

터널 배수시설에 유입된 침전물의 유입경로 및 성분분석 연구

A Study on Analysis of Influx Path and Ingredient
of Sedimentation Substance in Tunnel Drainage System

우 종 태*

유 상 건**

Woo, Jong-Tae

Yoo, Sang-Geon

Abstract

Red sedimentation substance contains large portion of Fe. The earth retaining structure of a tunnel and ground water containing more portion of Fe than other area are the major factor of this substance. In case of white sedimentation substance, the most frequently founded ingredient is CaO, which is occurred in case grouting injection materials for ground reinforcement is transmitted into a tunnel system by ground water. This substance is doesn't affect safety of a tunnel. Black sedimentation substance is often found in tunnels near station. This substance is a mixture of either white or red sedimentation substance and detergent material in station transmitted to a tunnel drainage system.

요 지

적색 침전물은 철성분이 가장 많이 포함되어 있었는데 이는 흙막이공과 지역 특성상 철분을 많이 포함하고 있는 지하수에 원인이 있는 것으로 판단된다. 백색 침전물의 경우 가장 많이 발견된 성분은 산화칼슘으로 건설당시 지반보강을 위하여 시행한 그라우팅 주입제인 시멘트가 지하수와 함께 터널 내부로 유입된 침전물로서 터널의 안전성에는 영향이 없을 것으로 판단된다. 흑색 침전물은 정거장 시점 및 중점 근접부 터널에서 발생되고 있으며, 이는 청소용수 등 이물질이 터널내 배수시설로 유입되어 백색 또는 적색 침전물과 혼합된 침전물이다.

Keywords : Red & White & Black Sedimentation Substance, Cao, Fe, Tunnel Drainage System

핵심 용어 : 적색, 백색, 흑색 침전물질, CaO, Fe, 터널 배수시스템

* 경희원, 경북대학 토목설계과 교수, 공학박사

** 서울특별시 도시철도공사 시설관리처 과장

E-mail jtwoo60@chol.com 016-270-0132

•본 논문에 대한 토의를 2004년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 2005년 4월호에 토론결과를 게재하겠습니다

1. 서론

도심지 지하에 건설되는 지하철 구조물은 일반적으로 지하수위 하부에 건설되기 때문에 배수처리와 구조물의 방수대책이 가장 중요한 요소라 할 수 있다

본 연구에서는 1996년 개통되어 운영중인 서울지하철 5호선 중 터널구간 31km를 대상으로 하여 배수시설 내부에 퇴적되어 있는 침전물의 유입경로와 성분을 조사 분석한 결과 적색 침전물이 유입된 지역은 토사 터널로 건설된 영등포~여의나루구간과 마장~군자구간에서 주로 발생되었으나, 그 외에도 풍화암층이 터널상부까지 깊게 분포되어 있는 구간과 하천통과구간에서도 적색 침전물이 터널내부로 유입되었다.

백색 침전물이 유입된 지역은 고지대인 화곡~신정, 마포~서대문, 군자~광나루 구간의 터널입구에서 주로 발생되었다 백태는 지하철 터널 전구간에서 발생되었으며, 흑색 침전물은 배수가 정체되는 정거장 주변에서 주로 발생되었는데 이는 정거장에서 청소한 물이 배수관 내부에 쌓여있는 백색 또는 적색 침전물과 혼합되어 색상이 변화한 것으로 추정된다

본 연구에서는 터널 배수시설로 유입된 다양한 침전물의 유입경로 및 특징과 성분분석을 통하여 터널 배수시설의 중요성을 인식시켜 터널의 설계, 시공 및 유지관리에 도움을 주고자 연구를 수행하였다

2. 터널 배수시스템

터널은 지하수의 처리형식에 따라 배수형 터널과 비배수형 터널로 구분하며, 배수형 터널은 굴착면을 통하여 터널로 유입되는 지하수를 배수관을 통하여 집수정으로 유도한 후 터널 밖으로 배수하는 형식으로서 지하수위가 높거나 유입 지하수량이 적은 경우 적용한다.

비배수형 터널은 굴착면을 통하여 터널로 유입되는 지하수를 인위적으로 배수하지 않는 터널형식으로서 지하수량이 많아 유지관리비가 크게 증가하는 경우 또는 지하수위가 그다지 크지 않은 경우에 적용한다 대부분의 구간에서는 배수형 터널로 건설되었으며, 일부 하천통과 구간 등에서만 비배수형 터널로 건설되어 본 논문에서는 배수형 터널 위주로 터널 배수시스템을 검토하였다.

