

연직배수재가 부분관입된 대심도 연약지반에 대한 압밀해석

Consolidation Analysis for Partially Penetrating Vertical Drains in Thick Soft Clay Ground

정성교¹⁾, Sung-Gyo Chung, 진현식²⁾, Hyun-Sik Jin, 제호경²⁾, Ho-Kyung Je, 김진근³⁾, Jin-Geun Kim, 도현영³⁾, Heon-Young Do

- 1) 동아대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng., Dong-A Univ.
- 2) 동아대학교 토목공학과 대학원 석사과정, Graduate student, Dept of Civil Eng., Dong-A Univ.
- 3) 한국토지공사 녹산사업단(동아대학교 산업대학원 재학), Korea-Land Corporation

SYNOPSIS : The areas around the mouth of the Nakdong river are mostly covered in thick soft clay deposits(40~60m). In order to improve the ground in these areas vertical drains have been partially penetrated up to the depth of about 25m. However, since the predicted values of consolidation time and settlement have often been changed, the involved workers fell into a dilemma.

Finite element analysis was performed to investigate the consolidation behaviour for it. The analysis result was compared with those of consolidation theories and applied to the observational procedures. As a result, because of the effects of stage construction and various ground conditions at different depths, the consolidation theories lead to the underestimated for predicting its consolidation rate. And the sooner is the time analyzed by the observational procedures, the smaller is predicted the final consolidation settlement.

KEYWORDS : Soft clay, FEM, Consolidation, Vertical drains, Partial penetration.

1. 서론

우리나라에서는 근래에 해안부를 끼고 대단위 공업단지, 주거단지 등이 조성되고 있다. 특히 낙동강 하구일대에 개발되고 있는 이러한 목적의 매립사업장에서는 연약지반의 두께가 50m 전후에 달하고 있으며, 연약지반 중에 연직배수재에 의한 지반개량이 약 25m 안팎으로 수행되고 있으나, 그 아래의 20m 정도의 깊이에서는 미처리층으로 존재하고 있다. 이러한 조성단지 내에서는 성토하중에 의한 침하량이 당초의 설계값보다 아주 과대하게 발생하고 있으며, 예측기법에 의한 최종침하량도 예측시점에 따라 다르게 평가되고 있는 등의 문제점을 내포하고 있다.

따라서 본 연구에서는 연직배수재가 부분관입된 대심도 연약지반에 대하여 유한요소해석을 통하여 각종 압밀거동을 관찰하였으며, 이 해석결과를 기존의 압밀해석법 및 예측기법들에 적용하여 각종 방법들의 신뢰성을 분석하였다.

2. 연직배수재가 부분관입된 압밀해석법

배수재가 부분관입된 경우에 압밀도를 추정하기 위하여 Hart 등(1958)은 미처리층 지반을 비압축성이 라고 가정하였고, 전지반의 평균압밀도를 식(1)과 같이 나타내었다.

$$\bar{U} = \bar{U}_{rz} \frac{l_m}{L} + (1 - \frac{l_m}{L}) \bar{U}_z \quad (1)$$

여기서, \bar{U}_{rz} : 연직배수재에 의해 관입된 흙의 평균압밀도,

\bar{U}_z : 연직배수재 아래에 있는 흙의 평균압밀도

l_m : 연직배수재의 길이, L : 전압밀지반의 두께.

이때 Hart 등(1958)은 \bar{U}_z 를 계산하는데 있어서 최대연직배수거리 H 를 그 지반의 전두께 및 배수경계에 관계되며 연직배수재와는 무관하다고 가정하였다. 그러나 Dames-Moore(1982)는 부분관입된 배수재의 끝단을 미처리층의 자유배수 경계조건으로 보았다.

Xie(1987)와 Zeng-Xie(1989)는 식 (1)에서 \bar{U}_z 를 추정하는데 식 (2)를 사용하도록 제안하였다.

$$\bar{U}_z = 1 - \frac{8}{\pi^2} \exp(-\frac{\pi^2}{4} T_v) \quad (2)$$

배수재 처리구간에서 방사상 평균압밀도는 식 (3)과 같이 나타내었다.

$$\bar{U}_r = 1 - \exp[-\frac{2T_r}{F(n)}] \quad (3)$$

식(2)로 나타낸 \bar{U}_z 를 위하여 Xie(1987)와 Zeng-Xie(1989)는 배수재 아래에 있는 층의 최대배수거리를 식 (4)와 같이 나타내었다.

