and analyze non-reinforced weathered granite soil and reinforced weathered granite soil by executing a unconsolidated-undrained triaxial compression tests. 2) To identify the strength characteristics of weathered granite soil reinforced with geotextile due to the repetitive dynamic loads through comparison of the stress-due to the static load and the repetitive dynamic loads.

**Key words :** Weathered granite soil, Unconsolidated-undrained, Strength characteristics, Ddynamic load.

### 1. 서 론

실내에서 비압밀 비배수(UU) 상태의 정·동적 삼축압축시험을 통하여 화강풍화토를 이용한 보강토의 거동특성을 조사함으로써 무보강토에 대한 보강토의 전단강도 특성을 조사하며, 정·동적 하중상태에 따른 무보강토와 보강토의 전단강도 특성의 변화를 조사하였다. 본 연구에서 사용된 흙 시료는 굴착공사 현장에서 발생한 화강풍화토로 시료는 지하 3m에서 채취한 풍화토를 사용하였다. 보강재로써는 최근 그 활용이 다양화되고 있고, 부직포는 일반적으로 구성섬유들이 일정한 방향없이 방사상으로 배열된 구조를 형성하고 있어 역학적, 수리적 특성이 우수한 것이 특징이다. 반복하중 상태에서 토류벽 구조물, 기초, 터널 등 지반구조물의 변위를 신뢰성 있게 평가하기 위하여 흙과 암반의 변형특성에 대한 정밀한 측정이 필요하다. 최근의 연구결과에 의하면 공용하중하에서 지반이 경험하는 변형률의 크기는 최대

0.5% 미만이고 대부분의 지반이 0.01%이하의 지변형률 거동을 보임이 알려졌고, 이들 거동을 해석하기 위하여는 지변형률에서 중간변형률 사이의(0.1%) 지반의 변형계수를 신뢰성 있게 측정할 수 있는 계측 기법이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 지반거동에 따른 조건에서 반복하중 상태에서의 지반이 경험하는 변동률의 크기를 0.5%로 설정하였다. 이러한 반복하중의 조건에 대한 동적 삼축압축 시험을 실시하여 동적하중이 보강토 구조물의 거동특성에 미치는 영향 및 강도특성에 대하여 조사하였다.

## 2 삼축압축시험 개요

### 2.1 사용된 시료특성

외부 반입된 화강풍화토의 물성시험 및 입도시험, 다짐시험을 실시하였고, 그 결과는 표 1에 요약하였다. 입도시험결과에서 평균균등계수( $C_{u(ave)}$ )=8.4, 평균곡률계수( $C_{c(ave)}$ )=5.23으로서 입도가 불량한 것으로 나타났고, 전형적인 화강암 풍화잔적토의 입도유형을 나타내고 있다. 연경도(Consistency)시험과 입도시험의 결과 등을 종합한 결과로부터 통일분류법(USCS)에 의해 분류한 결과 SM(모래질 실트)로 분류되었다.

표 1. 시료의 물성시험 결과

흙 종류	Liquid Limit $\omega_l$ (%)	Plastic Limit $\omega_p$ (%)	Plastic Index( $FI$ )	Gravity $G_s$	USCS	최적함수비 %	최대건조밀도 $\gamma_{dmax}$ ( $kg/cm^3$ )
화강풍화토	NP	NP	NP	2.64	SM	17.50	1.59

본 시험에 사용된 보강재는 국내에서 생산되는 폴리에스터 100% 장섬유 부직포(Staple Fiber Needle-punched Nonwoven Geotextile)이고, 부직포 단일폭으로 최대폭인 8.5m 초광폭 제품을 사용하였으며, Needle-Punching에 의한 삼차원적 구조로 결합되어 강도, 신도뿐만 아니라 유효 구멍크기(AOS), 수평배수능력 등이 우수한 제품이다. 각각의 토목섬유에 대하여 생산자에 의해서 제시된 물리·역학적 성질을 표 2에 나타내었다.

