

실내시험을 이용한 저치환 보강지반의 평가

배 우 석

청주대학교 이공대학 토목환경공학과
(2008. 8. 25. 접수 / 2008. 11. 18. 채택)

Evaluation of the Low Replacement Reinforced Ground Using Laboratory Tests

Woo-Seok Bae

Department of Civil and Environmental Engineering, Cheongju University
(Received August 25, 2008 / Accepted November 18, 2008)

Abstract : SCP(Sand Compaction Pile) method that forms a composite ground by driving compacted sand piles into the soft ground. This method is one of the soil improvement techniques for reinforcing and strengthening soft ground deposits. This thesis describes the investigation on the behavior of soft ground reinforced with SCP by low improvement ratio. Direct shear test and consolidation test carried out to verified behavior of composite ground reinforced with SCP. Test results were discussed with reference to the amount of consolidation settlement, variation of shear resistance with area replacement ratio and effect of the stress concentration. And, laboratory model loading test carried out to verified the effect of the location and failure mode of reinforced embankment. Residual shear strength varies with the area replacement and constrict load in the low replacement ratio. Calculated stress concentration ratio overestimate than proposed value by experimental, theoretical and analytical method. As regards the location, improving right below of the top of the slope was more effective than below of the toe of the slope. This thesis carried out to obtain fundamental information of behavior of the composite ground. Hereafter, centrifuge test that reproduce stress state of the in-situ must be necessary through the further study about pile penetration, reinforce position and construct time.
Key Words : sand compaction pile, soft ground, consolidation settlement, stress concentration

1. 서론

현재 모래다짐말뚝공법은 장비의 발달과 기술적인 진보를 통하여 육상을 비롯하여 해상에서도 널리 이용되고 있으나 대부분 고치환율의 보강이 이루어지고 있어 저치환 지반에 대한 거동 특성이나 신뢰성 있는 설계지침이 미비한 실정이며, 저치환시 응력집중현상과 침하 및 전단 특성 및 간편한 안정해석 및 설계법 등에 대한 연구가 필요한 실정이다.

이에 대한 연구로는 1957년 Murayama¹⁾가 모래다짐말뚝(Sand Compaction Pile, 이하 SCP라고 한다)이란 용어를 처음 사용한 이래 SCP로 개량된 복합지반의 특성에 대한 이론적 연구와 실내·외 실험을 통한 연구 및 해석적 연구에 대한 성과가 발표되고 있다. Ibaraki(1965)²⁾는 직접전단시험을 통하여 복

합지반 공시체의 응력분담을 고려한 전단저항력 공식을 제안하였으며, 응력분담비와 연직응력의 관계를 고찰하였다. 또한 Yamaguchi(1977)³⁾ 등은 모래말뚝 둘레의 점성토 상태에 따라서 응력분담비를 구하는 방법을 제안하고 $3 \sim 4 < n < 3.6 \sim 6.8$ 의 값을 제시하였다.

Shinsha(1991)⁴⁾ 등은 모래다짐말뚝으로 개량된 복합지반의 원심모형 실험을 통하여 저치환 복합지반에 대한 간편활동원 방법의 적용성에 대한 연구를 수행하였으며, 장신남(1997)⁵⁾ 등이 해석적인 방법을 통하여 강도결정에 영향을 미치는 인자를 제시하고 안정해석을 위한 프로그램의 개선에 대해 연구한 바 있다. 또한 배우석(2006)⁶⁾ 등은 저치환율의 모래다짐말뚝으로 개량된 복합지반에 대한 원심모형시험을 통해 응력집중비가 주로 하중조건과 면적치환비 그리고 경과시간에 따라 영향을 받고 있음을 확인하였다. 그러나 국내에서는 저치환율로

보강된 복합지반의 설계정수를 구하기 위한 실험적 연구는 비교적 미진한 상황이다.

