

연약지반에서의 쇄석골재 말뚝의 지지력 특성 연구

A Study on the Bearing Capacity of Gravel Column in Soft Ground

천병식*
Chun, Byung-Sik

여유현**
Yeoh, Yoo-Hyeon

ABSTRACT

Sand drain as a vertical drainage is widely used in soft ground improvement. Recently, sand, the principal source of sand drain, is running out. A laboratory model test was carried out to utilize gravel as a substitute for sand. Though which the characteristics of gravel are compared to those of sand for engineering purpose.

According to the test, the settlement was found to be smaller in gravel drain than in sand drain. The increase in bearing capacity by gravel pile explains the result. The clogging effect was not found in gravel column. As a result, it is assumed that gravel is relatively acceptable as a drainage material.

Gravel material seems better than sand material in bearing capacity and it is found that bearing capacity is larger when gravel is used as compaction pile than as drain from in-situ test on bearing capacity. Increase of bearing capacity with gravel pile means an effect of composite ground by stiffness of gravel material. It can be supposed to use gravel pile instead of sand pile in view of consolidation effect and bearing capacity.

1. 서론

최근 국내에서 연약지반개량을 위한 수직배수재로 sand drain을 많이 사용하고 있다. 그러나 sand drain의 주사용자재인 천연모래의 구득이 점차 어려워지고 있어 배수재료인 sand 재료의 대체재료로서 쇄석에 의한 gravel(인공쇄석골재)를 수직배수재료로의 활용을 위하여, 실내모형 시험 및 현장시험시공을 통하여 gravel 재료가 sand가 지닌 공학적 특성의 발휘 여부를 파악하고자 하였다.

실내모형시험에서는 Sand 재료 및 gravel 재료의 배수특성을 비교 평가하기 위하여 서해안 지역 연약지반의 토사를 시험지반으로하여 실내모형지반을 형성하고 각각의 수직배수재 재료를 이용하여 pile을 형성하고 주변지반에 중심으로부터 1.0D, 1.5D, 2.0D의 위치에 진동현식 간극수압계를 설치하고, 모형지반 상부에는 지표면침하판을 설치하여 하중재하에 따른 간극수압 변화 및 침하량 변화에 따른 압밀특성을 파악하였다. 또한 시험 실시전 및 시험 완료후 시험지반에 대한 토질시험을 실시하여 특성변화를 파악하였으며, 시험완료후에는 gravel pile의 심도별 clogging효과 여부를 파악하였다.

또한 현장시험시공에서는 Sand Drain 및 Sand Compaction Pile 지반과 Gravel Compaction Drain 지반으로 구분하여 Pile 지반과 주변 원지반에서 대하여 지지력 시험을 실시하였다. 지지력 시험 결과로부터 개량지반과 원지반의 복합지반 효과를 파악하여, gravel pile 적용성을 검토하였다.

* 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

** 해양대학교 이공대학 토목공학과 겸임교수

2. 실내모형시험

Sand 재료 및 gravel 재료의 배수특성을 비교 평가하기 위하여 서해안 OO지역 고속도로 현장 연약지반을 시험 토사로 선정하였으며, 형성된 실내모형지반에 각각의 배수재별 (sand 재료 & gravel 재료)로 pile을 형성하고 압밀대상층 중앙부 주변지반에 1.0D, 1.5D, 2.0D의 간격으로 진동현식 간극수압계를 설치하고, 지반 상부에는 지표면침하핀을 설치하여 하중 재하 및 재하후 방치에 따른 거동특성을 평가하였다.

2.1 사용재료의 공학적 특성

시험용 지반의 원지반 및 모형지반의 지반물성치는 다음 표 1에 나타내었다. 원지반의 공학적특성은 원지반에서의 기실시 지반조사자료이며, 모형지반은 인공적으로 조성된 연약 원지반이다. 또한 각 수직배수재별(sand 재료 & gravel 재료) 지반물성치는 다음 표 2에 나타내었으며 각 재료의 입경가적곡선은 그림 1에 나타내었다. 그림 1에 나타낸 바와 같이 수직배수재별 최대입경 크기는 gravel 재료의 경우는 25mm, sand 재료의 경우는 9.5mm로 하였다.

