

침하량과 간극수압에 의한 압밀도의 평가

Evaluation of the Degree of Consolidation using Settlement and Excessive Pore Water Pressure

이 달 원* · 임 성 훈 · 윤 제 식 · 김 지 문 (충남대)

Lee, Dal Won · Lim, Seong Hun · Yoon, Je Shik · Kim, Ji Moon

Abstract

This study was performed to analyze the degree of consolidation by the dissipation of excessive pore water pressure and final settlement prediction methods of the very soft clay. Hyperbolic method, Asaoka method and curve fitting method were used to compute the degree of consolidation. The degree of consolidation with excessive pore water pressure were used to compute, which considered the dissipation time with embankment construction. The degree of consolidation that was obtained by the peak excessive pore water pressure was less than in the case of the dissipation excessive pore water pressure. And, the degree of consolidation by the total settlement was nearly the same value that of layer settlement. The degree of consolidation that was obtained by excessive pore water pressure was larger than in the case of the settlement.

I. 서 론

최근 공업단지, 농업용지, 주거용지의 지속적인 공급이 요구되고 있으나 가용토지의 부족으로 해안 및 내륙의 연약지반등을 준설매립하는 사업들이 진행되고 있다. 그러나 개발에 따른 자연 생태계 보존등의 환경문제가 강하게 제시되고 있어 이를 위하여 조화로운 해안개발 방안의 필요성이 대두되고 있다.

연약지반은 대부분 점토(Clay)와 실트(Silt)로 구성되어 있어 지반의 강도가 약하며, 침하와 변형의 크기가 매우 크고 대부분이 물로 포화되어 있다. 또한, 장기적인 압축성으로 인하여 시공중과 시공 완료 후에도 계속적인 문제가 발생되고 있다.

따라서, 성토하중의 증가가 지반의 강도증가와 균형을 이루도록 성토시공속도를 조절하면서 안전한 시공관리 방법을 강구하여야 하고, 지반의 침하예측 및 여성토의 제거시기를 결정하기 위해서는 현장에 계측기를 설치하여 압밀도를 파악하여야 한다.

특히, 연약지반의 심도가 깊으면서 매우 큰 함수비와 간극비를 갖고 있는 지반은 침하량이 크기 때문에 압밀도의 예측은 압밀완료시점과 최종성토고를 결정하는데 가장 중요하게 고려할 사항이다.

압밀도를 산정하는 방법에는 침하량을 이용하는 방법, 과잉간극수압의 소산을 이용하는 방

법, 전단강도의 증가로 평가하는 방법, 실내에서 압밀시험을 수행하여 선행압밀 응력의 증가를 이용하는 방법 등이 있다.

실제 현장에서 압밀도의 파악은 침하량을 이용하는 경우가 많다. 그러나, 침하량으로 추정된 압밀도는 압밀이 빠르게 진행되는 것으로 나타나기 때문에 전단강도를 실제보다 과대평가하게 되어 연약지반의 압밀과정에 있어서 강도증가율을 부적절하게 평가하고 있는 경우가 많다.

그리고, 간극수압계는 지반의 측방변위의 파악, 성토하중에 의한 과잉간극수압의 변화를 파악하기 위하여 지중에 매설되고 있지만, 시공도중 간극수압계의 파손, 측정불능, 자료의 신뢰성 여부 등으로 인하여 얻어진 자료를 제대로 활용하고 않아 비경제적인 경우가 많다.

특히, 압밀도를 추정하는데 최종침하량을 이용한 압밀도는 각 제안 방법마다 오차가 커서 신뢰성을 파악하는데 어려움이 있고, 과잉간극수압을 이용한 압밀도와 상당한 차이가 있기 때문에 현장에서 압밀완료시점, 최종성토고의 결정, 여성토의 제거시기등을 결정하는데 어려움을 겪고 있다.

