

## 공동확장이론에 의한 Sand Pile 주변지반에서의 압밀특성에 관한 연구 A Study on Consolidation Characteristics at Sand Pile Adjacent Ground by Cavity Expansion Theory

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

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

<sup>2)</sup> 한양대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University

**SYNOPSIS** : Sand piling method is one of the most widely used methods to improve soft soils. There are several methods to install sand piles, but driven pile method is considered as one of the easiest method. This method simply pushes down the sand piles into soft soils, so that the excess pore pressure would be generated if the soil is saturated. This pore pressure acts as consolidation load. If the amount of sand pile induced pore pressure can be predicted in reasonable ways, the effects of sand piling to improve soft soils would be predicted, and the height of preload can be reduced.

In this article, sand pile induced excess pressure was predicted by cavity expansion theory, and the predicted values were compared with the field measured values. The results showed fair agreements between the measured and the predicted excess pore pressure.

**Keywords** : sand pile, excess pore water pressure, soft soil, cavity expansion theory

### 1. 서론

샌드 파일은 연약층 심도가 깊어서 수직배수거리가 큰 지반에 압밀시간 단축을 목적으로 수직배수재를 설치하는 공법으로 프리로딩공법과 병용되어 흔히 쓰이는 일반적인 연약지반 개량공법 중의 하나이다. 연약지반 개량시 샌드 파일의 역할은 경제적인 성토재료인 토사를 이용하여 프리로딩공법의 재하고를 조정함으로써 단기간에 요구 침하량이 발생되도록 대상압밀층의 침하속도를 증진시키는데 있다. 즉, 샌드 파일로서 대상지반의 배수거리를 단축하여 Terzaghi압밀이론의  $t=f(D^2)$  ( $t$ =압밀에 요구되는 시간,  $D$ =배수거리)의 관계에 의해 압밀에 요구되는 시간을 단축시켜, 압밀촉진에 의해 지반 재특성을 개량하게 된다.

샌드 파일의 설치방법에는 여러 가지가 있으나(Johnson, 1970) 본 연구에서는 driven pile 방식의 경우에 제한해서 고찰하고자 한다. 이 방식은 단부를 개폐할 수 있는 철타 케이싱을 뽑아내어 샌드 파일만이 지중에 남아있게 한다. Driven pile 방식에 의하여 타설된 샌드 파일은 원지반을 샌드 파일의 체적만큼 바깥으로 밀어내게 된다. 이로 인하여 샌드 파일 주변(밀려난 지반)에는 응력이 발생하게 되고, 포화된 지반의 경우는 과잉 간극수압이 유발되게 되며 시간이 경과함에 따라 소산되게 된다. 이 과정은 프리로드에 의해 발생하는 압밀과정과 근본적으로 동일한 원리임을 유추할 수 있다.

따라서 샌드 파일타입에 의해 지중에 발생하는 과잉 간극수압을 예측할 수 있으면, 샌드 파일 자체만으로 기대되는 압밀촉진 효과를 예상할 수 있다. 그러나 지금까지 Pre-Load + 샌드 파일에 의한 지반 개량 설계시, 샌드 파일타설에 의한 압밀 촉진효과는 무시되어 왔으며, 정량적으로 예측하여 이용하고 있는 것은 없는 실정이다.(NAVFAC, 1971) 본 연구에서는 샌드 파일자체의 지반개량 효과를 정량화하는

방안의 일부로, 국내 고속도로 공사현장에서 연약지반처리를 위한 침하안정관리 수행중 연구목적에 따라 원지반에 간극수압계를 심도별로 설치한 후 20개소의 예정된 위치에 샌드 파일을 원거리에서 근거리로 설치하면서 이 때 발생하는 간극수압을 측정하여, 샌드 파일 항타에 의한 과잉 간극수압을 정량적으로 예측하는 방법에 대하여 살펴보고자 한다.

