

S자형 보도사장교의 비틀림 제어를 위한 링크슈의 모델링과 배치방법 연구

지선근
서울시립대학교 토목공학과

Study on Modeling and Arrangement of Link-Shoes for Torsional Control of S-shaped Pedestrian Cable-Stayed Bridge

Seon-Geun Ji
Department of Civil Engineering, University of Seoul

요약 최근 미관과 독창성을 위해서 과감하고 실험적인 형상을 적용한 사장교가 시도되고 있다. 기존에 유사한 사례가 없는 교량의 경우 해석 모델링에 대한 깊은 고민과 검증이 필요하다. S자형 곡선 보도사장교는 역삼각형 트러스 보강거더의 편측에 1면으로 케이블이 배치되어 상시 비틀림이 발생한다. 비틀림 억제를 위해서 중앙 하현재에 배치한 받침을 기준으로 좌, 우측의 상현재에 링크슈를 배치하였다. 첫 번째 연구는 링크슈의 모델링 방법과 격벽 모델링 유무에 관한 것이다. 지점부 횡방향 구조계와 비틀림 강성을 정확히 반영하기 위해서 받침의 회전강성을 이용하는 간접적인 방법이 아닌 링크슈와 격벽을 직접 모델링하는 것이 필요하였다. 두 번째 연구는 압축전달 요소인 받침과 인장전달 요소인 링크슈의 횡방향 배치방법에 관한 것이다. 방법1은 곡선반경 외측에서부터 링크슈, 받침, 링크슈의 순서로 배치하는 것이고, 방법2는 받침, 받침, 링크슈로 배치하는 방법이다. 방법2는 방법1과 비교하여 외측 상현재의 응력은 커지고 내측 상현재의 응력은 감소하였다. 받침과 링크슈의 횡방향 배치방법에 따라 상현재의 응력 조정이 가능한 것으로 분석되었다.

Abstract Recently, cable-stayed bridges have been attempting to apply bold and experimental shapes for aesthetic and originality. In the case of bridges that have no similar cases, deep understanding and verification of analytical modeling is needed. S-shaped curved pedestrian cable-stayed bridge is always twisted because the cable is arranged on one side of the inverted triangular truss girder. In order to suppress the torsion, the Link-shoes are arranged at the left and right top members with reference to the Bearing placed at the mid-bottom member. The first research is related to the modeling method of Link-Shoe and Diaphragm. In order to accurately reflect the transverse structural system and the torsional stiffness, it was necessary to model the Link-Shoe and the Diaphragm directly rather than indirectly using the stiffness of the Bearing. The second study is related to the lateral arrangement of Bearing and Link-Shoes. Method 1 is to place in order of Link-shoe, Bearing, and Link-shoe from outside the curve radius. Method 2 is place to in order of Bearing, Bearing, and Link-shoe. In method 2, compared to method 1, the stress in the outer top member was larger and the stress in the inner one was decreased. It is analyzed that the stress adjustment is possible according to the lateral arrangement of Bearing and Link-Shoe.

Keywords : S-shape Curved Pedestrian Cable Stayed Bridge, Inverted Triangular Truss, Modeling of Link-Shoe, Diaphragm, Arrangement of Bearing and Link-Shoe

*Corresponding Author : Seon-Guen Ji(University of Seoul)

Tel: +82-2-3433-3063 email: marineji688@naver.com

Received March 12, 2019

Revised April 10, 2019

Accepted June 7, 2019

Published June 30, 2019

1. 서론

최근 미관이 우수하고 독창적이며 지역특성을 나타내는 랜드마크 교량으로 사장교가 널리 적용되고 있다. 특히, 차도교에 비해 보도교는 적용 범위가 자유롭고, 폭, 활하중의 규모가 작아서 과감하고 실험적인 형상을 적용할 수도 있다.

국내 사장교는 1984년 진도대교를 처음으로 800m 경간장의 인천대교에 이르기까지 다양한 연구와 노력에 의해 발전해 왔다. 국내 사장교의 초기 연구는 정적해석에 충실했다. 이후 2000년대에 접어들어 장경간화에 따른 동적 거동 분석[1-3], 케이블 장력의 최적화[4,5], 정밀시공방법[6] 등에 집중되었으며, 최근에는 유지관리, 재난관리, 방재 분야의 연구가 활발하다[7-9].

기존 연구는 직선보강거더, 정형적인 주탑 형상과 케이블 배치를 가진 교량을 대상으로 하였다. 최근에는 곡선 주탑과 곡선 보강거더, 미적 요소를 위한 케이블 3차원 배치 등 비정형적인 교량이 다수 적용되고 있다. 곡선 주탑 등 비정형 사장교에 대한 연구 몇 편이 소개되었으나[10,11], 아직까지 다양한 기하구조를 갖는 사장교에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구 대상 교량은 S자형 평면선형을 갖는 역대칭 2중 곡선 보도사장교이다. 보강거더의 횡단면은 강관을 역삼각형으로 배치한 트러스 구조이다. 주탑과 케이블은 보강거더의 곡선반경 내측에 1면으로 배치되었다. 주탑 형식은 경사 독립 주탑이며, 케이블은 경관과 곡선미를 위해서 3차원으로 배치되었다. 이러한 기하구조의 특성으로 보강거더에 비틀림이 발생하며, 비틀림 변형을 제어하기 위해서 각 지점마다 중앙에 위치한 받침을 기준으로 양쪽에 링크슈를 배치하였다.

