

# 연약지반 장기침하량 예측기법의 적용성 연구

장병욱(서울대) · 우철웅(서울대) · 이경호\*(서울대)

Chang, Pyoung Wuck · Woo, Chull Woong · Lee, Kyung Ho

## Abstract

The theory of consolidation has been achieved remarkable development, but associated properties are very difficult to determine in the laboratory. The theoretical shortcomings of those consolidation theories and uncertainties of associated properties make inevitably some discrepancy between theoretical and field settlements. Field settlement measurement by settlement plate is, therefore, widely used to overcome the discrepancy.

Among the various methods of ultimate settlement predictions using field settlement data, hyperbolic method and Asaoka's method are most commonly used because of their simplicity and ability to give a reasonable estimate of consolidation settlement.

In this paper, the applicability of hyperbolic method and Asaoka's method has been estimated by the analysis of the laboratory consolidation test and field measured data. It is shown that both hyperbolic method and Asaoka's method are significantly affected by the direction of drainage, and Asaoka's method is better to reflect the properties of the soft foundation than hyperbolic method.

## I. 서론

사회간접자본시설 확충의 일환으로 건설되는 항만, 고속도로, 방조제 등의 구조물은 연약지반상에 시공 될 수 있으며, 이로 인한 압밀 및 침하와 관련한 많은 문제점을 발생한다. 따라서 이에 대한 정확한 해석의 연구가 필수적이다.

Terzaghi의 일차원 압밀이론이 발표된 이후, 연약지반의 침하문제를 해석하는 방법으로 Barron의 방사 압밀이론을 비롯하여 여러 방법들이 제시되어 오고 있다. 침하해석법의 이론적 발달에도 불구하고 매개변수 결정의 난이함 등의 이유로 아직까지도 연약지반의 침하해석에는 비교적 간략한 방법인 Terzaghi의 일차원 압밀이론과 Barron의 압밀이론이 적용되고 있다. 압밀침하해석 결과는 방법상의 제한, 매개변수의 불확실성 등에 의해서 실제와 차이가 발생하는 것이 불가피하다.

이러한 문제들 때문에 현장 침하량 실측치를 이용한 침하량 예측기법이 사용되고 있으며 실측자료를 이용한 압밀침하량 추정방법을 이용하면 토질특성의 다양성, 하중의 크기와 분포의 불확실성 등이 최소화되어 실제 침하량을 보다 잘 예측할 수 있다.

실측치에 의한 침하량 예측기법은 일반적으로 쌍곡선법(Hyperbolic method), Hoshino법, Asaoka법, logt 법 등이 사용되고 있다. 장기침하량 예측법을 사용하여 신뢰성이 큰 침하예측을 위해서는 그 예측법의 신뢰성을 파악하는 것이 필요하나 이에 대하여 검토한 사례는 적으며, 우 등(참고문헌 8)에 의하여 이론적 해석 기법으로 그 신뢰성이 연구된 바 있다.

---

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

본 연구에서는 장기침하량 예측기법으로 가장 신뢰성을 인정받고 있는 쌍곡선법과 Asaoka법을 대상으로 이들 기법의 특성을 기존에 연구되었던 해석적 기법 외에 실험실 압밀시험과 현장계측자료분석으로 검토하여 장기침하량 추정 결과의 신뢰성을 분석하였다. 현장계측자료는 연직배수공이 적용된 지반에서 얻어진 것이며, 실험실 압밀시험은 Terzaghi의 일차원 압밀에 해당하는 침하자료를 얻기 위하여 실시하였다.

## II. 이론적 배경

연약지반의 압밀침하는 연직배수공법이 적용되지 않는 지반의 경우에는 Terzaghi의 일차원 압밀이론으로, 연직배수공법 적용지반의 경우에는 Barron의 압밀이론으로 해석하는 것이 일반적이다. 이 두 가지 압밀이론은 여러 문헌에서 언급되어 있으므로 생략하며, 많은 연구에 의하여, 대부분의 압밀문제에서 시간계수/압밀도 - 시간계수 관계는 60% 이상의 압밀도에서 직선적 관계를 보인다고 한다.

