

연직드레인 공법에 의한 연약지반의 압밀거동

Consolidation Behavior of Soft Ground by Prefabricated Vertical Drains

이 달 원* · 임 성 훈*
Lee, Dal Won · Lim, Sung Hoon

Abstract

A large scale field test of prefabricated vertical drains was performed to analyze the effect of parameters of the very soft clay at a test site. Compression index and the coefficient of horizontal consolidation obtained by back-analysis of settlement data were compared with those obtained by means of laboratory tests. Hyperbolic method, Asaoka method and curve fitting method were used to compute final settlement and coefficient of consolidation

The relationships of settlement measurement(S_m) versus design settlement(S_t) and the measurement consolidation ratio(U_m) versus design consolidation ratio(U_t) were shown as $S_m = (1.0 \sim 1.1)S_t$, $U_m = (1.13 \sim 1.17)U_t$ at 1.0m spacing of drain and $S_m = (0.7 \sim 0.8)S_t$, $U_m = (0.92 \sim 0.99)U_t$ at 1.5m spacing of drain, respectively. The relationships of the field compression index($C_{c_{field}}$) and virgin compression index($v_{cc_{lab}}$) were shown as $C_{c_{field}} = (1.0 \sim 1.2)v_{cc_{lab}}$. But it was nearly within the same range when considering the error factor with the determination method of virgin compression index and the prediction method of final settlement. The coefficient of horizontal consolidation that was obtained by back-analysis of the settlement data was larger than the coefficient of vertical consolidation, and the ratio of consolidation coefficient (C_h/C_v) was $C_h = (2.4 \sim 2.9)C_v$, $C_h = (3.4 \sim 4.2)C_v$ at 1.0m and 1.5m spacing of drain, respectively.

I. 서 론

연약지반의 압밀을 촉진시키기 위하여 연직배수 공법과 선행압밀공법을 병용하여 지반개량을 하는 방법들이 일반적으로 이용되고 있다. 그러나 배수

재가 설치된 연약지반의 압밀거동을 해석하기 위하여 정교한 수치해석기법을 이용하더라도 지반의 이방성등으로 인한 불확실성, 현장지반을 대표하는 정확한 매개변수 산정의 어려움, 수치해석에 적용된 모델, 초기조건, 하중 및 경계조건 등을 시

*충남대학교 농과대학

키워드 : 연직드레인, 최종침하량, 압축지수, 압밀계수, 압밀비, 쌍곡선방법, Asaoka방법, Curve fitting 방법

플레이션 하기가 어렵기 때문에 실제 연약지반에서 발생되고 있는 현상들은 설계단계에서 예측된 거동과 서로 일치하지 않는 경우가 많다.^{5,6,8,10,23)} 따라서 적용된 연약지반 개량공법들이 충분한 압밀축진효과를 발휘하고 있는지를 파악하는 것은 매우 중요한 문제이다.

이와같은 목적을 위하여는 현장에서 정확하게 계측된 침하량이나 간극수압자료로부터 역해석 기법 등을 이용하여 정확한 지반정수값을 산정하고 그 물성치를 이용하여 이론치와 실측치를 비교 분석한후 장래의 침하거동을 파악하여야 한다.

연약지반개량공법은 샌드드레인, 플라스틱 보오드 드레인(Plastic Board Drains:PBD)을 비롯하여 상당히 많은 종류의 공법들이 국내의 현장에서 시공되어 왔으며,²²⁾ 그 중 PBD 공법은 1975년 국내에 처음 시공된 이후로 품질개선과 시공방법 등의 개발로 시공성, 경제성, 효율성이 우수한 것으로 평가되어 점차적으로 시공실적이 증가하고 있다.

특히, 연직배수재로서 모래를 사용하던 공법들은 양질의 모래가 고갈됨에 따라 현장 주변에서 쉽게 구득할 수 없기 때문에 앞으로 PBD 공법은 사용량은 증가하리라고 판단된다. 그러나, 이 공법을 이용하여 지반개량을 할 경우, 드레인 타입시 발생되는 교란영향(smear effect), 타설심도 및 개량지반의 토질특성에 따른 드레인의 배수저항(well resistance) 등이 압밀축진효과를 저하시키는 주요 요인으로 작용하고 있다.^{13,21)}

PBD 공법은 Kjellman(1937)에 의하여 처음 적용되었으며, 그 동안 Bergodo등(1992)¹⁾ 여러 연구자들^{5,11)}에 의하여 타설심도의 증가에 따른 배수재의 인장강도, 통수능력, 필터의 막힘 가능성(clogging), 휨성(bending), 접힘가능성(folding) 등의 품질관리 기준들이 연구발표하였다

연약지반 개량시에 소요압밀시간을 예측하기 위한 연구는 Terzaghi의 일차원 압밀이론이 발표된 이후로 연직배수재에 의한 2차원 압밀로 확장한 Barron,³⁾ Hansbo,⁷⁾ Yoshikuni,²¹⁾ Onoue¹⁴⁾ 등에 의하여 제안되었고, 최종침하량의 예측방법은 Hyperbolc, Asaoka, Hoshino, Monden, Tan, Simulation,

FEM 방법 등이 계속해서 연구발표 되었다.^{2,19,24)}

이와 같이 연약지반의 정확한 지반조사를 위한 기술개발과 압밀특성에 관한 이론 및 실험적인 연구가 활발하게 진행되고 있지만, 현재로서는 사전 설계에서 적용할 수 있는 예측법이 아직 확립되어 있지 않다. 또한, 연약지반 설계시 정확한 해석방법의 적용이 어렵고, 계산과정의 복잡성, 시험방법의 어려움과 간편성 등의 여러가지 원인으로 인하여 교란영향과 배수저항을 과소 또는 과대평가하는 경향이 있고, 수평압밀계수(C_h)가 실내압밀시험에서 구한 압밀계수(C_v)와 같다고 가정하고 사용하는 경우가 많다.

