

도시터널 굴착지반의 탄성해석

남 정 만

제주대학교 해양토목공학과

Elastic Analysis of Urban Tunnelling Ground

Jung-Man Nam

Department of Ocean Civil Engineering, Cheju National University, Cheju 690-756, Korea

The finite element method and the boundary element method are applied to analyze stress and deformation developed in the elastic ground which an urban tunnel with various section is excavated. The analytical results by both the finite element method and the boundary element method show relatively good agreement with Mindlin's solution. And this paper shows that the boundary element method is more favourable than the finite element method because the work to obtain same accuracy is simple and computing time is short.

Also, to establish a reasonable design method for urban tunnel, minute investigation is carried out to variation of stress deformation around tunnel, subsidence and heave of ground etc.

Key words : tunnel, ground, finite element method, boundary element method, stress, deformation, elastic.

서 론

원래 터널은 도로 철도 등의 건설시 수송 시간의 단축을 목적으로 주로 산악 지대를 관통하여 설치되었으나, 인류문명의 발달과 더불어 근년에는 도시내의 토사지반에도 터널이 많이 설치되고 있다. 종래에는 이러한 도시터널의 굴착이 경제적 기술적인 이유로 회피되는 경향이 강하였다. 그러나 근년에는 도시내의 각종 지하구조물의 설치시 발생하는 용지의 취득곤란, 공사시의 교통공해 등의 이유로 인하여 터널이 채택되지 않으면 안되게 되었다. 또한 Shield공법 및 NATM(New Austrian Tunnelling Method) 등과 같은 특수한 터널공법의 개발로 인하여 지하철, 상하수도, 통신케이블, 가스관, 지하상가와 같은 교통 위생 통신 등의 시설물이 터널공법으로 설치되어 가는 예가 나날이 증가되어 가고 있는 실정이다.(遠藤浩三等, 1980)

도시터널은 산악터널과 달리 지표면에서 그 다지 깊지 않은 위치에 설치되는 것이 보통이며 지

표면에서의 경계조건은 터널 및 주변지반에 무시할 수 없을 정도의 영향을 미친다.(Tan et. al, 1980) 따라서, 도시터널의 합리적 설계법을 확립시키기 위하여서는 터널을 굴착하였을 경우 지반내에 발생하는 제반사항이 정확히 해석 규명되어야 할 것이다. 그러나 지금까지의 터널공학은 경험을 위주로 한 시공중심으로 취급되어 왔으며 터널지반의 응력상태와 변형에 대한 규명을 재료역학적 및 구조역학적 견지에서 다루어진 경우는 적었다. 그 이유는 터널 문제가 대단히 복잡 다양하여 각 현장마다 그 특성을 달리하고 있기 때문이다. 즉, 강재나 콘크리트 등의 재료에 관한 역학적 파악이 충분하다하여도 그것을 둘러싼 지반이 매우 복잡한 구조를 하고 있으며 위치와 시간에 따른 정성적 내지 정량적 특성파악이 매우 곤란하여 이론적 규명이 타 분야에 비교하여 지연되고 있음에 기인한다. 그럼에도 불구하고 한 현장에서 얻은 경험이 그대로 다른 현장에 활용될 수 없는 경우가 많다는 현실성으로부터 야기되는 이론적 규명

에 대한 강한 요망은 결국 외국에서 터널분야에 관한 많은 연구를 전향시키게 되었다. 우리 나라에서도 지하철 건설에 터널공법이 사용되면서 터널설계기술의 자립화가 어느 때보다도 시급히 요구되고 있다.

본 연구는 탄성지반 속에 도시터널을 굴착함으로써 인하여 지중에 발생하는 응력과 변형의 변화를 조사분석하고자 함을 목적으로 한다. 특히 터널굴착으로 인하여 유발되는 터널주위의 토압, 터널의 단면변형 및 지표면의 침하 등의 특성에 관하여 면밀하게 조사하고자 한다. 이들 터널굴착지반을 해석함에 있어서는 지반강도가 비교적 강한 경우에 적용 가능한 지반의 탄성에 주목하여 해석지반을 탄성체로 가정한다. 또한 해석방법으로 유한요소법(三本木茂夫等, 1970), 경계요소법(Brebbia et. al, 1980)을 터널해석에 적용시켜보고자 시도하여 보며 그 결과를 Mindlin의 해석해(Mindlin, 1939)와도 비교 검토하고자 한다.

평면변형율장의 탄성해석법

터널 굴착지반은 각 현장마다 그 지반특성이 복잡하므로 이것을 해석함에 있어서는 자연 여러가지 단순화 내지 이상화 작업을 크게 두 가지로 생각할 수 있다. 하나는 차원의 문제이고 다른 하나는 역학적 거동에 관한 것이다.

우선 전자에 관하여서는 복잡한 3차원의 터널지반을 2차원 평면변형율 문제로 근사해석하는 경우가 많다. 이는 터널입구 근방을 제외한 실제 지반이 2차원 평면변형 상태에 가깝고 평면구조로 취급되는 지보공 및 복공의 설치와도 차원이 일치될 수 있기 때문이다. 그 밖에도 3차원 해석에 비하여 훨씬 계산노력이 적게 든다는 이 점을 들 수 있다. (Yamaguti, 1929)

한편 지반의 역학적 거동에 관하여는 지반을 탄성체, 탄소성체 혹은 점탄소성체 등으로 가정하여 그들의 고유한 역학적 특성의 관계식이 도입되고 있다. 그러나 신중히 시공관리가 된 모래질지반이나 과압밀 점토 지반에서는 탄성적 거동이 지배적이어서 이러한 지반문제의 해석에는 탄성해석이 많이 사용되고 있다.

