

KGS Spring '95 National Conference

25, March, 1995/Seoul/Korea

배수재가 설치된 연약지반의 3차원적 압밀거동을 모델하기 위한 2차원 등가모델의 개발 및 역해석 기법의 적용 Development of 2D Equivalent Model and Application of Back-Analysis Technique for Modeling 3D Consolidation Behavior of Drainage-Installed Soft Deposits

이 승래, SEUNG-RAE LEE*, 김 윤태, YUN-TAE KIM**, 도 남영, NAM-YUNG DO**, 이 영남, YOUNG-NAM LEE***

* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 부교수, Associate Professor, Korea Advanced Institute of Science & Technology, Taejon

** 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Korea Advanced Institute of Science & Technology, Taejon

*** 정회원, 현대건설기술연구소 이사, Head Manager, Hyundai Institute of Construction Technology, Seoul

개요(SYNOPSIS) : In order to accelerate the rate of consolidation and to gain additional shear strength in soft clay deposits, the vertical drain with preloading has widely been used. The important things considered to design and to construct facilities on drainage-installed soft deposits are stability of constructions and settlements with time. Though a numerical model which can express complicated characteristics of the behavior and a concise analysis technique is used, the prediction of behavior of soft clay is different from measured settlements and pore pressures due to uncertainties involved in soil parameters as well as in two dimensional modeling of the real three dimensional characteristics of behavior.

To take into considerations of this difference, this paper focuses on the following two topics : one is a method of determining the equivalent model; the other is a back analysis method.

First, an equivalent model is obtained so that the results of two dimensional analysis are equal to the behavior of three dimensional analysis, estimated from ABAQUS program. To simulate the effect of three dimensional characteristics, the soil with drainage installed is approximated to a soil with an equivalent permeability and an adjusted spacing of drainage, in a rational manner.

Second, the soil parameters for Cam-clay model affecting the process of consolidation such as deformation moduli are back-analyzed on the basis of the settlement and pore pressure measured from real sites.

By using a combination of equivalent model and back analysis method, one may be able to appropriately analyze the behavior of drainage-installed soft deposits.

1 서론

전단강도가 매우 약하고 압축성이 큰 연약지반을 활용하고자 하는 경우에는 많은 지반공학적인 문제점이 유발될 수 있으므로 이러한 연약지반을 가장 효과적이며 경제적인 방법으로 개발할 필요성이 있다. 이때 가장 보편적으로 적용되는 개발방법이 각종 배수공법을 병행한 선행하중 공법이다.

배수재가 설치된 현장지반의 3차원적인 거동특성을 비교적 정확히 해석하기 위해서는 실제의 해석대상지반을 3차원 유한요소망으로 구성하여 해석할 수 있다. 그러나 광범위한 해석영역을 3차원의 유한요소망으로 모델하여 해석하기 위해서는 많은 시간과 노력이 필요하며 간혹 일반 개인용 컴퓨터에서는 해석이 불가능할 때도 있다. 따라서 실제의 거동특성을 2차원화하여 해석할 수 있는 등가의 해석모델에 대한 연구가 수행되었다.

기존에 제안된 등가의 투수계수를 이용하는 경우에는 임의의 한 시간에 대한 압밀도 또는 침하량은 어느 정도 예측이 가능하지만 전체 압밀과정에서의 거동은 적절히 예측하지 못하는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 임의의 시간에서 원지반의 압밀도와 모델된 지반의 압밀도를 함께 산정할 뿐 아니라, 또 다른 임의의 시간에서 원 지반의 압밀속도와 모델된 지반에서의 압밀속도를 동시에 함께 산정할 수 있는 방법을 모색하였다. 또한 제안된 등가의 투수계수를 비선형 유한요소해석 프로그램에 적용함으로써 배수재가 설치된 3차원 연약지반의 거동을 2차원 평면 변형률(plane strain) 상태로 가정하여 모델할 수 있도록 하였으며 교란효과(smear effect) 및 배수저항효과(well resistance effect)를 고려할 수 있도록 하였다.

그러나, 일반적으로 연약지반의 압밀거동은 많은 연구와 노력에도 불구하고 현장지반의 불균질성, 이방성 및 설계변수들에 대한 불확실성 등으로 정확한 예측이 매우 어려우므로 실제 시공 시 관측된 거동은 설계 시 예측된 거동과 상이한 경우가 대부분이다. 따라서 실제 시공 시 각종 계측기기들을 설치하여 관측되는 거동을 바탕으로 시공관리가 수행되고 있는 실정이며 관측된 거동이 설계시 예측된 거동과 매우 상이한 경우에는 재설계 및 대책이 요구된다. 이를 위하여 본 논문에서는 연약지반의 압밀거동을 역해석함으로써 설계 시 여러 시험방법에 의해 얻어진 연약지반의 설계변수 값들을 재검토할 수 있는 기법을 적용하였다.

뿐만 아니라, 비숙련자라도 편리하게 해석 프로그램을 사용할 수 있도록 사용자 편의의 전/후처리 시스템을 개발하여 복잡한 대상영역의 입력자료를 간편하게 작성할 수 있도록 하였다. 그리고 해석된 결과에 대한 이해를 증진시키기 위하여 변형된 요소망과 응력 및 간극수압에 대한 contour를 작성할 수 있도록 하였다.

2 등가모델의 개발

2.1 기존의 등가모델

2.1.1 Shinsha 등의 제안

Shinsha 등(1982)은 실제 대상지반의 방사방향 흐름을 평면방향 흐름으로 가정하여 해석하였을 때 유발되는 오차를 줄여 주기 위하여 Barron의 이론을 바탕으로 실제 방사방향의 흐름에 의한 압밀문제를 같은 압밀 속도를 갖는 수평방향 흐름을 갖는 일차원 압밀문제로 전환하여 고려하였다.

즉 실제 축대칭 방사방향의 흐름을 갖는다고 가정된 지반에서 50% 압밀이 일어나는데 소요되는 시간과 수평방향 흐름을 갖는 2차원 대상지반에서 50% 압밀이 일어나는데 소요되는 시간이 같도록 등가의 투수계수(k'_h)를 제안하였다.

$$k'_h / k = (L/d_s)^2 T'_{h50} / T_{h50} \quad (1)$$

위의 식에서 시간계수 T'_{h50} 과 T_{h50} 은 각각 Terzaghi의 일차원 압밀이론과 Barron의 이론식으로부터 구할 수 있다.

2.1.2 Cheung 등의 제안

Cheung 등(1991)은 Zeng과 Xie의 축대칭 압밀이론을 이용하여 Shinsha 등 (1982)이 이용한 방법, 즉 축대칭 모델로 가정된 지반의 50% 압밀도와 일차원 수평방향 흐름에 의한 50% 압밀도가 같도록 가정하여 다음과 같은 등가의 투수계수를 제안하였다.

$$k'_h = \lambda(L/d_s)^2 k_h \quad (2)$$

여기서, $\lambda = 2.26 / (F + \pi G)$, $F = \ln(n) - 3/4$, $G = \frac{k_h}{k_w} \left(\frac{l_m}{2r_w} \right)^2$, $n = \frac{r_s}{r_w}$ 이다.

