

지하 공간 설계와 시공의 지반공학적 접근과 실무적용

— 지반계수의 합리적 추정 —

Geotechnical Approach in Design and Construction of Underground Structures

— A Systematic Parameter Estimation —

이 인 모*¹

Lee, In-Mo

김 동 현*²

Kim, Dong-Hyun

Lo, K. Y.*³

Abstract

In spite of drastic development of underground technology too many uncertainties still exist in design and construction of underground structures. Estimation of ground parameters might be one of those uncertainties in design of underground structures. It is not an easy task to estimate the parameters reasonably well in advance in the design stage.

The main purpose of this paper is the best parameter estimation in the underground structures. In order to estimate unknown model parameters from the in-situ measurements as well as prior estimates, the Extended Bayesian Method(EBM) is utilized and implemented with Finite Element Program. The parameter estimation model utilized in this study is applied to two underground structures : the one Pusan subway tunnel; and the other Darlington intake tunnel in Canada, and the effectiveness of the proposed model is illustrated.

요 지

지하구조물에 대한 설계 및 시공기술의 많은 발전에도 불구하고 아직도 상당부분 그간의 경험에 의존하며, 또한 많은 불확정성 요소들을 내포하고 있다. 그 중 가장 대표되는 것이 지반계수로서, 이를 설계단계에서 정확히 산정하는 데는 많은 어려움이 따른다.

본 논문의 주된 목적은 지하공간의 설계와 시공을 유기적으로 연결할 수 있는 지반공학적 접근의 일환으로 최적의 지반계수를 산정하는 데 있다. 이를 위하여 초기예측치와 계측치로부터

*¹ 정회원, 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 교수

*² 정회원, 고려대학교 대학원 토목환경공학과 박사과정 수료

*³ 캐나다 Western Ontario 대학교 공과대학 교수

예측된 값을 합리적으로 조합할 수 있는 Extended Bayesian Method(EBM)을 적용하였으며, 이를 유한요소해석으로부터 구할 수 있도록 하였다. 또한 부산 지하철 현장과 캐나다의 Darlington 취수터널에 대한 예제해석을 수행하여 제안된 방법의 효용성을 검증하였다.

Keywords : Measurement, Statistical Analysis, Tunnel

1. 서론

국토의 효율적 이용을 위하여 고속철도, 지하철 등의 교통시설과 산업폐기물 처리시설, 에너지 저장시설, 공장 및 발전소 등을 지하공간에 설치하고자 하는 시도가 국내외에서 증대되고 있으며 이러한 터널 및 지하공간 건설 시에는 안정성과 경제성을 확보하는 최적의 설계와 시공이 요망된다.

최근 지하공간의 설계 및 시공에 관한 새로운 기술이 도입되어 국내의 터널 시공기술도 상당히 향상되었으나 아직도 많은 부분이 경험적인 방법이나 비합리적인 방법으로 처리되어 최적화된 공사가 이루어지지 못하고 있는 형편이다. 따라서 지하공간 개발시 안정성의 증대, 경제적인 설계와 시공이 시급한 실정이며, 이러한 최적화에 가장 중요한 요소는 지반계수를 얼마나 합리적으로 추정하느냐에 달려 있다고 해도 과언이 아니다.

지반계수 추정을 위하여 시편(sample)을 실내에서 실험으로 구하는 경우 실내실험조건과 현장조건은 차이가 날 수 밖에 없어 원천적으로 불확정성을 내포하게 된다. 이를 극복하기 위하여 현장에서 지하공간의 시공시 각종 계측을 행하게 되는데, 이 또한 계측오차를 피할 수 없으며, 계측치로부터 지반계수를 역산하는 과정에서도 불확정성이 따른다.

그러므로 본 논문에서는 지하공간의 설계와 시공의 지반공학적 접근법의 일환으로 설계시의 지반계수 초기 추정치와 시공시의 계측치로부터 구해지는 지반계수값을 합리적으로 조합하여, 최적의 지반계수를 구할 수 있는 역해

석 기법 개발에 주안점을 두었으며, 이는 피드백에 의하여 시공중에 계속적으로 최적화를 이루어 가는 첫걸음이라 할 수 있다.

2. 확장된 Bayesian 방법의 기본이론

지반계수들의 최적값을 예측하기 위한 역해석기법으로는 초기 가정치와 시공중의 계측치를 합리적으로 고려하여 조합할 수 있는 EBM(Extended Bayesian Method)을 이용하였으며(Honjo등, 1994a, Honjo등, 1994b), 이의 기본이론은 다음과 같다.

일반적으로 관측값은 식 1과 같은 형태로 나타낼 수 있으며,

$$\mathbf{u}^t = \mathbf{u}^t(\mathbf{x}|\boldsymbol{\theta}) + \boldsymbol{\epsilon}^t \quad (1)$$

여기서,

$\mathbf{u}^t = k$ 번째 단계에서의 관측값

$\mathbf{u}^t = k$ 번째 단계에서의 수학적 모델에 의한 예측값

$\boldsymbol{\epsilon}^t =$ 관측값과 예측값의 오차

$\mathbf{x} =$ 알고있는 입력값

$\boldsymbol{\theta} =$ 분석하고자 하는 매개변수이다.

만일 $\boldsymbol{\epsilon}^t$ 가 정규분포를 따른다고 가정하면, 관측값들의 분포는 식 2와 같은 복수정규분포를 가진다.

$$g(\mathbf{u}^*|\boldsymbol{\theta}) = (2\pi)^{-NK/2} |V_c|^{-K/2} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \sum_{t=1}^K \{ \mathbf{u}^* - \mathbf{u}^t(\mathbf{x}|\boldsymbol{\theta}) \}^T V_c^{-1} \{ \mathbf{u}^* - \mathbf{u}^t(\mathbf{x}|\boldsymbol{\theta}) \} \right\} \quad (2)$$

여기서, V_u 는 $\boldsymbol{\epsilon}^t$ 의 공분산행렬(covariance matrix),

K 는 측정구간(또는 측정단계)을 나타내며,
 N 은 관측점의 총개수이다.

사전정보에 의한 벡터량, 즉 초기예측치는 식3과 같으며,

$$\boldsymbol{\theta} = \mathbf{p} + \boldsymbol{\delta} \quad (3)$$

여기서, \mathbf{p} 는 매개변수 $\boldsymbol{\theta}$ 의 평균 벡터이며 $\boldsymbol{\delta}$ 는 사전정보의 불확실성을 의미한다.

사전정보의 분포도 관측값들의 분포와 동일하게 정규분포로 가정하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(\boldsymbol{\theta}|\beta) = (2\pi)^{-M/2} \beta^M |V_p|^{-1/2} \exp\left\{-\frac{1}{2}\beta(\boldsymbol{\theta}-\mathbf{p})^T V_p^{-1}(\boldsymbol{\theta}-\mathbf{p})\right\} \quad (4)$$

윗 식에서 V_p 는 사전정보값의 공분산 행렬을, M 은 분석하고자 하는 매개변수의 종류를 의미하며, β 는 불확실성의 크기를 나타내는 스칼라(scalar)양이다.

