

터널 덕트슬래브의 종방향 균열에 대한 원인 분석 사례 연구

A Case Study on Cause Analysis for Longitudinal Crack of Duct Slab in Tunnel

박성우^{1)*} 박승수²⁾ 황인백³⁾ 차철준⁴⁾
Park, Sung Woo Park, Seung Su Hwang, In Baek Cha, Chul Joon

Abstract

In this study, cause of longitudinal crack which is found on duct slab of road tunnel is studied. In-depth investigation, such as visual inspection, non-destructive testing and geometrical surveying of duct slab, is carried out. In order to perform cause analysis, the investigated results are compared to the results of numerical analysis. Many factors, which cause longitudinal crack, are classified as constrained condition of the duct slab, location of the rebar, temperature, shrinkage and so on. According to the classified causes of longitudinal crack, numerical analysis is performed considering construction stage of the tunnel lining. Especially, in order to predict shrinkage stain due to discrepancy of curing date, ACI-209 model, KCI structural design code and other researcher's shrinkage test results are compared. The results show that shrinkage strain is one of the main factors causing longitudinal crack. Other investigated tunnels are classified along with the construction method of duct slab and patterns of cracks. As a result, improving ways to construct duct slab are suggested.

Keywords : Tunnel, Duct slab, Longitudinal crack, Shrinkage strain

1. 서론

도로터널은 환기 방식에 따라 jet-pan등을 이용한 중류식 터널과 덕트슬래브를 시공하는 반회류식 또는 횡류식 터널로 나눌 수 있다. 이 중 반회류식 또는 횡류식 터널의 덕트슬래브는 지반을 지지하는 구조적인 역할보다는 환기를 목적으로 시공된 기능적인 측면이 있으므로 터널 라이닝의 안정성 측면에서 그 중요성이 다소 떨어진다고 볼 수 있으나 터널의 안전진단 시에 덕트슬래브 하면에 종방향 균열이 발생하는 사례가 종종 보고되고 있어 이에 대한 원인 분석과 유지관리 차원에서의 연구가 필요한 실정이다. 그러나 터널의 유지관리와 관련된 국내의 연구는 유지관리 계획(우종태 등, 2002; 노병철 등, 2006), 또는 새로운 진단기법(이유석 등, 2010; 박석균, 2005) 등에 대한 내용에 치중되어 있는 실정이다. 일부균열 발생 원인과 관련된 연구가 수행되었는데, 주변지반의 변형에 따른 터널 라이닝의 균열(Wang, 2010), 강섬유 혼입

여부에 따른 터널라이닝의 건조수축 균열(Mashimo et al, 2006), 2아치터널과 같은 특수한 형태의 터널에서 발생하는 균열(Wang, 2012), 터널이 아닌 구축된 슬래브에서의 건조수축 균열(Weiss, 1998) 및 정밀안전진단 결과를 토대로 한 NATM터널의 균열(추진호 등, 2011) 등을 분석하여 연구한 사례는 있으나 터널의 덕트슬래브에 발생한 균열의 발생 원인을 연구한 사례는 미미한 실정이다.

본 연구에서는 덕트슬래브의 현황조사를 토대로 덕트슬래브에 발생한 종방향 균열의 발생 원인을 분석하였다. 균열 발생 원인을 덕트슬래브의 단부 구축여부에 따른 거동의 변화, 매립된 철근의 위치변동, 시공 중 거푸집 조기 탈형 및 슬래브의 구축에 따른 건조수축(김한수 등, 2001) 등으로 분류하였고, 각각의 원인에 대한 분석을 실시하여 그 결과에 따라 덕트슬래브 설계 및 시공 시 유의점을 제언하였다.

1) 정회원, 한국시설안전공단 과장, 교신저자
2) 정회원, 한국시설안전공단 과장
3) 정회원, 한국시설안전공단 부장
4) 정회원, 한국시설안전공단 부장

* Corresponding author : sungwoo@kistec.or.kr 031-910-4096

• 본 논문에 대한 토의를 2012년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 2012년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

2. 터널 시공 및 조사 현황

2.1 터널 시공 현황

분석 대상 터널의 제원은 Table 1과 같으며, TBM으로

Table 1 Dimension of the tunnel

Compression Strength of concrete	Lining : 21 Mpa, Duct Slab : 24 Mpa
Method of Construction	TBM , NATM
Lane	3 Lane - 2 tunnels
Width of the tunnel	13.5m
Height of the tunnel	5.1~5.4m
Ventilation system	Transverse ventilation