본 연구 목적은 첫째, 링크슈의 모델링 방법과 격벽의 모델링 반영 유무가 전체계 해석에 미치는 영향을 분석하여 S형 보도 사장교의 구조 거동을 정확히 반영할 수 있는 해석 방법을 찾는 것이며, 둘째, 각 지점에서 횡방향으로 배치된 압축 전담 요소인 받침과 인장 전담 요소인 링크슈를 배치하는 방법과 수직강성의 변화가 지점부 보강거더의 응력에 미치는 영향을 분석하여 지점부 보강거더의 응력을 받침과 링크슈의 배치와 강성으로 조정하는 것이다.

2. S자형 사장교의 특징

2.1 일반사장교의 특징

직선사장교의 부반력은 경간의 비대칭에 의해서 발생한다. 측경간장은 주경간장의 0.42배를 적용할 경우 가장 경제적이며 구조적 안전성 확보에 유리하다. 주탑의 종방향 변위가 0이 되도록 케이블 장력을 조정할 경우 측경간 단부에 배치되는 케이블의 수직분력은 중앙경간의 대응하는 케이블의 수직분력보다 크며, 케이블이 분담하는 고정하중은 작다. 따라서 측경간 단부는 고정하중에 의해서 부반력이 발생한다. 또한, 차량 하중이 중앙경간에 재하될 때 부반력이 발생하는 경우가 많다[12].

Fig. 1은 타이다운 케이블을 설치하여 부반력을 제어한 교량의 측경간 단부 횡단면과 전체계해석 모델링이다. 보강형은 Box단면을 하나의 Frame요소로 모델링하고, 보강형의 도심과 받침은 강체링크로 연결하였으며, 탄성링크로 지점조건을 부여하였다. 타이다운 케이블은 종방향으로 받침과 동일한 위치에 배치되며, 횡방향으로 대칭이 되도록 계획한다. 따라서 타이다운 케이블은 별도로 모델링을 하지 않으며, 받침에 발생하는 부반력을 타이다운 케이블 검토 부재력으로 이용한다. 이는 타이다운 케이블의 모델링 유무가 전체계 해석에 영향을 주지 않기 때문이다.

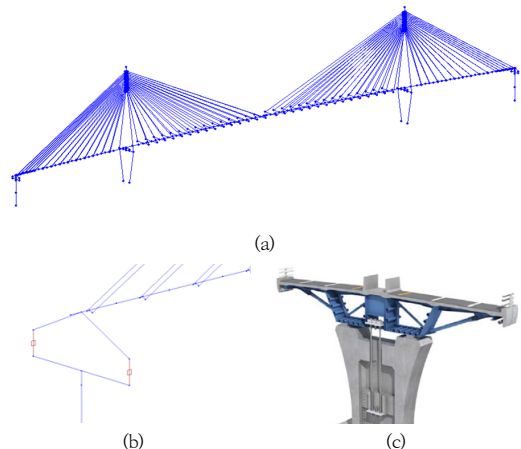


Fig. 1. Outline of Frame Modeling for Straight CBS

- (a) Frame model
- (b) Detail of P1
- (c) Cross Section of Tie-down

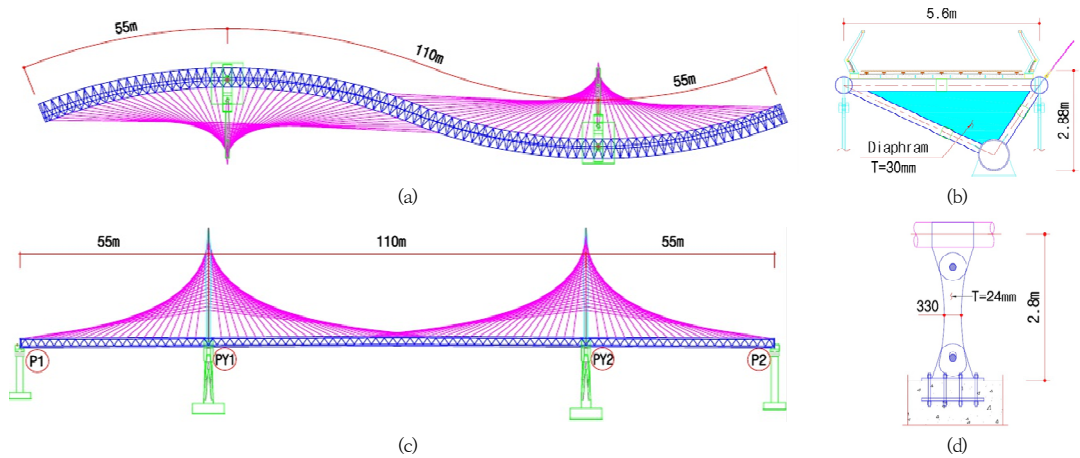


Fig. 2. Outline Of Bridge Plans for S-Shaped Pedestrian CBS
 (a)Plan View (b)Cross Section of Girder on Pier1 (c)Vertical View (d)Detail of Link-Shoe

