

점중 선행 하중으로 개량하는 연약지반의 계측기반 침하량 예측방법 개발

Prediction Method of Settlement Based on Field Monitoring Data for Soft Ground Under Preloading Improvement with Ramp Loading

우 상 인¹ Woo, Sang-Inn 윤 찬 영² Yune, Chan-Young
백 승 경³ Baek, Seung-Kyung 정 충 기⁴ Chung, Choong-Ki

Abstract

Previous settlement prediction methods based on settlement monitoring were developed under instantaneous loading condition and have restriction to be applied to soft ground under ramp loading condition. In this study, settlement prediction method under ramp loading was developed. New settlement prediction method under ramp loading considered influence factors of consolidation settlement such as thickness of clayed layer, quantity of surcharge load and preconsolidation pressure, etc. Geometrical correction method based on hyperbolic method (1991) and correction method based on probability theory were applied to increase accuracy of settlement prediction using field monitoring data after ramp loading. Large consolidation tests for ideally controlled one dimensional consolidation under ramp loading condition were performed and the settlement behavior was predicted based on the monitoring data. New prediction method yielded good result of entire settlement behavior by using data during an early stage of ramp load. Additionally, new prediction method offered better settlement prediction which had final settlement prediction in close proximity and low RMSE(Root Mean Square Error) than previous method such as hyperbolic method did.

요 지

현장계측 자료를 이용하여 연약지반의 향후 침하거동을 예측하는 기존의 방법들은 모두 즉시재하 조건을 가정하고 개발된 방법으로써 실제로는 연약지반의 안정성 등을 고려하여 점중재하가 이루어지는 현장에 적용하기에는 많은 제약이 있다. 본 연구에서는 연약층의 두께, 성토하중 크기, 선행압밀하중, 배수거리, 성토속도 등의 다양한 영향인자를 고려하였으며 점중재하가 완료된 이후의 지반개량 기간에도 지속적으로 예측 정확도를 높일 수 있는 계측기반 침하거동 예측기법을 개발하였다. 점중재하 과정에서의 예측방법과 성토완료 이후의 예측방법이 개발되었으며, 성토 완료 이후의 예측방법은 기하학적 보정을 이용한 정확도 향상기법과 확률론적 보정을 이용한 정확도 향상기법 두 가지를 제안하였다. 대형압밀시험 결과를 이용한 예측기법의 적용성 검증 결과, 기존의 예측기법을 적용할 수 없는 점중재하 초기에도 비교적 적은 데이터를 이용하여 상당히 높은 정확도를 가지고 침하거동을 예측할 수 있었다. 또한, 성토완료이후에도 기존 예측기법과 제안된 방법의 비교, 분석 결과 최종침하량과 RMSE에서 모두 제안된 방법이 기존의 예측기법에 비하여 우수한 예측결과를 보였다.

Keywords : FDM, Field monitoring, Hyperbolic, Ramp loading, Settlement prediction

1 정회원, 서울대학교 건설환경공학부 연구원 (Member, Researcher, Dept. of Civil and Environment Engrg., Seoul National Univ.)

2 정회원, 강릉대학교 토목공학과 전임강사 (Member, Full-time Lecturer, Dept. of Civil Engrg., Kangnung National Univ.)

3 정회원, 한국전력기술 기술원 (Member, Engineer, Korea Power Engrg. Company, INC)

4 정회원, 서울대학교 건설환경공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environment Engrg., Seoul National Univ., geolabs@snu.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

현장계측 자료를 이용하여 연약지반의 침하거동을 예측하는 기존의 방법으로는 Monden 법(1963), Asaoka 법(1978), 쌍곡선법(1991), $\sqrt{5}$ 방법(1998) 등이 있다. 상기 방법들은 모두 즉시재하 조건을 가정하고 개발된 방법이다. 하지만 실제 연약지반 개량 시에는 연약지반의 안정성 등을 고려하여 장기간에 걸쳐서 성토하중을 증가시키고 또한 성토기간이 전체 지반개량 기간의 상당부분을 차지하므로 이러한 점증재하 지반에 기존의 예측방법을 적용하기에는 많은 제약이 있다.

이에 따라 최근에 계측자료를 기반으로 점증재하 지반의 침하거동을 예측할 수 있는 방법이 제안되었으나(윤찬영 등, 2007), 성토하중의 크기, 배수거리, 재하속도 등 침하거동에 영향을 미치는 여러 영향 인자를 고려하지 않아서 다양한 현장에 적용하기에 한계가 있으며, 점증재하 과정에서의 자료만을 이용하므로 점증재하 완료 이후에는 예측정확도를 높일 수 없다는 단점이 있다. 본 연구에서는 지반의 재하하중 크기, 연약층의 두

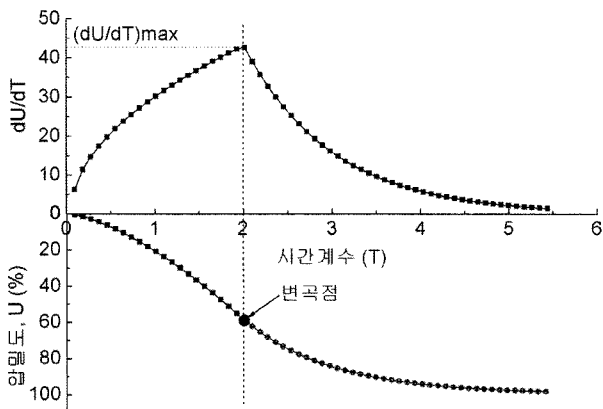


그림 1. 점증하중 재하시 평균 압밀도 곡선에서 변곡점의 위치(백승경, 2007)

