



정밀안전진단 결과를 활용한 NATM터널(무근)의 라이닝 균열 종류별 발생원인 및 분석 - Part I

추진호¹, 박성우², 김형탁³, 지기환⁴, 윤태국⁵

Analysis and cause of occurrence of lining cracks on NATM tunnel based on the precise inspection for safety and diagnosis - Part I

Jin-Ho Choo, Sung-Woo Park, Hyung-Tak Kim, Kee-Hwan Jee, Tae-Gook Yoon

ABSTRACT A crack is the main cause to affect the integrity of tunnel lining as well as leakage, spalling, exposed rebar, corrosion, carbonation and so on. Since the 1980, NATM has prevailed on excavation method and geotechnical philosophy in tunnel. Although the pattern of cracks has been reported by several engineers' effort, it was only focused on longitudinal cracks of lining. Eleven operational NATM tunnels have been conducted with the precise inspection for safety and diagnosis by KISTEC (Korea Infrastructure Safety and Technology Incorporation). With those results, the crack patterns by the spatial distribution and appearance for each tunnel have been analyzed and the cause of occurrence for seven common types of cracks in NATM tunnels was classified. Additionally, the longitudinal crack on lining above duct slab was figured out by numerical simulation and field inspection. Each crack has been analyzed by CCD (Charge-Coupled Device) scanner image with 3D configuration. Each type of cracks is also explained with output of experimental and condition of construction. Defined cracks on NATM tunnels will be good example for periodical inspection and precise inspection for safety and diagnosis.

Keywords: NATM, longitudinal crack, transverse crack, oblique crack, operational tunnel

요약 균열, 누수, 박락, 철근노출, 부식, 탄산화 등은 터널 라이닝 건전도 평가항목으로 그중에서 균열은 주요한 영향요인이다. 1980년 이후로, NATM은 터널의 굴착방법과 림폐합의 지반공학적 개념의 보급과 함께 넓게 적용되었으며, 라이닝에 발생된 균열의 연구도 진행되었으나 종균열에 제한된 연구가 주로 수행되었다. 본 논문에서는 11개의 공용중인 NATM 터널의 정밀안전진단 결과를 활용하여 공간적인 위치 및 형태별로 분석하여 터널별 공통된 7개의 균열을 정의, 원인 및 분석, 사례 등을 나타내었다. 종류별 균열은 CCD스캐너 이미지를 3차원으로 분석하여 향후 NATM터널 정기점검 및 정밀안전진단 시 유의한 사례가 될 수 있도록 하였다.

주요어: NATM, 종균열, 횡균열, 사균열, CCD스캐너 이미지

접수일(2011.4.7), 수정일(2011.4.18), 게재확정일(2011.5.15)

¹정회원, 한국시설안전공단 대리, 토목시공 기술사, 박사과정

²정회원, 한국시설안전공단 과장, 토목구조 기술사, 공학박사

³정회원, 한국시설안전공단 과장, 공학석사

⁴정회원, 한국계측기술연구소(KMTL) 이사, 공학석사

⁵정회원, 한국시설안전공단 차장, 토질 및 기초 기술사, 공학박사

*교신저자: 추진호 (E-mail: jinchoo@naver.com)

1. 서 론

터널의 시공 및 유지관리 시 주요하게 관리되는 균열은 다양한 형태와 위치에서 발생되고 있다. 터널의 균열은 암반, 쇽크리트, 라이닝에서 발생하나 시공 중의 상황을 제외한 공용중의 현장에서는 라이닝에 국한되어 조사된다. 공용중 터널에 대한 현장조사에 대한 최신 동향은 육안조사를 바탕으로 레이저 스캐너, 열화상카메라, 궤도뒤틀림 조사장비, CCD 스캐너, GPR 탐사 등을 수행하여 조사하고 있다(Asakura and Kojima, 2003; Seung-Nam Yu et al., 2007; Young-Seok Oh et al., 2010).

터널설계기준 해설서(2009)에 의한 터널의 굴착방법은 인력굴착, 기계굴착, 발파굴착, 파쇄굴착 등으로 구분하며 원자반이 본래 가지고 있는 지지능력을 최대한 보장할 수 있는 굴착방법을 안정성, 경제성, 시공성을 고려하여 채택하도록 권장하고 있다. 현재까지 국내에서 시공된 터널 굴착공법의 종류는 ASSM(재래식), NATM, TBM 등으로 크게 구분되고 있다. 본 논문의 경우, 1980년 이후 국내에서 시공된 NATM터널 중 지하철 복선터널, 고속도로 4차로 터널, 고속철도 복선터널, 일반도로 3차로 터널의 정밀안전진단 결과를 바탕으로 무근라이닝 균열에 대한 현장조사 내용을 종류별로 구분하였다.

NATM터널의 균열에 대한 연구는 부분적으로 시행되었으며 종균열 발생원인은 콘크리트의 온도변화, 건조수축, 2차 라이닝에 작용하중 증가 등의 요인으로 발생하는 것으로 분석되었다(한국시설안전공단, 1997). Hideto et al.(2006)은 라이닝 콘크리트 수축에 의한 천장부 종균열이 발생하는 것으로 분석하였으며 SFRC(Steel Fiber Reinforced Concrete) 보강시 라이닝에 대한 균열 발생 저감 효과를 실규모 시험 및 수치모델을 통하여 규명하였다.

한편, 이대혁(1998)은 4개소의 경부고속철도 NATM 터널의 현장조사로 천장부 대부분의 종균열은 천단에서 좌·우 20° 이내에 발생하는 것으로 분석하였으며, 이를 경감시키기 위해 측벽부의 쇳크리트와 라이닝의 마찰을 감소시킬 수 있는 연성을 증가시키는 방법과 천장부의 라이닝 두께를 적절하게 증가시키는 방법을 모형실험 및 수치해석을 이용하여 규명하였다.

이상의 천장부 종균열의 원인은 많은 연구자들에 의해 분석 및 규명되었으나, 실제 NATM터널 라이닝 균열의 종류는 종균열 이외의 다양한 위치, 형태로 조사되고 있다. 본 연구는 정밀안전진단 시 분석된 터널의 다양한 종류의 균열에 대한 발생원인을 분석하고자 한다. 또한, Wang(2010)이 1999년 타이완에서 발생한 Chi-Chi지진에 의한 112개의 공용중의 터널에 대한 피해조사 내용의 자료를 발췌하여, 사면의 전단변형에 따른 터널라이닝에 발생되는 결함 패턴의 연관성을 이미지 처리기법을 이용하였다. 이점을 착안하여 본 논문에서는 균열에 대한 CCD 카메라 이미지를 이용한 분석을 함께 실시하여 이해를 돋고자 하였다.

