

# 단경간 2련 강박스 거더 곡선교의 사각에 따른 부반력 특성

## Negative Support Reactions of the Single Span Twin-Steel Box Girder Curved Bridges with Skew Angles

박 창 민<sup>1)</sup>      이 형 준<sup>2)\*</sup>  
Park, Chang Min    Lee, Hyung Joon

### Abstract

The behaviors of the curved bridges which has been constructed in the RAMP or Interchange are very complicate and different than orthogonal bridges according to the variations of radius of curvature, skew angle and spacing of shoes. Occasionally, the camber of girder and negative reactions can be occurred due to bending and torsional moment. In this study, the effects on the negative reaction in the curved bridge were investigated on the basis of design variables such as radius of curvature, skew angle, and spacing of shoes. For this study, the twin-steel box girder curved bridge with single span which is applicable for the RAMP bridges with span length(L) of 50.0m and width of 9.0m was chosen and the structural analysis to calculate the reactions was conducted using 3-dimensional equivalent grillage system. The value of negative reaction in curved bridges depends on the plan structures of bridges, the formations of structural systems, and the boundary conditions of bearing, so, radius of curvature, skew angle, and spacing of shoes among of design variables were chosen as the parameter and the load combination according to the design standard were considered.

According to the results of numerical analysis, the negative reaction in curved bridge increased with an decrease of radius of curvature, skew angle, and spacing of shoes, respectively. Also, in case of skew angle of 60° the negative reaction has been always occurred without regard to  $\theta/B$ , and in case of skew angle of 75° the negative reaction hasn't been occurred in  $\theta/B$  below 0.27 with the radius of curvature of 180m and in  $\theta/B$  below 0.32 with the radius of curvature of 250m, and in case of skew angle of 90° the negative reaction hasn't been occurred in the radius of curvature over 180m and in  $\theta/B$  below 0.38 with the radius of curvature of 130m. The results from this study indicated that occurrence of negative reaction was related to design variables such as radius of curvature, skew angle, and spacing of shoes, and the problems with the stability including negative reaction will be expected to be solved as taken into consideration of the proper combinations of design variables in design of curved bridge.

**Keywords** : Twin-steel box girder, Curved bridge, Negative reaction, Radius of curvature, Skew angle, Spacing of shoes

### 1. 서론

곡선교는 외력에 의한 휨모멘트뿐만 아니라 기하학적 평면형상과 지점의 지지조건에 의해 비틀림 모멘트가 발생하게 되며, 지점에는 비틀림모멘트에 의해 곡선내측과 외측지점의 반력크기가 달라지고 경우에 따라서는 부반력이 발생하게 된다. 또한, 비틀림모멘트에 의해 거더에는 상향과 하향의 수직방향의 변위가 발생하여 비틀림 변형을 일으키며, 지점에는 비틀림모멘트에 의한 반력으로 인해 받침의 반력 분포는 내측과 외측이 서로 크게 달라진다. 곡선교에서 곡률이 커지면 지점부에는 큰 비틀림

모멘트가 발생하고, 이 비틀림모멘트에 의한상향의 수직 반력이 연직하중에 의한 수직반력보다 크게 되면 내측받침에는 부반력이 발생한다. 이와 같은 부반력은 연속곡선교에서 보다 단순곡선교에서 크게 발생하며, 이 부반력은 곡선교의 평면형상에 의한 것이므로 곡률이 매우 큰 경우에는 고정하중의 작용만으로도 부반력이 발생할 수 있으며, 활하중의 편심작용과 원심력 하중이 작용하는 경우에는 작용위치에 따라 정반력 또는 부반력이 발생한다. 이는 부상방지장치를 설치한 일반적인 받침에 정반력과 부반력이 반복 작용하여 받침에 충돌이 발생하므로 소음의 원인이 될 뿐만 아니라 받침에 심각한 손상을 초래하는

1) 정회원, 드림이앤지(주) 이사

2) 정회원, 한밭대학교 건설환경공학과 부교수, 교신저자

\* Corresponding author : leehj@hanbat.ac.kr 042-821-1112

• 본 논문에 대한 토의를 2012년 8월 31일까지 학회보 보내주시면 2012년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

등 교량의 사용성과 안전성에 영향을 미친다.

김용국(1997)은 3경간 연속 RC 슬래브 사교의 각도변화에 따른 지점 반력의 특성에 대한 연구를 수행하였고, 이학수(2003)는 2경간 철근콘크리트 슬래브 사교의 부반력에 관한 매개변수 연구에서 영향면을 이용하여 차량하중의 재하로 사각에 따른 지점반력을 평가하는 연구를 수행하였다. 박승수 등(2007)은 램프교에 적용된 곡선반경이 55m인 5경간 연속 PSC 박스거더 곡선교의 부반력 발생 진단사례를 소개하여 곡선교의 설계시 부반력의 제어의 필요성을 언급하였다. 조선규 등(2003)은 단경간 강합성 곡선교에서 경간장, 곡선반경 및 받침지지폭의 변화에 따른 부반력 특성에 대한 매개변수 연구를 수행하였고, 조선규 등(2005, 2006)은 단경간 곡선 강박스거더교에 대해 포트받침을 사용하는 경우, 받침하부 앵커볼트에 발생하는 불균등 부반력을 유한요소해석을 통해 산출하여, 현행설계방법에 의해 산출된 앵커볼트의 설계 부반력과 비교하는 연구를 수행하였다. Gupta 등(2007)은 RC T형 거더 사교를 대상으로 격자해석을 수행하여 사각과 지간길이에 따른 부반력 발생 특성을 분석하였으며, Zureick 등(2000)은 곡선 강 I형 거더교에 대한 실험과 해석 연구를 수행하여 주로 거더의 강도에 대해 분석하였으며 부반력에 대한 별도의 검토는 이루어지지 않았다. Lin과 Yuda(2000)는 강합성 교량에 대해 해석, 설계 및 시공에 관련하여 지금까지 발표되었던 다양한 연구결과를 분석한 결과를 발표하였으나 부반력에 대한 내용은 언급되지 않고 있다. 이상에서 살펴본 바와 같이 콘크리트 사교에서는 사각을 고려하여 부반력 특성에 대해 연구하였으나 대상교량이 곡선교가 아니며, 곡선교에서는 설계속도, 경간 길이, 곡선반경, 받침 지지폭 등이 부반력에 미치는 영향에 대해 검토되었으나, 교량의 사각에 대한 영향을 고려하지 않고 있다.

본 연구에서는 곡선교의 부반력의 특성을 규명하기 위하여 설계속도에 따른 곡선반경, 받침의 횡방향 지지거리 뿐만 아니라 곡선교의 부반력에 영향을 미치는 받침부의 사각을 매개변수로 하여 부반력의 특성을 비교검토 하였다. 이를 위하여 램프교에 적용이 가능한 지간(L)이 50m인 2련 강박스거더 단순 곡선교를 대상으로 도로교설계기준(2010)에 따른 하중조합에 대해 3차원 격자해석으로 구조해석을 수행하여 반력의 크기를 산정하고, 해석결과 분석을 통해 부반력이 발생하는 곡선반경, 받침간격 및 사각을 도출하고자 하였다.

