한국지반공학회 연약지반처리위원회 '2000 학술발표회 / Feb. 18, 2000 / Seoul, Korea

Gravel Pile의 현장적용을 위한 시험시공 사례연구

A Case Study on the Application of Gravel Pile in Soft Ground

천병식[1], Byung-Sik Chun, 고용일[2], Yong-Il Koh, 여유현[3], Yoo-Hyeon Yeoh,
김백영[4], Baek-Yung Kim, 최현석[5], Hyun-Seok Choi

1) 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Hanyang
2) 초당대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Enginering, Univ. of Chodang
3) 한국해양대학교 토목공학과 겸임교수, Concurrent Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Korea Maritime
4) (주) 석정건설 대표이사, President of Seokjung Construction Co.
5) 한양대학교 대학원 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Hanyang

SYNOPSIS : Sand drain as a vertical drainage is widely used in soft ground improvement. Recently, sand, the principal source of sand drain, is running out.

The laboratory model tests were 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. Two cylindrical containers for the model test were filled with marine clayey soil from the west coast of Korea with a column in the center, one with sand, the other with gravel. Vibrating wire type piezometers were installed at the distance of 1.0D, 1.5D and 2.0D from the center of the column. The characteristics of consolidation were studied with data obtained from the measuring instrument place on the surface of the container. The parameter study was performed on the marine clayey soil before and after the test in order to verify the effectiveness of the improvement. The clogging effect was checked at various depth in gravel column after the test.

In-situ tests area was divided into two areas by material used. One is Sand Drain(SD) and Sand Compaction Pile(SCP) area, the other is Gravel Drain(GD) and Gravel Compaction Pile(GCP) area. Both areas were monitored to obtain the information on settlement, pore water pressure and bearing capacity by measuring instruments for stage loading caused by embankment. The results of measurements were analyzed.

According to the test results, 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. It is assumed that gravel is relatively acceptable as a drainage material. Gravel is considered to be a better material than sand for bearing capacity, and it is found that bearing capacity is larger when gravel is used as a gravel compaction pile than as a gravel drain.

1. 서론

삼면이 바다로 둘러싸이고 국토면적이 좁은 우리나라는 해안 및 내륙의 연약지반의 활용을 통해 효율적인 국토이용이 절실한 실정이다. 그러나 해안의 초연약지반은 유동성이 큰 포화 점성토층이 깊은 심도로 분포하고 있고, 대부분이 압밀진행성 점토로서 성토 등의 상재하중 작용시 압밀침하, 전단변형 등이 발생하므로 안정성 확보를 위한 연약지반처리는 필수적이라고 할 수 있다.

현재 연약지반처리공법으로는 주로 치환공법, 탈수·배수공법(예, vertical drain, well point 공법), 진동다짐공법(예, sand compaction pile, vibro floatation 공법), 혼합처리공법(예, 생석회안정처리공법)등이 있다.

연약지반상 성토시 가장 큰 문제점은 압밀에 의한 장기압밀침하를 들 수 있으며 vertical drain공법, 특히 sand drain 공법은 이러한 문제를 해결하기 위한 압밀촉진공법으로 널리 이용되어져 왔다. 그러나 대규모 토목공사에 사용되는 건설재료로서 막대한 양이 소요되는 모래는 연약지반 안정처리의 주개량재로서 현재 수요는 급증하고 구득(채취 및 운반)은 갈수록 어려워져 재료는 고갈상태에 이르고 있는 실정으로서, 구득이 용이하고 저렴한 재료로서 내륙 및 해안 연약지반의 안정처리를 위한 대체재의 개발이 절실히 요구되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 연직배수재인 sand 재료의 대체재료로서 쇄석을 활용하는 gravel pile공법의 배수효과 및 지지력 증대 효과를 확인하기 위해 실내 모형시험과 함께 현장시험시공을 수행하여 연약지반 개량효과를 검증하고자 하였다.

