

교대 협착 발생 시 무조인트화 교량의 거동 분석 연구

A Study on Behavior of Post-integrated Abutment Bridge When Abutment and Bridge Decks are Jammed

박 양 흠¹⁾ · 남 문 석[†] · 장 일 영²⁾

Yang Heum Park · Moon S. Nam · Il Young Jang

Received: February 2nd, 2021; Revised: February 18th, 2021; Accepted: February 23rd, 2021

ABSTRACT : The expansion joints installed on the bridge for the accommodation of expansion and contraction of the super structure are essential members of the bridge. However, the expansion joints are deteriorated over time and the waterproof function weakens, causing rainwater to penetrate and deteriorate the structure. In order to solve the traffic congestion caused by frequent replacement of the old expansion joints along with the deterioration of the structure, a post-integrated abutment bridge in which the existing expansion joints are removed and replaced with reinforced concrete link connection has been applied to highway bridges since 2016. After the post-integrated abutment method was applied, it was partially applied to bridges in which the superstructure and abutment were jammed. In this study, the causes of problems that may occur when the post-integrated abutment method is applied to the jammed bridge were analyzed numerically. It was analyzed that damage occurred in the link connection part. Based on the results of this study, the application condition for the post-integrated abutment method is reinforced as it is not possible to apply the post-integrated abutment method to bridges are already jammed.

Keywords : Expansion joints, Deterioration, Post-integrated abutment bridge, Reinforced concrete link connection, Jammed bridge

요 지 : 교량 상부구조의 원활한 신축거동을 위하여 교량에 설치되는 신축이음장치는 교량의 필수부재인데, 신축이음장치는 시간이 지남에 따라 노후되고 방수기능이 약화되어 우수가 침투하여 구조물의 열화를 초래한다. 이러한 구조물의 열화 문제와 함께 노후된 신축이음장치의 잦은 교체로 인한 교통정체를 해결하기 위하여 기존 신축이음장치를 제거하고 철근콘크리트 연결부로 대체하는 무조인트화 공법이 2016년 이후부터 고속도로 교량에 적용되고 있다. 무조인트 공법이 적용된 이후에 상부구조와 교대가 협착된 교량에도 일부 적용되었는데 협착 교량의 무조인트화 연결부에 파손이 발생하였다. 본 연구에서는 협착 교량에 무조인트화 공법을 적용할 경우에 발생할 수 있는 문제점에 대한 원인을 수치해석적으로 분석하였으며, 그 결과 협착으로 인하여 무조인트화 연결부에 설계 시 적용한 하중 보다 큰 하중이 발생하여 연결부에 파손이 발생한 것으로 분석하였다. 이러한 연구결과를 바탕으로 협착이 발생한 교량에서는 무조인트화 공법을 적용하지 못하는 것으로 무조인트화 공법에 대한 적용조건을 강화하였다.

주요어 : 신축이음장치, 열화, 무조인트화 교량, 철근콘크리트 연결부, 협착 교량

1. 서 론

교량 상부구조의 원활한 신축거동을 위하여 교량에 설치되는 신축이음장치는 교량의 필수부재인데, 신축이음장치는 시간이 지남에 따라 노후되고 방수기능이 약화되어 우수가 침투하여 구조물의 열화를 초래한다. 고속도로 교량에 널리 사용하는 모노셀, 핑거조인트 등과 같은 신축이음장치는 개방형 조인트(opened joint)라고 하는데, 이 형식의 신축이음은 하면에 누수방지 시스템이 대부분 있지만 다양한 원인으로 손상되기 쉽기 때문에 기능을 유지하기 위해서는 지속적인 관리가 필요하다(Kang et al., 2018). 이러한 신축

이음장치의 누수는 결국 지속적인 유지관리와 교체가 필요하며, 이러한 유지관리와 교체로 인한 교통정체가 발생하여 고속도로 이용객의 불편을 초래하기도 한다. 이러한 신축이음장치에 따른 문제를 근본적으로 해결하기 위해서는 기존 신축이음장치를 제거하고 철근콘크리트(Reinforced Concrete, RC)를 타설하여 연결부(RC Link)로 대체하는 무조인트화 공법이 2016년에 고속도로 교량에 처음 적용한 이후 현재까지 63개교에 적용되었다(Korea Expressway Corporation, 2020a).

