

# 압밀해석을 위한 $\sqrt{s}$ - 예측기법

$\sqrt{s}$  - Observational Procedure for Consolidation Analysis

정 성 교* <sup>1</sup>	최 관 희* <sup>2</sup>
Chung, Sung-Gyo	Choi, Gwan-Hee
최 호 광* <sup>3</sup>	조 기 영* <sup>4</sup>
Choi, Ho-Kwang	Cho, Ki-Young

---

## ABSTRACT

Predictions of consolidation settlement and time must be always erroneous because of heterogeneity of soil media, errors associated with the measurement of soil parameters, drawback of consolidation theories and so on. When filling is done on compressible soils, the observational procedure is a useful means in practice of evaluating the final consolidation settlement and time. However, the existing observational procedures including some disadvantages such as the difficulty of finding the linearity in the settlement curves, the unavoidable personal error, and so on.

A new observational procedure( $\sqrt{s}$  method) is suggested here for the consolidation analysis in field. As the results of applying the  $\sqrt{s}$  method with other methods to two field data, the final settlements predicted by the  $\sqrt{s}$  method as well as by the Asaoka's method agreed well with the measured values. However, results obtained from the hyperbolic method(Tan, 1991) were always overestimated, and there happened many cases not to be predicted by the Hoshino's method. In the settlement curve from the  $\sqrt{s}$  method, the linearity between 60 and 90% of the average degree of consolidation is shown, and then the possibility of a personal error seems to be unusual. The final consolidation times(at  $U_{95}$ ) predicted by the  $\sqrt{s}$  method agreed well with the measured ones, but the ones by Asaoka and Tan(1996) methods were very much underestimated or overestimated, where  $U_{95}$  is the average degree of consolidation of 95%. The big errors of these two methods seem to result from unconsidering the effect of stage construction.

## 요 지

지반의 불균질성, 토질상수의 측정에 연관된 오차, 압밀이론의 단점 등으로 예측된 압밀침하량 및 시간은 항상 실측치와 잘 일치하지 않게 된다. 압축성 지반 위에 성토가 이루어질 때, 최종 침하

---

\*1 정회원, 동아대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*2 정회원, 삼안건설기술공사 토질부

\*3 정회원, 동명기술단

\*4 정회원, 동아대학교 대학원 토목공학과 박사과정

량과 압밀시간을 예측하기 위한 예측기법은 실무에서 유용한 수단이다. 그러나, 기존의 예측기법들에 의한 침하곡선에서 직선을 찾기가 어렵거나, 개인오차를 피할 수 없는 등의 단점을 내포하고 있다.

본 논문에서는 새로운 예측기법(√s법)으로 현장에서 압밀해석을 수행하기 위하여 제안되었다. 두 현장에 대하여 √s법과 함께 다른 기존의 방법들을 적용한 결과, √s법과 Asaoka법에 의해 예측된 최종침하량은 실측치와 좋은 일치율을 보여주었으나, 쌍곡선법(Tan, 1991)에서는 항상 과대평가된 결과를 또한 Hoshino 법에서는 많은 경우에 예측이 불가능한 결과를 보여주었다. √s법에 의한 침하곡선 상에서 평균압밀도가 60%와 90% 사이에서 직선을 나타내고 있어서 개인오차를 유발할 가능성이 희박하였다. √s법에 의하여 예측된 최종압밀시간은 실측치와 잘 일치하고 있는 반면에 Asaoka와 Tan(1996) 방법에 의한 결과는 아주 과소평가되거나 과대평가되었다. 이러한 이유는 후자의 두 방법에서 단계성토의 영향이 고려되지 못했기 때문인 것으로 사료된다.

Keywords : Observational procedure, Final consolidation settlement, Time, Stage construction

## 1. 서 론

근래에 이르러 국내는 물론 아시아 각국에서도 공단, 공항, 주거단지, 도로 등을 조성하기 위하여 해안 및 강변을 따라 대단위 매립 또는 성토사업이 활발히 추진되고 있다. 이 지역들은 대부분 연약점성토로 구성되어 있어서 매립공사시에 전단파괴 또는 과대한 압밀침하의 발생에 관심이 집중되어 있다. 이때 압밀침하는 최종성토고 및 압밀완료시점을 결정해야 하므로 대단히 중요한 사항이다.

일반적으로 압밀침하량과 시간은 각종 압밀 이론을 도입하여 예측되고 있으나 흙의 불균질성, 토질시험 및 해석해의 결함 등으로 실제 거동과는 잘 일치하지 않고 있다. 따라서, 이를 보완하기 위하여 현장에서는 실측침하량을 이용한 예측기법이 주로 사용되고 있다. 압밀침하 예측기법으로는 Asaoka(1978), 쌍곡선(Tan, 1991), Hoshino(1962), 유추(simulation)법 등이 있으나, 실제 적용시에 관계곡선이 직선성을 나타내지 않거나 또는 개인오차를 유발할 수 있는 소지를 다분히 지니고 있는 등의 단점을 지니고 있다.

본 연구에서는 기존의 예측기법이 지니고 있는 결점을 보완하기 위하여 쌍곡선법을 개

선한 새로운 침하예측기법(√s법)을 제안하였다. 새로이 제안된 침하예측법은 Terzaghi 및 Barron의 압밀해를 이용하여 임의의 제측시점 이후로부터 고려할 수 있는 최종압밀침하량, 연직 및 수평압밀계수를 산정하는 방법을 포함하고 있다. 이 √s법을 기존의 예측방법과 함께 압밀침하가 완료된 두 현장에 적용하여 최종압밀침하량 및 압밀시간을 실측치와 비교하였다.

