

압밀이론에 의한 침하량과 현장계측 침하량의 차에 의한 측방유동 침하량 산정

Estimation of Settlement Caused by Lateral Displacement by Means of the Differences of Settlements from Consolidation Theory and Field Measurement

강민수* · 전상옥** · 임성훈***,†

Kang, Min Soo* · Jeon, Sang Ok** · Eam, Sung Hoon***,†

ABSTRACT

In this study, it was developed that the software could be used to estimate consolidation settlement by curve fitting method according to Terzaghi's consolidation theory on the condition of gradual incremental loading, and the method of estimating settlement caused by lateral displacement was suggested, in which the settlement was calculated from the difference between the settlement calculated with the developed software using the early part of measured data and the settlement measured for the short duration from the beginning of embankment in the field. The verification of the suggested method of estimating settlement caused by lateral displacement showed good results.

Keywords: consolidation; lateral displacement; curve fitting; gradual incremental loading

1. 서 론

실내시험결과를 적용해서 산정한 연약지반의 1차압밀침하량은 이론적인 한계, 실내시험의 오류 등 다양한 원인에 의해서 시공과정에서 실제로 일어나는 침하량과는 차이를 나타내는 경우가 많이 있다. 따라서 시공과정 중에 계측한 침하량을 이용해서 1차압밀침하량을 다시 산출하고 설계 당시의 값과 비교 검증하는 방법이 많이 사용되고 있다.

연약지반에서 실측침하량에 의한 1차압밀침하량 예측 방법은 압밀이론을 기반으로 이론침하곡선과 실측침하곡선을 비교하여 입력변수를 최적화하는 Terzaghi의 이론식에 근거한 curve fitting 방법 (Terzaghi, 1943), Monden 방법 (Monden, 1963),

Tewatia 방법 (Tewatia, 1998)과 Mikasa의 압밀이론에 근거한 Asaoka 방법 (Asaoka, 1978; Asaoka and Matsuo, 1980) 등이 있고, 침하곡선의 기하학적인 형태로부터 추정하는 쌍곡선법 (Sridharan and Sreepada, 1981; Sridharan and Prakash, 1985; Sridharan et al., 1987)과 Tan의 방법 (Tan, 1993, 1994, 1995; Tan and Chew, 1996) 등이 있다. 이러한 방법들은 일시재하인 경우에 대해서 이론 혹은 침하곡선의 특성에 근거하여 제안된 방법이지만 실제의 시공은 대부분 단계 성토에 의해서 실시되므로 재하 종료 후 일정시간이 경과한 후에 적용이 가능하다. 점증재하인 경우에 대해서는 Terzaghi가 제안한 정률점증재하시의 $t/2$ 법에 의한 수정 방법이 있으나, 이 방법은 성토 종료 후의 자료로 침하곡선을 탐색하고 그 결과에서 성토구간의 침하량을 수정하는 방법이므로 성토 중의 계측값은 역해석에서 사실상 제외되고 정률점증이 아닌 경우에는 적용이 곤란하다 (Lee and Lim, 2000). 따라서 예측의 정확도를 높이기 위해서는 성토 종료 후의 장기간의 계측자료가 필요하게 되지만 성토가 성공적으로 종료되면 대부분 공사의 진행은 마무리단계에 해당되고 상당한 정도의 압밀이 진행된 이후이므로 예측된 침하량의 활용도가 높지 않다. 1차압밀침하량을 예측하여 적절하게 활용하기 위해서는 단계적인 점증재하기간

* 충청남도청 재난민방위과

** 한국농어촌공사 새만금개발처

*** 공주대학교 산업과학대학 지역건설공학전공

† Corresponding author. Tel.: +82-41-330-1264

Fax: +82-41-330-1269

E-mail address: geotechkor@kongju.ac.kr

2009년 8월 20일 투고

2009년 9월 9일 심사완료

2009년 9월 25일 게재확정

동안의 계측치를 이용할 수 있는 기법이 필요하다. Lim (1999)은 각 단계별 하중에 의한 침하가 독립적으로 발생하고 중첩되는 것으로 설정한 curve fitting 방법으로 역해석할 수 있는 프로그램을 개발하였다.

단계적인 성토재하기간에는 지반의 측방유동도 함께 발생하므로 측정된 지표침하량에는 측방유동에 의한 영향도 포함되어 있으므로, 이론적인 침하 역해석 방법을 성토 기간 중에 계측된 침하곡선에 직접 적용하면 결과가 왜곡될 수 있다. Hoshino는 측방유동에 의해서 발생하는 침하의 영향을 고려한 1차압밀침하량 역해석 방법을 제시하였다. 측방유동에 의한 침하의 영향은 재하 조건 및 지반의 상태에 따라서 다양한 크기로 나타날 수 있으므로 고정된 형태로 수식화를 하기 위해서는 보다 복잡한 형태가 되어야 할 것이다. Lim (1999)은 Hoshino 방법을 실측자료에 적용한 결과 1차압밀침하량 추정이 곤란하다고 하였다.

이 연구에서는 Terzaghi의 압밀이론에 의한 curve fitting 방법을 점증재하에 대해서 적용할 수 있도록 구현하고 지반의 측방유동이 적은 성토 초기 계측자료에 적용하여 전체 성토에 대한 1차압밀침하량을 산정하고 실측 침하량과의 차이로부터 측방유동에 의한 침하량을 산출하고자 한다.

II. 역해석에 의한 압밀침하 해석이론

1. Terzaghi의 압밀이론에 의한 curve fitting방법

Curve fitting에 적용하기 위한 Terzaghi 압밀이론의 기본식은 식 (1)과 같다 (Terzaghi, 1943).

