

## 샌드파일 설치지반에서의 복합지반효과

### A Study on Composite Ground Effects of Sand Piles

천병식<sup>1)</sup>, Byung-Sik Chun, 여유현<sup>2)</sup>, Yoo-Hyeon Yeoh

<sup>1)</sup> 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ.

<sup>2)</sup> 한국해양대학교 공과대학 토목환경공학과 겸임교수, Concurrent Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea maritime National Univ.

**SYNOPSIS** : Sand pile is one of the widely used ground improvement methods. Sand pile improved ground will have composite ground effects, even though the primary purpose is the accelerated consolidation. However, the consolidation of sand pile improved ground as a composite ground is substantially under developed. This study investigate the effect of composite ground for relatively low volume displacement sand piles. Plate bearing tests and earth pressure cell measurements are performed. It turned out that the contribution of sand pile as a load bearing mechanism is not substantial. However the bearing capacity of the surrounding clayey soil is increased by sixty percent, and it cause the stiffness change during consolidation. Therefore it is expected that, the effect of increased stiffness of sand pile improved ground is influenced by change of ground stiffness.

Key words : sand pile, consolidation, surrounding clayey soil, composite ground effect,

## 1. 서론

샌드파일은 연약층 심도가 깊어서 수직배수거리가 큰 지반에 압밀축진을 목적으로 프리로딩공법과 병용되어 쓰이는 일반적인 연약지반 개량공법 중의 하나이다. 프리로딩공법만으로 개량된 지반과 다르게 재료적 특성이 우수한 샌드파일과 주변지반과의 복합적인 거동에 의해 지지력의 증대효과가 있게 된다. 지반개량을 목적으로 연직배수재로서 샌드파일을 설치할 경우 압밀축진과 이에 따른 주변지반의 강도증대효과를 얻을 수 있다. 또한 샌드파일이 형성된 강성정도에 따라 지반과 샌드파일의 상호작용에 의해 지반지지력 증대효과인 복합지반효과를 고려할 수 있게 된다. 이와 같은 복합지반효과에 의한 지반개량 효과 증대는 일반적으로 개량면적(치환비)이 클 경우 우수한 특성을 보이며, 상대적으로 치환비가 작을 경우에는 그 고려를 생략하게 되는 것이 일반적이다.

따라서 본 연구에서는 상대적으로 면적치환비가 작은 연직배수재로서 적용된 샌드파일 설치지반에서 원지반과 샌드파일 설치위치에 대하여 평판재하시험을 실시하여 지지력 특성을 파악하였으며, 토압계를 설치하여 상재하중 변화에 따른 응력변화를 파악하여 샌드파일 설치지반에서 복합지반효과에 의한 지지력 특성에 대하여 살펴보고자 하였다.

## 2. 복합지반효과

샌드파일이 설치된 개량지반은 재료적 특성이 우수한 샌드파일과 주변지반의 복합적인 거동에 의해 면적치환비에 따라 지지력의 증대효과가 있다. 샌드파일과 주변지반의 복합지반 거동을 예로 나타내면 다음 그림 1과 같다. 그림에 나타낸 바와 같이 샌드파일에 작용하는 응력상태는 지표면에 작용하는 하중에 의한 유효연직응력과 지반의 수평응력에 의한 유효방사응력으로 표현되는 삼축상태와 비교되어질