2.1 중앙배수관

터널바닥 중앙에 설치되며, 터널 내부로 유입된 지하수를 집수하여 집수정으로 유도처리 하는 것이 주기능이며, 터널주변의 암반 절리면을 따라 흐르는 지하수를 종·횡방향 배수관으로 유입시켜 수압이 작용하지 않도록 하는 역할을 담당한다

중앙배수관은 집수정까지 연속적인 기울기로 부설되어야 하나, 터널지보패턴 및 터널 단면의 형식에 따라 배수관 맨홀의 단차 때문에 배수가 원활하지 못하고 정체되는 경우도 발생된다

중앙배수관은 Fig 1과 Fig 2와 같이 터널중앙에 설치되며, 복선터널은 직경 400mm, 단선터널은 직경 300mm의 유공흡관을 설치하고 있다

중앙수직배수관은 도상배수관과 중앙배수관을 연결하며, 직경 100mm PVC관을 10m 간격으로 설치한다

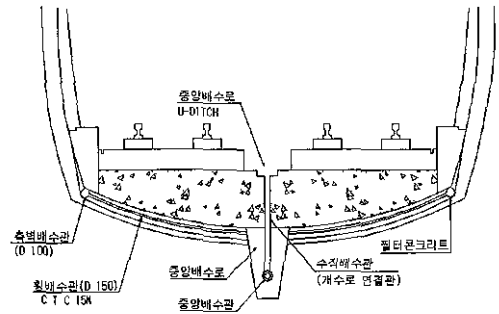


Fig 1 터널배수시스템 단면도

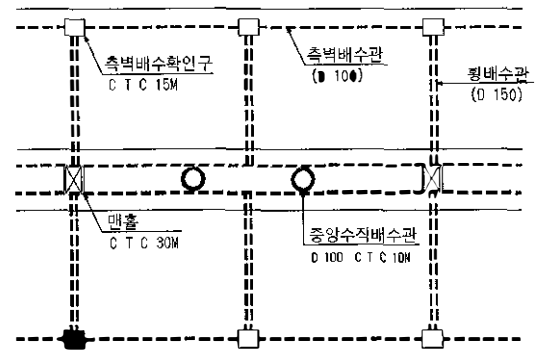


Fig 2 터널배수시스템 평면도

22 측벽배수관

Fig 1과 Fig. 2에서와 같이 터널의 좌우 측벽에 종방향으로 설치되며, 터널배면의 슛크리트층으로 침투한 지하수를 방수층을 따라 터널하단으로 유도시켜 터널라이닝에 수압이 작용하지 않도록 하는 주기능이 있지만 측벽배수관은 직경 100mm의 THP 유공관은 규격이 작아 외부로부터 유입되는 침전물이 퇴적되면 배수면적 감소로 배수기능이 상실되기 때문에 잔류수압이 작용할 경우 누수 및 구조물 안전성에 영향을 미칠 수 있어 측벽배수관의 단면을 크게 하는것이 필요하며, 이 경우 터널라이닝의 단면이 축소되지 않도록 해야 한다

23 횡배수관

Fig. 1과 Fig 2에서와 같이 터널 종방향 15m마다 측벽배수관(D100mm)을 중앙배수관(D300mm 또는 400mm)으로 연결 배수하는 기능을 담당하는 것이 횡배수관으로 직경 150mm의 PVC관이다

24 맨홀

Fig. 1과 Fig 2에서와 같이 중앙배수관을 따라 설치되는 중앙배수 맨홀은 30m 간격으로 설치되며, 측벽배수확인구는 15m 간격으로 설치되므로 맨홀에 연결되지 않는 측벽배수관과 중앙배수관을 연결하는 횡배수관은 유지관리가 불가능하므로 배수기능의 저하를 초래하고 있다

3 침전물의 유입경로 및 특징

3.1 적색 침전물

적색 침전물은 주로 영등포지역과 장한평지역의 터널에서 주로 발생되었으며, 이 지역은 하천통과 및 하천에 인접한 지역으로 풍화 잔류토층이 터널 단면까지 깊게 분포되어 있고, 지하수량이 풍부하여 지하수와 함께 세립분이 이탈되어 지하수와 함께 흘러가기도 하지만 배수시설에 퇴적되어 배수장애를 일으키고 있다

