TBM 도로터널의 단면특성 및 하부공간 활용을 위한 유효면적 검토

김현수¹, 김홍문^{2*}

A study on cross sectional characteristics and available area for using the lower space in TBM road tunnels

Hyun-Soo Kim, Hong-Moon Kim

ABSTRACT For the application TBM tunneling method, Both tunnel design standard and case study designed & constructed in domestic and foreign have been conducted. According to the study, the number of lane and inner shape (single or duplex) vary depending on the volume of traffic. Also extra space located in the top and bottom of tunnel is used for a multipurpose such as ventilation, disaster prevention, maintenance and administration. To find area ratio according to the components of road TBM tunnel, a standard section was considered as a two-lane road. Then, the analysis of area ratio of this section which consists of components for clearance, extra space in upper and lower tunnel was carried on two widths of shoulder. In addition, after a structural analysis, a thickness requirement of lower slab which is essential for road tunnel was derived on a few supporting types. Through correlation analysis, the ranges of available cross-sectional area between slab thickness and lower extra space of the tunnel was presented.

Keywords: TBM, road tunnel, tunnel cross section, available cross-sectional area

요 약 TBM 공법 적용을 위한 도로터널 단면의 국내·외 설계사례와 시공사례 및 터널단면 설계기준을 조사 분석하였다. 교통량에 따라 차로수의 규모 및 내부형상(단층 혹은 복층)이 상이하였고, 상·하부의 여유공간은 환기, 방재시설 및 유지관리 공간 등으로 다양하게 활용하고 있음을 확인하였다. TBM도로터널의 구성요소별 면적비를 확인하기 위하여 2차로 규모의 표준단면을 가정하고, 길어깨 폭원변화에 따른 내공단면 구성요소(시설한계 수용공간, 상부여유공간, 하부여유공간)의 단면적비를 분석하였다. 아울러 도로터널에 필수적으로 설치되는 차도 슬래브의 지지형식별 소요두께를 구조해석을 통하여 산정하였고, 산정된 벽체 및 슬래브 두께와 하부 여유공간의 상관관계를 분석하여 유효단면적 범위를 제시하였다.

주요어: TBM, 도로터널, 터널단면, 유효단면적

접수일(2012.2.27), 수정일(2012.3.9), 게재확정일(2012.3.23)

¹정회원, (주)평화엔지니어링 지반공학부 부장

²정회원, (주)평화엔지니어링 지반공학부 이사

*교신저자: 김홍문 (E-mail: iguakim@naver.com)

1. 서 론

국내 도로터널 건설 시 TBM(Tunnel Boring Machine)공법과 NATM공법을 병용하여 적용한 사례는 있으나, 전단면 TBM공법을 적용한 사례는 아직 없다. 그러나, 2000년대 후반 이후로 보령~태안간 해저터널, 강변북로 하저터널이 전단면 TBM터널로 설계 제안되었고, 이후 거제~마산간 해저터널, 한려대교 해저터널 등의 계획이 추가로 논의되고 있다. 또한 서울시의 도심도 지하도로망 구축사업(U-Smartway) 계획이 논의되어 전단면 TBM공법에 의한 도로터널 건설에 대한 관심이 커지고 있다.

국외에서는 도심지 지하도로 및 해저터널 프로젝트에서 쉴드TBM이 대다수 적용되었고, 규모 또한 대단면으로 건설되고 있다. 장수호 등은(2008) 도심지 지하도로는 single tube 형태의 소형차 전용의 복층식 도로가 적용된 대단면 쉴드 TBM의 적용 가능성이 높을 것으로 분석하였다.

TBM공법을 적용한 터널 단면은 대부분 원형이므로 NATM공법을 적용한 도로터널에 비하여 단면규모가 크고 공간 활용성이 떨어지는 문제점이 있다. 따라서 도로터널 건설에 TBM공법을 적용하기 위해서는 적정규모의 시설한계 적용과 함께 시설한계 이외의 여유공간에 대한 활용 계획이 터널단면 선정 시 중요하게 고려되어야 한다.

일반적으로 TBM공법을 적용한 도로터널에서는 상·하부 여유공간을 환기 및 방재시설과 유지관리 시설로 활용하게 되고, 터널 내에 슬래브를 설치하여 차량운행하중을 지지하고 공간을 확보하게 된다.

