

이상치를 이용한 관측적 침하예측기법의 개발

Development of a Observational Settlement Analysis Method Using Outliers

우철웅* · 장병욱**

Woo Chull-Woong · Chang Pyoung-Wuck

Abstract

Observational methods such as the Asaoka's method and the hyperbolic method are widely applied on the settlement analysis using observed settlement. The most unreliable aspects in those methods is arose from the subjective discretion of initial non-linearity on linear regression. The initial non-linearity is inevitable due to the settlement behaviour itself. Therefore an objective method is essential to achieve more reliable results on settlement analysis. It was found that the initial non-linear data are statistical outliers. New automation algorithms of the hyperbolic and the Asaoka's method were developed based on outlier detection method. The methods are a successive detection of outliers and a searching method of suitable hyperbolic range for the Asaoka's and the hyperbolic method respectively. Applicability of the algorithms was verified through case studies.

Keywords : Soft ground, Settlement analysis, Observational methods, Outliers

I. 서론

연약지반의 침하계측은 침하해석의 이론적 한계에 대한 인식^{9),19)}에 따라 이제 연약지반 공사의 필수불가결한 기술요소가 되었다. 연약지반의 침하 측정 결과는 성토 중의 안정성 관리에 부가적 지표로 이용되기도 하지만 주로 지반의 압밀도 및 잔류

침하량을 소정의 목표에 도달하도록 하는 것을 목표로한 관측적 연약지반 침하 해석기법에 적용된다. 성토의 안정성은 성토공정의 조정 및 대책공법의 도입으로 시공과정에서 극복될 수 있으나 부적절한 침하 예측결과는 준공 이후까지 영향을 주며 지반의 압밀도는 지반강도에 영향을 주기 때문에 연약지반의 압밀도를 신뢰성 있게 평가하는 것이 매우 중요하다.

연약지반의 관측적 침하예측기법은 지반의 압밀도를 추정할 수 있는 유용한 방법이다. 이들 예측기법은 계측데이터의 도형적 특성(Hyperbolic method)을 기반으로 하거나 압밀지배방정식으로부

* 신구대학 겸임교수
** 서울대학교 교수
* Corresponding author. Tel.: +82-2-880-4593
fax: +82-2-873-2087
E-mail address: wood@nate.com

터 유도(Asaoka method)되었으나 실제 해석 과정은 수치변환 및 회귀분석을 통해 수행된다. 이들 방법을 이용한 해석에 대해 많은 검토가 있다. Matyas와 Rotherburg(1996)는 Asaoka의 plot 결과가 압밀도 25~45%의 첫 번째 구간과 이후의 두 번째 구간으로 나뉘어 지며 첫 번째 구간을 이용한 데이터는 침하를 작게 평가한다고 하였고 또한 쌍곡선법에서는 압밀도 60%를 기준으로 두 개의 직선으로 평가될 수 있음을 보였다. Helbo(1999)도 이와 유사한 결과를 보고하였다. Cartier 등(1989)은 피트 지반의 압밀을 예측하는데 Asaoka 법이 충분한 정도를 가진다고 하였으나 Edil과 Haan(1991)은 이와는 달리 Asaoka 법의 피트 지반에 대한 적용성에 의문을 제기하였다. Helbo(1999)는 쌍곡선법과 Asaoka 법 모두 이차압축이 큰 지반에 적용성이 좋지 않다고 하였다. Baker(1994)는 Asaoka 법 해석과정에서 시간간격의 영향이 있음을 보고하였다. 이들 연구는 침하 측정치의 변동외에도 관측적 침하 해석과정의 내재적 요인에 의한 비선형성이 존재하며 이를 어떻게 다루어야 하는가에 집중되고 있다. 이는 역설적이게도 해석결과가 Chung 등(1998)이 언급한 바와 같이 주관적 판단에 상당히 좌우된다는 것을 의미한다. 관측적 침하 예측의 결과는 공사후 장기간에 걸친 관측이 없다면 그 옳고 그름을 판단할 수 없기 때문에 정확한 예측뿐만 아니라 해석과정의 객관성을 확보하는 것이 매우 중요하다. 이에 본 연구에서는 침하해석과정의 이상치를 특성을 구명하였으며 이를 기반으로 이상치 검출기법을 개발하여 객관적이고 신뢰할 수 있는 관측적 침하해석 기법을 개발하고자 하였다.

II. 이론적 배경

1. 연약지반 관측적 침하예측기법

실측치에 의한 침하량의 예측기법은 통계적 방

법, 도형적 방법, 시뮬레이션 방법 등이 주로 사용하며 일반적으로 쌍곡선법, Asaoka 법, \sqrt{t} 법, Hoshino 법, Monden 법, $\log t$ 법 등을 들 수 있다. 이 중에서 Hoshino 법, Monden 법, $\log t$ 법 등은 해석과정에서의 문제점으로 실제 연구에 이용된 사례는 거의 없으며 쌍곡선법 및 Asaoka 법을 중심으로 발전되어 왔다. Kodandaramaswamy와 Rao(1980)는 점토의 침하 및 용기가 쌍곡선식으로 표현될 수 있으며 압밀침하량이 쌍곡선 plot의 기울기의 역수로서 잘 표현될 수 있음을 보였다. 쌍곡선법에서는 압밀침하량(S)과 시간(t)의 관계를 다음과 같은 쌍곡선으로 가정한다.

$$\frac{t}{S} = \alpha + \beta t \dots \dots \dots (1)$$

따라서, 침하량은 다음과 같다.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} S = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{\frac{\alpha}{t} + \beta} = \frac{1}{\beta} \dots \dots \dots (2)$$

여기서, α 는 t/S 축의 절편이고 β 는 기울기이다.

