

다층구조계내 터널거동의 역해석

O 전병승*, 이상도**, 나경웅***, 김문점****

1 장. 서 론

지하구조체를 안전하고 경제적으로 형성시키기 위해서는 구조계 구성인자의 재료특성에 대한 정확한 파악과 구조계의 거동에 대한 정확한 해석이 요구된다. 즉, 실제문제를 수치적으로 모형화하고 구조거동을 이해하기 위해서는 대상 암반체의 초기응력상태와 재료특성을 정확히 반영해야 한다. 이러한 암반의 역학적 특성치는 실험실시험이나 현장시험에 의해 구할 수 있으나, 이는 측정지점 주위의 국부적인 영역에 대한 결과이므로 구조체 전체에 대한 특성을 파악하는데 어려움이 있다. 따라서 최근에는 현장에서 시공 중 실측한 변위와 응력해석에 의해 계산된 변위가 최소의 오차범위 내에 일치하도록 암반의 물성을 보정한 후 응력해석에 이용함으로써, 실제 시공현장에서 발생할 수 있는 암반의 물성 변화 등에 대하여 신속하고 합리적인 재설계 및 최적설계를 가능하게 하려는 역해석에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^{[1],[2]}

본 연구는 역해석의 기본 도구가 되는 해석 (forward analysis) 방법에 대한 연구와 역해석 (back analysis) 방법에 대한 연구의 두 단계로 구성된다. 먼저 경계요소를 이용하여 내부영역문제의 다층구조계를 물체력과 초기응력을 고려하여 해석하는 방법을 연구하였다. 즉, 무한기본해를 이용하여 각 층을 부영역으로 분할하고, 물체력과 초기응력의 항을 경계적분화하여 물체력과 초기응력을 포함한 계방정식을 구성한 후, 접합면에서의 평형조건과 적합조건을 이용하여 미지의 해를 구하는 방법을 사용하였다.^[3] 또한 역해석문제에는 직접법을 적용하였다. 역해석의 접근방법으로는 크게 직접법과 역산법으로 구분되는데, 본 연구에서는 프로그램화하는데 필요한 노력이 상대적으로 적고, 역해석 문제의 적용성에 있어서도 보다 우수한 방법인 직접법을 이용하였다.^[4] 즉, 직접탐색법으로 Powell's method 를 이용하여 경계요소해석에 의해 계산된 변위를 실측변위로 가정하여 대상구조체의 탄성계수와 초기응력을 추정하였다.

* 금호건설 기술연구소

** 삼성건설

*** 선경건설 지하비축팀

**** 정희원, 연세대학교 공과대학 토목공학과 교수

본 연구의 제한사항은 다음과 같다.

- (1) 대상암반은 평면변형률 상태의 선형 탄성체이다.
- (2) 다층구조를 형성하는 각각의 층은 등방성 균질체이다.
- (3) 층과 층 사이의 접합면은 완전부착되어 있다.
- (4) 초기응력은 대상구조 전체에 걸쳐 일정한 분포를 가지며, 초기 연직응력 성분은 지표로부터의 심도에 비례한다.
- (5) 대상암반에 작용하는 하중은 물체력과 초기응력으로 한다.

2 장. 본 론

2.1 경계요소에 의한 모형화

경계요소법은 주어진 영역의 내부 및 경계에서의 미지 변수의 거동을 지배하는 편미분 지배방정식을 경계치에만 관련된 적분방정식으로 변화시키고, 이 방정식의 수치해를 구하는 방법이다. 경계치에 대한 적분방정식을 유도하기 위하여는 영역 내의 평형 미분방정식을 만족하는 기본해 (fundamental solution) 를 이용한다. 이렇게 구해진 방정식은 주어진 경계조건 하에서 수치기법을 이용하여 해를 구한다.^[5] 본 연구에서는 주어진 경계에서 변위와 표면력의 향으로 적분방정식을 유도하기 위해 직접경계요소법을 사용한다. 수치해석에서는 경계만을 이산화하며, 기지의 경계조건을 도입함으로써 미지수가 변위와 표면력인 선형방정식이 얻어진다.