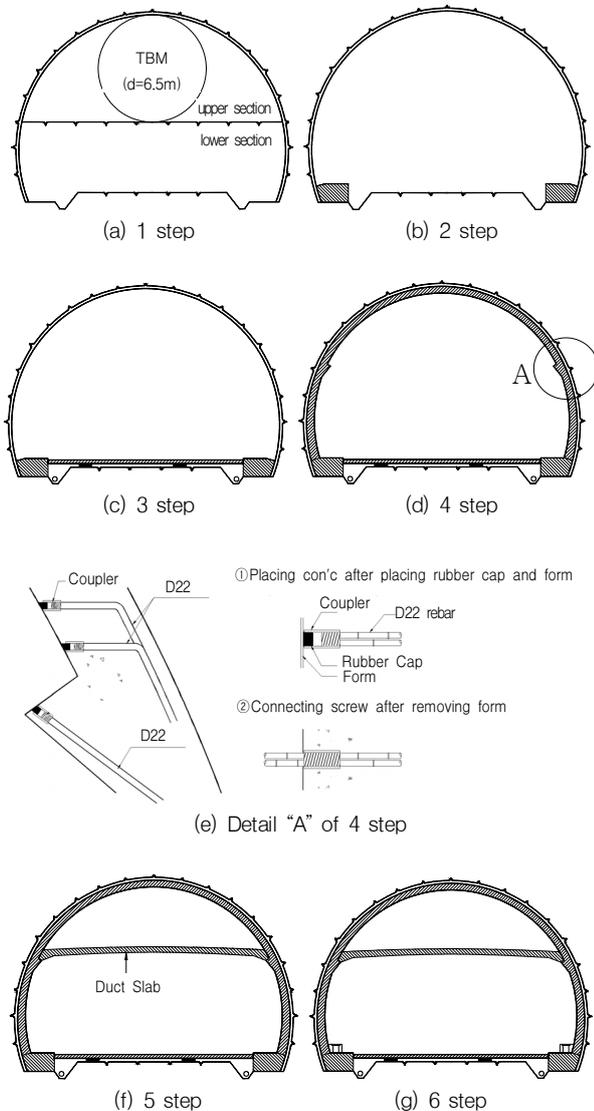


Fig. 1 Constuction procedure of the tunnel

Table 2 Dimension of the duct slab

Space of reinforcement	Upper	D22@200
	Lower	D22@200
Thickness of the slab	300mm (Center) 600mm (Edge of the slab)	
Thickness of cover concrete	50mm	

선진도강한 후에 NATM터널로 최종 굴착하였다. 종방향 균열이 발생한 대상 터널의 시공 순서도는 Fig. 1과 같다. 터널라이닝의 시공이 완료된 뒤에 순차적으로 덕트슬래브의 시공이 이루어졌으며 설계 목적 상 라이닝 하부에서 연결되는 철근이 덕트슬래브와 연결되어야 하므로 Fig. 1(e)와 같이 라이닝에 미리 매입된 철근에 커플러를 설치하여 덕트슬래브 시공 시 연결이 이루어지도록 계획하였다. 따라서 덕트슬래브와 라이닝의 접합부는 강결 조건으로 판단하여 설계에 반영하여 철근을 배근하였다. 덕트슬래브의 제원은 Table 2와 같다.

2.2 균열 발생 현황

2.2.1 외관조사

해당 터널의 외관 상태를 조사한 결과, Fig. 2와 같이 덕트슬래브 하면 중앙부에 4~6열의 종방향 균열(균열폭 0.3~0.5mm)이 관찰되었으며, 중앙부에서 멀어질수록 균열 폭이 작아지고 상대적으로 균열의 밀도도 낮은 것으로 조사되었다. 균열의 발생 양상 및 중앙 환기창 주변에 발생한 종방향 균열의 사진은 Fig. 2와 같다.

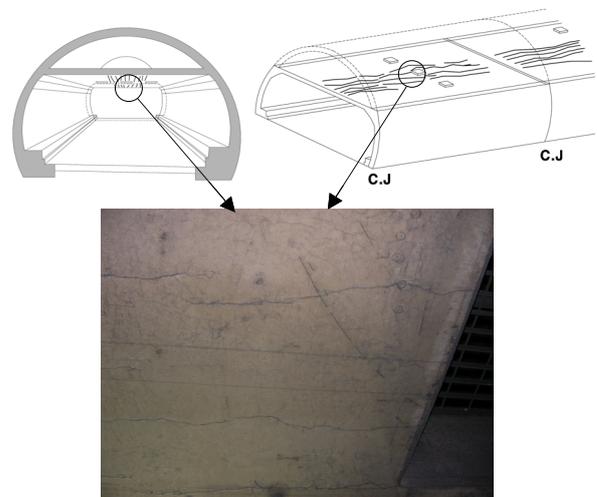


Fig. 2 Picture of longitudinal cracks of the duct slab

2.2.2 비파괴 조사

본 구조물 덕트슬래브에 반발경도법에 의한 비파괴강도 시험을 실시하였고 추정된 강도는 23.3MPa로서 설계 기준강도인 24MPa에 다소 못 미치나 소오의 강도를 거의 확보하고 있는 상태로 조사되었다.

본 구조물의 바닥판 하면에 발생한 종방향균열 발생부에 대해서 배력철근과의 연관성과 배근의 위치를 파악하기 위하여 철근탐사 시험을 실시하였다. 철근탐사 시 측정용센서를 바닥판 하면에 밀착 이동하면서 Fig. 3과 같이 균열부위에 Marking(그림에서 ▼ 표시)을 하여 탐사를 실시하였고, 그 결과 균열발생 위치와 배력철근의 위치가 전반적으로 일치하는 경향을 나타내고 있는 것으로 조사되었다. 탐사된 주철근 간격은 D22@200, 배력철근의 간격은 D13@150로서 설계도면과 대부분 일치하는 것으로 분석되었다.

균열의 깊이는 초음파탐사기(TR-300)을 이용하여 건

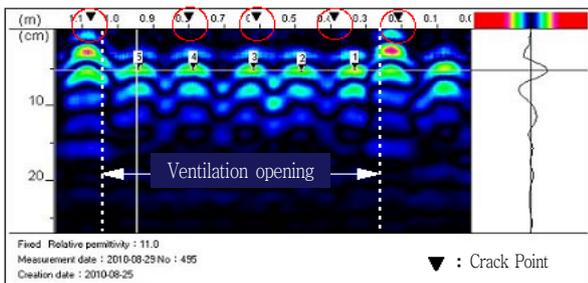


Fig. 3 Location Image of reinforcement of the duct slab

Table 3 Crack depth of the duct slab

No.	Crack depth (mm)	Cover depth (mm)	Thickness of slab (mm)	Crack width (mm)
1	141.2	52	300	0.3
2	173.7	60	300	0.2
3	138.4	54	300	0.4
4	141.2	55	300	0.3
5	120.7	46	300	0.2
6	117.3	51	300	0.3
7	157.9	48	300	0.2
8	127.0	40	300	0.2
9	215.2	53	300	0.4
10	198.8	61	300	0.3
11	191.8	50	300	0.3
12	199.1	45	300	0.3
13	213.6	49	300	0.4
14	187.0	52	300	0.5
15	86.9	57	300	0.4

전부와 균열부의 초음파도달 속도 차이를 이용하여 분석하였으며, 조사 결과 대부분의 균열이 철근의 피복두께보다 깊은 것으로 조사되었다.