$$H_a = (1 - a \frac{l_m}{L}) H \quad (4)$$

$$\text{여기서, } a = 1 - \sqrt{\frac{1}{1+b}}, \quad b = \frac{32}{\pi^2} \frac{1}{F(n) + \pi G}$$

$$F(n) = \ln(\frac{n}{s}) + \frac{k_h}{k_s} \ln(s) - \frac{3}{4} \quad (\text{간격항이 큰 경우 적용 식})$$

G : 배수정저항계수

H : 연직배수재의 처리층에 대한 연직배수길이($H = l_m$)

L : 지층의 두께, $n = R/r_w$, $s = k_h/k_s$

R : 연직배수재의 등가반경, r_w : 연직배수공의 등가반경

k_h : 지반의 수평투수계수, k_s : smear 영역의 투수계수.

식 (2)와 식 (3)을 식 (5)에 대입함으로써 연직 및 수평배수를 가진 지반의 평균압밀도를 산정하는 식 (6)을 다음과 같이 나타낼 수 있었다.

$$\bar{U} = 1 - (1 - \bar{U}_z)(1 - \bar{U}_r) \quad (5)$$

$$\bar{U}_{rz} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \exp\left[-\left(\frac{2C_h}{R^2 F(n)} + \frac{\pi^2}{4} \frac{C_v}{H^2}\right)t\right] \quad (6)$$

식 (2)와 식 (6)를 식 (1)에 대입하면 식 (7)과 같이 나타난다. 여기서 H_a 는 미처리층에 대한 배수 거리이다.

$$\begin{aligned} \bar{U} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \frac{1_m}{L} \exp\left[-\left(\frac{2C_h}{R^2(F(n) + \pi G)} + \frac{\pi^2}{4} \frac{C_v}{H^2}\right)t\right] \\ - \frac{8}{\pi^2} \left(1 - \frac{1_m}{L}\right) \exp\left[-\left(\frac{\pi^2}{4} \frac{C_v}{H_a^2}\right)t\right] \end{aligned} \quad (7)$$

3. 지반 및 현장조건

3.1 지반조건

본 해석을 위한 토질조건은 녹산지역에서 얻어진 실내 토질시험결과를 사용하기로 한다. 본 현장에서는 점성토의 두께가 약 40~60m이며, 그 아래로 모래자갈층이 존재하고 있다. 그림 1은 본 현장에서의 대표적인 지층구조 및 각종 토질특성을 나타내고 있다.

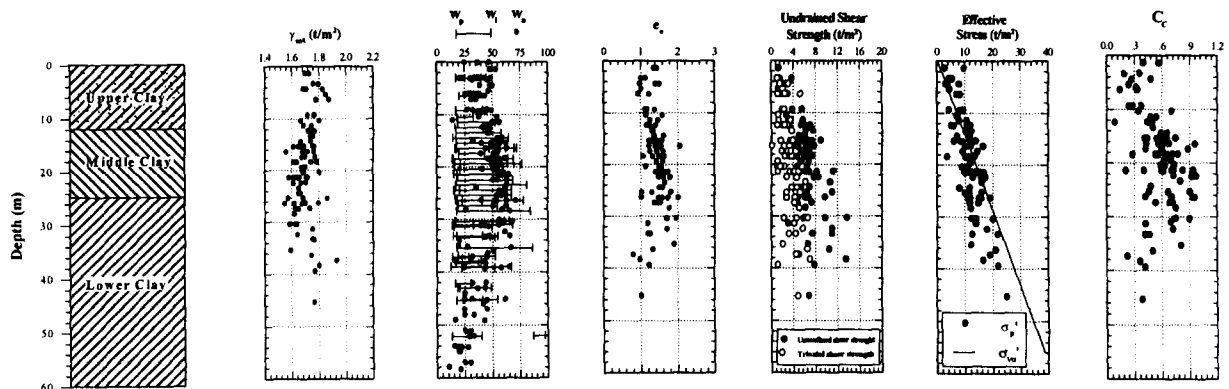


그림 1. 지층구조 및 지반특성

3.2 현장조건

본 현장의 성토고는 6.0~14m정도이며, 성토체의 단위중량은 약 20 kN/m^3 정도이다. 연직배수재는 플라스틱보드 드레인(PBD)를 사용하고 있으며, 연직배수재는 삼각형 배치에 의하여 1.6m간격으로 설치되어 있다. 연직배수공은 25~26m 깊이로 타설되어 있으며, 연직배수공의 통수량은 $q_w = 3 \sim 4 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 으로 설계되어져 있다.

