

터널공학에서 한계변형률 개념의 공학적 의미에 관한 연구

박시현^{1*}, 신용석², 배규진³

A study on the engineering meanings of the critical strain concept in tunnelling

Si-Hyun Park, Yong-Suk Shin, Gyu-Jin Bae

Abstract This paper intends to develop an assesment technique for the rapid and quantitative evaluation of tunnel safety during tunnel excavation by using displacement measurements. Control criteria for the field measurements are provided at tunnel construction sites in Korea and other countries. However, it was known that the criteria were not clear and varied depending on the construction sites. In order to make a reasonable support for guidelines, critical strain concept is introduced in this study. And the engineering meanings of the critical strain concept are investigated precisely. In order to do this, at first, the engineering meanings of the original concept from the previous researchers was investigated theoretically for the evaluation of tunnel safety. Subsequently displacement data were obtained by using the commercial program, then the evaluation of tunnel safety was conducted with the view point of previous researches. Additionally, strains are determined from the feedback analyses program by inputting measured displacements that were obtained from the commercial program, then the evaluation of tunnel safety was discussed with the critical strain concept. Consequently it can be concluded that the evaluation of tunnel safety can be determined quantitatively and rapidly in the field by introducing the critical strain concept.

Keywords: Control criterion, the evaluation of tunnel safety, critical strain, measured displacements

요 지 본 논문은 터널을 굴착중인 시공현장에서, 변위계측치를 이용하여 터널의 안정성을 신속하고 정량적으로 평가하기 위한 기법 개발에 관한 것이다. 국내외 터널시공현장에는 시공관리 기준치를 제시하고 있다. 그러나 이러한 관리기준치들은 그 근거가 불명확하며 시공현장마다 일관적인 기준이 설정되어 있지 않다. 본 연구에서는 시공관리기준의 합리성을 확보하기 위하여 한계변형률 개념을 새롭게 도입하였다. 그리고 한계변형률 개념에 대한 공학적 의미에 대한 상세 검토를 수행하였다. 이를 위해서 먼저, 기존 연구자들에 의해 적용된 한계변형률 개념의 터널안정성 평가방법에 대한 공학적 타당성을 이론해석적인 방법으로 검토하였다. 이어서 상용프로그램을 이용하여 터널굴착시 발생한 굴착면의 변위정보를 획득하고, 이를 기존의 평가방법과 동일한 방법으로, 한계변형률 개념에 의한 터널안정성 평가를 수행하였다. 또한, 상용프로그램에 의해 획득한 굴착면 변위를 입력치로 하여 터널주변지반의 변형률을 수치역해석 기법으로 산정한 후, 이를 이용하여 한계변형률 개념에 의한 터널안정성 평가를 추가로 수행하였다. 결과적으로 한계변형률 개념을 활용함으로써 굴착중인 터널에 대하여 터널안정성을 신속하고 정량적으로 평가하는 것이 가능한 것으로 확인되었다.

주요어: 시공관리기준, 터널 안정성평가, 한계변형률, 계측변위

1. 서 론

터널은 지반내부에 건설되기 때문에, 설계 및 시공에 있어 매우 복잡하고 어려운 것이 현실이다. 터널의 시공 안정성을 판단하기 위하여, 지반굴착과 더불어 변위 및 응력과 관련된 계측을 실시하도록 규정하고 있다(대한 터널협회, 1999). 이렇게 계측된 값들은 현장에서 제시하고 있는 관리기준치와 비교하여 안정성을 검토하고 있다. 그러나, 현장의 관리기준치는 아직까지도 그 근거

가 불명확한 상태에 있으며, 통일적·일관적 기준이 제시되어 있지 못한 실정이다.

터널시공관리 측면에서는 변위개념이 응력개념보다 활용성이 높은 것으로 판단된다. 변위계측은 응력계측에 비해 단순하며 계측지점도 손쉽게 확보할 수 있기 때문에, 이를 터널 안정성 판단에 활용하는 것이 훨씬 경제적이며 유리하다. 그럼에도 불구하고 이러한 변위계측결과를 시공실무에서 활용하여 안정성을 판단하는데는 아직도 그 활용성이 높지 않다(천병식, 남순성, 1996; 박시현, 신용석, 2007). 그러나, 시공현장에서 계측되는 변위값들은 결과적으로, 지반의 상태, 굴착방법, 지보재의 타설 방법·타설량, 지반-지보재의 상호거동 등을 보여주는 의미있는 지표이다. 따라서 신뢰성있는 계측변위를 얻을

¹정회원, 한국시설안전공단, 팀장

²정회원, 한국시설안전공단, 실장

³정회원, 한국건설기술연구원, 책임연구원

*교신저자: 박시현 (parksh@kistec.or.kr)

수 있고, 또 이를 제대로 활용할 수 있다면, 터널시공의 안정성 확보는 물론 지보재의 경제적 시공까지 달성할 수 있을 것으로 판단된다.