표 1. 재생형 카올리나이트의 입력 물성치(윤찬영과 정충기, 2005)

Plasticity index (%)	17
Percentage finer than #200 sieve (%)	98
Initial void ratio	0.970
Compression index, C_c	0.294
Initial vertical permeability, k_{v0} (m/s)	1.67×10^{-9}
Initial horizontal permeability, k_{h0} (m/s)	2.50×10^{-9}
Initial effective vertical stress (Maximum past pressure, kPa)	100
Change of vertical permeability index, C_{kv}	0.332
Change of horizontal permeability index, C_{hv}	0.365

께, 선행압밀하중과 같이 최종침하량에 영향을 주는 인자와 하중재하속도, 배수거리와 같이 침하속도에 영향을 주는 인자를 고려하여 장래 침하거동을 예측할 수 있는 방법을 제안하였으며, 점증재하가 완료된 이후에도 계측자료를 활용하여 침하거동 예측정확도를 지속적으로 높일 수 있도록 하였다. 제안된 방법의 적용성 및 신뢰성은 대형 압밀 실험 결과를 이용하여 검증하였다.

2. 점증하중 재하 지반의 침하거동

Olson(1977), Tang과 Onitsuka(2000), Zuh와 Yin(2001) 등은 점증하중 재하 지반의 압밀거동의 이론해를 제안하였다. 이론해에서 성토 완료 이전 시점과 이후 시점을 기준으로 평균압밀도-시간 관계는 2개의 곡선으로 구분할 수 있으며, 이 때 Tang과 Onitsuka(2000)는 성토가 완료되는 시점에서 다음 그림 1과 같이 평균압밀도의 변화율이 최대가 되는 변곡점이 나타난다고 하였다.

한편 Carrillo(1942)는 연직 및 방사 배수가 동시에 발생하는 즉시하중 재하 지반의 압밀해석 시에 연직방향과 방사방향 배수조건을 해를 각각 계산하여 조합하는 것으로 정확한 압밀해를 계산할 수 있다고 하였으나, 점증하중이 재하되는 조건의 압밀은 즉시하중 재하 조건의 압밀과 달리 Carrillo의 법칙이 성립하지 않는다(Tang과 Onitsuka, 2000). 따라서 점증하중 재하 지반에 대해서는 연직방향과 방사방향 배수조건을 해를 각각 계산하여 조합하는 것으로는 정확한 압밀해를 계산할 수 없다. 따라서, 본 연구에서는 점증하중 재하조건에서 연직방향과 방사방향 흐름을 동시에 고려하고 이와 함께 압밀 중 위치별 물성치 변화를 고려한 엄밀해석을 실시하기 위하여 윤찬영 등(2007)에 의하여 제안된 유한차분 해석을 실시하였다. 통일분류법에 따라 CL 점성토로 분류되는 정규압밀 재생형 카올리나이트의 특성(표 1)을

표 2. 유한차분 해석 조건

시료직경(mm)	배수재 직경(mm)	응력증분(kPa)	점증하중 재하시간(hr)
300	60	50	3, 5, 7, 10, 12, 15
		80	
		120	
360	60	50	
		80	
		120	
	30	50	
		80	
		120	

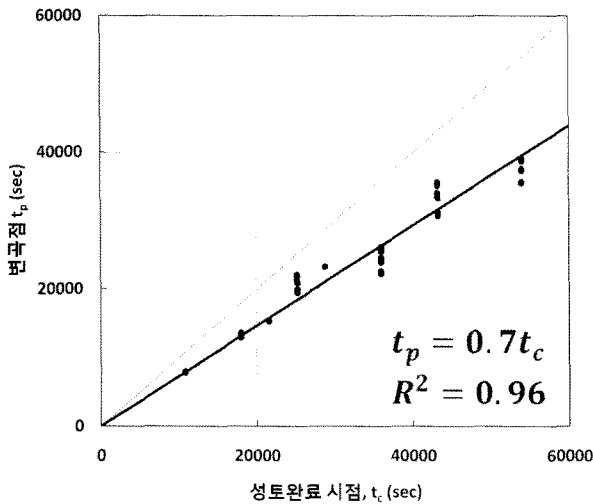


그림 2. 성토완료 시점과 변곡점의 관계

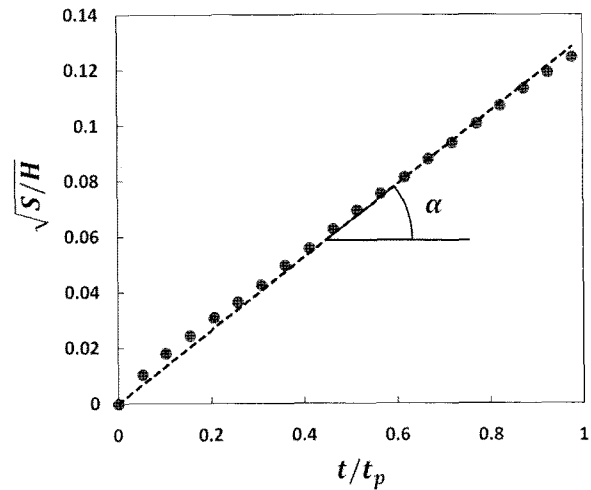


그림 3. 축 변환된 침하곡선(변곡점 이전)

기반으로 해석을 실시하였다.

사용한 차분망은 가로, 세로 각각 20 절점으로 구성하였으며, 시료의 크기는 높이 200mm에 대하여 배수거리 및 배수재 직경비의 영향을 고려하기 위하여 전체직경을 300mm, 360mm 두 가지 경우, 그리고 배수재 직경 30mm, 60mm에 대하여 해석을 수행하였다. 또한, 재하하중의 크기와 하중재하 속도의 영향을 고려하기 위하여 재하하중과 재하시간을 각각 50, 80, 120kPa 및 3, 5, 7, 10, 12, 15hr로 변화시켜가면서 총 54회의 해석을 실시하였다. 해석 조건은 표 2와 같다.

