

면적치환비가 작은 샌드파일 설치지반에서의 복합지반효과

Composite Ground Effects on Small Area Replacement Ratio of Sand Piles

천병식* · 여유현**

Chun, Byung Sik · Yeoh, Yoo Hyeon

Abstract

Sand pile is widely used as a ground improvement method. Although the primary purpose of constructing sand pile is accelerating consolidation, composite ground effect also can be gained by constructing sand pile. This study was accomplished to understand composite ground effect on the ground improved by sand piles which were applied as vertical drainage material when area replacement ratio was small relatively. For determining bearing capacities of origin ground and sand piles and analysing interaction between embankment and origin ground, bearing tests and earth pressure monitoring are performed. From the results, it turned out that the contribution of sand pile as a load bearing mechanism is not substantial. However, the bearing capacity of sand pile was increased to sixty percentages when compared with origin ground. The increasement of bearing capacity could be caused the change of consolidation characteristics during the process of consolidation by overburden load. Therefore, the composite ground effects depending on stiffness increasement of sand pile would be estimated as a factor decreasing consolidation settlement.

Keywords : Sand pile, Consolidation, Area replacement ratio, Composite ground effect

요 지

샌드파일 공법은 연약지반 개량을 위해 널리 사용되는 방법중의 하나이다. 샌드파일 설치에 의해 얻고자 하는 주된 목적은 압밀 촉진에 있으나 이와 더불어 복합지반효과를 지니게 된다. 본 연구에서는 상대적으로 면적 치환비가 작은 연직배수재로서 적용된 샌드파일 설치지반에서의 복합지반효과를 파악하고자 하였다. 이를 위하여 원지반과 샌드파일의 지내력 확인을 위한 평판재하시험을 실시하였으며, 성토체와 지반과의 상호거동을 확인하기 위하여 토압계를 설치하여 계측관리를 실시하였다. 분석결과 면적치환비가 작은 샌드파일 설치지반에서 복합지반을 고려한 지지력은 원지반의 지지력과 비교하여 매우 작은 증가효과를 보였다. 그러나 원지반과 비교한 샌드파일 설치위치에서의 지지력 증가는 약 60%로 나타났다. 이와 같이 샌드파일의 강성증대에 의한 파일설치 위치에서의 지지력 증대는 재하하중 작용에 의한 압밀진행 과정중 압밀특성 변화의 요인으로 작용하게 될 것이다. 따라서 샌드파일 강성증대에 따른 복합지반효과는 샌드파일 설치지반에서 압밀침하량이 감소하는 요인으로 평가될 수 있는 것으로 판단된다.

주요어 : 샌드파일, 압밀, 면적치환비, 복합지반효과

* 정희원 · 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수 · 공학박사

** 정희원 · 한국해양대학교 공과대학 토목공학과 겸임교수

1. 서론

샌드파일은 연약층 심도가 깊어서 수직배수거리가 큰 지반에 압밀축진을 목적으로 프리로딩공법과 병용되어 쓰이는 일반적인 연약지반 개량공법 중의 하나이다. 연약지반 처리를 위하여 샌드파일공법을 적용할 경우 프리로딩공법만을 적용하여 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 있게 된다. 또한 샌드파일의 강성정도에 따라 지반과 샌드파일의 상호작용에 의해 지반지지력 증대효과인 복합지반효과를 기대할 수 있다. 이와 같은 복합지반효과는 일반적으로 개량면적(면적 치환비)이 클 경우 효과가 크지만 상대적으로 면적치환비가 작을 경우에는 고려를 생략하는 것이 일반적이다.

따라서 본 연구에서는 현장시험을 통하여 상대적으로 면적치환비가 작은 연직배수재로서 적용된 샌드파일 설치지반에서 평판재하시험을 실시하여 지지력 특성을 파악하였으며, 토압계를 설치하여 상재하중 변화에 따른 응력변화를 파악하여 샌드파일 설치지반에서 복합지반효과에 의한 지지력 및 침하특성에 대한 기본적인 경향을 살펴보고자 하였다.

2. 지반개량특성

연약지반에서 샌드파일 설치에 따른 지반거동 메커니즘과 해석기법은 여러 연구자들에 의해 논의되고 있다. 연약지반상에 설치된 샌드파일은 연약지반의 일부를 보다 안정된 모래로 치환하여 연약지반과 모래에 의한 복합지반을 형성함으로써 지반강도 및 발생 침하량에 영향을 미치게 된다. 샌드파일 설치지반의 개량특성에 영향을 미치는 요소인 지지력, 침하, 복합지반효과에 대하여 설명하면 다음과 같다.

2.1 지지력 특성

점성토 지반에서의 극한지지력을 평가하기 위한 제안식 및 경험식에서의 중요한 매개변수는 샌드파일 재료의 내부마찰각과 주변 점성토의 전단강도 등이다. 그러나 연약지

반중에서 샌드파일에 작용하는 응력상태는 지표면에 작용하는 하중에 의한 유효 연직응력과 지반의 수평응력에 의한 유효방사응력으로 표현되는 삼축상태와 비교되어질 수 있다. 따라서, 샌드파일의 거동에 영향을 주는 요소는 주로 지반의 비배수 전단강도, 지반의 방사방향 응력-변형특성, 초기 샌드파일의 설치직경, 샌드파일 재료의 응력-변형 특성과 내부마찰각 등이 있으며, 하중이 작용할 때 발생하는 지반의 압밀은 보통 무시하게 된다.

한편, 연약지반중에 설치한 샌드파일에서의 일반적인 파괴형태는 Bulging파괴로, 이는 샌드파일의 주면과 선단의 지지형식 또는 선단지지형식 모두에서 주로 발생하는 파괴형태이다. 샌드파일의 극한지지력 평가를 위한 제안식을 살펴보면 Hughes(1975)의 경우 주면 마찰저항과 선단지지력으로, Hansbo(1994)의 경우에는 소성이론에 근거하여 실린더형 팽창의 경우 파괴시 방사응력(Radial Stress, σ_{rr})을 표현하였으며, Vesic(1972)의 경우에는 실린더형 공동확장이론에 의해 실린더는 무한대로 길게하고 지반을 탄성지역과 소성지역으로 구분하여 평가식을 제안하였다. 또한 Brauns(1978)는 3차원 수동토압이론을 적용하여 점성토 지반에서 파일의 극한지지력을 계산하는 식을 제안하였다. 이와 같이 극한지지력에 대한 제안식에 따라 차이는 다소 있으나 일반적으로 아래 식 (1)과 같이 점성토의 비배수전단강도에 지지력계수를 곱한 형태로 표현할 수 있다(Barksdale and Bachus, 1983).

$$q_{ult} = N_c \cdot s_u \quad (1)$$

여기서, q_{ult} : 샌드파일이 지지할 수 있는 극한지지력 (kPa)

s_u : 점성토의 비배수 전단강도(kPa)

N_c : 지지력계수

상기 식에서와 같이 지지력계수 및 지지력은 샌드파일 주변지반의 토질특성, 시공경험 및 기술수준 등에 따라 차이가 있을 수 있다.

