

NATM 터널 해석용 유한 요소 프로그램

(A Finite Element Program for the NATM Tunnelling Method)

유	태	성 *
고	일	두 **
박	상	철 ***
김	고	원 ***
이	영	환 ****

요 지

본 논문은 경제적이고 안정성 높은 터널 및 지하공동의 건설을 위한 "터널 시공법(NATM) 연구 개발" 계획의 일환으로 대우 건설 기술연구소에서 개발한 터널 해석용 유한 요소 프로그램인 DWTAP(Daewoo Tunnel Analysis Program)의 이론적 배경과 특성 및 계산방법등을 기술하며, DWTAP을 이용하여 해석한 실험을 수록하고 있다.

아울러 Parametric Study 를 통하여 입력되는 지반의 공학적인 성질과 터널의 기하학적인 특성에 대한 예민성을 알아내고, 실제로 설계 시공된 공구의 단면을 선정하여 해석결과와 계측결과를 비교 검토함으로써 일반적인 터널 거동을 고찰하였다.

DWTAP 은 터널의 굴착과정에 따른 주변지반과 Shotcrete 및 Rock Bolt의 변형과 응력변화등을 해석할 수 있는 프로그램으로서 단순한 고통 터널 뿐만 아니라, 지하발전소나 에너지 저장시설 및 군사시설등의 대규모 지하공동에도 적용할 수 있으며, 또한 다양한 시공방법과 각 시공단계별 안정성을 검토할 수 있다.

* (주)대우 엔지니어링 상무

** (주)대우 건설기술연구소 연구원

*** 한국 과학기술원 석사과정

1. 머리말

터널 신공법 (NATM: New Austrian Tunnelling Method) 이 우리나라에 도입되어 지하철 건설에 크게 이용되고 있어 설계(해석제외)및 시공의 수준은 현저하게 발달되었다. 하지만 그동안 프로그램의 비리로 외국에서 직접 해석을 해오지 않으면 안되었다. 따라서 대우 엔지니어링에서는 이러한 절실한 필요성 때문에 그동안 축적된 기술을 바탕으로 프로그램 개발에 착수하여 DWTAP (Daewoo Tunnel Analysis Program) 을 만들게 되었다.

DWTAP 은 NATM 에 의한 터널 설계시 터널 단면의 구조해석및 터널굴착에 의한 지반의 거동을 해석하기 위하여 개발한 2차원 유한요소 프로그램이다. 특히 본 프로그램은 지반의 굴착과 shotcrete 타설 및 rock bolt 설치 등을 반영하기 위하여 요소의 추가 및 제거가 가능토록 되어 있다.

본 프로그램을 개발하면 세개의 module 로 나눌수 있다. 첫째, 해석 과정에서 필요한 mesh data 를 digitizer 를 사용하여 작성하는 Preprocessing Module (DWMESH). 둘째, Preprocessing Module 에 의하여 작성된 data 를 사용하여 구조해석을 하는 Processing Module (DWTAP). 셋째, 해석된 결과를 쉽게 파악할 수 있도록 graphic 으로 출력해 주는 Postprocessing Module (DW PLOT) 로 구성되어 있다.

DWTAP 개발에 사용된 컴퓨터는 CYBER 835 기종이었으나 현재는 VAX 11/780 이 사용되고 있다. Tektronix 를 사용하기 위하여 필요한 graphic subroutine package 또는 IGL (Interactive Graphic Library) 이 사용되며, Tektronix 화면에 그려진 그림을 그래픽로 D-SCAN Plotter 로 출력하기 위하여 GRASCAN Software 가 사용된다.

2. 이론적 배경

본 프로그램은 재료의 비선형을 고려하기 위하여 탄소성 이론 (elasto-plastic theory) 을 근거로 하고, 인장응력을 받고 있는 요소는 해당 적분점에서 인장응력이 허용인장 응력을 넘으면 균열 (crack) 이 발생되는 것으로 간주하였다.

항복조건으로 Mohr-Coulomb 조건식을 일반화한 Drucker-Prager 항복조건식을 사용하여 흙이나 암반을 이상화 시키는 데 적합토록 하였다. 소성변형증분과 응력증분관계는 흐름이론 (flow theory) 을 사용하고, 소성변형이 진행됨에 따라 항복곡면이 일정하게 확대되는 등방경화 (isotropic strain hardening) 법칙을 적용했다.

2.1 항복조건

일반적으로 항복조건은 응력 벡터 $\{\sigma\}$ 와 경화변수 (hardening parameter) κ 의 함수라 할 때 다음식으로 표시된다.

$$F(\{\sigma\}, \kappa) = 0 \quad (1)$$

Drucker-Prager 항복조건식은 Coulomb 의 전단강도식으로 부터 유도되는 Mohr-Coulomb 조건식을 일반화한 식으로서 그 유도과정을 간단히 서술하기로 한다. Coulomb의 전단 강도식은 점착력 c 와 내부마찰각 ϕ 의 함수로서 인장응력을 양으로 표시할 경우

$$\tau = c - \sigma \tan \phi \quad (2)$$

로 표시되는데 그림 2.1로부터 유도된 관계식을 정리하면 항복면의 식은 다음식으로 표시된다.

$$F = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \phi + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - c \cos \phi = 0 \quad (3)$$

또한 식(3)을 불변량 (invariant) 으로 표시하면

$$F = \frac{1}{3} I_1 \sin \phi + J_2^{1/2} (\cos \theta - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta \sin \phi) - c \cos \phi = 0 \quad (4)$$

로 되는데 식(4)를 Mohr-Coulomb 항복 조건식이라 한다.

여기서 I_1 은 응력텐서의 제1불변량 (first invariant of stress tensor), J_2 는 응력 편차텐서의 제2불변량 (second invariant of stress-deviation tensor) 으로서 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_1 &= \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \\ J_2 &= \frac{1}{2} (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2) + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 \\ \sigma_x &= \sigma_x - \sigma_m, \quad \sigma_y = \sigma_y - \sigma_m, \quad \sigma_z = \sigma_z - \sigma_m \\ \sigma_m &= \frac{1}{3} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \end{aligned} \quad (5)$$

식(4)의 양변에 $(\cos \theta - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta \sin \phi)$ 를 곱하면

$$F = \alpha I_1 + J_2^{1/2} - k = 0 \quad (6)$$

로 되는데 Drucker-Prager 항복조건식이라 하며, α 와 k 는 c 와 ϕ 의 함수로서 그림 2.2에서 보이는 바와같이 3개의 관계식으로 표시된다.

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad k = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (7a)$$

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)} \quad k = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)} \quad (7b)$$

$$\alpha = \frac{\sin \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin^2 \phi)^{1/2}} \quad k = \frac{3c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin^2 \phi)^{1/2}} \quad (7c)$$

2.2 탄소성 응력 변형 관계식

소성 변형 증분과 응력 증분의 관계를 나타내기 위하여 본 프로그램에서는 흐름 이론 (flow theory) 이 사용되는데 이 이론은 소성변형증분 $d\{\epsilon_p\}$ 이 다음식으로 표시된다.

$$d\{\epsilon_p\} = \lambda \frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} \quad (8)$$

여기서 λ 는 비례정수이며, 소성변형 증분이 항복곡면에 수직이라고 하는 normality rule 을 나타낸다. 또한 소성변형증분은 에너지를 나타내는 소성포텐셜 Q 로 나타내지는데 이 관계는 다음과 같다.

$$d\{\epsilon_p\} = \lambda \frac{\partial Q}{\partial \{\sigma\}} \quad (9)$$

전 변형증분은 탄성 변형증분 $d\{\epsilon_e\}$ 와 소성변형증분 $d\{\epsilon_p\}$ 의 합으로 표시된다. 탄성 부분은 Hook 의 법칙을 적용하고 소성부분은 $Q=F$ 인 경우를 associated plasticity 라 하여 식(8)을 적용하면 다음과 같다.

$$d\{\epsilon\} = d\{\epsilon_e\} + d\{\epsilon_p\} = [D_e]^{-1} d\{\sigma\} + \lambda \frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} \quad (10)$$

이상과 같은 관계로부터 응력증분과 변형증분의 관계를 나타내는 탄소성 매트릭스 $[Dep]$ 가 유도된다.

$$d\{\sigma\} = [Dep] d\{\epsilon\} \quad (11)$$

$$[Dep] = [D_e] - \frac{[D_e] \left\{ \frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} \right\} \left\{ \frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} \right\}^T [D_e]}{A + \left\{ \frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} \right\}^T [D_e] \left\{ \frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} \right\}} \quad (12)$$

여기서 A 는 가공경화정수로써 응력 변형곡선에서 1차원 양으로 표시된 소성변형증분에 대한 응력 증분의 비이다. 특히 이상적인 소성체인 경우는 A 가 0이 된다.

