

국내 재래식 터널의 변상현황과 배면공동 보강 사례연구

A Case Study on Deformation Conditions and Reinforcement Method of Cavity behind the Lining of Domestic Old Tunnel

김영목¹⁾, Young-Muk Kim, 임광수²⁾, Kwang Su Lim, 마상준³⁾, Sang-Joon Ma

¹⁾ 한밭대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanbat National University

²⁾ 건설교통부 도로관리과 사무관, Secretary, Road Management Division, Road Bureau, MOCT

³⁾ 한국건설기술연구원 선임연구원, Senior Researcher, KICT

SYNOPSIS : In this study, the whole deformation conditions of domestic old tunnels and reinforcement methods for deformation tunnels were investigated and analysed, and the present conditions, occurrence cause and reinforcement methods of cavity behind the tunnel lining were investigated and analysed comprehensively.

The deformation causes of domestic old tunnels could be classified in three kinds : change of earth pressure operating tunnel ground, material problem of concrete lining, mistake of design and construction. As a result of analysis, the tunnel deformation was occurred by not specific cause but various cause

As a result of investigation for 455 domestic tunnel data, more than 70% of the tunnel deformation was related to leakage and the other deformation cause also accompanied leakage mostly. An applied reinforcement method was related to leakage and flood prevention measures, but application of reinforcement method for boundary area between tunnel and ground and tunnel periphery which influence on the tunnel stability was still defective.

The cavity of domestic old tunnel occupied about 16% of the total tunnel length and about 68% of cavity was located in the crown of tunnel, and besides, the occurrence cause of cavity was analysed to design, construction and management cause. The filling method for cavity using filling material was comprehensively applying to cavity behind tunnel lining.

Key words : tunnel lining, cavity, domestic old tunnel

1. 서 론

재래식 공법에 의해 시공된 터널의 변상으로 인한 터널의 구조적, 재료적인 피해로 인해 터널의 유지 관리 및 보수·보강, 터널 라이닝의 배면공동 발생으로 인해 터널 안정성에 미치는 영향에 대한 관심이 커지고 있다. 일본 철도 종합기술연구소(1998)에 의하면 터널변상 원인중 시공과정과 운영과정에서 생성된 터널 배면공동이 터널 안정성에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 밝히고 있다.

터널에서의 배면공동은 설계·시공·유지관리 중 다양한 원인들이 복합적으로 작용하여 발생하게 된다. 특히, 터널 천단부 라이닝 부분에는 콘크리트 타설 후 재료분리 등으로 인해 터널 천단부에 배면공동이 발생되는데, 이러한 터널 배면공동은 라이닝 균열, 누수 등과 밀접한 연관이 있는 것으로 밝혀지고 있다.

대부분의 국내 재래식 공법(American Steel Support Method, ASSM) 터널에서도 배면공동이 존재하며 이러한 공동은 응력집중으로 인하여 터널 구조물의 균열 및 변형을 초래하는 원인이 되기도 한다. 따라서 터널 배면공동의 현황파악과 보강공법에 대한 다각적인 연구가 필요하다.

본 연구는 대부분 ASSM으로 건설된 변상터널에서 나타나는 배면공동이 터널의 안정성에 미치는 영향을 파악하고, 배면공동 발생원인과 충전공법 등에 대한 조사, 분석을 실시하여 ASSM 터널의 배면공동 발생현황에 대한 공학적인 인식과 배면공동 보수·보강공법에 대한 합리적인 방안 수립에 도움을 주고자 한다.

2. ASSM 터널의 변상 및 대책

2.1 ASSM 터널의 변상형태

ASSM 터널에서의 배면공동 보강공법에 관한 연구의 방향과 적용대상을 설정하기 위하여 국내외 터널에서 발생되었던 변상원인과 변상형태에 대하여 분석하였다. 분석에 사용된 자료는 국내터널 455개 터널, 일본터널 300여 개소이며, 이 중에서 터널변상 원인과 변상형태 및 보수·보강공법이 명확하지 않은 터널은 제외하였다.

