

## 연직배수재 타설 직후 피압대수층이 있는 지반의 자중압밀침하

### Self-weight Consolidation Settlement of Soft-grounds on the Artesian Pressure After the Penetration of Vertical Drain

김현태<sup>1)</sup>, Hyun-Tae Kim, 조재홍<sup>2)</sup>, Jae-Hong Cho, 유진용<sup>2)</sup>, Jeon-Yong Yoo, 노종구<sup>3)</sup>, Jong-Koo Ro  
김승욱<sup>4)</sup>, Seung-Wook Kim

<sup>1)</sup> 농업기반공사 농어촌연구원 수석연구원, Research Fellow, Rural Research Institute, KARICO

<sup>2)</sup> 농업기반공사 농어촌연구원 책임연구원, Chief Researcher, Rural Research Institute, KARICO

<sup>3)</sup> 농업기반공사 구조·지반연구실장, Director, Rural Research Institute, KARICO

<sup>4)</sup> 농업기반공사 농어촌연구원 연구원, Researcher, Rural Research Institute, KARICO

**Synopsis** : This paper reviews depositional environments of marine deposits along the Nakdong river and then analytical solution of self-weight consolidation considering artesian pressure is made to find consolidated state. It's known that this area is in the under-consolidated state by the artesian pressure( $u_a=0.3\text{kg/cm}^2$ ) and the distribution of the artesian pressure is not linear but parabola. In predicting consolidation settlement for soft grounds improved by vertical drain, it is emphasized that the self-consolidation by sudden dissipation of artesian pressure should be considered.

**Key words** : Artesian pressure, Vertical drain, Self-weight consolidation

## 1. 서 론

피압대수층이 있는 연약지반에서 연직배수공법을 적용할 경우, 연직배수재를 타설하고 성토를 하지 않은 상태에서도 자중압밀침하가 크게 발생하며, 압밀해석 시 피압수압을 고려하지 않으면 침하량이 실제 값보다 훨씬 적게 계산되는 문제가 있다. 이는 피압수압 만큼 미압밀상태에 있기 때문이며, 연직배수재를 타설하면 피압수압이 소산되면서 자중압밀침하가 진행되기 때문이다.

본 연구에서는 낙동강하류 삼각주 충적평야에 대하여 피압수압을 고려한 퇴적 중 자중압밀해석을 통하여 미압밀상태를 확인하고, 심도별 피압수압의 분포를 분석하였다. 피압수압을 고려한 연직배수공법의 압밀침하해석과 실측침하량의 비교분석을 통하여 피압대수층이 있는 연약지반에서 연직배수공법의 압밀해석 시 고려하여야 할 사항을 제시하였다.

## 2. 피압대수층 위에 퇴적지반의 자중압밀해석

### 2.1 퇴적속도와 압밀상태

세계 중요 강의 삼각주에서 퇴적속도는 평균 30-100mm/yr이며, Mississippi 삼각주의 퇴적속도는 150mm/yr로 매우 높게 발생하고 있다고 한다. Cox(1968)는 동남아시아지역의 현세 퇴적속도에 대하여 Chao Phraya(Thailand) 24~50mm/yr, Irawaddy(Burma) 100mm/yr이라고 하였다. 백경중(1998)은  $^{14}\text{C}$ 연대측정결과와 분석으로부터 낙동강하구의 퇴적속도는 1.9~9.1 mm/yr(평균 2.9mm/yr)이라고 하였다.

Sangrey(1977)는 퇴적속도가 미압밀상태의 주 요인이며, 흙 내부의 Gas, 피압대 및 파력의 반복 등의 요인이 있다고 하였다(Nakase, 1984). 미압밀상태는 퇴적속도가 대단히 빠른 삼각주 지대에서 점토 또는 실트질 점토층에서 나타날 가능성이 높다고 하였다(Brand 와 Brenner, 1981 ; Nakase, 1984).

퇴적 중 자중압밀해석에 관하여 Terzaghi(1925), Ortenblad(1930), Terzaghi & Fröhlich(1936), Olsson 등(1949, 1953)의 연구가 있으며, Gibson(1958)은 일정 퇴적속도의 경우에 대한 자중압밀해석 방법을 제안하였다.

