

정밀안전진단 결과를 활용한 NATM (철근)의 라이닝 결함 종류별 발생원인 및 분석 - Part I

추진호^{1*} · 이인모²

¹정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 박사수료

²정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 교수

Analysis and cause of defects in reinforced cement concrete lining on NATM tunnel based on the Precise Inspection for Safety and Diagnosis - Part I

Jinho Choo^{1*} · Inmo Lee²

¹Ph.D. Candidate, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

²Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

*Corresponding Author : Jinho Choo, choojinho@kistec.or.kr

Abstract

Related to the previous paper on the typical crack pattern of tunnel lining with NATM, the characteristic defects in reinforced cement concrete lining of NATM tunnel have analyzed with the precise inspection with safety and diagnosis (PISD) by KISTEC. Depending on the reinforcing materials, steel rebar, steel fiber, and glass fiber have been implemented to reinforcing lining in various NATM tunnel constructions. Reinforcing lining with rebar are prevailed on NATM tunnel to countermeasure the weak geological circumstances, to pursuit the economical tunnel sections, and to resist the risk of tunnel deterioration. By the special act on the safety control of public facilities, the reinforced NATM tunnels for more than 1 km length are scrutinized closely to characterize defects; crack, reinforcement exposure, and lack of lining. Crack resistance by reinforcing is shown in comparison with the normalized crack to the length of tunnel. Typical exposed reinforcements in lining have exemplified with various sections. The lack of lining due to the mal-construction, spalling, fire, earthquake and leaching has been analyzed. The cause and mechanism with the field inspections and other studies has also been verified. Detailed cases are selected by the above concerns as well as the basic information from FMS (Facilities Management System). Likewise the previous paper, this study provides specialized defects in reinforced lining of NATM and it can be widely used in spreading the essential technics and reporting skills. Furthermore, it would be advised and amended for the detail guideline of Safety Diagnosis and PISD (tunnel).

Keywords: Reinforced NATM, Defects, Crack, Rebar exposure, Spalling

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
21(1)1-29(2019)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2019.21.1.001>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received August 27, 2018

Revised September 13, 2018

Accepted September 20, 2018



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2019, Korean Tunnelling and Underground Space Association

초 록

NATM (무근)터널의 라이닝 균열을 분석한 논문과 연계하여 NATM (철근)터널의 결함을 정밀안전진단 사례를 정리하여 결함별 원인을 분석하고자 하였다. NATM (철근)터널에서 콘크리트라이닝은 그 역할에 따라 철근과 같은 보강재를 사용하게 된다. 지반이 불량하거나 안전성 확보를 위한 라이닝 두께의 증가는 굴착단면의 증가와 라이닝 타설 물량의 증가를 유발하나, 철근보강 단면을 설계하여 경제성과 안전성을 함께 도모하게 된다. 시설물안전법에 의한 국내 1종 터널 시설물 중에서 NATM으로 시공된 구간에 철근보강을 실시한 라이닝의 결함 특성을 정리하여 형태별 발생원인을 분석하고자 하였다. 단철근, 복철근과 무근라이닝에 발생하는 균열을 비교하여 철근으로 인한 균열제어 효과를 분석하였다. 다양한 위치에서의 철근노출 사례와 함께 기술하였고 터널에서 고려될 수 있는 라이닝 두께 부족의 원인으로 정밀시공 미흡, 박락, 공용중 라이닝 화재에 의한 폭열, 지진, 용탈의 사례를 기존 연구와 비교하여 분석하였다. 향후 본 연구를 통해 정밀안전진단(터널) 세부지침의 보완 및 개정방향 등을 제시하고자 한다.

주요어: NATM (철근), 결함, 균열, 철근부식, 박락

1. 서론

1종 시설은 2017년 기준 9개 영역 14개로 구분되며 9,274개가 등록되어 관리되고 있다. 최초 정밀안전진단이 실시된 터널은 1,619개이며, 이중 NATM으로 시공된 터널은 816개이다. 시설물안전법에 의거 준공 후 10년이 지난 시점부터 한국시설안전공단과 민간전문진단기관이 최초 정밀안전진단을 관리주체로부터 의뢰받아 실시하고 있으며, 이후에는 시설물 등급에 따라 2~3년마다 정밀점검, 5~6년마다 정밀안전진단을 수행하고 있게 된다. 1995년 법 제정 이후 터널의 정밀안전진단은 외관조사, 내구성평가, 안전성평가 등 시설물의 합리적인 유지관리를 목표로 지속발전하고 있으며, 2018년에는 사용성 평가를 추가한 성능평가체계를 도입하고 있다(MOLIT, 2018).

터널의 균열에 대한 패턴을 분석한 연구들로 정밀안전진단보고서 및 유지관리체계는 시설물 진단시장의 성장과 함께 국가 기술도약의 길로 나아가고 있다(Kim et al., 2009; Wang et al., 2010; Wang, 2010; Balaguer et al., 2014; White et al., 2014). 터널의 사용 용도 및 기능에 따라 단면의 형태가 다른데 Choo et al. (2011)은 NATM (무근)터널의 균열을, Park et al. (2012)은 덕트슬래브를 지닌 터널의 결함을, Lee et al. (2009)은 pillar를 둔 3 Arch터널 결함의 분석 및 유지관리방안을 제시하였다.

지반의 변위 및 잔류수압 등이 고정적인 라이닝의 작용하중이라면 화재 및 지진은 외적인 활하중으로 고려될 수 있다. Jang et al. (2006)은 화재로 구조물에 피해가 발생한 사례를 정밀안전진단을 통해 분석하였으며, Wang et al. (2001)은 대만 Chi-Chi 지진($M_L = 7.3$)을, Wang et al. (2009)은 중국의 Wenchuan 지진($M_L = 8.0$)의 피해를 정리하였으며, Lanzano et al. (2008)과 Aydan et al. (2010)는 미국과 일본의 지진피해를 정리하여 이에 대한 대책을 제시하였다.

기존의 NATM에 대한 설계 및 유지관리는 NATM (무근)을 위주로 기술하고 있어 철근배근으로 고려되어야 할 설계 및 시공상의 특징, 유지관리 시 고려되어야 할 결함특성과 시험방법, 향후 설계 및 시공에 환류(feedback)

되어야 할 분석 등이 미비한 상태이다(Sandrone and Laniouse, 2010a, 2011b; Asakura and Kojima, 2003; Han and Jeong, 2014). NATM 주지보재인 숏크리트와 록볼트의 장기 사용성에 대한 연구는 지하수 영향으로 인한 숏크리트 및 그라우트의 용탈(Choi and Yang, 2013; Gérara et al., 2002; Tan et al., 2017), 지보재의 부식 및 열화(Thumann et al., 2015; Zeng et al., 2011; Usman and Galler, 2013) 등이 보고되고 있다.

본 연구에서는 1종 터널에 대한 정밀안전진단 중 한국시설안전공단에서 수행된 NATM (철근)터널에 대한 결함분석을 통해 향후 정밀안전진단 종사자 및 설계, 시공의 유의점을 고려한 개선방향을 제시하고자 하였다. 이를 위해 FMS (Facility Management System, 시설물정보관리종합시스템)자료 편집과 국내·외 다양한 사례를 포함하여 기술하였다.

2. NATM터널(철근) 라이닝

2.1 설계

지반 및 터널 단면의 특징을 반영하여 라이닝 두께, 단철근 및 복철근의 보강라이닝을 설계하며, 토피고 및 수압의 영향에 따라 인버트 설치와 더불어 철근배근 여부도 함께 고려된다. NATM 터널 지보설계는 암반상태에 따라 1차 지보재의 기능저하에 대한 콘크리트라이닝을 검토하게 된다. 추가적인 외적 하중의 증가, 굴착단면, 지반 상태 등을 고려하여 철근, 강섬유 등의 보강된 라이닝을 설계한다. 라이닝의 구조적 검토 이외에 균열제어 및 박락 저감 등의 사용성 및 유지관리 비용 개선, 영구적인 취약지반 및 취약단면에 대한 조치 등의 이유로 Fig. 1과 같은 항목을 NATM (철근)터널 설계에 검토하게 된다.

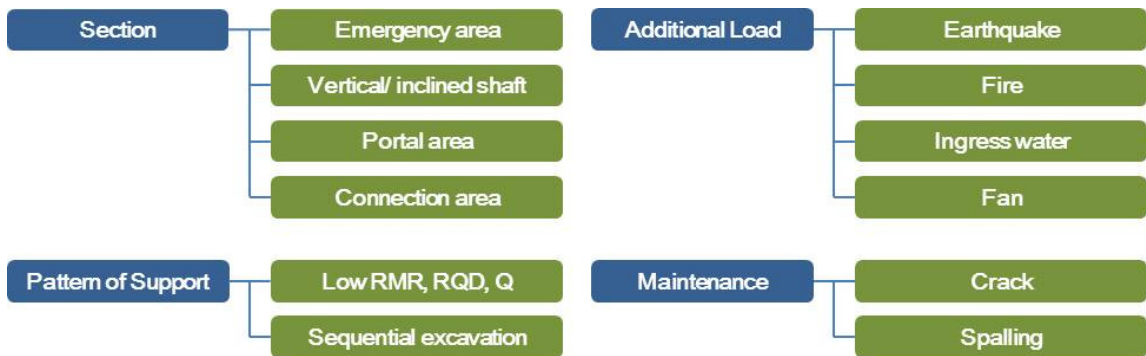


Fig. 1. Possible considerations for the design of the reinforced NATM tunnel

2.2 시공

터널 단면에 따른 굴착량 및 분할굴착의 방법 등은 지반특성을 고려하는 계측결과를 반영하여 검토한다. Fig. 2의 왼쪽과 같이 공사 중 및 공용 중 배수로, 유틸리티 배관, 점검로 등을 포함한 좌·우 공동구 영역을 시공하고 공

동구 영역에 기 시공한 철근과 라이닝의 주철근을 연장하여 설치한다(Fig. 2의 좌측, 1. 공동구 타설). 철근 조립망의 자중, 부직포 및 방수막의 특성, 타설 콘크리트의 낙하높이, 타설 중 붕괴 위험도 등을 고려하여 고정용 앵커를 설치한다(Fig. 2의 좌측, 2. 철근 배근). 강제거푸집을 설치한 후 측벽 및 천단부에 콘크리트를 압송하며, 천단부의 경우 채움부족을 대비하여 backfill그라우트 주입공을 설치한다. 라이닝 양생 이후 타음조사 및 GPR시험을 분석하여 추가적으로 라이닝 두께를 확보할 수 있도록 한다(Fig. 2의 좌측, 3. 라이닝 타설). 인버트 히빙 등의 문제가 있는 경우 인버트를 우선 보강 및 시공하는 경우도 있으며 보편적으로 라이닝 시공 이후 설치한다.

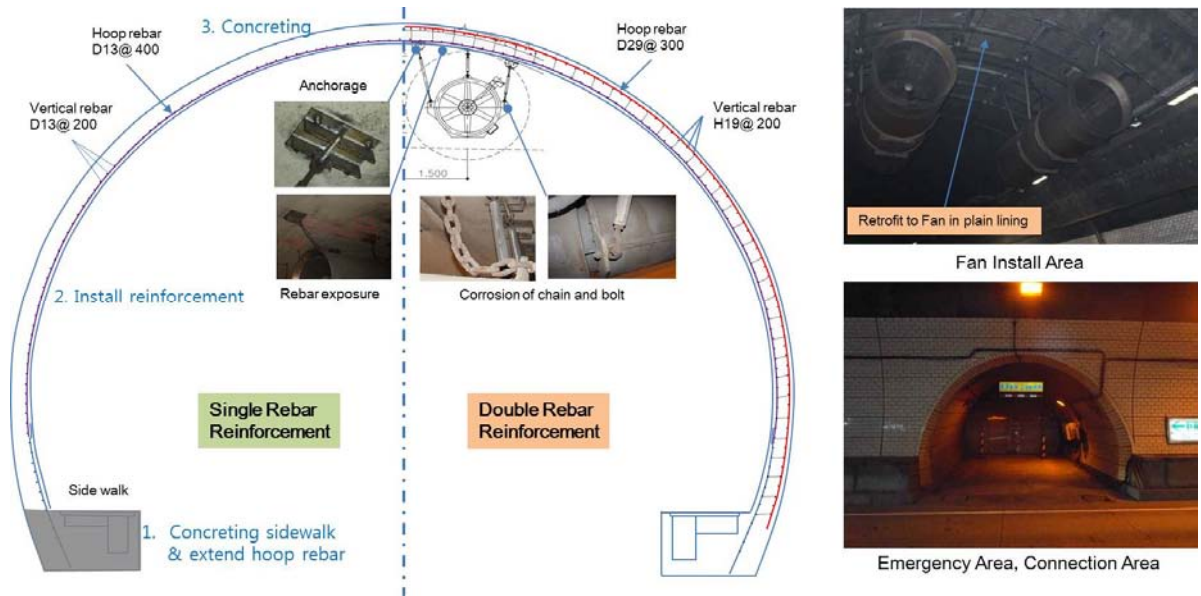


Fig. 2. Typical installment of reinforced lining in NATM tunnel (road tunnel)

2.3 운용

서울지하철 1기 및 수도권 이외 지역의 초기 지하철은 재래식공법(ASSM)이나 NATM (무근)으로 시공하였다. 굴착 심도가 깊어짐에 따라 다양한 지질 조건을 극복하기 위해 NATM (철근)을 채택하였다. 도로 및 고속철도의 터널 입·출구 개착구간과 연결되는 구간(갱구부), 작업을 위한 진입터널과 접속되는 구간, 터널 내 대피시설을 위한 확폭구간(비상주차대), 환기시설을 위한 수직 연결부 등에 NATM (철근)터널로 시공된 것으로 확인되었다. 최근의 진단에서는 Fig. 2의 오른쪽과 같은 종류식 환기팬의 앵커지지 상태, 주변 철근상태, 안전장치 등을 조사하고 있으며, 무근구간에 설치된 환기팬 영역에서는 I형강으로 보강한 사례 등에 대한 사용성을 추가적으로 검토하고 있다.

