

피압수압을 고려한 연직배수공법의 압밀해석

Consolidation Analysis of Vertical Drain Considering Artesian Pressure

김상규¹⁾, Sang-Kyu Kim, 김호일²⁾, Ho-Il Kim, 홍병만³⁾, Byung-Man Hong, 김현태⁴⁾, Hyun-Tea Kim

- 1) 동부산대학 대학장, Dean, Dong-Busan College
- 2) 농어촌진흥공사 구조지반연구실장, Director, Structural & Geotechnical Engineering Div., Rural Development Corporation.
- 3) 농어촌진흥공사 수석연구원, Research Fellow, Geotechnical Engineering Div., R.D.C.
- 4) 농어촌진흥공사 책임연구원, Principal Researcher, Geotechnical Engineering Div., R.D.C.

SYNOPSIS : Artesian pressure exists in Yangsan site, the maximum value of which has been measured as high as 5 t/m^2 . This paper deals with the prediction of consolidation settlement for the site with artesian pressure. The consolidation settlement at the site has been accelerated using vertical band drains. Since the artesian pressure gives lower effective stress than a static condition, its effect should be considered in the settlement prediction. This case study shows that the prediction of settlement and pore pressure dissipation agrees well with the measurements, when considering the artesian effect.

Key Words : Artesian pressure, Vertical band drain, Consolidation

1. 서론

우리나라 해안의 연약지반에는 피압대수층이 많이 발견되고 있으며 피압수압도 크기는 5m의 압력수두까지 측정된 보고도 있다. 피압수압이 존재하는 연약지반의 유효응력은 피압수압만큼 적은 상태로 압밀되어 있기 때문에 압밀침하량계산에서 피압수압을 고려하지 않아 예상보다 큰침하가 발생하는 사례가 있을 수 있다.

피압수압은 계절적으로나 퇴적진행동안에 변화될 수 있기 때문에 연약지반의 압밀이력 즉 선행압밀하중의 정확한 측정이 필요하다. 즉 현재의 피압수압보다 적은 압력상태가 장기간 존재하였다면 그 압력차이 만큼 과압밀상태에 있기 때문에 오히려 침하량이 적게 발생하는 조건도 존재할 수 있다.

그러나 반대로 과거에 더 큰 피압수압조건으로 있다가 그 수압이 감소하였다면 현재 압밀진행중에 있을 수도 있으며, 특히 인근에 건설과정에서 연직배수공법을 피압대수층까지 실시하여 지반의 피압수압이 소산된다면 상재하중의 증가가 없이도 지반의 압밀침하가 발생되게 될 것이다.

또한 피압수압이 있는 지반에서는 연직배수공법에서 상재하중을 재하하기 전에 배수재 타설만으로도 압밀침하가 크게 발생한 사례도 있다.

본 연구에서는 피압수압이 압밀침하에 미치는 영향을 분석하여 압밀해석에서 고려하여야 하는 과제를 제시하였으며, 특히 연직배수공법에서 선행압밀하중과 상재하중의 결정에 피압수압을 고려하여야 한다는 것을 시험시공지구 실측자료의 분석을 통하여 제시하였다.

$$S_c = \frac{C_c}{1 + e_o} * \log \frac{\sigma_{v1}}{\sigma_{v0}} * H$$

$$= \frac{0.66}{1 + 1.68} * \log \frac{1.87}{0.87} * 500 = 41 \text{ cm} \quad \text{이고}$$

피압수압을 고려하여 침하량을 계산하면

$$S_c = \frac{C_c}{1 + e_o} * \log \frac{\sigma_{v1}}{\sigma_{v0}} * H$$

$$= \frac{0.66}{1 + 1.68} * \log \frac{1.57}{0.57} * 500 = 54 \text{ cm} \quad \text{로서}$$

약 30%의 차이가 발생된다.

2) 피압수압이 변화되는 경우

이전에 피압수압이 현재의 피압수압보다 적은 상태로 압밀이 완료된 지반에서는 과압밀상태에 있는 조건이 되고 피압수압이 과거보다 감소한 경우는 압밀진행상태에 있게 된다.

