

지반응력변형과 지하수침투 해석에 대한 연성해석 및 역해석

—역해석기법을 이용한 지반변형 해석—

Coupling Analysis and Back Analysis for Soil Stress-Deformation -
and Seepage -Deformation Analysis by Back Analysis Method-

권 호 진*1

Kwon, Ho-Jin

변 광 옥*2

Byun, Kwang-Ook

Abstract

To know the importance of soil parameters which are used to estimate the deformation and porepressure of soil, the sensitivity for soil parameters in elastic analysis is analyzed. Using the consolidation test results of several cohesive soils, soil parameters are estimated by back analysis method, and from the parameters the deformations and porepressures of the soil are estimated by elastic analysis.

In elastic analysis for soil-deformation and porepressure, the sensitivity for the Young's modulus is large, and the estimation of Young's modulus is more important in proportion to the size of stress.

Using the measured results during initial short period in small stress, the soil parameters can be correctly estimated by back analysis method. To decrease the iteration number in back analysis and to get the better parameters, the initial measurements in more nodes are required and the more accurate initial measurements are required.

요 지

본 연구에서는 지반해석을 위한 여러 방법중 유한요소법에 의한 연성해석 및 역해석기법을 이용하여, 지반변형해석과 토질정수의 추정방법 등에 대하여 연구하였다. 토질정수의 정확한 산정의 필요성을 알기 위하여, 지반의 탄성해석에서의 탄성계수, 투수계수, 포아송비 등에 따른 민감도를 분석 고찰하였고, 여러가지의 점토질 흙에 대한 압밀실험결과를 이용하여 역해석기법에 의한 토질정수의 산정을 실시하고, 이 토질정수를 이용한 탄성해석에 의하여 지반의 변형과 간극

*1 정희원, 광주대학교 공과대학 토목공학과 부교수

*2 정희원, 동명기술공단 토질부 과장

수압을 구하여, 다음과 같은 결과를 얻었다.

탄성해석에 있어서, 지반의 탄성계수에 따른 지반변형량과 간극수압의 민감도가 비교적 크게 나타나므로, 탄성계수의 산정은 매우 중요하며, 재하하중이 클수록 탄성계수의 산정을 정확히 하여야 한다.

작은 하중단계에서의 짧은 시간의 실측치를 이용한 역해석을 통하여 토질정수를 산정함으로써, 비교적 단순한 탄성해석을 통하여서도, 더욱 큰 하중 재하시 또 장기간의 변형량을 실제와 가깝게 예측할 수 있으며, 역해석에서의 반복계산 회수를 줄이고 더욱 좋은 결과를 얻기 위해서는, 초기치 실측 절점의 개수를 증가시키고 초기 실측치의 더욱 정확한 산정이 필요하다.

1. 서 론

지반의 변형 특히 연약한 점토지반의 변형은 흙의 구조골격과 그의 간극을 채우고 있는 지하수의 상호작용에 따라 장기간에 걸쳐 발생하는 것으로 양자를 분리해서 연약지반의 변형을 결정하는 것은 어려운 일이다. 지반응력변형과 지하수 침투에 대한 동시해석을 連成解析(coupling analysis)이라고 하며, 유한요소법등을 이용한 많은 연구가 이루어지고 있다.⁽³⁾⁽⁵⁾⁽⁸⁾

많은 지반해석 방법중 가장 문제가 되는 요인은 해석방법의 차이나 정도보다는 오히려 지반의 토질정수를 합리적으로 결정하는 것으로 볼 수 있다. 지반의 탄성계수나 투수계수 등의 토질정수의 정확한 산정은 지반의 응력상태, 변형, 간극수압등 지반의 거동을 예측하는데 있어서 가장 어려운 문제의 하나이다. 이때 단기간의 실측치를 이용하여 연성해석의 역순으로 토질정수를 결정하는 것이 가능한데, 이를 逆解析(inverse analysis, back analysis)이라고 한다.⁽²⁾⁽⁵⁾⁽⁹⁾