4. 유한요소해석 및 결과분석

4.1 유한요소망 및 경계조건

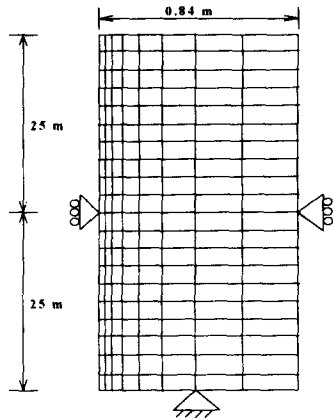


그림 2. 유한요소망

본 해석에서 연직배수재는 플라스틱보드 드레인(PBD)를 사용하여 25m 깊이까지 매설되었으며, 1.6m 간격의 삼각형 배치로 설치되었다. PBD의 등가반경은 0.025m이며, 영향반경은 0.84m 이다. 연직배수재의 관입영향을 고려한 교란영역비 $s=5$ 와 교란영역 투수계수비 $\eta=2$ 로 가정하였다.

그림 2는 본 해석을 위하여 축대칭 단위셀로 모형화된 유한요소망이다. 유한요소망은 1000개의 8절점 등대개요소(장방형)와 1111개의 절점으로 구성되어 있다. 경계조건 중에서 먼저 변위는 좌·우측 연직면에 대해서는 수평변위만을 구속을 하였고, 바닥면에서는 연직방향에 대해서 구속을 하는 조건으로 하였다. 배수에 대한 경계조건은 하부 점토층 아래에 자갈층이 존재하므로 지표면과 점토층의 바닥면에서 양면배수를 허용하게 하였다.

4.2 초기지반조건 및 재료상수

초기지반조건은 지하수위가 지표면과 일치하고 있으며, 지표면에서 과압밀비(OCR)를 2.0으로 가정하였다. 그리고 그 아래로 12.0m 깊이에서 과압밀비(OCR)가 1.0이 되도록 직선적으로 변하며, 그 아래의 깊이에서는 정규압밀상태인 것으로 하였다(그림 1을 참조).

본 해석에 사용된 재료상수는 그림 1을 참조하여 점토층에 대하여 표 1과 같이 결정하였다. 여기서 점토층에 대해서는 수정 Cam-Clay 모형을 사용하였다. 그리고 등가지반은 연직배수재가 매설되는 25m의 깊이에 대한 토질상수의 평균한 값으로 수평배수이론 및 유한요소해석에 사용될 것이다.

표 1. 점토층을 위한 수정 Cam-Clay 매개변수

	Depth(m)	γ_{sat} (kN/m ³)	e_0	G_s	ω (%)	ϕ' (°)	C_c	C_s	k_v (cm/s)
원지반	0.0 ~ 12.0	17.56	1.243	2.673	37.77	15.65	0.369	0.053	3.68×10^{-7}
	12.0 ~ 25.0	16.87	1.454	2.678	52.50	13.17	0.608	0.087	1.67×10^{-7}
	25.0 ~ 50.0	16.98	1.447	2.644	34.94	14.62	0.633	0.091	1.29×10^{-7}
등가지반	0.0 ~ 25.0	17.05	1.401	2.676	45.46	43.83	0.546	0.078	2.27×10^{-7}

4.3 해석방법 및 단계

해석종류는 원지반상태(CASE 1)와 등가지반상태(CASE 2)로 구분한다. 등가지반조건은 수평배수이론의 적용을 위하여 필요한 것으로 토질상수를 평균한 경우이다. 즉, 12m지점에서 지반특성이 변하므로 연직배수재의 처리구간인 25m까지 지반특성이 동일한 등가지반상태로 하였다. 이들에 대한 해석단계는 표 2과 같으며, 본 해석은 SAGE CRISP 3.02b(SAGE, 1997)을 사용하여 수행하였다.

