

다점동시변위계측에 의한 막장안전감시시스템의 개발과 시험적용



김영배
케이앤씨컨설턴트(주)



조용량
케이앤씨컨설턴트(주)



최종락
GS건설(주)
신림-봉천터널도로
2공구 소장

현재 터널 시공에 따른 사고가 빈번하게 발생되고 있으며 특히 막장면 부근 작업자들은 보다 큰 위험에 노출되어 있다. 우리는 이런 피해를 줄이기 위해 터널공사시 막장면의 거동(전조현상)을 실시간으로 계측하여 현장 및 외부에서 실시간으로 변위 확인을 가능하게 함으로써 작업자 위험의 최소화 및 인명피해를 사전에 방지할 수 있도록 막장안전감시시스템을 도입하게 되었다.

터널의 지질 구조는 복잡한 단층 파쇄대 등의 취약부가 다수 분포하고 있어 산악 터널 시공시 굴착 작업중 막장이 붕괴하는 경우가 있다. 막장의 붕괴를 예측하여 적절한 대책을 실시하고 굴착작업의 안전성을 향상하기 위해서는 막장 전체의 거동을 연속으로 감시하여 그 안전성을 평가 하는 것이 중요하다. 여기서 필자들은 레이저거리계를 이용한 다점동시변위계측에 의한 막장안전감시 시스템을 개발하였다. 우선 실내 시험을 행하여 측정 대상 요철의 측정정밀도에 대한 영향을 검토하였다. 또한 불량 지반의 터널 현장에 대하여 막장거동 계측에 시험 적용하

여 그 실용성을 검증하였다. 각종 시험이나 그 적용의 결과, 막장 추출량을 최소 1초 간격으로 측정 정밀도 1mm 이내로 연속 다점 측정이 가능한 것을 분명히 밝혔다.

키워드 막장, 붕괴, 모니터링, 리얼타임, 레이저거리계

1. 서론

터널은 복잡한 지질 구조이므로 산악부의 터널 시공에 있어서는 불안정한 붕괴하기 쉬운 지반을 만나는 경우가 있다. NATM은 1굴진장의 굴착, 버럭처리후에 1차지보공을 시공완료하기까지 사이 굴착면이 자립할 필요가 있다. 그러기 위하여 막장부근에 이들의 일련의 작업을 안전하게 시공하기 위해 막장 거동을 상시 감시하면서 그 거동에 대응하는 적절한 대책을 하는 것이 합리적이며 안전시공을 하는 것에 중요한 포인트가 된다. 여기서, 필자들은 막장 전체의 거동을 레이저거리계에 의한 실시간으로 다

점 동시 측정하고 막장 거동의 변화를 막장 부근에 있는 작업원에 즉시 경고하는 막장안전감시시스템을 개발하였다. 본 논문에는 개발한 막장안전감시시스템의 개요와 불량지반에 대한 막장 안전감시의 시험 적용결과에 대하여 보고한다.

2. 막장 거동 감시 기술과 과제

2.1 감시 대상 지반의 특징

여기서는 터널 굴착에서 만나는 지반을 종별로 괴상지반, 층상지반, 연질지반의 3개로 구별하여, 지반 성상을

표 1과 같이 설정하였다. 괴상지반은 랜덤의 절리가 발달하고 막장 안정성은 균열의 방향과 성상에 좌우된다. 층상지반은 층상, 편상이 연속하여 균열이 분포하고 막장의 안정성은 층리나 편리의 성상과 주향경사에 좌우된다.

연질지반은 잠재적인 균열이 분포하는 연암으로 막장의 안정성은 지반의 강도나 잠재적 균열에 의해 좌우된다. 이러한 지반이 막장에서 붕괴하는 경우, 일반적으로 괴상지반은 붕괴전의 변위는 적고, 용수를 동반한 돌발적인 붕괴가 발생한다(사진 1, 현무암). 연질지반은 굴착 후에 변위의 발생 증가를 보인 뒤 붕괴한다(사진 3, 경석회암). 층상지반에서는 괴상지반과 경질지반의 양방향 성상을 가지고 있다(사진 2, 멜란지). 이들 지반에 대하여 지반 변위계측으로 막장 붕괴를 예측 하는 경우, 괴상지

