

터널 3차원 절대변위 해석기법을 이용한 막장전방지반 예측

Prediction of Ground Condition Changes Ahead of Tunnel Face Using Three-Dimensional Absolute Displacement Analysis

방준호*¹, 한일영²

Bang, Joon-Ho · Han, Il-Young

Abstract

Arching effect occurs around the unsupported excavation surface near to tunnel face when a tunnel is excavated in a stable rock mass. If a weak fracture zone exists in front of tunnel face, a displacement occurs between tunnel face and weak fracture zone due to stress concentration. If three-dimensional absolute coordinates (longitudinal, transverse, vertical direction) is measured at tunnel face by geodetic method, the ground change in front of the tunnel face can be predicted by analysing three-dimensional absolute displacement. The purpose of this study is to verify the analysis method of three-dimensional absolute displacement by comparing the trend of displacement ratio at crown and sidewall of tunnel and the influence line/trend line of crown settlement compared with TSP results in the same section.

Keywords : Three-dimensional absolute displacement, tunnel face, weak zone, influence line, trend line

요 지

안정된 암반에 터널을 굴착하는 경우 아칭효과에 의해 막장주변에 응력재배치가 발생하고 터널 막장 전방에 연약대가 존재하는 경우 응력재배치가 충분히 이루어지지 않아 막장과 연약대 사이의 응력집중으로 인해 변위가 발생하게 된다. 만일 막장에 근접하여 측점에서 종방향, 횡방향, 연직방향의 3차원 절대좌표가 측정되는 경우 막장전방의 지반거동이 반영된 3차원 절대변위가 산정되고, 이러한 3차원 절대변위의 분석을 통해 막장전방의 지반조건을 예측할 수 있게 된다. 본 연구에서는 4개 현장에서 측정된 3차원 변위비의 경향선과 천단침하의 영향선/경향선 분석을 실시하여 연약대 위치를 추정하였고, 3차원 절대변위의 분석에 의해 추정된 연약대 위치를 동일한 구간에서의 TSP탐사로 추정된 연약대 위치와 비교함으로써 3차원 절대변위 해석기법의 현장 적용성을 검증하였다.

주요어 : 3차원 절대변위, 막장, 파쇄대, 영향선, 경향선

1. 서론

국내에서 터널 굴착 시 널리 적용되고 있는 NATM 공

법의 특징은 현장여건에 맞게 시공법의 변경이 가능하다는 점이다. 이러한 공법의 유연성은 현장에서 수행되는 계측결과와 피드백을 통해 가능하기 때문에, NATM공

*1 정회원, SK건설(주) 기술본부 연구소 과장 (jhsang-a@skec.co.kr)

2 정회원, SK건설(주) 기술본부 연구소 소장

법에 있어 현장계측은 중요한 역할을 담당하고 있다.

일반적으로 터널에서의 현장계측은 일상계측과 대포 단면 계측으로 구분되며, 주로 변위, 응력 등과 같은 물리적인 값을 획득하고 분석하여 시공에 다시 반영하는 과정상에 기여하게 된다. 터널의 일상 계측항목 중 내공 변위는 시공단계에서의 안정성 평가, 다음 굴착단계의 진행여부 등과 같은 중요한 판단의 기초자료로 제공될 수 있는데, 최근 테이프 신장계(tape extensometer)과 레벨(level)을 이용하는 2차원 상대변위 계측법 대신에 계측용 광파기(total station)을 이용하는 3차원 절대변위 계측법이 널리 이용되고 있다.

3차원 절대변위 계측법의 가장 큰 특징은 기존의 2차원 상대변위 계측법에 비해 다양한 데이터 분석방법이 제공되어 막장전방의 지반에 대한 평가가 가능하다는 점이다. 즉, 3차원의 절대변위에 대한 변위비(displacement ratio)의 경향선 변화 또는 변위비와 천단침하 등 변위의 영향선/경향선(influence line/trend line) 변화를 통해 막장전방의 연약대 존재여부를 판단할 수 있다는 점이다. 이러한 3차원 절대변위 계측법은 터널에서의 계측용 광파기와 반사타겟(reflector) 도입으로 가능하게 되었다(Rabensteiner, 1996).

본 연구에서는 국내 터널 현장에서 측정된 3차원 변위비 그래프의 경향선과 천단침하의 영향선/경향선 분석을 실시하여 연약대 위치를 추정하여 동일한 구간에서의 TSP(tunnel seismic prediction)탐사로 추정된 연약대 위치와 비교함으로써 3차원 절대변위 해석기법의 현장 적용성을 검증하였다.

2. 터널 굴착에 따른 아칭

안정된 응력상태를 보이는 암반에 터널을 굴착하는 경우 아칭효과(arching effect)에 의해 막장 주변으로 응력재배치가 발생하게 되고, 이러한 응력재배치 현상은 터널의 안정성 확보에 중요한 역할을 하게 된다. 그러나, 터널 시공 중 막장 전방에 파쇄대와 같은 연약대가 있는 경우 연약대로의 응력재배치가 충분히 이루어지지 못해 막장과 연약대 사이에 응력집중이 발생하게 되어 막장면에 인접한 부위에서의 변위가 급격히 증가하게 되므로 사전에 막장전방의 연약대를 감지하지 못하는 경우 터널

의 붕괴 또는 붕락을 초래할 수도 있다.

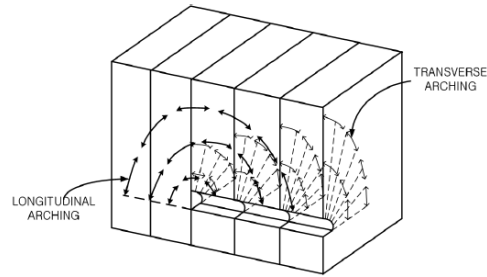


그림 1. 터널의 3차원 아칭

3. 3차원 절대변위 계측 및 해석방법

3.1 3차원 절대변위 계측방법

터널에서의 3차원 절대변위 계측법은 계측용 광파기로 변위가 수렴되어 안정한 상태에 도달한 지점을 기준점으로 설정하고, 측정하고자 하는 위치에 설치된 반사타겟을 광파기로 조사(照射)함으로써 측정점의 종방향, 횡방향, 연직방향 좌표를 얻는 것이다.