2.1.3 Bergado 등의 제안

Bergado 등(1994)은 연직 배수재나 조립토 말뚝(*granular pile*)이 설치된 지반의 거동을 해석하기 위하여 실제 지반의 경우 임의의 시간에 지반으로부터 배출된 배수량(*discharge*)과 같은 시간에 2차원 모델에서 배출된 배수량이 같다는 조건으로부터 다음과 같은 등가의 투수계수를 제안하였다(그림 1).

$$k_m = \frac{\pi D(1-\alpha_s)k}{2s \{ \ln(\frac{\alpha D}{d_s}) + R_s \ln(\frac{d_s}{d_w}) \}} \quad (3)$$

여기서 α_s 는 배수재가 영향을 미치는 지반의 면적에 대한 조립토 말뚝의 면적비((ts/Ds))를 나타내고, $\alpha = D_s/D$, $n = D/d_w$ 이다. 배수재의 배치 형태가 사각형 형태일 때에는 $s=D$ 이고, α 는 1.05이며, 삼각형 형태일 때에는 $s=0.866D$ 이고, $\alpha=1.13$ 이다. 또한 $R_s = k/k_s$ 로서 교란영역의 투수계수와 비교란 영역에 대한 투수계수의 비율 나타내는 변수이다.

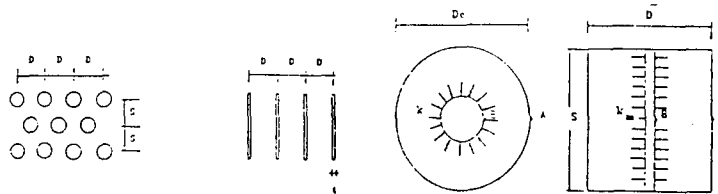


그림 1 조립토말뚝이 설치된 실제의 경우와 2차원 평면 변형율 등가모델

2.2 새로운 등가모델의 제안

기존의 Shinsha 등(1982), Cheung 등(1991)이 제안한 등가 압밀해석 방법에서는 실제 대상지반의 방사방향 흐름을 평면방향 흐름으로 가정하였을 때 유발되는 오차를 줄여주기 위하여, 원지반을 하나의 원통형 지반으로 고려한 후 원지반의 압밀도와 모델된 지반의 압밀도를 임의의 시간에 대하여 동일하게 산정할 수 있는 등가의 투수계수가 제안되었다. 또한 Bergado 등(1994)은 원지반에서의 유량과 2차원 모델지반의 유량을 임의의 시간에 대하여 동일하게 산정할 수 있는 방법을 제안하였다.

그러나 이와같은 방법으로 제안된 등가의 투수계수를 이용하는 경우에는 임의의 한 시간에 대한 압밀도 또는 침하량은 어느정도 예측이 가능하지만 전체 압밀과정에서의 거동은 적절히 예측하지 못하는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 임의의 시간에서 원지반의 압밀도와 모델된 지반의 압밀도를 같게 산정할 뿐 아니라 또 다른 임의의 시간에서 원지반의 압밀속도와 모델된 지반에서의 압밀속도를 동시에 같게 산정할 수 있는 방법을 모색하였다.

아래 그림 2는 반경방향의 흐름만을 고려한 이상화된 원통형 지반을 단위폭의 층류흐름이 일어나는 지반으로 모델화하는 것을 보여준다. 원지반을 배수재의 간격에 비례하는 지름을 가지는 원통형 지반으로 이상화하여 생각할 때 그림 2(a)의 배수재를 통하여 빠져나가는 유량과 그림 2(b)의 배수재를 통하여 빠져나가는 유량을 같게 함으로써, 즉 원통형 지반의 압밀속도와 모델된 지반의 압밀속도를 같다고 가정하여 등가의 투수계수를 구할 수 있다.

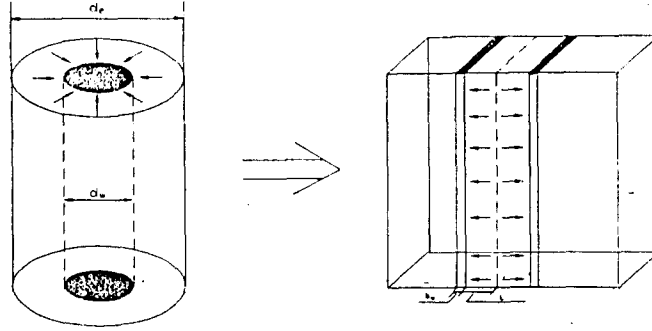
다음 식 (4)는 원통형으로 이상화된 지반의 배수재를 통해 배수되는 유량이고 식 (5)는 모델된 지반의 배수재를 통하여 배수되는 유량이다.

$$dQ = \frac{1}{s} 2\pi r_w k \frac{2\Delta h}{d_s} dz dt \quad (4)$$

$$dQ' = 2dz k' \frac{\Delta h}{L} dt \quad (5)$$

이 두 식으로부터 모델된 지반과 원통형 지반의 배수량이 같을 때의 등가의 투수계수 k' 를 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$k' = \frac{2\pi r_w L}{s d_s} k \quad (6)$$



(a) 원지반 (b) 수치모델지반
그림 2 실제 지반의 등가 모델화

또한 3차원 흐름을 갖는 원통형 지반의 50% 압밀도와 모델된 지반의 50% 압밀도를 나타낼 때의 시간은 각각 다음 식들로 표현될 수 있다.

$$t_{50} = \frac{d_e^2}{k} T_{h50} \quad (7)$$

$$t_{50} = \frac{L^2}{k'_h} T'_{h50} \quad (8)$$

이들 식으로부터 원통형 지반의 50% 압밀도와 모델된 지반의 50% 압밀도를 같게 해 줄 수 있는 등가의 투수계수 k'_h 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$k'_h = \left(\frac{L}{d_e} \right)^2 \frac{T'_{h50}}{T_{h50}} k \quad (9)$$

식 (9)의 유도과 마찬가지로의 방법으로 원통형 지반의 90% 압밀도와 모델된 지반의 90% 압밀도를 같게 해 줄 수 있는 등가의 투수계수 k'_{h90} 을 구할 수 있고 이를 식으로 표현하면 다음 식 (10)과 같다.

$$k'_{h90} = \left(\frac{L}{d_e} \right)^2 \frac{T'_{h90}}{T_{h90}} k \quad (10)$$

식 (6)과 식 (9)에서 원지반의 투수계수, k 는 같기 때문에 등가의 투수계수 k'_h 는 다음 식 (11)과 같이 표현될 수 있다.

$$k'_h = \left(\frac{L}{d_e} \right)^2 \frac{T'_{h50}}{T_{h50}} \frac{sd_e}{2\pi r_w L} k' \quad (11)$$

뿐만아니라 90% 압밀도를 같게 해주는 투수계수와 유량을 같게 해주는 투수계수가 같다고 가정하면 다음 식(12)와 같은 50% 압밀도와 90% 압밀도를 동시에 만족할 수 있는 등가의 투수계수를 구할 수 있다.

$$k'_h = \left(\frac{L}{d_e} \right)^4 \frac{T'_{h50}}{T_{h50}} \frac{T'_{h90}}{T_{h90}} \frac{sd_e}{d_w \pi L} k \quad (12)$$

