

## 실내모형시험을 통한 Gravel Drain의 배수효과에 관한 연구 A Study on the Drainage Effects of Gravel Drain by Laboratory Model Test

천병식<sup>1)</sup>, Byung-Sik Chun, 김백영<sup>2)</sup>, Baek-Yeong Kim, 고용일<sup>3)</sup>, Yong-Il Koh,  
여유현<sup>4)</sup>, Yoo-Hyeon Yeoh, 박경원<sup>5)</sup>, Kyoung-Won Park

- 1) 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ.
- 2) (주)석정건설 대표이사, President, Sukjung E & C. Co., Ltd.
- 3) 초당대학교 토목공학과 전임강사, Full Time Lecturer, Dept. of Civil Engineering, Chodang Univ.
- 4) 한양대학교 대학원 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ.
- 5) 한양대학교 대학원 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ.

**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. 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.

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. D is the diameter of the column. The transient process of pore water pressure with loading and the characteristics of consolidation were studied with the data gained from the measuring instrument place on the surface of the container. The parameter study was performed for the marine clayey soil before and after the test in order to check the effectiveness of the improvement. The clogging effect was checked at various depth in gravel column after the test.

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.

**Key Words** : sand drain, gravel column, clogging effect, drainage material

### 1. 서 론

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, 실내모형시험을 통하여 gravel 재료가 sand가 지닌 공학적 특성의 발휘 여부를 파악하고자 하였다.

Sand 재료 및 gravel 재료의 배수특성을 비교 평가하기 위하여 서해안지역 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 지표면침

하판을 설치하여 하중재하에 따른 간극수압 변화 및 침하량 변화에 따른 압밀특성을 파악하였다. 또한 시험 실시전 및 시험 완료후 시험지반에 대한 토질시험을 실시하여 특성변화를 파악하였으며, 시험완료 후에는 gravel pile의 심도별 clogging효과 여부를 파악하였다.

## 2. 실내모형시험

Sand 재료 및 gravel 재료의 배수특성을 비교 평가하기 위하여 서해안 OO지역 고속도로 현장 연약 지반을 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 지표면침하판을 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 수직 배수재별(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 ( $\gamma_t$ ) ( $t/m^3$ )	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)	$1.1 \times 10^{-3}$	2.0~4.0 (2.7)	
모형지반	60.5	47.66	19.2	1.54	0.37	$1.1 \times 10^{-3}$	1.2	

표 2. 배수재(sand 재료 & gravel 재료)의 공학적 특성

지반물성치 배수재종류	비중(Gs)	통일분류	입도분포		비 고
			No. 4 통과량(%)	No.200 통과량(%)	
모래	2.57	SP	98.80	0.84	
Gravel	2.67	GW	0.25	0.16	

