

PVD에 의한 연약점토지반의 압밀촉진효과에 대한 수치해석

Numerical Analyses on Consolidation Promotion Effect of Soft Clay Ground by Prefabricated Vertical Drain

유 승 경^{1*} You, Seung-Kyong

ABSTRACT

In this paper, a series of numerical analyses on soft clay ground improved by PVD were carried out, in order to investigate the consolidation promotion effect considering PVD width and surcharge pressure. In the numerical analyses, an elasto-viscoplastic three-dimensional consolidation finite element method was applied, in which the applicability of numerical analyses could be confirmed comparing with consolidation behavior simulated at the laboratory. And, through the results of the numerical analyses, consolidation behaviors of soft clay ground with elapsed time was elucidated, together with the effects of PVD width and surcharge pressure.

요 지

본 논문에서는 연약지반개량공법 중의 하나인 PVD공법에 의한 연약지반개량효과를 파악하기 위하여 일련의 수치해석을 실시하였다. 본 연구에서는 기존에 수행된 실내모형실험 결과와의 비교를 통하여 그 신뢰성이 검증된 탄점소성 3차원압밀 유한요소해석 방법을 사용하였다. 수치해석에서는 PVD의 폭과 상재하중의 크기를 다양하게 변화시키며 개량된 점토지반의 압밀거동을 재현하였으며 그 결과를 이용하여 개량된 연약점토지반의 압밀촉진효과에 미치는 PVD의 폭과 상재하중 크기의 영향에 대하여 고찰하였다.

Keywords : PVD method, Consolidation, Numerical analysis, Soft clay ground, PVD width, Surcharge pressure

1. 서 론

최근 우리나라에서는 산업발전과 사회적 요구의 다양화로 인해 국토 부족이라는 문제점이 대두되고 있음에 따라 해안지역의 개발이 확대 되고 있는 실정이다. 따라서 연약한 해저 점토지반이나 매립으로 조성된 연약지반 상에 다양한 건설 사례가 급증하고 있으며 이러한 건설 현장의 지반공학적 문제를 해결하려는 노력이 지속되고 있다. 연약지반 개량공법에는 목적이나 방법에 따라서 다수의 공법이 있지만, 그 가운데 연직배수재를 이용하여 점토층의 압밀 침하를 촉진시킴과 동시에 강도증가 촉진을 꾀하는 연직배수공법은 최근 증가하고 있는 항만공사나 해상공사에 폭 넓게 적용되고 있는 신뢰성 있는 공법중의 하나

이다. 특히 각종의 연직배수공법들 중에서 천연자원의 부족이나 경제성의 문제를 해결하기 위하여 인공적으로 제작된 다공질 배수재를 사용하는 PVD공법은 최근 그 적용과 보급이 급속히 진행되고 있으며 그 적용성이나 유효성에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. 그러나 PVD공법은 연직배수재의 형상이 기존의 원형 배수재와 달리 판상의 배수재를 사용하기 때문에 개량된 연약점토지반의 압밀거동 메커니즘이 복잡하며 따라서 현재 이 공법을 설계함에 있어 실무에서 일반적으로 사용되고 있는 간극수의 축대칭 방사형 흐름 이론을 근거로 하는 Barron(1948)이나 Hansbo(1981) 등의 이론해의 적용성에 대하여 엄밀히 검토하여야 할 필요성이 있다.

본 논문에서는 PVD에 의한 압밀촉진효과를 정량적으

^{1*} 정회원, 명지전문대학 토목과 부교수 (Member, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Myongji College, E-mail: yousk@mjc.ac.kr)

로 예측하는 방법을 확립하기 위한 연구의 일환으로 PVD가 타설된 연약점토지반의 압밀거동에 대한 일련의 수치해석을 실시하였다. 본 연구에서 사용된 수치해석방법의 신뢰성에 대해서는 PVD의 하나인 플라스틱보드드레인에 의해 개량된 연약점토지반의 압밀거동에 관한 연구(유승경, 2003)에서 일련의 실내모형실험과 그에 관한 수치해석을 실시하여 정량적으로 검증한 바 있다. 본 논문에서는 PVD에 의한 연약점토지반의 압밀거동에 대한 수치해석의 결과를 이용하여 PVD로 개량된 연약점토지반의 압밀촉진효과에 미치는 PVD의 폭과 상재하중 크기의 영향에 대하여 고찰하고자 한다.