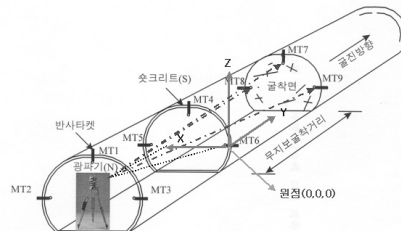


그림 2. 3차원 절대변위 계측 개념

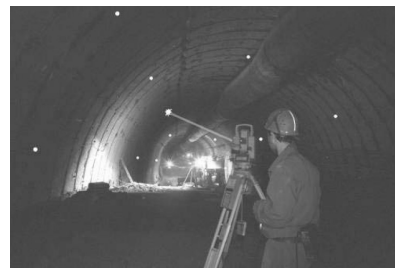


그림 3. 3차원 절대변위 계측

계측용 광파기에서 3차원 절대좌표를 구하는 원리는 EDM(electric distance meter)와 경위의를 통한 삼각 측량에 의한 것으로, 근적외선 광파를 반사타겟에 조사한 후 반사타겟의 반사광을 받아서 조사광과 반사광의 위상차로부터 거리를 구하고 계측용 광파기에서 측정한 수평각과 연직각을 이용하여 측정점의 3차원 절대좌표를 산출하는 것이다. 그리고 3차원 절대변위는 터널내공면의 측정점에서 얻어진 3차원 절대좌표의 초기치 대비 변화량에 대한 벡터합을 계산하여 구하게 된다.



그림 5. 선단앵커정착형 반사타겟

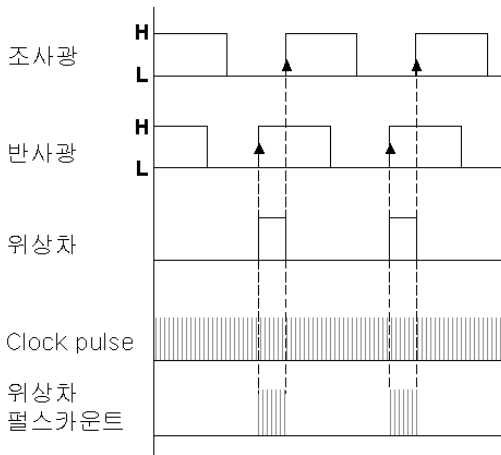


그림 4. EDM(electric distance meter)원리

한편, 터널 내공면 측정에서의 3차원 절대변위를 측정하기 위해 반사타겟이 필요한데, 국내외에서 사용되고 있는 반사타겟은 발파비산에 의해 손망실이 발생하고, 천공장비를 사용해야 하고 설치시 많은 시간이 소요되는 등 실제 적용상에 문제점이 있다.

이에 SK건설(주) 연구소에서는 기존 반사타겟의 문제점인 발파비산물에 의한 손망실과 설치상 문제점을 개선한 선단앵커정착형 반사타겟을 개발하였다. 본 제품은 선단부를 썬기형으로 처리하여 선단앵커내의 썬기를 햄머 등으로 타격하여 쉽게 설치할 수 있도록 하였고, 착탈식 기능을 부여하여 발파비산물에 의한 손망실을 최소화 하였으며, 양면에 반사시트를 부착하여 전후방 측정이 가능하도록 한 것이 특징이다.

3.2 3차원 절대변위 해석방법

3.2.1 영향선/경향선에 의한 막장전방 예측

Schubert와 Steindorfer(1996)는 3차원 절대변위를 이용하여 막장전방 지반을 예측할 수 있는 해석기법을 제안하였다. 이 기법은 영향선과 경향선으로 정의된 그래프를 측정위치에 따라 도시하고 그래프의 변화로부터 막장전방의 지반상태를 예측하는 것으로 3차원 절대변위로부터 구할 수 있는 천단침하 등의 변위와 종방향변위/연직방향변위 비 등의 계측변위비에 적용할 수 있다.

그림 6에서 보는 바와 같이 막장전방에 연약대가 존재하는 경우 막장이 연약대에 접근함에 따라 영향선 그래프에서 영향선간의 면적이 증가하게 되고, 경향선 그래프에서는 경향선이 직선으로 일정하게 진행되다가 연약대에 접근함에 따라 증가 또는 감소하게 되므로 이러한 영향선과 경향선의 변화로부터 막장전방의 연약대 존재 여부를 판단할 수 있게 된다.

3.2.2 천단 종방향변위/연직방향변위 비에 의한 막장전방 예측

Schubert와 Steindorfer(1996)은 천단부에서의 종방향변위와 연직방향변위의 비를 이용하여 막장전방을 예측할 수 있는 해석기법을 제안하였다. 그림 7에서 보는 바와 같이 막장이 경암에서 연암으로 진행되는 경우 막장 전방으로의 응력재배치가 이루어지지 않아 막장과 연약대 사이에 응력집중이 발생하여 천단부의 종방향변위 L값이 연직방향변위 C값에 비해 상대적으로 크게 발

생하여 결국에는 L/C변위비가 증가하게 된다.

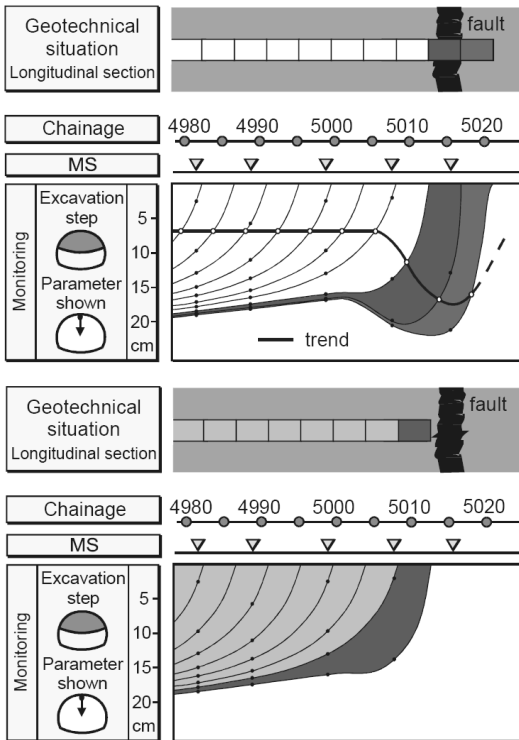


그림 6. 막장이 연약대에 접근할 때의 영향선과 경향선 변화

3.2.3 측벽변위/천단침하 비에 의한 막장전방 예측

Schubert와 Steindorfer(2002)은 동일 단면에서 측벽변위와 천단침하 비를 구해 터널 굴착면의 외부의 연약대를 예측할 수 있는 해석기법을 제안하였다. 그림 8에서 보는 바와 같이 연약대가 터널 축과 각도를 이루어 존재하는 경우 막장이 좌측 연약대에 접근함에 따라 좌측벽변위와 천단침하 비가 증가하다가 감소하고, 막장이 우측 연약대에 접근함에 따라 다시 우측벽변위와 천단침하 비가 증가하다가 감소하는 경향을 보인다.