본 논문에서는 영국터널협회(BTS, 2004)에서 최근 새롭게 개정된 Tunnel lining design guide의 Critical strain (한계변형률) 개념을 터널시공에 활용하기 위한 공학적 의미에 대해서 재조명해보았다. 이를 위해 먼저, 한계변형률 개념의 정의와 한계변형률이 가지는 공학적 의미에 대해 상세한 고찰을 실시하였다. 이어서, 지중응력이 작용하는 지반에 무지보 원형터널을 모델링하여 탄성, 탄소성지반에 대한 FEM해석을 수행하였다. 해석결과로 얻어진 터널굴착변위를 이용하여 변형률을 산정한 다음 이를 한계변형률 개념으로 평가하였다. 변형률을 산정하기 위해서는, 천단변위를 이용하는 간이법과 해석적모형을 이용하는 수치해석 기법을 각각 적용하였다. 본 연구는 한계변형률 개념의 공학적 활용성과 시공현장 실무에 대한 활용 가능성에 대해 검토한 것이다.

2. Critical Strain 개념

영국터널협회에서 최근 새롭게 개정된 Tunnel lining design guide에서는 Critical strain 개념을 소개하고 있는데, 이는 Sakurai의 개념(1982)을 그대로 인용한 것으로서 원저자의 자료를 토대로 간단히 요약하면 다음과 같다.

Critical strain(ϵ_0)은 그림 1과 같이 터널시공 현장에서 채취한 시편의 일축압축시험결과인 응력-변형률 관계로부터 구해진다. 즉 Critical strain은 일축압축시험으로부터 초기탄성영역의 거동특성과 파괴시의 일축압축강도를 이용하여 다음 식과 같이 정의되며, 일반적으로 파괴변형률(ϵ_f)보다는 항상 작은 값을 가지게 된다.

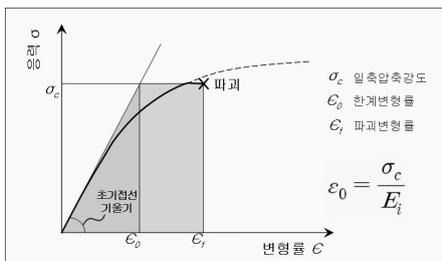


그림 1. 일축압축시험에 의한 응력-변형률선도

$$\epsilon_0 = \frac{\sigma_c}{E_i} \quad (1)$$

여기서, σ_c 와 E_i 는 각각 암석시편의 일축압축강도와 초기접선 탄성계수를 나타낸다.

흙 및 암석에 대한 Critical strain과 일축압축강도의 관계는 그림 2와 같다. 그림 2에서 나타난 바와 같이 Critical strain은 일축압축강도가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내고 있다. 櫻井(1997)에 의하면, 파괴변형률이 Critical strain보다 최대 2.5~4.0배 정도 더 큰 값을 나타내고 있으며, 또한 암반에서의 Critical strain이 암석공시체의 Critical strain에 비해 1.0~4.0배 정도 더 큰 값을 보이는 것으로 조사되었다. 이러한 사실은 Critical strain을 실무에서 활용함에 있어서 보수적인 근거를 제시하고 있는 것으로 판단되며, 공학적인 측면에서 안정률이 내포된 개념인 것을 알 수 있다.

그림 2의 한계변형률 그래프에서 나타난 상·하한 경계치를 활용함으로써 굴착중인 터널의 안정성을 정량적으로 평가할 수 있을 것으로 기대된다. 한계변형률 개념을 이용하여 굴착중인 터널의 안정성 평가에 대한 활용방안은 기존연구(박시현, 신용석, 2007)에 의해 제안된 바 있다.

3. 터널공학과 한계변형률 개념

3.1 한계변형률 개념의 공학적 근거

한계변형률 개념을 터널현장 실무에 활용한 기존의 연구사례(Sakurai, 1997; Swarup et al, 2000; Hoek and Marinos, 2000)에서는 주로 터널굴착시 계측된 천단변

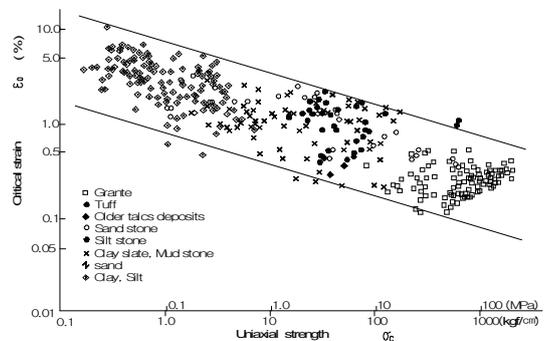


그림 2. Critical strain과 일축압축강도와의 관계⁸⁾

위를 터널의 반경으로 나누어 변형률을 구하고 이를 한계변형률 도표에 도시하여, 터널의 안정성을 평가하는 방법을 활용하고 있다.