식 (12)의 $\frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}}$ 는 Drucker-Prager 항복조건인 경우 chain rule 을 사용하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} = \alpha \{1, 1, 1, 0, 0, 0\}^T + \frac{1}{2\sqrt{3}} \{S_x, S_y, S_z, 2Z_{xy}, 2Z_{yz}, 2Z_{zx}\}^T \quad (13)$$

2.3 인장에 약한 재료

즉, 암반 혹은 콘크리트처럼 인장에 약한 재료의 특성을 고려하기 위하여 본 프로그램에서는 주응력이 허용인장응력을 넘는 경우 주응력에 직각방향으로 일차적으로 균열 (crack) 이 발생한다고 하고 응력-변형 관계식은 2차원 요소의 경우 다음과 같다. (그림 2.3, 그림 2.4 참조)

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & E & 0 \\ 0 & 0 & \beta G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (14)$$

여기서 β 는 0-1의 계수로서 균열면의 전단저항을 나타내며 본 프로그램에서는 0.5가 사용되고 있다.

일방향 균열이 발생한 요소가 또 다른 방향의 주응력이 허용인장응력을 넘으면 그 적분점은 완전히 파괴된 것으로 간주하며 강성을 완전히 0으로 한다.

2.4 Rock Bolt

터널 굴착으로 인하여 발생하는 터널주위 지반의 이완을 줄이고 지반을 보강하기 위하여 rock bolt 가 사용되는데 rock bolt 를 이상화하기 위하여 트러스 요소와 결합요소 (bond element) 가 사용된다. 결합요소는 지반과 rock bolt 의 결합상태를 나타내는 요소로서 미끄럼의 영향을 고려한다.

요소좌표계로 결합요소의 강도 매트릭스 $[K^e]$ 는 다음과 같다.

$$[K^e] = \begin{bmatrix} K_x & 0 & -K_x & 0 \\ 0 & K_y & 0 & -K_y \\ -K_x & 0 & K_x & 0 \\ 0 & -K_y & 0 & K_y \end{bmatrix} \quad (15)$$

요소좌표계로 결합요소의 변위를 각각 U_x, U_y , 결합요소의 부재력을 각각 F_x, F_y 라 하면

$$F_x = K_x U_x, \quad F_y = K_y U_y \quad (16)$$

로 되며 축방향력 F_x 가 다음식보다 큰 경우는 미끄럼이 일어난다고 생각한다.

$$|F_x| > |F_y| \cdot \mu \cdot SF + 2\pi r l \cdot c \quad (17)$$

여기서 μ 는 마찰계수, SF는 안전율, r은 통상 지반과 rock bolt 구멍 반경, l은 결합요소의 지배폭, c는 점착력이다.

2.5 굴착상당력 (Equivalent Force)

그림 2.5에서 처럼 원래 자중등에 의하여 초기응력을 받고 있던 지반을 굴착하게 되면 굴착면에서 불평형력이 발생하게 된다.

이 불평형력을 흔히 굴착상당력이라 칭하며 다음 단계의 하중으로 사용된다. 따라서 제거되는 요소중에서 굴착면 (응력자유면)에 접하는 요소는 응력을 접점력으로 환산하여 굴착상당력을 다음식으로 산정한다.

$$\{P\} = \int_V [B]^T \{\sigma\} dV \quad (18)$$

여기서 $[B]$ 는 변형과 절점변위 관계 매트릭스를 나타낸다. 이렇게 산정된 굴착상당력은 다음단계의 변위계산의 하중으로 사용된다.

2.6 잔류하중

잔류하중 (residual force) 벡터 $\{R\}$ 과 수렴오차 ϵ 은 다음식으로 계산된다.

$$\{R\} = \{F\} - \sum_v \int_v [B]^T \{\sigma\} dV \quad (19)$$

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\{R\}^T \{R\}}}{\sqrt{\{F\}^T \{F\}}} \quad (20)$$

여기서 $\{F\}$ 는 전하중 벡터이다.

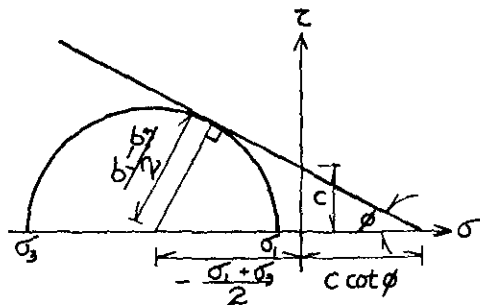


그림 2.1 Mohr-Coulomb Yield Criterion

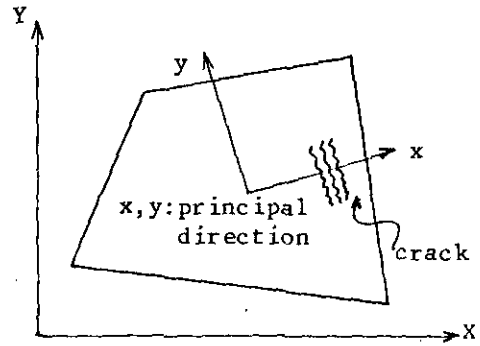


그림 2.4 인장에 약한 재료의 Crack

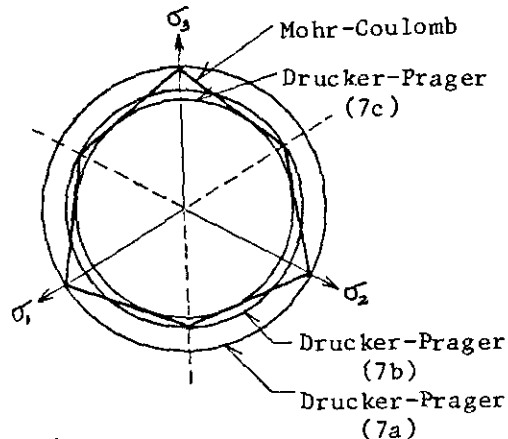


그림 2.2 π Plane Representation of the Mohr-Coulomb and Drucker-Prager Yield Criteria

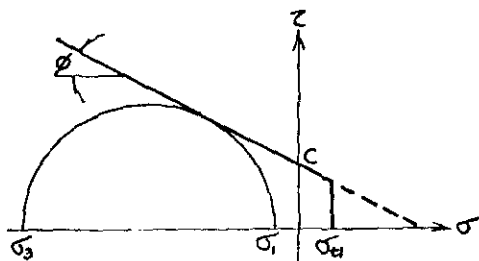


그림 2.3 Mohr-Coulomb 포락선에서 인장에 약한 재료

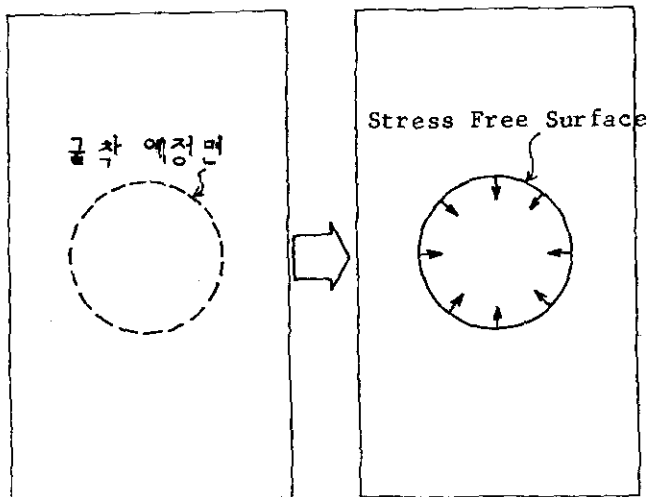


그림 2.5 Equivalent Force due to Excavation

3. DWTAP 프로그램

3.1 전체 흐름도






DWTAP 프로그램은 총 52개의 subprogram 으로 구성되어 있으며, 프로그램의 전체적인 흐름과 주요 subprogram 의 기능을 살펴보면 그림 3.1과 같다.