그림 1은 면적치환비의 변화에 따른 샌드파일 설치지반에서의 극한지지력의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 샌드파일에 의한 면적치환비가 증가될수록 극한지지력이 증가함을 알 수 있다.

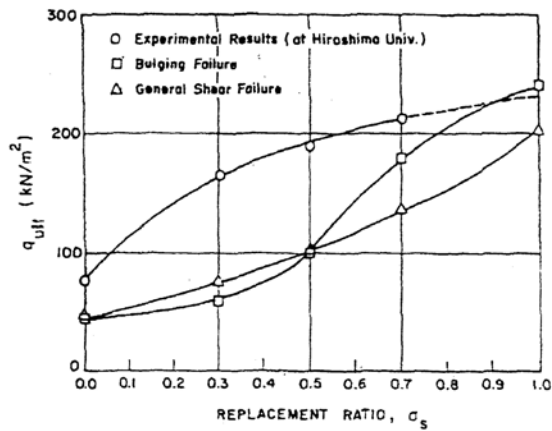


그림 1 극한지지력과 면적치환비와 관계(after Aboshi & Suematsu, 1985)

2.2 침하 특성

샌드파일이 설치된 연약지반에서 침하량을 계산하는 방법에는 단위셀 개념에 의한 응력비를 고려한 압축지수에 의한 방법, 복합지반효과에 의한 압축저감계수를 고려하는 체적압축계수에 의한 방법(일명 β 법)과 삼축상태의 응력 및 소성평형상태로 단위셀 내에 있는 흙은 단성체로 간주하여 샌드파일과 주변지반의 연직변위는 동일한 것으로 고려하는 Priebe방법(1976) 등이 있다. 여러가지 평가 방법 중 체적압축계수에 의한 방법에 대하여 설명하였다. 샌드파일 설치지반에서 하중이 재하될 때 점성토지반의 침하량 관계는 다음과 같다.

$$\beta = \frac{S_t}{S_0} \quad (2)$$

여기서, S_t : 샌드파일 설치후 침하량

S_0 : 원지반(무처리지반)의 침하량

β : 침하저감계수(Settlement reduction ratio)

이때, 침하저감계수(β)는 전단강도 표기식의 응력비(μ_c)와 같은 형태로 표현되며, 치환율에 따라 다음과 같이 구분하여 설명할 수 있다.

- 저치환 개량의 경우 ($a_s < 0.5$)

$$\beta = \mu_c = \frac{1}{1 + (n-1)a_s} \quad (3)$$

- 고치환 개량의 경우 ($a_s \geq 0.5$)

$$\beta = 1 - a_s \quad (4)$$

식 (3), (4)에서와 같이 저치환과 고치환 개량으로 침하저감계수를 구할 수 있다. 또한 그림 2에서는 침하저감계수에 대하여 Bergado(1987)의 실험결과와 여러 방법에 근거하여 계산한 결과로부터 면적치환비 및 샌드파일의 내부마찰각, 응력분담비의 변화에 따라 침하저감계수의 변화를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 전반적으로 면적치환비가 증가할수록 침하저감계수는 작아지고 발생침하량이 작아지고 있음을 알 수 있다.

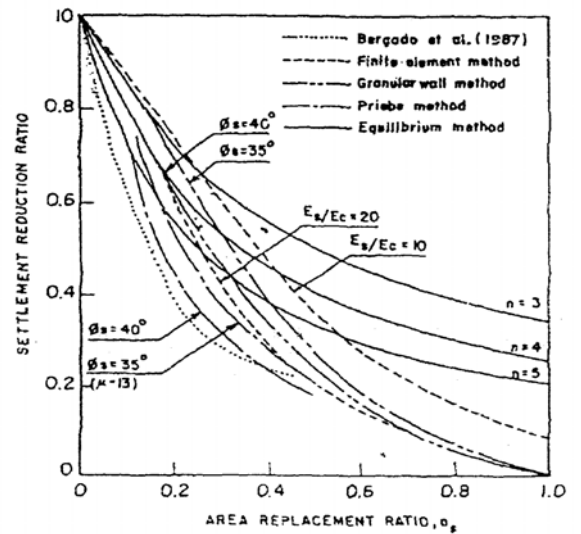
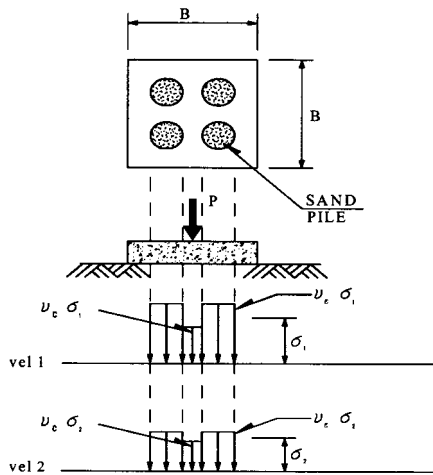


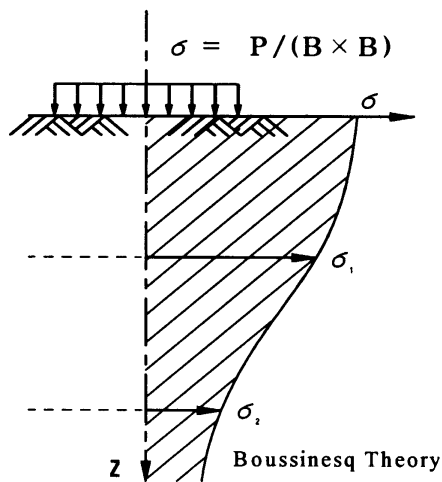
그림 2 면적치환비와 침하저감계수와의 관계(after Aboshi & Suematsu, 1985)

2.3 복합지반효과

샌드파일이 설치된 개량지반은 재료적 특성이 우수한 샌드파일과 주변지반의 복합적인 거동에 의해 지지력이 증대되는 효과가 있다. 이와 같은 복합지반의 거동을 예로 나타내면 다음 그림 3과 같다.



