

불연속암반내 시공되는 터널의 유한요소모델링

Finite Element Modeling of Tunnels Constructed in Discontinuous Rock Mass

유 충 식^{*1} 김 중 석^{*2}

Yoo, Chung-Sik Kim, Chong-Seok

이 호^{*3} 이 광 명^{*4}

Lee, Ho Lee, Kwang-Myoung

Abstract

This paper deals with the application of joint element in the finite element modeling of discontinuities encountered during rock tunneling. A nodal displacement joint element was implemented in a two dimensional finite element program GEOFE2D. The applicability of the joint element for modeling of discontinuities and the numerical stability of the implemented algorithm were examined by comparing the results of reduced small scale model tests as well as commercially available FEM program. The GEOFE2D was then used to analyze a tunnel crossed by a major discontinuity for the purpose of understanding the effect of discontinuity on the tunnel behavior. In addition, a modeling technique for the junction of discontinuity and shotcrete lining was presented. The results of analysis indicated that the stress-strain field around the tunnel is significantly altered by the presence of discontinuity, and that the stresses in the shotcrete lining considerably increase at the junction of the shotcrete lining and the discontinuity. It is therefore concluded that the major discontinuities must be carefully modeled in the finite element analysis of a tunneling problem in order to obtain more reliable results close to actual tunnel behavior.

요 지

본 논문에서는 불연속암반내 시공되는 터널의 유한요소해석에 있어서 절리요소를 이용한 불연속면의 모델링에 관한 내용을 다루었다. 불연속 암반터널의 모델링이 가능한 유한요소해석 프로그램의 개발을 위해 기존의 유한요소해석 프로그램 GEOFE2D에 불연속면의 모델링이 가능한 절점변위 절리요소를 적용

*1 정회원, 성균관대학교 공과대학 토목공학과 부교수

*2 도화종합기술공사 기사

*3 에스코 컨설턴트 기사

*4 성균관대학교 공과대학 토목공학과 부교수

하고 모형실험 및 기존의 상용프로그램과의 비교를 통해 그 타당성을 검증하였다. 또한 검증된 GEOFE2D를 이용하여 불연속면이 터널의 거동에 미치는 영향을 고찰하기 위해 불연속면이 터널을 관통하는 경우에 대한 해석을 수행하고, 그 과정에서 불연속면과 슛크리트 라이닝 교차부에서의 변위 적합조건을 만족시킬 수 있는 불연속면 모델링 기법을 제시하였다. 한편, 해석결과를 분석한 결과 불연속면은 터널 주변의 응력-변형률 상태에 현저한 영향을 미치며, 특히 불연속면이 관통하는 부위에서의 슛크리트 라이닝 축력 및 휨 모멘트가 현저히 증가하는 것으로 나타났다. 따라서, 불연속면을 포함하는 터널의 거동해석시에는 불연속면에 대한 보다 상세한 모델링이 수반되어야 실제 거동에 보다 근접하는 해석결과를 도출시킬 수 있을 것으로 판단된다.

Keywords : Tunneling, Discontinuity, Joint, Finite element analysis, Joint element

1. 서 론

최근 들어 사회간접시설 확충의 필요성으로 인해 철도 및 도로터널, 지하철 등의 교통시설과 양수발전소 혹은 원자력발전소와 같은 에너지 관리 시설, 그리고 방사능 폐기물 처분시설 및 농산물 저장시설 등을 위한 지하공간 건설 관련 사업이 꾸준히 증가하고 있다. 일반적으로 터널 및 지하공간의 설계 및 시공에서는 지반/암반의 공학적 재료로서의 특성 평가가 매우 중요한 부분을 차지하며, 따라서 대상 지반/암반의 암종 및 암석의 강도, 절리 및 풍화 발달 상태, 응력이력 및 지하수 존재 여부 등을 정확히 평가하여 설계 및 시공에 반영하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다. 특히, 터널이 시공되는 암반은 불균질하고 절리나 단층 혹은 파쇄대 등의 불연속면이 존재하는 경우가 많으며 이러한 불연속면이 존재하는 지반/암반에 굴착되는 터널 및 주변지반의 거동은 불연속면의 공학적 특성 및 공간적 분포 특성에 의해 지배되므로 터널의 설계/시공 단계에서는 불연속면이 터널의 거동에 미치는 영향을 반드시 고려하여야 한다.

현재 적용되고 있는 터널 설계/시공단계에서는 기 설계된 단면에 대하여 유한요소법 또는 유한차분법 등의 수치해석 기법을 이용하여 구조

해석을 수행하고 그 결과를 토대로 터널 자체의 거동 및 지보패턴의 타당성 등 구조적 안정성을 검토한다. 이러한 구조해석 결과의 타당성은 주변 암반 및 터널 구조계에 대한 수치 모델링의 적합성에 달려있으며, 특히 불연속면을 포함하는 암반에 시공되는 터널 구조계에 대한 수치 모델링 결과의 타당성은 불연속면에 대한 모델링의 적합성 여부에 좌우된다고 할 수 있다. 그러나 아직까지 불연속면에 대한 구체적 모델링 기준이 정립이 되어 있지 않을 뿐만 아니라 이에 대한 인식 부족으로 현재 실무에서는 불연속면에 대한 모델링이 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다. 즉, 실무에서는 불연속암반의 경우 불연속면을 고려하여 암반의 역학적 특성을 인위적으로 감소시키고 이를 설계에 반영하는 방법을 채택하므로 불연속면이 터널 및 주변지반의 거동에 미치는 영향에 대한 정성·정량적 평가가 매우 어려우며, 따라서 부적절한 설계/시공을 초래하게 되는 문제점이 지적되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 불연속 암반터널의 거동해석이 가능한 유한요소해석 프로그램을 개발함과 아울러서 불연속면 모델링 기준의 정립을 위해 기존의 터널해석 전용 유한요소해석 프로그램 GEOFE2D(유충식 등 1996)에 Goodman 등(1968)의 절점 변위 절리요소를 등대개변수요소

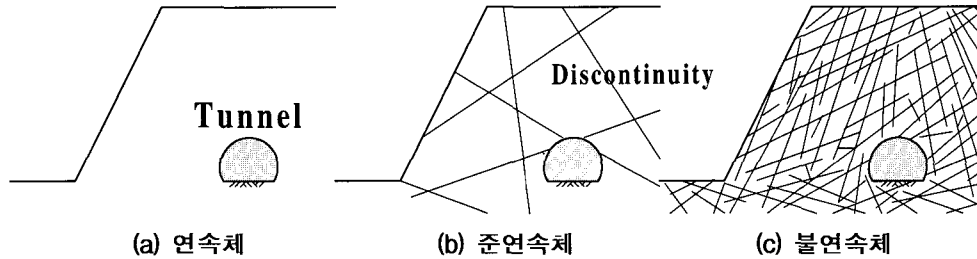


그림 1. 암반의 역학적 모델링

의 형태로 수정하여 적용하였다. 이를 토대로 불연속면의 효율적인 모델링 방안을 제시하였으며, 아울러서 터널문제에의 적용을 통해 불연속면이 터널의 거동 및 지보재의 응력 분포에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 불연속/절리 암반의 역학적 모델링