따라서 본 연구에서는 연약지반의 심도가 깊어지면서 매우 큰 함수비와 간극비를 갖고 있는 지반에서 침하량과 과잉간극수압을 이용한 압밀도를 비교·분석하여 연약지반 설계시 압밀완료시점과 최종성토고를 결정하기 위한 기초자료로 제공하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 현장 및 실내시험

본 현장지반의 물리적·역학적 특성을 파악하기 위하여 불교란 시료를 채취하여 실내시험을 한 결과는 Table 1과 같고, 현장지반의 분포특성을 파악하기 위하여 시추조사와 병행하여 표준관입시험(N치)을 실시한 결과와 층별침하계(M.C) 및 간극수압계(V.W)의 매설위치는 Fig. 1과 같다.

Table 1. Geotechnical properties at various site.

Methods	$W_n(\%)$	e_o	$qu(kgf/cm^2)$	C_c	C_s	OCR	$C_v(cm^2/s)$
A: Menard Drain	45~70	1.265~1.796	0.22~0.95	0.460~0.891	0.05~0.08	0.49~1.70	$1.43 \times 10^{-3} \sim 3.47 \times 10^{-4}$
B: Pack Drain	40~70	1.137~1.893	0.12~0.55	0.50~0.852	0.05~0.10	0.37~1.47	$1.19 \times 10^{-3} \sim 3.53 \times 10^{-4}$
C: Plastic Board Drain	38~70	1.196~1.892	0.15~0.93	0.515~0.967	0.05~0.12	0.55~1.72	$1.05 \times 10^{-3} \sim 3.43 \times 10^{-4}$

현장토질 조사 결과 N치 2~4의 연약점토층이 20~30m 두께로 분포하고, 실내시험 결과 이 지역의 No. 200번체 통과량은 거의 90% 이상으로 세립분 함유량이 매우 높은 점토로 구성되어 있다. 자연함수비와 액성한계는 각각 38~70% 와 30~55%의 범위로 분포되어 있으며, 지표면에서는 작고 심도가 깊어지면서 증가하여 G.L-10m 부분에서 최대치를 나타내고 그 후는 심도가 깊어지면서 점차로 감소하는 경향을 나타냈다.

2. 성토시공 및 계측

대상 현장지반의 연직드레인 타입심도는 현장시험 결과를 기초로 25.5m로 시공하였고, 성토시공속도는 30 cm/day를 성토하고 약 3~4일 방치기간을 두고 안정관리분석과 병행하여 약

70일 동안 5.0m까지 시공하였다. 약 70일 동안 단계성토에 따른 성토하중 증가와 180일의 방치기간동안에 침하량을 측정하기 위하여 층별침하계(Magnetic type)의 계측자료를 이용하였으며, 간극수압은 진동현식(Vibrating Wire Type) 간극수압계를 이용하였다.

3. 압밀도의 분석방법

압밀도를 평가하는 방법에는 침하량을 이용하는 방법, 과잉간극수압의 소산을 이용하는 방법, 전단강도의 증가로 평가하는 방법, 실내에서 압밀시험을 수행하여 선형압밀응력의 증가를 이용하는 방법 등이 있으나, 본 연구에서는 침하량과 과잉간극수압을 이용하였다.

침하량을 이용하는 방법은 $U_s = \{S_t/S_f\} \times 100$ (%) 으로 나타낼 수 있다.

여기서, S_t 는 현재까지의 침하량이고, S_f 는 최종예상침하량으로 각 층별침하량과 전체침하량의 계측자료로부터 쌍곡선 방법, Asaoka 방법, Curve fitting 방법에 의하여 추정하였다.

과잉간극수압의 소산을 이용한 방법은 $U_p = 1 - U_i/U_i$ 으로 나타낼 수 있다.

여기서, U_i 는 임의의 시간에서의 과잉간극수압이고, U_i 는 성토완료시의 과잉간극수압이다.

