

삼축압축시험을 통한 섬유로 구속된 흙의 응력-변형률-강도 거동 평가

유완규* · 김병일** · 조완제***

Yoo, Wan-Kyu* · Kim, Byoung-Il** · Cho, Wanjei***

Evaluation on Stress-Strain-Strength Behavior of the Textile Encased Soils via Triaxial Compression Tests

ABSTRACT

Recently, there are an increasing number of studies on the method of wrapping the outer wall of granular piles with geosynthetic fibers such as geotextile or geogrid that has a certain level of tensile strength as an alternative method for the ground improvement techniques. In this study, triaxial compression tests are performed on the sand and clay specimen encased with various textiles to evaluate the reinforcing effect with regard to the tensile strength of the textile. Furthermore, triaxial compression tests are performed on the clay specimen inserted by sand only and sand encased with geosynthetics to compare behavioral differences between the conventional sand compaction pile and geosynthetic encased sand pile with regard to the replacement ratio, a_s and the tensile strength of the geosynthetics. Based on the experimental results, the strength enhancement due to the textile is affected by the longitudinal tensile strength rather than the transverse one of the applied textile. The effect of the confinement by the textile encasement results in the large increase of the cohesions. The overall behaviors, such as shear strength, pore pressure parameter at failure and stress ratio, of the geosynthetic encased sand pile is quite different from those of the conventional sand compaction pile.

Keywords : Geosynthetics, Triaxial compression test, Replacement ratio, Tensile strength, Shearing behavior

초 록

기존의 연약지반 개량공법의 대체공법으로 유럽과 국내에서는 소정의 인장강도를 갖는 토목섬유로 골재말뚝의 외벽을 감싸는 공법에 대한 연구가 많이 증가하였다. 이 연구에서는 이와 같은 공법에서 골재말뚝의 외벽을 감싸는 원주형 섬유의 인장강도에 따른 지반보강 효과 및 보강 메커니즘 등을 파악하기 위하여 모래-팩, 점토-팩 복합토에 대한 삼축압축시험을 실시하였다. 또한 모래다짐말뚝공법을 모사하는 모래-점토 복합토와 모래다짐말뚝을 원주형 섬유로 보강한 모래-점토-팩 복합토에 대한 삼축압축시험을 실시하여 치환율(a_s)과 인장강도(T_a)에 따른 보강효과와 거동의 차이를 비교하였다. 시험결과 섬유의 보강효과로 인한 강도증가는 섬유의 수평방향 인장강도와 밀접한 관계가 있고, 섬유에 의한 구속응력 증가효과($\Delta\sigma_3$)에 의해서 점착절편(c, c')의 증가효과가 매우 크게 발생하는 것으로 나타났다. 또한, 모래다짐말뚝이 토목섬유로 보강된 경우(모래-팩-점토)와 그렇지 않은 경우(모래-점토)를 비교해 볼 때 삼축압축시 전단거동(전단강도, 파괴시 간극수압계수, 응력비 등)에 있어서 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다.

검색어 : 원주형 섬유, 삼축압축시험, 치환율, 인장강도, 전단거동

* 정희원 · 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라연구실 수석연구원 (lyu5553@kict.re.kr)

** 정희원 · 교신저자 · 명지대학교 토목환경공학과 교수 (Corresponding Author · Myongji University · bikim@mju.ac.kr)

*** 정희원 · 단국대학교 토목환경공학과 조교수 (jei0421@dankook.ac.kr)

Received December 13 2012, Revised January 10 2013, Accepted February 4 2013

1. 서론

연약지반 개량을 위해서 기존에 주로 사용되던 공법을 대체하기 위해서 유럽과 국내에서는 소정의 인장강도를 갖는 지오텍스타일(geotextile) 또는 지오그리드(geogrid) 등의 토목섬유로 골재말뚝(granular pile) 외벽을 감싸는 공법에 대한 연구가 많이 증가하였다. 이와 같은 토목섬유로 제작된 팩(pack) 형태의 보강재는 외부하중에 의한 말뚝 벌짐(bulging) 시 토목섬유에서 발휘되는 링인장강도(ring or hoop tensile force)를 통해 말뚝 수평방향 변형을 억제하고 수평 저항력을 증가시키는 것으로 알려져 있다.

토목섬유를 이용한 흙의 외부 보강효과에 대한 연구는 Al-Refeai(1985)의 일축압축시험을 이용한 내부, 외부 보강효과 비교 연구를 통해 본격적으로 시작되었는데, “jacketed stone columns”이라는 명칭을 붙인 시료의 삼축압축시험연구(Kabir & Alamgir, 1988)를 시작으로 현재의 토목섬유 보강 골재말뚝(granular pile)과 유사한 시험모델에 대한 연구가 시작되었다. 그 후에도 많은 유사 연구들이 진행되어 Katti et al.(1993)은 입자개념을 기본으로 하여 토목섬유로 보강된 쇄석기둥이 시공된 연약지반에 발생하는 개량효과에 대한 이론을 제안한 바 있다. 이 후 많은 연구자들이 모형시험과 수치해석적 연구를 통해 토목섬유를 보강한 모래 또는 자갈(쇄석)말뚝에 대한 연구(Madhav et al., 1994 ; Al-Joulani, 1995 ; Raithel et al., 2000, 2002, 2008 ; di Prisco, C. et al., 2006 ; Ayadat & Hanna, 2005 ; Malarvizhi & Ilamparuthi, 2004 ; Murugesan et al., 2006, 2007 ; Wu et al., 2009 ; Lo et al., 2009)를 수행하였고, 이에 대한 결과로 토목섬유로 모래 또는 자갈(쇄석)말뚝을 보강한 모델에 대한 압축강도와 수치해석적 모델, 하중-변형률 관계, 연약지반 침하, 장기거동(creep)에 관한 산정식 등이 제안되었다. 특히 최근 연구내용을 살펴보면 주로 일반적인 토목섬유에 비해 강도와 강성이 큰 지오그리드를 보강한 쇄석기둥의 등가원주(unit cell)개념에 대한 수치해석적 연구가 주를 이루고 있고 기존 모래다짐말뚝 공법을 토목섬유로 보강한 조건에 대한 연구결과는 국내·외에 그리 많지 않다.

이 연구에서는 모래다짐말뚝공법(SCP)의 대체 공법으로 토목섬유 보강 모래다짐말뚝(팩말뚝)이 시공된 복합지반에서 치환율(a_s), 토목섬유 인장강도(T_a)가 토목섬유 보강 모래다짐말뚝의 거동에 미치는 영향을 파악하고자 원주형 섬유로 보강된 다양한 조건

복합토에 대한 삼축압축시험을 실시하였다. 원주형 섬유의 지반보강 효과 및 보강 메커니즘을 파악하기 위하여 모래와 점토를 원주형 섬유로 보강한 모래-팩, 점토-팩 복합토에 대한 삼축압축시험을 실시하였으며, 보강제인 섬유의 인장강도를 달리하여 섬유의 인장강도 변화에 따른 복합토의 전단강도특성 변화를 파악하고자 하였다. 또한 모래다짐말뚝공법을 모사하는 모래-점토 복합토와 모래다짐말뚝을 원주형 섬유로 보강한 모래-팩-점토 복합토를 치환율(a_s)과 인장강도(T_a)를 달리하여 조성한 후 삼축압축시험을 실시하여 원주형 섬유로 보강된 모래다짐말뚝의 치환율과 인장강도에 따른 보강효과와 거동의 차이를 비교해 보고자 하였다.