본 연구에서는 퇴적속도를 고려한 자중압밀해석을 통하여 낙동강하구 삼각주의 압밀상태를 예측하고, 피압대수층이 있는 연약지반에서 연직배수공법의 압밀해석에 필요한 심도별 피압수압의 분포를 분석하였다.

## 2.2 피압대수층위에 퇴적 중 자중압밀해석방법

그림 1과 같이 대수층위에 해성점토가 퇴적될 때 상부 퇴적토의 하중에 의해 과잉간극수압이 발생하고, 이 수압이 소산되면서 자중압밀침하가 발생된다. 퇴적속도가 과잉간극수압의 소산속도보다 빠르다면 지중에 과잉간극수압이 누적되어 미압밀상태에 있게 된다. 본 연구에서는 이를 수치적으로 해석하기 위하여 그림 2와 같이 유한요소계로 나누어 미소시간간격으로 자중압밀해석을 하여 퇴적속도별 압밀상태를 분석하였다.

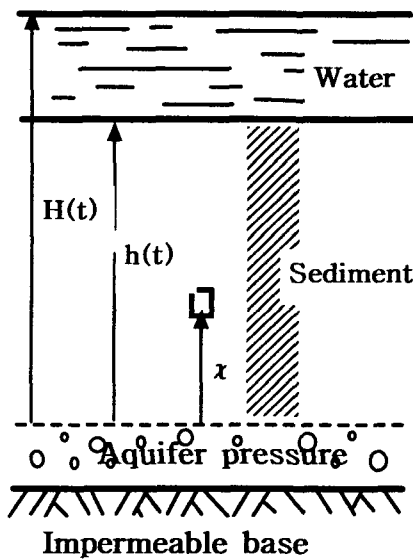


그림 1. 피압대수층 위의 퇴적모형

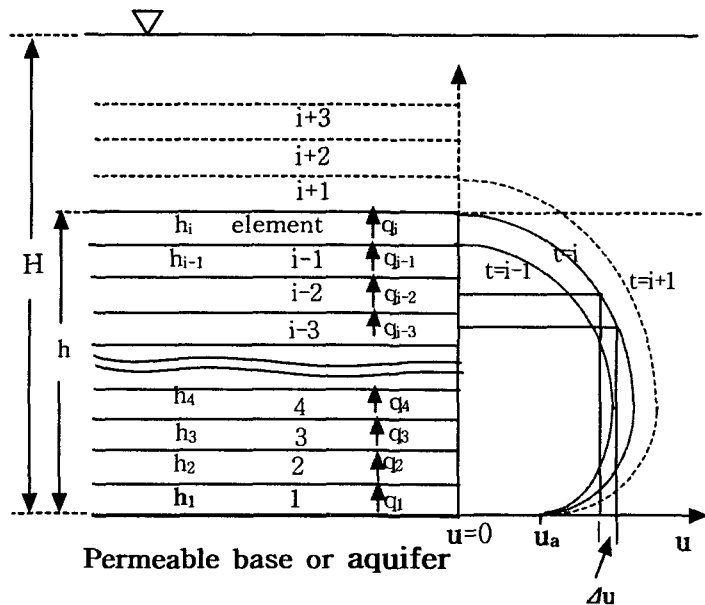


그림 2. 퇴적 중 자중압밀해석 모식도

## 2.3 지반특성 및 해석조건

피압대수층 위에 퇴적지층은 두께 26m의 실트질해성점토로서 초기간극비  $e_0=2$ , 압밀계수  $c_v=0.001\text{cm}^2/\text{s}$ , 압축지수  $C_c=0.7$ 이며, 퇴적속도는 그림 3과 같이 0.1~20cm/yr에 대하여 피압대수층의 수압이  $P_a = 0.3\text{kg/cm}^2$ 조건과, 피압수압이 없는 조건에 대하여 해석을 실시하였다. 피압대수층 내 피압수압은 유효응력보다 크면 파이핑이 발생하므로 퇴적층의 두께에 비례하여  $u_a=0.3\text{kg/cm}^2$ 까지 증가하는 조건으로 하였다.

