

2차원 모델화된 연약지반의 비선형 압밀해석시 이용되는 모델변수 추정을 위한 최적화기법

Optimization Technique for Parameter Estimation used in 2-Dimensional
Modelling of Nonlinear Consolidation Analysis of Soft Deposits

김 윤 태*¹
Kim, Yun-Tae
이 승 래*²
Lee, Seung-Rae

Abstract

The predicted consolidation behavior of in-situ soft clay is quite different from the measured one mainly due to the approximate numerical modelling techniques as well as the uncertainties involved in soil properties and geological configurations. In order to improve the prediction, this paper takes the following into consideration : an optimization technique should be adopted for characterizing the in-situ properties from measurements and also an equivalent and efficient model be considered to incorporate the actual 3-D effects.

The soil parameters used be the modified Cam-clay model, which have an effect on the process of consolidation, were back-analyzed by BFGS scheme on the basis of settlements and pore pressures measured in real sites. The optimization technique was implemented in a general consolidation analysis program SPIN2D. By using the program, one may be able to appropriately analyze the time-dependent consolidation behavior of soft deposits.

요 지

지반계수와 지반형상에 포함된 불확실성 뿐만아니라 근사적인 수치모델링에 기인하여 현장 연약지반에 대하여 예측된 거동과 실제로 계측된 거동은 매우 상이한 경우가 많다. 이러한 예측 결과를 개선하기 위하여 본 논문에서는 다음사항을 고려하였다. 계측치로부터 현장지반의 물성치를 보다 적절히 추정하기 위하여 최적화 기법이 적용되었으며, 3차원 거동효과를 효과적으로 고려하기 위하여 등가의 모델이 적용되었다.

지반의 압밀과정에 영향을 주는 수정 Cam-clay 모델의 지반계수값을 현장에서 계측된 침하량과 간극수압을 바탕으로 BFGS 기법을 적용하여 최적화하였으며, 최적화 기법은 일반적인 압밀 해석 프로그램인 SPIN2D에 적용되었다. 제안된 프로그램을 사용하여 연약지반의 시간의존적인

*¹ 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

*² 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 부교수

압밀거동을 적절히 예측할 수 있다.

Keywords : Nonlinear consolidation, Vertical drain, Optimization, BFGS

1. 서 론

연약지반 위에 구조물을 설계하여 시공하고자 할 때 고려해야 할 중요한 사항은 구조물의 안정성과 시간에 따른 침하량이다(Borja, 1984). 침하량은 주로 압밀과 creep 효과 때문에 발생하며, 이와 같은 침하량을 비교적 정확하게 산정하기 위해서는 지반의 복잡한 거동특성을 표현할 수 있는 수치해석 모델과 정확한 해석기법을 적용한 방법을 사용해야 한다.

배수재가 설치된 연약지반의 압밀해석은 해석적인 방법과 수치해석 방법을 사용하여 구할 수 있다. 해석적인 방법(Barron, 1948; Hansbo, 1981)은 하나의 원통형 실린더 지반의 등가영향구역(influence zone)에 대하여 선형압밀이론에 근거한 해석적인 해를 사용하여 임의의 시간에 대한 평균압밀도를 구하는 방법이다. 반면 수치해석 방법(Mesri 등, 1994; Bergado 등, 1994)은 유한차분법이나 유한요소법 등과 같은 수치해석 기법을 적용하여 연약지반의 압밀거동을 예측하는 방법이다.

그러나, 일반적으로 연약지반의 압밀거동은 많은 연구와 노력에도 불구하고 현장지반의 비균질성 및 이방성, 수치해석모델링에 포함된 오차, 설계변수들에 대한 불확실성 등으로 인하여 정확한 예측이 매우 어려우므로 실제 시공단계에서 관측된 거동은 초기설계단계에서 예측된 거동과 상이한 경우가 일반적이다. 따라서 실제 시공단계에서 침하량 계측기기나 간극수압 계측기기와 같은 각종 계측장비들을 현장에 설치하여 관측되는 거동을 바탕으로 시공관리가 수행되고 있는 실정이며, 관측된 거동이 설계시 예측된 거동과 매우 상이한 경우에는 재설계 및 대책이 요구된다.

기존의 수치해석 방법을 이용하여 연약지반의 압밀문제를 해석하고자 할 때에는 지반의

물성치가 입력자료가 되어 간극수압과 변위 등이 해석결과로서 출력된다. 그러나 시료 채취시 이미 어느 정도 교란되고 규모가 작은 시료에 대한 실험실 결과로부터 현장지반을 대표할 수 있는 물성치를 구하기가 어려우므로 예측결과에 대한 신뢰도가 저하된다. 따라서 일반적인 해석방법과는 달리 실제현장에서 실측된 변위나 간극수압을 사용하여 대상 시스템의 물성치를 구하는 방법을 역해석이라 한다(Gioda와 Sakurai, 1987; Sakurai 등, 1983).