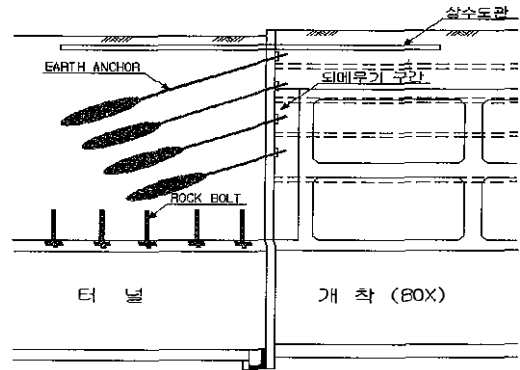


Fig 3 터널과 개착 박스구조물 연결부

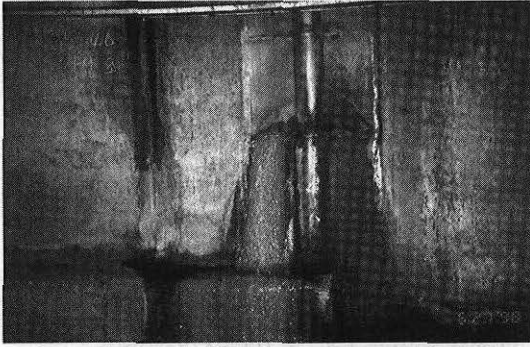
이와 같은 현상은 토사터널로 건설된 구간에서 발생되고 있으며, 기타지역에서도 터널과 개착 박스구조물 연결부위의 방수작업이 미흡한 구간에서는 퇴배수기 토사 및 매물강재의 부식된 녹물이 유입되기도 한다

터널과 박스구조물 연결부위로 침전물이 많이 유입되는 이유는 공사중 터널 갱구입구부 안전성을 확보하기 위해 Fig 3과 같이 어스앵카, 띠장, H-파일, 록볼트, 등을 설치하였으나, 공사완료 후 퇴배우기시 이러한 가시설 제거가 불가능하여 지중에 매몰하였기 때문에 개착 박스구조물과 터널입구 사이의 퇴배우기시 완벽한 다짐이 곤란했을 것이므로 투수계수가 상대적으로 커서 외부 지하수, 지표수, 생활하수 등과 같은 유입수와 함께 세립분이 터널 내부로 Photo 1과 같이 유입되고 있다.

침전물의 성분을 건조시켜 육안 관찰한 결과 터널과 개착 박스구조물이 연결된 터널입구에서 유입되는 침전물은 이물질이 많이 함유되어 있었으며, 자석을 접근시켜 실험한 결과 상당량의 철성분이 침전물 내에 포함되어 있었고, 배수확인구로 유입된 침전물결은 부드럽고 가벼운 고운 분말이었다

3.2 백색 침전물

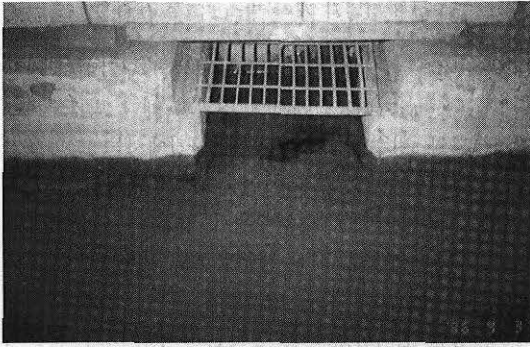
백색 침전물이 유입되고 있는 지역은 고지대 및 구릉지역에서 주로 발생되고 있으며, 기타 구간에서는 터널구조물과 개착 박스구조물 접합부를 통하여 백색 침전물이 유입되고 있다