2.2 S자형 사장교 개요

본 연구 대상 교량은 S자형 곡선 보도사장교로 역대칭 1면 사장교이다. 폭은 4.5m, 연장은 220m이며, 측경간장은 55m, 주경간장은 110m의 2주탑 사장교이다. 평면 선형은 S자형이며, 곡선반경은 145m이다. 보강형은 역삼각형 강판트러스 구조이며, 상현재와 하현재의 강종은 SM490을, 사재와 가로보는 SM400을 적용하였다. 주탑은 65°의 경사 독립 강관 주탑 형식이다. S자형 보강형의 편측에 배치된 주탑의 횡방향 안전성 확보를 위해서 주탑의 배면에 수직 백스테이케이블을 배치하였다. 각 지점마다 받침이 1개 설치되었으며, 횡방향 비틀림 변형을 억제하기 위해서 링크슈 2개와 30mm 두께의 격벽이 설치되었다.

2.3 S자형 사장교의 비틀림 형상

지점과 지점 사이에 있는 거더의 무게중심이 두 지점을 연결하는 직선상에 위치하지 않는 경우 거더에는 비틀림이 발생한다. 곡선교가 이에 해당되며, S자형 사장교는 역대칭 2중 곡선 보강거더 형상으로 비틀림이 복잡하게 발생한다. 역삼각형 트러스 횡단면이 적용되고 하현재에 1개의 받침이 배치된 경우 비틀림이 쉽게 발생한다. 또한 편측에 1면으로 배치된 케이블 장력의 수직, 수평 분력은 보강거더와 주탑에 비틀림 변형을 유발한다.

비틀림은 케이블 설치 전 보강거더에 자중이 재하되는 경우, 케이블 설치 후 보강거더 자중이 작용되는 경우, 케이블 설치 후 보강거더 자중과 케이블 장력이 도입되는 경우로 나누어 그 거동을 파악할 필요가 있으며, 이를 각

각 Case1, Case2, Case3라 한다.

케이블 설치 전 보강거더의 자중에 의한 경우 Case1의 비틀림 방향은 시점부에서 반시계방향, 주탑1의 지점부에서 시계방향이다.

시점부는 Fig. 3과 같이 무게중심이 지점을 연결한 선의 바깥쪽에 위치하고 단면의 하현재 위치도 Fig. 2(b)와 같이 오른쪽에 위치하고 있어서 반시계방향으로 회전한다. 주탑 지점부는 중앙경간 거더의 무게중심이 주탑 지점보다 내측에 위치하고 있어 시계방향으로 회전한다. 시점부와 종점부는 같은 원리로 회전방향이 서로 반대이다.

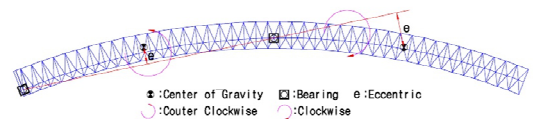


Fig. 3. Torsion Direction of Girder without Cable

Table 1. Direction of Torsion Deformation

| class | P1 | PY1 | PY2 | P2 |
|-------|----|-----|-----|----|
| Case1 | ↺ | ↻ | ↻ | ↺ |
| Case2 | ↺ | ↺ | ↻ | ↺ |
| Case3 | ↺ | ↺ | ↻ | ↺ |

↻: Clockwise, ↺: Counter Clockwise

케이블 설치 후 케이블에 장력을 도입하기 전과 후인 Case2와 Case3는 모든 위치에서 반시계방향으로 회전

하며 이를 정리하면 Table 1과 같다. 회전방향의 기준은 P1에서 P2로 진행하는 축을 기준으로 하였다. 케이블 장력 도입 전 고정하중만 작용하는 경우인 Case2도 회전 방향은 케이블 장력 도입 후인 Case3와 동일하다. 이는 Case2의 경우도 고정하중의 처짐에 의해 케이블에 장력이 도입되고 장력에 의해 비틀림이 유발되기 때문이다. 본 교량의 케이블 설치 후 비틀림 방향은 편측 설치된 케이블의 장력에 의해 결정된다.

2.4 교량받침과 링크슈 배치

연구 대상 교량의 보강거더는 역삼각형 트러스 구조로 하현재에 받침 1개와 양쪽 상현재에 링크슈 2개가 배치되어 있으며, 배치도는 Fig. 4와 같다.

PY1의 받침은 고정단이며, P1, PY2, P2는 교축방향 일방향 가동단이다.

