

샌드파일 주변지반에서 초기 방사방향 압축에 의한 압밀특성 연구

A Study on Consolidation Characteristics by Considering the Initial Radial Compression at Sand Pile Adjacent Ground

천병식¹⁾, Byung-Sik Chun, 여유현²⁾, Yoo-Hyeon Yeoh

¹⁾ 한양대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University

²⁾ 한양대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University

SYNOPSIS : Consolidation of the ground surrounding the sand piles is delayed by well resistance and smear effect. This study is executed to understand the factors that affect the characteristics of consolidation. This was accomplished by utilizing the estimated and measured values of the soil properties through the monitoring of the ground surrounding the sand piles. When it is assumed that the horizontal coefficient is equal to the vertical coefficient of consolidation, the estimated values is exceedingly similar to the measured values. The properties of the initially disturbed soil by the sand pile installation seemed to improve through the process of consolidation with the passage of time. From the results of the analysis of the settlement measurement, the measured values occurred about 60~90% of the predicted values. Considering the initial radial compression deformation, according to the theory of cavity expansion, the difference between the two appears to be in good agreement. In this study, to understand the behavioral characteristics of the ground surrounding the sand piles requires estimation through considering the initial radial compression as well as smear effect of the soil disturbance and well resistance.

Key words : sand pile, smear effect, well resistance, initial radial compression, cavity expansion theory

1. 서 론

샌드파일 설치시 주변지반은 교란이 발생하며 이로 인해 배수저항과 스미어 영향에 의해 압밀지연이 발생하게 된다. 샌드파일은 원지반을 샌드파일의 체적 만큼 바깥으로 밀어내어 샌드파일 주변(밀려난 지반)에는 응력이 발생하게 되고, 포화된 지반의 경우에는 과잉간극수압이 유발되고 시간이 경과함에 따라 소산하게 된다. 이 과정은 프리로드에 의해 발생하는 압밀과정과 근본적으로 동일한 원리임을 유추할 수 있다. 샌드파일 설치 지반에서의 개량원리는 공동확장이론에 의해 설명되어질 수 있으며, 본 연구에서는 이와 같이 교란된 샌드파일 주변지반의 개량특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 지반 특성치에 의해 파악된 침하 예측치와 계측관리 수행에 의한 실측결과와의 비교검토를 통하여 샌드파일 주변지반의 압밀 제특성(C_v , C_c)을 평가하고, 압밀특성 평가기법에 반영할 수 있는 영향인자를 파악하고자 하였다.

2. 샌드파일 주변지반의 거동특성

2.1 배수저항과 스미어 영향

연직배수재의 투수성 문제는 종방향의 투수계수의 값이 크기 때문에 수직배수재 내부에서 수두손실이 발생하여 압밀속도에 영향을 미치게 되는 데, 다음 식(1), (2)로부터 배수저항(well resistance)계수의 값(L)과 평균압밀도 U를 구할 수 있다.

$$L = \frac{32}{\pi^2} \frac{k_c}{k_w} \left(\frac{H}{d_w} \right)^2 \quad (1)$$

여기서, k_c : 점성토 지반의 투수계수(cm/sec)
 k_w : 수직배수재 내부에서의 투수계수(cm/sec)
 H : 배수거리(cm)
 d_w : 배수재의 직경(cm)

$$U = 1 - \exp\left(-\frac{8 T_h}{F(n) + 0.8L}\right) \quad (2)$$

샌드파일 설치로 인한 주변지반의 교란영역을 스미어존(smearred zone)이라 하고, 이것이 형성되면 상대적으로 큰 수평투수계수가 현저히 감소되므로 압밀을 지연시킨다. 스미어 영향을 고려한 방사선 방향의 압밀에 대한 해석 방법은 Scott(1963)에 의해 다음과 같이 제안되었다.

$$U = 1 - e^{-8 T_h / m} \quad (3)$$

여기서, $m = f(k_s, k_h, d_s, d_w, T_r, 1/K)$

2.2 공동확장이론(Cavity Expansion Theory)

타입말쪽에 의한 샌드파일은 지중에 강제로 타입되기 때문에, 지중에서 초기체적 "0"의 공간이 샌드파일의 체적 V 만큼 확장되는데 이와 관련하여 필요한 힘이 지중에 작용하게 된다. 공동확장이론은 그림 2에 보여주는 바와 같이 초기반경 R_i 인 지중공동이 최종반경 R_u (입의 체적 V)로 확장되었을 때 주변지반에 유발되는 응력들의 거동특성을 파악하는 이론이다.(Vesic, 1972)

