

점성을 고려한 PBD 타설 연약점토지반의 3차원 압밀해석

3-Dimensional Consolidation Analysis Considering Viscosity on Soft Clay Ground improved by Plastic Board Drain

*1 유승경 You, Seung-Kyong

*2 한중근 Han, Jung-Gun

*3 조성민 Jo, Sung-Min

*4 김지용 Kim, Ji-Yong

Abstract

A series of numerical analyses on soft clay ground improved by plastic board drain(PBD) were carried out, in order to investigate the consolidation behavior considering viscosity of the improved ground. The applicability of numerical analyses, in which an elasto-viscoplastic three-dimensional consolidation finite element method is applied in this study, was confirmed through comparison between experimental and analytical results. As the analytical results, consolidation behavior of both settlement and excess pore pressure and effective stress in clay were elucidated. Then secondary consolidation characteristics of improved ground were estimated through compare with results of typical one-dimensional consolidation analysis.

요 지

점성을 고려한 연약점토지반의 압밀거동을 파악하기 위해 플라스틱보드드레인(PBD)에 의해 개량된 연약점토지반의 압밀거동에 대한 탄점소성 3차원 수치해석을 실시하였다. 본 연구에서 사용한 수치해석기법의 적용성은 기존에 실시한 모형실험의 결과와 수치해석의 결과를 비교함으로써 검증하였다. 수치해석 결과로부터 연약점토지반의 침하 및 과잉간극수압의 소산거동, 유효응력증분의 변화 특성을 파악할 수 있었으며, 기존의 일차원 압밀해석 결과와의 비교를 통해 개량지반에서 발생하는 이차압밀특성을 평가하였다.

Keywords : Consolidation, Soft clay ground, Plastic board drain, Viscosity, Numerical analysis

1. 서론

일반적으로 연약점토지반은 높은 함수비, 낮은 응력 상태이므로 상재하중이 재하 될 경우 일차압밀 뿐만 아니라 이차압밀을 포함하는 탄점소성 압밀침하 거동이 나타나게 된다. 따라서, 기존의 탄소성이론을 이용한 압밀침하해석(일차압밀)으로는 연약지반의

정확한 압밀침하거동의 재현이 불가능하다. 또한 연약점토지반의 역학거동은 재하시간이나 재하속도 등 시간 의존성에 의한 영향이 큰 것으로 알려져 있다. 그러나 흙의 탄소성 구성모델을 이용하여서는 이러한 영향을 고려 할 수 없기 때문에 어떠한 형태로든 점토지반의 시간 의존적 거동을 흙의 구성식에 반영하려는 노력이 진행되어 왔으며, 이러한 배경으로

*1 명지전문대학 토목과 조교수 (Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Myongji College)

*2 중앙대학교 건설환경공학과 조교수 (Assistant Professor, Dept. of Civil & Env. Engineering, Chung-Ang University)

*3 (주)평원엔지니어링 대표이사 (President, Pyeong-Won Engineering)

*4 (주)평원엔지니어링 부장 (General Manager, Dept. of Geotechnical Eng., Pyeong-Won Engineering)

점토의 소성과 점성을 동시에 고려할 수 있는 탄점소성 구성 이론을 바탕으로 한 점토의 구성식이 제안되어 왔다.

본 논문에서는 연약점토지반의 이차압밀거동을 표현할 수 있는 탄점소성 구성모델을 이용한 3차원 압밀해석을 실시하여 PBD가 타설된 연약점토지반의 보다 정확한 압밀거동과 침하량 산정에 대하여 고찰하고자 한다. 우선, PBD를 포함하는 연약점토지반의 압밀거동 해석을 위한 3차원 모델화를 실시하고, 해석대상지반의 탄점소성 역학 파라미터를 결정한다. 그리고 Matsui-Abe에 의해 제안된 탄점소성 구성식(Matsui-Abe, 1986)을 적용한 3차원 압밀 유한요소법을 이용하여 PBD가 타설된 연약점토지반의 압밀거동 즉, 일차 및 이차압밀침하거동과 과잉간극수압의 소산, 유효응력의 증가 등을 재현하고, 그 결과로부터 장기간에 걸친 연약점토지반의

이차압밀 거동을 정량적으로 분석하여 연약점토지반의 점성을 고려한 합리적인 침하량 산정에 대하여 고찰한다.