(a) Stress in Improved Ground

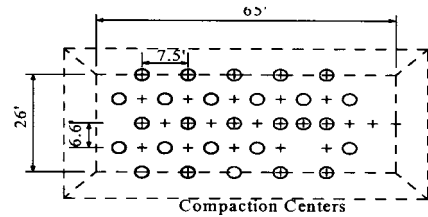


(b) Average Stress Distribution

그림 3 샌드파일 설치시 복합지반효과 발생기구

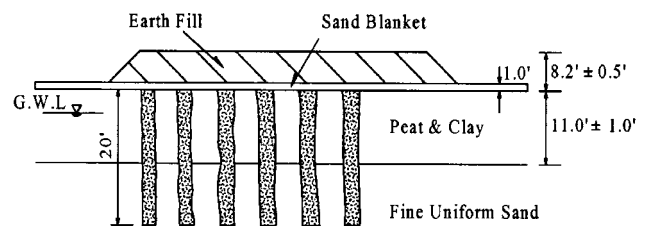
그림에서와 같이 샌드파일에 작용하는 응력상태는 지표면에 작용하중으로 인한 연직유효응력과 지반의 수평응력에 의한 방사방향 유효응력으로 표현되는 삼축상태와 비교되어질 수 있다. 응력-침하 관계에서와 같이 샌드파일 설치로 인한 효과는 주로 배수축진과 더불어 치환재료에 의한 지반강도 증대로 구분할 수 있다. 이것은 지반특성 및 시공상황과 관련한 복잡한 특성에 의해 지지력 메커니즘과 원지반의 응력 분담비가 고려된 거동특성, 개량지반의 장기 침하량 및 잔류 침하량과의 관계, 복합지반중에서 과잉 간극수압의 발생 및 소산확인의 고려가 요구된다.

그림 4는 동일지역에서 연직배수재 종류별 발생침하량의 실측결과를 예시한 것으로 샌드파일 보다 재료의 강성이 큰 쇠석말뚝의 경우 발생 침하량이 작으며 무처리시와 비교하여 샌드파일을 설치할 경우 발생침하량이 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이것은 사용재료의 강성 증가에 따라 원지반과 개량체와의 복합적인 거동에 의해 지지력 특성이 개선되며, 이에 따라 발생 침하량이 감소되는 것을 나타내고 있다.

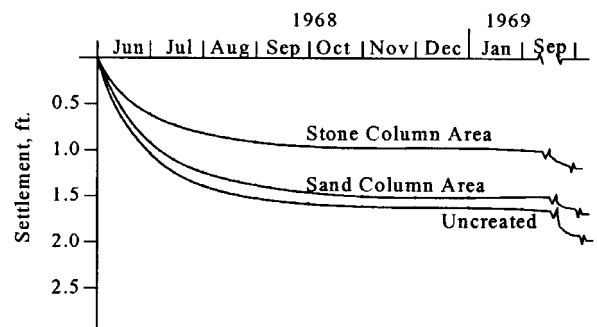


(a) O Stone Backfill+Steelment Plate(used for mean result)

O Stone Backfill+Steelment Plate



(b) $c = 100 \ 200\text{psf}$ $WC = 400 \ 440\%$
 $\phi = 13 \ 20^\circ$ $m_v = 0 \ 19\text{ft}^2/\text{k}$



(c) Note : 1psf = 0.0479kN/m², 1ft = 0.305m

그림 4 샌드파일 설치시 복합지반효과에 의한 침하발생량 비교(Greenwood, 1970)

그림 5에서는 원지반과 비교된 개량지반에서의 강성증대에 따른 압밀특성의 변화를 나타내며 Nagaraj et al(2000)에 의하면 원지반에 주입된 고결체에 의한 고화 상태 변화에 따라서 일정하중단계 내에서 압축지수가 크게 감소되며 침하발생량이 억제되는 것을 나타내고 있다.

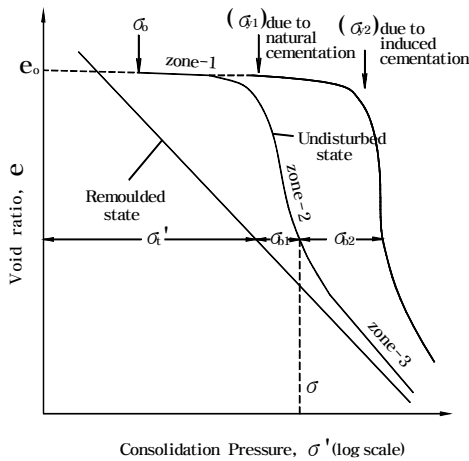


그림 5 지반 강성증대에 따른 압밀특성 변화

일반적으로 연약지반의 개량정도의 파악에 있어 복합지반효과는 개량체의 강성이 크고 면적치환비가 큰 개량지반에 대하여 고려하고 있지만 본 연구에서는 연직배수공법으로 적용하여 상대적으로 면적치환비가 작은 샌드파일 설치지반에서의 지반 지지력 특성 및 침하특성을 복합지반효과로 고려하고자 하였다.

3. 현장시험개요

3.1 지반특성

현장시험이 실시된 위치는 충청남도 00지역 고속도로 건설현장의 연약지반으로 12.0m정도 두께의 연약한 점토질실트(ML) 내지 실트질점토(CL)의 층적층과 하부의 층적 자갈층이 분포하고 있으며, 지하수위는 GL-0.5m 이내이다. 연약지반의 지반공학적 특성은 표 1에서와 같이 자연함수비(w_n)는 45.1%, 액성한계(w_L)는 42.4%, 소성지수(PI)는 20.2, N치는 2~4정도이며, 배인전단시험에 의한 비배수 전단강도(S_u)는 20.59kPa, 압축지수(C_c)는 0.325, #200체 통과율은 98.9%이다.