Asaoka 법(1978)은 연약지반위에 성토를 한 후 침하량과 침하율(settlement rate)을 일정기간 동안에 측정된 침하 데이터를 이용하여 최종침하량을 추정하는 방법이다. 이 방법은 Micasa(1963)의 유한변형률 압밀방정식으로부터 유도되었는데 압밀방정식을 재귀형 함수로 다음과 같이 표현하였다.

$$S_j = \beta_0 + \sum_{i=1}^j \beta_i S_{j-i} \dots \dots \dots (3)$$

$t = \infty$ 의 경계조건은 $S_j = S_{j-i} = S_\infty$ 이다. 이 경계조건을 위 식(3)에 도입하면 다음과 같다.

$$S_\infty = \frac{\beta_0}{1 - \beta_1} \dots \dots \dots (4)$$

Asaoka 법의 도해법은 Magnan과 Deroy(1980)에 의하여 정의되었다. 이 도해법은 일방향 혹은

이방향압밀 조건의 단일한 연약층의 경우에 대한 것이나 Asaoka 법은 연직배수재를 사용하는 경우에도 적용할 수 있으며 연약지반이 여러 층으로 이루어져 있는 경우에 대해서도 적용할 수 있다.²⁾

2. 이상치

쌍곡선법과 Asaoka 법의 해석과정에는 공통으로 회귀분석을 필요로 한다. 즉, 쌍곡선법은 $t/S-t$ 관계, Asaoka 법은 S_i-S_{i-1} 관계를 직선 회귀하여 회귀식을 구하여야 한다. 또한 이들은 Tan 등(1991) 및 Matyas와 Rothenburg(1996)가 언급한 바와 같이 기준압밀도는 다르나 압밀초기의 데이터와 높은 압밀도에서의 데이터의 회귀직선의 기울기가 다르며 압밀초기의 침하량을 해석에서 제외하는 것이 필요하다. 이들 초기 데이터는 해석결과의 차트로부터 "rule of thumb"에 의해 제거되는 것이 일반적이거나 이 경우에는 해석결과의 합리성을 보장할 수 없다.

연약지반의 관측적 침하해석은 각기 특정 space에서 침하자료를 도시하고 이를 직선회귀하여 모형의 매개변수를 산정하는 과정이 사용된다. 독립변수 x 와 종속변수 y 간의 직선회귀는 주어진 x 에서 y 가 정규분포(오차항 ϵ 이 정규분포)를 한다는 가정이 없을 때에도 최소자승법(method of least square)을 적용할 수 있다. 최소자승법의 회귀식은 다음과 같다.

$$\hat{y} = b_0 + b_1x \dots \dots \dots (5)$$

여기서,

$$b_1 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum(x_i - \bar{x})^2} \dots \dots \dots (6)$$

$$b_0 = \bar{y} - b_1\bar{x} \dots \dots \dots (7)$$

이상치(outliers)란 측정상의 과오 등으로 인하

여 과다하게 크거나 작게 나타난 측정치이다. Cherubini 등(1989)은 지반공학 데이터에서 이상치의 원인을 1) 지반조사에 있어 특이 샘플의 경우, 2) 시료의 품질, 3) 시험 및 데이터 취급오류와 같은 경우에 발생하며 이를 고려해야 한다고 지적한 바 있다. 본 연구에서 다루고 있는 장기침하량 해석과정에서는 이와 같은 본질적 이상치 외에도 연구사례 검토에서 살펴본 바와 같이 해석과정에서 불가피하게 발생하는 이상치가 존재한다.

회귀분석을 실시할 때 수행되는 여러 진단방법을 회귀진단(regression diagnostics)이라 하며 일차 회귀 모형에서는 오차항 정규분포, 이상치 검출, 영향치 검출이 필요하다. 이상치 검출법에는 표준화 잔차법(standardized residual method), 스튜던트화 잔차법(studentized residual method) 등 여러 방법이 사용된다(Tietjen,1984). 본 연구에서는 쌍곡선법과 Asaoka 법의 초기 침하가 해석결과에 미치는 영향을 최소화하고 합리적인 해석을 위한 이상치 검출법의 적용성을 검토한 결과, 이상치 검출 기법에 따른 기각결과의 차이가 거의 나타나지 않았으며 수치해석과정에서 기각치를 분리하기 어려운 문제가 있어 이상치 검출법으로서 표준화 잔차법을 선정하였다.

표준화 잔차법은 오차항을 정규분포라고 가정하여 다음 식 (8)과 같이 정의되는 표준화 잔차의 절대값이 과다하게 크면 이상치로 판단한다.

$$r_i = \frac{y_i - \hat{y}_i}{s\sqrt{1 - h_{ii}}} \dots \dots \dots (8)$$

여기서,

$$h_{ii} = \frac{1}{n} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{S_{(xx)}} \dots \dots \dots (9a)$$

$$s = \sqrt{MSE} \dots \dots \dots (9b)$$

여기서, n 은 데이터의 개수, S_{xx} 는 독립변수의 편

Table 1 Upper bound for critical values for standardized residual ($\alpha=0.05$)

Number of data	Number of independent variables					
	1	2	3	4	...	25
5	1.92					
6	2.07	1.93				
7	2.19	2.08	1.94			
8	2.28	2.20	2.10	1.94		
...	
30	2.96	2.96	2.95	2.94	...	2.17
40	3.08	3.08	3.07	3.07	...	2.84
50	3.17	3.16	3.16	3.16	...	3.04
70	3.29	3.29	3.28	3.28	...	3.23
100	3.41	3.41	3.40	3.40	...	3.38

차, h_{ii} 는 leverage이다.