그러므로 피압대수층이 있는 지반에서는 피압수압의 측정과 선행압밀비의 정확한 측정이 필요하다.

특히 연약지반처리를 위해 피압수압이 소산되도록 공사를 하였을 경우 인근에 지반침하가 발생하는 원인이 되므로, 피압대수층이 있는 지반의 압밀촉진공법에 의한 연약지반처리시 피압수압의 소산가능성과 그로 인한 인근지반의 침하발생가능성에 대한 검토가 필요하다.

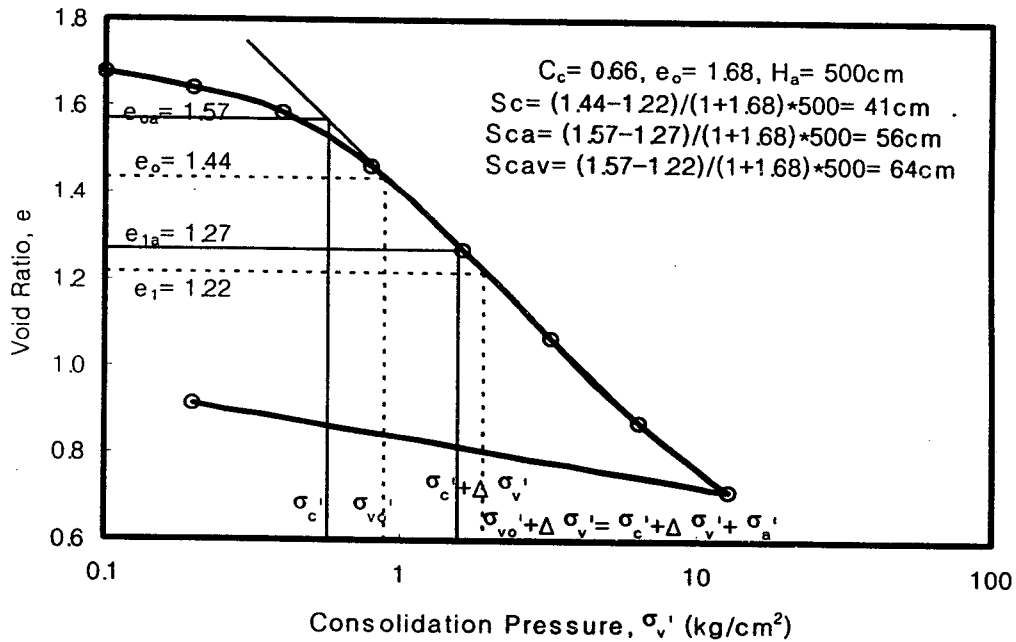


그림 2 심도 11m위치 비교란시료의 압밀곡선

2.2.2 연직배수공법에서 피압수압과 압밀침하량

피압대수층이 있는 연약지반에서 압밀촉진공법으로 연직배수공법을 적용할 때 피압수압을 고려하여 압밀침하량을 계산하여야 한다. 특히 배수재를 타설하면 배수재내에 수압은 정수두가 되므로 상재증가 하중은 인위적으로 재하되는 하중에 의한 증가응력에 피압수압을 더한 응력에 의한 압밀침하가 발생하게 된다.

이를 그림으로 나타내보면 그림 2에서 유효수직응력은 압밀전에 선행압밀응력(σ_c')에서 압밀완료후의 응력은 선행압밀응력(σ_c') + 재하증가응력($\Delta\sigma_v'$) + 피압수압(σ_{art}')이 된다.

피압수압을 고려하지 않고 침하량을 계산하면

$$S_c = \frac{C_c}{1 + e_o} * \log \frac{\sigma_{v1}}{\sigma_{v0}} * H$$

$$= \frac{0.66}{1 + 1.68} * \log \frac{1.87}{0.87} * 500 = 41 \text{ cm} \quad \text{이 고}$$

피압수압을 고려하여 침하량을 계산하면

$$S_c = \frac{C_c}{1 + e_o} * \log \frac{\sigma_{v1}}{\sigma_{v0}} * H$$

$$= \frac{0.66}{1 + 1.68} * \log \frac{1.87}{0.57} * 500 = 64 \text{ cm} \quad \text{로 서}$$

약 56%의 차이가 발생된다.