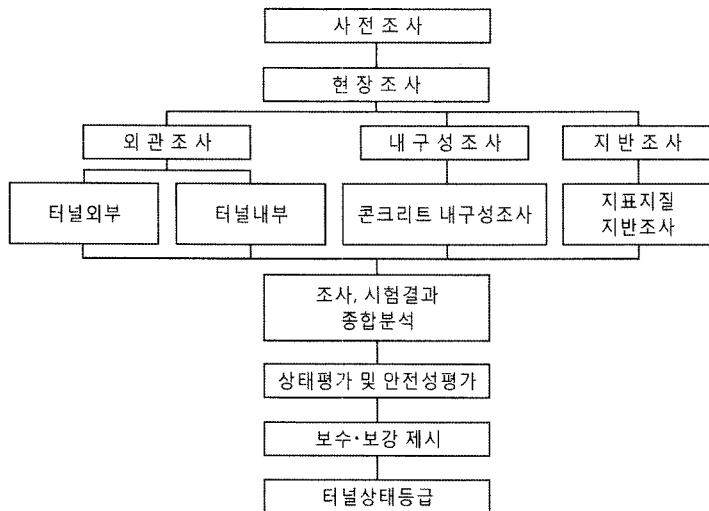


그림 1. 정밀안전진단의 일반적인 흐름

2. 정밀안전진단 및 분석된 NATM터널 설명

2.1 개요

시설물의 안전관리에 관한 특별법 제 13조에 의거한 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(터널 2003; 2009; 2010)에 의거하여 터널의 정밀안전진단은 그림 1과 같이 외관조사 및 내구성 평가를 바탕으로 상태평가 및 안전성 평가를 실시하며 터널등급을 산정한다.

2.2 정밀안전진단 터널의 설명

본 논문에서 정리된 터널의 외관조사는 CCD 카메라 이미지를 활용한 1차 영상분석, 2차로 육안조사, 3차의 근접확인 조사를 통하여 균열의 공간적 위치(spatial distribution), 형태(appearance)를 Wang(2010)의 분석의 일부를 채택하여 기술하였다. 분석된 터널의 개략적인 설명은 표 1과 같으며 각 터널의 추가적인 세부기술내용은 표 3과 같다.

표 1. 분석된 NATM 터널의 설명

| 구분 | 구분 | 터널명 | 준공년도 | 비고 |
|------|-----|---------------|---------|----|
| 지하철 | 복선 | A, B, C, D, E | 1985.10 | |
| 고속도로 | 4차로 | F, G | 1999.11 | |
| 고속철도 | 복선 | H, I | 1999.12 | |
| 일반도로 | 3차로 | J, K | 1999.4 | |

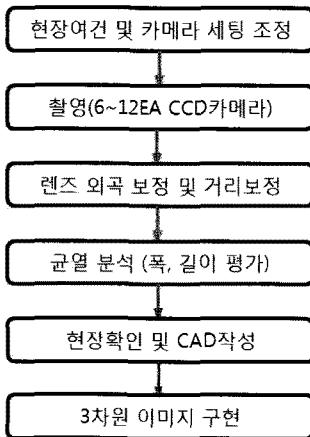


그림 2. CCD 카메라를 이용한 자료처리 절차

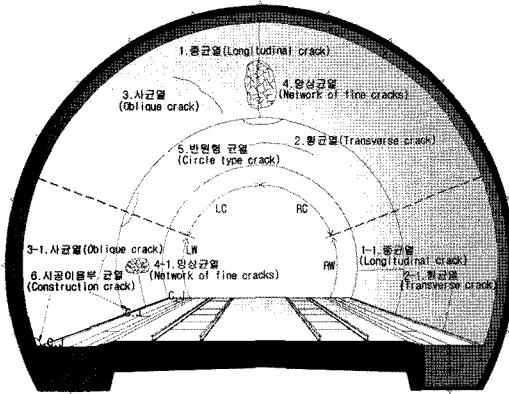


그림 3. NATM터널(무근)의 균열 모식도

표 2. NATM터널(무근) 라이닝 균열의 정의

| 조사된 균열의 구분 | 기존 연구 | 발생 위치 | 표3 내용 | 본문 위치 |
|---|---|----------------------|-----------|-------------|
| 종균열(longitudinal crack) ^{b,d} | 종방향균열, 수평균열 ^a | 천장부/측벽부 | 1, 1-1, 8 | 3.2.1, 7 참고 |
| 횡균열(transverse crack) ^{b,d} | 횡방향균열, 연직균열 ^a | 천장부/측벽부 | 2, 2-1 | 3.2.2 참고 |
| 사균열(oblique crack) ^b | 경사균열 ^a , inclined crack ^c | 천장부/측벽부 | 3, 3-1 | 3.2.3 참고 |
| 망상균열(network of fine cracks) ^{c,d} | 거북등 균열, 그물망 균열 | 천장부/측벽부 | 4, 4-1 | 3.2.4 참고 |
| 반원형 균열(circle type crack) ^d | - | 천장부/측벽부 | 5, 5-1 | 3.2.5 참고 |
| 시공이음부 균열(opening crack) ^{e,d} | - | 측벽부 | 6 | |
| 종균열(longitudinal crack) ^f | 종방향 인장균열, 구조적균열 | 덱트슬래브상면에서 1.5 m이내 | 7 | 3.2.6 참고 |

주) a - 김완영(2008), b - S. Pelizza et al.(2001), c - Dov Kaminetzky(1991), d - 한국시설안전공단(2010, 터널 세부지침)
e - Wang(2010), f - 추진호 등(2010)

2.3 CCD 카메라 스캐너를 활용한 3D 분석

터널의 정밀안전진단에 적용되고 있는 스캐너 방식은 자료획득 방법에 따라 레이저 방식, 광학 방식, 혼용방식이 일반적이다. 본 논문은 CCD 카메라를 이용한 광학방식을 선택하여 그림 2와 같이 3차원의 시설물을 촬영하여, 2차원으로 분석한 이후 다시 3차원으로 자료를 표현하였다.

3. NATM터널(무근) 균열 종류별 원인분석

3.1 균열 종류별 용어정의

균열과 관련된 국·내외 NATM터널(무근)의 라이닝 균열에 대한 용어는 일관성이 없이 사용되고 있어, 본 논문은 표 2와 같은 용어를 정의하여 기술하고자 한다.

