

곡선 강박스 거더의 휨-뒤틀림 응력비에 따른 중간 다이아프램 간격

이정화¹, 이기세¹, 임정현¹, 최준호², 강영종*¹
¹고려대학교 건축사회환경공학과, ²고려대학교 초대형구조기술연구소

Spacing of Intermediate Diaphragms Horizontally Curved Steel Box Girder Bridges considering Bending-distortional Warping Normal Stress Ratio

Jeong-Hwa Lee¹, Kee-Sei Lee¹, Jeong-Hyun Lim¹, Jun-Ho Choi², Young-Jong Kang^{1*}

¹School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University,

²Research Institute for Mega Structures, Korea University.

요약 곡선 박스 거더의 뒤틀림은 곡률 효과로 인하여 직선 박스 거더에 비하여 더욱 취약하지만, 국내 설계기준에서는 곡선 박스 거더의 중간 다이아프램 간격을 제시하고 있지 않다. 본 연구에서는 직선 및 곡선 박스 거더의 선형 유한요소해석을 통하여 뒤틀림 응력을 고려한 중간 다이아프램의 간격에 대한 연구를 수행하였다. 해석에 이용한 대상 교량은 단경간 곡선 박스 거더로써, 기존에 우리나라에서 건설되고 있는 교량의 데이터를 바탕으로, 매개변수는 중간 다이아프램의 갯수 1-6개, 곡률중심각은 0-30도, 지간장은 30m 및 60m, 플랜지의 폭과 높이는 2, 3m로 선정하였다. 휨-뒤틀림 응력비는 5%, 10%, 15%, 20%인 경우에 대해서 직선 및 곡선 박스 거더의 곡률 중심각 및 뒤틀림 응력비에 따른 적정 중간 다이아프램의 간격을 제시하였다. 또한, 해석 결과와 설계기준과의 비교를 통하여, 제안된 중간 다이아프램의 적합성을 평가하였다.

Abstract Although distortions of horizontally curved box girder are more susceptible than which of the straight girder due to curvature effect, current domestic design standards does not present spacing of intermediate diaphragms for the curved box girder. In this study, parametric studies for straight and curved box girder considering distortional warping normal stresses based on linear finite element analysis were carried out. Single span curved girders were chosen for analysis based on current domestic bridge data with 1-6 of solid intermediate diaphragms, 0-30 degree of subtended angle, 30m and 60m of span length and 2-3m of flange width and web height. The adequate spacing of diaphragms for the box girder were suggested considering subtended angles and bending and distortional warping normal stress ratios with 5%, 10%, 15% and 20%. The analysis results were also compared to a current design standard and suggested spacing of diaphragm were evaluated.

Keywords : Box girder, Curved bridge, Distortion, FEM, Spacing of diaphragm

1. 서론

최근 도심지의 교통의 발달로 인하여 교통밀집지역이

나 고속도로 인터체인지 등에서 곡선교량이 많이 시공이 되고 있으며, 국내에서는 주로 이러한 교량 구조물에 곡선 강박스 거더의 시공이 이루어지고 있다. 이는 강박스 거

본 논문은 건설교통부가 출원하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(12기술혁신B01-곡선 강교량의 합리적인 LRFD 설계기술 개발)에 의해 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Young-Jong Kang(Korea Univ.)

Tel: +82-2-3290-3317 email: yjkang@korea.ac.kr

Received August 18, 2015

Revised (1st September 2, 2015, 2nd September 4, 2015)

Accepted September 11, 2015

Published September 30, 2015

더가 1형 거더에 비하여 순수비틀림강성이 크기 때문이다. 반면에 박스 거더는 전형적인 박관구조물로서 볼 수 있으며 응력분포의 불균일, 변형의 증대, 국부좌굴과 같은 불안정성 등이 발생할 수 있으므로 설계단계에서부터 세심히 고려하여야 한다.

만약 박스 거더에 하중이 편재하되면 거더 단면에는 뒤틀림으로 인한 단면의 변형과 함께 불균일한 응력인 뒤틀림 법선응력이 발생하게 된다. 이와 같은 단면의 변형은 박스 거더의 강성을 저하시키고 국부응력의 증대를 초래하게 되므로 이를 반드시 방지하여야 한다. 이러한 뒤틀림을 제어하기 위하여, 박스 거더의 내부에는 중간 다이아프램(intermediate diaphragm)이 설치되어 뒤틀림에 의하여 발생하는 응력을 일정 수준 이내로 제한하게 된다.

