

교량 안전점검 지표별 내하성능 상관관계 분석

정규산^{1*} · 서동우¹ · 김재환¹ · 조한민² · 박기태³ · 신연우⁴

¹한국건설기술연구원 구조연구본부 수석연구원, ²한국건설기술연구원 구조연구본부 박사후연구원,

³한국건설기술연구원 구조연구본부 선임연구위원, ⁴(주)태성이엔씨 안전진단본부 상무이사

Correlation Analysis of Load-carrying Capacity by Safety Inspection Indicators in Bridges

Kyu San Jung^{1*}, Dong Woo Seo¹, Jae Hwan Kim¹, Han Min Cho², Ki Tae Park³, and Yeon-Woo Shin⁴

¹Senior Researcher, Dept. of Structural Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

²Post-Doc., Dept. of Structural Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

³Senior Research Fellow, Dept. of Structural Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

⁴Managing Director, Dept. of Safety Inspection, Taesung E&C Inc.

요약

교량은 경제 및 사회적 활동에 토대가 되는 핵심적인 사회기반시설이다. 우리나라의 교량은 70년대 경제발전과 함께 건설되기 시작하여 80~90년대에 집중적으로 건설되었다. 최근, 공용년수가 30년을 초과하는 교량의 수가 증가하고 있어서 교량의 안전을 확보하기 위해서는 지속적인 유지관리가 필요하다. 특히, 교량 노후화에 대응하기 위하여 ICT 기술을 활용한 유지관리, 예방적 유지관리, 생애 주기 비용 절감, 교량 장수명화와 같은 기술 개발 연구들이 활발히 추진되고 있다. 본 논문은 교량의 내하성능 추정 모델 개발 연구의 일환으로 교량의 안전성 평가 자료에 기초한 상관관계 분석 결과를 제시한다. 분석 결과를 통해, 교량의 내하성능과 상관성이 높은 지표를 도출하였다.

핵심용어: 교량, 유지관리, 내하성능, 상관분석, 안전점검

ABSTRACT

Bridges are a key infrastructure that underpins economic and social activities. In Korea, bridges began to be built with economic development in the 1970s and were built intensively in the 1980s and 1990s. In recent years, as the number of bridges with a service life of more than 30 years is increasing, continuous maintenance is required to ensure the safety of the bridges. In particular, in order to cope with the aging of bridges, research on technology development such as maintenance using ICT technology, preventive maintenance, life cycle cost reduction, and long life bridge is being actively promoted. This paper presents the results of correlation analysis based on the safety evaluation data of bridges as part of the research on the development of a model for estimating load-carrying capacity of bridges. As a analysis result, indicators highly correlated with the load-carrying capacity of the bridge was derived.

Keywords: Bridge, Maintenance, Load-carrying capacity, Correlation analysis, Safety inspection

*Corresponding author: Kyu San Jung, jungkyusan@kict.re.kr ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2517-7315>

Received: 19 August 2022, Revised: 19 August 2022, Accepted: 14 September 2022



1. 서론

교량은 하천이나 도로 등의 공간 위로 사람이나 차량이 건널 수 있도록 만든 시설물로서 하천, 섬, 그리고 산이 많은 우리나라 지형적 특성 및 물류 운송과 같은 현대사회의 특성을 고려할 때, 매우 중요한 사회기반시설물이다(Cho et al., 2007; Chai and Lee, 2012). 우리나라는 안전하게 교량을 사용하기 위하여 「시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법」(이하 ‘시설물안전법’이라 한다)(MOLIT, 2021a)에 의해 주기적으로 유지관리를 수행하고 있다(Kyung et al., 2015; Lee et al., 2021). 교량의 경우, 교량의 형식, 최대 경간장, 연장 등에 따라 제1종시설물, 제2종시설물, 제3종시설물로 구분하고 있으며, 제3종시설물에도 속하지 않는 상대적으로 규모가 작은 교량은 기타(종외)시설물로 구분하고 있다. 교량의 종별에 따라 점검 및 진단 실시범위가 다르며 안전점검등 과업 내용에서도 차이가 있다. 특히, 교량의 안전성 평가는 제1종시설물 및 제2종시설물의 일부에 대해서 주로 수행되고 있다(Lee et al., 2016; Shin et al., 2018).

현행의 교량 안전성 평가를 수행하기 위해서는 설계자료를 포함한 유지관리 자료 등의 검토, 교량 외관상태 조사, 비파괴 조사 및 재료시험 등이 요구되며 특히, 차량재하시험을 통한 교량 거동의 예측과 유한요소해석을 이용한 교량 거동의 해석과 같이 많은 자원 및 기술자의 전문성이 요구된다(Park and Yang, 2003; Lee et al., 2009; Jang et al., 2009). 따라서 우리나라 도로교량 약 37,000개소(MOLIT, 2022; Park et al., 2020)에 대해 안전성 평가를 수행하는 것은 현실적으로 어려우며 효율적이지도 않다. 현행의 시설물안전법 상에서는 정기점검 수행을 통해, 교량 상태에 따라 상위의 안전점검등 과업을 수행할 수 있으며, 정밀안전점검 수행 시, 필요에 따라 안전성 평가를 수행할 수 있도록 되어 있다. 하지만 정기점검 결과만으로 안전성 평가수행 여부를 결정하기 어렵고 안전성 평가수행의 결정을 위해서는 상위의 안전점검등 단계를 수행해야 하므로 전체 도로교량 중 대부분을 차지하는 중·소규모 교량의 안전성 평가는 수행되지 못하고 있는 실정이다.