본 논문에서는 국내·외 대표적인 TBM 도로터널 사례를 조사하여 단면 구성요소와 여유공간 활용사례를 분석하였다. 또한 단면계획 시 보다 효율적인 하부공간 활용을 위하여 차도 슬래브 지지방식에 따른 하부 여유공간의 규모를 검토하였다.

도심지 도로터널 단면을 단층터널과 복층터널로 구분하고, 복층터널은 소형차전용 도로터널로 계획하였으며, 각각의 터널별 터널 단면요소가 차지하는 단면적 구성비 분석과 차량 통행의 종류에 따른 TBM 도로터널의 규모를 제안하였다.

또한, TBM터널 내에 계획되는 슬래브 구조물의 종류를 구분하여, 슬래브의 지지형상에 따른 분류 및 슬래브 두께, 강도, 지지구조물 간의 이격거리 등을 변수로 구조해석을 수행하여 슬래브 규모별 적정 구조물 규모와 하부 공간의 유효단면적을 검토하였다.

2. 국내외 TBM 도로터널의 단면 사례분석

2.1 국내 TBM 도로터널 단면 설계사례

보령~태안(1공구) 도로건설공사 기본설계(2009) 시 제안된 TBM터널은 연장 6.9 km의 일방향 1차로의 해저터널로서 내경 8.8 m, 차로폭 3.5 m, 시설한계 높이 5.0 m에 단층 슬래브를 적용하였다. 슬래브는 2개의 하부 벽체에 의해 지지되었고 슬래브 하부 여유공간은 전기설비 및 배수구로 계획되었다. 강변북로 확장공사 기본설계(2010) 시 설계 제안되었던 TBM 터널은 일방향 2차로의 하저터널로서 내경 12.12 m, 차로폭 7.0 m, 시설한계 높이 4.8 m에 단층 슬래브를 적용하였다. 슬래브 하부는 버력채움에 의해 지지되는 방식으로 슬래브의 하부 여유공간은 급기 풍도로 계획되었다.

서울시 U-Smartway 계획 시 제안된 TBM 터널은 소형차 전용의 일방향 2차로 터널로서, 내경 13.5 m, 차로폭 6.5 m, 시설한계 높이 3.0 m에 복층 슬래브를 적용하였다. 슬래브는 양단부에서 지지되었고 슬래브 하부 여유공간은 격벽을 설치하여 급기 및 배기 풍도로 계획되었다(그림 1).

국내 TBM 도로터널 단면 설계사례를 분석한 결과, 차로 수는 1~2차로, 시설한계 높이는 3.0~5.0 m 규모로 적용되었다. 터널 내 차도는 단층 또는 복층으로 설치되었고, 슬래브 지지방식은 양단 지지 및 양단+2점 지지로 다양하였다.

국내 TBM 도로터널의 단면 규모가 다양한 것은 도로터널 특성상 도로의 용량에 따라 차로의 규모가 정해지는 것과 통행차량의 종류에 따라 시설한계의 규모가 달라지는 것이 주된 이유이다. 상하부 여유공간은 환기목적으로 주로 활용되었으며, 하부 여유공간 일부를 터널용 이외의 공동구로 활용하고자 하는 시도도 있었다.

그림 1. 국내 TBM 도로터널 단면 설계사례

2.2 프랑스 파리 A86 지하도로

프랑스 파리 A86 지하도로는 연장 7.5 km의 서터널과 10 km의 동터널로 구성되어있다(그림 2). 서터널은 대형차량 통행이 가능한 2차로 단층 터널로서 차로 폭은 5.6 m, 시설한계 높이는 4.55 m 이고 터널의 내경은 10.82 m이다. 시설한계 상부공간은 배기덕트, 중간부는 차로, 하부는 급기덕트로 활용되고 있다.

A86도로의 동터널은 소형차전용 3차로 복층 터널로서 상부 및 하부가 급기·배기덕트로 계획되었고, 중앙부는 상부 3차로와 하부 3차로로 계획되었다. 3차로 도로의 차로 폭은 8.4 m, 시설한계 폭은 8.72 m, 높이는 2.0 m로서, 상부 및 하부의 층고는 2.55 m이며, 터널의 내경은 10.4 m이다.

