

RC 슬래브교의 신축이음 손상과 바닥판 응답과의 상관관계 분석

정현진¹, 안효준², 박기태³, 정규산⁴, 김유희⁵, 이종한^{6*}

Correlation Analysis between Damage of Expansion Joints and Response of Deck in RC Slab Bridges

Hyun-Jin Jung¹, Hyo-Joon An², Ki-Tae Park³, Kyu-San Jung⁴, Yu-Hee Kim⁵, Jong-Han Lee^{6*}

Abstract: RC slab bridges account for the largest portion of deteriorated bridges in Korea. However, most RC slabs are not included in the first and second classes of bridges, which are subject to bridge safety management and maintenance. The highest damaged components in highway bridges are the subsidiary facilities including expansion joints and bearings. In particular, leakage through expansion joints causes deterioration and cracks of concrete and exposure of reinforced bars. Therefore, this study analyzed the effect of adhesion damage at expansion joints on the response of the deck in RC slab bridges. When the spacing between the expansion joints at both ends was closely adhered, cracks occurred in the concrete at both ends of the deck due to the resistance rigidity at the expansion joints. Based on the response results, the correlation analysis between displacements in the longitudinal direction of the expansion joint and concrete stress at both ends of the deck for each damage scenario was performed to investigate the effect of the occurrence of damage on the bridge behavior. When expansion joint devices at both sides were damaged, the correlation between displacement and stress showed a low correlation of 0.18 when the vehicles proceeded along all the lanes. Compared with those in the intact state, the deflections of the deck in the damaged case at both sides showed a low correlation of 0.34 to 0.53 while the vehicle passed and 0.17 to 0.43 after the vehicle passed. This means that the occurrence of cracks in the ends of concrete changed the behavior of the deck. Therefore, data-derived damage detection could be developed to manage the damage to expansion joints that cause damage and deterioration of the deck.

Keywords: RC slab bridge, Expansion joint, Bridge bearing, Deck, Correlation analysis

1. 서 론

우리나라는 2020년 도로 교량 및 현황조사(MOLIT, 2020)에 따르면 2019년 12월 기준 약 4,500개소의 교량이 공용연수가 30년이 넘은 노후교량이다. 10년 뒤에는 14,000개 이상, 20년 뒤에는 27,000개 이상으로 교량이 급격하게 노후화 될 것으로 예상된다. 국내 교량 총 35,902개소 중 실증교량으로 상부구조를 형식별로 구분하였을 때, RC 슬래브교, 라멘교, PSC-I교가 전체의 70% 이상을 차지한다. 이 중 30년을 초과한 교량은 RC 슬래브, PSC-I, 라멘교 순으로 나타났다(Kim et al., 2021).

교량의 안전관리 및 유지관리는 주로 1, 2종 교량에서 이루어지고 있다.

그러나 최근 교량의 안전사고 발생은 공용연수가 30년 이상의 3종 교량이 다수를 차지한다. 특히 RC 슬래브 교량은 특성상 1, 2종 교량에 포함되지 않은 교량이 많아 안전 관리가 잘 이루어지지 않은 실정이다. 따라서 노후화가 빠르게 진행되고 있는 상황에서 노후화된 RC 슬래브 교량의 안전성을 평가하고 확보할 수 있는 방안이 필요하다.

고속도로 교량에서 손상 발생비율은 상부구조가 86%로 하부구조보다 높은 손상 발생비율을 갖는다. 특히 상부구조 중 신축이음, 교면 포장, 받침 등 교량의 부속시설의 손상 발생이 약 73%로 주부재보다 높다(Kim et al., 2021). 한국도로공사 자료(KEC, 2013)에 따르면 1997~2011년 교량 구조물의 상태 등급 D와 E급의 부재현황을 분석한 결과, 신축이음부 손상이 가장 빈번히 발생되었고, 교면포장, 배수시설, 받침부 등이 뒤를 잇는다. 또한 한국도로공사 도로교통연구원(KEC, 2013; KEC, 2015)에 따르면 고속도로 교량의 대표적인 열화 원인은 신축이음부, 교대 지점부 등을 통한 누수이다. 특히 신축이음부는 손상이 빈번하고, 그 정도가 심각하며, 신축이음 자체 손상에 그치지 않고 구조물 전체의 열화 원인으로 작용된다. 또한 콘크리트 교량의 경우 백태, 균열 및 탈락, 철근부 노출 등

¹학생회원, 인하대학교 토목공학과 석사과정

²학생회원, 인하대학교 토목공학과 박사과정

³정회원, 한국건설기술연구원 노후인프라센터 선임연구위원, 공학박사

⁴정회원, 한국건설기술연구원 노후인프라센터 수석연구위원

⁵정회원, 한국건설기술연구원 노후인프라센터 박사후연구위원

⁶정회원, 인하대학교 토목공학과 부교수, 교신저자

*Corresponding author: jh.lee@inha.ac.kr

Department of Civil Engineering, Inha University, Incheon 22212, Rep. of Korea

•본 논문에 대한 토의를 2022년 1월 31일까지 학회로 보내주시면 2022년 2월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

의 열화도 주로 발생하였다.

따라서 본 연구에서는 RC 슬래브 교량의 신축이음부 유간 밀착으로 인한 손상을 모사하여 바닥판에 미치는 영향을 분석하였다. 대상 구조물은 국토교통부 통계자료(MOLIT, 2020)와 설계 도면을 참고하여 정의하였고, 구조물에 작용하는 설계하중은 신축이음의 유간거리와 밀접한 관련이 있는 온도변화와 차량하중으로 정의하였다(Ding, 2011; Miao, 2013). 유간이 밀착되면 바닥판의 신축 거동이 불가능해지고 그에 따라 후타재 파손 및 바닥판 콘크리트부의 균열 등이 발생할 것으로 예상된다. 위치 별 신축이음부 손상시나리오 정의를 통해 바닥판의 시간이력해석을 수행하였으며, 그 때의 응답값과 상관관계를 분석하였다.

2. 해석모델 구축

2.1 RC 슬래브 교량 선정 및 수치해석 모델

도로 교량 및 터널 현황조사(MOLIT, 2020)의 통계 분석 결과 2019년 12월 기준 우리나라 교량 중 가장 높은 비율을 차지하는 교량은 RC 슬래브 교량으로 전체 35,902개 중 24.2%에 해당한다. Park 등(2018) 연구에 따르면 공용연수가 20년 이상인 RC 슬래브 교량은 6,354개소로, 노후화가 상당히 진행되고 있음을 알 수 있다. 따라서 노후화된 RC 슬래브 교량의 안전성을 파악할 수 있는 방안이 필요하다.

RC 슬래브 대상 교량은 국토교통부 자료(MOLIT, 2020)를 참고하여 통계 분석한 결과 최빈값인 경간 길이 15m, 폭 12m, 두께 0.8m로 선정하였다.

