

수직 배수재가 설치된 연약지반의 압밀 해석 및 역해석 프로그램 현장 적용 The Field Application of A Computer Program for Consolidation and Back Analysis of Soft Clay Ground with Vertical Drains

이만수⁽¹⁾, Man-Soo Lee, 이영남⁽²⁾, Young-Nam Lee, 나영목⁽³⁾, Yung-Mook Na, 홍의⁽⁴⁾, Eui Hong

⁽¹⁾ 현대건설 기술연구소 연구원, Researcher, Hyundai Institute of Construction Technology

⁽²⁾ 현대건설 기술연구소 수석연구원, Senior Researcher in Chief, Hyundai Institute of Construction Technology

⁽³⁾ 현대건설 싱가포르 창이매립 공장, Senior Geotech. Engineer, Reclamation at Changi East, Hyundai Engineering and Construction Co.,LTD.

⁽⁴⁾ 현대건설 싱가포르 창이매립 대리, Geotech. Engineer, Reclamation at Changi East, Hyundai Engineering and Construction Co.,LTD.

개요(SYNOPSIS) : Recently, increasing the use of a soft clay ground area for social facilities in Korea, this paper summarizes the field application of a F.D.M consolidation analysis and simplex method computer program for soft clay ground with vertical drains.

According to this paper, this F.D.M consolidation analysis and simplex method computer program is very useful for predicting consolidation settlements and the elapse time to reach to a consolidation ratio.

주요어(Keyword) : 연약 지반, 압밀침하, 수직 배수재, 압성토, 압밀 수치 해석, 역해석

1. 서 론

좁은 국토의 효율적인 이용과 날로 확장되는 사회 기간 시설의 건설을 위하여 많은 도로, 공업단지 등이 연약 지반상에 축조되고 있다. 그러나 연약 지반위에 각종 시설들을 건설하는 데는 연약 지반 자체의 큰 압축성과 작은 강도로 인하여 시공상에 많은 문제들이 발생되고 있는 실정이다. 이러한 연약 지반의 특성을 파악하고 성토로 인한 연약 지반의 거동을 예측하고 성토 시공 관리를 할 수 있는 시스템은 국내에서도 많이 개발되고 있으나, 실제 현장의 복잡한 지반조건을 정확하게 예측하기란 불가능하므로 이론해석보다는 현장 계측 결과에 의존하는 실정이다. 그러나 압밀 침하 해석 부분에 있어서는 현장의 계측 결과를 이용한 지반 정수 역해석으로 수정 보완한다면 보다 정확히 예측할 수 있는데, 본 논문에서는 유한 차분법으로 개발된 압밀 해석 및 역해석 프로그램을 현장 적용 사례를 통하여 검증한 결과를 요약하여 보았다.

2. 압밀 해석 및 역해석 프로그램 개요

2.1 프로그램 개요

본 논문에서는 현재 약 2년간 수정·보완하여 완성단계에 있는 현대 건설과 한국 과학 기술원에서 공동 개발한 연약지반 성토 시공관리 시스템의 일부분인 압밀 해석과 역해석 프로그램을 사용하였다.

압밀해석은 축대칭 비선형 유한 차분법을 사용하였으며, 다음과 같은 현장 적용조건들을 만족시킨다.

1. Vertical Drain 고려
2. Multi-Layer System 적용 가능
3. Submergence & Buoyance Effect 고려
4. Large Strain Effect 고려
5. Smear Effect 고려
6. Intermediate Drainage Due To Sand Layer 고려
7. Variation Of Cc & Cv With P' 고려
8. Time Dependent Loading 적용

2.2 압밀 이론

점토 지반과 같이 매우 작은 투수성을 갖는 지반이 상당히 두꺼운 경우에는 압밀을 촉진하기 위한 연직 배수재가 설치되며, 이 경우에 대한 해석적인 압밀 침하를 추정 방법은 Kjelman(1973), Barron(1948), Hansbo(1981)등에 의해 제안되었다. 그러나, 이들의 방법에서는 압밀이 진행되는 동안 감소되는 간극비로 인하여 투수 계수나 압축 계수가 감소하는 것을 고려하지 않았으므로, 비교적 침하가 많이 유발되는 연약 점토 지반의 경우에는 현장에서 관측되는 시간-침하 양상을 예측하기는 어렵다. 또한 2차원 또는 3차원 유한 요소 해석 방법을 이용하여 배수재가 설치된 연약한 점토 지반의 압밀 거동을 해석하기 위하여는 많은 입력 자료 및 해석과정이 요구되므로 비교적 간단한 문제를 해결하기 위하여는 그 효율이 떨어진다.

그리하여 본 논문에서는 압밀과정에서 변화되는 지반의 투수 계수를 적절하게 고려할수 있을 뿐만 아니라, 유효 응력과 간극비 간의 비 선형적인 관계를 고려할수 있는 축대칭 압밀 이론을 바탕으로, 유한 차분법을 적용하여 해를 구함으로써 배수재가 설치된 연약 지반의 압밀 거동을 예측할수 있을 뿐만아니라 효율적이고 실용적인 간편한 방법을 사용하였다.