3. 1층 시설물 NATM (철근)터널의 현황

본 연구에서 검토된 NATM (철근)터널은 시공 기록의 준공도 및 GPR탐사로 분석된 유지관리 자료를 기준으로 TBM, BOX시공 구간 등은 제외하였으나, NATM터널의 개착구간은 연장에 포함하여 분석하였다. 지하철을 포함하여 일반철도 터널은 정거장 구간을 제외하였으며, 고속철도 터널, 지방도 및 국도를 포함한 일반도로 터널과 고속도로 터널로 구분하여 Table 1과 같이 정리하였다. 분석된 NATM (철근, NATM (Re))터널은 408개로 개착구간과 구분하여 굴착으로 시공된 구간에 단철근 및 복철근이 설치된 연장만을 분석하였다.

Table 1. Analyzed tunnels in the special act on the safety control of public facilities

	No. of Class 1 NATM tunnel	No. of NATM (Re) tunnel	Recent grade			Length of tunnel (m)		
			A	B	C	Open cut	NATM (Re)	NATM (P)
Total	816	408	72	328	8			
GRW	490	196 (48%)	17	176	3	51,709 (20.4%)	140,724 (55.6%)	61,215 (24.2%)
HRW	59	37 (9%)	28	9	-	7,281 (12.2%)	13,246 (22.2%)	40,617 (68.1%)
HR	154	104 (25.5%)	9	90	5	6,614 (4%)	18,187 (11%)	140,006 (85%)
GR	113	71 (17.5%)	18	53	-	6,011 (5.2%)	34,174 (35.9%)	71,569 (58.9%)

Editing data in FMS

일반철도(GRW) 및 일반도로(GR) 터널 시공이 많았으며 내구연한 동안 지속적인 보수로 대부분 B등급 이상으로 관리되고 있었다. 고속철도(HRW)의 경우는 사용기간이 짧고 및 선제적인 보수로 A등급으로 유지되는 경우가 많은 것으로 확인되었다.

주로 도심지에 시공된 일반철도의 경우는 연약한 지반에 심도가 깊어 추가하중을 고려하거나, 천층의 인접시설의 영향을 고려해 NATM (철근)으로 설계되었다. 일반철도 터널 연장의 55.6%가 NATM (철근)으로 시공된 반면 일부 단층대를 제외하고 상대적으로 지반이 양호한 고속철도 및 고속도로(HR) 터널은 22.2%로 시공된 것으로 분석되었다. 고속도로 터널의 경우 갱구부 일부 개착구간과 비상주차대, 수직구, 연결통로 등의 단면 취약부에 주로 NATM (철근) 구간을 설계·시공한 것으로 확인되었다.

터널 세부지침에 따른 상태평가에서 이러한 구조물의 특성을 명확하게 반영하여 평가하는 것이 필요하며, 최근의 GPR탐사 및 다채널초음파 토모그래피(White et al., 2016), 충격반향기법의 시험(Aggelis et al., 2008) 등을 활용하여 설계와 다른 실제의 시공 상태를 분석하여 정밀안전진단에 반영하고 있다.

4. 결함별 패턴 및 원인 분석

Table 2와 같이 분석된 터널의 결함별 사항은 Choo et al. (2011)이 NATM (무근)터널에서 분석한 종방향, 횡방향, 사방향, 반원형, 망상균열 등과 유사하게 NATM (철근)터널에서도 확인되어 재기술은 생략하였다. 본 연구에서는 철근시공에 따른 결함특성으로 첫째 철근배근에 따른 균열제어 효과를 스캐닝 자료에 근거한 외관조사 물량비교 및 국외 자료를 통해 결함을 분석하였고, 둘째 철근배근 단면의 구조적 특수성으로 인한 결함은 시공단계와 절차를 도식화하여 위치별로 기술하였고, 마지막으로 철근배근을 고려할 환경의 라이닝 두께는 NATM (무근)에 비하여 그 평가가 더 중요할 것으로 정밀안전진단에서 고려될 수 있는 화재, 지진, 주변 침투수에 의한 용탈과 같은 공용중의 환경적 요인 등을 검토하였다. 향후 본 연구를 통해 정밀안전진단(터널) 세부지침의 보완 방향 등을 제시하고자 하였으며 분석된 터널별 관련사항은 Table 2의 ‘Note’에 기술하여 참조될 수 있도록 하였다.

Table 2. Information of analyzed tunnel

No	Group	Tunnel	Length (m)	NATM_Re (m)	Main rebar	Thickness	Geology, Fault	Note	References
1	HRW	IJ	2,780	781	D16 @150/21	400	Biotite banded gneiss	CC, Invert, 2 Arch	Single rebar: D13, Double rebar: D16 (In), D19 (Ex) 2 Arch: D25 Open cut: H22
2		HH	10,002	671	D19 @150/21	400	Migmatitic gneiss, Granite	CC	
3		JS	2,617	405	D16 @150/21	400	Biotite banded gneiss	CC, Invert	
4		HS5	6,247	652	D19 @150/24	400	Conglomerate, Granitic gneiss	CC	
5		WJ	3,401	-	D19 @125/24	400-700	Augen gneiss, Biotite banded gneiss	CC	
6		BR	2,640	-	D16 @150/21	400-700	Biotite granite gneiss	CC	
7		MG	2,988	-	H19 @200/24	400	Granitic gneiss	CC, LL	
8		KO	4,727	441	D19 @150/24	400	Granitic gneiss	CC	
9	GR	CW1	2,340	2,135	D19 @125/24	300, 400 EA	Shale, Granodiorite, Fault	D/C	Free BC, Semi-transverse ventilation
10		CW2	2,345	2,131	//	//	//	D/C	
11		AM1	1,818	1,718	D19 @125/24	300, 400 EA	Bulguksa granite, Granodiorite	D/C	
12		AM2	1,818	1,700	//	//	//	D/C	

Table 2. Information of analyzed tunnel (continue)

No	Group	Tunnel	Length (m)	NATM_Re (m)	Main rebar	Thickness	Geology, Fault	Note	References
13	GR	GR_D	1,076	40	D19 @125/24	400	Biotite banded gneiss, Gneiss	D/C	Free BC, Semi-transverse ventilation
14		NS1_N	1,530	1,530	D19 @125/24	400	Biotite banded gneiss, Seoul granite	D/C	
15		NS1_O	1,532	1,532	//	400	//	D/C	
16		JR	3,300	3,300	D16 @200/21	400	Gneiss	D/C	Rigid (Park et al., 2012), Semi-transverse ventilation
17		HJM	3,780	3,780	D16 @200/21	300	Gneiss	D/C	
18		SSB	2,102	2,008	D19 @125/24	300	Slate	D/C	Free BC, Semi-transverse ventilation
19		BDJ	1,960	263	D19 @125/27	300	Quartz, Granitic gneiss	D/C	
20		NS2	1,622	1,622	D16 @250/24	300-400	Biotite banded gneiss, Granite	D/C	
21		HR_U	1,860	1,860	D25 @200/21	300-450	Andesite	D/C	
22		HR_D	1,860	1,860	//	//	//	D/C	
23		GRW	A	1,800	1,230	D16 @200/21	400	Granite	3 Arch
24	B		1,226	1,160	D16 @200/21	400	//	3 Arch, LL	KHM-JR3, Lee et al., 2009
25	C		750	680	D16 @200/21	400	//	3 Arch	Lee et al., 2009
26	D		899	173	D16 @200/21	400	//	3 Arch	DDM-CG, Lee et al., 2009
27	6_6161		634	617	D19 @150/21	400	Kyonggi gneiss, Seoul granite	2 Arch	
28	K_TK-1		1,497	365	D19 @150/27	700	Granitic gneiss, Daebo granite	2 Arch	
29	D_2-015		911.3	839.6	H19 @ 150/28	400	Shale	2 Arch, LL	
30	D_2-023		1,236.3	1,173.2	H19 @ 150/24	400	Daegu layer	2 Arch	
31	D_2-025		1,239.8	843.1	H19 @ 150/24	400	Daegu layer	2 Arch	
32	D_2-033		1,298.6	995.5	H19 @ 150/24	400	Shale	2 Arch	
33	D_2-056		951	840.2	H19 @ 150/24	400	Alluvial layer	2 Arch	
34	D_2-058	391.1	365.6	H19 @ 150/24	400	//	2 Arch		

Table 2. Information of analyzed tunnel (continue)

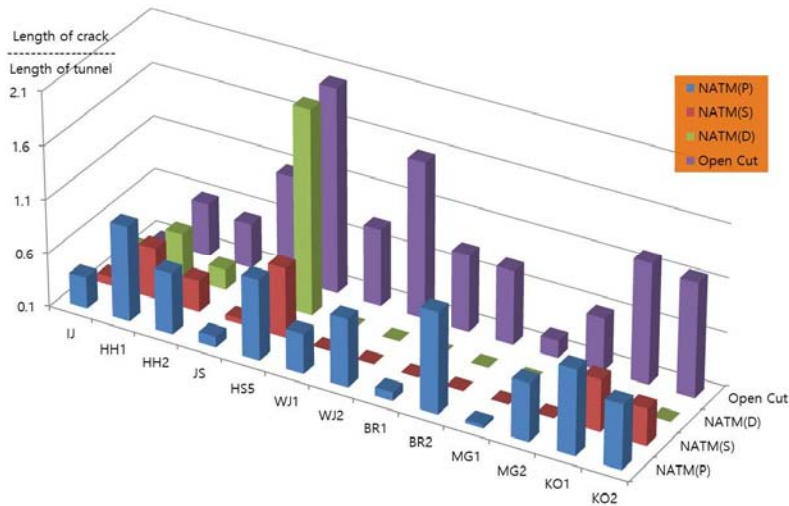
No	Group	Tunnel	Length (m)	NATM_Re (m)	Main rebar	Thickness	Geology, Fault	Note	References
35	HR	HS1	450	225	D19 @ 150/24	400	Sedimentary rock, Granitic gneiss	2 Arch	
36		SR_PG	841.9	420.9	D22 @ 150/24	600	Andesite	2 Arch	
37		SR_IS	892	446	//	//	//	2 Arch	
38	GR	YS	195	195	D19 @ 150/24	400	Granitite, Hwasun andesite	2 Arch	
39	GRW	GK	1,235.5	1,181.1	D19 @ 150/24	400	Gneiss	Invert	
40	GR	DRB	524.8	164.8	D19 @ 150/24	400	Shale, Sandstone	Invert	
41	HR	JS2_GC	1,511.5	258.5	D19 @ 150/24	400	Limestone	Invert	
42		JS2_DY	1,495.5	250.5	//	//	//	Invert	
43	GRW	7_7115	2,007	404.5	D16 @ 200/21	300	Granite, Granitic gneiss	LL	
44		7_7125	90	100	D19 @ 150/21	300	Granite	LL	
45		7_7155	680	590.7	D19 @ 150/21	300	Gneiss	LL	
46		D_1-025	691	461.5	H19 @ 150/21	400	Sandstone, Shale	LL	
47		D_2-011	1,180	896.2	H19 @ 150/24	500	//	LL	
48		5_5137	1,615.5	1,577.3	D19 @ 200/21	500	Gneiss, Alluvial layer	LL, Leaching	
49		5_5145	496	465	D16@ 250/21	300	Biotite banded gneiss	LL	
50		5_5147	1,856	1,806	D16@ 250/21	400	Granitite	LL	
51		5_5149	2,061	2,000	//	//	//	LL	
52		5_5151	1,709	1,531.2	D19@ 200/21	300	Biotite banded gneiss	LL	
53	GR	MSR_D	3,523	554	D19 @ 200/21	300, 400 EA	Granitic banded gneiss	LL	
54	HR	DS1_DG	1,387	61	D19 @ 125/24	300	Tuff, Bulguksa granite	LL	
55		JY	3,105	222.3	D19 @ 125/24	300	Guryungsan layer, Leucogranite	LL	
56		JR	4,600	1,106	D16 @ 125/24	300	Biotite granite gneiss	LL	
57		TY2_TY	1,620	68.5	D19 @ 200/24	300	Andesitic Lapilli tuff	Fire, SF	

Table 2. Information of analyzed tunnel (continue)