## 2. 단경간 강박스거더 곡선교의 해석 모델

### 2.1 해석대상교량 및 해석 모델

곡선교의 부반력 특성을 분석하기 위해 매개변수 해석에 적용된 교량 형식은 고속국도 램프교 기준을 적용하여 Fig. 1과 같은 단면형상을 갖는 단순곡선 2련강 박스거더교로 선정하였고, 교량의 제원은 교량폭원이 9.0m인 2차로이고, 교량지간(L)은 50.0m이다. 박스거더 사이에는 가로보가 설치되고 지점부에는 다이어프램이 설치되어 있다. 도로의 구조, 시설기준에 관한 규칙(2010)에 따라 램프교 특성에 적용 가능한 설계속도 40~80 km/hr에서 편구배 8%를 적용하였고, 종단구배는 없는 것으로 하였다.

곡선교의 해석모델은 보요소를 이용하여 Fig. 2와 같이 3차원 뼈대구조로 구성하였다. 각각의 박스거더는 중심축에서 종방향으로 보요소로 모델링하였고, 박스거더 사이에 설치된 가로보는 거더를 연결하는 보요소로 모델링 하였으며, 받침부에서는 박스거더의 중심위치에서 받침까지 무한강성을 갖는 보요소로 연결된 것으로 하여 뼈대구조로 모델링하였다. (Hambly(1991), Nakai 등(1988), 조

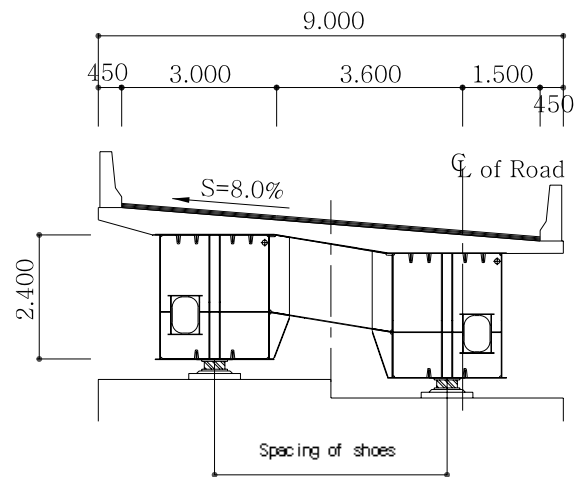


Fig. 1 Cross section of the twin-steel box girder bridge

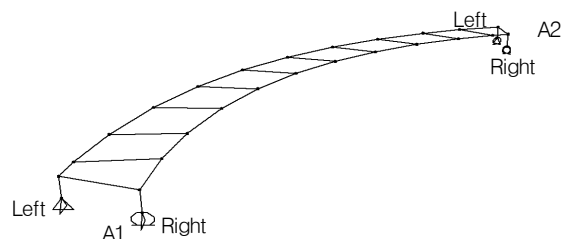


Fig. 2 Modeling of curved box girder bridge with frame element

선규 등 (2003)). 부재는 보 요소를 사용하였으며, 합성 전 구조와 합성후 구조에 대하여 각각 단면 특성값을 사용하여 해석하였다. 지점의 경계조건은 A1 좌측을 고정단, A1 우측과 A2 좌측을 1방향 가동단(교축방향), A2 우측을 양방향 가동단이 설치되는 것으로 하였다. 이때 경계조건의 구속방향은 국부좌표계를 사용하여 각 지점에서의 접선방향을 기준으로 하였다. 구조해석은 범용 구조해석 프로그램인 SAP2000(1996)을 이용하여 수행하였다.

## 2.2 매개변수

본 연구에서는 곡선교의 부반력의 특성을 규명하기 위하여 곡선반경, 받침간격(받침의 횡방향 지지거리) 및 교량의 사각을 매개변수로 매개변수해석을 수행하였다. 각 매개변수의 정의는 Fig. 3과 같으며, 각 매개변수의 변화량을 다음과 같이 하여, 총 75가지의 설계변수 조합에 대해 구조해석을 수행하였다. 매개변수의 선정은 한국도로공사에서 건설하여 관리하고 있는 교량의 자료를 참조로 하여 매개변수의 범위를 선정하였다. 자료에 의하면 경간장이 45m인 경우 곡선반경이 43.6m인 강박스 곡선교, 경간장 50m이고 곡선반경이 50m인 강박스 곡선교 등이 건설되어 있으며, 경간장이 45m인 단순 강박스교량에서도 곡선반경을 70m로 하여 시공된 교량이 있다. 따라서 매개변수중 곡선반경의 선정은 이를 참조로 하여 아래와 같이 선정하였다.

- 곡선반경 (R) : 50, 80, 130, 180, 250(m)
- 교량받침간격 (B) : 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5(m)
- 교량의 사각( $\theta$ ) : 곡선반경별로 60, 75, 90( $^{\circ}$ )

여기서, 곡선반경의 최소값 50m는 도로의 램프부분에 적용하는 도로선형의 최소 곡선반경을 고려하여 선정하였으며, 교량 사각( $\theta$ )은 일반적으로 사교에서는 교축직각 방향과 받침간 거리의 직선 사이의 각으로 정의되나 본 연구에서는 교축방향과 받침간 거리의 직선 사이의 각으로 하여 Fig. 3(c)에서와 같이 정의하여 사용하였다.

## 2.3 작용하중 및 하중조합

강박스 합성거더 곡선교의 거동 해석은 고정하중, 충격하중을 포함한 활하중, 원심하중 및 풍하중을 고려하여

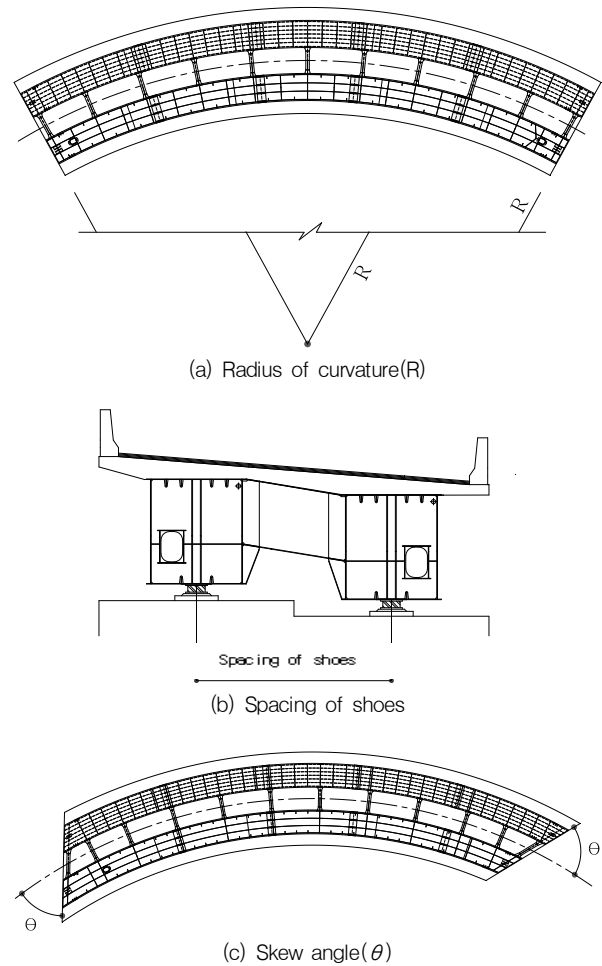


Fig. 3 Definition of radius of curvature(R), spacing of shoes(B) and skew angle( $\theta$ )