따라서 본 논문에서는 저치환시 복합지반의 거동 특성과 신뢰성 있는 설계인자의 획득을 위한 기초 자료의 획득을 목적으로 U-100 압밀시험을 수행하여 치환율이 복합지반의 거동에 미치는 영향과 파괴거동에 대하여 관찰하였다. 또한, 복합지반 강도의 결정에 치환율이 미치는 영향을 평가하기 위해 직접전단 시험을 수행하였으며, 연약지반에 대한 적정 치환율 결정에 가장 중요한 인자는 지지력과 전단강도를 결정하는 것이므로 보강위치에 따라 모형 재하 시험을 실시하였다.

2. 시험장치 및 방법

2.1. 대상시료의 특성

본 연구에 사용된 시료는 충남 당진 지역에서 채취한 해성 실트질 점토로 액성한계의 1.5배로 함수비를 가하고 교반한 후 슬러리상태에서 0.074mm 체를 통과시켜 불순물을 제거하여 사용하였다. 대상시료에 대한 물성실험 결과는 다음 Table 1과 같다.

지반의 보강을 위한 모래말뚝은 주문진 표준사를 이용하여 조성하였다. 체분석 결과 표준사는 SP

로써 타격봉 다짐시험에 의한 최대 건조단위 중량은 1.685gf/cm³으로 나타났으며, 깔때기를 이용하여 표준사를 자유낙하시켜 측정한 최소 건조단위중량은 1.384gf/cm³인 것으로 측정되었다. 본 실험에서 사용한 주문진 표준사의 기본 물리적 특성치는 Table 2와 같으며, 모형 모래말뚝의 조성 시 제시된 단위중량을 유지할 수 있도록 주의하여 실험을 수행하였다.

2.1. U-100 압밀시험

복합지반의 압밀거동을 파악하기 위해 제작된 실험장치는 측방향 변위를 억제하기 위하여 5mm의 두께를 지닌 아크릴로 구성되었으며, 지름 100mm, 높이 150mm로 제작하였고 몰드의 상·하부는 지반의 배수를 위하여 다공질판을 설치하였으며 상부에는 물의 공급 및 배수를 위한 밸브를 설치하였다.

가압은 레귤레이터를 이용하여 일정한 공압이 공급되도록 조절하였으며 공압은 air bag을 통하여 지반에 전달하도록 제작하였다. 반력은 충분한 강도를 지닌 연결봉을 이용하여 상·하부의 프레임을 연결하여 발휘되도록 하였으며, 공압과 공극수의 손실을 방지하기 위하여 몰드와 상·하부 프레임의 사이에 고무막을 설치하였다.

장치의 하부는 말뚝이 선단지지 조건이 되도록 하였으며 상부는 다공질판을 설치하여 매트 역할을 수행하도록 하였다. 지지력 실험과 같은 강성재하 조건을 위하여 동일한 재질의 원형 재하판을 사용하였으며, air bag과 벽면의 마찰을 최소화하기 위하여 그리스를 도포하였다. 실험에 사용된 U-100 압밀시험 장치는 Fig. 1과 같다.

Table 1. Physical properties of clay

Physical properties	Quantity
USCS	CL~ML
Liquid limit LL (%)	30.6~33.8
Plastic limit PL (%)	22.5~27.3
Plasticity index (%)	7.1~6.5
Natural water contents ω (%)	35~38
Specific gravity G _s	2.65
Total unit weight (kN/m ³)	16.87

Table 2. Properties of Jumunjin standard sand

	Specific gravity	2.60
Density test results	Maximum dry density (g/cm ³)	1.685
	Minimum dry density (g/cm ³)	1.384
	Maximum void ratio(e _{max})	0.879
	Minimum void ratio(e _{min})	0.543
Sieve analysis results	Uniformity coefficient(C _u)	1.30
	Coefficient of curvature(C _c)	1.02
	Effective size D ₁₀ (mm)	0.20
Direct shear test results	Internal friction angle φ(°)	47
	Cohesion C (kg/cm ²)	0

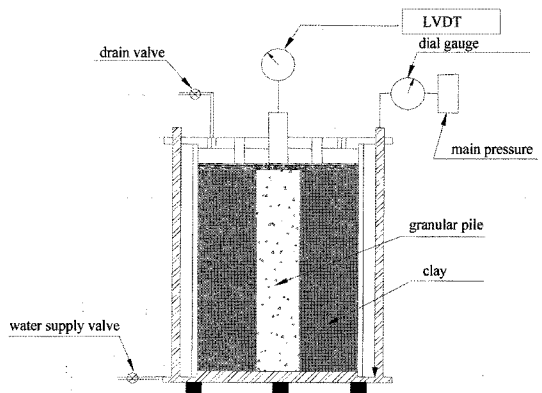


Fig. 1. A schematic diagram of U-100 consolidation test device.