## 2.4 퇴적속도별 자중압밀해석결과

그림 3.a)의 퇴적속도별로 자중압밀해석을 실시한 결과 심도별 잔유과잉간극수압 분포는 그림 3.b)와 같이 해석되었으며, 피압수압의 존재 여부에 따라 크게 다른 분포특성을 보이고 있다. 퇴적속도가 클수록 큰 과잉간극수압이 존재하며, 퇴적속도가 2cm/yr 이하일 때 최대 잔유과잉간극수압이  $u_{amax}=0.03\text{kg/cm}^2$  이하로 자중압밀이 거의 완료된 것으로 볼 수 있으나, 퇴적속도가 5cm/yr 이상이면  $u_{amax}=0.08\text{kg/cm}^2$  이상으로 미압밀상태에 있음을 알 수 있다.

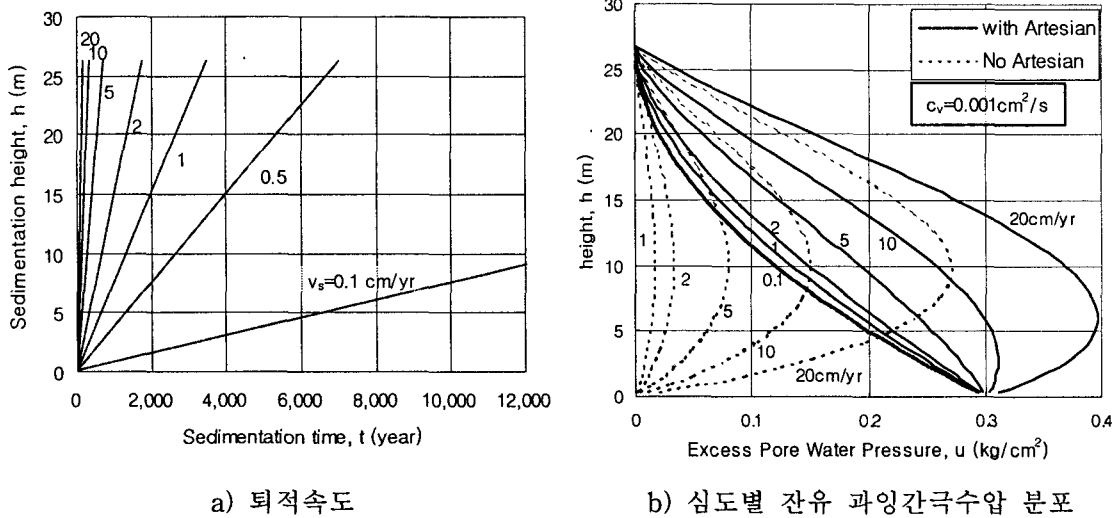
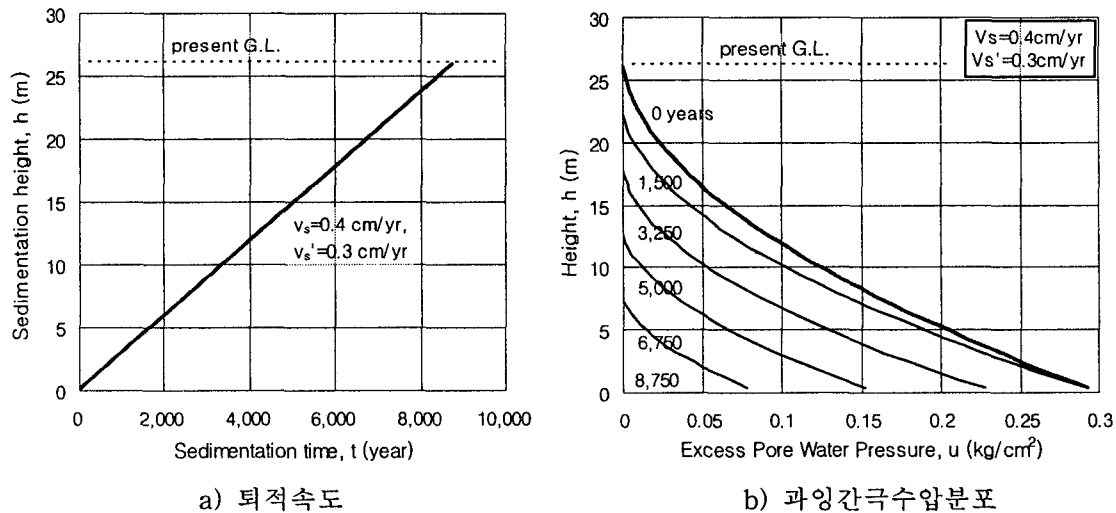
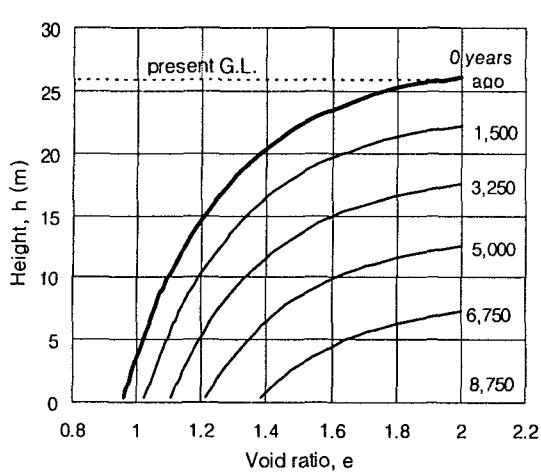