따라서 정확한 최종예상침하량과 소요압밀시간을 결정하기 위해서는 실제의 거동이 관측된 시점에서의 정확한 계측자료를 기초로 하여 최종예상침하량의 신뢰성을 높이고 역해석에 의한 현장도질정수의 산정, 2차 압밀침하량을 고려한 최종침하량의 예측방법, 합리적인 연직배수재의 설계를 위한 배수저항과 교란영역의 영향범위 등을 구명하는 연구가 필요하다.

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

따라서 본 연구는 연약지반의 심도가 깊으면서 압밀침하량이 큰 지역에서 연직드레인 공법에 의하여 개량한 지반의 침하거동을 파악하고, 현장계측결과를 기초로 기존의 최종침하량의 예측방법 등과 현장계측치로부터 역산한 압축지수와 압밀계수의 범위를 실내시험과 비교 분석하여 연약지반의 설계시 기초자료로 제공하고자 한다.

II. 분석 및 시험방법

1. 분석방법

연약지반을 개량할 경우 침하량은 드레인의 직경 및 간격보다는 연약층의 심도에 더 큰 영향을

받고, 침하속도는 연직드레인의 간격 및 배수성능에 의하여 큰 영향을 받는다. 그러나 배수거리를 인위적으로 짧게 하여 설계시 검토되었던 침하속도는 현장에서와 침하속도와 상당한 차이가 발생되고 있다. 이와같은 주요요인은 드레인 타입시 주변점토지반의 교란영향과 지반속의 간극수가 연직 드레인재를 통하여 배출되는데 받는 배수저항이 주요원인으로 작용하고 있다.^{7,14,21)}

연약지반의 성토시공 중에 현장계측치로부터 얻어진 시간-침하량곡선에 의하여 최종침하량을 예측하는 방법들은 각각의 제안식마다 가정조건들이 다르기 때문에 신뢰성 평가에 어려움이 있으나 그 중 신뢰성이 높다고 평가되어진 쌍곡선, Asaoka, Curve fitting 방법 등을 이용하여 비교 분석하였다 또한, 설계시 침하량과 소요압밀도의 산정은 Terzaghi, Barron, Hansbo, Yoshikuni, Onoue 방법 등에 의하여 교란영향과 배수저항을 고려한 경우와 무시한 경우로 구분하여 적용하였고, 현장계측치와 비교 분석하였다.

2. 현장 및 실내시험

현장시험 및 실내시험용 시료채취 위치는 낙동강 하류지역으로 삼각주의 축적평야가 발달되어 있으며, 점성토와 미세한 모래가 혼재되어 있는 축적층으로 형성되어 있다 현장지반의 분포특성을 파악하기 위하여 시추조사와 병행하여 표준관

입시험을 실시하였고, 대상지반의 물리적, 역학적 특성 및 압밀특성을 파악하기 위하여 불교란 시료를 채취하여 실내시험을 실시한 결과는 Fig. 1 및 Table 1과 같다.

Table 1. Geotechnical properties at PBD site

Depth(m)	ω_n (%)	e_0	$v_{cc_{lab}}$	$C\alpha$	OCR	C_v (cm ² /s)	k_v (cm/s)
0~3	45	1.196	0.515	0.009	1.67	1.05×10^{-3}	9.235×10^{-4}
3~13	70	1.892	0.967	0.016	0.55	3.12×10^{-4}	3.110×10^{-6}
13~21	60	1.549	0.776	0.013	1.15	3.43×10^{-4}	1.891×10^{-8}
21~30	38	1.353	0.592	0.006	1.72	1.43×10^{-3}	9.556×10^{-4}

Fig. 1과 같이 N치는 0~30m까지는 거의 0에 가까운 매우 연약한 지층으로 나타났고, 30m 이상에서는 점차로 증가하고 있다. 실내시험 결과 이 지역의 No. 200채 통과량은 거의 90% 이상으로 세립분의 함유량이 매우 높은 점토로 구성되어 있다. 자연함수비(ω_n)와 액성한계(ω_L)의 범위는 각각 38~70%, 30~55%의 범위로 분포되어 있으며, 지표면(GL-3.0m)에서는 낮고 심도가 깊어지면서 증가하여 GL-10.0m 부분에서 최대치를 나타내고 그 후는 심도가 깊어짐에 따라 점차로 감소하는 경향을 보여주고 있다.

그리고 액성한계와 자연함수비의 관계는 $\omega_L = (0.6 \sim 0.9) \omega_n$ 의 범위로 분포되어 있고, 초기간극비는 1.196~1.892의 범위이며, 과압밀비는 0.55~

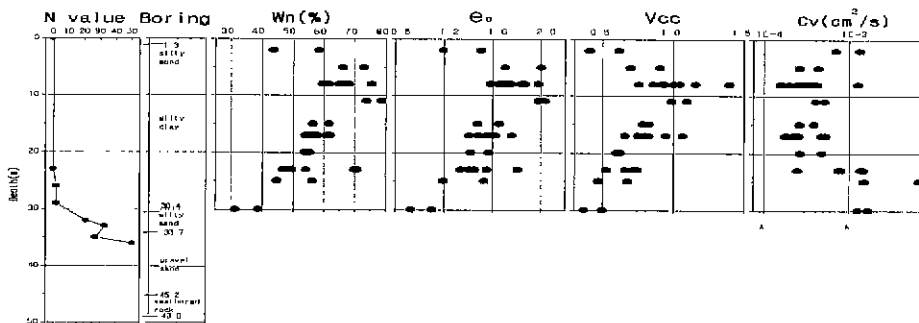


Fig. 1. Result of the field and laboratory tests

1.72의 범위로 분포되어 있다. 압밀침하량을 결정하는데 중요한 상수인 압축지수는 0.515~0.967의 범위이고, 액성한계와의 관계식은 $v_{CC_{lab}} = 0.032 \omega_L - 0.730$ 로 나타났다. 그리고 압밀계수(C_v)는 $3.12 \times 10^{-4} \sim 1.43 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{s}$ 의 범위로 분포되어 있으며 지표면에서는 크게 나타나고 점차적으로 일정한 값을 나타내다가 GL-20.0m부터 증가하고 있고, 투수계수(k_v)는 $1.89 \times 10^{-8} \sim 9.56 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ 의 범위로 분포되어 있다.