기존 교량을 무조인트화 하는 공법은 일본에서 처음 도입되었다. 일본의 무조인트화 공법은 교대 흥벽과 교량 상

1) Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology

† Senior Researcher, Expressway & Transportation Research Institute, Korea Expressway Corp. (Corresponding Author : msnam@ex.co.kr)

2) Professor, Department of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology

부구조 사이의 신축이음장치를 제거하고 철근콘크리트 구조로 연결하는 RC 연결조인트로 무조인트화 하는 공법이 다(中日本高速道路, 2011; 石川, 2013). RC 연결조인트의 적용범위는 콘크리트의 크리프 및 건조수축이 끝난 거더의 신축량이 20mm 이하, 사각 0도인 직교인 콘크리트 교량을 대상으로 하였다. 이러한 RC연결조인트 공법은 건조수축이 끝난 거더의 신축량이 20mm 이하인 콘크리트교에 제한적으로 적용되고 있으며, 사각이 있거나 강교 등에 대한 세부적인 분석이 되어 있지 않다. 그리고 Fig. 1과 같이 2차원 해석모델을 적용하여 사각이 존재하는 3차원적인 거동을 하는 교량을 분석하기엔 그 한계가 있다(Kang et al., 2018).

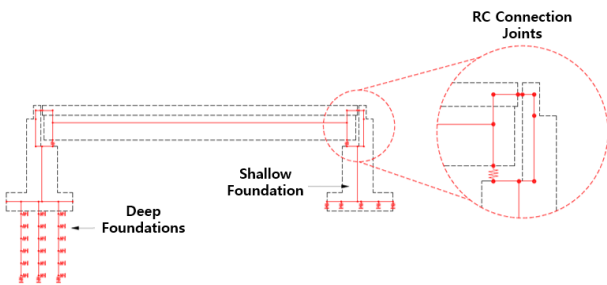


Fig. 1. Analysis model of RC connection joint method (石川, 2013)

국내에서의 무조인트화 교량은 일본의 RC 연결조인트의 사각 및 신축량의 제한 등과 같은 한계점들을 개선하여 고속도로 교량에 적극적으로 적용하고 있다(Kang et al., 2018). Kang et al.(2018)에서는 교량연장(10 ~ 100m), 상부구조형식(PSCI, 슬래브), 사각(0 ~ 30도), 교대 및 기초 제원, 지반조건 등 다양한 조건을 고려한 무조인트화 교량의 매개변수 해석과 실제 교량에 대한 현장시험시공과 계측을 통하여 무조인트화 교량의 적용조건, 설계 및 시공방법 등에 대한 기준을 정립하고 현재 확대적용 중이다(Fig. 2).



Fig. 2. Design and construction manual for post-jointless bridge (Korea Expressway Corporation, 2020b)

국내에 적용 중인 무조인트화 교량 63개소 중, 상부구조와 교대가 협착된 3개 교량에서 무조인트화 공법을 적용하였다. 협착이 있던 3개교에서는 RC 연결부에 균열 등의 손상이 발생하였다. 이러한 원인을 규명하기 위하여 본 연구에서는 협착이 발생한 상태의 교량을 무조인트화 하는 경우에 발생하는 거동을 분석하고 이에 대한 대책방안을 제시하고자 한다.

2. 무조인트화 공법의 개념

2.1 무조인트화 공법의 정의 및 거동

무조인트화 공법은 Fig. 3과 같이 기존 조인트 교량의 신축이음장치를 제거한 후 상부구조 일부와 교대 흥벽을 현장타설 철근콘크리트로 연결하여 무조인트 교량 형식으로 변경하는 공법이다(Korea Expressway Corporation, 2020b). 무조인트화 공법은 온도변화에 따른 상부구조의 신축 거동이 교대로 전달되므로(Fig. 4), 바닥판과 흥벽 사이 연결부의 축력 저항성, 흥벽의 휨저항성과 하부구조(교대 및 기초)의 강성 등이 교량 구조계의 지배적인 요소가 되므로, 교량 제원(연장, 사각, 상·하부 구조형식), 지반조건 등의 주요한 인자들에 따라 무조인트화 공법의 적용 여부가 결정된다(Korea Expressway Corporation, 2020b).