## 2. 현장개요

### 2.1 지층특성

본 현장은 충청남도 ○○~○○간 고속도로 6공구 지역에 위치하고 있으며, 상부에 5.4~12.5m 두께의 연약한 점토질 실트(MC)내지 실트질 점토(CL)의 충적층이 존재하고, 그 하부로 충적모래층, 자갈층, 풍화토, 풍화암, 연암층이 순차적으로 구성되어 있으며, 지하수위는 지표면 부근내지는 GL-2.4m이내에 존재하고 있다. 원지반의 토질공학적 특성은 표 1에 나타난 바와 같이 연약한 충적토의 베인전단시험 결과는 2.0~4.0 t/m<sup>2</sup>이고, 소성지수(I<sub>p</sub>)는 1.1~33%, 액성한계는 32~64%이며, 자연함수비(w<sub>n</sub>)는 27~55%, N치는 1~4정도이며, 압축지수는 0.2~0.42(평균 0.35), 압밀계수(C<sub>v</sub>)는 1.1×10<sup>-3</sup>cm<sup>2</sup>/sec 이다.

표 1. 연약한 원지반의 지반공학적 특성

| 구분  | 함수비<br>(w <sub>n</sub> )<br>(%) | 액성한계<br>(WL)<br>(%) | 소성지수<br>(PI)<br>(%) | 단위중량<br>(γ <sub>t</sub> )<br>(t/m <sup>3</sup> ) | 압축지수<br>(C <sub>c</sub> ) | 압밀계수<br>(C <sub>v</sub> )<br>(cm <sup>2</sup> /sec) | 비배수전단강도<br>(Su)<br>(t/m <sup>2</sup> ) | 비고 |
|-----|---------------------------------|---------------------|---------------------|--|---------------------------|---|--|----|
| 물성치 | 27~55<br>(41)                   | 32~64<br>(42)       | 1.1~33<br>(17)      | 1.45~2.01<br>(1.67)                              | 0.20~0.42<br>(0.35)       | 1.1×10 <sup>-3</sup>                                | 2.0~4.0                                |    |

### 2.2 현장 시험 개요

본 현장의 연약지반 처리공법은 샌드파일 설치후 단계별 성토에 따른 프리로딩 공법이 계획되어 있으며, 침하안정관리 기준에 따라 계측수행이 진행되고 있다. 본 연구에서는 침하안정관리에 따른 계측수행 내용에 추가하여 지반상태가 파악된 위치를 선정하여 원지반에 심도별(개랑심도의 1/3, 2/3위치)로 간극수압계(V/W type)를 설치하고, 원거리로부터 근거리로 샌드 파일을 타설하면서 간극수압을 측정하였다. 시험개요도는 그림 1에 나타난 바와 같다.

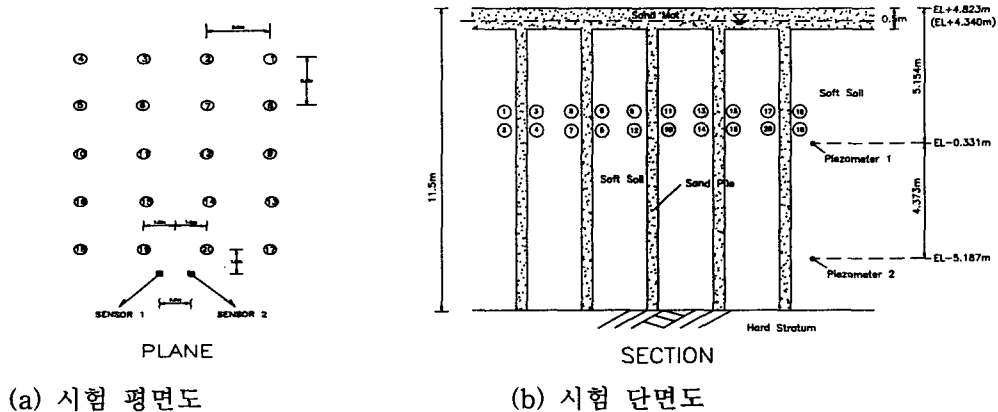


그림 1. 시험 개요도

## 3. 공동확장 이론

Driven pile에 의한 샌드 파일은 지중에 강제로 타입되기 때문에, 지중에서 초기체적 “0”의 공간이 샌

드 파일의 체적 V만큼 확장되는데 이와 관련하여 필요한 힘이 지중에 작용하게 된다. 공동확장 이론이란 그림 2에 보여주는 바와 같이 처음 반경  $R_i$ 인 지중공동이 최종 반경  $R_u$ (입의 체적 V)로 확장되었을 때 주변 지반에 유발되는 응력들의 거동특성을 파악하는 이론이다.