곡선 강박스 거더의 중간 다이아프램에 대한 설계규정은 미국 AASHTO의 Guide Specifications for Horizontally Curved Highway Bridges[1]와 AASHTO LRFD Bridge Design Specification[2], 일본의 한신시방서[3]에서 규정하고 있으나, 우리나라의 경우에는 도로교 설계기준 2010[4]에서 일본의 시방서를 수정하여 유사한 직선 박스 거더의 중간 다이아프램에 대한 설계규정을 두고 있을 뿐이다.

곡선 박스 거더 설계 시 직선 거더에 대한 설계규정을 그대로 준용한다면, 곡률이 매우 큰 경우에는 과소설계의 위험을 내포하고 있다. 또한 중간 다이아프램의 설치되는 강박스 거더 전체의 강성에 영향을 미치지 않으면서 많은 양의 수작업 용접을 요구하여 제작단가를 높이는 요소로 지적되고 있어 구조적으로 안전하며, 경제적인 중간 다이아프램의 설치를 위한 기초연구가 시급한 실정이다.

박스 거더의 중간 다이아프램 간격에 관한 주요 연구 논문으로 Park et al.[5]에서는 직선 박스 거더에 대한 중간 다이아프램 설치 간격에 대하여 휨 뒤틀림 응력비에 따라 적정 간격을 제시한바 있다. 그의 논문에서는 기존의 뒤틀림 휨 응력비를 5%, 10% 뿐 아니라 15%, 20%에 대해서도 제시하여, 박스 거더 중간 다이아프램의 경제적인 설치간격을 해석결과를 이용하여 제시하였다.

또한, Park et al.[6]는 곡선 박스 거더에 대한 9자유도 빔 요소를 이용하여, 단면 및 거더 길이에 대한 변수연구를 수행하여 적정 중간 다이아프램 간격을 제시하였다. 하지만, 기존의 설계기준에서 제시하고 있는 간격식보다

다소 복잡하게 제시되어 있다는 단점이 있다.

본 연구에서는 곡선 단경간 박스 거더에 대한 중간 다이아프램의 경제적인 설치 간격을 결정하기 위하여, 실제 교량의 단면과 지간장 및 다양한 뒤틀림 응력비를 변수로 하여 3차원 선형 유한요소해석을 이용한 매개변수 연구를 수행하였다. 해석 결과를 바탕으로 국내에서 주로 사용되는 강박스 거더에 대하여 곡률반경에 따른 적정 중간 다이아프램 간격을 제시하였다.

2. 박스 거더의 뒤틀림에 관한 설계규정

2.1 AASHTO LRFD Bridge Specification 2012

AASHTO LRFD Bridge Specification 2012[2]에서는 뒤틀림 응력을 제어하기 위하여 중간 다이아프램을 설치하도록 규정되어 있으며, 최대 간격은 40ft(12.2m)를 넘지 않도록 규정하고 있다. 뒤틀림에 의한 transverse bending stress의 한계 값도 20ksi(138MPa)로 규정하고 뒤틀림 응력은 길이방향의 휨응력의 10%가 넘지 않도록 뒤틀림을 제어하기 위한 기준을 두고 있다. 하지만, 곡선 거더와 직선 거더에 대한 설계기준은 명확히 구별하고 있지 않아 많은 혼란을 야기하고 있는 실정이다.

2.2 AASHTO Guide Specification for Horizontally Curved Steel Girder Highway Bridges(2003)

AASHTO Guide Specification for Horizontally Curved Steel Girder Highway Bridges 2003[1]에서는 뒤틀림응력이 휨응력의 10% 이내가 되도록 하고 있으며, 최대 간격은 9m로 제한하고 있다.

$$L_D \leq 30ft (\approx 9m)$$

$$\frac{f_{DW}}{f_b} \leq 10\%$$

여기에서 L_d 는 중간 다이아프램 간격, f_{dw} 는 뒤틀림법선 응력, f_b 는 휨응력이다.

2.3 한신 시방서(Hanshin Expressway Public Corporation of Japan)

한신 시방서[3]에서는 설계기준 중 유일하게 곡률중

심각에 따라 중간 다이아프램의 간격을 규정하고 있다. 이 기준은 Sakai and Nagai[7]의 연구를 바탕으로 만들어졌으며, 뒤틀림 응력이 길이방향 휨응력의 5%를 넘지 않도록 제한하고 있다. 또한, transverse distortional stress는 4.9MPa를 넘지 않도록 규정하고 있다. 아래는 한신 시방서[3]에서 규정하고 있는 중간 다이아프램 간격을 나타낸 것이다. 하지만, 본 규정에서의 하중조건과 단면데이터는 아주 오래전의 교량 데이터를 바탕으로 만들어졌다는 점에서 한계성을 지닌다.

