

국내외 터널구조물의 변상에 관한 조사 및 분석

Study on Investigation and Analysis about Damage of Tunnels



배규진*¹
Bae, Gyu-Jin



이성원*²
Lee, Sung-Won



조만섭*³
Cho, Mahn-Sup



이광호*³
Lee, Kwang-Ho

Abstract

In this study, we carried out investigation and analysis on damages in tunnels on order to provide the basic information for the safety assessment of tunnels and to minimize the potential damage of the same kind as investigated. The frequencies of occurrence in terms of 4 items, i.e., service life interval, type of the damage, cause of the damage, and geological condition, were examined and summarized based on 44 foreign and domestic cases of tunnel damages. Also, we carried out a survey research of which the content included 28 questions on the tunnel safety assessment. The answers collected from domestic experts in tunneling suggested that the most probable cause of the tunnel damages was cracking in tunnels at 42~58%. They also suggested that the poor construction work strongly caused the damages. Therefore, to ensure tunnel safety, high quality of construction should be maintained as examined. The types of damage and their extent of influence on the overall tunnel safety are of practical importance to be used in the artificial intelligent system for tunnel safety assessment.

Keywords : Tunnel damage, Damage reason and type, Safety assessment, Survey research

*¹ 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 연구부장

*² 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원

*³ 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원

요 지

본 연구에서는 안전진단에 관한 기본적 정보를 제공하고 유사한 변상의 발생을 최소화하기 위한 목적으로 터널의 변상사례들에 대한 조사와 분석을 수행하였다. 국내외 터널의 44개 변상사례에 대하여 4개 항목 즉, 내용수명, 변상유형 및 원인, 지질상태 등에 관한 빈도 수를 분석하였다. 이와 더불어 국내 터널분야의 전문가들로부터 안전진단 평가에 관련하여 총 28개 항목에 대한 설문조사를 수행하였다. 본 연구의 결과는 터널의 변상항목 중에는 균열에 의한 변상이 42~58% 정도로 가장 높은 비율을 나타냈다. 변상 원인으로 는 시공불량에 의한 영향이 높은 비율을 나타내고 있으므로 시공품질의 확보가 중요한 요인으로 사료된다. 설문조사 결과로부터 경직된 평가기준의 완화를 지적하였다. 그리고 각 항목별 중요도를 제시함으로써 인공지능기법 등을 안전진단분야에 적용하기 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

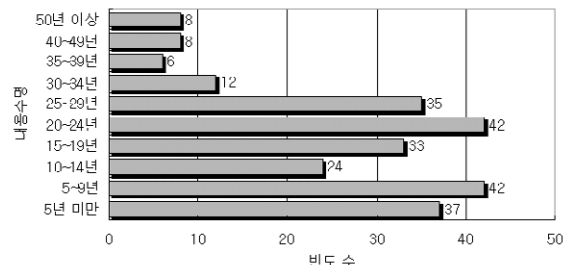
주요어 : 터널변상, 변상원인 및 유형, 안전진단, 설문조사

1. 서언

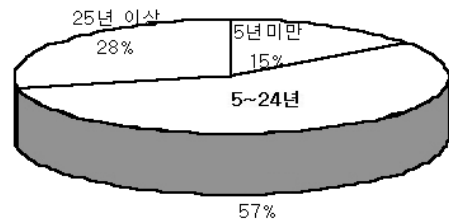
국내의 지하철, 도로터널 등 기존 터널구조물들에서 노후화에 따른 콘크리트 라이닝의 균열, 손상 및 누수 등으로 인해 터널구조물 자체와 사용의 안전성 그리고 인접구조물의 안전성에 대한 많은 문제가 대두되고 있다. 일본의 경우에는 터널구조물의 유지관리를 수행하고 있는 기관들을 중심으로 터널의 종류별 변상상태 분석 및 그 원인규명 등에 대한 분석을 활발하게 수행하고 있으며(原田康明, 1984: 日本 JTA 保守管理委員會, 1994 aab, 1998 : 鐵道總合技術研究所, 1990), 이를 근간으로 하여 각계의 관련분야에서 중요한 자료로 활용하고 있다. 국내에서도 이러한 터널변상의 종류와 원인 등에 대한 분석이 요구되고는 있으나 체계적인 조사 및 분석기법이 정립되어 있지 않기 때문에 정량화된 분석을 수행할 수 없었다. 따라서 본 연구에서는 국외의 운행중인 터널에 대하여 붕괴 및 주요 변상이 발생된 사례들에 대상으로 내용수명, 변상유형, 변상원인, 주변지반 종류 등 4개항의 조사항목을 선정하여 분석을 수행하였다. 또한 국내에서 수행된 안전진단 결과들을 대상으로 상기의 4개항 이외에 변상종류별 빈도 수 등을 추가로 분석하였다. 이와 더불어 터널의 안전진단 체계, 상태평가의 항목 및 기준, 안전성평가 방안 등 총 28문항에 대한 설문조사를 수행하였다. 이상과

같이 터널의 변상사례 분석 및 설문자료 분석이 다소 미흡하기는 하나 이런 결과를 제시함으로써 국내의 터널 안전진단 평가 기술력을 향상시키기 위한 기초자료가 될 수 있을 것으로 사료된다.

2. 문헌조사 및 변상사례 분석 개요



(a) JTA보고자료



(b) A.Haack 분류기준

그림 1. 일본 도로터널의 내용수명별 변상 경향

2.1 일본의 도로 및 철도터널 사례조사

2.1.1 내용 수명별 분석

그림 1(a)에는 JTA(保守管理委員會(1994a, 1994b)에서 발표한 “도로터널의 변상 발생까지의 사용연수 도수분포”를 나타내었고, 준공 초기의 0~10년과 20~30년 사이에 발생한 변상 및 붕괴의 빈도 수가 가장 많은 것으로 나타났다. 이 결과를 A. Haack(1995 & 1998)가 제시한 내용수명으로 재분류하면 그림 1(b)에서 나타낸 바와 같이 5~25년 사이에 내용수명별 변상 및 붕괴 발생비율은 약 57.1%로 가장 높게 나타났으며, 준공 초기의 0~5년 사이에 발생하는 비율 또한 약 15.0%로서 5년 간이라는 짧은 기간임을 감안한다면 매우 높은 것으로 볼 수 있다. 이상과 같이 터널의 변상은 시공 과정에서부터 발생한 미미한 원인들이 시간에 따른 노후화 및 자연적, 인위적 원인에 의해 대규모의 형태로 변화하는 것임을 알 수 있다.