Gioda(1985)는 시공단계에서 계측한 자료를 이용하여 현장 지반의 물성치를 역해석하는 방법들을 크게 역순법(Sakurai 등, 1983; Gioda 등, 1981), 직접법(Arai 등, 1983, 1984) 및 통계학적인 방법(Cividini 등, 1983)으로 분류하였다. 역순법은 일반 압밀해석의 지배 방정식을 역으로 하여 간극수압과 변위가 입력자료로 주어지고 탄성계수나 투수계수를 구하는 방법이다. 직접법은 계측치와 예측치와의 오차를 목적함수(object function)로 정의하고 이를 최소화하는 방법으로, 대표적인 직접법에는 simplex 방법, conjugate gradient 방법, quasi-Newton 방법 등이 있다(Sakurai 등, 1983; 김운태 등, 1994; 김문겸 등, 1995). 한편 앞의 역순법이나 직접법은 수치해석법 상의 오차와 계측에서 발생하는 측정오차를 고려하지 못하므로 이와 같은 계측치에 포함된 측정오차를 보완하기 위하여 통계를 이용한 Bayesian 방법(Asaoka와 Matsuo, 1979)과 Kalman filter를 적용한 연구(Murakami와 Hasegawa, 1988) 등이 보고 되고 있다.

시공과정에서 계측한 자료를 이용하여 연약지반의 물성치를 결정하는 역해석에 관한 기존의 연구는 표 1과 같이 연약지반이 선형적인 거동을 한다는 가정아래 탄성계수나 포아송비 및 투수계수를 구하는 방법이 대부분으로 배수

재가 설치된 연약지반의 비선형적인 거동특성을 충분히 고려할 수 있는 방법이 확립되어 있지 않은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 역해석 기법을 적용하여 배수재가 설치된 연약지반의 비선형 압밀거동을 비교적 잘 표현할 수 있

는 수정 Cam-clay 구성모델(Roscoe와 Burland, 1968)에서 사용되는 모델정수값들을 계측된 변위나 간극수압을 이용하여 최적화함으로써 보다 적절한 설계변수 추정이 가능하도록 하고자 하였다.

표 1. 압밀해석에 적용된 역해석 기법

연구자	설계변수	역해석 기법	해석방법
Gioda(1979)	E, k	Simplex method	FEM
Arai, Ohta & Yasui(1983)	E, v	Conjugate gradient method	FEM
Arai, Ohta & Kojima(1984)	E, v, k	Conjugate gradient method	FEM
Asaoka & Matuso(1984)	E, k	Auto regressive model(Asaoka model)	FEM(Biot's linear elastic consolidation)
Murakami & Hasegawa(1985)	Pore pressure	Kalman filtering	FDM
Arai, Ohta & Kojima(1987)	Initial tangent modulus of rigidity, shear strength, permeability	Conjugate gradient method	FEM(Hyperbolic model)
Shoji, et al.(1990)	E, v, k	BFGS	FEM(2D elastic consolidation)

한편, 일반적으로 배수재가 설치된 현장연약지반의 거동은 비선형적이며 3차원적인 배수(3 dimensional spatial flow) 및 거동특성을 가지고 있다. 그러므로 이와 같은 현장지반의 3차원적인 배수 및 거동특성을 비교적 정확히 해석하기 위해서는 실제의 해석대상지반을 3차원 유한요소망으로 구성하여 해석할 수도 있다. 그러나 광범위한 해석영역을 3차원 유한요소망으로 모델하여 해석하기 위해서는 많은 시간과 노력이 필요하다. 따라서 3차원 압밀해석을 수행하기보다는 간편한 2차원 평면변형률 수치모델로 배수재가 설치된 연약지반의 3차원적인 거동특성을 적절하게 해석할 수 있도록 등가투수계수와 배수재의 강성도를 고려한 등가폭을 가진 등가모델을 사용하였다. 제안된 최적화 기법과 등가모델을 비선형 유한요소해석 프로그램, SPIN2D(Borja, 1991)에 적용함으로써 배수재가 설치된 연약지반을 2차원 평

면 변형률(plane strain) 상태로 가정한 후, 현장에서 계측된 자료를 이용하여 비선형 압밀거동을 모델하기 위한 모델계수값을 최적화할 수 있도록 하였다.

2. 평면변형률 비선형 압밀해석

변위와 간극수압은 압밀거동에 영향을 미치는 가장 중요한 변수로 평형(equilibrium) 방정식과 연속(continuity) 방정식에 의해 서로 연관(coupled)되어 있고, 이들로부터 유도된 혼합형태의 방정식(mixed formulation)을 사용하여 흙입자와 물의 2상구조를 갖는 포화된 점토의 거동을 해석할 수 있다. 이때 과잉간극수압의 소산은 Darcy 법칙에 의하여 규정되고 연직 및 수평방향의 2차원적인 배수를 고려할 수 있다. Biot(1941)의 3차원 압밀이론을 바탕으로 한 압밀 지배 방정식은 식 (1) 및 (2)와

같이 표현된다(Booker & Small, 1975; Borja, 1988).

$$\sigma_{ij,j} + \dot{f}_i = 0 \in \Omega (\text{equilibrium eq.}) \quad (1)$$

$$\dot{u}_{i,j} + \dot{\epsilon}_i = 0 \in \Omega (\text{continuity eq.}) \quad (2)$$