일반적으로 터널 및 기타 지하공간이 시공되는 대상 지반/암반은 역학적 측면에서 그림 1에 제시된 바와 같이 연속체(continuum)나 불연속체(discontinuum) 혹은 준연속체(pseudo-continuum) 등 세 그룹으로 구분할 수 있다. 토사 지반이나 절리 혹은 여타의 불연속면이 존재하지 않는 무결함 암반은 그림 1(a)와 같이 연속체로 간주할 수 있으며, 그림 1(b)와 같이 소수의 절리 혹은 단층대 등의 불연속면을 포함하는 암반의 경우에는 불연속면으로 분리된 암괴의 거동이 터널 및 주변지반의 전반적인 거동에 큰 영향을 미치므로 불연속체로 간주한다. 한편, 절리암반과 같이 다수의 불연속면이 균을 이루며 형성된 경우에는 그림 1(c)에서 보이는 바와 같이 불연속면의 효과를 간접적으로 고려하는 준연속체로 간주한다.

이와 같이 불연속/절리 암반은 대상 지반/암반에 존재하는 불연속면의 공간적 분포 특성에 따라 불연속체 혹은 준연속체로 구분되며, 따라서 불연속 암반에 시공되는 터널의 거동해석에서

적용되는 대상 지반/암반의 수치 모델링 접근방법 또한 이에 따라 달라진다. 즉, 불연속체로 간주되는 암반의 경우 Cundall(1987)이 제안한 불연속체 개념의 개별요소법(discrete element method)을 적용하거나 유한요소법에서 Goodman 등(1968)이나 Gahboussi 등(1973) 혹은 Desai 등(1984)이 제안한 절리요소(joint element)를 이용하여 개개의 불연속면을 모델링 하는 명시적(explicit) 모델링이 이루어진다. 한편, 다수의 절리가 존재하는 경우에는 각 절리의 공간적 분포 특성과 역학적 특성을 개별적으로 모델링 하는 접근방법은 매우 비효율적일 뿐만 아니라 역학적 거동에 있어서도 연속체로서의 거동을 나타내므로 Alehossein과 Carter(1990)가 제안한 비등방(anisotropic) 모델 혹은 Zienkiewicz와 Pande(1977)가 제안한 multilaminate 모델을 이용하여 준연속체로서의 암시적(implicit) 모델링이 이루어진다. 그림 2는 불연속암반의 명시적·암시적 모델링 방법을 나열하고 있다.

3. 불연속면의 모델링이 가능한 유한요소해석 프로그램 개발

본 연구에서는 기존의 유한요소해석 프로그램 GEOFE2D(유충식 등 1996)에 불연속면의 모델링을 위해 기존의 절점변위 절리요소를 수정·적용하였다. 개발된 프로그램은 실내모형실험 및 기존의 상용프로그램 결과와의 비교를 통해 타

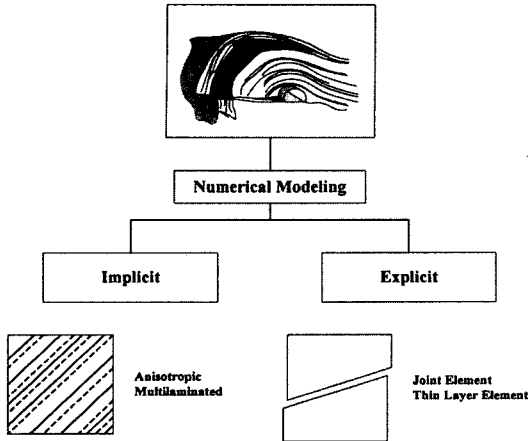


그림 2. 불연속/절리 암반의 모델링 방법

당성을 확보하였으며, 본 장에서는 이에 대한 내용을 다루었다.

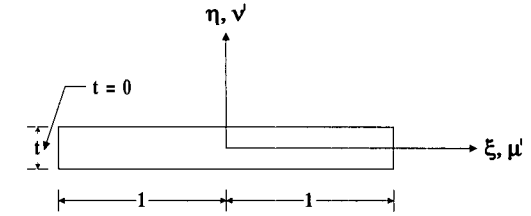
3.1 절점변위 절리요소의 적용

절점변위 절리요소는 Goodman 등(1968)에 의해 제안되었으며, 본 연구에서는 이를 등매개변수요소(isoparametric element) 형태로 변환하여 적용하였다. 한편, 불연속면의 탄소성 거동 해석이 가능하도록 Mana(1982)가 제안한 쌍일차 모형(bilinear model)을 적용하였다.

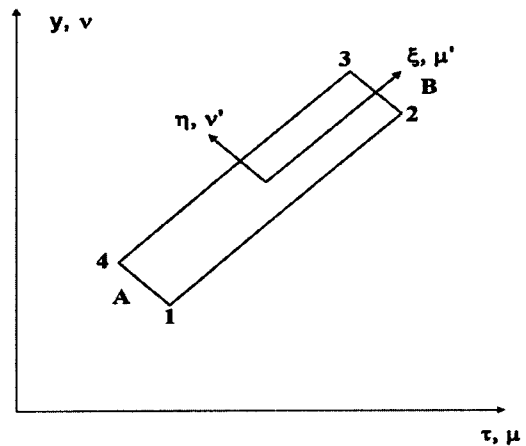
(1) Mapping

그림 3은 본 연구에서 적용한 4절점 절리요소를 지역(local) 및 전역(global) 좌표계에서 보여주고 있다. Goodman의 절리요소에서는 절점 1, 4과 2, 3에 각각 동일한 좌표를 부여하여 두께가 없는 것으로, 즉 $t=0$, 간주하나 본 연구에서는 불연속면이 임의의 두께를 갖을 수 있도록 수정하여 적용하였다.

좌표계의 mapping은 등매개변수요소 개념을 토대로 형상함수 N_A 및 N_B 를 이용하여 수행되며, 각 요소의 임의 점에서의 좌표는 다음과 같이 표현된다.