2. 삼축압축시험

2.1 시험에 사용된 재료

2.1.1 시험에 사용된 흙

시험에 사용된 흙은 부산에서 채취한 해성점토와 2mm이하로 체가름한 모래를 사용하였다. 점토의 경우 균질하고 포화된 시료를 제작하기 위해서 불순물을 제거한 후 끓여서 준비하였다. 시험에 사용한 흙의 특성값을 정리하면 Table 1과 같고, 입도분포 곡선은 Fig. 1과 같다.

2.1.2 시험에 사용된 섬유

이 연구에서는 모래-팩, 모래-점토 시료와 모래-팩-점토 시료에

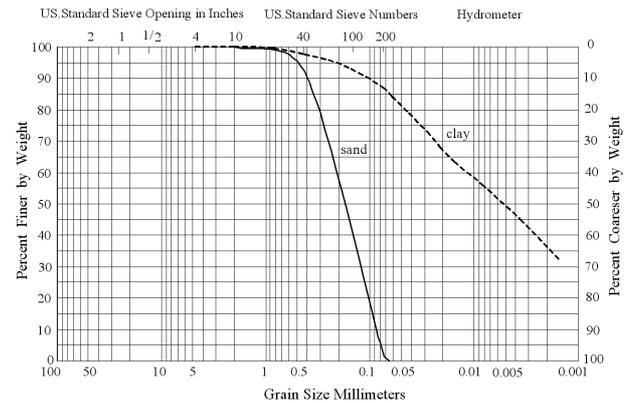


Fig. 1. Grain size distribution curves

Table 1. Soil properties

	Specific gravity, G_s	Atterberg limits		coefficient of consolidation, c_v (cm ² /sec)	Max. dry density, $\gamma_{d\max}$ (kN/m ³)	Min. dry density, $\gamma_{d\min}$ (kN/m ³)	Cohesion (kPa)		Friction angle (ϕ°, ϕ'°)		USCS
		LL(%)	PI(%)				c	c'			
clay	2.72	63.8	35	1.3×10^{-4}	-	-	0	0	15.9	27.4	CH
sand	2.68	-	-	-	18.17	12.57	0	0	38.3		SP

Table 2. Tensile strength of the textile used for triaxial tests with sand-pack and clay-pack specimen

Sample		CT-1	CT-2	CT-3	CT-4	CT-5	CT-6
Tensile strength, T_a (N/5cm)	Longitudinal direction	1110	368	503	42.2	201	759
	Transverse direction	425	237	300	18.3	202	559
Tensile elongation (%)	Longitudinal direction	13.9	8.10	14.7	35.2	10.7	13.2
	Transverse direction	15.9	7.60	9.08	42.3	7.36	13.4

Table 3. Seam strength of textiles used for triaxial tests with sand-pack-clay specimen

Sample	Textiles used for tests	
	SCT-1	SCT-2
Seam strength(N/5CM)	719.1	581.7

대해서 각기 다른 섬유를 적용하였다. 이렇게 시료 종류에 따라 다른 섬유를 사용한 이유는 기존 토목섬유의 기성제품을 사용할 경우 모래-팩 삼축압축시험에서는 보유하고 있는 삼축압축시험기의 하중용량을 초과할 우려가 있었기 때문이다. 모래-팩 삼축압축시험에서는 기존 토목섬유에 비해서 상대적으로 인장강도가 작고 적절한 강도차이를 갖는 일반적인 직포섬유 5종류(CT-1, 2, 3, 5, 6)와 부직포 섬유 1종류(CT-4)를 선정하여 사용하였다. 선정된 섬유의 역학적 특성은 Table 2에 정리하여 나타내었다. Table 2에서 섬유의 인장강도와 인장신도는 광폭스트립법 시험에 의해서 결정된 값으로 인장강도는 시험편이 파단될 때까지 인장시켜 시험편에 가해진 최대하중을, 인장신도는 절단될 때까지 늘어난 시험편 길이의 증가를 파지거리에 대한 백분율로 표시한 값이다. 경사 및 위사방향은 섬유 제조공정상에서 결정되는 방향이며, 인장강도 단위는 시험편의 폭 5cm에 대한 인장하중을 측정할 값이므로 'N/5cm'를 사용한다.

한편 모래-팩-점토 삼축압축시험에서는 토목섬유회사의 기성제품 중 적절한 강도차이를 갖는 2개의 폴리프로필렌(SCT-1, SCT-2) 토목섬유를 선택하여 사용하였다. 두 토목섬유에 대해서 광폭스트립법으로 인장강도시험을 실시하였으며 섬유의 인장강도에 비해서 봉합부의 인장강도가 작은 것으로 확인되었다. 시험에 사용된 토목섬유 샘플은 flat봉합(Koerner, 1986)을 하였으며 봉합부의 인장강도가 모래-팩-점토 시료의 파괴에 영향을 미치는 강도로 고려하였다. Table 3은 모래-팩-점토 삼축압축시험에 사용된 토목섬유의 봉합강도를 정리하여 나타낸 것이다.

2.2 시험에 사용된 장비

이 연구에서는 미국 Geocomp사에서 제작한 삼축압축시험기를 사용하였으며, 이 삼축압축시험기는 10kN의 하중까지 재하가 가능하다. 삼축압축시험에 사용된 물은 용존기포제거기를 이용하여

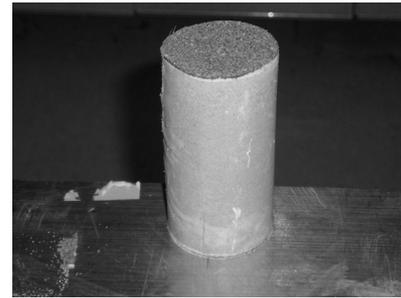


Fig. 2. Sand-pack composite soil

용존기포를 제거한 후 사용하였다. 삼축압축시험에 사용된 시료는 원심력 압밀시험기를 이용하여 제작하였으며 이 시험기는 기존 원심력 모형시험기를 응용하여 명지대학교 지반공학연구소에서 개발한 것이다. 이 시험기를 이용하여 제작된 점토시료는 회전원심력에 의해 예압밀되고 최종 압밀단계에서 시료바닥에 작용하는 선행압밀압력은 약 80kPa로 산정되었다.