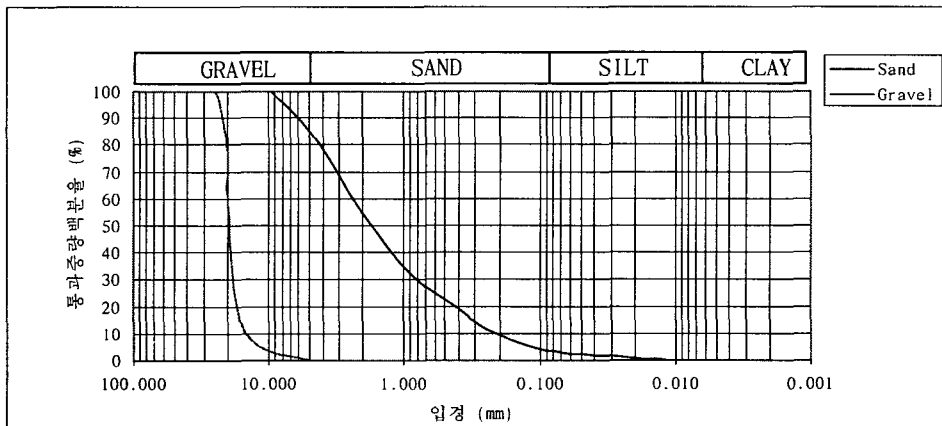


그림 1. 수직배수재(sand 재료 & gravel 재료) 입경가적곡선

## 2.2 실내모형시험

### 2.2.1 시험토조 제작

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

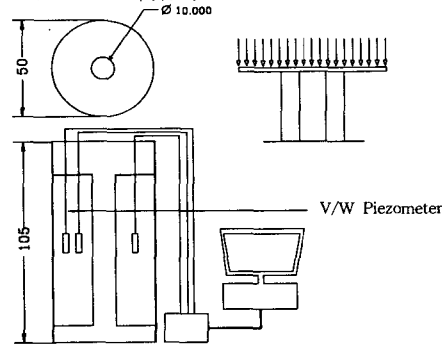


그림 2. 제작 모형토조

### 2.2.2 시험지반 제작

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

### 2.2.3 하중재하 방법

모형토조내에 설치한 수직배수재(sand & gravel)에 대하여 하중증가에 따른 간극수압 특성 및 압밀 특성을 파악하기 위하여 단계하중을 가하였으며 하중단계는 1단계에서는  $0.84 \text{ t/m}^2$ , 2단계에서는  $0.47 \text{ t/m}^2$ 을 추가하여  $1.31 \text{ t/m}^2$ 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 계측기이상유무

에 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.

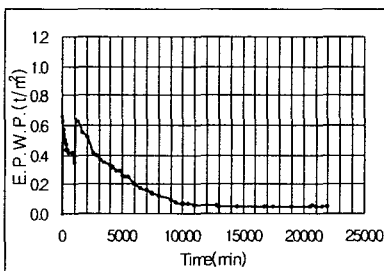
### 2.2.6 배수효과 확인

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.

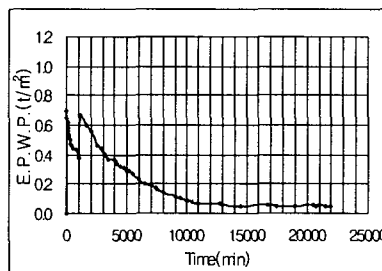
## 2.3 시험결과

### 2.3.1 간극수압

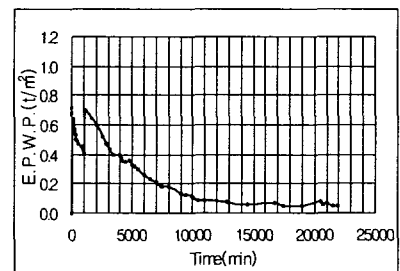
수직배수재별(sand & gravel)로 거리(1.0D, 1.5D, 2.0D)에 따라 설치후 측정된 간극수압계 계측결과는 다음 그림 3, 4에 나타내었다. 그림 3 (a), (b), (c)는 sand재료로 설치된 수직배수재 주변의 거리별 간극수압 특성으로 1단계 0.84 t/m<sup>2</sup> 하중재하시 발생 과잉간극수압은 2.0D 위치에서 최대 0.70 t/m<sup>2</sup>이 발생한 것으로 나타났으며, 과잉간극수압이 50% 소산후 2단계 1.31 t/m<sup>2</sup> 하중재하후에는 최대 0.71 t/m<sup>2</sup> 정도 발생후 계속적으로 수렴하였으며 시험 종료시 약 0.05 t/m<sup>2</sup> 정도를 나타내었다. 또한 그림 4 (a), (b), (c)는 gravel재료로 설치된 수직배수재 주변의 거리별 간극수압 특성으로 1단계 0.84 t/m<sup>2</sup> 하중재하시 발생 과잉간극수압은 2.0D 위치에서 최대 0.97 t/m<sup>2</sup>이 발생한 것으로 나타났으며, 과잉간극수압이 50% 소산후 2단계 1.31 t/m<sup>2</sup> 하중재하후 최대 0.99 t/m<sup>2</sup> 정도 발생후 계속적으로 수렴하였으며 시험 종료시 약 0.08 t/m<sup>2</sup> 정도를 나타내었다. 각 수직배수재별 과잉간극수압은 거리가 증가할수록 크게 발생하는 것으로 나타났다.



