

시공단계를 고려한 대단면 정거장 터널 안정성 해석

The stability analysis on large sectional tunnel station considering construction steps

강은구* 김양운** 안경철*** 한명식†
Kang, Eun-Gu Kim, Yang-woon Ahn, kyeong-Cheol Han, Myeong-Sik

ABSTRACT

Urban construction has numerous difficulties due to ground weakness and various complaints from third party, so it is not economically efficient and constructability is not favorable. Therefore, underground, which has good ground conditions, was used for construction field and facilities such as stations, and they are scaled up to enhance accommodation of facility limitation and function of stations. Large section tunnel station construction has numerous risk factors such as work boundary of excavation equipment, a relaxation of stress concentration, a safety plan of tunnel stability, and so on. Therefore, by using large section tunnel station stability analysis considering construction step, we expect to analyze the latent problem during construction, and to stabilize a future project plan of a large section structure design by using an auxiliary method and a support design.

1. 서 론

산업발달에 따른 물류 및 여객수송의 증가로 철도건설이 증가하고 있으며 도심내에서 정거장등의 시설물이 들어서게 되었다. 도심지 특성상 과도한 용지보상, 민원 및 교통난 해소, 선형의 제약등이 뒤따르므로 점차 지하공간을 활용하는 사례가 늘고있다. 대표적인 예로 대단면 터널 정거장이 있으며 이미 지하철에서는 운용중에 있다.

대단면 터널정거장은 시공시 굴착장비의 작업 한계고 및 응력집중 해소, 안정성 확보를 위해 다단 벤치 컷과 보조공법 적용이 필요하며 시설물의 기능성 확보를 위한 횡갱, 경사갱, 수직구등 다양한 단면과의 접속부에서 발생하는 안정성 문제와 공정 중첩을 극복해야 한다. 또한 대단면 터널은 상부 단면에 작용되는 하중이 크고 본선부에 비해 시공 중 여러 위험 인자를 지닐 수 있다. 따라서 안정성 평가를 통해 대단면 터널정거장 시공시 예상 문제점을 분석하고 보조공법 및 지보설계에 활용하여 향후 안정된 계획 수립에 참고할 수 있도록 한다.

2. 본 문

○○~○○ 복선전철 민간투자시설 사업은 수도권 남서부 지역의 교통난 완화 및 지역간 균형발전 도모를 위해 경인선, 안산선 및 서해안축을 연결하여 지역주민의 교통편의를 증대하고 나아가남북 교류확대

† 책임저자 : 정회원, 태조엔지니어링, 대표이사
E-mail :
TEL : (02)2140-9200 FAX : (02)418-7638
* 비회원, 태조엔지니어링, 지반사업부, 사원
** 비회원, 태조엔지니어링, 지반사업부, 과장
*** 비회원, 태조엔지니어링, 지반사업부, 전무이사

대비 및 서해안지역 발전에 따른 철도 수송로 구축으로 현행 경부선 중심에서 경부축과 서해축의 2축 체계로 전환하여 수송능력 확대를 위한 시설사업이다. 시설물은 연장 23km중 터널 및 Box 17.1km, 토공 및 교량 4.1km, 정거장 12개소 1.8km가 계획 되었으며 정거장 구간은 접근성, 지장물 현황, 지반 조건등을 고려하여 12개소 중 3개소(복사, 대야, 신천)를 터널 정거장으로 계획 하였다. 터널 정거장은 승강장, 기계실, 계단등 각종 내부시설을 수용할 수 있는 단면으로 대형화 하였으며 역사 연결통로, 환기용 수직구 접속부와 경사갱, 엘리베이터 등이 접속되는 복잡한 3차원 구조로 계획되었다.