표 3. 정밀안전진단에 따른 NATM터널의 발생 균열의 종류와 시공 및 굴착지반 조건

| 구조물 번호 | A | 서울메트로 3호선 복선 | | | 고속도로 4차로 | | | 정부고속철도 북선 | | | 내부순환도로 3차로 | | |
|-------------------------------------|---|---|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---------------------|
| | | D | E | F _C | F _D | G _U | G _D | H | I | J _C | J _D | K _U | K _D |
| 1,7,8 <small>(좌아치-C-우아치)</small> | 종균열(longitudinal crack) | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 2 <small>(좌아치-우아치)</small> | 횡균열(Transverse crack) | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 3 <small>(좌아치-우아치)</small> | 사균열(Oblique crack) | ✓ | - | ✓ | - | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 4 <small>(좌아치-우아치)</small> | 망상균열 (Network of fine cracks) | - | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 5 <small>(좌아치-우아치)</small> | 반원형 균열 (Cycle type crack) | ✓ | ... | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 1-1 <small>(좌아치-우아치)</small> | 종균열(longitudinal crack) | - | ✓ | - | - | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 2-1 <small>(좌아치-우아치)</small> | 횡균열(Transverse crack) | ✓ | - | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 3-1 <small>(좌아치-우아치)</small> | 사균열(Oblique crack) | ✓ | - | ... | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 4-1 <small>(좌아치-우아치)</small> | 망상균열 (Network of fine cracks) | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ... | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 5-1 <small>(좌아치-우아치)</small> | 반원형 균열 (Cycle type crack) | ✓ | - | - | - | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 6 <small>(좌아치-우아치)</small> | 시공이음부 균열 (Opening crack) | ✓ | - | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 시공 특이사항 단면변화 구간 | 외이야외 척지 단면변화 구간 | 축약 유체선 감소 | S.L 부위 충돌열 | - | - | - | - | 축력부양 시공이음부(종) 척지 | 축력부양 시공이음부(종) 척지 |
| 시공이음 간격 | 10m | 5m | 10m | 9m | 9m | 9m | 9m | 12m | 10m | 10m | 10m | 10m | 10m |
| 라이닝 설계기준 강도 | 구조물 조건 지반 및 굴착조건 | 임경양호 토피 층분 무지고공 사용 경암/ 천단련, 투착 경암/상부 층양도 층 분전 | 유치신구간, 경암/5단련분활 유체선 경암/상부 층양도 층 분전 | 복선/경암 복선/경암 | 경암상·하부 단면변화 | 경암 | 초상축운모 | 경암/상 하반단면증축 경암/pilot(TBM)+NATM | 21MPa | 21MPa | 21MPa | 21MPa | 21MPa |
| 기초침종류 | sliding form/ saddle form/ steel form | saddle form/ steel form | saddle form/ steel form | saddle form/ steel form | sliding form | sliding form | sliding form | sliding form | sliding form | sliding form | sliding form | sliding form | sliding form |
| Dimension | W8.65 x H 7.04 l=0.3m | W18 x H 10.04 W9.0 x H 7.04 | W10.3 x H 8.24 W11.3 x H 10.6 t=0.4~0.6m | W13.5 x H 8.6 W11.4 x H 10.6 t=0.4~0.5m | |

주) i, D는 조사된 터널의 상선 또는 하선을 의미함.

✓ : 균열분포가 뚜렷하여 대부분의 구간에서 쉽게 파악되며, ✓ : 전 연장대비 매우 낮은 개소로 조사됨을 의미함.

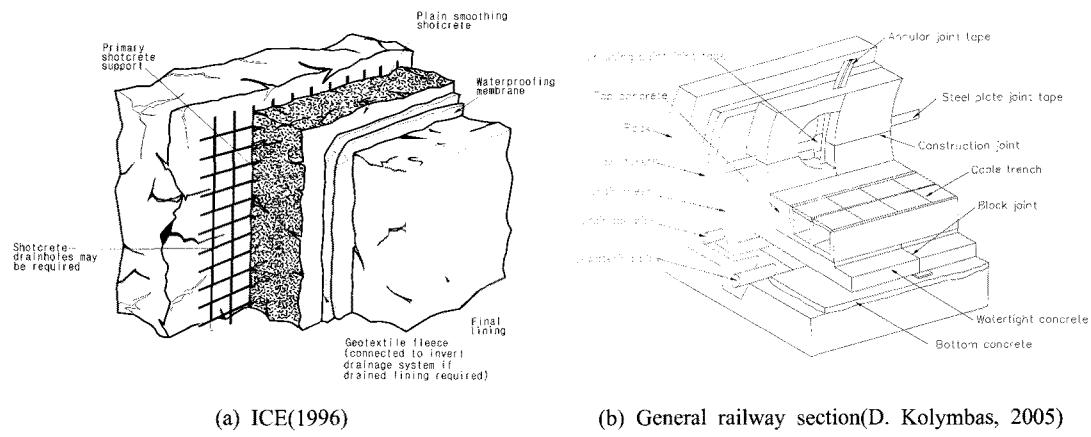


그림 4. NATM터널 라이닝 일반도(보강내용 포함)

본 논문에서 분석한 균열은 다음과 같은 내용으로 제한하여 기술하였다. 터널 진행방향과 평행한 축을 따라 발생한 균열을 종균열(1, 1-1, 8 : longitudinal crack)로 표현하였으며, 종방향 축과 직각으로 교차하는 면이 라이닝 면과 맞닿아 이루는 선상에 횡방향으로 조사된 균열을 횡균열(2, 2-1 : transverse crack)이라 정의하였다. 또한, 종방향 축과 사선 또는 경사를 이루는 형태의 균열을 사균열(3, 3-1 : oblique crack), 0.1~0.3 mm의 미세균열(hair crack)에서 0.3 mm 이상의 종·횡균열이 그물망형태로 발생된 균열을 망상균열(4, 4-1 : network of fine cracks)로 정의하였다. 횡방향 시공이음부(construction Joint, 이하 C.J)에 맞닿아 발생되는 반원형 또는 원의 1/4인 부채꼴 형태의 균열을 반원형균열(5 : circle type crack) 및 시공이음부 균열(6 : opening crack)로 구분하여 분석하였다.

또한, 도로터널에서 환기를 위해 설치한 덱트슬래브의 영향으로 그림 3과 같이 무근라이닝에 발생된 종균열(7 : longitudinal crack)을 추가적으로 분석하여 기술하였다.

그림 4는 ICE(1996)와 D. Kolymbas(2005)의 발췌한 내용을 수정한 것으로 NATM터널(무근)의 일반적인 라이닝의 모식도이다. 그림 4.a와 같이 암반면, 1차, 2차 속크리트, 부직포 및 방수지, 라이닝으로 구분하고 있다. 구조물의 용도에 따라 그림 4.b와 같이 배수, 시공이음, 추가시설 등을 계획하게 된다. 정밀안전진단이 공용중에 실시되는 점을 감안하여 본 논문에서 기술되고 분석되는 모든 균열은 터널 내부에서 조사 가능한 무근라이닝에 대한 내용으로 제한하여 기술하였다.

