

AHP분석을 통한 도로터널의 취약요소 발굴에 관한 연구

Study on Discovery of Vulnerable Factors in Road Tunnels through AHP Analysis

윤성규* · 강기천**

Seong-Kyu Yun* · Gichun Kang**

Abstract

This study aims to identify vulnerability factors through comprehensive safety diagnosis and to seek improvement measures for the safety and maintenance of facilities. In this study, the results of road tunnel inspections and diagnostics were converted into a database (DB). Using this data, we explored to identify vulnerable elements (NATM, ASSM) based on structural types and to develop efficient improvement measures. In this study, we analyzed 76 detailed safety diagnosis reports covering 45 different types of road tunnel facilities. In the detailed guidelines for comprehensive safety diagnosis, the database (DB) items for identifying vulnerable factors were selected by categorizing the basic information, such as the year of completion and damage items. In addition, AHP analysis was conducted separately through experts in related fields to analyze the correlation between damages. As a result, the primary vulnerability factors for NATM and ASSM were identified as cracks, leaks, insufficient lining thickness, and joint rear. ASSM was identified as relatively more susceptible to network cracks and material separation compared to NATM. In contrast, flaking and rebar exposure were interpreted as more significant vulnerabilities for NATM than for ASSM. In addition, the correlation between elements in NATM was found to be low, whereas in ASSM, the correlation between elements was high, indicating a more organic relationship.

Keywords: Tunnel, Lining, Crack, Leaking Water, Maintenance, AHP (Analytic Hierarchy Process)

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

1995년 「시설물의 안전관리에 관한 특별법」에 따라 국가주요시설물을 규모와 특징별(교량, 터널, 항만, 댐, 하천, 상·하수도, 건축물, 옹벽 및 절토사면)로 주기적인 안전점검과 정밀안전진단을 실시하며 그 점검 결과에 따른 안전조치(보수·보강)를 의무화하

였다. 이로 인해 공용중 증대형사고의 예방이 가능하게 되었으며, 시설물의 안전·유지관리체계에 대한 정립이 확립되었다고 평가할 수 있다. 이러한 안전관리 체계에 대한 정립과 함께 2003년에는 시설물의 설계·시공 및 유지관리 등 생애주기 동안에 발생하는 이력을 데이터베이스화한 “시설물통합정보관리시스템(Facility Management System, FMS)”을 구축하여 설계·시공·유지관리에 대한 통합적인 시스템을 완

*경상국립대학교 공학연구원, 학술연구교수(주저자: tjdrb330@gnu.ac.kr)

**경상국립대학교 토목공학과 부교수(교신저자: gkang@gnu.ac.kr)

비하여 현재 시설물정보관리종합시스템(FMS)을 통해 시설물에 대한 기본 사항은 물론, 안전점검 및 정밀 안전진단 실시현황 및 결과, 보수·보강실시 현황 등 유지관리 전반에 대한 사항을 확인할 수 있다(이유석, 2014). 이수정·김호철(2021)는 민간임대주택의 수익성에 대한 AHP를 활용한 연구를 수행하였다.

이와 같이 점검 및 진단이 체계적으로 시행된 지 22년이 지났지만 각 시설물별로 특히, 본 연구의 대상 시설물인 터널에 대한 관련자료, 점검 및 진단 결과만 물리적으로 쌓일 뿐 아직까지 점검 및 진단 실시 결과에 따른 DB화와 이를 통한 종합적인 분석은 시행되지 않았고, 예산 문제 등으로 발생한 손상에 대한 적절한 유지관리 조치가 시행되지 않고 있는 현실이다(이주형·조재열, 2020). 각 시설물별로 현재까지 수행된 점검 및 진단결과를 분석하면, 각 시설물과 구조형식별로 취약한 부재와 주로 발생하는 손상 유형을 파악할 수 있을 것이다. 이러한 분석결과를 바탕으로 장래에 점검 및 진단을 수행할 기술자들에게 각 시설물과 구조형식별로 취약한 부재와 요소를 제공함으로써, 더 효율적인 점검 및 진단을 수행할 수 있을 것으로 예상된다. 또한 이러한 정보가 설계 및 시공 과정에 반영된다면 유지관리 효율성을 높이고 유지관리 비용 절감에 기여할 수 있을 것이다.

이에 본 연구에서는 지난 22년 동안 「시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법(국토교통부, 2021)」(이하 시설물 안전법)에 의해 시행된 정밀안전진단 중 FMS상의 터널시설물 정밀안전진단 결과를 분석하여 그 결과를 DB화할 수 있도록 대표 시설물을 선정하여 기초 자료를 분류 및 DB화하고 이를 통해 각 구조형식별로 안전성을 저해하는 취약요소를 발굴하여 개선방안을 도출하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

1995년 시설물안전법이 시행된 지 22년이 경과된 지금, 그 간 실시되어온 수만 건의 정밀안전진단

결과 모두를 분석하기에는 너무 방대한 양이 된다. 따라서, 본 연구의 대상 시설물을 다음과 같은 사항을 고려하여 선정하였고, 그 대상은 Tables 1~2와 같다.

- 정밀안전진단을 수행한 1종 도로터널
- 동일한 데이터 수집 및 비교분석을 위해 국토안전관리원이 수행한 45개 터널시설물의 총 76회 정밀안전진단 보고서의 외관조사 Part
- 명칭은 임의의 명칭으로 형식_터널_상하선_진단_실시년도 순으로 "A_KD_1_2013"의 형식으로 함

DB항목은 기본현황과 손상요소로 구분 및 전문가 AHP 분석을 실시하였으며 자세한 분석방법은 다음 장에 기술하였다.