표준화 잔차법의 이상치 검출 기준의 기각치는 Lund(1975)에 의해서 제시되었으며 Table 1에 그 일부를 제시하였다. 이상치로 판단된 경우에도 일반적으로는 이상치를 버리고 나머지 만으로 회귀 분석을 하는 것이 무조건 옳은 것은 아니다. 그러나, 일반적 데이터와는 달리 관측적 침하예측과정에서는 앞서 살펴본 바와 같이 이상치는 해석과정

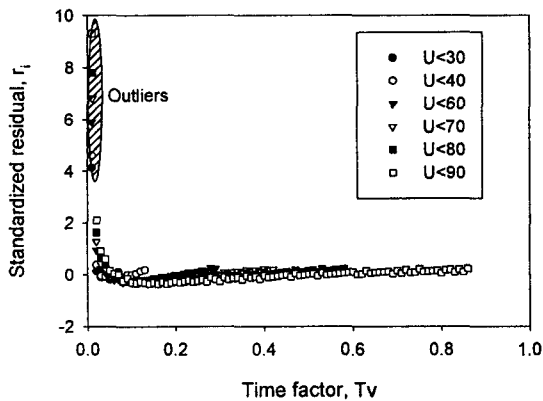
에서 발생될 수밖에 없으며 이는 해석기법의 침하 거동모델과 이론 혹은 실제 지반의 거동이 다르기 때문이다. 따라서, 이들 이상치는 관측적 침하예측 과정에서 제거되어야 한다.

III. 이상치를 이용한 침하예측기법의 개발

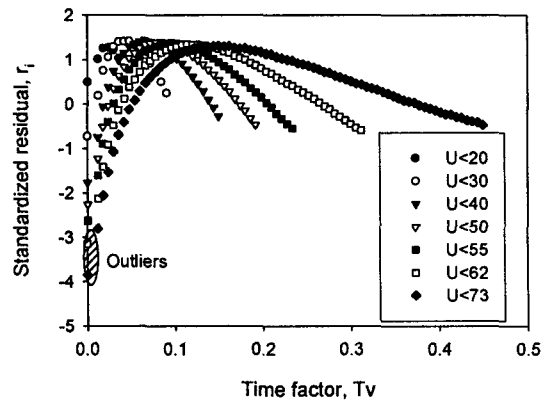
1. 침하거동의 이상치 특성

연약지반의 침하에 대한 이론적 접근은 크게 Terzaghi(1925) 및 Barron(1948)의 압밀이론을 중심으로한 Infinitesimal Strain Consolidation과 Gibson(1967) 이론 등의 Finite Strain Consolidation 문제로 나누어 볼 수 있다. Matyas와 Rothenburg(1996)은 유한변형압밀 거동도 시간계수와 압밀도 사이에 고유한 관계가 무한변형압밀 이론과 동일한 특성을 보인다고 하였다. 따라서, 연약지반의 관측적 침하예측과정에서의 이상치 특성을 살펴보는 데에는 Terzaghi 및 Barron의 이론적 압밀거동을 이용해도 충분할 것으로 판단된다.

Fig. 1은 Terzaghi 이론의 시간계수-압밀도 관계를 이용하여 각각 Asaoka 법 및 쌍곡선법에 적용하였을 경우의 이상치 특성을 분석한 결과이다.



(a) The Asaoka method



(b) The hyperbolic method

Fig. 1 Outliers on settlement prediction for Terzaghi's theory of consolidation

해석결과는 Terzaghi 이론 압밀거동의 초기 압밀 부분이 Asaoka 법 해석과정에서 이상치로 판정됨을 보여주고 있으며 이러한 이상치는 쌍곡선법 해석에서도 동일하게 나타난다. 다만, 쌍곡선법의 경우에는 60% 이내의 압밀도의 경우에는 초기 데이터 역시 이상치로 검출되지 않는 특성을 볼 수 있다. 쌍곡선법 해석에서는 이상치 특성이 위로 볼록한 형태를 보이고 있으나 최종침하 부근의 표준화 잔차는 절대치가 크지 않아 이상치로 판단되지는 않는다.

Fig. 2는 Barron의 압밀문제(N=10)를 각각 Asaoka법 및 쌍곡선법으로 해석한 결과이다. Barron 해석법의 Asaoka 법 해석에 이상치 검출을 적용한 결과, 이상치의 분포는 일정한 경향을 보이지 않으며 그 절대값도 이상치로 나타나지 않았다. 즉, Barron의 이론 압밀거동은 Asaoka 법으로 잘 해석되는 것으로 나타났다. 쌍곡선법의 경우에는 Terzaghi 이론에 적용한 경우에서 위로 볼록한 중형의 분포를 보이고 있는 것과 비교하여 아래로 볼록한 것을 제외하면 구간 중앙을 중심으로 대칭적인 분포를 보였다. 이러한 경향은 쌍곡선법의 경우, 어떤 형태의 압밀거동에서도 초기에는 불합리한 예측결과를 준다는 것을 의미한다.

