

프리캐스트 세그먼트 라이닝과 현장 타설 콘크리트 라이닝의 내구성 비교

Durability Comparison of Precast Segment Lining and Cast-in-place Concrete Lining

이 규 필[†]

Gyuphil Lee

Received: October 30th, 2023; Revised: November 8th, 2023; Accepted: November 20th, 2023

ABSTRACT : Cast-in-place concrete lining is commonly used in tunnel lining, but cast-in-place concrete lining has problems with construction and quality control. Precast segment lining is being used to solve these problems. In general, precast segment lining is known to have improved durability and easy maintenance such as rehabilitation of structures. This study compared the durability of 22 tunnel linings constructed with precast segments or cast-in-place reinforced concrete.

Keywords : Precast, Segment, Concrete lining, Durability

요 지 : 터널 콘크리트 라이닝은 현장 타설을 통한 시공법이 가장 일반적이나 현장 타설 콘크리트 라이닝은 시공성 및 품질관리의 문제점을 갖고 있으며, 이러한 문제점을 해결하기 위한 프리캐스트 세그먼트 라이닝이 활용되고 있다. 일반적으로 프리캐스트 세그먼트 라이닝은 향상된 내구성 및 이로 인하여 보수·보강 등 유지관리가 용이한 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 프리캐스트 세그먼트 또는 현장타설 철근콘크리트로 시공된 22개소 터널 라이닝의 내구성을 비교·분석하였다.

주요어 : 프리캐스트, 세그먼트, 콘크리트 라이닝, 내구성

1. 서 론

터널 콘크리트 라이닝은 현장타설을 통한 시공법이 가장 일반적인 시공법이라 할 수 있다. 그러나 이 경우 철근조립, 강재 거푸집 설치, 콘크리트 타설 및 양생 등 여러 공정이 요구될 뿐만 아니라 일련의 공정 중 작업불량은 콘크리트 라이닝의 품질은 물론 구조적 안정성에 영향을 미치게 되므로 품질관리에 만전을 기하여야 한다(Lee et al., 2009).

이러한 현장타설 콘크리트 라이닝의 단점을 해결하기 위하여 프리캐스트 세그먼트 라이닝의 활용에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다(Ma et al., 2008).

1990년대 후반에 들어 도심지 지하 공동구, 전력구 및 통신구 등의 구조물의 시공에 소형 프리캐스트 구조물을 제작 현장에서 조립하여 완성하는 공법이 국내에 소개되어 시공되기 시작하였다(Kim et al., 2019). 이러한 프리캐스트 구조물은 기존 현장타설 콘크리트를 대체한 공법으로 해외에서는 이미 오래전부터 상용화된 공법이며, 소규모 통로 및 수로 구조물 이외 지하차도 혹은 지중라멘교와 같은 대형

구조물에도 프리캐스트를 이용한 공법이 활발히 적용되어 오고 있다. 2000년대 이후 국내에서도 지중라멘교 등에 프리캐스트를 이용한 공법이 설계, 제작 및 시공 중에 있다(Lee et al., 2009).

프리캐스트 세그먼트 구조물은 현장타설 콘크리트의 여러 문제점 개선은 물론 제작 공정의 특성 등에 기인한 향상된 내구성 및 이로 인하여 보수·보강 등 유지관리가 용이한 것으로 알려져 있으나 이에 대한 정량적 비교·분석 결과는 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 프리캐스트 세그먼트 또는 현장타설 철근콘크리트로 시공된 22개소 터널 라이닝의 내구성을 비교·분석하였다.

2. 콘크리트 내구성 평가 항목

콘크리트 구조물에 영향을 미치는 내구성 저해 요소는 염해나 콘크리트 탄산(중성)화에 의한 철근부식, 동결융해 작용, 황산염해 등 외부 유해물질에 의한 화학적 침식 작용,

[†] Senior Researcher, Department of Geotechnical Engineering Research, KOREA INSTITUTE of CIVIL ENGINEERING and BUILDING TECHNOLOGY (Corresponding Author : freely@kict.re.kr)

알칼리-골재반응 등이 있다.