표 1. 감시 대상지반의 성상과 막장붕괴의 특징


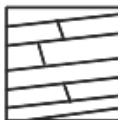

대상 지반	괴상지반	층상지반	연질지반
항목			
지반의 성상	<ul style="list-style-type: none"> - 랜덤한 균열이 발생 - 막장 안정성은 균열의 방향 성상에 좌우됨 	<ul style="list-style-type: none"> - 층상, 편암의 균열 - 막장안정성은 층리/편리의 성상과 주향경사에 좌우됨 	<ul style="list-style-type: none"> - 잠재적 균열 - 막장안정성은 지반자체의 경도, 잠재 크랙의 빈도에 좌우됨
암편의 구분	중경암에서 경암	암에서 중경암	연질
붕괴전의 변위	변위는 미소	변위는 미소에서 중정도	변위는 중에서 큰 정도
붕괴의 돌발성	돌발성 큼	돌발성은 소에서 중정도	돌발성 적음
지반변위계측에 의한 붕괴 예측가능성	곤란	가능성 있음	가능성 큼



사진 1. 괴상지반의 붕괴 예



사진 2. 층상지반의 붕괴 예



사진 3. 연질지반 붕괴 예

반에서는 변위 계측에 준하여 예측이 곤란하고, 연질지반에서는 예측 가능하다고 생각할 수 있다.

2.2 현재 상태의 막장 거동 감시 기술과 과제

막장의 거동을 계측, 평가하고 그 붕괴를 예측하는 기술로서는 변형이나 변위를 계측하는 기술이나 물질이 파괴와 동시에 발생하는 어코스틱에미션(AE)을 계측하고 그 발생의 빈도의 변위로 부터 붕괴의 가능성을 판단하는 기술 등이 있지만 여기서는 터널 기술자가 계측하여 그 결과를 즉시 평가 가능한 지반변위계측기술에 착안 하였다. 기존 계측 기술의 개요와 특징은 표 2와 같다.

막장 부근에서 천공, 장약, 발파, 버럭처리, 지보공시공 등의 일련의 작업이 연속적으로 실시되므로 막장의 거동 계측은 표 2와 같이 비접촉의 변위 계측이 가능한 광학 적 계측 기술이 적용되고 있다.

Non Prizm 자동 추적형 토탈 스테이션(TS)은 3차원 변위계측이 가능하지만 1측점의 계측에 5~10초 정도의 시간을 요하고, 동시에 다점계측이 불가능하다. 레이저 변위계는 측정 정밀도가 수 μ m로 고 정밀도이지만 측정 범위가 최대 1m정도로 막장에 접근하여 계측할 필요가 있다.

한편, 레이저 거리계는 측정정밀도가 ± 1 mm정도로 레이저 변위계보다 처지지만 측정범위는 최대100m로 크다. 본 개발에는 붕괴전의 변위량이 수mm에서 수십mm이상

으로 가상 연질지반에서의 붕괴거동을 감시하는 것을 목적으로 하고, 레이저거리계를 이용한 막장안전감시 시스템의 개발을 목표로 하였다.

3. 막장 안전감시 시스템의 개요

3.1 개발목적

레이저거리계를 이용한 막장안전감시 시스템의 개발시 장비의 필수 기능은 이하 4항목으로 설정하였다.

- (1) 막장 전체가 감시가능하고 다점동시 계측이 가능할 것.
- (2) 계측데이터를 지정한 시간간격(최소1초 간격)으로 연차적으로 보존하고 그 경과 시간 변화 파악이 가능할 것.
- (3) 계측치가 관리기준을 넘는 경우 정보, 경고등으로 막장 작업원에 경고가 가능할 것, 동시에 시스템에 접속한 카메라로 디지털 화상 보존이 가능할 것.
- (4) 막장 전체의 변위 거동을 시각적으로 파악가능하고 기능 (1) 및 (2)에서 취득한 계측데이터를 일괄 관리하여 변위량이나 변위속도를 연차계산 하여 막장의 안정성 평가를 실시간으로 하는 것을 목표로 하고 있다. 기능 (3) 및 (4)는 막장에서 작업 중