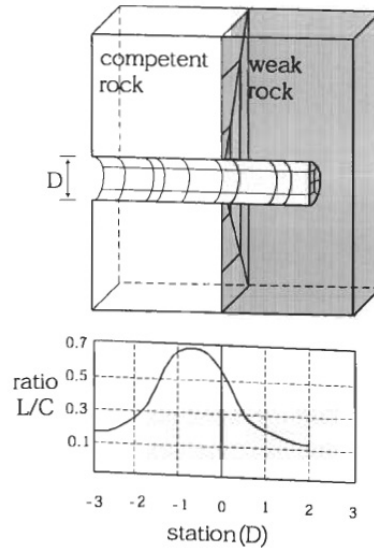


그림 7. 경암에서 연암으로 굴진될 때의 L/C변위비 변화

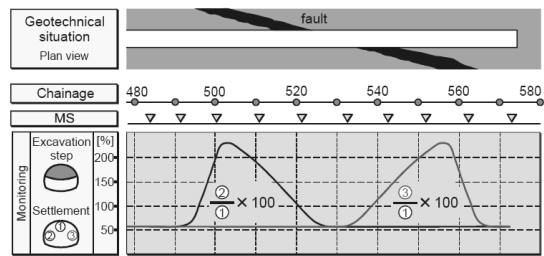


그림 8. 막장이 연약대에 접근할 때의 측벽변위/천단침하 비 변화

4. 현장 3차원 절대변위 예측결과 분석

현장 3차원 절대변위 예측이 시행된 4개 현장에 대해 3차원 절대변위 해석기법을 이용하여 변위비의 경향선 분석과 천단침하의 영향선/경향선 분석을 실시하였다.

이러한 3차원 절대변위의 분석에 의해 추정된 연약대 위치를 동일한 구간에서의 TSP탐사로 추정된 연약대 위치와 비교함으로써 3차원 절대변위 해석기법의 현장 적용성을 검증하였다.

4.1 고창-장성간 고속도로 2공구

4.1.1 현장개요

고창-장성간 고속도로 2공구는 서해안 고속도로 고창 IC와 호남고속도로 장성IC 및 88고속도로 담양IC를 연결하는 현장으로 현장 내 터널구간인 고창터널은 전라북도 고창군 고수면에서 전라남도 장성군 서삼면을 연결하는 터널로서 연장은 상행선 3.8km, 하행선 3.8km이고 터널 폭은 12.5m이며, NATM공법으로 굴착을 시행하였다.

본 터널의 지질은 선캄브리아가의 편암류와 이를 관입한 주라기의 화강암류가 분포하며, 선캄브리아가의 편암류는 화강편암, 흑운모편암이 주로 발달하여 분포하며 과업구간에는 흑운모편암이 소규모 포획암의 형태로 분포, 주라기 화강암류는 크게 반상화강암 및 복운모 화강암과 엽리상 화강암으로 구분되어 있다.

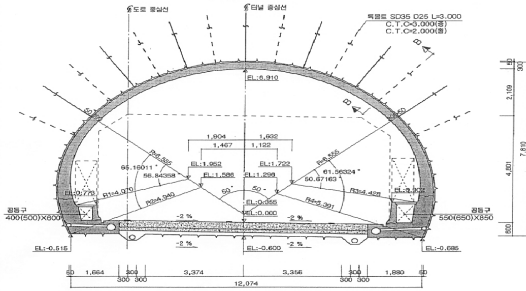


그림 9. 고창터널 표준 단면도

4.1.2 TSP탐사

본 탐사는 막장위치가 1+265일 때 1+265에서 1+450까지 약 185m 구간에 대해 실시하였고, 회절중합법을 이용하여 자료처리를 실시하였다. TSP탐사위치 및 탐사범위는 표 1과 같다. 그림 10은 회절단면도를 이용하여 탐사결과를 도시한 것이며, 표 2는 TSP탐사결과에 의해 예상되는 연약대의 위치 및 특성을 나타낸 것이다.

탐사결과 탐사구간내에서 총 7개소에서 연약대가 예측되었는데, 1+275, 1+400, 1+420, 1+450지점 부근에서 각각 단층대와 파쇄대가 있는 것으로 분석되었으며, 1+300 지점 전후로 소규모 파쇄대 3개소가 있는 것으로 분석되었다.

표 1. TSP 탐사위치 및 탐사범위

막장 위치	발전공 위치	수진공 위치	탐사범위
1+265	1+218~253	1+199	1+265~450

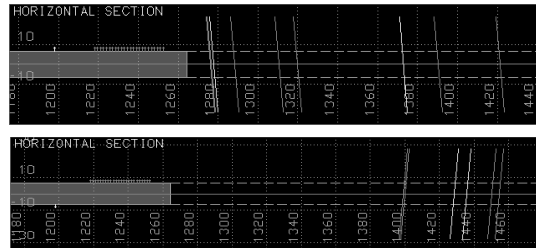


그림 10. TPS탐사 해석결과

표 2. TSP 추정 연약대와 막장관찰

위치	TSP탐사	
	특성	막장관찰
1+275	단층대	절리군
1+290	소규모파쇄대	절리군
1+320	소규모파쇄대	절리군
1+390	소규모파쇄대	절리군
1+400	파쇄대	절리군
1+420	파쇄대	파쇄대
1+450	파쇄대	파쇄대

4.1.3 현장 3차원 절대변위 분석

- 천단침하의 영향선/경향선

그림 11은 천단침하의 영향선/경향선 분석결과와 TSP 탐사결과에 의해 예측된 연약대의 위치를 비교한 것이며, 그래프에서 굵은 선은 경향선이며, 가는 선은 영향선을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 전반적으로 경향선으로 예측가능하나 일부 구간에서는 영향선에 의해 연약대를 예측할 수 있었다. 첫 번째 연약대의 경우는 경향선보다는 영향선의 경향으로부터 예측이 가능하였고, 두 번째 연약대의 경우는 영향선이 1+270지점부터 변하기 시작하여 1+290지점까지 상승하다가 회복되는 경향을 보이고 있어 1+270지점부터 1+290지점 사이에 연약대가 존재할 것으로 예측되었고, 경향선에서도 유사

한 경향을 보이고 있어 예측이 가능하였다.

세 번째 연약대는 경향선이 1+303지점부터 경향선이 상승하다가 1+330지점 이후 다시 하강하는 경향을 보이고 있어 1+303에서 1+330지점 사이에 연약대가 존재하는 것으로 유추할 수 있으며 TSP탐사결과와 일치하였다. 한편, 네 번째에서 여섯 번째 연약대는 경향선의 변화가 미미하여 예측할 수 없었고, 일곱 번째 연약대의 경우는 영향선으로부터 예측할 수 있었다.