과잉간극수압으로 압밀도는 두가지의 경우로 계산된다. 첫번째는 성토완료시의 Peak 과잉간극수압을 그대로 이용하는 경우이고, 두번째는 성토초기부터 성토완료시까지 점증하중의 형태로 시공되므로 성토도중에 과잉간극수압이 소산된다. 따라서 각 성토단계별로 성토시작전, 성토중, 성토완료후의 간극수압을 측정하여 성토시공중 소산되는 과잉간극수압을 이용하는 경우로 구분하여 계산하였다.

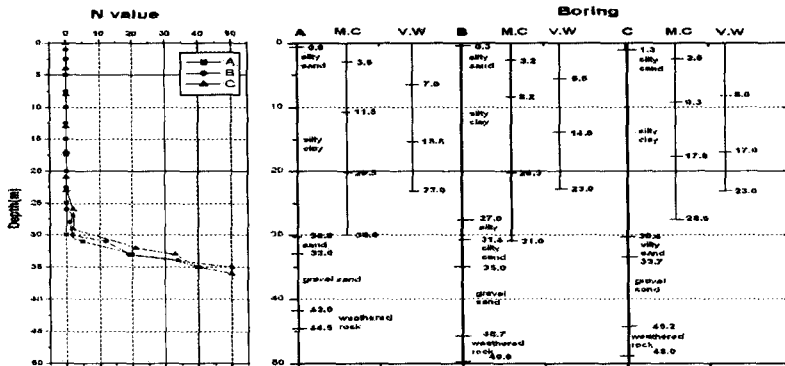


Fig. 1. Results of the standard penetration test and boring log.

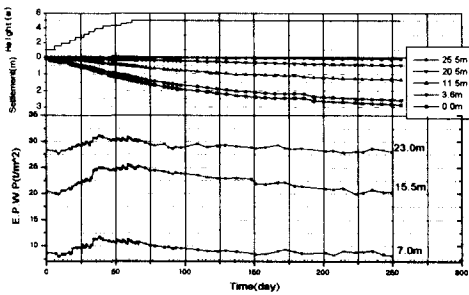
III. 결과 및 고찰

1. 시간에 따른 침하량과 과잉간극수압의 변화

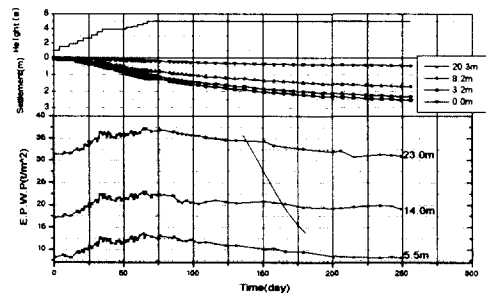
Fig. 2는 성토에 따른 시간-침하량과 시간-과잉간극수압의 변화를 나타낸 것이다. 시간에 따른 침하량 곡선은 성토가 진행됨에 따라 급격한 침하형태를 나타냈고, 성토완료후에도 침하가 계속해서 진행되고 있어 최종침하량에 도달되기까지는 상당한 시간이 소요될 것으로 판단된다.

현재까지의 계측침하량은 A공법의 경우 2.843m(①층(0~3.6m:0.27m), ②층(3.6~11.5m:1.247m), ③층(11.5~20.5m:0.856m), ④층(20.5~30.0m:0.47m))이고, B공법의 경우는 2.513m(①층(0~3.2m:0.21m), ②층(3.2~8.2m:0.592m), ③층(8.2~20.3m:1.247m), ④층(20.3~31.0m:0.46m))이고, C공법의 경우는 2.550m(①층(0~2.6m:0.22m), ②층(2.6~9.3m:0.840m), ③층(9.3~17.8m:0.887m), ④층(17.8~28.6m:0.59m))로 측정되었다.

