

막장면 안전관리 시스템(T.S.M)의 개발과 시험적용

케이앤씨컨설턴트(주) 이근배, 조용량, 김영배
 한국도로공사 삼척·속초건설사업단
 GS건설(주) 삼척·동해간 고속도로 제3공구

이번 호에 소개하는 막장면 안전관리 시스템은 터널 공사시 막장면의 거동(전조현상)을 실시간으로 계측하고, 이에 대해 현장 및 외부에서 즉각 변위 확인을 함으로써 작업자 위험을 최소화하는 한편 인명피해를 사전에 예방하는데 그 목적이 있다.

1. 서론

터널 시공 시 붕괴하기 쉬운 불안정한 지반을 만나는 경우가 있다. 특히 주로 사용되는 N.A.T.M(New Austrian Tunneling Method) 공법의 경우 굴진장의 굴착, 버럭 처리 후에서부터 1차 지보공 시공 완료시까지의 막장면이 자립할 필요가 있다. 이런 일련의 작업을 안전하게 시공하기 위해서는 거동을 상시 감시하면서 그에 대응하는 적절한 대책을 수립하는 것이 중요하다. 막장면 전체의 거동을 레이저 거리계에 의한 실시간 다점 동시 계측이 가능하고 거동의 변화를 인근에 있는 작업자에게 즉시 경고하는 막장면 안전관리 시스템에 대한 개요와 시험 적용결과에 대하여 소개하고자 한다.

2. 막장면 거동 감시 기술과 과제

가. 감시 대상 지반의 특징

터널 굴착에서 만나는 지반을 종별로 괴상지반, 층상지반, 연질지반 3개로 구별하고 지반 성상을 <표 1>과 같이 설정하였다. 괴상지반은 랜덤(random)의 절리가 발달하고 막장면 안정성은 균열의 방향과 성상에 의해 좌우된다. 층상지반의 경우 층상, 편상이 연속하여 균열이 분포하고 막장면의 안정성은 층리나 편리의 성상과 주향경사에 의해 좌우된다.

연질지반은 잠재적인 균열이 분포하는 연암으로 막장면의 안정성은 지반의 강도나 잠재적 균열에 의해 좌우된다. 이러한 지반이 막장면에서 붕괴하는 경우 일반적으로 괴상지반[사진 1]은 붕괴전의 변위가 적고 용수를 동반한 돌발적인 붕괴가 발생한다. 연질지반[사진 3]의 경우 굴착 후 변위의 발생 증가를 보인 뒤 붕괴한다. 층상지반[사진 2]에서는 괴상지반과 연질지반의

모두의 성상을 가지고 있다. 이들 지반에 대하여 변위계측으로 막장면 붕괴를 예측 하는 경우 괴상지반에서는 변위 계측에 준하여 예측이 곤란하고, 연질지반에서는 예측이 가능하다고 할 수 있다.

<표 1> 감시 대상지반의 성상과 막장면 붕괴의 특징

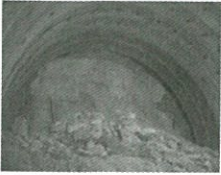
대상 지반	괴상지반	층상지반	연질지반
항목			
지반의 성상	· 랜덤(random)한 균열 · 막장면 안정성은 균열의 방향과 성상에 좌우됨	· 층상, 편상의 균열 · 막장면 안정성은 층리, 편리의 성상과 주향경사에 좌우됨	· 잠재적 균열 · 막장면 안정성은 지반의 강도, 잠재 균열에 좌우됨
암면의 구분	중경암에서 경암	연질에서 중경암	연질
붕괴전의 변위	미소	미소에서 중	중에서 대
붕괴의 돌발성	큼	소에서 중	적음
지반변위계측에 의한 붕괴 예측 가능성	적음	있음	큼



[사진 1] 괴상지반의 붕괴 예



[사진 2] 층상지반의 붕괴 예



[사진 3] 연질지반 붕괴 예

나. 현재의 막장면 거동 감시 기술과 과제

막장면의 거동을 계측, 평가하고 그 붕괴를 예측하는 기술로서는 변형이나 변위를 계측하는 기술이나 물질의 파괴와 동시에 발생하는 미소 소음을 계측하고 그 발생의 빈도로부터 붕괴의 가능성을 판단하는 기술 등이 있다. 여기서는 터널 기술자가 계측하여 그 결과를 즉시 평가 가능한 지반변위 계측 기술에 착안했다. 기존 계측 기술의 개요와 특징은 <표 2>와 같다. 막장면 부근에서 천공, 장약, 발파, 버럭 처리, 지보공 시공 등 일련의 작업이 연속적으로 실시되므로 막장면의 거동 계측은 <표 2>와 같이 비접촉의 변위 계측이 가능한 광학적 계측 기술이 적용되고 있다.