그림 1은 국내 조사대상 터널에서 발생된 변상형태를 분류하여 도시하였다. 변상형태 중 누수가 발생한 곳이 554개소로 가장 많았으며, 이 중에서 전면적인 누수발생이 107개소이었다. 그 다음으로는 균열이 발생한 곳이 82개소에서 발생되었고 기타 터널 라이닝의 부식과 탈락 순으로 터널변상이 발생하였다. 그림 1에서 보는 바와 같이 대부분의 터널변상에서는 누수현상을 동반하였으며 부식과 균열 등으로 분류된 항목들도 대부분 누수를 동반하는 것으로 분석되었다. 따라서 터널 변상의 대책공법 설계시에는 항상 지하수에 대한 대책을 고려하여야 함을 알 수 있다.

그림 2.2는 일본의 ASSM 터널 211개소에 대한 토피고와 터널변상 원인과의 관계를 나타낸 것으로 분석 결과 토피고가 30m이하일 경우 가장 많은 변상이 발생하였으며, 변상발생 원인은 경과년수와 소성압, 편압 등 주로 지압의 변화에 의해 터널이 변상된 것으로 조사되었다.

2.2 라이닝의 재령에 따른 강도특성

대상 터널은 재령이 약 5년(1,762일)에서 약 59년(21,535일)정도 경과한 도로 및 철도터널로서 분석 대상에 대한 강도시험으로 총 100개의 코어자료를 분석하였고, 재령에 따른 강도변화의 경향과 시험결과와 설계강도와의 비율, 즉 허용코어강도비로 나타내었다.

