

# RC 슬래브교의 손상에 따른 거동 분석 및 손상 평가 프로세스 제안

김유희\*† · 전준창\*\*

## Behavior Analysis of RC Slab Bridge according to Damage and Suggestion of Its Evaluation Process

Yuhee Kim\*† · Jun-Chang Jeon\*\*

### †Corresponding Author

Yuhee Kim

Tel : +82-31-910-0065

E-mail : yuheekim@kict.re.kr

Received : February 25, 2021

Revised : April 8, 2021

Accepted : May 10, 2021

Copyright©2021 by The Korean Society of Safety All right reserved.

**Abstract** : This study surveyed damage to small and medium-sized RC slab bridges, the largest in number in Korea. Four common types of damage were identified, and their static and dynamic structural behaviors were examined through structural analysis. The degree of damage was selected as an analysis parameter for three superstructures of RC slab bridges. After structural analysis, a damage assessment process was proposed that can be used as the basis for establishing maintenance yplans for these bridges. The results of the present study can be used for the safety management of RC slab bridges, classified as bridges suspected of safety flaws or requiring maintenance in load-carrying capacity tests.

**Key Words** : RC slab bridge, damage type, structural analysis, damage evaluation process, maintenance plan

## 1. 서론

우리나라에는 2019년 12월 기준 35,902개 교량이 가설되어 있으며<sup>1)</sup>, 그 중 RC 슬래브교(속빈 슬래브교 포함)가 약 24.2%(약 8,700개)로 가장 높은 비중을 차지하고 있다(Fig. 1 참조). 더욱이 박경훈 등<sup>2)</sup>에 의하면, 2017년 기준 RC 슬래브교 중 공용연수 20~30년 교량이 3,885개소, 30~40년 교량이 1,564개소, 40년 이상인 교량이 905개소로 조사된 바 있다. 즉, 공용연수 20년 이상 경과된 RC 슬래브 교량이 약 6,400개로서 전체의 70% 이상을 차지한다. Table 1은 전국 도로 상에 가설되어 있는 RC 슬래브교 중, 주변 도로와 환경 여건의 변화 또는 구조 및 내구성능 부족 등에 의해 개축 또는 폐기된 교량의 공용연수를 분석한 결과이다<sup>3)</sup>. 개축 또는 폐기된 RC 슬래브교의 평균 공용연수가 약 22.7년 이고, 공용연수 20년 이상 경과된 RC 슬래브교가 약 6,400개로 전국 각지에서 공용 중이라는 점을 감안하면 조만간 RC 슬래브교의 노후화가 사회적 문제가 될 수 있다는 것은 쉽게 유추할 수 있다.

대부분의 RC 슬래브교는 경간 길이가 20 m 이하로서 「시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법(이하 시설물안전법)」<sup>4)</sup>에 규정된 제1, 2종시설물에 포함되지 않으므로 정기적인 안전점검·정밀안전진단이 이루어지지 않고 있다. 개축 또는 폐기된 시점의 RC 슬래브

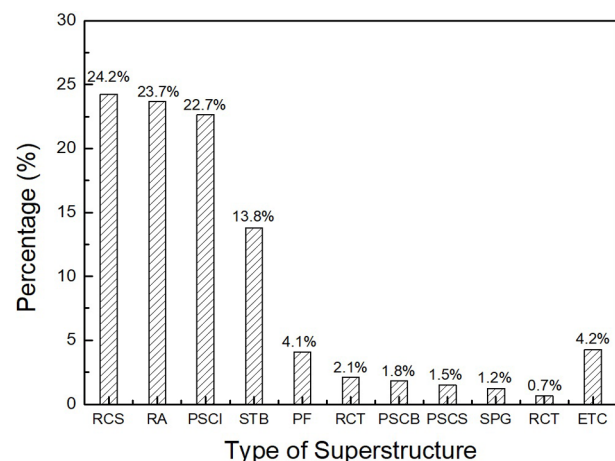


Fig. 1. Statistics on superstructure type of bridges.

\*한국건설기술연구원 노후인프라센터 박사후연구원 (Sustainable Infrastructure Research Center, KICT)

\*\*씨티씨 주식회사 전문이사 (Construction Technology Consultant Co., Ltd.)

Table 1. Statistics on reconstructed or demolished RC slab bridges

| Year                   | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| No. of bridges         | 518  | 411  | 260  | 449  | 310  | 316  | 336  | 250  | 320  | 278  | 210  |
| Average serviced years | 20.0 | 20.1 | 20.7 | 21.3 | 21.0 | 20.8 | 22.8 | 20.1 | 21.9 | 22.3 | 24.2 |

| Year                   | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | Total |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| No. of bridges         | 146  | 198  | 109  | 115  | 350  | 73   | 157  | 86   | 104  | 110  | 5,106 |
| Average serviced years | 21.2 | 23.2 | 25.6 | 24.6 | 20.1 | 21.0 | 24.6 | 25.6 | 24.7 | 31.9 | 22.7  |

교의 평균 공용연수와 20년 이상 공용 중인 RC 슬래브 교의 비율을 고려하면 이제부터라도 노후화된 RC 슬래브교의 안전성 평가 및 안전성 확보 방안이 시급히 수립되어야 할 것이다.

공용연수 20년 이상 경과된 약 6,400개의 RC 슬래브 교를 현행 「시설물안전법」에 따라 연 2회의 정기안전 점검만 실시하는 경우에도 매년 약 460억원이 소요될 것으로 보고된 바 있다<sup>9)</sup>. 이와 같이 과다한 비용이 소요되는 일률적인 점검 보다는 안전성이 의심되는 교량을 선별하고, 간단한 방법에 의해 점검·진단 또는 보수보강 등의 후속조치를 위한 근거자료를 마련하는 것이 이들 교량의 유지관리에 소요되는 비용과 인력 부담을 대폭 경감할 수 있을 것이다.

이 논문에서는 중소규모 RC 슬래브교의 손상사례를 수집·분석하여 발생빈도가 높은 손상유형을 도출하고, 이를 고려한 구조해석을 통해 손상에 따른 정·동적 구조거동 변화를 분석하였다. 다만, 현실적으로 안전점검 또는 정밀안전진단 단계에서 모드해석을 통해 모드 형상을 확인하는 것이 용이하지 않으므로 본 논문에서는 생략하였다. 연구대상 RC 슬래브교의 형식은 직각 충실 RC 슬래브교, 경사 충실 RC 슬래브교 및 직각 속빈 RC 슬래브교이며, 각 손상유형의 손상정도를 해석매개변수로서 고려하였다. 이러한 구조해석결과에 기초하여 RC 슬래브교의 유지보수 실시 시기 또는 정밀안전진단 시행 필요 여부를 판단할 수 있는 손상도 평가 프로세스도 함께 제안하였다.