2. 수치해석의 개요

2.1 수치해석대상의 현장개요

그림 1과 2는 각각 본 검토의 대상 현장을 나타내고 있다. STA.0+580 현장은 성토부 하부에 점토층이 13.5m에 걸쳐 분포하고 있으며 압축지수는 0.40에서 0.51의 값을 나타내고 있다. 한편, STA.4+860 현장은 13.5m의 점토층이 분포하고 있고, 압축지수는 0.32의 값을 나타내고 있다. 현장에 대한 자세한 조건은 표 1에 나타낸 바와 같다.

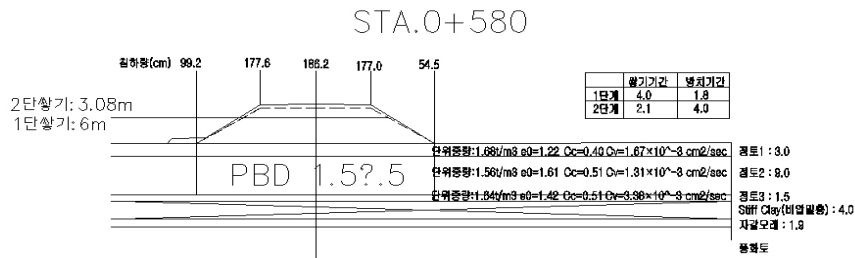


그림 1. STA.0+580 현장 개요도

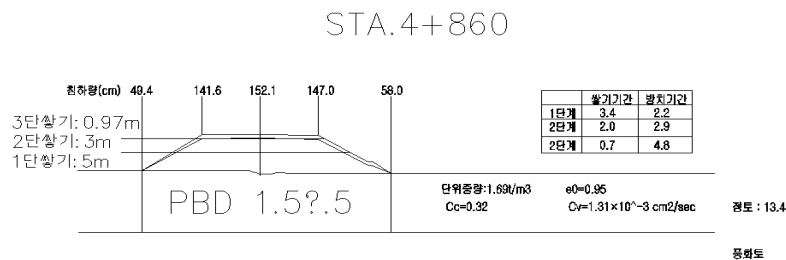


그림 2. STA.4+860 현장 개요도

표 1. 현장에 대한 설계정수

위 치		단위중량 γ_t (tf/m ³)	초기간극비 (e_0)	압축지수 (C_c)	2차압축지수 (C_s)	투수계수 (cm/sec)
STA.0+580	Layer 1	0.0~3.0m	1.68	1.22	0.40	5.72×10^{-8}
	Layer 2	3.0~9.0m	1.56	1.61	0.51	
	Layer 3	9.0~13.5m	1.64	1.42		
STA.4+860	Layer 1	0.0~13.4m	1.69	0.95	0.32	1.83×10^{-7}

2.2 연약점토지반의 탄점소성 모델화

본 검토대상지반을 구성하고 있는 점토는 고풍수비, 저응력 상태의 이차원압밀을 포함하는 비교적 압축성이 큰 복잡한 거동을 나타내리라 생각된다. 따라서, 점토의 역학거동은 Matsui-Abe(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.

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

여기서, v^w , μ , \dot{v}_r^v , δ 및 t 는 각각 점소성체적변형률, 이차원압밀계수, 기준점성체적변형률속도, 내부구속변형률 및 시간을 나타내고 있다. 또한, v^p 는 소성체적변형률이고 식 (2)와 (3)에 의해 정의된다.

(주동축) $\eta \geq \eta_{K_0}$

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

(수동축) $\eta \leq \eta_{K_0}$

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

여기서 λ , κ , e 및 η 는 각각 압축지수, 팽창지수,

간극비 및 응력비를 나타내고 있으며, 첨자의 K_0 는 K_0 상태에 대한 값을 나타내고 있다. 한편, M 및 α 는 각각 한계상태에 대한 응력비 및 소성증분비 파라미터이며 또한 첨자의 a 및 p 는 각각 주동상태 및 수동상태의 값을 나타내고 있다.