표 2 해석단계

Inc. No.	시 간(day)	내 용	Inc. No.	시 간(day)	내 용
1	1	1단 성토	7	1	4단 성토
2	60	압 밀	8	60	압 밀
3	1	2단 성토	9	6	5단 성토
4	60	압 밀	10	60	압 밀
5	1	3단 성토	11	1	6단 성토
6	60	압 밀	12	10000	압 밀

4.4 유한요소해석결과 및 분석

4.4.1 침하량-시간 관계의 분석

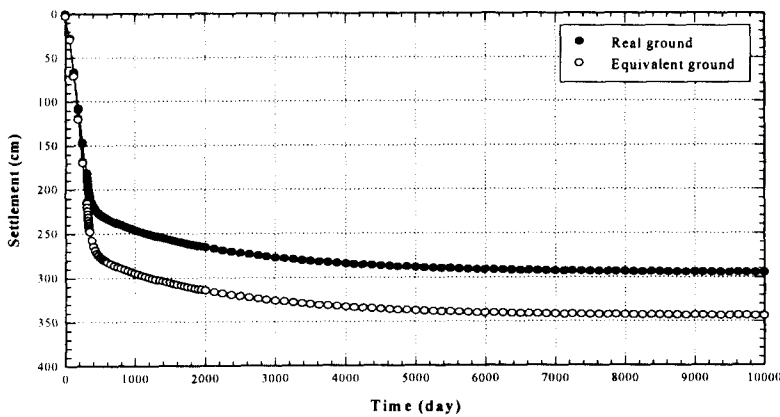
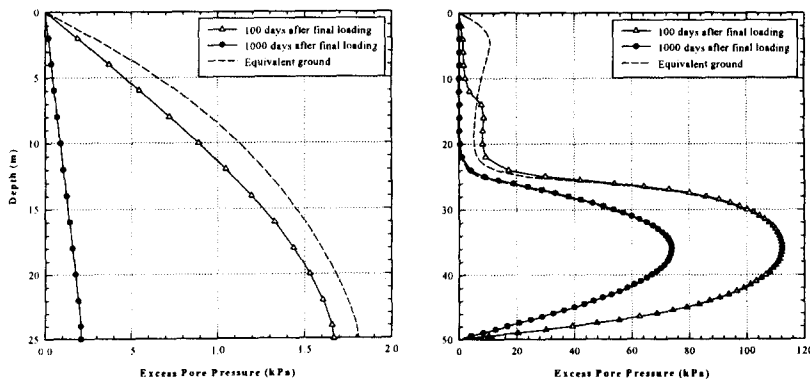


그림 3. 침하-시간 관계곡선

그림 3은 시간에 따른 지표침하를 나타내고 있다. 등가지반상태인 경우(CASE 2)가 원지반상태인 경우(CASE 1)보다 연직침하의 크게 발생하고 있는데, 이는 원지반조건을 등가지반상태로 계산하는 과정에서 발생된 평균압축지수와 유효연직응력에 따른 원인으로 사료된다. 그리고 침하속도는 두 경우가 비슷한 결과를 나타내고 있다.

4.4.2 과잉간극수압에 대한 분석



(a) 연직배수공의 내부

(b) 단위셀의 오른쪽 끝단

그림 4. 과잉간극수압 분포도

그림 4(a)는 연직배수공 내부의 과잉간극수압의 분포를 보여주고 있다. 여기서 보면, 연직배수공은 일면배수형태를 나타내고 있으며, 성토후 압밀시간이 크게 경과되지 않을 때(100일)는 과잉간극수압이 크게 되므로 동수경사가 증가하게 되고, 따라서 통수량이 증가하게 될 것이다. 그러나 장시간이 지나면서(1000일) 과잉간극수압이 급격히 감소하여 감을 알 수 있다. 그리고 등가지반에 대한 결과는 토질상수를 실제지반과 같이 완전히 재현할 수 없었던 원인으