해석 결과인 그림 2에서 확인할 수 있는 것과 같이 수치해석을 통한 엄밀해석 결과 성토완료시점 이전에 항상 변곡점이 나타나는 것을 알 수 있으며, 성토완료시점과 변곡점의 관계는 식 (1)과 같이 나타난다.

$$t_p = 0.7t_c \quad (1)$$

여기서 t_p : 변곡점까지의 시간(sec)

t_c : 성토완료까지의 시간(sec)

또한 유한차분 해석 결과로 얻어진 대상지반의 변곡점 이전의 침하량을 그림 3과 같이 축변환 하면 식 (2)와 같은 선형회귀식을 얻어낼 수 있다. 성토시간과 연약층의 두께에 따른 침하 거동을 정규화 시키기 위해서 침하량은 연약층의 두께로 나누었으며, 시간은 변곡점 발생 시점을 기준으로 구분하였다. 변곡점 이전의 선형회귀식에서 직선의 기울기는 α 로 나타낼 수 있으며, 시간이 0인 지점에서의 침하량은 이론적으로 발생하지 않아야 하므로 y축과의 교점은 0으로 설정하여 선형회귀를 수행하였다.

변곡점 이후의 침하량은 그림 4와 같이 축변환 하여 식 (3)과 같은 선형회귀식을 얻을 수 있다. 이 경우에도 연약층의 두께에 따른 침하 거동을 정규화 시키기 위해서 침하량을 연약층 두께로 나눈 후 축변환을 수행하였다. 변곡점 이후의 선형회귀식에서 직선의 기울기는 α' 으로 나타내며 y축과의 교점은 β' 으로 나타낼 수 있다.

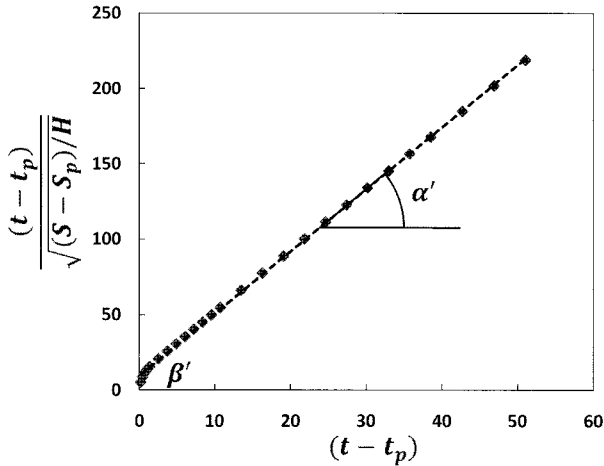


그림 4. 축 변환된 침하곡선(변곡점 이후)

따라서 대상지반에 대해서 식 (2), (3)에서 결정되는 계수 α , α' , β' 을 이용하면 지반의 침하거동을 예측할 수 있으며 최종침하량은 식 (4)와 같이 결정된다.

$$S = (\alpha t / t_p)^2 H \quad (t \leq t_p) \quad (2)$$

$$S = \left(\frac{t - t_p}{\alpha' (t - t_p) + \beta'} \right)^2 H + S_p \quad (t \geq t_p) \quad (3)$$

$$S_f = \frac{1}{\alpha'^2} H + S_p \quad (4)$$

여기서 S : 시간 t 에서의 침하량

S_p : 변곡점에서의 침하량

S_f : 최종 침하량

t_p : 변곡점까지의 시간

H : 연약층 두께

α : 변곡점 이전 회귀선의 기울기

α' : 변곡점 이후 회귀선의 기울기

β' : 변곡점 이후 회귀선의 절편

3. 점증하중 재하 지반의 침하거동 예측

3.1 성토완료 이전 시점에서의 침하거동 예측

향후 계획된 성토고에 대한 침하 거동 전체를 예측하기 위해서는 침하량 산정에 필요한 계수인 α , α' 과 β' 값들이 점증 재하 중에도 결정되어야 한다. 값은 점증하중이 재하되면서 침하가 발생하면, 그 결과를 식 (2)에 적용하여 재하 초기에 바로 결정할 수 있다. 반면에 과는 변곡점 이후의 침하량 평가에 관련된 값이므로 점증하중 재하되는 초기에는 바로 결정하기는 어렵다. 그

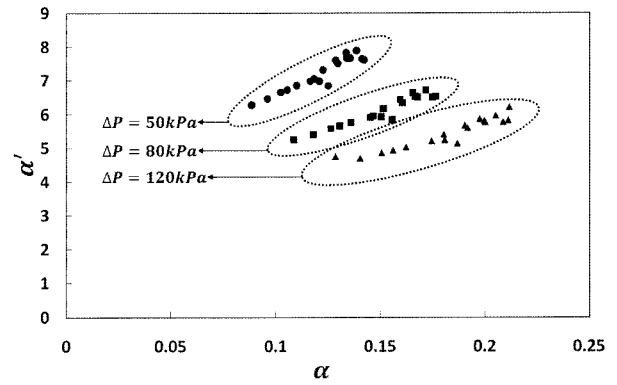


그림 5. 계수 α 와 α' 의 관계

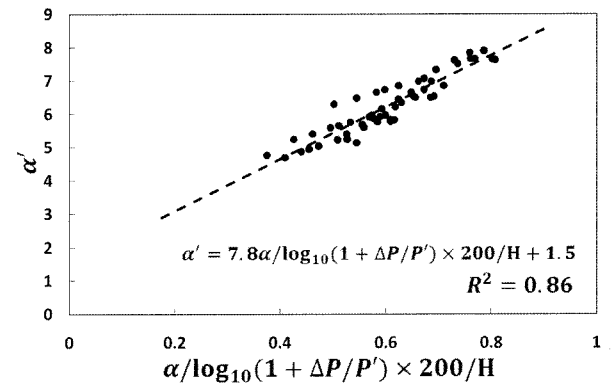


그림 6. 하중조건, 시료조건을 고려한 계수 α 와 α' 의 관계

러나 α' 과 β' 값은 동일 지반의 침하에 관련된 계수라는 점에서 α 값과 밀접한 관련이 있다.