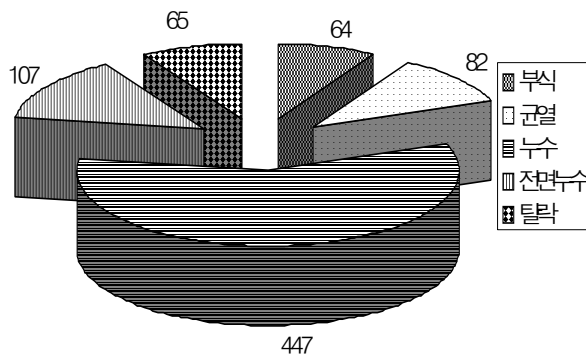


그림 1. 국내터널의 변상형태

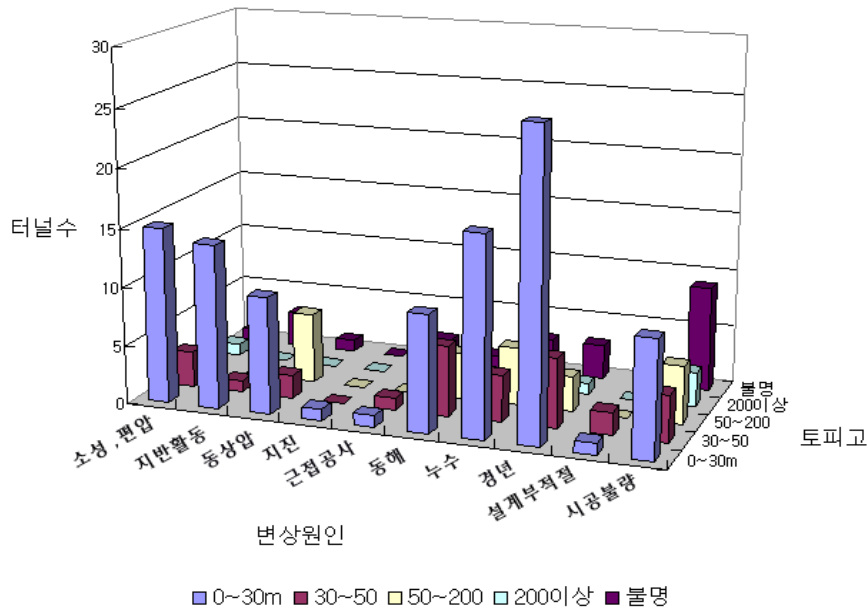


그림 2. 일본터널 211개소의 변상원인과 토펴고

그림 3은 터널의 재령에 따라 변화하는 콘크리트 라이닝의 강도시험 결과를 나타내고 있는데, 설계기준 강도를 고려하지 않은 상태로서 분석 자료의 범위가 매우 분산되어 있으나, 대체적으로 터널의 재령에 따라 강도가 감소되는 경향을 보이고 있다. 이와 같이 수집된 자료의 분산이 크게 나타나는 원인으로서는 코어의 길이, 코어채취 위치, 시공 당시의 골재, 모래, 염분 등의 영향에 기인하는 것으로 추측되며, 이런 점들이 충분히 고려되어진 분석이 향후 필요할 것으로 사료된다.

터널의 콘크리트 라이닝은 시공 당시의 터널표준시방서에 준하여 설계강도를 적용하고 있다. 수집된 터널 콘크리트 코어강도 시험결과를 시공 당시의 설계강도로 나눈 허용코어강도 비율과 재령과의 관계를 분석하였으며, 분석결과는 그림 4와 같다.