표 1 시험지역 원지반의 지반공학적 특성

구분	물성치	비고
함수비(w_n , %)	45.1	
액성한계(w_L , %)	42.4	
소성지수(PI, %)	20.2	
단위중량(γ_b , 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	
선형압밀하중(P_c , kPa)	45.11	
압축지수(C_c)	0.325	
입도분석	No.40 통과율(%)	100
	No.200통과율(%)	98.9
	< 2 μ (%)	24.0

3.2 현장시험

현장시험은 상대적으로 면적치환비가 작은 연직 배수공법으로 적용된 샌드파일에 의한 복합 지반의 개량특성을

파악하고자 하였다. 이를 위하여 원지반과 샌드파일의 지내력 확인을 위한 평판재하시험을 실시하였고, 성토체와 지반과의 상호거동을 확인하기 위하여 토압계를 설치하여 현장계측을 실시하였다.

현장시험시 샌드파일 공법의 적용 구분은 다음 그림 6과 같다. 그림에 나타난 바와 같이 도로성토지역에 연직배수를 목적으로 설치한 샌드드레인의 직경(D)은 400mm, 간격(C.T.C)은 2,000mm, 설치심도는 11.5m이며, 도로사면 지역의 경우는 측방유동이 발생하지 않도록 설치한 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 선정였다. 또한 면적치환비와 공법변화에 따른 지지력 특성을 파악하기 위하여 그림 7에서와 같이 4개소(샌드드레인 상부와 원지반, 샌드컴팩션파일 상부와 원지반)에 대하여 평판재하시험을 실시하였으며, 특히 샌드드레인 보다는 상대적으로 면적치환비가 크고 다짐에너지가 큰 샌드 컴팩션파일 설치지역에 대하여는 토압계를 설치하여 성토하중 변화에 따른 샌드파일 설치지역과 주변지반에서의 응력변화 특성을 파악하고자 하였다.

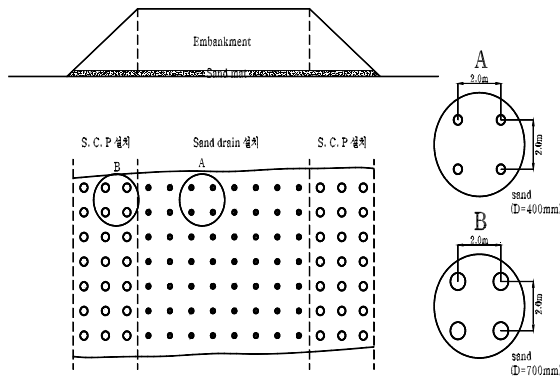


그림 6 시험부지 공법적용 단면도

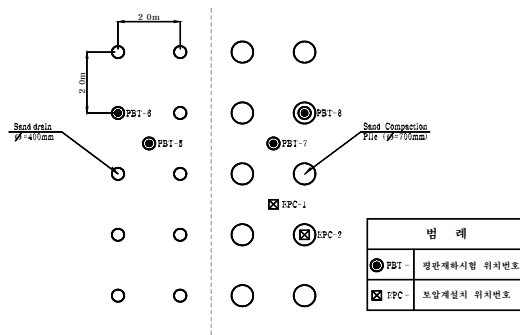


그림 7 현장시험 계획

3.2.1 평판재하시험

시험실시 지역은 샌드드레인 설치지역과 샌드컴팩션파

일 설치지역으로 구분하였다. 샌드파일 설치조건(직경, 간격, 다짐에너지 조건)별로 지반 지지력 특성의 상대적인 비교를 위하여 직경 400mm의 재하판을 동일하게 사용하여 시공 중장비를 재하하중으로 이용하여 평판재하시험을 실시하였다. 시험결과는 다음과 같은 일반적인 항복하중 결정방법에 의해 허용 지지력을 평가하였다.

- 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 허용 지지력을 평가하였다. 각 시험위치별로 항복응력을 평가한 하중(P)-침하량(S) 곡선법에 대한 해석결과에 대한 분석예를 그림 8 ~ 그림 11에 나타내었다. 샌드파일 설치조건별 허용지지력 분석결과를 요약 정리하여 표 2에 나타내었다.

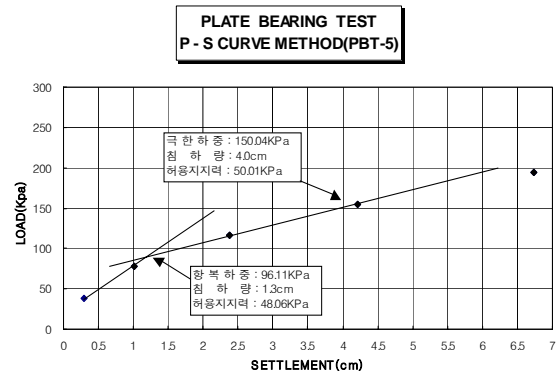


그림 8 PBT결과 분석예(SD 주변 원지반)

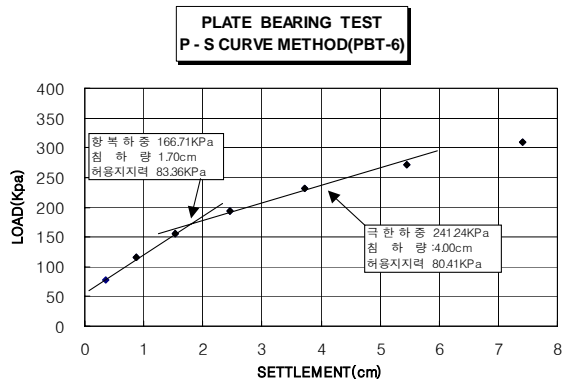


그림 9 PBT결과 분석예(SD 상부)

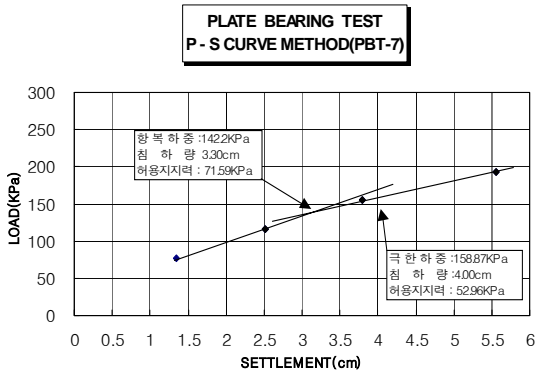


그림 10 PBT결과 분석예(SCP 주변 원지반)