지반응력변형과 지하수침투해석에 대한 연성해석을 통하여 지반의 거동을 예측할 수 있으며, 이때 가장 문제가 되는 토질정수의 결정은 실제지반이나 모형지반에서의 단기간의 실측치를 대입한 역해석을 통하여 결정 사용함으로써, 장기간에 걸친 지반거동예측의 신뢰성을 보다 높일 수 있다.⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁹⁾

본 연구에서는 지반해석을 위한 여러 방법중

유한요소법에 의한 연성해석 및 역해석기법을 이용하여 지반변형해석과 토질정수의 추정방법등에 대하여 연구하고자 한다.⁽⁴⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾

먼저 토질정수의 정확한 산정의 필요성을 알기 위하여, 지반의 탄성해석에서의 탄성계수, 투수계수, 포아송비 등에 따른 민감도를 분석 고찰하였고, 여러가지의 점토질 흙에 대한 압밀실험결과를 이용하여 역해석기법에 의한 토질정수의 산정을 실시하고, 이 결과를 이용한 탄성해석에 의하여 지반의 변형과 간극수압을 구하였다.

위와 같은 방법에 의한 지반해석의 결과와 비교하기 위해 실내실험으로 여러가지 시료에 대한 압밀시험을 실시하여 비교 분석하였고, 지반해석 프로그램으로는 탄점소성모델을 사용하여 개발된 UNICOUPL(unified normal and inverse stress and seepage flow coupling analysis program)를 사용하였다.

2. 이 론

2.1 連成解析(Coupling Analysis)⁽³⁾⁽⁵⁾⁽⁷⁾

지반의 응력-변형과 지하수침투 해석에 대한 동시해석을 연성해석이라고 하며, 연성해석에 대한 흐름도는 그림 1과 같다.

압밀현상을 나타내는 지배방정식에는 Terzaghi의 일차원 압밀방정식과 Biot가 제안한 다차원 압밀방정식이 있으며, 전자는 연속방정식에 기초하며 후자는 연속 방정식과 평형방정

식을 동시에 고려한다. 본 연구에서 사용한 프로그램 UNICOUP 에서는 Biot의 압밀방정식을 채택하였으며, Biot의 압밀방정식을 유한요소방법으로 해석하기 위하여 사용된 평면요소 모델은 Sandhu의 요소이며, 이 요소에서 간극수압은 4절점 평면요소로써, 변위는 8절점 평면요소로써 표현한다.

2.2 逆解析(Inverse Analysis, Back Analysis)
(2)(5)(9)

단기간의 실측치를 사용하여 연성해석의 역순으로 토질정수를 결정하는 것이 가능한데, 이를 역해석이라고 하며, 역해석에 대한 흐름도는 그림 2와 같다.

역해석은 시간과 침하량의 관측치로부터 지반의 물성을 수치적으로 추정하기 위하여 최소제곱법을 사용한다. 이 때 필요한 입력자료는 현장계측치(시간-침하량곡선), 탄성계수와 투수계수의 초기가정치, 포아송비, 초기간극비, 단위중량 등이며, 반복계산에 의해 현장에서

계측된 시간-침하량을 만족시키는 탄성계수, 투수계수등의 값을 산정한다.

k번째의 반복계산 수식은 다음과 같다.(1)(5)

$$\Delta y^{(k)} \simeq A^{(k)} \Delta x^{(k)} \quad (2-1)$$

여기서, $\Delta y_i^{(k)} \simeq y_i - f(x^{(k)}) = y_i - y_i^{(k)}$

y_i : 현장관측치(침하량)

$y_i^{(k)}$: k번째 반복계산치(침하량)
= $f_i(x)$

$A_{ij}^{(k)} \simeq (\partial f_i(x) / \partial x_j)_{x=x^{(k)}}$

($i=1-n, j=1-m$)

$\Delta x^{(k)}$: k번째 계산에서의 보정치

(k+1)번째의 물성계산치는 $\Delta x^{(k)}$ 로써 구한다.