## 2. √s 법의 제안

### 2.1 침하량

보완된 쌍곡선법인 √s침하예측법은 기존의 침하예측법을 실제현장에 적용할 경우에 종종 문제가 되고 있는 직선성을 확보하기 위하여 아래 식 (1)과 같이 압밀침하량의 제곱근(√s)과 시간(t) 관계를 쌍곡선으로 가정한다.

$$\sqrt{s} = \frac{t}{\alpha + \beta t} \quad (1)$$

그러므로

$$\lim_{t \rightarrow \infty} s = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{\frac{\alpha^2}{t^2} + \frac{2\alpha\beta}{t} + \beta^2} = \frac{1}{\beta^2} \quad (2)$$

따라서, 식 (1)은 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{t}{\sqrt{s}} = \alpha + \beta t \quad (3)$$

식 (3)은  $t/\sqrt{s}:t$  관계를 직선식으로 나타낸 것이다. 즉,  $\alpha$ 는 절편이며,  $\beta$ 는 이 직선의 기울기를 나타내고 있다. 따라서 최종침하량( $s_f$ )은 식 (2)에서와 같이 기울기의 제곱에 대한 역수인  $1/\beta^2$ 로 부터 얻을 수 있다. 실제로 압밀 초기에 침하계측을 수행할 수 없었던 경우에는, 그림 1과 같이  $(t-t_i)/(s-s_i):(t-t_i)$  관계를 사용하는 것이 현실적이다. 여기서  $s_i$ 는 임의시간  $t_i$  후에 측정된 침하량이다. 이러한 방법은 기존의 침하계측법에서와 같이 필요한 시기에 침하량을 초기화할 수 있는 것으로 매우 유용할 것이다.

따라서 임의시간 이후로부터 도시하였을 때에 식 (3)은 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$s_f = s_i + \frac{1}{\beta^2} \quad (4)$$

### 2.2.1 연직압밀계수

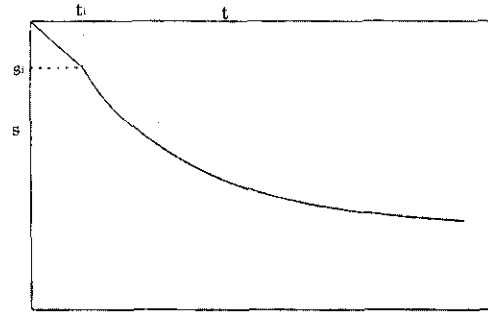
(1) 초기계측치를 고려한 경우

$\sqrt{s}$ 법에 의하면 평균압밀도 60%( $U_{60}$ )와 90%( $U_{90}$ )사이에서 직선을 나타내므로 Sridharan(1981, 1987)의 방법을 이용하여 압밀계수를 얻을 수 있다. 그림 2(a)는 Terzaghi 압밀해를 이용하여  $\sqrt{s}$ 법으로 나타낸 것이다. 여기서  $M$ 을  $U_{60}$ 과  $U_{90}$ 사이에서의 직선의 기울기( $=0.931$ ),  $C$ 를 절편( $=0.105$ )이라고 하면

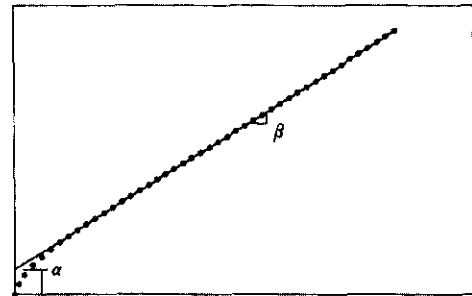
$$\begin{aligned} T_v / \sqrt{U_v} &= M \cdot T_v + C \\ &0.931 \cdot T_v + 0.105 \end{aligned} \quad (5)$$

이 곡선 상에서  $U_{60}$ 과  $U_{90}$  사이에 있는 임의의 압밀도와 원점을 잇는 직선의 기울기를  $M_1$ 라고 하고,  $M_1/M$ 을  $A$ 라고 하면 식 (6)이 성립한다.

$$T_v / \sqrt{U_v} = M_1 T_v \quad \text{또는} \quad 1/\sqrt{U_v} = M_1$$



(a)  $s:t$  곡선



(b)  $(t-t_i)/(s-s_i):(t-t_i)$  곡선

그림 1.  $\sqrt{s}$ 침하계측법을 위한 도형

이므로

$$A = M_1 / M = 1 / M \sqrt{U_v} \quad (6)$$

현장계측자료로부터 실제 침하량  $s$ 와 시간  $t$ 를 상기와 같은 방법으로 정리하면 그림 2(b)와 같으며, 관계식은 다음과 같이 얻어진다.

$$t/\sqrt{s} = m \cdot t + c \quad (7)$$

여기서  $m$ 은 현장계측곡선에서  $U_{60}$ 과  $U_{90}$ 사이의 직선기울기이며,  $c$ 는 절편이다.

직선 상의 임의의 점과 원점을 잇는 관계식은 식 (8)과 같게 된다.

$$t/\sqrt{s} = A \cdot m \cdot t \quad (8)$$

식 (8)을 식 (7)에 대입하면

$$t = \frac{c}{(A-1)m} \quad (9)$$

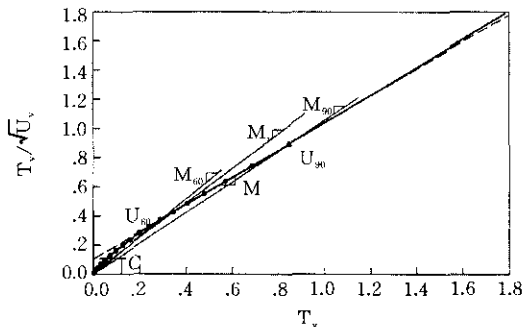
식 (9)를 Terzaghi 압밀이론식의 압밀계수에

대입하면 식 (10)과 같이 얻어진다.

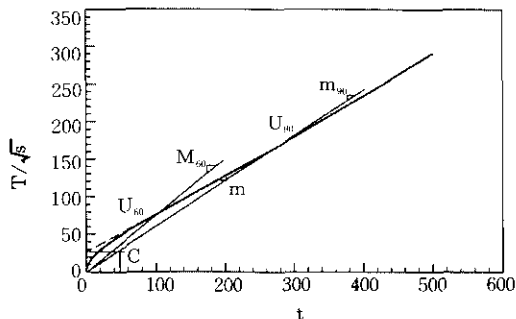
$$\begin{aligned} C_v &= T_v H_d^2 / t \\ &= T_v (A-1) m H_d^2 / c \\ &= B m H_d^2 / c \end{aligned} \quad (10a)$$

여기서,  $B = T_v (A-1) = C/M = 0.1095$ ,  $H_d$ 는 배수거리이다. 따라서, 식 (10a)는 식 (10b)로 간단히 표현될 수 있다.

$$C_v = 0.1095 m H_d^2 / c \quad (10b)$$



(a) Terzaghi 압밀해를 이용한  $T_v / \sqrt{U_v} : T_v$  곡선



(b) 실측자료를 이용한  $t / \sqrt{s} : t$  곡선

그림 2. 연직압밀계수를 위한 도형

(2) 임의의 계측시점으로부터 고려한 경우  
현장에서는 계측이 진행되고 있는 임의의 시점 이후에서부터 예측을 수행하는 경우가 자주 발생하고 있다. 이러한 경우에는 침하량 및 압밀계수의 예측값이 초기계측으로부터 모두 고려된 경우와는 상이하게 될 것이다.