Bayes' 이론에 의하면 사후분포(posterior distribution)는 식 5와 같이 나타낼 수 있다.

$$f(\boldsymbol{\theta}|\mathbf{u}^*, \beta) \propto f(\boldsymbol{\theta}|\beta)g(\mathbf{u}^*|\boldsymbol{\theta}) \\ = (2\pi)^{-(NK+M)/2} \beta^M |V_u|^{-NK/2} |V_p|^{-M/2} \\ \times \exp\left\{-\frac{1}{2}\sum_{k=1}^K \{\mathbf{u}^{*k} - \mathbf{u}^k(\mathbf{x}|\boldsymbol{\theta})\}^T V_u^{-1} \{\mathbf{u}^{*k} - \mathbf{u}^k(\mathbf{x}|\boldsymbol{\theta})\} - \frac{1}{2}\beta(\boldsymbol{\theta}-\mathbf{p})^T V_p^{-1}(\boldsymbol{\theta}-\mathbf{p})\right\} \quad (5)$$

$\hat{\boldsymbol{\theta}}$ 의 최적값은 식 5를 최대화 하는, 또는 다음 목적함수식을 최소화 하는 값으로 구할 수 있다.

$$J(\boldsymbol{\theta}|\beta) = \sum_{k=1}^K \{\mathbf{u}^{*k} - \mathbf{u}^k(\mathbf{x}|\boldsymbol{\theta})\}^T V_u^{-1} \{\mathbf{u}^{*k} - \mathbf{u}^k(\mathbf{x}|\boldsymbol{\theta})\} + \beta(\boldsymbol{\theta}-\mathbf{p})^T V_p^{-1}(\boldsymbol{\theta}-\mathbf{p}) \quad (6)$$

여기서, \mathbf{p} = 정규분포를 따를 경우 매개변수 $\boldsymbol{\theta}$ 의 평균값,

V_p = 매개변수 $\boldsymbol{\theta}$ 의 공분산 행렬이다.

식 6에서 알 수 있듯이 확장된 Bayesian 방법과 Bayesian 방법과의 근본적인 차이점은 스칼라양인 β 를 새로이 도입하는 것이다. 이 β

값은 또다시 Bayesian 이론을 이용하여 다음 식을 최대화 하는 값으로부터 구할 수 있다.

$$L(\beta|\mathbf{u}^*, \mathbf{p}) = \int f(\boldsymbol{\theta}|\beta)g(\mathbf{u}^*|\boldsymbol{\theta})d\boldsymbol{\theta} \quad (7)$$

이 β 값을 구하는 방법을 순차적으로 설명하면 다음과 같다. \mathbf{u}^* 는 다음과 같이 선형화시킬 수 있으며,

$$\mathbf{u}^{*k} \cong \boldsymbol{\phi}^k + S^k \boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{\epsilon} \quad (8)$$

여기서, $\boldsymbol{\phi}^k = \mathbf{u}^k(\hat{\boldsymbol{\theta}}) - S^k \hat{\boldsymbol{\theta}}$

$S^k = \left(\frac{\partial \mathbf{u}^k}{\partial \boldsymbol{\theta}^T}\right)_{\boldsymbol{\theta}=\hat{\boldsymbol{\theta}}}$ 이다.

한편, 식 8을 식 7에 대입하면 대수우도함수(log-likelihood function)를 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ln L(\beta|\mathbf{u}^*, \mathbf{p}) = \ln\{L(\beta|\mathbf{u}^*, \mathbf{p})\} \\ \cong -\frac{1}{2}NK \ln\{J_0(\hat{\boldsymbol{\theta}}) + \beta J(\hat{\boldsymbol{\theta}})\} + \frac{1}{2} \ln \left\{ \frac{\beta^M |V_p^{-1}|}{|\sum_{k=1}^K S^{(k)T} V_u^{-1} S^{(k)} + \beta V_p^{-1}|} \right\} + \text{const} \quad (9)$$

이제 β 값의 최적값은 식 9를 최대화시키는 값으로 구할 수 있다. 또는, 식 10과 같이 AIC 값을 정의하면 AIC 값이 최소가 될 때의 값으로 β 를 구할 수 있다.

$$\text{AIC} = -2\ln\{L(\beta|\mathbf{u}^*, \mathbf{p})\} + 2 \times (\text{예측계수의 수}) \quad (10)$$

식 9 또는 10으로부터 β 값을 구한 후, Gauss-Newton 방법이나 Box-Kanemasu 방법으로(Beck 등, 1977) 식 6에 나타낸 목적함수를 최소화 시킴으로써 지반계수의 최적값을 구할 수 있다.

이 방법들은 Taylor expansion의 앞선 두 항만을 고려하여 선형화시킴으로써 비선형문제를 극복하여 반복적으로 최적의 값까지 접근해 가는 방법들이다.

3. 역해석용 유한요소해석 프로그램

3.1 역해석용 유한요소해석 프로그램의 구성

지하공동의 발생으로 인해 야기되는 응력과 변형량의 예측을 위해서 본 연구에서는 탄성 및 탄·소성 유한요소 해석법을(Owen 등, 1980) 수학적 모델로 선정하였다. 터널굴착과정은 그림 1에서 보는 바와 같이 중력이 작용하는 초기응력 상태를 계산한 후, 굴착면에서 등가의 하중을 반대방향으로 가함으로써 굴착상황을 재현하였다.

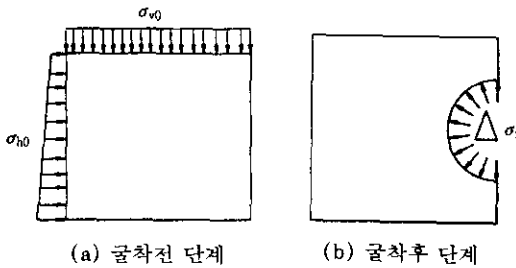


그림 1. 굴착상황 모델링

또한, 막장 진행이 충분히 이루어진 단면에서는 각 지보재들이 일체화되어 지지력을 발휘하므로 모든 지보재를 하나의 지보재로 가정하였으며, 지보재는 주변지반과 같은 연속체 요소 또는 모멘트 발생을 억제시킨 보 요소(beam element)로 모델링하였다.

참고문헌 9에 주어진 기본 프로그램을 수정·보완하여 상기의 모든 요소를 고려할 수 있

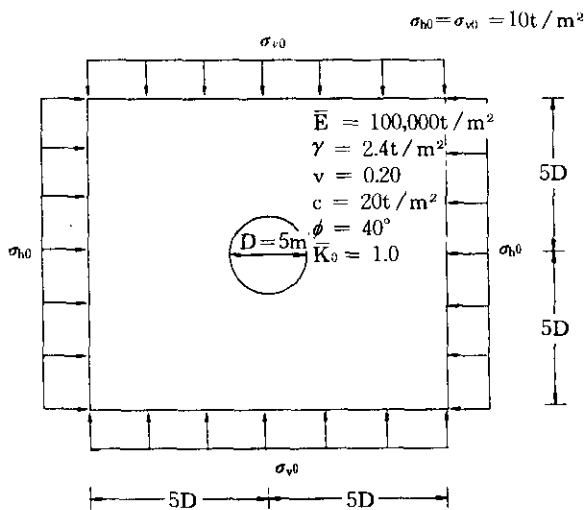


그림 2. 해석단면

도록 본 연구에 맞는 프로그램으로 새로이 개발하였다. 새로 개발된 프로그램은 그림 2에 나타낸 가상단면에 대해 Kirsch 공식에 의한 해석적 방법 및 범용 유한차분 프로그램인 FLAC(fast lagrangian analysis of continua, 1992)과의 비교를 통하여 검증하였으며, 검증 결과는 표 1에 나타내었다.

표 1. 해석결과

(단위 : mm)

	터널 바닥면	터널 천정부	터널 측벽부
Kirsch equation	0.3	0.3	0.3
FLAC	0.285	0.325	0.306
역해석용 FEM	0.283	0.322	0.295

3.2 매개변수 설정

지하구조물의 탄소성 해석에서 입력치로 사용되는 주된 지반계수는 탄성계수(E), 토압계수(K₀) 혹은 수평방향응력(σ_{h0}), 지반의 전단저항각(φ), 점착력(c), 단위중량(γ), 포아송 비(ν) 등이다.