그림 1에서 최초 반경 R_i 인 공동이 입의의 압력 P에 의해 최종 반경 R_u 로 확장된 경우, 주변지반은 R_u 바깥쪽 어느 범위까지는 심하게 밀려 소성거동을 할 것이며, 그 이상에서는 밀린 정도가 경미하여 탄성에 가까운 거동을 할 것이다. 이 때 소성거동 지역과 탄성거동 지역의 명확한 한계를 구분하는것은 어려움이 있지만, 개념상 소성거동 지역의 반경을 R_p 라고 한다. 이때 공동주변 지반요소의 응력변

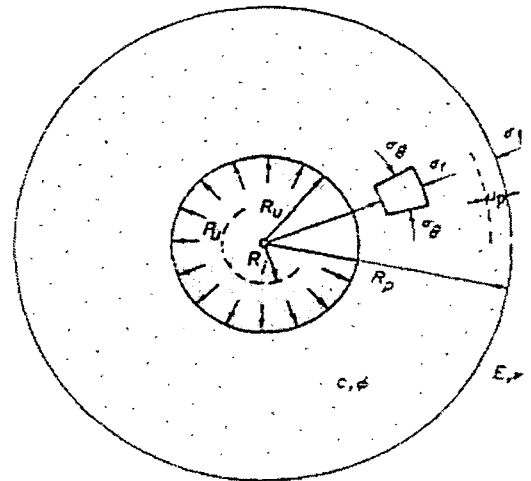


그림 1. 공동확장이론의 기본개념도

형조건을 이용한 미분방정식으로부터 공동주위의 응력상태를 파악할 수 있다. 공동확장이론은 원래 구형의 공동에 대하여 개발되었으나 파일과 같은 원통형 공동의 응력 등을 해석하기 위해 원통형 공동에 대해서도 이론이 발전되었다. 샌드파일은 그 형상의 특성상 원통형 공동확장 이론이 합당하겠으나, 기존의 연구결과는 샌드파일과 유사한 현상인 원추형 콘관입시험 결과 해석시 구형 공동확장 이론이 원통형

공동확장 이론보다 더 실제적인 것으로 평가(Rohani & Baldi, 1981)하고 있으므로 여기에서는 구형 공동확장이론만을 다루기로 한다. 이론에 대한 고찰은 Vesic(1972), Baligh (1986), Carter et al.(1986)등의 공동확장이론을 참고로 하여 소성반경 및 간극수압에 대한 중요한 식들에 대하여 살펴보기로 한다.

2.2.1 소성반경(R_p)

Vesic(1972)에 의하면 구형 공동확장의 경우에 소성영역의 반경(R_p)는 다음의 식으로 정리할 수 있다.

$$R_p(\text{소성 반경}) = R_u \cdot \sqrt[3]{I_{rr}} \quad (4)$$

여기서, R_p : 소성 반경, I_{rr} : 강성지수

R_u : 팽창된 공동의 최종 반경(샌드파일의 반경)

$$I_{rr} = I_r / (1 + I_r \cdot \Delta) \quad (\text{일반적인 흙의 경우, } \Delta = 0) \quad (5)$$

$$I_r = E / [2(1 + \mu) (S_u + q \tan \Phi)] = G / \tau \quad (6)$$

여기서, I_r : 강성지수, μ : 포아슨 비, E : 비배수 탄성계수(t/m^2)

τ : 전단강도(t/m^2), S_u : 비배수 전단강도(t/m^2)

q : 일축압축강도(t/m^2), Φ : 내부 마찰각($^\circ$), G : 전단탄성계수

Vesic(1972)에 의하면 점토지반에서 구형공동은 $R_p = (2 \sim 7)R_u$, 원통형 공동은 $R_p = (3 \sim 17)R_u$ 의 관계를 가진다고 하였으며, Nishida(1962)는 예민하지 않은 점토의 경우 $R_p = (3 \sim 4)R_u$ 이고, 예민한 점토의 경우 $8R_u$ 정도라고 하였다. Portotole점토에 대한 Battaglio et al.(1981)등의 실내실험결과들은 강성지수(I_r)가 약 200근방임을 보여주어 소성반경 $R_p = 5.8R_u$ 정도로 나타내고 있다. 또한 송(1991)에 의하면 점토지반에서 샌드파일 설치에 의해 소성반경 $R_p = (6 \sim 8)R_u$ 를 사용하는 것으로 정리하였다.

