

연약지반에서 최종침하량의 예측방법

Prediction of Final Settlement on Soft Ground

임성훈* · 강예묵 · 이달원 · 김지훈(충남대)

Lim, Seong Hun · Kang, Yea Mook · Lee, Dal Won · Kim, Ji Hun

Abstract

This study was performed of the research for accurate prediction of consolidation settlement at initial consolidation time. In order to analysis the program is developed which is able to analysis behavior of settlement caused by gradual load increment, and simulated consolidation using whole measured settlement data and that from beginning of embankment to end of it. The former result agrees with measured data and the latter it overestimated 13% larger than measured data. It was found the time which takes to be eliminated effect of gradual step load. This method is compared with the results from Asaoka, Hyperbolic and Tan's hyperbolic method respectively. Asaoka and Tan's hyperbolic methods are in good agreement with this method. But classical hyperbolic method overestimated about 32%.

I. 서 론

본 연구는 역해석에 의한 침하예측방법과 압밀초기에도 정확한 최종침하량을 예측할 수 있는 방법을 Curve Fitting 방법을 기초로 하여, 점증재하를 고려할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 또한 실제의 지반거동을 Simulation하고 성토종료일까지의 실측 자료를 이용하여 점증재하의 영향이 소멸되는 기간을 구분하였으며, 비교적 실제와 근접한 Hyperbolic방법, Asaoka방법등과 비교 분석하였다.

II. 자료분석 및 방법

가. 실측자료

본 연구에서 사용한 분석 자료는 ○○사업지구의 계측자료를 사용하였고, 해석에 사용된 지반물성치는 Table 1과 같다. 성토체의 습윤단위중량은 $1.845t/m^3$ 이고 최종성토고는 5m이다. 지반개량 공법으

Table 1 Properties of ground soil

Layer	Depth(m)	Initial void ratio(e_0)	Effective surcharge load(P_0)	Coefficient of consolidation (cm^2/sec)	Compression index	Virgin compression index
Layer 1	0 ~ 3	1.137	1.187	2.17×10^{-5}	0.42	0.50
Layer 2	3 ~ 8	1.739	3.948	3.53×10^{-4}	0.53	0.63
Layer 3	8 ~ 20	1.893	9.153	2.22×10^{-4}	0.79	0.85
Layer 4	20 ~ 31	1.430	18.027	1.19×10^{-5}	0.32	0.65

1998년도 한국농공학회 학술발표회 논문집 (1998년 10월 24일)

로써 Pack Drain공법이 사용되었고, 타입간격은 1.2m로 정사각 형태로 배치하여 시공되었다.

나. 해석방법

실측 침하량에 의한 최종침하량의 추정방법은 Curve Fitting(Simulation)방법, Asaoka방법, Hyperbolic방법, Tan의 Hyperbolic방법 등을 이용하였고, 점증재하를 고려한 해석 방법을 기존의 방법등과 비교 분석하고자 하였다.

1) Curve Fitting 방법

Terzaghi의 압밀이론으로부터 $S_f = \frac{C_c}{1+e_0} \cdot H \cdot \log_{10} \frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0}$ 이고, 압밀도는 교란영향과 배수저항을 무시하고 Barron의 압밀방정식을 이용하여 $U(T_h) = 1 - \exp\left\{-\frac{8 \cdot T_h}{F(n)}\right\}$ 을 사용한다. $S_t = S_f \cdot U$ 에서 C_c 와 C_h 를 시행착오법에 의해서 반복대입하여 실측 침하량과 가장 근접한 C_c 와 C_h 를 찾고 이때의 최종침하량을 얻는다.

2) Asaoka 방법

Mikasa의 압밀방정식 $\frac{\partial \epsilon}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial z^2}$ 로부터 $S_t = \beta_0 + \beta_1 \cdot S_{t-1}$ 의 관계가 유도되었다. x축에 S_t 를 취하고 y축에 S_{t+1} 을 취하여 자료의 직선구간의 y절편이 β_0 가 되고 기울기가 β_1 이 된다. 최종침하량은 $S_f = \frac{\beta_0}{1-\beta_1}$ 이 된다.

3) Hyperbolic 방법.