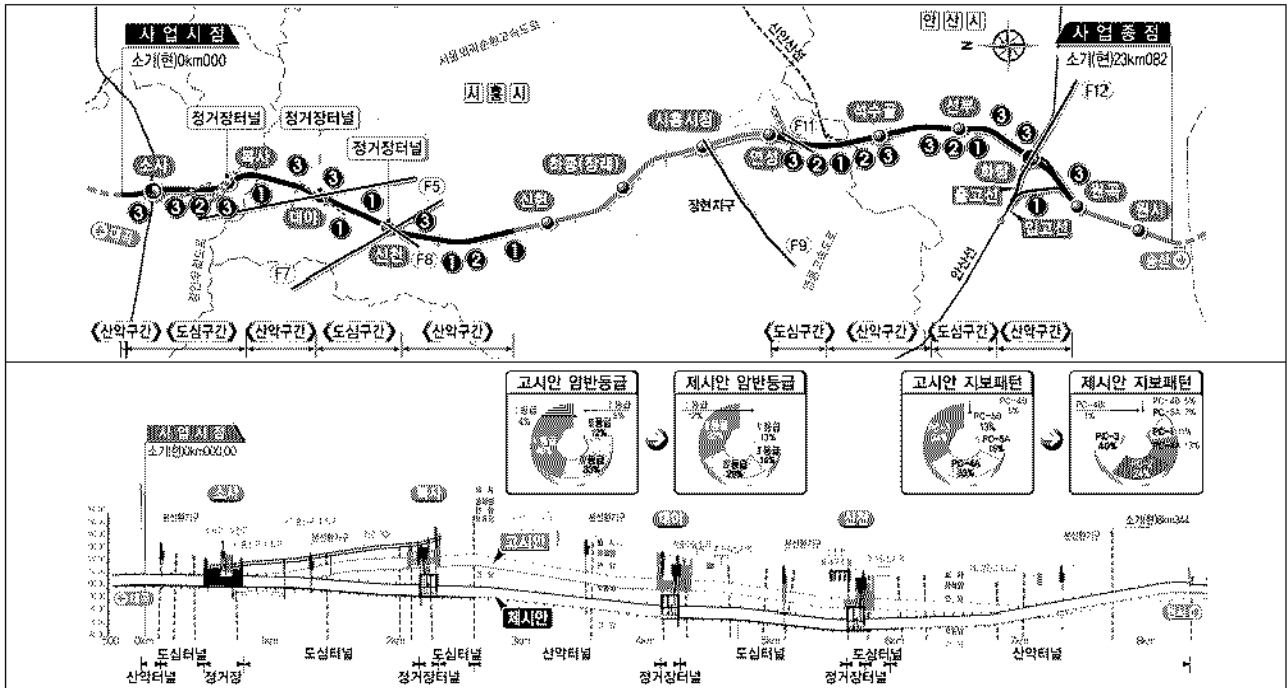


그림1. 과업구간 현황 및 종단계획

2.1 정거장 터널 계획 및 시공계획

(1) 터널 정거장 계획 수립

복사, 대야, 신천정거장은 지반조건이 불량하고 개착 정거장 계획시 장기간 공사로 도심 생활권 침해와 민원이 예상되므로 종단선형의 하향으로 구조물 심도를 암반양호구간에 계획(고시안 대비 보통암이상 37%향상, 그림1)하고 정거장을 터널화하여 상부 교통흐름 저축과 민원 영향을 최소화 하였다.

정거장 터널 단면계획은 병렬터널, 2-Arch 및 3-Arch 터널 단면 적용시 상부에 위치한 도로 주변 건물들의 용지 경계를 침범하게 되어 추가적인 용지 보상 문제가 발생되므로 정거장 구간의 주변여건을 고려하여 1-Arch의 대단면 터널을 계획하였다.

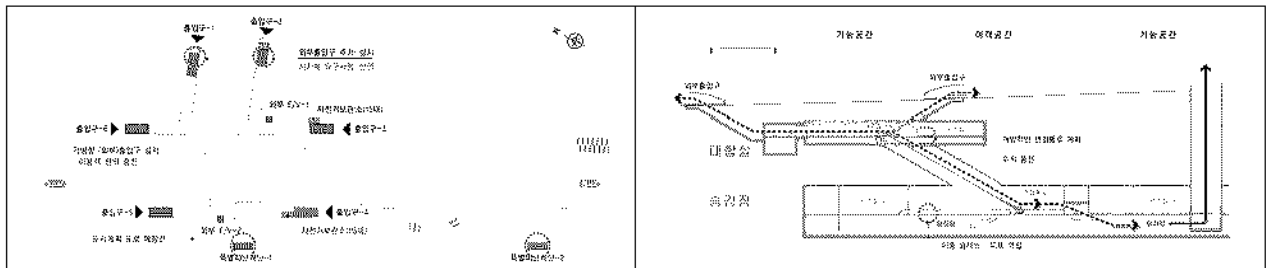


그림2. 대야정거장 평면 및 종단 구조물 계획

대단면 정거장 터널은 대구지하철 2호선 연장 영남대 구간, 서울지하철 녹사평, 버티고개역 등이 있으며 비교적 양호한 암반구간에 계획되었다.