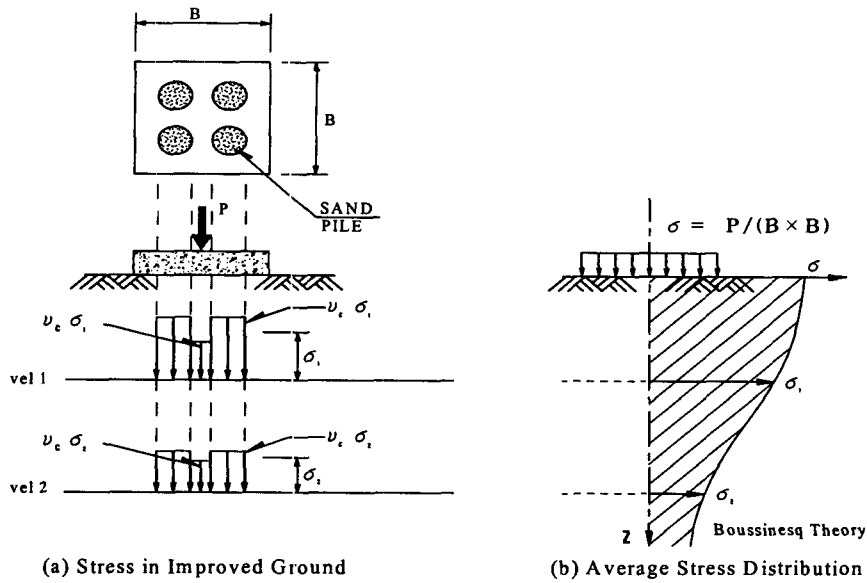


그림 1. 샌드파일 설치시 복합지반효과 발생기구

수 있다. 이와 같은 응력-침하 관계와 같이 샌드파일 설치효과는 주로 배수촉진 효과와 치환재료로부터 지반강도 개선효과로 평가되고 있으나 지반특성 및 시공상황과 관련한 복잡한 특성에 의해 샌드파일의 지지력 메커니즘과 원지반의 응력 분담비가 고려된 거동특성, 개량지반의 장기 침하량 및 잔류 침하량과의 관계, 복합지반에서의 과잉간극수압의 발생 및 소산확인 정도가 파악되어야 한다.

그림 2는 동일지역에서 연작배수재 종류별 발생침하량의 실측 예를 나타낸 것으로 샌드파일 보다 재료의 강성이 큰 쇠석말뚝의 경우 침하량 감소비는 매우 크며, 샌드파일 설치시에는 무처리시 보다 발생 침하량이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이것은 개량에 사용하는 재료의 강성 증가에 따라 원지반과 개량체와의 복합적인 거동에 의해 지지력 특성이 개선되며, 상재하중 작용에 따라 발생하는 침하량이 감소되는 것을 보여주는 것이다.

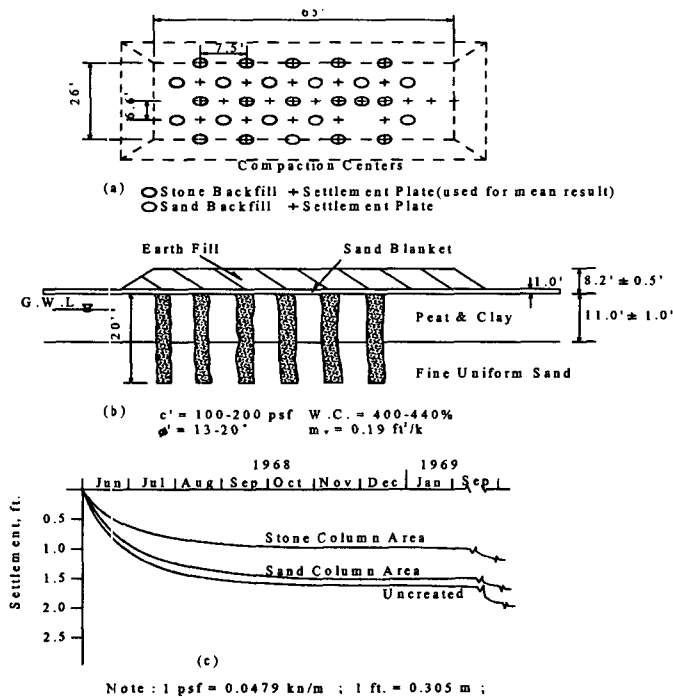


그림 2. 샌드파일 설치시 복합지반효과에 의한 침하발생량 비교

### 3. 현장시험개요

#### 3.1 지반특성

현장시험을 실시한 위치는 논산지역의 연약지반으로 12.0m정도 두께의 연약한 점토질실트(ML) 내지 실트질점토(CL)의 층적층이 존재하고, 그 하부로 층적 자갈층이 분포하고 있으며, 지하수위는 지표면 부근으로 GL-0.5m이내에 존재하고 있다. 연약지반의 지질공학적 특성은 표 1.에 나타낸 바와 같이 자연함수비( $w_n$ )는 45.1%, 소성지수(PI)는 20.2, 액성한계( $w_L$ )는 42.4%, N치는 2~4정도이며, 배인전단시험에 의한 비배수 전단강도( $S_u$ )는 20.59kPa, 압축지수( $C_c$ )는 0.325, #200체 통과율이 98.9%정도의 연약한 층적층이다. 불료란 시료를 채취하여 실내토질시험을 실시한 지층은 EL+0.15 ~ -0.65m로 상부 간극수압계 설치위치(EL-0.331m)의 지층이다.