표 2. 지반 변위계측기술의 개요와 특징

측정방법	Non Prizm 자동추적형TS	레이저 변위계	레이저 거리계
개요	전용 타켓을 설치하지 않아도 임의의 개소의 3 차원 변위를 계측	눈 타켓으로 측정기에서 피측정물까지 거리를 레이저 광선을 이용하여 고정밀 측정	눈 타켓으로 측정기에서 피측정물까지의 거리를 레이저 광선 으로 측정
3차원 계측	가능	곤란	곤란
측정정도	\pm 수 mm	수 μ m	\pm 1mm
측정거리의 범위	최대 100m 정도	최대 1m 정도	최대 200m 정도
동시 다점계측	측점수가 증가하면 동시계측은 곤란	사이클을 통하여 연속적인 동시계측은 곤란	측점수가 증가하여도 동시 계측이 가능

신기술 신공법

인 작업원에 평가결과를 신속하게 주지하여 적절한 행동(작업중지, 막장에서 피난 등)을 할 수 있는 주의환기 하는 것을 목표로 하고 있다.

- 측정범위 : 0.05~200m
- 측정정밀도 : ± 1.0mm (표준편차의 2배)
- 측정빈도 : 최소 1초 간격
- 비고 : 제어용 PC로의 데이터 전송은 BLUE TOOTH 사용가능.

3.2 감시시스템의 개요

그림 1은 여러 대의 레이저거리계에 의한 다점동시계측이 가능한 막장안전감시 시스템의 구성 예를 표시하고 있다. 레이저거리계는 점보드릴 혹은 막장 부근의 강제지보공에 설치하고(사진 4, 사진 5) 계측데이터는 점보드릴 내에 설치한 제어용PC(그림 1참조)에 무선으로 데이터를 전송한다.

제어용PC에서 연산처리를 연차적으로 행하고, 계측치가 관리치를 넘는 경우 유선 혹은 무선으로 접속한 카메라나 경고등이 작동한다.

사용한 레이저 거리계의 사양은 이하와 같다.

- 제조사, 제품명 : Leica DISTO TM D8

3.3 계측결과와 평가 방법

막장안전감시 시스템에 의하여 취득한 계측데이터는 레이저거리계에서 측정까지의 거리로, 그 거리를 연속적으로 계측하는 것으로 레이저 광의 광축방향의 변위량을 측정한다. 여기서 레이저거리계는 막장면에 대한 법선 방향에 설치되는 것에 국한되지 않으므로 측정값은 엄밀하게는 막장의 변위량과 일치하지 않는다. 그렇지만 막장에서 20m후방의 도로 2차선 단면(폭10m)의 측벽에 레이저거리계를 설치한 경우 막장 중앙에서 100mm의 변위량이 발생하면 측정값은 103mm가 된다. 이런 양자의 차는 3% 정도로 적어 실용상은 문제가 없는 것으로 판단된다.

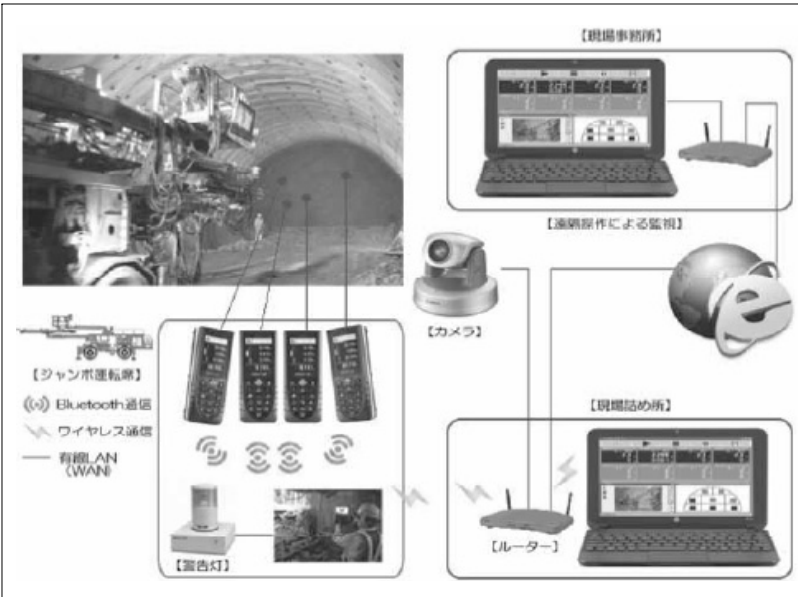


그림 1. 막장안전감시시스템의 구성 예



사진 4. 점보드릴 설치 예



사진 5. 강제 지보공 설치 예

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.

