

Tunnelling Technology

터널의 보수 및 보강



박남서
대덕공영 주식회사 대표이사

1. 터널의 보수 및 보강에 대한 이해

터널구조물은 지반의 강도를 이용하여 지반 내에 건설된다는 점에서 타 구조물과 차별성을 가지며 터널의 효과적인 설계와 시공, 보수·보강을 파악하기 위해서는 지반의 거동특성을 이해하는 것이 필요하다. 이러한 지반의 이해를 바탕으로 하여 20세기 들어서 터널분야의 발전은 고대와 근대의 발전에 비견될 정도로 비약적인 도약을 거듭하였다.

터널의 보수 및 보강방법도 최근 안전진단 기술의 발전에 발맞추어 새로운 공법들이 개발되고 있는 실정이나 우리나라에서는 주로 액체 방수법이나 분말 방수법에 의한 표면방수 및 보강콘크리트 덧씌우기 시공 등이 시행되고 있으며 근래에 몇몇 붕괴우려가 있는 터널에 국한하여 본격적인 보강공사가 시행되고 있다. 교량, 댐, 건축 구조물과는 달리 터널의 보수보강은 제한된 공간여건, 사용상의 제한, 라이닝 배면 지반상태 파악의 제한성 등 한계조건으로 인하여 상당한 전문적인 기술능력이 요구된다.

터널구조물의 수명을 몇 년으로 규정하기는 쉽지 않다.

인간의 수명이 의학의 발달에 따라 연장되고 있는 것과 같이 적절한 보수와 보강방법의 적용에 따라 터널구조물의 수명도 차이를 가질수 있을 것이다. 특히 터널이 위치한 지반조건이 양호한지, 시공은 성실하게 하였는지, 유지보수 및 보강공사는 적절한 시기에 적절한 방법으로 시행되었는지 하는데 따라 터널의 수명도 좌우된다.

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

2. 터널 변상의 원인

2.1 터널 변상원인의 구분

변상이라 함은 노후화(Deteriorated), 변형(Deformed), 파괴(Destroyed), 결함(Defective) 등을 포함하는 용어로서 실제 특정 한가지 요인에 의하여 발생하

기 보다는 두가지 이상의 요인이 복합적으로 작용하여 발생하는 경우가 많아 정확한 변상원인을 추정하는데에는 상당한 전문지식이 요구된다.

터널의 변상은 크게 두가지로 구분하는데 하나는 토압, 지하수압, 동상압 등과 같은 지반적 요인에 의하여 발생하는 변상이 있으며, 다른 하나는 터널 설계·시공 중의 인위적인 원인으로 인해 발생하는 변상이 있다. 이러한 요인을 구체적으로 분류하면 표 1과 같다.

표 1. 변상원인의 구분

외적 요인 (지반적)	내적 요인 (인위적)
편토압	굴착방법
소성압	부적절한지보재
이완토압	배수불량
수압	인버트처리불량
동상압	부적절한지반보강법
지진	단면부족
지지력 부족 및 지반침하	아치부배면공동
근접공사	설계 측벽배면공동
동해	라이닝두께부족
열해	부적절 이음출눈불량
연해 (煙害)	재료불량
경과년수	방수불량

2.2 외적 요인에 의한 변상형태

2.2.1 편토압

터널에 작용하는 좌우의 지반압이 현저하게 불균형을 이루는 상태를 편토압상태라 하고 일반적으로 경사지 지형에 터널이 존재하는 경우에 많으며, 이암, 혈암, 편암 및 활동성이 높은 점토광물을 함유한 유동성 지반등에서 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 생길수 있으며 편토압 정감조치를 하지 못한 경우에 편토압에 의한 터널의 변상이 발생할 가능성을 내재하고 있다. 편토압으로 인해 나타나는 현상들은 아래와 같다.

- 상부 사면측 어깨부의 수평균열
- 계곡부 측면에 수평균열 발생
- 상부사면측 라이닝 이음부의 단차발생
- 편토압 시종점 부근에 경사균열 발생
- Crown 중앙부근에 압좌 현상
- 단면축의 회전

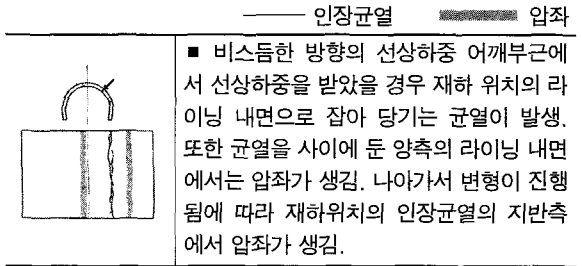


그림 1. 편토압 작용시 터널 변상의 예

2.2.2 이완 토압

이완토압은 풍화에 의한 절리면 결합도의 약화, 사질지반에서 세립 실트분의 유실에 의한 점착력의 저하, 라이닝 배면의 공극이나 두께부족 등으로 인해 발생한다.