2.3 배수재의 강성도 고려

배수재의 변위가 배수재의 강성도(EA)에만 비례한다고 가정하고, 3차원 해석에서 얻어지는 배수재의 침하량(Δ_{3D})과 2차원 해석에서 얻어지는 배수재의 침하량(Δ_{2D})을 같다고 가정하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수가 있다.

$$E_{3D} A_{3D} / S = E_{2D} A_{2D} \quad (13)$$

여기서 탄성계수, E 값이 Cam-clay 모델에서의 같이 팽창지수, κ 에 반비례 한다고 가정할 경우 식 (13)은 다음 식 (14)와 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{A_{3D}}{\kappa_{3D} S} = \frac{A_{2D}}{\kappa_{2D}} \quad (14)$$

또한 $\kappa_{3D} = \kappa_{2D}$ 로 가정하면 배수재의 강성도를 고려하기 위한 2차원 해석에 사용되는 배수재의 폭 b_w 는 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$b_w = \pi D^2 / 4S \quad (15)$$

2.4 제안된 등가모델의 검증 및 비교

제안된 등가모델의 검증을 위하여 3차원 압밀해석이 가능한 ABAQUS 프로그램의 해석결과를 이용하였다. 또한 실제 지반의 3차원적인 거동을 해석하기 위하여 간략화된 3차원 유한요소망을 이용하였으며 배수재가 사각형의 배열로 설치되어 있는 지반을 해석하고자 그림 3(a)의 원지반을 그림 3(b)와 같이 수치 모델화하였다. 지반의 응력-변형을 거동을 묘사하기 위하여 사용된 지반모델은 연약 점토지반의 거동 묘사에 적절히 적용되는 수정된 Cam-clay 모델을 사용하였으며 3차원 해석과 2차원 해석 시 같은 지반 물성치를 이용하였다(표 1).

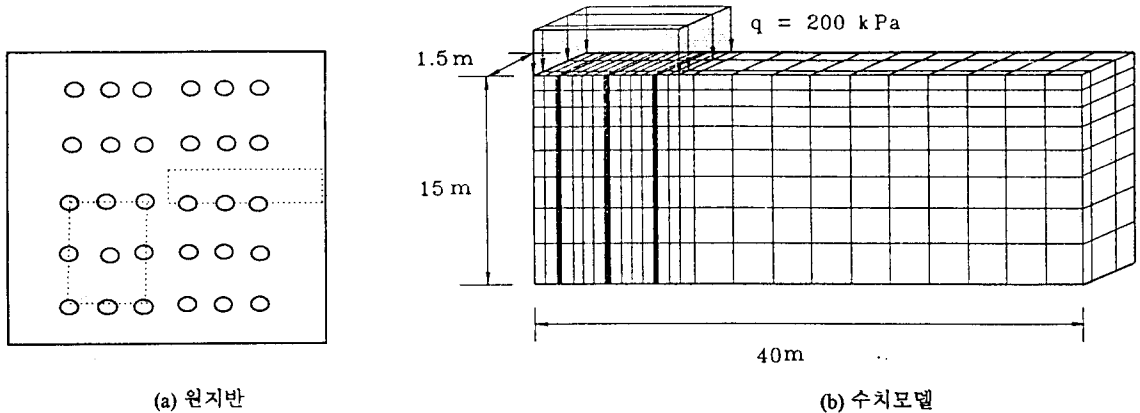


그림 3 대상 지반의 수치모델

표 1 해석에 사용된 지반 물성치

해석에 사용된 물성치	
점토지반	$\lambda=0.174, \kappa=0.026, M=1.2$
	$\frac{P_c}{2} = 80\text{kPa}$ 투수계수 = $5.84\text{E-}5 \text{ m/day}$
배수재	$\lambda=0.1, \kappa=0.026, M=2.5$
	$\frac{P_c}{2} = 300 \text{ kPa}$ 투수계수 = 10 m/day

2.4.1 배수재의 강성에 대한 고려

배수재의 강성에 대한 3차원 효과를 고려하기 위하여 앞절에서 유도한 배수재의 폭을 이용하여 2차원해석을 수행하였을 경우와 원지반의 배수재 지름을 이용하여 2차원 해석을 수행하였을 경우의 해석결과를 3차원 해석 결과와 비교하여 보았다.

표 2는 2차원 해석 시 배수재의 폭을 원지반의 배수재 지름으로 해석한 경우와 3차원 효과를 고려한 배수재의 폭을 사용한 경우의 해석결과를 비교한 것이다.

표 2 배수재의 강성도를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우 해석결과 비교(중앙점에서의 최종침하량)

3차원 해석결과	배수재의 강성도를 고려한 경우 2차원 해석결과	배수재의 강성도를 고려하지 않은 경우 2차원 해석결과
68.92 cm	66.36 cm	37.34 cm

위의 해석결과에서 알 수 있는 바와 같이 배수재의 강성도가 연약지반의 강성도보다 매우 클 경우 배수재의 강성도가 침하에 큰 영향을 끼침을 알 수 있고, 2차원 모델 시 배수재의 강성도를 적절히 고려해 줌으로써 더 좋은 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 따라서 다음의 해석들은 배수재의 강성도를 고려한 경우에만 수행되었다.

2.4.2 배수정 효과를 고려하지 않은 경우

배수재의 강성도를 고려하고 배수정 효과를 고려하지 않은 경우에 제안된 여러 2차원 등가모델 방법에 대해 얻어지는 해석결과를 비교하였다. 해석에 사용된 물성치는 위의 표 1과 동일하고 제안된 방법, Bergado 등의 방법, Shinsha 등의 방법, Cheung 등의 방법을 이용한 경우 얻어지는 등가의 투수계수는 다음과 같다(표 3).

표 3 각 방법에 의해 구해지는 등가의 투수계수(m/day)

	제안된방법	Cheung 등의 방법	Bergado 등의 방법	Shinsha 등의 방법
등가의 투수계수 (k_{eq})	3.932E-5	1.897E-5	4.525E-5	1.864E-5

다음 그림 5~7은 배수재의 투수계수와 등가의 투수계수비를 $k_w/k_{eq} = 1.0E+5$ 으로 가정할 경우 중앙점에서의 시간에 따른 침하량과 중앙점에서 깊이 5.3 m 및 9.3 m 깊이에서의 시간에 따른 과잉간극수압의 소산을 나타내고 있다.