(a) 터널과 개착 구조를 연결부



(c) 배수확인구 침전물 유입



(b) 배수확인구 침전물 퇴적



(d) 중앙맨홀 배수 장애 발생

Photo 1 백색 침전물의 유입전경

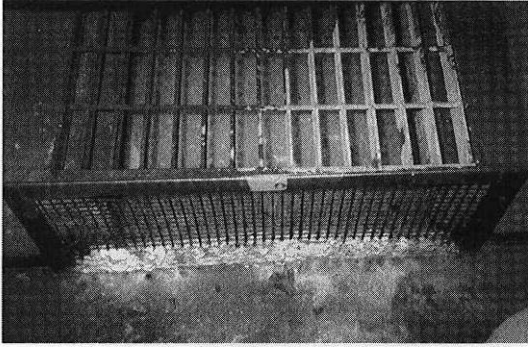
설계도면 및 감리보고서를 검토해 본 결과 고지대에 서는 단층파쇄대 지층의 지반보강 및 차수를 위하여 시행한 그라우트 주입재가 지하수와 함께 유입되고 있고, 터널과 개착 박스구조물이 연결되는 접속부는 터널입구 보강을 위하여 시행한 어스앵카, 록볼트, 치수 그라우팅 등에 사용된 주입재 일부가 지층 속에 존재하다가 용탈작용에 의해 지하수와 함께 터널내부로 유입되고 있는 것으로 판단된다.

터널 내부로 유입된 백색 침전물은 터널 중앙배수관 내부 및 측벽 배수확인구 내부에 침전되어 배수장애 및 배수기능을 저하시키기도 하고, 건조 되면 전동차 바람에 날려 터널을 오염시키는데 조사결과 시멘트의 주성분은 산화칼슘(CaO)이 많이 포함하고 있으며, 백색 침전물이 배수로에 흐르고 있는 전경은 Photo 2와 같다.

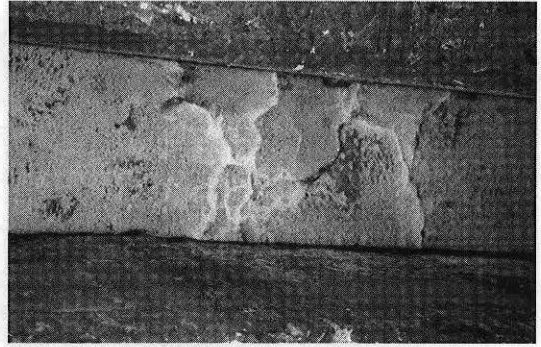
3.3 백 태

백태(Efflorescence)는 콘크리트 내부의 수분에 의하여 염성분이 콘크리트 표면에 고형화된 현상으로 콘크리트 중의 가용성분이나 콘크리트 주변의 가용성분이 수분의 이동에 의해 콘크리트 표면으로 이동하여 표면에서의 수분증발이나 공기중의 탄산가스 등의 흡수에 의하여 용해되고 있던 성분이 석출하거나 석출물 자체를 의미하며, 백화와 같은 의미로 쓰이고 있다.

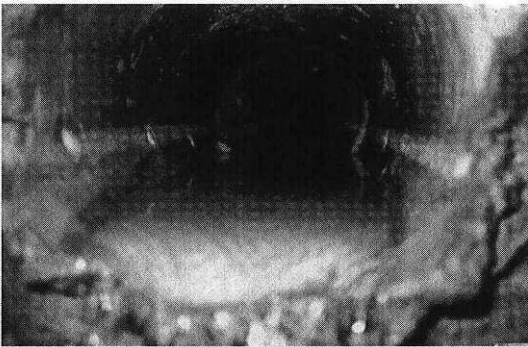
백색의 성분은 콘크리트 중성화 과정에서 발생하는 백색의 결정체이다. 경화한 콘크리트는 시멘트의 수화 생성물인 수산화칼슘(Ca(OH)₂)에 의해 PH가 12~13의 강알칼리성을 띠며, 이 때문에 콘크리트 중의 철근표면에는 수산화물의 보호피막으로 덮여 있기 때문에 부식하지 않는다.



(a) 배수확인구 침전물 퇴적



(c) 도상배수로 침전물 퇴적



(b) 배수관 내부 침전물 퇴적



(d) 백색 침전물 시료 채취

Photo 2 백색 침전물의 유입전경

그러나, 장기간 콘크리트가 노출되어 있는 경우 그 표면은 공기중의 탄산가스의 작용을 받아 $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ 의 과정을 통해 수산화칼슘은 서서히 탄산칼슘으로 변하여 알칼리성을 잃게 된다. 이와 같이 반응에 의하여 콘크리트가 알칼리성을 잃게 되는 것을 중성화 또는 탄산화라고 한다.