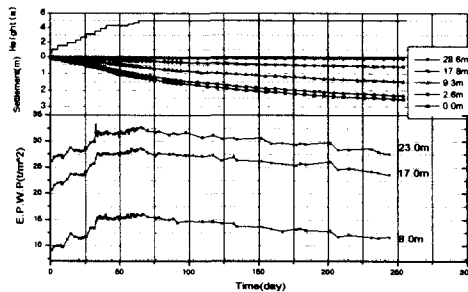
시간에 따른 간극수압계는 타입한 연직드레인의 영향 범위내에 매설하여 오차를 최소화하도록 하였다. 각 공법별로 매설된 간극수압계로부터 보정된 과잉간극수압은 처음에는 성토에 의한 상재하중을 간극수가 받게 되고 흙의 투수성이 작아 과잉간극수압의 소산속도가 느리기 때문에 지속적인 단계성토에 의해서 간극수압은 점차적으로 증가하게 되어 성토완료시에 최대치를 나타내고 성토종료 후 방치기간에는 서서히 소산되는 현상을 나타냈다.



(a) A section



(b) B section



(c) C section

Fig. 2. Variation of settlement and excessive pore water pressure with embankment.

성토하중을 받는 포화점토에서 과잉간극수압이 실내시험조건에서와 동일하게 1차원 변형만이 발생된다면 간극수압의 증가분도 성토하중의 증가분과 같게 된다. 그러나, 실제지반은 3차원 거동을 하므로 성토재하시 응력변화에 따른 간극수압의 거동은 다르게 나타난다.

과잉간극수압은 성토완료후 초기에 급속히 소산되고 그 이후로는 완만하게 진행되어 압밀을 촉진시키고, 지반의 전단강도를 증가시키게 되나 소산과정은 지반의 초기함수비, 압밀응력 및 배수조건, 연직드레인의 Clogging 현상 등에 큰 영향을 받게 된다. 이러한 현상은 실내압밀시험 결과에서도 나타난 바와 같이 선행압밀 하중단계를 경계로 압밀계수의 변화가 크기 때문에 과압밀 점토지반에 대하여는 신중히 고려하여야 한다.

그러나 초기에 급격한 과잉간극수압의 소산이 발생되지 않고 침하량에 비례하여 서서히 감소

하는 경향을 나타내고 있는데 이는 본 연구대상지반이 과압밀점토지반이 아니고 정규압밀지반으로 판단할 수 있다.

연약지반을 개량한 지역에서 깊이에 따른 과잉간극수압의 분포경향은 성토기간 중에는 큰 차이를 나타내고 있고, 그 증가 경향은 유사하지만 낮은 깊이에서 더 빨리 소산되는 경향을 나타냈다. 이것은 하부 층에서 드레인의 배수저항이 증가하므로 상부 층에 비하여 과잉간극수압의 소산속도가 약간 느린 경향이 있기 때문인 것으로 판단된다. 깊이에 따른 과잉간극수압의 크기와 소산속도를 비교하면 연직 배수공법의 배수성능을 판단하는 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

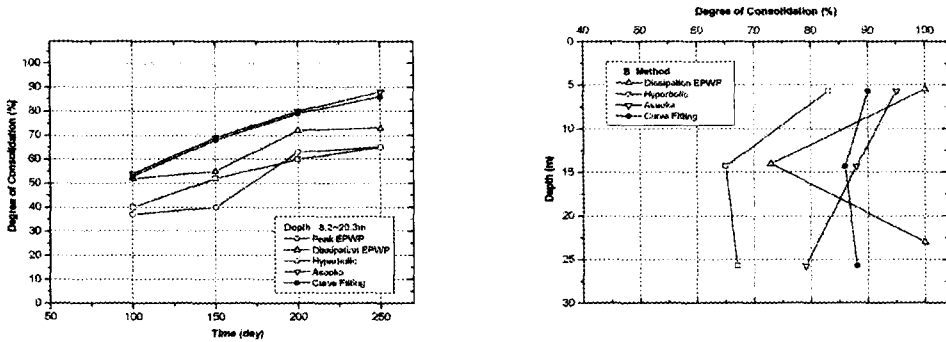
2. 침하량과 과잉간극수압으로 추정된 압밀도의 관계

Fig. 3 (a)는 B공법에서 층별침하량과 과잉간극수압으로 추정된 시간-압밀도의 변화를 나타낸 것이다.

