

壓密沈下 計測分析技法의 開發에 관한 研究

A Development of Practical Analysis Method for the Consolidation Settlements

김 준 석¹ Kim, Joon-Seok

김 주 용² Kim, Ju-Yong

Abstract

The settlement measured in the field shows a considerable difference from the predicted settlement due to various factors such as nonhomogeneous soft layers, sampling disturbance, erroneous selection of soil parameters and deficiency of consolidation theories among others. Therefore, analysis of actual settlement behavior based on the instrumentation and measurement data during consolidation period is a very useful procedure in evaluating the rates of consolidation settlement. This paper introduces a new practical method of analyzing consolidation settlement behavior, which is generalized and formulated from the existing analysis methods such as Hyperbolic method, Hoshino method and \sqrt{s} method. Through case studies, it is shown that the proposed method is a superior technique in reflecting the measured settlement behavior.

요 지

연약지반의 불균질성, 시료의 교란, 토질상수의 입력오차, 압밀이론의 단점등으로 예측된 압밀침하량 및 시간은 대부분 실측치와 잘 일치하지 않고 있다. 따라서 압밀기간동안 계측자료를 활용한 침하량 예측기법은 실무에서 매우 유용한 수단이라 할 수 있다. 본 논문에서는 예측기법으로 많이 활용되는 쌍곡선법, 아사오카법, 호시노법을 비롯한 최근에 제안된 \sqrt{s} 법의 이론적 공통점을 바탕으로 아사오카법을 제외한 나머지 분석기법들에 대하여 일반화된 쌍곡선 형태의 수식화 작업으로 새로운 분석 기법을 제안하였으며, 사례를 통하여 유용한 계측분석기법으로 적용성을 확인하였다.

Keywords : Consolidation settlement, Hyperbolic method, Hoshino method, \sqrt{s} method, Measurement data

1. 서 론

연약지반 관리기법으로 일반적으로 압밀침하량과 시간은 각종 압밀이론을 도입하여 예측되고 있으나 지반의 불균질성, 토질시험 및 해석해의 결함 등으로 실제 거동과는 잘 일치하고 않고 있다. 따라서, 이를 보완하기 위하여 현장에서는 실측침하량을 이용한 예측기법

이 주로 사용되고 있다. 압밀침하 예측기법으로는 아사오카법(1978), 쌍곡선법(Tan, 1991), Hoshino법(1962), \sqrt{s} 법(정성교, 1987) 등이 있으나, 실제 적용시에 관계 곡선이 직선성을 나타내지 않거나 침하-시간 곡선의 형태가 미리 국한되어 졌다는 단점을 지니고 있다.

본 연구에서는 쌍곡선법(Tan, 1991), Hoshino법(1962), \sqrt{s} 법(정성교, 1987)의 이론적 특성을 고찰하고 이들

1 정희원, 청운대학교 건설토목환경공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Chungwoon Univ., jskim@chungwoon.ac.kr)

2 정희원, 대우엔지니어링 부장 (Member, Manager, Daewoo Engrg. Co.)

3가지 분석방법들의 침하-시간 곡선식을 단일화된 한 개의 수식으로 도출화 하여 새로운 계측분석기법을 제안하였다. 또한 Terzaghi식과 Barron식을 이용한 침하 자료를 생성시켜 각 분석기법들에 의한 예측특성을 고찰하였으며 개발된 새로운 분석기법의 특성을 연구하였다.

2. 기존 계측분석기법 이론

본 절에서는 새로운 계측분석기법 모델을 개발하기 위하여 기존 계측분석기법인 쌍곡선법, 호시노법(Hoshino 법), \sqrt{s} 법, 아사오카(Asaoka)법의 이론적 특성을 고찰하였다.

2.1 쌍곡선법

쌍곡선법은 침하-시간의 관계를 식 (1)과 같이 쌍곡선 식으로 가정한 뒤 식 (1)을 식 (2)와 같이 선형방정식으로의 변환한 후, 선형방정식을 이용하여 종축에 $t/(S_t - S_0)$, 횡축에 t 를 취해 측정치를 도면화하여 선형 회귀분석을 통하여 α, β 를 산정하는 방법이다.

