

탄소성모델과 탄점소성모델을 이용한 지반변형해석 - 역해석 기법의 적용 -

Soil Stress-Deformation Analysis by Elasto-Plastic Model and Elasto-Viscoplastic Model - Using Back Analysis Method -

권호진* · 송영우** · 이원택*** · 변광욱****

Kwon, Ho Jin · Song, Young Woo · Lee, Won Taek · Byun, Kwang Wook

Abstract

Using several soil parameters which are obtained from the PI-experimental formulas and the back analysis method, the elastic analysis, the elasto-plastic analysis and the elasto-viscoplastic analysis for soil deformation are executed. Comparing the results with those of consolidation test, the indirect estimation method for soil parameters and the suitability of constitutive models are studied. The elastic analysis using back analysis result and the elasto-plastic analysis using the permeability coefficient obtained from back analysis are the nearest to the results of consolidation test. The elasto-viscoplastic analysis disagrees with the results of the consolidation test. It is inferred that elasto-viscoplastic model is not adequate to the soil of which plasticity index is low.

요 지

소성지수 등을 이용한 경험식 및 역해석기법을 이용하여 구한 각종 토질정수를 사용하여 탄성해석, 탄소성해석(Cam-clay model) 및 탄점소성해석(Sekuguchi-Ohta model)을 실시하고, 그 결과를 압밀실험 결과와 비교하여, 토질정수의 간접적 산정법 및 구성모델의 적합성에 대하여 고찰하여 다음과 같은 결과를 얻었다. 압밀실험결과에 가장 근접한 해석방법은 역해석결과를 이용한 탄성해석과 역해석에서 구한 투수계수를 이용한 탄소성해석이었으며, 압밀실험에서 구한 투수계수를 이용한 탄소성해석 및 탄점소성해석은 상재하중 10 t/m^2 이하에서는 압밀실험결과와 유사한 결과를 나타내었고, 역해석에서 구한 투수계수를 이용한 탄점소성해석이 가장 큰 차이를 나타내었다. 탄점소성해석결과와 압밀실험결과와의 차이가 가장 큰 이유는 소성지수가 매우 작은 시료에는 탄점소성모델의 적용이 적합하지 않기 때문인 것으로 판단된다.

* 정희원 · 광주대학교 공과대학 토목공학과 부교수

** 정희원 · 한남대학교 공과대학 토목공학과 조교수

*** 정희원 · 호남대학교 공과대학 토목공학과 전임강사

**** 정희원 · 동명기술공단 토질부 과장

1. 서 론

일반적으로 지반의 변형 특히 연약한 점토지반등의 변형은 흙의 구조골격과 그의 간극을 채우고 있는 간극수의 상호작용에 따라 장기간에 걸쳐 발생하는 것으로 양자를 분리해서 연약지반의 변형을 결정하는 것은 어려운 일이다. 지반응력변형과 과잉간극수압의 소산과 같이 두가지 요인을 동시에 고려하여 해석하는 기법을 連成解析(coupling analysis)이라고 하며, 유한요소법등을 이용한 많은 연구가 이루어지고 있다.⁽¹⁻⁵⁾

많은 지반해석 방법중 가장 문제가 되는 요인은 해석방법의 차이나 정도보다는 오히려 지반의 토질정수를 합리적으로 결정하는 것으로 볼 수 있다. 지반해석을 위하여 흙의 구성모델을 사용할 경우, 토질정수의 정확한 산정은 지반의 응력상태, 변형, 간극수압 등 지반의 거동을 예측하는데 있어서 가장 어려운 문제의 하나이다. 특히 탄소성모델이나 탄점소성모델을 사용하는데 필요한 여러 토질정수들의 산정은 매우 복잡하고 정밀한 실험 등을 통하여 구할 수 있으므로, 실제 이들 모델을 사용하는데 있어서 많은 제약을 받고 있다.^(6,7) 단기간의 실험치를 이용하여 연성해석의 역순으로 토질정수를 결정하는 것이 가능한데, 이를 역해석(back analysis, inverse analysis)이라고 한다.^(2,8)

본 연구에서는 소성지수 등을 이용한 경험식 및 역해석기법을 이용하여 구한 각종 토질정수를 사용하여 탄성해석, 탄소성해석(Cam-clay model) 및 탄점소성해석(Sekiguchi-Ohta model)을 실시하고, 그 결과를 압밀실험 결과와 비교하여, 토질정수의 간접적 산정법 및 구성모델의 적합성에 대하여 고찰하였다. 또 Cam-clay model 및 Sekiguchi-Ohta model에서 토질정수 산정의 중요성을 알기 위하여, 소성지수에 따른 지반거동의 민감도를 분석하였다. 지반해석프로그램으로는 Sandhu의 요소를 이용한 유한요소해석 프로그램인 UNICOU(unicoupled normal and inverse stress and seepage flow coupling analysis program)를 사용하였다.