3. 균열 원인 분석

수열의 종방향 균열 양상으로만 판단할 때에 대상 터널 덕트 슬래브의 균열은 구조적인 균열로 판단할 수 있으나 시공과정에서 발생하는 요인도 간과할 수 없는 요소이므로 단부 연결 조건의 변화, 철근의 위치 변경, 온도차, 건조수축 및 시공적 요인으로 나누어서 균열 발생 원인을 분석하였다.

3.1 균열발생 요인별 분석

3.1.1 단부 연결 조건의 변화

본 터널의 건설지에 따르면 라이닝 타설 시 커플러로 조립한 철근이 이동하여 기 매립된 철근의 위치를 찾기가 어려워 덕트슬래브의 시공에 어려운 점이 있었던 것으로 서술되어 있다. 라이닝 콘크리트가 타설된 이후에 덕트슬래브가 타설되는 만큼 철근이 커플러로 연결되어 있지 않다면 덕트슬래브 접합부는 구조적으로 고정단 거동을 한다고 보기 어렵다. 이러한 경우, 구조적으로 힌지 조건으로 검토하는 것이 필요하다. 따라서 연결부의 상태에 대한 비교를 검토하기 위하여 다음과 같은 두 가지 조건에 대한 구조해석을 수행하였다.

해석을 위한 콘크리트의 물성치는 Table 4와 같다.

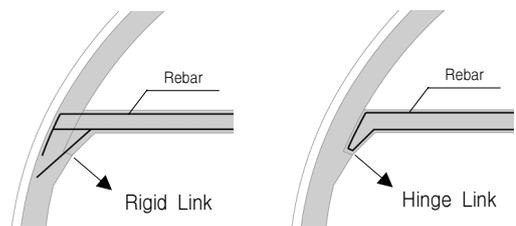


Fig. 4 Constrained condition between lining and duct slab

Table 4 Property of duct slab concrete

Contents	Value
Compressive strength of concrete (MPa)	23.3
Tensile strength of steel bar (MPa)	300.0
Modulus of elasticity of concrete (MPa)	26,964.0
Unit weight (kg/m ³)	2,450.0

터널 2차라이닝 구조해석 시 지반의 지반반력계수는 균열이 발생한 덕트슬래브 주변의 지반이 풍화암~경암으로 다양하게 분포하고 있어 풍화암 및 경암층의 변형계수값을 적용하여 2가지 Case에 대한 분석을 수행하였다.

$$k_n = E/R \times L$$

$$1,471 \text{ MPa} / 5 = 294,200 \text{ kN/m}^2 \text{ (경암)} \quad (1)$$

$$k_n = E/R \times L$$

$$100 \text{ MPa} / 5 = 20,000 \text{ kN/m}^2 \text{ (풍화암)} \quad (2)$$

터널라이닝에 작용하는 이완하중 및 잔류수압은 불확실한 하중이므로 부분적으로 영향을 미칠 수 있지만 터널 전 구간에 걸쳐 작용하고 있다고 보기 어려우므로 자중만을 하중으로 고려하여 해석을 수행하였다.

하중조건은 Table 5와 같이 암중에 따른 지반반력계수 및 접합부의 연결 상태의 변화에 따라 분류하였다.

Table 6에서 알 수 있듯이 덕트슬래브의 양단을 강결로 고정하였을 경우 균열이 발생한 중앙부의 휨모멘트는 저항모멘트보다 작으나 양단을 힌지 조건으로 해석하였을 경우 중앙부에서 저항모멘트를 초과하는 것으로 분석되었고 중앙부의 탄성 처짐도 양단힌지조건이 25mm 더 발생하는 것으로 분석되었다.

수치해석 결과만으로 판단할 때, 덕트슬래브 양단의 철

Table 5 Load cases due to rock and joint condition

Case No.	Rock condition	Coefficient of subgrade reaction (kN/m ²)	Joint condition between lining and duct slab
1-1	Hard rock	294,200	Rigid rink
1-2	Weathered rock	20,000	Rigid rink
1-3	Hard rock	294,000	Hinge rink
1-4	Weathered rock	20,000	Hinge rink

Table 6 Bending moment and deflection

Load case	Location	Mu (kN-m)	ϕM_n (kN-m)	deflection under service load(mm)
Case 1-1	Center	58.4	116.36	8
	Edge	102	165.72	-
Case 1-2	Center	61.5	116.36	9
	Edge	104	165.72	-
Case 1-3	Center	163.1	116.36	35
Case 1-4	Center	163.7	116.36	35

근이음 시공이 불량하여 힌지조건으로 판단할 경우 중앙부의 휨모멘트 과다로 구조적인 균열이 발생할 수 있다는 결과를 보여준 것이나, 다음과 같은 이유로 구조적 요인으로 단정할 수 없다고 판단된다.

첫째로, 현재로서는 직접 파취 이외에는 접합부의 철근 이음상태를 확인할 수 있는 방법이 없으나, 시공 당시 엄격한 관리를 통하여 철근의 이음이 시공되었다는 기록이 남아있어 이음시공이 불량하다고 단정하기 어렵고, 만약 이음부가 부실하게 시공이 되었다면 덕트슬래브 단부 상부에 그에 상반되는 균열이 발생하여야 하나, 조사 결과 단부 끝단의 균열이나 이격이 조사되지 않았다.

둘째로, 현장에서 측정한 덕트슬래브의 형상 측량결과 균열이 발생한 스펠과 균열 밀도가 낮거나 발생하지 않은 스펠의 형상이 유사하게 분석되어 처짐과 균열과의 연관성이 없다는 점이다.