표 2 생산자가 제시한 보강재의 특성

품 명	중량 ( $g/m^2$ )	인장강도 ( $kgf/in$ )		인장신도 (%)		봉합강도 (kg)	투수계수 ( $cm/sec$ )	두께 (mm)
		길이	폭	길이	폭			
부직포 (P520)	211.6	92.3	61.2	73	96	63.5	$2.8 \times 10^{-1}$	2.05
시험 방법	KS K 0514-1991	KS K 0520-1995 (C.R.E)		KS K 0520-1995 (C.R.E)		KS K 0530 -1997	KS K 2322	KS K 0506 -1996

### 2.2 삼축압축시험 장치 및 시료형태

본 연구에서는 정·동적 하중을 가할 수 있는 삼축압축 시험장치를 이용하였으며, 재하장치와 측정시스템으로 구성되어 있다. 특히 축하중 재하장치는 재하속도를 0.001~3.0mm/sec로 광범위하게 조절할 수 있도록 단계조정모터(steping motor)에 의해 구동된다. 이 모터는 산업용으로 광범위하게 사용되고 있으며, 정밀위치제어가 가능하다. 또한 모터의 펄스수를 조정함으로써 모터의 회전각을 원하는 위치로 제

여할 수 있다. 따라서 본 삼축압축 재하장치에 사용된 스테핑 모터는 정밀한 제어와 다목적으로 편리하게 사용할 수 있고, 사용자 임의대로 자유롭게 스테핑 모터를 쉽게 운영할 수 있는 시스템이다. 이러한 스테핑 모터를 제어하기 위하여 동작(Motor Motion) 제어용 조절기(Programmable Pulse Controller)가 사용된다. 프로그램은 반복을 지정할 수 있는 기능으로써 00~99까지 지정하여 프로그램을 반복할 수 있다. 이러한 자유로운 모터의 조작이 가능하게 되어있어, 단조재하(monotonic loading) 및 재하/재재하(unload/reload) 시험을 할 수 있는 장치이다. 시험계측은 축하중을 계측하기 위한 로드셀, 변위량을 측정하기 위한 변위계, 포화, 압밀 및 전단시 압력의 변화를 측정하기 위한 압력계 등의 측정장치를 사용하였다. 본 연구에서 데이터 취득은 자동데이터 수집장치(SG-148)를 사용하였다. 이 데이터로거는 로드셀 및 변환센서의 변형량을 컴퓨터에 연결하여 운영프로그램을 이용, 기기로부터 데이터를 자동 수집하여 통신방식으로 컴퓨터에 기록하여 분석하는데 사용된다. 측정채널은 6채널 슬롯삽입식이고 통신 방식은 RS 232C 콘넥타 9핀 100m 9600 Baud rate 방식이며, 분해도는 1/100000이다. 1~99초 측정 간격을 설정할 수 있다. 저장된 파일은 바로 엑셀프로그램과 호환텍스트로 파일을 변환시킬 수 있는 장점이 있다.

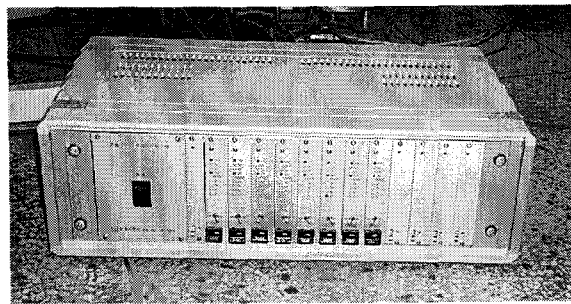


사진 1. 데이터 취득에 사용된 Data Logger

화강풍화토의 시료는 직경이 50mm, 높이가 100mm 몰드 2개를 조립한 후, 흙 시료의 다짐시험결과를 바탕으로 Proctor 다짐에너지 방정식에 의해 계산된 값으로 몰드내에 다짐된 화강풍화토의 건조밀도를 조사하고, 다짐시험 결과에서 나타난 최대건조밀도와 비교한 결과 흙 시료의 다짐방법이 적절한 것으로 나타났다. 이러한 시료의 형성을 위하여 흙 400g과 물 60g을 준비하여 조심스럽게 섞어 최적함수비가 되게 만들었고, 1층 다짐에 필요한 시료무게는 93g, 2층 93g, 3층 93g, 4층 100g의 시료를 몰드에 넣어 각 4회의 다짐봉을 이용하여 다짐을 실시한 후, 시료추출기에 넣어 시료를 빼내어 삼축압축 시험기의 하단에 설치하였으며, 시료의 함수비 및 시료의 무게를 측정하였다. 보강토 시료는 무보강 시료와 동일한 방법으로 다짐을 실시하였으며, 보강재를 매입하였다. 시험에 사용된 시료의 형태는 지반조건(그림 1)에 따라 총 4가지 형태로 제작하였으며, 그림 2는 본 연구에서 사용된 무보강 흙과 보강토의 시료 형태를 보여주고 있다.