2. 이 론

2.1 連成解析과 逆解析

유한요소해석 프로그램에서 구성방정식은 외부하중이나 수두의 변화에 대한 흙의 거동특성으로 작용하며, 그림 1에 표현된 것과 같이, 주어진 외부하중과 수두변화에 대응하는 침하량을 구하는데 직접적인 역할을 하므로, 적합한 구성모델과 구성방정식의 계수이거나 상수항인 토질정수를 구하는 일은 매우 중요하다.^(9,11)

역해석은 시간과 침하량의 관측치로부터 지반의 물성을 수치적으로 추정하기 위하여 최소제곱법을 사용한다.⁽⁶⁾ 이 때 필요한 입력자료는 현장계측치(시간-침하량 곡선)와 탄성계수, 투수계수의 초기값, 포아송비, 초기간극비, 단위중량 등이며, 반복계산에 의해 현장에서 계측된 시간-침하량을 만족시키는 탄성계수, 투수계수등의 값을 산정한다. 역해석의 주요과정을 흐름도로 나타내면 그림 2와 같이 된다.⁽²⁾

2.2 Sekiguchi-Ohta 모델

탄점소성모델인 Sekiguchi-Ohta 모델은 탄소성모

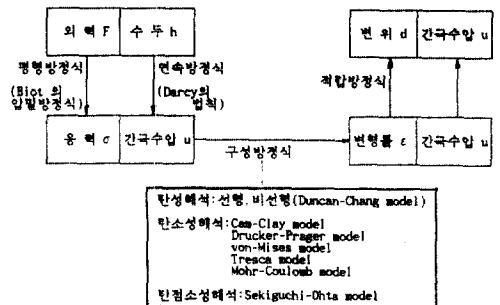


그림 1. 연성해석의 흐름도

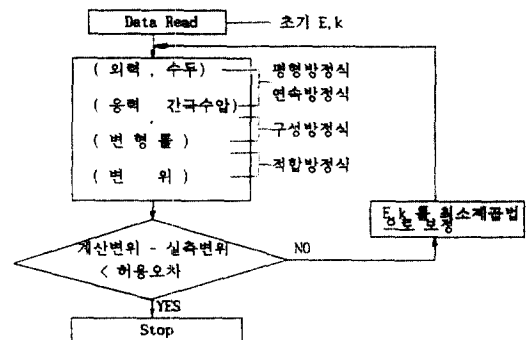


그림 2 역해석의 흐름도

델인 Cam-clay 모델에 점성을 추가 고려한 흙의 구성모델이며, 이 두 모델의 탄성거동은 한계상태 모델에서 κ -line을 따라 발생하므로 선형탄성모델과는 달리 정수압응력에 대해 비선형탄성거동을 하며, Sekiguchi-Ohta에 의해 제안된 탄점소성모델은 Cam-clay모델에 필요한 토질정수를 포함하여 추가로 이차압축지수와 초기체적변형률속도의 토질정수를 필요로 한다.^(2.4.9.12)

Sekiguchi-Ohta모델은 Cam-clay모델에 점성을 추가한 것으로, 구성방정식에서 변형률속도텐서는 아래 식과 같이 탄성변형률속도성분과 점소성변형률속도성분의 합으로 주어진다.

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^p + \dot{\epsilon}_{ij}^e \quad (1)$$

일반적으로 탄성변형률속도텐서는 다음 식과 같다.

$$\dot{\epsilon}_{ij}^e = \frac{\kappa \dot{P}}{3(1+e_0)P} \delta_{ij} + \frac{1}{2G} \dot{S}_{ij} \quad (2)$$

여기서, $\dot{\epsilon}_{ij}^e$: 탄성변형률속도텐서
 δ_{ij} : Kronecker delta
 G : 전단탄성계수

Sekiguchi는 체적 creep 방정식을 이용하여 다음과 같은 점소성 potential을 구하였다.

$$F \equiv \alpha \cdot \ln\{1 + (\dot{V}_o / t / \alpha) \cdot \exp(f/\alpha)\} \quad (3)$$

여기서, F : 점소성 potential
 f : 소성 potential
 t : 경과시간

한편, 점소성변형률속도텐서는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \Lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma'_{ij}} \quad (4)$$

여기서, $\dot{\epsilon}_{ij}^p$: 점소성변형률속도텐서의 ij 성분
 Λ : 비례정수

비례정수 Λ 를 결정하기 위하여 점소성변형의 연속조건 $\dot{F} = \dot{V}^p$ 를 가정하였으며, 이로써 구해진 Λ 는 다음 식과 같이 된다.

$$\Lambda = \frac{\lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma'_m} \dot{\epsilon}_v + 2\mu \frac{\partial F}{\partial \sigma'_{kl}} \dot{\epsilon}_{kl} + \frac{\partial F}{\partial t}}{\lambda \left(\frac{\partial F}{\partial \sigma'_m}\right)^2 + 2\mu \left(\frac{\partial F}{\partial \sigma'_{pq}}\right)^2 + \frac{\partial F}{\partial \sigma'_m}} \quad (5)$$

2.3 경험식을 이용한 토질정수의 결정^(2.6.7)

일반적으로 모든 입력매개변수가 실내토질시험 결과로부터 구해지는 것은 아니고, 다른 토질정수로부터 추정될 수도 있다. 소성지수(PI)와 압축지수(C_c) 등을 이용하여 다른 토질정수를 구하는 경험식에는 다음과 같은 것들이 있다