그림 3. 퇴적속도별 자중압밀해석결과

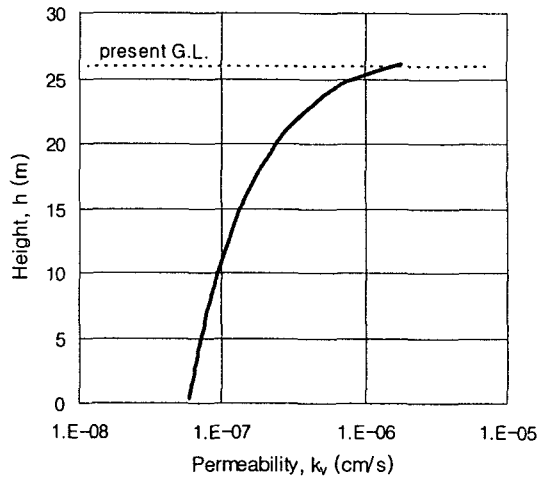
## 2.5 $V_s=3\text{cm/yr}$ 퇴적속도 시 자중압밀해석결과

자중압밀된 상태의 연간 평균 퇴적속도가 그림 4.a)와 같이  $V_s'=3\text{cm/yr}$  (매년 실퇴적속도  $V_s=4\text{cm/yr}$ ) 이고, 피압수압이  $u_a=0.3\text{kg/cm}^2$  인 조건에 대한 자중압밀해석결과 과잉간극수압은 그림 4.b)와 같은 분포를 보이고 있으며, 간극비와 투수계수 분포는 그림 4.c, d)와 같다. 심도별 피압수압분포를 직선분포로 보고 제반 해석을 하는 것이 일반적인데, 본 해석결과 그림 4.b)와 같이 곡선분포를 보이고 있다. 이는 심도별 투수계수가 동일한 값이 아니고 그림 4.d)와 같이 상부는 크고 하부로 갈수록 적어지기 때문이며, 그 이유는 투수계수가 적을수록 수두손실이 크기 때문이다.





c) 퇴적기간별 간극비분포



d) 현시점의 투수계수 분포

그림 4. 퇴적속도  $V_s'=3\text{cm/yr}$ 인 조건의 자중압밀해석결과

### 3. 퇴적지반특성 및 자중압밀침하실험치

피압대수층이 있는 연약지반에 연직배수재를 타설하고 성토 전과 후의 압밀침하량을 실측한 결과 그림 5, 6과 같다. 두께50cm의 수평배수층과 연직배수재를 타설하고 성토를 하지 않은 상태에서 피압대수층이 없는 지역은 20~25cm의 침하량이 발생하였지만, 피압대수층이 있는 지역은 50~60cm로 훨씬 큰 침하량이 발생하였다.

