

손상도 평가 프로세스를 이용한 RC 슬래브 교량의 공용내하력 평가 방안

이희현*·김유희**·전준창***

Lee, Hee-Hyun*, Kim, Yuhee**, Jeon, Jun-Chang***

Load-carrying Capacity Evaluation Method for RC Slab Bridges using the Damage Evaluation Process

ABSTRACT

This study was conducted to propose a simple method to evaluate the load-carrying capacity of RC slab bridges, which have been most frequently constructed in Korea. A number of RC slab bridges have been considerably deteriorated associate with the long service year. However, since these bridges are not included in the 1st and 2nd class infrastructures due to their short span length, they have been relatively neglected compared to other bridge types in terms of safety management. In the previous theoretical study, a process (draft) was proposed for evaluating the damage of RC slab bridges using the relationship between the displacement response ratio and the stiffness reduction rate derived by the measured displacement and natural frequency. In this paper, to verify the validity of the proposed damage evaluation process (draft), the results to the actual bridges were compared with the safety grade and the Matsui's deterioration index. In addition, to enhance the practical applicability of the existing process (draft), an improved method approximately evaluating the load-carrying capacity using only the measured natural frequency was presented. If an error of 10% of the load-carrying capacity is allowed, it is judged that the proposed damage evaluation process can be appropriately used not only for evaluating the safety of RC slab bridges, but also for determining priorities for their maintenance.

Keywords : RC slab bridge, Damage evaluation process, Stiffness reduction rate, Load-carrying capacity, Response correction factor

초 록

이 연구는 국내 공용 중인 교량 형식 중 건설 빈도가 가장 높은 RC 슬래브 교량의 공용내하력을 간단하게 평가할 수 있는 방안에 관한 것이다. 다수의 RC 슬래브 교량이 오랜 공용기간으로 인해 상당한 노후화가 진행된 상태지만, 교량의 규모 상 1, 2종 시설물에 포함되지 않아 그동안 안전 관리에 소홀한 측면이 있다. 기존의 이론적 선행연구에서는 실측 처짐 및 실측 고유진동수에 의해 도출된 처짐응답비와 강성저하율의 관계를 이용한 RC 슬래브 교량의 손상도 평가 프로세스(안)이 제시된 바 있다. 이 연구에서는 손상도 평가 프로세스(안)의 적정성을 검토하기 위해 실 교량에 대한 평가 결과를 시설물 안전법의 안전등급 및 Matsui의 노후도 지수와 비교·검토하였다. 또한 손상도 평가 프로세스(안)의 현장 적용성을 향상시켜 실측 고유진동수만으로 개략적인 공용내하력을 평가하는 개선된 방안을 제시하였다. 연구결과, 10% 정도의 공용내하력 평가 결과의 오차를 허용하는 경우, 이 연구에서 제시된 방법은 노후화된 RC 슬래브 교량의 안전성 평가 및 유지보수 우선순위 산정 등에 효율적으로 활용될 수 있을 것으로 판단되었다.

검색어 : RC 슬래브 교량, 손상도 평가 프로세스, 강성저하율, 공용내하력, 응답보정계수

* 중신회원 · 교신저자 · 씨티씨주식회사 대표이사 (Corresponding Author · CTC · lh@ctceng.co.kr)

** 정회원 · 국토안전관리원 안전성능연구소 기술개발실 책임연구원 (KALIS · yhkim@kalis.or.kr)

*** 씨티씨주식회사 전무이사 (CTC · jj@ctceng.co.kr)

Received March 15, 2023/ revised May 11, 2023/ accepted May 17, 2023

1. 서론

2020년 12월 말 기준 시설물통계연보(KALIS, 2021a)에 등록된 우리나라 도로교량은 27,823개이고, 그 중 1종 교량이 4,076개, 2종 교량이 6,693개, 3종 교량이 17,054개이다. 그러나 통계연보에 등록되지 않아 숫자를 파악하기 어려운 노후화된 중소규모의 중외 교량도 수천 개가 있을 것으로 추정된다. 도로교량을 상부구조형식에 따라 분류하면 RC 슬래브 교량이 전체의 약 24.8%로서 가장 높은 비중을 차지하고 있다. 현재 공용 중인 RC 슬래브 교량의 공용 연수는 20년 이상~30년 미만인 약 46%, 30년 이상~40년 미만이 약 18% 그리고 40년 이상이 약 11%로서 RC 슬래브 교량의 노후화가 상당히 심각한 것으로 알려져 있다(Park et al., 2017; Park et al., 2018). 그럼에도 불구하고 RC 슬래브 교량의 규모 상, 이들 교량의 대부분은 1, 2종 교량에 포함되지 않아 그동안 안전관리가 소홀히 취급되어 왔다는 사실은 부인하기 어렵다. 특히 노후화 또는 주변 환경의 변화로 인해 RC 슬래브 교량의 평균 개축 또는 폐기 시기가 공용 후 약 24년에 불과하다는 사실을 고려할 때 현재 전국 각지에서 공용 중인 상당수의 노후화된 RC 슬래브 교량에 대한 안전성 확보 방안 수립이 시급하다고 판단된다.

전체 교량의 절대 다수를 차지하는 3종 및 중외 교량들(이하 ‘중소규모교량’이라 한다) 중 공용연수 20년 이상 경과된 6,400여 개의 RC 슬래브 교량을 대상으로 ‘시설물안전법에 따라 연 2회의 정기안전점검만을 실시하는 경우에도 매년 약 460억원이 소요될 것으로 분석된 바 있다(Kim and Jeon, 2021). 따라서 이와 같이 과도한 비용과 인력이 소요되는 일률적인 정성적 점검 방법보다는 안전성이 의심되는 교량을 선별할 수 있는 정량적 기법 개발이 중소규모교량의 효율적인 유지관리를 위해 필요하다고 판단된다. 이에 한국건설기술연구원과 씨티씨(주)(KICT and CTC, 2020)에서는 간단한 방법으로 RC 슬래브 교량의 손상도를 평가할 수

있는 프로세스(안)을 제시한 바 있다.

이 논문에서는 기 제시된 RC 슬래브 교량의 손상도 평가 프로세스(안)의 적정성을 확인하기 위하여 2개의 RC 슬래브 교량을 대상으로 손상도 평가를 실시하였다. 손상도 평가 결과를 기준 안전진단 보고서상의 안전등급 평가 결과 및 노후도 지수(Matsui and Maeda, 1986)에 의한 평가 결과와 비교 검토하고, 개선방안을 도출하였다. 또한 손상도 평가 프로세스(안)의 현장작업 간소화 및 정량화를 위해 실측 강성저하율 R_m 으로부터 추정된 처짐 응답비 μ_e 를 이용하여 RC 슬래브 교량의 공용내하력을 정량적으로 평가하는 방안을 제안하였다. 실측 강성저하율 R_m 및 추정 처짐응답비 μ_e 는 각각 실측 고유진동수 및 손상도 평가 프로세스(안)에 의해 도출된다.

