

협착교량의 구조해석 및 안전성 평가

정재훈¹, 김문옥^{2*}, 최현호³, 김장환⁴

Structural Analysis and Safety Assessment for Constricted Bridges

Jae-Hun Jeong¹, Moon-Ok Kim^{2*}, Hyun-Ho Choi³, Jang-Hwan Kim⁴

Abstract: As the intense heat continues, many cases of highway pavement blow up and bridge expansion joints damages have been inspected. Especially, Expansion joint closure of bridges is an important problem that can threaten the safety of the bridge structure or reduce long-term durability. This paper proposed a structural analysis method for bridges having expansion joint closure and structural analysis was performed to verify the effects according to bridge types. Analysis bridges were divided into four types: concrete and steel bridges, shallow and piled foundations. To induce the situation of abutments and bridge decks are jammed, the following loads were additionally considered; lateral flow pressure, pavement expansion by alkali-aggregate reaction, creep settlement of backfill. The structural analysis method was verified by comparing the structural analysis results with the actually measured joint gap data. In addition, behavioral analysis due to joint closure was conducted to confirm the change in safety ratio by type of superstructure as the axial force increased.

Keywords: Joint closure, Constricted bridge, Lateral flow, Alkali-aggregate reaction, Bridge analysis

1. 서론

최근 지속적인 폭염 현상의 발생 등에 따라 교량의 신축이음부 협착으로 인한 포장 솟음이나 신축이음장치에 파손 사례가 다수 발견되고 있다(Kim, 2018). 이러한 교량의 신축이음부 협착은 과거에도 일부 발생했던 현상이지만 폭염 영향이 커진 최근 몇 년 사이에 발생 빈도가 특히 증가하고 있으며, 손상 범위도 커지고 있는 추세이다. 신축이음부 협착은 교대에 수평변위를 유발시키게 되며 이에 따라 교대 파손 등의 구조적 문제도 발생되고 있다(Lee, 2015).

일반적으로 교량 설계시 교대는 수평변위가 발생하지 않는 지점으로 가정하고 교량 상부구조에서 발생하는 수평변위는 신축이음장치에서 허용하도록 설계한다. 하지만 교대에 수평변위가 발생하게 되면 신축이음부에 협착이 발생하게 되고 설계시에 고려하지 않는 구속조건이 생성된다. 이에 따라 교량 상부구조에는 부가적인 축력이 발생하고 이렇게 발생한 부가 축력은 상부구조에 휨모멘트를 증가시키는 요인으로 작

용함으로써 교량의 안전성에 불리한 영향을 미치게 된다. 따라서 교량 상 협착이 발생하였거나 그 위험이 있는 경우에는 상세 구조해석을 수행하여 안전성을 판단할 필요가 있다.

이처럼 교량에서의 협착은 구조물의 내구성을 저하시키거나 안전성을 위협하는 중요한 문제임에도 불구하고 아직까지 협착교량에 대한 구조검토 방법 및 안전성 평가 방법은 정립되어 있지 않은 실정이다. 본 연구에서는 협착을 고려한 구조해석 방법을 제시하고 안전성 평가를 수행하였다. 제시된 구조해석 결과는 실제 교량 현황과 비교함으로써 검증하였다. 또한, 협착 영향을 가중시켜 구조해석을 수행함으로써 협착에 의한 교량형식별 거동 영향을 분석하였다.

2. 구조해석 및 안전성 평가

2.1 해석 개요

구조해석 및 안전성 평가에 앞서 구조해석 대상 교량을 선정하였다. 구조해석 대상 교량은 고속도로 전체 교량에 대한 유간 전수조사 결과를 참고하여 하절기에 협착이 예상되는 교량의 교량형식을 고려하여 Table 1과 같이 대표 구조형식을 선정하였다.