압밀이 진행됨에 따라 예측된 후반의 침하데이터는 지반의 침하량에 보다 근접한 값을 주게 되므로 초기의 데이터보다 신뢰할 수 있다. 따라서, 쌍곡선법의 경우에는 이론거동에서 이상치의 대칭 중형 분포를 나타내어 예측후반의 데이터를 이상치로 판단하였으나 이 경우에는 데이터의 신뢰성이 높으므로 이상치로 판정하여 기각해서는 안 된다. 또한, 여러 연구자들이 언급한 바와 같이 60% 이하의 압밀도에서의 거동과 이후의 거동이 분명하게 다르므로 초기 몇 개의 데이터만을 제외하여서는 정확한 예측결과가 기대되지 않는다.

이상의 관측적 침하해석의 이상치 거동을 살펴보면 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 가) Asaoka 법의 이상치는 예측 초기에만 나타난다.
- 나) 쌍곡선법의 이상치는 어느 경우의 압밀거동에서나 중형분포를 보인다.
- 다) 초기 비선형부 전체가 이상치로 평가되지는 않는다.

2. 이상치 검출 기법 개발

이와 같은 이상치 특성을 이용하여 침하예측기법

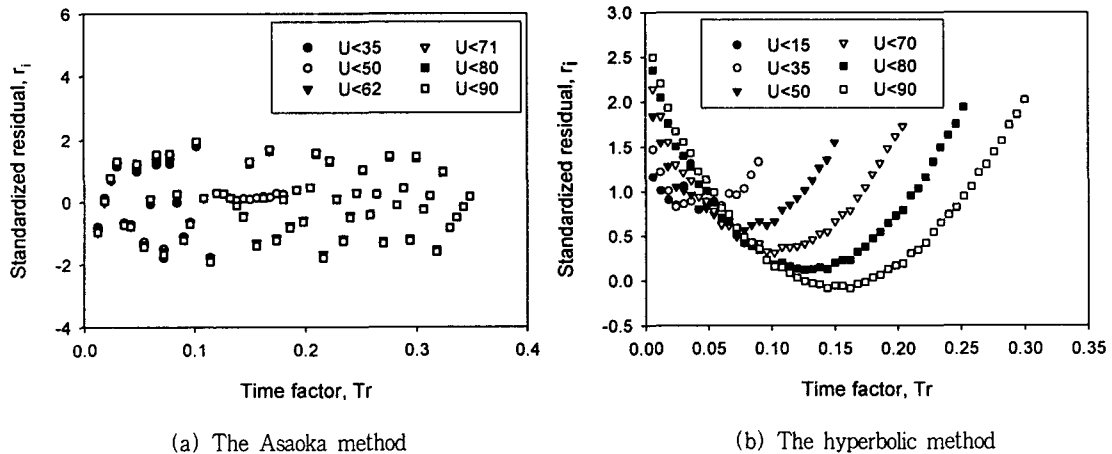


Fig. 2 Outliers on settlement prediction for Barron's theory of consolidation

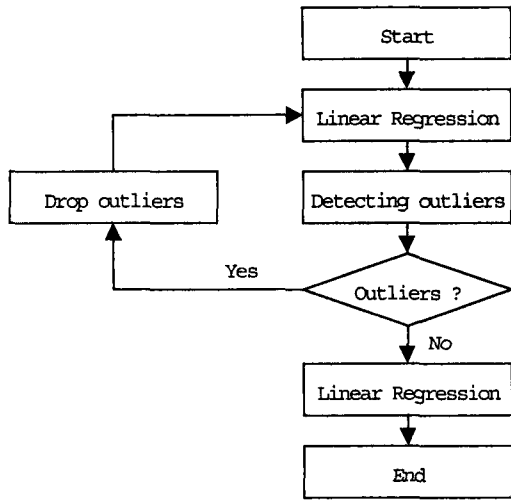


Fig. 3 Schematic diagram of successive outlier detection algorithm (SDM)

을 다음과 같은 이상치 검출 규칙을 수립할 수 있다.

- 가) 초기 비선형부를 최대한 검출하기 위해서는 단순 이상치 검출보다는 이상치를 연속적으로 검출하여야 한다.
- 나) 쌍곡선법에서는 이상치 검출 결과 중에서 후반부의 이상치는 적합한 데이터로 판단하여야 한다.

이상치 연속검출법(successive outlier detection algorithm, SDM)은 관측적 침하 예측기법의 선형거동을 정확하게 추출하기 위하여 통상의 이상치 검출기법을 데이터에 연속적으로 적용하는 것으로서 모식도로 표현하면 Fig. 3과 같다. 이 알고리즘에서는 이상치를 검사하여 이상치로 판정된 데이터를 제외한 데이터를 다시 이상치 검출하는 과정을 반복한다.