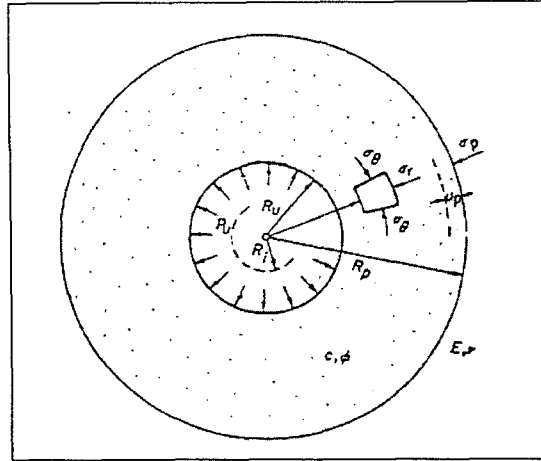


그림 2. 공동확장이론의 개념

그림 2에서 최초 반경  $R_i$ 인 공동이 입의 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 구분하는 것은 어려움이 있지만, 개념상 소성거동 지역의 반경을  $R_p$ 라고 한다. 이때 공동주변 지반요소의 응력변형조건을 이용한 미분방정식으로부터 공동주위의 응력상태를 파악할 수 있다.

공동확장이론은 원래 구형의 공동에 대하여 개발되었으나 Pile과 같은 원통형 공동의 응력 등을 해석하기 위해 원통형 공동에 대해서도 이론이 발전되었다. 샌드 파일은 그 형상의 특성상 원통형 공동확장이론이 합당하겠으나, 기존의 연구결과는 샌드 파일과 유사한 현상인 원추형 콘(Cone) 관입시험 결과 해석시 구형 공동확장 이론이 원통형 공동확장 이론보다 더 실제적인 것으로 평가(Rohani & Baldi(1981))하고 있으므로 여기에서는 구형 공동확장 이론만을 다루기로 한다. 이론에 대한 고찰은 Vesic(1972), Baligh(1986), Carter et al.(1986)등의 공동확장 이론을 참고로 하여 간극수압에 대한 중요한 식들과 그 결과의 응용에 대해서만 살펴보기로 한다. Vesic(1972)에 의하면 구형 공동확장의 경우에 발생하는 파인 간극수압은 나열한 다음의 식으로 정리할 수 있다.

$$\text{가) - } R_p(\text{소성 반경}) = R_u \cdot \sqrt[3]{I_{rr}} \quad (1)$$

여기서;  $R_p$  = 소성 반경,  $I_{rr}$  = 강성지수

$R_u$  = 팽창된 공동의 최종 반경(샌드 파일의 반경)

$$\text{- } I_{rr} = I_r / (1 + I_r \cdot \Delta) \quad (\Delta=0 \text{ 일반적인 흙의 경우}) \quad (2)$$

여기서;  $I_r$  = 강성지수

$$\text{- } I_r = E / [2(1 + \mu) (S_u + q \tan \phi)] = G / \tau \quad (3)$$

여기서;  $\mu$  = 포아슨 비,  $E$  = 비배수 탄성계수( $t/m^2$ )

$\tau$  = 전단강도( $t/m^2$ ),  $r$  = 공동 중심으로부터의 거리(m)

$S_u$  = 비배수 전단강도( $t/m^2$ ),  $q$  = 일축압축강도( $t/m^2$ )

$\phi$  = 내부 마찰각( $^\circ$ )

나) 소성 반경( $R_p$ ) 내부의 과잉 간극수압

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

여기서,  $\alpha_f$  = 파괴시 Henkel의 간극수압 매개변수

$$= S_u/q + (1 - \sin \phi)/(2 \sin \phi) \quad (5)$$

$$= 0.707(3A_f - 1) \quad (6)$$

$A_f$  = 파괴시 Skempton의 간극수압 계수

다) 소성 반경( $R_p$ ) 외부의 간극수압

$$\Delta u = 0.943 \alpha \cdot S_u (R_p/r)^2 \quad (7)$$

$$\alpha = \text{Henkel의 간극수압 매개변수} = 0.707(3A - 1) \quad (8)$$

$A$  = Skempton의 간극수압 계수

식(1)~(8)을 이용하여 과잉 간극수압을 정량적으로 예측한다는 것은 매우 복잡하다. 따라서 일반적인 연약지반로 제한하여 평가하였다.