2.3 시험방법

2.3.1 모래-팩 복합토

모래-팩 복합토의 삼축압축시험은 압밀-비배수(CU) 시험방법을 적용하여 실시하였다. 시료크기인 지름 5cm, 높이 10cm에 맞게 섬유를 재단하여 봉합한 후 투명케이싱을 이용하여 제작된 팩 내부에 모래시료를 상대다짐도 75%로 다져서 Fig. 2와 같이 모래-팩 복합토를 조성하였다. 조성된 복합토는 구속압력 100kPa, 200kPa, 300kPa로 등방압밀과정을 거쳐 비배수상태에서 변위를 제어하여 0.1%/min의 전단속도로 변형을 15%까지 시험을 실시하였다.

2.3.2 점토-팩 복합토

점토-팩 복합토의 삼축압축시험은 비압밀-비배수(UU) 시험방법을 적용하여 실시하였다. 불순물이 제거된 점토시료를 액성한계 이상의 함수비가 되도록 물을 붓고 충분히 교반한 후 점토시료의 기포를 제거하기 위하여 시료를 끓여서 슬러리 상태(평균 함수비 = 70±2%)의 점토를 준비하였다. 준비된 점토는 원통형 압밀상자에 담아 회전원심력을 단계적으로 증가시키면서 시료 성형이 용이하

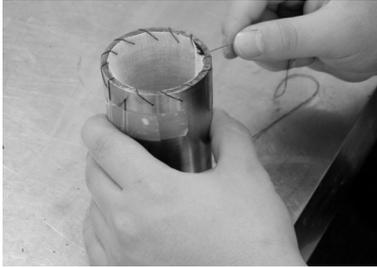


Fig. 3. Pack combine with steel casing

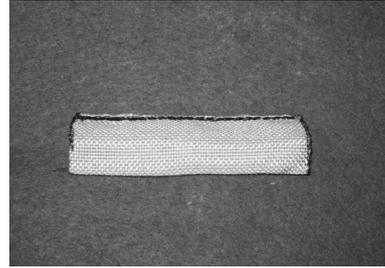


Fig. 5. Sewed pack for sand-pack-clay composite soil



Fig. 4. Clay-pack composite soil



Fig. 6. Frozen SCP for sand-clay composite soil

도록 예압밀하였다. 점토-팩 복합토를 조성하기 위하여 미리 제작된 팩(모래-팩 삼축압축시험에 사용된 팩과 동일한 방법으로 제작)을 Fig. 3과 같이 강제 케이싱에 실로 묶어 연결한 후에 성형된 시료를 케이싱 내부로 삽입하여 Fig. 4와 같이 점토-팩 복합토를 조성하였다. 조성된 시료는 100kPa, 200kPa 두 종류의 구속압력을 가하여 1.0%/min(변형률/시간)의 전단속도로 변형률 15%까지 비압밀-비배수(UU) 삼축압축시험을 실시하였다.

2.3.3 모래-팩-점토 모래-점토 복합토

모래-팩-점토 및 모래-점토 복합토는 압밀-비배수(CU) 시험방법을 적용하여 삼축시험을 실시하였다. 점토시료를 성형한 후 치환율(a_s) 10%와 20%에 맞는 크기의 케이싱을 점토 중앙에 삽입한 후 시료의 교란을 최소화 하면서 인발하여 점토시료 중앙에 공동을 만들고, 이 공동을 이용하여 점토시료 중간에 모래다짐말뚝 또는 팩으로 보강된 모래다짐말뚝을 설치하였다. 모래-팩-점토 시료의 경우에는 점토시료의 공동에 치환율에 맞게 미리 재단된 팩(Fig. 5 참조)을 삽입하였고, 점토시료에 큰 교란이 발생하지 않도록 이 팩 내부에 70%의 상대밀도로 모래를 다짐하여 채워 넣는 방법으로 모래-팩-점토 시료를 조성하였다. 또한 모래-점토 시료의 모래말뚝의 경우에는 동일한 상대밀도를 적용하여 모래시료($w = 10%$)를 다짐하여 미리 열린 말뚝(Fig. 6 참조)을 공동에 삽입하여 모래-점토 시료를 조성하였다. 이러한 방법으로 조성된 모래-팩-점토 및 모래-점토 시료(Fig. 7~Fig. 8 참조)를 일정 압력(100, 200, 300kPa)으로 등방압밀한 후 비배수 상태에서 변위를 제어하여

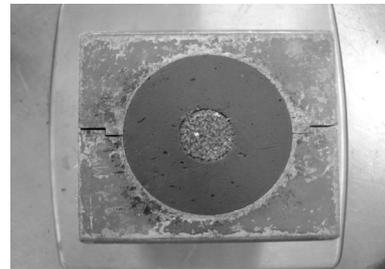


Fig. 7. Sand-clay composite soil

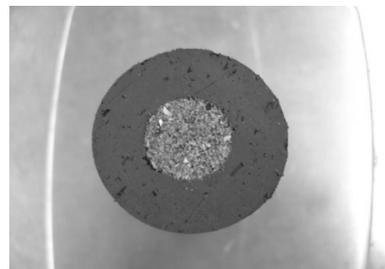


Fig. 8. Sand-pack-clay composite soil

0.1%/min의 전단속도로 모래-점토 시료의 경우에는 변형률 15%까지, 모래-팩-점토 시료의 경우에는 변형률 20%까지 삼축압축시험을 실시하였다. 이와 같이 시료 종류에 따라서 변형률을 다르게 적용한 이유는 변형률 15% 이전에 파괴가 발생한 모래-점토 시료와는 다르게 모래-팩-점토 시료에서는 변형률 15% 부근 또는 이후에 치환율과 토목섬유 종류에 따라서 거동에 차이를 보였기 때문이다.

Table 4. Strength parameter of sand-pack composite soils

Sample	Longitudinal tensile strength, T_{ah} (kN/m)	Cohesion, c (kPa)	Friction angle, ϕ (°)
sand	-	0	38.5
CT-1	8.5	368	38.2
CT-2	4.74	313	38.1
CT-3	6.0	341	38.1
CT-4	0.844	118	38.5
CT-5	4.04	302	38.5
CT-6	11.18	395	38.2

Table 5. Longitudinal tensile strength/cohesion (T_{ah}/c) for sand-pack composite soils

Sample	T_{ah}/c (m)	Sample	T_{ah}/c (m)
CT-1	0.0231	CT-4	0.0072
CT-2	0.0151	CT-5	0.0134
CT-3	0.0176	CT-6	0.0283