이 방법은 시간에 따른 침하의 곡선이 hyperbolic curve의 형태를 취한다는 가정으로부터 침하량 $S_t = S_0 - \frac{t-t_0}{\alpha + \beta \times (t-t_0)}$ 이 되고 최종침하량은 t가 무한대에 수렴할 때의 S_t 이므로 최종침하량 $S_f = S_0 + \frac{1}{\beta}$ 가 된다. 여기서 α 와 β 는 x축에 $t-t_0$ 를 취하고 y축에 $(t-t_0)/(s-s_0)$ 를 취해서 각각 자료의 직선구간의 y절편과 기울기가 된다.

4) 점증재하를 고려한 해석방법

연직드레인 공법과 Preloading공법을 병행하여 연약지반을 개량할 경우 성토시공은 점증재하에 의해 시공되고 그때 압밀침하량은 식(1)과 같이 된다.

$$S(t) = \int_0^t ds(t, \tau) d\tau = m_v \cdot H \cdot \int_0^t U(t-\tau) \frac{dP}{d} \tau \cdot d\tau \quad (1)$$

그러나 재하속도가 일정치 않을 경우에는 해석이 곤란하므로 정율점증재하로 가정하고 해석하거나, Terzaghi의 도식해법으로 해석한다. 그러나 이 방법들은 재하기간과 방치기간에 사용되는 수식이 다르고 도해작업이 필요하며, 실제의 경우에 있어서 정율점증재하가 되지 않는 경우는 사실상 Curve Fitting이 불가능하다. 따라서 일시재하로 가정하고 성토종료후 압밀이 상당기간이 경과한 후에 해석이 가능하고, 압

밀도 60% 이상이 되어야 신뢰성이 있다. 따라서 본 연구에서는 Fig.1과 같은 점증재하에 의한 실제의 압밀거동을 역해석으로 최적화하고 압밀초기에도 비교적 정확한 최종침하량을 예측할 수 있는 프로그램을 개발하였다.

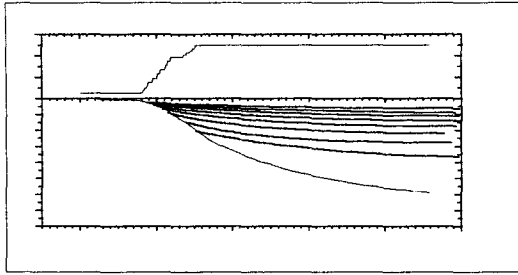


Fig.1 Time settlement behavior

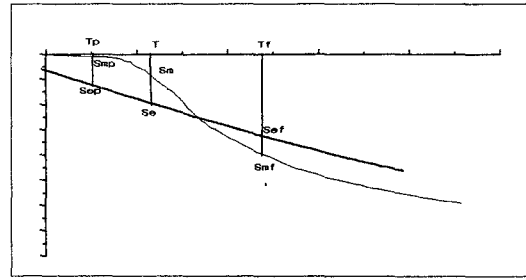


Fig.2 Deflection area between measured and estimated settlement

본 프로그램은 각각의 단계성토에 대한 침하가 원지반 상태에서 독립적으로 발생하고 이때의 C_c 와 C_h 는 전단계에 걸쳐 일정하다고 가정하였다. 20단계까지의 성토에 대해서 해석이 가능하고 n 단계의 성토에 대하여 다음식과 같은 지배방정식을 사용하였다.

$$\Delta S_{t_i} = \Delta S_{f_i} \cdot U \quad (2)$$

$$\Delta S_{f_i} = \frac{C_c}{1+e_0} \cdot H \cdot \log_{10} \frac{\sigma_0 + \Delta \sigma_i}{\sigma_0}, \quad U = 1 - \exp \left\{ - \frac{8 \cdot \frac{C_h \cdot t}{de^2}}{F(n)} \right\}$$

$$S_t = \sum_{i=0}^n \Delta S_{t_i} \quad (3)$$

최적화를 위해서 불규칙적인 계측시간 간격을 고려할 수 있도록 Fig.2와 같이 면적오차의 개념을 도입하여 이 면적오차 DA가 최소가 되는 C_c 와 C_h 는 Fig.3의 A와 같이 유일하다는 사실을 이용하였다.