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 (wn) (%)	액성한계 (wL) (%)	소성지수 (PI) (%)	단위중량 (γt) (t/m^3)	압축지수 (Cc)	압밀계수 (Cv) (cm^2/sec)	비배수 전단강도(Su) (t/m^2)
원지반	27~55 (41)	32~64 (42)	1.1~33 (17)	1.45~2.01 (1.67)	0.20~0.42 (0.35)	$1.1x10^{-3}$	2.0~4.0 (2.7)
모형지반	60.5	47.66	19.2	1.54	0.37	$1.1x10^{-3}$	1.2

표 2. 배수재(sand 재료 & gravel 재료)의 공학적 특성

지반물성치 / 배수재종류	비중(Gs)	통일분류	입 도 분 포	
			No. 4 통과량(%)	No.200 통과량(%)
모래	2.57	SP	98.80	0.84
gravel	2.67	GW	0.25	0.16

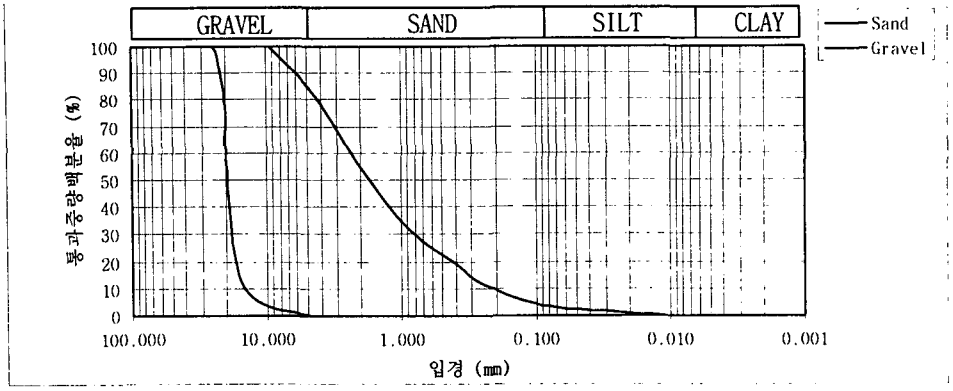


그림 1. 수직배수재(sand 재료 & gravel 재료) 입경가적곡선

2.2 실내모형시험

2.2.1 시험토조 제작

시험토조의 제작은 unit cell개념에 의해 모형지반에서 원지반과 개량재의 면적치환비를 고려하여 그림 2와 같은 두께 1cm, 직경 50cm, 높이 105cm의 아크릴로 제작하였으며, 수직배수재의 직경은 10cm로 하여 등가유효원의 직경을 50cm로 하였다.

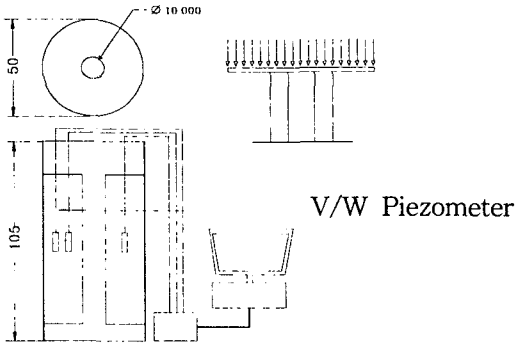


그림 2. 제작 모형토조

2.2.2 시험지반 제작

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

2.2.3 하중재하 방법

모형토조내에 설치한 수직배수재(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. 수직배수재 설치 방법

