

# 원심모형실험을 이용한 터널 측방배수관에 퇴적되는 침전물 저감방안 연구

## A study on the Reduction Scheme of Sediments Deposited on a Lateral Drain Pipe in Tunnel using Centrifugal Tests

김태영\*      김유석\*\*      박종관\*\*\*  
Kim, Tae Young   Kim, You Seok   Park, Jong Kwan

---

### ABSTRACT

Sediments deposited on lateral drain pipes in a tunnel make lateral porous pipes clogged. Since the safety of the tunnel can be affected by this phenomenon, it requires a regular maintenance of the lateral drain pipes. In this study, a series of centrifugal tests were conducted in order to find out the method which can reduce the clogging effect considerably. Four different types of tunnel drain configurations were selected in the experiments. By analysis of sediments for each configuration, the optimum drain configuration that can minimize sedimentation of cement constituents was investigated. As a results, the existing drain configuration which uses filter concrete appear to produce much sediments. In contrast, the new drain configuration appears to be able to reduce sedimentation ratio up to almost 50% comparing with the existing one. From these observations, it may be concluded that the new drain configuration, in which the lateral porous pipes of a tunnel are surrounded by gravel layer and non-woven geotextile, has high efficiency in maintenance.

---

### 1. 서론

국내에서 시공되고 있는 터널의 배수문제에 있어서 주로 배수로 인한 터널의 내구성저하에 대해 연구가 많이 이루어지고 있으며 이를 재료적인 측면에서 내구성을 향상시키는 방안이나, 배수가 적게 일어나도록 하는 터널단면에 대한 연구가 주를 이루고 있다(천병식 1995; 최송암 1995; 윤지남 1998; 문한영 2001). 이에 비하여 터널배수로 인하여 터널내부로 들어오는 지하수가 가지고 있는 고형성분에 의해 터널배수시스템에 미치는 영향에 대한 연구는 활발하지 않은 실정이다. 따라서 터널 공용중에 측방 배수관에 퇴적되는 침전물은 측방유공관의 막힘을 유발하여 터널안정성에 영향을 미치므로 정기적으로 측방배수관의 유지관리가 필요하다(유상건 2002; 우종태 2005).

본 연구에서는 측방배수관의 막힘을 최소한으로 줄일 수 있는 방안을 도출하고자 원심모형실험을 이용하여 4가지 case의 터널배수구조에 따른 침전물의 분석을 시행하여 시멘트성분의 침전물 퇴적을 최

---

\* 정회원, 서울산업대 철도전문대학원 철도건설공학과 석사과정

E-mail : tykim@dwconst.co.kr

TEL : (032)329-0703 FAX : (032)329-4106

\*\* 대우건설기술연구원 토목연구팀

\*\*\* 정회원, 서울산업대 토목공학과 교수

소화 할 수 있는 배수구조 개선방안을 연구하였다. 실험은 터널 배수단면 구조계를 축소모형으로 제작하고 기존 터널배수체계의 구성요소인 숏크리트와 필터콘크리트를 모델링하여 침전물의 주요 인자를 규명한다. 실험종류별 배수량 및 고형분의 비율과 X선 회절분석을 통한 고형성분을 분석을 통하여 터널 건설초기에 측방배수관에 퇴적되는 침전물의 주요성분 및 퇴적원인을 규명하여 침전물 퇴적을 최소화할 수 있는 개선된 배수구조체계를 도출하고자 한다.

## 2. 배수체계 모형실험

### 2.1 측방배수관 침전물의 침전구조

터널 내에 유입되는 유입수는 차수체, 숏크리트, 필터콘크리트, 부직포 등을 통해 측방배수관으로 유입된다(그림 2.1). 유입된 유입수의 구성성분은 시멘트의 주요성분인 산화칼슘이 주성분으로 물과 접촉하면 수산화칼슘으로 변화하고 대기중 탄산가스와 결합하면 탄산칼슘으로 변화되어 측방유공관에 백태를 유발함으로써 시간경과에 따라 배수관 내부에 점점 쌓여 배수관이 막히게 된다. 이는 지하수 유입량이 적은 구간에서 주로 발생하며 측벽배수관, 횡 배수관, 부직포 등에 쌓이게 되어 전체적으로 배수기능을 저하시키게 된다. 이는 터널구조물의 누수 및 라이닝에 잔류수압을 상승시켜 터널의 안정성에 영향을 미치게 되므로 배수관의 정기적인 유지관리가 필수적이고, 주요침전성분을 저장할 수 있는 시멘트성분의 재료를 최소한으로 사용할 필요가 있다.