No	Group	Tunnel	Length (m)	NATM_Re (m)	Main rebar	Thickness	Geology, Fault	Note	References
58	HR	SJ_NS	1,685	81	D22 @ 150/24	300	Migmatitic gneiss	Fire, SF	Jang et al., 2006
59		DN_IC	3,300	204	D19 @125/24	400	Granodiorite, hornblended biotite	Fire, Leaching	
60		DB_CC	1,075	64 OC	D16 @150/27	300	Palgongsan granite, Grey shale	Fire	
61	GRW	7_7195	442	244	D19 @ 150/21	300	Biotite, Quartz	Fire	Seo et al., 2005
62	HR	IG4_U	1,690	100	D16 @125/24	400	Shale	Invert	
63		IG4_D	1,690	100	//	//	//	Invert	
64		SD, 2017	4,297	NIY	D22 @125/27	300	Serpentine	Invert, EQ	Yoo et al., 2011
65		DJ, 2004	2,080	580.4	D22 @125/24	300	Mudstone	Invert	Kang et al., 2001
66		YB1,2015	15,080	NIY	D22 @125/24	300	Shale	Invert	Kim, 2010
67	HRW	BA, 2009	3,320	1,280	H13 @150/24 D22 @125/24	300 (PD-5) 500 (PD-6)	YangSan fault, 700 m	Invert, EQ	Lee et al., 2010
68		GS, 2007	5,580	1,257	D22 @125/24	400	Andesite, Shale	EQ	
69		DR, 2007	6,620	641	D16 @150/24	400	Portpyrite, Tuff	EQ	
70		DGR	21,755	NIY	D13,16 @150/24 D19, 22, 25 @150/24	400 (PD-5L,H) 400 (PD-6L,M,H)	Imgye granite	Fire, D/C	
71		YH	52,300	NIY	H13 @150/24 H22 @150/24	300 (PD-5) 500 (PD-6)	Banded, Blocky, Migmatitic gneiss	Fire, D/C	
72	GRW	HH	129	129	D16 @200/21	600	Granitite	3 Arch	

CC: Crack control, LL: Lack of lining, EA: Emergency area, D/C: Ductslab/Ceiling, Free BC: No rebar connection btw lining and ceiling, 6: Seoul metro line 6, K: Kwangju metro line 1, D: Daegu metro, 7: Seoul metro line 7, EQ: Earthquake, OC: Open cut, NIY: Not inspected yet (less than 10 years since built), SF: Spalling failure

Fig. 3은 고속철도 터널 별 무근, 단철근(Single), 복철근(Double), 개착공법(Open Cut)의 라이닝에 발생된 균열을 도시한 것으로 각 구간별 조사된 균열의 총길이를 해당 터널연장으로 나누어 ‘균열밀도’라 정의하여 분석하였다. HH1-2, BR1-2, MG1-2, KO1-2터널은 준공 후 10년(1st), 15년(2nd)의 균열밀도이며 보수상태를 파악할 수 있는 지표로 정밀안전진단에서 활용되고 있다. 세부적인 내용은 Table 3과 같다. 향후 정밀안전진단에서 호선별, 관할노선별 결함을 Fig. 3과 같이 지표화하여 관리주체가 유지관리의 우선순위를 현장 결과를 반영하여 선정할 수 있을 것으로 사료된다.



NATM (P): NATM (plain concrete), NATM (S): NATM (single rebar), NATM (D): NATM (double rebar), Open cut: Cut and cover

Fig. 3. Crack occurrence on lining depending on the type of reinforcement (refer to Table 3)

Table 3. Comparison of the effect on reinforcement in crack occurrence

Name	Plain			Single rebar			Double rebar			Open cut			Note
	LT	LC	Ratio	LT	LC	Ratio	LT	LC	Ratio	LT	LC	Ratio	
IJ	1999	776.1	0.39	186	34.2	0.18	595	146	0.25	-			
HH	9268	9043	0.99	473	276.6	0.58	198	101.1	0.51	63.4	37.4	0.59	1st
		6255.1	0.67		184.8	0.39		58.2	0.29		32.9	0.52	2nd (repaired after 1st)
JS	2157	434.6	0.2	300	43.8	0.15	105	2	0.02	55	59.3	1.08	W/ invert: 0.27 W/O invert: 0.19
HS5	5537	4732	0.85	628	469.6	0.75	24	44.9	2.01	58	116.5	2.01	
WJ	3297	1554.8	0.47							103	84.9	0.82	1st
		2409.7	0.73						161		1.56	2nd (repaired after 1st)	
BR	2142	380.4	0.18							498	407.9	0.82	1st
		2235.8	1.04						395.5		0.79	2nd (repaired after 1st)	
MG	2355	310.1	0.13							633.1	164.6	0.26	1st
		1511.2	0.64						376.7		0.59	2nd (repaired after 1st)	
KO	4059	3626.7	0.89	441	255.3	0.58				227	277.3	1.22	1st
		2844.2	0.70		196.8	0.44			263.9		1.16	2nd (repaired after 1st)	

LT: Length of tunnel (m), LC: Length of crack (m), Ratio: LC/LT, 1st: 1st inspection, 2nd: 2nd inspection

4.1 NATM (철근)의 특이균열 관련

4.1.1 철근배근에 따른 라이닝 균열 발생

NATM (무근)터널 라이닝과 달리 NATM (철근)터널 라이닝의 균열은 인장철근을 따라 발생하는 철근배근과 관련된 특이균열과 철근보강단면의 형상(덕트슬래브, 2, 3아치, 인버트 등)과 관련된 특이균열로 구분하였다. 먼저 철근배근과 관련된 특이균열은 개착터널 구간 및 이와 접속된 NATM (철근)터널에 주로 확인되는 균열은 Fig.4의 상단과 같다. 타설로 인한 콘크리트의 불균형력 및 거치된 철근의 변형 등으로 얇은 피복 구간이 발생하거나, 천단부 다짐불량 및 라이닝 타설두께 차이로 인장응력이 작용하는 영역에서 배력철근(터널의 종방향)을 따라 조사되었다. 해당 균열은 주입보수에 의해 유지관리 되어 현장점검에서 쉽게 확인되며 정밀안전진단에서는 해당 보수에 대한 내구성 평가 및 외기에 대한 영향 등을 검토하게 된다.

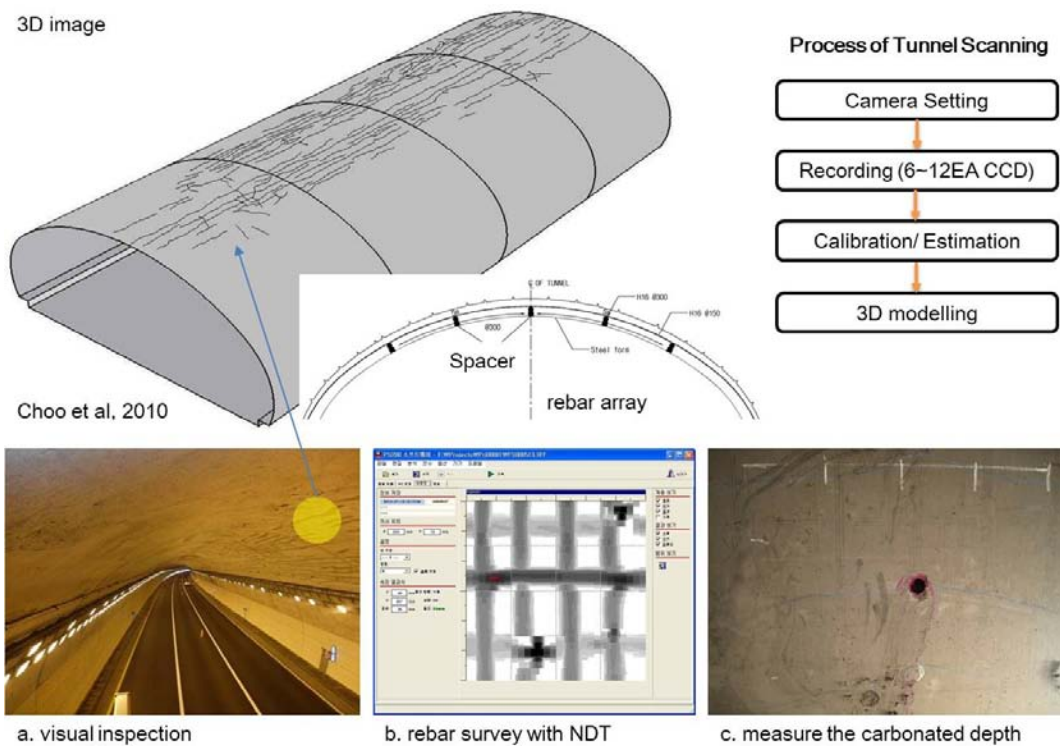


Fig. 4. Unique crack inspection in NATM (Re) related with rebar array and its survey with NDT

이러한 철근배근과 관련된 균열의 발생빈도 특징 및 철근배근으로 가능한 균열제어효과를 확인하기 위해 고속 철도터널 8개소에 대한 균열발생 현황을 정리하였다. 개별 정밀안전진단보고서에는 지반조건에 따른 지보패턴 별 분석을 실시하였으나 보편적인 경향 파악을 위해 Table 3과 같이 무근, 철근(단철근, 복철근), 개착구간의 시공 특징으로 구분하여 분석하였다.

터널연장대비 발생균열연장을 균열밀도율('Ratio'으로 표기)로 표기하여 분석하였으며, 시공방법에 따른 특징을 파악하기 위해 연장별 발생현황을 기울기로 나타내어 경향을 분석하였다(Fig. 5 참조). 일반적인 응력상태를 감안하여 HH, JS, KO터널은 복철근라이닝 < 단철근라이닝 < 무근라이닝의 순서로 균열발생 빈도는 크게 조사되었다. HS5터널과 같이 분석구간이 짧아 단위 미터 당 균열밀도율이 높아지거나, IJ터널과 같이 2 Arch의 연장별 면적이 넓은 경우에 약간의 변동은 있으나, 철근의 인장저항으로 NATM (철근)터널 라이닝이 NATM (무근)터널 라이닝에 비해 더 낮은 밀도로 균열이 발생됨을 IJ, HS5, KO에서도 확인할 수 있었다.

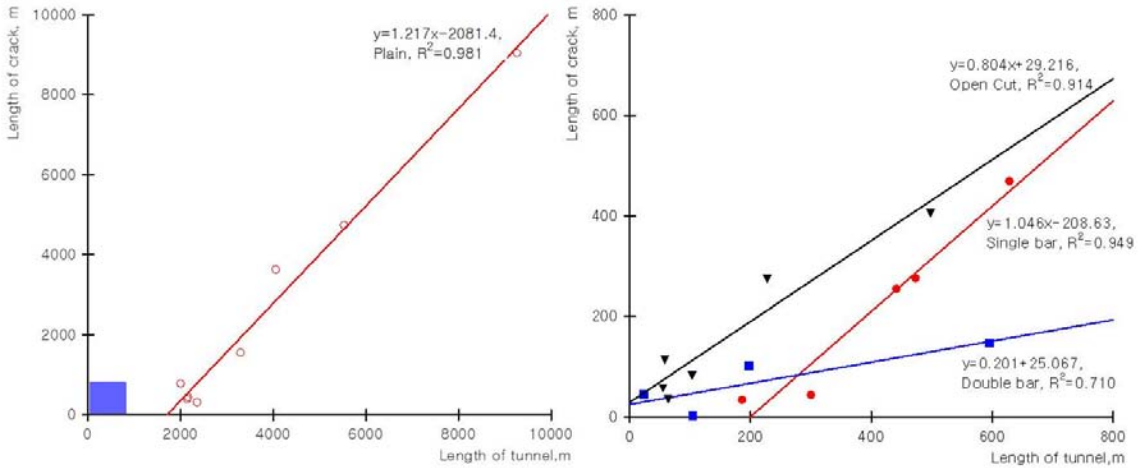


Fig. 5. Slope of crack occurrence related on the length of tunnel

굴착구간과 비교하여 외기 온도영향 및 되메움과 같은 시공 초기 진동 등으로 개착구간에서 높은 비율로 균열이 조사되었으나, HH터널의 경우 다른 터널과 달리 균열발생 밀도가 무근보다 적어 초기품질관리가 상대적으로 양호하며 철근의 균열제어효과가 적절히 발휘되는 것으로 분석할 수 있다.

Fig. 5와 같이 각 터널 연장대비 발생균열연장의 선형보간으로 나타낸 기울기는 시공방법에 따른 균열의 특징을 나타내는 지수로 활용될 수 있으며, 무근은 1.21, 단철근은 1.04, 복철근은 0.20로 단위길이로 표현한 밀도와 유사한 경향을 보였다. 또한, 복철근 구간(0.20)과 유사한 개착구간(0.80)은 외기영향으로 열화 가능환경에 놓여 발생빈도는 높으나 단철근구간(1.04)과 비교하여 균열제어 효과를 나타내고 있는 것으로 판단된다.

Fig. 6과 같이 1차 진단과 비교하여 조사시기가 보수 전·후에 따라 균열밀도가 높거나 낮아지며, 철근구간의 우선적 보수 등으로 0.3 mm 이상의 균열은 2차 진단에 대부분 보수되어 낮은 빈도로 조사되었다. 일부 개착구간의 증가는 외기온도의 영향을 받는 보수재 등의 사용으로 보수효과의 영향은 있으나 대체적으로 0.3 mm 이상의 균열은 보수로 균열밀도가 감소하였으며(WJ, BR), 0.3 mm 미만의 균열은 증가하는 것으로 분석되었다(WJ, BR, MK). JS터널에서 인버트 시공구간에 더 높은 균열밀도가 분석되었는데 이는 4.1.4에 국외사례와 함께 분석하여 기술하였다.

