

터널의 변상원인과 보수 및 보강

박 남 서 (대덕공영주식회사, 대표이사)

1. 서론

터널의 변상은 크게 두가지로 구분하는데 하나는 토압, 지하수압, 동상압 등과 같은 외적요인에 의하여 발생하는 변상이 있으며, 다른 하나는 터널의 구성재료가 시간의 경과에 따라 노후화(열화)되어 발생하는 변상이 있다.

변상이라 함은 노후화(deteriorated), 변형(deformed), 파괴(destoryed), 결함(defective)등을 포함하는 용어로서 실제 특정 한가지 요인에 의하여 발생하기 보다는 두가지 이상의 요인이 복합적으로 작용하여 발생하는 경우가 많아 정확한 변상원인을 추정하는데에는 상당한 전문지식이 요구된다.

터널구조물은 지반의 강도를 이용하여 지반내에 건설되는 것이 타구조물과 차별성을 가지며 터널의 변상원인을 파악하기 위해서는 지반의 거동특성을 이해하는 것이 필요하다.

최근 안전진단 기술의 발전에 발맞추어 보수 및 보강방법도 새로운 공법들이 개발되고 있는 실정이나 우리나라에서는 주로 액체방수법이나 분말방수법에 의한 표면방수 및 보강콘크리트 덧씌우기 시공등이 대체로 시행되고 있으며 최근에 몇몇 붕괴우려가 있는 터널에 국한하여 본격적인 보강공

사가 시행되고 있다.

터널구조물의 수명을 몇 년으로 규정하기는 쉽지 않다. 인간의 수명이 의학의 발달에 따라 연장되고 있는 것과 같이 적절한 보수와 보강방법의 적용에 따라 터널구조물의 수명도 차이를 가질 수 있을 것이다. 특히 터널이 위치한 지반조건이 양호한지, 시공은 성실하게 하였는지, 유지보수 및 보강공사는 적절한 시기에 적절한 방법으로 시행되었는지에 따라 터널의 수명도 좌우될 수 있다. 그러나 교량, 댐, 건축구조물과는 달리 터널의 보수보강은 제한된 공간여건, 사용상의 제한, 라이닝 배면 지반상태 파악의 제한성 등 한계조건으로 인하여 상당한 전문적인 기술능력이 요구되고 있다.

따라서 터널변상에 대한 보수 및 보강공법의 선정에 있어서는 변상현상, 변상원인, 터널의 환경조건, 구조조건, 작업조건등을 충분히 고려하여 효과적인 계획이 수립되어야 한다.

2. 변상원인

터널변상 원인은 외적요인에 의하여 발생하는 경우와 내적요인에 기인하는 경우로 크게 구분할 수 있다(표 2-1 참조).

〈표 2-1〉 변상원인의 분류

내적 요인	외적 요인
· 소성압	(1) 설계 부적절
· 편압 · 사면활동	· 매우불량
· 지반이완에 의한 연직압	· 인버트 미설치
· 수압	· 지보부적절
· 동상압	· 단면부족
· 지진	(2) 시공 불량
· 지지력부족 및 자반침하	· 아치부 배면공극
· 근접공사	· 측벽 배면공극
· 동해	· 라이닝 두께부족
· 염해	· 이음눈줄 불량
· 연해 (煙害)	· 재료불량
· 경과년수	· 방수불량

2.1 소성압

터널주변 지반의 강도가 토피압에 비하여 작은 경우 혹은 강도열화가 현저하게 발생한 경우에는 터널주변에 생긴 소성영역이 확대되어 터널의 라이닝에 큰 하중으로 작용한다.

소성압은 팽창성 점토를 다량 함유한 니암, 단층 파쇄대, 열수변질등 변질작용(Alteration)을 받은 변질암중 지반강도비($q_u / \gamma \cdot h$)가 2이하인 지반에서 주로 발생한다.

소성압에 의하여 변상이 생기기 쉬운 구조적 결함은 라이닝 천단부 배면공동, 라이닝 두께부족 등이 있다.