배수특성을 파악하기 위하여 비교평가한 수직배수재(sand & gravel)의 설치는 모형 원지반 제작시 모형토조 중심에 직경 10cm의 PVC관을 설치하고 빼면서 각각의 수직배수재를 설치하는 것으로 하였다. 수직배수재 설치시 타설이 불량한 경우에는 시험지반을 다시 제작하여 수직배수재를 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 수직배수재별 개량특성을 비교평가하기 위하여 수직배수재 설치심도 중앙에 수직배수재 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 계측기이상유무에 대한 검수를 완료하였다. 간극수압계는 원지반 천공후 설치하였으며, 설치후 상부지반을 밀폐하였다. 또한 하중 단계에 따른 침하량 측정을 위하여 모형 지반 상단부 4개소에 침하측정핀을 설치하였다. 이와 같이 설치된 계측기는 하중단계 및 시간경과에 따라 충분한 계측빈도로 계측을 수행하였으며, 각각의 배수재별 계측시간은 22,000분 정도 실시하였다.

2.2.6 배수효과 확인

각각의 수직배수재별 배수효과 특히 gravel 재료의 배수특성을 파악하기 위하여 시험 완료후 모형토조를 심도별로 굴착하면서 배수재의 형상 파악(심도별 수직배수재 직경 측정) 및 배수경로를 통한 주변 원지반의 토사에 의한 막힘현상 유무를 파악하였다.

3. 현장 시험시공

현장시험시공에서는 sand drain(SD) 및 sand compaction pile(SCP) 지반과 gravel drain(GD) 및 gravel compaction pile(GCP)지반으로 구분하여 단계별 성토하중에 대한 계측관리를 실시하여 각 공법의 침하특성, 간극수압특성 및 지지력 특성을 비교검토하고자 하였다.

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. 0+180 ~ 0+230 (50m 구간)

(2) 지층특성

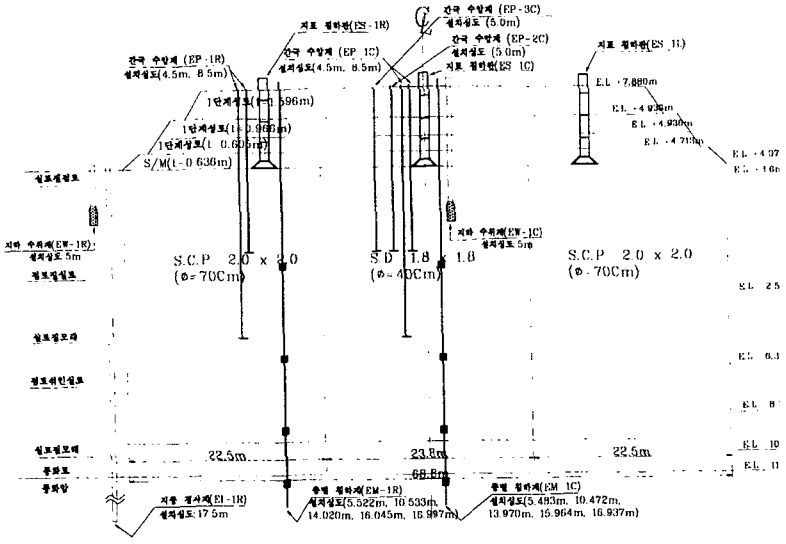
상부에 5.4m~12.5m두께의 연약한 점토질 실트(MC)내지 실트질 점토(CL)의 충적층이 존재하고, 그 하부로 충적모래층, 자갈층, 풍화토, 풍화암, 연암층이 순차적으로 구성되어 있으며, 지하수위는 지표면 부근 내지는 GL-2.4m 이내에 존재하고 있다. 연약한 충적토의 베인전단시험 결과 는 0.24~0.29kg/㎠ 이고, 소성지수(Ip)는 8~33%, 액성한계는 32~64%이며, 자연함수비는 27~55%, SPT의 N치가 1~4정도이다.

