

지반의 한계변형률을 이용한 터널수치해석 및 현장 적용성 연구

박시현*

한국시설안전공단 지하시설실

A Study on Numerical Analyses and Field Application for Tunneling Using the Critical Strain in the Ground

Si-Hyun Park*

Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation, Underground Facility Dept.

본 연구는 지반의 한계변형률을 활용하여 터널의 정량적 안정성 평가를 수행한 것이다. 한계변형률은 지반재료에 대한 새로운 역학적 물성치의 하나이다. 한계변형률 개념은 터널굴착 현장에서 계측된 변위정보와 함께 굴착지반의 변형에 대한 한계치 설정에 활용될 수 있다. 이러한 목적을 위해서 본 연구에서는 한계변형률 개념을 터널 안정성 평가에 활용한 것이다. 먼저, 수치해석 프로그램을 이용하여 터널굴착시 발생한 변위를 역해석 기법에 의해 지반변형률로 산정한 후, 이를 한계변형률 개념에 의해 터널 안정성을 평가하였다. 이어서, 터널시공현장에서 계측된 변위정보를 활용하여 실증적으로 한계변형률 관점에서 터널안정성 평가를 수행하였다. 본 연구를 통해 한계변형률 개념에 의해 터널의 안정성을 정량적으로 평가하는 것이 가능한 것을 확인하였다.

주요어 : 한계변형률, 터널굴착, 계측변위, 터널안정성

This study was carried out to assess quantitatively the safety of a tunnel by using critical strains in the ground. Critical strain is a new material property of the ground. It can be applied as deformation limits in the ground due to excavation using the measured displacement at the tunnel construction site. To achieve this purpose, the critical strain concept was reviewed and applied to assess the tunnel safety. First of all, the calculated excavation displacements of a circular tunnel by commercial programs were investigated and inputted into a feedback analysis module to calculate strains in the ground. Then the safety of tunnels was evaluated based on the critical strain concept. Subsequently the measured displacements obtained in the field are utilized practically to assess the safety of tunnels using the critical strain concept. Through this study, it was confirmed that the critical strain concept is useful to assess the safety of tunnels quantitatively.

Key words : critical strain, tunneling, measured displacements, safety of tunnels

서 론

터널은 일반구조물과 달리 지중에 시공되는 특징이 있어 설계 및 시공에 있어서 주의가 요구된다. 터널은 구성재료인 원지반과 구조체로서의 지보재의 상호작용에 의해 터널의 시공안정성이 좌우되어, 막장의 지반굴착과 더불어 변위 및 응력과 관련된 계측을 실시하도록 규정(대한터널협회, 2007)하고 있다. 터널굴착과 더불어

굴착면의 변위를 계측하는 것은 응력개념의 계측에 비해 매우 단순하며 계측지점도 손쉽게 확보할 수 있어 이를 터널 안정성 판단에 활용하는 것이 훨씬 경제적이다. 유리하다.

그러나, 일상계측의 한 부분인 변위계측은 현실적으로 시공현장에서 터널의 안정성을 판단하는 중요한자료의 역할을 하지 못하고 있다. 이에 대한 가장 큰 이유는 선행변위에 대한 불확실성과 터널현장에서 계측관

*Corresponding author: parksh@kistec.or.kr

리 기준치를 설정함에 있어서 통일적 지침이 될 수 있는 뚜렷한 기준이 부재한 실정이기 때문이며, 아직까지 국내 터널시공현장에서 터널계측에 대한 중요성이 높지 않으며 그 활용성도 미비한 실정이다(천병식과 남순성, 1996; 박시현과 신용석, 2007).

본 연구에서는 영국터널협회에 의하여 최근 새롭게 개정된 Tunnel lining design guide (british tunnelling society, 2004)의 한계변형률(critical strain)을 터널에 활용하여 정량적 안정성 평가를 재조명해 보았다. 이를 위해 먼저, 지중응력이 작용하는 지반에 무지보 원형터널을 모델링하여 탄성, 탄소성에 대한 FEM해석을 수행하고, 굴착면에서의 변위를 터널반경으로 나누어 변형률을 결정하였다. 또한, FEM해석 결과에서 계산된 변위를 입력치로 하여 역해석 기법의 해석모델에 의한 수치해석을 통해, 터널 주변지반의 변형률을 직접적으로 산출하였다. 이러한 방법으로 결정된 두 종류의 변형률을 비교 검토하여, 한계변형률 관점에서 터널안정성을 정량적으로 평가하였다. 마지막으로 실제 시공현장에서 3차원계측을 통하여 계속되어진 천단변위를 이용하여 시공단계에 따라 구한 변형률이 한계변형률 도표에서 어떻게 변화하는지를 고찰하였다.

