

교통량과 콘크리트 라이닝 균열 상관관계 분석

이규필*

정희원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 수석연구원

Correlation analysis of traffic and crack in concrete lining

Gyu-Phil Lee*

Senior Researcher, Geotechnical Engineering Research Department, KICT

*Corresponding Author : Gyu-Phil Lee, freely@kict.re.kr

Abstract

An analysis of covariance and Pearson correlation coefficient were performed to identify the relationship between both variables: traffic volume and crack. For this, it was carried out to analyse 216 tunnel inspection/diagnosis results with respect to the traffic. As a result, it has been proven that traffic volume and cracks in concrete linings are highly correlated. Therefore, it is recommended to consider traffic volume in planning of preemptive maintenance such as crack repair, etc.

Keywords: Traffic, Crack, Lining, Covariance, Pearson correlation coefficient

초 록

본 연구에서는 교통량과 균열 두 변수에 대한 관계성을 분석하기 위하여 공분산 분석 및 피어슨 상관관계 분석을 수행하였다. 이를 위하여 국도터널 216개소에 대한 정밀안전 점검, 정밀안전진단 시행결과 및 교통량을 조사/분석하였다. 분석결과 교통량과 콘크리트 라이닝에 발생하는 균열은 높은 상관성을 보이는 것으로 나타났다. 따라서 균열 보수 등 선제적 유지관리는 교통량을 고려한 계획수립을 수행하는 것이 바람직하다.

주요어: 교통량, 균열, 라이닝, 공분산, 피어슨 상관계수

1. 서 론

공용중인 터널의 콘크리트 라이닝에는 균열, 누수, 파손 등 손상 및 박리/박락, 백태, 재료분리 등과 같은 결함이 발생한다.

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
25(5)345-355(2023)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2023.25.5.345>

eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

Received July 17, 2023
Revised August 7, 2023
Accepted August 18, 2023



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 © 2023, Korean Tunnelling and Underground Space Association

터널분야 전문가 대상 AHP 설문 결과 콘크리트 라이닝에 발생하는 결함 가운데 균열 및 누수가 터널구조물의 상태안전성 평가지표중 가장 중요한 지표인 것으로 나타났으며(An and Kim, 2016), 국내외 44개소 터널에 대하여 결함을 조사 분석한 결과 콘크리트 라이닝에 발생하는 결함 중 균열이 가장 높은 비율을 차지하는 것으로 나타났다(Bae et al., 2001).

콘크리트 라이닝에 발생하는 균열은 재료적, 시공적, 환경적 요인에 의하여 발생되며 한 가지 원인으로 발생되는 것보다는 여러 가지 원인이 복합적으로 작용하여 발생한다. 또한 일반적으로 라이닝에 발생하는 균열은 작용하중으로 인한 인장응력의 증가로 발생하는 균열보다는 콘크리트의 건조수축 등 2차적인 효과에 의해 발생하는 경우가 많으며, 이외 다음과 같은 다양한 원인으로 균열이 발생한다(Korea Expressway Corporation, 2012).

- 부적절한 거푸집 제거시기로 양생기간 부족
- 콘크리트의 양생기간중 온도강하에 따른 수축
- 주변 대기 온도 변화에 따른 수축과 팽창의 반복
- 슬럼프가 큰 콘크리트의 타설
- 콘크리트 라이닝의 두께부족이나 타설방법의 불량
- 국부적인 지반 팽창에 따른 추가하중의 증가
- 라이닝과 원지반 상이의 공극에 의한 힘모멘트 혹은 편압의 발생
- 좌, 우측의 측벽 하부기초의 침하
- 지하수압의 작용

상기 원인에 의해 발생한 균열은 일반적으로 시간이 경과함에 따라 균열 폭과 길이 등이 증가하며, 이러한 균열의 발달과 관련하여 Chen et al. (2022)은 터널 내 차량주행에 따른 압력과 변화가 균열을 진전시킨다고 제안하였다.