시간에 따른 침하량과 토압의 변화는 각각 50mm 용량의 LVDT와 토압계를 사용하였으며, 측정자료는 PC에 내장된 UPC(Universal PC sensor interface card) 보드를 계측장치와 연결하여 일정 시간 간격에 따라 획득되었다. 압밀시험은 지반의 강성을 조절하기 위하여 1.5LL의 함수비로 재성형된 시료를 일정압력으로 24시간 동안 가압하여 일정 강도의 지반을 조성한 후 수행하였다. 원통형 압밀시험기의 벽면은 전술한 바와 같이 그리스를 도포하였으며 예압밀 후 시험기 하부는 배수를 억제시켜 일면 배수 조건이 되도록 조절하였다. 다음으로 다공질 판을 거치하고 air bag을 설치하였고 반력을 위한 상·하부의 프레임은 말뚝을 이용하여 고정시킨 뒤 가압밸브를 조절하고 100, 200, 250kPa의 강도로 6,000분의 시간에 걸쳐 단계적으로 압밀하중을 재하하였다.

단, 압밀 강도는 시험기 및 계측기의 용량과 복합지반의 지지 능력에 따라 결정하였으며, 공압은 동일한 하중이 재하되도록 삼축압축시험기의 레귤레이터가 사용되었다. 마지막으로 압밀 종료 후 대상지반에 대해 베인 실험을 실시하여 하중강도의 변화를 관찰하고 함수비를 측정하기 위해 심도와 위치에 따라 시료를 채취하였다.

2.2. 직접전단시험

직접전단시험은 시험에 사용된 표준사의 전단 특성과 조성된 복합지반의 전단거동을 파악하기 위해 시행되었다. 복합지반을 모사하기 위해 직접전단시험기의 전단상자에 치환율에 따라 케이싱을 설치하고 소정의 강도를 지닌 점성토 시료를 다짐법

Table 3. Case for consolidation tests of composite ground

Test series	A_s	Diameter of piles(cm)	Elapsed time(min)	
T1	0	-	100kPa	6,000
			200kPa	6,000
			250kPa	6,000
T2	0.1	3.2	100kPa	6,000
			200kPa	6,000
			250kPa	6,000
T3	0.2	4.5	100kPa	6,000
			200kPa	6,000
			250kPa	6,000
T4	0.3	5.5	100kPa	6,000
			200kPa	6,000
			250kPa	6,000

Table 4. Case for direct shear tests of composite ground

A_s	Diameter	Applied load(kPa)	Remark
20	2.68	20	Unit weight (kN/m ³) 16.96
		40	
		80	
40	3.79	20	Unit weight (kN/m ³) 17.16
		40	
		80	
60	4.65	20	Unit weight (kN/m ³) 16.87
		40	
		80	
100	-	20	Unit weight (kN/m ³) 17.06
		40	
		80	

에 의해 조성한 후 케이싱을 인발하면서 소정의 단위중량을 갖도록 모래말뚝을 조성하였다. 점성토 다짐 후와 말뚝 조성 후 각각 무게를 측정하여 점성토 지반과 모래말뚝의 단위중량을 측정하였으며, 복합지반을 조성한 후 치환율에 따른 전단강도의 변화를 파악하기 위하여 수직하중을 20, 40, 80kPa로 변화시켜 시험을 수행하였다.

2.2. 모형재하시험

모형재하시험은 SCP로 보강된 연약지반 위에 조성된 성토사면의 지지 특성 및 전단거동 특성을 파악하기 위하여 시행되었다.

