

역해석 수법과 현장계측에 의한 비선형 구성법칙 결정에 관한 기초적인 연구 Preliminary Study for Estimation of Nonlinear Constitutive Laws by using Back Analysis and Field Measurement

이재호¹⁾, Jae-Ho Lee, 아쿠타가와 신니치²⁾, Shinichi Akutagawa, 김영수³⁾, Young-su Kim,
사쿠라이 순슈케⁴⁾, Shunsuke Sakurai, 김광일⁵⁾, Guang-Ri Jin, 김낙영⁶⁾, Nag-Young Kim

- 1) 경북대학교 토목공학과 박사 후 연구원, Post-Doctoral Researcher, Dept. of Civil Engineering, KyungPook National University.
- 2) 일본 고베대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Architecture and Civil Engineering, Kobe University, Japan.
- 3) 경북대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Kyungpook National University.
- 4) 일본 건설공학연구소, Construction Engineering, Res. inst., Japan.
- 5) 경북대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Kyungpook National University.
- 6) 한국도로공사, 도로교통기술원 책임연구원, Chief Researcher, Research & Development center, Korea Expressway Corporation.

SYNOPSIS : Currently in increasing number of urban tunnels with small overburden are excavated according to the principle of the New Austrian Tunneling Method (NATM). Successful design, construction and maintenance of NATM tunnel in urban area demands prediction, control and monitoring of surface settlement, gradient and ground displacement with high accuracy. Use of measured displacement for parameter determination has been researched over the years, and one geotechnical engineering principle has been formed as back analysis. In this paper, back analysis of a ground deformational behavior involving nonlinear behavior is discussed. It is of primary importance to make reliable prediction of deformational behavior for shallow tunnels in soft ground. However, predictions made often prove to be incorrect due to complexity of constitutive law and other relevant factors. Back analysis therefore becomes more important, for it may be used to interpret measured displacement to derive nonlinear material characteristics. The paper shows some example in which a deformational mechanism is studied in the light of inhomogeneous distribution of Young's module, from which a logic is derived to identify two different types of nonlinear constitutive relationships.

Key words : NATM tunnel, back analysis, nonlinear material characteristics, prediction

1. 서론

터널, 지하대공동 등의 굴착 문제에서 사전에 입수 가능한 정보의 양과 질에는 한계가 있으며 설계단계에서 실시하는 수치해석은 개략적인 변형과 응력 경향을 파악하는 정도로 끝나는 경우가 많다. 실제 굴착 문제에서 발생하는 변위, 변형률, 응력분포 등은 계측데이터와 역해석기법을 통해서 평가하고, 동시에 안정성의 확인과 설계의 타당성을 확인하는 작업이 이루어지는 정보화시공이 행해지고 있다. 지하공간의 굴착문제와 관련된 정보화시공은 Sakurai 등(1982)에 의해서 제안된 역해석수법을 통해 다양한 종류의 문제에 적용과 개발이 수행되어져왔다. 역해석기법은 굴착에 따른 지하공동 주변의 지반이 탄성

거동을 나타낸다는 가정을 바탕으로 기본적인 접근이 제시되어졌으며, 이방성, 탄소성, 일반적 비선형성 등과 같은 보다 복잡한 상황에 대응할 수 있도록 발전하였다 (Sakurai 등, 1994; Sakurai 등, 1995; Akutagawa 등, 1998; Okuda 등, 1999; Sakurai 등, 2000).

일반적으로 역해석기법은 계측된 시점에서의 터널 주변 변형률과 응력 분포 그리고 선형 물성치를 평가하여, 관리기준치인 한계변형률을 통해 안정성을 파악하는데 이용되어져 왔다. 하지만, 역해석기법을 통해 다음 단계의 굴착에 있어서 터널과 주변 지반이 어떻게 거동(반응)하는지와 같은 예측능력에 대해서는 아직까지 충분한 결과를 얻지 못하였다.

본 논문에서는 지하공동의 굴착에 대한 지반 변형거동이 비선형성을 나타낸다는 것을 전제로 변위 계측과 함께 실시된 역해석 결과로부터 지반재료의 역학특성을 명확히 함과 동시에 다음 단계의 굴착에 대한 지반과 터널의 거동에 대한 예측성능을 향상시키는 것을 검토하였다.

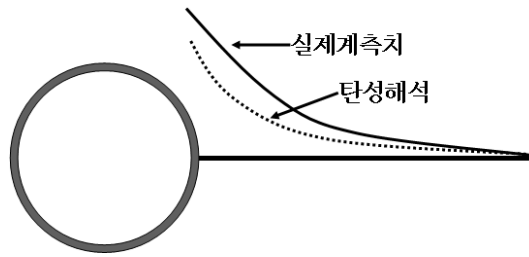


Fig. 1 Nonlinear displacement profile and trial approach

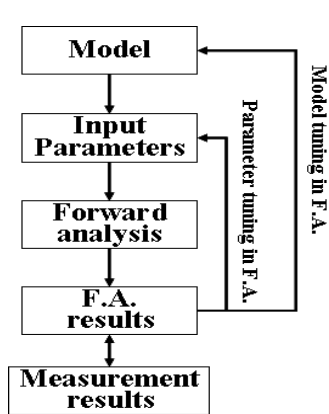


Fig. 2 Parametric study based on forward analysis

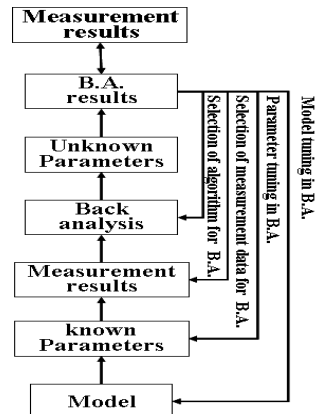


Fig. 3 Parametric study based on back analysis

2. 비선형 굴착 문제에서 역해석수법의 성과와 과제

2.1 비선형문제에서 역해석에 대한 일반론

비선형 굴착문제에서의 일반적인 변위계측결과를 Fig. 1의 실선에 나타내었다. 계측 데이터가 얻어진 경우에 기술자는 상당히 높은 정확도로 문제의 비선형성을 인식하게 된다. 이런 경우에 제 1 근사해로서 탄성모델을 이용한 순해석을 행하면 파선 1과 같은 결과를 얻게 된다. 탄성모델을 이용한 근사해가 충분하지 않다는 것은 명백하고, 실제 지반의 비선형성을 고려할 수 있는 수치해석법을 이용하여 파선 2,...,N 등을 구하는 매개변수 해석을 수행하는 것은 일반적이다. Fig. 2는 앞에서 설명한 순해석을 기본으로 한 매개변수 해석에 대한 개요도로서 계측치와 해석값의 오차율이 어느 값이 내에 구속한다면 정