Fig. 4는 이상치 연속검출법(SDM)을 Asaoka 법에 적용하여 Terzaghi의 일차원 압밀의 이론 시간-압밀도 관계를 해석한 결과이다. 여기서 "Best estimation"은 관측기간 최후의 수 개의 데이터만 이용하여 예측한 경우로서 이론적으로 예측가능한 최선의 예측결과이며 "Detection of outliers"는 단순이상치 검출, "Linear regression"은 이상치를 고려하지 않은 단순 선형회귀의 경우이다. Fig. 4(a)에서 이상치 검출기법의 적용결과가 통상적인 선형회귀 보다 대략 10% 정도의 예측정도의 향상이 있음을 알 수 있으며, SDM 알고리즘은 계측초기에는 5% 정도의 예측 정도의 향상에 그치고 있으나 60% 이상의 압밀도에서는 10% 이내의 오차로 침하량을 예측할 수 있는 것으로 나타났다. Fig.

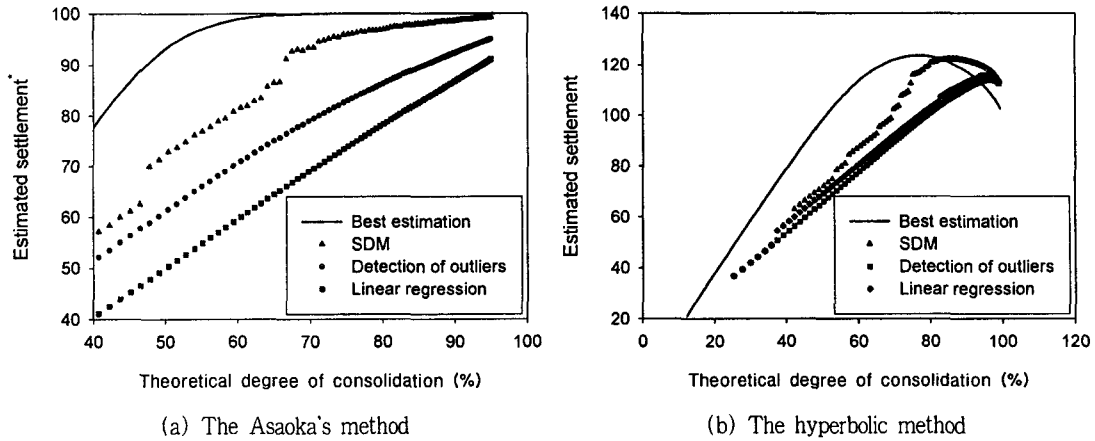


Fig. 4 Application result of SDM for Terzaghi's consolidation theory
*Estimated values are nondimensional.

4(b)는 Terzaghi 압밀 거동의 쌍곡선법의 적용에 연속이상치 검출을 이용한 결과로서, 70% 이하의 압밀도에서 이상치 검출 및 연속 이상치 검출법에 따른 예측 정확도의 향상은 크지 않았으나 70% 이상의 압밀도에서 연속 이상치 검출은 이론적인 최적 예측치와 유사한 예측결과를 보이고 있다. 그러나, 이 경우에도 침하량을 20% 가량 과대 평가하여 압밀도를 과소평가하는 결과를 가져왔다.

이상에서와 같이 연속 이상치 검출기법을 이론적인 시간계수-침하관계에 적용하여 예측결과를 향상시킬 수 있는 것으로 나타났다. 다만, 쌍곡선법의 경우에는 침하량을 과대평가하게 되는데 이와 같이 이상치 검출기법의 적용결과가 실제보다 큰 압밀도를 예측한 것은 쌍곡선 거동의 시점(t_0)의 잘못된 평가에서 기인한 것으로 판단된다. 즉, 지반의 침하가 쌍곡선적으로 감소하지는 않지만 성토종료 직후부터 쌍곡선 거동을 보이지 않으며, Tan(1995)과 같이 압밀도를 기준으로 설정하는 것도 불합리한 결과를 나타낼 수 있다. 따라서, 통계적 이상치 검출에서 나타난 이상치는 측정치가 쌍곡선적 거동 특성을 보이지 않는다는 것을 의미하므로 압밀침하의 쌍곡선 해석의 기점은 성토종료시가 아닌 쌍곡선 거동 시점으로 보아야 할 것이다. 따라서, 지반

의 압밀거동을 쌍곡선법으로 해석하기 위해서는 해석구간 시점(t_0)의 변경 즉, 쌍곡선 적합구간의 검출이 필요하다.

본 연구에서 개발한 쌍곡선 적합구간 탐색법 (suitable hyperbolic plot searching algorithm, SHP)의 모식도는 Fig. 5와 같다. 개발된 쌍곡선 적합구간 탐색기법을 Terzaghi 및 Barron의 압밀 거동에 적용한 결과는 각각 Fig. 6에 제시하였다.