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \Delta x^{(k)} \quad (2-2)$$

반복계산은 $\Delta x^{(k)}$ 또는 $\Delta y^{(k)}$ 가 충분히 작아질때까지 계속된다.

역해석의 주요과정은 (2-1)식의 구성에 있으며 연립방정식 (2-2)는 $\Delta x^{(k)}$ 에 대하여 계산된다. 계산치 y_i 는 유한요소법 순해석으로 구하며 Δy_i 는 현장계측치로서 입력된 값이다.

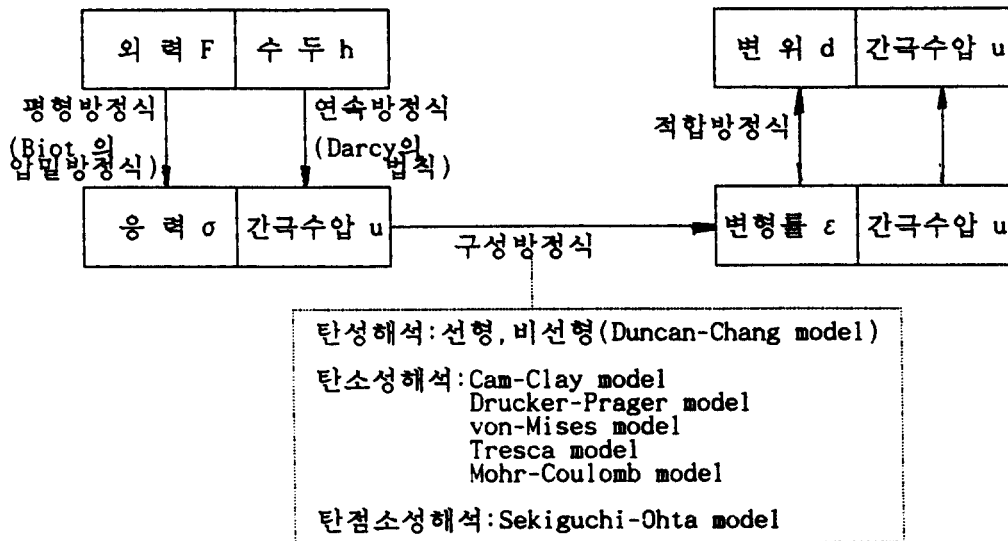


그림 1 연성해석의 흐름도

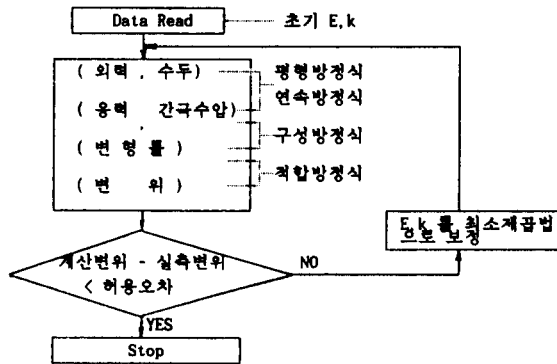


그림 2 역해석의 흐름도

3. 실험

수치해석 결과와 비교하기 위하여 4가지의 시료에 대하여 압밀실험을 실시하였으며, 각 시료의 공학적 특성은 표 3-1과 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.

표1. 시료의 공학적 특성

시 료	A	B	K-8	S-5
액성한계(%)	42	42	85.9	38.9
소성한계(%)	26	26	58.7	26.2
소성지수(%)	16	16	27.2	12.7
비 중	2.64	2.64	2.42	2.61
초기간극비	1.23	1.23	4.75	0.89
초기함수비	44.4	44.4	174	16.9
포 화 도(%)			88.6	49.5
전체단위중량(t/m ³)			1.30	1.90
건조단위중량(t/m ³)			0.47	1.63
압밀배수조건	양면배수	일면배수	일면배수	일면배수
시료채취장소	Kaolinite	Kaolinite	포항해성점토	광주 굴착토
시료 종류	재성형시료	재성형시료	불교란시료	재성형시료

4. 수치해석 및 결과 분석

4.1 탄성해석에서의 민감도 분석

탄성해석에서의 토질정수에 따른 민감도분석을 위하여, 그림 3과 같은 25m 두께의 등방 균질지층을 가정하고 2t/m²의 등분포하중이 재하되었을 경우의, 시간에 따른 지표면침하량과 간극수압의 크기를 구하였다.