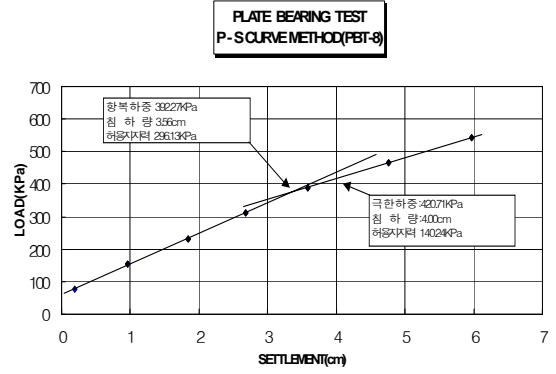


그림 11 PBT결과 분석예(SCP 상부)

표 2 평판재하시험 결과 요약

시험 위치	재하 최대 하중 (kPa)	항복하중에 의한 분석법											극한하중에 의한 분석법			
		P S			log P log S			S log t			ds/d(log t) P			극한 지지력 (kPa)	허용 지지력 (kPa)	
		항복 하중 (kPa)	허용 지지력 (kPa)	침하량 (mm)	항복 하중 (kPa)	허용 지지력 (kPa)	침하 량 (mm)	항복 하중 (kPa)	허용 지지력 (kPa)	침하량 (mm)	항복 하중 (kPa)	허용 지지력 (kPa)	침하 량 (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 샌드매트와 샌드파일 설치 후 성토하중 재하전에 실시한 것으로 하중재하후 시간 경과에 따른 강도특성변화를 고려할 경우는 지지력 특성이 크게 개선되어 질 것으로 판단된다. 표 2에서와 같이 지반의 지지력은 샌드드레인 설치지역보다는 면적치환비가 큰 샌드컴팩션 설치지역에서 지지력이 보다 크게 나타났다. 원지반 상부와 파일상부의 지반지지력은 샌드컴팩션파일 설치지역의 경우가 샌드드레인 설치지역 보다 크게 나타나 양호한 지지력 특성을 보여주었다. 또한 적용공법별로 원지반과 샌드파일의 지지력 증가를 고려하면 상대적으로 강성이 큰 샌드컴팩션파일 상부에서 265%의 강도증가가 발생한 것으로 나타났으며, 샌드드레인 설치지역에서는 60% 정도 증가하는 것으로 나타나 시공시 다짐을 실시하고 면적치환비가 큰 샌드컴팩션 파일의 경우 지지력이 크게 증가하는 경향을 보여 주고 있다. 특히 샌드드레인 설치지역

의 경우 원지반의 지지력과 비교된 지지력 증가비가 60% 정도로 작은 면적치환비를 고려하면 개량지역 전체에서의 지지력 증가는 더욱 작게 될 것이다.

3.2.2 토압 측정결과

복합지반효과에 의한 지반지지력 증대가 큰 것으로 평가되는 샌드컴팩션파일 적용구간에 대하여는 토압계를 설치(그림 7 참조)하여 성토하중 증가에 따른 응력전이(L.T., Load Transfer) 특성을 파악하였다. 샌드컴팩션파일 상부 및 주변 원지반에 설치하여 시간경과에 따라 측정된 토압의 경시변화는 그림 12와 같다.

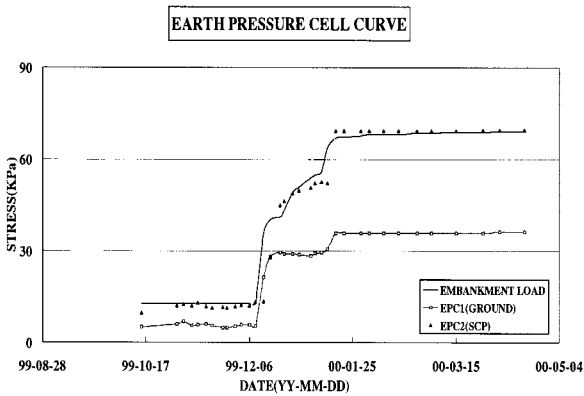


그림 12 성토하중 변화에 따른 토압발생 변화

그림에서와 같이 샌드컴팩션파일 상부에 설치한 토압계의 토압변화는 하중변화와 유사한 거동을 보이고 있으나 샌드컴팩션파일 주변 원지반에 설치한 토압계의 경우는 다소 작은 응력변화를 보이고 있다. 또한 성토완료 후 시간경과에 따른 작용응력의 감소경향 또한 매우 작게 나타나고 있다. 또한 하중증가에 의한 토압계 토압측정결과의 비를 나타내는 응력전이비(L.T.R., Load Transfer Ratio)는 그림 13에 나타내었다.

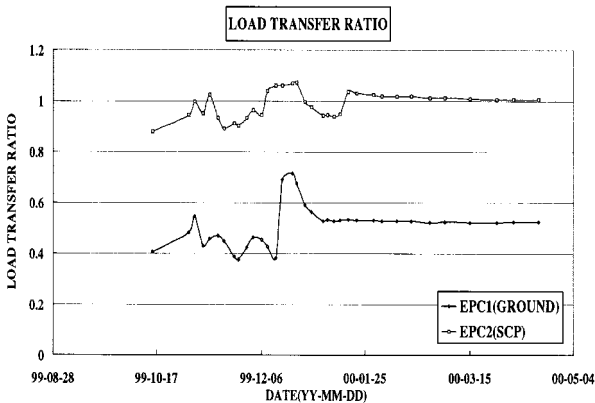


그림 13 토압에 설치위치 지반조건에 따른 응력전이비(L T R)변화

그림에 나타난 바와 같이 샌드컴팩션파일 상부에 설치한 토압계(EPC-2)에서의 응력전이비는 1.0정도로 성토하중 증가에 따른 응력전이가 확실하게 이루어졌음을 보여주고 있다. 그러나 샌드컴팩션파일 주변 원지반의 토압계(EPC-1)의 경우 응력전이비는 0.4~0.7의 범위를 보이며 성토완료 후 방치기간 동안의 응력전이비는 0.5정도로 나타나 샌드컴팩션파일과 비교되는 상대적인 응력전이비의 50%정도로 나타났다. 이와 같은 결과로부터 성토하중에 의한 지반에서의 하중분담은 상대적으로 원지반 보다 재료의 강성이 큰 샌드파일에서 분담율이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

4. 분석 및 고찰

4.1 지지력 특성

4.1.1 면적치환비

연약지반상에 설치한 샌드파일과 주변지반과의 복합지반효과를 파악하기 위하여 실시한 평판재하시험 및 토압계 측정결과 샌드파일의 강성증대에 의한 파일의 지지력은 원지반 보다 크게 개선되었음을 확인할 수 있었다.