Fig. 1은 대상 교량을 보여주며, 철근은 도면을 참고하여 설계하였다.

수치해석은 Python 언어 기반의 OpenSees 프로그램을 사용하여 수행하였다. 신축이음이 위치하고 있는 바닥판 양 끝단은 세밀한 요소로 모형화하여 유간밀착에 의한 손상이 바닥판에 미치는 영향을 정확히 분석하고자 하였다. 대상 교량

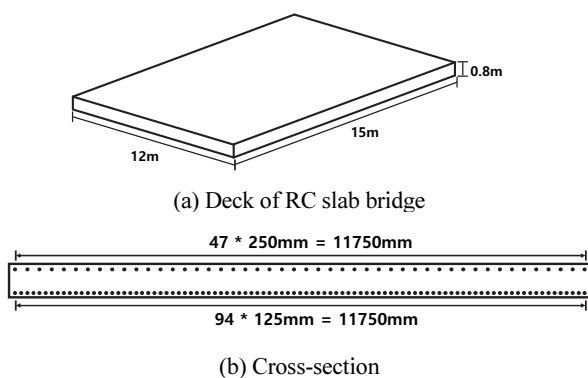


Fig. 1 Target RC Slab Bridge

의 바닥판은 쉘 요소로 모형화하였으며, 철근콘크리트 단면은 총 5개의 층으로 구성하였다. 각 층의 두께는 철근의 단면적과 개수, 콘크리트 두께를 고려하여 정의하였다. 바닥판의 상세 모델링은 Fig. 2와 같다.

철근콘크리트 바닥판의 손상 메커니즘은 콘크리트의 압축과 인장의 응력, 변형을 관계로 정의하였다. 철근은 항복강도와 탄성계수를 완전 탄소성(Elastic-perfectly plastic)으로 정의하였다.

2.2 신축이음 및 교량받침 설계

교량의 신축이음장치와 받침은 교량의 주요한 부재로써 바닥판에 발생하는 하중 및 변형을 안전하게 수용 및 전달하는 역할을 한다. 이중 신축이음장치는 온도변화에 의한 신축, 콘크리트 재령에 따른 건조수축과 크리프, 활하중에 의한 상부구조의 변위와 변형을 원활하게 함으로써 2차 응력의 발생을 최소화해준다(Cho et al., 2008).

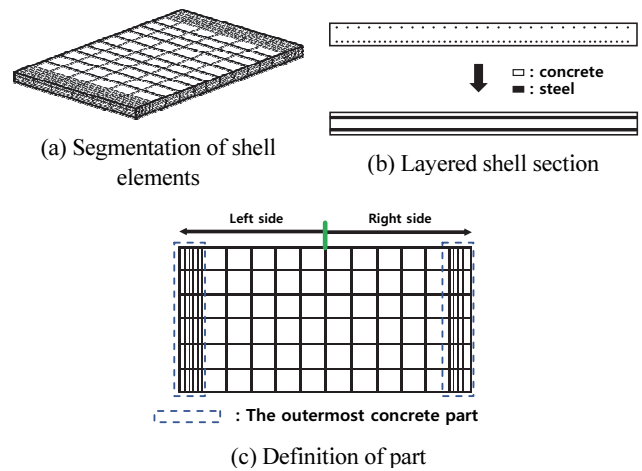


Fig. 2 Numerical analysis modeling

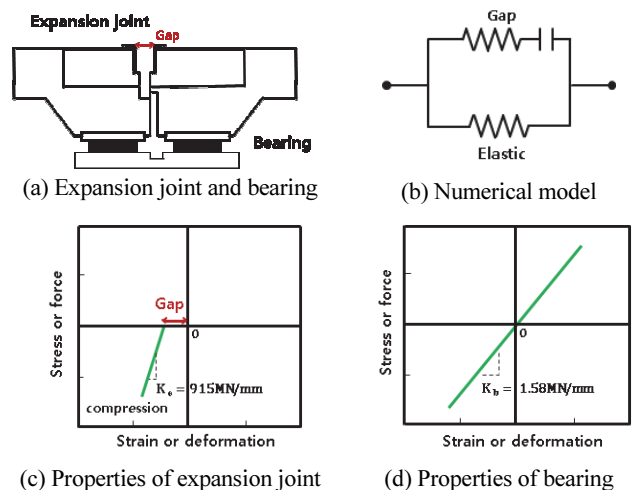


Fig. 3 Numerical model of expansion joint and bearing

신축이음장치는 Fig. 3(a)에 보인 바와 같이 변위와 변형의 원활한 수용을 위해 유간거리를 갖고 있다. 교량 받침은 상부 구조와 하부구조 사이에서 수직방향과 교축방향 및 교축직각 방향의 힘을 안전하게 전달해준다. Fig. 3(b)-3(d)는 신축이음 장치와 교량 받침의 수치해석 모델을 보여준다.

신축이음장치는 설계 신축량을 고려하여 양단에 Gap 요소로 유간거리를 정의하였다. 설계 신축량 이상의 변형 또는 밀착 손상이 발생한 경우는 신축에 저항하게 된다. 신축이음 장치의 저항 강성은 이웃하는 바닥판의 유효 단면적에 의한 축강성으로 정의하였다. 교량받침의 전단강성과 압축강성은 바닥판의 상재하중에 맞는 제원을 사용하였다.

3. 설계하중 및 손상시나리오 정의

3.1 온도하중

Ding (2011) & Miao (2013) 연구에 따르면 온도변화와 차량하중이 신축이음의 변위와 가장 밀접한 관계를 갖는다. 따라서 본 논문에서는 온도하중과 차량하중을 선정한 후 손상시나리오를 모사해 그에 따른 전체 구조물의 거동을 분석하였다.

온도하중은 온도변화에 의해 발생하는 변위를 고려하여 정의하였다. 온도변화가 발생할 때 생기는 구조물의 변위는 식 (1)과 같다.

$$\Delta L = \alpha \cdot (\Delta T) \cdot L \quad (1)$$

여기서, ΔL 는 온도변화로 인한 길이 변화량(mm), α 는 열팽창계수(COT, Coefficient of thermal expansion, / $^{\circ}\text{C}$), ΔT 는 온도변화($^{\circ}\text{C}$), L 은 부재 길이(mm)이다. 온도변화는 Table 1에 보인 바와 같이 설계 신축량 산정시 고려하는 최대 온도 변화인 40°C 를 적용하였다. 경간 길이 15m를 고려하였을 때

바닥판 정중앙을 기준으로 좌측과 우측으로 각각 3mm씩 총 6mm의 변위가 발생한다.