경계적분방정식은 한 점의 변위에 대하여 전체 경계 Γ 와 전체영역 Ω 에 대한 적분항으로 표시되며, 다음의 식 (1) 과 같다.

$$c_{pk} u_k + \int_{\Gamma} u_k t_{pk}^* d\Gamma = \int_{\Gamma} t_k u_{pk}^* d\Gamma + \int_{\Omega} b_k u_{pk}^* d\Omega - \int_{\Omega} \sigma_{kj}^0 \varepsilon_{pkj}^* d\Omega \quad (1)$$

여기서, c_{pk} 는 경계면 상의 기하학적 형상에 의해 결정되는 상수이며, u_{pk}^* , t_{pk}^* , ε_{pkj}^* 는 2 차원 문제에서 변위, 표면력, 변형률에 대한 기본해, u_k , t_k , b_k , σ_{kj}^0 는 변위, 표면력, 물체력, 초기응력이다.

변위에 대한 항을 합하여, r 개의 자유도를 가진 구조계에 대한 계방정식으로 구성하면,

$$\begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1r} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2r} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{r1} & h_{r2} & \cdots & h_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \cdots & g_{1r} \\ g_{21} & g_{22} & \cdots & g_{2r} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{r1} & g_{r2} & \cdots & g_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_r \end{bmatrix} \quad (2)$$

이며, 여기서 $\{h_{ii}\}$ 와 $\{g_{ii}\}$ 는 각각 변위와 표면력의 기본해 및 형상함수에 의해

구성되는 행렬이며, $\{u_i\}$, $\{t_i\}$, $\{B_i\}$ 그리고 $\{S_i\}$ 는 변위, 표면력, 물체력 및 초기응력 행렬이다. 또는,

$$[H]\{u\} = [G]\{t\} + \{B\} + \{S\} \quad (3)$$

이 된다.

다층구조를 구성하는 각각의 층이 등방성 균질체라는 가정 하에 대상영역을 분할하여 각각의 층을 부영역으로 모형화하고, 부영역과 부영역 사이의 접합면을 적절한 수의 요소로 이산화 한다.

그림 1 에서 전체영역 Ω 는 부영역 Ω^1 과 Ω^2 로 구성되며 Ω^1 과 Ω^2 는 접합면을 공유한다. 부영역 Ω^1 의 경계는 외부경계 Γ^1 과 접합면 상의 경계 Γ_I 로 구성되고, 부영역 Ω^2 의 경계는 외부경계 Γ^2 와 접합면 상의 경계 Γ_I 로 구성된다. 따라서 개개의 부영역에 대해 독립적으로 식 (3) 과 같은 계방정식을 구성한 후 이 식들의 조합에 의해 접합면 Γ_I 에서의 평형조건과 적합조건을 고려하여 전체영역에 대한 계방정식을 얻는다. 그림 1 에서 부영역 Ω^1 에 대해 계방정식을 구성하면 다음과 같다.

$$[H^1 \ H_I^1] \begin{pmatrix} u_1^1 \\ u_I^1 \end{pmatrix} + \{S^1\} = [G^1 \ G_I^1] \begin{pmatrix} t_1^1 \\ t_I^1 \end{pmatrix} + \{B^1\} \quad (4)$$

여기서 u^1 과 t^1 은 외부경계 Γ^1 에서의 절점변위와 표면력이고, u_I^1 과 t_I^1 은 부영역 Ω^1 에 속한 접합면 Γ_I 에서의 절점변위와 표면력이다. 마찬가지로 부영역 Ω^2 에 대해 계방정식을 구성하면 다음과 같다.

$$[H^2 \ H_I^2] \begin{pmatrix} u_2^2 \\ u_I^2 \end{pmatrix} + \{S^2\} = [G^2 \ G_I^2] \begin{pmatrix} t_2^2 \\ t_I^2 \end{pmatrix} + \{B^2\} \quad (5)$$

여기서 u^2 과 t^2 은 외부경계 Γ^2 에서의 절점변위와 표면력이고, u_I^2 과 t_I^2 은 부영역 Ω^2 에 속한 접합면 Γ_I 에서의 절점변위와 표면력이다.