따라서 본 연구에서는 터널 내 압력과 변화 원인인 교통량과 균열의 상관관계 분석을 위하여, 216개소 국도터널의 정밀안전점검과 정밀안전진단 결과 가운데 각 터널별 균열길이와 교통량 통계연보 기준 교통량을 조사·분석하였으며, 교통량과 균열길이에 대한 공분산 분석 및 피어슨 상관분석(상관계수)을 수행하였다.

2. 자료수집 및 분석방법

2.1 균열길이 및 교통량

2.1.1 균열길이

「시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법」에 따른 정밀안전점검 및 정밀안전진단은 콘크리트 라이닝에 발생한 균열, 누수, 파손 등 손상은 물론 재질 열화(박리/박락, 백태, 재료분리 등) 등과 같은 결함을 조사하고 있으며, 조사결과는 콘크리트 라이닝, 공동구, 노면, 옹벽, 갱구 등 부재별로 손상유형, 손상물량 등으로 정리된다.

본 연구에서는 최근 3년간 정밀안전점검 및 정밀안전진단을 시행한 216개소 터널에 대한 보고서를 수집하고, 각 터널별로 콘크리트 라이닝에 발생한 균열길이를 다음 Table 1과 같이 정리하였다.

Table 1. Example of data

	Tunnel ⁽¹⁾ length (m)	Crack ⁽²⁾ length (m)	Crack length per ⁽³⁾ unit length of tunnel (m)
○○ tunnel	630	793.2	1.259
□□ tunnel	1,500	827	0.551

※ (3) = $\frac{(2)}{(1)}$

표본자료 수집 대상 국도터널 216개소는 모두 2차선이나 터널연장은 최소 100 m 최대 4,580 m이다. 따라서 본 연구에서는 터널 단위길이(연장)당 균열길이를 산정하였다(Table 1 참조).

국도터널 216개소 가운데 「시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침」에 따른 제1종시설물(연장 1,000 m 이상)은 65개소 제2종시설물은 151개소이며, 공용연수 20년 이상인 터널은 17개소 20년 미만인 터널은 199개소이고 정밀안전점검 및 정밀안전진단 종합평가결과 A등급 23개소 B등급 193개소이다(Fig. 1 참조).