3.2 차량하중

국토교통부 자료(MOLIT, 2020)에 따르면 도로 교량의 설계하중은 DB-24가 약 84%로 가장 높은 비율을 차지한다. RC

Table 1 Range of temperature change and coefficient of thermal expansion (MOLIT, 2016)

Bridge type	Range of temperature ($^{\circ}\text{C}$)		COT (α)
	Normal area	Cold area	
RC, PSC bridge	-5 ~ +35	-15 ~ +35	1.0×10^{-5}
Steel bridge	Upper route bridge	-10 ~ +40	1.2×10^{-5}
	Lower route bridge	-10 ~ +50	1.2×10^{-5}

슬래브. 교량에서도 DB-24 설계하중이 가장 높은 비중을 차지하고 있다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 4에 보인 바와 같이 설계 차량하중 DB-24를 사용하였다. 차량 진행에 따른 동적 해석을 실시하였으며, 바닥판을 60km/h의 속도로 지나가는 것으로 가정하였다. 바닥판 폭은 12m로 총 3차선이다. 따라서 차량하중은 각 차선을 차량 한 대가 지나는 3가지 경우, 차량 2대가 두 차선을 동시에 지나는 3가지 경우, 차량 3대가 모든 차선에 재하되어 동시에 지나는 1가지 경우로 총 7가지의 경우를 고려하였다.

3.3 손상시나리오

본 연구에서는 신축이음의 손상 유무를 유간 밀착 여부로 정의하여 바닥판에 미치는 영향을 분석하였다. 유간 밀착에 의한 신축이음부 손상은 Fig. 5와 같이 모형화하였다. 손상시나리오는 신축이음장치 유간밀착이 발생한 위치에 따라 Table 2과 같이 정의하였다. 양쪽 신축이음 유간이 정상적으로 가동하는 경우는 Undamaged, 양쪽 유간이 모두 밀착되어 있는 상태는 Damaged-A, 좌측의 유간만이 밀착된 경우는

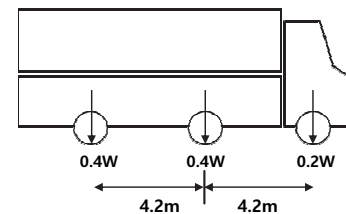
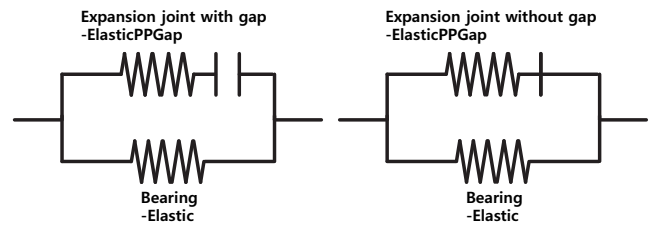


Fig. 4 Load and size of DB-24 (MOLIT, 2020)



(a) Undamaged case (b) Damaged case

Fig. 5 Damage types of expansion joint

Table 2 Damage scenarios

Damage type	Expansion joint	
	Left	Right
Undamaged	Intact	Intact
Damaged-A	Contact	Contact
Damaged-B	Contact	Intact
Damaged-C	Intact	Contact

Damaged-B라고 정의하였다. Damaged-C은 Damaged-B와는 반대로 우측 유간이 밀착되어 있고 좌측 유간은 변위를 수용할 수 있는 상태이다. Damaged-B와 Damaged-C은 유사한 거동을 보일 것으로 예상되지만 차량이 좌측에서 우측 방향으로 진행하기 때문에 차량 방향에 의한 영향을 분석하였다.

4. 손상시나리오별 바닥판 응답 분석

4.1 손상시나리오별 변위 응답

온도변화에 의한 하중을 고려하여 해석을 수행한 후 차량 하중에 의한 동적해석을 실시했다. 차량하중은 약 1.5초 동안 대상 교량에 이동되면서 재하되었다. 이후 10초 동안 추가 해석을 진행하여 차량이 지나간 후의 거동도 함께 분석하였다.

차량의 수와 차선 위치에 따른 신축이음부 교축방향 변위는 손상시나리오 별 비슷한 거동을 보였다. 신축이음부 손상이 발생하지 않은 위치의 교축방향 변위는 온도하중에 의해 신축변위가 지배적으로 발생되고 차량 조건과 상관없이 차량이 지나는 동안 거의 동일한 속도로 감소하였다. 바닥판을 빠져나간 후에는 차량의 수가 많을수록 교축방향 변위가 다소 빠르게 감소하였다. 손상이 발생한 위치에서의 교축방향 변위는 온도하중과 차량 조건에 의한 변화가 거의 발생하지 않았다. 따라서 변화가 가장 두드러지는 차량이 모든 차선을 동시에 지날 때의 시간이력해석을 정리하였다.

Fig. 6은 손상시나리오별 차량하중이 모든 차선을 동시에 지날 때 신축이음부 교축 변위를 보여준다. 교축 방향 변위는 바닥판 양쪽 끝단에서의 평균 변위로 나타내었다. 교축방향 변위는 온도하중에 지배적이고, 차량 하중에 의한 영향은 매우 미미하였다. 무손상 상태일 때의 신축이음부는 Fig. 6(a)에 나타낸 바와 같이, 온도하중의 영향으로 양쪽으로 약 3mm 씩 변위가 발생한 후 시간이 지남에 따라 점차 감소하였다. 양측 유간이 밀착된 Damaged-A은 Fig. 6(b)와 같이 온도하중과 차량하중에 의해 좌측과 우측 신축이음부 모두에서 변위가 거의 발생하지 않았다. 손상이 한쪽에만 발생한 Damaged-B, Damaged-C는 유간이 밀착된 신축이음부에서는 온도하중 및 차량하중에 의해 변위가 거의 발생하지 않았다. 반면, 손상이 발생하지 않은 곳은 약 2.8mm의 변위가 온도하중에 의해 발생한 후 시간이 경과함에 따라 점점 감소하였다.

신축이음부의 교축방향 변위와 함께, 온도하중과 차량하중 작용에 의해 발생한 길이 방향의 L/4 지점, L/2 지점, 3L/4 지점의 최대 처짐을 분석하였다. Table 3에 나타낸 바와 같이, 처짐은 교축방향의 변위와 다르게 차량하중에 의해 지배적이었다.

L/4지점에서 3L/4 지점으로 갈수록 처짐은 크게 발생하며, 신축이음에 손상이 발생하지 않을수록 더 큰 처짐을 보인다.