3.2 시험시공 규모

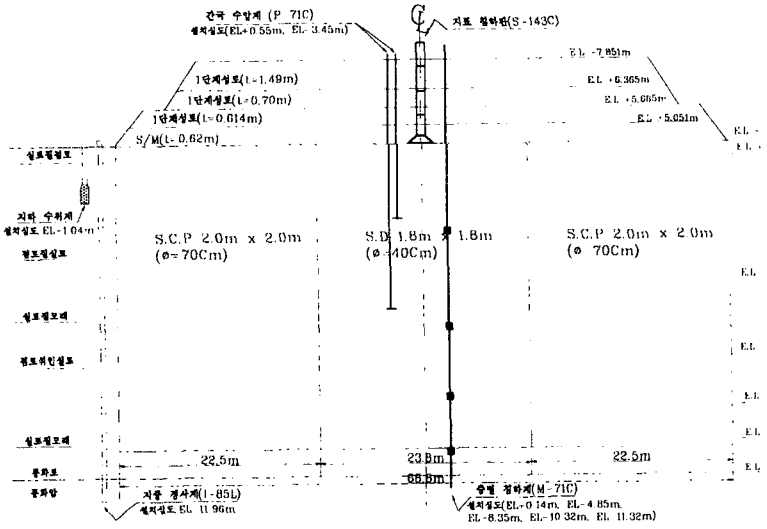
(1) sand drain 및 sand compaction pile : 50m × 75m
  - 설치심도 : 11.5m
(2) gravel drain 및 gravel compaction pile : 50m × 75m
  - 설치심도 : 11.5m

3.3 계측기 설치 현황

본 시험시공 구간에 설치된 계측기 설치단면을 배수재별로 나타내면 다음과 같다



(a) GD, GCP 설치지역



(b) SD, SCP 설치지역

그림 3. 계측기 설치단면도

4. 분석 및 고찰

4.1 간극수압특성

4.1.1 실내모형시험

토조 중심으로부터 거리별(1.0D, 1.5D, 2.0D)로 설치한 간극수압계 계측결과를 수직배수재별로 구분하여 그림 4., 5.에 나타내었다. 각 수직배수재에서 거리가 멀수록 과잉간극수압 발생량이 크고 소산 속도가 느린것으로 나타났다. 또한 시험 종료시 발생 과잉간극수압은 0.5~0.7t/m^2 정도로, 작용하는 0.31t/m^{2}과 비교할 때 과잉간극수압 소산에 의한 추정 압밀도는 90%이상을 상회하는 것으로 나타나고 있다. 그림 6.에는 거리에 따른 수직배수재별 과잉간극수압 소산상태를 보여주고 있다. 초기 발생 과잉간극수압은 gravel drain에서 크게 나타나고 있지만 시간 경과에 따른 과잉간극수압 소산정도는 유사하게 나타나고 있어, 두 재료의 간극수압 특성은 유사한 것으로 판단된다.