표 2에 제시된 다양한 조건에 대한 유한차분 해석 결과, 변곡점 전, 후의 두 곡선을 축 변환하여 얻어진 계수 α 와 α' 의 관계는 그림 5와 같다. 그림 5에서 각각의 하중 증분에 대해서 α 와 α' 관계의 특정한 경향성을 볼 수 있다. α' 는 식 (4)에서 볼 수 있듯이 최종침하량과 관계된 계수이다. 압밀침하에서 최종침하량은 하중증분, 선행압밀하중, 연약층의 두께의 영향을 받으므로 이를 고려하여 α 와 α' 관계를 수정할 수 있으며, 수정한 α 와 α' 의 관계는 그림 6과 같고, 관계식은 식 (5)와 같다.

$$\alpha' = 7.8 \alpha \frac{(200/H)}{\log_{10}(1 + \Delta P / P')} + 1.5 \quad (5)$$

여기서 H : 연약층 두께(mm)

ΔP : 성토하중(kPa)

P' : 선행압밀하중(kPa)

α 와 β' 의 관계는 그림 7과 같다. 이 때 β' 는 식 (3)에서 확인할 수 있는 것과 같이 침하곡선의 형태와 관련된 계수이다. β' 값이 작을수록 침하곡선은 최종침하량에

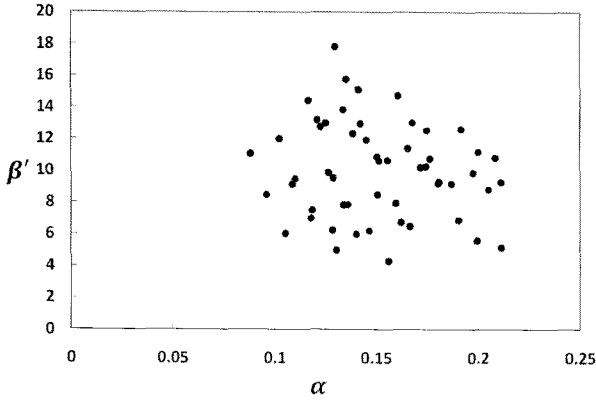


그림 7. 계수 α 와 β' 의 관계

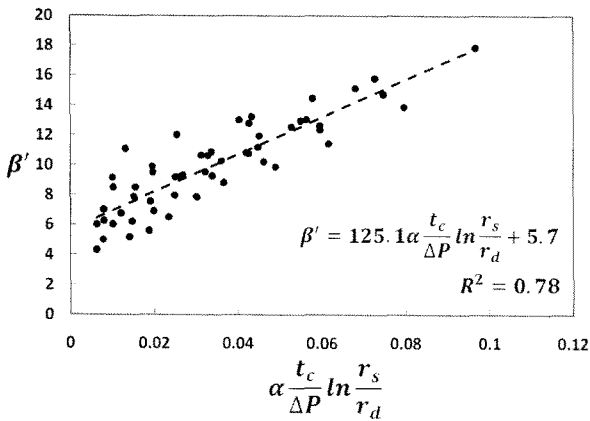


그림 8. 하중 재하속도와 배수거리를 고려한 계수 α 와 β' 의 관계

빠르게 근접한다. 따라서 α 와 β' 관계는 침하속도에 영향을 주는 요소에 의하여 영향을 받는다. 압밀침하 속도에 영향을 주는 요소로는 하중 재하 속도와 배수거리가 있다. 이러한 요소들을 고려하여 α 와 β' 관계를 재산정하면 그림 8과 같고, 관계식은 식 (6)과 같다.

$$\beta' = 125.2\alpha \frac{t_c}{\Delta P} \ln\left(\frac{r_s}{r_d}\right) + 5.7 \quad (6)$$

여기서 t_c : 성토완료 시점(hr)

ΔP : 성토하중(kPa)

r_s : 유효 배수 반경

r_d : 배수재의 반경

따라서 성토 초기의 계측자료를 이용하여 α 를 산정한 후, 식 (5), (6)을 이용하여 변곡점 이후 침하곡선의 계수인 α' , β' 를 산정할 수 있으며, 산정된 α' , β' 와 식 (3)을 이용하면 초기 계측자료만을 이용하여 변곡점 이후의 전체 침하거동까지 예측 할 수 있다.

3.2 성토완료 이후 시점에서의 침하거동 예측

상기 방법을 이용하여 초기 데이터만을 이용하여 전체 침하거동을 예측할 수 있지만 변곡점 이후 침하 데이터가 존재할 경우, 침하 예측의 정확도를 상승시킬 수는 없다. 이에 따라 본 연구에서는 다음과 같이 변곡점 이후의 침하 데이터를 이용하여 전체 침하거동 예측을 보정하는 방법으로 기하학적인 보정방법과 확률론적인 보정방법을 제안하였다.

