역해석 기법에 근거한 수직배수재로 개량된 연약점토지반의 침하예측
Prediction of Settlement of Vertical Drainage-Reinforced Soft Clay Ground using Back-Analysis

박현일[1], Hyun-Il, Park, 김윤태[2], Yun Tae, Kim, 황대진[3], Daejin, Hwang

[1] 삼성물산㈜ 건설부문 기술연구팀, 선임, Senior Researcher, R & D Team, Samsung Corporation
[2] 부경대학교 해양공학과, 조교수, Assistant Professor, Dept. of Ocean Engrg., Pukyong University
[3] 삼성물산㈜ 건설부문 기술연구팀, 수석, Principal Researcher, R & D Team, Samsung Corporation

SYNOPSIS : Observed field behaviors are frequently different from the behaviors predicted in the design state due to several uncertainties involved in soil properties, numerical modelling, and error of measuring system even though a sophisticated numerical analysis technique is applied to solve the consolidation behavior of drainage-installed soft deposits. In this study, genetic algorithms are applied to back-analyze the soil properties using the observed behavior of soft clay deposit composed of multi layers that shows complex consolidation characteristics. Utilizing the program, one might be able to appropriately predict the subsequent consolidation behavior from the measured data in an early stage of consolidation of multi layered soft deposits. Example analyses for drainage-installed multi-layered soft deposits are performed to examine the applicability of proposed back-analysis method.

Keywords : back-analysis, genetic algorithm, vertical drain, settlement, consolidation

1. 서 론

수직배수재로 개량된 연약지반에 재하성토를 적용할 경우 설계단계에서 예측된 침하거동과 시공 중에 관측된 거동이 서로 상이한 경우가 많다. 예로써, 국내 건설사례 가운데 설계시 예측침하량과 시공시 계측침하량을 서로 비교하여 그림 1에 나타내었다.

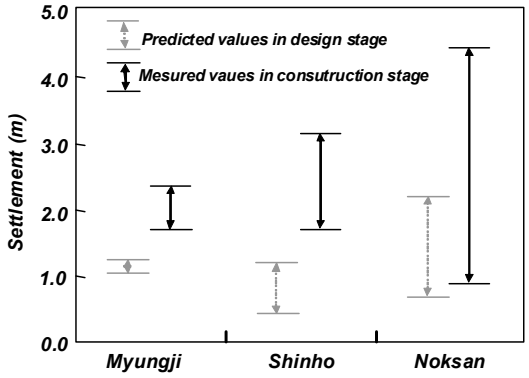


그림 1. 설계당시 예측된 침하량과 실제 계측된 침하량과의 비교 (정성교 등, 1999)

그림으로부터 국내 부산 점토지반에서 시공중에 계측된 침하량이 설계시 예측된 침하량보다 1.5~3배를 초과하는 경우가 발생됨을 알 수 있다. 이와 같이 수치해석 기법의 발전과 물성치 추정을 위한 각종 실내 및 현장시험의발달에도 불구하고 예측된 거동이 실제 관측된 거동과 매우 상이하게 나타나는 이유로 첫째, 현장지반의 물성치를 추정하는 과정 중에 포함되는 문제점이며, 둘째, 현장지반에 대한 해석시 사용된 해석모델, 하중조건, 경계조건, 및 초기조건 등을 정교하게 적용하더라도 대상 현장상태를 정확하게 모사(simulation)하기 어려우며, 셋째, 현장에서 거동 관측시 계측자나 계측방법에 따른 오차를 들 수 있다.