따라서 안전성 평가를 수행하지 않는 제3종 및 기타 교량에 대해서 내하성능을 추정하고 추정 결과를 바탕으로 안전성 평가가 요구되는 교량을 선별할 수 있는 연구가 필요하다. 해당 연구 결과를 통해 교량 관리주체에게 안전성 평가수행 여부의 의사결정을 위한 정보를 제공함으로써 중·소 규모의 교량 안전에 기여할 수 있을 것으로 생각된다. 이를 위해, 본 논문에서는 교량의 제원, 형식, 공용년수, 상태평가 결과, 사용환경 등의 지표로 조사하여 안전성 평가에 의한 공용내하력과 상관관계 분석을 수행하였으며, 분석 결과를 통해 공용내하력과 상관성 높은 지표를 도출하였다. 향후, 도출된 지표를 통해 다중회귀분석을 수행하여 교량 내하성능 추정 모델 개발을 수행하고자 하며 본 논문의 분석 결과를 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 본론

2.1 지표선정 및 사용 데이터 통계

지표별 내하성능 상관관계 분석을 위해 시설물안전법에 따른 안전성 평가 보고서를 수집하고, 데이터를 정리하였다. 자료수집 대상 교량은 상부구조 형식이 RC(Reinforced Concrete) 슬래브교, RC 라멘교이며, 안전성 평가 보고서에 기술되지 않았거나 미흡한 데이터는 「도로 교량 및 터널 현황정보시스템」(MOLIT, 2022)과 「시설물통합정보관리시스템」(MOLIT, 2021b)자료를 참고하여 가능한 모든 데이터를 수집하였다.

안전성 평가 보고서 등 각종 자료를 통해 수집된 데이터 항목은 준공년도, 설계하중, 상·하부 형식, 연장, 최대경간장, 폭, 차선수, 횡단구분, 노선구분, 일교통량, 상태평가 결과, 압축강도, 탄산화 깊이 시험결과, 염화물 함유량 시험결과, 상·하부 피복두께 측정결과, 실측·이론 처짐량, 처짐비, 실측·이론 고유진동수, 실측·이론 충격계수, 응답비, 응답보정계수, 기본내하율, 공용내하율, 공용내하력이며, 수집된 데이터 중 상태평가 결과, 탄산화 깊이 시험결과, 염화물 함유량 시험결과, 상·하부 피복두께 측정결과는 실시 부재에 따라 데이터 결과가 변하므로 지표 선정 시, 최소등급 또는 최솟값을 선정하였다. 응답비, 응답보정계수, 공용내하율, 공용내하력과 같이 재하시험 결과와 상호관계식에 의해 계산이 가능한 데이터는 계산을 통해

데이터화 하였고, 내하력 데이터가 없거나 추론이 불가능한 교량의 데이터는 본 연구에서 제외하였다.

수집한 자료로부터 지표별로 데이터화 하여 데이터 크리닝을 거쳐 상관관계 분석에 사용한 데이터의 통계는 다음과 같다. Table 1은 본 연구에 사용된 교량 98개소의 표본 데이터 중, 지역별 위치를 나타낸 것이다. 경상남도 지역 교량이 74개소로써 전체 표본 수의 약 75%이다. Table 2는 교량의 준공년도를 기준으로 분류한 것이다. 1981년부터 2000년 사이에 준공된 교량이 74개소로써 두 기간에 걸쳐 준공된 교량의 수가 전체 표본 수의 약 75%를 차지하고 있다. Table 3은 교량의 설계하중에 따라 분류한 것으로써 1등급인 DB-24가 전체 표본의 약 55%를 차지하고 있다. Table 4는 교량의 상부구조 형식에 따른 분류로써 RC 슬래브와 RC 라멘이 2:1의 비율을 이루고 있다.

Table 1. Statistics of collected data by region

Region	Number of collected data
Daejeon	12
Sejong	3
Chungbuk	2
Chungnam	7
Gyeongnam	74
Total	98

Table 2. Statistics of collected data by built year

Range of built year	Number of collected data
2001 ~ 2010	9
1991 ~ 2000	45
1981 ~ 1990	29
1971 ~ 1980	9
~ 1970	6
Total	98

Table 3. Statistics of collected data by design load

Design load	Number of collected data
DB-13.5	6
DB-18	37
DB-24	54
Not checked	1
Total	98

Table 4. Statistics of collected data by superstructure type

Superstructure type	Number of collected data
RC-Slab	67
RC-Rahmen	31
Total	98

Table 5는 교량의 총 연장에 따라 분류한 것으로 50 m에서 99 m 사이의 교량과 19 m 이하 교량이 각각 약 25% 정도로 분포하고 있다. Table 6은 최대 경간장에 따른 분류로써 10 m에서 19 m 사이의 최대 경간장을 가지는 교량이 74개소로 가장 많

이 분포하고 있다. Table 7은 도로등급에 따른 분류로써 일반국도 상의 교량 28개소, 지방도 상의 교량 35개소이고, 이는 전체 표본의 약 64%를 차지하고 있다. 본 연구에 사용된 데이터의 표본은 경상남도 지역의 공용연수 30년 이상, 최대 경간장 20 m 이내의 1등교(DB-24)교량으로 표현할 수 있다.