Ω^1 과 Ω^2 사이의 접합면 Γ_I 에서의 적합조건과 평형조건은 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u_I^1 &= u_I^2 = u_I \\ t_I^1 &= -t_I^2 = t_I \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6) 을 식 (4) 와 (5) 에 대입하고 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} H^1 & H_1^1 & 0 \\ 0 & H_1^2 & H^2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u^1 \\ u_1 \\ u^2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} G^1 & G_1^1 & 0 \\ 0 & -G_1^2 & G^2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} t^1 \\ t_1 \\ t^2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B^1 \\ B^2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} S^1 \\ S^2 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

식 (7) 은 행렬 $[H]$ 와 $[G]$ 가 banded 형태인 점을 제외하면 식 (3) 의 계방정식 과 형태가 같다.

문제의 경계조건을 Neumann type 이라고 가정하면 집합면에서의 변위와 표면력 은 모두 미지의 값이므로 식 (7) 은 다음과 같이 미지의 값을 좌변에 기지의 값을 우변에 구분하여 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} H^1 & H_1^1 & -G_1^1 & 0 \\ 0 & H_1^2 & G_1^2 & H^2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u^1 \\ u_1 \\ t_1 \\ u^2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} G^1 & 0 \\ 0 & G^2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} t^1 \\ t^2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B^1 \\ B^2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} S^1 \\ S^2 \end{pmatrix} \quad (8)$$

또는 문제의 경계조건을 Dirichlet type 이라고 가정하면 식 (7) 은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} G^1 & G_1^1 & -H_1^1 & 0 \\ 0 & -G_1^2 & -H_1^2 & G^2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} t^1 \\ t_1 \\ u_1 \\ t^2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} H^1 & 0 \\ 0 & H^2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u^1 \\ u^2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B^1 \\ B^2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} S^1 \\ S^2 \end{pmatrix} \quad (9)$$

일반적인 경우 위의 두 가지 경계조건이 혼합되어 있으므로 식 (8) 과 (9) 에 경계 조건을 적용하고 이에 따라 정리하면 다음과 같다.

$$[A] \{x\} = \{f\} + \{B\} + \{S\} \quad (10)$$

여기서 $\{x\}$ 는 미지의 표면력과 변위를 의미하고 $\{f\}$ 는 지정된 변위와 표면력 값들의 영향을 고려한 기지의 벡터이며, $[A]$ 는 $\{x\}$ 에 따라 또는 $[H]$ 또는 $[G]$ 로 구성된 계수행렬이다.

2.2 직접법의 이용

직접법에서 사용되는 비선형문제의 최적화기법으로는 일반적으로 목적함수의 경사, 즉 도함수를 이용하여 시행착오적으로 국부의 최소값을 탐색하는 경사법과, 도함수의 계산이 곤란한 경우 주어진 몇 개의 점에서의 목적함수의 값을 이용하여 최소점을 탐색하는 직접탐색법으로 분류된다.

최적화기법을 사용하는 기본적인 개념은 구조계의 거동은 탄성계수와 같은 구조계의 지반 매개변수의 함수로 표현될 수 있으며, 해석된 변위 u_i 와 실측변위 \bar{u}_i 에 의해 구성된 목적함수도 마찬가지로 매개변수의 함수로 표현될 수 있다는 것이다. 즉 목적함수를 최소화하는 매개변수의 값은 실제의 구조계의 역학적 거동을 가장 근사적으로 나타낼 수 있다는 개념이다.^[6]

일반적으로 직접탐색법에서 사용하는 실측변위와 계산변위와의 오차의 함수인 목적함수 (object function) W 는 식 (11) 과 같다.^[7]

$$W = \left\{ \sum_1^n [u_i - \bar{u}_i]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

u_i 는 i 번째 계측 지점에서의 계산에 의한 변위이고 \bar{u}_i 는 i 번째 계측 지점에서 의 현장에서 실측한 변위이다. 계산변위 u_i 는 응력해석에 있어서 처음에 가정된 미지변수 p 에 의한 함수로 나타낼 수 있으므로 목적함수 W 는 $W(p)$ 와 같이 표현될 수 있다.