특히 차량통행 및 열차운행, 수로터널에서의 수층(Water hammering)등의 작용시 터널 천정부에서 발생 가능성이 높으며, 콘크리트 라이닝에 휨응력을 발생시켜 아치부재로서의 기능이 손실되고 내력을 저하시킬 수 있다.

이완토압에 의한 터널의 변상현상은 다음과 같다.

- Crown 부근에 터널 축방향 균열 발생
- 아치 어깨부에 수평 또는 경사 균열 발생
- Crown 부근의 돌발적인 붕괴

이완토압에 의한 변상형태는 그림 2와 같다.

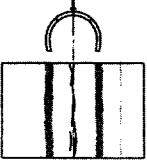
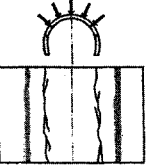
—— 인장균열 ——— 압좌	
	<p>■ 연직방향신상 하중</p> <p>천장부근에서 신상하중을 받았을 경우 천장의 라이닝 내면으로 잡아 당기는 균열이 발생하며 또한 양 어깨부근의 라이닝 내면에서는 압좌가 생긴. 변형이 진행되어 가면 천장의 인장균열의 지반측에서 압좌가 생긴.</p>
	<p>■ 연직분포 하중</p> <p>천장부에서 어깨부에 걸쳐 분포하중이 작용하여 터널의 지압이 큰 경우 어깨 부분에서 인장균열이 발생. 나아가서 변형이 진행되면 SL부근에서 압좌가 생긴.</p>

그림 2. 이완토압 작용시 변상형태

2.2.3 소성압

터널주변 지반의 강도가 토피압에 비하여 작은 경우 혹은 강도열화가 현저하게 발생한 경우에는 터널주변에 생긴 소성영역이 확대되어 터널의 라이닝에 큰 하중으로 작용한다. 이러한 소성압은 팽창성 점토를 다량 함유한 니암, 단층 파쇄대, 열수변질등 변질작용(Alteration)을 받은 변질암중 지반 강도비 ($q_u/r \cdot h$)가 2이하인 지반에서 주로 발생하고 이로인한 변상형태는 그림 3과 같다.

• 측벽 또는 아치부의 수평균열	• 측벽의 압축에 의한 내공폭 축소
• 천정부의 압좌	• 대피소 변상

2.2.4 수 압

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

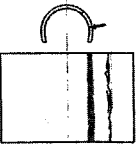
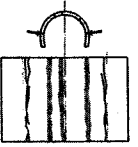
—— 인장균열 ——— 압좌	
	<p>■ 수평방향의 신상하중</p> <p>SL 부근에 신상하중에 걸린 경우 재하위치의 라이닝 내면에서 인장균열이 발생. 그리고 그 바로 위 어깨부근에는 압좌영역이 생기며, 변형이 진행되면 재하위치 인장균열의 지반측에 압좌가 생긴.</p> <p>다만, 하중이 수평방향인 경우엔 특히 인버트의 유무에 따라서 파괴가 진행되는 정도가 다름.</p>
	<p>■ 수평방향의 신상하중(양방향)</p> <p>SL 부근 양쪽에서 신상하중이 작용할 경우 재하개소의 라이닝 내면에서 인장균열이 발생. 또한 변형이 진행되면 어깨부근에서 천장에 걸쳐 광범위하게 압좌가 생겨 천장부의 라이닝이 박리·박락될 우려가 있음.이 경우 인버트의 유무에 따라서 파괴가 진행되는 정도가 다름.</p>

그림 3. 소성압 작용시 터널변상의 형태

2.2.5 동상압(凍上壓)

지반의 동결에 의한 변상으로 외기온도가 낮아 일평균 0℃ 이하의 온도가 -300℃·day 이상인 동결지수를 갖는 한냉지인 경우에 미고결 퇴적층이나 단층대에서 동상 가능성이 있다. 대체적인 판정의 자료는 표 2와 같다. 그림 4는 동결용해의 반복시 나타나는 터널 라이닝의 균열 형태를 보여준다

표 2. 고결지반의 동상성 판정

판정지표	기준값(함유조건)
일축압축강도*	50kg/cm ² 이하
건조밀도	1.5g/cm ³ 이하
포화습윤밀도**	2.0g/cm ³ 이하
함수비	25% 이하
Silt 이하의 함유량	20% 이상

* 가장 유효한 판정지표 ** 건조후 24시간 수침시료


	<p>■ 동결용해의 반복</p> <p>모퉁이 부분, 조인트부의 사균열과 터널진행 방향의 균열 등이 특징임.</p>
---	---

그림 4. 동결 용해 반복시 균열 형태

2.2.6 지반침하

지반침하에 의하여 터널이 변상하는 원인은 지하공동의 형성(화산암중 다공질 분출암 지역, 석회암, 석탄층의 채굴적등)이나 신설터널의 하부교차 등으로 인해 발생한다. 침하와 동반하여 균열은 터널의 종단방향으로 휘어져 켜여지는 상태로 변형이 발생하며 원통형 모양의 균열이 현저하고 시공이음이나 신축이음 외의 부분에도 불규칙하게 발생된다.