대상지반은 점토 슬러리(1.5LL)를 초기 높이가 20cm가 되도록 모형박스에 거치한 후 점토 상부에 steel sheet를 배치하여 일주일 동안 자중에 의해 압밀되도록 양면배수 조건으로 재하하였다. 대상지반이 완성된 후 베인 시험기를 이용하여 원지반의 전단강도를 측정하고 모래말뚝으로 연약지반을 보강하였다. 모래 말뚝은 소정의 함수조건으로 아크릴 파이프에 소정의 밀도로 다진 후 냉동하여 만들어지며, 외경이 모래말뚝의 직경과 같은 두께가 얇은 파이프를 이용하여 미리 지정된 지반에 치환율과 보강 위치에 따라 천공하고 냉동된 말뚝을 미리 형성된 구멍에 삽입하여 조성하였다.

모래 말뚝을 삽입한 후 sand-mat 층을 점토지반 표면에 형성하고 제방을 형성하기 위해 말뚝과 동일한 표준사를 점토지반 위에 자유 낙하하여 조성하였다.

모래말뚝과 성토체가 조성된 후 사면의 상부에 steel sheet를 겹쳐 놓은 후 재하시험을 시행하였다. 재하속도는 분당 2mm로 하였으며 최대변위가 25mm가 되도록 기록하였다. 시험은 정도를 높이기 위하여 2회 반복 시행하였다.

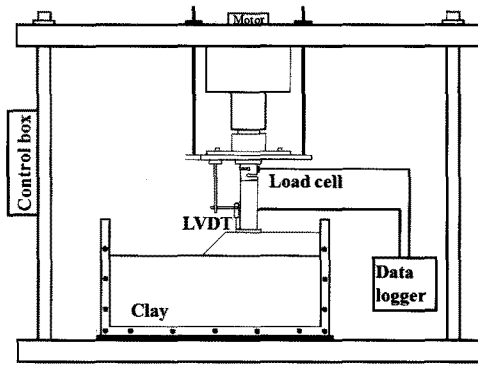


Fig. 2. A Schematic diagram of loading test device.

Table 5. Case for loading tests of composite ground

Test series	H/D	A_s	Embankment Height(cm)	Reinforced position	Number of piles
L1,L2	-	-	-	Untreated	-
L3,L4	10	10	8	Underneath crown	15
L5,L6	10	10	8	Underneath toe	15

3. 실험결과 및 분석

3.1. 복합지반의 전단특성

치환율(A_s)에 따라 모래말뚝을 설치하고 직접전단시험을 수행한 결과는 Table 6과 같다. 여기서, 복합지반의 전단강도는 전단응력-수평변위 곡선의 최대 응력이 아닌 잔류응력의 값을 측정하였다.

실험 결과 대상 시료의 전단특성은 치환율이 증가할수록 조밀한 모래와 유사하게 최대전단강도를 발현하고 시간이 경과함에 따라 전단저항이 감소되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 입자의 맞물림으로 인해 최대전단강도가 발현된 후 입자의 재배열로 맞물림 효과가 감소하여 전단저항이 감소되기 때문이다.

Table 6. Results of direct shear test

A_s (%)	Applied stress(kPa)	Vane test (kPa)	Shear strength	
			τ	ϕ
17%	20	10.4	36	17.2
	40		50	
	80		62	
34%	20	10.4	36	23.3
	40		59	
	80		113	
54%	20	10.4	37	45.0
	40		75	
	80		133	
100%	20	10.4	39	47.0
	40		76	
	80		138	

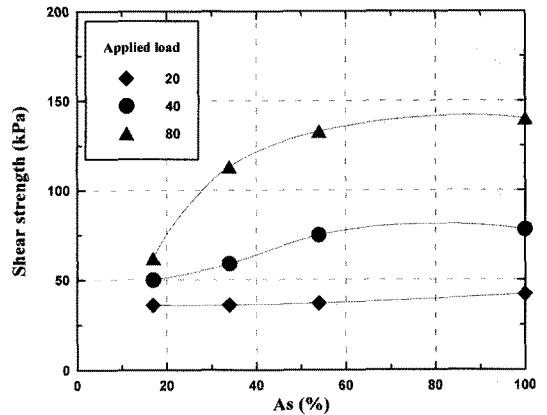


Fig. 3. Variation of shear strength.