표 1. 원지반 및 모형지반의 공학적 특성

구 분	함수비 (w_n) (%)	액성한계 (w_L) (%)	소성지수 (PI) (%)	단위중량 (γ_i) (t/m^3)	압축지수 (C_c) (t/m^2)	압밀계수 (C_v) (cm^2/sec)	비배수 전단강도(S_u) (t/m^2)	비 고
원지반	27~55 (41)	32~64 (42)	1.1~33 (17)	1.45~2.01 (1.67)	0.20~0.42 (0.35)	1.1×10^{-3}	2.0~4.0 (2.7)	
모형지반	60.5	47.66	19.2	1.54	0.37	1.1×10^{-3}	1.2	

표 2. 배수재(sand 재료 & gravel 재료)의 공학적 특성

배수재종류	지반물성치 비중(G_s)	통일분류	입 도 분 포		비 고
			No. 4 통과량(%)	No.200 통과량(%)	
모래	2.57	SP	98.80	0.84	
Gravel	2.67	GW	0.25	0.16	

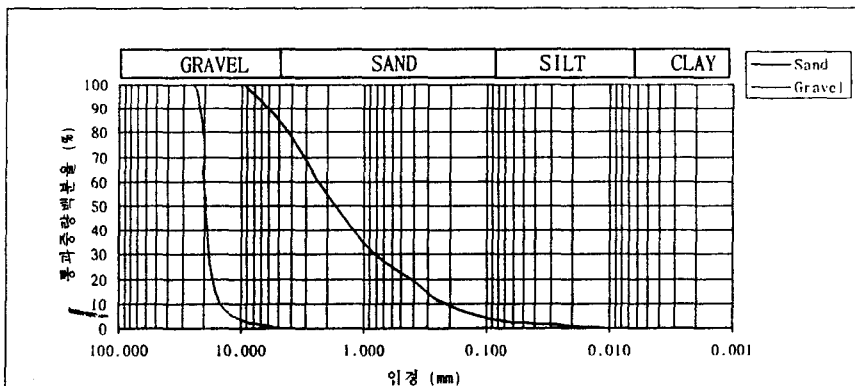


그림 1. 수직배수재(sand 재료 & gravel 재료) 입경가적곡선

2.2 실내모형시험

2.2.1 시험토조 제작

시험토조의 제작은 unit cell개념에 의해 모형지반에서 원지반과 개량제의 면적치환비를 고려하여 두께 1cm, 직경 50cm, 높이 105cm의 아크릴로 제작하였으며, 수직배수제의 직경은 10cm로 하여 등가유효원의 직경을 50cm로 하였다.

2.2.2 시험지반 제작

시험지반은 물성치가 파악된 원지반의 시료토를 이용하여 최대한 연약화한 상태에서 토조에 넣은후 자중압밀에 의해 표면건조상태까지 방치한 후 수직배수제를 설치하는 것으로 하였다. 수직배수제 설치전 시험지반의 지반물성치는 표 1에 나타낸 바와 같다. 또한 시험 원지반 상부에 수평배수층(sandmat층)은 표 2의 sand 재료를 이용하여 포설하였다.

2.2.3 하중재하 방법

모형토조내에 설치한 수직배수제(sand & gravel)에 대하여 하중증가에 따른 간극수압 특성 및 압밀특성을 파악하기 위하여 단계하중을 가하였으며 하중단계는 1단계에서는 0.84 t/m^2 , 2단계에서는 0.47 t/m^2 을 추가하여 1.31 t/m^2 을 재하하는 것으로 하였다. 2단계 하중재하시에는 1단계 하중재하후 과잉간극수압 소산이 50% 정도일 때를 기준으로 하였다.

2.2.4. 수직배수제 설치 방법

배수특성을 파악하기 위하여 비교평가한 수직배수제(sand & gravel)의 설치시 모형 원지반 제작시 모형토조 중심에 직경 10cm의 PVC관을 설치하고 빼면서 각각의 수직배수제를 설치하는 것으로 하였다. 수직배수제 설치시 타설이 불량한 경우에는 시험지반을 다시 제작하여 수직배수제를 재설치 하였다. 동일한 조건에서 gravel 설치시는 입자크기가 크고 입자간의 마찰력이 크기 때문에 sand 설치시 보다 작업난이도가 매우 어려워 세심한 설치기술이 필요하였다.