$$L_D = L_{DS} \kappa(\phi, L) \quad (1)$$

여기에서,

$$L_{DS} = \begin{cases} 6m & (L < 60m) \\ (0.14L - 2.4)m & (60m \leq L \leq 160m) \\ 20m & (L > 160m) \end{cases}$$

$$\kappa(\phi, L) = \begin{cases} 1.0 & (L < 60m) \\ 1 - \frac{\sqrt{\phi}(L-60)}{100\sqrt{2}} & (60m \leq L \leq 200m) \end{cases}$$

2.4 도로교 설계기준 2010, 2012

도로교 설계기준 2010[4]에서는 중간 다이아프램의 간격에 대한 규정을 직선교량에 대해서만 규정하고 있으며, 한신 시방서[3]의 기준과 거의 유사한 설계식을 사용하고 있다.

$$L_D < 6.0m \quad (L \leq 50m) \quad (2)$$

$$L_D \leq (0.14L - 1.0)m \quad (L > 50m) \quad (3)$$

단, $L_D \leq 20m$

또한, 도로교 설계기준 2012[8]에서는 뒤틀림에 견딜 수 있는 충분한 강도와 강성을 가져야 한다고 규정되어 있을 뿐, 간격을 결정하기 위해서는 해석결과에 따라 배치해야 한다고 간략히 규정되어 있어, 곡선 박스 거더의 기준으로 사용하기에는 매우 부족한 실정이다.

3. 유한요소해석

3.1 해석 개요

곡선 단경간 교량의 뒤틀림 응력을 평가하기 위하여

범용 구조해석 프로그램인 ABAQUS 6.13을 사용하여, shell element를 이용한 3차원 선형 해석을 수행하였다. 사용한 박스거더의 해석 요소는 4절점 쉘요소(S4R)를 이용하였다. 하중과 경계조건은 Park et al.[5]의 연구를 참고하여, 지점부분의 경계조건은 Fig. 1과 같이 휨 변형에 대해서는 자유지지조건을 사용하였고, 뒤틀림 변형에 대해서는 구속조건을 사용하였다. 재하된 하중은 거더의 최외측단에 등분포 활하중 124.55N/cm와 거더의 최외측 중앙에 105.92kN을 재하하였다. 이는 Park et al.[5]에서 사용한 활하중으로 AASHTO[9] HS20-44 차로 하중의 등분포하중 93.32N/cm와 집중하중 80kN을 33%가산하여 보수적으로 사용한 수치이다. 고정하중은 슬래브의 폭과 두께를 각각 7.2m, 25cm로 가정하여 등분포하중으로 재하하였다.

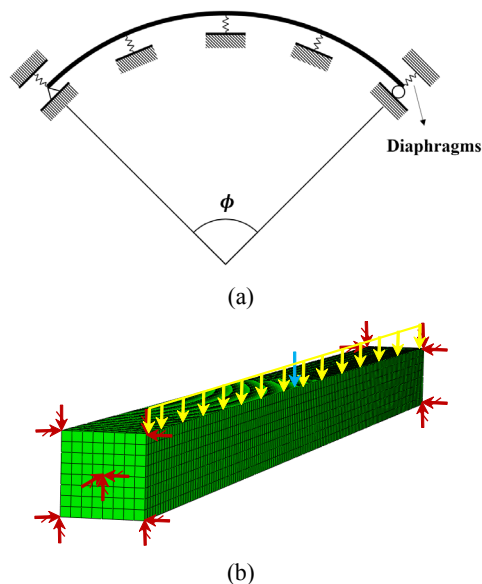


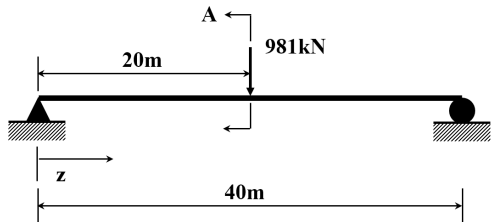
Fig. 1. Load and boundary condition for FEA model
(a) Boundary Condition (b)FEA Model

3.2 유한요소해석 검증 모델

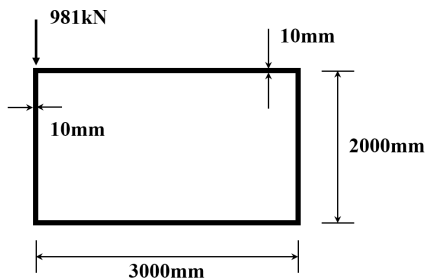
곡선 박스 거더의 유한요소해석 방법을 검증하기 위하여, 기존에 수행되었던 연구를 바탕으로 비교 검증하였다.