- 1) $\sin \phi' = 0.81 - 0.233 \log PI$; Kenney
- 2) $M = 6 \sin \phi' / (3 - \sin \phi')$
- 3) $\Lambda = M / 1.75$; Karube
- 4) $K_o = 0.44 \times 0.42 PI / 100$; Mcissarsch
 $K_o = 1 - \sin \phi'$; Jaky
- 5) $\mu = K_o / (1 + K_o)$
- 6) $e = w G_s$
- 7) $e_o = e - \lambda(1 - \Lambda) \log(\sigma_{vo}' - \sigma_{vi}')$
- 8) $\lambda = 0.434 C_c$
- 9) $m_v = 0.434 C_c / \{(1 + e_o)\sigma_{vi}'\}$
- 10) $k = m_v \gamma_w C_v$
- 11) $t_c \cong t_{90}$
- 12) $\alpha = 0.434 C / (1 + e_o)$; Sekiguchi
- 13) $\dot{\epsilon}_{vo} = \alpha / t_c$; Sekiguchi
- 14) $D = \lambda \Lambda / \{M(1 + e_o)\}$; Ohta
 $\Lambda = 1 - C / C_c$
- 15) $C / C_c = 0.07 \pm 0.02$: peat
 $C / C_c = 0.05 \pm 0.02$: clay; Mesri & Goldewski
- 16) $\lambda = 0.02 + 0.0045 PI$; Kamei

여기서, λ : 압축지수
 κ : 팽윤지수
 M : 한계상태계수
 Λ : irreversibility ratio
 α : 2차압축지수
 $\dot{\epsilon}_{vo}$: 초기체적압축변형률속도
 D : dilatancy 계수
 OCR : 과압밀비
 ϕ : 흙의 내부마찰각
 k : 투수계수
 K_o : 정지토압계수

PI : 소성지수
 γ : 흙의 단위체적중량
 e_0 : 초기간극비
 t_c : 1차압밀경과시간

3. 실험

수치해석 결과와 비교하기 위하여 4가지의 시료에 대하여 압밀실험을 실시하였으며, 각 시료의 공학적 특성은 표 1과 같다.

각 시료에 대하여 하중 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 3.2, 6.4, 12.8 kg/cm²을 단계적으로 가하고 하중단계마다 8, 15, 30초, 1, 2, 4, 8, 15, 30분, 1, 2, 4, 8, 24시간 경과했을 때의 압축량을 구하고, 간극비, 체적변화계수, 압밀계수, 투수계수 등을 구하였다.

4. 경험식을 이용한 탄소성해석 및 탄점 소성 해석

4.1 민감도 분석

탄점소성해석에 필요한 각종 토질정수들, 소성지

수를 이용한 경험식으로 산정하여, 탄점소성해석을 실시하고, 소성지수에 대한 민감도를 조사하였다. 그림 3과 같은 가상의 지반을 가정하여 평면변형 조건으로 탄점소성해석을 하였고, 재하조건으로는 2.5 t/m²의 등분포하중이 부분적으로 작용하되 하중 재하속도는 0.5 t/m²/day로 하였다. 해석에 필요한 각종 계수의 값을, 소성지수를 이용한 경험식으로 산정하여 표 2에 정리하였다. 이 때 소성지수로는 20%, 50%, 80%를 사용하여, 소성지수에 따른 지반 변형량의 민감도를 고찰하였다. 하중재하 종료시까지의 배수조건은, 소성지수별로 배수조건과 비배수 조건에 대하여 모두 고려하였다.

그림 4는 지반중심의 지표면(절점 15)의 수직방향 변형량을 표시한 것인데, 하중재하시까지 배수조건인 경우가 비배수조건인 경우에 비해서, 당연히 변형량이 크게 나타났지만, 소성지수에 따른 변형량의 차이는 크게 나타나지는 않았다. 그림 5와 그림 6은 각각 지표면 아래 -10 m인 절점 2와 절점 4의 수직방향 변형량을 표시한 것인데, 여기서는 배수조건이나 소성지수에 따른 차이가 거의 나타나지 않고 있다. 이는 재하하중의 크기에 비해 깊이가 큰 지

표 1. 시료의 공학적 특성

시 료	A	B	K-6	K-7	K-8	S-5	S-6
액성한계(%)	42	42	83.8	88.1	85.9	38.9	38.9
소성한계(%)	26	26	47.4	58.8	58.7	26.2	26.2
소성지수(%)	16	16	36.4	29.3	27.2	12.7	12.7
비 중	2.64	2.64	2.41	2.53	2.42	2.61	2.61
초기간극비	1.23	1.20	4.30	4.88	4.75	0.89	0.86
초기함수비	44.4	42.9	164	191	174	16.9	16.1
포화도(%)			92.1	99.2	88.6	49.5	48.7
전체단위중량(t/m ³)			1.30	1.26	1.30	1.90	1.86
건조단위중량(t/m ³)			0.49	0.43	0.47	1.63	1.60
압밀배수조건	양면배수	일면	양면	양면	일면	일면	양면
시료채취장소	市中 kaolinite		포항 해성점토			광주 굴착토	
시료 종류	재성형 시료		불교란 시료			재성형 시료	