- 침하 - 시간 곡선

$$S_t = S_0 + \frac{t}{\alpha + \beta t} \quad (1)$$

- 최종침하량

$$S_f = S_0 + \frac{1}{\beta} \quad (1.1)$$

여기서, S_t : 임의의 시간 t 에서의 침하량
 S_f : 최종 침하량

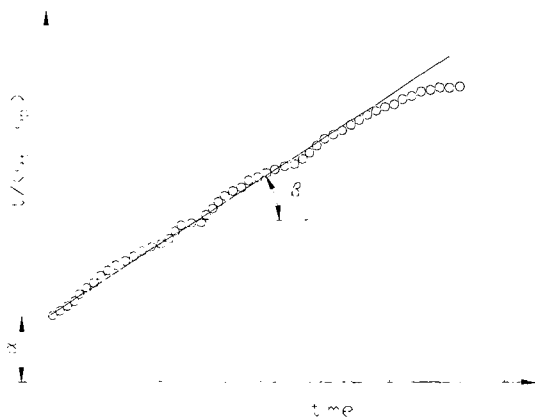


그림 1. 쌍곡선법의 선형 축변환

S_0 : 검토시점에서의 침하량
 t : 검토 시점부터의 경과시간
 α, β : 계수

- 선형방정식으로의 변환

$$\frac{t}{S_t - S_0} = \alpha + \beta t \quad (2)$$

2.2 호시노법(Hoshino법)

호시노법은 침하 - 시간 관계를 식 (3)과 같이 가정한 뒤 식 (3)을 식 (4)와 같이 선형방정식으로의 변환한 후, 선형방정식을 이용, 종축에 $t/(S_t - S_0)^2$, 횡축에 t 를 취해 측정치를 도면화하여 선형 회귀분석을 통하여 α, β 를 산정 하는 방법이다.

- 침하 - 시간 곡선

$$S_t = S_0 + \sqrt{\frac{t}{\alpha + \beta t}} \quad (3)$$

- 최종침하량

$$S_f = S_0 + \frac{1}{\sqrt{\beta}} \quad (3.1)$$

- 선형방정식으로의 변환

$$\frac{t}{(S_t - S_0)^2} = \alpha + \beta t \quad (4)$$

2.3 \sqrt{s} 법

\sqrt{s} 법은 침하 - 시간 관계를 식 (5)와 같이 가정한 뒤 식 (5)를 식 (6)과 같이 선형방정식으로의 변환한 후, 선형방정식을 이용, 종축에 $t/\sqrt{S_t - S_0}$, 횡축에 t 를 취해 측정치를 도면화하여 선형 회귀분석을 통하여 α, β 를 산정하는 방법이다.

- 침하 - 시간 곡선

$$\sqrt{S_t - S_0} = \frac{t}{\alpha + \beta t} \quad (5)$$

- 최종침하량

$$S_f = S_0 + \frac{1}{\beta^2} \quad (5.1)$$

- 선형방정식

$$\frac{t}{\sqrt{S_t - S_0}} = \alpha + \beta t \quad (6)$$

2.4 아사오카(Asaoka)법

아사오카(Asaoka)법은 침하 - 시간 곡선을 식 (8)과 같이 가정한다. Mikasa(1963)에 의해 유도된 식 (7)의 1차원 압밀의 편미분 방정식을 미분 방정식의 형태로 전환하여 a 를 정의한다. 최종침하량 산정은 그림 2의 (a)처럼 일정시간 등간격의 침하량을 나눈 다음 그림 2의 (b)와 같이 횡축에는 S_1, S_2, \dots 를, 종축에는 S_2, S_3, \dots 를 표시한후 회귀분석을 통한 직선과 원점에서 45° 를 그어 만나는 점을 최종침하량으로 산정한다. 계수의 산정은 $a = -\ln(\beta)/\Delta t$ 로 하고, β 값은 그림 2(b)의 회귀분석에 의한 직선의 기울기로부터 구한다. 여기서, Δt 는 등시간 간격을 의미한다.

$$C_v \frac{\partial^2 \varepsilon_v}{\partial z^2} = \frac{\partial v}{\partial t} \quad (7)$$

여기서, ε_v : 수직변형률
 v : 체적변형률
 C_v : 압밀계수

• 침하 - 시간 곡선

$$S_t = S_f - (S_f - S_0)\exp(-t/a) \quad (8)$$

여기서, S_0, S_f = 최초, 최종 압밀침하량
 a = 계수 (= $5/12 h^2/C_v$)

3. 새로운 계측분석기법 모델 개발

본 절에서는 2절에서 고찰된 기존 계측분석기법의 이론적 특성을 고려한 새로운 계측분석기법 모델을 개발

하였다.

쌍곡선법과 호시노법, \sqrt{s} 법의 침하-시간곡선 및 계수를 산정하기 위한 선형방정식을 살펴보면 매우 유사한 점이 있음을 알 수 있다. 이들 수식을 단일화된 수식으로 일반화 하면 다음 식 (9)와 같다.

$$S_t = S_0 + \left(\frac{t}{\alpha + \beta t} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (9)$$

앞의 식 (9)를 선형화 하면 다음 식 (10)과 같다.

$$\frac{t}{(S_t - S_0)^\gamma} = \alpha + \beta t \quad (10)$$

여기서 α, β, γ : 일반화된 쌍곡선법의 곡선계수

식 (9)와 식 (10)에서 곡선계수 γ 에 따라 앞에서 기술된 각 분석기법들과 동일하게 수식화 할 수 있다.

