

GSI 지수의 변형을 연화를 고려한 원형터널의 탄소성 해석

이연규¹⁾, 박경순^{2)*}

Elasto-plastic Analysis of Circular Tunnel with Consideration of Strain-softening of GSI Index

Youn-Kyou Lee, Kyung-Soon Park

Abstract For the elasto-plastic analysis of a circular tunnel driven in a strain-softening rock mass subjected to a hydrostatic in-situ stress condition, this study suggests a convenient elasto-plastic analysis scheme which takes the strain-softening of *GSI* index into account and demonstrates its potential as a numerical tool in designing a circular tunnel. The suggested numerical scheme was developed by modifying the previous elasto-plastic procedure proposed by Lee & Pietruszczak(2008). With the assumption that *GSI* index of rock mass adjacent to the tunnel surface may be degraded due to the damage caused by the blasting and excavation, the concept of the strain-softening of *GSI* index was invoked. The concept provides a useful tool considering the strain-softening of the strength parameters appearing in the generalized Hoek-Brown criterion because these parameters can be evaluated empirically by use of *GSI*. In order to check the validity of the proposed scheme, the elasto-plastic analyses for circular tunnels were performed in various analysis conditions and the results were discussed.

Key words Circular tunnel, Strain-softening, Elasto-plastic analysis, *GSI* index, Hoek-Brown strength parameters

초 록 이 연구에서는 정수압 지압 조건의 암반에 굴착되는 원형 터널의 탄소성 거동 해석을 위해 *GSI* 지수의 변형률연화를 고려한 탄소성 해석법이 제안되었고, 그 적용성이 검토되었다. 제안된 수치해석법은 Lee & Pietruszczak(2008)의 탄소성 해석방법을 수정하여 개발되었다. 터널 주변 암반에서는 발파와 굴착에 의한 암반의 손상으로 *GSI* 지수의 저하가 야기될 수 있다는 가정 하에 *GSI* 지수의 변형률연화 개념을 도입하였다. 일반화된 Hoek-Brown 식의 강도정수들은 *GSI* 값을 이용하여 경험적으로 계산할 수 있으므로 *GSI* 지수의 변형률연화 개념을 도입함으로써 이 강도정수들의 변형률연화가 해석에 반영되도록 하였다. 제안된 방법의 적합성을 검토하기 위하여 여러 해석조건에서 원형터널의 탄소성 해를 구하고 그 결과를 고찰하였다.

핵심어 원형터널, 변형률연화, 탄소성 해석, *GSI* 지수, Hoek-Brown 강도지수

1. 서론

경제적이고 안전하게 암반터널을 굴착하기 위해서는 설계 및 시공 과정에서 조사된 대상 암반의 다양한 지질학적, 역학적 특성을 효율적으로 반영시켜 안정성 해석을 수행하는 것이 필요하다. 최근 컴퓨터를 이용한 수치해석기법의 눈부신 발전과 더불어 터널의 안정성 평가를 목적으로 유한요소법, 유한차분법, 경계요소법

등에 기초한 다양한 수치해석 코드들이 개발되어 산업 현장에서 활발히 이용되고 있다. 그럼에도 불구하고 암반 구조물의 역학적 거동을 충분한 정밀도로 예측하는 것은 아직까지도 어려운 문제이다. 이는 수치해석 결과의 정확성이 사용하는 프로그램 자체의 정확도에 의해서 좌우되기도 하지만 해석을 위해 입력되는 변수의 정확성 및 신뢰성에 의해 더 크게 영향을 받기 때문이다.

지질학적 관찰과 비교적 간단한 역학적 시험을 통하여 암반을 분류하고 이로부터 암반 강도정수를 예측하려는 연구가 1970년대부터 활발히 진행되고 있다. RMR 분류법(Bieniawski, 1976)과 Q분류법(Barton et al., 1974)이 그 대표적인 예이다. Hoek(1994), Hoek et al.(1995)이 RMR 암반분류법의 대안으로 지질강도지수 *GSI*(Geological

¹⁾ 군산대학교 해양건설공학과 교수

²⁾ 군산대학교 대학원 해양산업공학과

* 교신저자 : drj000@nate.com

접수일 : 2010년 1월 25일

심사 완료일 : 2010년 2월 5일

게재 확정일 : 2010년 2월 8일

Strength Index) 개념을 새로 도입한 뒤로 GSI 지수가 해석적 또는 수치해석의 도구로서 중요하게 여겨지고 있다. 암반의 구조와 불연속면의 조건을 기초로 산정되는 GSI 분류 체계에서는 일반화된 Hoek-Brown 파괴 기준식의 강도정수 m_b , s , a 뿐만 아니라 절리암반의 변형계수와 같은 암반의 역학적 성질을 추정할 수 있는 경험식을 제공하고 있다(Hoek et al., 2002).

GSI 지수를 탄소성 변수로 설정하고 일반화된 Hoek-Brown 암반에 대해 탄소성해석을 실시하는 경우 암반의 강도지수들은 GSI 지수의 함수로 나타낼 수 있다. 그러므로 암반상태에 따른 적합한 GSI 값이 결정되면 그에 상응하는 강도 지수 값들은 경험식을 이용하여 간접적으로 산정될 수 있다. 이와 같이 GSI 값을 이용하여 다른 강도정수 값을 추정한다면 각 강도정수 값을 독립적으로 추정, 입력하는 경우에 비해 입력정수의 불확실성에서 기인되는 해석오류를 최소화시킬 수 있을 것으로 판단된다.