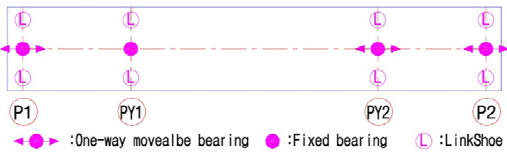


Fig. 4. Arrangement of Bearing and Link-Shoe

Table 2. Direction of Torsion Deformation

| part | | P1 | PY1 | PY2 | P2 |
|-------|-------|---------|---------|---------|---------|
| Case1 | Left | - | Tension | - | Tension |
| | Right | Tension | - | Tension | - |
| Case2 | Left | - | - | Tension | Tension |
| Case3 | Right | Tension | Tension | - | - |

링크슈는 힌지로 연결된 구조로 인장력에 저항하고, 압축력에는 저항하지 못한다. 따라서 횡방향 회전방향에 의해서 받침의 양쪽에 배치된 링크슈 중 하나는 인장을 받고 다른 한쪽은 부재력이 발생하지 않는다. 이를 정리하면 Table 2와 같다. 연구 대상 교량은 보강거더와 케이블 설치 완료 후 벤트를 제거하는 가설 공법을 적용하였으므로 Case1, Case2의 경우는 실제 발생하지 않는다.

3. 해석 결과 및 분석

3.1 개요

보강거더와 주탑은 절점당 6개의 자유도를 갖는 3차원 보요소로 모델링을 하였으며, 사장 케이블과 수직 백스테이케이블은 등가탄성계수를 적용한 트러스 요소로 모델링하였다. 받침은 탄성링크를 적용하였으며, 링크슈는 인장력만 작용하는 탄성링크를 적용하였다. 해석프로그램은 MIDAS를 적용하였다. 하중은 고정하중과 케이블 장력을 고려하였다.

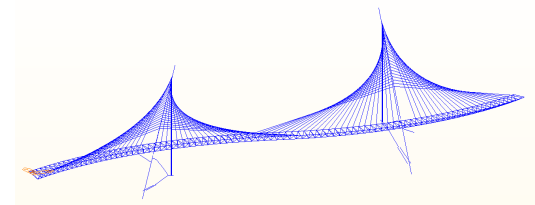


Fig. 5. Analysis Modeling

분석을 위한 하중조합은 1.0고정하중+1.0케이블 장력으로 하였다. 지점부의 격벽 모델링은 Fig. 6과 같이 판요소로 모델링하였다. 시공단계는 벤트 가설공법을 적용하였으므로, 보강거더, 주탑, 케이블 등 전체 구조가 완성된 단계를 1단계로 하였다.

3.2 링크슈와 격벽의 모델링 반영 유무가 교량에 미치는 영향 분석

일반적으로 직선사장교는 타이다운 케이블을 모델링하지 않고 받침에 발생하는 부재력을 이용하여 타이다운 케이블을 검토한다. 또 Box형 횡단면을 단면상수로 하는 하나의 프레임요소로 모델링 하므로 격벽은 전체계 해석에서 고려하지 않는다. 그러나 S자형 역삼각형 트러스 보강거더 사장교에서 링크슈와 격벽의 모델링 유무는 전체계 해석에 영향을 미칠 수 있다. 링크슈를 해석에 고려하는 방법으로 3가지 해석모델을 이용하여 분석하였다.

첫째, Fig. 6(a)와 같이 받침조건을 이용하는 간접적인 방법이다. 둘째, Fig. 6(b)와 같이 링크슈를 상현재에 직접 모델링 하는 방법이다. 셋째, 링크슈 모델에 격벽을 추가하였다. 이를 각각 방법1, 방법2, 방법3이라 한다. 3개 모델의 차이점을 받침과 링크슈의 반력, 고유치해석, PY1 지점부 보강거더 응력을 비교하여 분석하였다.

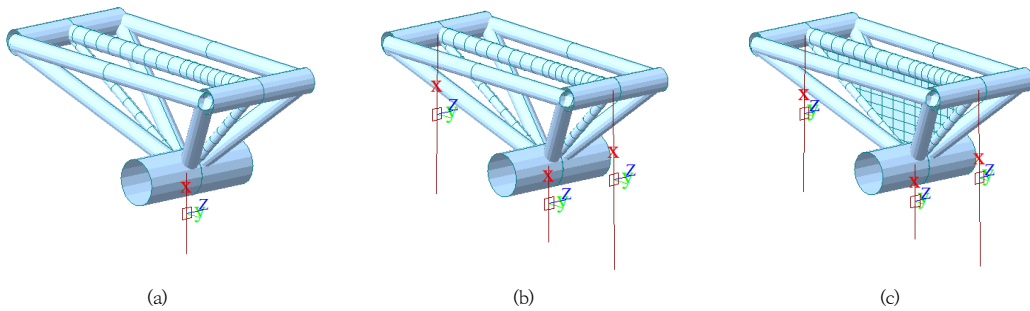


Fig. 6. Analysis modeling for Link-Shoe
(a)Method1 (b)Method2 (c)Method3

Table 3. Stiffness of Elastic-Link of Method 1

| part | Dx | Dy | Dz | Rz |
|----------------|---------|---------|---------|---------|
| Bearing [kN/m] | 1.0E+10 | 1.0E+10 | 1.0E+10 | 1.0E+10 |