(a) 1.0D 위치

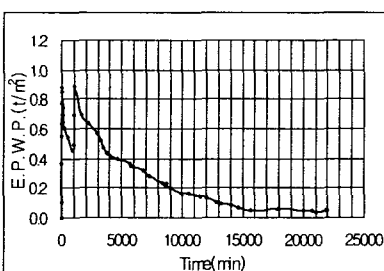


(b) 1.5D 위치

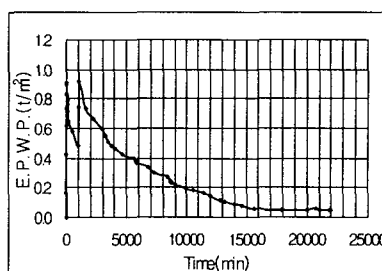


(c) 2.0D 위치

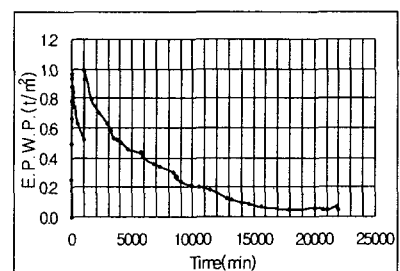
그림 3. Sand Drain 설치시 시간경과에 따른 과잉간극수압 분포



(a) 1.0D 위치



(b) 1.5D 위치



(c) 2.0D 위치

그림 4. Gravel Drain 설치시 시간경과에 따른 과잉간극수압 분포

### 2.3.2 압밀침하

하중증가에 따른 수직배수재별 압밀침하 측정결과는 다음 그림 5, 6에 나타낸 바와 같다. 그림에 나타난 바와 같이 동일한 하중증가에 따라 시험완료기간 동안 발생한 압밀침하량은 sand drain설치시에 약 4.17cm이고, gravel drain설치시 3.26cm로 gravel drain설치시에 발생침하량이 sand drain 설치시보다 상대적으로 작게 발생한 것으로 나타났다. 이와 같은 현상은 gravel pile의 지지력 효과와 관련한 사항으로 gravel pile의 침하억제효과와 관련한 분석이 필요하다.

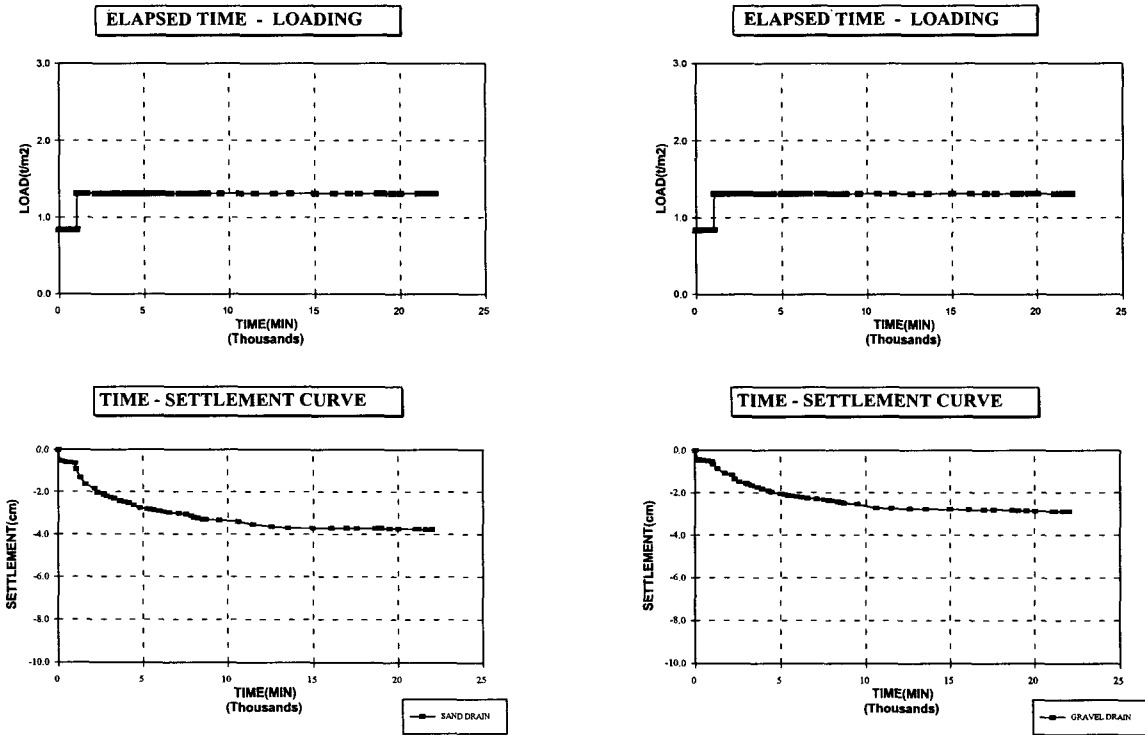


그림 5. Sand drain설치시 시간경과에 따른 압밀침하      그림 6. Gravel drain설치시 시간경과에 따른 압밀침하

### 2.3.3 토질시험 결과

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

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

구 분		함수비 (w) (%)	단위중량 ( $\gamma_t$ ) (t/m <sup>3</sup> )	삼축압축시험		압밀시험		비고
				C(t/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)	압축지수 ( $C_c$ ) (cm <sup>2</sup> /sec)	압밀계수 ( $C_v$ ) (cm <sup>2</sup> /sec)	
Sand drain	개량전	59.5	1.55	1.2	0	0.37	$1.1 \times 10^{-3}$	
	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. 이론 및 분석