이에 따라 지질강도지수 GSI와 Hoek-Brown 강도지수 중 하나인 교란계수(disturbance factor) D가 정수압 상태 원형터널의 탄소성 거동에 미치는 영향을 고찰하기 위한 다양한 연구들이 수행되어 왔다(Hoek & Brown, 1997, Carranza-Torres & Fairhurst, 1999, Cai et al., 2007, Sun et al., 2007, Sharan, 2008). 이러한 연구들은 GSI 지수가 항복함수의 강도정수 m , s , a , 점착력(c), 마찰각(ϕ) 등과 큰 상관성이 있음을 보여주고 있다. 그러나 지금까지 수행된 연구들 대부분은 탄성-완전소성 모델을 가정하였다(Carranza-Torres & Fairhurst, 1999, Sun et al., 2007). 이들의 연구에서는 GSI 지수를 암반을 대표하는 하나의 상수 값으로 가정하였기 때문에 발파나 터널굴착 시 암반손상에 따른 GSI 지수의 변화를 고려하지 못하고 있다. 그러므로 이러한 선행 연구에서 개발된 탄소성 해석법을 적용할 경우 원형터널의 탄소성 내공변위가 과소평가될 가능성이 크다.

이 연구에서는 이러한 문제점을 극복하기 위하여 GSI 지수의 변형률연화(strain-softening) 개념을 고려할 수 있는 간단한 탄소성 해석방법을 제안하고 이를 이용한 원형 터널 해석을 통해 발파나 굴착에 의한 GSI 지수의 연화가 원형터널 주변 암반의 탄소성 거동에 미치는 영향을 살펴보고자 한다. 제안된 원형터널의 탄소성 해석법은 Lee & Pietruszczak(2008)의 탄소성 해석법에 기초하여 개발되었으며 발파나 터널 굴착에 의한 암반손상의 영향을 GSI의 연화와 교란계수 D에 반영시켰다. 암반은 일반화된 Hoek-Brown 파괴조건식을 따르며 균질, 등방, 연속체로 가정하였다. 또한 항복응력 이후의 탄소성 거동은 GSI 지수를 소성전단 변형률의 함수로

고려한 변형률연화 거동에 의해 설명할 수 있는 것으로 가정하였다. 제안한 탄소성 해석방법의 검증을 위해 잔류 GSI 지수의 영향, 암반(암질)상태, 교란계수 D의 영향 등 다양한 해석조건 변화에 따른 원형터널의 탄소성 거동을 고찰하였다.

2. 잔류 GSI 값의 추정

GSI 지수를 이용하여 현지암반의 구조 및 절리면 상태를 가장 적절하게 반영하는 Hoek-Brown 강도정수를 추정하기 위한 연구들이 시도되고 있다. Cai et al.(2004)은 GSI 지수 산정의 편의를 위해 암반블록의 부피(V_b)와 절리표면 상태요소(J_c)를 이용하여 GSI 지수를 산정하는 방법을 제안하였다. 또한 V_b 와 J_c 로부터 GSI 값을 계산할 수 있는 다음과 같은 경험식이 제안되었다(Cai & Kaiser, 2006).

$$GSI(V_b, J_c) = \frac{26.5 + 8.79 \ln J_c + 0.9 \ln V_b}{1 + 0.0151 \ln J_c - 0.0253 \ln V_b} \quad (1)$$

Cai & Kaiser의 연구처럼 지금까지의 연구들에서는 절리암반의 정점 강도지수값 측정에 초점을 맞춰왔으나 절리암반에 굴착된 지하 암반구조물의 정밀한 설계를 위해서는 탄소성 해석 시 암반의 정점 강도지수와 잔류 강도지수값 모두가 수치해석에 반영되어야 할 필요성이 있다. 이에 따라 발파나 터널굴착에 의한 암반손상을 고려하여 잔류 GSI_r 및 잔류 강도지수를 추정하려는 연구가 시도되고 있다(Russo et al., 1998, Ribacchi, 2000, Cai et al., 2007, Sharan, 2008).

Russo et al.(1998)은 식 (2)과 같이 GSI_r 값이 정점 $GSI(GSI_p)$ 의 36%에 해당한다고 제안하였다.

$$GSI_r = 0.36 GSI_p \quad (2)$$

그러나 Russo et al.이 제안한 방법은 $GSI < 40$ 인 암반에 대해서는 GSI_r 을 과소평가하며 $GSI > 80$ 인 암반에 대해서는 GSI_r 을 과대평가 하는 경향이 있는 것으로 알려져 있다(Cai et al., 2007). 이와 비슷한 방법으로 Sharan(2008)은 다음 식 같이 GSI_p 값의 50%의 해당하는 값을 GSI_r 값으로 추정하였다.

$$GSI_r = 0.5 GSI_p \quad (3)$$

또한 Ribacchi(2000)는 삼축압축실험을 근거로 절리암반의 잔류 강도지수를 다음 식 (4)으로 나타낸 바 있다. 여기서 아래첨자 r 은 잔류값, p 는 정점값을 나타낸다.

$$m_r = 0.65m_b ; s_r = 0.04s \quad (4)$$

앞서 살펴본 경험식들은 암반의 잔류 강도지수 산정에 있어 실제 암반 상태를 적절하게 반영시키는데 한계가 있다.