2.2.2 과잉간극수압

Vesic(1972)은 포화된 지반에 형성된 공동주변에서 발생하는 과잉간극수압을 Henkel의 간극수압계수 a_f 를 이용하여 나타내었다. 초기응력이 등방압축 응력상태이고, 지반이 포화되어 있다고 가정하면, 확장된 구형공동의 임의의 소성영역에서 발생하는 과잉간극수압은 다음과 같이 된다.

$$\Delta u = \Delta \sigma_o + 0.9043 a_f S_u \quad (7)$$

이에 따라, 구형 공동확장시 공동 중심에서부터의 거리 r 이 R_p 이내의 임의지점(소성영역 이내의 지점)에서 발생하는 간극수압은 다음 식(8)로 나타낼 수 있다.

$$\Delta u = [0.943 a_f + 4 \ln(R_p/r)] S_u \quad (8)$$

여기서, a_f : 파괴시 Henkel의 간극수압 매개변수

$$= S_u / q + (1 - \sin \Phi) / (2 \sin \Phi) = 0.707(3A_f - 1)$$

A_f : 파괴시 Skempton의 간극수압 계수, r : 공동 중심으로부터의 거리(m)

소성 영역의 바깥($r > R_p$)에서는 평균연직응력 증가분을 0으로 다음과 같이 평가할 수 있다.

$$\Delta_u = 0.943 \alpha \cdot S_u (R_p/r)^2 \quad (9)$$

여기서, α : Henkel의 간극수압 매개변수 = $0.707(3A-1)$

2.3 틱소트로피와 강도증대

압축계수특성은 그림 2에서와 같이 교란과 불교란에 따라 큰 상관관계를 보여주고 있다.(Schmertmann, 1955) 그림에 나타낸 바와 같이 동일한 압력범위 내에서도 교란정도가 클 경우 상대적인 압축특성이 더욱 크다. 이와 같은 특성은 지반교란에 의한 스미어 영향 및 배수저항에 의한 압밀 지연 현상과 함께 상대적인 압축량의 증가가 발생하게 되어 예측치는 예측치와 상이하게 나타나는 경우를 설명할 수 있게 하는 것이다.

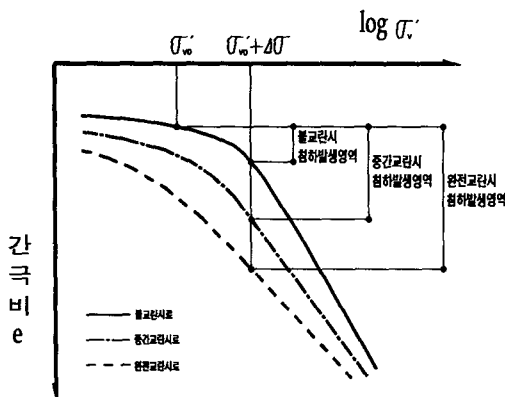


그림 2. 교란에 따른 침하발생영역 비교

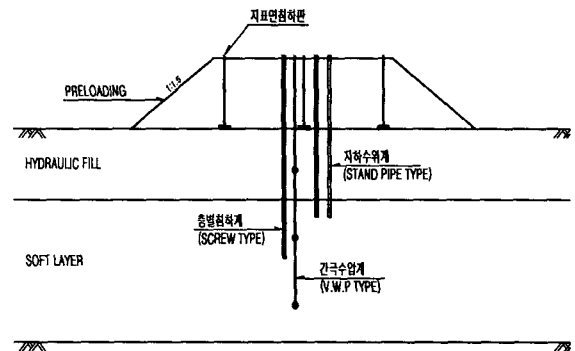


그림 3. 계측관리 계획도

3. 현장계측

3.1 개요

지층은 지표로부터 준설매립층, 퇴적층으로 상부의 준설매립층은 원지반으로부터 3.2~4.5m 정도로 포설되어 있으며, 통일분류상 실트질 또는 세립질 모래(SM~SP)로 이루어져 있다. 하부의 퇴적층은 실트 내지 실트질 점토(CL~ML) 및 실트질 모래(SM) 등이 불규칙하게 분포하고 있다. 준설매립을 실시하고 6개월 경과후 샌드파일 타설과 프리로딩($7.2t/m^2$)을 실시하였다. 샌드파일 타설전 지반특성을 나타내면 다음 표 1과 같다.(계측관리 계획도는 그림 3참조)((주)대우 등, 1995)