라) Skempton의 간극수압 계수 "A" (송, 1991)

식 (2)~(8)은 과잉 간극수압이 일정한 비례관계를 나타내고 있음을 보여준다. 여기에서 올바른 A값의 적용은 매우 중요하다. skempton의 간극수압계수 A값은 지반의 전단강도 정수  $S_u$  및 내부마찰각  $\phi$ 에 의해서 지배되므로 정확한 A값 산정을 위해서는 시험결과에 의한  $S_u$  및  $\phi$ 가 필요하게 된다. 그러나 연약 지반의  $S_u$  및  $\phi$ 를 정확하게 평가하는 것은 매우 어렵고, 시간적, 경제적인 문제가 수반된다. 그러므로 기존의 연구 결과들을 이용하여 A값을 합리적으로 추정하는 방법을 살펴보기로 한다.

A값의 물리적인 의미는 축차응력의 변화량( $\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3$ )에 대하여 체적이 얼마나 변화하는가 하는 계수이며(Skempton, 1954), 이상적인 탄성체의 경우 A값이 1/3임은 널리 알려진 사실이다. Skempton (1954)은 이 개념을 간극수압에 도입하여 지반 요소가 외력을 받을 때 발생하는 과잉 간극수압을 다음과 같이 표현하였다.

$$\Delta u = \Delta u_o + \Delta u_d \quad (9)$$

$$= B(\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)) \quad (10)$$

$$\Delta u_o = B\Delta\sigma_3 \quad (11)$$

$$\Delta u_d = BA(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3) \quad (12)$$

여기서,  $\Delta u$  = 총 과잉 간극수압( $t/m^2$ )

$\Delta u_o$  = 구속압력의 변화로 인한 과잉 간극수압( $t/m^2$ )

$\Delta u_d$  = 축차응력의 변화로 인한 과잉 간극수압( $t/m^2$ )

$\Delta\sigma_1$  = 최대 주응력의 변화량,  $\Delta\sigma_3$  = 최소 주응력의 변화량

A, B = Skempton의 간극수압계수

포화된 시료에 대한 비배수 삼축압축 시험의 경우를 예로 들면(B=1), 전단이 진행될 때  $\Delta\sigma_3 = 0$ 이고  $\Delta\sigma_1$ 이 증가된다. 따라서 식 (10)은 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta u = \Delta u_d = A(\Delta\sigma_1) \quad (13)$$

$$A = \Delta u / \Delta\sigma_1 \quad (14)$$

A값은 지반의 과압밀비, 응력상태 등에 따라 변화(Henkel, 1956)하므로 정확한 A값의 적용을 위해서는 지반조건을 신중히 고려하여야 한다. 그러나 샌드 파일에 의해 개량될 필요가 있는 지반은 연약한 정규 압밀토이거나 정규 압밀토에 가까운 과압밀토일 것이므로, 연약한 정규압밀토에 대한 A값을 적용하는 것이 합리적이다. 정규압밀토의 경우 전단이 진행됨에 따라 간극수압은 0에서 출발하여 점차 증가

하며 궁극에는 최대값에 도달하게 된다. 따라서 A값은 탄성상태에서의 값인 1/3에서 시작하여 점차 증가되어 표 2에서와 같은 파괴시의  $A_f$ 에 도달하게 된다. 그러므로 샌드 파일 항타에 의해 유발되는 지반의 과잉 간극수압은 소성 반경안에서는  $A_f$  값을, 바깥에서는 샌드 파일로부터의 거리에 따라  $A_f$  값을 조정하여 적용하는 것이 타당할 것이다.

표 2. 연구자별 정규압밀점토에서의  $A_f$ 값

| 연구자                     | $A_f$      | 비고                        |
|-------------------------|------------|---------------------------|
| Skempton(1954)          | 0.75 - 1.5 | Highly Sensitive Clay     |
| Skempton(1954)          | 0.5 - 1.0  | Medium Sensitive Clay     |
| Battaglio et al. (1981) | 0.9 - 1.0  | Clay                      |
| Henkel(1956)            | 0.9 - 1.0  | Weald Clay                |
| Tavenas(1978)           | 1.0        | Champlain Clay            |
| Fisher et al.(1978)     | 0.6        | Drammen Clay              |
| Crooks & Graham(1976)   | 0.4 - 1.0  | Belfast Estuarine Deposit |
| Lee et al. (1985)       | 0.8 - 1.2  | Ulsan Bay Marine Clay     |

상기의 표 2에서 정규압밀 연약지반의 경우  $A_f$ 값은 대개 1.0 범위임을 보여주고 있다.

