

침하량과 과잉간극수압을 이용한 압밀도의 추정

Estimation of the Degree of Consolidation using Settlement and Excess Pore Water Pressure

이 달 원* · 임 성 훈**

Lee, Dal Won · Lim, Seong Hun

Abstract

This study was performed to estimate the degree of consolidation using excess pore water pressure in the very soft ground. The final settlement prediction methods by Hyperbolic, Asaoka and Curve fitting methods from the measured settlement data were used to compare with the degree of consolidation estimated by excess pore water pressure. The dissipated excess pore water pressure during embankment construction and the peak excess pore water pressure on the completed embankment were used for the estimation of the degree of consolidation. After completion of embankment, it was concluded that the degree of consolidation estimated from dissipated excess pore water pressure was more reliable than that from the peak excess pore water pressure. And, the degree of consolidation estimated from the surface settlement was nearly the same as settlement of each layer. The degree of consolidation estimated from dissipated excess pore water pressure was a little larger than that from settlement.

Keywords : Soft ground, Degree of consolidation, Dissipated and peak excess pore water pressure

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 보

존등의 환경문제가 강하게 제시되고 있어 이를 위하여 조화로운 해안개발 방안의 필요성이 대두되고 있다.

연약지반은 대부분 포화도가 높은 점토(Clay)와 실트(Silt)로 구성되어 있어 지반의 강도가 약하고, 침하와 변형이 매우 크다. 또한, 장기적인 압축성으로 인하여 시공중과 시공 완료 후에도 지속적인 문제가 발생되고 있다.^{5,7,11)}

따라서, 성토하중의 증가가 지반의 강도증가와 균형을 이루도록 성토시공속도를 조절하면서 안전한 시공관리 방법을 강구하여야 하고, 지반의 침하

* 충남대학교 농공학과

** 충남대학교 대학원

* Corresponding author. Tel.: +82-42-821-5793

fax: +82-42-824-0467

E-mail address: dwlee@cnu.ac.kr

예측 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 연약지반의 개량 확인여부와 더불어 압밀완료시점과 최종성토고를 결정하는데 가장 중요하게 고려할 사항이다.

압밀도를 산정하는 방법에는 침하량을 이용하는 방법, 과잉간극수압의 소산을 이용하는 방법 등이 주로 이용되고 있다.

일반적으로 실제 현장에서 압밀도의 예측은 현장 계측으로 얻어진 침하량 자료로부터 최종침하량을 예측하여 이용하는 경우가 많다.^{4,9,10)} 그러나, 계측 초기에는 침하량이 작기 때문에 압밀도도 낮고, 계측자료도 충분하지 않기 때문에 추정된 압밀도는 오차가 커서 신뢰성을 파악하는데 어려움이 있어 실제침하량과 편차가 더 크게 예측되는 문제점을 가지고 있다. 이러한 결과는 전단강도를 실제보다 과대 또는 과소평가하게 되어 연약지반의 압밀과정에 있어서 강도증가율을 부적절하게 평가하게 된다.

또한, 지중에 간극수압계를 매설하고 성토하중에 의한 과잉간극수압의 소산과정을 측정하여 압밀도를 예측하는 방법이 이용되고 있다. 그러나, 간극수압의 계측결과는 침하계측자료만으로도 압밀도 예측이 가능하기 때문에 소홀히 다루어져 왔고, 시공도중 간극수압계의 파손, 측정불능, 계측자료의 불균일로 인한 신뢰성 여부 등의 요인으로 인하여 얻어진 자료가 제대로 활용되지 못하여 간극수압계의

매설 목적과는 다르게 비효율적이고 비경제적인 경우가 많다. 그러나 지반의 압밀도가 낮은 경우에는 침하계측자료에 의하여 압밀도를 예측하는 것보다 압밀초기에 계측자료가 충분한 간극수압을 이용하여 압밀도를 예측하는 것이 신뢰성이 클 것으로 판단된다.

이와같이 압밀도를 예측하는데 최종침하량을 이용한 압밀도와 과잉간극수압을 이용한 압밀도는 여러 가지 문제점을 내포하고 있고, 이론적으로 예측한 압밀도에도 상당한 차이가 있기 때문에 현장에서 압밀완료시점, 최종성토고의 결정, 여성토의 제거시기등을 결정하는데 어려움을 겪고 있다.^{2,3,8,12)}

따라서 본 연구에서는 연약지반의 심도가 깊으면서 매우 큰 함수비와 간극비를 갖고 있는 연약지반 개량지역에서 과잉간극수압을 이용한 압밀도 추정 방법을 제시하고, 침하량으로부터 구한 압밀도와 비교·분석하여 연약지반의 압밀완료시점을 판단하기 위한 설계자료로 제공하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 현장 및 실내시험

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 간극수

Table 1 Geotechnical properties at various site

Methods	$w_n(\%)$	e_o	$q_u(\text{kgf/cm}^2)$	C_c	OCR	$C_v(\text{cm}^2/\text{s})$
A: Menard drain	45~70	1.265~1.796	0.22~0.95	0.460~0.891	1.10	$1.43 \times 10^{-3} \sim 3.47 \times 10^{-4}$
B: Pack drain	40~70	1.137~1.893	0.12~0.55	0.50~0.852	0.92	$1.19 \times 10^{-3} \sim 3.53 \times 10^{-4}$
C: Plastic board drain	38~70	1.196~1.892	0.15~0.93	0.515~0.967	1.14	$1.05 \times 10^{-3} \sim 3.43 \times 10^{-4}$

압계(V.W)의 매설위치는 Fig. 1과 같다.