관측적 장기침하량 예측기법은 계측된 자료로부터 장기침하량을 추정하는 기법이다. 본 연구의 대상인 쌍곡선법(Hyperbolic Method)과 Asaoka 법, 두 예측기법의 적용성 평가를 위하여 압밀시험결과와 현장 계측결과를 이용하였다. 두 예측기법의 이론은 여러 문헌에 언급된 관계로 생략하였다.

압밀시험은 Terzaghi의 일차원 압밀을 모사하며, 연직 배수공이 설치된 현장의 계측결과는 Barron의 방사압밀을 모사한다. 압밀시험 결과나 현장 계측결과가 나타내는 장기침하량 정해값과 쌍곡선법이나 Asaoka법에 적용시켜 평가된 장기침하량 예측 값과의 비교를 통하여 각 장기침하예측기법을 평가한다.

장기침하량 예측방법의 정확성을 정량적으로 검토하기 위해서 식(1),(2)와 같은 오차량 및 예측률을 이용하였다.

$$\Delta S = S_m - S_f \quad (1)$$

$$K_t = [(S_f - S_o)/(S_m - S_o)] \times 100 \quad (2)$$

여기서,  $\Delta S$  = 오차량

$K_t$  = 예측률 (%)

$S_m$  = 압밀침하량 정해값

$S_f$  = 예측 압밀침하량

$S_o$  = 예측시점의 침하량

## III. 압밀시험 및 현장 계측결과

### 3.1 압밀시험 결과

여러 종류의 점성토에 대하여 압밀시험을 실시하였고 그 결과를 이용하여 일차원 압밀 조건에서의 장기침하량 예측기법의 신뢰성을 평가하고자 하였다.

사용된 시료는 남해안과 서해안의 해성점토로서 액성한계를 기준으로 저소성, 중소성, 고소성의 재료를 선정하였다. 사용된 시료의 물성치가 Table 1에 주어져 있다. 압밀시험은 직경 6cm, 높이 2cm인 시료를 이용하여

Table 1 Physical properties of soil

Sample Name	Specific Gravity	Liquid Limit (%)	Plastic Limit (%)	Plastic Index (%)	USCS	Remarks
LP	2.68	37	25	12	ML	Low Plasticity
MP	2.67	48	21	27	CL	Medium Plasticity
HP	2.68	67	22	45	CH	High Plasticity

KSF2316의 규정에 따라 실시하였다.

일차압밀침하량 산정결과를 이용하여 도출된 압밀시험의 시간-압밀도 관계를 Fig. 1에 중소성 점토에 대하여 대표적으로 하중단계별로 도시하였다. 여기서, 일차 압밀 침하량 기준 압밀도를 100%로 하였으며, 이차 압밀이 진행됨에 따라 100% 이상을 나타냄을 알 수 있다.

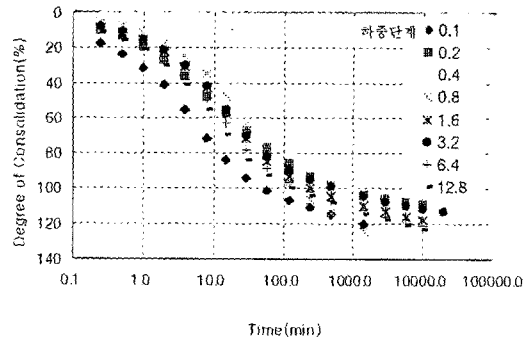


Fig. 1 Time-degree of consolidation relationship for MP specimen

### 3.2 현장 계측 결과

연약지반의 현장 계측자료를 이용한 장기 침하량 예측기법의 신뢰성 분석을 위하여 서해안 고속도로 서천-군산간 10 공구 건설공사의 계측데이터를 적용하였다. 서해안 고속도로 10 공구의 연약지반은 연직 배수 공법으로서 Pack Drain을 적용하였으며 연약지반의 침하관리를 위하여 지표면 침하판이 설치되었다.

분석에 사용된 지점별 침하자료는 Fig. 2와 같다.