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1)$$

여기서,
 t: 경과시간
 u: 공극수압
 C_v: 압밀계수
 z: 배수거리

Terzaghi는 식 (1)을 풀어서 평균압밀도 (U_{av})를 나타내는 식 (2)를 유도하였다.

$$U_{av} = \frac{\left(\frac{1}{H_t}\right) \int_0^{H_t} u_i dz - \left(\frac{1}{H_t}\right) \int_0^{H_t} u dz}{\left(\frac{1}{H_t}\right) \int_0^{H_t} u_i dz} \quad (2)$$

여기서,
 H_t: 압밀토층의 두께
 u_i: 초기과잉공극수압

또한 식 (2)와 식 (1)에 침하에 대한 초기 조건을 대입하고 정리하여 시간의 경과에 따른 평균압밀도 (U_{av})를 나타내는 식 (3)을 제시하였다.

$$U_{av} = 1 - \sum_0^{\infty} (2/M^2) \text{Exp}(-M^2 C_v t / H^2) \quad (3)$$

여기서,
 M = (2m + 1)π/2, m은 정수(0,1,2,3,4...)
 H: 최대배수거리

식 (3)은 시간에 따른 과잉공극수압의 소산에 관한 식이다. 이 식에서 침하량에 관한 변수는 포함되어 있지 않다. 엄밀한 의미에서 이러한 관계로부터 모순이 나타나고 침하량과 공극수압의 소산에 대한 계측자료가 서로 일치하지 않는 경우들이 발생한다. 식 (3)이 공극수압에 관한 항으로 유도되었음에도 역설적으로 공극수압보다는 침하계측자료와 잘 일치하는 경향이 있다.

Terzaghi는 공극수압과는 무관하게 하중에 대한 공극비의 변화율에 의해서 1차압밀침하량 (S_f)을 산정하는 식 (4)를 제시했다.

$$S_f = \frac{C_c}{1+e_0} H_t \log \frac{P_0 + \Delta P}{P_0} \quad (4)$$

여기서,
 C_c: 압축지수
 e₀: 초기 공극비
 P₀: 유효상재하중
 ΔP: 압밀재하하중

따라서 시간에 따른 평균 압밀침하량 (S_t)은 식 (3)과 식 (4)를 결합하여 식 (5)와 같이 된다.

$$S_t = S_f \times U_{av} \quad (5)$$

Olson(1977)은 하중이 일시에 재하되지 않고 일정하게 점진적으로 재하되는 경우에 경과시간에 따른 평균압밀도 (U_{av})를

산정하는 방법을 제시하였다. 그러나 이 방법을 적용하기 위해서는 시간에 따른 재하증가율이 직선형으로 일정한 정률점증재하인 경우에만 가능하다. 현장에서의 재하는 성토하중에 대한 안정관리에 의해서 증가율이 일정하지 않은 경우들이 많이 있으므로 적용이 곤란하다.

2. Curve fitting 역해석 프로그램의 개선

Lim (1999)은 각 재하 단계별 압밀침하가 Terzaghi의 압밀이론에 따라서 발생하고 중첩될 수 있는 것으로 설정하여 점증재하 압밀에 대한 역해석 프로그램을 개발하였다. 이 연구에서 사용한 방법의 기본적인 개념은 Lim (1999)의 방법에 기초하고 있으나 다음과 같이 개선되었다.

해석의 기본 골격은 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 각 단계하중에 의한 압밀이 독립적으로 진행되는 것으로 설정하고 전체 압밀은 각각의 압밀의 선형 중첩이 가능한 것으로 고려하였다. 이러한 조건이 정당화되기 위해서는 일시재하로 해석한 경우와 점증재하의 선형중첩으로 해석한 경우의 1차압밀침하량이 서로 일치하여야 한다.

일시재하에 대한 식 (4)를 점증재하의 선형중첩에 적용하면 다음과 같이 된다.

식 (6) 및 식 (7)의 조건을 적용한다.

$$S_{f1} + S_{f2} + \dots + S_{fn} = S_f \tag{6}$$

$$\Delta P_1 + \Delta P_2 + \dots + \Delta P_n = \Delta P \tag{7}$$

여기서

n : 재하단계

재하 1단계 만에 의한 1차압밀침하량은 식 (8)과 같다.

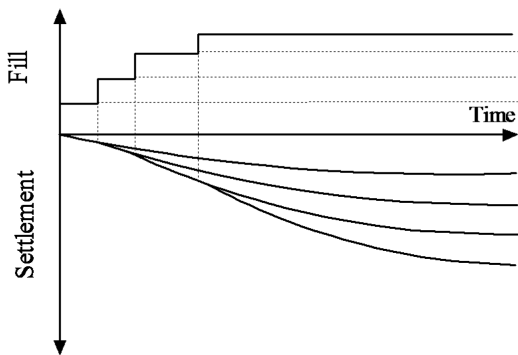


Fig. 1 Schematic diagram of simulation to gradual step loading consolidation

$$S_{f1} = \frac{C_c}{1+e_0} H \log \frac{P_0 + \Delta P_1}{P_0} \tag{8}$$

$$= \frac{C_c}{1+e_0} H \{ \log(P_0 + \Delta P_1) - \log P_0 \}$$

재하 2단계 만에 의한 1차압밀침하량은 식 (9)와 같다.

$$S_{f2} = \frac{C_c}{1+e_0} H \log \frac{P_0 + \Delta P_1 + \Delta P_2}{P_0 + \Delta P_1} \tag{9}$$

$$= \frac{C_c}{1+e_0} H \{ \log(P_0 + \Delta P_1 + \Delta P_2) - \log(P_0 + \Delta P_1) \}$$

재하 3단계 만에 의한 1차압밀침하량은 식 (10)과 같다.

$$S_{f3} = \frac{C_c}{1+e_0} H \log \frac{P_0 + \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3}{P_0 + \Delta P_1 + \Delta P_2} \tag{10}$$

$$= \frac{C_c}{1+e_0} H \{ \log(P_0 + \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3) - \log(P_0 + \Delta P_1 + \Delta P_2) \}$$

이상과 같은 방법으로 재하 n 단계 만에 의한 1차압밀침하량은 식 (11)과 같이 된다.

$$S_{fn} = \frac{C_c}{1+e_0} \times \log \frac{P_0 + \Delta P_1 + \dots + \Delta P_{n-1} + \Delta P_n}{P_0 + \Delta P_1 + \dots + \Delta P_{n-1}} \tag{11}$$

$$= \frac{C_c}{1+e_0} H \{ \log(P_0 + \Delta P_1 + \Delta P_2 + \dots + \Delta P_{n-1} + \Delta P_n) - \log(P_0 + \Delta P_1 + \Delta P_2 + \dots + \Delta P_{n-1}) \}$$