서터널의 슬래브는 2개의 하부 벽체에 의해 지지되고, 동터널의 하부 슬래브는 1개의 하부 벽체에 의해 지지되는 형식이다. 슬래브는 프리캐스트 콘크리트와 현장타설 콘크리트를 적용하였다.

2.3 말레이시아 SMART 터널

SMART터널은 연장 약 3 km의 2차로 소형차전용 터널로서 2차로 도로의 차로 폭은 6.5 m이며 시설한계 폭은 8.85 m, 높이는 2.55 m이고, 터널의 내경은 11.83 m이다(그림 3). 터널단면은 3개 층으로 구분되어, 일반조건과 보통수준의 폭풍인 경우는 상부층과 중간층의 도로터널을 운행하고, 상당한 폭풍우가 발생할 경우는 도로구간을 폐쇄한 후 홍수조절터널로 활용토록 계획되어있다. 특이한 점은, 터널내부에 물이 차더라도 환기시스템을 보호하기 위하여 환기팬은 터널외부에 설치되어있다. 하부 슬래브는 중간에 지지벽체가 없는 양단지지형으로 단부의 두께를 크게 하여 설치하였다.

그림 2. 프랑스 파리 A86 지하도로 터널 단면

그림 3. 말레이시아 SMART 터널 단면

2.4 중국 상하이 양쯔강 터널

상하이 양쯔강 터널은 연장 약 7.5 km의 3차로 단층 터널로서, 도로의 차로 폭은 11.25 m이며, 시설한계 폭은 12.75 m, 높이는 5.0~5.5 m로서, 터널의 내경은 13.7 m이다(R. Huang, 2008). 터널의 상부는 배기 풍도, 중간부는 차로, 하부는 전력설비 및 비상통로 등으로 계획되었고, 슬래브는 다수의 하부벽체에 의하여 지지되는 형식이 적용되었다.

국의 TBM 도로터널 단면을 분석한 결과 2~3차로의 단층 슬래브 구조가 대다수였으며, 복층 슬래브를 적용한 경우도 확인되었다. 또한, 터널단면의 상부는 JET FAN 또는 환기덕트로 구성된 환기공간, 중앙부는 차로공간, 하부는 환기공간 또는 공동구 및 대피로로 구성되어 있다.

TBM터널은 원형단면이므로 시설한계 이외의 상·하부 공간의 효율적 활용이 단면적 축소를 통한 경제성 확보에 중요한 요소임이 확인되었다.

그림 4. 상하이 양쯔강 터널단면

또한, 차도 슬래브는 양단에 지지하는 방식과 하부공간을 활용을 위한 벽체 설치 필요에 따라 중간에 지지점이 설치되는 방식도 있다.

3. TBM 도로터널 단면구성 비율 검토

3.1 검토단면 설정

TBM 도로터널의 단면 구성요소가 차지하는 면적 규모를 확인하기 위하여 비교기준을 선정한 후 터널단면을 구성하였다. 검토단면은 도시지역의 고속도로 및 소형차도로를 가정하였으며, 급·배기 풍도면적은 국내에서 제안된 TBM 도로터널(강변북로, U-Smartway) 사례를 참조하여 설정하였다(표 1). 도심지에 계획되는 대심도의 장대 도로터널임을 고려하여 횡류식 환기방식을 적용하고, 우측 길어깨는 2.0 m로 고려하였으며, 공동구는 최소규모로 가정하였다. 기준단면 설정 시 급·배기 공간은 단층터널의 경우 상부공간에 배치하고, 복층터널은 방향별로 각층의 상부와 하부공간에 따로 수용하는 것으로 설정하였다.

설정된 단면기준을 적용하여 도시지역 고속도로의 2차로 단층터널(TYPE-1), 소형차전용 고속도로의 2차로 단층터널(TYPE-2) 및 복층터널(TYPE-3)의 3개의 터널단면을 검토단면으로 계획하였다. 또한 비교를 위하여 좌우측 길어깨의 폭원을 변화시켜 단면규모에 미치는 영향을 추가로 검토하였다(표 2, 그림 5~그림 7).

