

암반의 진행성 파괴 기법을 이용한 터널거동 분석

이성민¹⁾ · 이윤규²⁾ · 신성렬³⁾

Analysis of Tunnel Behavior Using Progressive Rockmass Failure Technique

Seong-Min Lee, Yun-Gyu Lee and sung-ryul Shin

ABSTRACT Concentrated stresses due to the underground tunnel excavation easily cause many problems such as yielding, popping, and failure at the immediate roof, wall and floor of tunnel. Therefore, it is very important to predict the possibility of these problems when a tunnel is excavated underground. There are two typical methods to predict these problems. The one is to predict problems from the analysis of field monitoring data and the other is to predict them from computer simulations using good site investment data. Using the second method, this study attempted to describe the time-dependent or progressive manner of immediate roof and wall due to the underground tunnel excavation. An iterative technique was used to represent progressive failure of rockmass with the Hoek and Brown theory. By developing and simulating three different shapes of twin tunnels, this research estimated the proper size of critical pillar width between tunnels, distributed stresses on the tunnel walls, and convergences of tunnel crowns. Moreover, results out of progressive failure technique based on the Hoek and Brown theory were compared with the results out of Mohr-Coulomb theory.

Key words : Tunnel, Progressive Rockmass Failure, Computer Simulation, Pillar Width, Concentrated Stresses,

초 록 지하 터널굴착으로 인하여 발생한 집중응력은 터널 주변의 암반에 변형이나 파괴를 쉽게 발생시킨다. 따라서 터널을 지하에 굴착할 경우에는 이러한 문제점들을 사전에 예측하는 것이 좋은데, 그 예측방법으로는 계측자료를 이용하는 방법과 컴퓨터 수치해석을 통한 방법이 있다. 본 논문은 후자의 방법을 이용하여 터널 굴착 후 터널 주변 암반에 나타나는 시간 경과에 따른 암반의 진행적 파괴 거동을 해석하였으며, 본 해석을 위해 반복(Iteration)기법을 Hoek-Brown 이론과 접목하여 사용하였다. 또한, 터널 형상이 서로 다른 3가지 모델을 이용하여, 터널간 이격거리와 내공변위 그리고 집중 응력의 변화 양상 등을 검토하였으며, 본 연구의 결과를 국내에서 많이 사용하고 있는 Mohr-Coulomb 이론을 적용하였을 때 얻어지는 결과와 비교 분석하였다.

핵심어 : 터널, 암반의 진행성 파괴, 수치해석, 집중응력, 이격거리

1. 서 론

지하 암반에 터널을 굴착할 때, 터널 주변 암반이 변형되거나 Popping 또는 붕괴하는 현상을 쉽게 접할 수 있는데, 이러한 현상은 초기 평형상태에 있던 지반이 터널 굴착으로 인하여 교란되고 다시 제 2의 평형상태에 도달하기 위해 교란된 응력이 재분배되는 과정에서 주로 발생한다. 따라서 터널 시공시 터널의 안정성을 높이기 위해서는 이러한 현상들의 발생 가능성을 사전에 예측하여야 한다. 지하 터널 굴착으로 인하여 암반에 나타나는 현상에 대한 예측 방법으로는 현장 계측자료 분석을 이용하는 직접적인 방법과 수치해석 등을 통하는 간접적인 방법이 있다. 전자의 경우 터널 굴착에 의한 암반의 거동을 보다

정확하게 예측할 수 있는 장점은 있으나, 현장 여건상 굴착과 동시에 정확한 계측 자료를 얻는 데에는 많은 어려움이 있으므로 터널 시공을 위해 실시한 지반조사의 분석 결과를 토대로 실시한 후자의 방법이 대안으로 많이 사용되고 있다. 그러나 국내에서 현재까지 실시하고 있는 수치해석 등을 통한 간접적인 방법은 지반의 초기 특성 값을 입력시켜 터널 거동을 해석하므로, 터널 굴착 후 시간의 경과에 따라 변하는 암반의 연속적인 반응을 표현하

1) 정회원, 영동대학교 건설공학부 교수

2) 안동정보대학 토목공학과 교수

3) 정회원, 한국해양대학교 해양개발공학부 교수

원고접수일 : 1999년 8월 6일

원고 심사완료일 : 1999년 10월 23일

는데 많은 어려운 점이 있어 왔다.

본 연구에서는 터널 굴착 후 시간의 경과에 따라 변하는 불연속 암반의 연속적인 거동을 수치해석을 통하여 보다 현실적으로 표현하는데 그 1차 목적을 두었다. 암반의 불연속성을 표현하기 위해서 RMR (Rock Mass Rating) 암반 분류법을 이용한 Hoek-Brown의 경험적 암반파괴 이론을 사용하였으며, 굴착 후 시간에 따라 변하는 암반의 거동은 암반의 진행성 파괴기법(Progressive Rock Mass Failure Technique)을 FDM (Finite Difference Method) 코드인 FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua)을 이용하여 지하 30 m 하부의 암반층을 통과하는 터널에 적용하였으며, 그 결과를 Mohr-Coulomb 이론을 적용하여 얻은 결과와 비교 검토하였다. Mohr-Coulomb 이론에 필요한 암반의 점착력과 내부마찰각은 Hoek(1990)이 제시한 이론에 근거를 두고 추정하였다. 또한 본 연구에서는 지하에 복열 터널을 굴착할 때 고려해야 할 여러 가지 문제점들 중, 터널 형상과 이격거리 등에 변화를 주면서 분석 검토하였다.