Park et al.[5]은 직선 박스 거더에 대한 뒤틀림 해석을 전용해석프로그램을 개발하여 수행하였는데, 이때 사용되었던 모델을 본 연구에서 수행하였던 유한요소해석 모델의 검증 모델로 채택하였다. Fig. 2는 Park et al.[5]

의 해석 모델로 지간 40m, 복부판 높이 2000mm, 플랜지 폭 3000mm의 박스거더에 최외측에 981kN의 집중하중을 재하한 모델이다. 이에 따라 요소수에 대한 수렴도 해석을 통하여 적절한 요소의 수를 도출하였다.



(a)



(b)

Fig. 2. Box girder model of simple span. (a) Elevation (b)Section A-A [2]

Fig. 3은 단면 내 플랜지의 요소 개수에 따른 뒤틀림 응력 결과이다. 요소의 개수가 많아 질수록 기존 문헌의 결과에 어느 정도 수렴하는 것으로 나타났으나, 요소의 크기가 매우 작아질 경우에는 오히려 큰 뒤틀림응력이 산출되었다. 이는 중복식 다이어그램이 설치된 지점에서 국부적인 응력 집중현상이 발생하는 것으로 판단된다. 따라서 국부적인 응력이 크지 않은 적절한 플랜지의 개수를 8개로 보아 해석을 진행하였다. 이때의 뒤틀림 응력은 41.425MPa의 뒤틀림응력을 산출하였고, 이는 Park et al.[5]의 해석결과인 40MPa에 근접한 수치로 판단된다. 지간별로 뒤틀림응력을 검토한 결과도 매우 유사한 경향이 나왔으므로, 본 연구에서 수행된 플랜지의 요소 수는 8개로 선정하였다.

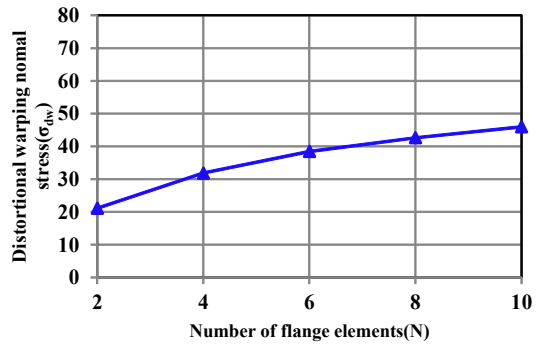


Fig. 3. Distortional warping normal stress according to the flange element numbers(N).

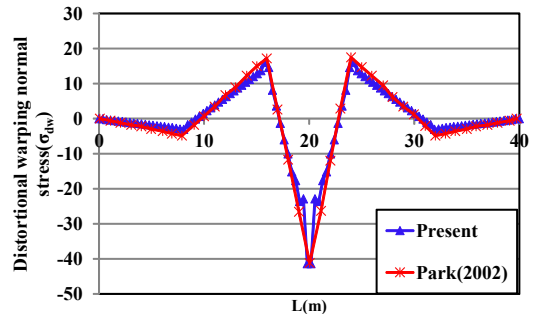


Fig. 4. Distortional warping normal stress along the span length.

3.3 해석 모델 선정

곡선 박스거더의 뒤틀림응력 평가를 적절히 수행하기 위하여, 거더의 길이(L), 단면의 폭(B)과 복부판 높이(H) 등 기하학적인 단면 형상은 현재 우리나라에서 많이 시공되고 있는 대표단면들을 선정하는 것이 타당할 것으로 판단하였다. 도로교설계편람 제5편 교량편[10]에서는 현재 우리나라에서 시공되고 있는 박스거더의 지간과 단면 치수에 대한 자료를 수록하고 있다. 단순박스거더교의 경우 지간은 30m-65m사이에서 주로 시공이 되고 있으며, 복부판 높이/지간길이 비는 1/20-1/30범위 내에서 시공되고 있다. 본 연구에서는 해석 모델의 적절한 폭과 높이를 2-3미터 내외로 가정하였다.

해석 모델은 Table 1와 같이 거더의 길이는 30m-60m, 플랜지 폭은 2-3m, 복부판 높이는 2-3m로 실제 시공단면과 유사한 치수를 사용하였으며, 플랜지과 복부판의 두께는 10-20mm로 가정하였다.