최근 Cai et al.(2007)은 실험실 시험과 현장 시험을 통한 실제 암반의 파괴과정에 근거하여 암반의 잔류강도를 추정하기 위한 확장된 GSI 시스템을 제안하였다. 기존 GSI 시스템의 블록의 파괴(V_b)와 절리 상태(J_c)를 나타내는 두 요소의 잔류값인 V_b^r 과 J_c^r 을 이용하여 잔류 GSI 값은 다음 식 (5)과 같이 구할 수 있다.

$$GSI_r(V_b^r, J_c^r) = \frac{26.5 + 8.79 \ln J_c^r + 0.9 \ln V_b^r}{1 + 0.0151 \ln J_c^r - 0.0253 \ln V_b^r} \quad (5)$$

Cai et al.은 여러 지역을 대상으로 제안한 방법의 검증을 통해 얻어진 GSI_p 와 GSI_r 의 비율(GSI_r / GSI_p) 관계를 Fig. 1과 같이 제시하였다. 또한 이러한 관계를 이용해 GSI_r 값을 다음 식 (6)과 같이 GSI_p 의 함수로서 표현할 수 있는 경험식을 제안하였다. 만약 대상 암반에 대한 GSI_p 값을 알고 있는 경우 이 경험식을 통해 간단하고 빠르게 GSI_r 값을 추정할 수 있다.

$$GSI_r = GSI_p e^{-0.0134 GSI_p} \quad (6)$$

이번 연구에서는 실제 암반상태를 적합하게 나타낼 수 있을 것으로 판단되는 Cai et al.(2007)이 제안한 경험식을 바탕으로 암반손상으로 인한 절리암반의 잔류 GSI 값을 추정하였다. 그러나 이 경험식은 GSI_p 값이 75보다 커짐에 따라 잔류 GSI 값이 감소하는 비현실적인 결과를 보이고 있어 다음 식과 같이 약간의 보정을

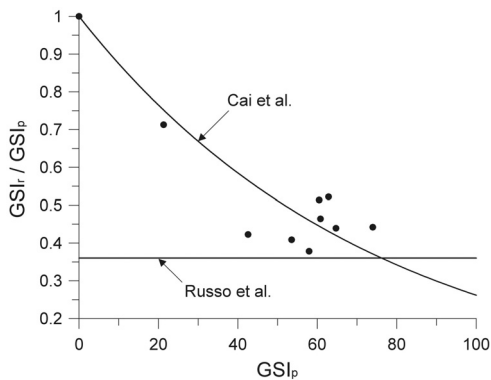


Fig. 1. Relationship between GSI_r / GSI_p and GSI_p (Cai et al., 2007).

실시하였다.

$$GSI_r = \begin{cases} GSI_p e^{-0.0134 GSI_p}, & 0 < GSI_p < 75 \\ 27.5, & GSI_p \geq 75 \end{cases} \quad (7)$$

Fig. 2는 식 (7)을 도시한 것으로 실선은 Cai et al.(2007)이 제안한 경험식 (6)이며 점선은 보정을 통해 얻어진 경험식 (7)을 나타낸 것이다. GSI_p 값이 75 이상이 되면 GSI_r 값은 GSI_p 값에 따라 변하지 않고 GSI_p 값이 75일 때의 값 즉 최대 GSI_r 값 약 27.5를 사용함으로써 Cai et al.이 제안한 경험식에서 나타난 문제점을 보완하였다. 식 (7)에 의하면 GSI_p 값이 작은 암반일수록 GSI_r 값은 GSI_p 값에 근접함을 알 수 있다. 이렇게 계산된 GSI_r 값을 이용하면 일반화된 Hoek-Brown 파괴조건식의 잔류 강도정수들은 다음과 같은 경험식으로 나타낼 수 있다.

$$m_r = m_i \exp\left(\frac{GSI_r - 100}{28 - 14D}\right) \quad (8)$$

$$s_r = \exp\left(\frac{GSI_r - 100}{9 - 3D}\right) \quad (9)$$

$$a_r = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-GSI_r/15} - e^{-20/3}) \quad (10)$$

Cai et al.(2007)의 연구에서는 GSI_r 을 이용하여 m_r , s_r , a_r 을 계산하는 경우 $D=0$ 을 가정하였지만 이 경우 GSI 지수의 변화에 따른 강도정수의 변화에 불연속성이 발생되므로 수치해석상 어려움이 예상된다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 이 연구에서는 교란계수 D 가 GSI 의 변화에 영향을 받지 않는 상수값으로 가정하

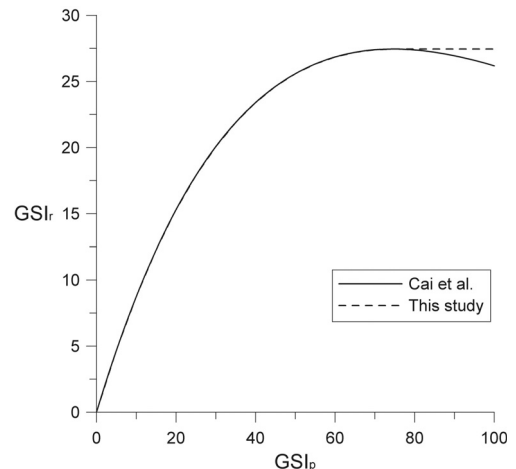


Fig. 2. The variation of GSI_r in terms of GSI_p .

였으며, 이에 따라 식 (8)~식 (10)과 같이 잔류강도 정수를 계산하는 과정에서도 0이 아닌 값을 갖는다.

3. GSI 지수를 활용한 변형률연화 규칙

기존의 연구에서는 각 개별 강도변수들에 대해 독립적인 변형률연화 규칙을 적용함으로써 해석에 필요한 입력자료 수가 증가하는 단점이 있었다. 탄소성해석의 결과는 강도지수의 크기에 매우 민감하므로 이러한 입력자료 수의 증가는 해석결과의 신뢰도를 떨어뜨릴 가능성이 크다. 또한 일반적으로 변형률연화 관련 입력자료는 실험적으로 결정하는 것이 매우 어렵다.