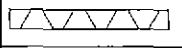
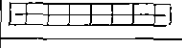
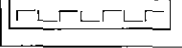
3. 드레인의 간격 및 자재선정

연직드레인 공법의 시공면적은 동일지만 여부, 경제적인 측면과 소규모로 인한 각 Type 별로 간섭의 영향을 배제하기 위하여 200m×90m(18,000m²)의 면적을 4구역으로 나누어 선정하였다.

연직드레인 설계는 수평압밀계수(C_h)가 연직압밀계수(C_v)와 같다고 가정하고, 교란영향과 배수저항을 고려하여 드레인을 설계하였을 경우(Case 1)는 타입간격을 1.0×1.0m(정적관입)으로 시공하였다. 또한 수평압밀계수(C_h)는 연직압밀계수(C_v)의 3배와 같다고 가정하고, 교란영향과 배수저항을 무시하여 드레인을 설계하였을 경우(Case 2)는 타입간격을 1.5×1.5m(동적관입)으로 시공하였다. 그리고 Case 3는 수평압밀계수(C_h)가 연직압밀계수(C_v)와 같다고 가정하고, 교란영향과 배수저항을 무시한 일반적인 설계법으로 Case1과 Case2를 비교하기 위하여 분석하였다.

타입간격은 연직, 수평 배수를 동시에 고려하여

Table 2. General type of plastic board drains

Type	Dimension (mm)	Materials (Core)	Cross section
A (Pocket)	100×4	PE(Pilament core)	
B (Pocket)	100×3	PP	
C (Pocket)	100×4	PP	
D (Heat bond)	100×3	PE	

주어진 기간내(약 7~8개월)에 소요압밀도(약 90%)를 얻도록 하였으며, 타입심도는 현장시험결과를 기초로 25.5m로 시공하였고, 시간-침하량 곡선은 성토고 5.0m에서 방치기간 (약 180일)을 두고 측정된 자료를 기초로 분석하였다. 연직드레인 자재는 코어형상, 필터제질, 사용빈도 등의 특성을 고려하고 각 자재에 대한 배수성능 등의 시험결과를 기초로 Table 2와 같이 A, B, C, D 형태의 4종을 선정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 드레인 간격별 침하량 분포특성

현장에 적용한 재하성토의 시공속도는 30cm/day를 포설하고 약 3일 정도의 방치기간을 두고 다시 시공하는 방법으로 안정관리분석과 병행하여 실시하였으며, 불안정으로 판단되었을 경우는 방치기간을 두어 시공속도를 5cm/day로 변경하여 약 70일 동안 5.0m까지 시공하였다.

약 70일 동안 단계성토에 따른 성토하중 증가와 180일의 방치기간동안에 침하량을 측정하기 위하여 성토체의 중앙에 매설된 지표면 침하판과 층별 침하계의 계측자료를 이용하였으며, 현장 및 실내 시험결과를 기초로 드레인 재질별, 타입간격별 설계침하량 및 실측침하량과 최종침하량 예측방법에 의하여 구한 압밀도를 비교 분석하였다.

가. 드레인 타입간격 1.0m에서의 압밀거동

Fig. 2는 수평압밀계수(C_h)는 연직압밀계수(C_v)와 같다고 가정하고, 교란영향과 배수저항을 고려한 타입간격 1.0×1.0m에서의(Case 1) 시간-침하량 분포를 나타낸 것이다.

시간에 따른 침하량 곡선은 성토가 진행됨에 따라 상당히 급격한 침하형태를 나타냈고, 성토 후 초기침하는 C형태의 드레인이 약간 더 큰 침하양상을 나타냈지만, 점차로 B형태의 드레인이 더 크고 A,C,D형태는 유사한 경향을 나타냈다. 실측침하량은 A:255cm, B:270cm, C:253cm, D:253cm이

고, 각 층별로 압밀도와 침하량을 구하여 계산한 설계침하량 256cm와 비교할 때 유사하게 나타났다.

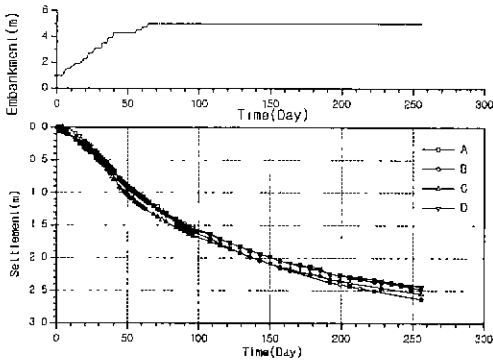


Fig. 2. Time-settlement curves with type of plastic board drains.(Case 1)

현재까지의 실측침하량과 설계침하량의 관계는 Fig. 3(a)와 같이 실측침하량은 설계침하량의 0.98~1.05의 범위로 나타났다. 연약지반의 설계시 침하량은 1차원 방법에 의하여 구하지만, 실제 현장 지반에서의 침하량은 2차원 압밀거동을 나타내고, 시료채취시 교란영향, 지반의 불균등성, 점토의 시간의존성, 점토층내부의 sand seam 등의 영향으로 설계침하량과 다르게 나타난다. 그러나 침하량이 큰 차이가 나타나지 않은 원인은 드레인 타입에 따른 교란영향과 배수저항을 고려하였기 때문에 거의 유사하게 나타난 것으로 판단된다.