3.2 프로그램 설명



1) 요소의 종류

본 프로그램에 사용되고 있는 요소는 두 가지 group 으로 나누어져 있다. 평면요소는 isoparametric element 를 사용하여 Gauss 적분법을 사용한다.

가) Linear Group

3 node element	:	
4 node element	:	
truss element	:	
bond element	:	
Wilson's modified 4 node element	:	

나) Quadratic Group

6 node curved element	:	
8 node curved element	:	

2) 재료의 종류

응력-변형관계는 그림 3.2에서 처럼 식(7a), 식(7b), 식(7c)의 k 에응력이 도달하게 되면 항복이 일어난다 하고 이상소성(ideal plasticity) 과 변형경화소성(strain hardening plasticity) 으로 나뉘어 사용된다.

3) Solution Optimization

가) Solution Method

강도 매트릭스를 저장할때 사용해야할 주 기억장치 절약방법으로 다음 두 가지 방법이 사용된다.

' Skyline Method

' Frontal Method

비선형 방정식을 풀기위하여 다음과 같은 방법을 선택하여 사용한다.

- ' Load Increment Method
- ' Iterative Method (Newton-Raphson Method, Modified Newton-Raphson Method)
- ' Combined Method

나) Optimization

band width 와 front width 를 최소로 하고 해석소요시간을 줄이기 위하여 접점번호와 요소번호를 내부적으로 다시붙여진다.

3.3 전산해석 결과

1) Printed Output

- 수렴 상황
- 접점번호 (X, Y 방향)
- 적분점의 응력 또는 요소의 평균응력
($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \sigma_{max}, \sigma_{min}, \tau_{max}, \bar{\sigma}, \theta$)
- 적분점의 변형
($\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{xy}, \epsilon_{max}, \epsilon_{min}, \gamma_{max}, \bar{\epsilon}, \theta$)

여기서 $\bar{\sigma}$ 는 유효응력(혹은 상당응력), $\bar{\epsilon}$ 는 유효변형(혹은 상당변형)을 나타내며, θ 는 X 축과 주응력 또는 주변형과 이루는 각을 표시한다.

2) Plotted Output

DWPLOT 프로그램을 사용하여 다음과 같은 그림을 그릴수 있다.

- mesh (접점번호, 요소번호)
- 경계조건
- 변위
- 요소의 평균응력 (주응력)

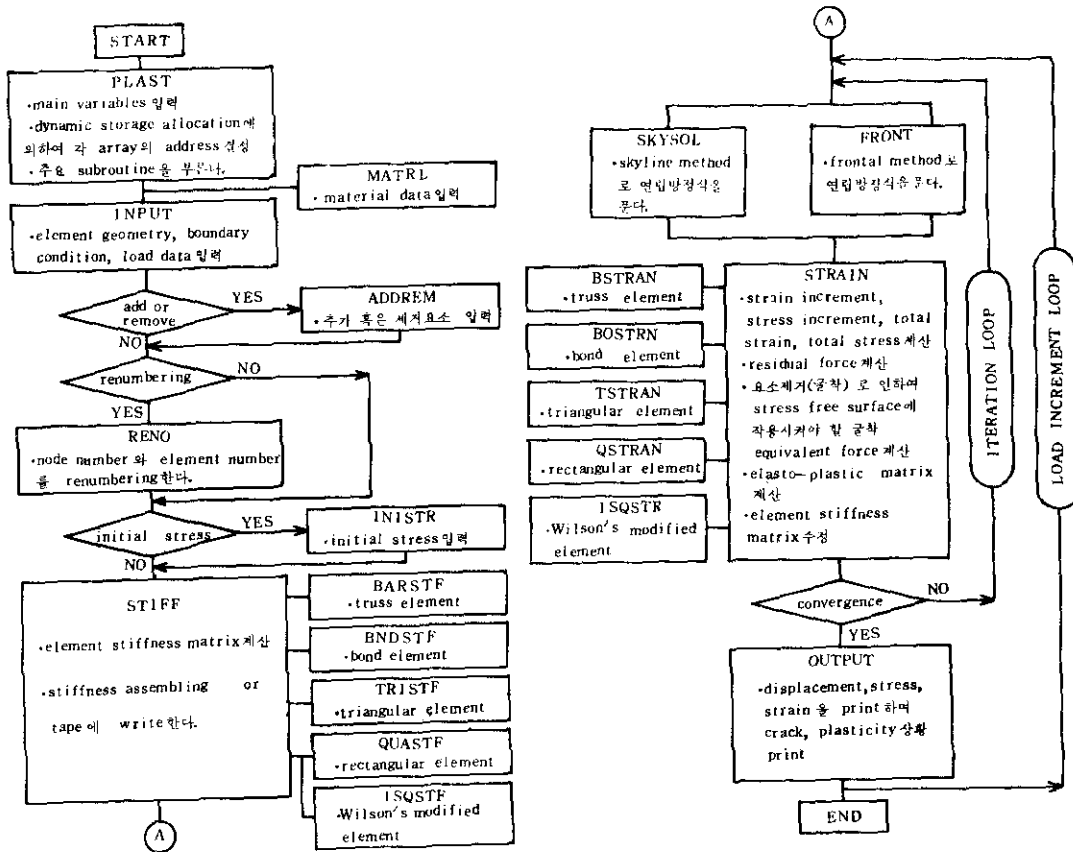


그림 3.1 Total Flow Diagram of DWTAP Program

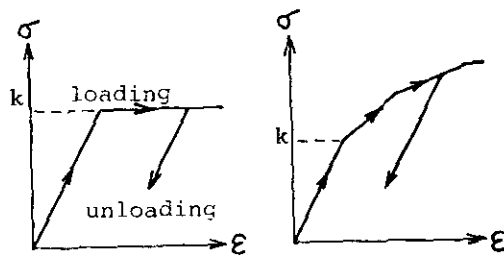


그림 3.2 Elasto-Plastic Behavior

4. 해석 예제

DWTAP 프로그램을 이용하여 해석한 것중 서울 지하철 4호선 제 470공구 (해학동 고개) 광복대단면의 결과를 요약하여 소개한다.

4.1 해석 모델

그림 4.1에서 처럼 해석영역을 상부로는 표층까지, 하부로는 터널 높이의 약 1배, 좌우로는 터널 높이의 약 2배로 하였으며 지표의 좌우에 언덕이 있기 때문에 이를 분포하중으로 처리하였다.

초기 축압계수 K_0 는 $\frac{\nu}{1-\nu}$ 로 부터 계산되었다.

4.2 입력 물성치

물성치는 현장 및 실내시험을 통하여 얻은 결과와 여러가지 시공상의 안정성을 고려하여 공학적인 판단으로 입력치가 결정되었다.

표 4.1은 해석에 사용된 지반 및 지보재의 특성을 나타낸다.

4.3 사용 요소

해석에 사용된 요소를 형태별로 분류하면 표 4.2와 같다.