Terzaghi 압밀이론식에서 평균압밀도는 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_v = \sqrt{\frac{4T_v}{\pi}} \quad T_v = \frac{C_v t}{H^2} \quad (0.2 \text{에 대하여}) \quad (11a)$$

$$U_v = 1 - \frac{8}{\pi^2} \exp\left(\frac{-\pi^2 T_v}{4}\right)$$

$$T_v = \frac{C_v t}{H^2} \geq 0.2 \text{에 대하여} \quad (11b)$$

일반적으로 임의의 시점은 압밀도 50% 이하에서부터 고려되므로 식 (11a)를 이용할 수 있다.

$$T_o = \frac{\pi}{4} U_o^2 \quad (12)$$

압밀도 60%와 90% 사이의 기울기( $M_i$ )가 직선이므로 식 (13)이 성립한다.

$$\frac{(T_{v60} - T_o)}{\sqrt{0.6 - U_o}} = M_1 (T_{v60} - T_o) + C_1 \quad (13a)$$

$$\frac{(T_{v90} - T_o)}{\sqrt{0.9 - U_o}} = M_1 (T_{v90} - T_o) + C_1 \quad (13b)$$

여기서  $C_1$ 은 절편이다. 그리고 식 (13)을 연립방정식으로 취하여  $B_1 = C_1 / M_1$ 을 구할 수 있다.

앞의 (1)절에서 기술된 방법과 동일하게 유도하면, 임의의 계측시점에서부터 고려될 경우의 압밀계수는 식 (14)와 같이 얻어질 수 있다.

$$C_v = B_1 m_1 H_d^2 / c_1 \quad (14)$$

여기서,

$$B_1 = \left( \frac{0.5617 \sqrt{0.9 - U_o}}{(0.8480 - 0.7850 U_o^2)(\sqrt{0.6 - U_o}) - (0.2863 - 0.7850 U_o^2)(\sqrt{0.9 - U_o})} - 1 \right) / (0.2863 - 0.7850 U_o^2)$$

$$U_o = s_o / s_s \leq 50\%$$

$s_o$  = 임의의 초기시점( $t_o$ )에서의 침하량

$m_1$  = 현장계측곡선에서  $U_{60}$ 과  $U_{90}$  사이의 직선기울기

$c_1$  = 현장계측곡선에서의 절편

$$t/\sqrt{s} = A'mt \quad (19)$$

## 2.2.2 수평압밀계수

(1) 초기계측치를 고려한 경우

연직배수재가 설치된 점성토 지반에서 과잉간극수가 수평방향으로만 흐른다고 가정하자. 이러한 조건에 대하여 Barron(1948), Hansbo(1981), Yoshikuni(1974), Onoue(1988) 등은 식 (15)과 같은 압밀해를 나타내었다.

$$U_h = 1 - \exp\left[\frac{-8T_h}{F(n)}\right] \quad (15)$$

여기서  $U_h$ 는 수평방향의 평균압밀도,  $T_h$ 는 수평방향의 시간계수 그리고  $F(n)$ 은 계수이다.

Barron의 해를 이용하여  $\sqrt{s}$ 법으로 도시화하면 그림 3(a)와 같이 된다. 이 그림에서 직선으로 나타나는  $U_{60}$ 과  $U_{90}$  사이의 기울기를  $M'$ , 종축과 만나는 절편을  $C'$  라고 하면 아래의 식이 성립한다.

$$T_h = \sqrt{U_h} = M'T_h + C' \quad (16)$$

이 곡선 상의  $U_{60}$ 과  $U_{90}$  사이에 있는 임의의 압밀도에서 원점을 잇는 직선의 기울기를  $M'_1$  라고 하고,  $M'_1/M'$ 를  $A'$  라고 하면 식 (17)이 얻어질 수 있다.

$$T_h / \sqrt{U_h} = M'_1 T_h \quad \text{또는} \quad 1/\sqrt{U_h} = M'_1$$

이므로

$$A' = M'_1 / M' = 1 / M' \sqrt{U_h} \quad (17)$$

연직배수재가 설치된 현장에서 계측자료를 이용하여  $\sqrt{s}$ 법으로 도시화하면 그림 3(b)와 같으며, 다음 식이 성립한다.

$$t/\sqrt{s} = m't + c' \quad (18)$$

여기서,  $m'$ 는 직선부분의 기울기이며,  $c'$ 는 절편이다.

직선 상의 한점과 원점을 잇는 관계식은 다음과 같이 된다.

식 (19)를 식 (18)에 대입하면

$$t = \frac{c'}{(A'-1)m'} \quad (20)$$

식 (20)을 이용하면 수평방향의 압밀계수는 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} C_h &= T_h D^2 / t \\ &= T_h (A'-1)m' D^2 / c' \\ &= B'm' D^2 / c' \end{aligned} \quad (21)$$

여기서,  $B' = T_h(A'-1) = C' / M'$ ,  $D$ 는 단위 연직배수공에 대한 영향원의 직경이다.

식 (15)에서 평균압밀도에 대한 압밀시간은  $F(n)$ 에 따라서 좌우되므로, 이 식을  $U_{60}$  및  $U_{90}$ 에 대하여  $F(n)$ 의 함수로 표현하면 식 (22)와 같이 된다.

$$T_{h,60} = -\frac{\ln(1-0.6)}{8} F(n) = 0.1145F(n) \quad (22a)$$

$$T_{h,90} = -\frac{\ln(1-0.9)}{8} F(n) = 0.2878F(n) \quad (22b)$$

식 (22)를 식 (16)에 대입하여 정의하면 식 (23)으로 된다.

$$(0.1479 - 0.1145M')F(n) = C' \quad (23a)$$

$$(0.3034 - 0.2878M')F(n) = C' \quad (23b)$$

식(23)을 연립방정식으로 풀면  $M' = 0.8975$ ,  $C' = 0.0451F(n)$  이므로  $B' = C' / M' = 0.05 \cdot F(n)$ 이다.