교란에 의한 투수계수 감소비는 $\eta = k_h / k_s$ 로 나타내며 k_h 는 C_h 와 C_v 의 관계에 따라 다르게 나타난다. 교란영역에서의 투수계수(k_s)는 여러 연구자들^{4,7,14)}이 제시한 연구결과를 보면 상당히 큰 차이를 나타내지만, 일반적인 설계시에는 실내시험에서 구한 연직투수계수와 같은 값을 사용하고 있다. 그러나 본 연구에서는 Hansbo, Onoue 방법에 의하여 교란영역의 투수계수를 $k_s = k_v$, $k_s = 1/2k_v$, $k_s = 1/3k_v$ 의 3단계로 변화시켜 최종침하량 예측방법으로 구한 압밀도와 비교 분석한 결과, $k_s = 1/2k_v$ 로 해석한 결과에서 비교적 잘 일치하는

것으로 나타났다

수평압밀계수(C_h)와 연직압밀계수(C_v)는 $C_h = C_v$ 로 가정하고, 교란영향과 배수저항을 무시한 일반적인 설계법으로 각 층별로 압밀도와 침하량을 구하여 계산한 경우(Case 3)는 301cm로 실측침하량은 설계침하량의 0.84~0.90 범위로 약간 작게 나타났다.

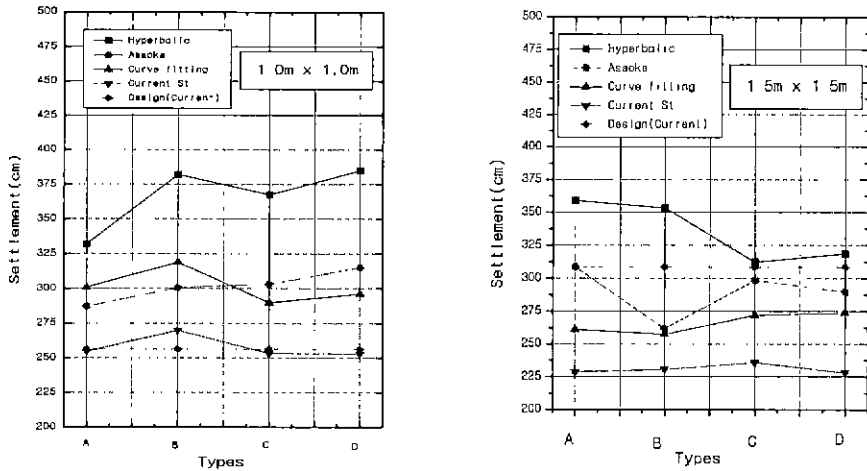
따라서 연약지반의 설계시 타입간격이 좁을 경우(1.0m)에는 교란가능성이 크기 때문에 시공기간 내의 소요압밀도를 분석하여 설계에 적용하여야 할 것으로 판단된다.

Madhav 등(1995)¹¹⁾은 Onoue의 이론을 바탕으로 교란지역, 교란의 전이지역, 비교란지역으로 구분하여 비교 분석 하였으며, 지반개량시 배수재의 직경증가에 따른 간격의 조밀성보다 랜드럴의 직경과 타입에 따른 교란영향을 고려하는 것이 더욱 효과적이라고 제안하였다.

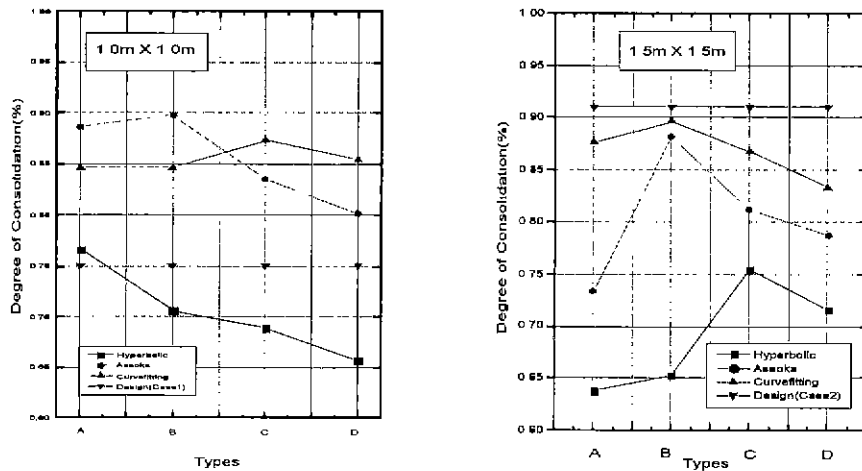
본 연구대상지역에서 분석한 최종침하량 예측방법에 의하여 구한 최종예상침하량은 Fig. 3(a)와 같이 287~385cm로 쌍곡선 방법은 382~385cm, Asaoka 방법은 287~315cm, Curve fitting 방법은 290~319cm로 쌍곡선 방법이 가장 크고, Asaoka 방법과 Curve fitting 방법은 유사하게 나타났다

최종예상침하량의 편차율을 보면 쌍곡선 방법이 Asaoka 방법보다 약 +22% 정도 크고, Asaoka 방법과 Curve fitting 방법은 $\pm 5\%$ 정도의 차이를 나타내서 분포경향으로 보면 쌍곡선 방법은 편차율이 크게 나타났다.

이와 같이 각 분석 방법별로 편차가 크게 나타나는 이유는 각 방법마다 가정된 조건들이 다르고, 초기부분의 침하량 곡선 자료의 변화량이 크기 때문에 회귀분석시 차이가 나타난 것으로 판단된다. 그러나 Asaoka 방법으로 구한 최종침하량 곡선은 점차로 Curve fitting 방법으로 구한 최종침하량 곡선에 근접하는 경향을 나타냈고, 점증하중을 고려하여 이론 침하량곡선을 실측 침하량에 fitting시킴으로서 현장토질정수를 구한 Curve fitting 방법은 실제 현장 조건을 잘 반영할 수 있다고 판단되어 역해석에 의한 현장압밀계수, 현장



(a) Settlement



(b) Degree of consolidation

Fig.3. Comparison of settlement and degree of consolidation with various analysis method

압축지수, 압밀비 등의 예측은 Curve fitting 방법으로 분석하였다.