2.1.2 변상의 원인별 분석

日本トンネル技術協會(1981)에서는 일본의 철도터널과 도로터널의 212개를 대상으로 설문조사를 수행하였고, 그림 2와 같이 변상 및 붕괴의 원인에 대한 분포비율을 조사하였다. 일본 철도터널에서도 국외자료의 경우와 유사하게 터널의 변상 및 붕괴원인들 중 자연적 발생 원인이 전체의 약 62.4%로 인위적 발생 원인(약 37.6%)보다 많은 분포를 나타내고 있으며, 또한 자연적 원인들 중 토압의 증가가 약 20.3%로 가장 많은 비율을 차지하고 있어 터널의 변상이나 붕괴를 일으키는 주요 원인을 알

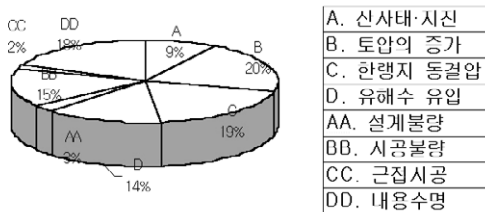


그림 2. 일본 철도터널 및 도로터널의 변상 및 붕괴원인별 분포비율

수 있다. 인위적 발생 원인들 중에서는 터널의 내용수명(약 18.4%)과 재료, 시공불량(약 14.6%)로 높은 비율을 차지하고 있으나 설계불량이나 근접시공에 의한 변상 및 붕괴의 발생은 비교적 낮은 비율을 나타내고 있다.

2.2 변상사례 분석 개요

2.2.1 국내외 변상사례 분석항목 선정

① 내용수명별 분석: 내용수명(주요 변상 및 붕괴가 발생할 때까지의 경과 년 수 혹은 안전진단 수행까지의 경과 년 수)별 구분은 A. Haack(1995)에 의해 제시된 내용수명별 변상의 유형들(표 1 참조)과 또한 JTA(保守管理委員會(1981)에서 발표한 변상 발생까지의 터널 내용수명을 참조하여 결정하였다. 이와 같이 상기의 두 가지 경우를 상호 조합하여 0~5년, 5~25년, 25~70년, 기타의 4단계로 구분하였다.

② 터널의 변상사례유형 분석: 터널에서의 주요 변상사례유형은 가) 상태조사(라이닝의 균열, 박리, 괴상박락, 누수 등), 나) 내구성조사(내공변형, 노반변상, 입출구부 부등침하, 지반붕괴 등), 다) 기타 등과 같이 구분하여 분석을 수행하였다.

③ 원인별 분석: 터널의 주요 변상 및 붕괴를 일으키는 원인들은 자연적 외력으로부터 발생하는 경우들과 인위적 오류로부터 발생하는 경우들로 대분하여 분석을 수행

표 1. 터널 재령기간에 따른 변상 유형

내용수명	변상 및 붕괴의 형태
0 - 5년	보증기간
5 - 25년	시공불량에 의한 변상의 발생 (동상, 화학성분의 지하수 등)
50 - 70년	설계불량 및 구조해석 불량 (팽창압, 지하수위, 배면공동 형성 등)
80년 이상	장기간의 터널 사용에 따른 변상 (벽돌 쪼인트 부식, 라이닝의 부분 파손)과 주변지반 및 구조물의 성질 그리고 시공품질이 터널수명에 기인

하였다.

④ 주변지반별 분석: 지반의 종류와 주요 변상 및 붕괴 발생 빈도와와의 관계를 조사하고, 추가로 유형과의 상관성을 분석하였다.

⑤ 변상유형 빈도 수 분석: 국내터널의 안전진단 결과들을 대상으로 변상의 유형들에 대한 빈도 수를 재래식터널공법(ASSM) 및 NATM개념 터널에 따라 각각 조사하여 보았다.

2.2.2 자료수집 및 분석방법

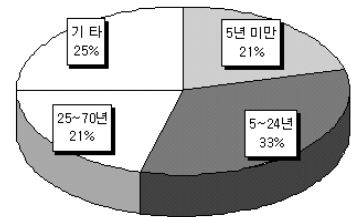
국내외 터널에 대한 주요 변상사례 분석을 수행하기 위하여 먼저, 국외의 사례(이하 국외자료라 칭함)는 단순 나열식 사고사례 조사자료(시설안전기술공단, 1996 & 1997)를 근거로 분석하였는데, 일본(22 개)과 독일(2 개)의 자료로 구성되어 있다. 그리고 국내의 사례(이하 국내자료라 칭함)는 여러 관련기관에서 제공한 약 20 개의 안전진단 결과를 대상으로 선정하였고, 전체 44 개의 국내외 자료들을 대상으로 분석을 수행하였다. 참고로 국외의 분석자료는 대부분 이미 대규모 변상이나 붕괴 등이 발생된 사례들을 수집한 것이나, 국내의 분석자료는 1995년에 제정된 “시설물의 안전관리에 관한 특별법”에 의거하여 터널에 대한 안전진단을 수행한 결과들로서 서로 상이한 특성을 지니고 있으므로 이러한 분석자료의 성격을 충분히 고려한 후 본 연구의 결과들을 이해해야 할 것이다.

3. 변상 및 붕괴사례 분석결과

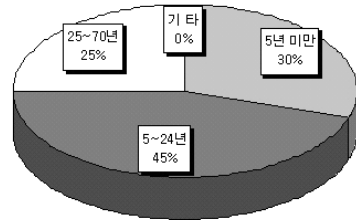
3.1 내용수명별 분석

본 연구에서는 터널의 내용수명에 따른 주요 발생빈도를 조사하였고, 그림 3에 그 결과를 도시하여 보았다.