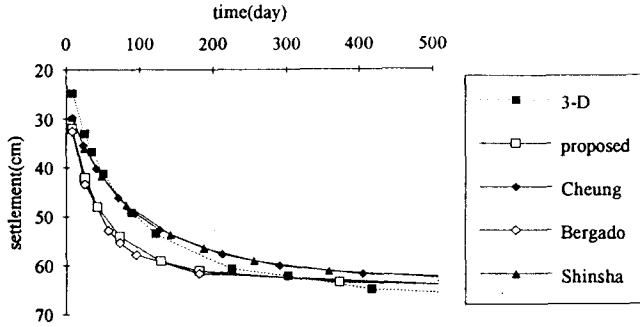


그림 5 중앙점에서의 시간에 따른 침하량

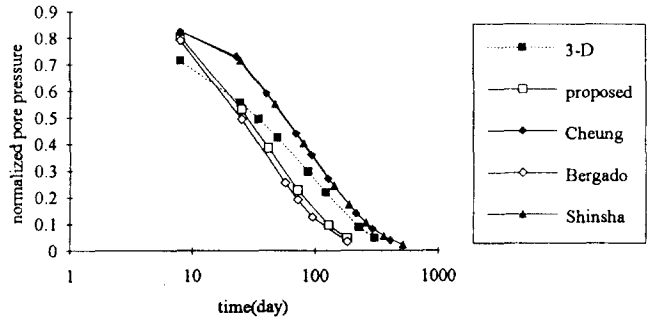


그림 6 중앙점에서 깊이 5.2 m 지점의 시간에 따른 과잉간극수압 소산

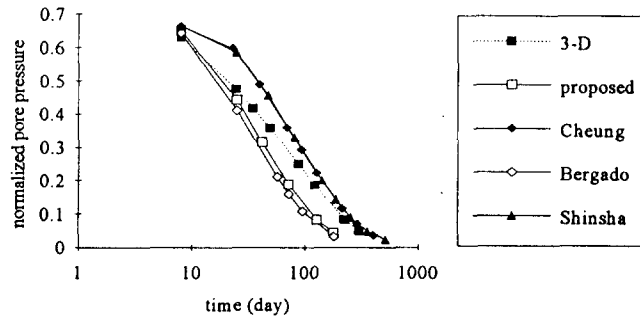


그림 7 중앙점에서 깊이 9.3 m 지점의 시간에 따른 과잉간극수압 소산

위의 그림들에서 알 수 있는 바와 같이 제안된 방법이나 Bergado 등의 방법과 같이 유량을 고려한 경우에는 시간에 따른 과잉간극수압의 소산속도가 3차원 해석의 시간에 따른 과잉간극수압의 소산속도를 과대평가하는 경향을 보인다. 그러나 압밀도를 고려한 Shinsha 등이나 Cheung 등의 방법을 이용할 경우에는 시간에 따른 과잉간극수압의 소산 속도를 과소평가하는 경향이 있다. 이러한 특성 때문에 시간에 따른 침하량도 제안된 방법이나 Bergado 등의 방법을 이용할 경우 초기 침하량을 과대평가하는 경향을 볼 수 있으며 Shinsha 등이나 Cheung 등의 방법을 이용할 경우에는 다소 과소평가하는 경향을 볼 수 있다.

2.4.3 배수정효과를 고려한 경우

2차원 등가모델 해석 시 배수정효과를 고려하기 위해서 기존의 축대칭이론에서 등가의 투수계수(k_{eq})를 구한 후 이를 2차원 모델지반의 점성토지반의 투수계수로 이용하고, 2차원 해석을 수행할 때 배수정 효과를 수치적으로 고려하기 위해 연직배수재의 투수계수와 등가의 투수계수비 k_w/k_{eq} 를 3차원 해석에서 배수정 효과를 고려해 준 것(k_w/k)과 동일하게 고려하는 방법을 사용하였다.

그림 8에서 10의 해석결과로부터 제안된 방법이나 Bergado 등의 방법을 이용하는 경우에 3차원 해석 결과와 비교적 근접한 결과를 얻을 수 있었다. 그림 8~10의 결과는 $k_w/k_{eq} = 500$ 일 경우 2차원 해석한 결과를 비교한 것이다. 이때 각방법에 의한 등가의 투수계수 k_{eq} 는 위의 표 3과 동일하다.

해석된 결과를 바탕으로 배수정효과를 고려하기 위해서는 2차원 해석 시 점성토지반에서는 등가의 투수계수를 사용하고 수치적인 방법으로 배수정효과를 고려해 주는 것이 3차원해석에 보다 근접한 해석결과를 얻을 수 있다. 제안된 방법이나 Bergado 등의 방법을 이용하여 2차원 해석을 하였을 경우, $k_w/k_{eq} = 500 \sim 2000$ 사이에서는 3차원 해석결과와 매우 근접한 해석결과를 얻을 수 있었고 그 이상의 값에 대하여서는 제안된 방법이나 Bergado 등의 방법을 이용하였을 경우에 시간에 따른 과잉간극수압의 소산속도를 과대 평가함으로 인해 초기침하량을 3차원 해석결과보다 다소 과다하게 산정함을 알 수 있다. 반면 Cheung 등이나 Shinsha 등의 방법을 이용할 경우에는 배수정 효과가 고려됨에도 불구하고 시간에 따른 과잉간극수압의 소산속도나 침하량을 다소 과소평가함을 알 수 있다.

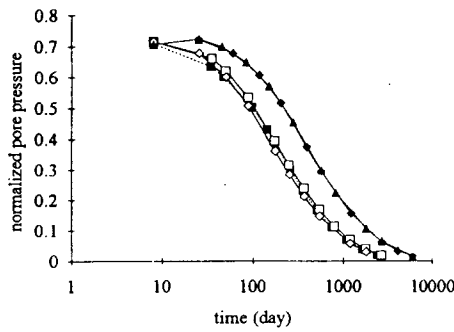


그림 8 중앙점에서 깊이 5.2m 지점의 시간에 따른 과잉간극수압 소산

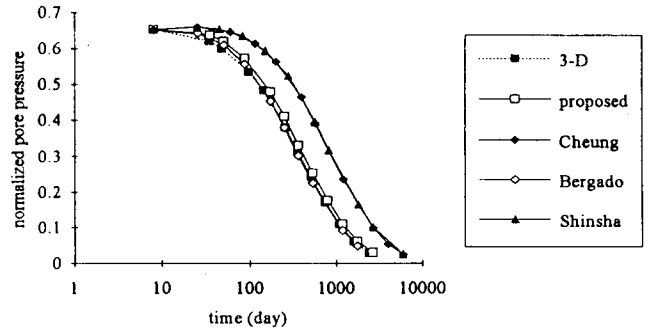


그림 9 중앙점에서 깊이 9.3m 지점의 시간에 따른 과잉간극수압 소산

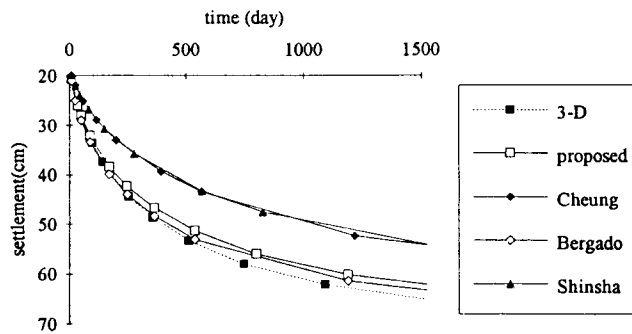


그림 10 중앙점에서의 시간에 따른 침하량

3. 역해석 기법의 개발

기존의 수치해석 방법을 이용하여 지반의 압밀문제를 해석하고자 할 때에는 그 지반의 물성치(예를들면, 무수계수나 탄성계수)가 입력자료가 되어 간극수압과 변위(침하량)가 결과로서 출력된다. 그러나 시료 채취 시 이미 어느 정도 교란되고 규모가 작은 시료에 대한 실험실 결과로써는 그 지반을 대표할 수 있는 물성치를 구하기 어려우므로 예측결과에 대한 신뢰도가 저하된다. 따라서 일반적인 해석방법과는 달리 실제현장에서 실측된 변위와 간극수압을 사용하여 대상 시스템의 물성치를 구하는 방법을 역해석이라 한다(Gioda와 Sakurai(1987), Sakurai 등(1983)).