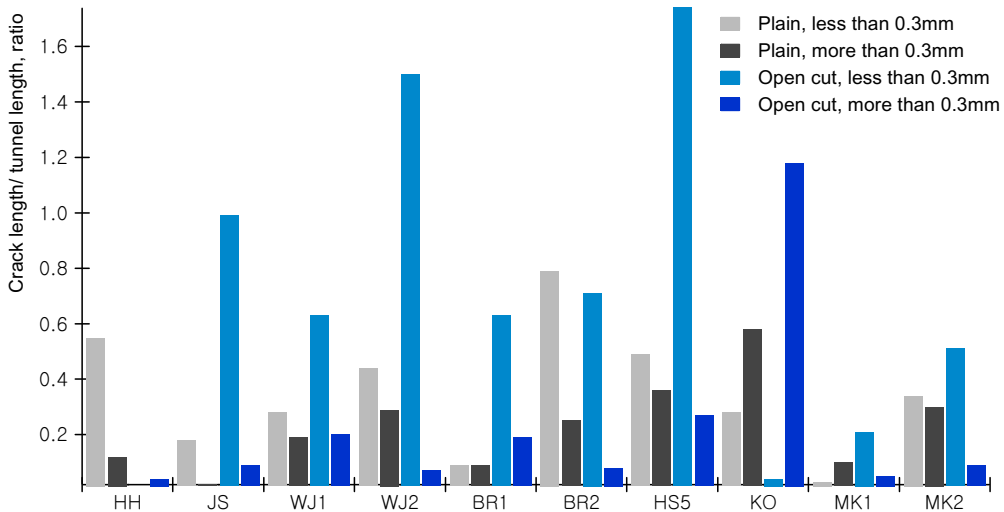


Fig. 6. Density of crack occurrence on lining with and w/o reinforcement

4.1.2 덕트슬래브/Ceiling 설치에 따른 균열

장대터널에서 환기 공간을 위해 설치된 덕트슬래브는 라이닝과 강결 및 분리하여 시공하며, 강결에 따른 결함 특성은 덕트슬래브의 하중에 의한 추가모멘트가 라이닝에 작용하여 덕트부 접속부 상단 2 m 이내에 내측 인장부 위에 종방향균열이 발생하는 것으로 분석하여 본 사례에서는 제외하였다(Park et al., 2012; Choo et al., 2011, Fig. 7 상단 참조). AFTES (2012)의 설명과 같이 라이닝 시공시 지지턱을 선행 시공하고 이후에 조립식 패널형태의 슬래브를 올려두고 단부를 그라우트로 고정하는 방법과 덕트슬래브를 현장 타설하는 경우로 구분할 수 있다. 이때, 패널 거치시 집중하중 및 충격에 의한 지지부의 파손, 거푸집 조기탈형으로 인한 접속부의 박락, 현장 타설된 덕트슬래브 자중에 의한 중앙부 처짐 등과 연관된 결함이 확인되었다. 검토된 덕트슬래브의 두께는 0.25~0.3 m 로 Fig. 7과 같이 양단 강결된 덕트슬래브는 양생시 중앙부에서 가장 큰 건조수축이 발생되며, 자중에 의한 중앙부 모멘트가 작용하여 덕트슬래브 하면에 인장균열이 종방향으로 초기에 발생하는 것으로 분석되었다. 해당 균열은 철근피복이 낮은 시공 스펠에 우선적으로 발생하며 양단 경계조건 및 거푸집 지지 시기 등의 차이로 중앙부 균열은 진전되게 된다. 공용년수의 증가 및 환기창 주변으로 균열이 연장되며 가장 취약한 환경에서는 그 범위가 망상균열의 형태로 확대되는 것으로 16개의 분석터널 중 JR과 HJM터널에서 확인되었다.

덕트슬래브가 설치된 터널의 유지관리사항으로는 해당 결함 보수 및 내구성대책과 더불어 터널 내 공기질 개선을 위해 덕트슬래브 상면 분진은 최소 반기 이상 정기적으로 제거하여 통행환경 개선 및 분기별 정기점검 등에 효율성을 높일 수 있을 것이다.

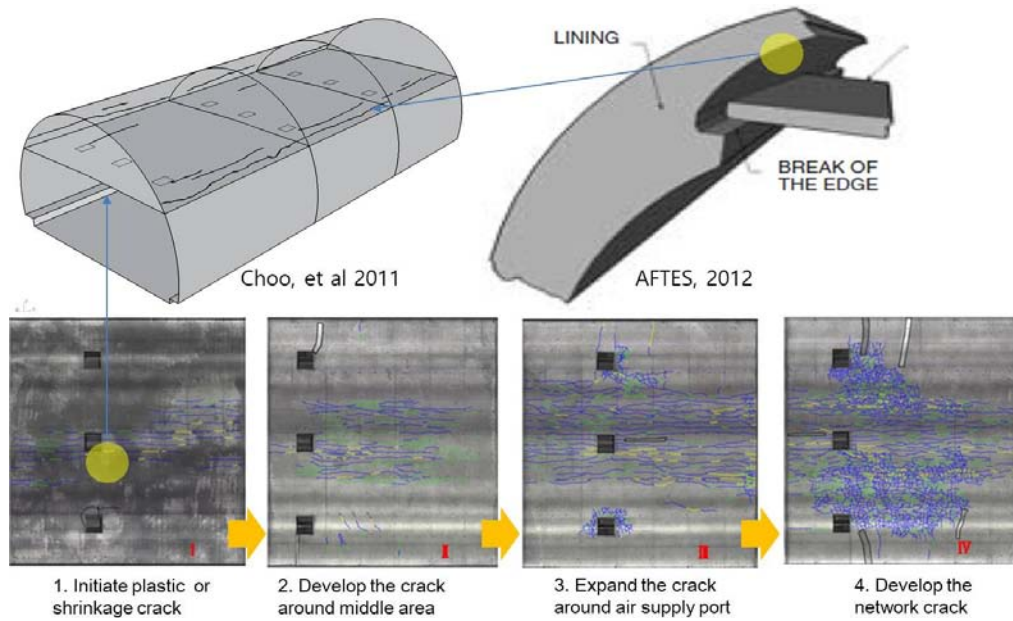


Fig. 7. Characterized cracks related with the duct slab (lining and beneath the ceiling)

4.1.3 2, 3 Arch 형식에 따른 균열

광산에서 사용되는 주방식 석주개념과 구분하여 도로 및 철도터널에서는 병렬터널의 중앙 중첩되는 지반영역 (pillar)을 경제성 및 환경피해 등을 고려하여 하나의 벽체로 설계 시공하게 된다. 이 부분은 추가적인 보강이 수행 되나 선행 지보를 후행작업으로 교란하게 되어 지반의 소성영역이 원지반인 좌·우 벽체보다 크게 발생하게 된다 (Lim and Son, 2014; Lu et al., 2015). 원지반을 보강하여 중앙벽체로 사용하는 2, 3 Arch 터널에서 필러의 주응력 방향, 이방향성, 그에 따른 전단하중의 불균형력 등의 영향을 받는다(Mgnumbwa et al., 2010). 본 연구에서는 필러가 원지반을 콘크리트 기둥으로 대체한 도로 및 지하철의 경우에 국한되어 기술한다.

Lee et al. (2009)은 Table 2의 A~D 터널과 같이 도심지 지하철 3 Arch 형식에서 좌·우 사용선로의 천단 중앙을 기점으로 필러부 천단에 인장균열을 조사·분석하였으며, Wang (2015) 및 Lai et al. (2014)은 고속도로 2 Arch 터널에서는 Fig. 8의 왼쪽 외관조사망도(Table 2의 SR_IS 터널)와 같이 필러부 반대 영역에 균열이 발생한 경우도 확인되었다. 2, 3 Arch 터널에서 필러부의 시공은 원지반과의 변위 및 하중조건이 상이하게 되며 그 원인으로는 Fig. 8과 같이 필러와 공동구의 기초 침하 차이(Fig. 8의 변위 1), 필러와 라이닝의 경계조건 차이(Fig. 8의 변위 2), 필러와 라이닝에 작용하는 지반 불균형력의 차이(Fig. 8의 변위 3) 등으로 추정된다. 좌·우 하중의 불균형력 및 필러와 원지반의 부등침하 등의 원인으로 검토된 17개 중에서 6개의 터널에서 유사한 균열이 확인되었다. 도심지 지하철의 환기를 고려하여 개착식 박스구조물로 환기구를 시공하는데 터널구간과 접하는 급격한 단면변화의 대책으로 2 Arch의 필러를 합벽 형태로 설계·시공하였고 실제 대구지하철 2호선의 대부분의 2 Arch 구간에는 해당 종방향균열을 발생시킬 불균형력 등이 발생되지 않아 유사한 균열은 확인되지 않았다. Fig. 8의 상단과 같이 필러

상단의 집수체계의 열화로 승강장에 누수가 지속적으로 발생하여 추가적인 배수공을 설치하기도 하였다. 진단시 추가 배수관을 기둥 띠철근을 절단하고 매입한 것이 확인되어 커플러를 이용한 띠철근 복원과 기둥부 압축내하력을 복원하기 위한 FREP (Fiber Reinforcement Epoxy Panel)로 구속하여 보강하였다. 승강장의 공간확보로 합벽 형태의 필러부 시공에 제약이 있어 정밀안전진단에서 승강장 마감부를 제거하고 조사된 일부 필러와 필러를 연결하는 종방향 거더에서 전단균열이 발생하여 향후, 설계·시공에 유지관리방안 사항도 고려할 필요가 있다.

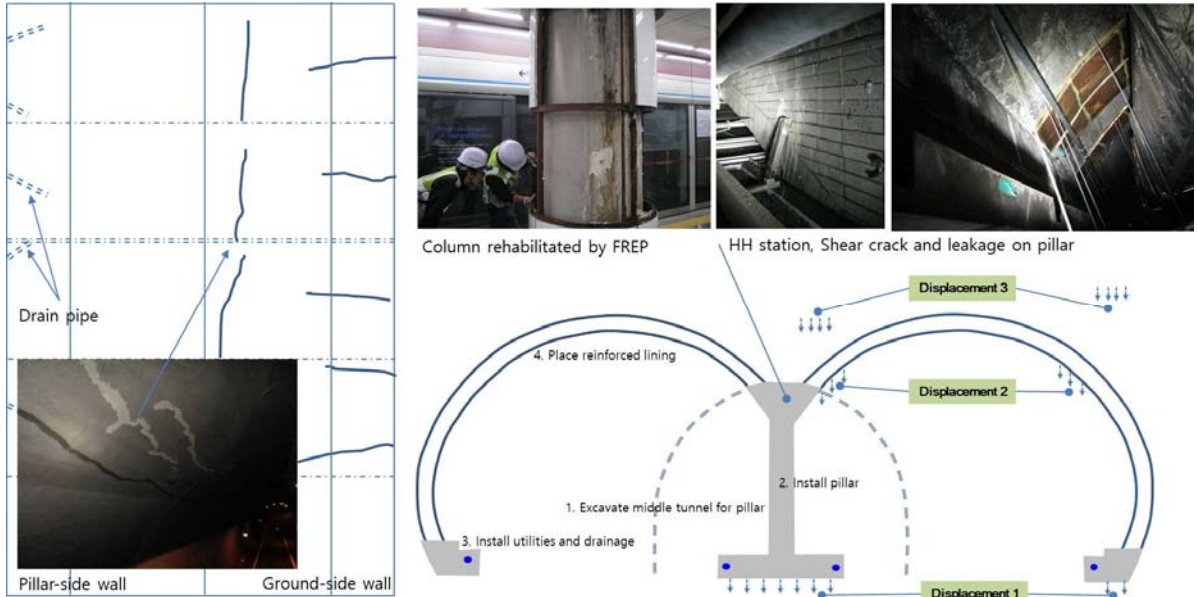


Fig. 8. Characterized cracks on double arch tunnel and typical defects in pillar area

4.1.4 인버트 설치에 따른 균열

Lee et al. (2013)는 인버트 히빙(heaving)과 관련된 50개의 터널을 팽창성(swelling) 지반에 의한 경우, 압착성(squeezing) 지반에 의한 경우, 지진으로 유발되는 경우, 고수압을 받는 경우, 사면활동에 의한 경우, 단층대의 거동에 의한 경우의 5가지로 구분하여 결함을 조사하여 대책을 분석하였다. 정밀안전진단에서는 인버트의 문제로 발견되는 초기 결함은 철도터널은 도상으로, 도로터널은 포장 Overlay 등으로 조사하기 곤란한 것이 일반적이다. Table 2에서 12개의 터널 중 JS터널은 Fig. 9(스캐닝 이미지)와 같이 인버트설치 구간에서 NATM(철근)에는 발생되지 않은 전단부 종방향 균열이 NATM(무근)에 발생되었다. 진단 기간 중 진행성 판단은 계측기간이 짧아 곤란하였으나 Askura and Kojima (2003)가 Tsukayama터널의 종방향균열에 대한 원인을 팽창성 지반의 거동으로 라이닝 천단에 압축력이 작용하는 것으로 분석하였다. 유사한 균열 발생 메커니즘이 AFTES (2015)에서도 기술되고 있어 정밀안전진단에서는 인버트 시공구간의 해당 균열은 1차지보의 열화와 동반하여 진행성이 예측되는 결함으로 지속적인 유지관리를 시행하도록 제안하였다.