여기서, u_i 는 변위함수 u 의 i 번째 성분, f_i 는 물체력(body force), σ_{ij} 는 유효응력텐서, ϵ_i 는 체적변형률을 각각 나타낸다. 위의 식 (1)과 (2)의 편미분 방정식에 대한 해를 구하기 위하여 유한요소법을 적용하면 다음과 같은 행렬형태의 방정식을 얻을 수 있다.

$$K^* d^* + G \dot{p} = \dot{f} \quad (3)$$

$$G^T d^* + \Phi p = h \quad (4)$$

여기서, d^* 및 p 는 변위 및 간극수압을 각각 나타내고, K^* 및 Φ 는 전체 강성행렬 및 전체유량(flux) 행렬을 각각 나타낸다. 그리고 G 와 G^T 는 변위와 간극수압의 요소 coupling 행렬이다.

또한 연직배수재가 설치된 현장지반의 거동은 3차원 배수 및 거동특성을 가지므로, 이와 같은 거동특성을 2차원 평면변형률 수치해석 모델에 의해 합리적으로 해석하기 위하여 연약지반의 등가투수계수와 배수재의 강성도를 고려한 등가폭을 사용하였다. 등가투수계수는 원지반과 평면변형률 지반의 유출량 등가조건과 50% 및 90% 압밀도의 등가조건을 만족할 수 있도록 식 (5)와 같이 유도된다(이승래 등, 1996).

$$k'_h = \left(\frac{L}{d_c} \right)^3 \frac{T'_{h50}}{T_{h50}} \frac{T'_{h90}}{T_{h90}} \frac{s}{\pi d_w} k \quad (5)$$

여기서, s 는 배수재의 간격, L 은 평면변형률 지반에서의 배수거리, d_w 는 배수재의 직경, d_c 는 배수재의 등가영향구역의 직경이다. 또한 k 는 현장지반에서의 수평방향 투수계수, T'_{h50} 와 T'_{h90} 는 각각 평면변형률 지반에서의 50% 및 90% 압밀도에 대응하는 시간계수, T_{h50} 와 T_{h90} 는 각각 대응하는 반경방향(radial flow)의 흐름에 대한 시간계수를 나타낸다.

성토하중에 의해 유발되는 배수재의 변위는 배수재의 강성도에만 비례하고, 3차원 해석에

서 얻어지는 배수재의 침하량과 2차원 해석에서 얻어지는 배수재의 침하량을 같다고 가정하여 배수재의 강성도를 고려하기 위한 2차원 해석에 사용되는 배수재의 폭 b_w 는 다음 식 (6)과 같이 표현될 수 있다.

$$b_w = \pi d_w^2 / (4s) \quad (6)$$

3. 비선형 구성모델변수의 최적화

연약지반의 비선형 압밀해석에 필요한 구성모델 변수를 계측된 현장자료로부터 최적화하기 위하여 계측치와 계산치와의 오차를 목적함수(objective function)로 정의하였다. 이와 같은 목적함수를 최소화하기 위하여 최적화 기법을 적용함으로써 현장지반을 대표할 수 있는 지반정수값을 얻을 수 있다. 목적함수($f(x)$)는 일반적으로 식 (7)과 같이 계측치와 예측치의 차이에 대한 제곱의 합으로 정의된다.

$$f(x) = \sum_{n=1}^{NT} \left[\sum_{i=1}^{ND} (u_i^n - U_i^n)^2 \right] \quad (7)$$

여기서, NT 는 계측이 이루어진 시간단계의 갯수, ND 는 계측자료의 갯수, u_i^n 는 n 시간 단계에서 i 지점의 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 변위와 간극수압의 값사이의 상대적인 크기효과를 줄여주기 위하여 목적함수는 다음 식 (8)과 같이 정의될 수도 있다. 2차원 평면변형률 비선형 해석에 사용되는 모델변수값을 최적화하기 위하여 적용된 역해석 기법의 흐름도는 그림 1과 같다.

$$f(x) = \sum_{n=1}^{NT} \left[\sum_{i=1}^{ND} (u_i^n / U_i^n - 1)^2 \right] \quad (8)$$