3.2 균열종류별 발생원인 분석

3.2.1 천장부 종균열 발생원인 및 분석

한국시설안전공단(1997)에 의하면 NATM의 천장부 종균열의 원인은 콘크리트 온도변화 및 건조

수축, 2차라이닝에 작용하중 증가 등에 따른 라이닝 인장 취약부에 자중, 라이닝 두께 차이에 의한 응력불균형, 1차라이닝의 소성변형에 따른 추가하중, 거푸집 조기 탈형, 지반의 Creep등의 복합적인 요인 등에 의하여 발생하는 것으로 연구되었다. 일반적인 현장조사 내용은 그림 5~6과 같으며, 이대혁(1998)의 연구결과와 유사하게 천단에서 좌·우 20°의 범위(약 7.4~8.4 m)에서 대부분의 종방향 균열이 조사되었으며 국부적인 범위로 20°이상의 영역에서도 조사되었다.

종균열의 공간적인 위치는 대부분 천단에서 좌·우 20°도의 범위에, 시공이음간격 또는 타설 위치의 영향을 받는 형태로 천단으로부터 좌·우에 편측 또는 양측으로 불룩한 형태 및 직선형태가 일반적이다. 또한, 시공여건, 응력상태, 주변 균열의 영향에 따라 경사 및 주변 균열로 분기 또는 합류의 형태로 균열이 발달하는 것으로 조사되었다. 일반적으로 1 span 전체에 걸쳐, 폭 0.5 mm이상으로 조사되어 다른 균열에 확연히 비교된다.

본 논문을 위해 참조한 모든 NATM터널(무근)은 발생빈도의 차이는 있으나 표 3과 같이 지반 및 시공조건 등의 원인으로 천장부에 종방향 균열이 발생한 것으로 조사되었다.

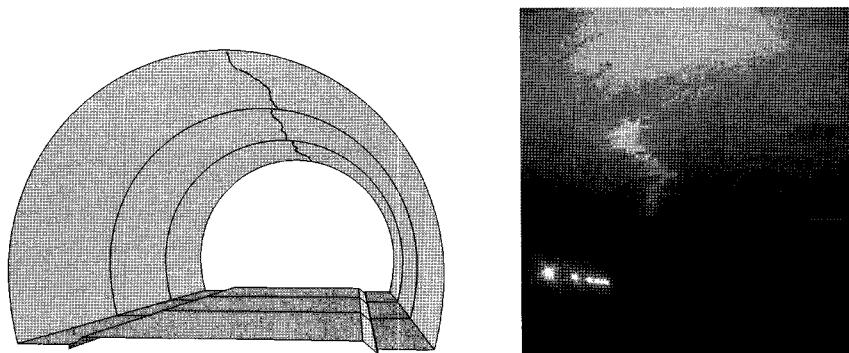


그림 5. 3차원 종균열분석 및 현장사례

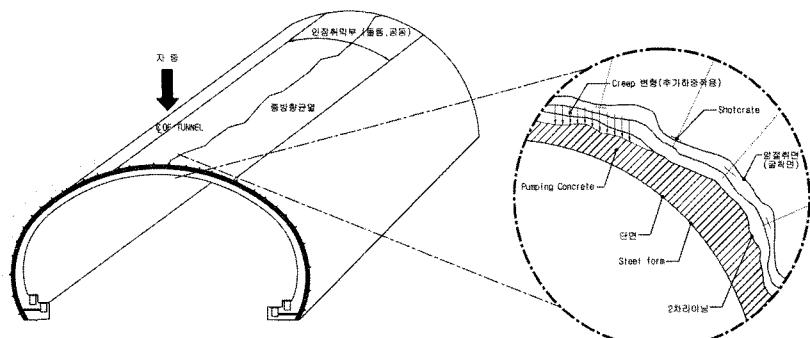


그림 6. 천장부 종균열 영향요인 모식도

3.2.2 횡균열 발생원인 및 분석

횡균열은 라이닝 시공순서 및 재료적 원인으로 발생한다. NATM터널(무근) 라이닝은 그림 7과 같이 보편적으로 속크리트 타설 이후에 3~4 span마다 신축이음을 두어 공동구 및 배수구등 하부구조물을 우선 시공한다. 이후 1 span보다 약 1~2 m 긴 강재거푸집을 기존 타설부 및 신설부에 맞대어 2차라이닝을 타설하게 된다. 이때, 2차라이닝 하부는 외적으로는 기존 타설된 공동구 및 배수구의 단부구속 영향을 받게 되고 내적으로는 2차 라이닝의 소성수축과 견조수축에 따라 접속부로부터 인장응력이 발생하여 횡균열이 발생한 것으로 판단된다.

터널 라이닝의 시공이음은 시공조건 및 경제성을 고려하여 결정하며 조사된 터널의 시공이음은 5~12 m의 범위로 나타났다.

분석한 대단면 터널 라이닝과 같이 조사된 라이닝 하단부의 두께가 지보패턴에 따라 대략 0.15~0.24 m가 증가됨을 고려할 때 매스콘크리트의 수화열에 의한 추가적인 영향도 있을 것으로 판단된다(김완영, 2008).

대표적인 횡균열의 위치는 측벽부 및 천장부 시공이음 사이로 H, I터널의 경우, 조명 배선용 홈을 중앙부에 설치하여 시설물의 기능성과 라이닝의 유지관리를 도모한 구조물로 대부분의 횡균열이 span 중앙의 조명배선용 홈에 발생되었다. 이와 같은 결과는, 횡균열에 대한 유발줄눈 역할을 부차적으로 담당하는 것으로 판단되었다.

천장부의 횡균열은 외적인 영향요인이 없는 경우 재료적 수축의 영향 등으로 그림 8과 같은 위치와 형태로 조사되었으며 다음과 같이 구분된다. 천장부 중앙부에 거푸집 자국을 따라 단독으로 조