도(精度)로 높은 현장 거동을 설명할 수 있다고 생각된다. 해석모델 설정을 명확하게 할 수 있는 경우에는 이런 순해석을 기본으로 접근이 가능하다. 하지만, 대부분의 경우에는 해석모델 설정을 위한 중요한 정보가 부족하거나 미지의 지반재료의 특성치가 많은 문제에 직면하게 된다. 이런 경우에는 정한 미지수를 구하기위해서 계측데이터와 역해석 프로그램을 이용해서 해결하는 방법이 이용된다. Fig. 3은 역해석을 기본으로 한 접근방법을 나타낸 것이다. Fig. 3과 같은 역해석 방법에서 재료의 미지수에 대한 정보가 부족한 경우에는 Fig. 2와 같은 매개변수를 수행하게 된다.

2.2 비탄성 변형률의 개념을 이용한 방법

Fig. 2와 3에 통해 굴착거동을 정도 높게 성공하기 위해서는 처음에 수행되어지는 모델설정이 중요함을 알 수 있었다. 하지만, 복잡한 지반조건에서 모델 설정을 실시하는 것은 쉽지가 않다. 암반의 비선형 거동은 소성, 균열, 파쇄대의 존재, 재료특성의 비균질성 등 많이 원인으로 이루어진다. 이러한 모든 요인들을 현지조사를 통해 사전에 정도 높은 해석 모델을 구축하는 것은 어려운 문제이다. 직접적 원인을 구체적으로 언급하지 않고, “최종적으로 비선형의 거동을 만들어내는 범용적 메커니즘”을 계측변위에서 결정할 수 있다면, 지하공동 주변의 변형률분포를 구하는 것은 유효하다고 생각되어진다. “범용적 메커니즘”이란 “지반이 탄성거동을 나타내는 것이라고 생각한 경우, 가상적인 외력을 도입해서 실제의 변위장을 재현한다면, 지반의 어느 곳에, 어느 정도의 가상외력을 도입하면 좋을까”라는 것이다. Sakurai 등(1994), Sakurai 등(1995) 그리고 Akutagawa 등(1998)은 이러한 상황에서 계측변위에서 변형률분포를 합리적으로 구하기 위한 비탄성 변형률 개념을 도입한 역해석기법을 개발하였다. Fig. 4는 비탄성 변형률 개념을 나타낸 개요도이다. 이러한 방법은 이하와 같은 형식에서 그 기본개념을 설명하는 것이 가능하다.

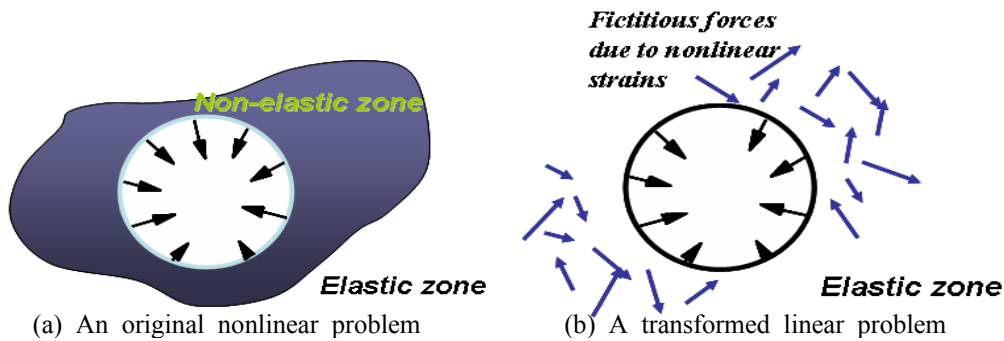


Fig. 4 concept of nonlinear strain

지금, 굴삭에 따른 응력증분, 변형률 증분을 각각 $\Delta\sigma$, $\Delta\epsilon$ 로 하고, 양자를 링크하는 비선형구성관계를 식 1와 같이 나타낼 수 있다. 식 (2)는 식 (1)를 소성변형률 증분항을 통해 표현한 것이다.

$$\Delta\sigma = D_{eq}\Delta\epsilon \quad (1)$$

$$\Delta\sigma = D_e\Delta\epsilon_e = D_e(\Delta\epsilon - \Delta\epsilon_p) \quad (2)$$

여기서, D_e 은 탄성 응력-변형률 매트릭스, $\Delta\epsilon_e$ 은 탄성 변형률증분, $\Delta\epsilon_p$ 은 비탄성 변형률증분이고, $\Delta\epsilon$ 은 $\Delta\epsilon_e$ 와 $\Delta\epsilon_p$ 를 합친 것을 의미한다. 식 (1)과 같은 비선형 구성식은 유한요소의 정식화에 필수적이지만, 역해석 알고리즘을 구성하는데 있어서 복잡하므로 다른 식으로 전환하는 것이 필요하다. 비선형 변형률에 관여하는 항은 식 (3)과 같이 가상하중을 고려한 구성식으로 다루는 것이 가능하다

$$\int_u B' D_e \Delta\epsilon dv = R + \int_{up} D_e \Delta\epsilon_p dv \quad (3)$$

여기서, B는 변위-변형률 매트릭스, 적분영역 v 은 전 해석영역, v_p 은 비탄성 거동에 해당되는 영역을 표시한다. 식 (3)에서 우변 제 2항은 비선형 변형률의 발생에 대응하는 가상외력(등가 가상외력)을 나타내고 있음을 알 수 있다. 등가 가상외력은 해석 영역의 요소마다 비탄성 변형률 크기가 다르므로 독립한 미지수로서 취급하게 된다. 결과적으로 굴착문제에 따르는 암반 변형문제는 비탄성 변형률을 하중항으로서 빼왔기 때문에 선형화된 가상암반에 복수의 외력군(실제의 외력과 비탄성 변형률에 상당하는 가상외력)이 작용한다는 문제로 바꾸어 볼 수 있다(Fig. 5). 굴착에 의해 발생하는 변위를 Δu 라고 하면, 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