그림 5는 터널 침하시 터널 라이닝에 발생하는 균열형태를 보여준다.

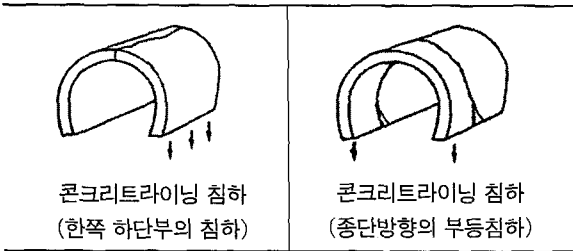


그림 5. 지반침하시 균열형태

2.3 인위적 요인 및 환경적 요인에 의한 변상형태

	<p>■ 화재, 표면가열</p> <p>급격한 온도상승과 건조에 의해 그물모양의 미세한 균열과 함께 가로, 세로로 거의 동일한 간격 및 굵기의 균열이 일어남. 또한 부분적으로 심하게 찢겨서 박락되는 일도 있음.</p>		<p>■ 산·염류의 화학작용</p> <p>콘크리트 표면이 침식되어 대다수의 경우 철근위치에서 균열이 생기며, 일부 콘크리트 표면이 박락되는 일도 있음. 노출된 철근은 진함이 심함.</p>
	<p>■ 부재 양면의 온도·습도 차이</p> <p>외부가 고온 또는 고습, 내부가 저온 또는 건조한 경우 균열은 구속부재의 인근접합부의 저온 또는 건조측에서 발생함. 초기 단계에서 균열은 관통하고 있지 않지만 반복해서 작용함으로 인해 시간이 흐르면 관통하는 일 있음</p>		<p>■ 중성화에 의한 내부철근의 녹, 침입염화물에 의한 내부철근의 녹균열</p> <p>은 철근을 따라 발생. 균열부분에서는 녹이 유출되어 콘크리트 표면을 오염시키는 일이 많다. 철근의 부식이 심할 때에는 콘크리트의 박락도 있음.</p>

그림 6. 사용 및 환경조건에 기인하는 균열형태

사용 및 환경조건에 따라 터널라이닝에 발생하는 균열은(그림 6) 화재나 표면가열로 인한 균열, 산염류의 화학작용, 부재양면의 온도 및 습도차이, 중성화에 의한 내부철근의 녹이나 침입염화물에 의한 내부 철근의 녹 등이 있으며 대체적인 균열형태는 그림 7에 나타난 바와 같다.

	<p>■ 혼화재의 불균질한 분산</p> <p>팽창성인 것과 수축성인 것이 있으며 부분적 또는 전체적으로 발생.</p>
	<p>■ 장시간 배합</p> <p>운반시간이 너무 길때에 발생하는 균열로 그물모양이 됨.</p>

그림 7. 사용 및 환경조건에 따른 균열형태

2.4 시공불량에서 기인하는 균열형태

시공불량에서 기인하는 균열의 형태는 혼화재의 불균질한 분산, 장시간 배합, 다짐불충분, 급속타설, 부적절한 이음처리 등의 요인에 의하여 발생하는 균열의 형태가 다르다(그림 8).



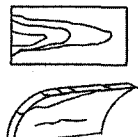
 <p>■ 불충분한 다짐</p>	 <p>■ 급속한 타설 콘크리트의 침강에 의해 발생</p>
 <p>■ 부적당한 이음 처리 콜 조인트가 됨.</p>	

그림 8. 시공불량으로 인한 균열형태

2.5 재료적 성질에서 발생가능한 균열형태

콘크리트의 재료적 성질에 따라 발생하는 균열은 시멘트의 수화열, 알칼리 골재반응, 시멘트 이상응결, 골재속의 진흙, 풍화암과 저품질의 골재, 콘크리트 수축으로 인한 균열등으로 대별할 수 있으며 균열의 형태는 그림 9와 같다.