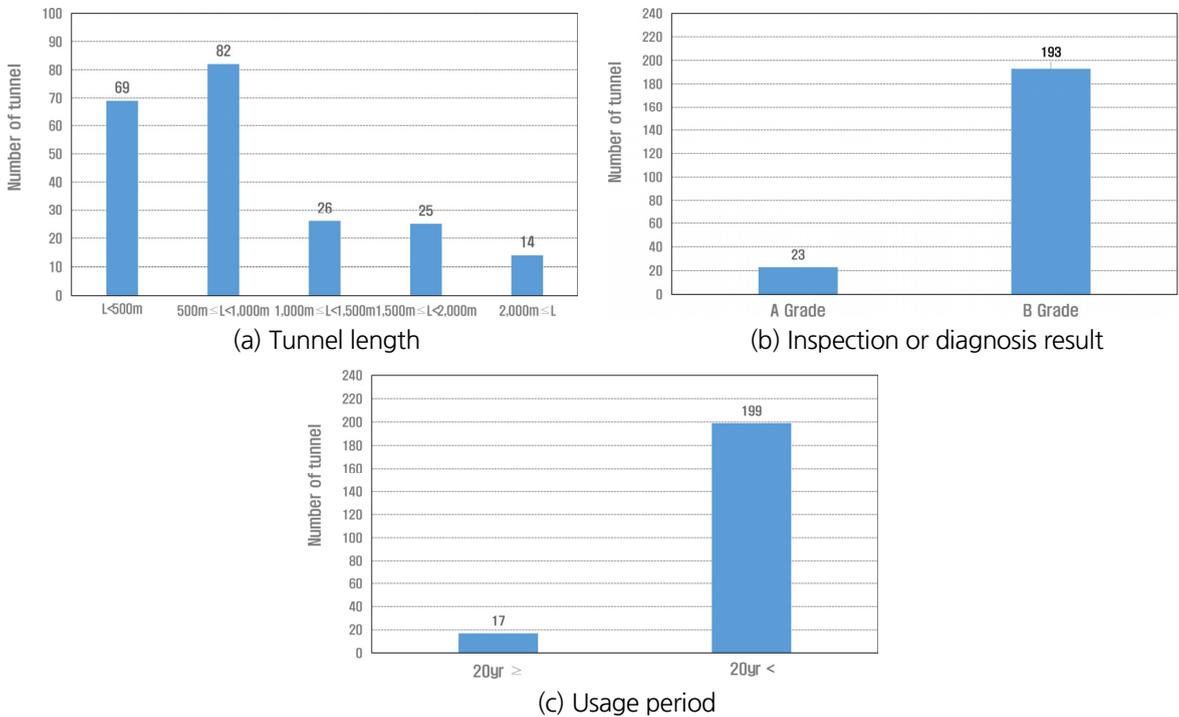


Fig. 1. Status of sampled tunnel

2.1.2 교통량

국토교통부에서는 고속국도, 일반국도, 국가지원지방도, 지방도의 교통량을 조사하여 도로의 계획과 건설, 유지관리 및 도로행정 등에 필요한 기본 자료와 각종 연구에 필요한 기초자료를 제공하고 있다(Traffic Monitoring System, 2023).

이를 위하여 일반국도 상 442개소에 자동 차종분류 조사 장비를 설치하여 1년 365일 24시간 연속으로 통과 차량의 차종별, 방향별, 시간대별로 상시조사를 시행하고 있으며, 기본 교통량 자료가 필요하다고 판단되는 약 1,600개소에 대해 수시조사를 시행하고 있다.

본 연구에서는 교통량과 균열의 상관관계 분석을 위하여, 표본자료 수집 대상 국도터널 216개소에 대하여 각 터널별 동일 노선상 최인접 조사지점의 교통량 자료를 조사/분석하였다.

상시조사 및 수시조사에 따른 교통량은 다음과 같이 1~12종의 차종으로 구분되며, 대표적인 차량 형태 및 차량 축수에 따른 종별 구분 상세 및 교통량 정보는 다음과 같다(Tables 2, 3 참조).

- 1종 : 승용차(16인승 미만 여객수송차량), 미니트럭
- 2종 : 버스(16인승 이상 여객수송차량)
- 3종 : 소형화물차 A (2축, 2.5톤 미만)
- 4종 : 소형화물차 B (2축, 2.5톤 이상)
- 5종 : 중형화물차 A (3축)
- 6종 : 중형화물차 B (4축)
- 7종 : 중형화물차 C (5축)
- 8종 : 대형화물차 A (4축, 화물 수송용 세미 트레일러 형식)
- 9종 : 대형화물차 B (4축, 화물 수송용 풀 트레일러 형식)
- 10종 : 대형화물차 C (5축, 화물 수송용 세미 트레일러 형식)
- 11종 : 대형화물차 D (5축, 화물 수송용 풀 트레일러 형식)
- 12종 : 대형화물차 E (6축 이상, 화물 수송용 세미 트레일러 형식)

Table 2. 12 vehicle classification

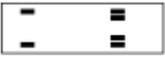
Classification	Representative sample	Axle arrangement	Classification	Representative sample	Axle arrangement
1			7		
2			8		

Table 2. 12 vehicle classification (continued)

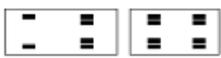
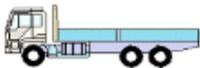
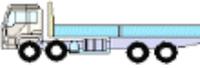
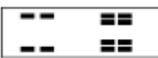
Classification	Representative sample	Axle arrangement	Classification	Representative sample	Axle arrangement
3			9		
4			10		
5			11		
6			12		

Table 3. Example of traffic data (unit: vehicles/day)

	Vehicle classification											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
○○ tunnel	1,813	602	868	740	808	179	159	109	92	265	32	0
□□ tunnel	31,080	410	7,010	1,544	833	1,217	133	26	0	64	0	10

국도터널 216개소의 교통량은 최소 1,000대에서 최대 81,827인 것으로 조사되었으며 교통량 분포현황은 Fig. 2와 같다.