이 연구에서는 이러한 문제점을 극복하기 위하여 GSI 지수의 변형률연화 개념을 도입하고 이로부터 다른 암반강도정수의 변형률연화 특성이 해석에 반영될 수 있는 변형률 연화 규칙을 정의하였다. 지질강도지수 GSI는 암반을 대표하는 상수가 아니라 Fig. 3과 같이 항복응력 이후 소성전단 변형률(γ)의 증가에 따라 점차 감소하는 탄소성 변수로 가정하였다. 이에 따라 일반화된 Hoek-Brown 암반을 가정할 경우 GSI의 함수로 표현되는 항복함수의 강도정수 m, s, a 역시 변형률연화 거동을 나타내게 된다. GSI 지수는 소성전단변형률(γ)의 함수로서 다음 식으로 가정할 수 있으며, 이 식에 따르면 GSI 값은 정점값에서 잔류값에 이를 때까지 소성전단 변형률(γ)의 증가에 따라 선형적으로 감소하는 특성을 보인다.

$$GSI(\gamma) = \begin{cases} GSI_p - (GSI_p - GSI_r) \frac{\gamma}{\gamma^*}, & 0 < \gamma < \gamma^* \\ GSI_r, & \gamma \geq \gamma^* \end{cases} \quad (11)$$

여기서 γ^* 는 잔류거동이 시작하는 소성전단 변형률의 임계값을 나타낸다.

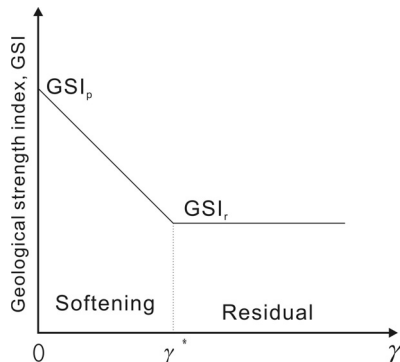


Fig. 3. Strain-softening behavior of GSI.

따라서 기존의 Hoek-Brown 경험식과 이 연구에서 제안한 GSI 지수의 변형률 연화규칙을 이용하면 $GSI(\gamma)$ 로부터 항복함수의 강도정수 m, s, a 의 연화는 다음의 식들로 표시될 수 있다.

$$m = m_i \exp\left(\frac{GSI(\gamma) - 100}{28 - 14D}\right) \quad (12)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI(\gamma) - 100}{9 - 3D}\right) \quad (13)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{\frac{-GSI(\gamma)}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right) \quad (14)$$

4. 소성유동법칙

일반적으로 소성유동법칙(plastic flow rule)은 탄소성 해석 시 절리암반의 변형거동의 해석결과에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(이연규, 2006; Lee & Pietruszczak, 2008). 암반에 발생하는 소성변형률 증분의 계산에 필요한 소성유동법칙은 소성포텐셜함수와 항복함수가 같은 경우 연상유동법칙(associated flow rule)이라 부르며 다른 경우 비연상유동법칙(non-associate flow rule)이라 부른다. 일반화된 Hoek-Brown 암반에 굴착된 원형터널의 탄소성해석 문제에서 연상유동법칙을 가정하면 체적팽창계수(k_{assoc})는 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$k_{assoc} = 1 + am \left(m \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^{a-1} \quad (15)$$

또한 비연상유동법칙을 가정하는 경우 체적팽창계수($k_{non-assoc}$)는 팽창각(dilation angle, ψ)을 이용한 다음과 같은 형태로 정의하는 경우가 많다(Carranza-Torres, 2004, Park et al., 2008).

$$k_{non-assoc} = \frac{1 + \sin\psi}{1 - \sin\psi} \quad (16)$$

Hoek & Brown(1997)은 암반(암질)의 상태에 따라 마찰각(ϕ)을 일정한 크기로 감소시키는 다음의 방법으로 팽창각(ψ)의 크기를 결정하였다.

$$\psi = \frac{\phi}{8} : \text{average quality of rock mass}$$

$$\psi = \frac{\phi}{4} : \text{good quality of rock mass} \quad (17)$$

$$\psi = 0^\circ : \text{poor quality of rock mass}$$

이 연구에서는 식 (15)와 관계식 $k_{assoc} = (1 + \sin\phi) / (1 - \sin\phi)$ 을 이용하여 마찰각(friction angle, ϕ)을 구한 후 식 (17)을 적용하여 팽창각을 계산하는 방법이 이용되었다. 강도지수 값들이 GSI 지수의 함수이므로 체적 팽창계수($k_{non-assoc}$) 역시 GSI 지수의 함수가 된다.

5. 수치해석 검증 및 결과분석

이 연구에서는 절리암반에 굴착되는 정수압 지압조건인 원형터널에 대해 GSI 지수의 변형률연화 개념을 통해 암반강도지수의 변형률연화 특성이 해석에 반영될 수 있는 간단한 탄소성 해석방법이 제안되었다. 제안한 탄소성 해석방법의 검증을 위해 잔류 GSI 지수의 고려 여부, 암반(암질)상태, 교란계수 D 가 원형터널의 탄소성 거동에 미치는 영향을 알아보았다.

탄소성 해석을 수행하기 위해서는 먼저 응력조건, 터널 형상 그리고 암반의 응력-변형률 관계 및 파괴조건에 대한 가정이 필요하다. 이 연구에서는 Fig. 4와 같이 정수압 지압조건인 암반에 굴착된 심부 원형터널을 해석대상으로 선정하였다. 해석 대상암반은 균질, 등방성, 연속성 암반으로 가정하였으며 내부 지보압 p_i 가 반경 방향으로 균일하게 작용하는 것으로 지보 효과를 반영하였다. 그리고 굴착으로 인하여 재배분된 응력이 암반의 강도를 넘을 경우 반경이 R_p 인 소성영역이 터널 주위로 발달하는 것으로 가정하였다. 또한 이 연구에서는 GSI 지수를 소성전단변형률의 함수로 가정하였다. 소성전단변형률의 증가에 따라 GSI 지수가 점차 감소하는 변형률연화 개념을 도입하였으며 이로부터 다른 암반강도지수의 연화특성이 내부적으로 해석에 반영될 수 있게 하였다. 암반의 항복조건으로 일반화된 Hoek-

Brown 파괴조건식을 적용하여 탄소성 해석을 수행하였다.