이는 물론 가장 많이 통용되는 Mohr-Coulomb 파괴이론을 사용하는 경우에 한하며, 암반역학에서 많이 사용하는 Hoek & Brown 모델을 사용하는 경우는 c, φ 대신에 m, s 등의 지반계수가 필요하게 된다.

단위중량과 포아송 비는 일정하다고 가정하면 매개변수는 다음의 벡터로 표시할 수 있다.

$$\hat{\theta} = \left\{ \begin{array}{c} \bar{E} \\ \bar{K}_0 \text{ 혹은 } \hat{\sigma}_{h0} \\ \tan \phi \\ \bar{c} \end{array} \right\} \quad (11)$$

이의 평균벡터 **p**와 매개변수 사이에 상관관계가 없다고 가정할 때의 공분산 행렬 V_p는 다음 식과 같다.

$$p = \left\{ \begin{array}{c} \bar{E} \\ \bar{K}_0 \text{ 혹은 } \bar{\sigma}_{no} \\ \frac{\tan \phi}{c} \end{array} \right\} \quad (11a)$$

$$V_p = \begin{bmatrix} \text{Var}(E) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \text{Var}(K_0) \text{ 혹은 } \text{Var}(\sigma_{no}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \text{Var}(\tan \phi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \text{Var}(c) \end{bmatrix} \quad (11b)$$

여기서, $(\bar{\cdot})$ 와 $\text{Var}(\cdot)$ 는 각각 (\cdot) 의 평균과 분산을 의미한다.

만일의 경우, 지반 자체가 워낙 견고하여 소성영역이 일부 제한된 구간을 제외하고 발생하지 않는 경우는 탄성해가 지배적이며, 이 때는 매개변수를 다음과 같이 설정하여도 문제가 없을 것이다.

$$\hat{\theta} = \left\{ \begin{array}{c} \hat{E} \\ \hat{K}_0 \text{ 혹은 } \hat{\sigma}_{no} \end{array} \right\} \quad (12)$$

$$p = \left\{ \begin{array}{c} \bar{E} \\ \bar{K}_0 \text{ 혹은 } \bar{\sigma}_{no} \end{array} \right\} \quad (12a)$$

$$V_p = \begin{bmatrix} \text{Var}(E) & 0 \\ 0 & \text{Var}(K_0) \text{ 혹은 } \text{Var}(\sigma_{no}) \end{bmatrix} \quad (12b)$$

터널 굴착으로 인해 발생한 변형량에 대한 현장계측값은 기본적으로 오차를 수반할 수밖에 없으며, 이 측정오차는 현장상황에 따라 크기가 커질 가능성이 크다. 그러나 본 논문에서는 β 에 의해 V_s 와 V_p 의 크기가 상대적으로 조절되므로 V_s 는 단위 행렬로 가정하였다.

4. 적용사례

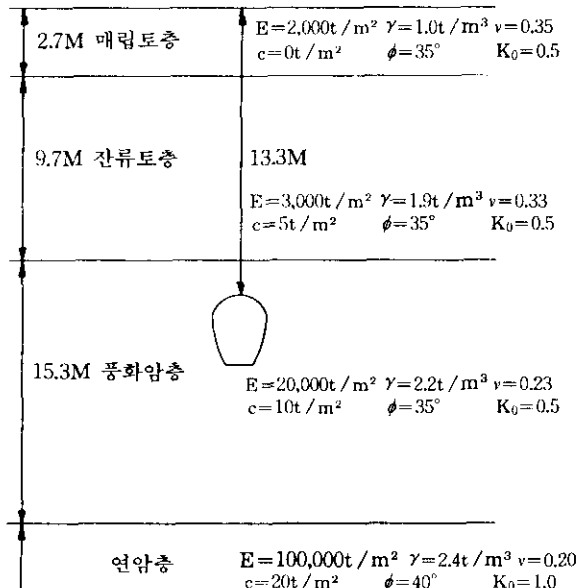
본 논문에서는 앞 절에서 서술한 지반계수 추정방법의 적용사례로서 부산지하철 현장 및 캐나다의 Darlington에 위치한 취수터널에 제안된 방법을 적용하여 그 효용성을 검토하였다.

부산지하철 지역은 주로 화강암과 화강편마암으로 구성되어 있으며, RMR값이 37로 Poor Rock 구간이다. Darlington 취수터널은 Lindsay 석회암으로 구성되어 있으며, 코아(core) 회수율이 100%, RQD가 평균 97%인 매우 좋은 암질로 구성되어 있다.

4.1 부산지하철 현장

4.1.1 지반조건 및 공사개요

본 지역은 중생대 쥐라기의 대보조산운동이 끝나고 백악기의 퇴적분지가 형성되었다. 이 후기에 산성 및 염기성 암맥의 관입 그리고 후속하여 불국사 화강암류의 관입이 진행되었으며, 이 지역의 화강암은 이에 속한다. 분포되어 있는 지층은 매립토층, 잔류토층, 풍화암과 연암순으로 되어있으며, 터널통과구간의 단면도는 그림 3에 나타내었다. 그림 3에서 알 수 있듯이 터널통과구간은 풍화암층으로 그림 4와 같은 PD-3형식으로 설계되었으며, 현장조건에 따라 포어폴링(forepoling)과 우레탄 그라우팅



※ 지반계수는 모두 초기 추정치임

그림 3. 대상구간 단면도

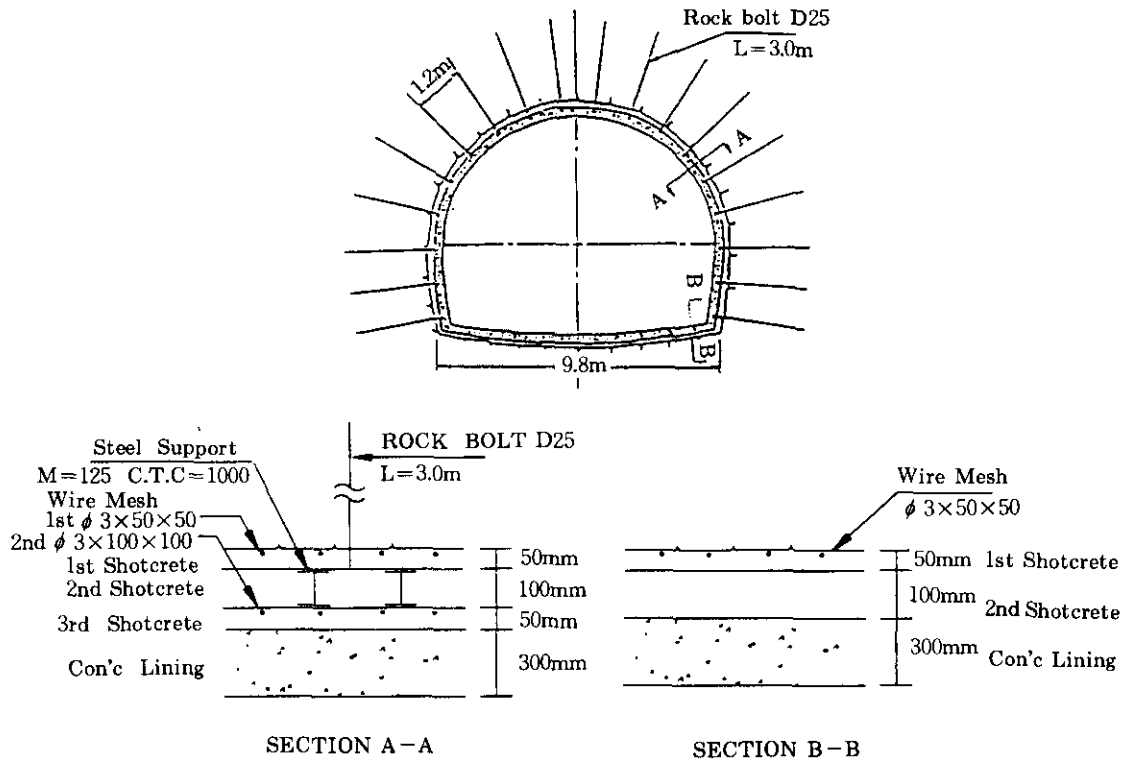
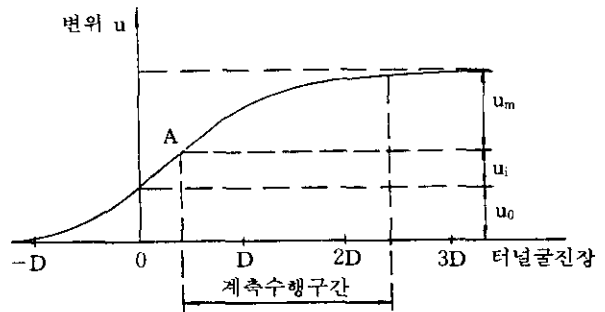