2. 해석 자료

2.1 해석에 사용된 수치모델

터널 형상에 따라 다르게 나타나는 암반의 진행성 파괴를 검토하기 위해, 지하 30 m 하부에 직경(D) 3 m인 원형 복열 터널과 인버트의 폭이 3.5 m와 4.1 m인 마제형 복열 터널을 모델화하였다. 모든 터널의 중심간 거리(CTC)는 9 m이다. 또한 원형 터널의 경우는 지반 특성에

따라 다르게 나타나는 터널의 거동을 분석할 수 있도록 경암층과 연암층을 대상으로 한 터널 굴착 모델을 선정하였다. 특히 연암층에 터널이 굴착되는 모델의 경우는, 터널의 이격거리 변화에 따른 아치 효과를 분석하기 위해 이격거리를 0.5D, 1.0D, 1.5D, 및 2.0D로 변화시킴으로써 응력과 변위에 대한 변화 양상을 검토하였다. 본 논문에서 사용된 수치모델의 크기는 폭 35 m × 높이 43.5 m이고, 그 대표적인 메쉬 형상은 Fig. 1과 같다.

2.2 해석에 사용된 Program

수치해석에 사용한 코드는 FDM을 응용한 FLAC으로써 FLAC에 관한 내용은 다수의 기존 논문에 수록되어 있고 Anon(1993)에 상세히 기록되어 있으므로 본 논문에서는 생략하기로 한다.

2.3 Hoek-Brown 파괴이론

Hoek and Brown(1980, 1988)은 암반 거동 해석에 있어서 불연속성을 포함하고 있는 취성 암반에 대한 이론과 경험을 바탕으로, 암반 파괴시 나타나는 주응력 사이의 관계를 정립하여 암반의 파괴이론을 유추하였다. 즉, Hoek-Brown 이론으로부터 산출된 암반의 허용강도($\sigma_{1,allhb}$)는, 암반의 최소주응력(σ_3)과 암석의 일축압축강도(σ_c) 그리고 RMR로부터 얻어진 암반상수 'm'과 's'에 의해 결정되며 그 이론은 다음과 같다.

$$\sigma_{1,allhb} = \sigma_3 + (m\sigma_c \sigma_3 + s\sigma_c^2)^{1/2} \quad (1)$$

위의 식(1)에 ' $\sigma_3 = 0$ '을 대입하면 암반의 일축압축강도

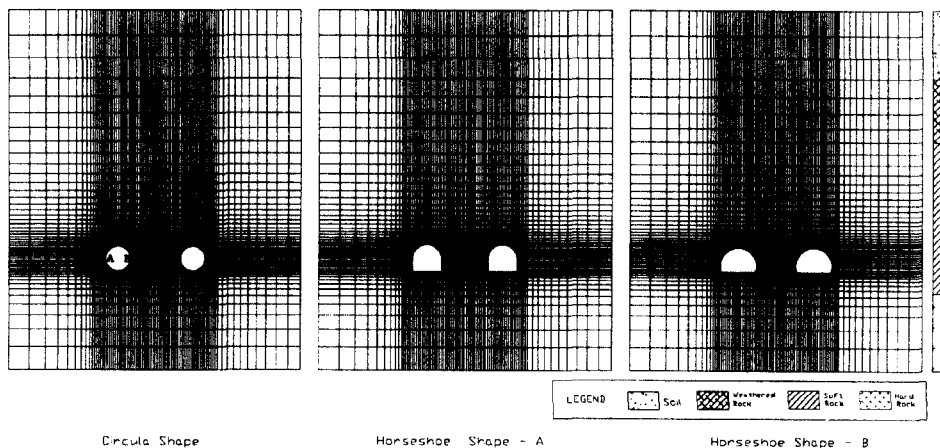


Fig. 1. Computer Models of Three Different Tunnel Shapes

($\sigma_{c, mass}$)를, ' $\sigma_{1, allhb} = 0$ '을 대입하면 암반의 허용인장강도 ($\sigma_{t, allhb}$)를 다음의 식(2)와 (3)과 같이 유도할 수 있다.

$$\sigma_{c, mass} = s^{1/2} \sigma_c \tag{2}$$

$$\sigma_{t, allhb} = 0.5 \sigma_c \{m - (m^2 + 4s)^{1/2}\} \tag{3}$$

Hoek-Brown 파괴이론은 1) 구속압력이 없는 상태에서 암반의 강도는 실내 시험으로부터 얻은 값보다 항상 작고, 2) 암반의 강도가 너무 RMR 값에 의존하고 있으며, 3) 파괴기준이 암반의 인장 파괴에는 부적당하다는 단점을 갖고 있으나, 이 이론은 불연속적인 암반의 파괴를 나타내는 유일한 파괴기준이고, 동시에 신중한 암반 특성 평가를 실시한 후 사용한다면 국내에서 많이 적용하고 있는 Mohr-Coulomb 파괴이론 보다 현실적이라 판단된다.