(a) Local Space : ξ, η



(b) Global Space

그림 3. 지역 및 전역 좌표계에서의 절리 요소

$$\begin{aligned} x &= N_A x_A + N_B x_B \\ y &= N_A y_A + N_B y_B \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, 형상함수로는 일반적인 지역 좌표계 ξ 로 표현되는 다음과 같은 선형 Lagrangian 내삽함수(interpolation function)를 사용한다.

$$N_A = \frac{1-\xi}{2}, \quad N_B = \frac{1+\xi}{2} \quad (2)$$

(2) Rayleigh-Ritz 근사화

절리요소의 상대 변위는 Rayleigh-Ritz 근사화 개념을 적용할 경우 식 (3)과 같이 표현된다

$$\begin{aligned} \Delta u &= N_A \Delta u_A + N_B \Delta u_B \\ \Delta v &= N_A \Delta v_A + N_B \Delta v_B \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, 상대 절점변위 Δu 와 Δv 는 각 절점의 절대 변위(u_i 및 v_i)를 이용하여 다음과 같이 표현

할 수 있다.

$$\Delta u_A = u_4 - u_1 \quad \Delta v_A = v_4 - v_1 \quad (4)$$

$$\Delta u_B = u_3 - u_2 \quad \Delta v_B = v_3 - v_2$$

한편, 식 (3)과 (4)를 조합하여 상대 변위를 절점변위 $\{\delta\}$ 로 표현하면 식 (5)와 같다.

$$\begin{pmatrix} \Delta u \\ \Delta v \end{pmatrix} = [M] \{\delta\}^T \quad (5)$$

여기서,

$$[M] = \begin{bmatrix} -N_A & 0 & -N_B & 0 & -N_B & 0 & -N_A & 0 \\ 0 & -N_A & 0 & -N_B & 0 & -N_B & 0 & -N_A \end{bmatrix}$$

$$\{\delta\}^T = \{u_1 \ v_1 \ u_2 \ v_2 \ u_3 \ v_3 \ u_4 \ v_4\}^T$$

(3) 변형률-변위 관계

절리 요소의 변형률은 지역 좌표축 ξ 와 η 에서의 연직 및 전단 지역 상대변위 $\Delta u'$ 과 $\Delta v'$ 로 정의되며, 아래 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_s \\ \varepsilon_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta u' \\ \Delta v' \end{Bmatrix} = [R][M]\{\delta\} = [B']\{\delta\} \quad (6)$$

여기서, ε_s 와 ε_n 은 각각 절리면에서의 전단 및 연직 변형률이며, 행렬 $[R]$ 은 식 (7)로 정의되는 절리요소의 기울기를 나타내는 회전 행렬이다. 한편, $[B']$ 은 절리요소의 변형률-변위 행렬이다.

$$[R] = \frac{\begin{bmatrix} \frac{dx}{d\xi} & \frac{dy}{d\xi} \\ -\frac{dy}{d\xi} & -\frac{dx}{d\xi} \end{bmatrix}}{\left[\left(\frac{dx}{d\xi} \right)^2 + \left(\frac{dy}{d\xi} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (7)$$

(4) 응력-변형률 관계

절리의 응력-변형률 관계는 재료특성행렬 $[D]$ 를 토대로 식 (8)과 같이 표현된다. 여기서, τ 와 σ_n 은 각각 절리면에서의 전단 및 연직 응력이며, 전단강성 K_s 와 연직강성 K_n 은 힘/(길이)³의

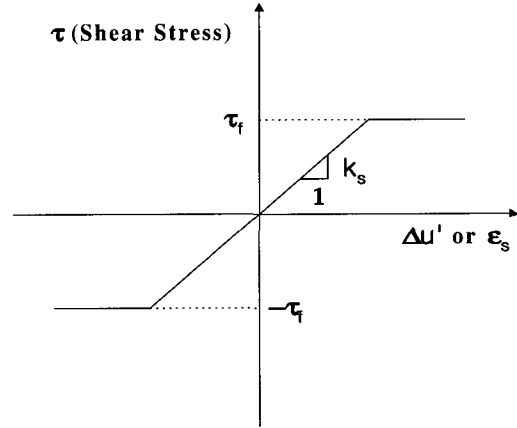


그림 4. 절리면의 전단응력-변위 관계에 적용된 쌍일차 모형

단위로 나타낸다. 한편, 절리는 전단시 팽창거동을 보이지 않는 것으로 가정하였으며, 비선형 응력-변형률 거동은 그림 4에서와 같이 단순화된 쌍일차(bilinear) 모형 및 식 (9)로 주어지는 Mohr-Coulomb 파괴 기준을 따르도록 하였다.

$$\begin{Bmatrix} \tau \\ \sigma_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_s & 0 \\ 0 & K_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_s \\ \varepsilon_n \end{Bmatrix} = [D] \begin{Bmatrix} \varepsilon_s \\ \varepsilon_n \end{Bmatrix} \quad (8)$$

$$\tau_f = c + \sigma_n \tan \phi \quad (9)$$

여기서, τ_f 와 σ_n 은 각각 절리면에서의 전단 강도 및 연직 응력이며, c 와 ϕ 는 각각 절리의 점착력 및 내부마찰각이다.

불연속면의 파괴는 전단 혹은 인장 파괴의 형태로 나타나는 것으로 가정하였다. 즉, 임의의 절리요소에서 전단력이 $|\tau| > \tau_f$ 인 경우에 전단 파괴가 발생한 것으로 간주하여 전단강성과 전단력으로 $K_s = 0$ 및 $\tau = \tau_f$ 의 값을 부여함으로써 전단저항 능력을 상실하도록 하였으며, 반면에 $\sigma_n > 0$ (인장응력)의 경우에는 전단 및 연직강성, 그리고 절리면의 응력으로 매우 작은 값을 부여하여(즉 $K_s = K_n = 0$ 및 $\tau = \sigma_n = 0$) 외력에의 저항 능력을 상실하는 효과를 얻도록 하였다.

(5) 강성 행렬 및 등가 절점력

절리 요소의 강성 행렬 및 등가 절점력은 일반 요소와 동일한 개념에 근거하여 식 (10)과 (11)의 형태로 계산된다.

$$[k] = \int_s [B]^T [D] [B] ds \quad (10)$$

$$\{f\} = \int_s [B]^T \left\{ \begin{matrix} \tau \\ \sigma_n \end{matrix} \right\} ds \quad (11)$$

여기서, $ds = [(dx/d\xi)^2 + (dy/d\eta)^2]^{1/2}$

3.2 프로그램 검증

본 연구에서는 절리요소가 적용된 GEOFE2D의 수치 알고리즘 및 불연속면에서의 상호거동 모사의 타당성을 검토하기 위해 축소 모형압반에 대한 실내모형실험 및 절리 블록재하조건에 대한 해석을 수행하고 그 결과를 GEOFE2D의 해석 결과 및 상용프로그램 DIANA(1996) 결과와 비교·분석하였다.