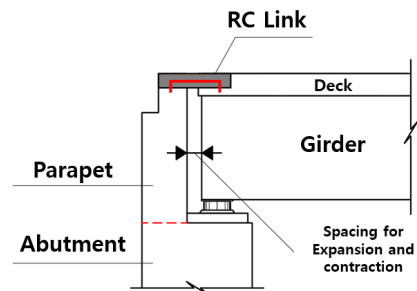


Fig. 3. Schematic of RC link on post-jointless bridge (Korea Expressway Corporation, 2020b)

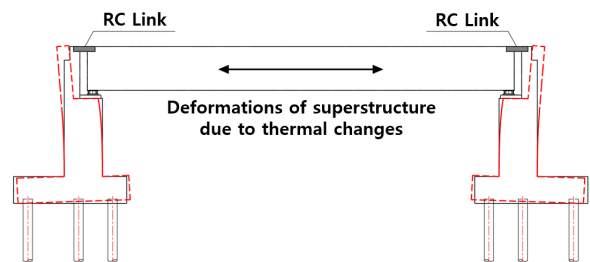


Fig. 4. Behavior of post-jointless bridge (Korea Expressway Corporation, 2020b)

2.2 무조인트화 공법의 설계방법

Korea Expressway Corporation(2020b)에서 제시하는 무조인트화 공법의 설계 시 설계하중은 온도하중, 활하중 및 토압이며, 검토부재는 RC 연결부 및 흥벽부에 대한 안정성 검토이다. 우선, RC 연결부에 대한 안정성 검토는 시공 시대기온도, 활하중과 토압을 고려한 전체 구조계 해석결과로 RC 연결부에 발생하는 철근과 콘크리트 응력을 검토하여야 한다. 그리고 차륜하중에 의한 연결부 휨 검토는 기존 교량 유간을 지간으로 하는 양단 고정정보로 철근의 응력을 검토하여야 한다(Fig. 5).

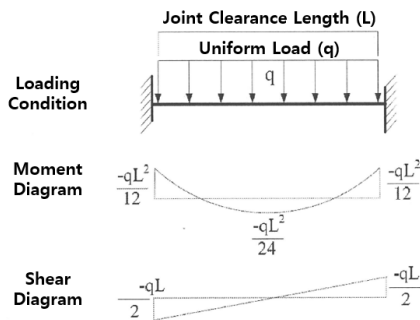


Fig. 5. Bending check on RC connection by wheel load (Korea Expressway Corporation, 2020b)

교대 흥벽부는 온도하중, 활하중과 토압에 의한 흥벽 휨 모멘트에 대한 안정성을 검토하여야 한다. 여기서, 온도하중과 활하중에 의한 휨모멘트는 전체 구조계 수치해석으로 산정하며, 토압에 의한 휨모멘트는 연결부와 흥벽 하단을 지점으로 하는 보로 산정한다. 그리고 산정된 휨모멘트에 대하여 기존 흥벽의 제원으로 안정성을 확보하는지 검토하여야 한다(Korea Expressway Corporation, 2020b).

3. 협착된 교량에 무조인트화 교량 적용사례

2001년에 준공된 단경간 30m PSC(prestress concrete) 거더 교량인 OO-4교(Table 1)에 무조인트화 공법을 2018년 11월에 적용하였다. 무조인트화 공법 적용 전에 OO-4교는 이미 신축이음장치의 유간과 바닥판과 교대 흥벽 사이의 유간이 없는 협착된 상태였다(Fig. 6). OO-4교의 교대와 상부 구조의 협착의 원인은 16m 정도의 고성토부에 위치한 교대 뒤채움과 원지반의 침하로 인한 교대 밀림이 협착의 주요 원인이었다.

협착이 발생한 OO-4교에 대한 근본적인 원인을 제거하지 못한 상태에서 무조인트화 공법을 적용한 이후, RC 연결부에 고축직각 방향으로 최대 10mm 정도의 균열이 발생

Table 1. Information of OO-4 bridge

Length (m)	Type of superstructure	Type of foundation	Skew angle (°)
30.0	PSCI	steel pipe pile	0

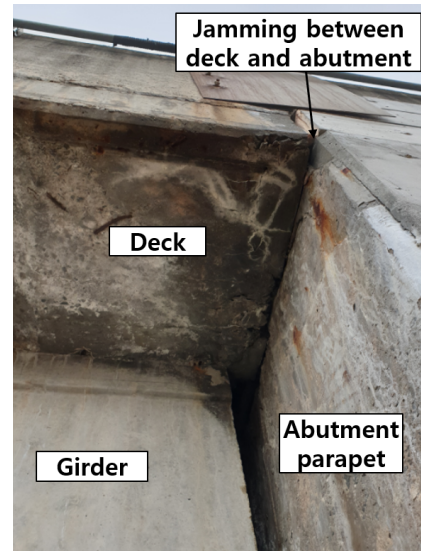
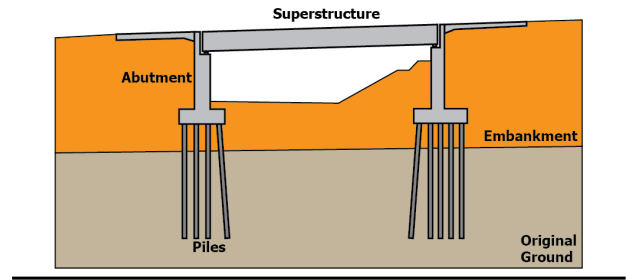