이러한 콘크리트의 성능저하 등을 평가하기 위하여 시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법에 의해 시행하는 정밀안전진단 내구성 평가항목으로는 반발경도법, 코어채취법 등을 이용한 강도시험, 초음파를 이용한 균열깊이 및 품질평가 시험, 탄산(중성)화 시험, 염화물 함유량 시험, 철근배근 시험, 철근부식도 시험, 실내시험 등이 있다(Choo et al., 2008).

또한 시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침(성능평가편)-터널에서 콘크리트의 내구성 평가항목은 크게 열화진전평가와 열화환경평가로 구분된다. 열화진전평가는 탄산(중성)화 깊이, 염화물 침투량, 피복 콘크리트의 품질, 열화환경평가는 제설제에 의한 염해환경, 비래염분에 의한 염해환경 및 동결융해의 반복에 의한 동해환경이 포함된다. 이 가운데 피복 콘크리트의 품질은 반발경도 측정결과를 활용하여 평가를 수행할 수 있도록 규정하고 있다.

본 연구에서는 프리캐스트 세그먼트 또는 현장타설 철근콘크리트로 시공된 라이닝의 내구성 비교·분석을 위하여, 상기 콘크리트의 내구성 평가 항목 중 22개소 터널 정밀안전진단 보고서 공통 조사항목인 중성화 깊이, 반발경도법에 따른 압축강도 및 외관 조사망도상 균열(망상균열 포함)을 콘크리트 내구성 평가 항목으로 선정하였으며, A 터널(상) 등 22개소 터널에 대한 정밀안전진단 결과를 조사·분석하였다.

3. 내구성 비교 평가 대상 구조물 개요

3.1 프리캐스트 세그먼트 라이닝

터널 라이닝이 프리캐스트 세그먼트로 시공된 A 터널은 2013년 준공된 2차선 도로터널로 프리캐스트 세그먼트의 제원은 폭 약 13m, 높이 약 8.3m, 세그먼트 두께 400mm,

콘크리트 설계기준 강도는 40MPa이며, 연장은 상행선 1,168m, 하행선 1,298m이다.

프리캐스트 세그먼트 라이닝은 좌·우 측벽부 및 천장부 3부분으로 구성되어 있으며, 시공구간은 상행선 출구부 65m, 하행선 입구부 64m로 총 129m이다.

본 연구에서는 프리캐스트 세그먼트로 시공된 터널 라이닝에 발생한 균열, 망상균열, 중성화 깊이 및 반발경도법에 의한 압축강도 등 정밀안전진단 시행 결과를 조사·분석하였으며, 프리캐스트 세그먼트의 제원, 시공 중 및 완공 후 전경은 Fig. 1~2와 같다.

3.2 현장 타설 철근콘크리트 라이닝

프리캐스트 세그먼트 구조물의 내구성 분석 비교 대상으로 A 터널과 동일하게 2013년 준공된 B 터널(상) 등 20개소 터널을 선정하였다. 일반적으로 터널 본선 구간의 라이닝은 무근콘크리트로 시공되며, 입출구부는 현장조건 고려 및 내진성능 확보 등을 위하여 일반적으로 철근콘크리트 라이닝으로 시공된다.

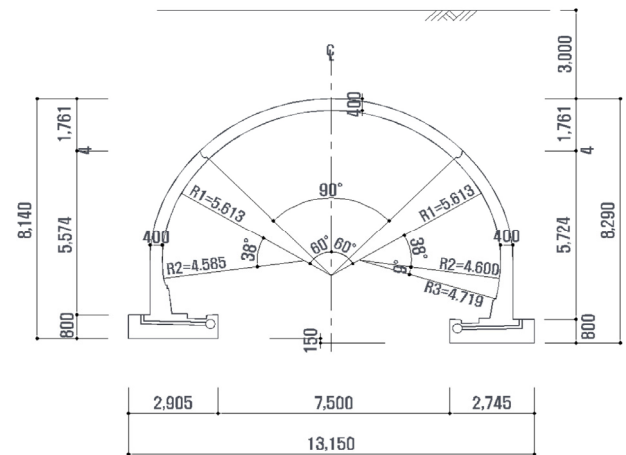


Fig. 1. Dimension of precast segment lining (unit : mm)