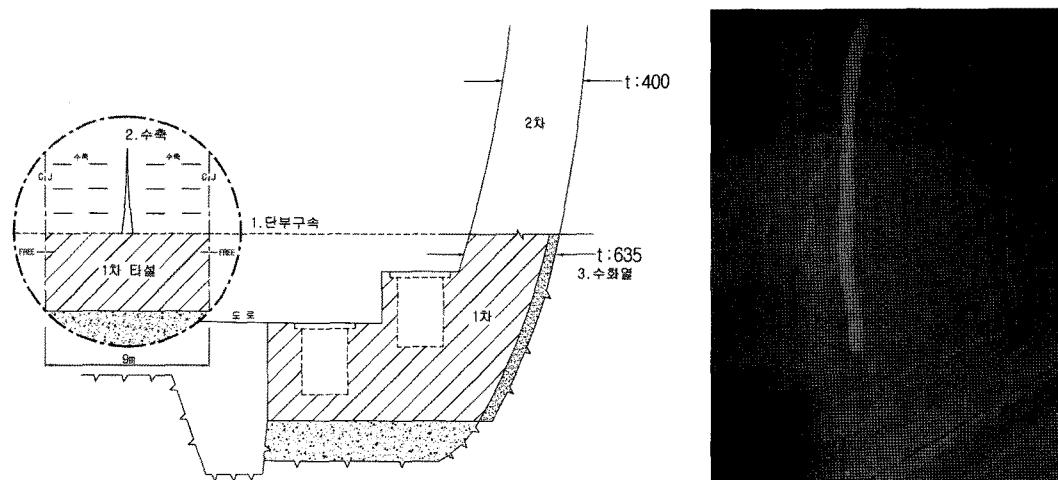


그림 7. 측벽부 횡균열 발생 모식도 및 현장사례

사되는 경우, 종균열과 연장 또는 교차하는 경우, 측벽부 횡균열과 연장되는 직선의 형태로 발달하는 경우 등으로 분석가능하다.

측벽부의 횡균열은 Spring Line부근까지 조사하여 폭은 0.1 mm이상으로 계절의 변화에 따라 미세하게 발달하는 것으로 판단되며 span별 반복되어 조사된다.

도로터널의 조도개선을 위해 측벽에 타일마감을 한 F, G터널의 경우 타일에 반사균열의 형태로 횡균열이 조사되었으며, 시공이음이 5 m인 B터널의 경우 측벽부 횡균열이 거의 조사되지 않았다.

라이닝에 작용되는 응력은 구속조건과 함께 경계조건도 고려하여 균열발생 원인을 설명할 수 있다. 그림 9는 I터널의 측벽부 종방향 균열의 발생빈도가 상대적 높아 측벽부의 횡방향 균열의 빈도가 낮게 조사되었다. 시공 및 재료적 원인으로 발생된 라이닝 응력은 횡균열을 발생시키며 발생된 횡균열로 인하여 이후의 종균열의 발생을 일부 제어하고 있을 것으로 판단된다.

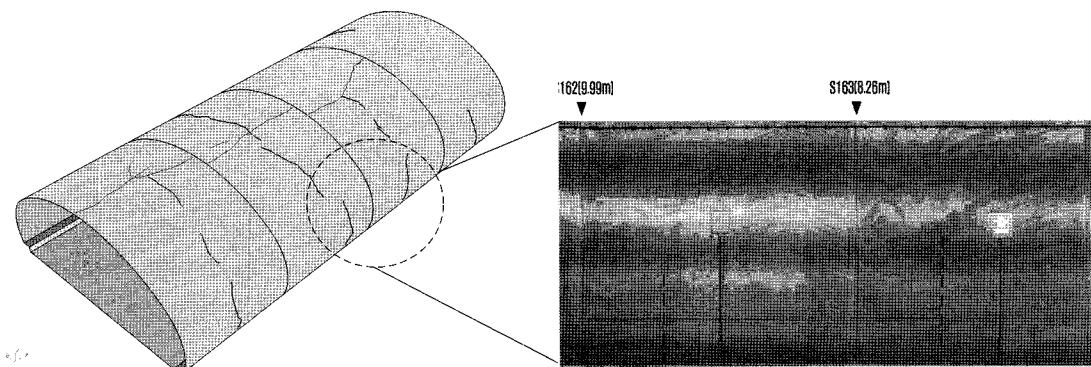


그림 8. 3차원 횡균열분석 및 2차원 전개

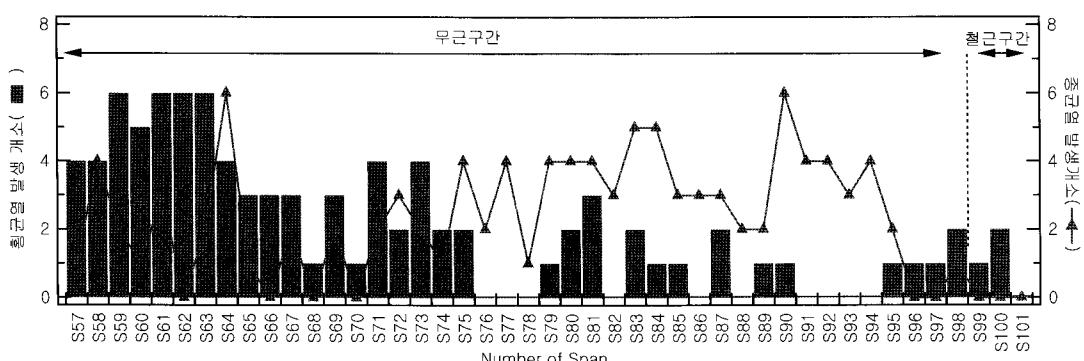


그림 9. 1 span에 조사된 종·횡균열의 분포

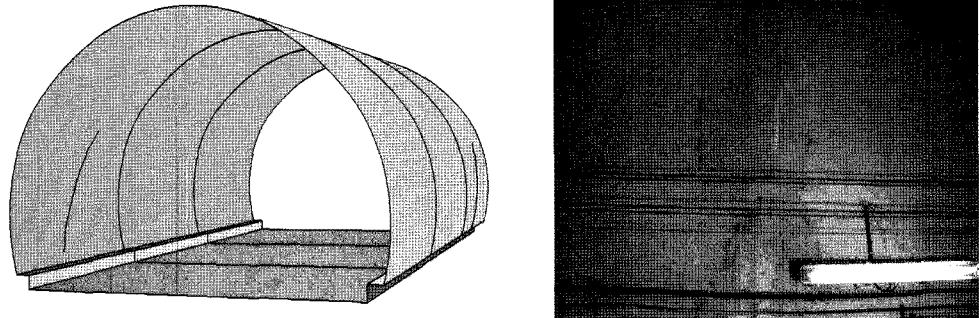


그림 10. 3차원 사균열분석 및 현장사례

3.2.3 사균열 발생원인 및 분석

본 논문의 사균열은 Wang(2010)의 연구와 같이 지진 및 사면활동과 같은 외적인 하중에 의한 라이닝에 발생되는 전단균열이 아닌 재료 및 시공 등의 원인으로 발생된 균열이다.

측벽부 사균열은 횡균열과 유사하게 기존 공동구 및 배수구의 외부구속으로 하단부에 초기균열이 발생한 후 경화에 따른 수축영향, 시공이음의 경계조건, 주변균열의 응력 영향범위의 변화 등으로 횡균열이 시공이음부로 기울어져 발생하게 된다. 천장부의 경우 종균열, 횡균열, 사균열의 주변 영향 및 재료적 수축, 경계조건 등의 변화로 발생된 것으로 판단된다.