2. 수치해석 개요

2.1 수치해석 방법

본 연구에서의 수치해석은 연계해석(Coupled analysis)이 가능한 탄점소성 3차원압밀 유한요소해석법(小田 등, 2000)을 적용하였다. 본 해석방법에는 리턴매핑기법(Return mapping procedure)을 적용하여 지반재료가 파괴상태에 도달한 후에도 안정적인 해석이 가능하다(Ortiz 등, 1986). 한편, 본 해석방법의 신뢰성은 PVD에 의해 개량된 연약점토지반의 압밀거동에 관한 연구를 통하여 실시한 모형실험 결과를 재현함으로써 검증한 바 있다(유승경, 2003).

2.2 수치해석 모델

그림 1은 본 연구에서 수행한 수치해석의 모델을 나타내고 있다. 본 모델은 PVD에 의한 연약점토지반의 정성적 거동을 파악하기 위하여 개량지반을 단순화한 것으로서 판상 연직배수재의 유효 등가경 결정 방법에 관한 연구(유승경 등, 2008)에서 사용한 모델과 동일하다. 수치해석

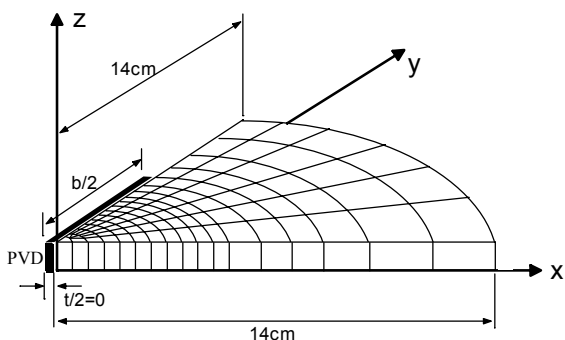


그림 1. 수치해석 모델(유승경 등, 2008)

영역은 간극수 흐름에 대한 대칭성을 고려하여 결정하였고, 배수재는 배수만을 담당하고 웰레지스텐스는 무시할 수 있다고 상정하였다. 따라서 점토지반과 배수재가 접하는 부분을 배수조건으로 표현하였으며 모형지반의 상면과 저면은 비배수조건으로 설정하였다. 한편 모형지반의 연직변위에 대하여 상면을 등침하 조건으로 설정하였고 그 외 경계 부분은 각각 변위에 대한 대칭성을 고려하여 x, y, z방향으로 구속하였다.

2.3 점토지반의 모델화

본 일반적으로 고풍수비의 연약점토지반은 저응력 상태이며 이차압밀을 포함하는 비교적 압축성이 큰 복잡한 거동을 나타내리라 생각된다. 따라서, 본 수치해석에서의 연약점토지반의 역학거동은 Matsui 등(1986)에 의하여 제안된 탄점소성 구성모델에 의해 표현하였다. 본 구성식에서는 시간에 의존하지 않는 탄소성변형과 시간의존 특성을 갖는 점성변형특성을 구분하여 표현함으로써 점성토의 시간 의존적 변형특성을 고려하고 있다. 즉, 소성 체적 변형률과 점성 체적 변형률의 합으로 얻어지는 점소성 체적 변형률을 산정하여, 이것을 변형률 경화 파라미터로 이용한다. 본 모델의 유동곡면(f)은 식 (1)에 의해 표현된다.