3. 피압수압을 고려한 연직배수공법 압밀해석(예)

3.1 기초지반 지층특성 및 연직배수공법 시험포설치내용

본 지구는 낙동강하류 삼각주의 충적평야지역으로 기반암위에 하상퇴적층으로 예측되는 피압대수층이 있으며 그 위에 층두께 27~28m의 해성점토층이 형성되어 있다.

퇴적지층의 흙은 그림 3과 같이 표층토(심도0~5m)는 예민비가 큰 실트질흙과 모래층이 혼재하여 있으며, 심도 5~20m층은 압축성이 큰 점성토로 형성되어 있고 심도 20~27m층은 압축성이 다소 적은 점성토로 형성되어 있다. 피압대수층의 피압수압은 피조콘조사시 약 4~5m의 과잉수두가 존재하는 것으로 조사되었다.


GL	H=5m	Fill $\gamma_t = 2.0 \text{ t/m}^3$
0 m	1st Layer : $e_o=1.19, c_v=0.002 \text{ cm}^2/\text{s}, C_c = 0.37,$	
-3 m	$\gamma_{sub} = 0.74 \text{ t/m}^3, (\text{Silty Sand or Silty Soil})$	
-20m	2nd Layer : $e_o=1.6, c_v=0.0005 \text{ cm}^2/\text{s}, C_c = 0.71,$	
-26m	$\gamma_{sub} = 0.64 \text{ t/m}^3, (\text{Silty or Clay Soil})$	
-26m	3rd Layer : $e_o=1.12, c_v=0.0008 \text{ cm}^2/\text{s}, C_c = 0.37,$	
	$\gamma_{sub} = 0.79 \text{ t/m}^3, (\text{Silty Sand or Sand})$	
		
	피압대수층 $P_{art} = 0.3 \sim 0.5 \text{ kg/cm}^2$ 피조콘조사시 측정값 0.5 kg/cm^2	

그림 3 시험포 기초지반 지층별 토질정수

연구시험포는 밴드드레인 4종류를 타설간격 1m와 1.5m간격의 8개 구간으로 나누어 타설심도는 샌드 매트(h=0.5m)를 포함하여 L=25.5m를 관입하고 상재하중은 12회로 나누어 성토고 0.2~0.5m씩 각 하중 단계별 방치기간은 4~7일간격으로 높이 5m의 성토를 하였다.

3.2 기초지반 퇴적지층 흙의 공학적 특성

압밀계수를 보면 표층토(심도 0~3m)는 $c_v=0.001\sim0.003\text{cm}^2/\text{s}$, 압축성이 큰 점성토층(심도 3~20m)은 $c_v=0.0003\sim0.0008\text{cm}^2/\text{s}$ 의 값을 보이고, 심도 약 20m부터 피압대수층(심도 26~28m)사이의 실트질점토로서 $c_v=0.0004\sim0.0008\text{cm}^2/\text{s}$ 값을 보이고 있다.

심도별 압축지수를 보면 표층토(심도 0~3m)는 $C_c=0.37$, 압축성이 큰 점성토층(심도 3~20m)은 $C_c=0.4\sim0.95$ 로 분포폭이 크며 평균값은 $C_c=0.71$ 이고, 심도 약 20m부터 피압대수층(심도 26~28m)사이의 압축성이 다소적은 실트질점토로서 $C_c=0.37$ 값을 보이고 있다.

3.3 압밀해석결과와 실측치의 비교(Colbond drain 1×1m구간)

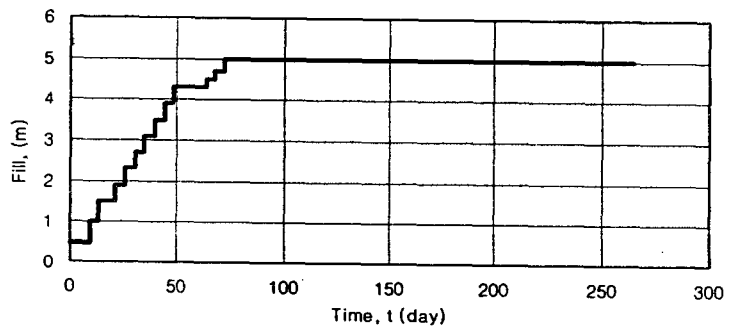
1) 피압수압 미고려

피압수압을 고려하지 않고 압밀층의 상부 토층의 하중을 초기유효응력으로 보고 성토하중만 상재하중으로 작용하는 조건으로 압밀해석을 실시하였다.

