



강박스 거더의 단면 형상비가 단면의 뒤틀림과 중간 다이아프램 간격에 미치는 영향

이정화¹ · 이기세² · 최준호³ · 강영종^{4*}

¹연구교수, 고려대학교, 초대형건설기술연구소, ²연구교수, 고려대학교, 초대형건설기술연구소,

³연구원, Texas A&M University, Ocean Engineering, ⁴교수, 고려대학교, 건축사회환경공학과

Effect of Cross-sectional Shape of Steel Box Girder on Distortion of Cross-section and Intermediate Diaphragm Spacings

Lee, Jeong Hwa¹, Lee, Kee Sei², Choi, Jun Ho³, Kang, Young Jong^{4*}

¹Research Professor, Research Institute for Mega Construction, Korea University, Seoul, Korea

²Research Professor, Research Institute for Mega Construction, Korea University, Seoul, Korea

³Researcher, Ocean Engineering, Texas A&M University, Texas, U.S.A.

⁴Professor, School of Civil, Environmental & Architectural Engineering, Korea University, Seoul, Korea

Abstract - If an eccentric load is applied to box girder of bridge, cross-section of the girder will be distorted. These distortion generates deformation of box section and stresses in the longitudinal direction. So the intermediate diaphragm must be properly installed in the box section to control the distortional warping normal stress. Modern design standards limit ratio of distortional warping normal stress to bending normal stress to less than 5 or 10%, but complex and various structural analysis steps are required at design stages. In this study, to simplify the structural analysis at the design stage, parametric study were conducted to presents required intermediate diaphragm spacing of the box girder bridge using finite element analysis. The effects of the cross-sectional shape of the steel box girder on the distortion of the cross-section and intermediate diaphragm spacings were analyzed by using parameters such as height to width ratio and span length of the actual box girder. Based on the FEA results, a simple design formula for designing required intermediate diaphragm spacing was presented when the ratio of distortional warping normal stress to bending normal stress is equal to 5% and 10% for each.

Keywords - Diaphragm, Steel box girder, Single span, Spacing, Distortion

1. 서론

우리나라는 평지에 비해 산지가 전체 국토의 약 70%에 달하여 도로의 건설시 교량의 비중이 매우 높다. 특히, 강박스 거더 교량은 I형 거더에 비하여 비틀림과 휨 강성이 우수하여 도로교 뿐 아니라 철도교로도 적용되어 오고 있으며 지속적으로 발전되어오고 있

다. 이러한 강박스 거더의 장점으로 인해, 큰 비틀림강성이 필요한 도로의 접속교에는 단박스형태의 강박스 거더가 많이 시공되고 있다.

Fig. 1.(a)와 같이, 단박스형태의 강박스거더에 편심 하중이 작용하게 되면, 편심 하중에 의해 단면에는 비틀림이 발생하게 되고 이 비틀림은 순수비틀림과 뒤틀림 하중으로 나뉘어 거더 단면에 작용하게 된다. 이때 뒤틀림 하중에 의하여 단면은 Fig. 1.(b)과 같이 뒤틀림이 발생하게 되는데, 이러한 단면의 변형은 교축방향의 법선 응력을 발생시키게 된다(Fig. 1.(c)). 이 응력을 뒤틀림 뒹 법선 응력(distortional warping normal stress)이라고 하며, 설계기준에서는 이 뒤틀림 뒹 법선 응력이 휨 법선 응력(bending normal stress)의 5%내지 10%이하로 발생하도록 규정하고 있다(AASHTO, 2014; Hanshin, 1988).

Note.-Discussion open until August 31, 2019. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on September 13, 2018; revised December 11, 2018; approved on December 28, 2018.