3.1 BFGS 최적설계 방법

Borja(1984, 1991)가 개발한 2차원 비선형 압밀해석 프로그램을 바탕으로 실제의 계측치를 입력자료로 대입하여 지반의 물성치를 최적

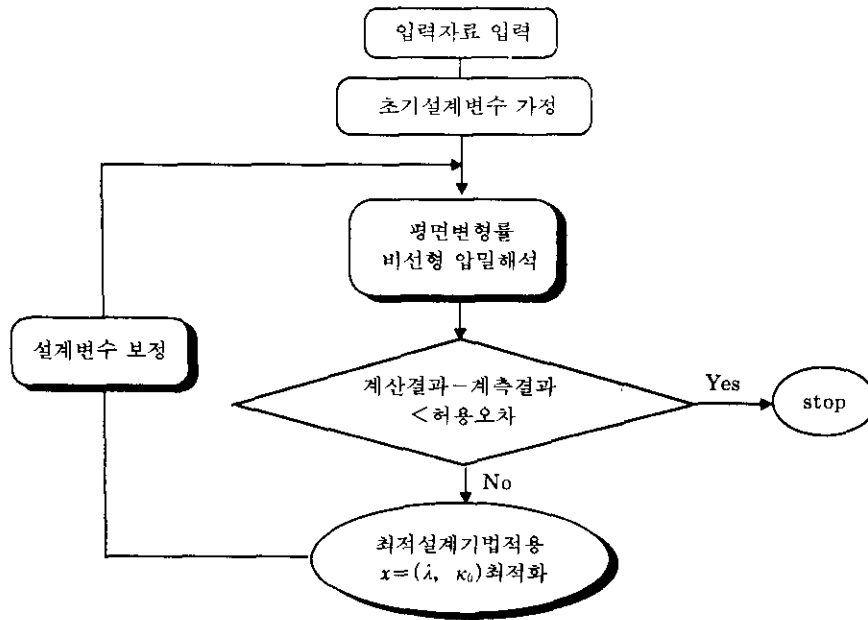


그림 1. 역해석기법 적용개요

화하기 위하여 BFGS 방법을 적용하였다. 최적화 방법에 사용된 설계변수(design value)는 식 (9)와 같이 Cam-clay 구성모델의 압축지수(λ)와 등가의 투수계수(k_v)로 설정하였다. 물론 다른 모델계수를 설계변수로 설정할 수도 있으며, 압밀거동에 비교적 크게 영향을 미치는 모델계수를 설계변수로 설정하는 것이 합리적이다. 최적화 기법에 사용되는 초기 설계변수값은 시공전의 현장지반에 대한 실내 및 현장 지반조사 등을 참고하여 결정할 수 있다.

$$x = (\lambda, k_v) \quad (9)$$

$$x_{lower} \leq x \leq x_{upper} \quad (10)$$

위식에서 x_{lower} 와 x_{upper} 는 설계변수의 하한값과 상한값을 나타내며, 현장지반에 대한 공학적 판단으로부터 설정할 수 있다.

목적함수를 최소화하기 위한 최적화 방법으로는 BFGS(Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno)(Arora, 1989) 방법을 사용하였다. BFGS는 비구속 문제(unconstrained problem)를 해석하기 위하여 최적의 설계변수를 찾는 방법중

에서 가장 효과적인 방법이다. 최적화과정중에 포함되는 일차원 탐색과정은 golden section method(Arora, 1989)를 사용하였다. 목적함수의 gradient vector는 목적함수가 상당히 함축적(implicit)이기 때문에 수치적인 유한차분법을 사용하여 구하였다.

3.2 BFGS 방법의 절차

다음은 BFGS 방법을 사용하여 목적함수의 최소값을 찾는 최적화방법을 나타낸다.

단계 1.

초기 설계변수값, $x = (\lambda, k_v) = x^{(0)}$ 을 선택하고, 초기 목적함수의 Hessian 행렬($H^{(0)}$)을 선택한다. 일반적으로 초기 Hessian 행렬은 $H^{(0)} = I$ 으로 가정하고, 수렴계수(ϵ) 및 $k=0$ 로 초기화하고, gradient vector($c^{(k)} = \nabla f(x^{(k)})$)를 계산한다.

단계 2.

gradient vector의 norm($\|c^{(k)}\|$)를 계산한다. 만약 $\|c^{(k)}\| < \epsilon$ 이면, 반복과정을 멈추고, 그렇지

않으면 계속한다.

단계 3.

일차원 탐색방향(search direction)을 찾기 위해 다음 식 (11)의 선형방정식을 푼다.

$$H^{(k)}d^{(k)} = -c^{(k)} \quad (11)$$

단계 4.

$f(x^{(k)} + \alpha d^{(k)})$ 를 최소화하기 위하여 golden section method를 사용하여 최적단계 크기($\alpha_k = \alpha$)를 계산한다.

단계 5.

다음 식 (12)와 같이 설계변수를 보완한다.

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \alpha_k d^{(k)} \quad (12)$$

단계 6.

다음 식 (13)과 같이 목적함수의 Hessian 행렬을 보완한다.

$$H^{(k+1)} = H^{(k)} + D^{(k)} + E^{(k)} \quad (13)$$

여기서, 행렬 $D^{(k)}$ 와 $E^{(k)}$ 는 아래의 식과 같이 주어진다.

$$D^{(k)} = \frac{y^{(k)} y^{(k)T}}{(y^{(k)} \cdot s^{(k)})} \quad (14)$$

$$E^{(k)} = \frac{c^{(k)} c^{(k)T}}{(c^{(k)} \cdot d^{(k)})} \quad (15)$$

$$s^{(k)} = \alpha_k d^{(k)} \quad (16)$$

(change in the design variables)

$$y^{(k)} = c^{(k+1)} - c^{(k)} \text{ (change in gradient)} \quad (17)$$

$$c^{(k+1)} = \nabla f(x^{(k+1)}) \quad (18)$$

단계 7.

$k = k + 1$ 를 수행한 다음 단계 2로 간다.