Fig. 2. View of the construction

콘크리트에 발생하는 균열은 철근보강 유무에 영향을 받게 되므로 본 연구에서는 B 터널(상) 등 20개소 터널 입출구부에 현장 타설 철근콘크리트 라이닝 구간에 발생한 균열, 망상균열, 중성화 깊이 및 반발경도법에 의한 압축강도 등 정밀안전진단 시행 결과를 조사·분석하였다.

B 터널(상) 등 20개소 모두 2차선 도로터널로 라이닝 두께 300mm, 콘크리트 설계기준 강도 24MPa이며, 터널별 입출구부에 시공된 현장타설 철근콘크리트 라이닝의 연장은 20~113m인 것으로 조사되었다(Table 1 참조).

4. 자료조사 및 분석

A 터널을 포함 22개 터널에 대한 정밀안전진단 결과 철근콘크리트 라이닝에 발생한 균열 길이, 망상균열 면적의 합, 중성화 깊이 및 반발경도법에 의한 압축강도는 Table 2와 같다.

Table 2에서 보이는 바와 같이 2013년 준공되어 10년 이상 공용 중인 A 터널(상) 등 22개소 터널별 철근콘크리트 라이닝에 발생한 전체 균열 길이는 최소 2~63.3m로 조사

Table 1. Dimension of tunnels

Classification	Tunnel length (m)	RC lining length on gates area (m)	Classification	Tunnel length (m)	RC lining length on gates area (m)
B tunnel (up)	940	95	G tunnel (up)	586	40
B tunnel (down)	960	68	G tunnel (down)	590	20
C tunnel (up)	270	87	H tunnel (up)	480	113
C tunnel (down)	180	75	H tunnel (down)	475	94
D tunnel (up)	1,300	72	I tunnel (up)	620	40
D tunnel (down)	1,255	65	I tunnel (down)	630	40
E tunnel (up)	1,765	91	J tunnel (up)	889	45
E tunnel (down)	1,735	106	J tunnel (down)	853	55
F tunnel (up)	510	76	K tunnel (up)	586	86
F tunnel (down)	445	76	K tunnel (down)	640	86

Table 2. Result of precision safety diagnosis

Classification	Crack length (m)			Pattern crack (m ²)	Carbonation depth (mm)	Compressive strength (MPa)
	Total	width<0.3mm	width≥0.3mm			
A tunnel (up)	2.8	2.8	0	18	3	52.0
A tunnel (down)	4.5	4.5	0	0	5~6	50.4
B tunnel (up)	44	35	9	42.44	5.5~6	24.6~26.3
B tunnel (down)	10.8	10.8	0	10.8	4.5~8	25.9~26.4
C tunnel (up)	10.5	9.7	0.8	13.85	5.5~8	24.8~26.2
C tunnel (down)	14.2	5	9.2	16.9	5.5~7	25.2~26.2
D tunnel (up)	22.5	22.5	0	13.4	7.5~8.5	24.9~26
D tunnel (down)	35.6	32.4	3.2	42.5	4~9	25.4~28.1
E tunnel (up)	37	35	2	203	4~5	23.9~27.2
E tunnel (down)	33.1	33.1	0	133	5~7	25.3~27.1
F tunnel (up)	31.2	27.2	4	312	11~13	24.7~24.8
F tunnel (down)	38.2	33.4	4.8	277	10~12	24.1~25.8
G tunnel (up)	61.8	44.8	17	4	9~17	24.8~27.4
G tunnel (down)	26.1	2.4	23.7	29.2	9.5~13	23.9~26
H tunnel (up)	56.4	41.3	15.1	471.69	3~6	23.9~25.4
H tunnel (down)	2	2	0	324	8~9.5	24.5~24.6
I tunnel (up)	27.5	27.5	0	303	8~11	23.5~28.1
I tunnel (down)	63.3	60.8	2.5	375	9~15	24.2~25.6
J tunnel (up)	60.9	27.7	33.2	154	20.1~20.9	24~26
J tunnel (down)	43.1	29.4	13.7	0	9.5~16.2	24~26.1
K tunnel (up)	26.4	26.2	0.2	8	2.5~3	27~28.4
K tunnel (down)	17.3	14.3	3	0	5.4~8.8	27.8~28.1