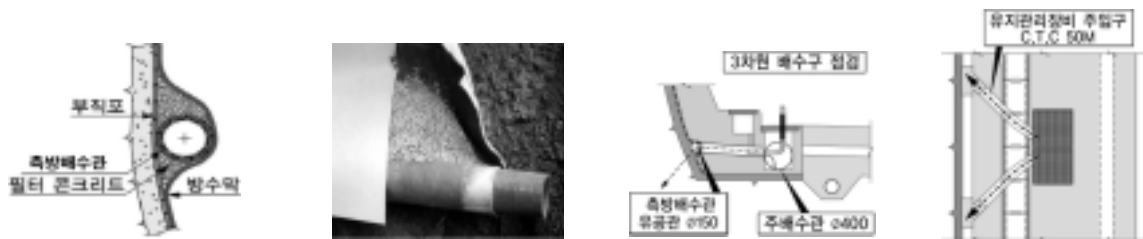


그림 2.1 터널 측방배수관 및 배수체계 현황

### 2.2 배수체계 모형실험 방법

터널내에 유입되는 유입수로부터 장기간에 퇴적되는 퇴적물의 특성을 파악하기 위하여 실제 배수체계를 모델링하고 장기간에 걸쳐 유출되는 상황을 모사하기에는 시간적 제약이 따른다. 또한 이를 구현하기 위해서는 유사한 터널단면을 제작하여 지하수 수압을 발생시켜야 하므로 실 구조물에 발생하는 침전물의 유지관리를 통한 분석 외에는 침전물의 발생성분 분석이나 발생 메카니즘을 규명하는 것은 어렵다. 본 연구에서는 이러한 시간적, 공간적 제약을 극복하기 위하여 지반공학에서 사용하고 있는 원심모형실험기를 이용하여 터널단면의 배수체계를 모형화하고 인위적으로 원심력을 발생시켜 실제 발생하는 수압을 통하여 배수시키는 방법을 적용하여 기존 배수체계와 개선된 배수체계를 모델링하여 유출량 및 고형성분을 분석함으로써 기존 배수체계에 대한 개선방안을 도출하고자 하였다.

즉, 소요의 수압이 자연스럽게 작은 실질수두에도 불구하고 강제로 가속도를 부여함으로써, 원지반에서 가해지는 수압과 유사하게 작용할 수 있도록 한다. 또한 물이 없는 상부에는 공기가 직접 배수로에 접해도 문제가 될 것이 없으며, 이러한 실험의 제한적 요소 및 한계성을 해소하기 위해서 개발된 장비가 Geotechnical Centrifuge이다. 본 실험에 사용한 Geotechnical Centrifuge 사양은 반경 3m에 최대 200g level까지 가속시킬 수 있는 장비(박중배 등, 1998)이다.

터널 배수 모사실험은 표 2.1 및 그림 2.2와 같이 4 Case를 수행하였으며, 가속도 level은 100g로 결정 하였다. 침전물의 주요 유발성분인 숏크리트와 필터콘크리트의 유무에 따라 모형을 제작하였으며, 배출수의 고형분이 확보되어 분석할 수 있도록 수차례에 걸쳐 배수실험을 수행하였고 배출수의 구성성분 분석을 위하여 증발하여 회수된 고형분에 대한 X선 회절분석을 시행하였다. 숏크리트의 콘크리트 배합은 2002년 한국도로공사의 터널지보공 관련 품질기준 배합비를 준용하였고 필터콘크리트는 건설교통부의 공사시방서(2002)의 배합표를 기준으로 작성하였으며 굵은골재의 최대치수는 실험여건상 4mm체를 통과한 자갈을 사용하였다.