2. RC 슬래브 교량의 손상 평가방법

2.1 손상도 평가 프로세스(안)

정밀안전점검·진단보고서에 기초하여 선행연구에서 제안된 손상도 평가 프로세스(안)은 RC 슬래브 교량의 대표적인 손상 유형을 4가지(경간 중앙부 휨균열, 중간 지점부 휨균열, 슬래브 측면 손상, 교량받침 기능 상실)로 분류하였다(Kim and Jeon, 2021; KICT and CTC, 2020). 또한 분류한 손상의 범위와 정도를 파라미터로 하는 상세구조해석을 실시하여 해석 강성저하율 R_a 와 해석 처짐응답비 μ_a 의 관계로부터 손상상태를 추정한다. Fig. 1은 해석 강성저하율 R_a 와 해석 처짐응답비 μ_a 의 관계를 보여주는 일례이다. Fig. 1에 나타난 실측 처짐응답비 μ_m 과 실측 강성저하율 R_m 은 각각 Eq. (1) 및 Eq. (2)와 같이 정의된다. Eq. (1)과 Eq. (2)에서 아래 첨자 ‘analyzed’는 무손상 상태라고 가정된 경우에 대한 해석치이고, ‘measured’는 현재의 상태, 즉, 손상 상태에 대한 실측치를 의미한다.

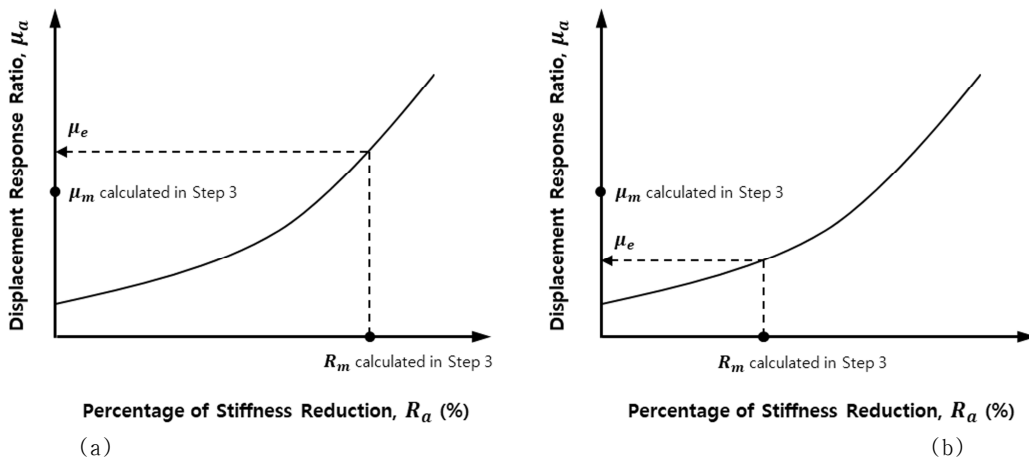


Fig. 1. Relationship between Displacement Response Ratio and Stiffness Reduction: (a) Displacement Behavior is Relatively Good, (b) Displacement Behavior is Relatively Poor

$$\text{실측 처짐응답비, } \mu_m = \frac{\delta_{measured}}{\delta_{analyzed}} \quad (1)$$

$$\text{실측 강성저하율(%)}, R_m = \left(\frac{f_{analyzed}^2 - f_{measured}^2}{f_{analyzed}^2} \right) \times 100 \quad (2)$$

여기서, $\delta_{measured}$: 실측 처짐

$\delta_{analyzed}$: 계산 처짐

$f_{measured}$: 실측 고유진동수

$f_{analyzed}$: 계산 고유진동수

손상도 평가 프로세스(안)에 따라 손상상태를 판단하는 과정은 다음과 같다.

Step 1) 구조해석에 의해 Fig. 1의 실선과 같은 해석 강성저하율 R_a 와 해석 처짐응답비 μ_a 의 관계를 작성한다.

Step 2) 재하시험용 차량에 의한 처짐과 고유진동수를 실측한다.

Step 3) 구조해석 및 실측에 의한 처짐과 고유진동수로부터 실측 처짐응답비 μ_m 과 실측 강성저하율 R_m 을 계산한다.

Step 4) Step 3에서 계산된 실측 강성저하율 R_m 을 이용하여 Fig. 1에서 추정 처짐응답비 μ_e 를 추정한다.

Step 5) 추정 처짐응답비 μ_e 와 Step 3의 실측 처짐응답비 μ_m 을 비교한다.

Fig. 1(a)와 같이 실측 처짐응답비 μ_m 이 추정 처짐응답비 μ_e 에 비해 작으면 고유진동수 저하에 의해 평가된 손상정도에 비해 처짐 거동이 상대적으로 양호하다고 판단한다. 반면 Fig. 1(b)와 같이 반대의 경우는 처짐 거동이 상대적으로 불량하다고 판단하여 정밀안전진단 또는 보수·보강과 같은 조치를 취하게 된다. 이와 같이 판단하는 근거는 실측 처짐응답비 μ_m 이 추정 처짐응답비 μ_e 보다 크다는 것은 손상에 따른 휨강성 저하에 비해 큰 처짐이 발생하는 것을 의미하기 때문이다.

2.2 RC 슬래브 교량의 상태 평가 기준

3중 시설물 안전등급 평가 매뉴얼(KALIS, 2021b)에 의하면 3중 시설물에 포함되는 RC 슬래브 교량은 정기점검 결과에 따라 슬래브의 상태를 Table 1과 같이 우수, 양호, 보통, 미흡 및 불량 의 5단계로 구분하여 평가하도록 하고 있다. 지면 관계 상 Table 1은 근결과 관련된 내용만을 발췌한 것이다. 정기점검 업무는 초급 기술자에 의한 개략적인 도보 외관조사만으로 이루어진다는 현실

Table 1. Evaluation Criteria on Superstructure of RC Slab Bridge Classified as 3rd Class

Grade	Definition of crack and damage on RC slab
Excellent	No crack or micro cracks with a width of less than 0.1mm
Good	Micro cracks with a width of 0.1~0.3mm
Fair	Cracks with a width of 0.3~0.5mm, or crack area ratio is less than 10%
Poor	Cracks with a width of 0.5~1.0mm, or crack area ratio is 10~20%
Very poor	Cracks with a width of 1.0mm or more, or crack area ratio is 20% or more

을 고려해 볼 때 Table 1에 의해 정확한 상태 평가가 이루어질지 강한 의문이 든다. 뿐만 아니라 3중 시설물에 포함되지 않은 중소규모 교량은 정기점검조차 거의 이루어지지 않는 것이 현실이다.