복합지반의 내부저항은 치환율이 증가함에 따라 전단강도가 증가하고 있으나 50% 이상의 치환율에서는 증가율이 둔화되는 경향을 보이며 이러한 경향은 구속되는 하중이 작을수록 증가율이 둔화되는 것으로 평가되었다.

실험결과는 직접전단시험의 응력집중효과에 의하여 비교적 큰 값을 나타내고 있으나 Fig. 3과 같이 저치환의 경우 복합지반의 잔류전단강도가 치환율의 영향을 크게 받고 있고 40~50% 이상의 고치환으로 갈수록 치환율에 따른 전단특성의 변화는 크지 않음을 알 수 있다. 또한, 실험 결과에 따른 내부마찰각 산정결과도 치환율에 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 복합지반의 응력저동 특성을 파악하기 위하여 기존에 제안된 복합지반의 전단강도 산정식을 이용하여 응력증가계수와 응력분담비를 산정하였다.

$$\tau = (1 - A_s) \cdot (c_u) + \mu_s \cdot \sigma \cdot A_s \cdot \tan \phi_s \quad (1)$$

$$\mu_s = \frac{\tau - (1 - A_s)c_u}{\sigma} \cdot A_s \cdot \tan \phi_s \quad (2)$$

$$m = \frac{\mu_s \cdot (1 - A_s)}{1 - \mu_s \cdot A_s} \quad (3)$$

여기서 μ_s 는 응력 증가계수, m 은 응력집중비, ϕ_s 는 말뚝의 내부마찰각, c_u 는 지반의 비배수강도를 나타내며 산정한 결과는 Table 7과 같다.

평가결과 전단시험을 통한 복합지반의 응력집중비는 3.4~3.5의 값을 보이는 것으로 나타났으며 하중이 증가함에 따라 증가되는 경향을 보이고 있다.

Table 7. Variation of stress concentration ratio with A_s

A_s (%)	σ (KPa)	τ (KPa)	c_s (KPa)	μ_s	m
17	4	9.5	10.4	2.52	3.4
34	4	8.4	10.4	1.89	3.49
54	20	40.3	10.4	-	-

이와 같이 SCP로 보강된 복합지반에서 지반과 말뚝체의 경계부에서 응력이 말뚝체로 전이되는 현상이 발생하며, 이러한 현상은 Fig. 3~4에 보여지는 바와 같이 저치환인 10~50%의 범위 내에서는 치환율이 증가함에 따라 응력집중비가 증가하나 50% 이상의 고치환율에서는 응력집중비가 일반적으로 감소하고 있으며, 대부분 1~4의 범위를 제안하고 있음을 알 수 있다.

3.2. 복합지반의 압밀거동

본 연구에서는 직접전단시험으로부터 저치환율 보강지반의 응력저동을 확인하고 저치환 복합지반의 특성을 평가하기 위하여 치환율 30% 이하에서 치환율 증가에 따른 복합지반의 침하량 변화를 평가하였다.

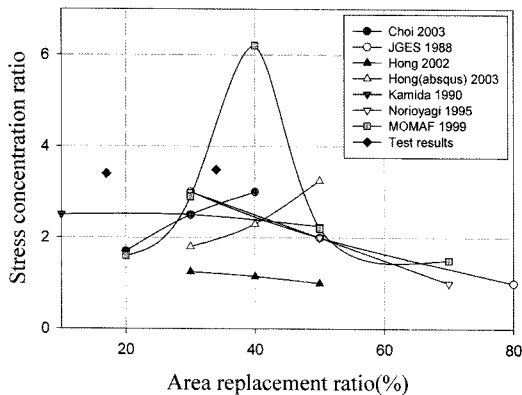


Fig. 4. Variation of stress concentration ratio.

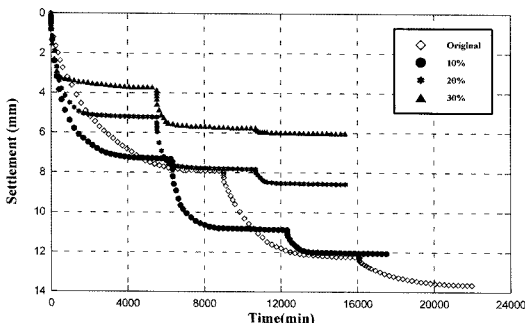


Fig. 5. Time-settlement curve with replacement ratio.