마) 소성 반경  $R_p$  (송, 1991)

식(1), (2), (3)으로 부터 소성반경은 지반의 강도정수  $c$ 와  $\phi$ 의 함수임을 보여주나  $c$ 와  $\phi$ 를 이용하지 않고 경험적으로 연약지반의  $R_p$ 를 구하는 방법을 고찰하였다. Vesic(1972)에 의하면 점토지반의 경우  $R_p = (2 \sim 7)R_u$ 이며, Poulos & Davis (1980)에 의하면 보통 흙의 경우  $R_p = 4R_u$ , 예민한 해성토의 경우  $R_p = 8R_u$ 임을 보여주고 있다. 또한 Portotole점토에 대한 Battaglio et al. (1981)등의 실내 실험 결과들은 강성지수 ( $I_p$ )가 약 200근방임을 보여주어 소성 반경  $R_p = 5.8R_u$  정도로 나타내고 있다. Bjerrum (1972)은 점토의 ( $E_u/C_u$ )값의 범위가 500~1500이라고 보고하였으며, 이로부터 계산된  $R_p$ 값은 (5.5-7.9)  $R_u$ 의 범위를 가진다. 또한 D'Appolonia et al.(1972)은 과압밀비가 높지 않은 점토의  $E_u/C_u$ 가 약 1000정도임을 ( $R_p = 6.9R_u$ )보고 하였다. 이상 기존의 연구 자료들을 종합하면, 본 지역의 실트질 점토의 소성 반경으로  $R_p = (6 \sim 8)R_u$ 를 사용하는 것이 적절한 것으로 판단된다.(평균치  $R_p = 7R_u$ ) 따라서 샌드 파일 개량지역 전체가 소성영역이거나 소성에 가까운 영역이 된다. 상기의 점토결과로부터  $A_f = A = 1$  그리고  $R_p = 7R_u$ 인 관계를 이용하면 다음과 같이 단순화된 대략식이 얻어진다.(송, 1991)

$$r > R_p ; \Delta_u = [1.33 + 4\ln(7R_u/r)] S_u \quad (15)$$

$$r \leq R_p ; \Delta_u = 65 S_u (R_u/r)^2 \quad (16)$$

#### 4. 현장계측결과 및 분석

그림 1의 샌드파일 설치 순서에 따라, 샌드 파일 설치과정중에 기 설치된 간극수압계로부터 간극수압 변화양상을 측정하였다. 샌드 파일은 원거리로부터 근거리로 설치하여 설치된 간극수압계 사이의 원지반 조건(탄성범위 조건)을 확보하도록 하였다. 각 심도 및 거리별 간극수압 측정기록을 요약 정리하여 표 3에 나타내었다.