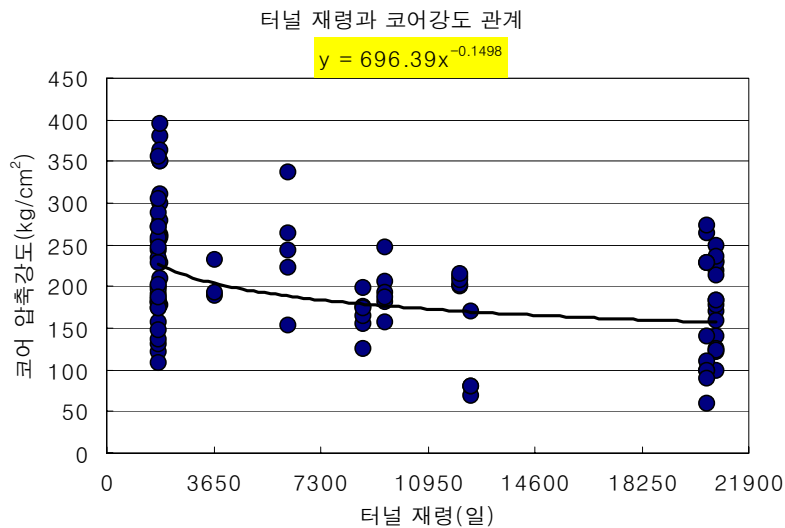


그림 3. 터널 재령에 따른 콘크리트 라이닝의 강도변화 경향

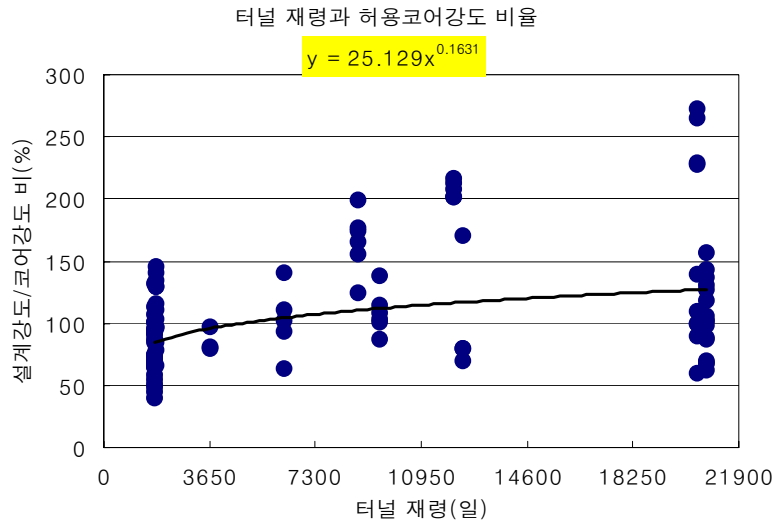


그림 4. 터널 재령과 콘크리트 라이닝의 허용코어강도 비율

그림 4에서 보는 바와 같이 자료의 분산정도가 약 30%~280%로 크게 나타나고 있으나 일반적으로 터널의 재령이 증가함에 따라 허용코어강도 비율이 증가하는 특이한 경향을 나타내었다. 이러한 특이 경향에 대한 원인을 추정한 결과 재령이 20~50년 정도 경과된 터널의 경우 설계기준강도 조사가 불확실하게 수행되었을 가능성이 있으며, 또한 과거로부터 수차례의 보수·보강 이력에 따라 국부적으로 강도가 증가된 부분의 코어강도 시험결과일 것으로 추정된다.

이상과 같이 터널 재령과 콘크리트 라이닝 강도와의 관계를 분석한 결과, 본 연구에서 수집한 자료들에 대하여 뚜렷한 강도의 저하현상이 발생됨을 확인할 수는 없었다. 이러한 원인으로서는 수집된 자료의 수가 부족하고 코어의 길이가 적절하지 못한 경우가 많았으며, 코어의 채취지점을 변상된 구간과 건전한 구간으로 구분하여 분석할 필요가 있다. 또한 터널의 사용목적, 즉 도로와 철도터널을 구분하는 경우 재령에 대한 차이와 진동, 매연 등의 영향에 따라 다소 차이가 있을 것으로 사료된다.

2.3 터널의 배면공동

터널 배면공동의 분포 현황을 분석하고자 ASSM 터널과 NATM 터널의 안전진단 보고서 중 GPR 탐사자료를 토대로 탐사 길이와 각 축선별로 존재하는 공동의 현황을 분석하였다. 조사대상 터널은 ASSM 터널 7개소, NATM 터널 13개소 등 총 20개소 터널에 대해서 조사하였다.

ASSM 터널은 전체 탐사길이의 15.72%의 구간에서 배면공동이 검사되었고, 비교적 최근에 건설된 NATM 터널들은 전체 탐사 길이 중 11.50%의 구간에서 배면공동이 검사되어 전체적으로 총 탐사길이의 13.54%의 구간에서 배면공동이 조사되었다. 또한 조사된 공동의 68%는 터널 천단부에 집중된 것으로 조사되었으며, 이것은 재료분리, 주입방법 때문인 것으로 분석된다.

2.2 보수보강 공법의 적용

현재 ASSM 터널의 안전성 평가에 적용되고 있는 구분 및 기준과 터널 라이닝 콘크리트의 균열 평가에 적용되고 있는 기준에 대해 조사하였다. 국내 ASSM 변상터널 중 보수·보강 공법이 수행된 터널에 대하여 사용된 공법을 조사하여 보았다. 철도터널과 같이 건축한계의 여유가 없는 터널과 일반도로 터널처럼 비교적 건축한계의 여유가 있고 작업공간이 확보된 터널과 자료수집 방법에 따라 다양한 보수·보강 공법이 분석되었지만 본 연구에서는 터널 종류 등을 구분하지 않고 자료 분석을 수행하였다.

그림 5는 ASSM 터널 455개소 중에서 변상터널의 보수·보강시 적용된 공법들이다. 보수·보강 공법 중

가장 많이 사용된 것은 240개소에서 사용된 액체방수 1법과 154개소에서 사용된 액체방수 2법이 많이 사용되었다. 그밖에 기타항목으로 분류된 보수·보강공법들은 낙반제거, 플룸관 설치, 모르타르주입, 새들 보강, LW, CD주입, 유도관설치, 스테인레스보강, 도피소 설치, 앵카볼트 설치, 그라우팅밀크주입, 도수 관설치 등으로 극히 취약한 부분에서 수행된 보강공법들이다.