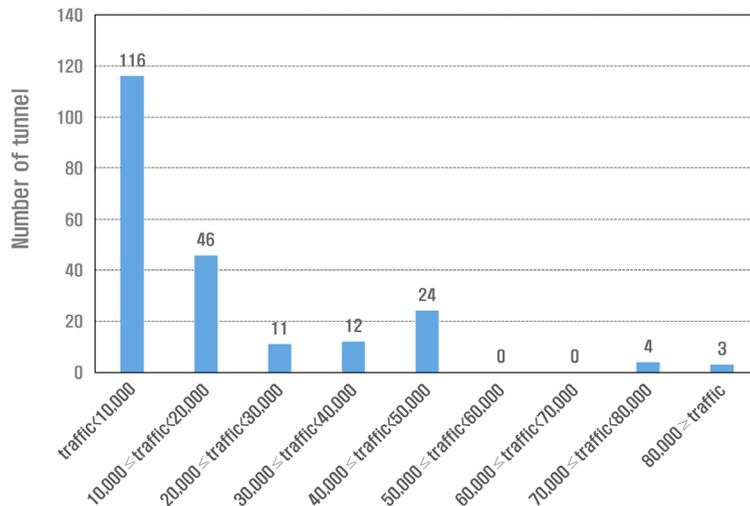


Fig. 2. Traffic distribution

2.2 교통량과 균열길이 회귀분석

회귀분석은 한 변수의 변화에 따른 다른 변수의 변화 정도와 방향을 예측하는 분석기법으로, 등간척도 이상의 두 변수 중에서 한 변수의 변화가 다른 변수의 변화에 따라 어떤 변화가 일어나는지를 보여주는 지표가 상관계수이다.

Fig. 3에서 보이는 바와 같이 회귀분석은 독립변수 교통량(X)과 종속변수 균열길이(Y)의 관계를 의미한다.

상관계수의 값이 높을수록 두 변수간의 관계가 높다고 할 수 있으며 콘크리트 라이닝의 균열발생 원인은 교통량에 국한되지 않으므로 두 변수(교통량, 균열길이)간 상관계수는 0.447로 높은 상관관계를 보이지 않는 것으로 나타났다.

그러나 계수의 값이 작다고 해서 그 가치가 중요하지 않다고 할 수 없으며, 따라서 본 연구에서는 교통량과 균열 두 변수에 대한 관계성 분석을 위한 공분산 분석 및 피어슨 상관관계 분석을 수행하였다.

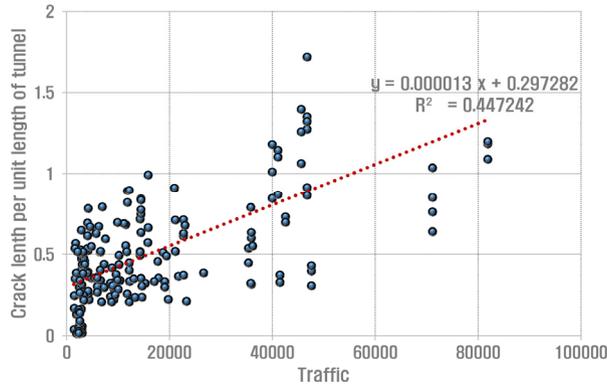


Fig. 3. Regression analysis of traffic and crack

2.3 공분산 분석 및 피어슨 상관계수 분석

본 연구에서 교통량과 균열 두 변수에 대한 관계성을 분석하기 위하여 수행한 공분산 분석 및 피어슨 상관관계 분석 관련 내용을 정리하면 다음과 같다.