2. 대상시설물 진단결과 및 분석 DB항목 선정

2.1 정밀안전진단 결과

기존 보고서의 분석 결과 누수, 균열, 박리, 백태, 박락 등 균열을 비롯한 재질열화 그 외에 타일탈락, 배수로 상태(이물질 및 침전물 유무), 배수로 파손 등에 대해 외관 조사를 실시하였으며, Ground Penetration Radar(G.P.R)을 활용한 라이닝 두께와 배면 공동을 조사한 사례 등 각 보고서의 조사방법, 조사항목 및 분석방법이 다르므로 공통된 항목을 추출하여 이를 분석하였다.

본 연구에서 분석한 터널은 NATM(New Austrian Tunnelling), ASSM(American Steel Support Method) 2가지 공법이 적용된 터널이다. 두 공법은 터널 굴착 시 내부를 지지하는 방법에 차이가 있다. NATM 공법은 지반자체가 주요한 지보재로 숏크리트, 락볼트 등을 활용하여 지반이 본래 가지고 있는 강도를 유지하게 한다. ASSM 공법은 터널을 발파 후 내벽을

Table 1. Research Target Tunnel (NATM)

No.	Tunnel Name	Year of Completion	Number of Lanes	Width (m)	Height (m)	The Perimeter of Tunnel (m)	Length (m)
1	N-JR_2_2012	2001	2	10.7	7.1	20.6	4,600
2	N-JR_1_2012	2001	2	10.7	7.1	20.6	4,600
3	N-D/B_2_2011	2000	2	9.65	6.7	19.7	1,075
4	N-D/B_1_2011	1995	2	9.65	6.7	19.7	1,041
5	N-DS_2_2011	1995	2	9.7	6.7	19.9	1,387
6	N-DS_1_2011	1995	2	9.7	6.7	19.9	1,362
7	N-MS_2_2011	1994	2	9.6	6.7	20	1,460
8	N-MS_1_2011	1994	2	9.6	6.7	20	1,450
9	N-HR_1_2011	1995	2	9	8	22.1	1,860
10	N-HR_2_2011	1995	2	9	8	22.1	1,860
11	N-SR_2_2010	1999	4	18	8.7	29	1,882
12	N-SR_1_2010	1999	4	18	8.7	29	1,865
13	N-SA_2_2010	1999	4	18	8.7	29	1,294
14	N-SA_1_2010	1999	4	18	8.7	29	1,254
15	N-JL_2010	1999	3	13.5	10.2	24.7	3,300
16	N-HS_2010	1990	2	9.3	6.1	17.2	1,986
17	N-HJ_2010	1999	3	13.5	10.2	24.5	3,780
18	N-NS_2_2009	1994	2	11.3	11.3	16.72	1,532
19	N-BJ_1_2009	1998	2	9.8	6.7	19.5	1,490
20	N-CW_1_2009	1993	2	10.8	8.28	24.4	2,340
21	N-OC_2008	1988	2	9.3	6.1	17.2	1,296
22	N-CW_2_2008	1996	2	10.4	7.6	24.4	2,345
23	N-D/B_1_2007	1995	2	9.65	6.7	19.7	1,041
24	N-DS_2_2007	1995	2	9.7	6.7	19.9	1,387
25	N-DS_1_2007	1995	2	9.7	6.7	19.9	1,362
26	N-MS_2_2007	1994	2	9.6	6.7	20	1,460
27	N-MS_1_2007	1994	2	9.6	6.7	20	1,450
28	N-HR_1_2006	1995	2	9	8	22.1	1,860
29	N-HR_2_2006	1995	2	9	8	22.1	1,860
30	N-NS_2_2005	1994	2	11.3	11.3	16.72	1,532
31	N-HS_2005	1990	2	9.3	6.1	17.2	1,986
32	N-CW_1_2004	1993	2	10.8	8.28	24.4	2,340
33	N-OC_2003	1988	2	9.3	6.1	17.2	1,296
34	N-MB_2002	1992	3	10.25	8.35	23.9	500
35	N-HS_2000	1990	2	9.3	6.1	17.2	1,986
36	N-NS_2_1998	1994	2	11.3	11.3	16.72	1,532
37	N-OC_1998	1988	2	9.3	6.1	17.2	1,296
38	N-CW_1_1998	1993	2	10.8	8.28	24.4	2,340
39	N-SCH_1_1997	1992	2	8	6.8	20	297
40	N-JK_2_1997	1992	2	8	6.6	20	340
41	N-JK_1_1997	1992	2	8	6.6	20	400
42	N-GK_2_1996	1991	2	7.2	6.8	20	495
43	N-GK_1_1996	1991	2	7.2	6.8	20	502
44	N-GA_2_1996	1991	2	7.2	6.8	20	743
45	N-GA_1_1996	1991	2	7.2	6.8	20	752
46	N-BW_2_1996	1991	2	7.2	6.8	20	358
47	N-BW_1_1996	1991	2	7.2	6.8	20	286

Table 2. Research Target Tunnel (ASSM)