목적함수 W 을 최소화하는 미지의 매개변수 p 가 대상구조체의 거동을 가장 합리적으로 나타내는 변수가 된다. 따라서 반복적인 계산 의해 $W(p)$ 을 최소화함으로써 역해석 문제를 해결하게 된다. 본 연구에서는 탄성계수, 포아손비, 정지토압 계수를 목적함수를 지배하는 미지의 매개변수로 설정하여 역해석을 수행하며, 마찬가지로 최적화 제약조건은 탄성계수 $E > 0$, 포아손비 $0 < \nu < 0.5$, 그리고 정지 토압계수 $K_0 > 0$ 이다.

식 (11) 은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$W = \left\{ \sum_1^n [u_i(p') - \bar{u}_i]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (12a)$$

$$\text{또한, } p' = \frac{1}{\alpha} p \quad (12b)$$

로서, 여기서 p 는 전단계에서 계산된 미지변수, p' 은 현단계에서 계산된 보정된 미지변수, 그리고 α 는 식 (13) 과 같은 scalar 값으로 미지변수의 반복계산시에 필요한 보정량을 설정해 준다.

$$\alpha = \frac{u(p)^T \bar{u}}{u(p)^T u(p)} \quad (13)$$

대상구조체가 선형탄성체로 가정되었다 하더라도 목적함수는 고차의 비선형함수로 표현되므로 최적화과정에 도입되는 방법들은 이러한 고차의 비선형 문제를 해결할 수 있어야 하며, 목적함수의 도함수 계산과 같은 수치해석 과정을 필요로 하지 않는 것이 바람직하다. Powell's method 는 직접탐색법 중에서 가장 널리 이용되고 있으며, 도함수를 이용하는 경사법과 비교하여 보다 우수한 기법으로 평가되고 있다. 본 연구에서는 Powell's method 를 역해석 문제에 이용한다.

2.3 수치해석 및 결과분석

2.3.1 경계요소해석의 검증

경계요소해석 프로그램의 검증을 위하여 내부영역 문제의 다층구조를 부영역을 이용한 경계요소로 모형화한 후, 이를 선형 유한요소해석 결과와 비교한다.

검증을 위해 그림 2 와 같은 모형을 설정하였다. 설정된 모형은 그림에 도시한 바와 같이 원공의 중심이 지표로부터 30 m 깊이에 존재하는 평면변형을 상태의 직경이 10 m 인 원공이며, 대상 구조체는 2 개의 층 (연암 및 경암) 으로 이루어진 구조로서, 첫번째 지층의 깊이는 15 m 로 설정하였다. 대상영역의 탄성계수는 첫번째 및 두번째 지층을 650 MPa 및 2000 MPa, 포아손비는 0.20 으로 각각 가정하고, 자중의 영향을 고려하기 위해 대상 구조체의 단위중량은 2.3 tf/m³ 및 2.5 tf/m³, 또한 정지토압계수는 0.25 로 설정하였다. 그리고 대상구조체는 원공주위의 24 개의 요소와 절점을 포함하여, 72 개의 선형요소와 복절점을 포함한 80 개의 절점을 사용하여 구성하고 해석을 수행하였다.

경계의 설정은 원공의 굴착으로 인한 영향이 미소한 곳까지 고려해야 하므로 지표에서 깊이 방향으로 100 m, 원공 중심에서 수평방향으로 100 m 떨어진 곳으로 경계를 설정하였고 유한요소해석 모형과 동일한 경계조건을 사용하였다. 그리고 유한요소해석 모형은 그림 3 과 같이 190 개의 4 절점 요소와 227 개의 절점으로 구성하였다.