## 2. RC 슬래브교의 손상유형 도출

### 2.1 연구 동향

노후교량 장수명화 연구단 등<sup>6)</sup>은 노후화된 중소규모 교량의 성능을 평가하고 장수명화 방안을 마련하기 위한 연구를 실시하였다. 이 연구에 의하면 RC 슬래브교의 주요 손상유형은 건조수축에 의한 슬래브 하면 균열, 피복두께 부족에 의한 철근 노출 및 부식, 노후화로 인한 교면포장 균열, 배수구 막힘 및 파손, 교량받침부 부식, 신축이음부 손상, 난간 변형 및 연석 균열 등이다.

오병환 등<sup>7)</sup>과 한국시설안전기술공단<sup>8,9)</sup>은 철거가 예정된 RC 슬래브교에 대한 파괴실험을 실시하고, 노후 교량은 교량받침부의 기능 저하에 의해 양단 고정 경계조건을 갖는 거동을 나타내므로 지점부 구속에 대한 적절한 평가가 선행되어야 한다고 하였다. Chiba 등<sup>10)</sup>은 중소규모 교량에서 빈번히 발견되는 교량받침 손상이 구조거동에 미치는 영향을 확인하기 위하여 정적재하실험과 구조해석을 실시하였다. 연구결과, 교량의 실제 거동은 교량받침을 양호한 상태로 가정한 경우와 기능이 상실된 상태로 가정한 경우의 사이에 있고, 교량받침의 기능이 상실되면 경간 중앙부의 응력은 감소하나 지점부에는 응력집중현상으로 인해 압축응력이 다소 크게 발생될 수 있다는 것을 확인하였다.

도심지역의 교량은 동절기의 제설제 살포로 인해 신축이음부로부터 염화물이온을 함유하고 있는 물이 유입되어 지점부 슬래브 측면 및 하면의 콘크리트 박리 또는 철근 부식 사례가 빈번하지만 교대 홍벽부의 유간이 적어 상세 육안조사가 불가능한 경우가 대부분이다. Honjo 등<sup>11)</sup>은 준공 후 27년 경과된 속빈 RC 슬래브 교에 대한 상세조사를 통하여 염화물에 의한 심각한 열화를 확인하고, 교량의 내구성 평가 시 이에 대한 배려가 필요하다고 하였다.

### 2.2 RC 슬래브교의 손상유형 도출

RC 슬래브교는 경간길이가 짧은 도로교에 오래 전부터 널리 적용되고 있는 상부구조형식이다. 이 교량의 단면 형태는 충실 단면과 속빈 단면이 있다. 속빈 단면은 자중으로 인한 경간길이의 제한을 다소간 해소하기 위해 적용되고 있으나, 시공성이 나쁘고 속이 비어 있는 부위에서 Fig. 2와 같은 손상 발생 가능성이 상대적으로 높다는 문제가 지적된다. 한편, 공간적 제약조건에 의해 건설되는 경사 슬래브교는 반력 분포가 불균등하고, 비틀림과 부반력 등의 영향으로 구조적으로 복잡한 거동을 나타내는 것으로 알려져 있다.

한국건설기술연구원 등<sup>5)</sup>은 공용연수 20년 경과된 RC 슬래브교의 설계방법을 확인하기 위해 2000년 도로교 설계기준<sup>12)</sup>과 2000년 이전의 기준을 비교·검토

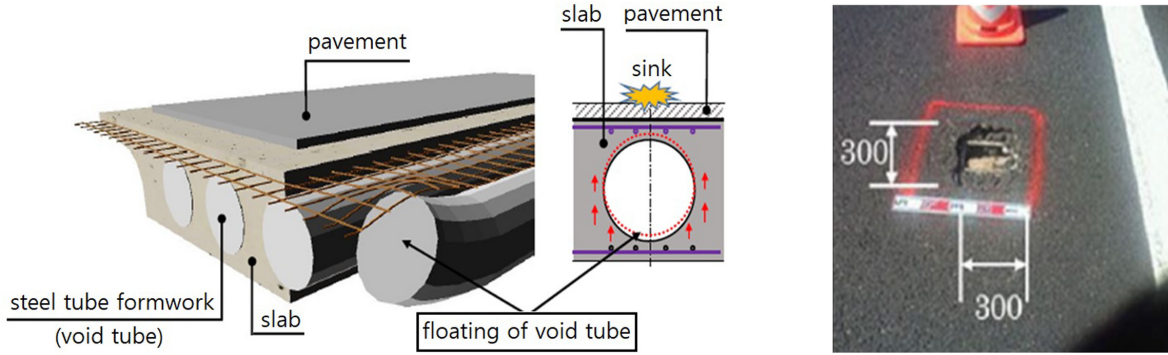


Fig. 2. Void tube floating and sunken pavement at a voided slab bridge.

Table 2. Target damage types and degrees in this study

| Damage type                     | Damage region    | Damage degree                            | Remarks            |
|---------------------------------|------------------|--|--------------------|
| Flexural crack at midspan       | Confer Fig. 3(a) | 0.05H, 0.10H, 0.15H, 0.20H, 0.30H        | H : section height |
| Flexural crack at inner support | Confer Fig. 3(b) | 0.05H, 0.10H, 0.15H, 0.20H, 0.30H        |                    |
| Damage at side face of slab     | Confer Fig. 3(c) | 0.05W, 0.10W, 0.15W, 0.20W               | W : section width  |
| Non-functioning bridge bearing  | Confer Fig. 3(d) | A1 10, 20, 30, 100 % fix, A1/A2 100% fix | A : abutment       |

하였다. 2000년 이전의 기준으로 설계된 RC 슬래브교는 피복두께 부족, 캔틸레버판 가외철근 부족 및 낮은 콘크리트 설계기준강도<sup>13)</sup>(180 kg/cm<sup>2</sup>) 등으로 인해 안전성 및 내구성에 불리하게 작용하여 유지관리상 문제가 발생할 수 있을 것으로 추정하였다. 또한, 1977년 표준시방서 이후 속이 비어 있는 부위 상부의 슬래브 최소 두께 규정이 100 mm에서 150 mm로 변경되었으므로 40년 이상의 공용연수를 갖는 속빈 슬래브교는 Fig. 2와 같은 포장 함몰 등의 문제가 발생할 가능성이 있는 것으로 판단하였다.