특히 shotcrete 의 두께가 25 cm 로 깊이에 비하여 매우 작으며, 실제로 shotcrete 속에 wire mesh 가 사용되고 있으므로 흙의 영향을 무시한 선부재(트릭스 요소)로 취급하였다. 지반을 이상화하는데 사용된 평면요소의 요소번호를 그림 4.2에 나타내었다.

4.4 해석 단계

굴착방법은 분할 bench cut 공법으로써 4단계로 굴착한다.

시공순서에 따라 초기단계를 포함하여 9단계로 나누어 해석하였으며, 표 4.3에 각 단계별 굴착상태와 지보정도를 나타내었다.

여기서 굴착에 따른 제하하중 (released load) 은 굴착직후에 50%가 일어나며 shotcrete 및 rock bolt 가 설치된 후에 나머지 50%가 일어나는 것으로 가정하였다. 따라서 굴착으로 인하여 발생하는 굴착상당력의 50%로 굴착한 상태에서 풀고, 나머지 50%로 지보재가 설치된 상태에서 해석한다. 이는 굴착만 된 상태에서 약 50%의 변위가 일어나고 약 50%의 변위로 지보재가 응력을 받는다는 것이며, 지보재의 하중부담 측면에서 본다면 안전측의 결과를 얻을 것으로 판단된다.

4.5 해석 결과

해석결과로 부터 각단계별 터널의 변위와 지표면의 침하량을 표 4.4에 나타내었다. 또한 최종상태에서 터널 주변의 변형형상과 주응력 상태를 그림 4.3과 그림 4.4에 각각 도시하였다. 그리고, 그림 4.5에 shotcrete 가 받고 있는 응력분포를, 표 4.5에 rock bolt 가 받고 있는 축력을 나타내었다.

4.6 해석결과와 계측결과와의 비교

지표면의 침하를 해석결과로 부터 그림 4.6에, 계측결과로 부터 그림 4.7에 도시하였다. 해석결과 최종 지표면 침하가 5.6 mm 계측결과 6 mm로 매우 근사한 결과를 보였다.

천단 침하는 해석결과 7.7mm, 계측결과 9 mm인데 이는 우상부 굴착후 계측기기를 설치하므로 표 4.4에서 제3단벽의 처짐 4.8mm를 빼면 2.9mm로 이것 또한 매우 우수한 결과로 판명된다.

그러나 해석단면 지점의 내공 변위는 추정되어 있지 않는 관계로 직접 비교할 수 없으나, 참고로 이 지점으로 10m 떨어진 단면의 상부 내공 변위가 0.1mm, 하부 내공 변위가 0.2mm로 거의 일어나지 않는 것으로 판단된다.

shotcrete 응력 또한 해석단면에 해당되는 지점의 계측결과가 없는 관계로 20m 떨어진 지점에 대한 계측결과와 비교해 보면 계측결과가 약 25kg/cm² 이내의 응력을, 해석결과가 최대 22.7 kg/cm²로 대체로 일치되고 있다.

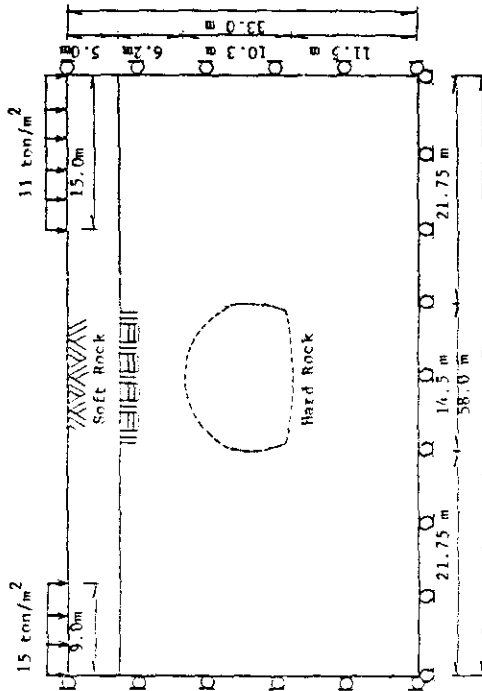


그림 4.1 해석단면, 지반상대 및 경계조건

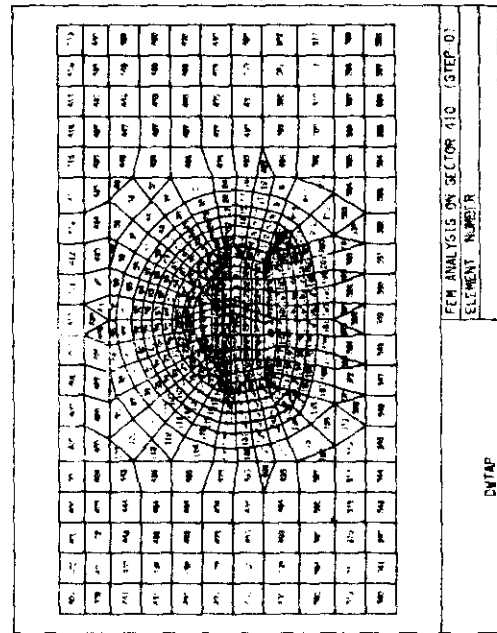


그림 4.2 평면요소의 요소번호

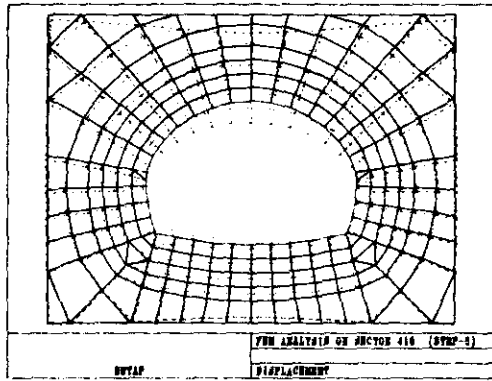


그림 4.3 변형도

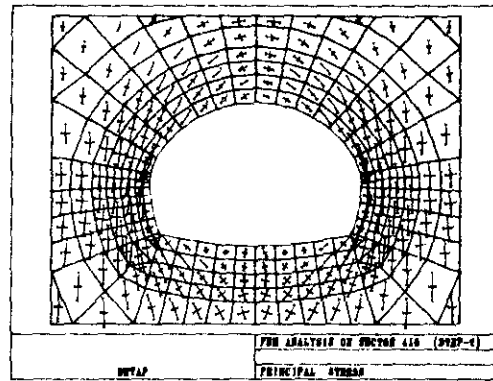


그림 4.4 응력도

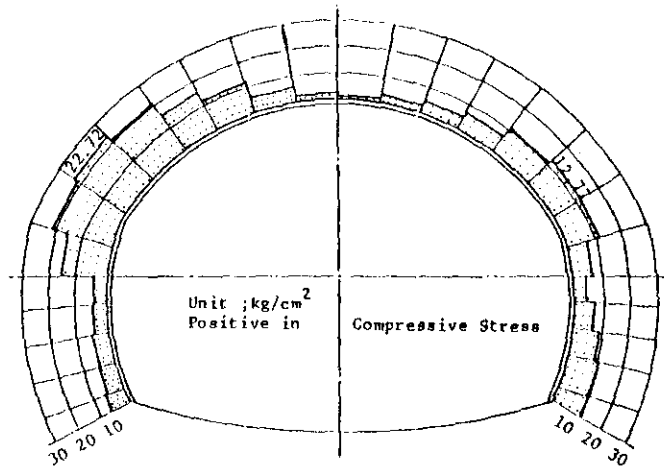


그림 4.5 Shotcrete 응력분포도

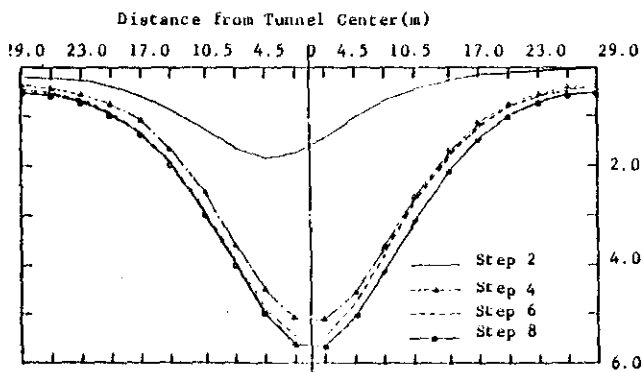


그림 4.6 지표면 침하 (계산)