이와 같은 문제점들 가운데 현장 거동을 지배하는 지반정수 값에 대한 불확실성을 줄이기 위하여 일반적인 해석방법과는 달리 실제현장에서 실측된 변위나 간극수압을 사용하여 대상 시스템의 물성치를 역으로 추정하는 역해석 기법이 제안되었다(Gioda와 Sakurai, 1987; Sakurai와 Takeuch, 1983). 역해석에 대한 연구는 터널이나 지하공동의 안정성을 평가하기 위해 주도적으로 행해져 왔다. 그러나 이 방법들은 지반의 거동이 동일한 물성은 갖는 단층지반에 대하여 선형적이고 등방성 재료로 구성되어 있다고 가정하여 현장 계측치로부터 지반의 탄성계수 값이나 포아송 비 등을 주로 역해석하였다. 그러나 암반과 달리 연약지반은 많은 수의 설계물성치를 갖는 다층지반으로 구성되는 경우가 빈번하다. 즉 최적화되어야 하는 설계물성치 값들이 단층지반에 비해 크게 증가한다고 할 수 있다. 이러한 다변수 최적화 문제에서 계측치의 거동을 정확히 모사할 수 있는 설계물성치 조합을 신뢰성 있게 추정하는 것은 쉽지 있다. 대표적인 최적화 기법으로 알려져 있는 conjugate gradient 방법, quasi-Newton 방법 등은 최적화 하고자 하는 문제의 목적함수값의 민감도에 의존해서 최종해를 찾는 방법이기 때문에 설계 변수의 초기 값 가정에 따라 전역해 또는 지역해로의 수렴성이 크게 좌우된다.

본 연구에서는 지역해(local solution)로의 수렴을 피하며, 전역해(global solution)에 안정적으로 수렴할 수 있는 견고한(robust) 최적화 기법으로 알려진 실수형 유전자 알고리즘(real coded genetic algorithms)에 근거한 역해석 기법을 제안하고자 하였다. 추정하고자 하는 다층 연약지반의 압밀 설계물성치는 각 층의 압축지수와 압밀계수값이며, 수직배수재가 설치된 지반의 압밀침하량은 Barron(1948)의 압밀이론에 의해 계산되었다. 또한 다음과 같은 두 가지 예제해석을 통하여 복잡한 물성치를 갖는 다층점토지반에 대한 제안된 역해석 기법의 수렴성과 적용성을 검토하고자 하였다.

2. 개량된 연약지반의 침하예측

Barron (1948)은 Terzaghi의 일차원 압밀이론을 토대로 지반을 자유변형률 조건과 등변형률 조건으로 구분하여, 연직배수재가 설치된 지반의 압밀 해석식을 제안하였다. 실제 설계 및 해석 시에는 등변형율 조건을 가정하는데, 이는 이론적으로는 적합하지 않지만 상대적으로 간편하고 실용적이다. 초기에 재하되는 상재하중은 모두 과잉간극수압으로 작용하며, 모든 변형율은 연직방향으로만 작용하고 각 배수재의 영향범위는 원형이라고 가정하였다. 연직배수재 설치시 압밀에 걸리는 시간은 다음 식 (1a)와 같으며, 수평방향 평균압밀도와 시간계수와의 관계는 다음 식 (1b)로 표현될 수 있다.

$$U_{av} = 1 - exp\left(\frac{-8\,T_h}{F(n)}\right) \qquad (1a)$$

$$T_h = \frac{c_h \cdot t}{d_e^2}\ ,\ F(n) = n^2/(n^2-1)\cdot ln(n) - (3n^2-1)/(4n^2),\ n = d_e/d_w \qquad (1b)$$

여기서, c_h = 수평압밀계수, T_h = 시간계수, d_e= 배수재의 유효직경, d_w= 배수재의 직경, U_{av} = 점토지반의 평균압밀도, C_c = 압축지수, e_o = 초기간극비, H=점토지반층의 두께, $\sigma_o^{'}$ = 초기유효응력, $\Delta\sigma$= 상재응력을 의미한다.

3. 역해석 적용시 목적함수값의 정의

본 연구에서 목적함수값은 직접법에 근거하여 계측 침하량과 압밀침하모델에 따른 예측 침하량과의 차의 제곱으로서 다음 식 (2)와 같이 정의되었다. 제안된 침하모델에서는 각 층에서의 압축지수값과 압밀계수값이 적용되었으므로, 최적화 과정을 통해 도출되어야 하는 모델계수의 수는 대상지반의 점토층 수 2이다. 계측 침하양상을 정확히 모사할 수 있는 모델 정수값들을 추정하기 위해서는 전역해(global solution)로의 수렴성이 확보된 최적화기법의 적용이 필요하다고 할 수 있다. 따라서 적용되는 함수의 모델 계수값들이 많을 수록 전역해로의 수렴성이 다른 최적화 기법에 비해 견고한(robust) 것으로 알려진 실수형 유전자 알고리즘이 적용되었다.

$$\text{목적함수,}\quad ObjV = \sum_{i=1}^{Num} (S(i) - \hat{S}(i))^2 \qquad (2)$$

여기서, Num = 계측 자료 개수, $S(i)$=i번째 계측 침하량, $\hat{S}(i)$ = i번째 계측 시점에서의 예측 침하량이다.

