

## 계측기간에 따른 쌍곡선법의 침하 예측에 관한 사례 연구

### A Case Study on Settlement Predictions of Hyperbolic Method for Initial Measurement Period

김성준<sup>1)</sup>Kim Sung Joon, 김유석<sup>1)</sup>Kim You Seok, 박중배<sup>2)</sup>Park Joong Bai, 정한중<sup>3)</sup>Jeong Han Jung, 김성운<sup>3)</sup>Kim Sung Woon

<sup>1)</sup>(주)대우건설기술연구소 연구원 Daewoo Institute of Construction Technology, Research Engineer

<sup>2)</sup>(주)대우건설기술연구소 선임연구원 Daewoo Institute of Construction Technology, Senior Research Engineer

<sup>3)</sup>(주)대우건설기술연구소 책임연구원 Daewoo Institute of Construction Technology, Principal Research Engineer

**SYNOPSIS** : Predictions of settlements under preloading for the improvement of soft soil is a very important element of construction management. Due to the non uniformity, difficulty of estimating reasonable soil properties, predictions of settlements and settlement velocities at the design stage are not easy to be close to the actual future settlements. To overcome this problem, the prediction methods based on the settlement observation of initial preloading stage such as hyperbolic method and Asaoka method have been employed frequently. However the estimating method for the reliability of these predictions at the time of prediction has not been suggested. In this study, comparisons of predicted settlements by hyperbolic method and observed settlements are explored through case studies. And a stratagem of estimating reliability of settlement predictions by hyperbolic method is suggested as the result of investigation on the relationship between the initial observed time and error of settlement prediction by hyperbolic method.

**KEYWORDS** : Hyperbolic method, Settlement observation, Preloading, Reliability

#### 1. 서론

점성토와 같은 연약지반을 개량함에 있어 장래에 발생할 침하량을 예측하는 것은 시공관리상 매우 중요한 요소이다. 연약지반 설계시 단계별 재하중 기간과 성토 높이는 일반적으로 각종 토질실험 자료를 바탕으로 대상 연약지반이 전단파괴가 발생하지 않고, 최종 지표고를 만족하도록 다단계 성토를 실시하게 된다. 그러나 설계시 일반적으로 사용하는 Terzaghi 일차원 압밀 이론식의 가정과 지반 물성치 조사의 한계 등 때문에 계산 침하속도 및 침하량은 실제 계측치와는 합치되지 않는 경우가 많이 발생하게 된다. 이와같이 설계 단계에서 정확한 장래 침하량을 산정하기란 매우 어렵기 때문에, 실제 시공에서는 초기에 발생하는 침하 계측치를 이용하여 장래에 발생할 침하량을 예측하여 기본 설계를 수정, 보완하게 된다. 이러한 지반 침하 계측치를 이용한 장래침하량 예측법으로는 아사오카 방법, 호시노 방법( $\sqrt{t}$  법) 등이 있으며, 쌍곡선법도 이러한 침하량 추정법 중의 하나이다. 즉, 일정한 하중상태가 된 시점 이후의 침하량과 시간과의 관계는 쌍곡선의 형태로 변화한다고 가정하여, Miyakawa (1967)는 식 (1), (2)를 제안하였다.

$$S_t = S_o + \frac{t - t_1}{\alpha + \beta \times (t - t_1)} \quad (1)$$

$$S_f = S_o + \frac{1}{\beta} \quad (2)$$

- $t$  : 재하를 시작한 시점부터의 경과시간
- $t_1$  : 재하초기부터 재하완료 이후의 임의 시점까지 경과시간
- $S_0$  : 시간  $t_1$  경과시 발생한 침하량
- $S_t$  : 시간  $t$  에서의 침하량
- $S_f$  : 최종 침하량
- $\alpha, \beta$  : 시간 간격에 따라 정해지는 계수

쌍곡선법에서의 침하량 예측치는 예측시점에서 계측 경과 일수가 증가할수록 실측치와 근접해지는 것이 일반적이다. 그림 1의 예측치와 계측치의 범례에서와 같이 최종침하량, 압밀침하속도 및 계측치의 정도 등은 지반이나 현장 조건에 따라서 상이하게 나타나므로, 계측 기간에 따라서 임의의 시점에서 예측한 장래 침하량은 일반적으로 실계측치와 비교하여 차이가 있게 된다.