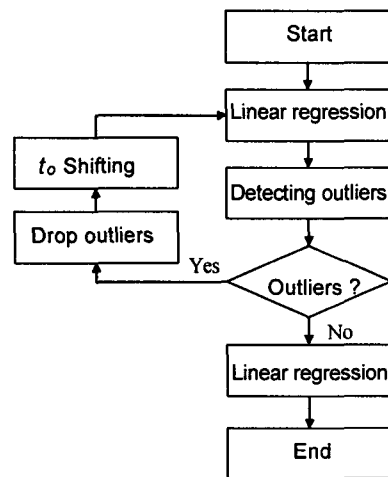
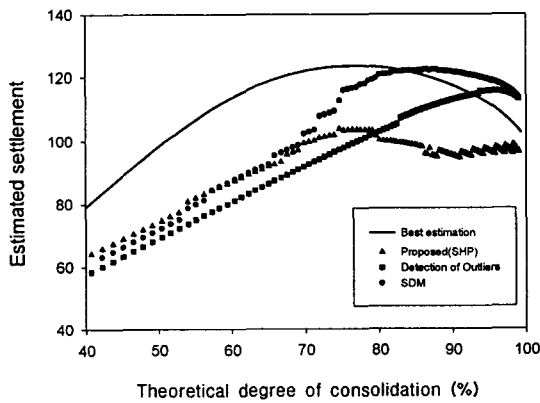
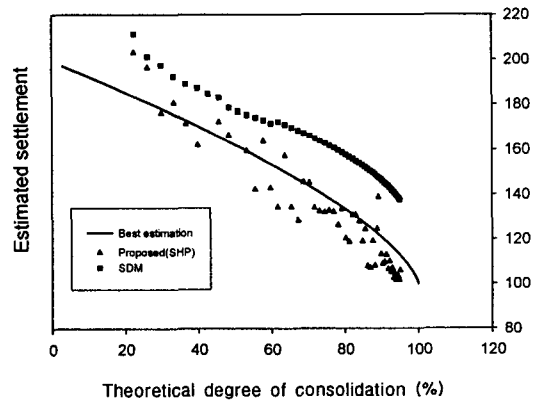


Fig. 5 Schematic diagram of the suitable hyperbolic plot searching algorithm (SHP)



(a) Terzaghi



(b) Barron

Fig. 6 Application result of the SHP algorithm

쌍곡선 적합구간 탐색법을 적용한 결과, Terzaghi 압밀거동의 경우에는 높은 압밀도에서 20% 정도 압밀도를 과대평가한 여타 방법과는 달리 거의 정확한 추정결과를 주고 있으며 Barron 압밀거동에서도 전체적으로 이론적인 최적 예측치에 근접하고 있으며 80% 이상의 압밀도에서 보다 정확한 예측이 가능한 것으로 나타났다. SDM 알고리즘과는 달리 SHP 알고리즘은 이상치로 판정된 자료를 쌍곡선 적합구간에서 제외하여 다시 쌍곡선법 해석의 이상치 검출을 반복하게 된다. 이를 통해 이상치 뿐만 아니라 쌍곡선 거동을 하는 구간을 검출함으로써 보다 정교한 예측이 가능하였다.

IV. 적용성 평가

본 연구에서 개발된 장기침하량 예측기법의 적용성을 알아보기 위하여 실제 계측사례에 적용하였다. 연구사례는 상당기간 방치되어 침하가 거의 완료된 연약지반 성토 사례를 이용하여 이상치 검출법 및 쌍곡선 적합구간 검출법을 적용하여 그 적용성을 검증하였다. 사례는 서해안 고속도로의 연약지반 중 한 지점의 계측데이터로서 이 지점의 연약

지반은 중-저소성의 실트질 점토 내지 점토질 실트 지반으로서 약 7m 내외의 심도를 보이고 있으며 연약지반 처리공법으로 sand drain 공법이 적용된 현장이다. Fig 7는 본 연구에서 사용된 침하 계측데이터로서 성토 후 약 250일 정도 방치되었으며 침하량은 21.0 cm로 침하가 완료된 상태이다.

Fig. 8(a)는 Aasoka 법의 일반적인 해석절차에 의한 선형부의 검출에 의해 해석(시간간격 10일)한 결과로서 장기침하량은 21.7 cm로 예측되었다. 이 결과에서는 Matyas(1999)가 언급한 바와 같은 기울기가 다른 두 개의 구간은 분명하지 않은데 이

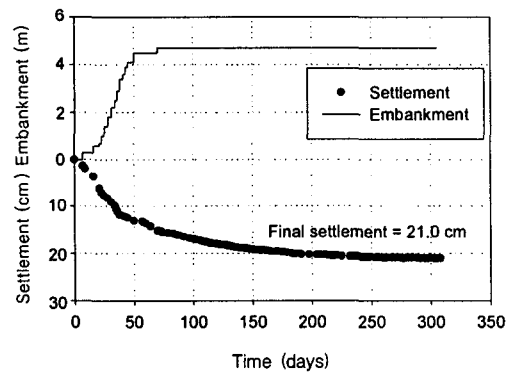


Fig. 7 Embankment and settlement records

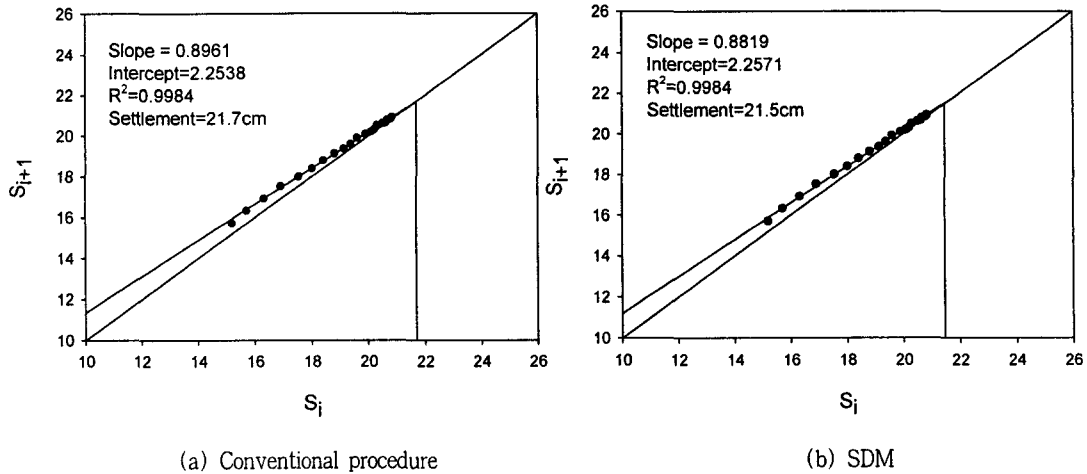


Fig. 8 Settlement estimation results by conventional and SDM procedure for the Aasoka method