하지만 상기에서 서술한 바와 같이, 한계변형률을 정의하고 한계변형률 도표를 작성함에 있어서는 현장에서 채취한 코어샘플에 대해 일축압축시험을 실시하여, 이때 발생한 압축변형률을 이용한 것임을 알 수 있다. 이렇게 정립된 한계변형률 개념을 터널현장 실무에 활용함에 있어서는, 지반굴착으로 인해 발생한 천단변위를 터널굴착크기와 비교하여 변형률을 산정하고 있다. 따라서 한계변형률 정의시와 활용시의 개념이 마치 서로 다른 방법에 의한 것으로 여겨지는 면이 있다. 따라서 이러한 개념들에 대한 명확한 설명과 공학적 근거가 제시될 필요가 있다.

터널굴착으로 인해 발생하는 주변지반의 응력변화 및 내공변위에 대한 다양한 이론식(Szechy, 1974)이 제안되어 있다. 이때 주변지반을 탄성체 또는 탄소성체로 간주하기도 하며, 초기 지반의 응력상태를 서로 달리 설정하여 제안하고 있다. 그 중에서 대표적인 것이 Kirsch 이론이며 아래의 그림은 Kirsch가 제안한 모델과 유사하다.

그림 3에서는 굴착단면과 함께 굴착 후 응력재분배로 인한 변형단면이 함께 도시되어 있다. 굴착면 측벽요소에 대한 응력상태도 함께 도시되어 있는데, 굴착으로 인한 응력해방으로 인해 원주응력(σ_r)이 0이 된 상태를 알 수 있다. 이때 접선응력(σ_t)은 증가하게 된다. 축대칭 탄성지반(그림 3에서 $p=q$)에서의 원형터널인 경우에는 접선응력(σ_t)이 원지반의 지중응력의 최대 2배로 증가되

는 것은 잘 알려진 사실이다. 터널굴착으로 인해 발생하는 접선방향의 변형률(ϵ_t)은 다음 식 (2)와 같이 전개 가능하다.

$$\epsilon_t = \frac{\Delta L}{L} = \frac{2\pi R - (2\pi(R - \Delta u))}{2\pi R} = \frac{2\pi \Delta u}{2\pi R} = \frac{\Delta u}{R} \quad (2)$$

상기와 같은 지반 거동 메커니즘에 의해 터널굴착에 의한 지반의 변형을 천단변위와 터널반경으로 표현 가능한 것을 알 수 있다. 따라서 상기의 검토내용은, 터널현장실무에서 천단변위와 터널크기를 이용하여 변형률을 개략 산정한 후, 이를 한계변형률 개념을 이용하여 터널안정성을 평가하는 것에 대한 공학적인 타당한 근거를 제시하고 있는 것으로 판단된다.

3.2 수치해석기법을 이용한 한계변형률개념의 고찰

본 장에서는, 한계변형률 개념에 대한 공학적 활용성을 보다 구체적으로 파악하기 위하여, 수치해석적인 방법을 이용한 다양한 검토를 실시하였다. 먼저 상용프로그램을 이용하여, 터널굴착시 발생한 천단변위를 이용하여 변형률을 산정한 후, 이를 한계변형률 개념으로 터널안정성 평가를 실시하였다. 또 다른 방법으로는, 터널굴착시 발생한 굴착면에서의 변위정보를 입력하여 주변지반의 압축변형률 분포 및 최대압축변형률을 구하여, 이를 한계변형률 개념으로 터널안정성 평가를 실시하였다. 굴착면에서의 변위정보를 이용하여 변형률을 구하기 위해서는 역해석에 근거한 수치해석 모듈이 필요한데, 본 연구에서는 기존에 개발된 해석모듈(박시현, 신용석, 2008)을 활용하였다.

3.2.1 천단변위를 이용하여 산정된 변형률

상용프로그램을 이용하여 터널굴착에 대한 수치해석을 실시하고, 그 결과로 천단변위를 구한 다음, 이를 터널의 크기로 나누어 한계변형률 개념으로 안정성을 평가하는 방법이다. 상용 FEM 프로그램으로는 Pentagon-3D(에 메탈드스포츠사, 2004)를 활용하였으며, 이때 가정 한 지반조건은 그림 4와 같다.

지반의 초기 응력조건은 $\sigma_x=0.49$ MPa, $\sigma_y=1.03$ MPa, $\tau_{xy}=0.2$ MPa로, 해석영역 전체에 걸쳐, 응력이 일정한 것으로 가정하였다. 연직응력을 토피압에 의해 발생한 것으로 가정하면, 약 40~50 m 정도의 토피고를 가지는

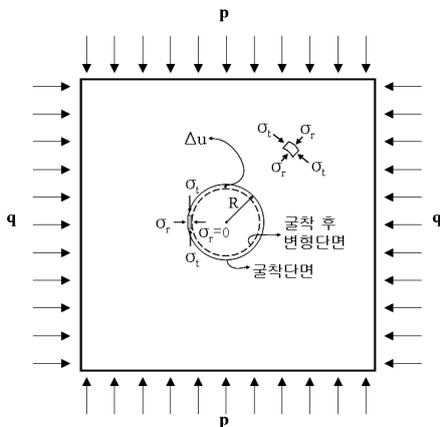


그림 3. 원형터널 굴착시의 지반 거동 모식도

것을 알 수 있다. 또한 전단응력을 고려한 것은 지표면의 경사 등을 반영하여 보다 실제적인 지반조건에 가깝게 재현하기 위함이다. 해석영역은 표 1에서와 같은 지반 물성치를 사용하였으며, 풍화토지반과 연암지반에 대해 각각 검토하였다. 터널직경은 10 m로 가정하였으며, 탄성지반 및 탄소성지반에 대하여 굴착 후 무지보 상태로 해석을 수행하였다. 해석을 수행한 후 천단부(A 점)와 측벽부(B 점과 C 점)에서의 굴착변위를 표 2에 정리하였다.

