Int. J. Highw. Eng. Vol. 17 No. 6 : 27-32 DECEMBER 2015
http://dx.doi.org/10.7855/IJHE.2015.17.6.027

터널천단변위와 암석 또는 암반의 일축압축강도를 이용한 시공 중인 터널의 예비 안정성 평가

The Pre-Evaluation of Stability during Tunnel Excavation using Unconfined Compression Strength of Intact Rock or Rock Mass and Crown Settlement Data

박 영 화 Park, Young Hwa | 태현엔지니어링 전무이사 (E-mail : 5285854@hanmail.net)
문 홍 득 Moon, Hong Duk | 정회원 · 경남과학기술대학교 토목공학과 교수 · 교신저자 (E-mail : hdmoon@gntech.ac.kr)
하 만 복 Ha, Man Bok | 정회원 · 경상대학교 환경 및 지역발전연구소 연구원 · 공학박사 (E-mail : doro3000@hanmail.net)

ABSTRACT

PURPOSES : It is difficult to estimate tunnel stability because of lack of timely information during tunnel excavation. Tunnel deformability refers to the capacity of rock to strain under applied loads or unloads during tunnel excavation. This study was conducted to analyze a methods of pre-evaluation of stability during tunnel construction using the critical strain concept, which is applied to the results of tunnel settlement data and unconfined compression strength of intact rock or rock mass at the tunnel construction site.

METHODS : Based on the critical strain concept, the pre-evaluation of stability of a tunnel was performed in the Daegu region, at a tunnel through andesite and granite rock. The critical strain concept is a method of predicting tunnel behavior from tunnel crown settlement data using the critical strain chart that is obtained from the relationship between strain and the unconfined compression strength of intact rock in a laboratory.

RESULTS : In a pre-evaluation of stability of a tunnel, only actually measured crown settlement data is plotted on the lower position of the critical strain chart, to be compared with the total displacement of crown settlement, including precedent settlement and displacement data from before the settlement measurement. However, both cases show almost the same tunnel behavior. In an evaluation using rock mass instead of intact rock, the data for the rock mass strength is plotted on the lower portion of the critical strain chart, as a way to compare to the data for intact rock strength.

CONCLUSIONS : From the results of the pre-evaluation of stability of the tunnel using the critical strain chart, we reaffirmed that it is possible to promptly evaluate the stability of a tunnel under construction. Moreover, this research shows that a safety evaluation using the actual instrumented crown settlement data with the unconfined compression strength of intact rock, rather than with the unconfined compression strength of a rock mass in the tunnel working face, is more conservative.

Keywords
tunnel, critical strain, field measurement, unconfined compression strength

Corresponding Author : Moon, Hong Duk, Professor
Department Civil Engineering, 33 Dongjin-ro, Gyeongnam National University of Science and Technology, Jinju City, 52725, Korea
Tel : +82.55.751.3296 Fax : +82.55.751.3209
E-mail : hdmoon@gntech.ac.kr

International Journal of Highway Engineering
http://www.ksre.or.kr/
ISSN 1738-7159 (print)
ISSN 2287-3678 (Online)
Received Oct. 21, 2015 Revised Oct. 22, 2015 Accepted Nov. 03, 2015

1. 서론

터널의 합리적 설계나 안전한 시공을 위해서는 시공 중인 터널의 거동을 관찰하고 계측하여 그 결과를 이용하여 당초 설계를 재검토하는 정보화시공이 요구된다. 현장계측을 실시하여 굴착 초기에 불확실한 요인을 정확히 파악하여 터널의 안전 시공을 유도하는 것이 필요하므로 터널

의 안정성을 사전에 평가하는 것이 무엇보다 중요하다.

터널의 정보화시공에는 응력계측과 비교하여 정밀도가 높고 측정이 간편한 변위 계측이 주로 이용되고 있다. Sakurai(1982)는 측정된 계측변위에서 응력으로 변환하는 과정없이 변형률을 평가하는 방법인 직접변형률 평가법과 평가기준치로서 한계변형률을 활용하는 방법을 제안하였다. 한계변형률은 암석의 일축압축강도와 변형계수의 비로서 정의되며, 불연속면의 영향을 그다지 받지 않고 암석의 일축압축시험에서 구한 값과 현장 암반에서 구해진 값이 거의 일치하는 것으로 알려져 있다.