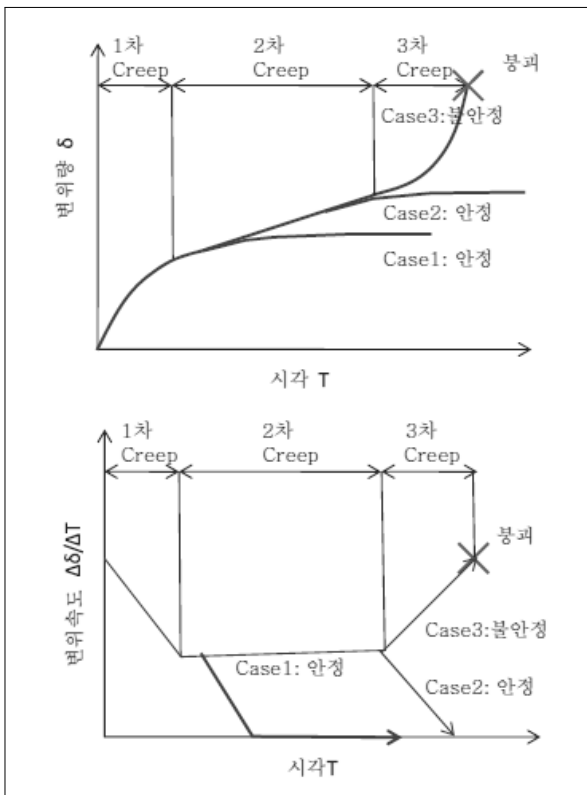


그림 2. Creep 파괴를 가정한 평가 방법의 개요

표 3에 레이저거리계의 측정으로 얻어진 평가 지표와 평가 기준을 표시한다. 지반의 변위량을 평가 지표로 하는 경우, 지반의 한계 변형에서 얻어지는 변위량이나 사전 수치해석에서 예측된 변위량과 크기 비교를 하는 것으로 평가 가능하다.

본 개발에서 대상이 되는 연질지반에서는 막장의 변위

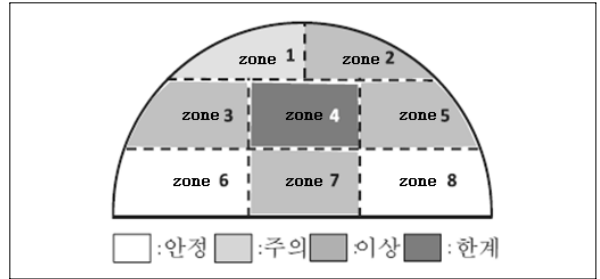


그림 3. 막장안정성의 구역표시 예

는 그림 2에 표시된 Creep 곡선에 따라 가장 가능한 것으로 하면, 변위속도를 평가 지표로 하여 변위속도가 0이 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, 막장 붕괴까지의 시간 예측이 가능하게 된다.

개발한 시스템은 현재까지 1대의 제어용PC에 최대 8층 점까지의 변위 계측이 가능하다. 굴착 폭 10m 정도의 터널에는 그림 3과 같이 막장 8개로 구역을 나누고 구역마다 안정성을 색으로 식별하여 실시간 표시 할 수 있다. 이것에 따라 시각적으로 확인 할 수 없는 취약부의 분포나 그 추이가 시각적으로 정량적으로 확인 가능, 막장 안정 대책공의 시공 단계로의 설계 및 시공에 활용 가능하다.

3.4 실내 정밀도 시험결과

레이저가 투사된 측정 대상물 요철이 측정 정밀도에 주는 영향을 파악하기 위하여 평 단면과 뿔머 붙인 면을 대상으로 하여 실내 정밀도 시험을 행하였다. 사진 6에 측정 대상물을 그림 4에 시험결과를 표시하였다. 평 단면은 플라스틱제의 판으로 측정거리의 범위는 5~25m이다.