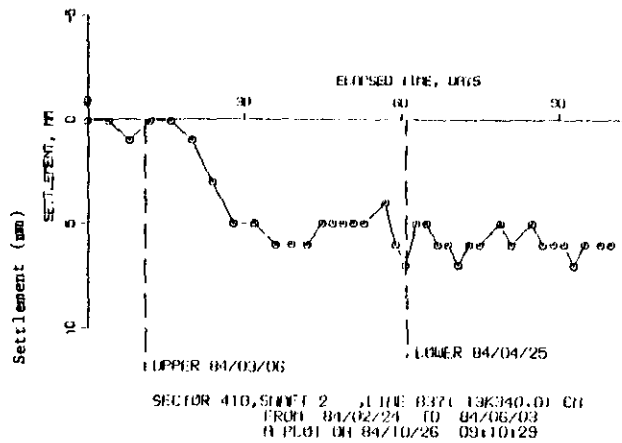


그림 4.7 지표면 침하 (계측)

표 4.1 입력된 지반 및 지보재의 특성

구분	단위	연압	경압	Shotcrete	Rock Bolt
단위중량	t/m ²	2.5	2.7	2.4	
탄성계수	x 10 ⁵ t/m ²	0.3	1.0	10.0	210.0
Poisson비		0.3	0.2	0.2	0.3
점착력	t/m ²	150	300	500	12,000
내부마찰각	도	45	50	30	
인장강도	t/m ²	30	70	50	24,000

표 4.2 요소 형태별 요소수

구분	요소 형태	요소 번호	요소수
지반	평면변형요소	1-338 401-558	496
Rock Bolt	트러스 요소	601-684	84
Shotcrete	트러스 요소	701-735	35
지반과 Bolt의 결합	결합 요소	801-884	84
계			699

표 4.3 계산 단계별 시공 형태


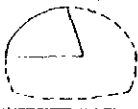
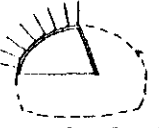
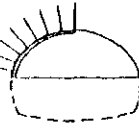

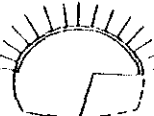

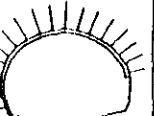
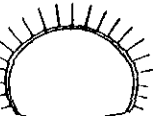
STEP NO.	0	1	2	3
Construction State	Initial Stress Condition	UL Excavation	UL Shotcreting & Bolting	UR Excavation
Shape				
	4	5	6	7
Construction State	LR Shotcreting & Bolting	LL Excavation	LL Shotcreting & Bolting	LR Excavation
Shape				
	8			
Construction State	LR Shotcreting & Bolting			
Shape				

표 4.4 비닐의 변위량

計算段階	1	2	3	4	5	6	7	8
a (mm)	1.0	1.8	3.6	5.1	5.4	5.4	5.6	5.6
b (mm)	1.2	2.0	4.8	7.1	7.4	7.5	7.6	7.7
c (mm)	-	-	-1.7	-2.6	-2.6	-2.5	-2.2	-1.9

a : 地表面沈下量

b : 天井部沈下量

c : 内空變位量

표 4.5 단계별 Rock Bolt의 최대 및 최소 축력 분포

解析段階	位 置	軸 力 (t)	備 考
2 段 階	⑦	1.4	1.0~1.4t (④~⑦)
	①	-0.4	
4 段 階	⑧	1.7	1.1~1.7t (⑤~⑩)
	①	-1.0	
6 段 階	⑧	1.7	1.0~1.7t (④~⑩)
	⑫	-0.8	
8 段 階	⑧	1.7	1.0~1.7t (⑤~⑫)
	⑫	-0.3	

5. Parametric Study 와 실제 단면 매수

5.1 Parametric Study

1) Parameter 의 선정

DWTAP 의 input parameter 는 크게 지반의 공학적인 성질에 관한 것과 터널의 기하학적인 형상에 관한 것으로 구분할 수 있다. 본 Parametric Study 에서는 지반의 특성에 관한 것으로 탄성계수(E), 초기 축압 계수(k_0), 단위 중량(γ_t), 점착력(c), 내부 마찰각(ϕ) 등을 선택하였고, 터널의 기하학적 형상으로는 토피의 두께(H), 터널의 직경(D), shotcrete 의 두께(t) 등을 택하였다. 아울러 parameter 상호간에 연관성이 있는 탄성 계수, 초기 축압 계수, 터널의 직경 및 토피의 두께 등의 변화를 연관시켜서 program 에 의한 터널의 거동을 검토하였다.

2) 표준 모델

parametric study 를 위한 표준 모델로 분석 결과의 보편성과 계산의 난이도를 고려해서 그림 5.1 에서와 같은 원형 터널을 선정하였으며 지반의 공학적 특성을 위한 표준 입력치는 서울시 지하철의 조사에서 얻은 화강토의 대표적인 값을 채택하였다(표 5.1).

3) 해석 방법

해석의 용이함을 위하여 지반의 초기 상태 부여, 전단면 굴착, soft shotcreting, hard shotcreting 등과 같은 4단계로서 해석을 행하였으며, 연구 방법은 수행하고자 하는 대상 parameter 를 제외한 모든 parameter 를 표준 입력치로 고정시켜 놓고 대상 parameter 만 변화시키므로써 대상 parameter 의 영향을 검토하였다.

5.2 Parametric Study 의 결과 분석

1) 단위 중량의 영향

단위 중량이 커지면 변위량들이 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 현상은 굴착으로 인해서 재분배되는 응력이 단위 중량이 증가함에 따라 커지기 때문이라 생각된다. (그림 5.2)

2) 소성 Parameter

Drucker-Prager 항복 조건식에서 $k=f(c,\phi)$ 이므로 점착력 c 와 내부 마찰각 ϕ 는 소성 여부를 결정하는 중요한 parameter 이다. 그림 5.3에서 알수 있듯이 내부 마찰각 ϕ 와 점착력 c 가 증가되면 터널 주변의 소성 영역이 감소하고, 어느 값을 넘으면 소성 영역이 발생하지 않는다.

3) 지반의 탄성 계수의 영향

지반의 탄성 계수가 커짐에 따라 변위량이 감소하는 경향을 보이고 있으며 특히 탄성 계수가 작은 범위에서는 급격하게 감소한다(그림5.4).

4) 초기 축압 계수의 영향

초기 축압 계수 K_0 은 지반의 초기 응력상태를 결정해 주는 parameter 로서 일반적으로 0.3 - 1.0의 값을 가지며, 그림 5.5에서 보인 바와 같이 K_0 이 증가하면 축벽부(Sidewall) 의 변위는 증가하나 다른 변위들은 감소하고 있다. 초기 축압계수는 수평응력 σ_H 와 수직응력 σ_V 와의 비로써 정의되므로

$$K_0 = \frac{\sigma_H}{\sigma_V} \quad (21)$$

이 된다. 즉, K_0 이 증가하면 수평응력 σ_H 가 커지므로 결국 축벽부의 변위가 증가하게 된다.