Table 5. Statistics of collected data by total length

Range of total length (m)	Number of collected data
100 ~	6
50 ~ 99	24
40 ~ 49	12
30 ~ 39	18
20 ~ 29	12
~ 19	26
Total	98

Table 6. Statistics of collected data by maximum span length

Range of maximum span length (m)	Number of collected data
50 ~	6
40 ~ 49	-
30 ~ 39	2
20 ~ 29	1
10 ~ 19	74
~ 9	15
Total	98

Table 7. Statistics of collected data by road class

Road class	Number of collected data
National highways	28
Special metropolitan city roads and Metropolitan city roads	11
National rural roads	12
Rural roads	35
Si roads	4
Gun roads	3
Not checked	5
Total	98

2.2 데이터 코딩 및 데이터 크리닝

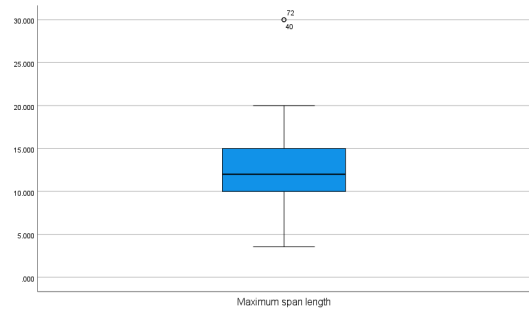
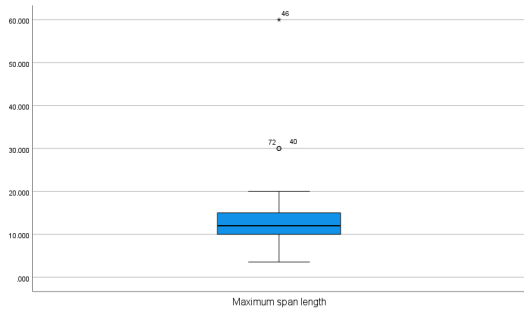
안전성 평가자료로부터 수집된 지표는 많은 양의 정보와 데이터를 포함하고 있다. 따라서 이런 정보와 데이터를 신속하고 정확하게 분석하며, 사용 및 데이터 관리가 편리한 IBM SPSS 프로그램을 활용하여 분석을 수행하였다. SPSS 프로그램은 전문 사용자가 아니더라도 일반 사용자가 데이터를 입력하고 데이터에 관리에 어려움이 없으며, 통계분석을 목적으로 IBM에서 개발한 소프트웨어이다.

수집된 데이터는 SPSS 데이터로 코딩하여 변수로 생성하였으며, 설계하중, 상태평가 결과 및 탄산화 깊이 시험 및 염화물 함유량 시험 결과와 같은 서열척도는 Table 8에 나타난 것과 같이, 양적 척도로 변환하여 분석을 수행하였다.

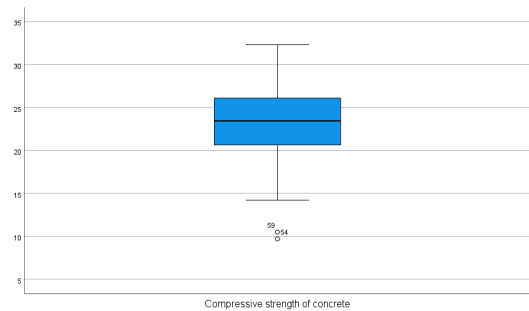
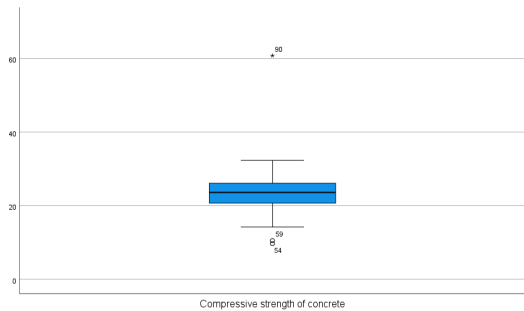
Table 8. Transformation results of quantitative data

Label	Design loads	Condition evaluation results	Test results (carbonation depth)	Test results (chloride content)
1	DB-24	a	a	a
2	DB-18	b	b	b
3	DB-13.5	c	c	c
4	-	d	d	d
5	-	e	e	e