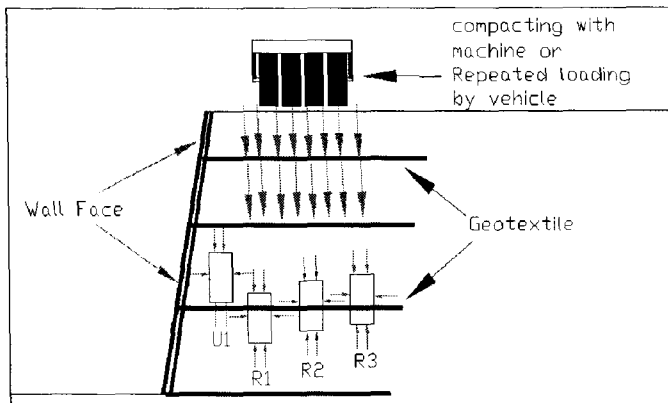


그림 1. 지반조건에 따른 시료형태 모식도

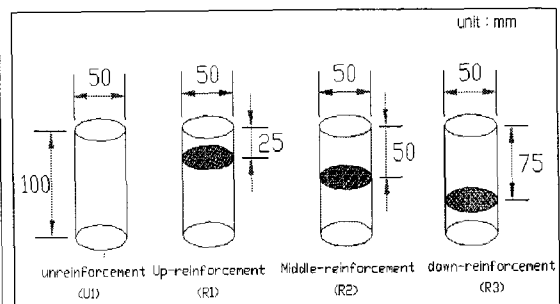


그림 2. 시험에 사용된 시료형태

### 3 정적하중 시험결과

#### 3.1 시료의 초기상태

비압밀 비배수(UU) 삼축압축시험은 포화된 지반에 일시적인 가설물 따위의 외력으로 인해서 유발된 과잉 간극수압이 소산될 만한 여유가 없이 시공하는 경우에 초기안정 해석을 위한 비배수 전단강도( $c_u$ )를 구하기 위한 실험이다. 무보강 화강풍화토와 보강 화강풍화토의 지반조건 상황을 재현하기 위하여 무보강(UUU1), 상부보강(UUR1), 중간보강(UUR2), 하단보강(UUR3)등의 4가지 형태의 시료에 대해 시험을 실시하였다. 표 3과 표 4는 각각의 시료에 대한 시험시료의 초기상태와 시험 후의 시료상태를 나타내고 있다.

표 3. 시험시료의 초기상태

시험 형태	구속압( $\sigma_3$ ), $tf/m^2$	크기, mm		시료 제작 후(Initial)				
		직경, $D$	길이, $L_0$	중량( $W$ ), g	함수비( $w$ ), %	건조단위중량, $\gamma_d$	초기간극비 ( $e_0$ )	포화도( $S_0$ ), %
UUU1	10	50	103	368.34	16.85	1.56	0.69	64.12
	15	50	103	370.67	16.65	1.57	0.69	64.62
	20	50	103	369.78	16.31	1.57	0.68	63.38
UUR1	10	50	103	367.56	15.35	1.58	0.68	59.99
	15	50	103	369.71	17.25	1.56	0.69	65.69
	20	50	103	366.74	16.92	1.55	0.70	63.62
UUR2	10	50	103	369.43	16.74	1.56	0.69	64.31
	15	50	103	368.43	16.24	1.57	0.68	62.63
	20	50	103	371.77	17.56	1.56	0.69	67.35
UUR3	10	50	103	367.66	16.08	1.57	0.69	61.91
	15	50	103	368.31	16.00	1.57	0.68	61.97
	20	50	103	367.33	16.25	1.56	0.69	62.20