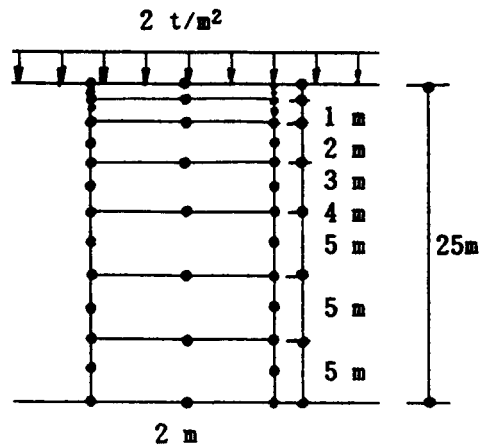


그림 3 일차원 모델

수치해석은 프로그램 UNICOUP를 사용하였으며, 지층은 평면변형조건의 일차원 탄성모델로 해석하였고, 경계조건은 횡방향구속으로 하고 최하단 절점만 변위고정으로 취급하였다. 지하수위는 지표면과 일치하고, 압밀이 진행되는 동안 투수계수는 일정한 것으로 가정하였고, 배수는 지표면으로의 일면배수로 가정하고, 하중재하시간 10^{-3} 일까지는 비배수조건으로 그 이후에는 배수조건으로 취급하였다.

기본적인 각종 계수의 값으로는 탄성계수 $100t/m^2$, 투수계수 $8.64 \times 10^{-4}m/day$, 포아송비 0.333, 초기간극비 0.7, 흙의 단위체적중량 $1.65t/m^3$, 정지토압계수 0.5, 과압밀비 1.0을 사용하였다.

탄성계수, 투수계수, 포아송비의 크기에 따른 지표면의 침하량과 지표면으로부터 3m 깊이에서의 간극수압의 변화량을 구하여, 그림 4-그림 9에 나타내었다.

그림 4와 그림 5는 탄성계수(E)에 따른, 침하량과 간극수압의 시간에 따른 변화를 나타내는데, 전체적으로 탄성계수가 작을수록 침하량이 증가하지만, 재하후 10일정도의 단시간에서는 탄성계수에 관계없이 비슷하게 작은 값이고, 100일 이상의 장시간에서는 탄성계수가 작을수록 절대침하량과 시간에 따른 침하증가율이 커진다는 것을 알 수 있다. 이것은 점토지반 재하후 단시간동안에는 하중을 간극수가 대부분 부담하고, 장시간 후에는 흙입자가 대부분의 하중을 부담하기 때문인 것으로 판단된다. 또 재하 후 단시간동안에는 지반탄성계수가 클수록 과잉간극수압의 소산이 빠르고 탄성계수의 크기에 따라 차이가 크지만, 시간이 1000일 이상 경과하면 간극수압의 크기는 비슷한 값으로 수렴하는 것을 보여주고 있는데, 이는 재하 후 단시간에서는 탄성계수가 작을수록 간극수가 하중을 많이 부담하기 때문인 것으로 생각된다.

그림 6과 그림 7은 포아송비(μ)에 따른, 침하량과 간극수압의 시간에 따른 변화를 나타내는데, 포아송비가 클수록 침하량과 간극수압이

작다는 것을 보여주고 있다. 이는 횡방향 구속 조건에서는 지반의 포아송비가 클수록 비압축성이므로 침하가 작게 일어나고, 흙의 변형저항이 크므로 간극수압이 작기 때문이다.