$\gamma=1$ 일 경우 : 쌍곡선법 (식 (1)과 (2) 참조)

$\gamma=2$ 일 경우 : 호시노법 (식 (3)과 (4) 참조)

$\gamma=0.5$ 일 경우 : \sqrt{s} 법 (식 (5)과 (6) 참조)

따라서 침하-시간 곡선식을 나타내는 식 (9)는 일반화된 쌍곡선 곡선형태로서 γ 값에 따라 쌍곡선법과 호시노법, \sqrt{s} 법의 곡선을 나타낼 수 있을 뿐만 아니라 γ 값에 따라 다양한 침하-시간 곡선형태를 나타낼 수 있음을 알 수 있다.

식 (9)로부터 최종침하량은 다음 식 (11)로 산정된다.

$$S_f = S_0 + \frac{1}{\beta^{1/\gamma}} \quad (11)$$

곡선계수 γ 는 식 (10)의 측정값과 예측값의 상관도가

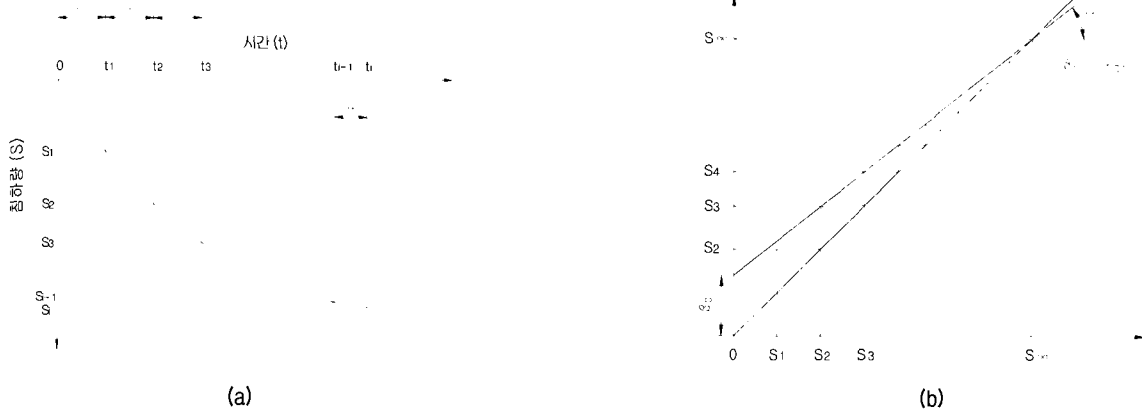


그림 2. 아사오카법의 계측분석기법

최대가 되도록 하거나 식 (9)의 예측값과 실측값의 오차를 최소화 하도록 산정한다. 곡선계수 γ 가 결정되면 식 (10)과 같은 선형화 작업을 수행한 후 회귀분석에 의하여 계수 α 와 β 를 산정할 수 있다.

개발된 계측분석기법은 기존방법처럼 침하-시간 곡선의 형태를 미리 결정하고 나서 계수 α 와 β 를 산정하는 방법이 아닌 계측값과 가장 잘 일치하는 쌍곡선 형태의 곡선을 계수 γ 를 통하여 결정할 수 있는 특성이 있다.

4. 계측분석기법의 적용예제

3절에서 제안된 새로운 계측분석기법 모델의 적용성을 확인하기 위하여 예제해석을 실시하였다. Terzaghi 평균압밀도와 Barron식으로 시간에 따른 침하자료를 생성시켜 각 분석기법들을 이용하여 분석한 결과에 대하여 고찰하였다. 침하자료는 Terzaghi인 경우에 수직압밀 계수($C_v = 1 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$)와 Barron인 경우에 수평압밀 계수($C_h = 5 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{sec}$) 및 배수재설치간격/배수재등가직경 비를 27로 가정하여 계산되는 압밀도에 총침하량 100cm를 곱하여 생성시켰다.

쌍곡선법과 호시노법, \sqrt{s} 법 및 아사오카법의 미지의 곡선계수는 2개이므로 다음 3가지 경우에 대하여 계측분석기법의 특성을 고찰하였다.

- ① 최종침하량(S_f)를 알고 한개의 시간-침하자료를 이용한 경우(1점법)
- ② 두개의 시간-침하자료를 이용한 경우(2점법)

③ 침하자료들에 대한 회귀분석을 이용한 경우(통계법)

4.1 최종침하량(S_f)를 알고 한개의 시간-침하자료를 이용한 경우(1점법)

아사오카법을 제외한 쌍곡선법과 호시노법, \sqrt{s} 법은 식 (11)에서 최종침하량 $S_f = \frac{1}{\beta^{1/\gamma}} = 100$ 를 이용해서 β 값을 산정할 수 있다.