2.2.5 계측관리 내용

각각의 수직배수제별 개량특성을 비교평가하기 위하여 수직배수제 설치심도 중앙에 수직배수제 직경(10cm)비로 중심으로부터 1.0D, 1.5D, 2.0D 간격에 진동현식 간극수압계를 설치하였다. 간극수압계는 낮은 하중단계에서도 정밀도의 유지가 가능한 검교정 완료된 tip을 사용하였으며, 설치전 계측기 이상유무에 대한 검수를 완료하였다. 간극수압계는 원지반 천공후 설치하였으며, 설치후 상부지반을 밀폐하였다. 또한 하중 단계에 따른 침하량 측정을 위하여 모형 지반 상단부 4개소에 침하측정핀을 설치하여 계측관리를 실시하였다.

2.2.6 배수효과 확인

각각의 수직배수제별 배수효과 특히 gravel 재료의 배수특성을 파악하기 위하여 시험 완료 후 모형토조를 심도별로 굴착하면서 배수제의 형상 파악(심도별 수직배수제 직경 측정) 및 배수경로를 통한 주변 원지반의 토사에 의한 막힘현상 유무를 파악하였다.

2.2.7 지반개량 검토

시험실시전 모형토조 원지반 및 시험완료후 개량지반에 대하여 실시한 토질시험 결과(함수비, 단위중량, 삼축압축시험, 압밀시험)를 요약정리하면 다음 표 3에 나타난 바와 같다.

표 3. 수직배수재별(sand & gravel) 개량전·후의 토질특성 변화

구 분		함수비 (w) (%)	단위중량 (γ) (t/m ³)	삼축압축시험		압밀시험		비고
				C(t/m ²)	ϕ (°)	압축지수 (C _c) (cm ² /sec)	압밀계수 (C _v) (cm ² /sec)	
Sand drain	개량전	59.5	1.55	1.2	0	0.37	1.1×10 ⁻³	
	개량완료후	51.5	1.70	1.82	0			
Gravel drain	개량전	61.0	1.54	1.2	0			
	개량완료후	53.0	1.68	1.80	0			

표 3의 개량 전·후의 토질특성 변화에서 전체적으로 sand drain & gravel drain 설치시의 비교에서 모형지반 조성시 gravel drain 지반의 함수비가 다소 높았으나 개량에 따른 강도증가는 비교적 유사하게 나타나는 것으로 평가 되었다.

3. 현장 시험시공

3.1 현장상황

- (1) 부지위치 (충청남도, 00 - 00간 고속도로건설공사, 제 0공구)
 - Gravel Drain, Gravel Compaction Pile : RAMP F STA. 0+130 ~ 0+180 (50m 구간)
 - Sand Drain, Sand Compaction Pile : 본선 STA. 8+700 ~ 8+740 (40m 구간)

(2) 지층특성

상부에 5.4m~12.5m두께의 연약한 점토질 실트(MC)내지 실트질 점토(CL)의 층적층이 존재하고, 그 하부로 층적모래층, 자갈층, 풍화토, 풍화암, 연암층이 순차적으로 구성되어 있으며, 지하수위는 지표면 부근 내지는 GL-2.4m 이내에 존재하고 있다. 연약한 층적토의 배인전단시험 결과는 0.24~0.29kg/cm² 이고, 소성지수(I_p)는 8~33%, 액성한계는 32~64%이며, 자연함수비는 27~55%, SPT의 N치가 1~4정도이다.