표 2.1 배수체계 모형실험 조건

구 분	case 1	case 2	case 3	case 4
터널 배수 구조	숏크리트+ 부직포+ 필터콘크리트	숏크리트+ 부직포+ 필터콘크리트+ 부직포	숏크리트	숏크리트+ 부직포+
적용대상	기존 배수체계 모델링 (숏크리트+ 필터콘크리트+ 측방배수관)		개선된 배수체계 모델링 (숏크리트+ 자갈배수층+ 측방배수관)	
g-level	100 g			

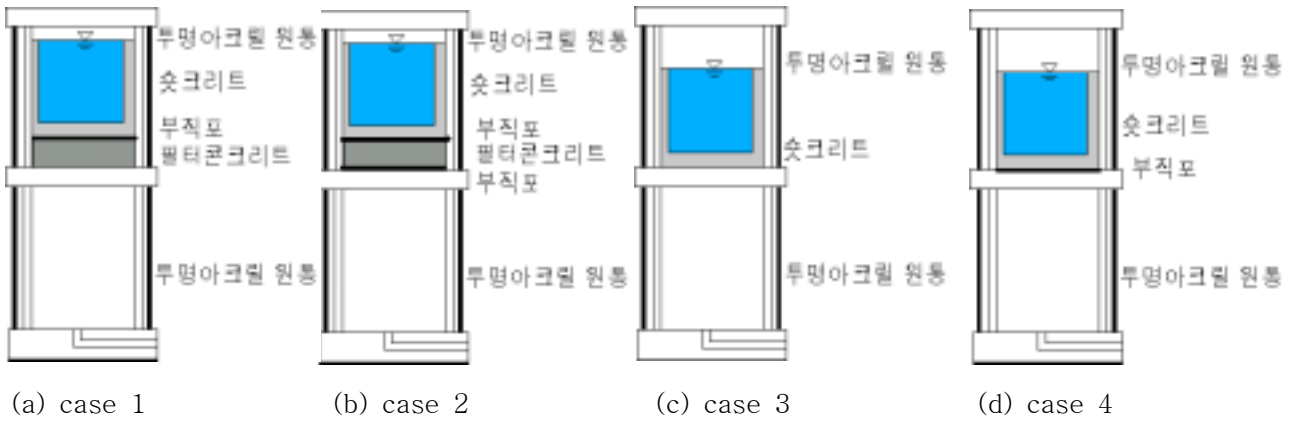


그림 2.2 터널 배수체계 실험모형

### 3. 모형배수실험 결과 및 분석

#### 3.1 배수실험 결과

숏크리트의 배수실험결과와는 표 3.1과 같고, 시간별 유출비율은 그림 3.1과 같이 나타났다. 고흥분 배출비율은 case 2, case 1, case 4, case 3의 순서로 많이 발생하였으며, 동일한 조건에서 하부에 필터콘크리트가 설치된 경우와 없는 경우를 비교하면 필터콘크리트가 없는 case 3, case 4가 0.25~0.37(g/l)로 필터콘크리트가 있는 case 1, case 2의 0.52~0.78(g/l)와 비교했을 때 상대적으로 단위체적당 고흥분 배출비율이 50%정도 작게 나타났다. 이것은 필터콘크리트는 굵은골재를 시멘트풀로 연결한 구조로 되어 있고, 숏크리트를 통과한 물은 필터콘크리트를 지나게 되어, 필터콘크리트의 시멘트성분을 물이 가지고 나가기 때문으로 사료된다. 실험 후 해체한 필터콘크리트 표면 확인결과 시멘트성분이 상당량이 빠져나간 것이 확인되었다.

표 3.1 배수실험결과

구 분	case1	case2	case3	case4
실험 내용	숏크리트+ 부직포+ 필터콘크리트	숏크리트+ 부직포+ 필터콘크리트+ 부직포	숏크리트	숏크리트+ 부직포+
고형분 배출 비율 (g/l)	0.52	0.78	0.25	0.37
소요 시간	7시간 26분(100g level기준)			