그림 4. 터널단면 형상

을 병행하였다. 굴착공법은 롱벤치 컷(Long Bench Cut) 공법으로 굴진량은 0.7m/일이다. 해석은 지반조건 및 공사조건이 거의 동일한 인접한 두 구간을 선정하여 수행하였다.

4.1.2 계측결과

지하공동의 굴착으로 인해 발생하는 지반의 거동은 그림 5와 같이 막장 도달전에 이미 영향 범위가 형성된다. 따라서 절대변위측정은 막장 도달전 지표에서 선진보링으로 시추공 신장계(borehole extensometer)를 설치하여 계측하여야 하나 적용자료로서 내부에서 측정된 자료만이 있어 이를 근거로 해석하였다. 이 경우 막장도달 전에 발생한 변형량과 막장도달시 발생한 변형량은 계측시행이 곤란하다. 따라서 본 연구에서는 근사해법을 이용하여 계측되지 않은 변위를 추정하였다. 만일 시추공 신장계에 의하여 절대변위의 계측치가 있는 경우는 근사



- D : 터널의 직경
- u_0 : 막장도달전 발생한 변형량
- u_i : 막장도달시 발생한 변형량
- u_m : 계측가능한 변형량

그림 5. 변형특성곡선

해법에 의한 변위추정은 불필요하다.

막장도달 후 발생한 변형량은 그림 5의 변형 특성곡선식을 지수함수로 가정하여 비선형회귀 분석과 보간법을 사용하여 구할 수 있다. 막

장 도달전 변위는 지반종류, 유변학 모델(rheological model) 및 단면형상에 따라 차이를 보이나, 최의 연구결과(1995) 풍화암 지반의 막장도달전 변형량은 전체변형량의 49% 정도임을 알 수 있다.

측정지점은 그림 6에 터널내부변위에 대한 회귀분석결과는 그림 7에 나타내었으며, 산정한 전체변형량은 표 2에 수록하였다. 그림 7과 표 2에서 STATION I, II란 인접한 두 구간을 각각 의미하며, EBM의 적용에서는 두 구간

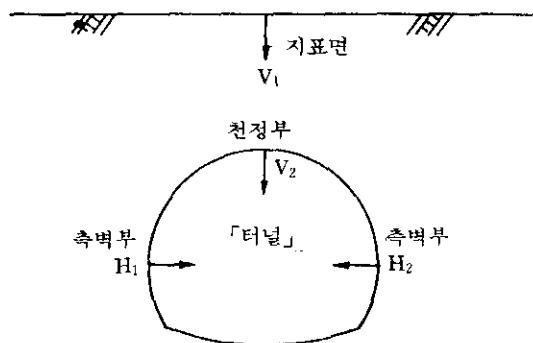


그림 6. 측정지점

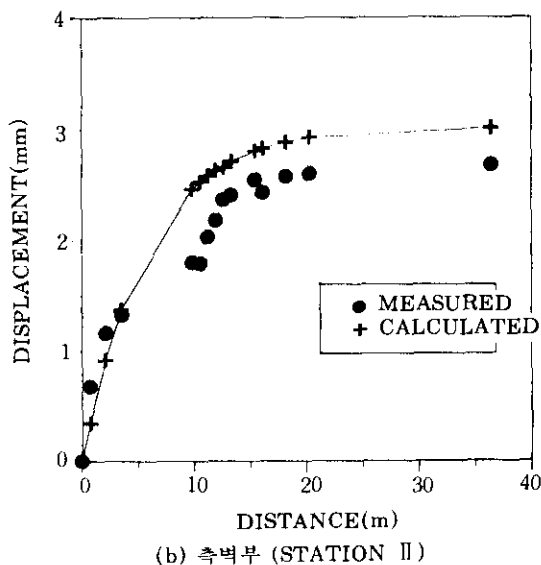
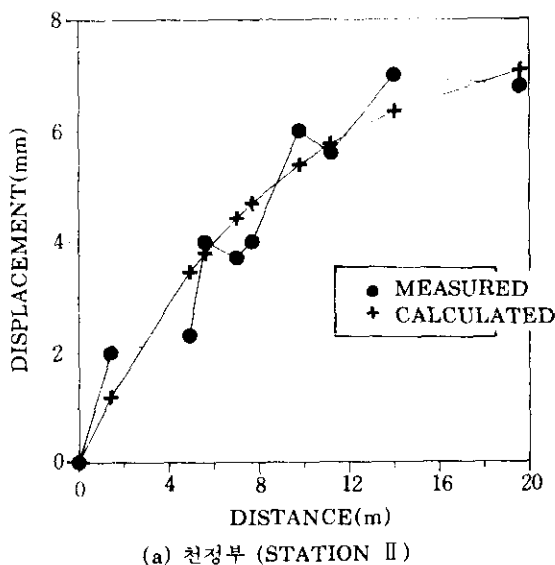
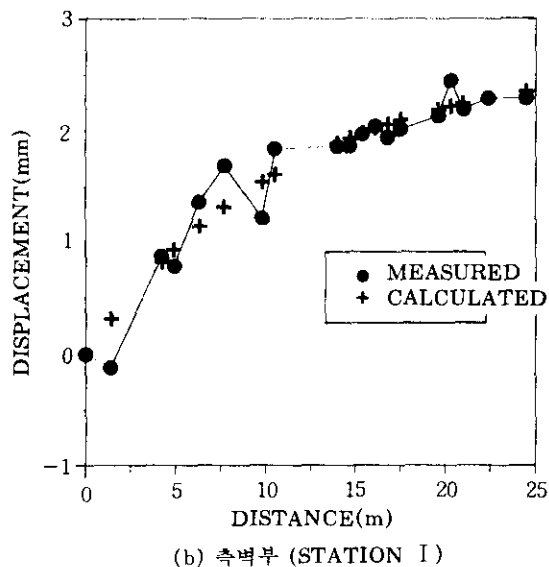
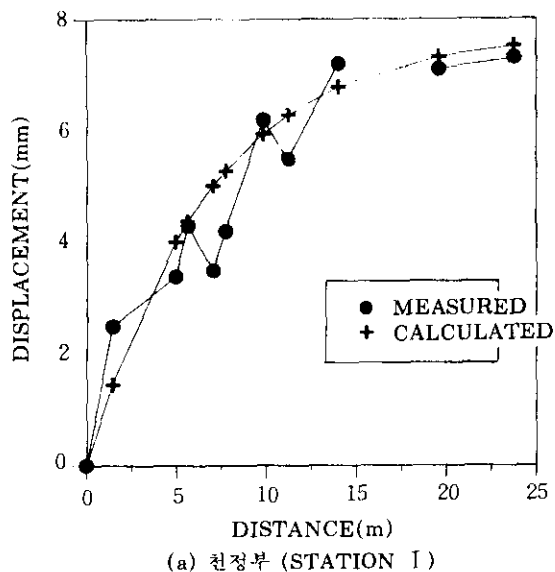