2.3 Matsui의 노후도 지수

Matsui and Maeda(1986)는 측정자료로부터 거더 교량 바닥판의 노후도를 판단하는 기준으로서 Eq. (3)에 나타난 노후도 지수 D_δ 를 제시하였다.

$$D_\delta = \frac{\omega - \omega_o}{\omega_c - \omega_o} \quad (3)$$

여기서, ω : 활하중에 의한 실측 처짐

ω_o : 콘크리트 전 단면을 유효하다고 가정할 때 등방성 판 이론에 의한 이론 처짐

ω_c : 인장측 콘크리트를 무시한 상태에서 직교이방성을 고려한 이론 처짐

바닥판의 상태가 건전한 경우는 실측 처짐과 콘크리트 전 단면이 유효할 때의 이론 처짐이 유사하므로 노후도 지수는 0에 가까운 값을 갖는다. 그러나 노후화가 진행되어 실측 처짐이 인장측 콘크리트를 무시할 때의 이론 처짐과 유사하게 되면 노후도 지수는 1에 가까워지고 이 상태를 사용한계상태에 도달한 것으로 판단할 수 있다. 그리고 노후도 지수가 1을 초과하게 되면 바닥판의 열화가 급속히 진행하여 편칭과 파괴 발생 여부를 검토할 필요가 있다.

3. 연구대상 교량의 측정 및 구조해석

3.1 연구대상 교량 현황

이 연구의 대상 교량은 모두 충실형 단면을 갖는 3중 슬래브

Table 2. Outline of Target Bridges

Items	Br. #1	Br. #2
Completion year	1999	1971
Design live load	DB-18	DB-13.5
Span configuration	4@15+ 4@15 = 120.0m (4 span continuous)	10+10+10 = 30.0m (simply supported)
Bridge width	6.0m	7.5m
Slab depth	0.80m	0.37m
Bearing type	Elastomeric bearing	Not installed
Skew angle	0°	15°

교량으로서 개략적인 현황은 Table 2와 같다.

3.2 교량 #1의 측정 및 구조해석 결과

4경간 연속교인 교량 #1에 대해 작성된 성능평가 결과보고서 (Company A, 2019)에 의하면 이 교량의 안전등급은 B이고, 각 경간 슬래브 하면에는 건조수축 및 수화열에 의해 발생한 것으로 추정되는 폭 0.1~0.2mm의 균열이 다수 있다. 총 중량 250.8kN의 3축 재하차량을 이용한 재하시험결과, 이 교량에는 차량의 위치에 따라 Table 3과 같은 치짐이 측정되었고, 실측 고유진동수는 6.74Hz로 분석되었다.

슬래브 교량의 구조적 특성을 고려하여 절점 당 6자유도를 갖는

플레이트 요소를 이용하여 Fig. 2와 같이 Midas Civil에 의해 대상 교량의 상부구조를 모형화하였다. 탄성반침 형식의 교량반침 특성을 모사하기 위해 지점부 경계조건은 스프링 요소로 처리하였다. 연석부의 강성은 해석모델에 반영하였고, 교면포장은 등분포의 등가질량으로 고려하였다.

준공도면을 이용하여 계산된 무손상모델에 대한 계산 치짐과

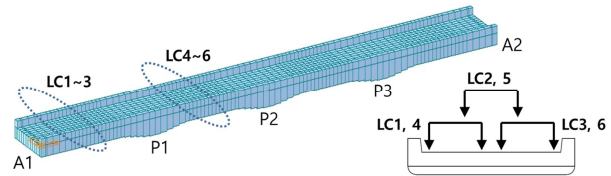


Fig. 2. Analytical FE Model for Br. #1

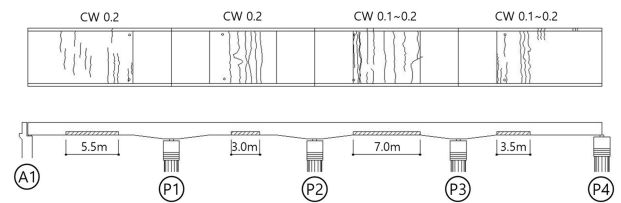


Fig. 3. Damage Region in the Longitudinal Direction of Br. #1

Table 3. Measured/Analyzed Displacement and Measured Response Ratio at Midspan of Br. #1

Items	Load cases						Average
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	
Measured displ. (mm)	0.99	0.86	0.96	0.79	0.66	0.78	-
Analyzed displ. (mm)	0.85	0.76	0.85	0.72	0.65	0.72	-
μ_m	1.16	1.13	1.13	1.10	1.02	1.08	1.10

Table 4. Analytical Results of Br. #1

Items		Baseline model	Section height of damaged model					
			0.95H	0.90H	0.85H	0.80H	0.70H	0.60H
LC1, 3	Maximum displ. (mm)	0.85	0.90	0.97	1.03	1.11	1.30	1.55
	μ_a	1.0	1.06	1.14	1.21	1.31	1.53	1.82
LC2	Maximum displ. (mm)	0.76	0.82	0.88	0.95	1.03	1.23	1.50
	μ_a	1.0	1.08	1.16	1.25	1.36	1.62	1.97
LC4, 6	Maximum displ. (mm)	0.72	0.75	0.79	0.83	0.88	1.01	1.18
	μ_a	1.0	1.04	1.10	1.15	1.22	1.40	1.64
LC5	Maximum displ. (mm)	0.65	0.68	0.72	0.76	0.81	0.94	1.12
	μ_a	1.0	1.05	1.11	1.17	1.25	1.45	1.72
Average of μ_a		1.0	1.06	1.13	1.20	1.28	1.50	1.79
Natural frequency (Hz)		6.99	6.77	6.53	6.29	6.04	5.51	4.95
R_a (%)		0.0	6.2	12.7	19.0	25.3	37.9	49.9