표 3. 간극수압계 측정결과 요약

| 샌드 파일 설치번호 | 상부간극수압계(EL-0.331m) |                         |                            | 하부간극수압계(EL-5.187m) |                         |                            | 비고 |
|------------|--------------------|-------------------------|----------------------------|--------------------|-------------------------|----------------------------|----|
|            | 측정거리 (m)           | 간극수압(t/m <sup>2</sup> ) | 과잉간극수압 (t/m <sup>2</sup> ) | 측정거리 (m)           | 간극수압(t/m <sup>2</sup> ) | 과잉간극수압 (t/m <sup>2</sup> ) |    |
| No.1       | 48.3a              | 5.77                    | 1.1                        | 46.7a              | 9.90                    | 0.37                       |    |
| No.2       | 45.7a              | 5.84                    | 1.17                       | 45.0a              | 9.97                    | 0.44                       |    |
| No.3       | 45.1a              | 5.98                    | 1.31                       | 45.7a              | 10.02                   | 0.49                       |    |
| No.4       | 46.7a              | 6.12                    | 1.45                       | 48.3a              | 10.14                   | 0.61                       |    |
| No.5       | 37.2a              | 6.20                    | 1.53                       | 39.1a              | 10.21                   | 0.69                       |    |
| No.6       | 35.1a              | 6.16                    | 1.48                       | 35.8a              | 10.22                   | 0.69                       |    |
| No.7       | 35.8a              | 6.43                    | 1.76                       | 35.1a              | 10.24                   | 0.71                       |    |
| No.8       | 39.1a              | 6.47                    | 1.80                       | 37.2a              | 10.25                   | 0.72                       |    |
| No.9       | 30.5a              | 6.74                    | 2.07                       | 28.0a              | 10.28                   | 0.75                       |    |
| No.10      | 28.0a              | 6.88                    | 2.21                       | 30.5a              | 10.33                   | 0.80                       |    |
| No.11      | 25.1a              | 7.86                    | 3.19                       | 26.1a              | 10.37                   | 0.84                       |    |
| No.12      | 26.1a              | 7.23                    | 2.56                       | 25.1a              | 10.37                   | 0.84                       |    |
| No.13      | 23.0a              | 7.36                    | 2.69                       | 19.5a              | 10.43                   | 0.91                       |    |
| No.14      | 16.8a              | 7.73                    | 3.06                       | 15.2a              | 10.51                   | 0.98                       |    |
| No.15      | 15.2a              | 8.22                    | 3.55                       | 16.8a              | 10.59                   | 1.06                       |    |
| No.16      | 19.5a              | 7.86                    | 3.19                       | 23.0a              | 10.65                   | 1.12                       |    |
| No.17      | 18.2a              | 8.40                    | 3.73                       | 13.5a              | 10.65                   | 1.12                       |    |
| No.18      | 13.5a              | 9.09                    | 3.42                       | 18.2a              | 10.94                   | 1.42                       |    |
| No.19      | 5.6a               | 9.70                    | 5.03                       | 9.0a               | 11.11                   | 1.58                       |    |
| No.20      | 9.0a               | 8.38                    | 3.71                       | 5.6a               | 10.96                   | 1.43                       |    |

a : 샌드파일의 반경

표 3에서와 같이 샌드 파일과 근접할수록 과잉간극수압은 증가하는 것으로 나타났으며, 비교적 연약한 지반으로 평가되는 상부지층에서 더욱 크게 발생하는 것으로 나타났다. 간극 수압계 설치심도별로 샌드 파일 설치 거리별로 발생한 과잉간극수압을 도시하면 다음 그림 3에 나타내었다. 그림 3에서와 같이 r/a = 50부근에서도 1.0 t/m<sup>2</sup> 정도의 과잉간극수압이 발생하며, 비교적 연약정도가 큰 상부 점토층의 경우 과잉간극수압 발생량이 크게 나타났다. 또한 r/a=15를 경계로 하여 과잉간극수압 발생경향이 직선화 하다가 r/a<15의 범위에서는 급속히 증가하는 것으로 나타났다. 이와 유사한 연구 사례를 종합적으로 표현하면 그림 4에 나타낸 바와 같으며, 결과들을 종합하면 일정한 다음과 같은 관계식이 표현되는 것으로 보고되고 있다.(송, 1991)

$$\Delta_u = P/(r/a)^n + Q/(r/a) \quad (\text{단, } 8 \leq r/a \leq 15 \text{인 범위에서}) \quad (17)$$

여기서, r/a = 샌드 파일 중심으로부터의 거리/샌드 파일의 반경

n = 반 대수지 상에서  $\Delta_u$ 와 (r/a)관계도의 기울기

(0.89; 보통 예민 점토, 2.89; 매우 예민한 해성점토)

P = 상수(1; 보통 예민 점토, 1000; 매우 예민한 해성점토)

Q = 상수(3; 보통 예민 점토, 6.5; 매우 예민한 해성점토)

