최신 투 아치 터널의 굴착 공법과 구조 및 설계
New Construction and Design Method of Two Arch Tunnel

윤석렬[1], Seok-Ryul Yun, 권오현 [2], Oh-Hyun Kwon, 서동현 [3], Dong-Hyun Seo

[1] (주)만영엔지니어링 이사, Managing Director, Man-Young Engineering Co.,Ltd
[2] (주)한석엔지니어링 부사장, Vice-president, Han-Seok Engineering Co.,Ltd
[3] (주)현이앤씨 대표이사, President, Hyun ENC Co.,Ltd

SYNOPSIS : In order to cope with ever growing traffic flow and complexity in the urban area, construction demands for expanding and realigning of existing urban roads and massive development of underground space within the urban area are in its increasing trend, it is fact that, mainly due to lack of statistical data accumulation through real construction, technology and construction practice to support such demands can hardly be said to have been established enough and leave many things still to be developed.
These circumstances therefore came to motivate me to get into a study for a particular subject of "Design Basics for Closely Neighbored Twin Tunnel" among others, and also to put forward subjects required to be further studied in this connection in the future as follows:
1) To make a new economical design model for closely neighbored twin tunnel not only to make a drain for center perfect but also a tunnel construction safe.
2) Further efforts should be exerted for establishment of general standards for design and construction of various types of large cross-section tunnels including Twin structure.

Key words : two arch tunnel, pilot excavation, central drainage, low point, precast

1. 서 론

본 논문은 도로 또는 철도, 지하 비축시설, 군사시설 등에서의 근접터널(투 아치 터널)의 시공방법과 그 구조에 관한 것으로, 중앙터널을 관통하고 중간벽체의 철근을 조립하고 콘크리트를 타설하여 형성시키고 중간벽체 상부의 틈을 그라우팅하는 단계, 좌, 우측 본선터널을 굴착하는 단계, 방수 및 배수시설 및 라이닝을 시공하는 단계로 이뤄지는 투 아치 터널의 시공에 있어, 중간벽체의 양 측벽 상부에 물이 모이는 배수저점(Low point)을 형성시키고 중간벽체의 길이방향의 중앙부에 배수관을 설치하여 중간벽체의 상부에 설치된 부직포 및 방수막에 의하여 집수되는 배수저점부의 물을 유공배수관과 이에 연결된 배수관을 통하여 원활히 배수시키도록 하는 것을 특징으로 하는 투 아치 터널의 공법과 구조에 관한 것으로, 기존의 공법보다 단면이 간단하고 중앙 상부 지반의 침투수를 효과적으로 하부로 배수하기가 용이하도록 개선시킨 것이다.

기존의 투 아치 공법은 굴착한 후 중간 벽체를 시공할 때 상부에 방수층을 두므로 지반의 충분한 지보가 불가능하여 구조적으로 불안정하고 나중에 본선부의 방수층과 연결해야 함으로 설치시기의 차이와 본선부의 발파 굴착에 따른 연결방수층의 열화 및 손상이 심하여 방수층 연결이 제대로 되지 못하며,

방수층과 배수관 연결부의 집수가 효율적이지 못하고 배수기능이 좋지 못해 터널 내부로 누수가 심하며 특히 동절기에는 결빙으로 인하여 벽체 등에 고드름이 발생하고 누수된 물이 포장바닥에 얼어붙어 교통에 상당한 지장을 초래하는 등의 결함을 가지고 있었으나 상기 제시된 투 아치 터널의 형식은 배수방법을 개선하고 방수시공도 동시에 할 수 있도록 단면과 배수방법을 개선하여 공정을 단순화시키고 품질의 향상과 공사기간 및 공사비를 획기적으로 줄이는 효과가 있을 것으로 생각한다.