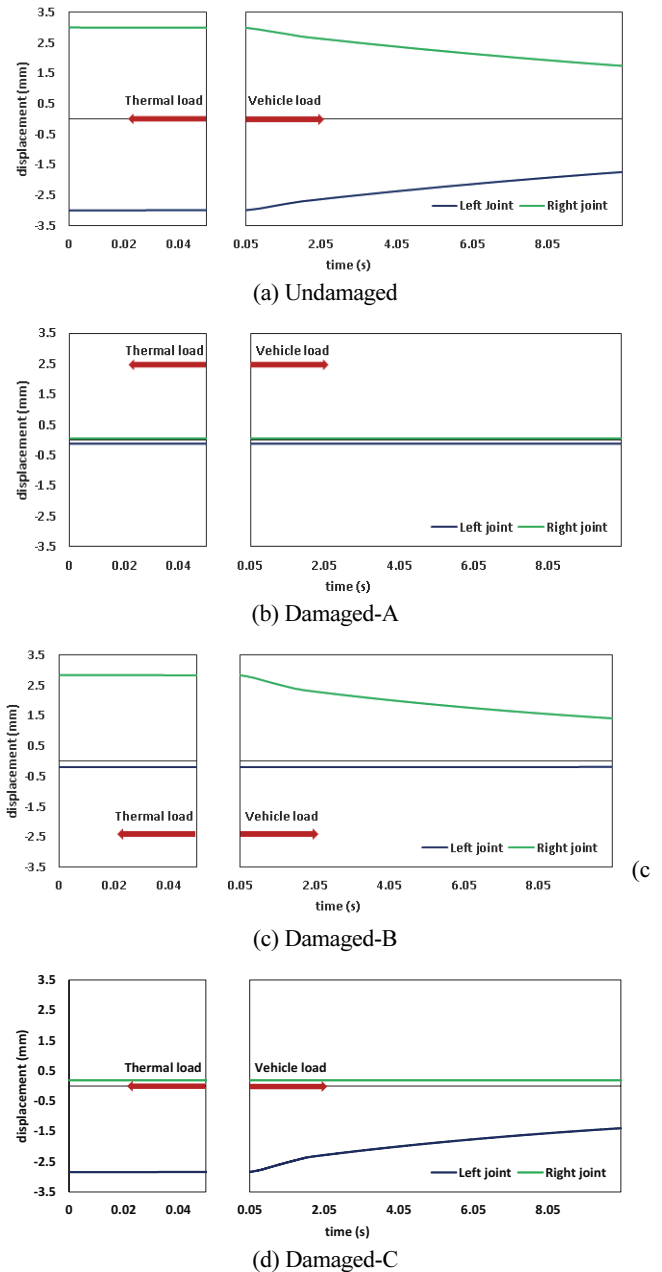


Fig. 6 Time history of average horizontal displacement on the edge of the deck

Table 3 Maximum deflection for each damage scenarios (units: mm)

Scenarios	L/4	2L/4	3L/4
Undamaged	0.06	0.46	1.16
Damaged-A	0.05	0.27	0.39
Damaged-B	0.06	0.43	1.06
Damaged-C	0.06	0.44	0.78

최대 처짐은 모든 손상시나리오에서 3L/4 지점에 발생하였다. 손상이 발생하지 않은 Undamaged의 경우 3L/4 지점에서

약 1.16mm의 가장 큰 처짐이 발생하였다. 반면, 신축이음 양면의 유간이 밀착된 Damaged-A는 3L/4지점에서 약 0.39mm로 정상 거동을 할 때보다 약 1/3배 작은 처짐이 발생하였다.

Fig. 7은 각 손상시나리오에서 처짐이 가장 크게 발생하는 3L/4 지점의 처짐과 신축이음부의 교축방향 변위의 관계를 보여준다. 신축이음의 좌측 유간거리가 확보된 Undamaged와 Damaged-C은 Fig. 7(a)에 보인 바와 같이 온도 및 차량하중에 의해 발생한 바닥판의 교축방향 변위가 시간이 지남에 따라 감소한다. 따라서 바닥판에 발생한 처짐을 원활하게 수용하며 원래의 상태로 돌아가는 것을 확인할 수 있다. 반면, 좌측 유간을 확보하지 못한 Damaged-A와 Damaged-B는 온도하중에 의한 교축방향의 변위가 회복되지 않고 바닥판의 처짐이 발생하였다. 우측 신축이음 장치의 손상인 경우에도 Fig. 7(b)에 보인 바와 같이 교축방향 변위와 바닥판 처짐의 관계가 좌측 손상과 유사하게 나타났다.

따라서 신축이음은 유간거리를 통해 상부구조의 변위를 원활하게 발생시켜 2차 응력의 발생을 최소화하는 것으로 판단된다. 반면, 신축이음부의 적정한 유간거리를 확보하지 못한 경우는 지속적인 온도변화와 차량하중에 의해 2차 응력에 의한 피해가 발생할 확률이 높을 것으로 보인다.

4.2 손상시나리오별 응력 응답

차량의 수와 차선 위치에 따른 손상시나리오 별 바닥판 응력을 비교 분석하였다. 바닥판에 인장과 압축응력이 모두 발생하지만, 압축응력의 경우 파괴 응력에 미치지 못하므로 본 논문에서는 인장응력만 정리하였다. 무손상인 Undamaged와 일면손상이 발생한 Damaged-B, Damaged-C는 바닥판 전체에서 차량 조건과 상관없이 유사한 거동을 보였다. 반면 양면 손상이 발생한 Damaged-A는 차량의 수가 많을수록 신축이음부와 밀접해 있는 바닥판 단부에서 응력이 증가하는 것을 확인하였다. 단부 콘크리트부를 제외한 바닥판 응력의 거동은 차량 조건의 영향을 거의 받지 않았다. 따라서 차량이 모든 차선을 동시에 지날 때의 시간이력해석을 분석하였다.

Fig. 8은 바닥판 양쪽 단부 콘크리트부의 평균 응력을 보여준다. Undamaged는 Fig. 8(a), (b)와 같이 바닥판 양쪽 단부에서 온도하중과 차량하중에 의해 응력이 발생되지 않았다. 이는 신축이음이 유간을 확보하고 있기 때문이다. 양쪽 신축이음에 손상이 발생한 Damaged-A는 신축이음의 양 끝단에서 온도하중에 의해 평균적으로 약 3.2 ~ 3.4MPa의 인장응력이 발생하였다. 차량하중이 지나가면서 응력은 점점 증가되어 바닥판의 균열이 확산되고 발생된 응력은 회복되지 않았다.