3.3 수치예제에 최적화 기법 적용

제안된 최적화 기법을 검증하기 위하여 배수재가 설치된 연약지반을 그림 2와 같은 유한요소망으로 작성하였다. 사용된 요소는 변위에 대한 8절점, 간극수압에 대한 4절점의 평면변형률 요소가 216개, 총 719개의 절점이 사용되었다. 유한요소망의 깊이는 15m, 폭은 40m이다. 경계조건은 그림 2와 같이 성토재 중심부분은 대칭에 의하여 수평변위가 구속되었고, 40m 우측부에서도 수평변위가 구속되었으며 하부단면에서는 연직변위가 구속되었다. 과잉

간극수압의 소산은 배수재와 상부표면을 통하여 유발되며, 상부표면의 간극수압은 영으로 가정하였다.

역해석에 사용되는 수정 Cam-clay 모델계수 값은 표 2에 나타나 있으며, 점토지반의 압축지수(λ)와 수평 투수계수(k_{ho})를 설계변수로 설정하였다. 연약지반위에 성토되는 성토하중은 그림 3과 같이 2단계로 성토된다고 가정하였다. 역해석에 사용되는 계측치는 침하량과 간극수압의 계측치로서 42일동안 계측이 되었다(그림 4). 이때 침하량은 성토단면 중심에서, 간극수압은 성토단면 중심의 5.2m에 깊이에서 각각 계측되었다.

계측된 자료를 바탕으로 최적화 기법을 적용하기 위하여 연약지반에 대한 설계변수는(λ, k_{ho})로 선택하였고, 연직 투수계수(k_{vo})는 수평 투수계수(k_{ho})의 반이라고 가정하였다. 그림 4는 계측된 값과 제안된 최적화 기법에 의해 최

표 2. 수치예제해석을 위한 수정 Cam-clay 모델 계수

Parameters	Clay	Vertical drains
κ	0.025	0.05
λ	Design value	0.10
M	1.47	2.50
Γ	1.65	1.65
ν	0.30	0.30
γ	19.8	19.8
k_{ho} (m/day)	Design value	8.84×10^{-1}
k_{vo} (m/day)	$k_{ho}/2$	4.42×10^{-1}

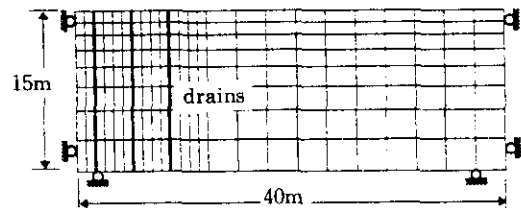


그림 2. 배수재가 설치된 지반의 유한요소망

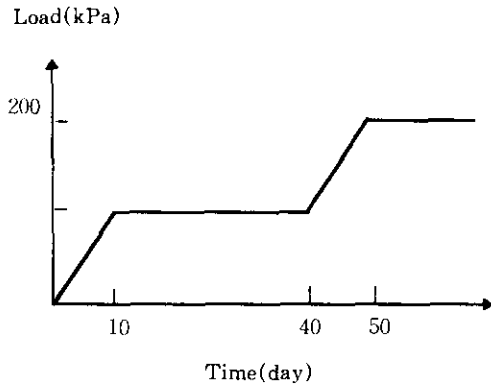
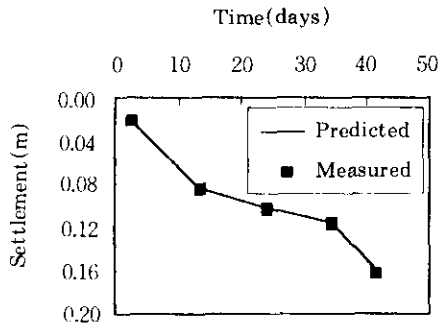
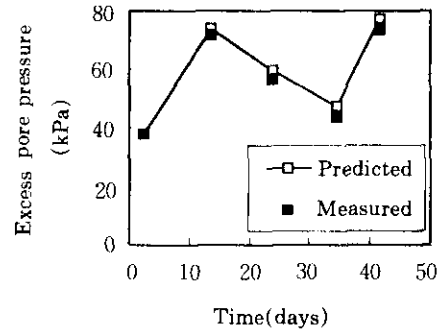


그림 3. 단계적으로 작용하는 하중

적화된 지반물성치를 사용하여 얻어지는 결과를 비교한 그림이다. 초기 설계변수값 (λ, k_{in})은 $(0.34, 9.0 \times 10^{-5})$ 이고, 최적화 기법을 사용하여 최적화된 설계변수값은 $(0.36, 5.2 \times 10^{-5})$ 이며, 목적함수의 값은 4.2×10^{-3} 이다. 앞의 수치해석 예제에서 최적화된 지반물성치를 사용하여 역해석된 침하량과 간극수압은 계측치와 잘 일치하는 경향을 준다는 것을 알 수 있다. 그림 5는 최적화된 설계변수값을 사용하여 장래의 침하량과 간극수압을 예측한 그림이다. 시공초기의 물성치를 이용하여 정해석을 수행한 결과는 실제 현장의 침하를 과소평가하고