Mindlin 해

수평지표면을 가지는 균질등방탄성지반중에 굴

착된 수평원형 터널지반문제는 Mindlin에 의하여 해석해가 유도 제안되었다. 즉, 터널굴착으로 인하여 터널굴착상에 작용하는 응력(이를 2차응력이라 함)은 Fig. 1의 쌍곡좌표를 이용하여 다음 식으로 구할 수 있다.(Mindlin, 1939)

$$\begin{aligned}
 (\sigma_r)_{\xi_1} = & \frac{\gamma a (\cosh \xi_1 - \cos \eta)}{2 \sinh^2 \xi_1} \left\{ \frac{2(1 - \cosh \xi_1 \cos \eta) \sinh \xi_1}{(\cosh \xi_1 - \cos \eta)^2} \right. \\
 & - 4 \cosh \xi_1 - \left(\frac{5 - 6\nu}{1 - \nu} + 2e^{-2\xi_1} \right) \cos \eta \\
 & \left. - 4 \sinh \xi_1 \sum_{n=2}^{\infty} N_n \cos n \eta \right\} + \frac{\gamma(1 - 2\nu)a}{6(1 - \nu)} (\cosh \xi_1 - \cos \eta) \\
 & \{ 6 \coth \xi_1 \operatorname{cosech} \xi_1 + 6 \operatorname{cosech}^2 \xi_1 \cos \eta \\
 & + 4 \sinh \xi_1 \sum_{n=2}^{\infty} S_n \cos n \eta \} \quad (1)
 \end{aligned}$$

여기서,

$$N_n = \frac{ne^{-n\xi_1} (\sinh n \xi_1 \cosh n \xi_1 - n \sinh \xi_1 \cosh \xi_1)}{\sinh^2 n \xi_1 - n^2 \sinh^2 \xi_1}$$

$$S_n = \frac{n(n^2 - 1) \sinh n \xi_1}{\sinh^2 n \xi_1 - n^2 \sinh^2 \xi_1}$$

또한, (ξ, η) 는 쌍곡 좌표, γ 는 지반의 단위체적중량, ν 는 Poisson비이다.

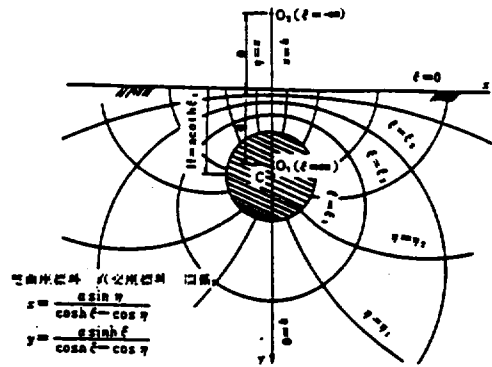


Fig. 1. Stress Distribution around a Horizontal Circular Hole

유한요소법(Finite Element Method)

Fig. 2와 같이 절점이 반시계방향으로 i, j, k 인 2차원문제의 삼각형요소의 절점변위벡터 $\{U_j\}$ 와 절점력벡터 $\{F_j\}$ 는 식(2), (3)과 같으며

$$\{U_j\}^T = \{u_i, v_i, u_j, v_j, u_k, v_k\} \quad (2)$$

$$\{F_j\}^T = \{X_i, Y_i, X_j, Y_j, X_k, Y_k\} \quad (3)$$

이들 사이의 관계는 식 (4)와 같다.

$$\{F\}_e = [K_e] \{U\}_e \quad (4)$$

여기서 $[K_e]$ 는 요소강성 매트릭스이며 다음과 같이 구한다.

$$[K_e] = A[B^*]^T [D] [B^*] \quad (5)$$

식(5)중 A는 삼각형요소의 면적이며 (6)과 같다.

$$A = \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{vmatrix} \quad (6)$$

또한 $[B^*]$ 는 다음식으로 구한다.

$$[B^*] = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} y_j - y_k & 0 & y_k - y_i & 0 & y_i - y_j & 0 \\ 0 & x_k - x_j & 0 & x_i - x_k & 0 & x_j - x_i \\ x_k - x_j & y_j - y_k & x_i - x_k & y_k - y_i & x_j - x_i & y_i - y_j \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$[D] = \frac{E_s(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서 E_s 는 지반의 탄성계수이다.

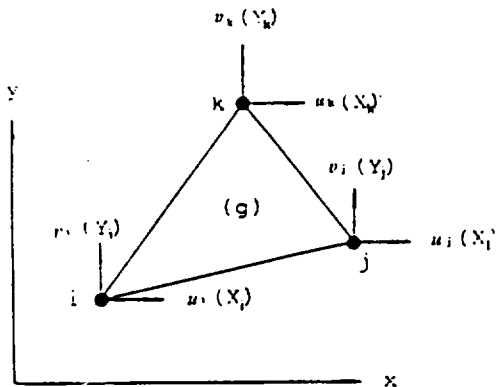


Fig. 2. An Element of a Continuum in Plane Strain

각 요소에 대한 식(5)로부터 전절점력벡터 $\{F\}$ 와 전절점변위벡터 $\{U\}$ 사이의 관계를 다음과같이 구한다.

$$\{F\} = [K] \{U\} \quad (9)$$

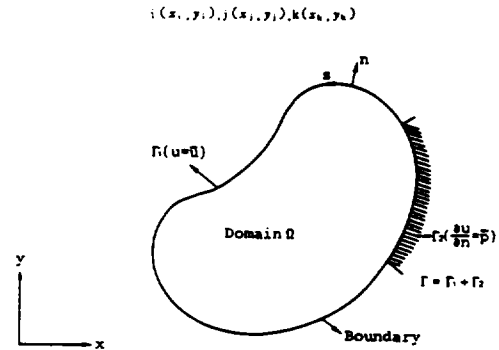


Fig. 3. Problem Domain Ω and Boundary Γ in B.E.M

여기서 $[K]$ 는 전체강성매트릭스이다. 식(9)로부터 미지변수에 대한 매트릭스를 풀면 각절점의 절점력과 절점변위를 구할 수 있다. 한편, 각 요소의 응력 $\{\sigma\}_e$ 는 다음과 같이 구하여 진다.