표 1. TBM 도로터널 단면비교를 위한 기준 설정

구 분	도시지역 고속도로	소형차전용 고속도로
차로폭	3.50 m	3.25 m
좌측 길어깨 / 우측 길어깨	1.0 m / 2.0 m	1.0 m / 2.0 m
시설한계 높이	4.5 m	3.0 m
급기면적 / 배기면적	6.5 m ² / 14.5 m ²	4.0 m ² / 9.5 m ²

표 2. 길어깨 폭원 변경을 고려한 비교단면 설정조건

지역 구분	도시지역 고속도로		소형차전용 도로			
터널종류(TYPE)	2차로 단층터널(TYPE-1)		2차로 단층터널(TYPE-2)		2차로 복층터널(TYPE-3)	
단면 비교	기준단면	비교단면	기준단면	비교단면	기준단면	비교단면
좌측 길어깨	1.0 m	1.0 m	1.0 m	0.75 m	1.0 m	0.75 m
우측 길어깨	2.0 m	1.0 m	2.0 m	1.0 m	2.0 m	1.0 m

(a) 기준단면

(b) 비교단면(우측 길어깨 축소)

그림 5. 도시지역 2차로 단층터널(TYPE-1) 단면 비교

(a) 기준단면

(b) 비교단면(좌·우측 길어깨 축소)

그림 6. 소형차전용도로 2차로 단층터널(TYPE-2) 단면 비교

(a) 기준단면

(b) 비교단면(좌·우측 길어깨 축소)

그림 7. 소형차전용도로 2차로 복층터널(TYPE-3) 단면 비교

3.2 검토단면의 규모 비교

도시지역 고속도로 2차로 단층터널(TYPE-1)은 우측 길어깨 축소 시 터널직경이 감소하였으며, 소형차전용 도로 2차로 단층터널(TYPE-2)의 경우는 좌측 및 우측 길어깨 축소 시 터널직경이 가장 크게 감소하여 1.2 m 축소되는 것으로 검토되었다. 소형차전용 도로 2차로 복층터널(TYPE-3)의 경우는 좌측 및 우측 길어깨 축소 시 시설한계 확보로 인한 터널직경의 변화는 크지 않은 것으로 나타났다(그림 8).

터널 내공단면적 구성비율은 내부공간을 크게 세부분으로 구분하여 면적을 산정하였다. 시설한계를 포함하는 단면 중간부분을 ‘시설한계 수용공간’으로 단면적을 일괄 산정하였고, ‘상부공간’과 ‘하부공간’으로 구분하였다. 2차로 단층터널(TYPE-1, TYPE-2) 및 2차로 복층터널(TYPE-3)의 단면구성 요소별 면적비율을 분석하였다(표 3, 그림 9).

그림 8. 단면설정 요소별 2차로 TBM 터널내경 변화

표 3. 검토단면의 내부단면적 및 부분별 단면적 비율

구 분		TYPE-1 도시지역 2차로 단층터널		TYPE-2 소형차전용 2차로 단층터널		TYPE-3 소형차전용 2차로 복층터널	
		기준단면		기준단면		기준단면	
		비교단면	비교단면	비교단면	비교단면	비교단면	비교단면
전체 내공단면적		112.3 m ²	101.0 m ²	98.5 m ²	78.5 m ²	142.7 m ²	141.0 m ²
부분별 단면적 비율(%)	상부 공간	21.7	24.5	28.6	25.8	11.8	11.8
	시설한계 수용공간	56.1	59.0	44.4	49.9	74.5	74.9
	하부 공간	22.2	16.5	27.0	24.3	13.7	13.3

그림 9. 터널 내부 단면적 구성비율 분포

2차로 단층터널(TYPE-1, TYPE-2)의 단면구성 비율은 시설한계 수용공간, 상부공간, 하부공간 순으로 단면적 구성 비율이 크게 나타났다. 2차로 복층터널의(TYPE-3)의 단면구성 요소별 구성 비율은 시설한계 수용공간, 하부공간, 상부공간의 구성비율 순서를 보였다. 단층터널의 시설한계 수용공간이 차지하는 면적비율은 TYPE-1의 경우 56.1~59.0%, TYPE-2의 경우 44.4~49.9%로 나타났다.