표 2. 소성지수에 따른 토질정수의 계산치

parameter	PI=20%	PI=50%	PI=80%
κ swelling index	0.031	0.073	0.115
λ compression index	0.155	0.365	0.575
D coeff. of dilatancy	0.051	0.082	0.099
μ poisson's ratio	0.344	0.394	0.437
γ unit weight of soil	1.500	1.500	1.500
e_0 initial void ratio	0.888	1.543	2.318
α secondary compression index	0.0044	0.0072	0.0086
ϵ_{sv} initial vol. strain rate	0.000210	0.000062	0.000013
k coeff. of permeability	0.00334	0.000855	0.000164
OCR overconsolidation ratio	1.0	1.0	1.0
Ko coeff. of earth p. at rest	0.524	0.650	0.776
ϕ angle of friction	30.5	24.5	21.5

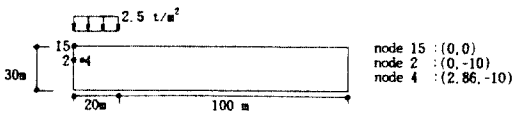


그림 3 탄점소성해석을 위한 2차원모델

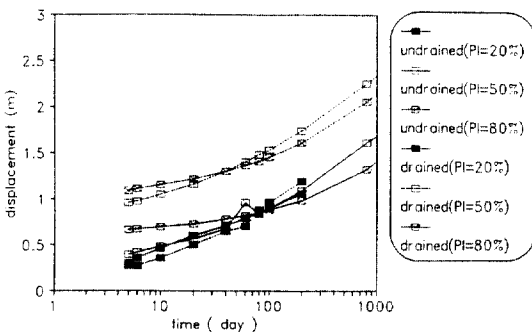


그림 4 2차원모델의 절점 15의 변형량

점에서의 변형량은, 재하하중의 영향이 미미하여 배수조건이나 소성지수에 따른 차이가 크게 생기지 않기 때문인 것으로 생각된다.

그림 7은 절점 4의 간극수압의 크기를 나타내는데,

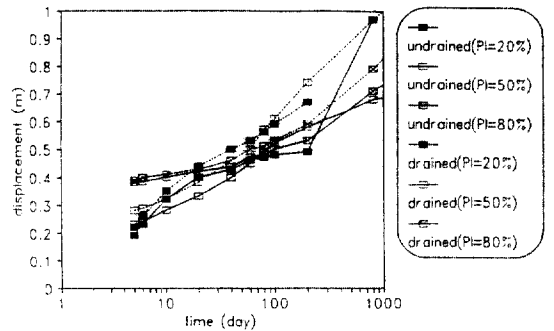


그림 5 2차원모델의 절점 2의 변형량

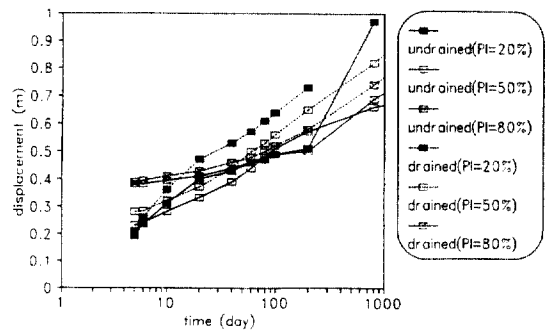


그림 6 2차원모델의 절점 4의 변형량

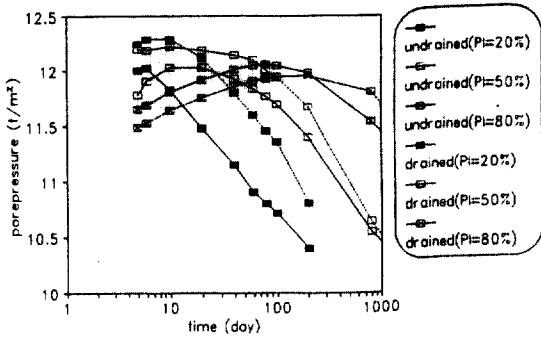


그림 7 2차원모델의 절점 4의 간극수압

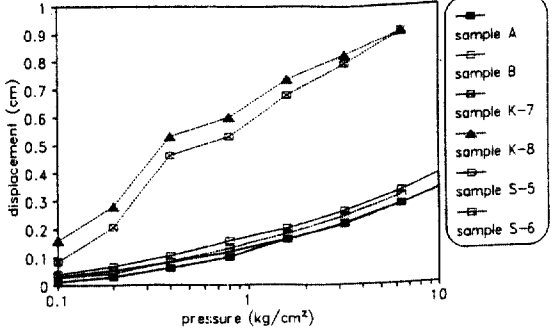


그림 8 절점 1의 압력-변형량에 대한 실험결과

전체적으로 소성지수가 클 수록 간극수압이 크고, 재하 직후 간극수압이 증가하다가 시간이 어느 정도 경과하면 간극수압이 감소하고, 간극수압이 감소하기 시작하는 시점은 소성지수가 클수록 늦어지는 경향을 나타내었다. 이는 재하 직후 과잉간극수압이 발생하여 간극수압이 증가하고, 소성지수가 클 수록 과잉간극수압의 소산이 늦게 일어나서 간극수압이 크게 작용하기 때문인 것으로 판단된다.