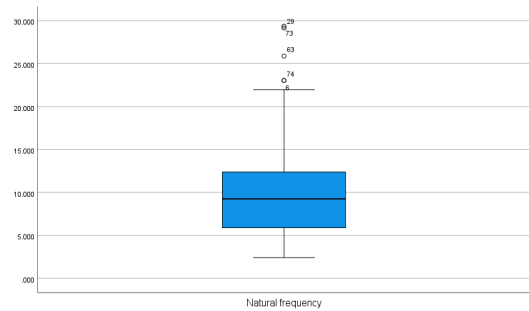
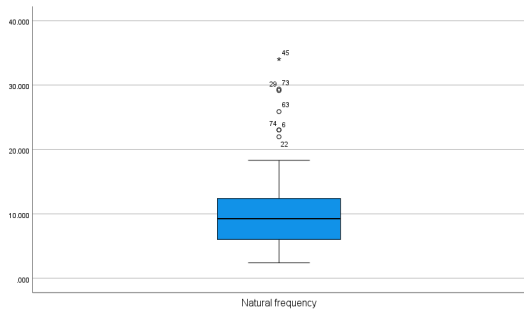
데이터 크리닝이란 정확한 분석을 위해 데이터를 검토하는 과정을 말하며 대표적으로 결측값(Missing value) 처리, 이상치(Outlier) 처리, 정규성 검정(Normality test)의 총 세 가지 단계로 구분된다. 먼저 결측값 처리는 분석에 필요없는 데이터를 제외시키는 작업으로 SPSS 프로그램에서 ‘시스템 결측값 처리’를 할 수 있도록 필요없는 데이터는 공란으로 처리하였다. 이상치 처리는 데이터 범위를 크게 벗어난 이상치로 인해 평균을 극단적으로 만드는 값을 제거하는 것으로 ‘데이터 탐색’ 기능을 이용하여 극단적인 이상치를 제거해 나가는 방식으로 수행하였다. Fig. 1은 이상치 제거를 위한 데이터 처리 결과를 나타낸 것으로서 별표와 숫자는 극단적인 이상치와 변수의 행번호를 나타낸다.



(1) Maximum span length (data range and result)



(2) Compressive strength of concrete (data range and result)



(3) Natural frequency (data range and result)

Fig. 1. Results of processing data for outlier

정규성 검정은 정규분포를 따르는 모집단에서 표본들이 취해졌는지 검정하는 것이다. 본 연구에서는 전체 표본 수가 30 이상인 독립변수는 정규분포를 이룬다는 중심극한정리 이론에 따라 별도의 정규성 검정은 필요 없을 것으로 판단된다. 다만, 교량 횡단은 표본 수가 30 이상이지만 집단의 구분이 2개 이하로 구성되어 본 연구에서는 제외하였다. 상기 세 가지 단계에서 제외된 변수 외에도 질적 척도로 이루어진 상·하부 형식, 노선 구분은 서열이 존재하지 않는 단순 명목척도로 선형 분석에 적합하지 않은 변수라 판단되어 본 연구에서 제외하였다.

2.3 변수 통계량 및 히스토그램

데이터 크리닝을 실시하여 확정된 변수들의 통계량과 히스토그램은 각각 Table 9와 Fig. 2에 나타낸 것과 같다.

Table 9. Variable statistics

Variable name	Average	Standard deviation	Number of samples
Built year	1990.140	9.079	97
Design load	1.510	0.614	97
Total length (m)	40.980	28.940	98
Maximum span length (m)	12.389	4.131	92
Width (m)	9.453	1.819	80
Number of lanes	2.450	1.253	98
Daily traffic (Number of car/day)	1516.590	1206.993	68
Condition evaluation (sole plate)	2.670	0.906	88
Condition evaluation (pavement)	2.230	0.840	88
Condition evaluation (drainage)	2.270	1.046	79
Condition evaluation (support)	2.190	0.856	36
Condition evaluation (substructure)	2.640	0.727	89
Compressive strength (MPa)	23.310	4.284	92
Carbonation depth (mm)	1.720	0.911	87
Chloride content (kg/m^3)	1.140	0.469	84
Top cover thickness (mm)	39.653	16.543	87
Lower cover thickness (mm)	59.508	28.570	59
Deflection (theory) (mm)	0.917	0.738	72
Deflection (measurement) (mm)	0.893	0.680	76
Deflection ratio	1.138	0.252	87
Natural frequency (theory) (Hz)	10.319	5.623	78
Natural frequency (measurement) (Hz)	9.743	4.892	80
Impact coefficient (theory)	0.288	0.016	86
Impact coefficient (measurement)	0.210	0.061	86
Response ratio	1.067	0.084	80
Response correction coefficient	1.167	0.250	78
Rating factor in the load carrying capacity (basic)	1.346	0.519	92
Rating factor in the load carrying capacity	1.609	0.680	94
Load carrying capacity	33.754	15.552	94