는 해석구간의 압밀도가 65% 이상으로서 45% 이내의 초기 선형구간을 지나갔기 때문에 판단된다. 또한 Asaoka plot에서 가시적으로 이상치가 나타나지는 않았다. Fig. 8(b)는 개발된 연속 이상치 검출법을 적용한 결과이며 가시적 판단과는 달리 첫 번째 데이터가 이상치로 판단되었으며 이상치를 제외하고 적용한 결과, 장기침하량을 21.5 cm로 예측하였다. 이 경우 이상치 검출은 추정결과에 큰 차이를 주지는 않았으나 이상치의 판정이 보다 객관적인 결과를 준다고 할 수 있다.

Fig. 9(a)는 일반적으로 공학적 판단을 이용하여 분석한 결과인데 계측 중반 이후의 강한 직선경향을 이용하여 직선회귀를 실시하였으며 장기침하량은 22.4 cm로 예측되었다. Tan 등(1996)이 지적인 바와 같이 초기의 아래로 볼록한 경향을 보여 주고 있으나 직선부의 압밀도는 이론적인 경향인 60% 이상과는 다르게 약 75% 이상에서 시작되는 것으로 나타났다. 이러한 점은 쌍곡선법의 해석에 있어서 일반적으로 60% 압밀도 이하에서 직선적 경향을 보이지는 않는다는 것을 의미한다.

Fig. 9(b)는 쌍곡선 적합구간 검출법(SHP)을 이용하여 해석한 결과이다. 해석결과 침하량을 21.8 cm로 예측하고 있어 관측된 최종 침하량인 21.0

cm와 가장 근접한 추정결과를 주었다. 이는 앞서 쌍곡선 적합 구간 검출법이 실제 예측가능한 최대 정밀도와 유사하거나 다소 나은 결과를 보인다는 점과도 정확하게 일치하였다. 이러한 결과로부터 개발된 SDM 및 SHP 알고리즘이 각각 Asaoka 법 및 쌍곡선법의 관측적 침하예측에 있어 비교적 신뢰성 있는 결과를 주는 것을 알 수 있다. 개발된 침하해석 기법의 장점은 해석자의 주관적 판단으로 좌우되지 않는 객관적인 방법이라는 점이며 따라서 이러한 방법은 해석과정의 자동화에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

V. 결 론

본 연구에서는 연약지반의 관측적 침하 해석과정에서 나타나는 비선형성 및 개인적 오차와 같은 문제점을 보완하기 위하여 통계적 이상치를 이용한 관측적 침하예측 기법을 개발하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 쌍곡선법과 Asaoka 법의 예측 정확도를 이론적 시간-압밀도 관계에 적용하여 검토한 결과, Terzaghi 압밀거동에서는 두 방법 모두 모든 압밀도에서 부정확한 예측결과를 주었으며 Barron 압

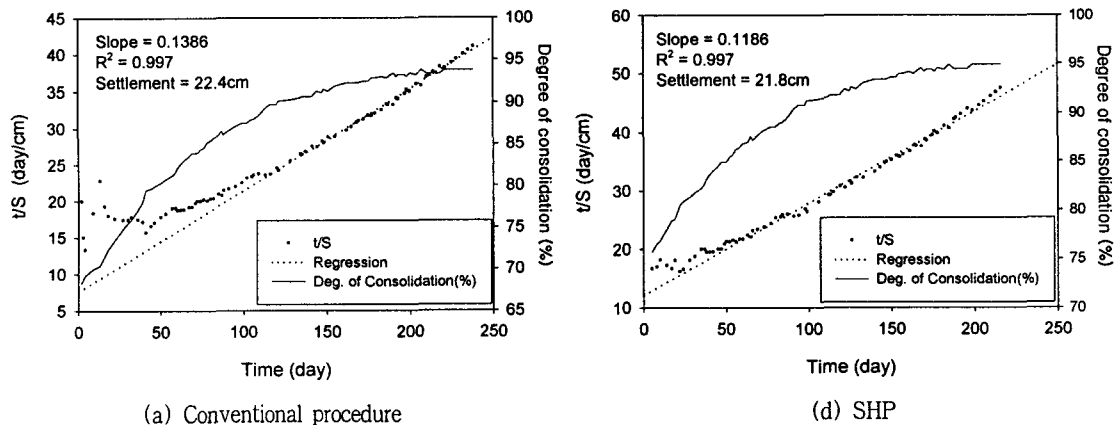


Fig. 9 Settlement estimation results by conventional and the SHP procedure for the hyperbolic method

밀거동의 경우에는 쌍곡선법이 초기 압밀도에서 부 적절한 예측결과를 주었다.