그림 5에 의하면 ASSM 터널에서의 변상은 대부분 누수와 연관이 있으며 대책공법도 대부분 누수 및 방수에 집중되어있다. 액체방수 1법이 240건, 분말방수 1법이 125건으로 전체의 절반을 차지하고 있는데 액체방수 1법과 분말방수 1법은 라이닝 표면만 각각 4mm, 24mm를 방수하는 공법으로서 라이닝의 변상이 전체적으로 일어난 것이기보다는 경과년수에 따른 표면의 부식과 열화로 인한 라이닝 표면의 변상이 많이 발생된 것으로 분석된다.

액체방수 2법이나 분말방수 2법 방수공사인 경우에는 표면의 불량한 부분 50mm를 따낸 후에 작업을 하는 것이므로, 일단 액체방수 2법과 분말방수 2법이 적게 사용되었다는 것은 라이닝 표면의 전체적인 부식보다는 일부 국부적인 부분의 부식 및 노화 등으로 보수·보강이 많이 진행되었다는 것을 의미한다.

2.3 보수·보강 사례의 분석

2.3.1 누수가 심한 사례

본 터널은 1973년에 지어진 단선 철도터널로 단면형상은 말굽형으로 ASSM으로 지어졌으며 중앙 배수식이다. 터널이 위치한 지형은 계곡부에 위치하며 절리 및 층리가 발달된 사암 및 셰일 등으로 구성되어 있고, 지형적인 특성에 기인하여 심하게 풍화된 파쇄대가 존재할 것으로 예상되며 이 파쇄대를 따라 상당량의 지표수가 유입될 것으로 사료되었다. 일부구간 우측벽체 하단에서는 수로가 형성되어 집중적인 지하수 유입이 되고 있는 상태이며 터널 전구간의 라이닝면은 습윤상태이거나 물방울이 떨어지는 정도이었다. 지표수 및 지하수 유입, 지하수 유입에 기인한 지반 취약대내 토입자 유출 그리고 1, 2차 라이닝 층분리 및 라이닝 배면공동 존재가 원인으로 판단된다.

터널 주변 지반내 불연속면에 의한 누수와 누수에 의한 지반 응력 이완대 등에 대처하기 위해 누수의 유입상태에 따라 심한 곳에 대해서는 우레탄 그라우팅 공법을 적용하였고, 그렇지 않은 곳에 대해서는 시멘트 밀크공법이 적용하여 지반상태를 치환하였다. 그외 록볼트를 적용하여 터널 안정성을 증대시켰으며, 지하수가 누수 되지 않고 터널 라이닝에 수압형태로 작용이 될 경우 유도배수공을 설치하여 지하수 수위를 저감시키도록 하였다.

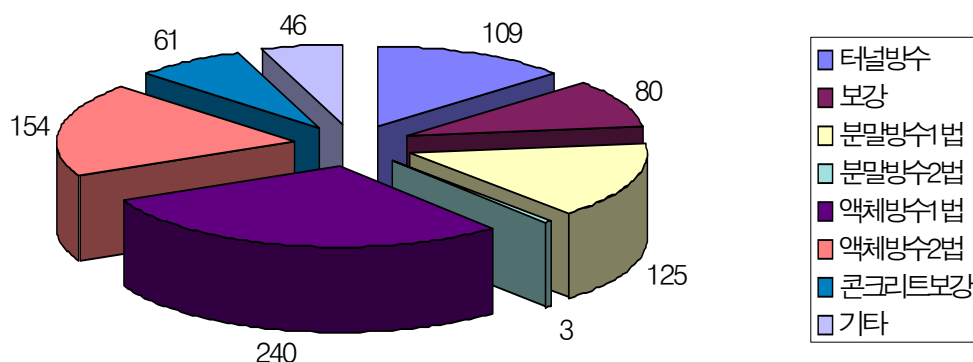


그림 5. ASSM 변상터널에서 사용된 보수·보강 공법

2.3.2 터널 주변의 지반압이 변화한 사례

본 터널은 1971년에 완공된 단선 철도터널로서 ASSM으로 시공되었다. 터널 내부를 조사한 결과 측벽 압출에 의해 단면축소와 터널 천정부에 압좌현상이 진행 중이며, 특히 노반 부풀림 현상이 일어나는 등 일부 터널 구조물 구간에 소성압을 받고 있는 것으로 예상되었다.