$$f = \mu \ln \left| \frac{1}{\delta} \left[\left\{ 1 - \exp \left(- \frac{\delta \nu_r^v}{\mu} t \right) \right\} \exp \left(\frac{\nu^p}{\mu} \right) + \delta \exp \left(- \frac{\delta \nu_r^v}{\mu} t \right) \right] \right| - \nu^p = 0 \quad (1)$$

여기서, ν^p , μ , ν_r^v , δ 및 t 는 각각 점소성체적변형률, 이차압밀계수, 기준점소성체적변형률속도, 내부구속변형률 및 시간을 나타내고 있다. 또한, ν^p 는 소성체적변형률이고 식 (2)와 (3)에 의해 정의된다.

$$(\text{주동측}) \quad \eta \geq \eta_{K_0}$$

$$\nu^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e} \left[\ln \left(\frac{p'}{p'_{yo}} \right) + \left(\frac{\alpha_a}{\alpha_a - 1} \right) \ln \left(\frac{M_a + (\alpha_a - 1)\eta}{M_a + (\alpha_a - 1)\eta_{K_0}} \right) \right] \quad (2)$$

$$(\text{수동측}) \quad \eta \leq \eta_{K_0}$$

$$\nu^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e} \left[\ln \left(\frac{p'}{p'_{yo}} \right) + \left(\frac{\alpha_p}{1 - \alpha_p} \right) \ln \left(\frac{M_p + (\alpha_p - 1)\eta_{K_0}}{M_p + (\alpha_p - 1)\eta} \right) \right] \quad (3)$$

여기서 λ , κ , e 및 η 는 각각 압축지수, 팽창지수, 간극비

및 응력비를 나타내고 있으며, 점자의 K_c 는 K_0 상태에 대한 값을 나타내고 있다. 한편, M 및 α 는 각각 한계상태에 대한 응력비 및 소성증분비 파라메타이며 또한 점자의 a 및 p 는 각각 주동상태 및 수동상태의 값을 나타내고 있다. 한편, 본 수치해석에서 점토의 투수성은 간극비에 의존한다고 가정하였으며 수치해석에 사용한 점토의 역학 파라메터는 표 1에 나타난 바와 같다. 이에 관한 자세한 내용은 PBD에 의해 개량된 연약점토지반의 압밀거동에 관한 연구(유승경, 2003)에서 설명한 내용을 참고하기 바란다.

2.4 수치해석 조건

표 2는 본 연구에서의 수치해석 조건을 나타내고 있다.

표 1. 점토의 역학 파라메터

| Parameters | | Value |
|--|-----------------|----------------------|
| Compression index | λ | 0.410 |
| Swelling index | κ | 0.035 |
| Stress ratio at critical state | M^* | 1.150 |
| Stress ratio at K_0 state | η_{k_0} | 0.710 |
| Poisson ratio | ν | 0.341 |
| Coefficient of secondary compression (1/min) | μ | 2.2×10^{-3} |
| Reference viscous volumetric (1/min) | $\dot{\nu}_r^v$ | 2.2×10^{-7} |
| Internal confining strain | δ | 0.001 |

수치해석에서는 PVD의 폭을 20mm에서 150mm까지 7가지로 변화시켰으며, 모델지반에 적용되는 재하압력증분은 29.4kPa에서 117.6kPa까지 4가지로 변화시켜 총 28케이스에 대한 수치해석을 수행하였다.

3. PVD로 개량된 점토지반의 압밀 거동 분석

3.1 압밀 침하 거동에 미치는 배수재 폭과 재하압력 증분의 영향

그림 2와 3은 각각 점토지반의 압밀 침하 거동에 미치는 배수재의 폭과 재하압력증분의 영향을 나타내고 있다. 그림 2로부터 재하압력증분이 29.4kPa과 117.6kPa인 경우 모두 배수재의 폭이 넓은 경우일수록 압밀침하의 속도는 빠르게 나타나고 있지만 모든 배수재의 폭에 대한 최종 침하량은 동일함을 알 수 있다. 한편, 그림 2 (a)와 (b)를 비교해 보면 재하압력증분이 큰 수치해석 결과에서 더 큰 압밀 침하량이 발생되고 있음을 알 수 있다. 그림 3으로부터 배수재의 폭이 20mm와 100mm인 경우 모두 재하압력