Copyright © 2019 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-02-3290-3317 Fax. +82-02-921-5166

E-mail. yjkang@korea.ac.kr

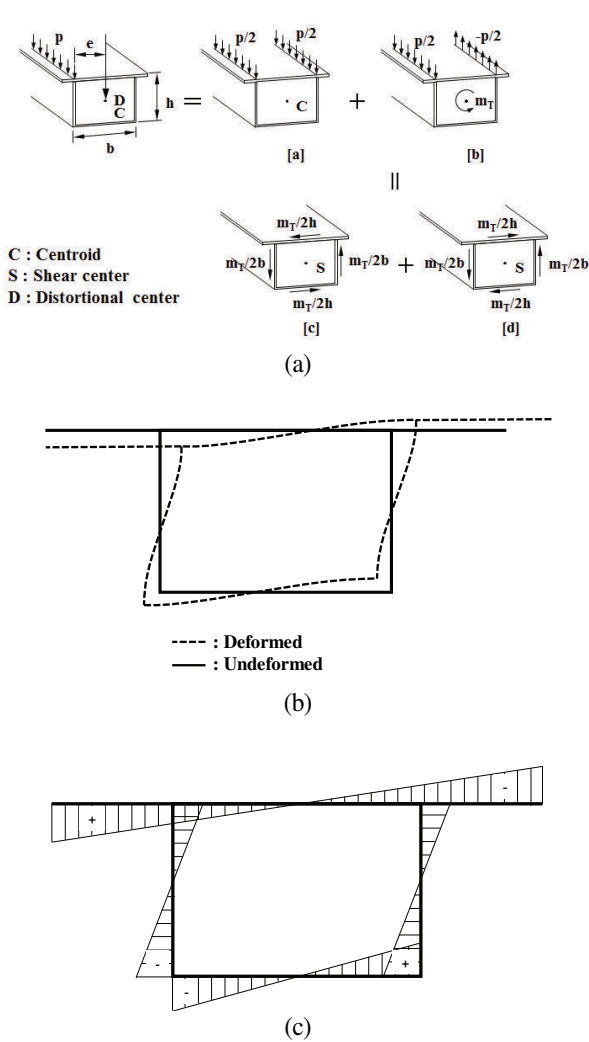


Fig. 1. Distortion behavior of steel box girder bridge
(a) distortional load component, (b) distortion of box section,
(c) distortional warping normal stress distribution of box section

단실 박스거더의 뒤틀림에 관한 연구는 지난 수십년동안 지속적으로 연구되어 오고 있다. 1968년 Dabrowski는 단박스 거더의 뒤틀림 거동을 처음으로 수학적으로 정식화하였고(Dabrowski, 1968), 이후 뒤틀림을 방지하기 위한 중간 다이아프램의 간격에 대한 연구가 수행되어 왔다(Oleinik and Heins, 1975; Sakai and Nagai, 1977; Nakai and Murayama, 1981).

Oleinik와 Heins (Oleinik and Heins, 1975)는 50ft에서 150ft의 지간을 갖는 단실 단박스 곡선교량에 대한 매개변수 연구를 수행하였고, 그들의 연구는 미국 고속도로 교통 관리 협회(American Association of State Highway and Transportation Officials)의 설계 기준에 적용되었다. 한편, 일본에서는 Nakai와 Murayama(Nakai and Murayama, 1981)에 의해서, 60m에서 150m의 지간을 갖는 직

선 및 곡선교량에 대해, 뒤틀림 뒹 법선 응력을 휨 법선 응력의 5% 이내로 제어할 수 있는 중간 다이아프램 간격에 대한 근사식을 제시하였다. 이 연구결과는 일본 한신 고속도로 주식회사(Hanshin, 1988)의 설계 가이드 라인에 적용되었다.

국내에서는 비틀림과 휨 강성이 우수한 강박스거더에 대하여 도로교와 철도교 등 다양한 분야에서 연구되어 오고 있다. (이성행 등, 2016; 황의승 등, 2017; 김도형 등, 2018) 강박스거더의 뒤틀림 해석과 중간다이아프램 간격과 관련해서는 임다수(2002), 박남희 등(2003), 최영준 등(2003), 박남희 & 강영종 (2004a, b, c), 윤동용 등(2005, 2006), 김승준 등(2008), 이정화 등(2015) 등의 관련 연구가 활발히 이루어졌다. 특히 2003년에는 Nakai와 Yoo(1988)와 Kang과 Yoo(1994)의 연구를 기반으로 9자유도의 박판박스 빔 요소가 개발되었으며, 이를 기반으로 단실 박스 거더의 뒤틀림 응력을 제어하기 위한 근사설계식이 제시되었다(Park et al. 2003).