본 터널에서는 그림 6과 같이 길이 3~4m, 25mm 프리스트레스 록볼트를 적용하였으며, 노반부와 측벽부를 록볼트 보강을 하여 지반의 전단 저항력을 증대시키었다. 2년 동안 계측한 결과 약 14.5mm 정도의 단면축소가 진행중 이었는데 라이닝에 내압효과를 증대시키기 위해 Saddle 보강과 보강판 철망을 설치하여 내공단면 축소와 복공판의 낙하 방지 등의 효과를 얻었다. 소성압에 의한 라이닝 균열이 발달하였는데 탄소섬유판을 라이닝 표면에 부착하여 라이닝의 전단 저항력 증가와 라이닝 표면의 노후화를 방지하였다.

2.3.3 배면공동이 존재한 사례

본 터널은 1978년에 완공된 도로터널로 ASSM으로 시공되었다. 터널 굴착시 과장약 발파로 인하여 1차 라이닝 아치부 및 측벽부 배면에 공동이 존재하였다. 배면공동이 존재하는 구간은 그림 3.11과 같이 균열 및 누수가 심하여 터널 라이닝 표면이 심하게 손상을 받았다.

본 터널은 시공시 1차 라이닝을 타설하고 1.2mm의 방수용 철판을 시공한 후 2차 라이닝을 타설한 2차선 도로터널로서 시공불량으로 배면공동이 발생하여 터널에 유해 응력이 작용, 균열과 누수 등의 추가적인 노후화가 발생되었다.

본 터널에서 적용된 재료는 시멘트, 모래, 물, 액체 방수제 등을 믹서에서 혼합하여 얻어지는 슬러리에 특수발포 노즐을 통하여 얻어지는 발포액의 기포를 다시 혼합하여 동시에 압송하여 배면공동 채움을 실시하는 공법이다. 주입압은 1~2kg/cm², 재령 28일 강도는 65~75kg/cm²으로 철도청 시방서 뒤채움재 강도의 10kg/cm²을 만족하며 단위중량도 상당히 작아 터널 천정부에 타설시 터널 라이닝에 걸리는 하중도 상당히 작다.

2.3.5 중성화에 의한 터널 열화가 진행되는 사례

본 보수·보강 시공 사례는 도로터널에서 매연에 의한 열화에 대한 것으로, 본 터널은 편도 2차선 도로터널로 1984년 ASSM에 의해 시공되었으며 말굽형, 배수형 터널이다. 터널 준공 후 십여년이 경과되