$$\{\sigma\}_e = [D] [B^*] \{u\}_e \quad (10)$$

경계요소법(Boundary Element Method)

물체력을 무시한 탄성체에 대한 경계치문제의 적분방정식은 다음과 같다.(Banerjee et. al, 1980)

$$C U_i + \int_{\Gamma} U_k F_{ik} d\Gamma = \int_{\Gamma} F_k U_{ik} d\Gamma \quad (11)$$

여기서 F 와 Γ 는 각각 Fig. 3에서 보는 바와 같이 외력과 경계이고 U_i 는 점 i 에서 1방향의 변위, C 는 점 i 가 경계점이면 $1/2$ 이고 내면이면 1 이다. 또한 U^* , F^* 는 다음식으로 표시되는 변위와 응력의 기본 특이해이다.

$$U_{ik}^* = \frac{1}{8\pi G(1-\nu)} \left\{ (3-4\nu)\delta_{ik} \ln\left(\frac{1}{r}\right) + \gamma_{,i}\gamma_{,k} \right\} \quad (12)$$

$$F_{ik}^* = \frac{1}{4\pi G(1-\nu)} \left[\frac{2\gamma}{2\pi} \{2\gamma_{,k}\gamma_{,i} + (1-2\nu)\delta_{ik}\} - (1-2\nu)(\gamma_{,i}\mu_k - \gamma_{,k}\mu_i) \right] \quad (13)$$

여기서 $G (= \frac{E_s}{2(1+\nu)})$, δ_{ik} 및 n 은 각각 전단탄성계수, Kroneker의 델타 ($i=k$ 이면 1 이고 $i \neq k$ 이면 0) 및 경계에서의 외향단위법선벡터이다. 그리고 성분 U_{ik}^* 와 F_{ik}^* 는 점 i 에서 1방향의 단위력이 작용할 때 k 방향에 발생하는 변위 및 힘을 나타내는

매트릭스이고, $\gamma_{,i}$ 은 $\frac{\partial \gamma}{\partial x_i}$ 이다. Fig. 3의 경계면을 n 개의 요소로 분할하여 각 요소의 중앙점을 절점으로 하는 일정요소를 취하면 다음 식이 구해진다.

$$C_i U_i + \sum_{j=1}^n \int_{\Gamma_j} F_j d\Gamma U_j = \sum_{j=1}^n \int_{\Gamma_j} U_j d\Gamma F_j + \int_{\Omega} U b d\Omega \quad (14)$$

이 식중 적분항을 H_{ij} 및 G_{ij} 라 하고 Gauss의 수치적분법을 이용하여 계산하면 식(14)는 식(15)로 된다.

$$C_i U_i + \sum_{j=1}^n H_{ij} U_j = \sum_{j=1}^n G_{ij} F_j \quad (15)$$

좌변의 U 를 함께 쓰고 매트릭스로 표시하면 식(16)이 된다.

$$[H][U] = [G][F] \quad (16)$$

식(16)을 풀면 경계상에서의 미지 변위와 힘이 구하여진다.

한편, 영역 내부의 응력은 식(11)의 U 를 미분함에 의해 다음과 같이 얻어진다.

$$\sigma_{ij} = \int_{\Gamma} D_{kij} F_k d\Gamma - \int_{\Gamma} S_{kij} U_k d\Gamma \quad (17)$$

여기서 D_{kij} 와 S_{kij} 는 다음과 같다.

$$D_{ijk} = \frac{1}{4\pi\gamma(1-\nu)} \left[(1-2\nu) \{ \delta_{ik} \gamma_{,j} + \delta_{kj} \gamma_{,i} - \delta_{ij} \gamma_{,k} \} + 2\gamma_{,i} \gamma_{,j} \gamma_{,k} \right] \quad (18)$$

$$S_{kij} = \frac{1}{2\pi\gamma^2(1-\nu)} \left[2 \frac{\partial \gamma}{\partial n} \{ (1-2\nu) \delta_{ij} \gamma_{,k} + \nu (\delta_{ik} \gamma_{,j} + \delta_{jk} \gamma_{,i}) - 4\gamma_{,i} \gamma_{,j} \gamma_{,k} \} + 2\nu (n_i \gamma_{,j} \gamma_{,k} + n_j \gamma_{,i} \gamma_{,k}) + (1-2\nu) (2n_k \gamma_{,i} \gamma_{,j} + n_j \delta_{ik} + n_i \delta_{jk}) - (1-4\nu) n_k \delta_{ij} \right] \quad (19)$$

도시터널 굴착지반 해석

응력 해방법

터널굴착지반은 터널굴착으로 인한 지중응력변화로 굴착전후에 서로 다른 응력상태에 놓여지게 된다. 여기서, 터널굴착전의 지반 속의 응력상태를 통상 1차응력(Primary Stress) 상태라하며 터널굴착후를 2차응력(Secondary Stress) 상태라 한다. 이 1차응력상태라함은 터널 굴착전에 자중, 지형, 지질구조, 응력이력등으로 부터 정하여지는 자중의 역학적 평형상태를 의미하며, 2차응력상태라

함은 터널 굴착으로 인하여 지금까지의 역학적 경계조건에 변화가 발생하여 새로운 평형상태로 변하게 된 상태이다.

수평지표면을 가지는 탄성지반 속의 한 위치 A 에 작용하는 1차응력을 각 σ_{y1} , σ_{x1} 라 하면 다음 식과 같이 구하여진다.

$$\begin{aligned} \sigma_{y1} &= \gamma \cdot h \\ \sigma_{x1} &= \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_{y1} = \lambda_h \sigma_{y1} \end{aligned} \quad (20)$$

여기서 γ 는 흙의 단위체적중량, h 는 지표면에서 A 위치 까지의 지중깊이, λ_h 는 축압계수이다.