균열밀도가 높은 단면과 그렇지 않은 단면의 중앙부의 단부에 대한 상대연직좌표는 Table 7과 같으며 균열 밀도와 상관없이 중앙부의 측점이 단부보다 67~86mm 상부에 위치하고 있다. 구조해석 결과에 따르면 단부가 힌지 조건이라면 최대 25mm의 추가 처짐이 발생하여야 하나, 균열이 발생하지 않은 스펠과 균열 밀도가 높은 스펠 모두 일정한 처짐 형상을 갖고 있으므로 단부의 구속조건이 불량하다고 결론짓기 어렵다고 판단된다.

3.1.2 덕트슬래브 고정단 상면의 피복두께 변화

철근배근탐사 결과 덕트슬래브 고정단의 라이닝에 매입된 이음부 철근이 타설 당시 하부로 이동하여 Fig. 5의

Table 7 Relative vertical coordinate of the center slab

Case	Relative vertical coordinate of the center (mm)
Span of high crack density	+67~86
Span of low crack density	+76~80

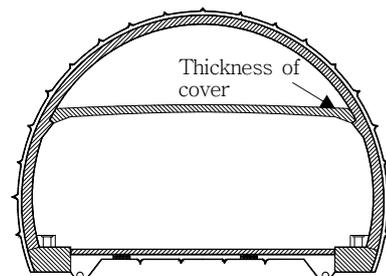


Fig. 5 Cover thickness of the duct slab

덕트슬래브 접합부 상면 피복이 80mm 내외로 설계치인 50mm보다 두꺼워져서 구조적으로 다소 불리하게 시공된 것으로 조사되었다. 이에 따라 철근피복두께의 변화가 덕트슬래브의 거동에 미친 영향에 대하여 검토를 수행하였다.

구조해석은 Fig. 6과 같이 Shell 요소로 모델링 하였다. 철근은 실제 철근이 배근된 위치에 단면적을 고려하여 환산 강성을 부여하였다. 중앙부는 대칭경계를 부여하였고 철근이 배근된 위치에서는 변위를 구속하는 조건으로 분석을 실시하였다.

구조해석결과, Fig. 7 및 Table 8과 같이 철근의 이동이 덕트슬래브 중앙부의 거동에 미치는 영향은 미미한 것으로 분석되었다.

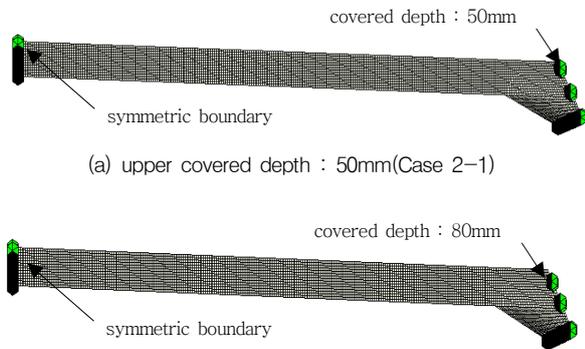


Fig. 6 Numerical modeling for location of steel bar

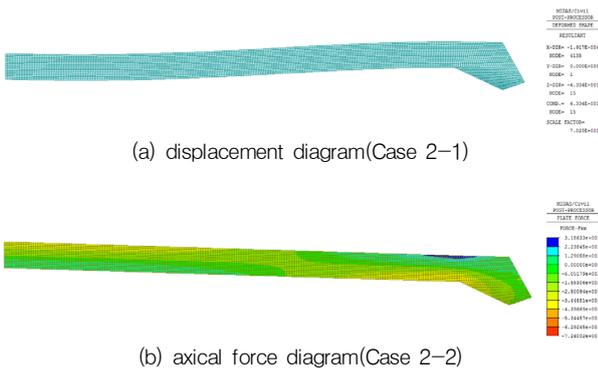


Fig. 7 Result of numerical analysis (Case 2)

Table 8 Bending moment at the center(Case 2)

	Case 2-1	Case 2-2
Maximum bending moment at the center	-64.9(kN-m)	-65.2(kN-m)

Table 9 Boundary condition (Case 3)

Load Case	Boundary condition at the bottom end of the lining
Case 3-1	Roller + Hinge
Case 3-2	Hinge + Hinge

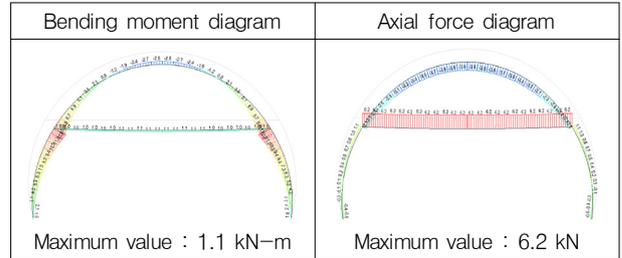


Fig. 8 Result of numerical analysis (Case 3)

3.1.3 온도 변화

온도변화에 따른 영향을 분석하기 위하여 계절별 온도 차이를 20°로 가정하였고, 수치해석 수행을 위한 라이닝 하부의 경계조건이 불확실한 측면이 있으므로 Table 9와 같이 경계조건 변화에 따른 분석을 수행하였다.

Case 3-1과 같이 라이닝 하부의 구속조건을 롤러 및 힌지로 가정할 경우 온도에 대한 수축이 자유롭기 때문에 온도변화에 대한 응력의 변화는 없는 것으로 분석되었다.

Case 3-2와 같이 하부 라이닝의 구속조건을 힌지로 가정하여 횡방향의 변위를 구속할 경우 휨모멘트도 및 압축력도는 Fig. 8과 같다. 인장력은 6.2kN으로 미미하고 이에 대한 인장응력 증가는 0.02MPa에 불과하므로 온도 변화에 의한 덕트슬래브의 거동 변화는 거의 없는 것으로 분석된다.