<표 2> 지반 변위계측기술의 개요와 특징

측정 방법	Non Prizm 자동추적형 Total Station	레이저 변위계	레이저 거리계
개요	전용 타켓을 설치하지 않아도 임의 개소의 3차원 변위 계측	측정기에서 피측정물까지의 거리를 레이저 광선을 이용하여 고정밀 측정	측정기에서 피측정물까지의 거리를 레이저 광선을 이용하여 측정
3차원 계측	가능	불가능	불가능
측정 정도	±1mm	±1μm	±1mm

측정거리의 범위	최대 100m 정도	최대 1m 정도	최대 200m 정도
다점 동시 계측	측점수가 증가하면 동시 계측은 곤란	측점수가 증가하면 동시 계측은 곤란	측점수가 증가하여도 동시 계측이 가능

Non Prizm 자동 추적형 Total Station은 3차원 변위계측이 가능하지만 1측점의 계측에 5-10초 정도의 시간이 필요하고, 다점 동시 계측이 불가능하다. 레이저 변위계는 측정 정밀도가 ±1μm로 고 정밀도이지만 측정 범위가 최대 1m정도로 막장면에 접근하여 계측할 필요가 있다. 한편, 레이저 거리계의 경우 측정 정밀도가 ±1mm 정도로 레이저 변위계보다 못하지만 측정 범위는 최대 200m로 크다. 본 개발에는 연질지반에서 붕괴전의 변위량이 1mm이상의 붕괴 거동을 감시하는 것을 목적으로 레이저 거리계를 이용한 막장면 안전관리 시스템 개발을 목표로 하였다.

3. 막장면 안전관리 시스템의 개요

가. 개발목표

레이저 거리계를 이용한 막장면 안전관리 시스템의 개발시 장비의 필수 기능은 아래 항목으로 설정하였다.

- (1) 막장면 전체 감시 및 다점 동시 계측이 가능할 것
- (2) 계측 데이터를 지정한 시간간격(최소 1초 간격)으로 연차적으로 보존하고 그 경과 시간에 따른 변화 파악이 가능할 것
- (3) 계측 데이터가 관리 기준을 넘는 경우 경보음, 경고등 작동으로 작업자에 경고가 가능할 것, 동시에 시스템에 접속한 카메라로 디지털 화상 보존이 가능할 것

- (4) 막장면 전체의 변위 거동을 시각적으로 파악 가능 할 것
- (5) 취득한 계측 데이터를 일괄 관리하여 변위량이나 변위속도를 연차 계산하여 막장면의 안정성 평가를 실시할 수 있을 것
- (6) 막장면에서 작업 중인 작업자에 평가결과를 신속하게 주지하여 적절한 행동(작업 중지, 막장면에서 피난 등)을 할 수 있도록 주의환기 할 수 있을 것

나. 시스템의 상세 개요

[그림 1]은 여러 대의 레이저 거리계에 의한 다점 동시 계측이 가능한 막장면 안전관리 시스템의 구성 예를 표시하고 있다. 레이저 거리계는 삼발이 혹은 막장면 부근의 강제 지보공에 설치하고 계측 데이터는 인근에 설치한 제어용 PC에 무선으로 전송한다. 제어용 PC에서는 연산처리를 행하고, 계측 데이터가 관리 기준을 넘는 경우 유선 혹은 무선으로 접속한 경보 장치의 경보음 및 경고등이 작동한다.



[그림 1] 막장면 안전관리 시스템의 구성 예

다. 계측결과와의 평가 방법

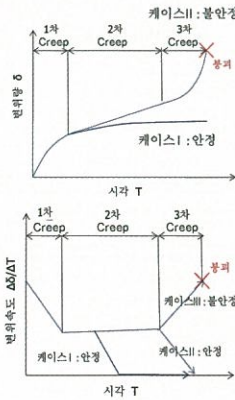
막장면 안전관리 시스템에 의하여 취득한 계측 데이터는 레이저 거리계에서 측정까지의 거리로, 그 거리를 연속적으로 계측하는 것이다. 여기서 레이저 거리계는 막장면에 대한 법선 방향에 설치되는 것에 국한되지 않으므로

측정값은 막장면의 변위량과 일치하지 않는다. 그렇지만 막장면에서 20m 후방의 도로 2차선 단면(폭10m)의 측벽에 레이저 거리계를 설치한 경우 막장면 중앙에서 100mm의 변위량이 발생하면 측정값은 103mm가 된다. 이런 양자의 차는 3% 정도로 적어 실용상 문제가 없을 것으로 판단된다. <표 3>에 레이저 거리계의 측정으로 얻어진 평가 지표와 평가 기준을 표시하였다. 지반의 변위량을 평가 지표로 하는 경우, 지반의 한계 변형에서 얻어지는 변위량이나 사전 수치해석에서 예측된 변위량과 크기 비교를 하는 것으로 평가가 가능하다.

