

한계변형률 개념을 활용한 터널안전성 평가

Tunnel Safety Assessment by using the Concept of the Critical Strain in the Ground

박시현¹⁾, Si-Hyun Park, 박성근²⁾, Sung-Kun Park

¹⁾ 한국시설안전공단 일반도로팀 과장, Research Manager, Inspection Div. KISTEC

²⁾ 한국시설안전공단 일반도로팀 사원, Research Assistant, Inspection Div. KISTEC

SYNOPSIS : In this study, an application method of critical strains concept for tunnels' safety by using the values of measured displacements which are obtained in the field is discussed. The aim is to: (1) study on the engineering meanings of critical strains concept by reviewing the previous researches and application examples with measured displacement values; (2) study on the engineering reasonability of critical strains concept with the view point of a tunnel engineering and a geotechnical engineering; (3) study on the features of ground deformation due to tunneling and reciprocal relation between total displacement and measured displacement; (4) evaluate a tunnel safety by using domestic measurements collected in the field; and (5) re-evaluate the control criteria which were previously used in the field, with the view point of critical strains concept. Consequently, it was confirmed that critical strains in the ground has a reasonability and a possibility of unified or common concept with the view point of a tunnel engineering.

Keywords : Critical strain, Measured displacements, Control criterion, Tunnel safety

1. 서론

본 연구에서는 시공중인 터널의 안전성을 정량적으로 평가하기 위한 실무적인 접근을 수행한 것이다. 이를 위해 한계변형률 개념을 터널시공에 도입하였으며, 한계변형률 개념의 활용성을 높이기 위하여, 먼저, 한계변형률 개념을 활용하기 위한 공학적 타당성을 제시하였다. 이어서 불연속성 특성을 내포한 지반의 특성을 반영하는 방법과 해결책, 한계변형률이 가지고 있는 보수적인 관점에서의 안전율의 종류와 그 정도를 상세히 검토하였다. 아울러, 지반의 일축압축강도만을 활용하는 것이 아닌 RMR 값등 다양한 지반정보를 활용할 수 있는 도표를 제안하였으며, 기존에 제안된 국가별 시공관리기준치를 한계변형률의 관점에서 통일적으로 고찰하였다. 마지막으로 실제 현장에서 계측된 데이터를 활용하여 한계변형률 관점에서 터널 안전성을 평가하였다. 결론적으로 본 연구에서 제안한 한계변형률 개념을 터널시공 현장에 활용함으로써 실시간으로 정량적인 안전성 평가가 가능한 것으로 판단되며, 국내는 물론 해외의 시공현장에서도 폭넓게 활용되기를 바란다.

2. 현재 터널시공현장에서의 안전성 판단방법

2.1 시공현장에서의 계측현황

실제 터널 시공현장에서 시공시 안전성을 어떻게 평가하고 있는 것일까. 어떤 시공현장에서는 안전성

판단의 기준은 계측결과에 의존하고 있다. 즉, 터널시공현장에서도 계측을 실시하는데, 일상적으로 실시되는 일상계측(주로, 변위개념에 기초를 둔 계측이다)과, 특별한 경우(터널구조물의 안전성이 확보되기 어렵다고 판단되는 경우)에 실시하는 정밀계측(응력개념에 기반을 두고 있음)을 실시하도록 규정하고 있고, 계측도 실시하고 있다. 또 계측결과를 비교할수 있는 관리기준치라는 것이 있어 얼핏보기에는, 시공현장의 계측이 잘 정비/관리되고 있는 듯하다. 그러나, 실제 시공현장에서의 계측은 우리들이 생각하듯이 이상적이지 않는 것이 현실이다. 각 나라별, 기관별로 현장에서 사용되고 있는 관리기준치를 표로 제시하면 다음과 같다.(구두 발표시 제시함)

현장에서 계측되는 지반의 변위 계측결과는 계측지점의 지질조건하에서 실제 굴착터널의 역학적 거동을 수치적으로 보여주는 의미 있는 정보로서 이를 제대로 분석·평가할 수만 있다면, 타설된 지보재에 대한 지보효과를 정량적으로 평가할 수 있을 뿐만 아니라, 굴착중인 터널의 안정성을 판단하는데 매우 중요한 자료로 활용될 수 있음은 두 말할 필요가 없다.