2. 투 아치 터널의 종래 기술의 문제점

본 논문은 도로 또는 철도, 지하비축시설, 군사시설 등에서의 터널의 공법과 그 장치 중, 특히 투 아치 터널의 중간벽체의 공법 및 구조에 관한 것이다. 기존의 투 아치 터널은 그림1에서 알 수 있듯이, 중앙 터널을 굴착한 후 중간 벽체를 시공할 때 상부에 방수층을 두므로 중앙 상부 지반의 충분한 지보가 불가능하여 구조적으로 불안정하고 본선부의 방수층과 연결해야 하므로 설치시기의 차이와 본선부의 발파 굴착에 따른 연결방수층의 열화 및 손상에 의하여 방수가 원활하지 못하며, 특히 방수 저점부의 연결배수관의 효율적인 집수가 불가능하고 동결에 의해 파손되기도 하여 배수가 제대로 되지 않아 중간벽체의 표면에 누수 및 백화현상이 발생하기도 하였다. 그리고 중간벽체의 콘크리트 타설시 벽체부, 상부헌치부, 방수막 설치 후 최상부로 나누어 분할하여 타설해야 하므로 많은 시간을 요하고 품질이 저하되는 원인이 되었다.

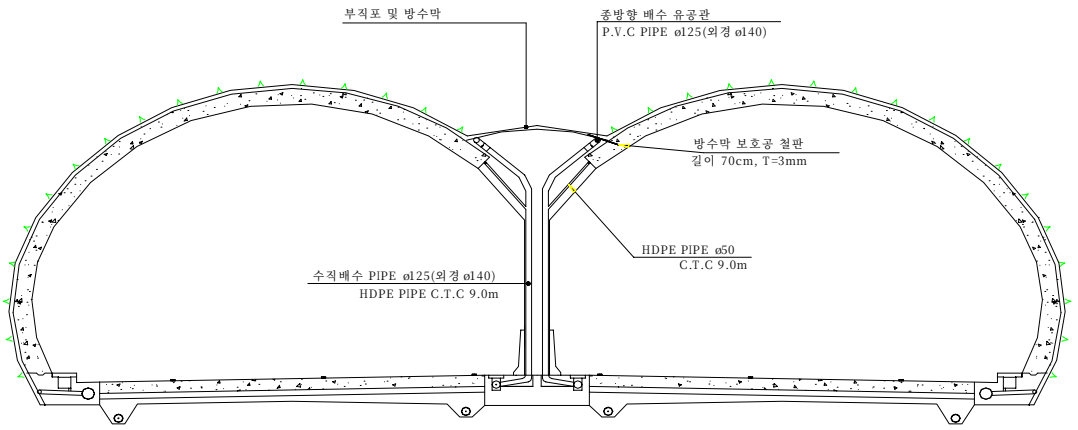


그림 1. 기존의 투 아치 터널의 단면

3. 투 아치 터널의 기술적 과제

상기 기술한 문제점을 해결하기 위하여, 특히 터널 중간 벽체를 설치하는 방법을 개선하여 중앙부의 지지기능을 확실히 보장하고 터널 중앙부 지반의 배수기능과 시공방법을 획기적으로 개선하고자 한다. 단계적으로 중앙터널의 상부를 굴착하는 단계, 중앙터널의 하부를 굴착하는 단계, 중앙터널을 관통하고 중간벽체에 철근을 조립하여 콘크리트를 타설하여 형성하고 중간벽체 상부의 틈을 그라우팅하는 단계, 좌측 본선터널의 상부를 굴착하는 단계, 우측 본선터널의 상부를 굴착하는 단계, 좌측 본선터널의 하부를 굴착하는 단계, 우측 본선터널의 하부를 굴착하는 단계에 이뤄지는 일반적인 투 아치 굴착터널의 시공에 있어서, 그림2처럼 중간벽체 상부의 배수층을 없애고 그라우팅에 의해 지반과 밀착시키도록 하여 본선터널의 하중이 집중되는 중앙부의 지지를 확실히 할 수 있도록 하고 중간벽체의 양 측벽 상부에 물이 모이는 배수저점(Low point)을 형성시키고 중간벽체의 길이방향의 중앙부에 배수관을 설치하여 중간벽체의 상부에 설치된 부직포 및 방수막에 의하여 집수되는 배수저점부의 물을 유공배수관과 이에 연결된 배수관을 통하여 배수시키도록 하여 이중으로 누수를 차단하는 구조가 될 수 있도록 하였다.

4. 투 아치 터널의 개선방안

투 아치 터널의 시공방법을 이용하여 완성된 단면은 그림2와 같다.