침하량으로 압밀도를 산정하는 방법에서는 쌍곡선, Asaoka, Curve fitting 방법 등을 이용하였다. 각 공법별로 시간에 따른 압밀도는 전체적으로 쌍곡선방법이 Asaoka와 Curve fitting 방법보다 작게 나타났다. 쌍곡선 방법은 이론적으로 시간이 무한대에서의 최종침하량이므로 여기에는 이차압밀이 포함되어 있기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 쌍곡선법으로 구한 압밀도가 90%에 도달되지 않았더라도 간극수압의 소산정도, 전단강도의 증가정도 및 실내시험의 결과 등을 종합적으로 판단하여 압밀완료시점과 최종성토고 등을 결정하여야 한다.

성토완료시의 Peak 과잉간극수압을 이용한 경우는 성토시공중 소산되는 과잉간극수압을 이용한 경우보다 압밀도가 약간 작게 추정되었고, 그 차이는 성토후 초기에는 크고 시간이 증가함에 따라 점차로 작아지는 경향을 나타냈으며, 성토시공중 소산되는 압밀도가 침하량으로 추정된 압밀도에 근접하는 것으로 나타났다.

Fig. 3 (b)는 B공법에서 층별침하량과 과잉간극수압으로 추정된 깊이-압밀도의 변화를 나타낸 것이다. 상부층(3.2m~8.2m)과 하부층(20.3m~30m)에서는 압밀이 빠르게 진행되고 중간층(8.2m~20.3m)에서는 압밀이 지연되는 양면배수의 현상을 나타냈다.



(a) Time- \check{U} (B method)

(b) Depth- \check{U} (B method)

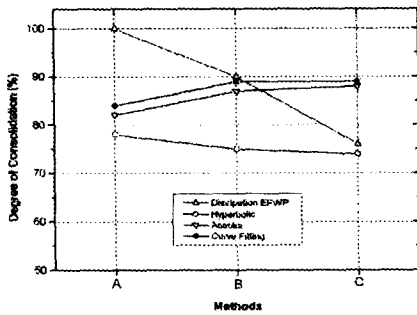
Fig. 3. Variation of the degree of consolidation with time and depth.

Fig. 4 (a)는 각 공법별로 최종계측일(250일)에서 각 층별침하량의 가중평균치를 이용한 압밀도($\check{U}_{s,mean}$)와 과잉간극수압으로 추정된 압밀도(\check{U}_p)와 비교 분석한 것이다.

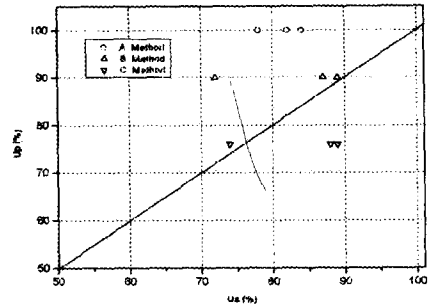
각 층별침하량으로 추정된 압밀도는 Asaoka 방법과 Curve fitting 방법은 거의 같고, 쌍곡선 방법은 작게 나타났다. 과잉간극수압으로 추정된 압밀도는 각 층별침하량으로 추정된 압밀도보다 A공법에서는 크고, B공법에서는 거의 같고, C공법에서는 작게 나타났다.

전체침하량으로 추정된 압밀도와($\check{U}_{s,total}$) 각 층별침하량의 가중평균치를 이용한 압밀도($\check{U}_{s,mean}$)의 관계는 $\check{U}_{s,total} = (0.94 \sim 1.10)\check{U}_{s,mean}$ 으로 거의 유사하게 나타났다.