식 (8), 식 (9), 식 (10) 및 식 (11)을 합하고 식 (6) 및 식 (7)을 대입하면 우변의 대수항들이 서로 소거되어 식 (12)와 같이 일시재하의 경우와 같은 식이 된다.

$$S_{f1} + S_{f2} + \dots + S_{fn} \tag{12}$$

$$= \frac{C_c}{1+e_0} H \{ -\log P_0 + \log(P_0 + \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \dots + \Delta P_{n-1} + \Delta P_n) \}$$

$$S_f = \frac{C_c}{1+e_0} H \log \frac{P_0 + \Delta P}{P_0}$$

$$S_f = \frac{C_c}{1+e_0} H \log \frac{P_0 + \Delta P}{P_0} \quad (4)$$

위 식의 전개과정에서 일시재하와 점증재하의 경우 두 식을 일치시킬 수는 있으나 log항에서 고려된 것과 같이 1단계 압밀이 종료되어 유효상재하중이 1단계의 ΔP_1 만큼 증가되는 것으로 고려한다면 초기공극비를 모두 같은 값을 사용한 것은 실제의 현상에 대해서 모순된다. 그러나 Terzaghi의 압밀이론이 압밀 진행 중의 토층의 변화 또는 공극의 변화를 무시하는

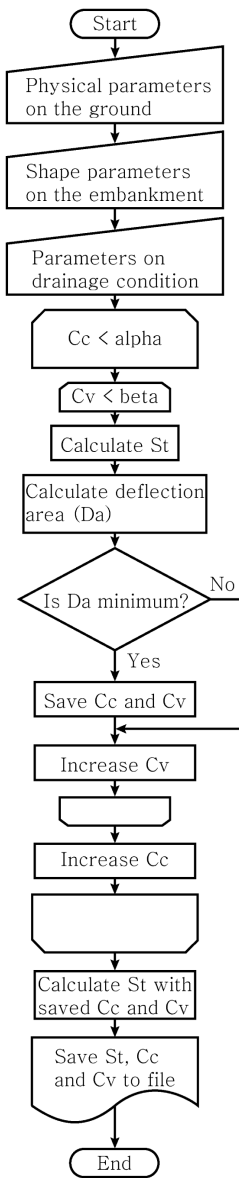
미소변형압밀이론이므로 적용이론에는 부합된다.

압밀도에 관한 식 (3)은 단계형 점증재하에 대해서 다음과 같이 분리될 수 있다.

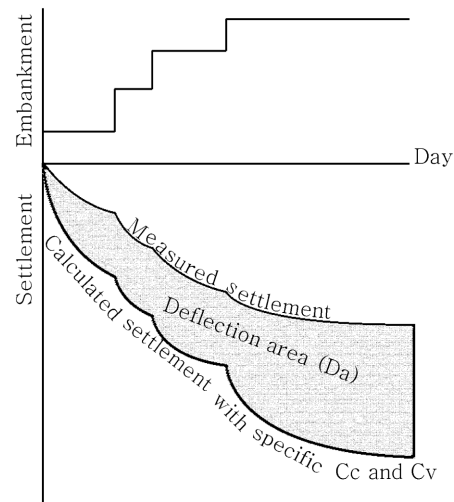
각 단계별 재하 시작 시간을 $t_0, t_1, t_2, \dots, t_{n-1}$ 이라면 임의의 시간 t 에서 각 단계별 평균압밀도는 다음과 같이 된다.

재하 1단계만의 평균압밀도는 식 (13)과 같이 된다.

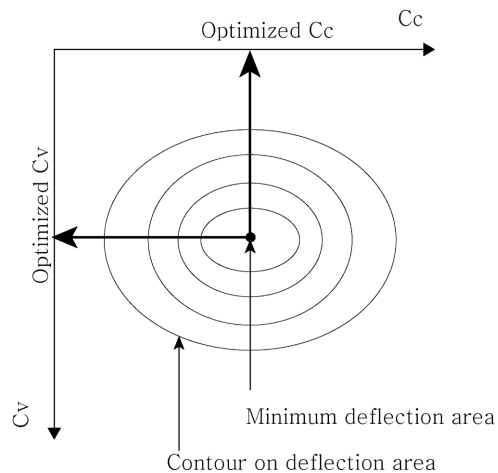
$$U_{av1} = 1 - \sum_0^{\infty} (2/M^2) \times \text{Exp}(-M^2 C_v (t-t_0)/H^2) \quad (13)$$



(a) Simplified flowchart of curve fitting program



(b) Definition of deflection area (Da)



(c) Response characteristic of deflection area to Cc and Cv

Fig. 2 Structure of curve fitting program

재하 2단계만의 평균압밀도는 식 (14)와 같이 된다.

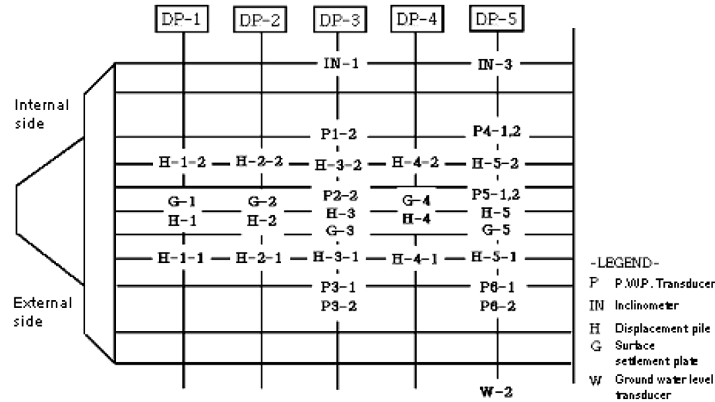
$$U_{av2} = 1 - \sum_0^{\infty} (2/M^2) \times \text{Exp}(-M^2 C_v(t-t_1)/H^2) \quad (14)$$

$$U_{av2} = 1 - \sum_0^{\infty} (2/M^2) \times \text{Exp}(-M^2 C_v(t-t_2)/H^2) \quad (15)$$