3.1.4 건조 수축

시공 순서 상 터널라이닝 콘크리트를 타설한 일자와 덕트슬래브 콘크리트를 타설한 일자가 서로 다르므로 타설 시간차에 의한 건조수축량의 불일치로 인하여 균열이 발생할 가능성이 있다. 대상 구조물은 종방향 균열에 대한 수축줄눈이 시공되어 있지 않으므로 건조수축으로 인한 균열 발생 가능성이 있다.

수치해석 시 경계조건은 덕트슬래브로 이어지는 철근이 양호하게 시공되었다고 가정하여 접합부의 철근배근 위치는 고정단으로 부여하였다. Case 4-1은 라이닝 콘크리트와 덕트슬래브 콘크리트가 동시에 타설되었을 경우의 조건이고, Case 4-2는 콘크리트 라이닝과 덕트슬래브 콘크리트의 타설 시차가 있었으며 이에 따라 라이닝

과 덕트슬래브의 건조수축 거동의 시간차가 발생하여 이를 고려하는 조건으로 분석을 수행하였다.

1) Case 4-1

본 하중조건은 라이닝 콘크리트와 덕트슬래브가 동시에 시공이 되어 건조수축변형의 시간차가 없는 경우를 묘사한 것이다. 건조수축변형률 150 $\mu\epsilon$ 을 고려하였을 때 인장력은 4.7kN으로 미미하고 이에 대한 인장응력 증가는 0.02MPa에 불과하므로 덕트슬래브가 터널라이닝과 동일한 시기에 시공되어 동시에 수축할 경우 건조수축으로 인한 거동의 영향은 거의 없는 것으로 분석되었다.

2) Case 4-2

앞서 분석한 Case 4-1은 덕트슬래브와 라이닝콘크리트의 타설 시간차에 대해서 고려하지 않았다. 그러나, 건설지에 따르면 시공 순서 상 터널라이닝 콘크리트를 타설한 뒤 일정기간의 시간경과 뒤에 덕트슬래브를 타설하였다. 시공 자료에 따라 라이닝 및 덕트슬래브 콘크리트 타설 시기를 정리하면 Table 10과 같다.

Table 10으로부터 라이닝콘크리트와 덕트슬래브의 시공 시간 차는 4개월 이내로 추정된다. 건조수축은 초기에 건조수축이 빠르게 진행되다가 서서히 수렴되는 방향으로 건조수축이 진행된다(한국콘크리트학회, 2007). 해당 부재의 단면, 표면적 등에 대한 조건을 고려하면 다소간 차이가 있을 수 있지만 타설 시간 차로 인하여 건조수축의 진행 속도에 차이가 발생한다. 특히 본 터널의 덕트슬래브와 같이 라이닝과 철근으로 강결된 조건에서는 횡단면에 대하여 덕트슬래브의 건조수축으로 인한 이음이 없는 상태로 건조수축 변형을 슬래브 구조가 모두 부담해야 하는 상황이므로 이에 대한 상세 검토가 필요하다.

건조수축 변형률을 산정하기 위한 라이닝 콘크리트와 덕트슬래브 타설 시간 차는 시공 당시 자료를 활용하여 120일로 적용하였다. 최종 건조수축 변형률을 산정함에 있어서 콘크리트구조설계기준(콘크리트학회, 2007) 및

Table 10 Curing process for the tunnel lining

Date	Curing process
'96. 4. 30.	Start date for concrete lining
'96. 7. 10.	Start date for duct slab
'97. 5. 30.	End date for concrete lining
'97. 9. 30.	End date for duct slab

ACI 209(ACI, 1992)의 예측식을 적용하였고 그 입력치는 Table 11과 같다. 여기서 상대습도는 습한 터널 환경을 감안한 추정값이며, 시멘트량, 잔골재율 및 슬럼프 등은 당시 콘크리트의 시험 성과표를 참고하였고 그 밖의 제원은 당시 현황을 추정하여 적용하였다. 예측식에 따른 건조수축 변형률은 Table 12와 같으며 적용 예측식에 따라 예측치가 차이가 나는 것은 부재의 형상이 연속적인 슬래브로서 실험실에서 적용하는 부재보다 그 규모가 크기 때문으로 판단된다.

검토된 모델의 유효성을 검증하기 위하여 다른 연구(이수진 등, 2011; 양은익 등, 2010; 한천구 등, 2006)에서 수행한 실험 실측치와 비교하였다 검토된 결과는 Table 13과 같으며 30MPa 이내의 압축강도 시편에 대해서는 시험결과와 적용 예측식이 전반적으로 일치하는 것으로 분석되었다.

Table 11 Input parameter for shrinkage analysis

Relative density(%)	70
Depth of duct slab(mm)	300
Slump(mm)	120
Air content(%)	6
S/a(%)	46.3
Unit weight of cement(kg/m ³)	352

Table 12 Estimated concrete shrinkage

Code	Estimate shrinkage 120 days after curing($\times 10^{-6}$)
ACI	210~250
structural design	100

Table 13 Comparing test results of concrete shrinkage

	Lee et al	Yang et al	Han et al	
Size of specimen (mm)	100 \times 100 \times 400	100 \times 100 \times 400	ϕ 100 \times 200	
Relative density(%)	60	60	-	
Slump(mm)	180	-	150	
S/a(%)	45	47	46	
Cement contents (Kg/m ³)	410	360	378	
Air content(%)	4	-	4.5	
Compressive strength(MPa)	30	24	38	
Estimated shrinkage ($\times 10^{-6}$) - 120 days after curing	Test result	470~510	450	490
	ACI	448~506	448~509	439~496
	KCI Structural design	425	452	388

건조수축에 대한 구조해석 시에는 최소의 영향을 검토하기 위해 Table 12에서 콘크리트 구조설계기준식에 의한 변형률(100 $\nu\epsilon$)을 적용하여 검토하였다.