2.2 편토압

터널에 작용하는 좌우의 지반압이 현저하게 불균형을 이루는 상태를 편토압 상태라 하고 일반적으로 경사지 지형에 터널이 존재하는 경우에 많다.

자연지형에서는 지반활동지역등 붕괴지, 애추

(Talus), 침식하천 상부사면 등이 편토압 구간일 가능성이 크며, 인공사면에서는 도로절취면, 택지 조성 절취사면과 댐담수에 의한 수위상승 또는 급격한 수위저하에 기인하는 사면붕괴 등이 있다.

이암, 혈암, 편암 및 활동성이 높은 점토광물을 함유한 유동성 지반등에서 상기한 지형적 특성을 가질 경우 편토압의 가능성은 더 커질수 있다.

과거에 설계되고 시공된 터널에서는 공사비, 기술의 미개발등 요인에 의하여 터널연장이 짧은 계곡부 및 지질구조선(Geological lineament)을 따라 터널이 건설된 경우가 많으므로 낙반후 충전 부족등에 의한 라이닝 배면의 공동이 생길 수 있으며 편토압 경감조치를 하지 못한 경우에 편토압에 의한 터널의 변상이 발생할 가능성을 내재하고 있다.

2.3 지반활동

사면을 구성하는 지반의 표층부가 지하수의 작용(간극수압의 증가등)과 활동면의 점토가 지하수의 포화 및 크립등으로 인한 변위발생시 전단강도의 저하($\sigma_{peak} \rightarrow \sigma_{residual}$)로 활동면을 따라 활동하는 현상이 발생하게 된다.

지하수는 지반의 자중의 증가, Creep등에 의한 물성 및 역학적 성질의 열화, 간극수압의 증가등 사면활동을 유발하는 요인이 된다.

따라서 터널이 사면 활동면상에 위치할 경우 터널의 변상 및 붕괴 가능성이 높다.

2.4 지반이완에 의한 연직압

굴착시 여굴 및 지반이완은 시간이 경과함에 따라 터널라이닝에 하중으로 작용하며 특히 차량 통행 및 열차운행, 수로터널에서의 수층(Water hammering)등의 작용시 터널 천정부에서 발생 가능성이 높다. 특히 터널의 배면공극이 있는 경우 콘크리트 라이닝에 휨응력을 발생시켜 Arch 부재로서의 기능이 손실되고 내력을 저하시킬 수 있다.

2.5 수압

터널라이닝에 발생하는 이상수압은 강우시 누적 강우에 의한 침투수가 다량 유입되거나 주변에 신설댐이나 저수지등의 건설로 터널 주변의 지하수위가 상승할 경우에 터널내 배수불량 및 도수공의 단면부족, 막힘(Clogging 현상) 등의 외부요인과 내부요인이 결합될 경우 라이닝 두께가 부족한 단면이나 구조적 결함이 수반된 부위에서 변상을 일으킬 수 있다.

2.6 동상압(凍上壓)

지반의 동결에 의한 변상으로 외기온도가 낮아 일평균 0℃이하의 온도를 날마다 더한 값이 -300℃·day이상인 동결지수를 갖는 한냉지인 경우에 미고결 퇴적층이나 단층대에서 동상 가능성이 있다. 대체적인 판정의 자료는 표 2-2와 같다.

〈표 2-2〉 고결지반의 동상성 판정

판정지표	동상받기 쉬운 조건
일축 압축강도*	50kg/cm ² 이하
건조 밀도	1.5g/cm ³ 이하
포화 습윤 밀도**	2.0g/cm ³ 이하
함수비	25% 이하
Silt이하의 함유량	20% 이상

* 가장 유효한 판정지표

** 건조후 24시간 수침시료의 밀도

2.7 지반침하

지반침하에 의하여 터널이 변상하는 원인은 지하공동의 형성(화산암 중 다공질 분출암 지역, 석회암, 석탄층의 채굴적등)이나 신설터널의 하부교차 등이 예상된다.