3.2 시험시공 규모

- (1) Sand Drain 및 Sand Compaction Pile : 30m × 30m이상
- (2) Gravel Drain 및 Gravel Compaction Pile : 30m × 30m이상
- (3) 시공간격 및 직경 : 기존 Sand Drain 및 Sand Compaction Pile간격과 동일(정사각형2×2)

4. 이론 및 분석

4.1 Gravel Pile의 이론

Gravel compaction pile은 연약한 세립토지반을 통과하여 지지층에 지지되게 시공되는 경우가 일반적이지만, 때로는 선단이 지지층에 지지되지 않는 floating pile의 형태로 시공되기도 한다. 이와 같이 시공된 gravel compaction pile의 연직하중에 대한 파괴는 대부분 팽창 파괴(bulging failure) 형태로 나타나고, 연약내지 매우 연약한 점성지반에 대한 이들 group

pile의 지지력은 group내의 single pile의 지지력에 pile의 개수를 곱하여 산정할 수 있기 때문에 (Barksdale & Bachus, 1983), single pile의 지지력을 산정하는 것은 매우 중요한 과제이다. Single gravel pile의 극한 지지력 산정에 대한 식들은 많은 연구자들에 의해 제안되어 정리되었다(Aboshi & Suematsu, 1985). 그리고, gravel pile 재료의 내부마찰각, 주변지반의 전단강도 및 극한 지지력과의 관계가 그림 2와 같이 정리되기도 하였다 (Bergado & Lam, 1987).

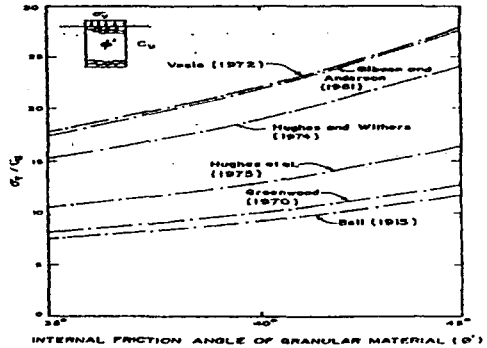


그림 2. 조립질 재료의 내부마찰각과 주변지반의 전단강도와 조립단말뚝의 극한지지력간의 관계

4.2 분석 및 고찰

4.2.1 간극수압특성

토조 중심으로부터 거리별(1.0D, 1.5D, 2.0D)로 설치한 간극수압계 측정결과를 수직배수재별로 구분하여 그림 3, 4에 나타내었다. 각 수직배수재별 간극수압상태는 그림 5에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 거리가 멀수록 과잉간극수압 발생량이 크고 소산속도가 느린것으로 나타났다. 또한 시험종료시 발생 과잉간극수압은 0.5~0.7t/m² 정도로, 작용하는 1.31 t/m²과 비교할 때 과잉간극수압 소산정도는 개량에 충분한 압밀도를 나타나고 있다. 초기의 과잉간극수압은 gravel drain에서 크게 나타나고 있으며 시간 경과에 따른 과잉간극수압 소산정도는 두 수직배수재에서 유사하게 나타나고 있어 간극수압 특성은 유사한 것으로 판단된다.

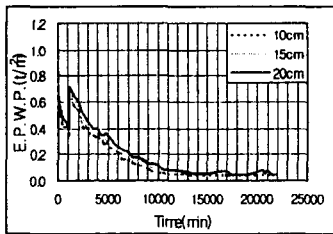


그림 3. sand drain 적용시 과잉간극수압 분포

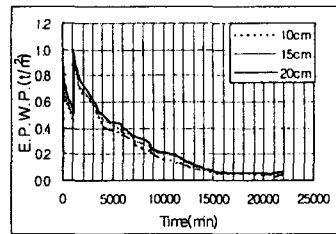
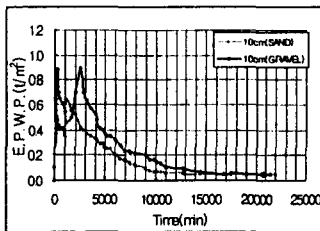
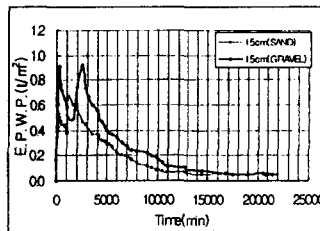