RC 슬래브교는 대부분 제1, 2종시설물에 포함되지 않으므로 그동안 정기적인 점검·진단이 이루어지지 않았으나, 심각한 문제가 발견된 몇몇 교량에 대해서는 정밀안전진단이 실시된 사례가 있다. 1981년 준공된 경사 RC 슬래브교 형식인 화산교와 대항교에 대한 정밀안전진단이 비엔티엔지니어링(주)에 의해 실시되었다<sup>14)</sup>. 이들 교량은 비록 구조적으로 문제가 되는 균열(휨균열, 사인장균열)은 발생되지 않았으나, 콘크리트 포장 덧씌우기(t=475 mm) 시공불량으로 인해 노면수가 슬래브 구체에 유입되어 누수, 백화 등이 심각한 상태이므로 지수공법, 철근방청공법 및 단면복구공법으로 보수할 것을 제안하였다. Ogawa 등<sup>15)</sup>은 준공 후 약 30년이 경과된 5경간 연속 속빈 RC 슬래브교를 대상으로 외관조사를 실시하였다. 이 교량에는 경간 중앙부에 균열폭 0.3 mm 이상의 교축직각방향 균열이 전 폭에 걸쳐 약 500 mm 간격으로 발생되어 있었고, 특히 속이 비어 있는 부위 하면에는 철근이 배치되지

않아 최대 균열폭 0.9 mm의 교축방향 균열이 약 1 m 간격으로 발생되어 있는 것을 확인하였다.

앞에서도 언급한 바와 같이, RC 슬래브교는 대부분 제1, 2종시설물에 포함되지 않는 시설물이므로 2019년 이전까지는 정기안전점검조차 이루어지지 않아 손상 유형에 대한 상세한 분석을 수행한 자료는 거의 없는 실정이다. 따라서 이 논문에서는 RC 슬래브교와 손상 유형이 유사하다고 판단되는 RC 바닥판에 대한 연구 결과를 참조하여 손상유형을 선정하였다. 한국도로공사 도로교통연구원 등<sup>16)</sup>의 연구에서는 전체 고속국도 교량 중 총 1,049개 교량의 정밀안전점검·안전진단보고서에 수록된 손상유형을 분석하였으며, 이 연구에 의하면 균열, 백태/누수, 박리/박락, 재료분리 및 기타 순으로 유손상률이 높게 나타났다. 이러한 손상은 구조해석에서 콘크리트 유효단면 감소로서 고려될 수 있을 것으로 판단된다.

이상과 같은 RC 슬래브교의 연구동향, 구조적 특징, 설계기준 변경과정 및 손상 사례를 분석한 결과를 토대로 RC 슬래브교에서 공통적으로 발생할 수 있는 4 가지 손상유형을 도출하였다. Table 2에 연구대상 손상 유형과 함께 구조해석에 고려된 각 손상유형별 손상정도를 정리하여 나타내었다.

### 3. 연구대상 교량 및 구조해석

#### 3.1 연구대상 교량

연구대상 교량을 선정하기 위해 2020년 도로 교량

Table 3. Outline of target bridges in this study

| Bridge type      | Completion year | Design live load | Span length     | Width  | $f_{ck}$ | Skew angle |
|------------------|-----------------|------------------|-----------------|--------|----------|------------|
| Solid, unskewed  | 1996            | DB-24            | 2@15.0 = 30.0 m | 11.0 m | 27 MPa   | 0°         |
| Solid, skewed    | 1997            | DB-24            | 2@12.5 = 25.0 m | 19.5 m | 27 MPa   | 14°        |
| Voided, unskewed | 1994            | DB-24            | 3@20.0 = 60.0 m | 19.0 m | 27 MPa   | 0°         |

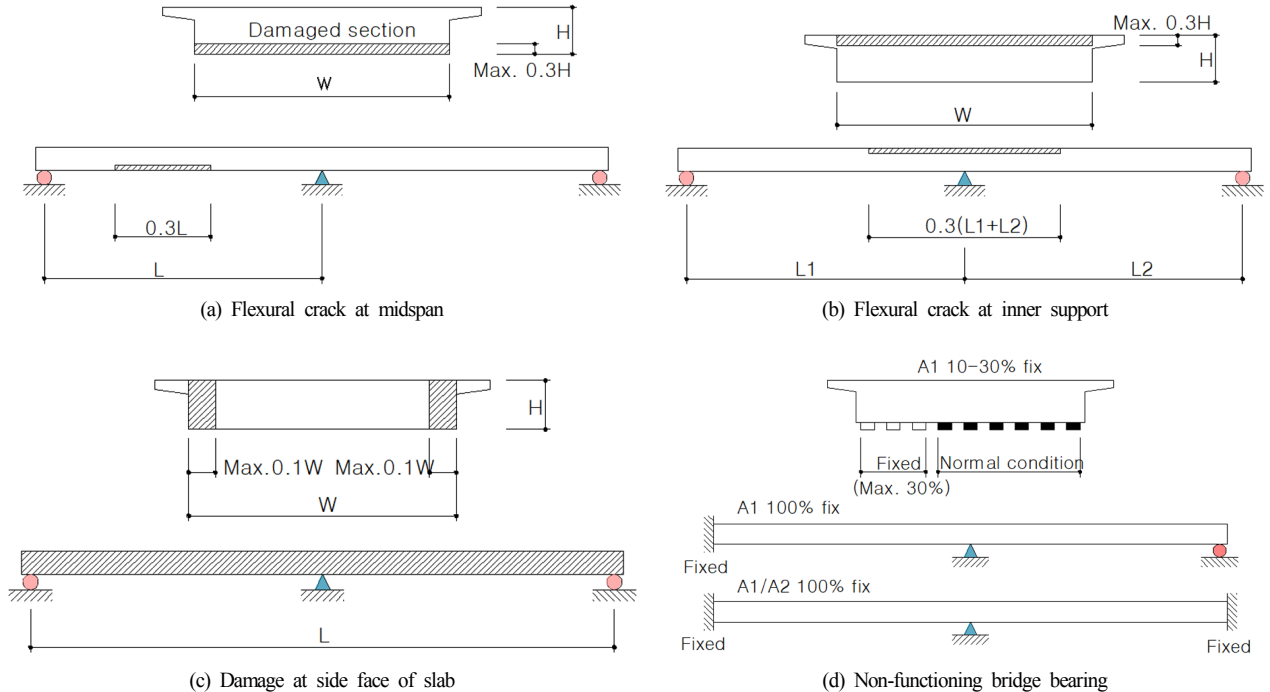


Fig. 3. Damage region of each damage type.

및 터널 현황조사<sup>1)</sup>에 수록된 RC 슬래브교의 총 연장, 최대 경간길이, 경간구성 및 설계하중을 조사하였다. 총실단면의 경우는 최대 경간길이 10~15 m, 경간구성 2~3경간 연속, 설계하중 DB-24인 경우가 가장 많은 비중을 차지하며, 속빈단면의 경우는 최대 경간길이 15~20 m, 경간구성 3경간 연속, 설계하중 DB-24인 경우가 가장 많은 비중을 차지하는 것으로 나타났다. 이러한 조사결과에 기초하여 선정된 연구대상 교량을 Table 3에 나타내었다.

### 3.2 구조해석 방법

연구대상 RC 슬래브교의 손상에 따른 정·동적 구조거동 변화를 분석하기 위해 고유치해석, 정적 구조해석 및 동적 구조해석을 수행하였다. 이 연구에 적용된 손상유형은 총 4가지로서 경간 중앙부 휨균열, 내측 지점부 휨균열, 슬래브 측면 손상 및 교량받침 기능 상실이다. 각 손상유형에 대한 손상 범위 및 정도는 Table 2와 같다. 고유치해석과 정적 구조해석은 범용 유한요소해석프로그램인 Midas Civil을, 동적 구조해석

은 이동하중에 의한 시간이력해석 전용 프로그램 (DAP-1)<sup>17-19)</sup>을 이용하였다.