2.8 근접시공

근접시공에 의한 터널의 변상은 기존터널에 근접하여 공사가 진행될 경우 터널 주변에서 응력의 균형이 깨어지는 현상이 발생하게 되어 생기기 쉽다. 기존 터널에 영향을 주는 근접시공의 종류는

표 2-3과 같다.

〈표 2-3〉 근접시공의 종류

시공종류	특징
터널의 병설	· 기존 터널에 병행하여 신설 터널을 건설 · 선로 증설공사할 때가 많다.
터널의 교차	· 기존 터널의 상부 또는 하부에 터널이 횡단
터널상부 개착	· 터널상부가 택지개발 등을 위해 개착
터널상부의 성토	· 터널상부에 택지개발 등을 위해 성토
터널상부의 구조물기초	· 터널상부에 고층의 건축물등이 건설되어 그 기초가 터널상부 또는 측부에 시공
터널측부의 굴착	· 터널측부의 지반을 도로확폭과 택지개발 등에 의해 굴착
지반진동	· 터널주변의 근접공사에 의한 지반진동 (특히 발파진동)
지하수위 변동	· 터널주변의 공사에 의해 지하수위가 상승하면 복공에 수압이 작용(Dam신설 등)

3. 보수 및 보강

3.1 보수

〈표 3-1〉 균열 보수재료와 공법과의 관계

재료종류	표면처리공법	주입공법	충진공법	
			표면처리공법	주입공법
수지계	레진 모르터	-	-	◎
	에폭시 수지	-	◎	◎
	가스성 에폭시수지	-	◎	◎
	탄성 실링재	◎	-	◎
	도막 탄성방수재	◎	-	-
시멘트계	폴리머 시멘트 슬러리	-	◎	-
	폴리머 시멘트 페이스트	◎	-	-
	폴리머 시멘트 모르터	-	-	◎
	시멘트 힐러	◎	-	-
	팽창 시멘트 그리우트	-	◎	-

터널의 보수는 터널이 변상되었거나 변상가능성이 있어 터널의 기능저하, 안전상 문제가 예상되는 경우에 균열 보수 목적인 표면처리, 주입, 충전공법에 따라 적절한 재료가 선정되어야 한다. (<표 3-1> 균열보수 재료와 공법과의 관계 참조).

균열 보수재는 크게 수지계와 시멘트계로 대별되며 특히 수지계의 경우 내구성과 접착성이 우수

하여야 하고 시멘트계는 체적변화가 적고 시공성과 내수성이 우수하여야 한다.

<표 3-2> 수지계 보수재료의 성능비교

<표 3-3> 수지계 표면피복재의 특징

<표 3-4> 수지계 주입재의 특징

<표 3-5> 수지계 충전·단면복구재의 특징

<표 3-2> 수지계 보수재료의 성능비교

구분	에폭시계	폴리에스터계	폴리우레탄계	고무·가스필로계
접착성	◎	○	○	△
가요성	△	△	◎	○
내구성	◎	○	○	×
내수성	◎	○	○	△
내알칼리성	◎	×	○	△
수축성	무	대	소	대
시공성	○	○	○	◎
경제성	△	○	○	◎