표 4. 파괴시험 후 시료상태

시험 형태	구속압( $\sigma_3$ ), $tf/m^2$	강제 포화 후 포화도, %	파괴시험 후(Final)			
			중량( $W$ ), g	함수비( $w$ ), %	건조단위중량, $\gamma_d$	간극비( $e_f$ )
UUU1	10	98.47	421.15	34.73	1.55	0.71
	15	99.69	424.08	36.26	1.54	0.72
	20	98.88	426.44	35.45	1.56	0.70
UUR1	10	97.69	420.48	35.02	1.54	0.71
	15	97.66	419.52	35.49	1.53	0.72
	20	99.68	423.27	34.75	1.55	0.70
UUR2	10	97.12	420.59	31.28	1.58	0.67
	15	97.83	417.93	34.77	1.53	0.72
	20	97.20	419.87	34.79	1.54	0.71
UUR3	10	97.97	420.28	35.81	1.53	0.73
	15	99.65	434.17	37.38	1.56	0.69
	20	97.71	423.21	35.19	1.55	0.71

#### 3.1 전단시험 결과

화강풍화토와 토목섬유로 보강된 화강풍화토에 대하여 각각의 구속압(10, 15, 20 $tf/m^2$ ) 상태 하에서 실험을 실시하였으며, 변형률은 최대 22%까지 측정하였다. 그림 5.1~5.4에 각각의 실험결과를 변형률( $\epsilon$ , %)과 축차응력(Deviator Stress,  $\sigma_1 - \sigma_3$ )으로 나타내었다. 모든 시험에서 최대응력상태는 나타나지 않았으며, 변형률 증가에 따라 지속적인 응력증가형태를 나타내고 있다. UUR2의 경우(그림 5)는 보강재를 시료의 중간에 배치한 형태의 시험결과로 변형률 5%에서 완만한 경사로 변화한 후 지속적인 증가를 보이나, 다른 시험결과와 경향과는 아주 다르게 변형률 15% 이후에 그 경사가 증가하는 양상을 보여주고 있다. 이러한 경향은 보강재가 상하단에 위치한 경우에는 나타나지 않는 경향으로 보강재의 배

치에 따라 대변형 후, 응력-변형의 형태가 달라질 수 있음을 보여주고 있다. 이러한 경향은 보강재를 중심으로 양쪽의 비보강부분에서 등방응력 상태가 되지 못하고 이방응력상태가 되어, 진행성 파괴양상으로 파괴되기 때문인 것으로 판단된다. 이것은 시료의 파괴모습(표 5)에서도 유추할 수 있고, 실제 실험 중 변형은 보강재 상부에서 대변형을 일으킨 후, 다시 보강재 하단부 시료부분에서 변형이 증가되는 양상을 확인할 수 있었다. 즉 UUU1의 무보강의 경우는 시료전체가 하나의 요소로서의 응력상태 및 변형에 가까우나, 보강재를 배치한 다른 시험의 경우, 보강재의 위치에 따라, 즉 보강되지 않은 부분의 시료높이에 따라 이방응력 상태화하여 파괴양상이 조금씩 다르게 나타나는 것으로 조사되었다.