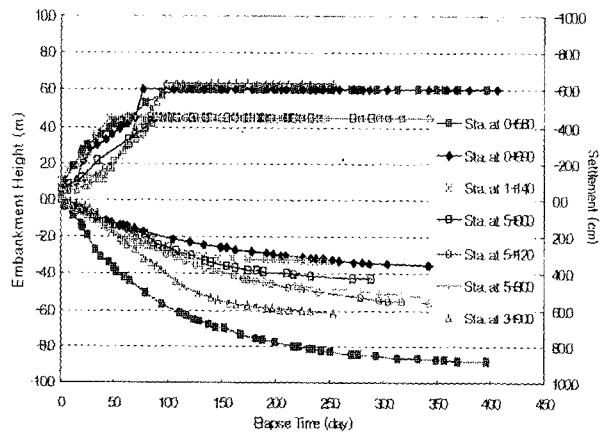


Fig. 2 Embankment height and measured settlement

## IV. 장기침하량 추정기법의 정확성 평가

### 4.1 압밀시험에 의한 장기침하량 추정 기법의 평가

#### 4.1.1 장기침하량 추정결과

Terzaghi의 일차원 압밀이론의 제반 조건은 압밀시험에 의하여 재현된다. 본 연구에서는 실험실 압밀시험을 실시하고 그 결과에 관측적 압밀 침하 예측기법을 적용하여 이들의 1차원 압밀조건에서의 예측 결과의 특징을 밝혀보고자 하였다.

시험은 고소성, 중소성, 그리고 저소성 점토에 대하여 실시하였으며, 대표적으로  $\sigma_v = 3.2 \text{ kg/cm}^2$  에

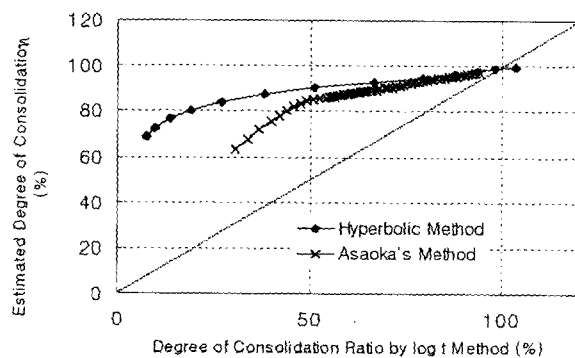


Fig. 3 Estimated degree of consolidation (High Plastic)

해당하는 각각의 경우에 대한 장기 침하량 추정결과가 Fig. 3~5에 주어져 있다.

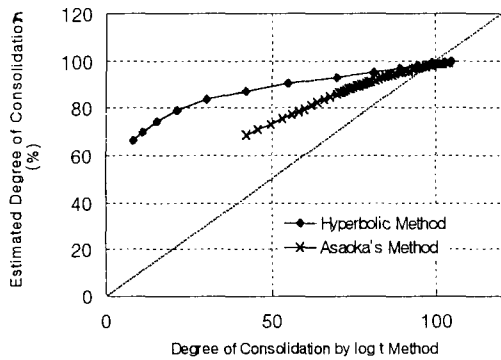


Fig. 4 Estimated degree of consolidation (MP)

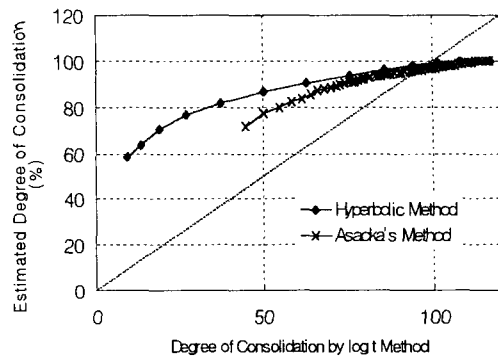


Fig. 5 Estimated degree of consolidation (LM)

#### 4.1.2 장기 침하량 추정결과의 특성

장기침하량 예측결과는 시료 및 압밀하중에 따라서 다소 차이는 있으나 모든 경우에서 실제 압밀도보다 큰 압밀도를 예측하였다. 또한 모든 경우에 있어서 Asaoka 법이 쌍곡선법에 비해서 실제 압밀도와 가까운 예측결과를 주고 있는 것으로 나타났다.