수행하였다. 고정하중은 합성전 고정하중(강재하중), 합성전 및 후 고정하중(콘크리트 바닥판 하중)으로 곡선교의 경우 바닥판의 노면경사로 인해 양쪽 거더에 작용하는 바닥판 하중은 다르게 된다. 따라서 합성전 고정하중인 콘크리트 바닥판에 대해서는 횡단면도상 각 위치별 바닥판 하중을 산정하여 하중재하 및 횡방향 하중분배를 통해 각 거더에 작용하는 하중 및 모멘트를 산정하였다. 여기서 구해진 반력과 모멘트를 다시 3차원 해석모델에 분포하중과 모멘트로 재하하였다. 합성후 고정하중은 2차 고정하중으로서 아스팔트 콘크리트 포장과 방호벽하중을 포함하였으며, 합성후 고정하중은 바닥판과 동일한 방법으로 재하하였다.

활하중은 곡선교와 같이 차량의 편심재하에 대한 설계가 중요한 교량에서는 표준차로폭이나 설계차로폭에 관계없이 DB하중이나 DL하중을 표준 점유폭인 3.0m 마다 연속시켜서 설계 차선수 이내로 최대의 편심효과가 일어

Table 1 Calculation of live load

Load	DB-24	DL-24	Dynamic Load Allowance(I)
Live Load	$P_f = 24.0\text{kN}$ $P_{r..} = 96.0\text{kN}$	$W=4.2\text{kN/m}$ $P_m=36.0\text{kN}$ $P_s=52.0\text{kN}$	$I = \frac{15}{40 + 50}$ $= 0.167 < 0.3$

Table 2 Combinations of loads and load Factors

Load case	Load combination	Rating factor
CASE 1	D.L.+ L.L + CE	1.00
CASE 2	D.L. + L.L + CE + W	1.25
CASE 3	D.L.+ L.L	1.20
CASE 4	D.L.+ 2×L.L(including I)	Negative reaction
CASE 5	D.L.+ W	

<Note> D.L.:Dead load, L.L.:Live load, CE:Centrifugal force, W:Wind load

날 수 있도록 재하하였다. 따라서 구조해석시 활하중은 재하가능한 차선중에서 가장 큰 윤하중은 2차선 재하시에 나타났기에, 활하중은 2차선에 동시에 편심으로 재하하여 최대 부재력을 산정하였고, 구조해석에 적용한 활하중의 크기는 Table 1과 같다.

원심하중은 도로교 설계기준(2010)에 따라 노면위에서 1.8m에 떨어진 위치에 재하였다. 활하중 재하위치의 수평 집중하중과 해석모델의 실제 원심하중이 작용하는 위치와의 거리를 편심으로 하는 우력모멘트로 원심하중을 재하하였다. 원심하중의 크기는 도로교 설계기준에 따라 곡선반경이 150m 이내인 경우에는 설계속도 40km/h, 곡선반경이 200m 이상인 경우에는 60km/h로 하여 계산하였다. 또한, 교량의 상부구조에 작용하는 풍하중은 교축에 직각으로 작용하는 수평하중으로 부재에 가장 불리한 단면력을 발생시키도록 재하하였다.

하중조합 및 증가계수는 도로교설계기준(2010)에 따라 Table 2와 같이 상부구조의 단면설계를 할 때 사용되는 하중조합중 일부인 3개 조합(CASE1~CASE3)과 받침부의 부반력을 검토할 때 적용하는 하중조합 2개(CASE4, CASE5)로 하였으며, 각 하중조합별 구조해석 결과를 비교분석하였다.

### 3. 해석결과 및 분석

#### 3.1 하중조합별 지점반력

교량의 사각( $\theta$ ), 받침부의 횡방향 지지간격(B) 및 곡선반경(R)에 따른 각 받침에서의 반력을 각 하중조합에

Table 3 Negative reactions in case skew angle  $\theta=90^\circ$  (unit:kN)

Spacing of shoes(B)	Load case	Radius of curvature, R(m)				
		50	80	130	180	250
3.5m	CASE 1	-3444.1	-1303.7	994.9	1473.0	1825.8
	CASE 2	-4399.5	-1721.7	1162.0	1760.9	2206.8
	CASE 3	-3106.7	-1096.7	95.7	649.0	1052.9
	CASE 4	-4409.6	-1849.8	-403.8	223.6	660.7
	CASE 5	-2589.0	-913.9	79.8	540.8	877.4
4.0m	CASE 1	-2800.4	-904.2	1140.0	1559.8	1873.4
	CASE 2	-3583.1	-1210.9	1353.5	1879.5	2275.7
	CASE 3	-2509.4	-726.2	337.8	822.1	1176.5
	CASE 4	-3609.6	-1342.2	-65.8	483.9	860.6
	CASE 5	-2091.1	-605.2	281.5	685.1	980.4
4.5m	CASE 1	-2294.1	-595.1	1248.8	1622.9	1907.9
	CASE 2	-2941.0	-815.5	1497.5	1966.2	2326.2
	CASE 3	-2039.0	-437.3	519.9	951.5	1268.3
	CASE 4	-2980.0	-950.7	182.2	670.1	1006.0
	CASE 5	-1699.1	-364.4	433.2	792.9	1056.9
5.0m	CASE 1	-1886.8	581.3	1332.8	1672.5	1932.2
	CASE 2	-2424.6	662.1	1608.8	2034.4	2362.4
	CASE 3	-1660.0	-207.1	661.5	1053.1	1337.2
	CASE 4	-2473.8	-642.4	372.2	811.7	1112.7
	CASE 5	-1383.3	-172.6	551.2	877.6	1114.3
5.5m	CASE 1	-1555.1	710.1	1399.1	1706.5	1950.5
	CASE 2	-2064.0	770.3	1644.9	2030.9	2342.0
	CASE 3	-1351.0	-21.2	774.0	1128.7	1391.0
	CASE 4	-2061.5	-396.4	520.6	916.4	1191.2
	CASE 5	-1125.9	-17.6	645.0	940.6	1159.2

대하여 3차원 격자구조 해석을 수행하여 계산하였다.

교량의 사각, 받침 간격 및 곡선반경에 관계없이 일반적으로 고정하중, 활하중, 원심하중 및 풍하중을 모두 고려한 하중조합 CASE 2에서 최대 정반력 및 부반력이 발생하는 것으로 나타났으며, 정반력은 A1 좌측, 부반력은 A1 우측 받침에서 발생하는 것으로 나타났다. 도로교설계기준에서 규정하고 있는 받침에 작용하는 부반력을 검토할 때 적용하는 하중조합중에서는 활하중과 고정하중을 고려한 경우(CASE 4)에 가장 큰 부반력이 발생하는 것으로 나타났으며, 그 크기는 CASE 2보다 다소 작게 나타났다으나 일부 곡선반경 및 받침간격 조합에서는 CASE 2보다 크게 나타났다.