3.2.1 기하학적인 보정

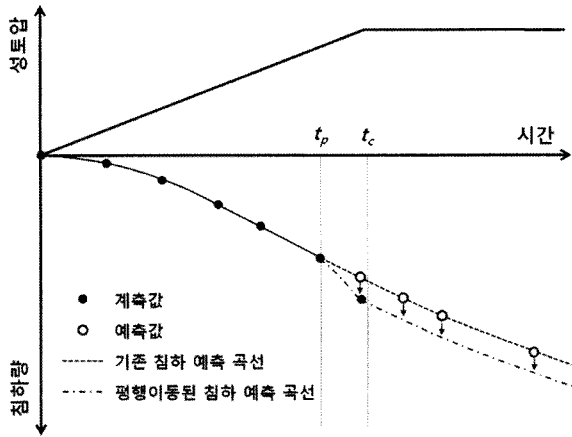
기하학적인 보정에서는 쌍곡선법을 근간으로 한 아래와 같은 방법을 이용하여 침하거동 예측결과를 지속적으로 보정, 정확도를 향상시킬 수 있다.

먼저 변곡점 이후의 새로 계측된 자료와 변곡점 이전 자료를 이용하여 예측된 예측값의 차이만큼 침하예측곡선을 평행이동 시킨다(그림 9(a)). 수직 평행이동된 침하 예측 자료에서 성토완료 시점(t_c)과 성토완료 시점의 두 배 되는 시점($2t_c$)사이의 침하 예측자료만을 이용하여 그림 9(c)와 같이 축변환을 실시하고 계수 α'' , β'' 를 구한 후, 산정된 계수값을 이용하여 침하곡선을 재보정한다(그림 9(d)). 상기 방법으로 $2t_c$ 이전까지의 계측 자료를 지속적으로 이용하여 예측결과의 정확도를 계속 향상시켜나가며, $2t_c$ 이후에는 기존의 방법인 쌍곡선법과 동일한 예측 결과를 나타낸다. 이러한 과정을 통하여 변곡점 이후에도 예측결과를 지속적으로 보정하고 정확도를 향상시킬 수 있도록 하였다.

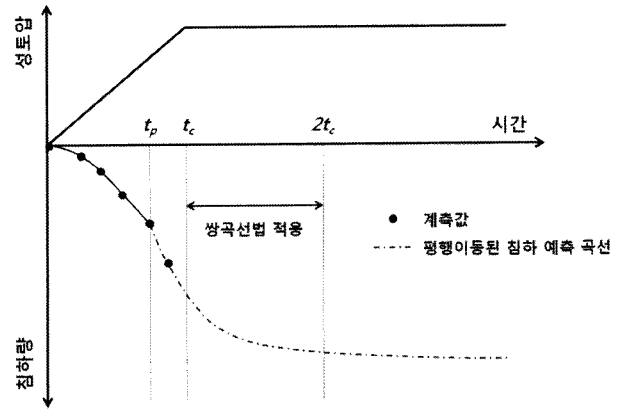
3.2.2 확률론적인 보정 방법

변곡점 이전 침하곡선의 계수 α 와 변곡점 이후 침하곡선의 계수 α' , β' 의 관계는 완벽한 선형관계가 아니라 분산이 존재하는 관계이다(그림 6, 8). 그림 10과 같이 α 와 α' 의 관계에서 결정된 α 에 대해서 결정계수 (R^2)를 최소화하는 추세선상의 값과 실제 α' 값의 차이를 ξ_α 라 할 때, 전체 해석결과에 대해서 ξ_α 의 평균과 표준편차를 산정할 수 있으며 이에 이용하여 ξ_α 의 분포를 그림 11과 같은 정규분포라 가정할 수 있다. α 와 β' 의 관계에서도 마찬가지로 그림 12와 같이 결정된 α 에 대해서 추세선상의 값과 실제 β' 값의 차이 ξ_β 의 분포를 계산할 수 있다.

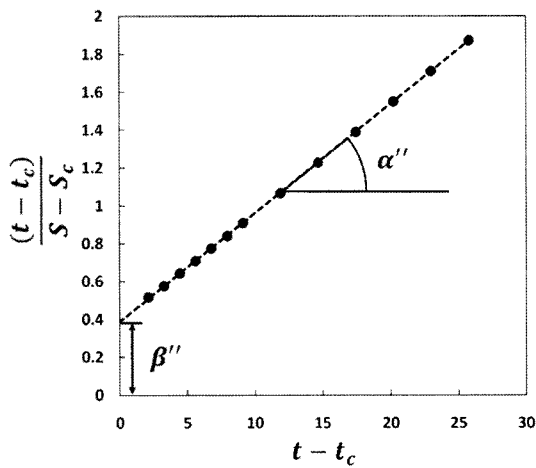
이러한 관계를 이용하여 변곡점 이후의 침하예측 정



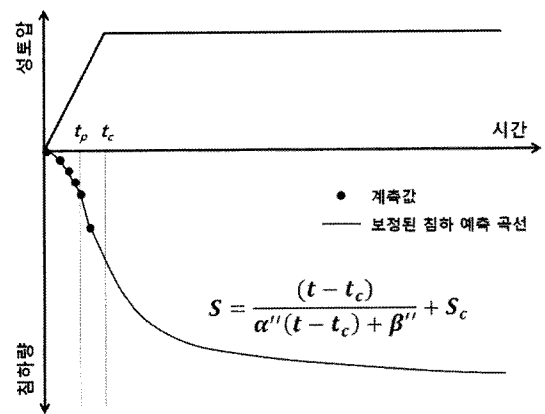
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 9. 변곡점 이후 데이터를 이용한 침하거동 보정 - 기하학적인 방법