표 2에서 보는 바와 같이, 천단부와 측벽부 모두에서 탄성지반보다 탄소성지반의 경우에 더 많은 변위가 발

생하는 경향을 확인할 수 있다. 또한, 그 변위 차이는 연암지반보다 풍화토지반에서 더 큰 것을 알 수 있다. 천단부에서는 전단력 때문에 비대칭으로 힘이 작용하여, 측벽부에서 대칭적으로 보인 것과 달리 비대칭적인 변위가 발생하는 것을 알 수 있었다. 이러한 값들의 변위 차이는 측벽부와 동일하게 연암지반보다는 풍화토지반이 크게 나타나고 있다.

이러한 수치해석 결과를 이용하여 한계변형률 개념에 의한 터널안정성을 평가하기로 한다. 이를 위해서는, 터널굴착시 발생한 천단변위를 터널의 반경으로 나누어서 변형률을 산정한다. 이 방법은 이미 앞에서 소개한 바와 같이 실무에 적용되었던 방법이다. 여기서는, 탄성 및 탄소성 지반에 대해, 상용 FEM 프로그램에 의한 결과를 이용하여 새롭게 평가하고자 한다. 표 3은 앞에서 수행한 결과인 천단변위(표 2의 A 점 Y 변위)를 이용하여 구한 변형률을 나타낸 것이다. 실제 터널현장에서도 연직 천단변위 계측에 많은 노력을 기울이고 있어, 이를 활용하여 안정성을 평가하는 것은 의미있는 일이다. 그림 5에는 표 3의 변형률을 한계변형률 도표에 나타낸 것이다. 그림 5의 한계변형률 도표에서는, 지반을 강도에 의해 크게 5개로 구분하고 있다. 이는 ISRM(1981)의 기준을 활용하여 실무적으로 활용하기 편리하도록 구분한 것이다.

풍화토 지반의 결과를 보면, 탄성, 탄소성 해석 모두

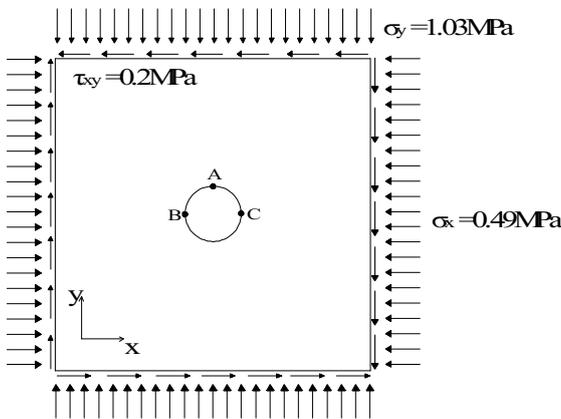


그림 4. 수치해석적 검토를 위한 지반 조건

표 1. 수치해석에 사용된 지반의 물성치

구 분	단위중량 γ (KN/m ³)	탄성계수 E (KPa)	포아손비 ν	점착력 c (KPa)	내부마찰각 ϕ (°)
풍화토지반	19.60	98065.9	0.35	50	30
연암지반	26.27	980659.2	0.25	250	40

표 2. 상용 FEM 프로그램에 의한 터널굴착면에서의 변위

구 분	지반 종류	변위 (mm)					
		A 점		B 점		C 점	
		X	Y	X	Y	X	Y
CASE-1	W/S in E/B	-17.5	-68.8	+21.2	+17.5	-21.2	-17.5
CASE-2	W/S in EP/B	-2.66	-117	+115	+4.21	-115	-4.21
CASE-3	S/R in E/B	-2.09	-7.18	+1.52	+2.09	-1.52	-2.09
CASE-4	S/R in EP/B	-2.23	-7.51	3.75	1.92	-3.75	-1.92

* W/S : Weathered Soil, S/R : Soft Rock
E/B : Elastic body, EP/B : Elasto-plastic body

하한 경계치를 초과하고 있으며, 상한 경계치 보다는 낮다. 연암 지반은, 해석결과 모두 하한 경계치보다 낮다. 그림 5를 이용하여 터널의 안정성을 평가해 보면, 다음과 같이 결론지을 수 있다. 즉, 풍화토지반에서는 탄성, 탄소성 지반에 대해 모두 안전성 확보가 어려우며, 탄소성지반이 더욱 불안정한 상태인 것을 알 수 있다. 또한 이러한 경우에 터널의 안정성을 확보하기 위해서는 지보재를 타설하여, 변위발생량을 줄일 필요가 있다. 연암 지반에서는 탄성, 탄소성 지반에서 모두 무지보 상태에서 터널의 안전성이 확보된 것으로 평가할 수 있다.