그림 3(a)의 국외자료 조사 결과를 살펴보면 5~25년 정도 경과된 터널들이 약 33.3%로 주요 변상 및 붕괴의



(a) 국외사례



(b) 국내사례

그림 3. 터널의 내용수명별 변상사례 발생 비율

발생 비율이 높게 나타나고 있는데, A.Haack가 제안한 표 1에 따르면 주로 시공불량에 의한 경우로 평가할 수 있어 인위적 원인이 많은 영향을 미치고 있는 것으로 판단된다. 그림 3(b)의 국내자료는 국외자료와 유사한 경향을 보이고 있지만, 분석자료의 특성상 분석에 사용된 대상자료들을 내용수명에 따라서 구분한 정도로 의미를 부여할 수 있다.

3.2 변상유형별 분석

터널의 변상 및 붕괴유형은 콘크리트 라이닝에 발생하는 것과 터널의 구조적 안정성에 문제가 되는 것으로 구분할 수 있는데, 이러한 유형은 터널의 전 연장에서 복합적으로 나타나게 되므로 해당 터널에서 가장 문제가 되는 변상이나 붕괴의 유형만을 선별하여 조사를 수행하였다. 그리고 한 현장에서 2 가지 이상의 주요 유형이 복합적으로 발생하는 경우 각각의 발생 유형을 모두 기재하여 유형별 발생 빈도 수를 조사하였으며, 그 결과를 그림 4에 나타내었다.

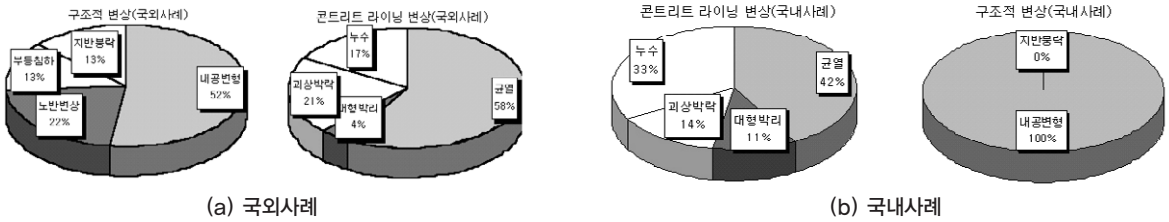


그림 4. 터널 변상유형별 분석 결과

3.2.1 국외자료 분석결과

그림 4(a)에서 보는 바와 같이 콘크리트 라이닝에서 나타나는 대표적인 4개 유형들 중에서 균열발생이 전체 유형의 약 58% 정도로 가장 높은 빈도 수를 나타내었다. 균열은 다른 변상유형들과 복합적으로 발생하고 있으며, 해당 터널의 사용성과 내구성에 악영향을 미칠 수 있는 규모의 종방향 균열과, 단차를 포함하는 경우도 있다. 또한 큰 규모의 종방향 균열이 발생된 위치는 대부분 Spring Line 이상의 Arch 구간으로 주로 인장균열 및 압좌현상을 수반하고 있다.

터널의 구조적 변상에 있어서는 내공축소에 의한 내공 변형이 전체 유형의 약 52% 정도로 높은 빈도 수를 나타내고 있으며, 대부분 큰 규모의 종방향 균열을 수반하고 있고, 내공변형이 발생한 사례는 대부분 사면지형 및 사면 활동, 팽창성 지반, 파쇄대 지반 등에서 주로 나타나는 현상으로 입출구 부분에서 국부적으로 많이 발생하고 있다.

3.2.2 국내자료 분석결과

국내의 경우도 그림 4(b)에 나타난 바와 같이 균열발생이 전체 유형의 약 42% 정도로 가장 높은 빈도 수를 나타내었다. 본 항목의 조사대상 균열은 단독 유형으로서 균열의 상태평가시 “C~E등급”인 하위등급의 종방향 균열, 종방향 + 사방향, 종방향 + 횡방향 균열이며, 단차를 포함하는 경우도 있다. 참고로 그림 5에는 국내자료를 대상으로 균열의 형상별 빈도 수(개 소)를 백분율로 나타내었

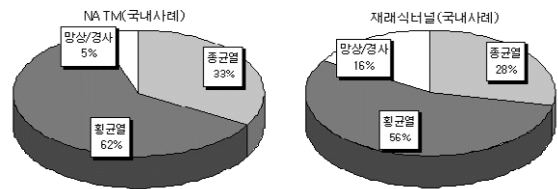


그림 5. NATM개념 및 재래식터널공법별 균열의 형상에 대한 빈도 수

고, 두 굴착공법 모두 횡균열이 50% 이상으로 가장 많이 나타났다.

그리고 지반하중이 직접 라이닝에 작용하는 ASSM공법의 경우 망상/경사 방향의 균열이 NATM개념의 터널 공법에 비해 약 10% 이상 많은 경향을 나타내고 있다.

균열이 발생한 위치는 국외의 경우와 유사하지만, 주로 콘크리트 특성에 기인한 인장균열을 수반하고 있으며, 또한 ASSM 공법과 NATM 개념의 터널방식에 따라 균열의 유형이 다소 차이를 보이고 있는데 아래의 “3.2.3 변상유형과 내용수명”과의 관계에서 설명하고 있다.

3.2.3 변상유형과 내용수명과의 관계

국내자료를 분석한 결과, 그림 6에 나타난 바와 같이 내용수명이 적은 NATM개념 터널의 경우(0~25년)에는 대부분 균열에 의한 변상이 높은 빈도를 나타내었고, 누수에 의한 변상은 비교적 낮은 빈도를 보이고 있다. 그러나 내용수명이 많은 경우(ASSM공법)에는 변상 및 붕괴의 유형이 다양하게 분포하는데 특히 누수와 박리 및 과상박락에 의한 변상이 더 많은 빈도를 나타내고 있다.