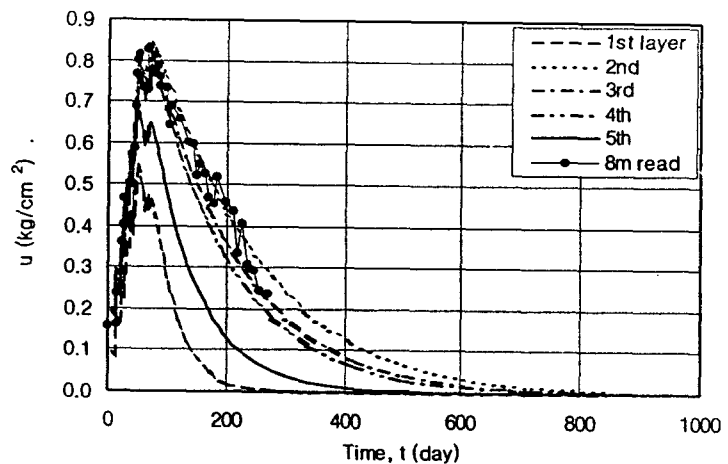
압밀해석결과 총침하량과 각층의 압밀침하량은 그림 4 c)와 같이 실측침하량의 70%밖에 발생되지 않는 것으로 해석되었다. 그러나 과잉간극수압발생곡선은 일치하는 것으로 나타났으며 상재하중 재하동안에 발생한 최대과잉간극수압은 그림 4 b)와 같이 성토재하하중 $1\text{kg}/\text{cm}^2$ 보다 적은 $0.8\text{kg}/\text{cm}^2$ 으로 상재하중재하기간 약 70일 동안에 $0.2\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 간극수압이 소산되고 성토완료후 서서히 소산되는 것으로 압밀해석과 실측자료가 잘 일치한다.

배수재를 통하여 배수되는 최대유량은 그림 4 d)와 같이 최종단계의 성토시점에 $0.16\text{cc}/\text{s}$ 인 것으로 해석되었으며 성토가 완료된후 급격히 감소하는 경향을 보이고 있다.

각 시간별 반경방향의 과잉간극수압분포는 그림 4 e)와 같이 성토기간동안은 증가하고 성토가 완료된 후 시간이 경과하면서 감소하는 관계를 보여주고 있다.

