

도심지 대단면 터널의 시공사례를 통한 굴착단면 분할 및 발파진동 저감방안

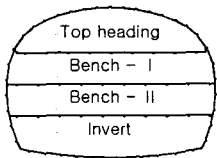
황현주¹⁾ · 강성국¹⁾

1. 서 론

1990년초에는 4차선 대단면 도로터널인 청계터널이 준공되면서 국내에서도 산악지역의 대단면 도로터널은 일반적인 추세로 전환될만큼 터널기술은 획기적 발전을 이루게 되었다. 그러나 도심지에서의 대단면터널은 토피가 얇고 건물 등의 지장물을 통과하는 문제점으로 적용된 사례가 많지 않았으나, 최근에(1995-2004) 서울도심지에서의 지하철과 도로터널에서 대단면 터널로 준공된 사례가 있어, 이들의 굴착시공사례를 소개함으로써 향후에 예상되는 도심지에서의 각종 스포츠시설, 저장시설 및 대규모 지하 도시건설 등에서 설계 및 시공에 참고가 되었으면 바램으로 굴착시공사례와 발파굴착에 따른 발파진동 전파특성을 소개하고자 한다.

2. 도심지 대단면 터널 시공사례 및 발파진동 전파특성

2.1 서울도심지 대단면 터널 시공현황

구 분	공사명	터 널 규 격	비 고
지하철	녹사평정거장	23.273m(폭)×16.655m(높이)×60m(연장)	
	창신정거장	23.273m(폭)×16.655m(높이)×67.5m(연장)	
	버티고개정거장	23.472m(폭)×14.617m(높이)×65m(연장)	
	유치선	18.372m(폭)×11.521m(높이)	
도 로	창신도로터널	18.872m(폭)×9.984m(높이)×386.5m(연장)	4차선단면

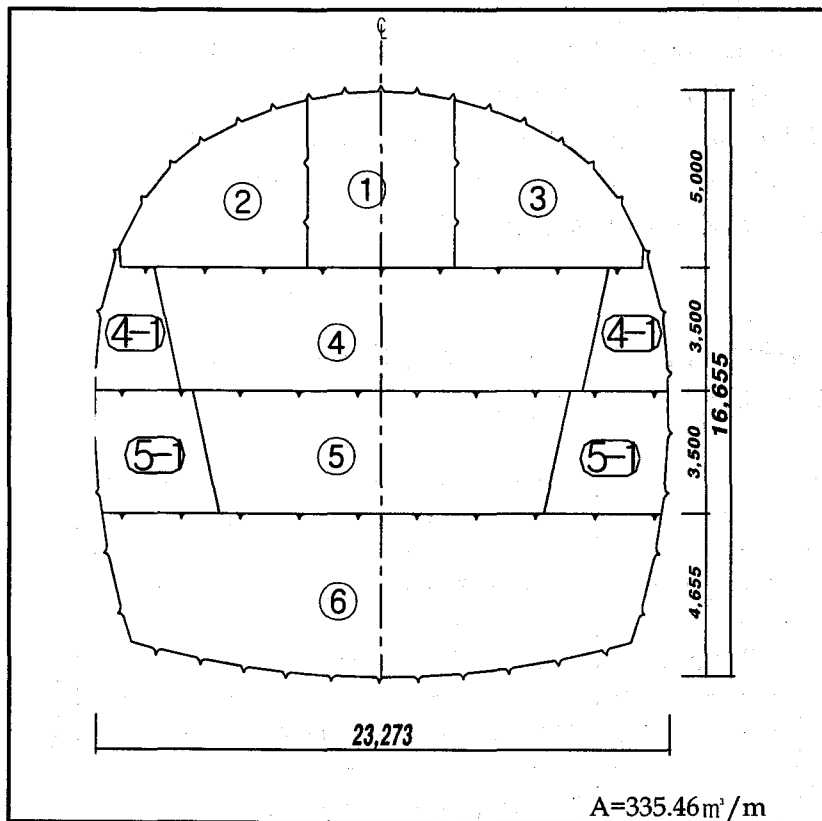
1) 협승엔지니어링

2.2 창신 정거장

지질 및 주변현황

본 현장의 기반암은 경기변성암체를 관입한 주라기말의 대보화강암에 속하는 대표적인 서울화강암으로써 터널통과 구간의 암반은 지표로부터 18m하부에 형성된 경암층으로 압축강도는 1300kg/cm²이상이며 RQD는 65%이상의 신선한 암반층이다. 본 현장의 20m 인근에는 쌍용APT단지와 50년 이상의 구옥과 3층 이하의 근린상가가 밀집되어 있어 발파굴착 시 인근 주민들의 민원이 극심했던 지역이다.