드레인 자체별 압밀도 평가는 최종침하량 예측 방법에 따라 다르게 나타나므로 절대평가보다는 이론압밀도(U_t)에 대한 현장압밀도(U_m)의 비(압밀비= U_m/U_t)를 고려하여 평가하여야 한다.

Fig. 3(b)는 최종침하량 예측방법으로 구한 압밀도(U_m)의 변화를 나타낸 것으로 쌍곡선 방법

에서는 66~77%, Asaoka 방법에서는 80~90%, Curve fitting 방법에서는 85~87%으로 나타났다. 실내시험으로 구한 이론압밀도(U_t : 75%)와 비교하면 압밀비(U_m/U_t)는 쌍곡선 방법에서는 0.88~1.03, Asaoka 방법에서는 1.07~1.20, Curve fitting 방법에서는 1.13~1.17으로 쌍곡선 방법은 약간 과소평가되었고, Asaoka 방법과 Curve fitting 방법은 유사한 경향을 나타냈다.

나. 드레인 타입간격 1.5m에서의 압밀거동

Fig. 4는 연약지반의 수평압밀계수(C_h)는 연직압밀계수(C_v)를 $C_h=3C_v$ 로 가정하고, 교란영향과 배수저항을 무시하여(Case 2) 주어진 기간내에 소요압밀도를 얻도록 드레인의 타입간격을 $1.5 \times 1.5m$ (동적관입)로 시공하였을 경우의 시간-침하량 분포를 나타낸 것이다.

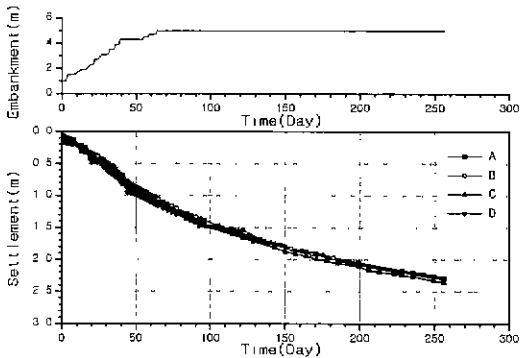


Fig. 4. Time-settlement curves with type of plastic board drains.(Case 2)

현재까지의 실측침하량은 A:229cm, B:231cm, C:236cm, D:228cm이고, 각 층별로 압밀도와 침하량을 구하여 계산한 설계침하량(309cm)과 비교할 때 상당히 작게 나타났다. 그리고 시간에 따른 침하량 곡선은 타입간격 1.0m에서와 유사한 분포경향을 나타냈다. 실측침하량과 설계침하량의 관계는 Fig. 3(a)와 같이 실측침하량은 설계침하량의 0.74~0.76 범위로 나타났다.

수평압밀계수(C_h)와 연직압밀계수(C_v)는 $C_h=C_v$ 로 가정하고, 교란영향과 배수저항을 무시한 일반적인 설계법으로 각 층별로 압밀도와 침하량을 구하여 계산한 경우의 설계침하량(Case 3)은 237cm으로 실측침하량과 비교할때 0.96~0.99 범위로 거의 일치하는 것으로 나타났다.

따라서 교란영향과 배수저항을 무시하고, 수평압밀계수를 연직압밀계수의 3배로($C_h=3C_v$)로 가정하고 설계한 경우는 과대설계가 된 것으로 판단된다 또한, Case 3의 설계침하량(237cm)과 현재까지의 실측침하량(228~236cm)을 비교하면 거의

유사하게 나타나서 타입간격 1.5m에서는 교란영향과 배수저항의 영향은 크지 않은 것으로 나타났다.

본 연구 대상지역에서 최종침하량 예측방법에 의하여 구한 최종예상 침하량은 Fig. 3(a)와 같이 257~385cm로 쌍곡선 방법은 312~359cm, Asaoka 방법은 262~311cm, Curve fitting 방법은 257~274cm로 쌍곡선 방법이 가장 크고, Asaoka 방법, Curve fitting 방법순으로 나타났다.

최종예상침하량의 편차율을 보면 쌍곡선 방법이 Asaoka 방법보다 약 17% 정도 크고, Asaoka 방법은 Curve fitting 방법보다 9% 정도 크게 나타났다. 이와 같은 원인은 분석방법에 따른 가정조건의 차이와 회귀분석시 오차 원인으로 판단되고, 타입간격 1.0m에서와 마찬가지로 쌍곡선 방법은 편차율이 크게 나타났다.

Fig. 3(b)는 최종침하량 예측방법으로 구한 압밀도(U_m)의 변화를 나타낸 것으로 쌍곡선 방법에서는 64~76%, Asaoka 방법에서는 74~88%, Curve fitting 방법에서는 83~90%으로 나타났다.

Case 2로 분석한 경우에 실내시험으로 구한 이론 압밀도(U_t :91%)와 비교한 압밀비(U_m/U_t)는 쌍곡선 방법에서는 0.70~0.83, Asaoka 방법에서는 0.81~0.97, Curve fitting 방법에서는 0.92~0.97으로 쌍곡선 방법은 약간 작게 나타났고, Asaoka 방법과 Curve fitting 방법은 유사한 경향을 나타냈다.

Case 3으로 분석한 경우에 실내시험으로 구한 이론 압밀도(U_t :70%)와 비교한 압밀비(U_m/U_t)는 쌍곡선 방법에서는 0.91~1.09, Asaoka 방법에서는 1.06~1.26, Curve fitting 방법에서는 1.19~1.29으로 쌍곡선 방법은 약간 작게 나타났고, Asaoka 방법과 Curve fitting 방법은 약간 큰 경향을 나타냈다.