2.3.1 공분산 분석

공분산(covariance)은 변수 하나에 대한 분산을 변수 둘 사이의 분산으로 확장한 것으로, 임의의 두 확률변수 X, Y 사이의 선형관계에 대한 정보를 알려주는 공분산은 양의 값인 경우 두 확률변수는 서로 양의 선형 관계가 있음을 의미하고, 공분산이 음의 값인 경우 두 확률변수는 서로 음의 선형 관계가 있음을 의미한다.

또한 두 확률변수 X, Y가 독립이면 X, Y의 공분산은 0이며, 이는 두 변수간 아무런 선형 상관관계가 없다는 것을 의미하며(Fig. 4 참조) 공분산은 다음과 같이 계산된다.

$$\text{공분산} = \text{Cov}[X, Y] = E[(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})] = \sigma_{XY} = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{n} \quad (1)$$

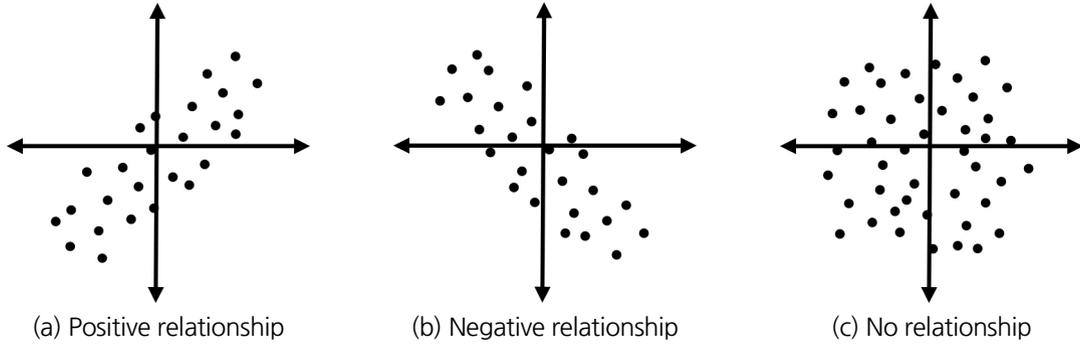


Fig. 4. Covariance

단 공분산은 두 변수의 스케일(scale)에 따라 값이 크게 달라지므로, 단순히 공분산이 더 크다고 해서 선형관계가 높은 것은 아니다.

2.3.2 피어슨 상관계수

피어슨 상관계수(Pearson Correlation Coefficient, PCC)란 두 변수 X와 Y 간의 선형 상관관계를 계량화한 수치이다. 피어슨 상관계수는 +1과 -1 사이의 값을 가지며, +1은 완벽한 양의 선형 상관관계 0은 선형 상관관계 없음 -1은 완벽한 음의 선형 상관관계를 의미한다.

피어슨 상관계수는 등간척도(간격척도)나 비례척도(비율척도)의 데이터에서 두 변수의 공분산을 각각의 표준편차의 곱으로 나눈 값으로 다음과 같이 계산된다.

$$\text{피어슨 상관계수} = \frac{\text{공분산}}{\text{표준편차} \cdot \text{표준편차}} \quad (2)$$

즉

$$\gamma_{XY} = \frac{\frac{\sum_i^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{n-1}}{\sqrt{\frac{\sum_i^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \sqrt{\frac{\sum_i^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n-1}}} \quad (3)$$

따라서

$$\gamma_{XY} = \frac{\sum_i^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_i^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_i^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (4)$$