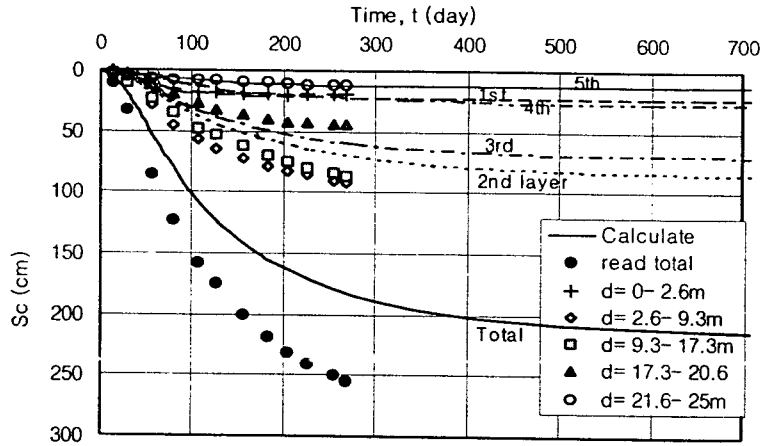


a) Fill

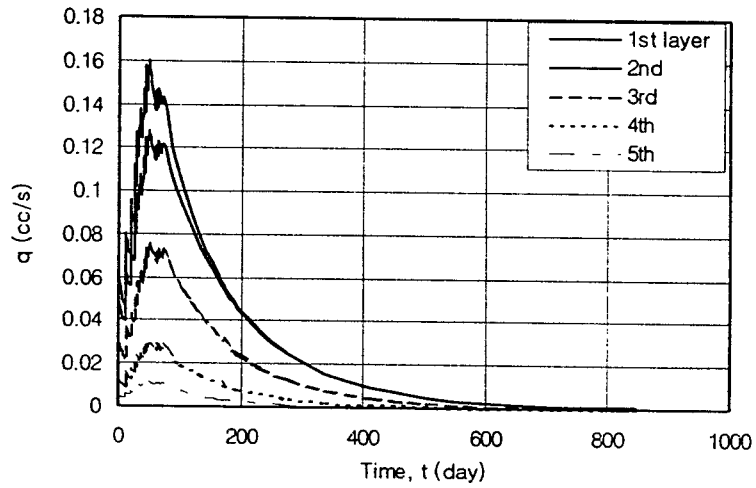


b) Time- Excess Pore Pressure

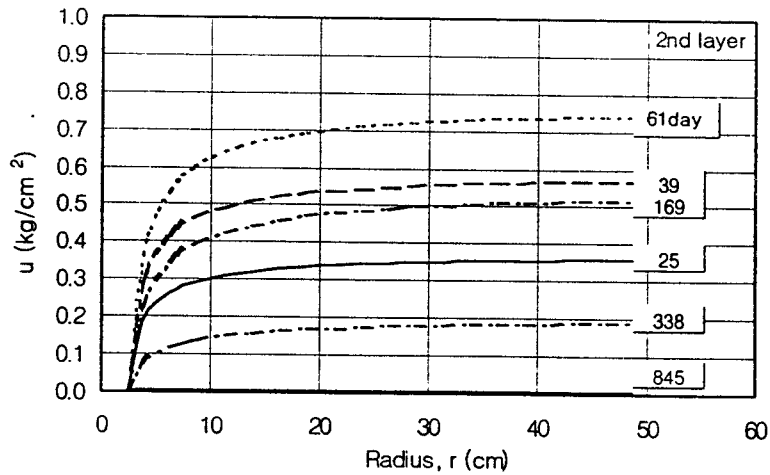
그림 4 피압수압을 고려하지 않은 압밀해석결과와 실측값의 비교(Colbond drain 1m×1m)



c) Time-Settlement



d) Time-Discharge Quantity



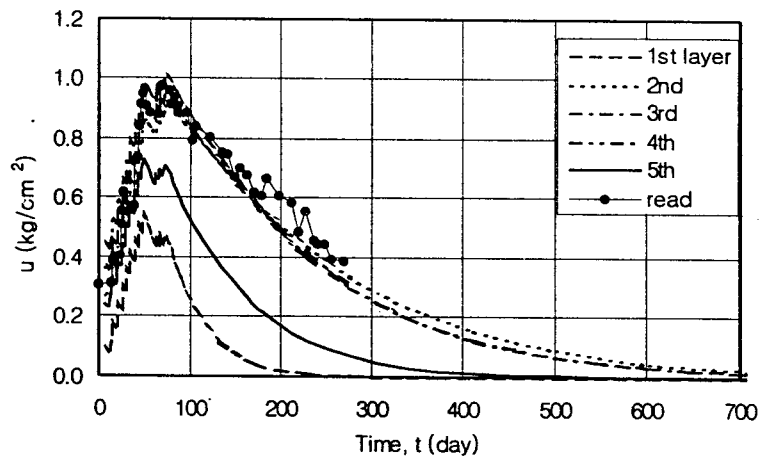
e) Radial distribution of excess pore water pressure

그림 4 피압수압을 고려하지 않은 압밀해석결과와 실측값의 비교(Colbond drain 1m×1m) (계속)