본 연구는 연직 배수재가 설치된 연약 점성토 지반의 지중 및 지표 침하계의 계측치를 종합하여 예측치와 계측치의 관계를 산술적으로 표현하는데 목적이 있다.

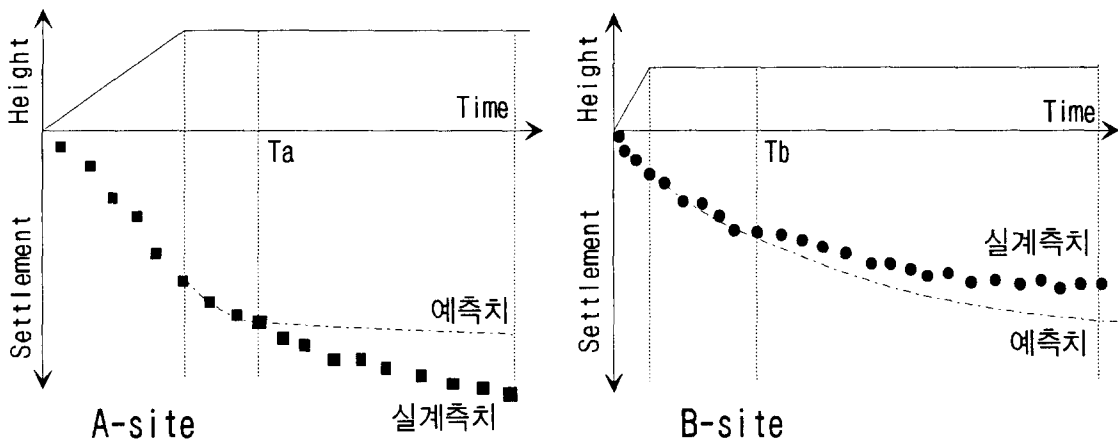


그림 1 계측기간에 따른 현장별 예측치와 계측치 범례

## 2. 사례 연구

### 2.1 사례 현장의 개요

계측 기간에 따른 장래 침하량 예측의 변화를 알아보기 위하여 국내외 4개 현장에서 10개소의 지중 및 지표 침하 계측자료를 선정하여 계측 기간별로 쌍곡선법에 의한 장래 침하량을 예측하였다. 시공 현장의 토질 주상도와 계측기 설치 위치는 그림 2 및 표 1 과 같다.