한쪽 유간만 밀착된 Damaged-B, Damaged-C은 유간이 밀착된 부분의 좌측과 우측 모두에서 온도하중으로 인해 약 0.30MPa의 응력이 발생하였고, 차량이 빠져나간 후 응력이

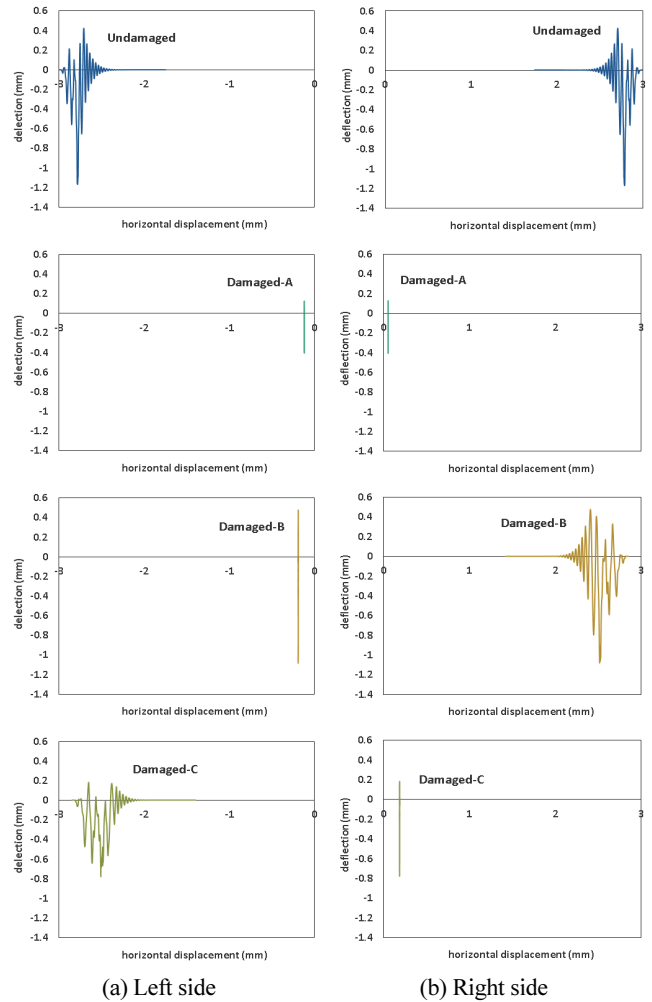


Fig. 7 Displacement of expansion joint and deflection of deck

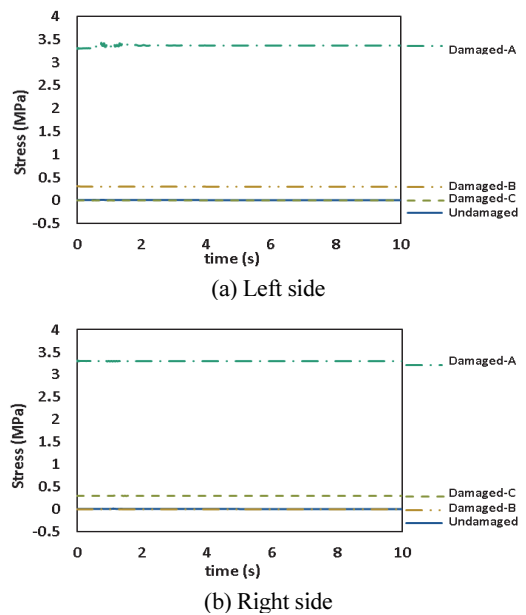


Fig. 8 Time history of average stress on the edge of the deck

점차 회복되었다. 신축이음의 유간이 밀착되지 않은 부분의 단부는 무손상일 때와 마찬가지로 0에 가까운 응력이 발생하였다.

신축이음 장치의 유간 밀착은 바닥판 단부의 응력과 밀접한 관계가 있다. 따라서 유간 밀착에 의해 신축이음부가 손상될 시 온도 및 차량하중과 같은 반복적인 하중에 의해 발생하는 구조물의 응답이 원상태로 회복되지 못하고 누적되어 콘크리트부의 균열 또는 박리, 박락의 발생과 확산이 예상된다.

Fig. 9은 손상시나리오 별 차량하중이 모든 차선을 동시에 지나는 경우의 바닥판의 최대응력분포 히트맵을 보여준다. 히트맵의 색은 균열 위험성을 보여주는데 콘크리트 파괴계수를 기준으로 파괴계수 이상일 때 붉은색을 띠며 균열 발생을 의미한다. 파괴계수를 넘지는 않으나, 파괴계수의 절반 이상은 향후 균열 발생 확률이 있을 것으로 판단하여 노란색으로 표시하였다. 그 이하의 응력은 초록색으로 표시하여 안정적

인 상태로 정의하였다.

Fig. 9(a)는 신축이음이 정상 거동을 하는 경우로 온도하중의 작용과 차량하중의 통행으로 발생하는 바닥판의 응력은 안정적인 상태로 확인할 수 있다. 반면 양쪽 신축이음에서 모두 손상이 발생한 Damaged-A의 경우는 Fig. 9(b)에 보인 바와 같이 바닥판 양쪽 끝단에서 파괴계수 이상의 인장응력으로 인해 균열이 발생하였고 추후 다른 영향에 의해 손상이 확산될 수 있을 것으로 판단된다. 신축이음의 한쪽 유간만 밀착된 Damaged-B와 Damaged-C의 경우는 신축이음의 유간이 밀착된 부분의 가장자리에서 응력이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 파괴계수의 절반에는 미치지 못하지만 손상이 발생하지 않은 경우와 비교하였을 때 응력이 증가하였으며, 유사하게 실제 현장에서 손상이 누적될 경우 바닥판 균열로 발전할 수 있을 것으로 판단된다.

4.3 신축이음부와 바닥판 응답간의 상관관계 분석

신축이음의 유간이 밀착되어 손상이 발생하면 온도변화와 차량하중에 의해 직접적으로 바닥판 처짐과 단부 콘크리트에 응력 변화가 발생한다. 따라서 손상시나리오별 온도하중과 차량하중에 의해 발생하는 신축이음과 바닥판 응답간의 상관관계를 분석하였다.

Fig. 10은 무손상 상태인 Undamaged의 각 지점 별 처짐과 손상이 발생한 Damaged-A, Damage-B, Damaged-C의 처짐