4. 역해석에 적용되는 최적화 알고리즘

유전자 알고리즘은 무작위로 생성된 유전자들(chromosomes)로 구성된 모집단이 재생산 (reproduction) 및 돌연변이(mutation)와 같은 유전자 조작(genetic operator)을 통하여 해에 보다 근접한 개체군으로 발전된다는 개념이다. 유전자 알고리즘(GA)은 이와 같이 자연 선택 및 자연 유전자와 같은 생물학적 진화 이론 개념에 근거한 확률론적 최적화 기법으로서 전역적이며 견고한 해를 구할 수 있다(Goldberg 1989, Holland 1975). 본 연구에서는 순위적합선별(rank-based fitness assignment) 방법이 확률론적 비례 추출(stochastic universal sampling)방법과 연계되어 사용되었다. 즉 각 세대에서의 개체들은 순위적합선별을 통하여 무작위로 선별된 이후 재생산과 돌연변이 과정을 거친 후에 다음 세대에 포함된다. 이러한 과정을 거친 후에 최종 세대에서의 최적 개체가 최적화 문제의 최종 해로서 채택된다.

5. 역해석 기법의 적용

5.1 가상침하자료에 대한 예제해석

본 절에서는 제안된 역해석기법을 실제 침하자료에적용하기 전 단계로서, 초기지반 물성치 및 압밀물성치가 주어져 있는 가상지반으로부터 얻어진 침하자료에 대한 예제해석을 수행함으로써 제안된 역해석기법의 수렴성을 확인하고자 하였다. 표 1에는 3층으로 이루어진 연약지반의 초기 지반 물성치들과 각 층의 압밀 물성값들이 주어져 있다.

표 1. 가상연약지반의 지반 물성치

Layer	initialvoidratio e_o	unitweight γ_{sub}(kN/m^3)	thickness H(m)	compressionindex C_c	coeffi.ofconsol. $c_h(m^2/day)$
1	2.0	15.1	3.0	1.2	0.005
2	1.5	16.2	5.0	0.9	0.003
3	1.0	17.8	10.0	0.6	0.002

여기서, 표 1에 주어진 각층의 압밀 물성치 값이 최적화되어야 하는 정해라고 할 수 있다. 그림 2에는 가상적으로 적용된 재하 성토공정이 나타나 있다. 성토공정은 샌드매트 포설후 총 3단계로 성토되었으며, 각 성토공정에 대하여 점증적 하중재하가 고려되지 않으므로 3단계로 모사하였다. 이 재하성토 적용시 Barron의 압밀이론식에 근거하여 1000일 동안의 시간-침하관계가 그림 2와 같이 구해졌다.