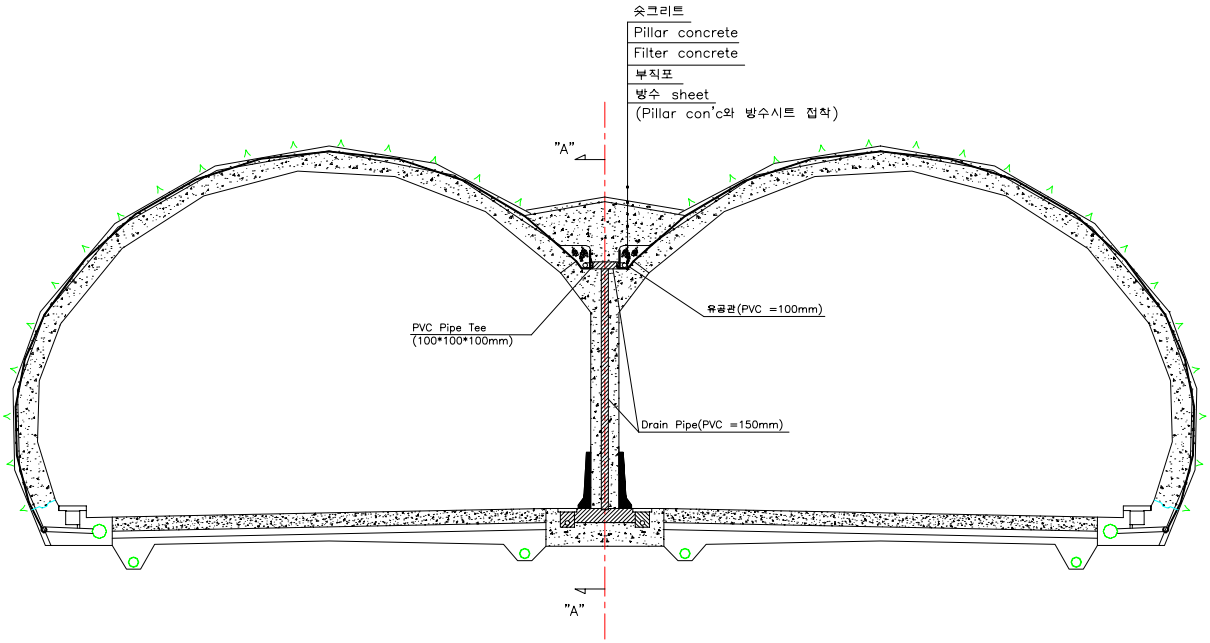


그림 2. 개선된 투 아치 터널의 단면

상기 중간벽체 상부에는 기존 터널에 있는 배수층을 없애고 그라우팅에 의해 지반과 밀착이 되도록 하여 본선터널의 하중이 집중되는 중앙부의 지지를 확실히 할 수 있도록 하였으며 그라우팅은 콘크리트의 충진 불량, 양생과정에서의 수축 등의 사유에 중간벽체와 굴착 천정부 사이의 틈이 벌어지므로 일반적으로 일정 길이의 그라우팅 호스를 중간벽체의 종 방향 길이에 맞춰 설치하여 다단계 무수축 시멘트 그라우팅(Cement Milk Grouting)을 실시하도록 한다. 또한 중간벽체의 터널 길이방향으로 5~15m 간격으로 시공이음 조인트를 겸한 수축 및 신축 줄눈을 두어 콘크리트의 균열을 제어하게 한다.

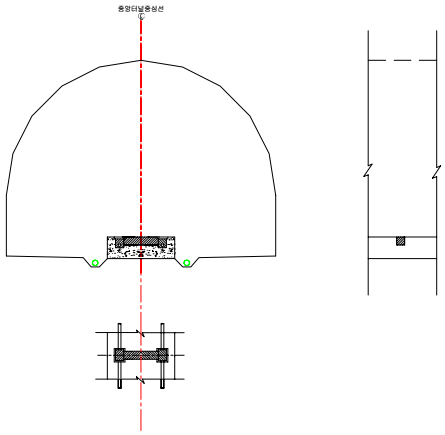
중간벽체의 주변지반 배수를 위한 형태 및 기능과 관련하여 중간벽체의 형태는 본 논문의 매우 중요한 부분으로 기존의 터널은 그림1에 나타낸 바와 같이, 벽체에 배수파이프를 설치하여 터널 상부 주변 지반의 지하수를 배제하도록 되어 있으나 방수층과의 연결부 집수가 원활하지 않고 배수가 잘 되지 않아 벽체의 표면에 누수 및 백화현상이 발생하였다. 이를 개선하고자 중간벽체의 양 측벽 상부에 물이 모이는 배수저점(Low point)을 형성시키고 중간벽체의 길이방향의 중앙부에 배수관을 설치하여 중간벽체의 상부에 설치된 부직포 및 방수막에 의하여 집수되는 배수저점부의 물을 유공배수관과 이에 연결된 배수관을 통하여 원활히 배수시키도록 하였다.