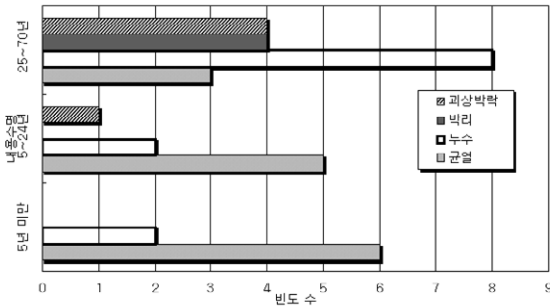


그림 6. 변상유형과 내용수명과의 관계

그 원인은 방수처리 방법(Waterproof)에 기인하는 것으로 사료되며, 또한 누수에 의한 열화와 바리, 박락 등이 비교적 많이 나타나고 있다. 참고로 내용수명이 적은 경우 종방향 균열이 Crown 부분에 많이 발생하게 되는데, 일반적으로 시공Joint 부분에서 연결이 어긋난 형상을 보이며 특히 반원형의 균열을 수반하는 경향이 많다. 이러한 현상은 외력에 의한 영향보다는 기 타설된 콘크리트와의 온도 차이와 수축(Shrinkage), 두께 부족 등의 영향으로 조사되었다.

표 2. 터널의 변상유형과 원인과의 상관성 분석을 위한 조사항목

외적 발생원인	A	사면지형에 의한 편압
	B	풍화암, 팽창성 지반 및 파쇄대의 지반압
	C	입출구부의 동상압 및 동결융해
	D	지하수 유입 및 지하수압
	E	기초부등침하(하천측 세굴, 지지력 부족)
인위적 발생원인	AA	시공불량(배면공동, 두께부족)
	BB	터널내 사고(차량화재, 충돌 등)
	CC	터널 Invert 미설치
	DD	상부의 성토, 하부의 절토 및 근접 시공
	EE	누수

3.3 변상원인별 분석

운영 중 터널의 변상원인을 규명하기 위하여 현재 국내 외에서 많은 연구가 수행되고 있는데, 변상원인을 외력에 의한 것, 설계·시공불량에 의한 것, 이를 다시 내적원인과 외적원인으로 구분하고 있다(日本トンネル技術協會, 1981; 시설안전기술공단, 1996 & 1997). 이상의 문헌 조사 결과로부터 표 2와 같이 8가지 원인으로 분류하여 국내외 변상사례에 유형과 원인에 대한 분석을 수행하였고, 그 결과는 그림 7에 나타내었다.

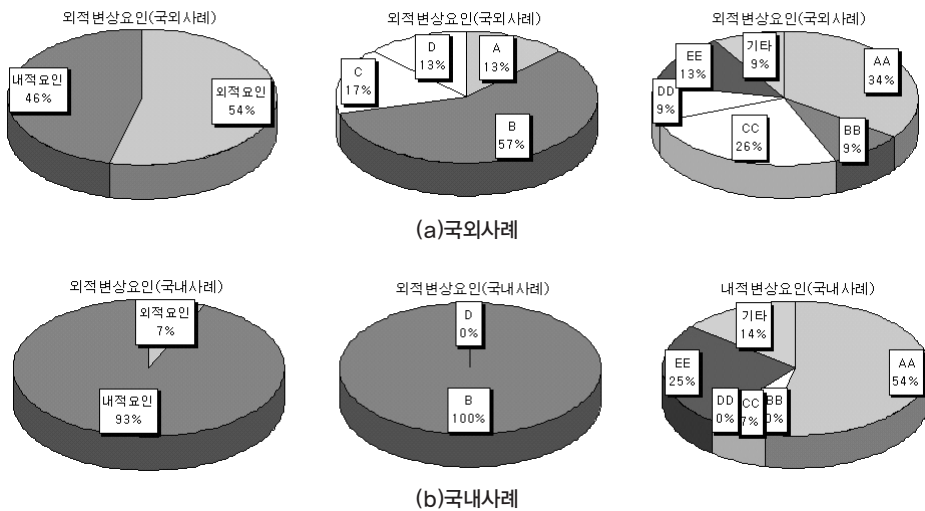


그림 7. 터널 변상원인별 분석 결과

3.3.1 국외자료 분석결과

국외자료로부터 변상 및 붕괴의 원인을 조사한 결과, 그림 7(a)에 나타난 바와 같이 전체 원인 중 외적원인은 약 54% 이고, 인위적으로 발생한 원인이 약 46%를 나타내고 있어 다각적인 지반조사에 의한 장기적 안정성이 필요함을 알 수 있다.

외적원인들 중에서는 풍화된 지반, 연약지반, 팽창성 지반 및 파쇄대 구간에서의 지반압이 약 57% 정도로서 터널의 변상 및 붕괴에 가장 큰 영향을 미치고 있으며, 인

위적 원인들 중에는 라이닝의 시공불량이 약 34% 정도로 작용하고 있다.

3.3.2 국내자료 분석결과

그림 7(b) 국내자료의 변상원인에 따른 분포비율을 조사한 결과, 외적원인은 약 7%에 불과하고, 인위적 원인이 93%로 대부분을 차지하고 있으며, 인위적 원인들 중 라이닝의 시공불량에 의한 원인이 54%로 가장 많은 분포를 나타내고 있다. 이러한 경향은 분석자료의 특성과 국내