표 1. 원지반의 지반공학적 특성(NS-site)

구분	물성치	비고
함수비( $w_n$ , %)	45.1	
액성한계( $w_L$ , %)	42.4	
소성지수(PI, %)	20.2	
단위중량( $\gamma_t$ , kPa)	16.97	
비배수전단강도( $S_u$ , kPa)	20.59	
N치	2~4	
일축압축강도( $q_c$ , kPa)	14.22	교란시료( $q_{ur}$ ) = 5.39 kPa
예민비	2.64	
선행압밀하중( $P_c$ , kPa)	45.11	
압축지수( $C_c$ )	0.325	
입도분석	No.40 통과율(%)	100
	No.200통과율(%)	98.9
	< 2 $\mu$ (%)	24.0

#### 3.2 현장시험

현장시험은 상대적으로 치환비가 작은 연직배수재로서 적용된 샌드파일의 복합지반효과를 파악하고자 하였다. 이를 위하여 원지반과 샌드파일의 지내력 확인을 위한 평판재하시험(PBT, plate bearing test)을 실시하였고, 성토체와 지반과의 상호거동을 확인하기 위하여 토압계(earth pressure cell)를 설치하여 현장계측을 실시하였다.

현장시험시 샌드파일 공법의 적용 구분은 다음 그림 3과 같다. 그림에 나타낸 바와 같이 도로성토지역의 샌드드레인의 직경(D)은 400mm, 간격(C.T.C)은 2,000mm, 설치심도는 11.5m이며, 도로사면지역의 샌드컴팩션파일은 직경(D) 700mm, 간격(C.T.C) 2,000mm, 설치심도 11.5m이다.

시험부지는 공법간의 면적치환비가 큰 차이를 보이는 샌드드레인과 샌드컴팩션파일 공법이 인접하여 적용되는 시공지역을 선정하여 면적치환비와 공법변화에 따른 지지력 특성을 파악하기 위하여 그림 4에서와 같이 4개소(샌드드레인 상부와 원지반, 샌드컴팩션파일 상부와 원지반)에서 평판재하시험을 실시하였으며, 면적치환비가 크고 다짐효과가 상대적으로 큰 샌드컴팩션파일 설치지역에 대하여는 토압계를 설치하여 성토체와 개량지반 상호간의 응력분포특성을 파악하였다.