본 논문에서는, 터널굴착으로 인하여 지중에 발생한 응력의 변화를 해석할 수 있는 방법으로 응력해방법을 사용한다. 이 해석법은 지반속에 계획된 터널경계면에 존재하는 1차응력을 초기조건응력이라 하고 터널굴착시 터널주면에서 이 응력이 해방되는 것으로 하여 이때 발생하는 응력변화를 산출하는 방법이다. 즉, 탄성지반에서 터널굴착후에 터널주면의 탄성변형이 모두 발생될 수 있다면 터널주면상의 법선방향 응력은 0이어야만 하기 때문에 터널주면에 작용하는 일차응력과 같은 크기의 힘을 터널주면상에 반대방향으로 작용시켜 응력변화량을 구할 수 있다. 이 응력변화량을 σ_{y0} , σ_{x0} , τ_{xy} 라 하면, 2차응력 σ_{y2} , σ_{x2} 는 다음식으로 구하여진다.

$$\begin{aligned} \sigma_{y2} &= \sigma_{y1} + \sigma_{y0} \\ \sigma_{x2} &= \sigma_{x1} + \sigma_{x0} \end{aligned} \quad (21)$$

최대주응력 σ_1 과 최소중응력 σ_2 는 다음과 같이 구하여진다.

$$\left[\begin{array}{l} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{array} \right] = \frac{1}{2} (\sigma_{x2} + \sigma_{y2}) \pm \sqrt{\frac{1}{4} (\sigma_{x2} - \sigma_{y2})^2 + \tau_{xy}^2} \quad (22)$$

해석지반

해석 대상지반으로는 균질등방탄성지반을 선택하였으므로 사질 지반이나 과압밀 혹은 불포화된 점성지반의 경우를 생각할 수 있다. 해석법으로는 유한요소법을 주로 사용하며 앞에서 설명한 Mindlin해와 경계요소법 결과와도 비교 검토한다. 유한요소법과 경계요소법에서는 응력해방법을 적용한다.

우선, 단위중량 γ 가 $1.8t/m^3$, 탄성계수 E_s 가 500

도시터널 굴착지반의 탄성해석

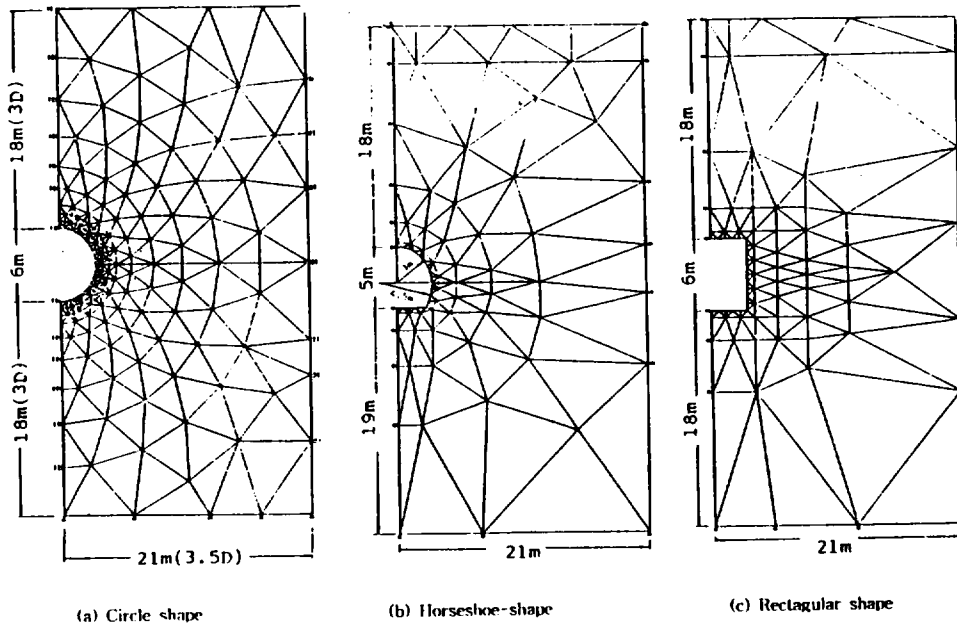


Fig. 4. Mesh used in Analysis

kg/cm², Poisson비 ν 가 0.2, 축압계수 λ_0 가 0.25이며 터널상부지반의 두께 H는 18m인 지반을 기준으로 하여 터널 주변의 변형과 응력을 검토한 후 이들 지반특성을 나타내는 요소를 하나씩 변화시켜 계산을 실시하여 각 요소에 대한 영향을 검토하여 본다. Fig. 4는 수평지표면을 가지는 반무한지반에 대한 유한요소법(F.E.M)에 의한 해석을 실시하기 위하여 터널 중심에서 터널직경 혹은 폭에 대략 3.5배되는 지역 까지를 해석범위로 하고 이 지반의 요소분할도를 도시한 것이다. 이 중 그림4(a)는 원형터널을 굴착할 경우의 터널주변지반을 298개의 삼각형요소로 분할한 예이며 그림4(b)와(c)는 마제형 및 구형터널을 굴착할 지반을 126개의 삼각형요소로 분할한 예이다.

한편 경계요소법(BEM)에 의한 해석을 실시하기 위하여서는 우선 터널중심에서 터널직경의 50배되는 경계면과 지표면으로 둘러 싸인 부분의 지반을 해석범위로 하였으며 이 해석범위를 59개의 선요소를 분할하였다. 이 중 터널굴착면은 16개의 선요소로 분할하였다. 이 해석범위는 4-1절에서 응력결과를 검토한후 터널직경의 5배범위까지 지도 축소시켜도 무방함이 거론될 것이다.