현장토질 조사 결과 N치 2~4의 연약점토층이 20~30 m 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-10 m 부분에서 최대치를 나타내고 그 후는 심도가 깊어지면서 점차로 감소하는 경향을 나타냈다.

2. 성토시공 및 계측

연직드레인 공법의 시공면적은 동일지반 여부, 경제적인 측면과 소규모로 인한 공법별 간섭의 영향을 배제하기 위하여 A, B, C 공법 모두 45 m × 50 m의 면적으로 시공하였고, 각 공법간에 60 m~90 m의 이격거리를 두었다. 타입간격은 연직 및 수평배수를 동시에 고려하여 주어진 기간(약 7~8개월)에 소요압밀도율(약 90%)를 얻도록 1.0 m × 1.0 m로 시공하였다.

대상 현장지반의 연직드레인 타입심도는 보오링, SPT, Piezocone 조사, 피압수의 영향, 드레인 자체의 선정시험 등의 현장 및 실내시험 결과를 기초로 25.5 m로 시공하였고, 성토시공속도는 30 cm/day를 성토하고 약 3~4일 방치기간을 두고 안정관리분석과 병행하여 약 70일 동안 5.0 m까지 시공하였다. 약 70일 동안 단계성토에 따른 성토하중 증가와 180일의 방치기간동안에 침하량은 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 선행압밀응력의 증가를 이용하는 방법 등이 있으나, 본 연구에서는 침하량과 과잉간극수압의 소산에 의한 방법을 이용하였다.

침하량을 이용한 압밀도 추정방법은

$$U_s = (S_f/S_p) \times 100(\%) \text{ 으로 나타낼 수 있다.}$$

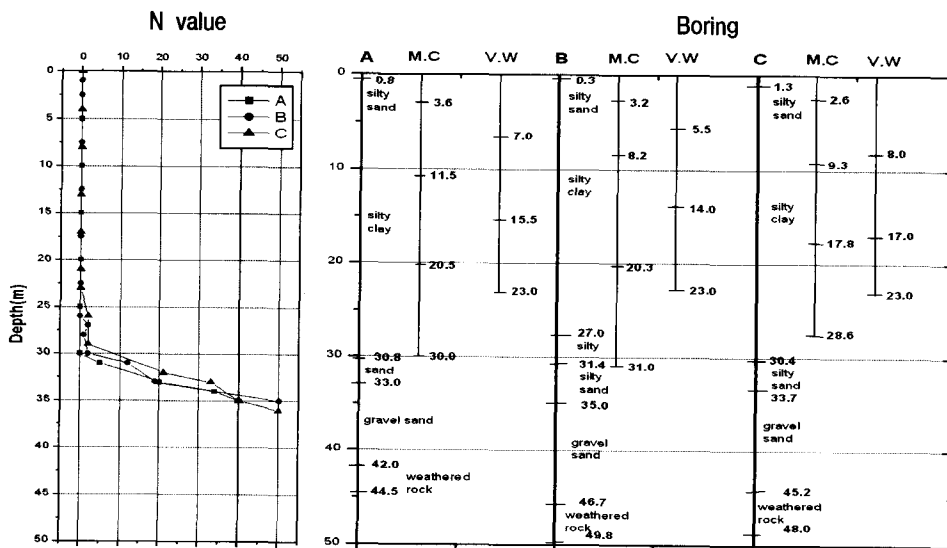


Fig. 1 Results of the standard penetration test and boring log

여기서, S_t 는 현재까지의 침하량이고, S_f 는 최종 예상침하량으로 각 층별침하량과 지표면 침하량의 계측자료로부터 쌍곡선 방법,⁹⁾ Asaoka 방법,¹⁾ Curve fitting 방법에 의하여 추정하였다. 연약지반상에 성토하중이 작용할때 Terzaghi에 의한 1차원 압밀방정식으로부터 경계조건과 초기조건을 적용하여 구한 과잉간극수압은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2u_i}{M} \sin \frac{Mz}{H} \exp(-M^2 T_v)$$

여기서, u_i =초기과잉간극수압, $M = \frac{(2m+1)\pi}{2}$,

m = 정수, $T_v = \frac{C_v t}{H^2}$, H = 배수거리,

z = 점토층 상면으로부터의 연직거리이다.