그림 7. 최종변위량 예측

표 2. 회귀분석 결과

		함수식	전체변형량(mm)
STATION I	터널 천정부	$u(x)=7.316(1-e^{-0.126x})$	13.42
	터널 측벽부	$u(x)=2.593(1-e^{-0.098x})$	6.47
	지표면	-	6.20
STATION II	터널 천정부	$u(x)=7.756(1-e^{-0.122x})$	14.12
	터널 측벽부	$u(x)=2.833(1-e^{-0.165x})$	6.32
	지표면	-	6.20

사이가 거의 동일한 점을 감안하여 두 구간을 한 개로 묶어서 산정한 대표값을 구하였다.

4.1.3 지반계수 결정

본 현장의 거동특성을 알아보기 위하여 우선 Hoek & Brown 모델에서 대표적인 정수값을 이용하여 소성영역의 분포양상을 알아보았다. 그 결과 인버트의 양 모서리 부분을 제외하고는 소성영역이 존재하지 않음을 알 수 있었다(이 등, 1994). 따라서, 대부분 탄성적인 거동을 보임을 감안하여 본 연구에서 구하고자 하는 지반계수는 지반의 탄성계수와 토압계수로 선정하였으며, 터널통과구간인 풍화암층과 영향권인 잔류토층에 대해 역해석을 수행하였다.

풍화잔류토인 경우 불교란 시료의 채취가 거의 불가능하기 때문에 지반계수를 표준관입시험 N값으로부터 추정하거나 다일러토미터(dilatometer)와 같은 현장실험으로부터 구할 수 밖에 없다. 그림 3에 기록된 지반계수 값들은 위의 방법으로 구하거나 또는 경험적으로 사용하여 왔던 값들을 나타내고 있다. 본 연구에서는 이 값들을 사전정보 예측치의 평균으로 하였으며, 그 변동계수는 큰 불확실성을 감안하여 0.3으로 하였다. 여기에서 변동계수란 표준편차를 평균으로 나누어준 불확실성의 정도를 나타내어 주는 지표라 할 수 있다. 따라서, 각 지반계수의 분산은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\text{Var}(\cdot) = [\Omega(\bar{\cdot})]^2 = [0.3(\bar{\cdot})]^2 \quad (13)$$

여기서 $\Omega(\cdot)$ 는 (\cdot) 의 변동계수이다.

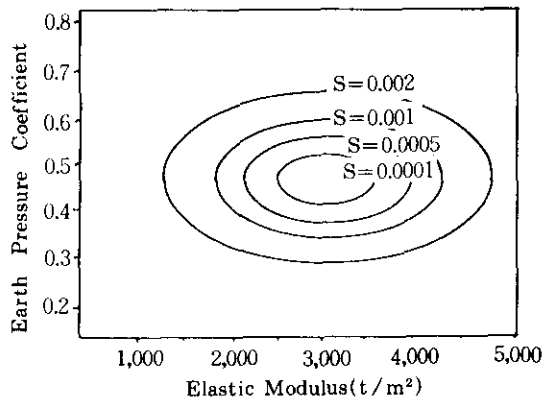
해석은 역순법과 EBM 방법으로 수행하였으며, 결과 비교를 통하여 EBM 방법의 효용성을 검토하였다. 역순법은 최소자승법을 이용하여 목적함수를 최소화시키는 방법으로 목적함수 등가선은 그림 8에 나타내었다.

그림 8에서 알 수 있듯이 평균적으로 잔류토 지반에서는 탄성계수 E는 2,970 ton/m², 토압계수 K₀는 0.46 일 때, 풍화암 지반에서는 탄성계수 E가 21,000 ton/m², 토압계수 K₀는 0.49 일 때 목적함수 값이 최소가 됨을 알 수 있다.

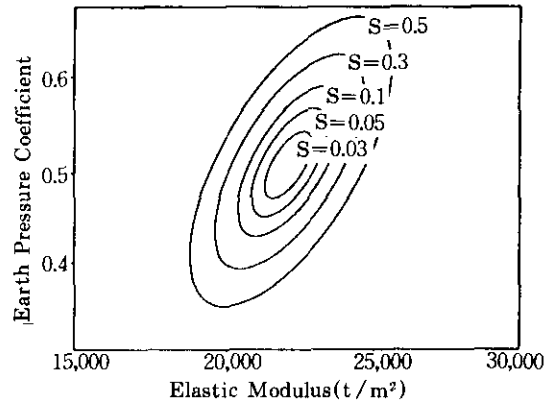
본 연구 결과는 U₀(막장 도달전 변위)값을 49%로 하여 계산한 결과이며, U₀ 값을 30%로 하여 STATION I에 적용하면 잔류토 지반에서는 탄성계수 E는 4,400 ton/m², 토압계수 K₀는 0.51 이며, 풍화암 지반에서는 탄성계수 E가 24,020 ton/m², 토압계수 K₀는 0.49 일 때 목적함수 값이 최소가 된다(이 등, 1994). 즉, U₀ 값에 따라 산정한 지반계수값이 10% 정도의 차이를 보이므로 이의 정확한 산정이 역해석 결과에 중요한 요소임을 알 수 있다.

EBM 방법으로 최적의 지반계수를 산정하기 위해서는 우선적으로 식 9를 최대화시키는 β값을 산정하여야 하며, 이는 AIC 값이 최소가 될 때를 의미한다.

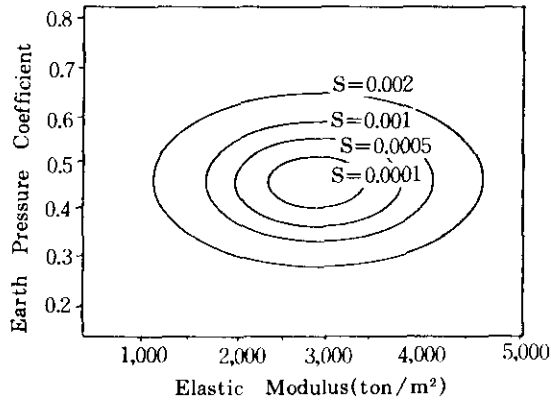
그림 9에서 알 수 있듯이 β가 2.6×10⁻⁵일 때 AIC 값이 최소가 되며, 산정한 β값을 식 6에 대입하여 목적함수 값을 최소화시키면 최적의 지반계수를 산정할 수 있다. 본 현장에 대한 역해석 수행결과는 표 3에 수록하였다.