사각이 90°인 경우에는 곡선반경이 50m, 80m일 때 받침간격에 관계없이 A1 및 A2 우측 받침에서 부반력이 동시에 발생하는 것으로 나타났다. 또한, 사각이 60°인 경우에는 받침간격과 곡선반경에 관계없이 부반력은 A1

Table 4 Negative reactions in case skew angle  $\theta=75^\circ$  (unit:kN)

Spacing of shoes(B)	Load case	Radius of curvature, R(m)				
		50	80	130	180	250
3.5m	CASE 1	-4478.6	-2276.1	-1056.7	584.0	920.3
	CASE 2	-5692.6	-2937.3	-1402.5	649.6	1074.9
	CASE 3	-4144.6	-2082.2	-922.8	-384.5	5.0
	CASE 4	-5623.9	-2975.8	-1531.0	-876.0	-415.9
	CASE 5	-3453.8	-1735.2	-769.0	-320.4	4.2
4.0m	CASE 1	-3631.5	-1749.5	-656.7	794.6	1090.1
	CASE 2	-4621.9	-2267.5	-892.3	923.0	1296.6
	CASE 3	-3353.5	-1580.4	-539.1	-67.2	274.2
	CASE 4	-4575.4	-2322.8	-1027.7	-459.9	-63.2
	CASE 5	-2794.6	-1317.0	-449.3	-56.0	228.5
4.5m	CASE 1	-3027.1	-1299.4	596.9	955.3	1215.9
	CASE 2	-3857.3	-1696.0	682.6	1131.6	1461.1
	CASE 3	-2782.7	-1160.1	-239.6	175.5	476.6
	CASE 4	-3831.8	-1757.8	-624.7	-134.3	209.7
	CASE 5	-2318.9	-966.8	-199.6	146.3	397.2
5.0m	CASE 1	-2540.4	-975.9	753.2	1077.4	1312.6
	CASE 2	-3241.6	-1284.4	884.3	1290.5	1587.9
	CASE 3	-2323.5	-850.5	-13.6	361.1	633.1
	CASE 4	-3232.4	-1357.0	-338.4	95.0	404.2
	CASE 5	-1936.2	-708.7	-11.3	300.9	527.5
5.5m	CASE 1	-2142.2	-715.1	878.8	1174.1	1388.9
	CASE 2	-2737.8	-952.5	1046.5	1416.5	1688.1
	CASE 3	-1947.7	-599.0	167.4	508.8	757.3
	CASE 4	-2741.9	-1035.1	-116.1	274.3	555.2
	CASE 5	-1623.1	-499.2	139.5	424.0	631.1

우측에서만 발생하였고, 사각이 75°인 경우에는 곡선반경이 50m일 때 받침간격에 관계없이 A1 및 A2 우측 받침에서 부반력이 동시에 발생하는 것으로 나타났다. 각 매개변수별로 해석한 결과 중 A1 우측 받침에 발생하는 반력을 정리한 것은 Table 3에서 Table 5와 같다. Table 3은 받침부 사각이 90°인 경우이고, Table 4 및 Table 5는 받침부 사각이 각각 75°, 60°인 경우이다. 곡선반경이 작을수록, 받침부 간격이 작을수록 부반력이 크게 발생하였으며, 동일한 곡선반경 및 받침 간격에 대해서는 사각이 작을수록 부반력이 크게 발생하는 것으로 나타났다.

### 3.2 곡선반경에 따른 지점반력 특성

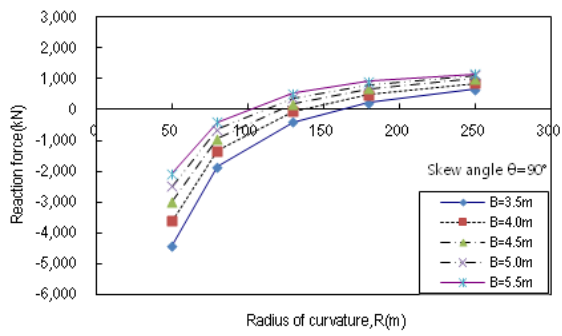
도로교 설계기준에서는 받침의 부반력을 검토할 때 적용하는 하중조합중에서 CASE 4에서 최대의 부반력이 발생하므로 본 연구에서는 CASE 4를 기준으로 곡선반경에

Table 5 Negative reactions in case skew angle  $\theta=60^\circ$  (unit:kN)

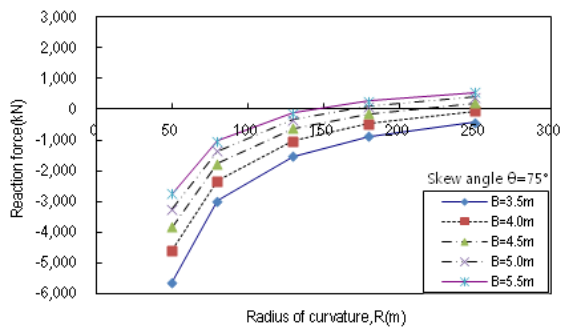
Spacing of shoes(B)	Load case	Radius of curvature, R(m)				
		50	80	130	180	250
3.5m	CASE 1	-4963.4	-2943.9	-1869.1	-1357.5	-991.2
	CASE 2	-6298.6	-3772.0	-2418.1	-1777.1	-1314.5
	CASE 3	-4641.7	-2760.7	-1748.1	-1262.0	-911.7
	CASE 4	-6183.0	-3742.5	-2464.5	-1857.2	-1424.7
	CASE 5	-3868.1	-2300.6	-1456.7	-1051.7	-759.8
4.0m	CASE 1	-4119.3	-2322.3	-1358.3	-909.3	-590.6
	CASE 2	-5231.7	-2983.5	-1769.3	-1206.8	-804.4
	CASE 3	-3837.2	-2163.2	-1252.8	-824.4	-517.7
	CASE 4	-5151.7	-2979.3	-1833.2	-1301.6	-927.0
	CASE 5	-3197.7	-1802.7	-1044.0	-687.0	-431.4
4.5m	CASE 1	-3449.4	-1838.9	-969.7	-571.2	616.8
	CASE 2	-4385.2	-2370.3	-1275.6	-776.4	712.3
	CASE 3	-3200.2	-1697.1	-873.7	-491.3	-216.7
	CASE 4	-4331.5	-2386.9	-1354.6	-884.5	-552.3
	CASE 5	-2666.9	-1414.3	-728.1	-409.4	-180.5
5.0m	CASE 1	-2908.8	-1452.1	-668.5	567.6	781.2
	CASE 2	-3702.0	-1879.6	-892.8	653.3	923.6
	CASE 3	-2686.8	-1323.6	-577.3	-230.5	17.4
	CASE 4	-3668.9	-1913.0	-985.4	-562.9	-267.6
	CASE 5	-2239.0	-1103.0	-481.1	-192.1	14.5
5.5m	CASE 1	-2465.1	-1138.8	443.4	716.5	908.5
	CASE 2	-3141.4	-1482.2	502.3	844.6	1087.6
	CASE 3	-2265.6	-1020.5	-340.3	-22.5	200.2
	CASE 4	-3124.7	-1529.5	-693.7	-310.9	-50.9
	CASE 5	-1888.0	-850.4	-283.6	-18.7	166.8

따른 지점반력 특성을 분석하였다. 사각과 받침간격에 대해 곡선반경을 매개변수로 하여 해석한 결과를 그림으로 나타내면 Fig. 4와 같다. 각각의 사각에 대하여 곡선반경이 증가하면 부반력이 비선형적으로 감소하는 경향을 보였다. 사각에 따라 차이가 있으나, 일반적으로 곡선반경이 150m 이하에서는 곡선반경의 증가에 따른 부반력의 감소폭이 크고, 곡선반경이 150m 이상일 때에는 곡선반경의 증가에 따른 반력의 감소폭이 작은 것으로 나타났다.