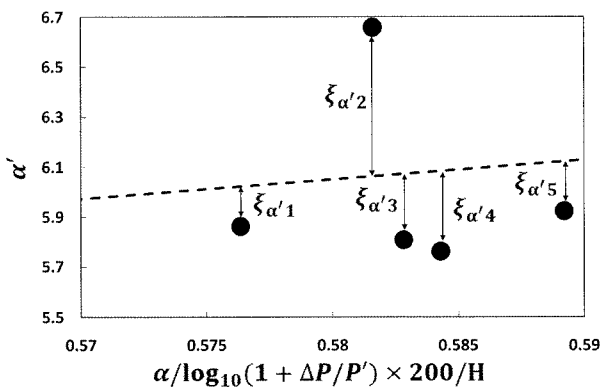


그림 10. α 와 α' 관계에서의 $\xi_{\alpha'}$ 산정

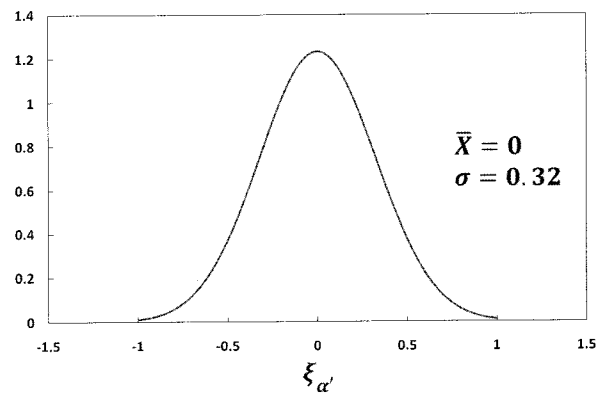


그림 11. $\xi_{\alpha'}$ 의 분포

확도를 향상시키는 방법은 다음과 같다. 먼저 변곡점 이전의 계측자료를 이용하여 산정된 α 값과 가정된 $\xi_{\alpha'}$, $\xi_{\beta'}$ 의 분포로부터 80% 신뢰도를 가지는 α' , β' 의 범위를 구한다. 계산된 α' , β' 의 범위에 대하여 계측값과 예측값의 오차가 최소화되도록 하는 α' , β' 값을 계산하고 식 (3)과 (4)를 이용하여 향후 침하거동 및 최종침하

량을 예측한다. 이 때 계측값과 예측값의 오차는 다음 식 (7)과 같이 산정되는 RMSE(Root Mean Square Error)로 산정된다. 이후 계측값이 지속적으로 추가되면 추가된 계측값을 포함하여 Trial-Error방법으로 계측값과 예측값의 오차를 최소화하는 α' , β' 값을 값을 찾게되며, 이를 위하여 계측값 추가에 따른 최적의 α' , β' 값을

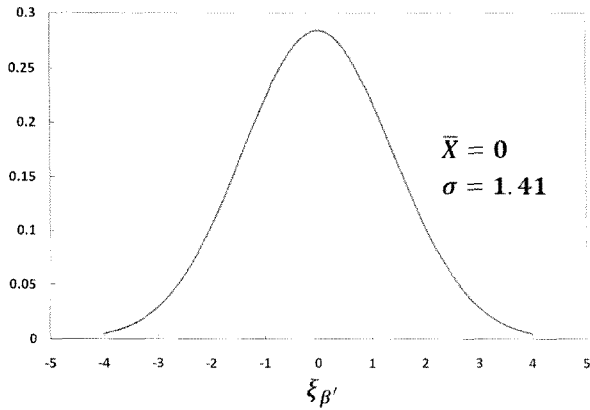


그림 12. ξ_{β} 의 분포

계산하는 자동화 프로그래밍을 구성하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - S'_i)^2}{n}} \quad (7)$$

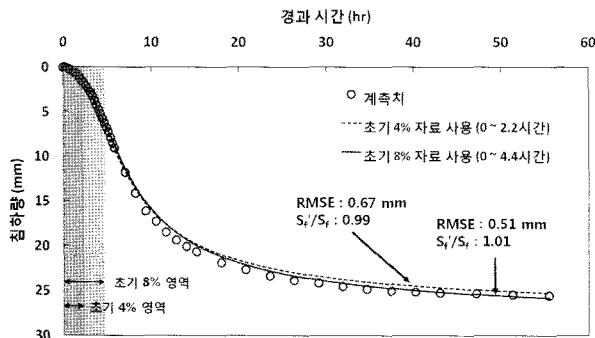
여기서 S_i : 계측 침하량
 S'_i : 예측 침하량
 n : 총 계측 횟수

4. 침하거동 예측 이론의 적용 및 평가

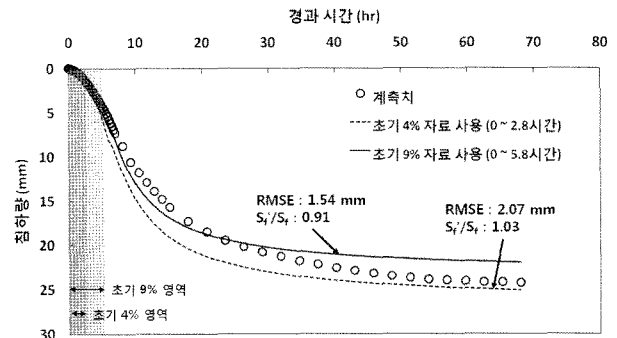
제안된 예측이론의 정확성과 타당성을 검증하기 위하여 카울리나이트 성형시료를 이용한 대형압밀시험 결과에 대하여 제안된 예측 방법을 적용하였다(윤찬영, 2005). 총 두 번의 대형압밀시험을 실시하였으며 대형압밀시험의 시험 조건은 표 3에 정리되어 있다.