한계변형률 개념 요약

영국터널협회에서 최근 새롭게 개정한 Tunnel lining design guide에는 한계변형률 개념을 소개하고 있는데, 이는 Sakurai(1997)의 개념을 그대로 인용한 것으로서 원저자의 자료를 토대로 요약하면 다음과 같다.

한계변형률(ϵ_0)은 Fig. 1과 같이 현장에서 채취한 시

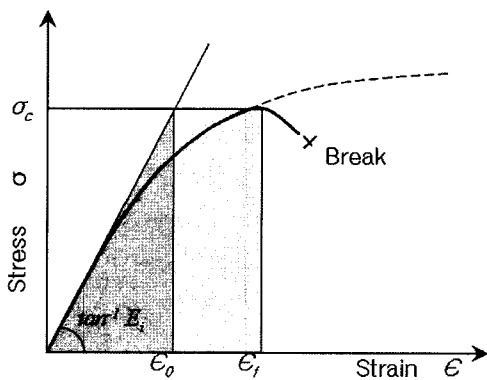


Fig. 1. Stress-strain relation according to uniaxial compression test.

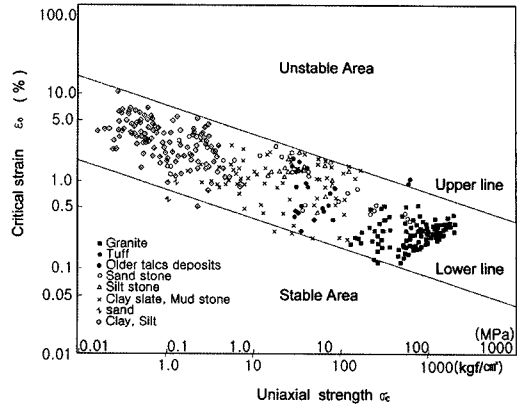


Fig. 2. Relation between critical strain and uniaxial compression strength.

편의 일축압축시험 결과인 응력-변형률 관계로부터 구해진다. 즉 한계변형률은 일축압축시험으로부터 초기탄성영역의 거동특성과 파괴시의 일축압축강도를 이용하여 다음 식과 같이 정의하며, 일반적으로 파괴변형률(ϵ_f) 보다는 작은 값을 가지게 된다.

$$\epsilon_0 = \frac{\sigma_c}{E_i} \tag{1}$$

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

토사(점성토)에서 경암에 이르기까지의 한계변형률과 일축압축강도의 관계는 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서 나타난 바와 같이 한계변형률은 일축압축강도가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내고 있다. Sakurai(1997)에 의하면, 파괴변형률이 한계변형률보다 최대 2.5~4.0배 정도 더 큰 값을 나타내고 있으며, 또한 암반에서의 한계변형률이 암석공시체의 한계변형률에 비해 1.0~4.0배 정도 더 큰 값을 보이는 것으로 조사되었다. 이러한 사실은 한계변형률을 실무에 활용함에 있어서 공학적으로 타당한 근거를 제시하고 있는 것으로 판단된다. 따라서 Fig. 2의 한계변형률 그래프에 나타난 상한 및 하한 경계치를 활용함으로써 굴착중인 터널의 안정성을 정량적으로 평가할 수 있을 것으로 기대된다. 지금부터는 이러한 관점에서 수치해석적인 방법과 실제 현장계측 자료를 토대로 터널안정성을 평가한 것을 기술한다.

터널의 정량적 안정성 평가

한계변형률 개념을 이용하여 터널 구조물의 정량적

안정성 평가를 수행하기 위하여, 먼저 수치해석적인 방법을 이용하여 검토하였다. 이를 위해, 상용 FEM 해석 프로그램을 이용하여 터널굴착시 발생한 굴착면에서의 변위를 구하고, 이를 한계변형률 개념으로 평가하였다. 또한, 기존 연구(박시현과 신용석, 2008)에서 개발된 수치 역해석모듈을 이용하여, 수치해석에서 구한 굴착면 변위를 입력하여 터널굴착 주변지반의 변형률을 직접 구하고, 이를 다시 한계변형률 개념으로 평가하였다. 이러한 검토는 결과적으로 기존 연구에서 개발한 수치 역해석모듈의 타당성에 대해서도 동시에 평가하게 된다. 본 연구에 이용된 수치 역해석모듈의 상세내용은 생략하기로 하며, 타당성을 검토하기 위한 개략적인 흐름을 요약하면 다음과 같다.

○ 우선, 지반조건을 가정하여 상용 FEM 프로그램에 의해 터널굴착 해석을 실시한다.

○ 터널굴착에 의해 발생한 굴착면에서의 변위값을 구한다.

○ 변위값과 그때의 굴착반경을 이용하여 변형률을 산정하고, 이를 이용하여 터널안정성을 한계변형률 관점에서 평가한다.