방법1은 Fig. 6(a)와 같이 링크슈를 직접 모델링하지 않고 받침조건의 회전강성을 이용하는 방법이다. 탄성링크요소를 적용하였으며, 회전강성은 1×10^{10} kN-m/rad의 무한강성을 적용하였다. 링크슈의 부재력은 탄성링크의 비틀림모멘트를 받침과 링크슈 간 거리로 나누어 링크슈의 축력으로 환산한다. 방법2, 3은 링크슈를 직접 모델링하는 방법으로, 보강거더의 상현재와 교각의 코핑을 탄성링크의 인장전단 요소를 이용하여 연결하였다. 링크슈의 강성은 링크슈의 폭과 두께, 그리고 길이를 이용하여 산정하였다. 이때 방법1, 2, 3의 케이블 장력은 모두 동일하도록 도입장력을 조정하였다. 이와 같이 가정한 링크요소의 강성도 자료를 정리하면, Table 4와 같다. 여기서 Dx, Dy, Dz는 국부좌표계에 대한 강성도방향을 나타낸다.

Table 4. Stiffness of Elastic-Link of Method 2, 3

| position | Stiffness [kN/m] | | |
|-------------|------------------|----------|----------|
| | Dx | Dy | Dz |
| Link-Shoe-L | 1.38E+07 | - | - |
| Bearing | 1.00E+10 | 1.00E+10 | 1.00E+10 |
| Link-Shoe-R | 1.38E+07 | - | - |

Fig. 7은 전체 케이블의 반으로 주탑1에 연결된 케이블 장력을 나타낸다.

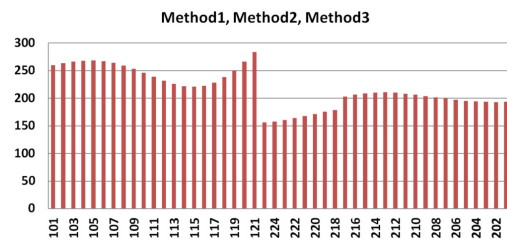


Fig. 7. Cable Force of Method1, Method2, Method3

받침과 링크슈의 수직방향 작용력은 Table 5와 같다. 방법1, 2, 3에서 받침작용력의 차이는 최대 7.3%이며, 링크슈는 4.3%이다. 모델링 차이가 전체 구조강성에 미치는 영향을 고유치 해석을 통하여 분석하였으며, Table 6에 정리하였다. 주요 모드에서 주파수의 차이는 1% 이내로 작았다.

Table 5. Result Force of Link-Shoe and Bearing

| position | Result Force [kN] | | |
|----------|-------------------|----------|----------|
| | Method1 | Method2 | Method3 |
| PY1 | Link-Shoe-L | - | - |
| | Bearing | -1,084.1 | -1,134.9 |
| | Link-Shoe-R | 1,378.5 | 1,421.8 |

Table 6. Eigenvalue Analysis

| Division | Frequency [cycle/sec] | | | |
|----------|-----------------------|---------|---------|--------|
| | Method1 | Method2 | Method3 | Shape |
| mode1 | 0.54716 | 0.54197 | 0.54479 | DZ |
| mode2 | 0.63596 | 0.63305 | 0.63412 | DY, RX |
| mode2 | 0.93751 | 0.93142 | 0.93363 | DX, RY |

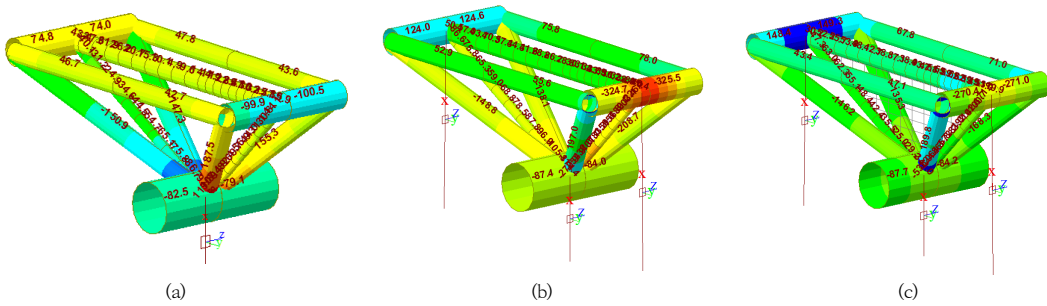


Fig. 8. Beam Stress Diagram
(a)Method1 (b)Method2 (c)Method3

Table 7. Stress of Girder

| position | Stress [MPa] | | |
|----------|--------------|-------------------|-------------------|
| | ①Method1 | ②Method2 (②/①) | ③Method3 (③/①) |
| Upp-L | 74.8 | 124.0 (166%) | 148.4 (198%) |
| Upp-R | -100.5 | -325.5 (324%) | -271.0 (270%) |
| Strut-L | -150.9 | -148.8 (99%) | -146.2 (97%) |
| Strut-R | 155.3 | -208.7 (134%) | -168.3 (108%) |
| Low | -82.5 | -87.4 (106%) | -87.7 (106%) |