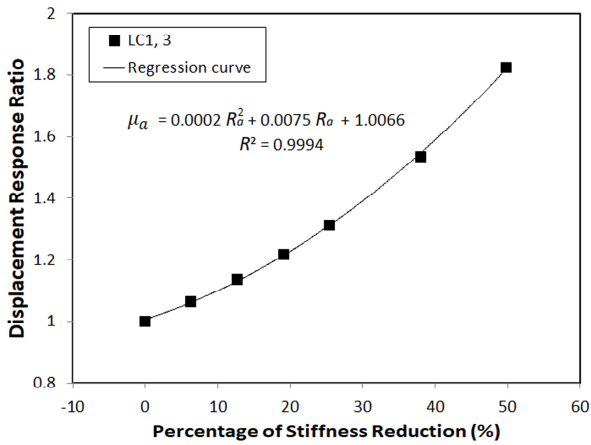


Fig. 4. An Example of the Relationship between Displacement Response Ratio and Stiffness Reduction of Br. #1 by Structural Analysis

Table 5. Regression Analysis Results of Displacement Response Ratio and Stiffness Reduction of Br. #1

Items	Equation of regression analysis	Coefficient of determination, R^2
LC1, 3	$\mu_a = 0.0002 R_a^2 + 0.0075 R_a + 1.0066$	0.9994
LC2	$\mu_a = 0.0002 R_a^2 + 0.0080 R_a + 1.0084$	0.9993
LC4, 6	$\mu_a = 0.0002 R_a^2 + 0.0040 R_a + 1.0072$	0.9988
LC5	$\mu_a = 0.0002 R_a^2 + 0.0045 R_a + 1.0085$	0.9988
Average	$\mu_a = 0.0002 R_a^2 + 0.0059 R_a + 1.0074$	0.9991

실측 처짐응답비 μ_m 은 Table 3과 같다. 그리고 해석 고유진동수는 6.99Hz로서 고유진동수에 의한 실측 강성저하율 R_m 은 7.0%로 추정된다. Table 3에 나타난 하중경우 LC1 ~ LC6은 Fig. 2와 같다.

대상 교량의 각 경간 중앙부에 발생되어 있는 균열에 의한 강성저하의 영향을 고려하기 위해 슬래브 두께 H를 전폭에 걸쳐 0.95H,

0.90H, 0.85H, 0.80H, 0.70H 및 0.60H의 총 6가지로 감소시켰다. 교축방향의 손상범위는 Fig 3에 나타난 바와 같이 외관조사 결과에 기초하여 선정하였다.

외관조사에 의해 확인된 손상을 고려한 구조해석을 통해 얻어진 교량 #1의 해석 처짐응답비 μ_a , 고유진동수 및 해석 강성저하율 R_a 는 Table 4와 같다. Table 4에서 해석 처짐응답비와 해석 강성저하율은 기준모델(baseline model, 무손상모델)을 기준으로 계산된 것이다. 또한 LC1과 LC3 및 LC4와 LC6은 구조물의 대칭성으로 인해 해석결과가 동일하여 함께 표기하였다. Fig. 4는 LC1과 LC3에 대한 해석 강성저하율과 해석 처짐응답비의 관계 및 회귀분석 결과를 보여 준다. 회귀분석 결과, 결정계수는 0.999 이상으로서 해석 처짐응답비와 해석 강성저하율은 매우 높은 상관성이 있다는 것을 알 수 있다. 다른 하중경우에 대한 회귀분석 결과는 Table 5에 나타내었다.

3.3 교량 #2의 측정 및 구조해석 결과

단순교인 교량 #2에 대해 작성된 정밀안전진단보고서 (Company B, 2020)에 의하면 이 교량의 안전등급은 E이다. 외관조사 결과에 의하면 망상균열이 슬래브 하면의 전체 면적에 걸쳐 발생되어 있으며, 발생원인은 시공 부주의 및 초기 공용 중 발생한 건조수축에 의한 것으로 언급되어 있다. 총 중량 249.1kN의 재하차

Table 6. Measured/Analyzed Displacement and Measured Response Ratio at Midspan of Br. #2

Items	Load cases			Average
	LC1	LC2	LC3	
Measured displ. (mm)	1.45	1.49	1.61	-
Analyzed displ. (mm)	1.32	1.08	1.33	-
μ_m	1.10	1.38	1.21	1.23

Table 7. Analytical Results of Br. #2

Items	Baseline model	Section height of damaged model							
		0.95H	0.90H	0.85H	0.80H	0.70H	0.60H	0.50H	
LC1	Maximum displ. (mm)	1.32	1.42	1.54	1.68	1.85	2.28	2.93	3.93
	μ_a	1.0	1.08	1.17	1.27	1.40	1.73	2.22	2.98
LC2	Maximum displ. (mm)	1.08	1.18	1.30	1.45	1.63	2.14	2.98	4.46
	μ_a	1.0	1.09	1.20	1.34	1.51	1.98	2.76	4.13
LC3	Maximum displ. (mm)	1.33	1.44	1.55	1.69	1.86	2.29	2.95	3.95
	μ_a	1.0	1.08	1.17	1.27	1.40	1.72	2.22	2.97
Average of μ_a		1.0	1.08	1.18	1.30	1.44	1.81	2.40	3.36
Natural frequency (Hz)		12.77	12.37	11.95	11.49	10.99	9.90	8.68	7.37
R_a (%)		0.0	6.2	12.4	19.0	25.9	39.9	53.8	66.7

Table 8. Regression Analysis Results of Displacement Response Ratio and Stiffness Reduction of Br. #2

Items	Equation of regression analysis	Coefficient of determination, R^2
LC1	$\mu_u = 0.0004R_u^2 + 0.0026R_u + 1.0437$	0.9957
LC2	$\mu_u = 0.0007R_u^2 - 0.0061R_u + 1.0967$	0.9909
LC3	$\mu_u = 0.0004R_u^2 + 0.0025R_u + 1.0438$	0.9956
Average	$\mu_u = 0.0005R_u^2 - 0.0003R_u + 1.0614$	0.9938

량을 이용한 현장재하시험결과에 의하면 이 교량에는 차량의 위치에 따라 Table 6과 같은 처짐이 측정되었고, 실측 고유진동수는 10.78Hz로 분석되었다.

교량 #2에 대한 해석모델은 지점부 경계조건을 제외하면 교량 #1과 동일한 방법으로 작성되었다. 교량 #2는 교량받침이 설치되어 있지 않아 해석모델 지점부의 수평변위를 구속시킨 경계조건을 적용하였다.