과압밀 상태와 정규 압밀 상태에 따른 압축성 변화를 고려하였다.

또한 자중은 무시하고 Darcy의 법칙은 유효하다고 가정하였다.

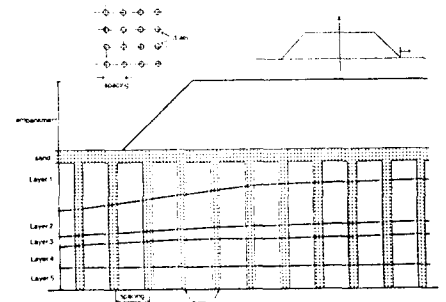


그림 1. 수직 배수재가 설치된 연약지반

하나의 배수재가 영향을 미칠수 있는 영역을 하나의 실린더로 생각하여 해석을 수행하였으며, 실린더안의 임의의 부피요소를 통과하는 물은 수평 방향의 흐름과 연직 방향의 흐름을 동시에 갖는다.

임의의 부피 요소의 수평 방향과 연직 방향을 통하여 빠져 나가는 유량의 차이가 그 요소의 부피 변화와 같다는 가정으로부터 다음과 같은 연속 방정식을 유도할수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{k_h}{g_w} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \left(\frac{k_h}{g_w r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k_v}{g_w} \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (1)$$

지반 재료의 시간에 따른 간극비의 변화는 유효 응력과 시간에 따른 함수로서 일차압밀과 이차 압밀로 구분 될수

있으므로 압축성의 방정식은 다음과 같이 표현 된다.

$$\left(\frac{\partial e}{\partial t}\right) = \left(\frac{\partial e}{\partial t}\right)_r \frac{\partial p}{\partial t} + \left(\frac{\partial e}{\partial t}\right)_n \quad (2)$$

역해석 방법으로는 일반적으로 목적함수의 gradient vector를 구하기가 불가능한 경우에 사용되어 질수 있는 Nelder와 Mead(1964)가 개량한 simplex방법을 사용하였다. 설계 변수의 갯수가 N개 일때에 N+1개의 꼭지점을 가지는 simplex를 형성하고 각각의 꼭지점에서 목적함수의 값을 도심을 통해 반사시켜 최적의 최소 목적 함수 값을 주는 설계 변수를 찾는 방법이다.

3. 현장 적용

압밀 침하 해석과 역해석 프로그램을 검증하기 위하여, 현대 건설 싱가포르 현장을 선정하였다. 공항 활주로와 유도도를 건설하기 위하여 매립하고, 수직 배수재 설치와 여성토 공법으로 압밀 축진을 강제로 유도하고, 대규모 실내 실험과 현장 실험, 현장 계측을 실시한 현장이었다. 각 실험들은 공사 실시 이전과 실시중 그리고 공사 종료시점까지 지속적으로 실시되고 있다.

본 논문에서 프로그램 적용 대상 지반은 현장에서 특정 지역을 선정하여 집중적으로 실험과 계측을 실시하였던 지역(Pilot Area)이다.

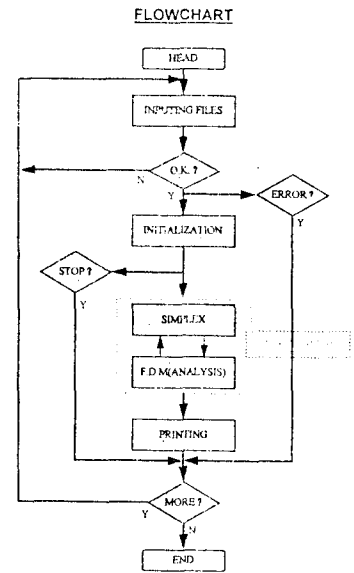


그림 2. 유한차분 압밀 해석 및 역해석 흐름도

3.1 현장 지반 조건

현장 지반은 해상에서 형성된 연약 점토층으로 두 층으로 나뉘어 지는데, 상부층의 두께는 대략 5.5m정도이며, 하부 점토층의 두께는 약 20m 가량 상당히 두껍게 분포하고 있다. 대체로 상부층은 하부층보다 함수비가 크며, 소성지수가 크고 연약하다. 해상에서 약 EL(-)4.0mCD에서 EL(+4.0mCD까지 준설 펌핑으로 매립한후, 4개 구획으로 구분하여 계측기가 설치되었고, 수직 배수재는 각 구획마다 No Drain, 1.5m, 1.7m, 2.0m등의 간격으로 paper drain으로 설치되었으며, EL(+10mCD 까지 모래로 여성토를 하였다.

3.2 지반 조사와 현장 계측

본 프로그램을 적용한 현장에서는 강도 특성과 압밀 특성을 파악하기 위하여 많은 종류의 현장 실험과 실내 시험이 실시되었는데, 그 중 압밀특성 관련 계수들은 수평 방향 압축 지수는 평균 1.0, 투수 계수는 대략 2.0×10^{-4} m/day 이었으며, 초기 간극비는 2.0 가량 되었다. 상부 점토층의 OCR값은 2.0 - 8.4, 하부층의 OCR값은 1.0 - 3.2 범위이었다.