측벽부 사균열의 위치는 횡균열과 시공이음부 사이 하단에서 인접한 시공이음부로 경사져 있으며 천장부 사균열은 천장부 20° 범위 주변에서 조사되었다. 형태는 반원형 균열, 종균열, 횡균열과 연결되어 발생되었거나 독립적으로 주변 시공이음과 연장되어 있거나 단속적으로 조사되었다. 일반적으로 길이는 5 m미만으로 폭 0.3 mm 이상으로 조사된다.

그림 8과 같이 F, G 터널의 천장부 사균열은 천장부 종균열, 횡균열, 시공이음부와 연장되어진 형태이며, 측벽부 사균열은 시공이음부 및 횡균열과 연장되어 발달된 형태로 그림 10과 같다. 기존 지하철 박스의 진단결과를 감안할 때, 외력에 의해 문제가 되는 사균열(김형탁, 2005)은 균열폭이 넓고 동일패턴의 균열이 반복되어 나타나나 본 논문에서 검토된 NATM의 무근라이닝에서는 조사되지 않았다.

3.2.4 망상균열 발생원인 및 분석

망상균열의 발생원인은 라이닝 작업 중 다짐과 연관성이 있으며 2차 라이닝 타설시 점검창에 vibrator를 넣어 다짐하거나 강재거푸집에 부착된 형태로 vibrator를 설치하여 다짐을 실시하게 된다. 일반적으로 재료분리를 예방하기 위해 콘크리트는 높이 1.5 m미만으로 타설하며, 거푸집의 밀림

을 우려하여 부착된 vibrator보다는 점검창을 이용한 인력에 의한 다짐을 실시한다. 이때, 작업자의 과다짐 및 workability를 위한 W/C의 부배합은 다짐시 표면으로 간극수의 이동을 발생시키며 표면에 레이턴스(laitance)를 유발시키며 라이닝 경화 초기의 미세균열을 발생시키는 것으로 판단된다.

보편적인 형태의 망상균열은 미세균열로 폭 0.1~0.2 mm 정도이나, 정밀안전진단시 분석된 망상균열은 미세균열 발생 영역에 횡균열, 종균열, 사균열 등의 연장 및 발달로 폭 0.3 mm 이상의 균열도 존재된 형태도 조사되었다. C, D, E터널의 측벽과 아치부의 변곡점(spring line 주변) 또는 측벽 횡균열의 끝단부에 주로 조사되었으며, H, I터널의 경우, 천장부의 중앙에 슈트홀 주변에 거북등 또는 그물망의 형태로 조사되었다.

그림 11은 B구간의 조사내용으로 좁은 시공이음으로 횡균열이 거의 발생되지 않았으나 그만큼 제한된 영역의 다짐이 실시되었을 것으로 판단된다. 이와 같은 시공조건으로 인한 과다짐, 재료적 수축, 공기단축을 위한 거푸집조기 탈형 등의 원인으로 미세한 망상균열이 조사되었으며 그림 12와 같이 표면에만 머물고 있는 균열로 조사되었다. 대부분의 망상균열은 폭 0.2 mm 미만으로 표면처리로 제거할 수 있으나 폭 0.3 mm 이상의 경우 종·횡 균열 등이 그물망의 형태로 복잡하게 내부까지 연장된 것으로 조사되었다.

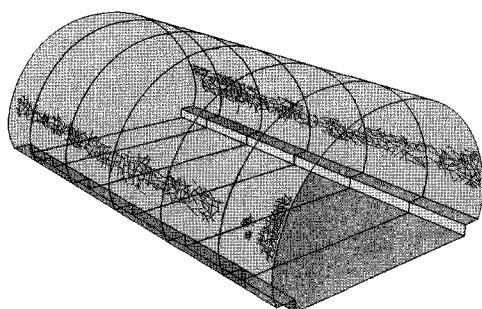


그림 11. 3차원 망상균열분석

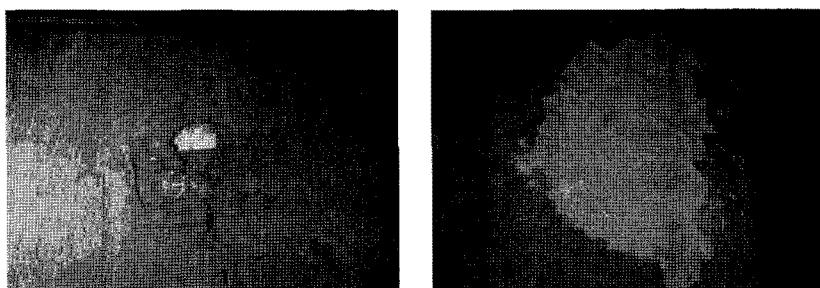


그림 12. 망상균열 진행 영역 평가(그라인딩 전·후)

3.2.5 반원형 및 시공이음부 균열 원인 및 분석

라이닝의 반원형 균열은 강재거푸집을 이용한 라이닝 시공시 기존 타설 라이닝과 밀실성 및 연속성을 위해 강재거푸집 임의 길이를 겹쳐 그림 14와 같이 유압 jack으로 밀착하게 된다. 이때, 기존 타설된 라이닝의 경화정도, 두께차이, 유압의 불균형과 이로 인한 라이닝 응력분포차이 등으로 인하여 취약부에 균열이 발생하게 된다.

반원형 균열의 발생위치는 주로 천장부 중앙 및 좌·우에 독립적 또는 종·횡균열과 연장되어 발생하는 것으로 조사되었으며 측벽보다는 어깨부 이상의 영역으로 제한적으로 조사되었다.

시공이음부의 균열은 반원형 균열과 유사하게 거푸집 밀착시 발생되는 유압의 불균형력 및 횡균열 발생 원인이 되는 단부구속, 그리고 시공이음부와 연결되는 응력해방의 경계조건 등의 불균형으로 발생하는 것으로 판단된다.

시공이음부 균열의 위치는 시공이음부 하단에 삼각형의 형태 또는 시공이음부와 이격거리 0.3 m미만의 범위에서 시공이음과 평행한 횡균열의 형태로 조사되었다. 경부고속선 H, I구간 시공이음과 평행한 횡방향의 시공이음부 균열은 정밀안전진단시 향후 박락의 위험이 있어 타격하여 제거하였다. 대부분의 시공이음부 주변의 삼각형 형태의 균열은 보수의 효과가 낮고 규모가 크지 않아 추가적인 결함이 없는 경우 보수순위를 하향조정하도록 유지관리하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.