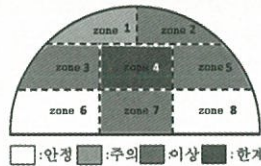
본 개발에서 대상이 되는 연질지반 막장면의 변위는 [그림 2]에 표시된 Creep 곡선에 따라 가정이 가능한 것으로 하면, 변위속도를 평가 지표로 하여 변위속도가 수렴 되는 경우 안정([그림 2] 하단의 Case1, Case2), 변위속도가 증가하는 경우에는 불안정([그림 2] 하단의 Case3)으로 판단 가능하다. 또한 변위속도의 역수를 평가 지표로 하면 막장면 붕괴까지의 시간도 예측이 가능하게 된다. 막장면 안전관리 시스템은 현재 1대의 제어용 PC에 최대 8측점까지의 변위 계측이 가능하다. 굴착 폭 10m 정도의 터널에는 [그림 3]과 같이 막장면을 8개 구역으로 나누고 안정성을 색으로 식별하여 실시간 표시가 가능하다. 이에 따라 시간적으로 확인할 수 없는 취약부의 분포나 그 추이가 시각적, 정량적으로 확인 가능하며 지반 안정 대책공의 시공 단계로의 설계 및 시공에 활용 가능하다.

<표 3> 계측결과와 평가 지표와 기준

평가 지표	1.변위량	2.변위속도	3.변위속도의 역수
평가 기준	한계변형에 의하여 산정한 변위량이나 수치해석에 의한 변위 예측값과 비교하여 지반의 안정성을 판단함	변위속도의 증감으로 지반의 안정성을 판단함	변위속도의 역수가 0이 되는 시각에서 붕괴를 예측함



[그림 2] Creep 파괴를 가정한 평가 방법의 개요

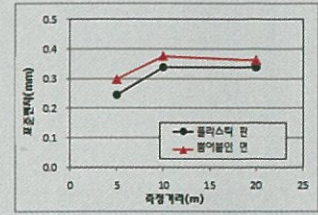


[그림 3] 막장면 안정성의 구역표시에

라. 실내 정밀도 시험결과

레이저가 투사된 측정 대상물 요철이 측정 정밀도에 주는 영향을 파악하기 위하여 평 단면과 뿔머 붙인 면을 대상으로 실내 정밀도 시험을 수행하였다. [사진 4]에는 측정 대상물을 [그림 4]에는 시험 결과를 표시하였으며 평 단면의 경우 플라스틱제의 판으로 측정거리는 5~25m로 하였다. [그림 4]의 시험결과 측정값 표준 편차는 투사면의 중별에 관계없이 모두 0.5mm 미만으로 양자의 차이가 적어 투사면의 요철이 측정 정밀도에 미치는 영향은 적은

것으로 판단된다.



[그림 4] 측정면의 요철의 경향



[사진 4] 측정대상물의 외관

4. 시험적용

가. 연질화된 경석용회암지반의 사례

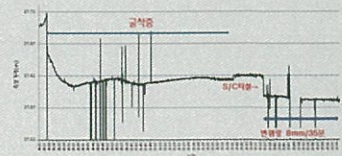
(1) 적용 터널 현장의 개요

변질열화에 의하여 연질화된 경석용회암 지반에서 막장면 붕괴가 자주 발생한 도로 터널에 대해 막장면 안전관리 시스템을 시험 적용하였으며 터널 공사의 개요는 아래와 같다.

- 공사명 : 00 고속도로 터널공사
- 공기 : 2007년3월20일~2011년2월28일
- 터널연장 : 2,089m
- 굴착단면 : 89m²

(2) 계측결과와 고찰

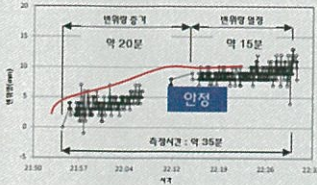
[그림 5]는 경석용회암이 분포하는 상반 중앙부 막장면[사진 5]에서 측정된 측정 데이터를 표시한 것이며 [그림 6]에는 각각 Shotcrete 타설 완료후 약 35분간의 변위량 변화를 표시한 것이다.