복층터널에서는 단층터널에 비하여 시설한계 수용공간 비율이 74%정도로 높게 나타났고, 좌우 측의 여유공간이 상대적으로 크게 발생하므로 좌우측면의 여유공간을 각종 설비의 수용공간으로 활용할 수 있을 것으로 검토되었다.

또한 단층터널에서는 하부공간 비율이 TYPE-1의 경우 16.5~22.2%, TYPE-2의 경우 24.3~27.0%로 나타나고, 평균적으로도 전체 내공단면적에서 차지하는 비율이 22%를 보인다. TYPE-3의 경우 하부공간의 비율이 상부공간보다 더 큰 13.3~13.7%인 것으로 검토되므로, 터널단면 계획시 하부공간 활용방안이 중요하게 고려되어야 한다.

4. 하부 공간 유효 단면적 검토

TBM 도로 터널단면 계획 시 시설한계 기준이외의 하부공간 계획을 위해서는 하부공간 활용 계획, 차도 슬래브 형식 및 지지방식, 안정성, 경제성 등의 검토가 필요하다. 본 논문에서는 하부 공간 계획의 복잡성을 감안하여 슬래브의 대표적인 형식과 두께에 따른 하부공간 유효면적을 검토하였다.

차도 슬래브의 지지방식에 따른 구조해석을 통하여 슬래브의 적정 규모 및 형식을 검토하였고, 슬래브 지지방식별 하부 유효공간의 면적을 비교하였다.

4.1 차도 슬래브 형식 검토

TBM 도로터널 단면에는 일반적으로 상부에 풍도슬래브, 하부에 차도 슬래브가 있으며, 연결 형식은 슬래브와 터널 라이닝의 연결방식을 고려하여 분리구조와 연결구조로 나눌수 있다(김상환 등, 2011).

풍도슬래브는 환기 및 방재 시 사용할 풍도공간을 확보하기 위하여 설치하는 부재로서, Flat형 슬래브 보다는 두께의 감소가 용이한 Arch형 슬래브를 적용하고 있으며, 자중과 작용하중 이외의 추가하중이 없으므로 풍도슬래브와 터널 세그먼트라이닝을 연결구조로 적용하고 있다.

그러나, 차도 슬래브에는 자중과 차량하중이(DB-24, DB13.5) 작용하여 터널 세그먼트라이닝에 과도한 단면력이 발생하므로, 연결구조 방식에 비하여 터널 세그먼트라이닝에 작용하는 부가적인 하중을 최소화하고 단면력을 감소하기 위하여 터널 구조물 안정성이 유리한 분리구조 방식을 주로 적용한다(정재호 등, 2011). 또한, 슬래브 설치방법은 현장타설 콘크리트 또는 프리캐스트 콘크리트 패널을 공장에서 제작하여 설치하고 있다(그림 10).

4.2 차도 슬래브 지지방식에 따른 구조 검토

차도 슬래브는 그림 11과 같이 크게 세 가지 지지방식으로 구분할 수 있다. 차도 슬래브에 대한 구조검토는 도시지역 고속도로 2차로 단층터널 단면의 하부 슬래브를 대상으로 하였다.

양단지지인 CASE-1의 경우, 양단+1점지지(지지벽체 1개)인 CASE-2의 경우, 그리고 양단+2점 지지(지지벽체 2개)인 CASE-3의 경우에 대하여 하부 슬래브에 작용하는 자중과 차량하중 및 지점의 위치를 가정하여 슬래브 두께와 지점간 이격거리 및 지지벽체의 두께를 검토하였다.

그림 10. TBM 도로 터널의 차도 슬래브 설치 형식

그림 11. 차도 슬래브 지지방식

하부 슬래브에는 좌측 및 우측 공동구 콘크리트 하중, 포장층 및 길어깨부 콘크리트 하중, 차량 운행에 의한 차량하중(DB-24)이 균등 분포하는 것으로 고려하였다. 또한, 하부 슬래브는 현장타설 콘크리트 분리구조로 가정하여 힌지조건을 적용하였으며, 지지벽체는 하부 슬래브와 연결된 고정 조건으로 고려하였고, 슬래브 및 벽체 콘크리트는 27 MPa, 철근은 400 MPa의 강도를 적용하였다.