○ 앞에서 구한 굴착면의 변위값을 입력치로 하여, 기 개발한 수치 역해석모듈로 해석을 수행한다.

○ 수치 역해석모듈에 의해 지반응력과 물성치(σ_x , σ_y , τ_{xy} , E)를 구하고, 최종적으로 터널굴착 주변지반의 변형률을 구한다.

○ 수치 역해석모듈에 의해 구한 지반변형률을 이용하여 터널안정성을 한계변형률 관점에서 평가한다.

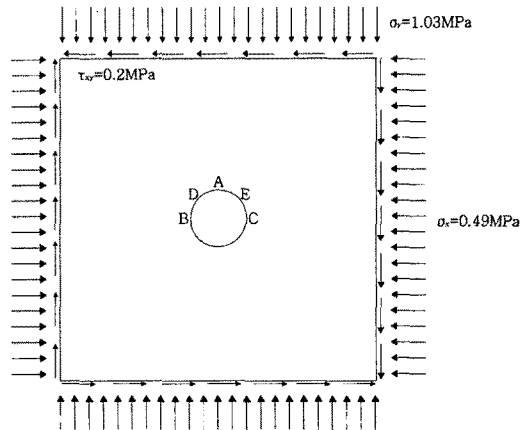


Fig. 3. Ground conditions for the numerical analyses.

수치 역해석모듈의 타당성에 대한 검토

상용 FEM 프로그램으로는 Pentagon-3D(에메랄드소프트사, 2004)를 활용하였으며, 이때 가정한 지반조건은 Fig. 3과 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 것을 알 수 있다. 또한 전단응력을 고려한 것은 지표면의 경사 등을 반영하여 보다 실제적인 지반조건에 가깝게 재현하기 위함이다. 해석영역은 Table 1에서와 같은 지반 물성치를 사용하였으며, 풍화토지반과 연암지반에 대

Table 1. Ground properties applied to the numerical analyses.

Classification	Unit weight γ (KN/m ³)	Elastic modulus E (kPa)	Poisson's ratio ν	Cohesion c (kPa)	Internal friction angle ϕ (°)
weathered soil	19.60	98065.9	0.35	50	30
soft rock	26.27	980659.2	0.25	250	40

Table 2. Displacements on the excavated surface by a commercial program.

CASE	Ground type	Displacement (mm)									
		Point A		Point B		Point C		Point D		Point E	
		X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1	W/S in E/B	-17.5	-21.2	17.5	-21.2	-17.5	-21.2	-41.3	-63.9	-41.3	-63.9
2	W/S in EP/B	-17.5	-21.2	17.5	-21.2	-17.5	-21.2	-95.2	-90.7	-95.2	-90.7
3	S/R in E/B	-1.75	-1.92	1.75	-1.92	-1.75	-1.92	-4.15	-6.84	-4.15	-6.84
4	S/R in EP/B	-1.75	-1.92	1.75	-1.92	-1.75	-1.92	-5.04	-7.19	-5.04	-7.19

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

해 각각 검토하였다. 터널직경은 10m로 가정하였으며, 탄성지반 및 탄소성지반에 대하여 굴착 후 무지보 상태로 해석을 수행하였다. 해석을 수행한 후 천단부(A점), 측벽부(B점과 C점), 어깨부(D점과 E점)에서의 굴착변위를 Table 2에 정리하였다.

Table 2에서 보는 바와 같이, 천단부, 측벽부, 어깨부 각각에서 탄성지반보다 탄소성지반의 경우에 더 많은 변위가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 그 변위차이는 연암지반보다 풍화토지반에서 더 큰 것을 알 수 있다. 천단부와 어깨부에서는 전단력 때문에 비대칭으로 힘이 작용하여 같은 높이의 좌우 변위값이, 측벽부에서는 대칭적으로 보인 것과 달리, 서로 상이하게 나오는 것을 알 수 있었다. 이러한 값들의 차이는 연암지반보다는 풍화토지반이 크게 나타나고 있다.

기존 연구(박시현과 신용석, 2008)에서 개발된 수치 역해석모듈은, 최소 3개의 변위 데이터의 입력만으로도 해석이 가능하다. 본 연구에서는 Table 2에서 구한 변위들 중에서 음영부분 6개의 변위를, 천단부와 측벽부(CASE 5~10), 천단부와 어깨부(CASE 11~13)로 구분하여 수치 역해석모듈에 4개의 변위값(천단부의 x,y 좌우측의 x)을 입력하였다. 변위를 입력함에 있어서는 상용 FEM 프로그램의 해석결과를 100%, 70% 입력하는 두 가지 방법을 고려하였다. 70%만을 입력한 것은, 실제 터널시공현장에서 계속되는 변위값이 총변위보다 적음을 반영한 것이다. 또한, 해석모듈을 이용하여 수치해석을 수행하기 위해서는 먼저 연직응력에 대해 가정할 필요가 있으며, Table 3과 같이 토피압 100%, 70% 두

가지 방법을 고려하였다. 토피압 70%만을 가정한 것은, 실제 터널시공현장에서의 연직토압이 토피압과 서로 다를 수 있음을 반영한 것이다.