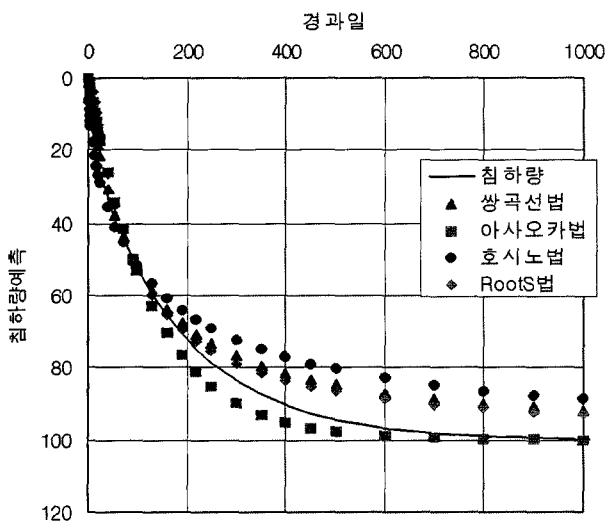
쌍곡선법 ($\gamma=1$ 일 경우) : $\beta=0.01$

호시노법 ($\gamma=2$ 일 경우) : $\beta=0.0001$

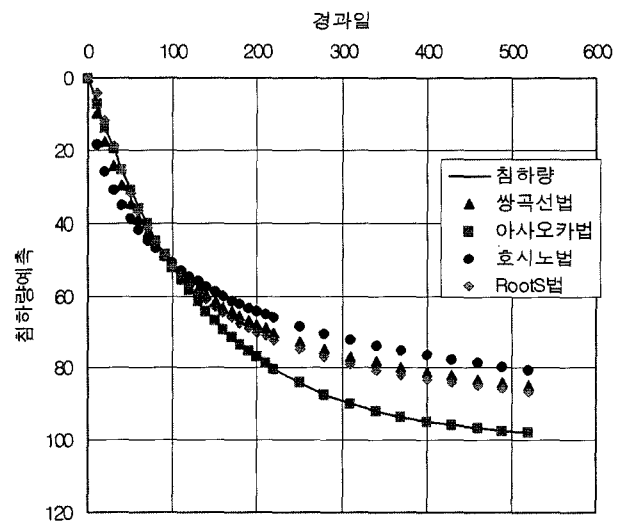
\sqrt{s} 법 ($\gamma=0.5$ 일 경우) : $\beta=0.1$

또한 한개의 침하-시간자료로서 Terzaghi 침하자료인 경우에 압밀도 50%에 이르는 시간자료(91일)와 Barron 이론식의 압밀도 50%에 이르는 시간자료(94일)로부터 식 (9)를 이용하여 α 값을 산정할 수 있다. 아사오카법을 적용한 경우에는 최종침하량 S_f 는 100cm로 설정하고 식 (8)을 이용하여 a 값을 산정하였다.

예측결과 그림 3과 같이 쌍곡선법, 호시노법, \sqrt{s} 법이 침하자료보다 예측값이 과소평가되는 것으로 나타났다. 이는 쌍곡선 형태의 분석방법들의 최종침하량 산정방법이 시간이 무한대인 경우를 가정한 이론적 배경에 기인한다. 반면 아사오카법은 Terzaghi 침하자료를 이용한 경우에는 과대평가하고 Barron 침하자료를 이용한 경우는 잘 일치하였다. 이는 Barron의 이론해의 수식 형태가 아사오카법의 침하곡선식과 일치하기 때문에 후자의 경우에 침하예측이 정확히 일치하였다.



(a) Terzaghi 침하자료를 이용한 경우



(b) Barron침하자료를 이용한 경우

그림 3. 1점법을 사용한 침하예측곡선

그러나 실제 최종침하량 S_f 를 미리 알 수는 없으므로 1점법은 최종압밀이 종료한 후에 침하-시간 곡선에 대한 분석기법들의 적합성 판정에 유용하게 사용될 수 있다.

4.2 두개의 시간-침하자료를 이용한 경우(2점법)

쌍곡선법과 호시노법, \sqrt{s} 법 및 아사오카법의 미지의 곡선계수가 2개이므로 2점의 시간-침하자료만 있으면 곡선형태를 나타낼 수 있다. 본 절에서는 압밀도 50% 및 90%의 시간-침하자료로부터 각 계측분석기법의 곡선계수를 산정하여 침하자료와 예측자료를 그림 4에 비교하였다.