대단면 터널의 규격 및 굴착분할도



굴착방법

1) Top Head 시공방법(굴착면 ① ② ③)

당초 설계에서는 양쪽 Side부분 ②,③을 선행굴착하여 중앙부①을 굴착기간 *동안

Rock-Pillar로 이용하여 대단면 터널에서 상부 침하를 방지할 목적이었다.

현장의 암반상태가 양호하고 계측결과 침하발생의 우려가 없고 Side부분 선행 굴착 시에는 심발개소의 증가로 발파진동 발생이 크며, 굴착효율과 시공성 저하 등의 불합리한 요소가 많아서, 중앙부①을 5m정도 선행굴착 후 양쪽 Side부분을 굴착하는 선행도갱식 3분할 굴착 방법으로 시공하였다.

보강방법은 중앙부굴착과 동시에 천반부에 Rock Bolt($\ell=5.0\text{m}$) Shotcrete를 실시하고 측벽에는 부석제거와 Shotcrete만을 타설하여 굴착시 변위와 낙석을 방지시켰다.

좌우 Side단면굴착 후에 Top Head부에 Rock Bolt와 Wire Mesh+Shotcrete 및 Steel Rib를 설치하였으나, Steel Rib의 경우에는 계측이나 구조계산상 설치할 필요는 없었으나 굴착단면 유지관리를 위하여 5~10m간격으로 설치하였다.

2) Bench- I, II 시공방법(굴착면 ④ ⑤)

당초 설계에서는 ④ 단면을 하향천공에 의한 Bench발파로 선진굴착 후 10~20m 후방에서 좌우 Side (4-1) 을 수평굴착 방식으로 굴착토록 하였다. 본 굴착방법은 천공과 발파방법이 이원화된 효율적인 굴착방법으로 초기에 시행하였으나, 도심지에서 버력처리 Cycle이 원활하지 못하고 하향천공을 위해서는 터널바닥을 청소를 시행하여야 하는등 현장여건상 불합리하여 수평굴착을 시행하였다.

본 수평굴착 방법을 채택할 경우에는 발파시 버력의 비석이 천반과 측벽에 부딪쳐서 Shotcrete에 손상을 주어 파손되므로 Bench 굴착 후에는 천반과 측벽에 파손된 부분에 Shotcrete를 일괄적으로 타설하는 것이 바람직하다. 차후 Bench 굴착후에는 천반고가 높아져서 재시공이 곤란하므로, 대단면 터널굴착 시에는 Bench굴착이 완료될 경우에는 일괄적으로 천반부의 보강검측과 확인후에 다음 단계의 Bench굴착이 필수적이라고 판단된다.

3) Invert 시공방법(굴착면⑥)