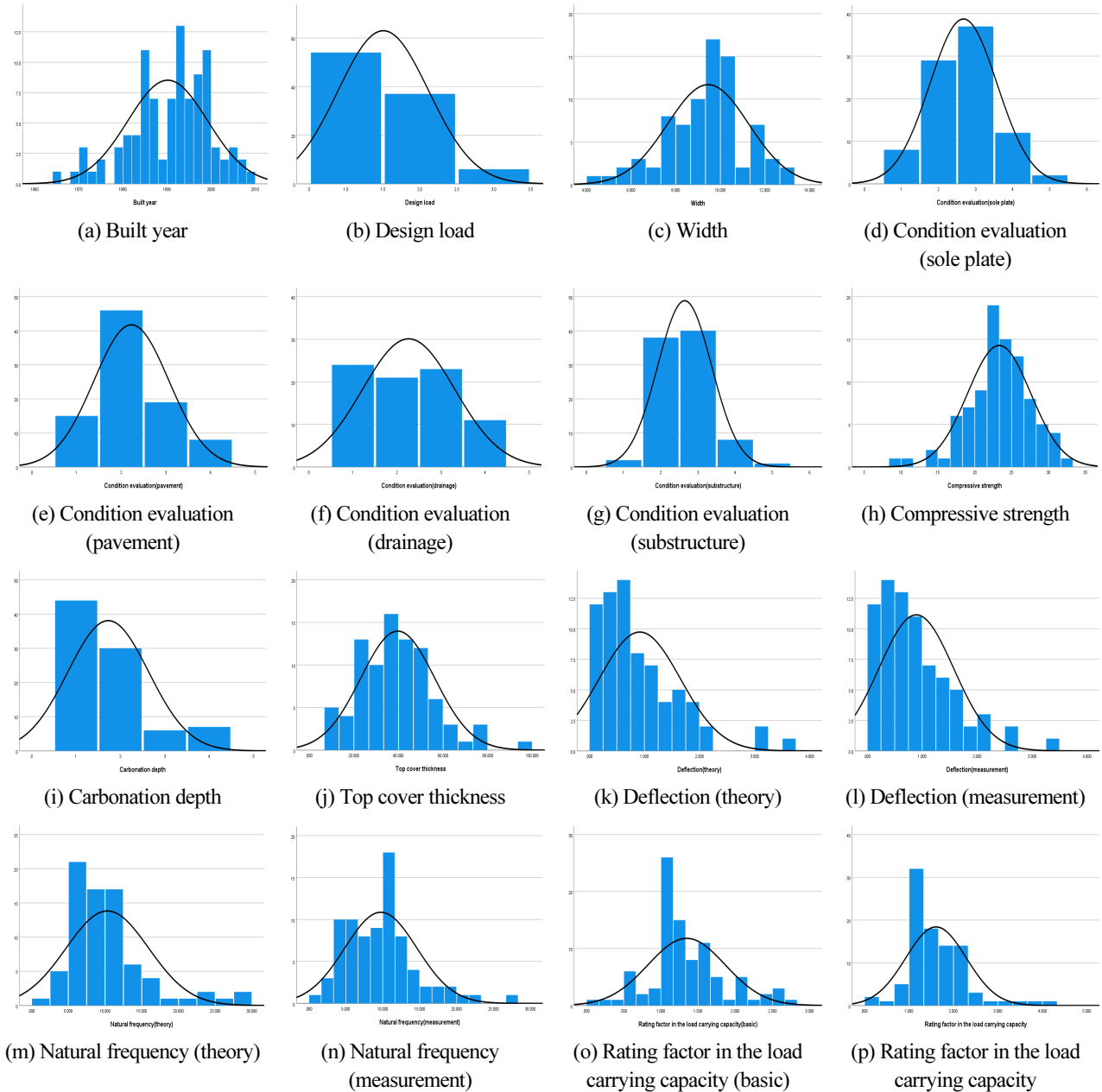


Fig. 2. Results of variable histogram

2.4 상관관계 분석

변수와 변수 간의 관계, 둘 또는 그 이상의 변수들에서 한 변수가 변함에 따라 다른 변수가 어떻게 변하는 것과 같은 변화의 연관성 정도, 변화의 크기 정도와 방향을 상관관계(Correlation)라고 한다. 따라서, 상관관계 분석(Correlation analysis)은 독립변수를 변화시켰을 때, 종속변수의 변화 정도를 분석하는 것을 말한다. 상관관계 분석은 모든 통계분석의 기본이 되며, 변수 간에 관련성이 없으면 다른 분석에서도 의미있는 통계분석 결과를 얻을 수 없다.

상관관계는 공분산 혹은 공변량(한 변수의 분산(또는 변량)중에서 다른 변수와 같이 변화하는 분산)의 정도에 따라 결정된다고 볼 수 있다. 여기서 공변량(Covariance)은 두 변수의 값이 각각의 평균으로부터 떨어져 있는 정도를 나타내는 특성값으로 편차의 곱을 평균하여 구하며, 변화하는 공변량이 클수록 직선에 가깝고 그러면 상관관계는 높아진다.

상관계수는 이러한 변수 간 상관관계의 정도를 수치로 표시하는 지수로써, -1에서 1 사이의 값으로 나타낸다. 이때, 0에 가

가을수록 상관관계는 낮아지며, 절대값 1에 가까울수록 상관관계는 높아진다. 상관계수 값에 의한 결정은 대체로 Table 10 과 같은 영역을 선택하여 관계정도를 파악하는데 낮은 상관계수 일지라도 버려서는 안되며, 해석 및 조사 결과의 가치에 따라 상관관계를 파악해야 한다.

본 연구에서는 상관계수는 두 변수 간의 관련성을 구하기 위해 보편적으로 이용되는 Pearson 상관계수(Pearson correlation coefficient, $r=X$ 와 Y 가 함께 변하는 정도 / X 와 Y 가 각각 변하는 정도)를 이용하여 분석을 수행하였다.