5.1 잔류 GSI 에 의한 영향 분석

기존의 연구들에서는 발파나 터널굴착에 의한 암반손상을 전혀 고려하지 않고 GSI 지수를 암반을 대표하는 하나의 상수로 가정하여 탄소성 해석이 수행되었기 때문에 원형터널의 탄소성 내공변위를 과소평가하는 경향이 있다. 이는 절리암반에 굴착되는 터널의 안정성 확보에 심각한 문제를 발생시킬 수 있다. 따라서 이 연구에서는 절리암반에 굴착되는 정수압 지압조건인 원형터널에 대해 발파나 터널 굴착 등에 의해 손상된 암반의 잔류 GSI 값(GSI_r) 고려 여부가 탄소성거동에 미치는 영향을 알아보았으며 이때 사용한 입력변수들은 Table 1에 나타난 것과 같다. Table 1의 GSI 값은 GSI_r 을 의미한다.

Fig. 5는 정수압(p_0) 상태인 심부 원형터널을 대상으로 GSI_r 을 고려한 해석과 고려하지 않은 탄소성해석 결과를 통해 터널주변 암반의 응력분포 및 변위 분포 양상을 비교한 것이다. Fig. 5(a)는 터널주변의 응력분포를 나타낸 것으로 GSI_r 을 고려한 해석(2) 즉, 취성-소성모델(brittle-plastic model)과 GSI_r 를 고려하지 않은 해석(1) 즉, 탄성-완전소성모델(elastic-perfectly plastic model)의 결과를 함께 도시하였다. 두 경우 모두 원주방향 응력(σ_θ)의 정점값은 약 50MPa로 같은 값을 보이고 있으나 터널 벽면에서는 완전 소성모델의 경우 4.8MPa이 나타나며 GSI_r 을 고려한 취성-소성모델의 경우 1.0MPa으로 작아지는 것을 알 수 있다. 이러한 차이는 파괴 이후 거동해석에서 잔류강도를 고려하는 것이 매우 중요함을 잘 시사해 준다. 이 그림은 또한 잔류강도의 고려 여부에 따라 소성변형의 크기가 큰 차이를 보일 수 있

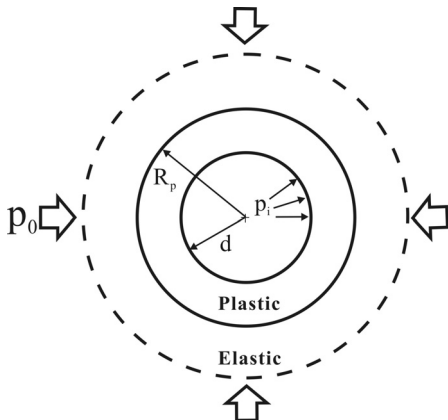


Fig. 4. Plastic annulus formed around circular opening.

Table 1. Input data for brittle-plastic and elastic-perfectly plastic analyses

Parameter	Value
Radius of tunnel(d)	5.0 m
Initial stress(p_0)	30 MPa
Support pressure(p_i)	0.0 MPa
Poisson's ratio(ν)	0.25
Uniaxial compressive strength(σ_c)	80 MPa
Dilation angle(ψ)	0°
GSI	50
D	0
m_i	12

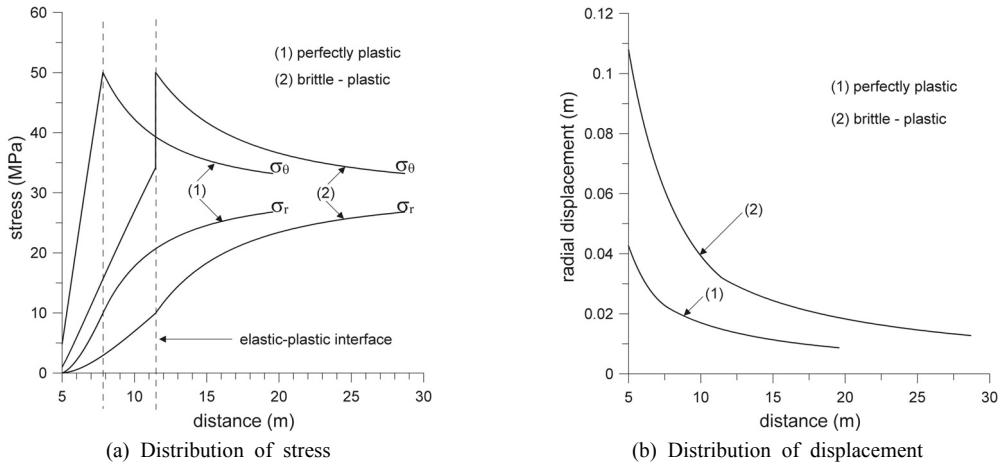


Fig. 5. Distributions of stresses and displacements for two different material assumptions.

음을 잘 보여준다. 잔류 GSI를 고려한 해석(2) 결과에서는 소성반경이 약 11.5m로 나타나고 있으며 고려하지 않은 해석(1) 결과에서는 소성반경이 약 7.8m로 감소하는 것을 알 수 있다.

Fig. 5(b)는 탄소성 해석 시 GSI 값이 터널 주변의 변위분포에 미치는 영향을 알아보기 위해 완전소성 및 취성소성 해석을 실시하고 그 결과를 도시한 것이다. 변위분포 역시 GSI 값에 따라 분포 양상이 크게 달라지는 것을 알 수 있으며 특히 터널 벽면에서의 변위값은 GSI를 고려한 해석(2)과 고려하지 않은 해석(1)의 결과 값이 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 잔류 GSI를 고려한 해석의 경우 터널벽면 변위는 약 10.7cm로 나타나고 있으며 고려하지 않은 경우에는 변위가 약 4.26cm로 약 60% 감소하고 있다.