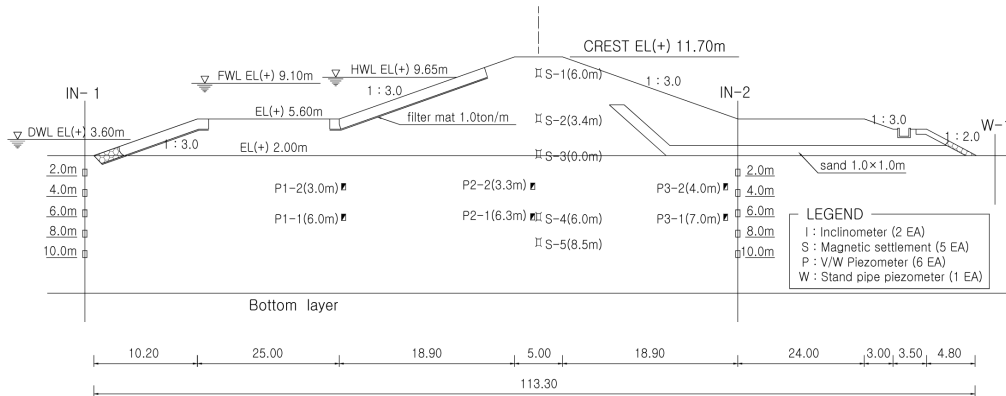
재하 n단계만의 평균압밀도는 식 (16)과 같이 된다.

$$U_{avn} = 1 - \sum_0^{\infty} (2/M^2) \times \text{Exp}(-M^2 C_v(t-t_{n-1})/H^2) \quad (16)$$

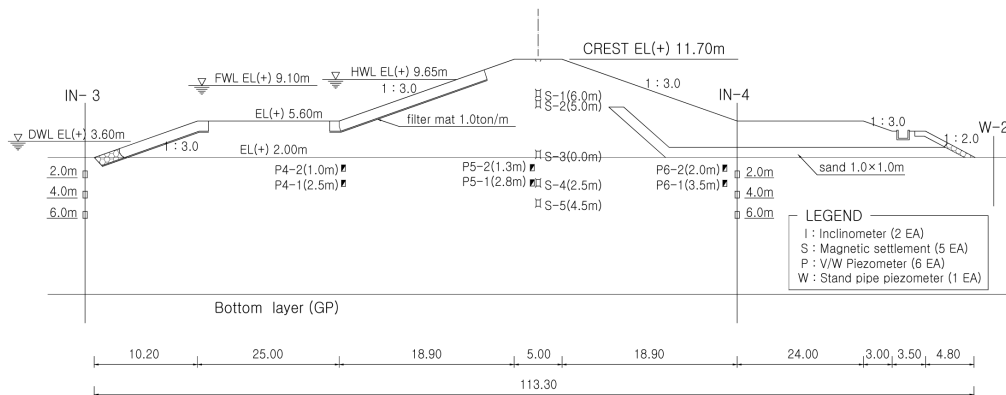
재하 3단계만의 평균압밀도는 식 (15)와 같이 된다.



(a) Horizontal positions of monitoring instruments



(b) Vertical positions of monitoring instruments in DP-3 of section



(c) Vertical positions of monitoring instruments in DP-5 of section

Fig. 3 Arrangement of monitoring instruments

위 식에서 재하 단계가 늦으면 압밀경과시간은 그만큼 감소한다. 따라서 각 단계별 임의의 시간에서의 침하량 $S_{t1}, S_{t2}, S_{t3}, \dots, S_{tn}$ 은 각각 식 (17)과 같이 된다.

$$S_{ti} = U_{avi} \cdot S_{fi} \quad (17)$$

여기서

$i : i = 1, 2, \dots, n$

$n : \text{전체 재하단계}$

임의의 시간에서의 전체 침하량 S_t 는 식 (17)을 t 시간 동안 실시된 성토 n 단계까지 합하는 식 (18)이 된다.

$$S_t = \sum_{i=1}^n S_{ti} \quad (18)$$

따라서 식 (18)은 근사화 과정을 거치지 않고 Fig. 1을 완전하게 표현하고 있다.

이상과 같은 절차에 의해서 시간에 따른 침하량이 중첩이 되도록 프로그램을 수정하였다. Fig. 2에는 단순화한 프로그램의 흐름도와 최적의 압축지수 (C_c) 및 압밀계수 (C_v)를 찾기 위해 구현한 최적화 개념을 나타내고 있다. 흐름도의 각 처리절차는 상당히 많은 양의 하부처리절차들을 묶어서 단순화한 표현이다.

III. 분석대상 지반의 현황

1. 계측현황

이 연구에서 해석한 현장은 농촌용수개발사업의 일환으로 충남 태안 지역의 연약지반상에 축조한 저수지 시공현장이다. 안정 및 침하관리를 위한 현장계측에는 경사계, 지하수위계, 층별 침하계, 공극수압계, 지표면 침하판 등을 설치하였다. 전체 제체 중단영역을 Fig. 3(a)와 같이 5개의 구역 (DP-1~DP-5)

으로 구분하고, 설계시에 실시한 지반조사 결과에서 연약지반 토층이 깊고 원지반의 지표가 낮아서 가장 높게 성토되는 제체의 중단 중앙부를 주계측단면으로 선정하였다 (DP-3). 암반층까지 굴착하고 콘크리트를 타설하여 시공하는 여수도와 인접한 지역은 부등침하 및 콘크리트와 제체의 접촉부에서 균열이 발생할 것으로 예상되어 안정관리를 주목적으로 부계측단면으로 설정하여 계측기를 설치하였다 (DP-5). DP-1, DP-2 및 DP-4 단면에는 원지반 표면에 지표면 침하판 만을 설치하여 침하량을 계측하였으나 DP-2에서는 침하봉이 중간에 유실되어 계측이 중단되었다. 제체의 형상 및 주계측단면과 부계측단면에서 계측기 측정의 위치 및 수량은 각각 Fig. 3(b) 및 Fig. 3(c)와 같다.