내부영역 문제의 경계요소해석과 유한요소해석을 수행하여 원공에서의 절점변위를 수평방향과 수직방향으로 나누어 그림 4 와 그림 5 에 도시하였다. 그 결과 경계요소해석과 유한요소해석 결과가 천정의 수직변위의 경우 -0.1499 cm, -0.1501 cm, 측벽부 수평변위의 경우 0.0259 cm, 0.0278 cm, 그리고 저면의 수직변위의 경우 0.3211 cm, 0.3207 cm 로, 본 연구에서 수행한 물체력과 초기응력을 고려한 다층구조체의 경계요소 프로그램이 유한요소해석 결과와 비교하여 근소한 오차 범위 내에서 합리적으로 일치함을 알 수 있었다.

또한, 경계요소해석 결과 원공주위의 수평방향의 변위가 유한요소해석 결과와 비교하여 상대적으로 더 큰 것을 알 수 있었는데, 이는 초기응력의 적분과정에서 영역적분 형태를 경계적분으로 변환할 때 수치적분을 수행함으로써 발생하는 오차인 것으로 판단되며, 이는 수직방향 변위에 비하여 미소한 값으로 전체적인 거동에 큰 영향을 미치지 않으므로, 본 경계요소해석 프로그램은 유한요소법과 비교하여 지하구조체의 해석에 있어서 보다 효율적인 것으로 판단된다.

2.3.2 역해석의 검증

본 절에서는 처음의 경계요소해석에서 사용한 원형 형태의 지하공동을 대상으로, 경계요소해석으로 부터 얻은 변위를 실측변위로 가정하여, 역해석기법을 이용하여 처음의 응력해석에서 기지의 값으로 가정하였던 각층의 탄성계수와 초기응력을 추정하였다. 단, 지층의 위치와 경계 등의 기하학적 자료는 기지의 값으로 하였다.

먼저 미지의 매개변수를 각 층의 탄성계수 2 개 만으로 제한하여 역해석을 수행하고, 또한 미지변수를 각 층의 탄성계수와 정지토압계수, 총 3 개로 가정하여 역해석을 수행하여 각각의 결과를 비교하였다. 여기서 역해석의 효율성을 높이기 위해 포아손비와 단위중량 등의 매개변수의 값은 기지의 상수로 고정하였다. 역해석을 위한 요소망의 구성에 있어서 계측점의 위치는 절점과 일치하도록 하였으며, 현장에서 일반적으로 측정되는 천단침하와 내공변위 및 원공의 중심축에 위치하는 지표면을 계측점으로 설정하였다. 일반적으로 지하구조체의 건설에 있어서, 계획단계에서 지질조사 등을 통해 굴착하려는 원지반의 지질구조와 지반의 종류 등의 대략적인 정보는 파악하고 있다. 따라서 본 연구에서도 첫번째 반복계산 단계에서의 탄성계수의 초기값을 연암 및 경암을 5000 MPa 으로 설정하였다.

원공의 천단변위, 내공변위 및 지표변위를 실측변위로 가정하여 역해석한 결과, 탄성계수의 최확값에 수렴하는 과정은 그림 6 및 그림 7 과 같다. 수직 및 수평 초기응력은 지표가 수평이고 측정된 원공내부의 변위가 터널 축을 통하는 수직평면에 대하여 대칭이라고 가정하면, 지반의 단위중량을 γ , 지표로부터의 깊이를 h , 정지토압계수를 K_0 라고 할 때, 각각 $\sigma_v = \gamma h$, $\sigma_h = K_0 \gamma h$ 에 의하여 구할 수 있다. 정지토압계수의 초기값을 1.0 으로 설정하여 역해석을 수행하였으며, 그 결과 최확값에 수렴하는 과정은 그림 8 에 도시하였다. 그 결과 처음의 경계요소해석에서 가정하였던 재료특성치와 비교하여 모두 근소한 오차로 수렴함을 볼 수 있었다. 그러나 최적화의 방향설정 과정이 첫번째 지층보다는 두번째 지층의 탄성계수값을 추정하는데에 주로 소요되는 것을 볼 수 있었는데, 이는 계측점으로 선택한 지점이 주로 원공주위에 분포하고 있으므로 목적함수 역시 두번째 지층의 탄성계수에 의해 크게 지배되기 때문이며, 또한 초기값과 최적화기법이 역해석에 지배적인 영향을 미치므로, 적절한 초기값과 최적화기법의 선택에 의해 소요되는 계산량과