표 3. 국내외 변상 및 붕괴사례에 의한 원인별 변상발생 유형

원 인		변상 유형
자 연 적 발 생 원 인	사면지형에 의한 편압	1. Crown과 Spring Line 사이의 수평균열 : 단차(압출) 및 상부 사면측의 단면축소 발생 2. 편압에 의한 Spring Line의 내공 변형(축소) 3. 갱문의 축방향 전도 4. 터널 종방향 좌표의 전체적인 위치(궤도) 이동
	풍화·연약·팽창성 지반 및 파쇄대	1. Crown 부분의 라이닝 내벽 압축에 의한 압좌·박락 발생 2. Invert 미설치 부분의 Heaving 3. 상부 지반의 균열
	입출구부의 동상압 및 동결·융해	1. Spring Line의 내공 변형(축소, 돌출) 2. Crown 부분의 축방향 균열
	지하수 유입 및 지하수압	1. 입출구부의 지표수 유입 : 라이닝 배면을 따라 유도된 지하수가 균열이나 배면공동, 취약부에서 집중적으로 누수(우기시 누수량이 급증)
	하천측 세굴 및 지지력 부족 의한 기초 침하	1. 부등침하 2. Crown과 Spring Line사이의 수평균열 3. 상부 지반의 균열
	기 타	1. 단층파쇄대 : 측벽 돌출(진행성)
인 위 적 발 생 원 인	라이닝 시공 불량	1. Crown부분의 배면공동 : 측벽 내공축소에 수반된 균열 및 박락(압좌), 지반이완에 의한 암반 붕락, 공동부분의 지반 침하, Crown부분의 축방향 균열 2. 라이닝의 두께 부족 : 특이한 변상형태가 없음.
	터널내 차량 사고	1. 라이닝의 손상 및 열화
	인버트 미설치	1. 노반의 Heaving
	상부 성토·하부 절토	1. 부등 침하(사면지형 하부 절토) 2. Crown과 Spring Line사이의 수평균열(사면지형 상부 성토)
	누 수	1. 시공 Joint에서의 누수가 지배적
기 타	1. 콘크리트 수화작용 : 종방향, 횡방향, 사방향 및 망상균열로 복잡(입출구부), 단일 종방향 균열(중앙부) 2. 지반 초기응력 : Crown 부분의 종방향 균열 3. 온도차 및 타설압 : Crown 부분의 시공Joint에서 반원형 균열이 발생 4. Cold Joint에서 단차발생 등	

안전진단의 기술수준으로부터 설명할 수 있는데 즉, 국내 자료의 경우 이미 기술한 바와 같이 주로 안전진단 자료만을 대상으로 분석할 수밖에 없었기 때문에 대규모 변상이나 터널붕괴 등의 외적원인에 대한 분석이 불가능하였다. 또한 안전진단에 관한 기술축적이 국외에 비하여 미흡하기 때문에 터널의 변상 혹은 붕괴에 대한 원인파악이 다소 부족한 것으로 사료된다.

3.3.3 변상원인과 유형과의 관계

터널의 점검 및 진단 목적 중에서 가장 중요한 과정은 터널의 내부와 외부에서 발생하는 각종 변상 및 붕괴를 예상, 감지하고 이에 대한 원인들을 추정하여 적합한 대책을 수립하는 것이다. 따라서 본 연구에서는 국내외 터널의 변상 및 붕괴사례에 대한 분석으로부터 원인과 유형과의 관계를 규명하였고, 분석결과를 표 3에 나타내었다.

터널의 변상 및 붕괴의 유형으로부터 그 원인을 추정하기 위해서는 자연적 발생 원인뿐만 아니라 인위적 발생 원인도 복합적으로 고려해야 하므로 표 3에서 제공하고 있는 결과들은 터널의 점검 및 진단시 객관적인 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료되며, 보다 정확한 원인추정을 위해서는 변상의 진행성 여부 등과 같은 정밀한 조사가 병행되어야 할 것이다.

3.4 주변지반에 따른 분석

터널 주변의 지반특성과 변상 및 붕괴의 원인과의 관계를 규명하기 위하여 국내의 자료로부터 6 가지의 지반특성을 구분하였으나, 국내자료의 경우 주변 지반에 대한 조사가 상당수 누락되어있어 분석이 불가능하였기 때문에 그림 8에는 국외자료에 한정하여 결과를 나타내었다.

국외자료에 한정된 지반특성별 분포를 조사한 결과, 유문암, 안산암, 풍화된 화강암 등의 화성암과 신생대 제 3기 지층이 전체의 약 22%로 터널의 변상 및 붕괴와 가장 밀접하게 관련되고 있다. 이외에도 응회암, 사암, 이암 등

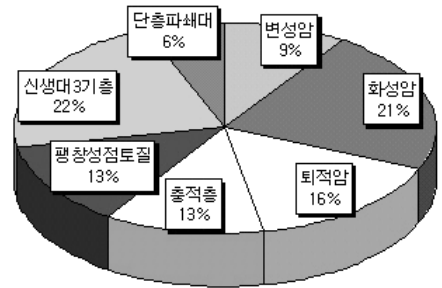


그림 8. 국외자료의 지반특성과 변상 및 붕괴발생과의 관계

의 이방성을 가지는 퇴적암과 팽창성 점토질 지반 등이 약 13 ~ 16%를 차지하고 있으며, 특이하게 관입 및 단층에 의한 파쇄대는 약 6.3%로 낮은 비율을 나타내고 있는데, 이러한 경향은 관입 및 단층파쇄대의 구간의 분포가 국부적인 특성을 보이기 때문으로 사료된다.

참고로 본 분석에서 제외된 국내자료의 터널주변 지층을 검토한 결과에서도 신생대 제3기 지층과 변성암류(화강편마암 및 편암 등)지층이 많이 분포하고 있어 국외자료의 경우와 유사한 변상이 발생할 가능성이 잠재하고 있다.

4. 터널 안전진단에 관한 설문조사

4.1 목적

본 설문조사는 터널의 안전진단 상태평가와 안전성평가의 합리적인 조사방법 및 판정기준 등을 마련하기 위한 목적으로 설문 응답자가 교과서적인 응답보다는 해당 분야의 풍부한 현장경험 및 전문적 지식을 바탕으로 응답할 수 있도록 요청하였다. 본 설문조사의 구성은 크게 터널의 안전진단 체계, 상태평가의 항목 및 기준, 안전성평가 방안 등 3개 분야이다. 이와 같이 터널분야 각계의 전문가들로부터 수집된 설문자료를 통하여 본 연구에서는 가) 국내의 터널 안전진단에 대한 체계를 재정비하고, 나) 실무경험을 토대로 계획, 설계, 시공, 유지관리 상의 변상

요인을 규명하며, 다) 터널 안전진단 분야에서 인공지능 기법의 적용을 위한 지식기반(knowledge base)으로 활용하고자 하였다.