두 해석 결과에서 볼 수 있듯이 원형터널의 탄소성 해석 시 터널 주변 암반의 잔류 GSI를 고려하느냐 하지 않느냐에 따라 터널주변의 응력분포 및 변위분포가 전혀 다른 양상으로 나타날 수 있음을 알 수 있다. 만약 암반손상에 따른 잔류 GSI 값을 전혀 고려하지 않고 GSI 지수를 암반을 대표하는 하나의 상수로 가정하여 탄소성 해석이 수행되면 원형터널의 탄소성 내공변위를 과소평가하게 되는 결과를 초래하게 될 것으로 사료된다. 이는 절리암반에 터널 굴착 시 안정성 확보에 심각한 문제를 야기시킬 수 있기 때문에 GSI 지수를 적용한 절리암반의 탄소성 해석 시 현지 암반에 적합한 GSI지수 선택 및 암반손상에 따른 잔류 GSI의 고려여부를 신중히 고려해야 할 것으로 생각된다.

물론 이 절의 해석결과 논의 과정에서 제시한 수치들은 가정된 해석조건에 한정되는 것이기는 하지만 그 경

향성은 일반화시킬 수 있을 것으로 예상된다. 터널 주변 암반의 GSI 지수 값은 터널의 굴착 및 변형거동에 따라 저하될 수 있으며 이를 고려하지 않고 설계가 이루어질 경우 터널의 안정성이 확보되지 않을 수도 있음을 이 절의 해석 예가 잘 보여주고 있다.

5.2 GSI 지수가 소성반경과 벽면변위에 미치는 영향

GSI 지수가 탄소성 해석 시 소성영역의 확장에 미치는 영향을 알아보기 위해 3가지 해석조건에서 해석을 실시하였다. 각 조건에 해당하는 입력자료를 Table 2에 나타내었다. Case1~Case3의 암반은 각각 양호한 암질의 암반(Good quality rock mass), 보통 암질의 암반(Average quality rock mass), 불량 암질의 암반(Poor quality rock mass)에 해당한다고 할 수 있다. 해석에 사용된 팽창각은 4절에서 설명한 방법에 따라 해석과정에서 내부적으로 계산된다.

이 3가지 해석조건 대해 GSI 값에 따른 소성반경의 확장에 대한 해석결과를 Fig. 6에 도시하였다. 그림에서 가로 축에 표시한 GSI 값은 GSI_p 를 의미한다. 세로축은 터널반경(a)으로 정규화시킨 소성반경을 나타낸다. 해석결과에서 알 수 있듯이 3가지 해석조건 모두 GSI 값이 증가함에 따라 소성반경이 지수 함수적으로 점점 감소하는 비슷한 경향을 보이고 있다. 특히 GSI 값이 약 30보다 작아지면 곡선의 경사가 급격히 커지는 것을 볼 수 있으며 암질이 불량한 암반일수록 더 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 즉, GSI 지수 저하에 따른 터널 주변의 소성대 확장폭은 암질이 불량한 암반의 경우에 더욱 크게 확대된다는 것을 잘 보여준다. GSI 값이 약 50보다 작아지면서 3가지 해석조건 모두에서 소성

Table 2. Input data for 3 different analysis conditions.

Parameter	Case 1 (Good quality)	Case 2 (Average quality)	Case 3 (Poor quality)
Radius of tunnel(d)	5.0 m	5.0 m	5.0 m
Initial stress(p_0)	15 MPa	15 MPa	5 MPa
Support pressure(p_i)	0 MPa	0.5 MPa	0.5 MPa
Poisson's ratio(ν)	0.2	0.25	0.3
Uniaxial compressive strength(σ_c)	150 MPa	80 MPa	20 MPa
D	0	0	0.2
m_i	25	12	8
γ^*	5e-3	5e-3	1e-2

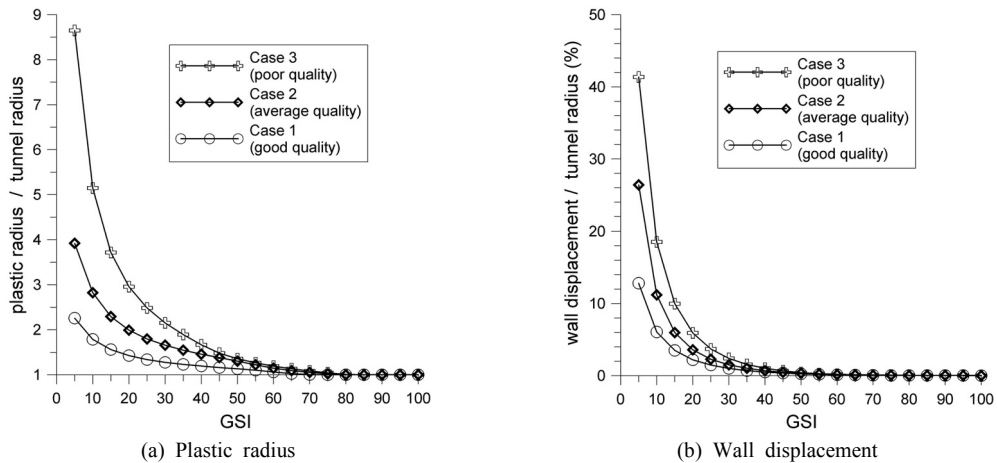


Fig. 6. Effect of the variation of GSI on the plastic radius and wall displacement.