교량 #2의 실측 처짐응답비 μ_m 을 분석한 결과는 Table 6과 같고, 해석고유진동수는 12.77Hz로서 실측 강성저하율 R_m 은 28.7%로 추정된다. Table 6에 나타난 하중경우 LC1~LC3의 교축직각방향 재하는 Fig. 2와 동일한 방식으로 하였

Table 9. Safety Grade of Target Bridges

Items	Safety grade due to damage	Structural safety grade	Overall safety grade
Br. #1	B	A	B
Br. #2	E	D	E

Table 10. Deterioration Index of Target Bridges

Items	Load cases						Average	Maximum
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6		
Br. #1	0.22	0.14	0.17	0.16	0.02	0.15	0.14	0.22
Br. #2	0.20	0.60	0.43	-	-	-	0.41	0.60

Table 11. Comparison of Measured and Estimated Displacement Ratio

Items		Load cases						Average	
		LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6		
Br. #1	Response ratio	Measured, μ_m	1.16	1.13	1.13	1.10	1.02	1.08	1.10
		Estimated, μ_e	1.07	1.08	1.07	1.05	1.05	1.05	1.06
	Deviation (%)		-7.8	-4.4	-5.3	-4.5	2.9	-2.8	-3.6
Br. #2	Response ratio	Measured, μ_m	1.10	1.38	1.21	-	-	-	1.23
		Estimated, μ_e	1.45	1.50	1.45	-	-	-	1.47
	Deviation (%)		31.8	8.70	19.8	-	-	-	19.5

다.

교량 #2는 망상균열이 슬래브 하면의 전체 면적에 걸쳐 발생되어 있으므로 경간 전체길이와 전폭의 슬래브 두께를 감소시켜 손상을 고려하였으며, 고려된 슬래브 두께는 0.95H, 0.90H, 0.85H, 0.80H, 0.70H, 0.60H 및 0.50H로서 총 7가지이다. 구조해석을 통해 얻어진 교량 #2에 대한 해석 처짐응답비 μ_u , 고유진동수 및 해석 강성저하율 R_u 는 Table 7과 같고, 하중경우별 해석 처짐응답비와 해석 강성저하율의 관계를 정리하면 Table 8과 같다.

4. 손상도 평가 결과

4.1 안전진단에 의한 안전등급

대상 교량의 기존 성능평가 결과보고서(Company A, 2019) 및 안전진단보고서(Company B, 2020)에 수록된 안전등급 평가 결과를 인용하여 Table 9에 나타내었다. 교량 #1은 비교적 양호한 상태(B등급)이지만, 교량 #2는 약 50년의 공용기간 동안 상당한 노후화가 진행된 상태(E등급)이다.

4.2 노후도 지수에 의한 평가 결과

Matsui 등(Matsui and Maeda, 1986)이 제안한 식을 사용하여 대상 교량들의 노후도를 평가한 결과는 Table 10과 같다. 노후도 지수가 0에 가까울수록 콘크리트 전 단면이 유효한 매우 양호한 상태이고, 1에 가까울수록 사용한계상태에 도달한 것으로 간주할 때, 교량 #1은 비교적 양호한 것으로 평가되고, 교량 #2는 노후화가 진행되고 있는 것으로 평가할 수 있다.

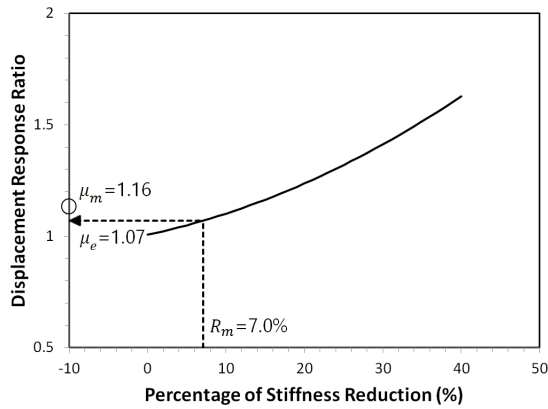


Fig. 5. An example of Damage Evaluation Process Result of Br. #1

4.3 손상도 평가 프로세스(안)에 의한 평가 결과

연구대상 교량에 대해 실측 고유진동수와 무손상상태의 해석 고유진동수로부터 구한 실측 강성저하율 R_m 을 Table 5와 Table 8에 나타난 회귀분석식에 대입하여 추정 처짐응답비 μ_e 를 구하고, 이를 실측 처짐응답비 μ_m 과 비교하여 Table 11에 나타내었다. Fig. 5는 교량 #1의 LC1에 대한 경우를 비교한 일례이다.

교량 #1의 경우, 실측 처짐응답비 μ_m 이 구조해석에 의한 추정 처짐응답비 μ_e 대비 미세하게 (평균 약 3.6%) 크다는 것은 손상이 시작되는 단계에 있는 것으로 평가할 수 있다. 교량 #2의 경우는 교량 #1과 달리 실측 처짐응답비 μ_m 이 추정 처짐응답비 μ_e 에 비해 작으므로 고유진동수 저하에 의해 평가된 손상정도에 비해 처짐 거동이 상대적으로 양호하다고 평가할 수 있다. 이러한 결과는 기존 선행연구의 손상도 평가 프로세스(안)에 의한 결과이며, 이에 대한 적정성은 5절에서 검토하였다.

5. 손상도 평가 결과 분석 및 개선방안 도출

4절의 손상도 평가 프로세스(안)에 의한 평가 결과의 적정성을 검토하기 위하여 안전진단보고서의 안전등급 및 Matsui의 노후도 지수에 의한 평가 결과와 비교하여 Table 12에 정리하였다. Table

10에서 알 수 있는 바와 같이 하중경우별 노후도 지수가 다소 편차가 있으므로 이 연구에서는 평균적인 상태를 파악하기 위해 노후도 지수 평균치를 사용하였다.

손상도 평가 프로세스(안)에 의한 교량 #1의 평가 결과는 안전진단보고서의 안전등급 및 Matsui의 노후도 지수에 의한 결과와 대체로 유사하다. 그러나 교량 #2의 손상도 평가 프로세스(안)에 의한 평가 결과는 양호(good)인 반면에 안전진단보고서의 안전등급은 E등급(불량)으로서 차이가 크다. 교량 #2는 약 50년의 공용기간 동안 상당한 노후화가 진행되었을 뿐만 아니라 교량받침이 설치되지 않은 사교(사각 15°)이므로 구조해석과 실제 거동의 차이가 평가 결과에 영향을 미쳤을 개연성이 높다. 또한 손상도 평가 프로세스(안)은 정량적 평가가 아닌 강성 저하에 따른 처짐 거동을 상대적으로 평가하는 정성적 도구라는 점도 주요 원인으로 판단된다.

손상도 평가 프로세스(안)은 외관조사, 현장재하시험 및 구조해석에 기초하여 결과를 도출하는데, 이러한 일련의 작업은 기존의 안전진단과 대동소이하다. 따라서 기존 손상도 평가 프로세스(안)의 활용도를 높이기 위해서는 현장작업 간소화 및 정량화에 관한 개선이 필요하다고 판단된다. 손상도 평가 프로세스(안)의 개선에 관한 내용은 6절에 기술하였다.