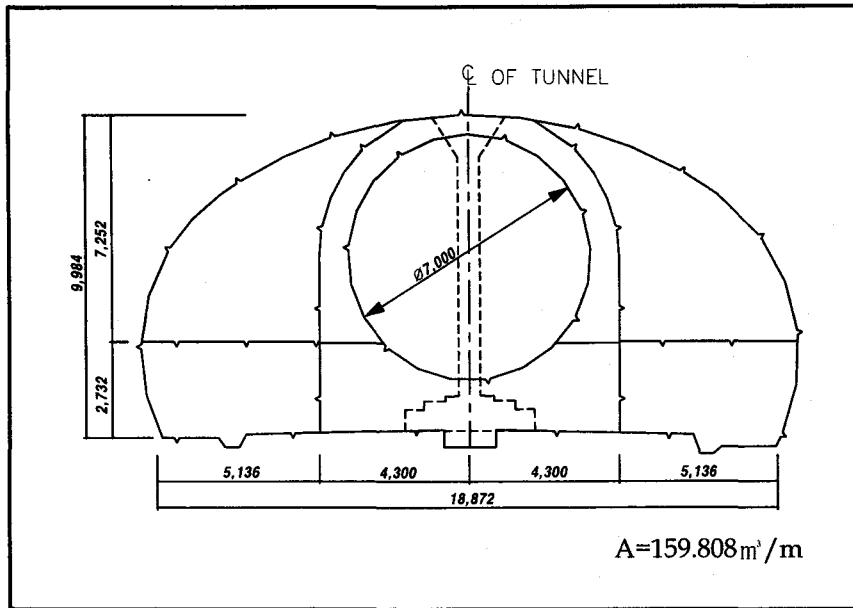
상부단면의 보강이 완료되어 역학적으로 안정되었다는 계측결과에 따라, 전단면 굴착방법으로 시공하였으며 하향천공에 의한 Bench 굴착방법은 바닥면의 요철과 여굴이 심하여 수평천공에 의한 굴착방법으로 시행하였다.

2.3 창신도로 터널(4차선)

터널단면 설계배경 및 문제점

1) 당초 터널설계 단면 및 변경터널 단면배경

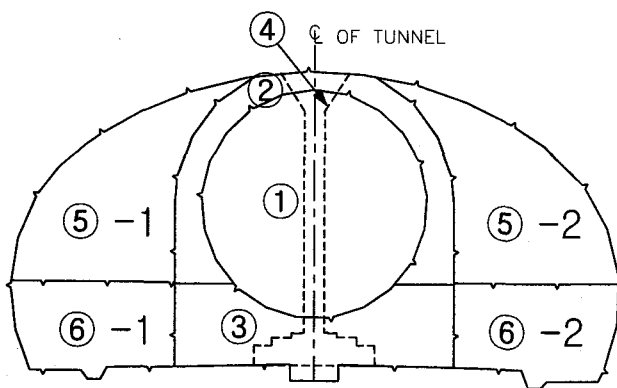
당초 토파가 낮은 도심터널에서 대단면 터널의 채택이 곤란하여 2-Arch터널로 설계하였으나 2-Arch 터널에서 방수처리가 곤란하여 미관손상 및 유지관리비가 상승하며 동절기에 입출구부에서 노면이 결빙되어 안전사고의 우려가 있는 등 기능적인 문제가 있으며 인접부에서 대단면 창신정거장 시공성공 사례 등을 토대로 하여 대단면 터널로 변경하여 시공하였음.



2) 터널굴착시에 예상되었던 문제점

- (1) 대단면 터널의 토피가 10~60m의 얇은 토피고로 인한 지반침하 및 터널의 안정성
- (2) 터널 통과지역의 직상부의 10~60m 상부에는 50년이상 노후주택의 밀집으로 발파진동으로 인한 피해 및 민원발생
- (3) 터널의 갱구부에는 보문사 사찰와 쌍용APT 및 주거밀집 지역으로 발파관련 민원발생
- (4) 중앙콘크리트 구조물의 발파진동 및 비산석의 손상여부

터널 굴착분할 및 시공순서



- ① 중앙단면 굴착(발파굴착, TBM) →
- ② 상부 중앙단면확장 → ③ 하부 중앙단면 확장 → ④ 중앙분리대 콘크리트 구조물 설치 → ⑤ 상부 좌우단면 확장 → ⑥ 하부 좌우단면 확장

굴착방법

1) 중앙부굴착(①단면)

발파굴착시에 발생하는 지반진동과 폭음의 영향으로 피해발생을 최소화하기 위하여 TBM

선행굴착후 확장발파 굴착공법을 선정하였다. 그러나 TBM장비의 전진기지와 회수기지를 위하여 양측갱구부 20~30m를 NATM 방식의 발파굴착을 시행되어야 하므로, 대부분 터널에서 갱구부는 토피가 낮고 인접 지장물과의 이격거리가 짧아서 민원발생이 가장 많은 점을 고려할 때 TBM 굴착공법이 도심굴착에서 민원측면에서 효율적이냐 문제는 고려해야 할 사항으로 판단된다. 또한 TBM굴착시 편차를 고려하여 터널중앙부에 배치하였으며 암반조건에 따라 Steel Rib와 Rock Bolt 및 Shotcrete등의 보강작업을 시행하였다.