No.	Tunnel Name	Year of Completion	Number of Lanes	Width (m)	Height (m)	The Perimeter of Tunnel (m)	Length (m)
1	A-KD_1_2012	1984	2	9.4	9.4	20.8	1,870
2	A-KD_2_2012	1984	2	9.4	9.4	20.8	1,870
3	A-NS_3_2011	1978	2	9.2	6.9	21.4	2,540
4	A-MD_1_2010	1988	2	9.4	8.1	21.4	1,740
5	A-MD_2_2010	1988	2	9.4	8.1	21.4	1,740
6	A-NS_1_2009	1995	2	10	7.1	17.9	1,530
7	A-GN_1_2008	1980	2	9	8.55	21.1	1,130
8	A-GN_2_2008	1980	2	9	8.55	21.1	1,090
9	A-KD_1_2008	1984	2	9.4	9.4	20.8	1,870
10	A-KD_2_2008	1984	2	9.4	9.4	20.8	1,870
11	A-NS_3_2006	1978	2	9.2	6.9	21.4	2,540
12	A-NS_1_2005	1995	2	10	7.1	17.9	1,530
13	A-MD_1_2005	1988	2	9.4	8.1	21.4	1,740
14	A-MD_2_2005	1988	2	9.4	8.1	21.4	1,740
15	A-DH1_2004	1975	2	9.5	6.6	20	522
16	A-DH2_2004	1975	2	8	6.6	20	449
17	A-GN_1_2003	1980	2	9	8.55	21.1	1,130
18	A-GN_2_2003	1980	2	9	8.55	21.1	1,090
19	A-KD_1_2003	1984	2	9.4	9.4	20.8	1,870
20	A-KD_2_2003	1984	2	9.4	9.4	20.8	1,870
21	A-NS_3_2002	1978	2	9.2	6.9	21.4	2,540
22	A-MD_1_2000	1988	2	9.4	8.1	21.4	1,740
23	A-MD_2_2000	1988	2	9.4	8.1	21.4	1,740
24	A-HI_1_2000	1984	2	10	5.2	23.2	320
25	A-KJ_2_1999	1969	2	9.4	7.3	20	152
26	A-KJ_1_1999	1969	2	9.4	7.3	20	135
27	A-KD_1_1997	1984	2	9.4	9.4	20.8	1,870
28	A-KD_2_1997	1984	2	9.4	9.4	20.8	1,870
29	A-NS_3_1996	1978	2	9.2	6.9	21.4	2,540

철재 지보공과 콘크리트 라이닝으로 하중을 지지하는 특징이 있다(김용하·김관진, 2006).

NATM의 경우 총 47건의 백태, 균열, 면상누수, 선상누수, 박리, 파손 및 손상, 층분리 및 박락, 철근노출, 재료분리, 배면공동 및 라이닝두께 부족이 조사되었으며, 타일탈락, 공동구 및 배수로 덮개파손이 부속시설에서 조사되었다. ASSM에서도 29건이 조사되어 NATM과 크게 다르지 않은 것으로 분석되었다.

주로 발생한 손상은 0.3mm 미만, 이상의 균열, 땅

상균열이며 그 외에 라이닝 두께부족, 누수, 배면공동도 빈번히 조사되었다.

연구대상 터널인 ASSM은 1969년부터 1995년 사이에 시공된 터널로, 당시 터널시공에 대한 기술력이 높지 않아 터널 간의 품질 차이가 큰 것으로 분석된다. 터널 구조물은 시간이 경과 될수록 안정화되는 특성을 가지고 있다. 이를 고려 할때에도 ASSM과 NATM의 공법 차이보다는 시공 기술의 발달 여부가 지배적인 것으로 분석된다.

2.2 취약요소 분석을 위한 DB 항목

터널시설물은 구조형식은 단순하지만 조사해야 할 손상의 항목이 정밀안전진단 세부지침상 세부적으로 구분이 되어있다(국토교통부, 2023).

크게 2차 지보재인 라이닝과 터널주변 상태로 구분되며 라이닝에는 철근유무에 따라 7~10항목의 평가요소가 있다. 이에 따르면 ASSM 터널과 NATM 터널의 조사항목(7개 항목)은 같고 NATM의 철근콘크리트 라이닝에는 무근 콘크리트 라이닝에 3개(철근노출, 탄산화, 염화물) 조사 항목이 추가되어 총 10개 항목의 손상에 대해서 조사하도록 규정하고 있다. 터널주변 상태에 대한 항목은 배수·지반·갱문·공동구상태의 4개 항목이 있지만, 갱문상태를 제외한 나머지 3개 항목은 기술자의 정성적인 판단영역으로 주관적인 평가항목이다.

이에 45개의 보고서를 분석한 결과, 취약요소를 도출하기 위한 데이터 선정은 다음과 같이 기본현황과 손상요소로 구분하여 통계분석을 실시하여 취약요소를 선정하기로 한다.

- 기본현황: 터널명, 공법, 준공연도, 진단시기, 경과년수, 연장, 차선수, 폭, 높이, 덕트유/무, 라이닝 둘레길이
- 손상요소: 균열, 누수, 백태, 박락 및 박리, 파손 및 손상, 층분리, 재료분리, 철근노출, 덮개파손, 이물질 퇴적, 탄산화, 라이닝 두께부족, 배면공동, 타일탈락

3. 취약요소 선정 및 개선방안

3.1 분석방법

취약요소 도출을 위해 진단결과의 손상정도를 다음과 같은 방법에 의해 분석하였다.

- 터널에서 가장 빈번히 발생하는 손상의 빈도 분석

- 손상별로 정량화 후 그 결과 가장 많은 면적을 차지하는 손상분석
- 터널별 단위연장당 발생한 손상의 빈도분석
- 터널별 단위연장당 발생한 손상의 길이(면적) 분석

위 방법을 사용하여 각각의 주요 손상 요소를 도출하고, 이들 요소의 중요도를 반영하기 위해 손상별 가중치를 적용하여 취약성 우선 순위를 결정하였다.

터널 시설물의 경우, 손상 요소별 가중치를 반영하여야 하나 정밀안전진단 세부지침에 명확히 제시된 가중치가 없어 전문가들의 설문조사를 통해 AHP 분석을 실시하여 각 요소의 가중치를 산정하였다.

또한 밀폐되어 있는 환경적인 특성을 가진 터널은 환기방식에 따라 탄산화의 영향이 있는 것으로 판단되므로 탄산화도 하나의 취약요소 대상으로 추가하여 분석하였다. 다만, 탄산화는 다른 손상처럼 길이 나 면적으로 평가하지 않고, 침투 깊이에 따라 평가되기 때문에, 환기 방식에 따라 별도로 분석하였다.