따라서 임의시간에 임의 깊이에서의 과잉간극수압의 소산을 이용한 압밀도는 다음과 같다.

$$U_p(U_d) = 1 - (u_t/u_i) = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} \exp(-M^2 T_v)$$

여기서, U_p = 최대과잉간극수압으로 구한 압밀도, U_d = 소산된 과잉간극수압으로 구한 압밀도, u_t = 임의의 시간에서의 과잉간극수압, u_i = 초기 과잉간극수압이다.

또한 연약지반 개량지역에서 Barron이 제시한 수평방향 압밀도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_p(U_d) = 1 - (u_t/u_i) = 1 - \exp(-8T_h/F_n)$$

여기서, $T_h = \frac{c_h t}{de^2}$, $F_n = \frac{n^2}{n^2-1} \ln(n) - \frac{3n^2-1}{4n^2}$,

$n = \frac{de}{dw}$, de = 영향원의 직경, dw = 연직배수재

의 직경이다.

초기 과잉간극수압(u_i)을 고려하여 압밀도를 추정할 경우에는 Fig. 2와 같이 두 가지로 구분할 수 있다. 첫번째는 성토완료시의 최대과잉간극수압

(peak)을 그대로 이용하는 경우이고(U_p), 두번째는 성토초기부터 성토완료시까지 점증하중의 형태로 시공되므로 각 성토단계별로 성토전후의 간극수압을 측정하여 성토중에 발생된 과잉간극수압의 소산(dissipation)과정을 이용하는 경우이다(U_d).

포화된 연약지반에 점증하중이 작용할 경우, 성토하중에 의하여 발생하는 과잉간극수압은 점차로 증가하고 최종성토고에서 최대치를 나타내고 그 이후에는 소산하기 시작한다. 그러나 전체적인 과잉간극수압의 소산은 성토시공중의 소산과 최대과잉간극수압 이후의 소산이 합성되어 발생하는 복합적인 거동을 나타내게 된다.

그러나 일반적으로 압밀도를 구할 경우 성토완료 후에 최대과잉간극수압 이후의 결과만을 이용하고 있다. 이와같은 방법은 비교적 간단하게 압밀도를 구할 수 있다는 장점을 가지고 있으나, 성토초기부터 성토완료시까지 소산된 과잉간극수압을 합리적으로 반영할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 특히 과압밀점토에서는 부의 과잉간극수압이 나타날 경우도 있고, 실트분이 많은 지반은 과잉간극수압이 빠르게 소산되기 때문에 표준적인 거동과는 다르게 나타나므로 압밀도에도 큰 차이가 발생하게 된다.

본 연구에서는 위와 같이 소산된 과잉간극수압에 의하여 압밀도를 추정하는 방법이 최대과잉간극수압을 이용하는 것보다 더 타당함에도 불구하고, 계측자료의 신뢰성 여부등으로 고가장비인 간극수압계의 자료가 제대로 활용되지 못하고 매설 목적과는 다르게 비효율적이고 비경제적인 경우가 많아 이들의 효율적 활용방안의 하나로 연약지반에서 가장 중요하게 다루어지고 있는 압밀도 추정방법에 이용하고자 하였다.

과잉간극수압 자료는 성토초기부터 성토완료시까지 성토일정에 따라서 변화되는 값을 1일 2회 주기로 자동 계측에 의하여 측정한 후 그래프를 확대하여 이상치는 제외하고 압밀도 분석에 이용하였다.

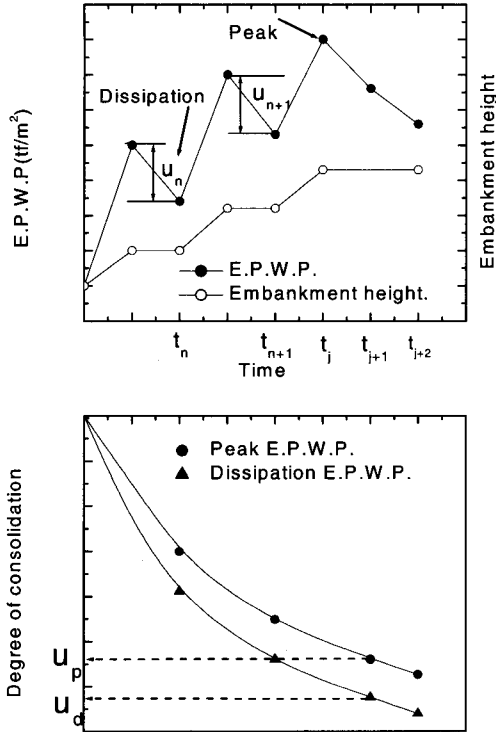


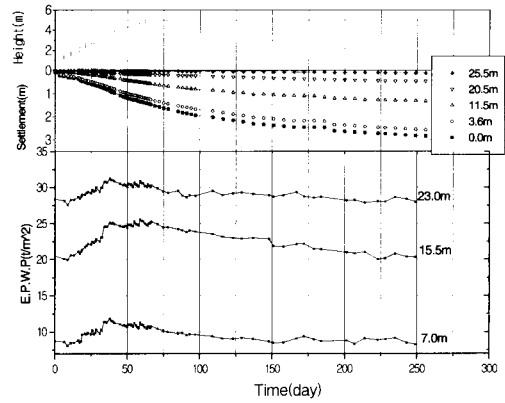
Fig. 2 Variation of degree of consolidation using peak and dissipated excess pore water pressure