되었다. 이 가운데 균열 폭이 0.3mm 이상인 균열은 J 터널(상)에서 최대 33.2m 발생한 것으로 조사되었으며, 균열 폭 0.3mm 미만의 균열은 G 터널(상)에서 최대 44.8m 발생한 것으로 조사되었다.

망상균열(pattern crack)은 프리캐스트 세그먼트로 시공된 A 터널(상)에서 18m² 발생하였으며, 현장 타설 철근콘크리트 라이닝으로 시공된 H 터널(상)에서 최대 약 472m² 발생한 것으로 나타났다.

중성화 깊이는 프리캐스트 세그먼트로 시공된 A 터널(하)에서 약 5~6mm인 것으로 조사되었고, B 터널(상) 등 20개 소 터널의 현장 타설 철근콘크리트 라이닝 구간에 발생한 중성화 깊이는 2.5~20.9mm인 것으로 조사되었으며, 반발경도법을 이용한 콘크리트 압축강도(평균)는 설계기준 강도(24MPa, 40MPa) 이상인 것으로 나타났다.

본 연구에서는 프리캐스트 세그먼트 라이닝의 내구성 분석을 위하여 각 터널별 상행선 및 하행선 합산 구간에 시공된 철근콘크리트 라이닝 단위 길이당 발생한 균열길이 및 망상균열 면적에 대한 정량적 분석을 수행하였으며 관련 내용을 정리하면 다음과 같다.

4.1 균열길이 및 망상균열 면적

A 터널 프리캐스트 세그먼트 라이닝에는 폭 0.3mm 미만의 균열만 발생한 것으로 조사되었으며, 라이닝 단위 길이당 발생한 균열은 0.057m로 나타났다.

B~K 터널 현장 타설 철근콘크리트 라이닝에는 라이닝 단위 길이당 0.152~1.465m의 균열이 발생한 것으로 나타났다. 이 가운데 균열 폭 0.3mm 미만의 균열은 0.057~1.104m, 균열 폭 0.3mm 이상의 균열은 0.01~0.678m로 나타났다.

라이닝 단위 길이당 발생한 망상균열의 면적은 프리캐스트 세그먼트 라이닝이 시공된 A 터널의 경우 0.14m²로 나타

났으며, 현장타설 콘크리트 라이닝이 시공된 B~K 터널의 경우 0.047~8.475m²로 조사되었다(Table 3 참조).

프리캐스트 세그먼트 라이닝(A 터널)의 단위 길이당 발생한 균열은 0.057m이며, 현장타설 철근콘크리트 라이닝(B~K 터널)의 단위 길이당 발생한 균열은 평균 0.59m로 나타났다(Fig. 3 참조).

또한 균열 폭 0.3mm 이상의 균열은 프리캐스트 세그먼트 라이닝(A 터널)에서 발생하지 않은 것으로 조사되었으나, Fig. 4에서 보이는 바와 같이 현장타설 철근콘크리트 라이닝(B~K 터널)에 균열 폭 0.3mm 이상의 균열은 단위 길이당