상부구조의 경우, 대표 강교 형식으로 강합성 박스교와 플레이트 거더교, 콘크리트 형식은 PSC 합성거더교와 슬래브교에 대해 구조해석을 수행하였다. 하부구조 형식은 직접기초

¹정회원, (주)스펙엔지니어링와이엔피 기술연구소 차장

²정회원, (주)스펙엔지니어링와이엔피 기술연구소 소장

³정회원, 한국도로공사 도로교통연구원 구조물연구실 연구위원

⁴정회원, 강원대학교 건설융합학부 조교수

*Corresponding author: hihioho@speceng.co.kr

SPEC engineering Y&P, 201, Songpa-daero, Songpa-gu, Seoul, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2023년 1월 31일까지 학회로 보내주시면 2023년 2월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Table 1 Selection of analytical bridges

Superstructure Type	Foundation Type	Span (BP/EP)	Gap in summer ¹⁾ (BP/EP)
RC Slab	Shallow	16.0m / 36.0 m	4.0mm / 0mm
PSC Girder	Piled	60.0m / 30.0 m	0mm / 19mm
Steel Box Girder	Piled	145.0m / 95.0 m	28mm / 0mm
Steel Plate Girder	Shallow	105.0m / 45.0 m	13mm / 0mm

1) Considered the temperature increase in the summer to the measured gap

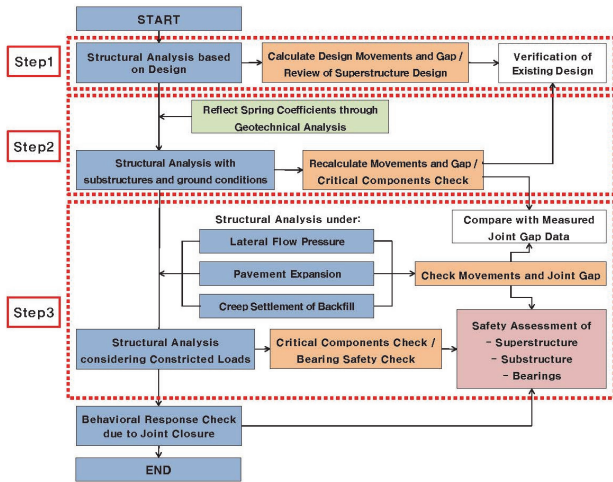


Fig. 1 Flowchart for structural analysis and safety assessment

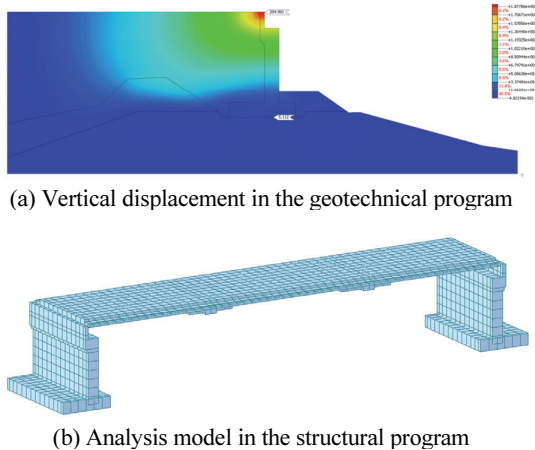


Fig. 2 Example of analysis procedure 2 (slab bridge)

와 말뚝기초를 모두 포함하도록 선정하였다.

구조해석 및 안전성 평가 흐름은 Fig. 1에 제시하였다. 절차 1의 설계단계 교량 구조해석은, 대부분의 협착교량의 경우 노후화된 교량으로써 설계 자료가 부실하거나 유실된 경우가 많으므로, 설계단계 교량의 구조 안전성을 확인하기 위해 수행되었다. 이를 위해 상부구조를 Beam 요소로 모델링하고 자중, 온

도하중 등의 설계하중을 반영하였다. 절차 2의 하부구조 및 지반조건을 고려한 구조해석은 교대 주변의 지반조건을 구현하기 위해 수행하였으며 이를 통하여 교대의 연직 스프링과 전단 스프링, 협착 후 거동시 적용할 수동토압에 대한 스프링계수를 산정하여 적용하였다. 이 때, 교대와 상부거더는 압축 전담요소(Gap)요소로 연결하여 상·하부 구조의 수평하중(온도, 토압, 크리프·건조수축 등)이 전달될 수 있도록 하였다. 절차 3은 협착상태를 구현한 단계로써, 설계단계에서 고려되지 못하는 협착 유발 인자를 하중으로 치환하여 적용하였다.