Ⅲ. 결과 및 고찰

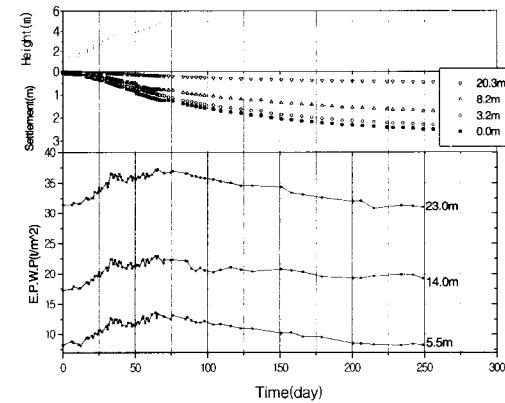
1. 시간에 따른 침하량과 과잉간극수압의 변화

Fig. 3은 성토에 따른 시간-침하량과 시간-과잉간극수압(E.P.W.P)의 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.

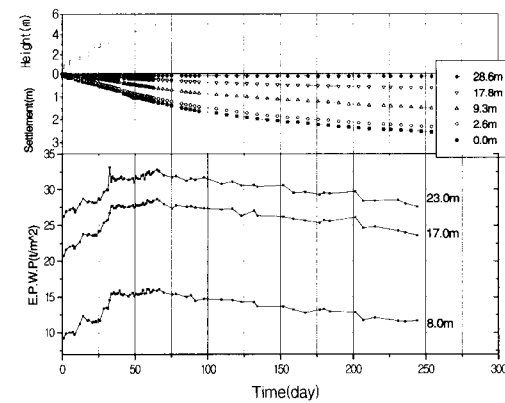
A공법의 경우 계측침하량은 2.843m {①층(0~3.6m:0.27m), ②층(3.6~11.5m:1.247m), ③층(11.5~20.5m:0.856m), ④층(20.5~30.0m:0.47m)}이고, B공법의 경우는 2.513m {①층(0~3.2m:



(a) A method



(b) B method



(c) C method

Fig. 3 Variation of settlement and excess pore water pressure with time

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 성토초기에는 상재하중을 간극수가 받게 되고 흙의 투수성이 작아 과잉간극수압의 소산속도가 느리게 나타났다. 계속적인 단계성토에 의해서 간극수압은 점차적으로 증가하게 되어 성토 완료시에 최대치를 나타내고 성토종료 후 방치기간에는 서서히 소산되는 현상을 나타냈다.

성토하중을 받는 포화점토에서 과잉간극수압이 실내시험조건에서와 동일하게 1차원 변형만이 발생된다면 간극수압의 증가분도 성토하중의 증가분과 같게 된다. 그러나, 실제지반에서는 성토재하시 응력 변화에 따른 간극수압의 거동은 다르게 나타난다.

과잉간극수압은 성토완료후 완만하게 진행되어 압밀을 촉진시키고, 지반의 전단강도를 증가시키게 되나 소산과정은 지반의 초기함수비, 압밀응력 및 배수조건, 연직드레인의 막힘현상 등에 큰 영향을 받게 된다. 이러한 현상은 일반적인 실내압밀시험 결과에서도 볼 수 있는 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 감소하는 경향을 나타내고 있는데 이는 본 연구대상지반이 과압밀점토지반이 아니고 정규압밀지반으로 판단할 수 있다.

과잉간극수압의 분포경향은 성토기간 중에는 큰 차이를 나타내고 있고, 그 증가 경향은 유사하지만 심도가 낮은 경우가 더 빨리 소산되는 경향을 나타냈다. 이것은 하부층에서 드레인의 배수저항이 증가하므로 상부층에 비하여 과잉간극수압의 소산속

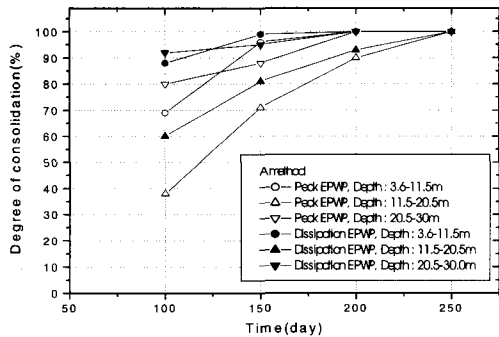
도가 약간 느린 경향이 있기 때문인 것으로 판단된다. 과잉간극수압의 소산속도가 빠르다는 것은 연직 배수재의 배수성능이 우수하다는 것을 의미하므로 이들을 평가하는 자료로도 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

Mesri 등(1980)은 압력증가에 따른 과잉간극수압비($\Delta u/\Delta p$)를 0.2, 0.4, 1.0으로 변화시키면서 실내압밀시험을 한 결과, 압력을 재하한후 초기에는 $\Delta u/\Delta p=1$ 로 나타났고, 압력증가에 의한 시간-압축곡선과 시간-재압축 곡선에서의 과잉간극수압 소산은 재압축보다는 압축곡선에서 빠르게 소산된다고 하였다. 이는 현장에서 성토시공을 일시하중으로 재하할 경우는 과잉간극수압의 소산이 빠르게 나타나고, 방치후 다시 성토하중을 재하하는 점증하중일 경우(재압축)는 과잉간극수압이 소산되지 않은 상태에서 재하되기 때문에 소산이 느리게 진행된다는 것을 의미한다고 볼 수 있다.