어떤 원인으로 인한 손상이 구조물에 나타나기까지는 여러 단계를 거치며, 이 과정에서 다른 손상들과 상호작용한다. 특히 상관관계가 더 높거나 복잡한 요소들은 손상의 진전속도가 빠르고, 시설물에 미치는 영향이 크기 때문에 안전 취약요소로서 중요성을 가진다.

이에 따라 손상 간의 상관분석이 필요하며, 본 연구에서 분석 결과와 취약요소의 우선순위를 고려하여 취약요소를 도출하였다.

3.2 취약요소 우선순위선정 및 손상간 상관분석

3.2.1 손상의 가중치

취약요소를 선정하기 위해 우선적으로 고려해야 할 것은 각 손상의 중요도를 평가하여 손상의 중요도를 구분하는 것이다. 이에, 각 손상별로 가중치를 고려하기 위해 해당분야 전문가 그룹의 AHP 설문을 실시하였다. 전문가 28명을 대상으로 하고 설문지

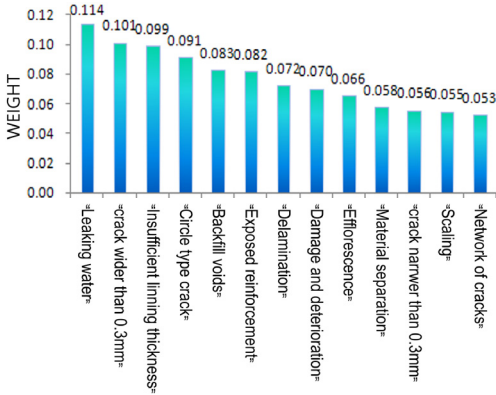


Fig. 1. Weight Selection by Damage

는 13항목 78문항에 대해 쌍대비교 하였다. 응답회수율은 64%(18명)이고, 설문응답자는 83%가 관련분야 10년 이상 경력자이며 그 결과 손상별 가중치는 Fig. 1과 같다.

3.2.2 취약요소 우선순위

AHP분석결과와 가중치, 발생된 손상의 빈도와 정도를 고려한 취약요소 우선순위 산정결과 ASSM과 NATM의 주요 취약요소는 Table 3과 같이 균열, 누

수, 라이닝 두께부족, 배면공동으로 분석되었다. 취약요소의 우선순위에서 상위 50%에 해당하는 요소들을 살펴보면, ASSM에서는 망상균열과 재료분리가 상대적으로 더 취약한 요소로 분석되었으며, NATM에서는 박락과 철근노출이 ASSM보다 더 높은 취약요소로 나타났다. 이 결과는 각 터널의 시공 특성과 당시 시공기술과 관련된 것으로 판단된다. ASSM의 경우 시공 당시 콘크리트 타설 후 다짐과 양생 등의 거시적인 측면이 주로 취약한 것으로 보이며, NATM 방식에서는 시공이음부위 박락, 시·중점 또는 개착구간의 철근노출, 방수슈트 손상에 의한 백태 등 국부적인 측면이 주로 취약한 것으로 판단된다.

도출된 취약요소 우선순위에서 NATM과 ASSM의 차이가 크지 않은 이유는 대상터널에서 대부분의 손상이 균열이 주로 나타나며, 다른 종류의 손상보다 발생 빈도와 발생률이 월등히 높기 때문이다. ASSM의 경우 대부분 1차 및 2차 라이닝을 시공하였으며 방수체계는 라이닝 사이에 방수슈트를 삽입하는 방식으로 누수의 정도가 적다. 이러한 점을 고려할 때,

Table 3. Results of Priority Calculation of Vulnerable Factors

Vulnerability Priority	NATM	ASSM
1	Cracks wider than 0.3 mm	Cracks wider than 0.3 mm
2	Leaking water	Leaking water
3	Insufficient lining thickness	Insufficient lining thickness
4	Backfill voids	Backfill voids
5	Cracks narrower than 0.3 mm	Cracks narrower than 0.3 mm
6	Delamination	Network of cracks
7	Network of cracks	Delamination
8	Exposed reinforcement	Material separation
9	Efflorescence	Exposed reinforcement
10	Material separation	Efflorescence
11	Scaling	Scaling
12	Damage and deterioration	Damage and deterioration
13	Circle type crack	Circle type crack

ASSM과 NATM의 라이닝 구조적 역할이 크게 다르지 않다고 판단된다.

3.2.3 손상요소별 상관분석

진단보고서를 분석한 결과, 손상은 서로 독립적이지 않고 상호 영향을 미치는 경향이 있으며 상관성이 높거나 다른 손상요소와 많은 연관성을 가진 요소는 시설물의 안전을 위협할 수 있는 치명적인 구조적 손상으로 이어질 가능성이 크다. 따라서 다른 손상과 상관성이 높거나 연관성이 많은 요소는 우선적으로 관리해야 하며, 효율적인 유지관리를 위해 우선순위를 두는 것이 중요하다. 이와 같은 사유로 취약요소를 도출할 때 손상의 상관분석 결과를 반영하는 것이 합리적이다. 이를 위해 각 손상 간의 상관관계를 분석하기 위해 단순선형 회귀분석을 수행하였으며 상관성이 높은 요소들을 도식화한 상관성맵