[그림 5] 막장면의 경시변화도



[사진 5] 상반 막장면 상황: 경석유회암



[그림 6] 막장면의 경시변화도(장·압출)

[그림 5]로부터 굴착에서 Shotcrete 타설 완료시까지의 막장면의 거동이 연속적으로 계측되는 것을 알 수 있다. 또한 계측 개소에 타설 전, 후 30mm 정도의 거리가 변화하고 있는 것으로 Shotcrete 두께 관리에도 활용 가능하다.

한편, [그림 5]의 계측 데이터에 있어서 측정값이 크게 변동하고 있는 것은 레이저 거리계 설치 지점과 막장면 측정 사이의 작업자나 굴착 기계가 작업 중에 기인 한 것이다. 본 시스템에서는 측정 데이터의 변동 한계치를 설정하고 그 한계값을 넘는 경우에는 계측 데이터를 자동적으로 폐기하는 기능을 가지고 있다. [그림 6]에는 Shotcrete 타설 완료 후 막장면의 변위량은 20분에 8mm 정도가 발생하였으며 이후 수렴하고 있는 것을 알 수 있다.

본 측정 단면에는 막장면의 변위량이 10mm 정도로 나타났으며 막장면의 거동은 [그림 2]의 아래 그림과 같이 Case2에 분류되어 측정 개소의 지반은 안정된 것으로 판단 가능하다. 이상의 것으로부터 막장면 붕괴 전에 비교

적 큰 변위가 발생하는 연질지반에서는 막장면을 복수의 구역으로 구분하고 구역별로 변위량이나 변위속도의 변화를 파악하는 것으로 안정성을 평가할 수 있음이 증명되었다.

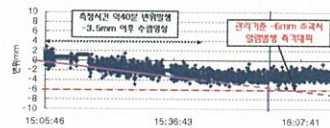
나. 안전관리 및 품질관리 사례

(1) 00도시철도2호선000공구(안전, 품질)

연암 - 보통암 강도의 심한풍화 - 보통풍화 상태를 나타내는 터널에 대하여 지보공 설치 작업시의 변위 양상을 측정하였다. 지보공 설치 작업시 막장면 상부 썩기형 단층파쇄대 구간 [사진 6], [그림 7]에서 -3mm 정도의 변위가 나타나 수렴 확인 후 이후 공정을 진행하였다. 만약, 지속적인 변위 발생으로 관리 기준 초과시에는 즉각 경보음이 발생하며 이 경우 작업자들이 대피토록 안전교육을 실시하였다.



[사진 6] 막장면의 감시 상황



[그림 7] 막장면의 경시변화도(측정No.4)

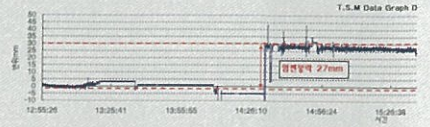
(2) 00 - 00간 도로건설공사(안전)

연암 - 풍화암 강도의 심한풍화 - 보통풍화 상태를 나타내는 터널에 대하여 강관다단 천공 작업시의 변위 양상을 측정하였다. 강관다단 천공시 천단부 암편 붕락[사진 7]으로 27mm 정도의 변위를 나타내었다. 암편 붕락시 경보를 발생으로 작업

자들이 대피하였으며 이로 인해 본 시스템의 효과를 입증하였다.



[사진 7] 강관다단 천공시의 암편붕락 전(좌), 후(우) 사진



[그림 8] 막장면의 경시변화도(측정No.1)

5. 맺음말

터널의 시공에 대하여 굴착 작업이 집중되는 막장면의 변위 거동을 상시 감시하고 그 안정성을 실시간 평가하는 것은 굴착공사의 안정성 향상을 위해 필요한 요소이다. 본 원고에서는 토목, 건축 공사의 측량에 사용되어지는 레이저 거리계를 이용하여 비교적 변위량이 큰 연질지반을 대상으로 막장면 안전관리 시스템의 개발개요와 시험적용 결과를 서술하였다.

그 결과 연질지반에서는 레이저 거리계를 이용하여 다점 동시 계측하고 변위량의 수렴경향이나 변위속도에 의거하여 막장면의 안정성 평가 가능성을 확인하였으며, 평가를 토대로 터널 작업자들의 위험을 최소화 할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 향후 유사지반이나 상이한 암종에서의 적용 사례를 수집하고 관리 기준의 설정 방법에 대하여 연구개발을 통하여 본격적으로 막장면의 안전관리에 적용하고자 한다. 아울러 본 시스템은 휴대가 간편하고, 지반이나 구조물의 변위거동을 원격 감시가 가능해 출입이 곤란한 법면이나 구조물 등의 동태 감시에도 활용이 가능하다고 판단이 된다. ☺