##### 3.2.1 평판재하시험

샌드파일설치에 따른 복합지반효과를 파악하기 위하여 샌드드레인 설치지역과 샌드컴팩션파일 설치

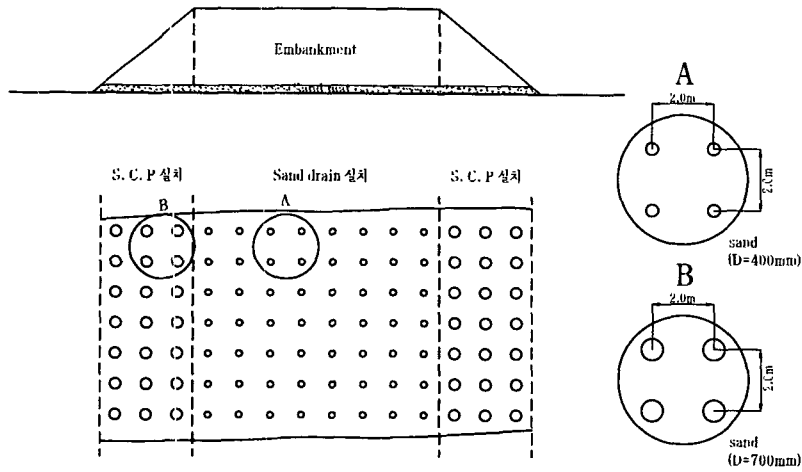


그림 3. 시험부지 공법적용 단면도

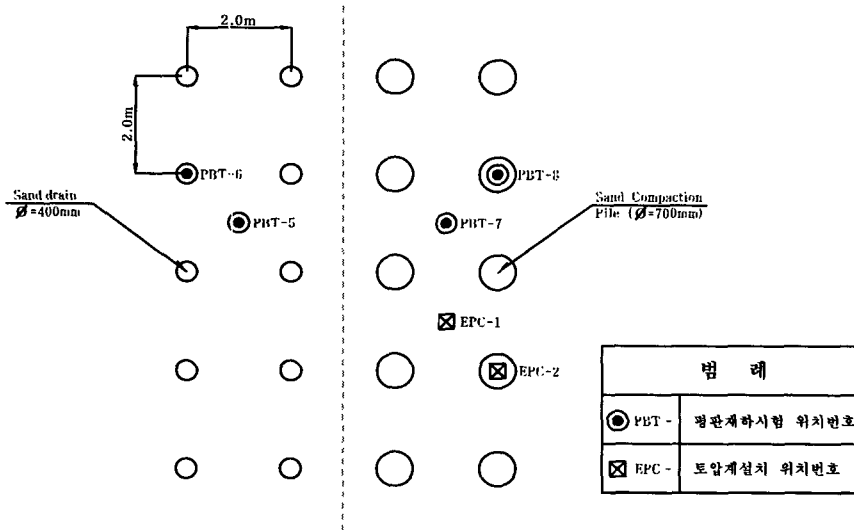


그림 4. 현장시험 계획

지역으로 구분하여 직경 400mm의 재하판을 사용하고 증장비를 재하하중으로 이용하여 평판재하시험을 실시하였다. 실시한 평판재하시험은 다음의 일반적인 항복하중 결정방법에 의해 항복하중을 구하였다.

- 하중(P) - 침하량(S) 곡선법
- log P - log S 곡선법
- S - log t 곡선법
- $P - ds / d ( \log t )$  곡선법

또한, 허용지지력의 결정은 항복하중의 1/2이하 또는 극한하중의 1/3이하로 하였으며, 재하판 직경의 10%에 해당하는 침하발생량을 기준으로 하여 극한하중을 구하여 허용지지력을 평가하였다. 시험결과를 상기의 분석방법을 이용하여 각 시험위치별로 항복응력을 평가하여 하중(P)-침하량(S) 곡선법에 대한 해석결과에 대한 분석에는 그림 5~그림 8에 나타내었으며, 분석결과를 종합하여 요약 정리하여 나타내면 표 2와 같다.

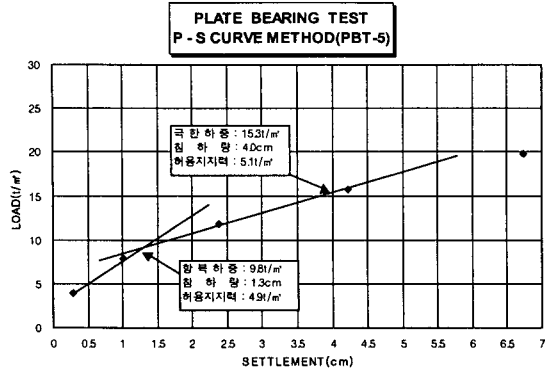


그림 5. PBT결과 분석 예 (샌드드레인 주변 원지반)

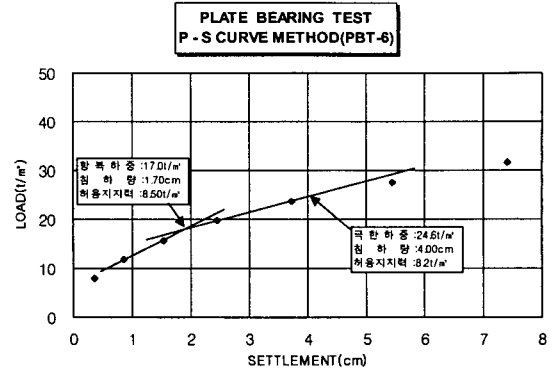


그림 6. PBT결과 분석 예 (샌드드레인 상부)