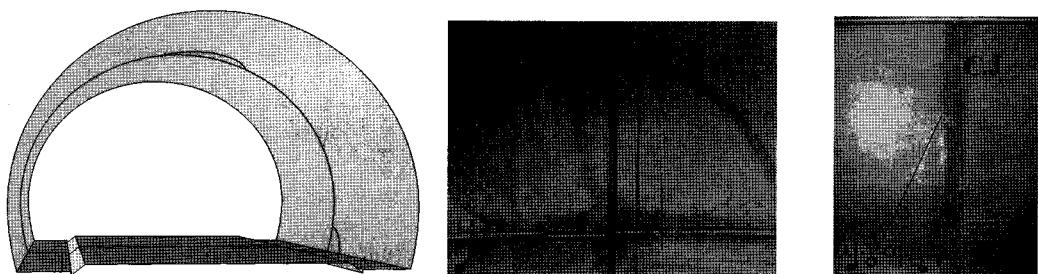


그림 13. 3차원 반원형 및 시공이음부균열 분석 및 현장사례

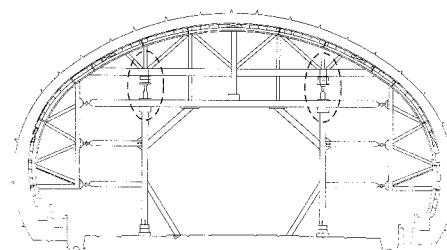


그림 14. 측벽부 횡균열 발생 Mechanism

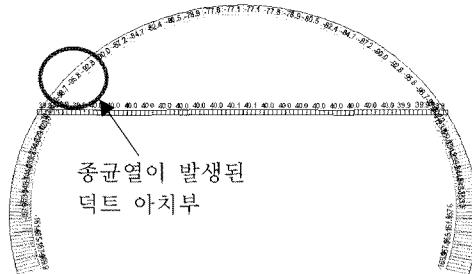


그림 15. 균열 원인분석을 위한 구조해석 모델

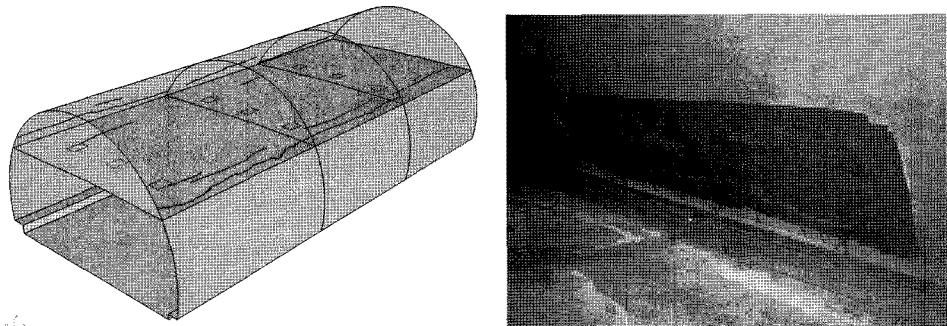


그림 16. 3차원 덕트슬래브 종균열분석 및 현장사례

3.2.6 덕트슬래브 종균열 발생원인 및 분석

환기를 위해 덕트슬래브를 설치한 J, K터널은 덕트슬래브와 원라이닝을 커플러를 이용하여 강결되어 시공되었다. 덕트슬래브의 구속조건, 지반-구조물조건, 하중조건, 온도영향, 건조수축 등의 구조해석 검토를 그림 15와 같이 실시하였다. 덕트슬래브의 자중 및 구속조건으로 인한 덕트슬래브 상면에서 상부 1.5 m이내에 허용인장응력을 초과하는 종균열이 발생한 것으로 분석되었으며, 계절에 따른 온도응력을 고려할 경우 균열발생부위를 중심으로 응력이 최대 3배 이상 증가하는 것으로 분석되었다.

발생위치 및 형태는 그림 16과 같이 덕트슬래브 상면에서 상부 1.5 m의 영역에 종균열이 폭 0.1 ~ 1 mm의 균열이 편측 또는 양측에 1 span 전체 및 일부에서 발생하였으며 복철근으로 시공된 구간에서는 거의 조사되지 않았다.

3.2.7 측벽부 종방향균열 발생원인 및 분석

다양한 경계조건 및 하중조건을 고려한 구조해석 결과 그림 17과 같다. 경암 지반을 발파에 의한

상·하반 굴착함에 따른 굴착면의 품질관리 미흡과 이에 따른 솗크리트에 작용하는 응력집중 및 불균형, 여굴과 미굴에 따른 라이닝 좌·우 두께 차이, 솗크리트와 라이닝의 들뜸에 따른 지반-구조물 상호작용의 차이, 거푸집 밀착과 탈형을 위한 jacking force 등의 원인으로 종균열이 발생하는 것으로 분석되었다.

측벽부에 조사되는 종방향 균열은 망상균열이 발달된 형태로 조사되는 것이 보편적이나 I터널 후반부의 대부분에서 그림 18과 같이 편측 또는 양측 벽체(1.8~6 m)에서 상·하반 굴착선(2.4 m) 주변으로 최대 6개 span에 연속하여 종방향 균열이 조사되었다. 균열은 시공이음부를 기준으로 구분되었으며, 일부 시공이음부 중앙의 조명홀 위치까지만 진행된 것으로 조사되었다.

조사된 균열은 대부분 관통균열로 확인되었으며 균열폭은 0.5~1 mm로 시공초기에 발생하였으며 진행성은 없는 것으로 계측되었다. 소성현지로 평가한 구조해석 결과 안전성은 확보된 상태로 향후 추가적인 결함에 따른 유지관리가 필요할 것으로 판단하였다.