2. 현장압축지수의 변화

연직배수재를 설치한 지반에서의 압밀거동에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 드레인 타입시 과도한 주변지반의 교란과 배수저항이라고 제시한 연

구결과가 발표되었지만,^{4,14,21)} 연직배수재의 설계는 적용되는 변수들에 따라서 압밀도의 차이를 나타내고 있으며, 이와같은 원인에 대한 영향범위가 각각의 제안자마다 다르고 정확하게 구명되지 않아 드레인 설계시 교란영역의 범위를 결정하는데 많은 문제점으로 남아 있다.

시료교란에 대한 연구결과¹⁶⁾를 보면 여러가지 교란된 시료에 대한 간극비-유효응력곡선($e-\log \sigma_v$)은 시료가 교란되면 압축지수는 감소하고 정규압밀점토는 시료의 교란정도에 따라 서로 다른 압축지수를 나타내지만 압밀압력 증가에 따라 간극비가 변화하다가 0.42 e_0 에서 만난다고 한다. Mesri 등(1974)¹²⁾은 압밀시험으로부터 얻어진 2차 압축지수(C_{α})와 압축지수(C_c)와의 비는 침하량을 분석하는데 매우 유용하게 이용할 수 있고, 시간에 따른 2차압축지수의 크기와 거동은 압밀압력에 따른 압축지수(C_c)와 밀접한 관련성을 가지고 있다고 하였다.

드레인 타입간격 1.0m에서 실측침하량에 의하여 역산한 현장압축지수는 Fig. 5(a)와 같이 쌍곡선 방법에서는 0.92~1.06, Asaoka 방법에서는 0.79~0.84, Curve fitting 방법에서는 0.76~0.88의 범위로 나타났다.

타입간격 1.5m에서 실측침하량에 의하여 역산한 현장압축지수는 쌍곡선 방법에서는 0.86~0.99, Asaoka 방법에서는 0.72~0.87, Curve fitting 방법에서는 0.71~0.76의 범위로 나타났다.

현장압축지수는 분석방법에 따라서 분포범위는 약간씩 차이가 있지만, 전체적으로 실내시험으로 구한 처녀압축지수 ($v_{cc,lab} = 0.73$)와의 관계는 쌍곡선 방법에서는 $C_{Field} = (1.2 \sim 1.5) v_{cc,lab}$ Asaoka 방법에서는 $C_{Field} = (1.0 \sim 1.2) v_{cc,lab}$ Curve fitting 방법에서는 $C_{Field} = (1.0 \sim 1.2) v_{cc,lab}$ 의 범위로 쌍곡선 방법에서는 약간 크게 나타났고, Asaoka와 Curve fitting 방법은 동일한 값을 나타냈다.

따라서 연약지반의 심도가 깊고, 침하량이 큰 지역에서 교란영향을 고려하여 설계시 적용하였던

압축지수는 현장계측로부터 역산한 압축지수보다 작게 나타났지만, 선행압밀하중에 대한 정확한 평가와 최종예상침하량 예측방법에 대한 오차량을 감안하면 거의 동일한 것으로 판단된다

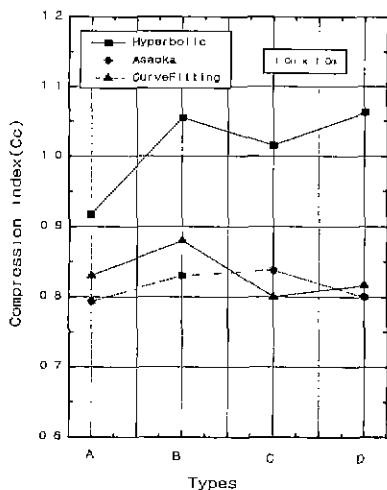
3. 현장압밀계수의 변화

불교란 점토의 입자는 판상으로서 입자배열 방향에 따라 투수성이 달라지는 비등방성 특성을 나타내는데 입자의 배열이 수평방향일 경우는 연직방향보다 투수성이 크므로 수평압밀계수가 연직압밀계수보다 크게 된다. 또한 실제 현장지반은 2차원 압밀조건에 가깝고, Sand seam 등의 영향으로 실제 현장압밀계수는 실내압밀계수보다 커지게 되므로 이론치보다 압밀시간이 짧아진다.

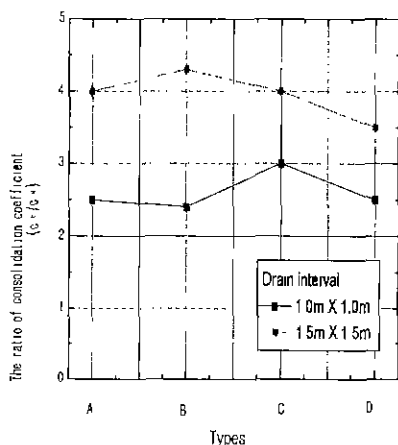
Terzaghi 압밀이론에 의한 압밀계수는 과잉간극수압의 소산으로부터 산정하나 실제 지반현장의 압밀특성이 상이하기 때문에 침하량 자료로부터 산정되는 압밀계수와 동일한 것으로 가정하여 산정한다. 그러나 압밀기간중 과잉간극수압의 소산속도는 침하속도와 일치하지 않기 때문에 상당한 차이가 나타나고 있다.

실내시험으로부터 연직압밀계수를 구하는 방법은 Terzaghi 압밀이론을 기초로 구한 Taylor의 Square-root 방법, Cassagrande의 $\log t$ 방법, Scott 방법, Su 방법 등이 있다.^{18,21)} 실내시험에서 수평압밀계수를 구하는 방법은 Barron 등(1948)³⁾ 여러 연구자들에^{7,9,17)} 의하여 제시되었는데 연직드레인은 압밀을 촉진시키는데 매우 효과적이거나, 드레인을 설치하였을 경우 압밀속도의 예측은 대표적인 수평압밀계수를 결정하기 어렵고, 드레인 타입시의 교란영향 때문에 신뢰성에 문제점이 있다고 하였다. 일반적인 압밀이론에서는 압밀계수는 일정하다고 가정하지만, 실내시험과 현장계측결과 점토의 압축성은 선행압밀응력을 기준으로 과압밀영역에서는 크고 정규압밀에서는 작게 나타난다. 또한 변형률속도와 재하시간에 영향을 받는 시간 의존적인 거동을 나타내기 때문에 압밀속도는 차이를 나타내게 된다. 수평압밀계수를 산정하기 위

한 방법은 최근에 적용성이 증가하고 있는 Rowe cell 압밀시험기, 현장용의 Piezocone 시험기,¹⁵⁾ 침하계측 및 간극수압자료분석에 의한 방법 등으로 구분할 수 있다.