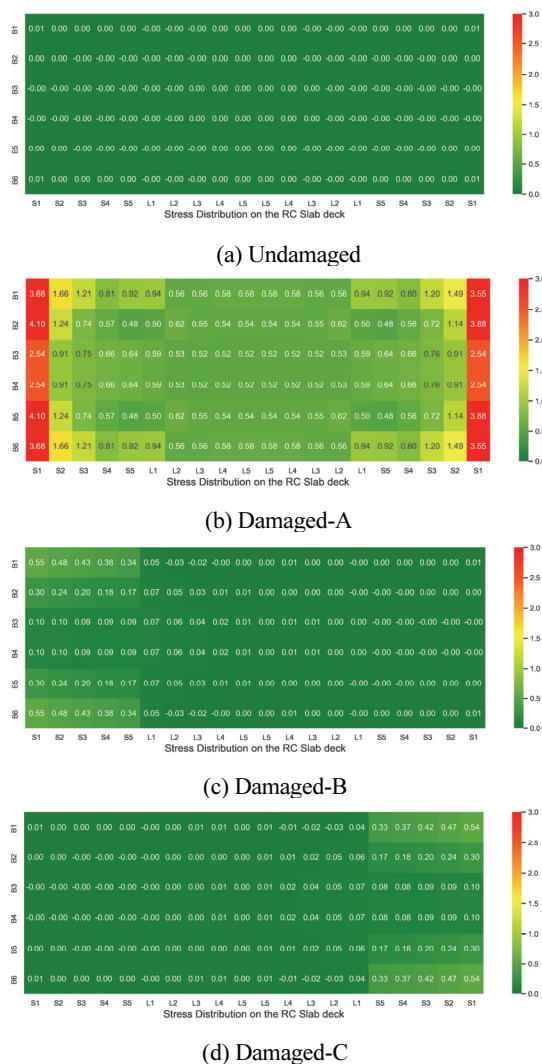


Fig. 9 Stress heatmap of the deck for each damage scenario

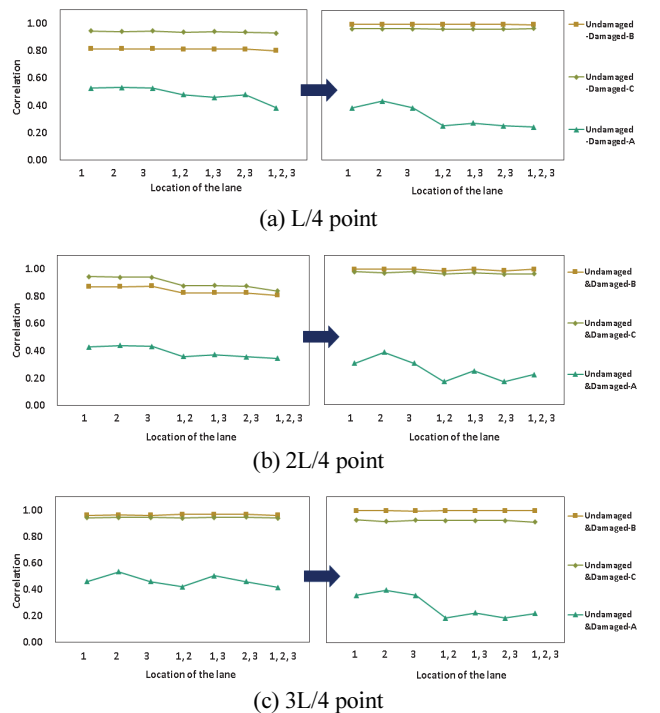


Fig. 10 Correlation of deflection in the deck between undamaged and other damage with respect to vehicle load

과의 상관관계를 차량이 바닥판을 지나가는 동안과 차량이 지나간 후에 대해서 분석하였다.

Fig. 10(a), (b), (c)는 각각 L/4, 2L/4, 3L/4 지점의 처짐 상관관계로 왼쪽의 그래프는 차량이 지나가는 동안, 오른쪽의 그래프는 차량이 지난 후의 상관성을 보여준다.

L/4 지점에서는 Fig. 10(a)에 보인 바와 같이 좌측 유간이 밀착된 Damaged-A와 Damaged-B는 좌측 유간이 확보된 Damaged-C에 비해 낮은 상관성을 보였다. 양쪽손상이 발생한 Damaged-A는 차량이 지나가는 동안 0.38 ~ 0.53의 상관계수를 보였고, 차량이 지나간 후는 0.24 ~ 0.43로 상관성이 떨어졌다. 이는 양단 콘크리트부의 균열 발생으로 Undamaged일 때와 다른 거동을 보이는 것으로 판단된다. 좌측 유간만 밀착된 Damaged-B는 차량이 지나가는 동안 약 0.8의 상관계수를 가지고 차량이 지나간 후는 1.0으로 Undamaged일 때와 매우 유사하게 높은 상관성을 보였다. 이는 차량이 지나가는 동안 유간 밀착으로 인해 좌측 단부 콘크리트에서 응력이 발생하지만 탄성 영역에 해당하여 원래의 상태로 회복되는 것으로 판단된다. 좌측 신축이음 장치가 정상거동을 하는 Damaged-C는 차량이 지나가는 동안 약 0.94의 상관성을 보이다가 차량이 지난 후 0.96으로 Undamaged일 때와 유사한 상관성을 보였다.

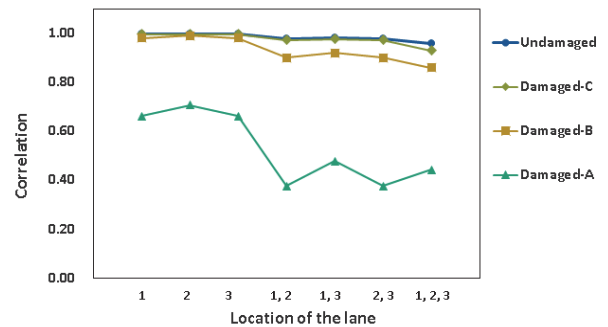
2L/4 지점은 Fig. 10(b)을 통해 Undamaged와 비교하였을 때 차량이 지나가는 동안 바닥판 처짐의 거동이 L/4 지점과 유사하였다. Damaged-A는 차량이 지나가는 동안 0.34~0.44로 낮은 상관성을 보였고, 차량이 지나간 후는 0.17~0.39로 차량 조건의 영향을 받았다. 차량이 1대가 바닥판 정중앙 차선을 지날 때 0.39의 상관계수를 갖지만, 차량들이 중앙에서 치우쳐진 상태로 차선을 지날 경우 0.17로 상관성이 떨어졌다. 이를 통해 양쪽 손상이 발생한 경우 무손상 바닥판 처짐과의 상관성이 차량의 수가 많을수록 또한 차량들이 차선을 비대칭으로 지날 때 더 낮은 상관성을 보였다. 2L/4 지점에서 Damaged-B, Damaged-C의 처짐은 L/4 지점과 매우 유사하게 차량이 지나가는 동안은 좌측 손상의 영향으로 약 0.81~0.94, 차량이 지난 후는 약 1.0의 상관계수로 Undamaged일 때와 유사한 거동을 보였다.

3L/4 지점에서 양쪽손상이 발생한 Damaged-A는 Fig. 10(c)에 보인 바와 같이 차량이 지나가는 동안 차량의 수에 따라 약 0.48~0.49의 상관성을 갖는다. 차량이 지난 후의 상관계수는 0.18 ~ 0.30으로 차량의 수와 차선 위치에 따라 상이한 값을 보였다. 우측 유간이 밀착된 Damaged-C는 차량이 지나가는 경우와 차량이 지나간 후의 상관관계가 거의 차이 없이 약 0.92 ~ 0.97를 보였다. 우측 유간을 확보한 Damaged-B는 차량이 지날 때와 차량이 지난 후 약 0.96과 1.0으로 Undamaged일 때의 바닥판 처짐과 유사한 거동을 보였다.