2.3 탄점소성 3차원 압밀 유한요소 해석법의 검증

본 연구에서의 수치해석은 탄점소성 3차원압밀 유한요소해석법(Oda, et al, 2000)을 적용하였다. 본 해석방법에는 리턴매핑기법(Return mapping procedure)을 적용하여 지반재료가 파괴상태에 도달한 후에도 안정적인 해석이 가능하다(Ortiz, et al, 1986). 한편, 본 해석방법의 유용성은 PBD에 의해 개량된 연약 점토지반의 압밀거동에 관한 연구를 통하여 실시한 모형실험 결과를 재현함으로써 검증한 바 있다(유승경, 2003).

2.4 연약점토지반의 탄점소성 역학 파라미터의 결정

점토의 모델화를 위해서는 압축지수, 팽창지수, 한계상태에서의 유효응력비, 이차원압밀계수, 기준체적변형률속도 등 구성모델의 역학 파라미터와 초기간극비, 투수계수, 투수계수변화지수 등의 지반 상태량을 결정할 필요가 있다. 따라서 본 검토에서는 점토의 역학특성 및 지반의 상태에 대한 파라미터 값들을 현장에서 얻은 정보(표 1)와 이를 활용하여 기준에 제안되고 있는 방법에 의해 표 2에 나타난 바와 같이 결정하였다.

2.5 PBD를 포함한 해석대상지반의 3차원 모델화

수치해석은 탄점소성 3차원 압밀 유한요소해석법(Oda, et al, 2000)을 적용하였으며, 표 3에 나타난 바와 같이 본 검토대상 현장과 동일한 조건으로 실시하였다.

본 연구에서의 수치해석은 최대 침하량이 발생되리라 예상되는 최대 상재하중이 작용하는 위치에서 PBD 1본이 담당하는 배수영역에 대한 단위지반을 대상으로 실시하였다. 그림 3은 수치해석영역과 경계조건을 나타내고 있다. 수치해석영역은 PBD 주변의 간극수 흐름에 대한 대칭성을 고려하여 해석 대상 단위지반의 4분의 1부분으로 결정하였고, PBD는

배수만을 담당하고 웰레지스턴스는 무시할 수 있다고 가정하였다. 따라서 PBD와 접하는 부분을 배수조건으로 하여 PBD에 의한 배수효과를 표현하였다. 또한, 현장조건과 일치시키기 위해 모델지반 상면은 배수 조건, 저면은 비배수 조건으로 하였다. 그림 4는 수치해석모델을 나타내고 있다. 수치해석영역을 38층으로 분할하였고, 각 층을 17개의 요소로 분할하였다.

표 2. 현장지반에 대한 설계정수

Position			λ	κ	M	n_{k_0}	v	$\mu(1/min)$	$\dot{v}_r^v(1/min)$	δ
STA.	Layer	Depth(m)								
0+580	1	0.0~3.0	0.1736	0.2018×10^{-2}	1.15	0.71	0.341	2.8×10^{-3}	1.3×10^{-8}	0.001
	2	3.0~9.0	0.2213	0.3277×10^{-2}						
	3	9.0~13.5	0.3333	0.3333×10^{-2}						
4+860	1	0.0~13.4	0.1389	0.3528×10^{-2}	1.15	0.71	0.341	2.4×10^{-3}	8.3×10^{-9}	0.001

표 3. 수치해석 대상 현장조건

Case	PBD width (cm)	Loading Stage	Incremental Pressure(kg/cm ²)	Initial Height of Ground(cm)
STA.0+580	10	1	1.725	1350
		2		
STA.4+860		1	1.704	1340
		2		
		3		