4.2 설문조사 대상

본 설문조사의 대상기관으로는 국내의 학계(13개), 연구소·공사·정부기관(9개), 터널 설계사(8개), 터널 시공사(9개), 안전진단 전문기관(17개) 등 터널 업무에 관련된 모든 분야를 대상으로 선정하였고, 총 28가지의 설문 중 터널의 안전진단 체계정립에 필요한 주요 8개의 응답자료를 선정하여 분석결과를 소개하고자 한다.

4.3 설문조사 분석결과

4.3.1 터널 안전진단 평가방식에 관한 설문

각계의 터널 관련 전문가들로부터 “기존의 대표등급 방식에 대한 적합성의 정도”와 “변상유형 및 터널부위별 개별등급 방식”에 대하여 응답자의 주관적 판단에 근거, 그 적합성 여부에 대한 의견을 수렴하여 보았다. 이와 같이 터널 안전진단의 평가방식에 대한 설문 응답자료를 분석한 결과를 그림 9에 나타내었다.

기존의 전체 대표등급 방식에 대한 설문조사 결과, 그림 9(a)에 나타낸 바와 같이 대표등급 방식에 대한 부정적 견해(36%)가 다소 것으로 나타났다. 대표등급 방식에 대한 부적합 사유는 5개 대표등급보다는 등급의 세분화(일

본의 A++, A1, A2)가 필요, 대표등급을 결정하는 과정에서의 신뢰성과 객관성이 부족, 변상의 진행성 정도가 평가의 주요 지표가 되어야 함, 과거의 보고(報告)방식의 답습 등이다.

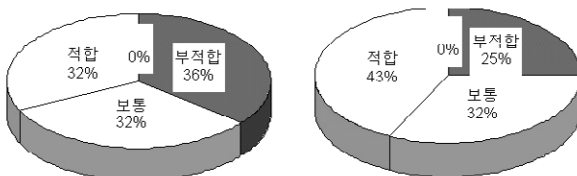
그림 9(b)는 새로운 평가방법에 대한 설문조사 결과로서 “모든 변상들을 개별적으로 평가하는 방식”에 대하여 응답한 결과이다. 이 평가방법은 터널 라이닝에 분포하는 모든 변상들의 상태를 각각 A~E등급으로 평가한 후, 각 변상들에 대하여 보수의 필요성 여부와 개별적인 변상의 원인 및 변상구간에 대한 정밀조사 등의 여부를 결정하도록 하는 방법이다.

이러한 평가방식에 대하여 응답자의 42.8% 정도가 적합의 의견을 제시하였다. 그러나 이러한 개별적인 평가방식에 대하여 부적합(25%) 견해의 사유로는 보수·보강에 대한 전제조건이 많아 관리의 모호성을 초래할 수 있다는 점과, 진단방법, 원인규명, 평가기술 수준 등이 향상된 이후에 적용해야 함 등을 지적하고 있다. 이외에도 국내의 안전점검 및 안전진단 체계의 전반적인 면에 있어서 가장 시급하게 수정·보완 해야할 부분에 대한 설문 응답자료를 요약·정리한 결과는 다음과 같다.

- 점검, 진단 등의 목적에 따른 진단방식과 판단기준의 구분이 필요
- 진단항목 위주의 대가산출 및 진단범위 결정은 비합리적
- 현 콘크리트 표준시방서의 평가기준 적용보다는 터널 자체의 평가기준 정립이 필요
- 시공 및 보수이력 반영을 위한 Data Base화 연구가 가장 시급

4.3.2 상태평가의 항목 및 기준에 관한 설문

본 설문은 각계의 전문가들로부터 안전진단 시 수행되는 각종 조사항목들에 대하여 “해당 항목의 조사결과가 상태평가 혹은 안전성평가에 어느 정도 영향을 미칠 것으로 판단하는지?”를 설문하였고, 항목별 중요도를 0~100



(a) 대표등급 방식 (b) 개별등급 방식

그림 9. 안전진단 평가방식에 대한 설문 결과

표 4. 상태평가에 영향을 미치는 중요도에 관한 설문자료 분석 결과

구 분	(1)평균중요도	표준편차	(2)중요도 지수	합 계	
균열조사	폭	61.8	22.3	0.23	1.0
	길 이	51.6	29.3	0.19	
	수량(밀도)	56.0	22.4	0.21	
	형 상	38.0	30.4	0.14	
	단 차	62.0	30.8	0.23	
누수조사	량	61.0	27.4	0.63	1.0
	수 질	35.2	28.5	0.37	
손상조사	박리/박락	48.0	28.4	0.343	1.0
	백 태	32.8	31.0	0.234	
	파 손	59.2	31.6	0.423	
강도조사	반발경도	53.6	24.0	0.36	1.0
	초음파 속도	35.6	30.0	0.24	
	코어강도	58.0	30.6	0.40	
GPR 조사	배면공동	52.8	37.5	0.524	1.0
	라이닝 두께	48.0	33.3	0.476	

※ 참고

- (1) “조사 항목별 상태평가에 미치는 중요도”에 응답한 값(0~100점)들의 평균치(총 25개 자료)
- (2) (1)의 평균중요도를 각 조사기법별 (1)의 총합으로 나눈 중요도 지수

까지의 점수로서 기입토록 요청하였다. 또한 기존의 외관 조사항목(균열 폭, 누수 량, 박리, 박락, 백태, 파손 등의 상태) 이외에도 추가 세부항목들에 대한 평가도 동시에 수행하였으며, 변상조사 항목별 중요도에 대한 전문가들의 의견을 종합적으로 분석한 결과는 표4에 나타낸 바와 같다.

이와 같이 각 조사항목 별 중요도를 분석한 결과 각 조사항목별 표준편차(σ)가 다소 크게 나타났으나, 설문응답 작성배경을 조사한 결과 “상태평가 및 안전성평가에의 적용성”과 “항목별 조사의 용이성 정도”, “조사자 및 평가자의 오류” 등을 고려하여 작성된 것으로 조사되어 상기의 결과들을 안전진단 상태평가에 적용함에 있어 각 항목 별 조사시 주의정도(caution level)로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

4.3.3 터널 내부의 시추작업에 대한 설문

터널내부 시추작업은 외관조사 및 비파괴검사를 이용

하여 습득된 자료에 대하여 최종적으로 확인하는 과정으로서 매우 중요한 특성을 가지고 있으나, “기존의 시추심도 측, 콘크리트 라이닝까지의 시추”에 대하여 관련 분야의 기술자들로부터 여러 의견들이 제시되고 있어 터널 내부에서 수행하는 시추작업의 심도에 대한 설문조사를 수행하여 보았다. 그림 10에는 터널 내부에서의 시추심도에 대한 전문가들의 견해를 분석한 그림으로서, 기존방식(방수층 이전까지)에 대한 적합성 여부에 대한 응답결과이다.