2.3 Mohr-Coulomb 파괴이론

Mohr-Coulomb 이론으로부터 산출된 암반의 허용강도 ($\sigma_{1, allmc}$)는 최소주응력(σ_3)과 암반의 내부마찰각(ϕ)에 의해 결정된다. 본 연구에 응용된 Mohr-Coulomb 이론(4)은 다음과 같다.

$$\sigma_{1, allmc} = \{2 c \cos\phi + \sigma_3 (1 + \sin\phi)\} / (1 - \sin\phi) \tag{4}$$

여기서도 $\sigma_{1, allmc} = 0$ 이라고 가정하면 암반의 인장강도를 계산하는 식 (5)를 유도할 수 있다.

$$\sigma_{t, allmc} = 2 c \cos\phi / (1 + \sin\phi) \tag{5}$$

2.4 암반의 역학적 삼수 선정

지표로부터 지하 수십 미터 사이의 천부 연암층을 대상으로 터널을 굴착할 경우, 굴착에 의해 발생하는 집중응력이 터널 측벽 연암의 허용강도를 쉽게 초과하여 터널 주변암반에 항복을 포함한 여러 가지 문제를 발생시키는 것을 현장에서 쉽게 발견할 수 있다.

따라서 이러한 문제점을 수치 해석을 통해 보다 현실적으로 나타내기 위해서는, 수치 해석시 주 입력자료로 사용되는 암반의 역학적 상수를 암반의 파괴기준에 따라 정확히 추정해야 한다. Hoek-Brown 이론을 암반의 진행성 파괴 기법에 적용할 경우에는, 암석의 실내시험 및 현장 측정 결과를 정량적으로 평가한 암반의 RMR 값으로부터 산출한 암반 상수 'm'과 's'와, 암석의 일축압축강도가 중요한 역학적 상수이다. 본 논문에서는 터널 통과 대상 지역의 정확한 암반의 RMR 값을 유추하도록 노력하였으며, 그 결과를 수치해석의 역학적 상수로 이용하였다. Mohr-Coulomb 이론을 암반의 파괴기준으로 적용할 경우에는 점착력(c)과 내부마찰각(ϕ)이 수치해석의 주요 역학적 상수이다. 암반의 'c'와 ' ϕ '값은 현장에서 암반의 직접단시험으로부터 구할 수 있으나, 이는 현실적으로 어려워져서 대부분의 경우는 무결암의 'c'와 ' ϕ '값에 감쇠지수(Reduction Factor) 나 RMR 값에 근거를 두고 제시된 Table(Brady and Brown, 1993)로부터 암반의 'c'와 ' ϕ '값들을 유추하고 있다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 제거하고 보다 정확한 암반의 'c'와 ' ϕ '값을 추정하기 위해, Hoek-Brown 이론에 여러 가지의 구속압력(Confining Pressure)을 적용하여 그에 대응하는 암반의 허용강도를 산출한 뒤 Mohr-Coulomb 파괴포락선을 완성함으로써 암반의 'c'와 ' ϕ '값을 추정하였다. 그 결과, 암반의 'c' 값은 암석의 'c' 값의 수 십분의 일 그리고 ' ϕ '값은 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 위의 결과로부터 산출된 암반의 점착력과 내부마찰각은 연암에서 $c = 2.19 \text{ kg/cm}^2$ 와 $\phi = 33^\circ$ 이었으며, 경암에서 $c = 5.14 \text{ kg/cm}^2$ 와 $\phi = 50^\circ$ 이었다. Table 1은 본 터널 단면 해석에 사용된 암석 및 암반의 역학적 상수를 나타낸 것이다. 한편, 본 논문에 적용된 풍화도와 풍화암의 'm'과 's'를 포함한 암반의 역학적 상수들은 터널 굴착에 의해 직접적인 영향을 받지 않는 관계로, 단지 상재하중 정도에만 적용할 수 있도록 항복이 발생하지 않

Table 1. Computer Input Data of Rockmass

항목	단위중량 γ (t/m^3)	탄성계수 E (t/m^2)	포아송 비 ν	일축압축강도 c (t/m^2)	m	s
풍화토	1.90	8,000	0.35	10	0.219	0.2×10^{-4}
풍화암	2.25	10,000	0.32	153	0.313	0.2×10^{-4}
연암	2.45	100,000	0.29	1,000	0.782	0.2×10^{-4}
경암(A)	2.70	400,000	0.27	5,000	1.598	0.00019
경암(B)	2.70	330,000	0.27	5,000	1.598	0.00019

는 범위에서 서울지역에서 실시한 많은 지반조사 결과에 바탕을 두고 임의로 선택하였다.