계측한 자료를 이용하여 현장 지반의 물성치를 역해석하는 기법들은 주로 유한요소법에 적용된 역해석 기법들은 크게 역순법 (inverse method)과 직접법 (direct method)으로 나뉘어진다. 역순법에는 일반 압밀해석의 지배 방정식을 역으로 하여 간극수압과 변위가 입력자료로 주어지고 탄성계수나 무수계수를 구하는 방법이다. 따라서 압밀해석의 지배방정식을 역순으로하여 프로그램을 개발하여야 한다. 그러나 역순법은 탄성문제에만 적용이 가능하고 비선형이나 점탄성 문제에는 적용할 수 없는 제한성을 지니고 있으며 프로그램을 작성하는데에 직접법보다 많은 노력과 시간이 소요되나 계산시간은 절약될 수 있다.

한편 직접법은 계측치와 계산치와의 오차를 목적함수(object function)로 정의하고 이를 최소화하는 방법이다. 목적함수(J)는 일반적으로 식 (16)과 같이 계측치와 예측치의 차이의 제곱의 합으로 정의한다.

$$J = \sum_{n=1}^{NT} \left[\sum_{i=1}^{ND} (u_i^n - U_i^n)^2 \right] \quad (16)$$

여기서, NT는 계측이 이루어진 시간단계의 갯수, ND는 계측자료의 갯수, u_i^n 는 n시간단계에서 i지점의 계산된 값, U_i^n 는 u_i^n 에 대응하는 계측치를 나타낸다. 계측치는 변위나 간극수압 등이 함께 사용될 수도 있고 또는 어느 하나만으로 구성될 수도 있다. 만약 변위나 간극수압과 같은 계측치가 동시에 사용된다면 목적함수는 다음과 같이 정의될 수도 있다.

$$J = \sum_{n=1}^{NT} \left[\sum_{i=1}^{Nd} (u_i^n / U_i^n - 1)^2 \right] \quad (17)$$

직접법은 적용성이 광범위하여 비선형 문제에도 적용이 가능하며 실측치의 횟수가 작을 경우에도 역해석이 가능하다. 그러나 미지변수를 변화시키며 반복계산에 의해 해를 구하므로 계산시간이 오래 걸린다. 대표적인 직접법에는 Simplex 방법, Conjugate gradient 방법, quasi-Newton 방법 등이 있다(Sakurai 등(1983), 김윤태 등(1994)). 전술한 역순법이나 직접법은 수치해석법 상의 오차와 계측에서 발생하는 측정오차를 고려하지 못하므로 이와 같은 계측치의 질적인 오차를 보충하기 위하여 확률을 이용한 Bayesian법도 연구(Asaoka와 Matsuo(1979))가 되고 있고, 최근에는 통계적 방법으로 Kalman filter를 적용한 연구(Murakami와 Hasegawa(1988))가 보고 되고 있다.

시공과정에서 계측한 자료를 이용하여 연약지반의 물성치를 결정하는 역해석에 관한 기존의 연구는 연약지반이 선형적인 거동을 한다는 가정아래 탄성계수나 poisson비 및 무수계수를 구하는 방법이 대부분으로 개량된 연약지반의 비선형적인 거동특성을 충분히 고려할 수 있는 방법이 확립되어 있지 않은 실정이다.

3.1 역해석 기법

Borja(1984, 1991)가 개발한 2차원 비선형 압밀해석 프로그램을 바탕으로 실제의 계측치를 입력자료로 대입하여 지반의 물성치를 구하는 역해석을 simplex 방법과 ADS 방법을 이용하여 수행하였다. 해석에 사용된 대상지반은 수정된 Cam-clay 모델을 사용하여 비선형적인 거동을 표현하였다.

연약지반의 투수계수는 등가모델에서 제안한 등가의 투수계수를 사용하고 압축지수(λ)와 한계상태선의 기울기인 M 값을 설계변수로 하여 역해석을 실시하기로 한다.

3.1.1 Simplex 방법

일반적으로 목적함수의 gradient vector를 구하기가 불가능한 경우에 사용되어 질 수 있는 방법으로 Nelder와 Mead(1964)가 개량한 simplex 방법을 사용하였다. 설계변수의 갯수가 N 개 일 때에 $(N+1)$ 개의 꼭지점을 가지는 simplex를 형성하고 각각의 꼭지점에서 목적함수의 값을 계산한 후에 가장 큰 목적함수의 값을 가지는 설계변수의 값을 도심을 통해 반사(reflection)시켜 최적의 최소 목적함수의 값을 주는 설계변수를 찾는 방법이다.

3.1.2 ADS 방법

ADS(a fortran program for Automated Design Synthesis)는 Vanderplaats (1987)가 개발한 포트란 프로그램으로서 다양한 알고리즘을 사용하여 목적함수의 최적의 최소값을 찾아내는 수치적인 최적설계 프로그램(numerical optimization program)으로서 주로 strategy, optimizer, one dimensional search의 세개의 기본적인 단계로 구성되어 있어서 사용자가 해석하고자 하는 문제에 적절한 방법을 선택해서 최적의 해를 구할 수가 있다. ADS 방법 안에는 여러가지 optimizer 방법들이 있으며 직접적인 방법으로 gradient 값을 구하지 못하는 경우에도 수치적인 방법(finite difference gradient)으로 구해주는 경우도 있으므로 실제의 비선형 문제에도 적용이 가능하다.

목적함수 : minimize $F(X)$

제한조건 :

$$G_j \leq LE, 0 \quad j = 1, m$$

$$H_k \leq EQ, 0 \quad k = 1, k$$

$$XL_i \leq LE, XU, i = 1, n$$

(18)

3.2 수치해석 예제문제

그림 11과 같은 대상지반을 총 요소수가 64개이고 절점수가 289개인 유한요소망을 작성하여 대상지반에서 관측된 자료를 바탕으로 역해석을 수행한다. 사용된 요소는 변위절점수가 9, 간극수압의 절점수가 4인, Q9P4인 요소를 사용한다. 대상지반의 수직 및 수평방향의 투수계수값은 등가의 투수계수로 환산된 값을 사용한다. 팽창지수 값은 0.053, 체적유효응력 (volumetric stress)이 1kpa에 대응하는 초기 간극비는 2.54로 가정하였다.