3. 공분산 분석 및 피어슨 상관계수 분석결과

3.1 분석자료 및 결과 예시

본 연구에서는 교통량은 1~12종 전체 교통량(평균일교통량)과 균열길이, 중형화물차이상(5~12종) 차량의 교통량 및 대형화물차이상(8~12종) 차량의 교통량과 균열길이에 대하여 각각 공분산 분석을 수행하였으며, 이를 위한 217개소 터널 균열 및 교통량 분석자료 정리현황 및 식(1) 및 식(4)에 의한 공분산 분석, 피어슨 상관계수 분석결과 예시는 Fig. 5와 같다.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Crack length per unit length of tunnel (m)	Traffic (vehicles/day)							
2	0.03900463	2411		covariance			Column 1	Column 2	
3	0.237380645	4554					Column 1	0.118524	
4	0.068277946	1248					Column 2	4178.865	3.18E+08
5	0.146036254	1248							
6	0.096818192	1349		Pearson Correlation Coefficient			Column 1	Column 2	
7	0.079090909	1349					Column 1	1	
8	0.175932203	1000					Column 2	0.681042	1
9	0.0425	2375							
10	0.30625	9418							
11	0.5025	9418							
12	0.207149758	9418							
13	0.624	8425							
14	0.492849858	12088							
15	0.315320463	7084							
16	0.025694118	1525							
17	0.061156627	2968							
18	0.057986871	2605							
19	0.682666667	11409							
20	0.682666667	11409							
21	0.551333333	11409							
22	0.551333333	11409							
23	0.364111111	21718							
24	0.336538313	9557							
25	0.52284654	4090							
26	0.789833333	4129							
27	0.321488372	15189							
28	0.391370558	4090							
29	0.376089385	9557							
30	0.296160878	2411							

Fig. 5. Example of crack/traffic data and analysis results

3.2 공분산 분석

평균일교통량과 균열길이의 공분산은 4,178.9, 5~12종 차량의 교통량과 균열길이의 공분산은 284, 8~12종 차량의 교통량과 균열길이의 공분산은 81.8로 교통량과 콘크리트 라이닝에 발생하는 균열은 양의 선형관계를 갖는 것으로 나타났다(Table 4 참조).

Table 4. Covariance of crack length and traffic

	Traffic classification		
	1~12	5~12	8~12
Covariance	4,178.9	284	81.8

3.3 피어슨 상관계수

3.3.1 차종 구분별 교통량

평균일교통량(1~12종)과 균열길이, 중형화물차이상(5~12종) 차량의 교통량 및 대형화물차이상(8~12종) 차량의 교통량과 균열길이에 대하여 각각의 피어슨 상관계수는 Table 5에서 보이는 바와 같이 각각 0.681, 0.718, 0.699로 교통량과 콘크리트 라이닝에 발생하는 균열은 높은 관계성을 갖는 것으로 나타났다.

따라서 교통량은 콘크리트 라이닝 균열발생에 영향을 주는 것으로 판단되며 특히 중형화물차이상(5~12종) 차량은 콘크리트 라이닝 균열발생에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Table 5. Pearson correlation coefficient of crack length and traffic

	Traffic classification		
	1~12	5~12	8~12
Pearson correlation coefficient	0.681	0.718	0.699

3.3.2 터널 연장

표본자료 수집 대상 국도터널 216개소 중 연장 1,000 m 이상 터널은 65개소, 연장 1,000 m 미만 터널은 151개소이다.

연장 1,000 m 이상 터널에 대하여 평균일교통량 기준 교통량과 균열길이에 대하여 피어슨 상관계수는 0.519로 두 변수간 큰 관계성은 보이지 않으나, 연장 1,000 m 미만 터널의 경우 평균일교통량 기준 교통량과 균열에 대하여 피어슨 상관계수는 0.711로 높은 관계성을 갖는 것으로 나타났다.

따라서 연장 1,000 m 미만 터널에서 교통량은 균열발생에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

3.3.3 공용연수

표본자료 수집 대상 국도터널 216개소 중 20년 이상 공용중인 터널은 17개소이고 정밀안전점검 및 정밀안전진단 종합평가결과는 모두 B등급이며, 공용연수 20년 미만인 터널 199개소 중 정밀안전점검 및 정밀안전진단 종합평가결과 A등급 23개소, B등급 176개소이다.