표 1. 상부퇴적층(연약지반) 압밀시험결과

지역	연약층심(m)	시료채취심도*2	e_0	C_c	C_v (cm/sec)	P_c (t/m^2)	OCR	비고
YARD-②	8.1	7.0~7.8m	1.155	0.23	3.36×10^{-3}	5.2	0.7*	
YARD-④	10.0	5.5~6.3m	1.084	0.27	5.21×10^{-3}	6.6	1.1	
YARD-⑥	10.3	5.0~5.8m	1.262	0.21	2.65×10^{-3}	3.5	0.6^{*1}	

*1: Under Consolidation Status. *2: 준설매립지반고(EL+5.20m)기준

3.2 계측결과

샌드파일 설치 및 프리로딩 방치후 3.5개월 경과기간 동안 현장계측결과와 분석결과는 표 2와 같다. 표에서

와 같이 침하해석은 해석모델중 신뢰도가 높게 평가되는 쌍곡선법으로 실시하였다. Preloading방치 3.5개월까지 실측결과는 30.9~50.4 cm의 범위로 쌍곡선법으로 분석한 현재 추정압밀도는 97.24~99.3%의 범위를 나타내고 있다. 예측치에 따른 상관도는 일부 지점을 제외하고 전체적으로 0.95이상으로 계측결과의 신뢰도는 매우 양호한 것으로 평가된다. 또한 각 Yard별 사면선단의 발생침하량은 중앙부의 지표면침하판(S-5, S-8, S-11) 측정치의 74~87%정도로 나타나, 성토하중조건(체제조건, 폭=30m, 높이=4.0m, 경사=1:1.5)에 의한 Boussinesq도표의 영향계수($I=0.8$ 내외로 평가됨)를 고려하면 유사한 응력분포 경향을 나타내고 있다.(천병식 등, 2000)

표 2. 지표면 침하판 측정결과 및 분석결과 요약

YARD 구분	계측기 번호	Sand Pile 타설일 (월/일/년)	Preloading 완료일 (월/일/년)	최종 계측일 (월/일/년)	계측결과 (cm)	현재추정 압밀도 U (%)	최종예측 침하량 (cm)	상관도	비고
②	S-4	5/27/95	6/16/95	9/30/95	39.9	96.35	41.4	0.9968	
	S-5	5/27/95	6/16/95	9/30/95	50.4	97.31	51.8	0.9946	
	S-6	5/27/95	6/16/95	9/30/95	44.4	94.89	46.8	0.9904	
④	S-7	5/26/95	6/17/95	9/30/95	36.1	97.51	37.0	0.9968	
	S-8	5/26/95	6/17/95	9/30/95	45.4	98.23	46.2	0.9856	
	S-9	5/26/95	6/17/95	9/30/95	39.9	97.39	41.0	0.9984	
⑥	S-10	5/25/95	6/16/95	9/30/95	30.9	97.24	31.8	0.9885	
	S-11	5/25/95	6/16/95	9/30/95	42.5	99.34	42.8	0.9956	
	S-12	5/25/95	6/16/95	9/30/95	34.3	97.60	35.1	0.9287	

4. 압밀특성 평가

4.1 지반조사 결과에 따른 압밀특성

4.1.1 침하량

Terzaghi 1차원 압밀방정식을 수정한 Schmertmann(1955)의 압밀침하량 산정식으로부터 정규압밀토조건으로 고려하여 평가하였다. 원지반상에 준설토로 작용한 상재하중이 약 4.2 ton/m²이며, 약 6개월 경과후 연직배수재를 설치하고 약 7.2 t/m²의 프리로딩 하중이 작용하는 것으로 하였다.(표 3참조) 6개월 경과후 추정압밀도는 약 22.5~42.5%이며, 프리로딩 완료후 준설토하중에 의한 잔류침하량과 프리로딩에 의한 침하량을 합한 총 예상침하량은 약 48.74~71.01cm로 실측치(30.9~50.4 cm) 보다 크게 평가되었다.