대단면 터널은 단면크기로 인해 작업 장비 및 작업원 워커빌리티 저하와 복합지반 조우 가능성이 높고 천단 아치부의 대형화로 낙반 발생등에 대한 천단부 안정성 확보가 매우 중요하다. 또한 터널주변 교란영역 증가, 수압작용 등 외부 작용력이 일반 터널단면과는 다르므로 지보 및 굴착 공법등이 개선되어야 한다. 따라서 양호한 암반구간에 계획함에도 불구하고 낙반등 상부 아치의 안정성 확보를 위해 아치각부 보강, 강판다단 및 지보재 강성 증가 계획을 수립하였고 굴착시 작업 장비 및 작업원의 작업공간 확보와 교란영역 최소화를 위해 다단벤치컷에 의한 분할굴착과 상호간섭을 배제하기위한 굴착공정을 계획하였다.

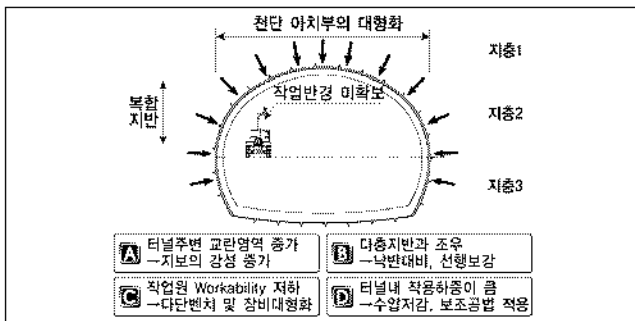


그림3. 대단면 굴착시 문제점

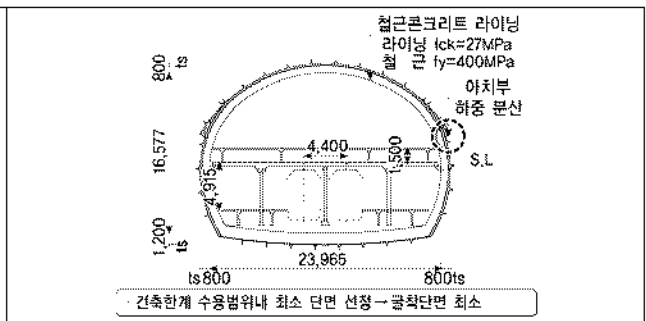


그림4. 정거장 터널 단면계획

(2) 굴착계획 수립 및 수치해석 적용

터널 정거장 시공은 굴착중 원지반 교란, 이완영역 최소를 위해 다단분할 굴착과 벤치길이 및 굴착방향을 조정하였다. 또한 경사갱, 횡갱, 수직구등을 선시공함으로써 굴착중 발생하는 버력처리를 원활히 하도록 계획하였다. 이처럼 복잡한 공정계획과 맞물려 부속터널과 대단면 터널 굴착시 안정성 검토를 위해 시공순서와 동일한 조건하에서 유한요소 해석프로그램을 통해 수치해석을 수행하였다.

굴착순서는 그림6과 같이 경사갱과 수직구 시공이 진행되고 경사갱 굴착완료후 경사갱을 통해 정거장터널 상부 굴착이 시작된다. 정거장 터널 굴착은 12개로 소할하고 상부 아치의 안정성 확보를 위해 좌우측 분할 단면을 선굴착하여 안정화 시키고 잔여 필라부를 굴착하도록 계획하였다(①→②→③→④→⑤→⑥). ①과 ②는 좌측과 우측의 굴착방향을 반대로 계획하여 상호 간섭을 억제하고 하반부 굴착시 측벽부에서의 지반 자립도를 유지하기 위해 다단 굴착을 적용하고 ⑦→⑧→⑨, ⑩→⑪→⑫의 순서로 굴착을 계획하였다.