굴착 중인 터널의 안정성을 평가하는 방법으로는 여러 가지 방법들이 제시되고 있는데, 간편한 평가방법으로 Franklin(1976)은 암석공시체의 일축압축강도와 암반의 구조 및 토피 깊이로서 평가하는 방법을 제안하고 있다. Yim(2009)은 RMR 값과 터널계측변위를 이용하여 굴착 중인 터널의 안정성 평가와 연약대의 예측에 관한 연구를 하였으며, Park and Shin(2007), Shin(2009)은 국내 터널현장에서 한계변형률 도표를 작성하여 터널 안정성을 평가할 수 있는 기준을 제시하였다.

본 연구에서는 대구지역의 안산암과 화강암 지반 터널 시공현장의 계측결과를 이용하여 한계변형률 개념을 터널의 예비 안정성 평가의 기준으로 적용하기 전에 그 평가의 기준이 되는 한계변형률도표(Sakurai, 1997)를 검증하여 보고자 하였으며, 암석의 한계변형률 개념을 암반으로 확대 적용하기 위한 암반의 변형률 산정 기법을 이용한 터널 현장의 안정성 평가방법의 현장 적용성을 평가하였다.

2. 한계변형률 개념

2.1. 한계변형률

한계변형률 개념을 터널현장 실무에 활용한 기존의 연구 사례들은 주로 터널 굴착 시 계측된 천단변위를 터널의 반경으로 나누어 변형률을 구하고 이를 한계변형률 도표에 도시하여, 터널의 안정성을 평가하는 방법을 활용하고 있다. 그러나 한계변형률 도표의 경우 현장에서 채취한 코어 샘플에 대해 일축압축시험을 실시하여, 이때 발생한 압축변형률을 이용한 것이다. 이렇게 정립된 한계변형률 개념을 터널현장 실무에 활용하기 위하여 지반굴착으로 인해 발생한 천단변위를 터널굴착크기와 비교하여 변형률을 산정하고 있다.

터널굴착으로 인해 발생하는 접선방향의 변형률(ϵ_t)는 다음 Eq. (1)과 같이 표현된다. Fig. 1은 거동 메카니즘을 나타낸 것이다.

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta L}{L} = \frac{2\pi R - (2\pi(R-\Delta u))}{2\pi R} = \frac{2\pi \Delta u}{2\pi R} = \frac{\Delta u}{R} \quad (1)$$

여기서, ϵ_t : 접선방향의 변형률, Δu : 천단침하량, R : 터널반경

Eq. (1)과 같은 지반 거동 메카니즘에 의해 터널굴착 시 지반 변형을 천단변위와 터널반경으로 표현 가능함을 알 수 있다. 따라서 터널현장 실무에서 천단변위와 터널크기를 이용하여 변형률을 산정한 후, 이를 한계변형률 개념을 이용하여 터널안정성을 평가하는 것에 대하여 공학적으로 타당한 근거를 제시하고 있다.

2.2. Sakurai의 직접변형률 평가법

Sakurai(1982)는 현장에서 비교적 안전하고 정확도 높은 계측이 가능한 암반 변위에 중점을 두어 계측변위에서 암반 내에 발생하고 있는 변형률을 추정하고, 그것을 한계변형률 혹은 파괴변형률과 비교하여 정량적 안정성을 평가하는 직접변형률 평가법을 제시하였다. 또한 간편한 실내시험의 하나인 암석공시체의 일축압축강도 시험 결과를 이용하여 Eq. (2)에 나타낸 한계변형률을 제안하였다(Sakurai, 1982). 즉, Fig. 1처럼 암석의 일축압축강도와 탄성계수의 비를 한계변형률 ε_o로 한다. 공시체의 탄성계수는 측면의 대칭위치에 부착된 변형률 게이지에서 시험 재하 중의 변형률을 계측하고 그 응력-변형률 관계에서 초기탄성계수 혹은 압축강도의 50% 응력에서의 접선 탄성계수로 하여 평가된 E_{50}이 이용된다.