먼저 침하 계측 자료 중 성토완료 이전의 하중 재하 초기자료를 본 연구에서 제안된 방법에 적용하여 이후의 침하거동을 예측하였다. 총 두 번의 실험에 대해서 전체 실험 시간 중 초기 4%의 침하 데이터와 변곡점까지의 침하 데이터를 이용하여 각각 침하예측을 수행하였다. 두 번의 대형압밀시험에 대한 침하거동 예측결과는 그림 13과 표 4에 정리되어 있다.

표 4에서 계측최종침하량과 예측최종침하량의 비율 (S'_f/S_f)과, 식 (7)과 같이 계산되는 RMSE(Root Mean Square Error)를 바탕으로 보았을 때, 첫 번째 실험의 경우 최종침하량에 대한 오차율이 2% 이내이고 RMSE도 0.7mm 이내로 그 오차가 매우 적으며 침하거동을 잘 예



(a) 실험 1에 대한 예측 결과



(b) 실험 2에 대한 예측 결과

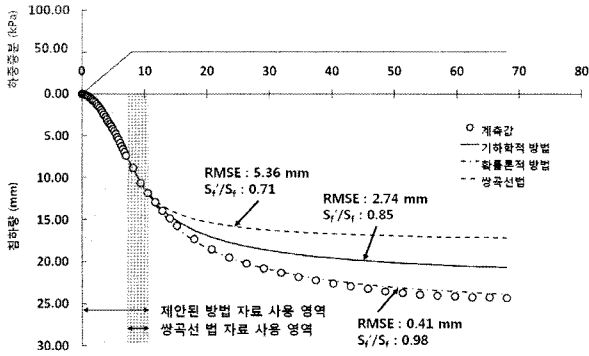
그림 13. 점증하중 재하시 침하거동 및 예측 결과(변곡점 이전)

표 3. 대형압밀시험 조건

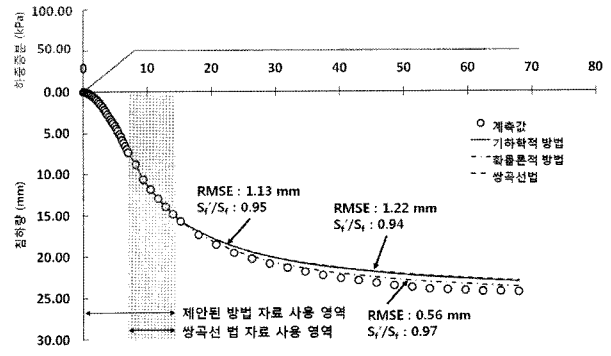
구분	선행압밀하중 (kPa)	하중 증분 (kPa)	점증하중 재하시간 (hr)	하중 재하 속도 (kPa/hr)	전체 시험 시간 (hr)
실험 1	95	60	6	10	50
실험 2	100	50	8	6.25	60

표 4. 예측조건 및 예측 결과(변곡점 이전)

구분	자료 사용 구간	계측최종침하량, S_f (mm)	예측최종침하량, S'_f (mm)	S'_f/S_f	RMSE (mm)
실험 1	초기 4%	25.60	25.32	0.99	0.67
	초기 8% (변곡점)		25.85	1.01	0.51
실험 2	초기 4%	24.30	25.14	1.03	2.07
	초기 9% (변곡점)		22.02	0.91	1.54



(a) 초기 15%, 성토완료 후 4% 자료 이용



(b) 초기 22%, 성토완료 후 11% 자료 이용

그림 14. 예측 결과 및 쌍곡선법과의 비교(실험 2, 변곡점 이후)

표 5. 예측 조건 및 예측 결과 (실험 2, 변곡점 이후)

구분	자료 사용 구간	계측최종침하량, S'_f (mm)	예측최종침하량, S_f (mm)	S'_f/S_f	RMSE (mm)
쌍곡선법	성토완료 후 4%	24.30	17.15	0.71	5.36
기하학적 방법	초기 15%		20.65	0.85	2.74
확률론적 방법	(성토완료 후 4%)		23.82	0.98	0.41
쌍곡선법	성토완료 후 11%	24.30	22.89	0.94	1.25
기하학적 방법	초기 22%		23.01	0.95	1.16
확률론적 방법	(성토완료 후 11%)		23.65	0.97	0.56

측하고 있는 것으로 나타났다. 두 번째 실험의 경우도 최종침하량에 대한 오차율이 10% 이내이며, RMSE는 2.1mm 이내로 오차가 조금 커지기는 하였으나 여전히 침하거동을 잘 예측하고 있다.

실험 2에 대해서 본 연구에서 제안된 변곡점 이후의 데이터를 이용한 침하 예측 정확도 향상기법인 기하학적인 방법과 확률론적인 방법을 각각 적용하고, 기존의 침하예측 방법(쌍곡선법)과 비교하였다. 총 실험 시간 중 초기 15%, 22% 자료를 이용하여 제안된 기하학적인 방법과 확률론적인 방법을 적용하여 침하예측을 수행하였으며, 각각 해당되는 성토완료 이후의 자료를 이용하여 쌍곡선법을 수행하여 비교하였다. 침하거동 예측 결과는 그림 14와 표 5에 정리되어 있다.

표 5에서 기하학적인 방법과 확률론적인 방법 모두 오차율과 RMSE 측면에서 기존의 쌍곡선법에 비하여 침하거동을 잘 예측하고 있는 것으로 나타났다. 또한 변곡점 이전 자료를 사용한 결과인 표 4에 비해서 변곡점 이후의 자료를 사용함으로써 침하거동 예측의 정확도가 향상되었다는 것을 알 수 있다. 특히 확률론적인 방법의 경우 성토완료 후 4%, 11% 자료이용 모두 오차율 3% 이내이고 RMSE 0.6mm 이내로서 가장 우수한 예측 결과를 보여주었다.

5. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 점증하중이 재하되는 지반에 대하여 하중 재하과정의 계측자료를 이용할 수 있으며, 재하 초기의 매우 적은 침하계측 자료만을 이용하여 정확하고 신뢰성 있는 예측이 가능한 계측기반 침하 예측 기법을 제안하였으며, 나아가 변곡점 이후의 침하 데이터가 추가될수록 지속적으로 침하거동 예측의 정확도를 높일 수 있는 방법을 제안하였다. 또한 실험조건이 잘 제어된 이상적인 1차원 점증 재하 조건에서 대형 압밀시험을 실시하고, 그 계측결과를 기반으로 침하거동 예측을 수행하여 제안된 방법의 적용성을 검증하였다.

- (1) 점증하중이 재하되는 지반의 침하거동은 성토완료 시점 이전에 나타나는 변곡점을 기준으로 두 개의 곡선으로 구분할 수 있으며, 각각의 곡선은 축변환을 통하여 선형회귀시킬 수 있다. 이 때 변곡점 이전과 이후의 침하거동은 각각 성토 시간과 연약층 두께에 대하여 정규화된 식 (2) 및 식 (3)으로 표현된다.
- (2) 변곡점 이전의 계측자료를 이용하여 변곡점 이후의 침하거동까지 예측하기 위해서는 변곡점 전, 후 침하곡선의 상관관계를 결정해야 하며, 이는 각 곡선

에 대한 선형회귀 직선의 기울기 및 절편인 와의 상관관계로 결정된다. 지반의 재하하중 크기, 연약층의 두께, 선형압밀하중과 같이 최종침하량에 영향을 주는 인자와 하중재하속도, 배수거리와 같이 침하속도에 영향을 주는 인자를 고려하여 결정된 상관관계는 식 (5), 식 (6)과 같다.

- (3) 점증 재하 조건에서 실시한 대형압밀시험에 대한 변곡점 이전의 침하 데이터를 이용한 침하거동 예측 수행 결과, 최종침하량 예측에 대한 정확도 및 전체 침하거동에 대한 정확도(RMSE)를 바탕으로 보았을 때, 총 침하량 25.6, 24.3mm에 대한 오차율이 10% 이내이고 RMSE도 2.07mm 이내로서 제안된 점증재하지반에 대한 계측기반 침하거동 예측방법은 그 오차가 적으며 침하거동을 잘 예측하는 것으로 나타났다.
- (4) 변곡점 이후의 계측 자료를 이용하여 침하거동 예측의 정확도를 향상시키는 방법으로 기하학적인 방법과 확률론적인 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 기존의 예측방법(쌍곡선법)과 비교하여 최종 침하량 및 전체 침하거동에 있어서 정확한 예측결과를 보여주었다. 특히 확률론적인 방법의 경우 총 침하량 24.3mm에 대한 오차율이 3% 이내이고 RMSE도 0.56mm 이내로서 가장 정확한 예측결과를 보였다. 이로부터 제안된 방법의 적용성 및 우수성을 검증할 수 있었다.
- (5) 본 연구에서는 연직 배수재가 설치된 1단 점증 재하 적용 균질 정규 압밀 점성토 지반의 침하 거동 예측

방법을 개발하였다. 다층 지반, 2단 이상의 점증 재하 등 복잡한 시공 및 지반 조건에 대해서는 개발된 방법의 적용의 한계점이 있으며, 이는 추가적으로 연구를 수행하여야 할 부분이다.

참 고 문 헌

1. 윤찬영, 이상인, 백승경, 정충기 (2007), “점증하중 재하 지반의 계측기반 침하 예측 방법의 개발”, *대한토목학회 논문집*, 제 27 권, 제 6C호, pp.425-432.
2. 백승경 (2007), *점증하중 재하 시 계측 자료를 이용한 침하 예측 방법*, 석사학위논문, 서울대학교, p.16.
3. 윤찬영, 조경진, 정충기 (2007), “연약지반 압밀해석을 위한 다층 지반 및 스미어 경계 영역에서의 수치해석 기법 개발”, *한국지반공학회 봄학술발표회*, pp.406-413.
4. 윤찬영, 정충기 (2005), “연직배수재가 설치된 정규압밀 점성토 지반의 점진적 압밀이 차후 압밀거동에 미치는 영향”, *한국지반공학회 논문집*, Vol.21, No.6, pp.5-18.
5. 윤찬영 (2005), *압밀 중 간극비의 변화가 연직배수재 설치 점성토 지반의 압밀거동에 미치는 영향*, 박사학위논문, 서울대학교, pp.70-80.
6. 조성민 (1998), *국내 연약 점성토 지반의 성토 재하시 변형 특성 분석*, 박사학위논문, 서울대학교, pp.74-77.
7. Carrillo, N. (1942), “Simple two and three dimensional cases in the theory of consolidation of soils”, *Journal of Mathematics and Physics*, Vol.21, pp.1-5
8. Tang, X. W. and Onitsuka, K. (2000), “Consolidation by vertical drains under time-dependent loading”, *International Journal for Numerical and Analytical Method in Geomechanics*, Vol.24, pp.739-751.
9. Tan, T. S., Inoue, T., Lee, S.L. (1991), “Hyperbolic Method for Consolidation Analysis”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.117, No.11, pp.1723-1737.

(접수일자 2008. 6. 5, 심사완료일 2008. 9. 9)