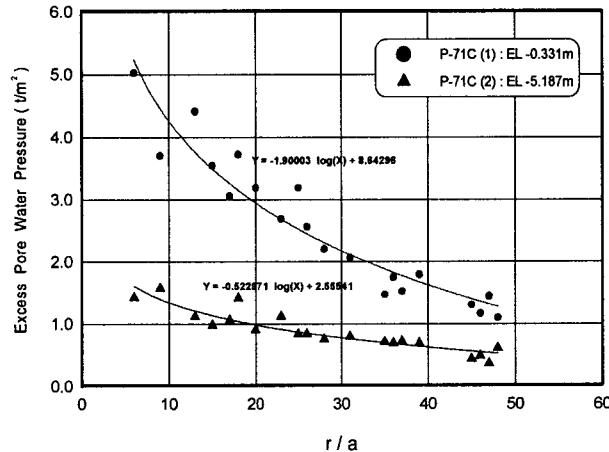


그림 3. 샌드 파일 설치위치별 과잉간극수압 발생 변화

본 현장에서 측정한 수직배수재 설치거리별 유효상재하중에 따른 과잉간극수압 발생분포는 그림 5에 나타내었다. 그림에서와 같이 상부 연약층에서는 일반적인 매우 예민한 해성점토의 변화경향을 보이고 있으며, 하부층에서는 보통 예민한 점토의 변화경향을 보이고 있는 것으로 나타났다.  $r/a < 15$ 인 상부 연약층에서는 일반적인 경향과 유사한 것으로 나타났다.

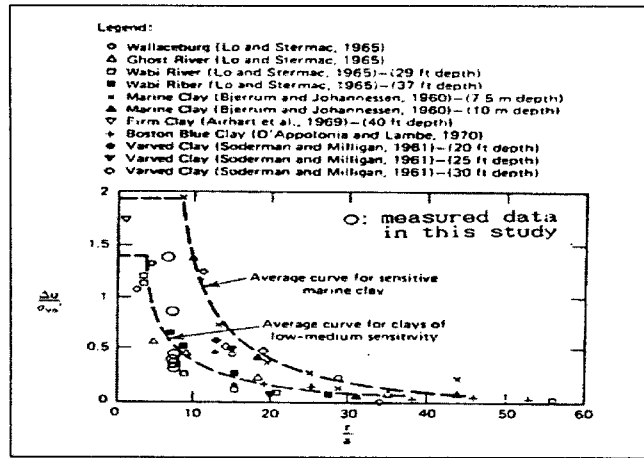


그림 4. 수직배수재 설치 거리별 과잉간극수압 발생관계(after Poulos & Davis, 1980)

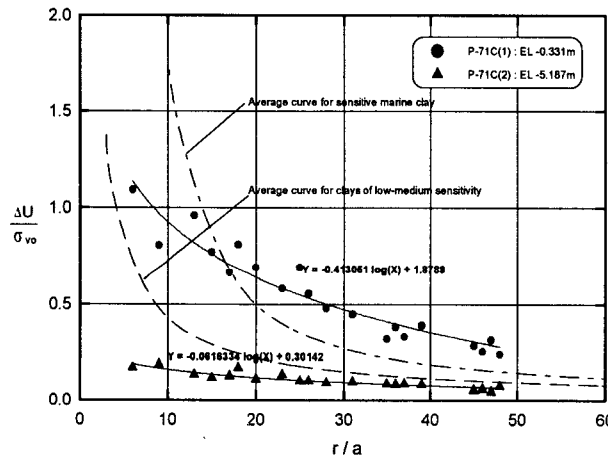


그림 5. 수직배수재 설치거리별 유효상재하중을 고려한 과잉간극수압 발생 변화

지반조건을 고려하여 식(16), (17)로 부터 과잉 간극수압 발생 경향을 예측할 수 있으며, 두 식을 비교하면 식(16)의 이론적 과잉 간극수압은 지반속에 샌드 파일 설치시 주변지반에 발생하는 과잉 간극수압은 파일 중심으로 부터의 거리가 멀어짐에 따라 거리의 2승에 반비례 한다는 것을 보여주나 식(17)의 실측 자료는 거리의 1승 혹은 3승에 반비례 한다는 것을 나타내어 다소 차이가 있음을 나타낸다. 두 식과 시험결과와 비교하면 예민비가 약간 높은 점토일수록 이론적 접근 방법과 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다. 따라서 계측결과로부터 지층별 유효상재하중을 고려한 과잉간극수압을 다음 식으로 나타내었다.