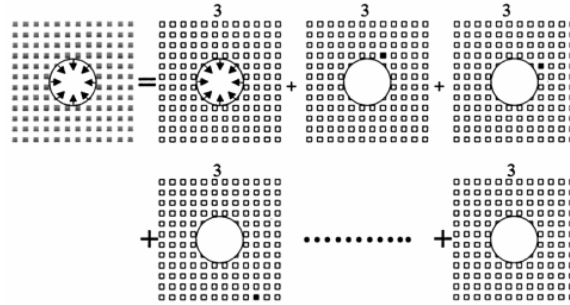


Fig. 5 Superposition of displacement field for a linearized problem

$$\Delta u = \sum_{i=1}^{3-3N} \Delta u_i x_i \quad (4)$$

여기서, N은 다른 비탄성 변형률을 정의하는 영역의 수를 나타낸다. 미지수 x_i 에 대해서는 최초의 3개가 초기응력에 관한 것이며, $3N$ 은 비선형 변형률을 의미한다. Δu_i 는 x_i 가 1인 경우의 변위 벡터를 나타낸다. 실제의 변위장이 복수 변위장을 선형으로 합쳐서 이용하면, 계측변위로부터 미지수 벡터를 구하는 것이 가능하다. 여기서 미지수의 수가 계측변위데이터를 상회하는 것이 많기 때문에 norm 최소화법(Sakurai 등, 1995; Gao 와 Mura, 1992)을 이용하고 있다.

2.3 역해석 결과의 2차처리를 포함한 반복계산

norm 최소화법에 의해 미지 벡터를 결정할 수 있기 때문에 식 (4)로부터 전체 변위장을 계산하는 것이 가능하다. 변위장과 응력장을 구하는 것이 가능하기 하므로 이 단계에서 한계변형률의 관리기준치를 통해 굴착된 주변 지반의 안정성을 평가하는 것이 가능하게 된다. 하지만, 이 단계에서의 역해석기법에는 개선해야할 점이 있다. 많은 미지수가 norm최소화법에 의해 구해지고 있기 때문에 변위계측 부근에 변형률이 집중되어 있으며, 변위가 계측되지 않은 부근에서는 재현성이 떨어지는 단점을 나타내었다. 또한, 계산된 단계에서의 계측변위는 어느 정도 재현하고 있지만, 그때의 정보가 암반 재료정수와 직접 관계하고 있는 것은 아니므로 이 후 굴착과정을 예측할 때 역해석 결과를 유효하게 이용하는 것은 어렵다는 점이다. 이러한 점을 개선하기 위해서는 1) 계측변위의 재현능력을 손상시키지 않고, 2) 비탄성거동이 암반의 물성에 연결되는 구조를 만들어서, 3) 이 후의 굴착과정을 예측할 때의 정도가 향상하는 방법론을 구축하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 norm최소화법으로 구한 역해석결과를 2차적으로 처리하는 것으로 위의 목적에 관한 기초적인 시험 및 검토를 수행하였다. 다음과 같은 두 가지 점을 고려하였다.

- ① 첫째는 비탄성거동이 발생한 원인은 탄성계수의 불균일성이 원인이다.
- ② 암반의 불균일한 탄성계수분포를 바르게 파악하면 계측변위를 재현할 수 있다

Fig. 6에서 굴착에 따른 응력과 변형률 관계가 실선의 루트를 따라서 현재 위치(O)에 도달했다고 한다. 이 때, 역해석의 시작단계에서 탄성계수 E 를 이용하고 있기 때문에 실제의 변형을 재현하기 위해서

가상하중(비탄성 변형률)이 존재하는 상태가 필요하다. 즉, 탄성계수 E 를 E_{eq} 로 변경하면, 저감된 탄성계수에 의해 가상하중의 도움을 받지 않아도 계측변위를 재현하는 것이 가능하게 된다. 이와 같은 해석적인 방법론을 고려하기 위해 탄성계수를 각 요소 i 마다 정의하는 것으로 하고, 탄성계수 저감율 A_i 를 식 (5)와 같이 최대 전단변형률비로 정의하는 것을 가정한다.

$$A_i = \frac{E_{ep}}{E} = \frac{\Delta\epsilon_e}{\Delta\epsilon_e + \Delta\epsilon_p} = \frac{\Delta\gamma_{max e}^i}{\Delta\gamma_{max}^i} \quad (5)$$

여기서, $\Delta\gamma_{max e}^i$ 은 i 번째 요소의 탄성 최대전단변형률, $\Delta\gamma_{max}^i$ 은 i 번째 요소의 전 최대 전단변형률을 나타낸다. 식 (5)에 의한 탄성계수의 변경은 1회로 최종치를 얻는 것이 불가능하기 때문에 오차율이 수렴될 때까지 반복계산을 수행한다. 해가 수렴한 단계에서 Fig. 7에 표시한 것 같은 비균질한 탄성계수 분포가 얻어지게 된다. Fig. 8은 역해석 프로그램의 과정을 나타낸 것이다.