Table 1. FEA model discriptions

| | L(m) | B(m) | H(m) | tf(mm) | tw(mm) |
|--------|------|------|------|--------|--------|
| Case 1 | 30 | 2 | 2 | 10 | 10 |
| Case 2 | 60 | 2 | 2 | 10 | 10 |
| Case 3 | 30 | 2 | 2 | 20 | 20 |
| Case 4 | 60 | 2 | 2 | 20 | 20 |
| Case 5 | 30 | 3 | 3 | 10 | 10 |
| Case 6 | 60 | 3 | 3 | 10 | 10 |
| Case 7 | 30 | 3 | 3 | 20 | 20 |
| Case 8 | 60 | 3 | 3 | 20 | 20 |

또한, 박스거더의 뒤틀림에 대한 곡률중심각의 효과를 평가하기 위하여 직선인 경우 곡률중심각 0에서부터 곡선인 경우 곡률중심각 5-30도까지 해석을 수행하였으며, 이때 중간 다이아프램은 등간격으로 1-6개를 설치한 것에 대하여 평가하였다.

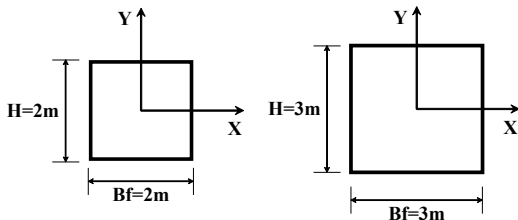


Fig. 5. Cross sections for parametric studies.

3.3 매개변수 분석

해석을 위해서 선정된 8개의 단면과 지간장에 대하여 뒤틀림응력에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 판단되는 중간 다이아프램 간격 및 곡률별로 매개변수해석을 수행하였다. 가장 큰 뒤틀림을 발생시킬 수 있는 경우를 고려하기 위하여 하중은 최외측단에 재하 하였으며, 등분포하중과 집중하중 및 비합성상태에서의 콘크리트 자중을 하중으로 재하하였다. 변수 해석에 대한 결과를 그래프로 나타내면 Fig. 6, 7와 같다. Fig. 6은 Case 3에 대한 해석 결과로 중간 다이아프램이 1개 설치되었을 때 거더 지간에 대한 뒤틀림응력분포이며, Fig. 7는 Case 6에서 중간 다이아프램이 5개 설치되었을 때의 뒤틀림 법선 응력 결과를 나타낸 것이다. 뒤틀림 응력은 곡률중심각이 커질수록 크게 증가하는 것으로 나타났다. 또한 중간 다이아프램의 간격이 작아질수록 뒤틀림 응력의 제어효과는 커짐을 알 수 있다.

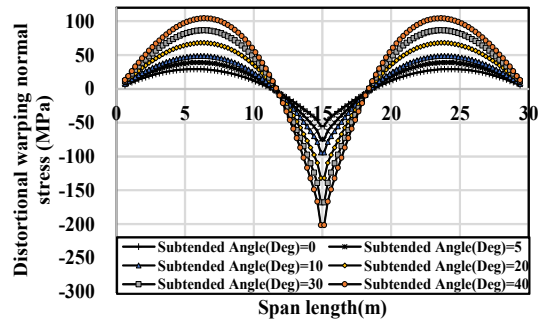


Fig. 6. Distortional warping normal stress with one of intermediate diaphragm along the span length - Case 3

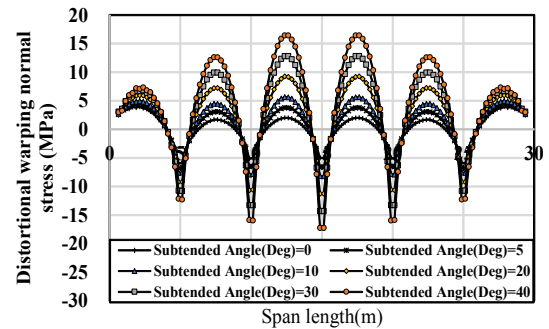


Fig. 7. Distortional warping normal stress with five intermediate diaphragms along the span length - Case 3

Table 1-8은 Case 1에서부터 8가지의 해석결과를 통해 산출된 최대 뒤틀림 응력과 휨응력의 비를 중간 다이아프램 간격에 따라 산출한 결과이다.

이를 바탕으로 뒤틀림 응력비에 대한 중간 다이아프램의 최소간격을 Table 10와 같이 나타낼 수 있다.

실제 사용되는 단경간 박스교량 지간장 범위 내에서 뒤틀림-휨 응력비가 5%일 때 거더의 곡률중심각에 따른 중간 다이아프램의 간격과 한신시방서[3]와 비교하면, Fig. 8과 같이 정리 할 수 다. 실제 교량 거더 지간장의 범위가 30-65m임을 상기하면 기존의 한신 시방서[3]에서 제공하고 있는 기준은 실제 거동과 큰 차이가 나타남을 알 수 있다. 따라서, 본 연구의 결과로써 제시된 중간 다이아프램 간격은 좀 더 경제적이고 합리적인 결과를 유도할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 2. σ_{dw}/σ_b stress ratios of Case 1

| Ld/L | Subtended angle(Deg) | | | | |
|------|----------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 0 | 5 | 10 | 20 | 30 |
| 0.14 | - | 2.9% | 3.4% | 5.0% | 6.7% |
| 0.17 | 2.5% | 3.3% | 7.0% | 5.6% | 7.3% |
| 0.2 | 4.1% | 5.3% | 9.0% | 9.2% | 11.9% |
| 0.25 | 8.8% | 10.9% | 13.1% | 13.5% | 18.0% |
| 0.33 | 13.1% | 17.2% | 21.0% | 29.6% | 38.0% |
| 0.5 | 28.4% | 38.1% | 47.9% | 67.6% | 87.2% |