6. 손상도 평가 프로세스에 의한 공용내하력 평가 방안

6.1 손상도 평가 프로세스(안)의 간소화 및 정량화

선행연구(Kim and Jeon, 2021; KICT and CTC, 2020)에서 제안한 방법에 의한 손상도 평가 결과는 정성적이고, 이 방법을 적용하여 손상도를 평가하기 위해서는 여러 가지 제약이 따르는 처짐을 실측해야 하는 문제가 있다. 이러한 문제를 개선하기 위해 이 연구에서는 처짐 측정 자료를 이용하지 않는 공용내하력 평가 방안에 대해 검토하였다.

교량의 공용내하력은 Eq. (4a)에 나타난 바와 같이 응답보정계수, 내하율 및 설계활하중에 의해 계산된다(KISTEC, 2019). 공용내하력 계산에 사용되는 내하율 RF 는 순수하게 구조해석을 통해 얻어지고, 설계활하중 P_r 은 정수로 주어진다. 따라서 공용내하력 계산 시 현장재하시험에 의한 측정결과를 반영하

Table 12. Comparison of Damage Evaluation Results on Target Bridges

Items	Measurement result		Evaluation result		
	Average of μ_m	R_m	By damage evaluation process (draft)	By precise safety assessment	By deterioration index, D_δ
Br. #1	1.10	7.0%	Fair	B	0.14
Br. #2	1.23	28.7%	Good	E	0.41

는 것은 Eq. (4a)의 첫 번째 항인 응답보정계수 K_s 이다.

$$\text{공용내하력, } P = K_s \times RF \times P_r \quad (4a)$$

여기서, K_s : 응답보정계수 $= \frac{\delta_{analyzed}}{\delta_{measured}} \times \frac{1+i_{design}}{1+i_{measured}}$ (4b)

$$RF : \text{내하율} = \frac{\phi M_n - \gamma_d M_d}{\gamma_l M_l (1+i_{design})} \quad (4c)$$

(ϕ : 강도감소계수, γ_d : 고정하중계수, γ_l : 활하중계수, M_n : 공칭휨강도, M_d : 고정하중 휨모멘트, M_l : 활하중 휨모멘트)

$$P_r : \text{설계활하중} \quad (4d)$$

응답보정계수 K_s 의 첫 번째 항인 $\delta_{analyzed}/\delta_{measured}$ 는 손상도 평가 프로세스(안)의 추정 치짐응답비 μ_e 의 역수에 해당한다. 그리고 응답보정계수 K_s 의 두 번째 항인 $(1+i_{design})/(1+i_{measured})$ 은 설계기준의 충격계수와 실측 충격계수에 의해 계산되는데, 특별한 경우를 제외하면 대부분 실측 충격계수는 설계기준상의 충격계수 보다 작다. 여기서, 특별한 경우란 신축이음부에 큰 충격을 유발할 수 있는 단차가 존재하거나 또는 노면 상태가 매우 불량한 경우 등이다. 이 연구에서는 안전측의 평가를 위해 $(1+i_{design})/(1+i_{measured}) = 1.0$ 으로 취하는 경우와 충격을 유발하는 주 인자인 노면조도, 주행속도 등을 고려하는 경험식에 의한 충격계수를 적용하여 응답보정계수를 구하고, 그 결과를 검토하였다.

6.2 공용내하력 평가 방안

6.2.1 충격계수 관련 항을 1.0으로 가정하는 방법 (방법 1)

Table 13은 연구대상 교량의 안전진단보고서(Company A, 2019; Company B, 2020)에 기술된 실측 충격계수를 사용하여 계산된 충격계수 보정치($(1+i_{design})/(1+i_{measured})$)를 나타

낸 것이다.

$$\text{연구대상 교량에 대해 } (1+i_{design})/(1+i_{measured}) = 1.0 \text{으}$$

Table 13. $(1+i_{design})/(1+i_{measured})$ of Target Bridges

Items	i_{design}	$i_{measured}$	$\frac{1+i_{design}}{1+i_{measured}}$
Br. #1	0.273	0.106	1.15
Br. #2	0.300	0.180	1.10

로 가정하고 Table 11의 추정 치짐응답비 μ_e 의 역수를 취하여 계산된 수정응답보정계수 $K_{s1}(=1/\mu_e)$ 을 Eq. (4b)의 기존 응답보정계수 K_s 와 비교하여 Table 14에 나타내었다. Table 14에 의하면 연구대상 교량 #1의 추정 치짐응답비 μ_e 를 이용한 수정응답보정계수 K_{s1} 은 기존 응답보정계수 K_s 를 이용하는 경우에 비해 최대 16.7%, 평균 10.0% 정도 공용내하력을 과소평가하고, 교량 #2의 경우는 평균적으로 약 23.8% 과소평가하는 결과를 나타내었다.

6.2.2 경험식에 의한 충격계수를 사용하는 방법 (방법 2)

충격계수 관련 항을 1로 가정한 수정응답보정계수 K_{s1} 을 사용하면 공용내하력을 실제보다 다소 낮게 평가하는 것을 알 수 있었다. 일반적으로 충격계수는 교량의 길이, 차량의 속도 및 노면조도의 영향을 크게 받으므로 이 연구에서는 실측 충격계수 대신 문헌(Chang et al., 1992; Chang and Lee, 1994)에 제시된 경험식에 의한 충격계수를 이용하여 응답보정계수 K_s 를 계산하는 방안을 검토하였다. 기존 문헌(Chang et al., 1992; Chang and Lee, 1994)에서는 차량의 모델링,

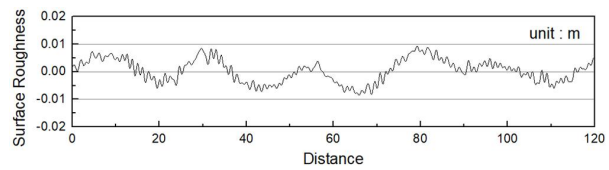


Fig. 6. An Example of Road Surface Roughness Profile

Table 14. Comparison of Response Correction Factors of Target Bridges

Items	Load cases						Average	
	LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6		
Br. #1	Existing, K_s	0.99	1.02	1.02	1.05	1.13	1.06	1.04
	Modified, K_{s1}	0.93	0.93	0.93	0.95	0.95	0.95	0.94
	Deviation (%)	-6.1	-8.8	-8.8	-9.5	-16.7	-10.4	-9.6
Br. #2	Existing, K_s	1.00	0.80	0.91	-	-	-	0.90
	Modified, K_{s1}	0.69	0.67	0.69	-	-	-	0.68
	Deviation (%)	-31.0	-16.3	-24.2	-	-	-	-24.4