3. 시험결과 및 분석

3.1 모래-팩 복합토

시험에 사용된 보강섬유에 대한 모래-팩 복합토의 삼축압축시험을 통해서 결정된 최대축차응력 결과를 이용하여 Mohr-Coulomb의 파괴규준에 따라 결정된 모래-팩 복합토의 강도정수를 Table 4에 정리하여 나타내었다. Table 4에서 보는 바와 같이 모래-팩 복합토에서 외벽을 둘러싼 팩의 종류(인장강도의 변화)에 따라 복합토의 내부미찰각은 보강을 하지 않은 모래시료의 경우와 비교할 때 거의 차이가 없는 반면에 점착력의 증가는 매우 확연하게 나타나고 있다. 따라서 삼축압축시험 시 증가한 축차응력의 크기는 복합토의 점착력 증가가 그 원인이라고 볼 수 있다. 모래를 둘러싼 섬유 수평방향인장강도가 전단과정에서 모래의 수평방향 팽창을 억제하는 효과를 발휘하여 점착력 증가 효과로 나타나게 되므로 보강재인 섬유의 수평방향 인장강도는 모래-팩 복합토의 전단강도와 밀접한 상관관계가 있다고 할 수 있다. 보강재인 섬유의 위사방향이 시료에 수평한 방향으로 향하도록 시료를 조성하여 시험을 실시하였으므로 Table 2에서의 위사방향에 대한 인장강도를 수평방향 인장강도로 결정하였다. 다만 CT-4 섬유의 경우에는 적절한 간격의 인장강도에 대한 결과를 분석하기 위하여 경사 방향이 수평방향을 향하도록 하여 경사방향의 인장강도를 수평방향 인장강도로 결정하였다. 이렇게 결정된 섬유의 수평방향 인장강도와 복합토의 점착력 관계로부터 쌍곡선 함수식을 유도하여 선형화하면 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{T_{ah}}{c} = a + bT_{ah} \quad (1)$$

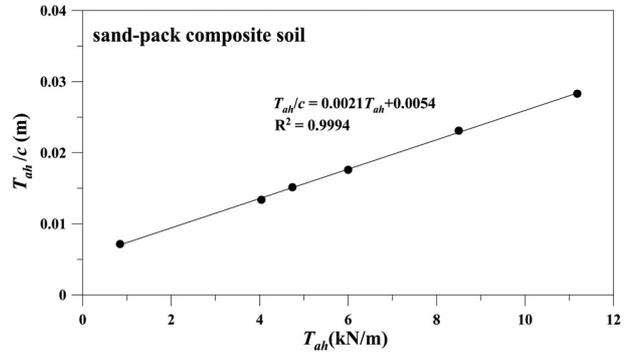


Fig. 9. Relationship between T_{ah}/c and T_{ah}

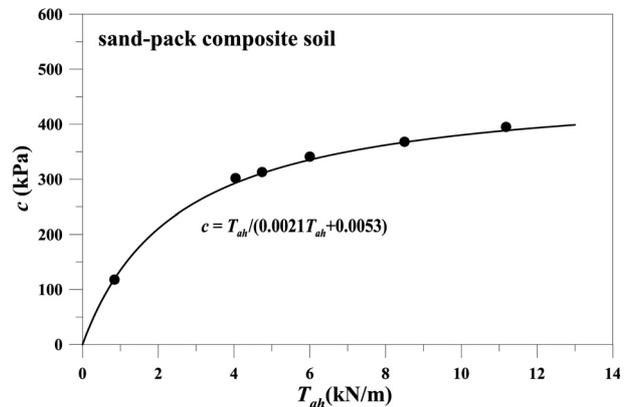


Fig. 10. Relationship between c and T_{ah}

여기서, T_{ah} : 보강섬유 수평방향 인장강도
 c : 모래-팩 복합토의 점착절편
 a, b : 선형화 직선의 절편 및 기울기 상수

모래-팩 복합토의 점착절편 c 에 대한 T_{ah} 와 T_{ah}/c 의 관계를 정리하여 Table 5에 나타내었고 이를 회귀분석하여 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에서 회귀분석을 통해 산정된 T_{ah} - T_{ah}/c 상관관계는 식 (2)와 같다. 식 (2)를 이용하여 쌍곡선 함수를 구하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (3)을 이용하여 섬유의 수평방향 인장강도

(T_{ah} , kN/m)와 복합토의 점착력(c , kPa) 관계를 그래프로 나타내면 Fig. 10과 같다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 모래다짐말뚝 보강을 위한 팩 재료로 사용된 섬유의 수평방향 인장강도는 식 (3)과 같이 쌍곡선 형태로 모래-팩 복합토의 점착력을 증가시키는 것으로 나타났다.

$$T_{ah}/c = 0.0021 T_{ah} + 0.0054 \quad (2)$$

$$c = \frac{T_{ah}}{0.0054 + 0.0021 T_{ah}} \quad (3)$$

여기서, c : 모래-팩 복합토 점착절편(kPa)
 T_{ah} : 팩의 수평방향 인장강도(kN/m)

3.2 점토-팩 복합토

점토-팩 복합토의 삼축압축시험은 모래-팩 복합토에서 보강된 섬유인 인장강도(T_a)가 복합토의 비배수전단강도 증가(Δc_u)에 어떠한 영향을 주는지 파악하기 위하여 실시하였다. 인장강도가 서로 다른 6종류의 섬유로 점토 외벽을 보강한 점토-팩 복합토와 보강을 하지 않은 점토에 대해 비압밀-비배수 삼축압축시험(UU)을 실시하였다.

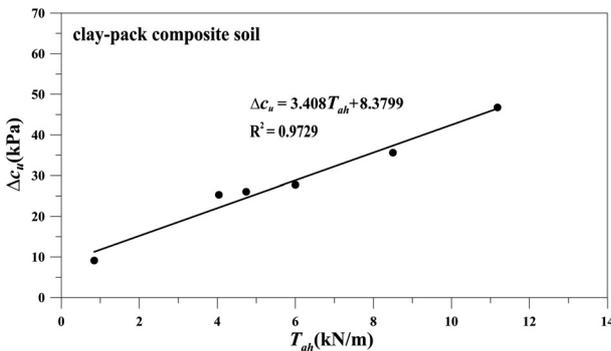


Fig. 11. Relationship between Δc_u and T_{ah}

점토-팩 복합토 시료들의 각 구속응력에 대한 최대축차응력을 이용하여 Mohr-Coulomb의 파괴규준에 따라 산정한 점토-팩 복합토의 비배수전단강도(c_u)와 무보강 점토의 비배수 전단강도(9.65kPa)에 대한 점토-팩 복합토의 비배수전단강도 증가량(Δc_u) 및 각 섬유의 수평방향인장강도(T_{ah})를 Table 6에 정리하여 나타내었다. 또한 팩의 수평방향 인장강도와 복합토의 비배수 전단강도 증가량의 관계를 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11에서 보는 바와 같이 섬유의 수평방향 인장강도와 점토-팩 복합토의 비배수전단강도 증가량(Δc_u)의 관계는 선형적으로 증가하며 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta c_u = 3.408 T_{ah} + 8.379 \quad (4)$$

여기서, Δc_u : 비배수 전단강도의 증가량(kPa)
 T_{ah} : 팩의 수평방향 인장강도(kN/m)

모래-팩에 대한 삼축압축시험결과와 점토-팩에 대한 삼축압축시험결과를 종합해 볼 때 소정의 인장강도를 갖는 섬유로 팩을 만들어 내부를 속채움할 경우 속채움 흙의 종류와 상관없이 섬유의 보강효과에 의해 점착절편 증가효과가 발생하는 것으로 판단된다.