표 5. 시험시료의 파괴모습

시험 종류	파괴 전	파괴 후	파괴 후 사진
UUU1			
UUR1			
UUR2			
UUR3			

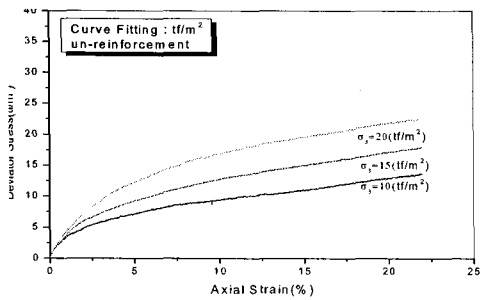


그림 3. UUU1의 전단시험결과

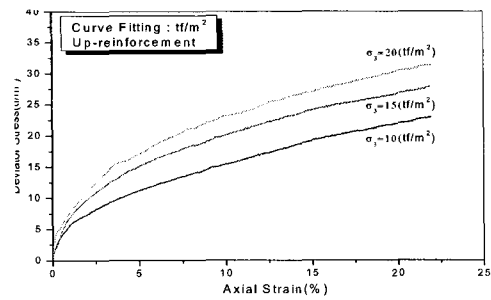


그림 4. UUR1의 전단시험결과

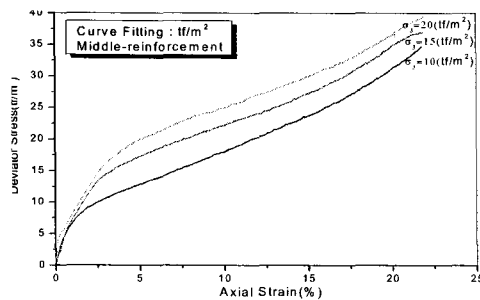


그림 5. UUR2의 전단시험결과

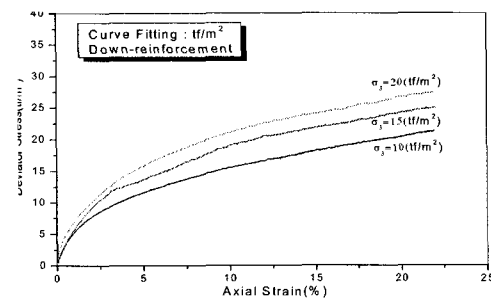


그림 6. UUR3의 전단시험결과

화강풍화토의 경우 전단 전 시료가 완전히 포화되어 있다 하더라도 압밀압력(구속압)에 의해 시료입자가 파괴되어 다소간의 압축이 발생한다는 것이 밝혀져 있다(2004, Ham). 또한 전단 전 완전 포화상태( $B=1$ )를 얻기는 매우 곤란하다. 따라서 화강풍화토는  $\phi_u=0$ 로 되지는 않는다. 또한 본 실험결과를 바탕으로 강도정수(strength parameter)의 산출은 Mohr-Coulomb의 파괴기준(failure criteria)인  $\tau_f = c + \sigma_f \tan \phi$  식으로 전단강도정수( $c$ )를 구하여 산출하였다. UU시험에서는 변형률 증가에 따라 전단 응력이 지속적으로 증가하나 최대응력점은 나타나지 않았다. 따라서 변형률 5, 10, 15, 20%에서의 응력상태를 각각의 구속압에 대해 선형회귀 분석하여 가상의 가상파괴포락선을 조사하였다. 이러한 결과를 요약하여 표 6에 정리하였고, 변형률 15%에 대한 결과를 그림 7에 나타내었다. 이러한 결과로부터 모든 변형률에서 산출한 가상의 파괴포락선은 무보강토에 비해 상당히 크게 나타나고 있으며, 보강재를 중간에 매입한 보강형태의 시료가 가장 큰 보강효과를 보이고 있다. 그러나 보강재의 상하단부 배치에 따른 차이는 거의 없다. 보강효과로서는 내부마찰각의 증가보다는 점착력 성분의 증가가 두드러진다. 또한 변형률이 증가할수록 점착력 성분의 증가가 더욱 커진다. 그러나 보강재 배치가 중앙에 있는 UUR2의 경우, 증가경향이 두드러지고 상하단 배치의 경우 그 증가경향이 그다지 크지 않게 나타나고 있다.

표 6. 각각의 변형률에 따른 가상파괴포락선

변형률 (%)	시험 형태	점착력 ( $c$ ), $tf/m^2$	내부마찰각( $\phi$ )	가상파괴포락선
5	UUU1	0.75	11.50	$\tau_5 = 0.75094 + 0.20356 \sigma_v$
	UUR1	2.17	12.87	$\tau_5 = 2.16839 + 0.2285 \sigma_v$
	UUR2	2.17	14.83	$\tau_5 = 2.16927 + 0.2647 \sigma_v$
	UUR3	3.09	10.98	$\tau_5 = 3.08925 + 0.19409 \sigma_v$
10	UUU1	0.67	15.24	$\tau_{10} = 0.66907 + 0.27245 \sigma_v$
	UUR1	2.91	15.52	$\tau_{10} = 2.90871 + 0.27768 \sigma_v$
	UUR2	4.18	14.51	$\tau_{10} = 4.18202 + 0.2589 \sigma_v$
	UUR3	3.60	14.05	$\tau_{10} = 3.59778 + 0.25029 \sigma_v$
15	UUU1	0.77	16.82	$\tau_{15} = 0.76924 + 0.30225 \sigma_v$
	UUR1	4.97	16.59	$\tau_{15} = 4.79193 + 0.29791 \sigma_v$
	UUR2	6.69	13.42	$\tau_{15} = 6.69202 + 0.23861 \sigma_v$
	UUR3	4.03	15.89	$\tau_{15} = 4.02625 + 0.28464 \sigma_v$
20	UUU1	1.40	16.82	$\tau_{20} = 1.39851 + 0.30225 \sigma_v$
	UUR1	4.79	16.59	$\tau_{20} = 4.79193 + 0.29791 \sigma_v$
	UUR2	10.41	11.73	$\tau_{20} = 10.40917 + 0.2077 \sigma_v$
	UUR3	4.77	16.59	$\tau_{20} = 4.76566 + 0.29793 \sigma_v$