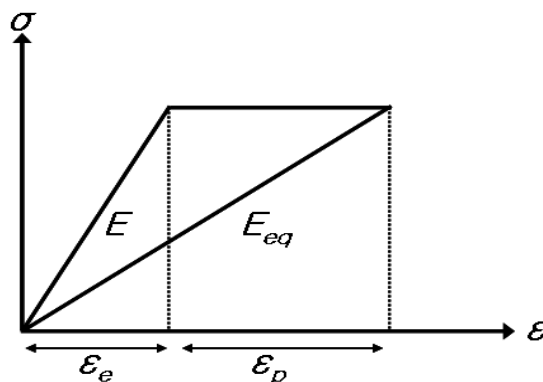


Fig. 6 Definition of equivalent Young's modulus

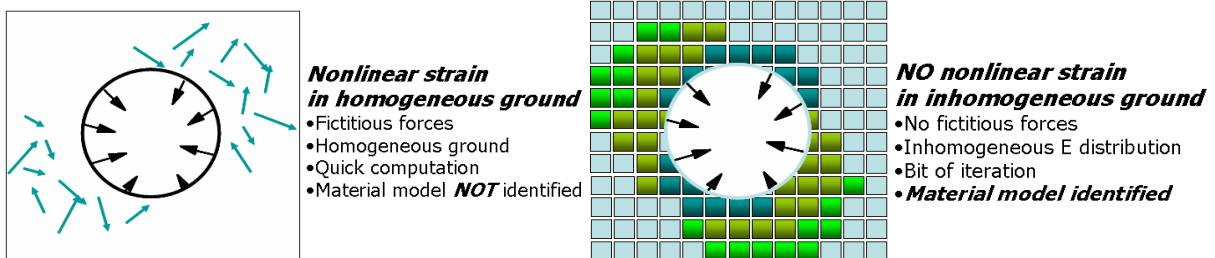


Fig. 7 Transformation of an original problem (above) to new problem(below) by secondary processing of back analysis results

3. 역해석결과에서 재료의 역학특성을 구하는 방법 1

3.1 비선형탄성구성칙을 정의하는 방법

Fig. 8의 반복형 역해석이 종료한 시점에서는 계측된 변위장이 거의 100%재현되어 있기 때문에 그때의 변형률분포 등으로 현 굴착단계의 안전성 평가 등이 가능하게 된다. 하지만, 예측정도의 향상을 위해서는 재료의 역학특성에 관한 정보를 평가할 필요성이 있다. 역해석 결과에서 재료의 역학특성을 구하기 위한 첫 번째 방법으로서 비균질한 탄성계수의 분포에서 비탄성 구성칙인 Duncan-Chang 모델(Fig. 9)의 물성치를 구하는 것을 실험해보았다. Fig. 9에서 Duncan-Chang 모델의 응력과 변형률 관계가 전

단응력 t , 전단변형률 r 로 표현하면 식 (6)과 같음을 알 수 있다. 이 때 전단강성 G 는 식 (7)과 같다.

$$\tau = \frac{\gamma}{b' + a'\gamma} \quad (6)$$

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{b'}{(b' + a'\gamma)^2} \quad (7)$$

역해석의 결과로서 얻어진 응력과 변형률 데이터를 통해 식(6)와 (7)에 정의된 구성식의 물성치를 찾는 것이 가능하다. 즉, 비균질한 탄성계수 분포에 가장 적절한 물성치를 구하는 것과 같은 논리임을 알 수 있다. 대상이 되는 암반의 영역은 광범위하므로 다른 종류의 비선형 탄성 구성식을 정의하는 것도 가능하지만, 본 논문에서는 가장 기본적인 단계로서 암반의 변형거동을 설명하는 유일한 구성식으로 식 (6)과 (7)를 고려하였다.

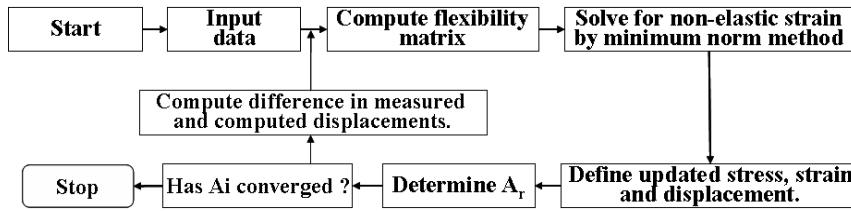


Fig. 8 Flowchart of the iterative back analysis

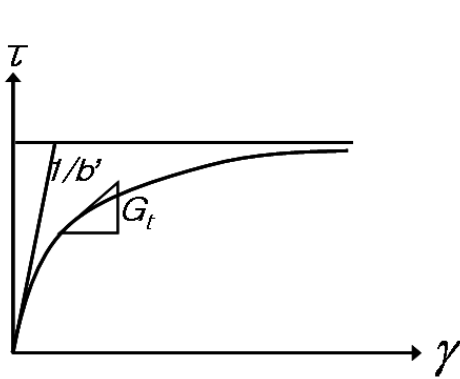


Fig. 9 Shear stress versus shear strain relationship derived from Duncan-Chang model

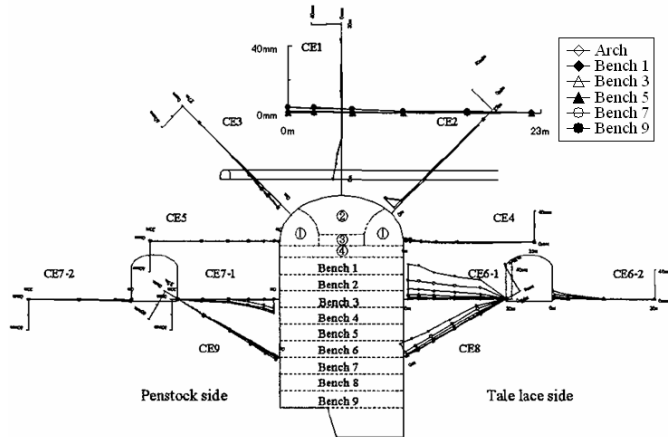


Fig. 10 Results of displacement measurement

3.2 대공동 굴착문제에서의 적용 예

적용된 지하공동은 토피가 약 300m이며, 보통암 이상의 양호한 암반 중에 폭 24m, 높이 47m, 길이 135m 규모의 공동으로서 굴착된 것이다. Fig. 10은 지하발전소대공동에서의 변위계측결과를 나타낸 것이다. Fig. 11은 제안된 역해석 방법을 적용하기 위한 유한요소 매쉬를 나타낸 것이다. 지하공동 굴착에 의한 비탄성 영향을 Fig. 중에 굵은 선으로 나타내었다. 이것은 미지수를 최소한으로 하기 위한 방법이며, 이용하는 컴퓨터의 용량이 충분하면 전 영역에서 비탄성거동이 발생한다고 가정하여도 상관없다.