(a) Compression index



(b) The ratio of consolidation coefficient

Fig. 5. Variation of compression index and the ratio of consolidation coefficient with various types.

Fig. 5(b)는 드레인 자재별 압밀계수비를 나타낸 것으로 타입간격 1.0m에서 실측침하량에 의하여 역산한 현장압밀계수는 쌍곡선 방법에서는 $2.9 \times 10^{-4} \sim 3.6 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{s}$, Asaoka 방법에서는 $3.5 \times$

$10^{-4} \sim 6.1 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{s}$, Curve fitting 방법에서는 $9.7 \times 10^{-4} \sim 1.2 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{s}$ 의 범위로 나타났다. 실내압밀계수(가중평균치: $4.10 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{s}$)와 현장압밀계수와의 비 (C_h/C_v)는 쌍곡선 방법에서는 0.7~0.9, Asaoka 방법에서는 0.9~1.5, Curve fitting 방법에서는 2.4~2.9의 범위로 나타났다.

타입간격 1.5m에서 실측침하량에 의하여 역산한 현장압밀계수는 쌍곡선방법에서는 $1.2 \times 10^{-3} \sim 1.6 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{s}$, Asaoka방법에서는 $1.5 \times 10^{-3} \sim 2.4 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{s}$, Curve fitting 방법에서는 $4.2 \times 10^{-3} \sim 5.1 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{s}$ 의 범위로 나타났다. 실내압밀계수와 현장압밀계수와의 비 (C_h/C_v)는 쌍곡선 방법에서는 1.0~1.3, Asaoka 방법에서는 1.2~2.0, Curve fitting 방법에서는 3.4~4.2으로 나타났다.

전체적으로 압밀계수비는 타입간격이 좁을 경우는 작고 타입간격이 넓을수록 크게 나타났다. 또한 압밀계수비는 분포범위가 매우 커서 판단기준을 정하는데 어려움이 있으나, 현장압밀계수는 실내압밀계수보다 크다는 일반적인 경향으로 판단하여 보면 최종침하량 예측방법중 쌍곡선 방법은 과대평가 되었기 때문에 작게 나타났고, 점증하중을 고려한 Curve fitting 방법은 거의 편차가 없는 것으로 나타났기 때문에 Curve fitting 방법을 기준으로 판단하여 보면 압밀계수비는 $C_h = (2.4 \sim 4.2) C_v$ 로 나타났다.

그러나 방치기간이 경과함에 따라서 현장압밀계수는 점차로 감소하는 경향을 나타내므로 압밀이 완료되었다고 판단될 경우에 최종침하량 예측방법에 의하여 재분석한후 정확한 압밀계수를 산정하는 것이 합리적이라고 판단된다.

Onoue 등(1988)¹⁴⁾은 불교란 점토의 방사형 압밀시험 결과 압밀계수비는 2.7~6.3의 범위이고, 투수계수비는 2.6~4.4의 범위로 나타난다고 하였다.

Almeida 등(1993)¹¹⁾은 여러 가지 형태의 연직드레인을 이용하여 현장실험을 수행하고 현장계측에 의한 침하량을 기초로 역해석하여 교란영향을 고려한 수평압밀계수를 계산하였다. 침하량으로부터 역산한 압밀계수 [$C_{h(s)}$]와 연직압밀계수와의 비는

$C_{h(s)}/C_{v(lab)}=5.0$ 이고, 실내시험으로부터 구한 수평 압밀계수와 $[C_{h(lab)}]$ 의 비는 $C_{h(s)}/C_{h(lab)}=2.5$ 로 나타나서 $C_{h(s)}$ 를 역산할 경우 2차 압밀이 영향을 미친다고 하였다.

지반의 침하량은 연직배수재의 직경 또는 간격 보다는 연약층의 두께에 더 큰 영향을 받고 침하 속도는 연직배수재의 간격 및 배수성능에 직접적으로 영향을 받게 된다. 연직배수재의 배수성능은 실내시험결과를 기초로 설계에 적용하지만 압밀이 진행되는 동안 드레인재의 변형 등으로 인하여 배수성능이 현저히 감소하기 때문에 연약층의 심도가 깊은 지반에서는 설계치와 현장계측치와는 상당한 차이가 발생되고 있다.

따라서 연직드레인의 배수성능의 평가는 침하의 절대량보다는 시간-침하량곡선에서 나타나는 침하 속도로 평가할 수 있으며 이를 정량적으로 표시하면 현장압밀계수로 나타낼 수 있다.

연직배수재의 성능평가 기준을 압밀계수비의 결과를 기초로 드레인 자재별로 판단하여 보면, 드레인 타입간격 1.0m에서는 C형태 드레인이, 타입간격 1.5m에서는 B형태 드레인이 약간 우수한 것으로 나타났으나, 동일한 타입간격에서는 재질간의 큰 차이가 발생되지 않아 모두 동일한 배수성능을 갖는 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구는 연약지반의 심도가 깊으면서 압밀침하량이 큰 지역에서 연직드레인 공법에 의하여 개량한 지반의 침하거동을 파악하고, 현장계측결과를 기초로 기존의 최종침하량 예측방법과 현장계측치로부터 역산한 압축지수와 압밀계수의 범위를 실내시험과 비교 분석 한 것으로 본 연구대상지역에서 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 최종침하량 예측방법에 의하여 구한 최종예상침하량은 쌍곡선 방법이 가장 크고, Asaoka 방법과 Curve fitting 방법은 유사하게 나타났으며, 타입간격이 좁을 경우에는 교란영향을 고려한 설계가 검토되어야 할 것으로 판단된다.