(1) 실내모형실험

실험에 사용된 모형압반은 시멘트와 고령토, 그리고 물을 9 : 2 : 4의 배합비로 반죽하여 얻어진 모르타르를 그림 5와 같이 기 제작된 42 cm (가로) × 42 cm (세로) × 9 cm (폭) 크기의 성형틀에서 양생시키는 방법으로 제작하였다. 모형압반 제작시에 지름 11.2 cm인 PVC관을 이용하여 원형공동을 생성하였으며, 두께가 2 mm인 양철판을 이용하여 불연속면을 인위적으로 재현하고 충분한 강도를 발현하도록 상온에서 약 20일간 양생시킨 후 재하시험을 수행하였다. 한편, 본 실험에서는 30°의 경사각을 갖는 단일 불연속면이 공동의 중앙부를 관통하는 경우와 경사각 30° 및 120°의 복수 불연속면이 공동을 관통하는 경우를 고려하였다. 그림 6은 복수 불연속면의 경우에 대한 실험조건을 도식적으로 보여주고 있다.

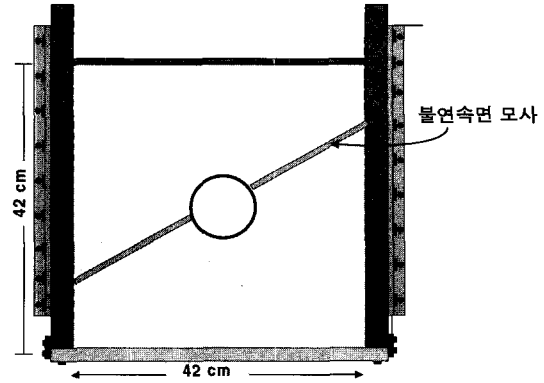


그림 5. 모형압반 성형틀

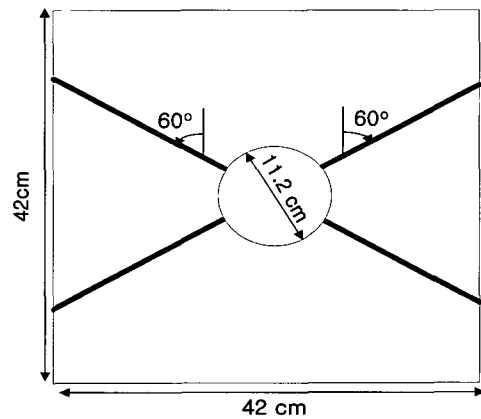
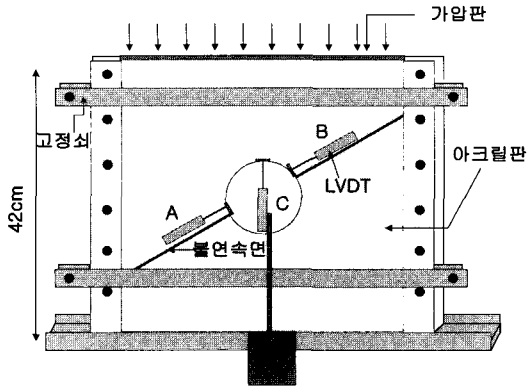
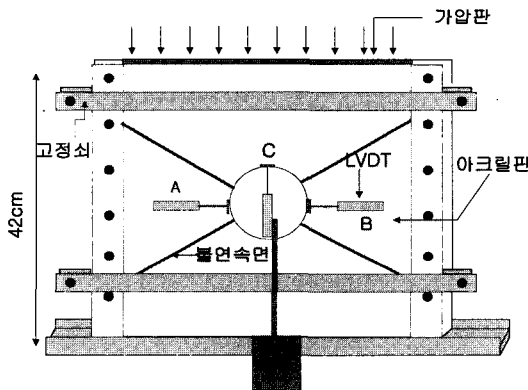


그림 6. 복수 불연속면 실험조건

한편, 재하시험은 제작된 모형압반을 그림 7과 같은 모형실험 프레임에 거치 시킨 후 불연속면에서의 상대변위를 유발시키기 위해 상부에서 등분포하중을 가하는 방법으로 수행하였다. 프레임의 전면부에는 전반적인 압괴의 변위 발생 경향을 육안으로 관찰할 수 있도록 하기 위해 두께 2 cm의 아크릴판을 부착하였으며 후면부에는 두께 3 cm의 목재판을 설치하였다. 또한 하중재하시 평면변형을 조건을 확보하기 위해 모형 프레임의 전·후면을 L-형강을 이용하여 구속하였으며 하중재하시 발생하는 압괴의 수평변위를 허용하기 프레임의 좌·우측 경계부는 구속하지 않았다. 아울러서 압반과 프레임이 접하는 부분에는 박리제(foam oil)를 이용하여 하중재하시



(a) 단일 불연속면



(b) 복수 불연속면

그림 7. 모형실험 가압 및 계측 장치 개요도

마찰을 최소화하였다. 한편, 상재하중은 UTM 하중재하장치를 이용하여 작용하였으며 시험 중에 발생하는 공동의 변위는 그림 7과 같이 LVDT를 공동 주변에 설치한 후 TDS-301 datalogger를 이용하여 계측하였다. 그림 8은 복수 불연속면의 경우에 대한 재하 직전 장면을 사진으로 보여주고 있다.

전술한 모형실험조건을 GEOFE2D 및 상용 프로그램인 DIANA를 이용하여 수치모델링을 실시하고 그 결과를 실험결과와 비교하였다. 해석 모델링에서는 모형암반의 제원 및 경계조건, 그리고 하중재하조건 등을 상세히 고려하였으며, GEOFE2D와 DIANA 결과의 직접적인 비교를 위해 동일한 요소망을 적용하였다. 그림 9는 해



그림 8. 모형암반 재하 장면

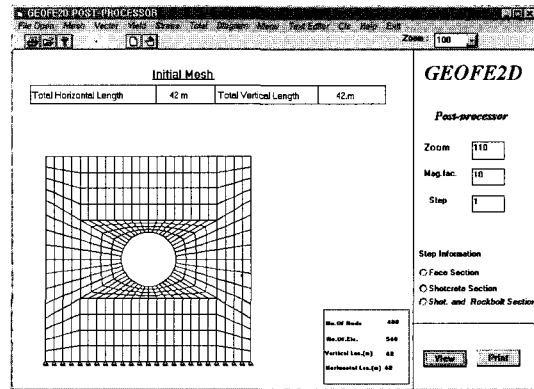


그림 9. 실내모형실험 해석에 적용된 유한요소망

석에 적용된 약 540여개의 절점과 480여개의 4절점 평면변형률요소, 그리고 16개의 절리요소로 구성된 유한요소망을 보여주고 있다. 한편, 재료의 모델링에 있어서 모형암반에 대한 예비실험 결과 모형암반의 강도가 절리면의 전단강성에 비하여 월등히 클 뿐만 아니라 암괴의 거동이 불연속면에서의 상대변위에 의해 좌우되는 것으로 나타나 암반과 절리는 탄성재료로 모델링하였다. 모형암반과 불연속면의 역학적 특성은 일축압축시험과 전단시험을 통해 결정하였으며, 표 1은 해석에 적용된 입력정수를 보여주고 있다.