Table 8. Settlement reduction coefficient

Load (kPa)	A_s (%)		
	10	20	30
50	0.8	0.58	0.43
100	0.9	0.66	0.47
200	0.82	0.61	0.47
250	0.84	0.64	0.40

시험결과 Fig. 5와 같이 치환율 증가에 따른 침하감소 효과를 확인할 수 있으며, 하중단계에 따른 침하감소양상을 보면 초기 하중인 100kPa에서는 치환율 증가에 따라 침하감소가 크게 일어나는 양상을 보이고 있으나 200kPa 및 250kPa에서는 감소 효과가 초기 하중 단계에 비해 크지 않다는 것을 확인할 수 있다.

Table 8은 저치환 SCP의 침하감소 효과를 정량적으로 파악하기 위하여 산정한 침하저감계수(β)의 변화를 보이고 있다. 침하저감계수는 원지반의 침하량에 대한 보강 후 복합지반의 침하량의 비로 Fig. 6과 같이 치환율이 증가할수록 침하저감계수가 작아지고 있음을 알 수 있다.

따라서 저치환율의 범위 내에서 침하 감소에 대한 치환율의 영향이 크게 미치고 있음을 알 수 있으며, 각 하중단계에 따른 변화는 크지 않은 경향을 나타내고 있다.

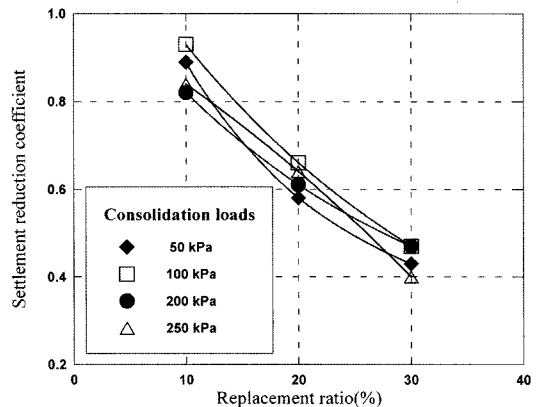


Fig. 6. Variation of β with replacement ratio.

Table 9. Time for 90% degree of consolidation

Loads	T_{90} (min)			
	Clay	Reinforced a_s (%)		
		10	20	30
100kPa	4560	2280	1200	720
200kPa	3000	2160	960	960
250kPa	3360	960	840	840

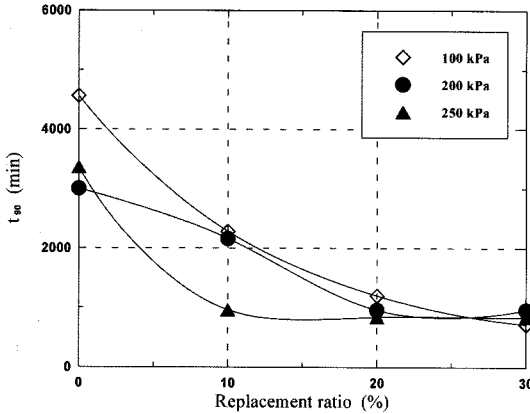


Fig. 7. Time ratio for 90% degree of consolidation.

Table 9와 Fig. 7은 치환율에 따른 압밀도 90% 도달시간($T_{90(\min)}$)을 보여주고 있다. 평가결과 치환율 10% 이하에서는 도달시간의 변화가 심한 것으로 나타났으나 20% 이상에서는 거의 유사한 값을 나타내고 있어 시험 대상 범위의 치환율 하에서는 유사한 압밀촉진 효과를 가지고 있음을 알 수 있다. 또한 이러한 효과는 각각의 하중단계에서도 유사한 경향을 보이고 있다.