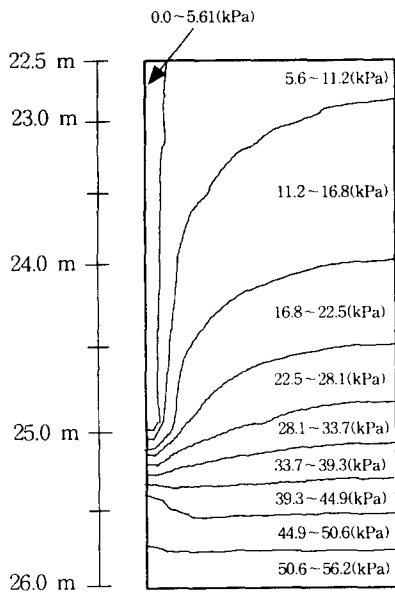
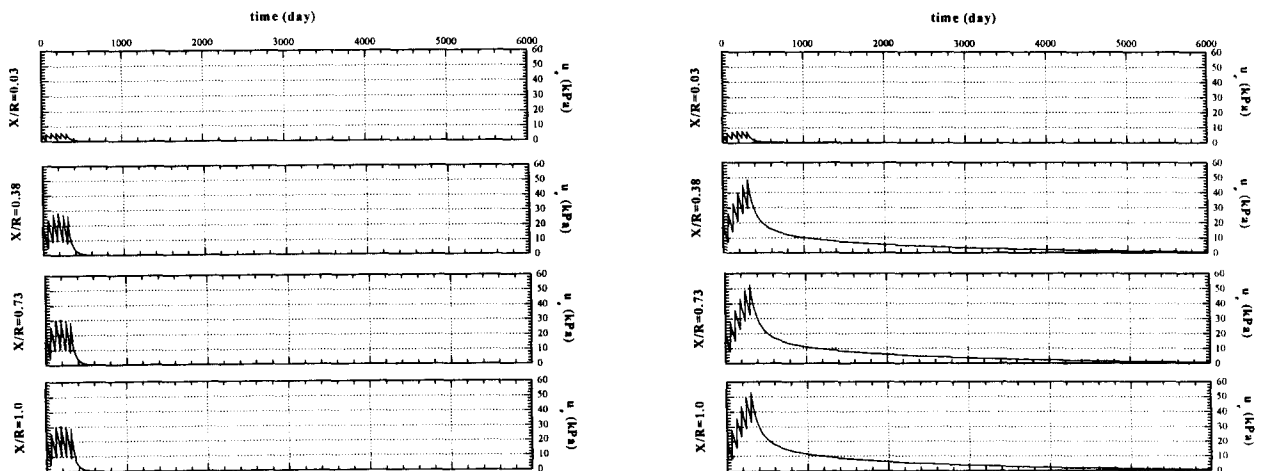


그림 5. 최종완료후 100일째의 과잉간극수압 분포

주변에서는 연직배수공의 영향으로 아래부분에서 과잉간극수압이 빠르게 소산되고 있음을 알 수 있다. 이 그림을 보면, 연직배수공의 부분관입에 따라 배수공 하단 2m(23.0~25.0m)정도가 미처리층의 배수에 기여하고 있음을 나타내고 있다. 그리고 이러한 배수의 영향으로 배수재의 하단 아래로 약 0.5m(25.0~25.5m)의 깊이까지 과잉간극수압의 소산이 불균등하게 일어나고 있음을 보여주고 있다.

그림 6는 압밀소요시간에 따른 과잉간극수압의 분포도를 나타내고 있다. 그림 6(a)는 지표면에서부터 12m지점에서의 시간에 따른 수평 거리별의 과잉간극수압의 분포를 보여주고 있다. 여기서 좌측은 무차원의 수평좌표를 나타내고 있으며, 우측은 과잉간극수압을 나타내고 있다. 연직배수재에서 멀어질수록 과잉간극수압의 소산이 늦어짐을 알 수 있다. 그림 6(b)는 지표면에서부터 25m지점에서 시간에 따른 과잉간극수압의 분포를 보여주고 있다. 이 경우에도 그림 6(a)와 동일한 경향을 보여주고 있지만, 12m 깊이의 것에 비하여 과잉간극수압이 유발된 크기가 훨씬 크며 소산시간도 훨씬 늦어짐을 알 수 있다.



(a) 12m 지점

(b) 25m 지점

그림 6. 시간 - 수평거리에 따른 과잉간극수압의 분포

로 100일 경과된 시점에 실제지반의 경우보다 약간 크게 얻어졌다.

그림 4(b)는 단위셀 오른쪽 끝단에 대한 과잉간극수압의 분포도이다. 원지반상태인 경우 최종성도후 100일이 경과할 때 지표면에서부터 12m까지의 부분에서는 과잉간극수압이 빠르게 소산되고 있으며, 그 아래 12~25m부분에서는 과잉간극수압의 소산이 늦어짐을 알 수 있다. 이는 현격한 배수길이의 차이에 따른 것이다. 등가지반상태인 경우에서 미처리층 부분은 원지반상태와 동일한 양상을 보이고 있지만, 처리층 부분에서는 4m 부근에서 과잉간극수압이 크게 발생하고 있으며, 12~25m까지는 거의 일정하게 나타나고 있다.