그림 4에 금번 시험한 측정거리에는 측정값 표준 편차는 투사면의 종별에 관계없이 모두 0.5mm미만으로 양자의 차이가 적어 투사면의 요철은 측정 정밀도에 영향이 없는 것으로 판단된다.

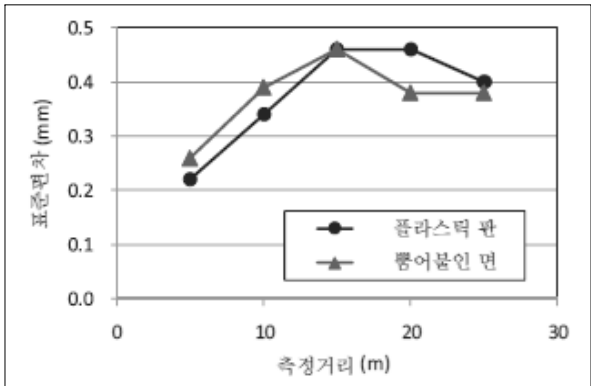


그림 4. 측정면의 요철의 경향



사진 6. 측정대상물의 외관

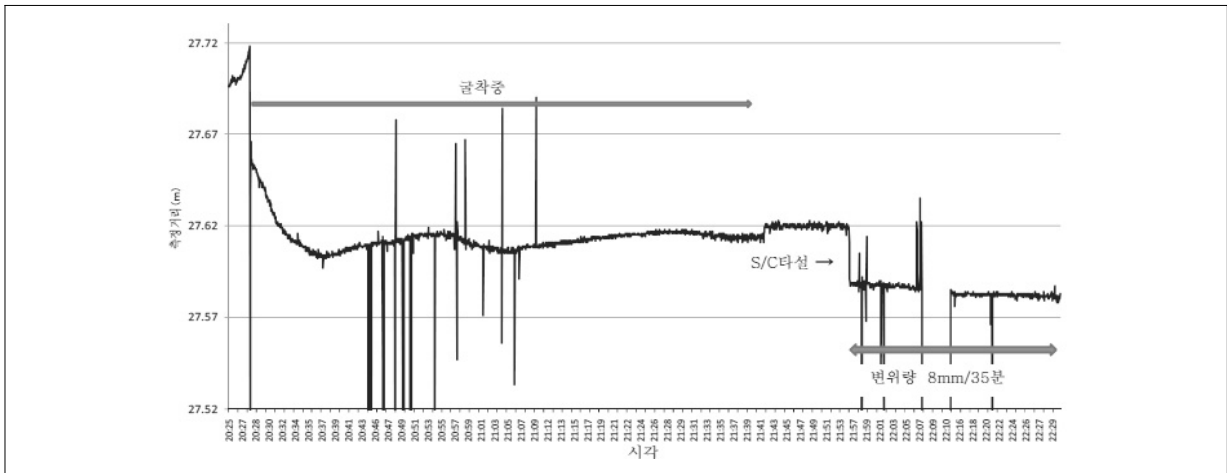


그림 5. 막장 추출량의 경시변화도

4. 시험적용

4.1 연질화한 경석응회암지반의 사례(5)

1) 적용터널 현장의 개요

변질열화에 의하여 연질화 된 경석응회암 지반에서 막장붕괴가 자주 발생한 도로 터널에 있어서 막장 안전감시 시스템을 시험 적용하여 그 유효성을 입증하였다.

터널 공사의 개요는 아래와 같다.

- 공사명 : 동경중앙자동차도로 오오자소우 터널공사
- 공기 : 2007년 3월 20일~2011년 2월 28일
- 공사장소 : 후쿠시마현 후쿠시마시 오오자소 지역내
- 발주자 : 국토교통성 도후쿠지방정비국
- 터널연장 : 2,089m
- 굴착단면 : 약 89m²(DI-b)