하중재하 모식도 및 하중 적용값은 그림 12와 표 4에 나타내었다.

4.2.1 양단지지(CASE-1) 검토 결과

하부 슬래브의 두께를 0.4 m~0.8 m로 변화시켜 슬래브에 작용하는 부재력과 소요 철근량을 비교한 결과, 슬래브 두께의 감소로 인한 자중의 감소로 슬래브에 작용하는 부재력은 작아지지만, 철근량은 크게 증가하는 것으로 검토되었다(그림 13).

양단지지의 경우 교통하중 지지가 가능한 슬래브 두께는 최소 0.4 m이상 적용하여야 하고, 철근량의 감소를 통한 경제성을 고려하면 슬래브 두께는 0.5~0.6 m 정도가 적절한 범위로 산정되었다.

그림 12. 하중 재하 개념도

표 4. 슬래브 구조해석 조건

	적 용 값	하중 조합
좌측 공동구 콘크리트 하중(D1)	$0.365 \text{ m}^2 \times 1 \text{ m} \times 25 \text{ kN/m}^3 / 0.25 \text{ m} = 36.5 \text{ kN/m}$	<ul style="list-style-type: none"> COMB1 = 1.4D (D= D1 + D2 + D3) COMB2 = 1.2D + 1.6L (D= D1 + D2 + D3)
우측 공동구 콘크리트 하중(D2)	$0.714 \text{ m}^2 \times 1 \text{ m} \times 25 \text{ kN/m}^3 / 0.25 \text{ m} = 71.4 \text{ kN/m}$	
포장층 및 길어깨부 콘크리트 하중(D3)	$0.1 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 25 \text{ kN/m}^3 / 10 \text{ m} = 2.5 \text{ kN/m}$	
차량 하중(L)	$235.36 \text{ kN} \times (1+0.3) \times 2 \text{대} / 8.5 \text{ m} = 72.0 \text{ kN/m}$

(a) 부재력(모멘트와 전단력)

(b) 보강 철근량

그림 13. 양단지지 슬래브의 부재력과 보강 철근량

4.2.2 양단+중간 1점지지(CASE-2) 검토 결과

하부 슬래브의 두께를 0.3 m~0.6 m로 변화시키고, 슬래브 두께별로 지지벽체 두께를 0.25 m에서 0.5 m로 증가시킬 경우 슬래브 및 지지벽체에 작용하는 부재력과 적용 철근량을 비교하였다. 슬래브 및 벽체두께의 감소로 인한 자중의 감소로 슬래브에 작용하는 전단력과 벽체에 작용하는 축력은 작아지고, 철근량은 증가한다. 슬래브 및 벽체두께 증가 시 모멘트는 작아지는 경향을 보이지만 특정 슬래브 두께에서 모멘트 증감의 경향이 변화하는 것으로 검토되었다(그림 14).

(a) 모멘트

(b) 전단력

(c) 축력

(d) 보강 철근량

그림 14. 양단+1점지지 슬래브의 부재력과 보강 철근량

양단+1점지지의 경우 철근량의 감소를 통한 경제성을 감안한다면 슬래브 두께는 0.4~0.5 m, 벽체두께는 0.25~0.3 m 정도가 적절한 것으로 산정되었다.

4.2.3 양단+중간 2점지지(CASE-3) 검토 결과

양단+2점지지인 경우의 구조검토는 양단+중간 1점지지 구조검토 시 고려하였던 지지벽체 최소 두께 0.25 m를 고정값으로 하고, 하부 슬래브의 두께를 0.5 m에서 0.25 m로 감소시키며 지지벽체 간의 간격을 2.5 m에서 5.0 m로 증가시킬 경우 슬래브 및 지지벽체에 작용하는 부재력과 철근량을 비교하였다.