Table 15. Maximum Value of Road Surface Roughness with Regard to Span Length

Multiplier	Road surface condition	Span length			
		25m	50m	75m	100m
× 0.5	Good	0.00367	0.00423	0.00464	0.00464
× 1.0	Fair	0.00733	0.00845	0.00928	0.00928
× 2.0	Poor	0.01466	0.01690	0.01856	0.01856
× 3.0	Very poor	0.02199	0.02535	0.02784	0.02784

Table 16. Pavement Condition of Target Bridges and Estimated Maximum Value of Road Surface Roughness

Items	Pavement condition	Span length (m)	Estimated maximum speed (km/h)	Estimated maximum value of RSR* (m)	Impact factor		
					Calculated by Eq.(5)	Measured	Design
Br. #1	Poor	15.0	80	0.01463	0.092	0.106	0.273
Br. #2	Poor	10.0	80	0.01436	0.092	0.180	0.300

※ RSR : road surface roughness

차량의 속도, 교량의 길이 및 노면조도의 상태에 따른 다양한 동적해석을 수행하고, 중선회귀분석(multiple linear regression analysis)에 의해 처짐에 대한 충격계수를 추정하는 경험식을 Eq. (5)와 같이 제안하였다. Eq. (5)에서 교량의 노면조도 형상은 Honda et al.(1982)이 작성한 노면조도 파워 스펙트럼을 이용하여 시뮬레이션하였다. Fig. 6은 보통 상태의 노면을 가정하여 시뮬레이션된 노면조도 프로파일의 일례이다. 그리고 Table 15는 노면상태에 따라 시뮬레이션된 노면조도 프로파일로부터 노면조도 최댓값을 정리한 것이다. 첫 번째 열의 승수(multiplier) 및 상태는 현장에서 교량의 노면상태를 외관조사하여 사용자가 결정해야 하는 값이다.

$$i_{empirical} = -\frac{644}{10^4} - \frac{637}{10^7}L + \frac{185}{10^5}V + \frac{648}{10^3}R \quad (5)$$

여기서, $i_{empirical}$: 경험식에 의한 충격계수

L : 교량의 지간길이 (m)

V : 차량의 주행속도 (km/h)

R : 노면조도의 최댓값 (m)

Table 16은 연구대상 교량의 교면포장 외관조사 결과 및 이로부터 추정된 경험식 충격계수를 실제 충격계수 및 설계 충격계수와 비교하여 정리한 것이다. Table 16의 경험식에 의한 충격계수는 Table 15의 불량에 해당하는 값을 선형회귀분석결과(노면조도 최댓값 = $5.344E-5 \times \text{지간길이} + 0.01383$)에 적용하여 얻어진 노면조도 최댓값이다.

Table 17은 손상도 평가 프로세스(안)에 의한 추정 처짐응답비 μ_e 의 역수와 충격계수 관련 항을 1.0으로 가정하는 방법(이하

Table 17. Comparison of Evaluation Results of Load-Carrying Capacity

Items	Br. #1	Br. #2	
$\left(\frac{\delta_{analyzed}}{\delta_{measured}}\right)_{ave}$	① Measured	0.91	0.81
	② Estimated by process (draft)	0.94	0.68
$\frac{1+i_{design}}{1+i_{measured}}$	③ Measured	1.15	1.10
	④ $i_{measured} \approx i_{design}$	1.00	1.00
	⑤ Calculated by Eq.(5)	1.17	1.19
K_s	Existing (①×③)	1.05	0.89
	Method 1 (②×④ = K_{s1})	0.94	0.68
	Method 2 (②×⑤)	1.10	0.81
P	Method 1	-10.2%	-23.7%
	Method 2	5.1%	-9.2%

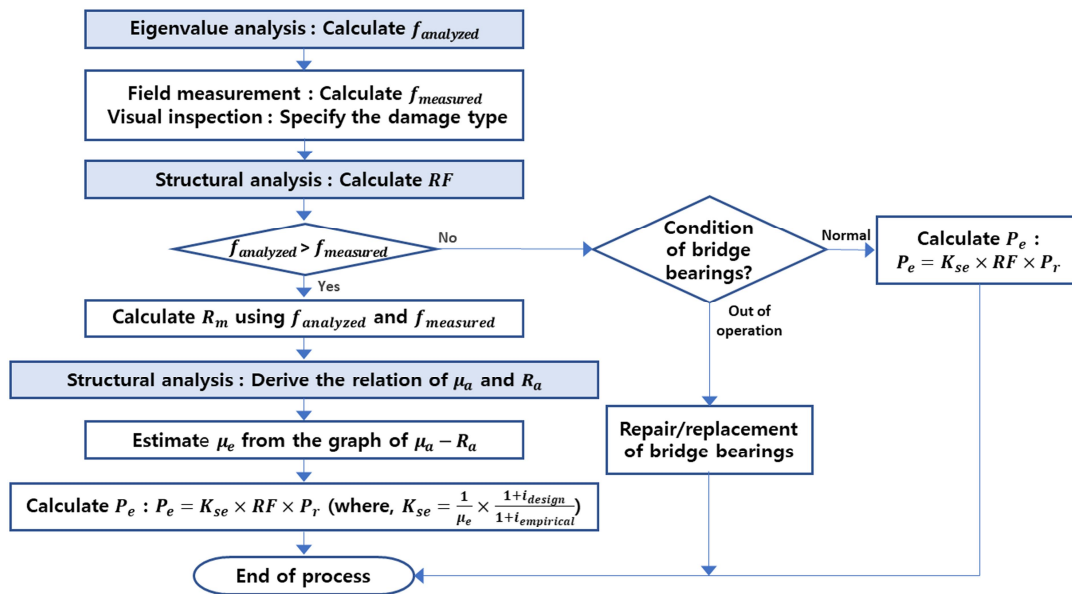


Fig. 7. Improved Damage Evaluation Process in This Study

방법 1) 및 경험식에 의한 충격계수를 사용하는 방법(이하 방법 2)에 의해 계산된 응답보정계수를 안전진단보고서의 값과 비교하여 나타낸 것이다. Eq. (4)에 나타낸 공용내하력 P 의 계산에 사용되는 내하율 RF 는 순수하게 구조해석으로만 구해지는 값이고, P_r 은 설계활하중이다. 따라서 응답보정계수의 차이는 공용내하력의 차이를 의미하므로 Table 17에서 공용내하력 P 를 이용하여 방법 1과 방법 2의 적정성을 검토하였다.