2.2 실시간 안전성 평가 방안

이러한 관점에서, 현장에서 계측된 계측정보를 이용하여 터널의 정량적 안전성을 평가할수 있는 방법이 있는 것인가. 기존의 정성적, 경험적 방법과는 다른 방법으로 역학적 개념에 기초를 둔 합리적인 방법으로 터널안전성을 신속하게 평가하는 방법이 과연 존재하는 것일까. 이에 대한 하나의 해결방법(정답은 누구도 모른다고 생각하기 때문에)으로 본 논문에서는 한계변형률 개념이라는 다소 생소한 방법을 소개하고자 한다. 물론 이 방법은 이미 제안된지 한참 오래되었음에도 불구하고 아직 국내에 크게 알려져 있지 않는 방법이다. 필자 등은 이러한 점에 착안하여, 기존에 제안된 한계변형률 개념을 공학적인 측면에서, 그리고 역학적인 측면에서 명확하게 그 근거, 타당성을 새롭게 정립하여 터널실무에 보편적으로 활용하기에 남득이 가도록 하여 널리 활용코자 함에 목적을 두고 있다.

3. 터널안전성 평가에 활용되는 한계변형률 개념이란

3.1 한계변형률의 정의

한계변형률 개념이란 도대체 무엇일까.. 우리나라에 이런류의 연구가 소개된 적은 없는가 살펴보니, 1990년대 초에 임계변형률이라는 용어로 소개된 적이 있는 것을 확인하였으나, 그때는 주로 외국에서 소개된 개념을 그대로 전달하는 정도였던 것 같다. 사실, 한계변형률이라는 것은 일본의 S. Sakurai (고베대학교 명예교수)에 의하여 처음으로 제안되었으며, 초기에는 주로 암석/점토 등의 실내실험 결과를 토대로 정립된 개념이다. 이것이 점차 시간이 경과되면서 터널시공현장으로 확장되어 사용되게 되었다. 먼저, 한계변형률(ϵ_0)은 그림 1과 같은 무결암 암석시편(Intact rock specimen)의 일축압축시험 결과인 응력-변형률 관계로부터 구해졌다. 즉, 한계변형률은 암석시료의 일축압축시험으로부터 초기 탄성영역의 거동특성과 파괴시의 일축강도를 이용하여 계산되는 변형률로서 일반적으로 파괴변형률(ϵ_f)보다 항상 작은 값을 가지게 된다.

흙 및 암석에 대한 한계변형률(ϵ_0)과 일축압축강도(σ_c)의 관계는 그림 2와 같다. 그림 2에서 나타낸 바와 같이 한계변형률은 일축압축강도가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내고 있다. S. Sakurai(1982)는 토사와 암석의 Rf는 대체적으로 0.05~0.8의 범위이며 일축압축강도가 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. 여기서 암석의 Rf 범위는 0.05~0.6이며, 토사의 경우에는 0.2~0.8로 조사되었다. 이 값을 이용하여 암석과 토사에 대한 파괴변형률을 식 3.2를 이용하여 계산하면 각각 0.1~2.5%, 1.3~40%로 계산되며 파괴변형률이 한계변형률보다 최대 2.5~4.0배 정도 더 큰 것을 알 수 있다. 이러한 관점에서, 만약에 우리가 파괴변형률 값 대신에 한계변형률 값을 실무에 활용한다면, 이만큼의 안전율을 내포하고 있다는 것을 의미한다고 볼수 있다. 사실 한계변형률 개념안에는 여러종류의 다양한 안전율이 존재하고 있다. 초기

제안자는 이들에 대해서 명확하게 밝히지 않았기 때문에, 실무에 활용되는 것이 다소 주저되었던 것으로 보여진다.