현재 국내외에서는 각 나라의 환경에 맞는 설계기준들이 다수 제시가 되고 있으나, 60m이하의 강박스 교량에 대해서 5m에서 6m의 다이아프램 간격이 실무적으로 사용되어 지고 있다. 또한, 다수의 연구들에도 불구하고 매개변수 해석의 범위와 단면의 형상, 사용하중의 크기 등이 동일한 범위 내에서 적용되어 있지 않기 때문에, 일관성있는 중간 다이아프램 간격 설계가 어려운 한계점이 있다.

본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위하여, 실제 도로교에 적용될 수 있는 단면의 크기와 단면의 형상, 거더의 길이를 도출하고, 실무 적용에 적합한 매개변수 해석연구를 수행하고자 한다. 또한, 강박스 거더의 단면 형상별, 거더 길이별 적정 다이아프램 간격을 도출하며, 이를 기존의 설계식과 비교함으로써 연구의 타당성을 검토하였다.

2. 설계기준

강박스거더의 다이아프램 간격 설계를 위한 기준들은 여러 나라에서 제시되었다. 미국의 AASHTO(2003)에서는 뒤틀림 뒹 법선 응력이 휨 법선 응력의 10%를 넘지 않도록 다이아프램을 설치하도록 제시되어 있다. 최대 다이아프램 간격이 9m(=30ft)를 넘지 않도록 규정하고 있으나, 중간 다이아프램 간격을 계산할 수 있는 설계식은 존재하지 않는다.

AASHTO(2014)에서도 마찬가지로 최대 다이아프램 간격을 약 12m(=40ft)를 넘지 않도록 규정되어 있다. 또한, 단면 뒤틀림으로 인한 플랜지와 복부판의 횡방향 휨 법선 응력(transverse bending normal stress)을 138MPa(=20ksi)를 넘지 않아야 하며, 뒤틀림 뒹 법선 응력은 휨 법선 응력의 10%를 초과할 수 없다.

$$L_d \leq 9m, \frac{\sigma_{dw}}{\sigma_b} \leq 0.1 \text{ for AASHTO(2003)} \quad (1)$$

$$L_d \leq 12m, \frac{\sigma_{dw}}{\sigma_b} \leq 0.1 \text{ for AASHTO(2014)} \quad (2)$$

여기서, L_d 는 중간 다이아프램 간격, σ_{dw} 는 뒤틀림 뒹 법선 응력, σ_b 는 강축에 대한 휨 법선 응력, σ_{dw}/σ_b 은 휨 법선 응력에 대한 뒤틀림 뒹 법선 응력의 비이다.

Hanshin (1988)에서는 직선 및 곡선 단실 강박스 거더 교량에 대한 중간 다이아프램 간격을 제시하고 있다. 이 기준에서는 휨 법선 응력에 대한 뒤틀림 뒹 법선 응력비 σ_{dw}/σ_b (이하, 법선 응력비)를 5%이하로 규정하고 있고, 단면 뒤틀림에 의한 횡방향 휨 법선 응력은 4.9MPa를 초과할 수 없으므로 AASHTO기준 보다는 보수적인 기준으로 평가된다. 이 기준에서 최소 다이아프램의 간격은 60m이하에서 6m로 규정되어 있으며, 설계식은 다음과 같다.

$$L_d = L_{ds}\kappa(\phi, L) \quad (3)$$

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

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

여기서, L_{ds} 는 직선 강박스 교량의 다이아프램 간격, L 은 지간장, ϕ 는 곡선교의 곡률중심각을 의미한다.