2. 지반의 물리 역학적 성질

현장지반조사 결과 지반은 입경이 작은 CL, MH, CH 등의 세립토로 구성되어 있다. 자연함수비와 액성한계는 각각 41% ~ 53%와 33% ~ 65%의 범위에 있다. 연약지반의 토층특성은 GL-1 m ~ GL-4 m에서 콘관입저항치 $q_c = 200$ kPa 이하로 매우 연약한 지층으로 형성되어 있으며, 이 토층 아래(GL-4 m)에서는 콘관입저항치 q_c 가 200 kPa ~ 1000 kPa 정도의 연약한 해상점토층이 두께 약 2 m ~ 10 m로 퇴적되어 있다. 주계측단면 (DP-3)은 연약층의 깊이가 약 10 m 정도이고 하부지반은 모래지반으로 이루어져 있다. 부계측단면 (DP-5)은 연약층의 심도가 약 4.5 m 정도이고 하부지반은 풍화된 암석층으로 추정된다. Table 1은 현장지반에 대한 실내토질시험결과를 나타낸 것이다.

3. 지중응력분포에 대한 고려

Terzaghi의 압밀이론은 지중응력분포를 무시한 일차원적인 압밀이론이다. 그러나 지반심도에 따라서 지중응력분포를 무시할 수 없는 경우에는 지반을 탄성체로 고려하여 지중응력분포에 대한 엄밀해를 구해야 하지만 그 계산이 복잡하므로 근사

Table 1 Mechanical properties of the ground

Point	Thickness of soft layer (m)	γ_t (kN/m ³)	Compression index (C_c)	Initial void ratio e_0	Preconsolidation pressure P_c (kPa)	Overburden pressure P_0 (kPa)	Coefficient of consolidation C_v (cm ² /s)	Cohesion (kPa)		remarks
								UU	Piezocone	
DP-1	6.62	17.023	0.41	1.250	-	239.02	1.034×10^{-3}	30.38	25.48	Unit weight of embankment = 19.110(kN/m ³)
DP-2	9.50	17.072	0.42	1.205	99.96		1.841×10^{-4}	40.18	25.48	
DP-3	9.97	16.670	0.45	1.367	98.98	342.41	3.020×10^{-4}	18.62	21.56	
DP-4	8.82	17.326	0.37	1.180	78.40	331.93	9.611×10^{-4}	32.34	15.68	
DP-5	5.05	17.023	0.41	1.250	-	182.38	1.034×10^{-3}	30.38	15.68	

적인 방법과 비교하여 큰 차이가 없다면 간편한 방법을 사용할 수 있다. 지중응력분포에 관한 가장 많이 쓰이는 간이법은 2:1 분포법이다. 이 개념은 물론 Boussinesq의 탄성이론을 근사화한 것이지만 비교적 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있고 계산이 매우 간편하다는 장점이 있다.

특정 심도에서 지중응력이 성토고의 증가에 대해서 선형 비례적으로 증가한다면 지중응력분포를 고려하지 않아도 curve fitting 최적화 과정에서 대응하는 변수값들의 조정으로 그 영향이 상쇄될 수 있다. 그러나 지중응력이 비선형적으로 변화한다면 주어진 단계성토조건에서 압밀침하곡선의 형태가 변하게 되므로 1차압밀침하량도 다르게 된다. 따라서 주어진 조건에 대한 지중응력의 변화를 검토한 후에 역해석에 포함할 것인지 결정하여야 한다.

제체는 성토고 3.6 m, 저폭 114.4 m로 압성토된 후에 본 제체가 시공되었다. 현장에서 시공된 압성토와 성토사면기울기에서 성토고가 10.8 m까지 증가하는 동안 심도 5 m 지점에서의 지중응력 분포를 2:1 분포법으로 계산한 결과 성토고의 증가에 따라서 심도도 증가하고 재하폭은 감소하기 때문에 지중응력은 비선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 역해석을 할 때 지중응력 분포를 고려하였다.

지반심도에 따른 지중응력 분포도 Boussinesq의 이론에 의하면 비선형적으로 분포한다. 이러한 경우에는 지반의 토질정수가 동일한 경우에도 토층을 여러 층으로 분리하여 ΔP 를 다르게 적용하여야 한다. 지중응력분포를 산정한 결과에 의하면 성토고에 비해서 지반심도가 얇기 때문에 근사적으로 직선형으로 고려하여도 될 것으로 판단되었다.

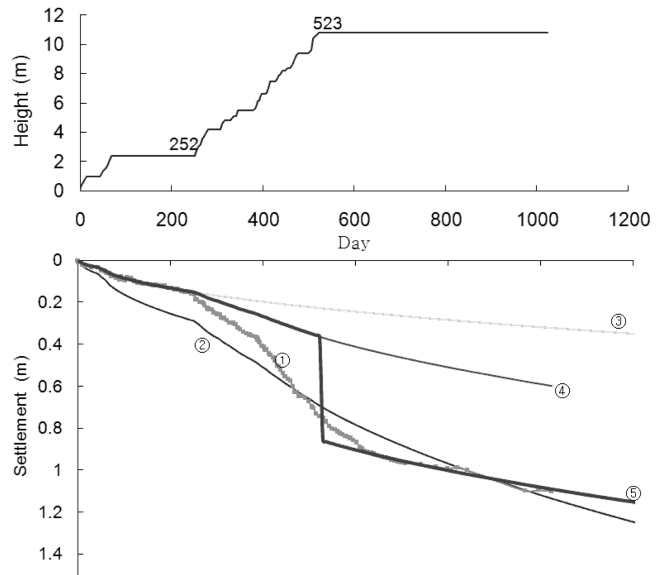
요약하면 ΔP_i 의 적용심도는 지반심도의 1/2 지점을 기준으로 하고 성토고의 증가에 따른 각각의 ΔP_i 값은 2:1 분포법에 의해서 산출하였다.