해석결과 및 고찰

터널주변지반의 응력

Fig. 5는 각종 단면의 터널을 굴착하였을 경우 터널굴착면 부근지반에 2차응력의 크기를 벡터로 도시한 것이다. 여기서 압축응력을 정(+)의 응력으로 정의하였다. 그림중 실선으로 표시한 응력은 식(1)의 Mindlin 해로 구한 원형터널에 대한 응력이며 흰 원과 검은 원으로 표시한 응력은 각각 유한요소법에서는 터널굴착면에 가장 접하여 있는 요소에 발생한 접선방향주응력을 터널면응력으로 간주하여 이 응력을 각 요소의 도심을 지나는 법선방향으로 크기를 표시하였다. 경계요소법에서도 터널굴착면에서 약간(터널굴착면에서의 요소길이의 반정도 깊이)지반내부로 들어간 위치에서의 접선방향 주응력을 터널면응력으로 간주하였다. Fig. 5에 의거하면, 터널의 측벽부에서는 큰 압축응력이 발생하고 터널의 천정과 바닥으로 갈수록 압축응력이 감소하다가 인장응력이 발생하게 까지 된다. 원형 및 구형터널의 경우는 응력분포가 상하거의 대칭으로 나타난다. 마제형터널의 경우 상부에서 측벽부에 이르기까지는 원형의 경우와 그다지 차이가 없지만 측벽부에서 상부까지는 현저

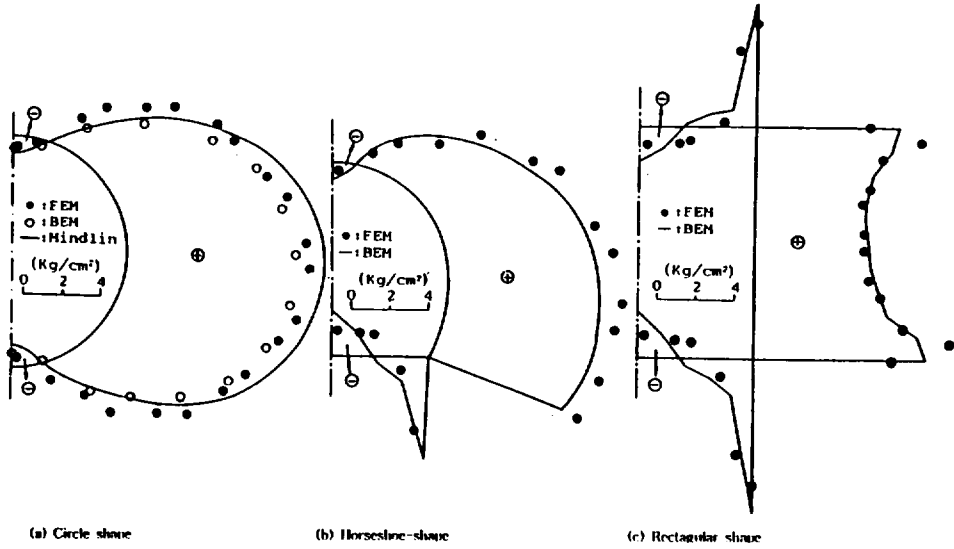


Fig. 5. Stress Distribution around tunnels

한 차이가 있다. 즉, 인장응력의 발생역은 천정부에서 원형의 경우와 거의 같지만 바닥 부분에서는 상당히 큰 인장응력이 넓은 범위에 분포되어 있다. 이것은 터널의 바닥 부분에 설치하는 Invert가 터널의 안전에 크게 기여하고 있음을 증명하여 주는 결과이기도 하다.

한편 구형터널의 경우 모서리부분에 응력집중현상이 일어나고 상하부의 인장응력은 크기와 영역이 원형과 마제형보다 크다. 이들 결과로부터 터널은 원형에 가까울수록 발생응력이 적음은 물론이고 인장응력에 대한 터널의 안전도도 상승되고 있음을 알 수 있다. 이 터널면응력은 지반탄성계수에 영향을 받지 않는 반면 토피고와 단위체적중량의 증가에 따라 선형적으로 증가하고 Poisson비의 증가에 따라 감소함이 밝혀진바 있다. 3가지 해석법으로 해석한 결과를 비교하면 다음과 같다. 우선 원형터널의 경우 경계요소법에 의한 결과가 유한요소법에 의한 결과보다 약간 덜 Mindlin의 해에 일치하고 있다. 그러나 이들 3가지 해석법에 의한 결과는 대략적으로 잘 일치한다고 할 수 있다. 유한요소법과 경계요소법이 Mindlin해석해에 잘 일치한다는 원형터널에 대한 이상과 같은 결과에 근거하여 마제형과 구형터널의 경우의 터널면응력을 유한요소법과 경계요소법에 의하여 구하여 보면 Fig. 5(b) 및 (c)와 같다. 이들 두가지 방법에 의한 결과는 원형터널의 경우와 동일하게 서로 잘

일치하고 있으나 최대압축응력은 유한요소법이 약간 크게 산정된다. 또한 마제형터널의 바닥부 및 구형터널의 천정부와 바닥부에서 인장응력과 압축응력의 변화위치는 유한요소법과 경계요소법이 다르게 나타나고 있다.

이상과 같은 동일정도의 결과를 얻기 위한 유한요소법과 경계요소법을 비교하여 보면 경계요소법이 유한요소법보다 작업과정과 계산시간에 있어서 유리함을 알 수 있다. 즉, 유한요소법은 데이터작성을 위한 요소분할작업에 많은 시간이 필요하며 컴퓨터계산시간도 경계요소법에 비하여 많이 소요되었다.

Fig. 6은 원형터널의 중심을 지나는 연직축과 수평축부분 지반에 터널굴착을 전후하여 발생하는 연직응력 및 수평응력의 응력변화율 즉 1차응력과 2차응력의 비를 도시한 것이다. 응력변화율 R_s 가 1이면 1차응력과 2차응력이 동일하여 터널굴착으로 인한 지중응력변화가 없음을 의미하며 1이하이면 응력이 감소되었음을 1이상이면 응력이 증가되었음을 의미한다.