$$\epsilon_o = \frac{\sigma_c}{E} \quad (2)$$

여기서, ε_o : 암석의 한계변형률, σ_c : 암석의 일축압축강도, E : 탄성계수

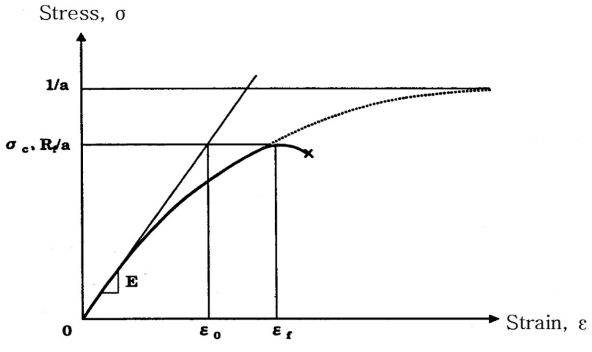


Fig. 1 Concept of Critical Strain and Failure Strain (Sakurai, 1982)

여기서, 암석의 응력-변형률 곡선이 쌍곡선 함수로 나타난다고 가정하면(Duncan and Chang, 1970), Fig. 1에 나타낸 함수에서 암석의 파괴 변형률 ϵ_f는 Eq. (3)으로 구한다. a, R_f는 쌍곡선 함수의 파괴강도를 표시한 인자이고, R_f는 여러 가지의 흙 및 암석에 대한 실내실험결과에서 대략 0.05~0.8 정도의 범위에 있고 일축압축강도의 증가와 함께 감소하는 경향이 있다고 보고되었다(Sakurai, 1982).

$$\epsilon_f = \frac{\sigma_c / E}{1 - R_f} = \frac{\epsilon_o}{1 - R_f} \qquad (3)$$

여기서, ε_f : 암석의 파괴변형률(일축압축상태), R_f : 압축강도를 표시하는 파라메타(일축압축상태)

Fig. 2는 여러 가지 암석에 대하여 한계변형률(ε_o)과 일축압축강도와의 관계를 나타낸 것이다(Sakurai, 1986).

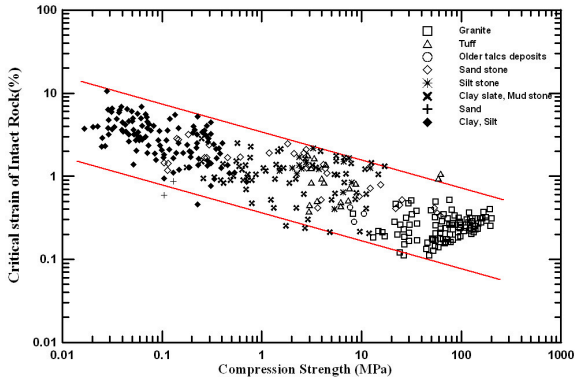


Fig. 2 Relationship of Critical Strain and Unconfined Compression Strength (Sakurai, 1986)

2.3. 한계변형률 개념의 현장 적용방법

Sakurai(1997)는 실내실험 결과에 의해 한계변형률 개념을 정립한 이후 다시 그 결과를 터널에 활용하였다. Fig. 3에서는 굴착으로 인하여 발생하는 천단변위를 터널직경으로 나누어 그 값을 종축의 변형률로 설정하고, 천단변위를 측정한 지반에서의 일축압축강도를 횡축으로 하여 표시한 것이다.

Fig. 3에는 터널 시공 중에 변상이 발생한 경우와 변상이 발생하지 않은 경우의 계측 값들이 함께 표시되어 있다. 변상이 발생한 경우에 대해서는 검은 점으로 표시하였으며 함께 표시된 숫자는 여러 가지 형태의 터널 변상이 발생된 상태를 의미한다. 즉, 터널변상이 발생한 경우는 한계변형률과 일축압축강도 관계 곡선의 상한치 기준에 근접하거나 상회하는 경우에 놓인다는 것이다.

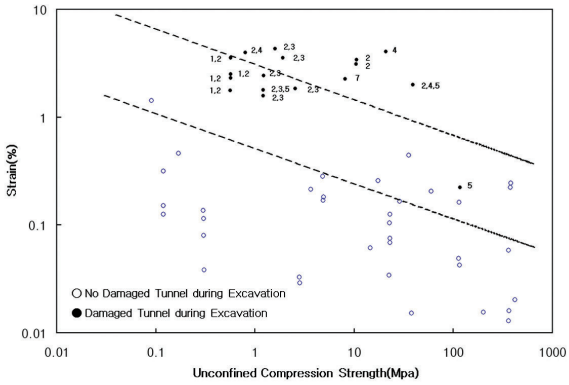


Fig. 3 Case Study of Critical Strain Concept using Tunnel Crown Settlement (Sakurai, 1997)

2.4. 암반에서의 한계변형률 산정방법

암석에 대한 실내시험으로부터 산정한 한계변형률을 실제 터널의 굴착에 활용하기 위해서는 암석에 대한 실험결과를 각종 불연속면이 존재하는 암반으로 대응시킬 수 있어야 한다. 대상지반이 암반 지반의 경우에는 크기 효과, 불연속면 등으로 인하여 차이가 발생할 수 있다.