국내 기준인 도로교 설계기준(2010)에서는 직선 단실 강박스 교량에 대한 중간 다이아프램 간격에 대한 규정을 아래와 제시하고 있다.

$$L_d = \begin{cases} 6m & (L < 50m) \\ (0.14L - 1.0)m \leq 20m & (L > 50m) \end{cases} \quad (4)$$

하지만 이후 개정된 도로교 설계기준 (2016)에서는 식(4)의 중간 다이아프램 간격식이 생략되고, 뒤틀림에 견딜 수 있는 충분한 강도와 강성을 가져야 하며, 중간 다이아프램 간격은 해석결과에 따라 배치해야 한다고 규정되어 있다.

3. 강박스거더의 뒤틀림 해석을 위한 유한요소해석기법

3.1 해석개요

강박스 교량의 뒤틀림 응력을 평가하기 위해 범용 구조해석 프로그램인 ABAQUS 2018을 사용하여 쉘 요소(S4R)를 이용한 3차원 탄성 유한요소해석을 수행하였다. 지점부분의 경계조건은 휨에 대하여서는 단순지지조건을 사용하였고, 비틀림에 대해서는 길이방향의 변형(longitudinal translation degree of freedom)은 허용하여 경계조건의 변위 구속에 의한 뒤틀림 뒹 법선 응력(distortional warping normal stress)의 발생을 최소화하였고, 비틀림에 의한 회전 변형이 발생하지 않도록 단면의 비틀림 자유도(torsional degree of freedom)를 구속하였다.

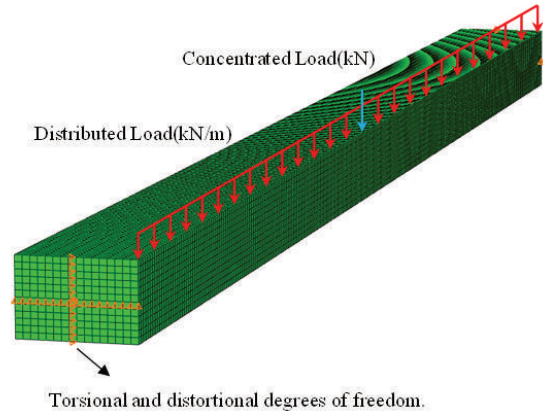


Fig. 2. Load and support conditions of FEA models

제하된 하중은 도로교에 규정된 KL-510 활하중을 재하하여, 거더의 최외측단에 등분포 활하중 12.5kN/m와 거더 최외측 중앙에 108kN을 재하하였다. 이는 AASHTO HS20-44 차로 하중의 등분포하중 9.3kN/m와 집중하중 80kN을 33%가산하여 보수적으로 사용한 수치이다. 콘크리트 바닥판에 대한 고정하중을 모사하기 위하여 거더 플랜지 폭의 2배를 콘크리트 바닥판의 폭으로 가정하였으며, 바닥판의 두께는 일반적으로 많이 시공되고 있는 25cm로 가정하여 박스거더의 최외측 끝단부에 길이방향의 등분포하중으로 치환하여 재하하였으며, 콘크리트와의 합성효과는 무시하여 비합성단면으로 가정하였다.

이렇게 제하된 편심하중에 의해 발생된 강박스거더의 뒤틀림 뒹 법선 응력은 플랜지에서 발생된 종방향 법선 응력으로 평가하였고, 해석 결과로부터 종방향의 휨 법선 응력과 뒤틀림 뒹 법선 응력을 분리하였다. 본 연구에서는 Fig. 2와 같은 쉘 모델을 이용한 해석 결과에서 플랜지 양끝단의 종방향 법선 응력을 먼저 구한 후, Fig. 3과 같이 휨 법선 응력과 뒤틀림 뒹 법선 응력으로 분리하였다. 플랜

지의 양끝단의 종방향 법선 응력의 평균을 휨 법선 응력으로 가정하였고, 이 실제 플랜지에서 발생하는 법선 응력과 휨 법선 응력의 차이를 뒤틀림 뒹 법선 응력으로 가정하였다. 순수 비틀림에 의해 발생하는 종방향 법선 응력은 그 영향이 뒤틀림 뒹 법선 응력이나 휨 법선 응력에 비하여 매우 작으므로 무시하였다(윤동용 등 2005).