공용연수 20년 미만 터널에 대하여 평균일교통량 기준 교통량과 균열길이에 대하여 피어슨 상관계수는 0.669, 20년 이상 공용중인 터널에 대하여 평균일교통량 기준 교통량과 균열길이에 대하여 피어슨 상관계수는 0.827인

것으로 나타났다.

따라서 연장 공용연수가 증가함에 따라 콘크리트 라이닝 재료열화 등이 발생하고 이에 따라 교통량이 균열의 발생 및 진행 등에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 교통량과 균열 두 변수에 대한 관계성을 파악하기 위하여 공분산 분석 및 피어슨 상관관계 분석을 수행하였다. 이를 위하여 국도터널 216개소의 정밀안전점검, 정밀안전진단 시행결과 및 교통량을 조사/분석하였으며 관련 내용을 정리하면 다음과 같다.

1. 평균일교통량(1~12종), 중형화물차 이상(5~12종) 차량의 교통량 및 대형화물차 이상(8~12종) 차량의 교통량 각각에 대한 공분산은 모두 양의 값을 갖는다. 따라서 교통량과 콘크리트 라이닝에 발생하는 균열은 양의 선형 관계를 갖는 것으로 나타났다.
2. 평균일교통량(1~12종) 중형화물차이상(5~12종) 차량의 교통량 및 대형화물차이상(8~12종) 차량의 교통량과 균열길이에 대하여 각각의 피어슨 상관계수는 각각 0.681, 0.718, 0.699로 교통량과 콘크리트 라이닝에 발생하는 균열은 높은 관계성을 갖는 것으로 나타났다. 특히 중형화물차이상(5~12종) 차량의 교통량은 콘크리트 라이닝 균열발생에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.
3. 평균일교통량(1~12종) 기준 연장 1,000 m 이상 터널의 균열길이에 대한 피어슨 상관계수는 0.519로 두 변수 간 큰 관계성은 보이지 않으나, 연장 1,000 m 미만 터널의 균열길이에 대한 피어슨 상관계수는 0.711로 높은 관계성을 갖는 것으로 나타났다. 따라서 교통량은 연장 1,000 m 미만 터널 콘크리트 라이닝의 균열발생에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.
4. 평균일교통량(1~12종) 기준 공용연수 20년 미만 터널의 균열길이에 대하여 피어슨 상관계수는 0.669, 20년 이상 공용중인 터널의 피어슨 상관계수는 0.827인 것으로 나타났으며, 따라서 연장 공용연수가 증가함에 따라 콘크리트 라이닝 재료열화 등이 발생하고 이에 따라 교통량이 균열발생에 영향을 미치는 것으로 판단된다.
5. 교통량은 콘크리트 라이닝 균열의 발생 및 진행 등에 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 터널의 연장 및 공용연수 또한 균열의 발생 및 진전과 높은 상관관계를 보이는 것으로 나타났다. 따라서 균열 보수 등 터널 구조물의 선제적 유지관리시 교통량, 터널연장 및 공용연수 등을 고려한 계획을 수립하는 것이 바람직하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 “2023년 터널관리시스템 운영”의 일환으로 작성되었습니다.

저자 기여도

이규필은 연구 개념 및 설계, 데이터 수집 및 분석, 원고 작성 및 검토를 하였다.

References

1. An, J.W., Kim, H.K. (2016), “Developments of performance-based assessment technique for existing tunnels”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 18, No. 6, pp. 525-533.
2. Bae, G.J., Lee, S.W., Cho, M.S., Lee, K.H. (2001), “Study on investigation and analysis about damage of tunnels”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 3, No. 3, pp. 31-43.
3. Chen, Y., Gao, Y., Shi, S., Xu, F., Zhao, W. (2022), “Characteristics of transient pressure in lining cracks induced by high-speed trains”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 228, pp. 1-11.
4. Korea Expressway Corporation (2012), A study on the minimization of longitudinal cracks of tunnel lining concrete in the roof, pp. 1-5.
5. Traffic Monitoring System Home page, <https://www.road.re.kr> (July 20, 2023).