표 2. 수치해석 조건

| PVD Width b (mm) | Increment of Surcharge Pressure $\Delta\sigma$ (kPa) |
|------------------------------|--|
| 20, 30, 40, 50, 70, 100, 150 | 29.4, 58.8, 88.2, 117.6 |

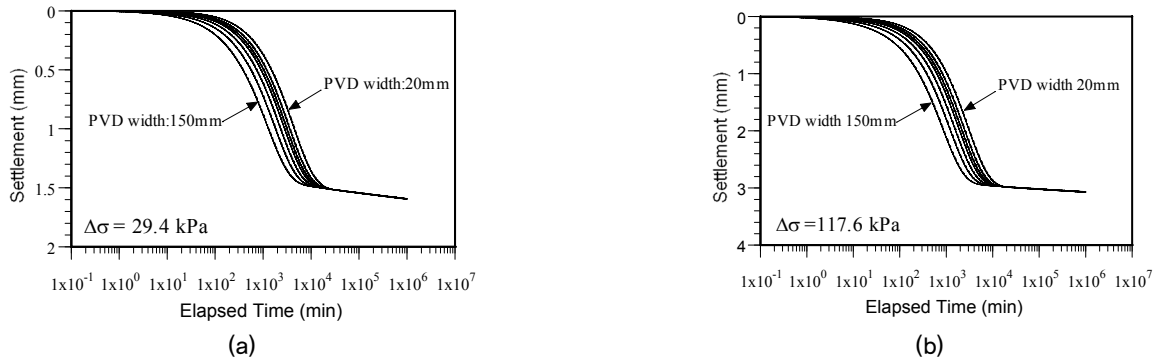


그림 2. 점토지반의 침하거동에 미치는 배수재 폭의 영향

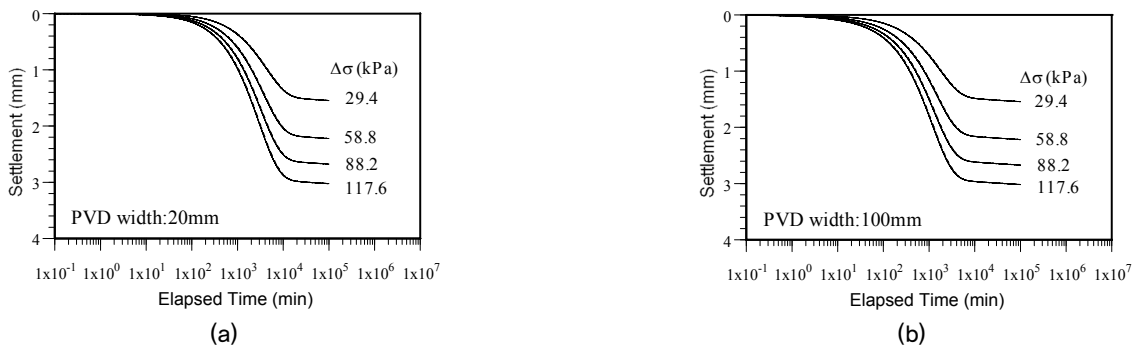


그림 3. 점토지반의 침하거동에 미치는 재하압력증분의 영향

증분이 클수록 모형지반의 침하량은 크고 일차압밀이 종료되는 시간이 짧음을 알 수 있다. 그러나 그림 3 (a)와 (b)의 비교를 통하여 알 수 있듯이 배수재의 폭에 관계없이 재하압력증분이 동일한 경우 발생하는 압밀침하량은 거의 같게 나타나고 있다.