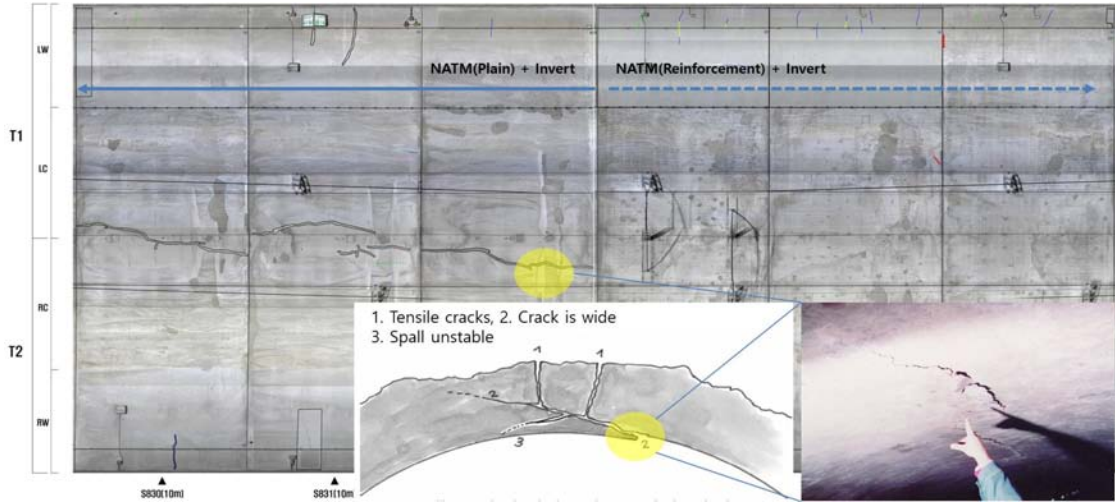


Fig. 9. Typical Characterized cracks on the reinforce tunnel with/without the invert

히빙의 대책으로 인버트를 고려하는 팽창성 지반으로는 경석고(anhydrite), 황철석(phrite), 이암(mudstone), 셰일(shale), 응회암(tuff), 사문암(serpentine), 편암(schist) 등에서 발생한 것으로 보고되고 있어, 정밀안전진단의 자료조사편에서 인버트 시공구간에 대한 지반조건을 함께 고려한 외관조사망도의 분석을 병행하여야 한다. 도심지 지하철의 노선경사는 지하수의 흐름이 낮은 곳으로 유도되는 경우, 배수체계의 열화 및 인버트에서 유입되는 수압 등으로 배수로 주변에 상시 체수가 다수의 현장에서 조사되었다. 이때, 계절적 체수 범위의 변동, 타움 및 시험공 등을 분석하여 도상콘크리트의 건전도 및 배면상태를 평가 하여야 한다.

4.2 철근배근과 관련된 결함

대단면 터널의 콘크리트라이닝 타설은 Kim et al. (2006a, 2009b)의 연구에서와 같이 일반적인 한 개의 시공이음 사이에는 9~12개의 점검창이 있으며 Fig. 10의 b슈트홀(천단, 좌·우 벽체)의 3개의 위치에서 타설하는 경우가 대부분으로 펌프압에 의해 기존 라이닝과 접속부까지 채워지는 방식이다(b슈트홀 → ② → ③ 또는 b슈트홀 → ①). 한 개의 시공이음 스팬(Span)은 여러 번의 레미콘을 펌핑하여 타설하며 타설 지연시간 및 거푸집의 마찰과 다짐불량 등으로 a와 같은 쪼개진 형태의 국부적인 균열 및 한 스팬 전부에 타설이음이 ①의 점선과 같은 형태로 조사되며, 배수체계가 열화 되었거나 침투수가 있는 경우 이러한 이음으로 누수 및 백태가 조사되었다. 무근의 경우 b슈트홀 → ② → ③로 펌프압으로 기존 접속부까지 밀실하게 채워지거나 채움부족에 따른 backfill을 실시하나 GPR탐사 결과는 한쪽(③)의 라이닝 시공이음부 부위에서 균등하지 않은 것으로 분석된다. 천단부 반원형 균열 발생도 이와 같은 이유로 단면두께가 불규칙한 위치에서 발생된다. 동일한 조건에서 철근을 배근하면 경우 b슈트홀 → ② → ③로 압송하는 상황이 철근의 부착 및 마찰로 제한되게 되어 실제 시공이음부 주변의 채움이 없는 상태가 발생되어 향후 시공 및 정밀안전진단에 이를 고려한 평가 시험방법 및 품질관리가 필요한 실정이다.

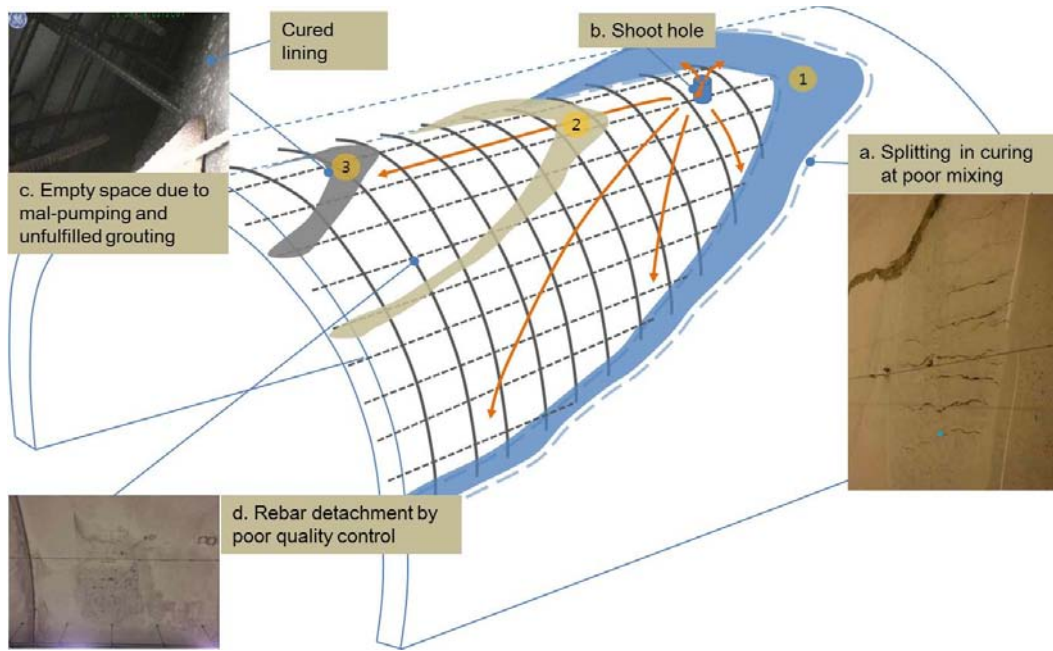


Fig. 10. Schematic display for pumping concrete in reinforced NATM tunnel

4.2.1 주철근의 노출

정밀안전진단에서 확인된 주철근의 노출은 굴착 중의 미굴 등으로 인한 단면 확보가 안된 경우, 공동구 타설 중 연장철근의 결속풀림과 이동, 라이닝 타설 중 불균형력으로 인한 철근의 이동, 부분적인 결속 풀림, 철근이음의 선형관리 부족, 스페이서 간격 미흡 등에서 발생하는 것으로 분석된다. Sandrone and Labiouse (2010)은 Fig. 11과 같이 공용 중 방수체계가 정상적인 라이닝은 겨울철 제설재의 살포에 따른 부식 가속환경을 만들며 균열부 및 피복 부족 구간에 철근부식에 따른 박락을 유발할 수 있는 것으로 분석하였다. 또한, 도로포장에서 최대 1.8미터 까지 습윤상태가 가능하며 습윤 깊이별 염화칼슘의 농도에 따라 동결 깊이가 영향을 받아 30년 된 라이닝에서 표면에서 최대 50 mm까지 열화가 진행된 것으로 분석하였다. 제설재 살포기간이 긴 도로터널의 정밀안전진단에서는 환산 염화물량의 보수기준이 c등급(1.2 kg/m^3) 이내임을 감안하여 최소 50 mm 이상의 코어를 채취하여 깊이 별 분석을 권고하고자 한다.

4.2.2 전단철근의 노출

내/외측 철근의 간격 및 전단 저항을 목적으로 설치하며 콘크리트 타설시 낙하되는 높이 및 좌·우 타설량의 편기로 인한 힘의 불균형 등으로 철근결속이 풀려 표면에 노출되는 경우가 일반적이다. 측벽과 달리 천단 및 덕트슬래브 하면의 전달철근 보수는 방청처리 없이 국부적으로 시행될 경우 운영 중 보수부의 박락으로 추가적인 사용성의 문제가 될 수 있어 보수방법 선정에 유지관리에 대한 문제점을 고려하여야 한다.

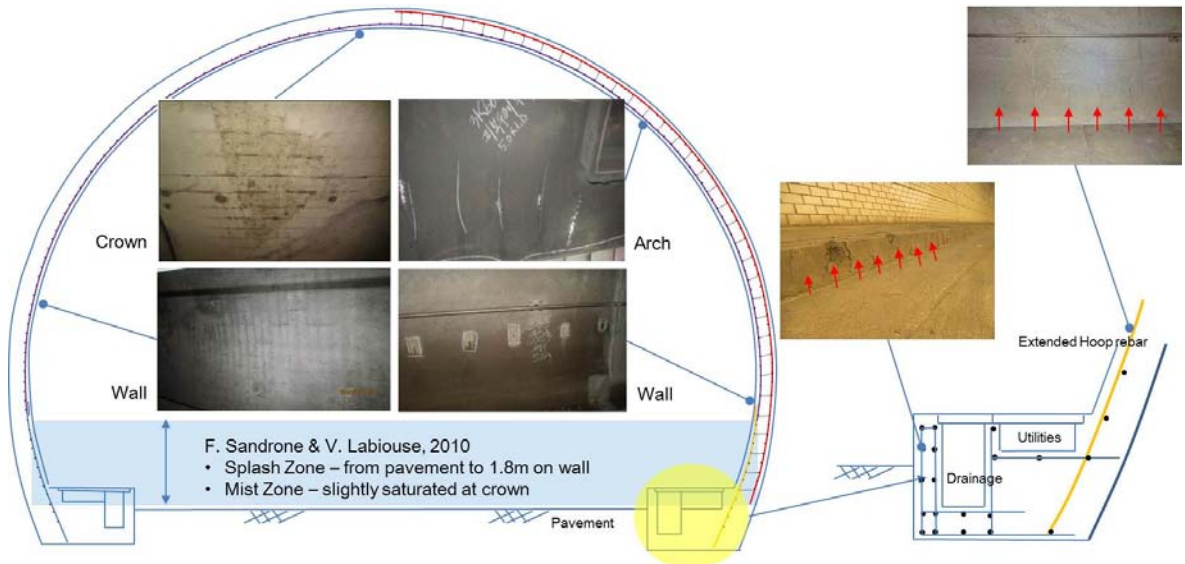


Fig. 11. Typical reinforcement exposures in reinforced NATM tunnel

4.3 라이닝 두께

NATM(철근)터널에서 두께와 연관된 세부지침 내용은 파손 및 손상, 박리, 층분리 및 박락의 평가기준이 있으며, 본 연구에서는 현장에서 고려 될 수 있는 시공여건에 따라 타설이 충분히 되지 않는 경우, 열화환경, 화재 및 지진으로 인한 라이닝 박락이 발생한 경우, 배면 침투수와 라이닝의 화학적인 용해로 인한 용탈(Leaching)로 두께가 얇아지는 경우로 구분하여 기술하였다. 동상용해, 층돌, AAR(Alkali Aggregate Reaction)등으로 라이닝에 미치는 영향은 제외하였다.

4.3.1 채움부족으로 두께가 부족한 경우

NATM(철근) 라이닝의 시공에서 취약함으로 언급되는 것은 품질관리가 쉽지 않은 점이다. NATM(무근)의 경우 라이닝 타설과 추가적인 경량콘크리트를 이용하여 채움 부족을 보완하는 시공방법을 채택하고 있다. 이러한, 라이닝에 대한 품질관리를 위해 초기점검에 GPR 탐사를 의무적으로 시행하도록 규정하고 있다. 하지만, NATM(철근)은 GPR탐사의 전자기파가 철근의 간섭으로 일반적으로 수행되는 두께 검증 및 배면탐사에 낮은 신뢰도를 보여 현실적으로 이를 평가하지 못하고 있는 실정이다.