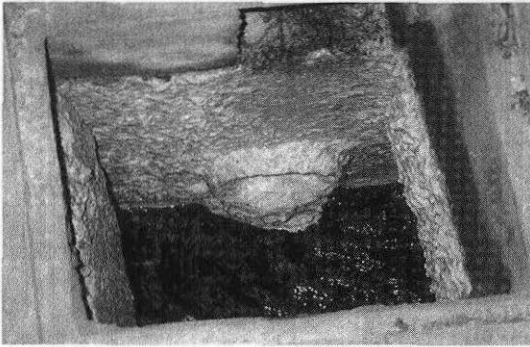
그 형태는 물 유리와 같이 결정체이므로 초기에는 지하수 등 작은 충격에도 쉽게 파괴 분해되지만 시간이 경과되면 동물의 석순이 자라듯이 백태는 배수관 내부에 점점 쌓여 Photo 3과 같이 완전히 막히게 되는데 약 3년~10년이면 측벽 배수관이 막히게 될 수 있다.

백태 발생은 지하수 유입량이 많고, 배수흐름이 양호한 구간에서는 발견되지 않고, 지하수 유입량이 적은 지역에서 발생되고 있다. 지하수가 많이 유입되는 지역에서 백태가 쌓이지 않는 것은 콘크리트 중성화작용에서 발생

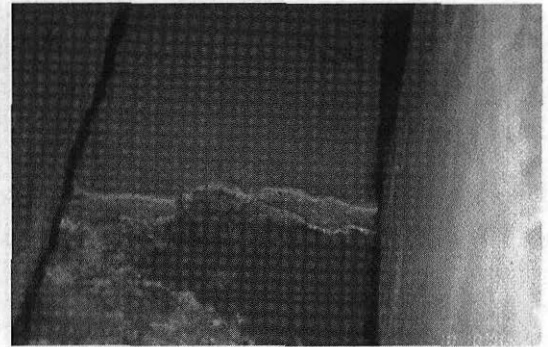
되는 백색 결정체는 지하수에 의해 흘러가기 때문에 퇴적되지 않고 있지만 지하수 유입량이 미소한 구간에서는 중성화 작용에 의해 발생된 백색 결정체 즉, 탄산칼슘이 측벽 배수관, 횡배수관, 배수재(부직포), 필터콘크리트에 쌓여 배수기능을 저하시키고 이로 인하여 터널 벽체 및 아치에서 누수가 발생되기도 하고, 도상의 배수 범람, 터널 라이닝에 잔류수압이 작용하게되어 터널의 안전에 중요한 문제가 되므로 철저한 배수관리가 요구된다.

3.4 흑색 침전물

흑색 침전물이 발생하는 지역은 역사 시중점 근접부 터널에서 발생되고 있으며, 이는 역사 청소용수 등 이 물질이 터널내 배수시설로 유입되어 백색 또는 적색 침전물과 혼합된 침전물이다.



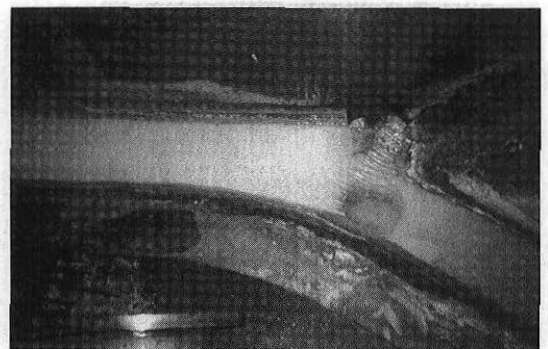
(a) 중앙맨홀 측벽 연결관 막힘



(c) 도상배수로 백태 퇴적



(b) 배수확인구 백태 유입



(d) 횡강접속부 백태 퇴적

Photo 3 백태 유입전경

흑색 침전물이 발생하게 되는 원인은 터널 중앙배수관이 정거장 개착구조물에서 차단되어 유통되고 있는 구간에서 주로 발생되며, Photo 4와 같이 유입되고 있다.