Fig. 6. Photo of bridge deck and abutment Jamming

하였다(Fig. 7). 이러한 RC 연결부의 파손은 지반변형으로 교대 밀림이 발생한 상태에서 교대 배면에 설계토압 이상의 토압이 작용하고, 이러한 이상토압으로 인하여 연결부에 과잉축력이 발생하여 손상이 발생한 것으로 판단된다.

2.2절에서 전술하였듯이 무조인트화 공법의 설계 시 고려하중은 온도하중, 활하중, 주동토압인데, OO-4교는 고성토체의 지반변형으로 교대 밀림이 발생하여 설계토압 보다 더 큰 이상토압이 작용한 것으로 판단된다. 이러한 이상토

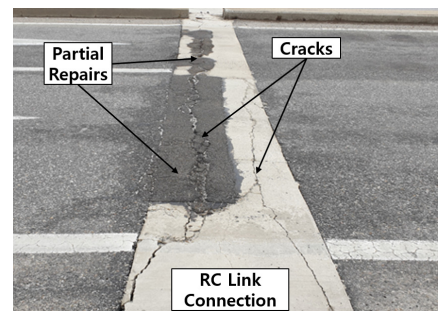


Fig. 7. Photo of bridge deck and abutment Jamming

압은 무조인트화 교량이 된 이후에도 지속적으로 작용하면서 상부구조의 온도팽창에 대한 구속력 증가를 유발한다. 이러한 구속력의 증가는 연결부 축력을 설계 시 보다 과도하게 발생시킴으로써 결국 연결부에 파손을 초래한 것으로 판단된다(Fig. 8). 이러한 지반의 변형으로 인한 교대협착이 무조인트화 교량에 미치는 영향에 대한 합리적인 근거를 마련하기 위하여 수치해석을 통하여 그 원인 및 대책방안을 도출하고자 한다.

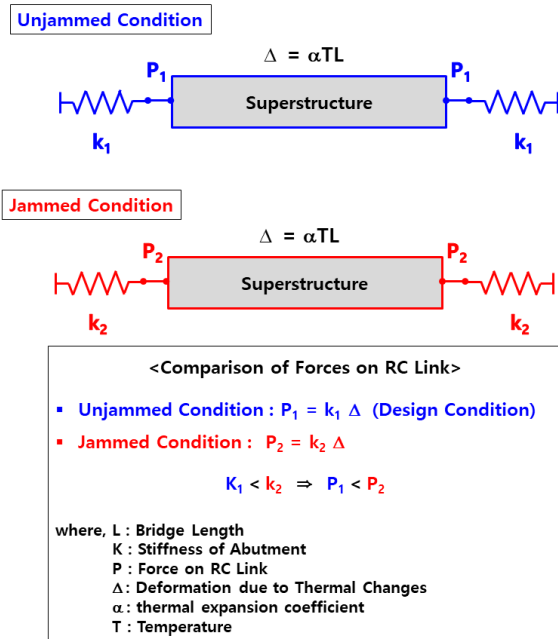


Fig. 8. Effect of jamming on post-jointless bridge

4. 협착 시 무조인트화 교량의 거동 분석

협착이 발생한 교량을 무조인트화 하는 경우의 거동을 분석하기 위하여 OO-4교를 대상으로 수치해석을 수행하였다. 해석프로그램은 MIDAS CIVIL을 사용하였으며, 시공 시 온도변화를 고려하여 기준온도를 변화시켜가며 구조검토를 수행하였다. 구조해석 모델은 평면 프레임 모델을 적용하여 OO-4교의 상부구조, 하부구조(교대) 및 말뚝기초까지 모델링하였다(Fig. 9). 여기서, 말뚝기초의 주변 지반스프링은 지질주상도의 N치를 참고하였으며 깊이별 p-y 곡선을 L-pile 프로그램으로 산정하여 모델링에 적용하였으며, 말뚝기초의 깊이는 교대의 거동이 6m 이상에는 영향이 없을 것으로 판단되어 6m까지 모델링에 포함시켰다. 탄성반침은 탄성연결요소로 적용하였으며, 작용하중은 상부구조에 온도하중으로 작용하였다. 그리고 연결부의 안전측 검토를 위하여 교대의 앞성토나 뒤채움의 저항은 고려하지 않았

