

삼축압축시험에 의한 모래-점토 복합시료의 전단거동 특성

Characteristics of Shear Behavior for Sand-Clay Composite by Triaxial Test

이진수¹ Lee, Jin-Soo
김재일² Kim, Jae-II
이강일^{3*} Lee, Kang-II

ABSTRACT

To examine the general features of a sand-clay composite triaxial test by making specimen varying ratios of diameters (d_w) of sand columns that are installed on the soft ground as drains to diameters (d_e) of drain zone so called drainage space ratio ($n=d_e/d_w$), densities of the granular columns, and strength of soft soils round around. I also conducted a test to research the reinforcement ability and effects of the ground when the granular columns are wrapped with supplementary materials such as geotextile. The results of the triaxial compression test showed that the shear strength increase is much big when the granular columns are wrapped with supplementary materials, while the shear strength increases as the diameter and density of the granular column increase in general. Also the drainage space ratio shows a distinct increase just below 3 and a similar shear behavior to sand is appeared. The pore water pressure coefficient decreases as the drainage space ratio decreases, however, when the drainage space ratio is less than 3~4, it declines significantly as shown in the results of shear behavior.

요지

모래-점토 복합시료의 제반 전단특성을 규명하기 위하여 연약지반에 설치한 배수재로서의 모래기둥의 직경(d_w)과 배수영향원의 직경(d_e)비 즉, 배수간격비($n=d_e/d_w$), 모래기둥의 밀도 및 모래기둥과 주변 연약토의 강성을 달리한 공시체를 제작하여 실내 삼축압축시험을 실시하였다. 또한 모래기둥을 토목섬유등의 보강재로 감싼 경우에 있어서 지반의 보강정도 및 효과에 대해서도 시험이 이루어 졌다. 삼축압축시험 결과, 모래기둥의 직경과 밀도가 커질수록 전단강도가 증가하는 일반적인 경향을 보이나, 모래기둥을 보강재료로 감싼 경우의 전단강도 증가가 매우 크다. 그리고 배수간격비가 3이하를 경계로 하여 그 증가정도가 뚜렷하게 나타나고 모래의 전단거동과 유사하다. 간극수압계수는 배수간격비가 작아질수록 감소하는 경향으로 전단강도 결과에서와 같이 배수간격비가 3~4이하에서는 그 감소 정도가 크다.

Keywords : Sand-clay composite, Drainage space ratio, Sand column, Geotextile

1. 서론

우리나라는 삼면이 바다로 둘러싸인 지형적인 여건상 해안지역이 발달하고 해성 점토가 넓고 깊게 분포되어 있다. 이러한 해안지역에서 이루어지는 부지조성 공사에서는 연약점토지반을 대상으로 하는 경우가 많다. 이 경우 해성점토를 이용한 준설매립이 이루어지고 일정한 시간이 경과하

면 연약지반의 개량공사가 뒤 따른다. 연약점토지반 개량공사의 주요관심은 압밀시간의 축진과 이에 따른 연약지반의 강도증가에 있다. 이중 연약점토지반에 모래기둥을 설치하는 개량공사에는 SD(Sand Drain)공법, PBD(Plastic Board Drain)공법 또는 압밀축진에 비해 지반지지력 증가에 중점을 둔 SCP(Sand Compaction Pile)공법이 종종 활용된다. 모래-점토로 이루어진 복합지반의 경우 압밀변형과 전단

1 동신대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Professor, Dept. of Civil Engineering, Dongshin University)

2 동신대학교 대학원 토목공학과 석사과정 (Graduate School Master Course, Dongshin University)

3* 대전대학교 공과대학 건설시스템공학과 부교수 (Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Daejin University, E-mail: kilce@daejin.ac.kr)