표 3. 설계 지반정수에 의한 예상 침하량 평가

지역	연약층도 (m)	현재 준설토에 의한 침하				프리로딩에 의한 예상 침하량(cm)	총예상침하량(cm)	비고
		준설토에 의한 추정 압밀도(%)	총예상침하량(cm)	현재 발생 침하량(cm)	추가 예상 침하량 (cm)			
YARD-②	8.1	32.0	32.50	10.42	22.07	36.48	58.85	
YARD-④	10.0	42.5	42.27	17.97	24.3	46.71	71.01	
YARD-⑥	10.3	22.5	30.57	6.87	23.7	38.01	61.71	

4.1.2 압밀기간

준설토하중에 의한 압밀기간 평가는 식(11)으로, 샌드파일 설치후 방사방향 압밀조건에 의한 압밀기간을 식(11)으로 표현하였다.

$$t = \frac{T_v \cdot H^2}{C_v} \quad (10)$$

여기서, C_v : 연직방향 압밀계수, T_v : 연직방향 시간계수
 H : 배수거리, t : 소요시간

$$t = \frac{T_h \cdot d_e^2}{C_h} \quad (11)$$

여기서, d_e : 유효거리, T_h : 연직방향 시간계수
 C_h : 수평방향 압밀계수(연직방향 압밀계수와 동일하게 평가)

샌드파일 설치간격은 2.4m×2.4m(4각형 배치)로 공동확장이론에 의한 소성영역이 전지반 영향을 미쳤을 것으로 보고 수평압밀계수에 의한 평가는 연직압밀계수와 같게 하여 검토를 실시하였으며, 검토 결과는 표 4에 나타낸 바와 같다. 표에 검토된 압밀도는 실측에 의한 압밀도와 유사한 특성을 보이는 것으로 나타났다.

표 4. 경과시간을 고려한 압밀도 평가

지역	C_h (cm ² /sec)	T_h	n	λ	U_h (%)	압밀도에 따른 예측침하량(cm)	비고
YARD-②	3.36×10^{-3}	0.5413	6.78	1.21198	97.2	57.2	
YARD-④	5.21×10^{-3}	0.6426	6.78	1.21198	98.6	70.0	
YARD-⑥	2.65×10^{-3}	0.3238	6.78	1.21198	88.2	54.2	

4.2 예측치와 현장 실측치의 비교 검토

설계 지반정수로부터 평가한 예상 압밀침하량 및 압밀기간 평가와 현장실측치에 의한 분석내용을 비교하면 표 5로 나타낼 수 있다. 표의 검토 내용에서와 같이 실측치는 압밀계수가 유사하거나 다소 크게 나타나며, 발생침하량에는 큰 차이를 보여주고 있음을 알 수 있다.

표 5. 예측치와 실측치의 비교

지역	예측치			실측치			비고
	압밀도 (%)	압밀도고려한 침하량 (cm)	최종침하량 (cm)	압밀도 (%)	현재침하량 (cm)	최종예측침하량 (cm)	
YARD-②(S-5)	97.2	57.2	58.85	97.31	50.4	51.8	D= 8.1m
YARD-④(S-8)	98.6	70.0	71.01	98.23	45.4	46.2	D=10.0m
YARD-⑥(S-11)	88.2	54.2	61.71	99.34	42.5	42.8	D=10.3m

4.2.1 침하량의 차이 발생원인에 대한 검토

실측된 침하량 발생량 예측치의 60~90% 수준으로 일반적으로 설계 검토시 발생하는 현상과 유사함을 알 수 있다. 침하발생의 절대량을 지배하는 것은 압축지수(C_c)이고, 침하의 발생속도를 지배하는 것은 압밀계수(C_v)임을 감안하면 실내시험 결과로부터의 차이점에 기인할 수 있다.(Balasubramaniam 등, 1981 ; Balasubramaniam 등, 1981) 그러나 실제 지반의 거동을 정량적으로 확인하는 것은 어려우므로 공동확장이론에 의한 초기 방사방향 압밀에 의한 거동으로 파악 하고자 하였다. 샌드파일 설치간격은 2.4^m × 2.4^m로 샌드파일 설치심도에 따른 샌드파일 설치시 초기 방사방향압축에 의한 개량지반의 예측 침하량을 검토하면 다음 표 6과 같다.