전체적으로 소성지수에 따른 지반변형량의 차이가 크지 않고, 소성지수와 과잉간극수압 소산과의 관계도 불분명하게 나타났는데, 이는 소성지수 자체가 경험적인 방법에 의하여 구해지는 물성치로서 그 정밀도에 한계가 있기 때문인 것으로, 소성지수를 이용한 경험식에서 구한 토질정수를 사용하여 지반 거동을 대략적으로 추정하는 것은 가능하지만, 정밀한 분석에 적용하는 것은 부적합한 것으로 생각된다.

4.2. 압밀실험 결과

그림 8은 시료 A, B, K-7, K-8, S-5, S-6의 변형량에 대한 압밀실험결과⁽¹³⁾를 하중단계별로 비교표시한 것이다. 비교란시료인 시료 K-7, K-8의 변형량은 비슷한 값을 나타내었고, 교란시료인 A, B, S-5, S-6의 변형량도 서로 비슷한 크기를 나타내었으며, 전자는 후자에 비해서 상당히 큰 값을 나타냈는데, 이는 비교란상태의 해성점토시료가 실험실에서 1개월 이상동안 압밀성형한 교란시료보다 소성지수, 초기간극비, 초기함수비가 훨씬 크기때문인 것으로 생각된다.

4.3 수치해석 결과와 압밀실험 결과의 비교

압밀실험에 사용한 시료 A, B, K-6, K-7, K-8, S-5, S-6에 대하여 탄소성해석 및 탄점소성해석을 실시하였다. 압밀실험에 사용한 시료는 그림 9(a)와 같은 원통형으로서 엄밀하게는 축대칭문제이지만, 탄소성해석 및 탄점소성해석에서 등분포하중 재하로는, 실제 압밀실험에서와 같이 시료상단에서의 균등침하를 얻을 수 없으므로, 원통형 시료의 중앙 부분만을 그림 9(b)와 같이 모델링하여 8개의 8절점요소와 43개의 절점으로 구성하고 평면변형조건을 적용하였다. 하중은 등분포하중으로 보고 0.1 - 12.8 kg/cm²까지 단계적으로 작용시켰으며, 재하소요시간은 0.01분으로 하였다.

탄소성해석에는 Cam-clay모델을, 탄점소성해석에는 Sekiguchi-Ohta모델을 사용하였고, Sekiguchi-Ohta모델은 점성고려에 필요한 2차압축지수와 초기변형률속도를 제외한 모든 토질정수를 Cam-clay 모델과 동일한 값을 사용하였다. 이 때 필요한 여러 토질정수는 소성지수와 관련된 경험식에서 산정하고, 투수계수는 압밀실험의 최소하중단계 0.1 kg/cm²에서 직접 구한 투수계수와 역해석에서 구한 투수계수를 사용하여 해석한 결과를 함께 비교하였다.

그림 10은 시료 A의 절점 1과 절점 21의 변형량 및 절점 21의 간극수압에 대한 결과를 구하여, 각각 하중단계별로 나타낸 것이다. 시료상단의 절점 1의 변형량에 대해서, 압밀실험결과에 가장 근접한 해석방법은 역해석기법을 이용한 탄성해석⁽¹⁴⁾과 역해석에서 구한 투수계수를 이용한 탄소성해석이며, 압밀실험에서 구한 투수계수를 이용한 탄소성해석과