3.3 모래-팩 점토, 모래-점토 복합토

시험에 사용된 점토시료의 강도정수는 Table 1에 나타낸 바와 같다. 또한 삼축압축시험(CU)결과 변형률 경화현상을 보이는 정규압밀점토로 파괴시간극수압계수(A_f) 역시 구속압력 100, 200, 300kPa에 대하여 일반적인 정규압밀점토의 파괴시간극수압계수인 0.5~1.0(Das, 2006)을 벗어나지 않는 0.76, 0.79, 0.77의 값으로 결정되었다.

3.3.1 모래-점토 복합토

연약한 점성토지반에 모래다짐말뚝(SCP)이 시공된 복합지반을 모사한 두 종류 치환율($a_s = 10, 20\%$)의 모래-점토 복합토에 대하

Table 6. Undrained shear strength and longitudinal tensile strength for clay-pack composite soils

Sample	Longitudinal tensile strength, T_{ah} (kN/m)	Undrained shear strength, c_u (kPa)	Undrained shear strength increment, Δc_u (kPa)
clay	-	9.65	-
CT-1	8.5	45.26	35.61
CT-2	4.74	35.7	26.05
CT-3	6.0	37.4	27.75
CT-4	0.844	18.77	9.12
CT-5	4.04	34.95	25.3
CT-6	11.18	56.4	46.75

Table 7. Strength parameter, strain and pore pressure parameter at failure of sand-clay composite soils

	Confined pressure (kPa)	Cohesion(kPa)		Friction angle(°)		Strain at failure, ϵ_f (%)	Pore pressure parameter at failure, A_f
		c	c'	ϕ	ϕ'		
sand-clay composite soil ($a_s = 10\%$)	100	8	5	16.1	29.5	14.12	0.570
	200					11.28	0.620
	300					11.52	0.720
sand-clay composite soil ($a_s = 20\%$)	100	21.5	0	18.5	31.5	7.83	0.218
	200					8.71	0.334
	300					8.53	0.436

Table 8. Strength parameter, strain and pore pressure parameter at failure of sand-pack-clay composite soils

	Replacement ratio, a_s (%)	Confined pressure (kPa)	Seam strength (N/5cm)	Cohesion(kPa)		Friction angle(°)		Strain at failure, ϵ_f (%)	Pore pressure parameter at failure, A_f
				c	c'	ϕ	ϕ'		
SCT-1	10	100	719.1	55.0	33.0	21.8	43.0	13.98	0.240
		200						13.99	0.375
		300						15.14	0.413
	20	100		171.3	105.5	26.2	48.2	20.00	0.103
		200						20.00	0.178
		300						19.76	0.218
SCT-2	10	100	581.7	56.4	40.8	23.2	43.8	14.82	0.268
		200						16.65	0.312
		300						18.30	0.405
	20	100		178.3	129.8	24.0	42.9	19.87	0.113
		200						18.49	0.198
		300						20.00	0.228

여 압밀-비배수(CU) 삼축압축시험을 실시하여 Table 7과 같은 결과를 얻었다. Table 7에서 보는 바와 같이 모래-점토 복합토에서는 치환율이 증가함에 따라서 점착절편과 전단저항각이 대부분 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 파괴시 간극수압계수는 치환율 증가에 따라서 감소하고 구속압력 증가에 따라서 증가하는 경향을 나타내었다.

3.3.2 모래-팩-점토 복합토

인장강도가 각기 다른 2종류의 토목섬유를 선정하여 모래-점토 복합토와 동일한 치환율 조건으로 모래다짐말뚝 외벽을 보강하는 모래-팩-점토 복합토를 조성하여 압밀-비배수(CU) 삼축압축시험을 실시하였으며, 시험결과로부터 결정된 주요 변수들을 Table 8에 정리하여 나타내었다. Table 8에서 보는 바와 같이 모래-팩-점토 복합토의 경우 치환율 증가에 따라 비배수해석과 유효응력해석 모두에서 점착절편의 변화가 크게 발생하는 것으로 나타났다. 이와 같이 모래-팩-점토 복합토에서 점착절편이 증가하는 경향을 나타내는 것은 모래-팩 복합토에서 점착절편이 증가하는 이유와 유사한

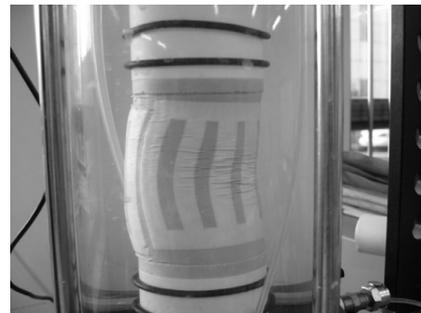


Fig. 12. Buckling failure of sand-pack-clay composite soil

것으로 판단된다. 즉 팽창하면서 파괴가 발생하는 모래다짐말뚝이 섬유인장강도에 의해 구속되어 발생한 전단강도 증가효과인 것으로 판단된다.

전단저항각의 경우 SCT-1 토목섬유를 사용한 모래-팩-점토 복합토에서 점착절편에 비해 상대적으로 변화량이 크지는 않지만 유효응력해석과 비배수해석으로 산정된 전단저항각 모두 증가하는

경향을 나타냈다. 반면 SCT-2 토목섬유를 사용한 복합토의 경우에는 유효응력해석 또는 전응력해석에 따라서 약간 증가하거나 감소하는 경향을 나타냈다. 이러한 경향이 나타난 이유는 모래-팩-점토 복합토에서 모래-점토 복합토의 일반적인 파괴 형태인 벌집파괴가 발생하지 않고 좌굴파괴(Fig. 12 참조)가 발생했기 때문인 것으로 판단된다. 즉, SCT-1 토목섬유는 SCT-2 토목섬유와 비교할 때 인장강도는 크고 인장신도는 작다. 또한, 모래다짐말뚝이 토목섬유로 보강된 팩말뚝 직경이 상대적으로 큰 치환율 20%가 적용된 시료는 치환율 10%가 적용된 시료에 비해서 좌굴파괴에 대한 영향이 상대적으로 작았을 것으로 생각된다. 따라서 이러한 결과와 조건을 종합적으로 판단할 때 좌굴파괴에 대한 영향이 작아질수록 토목섬유의 인장강도, 신도는 모래-팩-점토 복합토의 전단거동에 중요한 요인으로 작용할 것으로 판단된다.