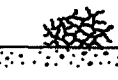

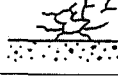
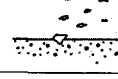
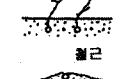
 <p>■ 시멘트 수화열</p>	<p>라이닝 두께가 두꺼운(t=80cm 이상) 단면에서 발생하기 쉬움.</p>
 <p>■ 알칼리 골재반응</p>	<p>가로, 세로 축방향 철근의 위치에 그다지 관계없이 그 재료의 축방향에 거의 평행으로 나타남. 또한 벽·옹벽에서는 방향성이 없는 지도형태로 나타남.</p>
 <p>■ 시멘트 이상응결</p>	<p>짙고 불규칙한 균열이 비교적 조기에 발생.</p>
 <p>■ 골재속의 진흙</p>	<p>콘크리트가 건조됨에 따라 불규칙적인 그물모양의 균열이 발생.</p>
 <p>■ 풍화암과 저품질의 골재</p>	<p>Pop out 상태로 발생</p>
 <p>■ 콘크리트 수축으로 인한 균열</p>	<p>상단철근 상부에서 발생하는 것으로 콘크리트 타설 1~2시간 후 철근을 따라 발생</p>

그림 9. 재료적 성질에서 발생가능한 균열형태

3. 보수 및 보강을 위한 터널의 평가 구분 및 기준

3.1 안전성 평가 구분

터널 보수 및 보강을 할 수 있는 근거인 터널의 상태평가는 안전점검 및 정밀안전진단 지침(건설교통부 고시)에 따라 표 3과 같이 구분한다.

그러나 국내 터널의 2차 라이닝 설계 개념을 살펴보면, 도로터널 및 경부고속철도 터널 구간에서는 도심지 통과 구간을 제외한 약 88% 이상이 배수형터널로 설계되었고, 설계 하중조합으로는 자중이나 혹은 자중 + 상부지반하중(입, 출구 부분)만이 적용되고 있다(한국건설기술연구원, 1998).

따라서 기존의 2차 라이닝 설계 개념은 외부하중을 고려하지 않는 단순구조물로 인식되어 왔음을 알 수 있는데, 최근에는 장기간의 1차 지보재 기능 저하나 라이닝 배면의 잔류수압 등의 연구 결과들을 고려하여 라이닝을 설계하는 경향이 증가하고 있다. 이와 같이 현재 운영중인 터널의 2차 라이닝에서 발생될 수 있는 균열의 원인은 콘크리트의 자체결함과 시공불량 뿐만 아니라 외부하중에 의한 원인도 포함될 수 있으므로, 라이닝에 발생된 균열의 안전진단 항목과 상태평가 기준은 변상원인을 고려하여 판단할 필요가 있으며 지반이 지보재의 주요 구성요소인 점을 인식할 필요가 있다고 판단된다.

표 3. 안전점검 및 정밀안전진단 지침 (1997, 건교부)

구분	상태
A	문제점이 없는 최상의 상태
B	경미한 손상의 양호한 상태
C	보조부재에 손상이 있는 보통의 상태
D	주요부재에 발달된 노후화(콘크리트 전단균열, 침하 등), 긴급한보수, 보강이 필요한 상태로 사용제한 여부를 판단
E	주요부재에 심각한 노후화 또는 단면손실이 발생하였거나 안전성에 위험이 있어 시설물을 즉각 사용금지하고 개축이 필요한 상태

3.2 안정성 평가 기준

터널의 상태평가는 안전점검 및 정밀안전진단 지침과 세부지침(터널편) 및 안전 점검 및 정밀안전진단 실무요령(터널편)을 참고하여 외관조사에 의한 결과를 균열, 누수, 박리, 박락, 손상 및 백태에 관한 평가기준 표 4로 판정한다.

표 4. 안전점검 및 정밀안전진단 평가기준

구분	A	B	C	D	E
균열	0.1mm 미만	0.1mm 이상 0.2mm 미만	0.2mm 이상 0.3mm 미만	0.3mm 이상 0.7mm 미만	0.7mm 이상
누수	누수부위가 없는 상태	누수흔적이 있는 상태	균열사이로 약간의 누수가 있는 상태 골재노출이	균열사이로 누수가 많은 상태	골재사이로 물이 계속 떨어지는 상태
골재노출	골재노출이 없음	골재노출이 약간 발견됨	여러곳에서 발견됨	골재노출상태가 매우 불량함.	골재노출상태가 매우 불량하고 범위가 대단히 넓게 발견됨
백태	백태없음	국부적인 백태	백태현상이 여러곳에서 발견됨	백태현상이 심한 상태	백태현상이 매우 심하고 범위가 매우 넓은 상태
박리	없음	0.5mm 미만	0.5~1.0mm	1.0~25mm	25mm이상이거나 조골재 손실
충분리 박락	없음	경미한 상태	깊이 25mm 미만 또는 직경 150mm 미만	깊이 25mm 이상 또는 직경 150mm 이상	박락이 극심하여 즉시 보수를 요하는 상태
손상	없음	아주 경미한 상태	경미한 손상 (10cm×10cm 미만)	중간손상 (10cm×10cm 이상 30cm×30cm 미만)	극심한 손상 (30cm×30cm 이상)