3.2 과잉간극수압의 소산 거동에 미치는 배수재 폭과 재하압력증분의 영향

그림 4는 점토지반의 평균과잉간극수압의 소산 거동에 미치는 배수재 폭의 영향을 나타내고 있다. 본 논문에서 과잉간극수압의 평균값을 산정하여 검토한 이유는 수치해석 대상 모델에서 배수재에 의한 압밀촉진효과의 위치별 차이를 평균적으로 가름하기 위함이다. 여기서 평균과잉간극수압은 다음과 같이 결정하였다.

$$\bar{u} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i \quad (4)$$

여기서, \bar{u} 는 평균과잉간극수압, n 과 u_i 는 각각 수치해석 모델에서 점토부의 요소수와 i 번째 요소에 대한 과잉간극수압을 나타내고 있다. 그림 4로부터 재하 직후의 시간에

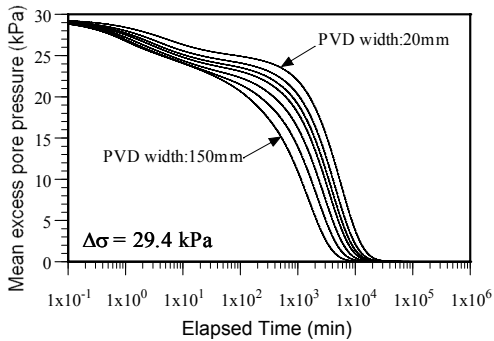
서는 배수재의 폭에 관계없이 재하압력증분에 상응하는 과잉간극수압이 발생되고 있음을 알 수 있다. 또한 재하압력증분이 29.4kPa과 117.6kPa인 경우 모두 배수재의 폭이 넓은 경우일수록 과잉간극수압의 소산 속도는 빠르게 나타나고 있음을 알 수 있다. 한편, 그림 5는 점토지반의 평균과잉간극수압의 소산 거동에 미치는 재하압력증분의 영향을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 배수재의 폭이 일정한 경우 재하압력증분이 클수록 과잉간극수압이 소산되는 시간은 미소한 차이지만 짧게 나타나고 있다.

3.3 점토지반의 유효응력 증가에 미치는 배수재 폭과 재하압력증분의 영향

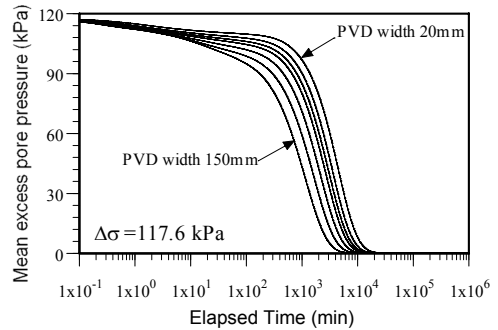
그림 6은 점토지반의 평균유효응력 증가에 미치는 배수재 폭의 영향을 나타내고 있다. 여기서 평균유효응력은 다음과 같이 결정하였다.

$$\Delta \bar{p}' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta p_i' \quad (5)$$

$$\Delta p_i' = \frac{\Delta \sigma_{xi}' + \Delta \sigma_{yi}' + \Delta \sigma_{zi}'}{3} \quad (6)$$

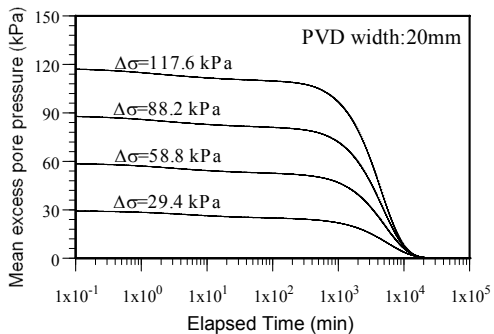


(a)