K_0 이 증가하면 터널 주변에 생기는 소성 영역이 축소되는 경향을 보이는데, 아랫와 같은 사실로써 이해할 수 있다. 일반적인 항복 조건식은

$$F(\sigma, \kappa) = f(\sigma) - k(\kappa) \quad (22)$$

로 표현되고, 여기서 $f(\sigma)$ 를 유효 응력 (effective stress) 이라 하며 소성 여부는 $f(\sigma) - k(\kappa)$ 의 값으로써 결정한다.

$$f(\sigma) > k(\kappa) : \text{소성 상태} \quad (23)$$

$$f(\sigma) = k(\kappa) : \text{초기 소성 상태} \quad (24)$$

$$f(\sigma) < k(\kappa) : \text{탄성 상태} \quad (25)$$

Drucker-Prager 의 항복 조건식에서 $k(\kappa)$ 는 c 와 ϕ 에 의해서 결정되고 유효 응력은 편차 응력의 제 2분변량으로 표현되므로 K_0 이 커지면 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 가 작아져서 결국 유효 응력이 감소한다. 그러므로 K_0 이 커지면 터널 주변의 소성 영역이 축소된다.

5) 터널 직경의 영향

터널의 직경이 커지면 변위가 증가하는 경향을 보이는데, 이런 현상은 터널 직경이 커지면 굴착에 의해서 터널 주변 지반의 고란 영역이 확대된다는 사실로써 이해할 수 있다. (그림 5.6)

6) SHOTCRETE 두께의 영향

Shotcrete 는 지반의 거동을 조기에 구속하고 역학적 불연속면이 있는 암반을 일체화시키는 역할을 한다. 그림 5.7에서 볼 수 있듯이 두께가 증가하면 변위들은 조금씩 감소하고 있다.

7) 토피 두께의 영향

토피의 두께가 커지면 변위가 증가하는 경향이 있으며 특히 토피의 두께가 20m보다 클 때에는 급격한 증가 현상을 보이고 있다. (그림 5.8) 그러나 실제 상황에서는 토피의 두께가 상당히 크면 오히려 변위가 감소하는 경향을 보이고 있는데, 이런 상반되는 현상을 보이는 이유로서 다음과 같은 사실을 생각할 수 있다.

첫째, 지중에는 지반의 강도를 증진시키는 arching 효과가 작용하는 데, program에서는 반영되지 않았고, 둘째로는 실제 상황에 있어서 토피가 증가되면 지반의 탄성 계수가 증가하나 본 해석에서는 길이에 관계없이 일정한 탄성 계수를 사용하였다.

8) 결합된 Parameter 의 영향

지반의 탄성 계수 (E), 초기 축압계수 (Ko), 토피의 두께 (H) 및 터널의 직경 (D) 등은 침하량에 상당한 영향을 보이고 있다는 것을 위에서 서술한 Parameter 들의 Parametric Study 의 결과분석에서 알 수 있었다. 그래서 그림 5.9 에서 위의 Parameter 들과 normalized crown settlement 와의 상관 관계를 나타내었다.

H/D가 증가하고 E 와 Ko이 감소하면 침하량이 증가하는 경향을 보이고 있으나 지반의 탄성 계수가 커지면 Ko 과 H/D 의 변화에 거의 영향을 받지 않는다. 터널의 직경이 일정한 경우, 토피의 두께가 증가하면 E가 작은 범위의 값일 때에는 침하량이 상당히 증가하나, E가 $1 \times 10^6 \text{ t/m}^2$ 보다 크면 미세하지만 오히려 감소하는 경향을 보인다. 이런 현상은 竹山 축의 결과와 일치하고 있다.

결론적으로 결합된 parameter 중에서 지반의 탄성 계수가 침하량에 가장 크게 영향을 미치는 parameter 임을 고찰하였으며, 위에서 서술한 parametric study의 결과들은 이미 발표된 Rowe, Lo 및 竹山 축의 결과와 일치됨을 검토하였다.

5.3 실제 단면 해석의 결과 분석

1) 단면 선정과 해석 방법

서울시 지하철 3.4호선의 구간 중에서 지반이 연약한 공구의 단면을 해석 단면으로 선정하였으며(그림 5.10)지반의 물성치로는 서울시 지하철의 조사에서 얻은 시험치를 사용하였다. (표 5.2) 시험치 중에서 매립층, 충전층 및 풍화토는 시험에 의한 물성치를 그대로 입력치로 선택하였으나, 풍화암과 연암의 경우에는 암반내에 존재하는 절리등을 고려하여 풍화암일 때는 시험치의 30%, 연암일 때는 시험치의 50% 만 취해서 입력시켰다.

지반이 연약하므로 실제 시공에서는 ring cut short bench 공법을 채택하였으며, 아울러 선정된 공구의 일부 지반을 약액 주입으로 보강시켰다. 그래서, 본 연구에서는 실제 시공법에 준하는 단계로서 단면 해석을 하였으며, grout 의 효과를 검토하기 위해서 grout를 하지 않은 경우 (CASE 1)와 grout 를 한 경우 (CASE 2) 로 나누어서 고찰하였다.

2) 결과 분석

해석 결과 grout 의 효과로 CASE 2 의 변위가 CASE 1 보다 약 40%정도 감소된 것을 관찰할 수 있으며, 최대 침하량도 약 30% 정도가 grout 의 효과로 감소된다 (그림 5.11).

현장 계측치와 계산치를 비교하면 계산치가 계측치보다 9 mm 정도 적게 나타났다. 그러나 계측된 침하 곡선과 수치 해석에 의한 침하 곡선의 경향이 서로 일치하고 있으며 지반의 초기 상태를 고려해 주는 지하수의 위치가 무시되었고 배수에 의한 압밀 침하등의 현상을 감안한다면 계산치가 상당히 타당성이 있는 값이라 생각된다.

그림 5.12에서 보인 바와 같이 서울시 지하철 3.4호선의 값들이 clay 지반의 터널에서 조사된 값들보다 크게 나타나고 있는데, 다음과 같은 현상으로 생각할 수 있다. 서울시 지하철의 입력치는 지반내의 절리 등과 같은 불연속면을 고려해서 실험치보다 작게 보정한 값임으로 같은 stability number 에서 기존의 조사치보다 침하량이 크게 계산되었다.

또한, 선정된 서울시 지하철의 현장 계측치가 기존의 조사치보다 큰 이유로는 막장 정지 시간등과 같은 시공에 관련된 parameter 의 영향과 과도한 용수에 의한 압밀 침하의 영향이라 생각된다. 그러나, 계측치와 계산치는 stability number 에 대수적으로 증가하는 현상을 보이는데 이는 L_0 의 보고와 일치함을 고찰하였다.

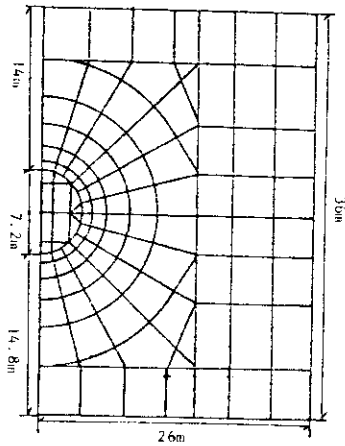


그림 5.1 Mesh for Parametric Study

표 5.1 표준 입력치

지반의 단위중량	2.1 t/m ³
지반의 탄성계수	2,000 t/m ²
지반의 내부마찰각	30.0°
지반의 점착력	1.0 t/m ²
지반의 포아송비	0.3
지반의 인장강도	1.932 t/m ²
초기 축압 계수	0.5
SOFT SHOTCRETE 탄성 계수	150,000 t/m ²
HARD SHOTCRETE 탄성 계수	1,000,000 t/m ²
SHOTCRETE 포아송비	0.2
SHOTCRETE 내부마찰각	30.0°
SHOTCRETE 점착력	500.0 t/m ²
SHOTCRETE 인장강도	866.0 t/m ²
도피 두께	14m
SHOTCRETE 두께	20cm