3. 암반의 진행성 파괴 기법

터널 굴착에 의해 교란된 암반의 파괴는 순간적으로 발생하는 경우도 있으나, 대부분의 경우는 시간의 흐름에 따라 응력이 재분배되는 과정에서 연속적인 파괴형태로 나타난다. 따라서 암반의 연속적 파괴에 대한 개념은 지하 암반이 파괴된 후 응력이 재분배되는 과정에서 연속적인 변화를 표현하는 것이다. Bieniawski(1969)는 압축에 의한 연속적인 파괴를 탄성계수를 감소시킴으로써 표현하였다. 이는 부서진 암반이 접촉에 의해서 그리고 암반에 내재하고 있는 축압에 의해서 파쇄 암반도 어느 정도의 잔류강도를 갖고 있다는 것이다. 이 이론에 근거를 두고, Kidybinski and Bobcock(1973)는 잔류강도와 최대 응력 사이의 비를 이용하여 암반의 연속적 파괴 거동을 표현하였으며, 그 후로 암반의 연속적인 파괴 기법이 수치해석에 점차 응용되기 시작하였다. Kripakov(1981) Park and Lee(1992)는 FEM과 암반의 진행성 파괴 기법을 이용하여 터널 굴착시 발생하는 암반의 연속적인 파괴 거동을 수치해석을 통해 나타내었다. 본 논문에서는 현재 국내에서 터널 해석에 널리 사용되고 있는 FDM 코드인 FLAC과, 그에 내장된 프로그램 언어인 FISH를 이용하여, Hoek-Brown 파괴 이론과 암반의 진행성 파괴 기법을 수치해석 모델에 적용할 수 있도록 하였다. 본 논문에 응용된 암반의 진행성 파괴 기법의 응용 방법은 Fig. 2의 순서도와 같으며 그 내용을 간단히 요약하면 다음과 같다.

현장시험 및 실내시험 결과로부터 산출한 RMR을 근거로 추정된 암반상수인 'm'과 's' 값 및 일축압축강도와 수치해석으로부터 산출한 최소 주응력을 식(1)과 식(3) 또는 식(4)과 식(5)에 대입하여 해석 모델내에 존재하는 모든 요소들의 허용 강도($\sigma_{1,allhb}$ 또는 $\sigma_{1,allmc}$)와 허용인장강도($\sigma_{t,allhb}$ 또는 $\sigma_{t,allmc}$)를 산출하였다. 그리고 그 결과들을 수치해석결과에서 계산된 최대주응력과($\sigma_{1,FDM}$)과 인장응력($\sigma_{t,FDM}$)으로 나누어 각 요소들의 안전율(Safety Factor)을 아래의 식 (6) 및 (7)과 같이 계산하였다.

$$SF1 = (\sigma_{1,allhb}) / (\sigma_{1,FDM}) \text{ 또는 } SF1 = (\sigma_{1,allmc}) / (\sigma_{1,FDM}) \tag{6}$$

$$SF2 = (\sigma_{t,allhb}) / (\sigma_{t,FDM}) \text{ 또는 } SF2 = (\sigma_{t,allmc}) / (\sigma_{t,FDM}) \tag{7}$$

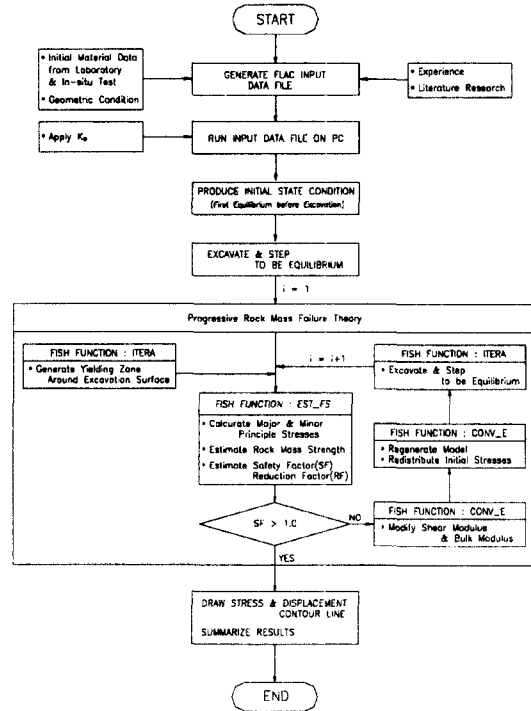


Fig. 2. Technique of Progressive Rockmass Failure

이 과정에서 모델내의 어느 요소에서라도 계산된 SF1의 값이 1보다 작은 요소가 존재한다면, 요소의 새로운 탄성계수(Enew)를 이전의 탄성계수(Eold)와 SF1을 이용하여 (8)과 같이 재 산정하여 FLAC의 입력자료로서 필요한 요소의 강성율과 체적 탄성계수를 안전율의 값에 따라 재조정되도록 반복(Iteration) 해석하였다. 본 연구에서는 이 과정을 모델내의 모든 요소들의 안전율 값들이 1을 넘어설 때까지 반복하였다.

$$E_{new} = E_{old} * SF1 \tag{8}$$

만약, SF2가 1보다 작은 경우는 요소에 인장파괴가 발생하였다고 가정하였다. 인장 파괴가 발생하였다면, 그 요소는 영구히 파괴된 것으로 가정하고, 요소가 갖고 있는 지보 능력을 제거하기 위해 인장 파괴가 발생한 단계 이후부터의 탄성계수를 0에 가까운 작은 값으로 대체하도록 하였다. 그러나 본 연구에서는 식 (2)로부터 산출한 암반의 인장강도가 해석시 발생한 인장력에 비해 커서 터널 주변암반에 인장파괴는 발생하지 않았다.