표 5. 지지벽체간 이격거리에 따른 지점간의 이격거리

지지벽체간 이격거리(d)	2.5 m	3.0 m	3.5 m	4.0 m	4.5 m	5.0 m
지점간 최대 이격거리	4.0 m	3.75 m	3.5 m(min)	4.0 m	4.5 m	5.0 m(max)
지점간 최소 이격거리	2.5 m	3.0 m	3.5 m	3.25 m	3.0 m	2.75 m

(a) 모멘트

(b) 전단력

(c) 축력

(d) 보강 철근량

그림 15. 양단+2점지지 슬래브의 부재력과 보강 철근량

슬래브 두께의 감소로 인한 자중의 감소로 슬래브에 작용하는 전단력과 벽체에 작용하는 축력은 작아지고 철근량은 증가한다. 지지 벽체간 이격거리가 증가할 경우 지지벽체에 작용하는 축력은 증가하고 슬래브에 작용하는 모멘트와 전단력은 이격거리 5.0 m인 경우가 최대이고, 3.5 m인 경우가 최소인 것으로 검토되었다(그림 15). 이는 지지벽체간의 이격거리가 2.5 m에서 5.0 m로 증가될 경우 지지점간의 최대 이격거리가 5.0 m, 4.5 m, 4.0 m와 2.5 m, 3.0 m, 3.5 m의 순서로 작아지기 때문인 것으로 판단된다(표 5).

양단+2점지지의 경우 이격거리 3.5 m인 경우 슬래브 두께를 0.4 m로 할 경우가 철근량의 감소를 통한 경제성 향상에 가장 유리한 것으로 산정되었다.

4.3 차도 슬래브 지지방식에 따른 단면 활용성 검토

구조해석 결과에 따라 산정된 차도슬래브와 적정두께를 평가하고, 슬래브 하부 공간의 유효면적을 산정하였다. 하부 유효면적은 그림 16(a)의 음영부분으로서 하부공간을 전력, 통신 및 유지관리용 통로로서 활용할 경우 시설물 설치를 고려하여 최소 높이가 0.8 m 이상 확보되는 부분으로 가정하였다.

(a) 하부공간 유효면적 설정 개념도

(b) 양단 지지

(c) 양단+중간 1점지지

(d) 양단+중간 2점지지

그림 16. 슬래브 지지방식별 하부 유효공간 면적 비교

양단지지의 슬래브 두께가 0.5~0.6 m 인 경우의 하부공간 유효면적은 19.3~20.3 m² 이고, 양단+중간 1점지지의 슬래브 두께가 0.4~0.5 m, 지지벽체 두께가 0.25~0.3 m 인 경우의 하부공간 유효면적은 19.4~20.6 m²이었다. 또한, 양단+중간 2점지지의 슬래브두께가 0.4 m, 이격거리 3.5 m 인 경우의 하부공간 유효면적은 20.0 m² 로서 지지벽체 수가 증가할수록 하부공간 유효면적은 감소하였고, 지지방식에 따른 차이는 10% 이하로 검토되었다(그림 16).

하부 슬래브의 지지방식에 따른 슬래브 하부 유효공간의 활용성 측면에서는 양단+2점지지 방식 보다는 양단지지 방식이나 양단+1점지지 방식이 유리한 것으로 검토되었다.

따라서, 하부공간을 유지관리용 통로, 전력 및 통신설비 등과 같이 용도별로 구분할 필요가 있을 때 공간 활용의 용이성 측면에서는 양단지지 방식의 하부 슬래브와 슬래브 상부하중을 지지하지 않는 일반벽체로 구조물을 계획함이 유리할 것으로 판단된다. 그러나, 양단지지 방식의 경우 슬래브 보강 철근량이 상대적으로 크므로 양단+1점지지 방식보다는 경제적인 측면에서 다소 불리할 것으로 예측된다.

또한, 설정된 2차로 규모의 도로터널 단면조건에서는 슬래브 하부의 지지벽체 설치에 따른 하부 유효공간 면적은 큰 차이가 없는 것으로 검토되었다.

5. 결 론

국내외 TBM 도로터널의 단면사례를 분석하여 단면구성요소의 배치특성을 분석하고 국내의 도로기하구조 설계기준을 만족하는 검토단면을 예시로 설정하여 단면적 구성 비율을 분석하였다.