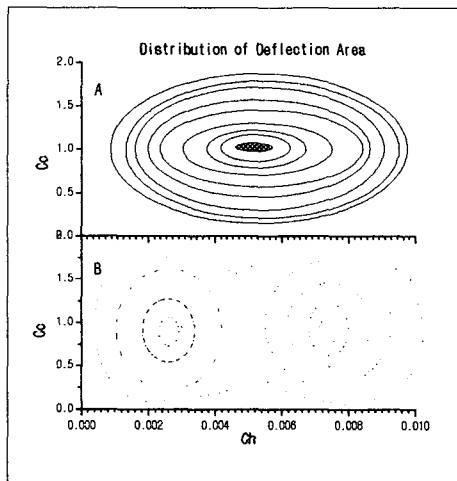


Fig.3 Distribution of deflection area

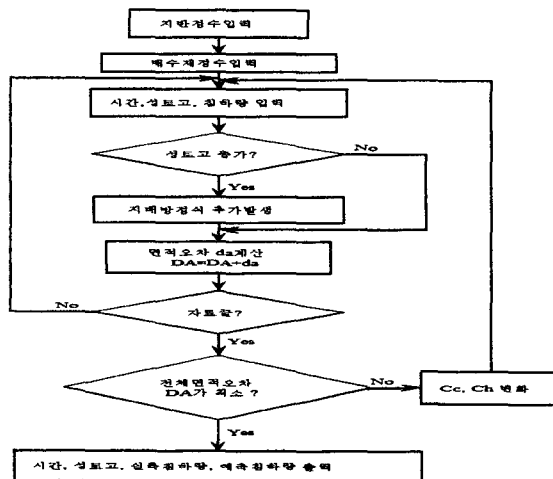


Fig. 4 Flow chart

$$da = \frac{|Se - Sm| + |Sep - Smp|}{2} \cdot (T - Tp) \quad (4)$$

$$da = \frac{|Sef - Smf| + |Se - Sm|}{4} \cdot (Tf - T) \quad (5)$$

$$DA = \sum da \quad (6)$$

여기서 Se와 Sm은 각각 임의의 시간에서 예측침하량과 실측침하량이다.

$T_p - T$ 구간에서와 같이 면적오차가 사각형을 형성하는 경우는 식(4)와 같이 면적오차가 사다리꼴을 형성한다고 가정하였으며 $T - T_f$ 구간에서와 같이 예측침하량과 실측침하량이 교차하는 경우는 각각의 폐다각형이 삼각형을 형성한다고 가정하여 식(5)와 같이 계산하였다. 실제의 경우에 있어서 계측시간 간격은 상당히 작으므로 위의 가정은 합리적인 것으로 판단된다. 본 프로그램의 흐름도는 Fig.4와 같다.