3.3 국내·외 기관에서 제안하는 콘크리트 허용균열 폭

우리나라 건설교통부와 시설안전기술공단이 1996년에 발간한 안전점검 및 정밀 안전진단 세부지침(터널)에서 제시하는 콘크리트라이닝의 균열 폭에 대한 상태 평가 기준은 3.2절에서 언급한바 있으며 다음 표 5에는 국내외 각 기관에서 제안하는 콘크리트 허용 균열 폭에 대한 기준을 보여주고 있다.

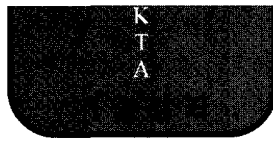
또한 표 6에서는 일본 콘크리트 공학협회에서 제안한 일반 콘크리트 구조물의 보수 여부를 판단하는 균열 폭의 한계와 표 7에서는 링컨터널에서 적용한 콘크리트 균열 폭과 보수·보강방법을 예로서 나타내고 있다.

그러나 제2장에서 전술한 바와 같이 터널 라이닝에서 발생하는 균열은 외부의 원인과 자체의 원인으로 구분할 수 있으며, 그 원인에 따라서 라이닝의 보수·보강방법이 다르게 적용되어 지는데, 상기의 표 4 ~ 표 7에서 제시하고 있는 기준(안) 및 한계치들은 단순히 콘크리트의 균열 폭만으로 한정되어 있어 합리적인 상태평가 및 보수·보강방법을 결정하는 기준으로는 미비함을 알 수 있다.

3.4 터널의 보수 및 보강을 위한 균열의 평가

콘크리트 라이닝에 발생한 균열을 터널의 상태평가를 설정하는 기준으로 삼기 위하여는 운전보안 등 안전성의 관점에서 분류되어야 할 것이다. 이러한 관점에서 볼 때 균열의 폭만으로 기준을 삼는 것은 매우 미흡하며, 특히 터널이 지중구조물이고 지반의 거동은 주변의 변화에 따라 변할 수 있는 개연성이 있는 점을 간과해서는 안될 것이다. 따라서 자연적인 지반은 응력변화 예측이 쉽지 않은 구조물이므로 정성적인 표현이 불가피한 점은 있으나 현장기술자들에게는 정량적인 판정기준이 요망되고 있다.

지반의 활동에 따른 터널의 내공변위를 기준으로 일본 철도 종합 기술연구소에서는 10mm/년 이상일 경우 '위



터널의 보수 및 보강

합', 3~10mm/년 이면 '조만간 위험', 1~3mm/년 이면 '장래위험'의 등급으로 변형속도 기준을 제시하고 있으며 단차균열 및 균열에 대한 기준도 표 8과 같은 판정기준을 제시하고 있다.

이러한 일본철도에서의 기준제시는 현재 우리의 건설

교통부 고시로 제시한 안전점검 및 정밀안전 진단지침(1997)의 균열 평가기준과 큰 차이를 나타내고 있다. 우리의 기준이 매우 미흡한 실정이므로 새로운 기준제시가 필요한 현시점에서 좋은 참고가 될 수 있다고 판단된다.

표 5. 국내·외 각 기관에서 제안하는 콘크리트 허용 균열 폭 (안전진단 실무요령-터널편, 1998)

국가명	종류 및	허용균열폭(mm)	비고
한 국	콘크리트 표준시방서 - 옥내 구조물 - 옥외 구조물	0.4 0.33	대한토목학회
	철근 - 건조한 환경 - 일반환경 - 부식성 환경 - 극심한 부식성 환경	0.006C 0.005C 0.004C 0.0035C	건설교통부 (1996) 본 규정은 10cm 이하에만 적용 가능함
	※참고 C : 최외단 철근의 표면과 콘크리트 표면사이의 콘크리트 최소 두께(mm)		
	도로교 시방서 및 해설(합성보) 항만구조물 원심력 철근 콘크리트 말뚝(Pole) - 설계하중 시, 설계 휨모멘트 작용 시 - 설계하중, 설계 휨모멘트 개방시	0.2 0.2 0.25 0.25	일본도로협회 운수성 JIS A 5309
영 국 (BSI 규정)	- 일반 구조물 - 특히 심한 침식성의 환경	0.3 0.004d	CP-110 ※d: 주철근 피복두께
스웨덴	- 사하중 - 사하중 + 활하중의 0.5배	0.3 0.4	도로교 규정
구 소련 (Chr 규정)	- 비 부식성 - 약 부식성 - 중 부식성 - 강 부식성	0.3 0.2 0.2 0.1	Chr II-B-1-62
미 국 (ACI 규정)	- 건조한 대기중이나 보호층이 있는 경우 - 습한 공기중·흙 중에 있는 경우 - 동결 방지용의약품에 접하는 경우 - 해수, 해수비말에 의해 건습 반복을 받는 경우 - 수밀한 구조부재	0.41 0.33 0.175 0.15 0.1	ACI318-71
유럽공동체 (콘크리트위원회)	- 상당한 침식작용을 받은 구조부재 - 보호공이 있는 보통의 구조부재 - 보호공이 없는 보통의 구조부재 - 현저하게 노출되어있는 부재 - 보호공이 없는 부재 - 현저하게 노출되어 있는 부재	0.1 0.3 0.2 0.1 0.3 0.2	- 지속하중 및 1년 이상 재하된 변동하중 - 지속하중과 변동하중의 불리한 조합
프랑스		0.4	Brocard