Table 3에서 보는 바와 같이 탄성조건(CASE 5, CASE 11)에 대해서는 초기응력조건을 완벽에 가깝게 재현하고 있는 것을 알 수 있다. 탄소성지반에서 발생한 변위를 활용한 경우(CASE 6, CASE 9, CASE 12, CASE 13)는 원지반의 물성치와 응력치들과 서로 다른 것을 쉽게 알 수 있다. 이것은, 수치 역해석모듈이 탄성이론에 근거하여 개발된 것에서 그 원인을 찾을 수 있다. 실제 지반이 탄성지반보다는 탄소성지반에 더 가까우며, 따라서 탄성이론에 근거를 둔 수치 역해석모듈을 사용하는 경우에는 Table 3에서와 같이 원지반의 조건을 100% 재현하지는 못하는 것을 나타내고 있다. Table 2에서 살펴본바와 같이, 풍화토지반보다 연암지반에서는 탄성, 탄소성 해석시 굴착변위의 차이가 심하지 않았다. 이러한 영향은 Table 3에서도 그대로 나타나 있다. 즉, 연암지반에 대한 해석사례(CASE 9~10)에서는 원지반 조건에 근접한 결과치를 보여주고 있다. 그러나, 탄성 및 탄소성 해석시 굴착변위의 차이가 크게 나타난 풍화토 지반에서는 탄소성 해석 결과(CASE 6~8) 원지반 조건과 뚜렷한 차이를 보인다. CASE 13은 천단부 및 어깨부의 x,y 변위 모두를 적용하여 초기응력을 산출한 결과이고 탄소성의 경우와 같이 원지반조건을 재현하지는 못하는 결과를 나타내고 있다. 그러나, 여기서 지적해 둘 것은 역해석모듈을 활용하는 최종목적이 Table 3의 원지반 조건의 재현이 아니라, 이들을 이용하여 터널

Table 3. Assumptions and results obtained from the feedback analysis module.

CASE	Assumptions of analysis			Results of analysis (MPa)		
	Ground type	Displacements	Vertical stress	E	σ_x	τ_{xy}
5	W/S in E/B	100%	-1.03 (100%)	98.00	-0.49	-0.20
6	W/S in EP/B	100%	-1.03 (100%)	51.26	-1.02	-0.02
7	W/S in EP/B	70%	-1.03 (100%)	73.23	-1.02	-0.02
8	W/S in EP/B	70%	-0.72 (70%)	51.26	-0.71	-0.01
9	S/R in EP/B	100%	-1.03 (100%)	868.57	-0.71	-0.19
10	S/R in EP/B	70%	-0.72 (70%)	868.57	-0.50	-0.13
11	W/S in E/B	100%	-1.03 (100%)	98.01	-0.49	-0.20
12	W/S in EP/B	100%	-1.03 (100%)	51.70	-0.98	0
13	W/S in EP/B	100%	-1.03 (100%)	50.84	-0.97	0
Reference	W/S Initial condition			98.00		
	S/R Initial condition		-1.03	980.00	-0.49	-0.20

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

Table 4. Strains calculated from the crown settlements.

CASE	Crown settlements(mm)	Strains (%)
		crown settlements/tunnel radius
1	68.8	1.38
2	117	2.34
3	7.18	0.14
4	7.51	0.15

주변지반의 변형률을 직접적으로 계산해 내고 그 값으로 터널안정성을 평가하는 것이다.

수치해석 기법을 이용한 한계변형률 개념의 고찰

한계변형률 개념을 검토하기 위하여, 앞에서 수행한 수치해석 결과를 이용하여 터널안정성 평가를 수행하였다. 터널의 안정성 평가를 수행하기 위해서는, 한계변형률 도표를 이용하여 다음의 두 가지 방법을 활용하였다.