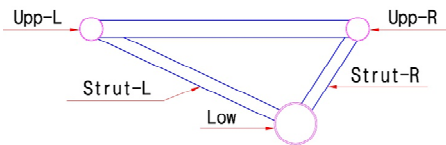


Fig. 9. Pattern Diagram

Fig. 8는 방법1, 2, 3으로 해석한 PY1 지점에서 보강 거더의 응력도이다. 받침조건을 이용하여 링크슈를 간접적으로 고려한 방법인 방법 1은 실제 링크슈가 연결되는 상현재에 응력이 크지 않았다. 그러나 링크슈를 직접 모델링 한 방법2, 3의 경우 링크슈가 연결된 상현재에서 응력집중이 발생한다. 링크슈가 설치되는 상현재의 응력의 경우 방법2가 방법1보다 324% 증가한다. 방법2에 격벽을 모델링 한 방법3의 경우 방법2에서 오른쪽 상현재는 감소하고 좌측 상현재는 증가하였다. 이는 좌,우 상현재와 하현재가 격벽으로 연결되어 비틀림 강성이 증가하였기 때문이며, 우측 상현재의 응력이 좌측 상현재로 분배되었기 때문이다.

오른쪽 사재의 경우, 방법1은 155MPa, 방법2와 방법3은 각각 -208.7, -168.3MPa로 크기뿐만 아니라 인장

과 압축이 반대로 발생한다. 이를 자유물체도로 표현하면 Fig. 10과 같다. 방법1은 케이블 장력을 오른쪽 사재가 저항하는 구조이며, 오른쪽 사재는 인장이 발생한다. 비틀림은 받침조건인 모멘트로 저항한다. 방법2, 3은 케이블 장력을 링크슈가 저항하는 구조이며, 오른쪽 사재는 압축이 발생한다. 비틀림은 링크슈가 저항한다. 따라서, 방법1은 방법2,3은 서로 다른 구조계이다.

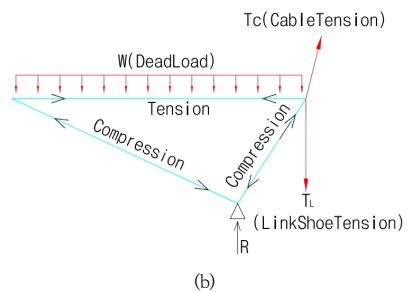
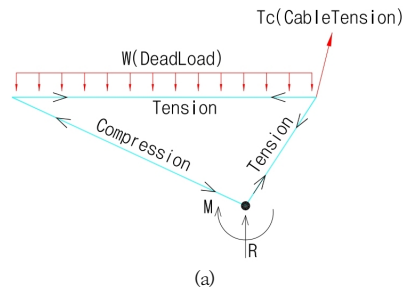


Fig. 10. Free Body Diagram
(a)Method1 (b)Method2, Method3

링크슈를 간접적으로 고려한 방법과 직접 모델링한 방법을 비교·분석한 결과, 간접법은 고유치 해석과 같은 전체 거동 분석은 직접법과 유사하였다. 그러나 간접법은 링크슈와 지점부 보강거더의 연결 구조계를 정확히 반영하지 못하여 받침과 링크슈의 작용력 및 상현재와 사재

의 응력에서 직접법과 차이가 발생하는 것을 알 수 있었다. 간접법의 경우 하중이 집중되어 응력이 가장 큰 것은 지점부 오른쪽 사재이다. 그러나 직접법의 경우 링크슈가 연결된 오른쪽 상현재에 하중이 집중되었다.

3.3 링크슈와 받침 횡방향배치가 교량에 미치는 영향 분석

링크슈는 인장력에만 저항하며, 압축력에는 저항하지 못한다. 3.2에서 분석한 바와 같이 비틀림 방향에 따라 인장력이 발생하는 위치의 링크슈는 그 역할을 하지만 반대쪽의 링크슈는 압축력에 저항하지 못한다.

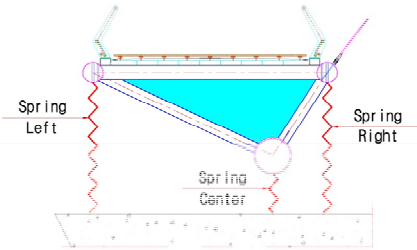


Fig. 11. Arrangement of Spring for Bearing and Link-Shoe

따라서 인장력을 저항하는 링크슈 위치의 상현재에 응력이 집중된다. 압축전담요소와 인장전담요소의 배치에 따라 보강 거더에 발생하는 응력을 비교 분석하고자 한다. Fig. 11과 같이 역삼각형 트러스 단면에 3개의 지점을 만들 수 있다.

압축전담요소와 인장전담요소의 배치를 Table 8과 같이 3가지의 방법으로 분석하였다. 방법1의 경우 중앙은 압축전담요소, 나머지는 인장전담요소를 배치하는 방법으로 3.2장의 배치방법과 동일하다. 방법2, 3의 경우 비틀림 방향에 따라 인장이 발생하는 부분은 인장전담요소를, 압축이 발생하는 위치는 압축전담요소를 배치하는 방법이다. 즉, P1과 PY1 지점에서 오른쪽은 인장전담요소를, 왼쪽과 중앙은 압축전담요소를 배치하였다.