거동에 있어서는 배수재 또는 강도 보강재로서의 모래기둥의 밀도, 설치간격 및 강성에 따라서 복잡한 양상을 나타낸다(박진홍, 2002; 이상익, 2003). 이에 본 연구는 모래기둥을 갖는 모래-점토 복합시료의 전단특성을 알고자 하는 연구의 일환으로 실내 삼축압축시험을 통하여 이루고자 하였다. 일반적으로 연약지반에 설치되는 모래기둥은 배수재 주변 점토지반의 배수를 유도하여 압밀촉진 또는 배수에 따른 함수비 감소와 압밀침하에 의한 지반강도를 개선할 목적으로 설치된다. 본 연구에서는 모래기둥이 있는 모래-점토 복합지반의 두 가지 큰 특성 즉, 압밀변형에 관련한 투수성과 전단거동 특성 중 전단강도특성에 주안점을 두고 이루어졌다. 이를 위해 본 연구에서는 모래-점토 복합시료의 제반 전단특성을 규명하기 위하여 연약지반에 설치한 배수재로서의 모래기둥의 직경(dw)과 배수영향원의 직경(de)비 즉, 배수간격비($n=de/dw$), 모래기둥의 밀도 및 모래기둥과 주변 연약토의 강성을 달리한 공시체를 제작하여 실내 삼축압축시험을 실시하였다. 또한, 모래기둥을 토목섬유등의 보강재로 감싼 경우에 있어서 지반지력의 보강정도 및 보강효과에 대해서도 시험이 이루어졌다.

2. 이론적 배경

연약점토지반을 개량할 목적으로 설치되는 SD(Sand Drain) 타설공법은 Kjellman(1948)에 의해 제안된 방법으로, 그 이래로 지금까지 여러 나라에서 널리 이용되었다(Barron, 1948). 1980년 후반에는 SD의 배수성과 그 효과에 대한 의문이 제기된 이후에 주로 투수계수에 따른 배수성 시험과 웰저항(Well Resistance)에 대한 연구가 많이 이루어졌다. Sabhahit 등(1997)은 연약점토지반에 모래기둥이 설치된 복합지반의 안정해석결과 치환율(SCP 공법에서는 치환율, $a_s = A_s/A$, SD공법에서는 배수간격비, $n = de/dw$)등에 따라 안전율이 20~30% 증가한다는 연구결과를 발표한 바 있다. 연약점토 지반에 모래기둥이 설치된 복합지반 위에 하중이 재하된 경우 점성토와 타설된 모래기둥의 강성이 서로 다르기 때문에 각각 분담하는 응력이 다르다. 그 결과 강성이 큰 모래기둥 쪽으로 응력이 집중하게 되어 이 때문에 점성토에 걸리는 응력이 상대적으로 작게 되므로 지지력 증대, 침하저감 등의 효과가 나타나게 된다(Juran 등, 1988). 복합지반 위에 평균응력 σ 는 지반반력으로 모래다짐말뚝에 σ_s , 점성토에 σ_c 의 응력이 발생하고, 여기에 모래기둥과 점토의 면적 A_s , A_c 의 범위

내에 응력이 일정하다고 하면 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$\sigma \cdot A = \sigma_s \cdot A_s + \sigma_c \cdot A_c \quad (1)$$

응력분담비($m = \sigma_s/\sigma_c$)를 이용하여 식 (1)을 다시 쓰면,

$$\sigma \cdot A = m \cdot \sigma_c \cdot A_s + \sigma_c \cdot A_c = \sigma_c (m \cdot A_s + A_c) \quad (2)$$

이 된다. 식 (2)로 부터 응력분담비($m = \sigma_s/\sigma_c$)와 치환율($a_s = A_s/A$)을 이용하여, 정리하면

$$\mu_s = \frac{\sigma_s}{\sigma} = \frac{mA}{mA_s + A_c} = \frac{m}{(m-1)a_s + 1} \quad (3)$$

$$\mu_c = \frac{\sigma_c}{\sigma} = \frac{A}{mA_s + A_c} = \frac{1}{(m-1)a_s + 1} \quad (4)$$

여기서,

$$a_s = \frac{A_s}{A}, \mu_s = \text{응력집중계수}, \mu_c = \text{응력감소계수},$$

따라서,

$$\mu_c \cdot a_s + \mu_c(1 - a_s) = 1 \quad (5)$$

이 되며, 식 (3), 식 (4) 및 식 (5)는 복합지반의 기본식이 된다.