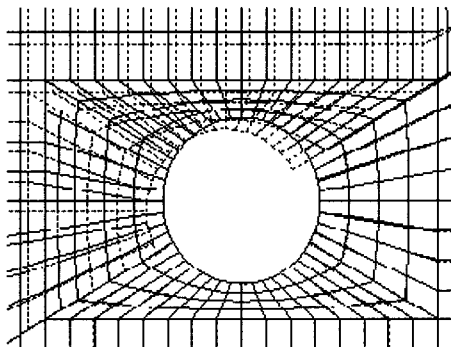
그림 10은 단일 및 복수 불연속면의 경우에 있어서 $q = 12 \text{ kPa}$ 의 상재하중 작용시의 변위양상을 보여주고 있는데 보이는 같이 불연속면에서

표 1. 해석에 적용된 모형암반 및 불연속면의 역학적 특성

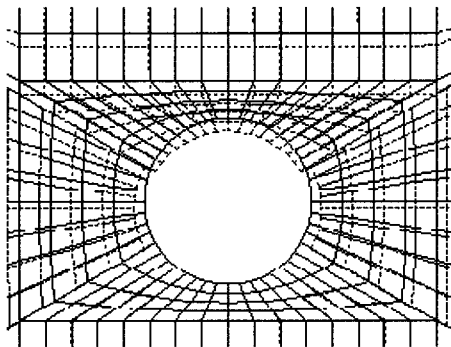
	탄성계수 E (kPa)	포아송비 ν	연직강성 K_n (kPa/m)	전단강성 K_s (kPa/m)
모형암반	2.6×10^6	0.3	-	-
불연속면	-	-	2.6×10^7	1.0×10^3

표 2. 상재하중 $q=12$ kPa에서의 각 지점 변위

구 분	구 분	변 위 (mm)		
		A	B	C
case 1	GEOFE2D 및 DIANA	12.8	12.7	6.7
	Model test	10.2	10.4	5.6
case 2	GEOFE2D 및 DIANA	6.7	6.5	7.8
	Model test	4.6	4.7	6.3



(a) 단일 불연속면



(b) 복수 불연속면

그림 10. 상재하중 $q=12$ kPa에서의 공동주변 변위 발생 양상

의 상대변위가 발생하는 경향을 잘 나타내고 있으며, 표 2는 모형실험과 유한요소해석에서 얻어

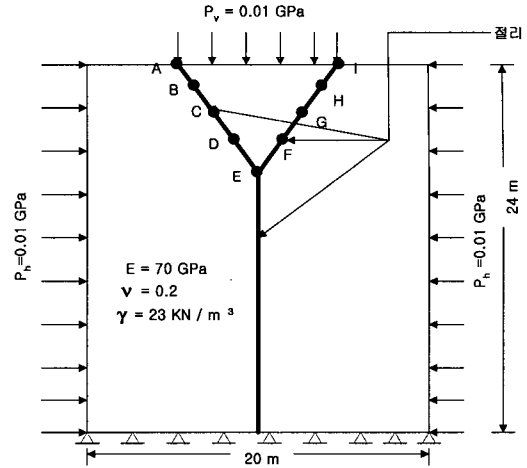


그림 11. 절리 블록 해석 조건의 개요도

진 각 계측지점에서의 변위를 비교하고 있다. 보이는 바와 같이 GEOFE2D와 DIANA의 결과는 동일한 것으로 나타났으며, 모형실험 결과와 비교할 때 다소의 차이는 있으나 정성·정량적인 측면에서 매우 유사한 것으로 나타났다. 모형실험과 유한요소해석 결과의 차이에 대한 원인은 실험시 발생할 수 있는 오류, 모형암반의 불균질성, 수치해석상의 오차 등을 들 수 있으며, 모형실험 및 수치해석에서 발생할 수 있는 오차의 범위를 고려할 때 이러한 정도의 차이는 허용 범위 이내에 드는 것으로 간주할 수 있다.

(2) 절리 블록 해석

본 해석에서는 그림 11과 같이 세 개의 불연속면으로 분리된 절리 블록에 수평·수직압이 작용하는 경우를 GEOFE2D와 DIANA를 이용하여 해석하고 그 결과를 비교하였다. 해석 모델링에서는 그림 11에서와 같이 바닥면에 힌지를 설치하여 x, y 방향 변위를 구속하고 불연속면에서의 상대변위를 유발시키기 위해 좌·우측 경계부와 췌기블록에 각각 $p_h = 0.01$ GPa와 $p_v = 0.0$ GPa의 수평 및 수직 압력을 작용시켰다. 해석에 적용된 유한요소망과 암괴 및 절리의 역학적 특성

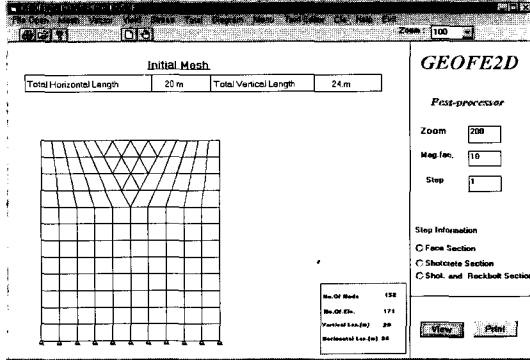


그림 12. 절리 블록 해석에 적용된 유한요소망

표 3. 절리 블록 해석에 적용된 암괴와 불연속면의 역학적 특성

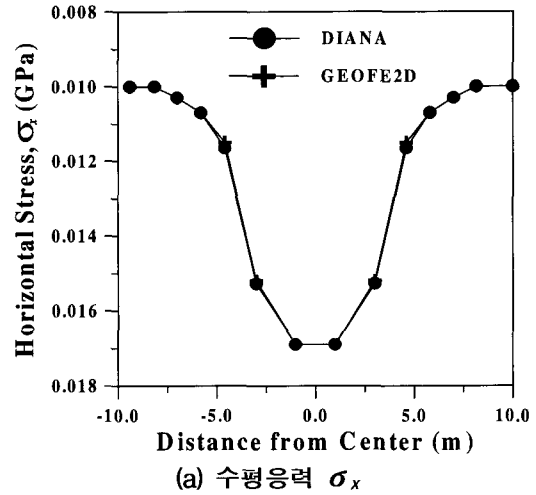
	탄성계수 E (kPa)	포아송비 ν	단위중량 γ (kN/m ³)	연직강성 K_n (kPa/m)	전단강성 K_s (kPa/m)
암괴	7.0×10^6	0.2	23	-	-
불연속면	-	-	-	7.0×10^8	100