고유치해석은 4가지 유형의 손상에 의한 고유진동수 변화로부터 RC 슬래브교의 강성을 분석하기 위해 실시되었다. 정적 구조해석은 손상이 응답비(=손상모델의 응답/기준(무손상)모델의 응답)와 내하력에 미치는 영향을 평가하기 위한 것이다. 한편, 동적 구조해석인 이동하중에 의한 시간이력해석은 직각 총실 RC 슬래브교만을 대상으로 주행속도 40~80 km/h에 대해 실시하였으며, 손상에 의한 충격계수 변화를 검토하였다.

### 3.3 구조해석 결과 및 고찰

#### 3.3.1 손상이 고유진동수에 미치는 영향

경간 중앙부 및 내측 지점부 휨균열(Table 2, Fig. 3 참조)을 고려한 고유치해석으로부터 얻어진 RC 슬래브교의 고유진동수 및 강성비는 Table 4와 같다. 구조계의 강성은 고유진동수의 2승에 비례하므로 식(1)에 의해 Table 4에 나타난 강성비를 계산하였다. Table 4에 의하면 RC 슬래브교의 휨 1차 진동수는 내측 지점

Table 4. Variation of Natural frequency and stiffness ratio due to flexural crack at midspan and inner support

| Items                           |              |                  |                 | Baseline model | Section height of damaged model |       |       |       |       |
|---------------------------------|--------------|------------------|-----------------|----------------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                                 |              |                  |                 |                | 0.95H                           | 0.90H | 0.85H | 0.80H | 0.70H |
| Flexural crack at midspan       | 1st bending  | Solid, unskewed  | Frequency (Hz)  | 4.91           | 4.83                            | 4.74  | 4.64  | 4.53  | 4.28  |
|                                 |              |                  | Stiffness ratio | 1.00           | 0.97                            | 0.93  | 0.89  | 0.85  | 0.76  |
|                                 |              | Solid, skewed    | Frequency (Hz)  | 5.57           | 5.49                            | 5.40  | 5.29  | 5.18  | 4.94  |
|                                 |              |                  | Stiffness ratio | 1.00           | 0.97                            | 0.94  | 0.90  | 0.87  | 0.79  |
|                                 |              | Voided, unskewed | Frequency (Hz)  | 4.49           | 4.48                            | 4.46  | 4.45  | 4.43  | 4.39  |
|                                 |              |                  | Stiffness ratio | 1.00           | 0.99                            | 0.99  | 0.98  | 0.97  | 0.95  |
|                                 | 1st twisting | Solid, unskewed  | Frequency (Hz)  | 11.25          | 11.25                           | 11.25 | 11.24 | 11.24 | 11.25 |
|                                 |              |                  | Stiffness ratio | 1.00           | 1.00                            | 1.00  | 1.00  | 1.00  | 1.00  |
|                                 |              | Solid, skewed    | Frequency (Hz)  | 10.44          | 10.39                           | 10.34 | 10.29 | 10.23 | 10.09 |
|                                 |              |                  | Stiffness ratio | 1.00           | 0.99                            | 0.98  | 0.97  | 0.96  | 0.93  |
|                                 |              | Voided, unskewed | Frequency (Hz)  | 5.65           | 5.64                            | 5.64  | 5.62  | 5.61  | 5.59  |
|                                 |              |                  | Stiffness ratio | 1.00           | 1.00                            | 0.99  | 0.99  | 0.99  | 0.98  |
| Flexural crack at inner support | 1st bending  | Solid, unskewed  | Frequency (Hz)  | 4.91           | 4.87                            | 4.83  | 4.78  | 4.73  | 4.60  |
|                                 |              |                  | Stiffness ratio | 1.00           | 0.99                            | 0.97  | 0.95  | 0.93  | 0.88  |
|                                 |              | Solid, skewed    | Frequency (Hz)  | 5.57           | 5.57                            | 5.56  | 5.56  | 5.55  | 5.53  |
|                                 |              |                  | Stiffness ratio | 1.00           | 1.00                            | 1.00  | 1.00  | 0.99  | 0.99  |
|                                 |              | Voided, unskewed | Frequency (Hz)  | 4.49           | 4.49                            | 4.49  | 4.49  | 4.49  | 4.49  |
|                                 |              |                  | Stiffness ratio | 1.00           | 1.00                            | 1.00  | 1.00  | 1.00  | 1.00  |
|                                 | 1st twisting | Solid, unskewed  | Frequency (Hz)  | 11.25          | 10.98                           | 10.70 | 10.42 | 10.14 | 9.60  |
|                                 |              |                  | Stiffness ratio | 1.00           | 0.95                            | 0.90  | 0.86  | 0.81  | 0.73  |
|                                 |              | Solid, skewed    | Frequency (Hz)  | 10.44          | 10.25                           | 10.04 | 9.81  | 9.56  | 9.01  |
|                                 |              |                  | Stiffness ratio | 1.00           | 0.96                            | 0.92  | 0.88  | 0.84  | 0.75  |
|                                 |              | Voided, unskewed | Frequency (Hz)  | 5.65           | 5.64                            | 5.64  | 5.63  | 5.62  | 5.60  |
|                                 |              |                  | Stiffness ratio | 1.00           | 1.00                            | 0.99  | 0.99  | 0.99  | 0.98  |

부 휨균열에 비해 경간 중앙부 휨균열의 영향을 많이 받으며, 비틀림 1차 진동수는 내측 지점부 휨균열의 영향을 다소 크게 받는다는 것을 알 수 있다. RC 슬래브 교의 단면형태에 따라서는, 속빈 단면에 비해 충실단면에서 손상의 영향이 다소 크게 나타남을 알 수 있다.

$$\text{강성비} = \left( \frac{f_{\text{damaged}}}{f_{\text{baseline}}} \right)^2 \quad (1)$$

$f_{\text{damaged}}$  : 손상모델의 고유진동수

$f_{\text{baseline}}$  : 기준모델의 고유진동수

RC 슬래브교의 측면 손상 및 교량받침 기능 상실에 대한 고유치해석결과를 각각 Table 5 및 Table 6에 나타내었다. 슬래브 측면 손상의 영향은 휨과 비틀림 진동모드 모두 경사 충실 RC 슬래브교에서 가장 크게 나타났다. 슬래브 측면 손상의 경우, 속빈 단면에 대해서는 속빈 부분의 영향을 고려하여 2가지 경우에 대해서만 검토하였다.