2) 계측결과와 고찰

그림 5에 토피 100m 연약한 경석응회암이 분포하는 DI-b의 상반 중앙부 막장(사진 7)에서 측정된 측정 데이

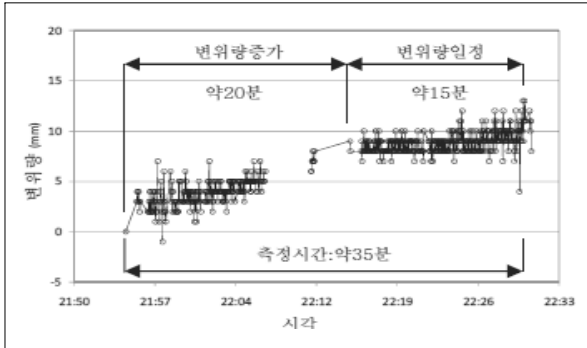


그림 6. 막장 압출량의 경시변화(정: 압출)

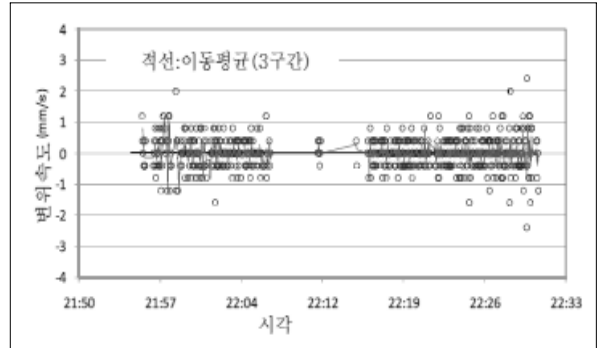


그림 7. 변위속도의 경시 변화



사진 7. 상반 막장상황 : 경음회합

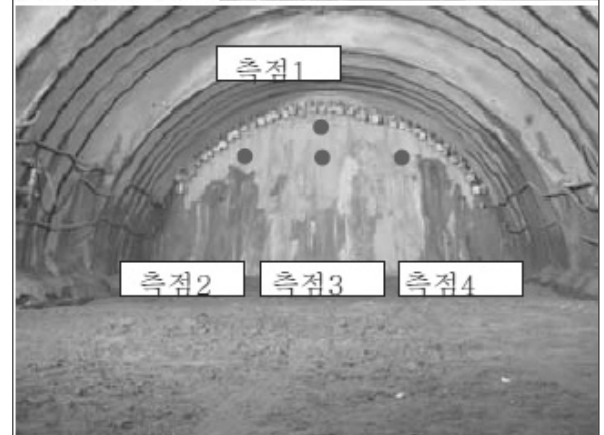


사진 8. 막장압출량의 감시 상황

터를 표시한다.

또한, 그림 6, 7에는 각각 슛크리트 타설 완료 후 약 35 분간의 변위량 및 변위속도 변화를 표시한 것이다.

그림 5로부터 굴착, 1차 타설 중 타설 완료 후의 막장의 거동이 연속적으로 계측하고 있다는 것을 알 수 있다. 또한 계측 개소에 슛크리트 타설 전후에 약 30mm 거리가 변화하고 있는 것으로 슛크리트 두께 관리에도 활용 가능하다. 한편, 그림 중의 계측 데이터에 있어서 측정값이 크게 변동하고 있는 것은 레이저 거리계 설치 지점과 막장 측정점 사이의 굴착 기계나 작업원의 작업 중에 기인 한 것이다. 현재의 시스템에서는 측정 데이터의 변동에 한계치를 설정하고 그 한계값을 넘는 변동이 있는 경우에는 계

측 데이터를 자동적으로 폐기하는 기능을 추가하고 있다.

다음으로 그림 6에 숏크리트 타설 완료 후의 막장의 변위량은 약 20분에 8mm정도 발생한 가운데 수렴하고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 그림 7과 같이 변위속도의 경시변화를 보아도 동일한 것으로 파악한다.

본 측정 단면에는 막장의 변위량이 10mm미만으로 적기 때문에 초기 변위속도는 적었지만 막장의 거동은 그림 2의 아래 그림과 같이 [Case-2]에 분류되어 측정 개소의 지반은 안정된 것으로 판단 가능하다.

이상의 것로부터 막장 붕괴 전에 비교적 큰 변위가 발생하는 연질지반에서는 막장을 복수의 구역으로 구분하고 구역별로 막장의 변위량이나 변위속도의 변화를 파악하는 것으로 막장 안정성을 평가할 수 있는 가능성이 증명되었다.