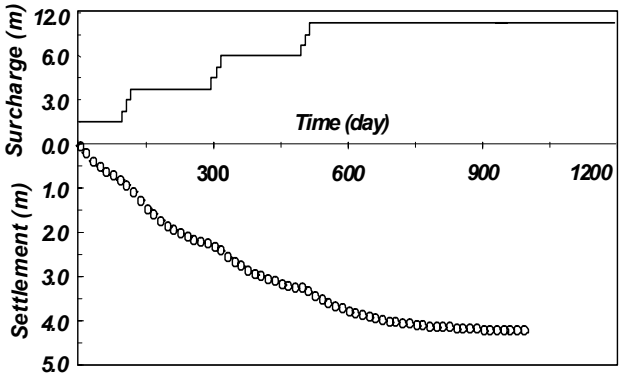
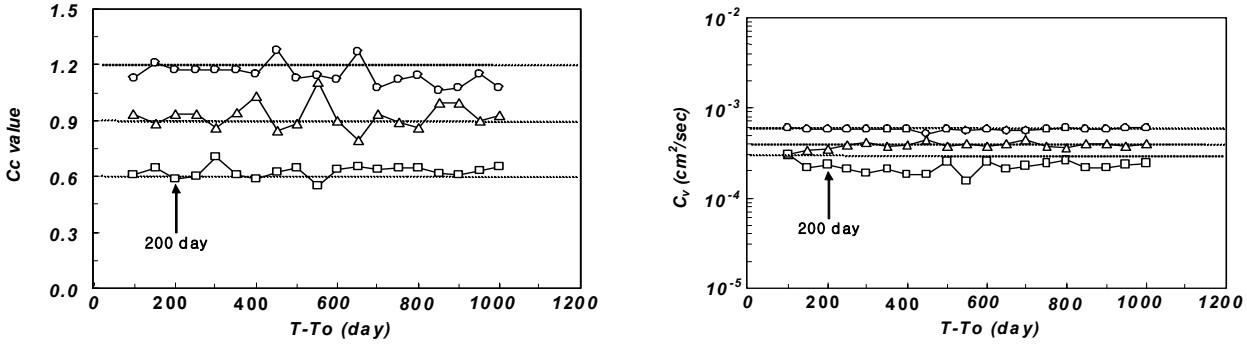


그림 2. 가상지반에 작용된 재하성토공정과 침하양상

역해석에 사용되는 침하자료의 계측기간 변화에 따라 역해석 과정을 통해 구해지는 압밀 물성치값들의 변동과 정해로의 수렴도를 살펴보았다. 즉 본 예제해석에서는 최종성토재하 이후에 최종적인 잔여침하량 10cm가 남는 시점을 계측기간 가운데 어느 계측시점에서 보다 신뢰성 있게 미리 예측할 수 있는지에 대한 여부를 검토하고자 하였다.

이를 위해 침하계측 100일부터 최종침하량 1000여일까지 50일씩 증가시키면서 총 19회 역해석을 각각 수행하여, 각각의 침하계측일수에 해당하는 역해석된 압밀물성치값을 그림 3에 나타내었다. 모델 계수값은 침하계측일수 초기부터 대체로 수렴되는 경향을 보이고 있다. 압축지수, C_c 값은 점토층 1, 2, 및 3층에 대하여 정해값 주변에서 약간의 변동을 보이고 있으며, 압밀계수, c_h값은 거의 정해에 수렴되는 결과를 얻을 수 있었다.



(a) C_c value (b) c_v vlaue

그림 3. 계측기간의 증가에 따른 역해석된 압밀 물성값들의 변화

그림 4에는 각 침하계측일수에 대하여 역해석된 모델계수값들을 사용하여 재해석을 다시 수행하여 주어진 최종성토를 한 후에 최종 잔여침하량이 10cm에 도달되는 시점, T_{10cm}를 재예측하였다. 여기서, T_{10cm}값은 계측이 시작되는 시점으로부터 최종 성토가 완료된 후 잔여침하량이 10cm가 되는 시점까지의 경과기간을 의미한다. 최종성토가 이루어지는 시점은 500일되는 시점이며, 침하계측이 시작된 초기 100여일 자료만을 사용하더라도 실제 해에 근접한 T_{10cm}값을 미리 예측할 수 있음을 알 수 있다. 계측

이 시작된 이후 대략 150일 경과 이후부터는 최종적인 T_{10cm} 값을 신뢰성 있게 얻을 수 있었다. 따라서, 가상지반에 대한 초기 압밀 물성치의 추정에 상당한 오류가 있었다 하더라도 침하양상에 부합되는 적합한 압밀 물성치값을 성토초기 단계에 추정할 수 있기 때문에 설계하중시 허용잔여침하량을 만족시킬 수 있는 적합한 성토공정을 재수립 할 수 있음을 알 수 있다. 이와 같이 가상지반의 침하자료에 대하여 역해석을 적용할 경우 침하계측초기자료만은 사용하더라도 지반의 압밀 물성치를 신뢰성있게추정할 수 있는 이유는 다음과 같다. 가상지반의 침하양상과 침하해석기법이 동일하며, 재하성토공정 및 침하계측 및 압밀 물성치를 제외한 초기 지반 물성치 입력에 있어서 오류가 전혀 포함되지 않았기 때문이다.