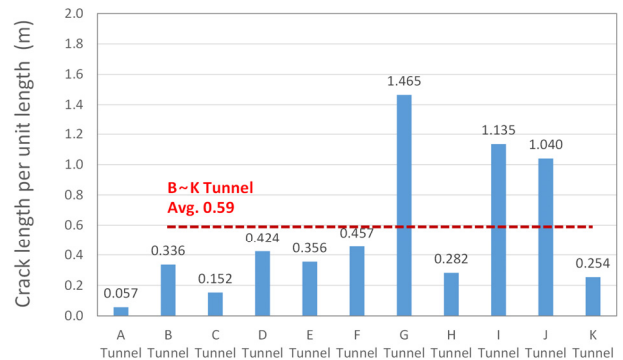


Fig. 3. Crack length per RC lining unit length

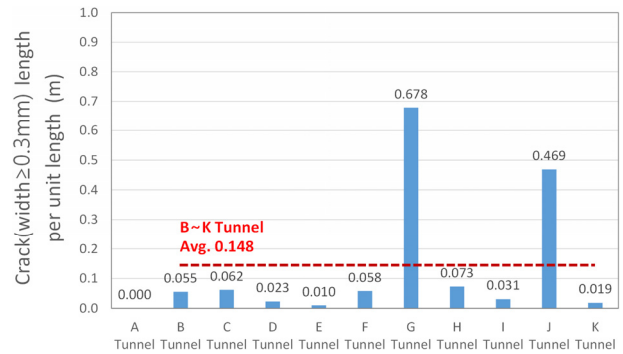


Fig. 4. Crack (width ≥ 0.3mm) length per RC lining unit length

Table 3. Crack length and pattern crack area per RC lining length

Classification	Crack length (m)			Pattern crack (m ²)
	Total	width < 0.3mm	width ≥ 0.3mm	
A Tunnel	0.057	0.057	0.000	0.140
B Tunnel	0.336	0.281	0.055	0.327
C Tunnel	0.152	0.091	0.062	0.190
D Tunnel	0.424	0.401	0.023	0.408
E Tunnel	0.356	0.346	0.010	1.706
F Tunnel	0.457	0.399	0.058	3.875
G Tunnel	1.465	0.787	0.678	0.553
H Tunnel	0.282	0.209	0.073	3.844
I Tunnel	1.135	1.104	0.031	8.475
J Tunnel	1.040	0.571	0.469	1.540
K Tunnel	0.254	0.235	0.019	0.047

0.01~0.678m(평균 0.148m) 발생한 것으로 나타났다.

프리캐스트 세그먼트 라이닝으로 시공된 A 터널 단위 길이당 발생한 망상균열은 0.14m²이며, 현장타설 철근콘크리트 라이닝으로 시공된 B-K 터널의 단위길이당 평균 2.1m²의 망상균열이 발생한 것으로 조사되었다(Fig. 5 참조).

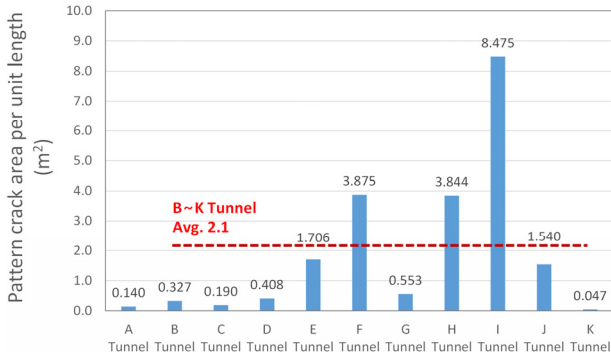


Fig. 5. Pattern crack area per RC lining unit length

따라서 현장타설 철근콘크리트 라이닝(B-K 터널)에 프리캐스트 세그먼트 라이닝(A 터널) 대비 평균 15배 이상의 망상균열이 발생한 것으로 나타났다.

프리캐스트 세그먼트 라이닝은 균열의 생성 및 폭과 길이의 진행이 낮은 것으로 나타났으며, 이러한 내구성 증진효과로 보수·보강 등 유지관리에 필요한 비용 절감이 가능할 것으로 판단된다.

4.2 중성화 깊이 및 압축강도

경화한 콘크리트는 시멘트의 수화 생성물로서 수산화석회를 함유하여 강알칼리성을 가지며, 이 강알칼리성이 철근을 보호하여 철근의 부식을 억제하는 역할을 수행한다. 그러나 중성화로 인하여 콘크리트의 pH 값이 감소됨에 따라 콘크리트 내부의 환경이 알칼리에서 중성으로 변화하며, 철근을 둘러싼 알칼리성 피막을 불안정하게 하여 부식을 유발하게 되므로 중성화는 철근콘크리트 구조물의 내구성 평가에 주요 인자라 할 수 있다.