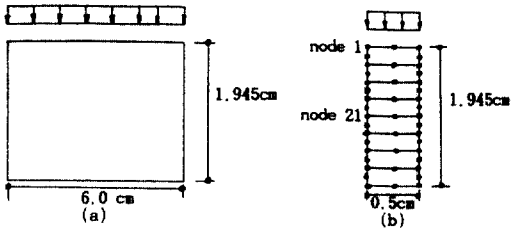


그림 9 탄소성 및 탄점소성해석을 위한 압밀모델

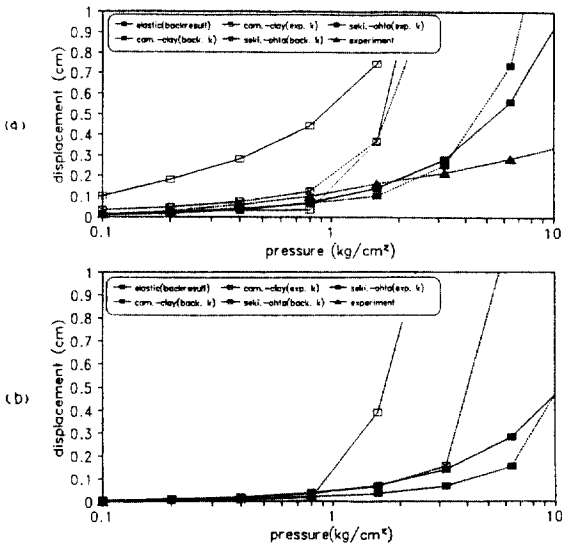


그림 10 (a) 시료 A의 절점 1의 변형량
(b) 시료 A의 절점 21의 변형량

탄점소성해석은 상재하중 $1 \text{ kg/cm}^2 (10 \text{ t/m}^2)$ 이하에서는 압밀실험결과와 유사하고, 특히 역해석에서 구한 투수계수를 이용한 탄점소성해석은 실험치와 차이가 가장 많이 나타났다. 절점 21의 변형량에 대해서도 상재하중 $1 \text{ kg/cm}^2 (10 \text{ t/m}^2)$ 정도까지는 역해석에서 구한 투수계수를 이용한 탄점소성해석을 제외하고는 비교적 유사한 결과를 나타내었다. 탄소성해석 및 탄점소성해석에서 하중증가에 따라 변형량이 급격히 증가한 것은, 시료의 응력상태가 항복조건에 도달하였기 때문인 것으로 생각되며, 특히 탄점소성해석에서 실험치와 차이가 가장 큰 이유는 소성지수가 매우 작은 시료에는 탄점소성모델의 적용이 적합하지 않기 때문인 것으로 판단된다. 소성지수가 시료 A보다 큰 시료 K-6, K-7, K-8에서는

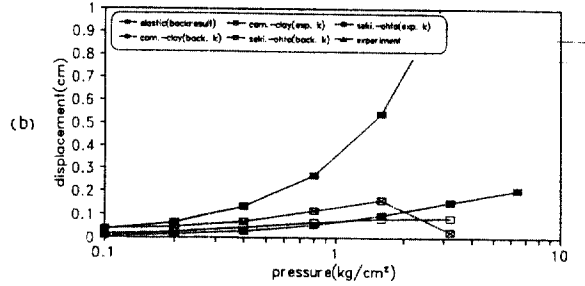
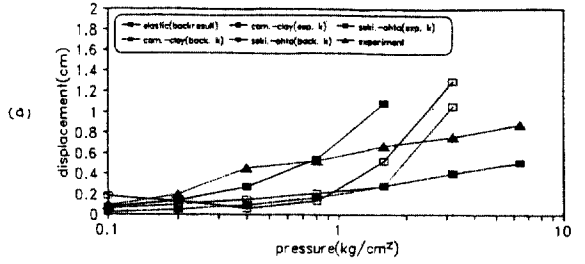


그림 11 (a) 시료 K-6의 절점 1의 변형량
(b) 시료 K-6의 절점 21의 변형량

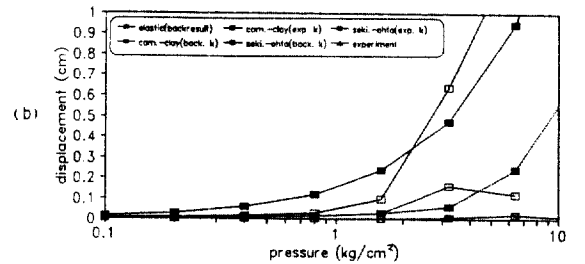
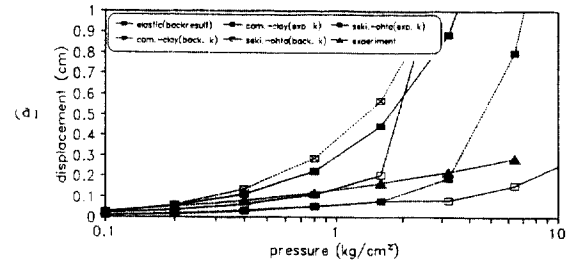


그림 12 (a) 시료 S-5의 절점 1의 변형량
(b) 시료 S-5의 절점 21의 변형량

탄점소성모델이 실험치에 비교적 근접하였다.⁽¹³⁾

그림 11과 그림 12는 각각 시료 K-6, S-5의 절점 1과 절점 21의 변형량에 대한 압밀실험결과와 각종 수치해석결과를 하중단계별로 비교한 것으로 전체

적인 특성은 시료 A의 경우와 유사하다.

그림 13은 시료 A의 절점 1에서의 수직방향 변형량에 대해서 압밀실험결과와 역해석기법을 이용한 탄성해석결과 및 역해석에서 구한 투수계수를 이용한 탄소성해석결과를 시간에 따라 비교 표시하였다. 압밀실험 및 탄성해석에서는 하중재하 직후에 변형량의 대부분이 발생하고 시간증가에 따른 변화는 작는데 비해, 탄소성해석에서는 시간에 따른 변형 증가가 다소 발생함을 보여주고 있다. 그림 14에서는 시료 A의 절점 21에서의 간극수압에 대해서 탄성해석, 탄소성해석(역해석 투수계수 사용), 탄점소성해석(역해석 투수계수사용) 결과를 비교표시하였다. 탄성해석에서는 재하와 동시에 간극수압이 급증하고 그 직후에 순간적으로 과잉간극수압이 전부 소산되어 원래의 간극수압을 회복했고, 탄소성해석에서는 과잉간극수압이 시간에 따라 서서히 소산되어 거의 최종상태를 회복했으나, 탄점소성해석에서는 시간에 따라 과잉간극수압이 약간만 소산되어 상당한 간극수압이 잔류하여 다른 해석에 비해 가장 큰 간극수압을 나타내었다.