시간을 더욱 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

또한, 지하구조체의 역해석에 있어서 탄성계수만을 미지변수로 가정하여 수행하는 것이 일반적이었으나, 본 연구의 결과 탄성계수 외에도 지하구조체의 거동에 지배적인 영향을 미치는 초기응력의 영향을 고려하여 역해석을 수행하는 것이 보다 합리적인 것으로 판단되며, 그리고 상대적으로 거동에 영향이 큰 매개변수의 선정에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

3 장. 결 론

본 연구에서는 물체력과 초기응력이 작용하는 다층구조체의 거동을 경계요소를 이용하여 모형화하고, 역해석기법을 이용하여 대상구조체의 재료특성을 추정하여 구조체의 거동을 보다 합리적으로 해석할 수 있는 프로그램을 개발하였다.

본 연구의 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 부영역으로 층을 이산화하고 물체력과 초기응력의 영향을 고려한 내부영역 문제의 경계요소해석 결과는 유한요소해석과 비교하여 비교적 합리적으로 일치하는 결과를 얻을 수 있었고, 상대적으로 자유도가 많은 유한요소법에 비해 지하구조체를 보다 효율적으로 모형화 할 수 있음을 알 수 있었다.
2. 경계요소해석으로 부터 얻은 변위를 실측변위로 가정하여 목적함수를 구성하고, 직접탐색법으로 Powell's method 를 이용하여 처음에 기지의 값으로 가정하였던 다층구조체의 각 층의 탄성계수와 초기응력을 역해석을 수행한 결과 최확값에 대해 근소한 오차범위 내에서 수렴하는 결과를 얻을 수 있었으므로, 본 연구에서 제안한 기법이 역해석 문제를 포함한 지하구조체의 거동해석에 합리적으로 적용될 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Cividini, A., Jurina, L., and Gioda, G., "Some Aspects of Characterization Problems in Geomechanics", *Int. J. Rock Mech and Mining Sciences & Geomechanics Abstr.*, Vol. 18, 1981, pp. 487-503.
2. Sakurai, S. and Takeuchi, K., "Back Analysis of Measured Displacements of Tunnels", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 16/3, 1983, pp. 173-180.
3. Venturini, W. S., *Lecture Notes in Engineering 4, Boundary Element method in Geomechanics*, Springer-Verlag, 1983.

4. Gioda, G. and Marier, G., "Direct Search Solution of an Inverse Problem in Elastoplasticity : Identification of Cohesion, Friction Angle and In-situ Stress by Pressure Tunnel Tests", *Int. J. Num. Meth. Engng.* Vol. 15, 1980, pp. 1823-1848.
5. Brebbia, C. A., Telles, J. C. F., and Wrobel, L. C., *Boundary Element Techniques*, Springer-Verlag, 1984.
6. Hisatake, M. and Ito, T., "Back Analysis for Tunnels by Optimization method", *5th Int. Conference of Numerical Methods in Geomech.*, Nagoya, 1985, pp. 1301-1307.
7. Ohkami, T., Ichikawa, Y. and Kawamoto, T., "A Boundary Element Method for Identifying Orthotropic Material Parameters", *Int. J. for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 15, 1991, pp. 609-625.