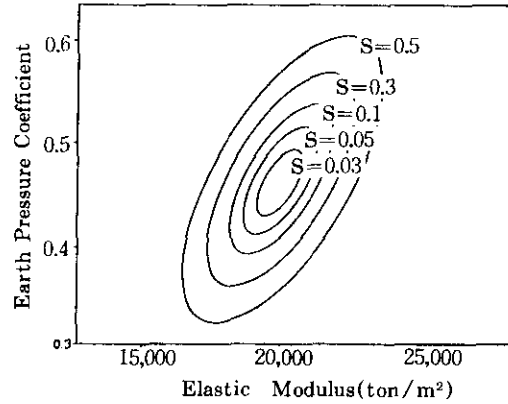
(a) 잔류토 지반(STATION I)



(b) 풍화암 지반(STATION I)



(c) 잔류토 지반(STATION II)



(d) 풍화암 지반(STATION II)

그림 8. 목적함수의 등가선

표 3. 역해석 수행결과(부산지하철)

		지층	탄성계수 (ton/m^2)	토압계수	목적함수
Incremental Method	STATION I	잔류토	3,050	0.46	9.0×10^{-5}
		풍화암	22,000	0.51	8.5×10^{-3}
	STATION II	잔류토	2,900	0.45	9.1×10^{-5}
		풍화암	20,000	0.47	8.4×10^{-3}
EBM		잔류토	3,000	0.45	1.6×10^{-4}
		풍화암	20,500	0.50	

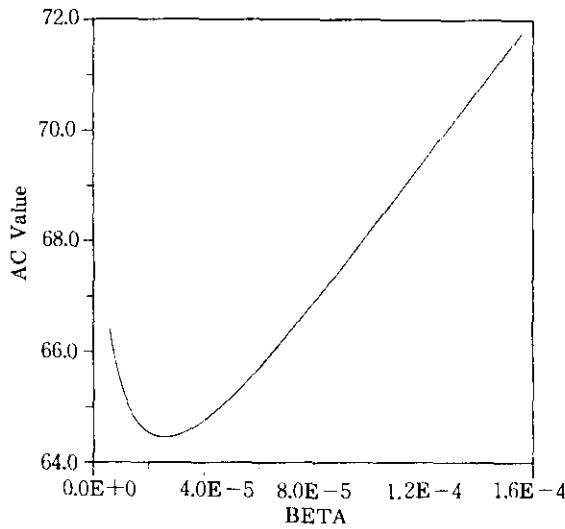


그림 9. β 대 AIC

4.2 Darlington 취수터널

Darlington 취수터널은 총연장 925m인 핵 발전소 시설물로서, 층상구조를 이루는 석회암 층에 위치하고 있다(Lo등, 1984). 터널은 지표면에서 12~35m에 위치하고 있으며, 터널의 단면도는 그림 10에 나타내었다. 굴착공법은 천공발파(drill and blast) 공법을 사용하였으며, 굴진장(span)은 8m씩 전단면 굴착하였다. 이 현장은 강도가 높고 절리가 거의 없는 지반 조건으로 완전 탄성거동을 나타내는 현장으로 볼 수 있다.

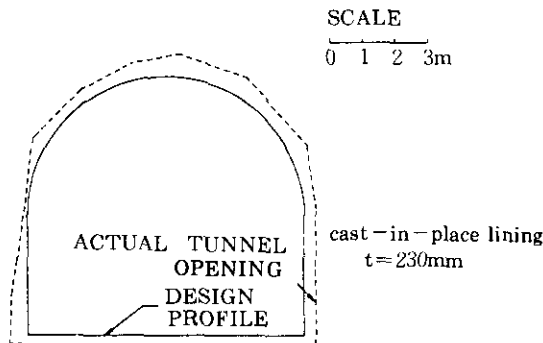


그림 10. 터널 단면도

4.2.1 사전 정보예측

깊이에 따른 수평방향 탄성계수(E_h)의 분포는 그림 11과 같으며, E_h 의 평균과 변동계수는 각각 46GPa($46.9 \times 10^5 \text{ton/m}^2$)와 0.14 이다(Ang등, 1975).

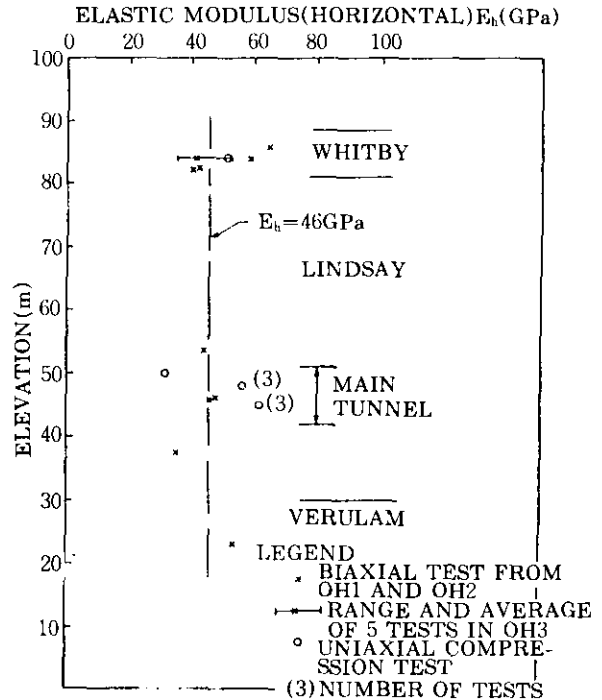


그림 11. 수평방향 탄성계수(E_h)의 분포

그림 11에 나타낸 탄성계수는 채취된 시료로 실내실험을 통해 산정한 값으로 현장에서의 탄성계수는 일반적으로 이보다 작은 값을 갖는다. 따라서 역해석시 사용할 탄성계수는 그림 12와 같이 RQD와의 관계를 통해 새로 산정하였다. 또한 수직방향의 탄성계수는 수평방향의 탄성계수와는 다른 값을 가지나, 본 현장에서는 E_v/E_h 의 비가 1.1에서 1.5정도이며 평균은 1.2이다. 따라서 등방탄성으로 가정할 때, 탄성계수는 다음과 같이 보정하여 초기 추정치를 구할 수 있다.

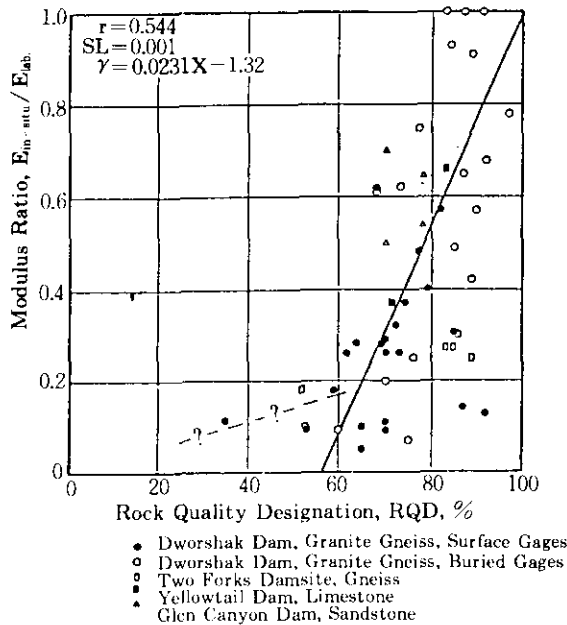


그림 12. R.Q.D.와 탄성계수간의 관계

$$\hat{E} = N_1 \cdot N_2 \cdot \hat{E}_k \quad (14)$$

여기서, N_1 은 실험실과 현장의 실험결과와의 차이에 대한 계수이며, N_2 는 비등방성을 고려하는 계수이다.