IV. 결과 및 고찰

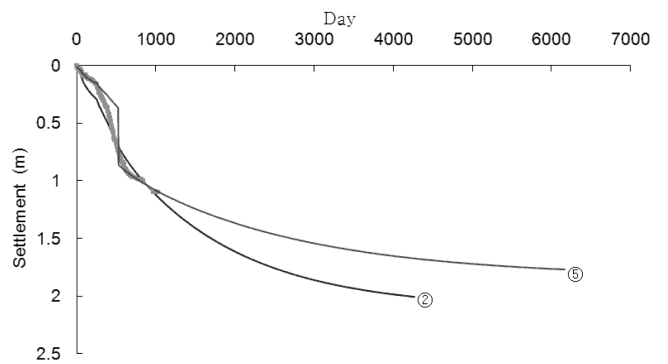
1. Curve fitting 역해석 프로그램에 의한 침하량 추정

Fig. 4는 수정된 프로그램을 사용하여 단면 DP-1에서 DP-5까지 계측된 지표면 침하량으로부터 지반의 압축지수 (C_v), 압밀계수 (C_i) 등을 최적화 기법에 의해서 구하고 1차압밀침하량을 산출하는 과정을 나타낸 것이다.

해석에 필요한 지반의 습윤밀도, 초기공극비 등은 연약지층의 두께가 비교적 큰 DP-3과 DP-4는 실험 자료를 사용하였으나 DP-1과 DP-5는 실험을 하지 않았기 때문에 DP-2, DP-3 및 DP-4의 평균값을 사용하였다. 지하수위는 지표면에 존재하며 지반은 완전히 포화된 것으로 설정하였다. 해석에 사



(a) Curves of settlement estimated by various curve fitting methods



(b) Curves of settlement estimated by two curve fitting methods until 95 % degree of consolidation

Fig. 4 Curve fitting analysis result at DP-3

용된 지반 물성치는 Table 1과 같다. 성토는 2.4 m까지 1차 성토 후 성토개시일로부터 252 일까지 방치한 후에 여성토를 포함한 최종 성토고 10.8 m까지 시공되었다. 배수조건은 양면 배수와 일면배수조건을 모두 해석하였으나 4단면 모두 1면 배수조건으로 해석하여 얻은 압축지수 (C_v)가 실내시험결과에 비해서 지나치게 큰 값을 나타내었고 DP-3 단면에 대한 piezocone 시험에서도 하부지반에 비피압 모래층이 존재하는 것으로 조사 되었으므로 모든 단면에 대해서 양면배수조건을 기준으로 하였다.

이 현장은 제체 누수의 우려로 인해서 연직배수재를 설치하지 않고 활동과괴에 대한 대책으로 압성토 공법이 시공되었다. 연약층의 최대심도가 약 10 m 정도로 중규모 연약층 두께에 대해서 배수축진공법을 사용하지 않고 순수한 압성토 만으로

시공이 이루어졌으므로 측방유동의 영향이 있을 것으로 판단되었다. Table 1의 습윤밀도와 점착력을 사용하여 얻은 한계성토고는 DP-1, DP-4 및 DP-5에서 약 9 m 정도로 나타났고, DP-3에서 5 m로 나타났다. 전체 계측자료를 입력하여 curve fitting 방법으로 역해석한 결과 실측침하곡선과 역해석된 이론곡선은 특히 성토 기간 동안 상당한 차이를 나타내고 있다. 이러한 차이는 성토에 따른 측방유동에 의한 침하로 판단되었다. 성토진행단계는 압성토의 일부인 2.4 m까지 성토 후 1차 방치기간이 있으므로 성토고 2.4 m단계의 방치 종료 시점까지의 자료를 사용하면 측방유동의 영향이 적을 것으로 판단되었다. 2.4 m 방치 종료 시점까지의 자료로 역해석된 압축지수와 압밀계수를 2단계 성토에 의한 침하량 산정에 적용한 결과 실측침하량과 상당한 차이를 나타내었다. 실측침하량이 매우 빠르게 나타나서 이론적인 침하량은 최적화 과정을 거쳐도 침하속도를 실측침하자료에 접근시키는 것이 곤란하였다. 이 결과로부터 실측된 침하량에는 이론적인 침하량만으로는 설명할 수 없는 침하가 포함되어 있다는 것을 유추할 수 있다. 그러나 성토 종료 후에는 실측침하곡선과 역해석 침하곡선이 유사한 형태를 나타내었다. 이러한 결과는 2단계 성토 진행 중에는 압밀에 의한 침하뿐만 아니라 측방유동에 의한 침하도 함께 발생하였기 때문으로 판단되었다. 따라서 2차 성토 기간 중의 침하량은 무시하고 2차 성토 종료 시점에서 특정한 값을 해석된 침하량에 합하여 성토 종료 후의 실측 침하곡선에 curve fitting 한 결과 성토 종료 후의 두 곡선이 잘 일치하는 것으로 나타났다. 그러므로 성토 종료 시점에서 추가한 특정한 침하량이 2차 성토기간 중에 발생한 측방유동에 의한 침하량으로 판단되었다. 이상과 같은 과정을 DP-3에 적용하여 해석한 결과를 Fig. 4(a)에 나타내었다. 그림에 나타난 곡선들의 해석 방법을 정리하면 다음과 같다.

곡선①은 실측 침하곡선이다.

곡선②는 1,024 일까지 실측된 전체침하량과 성토고 및 Table 1의 토질정수를 사용한 역해석 결과이다.

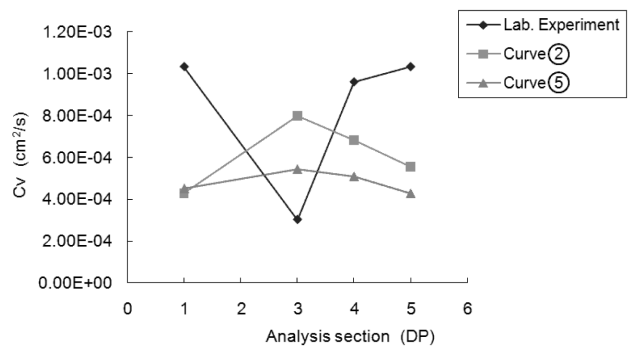
곡선③은 252 일까지의 실측침하량과 성토고 및 Table 1의

토질정수를 사용한 역해석 결과이다.