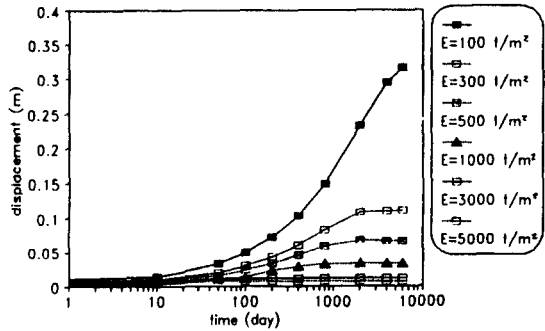


그림 4 탄성계수에 따른 변형량

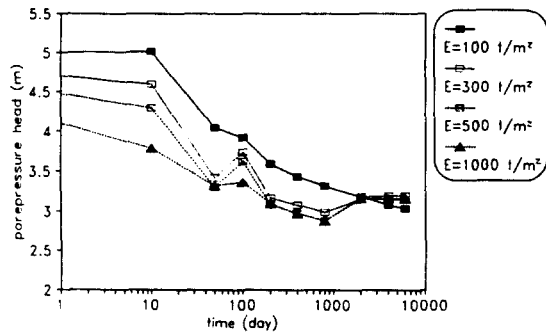


그림 5 탄성계수에 따른 간극수압

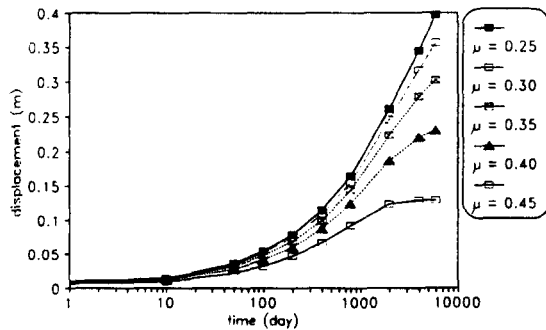


그림 6 포아송비에 따른 변형량

그림 8과 그림9는 투수계수(k)에 따른, 침하량과 간극수압의 시간에 따른 변화를 나타내는데, 투수계수가 클수록 침하가 빨리 완료되지만 최종침하량은 투수계수 크기에 관계없이 거의 일정해진다. 또 투수계수가 클수록 과잉간

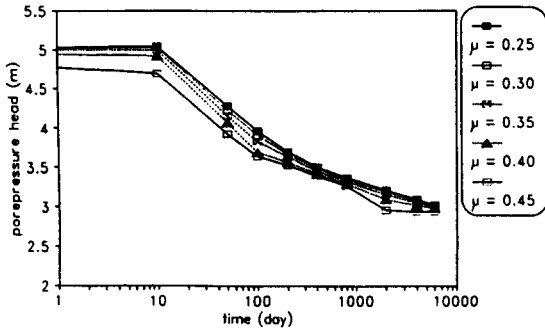


그림 7 포아송비에 따른 간극수압

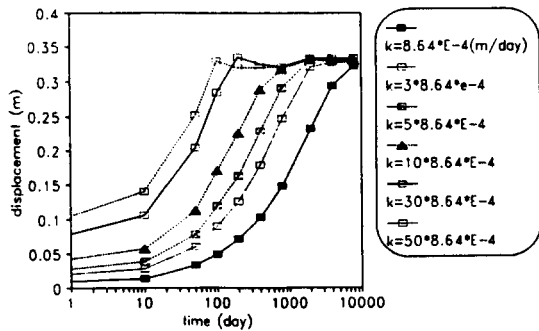


그림 8 투수계수에 따른 변형량

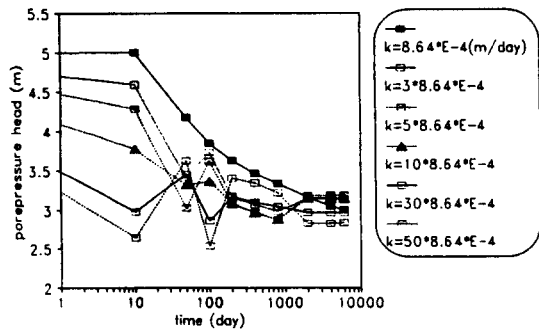


그림 9 투수계수에 따른 간극수압

극수압의 소산은 크지만 최종간극수압은 큰 차이가 없다는 것을 알 수 있다.