5. 개선된 투 아치 터널의 효과

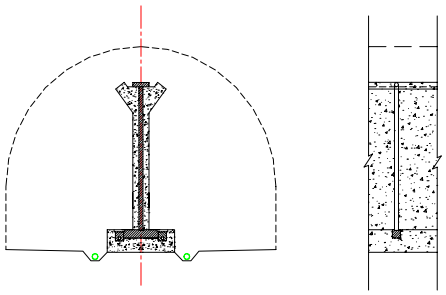
본 논문은 병설 터널의 이격거리를 줄일 수 있는 투 아치 터널의 구조에 대하여 중간벽체 상부에는 기존 터널에 있는 배수층을 없애고 그라우팅에 의해 지반과 밀착시키도록 하여 본선터널의 하중이 집중되는 중앙부의 지지를 확실히 할 수 있도록 하였고 중간벽체의 형태가 주변지반의 지하수 배수가 용이하고 터널 라이닝 설치 전에 방수층의 연속성 있는 동시 시공이 가능하도록 함으로써 기존 터널의 누수 문제를 근본적으로 해결하였다. 중간벽체의 콘크리트 타설은 2회에 1롯드를 칠 수 있도록 고안하여 콘크리트 타설 회수를 3회에서 2회로 줄여 품질향상과 공기 단축이 가능하도록 하였다.

즉, 기존 투 아치 공법의 지반 지보의 불충분으로 인한 불안정성과 터널내의 배수기능 불충분으로 발생하는 누수문제를 근본적으로 해결하고 시공 단계를 줄인 연속 중간벽체의 콘크리트 타설공법으로 시공공정을 단순화하여 품질의 향상과 공기 및 공비를 획기적으로 줄이는 효과가 있다.

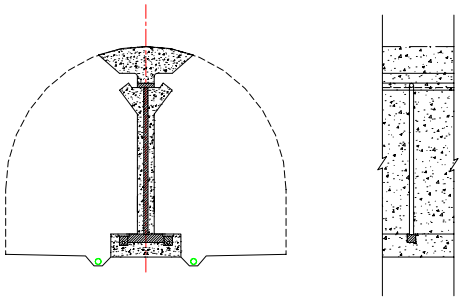
6. 시공 순서



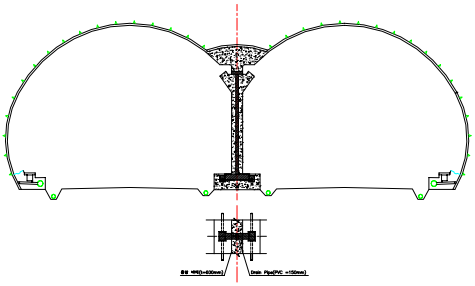
1.footing용 철근, 거푸집, Drain용 block out 설치 (Cover 받침 철물 설치), footing con'c 타설



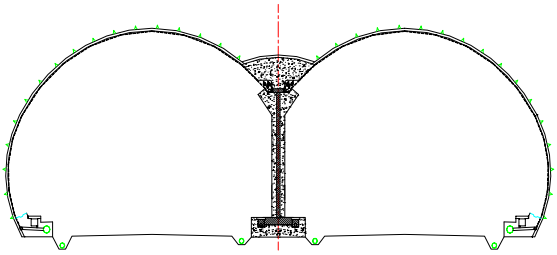
2. 벽체부(1) 철근, 거푸집, Drain Pipe 설치, con'c타설



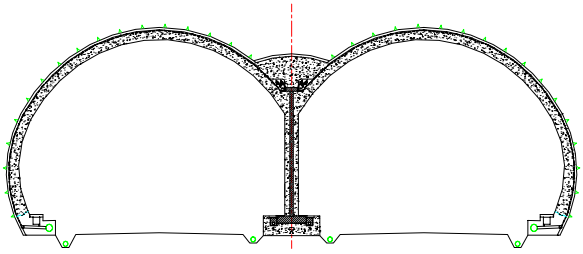
3. 벽체부(2) 철근, 거푸집설치, 벽체부(2) con'c타설,



4. 본선부 굴착 및 보강



5. 배수구, 공동구 시공, 중앙부 방수 시트 부착, 부직포 설치, 유공관(100)설치, filter con'c 타설, 본선부 방수시트, 부직포 연결 설치