먼저, 터널굴착으로 인해 계산된 천단변위를 터널의 반경으로 나누어서 변형률을 구하는 간이평가법을 활용하는 방법이다. 이 방법은 Sakurai(1997)와 Hoek and Marinos(2000)에 의해 실무에 적용되기도 하였다. 여기서는, 탄성 및 탄소성 지반에 대해 상용 FEM 프로그램에 의한 결과를 이용하여 한계변형률 개념으로 평가하고자 한다. Table 4는 앞에서 수행한 결과인 천단변위 (Table 2에서 A점의 Y 변위)를 이용하여 구한 변형률을 나타낸 것이다. 실제 터널현장에서도 연직 천단변위 측정에 많은 노력을 기울이고 있어, 이를 활용하여 안정성을 평가하는 것은 의미있는 일이다. Fig. 4에는 Table 4의 변형률을 한계변형률 도표에 나타낸 것이다. Fig. 4의 한계변형률 도표에서는 지반을 강도에 의해 크게 6개로 구분하고 있으며, 이는 ISRM(1981)의 기준을 적용하여 실무적으로 활용하기 편리하도록 구분한 것이다.

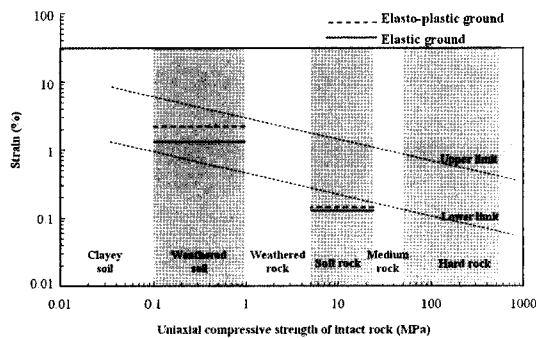


Fig. 4. Tunnel safety evaluation using crown settlements.

풍화토 지반의 결과를 보면, 탄성, 탄소성 해석 모두 하한 경계치를 초과하고 있으며, 상한 경계치 보다는 낮다. 연암 지반은 해석결과 모두 하한 경계치보다 낮다. Fig. 4를 이용하여 터널의 안정성을 평가해 보면 다음과 같이 결론지을 수 있다. 풍화토지반에서는 탄성, 탄소성 지반 모두 상한 및 하한 경계선의 중앙에 위치하고 있어 한계변형률의 범위 내에 위치하고 있어, 터널안정성에 주의가 필요하며, 탄소성지반이 탄성지반보다 더욱 불리한 상태로 평가된다. 따라서 터널의 안전성을 충분히 확보하기 위해서는 지보재를 타설하여, 변위발생량을 줄일 필요가 있음을 의미한다. 연암지반에서는 탄성, 탄소성 지반 모두 무지보 상태에서도 터널의 안전성이 확보된 것으로 평가할 수 있다.

한계변형률 개념을 활용하기 이전에는, 지반의 변형 정도를 활용하여 안정성을 평가할 때 지반요소가 탄성상태인지 또는 소성상태인지를 파악하는 것이 일반적이었다. 비록 지반요소가 소성상태인 것을 확인하였다더라도, 그것이 곧바로 안정성을 판단하는 요인으로 활용되는 못한 것이 현실이었다. 그러나 본 연구에서 살펴본 바와 같이 한계변형률 개념을 활용하게 되면, 터널굴착시 일반적으로 예측되는 천단변위를 활용하여 터널의 안정성을 정량적으로 평가 가능하며, 따라서 실무에 활용성이 기대된다.

다음으로는 기존 연구에서 개발한 수치 역해석모듈을 이용하는 방법이다. 수치 역해석모듈에 의해 구해진 변형률은 최대압축변형률을 의미하며, 이를 한계변형률 도표에 접시하여 터널의 안정성을 평가하게 된다. 한계변형률 개념을 처음 제안한 Sakurai는 한계변형률 도표를 작성하기 위하여 코아시편에 대한 일축압축시험을 실시하였다. 실질적인 측면에서 한계변형률 도표는 지반재료의 압축변형률을 나타낸 것이다. 이러한 관점에서 해석모듈을 이용하여 터널 주변지반의 (최대)압축변형률을 직접 구하고 이를 활용하여 터널의 안정성을 평가하는 것이 보다 합리적인 것이다.

Table 3에서 구한 해석결과를 활용하여 터널주변지반의 압축변형률의 분포를 구하면 Fig. 5와 같다. Fig. 5의 결과를 이용하여 터널주변지반의 최대압축 변형률을 정리하면 Table 5와 같다. Table 5에는 Table 4의 내용도 함께 정리하였다. Table 5의 두 종류의 변형률을 한계변형률 도표에 나타내면 Fig. 6과 같다.