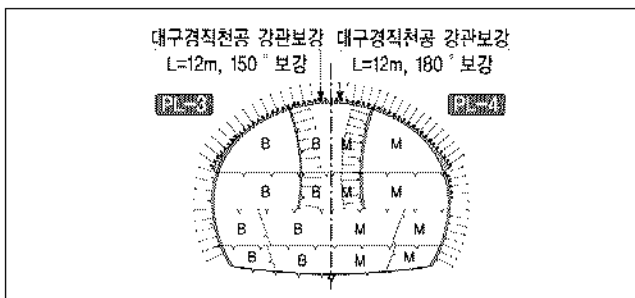


그림5. 지보계획

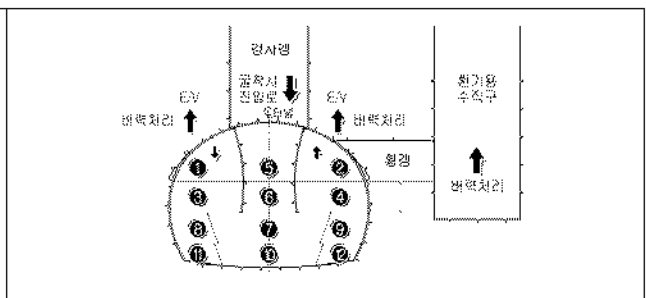


그림6. 굴착개요도

2.2 해석개요

정거장 터널의 복잡한 굴착공정과 횡갱, 경사갱등 접속구간에 대한 안정성 평가, 적용 지보패턴의 적정성 및 각 구조물간 영향을 평가하기 위해 유한요소 해석프로그램으로 안정성 검토를 수행하였다.

적용된 유한요소 프로그램은 지반조건, 단계별 굴착 및 지보설치 구현이 가능하고 사용성이 검증된 VisualFBA를 적용하였다. 주요 검토 항목은 ①정거장 터널 상부 굴착 시 경사갱의 간섭 영향, ②정거장터널 하부 굴착에 의한 경사갱, 수직구, 엘리베이터의 간섭 영향, ③횡갱 굴착 시 수직구의 간섭 영향, ④정거장 터널 전체에 대한 안정성 검토로 선정하였다. 상세 지반조사를 통해 검토지반의 물성은 도표 1과 같

2.3 해석 결과

(1) 굴착에 의한 상호 간섭 영향

각 시공 단계별 터널의 상호영향에 대한 결과는 <도표 3>에 나타내었다. 해석 결과 경사갱과 수직구 시공 완료후 정거장 터널 굴착시 경사갱에서 추가적인 변위가 발생하여 굴착시 접합되는 구조물에 대해 불리한 거동을 보이는 것으로 나타났다. 특히 경사갱과 정거장 터널이 접하는 구간에서 변위량이 가장 크게 발생했으며 이는 접속부에서 선시공 구조물 굴착후 평형상태를 이루던 3차원 응력상태가 추가적인 굴착으로 인한 응력재분배로 구조물에 불리하게 작용되었기 때문으로 분석된다. 따라서 경사갱과 터널 접속구간은 강성에 의한 보강 또는 낙반에 대비해 선행 보강이 우선시 되어야 한다. 엘리베이터의 경우 정거장 굴착시 내공 변위가 상당량 발생하였으나 수직구 접속부 횡갱 굴착시 수직구 내공변위는 큰 영향을 받지 않았으며 정거장 굴착시에도 수직구의 내공변위는 큰 변화를 보이지 않았다. 이는 엘리베이터용 수직갱이 정거장과 직접 접속되거나 환기용 수직구는 정거장과 충분한 이격거리를 갖고 접속되어 영향이 없는 것으로 분석된다.

(2) 터널 안정성 검토

전체적인 터널 안정성 해석결과 정거장 터널의 최대 수직 변위는 경암구간에서 비교적 큰 19mm가 발생하나 ASCE 계측관리기준<도표 4> 30~50mm이내로 굴착시공중 약간의 주의를 요하는 수준이다.