2.2 협착 하중

협착을 유발시키는 요인이나 설계에 고려되지 못하는 하중을 협착 하중으로 분류하여 적용하였다. 도로교통연구원의 연구 결과에 따르면(Korea Expressway Corporation Research Institute, 2013), 교대의 수평변위 발생원인은 시공 중 교대변위(50%), 시공오차(15%), 연약지반 측방유동(12%), 고성토구간 성토체 활동(10%), 뒤채움침하(8%), 알칼리골재반응(5%) 등으로 조사되었으며, 상기 수평변위 발생원인 중 시공원인을 제외한 인자를 정량적으로 환산하여 협착 하중으로 고려하였다. 즉, 연약지반의 측방유동, 뒤채움 침하 및 알칼리 골재반응에 의한 포장팽창, 뒷채움 침하를 고려하였다. 이 때, 측방유동의 경우 말뚝기초에만 작용하는 하중으로써 앞서 제시된 대상 교량 중 PSC 합성거더교와 플레이트거더교에 반영되었다.

2.2.1 측방유동압

연약지반에 따른 측방유동 발생여부는 한국도로공사의 수정IL 지수(Korea Expressway Corporation Research Institute, 1996)에 따라 검토하였다. 연약지반에 설치된 말뚝에 작용하는 측방유동압은 통상적으로 가장 많이 사용되는 이동변 삼각형 분포를 적용하였으며, 크기는 Tchebotarioff(1973) 등이 제안한 다음의 식을 사용하였다.

$$P_{\max} = \alpha \gamma h B \quad (1)$$

여기서, α 는 유동 압력계수, γh 는 성토하중, B 는 말뚝교축 직각 방향의 작용 폭이다.

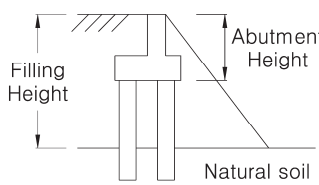
2.2.2 알칼리 골재반응에 의한 포장팽창

알칼리-골재 반응(이하 AAR: Alkali-Aggregate Reaction)은 시멘트에 존재하는 알칼리 성분이 골재의 반응성 실리카와 반응하여 팽창성 반응겔을 생성하여 콘크리트가 팽창하는 현상이다(Hong et al., 2006). 이 때 발생한 팽창압이 교대에 수평력으로 작용하면서 교대변위를 발생시키게 된다(Woo et al., 2017).

기존의 연구에 따르면 기존의 팽창줄눈, AAR, 온도에 의한

Table 2 Relationship between creep and elastic analysis

Filling Height	Creep factor
less than 10m	0.5
10m to 15m	1.0
15m to 20m	1.5
more than 25m	2.0



팽창과 포장의 마찰특성을 고려한 응력완화줄눈에 대한 시공 폭을 70mm로 제시(Korea Expressway Corporation Research Institute, 2019)하였다. 이에 포장팽창 하중은 실제 교량의 유간 현황과 구조해석 결과에 대한 반복 검토를 통해 응력완화 줄눈 시공 폭의 중간 값인 35mm로 선정하고 해당 변위가 유발되는 하중을 흙벽에 재하함으로써 하중영향을 반영하였다.

2.2.3 뒤채움 침하

뒤채움 침하는 토사 또는 자갈로 된 성토체가 매우 느린 속도로 하향 이동하는 Creep 현상으로서 흙 입자의 재배열의 의하여 발생하며 이로 인해 교대에 수평변위를 발생시킨다. 크리프 변위량은 탄성해석에서의 수평도압에 Table 2의 Creep 계수를 곱하여 고려할 수 있다(Seol et al., 2015).

3. 구조해석 및 안전성 평가 결과

3.1 유간거동 검토결과

교량형식에 따른 구조해석 절차별 발생유간 해석결과를 실제 교량의 하절기 예상 유간과 비교하였다. 구조해석 결과 Table 3과 같이 온도하중과 더불어 협착하중 고려시 모든 교량형식에서 협착이 발생하는 것으로 나타났으며, 특히, 강합성 박스거더교의 경우에는 온도에 의한 신장량 및 토압에 의한 교대변형만으로도 협착이 발생하는 것으로 검토되었다.