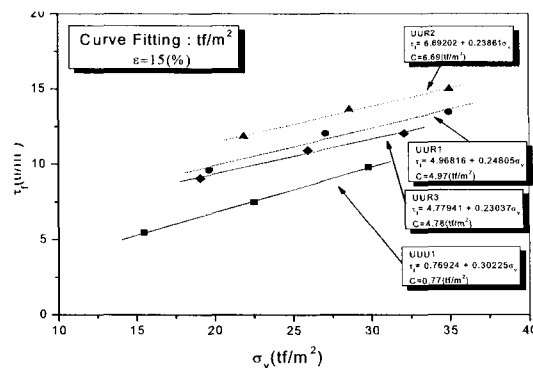


그림 7. 변형률 15%에서의 응력상태에 따른 가상파괴포락선

#### 4 초기반복하중 시험결과

보강토 구조물을 시공할 경우, 약 30cm 두께의 각 층 성토시 다짐성토를 위해 다양한 다짐장비가 사용되고, 시공 완료 후에도 외적인 환경에 의해서 보강토 구조물은 다양한 진동하중을 받게 된다. 반복하중 상태에서 지반구조물의 변형률을 신뢰성 있게 평가하기 위하여 흙의 변형특성에 대한 연구결과에 의하면 반복하중이 가해지는 상태에서 지반이 경험하는 변형률의 크기는 최대 0.5% 미만이고 대부분의 지반이 0.1% 이하의 저변형률 거동을 보임이 밝혀졌다(Burland, G.G. 1989). 따라서 본 시험에서는 현장 여건에 부합되도록 시험을 수행하기 위하여 반복하중에 의한 최대변형률의 크기를 0.5%로 설정하여 반복하중을 200초(0.25Hz) 동안 가한 다음, 정하중 상태로 전환하여 전단시험을 수행하였다. 시험결과는 그림 8~11에 나타내었다. 변형률이 증가함에 따라 하중도 계속적으로 증가하는 경향은 정하중 상태의 실험과 유사한 양상을 보여주고 있다. 또한 정적실험 결과와 동일하게, 보강재의 배치가 중앙에 있는 경우(DUUR2), 변형률 15% 이후 응력이 다시 증가하는 경향을 보이고 있다. 각 그림 오른쪽에 반복재하에 의한 초기부분의 응력-변형 관계를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 구속응력  $10tf/m^2$ 의 경우 반복재하시 변형률은 최대 0.5%이나, 구속응력이 커짐에 따라 반복재하시의 변형률은 점차 작아지고 있다. 이것은 반복재하 시간과 진동수를 각 시험에서 일정하게 유지한 관계로 반복변형률에 약간의 오차가 발생하였으나, 결과 해석에는 커다란 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

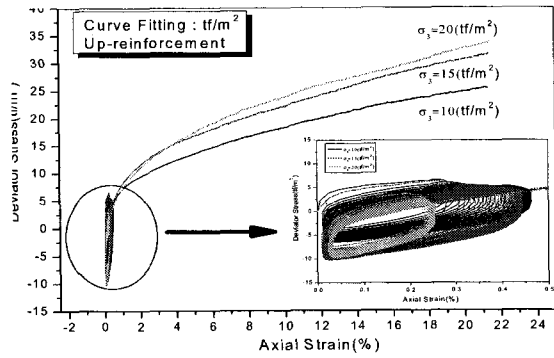
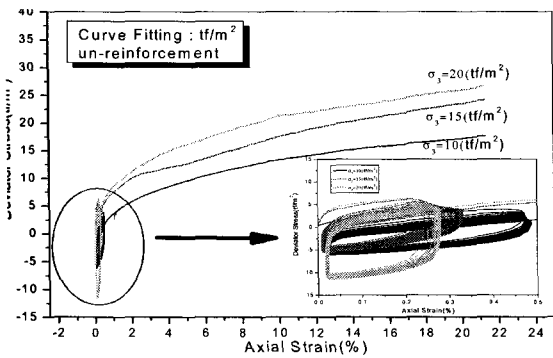


그림 8. 반복하중 후 전단시험결과(DUUU1)    그림 9. 반복하중 후 전단시험결과(DUUR1)