(주) ◎우수, ○양호, △보통, ×불량

<표 3-3> 수지계 표면 피복재의 특징

재료명	주요성분	특징·용도
아크릴 실리콘도료	아크릴실리콘수지	<ul style="list-style-type: none"> 내구성, 방식성, 상온경화성, 내산, 내알칼리성 우수 무기계 바탕과의 접착이 양호
도막계 콘크리트 보호재	에폭시수지, 아크릴우레탄수지	<ul style="list-style-type: none"> 콘크리트 보호재로 요구성능·시공조건에 따라 재료·공법의 선정이 가능
에폭시수지계 콘크리트 피복재	에폭시수지, 폴리우레탄수지	<ul style="list-style-type: none"> 내수·내염수·내화학약품성이 뛰어남 도막의 외관이 균일함 콘크리트 구조물이 염해대책에 적합
우레탄계 도장재	우레탄수지	<ul style="list-style-type: none"> 구체의 진동에 대한 추종성 양호
불소계 도장재	1액 상온건조형 불소 수지	<ul style="list-style-type: none"> 재도장(덧바름)이 가능 내수성, 내산성, 내알칼리성, 염분차단성 등 우수 침투성 흡수방지제 병용시 콘크리트와 부착성 증대
실리콘계 도장재	실리콘수지	<ul style="list-style-type: none"> 내후성, 내열성, 내한성, 균열추종성, 발수성, 방수성, 내약품성, 접착성, 방청성, 투습성, 난연성 등 우수 콘크리트 및 강구조물의 보호피막제로 사용

〈표 3-4〉 수지계 주입재의 특징

재료명	주요 성분	특징·용도
에폭시 수지계 균열주입제	에폭시수지	<ul style="list-style-type: none"> • 균열, 추종성이 양호 • 적용가능 균열 폭은 0.2~2.0mm
	유연형 에폭시수지	<ul style="list-style-type: none"> • 경화물의 유연성이 풍부하여 진행성 균열에 적합 • 균열 및 알칼리 골재반응의 성능저하 보수에 적합
	자기유화형 에폭시수지	<ul style="list-style-type: none"> • 수중경화, 콘크리트 중의 수분과 반응 • 강도특성이 뛰어나 • 균열 폭 0.15mm 이상에 적용
	에폭시수지, 포틀랜드 시멘트	<ul style="list-style-type: none"> • 수중경화형 에폭시수지와 시멘트의 반응으로 발포 • 적용 균열 폭 1mm~10mm
실런트계 충전재	우레탄수지	<ul style="list-style-type: none"> • 단일성분으로 작업성이 뛰어나 • 탄성계수가 작아 균열 추종성이 우수 • 구조물의 신축 줄눈분에 사용
폴리머 시멘트계 주입재	에폭시수지계 에밀전, 미분말충전재, 조강시멘트	<ul style="list-style-type: none"> • 균열폭 5.0mm 이상에 적용 • 습윤면에 대하여 접착성이 우수 • 알칼리골재반응에 의한 성능저하의 보수에 적합

〈표 3-5〉 수지계 충전·단면복구재의 특징

재료명	주요 성분	특징·용도
에폭시 수지계 충전재	에폭시수지	<ul style="list-style-type: none"> • 조성을 변화시켜 진행성 및 비진행성 균열에 적용 가능 • 구조물 표면수, 요철부 조정, 수평 및 상향 시공가능 • 중량이며 진동이 있는 좌대 보강 등에도 적용가능 • 수중 및 지수용은 물에 젖어 있거나 누수부위에도 적용가능
에폭시계 모르터	특수변형 에폭시수지	<ul style="list-style-type: none"> • 부착성이 높으며 경량, 바람 두께를 두껍게 할 수 있으며 공기가 짧고 작업성이 뛰어나 • 결손부위의 충전에 적합
	에폭시수지, 경량골재	<ul style="list-style-type: none"> • 비중이 낮아 상향시공성 양호 • 얇게 시공하여도 드라이아웃이 없음 • 단면보수용으로 적합
	에폭시수지, 특수골재	<ul style="list-style-type: none"> • 용변성 에폭시수지와 골재로 구성되어 천정부 시공가능 • 비투수성, 콘크리트 구조물의 방식, 방청, 결손부 보수, 요철부 조정
실런트계 충전재	2성분형 실리콘	<ul style="list-style-type: none"> • 내후성·내수성·내구성 우수, 프라이머 사용으로 대부분의 피착재에 접착가능, 연신특성 우수하며 진동 신축에 대한 추종성이 뛰어나
합성수지계 프리팩트콘크리트	불포화 폴리에스터수지, 골재	<ul style="list-style-type: none"> • 저온시의 강도 발현성이 뛰어나
우레탄계 충전재	2성분형 우레탄수지	<ul style="list-style-type: none"> • 신축 추종성이 뛰어나며 흘러내림이 없음 • 5mm 이상의 균열에 적용
에폭시계 단면복구재	에폭시수지	<ul style="list-style-type: none"> • 초경화성, 물로 반죽질기 조절가능 • 습윤부에 대한 접착성 양호 • 대형 균열이나 결손부에 적합