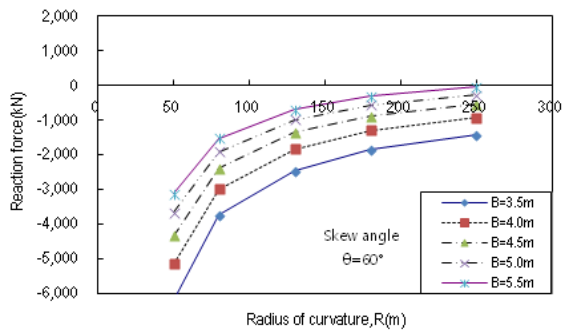
Fig. 4(a)은 사각 90°인 경우에 곡선반경에 따른 반력을 나타낸 것으로, 곡선반경 180m 이상에서는 부반력이 발생하지 않는 것으로 나타났고, 곡선반경이 180m보다 작은 경우에는 받침간격에 따라 부반력이 발생하지 않는 곡선반경이 다르게 나타났다. 곡선반경 50m인 경우 받침간격 3.5m, 5.5m에서 각각 -4,409.6kN, -2,061.6kN의 부반력이 발생하였고, 곡선반경 130m에서는 받침간격 3.5m에서 부반력 -403.8kN, 받침간격 5.5m에서 정



(a) Skew angle  $\theta=90^\circ$



(b) Skew angle  $\theta=75^\circ$



(c) Skew angle  $\theta=60^\circ$

Fig. 4 Support reactions according to radius of curvature

반력 520.6kN이 발생하였다. 사각 75°인 경우, 받침간격이 4.0m 이하이고 곡선반경 250m 이하이면 항상 부반력이 발생하는 것으로 나타났으며, 곡선반경이 150m 이하에서는 받침간격에 관계없이 항상 부반력이 발생하였다. 곡선반경 50m에서는 받침간격 3.5m, 5.5m에서 각각 -5,623.9kN, -2,741.9kN의 부반력이 발생하였고, 곡선반경 250m에서는 받침간격 3.5m에서 부반력 -415.9 kN, 받침간격 5.5m에서 정반력 555.3kN이 발생하였다. 곡선반경의 증가와 함께 좌, 우측 양 지지점의 반력차이는 비선형적으로 감소하는 것으로 나타났다. Fig. 4(c)에 나타낸 바와 같이 사각이 60°인 경우 최소 곡선반경인 50m에서 부반력이 최대 발생하였으며, 곡선반경의 증

가와 함께 부반력이 감소하고, 같은 곡선반경에서는 받침간격이 증가할수록 부반력이 감소하는 것으로 나타났다. 사각이 60°인 교량에서는 곡선반경이 250m 이하이면 받침간격에 관계없이 모두 부반력이 발생하는 것으로 나타났다. 곡선반경 50m에서는 받침간격 3.5m, 5.5m에서 각각 -6,183.0kN, -3,125.6kN의 부반력이 발생하였고, 곡선반경 250m에서는 받침간격 3.5m, 5.5m에서 각각 -1,424.7kN, -50.8kN의 부반력이 발생하였다.

일반적으로 곡선교에서는 평면적 기하형상으로 인해 노면이 곡선교의 좌·우측 양측 받침 중심점에 대하여 편심을 갖고 있으므로 고정하중 및 활하중에 의해 교량에는 비틀림모멘트가 발생하게 된다. 이때 동일 지간과 받침간격에 대하여 곡선반경을 변화시키게 되면 곡선반경이 작아질 경우 노면의 편심량이 증가하게 되어 비틀림모멘트는 증가하게 된다. 이와 같이 비틀림모멘트가 교량에 작용하게 되면 지점위치에서는 이에 저항하기 위한 우력모멘트가 발생하는데 이로 인해 교량의 내측 지점에서는 부반력이 나타나게 되며, 받침 간격이 일정한 경우 지점반력에 의한 우력모멘트의 팔길이는 변하지 않으므로 곡선반경의 감소로 인한 우력의 저항모멘트 증가로 양쪽 지지점의 반력차이는 증가하게 되는 것으로 나타났다.

### 3.3 받침의 횡방향 간격에 따른 지점반력

해석결과 동일한 사각과 곡선반경의 교량이라 하더라도 받침의 횡방향 간격에 따라서 부반력의 발생여부가 다르게 나타났다. 받침의 부반력을 검토하는데 적용하는 하중조합 중 가장 큰 부반력이 발생하는 하중조합 CASE 4에 대하여 각각의 사각에 대해 받침간격에 따른 A1 우측 받침에서의 수직반력의 변화를 그림으로 나타내면 Fig. 5와 같다. 해석 결과에 따르면 동일한 사각 및 곡선반경에 대해서 받침 간격이 증가하면 부반력이 감소하는 경향을 보였다.

사각이 90°인 경우 곡선반경 180m 이상일 때에는 받침간격에 관계없이 부반력이 발생하지 않았으며, 곡선반경이 80m 이하일 때에는 모든 받침간격에서 부반력이 발생하는 것으로 나타났고, 곡선반경 130m에서는 받침간격이 4.5m 이상일 때 부반력이 발생하지 않는 것으로 나타났다. 사각이 75°인 경우 곡선반경 130m 이하일 때에는 받침간격에 관계없이 항상 부반력이 발생하는 것으로 나타났으며, 곡선반경이 180m일 때에는 받침간격이 5.0m 이상에서 부반력이 발생하지 않고, 곡선반경 250m일 때