Fig. 12와 같이 NATM(철근)터널은 철근조립에서 그 형태를 유지하기 위해 방수막(②)을 관통하여 고정용 앵커(③)를 이용하여 슛크리트(①) 및 암반에 철근(④)을 거치하며 이때, 내·외부의 피복을 확보하기 위해 철근에 실린더 형태의 스페이서(④)를 이용하는 것이 일반적인 절차이다. 슈트홀을 이용해 콘크리트를 압송하여 타설(⑤)하고 이후에 채움 부족구간을 보완하기 위해 배면공동 backfill 그라우팅(⑥)을 실시하게 된다. 종방향균열 및

타설이음으로 인한 시공상의 취약함을 낮추기 위해 거푸집에 여러 개의 슈트홀을 설치하여 타설하는 방법이 소개되기도 하였으나 국내의 대부분의 라이닝은 전/후 시공이음 사이(L)로 약 1/3 L 천장 위치에 하나의 콘크리트 슈트홀을 두어 압송하는 방식이다. 라이닝 측벽은 다수의 점검찰을 이용하여 다짐 및 타설 상태를 확인할 수 있으나 과다다짐 등의 품질관리 미흡으로 발생하는 블리딩으로 측벽 망상균열이 연속하여 조사되기도 한다. Fig. 10(b)와 같은 슈트홀에서 먼 시공이음부에 채움부족이 NATM (무근)에 비해 NATM (철근)구간에서 17개소 (Table 2 참조)가 확인되었으며, Fig. 13과 같은 유지관리방안으로 향후 정밀안전진단 및 시공에 활용될 수 있도록 하고자 한다.

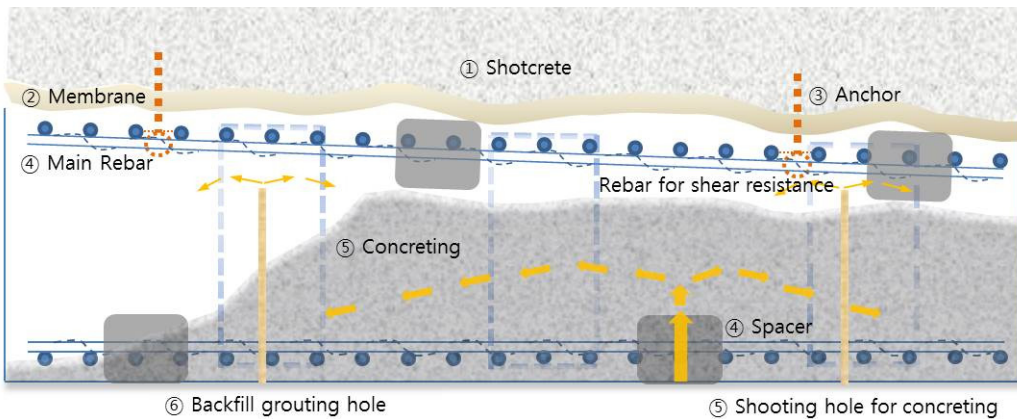


Fig. 12. Typical installment of reinforced concrete lining in NATM

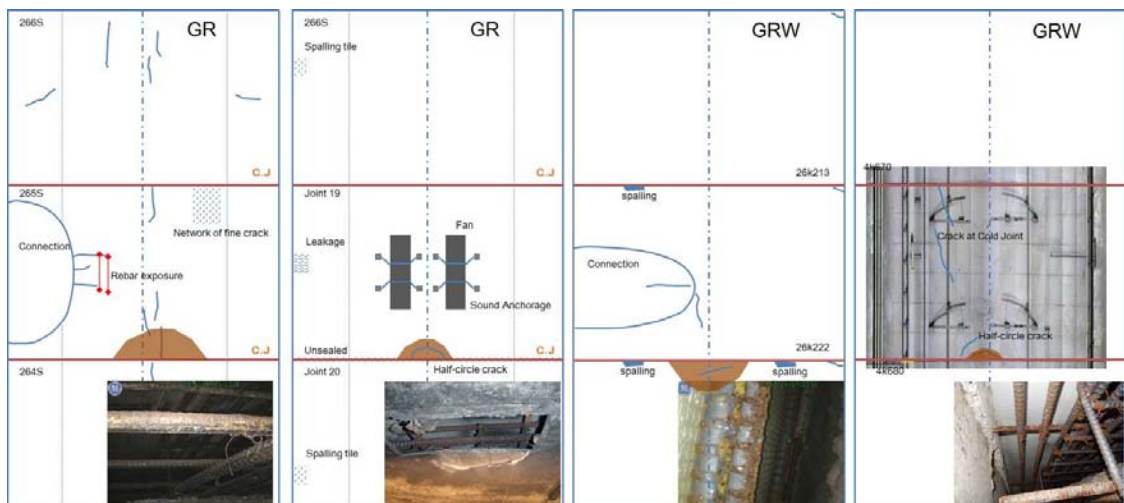


Fig. 13. Input parameters of the analysis

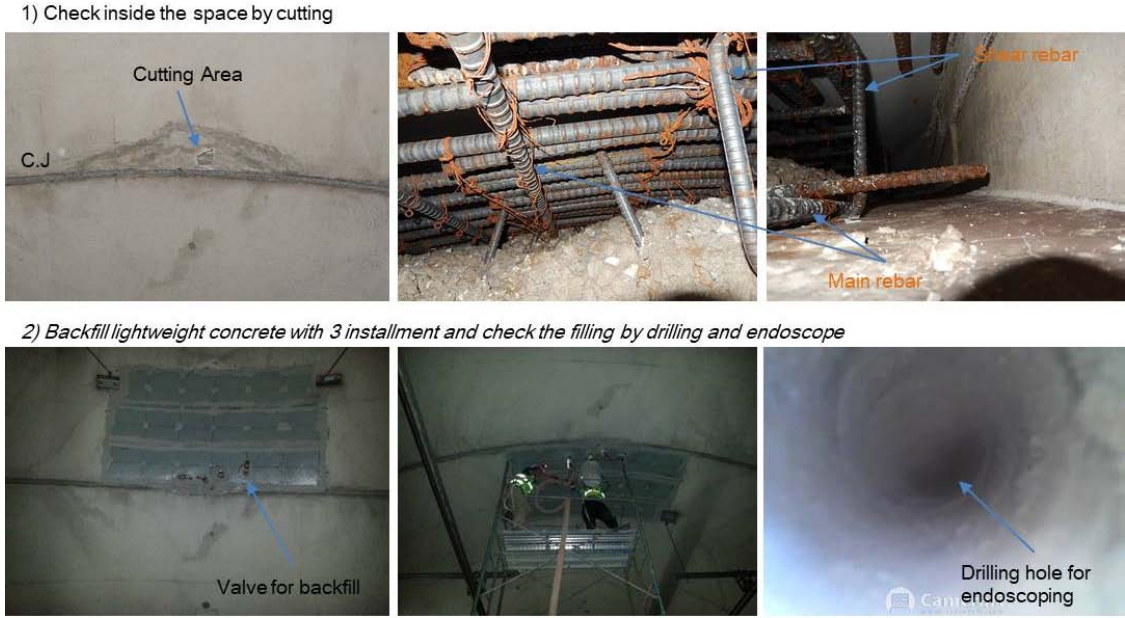


Fig. 13. Input parameters of the analysis (continue)

무근구간에서는 연결통로 및 비상주차대의 접속부는 타설 단면이 증가되어 연속된 타설물량 및 펌프압 등의 관리가 달라져야 하나 이를 고려하지 못하였을 것으로 추정되며, 더불어 철근배근구간에서는 라이닝 두께의 품질관리가 더 곤란하였을 것으로 판단된다. 도로터널의 경우 무근으로 대부분 시공되나 환기팬 및 중앙연결통로에만 NATM(철근)으로 시공되어, 대부분의 구간은 동일한 펌프압으로 타설 할 가능성이 높아, 단면확대 구간에서는 철근으로 인한 부착 및 마찰 저항에 대한 고려가 추가적으로 필요하다.

무근구간과 같은 시공이음부 주변의 반복된 반원형 균열은 Fig. 10과 같은 타설의 문제로 발생 가능한 라이닝 두께부족 구간과 연관성이 있는 것으로 Fig. 14 (위)와 같이 확인되고 있으며, GPR탐사를 병행하여 분석하는 것이 일반적이다. 반면에, Fig. 14 (아래)의 NATM(철근)의 경우 전자기파의 난반사로 인한 신호분석이 곤란하여 선택과업에서 GPR탐사를 지양하고 있는 실정이다. 금번의 조사 결과를 감안할 때, NATM(철근)구간에서도 채움부족에 대한 GPR의 신호분석, 시공이음부 반원형 균열, 타음 등의 종합적인 판정이 요구되는 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 향후 초기점검에서는 전구간을 시행하여 시공품질 상태를 검증하여 시설물 선진화를 도모할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 13의 대표적인 라이닝 채움부족(시공이음부의 음영된 반원)은 라이닝 타설시 단면변화에 따른 압송압과 타설량의 조절 오류, 타설시간의 지연으로 인한 조기경화와 철근과의 부착 등으로 유동성 저해, 철근배근에 따른 초기 품질관리 미흡등의 원인으로 발생하는 것으로 향후 시공 및 유지관리에서 이를 고려해야 한다. 이러한 결함에 대한 대구지하철의 보강사례는 Fig. 13의 아래와 같은 절차로 향후 유사결함에 대한 관리주체의 유지관리 공법결정에 도움이 되고자 한다.

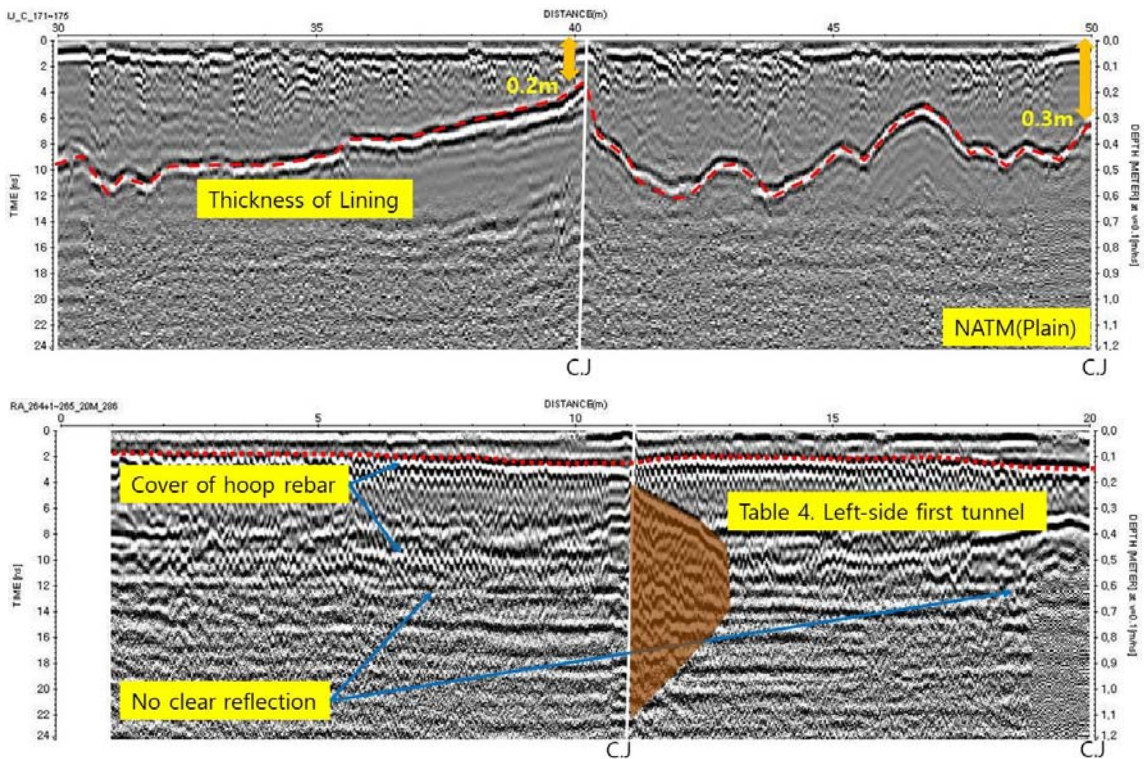


Fig. 14. Correlation between the half circle crack and thickness with GPR

4.3.2 박락으로 두께가 부족한 경우

라이닝 박락은 운용 중 열화환경에 지속된 노출로 발생되는 경우, 화재로 인한 폭열 및 지진에 의한 경우로 제한하여 기술하였다.

1. 열화환경에 지속적인 노출에 의한 박락

Askura and Kojima (2003)은 NATM (무근)인 Rebunhama 터널에서 Fig. 15의 왼쪽과 같이 라이닝 타설 시점에 1차 지보재의 변형 및 지속된 열화, 이로 인한 라이닝에 썩기형태의 분리면이 형성되었으며 공용 중에 편칭 파괴 형태의 취약부가 박락된 것으로 분석하였다.

NATM (무근)의 국내지하철 사례는, Fig. 15의 오른쪽과 같이 미굴로 인한 라이닝 두께 부족과 해당위치에 지속적인 배면 침투수로 인해 라이닝과 방수막이 들떠 있게 되었고 장기간 지하수위의 변동, 건설의 반복 환경, 수압증가, 공용 중 열차진동 등으로 취약부가 박락된 것으로 추정하였다(MOLIT, 2007). NATM (철근)의 경우 상대적으로 지반 열화로 인한 하중변화의 적응성은 있으나, 침투수위의 변동 및 수압증가 등으로 인한 철근부식 환경은 취약할 수 있어, 향후 정밀안전진단에서 유사성이 있는 결함을 사전에 인지하여 유지관리에 참고가 될 수 있도록 하고자 한다.