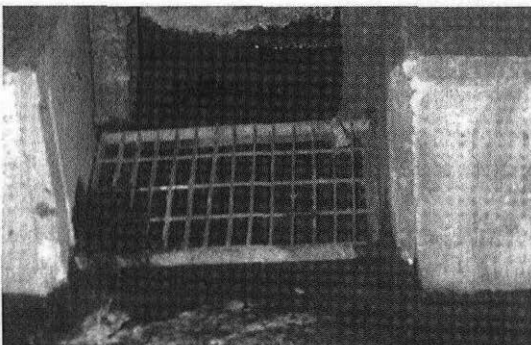


Photo 4 배수확인구 흑색 침전물 퇴적

4. 침전물 성분분석

4.1 화학성분조사

백색 및 적색 고형 침전물과 흡시료 그리고 액체상태의 시료 및 지하수에 대해서 실시한 화학적 성분분석 결과는 각각의 시료에 대한 전반적인 성분조사에 대한 결과와 또한, 고형물을 배제하고 액체상태로 만들어 시험한 결과이다. 특이한 사항은 흰색 침전물이 다른 시료에 비해 상대적으로 경도가 매우 작고 PH 10.9로 강알카리성을 나타내었다. 고형물에 대한 시험 결과로부터 강동~길동구간 및 마장~장한평 구간의 적색 침전물에서 상당히 많은 철분(513.8mg/l, 196 mg/l)이 검출되었으나, 터널내 집수정에서 채취한 지하수의 철분은 0.71mg/l로 적게 검출되었다.

적색 및 백색 침전물에 대한 X선 회절분석 결과와 서울지역 풍화토에 대한 시험치를 비교한 결과 적색 침전물에서 철성분의 함량이 상당히 큰 것으로 나타났고, 규소 및 알루미늄 성분의 함량은 상대적으로 작게 나타났다. 백색 침전물은 칼슘성분의 함량이 다른 시료에 비해 크게 나타났다.

4.2 공학적 성분조사

적색 침전물의 비중은 2.06으로 흙시료 2.70에 비해 상당히 작게 나타났는데 이는 대부분의 철분이 부식에 의해 부피가 팽창했기 때문에 낮은 비중값을 보인 것으로 판단된다. 평균입경은 0.04mm로 비중과 마찬가지로 흙시료에 비해 상당히 작은 값을 보였는데 이는 침전물이 터널주변 지층을 통해 유입되었을 경우 지층의 공극이 작기 때문에 많은양의 세립분만이 물과 함께 이동되어 터널내부로 유입될 수 있기 때문이다.

이때 지층에 존재하고 있는 토사 세립분도 함께 이동되어 터널내부로 유입되었을 가능성도 있다. 침전물에는 토사뿐만 아니라 여러 가지 물질이 혼합되어 있는 것을 예측할 수 있었다. 또한, 특이한 사항으로 시험을 위해 시료를 건조시켜 본 결과 고형물이 상당히 수축하는 현상을 발견하였으며 이로부터 상당히 많은 유기물질이 침전물 내에 존재하는 것을 알 수 있었다.

4.3 시험기관의 시험결과 성분분석

배수확인공에 퇴적되어 쌓여있는 백색 침전물을 채취하여 화학시험연구원에 시험의뢰 하여 성분분석을 하였으며, 그 결과는 Table 1과 같다. 강열감량(Ignition loss)은 시멘트를 950~1,050℃에서 강열하였을 때의 감량을 의미한다. 주로 시멘트 속에 포함된 물과 탄산가스의 양으로써 신선한 시멘트의 강열감량은 보통 0.6% 정도이며, 시멘트가 풍화되면 강열감량은 증가한다. 위 시험결과를 검토한 결과 산화칼슘 성분을 많이 함유하고 있으므로 시멘트성분으로 판단되며, 시멘트의 원료인 석회석, 규석, 산화철 원료, 석고 중에서도 석회석 성분과 거의 일치하고 있음을 알 수 있고, 분석결과는 Table 2와 같다.

Table 1 화학시험연구원의 시험 결과표 (단위 %)

성분	강열감량	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	합계
백색 침전물	43.4	0.51	0.17	0.41	55.1	-	99.59

Table 2 포틀랜드시멘트와 그 원료의 화학조성비(단위 %)

구분	보통 시멘트	석회석	점토	연규석	인산 석고
강열감량	0.6	42.6	8	2.6	20.9
SiO ₂	23.1	0.5	66.9	87	0.6
Al ₂ O ₃	5	0.2	13.6	5.3	1.2
Fe ₂ O ₃	3	0.3	5.5	3.6	0.6
CaO	63.8	55.2	2.9	0.4	31.5
MgO	1.6	0.6	1.3	0.3	0.2
SO ₃	2	-	-	-	45.1
Na ₂ O	0.4	-	-	-	-
K ₂ O	0.5	-	-	-	-
합계	100	99.4	98.2	99.2	100.0

따라서, 이 침전물의 유입량으로 판단해보면 숯크리트 및 콘크리트 등이 물과 접촉하여 발생된 백화현상이 아니고, 지반 차수그라우트 주입재가 이탈되어 퇴적된 것으로 판단된다.