그림중 실선과 점선은 각각 경계요소법에 의한 연직응력과 수평응력의 응력변화율이며 검은 원과 흰원은 유한요소법에 의한 결과를 표시한 것이다. 이들 2가지 해석법에 의한 결과는 서로 잘 일치하고 있다. 결국 Fig. 5와 Fig. 6의 결과로부터 터널면응력 및 지중응력은 유한요소법과 경계요소법

으로 구한 값이 서로 잘 일치하고 있음을 의미한다.

Fig. 6에 의하면 2차응력상태의 연직응력 σ_{z2} 는 터널 굴착으로 인하여 지표면에서 터널에 가까워 질수록 또는 터널바닥의 하부 깊은 곳에서 터널바닥에 가까워 질수록 1차연직응력 σ_{z1} 보다 감소하는 경향이 있음을 알 수 있다. 그 감소량은 터널 굴착면에서 터널직경의 1배정도의 위치 밖에서는 별로 크지 않으나 이 위치에서 터널면에 이르는 지반내에서는 감소량이 현저하게 증가하고 있다. 수평축상에서 살펴보면 σ_{z2} 는 σ_{z1} 보다 증가하는 경향이 있다. 이 증가량은 터널면에서 터널직경의 1배정도의 범위내에서는 현저하게 나타나지만 이 범위 밖에서는 응력의 변화가 거의 없다. 따라서 터널 굴착으로 인한 연직응력변화의 영향은 터널면에서 터널직경의 1배정도 범위내에서 현저하다고 할 수 있다.

한편, 2차응력상태의 수평응력 σ_{x2} 는 터널굴착으로 인하여 터널굴착면 부근을 제외하고는 연직축과 수평축에서 1차응력상태의 수평응력 σ_{x1} 보다 일반적으로 약간씩 증가된다. 그러나 그 변화량은 수평응력의 경우에 비교하여 그다지 크지는 않다. 천정과 바닥 및 측벽에서의 σ_{x2} 는 σ_{x1} 보다 급격히 감소하여 측벽부분에서는 0에 이르며 천정과 바닥에서는 인장응력까지 발생하게 됨을 알 수 있다. 응력변화의 영향도 연직응력의 영향범위인 터널직경의 1배정도내에서 현저히 나타나고 있다.

또한 Fig. 6으로부터, 터널하부지반과 측방지반에서는 터널중심으로부터 터널직경의 5배정도 되는 위치에 이르면 연직응력과 수평응력 모두 변화가 없음을 알 수 있다. 따라서 경제요소법에 의하여 계산을 할 경우 계산범위는 터널직경의 5배범위까지로 하여도 충분하리라 생각되어 이하의 경제요소법에 의한 계산 결과는 터널직경의 5배까지 범위를 계산대상지반으로 한다.

마세형 및 구형터널지반의 경우도 유사한 경향을 보이고 있음을 확인할 수 있었으나 본 논문에서는 생략한다.

터널주변 지반의 변형

Fig. 7은 원형터널중심을 지나는 연직축에 따른 지반의 침하량과 융기량을 유한요소법과 경제요소법으로 구하여 도시한 것이다. 이 결과에 의하면 일반적으로 말하여 이들 두 해석법에 의한 침하량

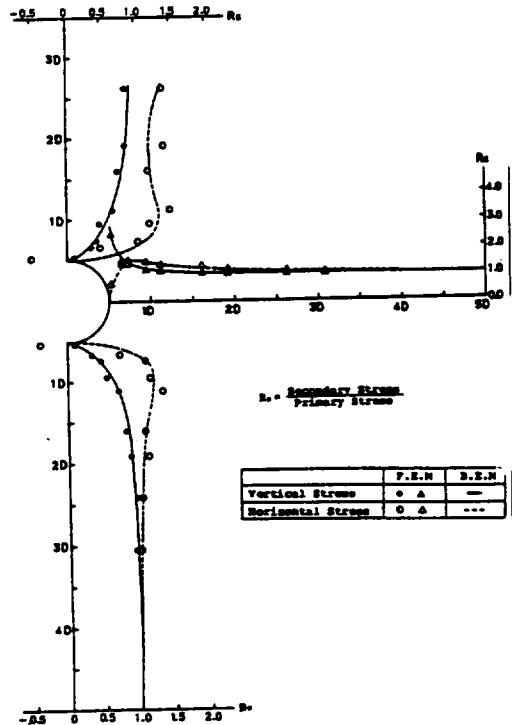


Fig. 6. Stress Ratio between Primary Stress and Secondary Stress

과 융기량은 양호한 일치를 보이고 있다고 할 수 있다. 터널상부지반의 침하량은 경제요소법에 의한 값이 유한요소법에 의한 값보다 약간 적게 산정되고 있으며, 터널하부지반에서는 경제요소법에 의한 융기량이 유한요소법에 의한 값보다 터널바닥에서는 약간 적으나 하부지반으로 갈수록 약간 크게 산정되고 있다. 이는 하부지반에서 두 해석법에 사용된 해석범위의 차이에 의한 것으로 생각된다. 즉 유한요소법이 해석범위는 터널중심에서 터널직경의 3.5배 영역이며 경제요소법의 해석범위는 터널직경의 5배로 하였기 때문인 것으로 생각된다.

이 그림으로부터 터널상부지반내의 침하량은 지표면에서 터널직경의 1배(6m)깊이 까지의 범위에서는 거의 동일한 량을 나타내고 있으며 터널면에서 터널직경의 1배정도 범위내에서 급격한 증가경향을 보이고 있다. 터널하부지반의 융기량분포를 나타낸 Fig. 7(b)로부터 터널면으로부터 터널직경의 2배정도 범위까지를 영향권으로 생각할 수 있으며 심한 영향권은 터널면에서 터널직경의 1배정도 범위임을 알 수 있다.