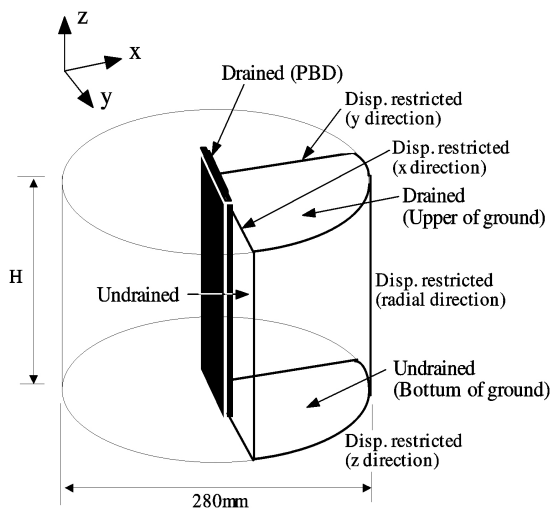


그림 3. 수치해석영역과 경계조건

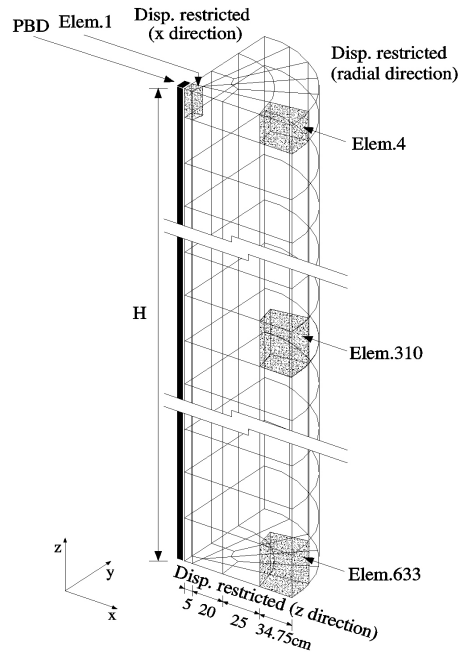


그림 4. 수치해석 모델

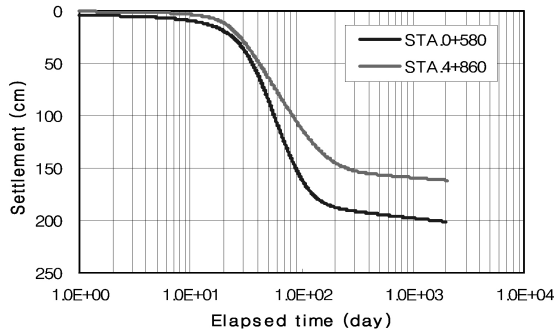


그림 5. 시간의 경과에 따른 침하량의 변화

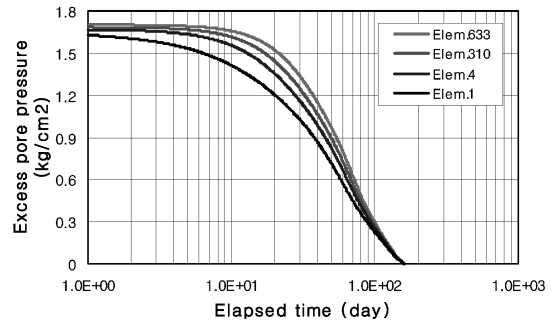


그림 6. 시간의 경과에 따른 과잉간극수압의 변화(STA.0+580)

3. 수치해석의 결과

3.1 경과시간에 따른 침하량의 변화

그림 5는 STA.0+580과 STA.4+860 위치에 대한 수치해석 결과로부터 얻은 모델지반의 시간 경과에 따른 지표면 침하량의 변화를 나타내고 있다. 두 위치에 대한 침하량의 변화로부터 모델지반에서 압밀 현상으로 인한 체적변화가 일어나고 있음을 알 수 있으며, 두 결과 모두 일차압밀현상이 종료된 후에도 2차압밀거동이 완만하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

수치해석결과를 분석해 보면 STA.0+580 위치에서의 일차압밀침하량은 약 183cm로 나타났으며 그 후 2차압밀이 계속 발생하여 약 2000일 정도가 경과 하면 일차압밀침하량을 포함하여 약 201cm의 압밀 침하가 발생되고 있음을 알 수 있다. 여기서, 본 수치해석 결과로부터의 일차압밀 종료시점은 모델지반의 과잉간극수압이 소산된 시점으로 결정하였다. 한편, STA.4+860 위치에서는 일차압밀침하량이 약 148cm로 나타났으며 그 후 2차압밀이 계속 발생하여 약 2000일 경과 후에는 일차압밀침하량을 포함하여 약 161cm의 압밀침하가 발생되고 있음을 알 수 있다.