2) 중앙부 확장굴착(②, ③ 단면)

중앙부를 상,하반으로 분할하여 상부반단면 ②선행으로 발파굴착을 시행하고 후방 30~50m지점에서 하부반단면 ③을 수평굴착 혹은 Bench굴착(하향수직천공)으로 병행하여 발파굴착을 시행하였다. TBM굴착시에 시공된 Steel Rib, Shotcrete등의 보강된 상태에서 발파굴착을 시행한 결과에 의하면 구속력증가로 인하여 발파진동 저감효과에 없는 것으로 분석되어 발파예정 구간에는 사전에 Steel Rib는 산소절단기로 부분적으로 절단하고 Shotcrete는 Breaker로 사전에 취약시켜서 발파를 시행한 결과 터널발파굴착에 비하여 20~30% 진동저감 효과있는 것으로 분석되었다. 발파진동의 영향을 고려하여 TBM확장 굴착공법을 채택할 경우에는 TBM 굴착부에서 보강을 최소화하는 설계기법도 고려되어야 하며, 가능한 Steel Rib와 Rock Bolt 보강을 지양하고 Shotcrete만으로 터널을 유지시키는 기법의 검토가 요구된다.

3) 중앙콘크리트 구조물 설치

상하선의 중앙분리와 도심지대단면 터널의 중앙지지보 역할을 목적으로 하여 벽체식 철근 콘크리트 구조물이 시공되었다.

4) 상부 좌우확장 굴착(⑤단면)

상부좌우 굴착시에 중앙에 설치된 콘크리트 구조물이 발파 비산석으로 손상되는 것을 방지하기 위하여 중앙하부 굴착면 ③ 부분은 버력으로 되메우기를 실시하고 상부에 노출된 구조물은 목재를 이용하여 구조물에 부착시켜서 방호벽을 설치하므로 발파비산석의 충격을 완화시켜서 구조물에 손상이 없이 발파굴착을 시행하였다.

5) 하부 좌우확장 굴착(⑥단면)

상부단면이 보강되어 안정된 상태이며, 공기단축을 위하여 터널연장에서 4~5개로 분할하여 하향천공에 의한 Bench 발파와 바닥면 정리를 위한 수평발파법을 병행하여 시행하였다.