이와 같이 개선된 샌드파일 개량지반의 지지력 특성을 복합지반효과로 파악하기 위하여 면적치환비를 적용공법 및 지역별로 평가하면 다음 표 3과 같다.

표에서와 같이 시험부지에서 샌드드레인 설치지역은 면적치환비가 3.14%이며, 샌드컴팩션파일 설치지역은 9.16%로 치환율 50% 미만의 저치환 개량으로 평가될 수 있다.

표 3 적용공법별 면적치환비

구 분	총면적 (m ²)	Pile 단면적 (m ²)	원지반 단면적 (m ²)	원지반 면적비 (%)	면적 치환비 (%)	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

4.1.2 지지력

이와 같이 평가된 면적치환비를 이용하여 현장시험으로

실시한 평판재하시험 결과로부터 복합지반효과에 의한 지반 허용지지력을 평가하면 표 4와 같다.

표 4 복합지반효과에 의한 지지력 증대효과 비교

구 분	Pile 지지력 (kPa)	원지반 지지력 (kPa)	복합지반효과를 고려한 지지력 (kPa)	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 샌드드레인 설치지역의 경우, 복합지반효과를 고려한 지지력은 약 50.99kPa로 원지반의 지지력 50.01kPa와 비교하면 지지력 증대효과는 매우 미소하다. 따라서 샌드드레인 설치지역에서 복합지반효과에 의한 지지력 증대는 무시할 정도로 작게 평가되고 있다. 반면 면적치환비가 9.16%인 샌드컴팩션파일 설치지역의 경우 복합지반효과를 고려한 지반의 허용지지력은 61.78kPa로 원지반의 허용 지지력 52.96kPa와 비교하면 15.7%정도 증가한 것으로 나타나 샌드컴팩션파일 설치시 복합지반효과에 의한 개량효과가 크게 평가되고 있음을 알 수 있다.

이와 같이 연약지반에서 압밀축진을 목적으로 연직배수재로 설치한 샌드파일(샌드드레인) 설치지반에서 복합지반효과로 인한 지지력 증대효과는 매우 미세하게 평가되고 있어 샌드파일의 강성에 의한 지지력증가의 영향은 매우 작은 것으로 판단된다.

그러나 샌드드레인 설치지역의 경우 원지반과 비교된 샌드파일 상부에서의 지지력 증가는 50.01 kPa에서 80.41kPa으로 나타나 증가비가 약 60% 정도로 크게 나타나고 있다. 이것은 Terzaghi(1955)의 시험결과에서와 같이 지반반력계수(k)는 동일한 작용하중하에서 발생침하량이 증가할수록 작아지는 것으로 원지반보다 상대적으로 지반 지지력이 큰 파일 상부에서의 발생 침하량이 작게 나타나게 됨을 다음 식 (5)로 설명할 수 있다.

$$k = \frac{q}{\Delta} \quad (5)$$

여기서, k : 지반반력계수

q : 작용하중

Δ: 침하량

이와 같이 압밀축진을 목적으로 연직배수공법으로 적용된 샌드파일 설치지반에서는 샌드파일 설치위치의 부분적으로 큰 강성을 지닌 골격으로 인해 성토하중 작용시 발생하는 전반적인 압밀 침하량을 경감시킬 수 있음을 추론할 수 있다.

4.2 침하 특성

연약지반에 압밀축진을 목적으로 프리로딩공법만을 적용한 지반과 비교하여 샌드파일을 설치한 지반의 경우 샌드파일 설치시에 발생하는 압밀침하량이 유사하게 나타나는 경우가 있으나 실측 침하량이 계산 침하량과 비교하여 매우 크거나 작게 발생하는 경우가 있다. 그림 14는 실측침하량이 계산침하량의 약 0.7~1.5배의 범위로 매우 큰 차이를 보이는 것으로 보고하고 있다. 실제로 예측치와 실측치의 상관관계는 세밀한 지반조사를 통해 시험시공결과에서 얻을 수 있는 것으로 지반조사자료가 부족한 실제 대규모 현장에서는 실측치가 예측치가 크게 차이가 발생하는 경우도 있다.

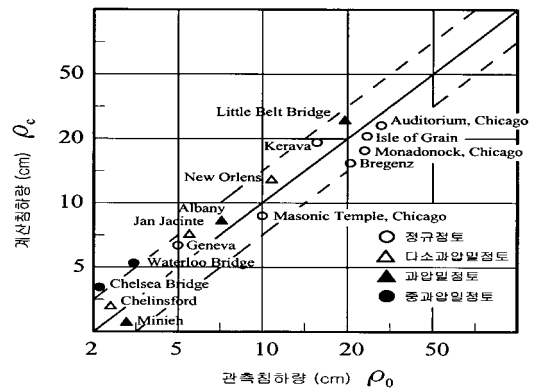


그림 14 통계적인 계산침하량과 실측침하량 (Mcdonald & Skempton, 1955)

4.2.1 침하량이 크게 발생하는 경우

계산 침하량 보다 실측 침하량이 크게 발생하는 경우는 물성치 판단의 부적절 및 지반교란 등의 영향에 의하여 발생하는 경우도 있다. 그림 15는 국내 낙동강 주변 연약지반 처리현장에서 설계검토시의 침하량과 실측에 의한 최종 예상침하량을 나타낸 것이다.