3. 시험

3.1 시료 준비 및 제작

본 연구에서 사용한 토질시료는 모래, 점토 및 황토이다. 이중 점토시료는 현장에서 교란 상태로 채취 운반하여 실내에서 슬러리 상태로 교반한 다음 모형토조(폭 0.25m, 길이 1.2m, 높이 1.0m)에 넣고 0.3kg/cm^2 의 압력을 가하여 정규압밀 점토를 재형성한 후 실내시험 등에 이용하였다(박병기 등, 1990; 이문수 등, 1994; 정진섭, 1983). 또한, 모래와 황토는 일정한 단위중량을 갖도록 제작하였고 하바드 다짐기를 사용하였다(ASTM, 2002). 모래-점토 복합시료의 실내 삼축압축시험용 공시체는 사전에 제작한 천공기를 사용하여 점토시료에 구멍을 뚫어 중앙에 배수용 모래를 투입하는 방법으로 복합시료를 제작하였다. 또한, 토목섬유를 감싼 시료의 제작은 토목섬유를 대신할 수 있는 코팅재료의 양단을 접합하여 재현하였다. 표 1은 본 시

험에 사용된 모래와 점토의 물리적 특성을 나타낸 것이다.

삼축압축시험의 공시체 모형은 그림 1과 같이 직경(d_e) 5.0cm, 높이(H) 12.5cm이고 모래기둥의 직경(d_w)은 배수 간격비에 따라 제작되었다.

3.2 시험 내용 및 방법

모래-점토 복합시료에 대한 압밀비배수 삼축압축시험을 수행하였다. 삼축압축시험(CU)은 구속압력, $\sigma_3 = 1.0, 2.0, 3.0\text{kg/cm}^2$ 3단계로 나누고 각각의 시료에 대해 포화와 압

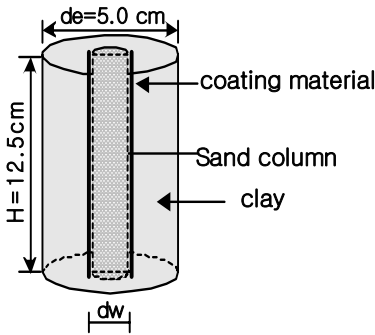


그림 1. 삼축압축시험 공시체 모형

표 1. 흙의 물리적 특성

구분	Gs	w (%)	LL (%)	PI (%)	#2.0mm체 통과량 (%)	#200체 통과량 (%)	USCS
모래1	2.65	건조	-	-	100.0	3.0	SP
모래2	2.65	건조	-	-	42.0	0.3	SP
점토	2.69	45.3	48.3	20.2	100.0	89.0	CL
황토	2.70	45.1	28.38	6.7	100.0	8.1	SC-SM

표 2. 삼축압축시험 종류

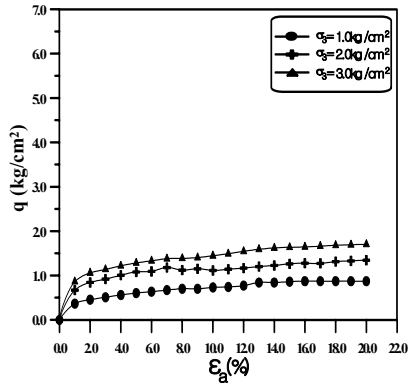
시료 조건	시험 No.	모래기둥 직경, d_w (cm)	배수 간격비 (n)	시료 조건	시험 No.	모래기둥 직경, d_w (cm)	배수 간격비 (n)
모래1	S1	5.0	-	모래1 + 점토	SC11	1.2	4.1
					SC12	1.5	3.3
					SC13	2.0	2.5
				모래1 + 황토	SC21	1.2	4.1
					SC22	1.5	3.3
					SC23	2.0	2.5
★모래2	S2	5.0	-	★모래2 + 점토	SC31	1.2	4.1
					SC32	1.6	3.1
					SC33	2.0	2.5
점토	C1	-	-	모래1 + 점토 + 토목섬유	SC41	2.0	2.5
황토	C2	-	-	모래 + 황토 + 토목섬유	SC51	2.0	2.5
참고	- 모래 기둥의 건조 단위 중량 : S1, S2($r_d=1.6\text{g/cm}^3$) -★ 송병관(2005)						

밀과정을 거친 후 전단은 0.5mm/분으로 실시하였다. 삼축 압축시험 내용은 표 2에 나타난 바와 같이 모래기둥의 건조밀도는 1.60g/cm^3 로 하고, 각각의 시료에 대하여 모래기둥을 설치 않은 시료와 배수간격비(n)를 2.5, 3.3, 4.1, 모래기둥을 토목섬유로 감싼 경우와 모래 기둥과 주변 흙의 종류를 달리하여 시험이 이루어졌다.