도표 3. 해석 결과

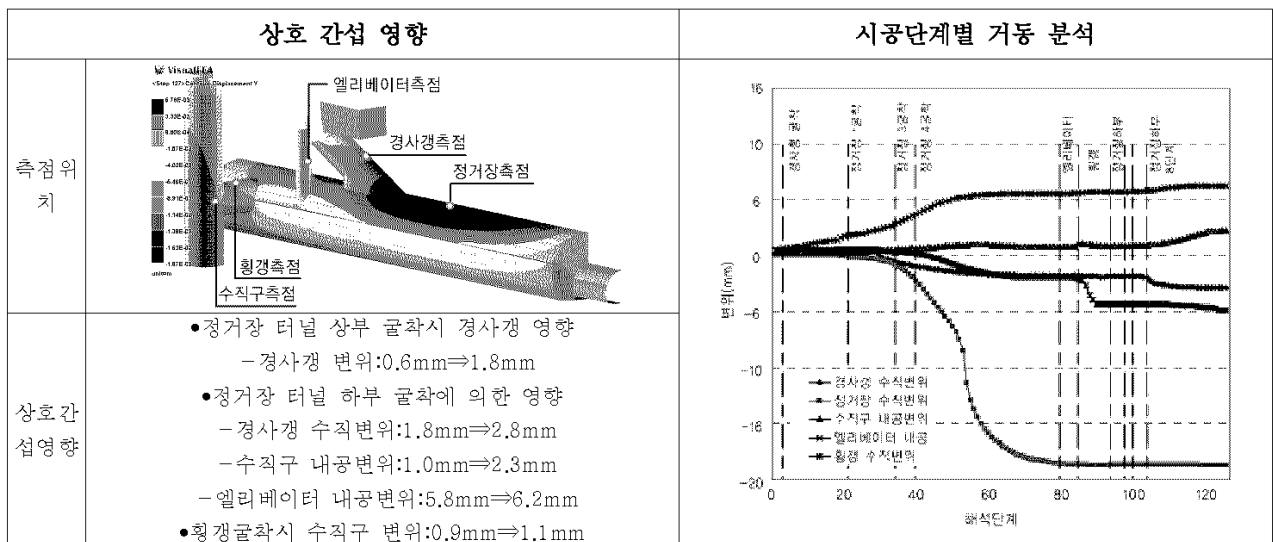


도표 4. 천단침하의 관리기준치(ASCE, Franklin)

주의레벨	지 반	A(경암)	B(연암)	C(풍화암)
	1		0.3cm~0.5cm	0.5cm~1.0cm
2		1.0cm~1.5cm	1.5cm~4.0cm	4.0cm~9.5cm
3		3.0cm~4.0cm	4.0cm~11.0cm	11.0cm~27.0cm

①주의레벨 1 : 지반은 안정되어 있지만 이완영역의 발생한계에 달하기 때문에 굴착에 약간의 주의를 요함

②주의레벨 2 : 이완영역이 발생하는 것으로 간주함

③주의레벨 3 : 명확하게 이완영역이 발생하기 때문에 안전의 문제와 시공의 곤란이 예상되므로 굴착방법, 지보공법 등의 변경을 요함

숏크리트 응력은 경사갱과 정거장이 접속하는 부분에서 최대 8.2MPa의 응력 집중이 발생하나 허용치인

8.40MPa를 만족한다. 록볼트 축력은 정거장 터널에서 최대 83kN이 발생하여 허용치인 89kN을 만족한다. 또한 지중응력 평가 결과 파괴율은 대부분 0.6이하로 지반내 소성영역 발생은 국부적으로 발생하여 전체적인 안정성에는 문제가 없으며 응력 이력분석결과 모든 구역이 파괴면 안쪽에서 탄성거동 하는 것으로 분석되었다. 수치해석에서 발생하는 응력 및 지보 부재력 집중구간은 설계단계에서 충분한 검토를 필요로 하며 보조공법과 계측계획 수립, 굴착공법 변경등을 적극 반영하여 안전한 시공이 되도록 계획하여야 한다. 천단부 변위는 강판단단 및 그라우팅에 의한 강성보강, 경사갱 접속부 응력집중은 상부 아치 각부를 통해 주변지반으로 응력분배가 원활하도록 계획하고 다단벤치컷을 적용하여 지반 이완이 최소화 되도록 하였다. 또한 합리적인 계측관리 계획을 수립하여 안전한 터널 시공을 도모하였다.