3.3.3 모래-팩-점토 복합토와 모래-점토 복합토 비교

3.3.3.1 변형률-간극수압계수 관계

모래-점토 복합토와 모래-팩-점토 복합토에 대한 변형률과 간극수압계수(A)의 관계를 Fig. 13~Fig. 14에 비교하여 나타내었다. Fig. 13에서 보는 바와 같이 모래-점토 복합토의 간극수압계수는 치환율 증가와 구속압력 감소에 따라 감소하며 과압밀점토와 가까운 거동형태를 나타내었다. 이러한 경향은 비배수 전단시 모래와 점토에 발생하는 간극수압의 변화 형태와 상관관계가 있는 것으로 판단되는데 비배수 전단시 모래에서는 과잉간극수압이 감소하여 부(-)의 간극수압이 발생하는 반면 점토의 경우 전단이 진행됨에 따라 과잉간극수압이 증가하여 두 간극수압의 차이가 상쇄되는 효과가 나타나기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 14에서 보는 바와 같이 모래-팩-점토 복합토에서는 시료의 변형률이 커짐에 따라서 과잉간극수압계수가 초기에 증가한 후 지속적인 감소형태를 나타내었으며 이러한 경향은 모래-점토 복합

토에서와 유사한 거동에 의한 것으로 판단된다. 한편 치환율 10%를 적용한 모래-팩-점토 복합토에서는 파괴가 발생한 후 간극수압계수가 다시 증가하는 경향을 나타내었고 파괴 직후가 뚜렷하게 나타나지 않은 치환율 20%로 조성된 모래-팩-점토 복합토에서는 변형률 증가에 따라 계속적으로 감소하거나 일정한 값으로 수렴해 가는 것으로 나타났다.

파괴시 간극수압계수를 비교해 볼 때 동일한 치환율의 모래-점토 복합토에 비해서 모래-팩-점토 복합토가 상대적으로 작은 값을 나타내었다. 상대적으로 강성이 큰 팩말뚝에 모래다짐말뚝에 비해서 상대적으로 큰 축차응력이 분담되고, 점토층에는 상대적으로 작은 응력이 분담된다. 또한 섬유로 보강된 모래다짐말뚝에서는 보강제인 섬유가 모래의 부피팽창을 억제하는 효과가 발생하게 된다. 따라서 모래-팩-점토 복합토의 모래다짐말뚝에 발생하는 부의 간극수압은 모래-점토 복합토에 비해 상대적으로 크게 발생하게 되고, 점토에 발생하는 간극수압은 상대적으로 작게 발생된다. 그 결과로 파괴시 간극수압계수(A_f)가 상대적으로 작게 산정된 것으로 판단된다.

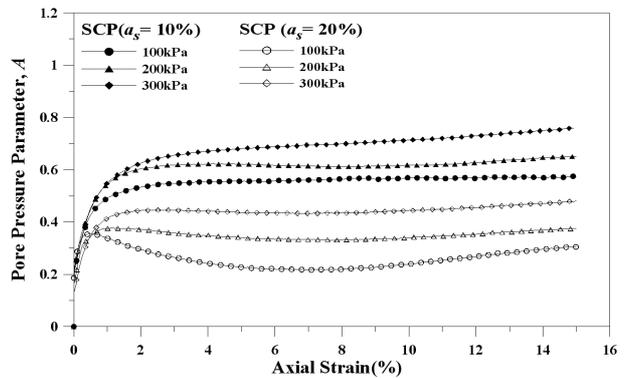


Fig. 13. Relationship between strain and pore pressure parameter for sand-clay composite soils

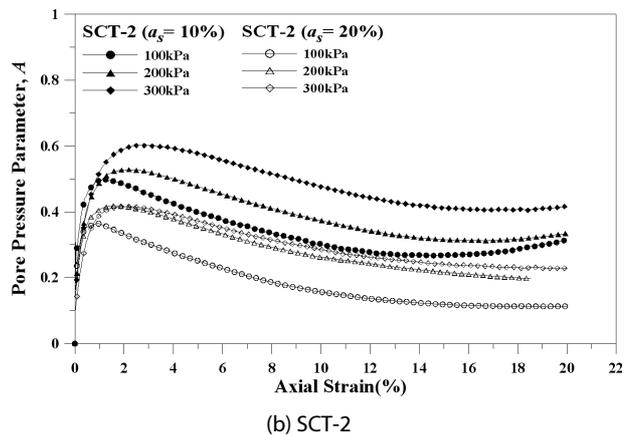
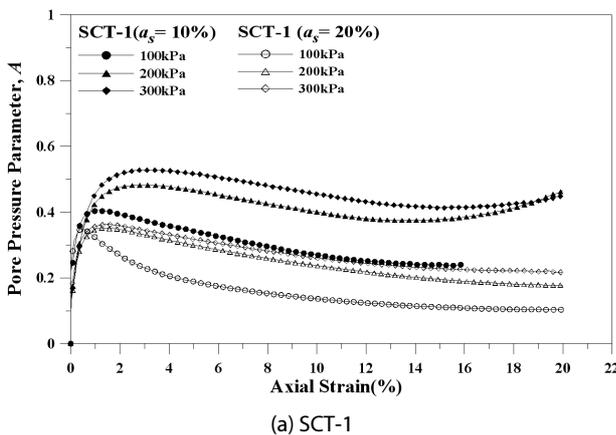


Fig. 14. Relationship between strain and pore pressure parameter for sand-pack-clay composite soils

3.3.3.2 변형률-응력비 관계

삼축압축시험에서 전단 중 발생하는 최대 유효주응력의 증가량($\Delta\sigma_1'$)을 최소 유효주응력 증가량($\Delta\sigma_3'$)으로 나누어 정규화하면 응력비(stress ratio)를 산정할 수 있다. 이러한 응력비는 같은 구속압력조건에서 상대적으로 얼마나 더 큰 유효축차응력($\Delta\sigma_d'$)이 발생하는지 비교하는데 유용하게 사용할 수 있다. Fig. 15에는 모래-점토 복합토에 대한 삼축압축시험을 통해 결정된 변형률에 따른 응력비의 변화를 나타내었다. Fig. 15에 나타낸 바와 같이 응력비는 치환율이 높아질수록 변형 초기에 크게 나타나 변위 초기에 더 큰 최대주응력을 감당하는 것으로 나타났으며, 같은 치환율의 경우 구속압력이 작을수록 응력비가 증가하는 것으로 나타났다. 또한 약 3 정도의 응력비에서 거의 모든 조건에 대한 시료의 응력비가 수렴하는 것으로 나타났다. 한편 모래-팩-점토 복합토에 대한 변형률-응력비 관계는 Fig. 16에 나타내었다. Fig. 16에서 보는 바와 같이 변형률 20% 이전에 파괴가 발생한 치환율 10%의 SCT-1, SCT-2 복합토에서 일정한 값(약 4~7)으

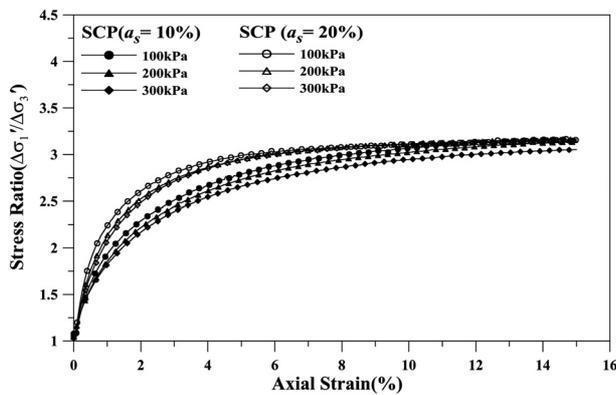
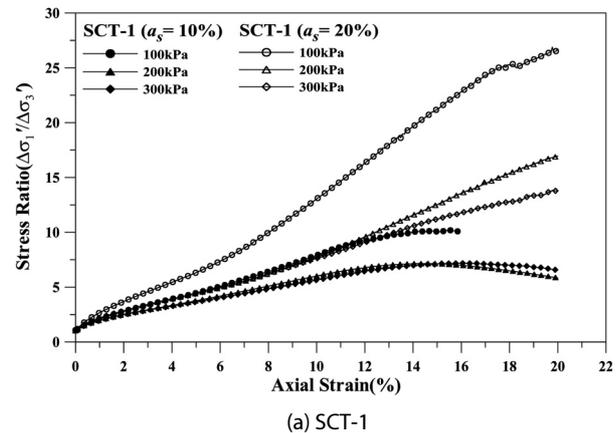