분석결과에서 Terzaghi 침하자료를 이용한 경우에 \sqrt{s} 법이 최종적인 침하-시간곡선을 비교적 잘 예측하였고, Barron 침하자료를 이용한 경우에는 아사오카법이 정확히 예측하였다. 반면 호시노법은 침하자료 모두에

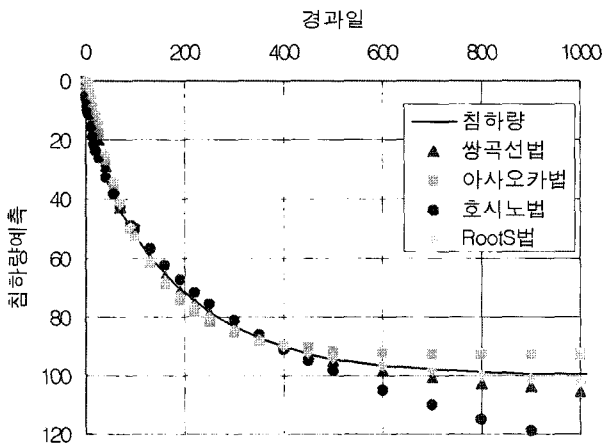
서 상당한 오차를 나타내고 있다.

4.3 새로운 계측분석기법 모델을 이용한 경우(침하자료들에 대한 회귀분석 이용)

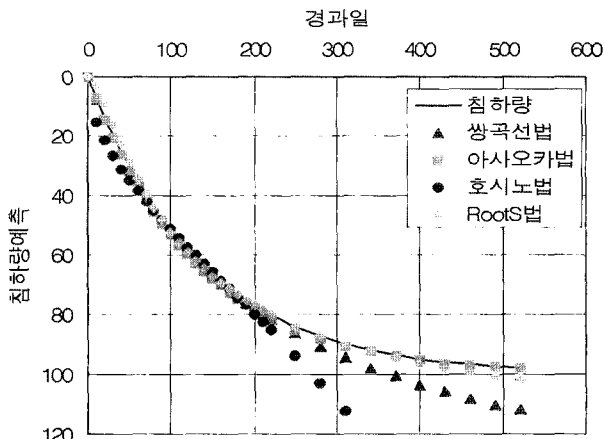
회귀분석을 이용한 통계법은 연약지반 계측분석방법 중 실무에서 가장 널리 사용되고 있다. 앞에서 기술한 1점법과 2점법이 침하-시간 곡선식을 미리 설정하고 적용한 계측분석기법인 것과는 달리 본 연구에서 제안된 계측분석기법은 통계법에 의하여 침하-시간 곡선형태도 침하자료의 분석을 통하여 설정될 수 있다. 본 예제에서는 압밀도 50%~90%에 해당되는 침하자료에 대하여 회귀분석을 수행하였다.

제안된 계측분석법을 적용할 경우에는 먼저 식 (9)에서 γ 값을 변화시키면서 그림 5와 같은 $\frac{t}{(s_t - S_0)^\gamma}$ 와 시간과의 선형관계에 대한 상관도를 산정한다. 이 중 상관도가 가장 높은 γ 값을 선정한다. 본 예제의 경우에 γ 값은 0.01(Terzaghi 침하자료) 및 0.0001(Barron 침하자료)로 산정되었으며 이 경우 상관도 값은 1.0으로 평가되었다.

선형 회귀분석을 통하여 α , β 를 산정하고 각 분석기법에 의한 침하예측곡선을 그림 6에 나타내었다. 제안된 계측분석기법 모델 결과는 곡선계수 γ 를 통하여 쌍곡선법, 호시노법, \sqrt{s} 법과 예측곡선의 형태가 다르며, 실측 자료와 매우 유사한 결과를 나타냄을 알 수 있다. 또한 Barron의 이론해와 아사오카법의 곡선식이 동일하다는 이유로 Barron 침하자료의 분석기법중 아사오카법을 제외하면 일반화된 쌍곡선법은 Terzaghi 침하자료 및 Barron 침하자료 모두에서 양호한 침하-시간 관계를 보여주고 있다.