전체적으로 탄성해석에 있어서, 지반의 탄성계수에 따른 침하량과 간극수압의 민감도가 가장 크다고 할 수 있으므로 탄성계수의 산정은 중요하며, 상재하중이 클수록 지반탄성계수의 산정을 정확히 하여야 한다.

4.2 역해석에 의한 토질정수의 산정

역해석은 민감도가 비교적 큰 탄성계수와 투수계수의 초기치를 가정하고 탄성해석하여 변위량을 구하고, 압밀실험에서 구한 실측치와 비교하여 오차를 구하며, 허용오차범위에 올 때까지 탄성계수와 투수계수를 변화시켜 반복 계산하여, 정확치를 구한다. 여기에서는 압밀하중 0.1kg/cm² 단계에서 0-1440분 동안의 실측치를 사용하여 역해석을 실시하고, 그 결과를 사용하여 압밀하중 0.1-12.8kg/cm² 단계, 시간 1440-10080분까지의 탄성해석을 실시하였다.

역해석 및 탄성해석에 사용한 모델은 그림 10과 같이 8개의 요소와 43개의 절점으로 구성하여 평면변형조건으로 해석하였고, 하중은 등분포하중으로 취급하였다. 시료는 정규압밀점토로 가정하고 투수계수는 하중재하에 관계없이 일정한 것으로 가정하였다.

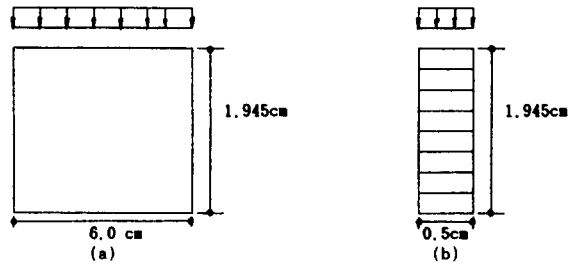


그림 10 역해석을 위한 모델

그림 11은 역해석에 의한 탄성계수의 산정을 나타낸 것인데, 시료 A, B, K-6, K-7는 초기

탄성계수를 $100\text{kg}/\text{cm}^2$ 으로 가정하고, 시료 K-8의 초기탄성계수는 $10\text{kg}/\text{cm}^2$ 으로 가정하였다. 초기가정치가 같더라도 흙의 특성에 따라 최종탄성계수의 수렴치는 차이가 발생하였고, 초기가정치는 크게 차이가 있지만 최종치의 차이는 크게 줄어들었으며, 초기치를 부정확하게 가정할수록 반복회수가 증가하였음을 알 수 있다. 그림 12는 역해석에 의한 투수계수의 산정을 나타낸 것인데, 여기서도 마찬가지로 초기가정치와 최종치의 차이가 클수록 반복회수가 증가함을 알 수 있다.

유사한 시료들의 탄성계수와 투수계수의 최종치의 차이가 크게 생긴 것은, 구하고자 하는 미지의 토질정수는 두개인데 비하여 초기 실측치의 부족 및 실측치의 부정확성때문인 것으로 생각된다. 따라서 역해석에서의 반복계산 회수를 줄이고 더욱 좋은 결과를 얻기 위해서는, 초