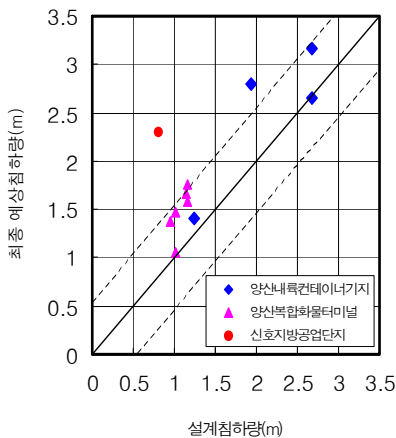


그림 15 국내 낙동강 주변 연약지반 처리지역에서의 설계침하량과 최종예상침하량 관계 분석

그림에 나타난 바와 같이 일반적으로 최종 예상침하량은 설계침하량과 유사하거나 대부분 상회하고 있는 것으로 나타나 있는데, 이와 같이 실제 침하량이 크게 발생하는 이유는 설계시 예상치 못한 압밀층의 존재를 시공중 확인하거나 연약층의 압밀특성치를 과소평가한 원인으로 파악하고 있다(한국지반공학회, 1998). 또한 연약지반상의 도로성토사면인 경우 샌드파일 설치로 인한 원지반의 교란과 지반지력 부족에 의한 측방유동현상에 따른 과다 침하현상이 발생하는 경우도 보고되고 있다.

4.2.2 침하량이 작게 발생하는 경우

일반적으로 연직배수재로 연약지반에 압밀촉진공법을 적용할 경우 압밀침하량이 작게 발생하는 이유는 다음과 같이 설명되어지고 있다.

- ① 일반적으로 실내시험용 시료는 다른 지역보다 연약한 층에서 채취되므로 실내에서 얻어지는 압축지수 값이 실제 지반을 대표하는 값보다 크게 된다. 따라서 설계

시 예측되는 값은 실측치보다 커지게 된다.

- ② 도로 성토하중은 유한한 폭을 가진 대상하중이므로 성토하중은 지중에 분산되어 하중강도가 낮아진다. 따라서 실측되는 값이 설계시 예측되는 값보다 작아진다.
- ③ 설계시 예측된 침하량은 1차원 압밀이론이 적용되어 제방의 가운데 부분의 침하량을 나타내나, 실제 계측이 수행된 위치는 제방의 가장자리 부분일 경우 가운데 부분보다 성토하중에 의한 연직응력이 작아지게 된다.
- ④ 설계시 예측은 1차원 압밀이론에 의하여 산정되나 실제 현장 사정은 2차원 압밀에 보다 가깝다. 따라서 실측되는 값이 설계시 예측치보다 작아지게 된다.
- ⑤ 현장의 연약지반 표면에는 하부 지반보다 딱딱한 Dry Crust가 형성되어 있다. 따라서 실측되는 값이 설계시의 예측(계산)치 보다 작아지게 된다.

상기 원인중 ①번 항목은 Balasubramaniam & Brenner(1981)에 의해서도 보고된 바 있으며, 해성퇴적층중의 샌드심과 같은 양호한 지층이 존재할 경우 그 가능성이 매우 크다. 또한 ②, ③의 경우 도로성토 하중조건에서 Boussinesq(1885)의 지중응력 분포이론에 의하여 영향계수로부터 확인이 가능하다. ④항은 Skempton & Bjerrum(1957)의 해법을 이용하여 검토가 가능하며 대상하중의 경우 압밀침하량은 식 (6)과 같이 보정될 수 있다고 하였다.

$$S_c = \mu \cdot S_{oed} [A + \alpha \cdot (1 - A)] \cdot S_{oed} \quad (6)$$

여기서, S_c : 대상하중에 대한 발생 침하량

μ : 조정계

S_{oed} : 표준압밀시험기에 의한 침하량

A : Skempton의 간극수압계수

α : 대상하중의 폭 및 압밀층의 두께에 의해 결정되는 상수

식 (6)에서 정규압밀토의 경우 μ 는 0.8~1.0정도로 실제침하량은 계산치의 약 80%~100%정도가 됨을 추정할 수 있다. ⑤항은 준설매립 시공과정중의 초기지반에서 발생할 수 있는 현상으로 정량화한 평가는 다소 어려울 것으로 판단된다. 이와 같이 상기의 사항들은 대부분 연직배수재 사용여부에 대한 공법별 개량기구를 고려치 않고 통계

적으로 침하발생량을 평가하고 있다.

따라서 연직배수공법중 샌드파일을 설치할 경우 발생침하량 감소 원인에 대하여 상기의 5개사항에 추가하여 다음의 사항을 검토하였다.

- ⑥ 샌드파일 설치시 공동확장이론(Vesic, 1972)에 의한 초기 방사방향 압축으로 인하여 주변지반의 압밀특성이 변화하므로 실제 발생침하량이 감소한다(천병식 등 2000(a), (b), 2001)
- ⑦ 설치된 샌드파일의 강성증대와 이에 따른 복합지반효과에 의해 실측치가 설계시의 예측치 보다 작아질 수 있다.

⑥항은 그림 16에서와 같이 초기 방사방향압축을 고려한 예측치와 실측치는 일반적인 계산에 의한 예측치와 비교하여 매우 높은 상관관계가 있음을 알 수 있다(천병식 2000(b)).

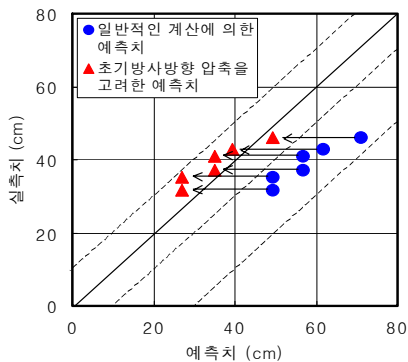


그림 16 초기 방사방향압축을 고려한 예측치와 실측치의 비교 예(천병식 2000(b))

이와 같이 샌드파일 설치지반의 압밀특성은 샌드파일 설치로 인한 초기방사방향 압밀현상과 상재하중 재하로 인한 압밀 현상이 상호작용하며, 이로 인해 개량된 주변지반은 압밀특성이 변화하여 상재하중 재하시 변화된 압밀특성에 의해 발생 침하량이 감소할 수 있음을 설명할 수 있게 된다.

또한 ⑦항의 경우에는 그림 4에서와 같이 개량체의 강성 정도에 따라 개량완료후 발생침하량이 다르게 나타남을 보여주는 것으로(Greenwood, 1970) 그림 2에서와 같이 면적치환비에 따라 침하저감계수가 커지고 이에 따라 발생침

하량이 감소하게 된다. 또한 그림 5에서와 같이 지반 강성의 증대는 압밀특성 변화를 의미하는 것으로 샌드파일 설치지반은 강성증대로 인해 지지력이 증대되고 압축특성이 변화하여 복합지반효과(Nagaraj, 2000)에 의해 발생 침하량이 감소될 수 있음을 추론할 수 있게 된다.