- 예민한 상부 점성토층;  $\frac{\Delta U}{\sigma'_{vo}} = -0.413051 \log\left(\frac{r}{a}\right) + 1.8789$  (18)

- 보통예민한 하부 점성토층;  $\frac{\Delta U}{\sigma'_{vo}} = -0.0616334 \log\left(\frac{r}{a}\right) + 0.30142$  (19)

본 연구는 지층조건이 파악된 위치에 계획적으로 간극수압계를 설치한 후 샌드 파일 설치위치를 원거리에서 근거리로 다양하게 변경하면서 시험을 실시하여 기타 연구자의 연구결과와 비교하여 매우 종합적인 결과가 얻어진 것으로 여겨진다. 또한 기존의 연구결과와 비교적 유사한 것으로 여겨지며, 동일한 위치에서도 심도에 따라 공동확장에 따른 과잉간극수압 특성이 다르게 평가되고 있는 것으로 나타났다.

이와 같이 과잉간극수압 특성의 변화를 보이는 요소는 점성토의 강도(예민정도 포함)와 팽창영역에서 소성거동에 따른 영향으로 일반적으로 샌드 파일의 직경이 40cm이고 설치간격이 200cm인 경우 개량지역 주변지반 전체가 소성영역으로의 평가가 가능한 바, 연약지반처리공법으로 수직배수재인 샌드 파일 일을 설치할 경우 부수적으로 발생하는 공동확장에 의한 수평 압밀 개량효과의 추가 검토를 통한 전체 지반의 압밀특성이 고려되어야 할 것으로 판단된다.

## 5. 결론

샌드 파일 주변지반의 공동확장에 의한 압밀특성 연구결과를 요약정리하면 다음과 같다.

- 1) 연약지반 심도별로 간극수압계를 설치하고 샌드 파일을 원거리로부터 근거리로 설치하면서 간극수압을 측정할 결과 거리와 지반조건에 따라 일정한 경향이 있음을 파악하였다.
- 2) 샌드파일 설치위치가 가까울수록  $r/a$ (=설치거리/샌드파일직경) $<15$ 인 범위에서 발생과잉간극수압은 매우 크게 발생하는 것으로 나타났으며, 동일한 위치에서도 지층심도 및 연약정도에 따라 과잉간극수압특성이 매우 다르게 나타났다.
- 3) 계측수행결과를 이용한 분석으로 공동확장이론을 이용한 일정한 간극수압특성 예측이 가능하며, 다른 지역에서 측정된 과잉 간극수압자료와 대체로 유사한 특성을 나타내었다.
- 4) 이와 같이 샌드파일 설치시 공동확장에 과잉간극수압이 발생하고 이로 인한 수평 압밀 특성 예측이 가능한 바 샌드파일 설치시 부수적으로 발생하는 공동확장에 의한 수평 압밀 개량효과를 고려한 전 지반의 압밀특성을 고려하여야 할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 송정락(1991), "공동확장이론에 의한 sand pile항타시의 과잉간극수압 예측", 대우엔지니어링 기술보, 제 8권 제 1호, pp.3~10
2. 한국지반공학회(1997), 지반공학 시리즈 6-연약지반-, pp.447-478
3. 천병식 등(1998), 지반공학-이론과 실제-, 구미서관, pp.226-231
4. Baligh M.M.(1986), "Undrained Deep Penetration, II: Pore pressure", Geotechnique, Vol.36, No.4, pp.487-501
5. Battaglio, M., Jamiolkowski, M., Lancellotta, R. and Maniscalco, R.(1981), "Piezometer Probe Test in Cohesion Deposits", Proceedings of A Session Sponsored by The Geotechnical Engineering Division at The ASCE National Convention, St. Louis, Mississippi, Oct. 26-30, pp.264-302
6. Bjerrum, L.(1972), "Embankment on Soft Ground", Proc, Specialty Conf. Perform. Earth Supported Structure, ASCE, Vol. II, pp.1-54
7. NAVFAC(1971), Design Manual, Soil Mechanics, Foundations and Earth Structures, DM-7, pp.7-6-1~25
8. Rohani, B. and Baldi, G.Y.(1981), "Correlation of Cone Index with Soil Properties", Proceedings of a Session Sponsored by the Geotechnical engineering Division of the ASCE National Convention, St. Louis, Mississippi, Oct. pp.128-144, 1981.
9. Skempton, A.W.(1954), "The Pore-Pressure Coefficients A and B", Geotechnique, Vol.4, pp.143-147
10. 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