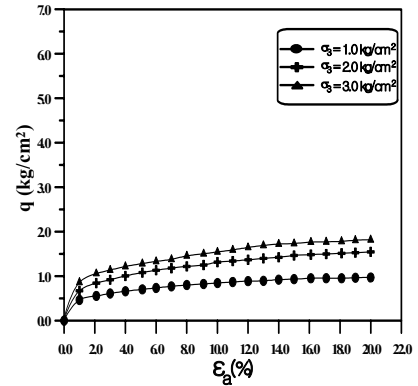
4. 시험결과 및 분석

그림 2 a), b), c), d)는 순수 점토시료와 배수간격비에 따른 시료의 삼축압축 비배수 전단시험 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 구속압력에 따라 축차응력이 점차 증가하지만 파괴점이 분명치 않은 전형적인 변형을 경화거동을 보인다. 그림 2 b)는 모래기둥 직경 1.2cm인 경우 즉, 배수 간격비가 3~4 이상이 될 때는 전단강도에 있어서 순수점토시료와 비교해 볼 때에 축차응력의 값이 거의 유사하게 나타났다. 이것으로 보아, 모래기둥의 배수간격비에 따른 영향이 없는 것으로 나타나 전단강도에의 기여가 거의 없다는 것을 알 수 있다. 또한 그림 2 c), d)에서와 같이 배수 간격비가 작아질수록 축차응력이 커지는 것을 알 수 있다.