이렇듯이, 한계변형률 개념을 활용하기 이전에는, 지반의 변형 정도를 활용하여 안정성을 평가할 때, 지반요소가 탄성상태인지 또는 소성상태인지를 파악하는 것이 일반적이었다. 비록 지반요소가 소성상태인 것을 확인하였더라도, 그것이 곧바로 안정성을 판단하는 수단으로 활용되는 못한 것이 현실이었다. 그러나 본 연구에서 살펴본 바와 같이, 한계변형률 개념을 활용하게 되면, 터널굴착시 일반적으로 예측되는 천단변위를 활용하여 터널의 안정성을 정량적인 측면에서 평가 가능하며, 실무에 활용성이 높은 것을 알 수 있다.

표 3. 천단변위에 의해 산정된 변형률

구분	천단변위 (mm)	변형률(%)	
		천단변위/터널반경	최대압축변형률*
CASE-1	68.8	1.38	2.06
CASE-2	117	2.34	5.38
CASE-3	7.18	0.14	0.21
CASE-4	7.51	0.15	0.39

* 순해석 FEM 결과를 이용하여 구한 터널주변 지반 변형률

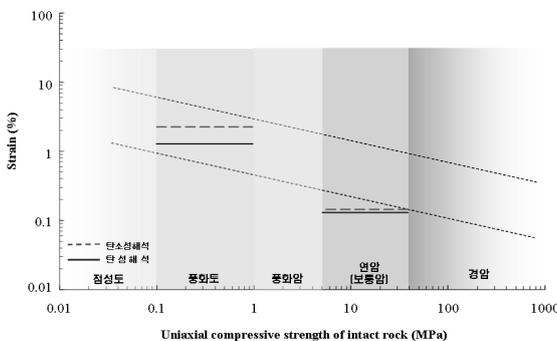


그림 5. 천단변위를 활용한 터널 안정성 평가

3.2.2 해석모듈을 이용하여 산정된 변형률

터널굴착으로 인해 발생한 주변지반의 최대압축 변형률을 산정하기 위한 또 다른 방법으로는 역해석기법을 토대로 개발된 해석모듈에 의한 방법이 있다. 해석모듈에 대한 상세 내용은 본 논문에서는 생략하기로 한다. 다만, 본 연구에서 활용을 위해 해석모듈의 특징을 개략적으로 요약하면 다음과 같다. 그림 6은 해석모듈의 흐름도를 나타낸 것이다.

- 터널굴착면에서의 변위정보(x 및 y 방향 변위량)를 해석모듈에 입력
- 해석모듈은 탄성이론을 활용하고 있으며, 3개의 항으로 구성된 \bar{c} 를 출력

$$\bar{c} = \left\{ \begin{matrix} \sigma_{x_0}/E_g \\ \sigma_{y_0}/E_g \\ \tau_{xy_0}/E_g \end{matrix} \right\} \quad (3)$$

- 출력치가 3개의 항이므로 3개의 입력정보만으로도 해석이 가능함.
- \bar{c} 는 초기 지반의 응력상태를 의미하며 4개의 변수로 구성되어 있음.
- 연직응력을 터널 토피하중으로 가정할 수 있음 ($\gamma H = \sigma_y$ 이용)
- 연직응력이 가정되면, 수치역해석 기법을 이용하여 나머지 물성치(E, σ_x, τ_{xy})를 직접적으로 구할 수 있음.
- 해석모듈에 의해서 구한 지반물성치와 응력치들을

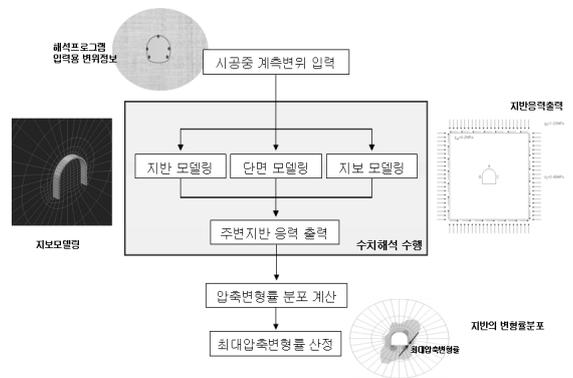


그림 6. 해석모듈의 개략 흐름도

이용하여, 탄성해석에 의해 굴착터널의 주변지반에 대한 변형률 분포를 구한다. 동시에 최대압축변형률을 구한다.

- 최대압축변형률을 한계변형률 개념으로 터널안정성을 평가

본 연구에서는 표 2에서 구한 변위들 중에서 음영부분 4개의 변위(천단부의 x,y 좌우측의 x)를 천단부와 측벽부로 구분하여 해석모델에 입력하였다. 변위를 입력함에 있어서는, 상용 FEM 프로그램의 해석결과를 100%, 70% 입력하는 두 가지 방법을 고려하였다. 70%만을 입력한 것은, 실제 터널시공현장에서 계측되는 변위값이 총변위보다 적음을 반영한 것이다. 또한, 해석모델을 이용하여 수치해석을 수행하기 위해서는 먼저 연직응력에 대해 가정할 필요가 있으며, 표 4와 같이 토피압 100%, 70% 두 가지 방법을 고려하였다. 토피압 70%만을 가정한 것은, 실제 터널시공현장에서의 연직토압이 토피압과 서로 다를 수 있음을 반영한 것이다.