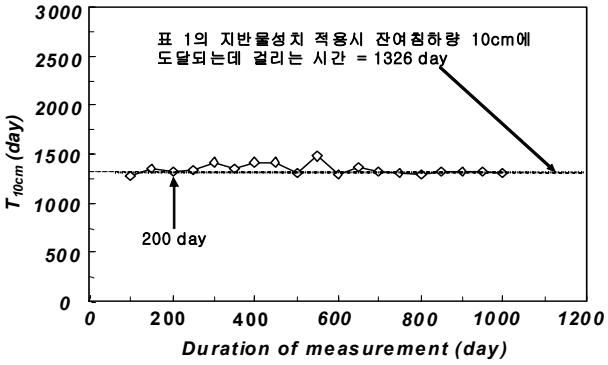


그림 4. 계측기간의 증가에 따른 T_{10cm} 값의 변화

계측침하일수가 100일, 500일 및 1000일인 경우 구해진 모델계수 값을 사용하여 시간에 따른 침하량 관계가 그림 5에 각각 예측되어 있다. 계측 초기인 100일까지 계측된 침하자료를 사용하여 역해석된 압밀계수 값들을 사용하여 침하예측을 수행하더라도 침하양상과동일한 예측결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

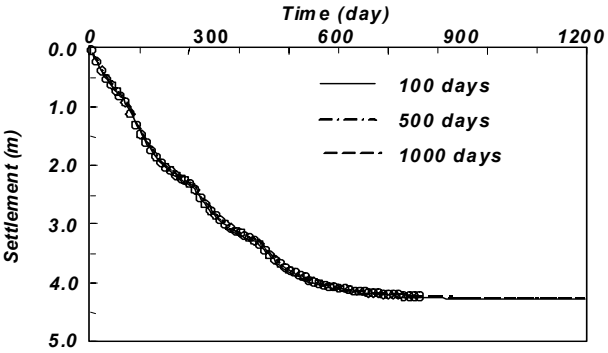


그림 5. 가상지반에 대한 침하자료와 예측값 비교

5.2 개량된 연약지반 성토현장 계측자료에 대한 해석

본 연구에서는 낙동강 유역의 개량된 연약지반에서 계측된 침하자료가 해석에 적용되었다(정경환 등, 2004). 대표적인 지층 구성이 그림 6에 나타나 있다. 지표로부터 10m두께의 점토층, 1~2m 정도의 중간 모래층, 하부에 10m 이상되는 점토층 및 최하단부의 모래자갈 퇴적층으로 구성되어 있다. 해석을 위해서 지반은 3개의 점토 층으로 구분되었으며, 각 점토층에 대해 수행된 표준 압밀시험 결과들을 살펴보면 다음과 같다. 압축지수, C_c의 경우 점토층 1은 1.0~1.8로서 고압축성이며, 점토층 2 및 3의 경우에는 0.8~1.4 및 0.4~0.8의 범위를 갖으며, 심토가 깊어질수록 저압축성의 경향을 띠고 있다. 점토층 1, 2및 3의 연직압밀계수값, c_h의 경우, 각각 0.00018~0.00190, 0.000419~0.00633 및 0.000431~0.00662 cm^2/sec로서 점토층 1의 값이 다소 작은 범위에 분포하고 있지만, 서로 큰 차이를 보이지는 않음을 알 수 있다.

침하는 지표면에서대략 4.5년(1670일) 동안 계측되었으며, 적용된 재하성토과정이 그림 7에 나타나 있다. 본 연구에서는대상지반의 중간 모래층에서 침하는 유발되지 않는 것으로 가정하였다.