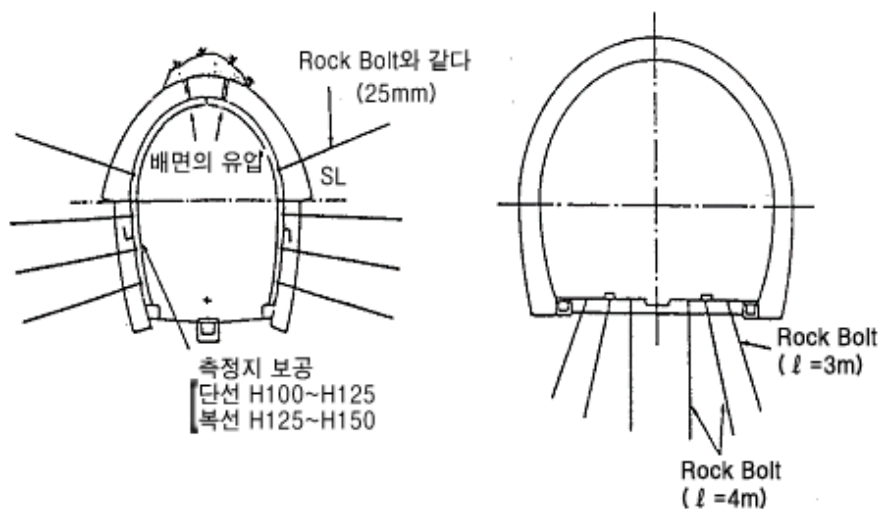


그림 6. 지반압에 대한 보강 패턴

였으나 준공 후 라이닝 청소 등 유지관리를 소홀히 하여 통과차량의 매연 등 오염물질이 터널 라이닝 표면에 두껍게 덮여 있어 라이닝의 열화를 촉진시키었다. 본 사례에서 보수, 보강을 실시하기 전에 고압 물세척 청소 후, 열화두께를 조사하였다.

열화두께는 대부분 30~40mm정도의 것이 많았으며 100mm가 넘는 곳도 있었다. 또한, 갱구쪽으로 가까워짐에 따라 열화두께가 얇아지는 경향을 보여 터널 갱구부 보다는 터널 중간부분에 터널 열화가 더 심하게 진행되었다. 중성화의 원인으로 라이닝 유지관리 미흡, 라이닝 표면에 심한 물곰보 및 라이닝 타설 스틸 폼의 변형 등 시공 불량으로 보인다.

본 터널에서 적용된 타일 시공법은 고압수를 이용하여 터널 라이닝면을 청소 후, 중성화된 벽체 표면을 20~30mm 두께로 중성화가 진행된 부분을 쪼아낸 후, 타일시공을 실시하여 중성화를 방지하는 공법이다.

2.3.5 경량기포 모르타르를 이용한 터널 및 지하공동 충전사례

○○도로 터널은 1970년에 준공된 길이 1,621m의 2차선 터널로서 ASSM으로 건설되었다. 1996년 개수공사시 정밀안전진단 자료에 의하면 터널 전체 주면적의 7%(터널아치부 총 길이의 50%)에서 최대 공동깊이 113cm로 공동채움 물량이 약 1,830m²으로 예상되었고, 1998년 기본설계시 터널 총 길이의 61.5%에서 평균 공동깊이 34cm로 공동채움 물량이 1,470m³으로 조사되었다. 그러나 현장실측에서는 터널 총 길이의 약 85%에서 최대공동깊이 4.40m의 크기로 공동채움 물량이 17,760m³인 것으로 조사되었다.

본 터널의 공동부 채움은 구간을 설정하여 각각 Sealing 슛크리트, 채움 슛크리트, 시멘트 모르타르와 경량기포콘크리트로 시공하였다.

공동 충전에 사용된 경량기포 콘크리트는 제작방법에 따라 여러 가지 종류가 있으나 플라이애쉬를 혼합하여 고유동성으로 충전효과가 우수하며 충전효과 확보의 주요소라 할 수 있는 수축성이 기타 재료보다 우수한 압축강도 20kg/cm² 정도의 경량기포 콘크리트를 사용하였다.

충전은 전체공동 충전방안과 장래 굴착부분을 제외한 충전방안을 검토하였다. 이 중 신설되는 터널구간중 좌측에 존재하는 기존 터널과 교차하는 구간이 있으며 본 구간은 중, 횡방향으로 교차 및 이격되는 정도가 변하므로 시공성 불량에 따른 불안정성 유발 가능성이 크고 보강이 미흡할 경우 상부 주택이나 경부선 노반의 침하 및 붕괴위험이 큰 구간이므로 그림 7과 같이 전체공동을 충전하고 신설터널을 굴착하는 공법을 선택하였다.