6. 라이닝 시공

그림 3. 개선된 투 아치 터널의 시공순서도

7. 중앙부 배수 상세

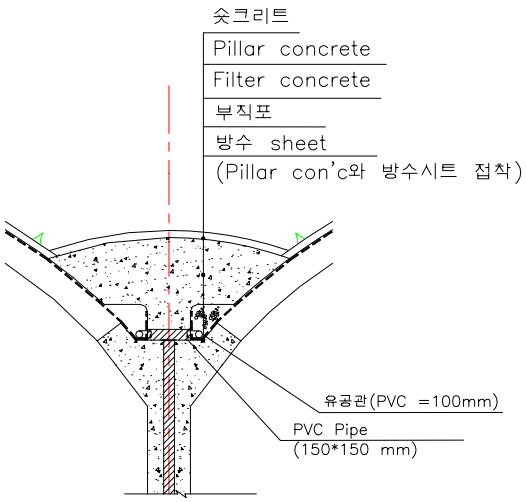


그림 4. 개선된 투 아치 터널의 중앙부 배수 상세도

8. 터널의 안정성 검토

8.1 지보재 특성치 결정

터널의 안정성은 기존의 투 아치 터널과 굴착단면이 유사하므로 해석상 큰 차이는 없을 것으로 사료된다.

터널의 안정성 분석을 위한 수치해석에서는 지보공들을 모형화하여 실제의 지반과 지보공들 간의 상호거동을 최대한 근사적으로 표현할 수 있어야 한다. 본 터널해석에서는 FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua) 프로그램을 이용하여 지보부재로서의 숏크리트 및 록볼트를 각각 Beam 및 Cable 요소로 적용하였다.

1) 숏크리트

숏크리트의 시간의존성 경화도에 따라 강도를 연한 숏크리트와 굳은 숏크리트로 구분하여 탄성계수를 다르게 적용하였다. 또한 FLAC에서 Beam Element는 평면응력 조건에서의 요소이므로 터널내 숏크리트와 같이 터널 축방향에 연속적으로 설치되는 구조에서는 평면변형율 조건을 만족시키기 위하여 다음과 같이 보정된 변형계수를 적용하여야 한다.

$$E^{*}=\frac{E}{(1-\nu^{2})} \qquad (1)$$

여기서, E* : 보정 변형계수, ν : 0.2

표 1. 숏크리트의 적용 특성치

특 성 치 / 구 분	압축강도 (kgf/cm^2)	탄성계수 E ($10^3 tf/m^2$)	적용 탄성계수 E* ($10^3 tf/m^2$)	단면적 (m^2)	단면 2차모멘트 ($10^{-4} m^4$)
연한 숏크리트	100	500	521	0.05~0.20	0.104~6.67
굳은 숏크리트	200	1,500	1,562	0.05~0.20	0.104~6.67

2) 록볼트

Cable요소로서 입력 매개변수는 다음 표2와 같다.

표 2. 록볼트의 적용 특성치

특 성 치 / 구 분	Area(D25) (m^2)	탄성계수 E ($10^3 tf/m^2$)	인장한계 (tf)	Kbond (tf/m/m)	Sbond (tf/m/m)
록볼트	4.91×10^{-4}	21,000	17.7	1.30×10^{6}	53.7

* Kbond : shear stiffness of grout , Sbond : Cohesive strength of grout

위 표2는 터널굴진 방향의 단위 m당 적용되는 값으로서 패턴별로 터널의 종방향 굴진 및 록볼트 설치간격을 고려하여 각각 다르게 적용하였다.

8.2 적용지반 특성치

본 터널해석에 적용한 지반 특성치는 종합하면 다음 표3과 같다.