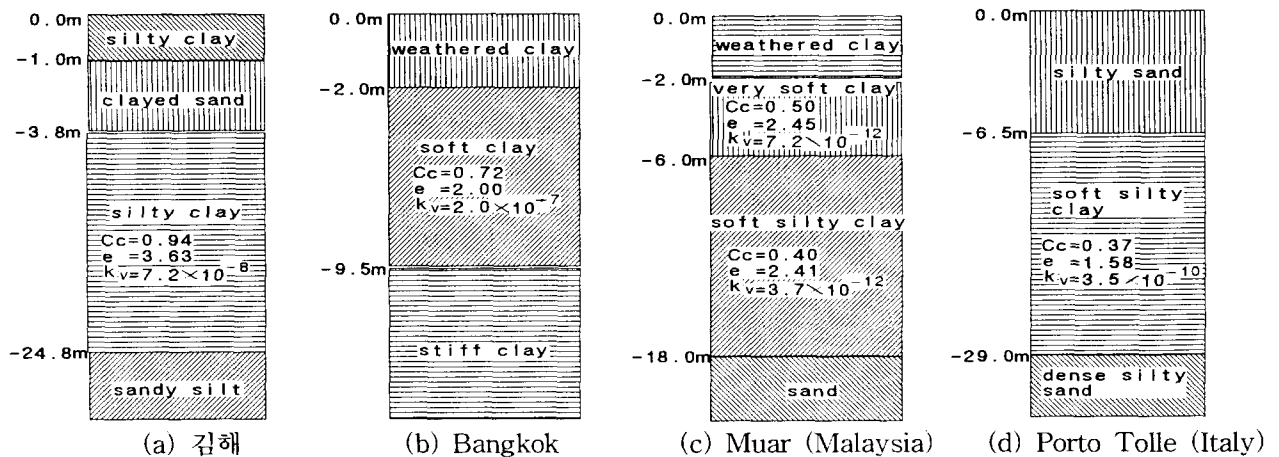


그림 2 사례 현장의 토질 주상도

표 1 사례현장의 적용공법 및 계측기 설치위치

| 사례 현장                  | 적용 공법                                  | 기 호         | 계측기 위치           | 사례 현장                 | 적용 공법                         | 기 호   | 계측기 위치           |
|------------------------|--|-------------|------------------|-----------------------|-------------------------------|-------|------------------|
| 김 해                    | vertical drain+<br>재하중 공법+<br>진공 압밀 공법 | SD 11       | 지표침하계            | Bangkok<br>(Thailand) | vertical drain<br>+<br>재하중 공법 | BKS1  | 지표침하계            |
|                        |  | SD 12       | 지표침하계            |                       |                               | BKS2  | 지표침하계            |
| Muar<br>(Malaysia)     | vertical drain+<br>재하중 공법              | Mal-s       | 지표침하계            |                       |                               | BKS3  | 지표침하계            |
|                        |  | Mal-ss      | 지중침하계<br>(-5.5m) |                       |                               | BKSS1 | 지중침하계<br>(-2.5m) |
| Porto Tolle<br>(Italy) | vertical drain+<br>재하중 공법              | Porto Tolle | 지표침하계            |                       |                               | BKSS2 | 지중침하계<br>(-5.5m) |

그림 3은 Bangkok의 시험성토구간 중에서 S2 지점(BKS2)에 대한 초기계측기간 $t_c$ (=100, 470, 800, 1000 day)에 따른 장래 침하량 예측 결과이다. 쌍곡선법으로 예측한 장래 침하량은 그림 3에서와 같이 계측 기간이 증가함에 따라서 실침하 계측치와 근접하게 되는 것으로 나타났다. 예를 들어 1000day 계측치를 이용한 침하량 예측은 100day의 침하량 예측치 결과보다 실계측치와 더 잘 일치하는 것으로 나타났다.

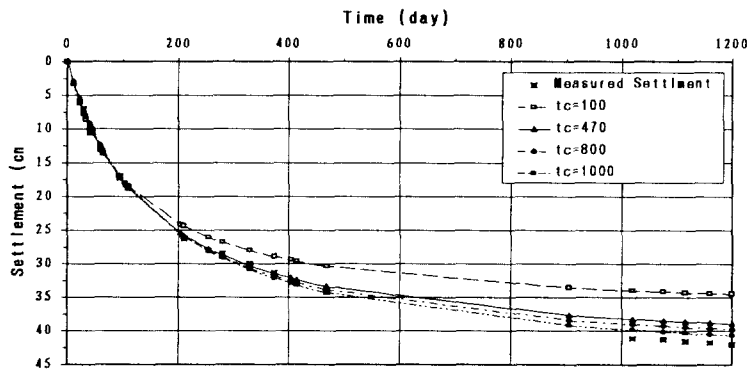


그림 3 Bangkok 시험 성토에 대한 쌍곡선법에 의한 사례 연구

## 2.2 정규화 변수 산정 방법

임의 시점에서 쌍곡선법으로 예측한 장래 침하량과 실계측 침하량을 산술적으로 표현하기 위해서는 침하속도 및 침하량 등의 지반특성과 현장조건이 다르기 때문에 비교가 불가능하여 본 연구에서는 계측 기간과 침하량에 대하여 정규화 변수를 도입하였다. 계측 기간의 영향을 정규화시키기 위하여  $t_c/T_{50}$ 와  $t_c/T_{90}$ 의 무차원 값을 도입하여 식 (3), (4)와 같이 정의하였다.

$$\frac{t_c}{T_{50}} = t_c \frac{\beta}{\alpha} \tag{3}$$

$$\frac{t_c}{T_{90}} = t_c \frac{\beta}{9 \times \alpha} \tag{4}$$

여기서  $\alpha, \beta$ 는 쌍곡선식 계수이고,  $t_c$ 는 초기 계측 기간이다. 따라서  $T_{50}, T_{90}$ 은 식 (5), (6)에서와 같이 쌍곡선식의 계수( $\alpha, \beta$ )로 산정할 수 있다. 여기서  $\alpha, \beta$  값은 계측 기간에 따라서 변화하기 때문에  $T_{50}$ 과  $T_{90}$  또한 계측 기간의 변화에 따라서 변화한다.  $T_{50}$ 과  $T_{90}$ 의 정의는 그림 4와 같다.