그림 15는 시료 B의 절점 1에서의 변형량에 대

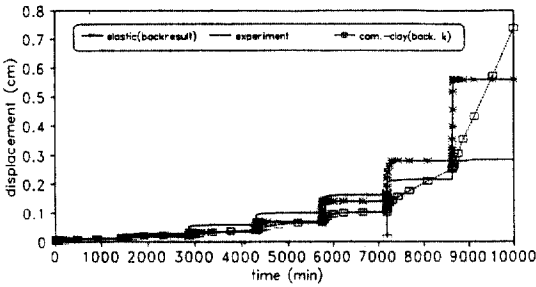


그림 13 시료 A의 절점 1에서의 시간 - 변형량

해서 탄소성해석을 한 결과를 시간에 따라 나타낸 것인데, 소성지수를 이용한 경험식에서 구한 토질정수를 사용하되 투수계수에 한하여, 압밀실험의 초기하중단계에서 구한 초기투수계수 및 전체하중단계에서 구한 평균투수계수를 사용한 결과를 비교 표시하였다. 전체적으로 초기투수계수를 사용한 경우가 평균투수계수를 사용한 경우보다 변형량이 크게 나타났는데, 이는 압밀하중이 증가할수록 투수계수가 감소하여 평균투수계수가 초기투수계수보다 작기 때문이다. 그림 16은 시료 B의 절점 21에서의 간극수압을 같은 방법으로 비교표시한 것이며, 마찬가지로 초기투수계수를 사용한 경우가 평균투수계수를 사용한 경우에 비해서 간극수압의 크기가 작게 나타났다.

그림 17, 그림 18에서는 시료 K-7의 절점 1의 변형량과 절점 21의 간극수압에 대해서 탄점소성해석을 한 결과를 나타냈는데, 소성지수를 이용한 경험식에서 나온 토질정수를 사용하되 투수계수에 한해, 압밀실험의 초기하중단계에서 구한 초기투수계수 및 전체하중단계에서 구한 평균투수계수를 사용한 결과를 비교표시하였다. 탄소성해석에서와 마찬

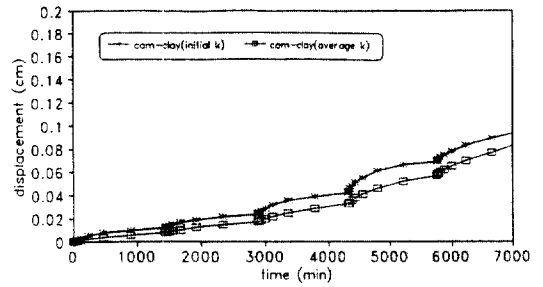


그림 15 시료 B의 절점 1에서의 시간 - 변형량

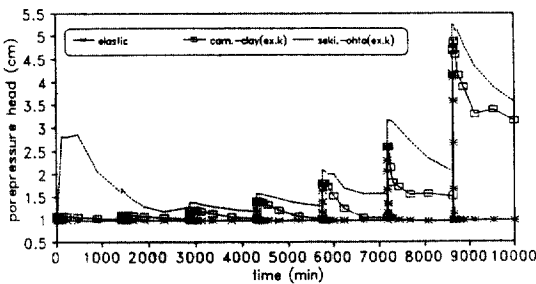


그림 14 시료 A의 절점 21에서의 시간 - 간극수압

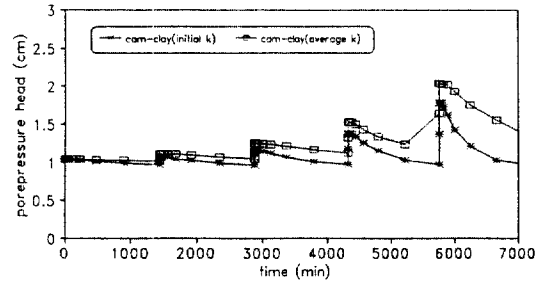


그림 16 시료 B의 절점 21에서의 시간 - 간극수압

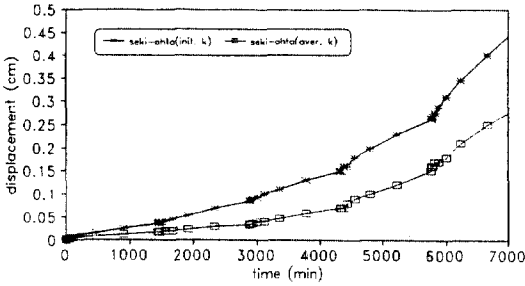


그림 17 시료 K-7의 절점 1에서의 시간 - 변형량

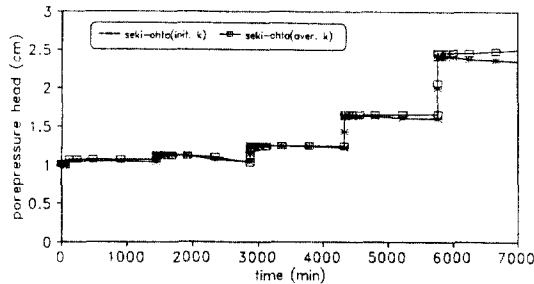


그림 18 시료 K-7의 절점 21에서의 시간 - 간극수압

가지로, 초기투수계수를 사용한 경우가 평균투수계수를 사용한 경우에 비해 변형량이 크게 구해지고, 간극수압은 약간 작게 구해지는데, 간극수압의 차이는 변형량의 차이에 비하여 매우 작은 값이었다.