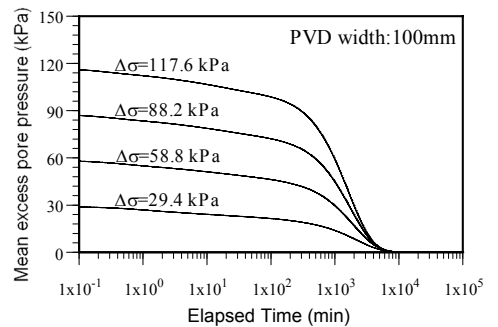


(b)

그림 4. 점토지반의 과잉간극수압 소산에 미치는 배수재 폭의 영향

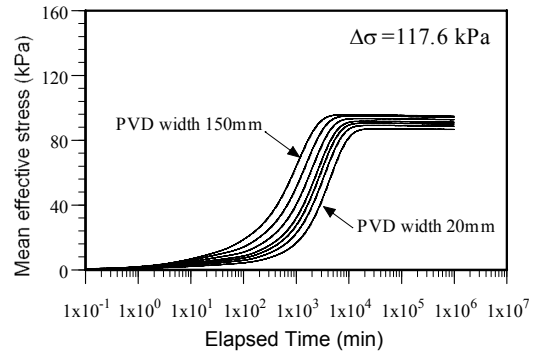
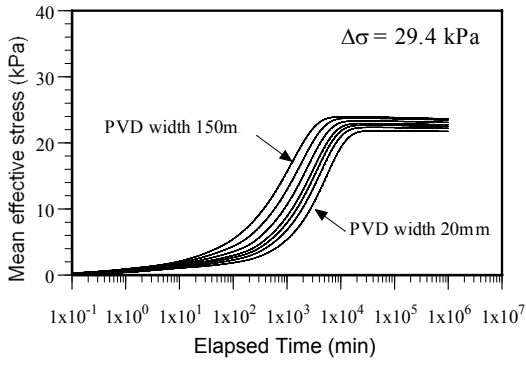


(a)



(b)

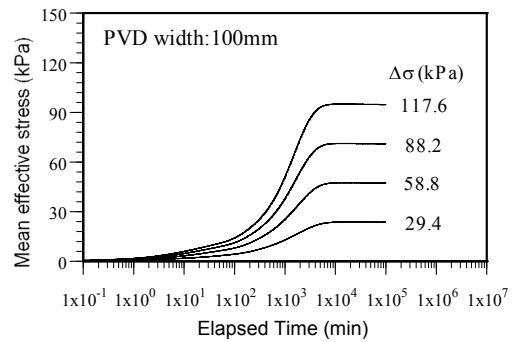
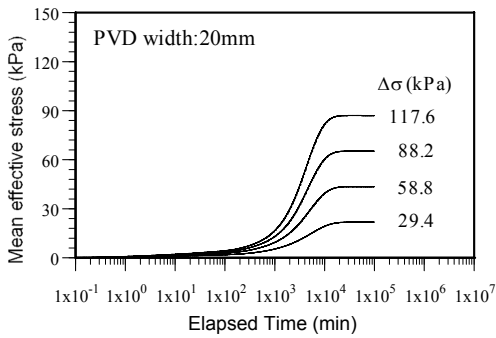
그림 5. 점토지반의 과잉간극수압 소산에 미치는 재하압력증분의 영향



(a)

(b)

그림 6. 점토지반의 유효응력 증가에 미치는 배수재 폭의 영향



(a)

(b)