본 연구에서는 정밀안전진단에서 수행한 각 터널별 철근콘크리트 라이닝의 중성화 깊이를 조사·분석하였다.

프리캐스트 세그먼트 라이닝의 평균 중성화 깊이는 평균 4.7mm이며, 현장 타설 철근콘크리트 라이닝의 중성화 깊이는 5.4~16.2mm(평균 8.69mm)로 프리캐스트 세그먼트 라이닝의 중성화 깊이는 현장타설 철근콘크리트 라이닝 대비 약 13~69%(평균 약 46%) 작게 발생하는 것으로 나타났다(Fig. 6 참조).

입출구부 철근콘크리트 라이닝의 반발경도법을 이용한

콘크리트 압축강도(평균)는 설계기준 강도 24MPa, 40MPa 이상인 것으로 나타났다(Fig. 7 참조).

시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침(성능평가 편)-터널에서는 피복(표면부) 콘크리트 품질은 반발경도 측정을 통한 압축강도 대비 설계강도의 비(q_{cl})가 100% 이상인 경우 피복 콘크리트의 내구성능이 양호한 상태로 규정하고 있다.

Table 4에서 보이는 바와 같이 조사·분석 대상 터널 22개소의 터널 입출구부 철근콘크리트 라이닝의 q_{cl} 는 모두

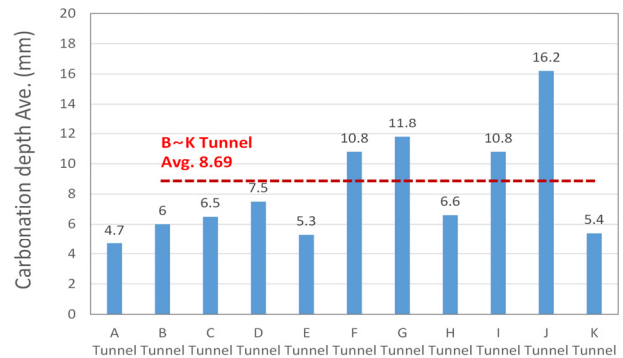


Fig. 6. Carbonation depth

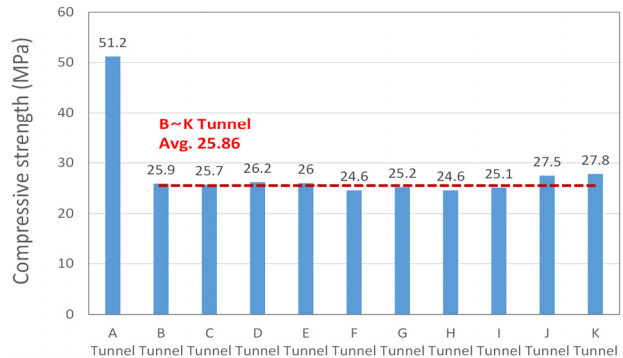


Fig. 7. Compressive strength

Table 4. Carbonation depth & Compressive strength

Classification	Compressive strength (MPa)		
	Rebound hammer test (Avg.)	Design	q_{cl} ¹⁾
A Tunnel	51.2	40	128.0
B Tunnel	25.9	24	107.9
C Tunnel	25.7	24	107.1
D Tunnel	26.2	24	109.2
E Tunnel	26.0	24	108.3
F Tunnel	24.6	24	102.5
G Tunnel	25.2	24	105.0
H Tunnel	24.6	24	102.5
I Tunnel	25.1	24	104.6
J Tunnel	27.5	24	114.6
K Tunnel	27.8	24	115.8

1) $q_{cl} = (\text{rebound hammer test} \div \text{Design}) \times 100\%$

100% 이상으로 피복 콘크리트의 내구성이 양호한 것으로 나타났다.

프리캐스트 세그먼트로 시공된 A 터널의 경우 압축강도 대비 설계강도의 비(q_{ci})는 128%로 현장 타설 철근콘크리트 라이닝으로 시공된 터널 대비 높은 값을 보인다.