따라서 식 (21)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_h = 0.05F(n)m' D^2 / c' \quad (24)$$

(2) 임의의 계측시점으로부터 고려한 경우

현장계측이 임의의 시점으로부터 이루어질 때,  $U_{60}$  및  $U_{90}$ 에 대하여 식 (16)은 식 (25)와 같은 형태로 표현될 수 있다.

$$\frac{(T_{h60} - T_o)}{\sqrt{0.6 - U_o}} = M'_1(T_{h60} - T_o) + C'_1 \quad (25a)$$

$$\frac{(T_{h90} - T_o)}{\sqrt{0.9 - U_o}} = M'_1(T_{h90} - T_o) + C'_1 \quad (25b)$$

식 (25)를 연립방정식으로 풀어서  $M'_i$  및  $C'_i$ 를 구하면  $B'_i$ 가 얻어진다.

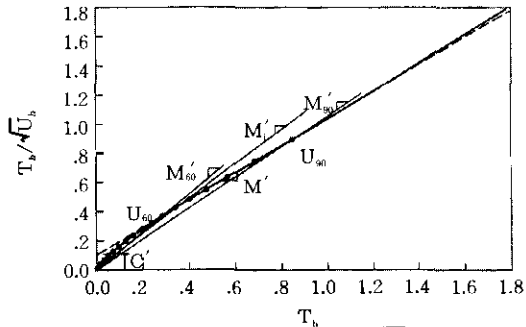
$$B'_i = C'_i / M'_i$$

$$= \left( \frac{0.1733\sqrt{0.9-U_o}}{\left(0.2878 + \frac{\ln(1-U_o)}{8}(\sqrt{0.6-U_o}) - (0.1145 + \frac{\ln(1-U_o)}{8})(\sqrt{0.9-U_o})\right)^{-1}} \right) \cdot \left( 0.1145 + \frac{\ln(1-U_o)}{8} \right) F(n) \quad (26)$$

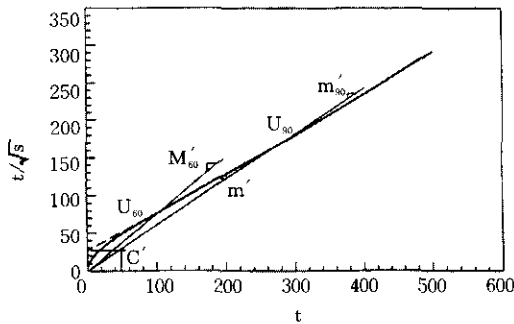
따라서, 수평방향의 압밀계수는 식 (27)과 같이 된다.

$$C_b = B'_i m'_i D^2 / c'_i \quad (27)$$

여기서,  $c'_i$  및  $m'_i$ 는 현장계측곡선에서 절편과 기울기를 각각 나타낸다.



(a) Barron 압밀해를 이용한  $T_b / \sqrt{U_b} : T_b$  곡선



(b) 실측자료를 이용한  $t/\sqrt{s} : t$  곡선

그림 3. 수평압밀계수를 위한 도형

### 3. 현장적용

#### 3.1 현장개요

##### 3.1.1 위치 및 공사개요

#### (1) 현장1

본 현장은 부산광역시 강서구 명지동 소재로 공유수면을 매립하여 주거단지를 조성하는 구역내의 도로성토 및 지하차도 축조를 위한 공사현장이다. 지반개량공법으로 지표면 위에 모래를 1.0~1.5m 두께로 포설하였으며, 2.0m 간격으로 팩드레인(PD)을 점토층 아래의 하부모래층내인 28.6~30.5m 깊이까지 매입하였다. 성토는 일반토사로서 6.0~15.0m 높이로 약 3.0년에 걸쳐 단계성토되었으며, 허용침하량내로 압밀침하가 완료된 시점에서 최종성토 고로부터 1.0~1.2m의 두께가 제거되었다(박, 1997).

#### (2) 현장2

본 현장은 부산광역시 남구 감만 1동 264~256번지에 위치하며, 부산항 4단계 컨테이너 전용부두를 건설하기 위하여 먼저 1991년 12월에 착공하여 94년 11월경에 안벽 및 호안공사가 완료되었다. 컨테이너 부지의 매립은 준설토, 일반토사 및 동해모래에 의하여 약 2년(1994. 6.~1997. 1.)에 걸쳐 실시되었다. 매립은 해수면 위로 2.0~3.0m 높이까지 수행되었으므로 총 매립고는 약 3.0~15m에 이른다.

지반개량은 시공성, 공기의 제한, 경제성 등을 감안하여 지역에 따라 PBD(Prefabricated Board Drain), 팩드레인(PD), 동다짐 및 선행재하공법이 매립층 위에서 채택되었다. PBD는 0.8m 간격의 정방형으로 배치되었으며, 점토층 아래의 모래층에 이를 때까지 약 5.0~19.0m 깊이로 매입되었다. 선행하중을 위하여 일반토사 및 모래를 약 3.0~9.0m 높이로 70~450일에 걸쳐 수행되었다.

PD는 1.0~1.2m 간격으로 배치되었으며, 타

설깊이는 하부 모래층의 상단인 약 5.0~19.0m 까지 이르렀다. 이 구간에서는 매립층 위에 약 2.0~6.0m 두께로 60~400일에 걸쳐 단계성토 되었다. 그리고 약 100~300일 동안의 압밀침하를 거쳐 허용침하량(10cm)을 만족하는 실제 침하에 이르렀을 때 과재성토(2.0~9.0m의 높이)를 제거하였다((주)대우, 1997).

### 3.1.2 지층구조 및 토질특성

#### (1)현장1

본 지역의 지질은 해수작용에 의하여 퇴적된 총적층이 34~73m 두께로 분포하고 있는

표 2. 현장1에서 점성토의 토질특성

	구 분	범 위	비 고
물리적 특성	200번체 통과율(%)	95 ~ 99 (97)	
	함수비, w(%)	40 ~ 64(54)	
	비중, G <sub>s</sub>	2.65 ~ 2.73(2.69)	
	액성한계, LL(%)	39 ~ 66(53)	
	소성지수, PI(%)	19 ~ 49(34)	
역학적 특성	일축압축강도, q <sub>u</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	0.06 ~ 0.79(0.50)	깊이에 따라 증가
	비배수전단강도, S <sub>v</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	0.08 ~ 0.58(0.42)	
압축특성	선형압밀응력, p <sub>e</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	0.72 ~ 1.09(1.60)	
	압축지수, C <sub>c</sub>	0.38 ~ 0.86(0.59)	