$$T_{50} = \frac{\alpha}{\beta} \quad (5)$$

$$T_{90} = \frac{9 \times \alpha}{\beta} \quad (6)$$

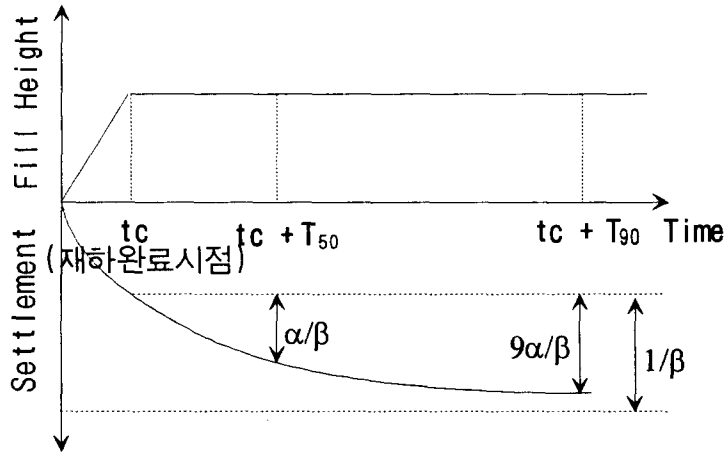


그림 4  $T_{50}$  과  $T_{90}$  의 정의

$$E_{50} = \frac{S_{m50} - S_{t50}}{S_{m50}} \quad (7)$$

$$E_{90} = \frac{S_{m90} - S_{t90}}{S_{m90}} \quad (8)$$

또한, 식(7), (8)은 침하량에 대한 정규화 변수로서  $S_{t50}$  과  $S_{m50}$  은 각각  $T_{50}$  에서 쌍곡선식의 예측 침하량과 계측 침하량이고,  $S_{t90}$  과  $S_{m90}$  은  $T_{90}$  에서 쌍곡선식의 예측 침하량과 계측 침하량이다. 그리고,  $E_{50}$  과  $E_{90}$ 은 각각 압밀도 50%와 90% 에서의 발생 오차이다.

Malaysia Muar 지역의 연약지반 현장에 대하여  $E_{50} - t_c/T_{50}$  과  $E_{90} - t_c/T_{90}$  의 상관 관계를 나타내면 그림 5, 6 과 같다.

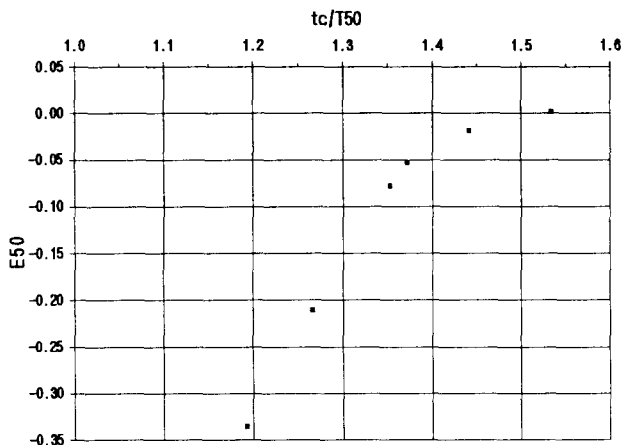


그림 5  $E_{50} - t_c/T_{50}$  (Mal-s)