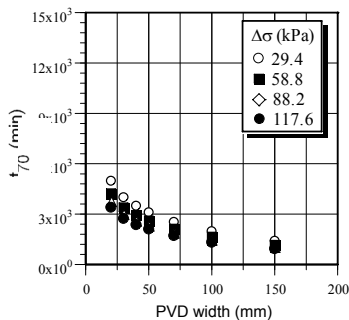
그림 7. 점토지반의 유효응력 증가에 미치는 재하압력증분의 영향

여기서, $\Delta\sigma'_{xi}$, $\Delta\sigma'_{yi}$, $\Delta\sigma'_{zi}$ 는 각각 점토부에 대한 i 번째 요소의 x , y , z 방향의 수직유효응력의 초기 값으로부터의 증분 값이며 n 은 수치해석 모델에서 점토부의 요소수를 나타내고 있다. 점토부의 유효응력증분은 압밀이 진행됨에 따라 증가하고 있으며 다소의 차이는 있지만 배수재의 폭에 관계없이 정상상태(Steady state)에 도달한 시점에서의 값이 유사함을 알 수 있다. 또한 정상상태에 도달하기까지의 시점은 배수재의 폭이 넓을수록 빠르게 나타남을 알 수 있다. 그림 7은 점토지반의 평균유효응력 증가에 미치는 재하압력증분의 영향을 나타내고 있다. 당연한 사실이지만 배수재의 폭에 관계없이 재하압력증분이 클수록

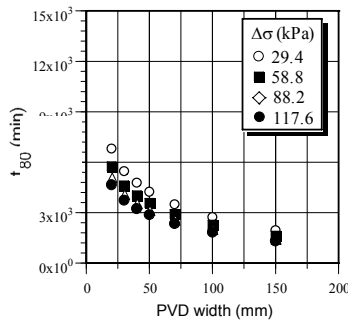
정상상태에 도달한 시점에서의 평균유효응력증분의 값은 크게 나타나고 있으며 각각의 배수재 폭에 대하여 정상상태에 도달되는 시점은 재하압력증분의 크기가 클수록 빠르게 나타나고 있다.

4. PVD로 개량된 점토지반의 압밀 시간 분석

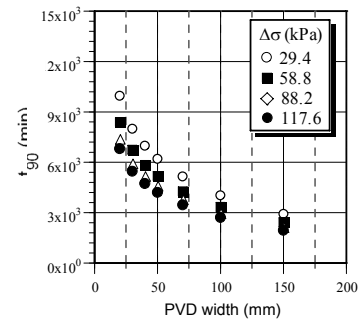
그림 8과 9는 각각 점토지반이 소정의 압밀도(70%, 80%, 90%)에 도달하는 시간 즉, 소정의 압밀시간과 배수재의 폭 및 재하압력증분의 관계를 나타내고 있다. 여기서 점토지반의 압밀도는 다음과 같은 식으로 산정하여 압밀시간을



(a) Time at U=70%

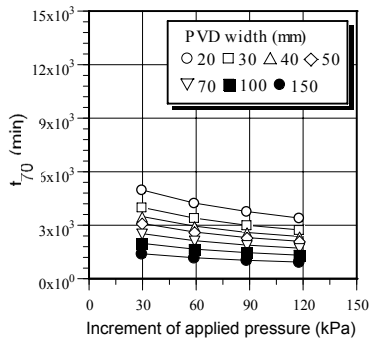


(b) Time at U=80%

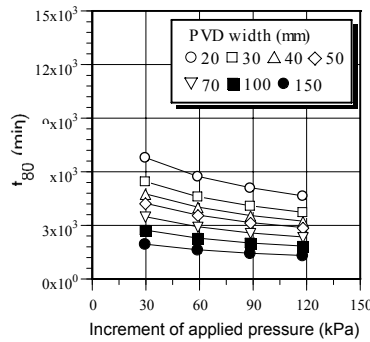


(c) Time at U=90%

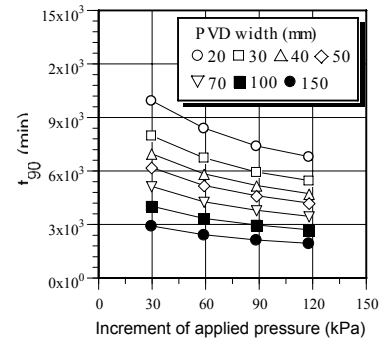
그림 8. 압밀시간과 배수재 폭의 관계



(a) Time at U=70%



(b) Time at U=80%



(c) Time at U=90%

그림 9. 압밀시간과 재하압력증분의 관계

결정하였다.