시험결과로부터 연직배수를 목적으로 적용한 샌드파일의 경우 작은 면적치환비로 인해 복합지반효과에 의한 지지력 증대효과는 매우 작게 평가되는 것으로 나타나고 있어 복합지반효과에 의한 발생 침하량 감소는 미약할 것으로 보이지만 일정 간격으로 설치한 샌드파일의 골격에 의한 강성증대로 인해 압밀진행 과정중 발생 압밀침하량의 감소에 영향을 미칠 수 있는 요소인 것으로 판단된다.

이와 같이 샌드파일 설치지반의 압밀특성변화는 다양하게 검토될 수 있으며 상기의 7개항에 대한 종합적인 검토가 필요한 것으로 판단된다. 특히 압밀특성 변화에 영향을 미치는 요인이 다양하게 존재하고 있으나 연약지반중에 설치한 샌드드레인의 강성 증대에 의해 발생 침하량이 감소될 수 있는 현상에 대한 종합적인 고려가 필요한 것으로 판단된다. 개량지반의 강성변화에 의한 지반개량특성은 현장 재하시험 및 계측관리를 통하여 정량적으로 평가되어질 수 있다.

5. 결론 및 제언

면적치환비가 작은 연직배수공법으로 적용한 샌드파일 설치지반에서 현장시험 및 계측결과로부터 파악한 복합지반효과에 의한 지지력 및 침하특성을 요약·정리하면 다음과 같다.

- (1) 샌드파일 구분(샌드드레인/샌드컴팩션파일)에 따라 지역을 구분하여 평가된 면적치환비는 샌드드레인 설치지역에서 3.14%이며, 샌드컴팩션파일 설치지역에서는 9.16%로 나타났다. 복합지반효과를 고려한 평가 지반의 허용 지지력은 샌드드레인 설치시 약 2%, 샌드컴팩션 파일설치시 15.7%로 나타나 면적치환비가 상대적으로 작은 샌드드레인 설치 지역에서 복합지반효과를 고려한 지지력 증가요인은 매우 작은 것으로 판단된다.
- (2) 샌드파일 설치 위치에서의 지지력 증대는 샌드드레인 시공의 경우 60%정도 증가하였으며, 면적치환

비가 크고 다짐시공으로 인해 재료강성이 상대적으로 큰 샌드컴팩션파일에서는 265%정도 증가하는 것으로 나타나 일정 간격으로 설치한 샌드파일의 골격에 의한 강성증대로 인해 압밀진행 과정에서 발생 압밀침하량의 감소에 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다.

- (3) 샌드파일 설치지반의 응력전이를 파악하기 위하여 샌드컴팩션파일 설치지역에서 원지반과 파일상부로 구분하여 상재 하중재하에 따른 토압의 경시변화를 확인한 결과 응력전이비는 원지반의 경우는 0.5정

도이고, 파일 상부에서는 1.0내외로 상재하중의 응력이 샌드컴팩션파일에 대부분 전달되고 있음을 알 수 있었다.

- (4) 샌드파일 설치지반에서 예측 침하량 보다 실측 침하량이 작게 발생하는 경우는 샌드파일 설치시 발생하는 초기 방사방향 압축현상과 더불어 샌드파일 강성에 의한 복합지반효과에 의해 압밀특성 변화의 영향을 미치는 요인인 것으로 판단된다. 본 시험은 각 개소당 1회의 현장실험 및 계측을 통해 분석한 결과로 다양한 면적치환비 조건에 따른 검증이 필요한 것으로 판단된다.

(접수일자 : 2001. 7. 12.)

참 고 문 헌

- 1 송정락, 백승훈, 오다영(1992), "현장계측사례를 통한 압밀특성 평가", 한국지반공학회 92년 가을 학술 발표회(준설, 매립, 인공섬) 논문집, pp 121~130
- 2 천병식, 여유현(2000(a)), "Sand Pile 주변지반에서의 공동확장이론에 의한 과잉간극수압특성 연구", 대한토목학회논문집, 제20권 제 5 C호, pp 429~439
- 3 천병식, 여유현(2000(b)), "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 Aboshi, H and Suematsu, N (1985), "Sand Compaction Pile Method:State of the Atr Paper", Ptoe 3rd Geotech Seminar on Soil Improvement Methods NTU, Singapore, pp 62~64
- 7 Balasubramaniam, A S and Brenner, E W (1981), "Consolidation and settlement of soft clay", Soft Clay Engineering, Elsevier, pp 479~566
- 8 Barksdale, R D and Bachus, R C (1983), "Design and Construction of Stone Column", Report No FHWA/RD 83/026, National Technical Information Service, Springfield, Virginia U S A
- 9 Bergado, D T and Lam, F L (1987), "Full Scale Load Test of Granular Piles with Different Densities and Different Properties of Gravel and Sand in the Soft Bangkok Clay", Soils and Foundations Journal, Vol 27, No 1, pp 86~93
- 10 Greenwood, D A (1970),"Mechanical Improvement of Soils Below Ground Surface", Proceedings, Ground Engineering Conference, Institution of Civil Engineers
- 11 Hughes,J M O , Withers, N J and Greenwood, D A (1975),"A Field Trial of Reinforcing Effects of Stone Columns in Soil", Geotechnique, Vol 25, No 1, pp 31~44
- 12 McDonald, D H and Skempton, A W (1955), "A Survey of comparison between calculated and observed settlement of structures on clay", Conf Corr between Calcul & Obser Stresses and Displacements, Instn Civ Engrs, pp 1~318
- 13 Priebe, H (1976), "Estimating Settlements in a Gravel Column Comsolidated Soil", Die Bautechnik 53, pp 160~162
- 14 Skempton, A W and Bjerrum, L (1957), "A Contribution to the Settlement Analysis of Foundation on Clay", Geotechnique, Vol 7, No 4, pp 168~178

- 15 T S Nagaraj(2000), "Composite Soft Ground Its Formation and Characterization", Special Invitation Lecture, pp 1~25
- 16 Terzaghi, K (1955), "Evaluation of the Coefficient of Subgrade Reactions", Geotechnique, Institute of Engineers, London, Vol 5, No 4, pp 197~326
- 17 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