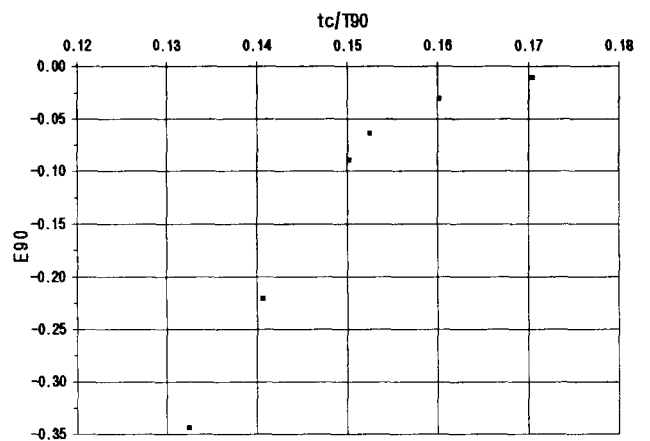


그림 6  $E_{90} - t_c/T_{90}$  (Mal-s)

### 2.3 계속 기간에 따른 쌍곡선법 예측의 신뢰성의 영향

초기 계측 기간의 변화에 따라서 쌍곡선법으로 지중 및 지표 침하 예측의 신뢰성을 평가하기 위하여  $E_{50} - t_c/T_{50}$  과  $E_{90} - t_c/T_{90}$  의 관계를 시공 사례 현장을 종합하여 나타내면 그림 7, 8 과 같다.