표 6. 초기 방사방향 압축량을 고려한 예측침하량&실측침하량의 비교

지역	총예측 침하량 (cm)	초기 방사방향 압축량 (cm)	초기 방사방향압축을 고려한 예측 총침하량 (cm)	현재 발생 침하량 (cm)	실측에 의한 장래 침하량 (cm)	비고
YARD-②(S-5)	57.2	17.66	39.54	50.4	51.8	D=8.1m
YARD-④(S-8)	71.01	21.80	49.21	45.4	46.2	D=10.0m
YARD-⑥(S-11)	61.71	22.45	39.26	42.5	42.8	D=10.3m

표 6의 샌드파일 설치시 초기 방사방향 압축량은 제안식으로 다음의 식(12)로 간단히 표현될 수 있다.

$$S_{rc} = \frac{A_{sp}}{A_g} D \quad (12)$$

여기서, S_{rc} : 초기 방사방향 압축량(cm), A_{sp} : 샌드파일 1개의 단면적(m^2)

A_g : 샌드파일 설치간격에 따른 면적($2.4m \times 2.4m$), D : 샌드파일 설치 심도(cm)

상기 식에 의해 샌드파일 설치에 의한 초기 방사방향 압축량을 고려한 예측침하량은 실측량과 비교하면 비교적 유사한 특성을 보여주는 것으로 평가된다. 샌드파일 설치시의 방사방향압축을 고려한 침하거의 양상을 다음 그림 5에 나타내었다. 그림에 나타낸 바와 같이 샌드파일 설치에 의한 주변지반의 변형거동 양상은 우선적으로 방사축 방향 압축이 발생한 후 연직침하가 발생하는 것을 보여주고 있으며, 이와 같은 사항을 식으로 나타내면 식(13)과 같다.

$$S_{cl} = S_c - S_{rc} \quad (13)$$

여기서, S_{cl} : 샌드파일 설치후 실제 발생침하량, S_c : 샌드파일 미고려시 원지반 예상 침하량
 S_{rc} : 초기 방사방향 압축량(식(12)참조)

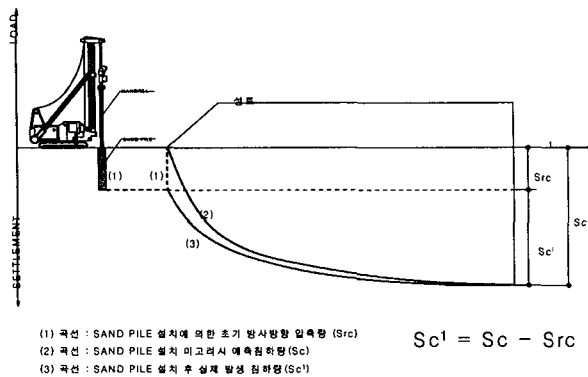


그림 5. 샌드파일 설치시의 방사방향압축을 고려한 침하거동 양상

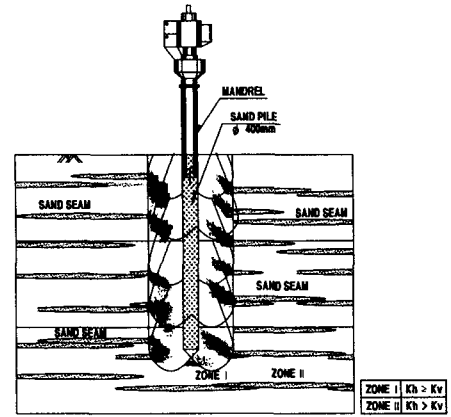


그림 6. 해성퇴적층에 존재하는 샌드심에 의한 영향

4.2.2 압밀기간 특성에 대한 검토

샌드파일 설치시 주변지반 교란에 의한 스미어 영향 및 배수저항에 따른 압밀지연 현상은 수평압밀계수와 연직압밀계수를 동일하게 평가하므로써 샌드파일 설치에 의한 교란의 영향의 고려가 가능하게 되었다. 침하 발생속도를 지배하는 것은 압밀계수임을 감안하면 연직압밀계수와 수평압밀계수를 같게 평가한 사항은 샌드파일 주변지반의 수평압밀계수 특성은 지반 교란 영향에 의해 연직 & 수평압밀계수를 유사하게 평가하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.(그림 6 참조)각극수압계 측정결과에 의하면 샌드파일 설치 지반은 공동확장이론에 의해 그림 7에서와 같이 $8d$ (d : 샌드파일 직경)내에서는 과잉간극수압 증가경향이 크게 나타나 샌드파일 설치간격을 $2.4m \times 2.4m$ 로 한 본 시험지역에서는 그림 8에 나타낸 바와 같이 주변지반 전체가 소성영역이 된다. 본 지역에서와 같이 교란된 샌드파일 주변지반의 투수성이 양호한 원인은 해성퇴적층에 존재하는 샌드심에 의한 배수촉진 영향과, 염분함유율이 큰 해성점토층에서의 강도회복 현상이 빠르게 진행되어 예상 압밀 소요기간내에 개량된 압밀특성을 보여주는 것으로 판단된다.