Fig. 4 (b)는 과잉간극수압으로 추정된 압밀도와(\check{U}_p) 각 층별침하량의 가중평균치를 이용한 압밀도($\check{U}_{s,mean}$)의 관계를 나타낸 것이다. 각 공법별로 압밀도는 A공법에서는 $\check{U}_p = (1.19 \sim 1.28)\check{U}_{s,mean}$, B공법에서는 $\check{U}_p = (1.01 \sim 1.25)\check{U}_{s,mean}$, C공법에서는 $\check{U}_p = (0.85 \sim 1.03)\check{U}_{s,mean}$ 으로 과잉간극수압으로 추정된 압밀도가 약간 크게 나타났다.



(a) \check{U} at various methods



(b) \check{U}_p and $\check{U}_{s,mean}$

Fig. 4. Variation of the degree of consolidation at various methods.

IV. 결론

본 연구에서는 연약지반의 심도가 깊으면서 매우 큰 함수비와 간극비를 갖고 있는 3개의 연약지반 개량지역에서 침하량과 과잉간극수압을 이용한 압밀도를 비교분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 성토하중의 증가에 따라 과잉간극수압은 발생과 소산이 동시에 이루어지면서 점차로 증가하였다가 최종성도완료 후에는 서서히 감소하는 정규압밀 상태를 나타냈고, 깊이에 따른 과잉간극수압의 크기와 소산속도를 비교하면 연직 배수공법의 배수성능을 판단하는 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

2. 성토완료시의 Peak 과잉간극수압을 이용한 경우는 성토시공중 소산되는 과잉간극수압을 이용한 경우보다 압밀도가 약간 작게 추정되었고, 전체침하량으로 추정된 압밀도와($\check{U}_{s,total}$) 층별침하량으로 추정된 압밀도($\check{U}_{s,mean}$)의 관계는 $\check{U}_{s,total} = (0.94 \sim 1.10)\check{U}_{s,mean}$ 으로 거의 유사하게 나타났다.

3. 과잉간극수압으로 추정된 압밀도와(\check{U}_p) 층별침하량으로 추정된 압밀도($\check{U}_{s,mean}$) A공법에서는 $\check{U}_p = (1.19 \sim 1.28)\check{U}_{s,mean}$, B공법에서는 $\check{U}_p = (1.01 \sim 1.25)\check{U}_{s,mean}$, C공법에서는 $\check{U}_p = (0.85 \sim 1.03)\check{U}_{s,mean}$ 으로 과잉간극수압으로 추정된 압밀도가 약간 크게 나타났다.

V. 참고문헌

1. Duncan, J.M., 1993, Limitation of Conventional Analysis of Consolidation Settlement, *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 119(9): pp.1333-1359.
2. Høeg, K., Andersland, O. B. and Rolfsen, E. N., 1969, Undrained Behaviour of Quick Clay under Load Tests at Åsrum, *Géotechnique*, 19(1), pp. 101-115.
3. Murakami, Y., 1979, Excess Pore-Water Pressure and Preconsolidation Effect Developed in Normally Consolidated Clay of Some Age, *Soils and Foundation*, 19(4), pp. 17-29.
4. Suzuki, O., 1988, The Lateral Flow of Soil Caused by Banking on Soft Clay Ground, *Soils and Foundations*, 29(4), pp. 1-18.
5. Xie, K.H., Li, B.H. and Li,Q.L., 1996, A Nonlinear Theory of Consolidation under Time-Dependent Loading, *Proceeding of Second International Conference on Soft Soil Eng.*, Vol.1, pp.193-198.
6. Yoshimi, Y., 1987, Pore Pressure Dissipation Ratio for a Nonlinear Consolidation Problem, Technical note, *Soil and Foundations, JSSMFE*, 27(3), pp.88-90.