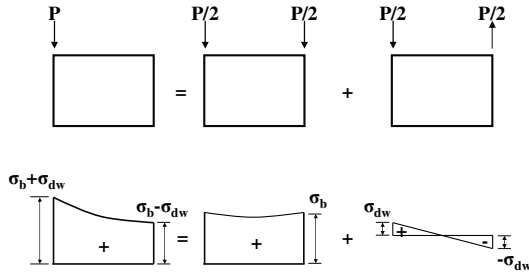


Fig. 3. Decomposition of distortional warping normal stress and bending normal stress at the box girder flanges

3.2 해석모델결정

유한요소해석모델이 실제 교량 모델에 대한 대표성을 확보해야하므로, 해석단면의 기하형상을 결정하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 국내 교량에 대한 데이터를 이용하여, 해석 단면의 기하형상이 실제단면을 반영할 수 있도록 결정하여 해석모델의 대표성을 확보하였다.

Fig. 4.는 도로교 설계편람(2008)에 규정된 국내 강박스교량의 일반적인 단면치수를 나타낸다. 거더의 높이(H)는 플랜지 폭(B)에 비해서 약 0.5에서 1.5배로 시공됨을 알 수 있다. 본 연구의 해석 범위에는 단면 형상비(H/B)가 0.5, 0.67, 1, 1.5인 경우로 나누어 해석을 진행하였다.

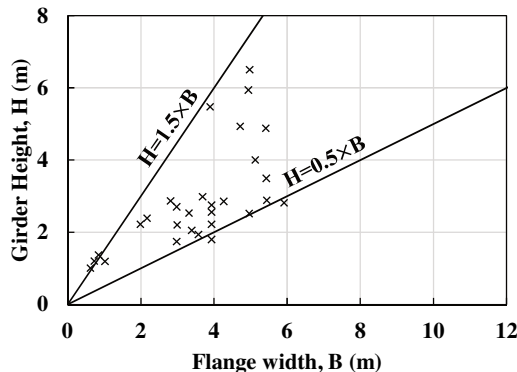


Fig. 4. General cross section range of single box sections

또한, 거더의 길이는 Fig. 5와 같이 도로교 설계 편람(2008)에 제시된 국내 교량의 거더 높이(H)와 지간장(L)의 관계에 대한 자료를 참고하여 결정하였으며, 본 해석에서는 대략적인 평균값으

로 판단되는 거더 높이(H)를 지간장(L)의 1/25로 가정하여 해석에 반영하였다. 이는 도로교 설계기준(2014)에 규정되어 있는, 거더의 최소 높이 규정과 일치하는 수치이다.

또한, 단경간 강박스거더는 일반적으로 지간장(L) 30m에서 최대 80m까지 시공되고 있는 것으로 알려져 있다. 복부판의 경우, 휨 강성에 미치는 영향은 크지 않기 때문에, 얇을수록 경제적이므로 10mm로 가정하였으며, 플랜지의 두께는 20mm~30mm으로 가정하였다. 따라서, 종합적으로 결정된 일반적인 교량의 단면 치수를 반영한 해석모델 단면 제원은 Table. 1과 같다. 또한, 해석에서 고려된 강재의 재료물성치는 구조용 강재의 탄성계수(E)인 205,000MPa로 가정하였다.