Table 10. Correlation degree according to correlation coefficient

Correlation coefficient	Degree of correlation	Correlation coefficient	Degree of correlation
$\pm 0.8 \sim$	Very high	$\pm 0.2 \sim 0.4$	Low
$\pm 0.6 \sim 0.8$	High	$\pm 0 \sim 0.2$	Few
$\pm 0.4 \sim 0.6$	A little high	0	None

변수 관계의 방향은 양(+)과 음(-)으로 표현하며, 관계의 방향에 따라 한쪽이 증가할 때 다른 쪽도 증가하는 관계, 즉 증감의 방향이 같은 경우, 양(+)의 상관관계가 있으며, 한쪽이 감소할 때, 다른 쪽이 증가하는 관계, 즉 증감의 방향이 반대인 경우, 음(-)의 상관관계가 있는 것으로 본다. 상관관계는 인과관계가 아닐 수도 있다는 점에 유의해야 한다. 즉, 독립변수와 종속변수의 관계일 수도 있고 아닐 수도 있다. 또한, 관계의 정도는 확률적 표현인 만큼 상관계수는 두 변수 관계의 상관성에 대한 예측의 정확도를 나타내는 것이다.

2.5 상관관계 분석 결과

공용내하력과 독립변수 간의 상대적 영향력을 파악하기 위해 Pearson 상관분석을 실시하여 상관관계를 조사하였다. 상관 분석의 귀무가설을 ‘공용내하력과 독립변수 간에 상관관계가 없다’이고, 대립가설은 ‘공용내하력과 독립변수 간에 상관관계가 있다’로 정의되며, 유의확률 분석 결과 준공년도, 설계하중, 폭, 상태평가 바닥판, 상태평가 포장, 상태평가 배수, 상태평가 하부, 압축강도, 탄산화 깊이 시험결과, 상부 피복두께 측정결과, 실측·이론 처짐량, 실측·이론 고유진동수, 기본내하율, 공용내하율의 유의확률이 유의수준 0.05 이하로 나타나 대립가설이 채택되었다.

유의수준을 만족하는 변수 중 설계하중, 상태평가 배수, 압축강도, 탄산화 깊이 시험결과, 이론 처짐량, 기본내하율, 공용내하율은 상관계수가 ± 0.4 이상으로 상관관계를 나타내는 것으로 분석되었다.

두 변수가 서로 어떤 유형으로 어느 정도의 관계를 갖고 있는지 변수의 관찰값을 XY-평면에 좌표로 나타낸 것을 산점도 (Scatter diagram)라 하며, 상관계수가 ± 0.2 이상 변수의 산점도는 Fig. 3에 나타난 것과 같다. Fig. 3에서 확인할 수 있듯이 공용내하력은 준공년도가 오래될수록, 교량 폭과 압축강도, 이론·실측 고유진동수, 기본내하율, 공용내하율이 클수록, 상부 피복이 깊을수록 커지며, 설계하중이 작을수록, 상태평가 바닥판·포장·배수·하부, 탄산화 깊이 시험결과가 ‘a’ 등급일수록, 이론·실측 처짐량이 작을수록 커지는 상관관계가 도출되었다.

Table 11은 공용내하력에 대한 각 독립변수별 상관분석 결과를 나타낸 것이다. 표에 제시된 16개의 독립변수는 모두 상관 계수 ± 0.2 이상으로 분석되었으며, 표에 제시되지 않은 다른 독립변수는 ± 0.2 미만으로 분석되었다. 재하시험에 따른 처짐량, 변형량, 고유진동수와 같은 계측 데이터와 안전성 평가 자료는 상대적으로 확보하기가 어렵다. 대부분의 재하시험이나 안전성 평가는 정밀안전진단에서 실시되기 때문이다. 따라서, 상관계수가 높은 지표를 발굴하기 위해서는 지속적으로 다수의 데이터를 확보하기 위한 노력이 필요할 것으로 생각된다.