5 결론

본 연구는 1996년 개통되어 운영중인 서울 지하철 5호선 터널구간을 대상으로 배수시설 내부에 퇴적되어 있는 침전물의 유입경로 및 성분을 조사 분석한 것으로 결론은 다음과 같다. 적색 침전물은 성분 조사결과, 철분이 가장 많이 포함되어 있었는데 이는 시공시 사용되었던 철재 가시설과 지역 특성상, 철분을 많이 포함하고 있는 지하수에 원인이 있는 것으로 판단된다.

또한, 침전물 내에 휘발성 고형물과 토사 세립분도 포함되어 있는데 이는 공사중 발생된 다양한 이물질이 되메우기 지층 속에 존재하고 있다가 강우 또는 지하수위 변동으로 인하여 상부 지층으로부터 지하수와 함께 지하철 내부로 유입되고 있는 것으로 보인다.

적색 침전물 발생지역은 충적토 및 풍화토 지반으로 지하수위가 높고 다량의 지하수가 터널내부로 유입되어 장기적으로 양수작업을 할 경우 터널배면 주변에 유로형성 또는 공동형성으로 터널의 안정성에 영향을 미칠 우려가 있으므로 지속적인 관찰 후 토사 및 침전물 또는 지하수 유입량이 증가될 경우에는 그라우팅 등으로 보강하여 지하수 유입을 억제시켜야 할 것이다

백색 침전물에서 가장 많이 발견된 성분은 산화칼슘으로 건설당시 지반보강을 위하여 시행한 그라우팅 주입제인 시멘트가 지하수와 함께 터널내부로 유입된 침전물로서 터널의 안정성에는 영향을 없을 것으로 판단된다

흑색 침전물은 역사 시점 및 종점 근접부 터널에서 발생되고 있으며, 이는 역사 청소용수 등 이물질이 터널내 배수시설로 유입되어 백색 또는 적색 침전물과 혼합된 침전물이다.

이러한 침전물유입을 억제하기 위해 환경 친화적인 건설로 공시중에 사용하였던 강재를 지중에 매몰시키는 향후 지하수 오염 등의 문제가 발생되므로 가급적 지양하고, 터널과 개착 박스구조물 연결부위는 터널내부로 이물질 및 토사가 유입되지 않도록 쓰일시멘트 등으로 되메우기 보강하고, 측벽배수관 청소가 용이하게 배수관 확대 및 청소구를 추가 설치한다면 배수기능 유지 및 터널 안정에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1 대한터널협회, "터널표준시방서", 1999 pp61~63
- 2 대한토목학회, "토목용어사전", 1998
- 3 문준석, "터널 배수재의 필터의 폐색 및 수리적 특성에 관한 연구", 2000
- 4 서울특별시 도시철도공사, 코오롱건설(주), "지하철5호선 강동~길동역간 구조물 정밀안전진단보고서", 1997
- 5 서울특별시 지하철건설본부, "제2기 서울지하철 터널설계 및 시공감리 종합보고서", 1994
- 6 서울특별시 지하철건설본부, "지하철5-12공구 시공감리 종합보고서", 1996
- 7 서울특별시 지하철건설본부, "지하철5-36공구 시공감리 종합보고서", 1996
- 8 우종태, 이래철, "도시철도 토목구조물 변위계측 종합조사보고서", 서울특별시 도시철도공사, 2003
- 9 우종태, "지하철 터널내 침전물질의 유입경로 및 성분 분석 연구", 한국구조물진단학회 불학술발표회논문집, 2004 5, pp 407~412
- 10 우종태 외, "건설재료 및 품질시험", 구미서관, 2004 pp 24~28
- 11 한국콘크리트학회, "콘크리트 구조물의 균열", 제18회 기술강좌, 1999 pp IV-41~45
- 12 한국콘크리트학회, "콘크리트 진단 및 유지관리", 2003 pp 96~105
- 13 Geoff Mays, "Durability of concrete structures", 1992
- 14 日本コンクリート工學協會, "コンクリート診断技術", 2001

(접수일자 2004년 6월 8일)