2.4 서울지하철 9-14공구 유치선

지질 및 주변현황

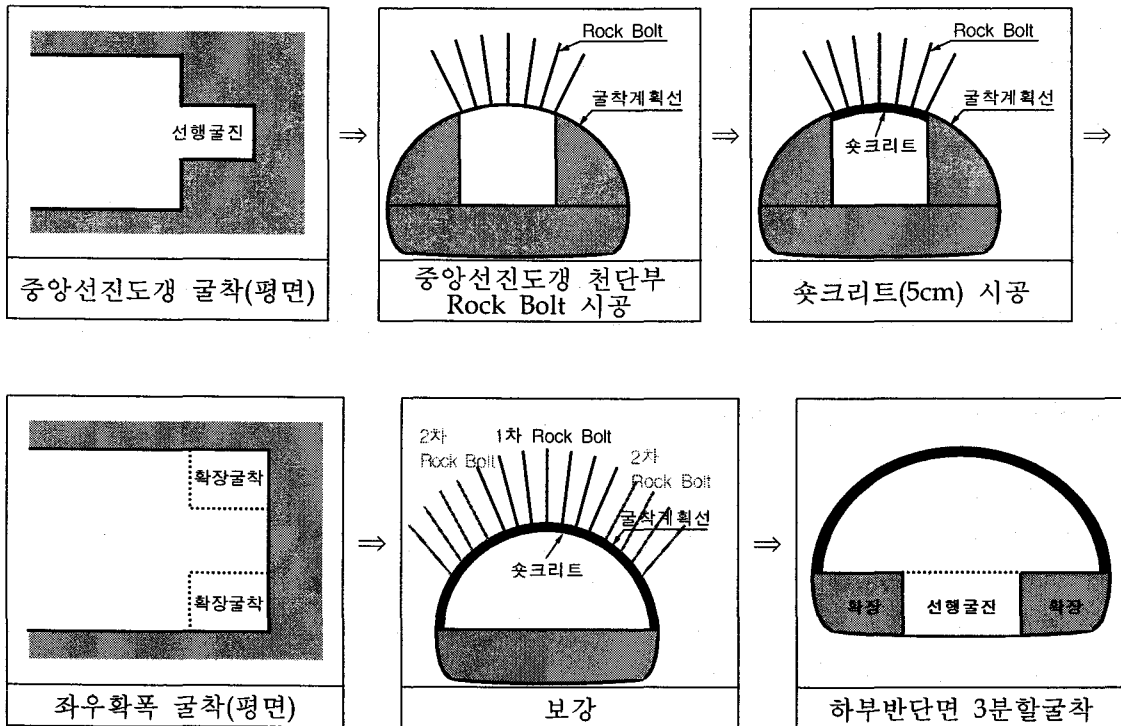
서울의 강남에 위치하고 있는 지하철유치선은 선캠브리아기의 형성된 호상혹운모 편마암 지역으로 암반의 강도는 연암~경암을 구간으로 도로하부를 30~50m 통과하는 지하철 유치선으로 인근에는 호텔 및 대형건물 등이 20~30m 이격거리 위치하고 있어, 터널 발파굴착 시 발생하는 진동으로 민원발생이 많았던 구간이다.

굴착단면 변경배경

상부반단면의 굴착단면이 2분할 CD굴착으로 설계되었으나 인근 건물의 발파진동 영향과 지반조건이 설계단계에서 예상한 것보다 양호한 상태로써, CD굴착을 위한 발파작업시에 중앙의 굴착면이 과굴로 인하여 Steel Rib 설치가 곤란하고, 암반과 밀착되지 않아 하중분담 효과가 전혀 없을 것으로 판단되며, 시공공정이 복잡하여 시공성과 안정성이 불리하였다.

구 분	당 초 설 계		변 경	
단 면				
지보패턴	P4	P5	P4	P5
굴착공법	C,D 굴착		선진도갱 굴착	
굴 진 장	1.0m	1.2m	1.0m	1.0m

굴착방법

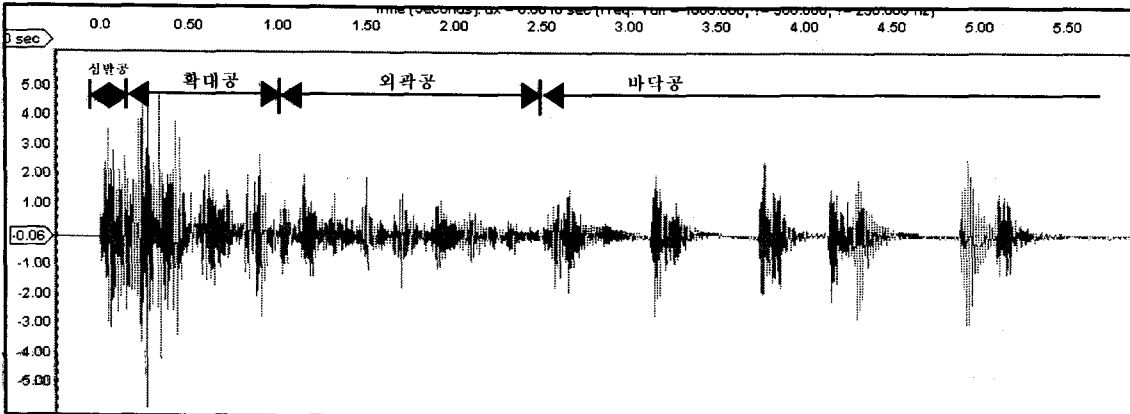


2.5 도심지 대단면 터널에서 발파진동 전파특성

발파공의 위치별 발파진동 전파특성

심발공의 천공방법에는 평행천공, 경사천공, 평행+경사천공등이 국내에서 가장 많이 사용되는 방법이나, 진동발생 측면에서는 어떤 방법이 가장 효율적이라고 정량적으로 평가하기는 곤란하나 발파실패 확률이 적은 심발공 형태가 진동발생이 가장 적다. 발파 실패의 경우는 화약에너지가 굴착하는데 소비하지 않고 진동파로 전환되기 때문이다.