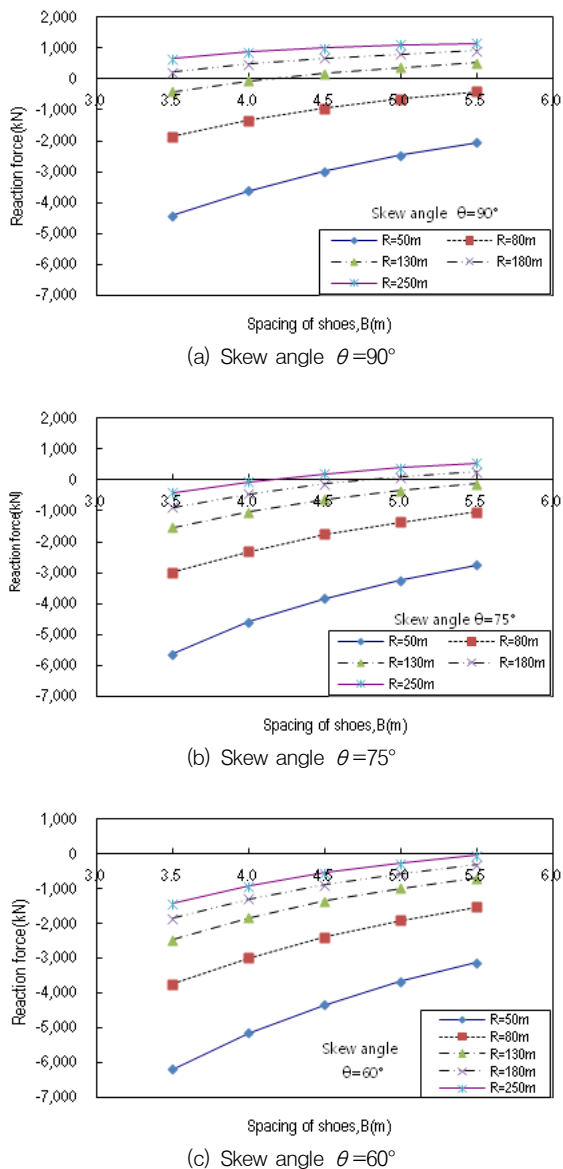


Fig. 5 Support reactions according to spacing of shoes

에는 받침간격이 4.5m 이상일 때 부반력이 발생하지 않았다. 사각 60°인 경우에 곡선반경을 250m 이하로 하면 받침간격에 관계없이 항상 부반력이 발생하는 것으로 나타났으며, 부반력의 크기는 받침간격이 증가할수록 거의 선형적으로 감소하는 경향을 보였다. 또한, 모든 곡선반경에서 받침간격의 증가와 함께 양 지지점에 대한 반력의 차가 감소하는 것으로 나타났다.

이와 같이 동일한 경간장과 곡선반경에서 받침 간격에 따라 수직반력 값이 차이를 보이는 것은 동일한 사각과 곡선반경을 가질 경우 지지점에 작용하는 비틀림모멘트에 대한 저항 모멘트는 일정하나 지지간격이 증가하면 우

력모멘트의 팔길이가 길어져 우력모멘트를 유발하는 지점반력은 감소하게 된다. 따라서 지지간격의 증가로 인해 양쪽 지지면의 반력차이는 감소하게 되고, 받침간격이 작을 경우 부반력이 발생하게 되는 것으로 나타났다.

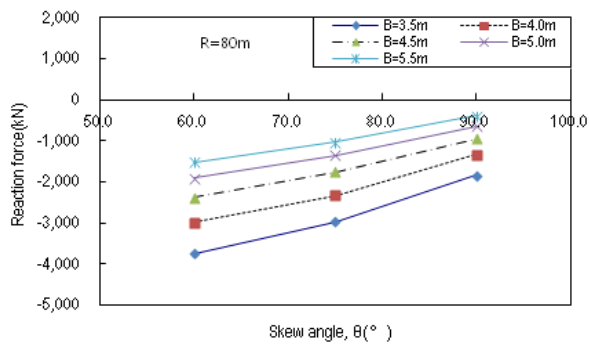
### 3.4 받침부의 사각 변화에 따른 지점반력

받침간격과 곡선반경이 같은 교량에서 받침부의 사각에 따라라도 지점반력이 다르게 분포되며, 해석결과에 의하면 받침부의 사각이 증가하면 부반력의 크기가 감소하는 경향을 보였다. Fig. 6은 하중조합 CASE 4에 대하여 사각의 변화에 따른 A1 우측 받침에서의 수직반력의 변화를 보여주고 있으며, 사각이 증가하면 받침간격에 관계없이 부반력의 크기가 감소하고, 그 감소폭은 받침부의 사각의 변화와 거의 선형의 관계를 나타냈다. 또한, 사각이 작은 경우(60°)에 받침간격에 따른 부반력의 변화폭이 사각이 큰 경우(90°)보다 다소 크게 나타났다.

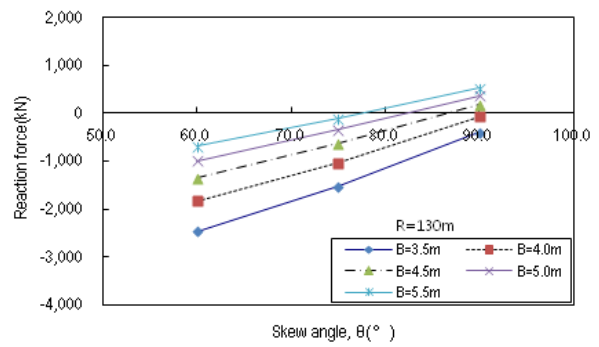
Fig. 6(a)는 곡선반경 80m인 경우 각각의 받침간격에 대해 사각에 따른 반력을 나타낸 것으로 사각에 관계없이 항상 부반력이 발생하는 것으로 나타났다. 곡선반경이 130m일 때 사각이 75° 이하에서는 받침간격에 관계없이 항상 부반력이 발생하였다(Fig. 6(b)). 곡선반경 180m 이상인 경우에는 받침간격에 관계없이 사각 60°에서는 부반력, 사각 90°에서는 정반력이 항상 발생하였고, 사각 75°에서는 받침간격에 따라 정반력과 부반력이 발생하는 것으로 나타났다(Fig. 6(c),(d)).

### 3.5 해석결과 분석

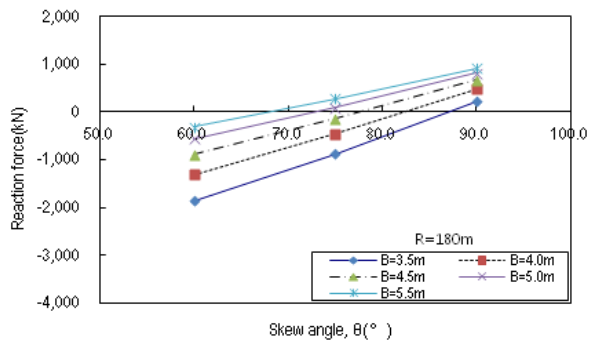
곡선교의 부반력에 영향을 미치는 설계변수는 크게 지간길이, 곡선반경, 받침 간격, 사각 등으로 요약할 수 있으며, 이들 설계변수들의 상호 관계에 의해 부반력이 발생하는 것이다. 본 연구에서는 지간길이(L)가 50m인 강박스 거더 곡선교에 대해 곡선반경, 횡방향 받침간격, 사각 등이 부반력에 미치는 영향을 해석적으로 분석하였으며, 이를 바탕으로 설계변수들의 상호관계 중에서 사각(θ)과 받침간격(B) 비 θ/B와 곡선반경이 부반력의 발생에 미치는 영향을 분석하였다. Fig. 7은 사각과 받침간격의 비(θ/B)에 따른 반력의 크기를 나타낸 것으로 사각과 받침간격의 비가 증가하면 발생하는 부반력의 크기가 증가함을 보여주고 있으며, 그 경향은 곡선반경이 작은 경