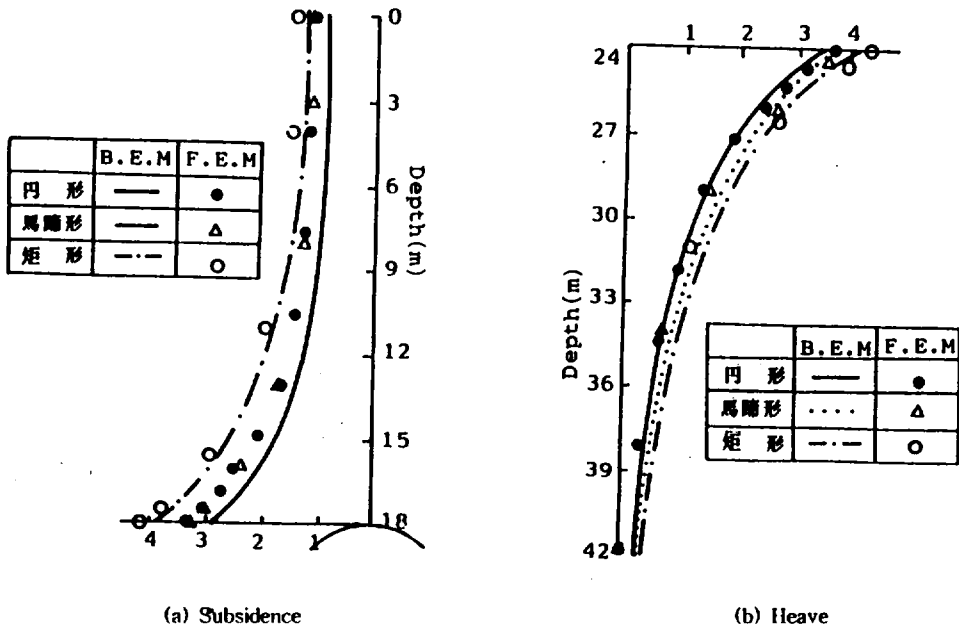


Fig. 7. Subsidence and Heave of the Ground

Fig. 8과 9는 Poisson비가 각각 0.2와 0.4인 지반에 설치된 터널의 터널면절점의 변위를 유한요소법으로 도시한 것이다. 그림8(a)의 원형터널의 경우는 경계요소법과도 비교하고 있으나 경계요소법에 의한 결과와 유한요소법에 의한 결과는 극히 양호한 일치를 보여주고 있다. Fig. 8과 9로부터 알 수 있는 바와 같이 원형과 구형 터널단면의 변형은 거의 상하대칭의 결과를 보여주고 있다. Poisson비가 0.2인 Fig. 8의 경우는 터널 상하부에서 단면축소를 보이고 측방부에서는 단면확대 경향을 보이고 있다. 이 경향은 마제형 터널에서도 관찰할 수 있다. 그러나 구형의 경우는 Fig. 8(a)에서 보는 바와 같이 언제나 단면축소의 경향이 있다. 한편 Poisson비가 0.4인 Fig. 9의 경우는 원형 마제형 및 구형터널 단면이 모두 상당한 단면축소의 경향을 보이고 있다. 또한 터널의 천정과 바닥에서는 침하량과 융기량이 Poisson비가 0.2인 경우에 비하여 적은 값을 보이고 있으나 측벽에서는 단면확대경향이 아닌 상당량의 단면축소경향이 있음을 알 수 있다.

이러한 침하량과 융기량은 토피고와 흙의 단위체적중량의 증가와 함께 선형적으로 증가하고 지반탄성계수의 증가에 따라 크게 감소하며 Poisson비의 증가에 따라서는 약간의 감소경향이 있음이 밝혀진바 있다.

지표면의 침하량

터널을 지반 속에 굴착하면 지표면이 침하하게 되고 주변구조물에 무시할 수 없을 정도의 영향을 미치게 된다.

본 연구의 대상지반에 대하여 지표면의 침하량을 조사하여 보면 Fig. 10과 같다. 이 그림에 의하면 원형터널의 경우 경계요소법에 의한 침하량은 유한요소법에 의한 값보다 적게 나타나고 있다. 이는 앞서도 언급한바와 같이 두 해석법에 사용된 해석범위가 다른점에 기인된 것으로 생각된다.

침하는 터널 직상부의 지표면에서 가장 큰 값을 보이며 원형, 마제형 및 구형의 순으로 침하량이 증대하고 있음을 보여준다. 따라서 지표면의 침하량은 원형에 가까운 터널굴착일수록 적음을 알 수 있다.

또한 지표면의 침하량은 지반탄성계수와 Poisson비의 증가에 따라 감소하며 토피고와 흙의 단위체적중량의 증가에 따라 감소하며 토피고와 흙의 단위체적중량의 증가에 따라 선형적으로 증가함이 알려져 있다.

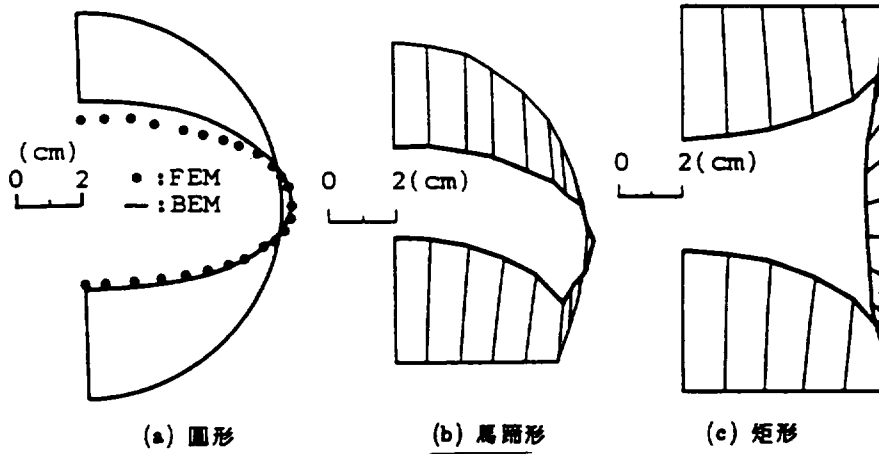


Fig. 8. Displacement of Tunnel Section($\omega=0.2$)