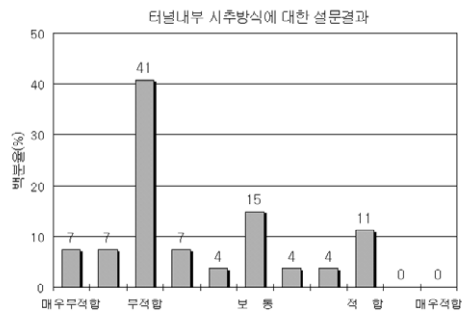


그림 10. 터널내부 방수층 이전까지의 시추에 대한 적합성

그림 10으로부터, 기존방식의 터널내부 시추심도에 대하여 매우 부적합(7.4%) 및 부적합(55.5%)의 견해가 약 63%로 높게 나타났으며, 적합(14%)의 견해는 비교적 낮게 조사되었다. 이러한 분석결과는 방수층 이후의 1, 2차 숏크리트 혹은 주변지반의 상태까지 조사할 필요성이 있고, 라이닝에 발생하는 변상들의 원인 규명 및 안전성평가를 위한 각종 계측의 필요성이 증대되고 있음을 의미하고 있다. 그러나 방수층의 복원 문제와 측정항목, 측정방법 등에 대한 경험과 연구가 부족하여 현재 상황에서의 적용이 불가하거나 혹은 반드시 필요한 구간에만 한정적으로 직경의 1배(1D) 정도의 시추도 필요하다는 의견이 제시되었다.

4.3.4 상태평가 등급에 대한 설문

본 설문항목은 터널의 상태평가 조사항목 및 평가기준에 대한 적합성 여부와 현장경험과 전문적 지식에 바탕을 둔 응답자의 주관적 평가기준 범위를 조사하였다. 그러나 대부분의 응답자가 평가등급별 범위를 제시하지 않았으나 일부의 응답 내용을 요약·정리한 결과는 다음과 같다.

- 균열 폭: 획일적인 적용보다는 철근의 유무, 터널의 용도, 균열의 깊이 등을 고려하여 평가기준을 달리 하며, 대체적으로 평가기준(안)의 범위가 터널의 특성을 반영하지 못함을 지적하고 기존(안)보다 큰 범위를 제시하였다. (예를 들면, 긴급보수가 요구되는 “E”등급의 경우, 기존의 0.7mm 이상에서 약 1.0~5.0mm 이상까지 제시)
- 균열형상: 형상은 균열의 발생원인과 균열의 길이에 따라 경중(敬重)을 달리하므로 개별적인 평가등급(안)이 무의미하다는 의견과 2개 이상의 종합적인 균열 즉, 사+횡 균열, 횡+종 균열, 망상균열, 반(半)횡단 혹은 전(全)횡단 횡균열 등에 따라 평가기준(안)을 제시한 경우가 있다.
- 균열단차: 국내에서 단차의 발생 빈도가 적으므로 무

의미하다는 의견과 균열 폭 3~5mm의 단차 등급을 적용하는 것이 국내 터널에 적합하다는 의견이 제시되었다.

- 균열밀도: 개별적인 평가등급(안)은 무의미하다는 의견과 [Span당 A(0) B(1~2) C(3~5) D(5~9) E등급(10개 이상)] 혹은 조사자의 전문성을 고려하여 “매우 양호” ~.....~ “매우불량” 등의 언어변수로 할 수 있음을 제시하였다.
- 누수량: 터널의 사용 목적별로 구분하여 터널의 허용 누수량에 따라 기준으로 적용토록 제안하였다.
- 파 손: 기존(안)이 비교적 소규모로 경직된 등급이므로 보수를 필요로 하는 “D”, “E”등급의 범위를 100~300cm²까지 제안하였다.

4.3.5 안전성 평가에 관한 설문

국내에서 시공중인 NATM개념의 터널에서 설계, 시공 과정 등을 모두 고려할 때, 현장 실무경험을 토대로 콘크리트 라이닝에 하중이 어느 정도 작용할 것인지에 대한 설문을 실시하였고, 본 설문항목에 대한 분석 결과는 다음 그림 11에 나타난 바와 같다.

그림 11에서 보는 바와 같이 NATM개념의 터널에서 콘크리트 라이닝에 작용하는 하중의 크기가 적다가 59% 그리고 크다가 33%로 나타났으며, 국내의 터널 기술력을 고려할 때 비교적 NATM개념에 충실하게 시공된 것으로 판단된다. 그리고 “라이닝에 작용하중이 크다고 응답한

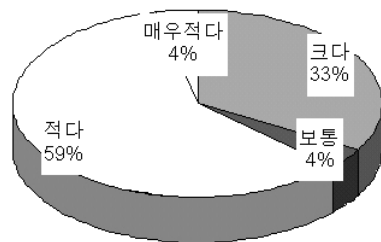
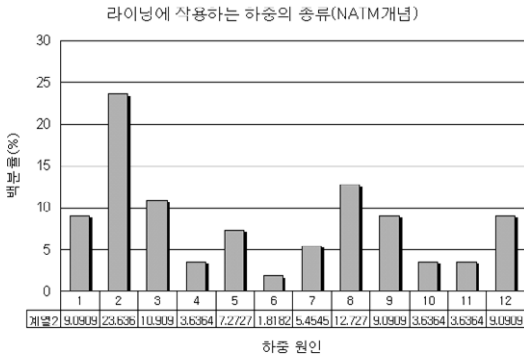