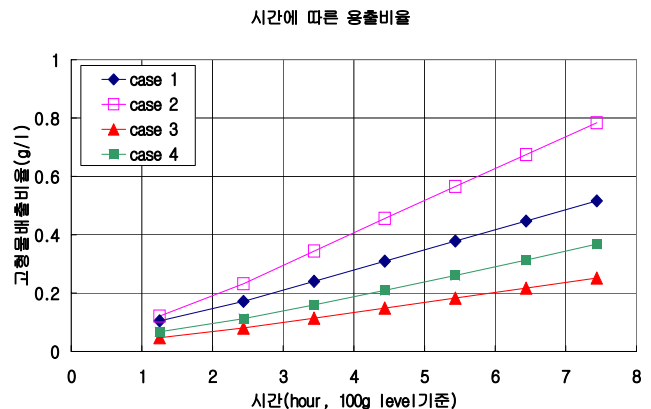


그림 3.1 고흥분 시간별 발생추이

### 3.2 배출수의 고형분 분석

배출수에서 고화된 고형물질의 물리화학적 특성, 주성분 음이온과 양이온 및 중금속 원소를 분석하여 수질특성과 침전가능물질을 추정하였다. 백색 침전물의 정량적 화학분석 및 광물성분의 정확한 분석을 위하여 X-선 형광분석(XRF)과 X-선 회절분석(XRD)을 실시하였다. 분석대상 시료는 시멘트과 콘크리트 및 침전물 등 6개 시료이다. 4종류의 배출수 고형분 시료 분석결과 pH 10.56 ~ 10.97의 범위를 갖는 높은 알칼리성을 보였으며 전기전도도는 474 ~ 2,120의 범위를 갖는 등, 용존이온이 많은 것으로 판명되었다. SiO<sub>2</sub>를 비롯한 Ca, K, Na의 함량이 case 2 시료에서 특히 높게 나타났고 전반적으로 알칼리이온(Na+K) 함량과 알칼리도가 높은 것으로 보아 CaCO<sub>3</sub>와 K를 함유한 점토광물의 용해도가 높은 수질로 사료된다. 분석수질이 갖는 용존이온의 평균 침전률은 0.615 ~ 1.428 mm/year이며, case 2 시료에서 최고치를 기록하였다.

표 3.2는 6개 시료의 X-선 형광분석 결과이다. case 1번에서 4번까지는 침전물의 주요인자로 작용하는 CaO(21.30 ~ 33.06 wt%)와 K<sub>2</sub>O(22.16 ~ 39.67 wt%)의 함량이 비슷한 함량을 이루고 있는 것으로 보아 방해석을 주성분으로 하는 시멘트와 K<sub>2</sub>O의 함량이 높은 정장석과 운모가 용출과정에서 왕성한 용해반응을 보여 석출된 것으로 사료된다. X-선 회절분석 결과 CaO와 K<sub>2</sub>O를 주성분으로 하는 방해석과 K-운모의 회절선이 잘 나타나 있는 것으로 확인되었다. 배출수로부터 고화된 성분은 콘크리트의 중성화나 염해에 의한 콘크리트의 용해된 성분보다는 수화반응이 일어나지 않은 미반응 시멘트성분이나 결합력이 떨어지는 시멘트 성분이 콘크리트의 공극을 타고 나온 배출수를 따라 콘크리트표면으로 나온 것으로 추정된다. 실제로 공용중인 터널에서도 이와 유사한 결과가 나온바 있다(유상건 2002).

표 3.2 용출수에서 고화된 침전물의 성분분석 결과

No.	cement	concrete	case 1	case 2	case 3	case 4
SiO <sub>2</sub>	20.18	69.09	0.67	0.43	0.51	0.41
TiO <sub>2</sub>	0.18	0.12	nd	nd	nd	nd
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.75	6.93	0.70	0.58	0.62	0.50
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.04	0.92	nd	nd	nd	nd
MnO	0.09	0.04	nd	nd	nd	nd
MgO	3.78	0.92	0.09	0.06	0.09	0.04
CaO	55.08	12.65	33.06	30.05	25.16	21.30
Na <sub>2</sub> O	0.35	1.06	1.83	1.91	2.44	2.37
K <sub>2</sub> O	1.68	2.99	22.16	23.68	32.66	39.67
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.20	0.06	0.01	0.01	0.01	0.01
LOI	10.95	5.18	41.32	42.91	38.43	34.84
Total	99.28	99.96	99.84	99.63	99.92	99.14

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; as total FeO, nd; not detected(불검출), LOI; loss-on-ignition(작열감량)

### 3.3 배수체계 개선방안

터널 배수체계별 배출수의 고형분 분석결과 숏크리트와 필터콘크리트로부터 배출된 시멘트성분의 침전물이 지배적인 인자로 밝혀진 바, 기존 배수체계로부터 측방배수관 시공에 사용되는 필터콘크리트를 대체할 수 있는 새로운 배수체계 시공방안을 제시하면 그림 3.2와 같다. 측방배수관 주변에 필터콘크리트 대신 자갈층을 포설함으로써 시멘트성분의 침전량을 50%정도 줄일 수 있으며, 측방배수관 유지관리를 위한 점검구를 측방배수관 상부에 직접 시공함으로써 육안으로 침전물의 침전여부를 확인 가능하다. 따라서 본 유지관리 효율성을 향상시킬 수 있는 개선방안은 철도터널과 같이 제한된 시간 내에 유지관리가 필요한 구조물에서는 경제성과 유지관리 효율성을 높일 수 있는 우수한 배수체계로 사료된다.