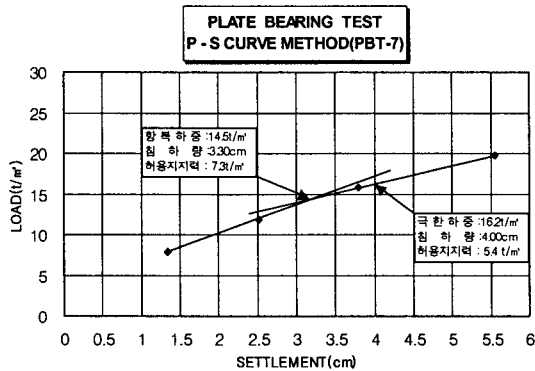


그림 7. PBT결과 분석 예 (샌드컴팩션파일 주변 원지반)

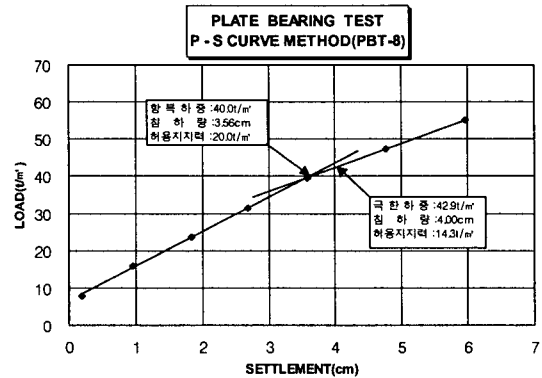


그림 8. PBT결과 분석 예 (샌드컴팩션파일 상부)

표 2. 평판재하시험 결과 요약

시험 위치	재하 최대 하중 (kN/m²)	항복하중에 의한 분석법											극한하중에 의한 분석법			
		P - S			log P- log S			S-log t			ds/d(log t)-P			극한 지지력 (kN/m²)	허용 지지력 (kN/m²)	
		항복 하중 (kN/m²)	허용 지지력 (kN/m²)	침하량 (mm)	항복 하중 (kN/m²)	허용 지지력 (kN/m²)	침하량 (mm)	항복 하중 (kN/m²)	허용 지지력 (kN/m²)	침하량 (mm)	항복 하중 (kN/m²)	허용 지지력 (kN/m²)	침하량 (mm)			
샌드 드레인 설치지역	원지반	193.68	96.11	48.05	13.0	98.07	49.03	14.0	116.21	57.86	24.0	147.10	73.55	38.0	150.04	50.01
	파일	309.89	166.71	83.36	17.0	170.64	85.32	18.0	232.42	116.70	37.3	193.68	97.09	24.5	240.26	80.41
샌드 컴팩션 파일 설치지역	원지반	193.68	142.20	71.59	33.0	137.29	68.65	30.0	154.95	77.47	38.0	142.20	71.59	33.0	158.87	52.96
	파일	539.37	392.27	196.13	36.0	392.27	196.13	39.0	387.36	193.68	35.9	451.11	225.55	45.0	421.69	140.24

현장에서의 평판재하시험은 샌드매트가 설치된 위치에서 샌드파일 설치 후 성토하중 재하전에 실시한 시험결과로 하중을 재하시 강도개량 특성변화를 고려할 경우는 개량특성이 크게 개선되어 질 것으로 판단된다. 표 2의 평판재하시험결과 요약에서와 같이 샌드드레인 설치지역보다는 샌드컴팩션파일 설치지역에서의 지지력 특성이 전체적으로 양호하게 평가된다. 원지반 특성을 비교하면 샌드컴팩션파일 설치지역의 경우가 보다 지지력이 양호하게 평가되었으며, 말뚝의 경우는 샌드컴팩션파일 지역에서 매우 큰 지지력 특성을 나타내고 있다.

또한 적용공법별로 원지반과 샌드파일의 지지력 증가를 고려하면 상대적으로 강성이 큰 샌드컴팩션파일에서 265%의 강도증가가 발생한 것으로 나타났으며, 샌드드레인 설치지역에서 원지반과 비교된 샌드파일의 지지력은 60%정도로 작게 증가하는 경향을 보여 주었다. 특히 원지반의 지지력과 비교된 샌드

드레인(샌드파일)의 지지력증가비 60%는 작은 면적치환비를 고려하면 증가된 지지력은 더욱 작을 것이다.