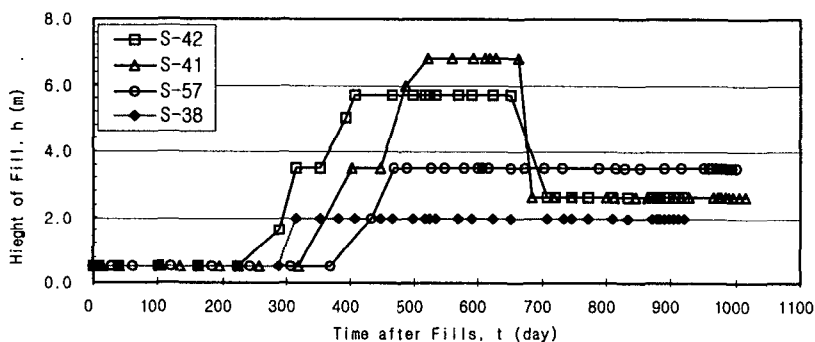


그림 5. 성토속도

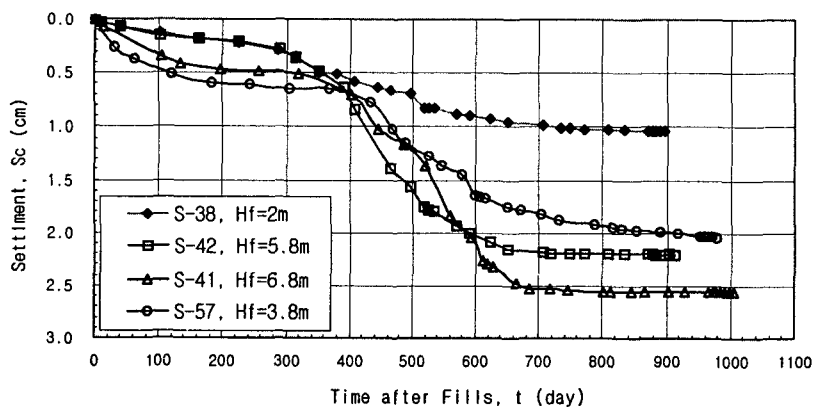


그림 6. 실측침하량

## 4. 연직배수재 타설 시 압밀해석

### 4.1 자중압밀해석

#### 4.1.1 압밀해석방법

연직배수재를 타설한 상태 즉 본 성토를 하기 전 상태에서도 피압수압의 소산에 의해 자중압밀침하가 발생된다. 이를 확인하기 위하여 그림7과 같은 지반조건에 대하여 그림4의 심도별 피압수압분포 조건으로 자중압밀해석을 실시하였다. 압밀해석방법은 Hansbo (1981)해를 사용하였다.