〈표 3-6〉 시멘트계 보수재료의 특징

재 료	장 점	단 점	적 용
실리카 흙	초고강도, 수밀성·내구성 향상	고가, 단위수량·점성증가	고품질 뿔칠, 내마모성이 요구
뿔칠콘크리트	부착력 대, 수축 소, 시공이 용이	품질이 기능공에 의존 기능공 필요	
섬유보강콘크리트	균열저항성 대, 피로저항 향상	표면부 섬유 부식 섬유의 분산이 곤란	균열제어, 뿔칠, 프리캐스트
폴 리 머	부착성 대, 양생 1일 이내, 투수·투기성 소, 내화학 저항성 대	가사시간이 짧음 혼합·취급이 특수, 기능공 필요	포장, 충전, 화학적 침식개소
팽창시멘트계 (팽창성·무수축 그라 우트)	취급용이, 동결융해 저항성 증가	배합이 시멘트 성분이나 비빔온도에 영향을 줌, 거푸집이 필요	공극충전, 균열충전
석고계(무수축· 팽창성 그라우트)	취급용이, 경화가 빠름, 공기양생	습윤상태에서 불안정 경화가 빠름 물에 용해되기 쉬움	건조조건에서 볼트·파이프 고정
팽창시멘트계 (팽창성·무수축 그라우트)	취급용이 매우 빠름, 내산·내황산염, 내열	습윤양생이 필요	볼트고정, 작은공극의 충전, 포스트텐션의 텐돈의 충전
칼슘·알루미늄이 트계(팽창성·무수 축 그라우트)	경화가 매우 빠름, 내산·내황산염, 내열	가사시간 짧음 표면요철의 처리 필요 암모니아 냄새가 심함	지수용의 충전
마그네슘 인산염	취급용이, 부착력 대동결 온도하에 사용가	가사시간 짧고 수축성 비교적 고가	저온 하에서의 보수
초미립시멘트	침투성이 높음, 블리딩이 적음	다량의 물이 필요 먼지가 다량으로 발생	구조물·지반, 암반의 그라우팅

3.2 보강

3.2.1 터널보강의 목적

1) 터널 주변지반의 전단강도 강화

터널의 안정성을 증대시키기 위해서는 흙의 전단강도를 강화하지 않으면 안된다. 전단강도는 아래의 식 〈2.1〉로 표현되며 주입재의 특성과 지반의 특성이 상호 결합하여 강도의 정수 c' 혹은 ϕ' 를 향상시키므로써 터널굴착시 터널의 안정성을 향상시킨다.

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \dots\dots\dots\langle 2.1 \rangle$$

여기서 τ : 전단강도
 c' : 유효점착력
 ϕ' : 유효 내부마찰각
 σ' : 유효연직응력

2) 압축특성의 개선

안정제의 첨가, 주입등에 의해서 형성된 결합물질을 따라 토립자가 정착되므로 지반의 골조강성이 증강되고 압축 특성도 개선된다. 또한 결합물질의 간극충전도 지반의 변형을 적게 하는 원인이 된다. 따라서 터널 굴착에 따른 주변 지반침하를 억제시킬 수 있다.

하여 원위치 혼합이나 주입을 통한 지반간극의 충전으로 투수성을 저하시켜서 지하수 유출에 의한 터널의 안정성 저해요소를 감소시킨다.

3) 투수성의 개선

시멘트 몰탈, 시멘트 밀크 또는 약액 등을 사용

4) 지반의 변형 및 파괴장치

지반강화 및 구조적 보강을 통한 터널굴착에 따른 지반의 변형 및 파괴방지를 도모한다.