암반의 기본 물성과 초기응력의 계측결과 등은 참고문헌(10, 11)에서 기술하고 있기 때문에 본 논문에서는 제안한 방법과 결과만을 기술하였다. 첫 번째로 굴착한 단계에서 입수된 계측변위를 사용하여 비균질한 탄성계수분포를 구하였다. Fig. 12 (a)는 3단계 Bench 굴착이 종료한 시점에서의 변위를 통해 역해석을 실시한 결과이다. 본 논문에서 제안하는 방법을 이용하지 않고 기존의 역해석 기법에서 구한

탄성계수와 초기지중응력을 가지고, 굴착완료 단계에서의 변형거동을 예측하면 Fig. 12 (b)와 같다. Fig. 12(a)에서 얻어지는 역해석 결과를 이용해서 식 (6)를 결정한 경우 먼저 전단강성과 최대 전단변형률의 관계가 Fig. 13와 같이 얻어진다. 최소자승법으로 구한 회귀곡선은 Fig. 13에 표시한 것과 같다.

Fig. 13에서 구한 물성치와 식 (6)의 구성식을 이용해 최종 단계를 예측하면 Fig. 12 (c)와 같은 변형률분포를 얻는다. Fig. 12 (c)에서 공동 우측벽 하부주변에 변형률의 큰 영역이 출현하는 것이 예측되어 있다. 이것은 최종적인 단계에서 모든 계측변위에서 구한 가장 신뢰도가 높은 변형률 분포도를 나타낸 Fig. 12 (d)를 잘 표현됨을 알 수 있다. Fig. 14는 5단계 Bench 굴착 종료 후의 계측데이터로부터 같은 방법을 통해 얻은 결과를 비교한 것이다. Fig. 12와 14를 통해 본 논문에서 제안하는 방법이 최종 단계에서의 변형거동을 어느 정도 예측 가능함을 알 수 있다.

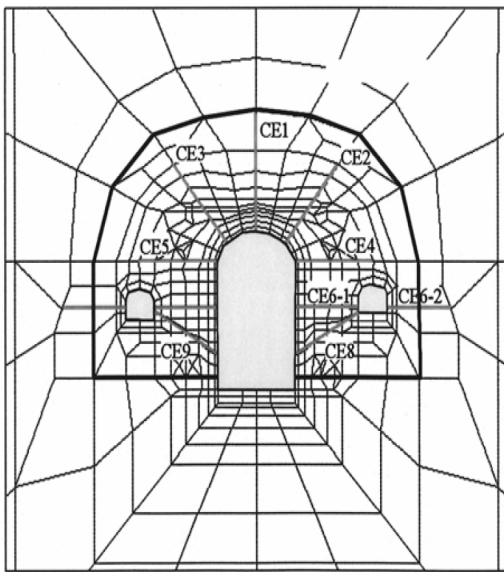


Fig. 11 Finite element mesh used for back analysis

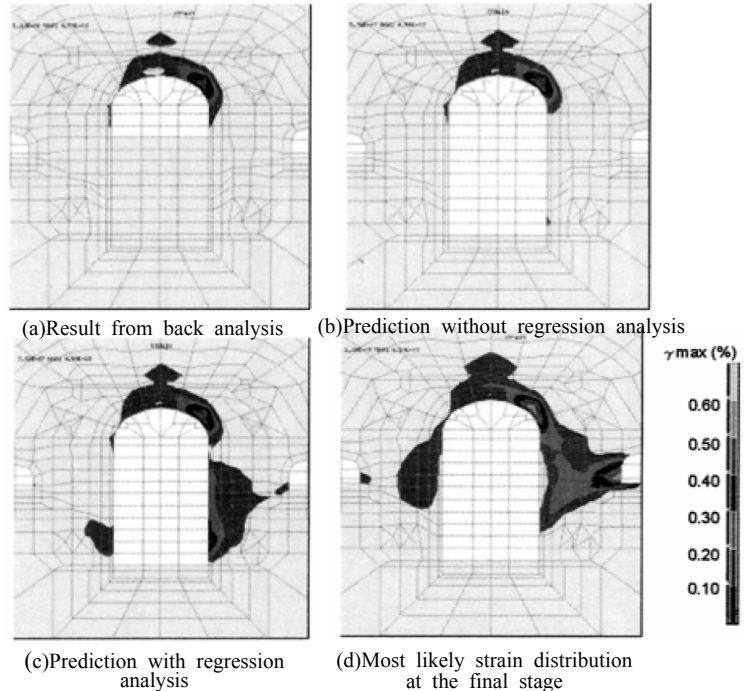


Fig. 12 back analysis at the end of Bench 3 excavation

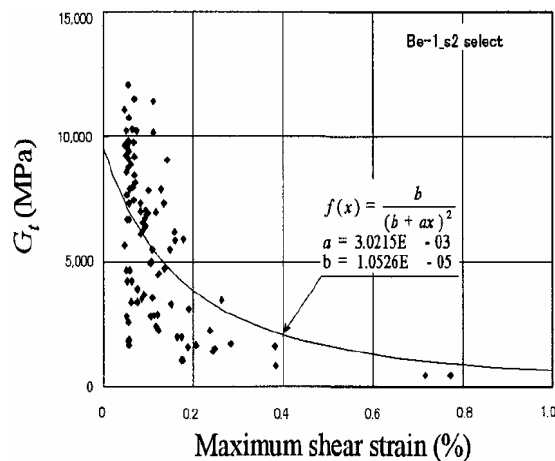


Fig. 13 Identification of a Duncan-chang model by least square regression

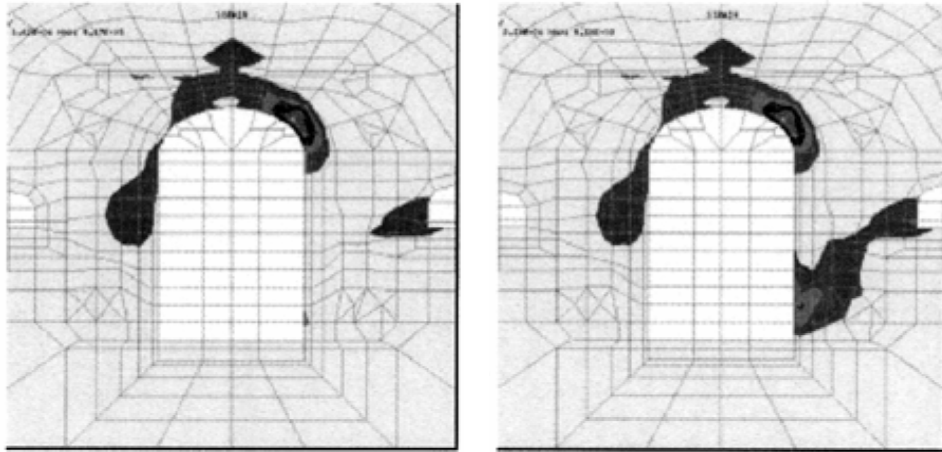


Fig. 14 Prediction of strain distribution at the final stage without (left) and with(right) the identified constitutive law at Bench 5 excavation. Grey scale is the same as for Fig. 12