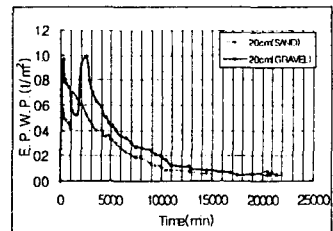
그림 4. gravel drain 적용시 과잉간극수압 분포



(a) 1.0D



(b) 1.5D



(c) 2.0D

그림 5. 수직배수재별 간극수압계 설치위치에 따른 과잉간극수압 분포

4.2.2 침하특성

하중증가에 따른 상부 모형지반에서 수직배수재별 압밀침하량을 비교하여 그림 6에 나

타내었다. 또한 그림 6의 각 수직배수재별 침하경향에 따라 쌍곡선법(Hyperbolic method)에 의한 침하해석결과는 표 4에 나타내었다.

표 4의 쌍곡선법에 의한 침하해석결과에서와 같이 침하경향에 따른 상관도는 0.9973~0.9977로 매우 높은 상관관계를 나타내고 있으며, 최종 예측침하량에 관련한 현재의 추정압밀도는 sand drain의 경우 90.24%, gravel drain의 경우는 88.22%로 나타났다. 동일 시험기간 동안 gravel drain의 압밀도는 sand drain의 압밀도에 비하여 약 2% 작은 것으로 나타나고 있으나, 예측된 잔류침하량은 이와 반대로 sand drain시 0.41cm, gravel drain시 0.38cm로 gravel drain에서의 잔류침하량이 작게 평가되는 것으로 나타나 gravel drain시공시 지지력 증대에 따른 침하억제 효과가 매우 큰 것으로 판단된다.

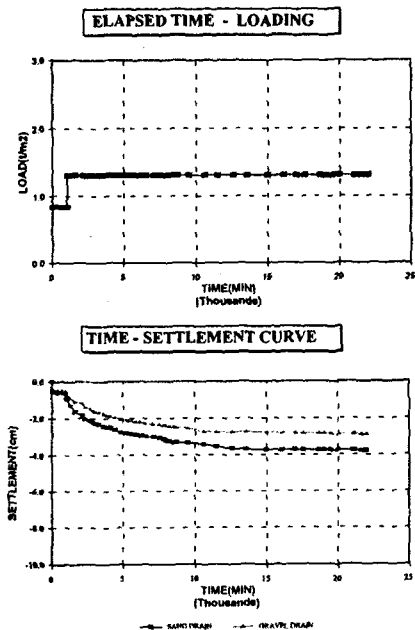


그림 6. 수직배수재별 시간경과에 따른 침하양상

표 4. 쌍곡선법에 의한 침하해석결과

구 분	Sand drain	Gravel drain	비 고
상관도 (R)	0.9973	0.9977	
현재침하량 (cm)	3.76	2.88	
최종예측침하량 (cm)	4.17	3.26	
잔류침하량 (cm)	0.41	0.38	
현재 추정압밀도 (%)	90.24	88.22	

4.2.3 배수특성

Gravel pile설치지에서 압밀진행시 배수경로를 통한 토사의 유실 및 막힘현상을 파악하기 위하여 시험완료후 시험지반을 해체하면서 육안확인을 실시하였으며, 시험지반내의 배수상태는 그림 7에 나타내었다. 확인결과 gravel pile 주변지역으로부터 원지반 토사유입은 발생하지 않는 것으로 나타났다. 본 연구에서 gravel 재료의 최대입경크기는 25mm로 제한하였으므로, 이와 같은 입경크기에서 gravel pile을 통한 배수효과는 sand pile과 유사한 특성으로 배수효과는 매우 양호한 것으로 평가된다.

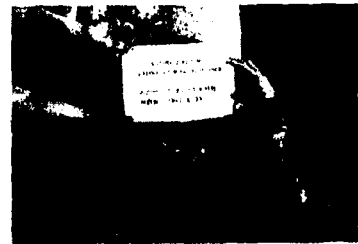


그림 7. 시험토조에서의 gravel drain

4.2.4 복합지반 지지력 특성

깊이 5.4m~12.5m로 시공된 single gravel pile과 single sand pile의 위치에서 PE mat까

지를 제거한 후, $\phi 400 \sim \phi 700\text{mm}$ 의 pile 및 각 pile들 사이의 원지반에서 $\phi 400\text{mm}$ 의 제하판을 사용하여 재하시험을 실시하였다. 재하시험 결과는 표 5와 같다.