Table 6은 교량받침 본체 및 주변 받침 콘크리트의 손상으로 인해 교량받침으로서의 기능이 상실되어 경

계조건이 변하는 경우의 해석결과를 나타낸 것이다. 결과를 살펴보면 다른 손상유형들과 달리 고유진동수가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 경계조건 변화에 의한 것인데, 상부구조의 강성 증가에 의한 고유진동수 증가로 오인할 개연성이 있다. 특히 이러한 경향은 충실단면의 휨 진동모드에서 뚜렷하다. 고유진동수의 경우 온도의 영향을 배제할 수 없으므로 실제 계측 시에는 주성분분석법, 요인분석법 등과 같은 방법을 통해 온도의 영향을 제거하는 과정이 필요하다. 본 논문에서는 온도의 영향을 고려하지 않고 교량의 거동을 확인하는 수치해석을 수행하였기 때문에 위와 같은 분석과정은 생략하였으나, 실측 데이터를 분석 시에는 온도의 영향을 보정하는 과정이 필요할 것이다. RC 슬래브교의 실측 고유진동수가 증가하는 경우, 그 영향은 교량받침부 손상과 관련되었을 개연성이 크므로 안전점검 시 교량받침부에 대한 세심한 외관조사가 필요한 것을 알 수 있다.

손상에 의해 진동모드 형상도 다소 변화되는 것을 확인하였지만, 현실적으로 안전점검 또는 정밀안전진단 단계에서 모드해석을 통해 모드 형상을 확인하는 것이 용이하지 않으므로 이 논문에서는 생략하였다.

Table 5. Variation of Natural frequency and stiffness ratio due to damage at side face of slab

| Items                       |              |                  |                 | Baseline model | Section width of damaged model |       |       |       |
|-----------------------------|--------------|------------------|-----------------|----------------|--------------------------------|-------|-------|-------|
|                             |              |                  |                 |                | 0.95W                          | 0.90W | 0.85W | 0.80W |
| Damage at side face of slab | 1st bending  | Solid, unskewed  | Frequency (Hz)  | 4.91           | 4.71                           | 4.55  | 4.40  | 4.25  |
|                             |              |                  | Stiffness ratio | 1.00           | 0.92                           | 0.86  | 0.80  | 0.75  |
|                             |              | Solid, skewed    | Frequency (Hz)  | 5.57           | 5.37                           | 5.14  | 4.88  | 4.56  |
|                             |              |                  | Stiffness ratio | 1.00           | 0.93                           | 0.85  | 0.77  | 0.67  |
|                             |              | Voided, unskewed | Frequency (Hz)  | 4.49           | -                              | 4.19  | -     | 3.81  |
|                             |              |                  | Stiffness ratio | 1.00           | -                              | 0.87  | -     | 0.72  |
|                             | 1st twisting | Solid, unskewed  | Frequency (Hz)  | 11.25          | 10.60                          | 10.01 | 9.37  | 8.68  |
|                             |              |                  | Stiffness ratio | 1.00           | 0.89                           | 0.79  | 0.69  | 0.60  |
|                             |              | Solid, skewed    | Frequency (Hz)  | 10.44          | 9.51                           | 8.29  | 7.07  | 6.09  |
|                             |              |                  | Stiffness ratio | 1.00           | 0.83                           | 0.63  | 0.46  | 0.34  |
|                             |              | Voided, unskewed | Frequency (Hz)  | 5.65           | -                              | 4.90  | -     | 4.12  |
|                             |              |                  | Stiffness ratio | 1.00           | -                              | 0.75  | -     | 0.53  |

Table 6. Variation of Natural frequency and stiffness ratio due to non-functioning bridge bearing

| Items                          |              |                  |                 | Baseline model | Boundary condition of damaged model |            |            |             |                |
|--------------------------------|--------------|------------------|-----------------|----------------|-------------------------------------|------------|------------|-------------|----------------|
|                                |              |                  |                 |                | A1 10% fix                          | A1 20% fix | A1 30% fix | A1 100% fix | A1/A2 100% fix |
| Non-functioning bridge bearing | 1st bending  | Solid, unskewed  | Frequency (Hz)  | 4.91           | 5.29                                | 5.41       | 5.50       | 5.90        | 7.83           |
|                                |              |                  | Stiffness ratio | 1.00           | 1.16                                | 1.21       | 1.26       | 1.44        | 2.55           |
|                                |              | Solid, skewed    | Frequency (Hz)  | 5.57           | 5.88                                | 5.98       | 6.08       | 6.62        | 8.60           |
|                                |              |                  | Stiffness ratio | 1.00           | 1.11                                | 1.15       | 1.19       | 1.41        | 2.38           |
|                                |              | Voided, unskewed | Frequency (Hz)  | 4.49           | 4.61                                | 4.63       | 4.69       | 4.94        | 5.91           |
|                                |              |                  | Stiffness ratio | 1.000          | 1.05                                | 1.06       | 1.09       | 1.21        | 1.73           |
|                                | 1st twisting | Solid, unskewed  | Frequency (Hz)  | 11.25          | 11.57                               | 11.62      | 11.63      | 11.72       | 13.15          |
|                                |              |                  | Stiffness ratio | 1.00           | 1.06                                | 1.07       | 1.07       | 1.08        | 1.37           |
|                                |              | Solid, skewed    | Frequency (Hz)  | 10.44          | 10.50                               | 10.50      | 10.51      | 12.51       | 14.29          |
|                                |              |                  | Stiffness ratio | 1.00           | 1.01                                | 1.01       | 1.01       | 1.44        | 1.87           |
|                                |              | Voided, unskewed | Frequency (Hz)  | 5.65           | 5.81                                | 5.82       | 5.82       | 5.99        | 6.88           |
|                                |              |                  | Stiffness ratio | 1.000          | 1.056                               | 1.06       | 1.06       | 1.12        | 1.48           |

Table 7. Regression analysis results due to damage

| Items            |                                 | Regression equation                               | R <sup>2</sup> |
|------------------|---------------------------------|---|----------------|
| Solid, unskewed  | Flexural crack at midspan       | $y = 0.9805 + 0.0310x$                            | 0.995          |
|                  | Flexural crack at inner support | $y = 0.9979 + 0.0194x$                            | 0.970          |
|                  | Damage at side face of slab     | $y = 1.0009 + 0.0115x + (5.71 \times 10^{-4})x^2$ | 0.999          |
| Solid, skewed    | Flexural crack at midspan       | $y = 0.9776 + 0.0327x$                            | 0.990          |
|                  | Flexural crack at inner support | $y = 1.3246 - 0.3227 \times 0.5879^x$             | 0.998          |
|                  | Damage at side face of slab     | $y = 1.0086 + 0.0151x$                            | 0.998          |
| Voided, unskewed | Flexural crack at midspan       | $y = 0.9875 + 0.1469x$                            | 0.998          |
|                  | Flexural crack at inner support | -   | -              |
|                  | Damage at side face of slab     | $y = 1.0 + 0.0156x + (9.55 \times 10^{-4})x^2$    | 1.000          |