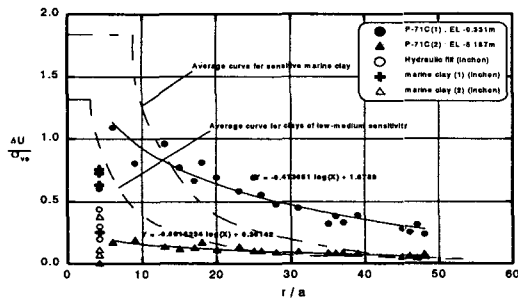


그림 7. 연직배수재 설치거리별 유효상재하중에 의한 과잉간극수압 발생 변화

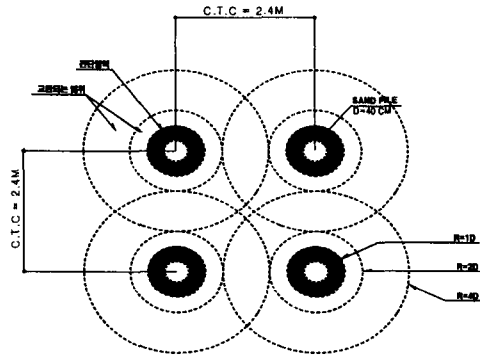


그림 8. 샌드파일 주변의 교란 영역도(간격 2.4m×2.4m)

5. 결론

공동확장이론에 의한 초기 방사방향 압축을 고려한 샌드파일 주변지반의 압밀특성 연구결과를 요약 정리하면 다음과 같다.

- (1) 해성점성토지반에 샌드파일 설치 및 프리로딩과정중 실측에 의한 침하량은 지반조사결과에 의한 예측치에 60~90%로 작게 평가되었으나 공동확장이론에 의한 초기 방사(축)방향 압축량을 고려할 경우 실측치와 좋은 일치를 보여 주었다.
- (2) 연직 & 수평압밀계수를 동일하게 고려하여 평가한 압밀도는 실측 및 예측에서 약 97%로 서로 유사하게 나타나 샌드파일 설치시 지반교란에 의한 압밀지연을 고려하여 수평 & 연직압밀계수를 동일하게 평가하는 것이 적용성이 양호한 것으로 판단된다.
- (3) 해성퇴적층중에 샌드파일 설치시 압밀지연 현상이 파악되지 않았으며 이와 같이 압밀기간에 영향을 미치는 요인은 샌드심과 염분함유율로 염분함유율이 클 경우 강도회복이 빠른 것에 기인한다.
- (4) 샌드파일 설치시 공동확장이론에 의한 초기방사방향 압축량의 평가는 샌드파일 설치로 인한 압밀기간 지연과 비교되어지는 지반개량특성 인자로서 평가되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. (주)대우, (주)대우엔지니어링(1995), **Sand Mat 시험시공 계측관리용역 보고서**, pp.1~31.
2. 송정락(1991), "공동확장이론에 의한 sand pile항타시의 과잉간극수압 예측", **대우엔지니어링 기술보**, 제8권 제1호, pp.3~10.
3. 천병식, 여유현(2000), "공동확장이론에 의한 sand pile 주변지반에서의 압밀특성에 관한 연구", **한국지반공학회 2000년 봄학술 발표회**, pp.231~238.
4. Balasubramaniam, A. S., Berhado, D. T., Lee, Y. H., Chandra, S. and Yamada, Y.(1985), "Stability and settlement characteristics of structures in soft Bangkok clay", **11th ICSMFE, Sanfransisco**, pp.1641~1648.
5. Balasubramaniam, A. S. and Vrenner, E. W.(1981), "Consolidation and settlement of soft clay", **Soft Clay Engineering**, Elsevier, pp.479~566.
6. Schmertmann, J.(1955), "The Undisturbed Consolidation Behavior of Clay" **Transactions, ASCE**, Vol.120, pp.345~356.
7. 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.