3.2.2 보강공법의 적용

토압 및 지반압의 증가에 의하여 변상이 생길 가

〈표 3-7〉 변상원인과 대책공법

변상원인 대책공법		소 성 압	편 압 · 사 면 활 동	지 반 이 완 에 의 한 연 직 압	수 압	지 반 침 하	지 반 활 동	지 진	비 고
보강판, 철망		△	△	○	△	△	△	○	
배면주입공		●	●	●	●	●	●	●	
라이닝 보강공	뿔어붙임 콘크리트	○	○	△	△	△	○	○	큰 변위가 예상될 때, 강섬유 보강된 숏크리트(SFRC)사용
	현장타설 콘크리트	○	○	△	△	×	○	○	
강지보공 보강(Saddle)		○	○	○	△	●	○	○	
록볼트(Rock-Bolt)보강공		●	●	△	△	△	○	○	
다짐 콘크리트 공		×	○	×	×	×	△	△	
스트러트 공		○	○	×	△	△	○	△	
인버트 콘크리트 설치		○	○	×	△	○	○	○	
지반 주입공		×	△	△	△	△	×	○	
배수공 개량 또는 신설		△	△	△	●*	×	○	△	*도수공개량·신설에 의한 배수 처리 개선
사면안정공			○				●	●	

(주) 표에서 대책공법은 각각의 변상 원인에 대해 적절한 공법들을 조합시켜 사용하는 일이 많다.

(주) ●최적의 공법, ○적합한 공법, △경우에 따라 유효한 공법, ×적합하지 않은 공법

능성이 있는 터널은 변상의 원인이 될 수 있는 소성압, 편토압, 사면활동, 지반이완에 의한 연직압, 수압, 지반침하, 지진등을 고려한 보강공법을 종합하여 표로 작성하면 <표 3-7>과 같다.

4. 결론

터널 구조물은 환경변화가 적은 지하에 건설되어 구조적으로 안전한 것으로 알려져 있으나 1996년 북해도 토요야마 터널의 붕괴사고로 많은 인명피해가 발생하고 최근 국내 지하철 7호선 침수사고, 영동선 산골터널, 안산터널의 붕괴 위험성등이 알려지면서 터널구조물의 변상과 보수 및 보강대책에 대한 관심이 커지고 있는 실정이다.

지반내에 건설된 터널의 대부분은 굴착면이 콘크리트 라이닝으로 인하여 관찰되기 어려우며 단지 변상상태에 따라 그 원인을 추정하고 대책을 산정해야 하는 점이 여타 구조물과 차이점이 있다. 따라서 보수 및 보강공법의 선정에는 지형, 지반특성, 지질구조, 지하수 상태등 외적요인과 시공상태 등 내적요인을 제대로 파악하여야 하는 어려움이 있어 전문적인 기술력이 필요로 한다.

특히 터널내에서의 보수·보강은 시간적, 공간

적 제한성을 가지고 있으며 구조물 한계, 건축한계 등 내공단면 확보의 기본요건을 만족시켜야 하는 제약이 뒤따르므로 이에 걸맞는 공법의 선정을 위해서는 안전진단 기술의 향상, 전문기술인력의 배양, 다양한 보수·보강기술의 개발등이 뒤따라야 하겠다.

참고문헌

1. 석탄산업합리화사업단, 대덕공영(주)(1995), "철암지역 지반침하 보강공사 실시설계 보고서" pp. 65~94
2. 삼부토건(주), 대덕공영(주)(1995), "서울지하철 5호선 5-18공구, 한강 하저터널 막장지반조사", pp. 46~57
3. 건설교통부(1996), "터널표준시방서" pp. 89~91, 127~135
4. (사)철도종합기술연구소(일본)(1990), "터널 보수·보강 매뉴얼", pp. 70~115
5. 한국건설기술연구원(1998), "터널의 안전진단 체계정립 및 균열자동추정 시스템 개발(I)", pp. 47~48