\*  $y$  : displacement response ratio,  $x$  : stiffness reduction

### 3.3.2 손상이 처짐 및 모멘트 응답비에 미치는 영향

이 연구에서 고려한 4가지 손상유형이 처짐 및 모멘트의 응답비에 미치는 영향을 분석하기 위해 응답비와 강성저하율의 관계를 분석하였다. Fig. 4는 경간 중앙부 휨균열에 대한 것이며, 그림 중의 LC1 및 LC2는 각각 교량 횡단면 편측 재하 및 중앙 재하를 의미한다. 한편, 응답비 및 강성저하율은 각각 식(2) 및 식(3)과 같이 계산하였다.

$$\text{응답비} = \frac{R_{\text{damaged}}}{R_{\text{baseline}}} \quad (2)$$

$R_{\text{damaged}}$  : 손상모델의 응답(처짐 또는 모멘트)  
 $R_{\text{baseline}}$  : 기준모델의 응답(처짐 또는 모멘트)

$$\text{강성저하율(\%)} = (1 - \text{강성비}) \times 100 \quad (3)$$

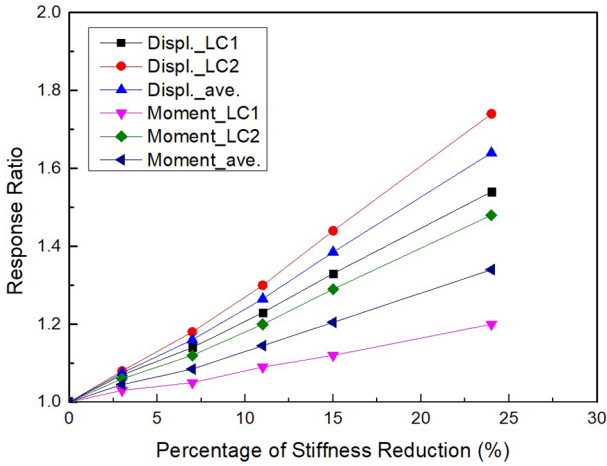


Fig. 4. Relationship between stiffness reduction and response ratio due to flexural crack at midspan.

Fig. 4에 의하면 처짐이 모멘트에 비해 손상에 따른 강성 저하에 민감하게 반응하는 것을 알 수 있다. Fig. 4의 LC1와 LC2 중에서 LC2의 영향이 크게 나타나므로 LC2의 처짐 응답비를 대상으로 강성저하율과의 상관관계를 분석하기 위해 회귀분석을 실시하였다. Table 7은 연구대상 RC 슬래브교의 손상에 따른 회귀분석결과를 보여 준다. Table 7에 나타난 최소 결정계수가 0.970이므로 모든 교량에 대해 처짐 응답비와 강성저하율은 매우 높은 상관관계가 있다는 것을 알 수 있다. 직각 슬래브교의 측면 손상의 경우는 2차 함수, 경사 슬래브교 내측 지점부 휨균열의 경우는 지수함수에 의한 회귀분석식이 적절한 것으로 나타났으나, 그 외의 경우는 모두 1차 함수로 표현되는 것을 알 수 있다. 속빈 슬래브교의 경우, 내측 지점부 휨균열에 의한 강성

저하율과 처짐 응답비의 변화가 거의 없어 분석 대상에서 제외하였다.

한편, 교량받침 기능 상실을 고려한 해석에서는 다른 손상유형과는 달리 손상정도 증가가 응답비 감소와 강성비 증가로 나타나며, 일정한 경향을 나타내지 않아 분석대상에서 제외하였다.

### 3.3.3 손상이 내하력에 미치는 영향

직각 충실 단면에 대해 경간 중앙부 휨균열을 모사한 해석의 경우, 안전율 및 안전등급을 정리한 결과는 Table 8과 같다. Table 8의 안전등급은 세부지침 해설서 교량편<sup>20)</sup>의 안전율에 따른 안전등급이다. 고정하중 및 설계활하중(충격 영향 포함)에 의한 정적 구조해석을 실시하여 극한모멘트  $M_u$ 를 산정하고, 이를 공칭모멘트  $\phi M_n$ 와 비교하여 안전율  $SF$ 를 산출하였다. 검토된 결과에 의하면 손상 증가에 의해 경간 중앙부 및 내측 지점부의 안전율은 감소하지만, 그 정도가 미미하였다. 다른 손상유형의 경우도 경간 중앙부 휨균열과 유사한 경향을 나타내었다.

### 3.3.4 손상이 충격계수에 미치는 영향

직각 충실 RC 슬래브교에 대해 경간 중앙부 휨균열을 고려한 동적 구조해석을 실시하였으며, 이로부터 얻어진 처짐 시간이력곡선의 일례를 Fig. 5에 비교하여 나타내었다. 손상정도가 커질수록 최대 처짐이 증가하는 것을 알 수 있으며, 이러한 이력곡선으로부터 주행 속도별 최댓값을 정리하여 식(4)에 따라 충격계수를 산정한 결과는 Table 9와 같다. Table 9에 의하면 손상에 따른 충격계수는 미미하게 증가하는 것으로 나타났다.

Table 8. Ultimate moment, nominal moment and safety factor due to flexural crack at midspan

| Items         | Baseline model      | Section height of damaged model |         |         |         |         |         |
|---------------|---------------------|---------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
|               |                     | 0.95H                           | 0.90H   | 0.85H   | 0.80H   | 0.70H   |         |
| Midspan       | $M_D$ (kN · m)      | 328.2                           | 328.2   | 328.2   | 328.2   | 328.2   | 328.2   |
|               | $M_{L+i}$ (kN · m)  | 278.6                           | 279.9   | 281.4   | 283.1   | 285.1   | 290.3   |
|               | $M_u$ (kN · m)      | 1025.6                          | 1028.3  | 1031.5  | 1035.3  | 1039.7  | 1050.8  |
|               | $\phi M_n$ (kN · m) | 1232.2                          | 1232.2  | 1232.2  | 1232.2  | 1232.2  | 1232.2  |
|               | Safety factor, $SF$ | 1.201                           | 1.198   | 1.195   | 1.190   | 1.185   | 1.173   |
|               | Safety grade        | A                               | A       | A       | A       | A       | A       |
| Inner support | $M_D$ (kN · m)      | -780.5                          | -780.5  | -780.5  | -780.5  | -780.5  | -780.5  |
|               | $M_{L+i}$ (kN · m)  | -256.7                          | -260.7  | -266.7  | -273.7  | -282.1  | -304.8  |
|               | $M_u$ (kN · m)      | -1566.6                         | -1575.2 | -1588.0 | -1603.0 | -1621.1 | -1669.9 |
|               | $\phi M_n$ (kN · m) | -1756.4                         | -1756.4 | -1756.4 | -1756.4 | -1756.4 | -1756.4 |
|               | Safety factor, $SF$ | 1.121                           | 1.115   | 1.106   | 1.096   | 1.083   | 1.052   |
|               | Safety grade        | A                               | A       | A       | A       | A       | A       |