3.2 경과시간에 따른 과잉간극수압의 변화

그림 6과 7은 각각 STA.0+580과 STA.4+860 위치에 대한 수치해석 결과로부터 얻은 모델지반의 시

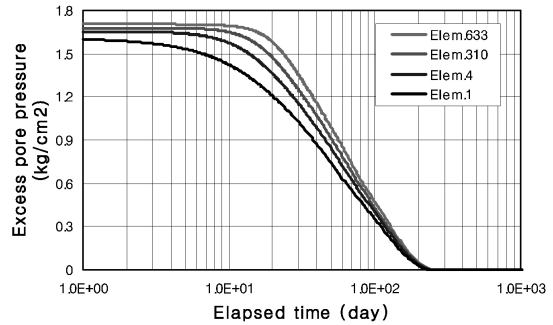


그림 7. 시간의 경과에 따른 과잉간극수압의 변화(STA.4+860)

간 경과에 따른 과잉간극수압의 변화를 나타내고 있다. 각각의 그림에는 그림 4에 표시되어 있는 4개의 요소에 대한 과잉간극수압의 변화를 나타내고 있다. 즉, 요소 1은 모델지반의 가장 상부에서 드레인과 인접하고 있는 요소에 해당되며, 요소 4는 모델지반의 가장 상부에서 드레인과 가장 떨어져 있는 요소에 해당된다. 또한 요소 310은 모델지반의 중간심도에서 드레인과 가장 떨어져 있는 요소에 해당되며, 요소 633은 모델지반 최하부에서 드레인과 가장 떨어져 있는 요소에 해당된다.

두 그림에서 알 수 있듯이 재하초기에 발생하는 과잉간극수압은 모델지반의 위치에 관계없이 재하 하중과 거의 비슷한 크기로 발생되고 있음을 알 수 있다. 그 후 과잉간극수압의 소산은 요소 1에서 가장 빨리 발생되고 있으며, 그 다음으로 요소 4, 요소 310, 요소 633의 순서로 소산됨을 알 수 있다. 요소 633은 모델지반의 상면배수조건에 의한 영향을 거의 받고 있지 않고 드레인으로부터 가장 멀리 떨어져 있기 때문에 가장 늦게 과잉간극수압의 소산이 발생되고 있다고 판단된다. 그러나 두 해석 케이스에서 모든

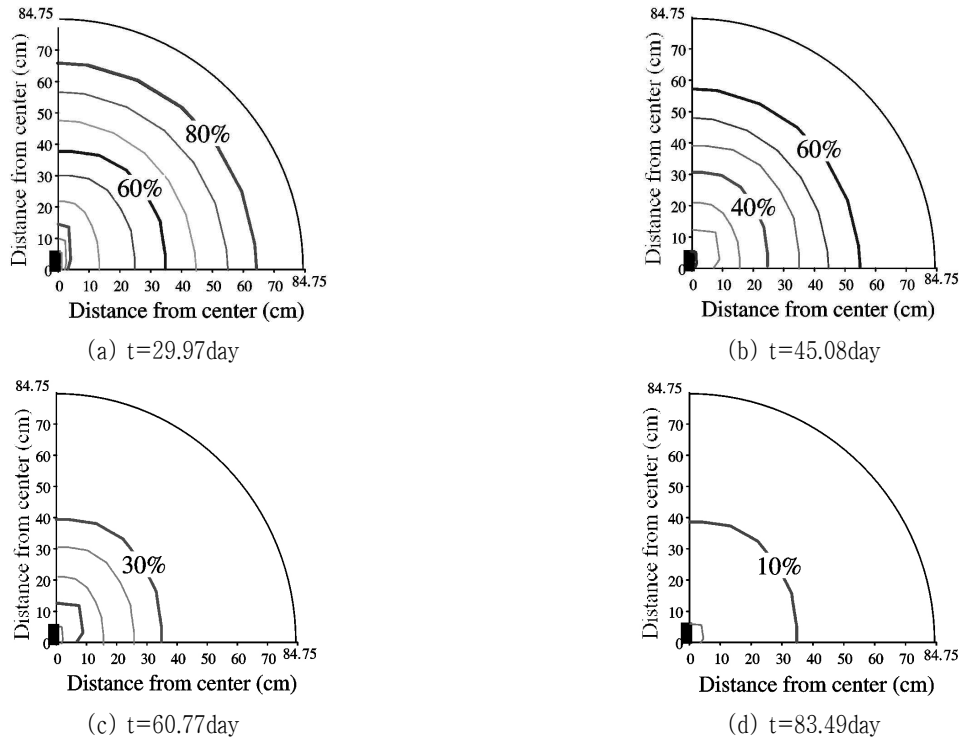


그림 8. 시간의 경과에 따른 과잉간극수압분포의 변화

요소에서의 과잉간극수압이 소산되는 시간은 거의 같음을 알 수 있다.