표 4. 계측지점의 변위

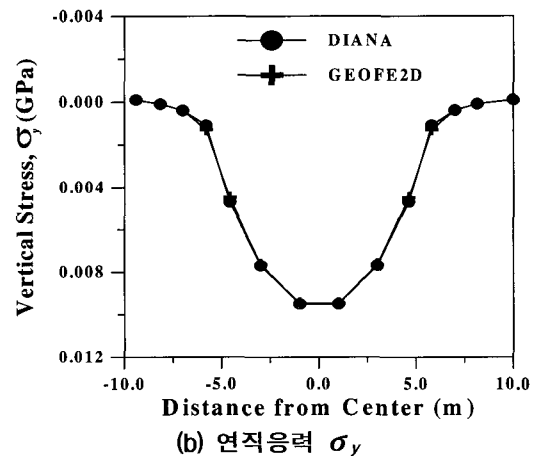
	GEOFE2D		DIANA	
	x-방향 변위 (mm)	y-방향 변위 (mm)	x-방향 변위 (mm)	y-방향 변위 (mm)
A	0.76	0.74	0.76	0.75
B	0.41	0.82	0.40	0.83
C	0.23	0.78	0.22	0.78
D	0.11	0.69	0.11	0.69
E	0.00	0.59	0.00	0.60
F	-0.11	0.69	-0.11	0.69
G	-0.22	0.78	-0.22	0.78
H	-0.40	0.82	-0.40	0.83
I	-0.75	0.74	-0.76	0.75

이 각각 그림 12와 표 3에 나타나 있다.

표 4는 GEOFE2D와 DIANA에서 얻어진 결과를 토대로 그림 11에 표시된 각 계측지점에서의 변위를 비교하고 있는데 보이는 바와 같이 거의 동일한 것으로 나타났다. 한편, 최상단 요소의 수평 및 연직응력 σ_x 와 σ_y 를 비교하고 있는 그림 13에서도 두 결과가 거의 일치하는 경향을 관찰할 수 있다.



(a) 수평응력 σ_x



(b) 연직응력 σ_y

그림 13. 수평 및 연직응력 비교

실내모형실험 및 절리 블록 해석 결과를 종합적으로 분석할 때 GEOFE2D에 적용된 절리요소 불연속면에서의 상대 변위를 적절히 묘사 하는 것으로 나타났으며, 따라서 GEOFE2D는 불연속면을 포함하는 암반 터널의 거동해석에 효율적으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 불연속암반 터널의 유한요소해석

본 연구에서는 GEOFE2D를 이용하여 불연속 암반에 시공되는 터널의 거동해석시 절리요소를 이용한 불연속면의 구체적 모델링 방법을 제시

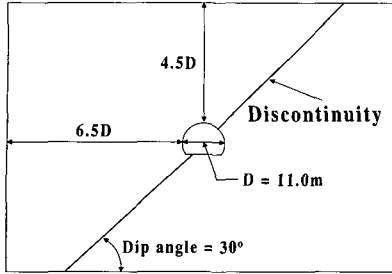


그림 14. 해석 대상 터널의 개략도

하고 해석결과를 토대로 불연속면의 모델링 여부가 해석결과에 미치는 영향을 정성·정량적으로 고찰하였다.

(1) 해석조건

본 해석에서는 직경 $D = 11.0\text{m}$, 토피 약 10D의 마제형 도로터널이 보통암에 해당하는 지반에 시공되는 경우에 있어서 두께 약 30cm의 충전물을 포함하는 불연속면이 30°의 경사각으로 터널 중앙부를 관통하는 경우를 다루었다. 그림 14는 해석에서 고려된 터널 및 지반 조건의 개략도를 보여주고 있는데 해석의 편의상 터널은 전단면 굴착으로 시공되고 막장 후방에서 슛크리트가 타설되는 것으로 가정하였다. 불연속면의 모델링 여부에 따른 터널의 거동을 고찰하기 위해 불연속면을 모델링하지 않은 경우(case 1)와 모델링한 경우(case 2)에 대한 해석을 수행하고 그 결과를 비교·고찰하였다.

(2) 해석 모델링

해석 모델링에 있어서 터널 중심으로부터 좌·우측 및 하부에 각각 6.5D 및 4.5D에 해당하는 영역을 모델링에 포함시켰으며, 좌·우측 경계면과 하부 경계면에는 각각 연직 및 수평롤러를 설치하였다. 한편, 터널 상부토피는 터널 천단부에서 약 4.5D에 해당하는 영역만을 모델링하고 그 상부에 잔여 토피에 해당하는 등가의 상재하중을 재하하는 방법으로 모델링 하였다. 해석

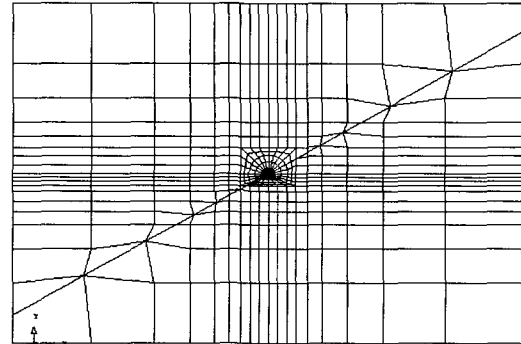


그림 15. 터널 해석에 적용된 유한요소망

영역을 이산화하는데 있어서 암반은 3절점 및 4절점 평면변형요소를 이용하였으며 불연속면은 본 프로그램에 적용된 4절점 절리요소를 이용하여 모델링하였다. 그림 15는 약 380여개의 절점과 350여개의 평면변형 요소, 그리고 30여개의 절리요소로 구성된 유한요소망을 보여주고 있다. 한편, 불연속면이 슛크리트 라이닝을 관통하는 부분의 모델링에 있어서 불연속면과 슛크리트 라이닝의 변위 적합조건(compatibility requirement)을 만족시키기 위해 그림 16과 같이 암반과 라이닝의 경계면에도 절리요소를 적용하는 방법을 채택하였다. 재료의 모델링에 있어서 암반은 Drucker-Prager 항복규준을 따르는 탄소성 재료로, 그리고 불연속면과 슛크리트 라이닝은 탄성 재료로 간주하였으며 표 5는 해석에 적용된 입력정수를 나열하고 있다.