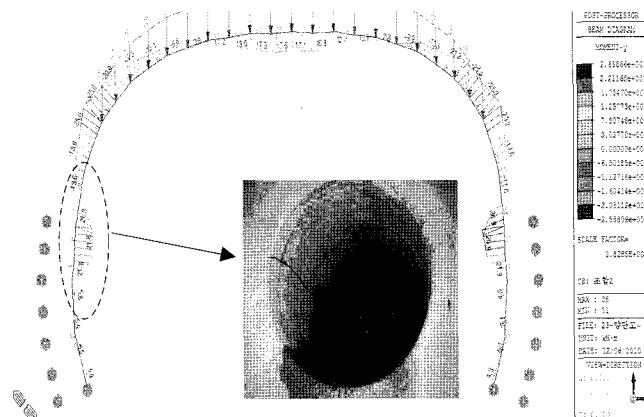


그림 17. 균열 원인분석을 위한 구조해석 모델 및 관통확인

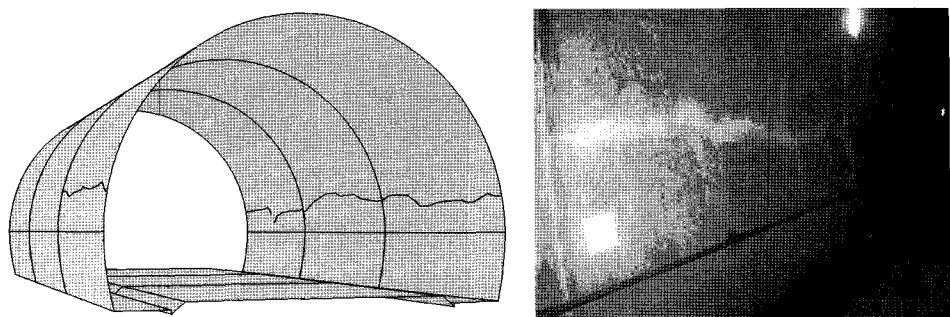


그림 18. 3차원 측벽 종균열분석 및 현장사례

4. 결 론

한국시설안전공단에서 수행한 서울메트로 3호선 5 구간, 경부고속선 2 구간, 내부순환로 2 구간, 외관순환고속도로 2구간의 정밀안전진단 결과를 분석하여 NATM터널(무근)에서 공통되게 관찰되는 균열을 정의하였다. 균열 종류별 발생원인 및 균열의 공간적인 위치 및 형태를 CCD 스캐너 이미지를 이용하여 3차원으로 분석하여 시공특성 및 지반특징을 고려한 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 조사된 모든 터널에서 조사된 천장부 종균열은 향후 NATM터널(무근) 설계시, 시공, 유지관리시 저감을 위한 연구가 필요할 것으로 판단되며,
- 횡균열의 저감을 위한 터널 시공이음부 중앙에 조명홈을 설치하는 것은 일종의 균열유발 기능을 확인하였으나, 구체적인 연구 및 설계 사례가 없어 향후 이에 대한 연구가 필요하다.
- 시공이음부는 타설되는 span의 길이에 따라 5~12 m간격으로 설치하며 경제성을 고려하여 연장을 늘려 시공하나 횡균열 및 사균열의 빈도가 증가하는 단점이 있어 Life Cycle Cost(LCC) 개념을 도입한 설계 및 시공이 필요할 것으로 판단된다.
- 폭 0.1~0.2 mm의 망상균열은 표면에만 조사되는 균열로 표면처리만으로 보수가 가능하나 0.3 mm이상의 경우 표면처리 이외에 주입보수 및 박락 여부 판단하여 유지관리하여야 한다.
- 반원형 균열 및 시공이음부 균열은 보수에 대한 내구성이 낮아 재균열 및 시공이음부의 영향으로 누수가 동반되는 경우가 일반적으로 보수시 이러한 조건을 고려하여야 한다.
- 환기 및 방재를 위해 설치한 덕트슬래브는 원라이닝과 강결하여 시공할 경우, 덕트슬래브 상부 원라이닝에 구조적 균열이 발생할 수 있어 향후 설계시 이를 고려하여 균열 발생 요인을 저감시켜야 한다.
- 터널 라이닝에서 조사되는 균열은 대상지반 굴착단계에서의 여굴과 미굴 관리, 지하수의 배수상태, 지반-구조물의 상호작용의 범위, 타설시 라이닝 두께의 정밀시공, 거푸집 설치 및 해체를 위한 유압의 영향 등이 원인으로 발생된다. 따라서, 현장을 고려한 설계 및 정밀시공은 구조물 균열 저감을 위한 기초가 될 것이다.

참 고 문 헌

- 국토해양부(2008), “시설물의 안전관리에 관한 특별법령집”.
- 국토해양부(2003, 2009, 2010), “안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(터널)”.

-
3. 김완영(2008), “대단면 터널 라이닝 콘크리트의 균열저감 연구”, 한국콘크리트학회 가을 학술대회 논문집, pp. 509-512.
 4. 김형탁, 조성우, 이재욱, 윤태국(2005), “병행 시공된 공동구로 인한 터널 콘크리트 슬래브의 균열발생 사례연구”, 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp. 5559-5562.
 5. 민경환, 정형철, 양준모, 윤영수(2009), “대단면 터널 라이닝 적용 고성능 콘크리트의 수화열 특성”, 한국 터널공학회 논문집, 제11권, 제1호, pp. 37-45.
 6. 이대혁(1998), “모형실험 및 수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 균열특성에 관한 연구”, 서울대학교 공과대학 공학박사학위 논문, p. 292.
 7. 이유석, 박성우, 황인백, 신용석, 김순곤(2009), “공용중인 3-Arch 터널의 열화조사 및 원인분석”, 한국터널공학회 논문집, 제11권, 제1호, pp. 97-105.
 8. 정수매, 박인준(2009), “NATM 터널라이닝 종방향 균열 제어공법”, 한국터널공학회 논문집, 제11권, 제4호, pp. 437-447.
 9. 추진호, 박시현, 김홍균, 이상철, 윤태국(2010), “덕트슬래브를 지닌 도로터널의 종방향 균열원인 및 분석 사례”, 2010 성과발표회 및 건설안전 포럼자료집, 한국시설안전공단.
 10. 한국시설안전기술공단(1997), “NATM터널(도로)의 종방향균열 원인분석과 보수·보강공법 연구”.
 11. 한국터널공학회(2009), “터널설계기준 해설서”, 도서출판 씨·아이·알.
 12. Asakura, T., Kojima, Y. (2003), “Tunnel maintenance in Japan”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 18, pp. 161-169.
 13. Institution of Civil Engineering (1996), “Sprayed concrete linings (NATM) for tunnels in soft ground”, ICE Design and Practice Guide, Thomas Telford, p. 88.
 14. Janpanese Society of Civil Engineering (2003), “Tunnel deformation mechanism”, Tokyo, p. 320.
 15. Kaminetzky, D. (1991), “Design and construction failures lessons from forensic investigations”, McGraw-Hill, pp. 107-202.
 16. Kolymbas, D. (2005), “Tunnelling and tunnel mechanics -A rational approach to tunnelling”, Springer, p. 184.
 17. Mashimo, H., Isago, N., Kitani, T., Endou, T. (2006), “Effect of fiber reinforced concrete on shrinkage crack of tunnel lining”, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 21, pp. 382-383.
 18. Pelizza, S., Oggeri, C., Oreste, P., Peila, D. (2000), “Damage causes and repair for tunnel lining: monitoring and analysis in practice”, Proceedings of ITA-AITES 2001 World Tunnel Congress, Vol. II, pp. 721-732.
 19. Wang, T.T. (2010), “Characterizing crack patterns on tunnel lining associated with shear deformation induced by instability of neighboring slope”, Engineering Geology, Vol. 115, pp. 80-95.
 20. Yu, S.N., Jang, J.H., Han, C.S. (2007), “Auto inspection system using a mobile robot for detecting concrete cracks in tunnel”, Automation in Construction, Vol. 16, pp. 255-261.