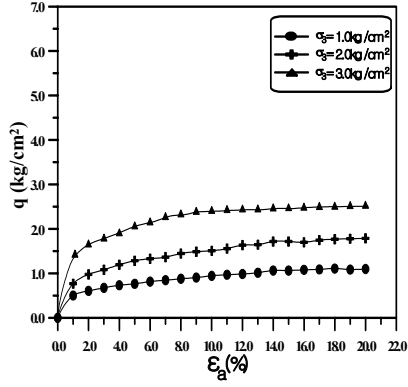
그림 2 e), f), g), h)는 모래기둥의 주변 흙을 황토로 한



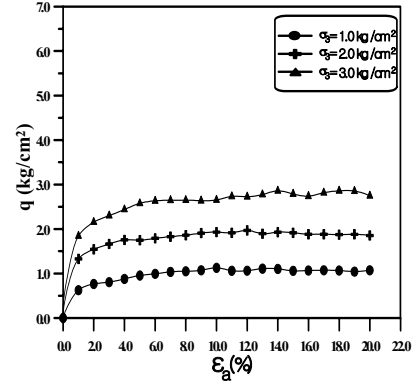
a) C1



b) SC11

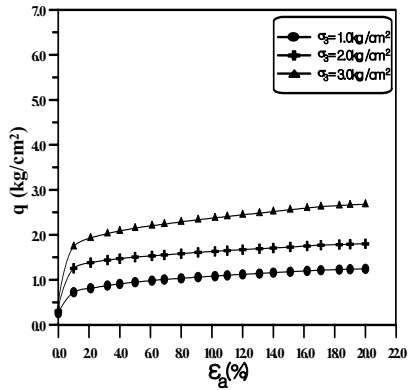


c) SC12

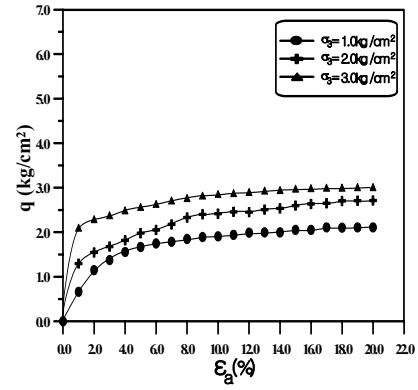


d) SC13

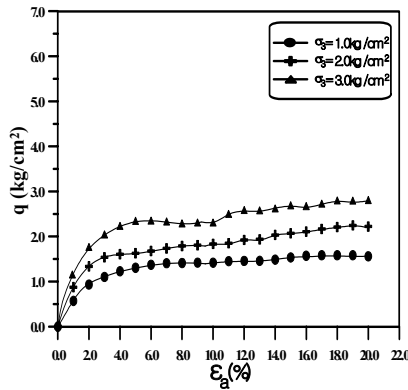
그림 2. a)~d) 축차응력과 변형율의 관계



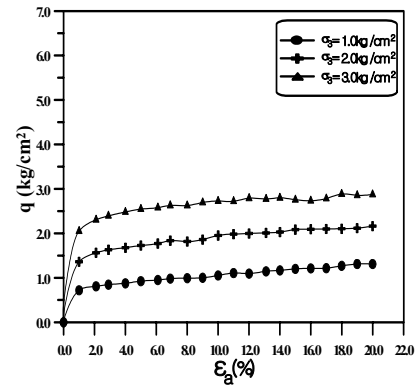
e) C2



f) SC21



g) SC22



h) SC23

그림 2. e)~h) 축차응력과 변형율의 관계

경우로 배수간격비에 따른 시료의 삼축압축 압밀비배수 전단 시험 결과를 나타낸 것이다. 그림 2 e)의 황토시료는 순수 점토시료의 경우보다는 축변형률에 따라 축차응력값이 2배정도 크게 나타나지만, 이 값은 모래기둥의 축차응력 즉, 강성이 서로 같은 값으로서 모래기둥의 설치에 따른 배수 효과는 기대할 수 있어도 전단강도에 미치는 영향이 없음을 보여주고 있다.

그림 2 i), j)는 점토와 황토시료에 대하여 모래기둥을 설치하고 모래기둥을 코팅재료로 보강한 시료에 대한 삼축압축시험 결과를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 코팅재료가 없는 시료에 비해 매우 큰 전단강도 보강효과가 있는 것을 알 수 있으며 파괴 형태는 변형률 연화거동을 나타낸다.

그림 3은 모래기둥의 직경에 따른 간극수압계수(Af)를 나타낸 것으로 배수간격비가 작아질수록, 감소하는 경향을 보이며, 특히 배수간격비가 3~4이하 즉, 모래기둥의 직경이 1.2cm 이상이 되면 감소 정도가 매우 큼을 알 수 있다.

그림 4 a)~j)는 시험조건에 따른 응력경로를 도시한 것으로 모래기둥의 직경이 1.2cm 이하인 경우 즉, 배수간격비가 4 이상인 경우에는 곡면 형태이며, 모래기둥의 직경이 1.2cm 이상인 경우 즉, 배수간격비가 3 이하에서는 모래의 전단거동과 유사하게 직선적인 경로로 나타나고 있다. 또한 모래기둥을 토목섬유로 감싼 시료에 있어서도 비슷한 결과를 보이고 있다.

그림 5 a), b)는 삼축압축시험에 의한 내부마찰각과 점착력을 흙의 종류와 모래기둥을 토목섬유로 감싼 시료에 대하여 배수간격비에 따라 나타낸 것이다. 모래기둥의 직경과 밀도가 커짐에 따라 내부마찰각은 커지고 점착력은 작아지는 일반적인 경향이 나타난다. 그러나, 배수간격비가 3 이하를 경계로 하여 이와 같은 현상이 급격하게 변화

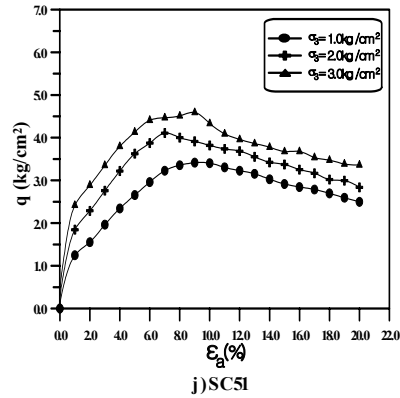
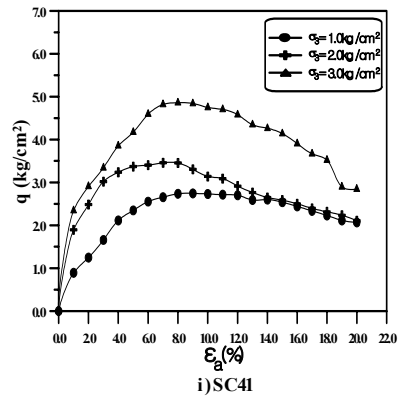