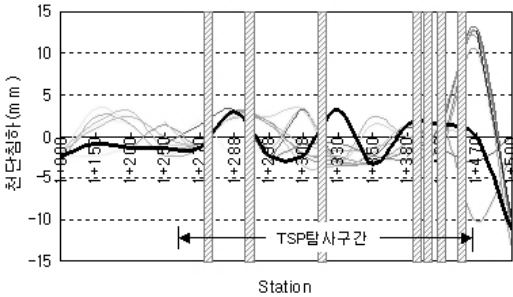


그림 11. 천단침하의 영향선 및 경향선

천단침하의 영향선/경향선 분석에 의한 연약대 예측도는 전체 7개소 중 4개소를 예측할 수 있어 약 58% 정도를 보이고 있다. 한편, 천단침하의 영향선/경향선은 전반적으로 연약대의 위치로부터 터널 폭의 2배인 약 20~30m 전방부터 변하기 시작하는 것으로 분석되었다.

- 천단부의 종방향변위/연직방향변위 비

그림 12는 굴착방향으로 천단부에서 측정된 종방향변위와 연직방향변위의 비를 표시한 것이다. 그림 12에서 보는 바와 같이 첫 번째, 세 번째, 네 번째와 다섯 번째 연약대는 종방향변위/연직방향변위 비에 대한 그래프의 경향으로부터 예측이 가능하였으나, 나머지의 경우 그래프의 변화폭이 미미하여 예측이 불가능하였다.

종방향변위/연직방향변위 비의 분석에 의한 연약대 예측도는 전체 7개소 중 4개소를 예측하고 있어 약 58% 정도를 보이고 있다. 한편, 종방향변위/연직방향변위 비의 그래프는 연약대의 위치로부터 터널 폭의 1배인 약 10m 전방부터 변하고 있음을 알 수 있었다.

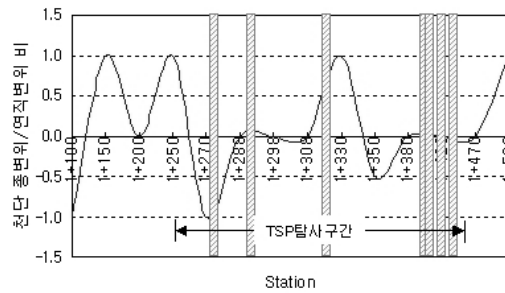


그림 12. 천단부의 종방향변위/연직방향변위 비

- 측벽변위/천단침하 비

그림 13과 14는 각각 좌, 우측벽변위와 천단침하 비를 표시한 것으로 전반적으로 그래프의 등락경향으로부터 연약대의 예측이 가능하였다. 그림에서 보는 바와 같이 TSP탐사에 의한 연약대 위치가 측벽변위/천단침하 비 그래프의 정점 또는 저점과 대부분 일치하여 나타나고 있어 측벽변위/천단침하 비로부터 연약대의 예측이 가능하다는 것을 알 수 있었다.

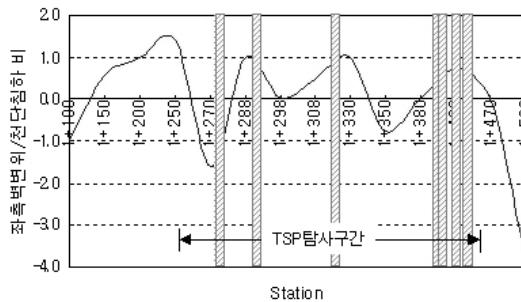


그림 13. 좌측벽 변위/천단침하 비

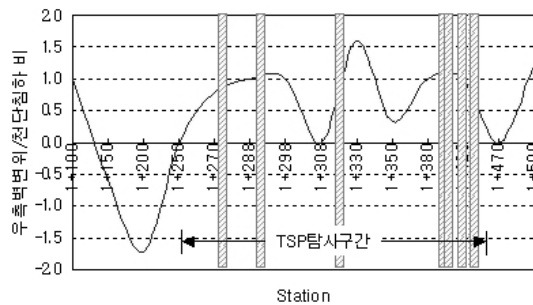


그림 14. 우측벽 변위/천단침하 비

좌, 우측벽변위/천단침하 비의 분석에 의한 연약대 예측도는 평균 64% 정도를 보이고 있고, 측벽변위/천단침하 비의 그래프는 연약대의 위치로부터 터널폭의 2배인 약 20~40m 전방부터 변하고 있음을 알 수 있었다.

4.2 풍동-용두간 도로

4.2.1 현장개요

충주시판내국도대체우회도로(풍동-용두) 현장은 충청북도 충주시 풍동에서 충주시 용두동까지 연결하는 국도대체 도로 현장으로 현장 내 터널구간인 용관터널은 충주시 풍동에서 용두동을 연결하는 터널로서 연장은 상행선 0.4km, 하행선 0.5km이고, 터널폭은 9.8m이며, NATM공법으로 굴착을 시행하였다.

본 터널의 지질은 신생대 4기의 충적층이 넓게 분포하고 있으며, 하부로부터 결정질 석회암으로 구성된 조산계 대석회암층의 석회암층과 관계불명인 변성퇴적암층이 놓이며 옥천계 지층이 피복되어 있다. 백악기의 화성암류는 이들 암층을 관입하였으며 분화과생암인 암맥들로 구성되어 있다.

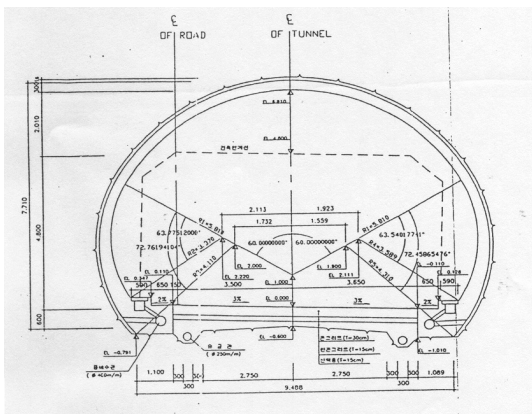


그림 15. 용관터널 표준 단면도

4.2.2 TSP탐사

본 탐사는 막장위치가 5+183일 때 5+120에서 5+235까지 약 115m 구간에 대해 시행하였고, 회절중합법을 이용하여 자료처리를 실시하였다. TSP탐사위치 및 탐사

범위는 표 3과 같다. 그림 16은 회절단면도를 이용하여 탐사결과를 도시한 것이며, 표 4는 TSP탐사결과에 의해 예상되는 연약대의 위치 및 특성을 나타낸 것이다.

탐사결과 탐사구간내에서 총 5개소에서 연약대가 예측되었는데, 1+275, 1+400, 1+ 420, 1+450 지점 부근에서 각각 단층대와 파쇄대가 있는 것으로 분석되었으며, 1+300 지점 전후로 소규모 파쇄대 3개소가 있는 것으로 분석되었다.