추정압밀도는 압밀하중의 변화와는 뚜렷한 상관관계를 보이지 않았으며, 동일한 하중단계에 대한 저소성, 중소성, 및 고소성 점토의 추정압밀도는 비슷한 경향을 보여 뚜렷한 차이를 보이지 않았다. 다만 고소성 점토의 경우에는 Asaoka 법의 예측결과에서 다소 급격히 기울기가 변화는 특이한 점이 발견되었다. 이는 고소성 점토가 압밀하중을 받는 경우에 압밀기작 외에 점토의 구조적 재배열과 같은 변화를 수반하고 이러한 거동은 일차압밀이 완료되기 이전에 발생하는 것으로 추정된다. 이에 대한 보다 많은 연구가 필요한 것으로 판단된다.

압밀시험 결과를 이용한 장기 침하량 추정결과로부터 시간/압밀도 - 시간 관계가 쌍곡선법과 Asaoka 법 모두에서 정확히 직선을 보임을 확인하였다.

### 4.2 현장계측결과에 의한 장기침하량 예측기법의 분석

#### 4.2.1 장기침하량 추정결과와 분석

연약지반의 현장 계측결과를 이용하여 장기침하량 예측기법의 신뢰성을 분석하였다. 지점별로 쌍곡선법과 Asaoka법을 이용하여 장기침하량을 추정하고 압밀도를 산정하였으며, 대표적으로 0+580 지점에 대한 장기침하량 추정결과와 압밀도 추정결과가 Fig. 6과 Fig. 7에 주어져 있다.

장기침하량 추정결과를 살펴보면, 쌍곡선법은 한 지점을 제외한 모든 지점에서 초기에 위로 볼록한 형태, 즉 예상침하량이 증가되다가 감소하는 경향을 보였으나, Asaoka법은 모든 지점에서 초

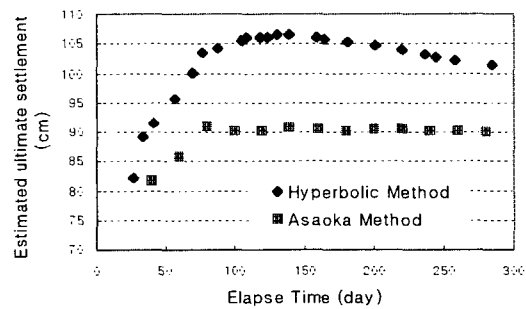


Fig. 6 Estimated ultimate consolidation at 0+580

기에 조금 위로 불룩한 거동을 보인 후 점차 일정한 장기침하량을 예측하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 계측기간에 따른 장기침하량의 예측결과와 안정성이 쌍곡선법 보다 Asaoka법이 더 좋다는 것을 의미한다.

압밀도는 모든 지점에서 시간의 경과에 따라 추정압밀도가 증가하며, Asaoka법에 의한 압밀도 추정결과가 쌍곡선법에 의한 추정결과보다 큰 압밀도 즉, 압밀침하량을 작게 예측하고 있으며 두 가지 예측기법의 추정압밀도의 차이는 10~20% 범위이다.

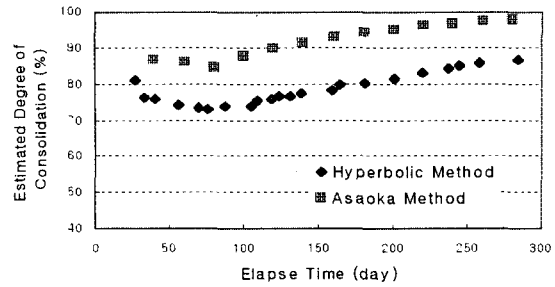


Fig. 7 Estimated degree of consolidation at 0+580

#### 4.2.2 장기침하량 추정결과의 T/U - T 관계

현장 계측자료를 이용한 장기 침하량 추정결과를 이용하여 시간/압밀도 - 시간 관계를 구했으며, Table 2에 각각의 지점에서의 T/U - T 관계를 직선회귀한 결과로부터 구한 직선의 기울기를 제시하였다.

시간계수/압밀도 - 시간계수의 직선적 관계식을 식 3a와 같이 나타낼 수 있고, 이를 T에 관하여 정리하면 식 3b와 같다.

$$\frac{T_r}{U} = \alpha T_r + \beta \quad (3a)$$

$$T = \frac{U\beta}{1 - U\alpha} \quad (3b)$$

여기서,  $T > 0$ ,  $\beta > 0$  이므로

$$1 - U\alpha \geq 0 \quad (3c)$$

여기서,  $0 \leq U < 1$  이므로

$$0 \leq \alpha < 1 \quad (3d)$$

따라서 기울기의 이론적 최대치는 1인데, Table 1에서 쌍곡선법은 1보다 큰 값을, Asaoka법은 1보다 작은 값을 각각 나타내고 있다. 이러한 결과는 쌍곡선법의 예측결과가 T/U - T 관계의 직선 특징을 위배하며, 쌍곡선법의 예측결과로 장기침하량을 예측하는데 한계가 있음을 나타낸다.