그림 2. i), j) 축차응력과 변형률의 관계

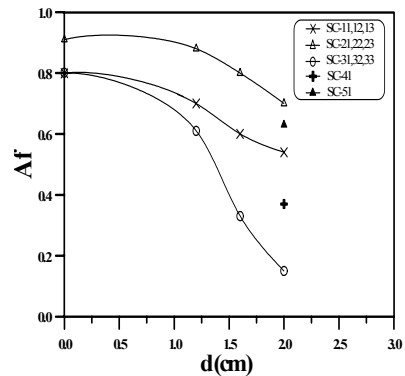


그림 3. 간극수압계수(Af)와 배수간격비 관계

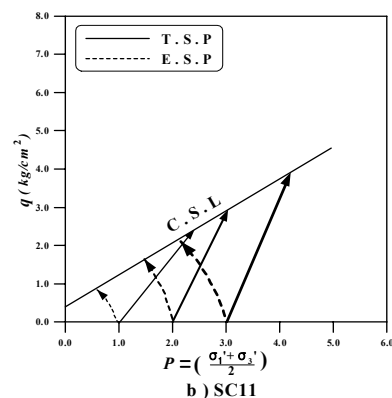
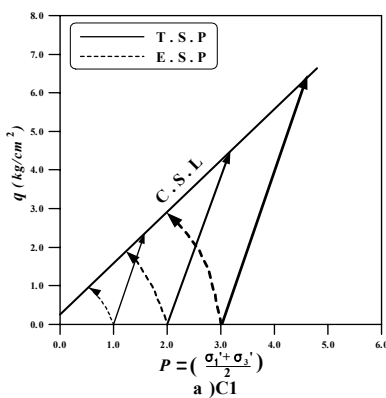


그림 4. 응력 경로(계속)