Table 3. σ_{dw}/σ_b stress ratios of Case 2

| Ld/L | Subtended angle(Deg) | | | | |
|------|----------------------|-------|-------|-------|--------|
| | 0 | 5 | 10 | 20 | 30 |
| 0.14 | - | 3.4% | 4.9% | 7.8% | 10.7% |
| 0.17 | 2.4% | 4.4% | 6.5% | 10.6% | 14.6% |
| 0.2 | 3.6% | 6.6% | 9.6% | 15.6% | 21.7% |
| 0.25 | 8.5% | 9.3% | 14.1% | 23.6% | 33.3% |
| 0.33 | 12.1% | 22.6% | 28.9% | 45.9% | 62.6% |
| 0.5 | 23.4% | 40.0% | 56.8% | 90.4% | 123.7% |

Table 4. σ_{dw}/σ_b stress ratios of Case 3

| Ld/L | Subtended angle(Deg) | | | | |
|------|----------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 0 | 5 | 10 | 20 | 30 |
| 0.14 | | 2.78% | 3.34% | 4.92% | 6.52% |
| 0.17 | 2.8% | 3.2% | 4.4% | 5.5% | 7.4% |
| 0.2 | 4.0% | 5.2% | 6.5% | 9.0% | 11.5% |
| 0.25 | 8.5% | 10.7% | 12.8% | 13.2% | 17.5% |
| 0.33 | 12.6% | 16.7% | 20.8% | 29.0% | 37.0% |
| 0.5 | 26.3% | 35.8% | 45.2% | 64.0% | 82.5% |

Table 5. σ_{dw}/σ_b stress ratios of Case 4

| Ld/L | Subtended angle(Deg) | | | | |
|------|----------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 0 | 5 | 10 | 20 | 30 |
| 0.14 | - | 3.4% | 4.8% | 7.7% | 10.6% |
| 0.17 | 2.3% | 4.3% | 6.4% | 10.4% | 14.5% |
| 0.2 | 3.4% | 6.4% | 9.4% | 15.3% | 21.3% |
| 0.25 | 4.3% | 9.0% | 13.6% | 22.9% | 32.3% |
| 0.33 | 10.6% | 18.4% | 26.0% | 41.6% | 56.9% |
| 0.5 | 14.7% | 26.4% | 38.2% | 62.0% | 86.2% |

Table 6. σ_{dw}/σ_b stress ratios of Case 5

| Ld/L | Subtended angle(Deg) | | | | |
|------|----------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 0 | 5 | 10 | 20 | 30 |
| 0.14 | | 2.8% | 3.6% | 5.2% | 7.0% |
| 0.17 | 3.1% | 3.5% | 3.7% | 4.6% | 6.7% |
| 0.2 | 4.9% | 4.9% | 5.4% | 7.3% | 9.8% |
| 0.25 | 5.7% | 6.3% | 7.3% | 9.8% | 12.8% |
| 0.33 | 14.0% | 15.6% | 17.9% | 23.2% | 29.2% |
| 0.5 | 29.7% | 34.8% | 41.0% | 54.5% | 68.9% |

Table 7. σ_{dw}/σ_b stress ratios of Case 6

| Ld/L | Subtended angle(Deg) | | | | |
|------|----------------------|-------|-------|-------|--------|
| | 0 | 5 | 10 | 20 | 30 |
| 0.14 | - | 2.9% | 3.7% | 5.4% | 7.3% |
| 0.17 | 2.6% | 3.7% | 4.9% | 7.4% | 10.0% |
| 0.2 | 3.8% | 5.5% | 7.4% | 11.2% | 15.2% |
| 0.25 | 4.8% | 7.7% | 10.7% | 17.0% | 23.4% |
| 0.33 | 12.7% | 18.2% | 24.0% | 35.5% | 47.1% |
| 0.5 | 28.7% | 41.9% | 55.4% | 82.4% | 103.8% |