Sakurai(1983)는 실내 시험에 의한 암석의 한계변형률을 암반 범위로 확대하여 사용할 수 있음을 제시한 바 있다. 암반의 한계변형률 산정을 위해서는 암반강도(σ_{mass})와 암반 탄성계수(E_{mass})를 측정해야 한다. 암반강도 및 탄성계수는 현장 원위치 시험을 통해 결정할 수 있으나, 본 연구에서는 매 굴착면마다 수행되는 암반평가결과(RMR)를 매개변수로 하는 경험식을 사용하였다.

Aydan and Dalgic(1998)은 암석의 일축압축강도 σ_c와 RMR이 포함된 Eq. (4)와 같은 암반의 일축압축강도 추정식을 제안하였다. 일반적으로 상수 β는 6을 적용한다.

$$\sigma_{mass} = \frac{RMR}{RMR + \beta(100 - RMR)} \sigma_c \quad (MPa) \qquad (4)$$

3. 한계변형률을 이용한 터널 예비 안정성평가

3.1. 현장개요

본 연구 대상은 대구지역의 도로 터널인 안산암 지반과 화강암 지반의 터널 상행선과 하행선 현장이다.

Table 1은 대구터널의 개요이며, Fig. 4는 터널 구간의 지층분포도이다.

Table 1. Description of Daegu Tunnel

Description		Up train direction	Down train direction
Tunnel length	Total length	912m	932m
	NATM length	878m	898m
	Open cut length	34m	34m
Tunnel position	Entrance of tunnel	STA.07+493	STA.07+513
	Exit of tunnel	STA.08+425	STA.08+425

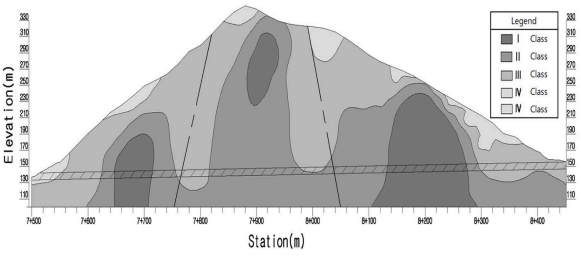


Fig. 4 Ground Condition Cross Section View of Daegu Tunnel

3.2. 터널 천단침하량을 이용한 변형률 예측

현장에서 계측을 실시한 경우 Panet and Guenot (1982)이 제시한 Fig. 5와 같이 변위의 발생경향을 세 가지로 구분할 수 있으며 실제 계측으로 인해 얻게 되는 값은 계측변위(C_m)이고 전체 변위는 Eq. (5)와 같이 표현된다. 본 연구에서도 터널현장에서 직접 측정한 계측변위만을 측정하였다(Bugye Engineering Co., 2011). 따라서 본 연구에서는 실제 계측치만을 이용한 안정평가와 기존 연구에 의한 선행변위와 계측 전 변위를 가정하여 전체 변위를 고려한 터널의 변형률 산정에 대하여 평가하였다.

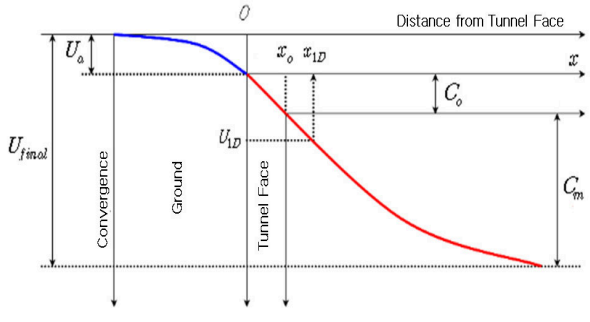


Fig. 5 General Displacement Pattern of Tunnel Excavation (Panet and Guenot, 1982)