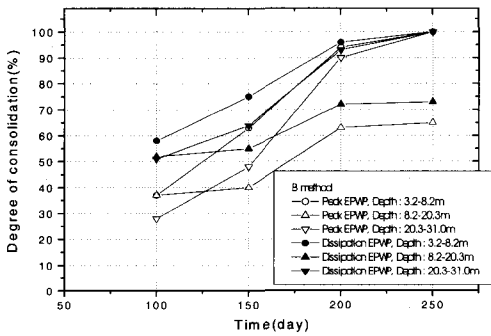
Indraratna등(1994)은 연직드레인(PBD)으로 타설된 연약지반의 개량효과를 확인하기 위하여 현장 시험성토를 실시하고 과잉간극수압의 거동을 수치 해석과 실측치를 비교 분석하였다. 시간에 따른 과잉간극수압이 흙과 드레인 사이에서 완전배수조건이라면 영(zero)이 되지만, 실제현장에서 과잉간극수압의 소산은 다른 요소사이의 부분적인 막힘 현상등으로 순간적으로 소산되지 않는다고 하였다. 또한, 성토초기에는 실측치와 예측치가 거의 일치하지만 시간이 경과함에 따라 부분적인 막힘 현상으로 인하여 큰 차이가 나타난다고 하였다. 평균과잉간극수압의 소산율을 역산한 결과, 성토단계가 증가할수록 소산율도 점차로 감소하는 현상을 나타낸다고 하였다.

2. 과잉간극수압에 의한 심도별 압밀도의 변화

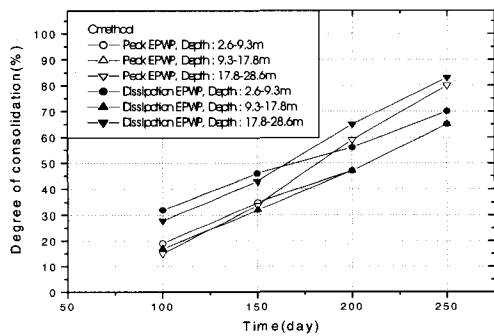
Fig. 4는 각 공법별로 성토완료후 최대과잉간극수압과 성토중에 소산된 과잉간극수압을 이용하여 구한 심도별 압밀도의 변화를 나타낸 것이다.



(a) A method



(b) B method



(c) C method

Fig. 4 Variation of degree of consolidation with peak and dissipation excess pore water pressure

투수계수가 작은 점토지반의 경우, 점중하중에 의한 과잉간극수압은 각 하중단계별 과잉간극수압의 합과 거의 같게 될 것이고, 투수계수가 큰 지반의 경우, 점중하중에 의한 과잉간극수압은 거의 영(0)이 될 것이다.

A공법의 경우 성토완료후 초기에는(약 100일)

소산된 과잉간극수압을 이용한 압밀도가 최대과잉간극수압을 이용한 압밀도보다 10~20% 정도 더 크게 나타났다. 시간이 경과함에 따라 압밀도의 변화폭은 점점 작아지고 250일 경에는 같아지는 경향을 나타냈다. 심도에 따라서는 지표면과(G.L-3.6~11.5 m) 하부심도(G.L-20.5~30.0 m)에서는 압밀도가 높고, 중간심도에서는 낮은 압밀도를 나타냈다. 이와같은 현상은 상부와 하부는 양면배수조건이고, 물리적 성질이 상대적으로 큰 변화를 나타내는 중간심도에서는 압밀이 지연되는 것으로 판단된다.

B공법의 경우 성토완료후 초기에는(약 100일) A공법과 마찬가지로 소산된 과잉간극수압을 이용한 압밀도가 최대과잉간극수압을 이용한 압밀도보다 10~20% 정도 더 크게 나타났다. 시간이 경과함에 따라 지표면과(G.L-3.2~8.2m) 하부심도(G.L-20.3~31.0m)에서는 압밀도의 변화폭은 점점 작아지고 250일경에는 같아졌으나 중간심도에서는 압밀도의 변화폭이 없고 낮은 압밀도로 A공법과 유사한 경향을 나타냈다.