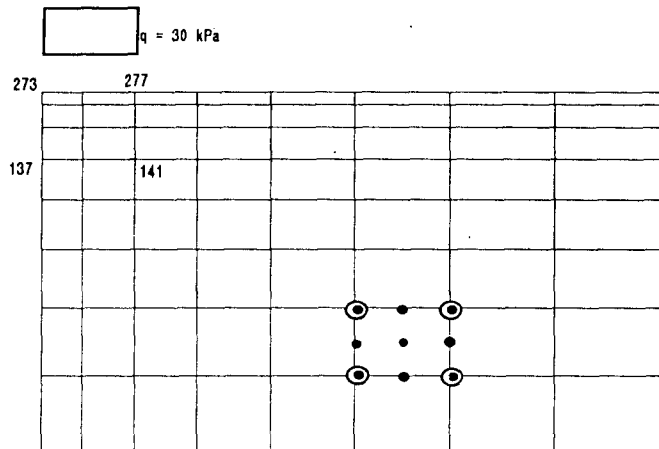


그림 11 유한요소망

그림 11과 같은 대상지반에 총 성토하중 30kPa이 10일에 걸쳐 점진적으로 성토 되어진다. 간극수압은 성토단면의 중앙과 toe부분의 각각 깊이 15m에 있는 지점(절점 137, 141)에서 측정하였으며, 침하량은 성토단면의 중앙과 toe부분의 지표면(절점 273, 277)에서 각각 계측하였다. 그리고 수평방향의 변위는 toe부분(절점 277)에서 계측하였다. 계측시간은 성토가 끝나기 전의 3일과 9일, 성토완료후 11일, 12일 및 13.1일에 관측되었다고 가정한다. 계측된 간극수압과 침하량 및 수평방향의 변위는 각각 표 4와 같다.

표 4(a) 간극수압의 계측치(단위 : kPa)

시간(day)	절점 137	절점 141
3	.1558E+03	.1523E+03
9	.1687E+03	.1610E+03
11	.1685E+03	.1609E+03
12	.1681E+03	.1609E+03
13.1	.1673E+03	.1607E+03

표 4(b) 침하량과 수평방향변위의 계측치(단위: m)

시간(day)	점점 273 (침하량)	점점 277 (수평방향변위)	점점 277 (침하량)
3	-6246E-01	-1237E-02	-2759E-01
9	-1767E+00	-1366E-01	-8106E-01
11	-1795E+00	-1511E-01	-8242E-01
12	-1839E+00	-1729E-01	-8461E-01
13.1	-1909E+00	-2048E-01	-8811E-01

3.2.1 2차원 비선형 압밀해석에 Simplex 방법의 적용

표 4와 같은 침하량과 간극수압 및 횡방향의 변위가 약 2주일 간에 계속되어 입력자료로 주어졌을 때에 연약지반의 거동에 크게 영향을 주는 주요소인 압축지수값과 한계상태선의 기울기 값을 설계변수로 하여 simplex 방법을 적용하여 역해석을 실시하였다. 역해석된 압축지수 값은 0.372, 한계상태선의 기울기는 1.55를 역해석 하였다.

그림 12는 역해석을 통해 얻어진 자료를 바탕으로 간극수압과 변위값을 비교한 결과로서 비교적 정확한 거동을 얻을 수 있다.

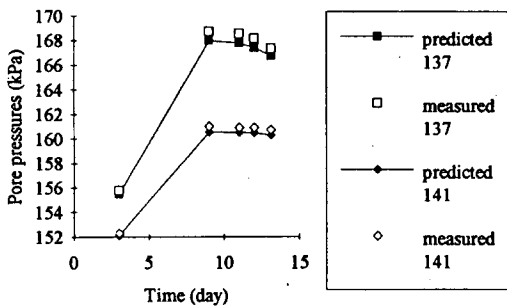


그림 12(a) simplex 방법으로 역해석한 간극수압의 결과

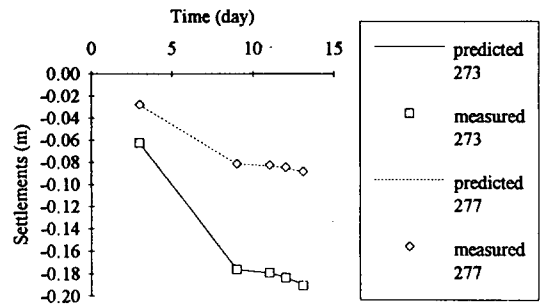


그림 12(b) simplex 방법으로 역해석한 침하량의 결과

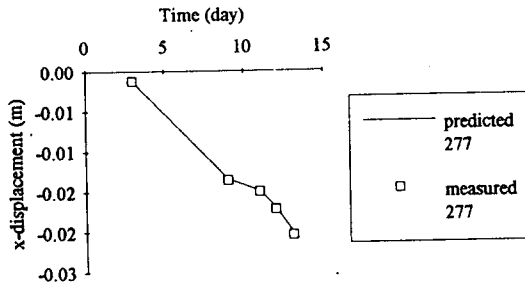


그림 12(c) simplex 방법으로 역해석한 횡방향변위 결과

3.2.2 2차원 비선형 압밀해석에 ADS 방법의 적용

앞 절의 simplex 방법에서 사용된 똑같은 자료를 바탕으로 압축지수값과, 한계상태선의 기울기 값을 설계변수로 하여 ADS 방법을 적용하여 역해석을 실시하였다. 역해석된 압축지수 값은 0.371, 한계상태선의 기울기는 1.48을 역해석 하였다.

그림 13은 역해석을 통해 얻어진 자료를 바탕으로 간극수압과 변위값을 비교한 결과로서 simplex 방법을 적용했을 때와 비슷한 결과를 얻을 수 있다.

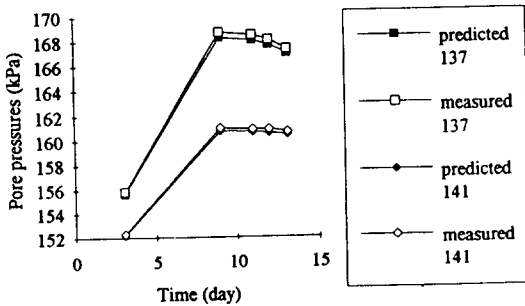


그림 13(a) ADS 방법으로 역해석한 간극수압의 결과

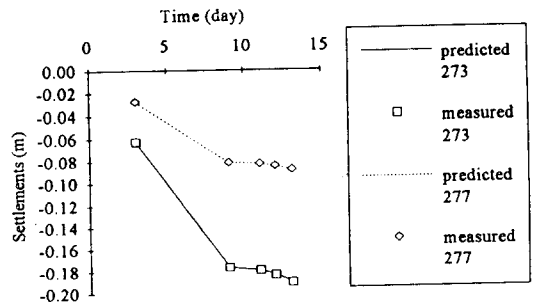


그림 13(b) ADS 방법으로 역해석한 침하량의 결과

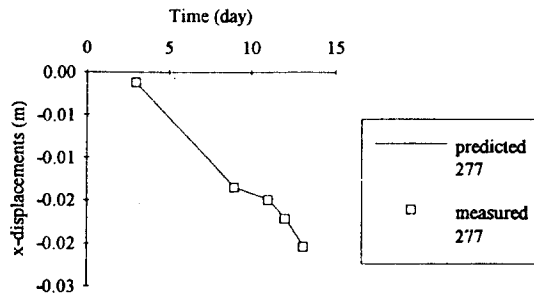


그림 13(c) ADS 방법으로 역해석한 횡방향변위 결과

앞의 결과로부터 실제 지반의 거동특성이 시공초기에 계속되어 진다면 simplex 방법과 ADS 방법을 통한 역해석 기법을 적용하여 유한요소법을 이용한 2차원 비선형 압밀거동에 영향을 주는 물성치를 역해석 할 수 있다. 그러나 실제 문제에 적용된 2차원 비선형 역해석 기법은 요소의 갯수가 많아짐에 따라 계산시간이 크게 증가하기 때문에 계산시간이 매우 길어지는 단점이 있다. 따라서 실제문제에 적용하는 경우에는 계속치가 설치된 부분의 지반 특성등을 토대로하여 일차원화된 모델을 적용함으로써 그 주변지반의 물성치만을 역해석하여 차후 거동을 예측하는 것이 보다 효과적일 것으로 사료된다.