$$U_{final} = U_a + C_o + C_m \quad (5)$$

여기서, U_{final} : 전체 변위

U_a : 선행변위

C_o : 계측 전 변위

C_m : 계측변위

본 연구 대상 터널에서는 선행변위에 대한 계측이 이루어지지 않았으나 선행 연구들(Park and Shin, 2007)에 의하면, 전체 변위에 대하여 선행변위는 20~30%를 제시하고 있으므로 본 연구에서는 전체 변위에 대한 선행변위의 비를 30%로 판단하고 이에 따라 산정하였다. 일반적인 터널계측에서는 계측 전 변위를 측정할 수 없으나, 굴착 시 계측한 막장거리에 대한 침하량 곡선에서 최초 측점지점의 침하량을 0으로 하여 거리와 침하량에 대한 근사함수식에 의한 회귀분석을 실시하면 계측지점에서 계측 전 변위를 추정할 수 있다. 본 연구에서 근사함수식은 지수함수식을 사용하였다.

Fig. 6과 Fig. 7은 선행변위, 계측 전 변위, 계측변위

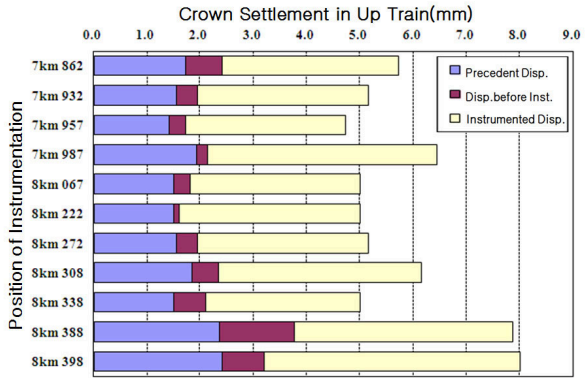


Fig. 6 Crown Settlement of Up Train (mm)

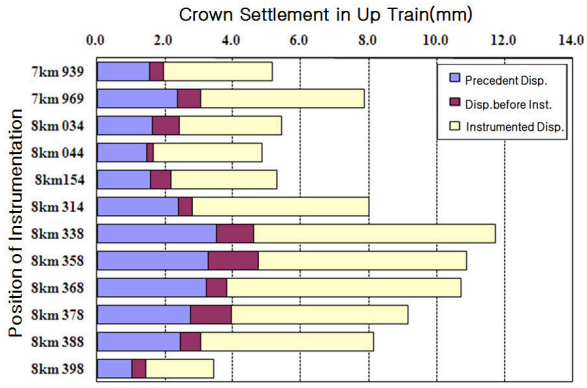


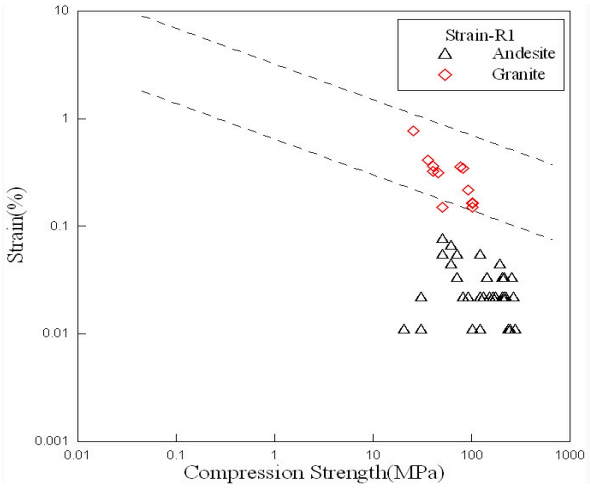
Fig. 7 Crown Settlement of Down Train (mm)

그리고 전체 변위를 막대그래프로 표시하였다. 변위에 대한 분석 결과, 선행변위의 최소 값은 1.03mm, 최대 값은 3.514mm이고, 계측 전 변위의 최소 값은 0.1mm, 최대 값은 1.5mm이고, 계측변위의 최소 값은 2.0mm, 최대 값은 7.1mm이다. 그리고 전체 변위의 최소 값은 3.43mm, 최대 값은 11.7mm이다.