위에서 설명한 바와 같이 FDM 코드를 이용한 암반의 진행성 파괴 기법은 터널굴착에 의해 발생하는 암반의 연속적인 파괴와 항복 현상을 보다 현실적으로 표현하기 위

한 것이다. 수치 모델에서 터널을 굴착할 경우는 굴착되는 암반이 받고 있던 응력이 터널 굴착주변 암반으로 전이되게 되고, 터널 측벽과 같은 특정한 지역의 요소들에게는 응력이 집중되게 된다. 본 진행성 파괴기법은 이렇게 터널굴착에 의해 집중된 응력이 요소들의 허용강도를 초과하는 가를 검토하여, 허용강도를 초과하는 경우는 그 요소들은 파괴되었거나 항복된 것으로 간주하고, 그 요소들의 재료적 특성을 조절하여 줄어듦으로써 초과된 응력을 인근 요소들에게 전이시키도록 하는 것이다. 이러한 일련의 과정은 지하에 공동이 형성되어 응력이 재분배되는 동안 실시되며, 모든 요소들이 재분배되는 응력으로부터 안정화되어 터널구조물이 평형 상태에 도달할 때 즉, 허용강도가 응력보다 같거나 커질 때까지 계속 반복적으로 실시하는 것이다.

또한, 본 연구에서는 위에 언급된 전과정이 한번에 이루어지도록 FISH를 코딩하여 매 반복이 끝날 때마다 분석하고 재 입력해야 하는 번거로움과 그로부터 발생하는 계산오차를 최소화하도록 하였다.

4. 해석 결과

4.1 탄소성 모델과 진행성 파괴 기법의 비교

암반의 파괴 강도는 적용하는 파괴기준에 따라 다르다. 즉, 파괴기준에 따라 적용하는 역학적 상수가 틀리고, 그 적용된 역학적 상수에 따라 암반의 파괴 강도가 크게 좌우된다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 Hoek(1990)의 이론에 근거를 두고 'm'과 's' 값을 이용하여 Mohr-Coulomb 파괴기준에 필요한 암반의 점착력과 내부마찰각을 구하였으며, 탄소성 모델과 진행성 파괴기법을 상호 비교하기 위해, 이격거리가 0.5D인 원형 복열 터널이 연암에 굴착되는 수치 모델을 이용하여 1) Mohr-Coulomb 파괴기준을 적용한 탄소성 모델과 2) Mohr-Coulomb 파괴기준을 적용한 진행성 파괴 기법 그

리고 3) Hoek-Brown 파괴기준을 적용한 진행성 파괴 기법을 각각 적용하여 해석하였다. Table 2는 본 연구에서 실시한 결과를 집중응력의 감소율과 터널 천단부에서의 침하율 그리고 항복 영역으로 나타낸 것이다.

여기서, 집중응력 감소율은 첫 번째 반복단계에서 터널의 측벽부에 발생한 최대집중응력을, 탄소성 모델에서의 해석 결과와 진행성 파괴기법에의 최종 반복 단계 결과에서 얻은 집중응력과 비교하여 그 감소량을 백분율로 나타낸 것이다. 즉 집중응력 감소율은 최종 평형 상태에서 나타난 암반의 항복깊이와 과다한 응력 집중의 전이 정도를 나타낼 수 있어서, 집중응력 감소율이 크다는 것은 그만큼 암반의 항복이 더 크게 발생하였음을 의미한다.