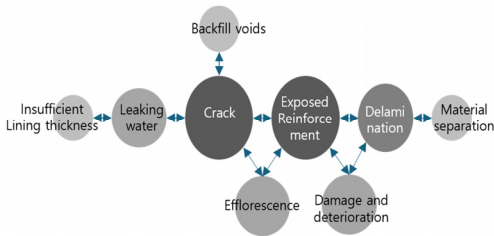


Fig. 2. NATM Correlation Map by Damage Factor

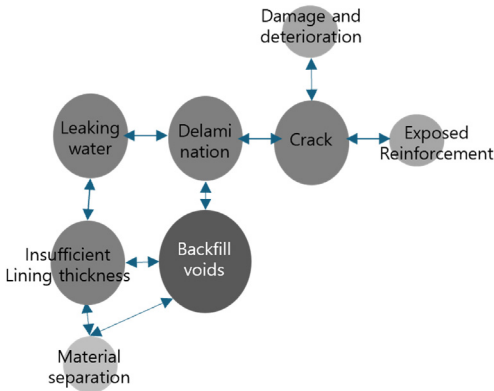


Fig. 3. ASSM Correlation Map by Damage Factor

은 Figs. 2~3과 같다.

NATM의 경우 각 요소 간의 상관성이 낮은 반면 ASSM의 경우 요소 간의 상호 상관성이 높고 유기적으로 연결되어 있음을 확인할 수 있다. NATM에서는 균열, 철근노출, 박락 등의 손상요소들이 다른 요소들과 많은 상관관계를 보여 이들 손상이 향후 안전 취약요소로 발전할 가능성이 상대적으로 크다는 것을 시사하고 있다.

ASSM의 경우 균열, 배면공동, 누수, 라이닝두께 부족, 박락을 중심으로 도식화할 수 있으며 손상요소 간의 높은 상관성과 유기적인 관계는 시설물의 안전에 중대한 취약요소로 발전할 가능성이 크다는 것을 의미한다. 상관성이 높고 유기적인 관계는 지하수위 변화, 인접공사 등과 같은 외부환경 변화에 적극적으로 반응하여 한 가지 취약요소가 다른 취약요소로 발전할 수 있다는 것을 나타낸다. 따라서 이러한 취약요소를 제어하면 효과적인 관리가 가능하다고 해석할 수 있다. 이처럼 손상은 일부 또는 다수의 요소들과 유기적인 상관관계를 가지며, 이러한 복합적인 관계를 가진 손상 요소는 시설물에 중대한 안전 취약요소로 발전할 가능성이 매우 높은 것으로 분석된다.

3.3 취약요소 선정

3.3.1 취약요소 우선순위와 상관성 분석결과

NATM의 경우 균열과 박락, 철근노출이 취약요소이며 균열의 경우 횡방향으로 발생한 균열은 대부분 길이가 짧고 진조수축, 공동구 선 시공 등 터널 하부의 구속조건에 의해 발생한 것으로 굴착 시 원지반의 지지조건을 충족할 경우, 구조적인 문제가 발생하는 경우는 거의 없다. 즉 NATM에서 문제가 되는 균열은 그 폭이 크고 발생방향이 터널과 평행한 종방향 균열이다. 주로 발생하는 위치는 터널의 아치 또는 측벽부, 덕트슬래브 상·하면의 종방향 균열이 취약요소로 발전할 가능성이 매우 크다.

또한, NATM의 경우, 배면공동은 숯크리를 사용하여 여굴부위를 채우기 때문에 NATM에서 배면공동은 주로 숯크리트와 방수 슈트 사이의 들뜸 또는 방수슈트와 라이닝 사이의 들뜸으로 조사된다. 이로 인해 배면공동이 안전취약요소로 발전할 가능성은 매우 낮다고 판단된다. 더 나아가 NATM에서는 배면공동과 라이닝두께 부족에 대해 기본적으로 계측을 통해 지반 변위의 수렴여부를 확인한 후 라이닝을 시공하므로 라이닝의 구조 역학적 중요성을 고려했을 때 ASSM보다 덜 중요한 요소로 판단된다.

다만 박락은 발생 시 교통사고 등 2차 사고를 야기하므로 손상의 크기와 상관없이 NATM과 ASSM 모두 취약요소로 선택되는 것이 합리적이라 판단된다.

NATM에서 철근이 시공된 단면변화부, 개착구간, 시·중점부 등에서 철근이 노출되어 부식, 단면감소 등으로 인한 단면력 저하가 발생할 수 있으므로 앞에서 언급한 결과와 같이 취약요소로 선택되어야 할 것이다.

ASSM에는 NATM과 달리 배면공동, 누수, 라이닝 두께부족이 추가적인 취약요소로 나타나는데, 이는 방수슈트가 시공된 터널을 제외하면 대부분 NATM 처럼 방수체계가 없고 콘크리트 자체의 방수능력에 의존하기 때문이다. 따라서 공용연수가 증가함에 따라 이러한 요소들은 취약요소로 고려되어야 한다.

ASSM에서는 라이닝 두께부족과 배면공동이 취약요소로 고려되어야 한다. 이는 ASSM의 라이닝이 락볼트와 같은 지보재 없이 지반하중을 직접 받는 특성과 NATM처럼 체계적인 계측결과를 활용하지 않는 시공 특성 때문이다. 굴착 후 라이닝은 어느정도 이완하중과 소성압을 감당해야 하므로 이러한 요소들에 대해 주의가 필요하다. 특히 ASSM에서 배면공동은 NATM처럼 숯크리트 여굴부위를 채우는 대신 목재 등을 이용하여 채우기 때문에 시설물의 공용연수를 고려하여 중요하게 다루어져야 한다.