#### (2)현장2

본 지역의 지층은 해수면 아래에 해안퇴적층, 풍화대층 및 기반암이 위치하고 있다. 여기서 해안퇴적층은 표 3과 같이 점성토, 모래 및 자갈층으로 구성되어 있다. 그리고 주된 침하를 일으키는 점성토층의 토질특성은 표 4와

표 4. 현장2에서 점성토의 토질특성

	구 분	범 위	비 고
물리적 특성	200번체 통과율(%)	0 ~ 99 (73.2)	
	함수비, w(%)	25 ~ 63(40.8)	
	비중, G <sub>s</sub>	2.66 ~ 2.79(2.72)	
	액성한계, LL(%)	30 ~ 99(61.1)	
	소성지수, PI(%)	6.4 ~ 69(37)	
역학적 특성	일축압축강도, q <sub>u</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	0.08 ~ 3.06(1.04)	깊이에 따라 증가
	비배수전단강도, S <sub>v</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	0.15 ~ 1.22(0.62)	
압축특성	선형압밀응력, p <sub>e</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	0.45 ~ 4.00(1.75)	
	압축지수, C <sub>c</sub>	0.08 ~ 1.28(0.43)	

데, 대체로 사질토, 점성토 및 사력층으로 3구분 할 수 있다. 표 1은 각 층의 특성을 나타내고 있다. 그리고 표 2는 점성토층이 갖는 토질 특성을 보여주고 있는데, 해안점토가 지닌 일반적인 특성과 마찬가지로 특성값의 변화폭이 심하게 나타나고 있다.

표 1. 현장1의 지층구조

구분	심도(m)	두께(m)	흙의 종류	통일 분류법	비고
1	0~13	7~13	상부 사질층	SM, SP	
2	10~35	15~23	점성토층	CL, CH	
3	29~68	40~50	모래자갈층	GW, GM, SM	

같으며, 특성치의 변화폭이 아주 심하게 나타나고 있다.

표 3. 현장2에 대한 퇴적층의 지층구조

구분	두께(m)	흙의 종류	통일 분류법	비고
1	3~22	점성토층	ML, CL, CH	
2	1~26	모래층	SP-SM, SM, SC	
3	1~15	모래 자갈층	GW, GM, SM	

### 3.1.3 현장계측

#### (1) 현장1

평지주거단지 조성공사에서 도로부와 지하차도 부분의 성토관리를 위하여 사용된 현장계측기는 층별침하계, 간극수압계 및 지하수위계가 각각 16개소, 경사계가 6개소에 설치되었다. 계측빈도는 성토기간 동안에 1일 1회씩으로 수행되었으며, 성토완료 후에는 계측빈도를 늘려서 조정되었다(박, 1997 ; 최, 1997).

#### (2) 현장2

부산항 4단계 컨테이너 부두공사 현장에 설치된 현장계측기는 전 부지에 걸쳐 지표침하판 96개소, 층별침하계, 간극수압계 및 지하수위계가 각각 14개소, 경사계와 Tiltmeter가 각각 9 및 6개소에 설치되었다. 계측빈도는 성토 중에 주 3회씩으로 수행되었다.

## 3.2 각종 침하예측기법에 의한 비교

### 3.2.1 최종침하량의 비교

#### (1) 현장1

평지주거단지현장의 총 16개소의 층별침하계 중에서 침하가 종료된 9개소의 계측자료를 이용하여  $\sqrt{s}$ 법을 비롯한 각종 예측기법에 의하여 최종침하량을 추정하였다. 여기서, 각 층별침하계에는 3깊이에서 각각 소자가 설치되어 있었으므로, 각 층별침하계에서 3개씩 모두 27개의 계측자료를 얻을 수 있었다. 최종압밀침하량과 압밀소요시간은 부록의 그림 A.1을 참조하여 구할 수 있다.

그림 4는 실측침하량과 각종 예측기법에 의한 최종침하량을 비교한 것이다. 여기서, Asaoka(1978) 및 쌍곡선법(1991)에 의하여 예측된 최종침하량의 10cm(허용침하량) 이내에 모두 도달할 때, 선행하중(과재성토)를 제거하고 이때의 침하량을 최종실측침하량으로 정의하였다. 그러나 엄격한 의미에서는 최종침하량이 아니다. 이 그림에서 보면, 예측 최종침하량

은 Asaoka법에 의한 평균값이 실측침하량의 0.99(0.96~1.09)배로 실측침하량에 가장 근접하게 나타났지만, 실제로 2차압축침하량을 포함한 잔류침하량을 고려하면 다소 과소평가된 결과로 생각할 수 있다. 다음으로 근접한 결과가  $\sqrt{s}$ 법에 의한 예측치로써 실측치의 1.04(0.99~1.08)배이다. 위와 같은 잔류침하량을 생각하면 4% 정도의 과대평가는 허용될 수 있는 예측값으로 사료된다. 그리고 쌍곡선 및 Hoshino법에 의한 결과는 각각 평균 10%(1.03~1.38) 및 17%(1.08~1.38)로 과대평가되고 있다. 이러한 결과는 최 등(1997)에서 기술된 이론 및 현장적용 결과에서와 동일한 순서이다.

표 5에서는 각종 예측기법에 의한 최종침하량의 크기 순서를 나타내고 있다. 즉, 각 방법들 아래에 기록된 수치는 각각의 등수에 해당

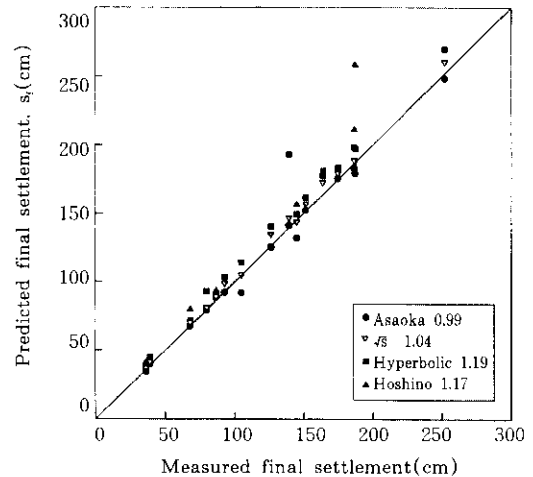


그림 4. 현장1에 대한 각종 예측기법에 의한 최종침하량의 비교

표 5. 현장1에 대한 예측최종침하량의 크기순서

등위	쌍곡선법	Hoshino법	Asaoka법	$\sqrt{s}$ 법	비고
1	17	8	-	1	
2	7	-	3	17	
3	1	-	16	9	
4	1	1	9	-	
예측불가	1	18	-	-	



하는 것수의 합계를 의미한다. 이 표에서 보면 Asaoka,  $\sqrt{s}$  및 쌍곡선법의 순서로 크게 나타나고 있으나, Hoshino법의 경우는 27개의 자료 중에서 과반수 이상인 18개의 자료에서 예측이 불가능 했으며, 얻어진 결과들은 대체로 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그리고 최(1997)를 참고하면,  $\sqrt{s}$ 법을 적용했을 경우에는 평균압밀도 60~70%에서부터 예측곡선이 직선으로 나타났지만, 기타 방법들에서는 80% 이상에서 직선성을 보여서 최종침하량의 초기 예측이 어려웠음을 보여주었다. 그리고, Asaoka 법에서는 직선성이 좋지 않아서 개인오차를 유발할 소지가 다분히 있다는 것을 보여주고 있다.