그러므로, E 의 평균과 변동계수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{E} &= \bar{N}_1 \cdot \bar{N}_2 \cdot \bar{E}_k \quad (14) \\ &= 0.95 \times 1.1 \times 46 = 48 \text{ GPa} \\ &= 49 \times 10^5 \text{ ton/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Omega(E) &= \sqrt{\Omega^2(N_1) + \Omega^2(N_2) + \Omega^2(E_k)} \\ &= \sqrt{0.03^2 + 0.05^2 + 0.14^2} = 0.15 \end{aligned}$$

여기서 $(\bar{\cdot})$ 과 $\Omega(\cdot)$ 는 (\cdot) 의 평균과 변동계수이다. 따라서 E 값의 분산값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Var}(E) &= [\bar{E} \cdot \Omega(E)]^2 = (48 \times 0.15)^2 \\ &= 52 \text{ GPa}^2 = 54 \times 10^{10} (\text{ton/m}^2)^2 \end{aligned}$$

초기 지중응력의 측정결과는 그림 13에 나타내었으며, 수평방향 토압계수 K_0 는 직접적으로 상재하중에 비례하지 않으므로, K_0 보다 초기

수평응력 σ_{h0} 를 구하고자 하였다. 그림 13으로부터 구한 초기 수평응력의 평균과 분산(Ang 등, 1975)은 각각 10MPa와 5.3MPa²이다.

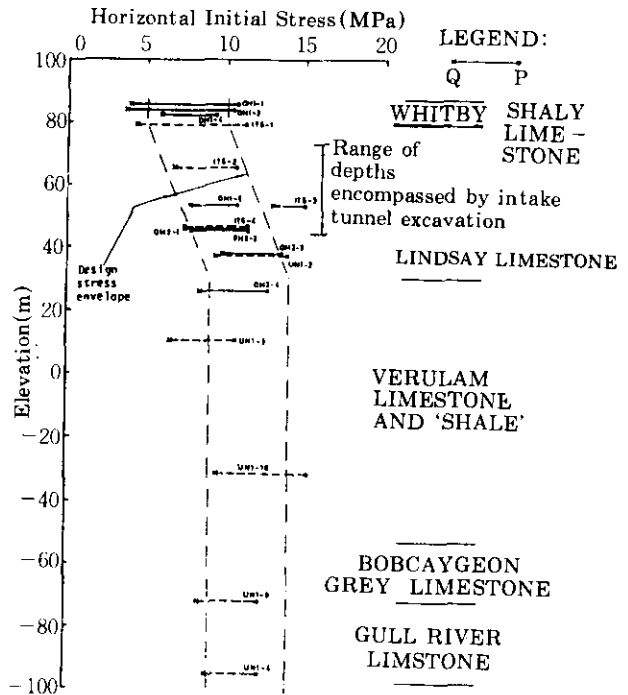


그림 13. 수평방향의 초기지중응력

앞에서 서술한 바를 종합하여 지반계수의 초기 추정치는 평균과 공분산 값으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{\mathbf{p}} = \left\{ \begin{array}{l} \bar{E} \\ \bar{\sigma}_{h0} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} 48 \text{ GPa} \\ 10 \text{ MPa} \end{array} \right\}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_p &= \begin{bmatrix} \text{Var}(E) & 0 \\ 0 & \text{Var}(\sigma_{h0}) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 52 \text{ GPa}^2 & 0 \\ 0 & 5.3 \text{ MPa}^2 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

4.2.2 지반계수 결정

현장 시공시에 지중변위계를 설치하여 변위를 측정하였으며, 이를 표 4에 나타내었다. 계측된 변위도 편향오차(bias error)를 필히 수

표 4. 지중변위계에 의한 변형량 측정 결과

(단위 : mm)

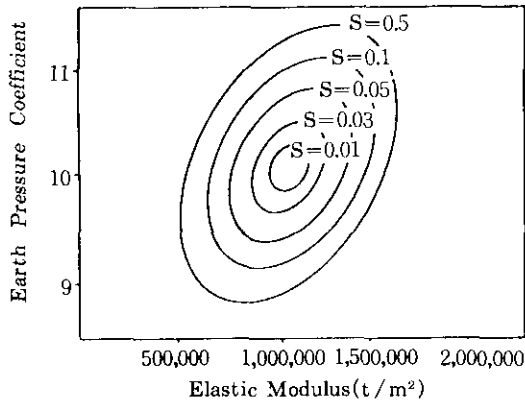
측점	Extensometers	구간 (m)	Extensometer 설치깊이 (m)		r/a	측정된 변형량		비고
						보정전 (상대변위) (mm)	보정후 (절대변위) (mm)	
E3	A and C	0+34.6	A	1	1.22	0.54	0.74	지표면에서 터널 천정부로 설치
	B and C		B	9	3.0	0.10	0.30	
	C		C	21	5.67	-	0.20	
E4	D and F	0+36	D	2	1.44	0.73	2.3	터널 내부에서 터널 측벽부로 설치
	E and F		E	10	3.22	0.53	1.8	
			F	30	7.67	-	0.5	
E5	G and J	0+65	G	2	1.44	0.9	2.8	터널 내부에서 터널 측벽부로 설치
			J	24	6.33	-	0.6	
E6	Convergence	0+65	-	-	1.1	1.0	3.1	터널 내부에서 터널 측벽부로 설치
	D and F		D	2	1.44	0.7	2.4	
	E and F		E	8	2.78	0.3	1.4	
E8	G and J	1+96	G	2	1.44	1.2	3.6	터널 내부에서 터널 측벽부로 설치
	H and J		H	8	2.78	0.7	2.3	
			J	24	6.33	-	0.6	
E9	D and F	1+96	D	2	1.44	0.85	2.7	터널 내부에서 터널 측벽부로 설치
			F	24	6.33	-	0.6	

주) (1) 실제굴착직경 a = 4.5m : (2) 상대 탄성변위는 3a(i. e., 13.5m)만큼의 막장굴진후 측정 :
 (3) 보정계수 2.5는 측벽부 계측시 사용함.

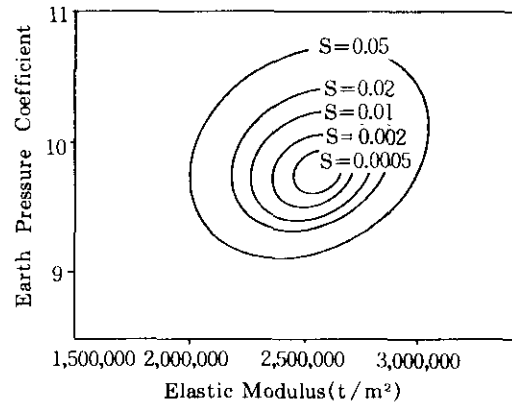
반할 수 밖에 없으며, 이를 보정한 절대변위도 표 4에 함께 수록되어 있다.

과 EBM 방법으로 비교해석하였으며 역순법에 의한 수행결과는 그림 14에 나타내었다.

해석은 부산지하철 현장과 동일하게 역순법



(a) 파쇄대



(b) 원지반

그림 14. 목적함수의 등가선

EBM 수행을 위해 스칼라양인 β 를 그림 15에서 AIC 값이 최소가 되는 값으로 부터 구한 후 이를 목적함수식에 대입하여 최적의 지반계수를 산정하였다.

Darlington 취수터널에 대한 역해석 수행결과는 공사 후 정밀한 계측결과를 얻기 위해 지속적으로 수행한 계측(post-monitoring) 결과(Lo등, 1984)와도 비교하여 표 5에 나타내었다.

4.3 토 의

본 논문에서는 지하공간개발을 위한 지반계수의 새로운 예측법인 확장된 Bayesian 방법의 효용성을 평가하고자 두 개의 현장에 적용하여 보았다.