따라서 프리캐스트 세그먼트 라이닝은 현장타설 철근콘크리트 라이닝 대비 낮은 중성화 진행 속도, 양호한 피복 콘크리트의 내구성을 갖는 것으로 나타났으며, 이러한 내구성 향상은 구조물의 장수명화에 기여할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 프리캐스트 세그먼트 라이닝의 내구성 분석을 위하여 균열, 중성화 깊이 등을 평가인자로 선정하였으며, 현장 타설 철근콘크리트 라이닝과 프리캐스트 세그먼트 라이닝이 시공된 터널에 대한 정밀안전진단 수행 결과를 조사·분석하였다. 프리캐스트 세그먼트 라이닝 및 현장 타설 철근콘크리트 라이닝의 내구성 분석 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 현장 타설 철근콘크리트 라이닝의 단위 길이당 발생한 균열은 평균 0.59m이나, 프리캐스트 세그먼트 라이닝의 단위 길이당 발생한 균열은 0.057m로 현장 타설 철근콘크리트 라이닝 대비 약 10% 미만의 균열이 발생하는 것으로 나타났다. 또한 균열 폭 0.3mm 이상의 균열은 프리캐스트 세그먼트 라이닝에서 발생하지 않은 것으로 분석되었다.
- (2) 프리캐스트 세그먼트 라이닝 및 현장 타설 철근콘크리트 라이닝의 단위 길이당 발생한 망상균열 면적은 각각 0.14m^2 , (평균) 2.1m^2 로 현장타설 철근콘크리트 라이닝에 평균 15배 이상 망상균열이 발생한 것으로 나타났다. 따라서 프리캐스트 세그먼트 라이닝이 현장 타설 철근콘크리트 라이닝보다 균열의 발생 및 진행이 낮은 것으로 나타났다.

- (3) 프리캐스트 세그먼트 라이닝의 평균 중성화 깊이는 4.7mm이며, 현장 타설 철근콘크리트 라이닝의 중성화 깊이는 5.4~16.2mm(평균 8.69mm)로 프리캐스트 세그먼트 라이닝의 중성화 깊이는 현장 타설 철근콘크리트 라이닝 대비 약 13~69%(평균 약 46%) 작게 발생하는 것으로 분석되었다.
- (4) 프리캐스트 세그먼트 라이닝의 반발경도 측정을 통한 압축강도 대비 설계강도의 비(q_{ci})가 128%로 현장 타설 철근콘크리트 라이닝으로 시공된 터널 대비 평균 약 20% 높은 것으로 나타났다.
- (5) 프리캐스트 세그먼트 라이닝은 균열의 생성 및 폭과 길이의 진행을 효과적으로 제어하며, 현장 타설 철근콘크리트 라이닝 대비 낮은 중성화 진행 속도, 양호한 피복 콘크리트의 내구성을 확보하는 것으로 분석되었다. 이러한 프리캐스트 세그먼트 라이닝의 내구성은 보수·보강 등 구조물 유지관리에 필요한 비용 절감 및 장수명화에 기여할 것으로 판단된다.

References

1. Choo, J. H., Kim, H. T., Kim, H. K. and Hwang, I. B. (2008), The enhanced assessment of the integrity on underground structure by using the primary inspection in precise safety diagnosis, KSCE 2008 Convention & Civil Expo, pp. 4176-4179 (in Korean).
2. Kim, H. J., Lee, G. P. and Lim, C. W. (2019), Investigation for the deformation behavior of the precast arch structure in the open-cut tunnel, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 21, No. 1, pp. 93-113 (in Korean).
3. Lee, G. P., Lee, S. W. and Hwang, J. H. (2009), Mechanical behaviour of rib-reinforced precast tunnel liner according to variable rib-reinforcement shapes, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 11, No. 3, pp. 265-275 (in Korean).
4. Ma, S. J., Jang, P. S., Shin, J. Y. and Nam, K. W. (2008), The study on mechanical properties of PC panel with steam curing condition, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 10, No. 1, pp. 17-24 (in Korean).