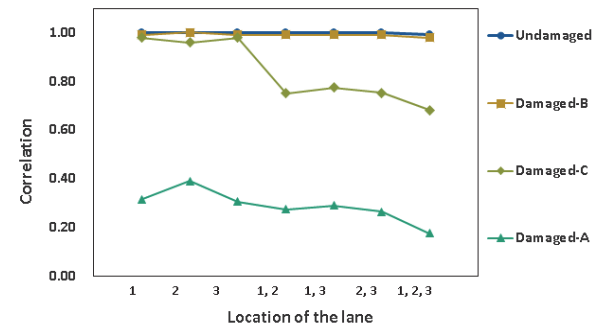
Fig. 11은 신축이음부 교축방향 평균 변위와 바닥판 양쪽

단부 콘크리트의 평균 응력과의 상관관계를 분석하였다. Fig. 11(a)는 좌측의 교축방향 변위와 바닥판 단부 콘크리트 응력의 상관계수 값을 보여준다. Undamaged와 Damaged-C는 좌측에 손상이 발생하지 않아 1.0에 가까운 상관계수를 갖는다. 좌측에만 손상이 발생한 Damaged-B는 차량이 1대만 지날 때는 약 1.0의 상관성을 보이지만, 차량의 수가 증가할수록, 차량이 중앙에서 치우칠수록 상관성이 떨어졌다. 하지만 한쪽 손상이 발생한 Damaged-B와 Damaged-C는 여전히 신축이음부 교축 변위와 바닥판 응력과는 높은 상관성을 가지고 있었다. 양쪽 유간이 모두 밀착된 Damaged-A는 차량 1대가 바닥판 정중앙을 지나는 경우는 0.71, 중앙에서 치우쳐 지나는 경우는 0.66 상관계수를 보였다. 반면, 차량 2대가 바닥판을 대칭으로 지나는 경우는 0.48의 상관성을, 한쪽으로 치우쳐진 상태로 지나는 경우는 0.38로 상관성이 감소하였다. 차량이 모든 차선을 지나는 경우는 0.44로 차량 2대가 대칭으로 바닥판을 지나는 경우와는 유사하고 비대칭으로 지날 때보다는 다소 높은 상관성을 보였다.

우측에서 신축이음부 교축 방향 변위와 단부 콘크리트의 응력의 상관관계는 Fig. 11(b)와 같다. 우측 신축이음부가 유간을 확보하고 있는 Undamaged와 Damaged-B는 약 1.0에 가까운 상관성을 보였다. 우측 유간이 밀착된 Damaged-C는 차량이 1대 지날 때는 1.0에 가까운 상관계수를 갖는다.



(a) The left side



(b) The right side

Fig. 11 Correlation between the displacement of the joint and the stress of the deck due to the damage scenario and vehicle load

그러나, 차량의 수가 증가할수록 상관성이 감소하여, 모든 차선을 지나는 경우 0.68로 가장 낮은 상관성을 보였다. 차량 2대가 대칭으로 지나는 경우는 약 0.77, 중앙에서 치우친 상태로 바닥판을 지나는 경우는 약 0.75로 유사하게 나타났다. Damaged-A의 바닥판 교축방향 변위와 콘크리트 응력은 차량 조건에 따라 0.18~0.39의 상관성을 보였다. 차량 1대가 바닥판 정중앙을 지날 때 0.39, 차량 2대가 비대칭으로 지날 때 0.27, 차량이 모든 차선을 지날 때는 0.18로 가장 낮은 상관성을 보였다.

신축이음부 교축 변위와 바닥판 단부 콘크리트부의 응력과 상관성 분석을 통해 양쪽 모두 손상이 발생한 Damaged-A에서 가장 낮은 상관성을 보였다. 특히, 좌측보다 우측에서 낮은 상관관계를 보였다. 이는 차량이 진입하는 좌측보다 차량이 빠져나가는 우측의 손상에 더 민감하게 반응하는 것을 의미한다. 이러한 신축이음 장치의 손상은 바닥판 전체 거동의 변화를 일으키며, 신축작용의 직접적인 영향을 받는 단부 콘크리트의 교축 방향 변위와 응력과의 상관관계가 감소한다. 따라서 바닥판 응답 데이터를 활용한 데이터 기반의 손상 탐지를 통해 잦은 훼손과 파손이 발생하는 신축이음 장치의 조기 보수, 보강 및 사전 관리가 가능할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 국내 노후 교량 중 많은 부분을 차지하는 RC 슬래브 교의 신축이음부 손상을 모사하여 신축이음 손상이 바닥판의 응답에 미치는 영향을 분석하였다. 국토교통부 통계자료와 설계도면을 참고하여 선정된 구조물을 대상으로 바닥판 응답의 시간이력해석을 실시하였다. 손상 시나리오 별 신축이음부의 교축방향 변위와 바닥판의 응력, 지점 별 처짐을 비교한 후 그 상관관계를 분석하였다. 본 논문에서 도출된 주요 결과는 다음과 같다.

신축이음 손상이 발생하지 않은 Undamaged는 설계하중이 작용하였을 때, 신축이음부의 교축방향 변위가 발생한 후 시간이 경과함에 따라 원래의 상태로 회복되었다. 또한 바닥판의 응력은 거의 발생하지 않았다. 이는 시간이 지남에 따라 바닥판 양단 신축이음부의 유간이 바닥판에서 발생한 변형을 수용함으로써 바닥판의 응력이 발생하지 않는 것으로 판단된다. 신축이음부 교축방향 변위와 바닥판 양쪽 단부 콘크리트의 응력의 상관관계 분석 결과 차량 조건에 따라 약간 감소하지만 약 1.0의 상관성을 가졌다.

양쪽 유간이 모두 밀착된 Damaged-A는 신축이음부 교축방향 변위가 거의 발생하지 않았고, 바닥판 양쪽 단부에서 최대 3.6MPa 정도의 응력이 발생하였다. 따라서 신축이음부와 밀접한 단부 콘크리트에서 균열이 발생하였다. 무손상 상태

인 Undamaged와 비교하였을 때 차량이 지나가는 동안의 바닥판의 처짐은 각 지점에 따라 0.39~0.48의 상관성을 보였다. 차량이 지나간 후 바닥판 처짐 상관계수는 0.25~0.32로 차량이 지나갈 때보다 감소하였다. 이는 신축이음 양단 손상으로 인한 바닥판 단부 균열이 바닥판 거동에 변화를 유발한 것이다. 신축이음 교축방향 변위와 단부 콘크리트 응력의 상관계수는 차량의 수가 증가할수록, 차량이 비대칭으로 지나갈수록 더욱 감소하였다. 좌측과 우측에서 각각 최소 0.38, 0.18로 차량이 빠져나가는 우측에서 상관성이 더 떨어졌다.