### 3.2.2 토압 측정

일반적으로 복합지반에 의한 지반지지력 증대효과가 큰 것으로 여겨지는 샌드컴팩션파일공법 적용구간에서 토압계를 설치(그림 4참조)하여 성토하중 증가에 따른 응력전이(Load Transfer)특성을 파악하기 위하여 샌드컴팩션파일 상부 및 주변 원지반에 설치하여 시간경과에 따라 측정된 토압변화는 그림 9에 나타내었다. 그림에 나타낸 바와 같이 성토하중 증가와 함께 샌드컴팩션파일 상부에 설치한 토압계의 토압변화는 하중변화에 따라 유사한 특성을 보이고 있으나 샌드컴팩션파일 주변 원지반에 설치한 토압계의 경우는 다소 작은 응력변화를 보이는 것으로 나타났으며, 또한 성토완료 후 시간경과에 따라 작용응력은 작게 감소하는 경향을 보여주고 있다. 또한, 하중증가에 따른 토압계 측정결과의 비로 나타내는 응력전이비(L.T.R., Load Transfer Ratio)를 그림 10에 나타내었다.

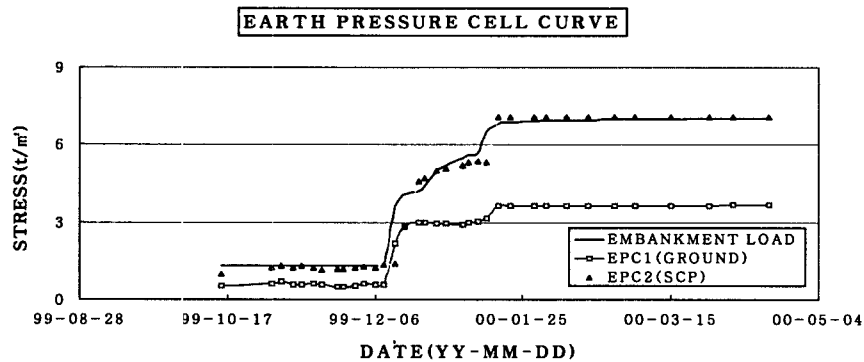


그림 9. 성토하중변화에 따른 토압발생 변화

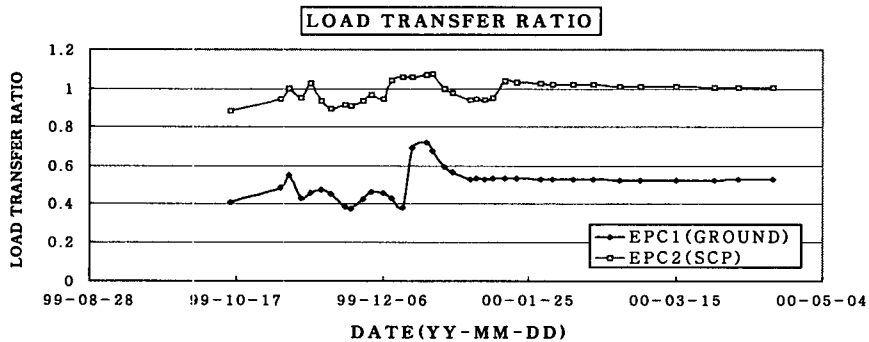


그림 10. 토압계 설치위치 지반조건에 따른 응력전이비(L.T.R) 변화

그림에 나타낸 바와 같이 샌드컴팩션파일 상부의 토압계(EPC-2)에서의 응력전이비는 1.0정도를 나타내고 있어 성토에 따른 하중작용의 확실한 응력전이가 이루어졌음을 보여주며, 샌드컴팩션파일 주변 원지반의 토압계(EPC-1)의 경우 응력전이비는 0.4~0.7의 범위를 보이거나 성토완료 후 방치기간 동안의 응력전이비는 0.5정도로 나타나 샌드컴팩션파일과 비교되는 상대적인 응력전이비의 50%정도로 평가가 가능하다.

이와 같은 결과로부터 성토하중에 의한 지반에서의 하중분담은 상대적으로 강성이 큰 샌드컴팩션파일에서 분담율이 크게 나타나고, 샌드컴팩션파일 주변 원지반은 작용하중에 따른 지층의 압밀현상이 상대적으로 크게 발생하기 때문에 응력전이가 작게 발생한 것으로 판단된다.