$$U(\%) = \frac{s}{s_f} \times 100 \quad (7)$$

여기서, s 와 s_f 는 각각 임의의 시간에서의 침하량과 일차압밀 종료시점에서의 침하량을 나타내고 있다. 그림 8로부터 모든 압밀도에서 배수재의 폭이 증가할수록 압밀시간은 짧아지고 있음을 알 수 있으며 압밀이 진행됨에 따라 배수재의 폭에 따른 압밀시간의 차이가 크음을 알 수 있다. 한편, 그림 9에 의하면 모든 압밀도에서 재하압력증분이 클수록 압밀시간이 짧아지고 있으며 이러한 특징은 배수재의 폭이 작을수록 현저히 나타남을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 PVD공법에 의한 연약지반개량효과 특히 배수재의 폭과 재하압력증분이 개량지반의 압밀축진효과에 미치는 영향을 파악하기 위하여 일련의 수치해석을 실시하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. PVD로 개량된 연약지반에서 재하압력증분의 크기에 관계없이 배수재의 폭이 클수록 압밀침하의 속도는 빠르게 나타났지만 최종 침하량은 동일하게 나타났다. 또한, 재하압력증분이 클수록 점토지반의 침하량은 크고 일차압밀침하가 종료되는 시간이 짧음을 알 수 있었다.
2. 점토지반에 대한 하중재하 직후에서는 배수재의 폭에 관계없이 재하압력증분에 상응하는 과잉간극수압이 발생되었으며 배수재의 폭이 클수록 과잉간극수압의 소산 속도는 빠르게 나타났다. 또한, 배수재의 폭이 일정한 경우 재하압력증분이 클수록 과잉간극수압이 소산되는 시간은 미소한 차이지만 짧게 나타났다.

3. 점토부의 유효응력증분은 압밀이 진행됨에 따라 증가하여 정상상태(Steady state)에 도달하였으며 그 시점에서 값은 배수재의 폭에 관계없이 유사함을 알 수 있었다. 또한 정상상태에 도달하기까지의 시점은 배수재의 폭과 재하압력증분의 크기가 클수록 빠르게 나타났다.
4. PVD로 개량된 점토지반에서 배수재 폭의 증가에 따른 압밀시간 단축효과는 압밀이 진행될수록 크게 나타났으며 재하압력증분의 증가에 따른 압밀시간의 단축효과는 배수재의 폭이 작을수록 현저히 나타남을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 유승경 (2003), PBD에 의해 개량된 연약점토지반의 압밀 거동에 관한 연구, *대한토목학회 논문집*, 제23권 제6C호, pp.399-406.
2. 유승경, 小田和廣(2008), “판상 연직배수재의 유효 등가경결정 방법에 관한 연구”, *한국지반공학학회 논문집*, 제24권 제6호, pp.95-100.
3. 小田和廣, 松井 保, 柳 承庚(2000) “PDを含む軟弱粘土地盤の壓密舉動と壓密度に關する解析的考察”, *日本土木學會第55回年次學術講演會論文集*, III-B197.
4. Barron, R.A. (1948), “Consolidation of fine-grained soils by drain wells”, *Transactions, American Society of Civil Engineers*, Vol.113, pp.718-742.
5. Hansbo, S. (1981), “Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains. Paper 12/22”, *Proceedings of the 10th ICSMFE*, Stockholm, Sweden, Vol.3, pp.677-682.
6. Matsui, T. and Abe, N.(1986), “Flow Surface Model of Viscoplasticity for Normally Consolidated Clay”, *Proc. 2nd Int. Symp. Num. Models Geotech.*, Ghent, pp.157-164.
7. Ortiz, M. and Simo, J. C. (1986), “An Analysis of a New Class of Integration Algorithms for Elastoplastic Constitutive Relations”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol.23, pp.353-366.

(논문접수일 2009. 2. 25, 심사완료일 2009. 3. 7)