그림 5는 최종성도후 100일에 해당되는 과잉간극수압의 등고선을 연직배수공의 하단 주변에 대하여 집중적으로 나타내고 있다. 공내부에서는 과잉간극수압이 빠르게 소산되고 있으며, 25m깊이에서 연직배수공

5. 각종 해석법예의 적용

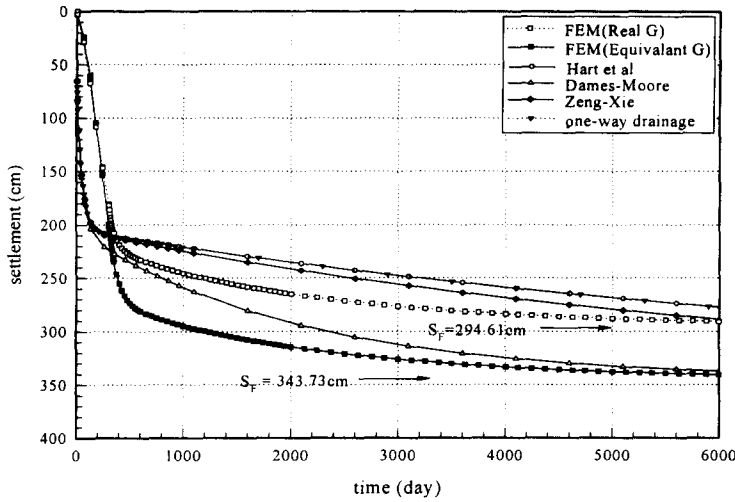


그림 7. 각종 압밀해와 유한요소해석에 의한 침하량:시간관계의 비교

그림 7에서 보면, 등가지반에 대한 유한요소해석결과에 비하여 모든 압밀해에 의한 결과가 압밀 초기 부분(약 400일 이내)에 신속히 압밀이 촉진되는 것으로 산출되었다. 이러한 결과는 각종 압밀해가 단계 성토의 영향을 고려할 수 없다는 점이 주된 원인으로 작용하였을 것으로 사료된다. 그리고 이론해에서는 압밀이 발생되기 전($t=0$)에 임의 초기 침하량이 존재하는 단점을 역시 지니고 있다. 압밀초기부분을 지나면서 Dames & Moore(1982), Zeng & Xie(1989) 및 Hart 등(1958)의 순으로 FEM결과에 접근하고 있지만, 실제 지반거동의 예측을 위해서는 상당히 문제가 잔존해 있다.