표 4에서 보는 바와 같이 탄성조건(CASE 5)에 대해서는 초기응력조건을 완벽하게 재현하고 있는 것을 알 수 있다. 탄소성지반에서 발생한 변위를 활용하여, 해석모델에 의한 수치해석을 수행한 경우(CASE 6, CASE 9)는, 원지반의 물성치 및 응력치들과는 서로 다른 값이 추정되는 것을 쉽게 알 수 있다. 이것은, 해석모델이 탄성이론에 의해 작성된 것에서 그 원인을 찾을 수 있다. 실제 지반이 탄성지반보다는 탄소성지반에 더 가까우며 따라서, 탄성이론에 근거를 둔 해석모델을 사용하는 경

우에는 표 4에서 같이 원지반의 조건을 100% 재현하지는 못하는 것을 나타내고 있다. 표 2에서 살펴본바와 같이, 풍화토지반보다 연암지반에서는 탄성, 탄소성 해석시 굴착변위의 차이가 심하지 않다. 이러한 영향은 표 4에 그대로 나타나 있다. 즉, 연암지반에 대한 해석사례(CASE 9~10)에서는 원지반 조건에 근접한 결과치를 보여주고 있다. 이는 풍화토지반에 비해 연암지반이 보다 더 탄성적인 거동을 보이기 때문인 것으로 판단된다. 그러나, 탄성, 탄소성 해석시 굴착변위의 차이가 크게 나타난 풍화토 지반에서는, 탄소성 해석 결과(CASE 6~8) 원지반 조건과 다른 결과치를 보여주고 있으며 특히, 천단응력의 추정치가 원지반의 경우와 차이가 많은 특징이 있다. 이에 대한 원인의 하나로 생각할 수 있는 것은 측정점의 위치와 개수이다. 즉, 본 논문에서 사용하고 있는 측정점의 위치는 천단부와 수평부에 대해서만 입력하고 있기 때문에 수평지점의 입력치(표 2)에서 좌우 비대칭성이 반영되어 있지 못하고 있다. 이러한 관점에서 측정점의 위치를 변경하거나 입력개수를 늘리는 등, 보다 다양한 추가 연구에 의해 상세한 검토가 수행될 필요가 있다. 그러나 여기서, 지적해 둘 것은, 해석모델을 활용하는 최종적인 목적은 표 4에서 나타낸 바와 같은 원지반조건의 재현이 아니라, 이들을 이용하여 최대 압축변형률을 계산해 내고, 그 값으로 터널안정성을 평가하는 것이라는 점이다.

다음으로는, 해석모델에서 구한 지반물성치와 응력치들을 이용하여 터널 주변지반에 대한 변형률 분포 및

표 4. 개발된 해석모델에서 구한 지반의 응력상태(MPa)

구분	해석시의 가정치들			해석 결과		
	지반 종류	변위	연직응력	E	σ_x	τ_{xy}
CASE-5	W/S in E/B	100%	-1.03 (100%)	98.00	-0.49	-0.20
CASE-6	W/S in EP/B	100%	-1.03 (100%)	51.26	-1.02	-0.02
CASE-7	W/S in EP/B	70%	-1.03 (100%)	73.23	-1.02	-0.02
CASE-8	W/S in EP/B	70%	-0.72 (70%)	51.26	-0.71	-0.01
CASE-9	S/R in EP/B	100%	-1.03 (100%)	868.57	-0.71	-0.19
CASE-10	S/R in EP/B	70%	-0.72 (70%)	868.57	-0.50	-0.13
참고	W/S Initial condition		-1.03	98.00	-0.49	-0.20
	S/R Initial condition			980.00		

* W/S : Weathered Soil, S/R : Soft Rock,
E/B : Elastic body, EP/B : Elasto-plastic body