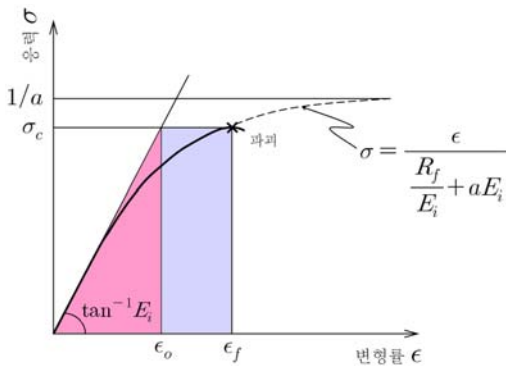


그림 1. 무결암 암석시편의 응력-변형률선도

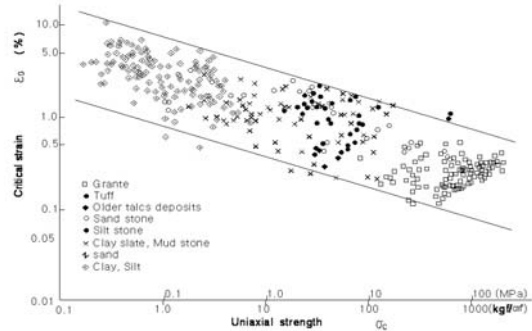


그림 2. 실내시험에 의한 한계변형률과 일축압축강도와의 관계(S. Sakurai, 1982)

3.2 한계변형률을 활용한 사례

한계변형률 개념에 토대를 둔 연구 사례는 사실 많지 않다. 제안시점을 감안한다면, 사실 많은 수의 연구가 소개되었을 법한데도, 국내는 거의 전무하며, 해외에서도 크게 관심을 받지 못했던 것 같다. 그러나 해외사례를 찾아보면 그나마 다행스러웠던 점은, 필자 자신의 명성도 명성이지만, 세계적인 암반 공학의 대가이신 Hoek 선생이 2000년대에 들어서면서부터 한계변형률 개념에 관심을 가지게 되었고 몇편의 연구사례가 제안되었다는 점이다.

Sakurai는 실내시험결과에 의해 한계변형률 개념을 정립한 이후 다시 그 결과를 터널현장으로 활용을 시도하였다. 그림 3은 지반굴착으로 인하여 발생하는 천단변위(계측변위)를 터널반경으로 나누어 그 값을 종축의 변형률로 설정하고, 천단변위를 측정된 지점에서의 지반의 일축압축강도를 횡축으로 하여 수집한 데이터를 도시한 것이다. 이와 거의 동일한 개념을 Hoek도 활용하였으며, 그림 3에 두 연구자의 연구결과를 동시에 플롯하였다. 그림 3에서 두 개의 점선과 원형데이터는 Sakurai의 연구논문, 붉은실선과 삼각형데이터는 Hoek의 연구논문에서 각각 발췌한 것으로 두 연구결과를 하나의 그림에 그려보면, 그림에서 보듯이 동일한 개념에 근거를 두고 있음을 확연하게 이해할 수 있다. 또한 두 연구 모두 터널시공도중 변상이 발생한 경우에는 진한색으로 표시하였다. Sakurai의 상한선(점선) 부근과 Hoek의 경계선(실선) 상부에 도시된 계측치들은 터널안정성이 확보되지 못하고 있는 것을 쉽게 알 수 있다. 사실상 이 그래프가 가지는 의미는 실용적인 관점에서 매우 크다. 즉, 현장의 변위계측치를 이용하여 구조물 안전성을 파악할수 있게 되는 길이 열린것이다. 이론적인 근거는 차치하더라도, 실무적으로 이만한 정도의 데이터로 검증이 되었다는 것은 이미 신뢰성이 검증되었다고 보아도 무방하다는 것이 필자의 생각이다.