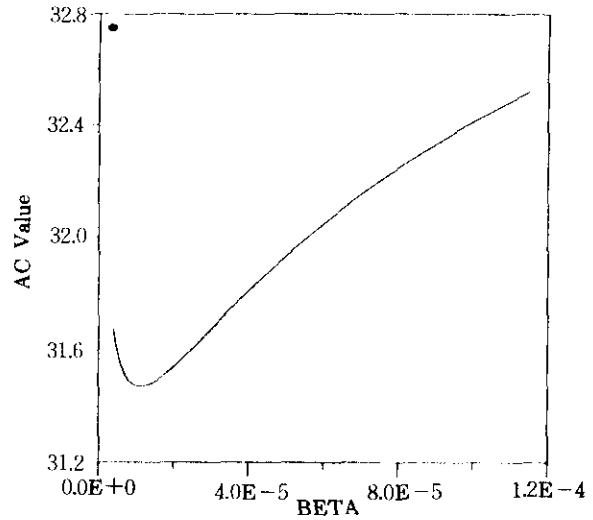


그림 15. β 대 AIC

표 5. 역해석 수행결과 (Darlington 취수터널)

		탄성계수(ton/m^2)	토압계수	목적함수
Post Monitoring	파쇄대	1,023,600	9.00	-
	원지반	2,558,960	9.00	-
Incremental Method	파쇄대	1,018,000	10.05	9.1×10^{-3}
	원지반	2,550,000	9.80	8.4×10^{-5}
EBM	파쇄대	1,019,200	10.00	7.3×10^{-4}
	원지반	2,554,000	9.85	

확장 Bayesian 방법의 가장 큰 장점은 지반계수를 예측함에 있어 설계당시에 수행된 실험 혹은 이제까지의 경험을 바탕으로 초기예측치와 시공중에 계측된 값을 합리적으로 묶어서 최적의 계수를 예측할 수 있다는 점이다. 식 6을 보면 초기추정치든지, 계측치든지 간에 그 불확실성이 큰 것일수록 최적화과정에서 그 비중을 적게 두며(분산행렬의 역수), 이 값들로부터 β 값을 도입하는 것이다.

본 연구에서 역순법이라고 명명한 것은 초기추정치는 완전히 무시하고 계측치만으로부터 최소자승의 오차를 갖는 지반계수를 구하는 것이다. 즉, 계측치가 필연적으로 가지고 있는 계

측오차를 전혀 고려하지 못한 방법이며, 이는 계측치가 완벽하기 전에는 이로부터 구한 계수 예측치는 초기추정치보다 더 낮다고 단정하기 어렵다. 반면에 확장된 Bayesian 방법은 초기추정치와 그 불확정성, 계측치와 그 불확정성을 유기적으로 함께 고려한 합리적인 방법으로 말할 수 있다. 본 예제결과에서 역순법에 의한 예측값과 제안된 방법에 의한 예측값이 가까울수록 계측치의 비중이 큰 경우고, 반대로 두 개의 예측치가 다를수록 오히려 초기추정치가 비중이 큰 경우로 볼 수 있다.

본 연구에서 도입한 확장된 Bayesian 방법은 단순히 지반계수의 예측에만 적용되는 것은

아니다. 예측치에 대한 불확정성의 감소 정도의 평가가 본 방법으로 가능하며, 식 10에 표시된 AIC 인자의 도입으로 지하공간에 대한 각종 예측모델중 최적의 모델을 찾아낼 수도 있다. 너무 복잡한 모델은 모델오차는 적으나 많은 지반계수가 소요되는 약점이 있고, 반대로 너무 단순한 모델은 추정해야 하는 계수는 적으나 모델오차가 클 염려가 있다. 이러한 문제들에 대해 AIC 값을 평가함으로써 최적의 모델을 제시할 수 있다. 본 연구에서는 예측모델 개발에만 역점을 둔 바, 그 다양한 적용성에 대하여는 추후에 다른 한 논문으로 발표하고자 한다.

5. 결론

본 논문에서는 사전정보에 의한 지반계수와 현장 계측치로부터 예측된 값을 종합하여 가장 합리적인 지반계수 예측법 확장된 Bayesian 방법을 도입하였다. 새로운 예측법을 부산지하철 현장과 캐나다의 Darlington 취수터널 현장에 적용하여 그 효용성을 평가하였으며, 각 정수값을 계속적으로 증가시켜 가며 최적값을 찾아내는 역순법과 비교·검토 하였다.

본 연구의 결론은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 1) 부산지하철 현장이나 Darlington 취수터널 모두 역순법 및 새 예측법(EBM)으로 지반계수를 예측한 결과 그 차이가 5% 이내로 큰 차이가 나지 않아서 계측치에 비중이 있음을 알 수 있었으며, 특히 Darlington 취수터널의 경우 현장에서 지속적으로 계측(post-monitoring)한 결과와 유사한 결과를 얻음을 알 수 있었다.
- 2) 부산지하철 현장은 매립토/잔류토/풍화암/연암/경암으로 이루어지는 우리나라의 가장 대표적인 지반조건으로 볼 수 있다. 제한된 조건이기는 하지만 본 연구결과에 의하면 표 3과 같은 잔류토 및 풍화

암의 지반계수를 구할 수 있었으며, 여타의 자료가 없는 한, 이를 그 초기 추정치로 사용할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 지하공간 설계·시공의 지반공학적 접근의 일환으로 지반계수를 합리적으로 추정할 수 있는 기법의 기본 방법(methodology) 개발에 주된 초점을 맞추었으며, 향후의 계속적인 연구로 개발된 기법을 다각도로 적용하여 지하공간 설계에서 많은 부분으로 차지하는 경험적 요소를 공학적인 관점으로 규명하여 학문적으로 접근할 수 있도록 하고자 한다.

감사의 글

이 논문은 교육부(학술진흥재단)의 1994년도 대학교수 국비해외파견(공동연구)으로 이루어진 것으로 캐나다의 웨스턴 온타리오 대학교 고려대학교간의 공동연구의 결과이며, 이에 학술진흥재단에 감사드린다. 특히 첫번 째 저자에게 연구년의 기회를 주어 이 연구를 가능케 한 고려대학교에게도 감사드린다.

참고 문헌

1. 이인모, 김동현, 박영진, 백동호, 최수일(1994), "지하구조물 건설시 역해석에 의한 지반특성치 산정", '94 가을학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. 191~198
2. 최항석(1995), 옹력침중을 고려한 터널의 3차원 거동에 관한 연구, 고려대학교 석사학위 논문
3. Ang, A.H-S. and Tang W.H.(1975), *Probability Concepts in Engineering Planning and Design*, Vol.I, John Wiley & Sons Inc., New York
4. Beck, J.V. and Arnold, K.J.(1977), *Parameter estimation in engineering and science*, John Wiley & Sons, Inc
5. FLAC(1992), "Manual(Ver 3.2)", Itasca Consulting Group
6. Honjo, Y. Wen-Tsung, L. and Guha, S.

- (1994a), "Inverse analysis of an embankment on soft clay by Extended Bayesian Method", *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, vol. 18, pp. 709~734
7. Honjo, Y., Wen-Tsung, L. and Sakajo, S. (1994b), "Application of Akaike information criterion statistics to geotechnical inverse analysis : the Extended Bayesian Method", *Structural Safety*, vol.14, pp. 5~29
8. Lo, K. Y., and Lukajic, B.(1984), "Predicted and measured stresses and displacements around the Darlington Intake Tunnel", *Can. Geotech. J.*, vol. 21, pp. 147~165
9. Owen, D.R.J. and Hinton, E.(1980), *Finite Elements in Plasticity: Theory and Practice*, Pine-ridge Press, Swansea, U.K.

(접수일자 1995. 10. 6)