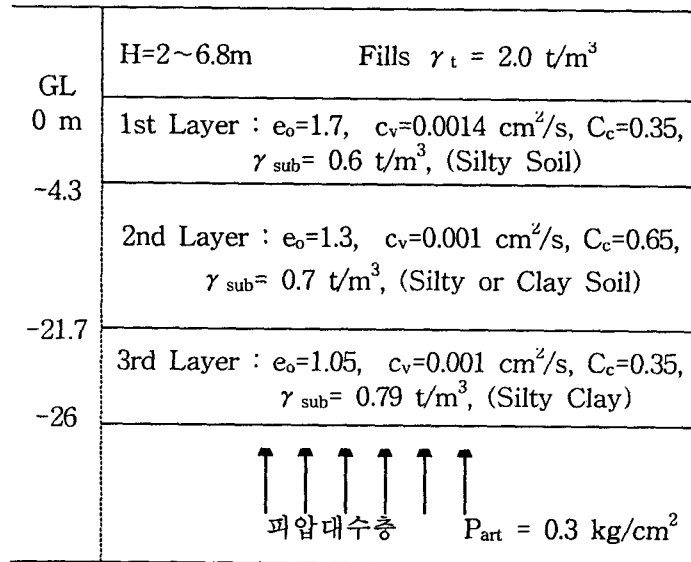
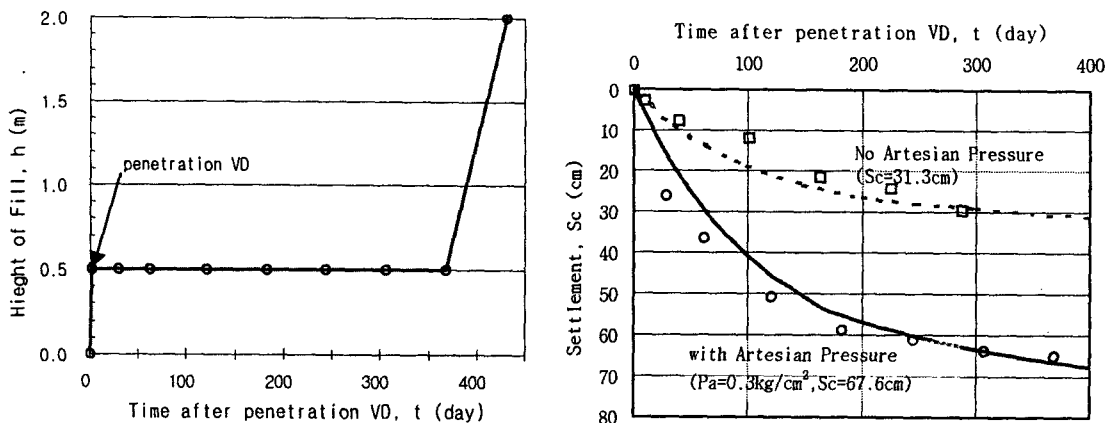


그림 7. 기초지반 지층 및 각 지층별 토질정수

#### 4.1.2 압밀해석결과 및 실측치와의 비교

그림 8.a)와 같은 성토조건으로 압밀해석결과 그림 8.b)와 같은 결과를 얻었다. 실측값과 비교하면 비교적 잘 일치하고 있다. 여기서 피압수압이 있는 지역은 침하량이 67.6cm이지만 피압수압이 없는 지역은 31.3cm의 침하가 발생되었다. 즉 피압수압에 의한 추가 자중압밀침하가 36.3cm가 더 발생되었음을 알 수 있다.