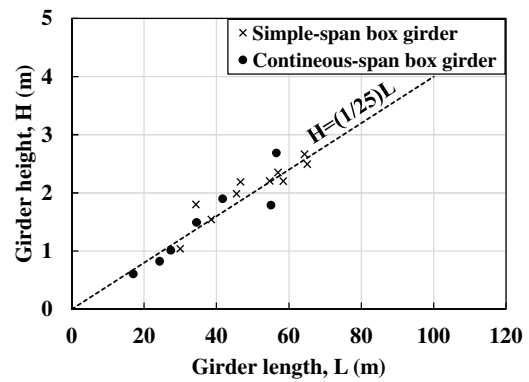


Fig. 5. Range of span length(L) and girder height(H)

Table. 1 Dimensions of analysis models

(Unit: m)

Flange width (B)	Girder height (H)	Span length (L)	No. of diaphragms (EA)	Flange thickness (t_f)	Web thickness (t_w)
0.67H, H, 1.5H, 2H	1/25L	30, 40, 50, 60, 70, 80	0-12	0.02, 0.03	0.01

3.3 예비해석

박스 거더의 유한요소해석 방법을 검증하기 위해, 기존에 수행되었던 연구를 바탕으로 비교 검증하였다. Park et al.(2003)은 단박스 거더에 대한 뒤틀림 해석을 위하여 뒤틀림이 고려된 9자유도 보요소 프로그램을 이용하여 매개변수해석연구를 수행하였다. 본 연구에서는 Park et al.(2003)의 해석결과를 이용하여 3차원 유한요소해석의 해석결과를 검증하였다.

Fig. 6.은 예비해석을 위한 강박스 단면의 형상과 하중 및 경계조건을 나타낸다. 집중하중 981kN은 거더의 중앙 단면의 최외측부에 재하를 하여 뒤틀림을 발생시키도록 재하하였다.

요소의 개수도 해석의 정확성에 매우 큰 영향을 미치므로, 플랜지의 요소 개수를 기준으로 요소개수별 응력의 수렴도를 평가하였다. 수렴도 해석결과, 약 16개의 플랜지 요소 개수에서 법선응력비(σ_{dw}/σ_b)가 수렴하여, 해석에 반영하였다. Fig. 7.과 같이 뒤틀림 해석결과와 기존 문헌의 해석결과와 매우 유사한 경향을 보여 해석의 정확성을 검증하였다.

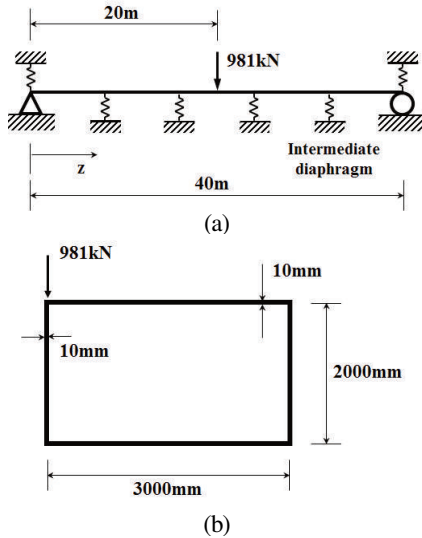


Fig. 6. Analysis description of preliminary analysis (a) Load and support conditions; (b) Cross section

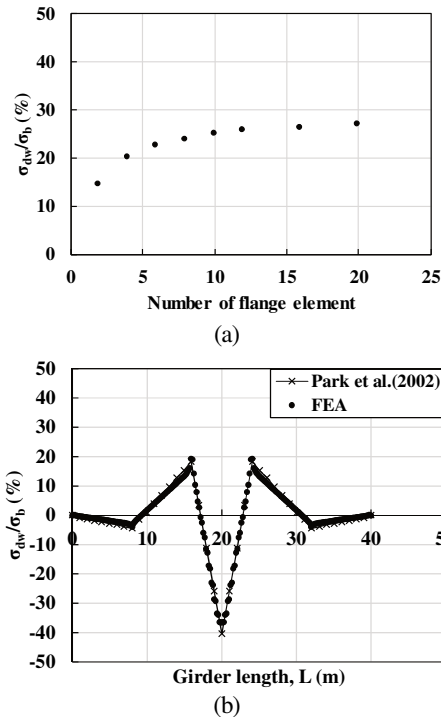


Fig. 7. Preliminary analysis results. (a) σ_{dw}/σ_b according to number of flange elements, (b) Comparisons of analysis results