(3) 결과 분석 및 고찰

그림 17은 터널 주변의 변위 발생 경향을 비교하고 있다. 보이는 바와 같이 불연속면의 모델링 여부에 따라 터널 주변 변위발생 양상이 현저히 달라지는 경향을 잘 관찰할 수 있다. 즉, 불연속면을 모델링한 경우에는 불연속면에서의 상대변위로 인해 전반적으로 좌측하향의 변위 패턴을 나타내고 있어 불연속면을 모델링하지 않은 경우와 비교하여 정성·정량적으로 상이한 변위

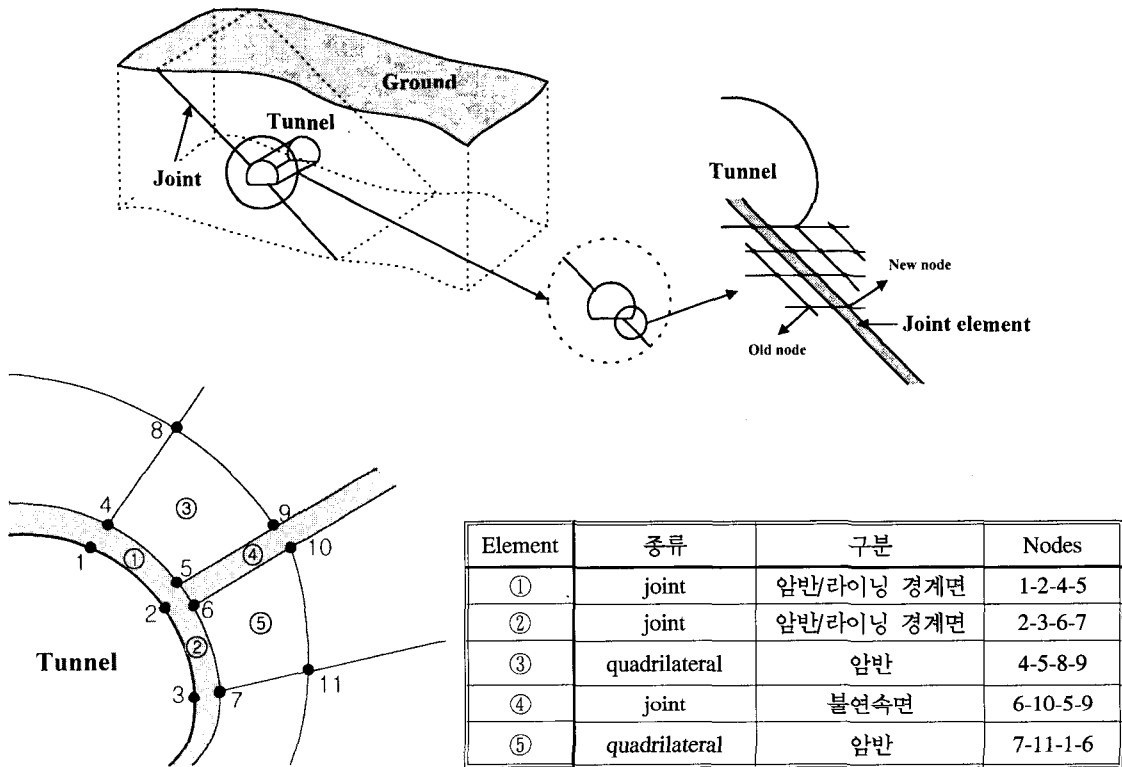


그림 16. 암반/불연속면/숏크리트 라이닝 모델링 상세도

표 5. 해석에 적용된 암반 및 불연속면의 역학적 특성

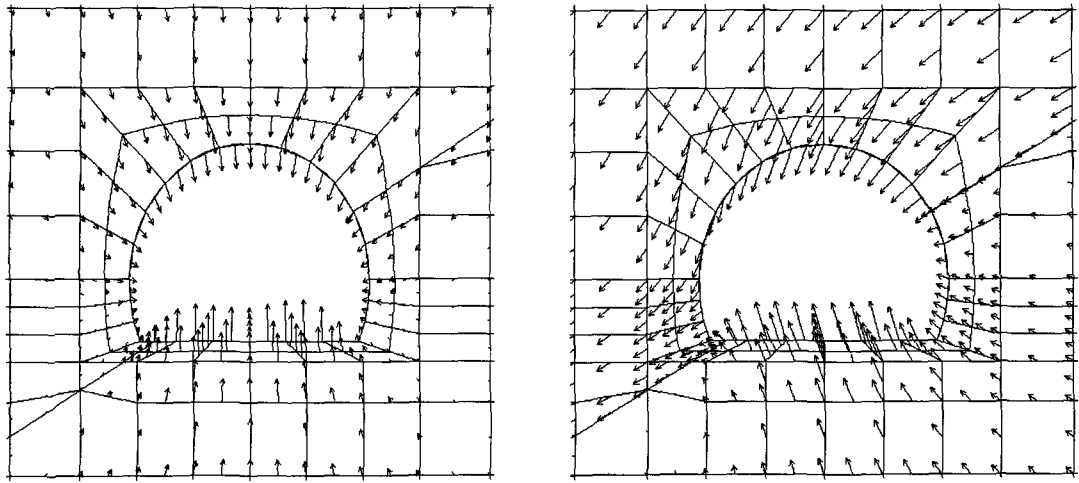
구분	암반	숏크리트	불연속면
탄성계수 E (kPa)	3.0×10^6	3.0×10^7	-
포아송비 ν	0.23	0.2	-
내부마찰각 ϕ (deg.)	35.0	-	-
점착력 c (kPa)	100.0	-	-
단위중량 γ (kN/m ³)	23.0	25.0	-
축압계수 K_0	0.75	-	-
연직강성 K_n (kPa/m)	-	-	3.0×10^7
전단강성 K_s (kPa/m)	-	-	1.0×10^3

발생 양상을 보여주고 있다. 이러한 경향으로부터 불연속면을 모델링하지 않을 경우에는 불연속면에서의 상대변위로 인한 전반적인 변위 패턴을 적절히 묘사할 수 없음을 알 수 있다.

한편, 숏크리트 축력 및 휨모멘트 발생 경향을 보여주고 있는 그림 18과 19에서 또한 불연속면의 모델링 여부에 따라 분포 양상이 현저히 달라

지는 경향을 보이고 있어 불연속면의 영향을 보다 뚜렷하게 관찰할 수 있다. 즉, 축력분포를 비교하고 있는 그림 18에서는 불연속면에서의 상대변위로 인해 불연속면 관통부위 및 터널 우측 부위에서의 축력이 최대 100% 이상 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 그림 19에서 나타내고 있는 휨모멘트의 경우 또한 불연속면이 관통하는 좌측 인버트 부분에서 현저히 증가하는 경향을 보이고 있다.

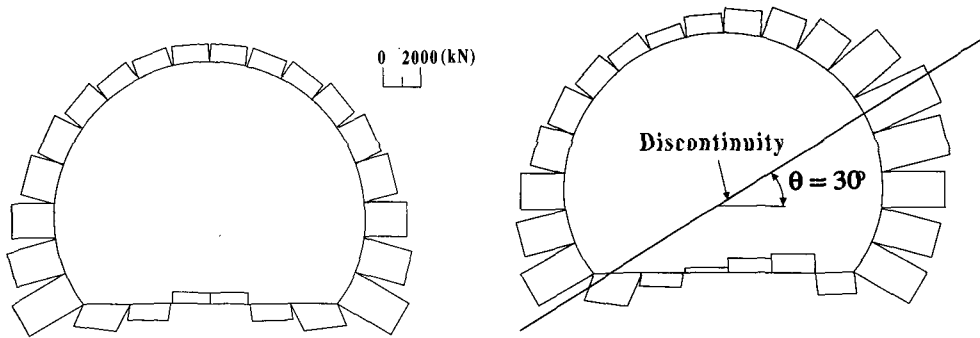
알아본 바와 같이 불연속면은 터널 및 주변 지반의 응력-변형률 거동은 물론 숏크리트 라이닝 응력 분포에 현저한 영향을 미치며, 불연속면을 적절히 모델링하지 않을 경우 불연속면에서 발생하는 국부적 불안정(local instability) 현상을 적절히 묘사할 수 없는 것으로 나타났다. 따라서, 터널 설계/시공 단계에 적용할 수 있는 보다 현