반경이 GSI 지수에 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 그러나 GSI 값이 증가하여 특정 값 이상이 되면 GSI 지수에 따른 소성반경의 영향이 거의 나타나지 않고 있음을 알 수 있다. GSI 지수가 터널 안정성확보에 미치는 영향을 더 자세히 알아보기 위해 Fig. 6(b)에 3 가지 해석조건에 대해 GSI 지수가 터널벽면 반경방향 변위에 미치는 영향을 도시하였다. 세로 축은 터널반경 (d)으로 정규화 시킨 터널벽면 변위를 나타낸다. 변위해석결과 역시 GSI 값이 증가함에 따라 벽면변위가 지수 함수적으로 감소하는 경향이 3가지 해석조건 모두에서 뚜렷이 나타나고 있다. GSI 값이 약 50보다 작아지면 3가지 해석조건 모두 GSI 지수가 벽면변위에 미치는 영향이 점점 커지는 것을 볼 수 있으며 또한 GSI 값이 약 50보다 커지면서 벽면변위에 미치는 GSI 지수 영향이 미미해짐을 알 수 있다.

이상의 해석결과로부터 점점 GSI 값이 대략 50보다 작은 암반에 굴착된 터널에서는 터널주변에서 GSI 지

수의 연화가 소성대 확대와 내공변위 증가에 큰 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다. 또한 GSI 지수 연화에 대한 터널 탄소성거동의 이러한 민감성은 암질이 불량한 암반의 경우에 더욱 크게 나타남을 잘 볼 수 있다.

5.3 교란계수 D 의 영향

Fig. 7은 일반화된 Hoek-Brown 항복조건식에 나타나는 교란계수 D 가 소성영역의 확장에 미치는 영향을 알아보기 위해 D 이외의 입력정수는 Table 2의 Case 2에 해당하는 암반 입력정수를 취하고 GSI 값과 초기지압 (p_0) 조건을 달리 적용한 탄소성 해석결과를 도시한 것이다. Fig. 7(a)는 GSI 값을 50, 65, 75로 증가시킨 세 경우의 암반에 대한 해석 결과를 도시한 것으로서 교란계수 D 가 증가할수록 소성반경의 크기가 세 암반 모두 지수 함수적으로 커지고 있음을 볼 수 있으며 GSI 지수가 큰 암반일수록 교란계수 D 의 영향을 적게 받아 해석 곡선의 기울기가 점점 작아지는 경향을 보이고 있다.

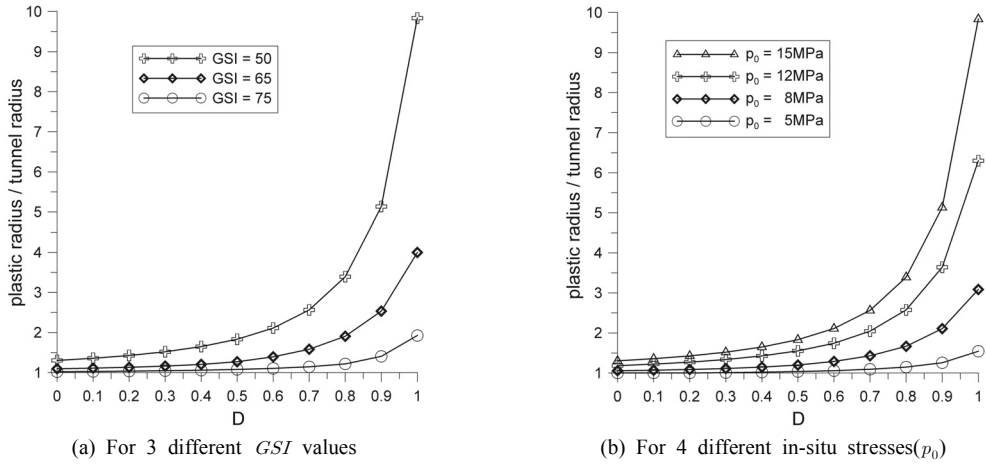


Fig. 7. Effect of disturbance factor D on the plastic radii.

이로 미루어 보아 암질이 불량한 암반 일수록 교란계수 D 의 영향을 더 많이 받을 것으로 생각된다. 또한 GSI 지수가 50, 65, 75인 모든 암반에서 교란계수 D 가 증가할수록 소성영역의 범위가 점점 넓어지고 있음을 알 수 있으며 특히 $D > 0.5$ 일 때 소성영역의 확장에 미치는 영향이 급격히 커짐을 볼 수 있다. 이는 GSI 지수가 작은 암반일수록 그 특징이 더 두드러짐을 알 수 있다. 그러므로 GSI 지수의 크기에 상관없이 모든 암반에서 교란계수 D 의 값이 0.5보다 커지지 않도록 주의해야 할 것으로 판단된다.

Fig. 7(b)는 4가지 경우의 초기지압(p_0) 조건을 적용한 암반에 대해 교란계수 D 가 소성영역의 확장에 미치는 영향을 도시한 것으로 초기지압(p_0)은 각각 15MPa, 12MPa, 8MPa, 5MPa로 가정하였다. 여기서 정점 GSI 값은 50으로 가정하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 초기지압(p_0)의 크기에 따라 교란계수 D 가 소성영역의 확장에 미치는 영향이 분명히 다른 양상을 보이고 있음을 알 수 있다. 초기지압(p_0)이 증가함에 따라 교란계수 D 가 소성영역의 확장에 미치는 영향이 더 크게 나타나고 있는 것을 볼 수 있으며 특히 $D > 0.5$ 일 때 그 특징이 더 두드러짐을 알 수 있다. 초기지압(p_0)이 큰 암반일수록 교란계수 D 의 영향을 많이 받음을 알 수 있으므로 지하암반에 터널 굴착 시 터널의 깊이가 증가할수록 암반이 교란되지 않도록 더욱 주의해야 할 것이다.