3.3 실제 예제문제

개발된 역해석 기법을 1989년 말레이시아에서 개최된 국제학술회 보고서에 있는 높이 3m의 시험성토자료를 바탕으로 역해석을 실시하였다. 대상지반은 상부의 과압밀된 지반과 하부의 연약지반으로 크게 두 부분으로 구분하였으며 사용되는 물성치는 대표적인 평균값을 사용하였고, 성토단면의 중심에서 200일동안에 계속된 침하량의 자료를 바탕으로 성토단면의 중심하부지반에 대한 일차원 압밀모델로 요소망을 작성하여 압밀침하량에 크게 영향을 주는 하부지반의 압축지수(λ)와 한계상태선의 기울기인 M 값을 설계변수로 하여 역해석을 실시하였다. 역해석된 압축지수 값은 0.33, 한계상태선의 기울기는 1.33으로 계속이 이루어진 기간까지 침하량과 비슷한 결과를 주는 물성치를 얻을 수가 있었다(그림 14).

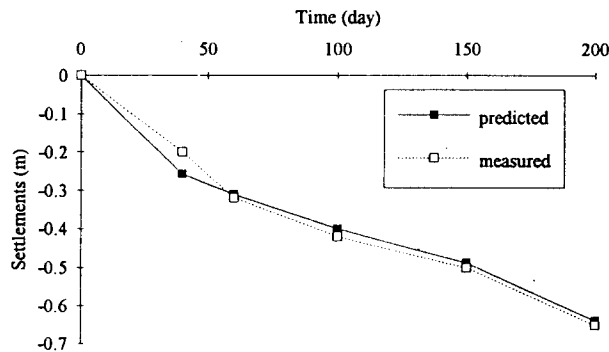


그림 14 시험성토의 침하량 자료를 역해석한 결과

4. 사용자 편의 전/후처리 시스템 개발

개발된 여러 해석방법들이 프로그래밍되어 실제 적용되었을 경우에, 입력자료를 작성하거나 출력된 자료를 이해하는 것은 전문가일지라도 상당한 어려움을 겪기 마련이다. 따라서 본 논문에서는 전/후처리 기법을 도입함으로써 사용자가 전문가가 아닐지라도 쉽고 편리하게 프로그램을 사용할 수 있도록 하였다.

전처리 시스템에서는 개발된 시스템을 사용자가 간단하고 편리한 방법으로 사용할 수 있도록 마우스나 키보드를 이용하여 원하는 메뉴를 선택하여 해석에 필요한 데이터의 입력과 수정이 가능하도록 하며, 초보자도 쉽게 사용할 수 있도록 입력데이터의 의미를 확인할 수 있도록 한다. 또한 후처리 시스템에서는 해석된 결과에 대한 이해를 증진시키기 위하여 성토하중에 의하여 변형된 요소형태와 그때의 지반의 응력상태 및 간극수압의 크기를 등압선(contour)을 이용하여 도시하여 해석결과를 한눈에 볼 수 있도록 표현하였다.

개발된 전/후처리 프로그램은 볼랜드 C++을 사용하여 프로그래밍 하였으며 특히 입력자와 컴퓨터 사이에 GUI(graphic user interface)를 채택하여 사용자의 입력작업을 용이하게 하였다.

4.1 비선형 압밀해석에 대한 전처리 시스템

유한요소법이 적용된 2차원 비선형 압밀해석 프로그램을 사용하여 대상구조물을 해석하고자 할 때 해석하고자 하는 영역에 대한 요소의 갯수, 절점의 갯수, 외부하중, Node와 Mesh Generation 및 해석 대상지반의 물성치 등에 대한 정보를 일일이 작성해야 한다. 그러나 해석 대상지반이 복잡한 경우에는 일반적으로 초보자가 이와같은 작업을 할 때에는 실수를 하기 쉬우며 많은 시간과 노력이 소요된다.

전처리 기법에서는 해석하고자 하는 해석영역의 지반재료에 대한 정보를 쉽게 작성하여 입력할 수 있으며 외부하중을 집중하중이나 등분포 하중으로 쉽게 입력할 수 있다. 뿐만아니라 해석 대상영역에 대한 Node 및 Mesh Generation을 쉽게 수행할 수 있도록 하여 입력화일 작성시에 소요되는 많은 시간과 노력을 절약할 수 있게 되었다. 또한 해석에 사용되는 요소는 Q4P4, Q8P4 및 Q9P4를 지원하고 있으며 Menu에서 선택하여 사용할 수 있다(예제 그림 15).

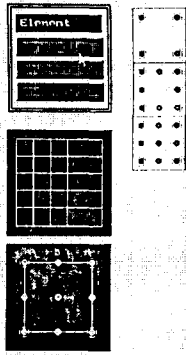


그림 15(a) 2차원 압밀해석과 관련된 Geometry 입력자료 화면

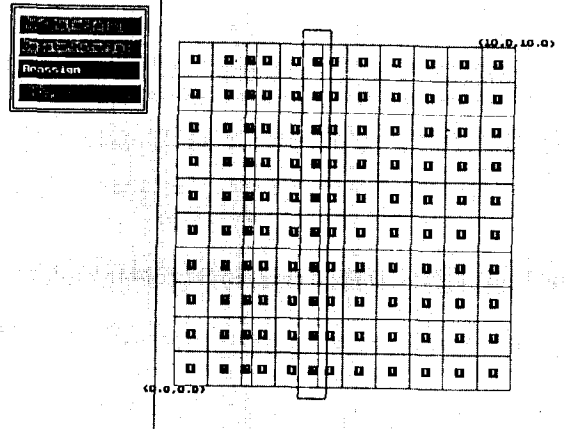


그림 15(b) 2차원 압밀해석과 관련된 Material의 1차 입력자료 화면

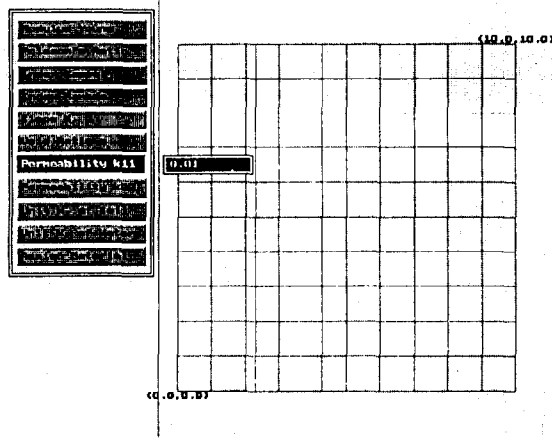


그림 15(c) 2차원 압밀해석과 관련된 Material의 2차 입력자료 화면

4.2 비선형 압밀해석에 대한 후처리 시스템

FEM을 사용하여 2차원 압밀해석을 수행하였을 때 유한요소해석에 대한 경험이 부족하더라도 해석된 결과를 쉽게 이해할 수 있도록 후처리 시스템을 개발하였다. 본 후처리 시스템에서는 해석된 지반의 변위량을 화면에 출력함으로써 해석된 지반의 전체적인 변형거동을 이해하는데 도움을 준다. 뿐만 아니라 수평 및 수직방향의 응력과 간극수압의 등압선을 도식적으로 표시하였다(예제 그림 16).