(2)현장2

부산항 4단계 컨테이너 전용부두 건설공사에서 PBD 및 PD 구간에 대하여 실시된 총 96개의 지표침하판에 의한 계측자료를 이용하여 최종침하량을 분석하였다. 여기에서도 실측된 최종침하량은 앞서서와 같이, 실측침하량이 Asaoka와 쌍곡선법에 의해 예측된 최종침하량에서 허용침하량인 10cm를 뺀값을 모두 초과될 때, 이 값을 실측된 최종침하량으로 정의하였으며 선행하중을 제거하였다.

그림 5는 실측침하량과  $\sqrt{s}$ 법을 포함한 각종 예측기법으로부터 계산된 최종침하량을 나타내고 있다. 이 그림에서 보면, Asaoka법에 의한 예측치가 실측치보다 1.019(0.94~1.16)배,  $\sqrt{s}$ 법에 의한 것이 1.032(0.95~1.09)배, 쌍곡선법에 의한 것이 1.044(0.98~1.23)배 그리고 Hoshino법에 의한 것이 1.085(0.95~1.34)배로 나타났다. Hoshino법의 결과가 대체로 크게 산출되며 평균적으로 8.5%가 과대평가되고 있지만, 기타 방법에 의한 결과는 5%이내의 오차로 과대평가되고 있기 때문에 양호한 예측결과라고 생각된다. 그러나,  $\sqrt{s}$ 법에 의한 오차의 범위가 다른 방법들에 비하여 훨씬 좁다는 점에서 우수성을 엿볼 수 있다.

표 6은 예측기법에 따른 크기순서를 나타내

고 있다. 이 표에서도 그림 5에서와 같이  $\sqrt{s}$ 법 및 Asaoka법에 의한 결과가 비슷하며, 쌍곡선법 및 Hoshino법에 의한 것이 전자의 것들보다 크게 나타남을 볼 수 있다. 본 현장의 경우에서도 Hoshino법에 의하여 예측불가한 자료가 7개로 집계되었지만, 현장1에 비하여 비교적 작은 비율이다. 그리고, 예측곡선의 직선성에 대한 문제는 현장1의 경우와 동일하였으며, 역시  $\sqrt{s}$ 법에 의한 것이 직선성이 좋았고 또한 평균압밀도 60~70%에서부터 예측이 가능하였다. 따라서 다른 방법들이 지닌 단점(최 등, 1997)을 고려하면  $\sqrt{s}$ 법의 적용성은 우수하다고 할 수 있을 것이다.

최종압밀소요시간은 1차압밀이 100%에 도달될 때의 시간을 의미하지만, 실제적으로 이 시간은 거의 무한대에 가까운 값에 해당한다. 따라서, 여기서는 평균압밀도 95%에 도달되는

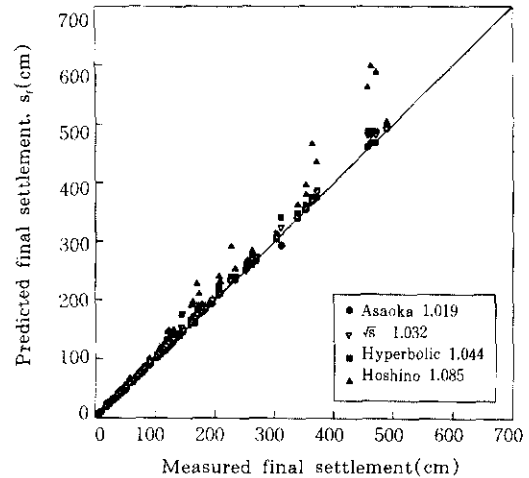


그림 5. 현장2에 대한 실측 및 각종 예측기법에 의한 최종침하량의 비교

표 6. 현장2에 대한 예측최종침하량의 크기순서

등위	쌍곡선법	Hoshino법	Asaoka법	$\sqrt{s}$ 법	비고
1	16	70	13	2	
2	63	13	8	17	
3	17	5	11	61	
4	-	1	64	16	
예측불가	-	7	-	-	

시간을 최종압밀시간이라고 정의하였다. 이때 평균압밀도는 식(4)로써 구한 최종압밀침하량에 대한 임의 시간에서의 침하량으로 가정하였다.

그림 6은 95% 평균압밀도에 도달하는 실측된 압밀시간과  $\sqrt{s}$ 법을 포함한 다른 예측기법에 의한 압밀시간을 비교한 것이다.  $\sqrt{s}$ 법에 의한 예측압밀시간( $t_p$ )은 식 (15)에  $T_v = C_v \cdot t/D^2$ 과 식 (27)을 대입하여 정리하면 다음과 같이 얻어질 수 있다. 식 (28)은 임의 계측시점( $t_c$ ) 이후에 소요되는 압밀시간을 예측하는 공식이다.

$$t_1 = \frac{-c'_1 \ln(1 - U_h)}{8B'_2 m'_1} \quad (28)$$

여기서  $B'_2 = B'_1/F(n)$ 으로 계수이며,  $U_h$ 는 요구되는 압밀도(예로서 0.95)이다. 다른 예측기법에서와 마찬가지로  $\sqrt{s}$ 법에서도 압밀시간은 배수정효과(well resistance) 및 교란효과(smear effect)에 무관하게 얻어지게 된다.