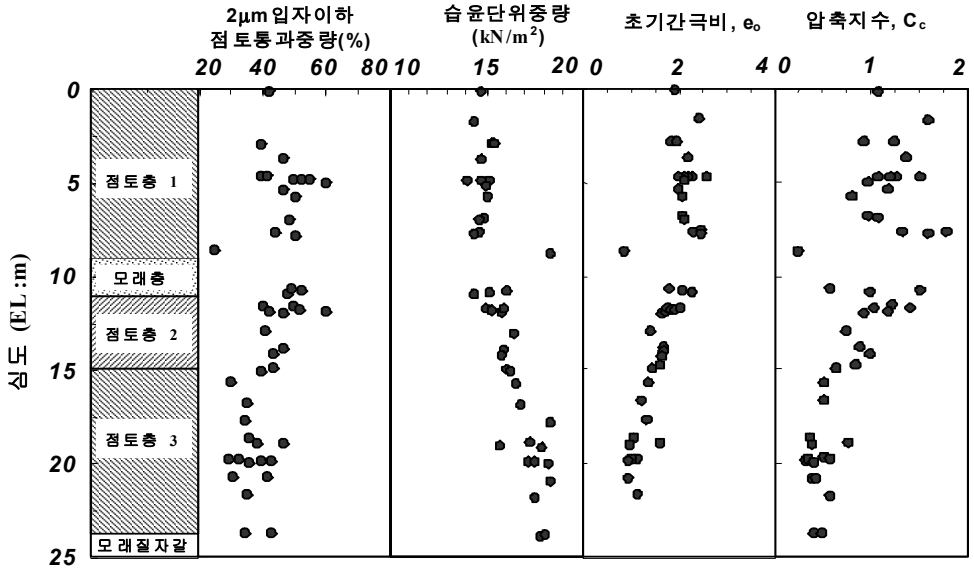


그림 6. 실제 현장지반의 토질 및 지질 특성

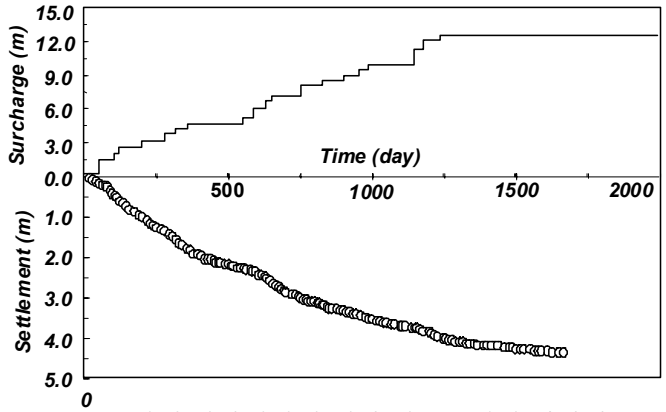
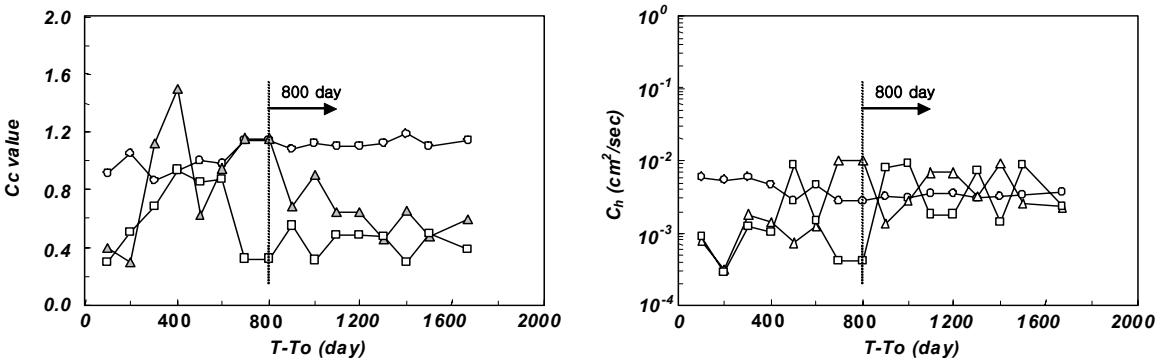