C공법의 경우 성토완료후 초기에는(약 100일) 지표면과 하부심도에서는 소산된 과잉간극수압을 이용한 압밀도가 최대과잉간극수압을 이용한 압밀도보다 10%정도 더 크게 나타났다. 시간이 경과함에 따라 지표면과(G.L-2.6~9.3m) 하부심도(G.L-17.8~28.6m)에서는 압밀도의 변화폭은 점점 작아지고 특히 하부심도에서는 압밀이 빠르게 진행되는 현상을 나타냈다. 그러나 중간심도에서는 압밀도의 변화폭이 없고 동일한 압밀도를 나타냈다. 이상과 같이 각 공법별로 성토중 소산된 과잉간극수압을 이용한 압밀도가 최대과잉간극수압을 이용한 압밀도보다 성토완료후 초기에는 10~20% 정도 더 크게 나타났고, 지표면과 하부심도에서는 양면배수의 영향으로 압밀이 급격하게 진행되는 반면에 중간심도에서는 압밀이 지연되는 현상을 나타냈다. 또한 공법별 압밀도의 분포경향은 A공법은 성토완료후 초기부터에 압밀이 이미 상당히 진전되어 있

고, B공법도 중간심도를 제외하고는 급격한 압밀이 진행되고 있다. C공법은 초기에 낮은 압밀도를 나타내지만 압밀속도가 빠르게 증가하는 현상을 나타냈다.

3. 침하량과 과잉간극수압으로 추정된 압밀도의 관계

침하량으로 추정된 압밀도와 성토시공중 소산되는 과잉간극수압 및 성토완료시의 최대과잉간극수압을 이용한 압밀도는 다르게 나타나기 때문에 현장에서 압밀도를 판단하는데 어려움이 있다.

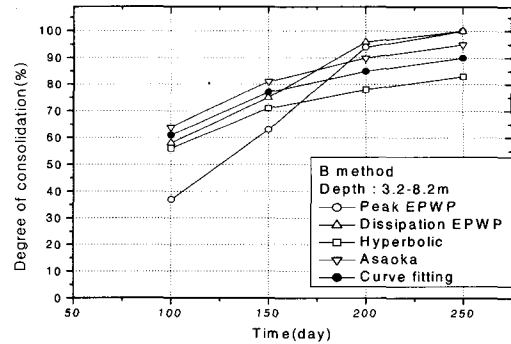
Fig. 5는 B공법에서 층별침하량과 과잉간극수압으로 추정한 시간-압밀도의 변화를 심도별로 나타낸 것이다.

최종침하량에 의한 압밀도 산정방법은 각각의 방법마다 가정조건들이 다르기 때문에 신뢰성 평가에 어려움이 있지만 그 중에서 쌍곡선, Asaoka, Curve fitting 방법 등을 이용하여 압밀도를 비교 분석하였다.

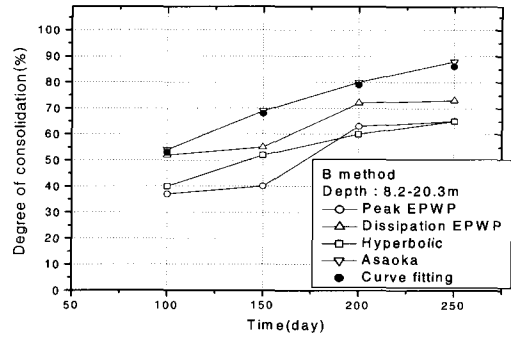
시간에 따른 압밀도는 전반적으로 각 방법별, 심도별로 차이를 나타냈지만 250일을 기준으로 판단하면, 지표면에서는 Asaoka 및 Curve fitting 방법이 쌍곡선 방법보다 약 7% 정도 더 크고, 중간심도에서는 Asaoka 및 Curve fitting 방법은 동일하고 쌍곡선 방법과는 약 20% 정도 큰 차이를 나타냈으며, 하부심도에서는 Curve fitting방법이 가장 크고 쌍곡선방법이 가장 작게 나타났다. 쌍곡선 방법은 이론적으로 시간이 무한대에서의 최종침하량 이므로 여기에는 이차압밀이 포함되어 있기 때문인 것으로 판단된다.

전체적으로 Asaoka 및 Curve fitting 방법은 오차의 범위가 1~9% 정도로 작게 나타났으나 쌍곡선방법은 최대 20% 정도로 크고 압밀도는 작게 추정되었다.

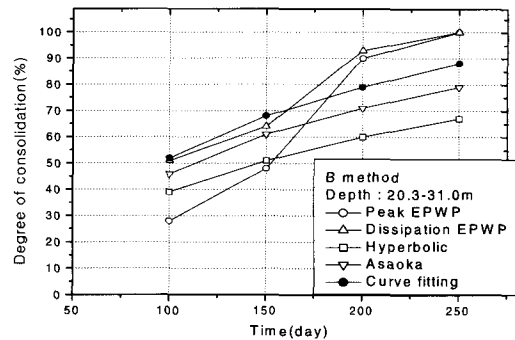
성토시공중 소산되는 과잉간극수압을 이용한 경우가 성토완료시의 최대과잉간극수압을 이용한 경



(a) Depth : 3.2~8.2m



(b) Depth : 8.2~20.3m



(c) Depth : 20.3~31m

Fig. 5 Variation of degree of consolidation using settlement and excess pore water pressure at B method

우보다 압밀도가 크게 추정되었고, 그 차이는 성토 후 초기에는 크고 시간이 경과함에 따라 점차로 작아지는 경향을 나타냈다.