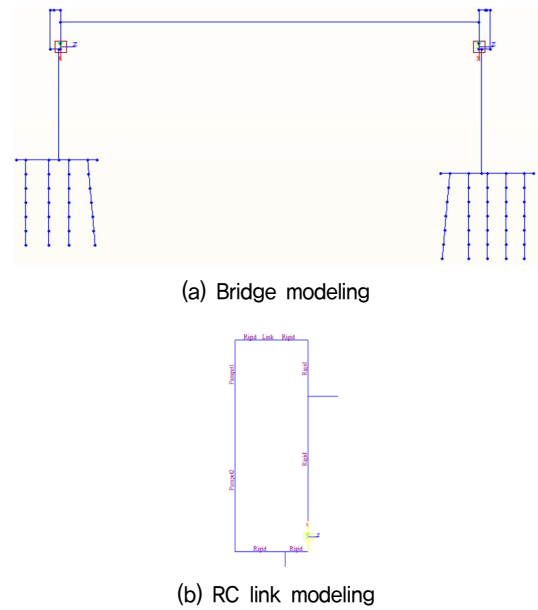


Fig. 9. Modeling of OO-4 bridge

Table 2. Properties for numerical analysis

Items	Properties
Design concrete strength (f_{ck}) (MPa)	40.0
Rebar type and allowable strength (f_{sa}) (MPa)	H bar / 180 MPa
Temperature changes (°C)	+20, +30
SPT N value for original ground	30
SPT N value for backfill	35

다. 해석에 사용된 세부적인 물성값들은 Table 2에 제시하였다.

Fig. 8과 같은 협착 여부에 따른 무조인트화 교량의 거동을 분석하기 위하여 협착이 발생하지 않는 조건(교대 자유 거동)과 한쪽 교대가 협착된 조건(교대 고정 거동)을 모사하였다. 여기서, 협착 조건을 교대 고정으로 모사한 이유는 지반변형으로 교대에 작용하는 이상토압에 대한 정량적인 수치가 기존 연구자료에 없으므로, 교대와 일체화된 상부구조의 신장거동 시 교대가 배면방향으로 밀리지 않고 고정되어 저항하는 조건, 즉 교대의 구속력을 최대($k_2 = \infty$)로 설정하였다. 그리고 협착과 비협착 조건에 대한 해석모델은 교대의 구속력을 제외하고 동일한 조건으로 모사하여 협착에 대한 영향성을 검토하도록 하였다.

수치해석결과에 의하면(Table 3), RC 연결부에서 발생하는 최대 축력은 상부구조가 수축할 때 인장력에서 발생하였으며, 협착된 경우의 RC 연결부 최대 인장축력은 협착이 발생하지 않는 정상적인 경우에 비하여 약 1.9배 크게 발생하였다. 이러한 협착 시 연결부에 발생하는 과잉 인장축력은 설계 시 허용값(연결부 철근의 허용인장응력인 180MPa)을 크게 초과하는 값으로서 RC 연결부의 손상을 초래하는

Table 3. Analysis results of OO-4 bridge

Analysis results	Temperature changes of +20°C		Temperature changes of +30°C	
	Unjammed	Jammed	Unjammed	Jammed
Force diagrams on RC link (kN)				
Rebar layout (diameter @spacing)	H9.5 @250mm	H9.5 @250mm	H10.9 @250mm	H10.9 @250mm
Stress on RC link (MPa)	157.0	306.1	178.9	348.8
Allowable stress (MPa)	180.0	180.0	180.0	180.0
Stability	OK	NG	OK	NG

주된 원인으로 분석되었다.