6. 결론

절리암반에 굴착되는 정수압 지압조건인 원형터널에 대해 발파나 터널 굴착에 의한 손상에 기인한 암반의

잔류 GSI지수와 교란계수 D 를 고려할 수 있는 간단한 탄소성 해석방법을 제안하였다. 제안된 방법에서 암반은 일반화된 Hoek-Brown 파괴조건식을 따르며 항복응력 이후의 탄소성 거동은 GSI 지수를 소성전단 변형률의 함수로 고려한 변형률연화 거동이 나타나는 것으로 가정하였다. 제안한 탄소성 해석방법의 검증을 통해 잔류 GSI 지수의 영향, 정점 GSI의 영향, 교란계수 D 의 영향 등 다양한 지반조건의 변화에 따른 원형터널의 탄소성 거동을 살펴보았으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 원형터널의 탄소성 해석 시 터널 주변 암반의 잔류 GSI 지수를 고려하느냐 하지 않느냐에 따라 터널 주변의 응력분포 및 변위분포가 전혀 다른 양상으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 잔류 GSI 값을 고려하지 않은 탄성-완전소성 탄소성 해석이 수행될 경우 원형터널의 탄소성 내공변위가 과소평가 되는 문제가 발생하여 절리암반에 터널 굴착 시 안정성 확보에 심각한 문제를 야기시킬 수 있을 것으로 판단된다.
- 2) 이 연구에서 고려된 암반조건에서 정점 GSI 값이 50보다 작은 암반에 굴착된 터널의 경우 GSI 지수의 연화에 따라 터널주변의 소성영역의 확장과 터널 벽면변위가 증가가 심화되는 현상이 있음을 볼 수 있었으며 특히 암질이 불량한 암반일수록 더 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있었다. 따라서 정점 GSI 값이 대략 50보다 작은 암반에 터널을 굴착하는 경우 터널 주변암반에서 GSI 지수의 연화가 발생할 가능성을 염두에 두고 터널설계가 이루어져야 터널

의 안정성이 확보될 수 있을 것으로 판단되었다.

- 3) 교란계수 D 가 증가할수록 소성영역의 범위가 점점 커지고 있음을 알 수 있으며 특히 $D > 0.5$ 일 때 소성영역의 확장에 미치는 영향이 급격히 커짐을 볼 수 있다. 따라서 모든 암반에서 교란계수 D 의 값이 0.5보다 커지지 않도록 주의해야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입(No.2009-0075527).

참고문헌

1. 이연규, 2006, Mohr-Coulomb 암반에 굴착된 원형 터널의 변형률연화 거동해석, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 제16권, 제6호, pp. 495-505.
2. Barton, N., Lien, R. and Lunde, J., 1974, Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support, Rock Mech., 6, pp. 183-236.
3. Bieniawski, Z.T., 1976, Rock mass classification in rock engineering, Proc. of the Symp. on Exploration for Rock Eng., Cape Town, pp. 97-106.
4. Carranza-Torres, C. and Fairhurst, C., 1999, The elasto-plastic response of underground excavations in rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 36, pp. 777-809.
5. Carranza-Torres, C., 2004, Elasto-plastic solution of tunnel problems using the generalized form of the Hoek-Brown failure criterion, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 41, pp. 480-481.
6. Cai, M., Kaiser, P.K., Uno, H., Tasaka, Y. and Minami, M., 2004, Estimation of rock mass strength and deformation modulus of jointed hard rock masses using the GSI system, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 41, pp. 3-19.
7. Cai, M. and Kaiser, P.K., 2006, Visualization of rock mass classification systems, Geotech. Geolog. Eng., 24, pp. 1089-1102.
8. Cai, M., Kaiser, P.K., Tasaka, Y. and Minami, M., 2007, Determination of residual strength parameters of jointed rock masses using the GSI system, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 44, pp. 247-265.
9. Hoek, E., 1994, Strength of rock and rock masses, ISRM News Journal, 2,2, pp. 4-16.
10. Hoek, E., Kaiser, P.K. and Bawden, W.F., 1995, Support of underground excavation in hard rock, Rotterdam: Balkema.
11. Hoek, E. and Brown, E.T., 1997, Practical estimates of rock mass strength, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 34, pp. 1165-1186.
12. Hoek, E., Carranza-Torres, C. and Corkum, B., 2002, Hoek-Brown failure criterion-2002 edition, Proc. 5th North American Rock Mech. Sympo. 1, pp. 267-273.
13. Lee, Y.K. and Pietruszczak, S., 2008, A new numerical procedure for elasto-plastic analysis of a circular opening excavated in a strain-softening rock mass, Tunnel. Under. Space Tech., 23, pp. 588-599.
14. Park, K.H., Tontavanich, B. and Lee, J.G., 2008, A simple procedure for ground response curve of circular tunnel in elastic-strain softening rock masses, Tunnel. Under. Space Tech., 23, pp. 151-159.
15. Russo, G., Kalamaras, G.S. and Grasso, P., 1998, A discussion on the concepts of geomechanical classes behavior categories and technical classes for an underground project, Gallerie e Grandi Opere Sotterranee.
16. Ribacchi, R., 2000, Mechanical tests on pervasively jointed rock material: insight into rock mass behaviour. Rock Mech. Rock Eng., 33, pp. 243-266.
17. Sun, J.S., Lu, W.B., Zhu, Q.H. and Chen, M., 2007, Elasto-plastic analysis of circular tunnels in jointed rock masses satisfy the Hoek-Brown failure criterion, J. China Univ. Min. Tech., 17.3, pp. 393-398.
18. Sharan, S.K., 2008, Analytical solutions for stresses and displacement around a circular opening in a generalized Hoek-Brown rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 45, pp. 78-85.

이 연 규



1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1989년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1994년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사
Tel: 063-469-1864
E-mail: kyoulee@kunsan.ac.kr
현재 군산대학교 해양과학기술대학 해양건설공학과 교수

박 경 순



2007년 군산대학교 해양과학기술대학 해양시스템공학과 공학사
2009년 군산대학교 대학원 해양산업공학과 공학석사
Tel: 063-469-1861
E-mail: drj000@nate.com
현재 군산대학교 대학원 해양산업공학과