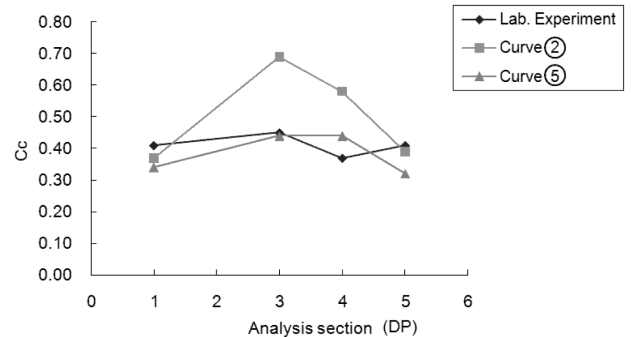
곡선④는 역해석한 곡선③으로부터 얻은 압축지수 (C_c) 및 압밀계수 (C_v)와 1,024 일까지의 성토고를 적용하여 계산한 침하곡선이다. 2단계 성토 기간 동안 실측침하곡선과 상당한 차이가 있지만 2단계 성토 종료 후에는 곡선의 형태가 실측침하곡선과 비슷한 형태이다.

곡선⑤는 곡선④에서 2단계 성토종료일에 측방유동에 의한 침하량을 추가한 것이다. 측방유동에 의한 침하량은 곡선의 후반부가 잘 일치하도록 시행착오법으로 산정하였다.

이와 같은 방법으로 DP-1, DP-3, DP-4 및 DP-5단면의



(a) Comparison of the coefficient of consolidation



(b) Comparison of the compression index

Fig. 5 Comparison of parameters from laboratory test and curve fitting analysis

Table 2 Primary consolidation settlements and the degrees of consolidation resulted from the each curve fitting analysis

	Section							
	DP-1		DP-3		DP-4		DP-5	
Number of curve	Sf (m)	Degree of consolidation (%)	Sf (m)	Degree of consolidation (%)	Sf (m)	Degree of consolidation (%)	Sf (m)	Degree of consolidation (%)
Lab. experiment	1.115	51.1	1.520	72.4	1.217	78.1	0.960	70.9
②	0.947	60.2	2.110	52.1	1.741	54.6	0.857	80.1
⑤	0.910	62.6	1.836	59.9	1.629	58.4	0.883	77.4

Sf : Primary consolidation settlement

계측자료에 대해서 역해석을 실시하였다. 해석 결과들 중에서 연약지반 심도가 가장 깊은 DP-3 단면에 대해서 해석된 침하 곡선들 만을 대표적으로 Fig. 4에 나타내고 나머지 결과들은 Fig. 5 및 Table 2에 압축지수, 압밀계수 및 1차압밀침하량 등을 각각 나타내었다.

Fig. 4(b)는 곡선② 및 곡선⑤가 압밀도 95 %에 도달할 때까지의 장기 침하곡선을 나타낸 것이다. 측방유동을 고려하지 않은 침하곡선②는 측방유동을 고려한 경우에 비해서 침하량도 크고 압밀도 빨리 진행되는 것으로 나타났다.

DP-4단면에 대한 해석결과에서 전체 침하자료를 입력하여 역해석한 곡선②는 많은 편차를 나타내었고 1단계 역해석 침하량에 시행착오법으로 산정한 측방유동에 의한 침하량을 더한 곡선⑤는 1단계 성토구간과 2단계 성토 종료 후에 잘 일치하였으며 2단계 성토 종료 후에 역해석 결과와 실측자료가 일치하는 시점도 DP-3에서 보다는 더 빠른 것으로 나타났다. 이러한 결과는 연약지반의 깊이가 DP-3보다는 작기 때문에 측방유동이 조기에 종료된 것으로 판단된다. 곡선②와 곡선⑤를 압밀도 95 %가 될 때까지 비교하면 DP-3과 유사한 경향을 나타내어 침하량은 크고 침하속도는 빠른 것으로 나타났다.

DP-5단면에 대해서 전체 자료를 입력하여 역해석한 곡선②는 다른 단면에서와 마찬가지로 실측침하곡선과 큰 차이를 나타내었다. 또한 1단계 성토시의 침하자료 만을 적용하여 역해석한 곡선⑤는 곡선②보다는 잘 일치하였지만 다른 단면에서의 결과를 고려할 때 비교적 큰 차이를 나타내었다. 이 단면은 암반까지 터파기를 하여 시공하는 여수토 시공 위치와 인접하여 있어 정상적인 압밀침하를 교란시키는 원인이 있었던 것으로 판단된다.

Fig. 5에서는 실내시험결과와 곡선② 및 곡선⑤ 방법으로 역해석하여 얻은 각 단면별 압축지수 (C_c)와 압밀계수 (C_v)를 각각 비교하였다. 압축지수 (C_c)는 DP-1 및 DP-5 단면에서는 모두 비슷하게 나타났고, DP-3 및 DP-4 단면에서는 곡선②의 압축지수가 크게 나타났다. 이는 측방유동에 의한 침하가 압밀침하로 간주되어 압축지수가 과다하게 해석된 것으로 판단된다. 압밀계수는 각 해석 방법과 실내시험 모두 불규칙적인 관계로 나타났고 편차는 약 40 배 정도의 범위 내에 있는 것으로 나타났다. 모두 인접한 지반이므로 압밀계수도 모든 단면에서 비슷한 값을 나타낼 것으로 판단되었다. 지반의 측방유동을 고려한 곡선⑤에서는 압밀계수값이 모두 비슷하게 나타났으나 곡선②에서는 연약층 깊이에 비례해서 다른 값을 나타내고 있고 실내시험에서는 불규칙적인 경향을 나타내어서 곡선⑤ 방법이 가장 신뢰할 만한 방법임을 간접적으로 판단할 수 있다.

Table 2는 이상의 해석결과들을 1차압밀침하량과 압밀도에

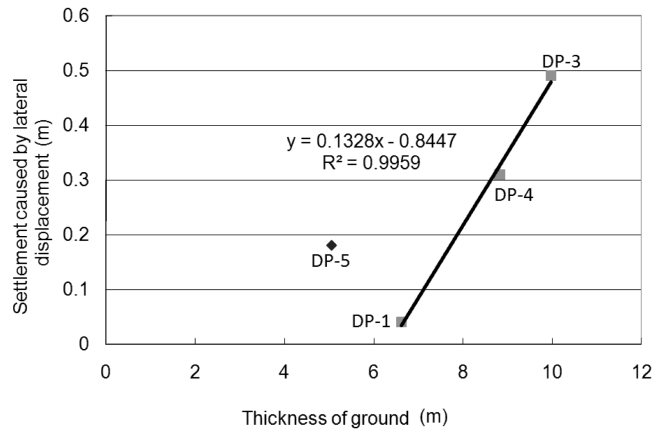


Fig. 6 Relationship between the thickness of soft ground and the settlement caused by lateral displacement

관해서 정리한 것이다. 1차압밀침하량은 0.883 m~1.836 m의 범위에 있고, 압밀도는 58 %~77 %, 압밀도 95 %에 소요되는 기간은 5.8 년~ 16.9년의 범위에 있다. 측방유동에 의한 침하를 구분하여 해석한 결과에서 모두 최종 침하량이 작게 나타났으므로 측정 종료시점 현재의 압밀도는 더 크게 나타났다.