#### 3.1 Gravel Drain의 이론

##### 3.1.1 Unit cell 이론

일반적으로 Gravel pile(GP), 샌드 컴팩션 파일, 석회 또는 시멘트 말뚝과 같은 원주형의 구성물은 지지력의 증가와 침하량의 감소, 압밀도의 증가, 연약하거나 느슨한 퇴적지반에서의 액상화방지로 지반을 보강하기 위하여 사용된다. 이것들은 연약점토층, 실트층 혹은 느슨한 조립 퇴적지반에 이상적으로 적합하다. 몇몇의 설계방법들은 지지력을 평가하기 위하여 개발되어졌고, GP로 보강된 지반의 하중-침하거동은 경험적인 평가 또는 이론적인 해석에 바탕을 둔다. (Bergado et al., 1991, Madhav, 1990) GP를 다루는 분야의 확대에 여러 가지 이론적인 모델은 Unit cell 이론(Balaam et al., 1977, Van Impe & Madhav, 1992)에 근거한 보강지반의 거동을 평가하기 위하여 발전되었다.(M.R.Madhav, J.K.Sharma & S.Chandra, 1999) 본 모형시험에서는 다음 그림 7의 Unit cell 개념에 의하여, 주변지반 및 수직배수재의 직경을 고려하여 모형토조에서 수직배수재의 직경은 10cm로 하여 등가유효원의 직경을 50cm로 하였다.

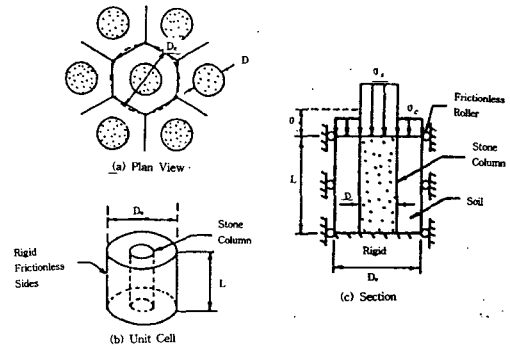


그림 7. Unit cell 개념도 (T.F.H.A., 1983)

##### 3.1.2 침하억제 및 지지력 증대

Gravel pile의 극한지지력에 관해 각 기관 및 제안자에 따라 차이가 있으나 일반적으로 아래식과 같은 점성토의 비배수 전단강도에 지지력계수를 곱한 형태로 표현된다.(Bergado, 1987)

$$Q_{ult} = N_c \cdot S_u \tag{1}$$

여기서,  $Q_{ult}$  : Gravel Pile에 지지할 수 있는 극한지지력

$S_u$  : 점성토의 비배수 전단강도

$N_c$  : 지지력계수(15~40)

이와 같은 제안치들은 gravel pile의 파괴형태를 bulging 파괴로 가정하고 유도된 것이며, 사면안정의 해석에 있어서 전단강도의 증가를 고려할 때에는 복합지반(composite ground)의 강도 증가식을 이용하게 된다.(이승련, 1998)

일반적으로 sand pile 보다 gravel pile의 재료적 강도특성에 의해 지지력이 증대하는 것으로 나타나고 있으며, 이와 같은 gravel pile 개량지반의 지지력 증대에 의해 원지반의 발생침하량이 감소하게 된다. 이와 같은 복합지반의 거동형태는 다음 그림 8에 나타낸 바와 같다.

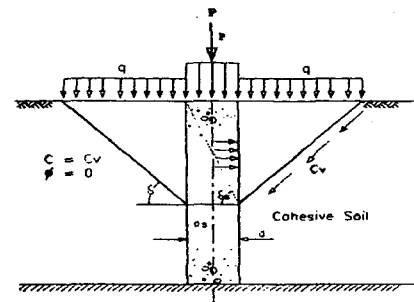


그림 8. gravel pile 개량지반에서의 복합지반 거동형태

### 3.2 분석 및 고찰

#### 3.2.1 간극수압특성

토조 중심으로부터 거리별(1.0D, 1.5D, 2.0D)로 설치한 간극수압계 계측결과를 수직배수재별로 구분

하여 그림 9, 10에 나타내었다. 각 수직배수재에서 거리가 멀수록 과잉간극수압 발생량이 크고 소산 속도가 느린것으로 나타났다. 또한 시험 종료시 발생 과잉간극수압은  $0.5 \sim 0.7t/m^2$  정도로, 작용하는  $0.31t/m^2$ 과 비교할 때 과잉간극수압 소산에 의한 추정 압밀도는 90%이상을 상회하는 것으로 나타나고 있다. 그림 11에는 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.