4. 역해석 결과에서 재료의 역학특성을 구하는 방법 2

4.1 변형률 연화특성을 표현하는 방법론

Fig. 8에 나타난 역해석 방법에 있어 어떤 구성식을 적용할 것인지에 대한 정확한 답은 없다. 즉, 본 방법에서 구한 값이 유일해를 나타내는 것은 아니다. 본 장에서는 3장의 비선형 탄성 구성식을 달리하여 변형률 연화거동을 나타내는 변형메커니즘에 대해 연구를 수행하였다.

Fig. 15에 토피가 얇은 NATM 터널 주변에 발생하는 전형적인 변형률 분포를 나타낸다. Fig. 15와 같은 터널 측벽부에서 지표면에 걸쳐 발달하는 전단 변형률이 탁월한 영역이 존재하는 도시 NATM 특유의 변형 모드를 나타내기 위해서 Shinichi(2006) 등은 이방성 손상 파라메타 m 과 잠재적 미끄러진 면에서의 Coulomb 파괴기준을 고려한 변형률 연화 모델을 제안하였다. 변형률 연화모델에서는 Fig. 16과 같이 이방성 손상 파라메타 m 을 전단변형률 증가에 따라 감소시키는 것과 같이 잠재적 미끄러진 면(Fig. 17 참조)에 Coulomb 파괴기준식을 적용해서 강도 파라메타를 변형률 증가와 같이 잔류치까지 감소시키는 수법을 취하고 있다.



Fig. 15 Typical strain distribution for a shallow NATM tunnel.(This Figure is shown only to show location of strain concentration)

4.2 변형률 연화특성의 동정을 시험하기 위한 문제 설정

본 절에서는 여기에서 소개하고 있는 변형률 연화모델로 가상의 계측데이터를 작성하기로 한다. 이것을 가상계측변위로서 제안하는 비균질 역해석 수법으로 역해석을 실시하여 그 결과로부터 어느 정도 변형률 연화 특성을 동정할 수 있는지를 검증한다.

수치계산 예에 이용한 유한요소 매쉬를 Fig. 18에 나타낸다. 터널지름 D는 10m로 하고, 토피H는 1D로 했다. 좌우의 연직경계는 수평변위를, 하부경계는 연직변위를 구속했다. Table 1에 표시한 입력데이터를 이용해서 가상의 계측데이터를 작성했다. 계측 데이터를 정의한 장소는 Fig. 18에 도시하고 있다. 계측라인 6, 7은 동일한 곳에 있지만, 한 쪽은 신축변위, 다른 한 쪽은 회전변위를 계측하는 것을 의미한다. 그 외의 라인에서는 신축변위를 계측하기로 한다.

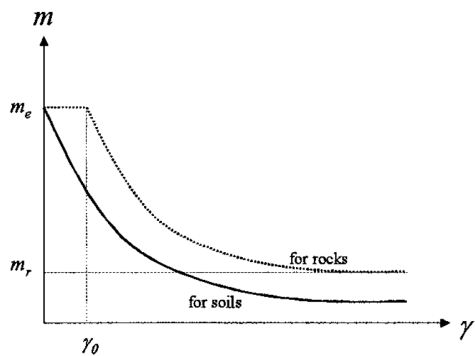


Fig. 16 Anisotropy parameter m versus shear strain

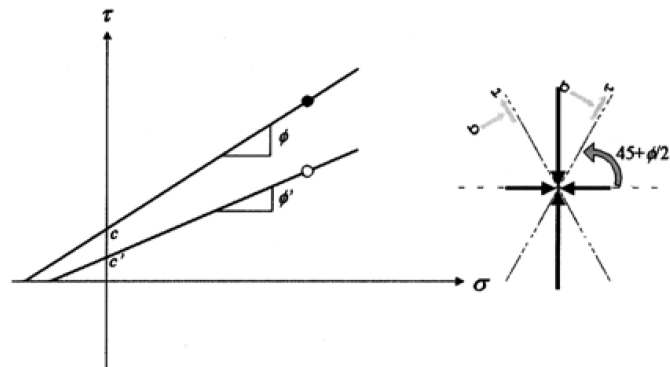


Fig. 17 Conjugate slip planes and reduction of strength parameters

4.3 변형률분포의 동정

Fig. 18에 도시되어 있는 변위계측개소의 데이터를 전부 이용해서 역해석을 했다. 비교를 위해서 비탄성변형률을 구하는 것만으로 끝낸 역해석 결과도 같이 Fig. 19에 표시했다.

변형률 연화모델에서 얻은 “진짜 변형률 분포(Fig. 19a)”에 대해 비탄성변형률을 구하는 것만으로 끝낸 것(Fig. 19b)보다도 비균질 탄성계수분포를 구한 것(Fig. 19c)이 정도 좋게 변형률을 분포를 동정할 수 있다고 말할 수 있다.