Fig. 6은 곡선⑤ 방법에 의한 역해석 과정에서 산출된 측방유동에 의한 침하량과 연약층의 두께와의 관계를 나타낸 것이다. DP-1, DP-3 및 DP-4에서는 선형비례관계가 나타나지만 DP-5에서는 다른 경향을 나타내고 있다. 이러한 원인은 전술한 것과 같이 DP-5 지점이 여수토 터파기 시공위치와 인접해 있어서 압밀과정이 교란되었기 때문으로 판단된다. 이 지점을 제외한 나머지 위치에 대해서 결정계수 값이 1에 근접하는 매우 밀접한 관계로 나타나서 곡선⑤ 방법에 의해서 추정된 측방유동침하량이 신뢰성이 높은 결과임을 나타내고 있다.

성토기간 동안에 계측된 침하자료에 역해석 이론을 적용하여 측방유동에 의한 침하량을 산출한다는 것은 다른 한편으로는 성토기간 동안에 계측된 침하자료를 단순히 역해석에 적용해서 1차압밀침하량을 산출하는 것이 부적절하다는 본질적인 한계점을 나타내고 있다. 기존의 역해석 방법을 성토 기간 중에 적용할 수 있도록 발전시키기 위해서 경사계로 계측한 측방유동량을 역해석에 포함시키는 기법에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 이 연구의 대상이 된 현장에서는 자동계측방식에 의한 경사계를 사용하였으나 측정결과에 기복이 심하여 후속연구를 진행시키지 못하였다.

V. 결 론

연약 점토 지반에 축조한 저수지 시공현장에서 계측된 자료를 이용해서 Terzaghi의 압밀이론에 단계성토를 고려하고 측

방유동에 의한 침하량을 구분한 curve fitting 방법을 적용하여 연약지반의 압밀도, 1차압밀침하량 및 측방유동에 의한 침하량을 산정하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

실측된 침하곡선은 측방유동을 고려하지 않고 예측한 침하곡선보다 최적화 과정을 거쳤음에도 불구하고 빠른 속도로 진행되는 편차를 나타내어서 압밀침하와 압밀이외의 원인에 의한 침하가 함께 발생했음을 확인할 수 있었다.

측방유동을 고려하지 않고 역해석한 침하곡선은 측방유동을 고려하여 역해석한 침하곡선보다 최종적인 침하량은 더 크고 압밀도 95 %에 도달하는데 필요한 시간은 더 짧게 나타났다.

성토 높이가 낮아서 측방유동이 상대적으로 작은 공사 초기 동안의 계측자료만을 이용하여 개발된 프로그램으로 역해석하여 지반을 대표할 수 있는 압축지수와 압밀계수를 얻을 수 있었다.

측방유동이 크게 발생하기 전에 실측된 침하자료를 역해석하고 이후의 실측 침하량과 비교하여 측방유동에 의한 침하량을 산정하는 방법은 연약지반의 두께와 정비례관계가 있는 것으로 나타나서 신뢰성이 있는 방법으로 판단되었다.

REFERENCES

1. Asaoka, A., 1978. Observational procedure of settlement prediction. *Soils and Foundations* 18(4): 87-101.
2. Asaoka, A. and M. Matsuo, 1980. An inverse problem approach to settlement prediction. *Soils and Foundations* 20(4): 53-66.
3. Lee, D. W. and S. H. Lim, 2000. Final settlement prediction methods of embankments on soft clay. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 42: 68-77.
4. Lim, S. H., 1999. Final settlement prediction methods of embankment on soft clay by back analysis. A thesis for the degree of master of agriculture. Chungnam National University
5. Monden, H., 1963. A new Time-fitting method for the settlement Analysis of foundation on soft clays. *Memoir Faculty of Engrg. Hiroshima Univ.* 2-1 21: 21-29.
6. Olson, R. E., 1977. Consolidation under time-dependent loading. *Journal of Geotechnical Engineering Division ASCE* 103(GT1): 55-60.
7. Sridharan, A., N. S. Murthy, and K. Prakash, 1987. Rectangular hyperbola method of consolidation analysis. *Geotechnique* 37(3): 355-368.
8. Sridharan, A., and K. Prakash, 1985. Improved rectangular hyperbola method for the determination of coefficient of consolidation. *Geotechnical Testing Journal* 8(1): 37-40.
9. Sridharan, A., and R. A. Sreepada, 1981. Rectangular hyperbola fitting method for one dimensional consolidation. *Geotechnical Testing Journal* 4: 161-168.
10. Tan, S. A. and S. H. Chew, 1996. Comparison of the hyperbolic and Asaoka observational method of monitoring consolidation with vertical drains. *Soils and Foundations* 36(3): 31-42.
11. Tan, S. A., 1993. Ultimate settlement by hyperbolic plot for clays with vertical drains. *Journal of Geotechnical Engineering* 119(3): 950-1066.
12. Tan, S. A., 1994. Hyperbolic method for settlement in clays with vertical drains. *Canadian Geotechnical Journal* 31: 125-131.
13. Tan, S. A., 1995. Validation of hyperbolic method for settlement in clays with vertical drains. *Soils and Foundations* 35(1): 101-113.
14. Terzaghi, K., 1943. *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley & Sons : 286-289.
15. Tewatia, S. K., 1998. Discussion about comparison of the hyperbolic and Asaoka observational methods of monitoring consolidation with vertical drains. *Soils and Foundations* 38(2): 224-227.