3.3. 복합지반의 파괴거동

현재 모래다짐말뚝에 대한 연구는 SCP로 개량된 복합지반의 전단거동과 간단한 안정해석에 사용되는 여러 가지 방법의 적용성을 파악하기 위해 응력집중비와 압밀로 인한 점착력의 증가 등을 검증하는 방향으로 진행되고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에는 현장상태의 재현과 보강위치의 결정을 위한 기초적인 자료를 획득하기 위해 전단시험과 압밀시험 결과를 이용하여 증력 상태에서의 모형시험을 수행하였다.

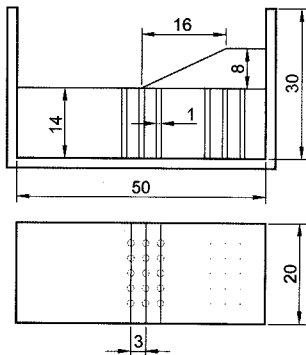


Fig. 8. Prototype ground and location of piles.

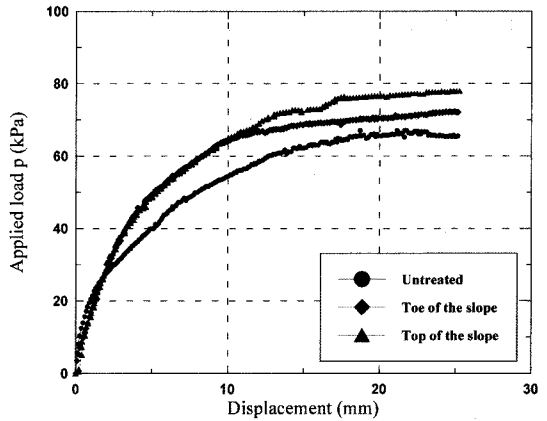


Fig. 9. Load-displacement curve of composite ground.

모형시험은 보강위치에 따른 거동양상을 검토하기 위하여 치환율과 근입비를 고정하고 말뚝의 위치를 성토체의 천단 하부와 법면의 하부로 변경하여 수행하였다.

Fig. 8에 나타난 바와 같이 보강지반은 10% 내외의 치환율을 갖도록 15개의 말뚝을 설치하였다. 재하하는 성토체가 파괴될 때까지 완속으로 강제재하되었으며 재하시험 결과는 Fig. 9와 같다.

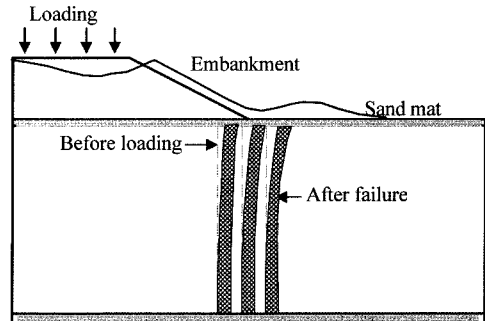


Fig. 10. Failure mode of case on improving below of the toe of the slope.

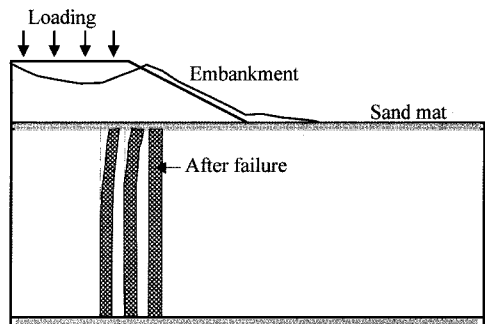


Fig. 11. Failure mode of case on improving below of the top of the slope.

복합지반의 파괴거동을 평가해본 결과 Fig. 10~11과 같이 보강위치에 관계없이 유사한 파괴거동을 보이고 있으며 특히, 성토체의 파괴가 하부지반에 영향을 미치지 않는 재하 초기의 양상은 보강여부와 관계없이 유사한 것으로 나타났다.

또한 성토체의 지지력은 무보강시가 51kPa, 법면부 하부를 보강한 경우 71kPa, 법면의 천단부 하부를 보강한 경우가 82kPa를 보이고 있다. 또한, 파괴 후 지반을 절단하여 관찰한 결과 상재 하중의 작용에 의해 성토체의 전단파괴가 진행되며 하부 점성토지반의 측방유동을 유발하여 말뚝 상부의 변위가 발생하는 것으로 판단된다.