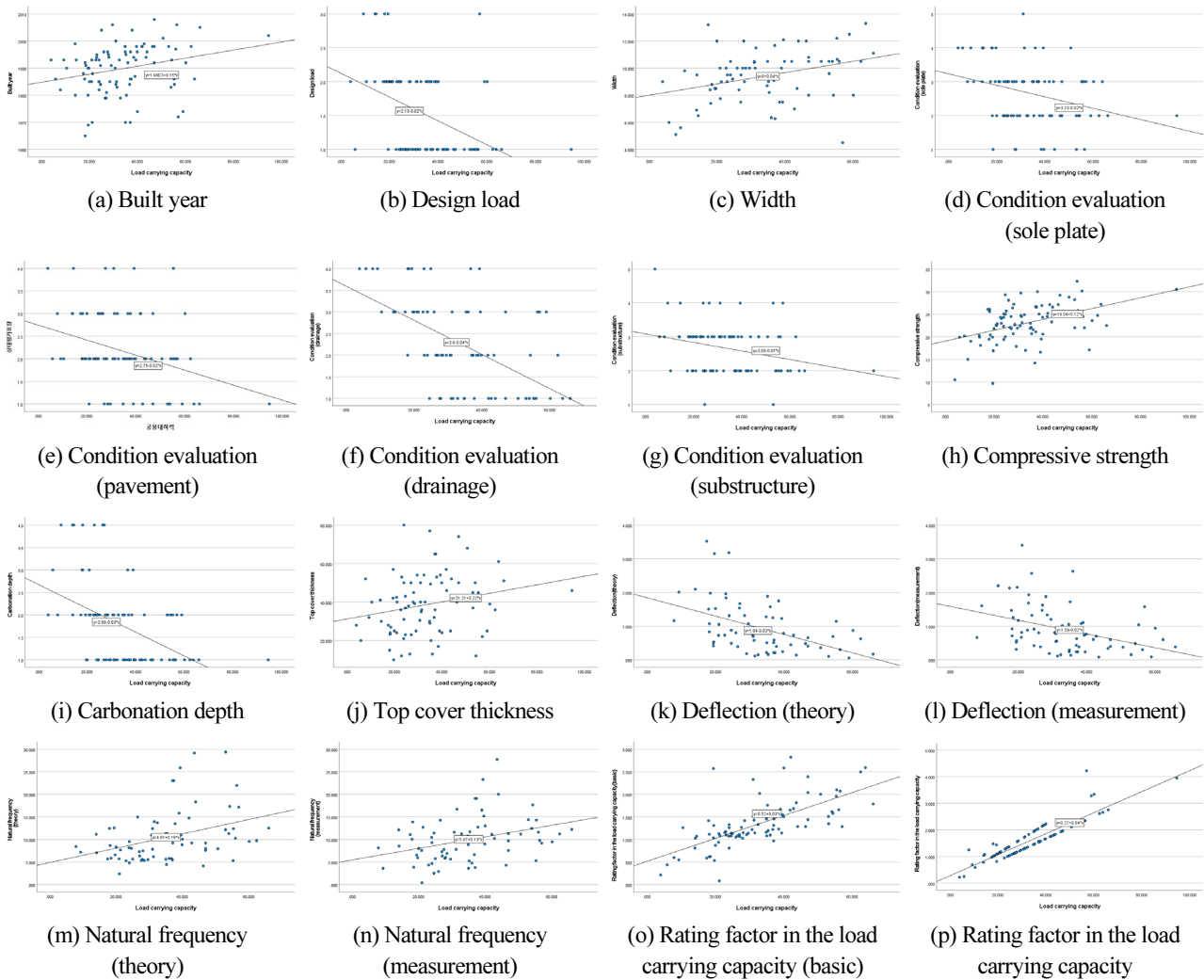


Fig. 3. Scatter plot by correlation analysis for each indicator

Table 11. Results of correlation analysis between Load-carrying capacity and independent variables

Variable name	Correlation coefficient	Variable name	Correlation coefficient	Variable name	Correlation coefficient	Variable name	Correlation coefficient
Built year	+ 0.254	Condition evaluation (pavement)	- 0.331	Carbonation depth	- 0.458	Natural frequency (theory)	+ 0.375
Design load	- 0.438	Condition evaluation (drainage)	- 0.569	Top cover thickness	+ 0.228	Natural frequency (measurement)	+ 0.343
Width	+ 0.342	Condition evaluation (substructure)	- 0.278	Deflection (theory)	- 0.476	Rating factor in the load arrying capacity (basic)	+ 0.677
Condition evaluation (sole plate)	- 0.309	Compressive strength	+ 0.454	Deflection (measurement)	- 0.391	Rating factor in the load arrying capacity	+ 0.904

3. 결론

본 연구에서는 교량 내하성능 추정 모델 개발 연구의 일환으로 교량의 공용내하력과 독립변수 간의 상대적 영향력을 파악하기 위해 Pearson 상관분석을 수행하였다. 이를 통해, 유의수준을 만족하는 변수들(설계하중, 상태평가(배수), 압축강도, 탄산화 깊이 시험결과, 이론 처짐량, 기본내하율, 공용내하율)을 도출할 수 있었다. 교량의 안전성 평가 자료는 데이터 확보에 어려움이 있어, 제한적인 데이터 사용으로 인해 상관계수가 ± 0.4 정도로 비교적 낮지만, 지속적으로 지표를 추가하고 관련 데이터를 수집함으로써 보다 정확한 분석 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

특히, 교량 내하성능 추정 모델 개발을 위해서, 교량의 내하성능에 미치는 영향이 큰 지표를 도출하고 상관분석을 실시하여 사용 가능한 데이터를 구축하는 연구는 지속적으로 수행될 필요가 있다. 현재에도 추가적인 데이터 확보를 위해 자료를 수집 중이며, 추가 분석을 위해 데이터 셋을 구축하고 있는 중이다.

향후, 구축된 데이터 및 상관분석 결과에 기초한 교량 내하성능 추정 모델 개발을 통해, 준공된 교량의 손상 진행 추이 분석, 중장기 보수 비용 산정, 내구연한 예측, 그리고 안정성 평가를 수행하지 않는 제3종 및 기타(종외) 교량의 예방적 유지관리 수행에 활용이 가능할 것으로 판단한다.

Acknowledgment

Research for this paper was carried out under the Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT) Research Program (project no. 20220217-001, Development of DNA-based smart maintenance platform and application technologies for aging bridges) funded by the Ministry of Science and ICT.