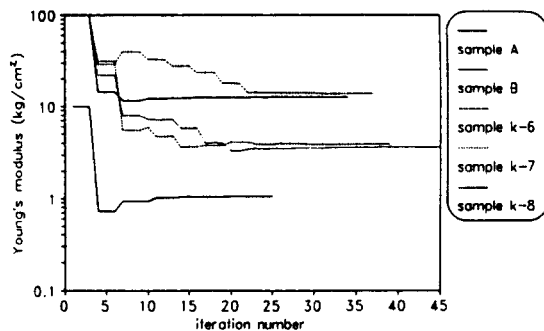


그림 11 탄성계수에 대한 역해석

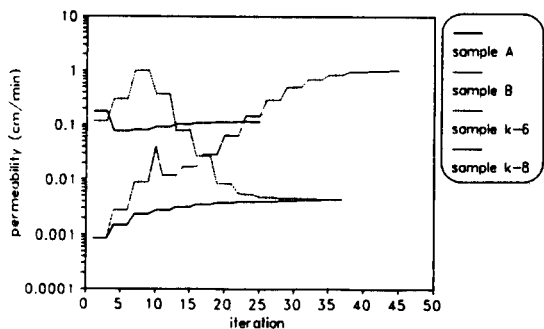


그림 12 투수계수에 대한 역해석

기치 실측 절점의 갯수를 증가시키고 초기 실측치의 더욱 정확한 산정이 필요하다고 할 수 있다.

4.3 실험 결과와의 비교 및 분석

역해석에서 얻은 토질정수(탄성계수, 투수계수)를 사용하여 탄성해석한 결과와 압밀실험 결과를 그림 13-그림 16에 표시하였다. 각각의 그림은 시료 A, B, K-8, S-5의 시료 상단에서의 변형량에 관한 것으로, 압밀하중은 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 3.2, 6.4, $12.8\text{kg}/\text{cm}^2$ 을 가하였고, 각각의 하중에 대하여 24시간(1440분)씩 압축량을 측정하였다. 그림에서 일정한 간격으로 변위량이 계단식으로 증가하는 점이, 압밀하중을 증가시키는 시점을 나타낸다.

시간이 작을 때 즉 압밀하중이 작을 때는 실험치와 탄성해석치가 근사한 값을 보여주고 있고, 시간이 경과할수록 즉 압밀하중이 증가할수록 탄성해석치가 더 큰 값을 나타내는 경향을 보여주고 있다. 이것은 실험치에서는 압밀하중이 증가할수록 또 재하시간이 증가할수록, 간극비 감소로 인한 탄성계수의 증가와 투수계수의 감소 효과에 의하여 변형증가율이 감소하는데 비하여, 탄성해석에서는 탄성계수와 투수계수를 항상 일정한 것으로 가정하였기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 탄성해석시 하중단계별로 변화하는 탄성계수와 투수계수를 사용하면 실험치와 탄성해석치가 더욱 근사한 값을 나타낼 것이다.

시료 A, B, S-5에서는 단계적 하중 증가 직후 단기간 동안만 변형이 증가한 후 일정한 값을 나타냈지만, 시료 K-8에서는 비교적 오랫동안 변형량이 증가하였다. 이는 시료 K-8의 소성지수가 다른 시료에 비하여 크기 때문에 creep효과가 크게 발생하였기 때문인 것으로 여겨진다.