표 5. 현장에서의 지반 지지력 시험결과 요약

시험위치	시험번호	제하판중량 (t/m^2)	항복하중에 의한 분석법						극한하중 (t/m^2)	극한하중에 의한 허용지반 지지력(t/m^2)
			P - S			LOG P - LOG S				
			항복하중 (t/m^2)	허용지반 지지력 (t/m^2)	침하량 (mm)	항복하중 (t/m^2)	허용지반 지지력 (t/m^2)	침하량 (mm)		
Gravel Drain(원지반)	PBT-1	19.75	13.4	6.70	24.0	13.0	6.5	24.0	16.2	5.4
Gravel Drain Pile	PBT-2	31.60	22.0	11.0	22.5	22.0	11.0	22.0	29.0	9.7
Gravel Compaction(원지반)	PBT-3	19.75	14.8	7.40	21.0	15.0	7.5	22.0	17.3	5.8
Gravel Compaction Pile	PBT-4	55.30	42.5	21.3	30.0	43.0	21.5	31.0	48.5	16.2
Sand Drain(원지반)	PBT-5	19.75	9.80	4.9	13.0	10.0	5.0	14.0	15.3	5.1
Sand Drain Pile	PBT-6	31.60	17.0	8.50	17.0	17.4	8.7	18.0	24.5	8.2
Sand Compaction(원지반)	PBT-7	19.75	14.5	7.3	33.0	14.0	7.0	30.0	16.2	5.4
Sand Compaction Pile	PBT-8	55.30	40.0	20.0	36.0	40.0	20.0	39.0	43.0	14.3

또한 수직배수재별로 실시한 지지력시험결과를 이용하여 Pile 지지력 및 원지반 지지력관계에 따른 복합지반지지력 및 원지반의 강도증가율은 표 6과 같다.

표 6. 복합지반의 단면적

구 분	총면적(m^2)	Pile 단면적(m^2)	원지반단면적(m^2)	비 고
Drain 지역	4.0	0.1256	3.8744	$2\text{m} \times 2\text{m}$
Compaction Pile 지역	4.0	0.3847	3.6153	$2\text{m} \times 2\text{m}$

표 7. 복합지반효과에 의한 지지력 증대효과 비교

구 분	Pile 지지력 (t/m^2)	원지반 지지력 (t/m^2)	복합지반 지지력 (t/m^2)	복합지반 원지반 강도증가율	$\frac{\text{Pile}}{\text{원지반}}$ 강도증가율	비 고
SD지역	8.2	5.1	$\frac{8.2 \times 0.1256 + 5.1 \times 3.8744}{4} = 5.19$	2%	38.3%	
SCP지역	14.3	5.4	$\frac{14.3 \times 0.3847 + 5.4 \times 3.6153}{4} = 6.26$	15.7%	128.3%	
GD지역	9.7	5.4	$\frac{9.7 \times 0.1256 + 5.4 \times 3.8744}{4} = 5.53$	2.4%	79.6%	
GCP지역	16.2	5.8	$\frac{16.2 \times 0.3847 + 5.8 \times 3.6153}{4} = 6.80$	17.24%	138.2%	

표 7에 나타낸바와 같이 극한하중에 의한 허용지지력으로부터 Sand 및 Gravel Drain에서 원지반에 대한 Pile의 강도증가율은 38.3%와 79.6%로 Gravel Drain에서 약 2배 정도의 지지력 증대가 발생한 것으로 나타났으며 또한 복합지반 효과를 고려한 지반지지력은 5.19t/m^2 , 5.53t/m^2 로 나타나 Gravel Drain 설치시의 지지력증대가 크게 평가되고 있다.