Fig. 6에는 Fig. 4의 천단변위에 의한 변형률도 함께 나타내었다. 풍화토, 연암지반에 대해 모두 역해석모듈의 결과가 천단변위에 의한 간이평가법의 결과보다 변

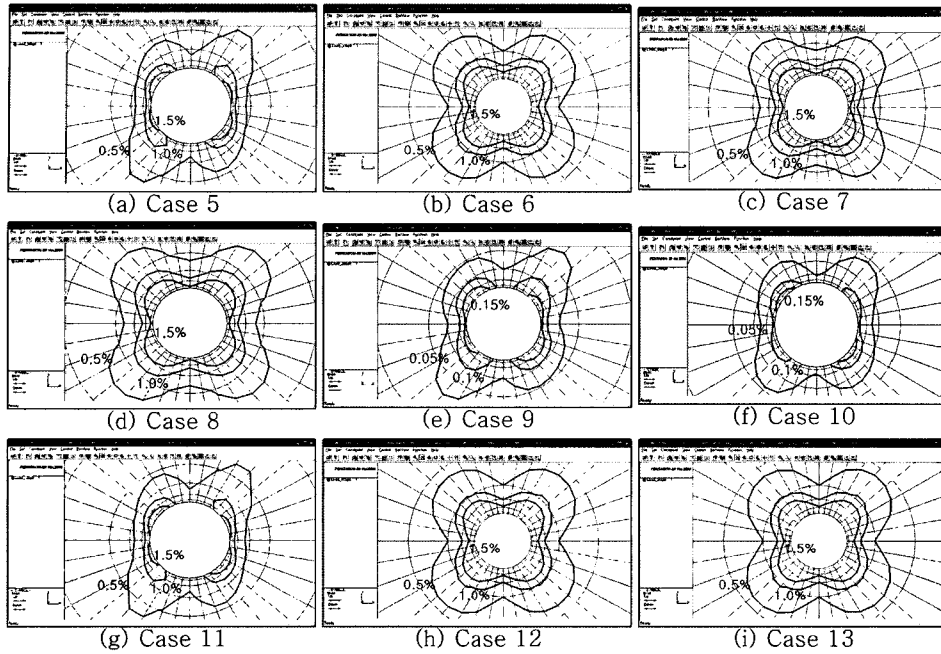


Fig. 5. Compressive strain distribution of ground by tunnel excavation.

형률이 더 크게 나타난 것을 알 수 있다. 역해석 모듈에서는 굴착변위 및 수직응력조건을 원지반 조건보다 줄여서 입력하였음에도 불구하고, 천단변위에 의한 변형을 보다 더 높은 변형률이 발생하였다. 이러한 결과는 실무적인 측면에서 활용성이 기대된다. 즉, 천단변위에 의한 간접적 평가법으로 안전성을 미리 파악하고, 보다 정밀

한 안전성 판단이 필요한 경우에는 역해석모듈을 이용하여 보다 상세한 검토를 수행할 수 있기 때문이다. 또한, 탄소성 지반에 대해 다양한 해석조건에서도 한계변형을 도표상에서는 공학적 범위내에서 충분히 실무에 활용 가능한 것을 확인하였다.

Table 5. Maximum compressive strains calculated by the analysis module.

CASE	Crown settlements (mm)	Strains(%) obtained from	
		crown settlements /tunnel radius	analysis module
1	68.8	1.38	-
2	117	2.34	-
3	7.18	0.14	-
4	7.57	0.15	-
5	-	-	2.06
6	-	-	4.16
7	-	-	2.91
8	-	-	2.91
9	-	-	0.25
10	-	-	0.18
11	-	-	2.06
12	-	-	4.02
13	-	-	4.09

현장계측사례를 이용한 한계변형을 개념의 고찰 실제 터널현장에서 시공 중 시행된 터널계측자료의 천단변위 결과로부터 변형률을 산출하여 한계변형률개념에 의한 안정성 평가를 수행하였다. 본 터널은 강원도

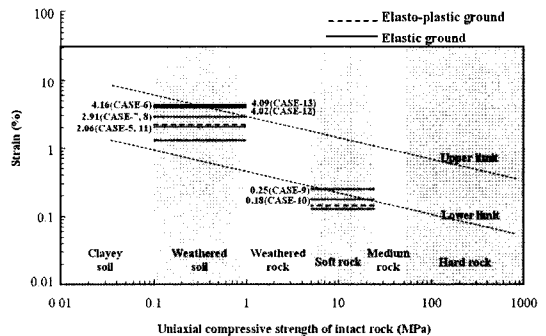


Fig. 6. Tunnel safety evaluation through maximum compressive strain.

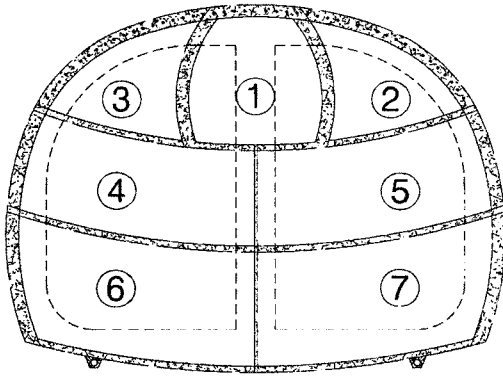


Fig. 7. Excavation step in tunneling.