표 6. 일본 콘크리트공학협회에서 제안한 보수여부에 관한 균열 폭의 한계

구분	환경*2 기타요인 *1	내구성에서 본 경우			방수에서 본 경우
		엄한 경우	중 간	느슨한 경우	
보수를 필요로하는 균열폭(mm)	대	0.40이상	0.40이상	0.60이상	0.20이상
	중	0.40이상	0.60이상	0.80이상	0.20이상
	소	0.60이상	0.80이상	1.00이상	0.20이상
보수를 필요 로 하지않는 균열폭(mm)	대	0.10이하	0.20이하	0.20이하	0.50이하
	중	0.10이하	0.20이하	0.30이하	0.50이하
	소	0.20이하	0.30이하	0.30이하	0.50이하

주) *1 기타 요인(대, 중, 소)으로는 콘크리트 구조물의 내구성 및 방수성에 미치는 유해성 정도를 나타내고, 아래 요인의 영향을 종합, 판단하여 정한다.
 균열의 길이와 패턴, 철근의 피복 두께, 콘크리트의 표면 피복 유무, 재료 배합, 조인트 등
 *2 주로 철근의 녹 발생조건에 관점에서 본 환경조건

표 7. 미국 링컨터널의 허용 균열 폭과 보수·보강 방법

상태등급 구분	가능균열	A	B	C
균열 폭	· 1/16인치 미만 (1.59mm미만)	· 1/16 ~1/8인치 (1.59 ~3.18mm)	· 1/8 ~1/4인치 (3.18 ~6.35mm)	· 1/4인치 이상 (6.35mm 이상)
비 고	없 음	· 보수·보강 - 에폭시 주입 - 주입간격 15cm	· 보수·보강 - 에폭시 주입 - 주입간격 25cm - 균열부위는 밀봉	· 보수·보강 - 에폭시 주입 - 주입간격은 균열 깊이 - 균열부위는 흠파기 후면 정리

주) 1) 링컨터널은 Segment라이닝 위에 도로로 활용하기 위한 별도의 콘크리트 라이닝 및 슬래브를 시공하였음.
 2) 슬래브는 H-형강과 철망으로 보강된 콘크리트 구조물임.
 3) 균열보수·보강은 슬래브, 벽체 및 인버트에 적용.

표 8. 균열 및 단차균열에 대한 건전도 판정

균열 및 단차균열	연 장		
	10m 이상	5~10m	5m 이하
5mm 이상	위험	조만간 위험	조만간 위험
3~5mm	조만간 위험	조만간 위험	장래 위험

4. 터널 보수 및 보강공법

4.1 보수 및 보강의 필요성

터널의 보수는 터널이 변상되었거나 변상가능성이 있어서 터널의 기능저하 또는 안전상의 문제가 예상되는 경우 실시하며 터널의 보강은 터널의 내하력 저하시 설계목적에 맞도록 기능을 회복시키거나 증가시킬 필요가 있는 경우에 실시한다.

4.2 보수 대책

4.2.1 노후화대책

터널 콘크리트 라이닝의 재료가 노화되어 보수를 요하는 터널로서 철근부식 및 균열, 박리 등으로 일반적인 노후화 현상이 발생하였을 경우에 현상별로 원인에 따라 대책을 강구하며 대체적인 내용은 표 9와 같다.

4.2.2 누수보수대책

터널에서의 누수는 지반내에 있는 토립자의 유출을 동반하여 터널배면의 공동을 형성, 이완토압의 증가, 라이닝 콘크리트의 열화 촉진, 동해 가능성의 증대 등 터널 안전성을 저하시킬 수 있으므로 누수대책이 강구되어야 한다.

누수대책을 누수상태별 요인별로 분류하면 표 10과 같다.