표 3. 적용지반 특성치

특성치 / 구 분	변형계수 ($10^3 tf/m^2$)	포아송비	마찰각 (°)	점착력 (tf/m^2)	단위중량 (tf/m^3)
토 사	1.5	0.33	25	3	1.85
풍 화 암	50	0.30	35	25	2.26
연 암	312	0.25	40	70	2.5
경 암	750	0.22	45	150	2.65

8.3 해석결과

선정된 해석단면의 모델링은 그림5와 같고, 앞에서 언급한 지반 및 지보재 물성치를 사용하여 수치해석을 수행한 결과는 다음과 같다.

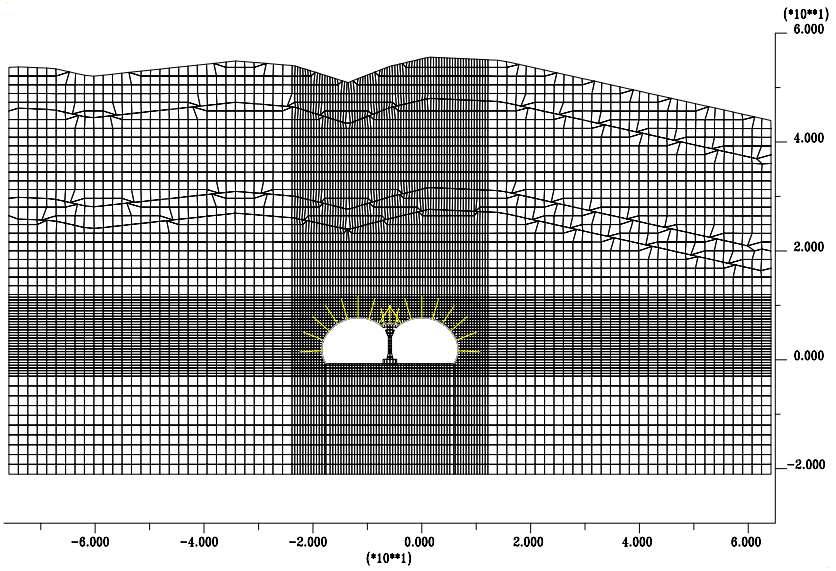
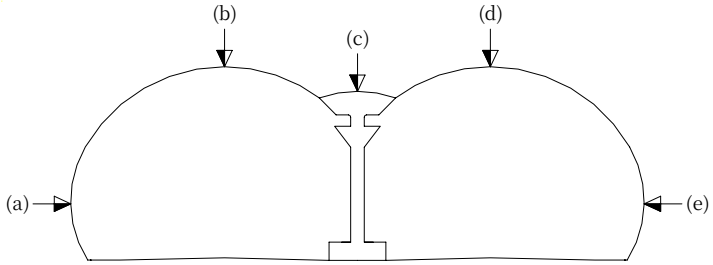


그림 5. 터널 해석 모델링

■ Ko = 0.5일 경우

1) 변 위

측 점 위 치


측 점	시 공 단 계						
	0	1	2	3	4	5	6
a	-	-0.014	-0.018	-0.404	-0.613	-0.200	-0.184
b	-	0.687	0.704	-2.658	3.652	3.695	3.691
c	-	1.438	1.472	-2.279	3.378	3.380	3.377
d	-	0.682	0.700	-1.238	3.633	3.629	3.669
e	-	-0.047	-0.049	-0.163	-0.602	-0.580	-0.170

주) 0 : 초기상태, 1 : 중앙터널굴착, 2 : 중앙벽체시공, 3 : 본선좌측상반굴착
4 : 본선우측상반굴착, 5 : 본선좌측하반굴착, 6 : 본선우측하반굴착

2) 지보재 응력

주)단위 : 응력(kgf/cm^2), 축력(tonf)

단 계	숏 크 리 트			중간벽체	록 볼 트
	최대휨압축응력	최대휨인장응력	최대전단응력	최대압축응력	최대축력
1	14.845	-	0.017	-	0.868
2	14.866	-	0.017	5.000	0.906
3	22.524	0.116	0.048	35.000	1.342
4	32.730	3.058	0.064	70.000	3.190
5	25.018	2.317	0.136	80.000	3.256
6	18.420	1.616	0.128	80.000	3.320