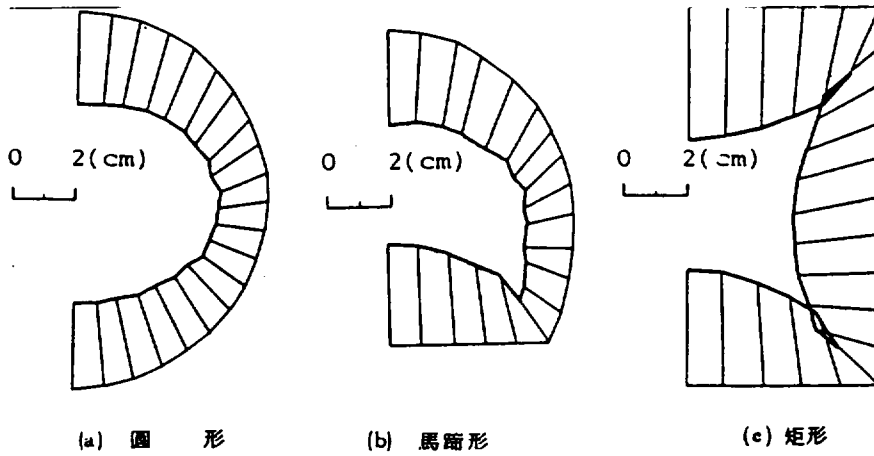


Fig. 9. Displacement of Tunnel Section($\omega=0.4$)

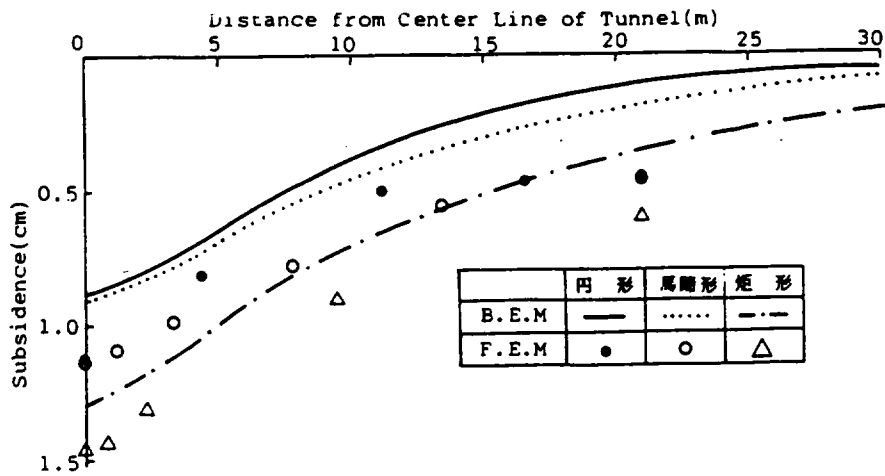


Fig. 10. Deformation of Groun Surface

결 론

유한요소법과 경계요소법을 이용하여 탄성지반에 굴착된 도시터널의 해석이 실시되었으며, 이들 결과는 Mindlin 해와도 좋은 일치를 보이는 것으로 나타났다. 이들 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 동일 정도의 결과를 얻기 위하여 경계요소법은 유한요소법보다 작업과정과 계산시간에 있어서 유리하다.
2. 터널굴착으로 인한 응력과 변형의 영향영역은 터널면에서 터널크기의 1배 이내에서는 극심한 영향을 받는다. 또한 터널중심에서 터널크기의 5배 되는 위치에서는 변화가 발생하지 않는다.
3. 원형단면의 터널일수록 안전하다.
4. 터널굴착으로 인하여 측벽부에서 큰 압축응력이 발생하고 천정과 바닥부에서는 크게 감소하여 인장응력이 발생하기도 한다.
5. 연직응력은 터널상하부지반에서는 감소하고 측벽부에서는 증가하며 수평응력은 터널에 극히 가까운 부분을 제외한 곳에서는 증가한다.
6. 지표면의 침하량은 터널직하부의 지표면에서 가장 큰 값을 보이며 원형, 마제형, 구형터널 순으로 침하량이 증대한다.

참 고 문 헌

遠藤浩三, 朴田浩, 有蘭勳 “供設シルド工事における地盤沈下”, 土木技術, Vol.27, No.11, 1972, pp.62~68.

- 三本木茂夫, 吉村信敏, “有限要素法による構造解析プログラム”, 培風館, 東京, 1970. pp.90~97
- Banerjee, P. K. and Butterfield, R., “Boundary Element Methods in Engineering Science”, McGraw-Hill, 1981, pp.420~430
- Brebbia, C. A. and Walker, S. “Boundary Element Techniques in Engineering”, Newnes-Butterworth, 1980.
- Davis, E. H., Gunn, M. J., R. J. and Seneviratne, H. N., “The stability of shallow tunnels and underground openings in cohesive materials”, Geotechnique, Vol. 30, No.4, 1980. pp.397~416
- Mair, R. J., Gunn, M. J. and D' Reilly., M. P., “Ground movement around shallow tunnels in soft clay”, Tunnels & Tunnelling, June, 1982, pp.45~48
- Mindlin, R.D., “Stress distribution around a tunnel”, Proc. of ASCE, Vol.65, 1939, pp.619~642.
- Tan, D. Y. and Clough, G. W., “Ground control for shallow tunnels by soil grouting”, GED, ASCE, Vol. 106, No. GT9, Proc Paper15716, Sep. 1980, pp.1037~1057.
- Yamaguti, N., “On the stresses around a horizontal circular hole in gravitating elastic solid”, 土木學會誌, 東京, Vol. 15, NO. 4, 1929. pp.291~303