2. 쌍곡선법과 Asaoka 법의 부정확한 예측결과는 초기 비선형성에 의한 것으로서 이를 검토한 결과 통계적 이상치인 것으로 나타났다.

3. 객관적이고 신뢰성 있는 관측적 침하 예측을 위하여 연속이상치 검출 및 쌍곡선 적합구간 검출법을 개발하였다. 연속이상치 검출기법은 Asaoka 법의 자동화 해석에 적용할 수 있으며 쌍곡선 적합구간 검출법은 쌍곡선법의 해석에 이용할 수 있다.

4. 연속이상치 검출법 및 쌍곡선 적합구간 검출법의 적용성을 이론적 거동 및 짐하사례를 통해 검증한 결과, 신뢰할 수 있는 결과를 주었다. 통상의 방법이 주관적 판단에 의존하는 것과는 달리 개발된 방법은 객관적이고 일관된 해석결과를 주며 예측과정의 자동화가 가능하다는 점이 장점이다.

References

1. Asaoka, A. 1978. Observational procedure of settlement prediction, *Soils and foundations*. JSSMFE. 18(4):87-101.
2. Asaoka, A. and M. Matsuo. 1980. An inverse problem approach to settlement prediction. *Soils and foundations*. JSSMFE. 20(4):53-66.
3. Baker, S. A. 1994. Settlement prediction at Muar Flats using Asaoka's method. *Prediction versus Performance in Geotechnical Engineering*. Rotterdam. 175-181. Balkema.
4. Barron, R. A. 1948. Consolidation of fine grained soils by drain wells. *Trans ASCE*. 113:718-754.
5. Cartier, G. A., Londez M. Allaey and F. Ropers. 1989. Secondary settlement of peat during a load test. *Proc. of the 12th ICSFME*. Rio de Janeiro. 3:1721-1722.
6. Cao, L. F., Y. M. Na., B. M. Win and V. Choa. 1999. Observation of field measurements during soft soil improvement, *Field measurements in Geotechnics*. Rotterdam. 475-480. Balkema.
7. Cherubini, C., V. Cotecchia, C. I. Giasi and G. Todaro. 1989. Identification of outliers in geotechnical data. *Computer and physical modelling in Geotechnical Engineering*. 383-388. Balkema.
8. Chung, S. G., G. H. Choi, H. K. Choi and K. Y. Chio. 1998. \sqrt{s} -Observational procedure for consolidation analysis. *J. of the Korean Geotechnical Society*. KGS. 14(2):41-53. (in Korean)
9. Draper, N. R. and H. Smith. 1981. *Applied Regression Analysis 2nd Edition*. John Wiley & Sons, Inc.
10. Duncan, J. M. 1993. Limitation of conventional analysis of consolidation settlement. *J. of the Geotechnical Engineering Div.* ASCE. 119(9):1333-1359.
11. Edil, T. B. and E. J. den Haan. 1994. Settlement of peats and organic soils. *Proc. of Settlement '94*. ASCE. 1543-1572.
12. Gibson, R. E. and K. Y. Lo. 1961. A theory of soils exhibiting secondary compression. *ACTA Polytechnical Scandinavia*. Ci 10 296. Scanavian Academy of Science.
13. Helbo, T. 1999. Prediction of settlements and consolidation periods using field observational methods on Lekir coastal development project-phase 1, Malaysia. *Field Measurements in Geotechnics*. Rotterdam. 493-498. Balkema.
14. Kodandaramaswamy, K. and S. Narasimha Rao. 1980. The prediction of settlements and heave in clays. *Can. Geotech. J.* NRC of Canada. 17:629-631.
15. Lee, S. W., J. B. Park, Y. S. Kim, S. J. Kim, S. W. Kim and H. J. Chung. 1997. A study on the evaluation of reliability for settlement predictions by hyperbolic method. *J. of the Korean Geotechnical Society*. KGS. 13(6):5-

12. (in Korean)
16. Lund, R. E. 1975. Table for an approximate test for outliers in linear models. *Technometrics*. 17(4):473-476.
17. Magnan, J. P. and J. M. Deroy. 1980. Analyse graphique des tassements observés sous les ouvrages. *Bull. Liais. Lab. Ponts Chauss.* 199:45-52.
18. Matyas, E. L. and L. Rothenburg. 1996. Estimation of total settlement of embankments by field measurements. *Can. Geotech. J. NRC of Canada*. 33: 834-841.
19. Micasa, M. 1963. The consolidation of soft clay—a new consolidation theory and its application. *Kajima-suppan-kai*. Tokyo. (in Japanese)
20. Olson, R. E. 1997. Settlement of embankments on soft clays. *J. of the Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. ASCE. 124 (4):278-288.
21. Tan, S. A., T. Inoue and S. L. Lee. 1991. Hyperbolic method for consolidation analysis. *J. of the Geotechnical Engineering Div. ASCE*. 117(11):1723-1737.
22. Tan, S. A. 1995. The hyperbolic method for prediction of ultimate primary settlement in clays with vertical drains. *Compressibility and Consolidation of Clayey Soils*. Balkema. 795-800.
23. Terzaghi, K. 1925. Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage. *Franz Deuticke Wien*. Austria.
24. Tietjen, G. L. 1986. The analysis and detection of outliers. *Goodness-of-Fit Techniques*. D'Agostino R. B. and M. A. Stephens (eds). Marcel Dekker, Inc. 497-522.