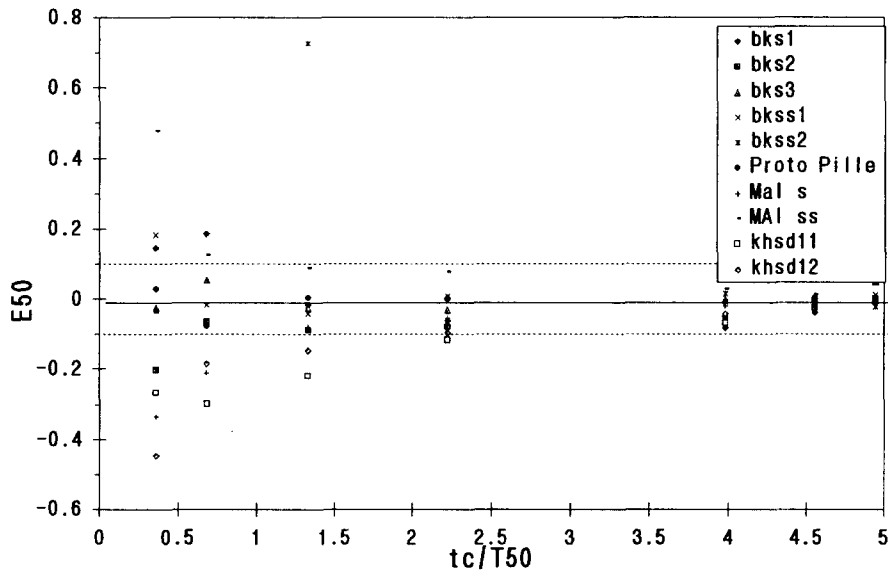


그림 7  $E_{50} - t_c/T_{50}$

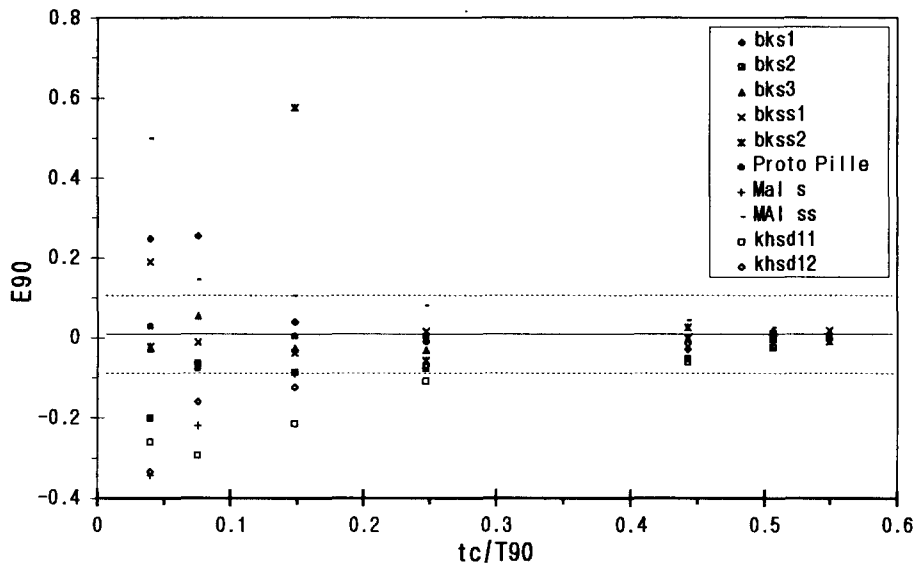


그림 8  $E_{90} - t_c/T_{90}$

시간의 정규화 변수인  $t_c/T_{50}$  와  $t_c/T_{90}$  가 길어질수록 계측치와 예측치의 오차값인  $E_{50}$ ,  $E_{90}$  이 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 계측 경과 시간이 증가할수록 쌍곡선 침하 예측의 신뢰성이 증가하는 것으로 나타났다.

모든 사례 현장에 대하여  $t_c/T_{50}$  가 2.2 일때, 예측의 최대 오차는 실제측치와 비교하여 10% 보다 작게 나타났고,  $t_c/T_{50}$  가 1.5 일때, 예측의 최대 오차가 15% 보다 작게 나타났다.

또한,  $t_c/T_{90}$  이 0.25 일때, 예측의 최대 오차는 10% 보다 작게 나타났고,  $t_c/T_{90}$  가 0.2 일때, 예측의 최대 오차는 15% 보다 작게 나타났다.

### 3. 결론 및 향후 연구 과제

본 연구에서는 쌍곡선법으로 장래 침하량을 예측함에 있어서 초기 계측 기간의 변화에 따라서 신뢰성 평가 방법에 대하여 제안하였다. 계측 기간에 정규화 변수를 사용하기 위하여  $t_c/T_{50}$  과  $t_c/T_{90}$  의 무차원 값을 정의하였다. 그리고, 이러한 2개의 무차원 값은 예측 시간에서의 쌍곡선식으로부터 구할 수 있다.

사례 연구 결과, 계측 경과 시간이 증가할수록 쌍곡선 침하 예측의 신뢰성이 증가하는 것으로 나타났으며, 계측기간의 정규화 변수인  $t_c/T_{50}$  와  $t_c/T_{90}$  가 각각 2.2 와 0.25 보다 크면, 실제측치와 쌍곡선 침하 예측의 오차값인  $E_{50}$  ,  $E_{90}$  는 10% 보다 작게 나타남을 알 수 있었다.

그러나 이러한 결과는 한정된 사례에 기초한 것이기 때문에, 제안된 값은 참고값으로 고려할 수 밖에 없다. 향후 좀 더 폭넓은 사례 연구를 수행하여 지반 고유의 소성지수, 압축성과 같은 지반 고유의 성질에 대한 영향도 함께 고려해야 할 것이다. 그리고, 다른 침하 예측 기법인 Asaoka 방법, Hoshino 방법 등과 같은 침하 예측 기법으로 유사한 사례 연구를 병행하여 다양한 조건에서의 연구가 요망된다.

### References

1. (주) 대우, (1995), "김해시 하수 종말 처리장 설치공사 기초지반에 대한 사전 토질조사 결과 보고서"
2. Dennes T. B., Apollo. S. E., Casan L. S. & Marolo. C. A. (1992), "Inverse Analysis Of Geotechnical Parameters On Improved Soft Bangkok Clay" Proc. ASCE J. Geotechnical Engineering, Div. Vol. 118, No. 7, July, pp.1012~1030.
3. Indraratna B., Balasubramaniam A. S. & Ratnayake. P. (1994), "Performance Of Embankment Stabilized With Vertical Drains On Soft Clay" Proc. ASCE J. Geotechnical Engineering, Div. Vol. 120, No. 2, Feb., pp.257~273.
4. Indraratna B. & Redana I. W. (1997), "Plane-Strain Modeling Of Smear Effects Associated With Vertical Drains" Proc. ASCE J. Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, Div. Vol. 123, No. 5, May, pp.474~478.
5. Hird C. C. et al. (1995), "Modelling The Effects Of Vertical Drain In 2-D Finite Element Analysis Of Embankment On Soft Ground" Can. Geotech. J. Vol. 32, pp. 795~807.
6. Miyakawa Ichiro. (1967), "A Reaserch On Preloading by Sand Mat And Drain", Soil And Foundation, Vol. 15, No. 3