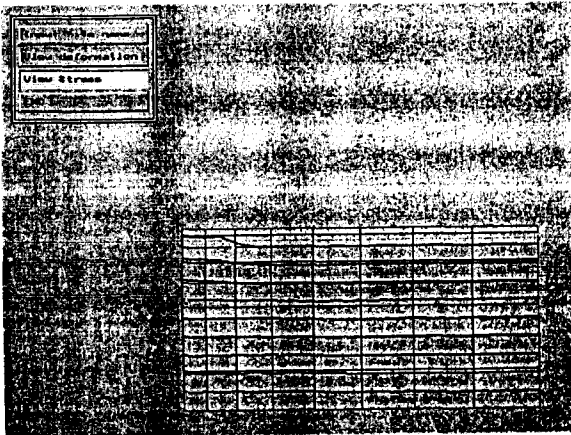


그림 16(a) 2차원 압밀해석 결과에 대한 변형된 요소망

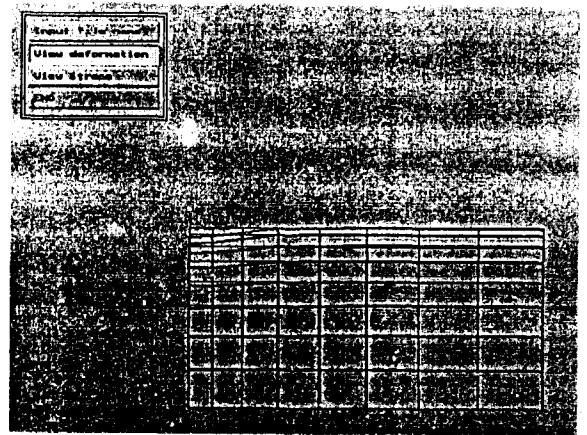


그림 16(b) 2차원 압밀해석 결과에 대한 등압선

5. 결론

배수제가 설치된 연약지반의 3차원적인 거동특성을 2차원 평면 변형을 모델로 해석하기 위하여 등가의 투수계수가 제안되었으며 3차원 ABAQUS 해석결과 및 기존의 등가모델과 비교 검증할 수 있었다. 또한 2차원 해석 시 배수제의 폭을 그대로 사용하는 경우에 실제 3차원 해석에서 보다 훨씬 적은 침하량을 산정할 수 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 배수제의 강성도가 주변 연약지반의 강성도보다 매우 클 경우 가해진 응력이 배수제에 집중되므로 나타나는 결과라고 보여지며 2차원 해석 시 나타나는 이러한 영향을 줄이기 위하여는 2차원 해석 시 배수제의 강성도에 3차원 효과를 고려해 주는 방법을 이용할 경우 다소 개선될 수 있음을 알 수 있다. 뿐만아니라 배수정효과를 고려하기 위해서는 2차원 해석 시 점성토 지반에서는 등가의 투수계수를 사용하고 수치적인 방법으로 배수정효과를 고려해 주는 것이 3차원해석에 보다 근접한 해석결과를 줌을 알 수 있다.

유한요소법을 이용한 2차원 비선형 압밀해석에 simplex 방법, ADS 방법의 두가지 역해석 기법을 적용하였다. 이때에 지반의 압밀에 크게 영향을 미치는 투수계수는 등가의 투수계수로 변환된 값을 이용하였으며, 압축지수와 한계상태선의 기울기를 설계변수로 설정하여 Cam-clay 모델을 사용한 비선형 압밀해석에 필요한 물성치를 역해석 할 수 있다. 그러나 실제 문제에 적용된 2차원 비선형 역해석 기법은 요소의 개수가 많아짐에 따라 계산시간이 크게 증가하기 때문에 계산시간이 매우 길어지는 단점이 있다. 따라서 실제문제에 적용하는 경우에는 계측치가 설치된 부분의 지반 특성등을 토대로하여 일차원화된 모델을 적용함으로써 그 주변지반의 물성치만을 역해석하여 차후 거동을 예측하는 것이 보다 효과적인 것으로 사료된다.

유한요소법을 적용한 2차원 압밀해석에 필요한 Control Card, Geometry, Force 및 Material에 대한 정보를 초보자도 간단한 방법으로 입력자료를 작성할 수 있도록 전처리 기법이 적용되었으며 2차원 압밀해석 결과에 대한 후처리 시스템을 개발하여 해석된 변형과 응력분포에 대한 결과를 이해하는데 도움을 주고자 하였다.

6 참고문헌

- 김윤태, 이승래, 도남영, 이영남(1994), "배수제가 설치된 압축성 지반의 효율적인 압밀해석 및 역해석", 한국지반공학회 '94 가을학술발표회 논문집, pp 175-181.
- Arora(1989), J. S., "Intorduction to Optimum Design", McGraw-Hill Series
- Asaoka, A. and Matsuo, M.(1979), "Bayesian approach to inverse problem in consolidation and its application to settlement prediction", Proc. 3rd Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, Aachen
- Barron, R.A. (1948), "Consolidation of fine-grained soils by drain wells", Trans. ASCE, Vol. 113., paper No 2346.
- Bergado, D. T., Asakami, H., Alfaro, M. C. and Balasubramaniam, A. S., (1991), "Smear Effects of Vertical Drains on Soft Bangkok Clay", J. Geotech. Engr. Div., ASCE, Vol. 117, No. GT10, pp. 1509~1530.
- Borja, R. I, and Kavazanjian, E. (1984), "Finite element analysis of the time-dependent behavior of soft clays ", Geotechnical Engineering Reserch , Report No. GT1
- Borja, R. I.(1988), "The Analysis of Consolidation by a Quasi-Newton Technique", Int. J. for Numerical and analytical Methods in Geomechanics, Vol 12, pp221-229
- 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, pp555-583.
- Murakami, A. and Hasegawa, T.(1985), "Observation prediction of settlement using Kalman filter theory", Proc. 5th Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, Nagoya.
- Nelder, J. A., and R. Mead, "A Simplex Method for Function Minimization", Computer J. 7, 308-313, 1964, Publishing Company, p 665.
- Sakurai, S. and Takeuchi, K.(1983), "Back Analysis of Measured Displacement of Tunnels", Rock Mechanics and Rock Engineering 16, pp 173-180.
- Shinsha, H., Hara, H., Abe, T. and Tanaka, A., (1982), "Consolidation Settlement and Lateral Displacement of Soft Ground Improved by Sand Drains", Tsuchi-to-kiso, JSSMFE, Vol. 30, No. 2, pp. 7~12.
- Vanderplaates, G. N.(1987), ADS- A fortran program for automated design sythesis, Ver. 2.01.
- Zeng, G. X. and Xie, K. H., (1989), "New Development of the Vertical Drain Theories", Proc. 12th ICSMFE, Vol. 2, pp. 1435~1438.