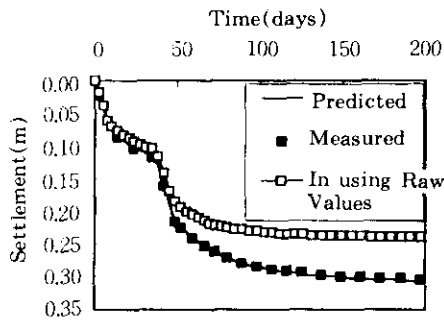


(a) 압밀침하

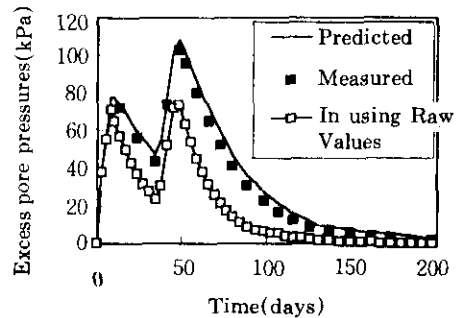


(b) 간극수압의 소산

그림 4. 예측치와 계측치의 비교



(a) 압밀침하



(b) 간극수압의 소산

그림 5. 수치예제에 대한 미래의 침하량과 간극수압의 예측

간극수압도 실제 보다 빨리 소산되는 결과를 얻을 수 있으나, 최적화된 지반 물성치를 사용하면 장래에 발생하는 연약지반의 침하량과 간극수압의 소산을 비교적 정확히 예측할 수 있다.

3.4 실제 문제에 최적화 기법 적용

개발된 최적화 기법을 1989년 말레이시아에서 개최된 국제학술회의 보고서에 나타나있는 시험 성토자료(The Malaysian Highway Authority, 1989)에 적용하여 역해석을 실시하였다. 대상지반은 상부 2.0m 두께의 과압밀된 지반과 5.0m의 매우 연약한 실트성 점토지반, 13.0m의 매우 두꺼운 연약지반으로 크게 세 부분으로 구성되었다. 사용되는 물성치는 표 3과 같이 대표적인 평균값을 사용하였고, 시험성토에 대한 상세한 물성치는 Chai 등(1994)에 상세히 기술되어 있다. 시험성토계획은 표 4에 요약된

것과 같이 4단계로 성토되었으며, 표 5는 성토 단면의 중심에서 150일동안에 계측된 침하량과 간극수압의 자료를 나타낸다. 해석대상지반 위에 성토된 단면은 대칭이므로 반단면만을 고려하여 수치해석을 수행하였다. Muar 점토지반에 대한 유한요소망과 경계조건은 그림 6과 같으며, 변위절점이 9개 및 간극수압 절점이 4개인 사변형(quadrilateral) 요소를 사용하였다.

세번째 층의 연약지반의 깊이가 매우 크기 때문에 연약지반의 전체거동을 지배할 수 있다고 사료되므로, 설계변수값은 세번째 층의 압축지수와 투수계수 및 두번째 층의 투수계수로 선택($\lambda_v, k_{vo1}, k_{vo2}$) 하였다. 이때 물론 다른 물성치로 설계변수를 설정할 수도 있다. 수평 투수계수(k_{ho})는 연직 투수계수(k_{vo})의 두배라고 가정하였다. 초기 설계변수($\lambda_v, k_{vo1}, k_{vo2}$)는 (0.30, 4.0×10^{-4} , 6.0×10^{-4})로 추정하였고 제안된 최

표 3. Muar clay에 대한 수정 Cam-clay 모델계수값

Parameters	Soil layer 1	Soil layer 2	Soil layer 3
	Depth 0-2m	Depth 2-7m	Depth 7-20m
	Weathered clay	Very soft silty clay	Soft silty clay
κ	0.06	0.10	0.05
λ	0.35	0.61	Design value
M	1.2	1.07	1.07
Γ	3.07	3.07	1.61
ν	0.20	0.25	0.25
$\gamma(\text{KN/m}^3)$	15.5	14.5	15.5
$k_{ho}(\text{m/day})$	24.04×10^{-4}	$k_{ho} \times 2$	$k_{ho} \times 2$
$k_{vo}(\text{m/day})$	12.00×10^{-4}	Design value	Design value

표 4. 시험성토지반의 건설단계

Stage	Total fill thickness (m)	Fill period(days)	Rate of filling(m/day)	Rest period(days)
1	1.6	0 to 17	0.11	17 to 35
2	2.7	35 to 52	0.05	52 to 140
3	3.7	140 to 168	0.04	168 to 280
4	3.9	280 to 287	0.03	280 to present

표 5. 예측된 침하량과 간극수압

Time (days)	Settlements at the surface(m)	Excess pore pressure heads at the depth of 6.7m(kPa)
20.00	0.11	2.0
40.00	0.20	3.0
60.00	0.35	3.8
100.00	0.43	3.6
150.00	0.52	4.0

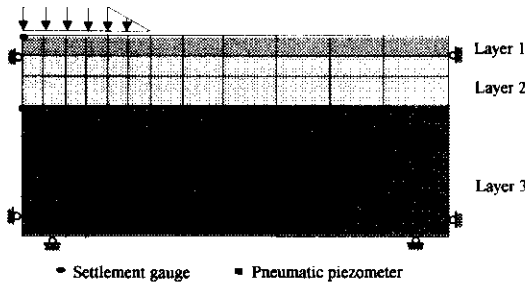


그림 6. 시험성토지반의 유한요소망

적화 기법을 사용하여 최적화된 설계변수는 $(0.38, 4.71 \times 10^{-1}, 6.67 \times 10^{-1})$ 으로서 합리적인 설계변수값이 도출되었다(Chai 등,1994). 이때 최적화된 목적함수의 값은 0.472이다.