이상과 같이 침하량과 과잉간극수압으로 추정된 압밀도는 심도별로 차이는 있지만, 성토완료후 초

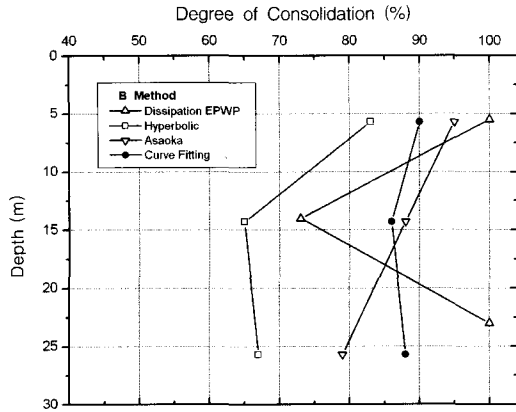


Fig. 6 Variation of the degree of consolidation with depth at B method

기에는 소산된 과잉간극수압으로 추정된 압밀도가 침하량으로 추정된 압밀도와 근접하는 것으로 나타났다. 시간이 경과함에 따라 소산된 과잉간극수압으로 추정된 압밀도와 과잉간극수압의 최대치를 이용한 압밀도가 같아지게 되므로 큰 차이를 나타내지 않았다.

이와같은 현상은 A공법과 C공법에서도 심도별로 차이는 있지만 일반적으로 성토시공중 소산되는 압밀도가 침하량으로 추정된 압밀도와 근접하는 것으로 나타났다. 특히 성토완료후 초기에는 최대간극수압을 이용한 압밀도는 과소평가되므로 소산된 과잉간극수압을 이용하여 압밀도를 추정하는 것이 합리적이라고 판단된다.

Fig. 6은 B공법에서 최종계측일(250일)에서의 층별침하량과 과잉간극수압으로 추정된 심도-압밀도의 변화를 나타낸 것이다. 전반적으로 상부층(3.2m~8.2m)과 하부층(20.3m~30m)에서는 중간층(8.2m~20.3m)보다도 압밀이 약간 빠르게 진행되는 현상을 나타냈다.

압밀이 진행되는 동안 침하량으로 추정된 압밀도는 심도에 따라 10~23% 범위로 편차가 나타나고, 소산된 과잉간극수압으로 추정된 압밀도와도 심도에 따라서 매우 다르게 나타났다. 또한 배수경계면에서는 과잉간극수압이 빠르게 소산되는데 이는 변

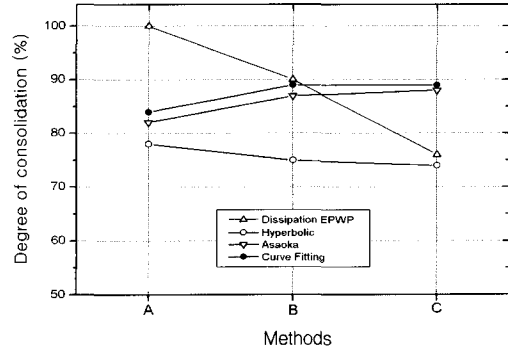


Fig. 7 Variation of the degree of consolidation at various methods

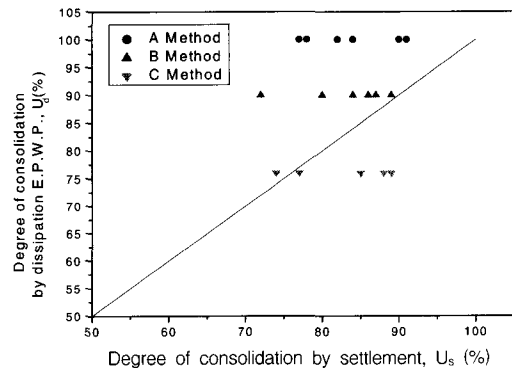


Fig. 8 Variation of the degree of consolidation with settlement and excess pore water pressure at various methods

형속도의 영향이 점토층 중앙부보다는 더 크기 때문으로 판단된다.

Fig. 7은 각 공법별로 최종계측일(250일)에서 각 심도별 층별침하량을 이용한 압밀도(U_s)와 과잉간극수압으로 추정된 압밀도(U_d)와 비교 분석한 것이다.

층별침하량으로 추정된 압밀도는 Asaoka 방법과 Curve fitting 방법은 오차범위가 약 3% 정도로서 거의 같고, 쌍곡선 방법은 오차범위가 약 15% 정도로 크고, 압밀도는 작게 나타났다. Asaoka 방법과 Curve fitting 방법을 기준으로 과잉간극수압으로 추정된 압밀도는 층별침하량으로 추정된 압밀도보다 A공법에서는 크고, B공법에서는 거의 같고,

C공법에서는 작게 나타났다.