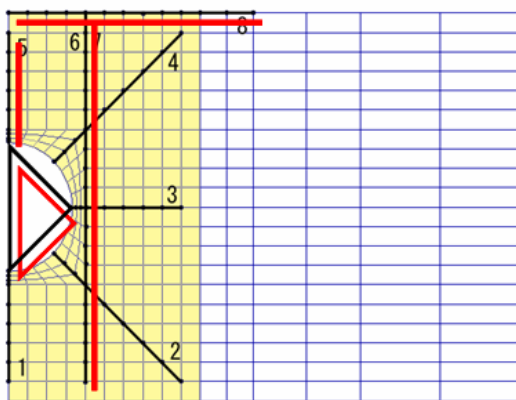


Fig. 18 Finite element mesh and measurement conFig.uration

Table 1. input parameters used to create artificial measurement data

Parameter	Value
Young's modulus (MPa)	1000
Poisson's ratio	0.3
Unit weight (MN/m ³)	0.026
Friction angle (degrees)	30
Cohesion (MPa)	0.1 (initial) 0.01 (residual)
$\Delta\gamma$	0.001

4.4 변형률 연화특성의 동정

역해석의 결과 얻어진 응력상태를 이용해서 Fig. 20에 mohr의 응력원의 중심을 σ 좌표에, 반경을 τ 좌표에 잡은 점을 나타냈다. 이 상태에서 모든 응력 포인트가 그것을 넘지 않을 것 같은 파괴기준선을 설정한다고 하면 순해석을 실시하였을 시의 초기의 파괴기준치(연화특성이 나타나기 전의 것)에 가까운 것을 얻는 것이 가능하다. 그대로는 연화특성을 구하는 것이 불가능하지만, Fig. 20을 잘 관찰해보면 변형률이 작을 때의 응력(열은 색)이 비교적 높은 위치에 있고 반대로 변형률이 크게 되면 (진한 색) 응력 포인트는 점점 하방에 내려가는 경향이 보여 진다. 이 경향이야말로 연화특성이라고 사료되기 때문에 변형률의 크기마다 파괴기준선을 설정하고 그때의 점착력의 값을 최대 전단 변형률와의 관계로 나타낸 것이 Fig. 21의 실선이다.

열은 색의 포인트는 변형률연화해석에 의해 가상의 계측데이터를 작성할 때 터널스프링라인 부근에 있는 요소의 c , r 의 관계를 나타낸 것이다. 파선은 그 평균을 나타낸다. 변형률 연화해석에서는 응력이 파괴기준에 도달한 요소부터 순서대로 c 를 저하시키기 때문에 c 와 r 의 관계(재료의 연화특성을 정의하는 관계)는 이것들의 평균치에 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 연화특성을 특정할 수 있으면 그것을 이용해서 충분한 정도로 예측해석을 할 수 있다.

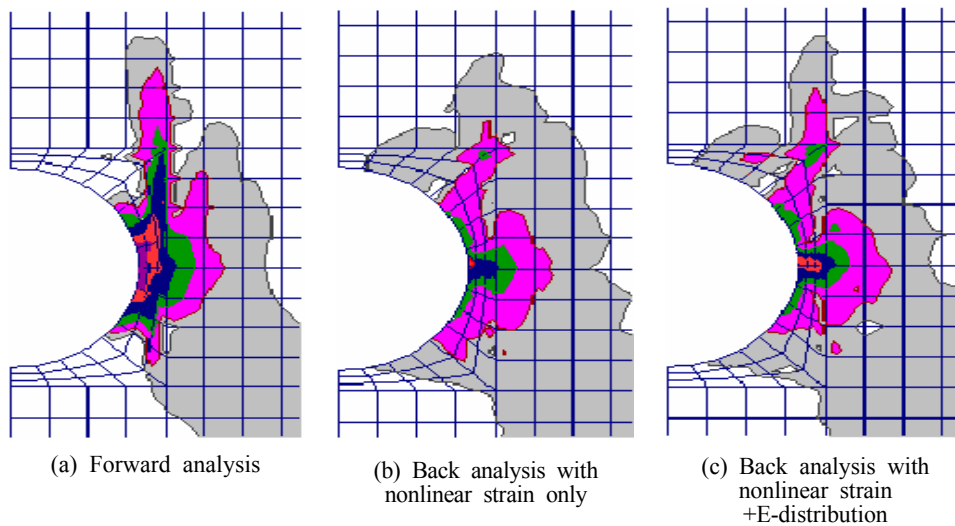


Fig. 19 Results of the strain softening analysis and back analysis

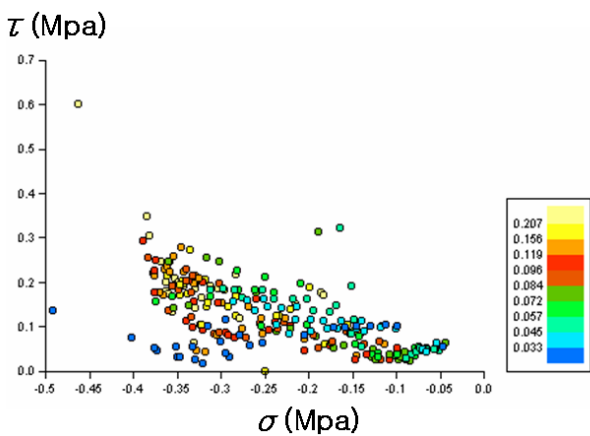


Fig. 20 State of stress in back analysis with gray scale

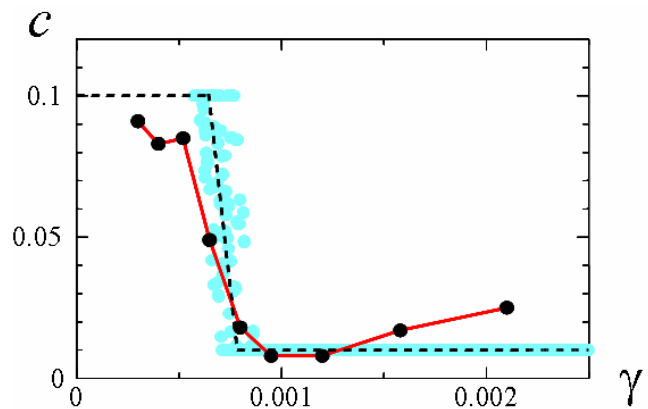


Fig. 21 Identified reduction of cohesion versus shear strain

5. 결론

본 논문에서는 비선형거동을 나타내는 대소지하공동의 굴착 문제에서 효과적으로 현재의 변형률 분포를 구하는 것과 동시에 남은 굴착과정의 변형거동을 가능하면 높은 정확도로 예측하기 위한 역해석의 방법에 대하여 서술했다. 우리나라의 지질 구조는 복잡하므로 Fig. 22에 있는 것처럼 먼저 처음에는 일반적인 비탄성 변형률에 의해 복잡한 변위장을 재현하고 다음에 그 정보를 비균질 탄성계수분포로 변환하는 방법을 취했다. 또한 그 단계에서 얻은 응력분포, 변형률분포에 포함되어 있는 잠재적인 정보를 추출하는 것으로 암반재료의 비선형 구성 법칙을 동정하는 것이 가능하다는 것을 두개의 다른 모델을 이용하여 나타냈다. 이 3단계의 접근방법은 복잡한 변위장을 분석해서 그 중에서 장래 예측이 가능하게 하는 정보를 추출하는 한 개의 수법으로서 어느 정도의 가능성을 가지고 있다고 생각하며, 앞으로도 다양한 케이스스터디에 응용해갈 예정이다.