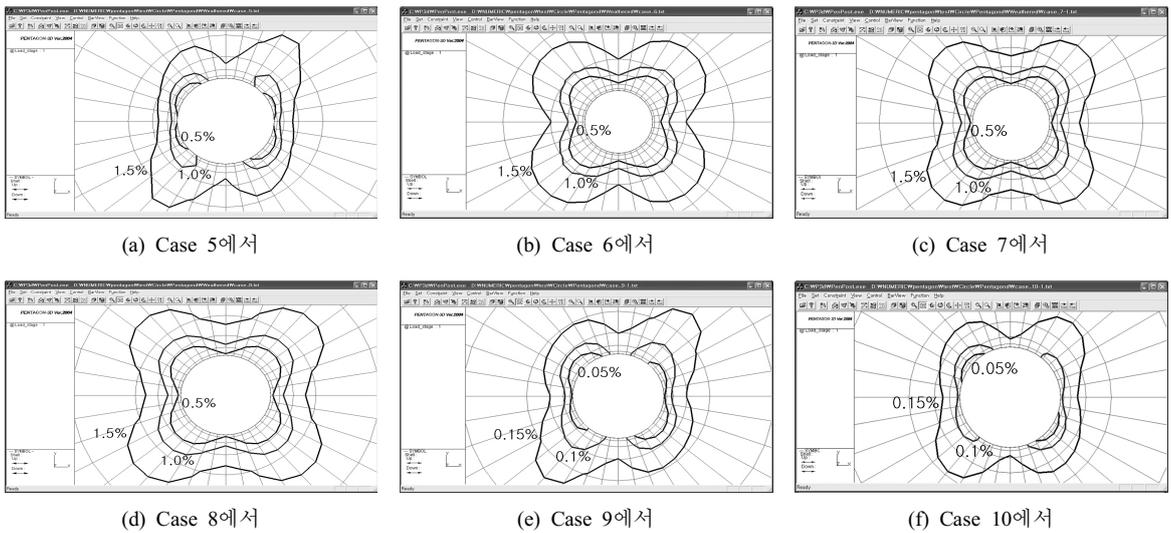


그림 7. 터널굴착에 의한 주변지반의 압축변형률 분포도

최대압축변형률을 구하여 이를 한계변형률 개념으로 터널 안정성을 평가하였다. 한계변형률 개념을 처음 제안한 Sakurai는, 한계변형률 도표를 작성하기 위하여, 코아 샘플에 대한 일축압축실험을 실시하였다. 따라서 해석모듈을 이용한 경우에서도 터널 주변지반의 최대압축 변형률을 구하여 평가하는 것이 합리적인 것으로 판단 된다.

표 4에서 구한 해석결과를 활용하여, 터널주변지반의 압축변형률의 분포를 구하면, 그림 7과 같다. 풍화도의 탄소성 해석결과를 활용한 CASE 6~8에서는 원지반의 좌우 비대칭적 응력상태와 달리 대칭적 응력상태를 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 이는 앞서서도 지적한 바와 같이, 해석모듈에서 추정된 전단응력이 원지반의 것과 차이가 크기 때문인 것으로 판단된다. 그림 7의 결과를 이용하여 터널주변지반의 최대압축 변형률을 정리하면, 표 5와 같다. 표 5에는 표 3의 내용도 함께 정리하였다. 표 5의 두 종류의 변형률을 한계변형률 도표에 나타내면, 그림 8과 같다.

그림 8에는, 그림 5의 천단변위에 의한 변형률도 함께 나타내었다. 풍화토지반, 연암지반에 대해 모두, 해석모듈의 결과가 천단변위에 의한 결과보다, 변형률이 더 크게 나타난 것을 알 수 있다. 즉, 원지반의 응력상태 중에서 전단응력에 대한 추정에서 큰 차이가 발생함에도 불구하고 천단변위에 의한 변형률보다 해석모듈에 의한

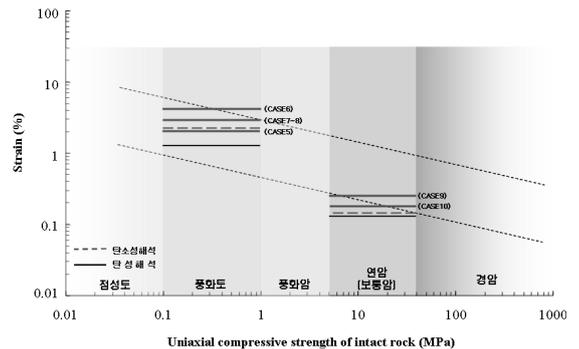


그림 8. 최대압축변형률을 활용한 터널 안정성 평가

변형률이 더 큰 변형률을 나타내고 있다. 이는 연직변위만에 의한 천단변위에 의한 변형률 산정 방법에서는 전단응력에 의한 영향이 크게 반영되지 못함을 의미하는 것으로 판단된다. 결론적으로 천단변위에 의해 결정된 변형률(CASE-1의 1.38, CASE-2의 2.34)과 해석모듈에 의해 결정된 변형률(CASE-5의 2.06, CASE-6의 4.16)을 비교한 결과, 원지반의 변형률(CASE-1의 2.06, CASE-2의 5.38)에 보다 더 가까운 값을 제공하는 것은 해석모듈에 의한 것으로 나타났다.