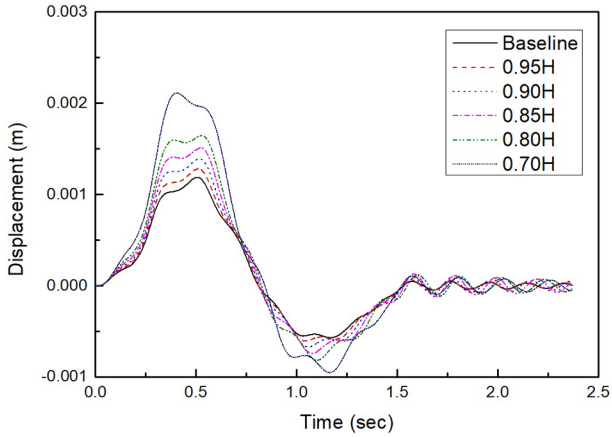


Fig. 5. Dynamic analysis result due to flexural crack at midspan ( $V=80$  km/h).

문헌<sup>17,21,22)</sup>에 의하면 충격계수는 교량의 손상보다는 포장 요철(노면조도)의 영향을 크게 받는 것으로 알려져 있다.

$$\text{충격계수} = \frac{\delta_{dynamic} - \delta_{static}}{\delta_{static}} \quad (4)$$

$\delta_{dynamic}$  : 동적 최대 처짐

$\delta_{static}$  : 정적 최대 처짐

#### 4. RC 슬래브교의 손상도 평가 프로세스

교량구조물은 손상이 진행되면 손상의 증가와 함께 응답이 증가하고 강성은 감소하는 것이 일반적이다. 앞서 손상을 인위적으로 모사하여 실시한 구조해석결과에 의하면 RC 슬래브교에서의 손상은 단면력 보다 처짐과의 상관성이 높고, 처짐 응답비와 강성저하율은 대체로 선형적인 관계를 가짐을 알 수 있었다. 따라서, 이 논문에서는 처짐과 고유진동수 자료를 이용하여 RC 슬래브교의 강성저하율을 추정하는 손상도 평가 프로세스를 다음과 같이 제안한다. 제안된 프로세스는 대상 교량의 내하력 등을 정량화하여 상태를 평가하는 것이 아니고, 처짐 및 고유진동수에 관한 응답비를 이용하여 노후 정도를 평가하는 방법이다. 그렇기 때문에 Fig. 6의 실선과 같이 손상 종류와 정도를 반영하여 구조해석을 수행하였으며, 이에 따른 응답비 변화를 작성하였다. 실제 현장에서는 차량통제 없이 의사정적 시험을 통해 처짐과 고유진동수를 실측하는 것을 권장하며, 본 방법이 어려울 경우 승용차로 에스코트한 시험차량을 주행시키는 방법을 통해 구한 동적응답을 필터링하여 충격효과와 배제된 정적처짐 성분을 산출할 수 있다.

Table 9. Variation of Impact factor due to flexural crack at midspan

| Items                   |    | Baseline model | Section height of damaged model |       |       |       |       |
|-------------------------|----|----------------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                         |    |                | 0.95H                           | 0.90H | 0.85H | 0.80H | 0.70H |
| Running velocity (km/h) | 40 | 0.015          | 0.015                           | 0.013 | 0.009 | 0.002 | 0.013 |
|                         | 50 | 0.013          | 0.015                           | 0.016 | 0.014 | 0.007 | 0.024 |
|                         | 60 | 0.011          | 0.019                           | 0.029 | 0.043 | 0.055 | 0.074 |
|                         | 70 | 0.054          | 0.060                           | 0.065 | 0.067 | 0.063 | 0.034 |
|                         | 80 | 0.050          | 0.046                           | 0.037 | 0.024 | 0.004 | 0.022 |
| Maximum impact factor   |    | 0.054          | 0.060                           | 0.065 | 0.067 | 0.063 | 0.074 |

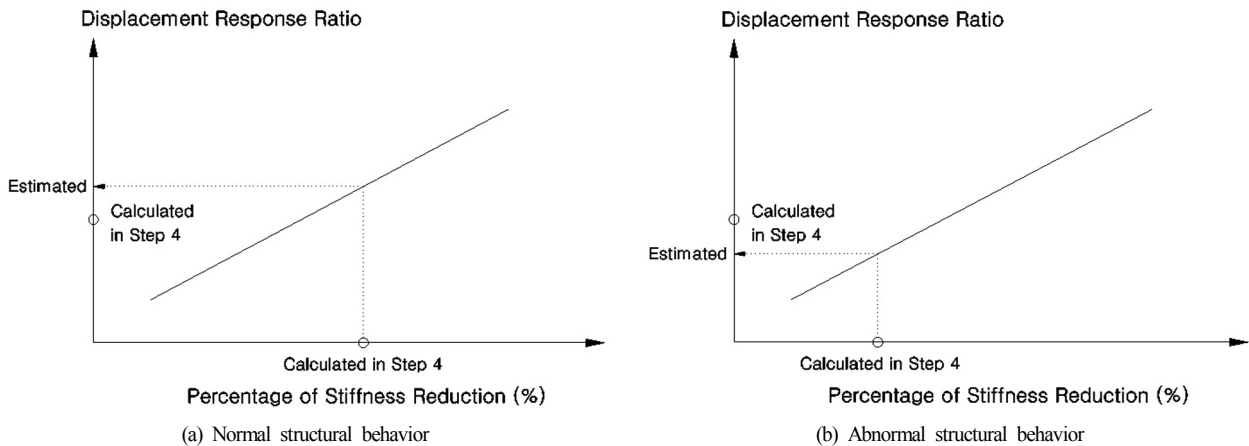


Fig. 6. Damage assessment concept of RC slab bridge using relationship between displacement response ratio and stiffness reduction.



- 1단계 : 준공도면 기반 처짐 및 고유진동수 계산
- 2단계 : 현장실험에 의해 처짐 및 고유진동수 측정
- 3단계 : 외관상태로부터 손상유형을 특정하고, 구조 해석에 의해 처짐 응답비와 강성저하율의 관계 작성(Fig. 6)
- 4단계 : 해석 및 현장실험결과를 이용하여 처짐 응답비 및 강성저하율 계산
- 5단계 : 4단계의 계산 강성저하율을 이용하여 Fig. 6(3단계에서 작성)에서 처짐 응답비 추정
- 6단계 : 5단계의 추정 처짐 응답비와 4단계의 계산 처짐 응답비 비교
- 7단계 : 5단계의 추정 응답비가 4단계의 계산 응답비보다 큰 경우(Fig. 6(a) 참조)에는 대상교량이 정상적으로 거동하는 것으로 간주할 수 있고, 작은 경우(Fig. 6(b) 참조)에는 손상이 진행된 상태이므로 정밀안전진단 또는 보수·보강이 필요한 교량으로 판단

한편, 7단계에서 비록 대상교량이 정상적으로 거동한다고 판단된 경우에도 강성저하율이 큰 경우에는 정밀안전진단 또는 보수·보강이 필요한 교량으로 평가할 수도 있다. 그리고 손상된 교량의 측정 고유진동수가 준공도면에 근거하여 계산된 고유진동수보다 큰 경우에는 강성저하율이 음(마이너스)의 값이 된다. 이 경우에는 교량받침 본체와 주변 받침 콘크리트의 상태를 확인하거나, 구조해석모델을 개선하여 고유진동수를 재계산하는 과정이 필요하다.