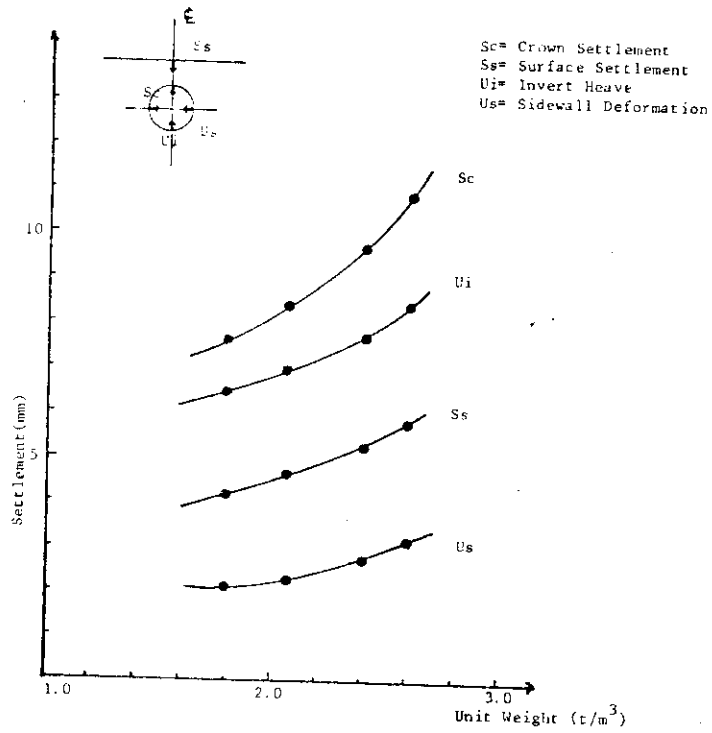


그림 5.2 INFLUENCE OF UNIT WEIGHT ON SETTLEMENTS

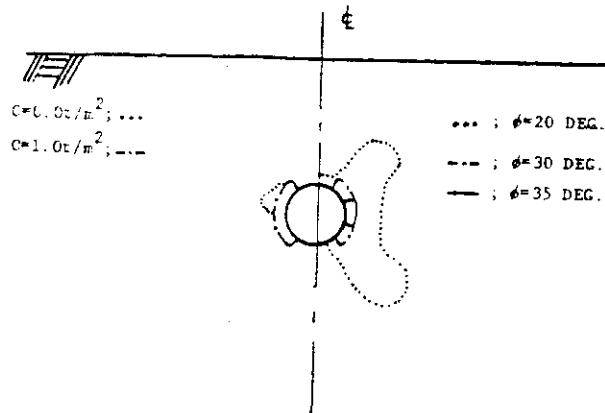


그림 5.3 INFLUENCE OF PLASTICITY PARAMETER ON PLASTIC ZONE

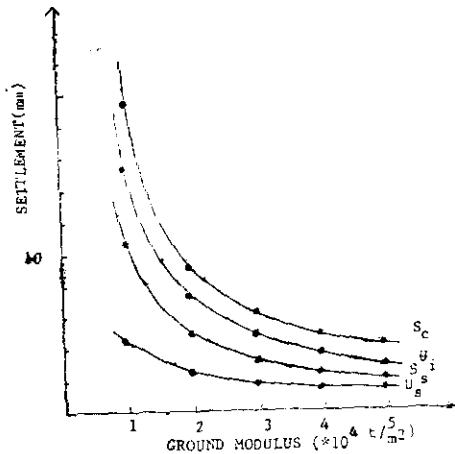


Fig 5.4 INFLUENCE OF GROUND MODULUS ON SETTLEMENTS

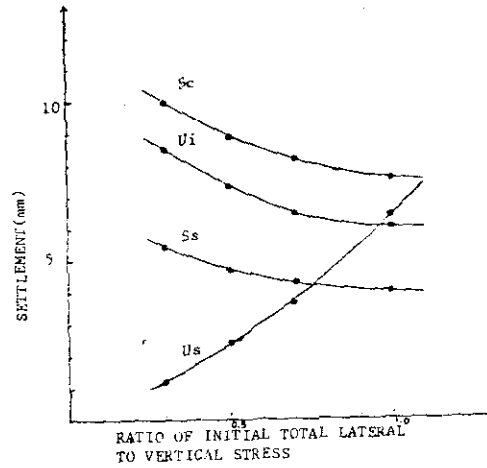


Fig 5.5 INFLUENCE OF K_0 ON SETTLEMENTS

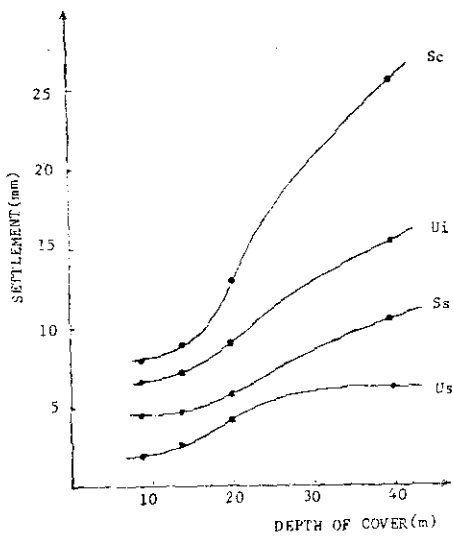


Fig 5.8 INFLUENCE OF DEPTH OF COVER ON SETTLEMENTS

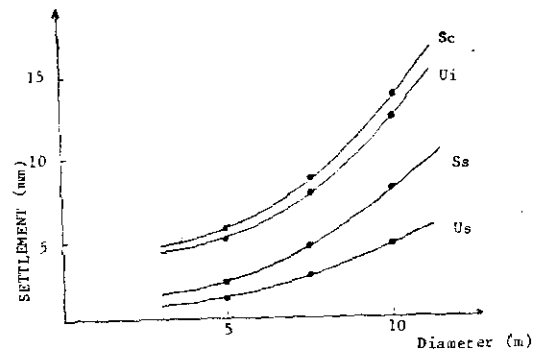


Fig 5.6 INFLUENCE OF DIAMETER ON SETTLEMENTS

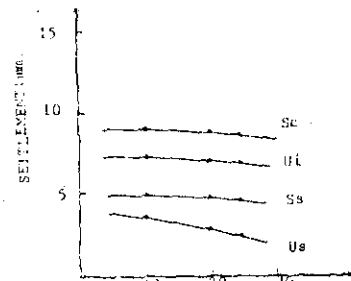


Fig 5.7 INFLUENCE OF THICKNESS OF SHOTCRETE ON SETTLEMENTS

표 5.2 지반의 실험치

區分	地盤	埋立層	沖積層	風化土	風化岩	軟岩	Grouted Soils
單位重, γ (t/m^3)	(1.6)	1.54	1.74-2.11 (1.9)	(2.2)	(2.5)	(2.0)	
變形係數, D ($\times 10^{-3} \text{ t/m}^2$)	(1.0)	(1.5)	1.5-6.5 (2.5)	35.0-113.9 (61.2)	144.4-234.5 (221.1)	(5.0)	
粘聚力, C (t/m^2)	(1.0)	0.4-6.4 (0.8)	0-3.6 (1.7)	(3.0)	(10)	(25)	
內部摩擦角, ϕ ($^\circ$)	(2)	24-34 (28)	28.5-35 (31.8)	(40)	(45)	(35)	
N 值		4-15 (12)					