III. 결과 및 고찰

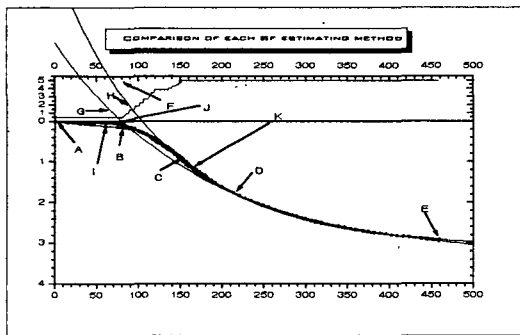


Fig. 5 Gradual load analysis

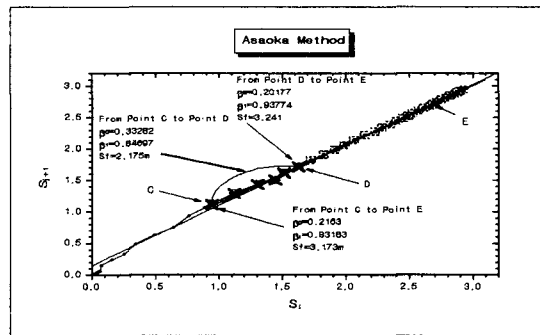


Fig.6 Asaoka method

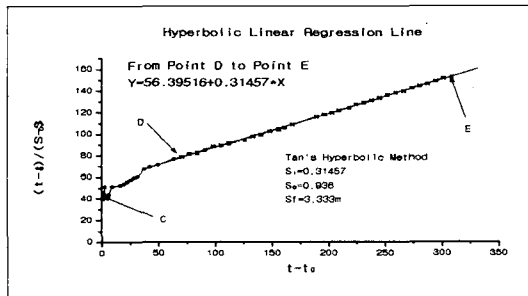


Fig. 7 Hyperbolic linear regression line

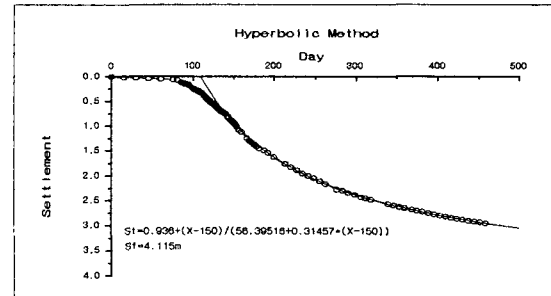


Fig.8 Hyperbolic method

가. Curve Fitting 방법

Fig. 5는 연직드레인 타입후 약 70일의 성토기간과 성토고 5m에서 방치기간을 두고 측정한 지반의 계측 자료를 해석한 결과이다. 곡선 J는 실측자료이고, 곡선 K는 A에서 E까지의 전체 자료를 이용한 해석결과로써 전 구간에 걸쳐 실제 지반 거동에 매우 근접하게 Simulation할 수 있었다. 곡선 I는 A에서 C까지의 성토기간동안의 계측자료를 이용한 해석결과로서 해석구간에서 실측 침하량과 매우 근접한 결과를 나타내었다. 곡선 H는 일반적으로 사용하는 Curve Fitting방법으로써 C에서 E까지의 자료를 일시하중이 재하된 것으로 가정하여 $t_0=150$ 일, $S_0=0.936$ m로 취한 결과이다. 곡선 G는 F와 같은 일시하중이 $t_0=80$ 일에 가해진

다고 가정하여 해석한 결과이다. 여기서 A는 Sand Mat시공시점, B는 성토시점, C는 성토종료시점, D는 성토종료일로부터 성토기간과 동일 기간이 경과한 시점, E는 계측종료시점이다.

나. Asaoka방법

Fig. 6은 시간-침하량 곡선으로부터 구한 실측자료를 구간별로 C에서 E까지, D에서 E까지 그리고 C에서 D까지 Asaoka방법에 의하여 해석한 결과이다. Fig.7과 Fig.8은 일반적인 Hyperbolic 방법과 Tan의 Hyperbolic방법을 이용하여 D에서 E까지의 자료를 이용하여 해석한 결과이고, 각 방법별 최종침하량은 Table.2와 같다.

Table. 2 Estimated final settlements from each prediction methods. (unit : m)

Range of analysis Analysis method	A - E	A - C	B - E	C - E	D - E	C - D	Remark
Curve Fitting I.	3.112	3.520					Gradual step load
Curve Fitting II.			3.338	3.113			Instant full load
Asaoka			3.655	3.173	3.241	2.175	
Hyperbolic					4.115		
Tan's Hyperbolic					3.333		

해석에 사용된 지반은 압밀이 90%이상 진행되었다고 판단되어 2차성토를 시공한 현장이다. 점중재하를 고려하여 A-E의 전 구간에 걸쳐 해석한 최종침하량과, 일시하중으로 고려하여 성토종료일인 C이후의 전체 자료를 일반적인 Curve Fitting 방법으로 해석한 결과, 실측 침하량과 매우 근접한 결과를 나타내었다.

다. 재하방법에 따른 프로그램의 검증.

개발된 프로그램을 이용해서 시도한 성토종료일에서의 최종침하량 예측은 실제의 지반거동보다 약 13% 정도 과대 추정되었다. A - B 구간에서는 Sand Mat 타설 후 연직드레인이 설치된 기간이다. 실제의 압밀 거동은 연직방향 압밀이 발생한 것으로 판단되지만 본 해석에서는 편의상 방사형 압밀로 해석하였다. 따라서 점중재하로 해석할 경우에 초기부분에서 과대추정되어 면적오차 d_a 가 크게 나타났지만, 전구간에 걸쳐 해석할 경우에는 그 영향이 감소됨을 알 수 있었다. 그러나 해석기간이 짧으면 상대적으로 큰 영향을 미치기 때문에 과대추정되었고, Fig.3 B와 같이 등면적오차선이 형성이 되어 다소 불안정하게 나타났다.