Table 8. σ_{dw}/σ_b stress ratios of Case 7

| Ld/L | Subtended angle(Deg) | | | | |
|------|----------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 0 | 5 | 10 | 20 | 30 |
| 0.14 | | 2.7% | 3.5% | 6.0% | 6.8% |
| 0.17 | 3.5% | 3.4% | 3.6% | 4.6% | 6.5% |
| 0.2 | 4.7% | 4.8% | 5.3% | 7.1% | 9.4% |
| 0.25 | 9.1% | 9.5% | 10.6% | 12.7% | 15.0% |
| 0.33 | 13.3% | 15.1% | 17.5% | 22.3% | 27.4% |
| 0.5 | 28.1% | 33.5% | 39.6% | 52.0% | 64.8% |

Table 9. σ_{dw}/σ_b stress ratios of Case 8

| Ld/L | Subtended angle(Deg) | | | | |
|------|----------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 0 | 5 | 10 | 20 | 30 |
| 0.14 | - | 2.8% | 3.6% | 5.3% | 7.0% |
| 0.17 | 2.7% | 3.8% | 4.8% | 7.2% | 9.7% |
| 0.2 | 3.6% | 5.4% | 7.3% | 11.0% | 14.8% |
| 0.25 | 8.5% | 10.5% | 14.5% | 16.7% | 22.9% |
| 0.33 | 12.0% | 17.5% | 23.3% | 34.6% | 45.8% |
| 0.5 | 25.8% | 38.3% | 51.1% | 76.5% | 94.5% |

Table 10. Spacing of intermediate diaphragms considering various σ_{dw}/σ_b stress ratios for actual bridge data ranges.

| Stress ratio (σ_{dw}/σ_b , %) | Subtended angle(Deg) | | | | |
|---|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | 0° | 5° | 10° | 20° | 30° |
| | Straight girder | Curved girder | | | |
| 5 | $L_d = \frac{1}{5} L_e$ | $L_d = \frac{1}{6} L_e$ | $L_d = \frac{1}{7} L_e$ | - | - |
| 10 | $L_d = \frac{1}{4} L_e$ | $L_d = \frac{1}{5} L_e$ | $L_d = \frac{1}{5} L_e$ | $L_d = \frac{1}{7} L_e$ | - |
| 15 | $L_d = \frac{1}{3} L_e$ | $L_d = \frac{1}{4} L_e$ | $L_d = \frac{1}{4} L_e$ | $L_d = \frac{1}{6} L_e$ | $L_d = \frac{1}{6} L_e$ |
| 20 | $L_d = \frac{1}{3} L_e$ | $L_d = \frac{1}{4} L_e$ | $L_d = \frac{1}{4} L_e$ | $L_d = \frac{1}{6} L_e$ | $L_d = \frac{1}{6} L_e$ |

Where, L_e = effective girder length

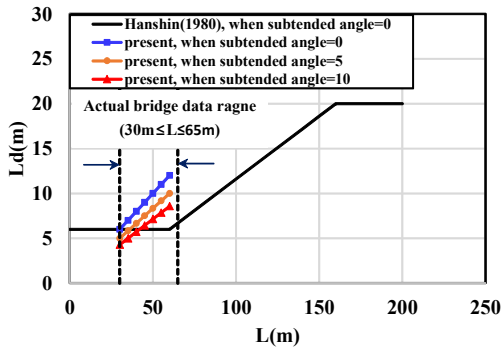


Fig. 8. Spacing of intermediate diaphragms according to the subtended angle when O_{dw}/O_b is equal to 5% for range of actual bridge data.

3. 결론

본 연구에서는 곡선 박스거더교량의 적정 중간 다이아프램의 간격을 제시하기 위하여, 선형 유한요소해석을 이용하여 곡률 중심각, 뒤틀림응력비, 중간 다이아프램의 간격을 변수로 연구를 수행하였다. 연구내용을 간략히 정리하면 아래와 같다.

1. 한신 시방서[3]를 제외한 국내의 설계기준들은 직선 거더에 대한 중간 다이아프램간격을 제시하거나, 간략히 뒤틀림 응력비의 제한을 두어 설계하도록 규정하고 있다. 하지만, 이마저도 실제 단경간 교량에 대한 설계를 할 경우 일률적으로 5m의 간격으로 중간 다이아프램의 설계를 유도하고 있어서 보수적인 설계를 제시하고 있는 것으로 판단된다.
2. 직선 박스 거더에 비하여 곡선 박스 거더교량은 곡률효과로 인하여 더 큰 뒤틀림 하중을 받는 것으로 나타났다. 즉, 도로교 설계기준 2010[4]을 따른 경우, 곡선 박스 거더의 설계는 과소 설계될 위험성이 있는 것으로 판단된다.
3. 도로교설계편람[10]에서 기술한 바에 의하면 실제 교량의 지간장 범위는 30-65m범위 내에 있으나, 한신 시방서[3]나 국내 도로교 설계기준[4]에서는 약 100m이상의 거더에 대해서도 중간 다이아프램 간격을 제시하고 있다. 하지만, 이는 실제 교량형식에서는 적용하기 힘든 기준으로 판단된다.
4. 곡선 박스 거더 교량에 대한 매개변수 해석 결과를 바탕으로 실제 사용가능성이 높은 지간장 범위 내에서 최소한의 중간 다이아프램 간격을 제시한 결

과, 한신 시방서[3]의 기준보다 경제적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.