Table 17에 의하면 응답보정계수의 충격계수 관련 항에 경험식에 의한 충격계수를 적용하는 방법 2가 방법 1에 비해 편차가 작으며, 방법 2는 기존 응답보정계수 K_s 를 사용하는 경우 대비 공용내하력을 10% 이내의 편차범위에서 추정할 수 있음을 알 수 있다.

6.3 개선된 손상도 평가 프로세스 제안

선행연구(Kim and Jeon, 2021; KICT and CTC, 2020)에서 제안된 손상도 평가 프로세스(안)은 앞서 5절에서 언급한 바와 같이 정성적인 측면이 있다. 이에 대한 개선책으로서 이 연구에서는 기존 손상도 평가 프로세스(안)의 현장작업 간소화 및 정량화를 위해 처짐 측정을 배제하고, 손상도 평가 프로세스(안)에 의한 추정 처짐응답비 μ_e 와 방법 1 및 방법 2에 의한 충격계수를 사용하여 응답보정계수 K_s 를 계산하여 공용내하력을 평가하는 방안에 대해 검토하였다. 검토결과, 손상도 평가 프로세스(안)에 의한 추정 처짐응답비 μ_e 와 경험식에 의한 충격계수를 사용하여 계산된 공용내하력은 「시설물의 안전 및 유지관

리 실시 세부지침(이하 세부지침)」(KISTEC, 2019)에 의한 값과 10% 이내의 편차를 나타내었다.

연구결과에 기초하여 노후화된 중소규모 RC 슬래브 교량의 손상도를 평가할 수 있는 개선된 정량적인 프로세스를 Fig. 7에 나타내었다. 이 연구에서 제안된 프로세스에서 공용내하력은 Eq. (6)과 같이 추정 공용내하력 P_e 에 의해 평가한다.

$$\text{추정 공용내하력, } P_e = K_{se} \times RF \times P_r \quad (6a)$$

여기서, K_{se} : 추정 응답보정계수 = $\frac{1}{\mu_e} \times \frac{1+i_{design}}{1+i_{empirical}}$ (6b)

μ_e : 추정 처짐응답비

i_{design} : 설계 충격계수

$i_{empirical}$: 경험식에 의한 충격계수 (Eq. (5) 참조)

7. 결론

이 연구를 통해 도출된 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 선행연구의 손상도 평가 프로세스(안)은 강성 저하에 따른 처짐 거동을 상대적으로 평가하므로 세부지침에 의한 안전 성능 등급 평가 결과와 상이한 경우가 있을 수 있음을 확인하였다.
- (2) 손상도 평가 프로세스(안)의 현장작업 간소화 및 정량화를 위해 처짐 측정을 배제하고, 공용내하력을 정량적으로 평가할 수 있는 개선된 손상도 평가 프로세스를 제안하였다.

- (3) 제안된 손상도 평가 프로세스는 추정 처짐응답비와 경험식에 의한 충격계수를 적용하여 추정 공용내하력을 평가하며, 평가결과는 세부지침에 의한 값과 10% 이내의 편차를 나타내었다. 다만 적용대상 교량의 숫자가 다소 제한적임을 고려할 때 제시하는 방법의 범용성을 확인하기 위한 추가 연구가 필요하다고 판단된다.

국내에 건설된 교량의 절대 다수를 차지하는 노후화된 중소규모 교량의 안전성을 현행 세부지침과 같이 정기점검만에 의해 판단하는 경우, 평가 기준이 다소 정성적이어서 점검자에 따른 편차가 예상된다. 또한 일률적인 주기로 노후화된 중소규모교량을 점검하는 것은 매우 비경제적일 뿐 아니라 비효율적으로 판단된다. 이와 같은 문제를 해소하기 위해 이 연구에서는 정량적인 손상도 평가 프로세스를 제안하였다. 10% 정도의 공용내하력 평가 결과의 오차를 허용하는 경우, 제안된 방법은 노후화된 RC 슬래브 교량의 안전성 평가 및 유지보수 우선순위 산정 등에 효율적으로 활용될 수 있을 것으로 판단되었다.

감사의 글

이 연구는 한국건설기술연구원의 연구비(과제번호 2021-151)를 지원받아 수행되었습니다.

References

- Chang, D. I. and Lee, H. H. (1994). "Impact factors for simple span highway girder bridges." *ASCE Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 3, pp. 704-715, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1994\)120:3\(704\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1994)120:3(704)).
- Chang, D. I., Lee, H. H. and Jeon, J. C. (1992). "Vibrations and impact factors for highway girder bridges." *Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea*, COSEIK, Vol. 5, No. 3, pp. 139-146 (in Korean).
- Company A (2019). *Report on Performance Evaluation of Br. #1* (in Korean).
- Company B (2020). *Report on Safety Evaluation of Br. #2* (in Korean).
- Honda, H., Kajikawa, Y. and Kobori, T. (1982). "Spectra of road surface roughness on bridges." *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 108, No. 9, pp. 1956-1966.
- Kim, Y. and Jeon, J. (2021). "Behavior analysis of RC slab bridge according to damage and suggestion of its evaluation process." *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 36, No. 3, pp. 40-49, <https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2021.36.3.40> (in Korean).
- Korea Authority of Land & Infrastructure Safety (KALIS) (2021a). *2021 Yearbook of Infrastructure Statistics* (in Korean).
- Korea Authority of Land & Infrastructure Safety (KALIS) (2021b). *Safety Grade Evaluation Manual for 3rd Class Infrastructure* (in Korean).
- Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation (KISTEC) (2019). *Specific Guidelines on the Safety Control and Maintenance of Establishments* (Inspection/Diagnosis, Bridge) (in Korean).
- Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT) and Construction Technology Consultant (CTC) (2020). *Structural Analysis Simulation for Damage Assessment on RC Slab Bridges and Wireless Measurement Technical Survey* (in Korean).
- Matsui, S. and Maeda, Y. (1986). "A rational evaluation method for deterioration of highway bridge decks." *Journal of JSCE*, JSCE, Vol. 374, pp. 419-426 (in Japanese).
- Park, K. H., Sun, J. W., Lee, H. and Hwang, Y. K. (2017). "A basic study on lifetime estimation of RC bridges." *Proceedings of Autumn Conference of Korea Concrete Institute*, KCI, Vol. 29, No. 2, pp. 413-414 (in Korean).
- Park, K. H., Sun, J. W., Lee, H. and Hwang, Y. K. (2018). "Study on reconstruction and deterioration of RC slab bridges." *Proceedings of Autumn Conference of Korea Concrete Institute*, Vol. 30, No. 2, pp. 693-694 (in Korean).