### 5. 결론

국내 건설실적이 가장 많은 RC 슬래브교의 손상유형 및 구조적 특성 등을 고려하여 구조해석을 수행하였으며, 이로부터 얻어진 결과 요약은 다음과 같다.

(1) RC 슬래브교 구체에 발생된 손상은 교량의 응답을 증가시키고, 고유진동수를 감소시킨다. 그러나 경계조건 변화를 수반하는 교량받침 기능 상실은 반대의 경향을 나타낼 뿐만 아니라 응답 변동범위가 다른 손상유형들에 비해 크게 나타나는 것으로 평가되었다. 따라서 RC 슬래브교의 손상도 평가를 위한 외관조사단계에서 교량받침의 상태를 면밀히 관찰할 필요가 있다.

(2) RC 슬래브교의 손상은, 모멘트에 비해 처짐에 민감하게 반응하며, 처짐 응답비는 대체로 강성저하율과 선형적인 관계를 갖는다.

(3) RC 슬래브교의 손상유형을 고려한 구조해석 결

과에 기초하여 단일 손상에 대한 처짐 응답비와 강성저하율의 관계로부터 손상도를 추정할 수 있는 손상도 평가 프로세스를 제안하였다.

(4) 이 논문에서 제안된 손상도 평가 프로세스는 정기점검에서 D 또는 E등급으로 평가된 제3종 RC 슬래브교의 수치적 계측관리 또는 준공 후 3년이 경과하였으나 그 동안 전혀 점검이 이루어지지 않아 안전성 확인이 필요하다고 판단되는 종 외 RC 슬래브교의 정량적 안전성 평가에 활용될 수 있으며, 또한, 중소규모 교량의 정기점검 주기 개선을 통한 예산 절감에도 기여할 수 있다고 판단된다.

**Acknowledgement:** This research was supported by Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology Project Research Fund, 2021(Project Number 20210143-001).

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업(과제번호 20210143-001)의 연구비를 지원받아 수행되었습니다.

### References

- 1) Ministry of Land, Infrastructure and Transport, “Yearbook of Road Bridge and Tunnel Statistics”, 2020.
- 2) K. H. Park, J. W. Sun, H. Lee and H. K. Hwang, “Study on Reconstruction and Deterioration of RC Slab Bridges”, Autumn Conference of Korea Concrete Institute, pp. 693-694, 2018.
- 3) K. H. Park, J. W. Sun, H. Lee and H. K. Hwang, “A Basic Study on Lifetime Estimation of RC Bridges”, Autumn Conference of Korea Concrete Institute, pp. 413-414, 2018.
- 4) Ministry of Land, Infrastructure and Transport, “Special Act on the Safety Control and Maintenance of Establishments”, 2018.
- 5) Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology and Construction Technology Consultant, “Structural Analysis Simulation for Damage Assessment on RC Slab Bridges and Wireless Measurement Technical Survey”, 2020.
- 6) Korea Long Life Bridge Center and Construction Technology Consultant, “A Study on the Evaluation of Performance and Repair/Reinforcement of Small and Medium-sized Deteriorated Bridges based on Experimental Verification”, 2019.
- 7) B. H. Oh, H. S. Shin, H. M. Kang, Y. U. Kim and D. W. Yoo, “Failure Test of Reinforced Concrete Slab Bridge”,

- Proceedings of Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 1998.
- 8) Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation, "Improvement of Precise Safety Assessment and Allowable Load-carrying Capacity Rating Method on Bridge", Ministry of Construction and Transportation, 1997.
  - 9) Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation, "Improvement of Precise Safety Assessment and Allowable Load-carrying Capacity Rating Method on Bridge(Ⅱ)", Ministry of Construction and Transportation, 1999.
  - 10) Y. Chiba, H. Onishi, S. Iwasaki and K. Sasaki, "A Study of Bearing Behavior of the Existing Small-scale Bridges by Static Loading Test", Proceedings of Constructional Steel, Vol. 25, pp. 551-558, 2017.
  - 11) K. Honjo, Y. Uehigashi and T. Maruya, "Detailed Investigation of Girder End of RC Voids Slab Bridge", 58th Proceedings of Japan Society of Civil Engineers, pp. 185-186, 2013.
  - 12) Korea Road Association, "Highway Bridge Design Specifications", 2000.
  - 13) Ministry of Construction, "Highway Bridge Design Standard Specifications", 1977.
  - 14) BNT Engineering, "Precise Safety Assessment Report on Hwa-San Bridge and Dae-Hwang Bridge on National Road No. 1", Suwon Regional Road Maintenance and Construction Office, 1998.
  - 15) A. Ogawa et al., "Strength Evaluation of a Reinforced Concrete Hollow Slab Bridge by Field Loading Test", Bridge and Foundation Engineering, 1999.
  - 16) Korea Expressway Corporation(Expressway & Transportation Research Institute) and Construction Technology Consultant, "Optimization of Bridge Inspection based on Reliability", 2013.
  - 17) D. I. Chang and H. H. Lee, "Impact Factors for Simple Span Highway Girder Bridges", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 120, No. 3, pp. 704-715, 1994.
  - 18) H. H. Lee, J. C. Jeon and K. S. Kyung, "Determination of a Reasonable Impact Factor for Fatigue Investigation of Simple Steel Plate Girder Railway Bridges", Engineering Structures, Elsevier, Vol. 36, pp. 316-324, 2012.
  - 19) J. C. Jeon and H. H. Lee, "Development of Displacement Estimation Method of Girder Bridge using Measured Strain Signal induced by Vehicular Load", Engineering Structures, Vol. 186, pp. 203-215, 2019.
  - 20) Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation, "Specific Guidelines on the Safety Control and Maintenance of Establishments (Inspection/Diagnosis, Bridge)", 2019.
  - 21) H. H. Lee, J. C. Jeon, K. S. Kyung and T. Mori, "Influence of Moving Vehicle on Fatigue of Steel Girder Bridge", International Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol. 6, No. 4, pp. 269-278, 2006.
  - 22) H. H. Lee, J. C. Jeon and K. S. Kyung, "Suggestion of Impact Factor for Fatigue Design of Steel Girder Bridge", Journal of Korean Society of Civil Engineers, Vol. 27, No. 6A, pp. 777-788, 2007.