그림 7. 실제 현장지반에 대한 성토공정과 침하자료

5.1절의 예제해석과정과 동일하게 역해석에 사용되는 침하계측자료의 수를 침하계측 초기부터 점차 증가시키면서 압밀계수의 값들과 최종잔여침하량이 10cm에 도달되는 시점 T_{10cm}을 역해석 과정을 통하여 구하였다. 역해석은 침하자료를 100일부터 최종침하량 1600여일까지 100일씩 증가시키면서 총 16회 수행하였다. 그림 8에는 각각의 침하계측일수에 해당하는 침하자료를 사용하여 역해석된 모델계수값들이 구해져 있다. 침하계측일수가 800일을 넘어서면서 모델 계수값은 대체로 수렴되는 경향을 보이고 있다. 압축지수, C_c 값의 경우, 점토층 1, 2, 및 3층에 대하여 각각 1.2, 0.5~0.7 및 0.3~0.5범위를 갖으며 심도가 깊어짐에 따라 압축지수의 값이 점차로 감소하는 경향을 보인다. 역해석을 통하여 예측된 압축지수값들은 그림 6의 현장지반 물성특성에 나타난 심도에 따른 압축지수값의 분포와 비교적 일치되는 경향을 보였다. 압밀계수, c_h 값의 경우 침하계측일수가 800~900일을 경과하면서 대체적으로0.002~0.008 m^2/day 범위로 수렴하는 경향을 보이며, 심도에 따라 서로 큰 차이를 보이지 않고 있다.

그림 9에는 각 침하계측일수에 대하여 얻어진 모델계수값들을 사용하여 최종성토를 한 후에 최종 잔여침하량, 10cm에 도달되는 시점, T_{10cm}이 나타나 있다. 여기서, T_{10cm} 값은 계측이 시작되는 시점으로부터 최종 잔여침하량이 10cm가 되는 시점까지의 경과기간을 의미한다. 최종성토가 이루어지는 시점이

1300여일이다. 침하계측일수가 100~700일인 동안에는 T_{10cm} 값이 상당한 변동을 보임을 알 수 있다. 5.1절의 가상침하자료 분석에서는 지반의 입력물성치, 침하자료 및 성토공정에 전혀 오류가 포함되지 않았기 때문에 최종성토시의 침하양상과 T_{10cm}을 침하계측 초기자료만을 사용하더라도 정확히 예측하였었다. 그러나 본 예제와 같이 실제 침하자료의 경우에는 위에서 이미 언급한 바와 같이 간극비, 단위중량 등과 같은 지반의 입력물성치들과 계측된 침하자료와 성토공정에 각각 오류가 포함될 수 밖에 없기 때문에 계측초기자료만을 사용할 경우에는 예측에서의 상당한 변동을 피하기 어렵다. 그러나 침하계측이 대략 800여일을 경과함에 따라 추정되는 지반압밀 물성값들과 T_{10cm} 값은 상당히 수렴되는 경향성을 보였다.



(a) C_c value (b) c_h vlaue

그림 8. 계측기간의 증가에 따른 역해석된 압밀 물성값들의 변화

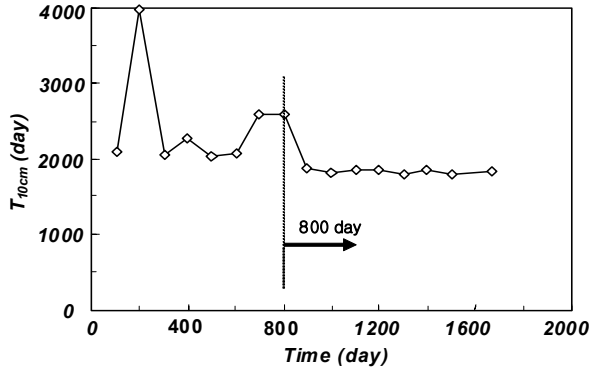


그림 9. 계측기간의 증가에 따른 T_{10cm} 값의 변화

그림 10에는 계측침하일수가 200일, 700일, 1000일 및 1670일인 경우에 대하여 구해진 모델계수 값을 사용하여 시간에 따른 침하량이 예측되어 있다. 200일인 경우에는 예측에서 상당한 오류를 보이며 T_{10cm} 값도 과다하게 예측하고 있음을 알 수 있다. 계측침하일수가 700일을 경과함에 따라 침하예측이 상당히 개선되었다. 800일 이후부터는 침하자료와 예측침하곡선이 거의 일치하는 경향을 보였다.