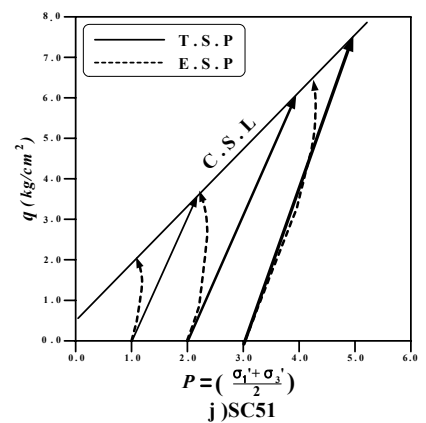
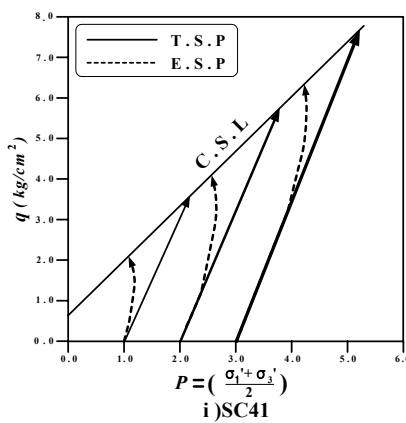
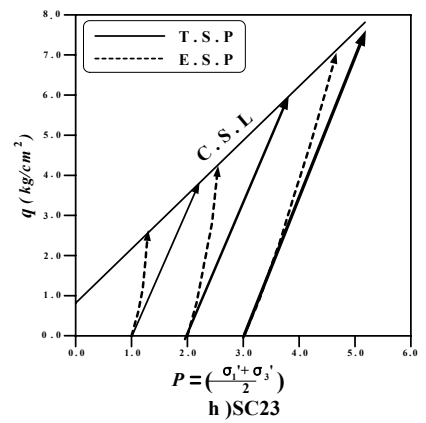
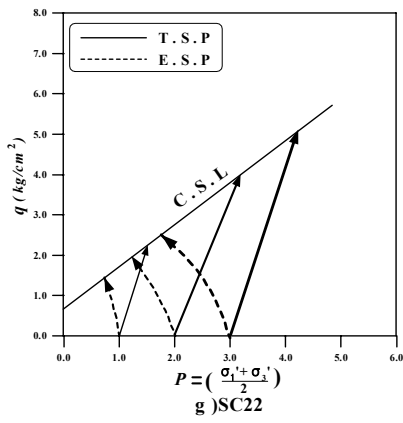
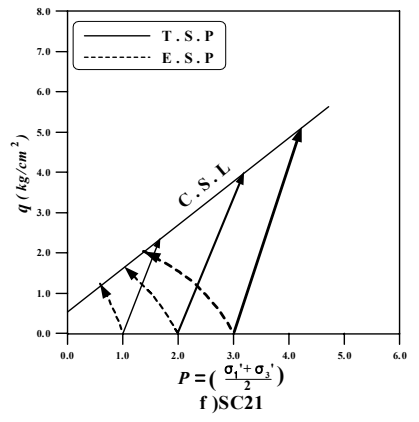
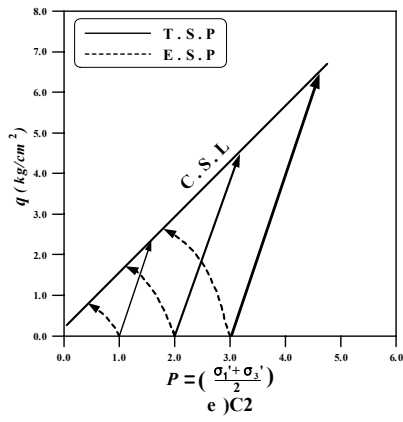
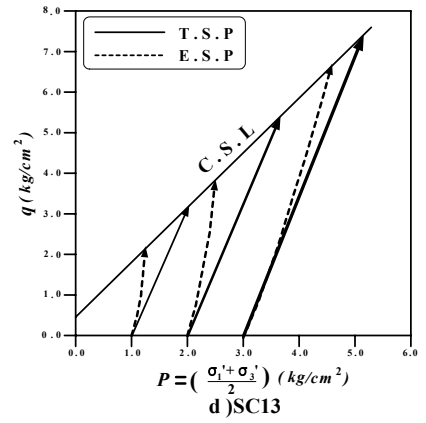
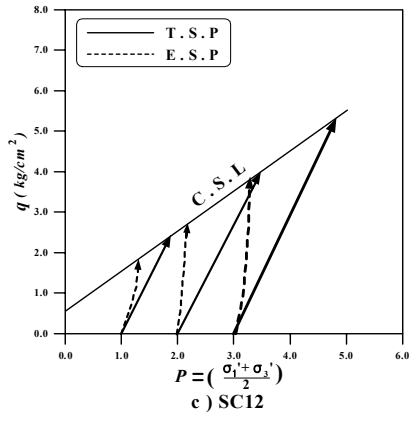
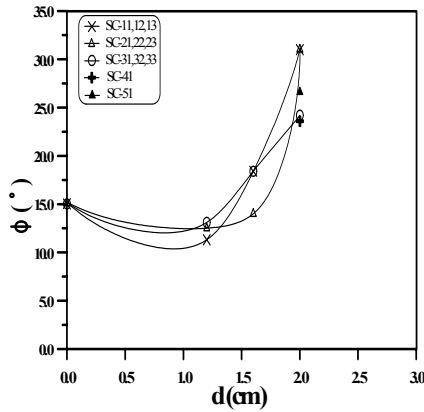
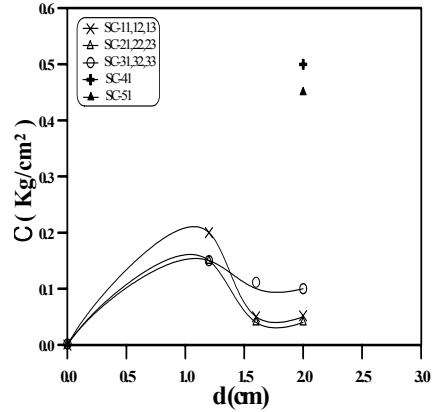


그림 4. 응력 경로



a) 내부마찰각과 배수간격비의 관계



b) 점착력과 배수간격비의 관계

그림 5. 삼축압축시험에 의한 강도정수 비교

되며 사질토의 거동에 더 가깝다. 한편, 모래기둥을 감싼 시료가 그렇지 않은 시료에 비해 내부마찰각은 조금 작아지는 반면에 점착력은 매우 커진다.