(a) Terzaghi 침하자료를 이용한 경우



(b) Barron 침하자료를 이용한 경우

그림 4. 2점법을 사용한 침하예측곡선

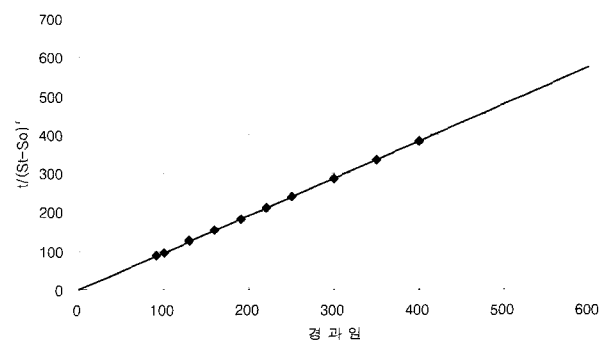
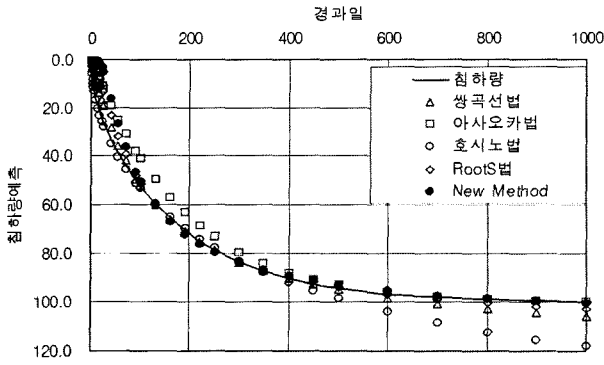
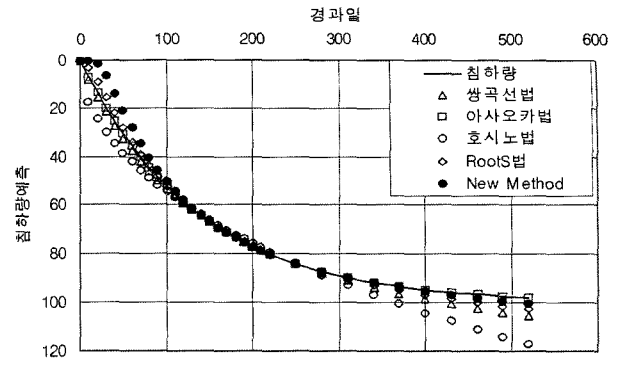


그림 5. 새로운 분석기법의 선형화



(a) Terzaghi 침하자료를 이용한 경우



(b) Barron침하자료를 이용한 경우

그림 6. 통계법을 사용한 침하예측곡선

5. 현장적용

개발된 계측분석기법의 현장적용성 및 상세분석과정을 기술하기 위하여 경남 김해지역의 OO공사지역의 시험시공 계측자료에 대하여 분석을 수행하였다.

5.1 현황

본 현장은 연약지반 개량공법의 효율성을 검토하기 위하여 2종류의 수직배수재의 대하여 시험시공을 실시한 지역으로 14개의 지표면 침하판, 2개의 층별침하계 등이 설치되었다. 이 지역은 해성 퇴적된 지역으로 높은 함수비(73~118.2%, 평균 92.9%)와 큰 간극비(1.966~3.182, 평균 2.52), 높은 압축지수(0.899~2.158, 평균 1.505)를 갖는 것으로 조사되었다. 또한 수직압밀계수는 평균 $2.3 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 로 조사되었으며 Rowecell실내시험을 이용한 수평압밀계수는 $0.22 \sim 1.1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 로 조사되었다. 연약층후는 약 4~20m정도이며 압밀계측기간은 1년으로 80~90%정도 압밀진행 상태이다.

5.2 오차합의 정의

적합한 곡선계수 γ 값을 선정하기 위하여 다음과 같은 오차합을 정의하였다.

$$\text{error}_1 = \sqrt{\sum_{n=t_0}^{t_{80}} \left(\frac{t}{t_{\max}}\right)^2 \cdot (s_{\text{pred}} - s_{\text{measured}})^2} \quad (12)$$

$$\text{error}_2 = \sqrt{\sum_{n=t_0}^{t_{100}} \left(\frac{t}{t_{\max}}\right)^2 \cdot (s_{\text{pred}} - s_{\text{measured}})^2} \quad (13)$$

여기서 S_{pred} : 예측된 침하량값

S_{measured} : 측정된 침하량값

t : 측정시간

t_{\max} : 최종측정시간

t_0, t_{80}, t_{100} : 최종측정값의 0%, 80% 및 100%에 해당하는 계측시간

본 현장예제에서는 최종측정값의 40%~80%사이의 측정자료가 선형 변환 분석되어 그 분석결과를 이용하여 80%~100%의 측정자료에 대하여 침하량을 예측하도록 하였다. 따라서 error_1 은 초기부터 현 분석시점까지의 오차를 의미하며 error_2 는 초기부터 최종시점까지의 오차를 의미한다. 따라서 error_1 은 분석시점까지의 측정자료를 가지고 최소의 오차합을 갖는 곡선계수 γ 값을 선정하는데 이용되며 error_2 는 그 값이 작을수록 추후 압밀침하량을 잘 예측하는 것으로 판단할 수 있는 척도가 된다. 오차합을 정의할 때 초기 계측자료와 최근에 측정된 자료의 중요도를 고려하기 위하여 식 (12)과 (13)에서 경험적인 가중치 $(t/t_{\max})^2$ 를 고려하였다.