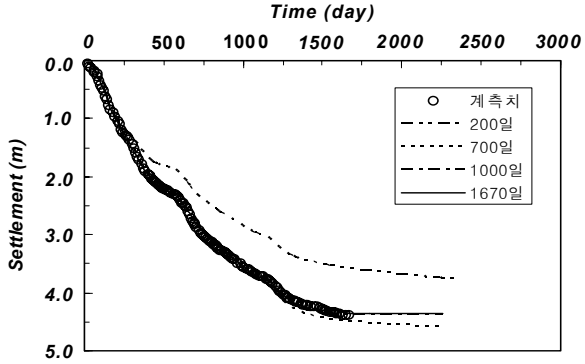


그림 10. 실제현장지반에 대한 압밀 침하자료와 예측값의 비교

실제 현장에서 사용되고 있는 압밀도 예측기법인 아사오카방법, 호시노 방법 등은 최종성토가 이루어진 1300일 이후에 압밀도가 50% 이상 이루어진 시점 이후에 신뢰성 있는 예측이 가능하다. 그에 반해 본 연구에서 제안된 역해석 기법을 적용할 경우 T_{10cm} 값을 침하계측 800일 이후부터는 비교적 안정적으로 예측할 수 있음을 알 수 있었다. 따라서, 지반개량기간 이후에 상부후속공정에 대한 여유기간이 충분히 확보되지 않는 경우에 설계시 예측된 침하양상과 달리 지속적으로 침하가 유발될 수가 있다. 제안된 역해석기법을 적용함으로써 보다 조기에 현장지반의 침하양상에 적합한 압밀물 성치 조합을 추정함으로써, 후속공정에 적합한 성토공정을 재수립함으로써 안정적인 후속공정을 수행하는데 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

6. 결 론

본 연구에서는 연직배수재가 설치된 연약지반에서 성토과정초기에 계측되는 침하자료를 역해석 함으로써 현장의 실제 침하양상이 반영된 성토공정을 재수립하는데 기여할 수 있는 역해석기법을 제안하였다. 여기서, 다층 연약지반의 경우 역해석되어야 하는 압밀설계 물성값들의 수가 많기 때문에 전역해로의 수렴성을 확보할 수 있는 유전자 알고리즘에 근거한 최적화 기법을 적용하였다.

제안된 역해석 기법의 구성을 살펴보면 개량된 지반의 압밀 침하는 Barron의 압밀이론에 근거하였으며, 최적화 과정은 유전자 알고리즘을 사용하였다. 다음과 같은 두 가지 예제해석을 통하여 제안된 역해석 기법의 적용성을 검토하였다. 지반의 기본 물성 및 압밀 물성값이 주어져 있는 가상지반과 낙동강 유역에서의 3층으로 구성된 실제 점토지반에서 계측된 침하자료에 적용함으로써 계측기간 중에 추정된 압밀물성치값들과 최종침하 완료시점 및 최종침하양상에 대한 예측정도가 검토되었다. 본 연구에서는 사례연구가제한적으로 수행되었으나 향후 연구에서는 제안된 역해석기법의 적용성과 활용성에 대한 안정성을 확보하기 위해서 충분한 현장계측자료에 대한 사례연구를 수행하고자 계획하고 있다.

참고문헌

1. 정경환, 신민식, 김동해, 이준석, 김두호, 김창시(2004), "낙동강 하구지역의 연약지반상 성토에 따른 현장계측관리 사례연구", **ISSMGEATC-7심포지움:연약지반상의지반공학적문제와시공사례**, pp. 69~81.
2. 정성교, 백승훈, 김규종, 이대명(1999), "낙공강 하구점토이 압축특성에 관한 연구", **한국지반공학회논문집**, 제 18권, 제4호, pp. 295-307.
3. Gioda, G. and Sakurai, S.(1987), "Back Analysis Procedures for the Interpretation of Field Measurements in Geomechanics", *Int. J. for Numerical and analytical Methods in Geomechanics.* Vol. 11, pp. 555-583.
4. Goldberg, D.E., 1989. *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*, New York: Addison-Wesley.
5. Holland, J. J.,1975. *Adaptation in natural and artificial systems*, The University of Michigan Press.
6. Sakurai, S. and Takeuchi, K.(1983), "Back Analysis of Measured Displacement of Tunnels", *Rock Mechanics and Rock Engineering* 16, pp 173-180.