해석모듈에서는 굴착변위 및 수직응력조건을 원지반 조건보다 줄여서 입력하였음에도 불구하고, 천단변위에 의한 변형률보다 더 높은 변형률이 발생하였다. 이는 해

표 5. 해석모델에 의해 산정된 최대압축 변형률

구분	천단변위(mm)	변형률 (%)		
		천단변위/터널반경	최대압축변형률	해석모델 이용
CASE-1	68.8	1.38	2.06	-
CASE-2	117	2.34	5.38	-
CASE-3	7.18	0.14	0.21	-
CASE-4	7.57	0.15	0.39	-
CASE-5	-	-	-	2.06
CASE-6	-	-	-	4.16
CASE-7	-	-	-	2.91
CASE-8	-	-	-	2.91
CASE-9	-	-	-	0.25
CASE-10	-	-	-	0.18

석모듈이 탄성론을 활용하고 있는 것에 기인하는 것으로서, 변위를 줄이게 되면 지반의 탄성계수가 커지며 (CASE-6 & 7), 변위와 응력이 동시에 줄어들게 되면 탄성계수가 동일(CASE-6 & 8)해지기 때문이다. 이러한 결과는 실무적인 측면에서 활용성이 기대된다. 즉, 현장에서 계측되는 변위가 원지반의 변위를 모두 포함한 것은 아니기 때문이다. 또한, 천단변위에 의한 간이적 평가법으로 안전성을 미리 파악하고, 보다 정밀한 안전성 판단이 필요한 경우에는 해석모델을 이용하여 보다 상세한 검토를 수행한다는 측면에서도 해석 모델의 활용성이 기대된다 할 수 있다. 이로서, 탄소성 지반에 대해 다양한 해석조건에서도 한계변형률 도표상에서는 공학적 범위내에서 활용성이 기대된다.

4. 결 론

본 연구에서는 영국터널협회에서 최근 새롭게 추가된 Critical strain 개념을 터널시공 실무에 활용하기 위하여, 한계변형률 개념의 공학적인 의미와 그 특성에 대하여 검토한 것이다. 다음은 본 연구의 결론을 정리한 것이다.

- (1) 천단변위를 터널의 반경으로 나누어 결정된 변형률을 한계변형률 개념에 활용하는 것은 공학적으로 타당한 것으로 나타났다. 수치해석기법을 이용하여 탄성, 탄소성 지반에 대해 천단변위를 한계변형률 개념에 활용하여 터널 안전성을 평가하였다. 그 결과

변위계측결과를 활용하여 터널 시공실무에서 안정성 평가가 가능한 것으로 나타났다.

- (2) 본 연구에서 활용한 해석모델은, 탄성지반에 대해서는 원지반의 물성치 등을 정확히 추정하고 있으나, 탄소성 지반에 대해서는 차이를 보이고 있다. 그러나 천단변위에 의해 결정된 변형률보다는 해석모델에 의해 결정된 변형률이 원지반의 변형률에 보다 더 가까운 값을 제공하는 것으로 나타났다.
- (3) 해석모델에서는 원지반의 응력상태중에서 전단응력을 적절하게 평가하고 있지 못한 것으로 나타났다. 그러나 해석모델을 이용하여 최대압축변형률을 추정하여 이를 한계변형률 개념에 활용함에 있어서는 타당한 결과를 도출하는 것을 확인하였다.

향후 원지반의 전단응력에 대한 추정에 보다 다양한 연구가 수행될 필요가 있으며, 터널굴착에 따른 원지반의 총변위가 아닌 계측변위를 이용하여 한계변형률 개념을 적용하기 위해서는 계측변위와 총변위의 관계 등에 대해서도 구체적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부의 지원에 의하여 첨단도시개발사업(과제관리번호 R&D/05건설택심 D03-01) 주관으로 수행된 과제 내용의 일부를 정리한 것입니다. 연구비 지원에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. (사)대한터널협회 (1999), 건설교통부 제정 터널표준시방서.
2. 천병식, 남순성 (1996), “서울지하철 터널의 계측관리 기준치에 관한 연구”, 대한토목학회논문집, 제16권, 제 III-1호, pp. 47-59.
3. 박시현, 신용석 (2007), “한계변형률 개념을 활용한 터널 안정성 평가에 관한 연구”, 한국지반공학회논문집, 제23권, 제5호, pp. 29-42.
4. 박시현, 신용석 (2008), “터널굴착 변위를 활용한 시공 중 피드백 해석기법 연구”, 한국지반공학회논문집, 제 24권, 제1호, pp. 81-89.
5. 에메랄드소프트사 (2004), PENTAGON-3D 사용자 매뉴얼
6. 櫻井春輔 (1982), “トネル工事における變位計測結果の評價法”, 土木學會論文報告集, 第317号, pp. 93-100.
7. British Tunnelling Society (2004), Tunnel lining design guide, ICE.
8. Sakurai, S. (1997), “Lessons Learned from Field Measurements in Tunnelling”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 12, No. 4, pp. 453-460.
9. Swarup, A. Goel R.K. and Prasad V.V.R. (2000), Observational Approach for Stability of Tunnels, Tunneling Asia 2000, New Delhi, pp. 38-44.
10. Hoek, E. and Marinos, P. (2000), “Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses”, Tunnels and Tunnelling.
11. Szechy, K. (1974), The Art of Tunnelling, AKAD MIAI KIADO·BUDAPESAT.
12. ISRM. (1981), Basic geotechnical description of rock masses, int J. Rock Mech Min. & Geomech Abstr. 18, pp. 85-110.



박시현

한국시설안전공단
팀장

E-mail: parksh@kistec.or.kr



신용석

한국시설안전공단
실장

E-mail: sys3281@kistec.or.kr



배규진

한국건설기술연구원
책임연구원

E-mail: gjbae@kict.re.kr