파괴하중은 보강 위치에 따라 차이가 없으나 성토체의 천단 하부를 보강한 경우가 법면의 하부를 보강한 경우보다 변위가 작은 것으로 나타났다. 이러한 경향은 천단부에서 전달된 하중이 천단부 하부에 설치된 말뚝이 점성토 지반의 움직임을 방해하여 측방향으로의 유동을 구속하는 효과를 발휘하기 때문인 것으로 판단된다.

실험 완료 후 사면은 천단 부분이 침하되며 법면의 앞굽부분과 지표면은 크지는 않으나 융기되는 경향을 나타내고 있다. 또한 두 경우에서 동일하게 말뚝체와 말뚝체 사이의 점성토 지반이 함께 움직이는 경향을 나타내어 SCP로 보강된 사면의 안정 해석 시 보강구간의 지층을 일체화하여 복합지반의 강도정수를 적용하는 방법이 타당성을 지니고 있음을 알 수 있다.

단, 중력상황에서의 실험이 갖는 특성상 상부의 하중이 연약지반 내부로 충분히 전달되지 못하여 말뚝의 하부변위가 구속되는 양상을 나타내고 있으므로 향후 다양한 보강위치와 근입비에 대한 실험, 현장 응력 상태를 재현한 실험이 보강되어야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 저지환율의 모래다짐말뚝이 전단 거동 및 복합지반의 압밀특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 직접전단시험 및 압밀시험, 실내모형실험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 저지환율 하에서 복합지반의 내부저항은 치환율의 증가에 따라 내부마찰각이 증가하며 전단강도가 커지고 있으나 50% 이상의 고치환율에서는 증가율이 둔화되는 경향을 보이며 이러한 경향은 구속되는 하중이 작을수록 두드러지는 것으로 평가되었다.

2) 압밀시험 결과 치환율 증가에 따라 침하저감 계수가 작아지며 침하감소 효과가 두드러지고 하중 증가에 따른 감소 효과는 둔화되는 양상을 보이고 있다. 따라서 저지환율의 범위 내에서 침하 감소에 대한 치환율의 영향이 크게 미치고 있음을 알 수 있으며, 각 하중단계에 따른 변화는 크지 않은 경향을 나타내고 있다.

3) 말뚝의 위치에 따른 지지력을 평가한 결과 성토체의 천단 하부를 보강한 경우가 법면의 하부를 보강한 경우보다 변위가 크지 않은 것으로 나타났으며, 말뚝체와 말뚝체 사이의 점성토 지반이 함께 움직이는 경향을 나타내어 SCP로 보강된 사면의 안정 해석 시 보강구간의 지층을 일체화하여 복합지반의 강도정수를 적용하는 방법이 타당성을 지니고 있음을 알 수 있다.

참고문헌

- 1) Murayama, S., "Improvement of Soft Ground by Sand Compaction Piles", Conference Papers of Osaka Construction Works, No. 150, pp. 1~17, 1957.
- 2) Ibaraki, T., "An Experimental Research of Composite ground by direct shear test", Tsuchi to Kiso, Vol. 13, pp. 33~39, 1965.
- 3) Yamaguchi, h. and Murakami, Y., "On Stress Distribution of Composite Ground", The 11th Conference of JSSMFE, pp. 543~546, 1977.
- 4) Shinsha, H., Takata, K., Kurumada, Y., and Fuji, N., "Centrifuge Model Tests on Clay Ground Partly Improved by S.C.P.", Centrifuge 91, Rotterdam, pp. 311~318, 1991.
- 5) 장신남, 박용원, 김병일, "모래다짐말뚝 시공 지반의 사면안정해석", 한국지반공학회 가을 학술 발표회 논문집, pp. 89~96, 1997.
- 6) 배우석, 오세욱, 신방웅, "모래다짐말뚝으로 개량된 복합지반의 거동에 관한 원심모형실험-응력 집중을 중심으로", 대한토목학회 논문집, Vol.26 No.1C, pp. 19~24, 2006.