2. 실측침하량(S_m)과 설계침하량(S_t)의 관계 및 실측압밀도(U_m)와 설계압밀도(U_t)와의 관계는 드레인 타입간격 1.0m에서는 $S_m=(1.0\sim1.1)S_t$, $U_m=(1.13\sim1.17)U_t$ 로 나타났고, 타입간격 1.5m에서는 $S_m=(0.7\sim0.8)S_t$, $U_m=(0.92\sim0.99)U_t$ 의 범위로 나타났다.

3. 현장압축지수(CC_{Field})와 실내압축지수($v_{CC_{lab}}$)와의 관계는 $CC_{Field}=(1.0\sim1.2)v_{CC_{lab}}$ 로 나타났으나, 압축지수의 결정방법과 최종예상침하량의 적용방법에 따른 오차를 감안하면 거의 동일한 것으로 판단된다.

4. 현장계측치로부터 역산한 현장압밀계수는 실내시험에서 구한 연직압밀계수보다 크게 나타났고, 압밀계수비 (C_h/C_v)는 드레인 타입간격 1.0m에서는 $C_h=(2.4\sim2.9)C_v$, 드레인 타입간격 1.5m에서는 $C_h=(3.4\sim4.2)C_v$ 의 범위로 크게 나타났다.

참 고 문 헌

1. Almeida, M. S. S. and C. A. M. Ferreira, 1993, Field, in situ and laboratory consolidation parameters of a very soft clay, Predictive soil mechanics, Thomas Telford, London, pp. 73~93.
2. Asaoka, A., 1978, Observational procedure for settlement prediction, Soils and Foundations, 18(4), pp. 87~101.
3. Barron, R. A., 1947, Consolidation of fine-grained soils by drain wells, J. Soil. Mech. Found. Div., ASCE, 73(SM6), pp. 811~835.
4. Bergado, D. T., J. C. Chai, M. C. Alfaro and A. S. Balasubramaniam, 1992, Improvement techniques of soft ground in subsiding and lowland environment, GEOTECH 92, Vol.1, pp. 1~55.
5. Bergado, D. T., R. Manivannan and A.

- S. Balasubramaniam, 1996, Proposed criteria for discharge capacity of prefabricated vertical drains, *Geotextiles and Geomembranes*, 14, pp. 481~505.
6. Duncan, J. M., 1993, Limitations of conventional analysis of consolidation settlement, *J. Geol. Eng.*, 119(9), pp. 1333~1359.
7. Hansbo, S., 1960, Preconsolidation of soft compressible subsoil by the use of prefabricated vertical drains, *GEOTECH 92*, Applied ground improvement techniques, Vol. 2, pp. 1~11.
8. Housley, G.T. and A. N. Schofield, 1992, Predictive soil mechanics, Proceedings of the Wroth Memorial Symposium held at St Catherine's College, Oxford.
9. Johnson, S. J., 1970, Precompression for improving foundation soils. *J. Soil Mech. Found. Div.*, ASCE, 96, pp. 111~144.
10. Ladd, C. C., A. J. Whittle and D. E. Legaspi, 1994, Stress-deformation behavior of an embankment on Boston blue clay, *Geotechnical Special Publication 40(2)*, pp. 1730~1759.
11. Madhav, M. R., Y. M. Park and N. Miura, 1995, Mechanics of kinking and buckling of plastic board drains, *Structural engineering and mechanics*, 3(5), pp. 429~443.
12. Mesri, G. and A. Rokhsar, 1974, Theory of consolidation for clays, *J. of the Geotechnical Eng. Div.*, 100(8), pp. 889~904.
13. Onoue, A., 1992, Precompression and vertical drain designs, *GEOTECH 92*, Applied ground improvement techniques. Vol. 2, pp. 1~78.
14. Onoue, A., 1988, Consolidation by vertical drains taking well resistance and smear into consideration, *Soils and Foundations*, 2(4), pp. 165~174.
15. Robertson, P. K., R. G. Campanella and A. Wightman, 1983, SPT-CPT correlations. *J. of Geotechnical Division*. ASCE, 109(11), pp. 1449~1460.
16. Schmertman, J. H., 1955, The undisturbed consolidation behavior of clay, *Trans. ASCE*, 120, pp. 1201~1227.
17. Skempton, A. W. and L. Bjerrum, 1957, A contribution to the settlement analysis of foundations on clay, *Geotechnique*, Vol. 7, pp. 168~178.
18. Su, H. L., 1958, Procedure for rapid consolidation test, *J. Soil Mech. Found. Div.*, ASCE, 84(SM 3), pp. 1~13.
19. Tan, S. A and S. H. Chew, 1996, Comparison of the hyperbolic and Asaoka observational method monitoring consolidation with vertical drains, *Soils and Foundations*, 36(3), pp. 31~42.
20. Xie, K. H., B. H. Li and Q. L. Li, 1996, A nonlinear theory of consolidation under time-dependent loading, *Proceeding of second international conference on soft clay eng.*, Vol. 1, pp. 193~198.
21. Yoshikuni, H. and H. Nakanodo, 1974, Consolidation of soils by vertical drain wells with finite permeability, *Soils and Foundations*, 14(2), pp. 35~46.
22. 藤田圭一, 1995, 軟弱地盤對策工法總技術, 東和技術編輯部譯.
23. 土質工學會編, 1979, 盛土の調査設計から施工まで, 現場技術者のための土と基礎シリーズ.
24. 土質工學會編, 1992, 軟弱地盤の理論と實際, 土質基礎工學ライブラリ-37.