Compaction Pile의 경우 원지반과 비교한 Pile의 강도증가율은 Sand 적용시 128.3%, Gravel 적용시 138.2%로 Gravel 재료적용시 10%정도 증대한 것으로 나타났으며 복합지반 효과를 고려한 지지력 평가시 평가지지력은 Sand의 경우 6.26t/m^2 , Gravel의 경우 6.80t/m^2 이고 강도증가율은 15.7%와 17.24%로 나타나 Gravel 재료 적용시 양호한 지지력 증대 특성을 보여주고 있다. 상기의 시험결과는 샌드메트가 설치된 위치에서 Sand/Gravel Pile 설치후 성토하중 재하전에 실시한 시험결과로 하중 재하시 강도개량 특성변

화를 고려할 경우에는 개량특성은 크게 개선될 것으로 판단된다.

5. 결 론

실내 모형시험 및 현장시험 시공을 통하여 gravel pile의 공학적 특성을 파악한 연구결과를 요약정리하면 다음과 같다.

- 1) 수직배수재 종류(sand 재료 & gravel 재료) 및 거리별(1.0D, 1.5D, 2.0D, D:수직배수재 직경) 과잉간극수압 소산에 의한 압밀도는 90%정도 이상으로 유사한 간극수압특성을 나타내고 있는 것으로 판단된다.
- 2) 배수재별 침하측정결과로부터 쌍곡선법에 의한 침하해석결과 침하경향에 따른 상관도는 매우 높으며, 현재의 추정압밀도는 sand drain 90.24%, gravel drain 88.22%로 나타나고 있으나 예측된 잔류침하량은 sand drain 0.41cm, gravel drain 0.38cm로 gravel drain에서의 잔류침하량이 비교적 작게 평가되어 gravel drain 시공시 지지력 증대에 따른 침하억제 효과가 매우 크게 나타날 것으로 판단된다.
- 3) sand drain & gravel drain 설치시 개량 전·후의 토질특성 변화에서 지반의 공학적 특성은 비교적 유사하게 증가하는 것으로 평가 되었다.
- 4) Gravel drain 설치지반에서 압밀진행시 배수경로를 통한 막힘현상은 발생하지 않아 gravel drain을 통한 배수효과는 sand drain과 유사한 것으로 평가된다.
- 5) 현장시험 시공시 실시한 지지력 시험결과에 의하면 Sand재료 보다는 Gravel 재료의 지지력 특성이 크게 나타났으며, Drain 적용시 보다는 Compaction Pile 적용시 지지력이 전반적으로 크게 나타났다.
- 6) Gravel Pile 설치시 지지력의 증대 경향은 Gravel 재료 강성에 의한 복합지반효과를 의한 것으로, Gravel Pile 적용시 압밀효과, 지지력 특성을 통한 Sand 재료의 대체 실용화가 가능한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Bergado, D.T., & Lam, F. L.(1987), Full scale load test of granular piles with different densities and different proportions of gravel and sand on soft Bangkok clay, Soil and Foundations, Vol.27, No.1, pp.86-93
2. M.R.Madhav, J.K.Sharma & S.Chandra(1999), Granular pile groups - An interaction analysis, Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul, Korea Vol.1, pp.229-232
3. T.F.H.A.(1983), Design and construction of stone column, Vol.1, pp.1-193
4. Balaam N.P., Poulos, h.g. and Brown, P.T.(1977), Settlement analysis of soft clays reinforced with granular piles, Proc Fifth Asian Regional Conf., Bangkok, Thailand Vol.1, pp.81-92
5. Van Impe, W.F. & Madhav, M.R.(1992), Analysis and settlement of dilating stone column reinforced soil. Austrian Geomech., J., Feb-March, Vol.137, pp.114-121
6. Aboshi, H. and Suematsu, N. (1985). 'Sand Compaction Pile Method : State of the Art Paper', Proc. 3rd Geotech. Seminar on Soil Improvement Methods, NTU, Singapore.
7. Barksdale, R. D. and Bachus, R. C.(1983). "Design and Construction of Stone Columns", Vol. 1, Report No. FHWA/RD-83/026, National Technical Information Service, Springfield, Virginia, p.195
8. D.T.Bergado et al, (1987), "Full scale load test on granular piles and sand drains in the soft Bangkok Clay", Proc. Intl. Conf. on In-situ Soil and Rock Reinforcement ,paris, pp. 111-118.