표 3. TSP 탐사위치 및 탐사범위

막장 위치	발진공 위치	수진공 위치	탐사범위
5+183	5+185~220	5+235	5+120~235

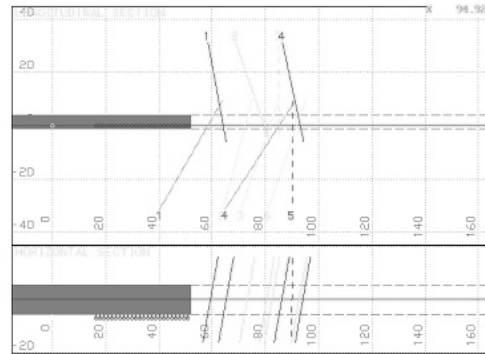


그림 16. TPS탐사 해석결과

표 4. TSP 추정 연약대와 막장관찰

위치	TSP탐사		막장관찰
	특성		
5+142	파쇄대		파쇄대
5+145	파쇄대		절리군
5+150	단층파쇄대		파쇄대
5+171	단층파쇄대		절리군
5+177	파쇄대		파쇄대

4.2.3 현장 3차원 절대변위 분석

- 천단침하의 영향선/경향선

그림 17은 현장 데이터에 의한 영향선/경향선과 TSP

탐사에 의한 연약대의 위치를 비교한 그래프이다. 그림 17에서 보는 바와 같이 5+130에서 5+150지점까지는 경향선에 의해, 5+150에서 5+190지점까지는 영향선에 의해 연약대 예측이 가능하였다.

첫 번째와 두 번째 연약대의 경우는 경향선이 5+130 지점부터 변하기 시작하여 5+150지점까지 상승하다가 회복되는 경향을 보이고 있어 5+130지점부터 5+150지점 사이에 연약대가 존재하는 것으로 유추할 수 있었으며 이는 TSP탐사결과와 일치하였다. 네 번째 연약대의 경우는 영향선이 5+160지점부터 변하다가 5+190지점에서 일정한 값을 보이고 있어 5+170지점 부근에 연약대가 존재하는 것으로 예측되었고 TSP탐사결과와 일치하였다. 천단침하의 영향선/경향선 분석에 의한 연약대 예측도는 전체 5개소 중 3개소를 예측할 수 있어 60% 정도를 보이고 있다. 한편, 천단침하의 영향선/경향선은 전반적으로 연약대의 위치로부터 터널폭의 1배인 약 10m 전방부터 변하기 시작하는 것으로 분석되었다.

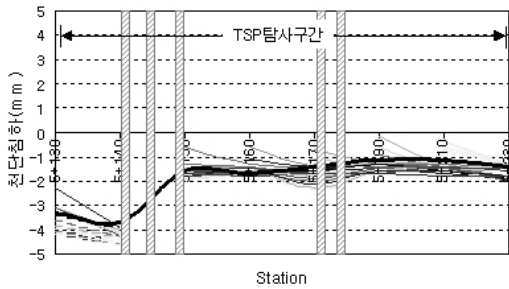


그림 17. 천단침하의 영향선 및 경향선

- 천단부의 종방향변위/연직방향변위 비

그림 18은 천단부에서 측정된 종방향변위와 연직방향 변위의 비를 표시한 것이다. 그림 18에서 보는 바와 같이 첫 번째에서 세 번째 연약대의 경우 5+130지점 이전부터 5+160지점까지 종방향변위와 연직방향변위의 비가 크게 변하고 있어 두 지점 사이에 연약대가 존재하는 것으로 유추할 수 있었고, 네 번째와 다섯 번째 연약대의 경우도 마찬가지로 5+160지점부터 5+190지점까지의 변화로부터 연약대 존재를 예측할 수 있었다. 종방향변위/연직방향변위 비의 분석에 의한 연약대 예측도는 전

체 5개소 중 5개소를 예측할 수 있었고, 터널폭의 1배인 약 10m 전방부터 그래프의 형상이 변하고 있음을 알 수 있었다.

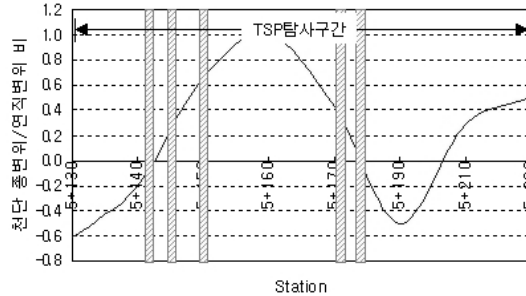


그림 18. 천단부의 종방향변위/연직방향변위 비

- 측벽변위/천단침하 비

그림 19와 20은 각각 좌, 우측벽변위와 천단침하 비를 표시한 것으로 좌측벽의 경우 5+130지점 이전부터 그래프의 형상이 변하기 시작하다가 5+150지점에서 다시 감소하는 경향을 보이고 있어 첫 번째에서 세 번째 연약대의 예측이 가능하였고, 우측벽의 경우는 5+130지점 이전부터 감소하다가 5+160 부근에서 일정한 값을 보이는 것으로 첫 번째부터 세 번째 연약대의 존재를 예측할 수 있었다.

좌, 우측벽변위/천단침하 비의 분석에 의한 연약대 예측도는 평균 60% 정도를 보이고 있고, 터널폭의 1배인 약 5~10m 전방부터 그래프의 형상이 변하고 있음을 알 수 있었다.

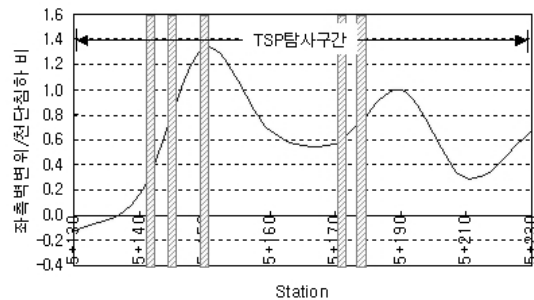


그림 19. 좌측벽 변위/천단침하 비

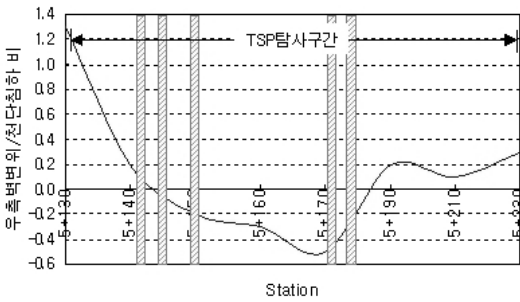


그림 20. 우측변위/천단침하 비

4.3 원형-금구간 도로

4.3.1 현장개요

원형-금구간 도로 현장은 전라북도 정읍시 용동면 용호리와 김제시 금구면 용북리를 연결하는 도로 현장으로 현장내 터널구간인 솟튼터널은 전라북도 정읍시 용동면 용호리에서 통석리에 걸쳐 위치한 솟튼재를 관통하는 터널로서 연장은 상행선 0.8km, 하행선 0.7km이고, 터널폭은 8.1m이며, NATM공법으로 굴착을 시행하였다.