100 $\nu\epsilon$ 의 건조수축 변형률은 덕트슬래브 타설 이전에 이미 발생된 수축량이므로 덕트슬래브는 양단 구속으로 인하여 라이닝이 받은 수축 변형률만큼 구속되는 효과가 있다고 가정하여 분석을 수행하였다. 분석을 위한 수치해석 모델은 철근을 고려하여 Shell요소로 모델링하였고 건조수축변형률은 등가온도하중으로 치환하여 적용하였다. 해석결과 수병방향응력은 Fig. 9와 같다. 건조수축에 의한 응력분포 및 변위형상으로 판단할 때, 자중으로 인한 응력분포와 유사하므로 자중에 의한 응력과 건조수축에 의한 응력은 서로 같은 방향으로 증가된다고 판단된다. 해석결과에 따르면 건조수축에 의한 덕트슬래브 하면 콘크리트 응력은 5MPa 이상 증가하여 콘크리트의 인장강도를 초과하는 것으로 분석되었다. 이 때의 중앙부 처짐은 4mm로서 덕트슬래브 단부의 지점 조건 변화에 의한 탄성침하량은 25mm보다 작다. 인장철근만 배근된 경우와 같이 단면이 비대칭인 경우 건조수축에 의한 처짐이 발생하지만 압축철근이 배근될 경우, 처짐량이 줄어든다는 기존의 연구(김진근 등, 1998; 안성수 등, 2006) 결과로 알 수 있듯이 본 터널의 덕트슬래브의 경우, 압축철근이 인장철근과 동일하게 배근되어 처짐이 거의 발생하지 않는 것으로 분석된다.

균열의 밀도와 처짐은 연관성이 높지 않다는 현장 조사 결과로 미루어 판단할 때, 처짐량이 크지 않은 건조수축으로 인한 응력 변화는 처짐량이 큰 단부조건 변화에 의한 응력 증가보다 균열 발생 원인으로서의 가능성이 더 높다고 판단된다.

Fig. 9에서 건조수축으로 인한 인장응력은 균열이 발생

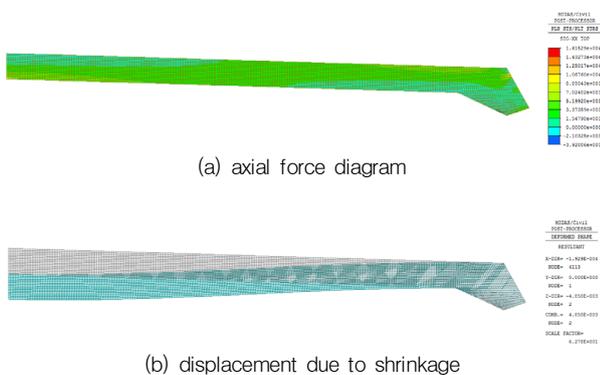


Fig. 9 Axial force and displacement due to shrinkage

한 덕트슬래브 중앙부 하면에 집중되어 있고, 덕트슬래브의 자중으로 인하여 중앙부 하면 콘크리트에 추가적인 인장응력이 작용되므로 건조수축과 자중에 의해 균열폭이 확대되었다는 분석이 가능하다. 덕트슬래브 상부의 건조수축 균열이 발생하지 않았다는 점도 해석결과와 일치한다. 따라서 라이닝 타설 기간의 불일치로 인한 건조수축 속도의 차이는 균열 발생의 주요한 원인 중에 하나로 판단된다.

3.1.5 거푸집 조기 탈형

콘크리트 강도가 발현되기 이전에 거푸집을 조기 탈형하여 Fig. 10과 같이 처짐과 균열이 발생하였을 가능성이 있다. 덕트슬래브는 Sliding Form설치 후 한 스펠당 10m의 길이로 시공하게 되는데 덕트슬래브의 폭이 11.6m로 지간이 길며 시공당시 적절한 양생 시간을 확보하지 못해 미세한 균열이 발생한 후 2차적으로 거푸집 탈형 후 자중 및 크리프에 의한 영향이 복합적으로 작용하여 균열이 발생하였을 가능성이 있다.

콘크리트 타설 후 수화작용 시 수화열에 의해서 콘크리트 구체 내부의 온도가 증가하고 초기 양생이 종료되면 온도가 내려가면서 강도 증가와 더불어 수축작용이 일어나는데 이러한 수축작용이 거푸집에 의해 구속될 경우 인장응력이 발생되어 미세한 균열이 발생할 수 있으며 거푸집 탈형 후 자중에 의해 초기 처짐 및 크리프에 의해 균열폭이 확대될 수 있다.

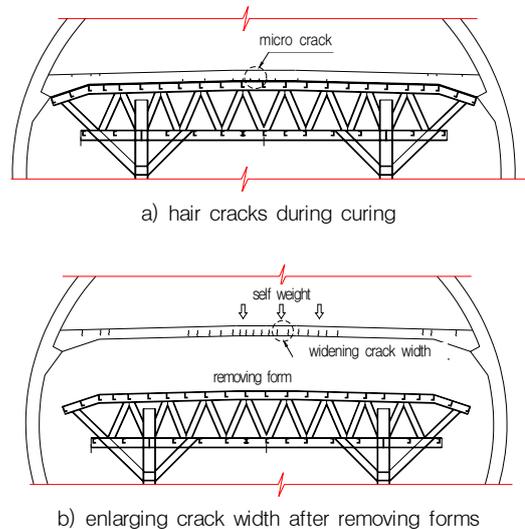


Fig. 10 Cracks during construction

3.2 종합 분석

이상과 같이 다양한 조건에 대하여 검토를 수행한 결과 균열발생 원인으로 추정되는 사항을 정리하여 평가하면 Table 14와 같다.