Fig. 15. Relationship between strain and stress ratio for sand-clay composite soils



로 수렴하는 것으로 나타났다. 반면에 치환율 20%로 조성된 두 종류 모래-팩-점토 복합토의 경우 변형률 증가에 따라 계속적으로 응력비가 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 변형률 20% 부근에서 응력비의 증가율이 둔화되는 그래프의 형태로 유추해볼 때 변형률 20% 부근에서 시료는 거의 파괴 상태에 도달한 것으로 판단된다.

3.3.3.3 파괴시간극수압계수 및 강도정수

앞에서 설명한 Table 7과 Table 8을 이용하여 시료 조건과 치환율(a_s) 변화에 따른 파괴시간극수압계수(A_f), 점착절편(c, c') 및 전단저항각(ϕ, ϕ') 변화를 Fig. 17~Fig. 18에 나타내었다. Fig. 17은 치환율과 복합토의 종류에 대한 파괴시간극수압계수(A_f) 변화를 나타낸 것이다. Fig. 17에서 보는 바와 같이 파괴시간극수압계수(A_f)는 모래-점토와 모래-팩-점토 복합토의 모든 경우에서 치환율(a_s) 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내었지만 그 감소 형태는 약간의 차이를 나타내었다. 치환율(a_s) 20%로 조성된 모래-팩-점토 복합토의 경우에 일부 시료들은 거의 0에 근접하는 값을 나타내었다. 이러한 결과를 볼 때 치환율이 더 증가할 경우 모래-팩-점토 복합토의 비배수 전단거동은 사질토의 배수거동과 유사한 결과를 나타낼 것으로 예측된다. 동일한 치환율(a_s)로 조성된 모래-점토와 모래-팩-점토 복합토에 대한 파괴시간극수압계수(A_f)를 비교하면 토목섬유를 보강하지 않은 시료에 비해 토목섬유를 보강한 시료에서 파괴시간극수압계수(A_f)가 작게 산정되었다. 이러한 결과가 나타난 이유는 앞에서 설명한 바와 같이 유사한 과잉간극수압 발생조건에 대해 모래다짐말뚝에 비해 팩으로 보강된 말뚝에 상대적으로 큰 응력이 분담되어 부(-)의 간극수압이 더 크게 발생하고 점토에는 상대적으로 작은 응력이 분담되어 간극수압이 작게 발생했기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 18(a)에는 시료 조건, 치환율(a_s) 변화에 따른 복합토 시료

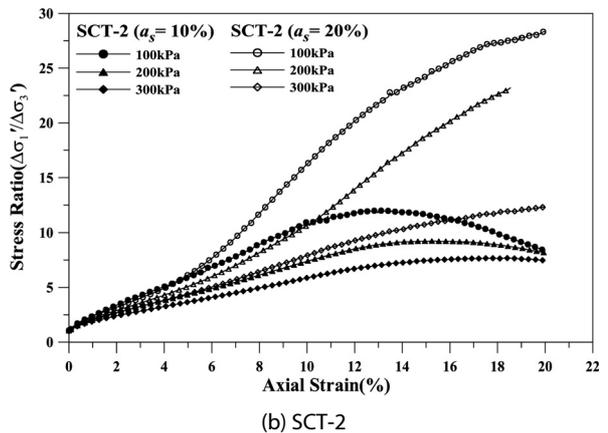


Fig. 16. Relationship between strain and stress ratio for sand-pack-clay composite soils

의 점착절편 변화를 나타내었다. 치환율(a_s) 20%로 조성된 모래-점토 복합토의 유효 점착절편(c')에 대한 결과를 제외하고 모든 조건에서 치환율(a_s) 증가에 따라 점착절편이 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 또한, 모래-팩-점토 복합토의 경우 모래-점토 복합토에 비해 치환율(a_s) 증가에 따른 점착절편의 증가가 매우 크게 발생하는 것으로 나타났다.

Fig. 18(b)는 시료 조건, 치환율(a_s) 변화에 따른 복합토 시료의 전단저항각(ϕ, ϕ') 변화를 나타낸 것이다. Fig. 18(b)에서 보는 바와 같이 모래-팩-점토 복합토의 전단저항각(ϕ, ϕ')은 치환율(a_s) 이 10%로 증가 시에 뚜렷한 증가를 보인 이후 20%로 증가 시에는 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 반면 모래-점토 복합토의 경우에는 치환율(a_s) 증가에 따라서 계속적으로 증가하는 경향을 나타내긴 하지만 그 증가율은 매우 작은 것으로 나타났다.

모래-팩, 점토-팩, 모래-팩-점토 복합토에 대한 삼축압축시험 결과를 종합해 볼 때 원주형 섬유인 팩으로 보강된 흙에서 나타나는 강도증가효과는 전단저항각(ϕ, ϕ')의 증가에 비해서 점착절편

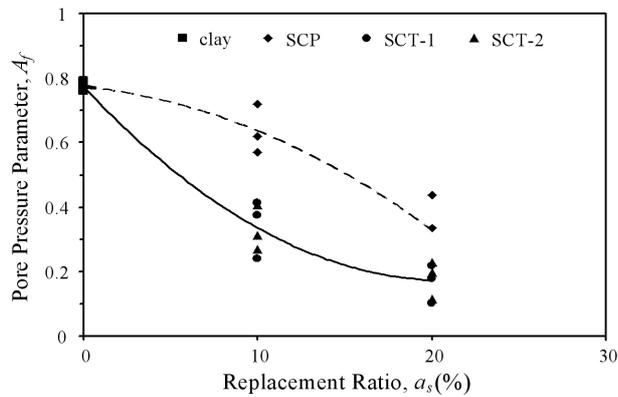
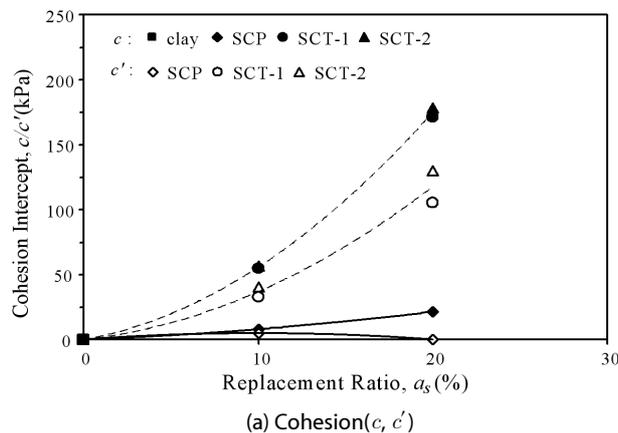


Fig. 17. Pore pressure parameter change according to specimen condition and replacement ratio



(c, c')의 증가로 매우 뚜렷하게 나타났으며 이러한 결과는 팩의 보강으로 인해서 발생한 흙의 부피팽창 억제에 기인하는 것으로 판단된다.