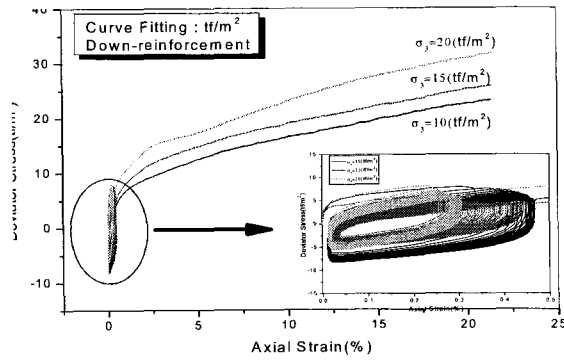
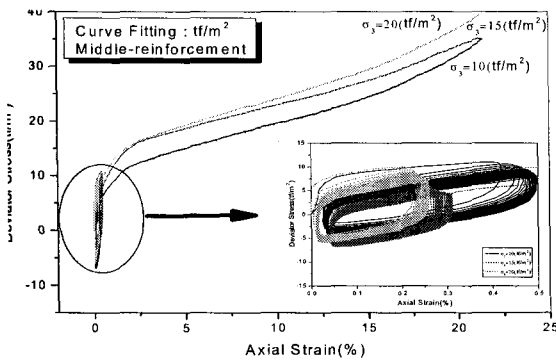


그림 10. 반복하중 후 전단시험결과(DUUR2)    그림 11. 반복하중 후 전단시험결과(DUUR3)

## 5 결론

화강풍화토와 토목섬유(부직포)를 이용하여 비압밀비배수 삼축압축(UU)시험을 무보강 시료와 보강재 배치위치에 따라 4가지 형태의 시료로 구분하여 지반상황을 고려한 구속압( $\sigma_3$ )을 가했으며, 정적하중과 초기동적반복하중으로 구분하여 시험을 실시하였다. 이러한 시험결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

가. 비압밀비배수 조건임에도 불구하고 구속압력이 증가함에 따라 축차응력이 증가한다. 이것은 구속압에 의한 압밀시 및 전단시 화강풍화토의 파쇄특성에 의거 압축되기 때문이다.

나. 비배수 조건하에서의 보강 화강풍화토의 전단강도 증가는 주로 점착력성분 증가에 기인하고, 점착력성분의 증가비율은 무보강, 보강의 경우 공히 동적인 경우가 정적인 경우에 비해 약간 크나, 그 차이는 매우 미미하다.

다. 비배수조건하에서의 보강화강풍화토의 내부마찰각 성분은 무보강에 비해 작게 나타난다. 그 차이는 정적하중 경우에 동적인 경우가 더 크다. 그 이유는 화강풍화토의 파쇄특성이 보강의 경우가 더 작기 때문인 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. 조용성, 김유성(2003), "실내모형실험에 의한 녹화보강토벽의 거동분석". 한국지반환경공학회 논문집, 제4권 제1호, pp.11~17.
2. 조용성(2005), "초기반복하중에 의한 토목섬유 보강 화강풍화토의 변형강도특성", 전북대학교 토목공학과 박사학위논문
3. 함태규, 조용성, 김유성(2004), "단입자파쇄특성에 기초한 화강풍화토의 압축특성에 관한 연구". 한국지반공학회논문집, 제20권 제8호.
4. Goto, S., Tatsuoka, F., Shibuya, S., Kim, Y-S. and Sato, T.(1990), "A simple gauge for local strain measurements in the laboratory" Soils & Foundations.
5. N. Unnikrishnan, K. Rajagopal, N.R.Krishnaswamy(2002), "Behaviour of reinforced clay under monotonic and Cyclic loading" Geotextiles and Geomembranes 20 117-133.
6. Krishnaswamy, N.R.,Isaac, T.,(1995). "Liquefaction analysis of saturated reinforced granular soils." Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE 121, 645-651.
7. Hyde, A. F. L., Yasuhara, K., Hirao, K.,(1993) "Stability criteria for marine clay under one-way cyclic loading. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE 119, 1771-1789.
8. Kazuya Yasuhara, Satoshi Murakami, Byung-Woong Song, Seiji Yokokawa, and Adrian F.L.Hyde. (2003), "Postcyclic Degradation of Strength and Stiffness for Low Plasticity Silt", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, p.756-769.