압밀침하를 측정하기 위하여 다수의 침하관, 층별 침하계, 간극 수압계가 설치되었다. 현장 계측은 준설 펌핑으로 약 6m 성토한 후에 실시되었으므로, 1단계 성토 하중에 의한 침하는 특정구간을 제외하고는 측정할수 없었다.

3.3 압밀 침하 해석 및 역해석 현장 적용

연약 점토층은 두개의 층으로 나뉘어지고, 모래 매트가 포설되고 수직 배수재가 1.7m 정방형으로 설치되었으며, 2단계로 성토가 이루어진 현장의 조건을 고려한 압밀 침하 역해석을 실시한 예는 다음 그림3, 그림4 와 같다. 그림3

과 그림4에서 굵은 실선은 평균 압밀도 곡선을 나타낸다.

압밀 역해석에서 사용된 역해석 변수는 압축 지수와 투수 계수, 두가지 변수를 사용하였다. 역해석으로 얻은 두 변수들은 현장 지반 조사에서 얻을수 있는 범위내의 값이었다.

그림3 에서 보이듯이 역해석에 사용된 침하점의 갯수는 4개인데, 각점에서 지반 정수 역해석으로 얻은 압밀 침하량은 거의 일치함을 알수 있다.

그림4 는 현장 압밀 중 계측 결과를 이용하여 최종 침하량을 예측한 결과이다. 압밀이 90%에 도달할때 약 400일이 소요됨을 알수 있다.

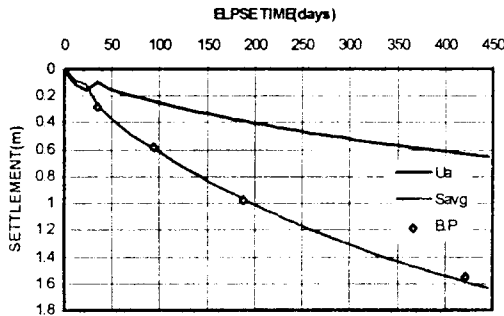


그림 3. 압밀 역해석

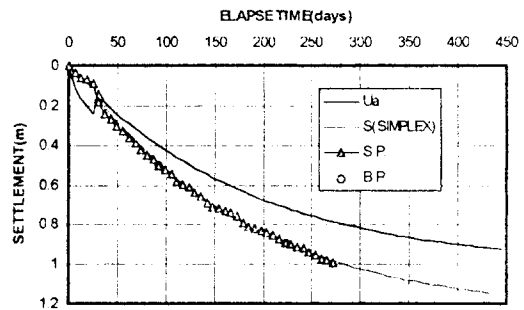


그림 4. 최종 침하량 예측

본 논문에서 사용된 프로그램을 이용하면, 압밀 침하측량 대부분의 경우에 성토 진행과정의 초기 침하를 측정할 수 없으며, 장기간에 걸쳐 측량이 이루어지므로 인해 측량결과를 망손하여, 일부분만을 신뢰할 수 밖에 없는 경우가 있을수도 있으므로, 이러한 경우에는 역해석으로 압밀 침하를 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

- 1) 수직 배수재가 설치된 복합지반의 축대칭압밀 모델을 유한 차분 수치해석으로 현장 적용하여 검증한 결과 여러가지 현장의 조건을 고려할수 있는 압밀 침하 해석을 할 수 있음을 확인하였다.
- 2) 압밀 침하 계측값을 simplex 방법으로 역해석을 하여, 적절한 지반 정수를 산정할 수 있었다.
- 3) 침하 계측과정에서 일정구간 불량한 계측값이 있는 경우에도 압밀 역해석으로 수정 할 수 있었으며, 최종 침하량을 예측할 수 있었다.
- 4) 유한 차분 수치해석으로 압밀해석을 함으로서 입력 자료가 간단하며, 역해석 시간을 단축하고 동시에 많은 사용자들이 이용할 수 있도록 Internet을 통하여 대형 컴퓨터에서 수행될 수 있도록 수정 보완될 것이다.

5. 참고문헌

- 1) 김운태,이승래,도남영,이영남(1994), "배수재가 설치된 압축성 지반의 효율적인 압밀 해석 및 역해석", 한국 지반 공학회 '94 가을 학술 발표회 논문집, pp 175-181
- 2) Arora,J.S.(1989), "Introduction to Optimum Design", McGraw-Hill Series
- 3) Barron,R.A.(1948), "Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells", Trans. ASCE, Vol.113.
- 4) Hansbo,S.(1981), "Consolidation of Fine-Grained Soils by Prefabricated Drains", paper 12/22 Proc. 10th Int.Conf.Soil Mech.Founda.Eng. Stockholm, Sweden
- 5) Mesri,G. and Rokhsar,A.(1974), "Theory of Consolidation of Soils" ,J.Soil Mech. Found. Eng., ASCE,Vol.100, No.GT8,pp.889-904