해석 결과에 의하면, Hoek-Brown 이론에 진행성 파괴기법을 적용한 방법이 집중응력 감소율과 천단침하율 등에 있어서 다른 방법들보다 큰 것으로 나타났다. 그 이유는 Mohr-Coulomb 이론을 암반의 파괴기준으로 수치해석에 이용한 경우는 암반의 'c'와 ' ϕ '값이 암반의 파괴강도를 결정하는 주요 요소이기 때문에, 해석 결과는 'c'와 ' ϕ '값에 크게 좌우되는 경향을 보이기 때문이다. 본 연구에서 실시한 모든 해석 모델을 검토해 볼 때 터널이 천부암층에 굴착되는 경우는, 터널간 이격거리가 본 연구에서와 같이 매우 좁거나(0.5D) 암반의 'c'값이 무결암의 'c'값에 비해 수십 배 이상 작지 않는 한 거의 모든 요소에서 파괴가 발생하지 않는 것으로 나타났다. 이는 천부암에 터널이 굴착되는 경우는 굴착 후 암반에 작용하는 구속압력이 작고 Mohr 원 자체가 작기 때문에 암반의 'c'값이 ' ϕ '값보다 암반의 파괴를 규정하는데 더 우선하고 있기 때문이다. 그러나 Hoek-Brown 파괴기준에 진행성 파괴기법을 적용한 경우는 Hoek-Brown 이론 자체가 암반의 불연속성을 포함하고 있는 경험적인 파괴이론이므로 암반의 'c'와 ' ϕ '값이 불필요할 뿐 아니라, 터널이 천부암층에 굴착되는 경우에도 터널 측벽 주위에서 항복지역이 형성됨과 동시에 매 반복 단계마다 항복 지역에서 응력이 전이됨으로써 집중응력이 감소되는 경향이 비교적 다른 방법들에 비해 크게 나타났다. 이는 Hoek-Brown 이론에 근거한 암반의 파괴포락선은 비선형적이며 대부분의 경우 Mohr-Coulomb의 파괴 포락선 아래에 존재하기 때문이다.

4.2 터널 형상에 따른 암반의 진행성 파괴분석

터널 형상에 따른 암반의 진행성 파괴를 알아보기 위해 진행성 파괴기법을 적용한 Hoek-Brown 암반 파괴 이론

Table 2. Comparison of Ratio of Convergence Reduction and Concentrated stress

항 목	집중응력 감소율(%)	천단침하율 (%)	항복영역 (D=터널직경)
Mohr-Coulomb 탄소성 모델	28.91	8.2	측벽으로부터 0.1D
Mohr-Coulomb 진행성 파괴 기법	23.95	5.5	측벽으로부터 0.1D
Hoek-Brown 진행성 파괴 기법	33.43	11.6	측벽으로부터 0.2D

Table 3. Ratio of Convergence and Reduction of Concentrated Stresses

항 목	수직내공변위율 (%)	수평내공변위율 (%)	집중응력 감소율(%)		내공변위비 (수평/수직)	
			A	B		
원형터널	Hoek-Brown (Progressive)	3.88	21.01	20.19	21.69	34.69
	Mohr-Coulomb (FLAC)	31.14	27.00	12.13	13.23	28.84
마제형터널-A	Hoek-Brown (Progressive)	11.29	287.40	77.03	84.13	151.30
	Mohr-Coulomb (FLAC)	67.21	25.92	17.41	22.89	32.73
마제형터널-B	Hoek-Brown (Progressive)	9.44	96.81	49.30	35.60	42.50
	Mohr-Coulomb (FLAC)	61.29	55.94	52.40	38.79	20.17

을 터널 중심간 거리가 9 m인 원형 복열 터널 이외에 2 종류의 마제형 터널에 적용하였다. 그 결과, 원형 터널 해석을 할 때와 같이 초기 반복 단계에서 발생한 터널 측벽 주위에 집중된 응력은 반복 단계를 거듭할 때마다 감소하였고, 그에 따라 측벽 주위 압반의 항복은 계속 진행하여 그 범위가 측벽으로부터 약 0.2D 정도까지 진행하였다.

또한, 압반의 진행성 파괴에 따라 변하는 터널 내공의 거동을 파악하기 위해 첫 번째 반복 단계에서의 내공변위에 대한 최종 반복 단계에서의 내공변위를 수직과 수평으로 나누어 그 증가량을 백분율로 나타내었다. 또한 최종 반복 단계에서 수평 내공변위에 대한 수직 내공변위의 비를 검토하여 Table 3에 Mohr-Coulomb 탄소성 이론을 적용했을 때의 결과와 함께 나타내었다.

Table 3에 의하면, Hoek-Brown 이론에 진행성 파괴 기법을 적용할 경우 수평 내공변위 증가율이 수직 내공변위 증가율에 비해 모든 터널에 있어서 현저히 크게 나타났다. 특히 수직 측벽을 갖고있는 마제형 터널의 경우는 형태에 따라 차이는 있겠지만, 원형 터널에 비해 수평 변위 증가율이 크게 나타났다. 이 결과는 수직 측벽을 갖고있는 터널 주변 압반은 일반적인 원형 형상의 터널 주변 압반보다 집중응력이 많이 작용하여 쉽게 항복된다는 사실을 보여주는 것이다. 따라서, 이러한 터널의 지보나 계측시에는 터널 천단부 침하 이외에 측벽변형 등의 문제에 더욱 주의해야 할 것으로 사료된다. 그러나 Mohr-Coulomb 파괴기준을 적용한 탄소성 모델을 사용한 경우는 터널 형상에 관계없이 터널 내공변위의 수직/수평 내공변위 비는 Hoek-Brown의 결과에 비해 거의 일정함을

보이고 있으며, 수평내공변위 증가율에 있어서도 서로의 차이가 압반의 진행성 파괴에 비해 그다지 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 Mohr-Coulomb 이론은 본 연구에서 사용한 기법과는 달리 천부 압반층에 나타나는 터널의 소성거동을 표현하는데 있어서 Hoek-Brown 이론보다 덜 민감하다는 것을 의미한다.