References

- Chai, W. K. and Lee, M. G. (2012). The Relationship between the Load Carrying Capacity and Transformed Impact Factor of Highway Bridge. *Journal of the Korean Society of Safety*. 27(6): 138-143.
- Cho, S. J., Yi, J. H., Lee, C. G., and Yun, C. B. (2007). Evaluation of Load Carrying Capacity of Bridges Using Ambient Vibration Tests. *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*. 27(1): 79-89.
- Jang, H. S., Koo, H. B., Shin, H. S., and Park, H. S. (2009). Evaluation of Service Load Carrying for Bridge Using Heavy Vehicles. *Korean Society of Civil Engineers 2009 Convention*. 2009: 2203-2206.
- Kyung, K. S., Lee, Y. I., and Lee, S. J. (2015). Analysis of Load Carrying Capacity of Bridges Based on Field Data with Serviced Time. *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*. 35(1): 31-38.
- Lee, C. G., Cho, S. J., Lee, J. J., and Yun, C. B. (2009). Study for Practical Use of Smart Load Carrying Capacity Evaluation. *Korean Society of Civil Engineers 2009 Convention*. 2009: 127-130.
- Lee, H. S., Roh, H. S., and Park, K. H. (2016). Load Carrying Capacity Evaluation of Single Span Bridge Using Impact Factor Response Spectrum. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*. 17(12): 730-736.
- Lee, S. Y., Lee, S. E., Kim, N. H., and Lee, S. O. (2021). Study of Decision Making Procedures for Follow-up Management of Water-friendly Riverfront. *Journal of Korean Society of Disaster & Security*. 14(4): 81-91.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2021a). *Special Act on the Safety Control and Maintenance of Establishments*. Sejong: Korea Law Translation Center.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2021b). *Facility Management System*. Sejong: Korea Authority of Land & Infrastructure Safety.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2022). *Yearbook of Road Bridge and Tunnel Statistics*. Sejong: Bridge and Tunnel Information System.

- Park, J. H., An, H. J., Han, M. S., Min, J. Y., and Lee, J. H. (2020). Examination of Correlation between the Condition Evaluation Results of Superstructure and the Safety and Load-carrying Capacity of Bridges. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*. 24(4): 64-71.
- Park, K. H. and Yang, S. H. (2003). Load Carrying Capacity Evaluation Considering the Structural Characteristics of Bridge Bearing. *Journal of Korea Institute for Structural Maintenance Inspection*. 7(4): 209-216.
- Shin, S. B., Paik, I. Y., Shin, D. H., and Sim, S. H. (2018). Development of Reliability Based Assessment Technology for Load-bearing Capacity and Multi-data-based Bridge Performance Assessment Technology. *Magazine of the Korea Concrete Institute*. 30(4): 32-37.

Korean References Translated from the English

- 경갑수, 이영일, 이성진 (2015). 실측자료에 기초한 공용년수 증가에 따른 교량 내하력 분석. *대한토목학회 논문집*. 35(1): 31-38.
- 국토교통부 (2021a). 시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법. 세종: 법령정보센터.
- 국토교통부 (2021b). 시설물통합정보관리시스템. 세종: 국토안전관리원.
- 국토교통부 (2022). 도로 교량 및 터널 현황조사서. 세종: 도로 교량 및 터널 현황정보시스템.
- 박길현, 양승현 (2003). 교량받침의 거동특성을 고려한 내하력 평가. *한국구조물진단학회지*. 7(4): 209-216.
- 박주현, 안효준, 한만석, 민지영, 이종한 (2020). 노후 교량 유지관리를 위한 상부구조물의 상태평가 결과와 교량의 안전성 및 내하력과의 상관관계 분석. *한국구조물진단유지관리공학회 논문집*. 24(4): 64-71.
- 신수봉, 백인열, 신도형, 심성한 (2018). 신뢰도기반 교량 내하력평가 및 다중데이터기반 교량 성능평가. *콘크리트학회지*. 30(4): 32-37.
- 이승연, 이상은, 김나희, 이승오 (2021). 하천 내 친수지구의 사후관리 의사결정 절차 방법 연구. *한국방재안전학회 논문집*. 14(4): 81-91.
- 이창근, 조수진, 이종재, 윤정방 (2009). 스마트 내하력 평가 기법 실용화 연구. *대한토목학회 정기학술대회 논문집*. 2009: 127-130.
- 이후석, 노화성, 박경훈 (2016). 충격계수 응답스펙트럼을 이용한 단경간 교량의 내하력 평가. *한국산학기술학회논문지*. 17(12): 730-736.
- 장화섭, 구현본, 신현섭, 박홍석 (2009). 중차량을 이용한 교량의 공용내하력 평가. *대한토목학회 정기학술대회 논문집*. 2009: 2203-2206.
- 조수진, 이진학, 이창근, 윤정방 (2007). 상시진동계측에 의한 교량의 공용내하력 평가. *대한토목학회 논문집*. 27(1): 79-89.
- 채원규, 이명구 (2012). 교량의 공용내하력과 환산충격계수 관계 연구. *한국안전학회지*. 27(6): 138-143.