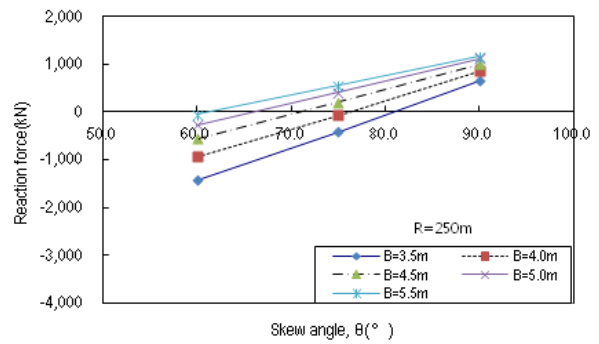
(a) Radius of curvature R=80m



(b) Radius of curvature R=130m

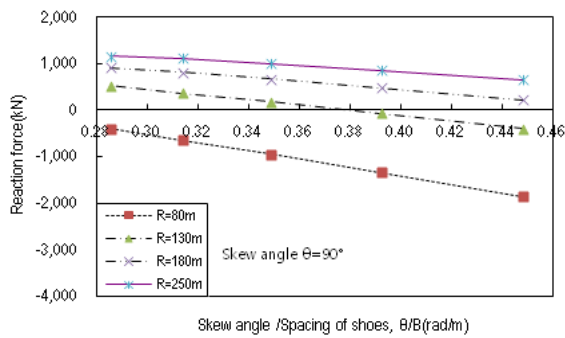


(c) Radius of curvature R=180m

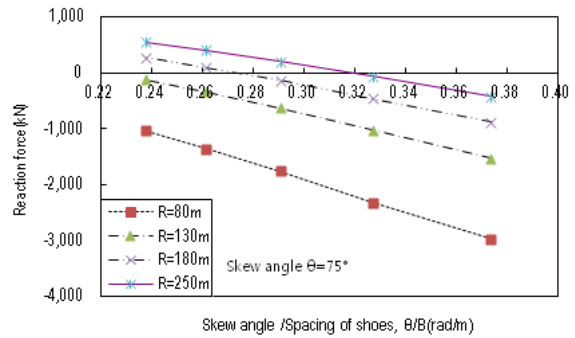


(d) Radius of curvature R=250m

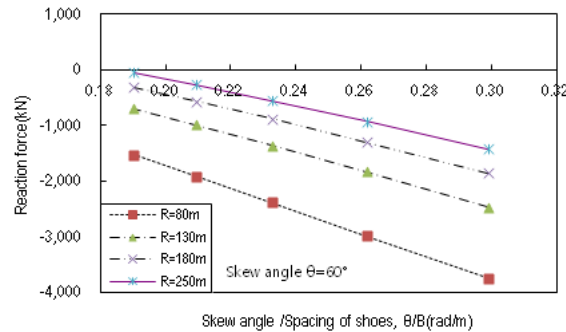
Fig. 6 Support reactions according to skew angle



(a) Skew angle  $\theta=90^\circ$



(b) Skew angle  $\theta=75^\circ$



(c) Skew angle  $\theta=60^\circ$

Fig. 7 Support reactions according to skew angle to spacing of shoes ratio



Table 6 Skew angle to spacing of shoes ratio when there is no negative support reactions in curved bridge with span length L=50m

Skew angle $\theta$ (°)	Radius of curvature R(m)	$\theta/B$ (rad./m)	Remark
90	below 80		Always negative reaction
	130	below 0.38	
	over 180		Always positive reaction
75	below 130		Always negative reaction
	180	below 0.27	
	250	below 0.32	
60	below 250		Always negative reaction

우에 더 명확하게 나타났다. 곡선반경이 80m 이하인 경우에는 사각과 받침간격의 비( $\theta/B$ )에 관계없이 항상 부반력이 항상 발생하는 것으로 나타났다. 도로교설계기준에서 받침부의 부반력을 검토할 때 적용하는 하중조합중 큰 부반력을 발생시키는 하중조합 CASE 4를 기준으로 하였을 때 지간길이 50m인 단순 곡선교에서 부반력이 발생하지 않는 곡선반경(R)과 사각과 받침간격(B)의 비,  $\theta/B$ 는 Table 6과 같다.

사각이 90°인 경우에 곡선반경이 180m 이상에서는  $\theta/B$ 에 관계없이 항상 정반력이 발생하였고, 곡선반경 130m에서는  $\theta/B$ 가 0.38 이하일 때는 부반력이 발생하지 않는 것으로 나타났다. 사각이 75°인 경우에는  $\theta/B$ 에 관계없이 곡선반경 130m 이하에서는 항상 부반력이 발생하였고, 곡선반경 180m에서는  $\theta/B$ 가 0.27 이하일 때, 곡선반경 250m에서는  $\theta/B$ 가 0.32 이하일 때 부반력이 발생하지 않는 것으로 나타났다. 또한, 사각이 60°인 경우에는 곡선반경 및  $\theta/B$ 에 관계없이 항상 부반력이 발생하는 것으로 나타났다. 따라서, 곡선반경이 감소함에 따라 부반력이 발생하지 않는 사각은 증가함을 알 수 있다. 동일한 곡선반경의 곡선교에서 사각이 90°, 75°, 60°로 감소함에 따라 곡선교의 평면형상조건에 의해 비틀림 모멘트는 증가하게 되므로 곡선반경을 증가시켜야만 비틀림 모멘트의 감소효과로 부반력은 감소 또는 제어할 수 있음을 알 수 있다. 또한 경간장이 같은 경우 부반력이 발생하지 않기 위해서는 곡선반경이 증가하면  $\theta/B$ 도 같이 증가해야 함을 알 수 있었다.  $\theta/B$ 가 증가한다는 것은 받침의 횡방향 간격이 감소함을 의미하며, 이것은 일정한 곡선반경과 경간장을 갖는 구조물에 작용하는 비틀림모멘트는 받침의 간격과 직접적인 접적인 관계가 있음을 나타낸다. 즉, 좌, 우 양측 받침 중심거리인 받침간격을 증가시키면

비틀림모멘트에 의해 지지점에 작용하는 우력의 팔길이가 증가하여 우력의 크기는 감소하고 부반력도 감소하게 된다.