(a) case 1 (W/O Discontinuity)

(b) case 2 (With Discontinuity)

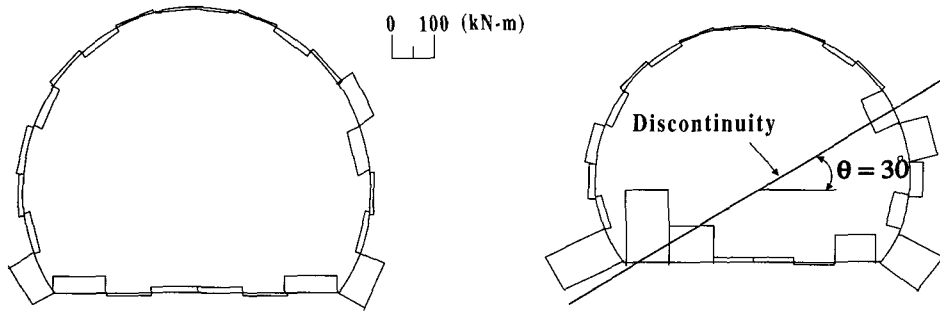
그림 17. 변위 발생 경향



(a) case 1 (W/O Discontinuity)

(b) case 2 (With Discontinuity)

그림 18. 슛크리트 라이닝 축력 분포 경향



(a) case 1 (W/O Discontinuity)

(b) case 2 (With Discontinuity)

그림 19. 슛크리트 라이닝 휨모멘트 분포 경향

실적인 결과의 도출을 위해서는 터널 구조해석 시 불연속면에 대한 구체적인 모델링이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 기존의 유한요소해석 프로그램 GEOFE2D에 Goodman의 절리 요소를 등매개변수의 형태로 수정·적용하여 불연속면의 모델링이 가능한 프로그램을 개발하고 모형실험결과 및 기존의 상용프로그램과의 비교를 통해 그 타당성을 검증하였다. 또한, 개발된 프로그램을 이용하여 불연속면이 터널을 관통하는 경우에 대한 해석을 수행하였으며, 그 과정에서 불연속면과 슛크리트 라이닝 교차부에서의 변위 적합조건을 만족시킬 수 있는 모델링 기법을 제시하였다. 한편, 해석결과를 분석한 결과 불연속면의 모델링 여부에 따라 터널 및 주변지반의 응력-변형을 거동 및 슛크리트 라이닝 응력발생 양상이 현저히 상이하게 나타났으며, 특히 불연속면을 모델링한 경우에 있어서 불연속면과 슛크리트 라이닝 교차부에서의 슛크리트 라이닝 축력 및 휨모멘트가 현저히 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과로 미루어 볼 때 불연속면의 모델링을 생략할 경우 이러한 국부적 응력집중 현상을 적절히 묘사할 수 없으므로 부적절한 설계를 초래할 수 있으며, 따라서 불연속면을 포함하는 터널의 거동해석시에는 불연속면에 대한 보다 상세한 모델링이 수반되어야 실제 거동에 보다 근접하는 해석결과를 도출시킬 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 건설기술연구개발사업 산학공동연구(과제번호: RND96(0110) 및 성균

관대학교 산업설비 안정성평가 연구센터(SAFETY and Structural Integrity Research Center)의 연구비 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 유충식, 이호 (1998), "불연속 암반에 시공되는 터널의 거동 메카니즘에 관한 유한요소해석", 1998년도 학술발표회 논문집 (II), pp. 23-26.
2. 유충식, 김영준, 김종석, 백동호, 김수일 (1996), "지반굴착 해석을 위한 유한요소해석 프로그램 개발 및 적용", 1996년도 학술발표회 논문집 (II), pp. 363-366.
3. Alehossein H. and Carter J. P. (1990), "On the implicit and explicit of joints in the analysis of rock masses", Proc. of Int. Conf. on Mechanics of Jointed and Faulted Rock, Rossmanith (ed.), Balkema, pp. 487-494.
4. Cundall, P. A. (1987), "Distinct element models of rock and soil structures", Analytical and Computational Methods in Engineering rock Mechanics, E. T. Brown Ed., pp. 129-163.
5. Curran, J. H. and Ofoegbu, G. I. (1993), "Modeling Discontinuities in Numerical Analysis", Comprehensive Rock Engineering., Vol. 1, pp. 443-468.
6. DIANA Users Manual, Release 6.1, TNO Building and Construction Research, Netherlands, 1996.
7. Desai, C. S. and Christian, J. T. (1977), Numerical Methods in Geotechnical Engineering, McGraw Hill.
8. Desai, C. S., Zaman, M. M., Lightner, J. G., and Siriwardane, H. J. (1984), "Thin-layer elements for interfaces and joints." Int. J. for Num. Anal. Mech. in Geomech. Vol. 8, pp. 19-43.
9. Ghaboussi, J., Wilson, E. L., and Isenberg, J. (1973), "Finite element for rock joints and interfaces." J. of the Soil Mech. and Found. Div. Proc. of A.S.C.E., Vol. 99, No. SM10, pp. 833-848.
10. Goodman, R. E., Taylor, R. L., and Brekke, T. L. (1968), "A model for the mechanics of jointed rock." J. of the Soil Mech. and Found. Div. Proc. of A.S.C.E., Vol. 94, No. SM3, pp. 637-657.
11. Pande, G. N. (1993), "Constitutive Models for Intact Rock, Rock Joints and Jointed Rock Masses", Comprehensive Rock Engineering, Vol. 1, pp. 427-442.
12. Lei, X. Y., Swoboda, G., and Zenz, G. (1995), "Application of Contact-Friction Interface Element to Tunnel Excavation in Faulted Rock", Computers

- and Geotechnics, Vol. 17, pp. 349-370.
13. Palmer, M. C. (1989), "Experimental modelling of the effects of jointed rock on a circular opening through a rock mass", Degree of Master of Science in State University of New York at Buffalo.
14. Pande, G. N., Beer, G., and Williams, J. R. (1990), "Numerical Methods in Rock Mechanics", pp. 97-107, John Wiley & Sons Ltd.
15. Zienkiewicz, O. C. and Pande, G. N. (1977), "Time-dependent multilaminate model of rocks - A numerical study of deformation and failure of rock masses", Int. J. for Num. Anal. Mech. in Geomech. Vol. 1, pp. 219-247.

(접수일자 1999. 5. 4)