3.3.2 탄산화

터널공법과 상관없이 환기 방식에 따른 탄산화 진행 정도를 살펴보면, 환기 덕트를 사용하는 반횡류식을 채택한 터널 중 86%가 탄산화가 초과 진행되었으며, 이 중 ASSM 터널의 66%에서 탄산화의 진행속도가 빠른 것으로 나타났다. 반면, 환기덕트가 없는 종류식 환기방식을 사용하는 터널 중 92%는 탄산화진행에 여유가 있고, 그 중 86%는 NATM 터널로 종류식 환기방식을 사용하는 NATM터널이 상대적으로 탄산화 진행속도가 느린 것으로 분석된다.

탄산화의 경우에는 공법보다는 환기방식, 교통량에 크게 영향을 받는 것으로 분석되어 교통량이 많은 곳에 위치한 반횡류식 환기방식의 터널의 콘크리트부가 이산화탄소에 노출되어 있어 탄산화로 인한 철근의 부식, 콘크리트의 탈락 등의 손상을 유발하므로 탄산화도 시설물의 취약요소로 고려되어야 한다.

3.4 개선방안

76회 터널 시설물의 진단보고서를 대상으로 손상 사례를 분석하고 작성된 데이터베이스를 분석하여 통계적 기반의 손상현황을 분석하였다. 또한 각 손상의 중요도를 산정하기 위해 해당분야전문가 그룹의 AHP분석을 실시하고 도출된 가중치를 반영하여 취약요소의 우선순위를 결정하였으며 손상간 상관분석을 실시하여 손상간 상호분석을 도출하여 취약요소를 선정하였다.

이러한 분석과정을 통해 도출된 터널의 취약요소는 다음과 같다.

- NATM의 경우 균열, 철근노출, 박락이 주요 취약요소
- ASSM의 경우 배면공동, 라이닝 두께부족, 균열, 누수, 박락이 취약요소

또한, 환기방식에 따라 반횡류식 환기방식을 채택한 터널이 탄산화에 상대적으로 취약한 것으로 분석되었다.

NATM에서는 다양한 지반 보강 및 보조공법이 적용되며, 굴착 후 계측이 진행되기 때문에 손상 간의 상관성이 상대적으로 낮고 일반적인 취약요소가 나타난다. 반면 ASSM에서는 굴착면에 강지보재를 설치하고 굴착 후 일정 기간 동안 라이닝이 이완하중과 소성압을 직접 지탱해야 하므로 ASSM의 취약요소는 상대적으로 높은 상관성을 가지며 유기적인 관계를 형성하는 것으로 분석된다.

본 연구에서 도출된 안전취약요소는 다음과 같으며 각 손상에 대한 구체적인 예와 그에 대한 대책방안을 정리하면 다음과 같다.

3.4.1 균열

ASSM의 경우 파손 및 손상, 박락, 철근노출간의 상관관계가 높으며, NATM의 경우 누수 및 백태, 배면공동, 철근노출 간 상관관계 높다. 콘크리트 라이닝에서 가장 빈번하게 나타나는 손상 유형으로는 라이닝 아치부에서 발생하는 종방향 및 사방향 균열, 덕트 슬래브에서 발견되는 종방향 균열이 있으며, 이들 패턴은 시설물의 안전 취약요소이다.

라이닝 아치부에서 발생하는 사방향 및 종방향 균열은 재료·시공·설계 3가지 측면으로 나누어 분류할 수 있다.

재료적인 측면으로는 수화열과 건조수축량을 저감시키는 것으로 혼화재를 사용하는 방법, 와이어매쉬나 철근 등을 콘크리트에 첨가하여 인성을 증가시키는 방법이 있다.

시공적인 측면으로는 설계단면대로 여굴과 미굴 규모를 최소화하여 라이닝의 일정한 두께를 유지하는 것이다. 또한 터널 양쪽 벽의 단부침하를 줄이기 위해 단부기초부 여굴에 버림콘크리트를 타설하는 것이다. 이러하면 충분한 지지력을 확보할 수 있다.

더불어, 균열을 제어하는 방법으로 라이닝 표면을 습윤양생 하고 천단부에 줄눈을 시공하여 균열을 한 곳으로 유도하여 보수 또는 지속적인 관찰하는 방법도 효과적이다.

덕트슬래브에서 조사되는 종방향균열은 라이닝과 슬래브가 강결된 상태에서 부재의 건조수축, 온도변화에 따른 신축, 슬래브 자중에 의해서 복합적인 요인에 의한 것으로 프리캐스트 슬래브를 시공하는 것이 효과적이다. 또한 유지관리 측면에서나 시공속도, 품질관점에서 반횡류식보다는 종류식을 채택하는 것이 좋다.

3.4.2 누수

누수는 ASSM의 경우 배면공동, 라이닝두께부족, 박락의 손상요소와 상관관계가 있으며, NATM의 경우 균열, 라이닝두께부족과 상관관계가 있다. 누수로부터 초래되는 안전취약요소는 라이닝 콘크리트의 단면손실과 인접굴착 등에 의한 주변지반의 침하 등을 들 수 있다.

즉, 유입수에 콘크리트에 해로운 성분이 포함된 경우, 콘크리트와 철근의 부식 및 열화를 가속화시켜 동결·융해에 의한 구조적 손상을 유발하며, 이로 인해 라이닝이 단면력이 감소하여 라이닝 파괴 등 구조적인 손상으로 이어질 수 있다. 또한 누수와 함께 토립자가 유입되면 터널 주변에 배면공동이 형성되어 주변 지반조건이 변화를 초래하고 이로 인해 구조체에 구조적 영향을 미칠 수 있다. 나아가 주변 지반이 지하수위 저하, 지반침하 발생 등 시설물 및 인근 시설물의 안전 취약요소로 발전할 수 있다.

누수에 대한 대책으로는 설계 전 물이 모일 수 있는 계곡부 등을 피하고, 지반조건이 양호한 곳을 선정하여야 한다. 또한, 배면공동이 발생하지 않도록 하고 방수체계의 품질확보, 라이닝 두께의 준수, 터널 내·외부의 배수로 유지관리가 필요하다.