본 터널의 지질은 주라기 편마상 화강암을 기반암으로 하며 이를 부분적으로 대보 화강암이 관입하고 있다. 기반암인 편마상 화강암은 주로 석영, 장석 및 흑운모로 이루어져 있으며 대체로 미약한 편마상 구조를 갖는 중립질 또는 조립질 암석이다. 터널 지역의 시추조사는 솟튼터널의 시중점부 및 중앙부에 각각 1개소씩 이루어졌다. 시중점부는 각각 심도 2~7.5m까지 풍화대, 4.4~8.2m 까지 풍화암, 약 12m까지 연암, 이후 심도는 경암층으로 이루어져 있는 것으로 조사되었다. 중점부가 시중점부에 비해 풍화층이 깊으나, 공학적으로 큰 차이를 보이지는 않을 것으로 판단되며, 터널 중앙부 또한 유사한 층후를 보였다.

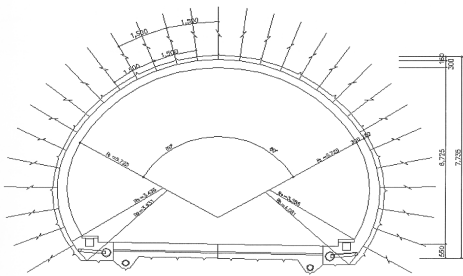


그림 21. 솟튼터널 표준 단면도

4.3.2 TSP탐사

본 탐사는 막장위치가 2+003일 때 2+003에서 2+220까지 약 220m 구간에 대해 시행하였고, 회절중합법을 이용하여 자료처리를 실시하였다. TSP탐사위치 및 탐사범위는 표 5와 같다. 그림 22는 회절단면도를 이용하여 탐사결과를 도시한 것이며, 표 6은 TSP탐사결과에 의해 예상되는 연약대의 위치 및 특성을 나타낸 것이다.

탐사결과 탐사구간내에서 총 4개소에서 연약대가 조사되었는데, 전반적으로 대규모 단층대나 파쇄대는 관찰되지 않았으며 소규모 파쇄대가 관찰되었다.

표 5. 탐사위치 및 탐사범위

막장 위치	발진공 위치	수진공 위치	탐사범위
2+003	1+973~996	1+958	2+003~220

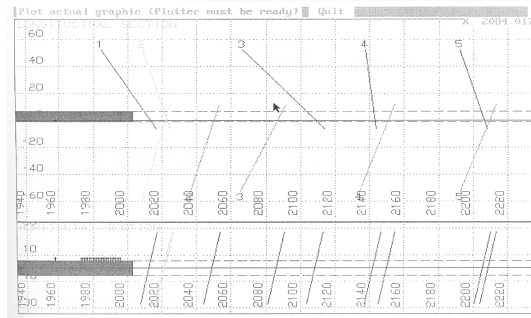


그림 22. TSP탐사 해석결과

표 6. TSP 추정 연약대와 막장관찰

위치	TSP탐사		막장관찰
	특성		
2+050	소규모파쇄대		풍화대
2+087	소규모파쇄대		절리군
2+109	소규모파쇄대		풍화대
2+143	소규모파쇄대		절리군

4.3.3 현장 3차원 절대변위 분석

- 천단침하의 영향선/경향선

그림 23은 천단침하의 영향선/경향선과 TSP탐사에

의한 연약대의 위치를 비교한 그래프이다.

첫 번째 연약대의 경우 2+030부터 경향선이 감소하다가 2+050지점에서 다시 상승하는 경향을 보이고 있어 2+050지점의 연약대 예측이 가능하였고, 두 번째의 경우는 2+060지점부터 경향선이 변하기 시작해 2+087지점에서 최저점을 보이다가 다시 증가하는 경향을 보이고 있어 경향선 분석으로 예측이 가능하였다. 한편, 세 번째 연약대의 경우는 경향선 보다는 영향선으로 예측할 수 있었는데, TSP탐사결과로 확인된 2+109지점의 연약대와 일치하고 있는 것을 알 수 있었다.

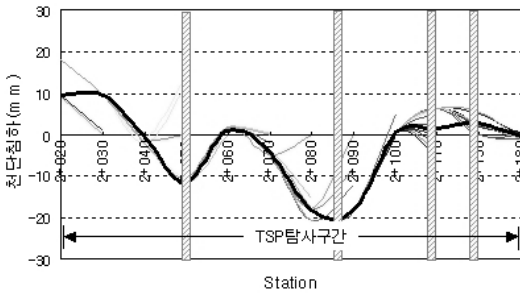


그림 23. 천단침하의 영향선 및 경향선

천단침하의 영향선/경향선 분석에 의한 연약대 예측도는 전체 4개소 중 3개소를 예측할 수 있어 75% 정도를 보이고 있다. 한편, 천단침하의 영향선/경향선은 전반적으로 연약대의 위치로부터 터널폭의 1배인 약 10~20m 전방부터 변하기 시작하는 것으로 분석되었다.

- 천단부의 종방향변위/연직방향변위 비

그림 24는 천단부에서의 종방향변위와 연직방향변위 비를 표시한 것이다. 첫 번째 연약대의 경우 종방향변위와 연직방향변위의 비가 2+040지점부터 증가하다가 2+055지점 부근에서 다시 감소하는 경향으로부터 연약대 존재가 예상되었고 TSP탐사결과와 일치하였다. 한편, 두 번째 연약대의 경우 종방향변위와 연직방향변위의 비가 2+070지점에서 증가하다가 2+080지점에서 다시 감소하는 경향에서 예측이 가능하였다. 그러나, 세 번째와 네 번째의 경우 그래프의 변화폭이 매우 작아 예측이 곤란하였다.

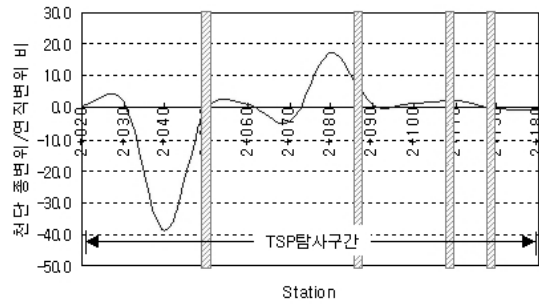


그림 24. 천단부의 종방향변위/연직방향변위 비

종방향변위/연직방향변위 비의 분석에 의한 연약대 예측도는 4개소 중 2개소를 예측할 수 있었고, 그래프의 형상은 연약대로부터 약 10m 부터 변하고 있음을 알 수 있었다.