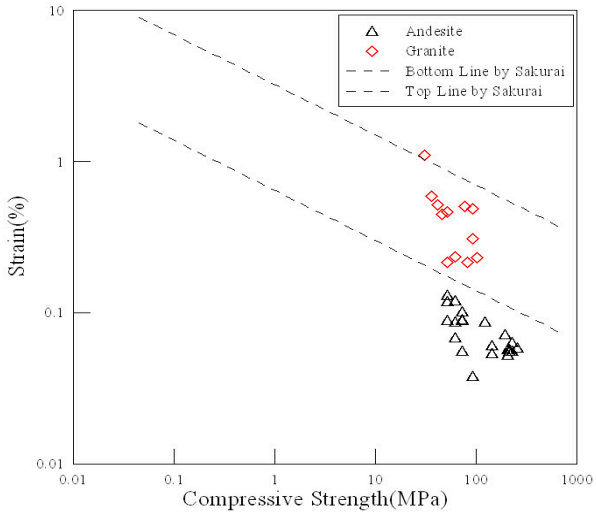
3.3. 한계변형률 도표를 이용한 터널의 예비 안정성평가

본 연구 대상 터널의 상·하행선 천단침하량에 대한 변형률과 일축압축강도를 이용하여 터널의 안정성을 평가하였다. 천단침하량에 대한 변형률은 선행변위와 계측 전 변위 그리고 계측변위 모두를 고려한 전체 변위를 터널의 반경으로 나누어 구하였고, 막장관찰 자료에서 암석의 일축압축강도와 RMR 값을 산정하였다. 그리고 산정한 변형률과 일축압축강도를 바탕으로 Sakurai(1997)가 제시한 한계변형률 도표를 이용하여 터널의 안정성 평가를 실시하였다.

Fig. 8은 암석의 일축압축강도와 한계변형률에 대한 터널 굴착 시의 안정성 평가 결과이며, Fig. 8(a)는 실제 계측치만을 이용한 경우이고, Fig. 8(b)는 실제 계측은 하지 않은 선행변위와 계측 전 변위 그리고 계측 변위 모두를 고려한 전체 변위를 이용한 경우이다. 안산암 지반 터널은 한계변형률 도표의 하한 관리치보다 아래에 위치하여 매우 안전한 상태임을 나타내고 있다. 화강암 지반의 경우 한계변형률 도표의 상하 관리 기준치 내에 주로 위치하며, 일부는 상한치에 근접함에도 불구하고 시공 중 변상없이 안전하게 시공되었으므로 터널의 안정성을 보수적으로 평가하고 있음을 알 수 있었다.



(a) Evaluation of Stability Using Actually Measured Crown Settlement



(b) Evaluation of Stability Using Total Displacement of Crown Settlement

Fig. 8 Relationship between Strain by Crown Settlement and Unconfined Compression Strength of Intact Rock

Fig. 9는 RMR을 활용한 암반강도 추정 Eq. (4)를 이용하여 구한 암반의 일축압축강도와 한계변형률에 대한 터널 굴착 시의 안정성평가 결과이다. 터널의 안정성 평가 결과를 분석해 보면, 안산암과 화강암 지반 모두 막장의 암석의 일축압축강도를 적용한 경우가 암반의 일축압축강도를 적용한 경우보다 한계변형률 상하 관리기준에 속하거나 상한 기준치에 근접하는 것으로 나타나기 때문에 보다 보수적인 안정성 평가를 하는 것으로 평가된다.

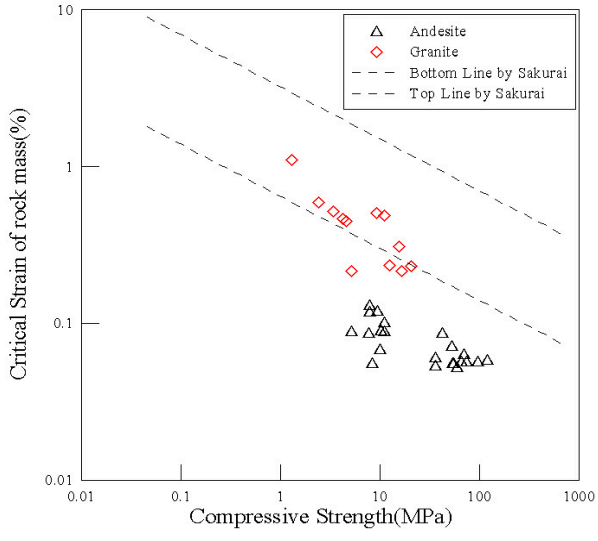


Fig. 9 Relationship between Strain by Crown Settlement and Unconfined Compression Strength of Rock Mass