에 시공중인 병렬터널로서, 연장 1200 m, 굴착직경 17 m에 이르는 대단면 터널이다. 터널주변의 주암종은 편암류와 안구상 편마암이며, 석회 규산염암과 암백류가 국지적으로 분포되어 있다.

한계변형률 개념에 의한 안정성평가를 위하여 지반상태가 비교적 불량한 지점을 선택하였다. 대상지점은 Fig. 7과 같이 분할굴착이 시행되었다. 평가위치 지점의 지반상태는 face mapping 자료(Table 6)를 토대로 결정하였다. 상부 중앙부분의 굴착은 2005년 11월 15일에 실시하였으며, 첫 번째 계측기(천단 및 좌우측 벽체)의 설치 및 측정은 2일 후인 11월 17일 시행되었다.

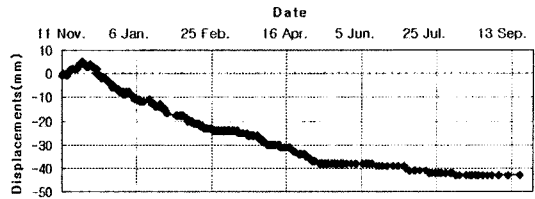


Fig. 8. Variation of measured crown settlement during excavation.

12월 5일 ②에 해당하는 상반 우측부를 굴착, ①의 우측 벽체에 설치되어있던 계측타기는 굴착과 동시에 파손되어 2일 후인 12월 7일 영점 조정 후 ②번의 우측 벽체지점으로 이동, 계측이 실시되었다. 이후 12월 15일, 상부의 좌측부분 ③번이 굴착된 것을 face mapping 자료를 통하여 확인하였다. 좌측부분 또한 우측과 같이 굴착에 의한 계측타기 파손으로 인하여 5일 후인 12월 20일, 좌측부에 다시 설치 된 것을 알 수 있었다. 이후 2006년 2월 3일 중반 좌측굴착④ 및 2006년 4월 8일 하반 좌측굴착⑥이 진행되었으며, 이후 2006년 10월 8일(대략11개월간)까지 계측이 꾸준히 진행되었다.

천단부의 계측타기는 처음 설치한 상태부터 계속적으로 계측관리가 이루어졌다. 천단변위를 시간에 따라 Fig. 8에 나타내었다.

Table 6. Excavation step and Face mapping.

Classification	Upper-middle			Upper-right			Upper-left		
Excavation Step									
Joints	J1	J2	J3	J1	J2	J3	J1	J2	J3
Strength of intact rock	7	7	7	7	7	7	2	2	2
RQD	13	13	13	17	17	17	8	8	8
Joint spacing	5	10	10	8	10	10	5	5	8
Condition of joints	1	14	7	6	16	16	4	7	9
Groundwater	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Strike and dip orientation of joints	-12	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5
Total	29	54	47	48	60	60	29	32	37
RMR Score			43			56			32

Table 7. Strains at the crown according to the excavation step.

Date	Excavation step	Equivalent radius(m)	Displacements (mm)	Strain(%)	At Fig.9
2005.12.15	Upper-right	5.38	2	0.037	①
2006.02.03	Middle-left	7.97	18	0.225	②
2006.04.08	Lower-left	10.06	30	0.298	③
2006.09.19	Lower-left	10.06	43	0.427	④

Fig. 8을 보면, 처음 상반중앙부 굴착시 천단계측 타 것이 상부로 움직이다가 상반우측 굴착시점(12월 5일) 부터 하부로 침하하면서 하반굴착까지 계속하여 변위가 증가하고 있다. 2006년 9월 19일 계측을 끝마친 시점까지의 최종변위는 43 mm로, 4월8일 하반굴착을 시작한 일로부터 최종변위까지는 10 mm 이상의 변위가 더 발생하였으며, 5월 8일 이후부터는 변위 수렴성이 비교적 뚜렷하다.

터널안정성 평가를 위한 한계변형률 도표에 도식화하기 위해서는 변형률을 산출하여야 한다. 이를 위해 시간에 따른(시공단계별) 변위값들을 터널의 설계반경으로 나누어 쉽게 구할 수 있다. 그러나 실제 터널시공에 있어 한번에 전단면굴착을 하지 않는 분할굴착의 경우에는 시공단계(분할굴착)로 인해 터널반경은 연직부와 수평부의 길이가 서로 다르다. 따라서 굴착된 실단면적을 고려하여 등가반경을 구하였고, 이를 이용하여 변형률을 산출하였다. 시공에 따른 천단지점의 등가반경 및 변위는 Table 7에 정리하였다.