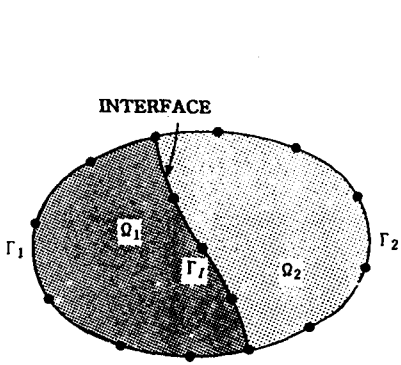


그림 1 영역의 분할

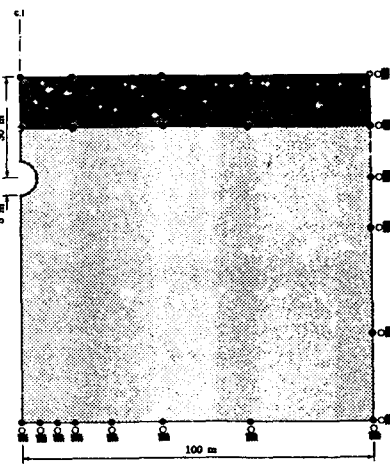


그림 2 경계요소해석 모형

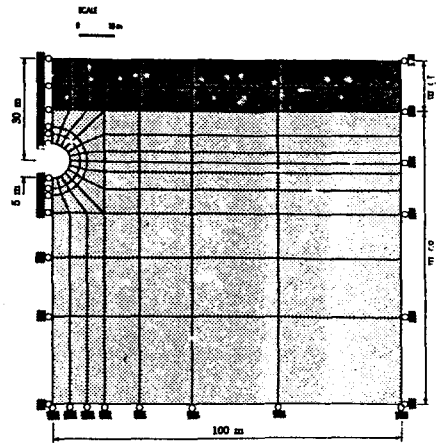


그림 3 유한요소해석 모형

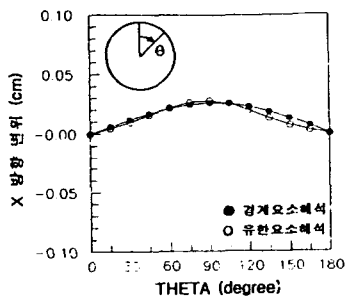


그림 4 원공의 수평변위 비교

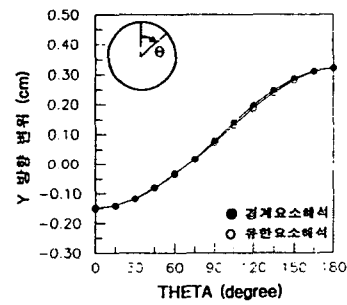


그림 5 원공의 수직변위 비교

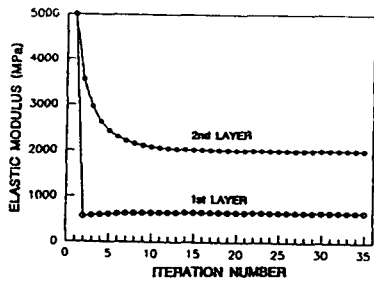


그림 6 탄성계수의 수렴과정
(미지변수 2)

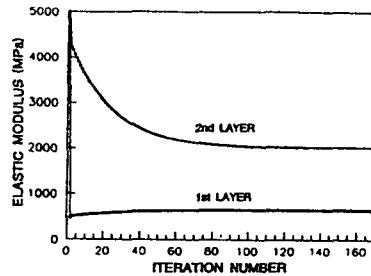


그림 7 탄성계수의 수렴과정
(미지변수 3)

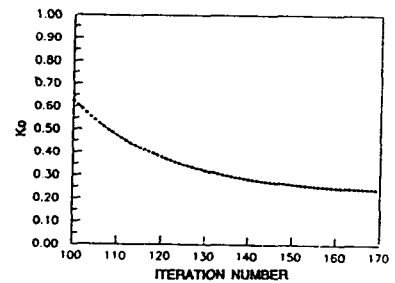


그림 8 정지토압계수의 수렴과정
(미지변수 3)