4. 결론

본 연구에서는 터널 굴착 중 계측결과와 막장관찰, 암석 및 암반의 일축압축강도를 이용한 한계변형률 개념으로 터널의 안정성을 현장에서 신속히 예비 평가하는 방법에 대해 대구지역 터널의 안산암 지반과 화강암 지반의 터널 굴착 현장을 대상으로 분석하였으며, 본 연구에서 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 한계변형률 도표를 이용한 터널의 예비 안정성 평가 결과, 터널의 실제 천단침하 계측 변위만을 이용한 경우가 선행변위와 계측 전 변위 그리고 실제 계측 변위 모두를 고려한 전체 변위를 이용한 안정성 평가의 경우보다 한계변형률 도표의 약간 아래쪽에 위치하는 것으로 나타났다. 그러나 두 경우 모두 거의 비슷한 경향을 보였다. 이러한 사실은 두 경우 모두 터널의 정밀 안정성 평가보다는 시공 중인 터널의 예비 안정성을 현장에서 신속히 평가하는 또 하나의 대안으로 활용 가능하다고 판단된다.
2. 현장에서 계측된 터널 천단변위와 암석의 일축압축강도를 이용하여 Sakurai(1997)가 제시한 한계변형률 도표를 적용하여 대구 지역의 안산암 지반과 화강암 지반의 굴착 중인 터널의 안정성을 예비 평가하는 것이 가능하다는 것을 확인하였다. 그러나 터널변상이 발생한 보다 많은 국내 자료를 추가하여 한계변형률 도표를 보완할 필요가 있다.
3. 터널의 안정성 평가를 위한 한계변형률 도표를 적용함에 있어 막장의 암석의 일축압축강도를 적용한 경우가 암반의 일축압축강도를 적용한 경우보다 한계변형률 도표 관리기준치의 상부에 나타나기 때문에 보다 보수적인 안전측으로 평가하는 방법이라 판단된다.

감사의 글

"이 논문은 2015년도 경남과학기술대학교 대학회계 연구비 지원에 의하여 연구되었음."

REFERENCES

Aydan, O. and Dalgic, S., 1998, Prediction of Deformation Behaviour of 3 Lanes Bolu Tunnels through Squeezing Rocks of North Anotolian Fault Zone(NAFZ). Proc. Regional Symp. on Sedimentary Rock Engineering, Taipei, pp. 228-233.

Bugye Engineering Co., 2011, Bummul Tunnel Field Instrumentation Report-Daegu 4rd beltway private investment Project, Final Report.

(부계기술단, 대구 4차 순환도로 민간투자 시설사업 범물터널 계측, 최종보고서, 2011.)

Duncan, J. M. and Chang, C. Y., 1970, Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol. 96, No. 5, September/October 1970, pp. 1629-1653.

Franklin, J. A., 1976, An Observation Approach to the Selection and Control of Rock Tunnel Linings, Proc. of Shotcrete for Ground Support, ACI Special Publication, pp. 556-596.

Panet, M., and Guenot, A., 1982, Analysis of Convergence behind the Face of a Tunnel, Tunnelling82, Proc. of the 3rd International Symposium, Brighton, pp. 197-204.

Park, Si Hyun and Shin, Yong Suk, 2007, A Study on the Safety Assessment Technique of a using Critical Strain Concept, Journal of The Korean Geotechnical Society, Vol.23, No.5, pp. 29-41.

Sakural, S., 1982, An Evaluation Technique of Displacement Measurements in Tunnels, Proceedings of Japan Society of Civil Engineers, Vol. 317, pp. 93-100.

Sakurai, S., 1983, Displacement Measurements Associated with the Design of Underground Openings, Proceedings Int. Symposium Field Measurement in Geomechanics, Zurich, Switzerland, pp. 1163-1178.

Sakurai, S., 1986, Field Managements and hazard warning levels in NATM, Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.34, No.2, pp. 5-10.

Sakurai, S., 1997, Lessons Learned from Field Measurements in Tunnelling, Tunnelling and underground Space Technology, Vol. 12, Issuue 4, pp. 453-460.

Shin, Shi Un, 2009, Tunnel Stability Evaluation by using Limit Deformation Ratio, KyungPook University Graduate Ph.D. Thesis, pp. 181-192.

Yim, Sung Bin, 2009, Safety Assessment of Face and Prediction of Weak Zone Based on RMR and Measured Displacement during Tunnel Excavation, ChungBuk University Graduate Ph.D. Thesis, pp. 88-90.