- 측벽변위/천단침하 비

그림 25와 26은 각각 좌, 우측벽변위와 천단침하 비를 표시한 것으로 좌, 우측벽에서 연약대 4개소 중 2개소가 예측되고 있어 50% 예측도를 보이고 있었다. 좌측벽의 경우 2+040지점에서 2+070지점까지 그래프의 변화가 크게 나타나 첫 번째 연약대 예측이 가능하였고, 2+090지점에서 2+110지점까지의 그래프 경향으로부터 세 번째 연약대의 유추가 가능하였다.

한편, 우측벽의 경우 2+040지점과 2+100지점부터 그래프가 변하기 시작하여 2+050지점과 2+109지점에서 최고점을 보이고 있어 첫 번째와 세 번째 연약대의 예측이 가능하였다. 전반적으로 연약대 위치에서 전방 약 10~20m 이전부터 그래프 형상이 변하기 시작하는 것으로 분석되었다.

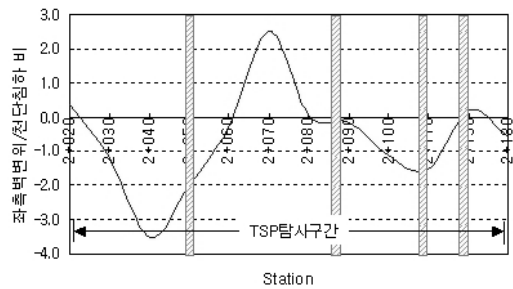


그림 25. 좌측벽 변위/천단침하 비

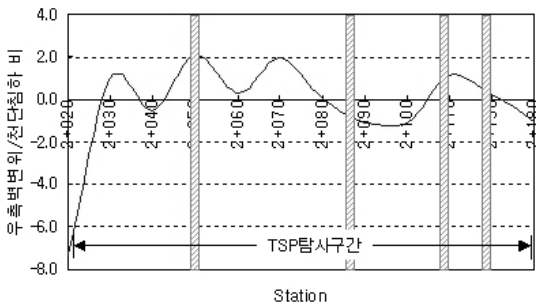


그림 26. 우측변위/천단침하 비

4.4 장항선 1-1공구 노반개량

4.4.1 현장개요

장항선 1-1공구 철도노반공사는 충청남도 아산시 득산동에서 아산시 도고면을 연결하는 철도 노반개량구간으로 현장내 터널구간인 신창터널은 아산시 신창면 행목리에서 아산시 도고면 향산리를 연결하는 단굴 복선 터널로서 연장은 2.3km이고, 터널폭은 10.1m이며, NATM공법으로 굴착을 시행하였다.

본 터널의 지질은 시대미상의 편마암류와 후기인 중생대 백악기에 관입한 화강암류로 구성된다. 편마암류는 본역 고기의 기반암으로 흑운모호상편마암, 각섬석편마암, 녹니석편암 등으로 구성되어 있다. 본 편마암류는 화강암의 관입으로 인하여 페그마타이트 및 석영맥의 발달이 많은 곳으로 절리 발달이 비교적 심한 편이며, 편마구조 및 편리가 잘 발달되어 있다.

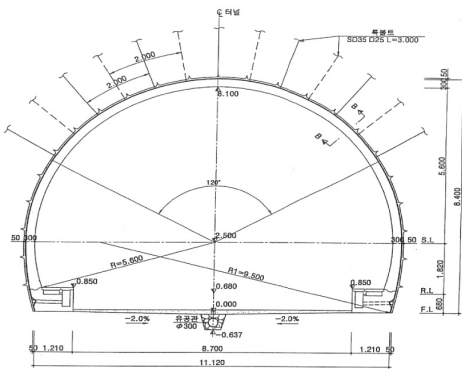


그림 27. 신창터널 표준 단면도

4.4.2 TSP탐사

본 탐사는 막장위치가 20+721일 때 20+651에서 20+851까지 약 200m 구간에 대해 시행하였고, 회절중합법을 이용하여 자료처리를 실시하였다. TSP탐사위치 및 탐사범위는 표 7과 같다. 그림 28은 회절단면도를 이용하여 탐사결과를 도시한 것이며, 표 8은 TSP탐사결과에 의해 예상되는 연약대의 위치 및 특성을 나타낸 것이다.

탐사결과 탐사구간내에서 총 6개소에서 연약대가 조사되었는데, 전반적으로 대규모 단층대나 파쇄대는 관찰되지 않았으며 소규모 파쇄대가 관찰되었다.

표 7. TSP 탐사위치 및 탐사범위

막장 위치	발진공 위치	수진공 위치	탐사범위
20+721	20+704~671	20+651	20+651~851

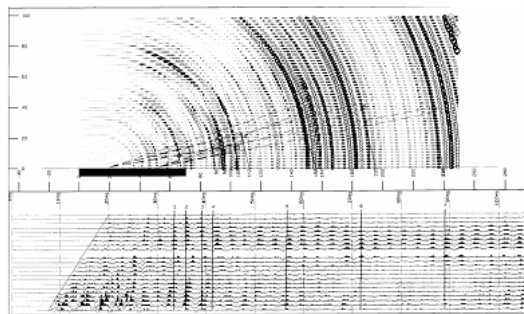


그림 28. TPS탐사 해석결과

표 8. TSP 추정 연약대와 막장관찰

위치	TSP탐사	
	특성	막장관찰
20+785	파쇄대	단층
20+805	파쇄대	단층과 파쇄대
20+820	파쇄대	파쇄대
20+825	파쇄대	절리군
20+840	파쇄대	파쇄대
20+845	파쇄대	절리군

4.4.3 현장 3차원 절대변위 분석

- 천단침하의 영향선/경향선

그림 29는 천단침하의 영향선/경향선과 TSP탐사에 의한 연약대의 위치를 비교한 그래프이며, 굵은 선으로 표시된 것이 경향선이며, 가는 선으로 표시된 것이 영향선이다. 그림 29에서 보는 바와 전반적으로 TSP탐사결과로부터 추정된 연약대의 위치가 전반적으로 경향선의 최고점 또는 최저점과 일치하고 있어 예측이 가능하였다.

천단침하의 영향선/경향선 분석에 의한 연약대 예측도는 전체 6개소 중 6개소를 예측할 수 있었으며, 천단침하의 경향선은 전반적으로 연약대 위치로부터 약 5~15m 전방부터 변하기 시작하는 것으로 분석되었다.