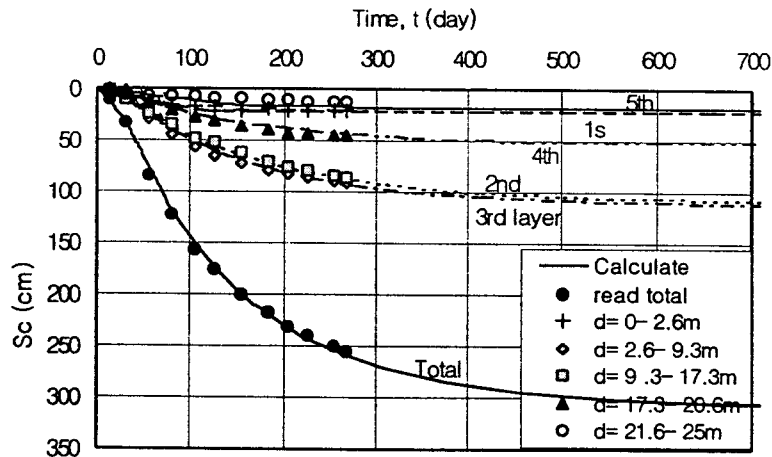
2) 피압수압 고려

피압수압을 고려하여 압밀해석을 실시한 결과 과잉간극수압은 그 층에 존재하는 것으로 고려한 피압수압(0.2~0.3kg/cm²)만큼 더 증가하는 것으로 해석되었으며 실측치는 간극수압설치시의 지층의 간극수압을 0으로 보고 정수두압만을 기준으로 하였다고 보면 그림 5 a)와 같이 해석값과 실측값은 잘 일치한다.

압밀침하량을 보면 피압수 미고려에서 실측값보다 70%밖에 되지 않던 침하량이 그림 5 b)와 같이 잘 일치하고 있다. 각 층별침하량도 해석값과 실측값이 잘 일치하는 것으로 분석되었다.



a) Time - Excess pore pressure



b) Time - Settlement

그림 5 피압수압을 고려한 압밀해석결과와 실측값의 비교(Colbond drain 1m×1m)

4. 결론

피압대수층이 있는 연약지반위 성토공에 대하여 무처리조건과 연직배수공법조건에 압밀침하해석을 실시하여 피압수압의 조건별 침하량의 변화를 분석하고 피압대수층이 있는 연구시험시공지구의 실측자료와 비교분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 피압대수층이 있는 연약지반의 압밀침하량은 피압수압만큼 적은 유효응력으로 압밀되어 있을 가능성이 크며, 피압수두가 3m일 때 이로 인한 압밀침하량이 선행압밀응력조건에 따라 차이는 있지만 피압수압이 없는 조건보다 약 30%정도까지 크게 발생될 수 있다.
- 2) 대수층내 피압수압의 이력과 변화가능성에 따라 압밀침하량이 크게 차이가 있으므로 현재 지반토에 대한 선행압밀하중의 정확한 측정이 필요하며, 향후 피압수압의 변화가능성을 정확히 예측하여 이를 고려한 압밀해석이 필요하다.
- 3) 피압수압이 있는 지반에서 연직배수공법의 압밀해석은 배수재내에 수압은 정수두압이므로 피압수압은 상재증가하중으로 작용하게 되며 이를 고려한 해석결과 침하량이 56%이상으로 증가할 수 있으므로 이를 고려한 압밀해석이 필요하다.
- 4) 시험시공위치는 피압대수층이 있는 해성점성토의 퇴적지반으로 피압수압을 고려하지 않은 압밀침하량은 실측값의 70%정도밖에 안되지만 피압수압을 고려하면 실측값과 잘 일치한다. 이는 기초지반토의 선행압밀하중이 유효수직토압보다 피압수압만큼 적은 조건으로 압밀되어 있기 때문으로 판단되며, 이 결과로 부터 피압대수층이 있는 지반에서 연직배수공법의 압밀해석은 선행압밀응력과 피압수압을 고려하여야 정확한 압밀침하량을 구할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

5. 참고문헌

1. 한국토지공사(1996), “양산·물금 시험시공지구 Piezocone 조사용역보고서”
2. 한국토지공사(1997), “연약지반의 처리공법과 침하계측에 관한 연구 ‘-양산물금 연약지반 시험시공-’”, 한국토지공사 토지연구원
3. 김현태(1998) 스미어존내 투수성변화와 웰저항을 고려한 연직배수공법의 압밀해석“, 박사학위논문