3.4.3 탄산화

탄산화는 콘크리트 구조물의 열화와 관련하여 주목받고 있는 현상 중 하나로 시간이 경과함에 따라 콘크리트 내구성에 부정적인 영향을 미친다. 대상터널의 시설물별로 탄산화의 진행여부를 분석한 결과 반횡류식 환기방식을 적용한 도심지 터널의 경우 86%시설물의 탄산화 진행이 예측치 보다 빠른 것으로 분석되었다. 콘크리트 구조물에서 탄산화는 피복두께를 넘어서 철근표면에 도달하게 되면 철근부식을 유발하는 직접적인 인자로 균열, 박락 등과 연관성이 있어 구조체의 성능을 저하시켜 안전취약요소로 귀결될 수 있다.

탄산화에 대한 대책으로는 설계·시공·유지관리 단계로 나눌 수 있다.

설계단계에서의 방안은 시설물 성능조건에 맞는 배합설계를 하고 적절한 피복두께를 고려하여야 한다. 배합설계시 양질의 골재를 사용하도록 하고 경량골재를 사용할 땐 분산제, AE제 등의 표면활성제를 사용해야 하며 물시멘트비(W/C)를 가능한 적게 해야 한다.

시공단계에서는 방안은 콘크리트 품질을 확보해야 한다. 콘크리트를 타설할 때 피복두께를 설계치와 동일하게 하도록 시공해야 다짐과 양생을 통해 재료분리가 발생하지 않도록 해야 한다.

유지관리단계에서 방안은 주기적인 점검 및 그 결과에 대한 빠르고 철저한 보수가 이루어져야 한다. 손상이 없더라도 폐쇄적인 환경에 위치하며 탄산화 진행이 빠르다고 판단될 경우 표면처리를 실시하여 탄산화 진행을 막아야 한다. 또한 관리주체는 교통량이 환기용량을 초과한다고 판단될 경우 환기방법, 가동시간을 변경하여 자동차의 유해가스에 대한 환기가 이루어지도록 해야 한다.

3.4.4 배면공동

배면공동의 경우 ASSM 및 NATM 모두 높은 빈도

로 조사되거나 발생 면적 등 규모로 볼 때 ASSM에서 더 크게 발생한다. 또한 상관분석결과 ASSM에서 다른 손상들과 상관관계가 높은 것으로 분석된다. 즉, 배면공동은 ASSM에서 상대적으로 NATM보다 취약요소로 작용하게 된다. 안전취약요소로 발전할 수 있는 대표적인 상황으로는 배면공동이 있는 부위에서 지속적인 누수로 인해 암반이 침식되거나 배면의 토사 유출되어 공동이 확장되는 경우가 있으며, 또는 공동이 있는 구간에 인접공사나 지반조건의 변화로 인해 소성압이나 이완화중이 작용할 때이다. 배면공동의 발생을 최소화하기 위해서는 지반조건에 적합한 굴착방법을 선택하고, 라이닝 타설 시 타설속도와 방법을 철저히 준수해야 한다. 최종적으로 배면공동이 발생하였을 경우, 뒷채움 작업을 수행하여 이를 보완해야 한다.

3.4.5 라이닝 두께부족

라이닝두께부족의 경우 ASSM 및 NATM 모두 높은 빈도, 넓은 면적으로 조사된다. ASSM에서 라이닝 두께부족은 굴착초기의 지반하중을 직접 받는 공법 특성상 상대적으로 더 안전취약요소로 발전할 수 있는 것으로 분석된다.

라이닝두께가 설계치보다 얇게 시공되면 NATM의 경우 방수쉬트가 노출되어 시간경과에 따라 누수에 취약해지며 해당부위에 응력이 집중되어 균열 등 손상이 발생하게 된다. 또한 해당구간이 철근이 시공된 라이닝이면 철근배근이 불규칙해지며 피복두께가 부족하여 탄산화에 의한 철근부식을 유발하게 된다. ASSM 터널의 라이닝은 소성압이나 이완하중을 직접 받는 주부재이므로 라이닝의 파괴를 유발하게 된다.

발생원인은 주로 시공단계에서 발생하며 굴착시 계획된 단면되도록 굴착되지 않고 보다 작게 굴착되어 차후 시공되는 라이닝의 두께에 영향을 미치는 경우가 대부분으로 미굴을 최소화 할 수 있는 굴착방법

을 선택하거나, 굴착 후 미굴부위를 점검하여 처리하여야 한다.

3.4.6 박락

연구보고서 분석결과 박락은 대규모로 발생하지 않았으나 여러 손상과 밀접한 관계를 가지고 있어 여러 손상요소의 최종 귀결상태로서 안전취약요소의 중의 하나이다.

산악에 위치하고 방수체계가 없는 ASSM은 누수가 발생된 부위가 외기 온도의 영향을 받을 경우, 대규모 박락이 발생하기도 하고 드물기는 하나 소성압에 의해 박락이 발생하는 경우도 조사가 되고 있다. 따라서 지반변위에 대한 수렴여부를 확인하고 라이닝 품질 및 두께확보가 필요하다. 이는 공용 중 균열, 염해, 탄산화, 염해, 누수 등의 안전취약요소로부터 상관성이 높은 박락 또한 방지할 수 있기 때문이다.