한계변형률 개념을 이용한 터널 안정성 평가를 위하여 굴착지반의 지반조건을 일축압축강도 및 face mapping 자료 등을 고려하여 연암으로 구분하였다.

Fig. 9에는 Table 7의 시공단계에 따른 변형률을 점시한 것이다. 상반굴착시(①)까지의 변형률은 하한경계선

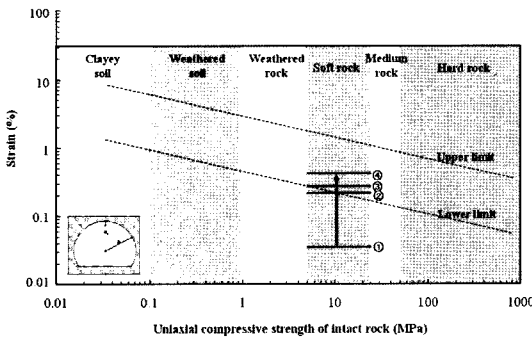


Fig. 9. Variations of strains at the crown according to the excavation step.

보다 아랫부분에 위치하여 충분한 안정성이 확보된 것으로 판단된다. 상반굴착이 완료된 후, 중반좌측굴착(②) 시 변형률이 크게 증가하여, 하한경계선에 도달한 것을 알 수 있다. 그 후 중반굴착이 완료되는 시점까지 변형률의 증가는 크지 않다가 다시, 하반굴착후(③→④) 변형률이 크게 증가하여, 최종적으로 상한 및 하한선의 중간 지점에서 멈추고 있는 상태이다. 본 터널은 국내에서 보기드문 대단면 굴착으로, 수회에 걸친 분할굴착을 실시하는 등, 현장시공시 많은 관심이 집중되었기 때문에, 계측값의 신뢰도는 높다고 볼 수 있다. 이러한 관점에서 본 터널에 대해 한계변형률 개념에 의한 안정성 평가 결과, 터널 시공 및 지보재 지보효과가 적절히 관리되고 있는 상태인 것으로 판단된다.

결 론

본 연구를 통하여 도출된 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서는 수치해석적인 방법과 현장계측 결과를 활용한 실증적인 방법으로 한계변형률 개념에 의한 터널안정성 평가를 수행하였다. 그 결과, 터널굴착시 발생하는 변위정보를 이용하더라도, 터널의 안정성을 정량적으로 평가하는 것이 가능함을 확인하였다.
- 2) 기존 연구에서 개발한 수치 역해석모듈은 탄성조건(CASE 5, CASE 11)에 대해서는 초기응력조건을 완벽하게 재현하고 있으나, 탄소성지반(CASE 6, CASE 9, CASE 12, CASE 13)에 대해서는 원지반 물성치를 완벽하게 재현하지는 못하는 것으로 나타났다.
- 3) 그러나, 수치 역해석모듈을 이용하는 것이 천단변위를 터널반경으로 나누어 구하는 간이평가법에 의한 변형률보다 더 크게 나타나, 터널안정성에 대해 보다 상세한 검토가 가능하여 실무활용성이 기대된다.
- 4) 현장계측 사례를 이용한 한계변형률 개념의 고찰에서는, 시공이 진행됨에 따라 굴착단면적이 변화하여 등가반경에 의해 변형률을 산정하는 것이 합리적인 것으로 나타났다.

사 사

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

참 고 문 헌

- 대한터널협회, 2007, 건설교통부 재정 터널설계기준.
- 박시현, 신용석, 2007, 한계변형률 개념을 활용한 터널 안정성 평가에 관한 연구, 한국지반공학회논문집, 23(5), pp.29-42.
- 박시현, 신용석, 2008, 터널굴착 변위를 활용한 시공중 피드백 해석기법 연구, 한국지반공학회논문집, 24(1), pp.81-89.
- 에메랄드소프트사, 2004, PENTAGON-3D 사용자 매뉴얼.
- 천병식, 남순성 1996, 서울지하철 터널의 계측관리 기준치에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 16(III-1), pp.47-59.
- British Tunnelling Society, 2004, Tunnel lining design guide, ICE.
- Hoek, E. and Marinos, P., 2000, Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses, Tunnels and Tunnelling.
- ISRM. 1981, Basic geotechnical description of rock masses, Int J. Rock Mech Min. & Geomech Abstr. 18, pp.85-110.
- Sakurai, S., 1997, Lessons Learned from Field Measurements in Tunnelling, Tunnelling and Underground Space Technology, 12(4), pp. 453-460.

2008년 8월 20일 원고접수, 2008년 9월 16일 게재승인

박시현

한국시설안전공단 지하시설실
411-758, 경기도 고양시 일산서구 시민대로 1160
Tel: 031-910-4085
Fax: 031-910-4178
E-mail: parksh@kistec.or.kr