#### 4. 분석 및 고찰

연약지반상에 설치한 샌드파일과 주변지반과의 복합지반효과를 파악하기 위하여 실시한 평판재하시험 및 토압계 계측결과 샌드파일의 강성은 원지반보다 크게 개선되었음을 확인할 수 있었다. 이와 같이 개선된 샌드파일 개량지반의 지지력 특성을 복합지반효과로 파악하기 위하여 개량면적을 고려한 면적치환비를 각 적용공법 및 적용지역별로 구분하여 평가하면 다음 표 3과 같다.

표 3. 복합지반의 단면적

구 분	총면적 (m <sup>2</sup> )	Pile 단면적 (m <sup>2</sup> )	원지반단면적 (m <sup>2</sup> )	원지반면적비 (%)	면적치환비 (%)	비 고
샌드드레인 설치지역	4.0	0.1256	3.8744	96.86	3.14	2m×2m
샌드컴팩션파일 설치지역	4.0	0.3847	3.6153	90.38	9.16	2m×2m

표 3에 나타낸 바와 같이 샌드드레인 설치지역은 면적치환비가 3.14%이며, 샌드컴팩션파일 설치지역은 9.16%로 평가된다. 이와 같이 평가된 면적비를 이용하여 평판재하시험으로부터 얻은 각 지역별 지지력으로부터 복합지반의 지지력을 평가하면 표 4와 같다.

표 4. 복합지반효과에 의한 지지력 증대효과 비교

구 분	Pile 지지력 (kN/m <sup>2</sup> )	원지반지지력 (kN/m <sup>2</sup> )	복합지반효과를 고려한 지지력 (t/m <sup>2</sup> )	복합지반에 의한 강도증가율 (%)	비고
샌드드레인 설치지역	80.41	50.01	$0.9686 \times 50.01 + 0.0314 \times 80.41 = 50.96$	2%	
샌드컴팩션파일 설치지역	140.24	52.96	$0.9038 \times 140.24 + 0.0916 \times 140.24 = 60.71$	15.7%	

표 4에서와 같이 샌드드레인의 경우, 복합지반효과를 고려한 지지력은 약 50.99kN/m<sup>2</sup>로 원지반의 지지력 50.01kN/m<sup>2</sup>와 비교하면 매우 작은 증가효과를 보이고 있다. 반면 샌드컴팩션파일의 경우 복합지반효과를 고려한 지지력은 약 61.78kN/m<sup>2</sup>로 원지반의 지지력 52.96kN/m<sup>2</sup>와 비교하여 약 15.7%정도 증가한 것으로 나타나 복합지반효과에 의한 개량효과가 크게 평가될 수 있음을 알 수 있다.

이와 같이 일반적으로 연직배수재로 설치한 샌드파일(샌드드레인)에서는 복합지반효과로 인한 지지력 증대효과는 매우 작게 평가되고 있어 설치된 샌드파일 강성에 의한 지지력증가 영향요소는 매우 작은 것으로 판단된다. 그러나 평판재하시험 결과로부터 파악된 샌드드레인 설치지역에서 원지반과 파일 설치부분과의 비교에서 파일설치부분이 약 60%정도 증가된 경향을 보이고 있으므로, 파일설치 부분에서는 부분적으로 성토하중에 의한 압밀발생 과정에서 압밀침하량을 경감시킬 수 있는 중요한 요소로 작용할 수 있을 것으로 판단된다.

연약지반 개량공법으로 프리로딩만 실시한 지반과 비교하여 샌드파일을 설치지반의 경우 샌드파일 설치시 발생하는 압밀침하량이 물성치의 판단 부적절 및 지반교란 등의 영향(한국지반공학회, 1998)에 의하여 계산침하량 보다 크게 발생하는 경우도 있으나 일반적으로 발생 침하량이 경감(송정락 등, 1992)되는 경우가 많은데 이와 같은 이유는 일반적으로

- ① 실내시험용 시료는 다른 지역보다 연약한 층에서 채취하여 구한 토질정수 사용
- ② 유한한 폭을 가진 대상하중으로 지중에 분산되어 하중강도가 저하
- ③ 제방하중 작용시 제방의 가장자리 부분인 경우 연직 작용응력 감소
- ④ 설계시 예측은 1차원 압밀이론에 의하여 산정되나 실제 현장 조건은 2차원 압밀에 보다 가깝다.
- ⑤ 현장의 연약지반 표면에는 하부 지반보다 딱딱한 Dry Crust가 형성
- ⑥ 샌드파일 설치시 공동확장이론(Vwsic, 1972)에 의한 초기 방사방향 압축으로 인한 주변지반의 압밀특성변화(천병식 등 2000a,b, 2001)