그림 11. “NATM개념 터널의 라이닝에 하중이 작용할 것인지?”에 대한 설문



- 원인1 : 수렴이진 타설
- 원인2 : 배수시설 불량
- 원인3 : 배면공동
- 원인4 : 팽창성지반
- 원인5 : 두께 부족
- 원인6 : 갱구부 토압 미고려
- 원인7 : 상부구조물 신실
- 원인8 : 파쇄대 통과구간
- 원인9 : 변도압 미고려
- 원인10 : 지진/진동
- 원인11 : 퇴적/변성 총상구조
- 원인12 : 슛크리트 기능저하

그림 12. 라이닝에 작용 가능한 하중의 종류

경우, 혹은 향후 라이닝에 하중이 작용한다면 무엇이라고 추정하는가?”에 대하여 설문한 결과를 그림 12에 나타내었는데, 배수시설 불량에 따른 외압과 파쇄대 통과구간에 서의 지보기능 저하, 배면공동에서의 응력이완 등이 비교적 높은 응답결과를 나타내고 있다. 또한 수렴이진 타설, 편토압 미고려, 슛크리트의 기능 저하 등 주로 시공요인 들을 지적하고 있어 터널의 안전진단시 외력에 의한 원인을 추정하기 위하여 시공 당시의 이력과 함께 실제 터널 시공에 참여한 중견 전문가를 안전진단에 포함시키는 방안도 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 터널의 동일 또는 유사한 변상 및 붕괴의 재발을 방지하고, 안전관리에 대한 기술정보를 제공하기 위한 목적으로 국내외의 운행중인 44개 터널에 대하여 터널의 변상사태에 대한 분석을 수행하였다. 또한 국

내의 터널관련 전문가들로부터 현행 안전진단에 관한 설문조사를 수행하여 기존의 불합리한 제도나 방법 등을 개선하고자 노력하였다. 이상의 터널 변상사태 분석과 설문조사 결과들을 요약하면 아래와 같다.

1) 터널의 변상유형별 분석 결과, 균열발생이 전체 유형의 약 42~58% 정도로 가장 높은 비율을 나타내었으며, 또한 15~25년 이하(NATM개념 터널)의 경우 대부분 균열에 의한 변상이 발생한 반면에 약 20~25년 이상(ASSM공법 터널)의 경우는 누수와 박리 및 괴상박락에 의한 변상이 더 많은 빈도를 나타내고 있어 터널의 내용수명 및 시공방식에 따른 원인규명 시 객관적인 근거로 제공될 수 있을 것이다.

2) 터널의 변상원인별 분석 결과, 외적 원인과 인위적 원인은 각각 54%, 46%를 나타내고 있는데 인위적 원인들 중 라이닝의 시공불량에 의한 원인이 약 50%로서 가장 많은 분포를 나타내고 있다. 또한 터널의 변상원인에는 국내외 모두가 시공불량에 의한 인위적 원인이 공통적으로 많은 비율을 차지하고 있으므로 시공단계에서의 정밀성을 보다 높여야 할 것이다.

3) 터널의 변상 및 붕괴의 유형으로부터 그 원인을 추정하기 위해서는 자연적 발생 원인뿐만 아니라 인위적 발생 원인도 복합적으로 고려해야 하며, 본 연구의 표 3에서 제공하고 있는 변상현상과 원인과의 관계로부터 터널의 점검 및 진단시 객관적인 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

4) 터널 안전진단에 대한 설문조사 결과, 기존의 대표 등급 방식에 대한 수정 혹은 개별등급 방식의 적용에 대한 필요성을 얻을 수 있었으며, 또한 변상의 복합적인 요소들(예, 균열 폭, 길이, 밀도, 형상, 단차 등)을 종합적으로 고려함과 동시에 터널의 특성을 충분히 고려하여 보다 완화된 평가기준이 마련되어야 할 것이다. 그리고 터널의 상태평가 항목별 중요도지수는 인공지능 등을 이용한 자동화 안전진단 평가기술 개발에 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. 原田康朗(1984), “トンネルの保守・維持管理シリーズ(1) - 國鐵におけるトンネルの維持と保守”, *トンネルと地下*, 第15卷 5, pp.69-75.
2. 日本JTA保守管理委員會(1994), “連載講座-トンネルの保守・維持管理(1)-道路トンネルの例”, *トンネルと地下*, 第15卷 5, pp.87-92.
3. 日本JTA保守管理委員會(1994), “連載講座-トンネルの保守・維持管理(4)-JRの場合”, *トンネルと地下*, 第25卷 4, pp.67-72.
4. 日本JTA保守管理委員會(1998), “連載講座-建設・保守管理へのフィードバック(1)-變状事例からみた提案”, *トンネルと地下*, 第29卷 5, pp.69-78.
5. 鐵道總合技術研究所,(1990) “トンネル補強 補修マニュアル”, 研友社, pp11-12, 14-15, 23.
6. 한국건설기술연구원(1998), “터널의 안전진단 체계정립 및 균열 자동측정시스템 개발(I)”, pp137-151.
7. A. Haack, J. Schreyer, and G. Jackel(1995), “State-of-the-art of Non-destructive Testing Methods for Determining the State of a Tunnel Lining”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 10, No.4, pp413-431.
8. A. Haack(1998), “Maintenance and repair of underground structures and tunnels”, *Tunnels and Metropolises*, Negro Jr & Ferreira(eds), Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5410 936X, pp.459-473.
9. 日本トンネル技術協會(1981), “トンネル變状の實態調査とその原因解明に關する研究(その2)報告書”, 社團法人 日本トンネル技術協會, pp.21-128.
10. 시설안전기술공단(1996), “시설물 사고사례 조사(I)”, 시설안전기술공단 TS-96-R5- 001, pp.256-308.
11. 시설안전기술공단(1997), “시설물 사고사례 조사(II)”, 시설안전기술공단 TS-97-R5- 002, pp.337-408.
12. Abdullah Memon(1998), “Cracking of unreinforced concrete linings in the TAG motorway tunnels”, *Tunnels and Metropolises*, Negro Jr & Ferreira(eds), Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5410 936X, pp.439-444.