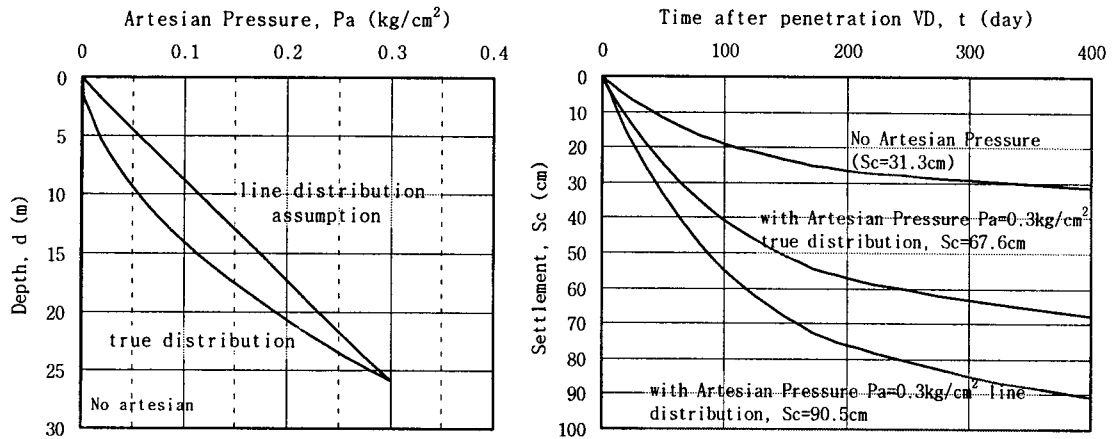
a) 시간-성토관계

b) 시간-침하량곡선

그림 8. 수평배수층과 연직배수재를 타설한 조건의 압밀침하해석결과

### 4.1.3 피압수압분포에 따른 압밀침하량 차이

퇴적 중 자중압밀해석결과 심도별 피압수압분포는 곡선이라는 결과를 얻었다. 일반적으로 적용하고 있는 직선분포와 곡선분포의 압밀침하량에 미치는 영향을 분석하기 위하여 그림 9.a)와 같은 피압수압분포에 대한 압밀침하해석을 실시한 결과 그림 9.b)와 같이 곡선분포일 때 67.6cm, 직선분포일 때 90.5cm로 22.9cm가 더 발생되는 것으로 과대평가됨을 알 수 있다.



a) 심도별 피압수압분포 가정

b) 시간-침하량곡선

그림 9. 심도별 피압수압분포에 따른 압밀침하 차이

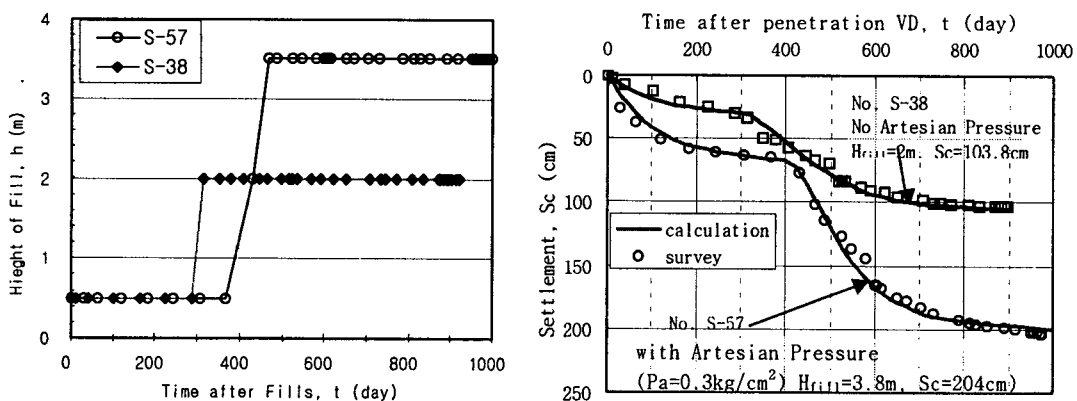
### 4.2 성토 시 압밀해석결과

연직배수재를 타설하고 성토를 하기 전까지의 압밀해석은 4.1절에서 해석한 결과를 사용하고 성토한 후는 Hansbo(1981)해를 사용하여 추가 성토하중에 의한 연직배수공법의 압밀해석을 하였다.

그림 10.a)와 같이 No. S-38은 성토고  $H_{fill}=2m$ 이고 피압수압이 없는 지역이나, No. S-57은 성토고  $H_{fill}=3.8m$ 이고 피압수압이 있는 지역이다. No. S-38은 피압수압이 없는 조건으로, No. S-57은 피압수압이 있는 조건으로 압밀해석을 실시한 결과 그림 10.b)와 같이 실측치와 잘 일치하는 결과를 얻었다.

피압수압의 영향을 분석하기 위한 해석결과의 비교는 그림 11과 같이 피압대수층에  $u_a=0.3 kg/cm^2$ 의 피압수압이 있는 조건이 없는 조건보다 36cm이상 침하량이 더 큰 것으로 분석되었다.