그림 7은 예측된 거동과 최적화된 설계변수를 통하여 예측된 거동을 비교하였다. 예측된 침하량은 예측된 침하량과 매우 비슷하지만, 예측된 간극수압은 다소 과대 평가하였다. 이와 같은 이유는 수치모델링에 대한 오차와 다른 지반정수값과 관련된 오차 등에 의해 기인된다고 사료된다. 예로서 세번째 연약한 지층 밑에 medium dense와 dense clayey silty sand층이 존재(Indraratna, 1994)하여 부분적인 배수가 일어나지만 본 수치해석에서는 이를 고려하지 않았다. 그림 8은 최적화된 설계변수를 사용하여 예측할 수 있는 장래의 침하량 및 간극수압과 현장에서 예측된 거동을 비교하여 나타내고 있다. 그림 8의 결과로부터 볼 때, 시공초기에 예측된 거동을 역해석하여 얻은 최적화된 지반물성치를 사용하면 장래의 시공단계에서 유발되는 간극수압이나 침하량을 비교적 적절히 예측할 수가 있다고 사료된다.

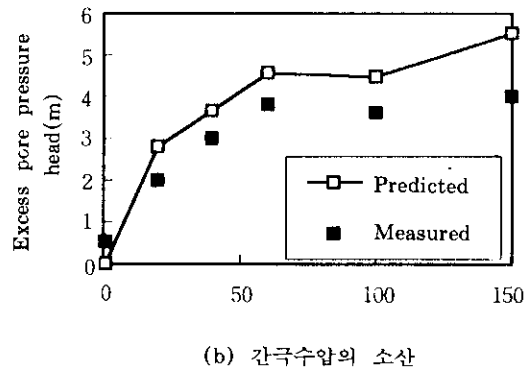
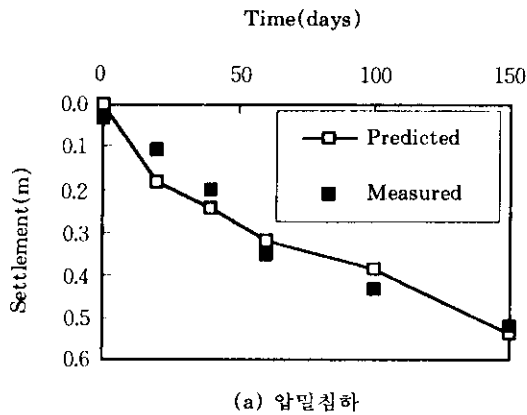
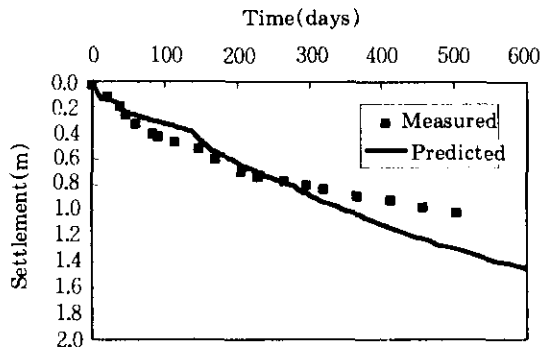
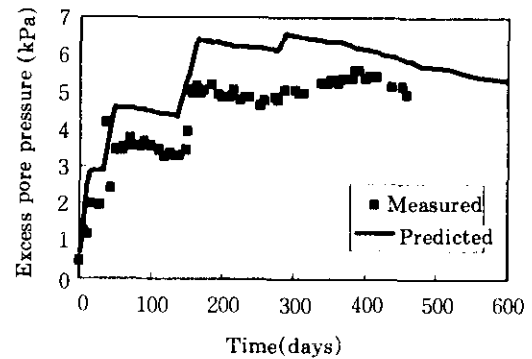


그림 7. 시험성토에 대한 역해석 결과



(a) 압밀침하



(b) 간극수압의 소산

그림 8. 시험성토에서의 미래의 침하량과 간극수압의 예측

4. 결 론

배수재가 설치된 연약지반의 3차원적인 거동특성을 2차원 평면 변형률 모델로 수치해석하기 위하여 등가투수계수와 배수재의 강성도를 고려한 등가폭을 가진 등가모델을 사용하였으며, 현장에서 계측된 자료로부터 현장지반의 비선형거동을 보다 적절히 예측할 수 있는 모델변수를 추정하기 위하여 최적화 기법을 적용하였다. 적용된 최적화 기법을 사용하여 연약지반의 비선형 압밀과정에 영향을 미치는 Cam-clay 구성모델의 변형계수나 투수계수 값을 현장에서 계측된 침하량과 간극수압을 이용하여 최적화 할 수 있었으며, 등가모델과 최적화 기법을 SPIN2D 프로그램에 적용하여 연약지반의 시간의존적인 장래거동을 비교적 정확히 예측할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 김문겸, 장정법, 박태균(1995), "탄소성 지반내 터널굴착에 따른 역해석", 대한토목학회 논문, 제15권, 제2호, pp 483-490.
2. 김윤태, 이승래, 도남영, 이영남(1994), "배수재가 설치된 압축성 지반의 효율적인 압밀해석 및 역해석", 한국지반공학회 '94 가을학술발표회 논문집, pp 175-181.
3. 이승래, 김윤태(1996), "성토재 아래의 연약지