등으로 설명 할 수 있다. 상기 사항에 추가하여 샌드파일 설치지반은 샌드파일의 강성증대로 인해 지지력이 증대되고 압축특성이 변화하여 복합지반효과(Nagaraj, 2000)에 의해 침하량이 감소될 수 있는 것으로 판단된다.

## 5. 결론 및 제언

샌드파일 설치지반에서 평판재하시험 및 토압계 측정결과로부터 파악한 복합지반효과에 의한 지지력 특성을 요약·정리하면 다음과 같다.

- 1) 샌드파일 구분(샌드드레인/샌드컴팩션파일)에 따라 지역을 구분하여 실시한 평판재하시험결과 샌드컴팩션파일 설치지역에서의 지지력특성이 전체적으로 양호하게 평가된다. 원지반특성을 비교하면 샌드컴팩션파일 설치지역의 경우, 지지력이 양호하게 평가되었으며, 파일의 경우는 샌드컴팩션파일에서 시공시에 매우 큰 지지력 특성을 나타내고 있다.
- 2) 샌드파일 설치에 따른 연약지반에서의 지지력 증가는 다짐말뚝으로 재료강성이 상대적으로 큰 샌드컴팩션파일에서는 265%정도 증가하였으며, 샌드드레인의 지지력은 60%정도로 작게 증가하는 것으로 나타났다.
- 3) 샌드컴팩션파일 설치지역에서 토압계를 설치하여 샌드컴팩션파일 상부와 주변원지반에 대한 응력전이비를 확인한 결과 샌드컴팩션파일에서는 1.0내외로 성토하중의 응력전이가 발생하였으나, 침하가 발생하는 연약한 주변 원지반의 경우는 0.5정도로 나타났다.
- 4) 평가된 면적지환비는 샌드드레인 설치지역의 경우 3.24%이며, 샌드컴팩션파일 설치지역의 경우는 9.16%로 복합지반효과를 고려한 지지력은 샌드드레인 설치지역의 경우 약 2%, 샌드컴팩션 파일 설치지역의 경우 15.7%로 나타나 샌드드레인 설치 지역에서 복합지반효과를 고려한 지지력 증가요인은 매우 작은 것으로 나타났다.
- 5) 일반적으로 연직배수재로 설치한 샌드파일(샌드드레인)에서는 복합지반효과에 의한 지지력 증대효과는 매우 작게 평가되고 있으나 샌드파일의 강성은 원지반과 비교하여 60% 증가한 것으로 평가되므로 성토하중에 의한 압밀과정중 부분 또는 전체적으로 압밀침하량을 경감시킬 수 있는 중요한 요소로 작용할 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 송정락, 백승훈, 오다영(1992), "현장계측사례를 통한 압밀특성 평가", 한국지반공학회 92년 가을 학술 발표회(준설, 매립, 인공섬) 논문집, pp.121~130
2. 천병식, 여유현(2000a), "Sand Pile 주변지반에서의 공동확장이론에 의한 과잉간극수압특성 연구", 대한토목학회논문집, 제20권 제 5-C호, pp.429~439
3. 천병식, 여유현(2000b), "Sand Pile 주변지반에서의 지반개량특성에 관한 연구", 한국지반공학회 논문집, 제16권 제 5호, pp.203~212
4. 천병식, 여유현(2001), " Sand Pile 설치지반에서 텍소트로피에 의한 지반개량특성", 한국지반공학회 논문집, 제17권 제 1호, pp.5~14
5. 한국지반공학회(1988), "양산물금관련 학술연구 용역 보고서", pp.2-33~68.
6. Vesic, A. S.(1972), "Expansion of Cavities in Finite Soil Mass", J. of Soil Mechanics and Foundations Div, ASCE, Vol.98, No.SM3, Mar. pp.265~290
7. T.S. Nagaraj(2000), "Composite Soft Ground - Its Formation and Characterization", Special Invitation Lecture, pp.1~25