5. 본 연구에서 검토한 단경간 폐합 강박스 거더는 합성 진상태의 단면을 이용하므로 비틀림 거동을 파악하기에는 이상적인 조건에서 중간 다이아프램 간격에 대한 연구를 수행하였다. 하지만, 향후 연구에서는 수평 브레이싱이 설치된 강 준폐합 단면 또는 강합성 폐합단면을 대상으로 한 박스거더의 뒤틀림 응력에 대한 평가를 수행하여 보다 실무 설계에 적합한 뒤틀림 응력에 대한 평가가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

References

- [1] AASHTO. Guide Specifications for Horizontally Curved Steel Girder Highway Bridges. American Association of State Highway and Transportation Officials, Inc., Washington, D. C., 2003.
- [2] AASHTO. AASHTO LRFD Bridge Design Specification. American Association of State Highway and Transportation Officials, Inc., Washington, D. C. 2012.
- [3] Hanshin Expressway Public Corporation. Guidelines for the design of horizontally curved girder bridges, Japan, 1988.
- [4] Korean Ministry of Construction and Transportation. Standard Specifications for Highway Bridges, Korea, 2010.
- [5] N. H. Park, Y. J. Choi, G. S. Yi, Y. J. Kang, "Distortional Analysis of Steel Box Girders", Steel Structures, 2(2002), pp. 51-58, 2002.
- [6] N. H. Park, Y. J. Choi, Y. J. Kang. Spacing of intermediate diaphragms in horizontally curved steel box girder bridges, Finite Element in Analysis and Design, 41, pp. 925-943, 2005.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.finel.2004.12.006>
- [7] Hiroshi. Nakai, C. H. Yoo, "Analysis and Design of Curved Steel Bridges", McGrawHill, 1988.
- [8] Korean Ministry of Construction and Transportation. Standard Specifications for Highway Bridges, Korea, 2012.
- [9] AASHTO. AASHTO LRFD Bridge Design Specification. American Association of State Highway and Transportation Officials, Inc., Washington, D. C. 1993.
- [10] Korean Ministry of Construction and Transportation. Design Manual for Highway Bridges, Korea, 2008.

이 정 화(Jeong-Hwa Lee)

[준회원]



- 2011년 8월 : 서울과학기술대학교 건설공학부 토목공학 (공학사)
- 2013년 8월 : 고려대학교 건축사회 환경공학과 (공학석사)
- 2013년 9월 ~ 현재 : 고려대학교 건축사회환경공학과 (박사과정)

<관심분야>

합성재료, 구조해석, 합성구조, 해양구조

최 준 호(Ho-Jun Choi)

[정회원]



- 2007년 8월 : 고려대학교 토목환경 공학과(공학사)
- 2013년 8월 : 고려대학교 건축사회 환경공학과(공학박사)
- 2013년 9월 ~ 현재 : 고려대학교 초대형구조기술연구소 연구교수

<관심분야>

비선형해석, 구조물건전도모니터링, 해양공학

이 기 세(Kee-Sei Lee)

[정회원]



- 2009년 8월 : 고려대학교 토목환경 공학과 (공학석사)
- 2015년 2월 : 고려대학교 건축사회 환경공학과 (공학박사)
- 2015년 2월 ~ 현재 : 고려대학교 건축사회환경공학과 (연구교수)

<관심분야>

구조공학, 구조해석

강 영 종(Young-Joung Kang)

[정회원]



- 1979년 3월 : 고려대학교 토목환경 공학과(공학사)
- 1983년 3월 : 고려대학교 대학원 토목공학과(공학석사)
- 1987년 9월 : Auburn univ(공학박사)
- 1983년 3월 ~ 현재 : 고려대학교 건축사회환경 정교수

<관심분야>

비선형해석, 구조물건전도모니터링, 구조공학

임 정 현(Jeong-Hyeon Lim)

[준회원]



- 2007년 3월 : 순천대학교 토목공학과 (공학사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 고려대학교 건축사회환경공학과 (석박사 통합과정)

<관심분야>

구조공학, 구조해석