4.2 미고결 사질지반의 사례

1) 적용 터널 현장의 개요

지하수위하의 미고결지반에서 막장 안정대책으로 주입식 강관다단 공법이 적용된 도로 터널에 대하여, 주입시의 막장 거동 감시에 시험 적용하여 그 유효성을 입증하였다.

터널 공사의 개요는 아래와 같다.

- 공사명 : 권양도 가사모리 터널 4공구
- 공기 : 2010년 2월 26일~2012년 2월 29일
- 공사장소 : 치바현 초우세이군 미나미쵸
- 발주자 : 국토교통성 간토우 지방 정비국
- 터널연장 : 전장 2,420m
상반굴착 628.3m, 하반굴착 690.6m,
복공/방수공 1,354.5m
- 굴착단면 : 약 102.86m²(W-DIF)

2) 계측결과와 고찰

막장추출량 계측은 사진 8과 같다. 막장안정 대책공 시

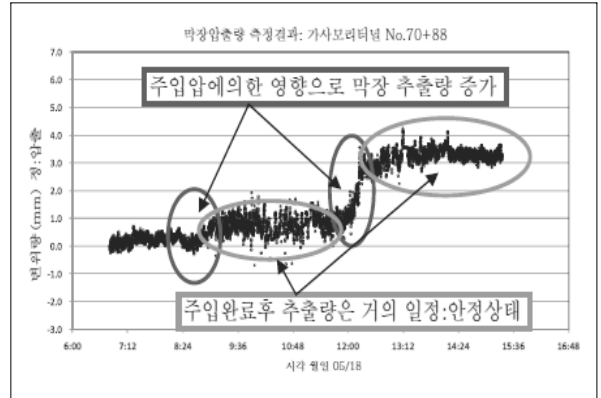


그림 8. 막장 추출량의 경시변화도(측정No.3)

공중에 4대의 레이저거리계를 이용하여 실시하였다. 그림 8에 측정 No.3의 막장추출량의 경시변화도를 표시하였다.

그림 8에 의하여 뽑어 붙이기 타설로 보강된 막장은 우레탄계 주입재의 주입에 의하여 수mm정도 추출된 후, 일정 값으로 수렴된 것을 알 수 있다. 특히 2차 주입시에 약 2.5mm 추출된 것을 명확하게 알 수 있다. 이것으로 본 시스템을 막장 대책공 시공시에 적용하는 것으로 대책공 시공중의 막장의 안정성을 감시 평가가 가능한 것으로 판단된다.

4.3 국내적용사례

1) 적용 터널 현장의 개요

- 공사명 : 신림-봉천 터널 2공구
- 공기 : 2011년 10월 31일~2017년 12월 31일
- 공사장소 : 서울시 관악구 낙성대동
- 발주자 : 서울시 도시기반시설본부
- 터널연장 : 전장 2,237m
- 굴착단면 : 약 110.00m²



사진 9. 막장면 거동 감시 상황

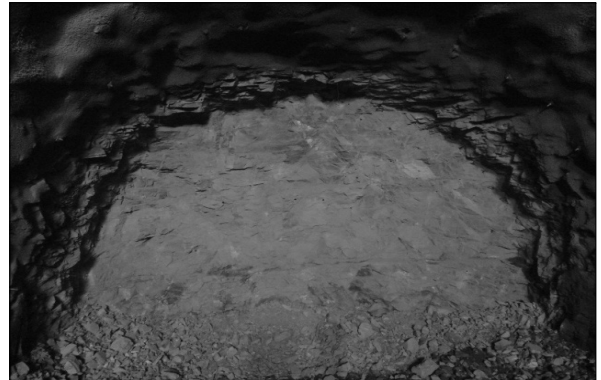


사진 12. 터널막장상황 : 편마암(연암,경암)



사진 10. 경광등 작동



사진 11. 제어용 PC

2) 계측결과와 고찰

사진 9는 여러 대의 레이저거리계에 의한 다점동시계측이 가능한 막장안전감시 시스템의 구성을 나타내고 있

다. 레이저거리계는 막장에서 20~30m후방 부근의 지반에 설치하고(사진 9, 사진 10)계측데이터는 삼각대위에 설치한 제어용PC(사진 11)에 무선으로 데이터를 전송한다.