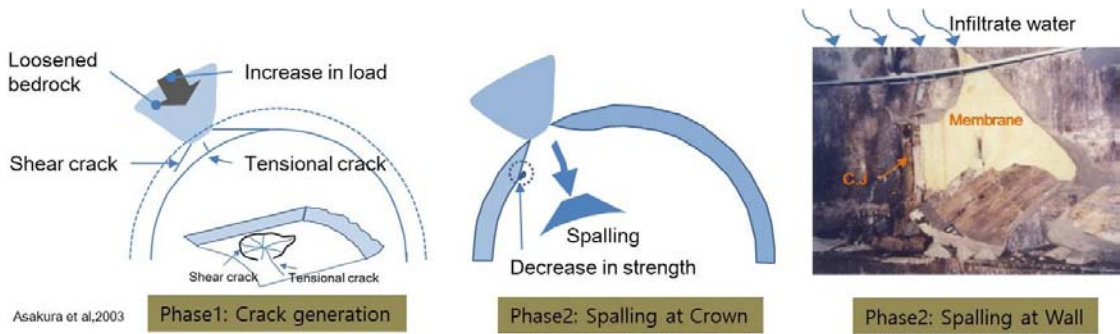


Fig. 15. Spalling at lining in NATM on wall (left) and crown (right)

Käthler et al. (2017)은 2년 미만의 단기(신생) 균열은 부식환경을 가속할 수 있다고 하였지만, 정밀안전진단이 처음 실시되는 10년 이상의 장기적인 측면에서는 가속환경과 더불어 철근의 부식 및 부산물 등으로 균열이 폐색(clogging)될 수 있어 관련된 부식-균열진행 경향이 일관되게 지속되지는 않는다. 따라서 박락 평가를 위한 대표 위치에 대한 샘플을 선정할 때에는 균열빈도, 모양, 하중조건의 변화, 주변 지하수위의 변동, GPR탐사 결과 등에 대해 추가 검토를 고려할 수 있다.

2. 화재로 인한 박락

화재로 인한 콘크리트 가열은 내부 공기의 팽창 등으로 폭발을 유발하며 이를 폭열로 나타나게 된다. 국내 지하철 및 도로터널의 화재로 인한 단면감소와 그에 따른 구조물 전체의 안전성 저해요인을 Table 2의 7개 터널에 대해 검토하였다. 화재 발생시 표면온도와 노출 정도에 따른 열화의 피해범위가 달라지며 정밀안전진단에서 코어를 이용한 최대온도를 분석하며 깊이별 피해범위를 산정하여 단면복원을 결정하게 된다. 이때, 보강재에 대한 평가도 병행하여 고려한다. 기존 화재터널에 대한 진단사례를 감안한 다음과 같은 유지관리의 주안점을 고려하고자 한다. Seo et al. (2005)는 원형의 단면이 박스단면보다 온도의 영향을 적게 받고 있다고 하였으나 발원의 에너지원에 따라 달라져 정밀안전진단에서 선택과업으로 현장조건을 고려한 화재시나리오 등을 분석하여 보다 선진화된 평가가 필요하다. 터널내 화재는 자동차, 모터카, 발전기 등의 발화로 진단에서는 그을음 영역과 구조적 취약성을 지니는 폭열영역으로 구분 할 수 있으며, 관리주체의 보수 예산순위에 밀려 그을음 영역은 대부분 그대로 방치되고 있는 실정이다(Fig. 16 참조). 화재사고가 발생한 터널의 경우 피해범위, 보수범위 등을 기존 자료조사에 보다 상세히 기술하여 향후 점점 및 진단마다 달라지는 기술자에게 알려 보다 합리적인 조사 및 유지관리를 시행할 수 있도록 하는 것이 바람직하다. Mont Blanc터널, Tauern터널, Gotthard터널 등의 사고와 같은 해외 화재에 대한 전문가 리포트가 작성·공유되고 있어 향후 설계, 시공, 유지관리의 환류가 이루어질 수 있는 환경을 만들어야 한다. Leitner (2001)이 보고한 Tauern터널은 격벽이 있는 덕트슬래브의 터널 화재로 4.1.2의 대상 터널의 경우 향후 유지관리방안에 참고할 것을 제언하며, 대심도, 장대터널의 화재 안전기준관리 및 정밀안전진단에서의 성능평가 항목 등에 이를 고려할 연구가 필요할 것으로 사료된다.



Fig. 16. Damaged surface by fire on subway (left) and road (middle), tauern (right)

3. 지진에 의한 박락

Table 2의 경주지진 인접 4터널을 검토한 결과 국내 피해는 조사되지 않았으나 대만 Chi-Chi, 일본 Niigataken-Chuetsu (Yashiro et al., 2007) 지진, 중국 Wenchuan 지진, 그 외 외국 자료에 연구된 결함은 Fig. 17과 같은 신규로 깨어진 균열과 균열주변의 박락이 동반됨을 확인할 수 있다. Wang et al. (2001)은 무근 라이닝에 단면변화부, 갱구부, 단층통과구간 등이 박락에 취약한 것으로 하중 및 지형조건에 따른 9가지의 결함패턴을 분석하였다. 지진에 의한 박락은 NATM (철근)터널 라이닝에서는 그 빈도가 상대적으로 낮을 것으로 판단되나 지진 인접지역은 세심한 외관조사로 향후 지진으로 인한 라이닝 결함 변화가 검토되어야 한다. 국가주요 시설로 건설 당시의 단층대 통과 사항, 천층으로 관리되는 구간, 국내 지진이력으로부터의 영향거리 등에 대한 사전 연구가 필요하며 향후 그에 따른 지진피해를 파악하는 매뉴얼 및 특성교육의 강화가 필요한 실정이다.

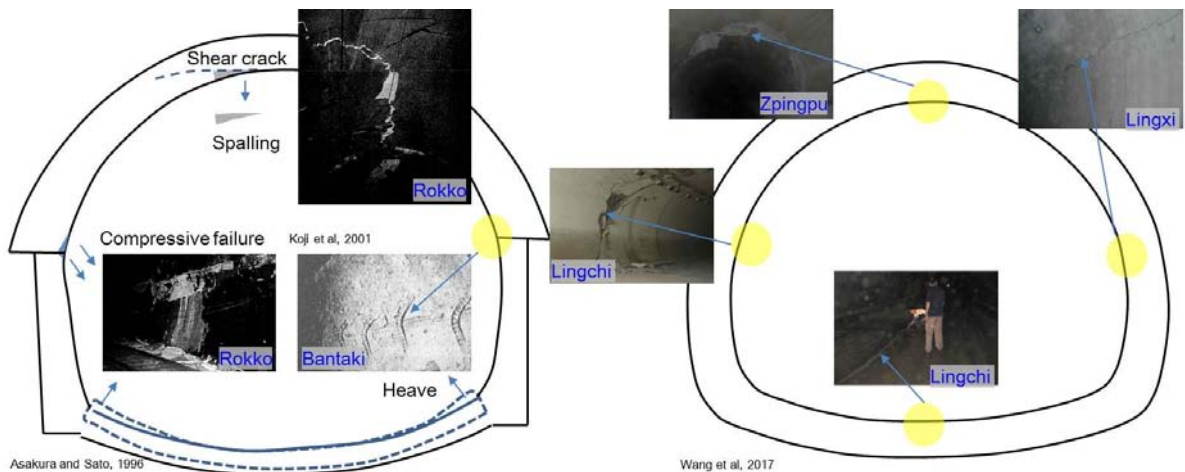


Fig. 17. Seismic damage on tunnel lining

4.3.3 용탈로 인해 두께가 부족한 경우

시멘트의 수화작용에 의해 발현되는 강도는 Ca^{2+} 농도에 따른 용탈로 열화가 가속되는 것으로 연구되었으며, Gerard et al. (2002)는 칼슘이온 2 mmol/L의 농도로 균열폭 0.3 mm에 지하수 흐름을 만들어 $0.4 \times 10^{-9} m^2/s$ 의 확산계수 환경에서 20년 기준으로 대략 두께 100 mm의 용탈된 라이닝은 강도의 80%를 상실하게 되며 공극을 증가시켜 열화환경이 가속화되는 것으로 분석하였다. Sandrone and Labiouse (2010)은 Yokozeki et al. (2004)의 용탈로 인한 분석에서는 100년에 100 mm가 용탈되는 것으로 분석된 자료 등을 감안할 때, 정밀안전진단에서 용탈로 인한 라이닝 두께 감소는 환경에 따라 변동이 있어 시험방법 및 평가절차에 대한 기준정립이 필요한 상태이다. 정밀안전진단에서의 용탈로 인한 라이닝 두께 감소와 더불어 그라우트 및 숏크리트의 용탈은 $CaCO_3$, $Ca(HCO_3)_2$ 의 용해도의 차이에 따라 침전 결합하여 Fig. 18 왼쪽과 같이 배수구 막힘 등의 배수체계 열화요인을 유발하게 된다. Fig. 18 오른쪽 Thurmman et al. (2015)의 분석과 같이 시공이음, 균열, 타설이음의 누수와 더불어 탄산가스 노출환경인 도로터널에서는 배수구 조사와 병행하여 용탈로 인한 라이닝 두께감소에 대한평가를 수행하는 것을 고려해야 한다.

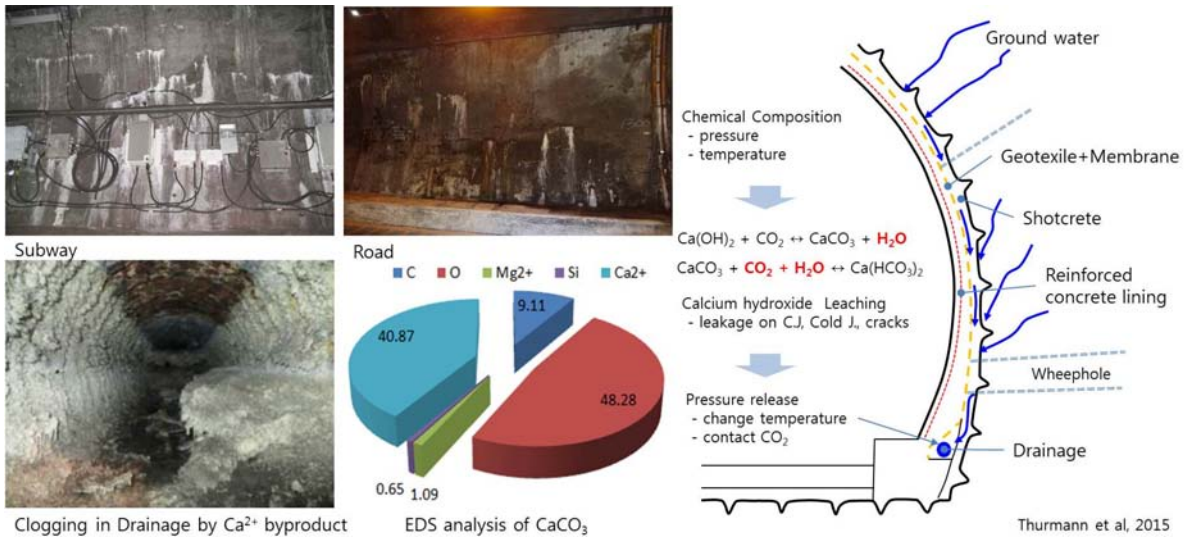


Fig. 18. Calcium leaching on lining (left) and chemical modelling concept (right)

Sandrone and Labiouse (2010)의 도로터널 사례와 같이 배면 침투수의 용탈은 단지 두께의 문제만이 아닌 라이닝 탄성계수 및 강도에 영향을 주는 것으로 조사되어, 향후 정밀안전진단에서 상태평가 항목인 라이닝 두께와 더불어 안전성 평가에서도 중요 영향인자가 될 수 있어 국내에서도 이에 대한 연구가 필요한 실정이다.

5. 결론

시설물의 정밀안전진단이 도입된 24년의 기간에 국내 시설물 진단기술의 향상 및 관련 직종의 발전이 현재까지도 지속되고 있다. 한국시설안전공단에서 실시된 정밀안전진단 결과, 시설물통합정보관리체계, 관련 해외 사례를 통해 NATM (무근)에 연속한 NATM (철근)에 대한 결함 특성을 다음과 같이 분석하였다.