4.2.3 동해대책

터널의 환경조건에 따라 동해대책이 필요하다. 특히 해발고도가 높은 지역에 위치하는 철도터널에서 많이 발생하는 경향을 보이는데 단열재의 사용이 기본이 되며 경우에 따라 가열공법이 사용되기도 한다. (표 11 참조)

4.2.4 균열보수 대책

콘크리트 라이닝의 균열보수는 일반 콘크리트 구조물의 경우와 같이 표면처리 공법, 충전공법, 도포공법 등으

로 구분할 수 있으며 균열의 원인, 깊이, 길이, 형태와 환경조건을 고려하여 콘크리트 라이닝의 성능을 유지할 수 있도록 표 12와 같이 목적에 적합하게 시행한다.

표 9. 노후화 현상별 원인과 대책

노후화 현상	원인	구분	영향인자	대책
철근 부식	염해	내적요인	콘크리트 내부 허용Cl량초과	해사세척에 의한 Cl 제거 표면을 기밀성 도료로 도장
		외적요인	제설제살포 또는 해안환경에 의한 염화물 침입	
중성화	외적요인	내적요인	콘크리트 W/C, 공극이 큼	적정한 W/C 선정 기밀성 도료로 표면도장
		외적요인	대기의 CO ₂ 농도증가, 중성화가 철근 깊이까지 도달	
균열, 박리	알칼리 골재반응	내적요인	알칼리 반응성 골재를 사용할때 시멘트 중의 K ₂ O가 다량 있음	반응성 골재의 사용제한, 저알칼리성 시멘트를 사용 콘크리트를 건조상태로 보존, 수밀성 도장
		외적요인	콘크리트가습윤상태에 있음	
건조 수축	외적요인	내적요인	단위수량이 높은 시멘트 사용	단위수량이 적은 무수축 시멘트 사용초기양생을 충분히 실시
		외적요인	콘크리트의 건조속도가 빠름	

표 10. 누수 대책공의 선정(누수의 동결이 없는 경우)

요인	누수상태	선심						면심		비고
		누수량	소량	다량	소량	다량	유	무		
분류	내공단면여유	유	무	유	무	유	무	유	무	
선상 대책 공법	도수공법	○	-	○	-	△	-	△	-	
	흙파기공법	-	○	○	○	-	○	-	○	· U, V 커트 등 · 면상대책공법의 전처리로 서도 시행
	지수공법	△	△	-	-	-	-	-	-	· 누수량이 물방울 형성 정도이고 범위가 한정되는 경우 적용 가능
면상 대책 공법	숏크리트공법	-	-	-	-	○	-	○	-	· 철망, 앵커 및 도수공의 병용 필요
	도포공법	-	-	-	-	△	△	-	-	· 누수 정도가 경미할 때에만 적용
	방수판	-	-	-	-	-	-	-	○	
	방수시트	-	-	-	-	○	-	○	-	· 내부라이닝 개축 등을 행할 경우
	배면주입공법	-	-	○	○	-	-	○	○	· 토피가 작고 지표수와 우수가 터널배면공동을 통하여 직접 터널내로유입하는 경우
	수위저하공법	-	-	○	○	-	-	○	○	· 지하수위가 높은 상태에서 용수나 열차 하중의 반복 하중에 의한 지반재료의 배출

주) ○ : 적용 가능한 공법 △ : 경우에 따라 적용할 수 있는 공법

표 11. 동해대책공의 선정

선정요인	누수 동결상태	선심				면심		비고
		단면의 여유	유	무	유	무		
단열 공법	흙파기		○*	○**				* : 한냉정도가 작은 경우에 유효 ** : 단열재 폭이 U흙의 폭 이상으로 필요
	단열재삽입공법							
	표면단열 처리공법		○			○		
	이중라이닝 단열처리공법					○	○	라이닝 강화가 필요한 경우, 개축과 병용
가열공법(전열난방기, 열관)			○					한냉이 심하고 국부적인 누수경우 (전원이 필요)

터널의 보수 및 보강

표 12. 균열보수 공법의 분류

보수목적	균열현상·원인		균열폭 (mm)	보수공법				
				표면처리공법	주입공법	충진공법	그 밖의 공법	
침투성방수제	도포공법	기타						
방수성	철근이 부식되지 않은 경우	균열폭의 변동이 작다	0.2 이하	○	△	○	○	
		균열폭의 변동이 크다	0.2~1.0	△	○		○	
내구성	철근이 부식되지 않은 경우	균열폭의 변동이 적다	0.2 이하	○	△	△		
		균열폭의 변동이 크다	0.2~1.0	△	○	○		
	1.0 이상	△	○	○				
	0.2 이하	△	△	△				
	0.2~1.0	△	○	○				
1.0 이상	△	○						
철근부식		-			○			
열 해		-					●	
반응성골재		-					●	

※ 1. 균열폭 3.0mm 이상의 균열은 구조적인 결함을 수반하는 일이 많으므로 여기에 표시하는 보수공법 뿐만 아니라 구조내력의 보강을 포함하여 실시하는 일이 보통이다.
 2. ○ 적당 ● 연구단계 △ 조건에 따라 적당

4.3 터널보강공법

터널보강의 목적은 터널 주변지반의 전단강도를 강화하여 터널의 안정성을 증대시키기 위하여 시행하는 것과 콘크리트 라이닝의 내하력을 키우기 위한 라이닝 보강공

으로 대별된다.