철근으로 덕트슬래브의 좌우가 구속되어 있는 상태에서 타설 시차를 두고 덕트슬래브의 타설을 실시하면 건조 수축으로 인한 변형을 제어할 수 없으므로 수축줄눈이 없는 상태에서는 건조수축으로 인한 균열이 발생할 가능성이 높다. 덕트슬래브 단부의 시공불량으로 인한 균열은 구조적인 균열로 판단할 수 있으나, 처짐과 균열의 밀도가 일치하지 않는 현재의 상태, 덕트슬래브 단부 상부의 균열이 없는 점 등으로 판단할 때 그 가능성은 크지 않다고 판단된다.

덕트슬래브의 시공에 있어서 현장타설하는 시공 방법은 Table 15와 같이 분류할 수 있다. “A” 터널이 본 대상 터널이고 “B” 및 “C” 터널은 다른 형식으로 시공된 터널이다. 유형을 분류하여 기존에 수행된 안전진단 조사내용을 분석한 결과, “A”형식의 터널은 대부분이 덕트슬래브

하면에서 종방향 균열이 조사되었으나, “B” 터널 및 “C” 터널의 덕트슬래브 하면에서는 종방향 균열의 발생빈도가 높지 않은 것으로 분석되었다.

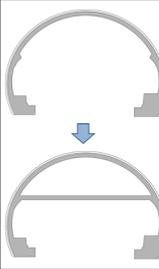
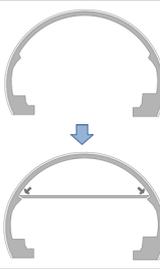
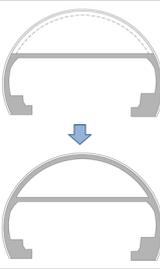
이상과 같은 내용으로부터 판단할 때, 본 연구에서 적용한 Table 15의 “A”와 같은 시공 방법은 폭이 넓은 터널에 있어서 덕트슬래브의 중앙부에 발생하는 종방향 균열은 어느 정도 불가피한 측면이 있다. 또한 덕트슬래브의 거동이 라이닝콘크리트의 구조에도 영향을 미쳐 어깨부에 균열을 야기하는 경우(추진호 등, 2011)도 있을 수 있으므로 바람직한 설계방법이 아닌 것으로 판단된다. “B” 형식의 터널은 “A”형식의 터널의 단점을 보완할 수 있으나 덕트슬래브의 두께가 두꺼워져 폭이 넓은 터널에 적용하기에는 문제가 있으며, “C”형식은 라이닝의 아치와 측벽이 일체화 거동이 어려워 아치의 구조적인 장점을 살리 어려운 문제점이 있을 수 있다.

이와 같은 문제점을 보완하기 위해서는 덕트슬래브 콘크리트의 현장타설을 지양하고 프리캐스트 중공 슬래브 시공 등의 덕트슬래브 자중을 경감하는 공법(정건용 등, 2011)등을 적용하면 시공성 확보가 용이할뿐더러 유지관리에도 합리적인 대책이 될 것으로 판단된다.

Table 14 Possibility of cause of crack

Cause of crack	Possibility of cause	
	high	low
Joint condition change (fixed → hinge)		○
Change location of steel bar		○
Thermal change		○
Shrinkage	○	
Short curing time before removing form		○

Table 15 Construction types of duct slab

	“A” tunnel	“B” tunnel	“C” tunnel
Duct slab type	Placing duct slab after finishing concrete lining	Placing duct slab after finishing concrete lining	Placing duct slab with lateral part of lining
Boundary condition	Rigid link	Hinge link	Rigid link
Stage of lining construction			
Investigated crack shape	Longitudinal crack	Reticular crack	Reticular crack

4. 결론

본 연구의 대상 터널은 폭이 넓은 도로터널에서 덕트슬래브 중앙부의 자중으로 인한 휨모멘트를 경감시키기 위하여 덕트슬래브와 라이닝의 일체화 거동을 유도하는 시공 방법을 적용하였고 그 결과 덕트슬래브 하면에 종방향 균열이 발생하였다. 이에 따라 균열에 대한 발생 원인 분석을 실시하였고 그 결과로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 슬래브구조에 있어서 수열의 종방향 균열이 발생할 경우 하중에 대한 내력 부족에 기인하는 구조적인 균열로 판단하기 쉬운 경향이 있다. 그러나 본 연구에서 대상구조물 전체 연장에 대한 균열발생 패턴과 처짐과의 상관관계를 분석한 결과에 따르면 균열 발생 빈도가 낮은 Span과 높은 Span의 슬래브 중앙에서의 처짐은 그 차이가 25mm 내외로 발생하여야 하나 측량결과 균열 발생 밀도가 높은 부위와 그렇지 않은 부위의 처짐의 차이가 거의 없는 것으로 분석되어 발생한 종방향 균열은 구조적인 균열로 단정하기에는 무리가 있는 것으로 판

단된다.