신축이음의 한쪽 유간만 밀착된 Damaged-B와 Damaged-C의 서로 유사한 거동을 보였다. 유간을 확보한 신축이음부는 최대 2.8mm의 변위가 발생한 후 시간이 지남에 따라 감소하였다. 신축이음의 손상이 발생한 부분에서는 교축방향 변위가 거의 발생하지 않고 최대 0.57~0.59MPa의 응력이 발생하였다.

Undamaged과 Damaged-B는 차량이 지나가는 동안 바닥판 처짐의 상관계수는 L/4, 2L/4, 3L/4 지점에서 각각 0.81, 0.84, 0.96으로 손상 발생 지점과 가까울수록 상관성이 떨어졌다. 차량이 지나간 후 모든 지점에서 상관계수는 1.0으로 신축이음 장치가 정상거동 할 때와 유사한 거동을 보였다. Damaged-C는 차량이 지나가는 동안 바닥판 처짐의 상관계수는 지점 별로 0.94~0.96, 차량이 지나간 후는 0.92~0.97로 Undamaged와 유사한 상관성을 보였다.

신축이음부 교축방향 변위와 바닥판 단부 응력의 상관계수는 유간이 밀착된 부분에서 가장 낮은 상관성을 보였다. Damaged-B는 좌측에서, Damaged-C는 우측에서 각각 0.86, 0.68의 상관성을 보였다. Damaged-C의 손상이 차량이 빠져나가는 우측에 위치해 있어 차량하중의 영향으로 더 낮은 상관성을 보이는 것으로 판단된다.

본 연구의 결과 신축이음 장치가 유간을 확보한 경우 설계하중에 의해 발생한 교축방향 변위와 응력은 시간이 경과함에 따라 감소하였다. 반면 유간이 밀착되었을 때 발생한 교축방향 변위와 응력은 시간이 지나도 온도하중과 차량하중에 의해 발생한 값에서 회복되지 않았다. 또한 신축이음의 손상은 신축이음부의 교축방향 변위와 바닥판 단부 콘크리트 응력과의 상관성을 떨어뜨릴 뿐만 아니라 바닥판 전체 처짐에도 영향을 미치는 것을 확인하였다. 즉, 신축이음의 손상은 신축이음부와 근접한 바닥판 단부뿐만 아닌 바닥판 전체에 손상 발생 가능성이 높아진다. 따라서, 신축이음장치에 손상이 발생하였을 때 신속한 보수 및 교체가 이루어지지 않으면 바닥판의 손상 발생과 확산으로 인한 2차 피해를 유발하는 원인이 될 수 있다. 따라서 바닥판 응답에 대한 지속적인 관찰과 대응이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업 "DNA 기반 노후 교량 구조물 스마트 유지관리 플랫폼 및 활용기술 개발" 과제 (20210289-001)를 통해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2020), *Road Bridge and Tunnel Status Report*, 19-31
2. Cho, H. J., Oh, J., Park, K. N., and Lee, H. J. (2008), Maintenance condition and Improving performance of Expansion Joint on Bridges, *Journal of the Earthquake Engineering Society*, EESK, 164-170
3. Park, K. H., Seon, J. W., Lee, H. S., and Hwang, Y. K. (2018), Study on Reconstruction and Deterioration of RC Slab Bridges, *Journal of Korea Concrete Institute*, KCI, 30(2), 693-694
4. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2016) *Korean Highway Bridge Design Code*, 19-35
5. Korea Expressway Corporation (2013), *Improvement of Bridge Inspection System by Damage Analysis*, 37-41
6. Korea Expressway Corporation (2015), *Bridge Maintenance Strategies for Service Life 100 years*, 61-71
7. Kim, H. S., Lee, I. K., Park, Y. H. (2021), Deterioration Patterns and Chloride Attacks of Expressway Bridge under De-icing Salts Environments, *Magazine of Korea Concrete Institute*, KCI, 33(4), 14-18
8. Ding, Y., Li, A. (2011), Assessment of bridge expansion joints using long-term displacement measurement under changing environmental conditions, *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*, 5(30), 374-380
9. Miao C. Q., Deng, Y., Ding, Y. L., Li, A. Q. (2013), Damage alarming for bridge expansion joints using novelty detection technique based on long-term monitoring data, *Journal of Central South University*, 20(1), 226-235

Received : 11/09/2021

Revised : 11/22/2021

Accepted : 11/23/2021

요 지 : 우리나라 노후화 교량 중 많은 부분을 차지하는 RC 슬래브 교량은 대부분이 교량 안전 관리 및 유지관리의 대상인 1, 2종 교량에 포함되지 않는다. 또한 고속도로 교량에서 가장 높은 손상율을 차지하는 부속시설은 신축이음과 교량 받침부이다. 특히, 신축이음부를 통한 누수는 콘크리트 교량의 열화를 유발하고 균열 및 철근부 노출 등의 원인이 된다. 따라서 본 연구에서는 RC 슬래브교의 신축이음부 유간 밀착 손상이 바닥판 응답에 미치는 영향을 분석하였다. 양단 신축이음의 유간이 밀착된 경우 바닥판의 교축방향 변위가 발생되지 못해, 양쪽 단부 콘크리트에서 균열이 발생하였다. 또한, 응답 결과를 바탕으로 손상시나리오 별 신축이음부의 교축방향 변위와 바닥판 양단 콘크리트 응력과의 상관관계를 분석하고, 손상발생이 교량 거동에 미치는 영향을 파악하였다. 신축이음 장치 양면손상이 발생한 경우 변위와 응력과의 상관관계는 차량이 모든 차선을 지날 때 0.18로 낮은 상관성을 보였다. 무손상 상태와 비교했을 때도 바닥판 처짐은 차량이 지나는 동안 0.34~0.53, 차량이 지나간 후 0.17~0.43으로 낮은 상관성을 보였다. 이는 단부 콘크리트의 균열 발생으로 바닥판 전체 거동에 변화가 생긴 것을 의미한다. 따라서 바닥판 응답 데이터 기반 상관관계 분석과 이를 활용한 데이터 기반의 손상탐지가 가능하며, 이를 통해 바닥판 손상 및 열화의 원인이 되는 신축이음부의 조기 보수 및 보강, 사전관리에 기여하여 많은 도움이 될 것으로 기대된다.

핵심용어 : RC 슬래브교, 신축이음, 교량받침, 바닥판, 상관관계 분석