4.3 연압에서 굴착되는 원형터널간 이격거리와 그 영향

터널간 이격거리가 터널과 주변 압반에 미치는 영향을 알아보기 위해, 원형 복열 터널 모델에 Hoek-Brown 파괴이론에 진행성 파괴기법을 적용하여 해석하였다. 그 결과, 첫 번째 반복 단계에서 굴착 후 나타난 집중응력과 터널의 이격거리는 서로 비선형적인 것으로 나타났다. 즉, 터널 D에 대한 Pillar 두께의 비가 터널이 굴착될 지역의 초기 평형 상태에서의 응력에 대한 터널 굴착 후 첫번째

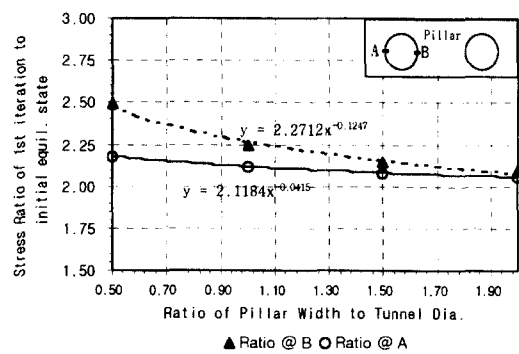


Fig. 3. Ratio of Concentrated Stresses vs. Pillar Width

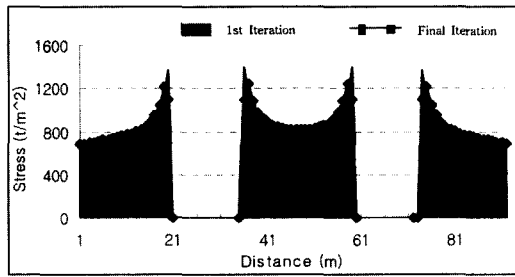


Fig. 4. Stress Distribution on the 2D Thick Pillar and Side Wall

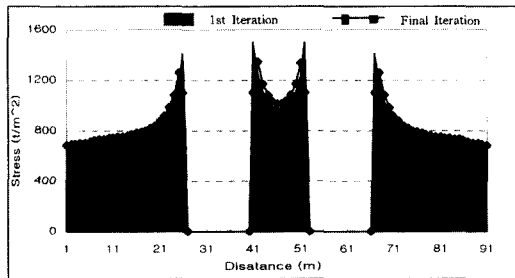


Fig. 5. Stress Distribution on the 1D Thick Pillar and Side Wall

반복 단계에서 나타난 집중 응력에 대한 비가 Fig. 3과 같이 비선형적으로 나타났다. 특히 Fig. 3을 보면 터널 직경에 대한 Pillar의 비가 1.0 이하가 되었을 경우는 응력비가 점차 증가함을 보였다. 한편, 이러한 터널 측벽부에 집중된 응력은 매 반복 단계마다 지보력이 있는 지역으로 전이되었는데, 그 전이율은 이격거리가 작을수록 크게 나타났다. 그 이유는 앞서서도 설명한 바와 같이 이격거리가 작을수록 집중응력이 크고 그만큼 암반이 쉽게 이완되기 때문이다.

최종 반복 단계에서의 응력 분포를 보면, 최대 응력 (Peak Stress)이 발생한 위치가 터널 측벽 끝단에서 터널 외부쪽, 또는 Pillar의 중앙부로 이동하였음을 Fig. 4와 Fig. 5로부터 알 수 있다. 물론 최대응력의 크기도 작용위

Table 4. Variation of Concentrated Stresses and Convergence

항 목	이격거리 (0.5D)	이격거리 (1.0D)	이격거리 (1.5D)	이격거리 (2.0D)
집중응력 감소율(%)	33.43	26.35	23.46	21.70
내공변위 증가율(%)	166.67	50.45	10.81	0

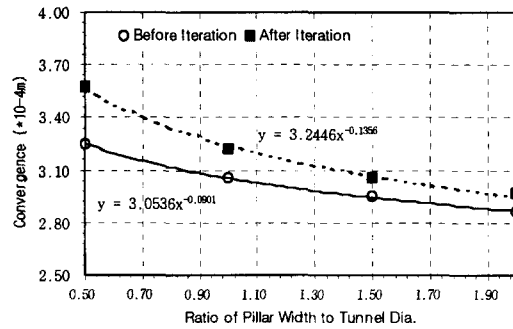


Fig. 6. Convergence vs. Ratio of Pillar Width

치의 전이와 함께 감소하였음을 알 수 있다. 본 연구에서 나타난 이격거리에 대한 집중응력의 감소율 및 내공변위의 증가율은 Table 4와 같다.

터널 이격거리가 터널 직경보다 작은 경우에는 과도하게 집중된 응력의 재분배가 이루어진 Pillar 중앙에 또 다른 집중응력이 발생하였고, 터널 내공에도 영향을 미쳐 터널 내공변위는 Fig. 6과 같이 터널 이격거리의 감소에 따라 증가함을 보여 주었다.