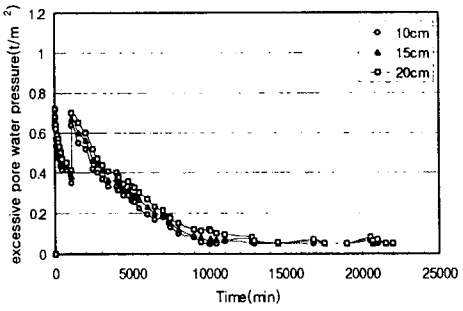


그림 4. sand drain 적용시 과잉간극수압 분포

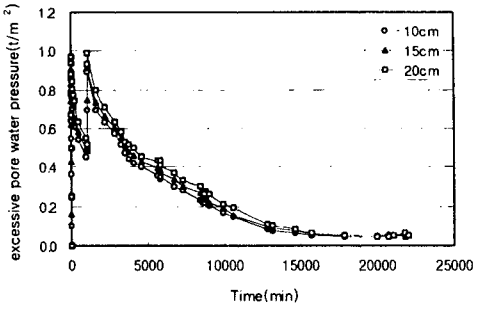
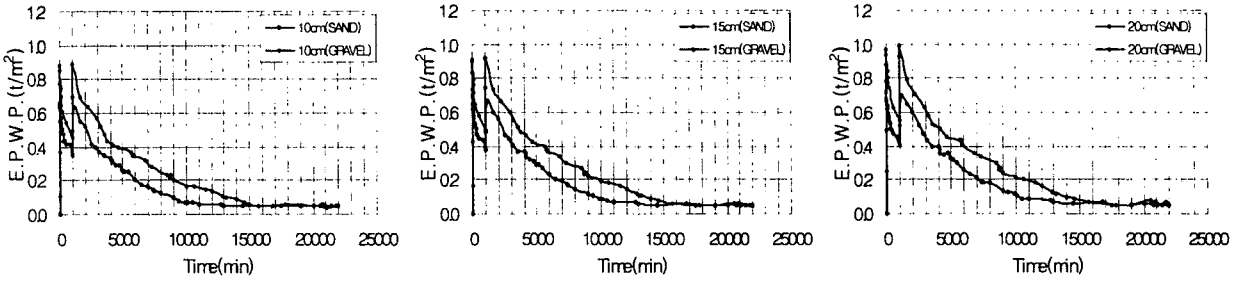


그림 5. gravel drain 적용시 과잉간극수압 분포



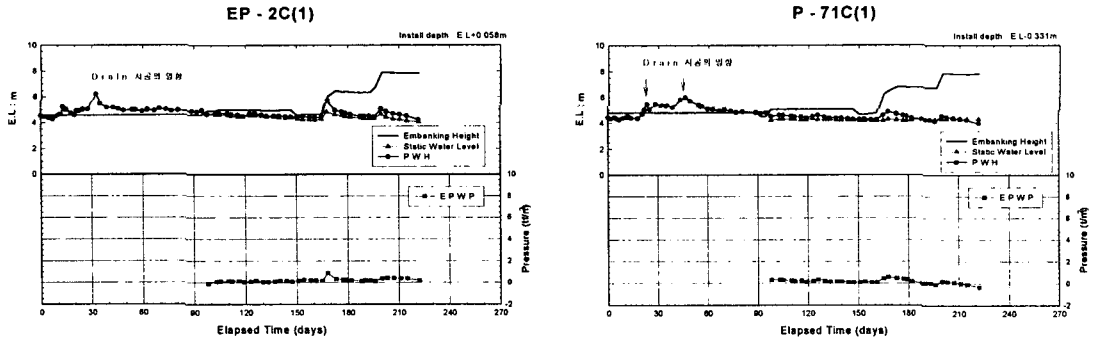
(a) 1.0D (b) 1.5D (c) 2.0D

그림 6. 수직배수재별 간극수압계 설치위치에 따른 과잉간극수압 분포

4.1.2 현장시험시공

간극수압 측정자료에 의해 파악된 과잉간극수압은 GD, GCP구간과 SD, SCP 구간의 상하부지반 모두에서 1단계 성토작업(누계 성토고 H=2.3~3.8m)시 최대 과잉간극수압은 0.6t/m^{2}정도 이내로, 성토진행중 과잉간극수압이 빠르게 소산되었음을 보여주며, 1단계 성토후 방치중인 현재 매우 미소한 과잉간극수압 특성을 나타내고 있는 것으로 나타났다.

다음 그림 7.은 각 설치지점의 지하수위 및 간극수압, 과잉간극수압 변화 경향을 나타낸 것이다.



(a) GDD, GCP 구간 (b) SD, SCP 구간

그림 7. 각 공법별 배수 및 간극수압특성(지하수위계, 간극수압계)

4.2 침하특성

4.2.1 실내모형시험

하중증가에 따른 상부 모형지반에서 수직배수재별 압밀침하량을 비교하여 그림 8에 나타내었다. 또한 그림 8.의 각 수직배수재별 침하경향에 따라 쌍곡선법(hyperbolic method)에 의한 침하해석결과는 표 3. 에 나타내었다.