위에서 도출된 취약요소들은 궁극적으로 박락·박리 손상으로 이어져 라이닝의 단면력을 감소시키며, 이로 인해 안전취약요소로 발전할 수 있다. 이러한 취약요소들은 일상적으로 높은 빈도와 광범위하게 발생하는 문제들을 해결함으로써 충분히 예방할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

시설물안전법 시행으로 종시설물의 경우 약 22년 동안 점검 및 정밀안전진단을 시행해오고 있다. 또한 그 실시결과를 시설물통합정보관리시스템(FMS)에 DB화하여 국내 주요 시설물에 대한 안전 및 유지관리를 시행해오고 있다. 그러나 시스템에 아직까지 단순 저장만 하는 형태로 그 결과를 적극적으로 활용하기에는 한계가 있어 데이터 기반의 통계분석은 이루어지지 않고 있는 현실이다.

또한 시설물의 안전에 영향을 미치는 취약요소는 각각의 기술자의 경험과 지식을 바탕으로 도출되고

연구되어 왔다. 따라서 점검 및 진단결과를 반영하여 취약요소와 안전취약요소 간의 관계를 명확히 정립할 필요가 있다.

본 연구의 목적은 도로터널 시설물에 대하여 대표적인 공법별(NATM, ASSM)로 진단 결과를 데이터 베이스화하고 이를 분석하여 시설물별로 취약요소를 도출하고 이에 대한 대책방안을 수립함으로써 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

- (1) 손상의 빈도 및 정도, AHP 분석결과와 가중치를 반영한 취약요소 우선순위 산정결과 NATM과 ASSM의 취약요소는 1순위 폭 0.3mm 이상 균열, 2순위 누수, 3순위 라이닝 두께부족 등이며 NATM과 ASSM의 취약요소에서 큰 차이를 보이지 않았다. 또한, 탄산화는 터널형식보다 환기방식의 영향을 받으며 반횡류식 환기방식의 터널이 탄산화에 취약한 것으로 분석되었다.
- (2) 손상요소별 상관분석 결과, NATM의 경우 각 요소간 상관성이 적은 반면 ASSM의 경우 배면공동에 의해 라이닝 두께부족, 누수, 박락 등의 손상으로 발전하는 것으로 조사되어 상호 상관성이 높고 서로 유기적인 관계인 것으로 분석되었다.
- (3) 터널에서서의 안전취약요소는 균열, 누수, 탄산화, 배면공동, 라이닝 두께부족, 박락이며 이러한 취약요소는 최종적으로 박락 및 박리 손상으로 귀결되는 것으로 분석되었다.
- (4) 본 연구에서는 정기적으로 유지관리가 이루어지는 터널시설물에서의 안전취약요소를 분석하였다. 이를 통해 시설물에서 자주 발생하는 손상의 빈도와 정도, 중요성 및 손상 간의 상관관계를 파악하여 도출된 취약요소들이 점진적으로 발전하여 발생하는 것으로 분석되었다. 점검 및 진단을 통해 도출된 취약요소에 대한 적절한 대책을 마련함으로써 안전취약요소를 효과적으

로 유지관리 할 수 있을 것으로 예상된다.

- (5) 본 연구결과를 바탕으로 시설물별 매뉴얼을 작성하면 예방적 효과를 얻을 수 있으며 이를 통해 보수 및 보강비용, 유지관리비용 등 시설물관리 비용을 절감할 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

1. 국토교통부(2021.9.17), “시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법령집”.
2. 국토교통부(2023.12.28), “시설물의 안전 및 유지관

리 실시 세부지침(터널편)”.

3. 김용하·김관진(2006), 「NATM 이론과 실제」, 서울: 구미서관.
4. 이유석(2014), 「도로시설 진단결과 분석을 통한 취약요소 발굴 및 개선방안 연구」, 일산: 한국시설안전공단.
5. 이수정·김호철(2021), “AHP분석을 통한 민간임대주택 리츠 수익성의 중요 요인 분석”, 「한국도시행정학회」, 34(3): 41~55.
6. 이주형·조재열(2020), “노후 콘크리트 구조물의 실용적 유지관리를 위한 콘크리트 구조물 안전진단 지침 분석”, 「LHI Journal」, 11(3): 83~92.

요약

1995년 시설물의 안전관리에 관한 특별법 제정 이후 주기적으로 시설물을 점검 및 진단하고 그 결과에 따라 보수·보강 등 안전조치를 의무화하였다. 이와 같이 점검 및 진단이 법에 의해 체계적으로 수행된 지 22년이 지났지만 그 결과만 물리적으로 쌓일 뿐 아직까지 이를 통한 데이터기반의 통계분석은 시행되지 못한 현실이다. 이에 본 연구에서는 도로터널 점검 및 진단 결과를 DB화하고 이를 통해 구조형식별(NATM, ASSM) 취약요소를 발굴하고 효율적인 개선방안을 도출하고자 하였다. 본 연구대상 시설물은 45개의 1종 도로터널 시설물의 76회 정밀안전진단 보고서를 분석하였다. 취약요소를 도출하기 위한 DB 항목은 준공연도, 공법 등 기본현황과 정밀안전진단 세부지침 상의 손상 항목으로 구분하여 선정하였다. 또한, 해당분야 전문가를 통해 AHP분석을 별도로 실시하여 손상간 상관분석을 실시하였다. 손상의 빈도와 정도, AHP(Analytic Hierarchy Process)분석결과와 가중치를 반영한 취약요소 우선순위 산정결과, ASSM 및 NATM의 주요 취약요소는 라이닝 두께부족, 배면공동, 균열, 누수로 분석되었다. NATM은 박락, 철근노출이 취약요소이며, ASSM은 재료분리, 망상균열이 취약요소로 분석되었다. 또한, NATM의 경우 각 요소간의 상관성이 낮은 반면 ASSM의 경우 요소 간의 상호 상관성이 높고 유기적으로 연결되어 있는 것으로 분석되었다.

주제어: 터널, 라이닝, 균열, 누수, 유지보수, AHP(Analytic Hierarchy Process)