협착이 발생한 교량의 거동을 비교하였을 때 실제와 유사한 거동이 재현되었다는 점에서 검토방법은 타당한 것으로 판단된다. 다만 해석유간은 하절기 예상 유간에 비해 보수적인 결과가 도출되었는데 이는 아직까지 정량적으로 계산될 수 없는 포장팽창 및 교대밀림과 같은 외부요인에 의한 변위에 대해 보수적인 계산방법을 고려하였으며, 모든 협착요인이 작용하는 상태를 가정하였기 때문인 것으로 예상된다.

3.2 상부구조 검토결과

상부구조는 Fig. 3과 같이 협착이 발생하더라도 휨모멘트의 유의미한 변화는 나타나지 않았으며, 거더전반에 걸쳐 압축력만이 추가되는 것을 볼 수 있었다. RC 슬래브교의 경우 이로 인하여 휨저항성능이 증가하여 안전율이 증가하였으나, PSC

Table 3 Residual joint gap by considerations

Bridge Type		Step 2	Step 3	Joint gap
RC	BP	26.6mm	closed	4.0mm
Slab Br.	EP	31.8mm	closed	closed
PSC	BP	42.2mm	closed	closed
Girder Br.	EP	39.7mm	closed	19.0mm
Steel Box	BP	18.8mm	closed	28.0mm
Girder Br.	EP	closed	closed	closed
Steel Plate	BP	28.2mm	closed	13.0mm
Girder Br.	EP	21.1mm	closed	closed

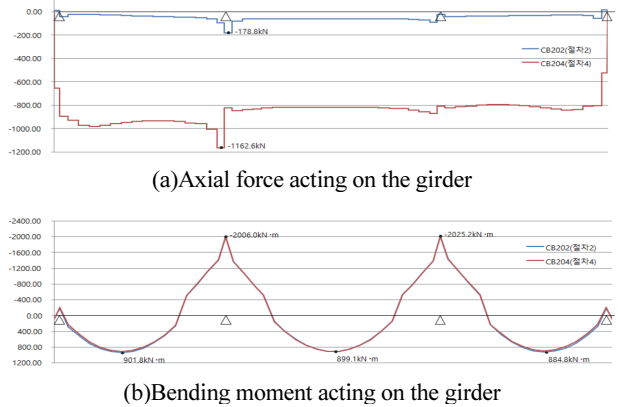


Fig. 3 Comparison of member force of slab bridge by case

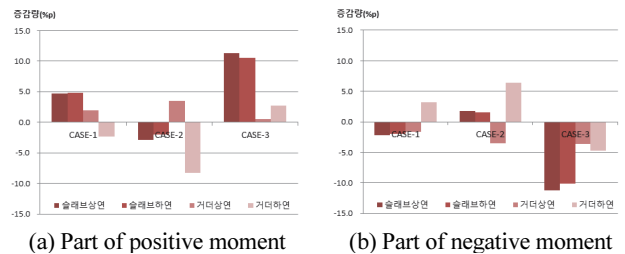


Fig. 4 Stress variation of steel box girder by case

합성거더교의 경우 이미 긴장력이 작용하는 상태에서 압축력이 추가되어 안전율이 소폭 감소하는 것으로 검토되었다.

강교의 경우 상부구조에 발생하는 협착에 의한 축력에 대하여 거더와 슬래브의 하중 분담률은 다음과 같이 3가지 경우로 설정하여 검토하였다.

- CASE#1 : 거더와 슬래브가 각각 축강성의 비율로 분담
- CASE#2 : 강재주형이 단독으로 저항
- CASE#3 : 콘크리트 슬래브가 단독으로 저항

Fig. 4에 강교의 협착 전·후, 거더의 응력 증감량을 나타내었

Table 4 Review results of substructure(steel box girder bridge)

Abutment		Mu (kN · m)	ϕ Mn (kN · m)	Check
Parapet wall (H=0.80m)	backward	658.48	461.00	N.G
	forward	390.73	233.40	N.G
Body wall (H=1.00m)	backward	2493.06	1140.10	N.G
	forward	962.59	581.20	N.G

Pile Stress		σ_c (MPa)	σ_b (MPa)	Stress ratio	Check
BP	Comp.	85.58	59.31	1.035	N.G
	Tens.	29.21	82.31	0.797	O.K
EP	Comp.	79.50	74.34	1.099	N.G
	Tens.	22.62	66.49	0.636	O.K

다. 압축력이 작용하는 정모멘트부의 슬래브 및 거더상연, 부모멘트의 거더하연의 응력은 증가한다. 반대로 정모멘트부의 거더하연과 부모멘트부의 슬래브 및 거더상연의 응력은 감소하게 된다. 강제주형이 모든 압축력에 저항하는 CASE#2의 경우가 거더의 응력변화량이 가장 크게 나타나므로, 거더 안전성 검토시 가장 불리한 방법인 것으로 판단된다.