5.3 적용

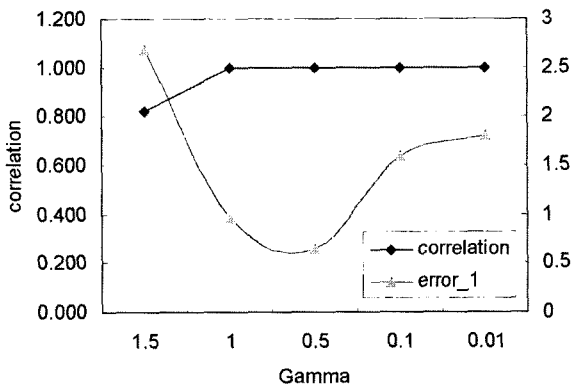
제안된 분석기법의 곡선계수 α, β, γ 를 산정하는 절차는 다음과 같다.

- 임의의 곡선계수 γ 를 가정한다.
- 가정된 γ 값에 대하여 식 (10)과 같이 계측자료에 대한 선형화 작업을 수행한 후 선형회귀분석에 의하여 계수 α 와 β 를 산정한다.
- 결정된 α, β, γ 에 따라 침하곡선 형태가 결정되고 실측값과 예측값에 대한 오차합을 산정한다.
- 몇 개의 곡선계수 γ 에 대하여 위 과정을 반복하여 최소의 오차합을 주는 γ 값을 산정한다.

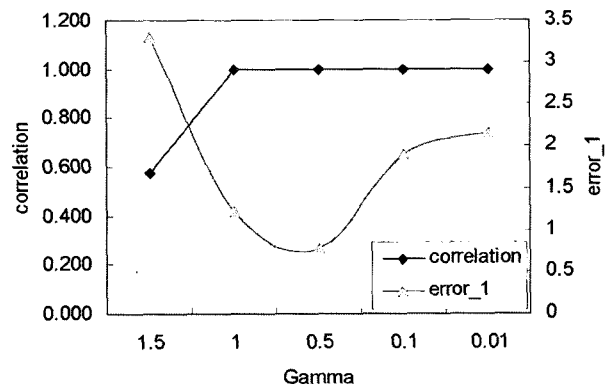
본 현장자료에 대하여 몇 개의 곡선계수 γ 값을 선택하고 그 각각에 대하여 선형 변환된 계측자료의 상관도 (correlation)와 오차(error_1 및 error_2)를 산정하여 그림 7 및 그림 8에 나타내었다. 그림 7은 곡선계수 γ 값을 산정하기 위하여 상관도와 오차(error_1)를 나타낸 그림으로 두 분석자료 모두 γ 가 1이하일 경우에는 상관성이 모두 양호하였고 γ 가 0.5일때(\sqrt{s} 법)가 error_1의 오차를 최소화하는 것으로 나타났었다. 또한 그림8에서는 침하량 예측의 정확성에 대한 척도를 나타내는 error_2

의 최소오차도 γ 가 0.5일 경우로 나타나 본 현장의 경우에 분석시점까지의 최적 침하곡선형태가 향후 침하발생경향도 잘 예측하는 것으로 평가되었다. 계측된 침하자료와 침하량 예측결과는 그림 9에 나타내었다.

본 현장은 γ 가 0.5일 경우가 적합한 곡선계수로 판정되나 지질조건 및 배수조건, 개량공법조건 등이 상이한 지반에서는 곡선계수 γ 값이 다양하게 나타날 것으로 예상되므로 향후 보다 많은 현장계측자료에 대한 적용으로 제안된 계측분석기법의 타당성이 입증되길 기대한다.

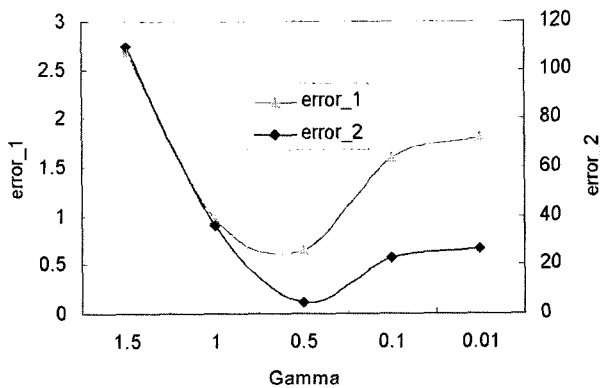


(a) 계측자료(SP-1)

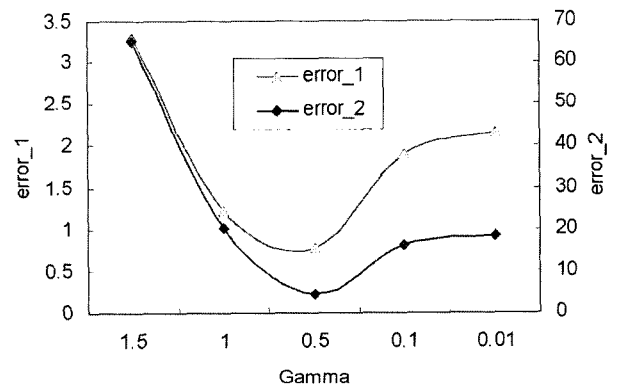


(b) 계측자료(SP-2)