협착이 발생한 교량에 무조인트화 공법을 적용한 현장 사례 분석과 구조검토를 통하여, 협착이 발생하거나 우려되는 교량에 대한 무조인트화 공법의 적용조건을 다음과 같이 정리하였다. 무조인트화 공법은 상세설계 시 고려하는 설계하중(온도하중, 활하중 등) 이외에 예상하지 못한 교대부 추가하중(포장팽창, 교대 밀림 등)이 발생하면 교량의 안정성에 영향을 미치게 된다. 따라서, 교량의 신축유간(교대 및 교각의 신축이음장치 유간, 바닥판 및 거더 유간)이 부족하여 교대 협착이 우려되는 경우에는 무조인트화 공법을 적용할 수 없으며, 이러한 제외 교량들은 적절한 사후 조치 및 안정화 단계를 확인한 후 적용하도록 한다. 이

2.2 [단계 1] 기본 적용조건 검토

교대부 무조인트화 공법의 적용은 다음 조건을 만족하는 교량으로 제한한다.
(1) 대상 교량은 건조수축과 크리프 거동이 수렴된 공용년수 10년 이상 교량으로 한다.
(2) 상부구조 형식은 PSCI 거더교와 RC슬래브교의 콘크리트교로 하며, 강교는 제외한다.
(3) 하부구조 교대기초 형식은 강관말뚝 기초로 제한한다. 단, 직립기초 형식은 상세검토를 수행하여 적용하도록 한다.
(4) 교량사각은 30° 이하로 제한하며, 교량받침은 탄성받침으로 제한한다.
(5) 교대부 무조인트화 공법은 단경간 또는 다경간 교량에 적용할 수 있다.
(6) 공용 중 포장팽창, 지반과다변형 등으로 인한 협착(교대 및 교각의 신축이음장치 협착, 바닥판 및 거더 협착)이 이미 발생하거나 우려되는 교량은 교대부 무조인트화 공법의 적용 대상 교량에서 제외한다.
(7) 교대부 무조인트화 공법을 적용하면 교량받침에 대한 추가적인 유지관리가 어려우므로, 교량받침 상태를 확인하여 보수보강을 완료한 후 적용하여야 한다.
(8) 대상 교량의 상부구조 형식이 상이하게 적용되거나 교각부에 신축이음장치가 있는 경우에는 적용을 제한한다. 다만, 부록 3의 편측 교대부 무조인트화 공법 적용방법(안)을 적용할 수 있는 경우에는 별도의 검토를 수행하여 편측 교대부를 무조인트화 공법을 적용할 수도 있다.

Fig. 10. Application condition of post-jointless bridge (Korea Expressway Corporation, 2020b)

리한 협착교량에 대한 적용조건은 무조인트화 설계 및 시공 지침(Korea Expressway Corporation, 2020b)에 반영되었다(Fig. 10).

5. 결 론

본 연구에서는 협착된 상태에서 무조인트화 공법을 적용한 실제 교량에 대한 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 지반변형으로 교대 협착이 이미 발생한 교량에 무조인트화 공법을 적용하는 경우에는 설계토폰보다 더 큰 이상토폰이 작용하게 되며, 이로 인하여 RC 연결부에 손상이 발생할 수도 있다.
- (2) 교대협착 시 발생하는 이상토폰은 무조인트화 시공이 후에도 지속적으로 작용하면서 상부구조의 온도팽창에 대한 구속력을 크게 만들면서 RC 연결부 축력이 과다하게 작용하는 원인이 된다.
- (3) 이미 협착이 발생한 무조인트화 교량에 대한 수치해석적 거동분석 결과, 협착된 경우의 RC 연결부에 발생하는 축력은 협착이 발생하지 않는 정상적인 경우에 비하여 약 1.9배 크게 발생하였다. 이러한 협착 시 연결부의 과잉축력은 설계 허용값을 크게 초과하면서 RC 연결부의 손상을 초래하였다.
- (4) 협착이 발생한 교량에 무조인트화 공법을 적용한 현장 사례 분석과 구조검토를 통하여, 협착이 발생하거나 우려되는 교량은 무조인트화 공법을 적용하지 못하는 것으로 무조인트화 공법에 대한 적용조건을 강화하였다.

References

1. Kang, H. T., Park, Y. H., Kim, J. C., Lee, B. J. and Nam, M. S. (2018), Study on remodeling a bridge with expansion joints into IABS, EXTRI-2018-44-534.9607, Korea Expressway Corporation (In Korean).
2. Korea Expressway Corporation (2020a), Removing expansion joints on abutment of existing bridges, Korea Expressway Corporation (In Korean).
3. Korea Expressway Corporation (2020b), Design and construction manual for removing expansion joints on abutment of existing bridges, Korea Expressway Corporation (In Korean).
4. 石川 (2013), 凍結防止剤の影響を受ける既設道路橋の耐久性向上に関する研究, 長岡技術科学大学博士論文 (In Japanese).
5. 中日本高速道路(株) (2011), RC連結ジョイントの設計・施工の手引案 (In Japanese).