특히 도심지터널의 경우에는 굴진장이 대부분 1.3m미만이므로 심발공이 확대공보다도 진동이 크게 발생된다는 논리보다는 저항선에 따른 구속력이 크게 좌우되는 상황이다. 아래 그림의 진동이력 곡선에서는 심발공보다는 확대공에서 진동발생이 크게 발생된 것을 분석한 결과에 의하면, 굴진장이 1.3m미만에서는 심발공과 확대공에 구별없이 저항선에 의한 구속력에 따라 진동발생의 차이가 발생됨을 알 수 있다.



뇌관의 기폭단차에 따른 발파진동 전파특성

동일한 지발당 장약량의 경우에는 일반적으로 20ms 이내의 MS뇌관의 경우에는 진동의 상호 감쇠작용으로 진동치가 작을 것이라는 것이 일반적 이론이나 실제 터널발파에서 열과 열의 시간 단차가 20ms이하일 경우는 진동치가 크게 발생되었으며 천공장에 따라 다소 차이는 발생될 수 있으나 100ms 이상이 되어야 진동치가 적었다. 그 사유는 전열의 발파석이 파쇄되어 떨어지기 전에 다음 열이 발파될 경우에 구속력이 커서 진동발생이 오히려 크게 발생되었기 때문이다.