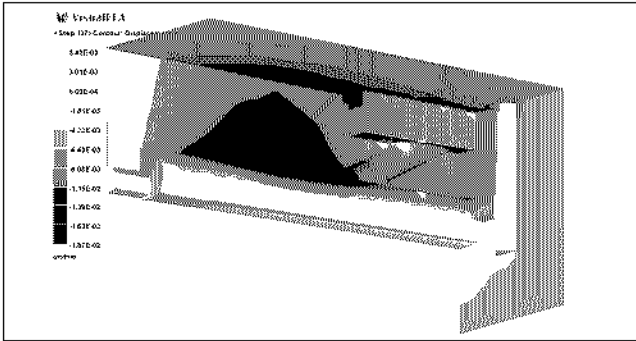


그림 10. 수직변위도

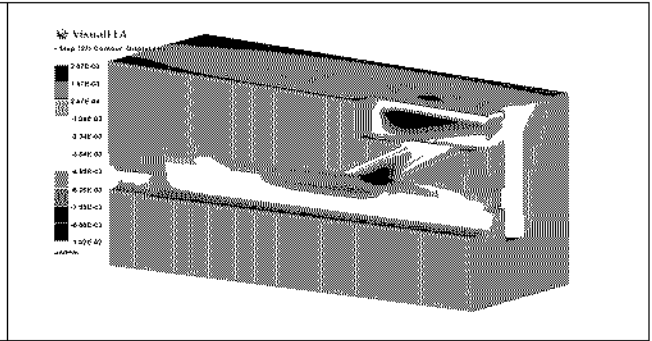


그림 11. 수평변위도

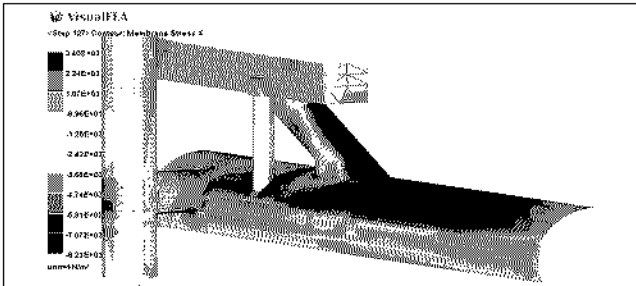


그림 12. 슛크리트 멤 압축응력

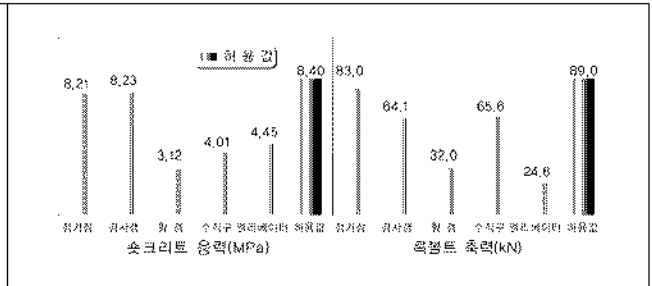


그림 13. 지보재 부재력

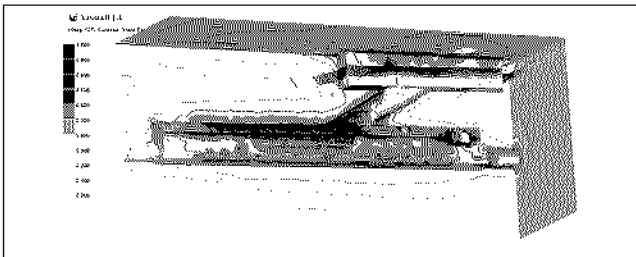


그림 14. 파괴율 분포

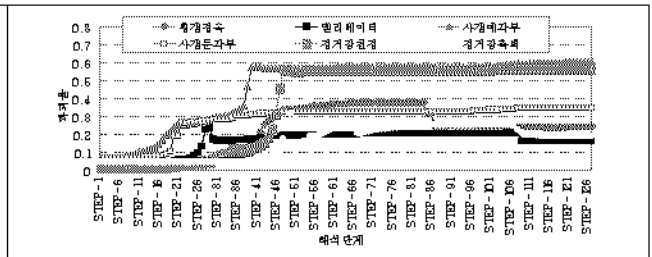


그림 15. 파괴율 이력분석

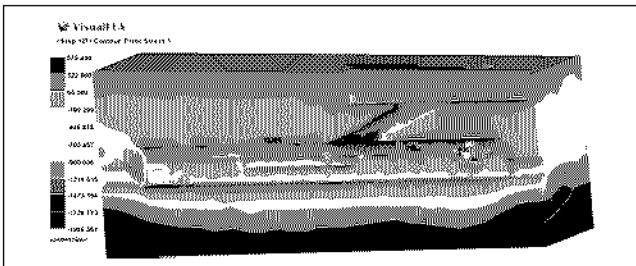


그림 16. 지반 주응력

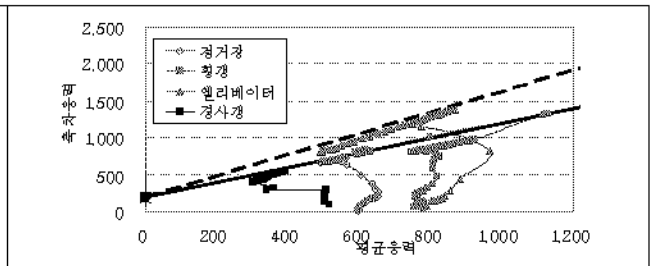


그림 17. 응력 이력분석

3. 결 론

대단면 터널정거장은 도심지 민원 및 교통난 해소, 선형의 제약등으로 점차 이용사례가 늘어가는 추세이다. 대단면 터널정거장은 시공시 굴착장비의 작업 한계고 및 응력집중 해소, 터널 안정성 확보를 위해 다단 벤치컷과 보조공법 적용이 필요하며 구조물의 사용목적과 시설물의 기능성 확보를 위해 횡갱, 경사갱, 수직구, 엘리베이터용 수직구등 다양한 단면과 시공인터페이스에서 발생하는 안정성 문제와 공정 중첩을 극복해야 한다. 또한 대단면 터널은 이완하중이 크고 일반 터널에 비해 시공 중 여러 위험 인자를 지닐 수 있다.