4. 결론

이 연구에서는 원주형 섬유로 보강된 흙의 거동을 파악하고 토목섬유의 모래다짐말뚝 보강효과에 대한 영향을 확인하기 위하여 모래-팩, 점토-팩, 모래-점토, 모래-팩-점토 복합토에 대한 삼축 압축시험(UU 시험 및 CU 시험)을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 삼축압축시험 결과에서 섬유의 보강효과는 섬유의 수평방향 인장강도의 증가에 따라서 모래-팩 시료에서는 점착절편(c), 점토-팩 시료에서는 비배수 전단강도(c_u)의 증가로 나타났다.
- (2) 동일한 치환율의 모래-점토 복합토와 모래-팩-점토 복합토의 파괴시 간극수압계수를 비교해 볼 때 모래-팩-점토 복합토가 상대적으로 작은 값을 나타내었고 이러한 결과는 하중을 상대적으로 크게 분담하는 말뚝강성의 차이(원주형 섬유로 인한 말뚝의 보강효과)에 의한 것으로 판단된다.
- (3) 변형률 증가에 따라 모래-점토 복합토의 응력비($\Delta\sigma_1' / \Delta\sigma_3'$)는 일정한 값(약 3)으로 수렴한 반면에 치환율 10%인 모래-팩-점토 복합토의 경우에는 약 4~7의 값으로 수렴하였고, 치환율 20%가 적용된 경우에는 계속 증가하는 경향을 나타내었다.
- (4) 치환율 20%로 조성된 모래-팩-점토 복합토의 일부 시료에서 파괴시 간극수압계수(A_f)가 거의 0에 근접하였다. 이러한 경향으로 볼 때 치환율이 증가할수록 모래-팩-점토 복합토의 비배수 전단거동은 사질토의 배수거동과 유사한 결과를 나타낼 것으로 예상된다.

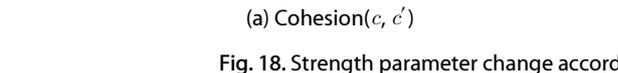


Fig. 18. Strength parameter change according to specimen condition and replacement ratio

- (5) 모래-팩-점토 복합토에 대한 삼축압축시험결과에 의하면 내부 마찰각(ϕ , ϕ')의 증가에 비해 점착절편(c , c')의 증가율이 매우 크게 나타났다. 이러한 결과를 모래-팩, 모래-점토에 대한 시험결과와 종합적으로 고려해 볼 때 원주형 섬유로 흙을 보강한 경우에는 점착절편 증가효과가 뚜렷하게 발생했으며 섬유에 의한 구속응력 증가 효과($\Delta\sigma_3$)에 기인한 것으로 판단된다.
- (6) 삼축압축시험결과로 밝혀진 원주형 섬유의 흙 보강효과와 모래-팩-점토 복합토의 거동특성은 향후 연구예정인 무리형태로 조성된 모형지반에 대한 연구결과와 함께 실제 현장에 시공된 토목섬유 보강 모래다짐말뚝(팩말뚝)의 지지력, 침하 등의 거동에 대한 특성을 파악하고 예측하는데 중요한 기초자료로 사용될 수 있을 것으로 예상된다.

References

- Al-Joulani, M. A. (1995), *Laboratory and analytical investigation of sleeve reinforced stone columns*, Ph.D. thesis, Civil Eng., Carleton Univ., Ottawa, Ontario, Canada.
- Al-Refeai T.O. (1985), *Constitutive behavior of fabric vs. fiber reinforced sand*, Ph.D Thesis, Civil Engineering Dept., Univ. of Michigan, Michigan.
- Ayadat, T., Hanna, A.M. (2005), "Encapsulated stone columns as a soil improvement technique for collapsible soil", *Ground Improvement*, Vol. 9, No. 4, pp. 127-147.
- Das, Braja M. (2006), *Principles of Geotechnical Engineering(6th Edition)*, Thomson, International Student Edition.
- di Prisco, C., Galli, A., E., Bongiorno, D. (2006), "Geo-reinforced sand columns : small scale experimental tests and theoretical modelling", *Proceeding of the 8th International Conference on Geosynthetics(8ICG)*, Sep 2006, Yokohama, Japan, pp. 1685-1688.
- Kabir, M.H. and Alamgir, M. (1988), "Geotextile and geogrid jacketed stone columns in clay", *Proc. 1st Indian Geotext. Conf.*, Bombay, India, Dec., pp. 45-50.
- Katti, R. K., Katti A.R., Naik, S. (1993), *Monograph to Analysis of Stone Columns with and without Geosynthetic Encasement*. CBIP Publication, New Delhi.
- Koerner, Robert M. (1986), *Designing with Geosynthetics*, Prentice-Hall, New Jersey.
- Lo, S.R., Zhang, R., Mak, J. (2009), "Geosynthetic-encased stone columns in soft clay : A numerical study", *Journal of the Geotextile and Geomembranes*, pp. 1-11.
- Madhav, M., Miura, M., Alagmir, M. (1994), Improving granular column capacity by geogrids reinforcement, *5th Int. Conf. on geotextiles, geomembranes and related product*, Singapore.
- Malarvizhi, S.N., Ilamparuthi, K. (2004), "Load versus settlement of clay bed stabilized with stone and reinforced stone columns", *International Proceeding of GeoAsia*.
- Murugesan, S., Rajagopal, K. (2006), "Geosynthetic-encased stone columns : numerical evaluation", *Journal of the Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 24, No. 6, pp. 349-358.
- Raithel, M., Kempfert, H. G. (2000), Calculation models for dam foundations with geotextile coated sand columns. *Int. Proceeding of the International Conference on Geotechnical and Geological Engineering*, GeoEng-2000, Melbourne.
- Raithel, M., Kempfert, K. G., Kirchner, A. (2002), "Geotextile-encased columns (GEC) for foundation of a dike on very soft soils", *Int. Proceedings of the 7th International Conference on Geosynthetics*, Nice, France, pp. 1025-1028.
- Raithel, M. and Kirchner, A. (2008), "Calculation techniques and dimensioning of encased columns - design and state of the art", *Proceeding of the 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics*, June 17-20, 2008, Shanghai, China.
- Wu, C. S., Hong, Y. S. and Lin, H. C. (2009), "Axial stress-strain relation of encapsulated granular column", *Journal of the Computers and Geotechnics*. Vol. 3, pp. 226-240.