보강공법 적용시에는 터널 변상 원인에 따른 대책공법을 적용하여야 하므로 지반의 상태를 파악하고 그 원인을 규명하는 것이 매우 중요하다. 따라서 터널 보강에서는 경험이 있는 지반기술자의 역할이 매우 중요하다고 할 수 있다.

표 13. 변상원인과 보강공법

대책공법	변상원인		지반이완에 의한 연직압	수압	지반 침하	지반 활동	지진	비 고
	소성압	편압 사면활동						
보강판, 철망 배면주입공	△	△	○	△	△	△	○	
라이닝 보강공	○	○	△	△	△	○	○	큰 변위가 예상될 때, 강섬유 보강 슛크리트(SFRC)사용
스프리트 공	○	○	△	△	×	○	△	
강지보재 보강(Saddle)	○	○	○	△	●	○	○	
록볼트 보강공	●	●	●	△	△	○	○	
다짐 콘크리트 공	×	○	×	×	×	△	△	
스트러트 공	○	○	×	△	△	○	△	
인버트 콘크리트 설치	○	○	×	△	○	○	○	
지반 주입공	×	△	△	△	△	×	○	
배수공 개량 또는 신설	△	△	△	●*	×	○	△	※도수공개량,신설에 의한 배수처리 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 않은공법

표 13은 터널의 변상 원인이 될 수 있는 소성압, 편도압, 사면활동, 지반이완에 의한 연직압, 수압, 지반침하, 지반활동, 지진등을 고려한 대책공법을 제시한 것으로서 일본철도에서는 표준화하는 단계까지 발전하고 있는 점이 주목할 만한 점이라고 판단된다.

5. 결론

지반내에 건설된 터널 구조물은 대부분 굴착면이 콘크리트 라이닝으로 인하여 관찰되기 어려우며 지반자체가 가장 중요한 구조적 부재이므로 변상의 원인을 추정하고 대책을 결정하는 방법이 일반 토목구조물과 차이가 있다.

따라서 보수 및 보강공법의 선정에는 시공상 문제점이나 설계상 문제점 외에도 외적요인인 지형, 지반특성, 지질구조, 지하수 상태의 파악이 중요하고 특히 지반이 완전탄성체가 아닌 점성, 소성을 갖는 점과 지보재의 열화등을 감안할 때 변상의 진행성도 보수 및 보강의 정도를 결정하는 상태평가에서 고려하여야 할 중요한 점이라 판단된다.

특히 터널내에서의 보수 및 보강은 공용중인 터널에서 시간적, 공간적 제한을 가지고 있으며 구조물한계, 건축한계, 차량한계 등 내공단면 확보의 기본요건을 만족시켜

야 하는 제약이 뒤 따르므로 이에 알맞는 공법의 선정이 중요한 요소이다.

우리나라 터널의 보수 및 보강체계를 정립하기 위하여는 일반 콘크리트 구조물에 적용가능한 상태평가 기준의 재정립이 요구되고 있으며 보수 및 보강 설계에서도 유사 조건일 경우 유사한 설계 패턴의 정립도 필요하다고 판단된다.

터널의 보수 및 보강은 지반이 주지보재임을 인식하여 안전진단기술의 향상과 정형화되고 현실성있는 상태평가 기준의 정립과 다양한 보수 및 보강기술의 개발이 뒤따라야 할 것이다.

참고문헌

1. 박남서(1999) "터널의 변상원인과 보수 및 보강", 터널기술 Vol 1, 대한터널협회 pp59~66
2. 건설교통부(1999) "터널표준시방서" pp144~154
3. (사)철도종합기술연구소(1999) "변상터널 대책공 설계 매뉴얼" pp208~212, pp58~63
4. (사)철도종합기술연구소(1990) "터널 보수 보강 매뉴얼" pp70~72
5. 한국건설기술연구원(1998) "터널의 안전진단 체계정립 및 균열자동추정 시스템 개발(Ⅰ)" pp47~48
6. 시설안전기술공단(2000) "터널의 보수 및 보강", "안전점검 과정 교육교재(Ⅱ)" pp437~503