1. 통상적인 갱구부 접속부, 연결통로, 환기구 접속부, 비상주차대 등의 영역 이외에도 NATM (철근)으로 고려하는 도심지 지하철을 포함하는 일반철도가 설계·시공 비율이 높은 것으로 분석되었다.
2. NATM (철근) 라이닝의 특수성은 NATM (무근)에 비해 균열이 제어될 수 있음을 고속철도 사례를 통해 분석하였으며, 균열 빈도의 비교시 조사연장, 보수시기 등을 고려하여야 한다.
3. 철근배근과 관련된 균열은 인장응력부 얇은 피복부에 특징적으로 조사되었으며 외기영향을 고려한 유지관리방안을 고려해야 한다. 복철근, 단철근, 무근순으로 균열발생 빈도가 낮은 것을 감안할 때 철근배근에 따른 균열제어효과를 확인할 수 있었으며, 개착구간은 0.3 mm 미만의 균열증가를 감안하여 내구성 확보를 위한 유지관리방안이 고려되어야 한다.
4. 덕트슬래브를 강결하는 경우, 기존 보고된 덕트부 라이닝 종방향균열과 더불어 덕트슬래브 하면의 종방향 특이균열이 발생됨을 고려한 유지관리를 검토하여야 한다.
5. 일반 터널단면과 비교하여 횡단면 응력 및 변위의 불균형이 발생 가능한 2, 3 Arch터널의 경우 발생 변위의 상대적 차이로 종방향 인장균열이 발생될 수 있어 조사자의 해당 결함 인지와 결함 정도에 따른 유지관리방안을 고려해야 한다.
6. 팽창성 지반에 고려되는 인버트의 설치로 인해 천단부 압축력으로 인한 균열이 보고되고 있으므로, 인버트가 시공된 터널의 경우, 지반특성을 고려한 천단부 종방향 압축균열이 발생될 수 있어 조사자의 해당 결함 인지와 결함 정도에 적합한 유지관리가 요구된다.
7. NATM (철근)구간의 라이닝 채움부족으로 인한 두께부족을 증점기술 하였으며, 적합한 보강사례를 통한 향후 유지관리방안을 제시하였으나, 해당 결함에 대한 시험방법 제약 등은 향후 정밀안전진단 기술발전이 요구되는 분야로 추가적인 연구가 필요한 실정이다.
8. 미굴 단면의 라이닝에서 발생될 수 있는 배수체계의 열화 및 기타 작용하중 등으로 NATM (무근)의 박락이 보고 되었으나 NATM (철근)에서는 철근의 부착 등의 결속으로 피해사례의 빈도는 검토된 터널에서는 확인되지 않았다.
9. 화재 피해로 인한 터널 라이닝에 대한 평가절차 및 시험방법이 정밀안전진단의 세부지침에 제시되고 있지 않아 정확한 유지관리방안이 모호하며, 단면복원을 제외한 그을음의 경우 보수 없이 존치하여 터널 내 환경 개선을 위한 유지관리방안의 개선이 요구된다.
10. 경주지진으로 인근 터널의 피해결함은 확인되지 않았으며 지진 피해사례가 보고된 국외자료를 근거한 패턴

별 결함을 분석하여, 기술자가 지진피해를 인지하고 발생원인 및 보강방안에 대한 체계적인 조사방법 및 유지관리방안의 연구가 필요한 실정이다.

11. 결함부 누수로 인한 라이닝 열화와 더불어 겨울철 제설재 살포에 따른 라이닝 습윤구간에 대한 평가절차와 정밀안전진단 세부지침의 개정이 필요하며, 열화 환경변화에 따른 구체적으로 평가할 수 있는 체계적인 연구가 필요한 실정이다.

이와 같이 NATM (철근)터널 라이닝에 대한 특이결함 및 유지관리방안을 정밀안전진단 사례 및 해외 연구자료를 통해 향후 진단 종사자 및 설계·시공에 참고될 수 있는 자료를 제공하고자 하며, 추가적으로 논문에서 언급된 필요한 조사 기법연구, 분석방법 절차 및 기준정립 연구, 관련 세부지침의 개정 등이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구에 자료를 공유해주신 한국시설안전공단 터널진단 동료에게 깊은 감사를 드립니다.

References

1. Aggelis, D.G., Shiotani, T., Kasai, K. (2008), "Evaluation of grouting in tunnel lining using impact echo", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 23, No. 6, pp. 629-637.
2. Asakura, T., Kojima, Y. (2003), "Tunnel maintenance in Japan", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 18, No. 2-3, pp. 161-169.
3. Aydan, Ö., Ohta, Y., Geniş, M., Tokashiki, N., Ohkubo, K. (2010), "Response and earthquake induced damage of underground structures in rock mass", *Journal of Rock Mechanics and Tunnelling Technology*, Vol. 16, No. 1, pp. 19-45.
4. Balaguer, C., Montero, R., Victores, J.G., Martinez, S., Jardón, A. (2014), "Towardly fully automated tunnel inspection: a survey and future trends", *Proceedings of the 31st ISARC, Keynote, Sydney*, pp. 1-15.
5. Boulogne, C., Frachon, S., Kasperski, J., Larive, C., Peru, Y., Robert, A., Spataro, F., Subrin, D. (2015), "Road tunnel civil engineering inspection guide-book2: Catalogue of deteriorations", *AFTES, Lyon*, pp. 1-140.
6. Choi, Y.S., Yang, E.I. (2013), "Effect of calcium leaching on the pore structure, strength, and chloride penetration resistance in concrete specimens", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 259, pp. 126-136.
7. Choo, J.H., Park, S.W., Kim, H.T., Jee, G.H., Yoon, T.G. (2011), "Analysis and cause of occurrence of lining cracks on NATM tunnel based on the precise inspection for safety and diagnosis - Part I", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 13, No. 3, pp. 199-214.
8. Gérard, B., Le Bellego, C., Bernard, O. (2002), "Simplified modelling of calcium leaching of concrete in various environments", *Materials and Structures*, Vol. 35, No. 10, pp. 632-640.
9. Han, Y.C., Jeong, S.S. (2014), "A study on the concrete lining behavior due to tunnel deterioration",

- Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 30, No. 4, pp. 21-34.
10. Jang, S.H., Yoon, T.G., Choi, S.W., Bae, G.J. (2006), "Countermeasures and damages of tunnel by fire", Korean Geotechnical Society, Vol. 22, No. 3, pp. 7-19.
 11. Kang, H.W., Kwak, H.J., Jung, H.J., Kim, Y.G. (2001), "Geotechnical characteristics of mudstones and its application", Magazine of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 3, No. 4, pp. 99-113.
 12. Kim, K.H. (2010), "A study on the tunnels excavation to shale section, Korea University of Graduate School, Master's Degree, pp. 1-84.
 13. Kim, S.W., Ra, K.W., Koh, S.Y. (2006), "Improvement of concrete lining construction method in large section tunnel", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 8, No. 1, pp. 77-86.
 14. Kim, S.W., Shin, B.S., Park, I.J. (2009), "Model tests on concrete placement method of tunnel lining due to tunnel size", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 11, No. 3, pp. 213-221.
 15. Käthler, C.B., Angst, U.M., Wagner, M., Larsen, C.K., Elsener, B. (2017), Effect of cracks on chloride-induced corrosion of reinforcing steel in concrete - a review, NPRA Report, Nr. 454, pp. 1-37.
 16. Lai, J.X., Qin, J.L., Guo, C.X., Liu, B.Z. (2014), "Treatment Technique for double-arch highway tunnel with carbon fiber reinforced polymer: a case study", Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 19, pp. 6839-6845.
 17. Lanzano, G., Biotto, E., Russo, G. (2008), Tunnel under seismic loading: a review of damage case histories and protection methods, Book Presentation, Termoli, pp. 1-10.
 18. Lee, C.H., Wang, T.T., Sun, L.J., Huang, T.H. (2013), "Invert heaving in operational tunnels - problems and countermeasures", Proceedings of the WTC, Geneva, pp. 770-777.
 19. Lee, J.M., Park, N.H., Lee, J.H. (2010), "Construction case study of Bokan tunnel passing Yangsan, a fault formation at 12-4 lot of Kyungbu high speed railroad project", Korean Society Civil Engineering, Vol. 58, No. 9, pp. 60-66.
 20. Lee, Y.S., Park, S.W., Whang, I.B., Shin, Y.S., Kim, S.G. (2009), "Analysis of cause and deterioration about using 3-arch tunnel", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 11, No. 1, pp. 97-105.
 21. Leitner, A. (2001), "The fire catastrophe in the Tauern tunnel: experience and conclusions for the Austrian guidelines", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 16, No. 3, pp. 217-223.
 22. Lim, H.M., Son, K.G. (2014), "The stability analysis of near parallel tunnels pillar at multi-layered soil with shallow depth by numerical analysis", Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 15, No. 1, pp. 53-62.
 23. Lu, Z., Wu, L., Zuo, Q., Yuan, Q., Li, B. (2015), "Lining strength area deformation control effects and stress characters analysis in non-pre-advanced twin tube tunnels", Electronic Journal Geotechnical Engineering, Vol. 20, Bun. 11, pp. 4535-4547.
 24. Mercusot, A., Boeri, A. (2012), "AFTES recommendations-geometry, concrete, formwork and

- concreting of tunnel linings: construction defects, GT36R1A1 - Appendix 1”, AFTES, Lyon, pp. 440-461.
25. Mgunbwa, J.J., Suorineni, F.T., Kaiser, P.K. (2010), “Failure mechanisms of pillars under shear loading”, UDSR, Tanzania, pp. 1-8.
 26. MOLIT (2007), “Development of repair and rehabilitation method in drained tunnel under the residual water pressure”, KISTEC, pp. 1-481.
 27. MOLIT (2018), “Special act on the safety control of public structure”, KISTEC, pp. 1-357.
 28. Park, S.W., Park, S.S., Hwang, I.B., Cha, C.J. (2012), “A case study on cause analysis for longitudinal crack of duct slab in tunnel”, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection, Vol. 16, No. 5, pp. 19-28.
 29. Sandrone, F., Labiouse, V. (2010), “Analysis of the evolution of road tunnels equilibrium conditions with a convergence-confinement approach”, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 43, No. 2, pp. 201-218.
 30. Sandrone, F., Labiouse, V. (2011), “Identification and analysis of Swiss road tunnels pathologies”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 26, No. 2, pp. 374-390.
 31. Seo, K.C., Yoon, T.G., Park, S.H., Cho, S.H, Kim, E.C. (2005), “Deterioration character of tunnel damaged by fire and fire proofing measure”, Proceedings of the Joint Conference of Geotechnical Engineering, October, Gyeonggi, pp. 129-139.
 32. Tan, Y.Q., Smith, J.V., Li, C.Q., Dauth, J. (2017), “Calcium leaching of a concrete tunnel lining under aggressive groundwater conditions”, Proceedings of the World Tunnel Congress, Bergen, pp. 1-5.
 33. Thumann, M., Astner, M., Saxer, A., Kusterle, W. (2015), “Precipitation in the tunnel drainage system optimized shotcrete mix-design”, Proceedings at Shotcrete for Underground Support XII ECI Symposium Series, Singapore, pp. 1-19.
 34. Usman, M., Galler, R. (2013), “Long-term deterioration of lining in tunnels”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 64, pp. 84-89.
 35. Wang, L. (2015), “Settlement impact analysis and countermeasure research of the down traversing formed by the double-arch subway tunnels through the existing railways in loess area”, ICETA, Nagoya, pp. 1-10.
 36. Wang, R., Fan, S., Yuan, Y. (2010), “Appearance defects on lining structure of tunnel”, Proceedings of the 2nd International Symposium on Service Life Design for Infrastructure, Deft, pp. 1051-1058.
 37. Wang, T.T. (2010), “Characterizing crack patterns on tunnel linings associated with shear deformation induced by instability of neighboring slopes”, Engineering Geology, Vol. 115, No. 1-2, pp. 80-95.
 38. Wang, W.L., Wang, T.T., Su, J.J., Lin, C.H., Seng, C.R., Huang, T.H. (2001), “Assessment of damage in mountain tunnels due to the Taiwan Chi-Chi earthquake”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 16, No. 3, pp. 133-150.
 39. Wang, Z.Z., Gao, B., Jiang, Y.J., Yuan, S. (2009), “Investigation and assessment on mountain tunnels and geotechnical damage after the Wenchuan earthquake”, Science in China Series E: Technological Science, Vol. 52, No. 2, pp. 546-558.
 40. White, J., Hurlbaas, S., Shokouhi, P., Wittwer, A., Wimsatt, A. (2014), “Noncontact techniques for monitoring of tunnel linings”, Structural Monitoring and Maintenance, Vol. 1, No. 2, pp. 197-211.

41. White, J.B., Wieghaus, K.T., Karthik, M.M., Shokouhi, P., Hurlebaus, S., Wimsatt, A. (2016), "Nondestructive testing methods for underwater tunnel linings: practical application at Chesapeake channel tunnel", *Journal of Infrastructure Systems*, Vol. 23, No. 3, B4016011-1-11.
42. Yashiro, K., Kojima, Y., Shimizu, M. (2007), "Historical earthquake damage to tunnels in Japan and case studies of railway tunnels in the 2004 Niigataken-Chuetsu earthquake", *Quarterly Report of RTRI*, Vol. 48, No. 3, pp. 136-141.
43. Yokozeki, K., Watanabe, K., Sakata, N., Otsuki, N. (2004), "Modelling of leaching from cementitious materials used in underground environment", *Applied Clay Science*, Vol. 26, No. 1-4, pp. 293-308.
44. Yoo, J.H., Kim, Y.K., Chung, C.H. (2011), "A case study on the design of tunnel excavation in geological anomalies", *Tunnel and Underground Space*, Vol. 21, No. 5, pp. 341-348.
45. Zeng, X., Wang, Z., Fan, J., Zhao, L., Lin, D., Zhao, J. (2011), "Problems of durability and reinforcement measures for underground structures in China", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol. 3, No. 3, pp. 250-259.