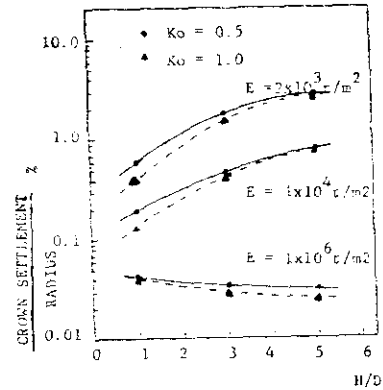


그림 5.9 Major parameter and calculated normalized crown settlement

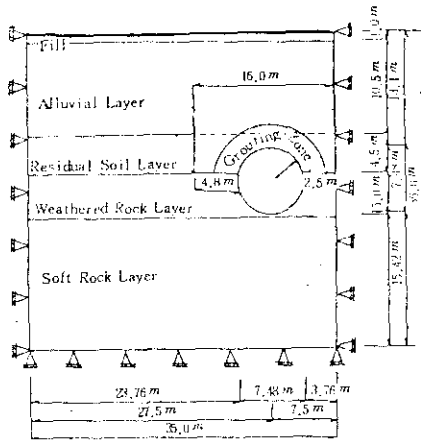


그림 5.10 해석영역과 경계조건

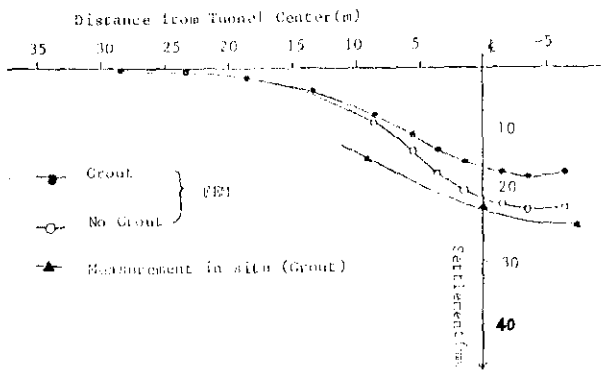


그림 5.11 COMPARISON OF MEASURED AND CALCULATED SURFACE SETTLEMENT CURVES

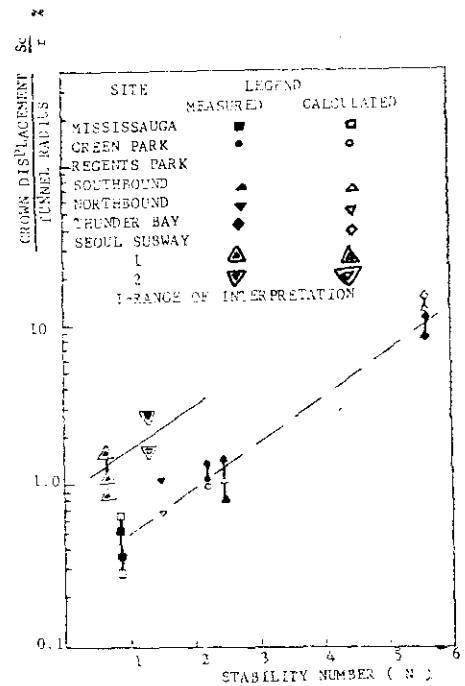


그림 5.12 COMPARISON OF MEASURED AND CALCULATED NORMALIZED CROWN DISPLACEMENT

6. 맺음말

이상에서 DWTAP 프로그램의 이론적 배경, DWTAP 프로그램을 사용하여 수행한 parametric study 와 서울 지하철 3.4호선 실제 단면의 해석결과를 기술하였다.

우선 본 프로그램의 특징을 열거하면 다음과 같다.

첫째, 점점번호와 요소번호를 내부적으로 다시 붙이는 (reordering) 기능을 보유하고 있으므로 시간 단축은 물론 주기억장치 (core) 외 사용도 줄어든다. 또한 점점번호와 요소번호를 순서적으로 붙일 필요없는 장점도 있다.

둘째, Wilson 의 수정요소를 사용함으로써 4변형 요소의 변위와 응력을 보다 정확하게 계산할 수 있다.

셋째, preprocessor 프로그램 (DWMESH) 을 개발함으로써 mesh 데이터 작성에 소요되는 많은 시간을 절약할 수 있다.

넷째, Tektronix 에 의한 graphic 으로 데이터 check 의 용이성 뿐만 아니라 plotting 에 의하여 해석결과외 파악이 쉬워졌다.

다섯째, 재료의 성질에 허용인장응력을 입력시키므로써 인장에 막한 재료의 취급이 가능하다.

다음으로 본 프로그램을 사용하여 해석한 결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다. 본 논문에서 계측결과가 있는 410공구에 대해서 앞에서 예시한 바와같이 해석결과의 타당성은 입증되었다.

끝으로 parametric study 와 실제 단면 해석의 결과를 분석함으로써 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

첫째, 흙이나 암반과 같은 마찰성 재료 (friction material) 에서는 소성 parameter 인 점착력 c 와 내부 마찰각 ϕ 에 의해서 지반의 고유한 소성한계치가 결정되고 지반의 초기 응력상태를 결정하는 초기 축압 계수 K_0 이 커지면 소성 영역이 감소한다.

둘째, 초기 축압 계수 K_0 이 증가하면 지표면 침하량과 선정부 침하량은 감소하지만 터널 축변부 변위는 증가한다.

셋째, 지반의 탄성계수 (E), 토피의 두께 (H), 터널의 직경 (D), 초기 축압 계수 (K_0) 등은 서로 연관성을 가지고 변위에 영향을 끼치나, 그중에서 지반의 탄성 계수가 가장 지배적인 parameter 이다. 탄성 계수가 1×10^6 t/m² 가 되면 K_0 과 H/D 의 효과는 거의 무시된다.

넷째, 연약한 지반을 약액 주입으로 보강한 경우 터널 상부를 grouting soil to modelling 하면 계측치에 의한 지표면 침하 곡선의 형상과 같은 형상의 계산치에 의한 침하 곡선을 얻을 수 있으므로, grout 의 효과를 simulation 할 수 있다.

다섯째, 서울시 지하철 3.4 호선의 계산치와 계측치는 clay 지반의 터널에 관한 계산치와 계측치보다 크게 나타나지만, stability number 에 대수적으로 증가하는 일치된 경향을 보이고 있다.

본 논문에 사용된 DWTAP 는 초기 지반 상태의 simulation 에 필요한 초기 축압 계수 K_0 과 변위를 가장 강하게 지배하는 지반의 탄성계수 E 를 적절하게 선정해서 입력시키면 정확한 침하량을 예측할 수 있는 program 이라 생각된다.

참 고 문 헌

1. Desai, C.S., and Abel, J.F., "Introduction to the Finite Element Method", Van Nostrand Reinhold Company, 1972.
2. Desai, C.S., and Christian, J.T., "Numerical Methods in Geotechnical Engineering", McGraw-Hill Book Company, 1977.
3. Lo, K.Y., Rowe, R.K., "Predicting Settlement due to Tunnelling in Clays", Tunnelling in Soil and Rock, ASCE, P 46-76, 1984.
4. Owen, D.R.J., and Hinton, E., "Finite Elements in Plasticity: Theory and Practice", Pineridge Press Limited, 1980.
5. Rowe, R.K., Lo, K.y., "A Method of Estimating Surface Settlement above Tunnels Constructed in Soft Ground", Can. Geotech.J., Vol 20, P 11-22, 1983.
6. Rowe, R.K., "A Theoretical Examination of the Settlement Induced by Tunnelling: For Case Histories", Can. Geotech.J., Vol 20, P 299-314, 1983.
7. Smith, I.M., "Programming the Finite Element Method (with Application to Geomechanics)", John Wiley & Sons, 1982.
8. Zienkiewicz, O.C., "The Finite Element Method", McGraw-Hill, 1977.
9. 竹山 喬, 葛野 恒夫, "鐵道シールド"의 施工に伴う 地盤 沈下と 其の 予測, トネルと地下, Vol. 14, No. 9, P159~170, 1983.
10. 유택성, 이성민, "서울시 지하철 3.4호선 도심구간 건설을 위한 터널 신공법", 대한 토목 학회지, Vol 30, No. 5, 1982.
11. (주)대우 엔지니어링, "NATM 터널 해석을 위한 유한요소 프로그램 연구 개발 보고서 (DWTAP)", DWERI-CE-2, 1984. 6.