- (2) 라이닝 시공 시 철근의 이동으로 인하여 단부 상부 철근의 커플러의 위치가 당초보다 약 30mm 하부로 이동하여 이를 수치해석에 반영하여 분석한 결과 중앙부의 휨모멘트는 이동 전과 비교하여 1% 이내의 증가에 그쳐 단부의 철근 위치 변화는 발생한 균열과는 거의 무관한 것임을 확인하였다. 또한, 온도변화의 영향도 0.02MPa의 응력변화로 균열의 거동에 미치는 영향은 제한적임을 확인하였다.
- (3) 재령초기에 급속히 진행되는 건조수축 거동을 감안하여 터널라이닝과 덕트슬래브의 콘크리트 타설 시차를 고려하여 해석을 수행한 결과, 슬래브 하면의 응력이 5MPa 이상으로 인장균열을 유발할 수 있는 것으로 분석된 반면, 처짐량은 4mm 이내로서 처짐과 관계없이 건조수축으로 인한 인장균열이 발생할 수 있음을 확인하였다.
- (4) 도로터널 덕트슬래브의 시공은 본 대상 터널과 같이 콘크리트 타설 시기가 상이할 경우 건조수축 균열을 유발할 수 있으므로 타설 시차가 거의 발생하지 않도록 시공방법을 개선하거나 경량의 PC 슬래브 시공 등으로 공법을 대체하여 시공하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김진근, 이상순, 양주경, 신병천, “건조수축에 의한 철근콘크리트 보의 곡률 및 처짐”, 한국콘크리트학회 논문집, 제10권 6호, 1998, pp.261-268.
2. 김한수, 정중현, 조석희, “시공단계를 고려한 고층건물 콘크리트 슬래브의 건조수축 응력해석”, 한국콘크리트학회 논문집, 제13권 5호, 2001, pp.457-465.
3. 노병철, 김종우, 김정훈, “무선인터벡을 이용한 웹 기반 원격지 철도터널의 계측관리”, 구조물진단학회지, 제10권 3호, 2006, pp.159-164.
4. 박석균, “3 다이폴 안테나 방식 레이더에 의한 콘크리트 터널 라이닝 배면 공동의 형상 추정”, 한국콘크리트학회논문집, 제17권 2호, 2005, pp.221-227.
5. 안성수, 성원진, 강병수, 이용학, “건조수축과 크리프에 의한 합성형 거더의 재령중속적 거동”, 한국콘크리트학회 논문집, 제18권 1호, 2006, pp.109-116.
6. 양은익, 김일순, 이성태, 이광명, “콘크리트 건조수축 측정 방법 및 예측 모델에 대한 비교”, 한국콘크리트학회논문집, 제22권 1호, 2010, pp.85-91.
7. 우중태, 이승, “계측에 의한 터널 라이닝의 안전성 분석”, 구조물진단학회지, 제6권 3호, 2002, pp.103-110.
8. 이수진, 이희근, 이승훈, 원종필, “건조수축에 따른 균열 방지를 위한 콘크리트 슬래브의 정량적 줄눈 간격 산정”, 한국콘크리트학회논문집, 제23권 3호, 2011, pp.289-294.
9. 이유석, 이태중, 박광립, 오영석, 차철준, “열화상카메라를 활용한 외부온도의 터널내 영향범위 산정방법 연구”, 구조물진단학회지, 제14권 5호, 2010, pp.136-143.
10. 정건웅, 안대진, 홍문기, 김방철, “장대 횡류식터널의 환기덕트 시공성 개선을 위한 PC 중공 슬래브 설계 및 시공사례”, 한국터널지하공간학회지, 제13권 5호, 2011, pp.50-59.
11. 추진호, 박성우, 김형탁, 지기환, 윤태국, “정밀안전진단 결과를 활용한 NATM터널(무근)의 라이닝 균열 종류별 발생원인 분석-Part 1”, 한국터널지하공간학회논문집, 제13권 3호, 2011, pp.199-214.
12. 한국콘크리트학회, 콘크리트 구조설계기준 해설, 기문당, 서울, 2007, pp.33-45.
13. 한천구, 한민철, 송승현, 윤섭, “팽창재와 수축저감제를 병용한 콘크리트의 건조수축 특성”, 한국콘크리트학회논문집, 제18권 3호, 2006, pp.397-404
14. ACI 209R-92, Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures, ACI committee 209, Detroit, 1992, pp.4-9.
15. Mashimo, H., Isago, N., Kitani, T. and Endou, T., “Effect of Fiber Reinforced Concrete on Shrinkage Crack of Tunnel Lining”, Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 21, 2006, pp.382-383.
16. Wang, N., Chen, P., Wang, J. and Liu, W., “Crack Propagation Detection and Simulation Research of Jiulong Tunnel”, Advanced Materials Research, vol. 446-449, 2012, pp.2256-2261.
17. Wang, T. T., “Characterizing Crack Patterns on Tunnel Linings Associated with Shear Deformation Induced by Instability of Neighboring Slopes”, Engineering Geology, vol. 115, 2010, pp.80-95.
18. Weiss, W. J., Yang, W. and Shah, S. P., “Shrinkage Cracking of Restrained Concrete Slabs”, ASCE Journal of Engineering Mechanics, vol. 124, No. 7, 1998, pp.765-774.

(접수일자 : 2012년 4월 25일)

(수정일자 : 2012년 6월 5일)

(심사완료일자 : 2012년 7월 10일)

요 지

본 연구에서는 반횡류식 터널 덕트슬래브 하면 중앙부에 발생한 종방향 균열의 발생 원인을 분석하였다. 분석을 수행하기 위하여 균열이 발생 부위에 대한 상세한 외관조사, 비파괴조사 및 덕트슬래브의 처짐 측량을 실시하였고, 그 결과와 수치해석결과와의 상관관계 분석을 수행하여 균열 발생 원인에 대한 상세한 분석을 실시하였다. 균열 발생 원인의 주요 인자로 단부구속조건, 철근의 위치, 온도의 변화 및 건조수축 등으로 분류하였고, 콘크리트 라이닝을 우선적으로 타설하고 덕트슬래브를 철근 커플러로 강결하여 수개월 후에 별도 타설한 시공여건에 따라 발생할 가능성이 있는 요소들을 고려하여 수치해석을 실시하였다. 특히, 건조수축에 대한 분석을 위하여 ACI209 및 콘크리트 구조설계기준의 예측식과 기존 연구의 실험결과를 비교하여 시공당시의 건조수축 발생량을 예측하였고 구조해석을 수행하여 건조수축이 균열발생의 주요한 원인 중에 하나라는 결과를 도출하였다. 이에 따라 기존에 수행한 도로터널의 안전진단 결과를 덕트슬래브의 시공 방법에 따라 분류하고 균열발생 패턴을 분석하여 덕트슬래브가 있는 터널의 시공방법의 개선에 대한 제언을 하였다.

핵심 용어 : 터널, 덕트슬래브, 종방향 균열, 건조수축