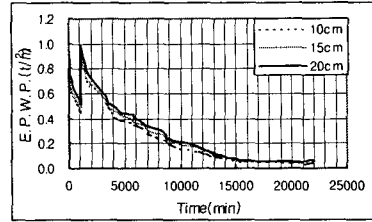
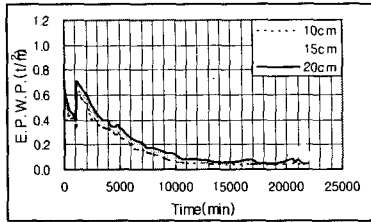
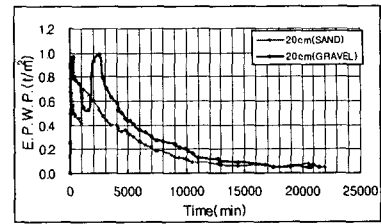
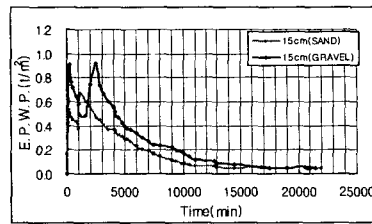
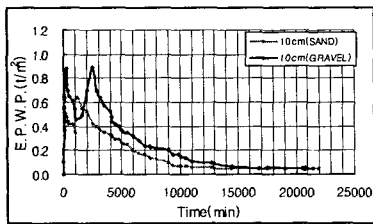


그림 9. sand drain 적용시 과잉간극수압 분포      그림 10. gravel drain 적용시 과잉간극수압 분포



(a) 1.0D

(b) 1.5D

(c) 2.0D

그림 11. 수직배수재별 간극수압계 설치위치에 따른 과잉간극수압 분포

### 3.2.2 침하특성

하중증가에 따른 상부 모형지반에서 수직배수재별 압밀침하량을 비교하여 그림 12에 나타내었다. 또한 그림 12의 각 수직배수재별 침하경향에 따라 쌍곡선법(Hyperbolic method)에 의한 침하해석결과는 표 4에 나타내었다.

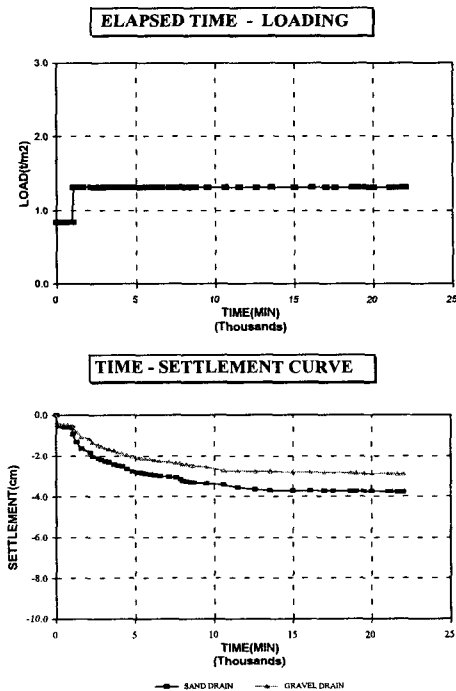


표 4. 쌍곡선법에 의한 침하해석결과

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	

그림 12. 수직배수재별 시간경과에 따른 침하양상

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.

### 3.2.3 배수특성

Gravel drain 설치지반에서 압밀진행시 배수경로를 통한 토사의 유실 및 막힘현상을 파악하기 위하여 시험완료후 시험지반을 해체하면서 육안확인을 실시하였으며, 시험지반내의 gravel drain 상태는 그림 13에 나타내었다. 확인결과 gravel drain 주변 지역으로부터 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.

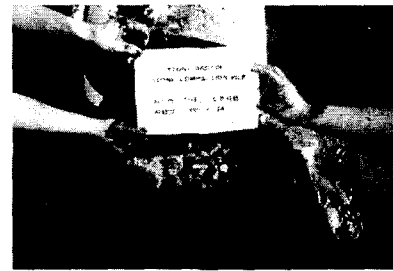


그림 13. 시험토조에서의 gravel drain

## 4. 결론

모형시험을 통하여 gravel drain의 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 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.
- 3) sand drain & gravel drain 설치시 개량 전·후의 토질특성 변화에서 지반의 공학적 특성은 비교적 유사하게 증가하는 것으로 평가되었다.
- 4) Gravel drain 설치지반에서 압밀진행시 배수경로를 통한 막힘현상은 발생하지 않아 gravel drain을 통한 배수효과는 sand drain과 유사한 것으로 평가된다.

## 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 proportions 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