그림 8은 해석 케이스 STA.0+580에 대한 과잉간극수압 분포의 시간에 따른 변화를 나타내고 있다. 과잉간극수압의 분포에 대한 모델지반의 상면배수 조건의 영향을 최대한 배제하기 위하여 모델지반의 최하층부를 대상으로 그 분포를 분석하였다. 한편, 그림에 나타내고 있는 경과시간은 모델지반의 압밀도가 각각 20%, 40%, 60%, 80%의 시점을 의미하며, 그림 중의 분포는 재하압력증분에 대한 과잉간극수압의 백분율로 나타내었다.

모델지반의 과잉간극수압은 시간이 경과함에 따라서 PBD에 접하는 부분으로부터 소산되어가는 모양을 잘 알 수 있다. 한편, 과잉간극수압의 분포형상에 미치는 PBD형상(판상)의 영향은 PBD의 근접부에 한정되어 있을 뿐, PBD에서 멀어질수록 그 분포는 PBD를 중심으로 하는 거의 동심원에 가까운 형상을 나타내고 있다. 따라서 PBD와 같은 판상의 배수재를 적용하는 경우에도 배수재의 등가경을 적절히 결정할 수 있다면, 축대칭 문제로서 압밀거동을 생각할 수 있다고 판단된다.

3.3 경과시간에 따른 유효응력증분의 변화

그림 9는 점토지반의 평균유효응력증분의 시간에 따른 변화를 나타내고 있다. 점토지반의 평균유효응력증분은 다음과 같은 식으로 산정하였다.

$$\Delta \bar{p}' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta p_i' \quad (4)$$

$$\Delta p_i' = \frac{\Delta \sigma_{ri}' + \Delta \sigma_{zi}' + \Delta \sigma_{\theta i}'}{3} \quad (5)$$

여기서, $\Delta \sigma_{ri}'$, $\Delta \sigma_{zi}'$, $\Delta \sigma_{\theta i}'$ 는 각각 i 번째 점토

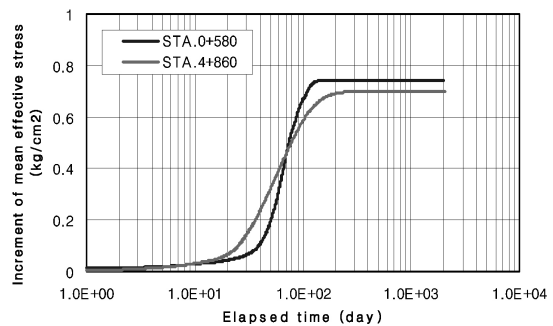


그림 9. 시간의 경과에 따른 평균유효응력증분의 변화

요소의 반경방향, 연직방향, 원주방향의 연직유효응력의 초기값으로부터의 증분이다.

그림으로부터 알 수 있듯이 두 해석케이스 모두 시간이 경과함에 따라 모델지반의 평균유효응력증분은 증가하고 있으나, 어느 시점에 도달하면 그 값이 일정하게 유지되는 정상상태를 보이고 있다. 한편, STA.0+580에 대한 모델지반의 최대유효응력증분은 약 0.74kg/cm^2 으로 나타났으며, STA.4+860에 대한 최대유효응력증분은 약 0.69kg/cm^2 으로 나타났다.