5. 결론

모래기둥이 설치된 모래-점토 복합시료의 전단거동 특성을 알기 위하여 삼축압축시험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 점토 시료에 설치한 모래기둥의 직경이 커질수록 전단강도가 증가하는 일반적인 경향을 보이나 배수간격비가 3이하를 경계로 하여 그 증가정도가 매우 크며 모래의 전단거동과 유사하다.
- (2) 간극수압계수(Af)는 배수간격비가 작아질수록 감소하는 경향으로 전단강도 결과와 유사하게 배수간격비가 3~4 이하에서는 그 감소 정도가 크다.
- (3) 응력 경로에서도 배수간격비가 3~4를 경계로 하여 곡면 형태에서 모래의 응력 경로와 유사한 직선 형태로 변화하였다.
- (4) 모래기둥을 코팅재로 감싸 보강한 경우가 전단강도의 증가에 있어 매우 큼을 알 수 있었다. 특히, 모래기둥을 코팅재로 감싼 경우에는 재하시 구속압력과 더불어 보강 코팅재에 의한 방사방향의 인장지지 때문에 전단강도가 매우 커진 것으로 판단된다.
- (5) 모래기둥을 토목섬유로 감싼 시료는 전단거동에 있어서 변형을 연화 거동을 보이며, 간극수압계수에 있어서는 모래기둥을 토목섬유로 감싼 경우와 그렇지 않은 경우 모두 배수간격비가 작아질수록 감소한다.

참고문헌

1. 박병기, 손순종, 남진희, 장용채, 강권수, 이강일 (1990), “연약지반의 변형억제 효과에 대한 2차원 모형실험 및 수치계산”, *한국토질공학회*, 제6권, 제3호 pp.53-64.
2. 박진홍 (2002), *보강화강토의 보강효과 및 전단거동에 관한 연구*, 석사학위논문, 동신대학교 대학원.
3. 이문수, 이진수, 오재화 (1994), “개량연약지반의 모형실험과 변형해석 (I)”, *한국농공학회*, 제36권, 제2호, pp.67-78.
4. 이상익 (2003), *모래-점토 복합토의 공학적 특성*, 박사학위논문, 명지대학교 대학원.
5. 정진섭 (1983), *포화점토의 응력-변형률에 관한 연구*, 박사학위논문, 전남대학교 대학원.
6. 송병관 (2005), *Sand Columns을 갖는 모래-점토 합성시료의 전단거동 특성*, 석사학위논문, 동신대학교 대학원.
7. American Society for Testing and Materials (2002), *Annual Book of ASTM Standards*, Sec.4, Vol.04. 08, Designation : D 2435-96, Philadelphia, Pa.
8. Barron, R. A. (1948), “Consolidation of Fine-Grained by Drain Wells”, *Transactions ASCE*, Vol.113, Paper No.2346, pp.718-742.
9. Juran I. and Guermazi A. (1988), “Settlement Response of Soft Soil Reinforced by Compacted Sand Columns”, *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.114, No.8, pp.930-949.
10. Kjellman, W., Discussion (1948), “Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells”, *Transactions ASCE*, Vol.113, pp.748-751.
11. Sabhahit, N., Basudhar, P. K., MadhiraR. Madhav (1997), “Generalized Stability Analysis of Embankments on Granular Piles”, *Soils and Foundations*, Vol.37, No.4, pp.13-21.
12. Skempton, A. W. (1954), “The Pore-Pressure Coefficients A and B”, *Geotechnique*, Vol.4, pp.143-147.

(논문접수일 2006. 9. 27, 심사완료일 2006. 12. 1)