또한, 본 연구에서는 특정 사각과 곡선반경에 대해 부반력이 발생하지 않는 받침간격을 해석적으로 확인하였으며, 이를 바탕으로 일정한 경간장에서 곡선반경의 증가와 더불어 비틀림모멘트 감소효과에 따라 부반력이 발생하지 않는 받침의 횡방향 간격을 산정할 수 있었다. 곡선교는 곡선반경, 사각 및 받침의 횡방향 간격 같은 매개변수의 상호관계에 따라 부반력이 발생하는 기하학적 경계조건이 나타나게 되므로 도로의 평면계획에 의해 곡선교의 곡선반경이 결정되면 부반력이 발생하지 않는 사각과 받침간격의 비( $\theta/B$ )를 적용하여 부반력이 발생하지 않는 구조계로 설계할 수 있음을 확인하였다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 램프교에 적용이 가능한 지간길이(L) 50m, 교량폭(B) 9.0m인 단순 지지된 2련 강박스거더 곡선교에서 교량의 곡선반경, 사각 및 받침의 횡방향 간격을 매개변수로 하여 이들이 부반력의 발생에 미치는 영향을 3차원 격자모델을 이용한 구조해석을 수행하여 분석하였으며, 이를 토대로 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 곡선반경과 받침 간격은 작을수록 부반력이 크게 발생하였으며, 동일한 곡선반경 및 받침 간격에 대해서는 사각이 작을수록 부반력이 크게 발생하는 것으로 나타났다.
- (2) 받침간격이 증가하면 좌·우측 양측 지지점의 반력차이는 감소하였고, 부반력도 점차 감소하는 것으로 나타났다.
- (3) 사각이 90°인 경우에 곡선반경이 80m 이하에서는 항상 부반력이 발생하였고, 곡선반경 180m 이상에서는 부반력이 발생하지 않았으며, 곡선반경 130m에서는 사각과 받침간격의 비( $\theta/B$ )가 0.38 이하에서 부반력이 발생하지 않았다.
- (4) 사각이 75°인 경우에 곡선반경 130m 이하에서는 항상 부반력이 발생하였고, 곡선반경 180m에서는 사각과 받침간격의 비( $\theta/B$ )가 0.27 이하일 때, 곡선반경 250m에서는 사각과 받침간격의 비( $\theta/B$ )가 0.32 이하에서 부반력이 발생하지 않았다.

- (5) 사각이 60°인 경우에 곡선반경이 250m 이하이고 받침간격이 3.5m~5.5m 범위내에서는 항상 부반력이 발생하는 것으로 나타났다.
- (6) 부반력이 발생하지 않는 각각의 설계변수들의 상호 관계에서는 사각이 작아지는 경우에는 사각과 받침간격의 비( $\theta/B$ )가 감소하였고, 같은 사각에서는 곡선반경이 증가하면  $\theta/B$ 가 증가하였다.

이상과 같은 연구결과로부터, 단경간 강박스거더 곡선교를 설계할 때 곡선반경, 사각 및 받침간격과 같은 설계변수들의 상호관계를 적절히 설정하면 부반력이 발생하지 않는 구조계로 설계가 가능함을 알 수 있었으며, 다양한 지반, 세분화된 사각의 크기 및 곡선반경 등에 대해 추가의 연구를 수행하여 이를 상호 변수들의 상호관계를 도출하면 교량 설계실무에 효율적으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. 김용국, "3경간 연속 RC 사교의 각도변화에 따른 지점 반력의 특성", 한양대학교 논문집, 1997.
2. 대한토목학회, 도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙 해설 및 지침, 대한토목학회, 2010.
3. 박승수, 지승구, 유덕용, "PSC 박스 거더 곡선교의 부반력 발생 진단 사례", 한국구조물진단학회지, 제11권 1호, 2007, pp.30-35.
4. 이학수, "2경간 철근콘크리트 사교의 부반력에 관한 매개변수 연구", 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집, 제15권 2호, 2003.

- pp.381-387.
5. 조선규, 윤석구, 유선미, "단경간 곡선교의 부반력에 대한 변수연구", 2003 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 2003, pp.511-515.
6. 조선규, 이종민, 서동주, "단경간 곡선강교에 발생하는 부반력에서 앵커볼트 간격의 영향", 2006 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 2006, pp.97-100.
7. 조선규, 이종민, 서동주, "단경간 곡선강교의 받침 앵커볼트에 발생하는 불균등 부반력에 대한 연구", 2005 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 2005, pp.967-970.
8. 한국강구조학회, 강구조관람 제4권 강도로교의 설계, 1995.
9. 한국도로교통협회, 도로교 설계기준, 건설정보사, 2010.
10. Computers and Structures Inc., SAP2000 Analysis Reference, 1996.
11. Gupta, T. and Misra, A., "Effect on Support Reactions of T-Beam Skew Bridge Deck", ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, vol. 2, No. 1, Feb. 2007, pp.1-9.
12. Hambly, E. C., Bridge Deck Behavior, 2nd Ed. E & FN SPON, 1991.
13. Lin, W. and Yoda, T., "Analysis, Design and Construction of Curved Composite Girder Bridges : State-of-the-Art", International Journal of Steel Structures, vol. 10, No. 3, Sep. 2010, pp.207-220.
14. Nakai, H. and Yoo, C. H., Analysis and Design of Curved Steel Bridges, McGraw-Hill, 1998.
15. Zureick, A., Linzell, D., Leon, R. T. and Burrell, J., "Curved Steel I-Girder Bridges: Experimental and Analytical Studies", Engineering Structures, vol. 22, 2000, pp.180-190.

(접수일자 : 2012년 2월 8일)  
 (수정일자 : 2012년 3월 6일)  
 (심사완료일자 : 2012년 5월 16일)

#### 요 지

도로의 진출입로나 인터체인지에 널리 적용되고 있는 곡선교는 곡선반경, 사각 및 받침 간격 등에 따라 직선교보다 복잡한 거동을 나타낸다. 특히 상부구조물의 휨과 비틀림에 의해 스티프니스가 발생할 수 있고, 예각부 받침에는 부반력이 발생할 수 있다. 본 연구에서는 곡선교에서 교량의 곡선반경, 받침간격 및 사각이 부반력에 미치는 영향에 대해 분석하였다. 이를 위해 RAMP에 적용 가능한 지반(L)이 50m인 단경간의 강박스거더 곡선교를 대상으로 3차원 격자구조 모델을 이용하여 해석적인 방법으로 지점반력을 산출하였다. 부반력은 교량의 평면형상, 구조계의 형성, 받침의 조건 등에 의해 그 크기가 결정 되므로 매개변수는 곡선반경, 사각 및 받침간격으로 하였으며, 도로교설계기준에 제시된 하중조합에 의해 발생하는 반력의 크기를 계산하였다.

수치해석한 결과에 의하면 부반력은 곡선반경, 받침간격 및 사각이 작을수록 크게 발생하는 것으로 나타났으며, 사각 60° 일 때 곡선반경 250m 이하에서는 받침간격에 관계없이 항상 부반력이 발생하였고, 사각 75°일 때 곡선반경 180m에서는  $\theta/B$ 가 0.27 이하, 곡선반경 250m에서는  $\theta/B$ 가 0.32 이하에서 부반력이 발생하지 않았으며, 사각 90° 일 때 곡선반경 130m에서는  $\theta/B$ 가 0.38 이하 일 때와 곡선반경이 180m 이상일 때 부반력이 발생하지 않았다. 이상의 결과로부터 설계변수인 곡선반경, 받침간격 및 사각이 곡선교에서 부반력 발생과 밀접한 관계가 있음을 확인하였고, 곡선교의 설계시 설계변수들의 상호관계를 적절히 설정하면 부반력이 발생하지 않는 구조계로 설계가 가능함을 알 수 있었다.

**핵심 용어** : 강박스, 곡선교, 부반력, 곡선반경, 사각, 받침간격