■ 결과분석

1) 중앙부 Pilot 굴착 후 해석결과 숏크리트 최대 압축응력은 32.7 kgf/cm^{2}로 나타났으며 이는 허용응력 80.0 kgf/cm^2 이내이고, 록볼트 최대축력 역시 3.3 tonf으로 허용축력 8.6 tonf 이내의 값을 갖는 것으로 나타났다.
2) 터널주변 발생된 최대변위는 천단부 3.7 mm, 측벽부 0.6 mm로서 그다지 큰 변위가 발생할 것으로 예상되지 않는다.
3) 중간벽체는 상부의 이완하중을 지반으로 전달하는 구조물로서, 작용하는 최대 압축응력 80.0 kgf/cm^{2}로 허용응력인 96.0 kgf/cm^2 이내로 나타났으며 설계시 중간벽체에는 철근을 보강하여 작용하중에 견디도록 계획되었으므로 벽체 안정에는 큰 문제가 없을 것으로 사료된다.
4) 지층구조, 발생변위, 지보재 응력 등을 미루어 종합적으로 판단하면 안정성에는 문제가 없을 것으로 판단되며 시공할 때 근접굴착영향을 확인할 수 있는 계측을 철저히 하는 등의 주의가 요구된다.

9. 결 론

1) 근접터널인 투 아치 터널에 있어서 기존 형식보다 주요 고려사항인 중앙굴착부 지보와 배수처리를 완벽하게 해결할 수 있는 단면과 배수처리 방법을 제시하였다.
2) 중앙부 배수를 원활히 하기 위해 라이닝을 중간벽체 상부에서 지지시키지 않고 바닥까지 연장, 시공하는 방법도 고려해 볼 수 있으나 배수성능은 비교적 우수하나 굴착폭이 커져 안정성과 경제적으로 불리하게 되며 중간벽체 콘크리트면에 덧씌워 방수층과 라이닝을 시공하게 되므로 비효율적이다.
3) 향후에 투 아치 터널의 시공법에 있어 Pilot 터널과 중앙부 Pillar의 시공이 터널 전체 공사비의 Key Point이므로 도항(Pilot)이 없는 터널의 연구도 병행할 필요가 있을 것이며 중간 벽체를 Precast화하는 방법과 환기에 대한 별도의 고려는 별개로 하고 벽체를 기둥으로 처리하여 미관개선과 공사중 장비의 통행을 가능하게 하여 효율적인 시공이 가능하도록 하는 등의 연구가 뒤따라야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 김창용 등, “Umbrella Arch 공법이 적용된 터널의 3차원 유한요소 해석에 관한 연구”, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, Vol.8, 1998. pp 209-225
2. 김학문, “쌍굴터널 굴진에 따른 주변지반의 거동과 간섭효과”, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, Vol.7, 1997. pp 136-142
3. “근접 터널”, 최신 터널공법 총기술, 도서출판 과학기술,1994. pp 214-239
4. 마상준 등, “지하교차 터널의 수치해석 및 시공법 연구”, 한국건설기술연구원, 1998. 1
5. 양종화 등, “대단면 장대 산악터널에서의 NATM 기계화 시공”, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, Vol.10, 2000. pp 111-120
6. 유영현, “교차터널의 시공사례 및 거동 특성”, 건설기술정보, 건설기술연구원, 1998/1
7. 유영현 등, “국내터널건설의 현황조사 및 교차터널의 설계법 개발 연구”, 한국건설기술연구원, 1997.9
8. 일본터널기술협회, “기설 터널내에서의 분기부의 설계와 시공”, 터널과 지하, vol. 31 no. 12 2000. pp 17-28
9. 일본터널기술협회지, “각국의 안경터널의 현상과 과제”, 터널과 지하, vol. 32 no. 9 2001. pp 53-62
10. 장찬수, “근접시공”, 기술경영사, 1997. pp 241-274
11. 지왕률, (주)청석ENG. “서울 지하철 6호선 녹사평 정거장의 대단면 터널설계”, 기술정보 1994.
12. 최명호, “진영터널 시공 결과 보고”, 한국도로공사, 1998/11
13. 한국도로공사, “고속도로 터널설계 실무자료집 “, 1995. pp 155-178
14. Arsenio Negro Jr. & Argimiro Alvarez Ferreira, "Tunnels and Metropolises", Vol.2. 1998. pp 1193-1198
15. Kalman Kovari, “NATM 개념의 오류에 관한 고찰”, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, Vol.6, 1996. pp 75-87
16. *KTA,* “도로에서의 2-Arch 터널의 적용성”, *KTA 2001 Annual Conference / May 31, 2001 / Seoul / Korea*