Fig.5에서 점중재하로 해석한 곡선 K와 $t_0=80$ 일에서 일시재하로 해석한 곡선 G는 D점 전후에서부터 일치하였다. 따라서 실제의 압밀거동이 D점이후에서는 점중재하의 영향이 소멸되는 것으로 판단된다. D점 직전에서 실측침하량이 비정상적으로 과대하게 계측되어 예측된 침하량과 일시적인 편차를 나타내어 이 구간에서는 계측오차가 발생한 것으로 판단되고 Fig.6과 Fig.7에서 D점 직전에서부터 양호한 직선성을 나타내서 이를 입증하고 있다. Barron의 방법에 의해 역산한 수평압밀계수(C_h)는 $3.5 \times 10^{-4}(\text{cm}^2/\text{sec})$ 으로 점중재하와 일시재하로 해석한 결과가 동일하고 각 토층별 실내시험결과를 전체 토층으로 환산한 수직압밀계수(C_v)= $4.5 \times 10^{-4}(\text{cm}^2/\text{sec})$ 과 근접하게 나타났다. 현장계측치로부터 역산한 현장압축지수(C_c)는 점중재하로 해석한 경우 1.03으로 나타났고, 일시재하로 해석한 경우 0.9로 실내시험에서 얻은 처녀압축지수(V_{cc})보다 약간 크게 나타났다. 일시재하와 점중재하에 있어서 압축지수(C_c)값이 차이가 나는 것은 점중재하로 해석할 경우 n단계까지의 성토에 대한 지배방정식은 식(7)과 같이 해석되고, 일시재하로 해석할 경우는 식(8)과 같이 해석되기 때문으로 판단된다.

$$S_f = \frac{C_c}{1+e_0} \cdot H \cdot \left\{ \sum_{i=0}^n \log_{10}(P_0 + \Delta P_i) - \log_{10} P_0 \cdot n \right\} \quad (7)$$

$$S_f = \frac{C_c}{1+e_0} \cdot H \cdot \log_{10} \frac{P_0 + \Delta P}{P_0} \quad (8)$$

Asaoka방법에 의한 해석에 있어서는 C - E구간의 자료를 사용하여 해석한 결과와 D - E구간의 자료를 사용하여 해석한 결과에 있어서 각각 2%, 4%정도 과대 추정되었으나, B - E구간의 자료를 사용하여 추정된 결과는 17%정도 과대 추정하였고, C - D 구간의 자료를 사용한 해석결과는 최종 침하량이 30%정도 과소 평가되었다. 초기시간(t_0)를 150일, 초기침하량(s_0)를 0.936m로 하여 C - E 구간에 걸쳐 Hyperbolic 방법에 의해 해석한 결과, C - D 구간에서는 직선성이 확보되지 않아서 침하량 추정이 불가능하였고, D - E 구간에서의 침하량 추정은 약 32% 정도 과대 추정되었다. Tan의 방법에 의한 최종침하량은 7%정도 과대추정되었다. 이와 같은 원인은 Tan등이 제안한 α 값이 부정확하게 산정되었기 때문으로 추정되므로, 실제 해석에 이용할 경우는 신중하게 고려하여야 할 것으로 판단된다.

IV. 결론

연직드레인이 설치된 연약지반의 압밀거동을 점중재하와 일시재하를 영향을 고려하여 해석한 결과를 비교하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 성토종료일까지의 실측자료를 이용한 경우, Asaoka, Hyperbolic 그리고 Tan의 방법은 침하량 예측이 불가능하였지만 개발된 프로그램은 예측이 가능하고 13%정도 과대추정되었다.
2. 일시재하로 고려하여 최종침하량을 예측한 결과 Asaoka방법은 4%정도, Tan의 방법은 7%정도로 약간 크게 예측되었으나, 개발된 프로그램은 실측침하량과 일치함을 나타냈다.
3. 점중재하의 영향을 무시할 수 있는 시점은 성토종료일로부터 성토기간만큼, 약 2배의 시간이 경과한 시점으로 판단되고, 일시재하로 고려하여 역해석할 경우는 이 시점을 경과한 계측 자료를 이용하는 것이 정확할 것으로 판단된다.
4. 실내시험에서 얻은 압밀계수는 Barron의 식을 사용할 경우 $C_v=C_h$ 로 추정하는 것이 합리적인 것으로 판단되고, 실내시험으로 구한 압축지수는 현장압축지수와 비교할 때 약간 과소 평가된다.

V. 참고문헌

1. Asaoka, A., "Observational procedure of settlement prediction", Soils and Foundations, Vol.18, No.4, Dec. 1978, pp.87-101,
2. Tan,S.A. and Chew, S.H., "Comparison of the hyperbolic and Asaoka observational method of monitoring consolidation with vertical drains",Soils and Foundations, Vol.36, No.3, Sept. 1996, pp.31-42
3. Yoshikuni, H.,"Basic Consolidation Theory of Vertical Drain Method", Geotech 92 Workshop, Dec. 1992, pp.53 - 57,