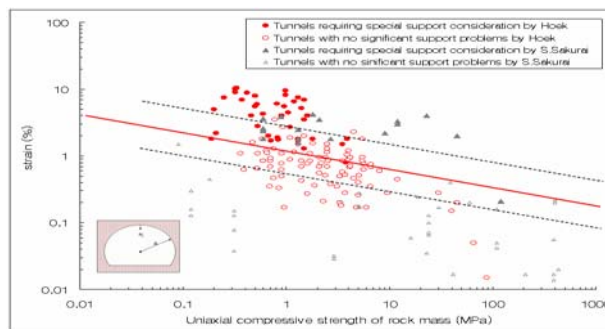


그림 3. Sakurai와 Hoek의 연구결과 통합

4. 국내 현장계측데이터를 활용한 안전성 평가 사례

두 곳의 터널현장에서의 계측자료와 막장관찰 자료를 활용하여 터널의 안전성을 본 연구에서 제안한 한계변형률 개념으로 평가하여 보았다. A터널의 경우, 전단면 굴착이 실시된 경우이며, B터널의 경우는 굴착을 여러 단면으로 나눈 분할 굴착을 실시한 경우이다. 각각의 현장에 막장관찰자료는 표 4, 표 6에 제시되어 있다. 또한 한계변형률 도표를 이용하기 위하여 터널의 등가반경과 변위, 계산된 변형률은 표 5, 표 7에 제시되어 있다.

표 4. A터널 Face Mapping

굴착순서	전단면 굴착		터널 막장 Face Mapping Sheet
Face Mapping	암석의 강도	2	
	RQD	3	
	불연속면의 간격	5	
	불연속면의 상태	5	
	지하수위상태	7	
	불연속면의 방향성에 대한 보정	-5	
	RMR Score	20	

표 5. A터널의 천단변형률

시공단계	등가반경(cm)	변위(cm)	변형률(%)
전단면 굴착	500	11	2.2

표 4. B터널의 계측기 설치순서 및 Face Mapping

굴착순서	상반 (우측, 표5의 ①)			상반 (좌측, 표5의 ②)			중반 (좌측, 표5의 ③)			하반 (좌측, 표5의 ④)			
	개요도												
Face Mapping	절리	J1	J2	J3	J1	J2	J3	J1	J2	J3	J1	J2	J3
	암석의 강도	7	7	7	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	RQD	17	17	17	8	8	8	3	3	3	3	3	3
	불연속면의 간격	8	10	10	5	5	8	5	5	8	5	5	8
	불연속면의 상태	6	16	16	4	7	9	1	1	6	1	1	6
	지하수위상태	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	불연속면의 방향성에 대한 보정	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5
	총점	48	60	60	29	32	37	21	21	29	21	21	29
RMR Score	56			33			24			24			

표 5. B터널의 시간(시공단계)에 따른 천단변형률

날짜	순서	시공단계	등가반경(m)	변위(mm)	변형률(%)
2005.12.05	①	상반우측굴착	5.38	2	0.037
2005.12.15	②	상반좌측굴착	6.19	9	0.140
2006.02.03	③	중반좌측굴착	7.97	18	0.225
2006.09.19	④	하반좌측굴착	10.06	43	0.427

위의 두 현장의 천단변위와 RMR, 일축압축강도 등을 이용하여 한계변형률 도표에 나타내었다(그림 5). A터널의 경우, 천단변위가 많이 발생한 터널로 한계변형률 도표의 상한선보다 더 높은 지점에 나타나 있어 매우 위험한 상태임을 알 수 있었다. 실제로 본 터널은 그림 4에서와 같이 천단부 숏크리트에 종방향 균열이 크게 발생하여, 터널안전성에 문제가 발생하였다. 한편, B터널은 단면이 확폭되어 가면서 RMR값 등의 지반 물성치가 달라지는 것을 볼 수 있으며, 조사된 최종단계에서의 RMR 값은 24점, 일축압축강도는 2점(5~25MPa), RQD는 3점(25%이상) 등으로 각각 조사되었다. 그림 5에서와 같이, 굴착단면이 점차 넓어질 때마다 변위가 달라지면서 그래프상에서의 플롯가 이동되어 지는 것을 볼 수 있다. 최종적으로 본 터널의 ④지점은 상한선과 하한선 중간정도 위치하는 것으로 나타났으며, 향후 추가 확폭부분이 남아있기 때문에, 시공과 계측에 신중을 기하여야 할 것으로 판단된다.