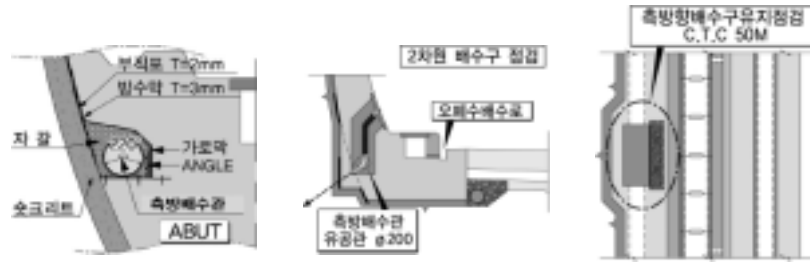


그림 3.2 터널 측방배수관 배수체계 개선방안

#### 4. 결론

본 연구에서는 측방배수관의 막힘을 최소한으로 줄일 수 있는 방안을 도출하고자 원심모형실험을 이용하여 4가지 case의 터널배수구조에 따른 침전물을 분석하여 시멘트성분의 침전물 퇴적을 최소화 할 수 있는 배수구조 개선방안을 연구하였으며 다음과 같은 결론에 도달하였다.

- 1) 배출수의 고형성분 비율은 기존배수체계의 경우가 2배정도 높게 나타났으며, 굵은골재를 감싸고 있는 시멘트 페이스트 성분이 빠져나온 것으로 판단된다.
- 2) 4종류의 고형분 시료는 pH 10.56 ~ 10.97의 범위를 갖는 높은 알칼리성을 보였다. 전반적으로 알칼리 이온(Na+K) 함량과 알칼리도가 높은 것으로 보아 CaCO<sub>3</sub>와 K를 함유한 점토광물의 용해도가 높은 수질로 사료된다. 분석수질이 갖는 용존이온의 평균 침전률은 0.615 ~ 1.428 mm/year이며, case 2 시료에서 최고치를 기록하였다.
- 3) 침전물의 주요인자로 작용하는 CaO(21.30 ~ 33.06 wt%)와 K<sub>2</sub>O(22.16 ~ 39.67 wt%)의 함량이 비슷한 함량을 이루고 있는 것으로 보아 CaCO<sub>3</sub>를 주성분으로 하는 시멘트와 K<sub>2</sub>O의 함량이 높은 정장 석과 운모가 용출과정에서 왕성한 용해반응을 보여 석출된 것으로 사료된다.
- 4) 필터콘크리트를 사용하는 기존 배수시스템의 배수구조는 침전물을 많이 배출시키는 구조로 확인되었으며, 기존 배수구조에 비하여 제시된 배수구조 개선방안이 고형분 배출비율 50% 감소, CaO 성분비율 2/3수준으로 저감되는 것으로 나타나 터널 측방배수관 주변을 자갈층 및 부직포로 둘러싼 새로운 배수구조의 유지관리 효율성이 높은 것으로 분석되었다.

#### 참고문헌

1. 문한영, 이승태, 정호섭, 김홍삼(2001) 시멘트 모르타르의 황산염용액에 대한 침식 평가, 대한토목학회 논문집, Vol.21, No.6, pp.977~986.
2. 박중배, 박철립, 김성운, 정한중, 김유석, 김성준(1998) Geotechnical centrifuge facility at Daewoo Institute of Construction Technology, Centrifuge 98, pp. 9-12.
3. 우종태(2005) 도심지터널에 유입된 지하수량 및 침전물의 성분분석 연구, 터널기술, vol7, no3, pp. 219-226.
4. 유상건(2002) 터널 배수시설로 유입된 침전물의 실태 및 성분분석, 한국구조물진단학회지, pp. 30-36.
5. 윤지남(1998) 국내 비배수형 터널의 배수 및 방수방법 개선에 관한 연구, 한양대학교, 석사학위논문
6. 천병식, 최송암, 남순성(1995) 배수형 터널내 과다유입수가 터널의 안정에 미치는 영향, 한국지반공학회 논문집, Vol.11, No.4, pp. 125~137.
7. 최송암, 정현철, 최현석, 신태식, 천병식(1995) 지하공간시설물의 장기안정성 및 효율적 유지관리 연구, 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp. 409~412