제어용PC에서 연산처리를 연차적으로 행하고, 계측치가 관리치를 넘는 경우 유선으로 접속한 경광등에 경고등이 작동한다.

※ 경광등 경고단계 표시

안전: 초록색, 주의: 노랑색, 위험: 적색

당 현장에서의 막장안전감시시스템관리는 터널작업 중 지보설치 및 화약장약작업 진행시에 중점적으로 관리하여 Data를 취득하고 있으며 측정데이터는 레이저거리계에서 막장면까지의 거리로, 그 거리를 연속적으로 계측하는 것으로 레이저광의 광축방향의 변위량을 측정한다.

막장안전감시시스템 측정은 사진 9, 10과 같으며 막장면 거동 계측은 사진 11과 같다.

막장작업 시공 중에 5대(측점 No.1~No.5)의 레이저거리계를 이용하였으며, 그림 9는 막장화약장약 작업시간 약 1시간 30분 동안 측정한 측정 데이터를 나타낸 것으로 변위량 및 변위속도 변화를 표시한 것이다.

그림 9 터널 막장변위 경시변화도(No.1)를 보면 막장

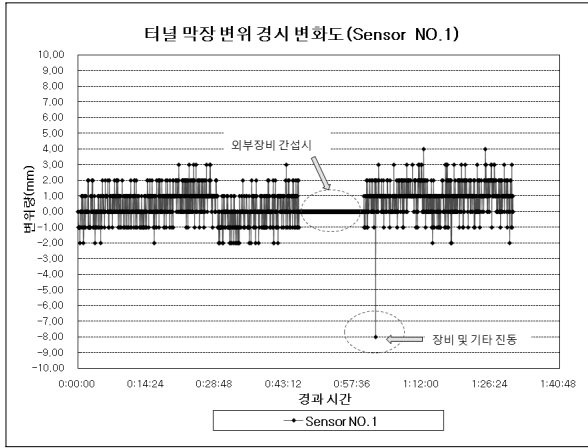


그림 9. 터널 막장변위 경시변화도(No.1)

발파이후 화약장약 작업중에 측정된 것으로 오차변위 $\pm 1\text{mm}$ 이내에서 추출됨을 알수 있다. 또한 장비 및 작업자의 이동에 따른 레이저빔 간섭시와 장비 및 기타 진동시 이상 데이터를 확인할 수 있다. 당 현장의 막장 지질 상태는 경암질의 편마암(연암, 경암)이 분포하고 있으며 RMR점수는 65점으로 막장변위발생은 1~2mm로 미미하게 나타났다.

이것으로 본 시스템을 화약장약작업 공정 진행시 적용한 결과 막장의 안정성을 평가함으로써 터널 작업자들의 안전성을 감시할 수 있음이 증명되었다.

6. 맺음말

터널의 시공에 대하여 굴착 작업이 집중되는 막장의 변위거동을 상시 감시하고 그 안정성을 실시간 평가하는 것은 굴착공사의 안정성을 향상시키기 위하여 불가피하다.

본 논문에서는 토목건축공사의 측량에 이용되어지는 레이저거리계를 이용하여 비교적 변위량이 큰 연질지반을 대상으로 막장 안전감시 기술의 개발 개요와 시험적용 결과를 서술하였다.

그 결과 연질지반에서는 레이저거리계를 이용하여 연속적으로 다점으로 막장 거동을 측정하고 변위량의 수렴 경향이나 변위속도에 의거하여 막장의 안정성 평가 가능성을 표시하였다.

본 막장면안전감시시스템의 막장안정성 평가를 토대로 터널 작업자들의 위험을 최소화 할 수 있을 것으로 판단 된다.

또한 향후, 유사지반이나 상이한 암종의 적용사례를 수집하고 관리 기준의 설정 방법에 대하여 검토를 더하여 본격적으로 막장의 안전감시에 적용하고자 한다. 또한, 슛크리트타설이나 락볼트 등 막장 안정대책공의 시공 단계에서 수정설계에도 활용할 예정이다.

더욱이, 본 시스템은 간이로 비접촉으로 지반이나 구조물의 변위거동이 원격 감시 가능한 것으로부터, 출입이 곤란한 법면이나 구조물 등의 동태 감시에도 활용 가능하다고 판단이 된다.