Table 8. Arrangement of Tension Only and Compression Only Spring for Method1, 2, 3

| position | | Method1 | Method2, 3 |
|----------|--------|------------------|------------------|
| P1, PY1 | Left | Tension Only | Compression Only |
| | Center | Compression Only | Compression Only |
| | Right | Tension Only | Tension Only |

인장전담요소는 $1.38 \times 10^7 \text{ kN/m}$ 을 적용하였고, 중앙부 압축전담요소의 스프링 상수는 $1 \times 10^{10} \text{ kN/m}$ 를, 왼쪽 압축전담요소는 방법2는 $1 \times 10^{10} \text{ kN/m}$ 을, 방법3은 $1 \times 10^5 \text{ kN/m}$ 를 적용하였다.

Table 9. Stiffness of Elastic-Link of Method 1,2,3

| position | | Vertical Stiffness [kN/m] | | |
|----------|--------|---------------------------|----------|----------|
| | | Method1 | Method2 | Method3 |
| P1, PY1 | Left | 1.38E+07 | 1.00E+10 | 1.00E+05 |
| | Center | 1.00E+10 | 1.00E+10 | 1.00E+10 |
| | Right | 1.38E+07 | 1.38E+07 | 1.38E+07 |

방법2, 3은 좌측에 압축전담요소를 적용하였다. Table 9을 보면 방법2는 방법1과 비교할 때 우측의 값은 줄고, 좌측은 압축력이 발생한다. 이는 비틀림에 의해서 방법1의 경우 우측링크에 하중이 집중되었지만, 방법2의 경우 좌측링크로 하중이 분산된 것을 의미한다.

Table 10. Result Force of Link-Shoe and Bearing

| position | | Result Force [kN] | | |
|----------|--------|-------------------|---------|---------|
| | | Method1 | Method2 | Method3 |
| PY1 | Left | - | -449.8 | -283.9 |
| | Center | -1,111.0 | 60.4 | -378.8 |
| | Right | 1,403.2 | 680.3 | 950.4 |

이러한 효과로 Table 11의 보강거더 상현재의 좌우 응력도 동일한 경향을 보인다. 좌측 상현재는 118.2MPa에서 197.8MPa로 증가하고, 우측 상현재는 366.5MPa에서 230.2MPa로 감소한다.

Table 11. Stress of Girder

| position | Stress [MPa] | | |
|----------|--------------|-------------------|-------------------|
| | ①Method1 | ②Method2 (②/①) | ③Method3 (③/①) |
| Upp-L | 118.2 | 197.8 (167%) | 170.8 (144%) |
| Upp-R | -366.5 | -230.2 (63%) | -264.1 (72%) |
| Strut-L | -149.0 | -143.8 (96%) | -145.3 (97%) |
| Strut-R | 232.3 | 204.2 (88%) | 200.7 (86%) |
| Low | -86.0 | -86.4 (100%) | -86.8 (101%) |

방법2와 3은 좌측 압축전담요소 스프링상수의 차이에 의한 거동분석이다. 방법3의 경우 압축스프링상수의 감소에 따라 링크의 반력과 보강거더 상현재의 응력이 감소한다. 이는 좌우 링크의 스프링상수 변화로 좌우 링크의 반력과 보강거더 상현재의 좌우 응력변화가 가능함을 의미한다.

분석결과, 압축전담요소인 받침과 인장전담요소인 링크슈의 횡방향 배치변화와 각 요소의 강성변화는 보강거더 상현재의 좌우측 응력을 조정할 수 있다.

4. 결론

본 연구 대상은 역삼각형 트러스단면 보강거더를 가진 S자형 보도사장교로, 보강거더 중앙부 하현재에 받침을 배치하고, 비틀림 제어를 위해서 좌우측의 상현재에 링크슈를 배치하였다.

첫 번째 연구는 링크슈의 모델링 방법과 격벽의 모델링 반영 유무가 전체계해석에 미치는 영향을 분석하는 것이다. 방법1은 링크슈를 모델링하지 않고 중앙받침 지점조건의 비틀림 강성을 이용하여 링크슈를 간접적으로 고려하는 방법이다. 방법2는 링크슈를 인장전담요소로 직접 모델링하는 방법이며 방법3은 방법2에 격벽을 추가하였다.

방법1,2,3의 고유치 해석 결과 주요모드의 주파수 차이는 1% 이내로 전체 구조강성은 유사하였다. 받침과 링크슈의 작용력은 최대 7% 차이를 보였으며, 받침의 회전 강성을 무한 강성으로 적용하는 방법은 정확한 링크슈 강성을 반영하지 못하였다.

방법1의 보강거더 응력 집중부는 지점부 오른쪽 사재이고, 방법2와 3은 링크슈가 연결된 오른쪽 상현재에서 가장 큰 응력 집중이 발생하였다. 또한 방법1의 오른쪽 사재는 인장력이 발생하고, 방법2,3은 압축력이 발생하였다. 이것은 방법1과 방법2,3의 구조계가 서로 다르기 때문이다.