4. 점성을 고려한 연약지반의 침하량 산정

4.1 기존 설계방법에 의한 압밀침하거동과의 비교

그림 10과 11은 기존의 설계방법과 탄점소성 압밀계산방법으로부터 얻은 각각의 현장위치에서 발생하는 압밀침하거동의 시간에 따른 변화를 나타내고 있다. 최종 압밀침하량에 대하여 주목하면, 탄점소성 압밀계산방법으로부터 얻은 두 현장의 일차압밀 침하량은 3.1절에서 설명한 바와 같이 STA.0+580 위치에서 약 183cm, STA.4+860 위치에서 약 148cm로 나타났으며, 기존의 설계방법으로 산정한 일차압밀침하량은 두 현장 각각 약 186cm과 152cm로 나타났다. 이론적으로 생각해보면 두 가지 방법에 의한 일차압밀침하량은 일치하여야 하지만, 여기서 근소하나마 차이가 보이는 것은 수치해석상 모델링의 차이와 하중재하조건의 차이에 기인된다고 판단

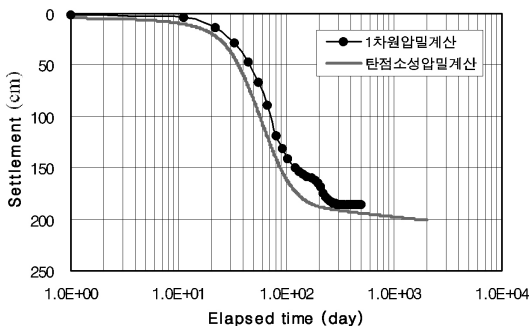


그림 10. 압밀침하거동의 비교(STA.0+580)

된다. 한편, 그림에서 알 수 있듯이 기존의 방법에 의한 압밀침하거동은 일차압밀이 종료된 후의 거동 즉, 이차압밀거동을 표현하지 못하고 있으나, 본 검토에서 사용한 탄점소성 압밀계산방법은 이를 잘 표현하고 있다. 경과일수를 2000일로 상정하여 이차압밀침하량을 검토해 보면 일차압밀이 종료된 이후에도 STA.0+580 위치에서는 약 18cm, STA.4+860 위치에서는 약 13cm의 추가 이차압밀침하량이 발생됨을 알 수 있다.

4.2 점성을 고려한 침하량의 산정

이미 개요에서도 설명한 바와 같이 고품수비, 저응력 상태의 연약점토지반 상에 상재하중이 재하 될 경우 일차압밀 뿐만 아니라 이차압밀을 포함하는 탄점소성 압밀침하 거동이 나타나게 된다. 따라서, 탄소성이론을 근거로 하는 기존의 설계방법으로는 연약지반의 정확한 압밀침하거동을 재현하기 어렵다. 특히, 연약지반상의 성토 후 장기적인 지반의 안정성을 평가할 경우 일차압밀 이후에 발생하는 이차압밀 거동에 대해서 반드시 검토하여야 할 것이다. 본 검토를 통해서 얻은 결과에 의하면, 검토대상지반에서 일차압밀이 종료된 후에도 장기적인 이차압밀침하가 발생하여 약 5년 후에는 13~18cm의 추가적인 침하변형이 발생하였다. 따라서 연약지반 상에 축조되는 상부 토목구조물의 장기적 안정성을 확보하기 위해서는 장기적으로 발생하는 이차압밀변형을 고려한 지반개량의 범위와 규모를 결정하여야 할 것으로 판단된다.

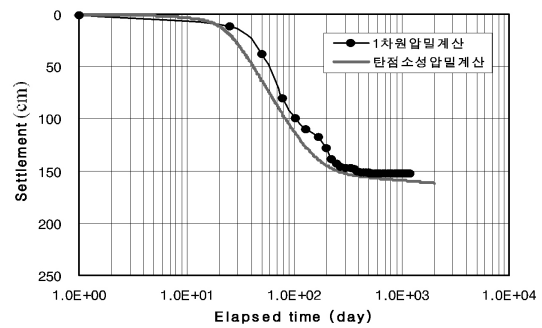


그림 11. 압밀침하거동의 비교(STA.4+860)