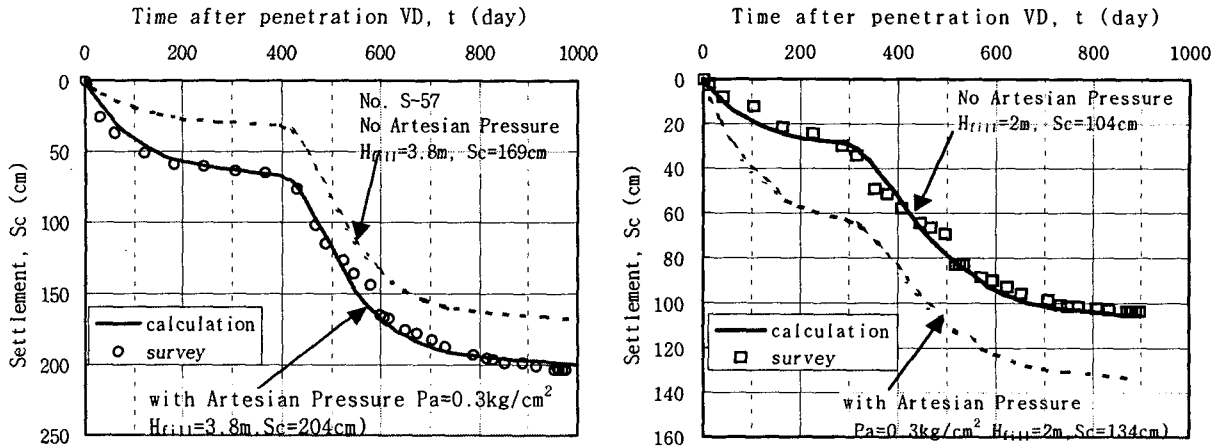
피압수압이 존재하는 지반에서는 성토없이 연직배수재를 타설만 하여도 피압수압소산에 의한 자중압밀침하가 크게 발생되며, 성토 시 최종침하량이 그 만큼 더 크게 발생된다는 것을 알 수 있다.



a) 시간-성토

b) 시간-침하량곡선

그림 10. 압밀침하량의 해석결과와 실측치 비교



a) No. S-57(피압수압이 있는 지역)      b) No. S-57(피압수압이 없는 지역)

그림 11. 피압수압 유무에 따른 압밀침하곡선 비교

## 5. 결론

본 연구에서는 피압대수층이 있는 연약지반에서 퇴적 중 자중압밀해석 및 연직배수공법의 압밀해석을 실시하였으며, 해석결과를 실측자료와 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 퇴적속도가 클수록 미압밀 정도가 크며, 압밀계수  $c_v=0.001\text{cm}^2/\text{s}$  지반에서 퇴적속도가 2~5cm/yr 이상이면 압밀해석 시 고려하여야만 될 정도의 잔유과잉간극수압( $0.03\sim 0.08\text{kg}/\text{cm}^2$  이상)이 존재하는 미압밀상태에 있다는 해석결과를 얻었다.
- 2) 피압대수층 위에 균일퇴적토층 내 심도별 피압수압의 분포는 투수계수분포 때문에 직선분포가 아니고 상부로 갈수록 크게 감소하는 포물선분포이며, 직선분포로 가정하면 압밀침하량이 실제보다 과대 평가하게 되는 해석결과를 얻었다.
- 3) 피압대수층이 있는 지반에서는 연직배수재를 타설하고 성토를 하지 않은 상태에서도 피압수압의 소산에 따른 자중압밀침하가 크게 발생한다는 결과를 얻었다.
- 4) 연직배수공법의 압밀침하량이 피압대수층이 있는 지반에서는 피압수압이 없는 조건보다 그 침하량이 훨씬 크므로 피압수압에 의한 미압밀을 고려한 압밀해석이 필요하다는 결론을 얻었다.

## 참고문헌

1. 백경중(1998), "낙동강하구 및 인접해안의 퇴적환경이 해성퇴적층의 공학적 특성에 미치는 영향", 박사학위논문, 동국대학교, pp.38~58.
2. Brand, E.W. and Brenner, R.P.(1981), "Soft Clay Engineering", Elsevier Scientific Publishing Company, pp.159~238, 311~317, 537~544,1.
3. Cox, J.B.(1968), "A Review of the Engineering Characteristics of the Recent Marine Clays in South East Asia", Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand, Research Report NO.6, pp.20~146.

4. Gibson, R.E.(1958), "The Progress of Consolidation in a Clay Layer Increasing in Thickness with Time", *Geotechnique*, Vol.8, pp.171~182.
5. Hansbo, S.(1981) "Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains", Proc. 10th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Stockholm, Sweden Vol. 3, paper 12/22, pp. 677~682.
6. Nakase, A.(1984), "海洋土質", 日本土木學會, pp.11~12, 119~142.