6. 예측기법에 의한 최종침하량

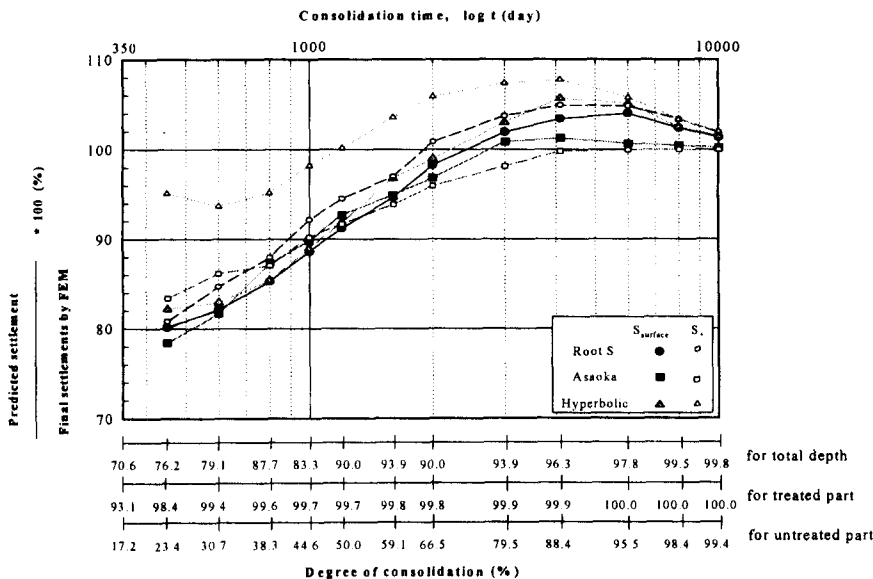


그림 8. 압밀도 - 침하비의 관계

본 장에서는 등가지반조건에 대하여 앞의 2장에서 기술된 기존의 압밀해들과 유한요소해석결과에 의한 압밀침하량과 시간의 관계를 나타내고자 한다. 그림 7은 Hart 등(1958), Dames & Moore(1982) 및 Zeng & Xie(1989)에 의한 압밀해와 등가지반 및 실제지반에 대한 유한요소해석결과를 도시한 것이다. 여기서 기술된 압밀해들은 기본적으로 수평배수이론 및 Terzaghi의 1차원 압밀이론에 바탕을 두고 있기 때문에 지층의 변화를 고려할 수 없다. 따라서 비교대상도 실제의 지반에 대한 것보다는 등가지반에 대하여 이루어질 수 밖에 없을 것이다.

그림 8을 보면, 모든 경우에 예측시점이 빠를수록 실제의 최종침하량을 훨씬 더 과소평가하고 있음을 알 수 있다. 즉, 각종 예측기법에의 적용시에 직선의 기울기가 시간에 따라 변한다는 것을 의미한다. 이러한 원인은 연직배수공이 설치된 부분에 대한 압밀도가 미설치된 부분의 것 과 아주 다른 것으로부터 추측할 수 있을 것이다. 그리고 90% 이상의 압밀도에서 과대하게 예측된 결과는 이론적인 의미이며(정 등, 1997),

실제 현장에서 예측기법의 적용성은 좋은 것으로 평가되었다(정 등, 1998). 또 다른 중요한 결과는 지표침하량에 의한 예측결과가 연직배수재의 처리층 및 미처리층의 침하량에 대하여 각각 최종침하량을 예측하여 합산한 결과보다 작게 산출된다는 것이다. 이러한 차이는 특히 쌍곡선법에서 아주 크게 나타나고 있다.

따라서, 낙동강 하구와 같이 대심도 연약지반 내에 부분적으로 연직배수공을 관입하여 지반개량하는 현장에서는 최종침하량을 위한 예측기법의 적용시에 처리 및 미처리층을 분리하여 예측하여야 하며, 또한 예측시점에 따른 최종침하량의 변화를 극복할 수 있는 새로운 예측기법이 신속히 개발되어야 할 것으로 기대한다.

7. 결론

대심도 연약지반 내에 연직배수재가 부분 관입된 경우에 대하여 유한요소해석을 통한 압밀거동의 분석, 이 해석결과를 기존의 압밀해 및 예측기법에 적용한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 지층구조가 변하는 대심도 연약지반을 동일한 토질정수를 지닌 등가지반으로 모형화하여 압밀이론을 적용하는 것은 무리가 있었다. 그리고, 과제하중으로 유발되는 과잉간극수압이 연직배수공의 하단 부근에서는 위쪽보다 크게 잔존하면서 소산되고 있었다.

(2) 연직배수공이 부분 관입된 연약지반을 위한 기존의 압밀해는 실제 침하속도를 과소평가 하였다. 그리고 이러한 이론해는 지층의 변화와 단계성토의 영향을 고려할 수 없었으므로 대심도 연약지반에 직접 적용하는 데는 문제가 있었다.

(3) 침하예측기법을 적용한 결과, 예측시점이 빠를수록 최종침하량이 훨씬 더 과소평가 되었다. 그리고 연직배수재의 처리 및 미처리층을 분리하여 예측하는 방법이 더 효과적이었지만, 근본적인 문제를 해결할 수는 없었다.

참고문헌

1. 정성교 등(1998). “압밀해석을 위한 \sqrt{s} -예측기법”, 한국지반공학회지, 제14권, 제2호, pp.41~52.
2. 정성교 등(1997). “새로운 침하예측기법 및 적용”, 97년 가을 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp.37~47.
3. 한국지반공학회(1997), “녹산국가산업단지 연약지반기술검토 학술연구용역보고서” .
4. Hart, E. G., Konder, R. L. and Boyer, W. C. (1958), “Analysis for Partially Penetrating Sand Drains”, JSMFD, ASCE, Vol.84, No.SM4, October, pp.1812-1-1812-15.
5. Dames and Moore. (1982b), “Replacement Airport at Chck Lap Kok Study Report No.1-Test Embankment” .
6. Zeng, G. X. and Xie, K. H. (1989), “New Development of the Vertical Drain Theories”, Proc. 12th ICSMFE, Rio de Janeiro, Brazil, Vol.2, pp.1435-1438.