격벽을 모델링한 방법3은 방법2보다 오른쪽 상현재 응력은 감소하고 좌측은 증가하였다. 이는 좌우 상현재와 하현재가 격벽으로 연결되어 비틀림강성이 증가하였기 때문이며, 우측 상현재의 응력이 좌측 상현재로 분배되었기 때문이다.

본 교량과 같이 비틀림 거동이 지배적인 교량은 정확한 구조계와 비틀림강성을 반영하기 위해서 구조 해석시 링크슈와 격벽을 모델링해야한다.

두 번째 연구는 받침과 링크슈의 횡방향 배치와 수직 강성이 보강거더 상현재의 응력에 미치는 영향을 분석하는 것이다. 방법1은 곡선반경 바깥쪽에서 링크슈, 받침, 링크슈의 순서로 배치하는 것이고, 방법2는 받침, 받침, 링크슈로 배치하는 방법이다. 방법2는 방법1과 비교하여 좌측상현재의 응력은 증가하고, 우측상현재의 응력은 감소한다. 또한 방법3은 좌측링크의 수직강성을 방법2의 1/2로 감소시킨 것으로 좌측 상현재의 응력은 감소하고, 우측상현재는 증가하였다.

인장전담요소인 링크슈와 압축전담요소인 받침의 횡방향 배치와 강성의 크기에 따라 하중의 횡분배 조정이 가능하였다.

정확한 해석 모델링은 설계, 시공, 유지관리 시 기준이 되는 매우 중요한 작업이다. 특히, 기존에 유사사례가 없거나, 많지 않은 교량의 경우 해석 모델링에 대한 깊은 고민과 검증이 필요하다. 이러한 이유로 국내 사례가 없는 S형 곡선사장교의 본 연구는 향후 유사한 곡선 사장교에서 비틀림 제어를 위한 구조 계획시 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

References

- [1] J. S. Kim, *Wind Stability of Cable-Stayed Bridge Considering the Construction Sequences*, Doctor's thesis, University of Seoul, Seoul, Korea, pp.80-157, 2005.
- [2] S. H. Kim, *Wind Analysis of Cable-Stayed Bridge Considering Aerodynamic Admittance Function*, Doctor's thesis, University of Seoul, Seoul, Korea, pp.111-209, 2011.
- [3] B. C. Kim, *Buffeting Response of Cable-stayed Bridge using 3-Dimensional Computational Fluid Dynamics*, Doctor's thesis, University of Seoul, Seoul, Korea, pp.104-155, 2013.
- [4] J. H. Jung, *Analysis of symmetric or non-symmetric cable-stayed bridges*, Doctor's thesis, University of Seoul, Seoul, Korea, pp.60-104, 2003.
- [5] S. S. Yhim, "Determination of Initial Tension and Reference Length of Cables of Cable-Stayed Bridges", *Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol.9, No.2, pp. 137-146, Apr. 2005
- [6] Y. J. Lee, B. C. Lho, C. K. Kim, S. W. Bae, "A Study on Controlling the Negative Reaction of Cable Stayed Bridge Considering Constructability and Economy : Vam Cong Cable Stayed Bridge in Vietnam", *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol.18, No.5, pp. 87-95, Sept. 2014

DOI: <http://dx.doi.org/10.11112/jksmi.2014.18.5.087>

- [7] G. Y. Kim, D. W. Seo, "Structural Safety Evaluation of Cable Stayed Bridge based on Cable Damage Scenarios", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.19, No.7, pp. 105-111, Jul. 2018
DOI: <http://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.7.105>
- [8] E. R. Kim, "Seismic Damage Index Proposal and Damage Assessment for Cable-Stayed Bridge", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.19, No.1, pp. 127-135, Jan. 2018
DOI: <http://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.1.127>
- [9] H. J. Lee, "Study on the Efficient Application of Vision-Based Displacement Measurements for the Cable Tension Estimation of Cable-Stayed Bridges", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.17, No.9, pp. 709-717, Sept. 2016
DOI: <http://doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.9.709>
- [10] S. G. Ji, *Lateral Behaviors of U-type Concrete Pylon in Cable Stayed Bridge*, Master's thesis, University of Seoul, Seoul, Korea, pp.16-33, 2016
- [11] Y. S. Na, *Structural Stability of S-type Pedestrian-CSB due to Tension Change of Backstay Cables*, Master's thesis, University of Seoul, Seoul, Korea, pp.40-69, 2018
- [12] Niels J. Gimsing, *Cable Supported Bridges*. p.165-239, A John Wiley & Sons Publication, 2012.

지 선 근(Seon-Geun Ji)

[정회원]



- 2010년 8월 ~ 현재 : (주)삼보기
 출단 이사
- 2016년 8월 : 서울시립대학교 토
 목공학과 (공학석사)
- 2017년 2월 ~ 현재 : 서울시립대
 학교 토목공학과 (박사과정)

〈관심분야〉

토목구조, 구조진동