또한, TBM도로터널에서 필수적으로 설치되는 하부 슬래브의 구조적 형상 및 지지방식을 조사하여 비교하였고, 구조해석을 통하여 교통하중 지지가 가능한 두께를 산정하고, 하부공간 활용이 가능한 유효 단면적을 산정하였다. 연구에서 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. 국내외의 주요 TBM 도로터널 사례를 조사한 결과, 2~3차로의 단층 슬래브 구조의 터널이 대다수이고, 소형차 전용도로의 경우는 대단면 복층터널로 계획하여 단면 활용성을 높이고 있는 것으로 조사되었다.
2. TBM 도로터널에서는 단면크기를 결정하는 가장 결정적인 요소는 시설한계의 크기이며, 시설한계 상부공간은 거의 환기공간으로 활용되고, 하부공간은 추가적인 환기 및 방재설비, 유지관리시설 및 공동구 설치공간으로 활용되고 있다.

3. 도시지역 고속도로 2차로 단층터널, 소형차전용 2차로 단층터널과 복층터널 등 세가지 형식의 검토단면을 설정하고, 각 터널단면의 구성요소별 단면적 비율을 산정한 결과, 시설한계 수용공간 비율은 44~75%, 상부공간은 12~29%, 하부공간은 14~27%의 순으로 나타났다.
4. 복층터널에서는 단층터널에 비하여 시설한계 수용공간 좌우측면 여유공간이 상대적으로 크게 발생하므로 각종 설비수용공간으로 추가 활용이 가능할 것으로 평가되었다.
5. TBM터널에서는 차량주행에 필요한 슬래브 설치가 필수적이며, 단층슬래브의 설치방식 및 구조형식을 조사한 결과 세그먼트 라이닝에 발생하는 단면력의 크기가 연결구조 방식보다 작은 분리구조 방식이 주로 적용됨을 확인하였다.
6. 구조해석을 통하여 차도 슬래브의 적정 두께를 산정한 결과, 양단지지의 경우 0.5 m~0.6 m가 적정하며, 양단+1점지지의 경우는 벽체두께를 0.25 m~0.3 m로 할 경우 슬래브 두께는 0.4 m~0.5 m가 적정하고, 양단+2점지지의 경우는 하부공간 활용에 유리하도록 벽체간 이격거리를 3.5 m로 할 경우, 슬래브 두께가 0.4 m가 적정한 것으로 산정되었다.
7. 2차로 규모의 단층 도로터널에서는 차도슬래브 하부공간 유효면적은 17 m²~22 m²로 산정되었고, 지지방식에 따른 차이는 10% 이하로 나타났다. 따라서, 활용목적상 별도의 격벽설치가 불필요한 경우에는 양단+2점지지 방식보다는 양단지지 또는 양단+1점지지 방식이 공간 활용성 측면에서 유리한 것으로 검토되었다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술 혁신사업의 “TBM 핵심 설계·부품기술 및 TBM터널의 최적 건설기술 개발(과제번호 : 10기술혁신E09)” 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 김상환, 김재성, 양동완, 이용호, 문철화, 백동호, 김기완 (2011), “대심도 지하도로 터널 설계사례”, 한국터널지하공간학회 학술발표회논문집, pp. 147-159.
2. 장수호, 지왕률, 배규진 (2008), “국내외 주요 TBM터널의 현황과 전망”, 한국터널지하공간학회 제9차 터널 기계화시공기술 국제심포지엄 논문집, pp. 143-144.
3. 정재호, 전덕찬, 신일재, 심동현 (2011), “국내 최초 대심도 복층터널의 계획”, 한국터널지하공간학회 학회지, Vol. 13, No. 1, pp. 23-24.

4. 삼성물산 (2010), “대단면 쉼터TBM 기술자료집”, pp. 3-10.
5. 서울특별시 (2010), “지상도로 교통량 저감을 위한 기본계획 종합보고서”
6. GS건설 (2009), “보령~태안 제1공구 도로건설공사 기본설계 보고서”
7. GS건설 (2010), “강변북로(양화대교~원효대교) 확장공사 기본설계 보고서”
8. R. Huang (2008), “The shanghai yangtze river tunnel (Theory, design and construction)”, Taylor & Francis, pp. 3-7, pp. 83-87.