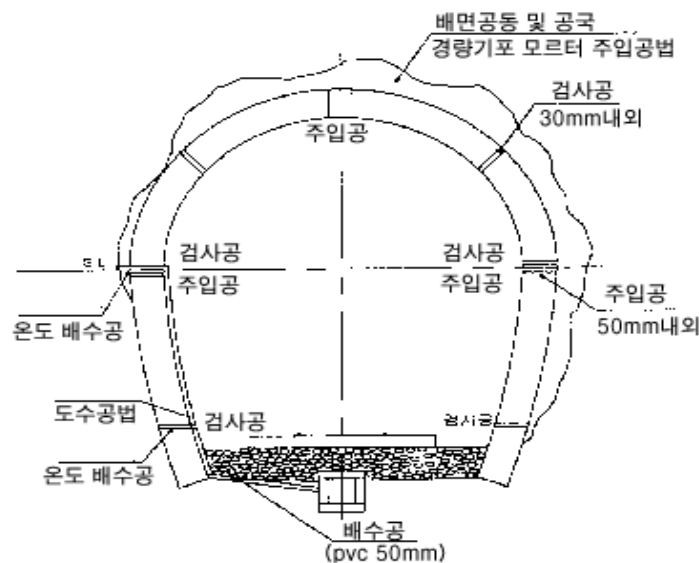


그림 7. ○○터널 배면공동충전 방법

3. 결 론

국내 재래식 ASSM 터널의 변상원인은 터널 주변지반에 작용하는 지압의 변화, 콘크리트 라이닝의 재료적인 문제, 설계 및 시공의 부적절 등 세 가지로 크게 구분되었으며, 분석결과 특정 원인뿐만 아니라 여러 가지 원인들이 복합적으로 작용하여 다양한 터널변상 형태를 나타내었다.

터널 변상 형태를 조사한 결과 70%이상이 터널내의 누수와 연관되어 있으며 기타 변상 원인들도 대부분 누수를 동반하는 것으로 분석되었다. 적용된 보수·보강 공법 또한 대부분 누수 및 방수에 관한 공법이 수행되었으며, 터널 안정성에 영향을 미치는 터널 지반사이의 경계영역과 터널 주변영역에 대한 보강공법의 적용은 아직 미미한 것으로 분석되었다.

국내 ASSM 터널에서의 배면공동은 전체 터널길이의 약 16%에 해당하는 부분을 차지하고 있으며, 그 중 68%는 터널 천단부에 위치하고 있었다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부(1999), 도로설계편람-터널편.
2. 건설교통부(1996), 안전진단 및 정밀안전진단 세부지침-터널편.
3. 건설교통부(2003), 터널 외관조사 자동화 시스템 개발, 건설교통부 건설기술개발연구사업.
4. 대한터널협회(1999), 건설교통부 제정 터널표준시방서, pp.122~123.
5. 서강천(2001), “도심터널의 맹점과 보수보강사례”, 터널기술, Vol.3, No.4, pp.69~79.
6. 시설안전기술공단(1996), 터널 보수·보강 기술 편람.
7. 시설안전기술공단(1997), 안전점검 및 정밀안전진단 실무요령: 터널편.
8. 철도종합기술연구소(1992), 변상터널 대책공 설계메뉴얼-터널편.
9. 한국철도기술연구원(1998), 변상터널의 보강공법에 관한 연구, pp.5~61.
10. 한국건설기술연구원(2000), 고속전철 구조물 안전성 기술 개발, 2단계 1차년도 보고서, pp.115~130.
11. 한국건설기술연구원(1998), 국내 터널 설계 기술력 향상을 위한 신기술 연구(I), pp.347~342.
12. 鐵道總合技術研究所(1998), 変狀トソネル對策工設計マニュアル.
13. JTA保守管理委員會(1994), “トソネの保守維持管理(6)”, トソネと地下, 第25卷, 第6号, pp.73~81.
14. Thoma, S. K., et al(1996), “Maintenance of MTR Tunnels”, Tunnel Management, Operation and Maintenance, pp.173~182.