그림 6에서 보면,  $\sqrt{s}$ 법에 의한 압밀시간은 실측치의 0.81~1.05(평균 0.91), Asaoka법에서는 0.20~0.58배(평균 0.37) 그리고 수정쌍곡선법(Tan, 1996)에서는 0.30~1.22배(평균 0.59)로 나타났다. 이 결과에 의하면,  $\sqrt{s}$ 법에 의하여 최종 압밀시간을 예측하는 것이 타 방법들에 비하여 월등히 우수하며, 실제값에도 근사하게 일치함을 알 수 있다. 타 방법들에서 큰 오차를 보인 이유는 단계성토에 따른 지연효과를 고려하지 못하였기 때문이다. 즉, 단계성토의 영향은 임의의 시간( $t_c$ ) 이후에 소요되는 압밀소요시간( $t_1$ )을 식 (28)과 같이 고려하였기 때문이다(부록의 그림 A.1을 참조). 본 현장의 경우에 최종 성토단계가 수행되는 직전의 평균압밀도가 약 60~70%를 초과하였으나,  $\sqrt{s}$ 법을 제외한 다른 방법에서는 이러한 영향을 고려할 수 없었기 때문이었다(최, 1997). 그리고 수정쌍곡선법에서는 연직배수의 영향( $U = 1 - (1 - U_v)(1 - U_h)$ )을 고려하였지만 오차가 아주 크게 나타났다.

## (2)현장2

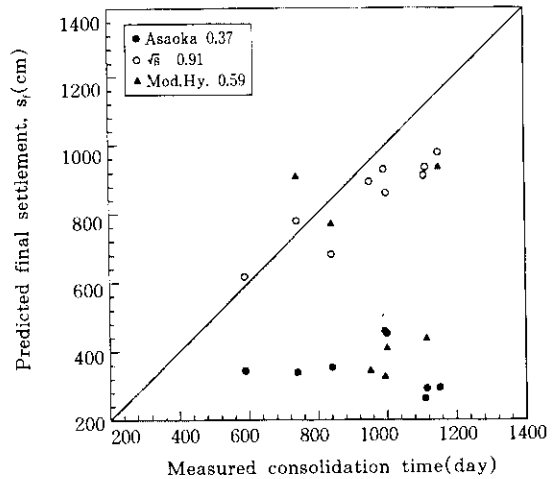


그림 6. 현장1에 대한 최종압밀시간의 실측 및 예측값의 비교

그림 7은 현장2에 대한 최종압밀시간의 실측값과 예측값을 비교한 것이다. 앞의 식 (28)에 의하여 계산된  $\sqrt{s}$ 법의 결과는 실측값의 0.51~1.43배(평균 0.99배), Asaoka법에서는 0.13~2.82배(평균 0.85배) 그리고 수정쌍곡선법에서는 1.04~3.13배(평균 1.43배)로 얻어졌다. 이 그림에서 보면,  $\sqrt{s}$ 법에서는 2개의 값을 제외하면 예측치가 실측치와 아주 근접할 뿐만 아니라 평균적으로 실측치와 아주 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러나 Asaoka법에서는 약 15%의 과소평가, 또한 수정쌍곡선법에서는 약 43%의 과대평가로 나타내고 있다. 후자의 두 방법에서 발생한 오차는 현장1에서와 같이 단계성토의 영향을 고려하지 못한 이유에서 유발된 것으로 사료된다. 이 현장에서도 최종 단계성토가 수행되기 직전에 이미 70% 이상의 압밀이 진행되었기 때문이다.

단계성토가 수행되는 현장에 대해서 일반적으로 최종단계의 성토에 따른 침하량을 분석하여 최종압밀시간을 예측하고 있으나, 기존의 예측기법에서는 최종 성토단계 이전의 영향을 고려할 수 없으므로 큰 오차를 유발하게 된다.

따라서,  $\sqrt{s}$ 법은 최종 성토단계 이전의 영향을 고려할 수 있는 유일한 압밀시간 예측법일 뿐만 아니라 실측치와도 아주 좋은 일치율을 보여 주고 있으므로 실무에 직접 사용될 수 있을 것으로 추천된다.

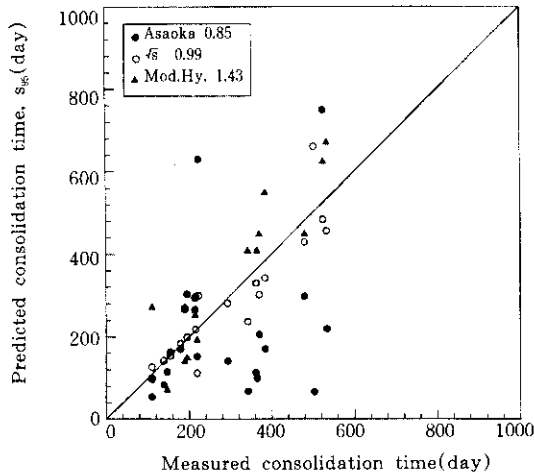


그림 7. 현장에 대한 최종압밀시간의 실측 및 예측 값의 비교

#### 4. 결 론

점성토 지반 위에 성토가 수행될 경우에 최종침하량과 압밀시간을 예측하기 위한 새로운 예측기법( $\sqrt{s}$ 법)이 제안되었으며, 이 예측기법을 기존의 방법들과 함께 두 현장에 적용한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1)  $\sqrt{s}$ 법에 의한 침하곡선에서 평균압밀도가 60%와 90% 사이에서 직선성이 아주 좋아서 개인 오차의 유발가능성이 적었으나, 기존의 다른 방법에서는 그렇지 못했다.
- (2)  $\sqrt{s}$ 법에 의한 최종 침하량의 예측은 실측치와 아주 잘 일치하였으며 Asaoka법에 의한 것과 비슷하였다. 그러나 쌍곡선법에 의한 결과는 약간 과대평가 되었으며, Hoshino법은 적용성이 좋지 못하였다.

- (3)  $\sqrt{s}$ 법에 의하여 제안된 최종압밀시간의 예측법은 단계성토의 영향을 고려할 수 있는 유일한 방법으로 실측치와 아주 좋은 일치율을 나타내는 결과를 보여주었다. 그러나, 단계성토의 영향을 고려할 수 없는 Asaoka 및 수정쌍곡선법(Tan, 1996)에서는 크나 큰 오차를 나타내었다.

앞으로 많은 현장에  $\sqrt{s}$ 법이 적용되어 이 방법의 타당성이 입증되길 기대한다.