그림 7. 곡선계수(γ)값에 따른 상관도와 error_1

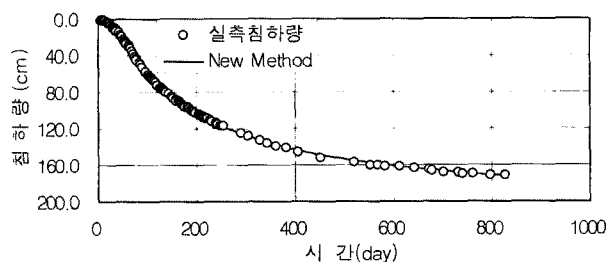


(a) 계측자료(SP-1)

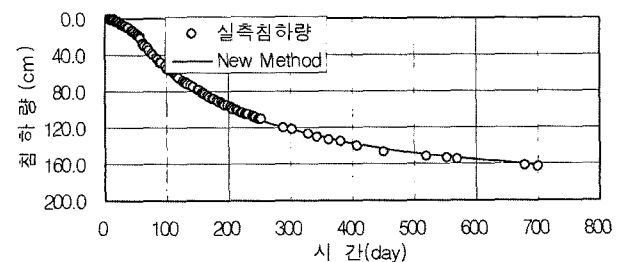


(b) 계측자료(SP-2)

그림 8. 곡선계수(γ)값에 따른 error_1과 error_2



(a) 계측자료(SP-1)



(b) 계측자료(SP-2)

그림 9. 새로운 계측분석기법을 적용한 침하량 예측결과

5. 결론

본 논문에서는 새로운 계측분석기법 모델 개발하여 제안하였으며 비교 예제해석을 수행하였다. 본 논문을 통하여 아래와 같은 연구결과를 도출하였다.

- (1) 본 연구에서는 기존의 연약지반의 침하관리기법인 쌍곡선법, 호시노법, \sqrt{s} 법에 대한 고찰을 통하여 단일화된 새로운 수식을 도출하였다.
- (2) 개발된 분석기법은 식 (9)와 같으며 $\gamma=1$ 일 경우에는 쌍곡선법, $\gamma=2$ 일 경우에는 호시노법, $\gamma=0.5$ 일 경우에는 \sqrt{s} 법을 나타내어 기존의 곡선형태를 모두 포함할 수 있을 뿐만 아니라 γ 값의 변화에 따라 다양한 쌍곡선형태의 침하곡선을 표현할 수 있다.
- (3) 침하곡선의 형태는 계측자료 분석 전에 미리 가정한 기존의 방법과는 달리 침하자료의 통계분석에 의하여 선형방정식의 상관도를 높이고 실측 침하량과 예측침하량의 오차가 최소화 되도록 곡선계수 γ 값을 결정할 수 있다.
- (4) Terzaghi 침하자료 및 Barron 침하자료를 생성시켜 1점법, 2점법 및 개발된 분석기법에 따른 예제해석결과를 비교하였으며 본 연구에서 제안된 새로운 계측분석기법 모델 결과가 매우 양호한 침하-시간 곡

선관계를 나타내는 것으로 확인되었다.

- (5) 실측자료에 대한 분석 적용으로 곡선계수 γ 값을 산정하는 과정을 비교적 상세히 나타내었으며 분석시점 이후 발생하는 침하량도 비교적 잘 예측할 수 있는 방법으로 분석되었다. 그러나 향후 보다 많은 현장 적용으로 제안된 분석기법의 타당성 및 활용성이 증진되기를 기대한다.

감사의 글

본 연구는 2001년도 청운대학교 학술연구구성비 지원으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 정성교, 최관희, 최호광, 조기영 (1998), “압밀해석을 위한 \sqrt{s} -에측기법”, 한국지반공학회논문집, 제14권, 제2호, pp.41-52.
2. Asaoka, A. (1978), “Observational Procedure of Settlement Prediction”, *Sols and Foundations*, JSSMFE, Vol.18, No.4, pp.87-101.
3. Barron, R. A. (1948), “Consolidation of Fine Grained Soils by Drain Wells”, *Trans ASCE*, Vol.113, pp.718-754.
4. Hansbo, S. (1979), “Consolidation of Clay by Band-Shaped Prefabricated Drains”, *Ground Eng'g*, 12,5, pp.16-25.
5. Tan T. S. et al. (1991), “Hyperbolic Method for Consolidation Analysis”, *JGE, ASCE*, Vol.117, No.11, pp.1723-1737.

(접수일자 2005. 2. 2, 심사완료일 2005. 4. 15)