3.3 하부구조 검토결과

교대는 일반적으로 배면에서 작용하는 하중에 저항하도록 설계한다. 그러나 협착이 발생한 경우 협착상태에서 온도가 상승하면 교대 상단에 배면으로 하중이 작용하게 되며, 흙벽 및 벽체는 매우 취약한 상태가 된다.

하부구조 검토결과, Table 4와 같이 협착 발생시 교대의 흙벽과 벽체의 전, 후면, 교좌장치 및 말뚝 등 하부구조 대부분 부재에서 단면이 부족하거나 그 허용치를 초과하는 것으로 확인되었다. 다만, 협착 발생시 가장 취약한 구조부재는 흙벽으로 과도한 협착이 발생할 경우에는 흙벽이 먼저 파괴됨으로써 교대벽체에 실제로 전해지는 하중은 크지 않을 것으로 예상된다.

4. 협착에 의한 거동 영향 분석

각 교량의 상부형식에서 가장 불리한 단면을 기준으로 협착하중 증가에 따른 영향을 검토하였다. 이를 위해 협착상태가 구현된 모델링에서 거더에 작용하는 협착영향을 거더에 작용하는 축력으로 고려하고, 축력 증감에 따른 교량형식별 안전을 변화 경향을 확인하였다. 작용 압축력(P)은 앞서 수행한 협착시의 축력(P₀)을 기준으로 축력이 없는 경우(P/P₀=0)부터 최대 5배(P/P₀=5)까지 증가시키며 검토하였다.

4.1 콘크리트교

Fig. 5은 RC슬래브교와 PSC 합성거더교의 축력 증감에 따

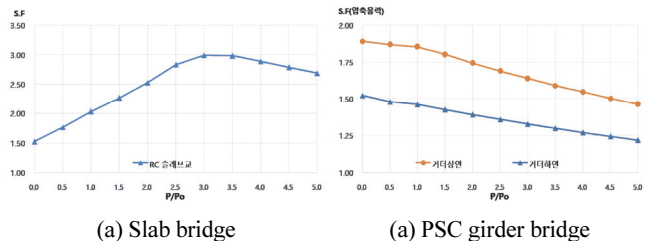


Fig. 5 Flexural resistance of con'c bridge with increasing axial force

른 교량의 안전을 변화를 나타낸 것이다. 슬래브교는 축력이 증가함에 따라 일정 수준까지 단면의 휨저항이 증가하나 이후 그 안전율은 점차 감소하는 경향을 보인다. 이는 균형편심을 기준으로 저항모멘트가 변화하는 기둥의 축력-모멘트 상관관계와 유사한 거동으로서, 축력 증가에 따라 거더는 보에서 기둥으로 그 거동 변화를 보여준다. PSC 거더교는 축력이 증가함에 따라 안전율이 점차 낮아지는 경향을 보이며, 검토 대상 단면은 부모멘트부이므로 거더상연보다는 하연의 안전율이 낮은 것으로 계산된다. PSC교는 보통 프리스트레스에 의하여 이미 강한 압축력을 받는 상태이므로, 추가로 압축력이 더해질수록 거더의 압축응력이 허용응력에 근접하게 되며, 따라서 그 안전율이 낮아지게 된다.

그러나 상기 검토 결과는 거동 영향을 분석하기 위해 협착에 의한 압축력을 과다하게 증가시킨 경우로써, 현실에서는 주기적으로 교량의 유지관리 및 점검이 수반하므로 협착에 의한 발생축력이 극단적으로 증가하지는 않는다. 따라서 협착발생시 슬래브교의 단면성능은 유리해지는 경향으로 판단하는 것이 타당하다. 다만, PSC 거더교의 경우 이미 거더 내 상당한 수준의 긴장력이 도입된 상태이므로, 오히려 압축부의 발생응력이 허용응력을 초과할 여지가 있다. 따라서 PSC 거더교의 경우 협착발생 조건에 대해 구조해석을 수행하여 그 안전성을 확인하는 것이 바람직하다.