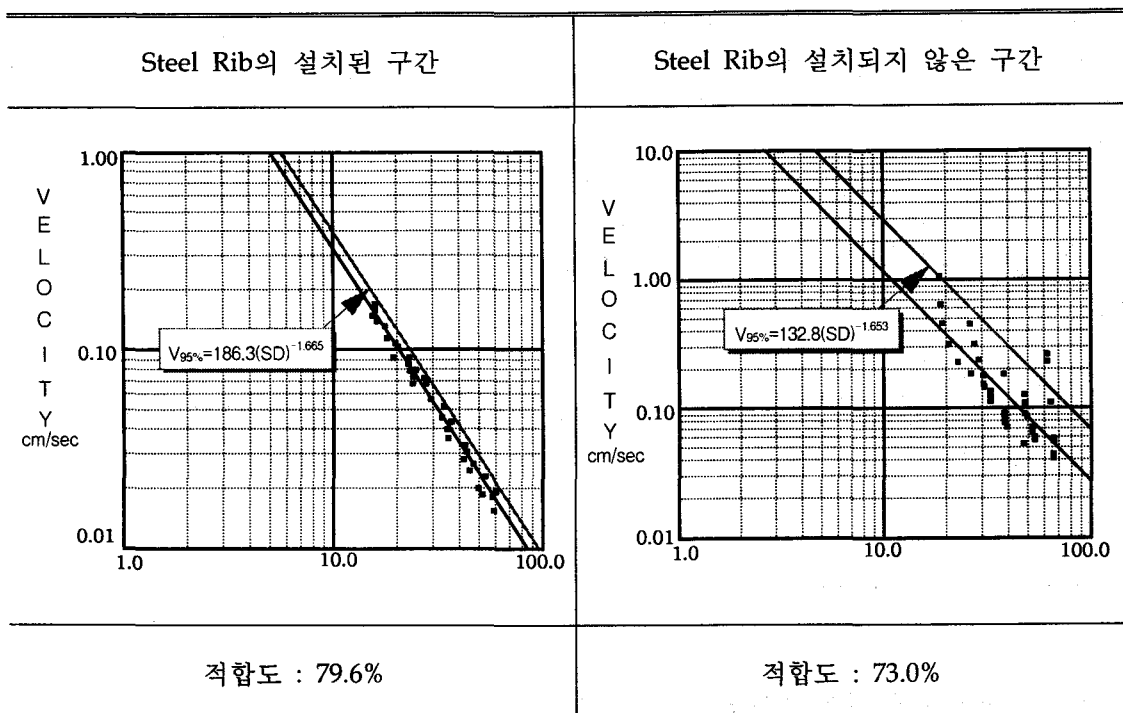
폭약의 폭력

서울지하철 3,4호선 건설시 연구결과에 의하면 진동치의 크기는 폭약의 폭발속도와 비례하는 것으로 즉 제라틴다이나마이트:함수폭약:초안폭약=1.0:0.8:0.65로 제시하였다. 따라서 진동제어를 위해서는 저폭속 폭약이 사용되어야 한다는 이론은 진동저감을 위한 폭약의 선택에서 오류를 범하기 쉽다. 발파에 의한 암반의 파괴형태는 암반의 강도와 성질 특히 취성도와 관계가 있으므로 취성도가 큰 화강암과 같은 경암에서는 고평속 화약력이 큰 폭약을 사용해야 하고, 퇴적암류와 같

이 취성이 약하나 인장력이 상대적으로 큰 압질에서는 저폭속에 가스발생량이 많은 폭약류가 효과적이다. 따라서 폭약의 선택은 암석의 탄성파속도와 폭약의 폭속이 동일한 폭약을 사용하는 것이 가장 이상적인 선택이다.

다분할 굴착방법에 따른 강지보 설치구간의 진동전파 특성

대단면 터널은 임시로 노출되는 굴착면에 슛크리트, 록볼트 및 강지보로 보강된 상태에서 발파 굴착은 시행하게 되는 보강에 따른 구속력증가로 발파진동이 약30%이상 증가되는 것으로 분석되었다.



3. 결론

- 1) Top Head 부분은 굴착시 1자유면 형태이므로 굴착효율 저하와 발파진동 발생이 크며, 지표침하가 가장 우려되는 부분이므로 상부(Top Head)부분의 굴착단면은 장비의 시공성과 활용성을 감안하되, 가능한 최소단면을 선택하는 것이 좋다.
- 2) Top Head부분을 분할굴착시에는 2분할의 CD굴착보다는 3분할의 중앙선진 도갱식 굴착방법이 지표침하 요인이 적고, Cycle Time 측면에서도 전단면 효율을 얻을 수 있다는 장점을 지니고 있어 시공성과 공기측면에서도 유리하다.
- 3) Bench 굴착에서는 상부단면(Top Head)의 내공변위등의 계측결과를 수렴하여 결정되어야

하나, 하향천공에 의한 Bench 발파시에는 천공장비의 능력과 발파진동의 영향을 고려하여 3~4m 높이가 적합하며, 수평굴착시에는 4~7m 높이로 분할하여도 문제가 없다.

4) Bench 굴착단면을 분할할 경우 2분할 단면보다는 중앙선진 굴착에 의한 좌우단면 확장 방법이 3분할방법이 안정성측면과 시공성측면에서 유리하다.

5) 도심지터널은 굴진장이 1.3m미만이므로 심발공, 확대공등의 발파공의 위치별에 따라 진동크기가 달라지는 현상보다는 저항선과 자유면 상태등의 발파공의 구속력에 따른 영향이 크다

6) 뇌관의 기폭단차는 전열과의 기폭단차가 100m이상이 되어야 구속력 감소로 진동저감 효과가 양호하다.

7) 분할굴착 과정에서 임시로 발생하는 굴착면의 보강은 가능한 Rock Bolt와 강재지보를 지양하고, 부석정리와 Shotcrete만으로 보강을 시행하는 것이 진동저감 효과가 양호하다.

참고문헌

1. 서울시 지하철 건설본부 2002, 서울지하철 6호선 건설지.
2. 서울시 지하철 건설본부 2001, 서울지하철 9호선 914공구 건설공사 설계보고서.
3. 유창하, 황현주, 2006, 터널공학회 기술강좌(6강) 도심지 터널발파 기술 및 특성이해
4. 김성호, 2005, 발파진동이 시설물에 미치는 영향연구, 서울시립대학교 도시과학대학원 토목공학과
5. 황현주, 1999, 지하철 건설공사중 발파작업에 따른 문제점 및 개선방안, 한국지반공학회.