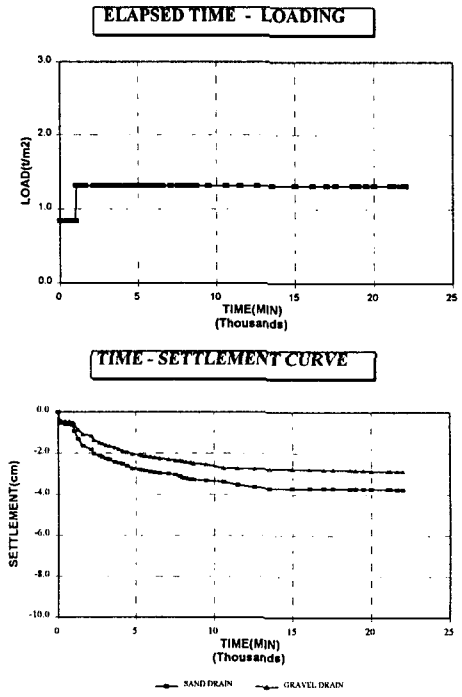


표 3. 쌍곡선법에 의한 침하해석결과

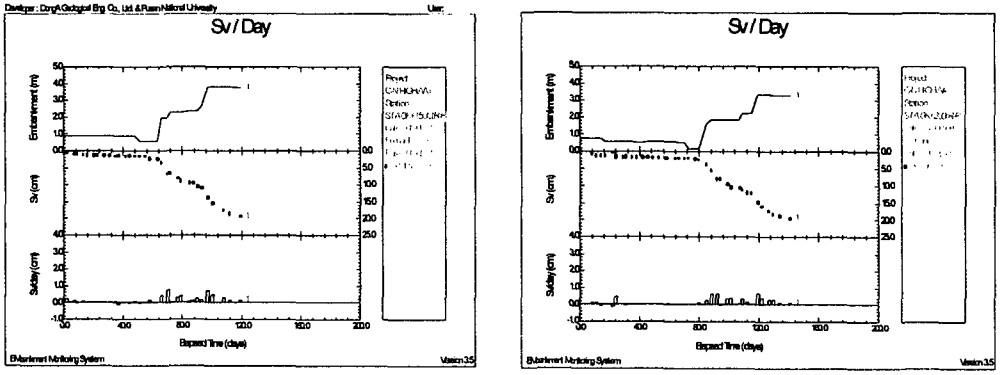
구 분	Sand drain	Gravel drain	비 고
상관도 (R)	0.9973	0.9977	
현재침하량 (cm)	3.76	2.88	
최종예측침하량 (cm)	4.17	3.26	
잔류침하량 (cm)	0.41	0.38	
현재 추정압밀도 (%)	90.24	88.22	

그림 8. 수직배수재별 시간경과에 따른 침하양상

표 3의 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.

4.2.2 현장 시험시공

각 공법 적용지역별로 설치운영한 지표면 침하판 측정결과, 수직배수재설치 및 1단계 성토후 방치중에 측정한 발생 침하량은 도로중앙쪽에서 두공법 모두 20cm 내외로 나타났으며, 성토작업후 현재까지 1일 침하량 증가속도는 0.1cm/day 내외로 일반적인 안정관리 기준치인 Sh/Sv=0.5~0.6에 훨씬 못미치는 결과를 나타내고 있어 두 공법 모두 양호한 특성을 보이는 것으로 나타났다.



(a) GD, GCP 구간 (b) SD, SCP 구간

그림 9. 각 공법별 침하특성(지표면 침하판)

4.3. 배수특성

4.3.1 실내모형시험

Gravel drain 설치지반에서 압밀진행시 배수경로를 통한 토사의 유실 및 막힘현상을 파악하기 위하여 시험완료후 시험지반을 해체하면서 육안확인을 실시하였으며, 시험지반내의 gravel drain 상태는 사진 1.에 나타내었다. 확인결과 gravel drain 주변지역으로부터 원지반 토사유입은 발생하지 않는 것으로 나타났다. 본 연구에서 gravel 재료의 최대입경크기는 25mm로 제한하였으므로, 이와 같은 입경크기에서 gravel drain을 통한 배수효과는 sand drain과 유사한 특성으로 배수효과는 매우 양호한 것으로 평가된다.