터널간 이격거리 결정 방법으로는 터널 Crown의 침하율의 수렴상태에 따라 결정하는 방법(백영식 외(1993))이 있으나, 본 연구에서는 Pillar에 걸리는 응력의 분포나 Yielding 상태, 또는 파괴의 가능성에 근거를 두고 결정하는 방법을 이용하였다. 따라서, 본 연구 지역에 원형터널 굴착시의 Critical Pillar 두께는 Pillar에 걸리는 응력분포를 나타내는 Fig. 4 및 Fig. 5와, 항복범위 및 이격거리 감소에 따른 터널 내공변위 증가율을 보여주는 Fig. 6을 고려할 때, 한계 Pillar 두께는 터널직경의 1D 이상은 되어야 안정하다고 판단되었다.

4. 결 론

본 논문은 Hoek-Brown의 이론을 이용하여 암반의 진행성 파괴 현상을 표현한 반복법 FDM 코드인 FLAC 내의 FISH 언어를 이용하여 그 공정을 자동화하여 굴착 후 연속적으로 발생하는 암반의 파괴를 나타내었다. 또한 위의 기법을 이용하여 터널간 이격거리와 터널 측벽부에 재하되는 집중응력과의 관계를 보다 정확히 설명하였으며, 터널이 연암층에 굴착될 경우에 고려해야 할 터널 측벽부에 발생하는 암반의 항복 범위와 터널간 한계 이격거리를 0.2D와 1D로 각각 예측하였다.

한편, 터널이 천부 암반층을 통과할 경우에는 암반의

점착력이 내부마찰각보다 암반의 파괴를 규정하는데 더 중요한 요소라는 것과, 수직축벽을 갖고 있는 터널 주변 암반이 일반적인 원형 형상의 터널 주변 암반보다 집중응력에 민감하게 반응하며 수평변위가 수직변위보다 크게 발생한다는 것을 제시하였다.

참 고 문 헌

1. 백영식, 김홍택, 임수빈, 1993, 산악지 쌍굴 수로터널 해석에 대한 고찰, 지반공학과 터널기술, 한국지반공학회 '93 봄 학술발표회 논문집, 21-26.
2. 임수빈, 이성민, 이재우, 김유진, 김영구, 1994, 터널 굴착에 의한 주변 암반의 Progressive Failure와 상부 구조물에 미치는 영향, 94 토목공학회 학술발표회 논문집, 727-730.
3. Anon, 1993, Flac User's Manual, Itasca Consulting Group.
4. Bieniawski, Z. T., 1969, Deformational Behavior of Fractured Rock Under Multi-Axial Compression, Proceedings, 3rd International Conference on Structure, Solid Mechanics and Engineering Materials, Southampton, England, Paper 55.
5. Brady, B.H.G and E.T. Brown, 1993, Rock Mechanics of Underground Mining, 2nd Edition, Champman & Hall, London, 571p.
6. Hoek, E., and Brown, E.T, 1980, Underground Excavations in Rock, The institution of Mining and Metallurgy, London, 527p.
7. Hoek, E., and Brown, E. T., 1988, "The Hoek-Brown Failure Criterion - a 1988 Update," Proceedings of 15th Canadian Rock Mechanics Symposium, Toronto.
8. Hoek, E., 1990, Estimating Mohr-Coulomb Friction and Cohesion Values from the Hoek-Brown Failure Criterion, Int. J. Rock Mech. Sci. and Geomech. Abstr., 27.3, 227-229.
9. Kidybinski, A., and C.O. Bobcock, 1973 Stress Distributions and Rock Fracture Zones in the Roof of Longwall Face in a Coal Mine, Rock Mechanics Journal, 5.1, 1-19.
10. Kripakov, N. P., 1981, Finite Element Analysis of Yield Pillar Stability, Computers and Structures, 13, 575-593.
11. Park, D.W. and Lee, S.M., 1992, Application of Three-Dimensional Numerical Modeling for Longwall Mine Design, 121st SME Annual Meeting, Pre-print 92-169, Phoenix, AZ. 10

이 성 민



1987년 인하대학교 공과대학 자원공학과, 공학사
 1989년 West Virginia University, 공학석사
 1993년 University of Alabama, 공학박사

Tel : 0414-740-1172

E-mail : sm-lee@youngdong.ac.kr

현재 영동대학교 공과대학 토목공학과 전임강사

이 윤 규



1989년 인하대학교 공과대학 토목공학과 공학사
 1991년 인하대학교 공과대학 토목공학과 공학석사

Tel : 0571-820-8191

E-mail : yglee@www.ait.ac.kr

현재 안동정보대학 토목공학과 전임강사

신 성 렬



1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사
 1990년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학석사
 1994년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학박사

Tel : 051-410-4681

E-mail : srshin@hanaro.knaritime.ac.kr

현재 한국해양대학교 해양개발공학부 교수