Table 2 Slope of T/U - T relationship

Station	Hyperbolic method	Asaoka method
0+580	1.133	0.982
0+690	1.299	0.992
1+140	1.034	0.904
5+000	1.110	0.940
5-120	1.167	0.998
5+300	1.139	0.942
3+900	1.062	0.985

## V. 결론

연약지반의 관측적 장기침하량 예측기법의 신뢰성을 평가하기 위하여 실험실 압밀시험결과와 현장 계측자료를 이용하여 쌍곡선법과 Asaoka법을 대상으로 적용한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1차원 압밀을 모사하는 실험실 압밀시험결과를 이용한 장기침하량 분석 결과
- 가. 모든 경우에 두 예측기법이 압밀도를 실제보다 크게 산정하였으나, Asaoka 법이 쌍곡선법에 비해 보다 정확한 결과를 주는 것으로 나타났다.
- 나. 두 예측기법에 의한 추정압밀도는 점토 조성의 변화와 뚜렷한 상관관계를 가지지 않았다. 다만 고소성 점토의 경우에는 Asaoka 법의 예측결과에서 구조적 재배열로 추정되는 특이점이 발견되었다.

- 연직배수공이 시공된 연약지반의 현장계측결과를 이용하여 장기침하량을 분석 결과
- 다. Asaoka 법에 의한 압밀도 추정결과가 쌍곡선법보다 10-20% 크게 나타났으며, 이는 일차원 압밀실험 결과에 의한 추정치와 상반된다. 즉, 장기침하량 예측결과의 신뢰성은 지반의 압밀조건에 지배받는 것으로 나타났다.
- 라. 장기침하량 예측결과로부터 계측기간에 따른 장기침하량 예측결과의 안정성은 Asaoka법이 쌍곡선법 보다 좋음을 알 수 있었다.
- 마. 실험실 압밀시험과 현장계측자료를 이용한 장기침하량 예측결과에서 시간/예측압밀도-시간은 직선관계를 보였다. 그러나, 현장계측자료를 이용한 쌍곡선법 예측결과의 시간/예측압밀도-시간 관계의 기울기는 1 이상인 것으로 나타났다. 따라서, 쌍곡선법은 연약지반 침하거동의 본질적 특성을 잘 반영하지는 못하는 것으로 사료된다.

## 참고문헌

1. Asaoka, A. 1978, "Observational procedure of settlement prediction", Soils and Foundations, 18(4), 87-101
2. Asaoka, A. and Matsuo, M., 1980, "An inverse problem approach to settlement prediction", Soils and Foundations, 20(4), 55-66
3. Barron, R. A.(1948), "Consolidation of fine grained soils by vertical wells", Trans. ASCE, Vol 113, pp. 718-754
4. Tan, S-A and S-H Chew, "Comparison of the hyperbolic and Asaoka observational method of monitoring consolidation with vertical drain", Soils and foundation, Vol. 36, No. 3, pp. 31-42
5. Tan, S-A, Inoue, T., and Lee, S-L, 1991, "Hyperbolic method for consolidation analysis", J. of Geotech. Engrg, ASCE, Vol 117, No. 11, pp. 1723-1737
6. 世良 至, 殿垣内 正 人, 川井田 實, 1993, 實測値に基づく軟弱地盤の沈下豫測法の精度と適用性, 土と基礎(41-2, 421), pp.11-16
7. 오재화, 남기현, 이문수, 허재은, 김영남, 1996, Pack-Drain으로 개량된 점토지반의 거동해석, 한국농공학회지, Vol. 38 No.1, pp. 115-127
8. 우철웅,장병욱,송창섭, 1996, 연약지반 장기침하량 예측기법의 신뢰성 평가, 한국농공학회지 제 38권 제 6호, pp. 35-41