반에 설치된 연직배수재의 수치모델링", 한국지반공학회, 제출 심사중

4. ABAQUS USER'S MANUAL(1993), Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. Ver. 5.3
5. Arai, K., Ohta, H. and Kojima, K.(1984), "Estimation of soil parameters based on monitored movement of subsoil under consolidation", Soils and Foundations, Vol. 24, No. 4, pp 95~108
6. Arai, K., Ohta, H. and Kojima, K.(1987), "Estimation of nonlinear constitutive parameters based on monitored movement of subsoil under consolidation", Soils and Foundations, Vol. 27, No. 1, pp 35~49
7. Arai, K., Ohta, H. and Yasui, T.(1983), "Simple optimization techniques for evaluating deformation moduli from field observations", Soils and Foundations, Vol. 23, No. 1, pp 107~113
8. Arora, J. S.(1989), "Introduction to Optimum Design", McGraw-Hill Series
9. 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
10. Asaoka, A. and Matsuo, M.(1984), "An inverse problem approach to the prediction of multi-dimensional consolidation behavior", Soils and Foundations, Vol. 24, No. 1, pp 49~62
11. Barron, R. A.(1948), "Consolidation of fine-

- grained soils by drain wells", *Trans. ASCE*, Vol. 113, paper No. 2346, pp. 718~742
12. Bergado, D. T. and Long, P. V.(1994), "Numerical analysis of embankment on subsiding ground improved by vertical drains and granular piles", XII ICSMFE, New Delhi, India
 13. Borja, R. I. and Kavazanjian, E.(1984), "Finite element analysis of the time-dependent behavior of soft clays ", *Geotechnical Engineering Research* , Report No. GT1
 14. Borja, R. I.(1988), "The Analysis of Consolidation by a Quasi-Newton Technique", *Int. J. for Numerical and analytical Methods in Geomechanics*, Vol 12, pp 221-229
 15. Borja, R. I.(1991), "Composite Newton-PCG and Quasi-Newton Iterations for Non-linear Consolidation ", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 86, pp. 27~60
 16. Chai, J. C., Sakajo, S. and Miura, N.(1994), "Stability analysis of embankment on soft ground(A case study)", *Soils and Foundations*, Vol. 34, No. 2, pp 107~114
 17. Cividini, A., Maier, G. and Nappi, A. (1983), "Parameter estimation of a static geotechnical model using a Bayes' approach", *Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 18, pp 487~503
 18. Gioda, G. and Jurina, L.(1981), "Numerical identification of soil structure interaction pressures", *Int. J. Numer. Anal. Methods in Geomech.* 5, pp 33-56
 19. 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.
 20. Gioda, G.(1979), "A numerical procedure for defining the values of soil parameters affecting consolidation", *Design parameters in geotechnical engineering*, BGS, London, Vol. 1Gioda, G.(1985), "Some remarks on back analysis and characterization problems in geomechanics", *Proc. 5th Int. Conf. Numer. Methods in Geomech.* Nagoya, 1, pp 47~61
 21. Hansbo, S.(1981), "Consolidation of fined-grained soils by prefabricated drains", paper 12/22: *Proc. 10th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, Stockholm, Sweden Vol. 3, pp. 667~682
 22. Hird, C.C., Pyrah, I.C., Russell, D. and Cincicoglu, F.(1995), "Modelling the effect of vertical drains in two-dimensional finite element analyses of embankments on soft ground", *Canadian Geotechnical J.*, Vol. 32, pp 795~807
 23. Mesri, G., Lo, D.O.K. and Feng, T.W. (1994), "Settlement of Embankments on Soft Clays", *Geotechnical Special Publication No. 40*, pp. 8~56
 24. Murakami, A. and Hasegawa, T.(1985), "Observation prediction of settlement using Kalman filter theory", *Proc. 5th Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics*, Nagoya.
 25. *Proceeding of the International Symposium on Trial Embankment on Malaysian Marine Clays*(1989), Kuala Lumpur, The Malaysian Highway Authority
 26. Roscoe, K. H., and Burland, J. B.(1968), "On the generalized stress-strain behaviour of wet clay, *Engineering Plasticity*", Cambridge University Press. pp 535~609.
 27. Sakurai, S. and Takeuchi, K.(1983), "Back Analysis of Measured Displacement of Tunnels", *Rock Mechanics and Rock Engineering* 16, pp 173-180.
 28. Shoji, M., Ohta, H., Arai, K., Matsumoto, T. and Takahashi, T(1990), "Two-dimensional Consolidation Back-Analysis", *Soils and Foundations*, Vol. 30, No. 2, pp 60~78.

(접수일자. 1996. 4. 25)