전체적으로 말하면, 작은 하중단계에서의 짧은 시간의 실측치를 이용한 역해석을 통하여 토질정수를 산정함으로써, 비교적 단순한 탄성

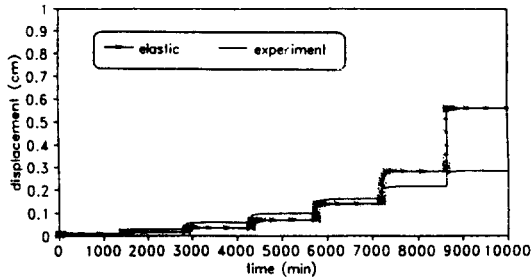


그림 13 시료 A에 대한 탄성해석결과와 실험결과와의 비교

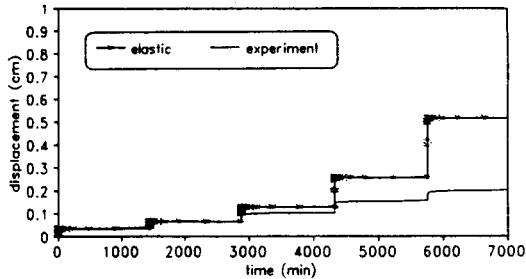


그림 14 시료 B에 대한 탄성해석결과와 실험결과와의 비교

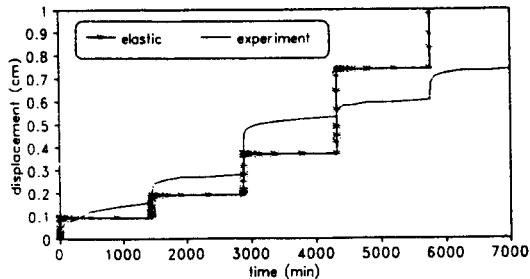


그림 15 시료 K-8에 대한 탄성해석결과와 실험결과와의 비교

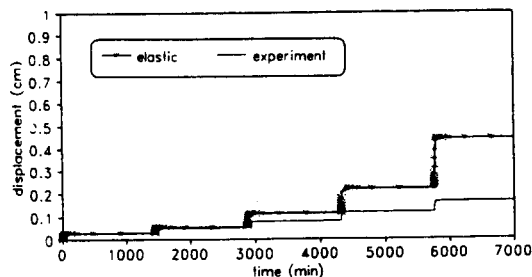


그림 16 시료 S-5에 대한 탄성해석결과와 실험결과와의 비교

해석을 통하여서도, 더욱 큰 하중재하시 또 장기간의 변형량을 실제와 가깝게 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

1. 탄성해석에 있어서, 지반의 탄성계수에 따른 지반변형량과 간극수압의 민감도가 비교적 크게 나타나므로, 탄성계수의 산정은 매우 중요하며, 재하하중이 클 수록 탄성계수의 산정을 정확히 하여야 한다.
2. 역해석에서의 반복계산 횟수를 줄이고 더 좋은 결과를 얻기 위해서는, 초기치 실측 절점의 갯수를 증가시키고 초기 실측치의 더욱 정확한 산정이 필요하다.
3. 역해석에서 얻은 토질정수를 사용하여 탄성해석한 결과와 암밀실험 결과를 비교한 결과, 암밀하중이 작을 때는 실험치와 탄성해석치가 근사한 값을 나타내었고, 시간이 경과할수록 즉 암밀하중이 증가할수록 탄성해석치가 다소 큰 값을 나타내었다.
4. 작은 하중단계에서의 짧은 시간의 실측치를 이용한 역해석을 통하여 토질정수를 산정함으로써, 비교적 단순한 탄성해석을 통하여서도, 더욱 큰 하중 재하시 또 장기간의 변형량을 실제와 가깝게 예측할 수 있다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 김우철 외 8인(1990), 현대통계학, 영지문화사, 216-247p.
2. 太田, 良峰(1985), "탄점소성 유한요소법 해석에 따른 입력 parameter의 결정법", 제20회 일본토질공학연구발표회, 名古屋.
3. Akai, Ohnishi and Murakami(1979), "Cou-

- pled stress flow analysis in saturated-unsaturated medium by finite element methods", Third international conference on numerical methods in geomechanics, Archen., 241 - 249p.
4. Atkinson, J.H. and Bransby, P.L.(1978), The mechanics of soils: An introduction to critical state soil mechanics, McGraw-Hill, London.
 5. Century Research Center(1988), "User manual of unified normal and inverse stress and seepage flow coupling analysis program", Japan.
 6. Chen. W.F. and Baladi, G.Y.(1985), Soil plasticity: Theory and Implementation, Elsevier.
 7. Desai, C.S. and Siriwardane, H.J.(1984), Constitutive laws for engineering materials, Prentice-Hall, New Jersey.
 8. Lewis, R.W. and Schrefler, B.A.(1986), The finite element method in the deformation and consolidation of porous media, John Wiley & Sons, New York.
 9. Ohta, H. and Iizuka, A.(1987), "A determination procedure of input parameters in elasto-viscoplastic finite element analysis". Soil and Foundations, Vol.27, No.3. 71-87p.
(접수일자 1992. 9. 23)