5. 결론

1) 탄점소성해석에 있어서 소성지수에 대한 민감도를 분석한 결과, 소성지수에 따른 지반변형량의 차이가 크지 않고, 소성지수와 과잉간극수압 소산과의 관계도 불분명하게 나타났는데, 이는 소성지수 자체가 경험적인 방법에 의하여 구해지는 물성치로서 그 정밀도에 한계가 있기 때문인 것으로 생각된다.

2) 암밀실험결과에 가장 근접한 해석방법은 역해석결과를 이용한 탄성해석과 역해석에서 구한 투수계수를 이용한 탄소성해석이었으며, 암밀실험에서 구한 투수계수를 이용한 탄소성해석 및 탄점소성해석은 상재하중 10 t/m² 이하에서는 암밀실험결과와 유사한 결과를 나타내었고, 역해석에서 구한 투수

계수를 이용한 탄점소성해석이 가장 큰 차이를 나타내었다.

3) 탄성해석에서는 재하와 동시에 간극수압이 급증하고 그 직후에 순간적으로 과잉간극수압이 모두 소산되었고, 탄소성해석에서는 과잉간극수압이 서서히 소산되어 거의 초기에 가까운 간극수압을 회복하였으나, 탄점소성해석에서는 시간에 따라 과잉간극수압이 약간만 소산되고 상당한 간극수압이 잔류하여 다른 해석방법에 비하여 가장 큰 간극수압을 나타내었다.

4) 소성지수를 이용한 경험식에서 구한 토질정수를 사용하여 지반거동을 대략적으로 추정하는 것은 가능하지만, 정밀한 분석에 적용하는 것은 부적합하며, 특히 소성지수가 매우 작은 지반에서는 탄점소성모델의 적용이 적합하지 않다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단(과제번호 903-1306-007-2)의 기초연구비 지원에 의하여 수행된 것으로, 이에 대하여 깊은 감사를 드립니다.

參 考 文 獻

1. Akai, Ohnishi and Murakami, "Coupled stress flow analysis in saturated-unsaturated medium by finite element methods", *Third international conference on numerical methods in geomechanics*, Archen., 1979, pp. 241-249.
2. Century Research Center, "User manual of unified normal and inverse stress and seepage flow coupling analysis program", Japan, 1988.
3. Sekiguchi and Ohta, "Induced anisotropy and time depending in clay", *Proc. 9th ICSMFE*, Tokyo, 1977, pp. 229-237.
4. 이영생, "유한요소해석을 위한 흙의 비선형 구성 모델", 서울대학교 공학박사 학위논문, 1991. 2.
5. 紫田 徹, 關口 秀雄, "성토기초지반의 탄점소성거동 해석과 파괴예측", 일본토목학회 논문보고집, No 301, 1980, pp. 93-104.
6. Ohta, H. and Iizuka, A., "A determination procedure of input parameters in elasto-viscoplastic finite element analysis", *Soil and Foundations*, Vol. 27, No. 3, 1987, pp. 71-87.

7. 太田, 良峰, “탄점소성 유한요소법 해석에 따른 입력 parameter 의 결정법”, 제20회 일본토질공학 연구발표회, 名古屋, 1985.
8. 김우철 외 8인, 현대통계학, 영지문화사, 1990, pp. 216-247.
9. Britto, A.W. and Gunn, M.J., *Critical state soil mechanics via finite element*, John-Wiley & sons, 1987.
10. Chen. W.F. and Saleeb, A.F., *Constitutive Equations for Engineering Materials*, John-Wiley & Sons, Vol. 1, New York, 1982.
11. Duncan, J.M. and Chang, C.Y., “Nonlinear Analysis of stress and strain in soils”, *J. of Geotechnical Eng. Division, ASCE*, Vol. 96, No. SM5, 1970, pp. 1629-1653.
12. 박병기, 정진섭, 이문수, “흙의 구성식 해설(3)”, **대한토질공학회지**, 제3권 제3호, 1987, pp. 97-108.
13. 권호진, “지반응력변형과 지하수침투해석에 대한 연성해석 및 역해석”, 한국과학재단 연구보고서 KOSEF 903-1306-007-2, 1992.
14. 권호진, 변광욱, “역해석기법을 이용한 지반변형해석”, **한국지반공학회지**, 제9권 제1호, 1993, pp. 21-29.

(接受 : 1992. 11. 14)