따라서 굴착 및 보강, 시공계획을 반영한 대단면 터널의 안정성 검토를 수행하였으며 검토 결과는 다음과 같다.

1. 경사갱과 정거장 터널 접속부에서 지보재 응력집중 및 변위증가가 가장 크게 발생하였다. 이는 중력방향으로 단면의 접속이 이뤄짐에 따라 굴착영향을 크게 받는 것으로 분석되었으며 강관다단 및 아치각부 적용등 변위제어와 응력분배등을 통해 허용기준 이내로 안정성을 확보하였다.
2. 대단면 굴착공법으로 다단벤치컷을 적용하고 상부 단면의 굴착 방향을 엇갈리게 계획하여 굴착중 발생하는 변위중첩을 최소화 하고 굴착면 단위로 선행 보강하여 이완영역 발생을 억제하였다. 그 결과 터널 정거장 상반 굴착시 최대 천단변위가 발생되나 하반부 굴착시 수렴하므로 굴착공법과 보조공법의 적용은 적절한 것으로 평가된다.

이와 같이 사전 안정성 평가를 통해 대단면 터널정거장 시공시 예상 문제점들을 분석하고 보조공법 적용 및 지보설계에 활용하여 향후 대단면 구조물 설계시 안정된 계획 수립에 이바지 할 수 있도록 한다.

참고문헌

1. 정윤영(2007), “저토포고 대단면 정거장 터널의 설계”, 한국터널공학회 논문집, 제9권 2호, pp.171-182.
2. 문상조, 장석부(1999), “지하철 대단면 터널의 설계와 시공관리 사례”, 한국지반공학회 spring '99 National Conference, pp.285-292.
3. 이재영, 안성율(2006), “실무 유한요소해석 입문”, 사이텍이엔씨