#### 참 고 문 헌

1. (주)대우 (1997), "부산항 4단계 컨테이너 터미널 부지 지반개량공사 보고서".
2. 박성수 (1997), "선형재하공법의 적용에 따른 지반침하의 예측 및 현장제측". 공학석사 학위논문, 동아대학교.
3. 최관희 (1997), " $\sqrt{s}$  침하예측기법 및 적용", 공학석사 학위논문, 동아대학교.
4. 최호광, 이대명, 백승훈, 정성교 (1997), "새로운 침하예측기법 및 적용", 97 가을학술발표회논문집, 한국지반공학회, pp. 37~47.
5. Asaoka, A. (1978), "Observational procedure of settlement prediction". Soils and Foundations, JSSMFE, Vol. 18, No. 4, pp. 87~101.
6. Barron, R. A (1948), "Consolidation of fine-grained soils by drain wells". Trans ASCE, Vol. 113, pp. 718~754.
7. Hansbo, S. (1981), "Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains". Proc. 10th International Conference on SMFE, Stockholm, Vol. 3, pp. 677~682.
8. Onoue, A. (1988), "Consolidation by vertical drains and taking well resistance and smear into consideration", Soils and Foundations, Vol. 28, No. 4, pp. 165~174.
9. Sridharan, A. and Sreepada Rao, A. (1981), "Rectangular Hyperbola Fitting Method for One Dimensional Consolidation", Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 4, No. 4, Dec. pp. 161~168.

10. Sridharan, A., Murthy, N. S. and Prahash, K. (1987). "Rectangular hyperbola Fitting method of consolidation analysis", *Geotechnique*, Vol. 37, No. 3, pp. 335~368.
11. Tan T. S. et al (1991). "Hyperbolic method for consolidation analysis", *JGE*, ASCE, Vol. 117, No. 11, pp. 1723~1737.
12. Tan, S. A. (1995). "Validation of hyperbolic method for settlement in clays with vertical drains". *Soils and Foundations*, JSSMFE, Vol. 35, No. 1, pp. 101~113.
13. Tan, S. A. and Chew S. H. (1996), "Comparison of the hyperbolic and Asaoka observational method of monitoring consolidation with vertical drains", *Soils and Foundations*, JGS, Vol. 36, No. 3, pp. 31~42.
14. Yoshkuni, H. (1979). "Design and construction control of vertical drain methods". Doctoral thesis, Found. Engng. Series, Gihodo, Tokyo.
15. 星野 和(1962), "最新にあける基礎の諸問題", *土質學會第17回年次學術*, 日本土木學會, pp. 63~67.

(접수일자 1998. 1. 7.)

# 부 록

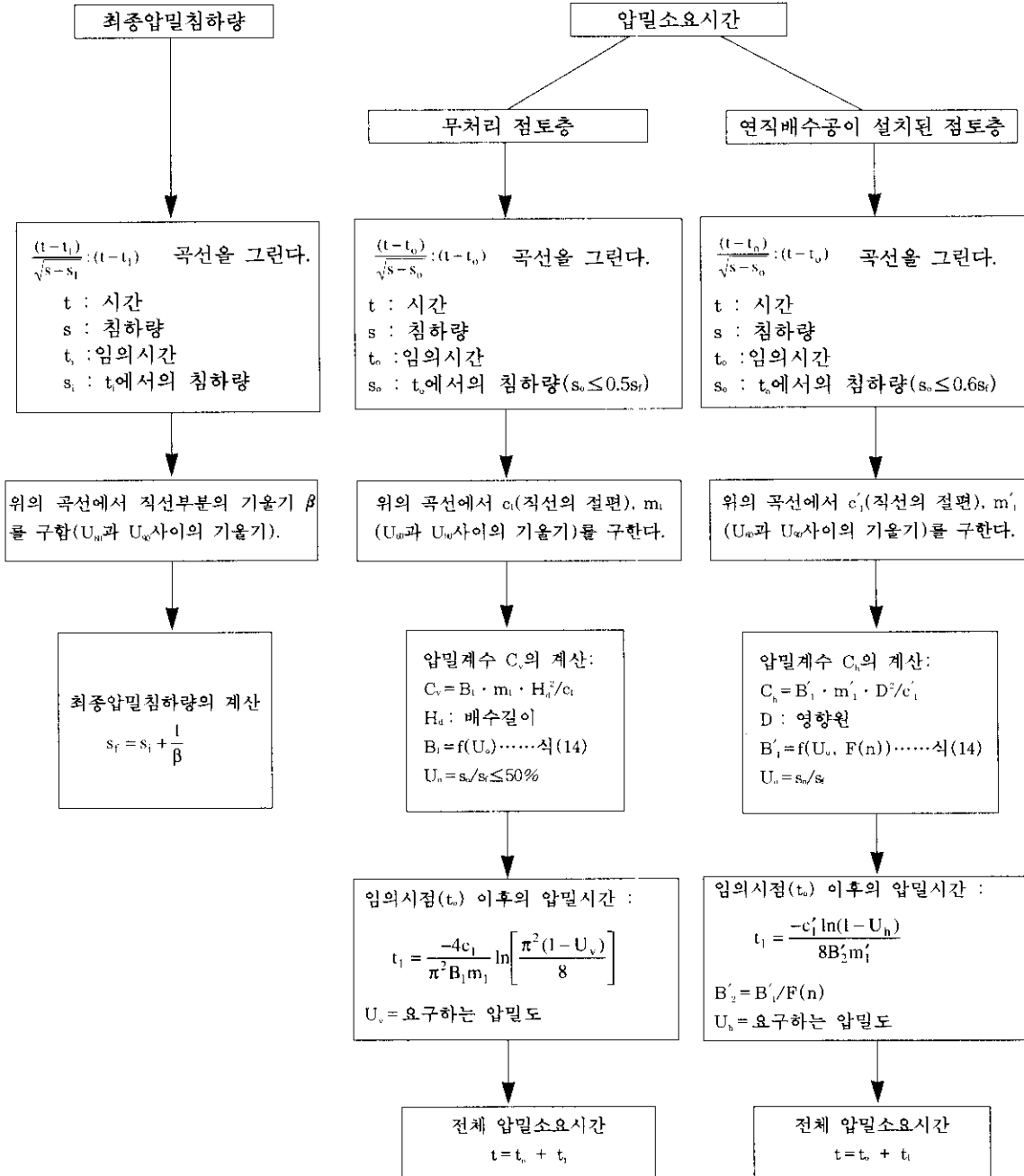


그림 A.1 최종압밀침하량 및 압밀소요시간 예측을 위한 흐름도