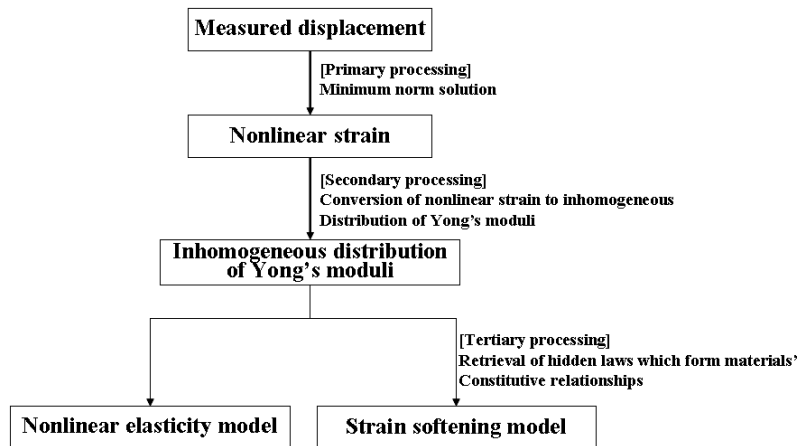


Fig. 22 New concept of back analysis for nonlinear problems

감사의 글

This research was carried out under the Rock Mechanics and Underground Laboratory of Kobe University. The guidance of S. Sakurai is gratefully acknowledged. This work was supported by the Brain Korea 21 Project in 2007. This study also was partly funded by the Korea Institute of Construction and Transportation Technology Evaluation and Planning under the Korean Ministry of Construction and Transportation in Korea (Grant No. 05-D03-01).

참고문헌

1. S. Sakurai and K. Takeuchi, (1983), "Back analysis of displacement measurements in tunnelling", *Proceedings of the JSCE*, Vol.337, pp.137 - 145.
2. S. Sakurai, I. Kawashin, A. Saragai and S. Akutagawa, (1994), "Back analysis of the non-elastic deformational behavior of ground materials" , *Journal of Geotechnical Engineering, JSCE*, Vol.505/III-29, pp.133-140.
3. S. Sakurai, S. Akutagawa and O. ToklIdome, (1995), "Back analysis of non-elastic strains based on minimum norm solution" , *Journal of Geotechnical Engineering, JSCE*, Vol.517/III-31, pp.197-202.
4. S. Akutagawa, M. Kakihara, M. Takeyama and S. Sakurai, (1998), "Back analysis of excavation process of underground powerhouse cavern considering slip deformation of rock joints", *Journal of Geotechnical Engineering, JSCE*, Vol.589/III-42, pp.335-348.

5. M. Okuda, T. Abe and S. Sakura, (1999), "A non-linear- back-analysis procedure for shallow tunnels excavated in unconsolidated grounds", *Journal of Geotechnical Engineering, JSCE*, Vol.638/III-49, 1)p.383-388.
6. S. Sakurai ,(2000), "Back analysis in observational methods", *Journal of Geotechnical Engineering, JSCE*, Vol.652/III-51, pp.1-10.
7. S. Sakurai, (1982), "An evaluation technique of displacement measurements in tunnels", *Journal of Geotechnical Engineering, JSCE*, Vol.317, pp.93-100
8. Z. Gao and T. Mura, "Nonelastic strains in solids-An inverse characterization from measured boundary data", *Int. J. Engineering Science*, Vol.30, No.1, pp.55-68 (1992).
9. J. M. Duncan and C. Y. Chang, (1970), "Nonlinear analysis of stress and strain in soils", *Proc. ASCE*. Vol.96, SM5, pp.1629-1653.
10. K. Takeuchi, T. Shinjima, S. Akutagawa and S. Sakurai, (2000), "Back analysis to model out rock mass behavior due to inhomogeneity and its application to cavern construction", *Journal of Geotechnical Engineering, JSCE*, Vol.659/III-52, pp.241-252.
11. K. Takeuchi, T. Shimura, S. Akutagawa and S. Sakurai, (2002), "Development of a new prediction method of rock mass stability based on the results of the back analysis during excavation", *Journal of Geotechnical Engineering, JSCE*, Vol.701/III-58, pp.253-262.
12. M. Harada, T. Katayama and A. Yada, (1991), "Design and construction of the underground cavern in Ohkoshi hydro power station", *Electric Power Civil Engineering*, No.230, pp.465-7.
13. T. Katayama, A. Yada, Y. Kiyai and T. Fukuoka, (1991)," Excavation of huge underground cavern of shell head shape-ohkoshi hydro power station of Kansai Electric Power Co.", *Tunnels and Underground*, Vol.22. No.10, pp.7-14.
14. T. Katayama, A. Yada and Y. Hirakawa, (1992), "Observational excavation method of the underground cavern in Ohkoshi hydro power station" , *Electric Power Civil Engineering*, No.237, pp.97-107.
15. S. Akutagawa, A. Hasegawa and R. Yamashita, (2002), "An example of back analysis of a deformational behavior", *Journal of Tunnel Engineering, JSCE*, Vol.12, pp.143-148.
16. T. Kitagawa, N. Nakayama, T. Matsunaga, S. Akutagawa and S. Konishi, (2004), "Applicability of tile strain softening model for the research of the surface settlement", *Journal of Tunnel Engineering, JSCE*, Vol.14, pp.53-60.