4.2 강교

강합성 박스거더교와 플레이트거더교의 경우 전반적으로 유사한 거동 경향을 보였다. 강제거더의 상·하연 플랜지는 모멘트에 따라 각각 압축응력과 인장응력을 나누어 받으며 여기에 압축응력이 추가되는 구조이다. 따라서 정모멘트부의 상부 플랜지, 부모멘트부의 하부플랜지에 대해 그 안전성을 검토하여야 한다. 특히 이 중에서 국부좌굴의 위험이 있는 부모멘트부 하부플랜지는 가장 불리한 검토단면으로 고려되어야 한다.

축력 증감에 따른 박스거더교의 휨단면저항 변화 검토 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 위험단면이 정모멘트부의 상부플랜지와 부모멘트부의 하부플랜지일 경우에는 CASE#2의 검토방법이 더 보수적인 결론을 도출하는 것으로 검토되었다.

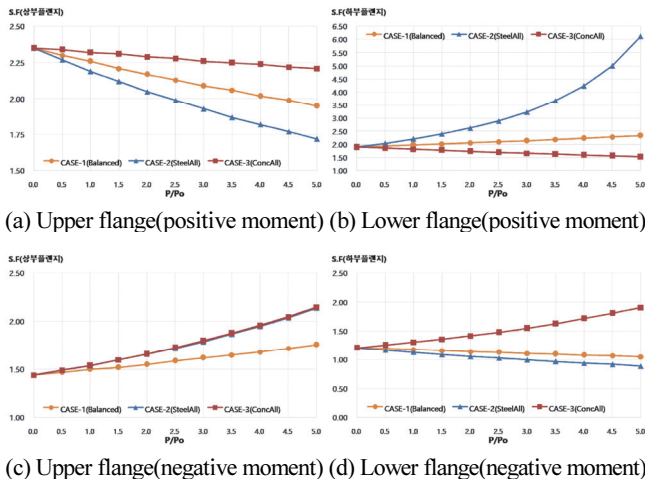


Fig. 6 Flexural resistance of steel bridge with increasing axial force

반대로 정모멘트의 하부플랜지는 CASE#3 에서 더 불리한 결과가 도출되었으며, 부모멘트부의 상부플랜지는 CASE#2 와 3이 비슷한 경향을 나타내었다. 따라서 강합성 교량은 협착 발생시 개별 위험단면에 대하여 강제주형 또는 콘크리트 슬래브가 단독으로 축력에 저항하는 경우에 대해 각각 고려하여 구조검토를 수행하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 협착교량에 대한 구조해석 방법을 제시하고, 그에 따라 대표형식 교량에 대한 협착상태 구조해석을 수행하여 그 거동 영향을 확인하였다. 대표교량은 상부구조의 경우 콘크리트교와 강교, 하부구조의 경우 직접기초와 말뚝 기초로 구분하여 선정하였으며, 지반 및 하부구조의 영향을 고려할 수 있는 구조해석 방법을 제시하였다.

협착 하중조건으로는 온도하중에 의한 거더 신장, 알칼리 골재반응에 의한 포장팽창과 지반변형에 따른 교대밀림 및 연약지반에 의한 측방유동을 고려하였으며, 교량의 협착여부를 검토하고 협착이 발생할 경우 이에 따른 구조물 주요 단면의 안전성을 검토하였다. 이후 협착시 상부구조에 작용하는 축력을 증가시키며 협착에 의한 상부구조의 거동 영향 분석을 실시하였다. 협착발생에 따른 안전성 검토 및 거동 분석 결과를 아래에 요약하였다.

- 온도하중, 포장팽창 및 교대밀림 등 협착에 영향을 주는 조건을 고려한 구조해석 결과, 신축이음부 발생변위는 실제 교량의 측정유간을 토대로 계산된 하절기 예상 변위보다 비교적 큰 값으로 산정되었다.
- 협착교량 구조해석 결과, 협착에 따른 상부구조의 휨모멘트 변화는 적으나 거더 전반에 걸쳐 축력이 증가하고 이

에 따른 안전을 변화가 확인되었다. 하부구조의 경우 협착 발생시 교대의 흙벽, 벽체, 말뚝 등 대부분 부재에서 단면이 부족하거나 그 허용치를 초과하였다.