5. 결론

본 검토에서는 연약지반의 이차압밀거동을 표현할 수 있는 탄점소성 구성모델을 이용한 다차원 압밀 해석을 실시하여 본 검토대상의 연약지반에 대한 보다 정확한 압밀거동과 침하량을 산정하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 연약지반의 재하초기에 발생하는 과잉간극수압은 지반 중의 위치에 관계없이 재하하중과 거의 비슷한 크기로 발생되었다. 또한, 과잉간극수압의 소산은 PBD와 상부층에 가까운 부분일수록 빨리 발생되었으나, 연약지반 중의 각 부분에서의 과잉간극수압 소산 종료 시간은 모두 같음을 알 수 있었다.
2. 과잉간극수압의 분포형상에 미치는 PBD 형상(판상)의 영향은 PBD의 근접부에 한정되어 있을 뿐, PBD에서 멀어질수록 그 분포는 PBD를 중심으로 하는 거의 동심원에 가까운 형상을 나타내고 있었다. 따라서 PBD와 같은 판상의 배수재를 적용하는 경우에도 배수재의 등가경을 적절히 결정할 수 있다면, 축대칭 문제로써 압밀거동을 생각할 수 있다고 판단된다.
3. 시간이 경과함에 따라 연약지반의 평균유효응력 증분은 증가하였으나, 어느 시점에 도달하면 그 값이 일정하게 유지되는 정상상태를 보였다. 한편, 정상상태에 도달한 후 STA.0+580에서의 최대유효응력증분은 약 0.74kg/cm^2 였으며, STA.4+860에서의 최대유효응력증분은 약 0.69kg/cm^2 으로 나타났다.
4. 검토대상지반에서 일차압밀이 종료된 후에도 장기적인 이차압밀침하가 발생하여 약 5년 후에는 13~18cm의 추가적인 침하변형이 발생하였다. 따라서 연약지반 상에 축조되는 상부 토목구조물의 장기적 안정성을 확보하기 위해서는 장기적으로 발생하는 이차압밀변형을 고려한 지반개량의 범위와 규모를 결정하여야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 유승경(2002), 플라스틱보드드레नによる壓密促進効果の評価手法に関する研究. 博士學位論文, 大阪大學.
2. 유승경(2003), PBD에 의해 개량된 연약점토지반의 압밀거동에 관한 연구, 대한토목학회 논문집, 제23권 제6C호, pp.399-406.
3. 유승경, 홍원표, 윤길림(2003), 실내모형실험에 의한 Plastic Board Drain이 적용된 연약지반의 압밀거동에 관한 연구, 한국지반환경공학회 논문집, 제4권 제4호, pp.17-23.
4. 小田和廣, 松井保, 柳承庚(2000), PDを含む軟弱粘土地盤の壓密學動と壓密度に関する解析的考察, 土木學會第55回年次學術講演會, III-B197.
5. 岡 二三生(2000), 地盤の彈粘塑性構成式, 森北出版社, pp.44-71.
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. Oda, K., Matsui, T., Nakamura, S. and Okawa, H.(1998), "Analytical Study on Consolidation Characteristic of Soft Clay Ground Improved by PD", *Kansai Chap., Proc. Annual Conf. Civil Eng., JSCE*, III-46-1~2.
8. 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.
9. Tavenas, F., Jean, P., Leblond, P. and Leroueil, S.(1983), The permeability of natural soft clays. Part II : *Permeability characteristics. Canadian Geotechnical Journal*, Vol.20, pp.645-660.
10. Matsui, T., Oda, K. and Nabeshima(1996), Analytical Study on Settlement Behavior of Soft Ground Improved by SCP, *Proceedings of ISOPE '96*, Vol.4, pp.582-587.
11. You, S. K., Oda, K., Matsui, T.(2001), Model Tests on Consolidation Behavior of Clay Ground Improved by Plastic Board Drains, *Proceedings of ISOPE '2001*, Vol.II, pp.687-693.
12. Oda, K., Matsui, T. and You, S. K.(2001), Model Tests and Numerical Simulations on Consolidation Behavior of Clay Ground Improved by SCP with Low Replacement Area Ratio, *International Symposium on Recent Developments of Ground Improvement(ISRDGI 2001)*, Special Technical Publication-2, pp.9-12, 2001.
13. S. K. You, J. Y. Lee, J. G. Han, S. D. Cho.(2004), Effect of Drains Spacing on Consolidation Characteristics of Clay Ground with Plastic Board Drains, *Proceeding of the 3th Asian Regional Conference on Geosynthetics*, pp. 771-778.