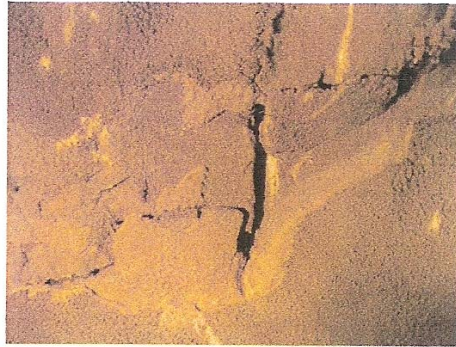
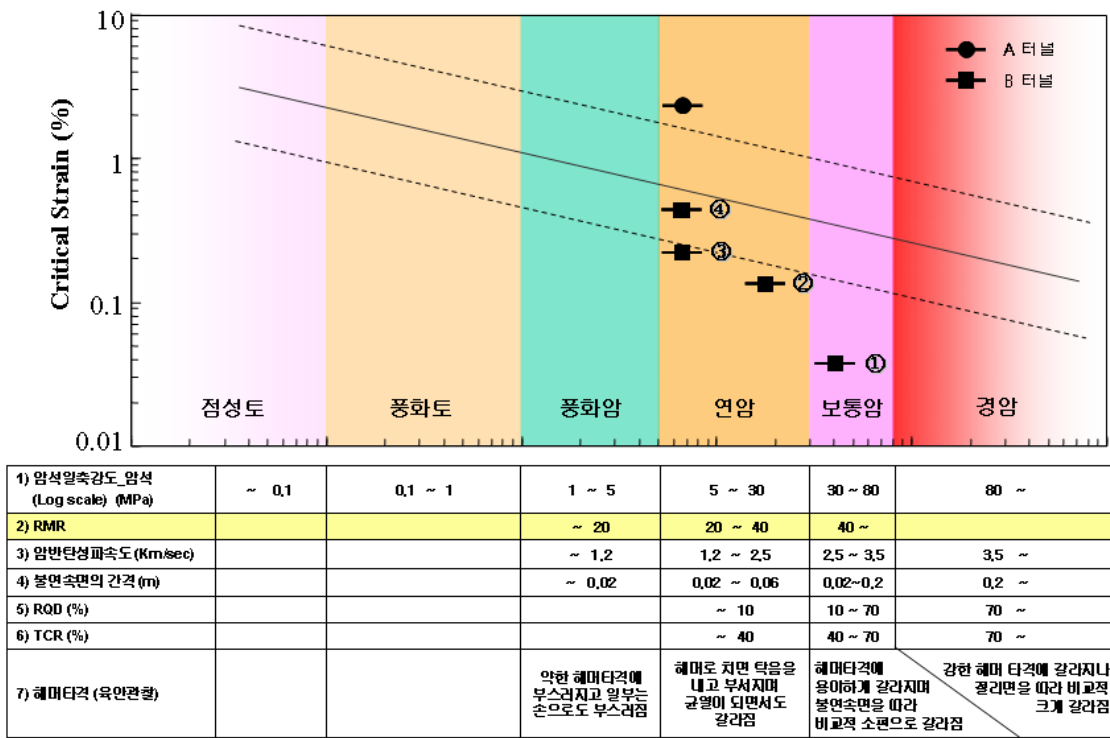


그림 4. 숏크리트 균열사진



※ 활용자료 : ISPM(1961), 철도시설공단 설계기준(2005), 엔지니어링협회지반조사표준품셈(2004) 등

그림 5. 터널현장의 계측사례를 이용한 안전성평가

참고문헌

1. 신용석, 박시현 (2009), “터널공학을 중심으로 한 한계변형률의 공학적 적용성”, 한국터널공학회논문집, 제11권 4호 pp.403-410.
2. 박시현, 신용석, 배규진 (2008), “지반의 한계변형률을 이용한 터널수치해석 및 현장적용성 연구”, 한국터널공학회논문집, 제10권 2호 pp.129-137.
3. 박시현, 신용석 (2007), “한계변형률 개념을 활용한 터널 안정성 평가에 관한 연구”, 한국지반공학회논문집, 제23권 5호, pp.29~41.
4. 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.
5. Hoek, E. and Marinos, P.(2000), "Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses", Tunnels and Tunnelling.
6. Sakurai, S. (1997), "Lessons Learned from Field Measurements in Tunnelling", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.12, No.4, pp. 453-460.
7. 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.