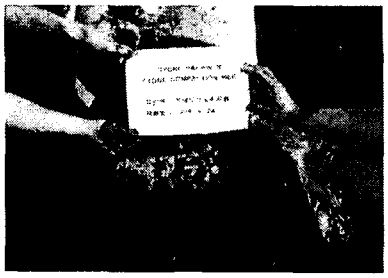


사진 1. 시험토조에서의 gravel drain

특히 그림 4.~6.에서와 같이 gravel drain은 sand drain과 비교할 때 과잉간극수압 소산특성이 거의 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다. 즉 초기 과잉간극수압과 임의 시간의 과잉간극수압치는 다르지만 소산정도 및 소산과정은 기존의 sand drain과 유사하게 나타나 배수효율 또한 sand drain 공법과 비슷한 것으로 판단된다.

또한 시험 완료시까지 간극수압소산 특성이 sand drain에서와 같이 일정한 경향을 나타내고 있어, vcd 내부로의 토사유입에 의한 막힘현상(clogging effect)은 발생하지 않는 것으로 조사되었다.

4.3.2 현장 시험시공

현장 시험시공 계측결과에서도 실내모형시험에서와 같이 간극수압특성과 침하특성을 분석해볼 때 Sand Drain과 유사하게 나타나 배수효율 또한 Sand Drain 공법과 비슷한 것으로 판단되었으며 Drain 설치후 약 5개월이 경과한 시점에서 지표면으로부터 GL-5.0m까지 굴착하여 막힘현상의 발생유무를 조사한 결과, clogging effect에 의한 배수효율 저하는 없는 것으로 나타났다.(사진 2참조)

(a) GL-1.0m 지점　　(b) GL-5.0m 지점

사진 2. 지중의 구근상태 확인 및 배수(막힘현상 여부)성능 확인

5. 결론

실내 모형시험 및 현장시험 시공을 통하여 Gravel Pile의 공학적 특성을 파악한 연구결과를 요약정리하면 다음과 같다.

1) 실내모형시험에 의하면 연직배수재 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.

또한 배수재별 침하측정결과로 부터 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 drain시공시 지지력 증대에 따른 침하억제 효과가 매우 크게 나타날 것으로 판단된다.

2) Gravel drain 설치지반에서 압밀진행시 배수경로를 통한 막힘현상은 실내시험 및 현장시험 모두 발생하지 않아 gravel drain을 통한 배수효과는 sand drain과 유사한 것으로 평가된다.

3) 실내 모형시험 및 현장 시험시공결과를 종합하여 보면 전체적으로 gravel drain에 의한 배수 및 간극수압특성은 상호 유사한 것으로 검토되어 gravel pile 강성에 의한 복합지반 거동에 의한 효과를 고려할 때 sand drain 공법과 비교하여 보다 효과적인 공법인 것으로 나타났다.

4) 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.

6. 참고문헌

1. 이승련(1998), 진동다짐쇄석말뚝의 적용성에 관한 연구, 한양대학교 산업대학원 석사학위논문, pp.1-75
2. Bergado, D.T., & Lam, F. L(1987), Full scale load test of granular piles with different densities and different properties of gravel and sand on soft Bangkok clay, Soil and Foundations, Vol.27, No.1, pp.86-93
3. 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
4. T.F.H.A.(1983), Design and construction of stone column, Vol.1, pp.1-193
5. 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
6. 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
7. 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.
8. 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, Verginia, 195p.
9. 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.