일반적으로 압밀도의 추정은 각 심도별 층별침하량을 이용하는 것보다는 지표면에서의 전체침하량을 이용하여 압밀도를 추정한다. 전체침하량으로 추정된 압밀도와(U_{st}) 각 심도별 층별침하량을 이용한 압밀도(U_s)의 관계는 $U_{st}=(0.94\sim 1.10) U_s$ 으로 거의 유사하게 나타났다.

Fig. 8은 과잉간극수압으로 추정된 압밀도(U_d)와 침하량을 이용하여 쌍곡선, Asaoka 및 Curve fitting 방법으로 분석한 압밀도(U_s)의 관계를 나타낸 것이다. 각 공법별로 과잉간극수압에 의한 압밀도는 A공법에서는 $U_d=(1.10\sim 1.28) U_s$ 로 크게 나타났고, B공법에서는 $U_d=(1.01\sim 1.25) U_s$ 으로 약간 크게 나타났으며, C공법에서는 $U_d=(0.85\sim 1.03) U_s$ 으로 압밀도가 약간 작게 나타났다.

IV. 결 론

본 연구는 연약지반의 심도가 깊으면서 매우 큰 함수비와 간극비를 갖고 있는 연약지반 개량지역에서 과잉간극수압을 이용하여 압밀도를 추정하였고, 침하량으로부터 구한 압밀도와 비교분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 성토하중의 증가에 따라 소산된 과잉간극수압을 이용한 압밀도를 추정하였고, 성토중 소산된 과잉간극수압을 이용한 압밀도가 최대과잉간극수압을 이용한 압밀도보다 성토완료후 초기에는 10~20% 정도 더 크게 나타났다.

2. 성토완료후 초기에는 시공 중 소산되는 과잉간극수압을 이용한 경우가 침하량으로 추정한 압밀도와 근접하고, 성토완료시의 최대과잉간극수압을 이용한 경우는 압밀도를 과소평가 하므로 소산된 과잉간극수압에 의한 압밀도를 이용하는 것이 합리적이라고 판단된다.

3. 지표면에서의 전체침하량으로 추정된 압밀도(U_{st})와 각 심도별 층별침하량을 이용한 압밀도

(U_s)의 관계는 $U_{st}=(0.94\sim 1.10) U_s$ 으로 거의 유사하게 나타났다.

4. 과잉간극수압으로 추정한 압밀도(U_d)와 침하량으로 추정된 압밀도(U_s)는 A공법에서는 $U_d=(1.10\sim 1.28) U_s$, B공법에서는 $U_d=(1.01\sim 1.25) U_s$, C공법에서는 $U_d=(0.85\sim 1.03) U_s$ 으로 과잉간극수압으로 추정된 압밀도가 약간 크게 나타났다.

References

1. Asaoka, A. 1978. Observational procedure for settlement prediction. *Soil and Foundations*, 18(4):87-101.
2. Barron, R. A. 1947. Consolidation of fine-grained soils by drain wells. *J. Soil. Mech. Found. Div. ASCE* 73(6):811-835.
3. Duncan, J. M. 1993. Limitation of conventional analysis of consolidation settlement. *Journal of Geotechnical Engineering Division ASCE* 119(9): 1333-1359.
4. Indraratna, B., A. S. Balasubramaniam, and P. Ratnayake. 1994. Performance of embankment stabilized with vertical drains on soft clay. *J. of Geotechnical Engineering ASCE* 120(2):257-273.
5. Leroueil, S., F. Tavenas, B. Trak, P. La Rochelle, and M. Roy. 1978. Construction pore pressures in clay foundations under embankments. *Can. Geotech. J.* 15: 54-65.
6. Mesri, G., and Y.K. Choi. 1980. Excess pore-water pressure and preconsolidation effect developed in normally consolidated clays of some age. *Discussions. Soil and Foundations, JSSMFE* 20(4):143-148.
7. Murakami, Y. 1979. Excess pore-water pressure and preconsolidation effect developed in normally consolidated clay of some age. *Soils and Foundation* 19(4):17-29.

8. Onoue, A. 1988. Consolidation by vertical drains taking well resistance and smear into consideration. *Soils and Foundation* 2(4):165-174
9. Sridharan, A., N. S. Murthy, and K. Prakash. 1987. Rectangular hyperbola method of consolidation analysis. *Geotechnique* 37(3):355-368.
10. Tan, S. A., and S. H. Chew. 1996. Comparison of the hyperbolic and Asaoka observational method monitoring consolidation with vertical drains. *Soils and Foundation* 36(3):31-42.
11. Tavenas, F., R. Blanchet, R. Graneau, and S. Leroueil. 1978. The stability of stage-constructed embankments on soft clays. *Can. Geotech. J.* 15:283-305.
12. Yoshikuni, H., and H. Nakanodo. 1974. Consolidation of soils by vertical drain wells with finite permeability. *Soils and Foundation* 14(2):35-46.
13. Yoshimi, Y. 1987. Pore pressure dissipation ratio for a nonlinear consolidation problem. Technical note. *Soil and Foundations, JSSMFE* 27(3):88-90