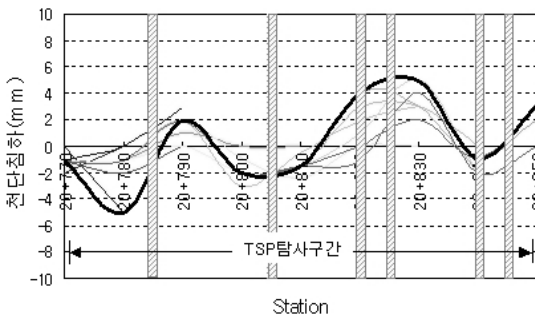


그림 29. 천단침하의 영향선 및 경향선

- 천단부의 종방향변위/연직방향변위 비

그림 30은 천단부에서 측정된 종방향변위와 연직방향변위의 비를 표시한 것으로, 본 현장의 경우 전반적으로 천단침하의 영향선/경향선 분석결과와 유사한 그래프 형상을 보이고 있어 6개소 연약대의 예측이 가능하였다. 종방향변위/연직방향변위 비의 분석에 의한 연약대 예측도는 전체 6개소 중 6개소를 예측할 수 있었고, 종방향변위/연직방향변위 비의 그래프는 연약대의 위치로부터 터널폭의 1배인 약 5~15m 전방부터 변하고 있음을 알 수 있었다.

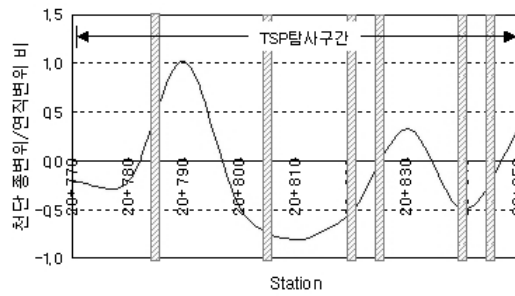


그림 30. 천단부의 종방향변위/연직방향변위 비

- 측벽변위/천단침하 비

그림 31과 32는 각각 좌, 우측벽변위와 천단침하 비를 표시한 것으로 전반적으로 그래프의 등락경향으로부터 연약대의 예측이 가능하였다. 그림에서 보는 바와 같이 TSP탐사구간에서 6개소의 파쇄대가 관찰되었는데, 연약대의 위치와 측벽변위/천단침하 비 그래프의 최저점과 최고점과 일치하고 있어 측벽변위/천단침하 비로부터 연약대의 예측이 가능하다는 것을 알 수 있었다.

전반적으로 연약대 위치에서 전방 약 5~15m 이전부터 그래프 형상이 변하기 시작하는 것으로 분석되었고, 이는 터널폭의 1배에 해당되는 거리가 된다.

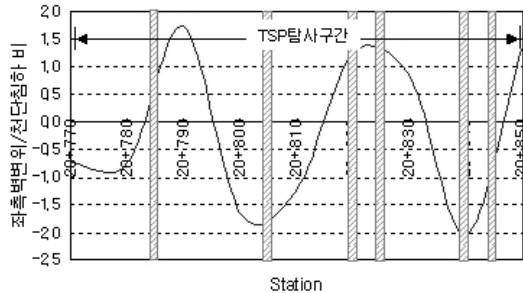


그림 31. 좌측벽 변위/천단침하 비

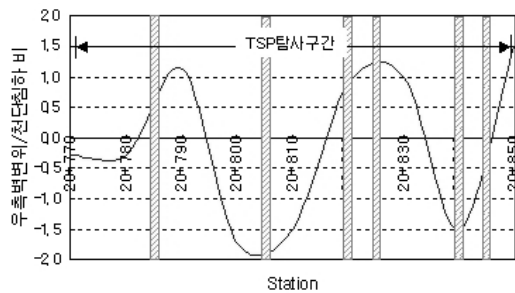


그림 32. 우측벽 변위/천단침하 비

4. 결론

본 연구에서는 국내 4개 터널 현장에서 측정된 3차원 절대변위에 대해 3가지 해석기법을 이용하여 연약대 위치를 예측하였고, 이를 TSP탐사에 의한 연약대 위치와 상호 비교함으로써 3차원 절대변위 해석기법의 현장 적용성을 검증하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 현장에서 수집된 3차원 절대변위에 대해 천단부와 측벽부의 변위비의 경향선 분석과 천단침하의 영향선/경향선 분석을 실시하였고, 3차원 절대변위의 분석에 의해 추정된 연약대 위치를 동일한 구간에서의 TSP탐사로 추정된 연약대 위치와 비교함으로써 연약대 예측도와 예측거리를 산정하였다.
2. 3차원 절대변위 해석기법에 의해 막장전방의 연약대 존재를 판별하는 예측도는 약 70% 정도로 나타났다. 천단부의 종방향변위/연직방향변위 비, 천단침하의 영향선/경향선, 측벽변위/천단침하 비 순으로 높은 예측도를 보이고 있음을 알 수 있었다.
3. 3차원 절대변위 해석기법에 의해 막장전방의 연약대 존재를 판별하는 그래프의 경향이 변하는 범위는 터널 폭의 1~2배 이전부터 일정하게 나타남을 확인하였다.
4. 3차원 절대변위 분석을 통해 천단부의 종방향변위/연직방향변위 비가 예측도와 예측거리면에서 우수한 예측인자로 막장전방 예측에 효과적이거나, 보다 면밀한 분석을 위해서는 다른 두가지 해석기법과 병행하여 분석하면 보다 효과적일 것으로 판단된다.

5. 현재 국내에서 적용되고 있는 광파기 계측은 운영상 종방향 변위를 측정하지 않는 것이 일반적이다. 그러나, 연약대와 같은 지반변화에 민감한 종방향 변위가 막장전방 예측에 유리하므로 계측용 광파기와 반사타겟의 전반적인 보급이 이루어지고 이를 통해 종방향 변위가 누락없이 측정되면 3차원 절대변위 해석기법의 활용성은 점차 확대될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호:04핵심기술C01)에 의한 것이며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Rabensteiner(1996), K., Advanced Tunnel Surveying and Monitoring, Felsbau, Vol.14. No.2, pp. 98~102.
2. Schubert, P., and Vavrovsky, G.M(1994)., Interpretation of Monitoring Results, World Tunnelling, Nov., pp. 351~356.
3. Schubert, W., and Steinforfer(1996), A., Selective Displacement Monitoring Tunnel Excavation, Felsbau, Vol.14. No.2, pp. 93~97.
4. Schubert, W., Steindorfer, A., and Button, E.A.(2002), Displacement Monitoring in Tunnels—An Overview, Felsbau, Vol.20. No.2, pp. 7~ 11.

방준호

SK건설(주) 기술본부 연구소 과장
jhsang-a@skec.co.kr



한일영

SK건설(주) 기술본부 연구소 소장
iyhan@skec.co.kr