- 협착에 의한 거동 영향 분석 결과, RC 슬래브교는 거더 내부 축력 증가에 따라 그 단면저항 증가하여 안전성에 유리한 경향을 보였다.
- PSC 합성거더교는 거더부의 부가 축력에 따라 축응력과 휨압축응력이 증가하는 경향을 보이며, 이에 따라 발생응력이 허용응력을 초과할 우려가 있는 것으로 확인되었다.
- 강합성 박스거더교와 플레이트거더교는 협착 발생시 유사한 거동을 보였다. 정모멘트부의 경우 거더상연에서, 부모멘트부의 경우 거더하연에서 압축응력이 증가하였으며 이에 따라 해당 구간의 안전율이 저하되는 것으로 확인되었다.
- PSC 합성거더교와 강교에 협착이 발생하였거나 우려되는 경우에는 협착을 고려한 별도의 구조해석을 수행하여 상부구조의 안전성을 검토하는 것이 바람직하다.

감사의 글

이 논문은 한국도로공사 도로교통연구원의 ‘협착 대응 교량 신축이음 적정시공 및 관리기준 연구’ 내용을 기초로 작성되었으며, 2022년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다(2022RIS-005).

References

1. Kim, K. H., Park, C. H., and Lee, S. R. (2018), Maintenance Plan of Constricted Bridge by Lateral Movement of Abutment, Expressway, *Korea Expressway Corporation*, 85, 132-140
2. Lee, S. R. (2015), A study on the Status and Causes of Lateral Movement of Bridge Abutment through the Analysis of Domestic and Foreign Cases, *Geoenvironmental Engineering, Korean Geo-Environmental Society*, 16(1), 5-13
3. Korea Expressway Corporation Research Institute (2013), Cause of Lateral Movement of Bridge Abutment and Countermeasure.
4. Korea Expressway Corporation Research Institute (1996), A study on Protection Method for Lateral Movement of Abutment (II).
5. Tschebotarioff, G.P. (1973), *Foundation design and Construction*, 2nd ed., McGraw-Hill, NY.
6. Hong, S. H., Han, S. H., and Yun, K. K. (2006), A Case Study for Deterioration due to Alkali-Silica Reaction in the Cement Concrete Pavement, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 18(3), 355-360
7. Woo, J. W., Yhim, S. S. (2017), Concrete Pavement Expansion due to Alkali-Aggregate Reaction and Damage Prevention of Bridges, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 21(5), 67-73

8. Korea Expressway Corporation Research Institute (2019), A Study on Pressure Relief Joint to Prevent a Blow-up of Concrete Pavement.
9. Seol, U. H., Gwak, S. G., Bae, B. H., and Park, J. S. (2015), Method of Minimizing the Horizontal Displacement of Bridge Abutment on Landfill, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 63(2), 54-59.

Received : 09/06/2022

Revised : 12/06/2022

Accepted : 12/09/2022

요 지 : 지속적인 폭염이 발생함에 따라 협착으로 인한 포장 솟음이나 교량 신축이음 파손 사례가 다수 발견되고 있다. 특히 교량에서의 협착은 구조물의 안전성을 위협하거나 장기적인 내구성을 저하시킬 수 있는 중요한 문제이다. 본 논문에서는 교량에 협착이 발생할 경우에 대한 구조해석 방법을 제시하고, 대표형식 교량에 대한 협착상태 구조해석을 수행하여 그 거동 영향을 확인하였다. 대표교량은 상부구조의 경우 콘크리트교와 강교, 하부구조의 경우 직접기초와 말뚝기초로 구분하여 선정하였으며, 측방유동압, 알칼리 골재반응에 의한 포장팽창, 뒤채움재의 Creep로 인한 침하를 협착에 대한 추가적인 하중으로 고려하였다. 구조해석 결과를 실제 측정된 유간 데이터와 비교하여 구조해석 방법을 검증하였다. 또한 협착에 의한 거동 영향 분석을 수행하여 축력이 증가함에 따른 상부구조의 형식별 안전율 변화 경향을 확인하였다.

핵심용어 : 협착, 협착교량, 측방유동, 알칼리 골재반응, 교량 구조해석