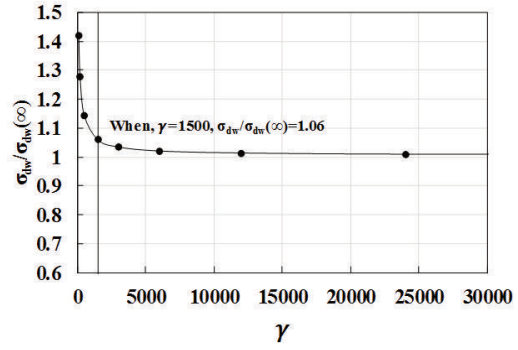


Fig. 8. Convergence analysis results according to intermediate diaphragm rigidity variations

한편, Nakai and Yoo(1988)에 의하면 뒤틀림에 영향을 미치는 요인으로 중간 다이아프램의 간격과 설치되는 중간 다이아프램 강성(K_d)도 뒤틀림에 영향을 미친다는 연구결과를 나타내었다. 교량에 실제로 설치되는 중복식 중간 다이아프램은 무한한 뒤틀림강성을 가질 수 없기 때문에, 현실적인 중간 다이아프램의 강성 결정이 매우 중요하다. Nakai와 Yoo(1988)에 의하면, 일반적으로 사용되는 중간 다이아프램의 강성은 중간 다이아프램 사이의 박스 단면의 뒤틀림 강성(K_{dw})보다 1500배 이상을 사용할 것을 제안한바 있다. 따라서, 본 연구에서도 중간 다이아프램과 박스 단면의 뒤틀림 강성비(γ)는 1500을 사용하였다(Fig. 8.).

$$\gamma = \frac{K_d}{K_{dw} L_d} \geq 1500 \quad (5)$$

$$K_{dw} = \frac{24EI_w}{\alpha_0 H}$$

$$K_d = Gt_d BH$$

여기서, L_d 는 다이아프램 간격, K_{dw} 는 단면의 단위길이당 뒤틀림 강성, K_d 는 중복식 다이아프램의 뒤틀림 강성, γ 는 뒤틀림 강성비이다.

4. 유한요소해석 결과 분석

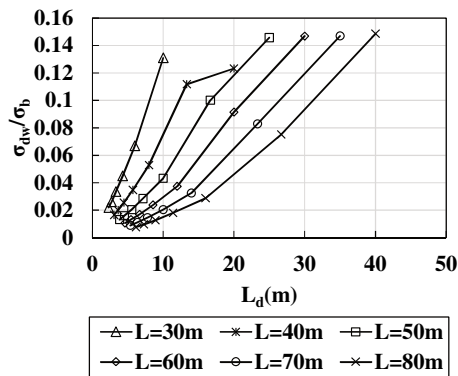
4.1 해석을 통한 강박스거더의 뒤틀림 거동

본 연구에서는 박스단면의 형상에 따른 적정 중간 다이아프램 간격을 추정하기 위하여 유한요소해석을 수행하여 분석 연구를 수행하였다. Fig. 9.와 10.은 지간장(L), 단면 형상비(H/B)별 법선 응력비(σ_{dw}/σ_b)를 중간 다이아프램의 간격(L_d)에 대해 나타낸 결과이다. Fig. 9.는 플랜지의 두께(t_f)가 20mm인 경우에 대한 결과이고, Fig. 10.은 플랜지의 두께가 30mm인 경우에 대한 해석

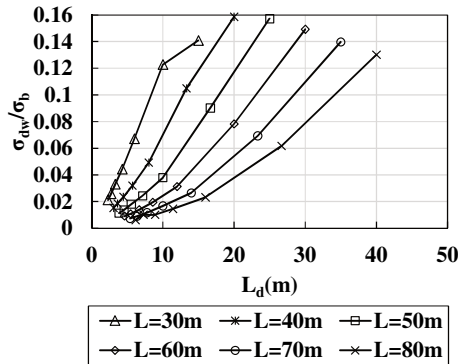
결과이다. 해석결과, 지간장, 중간 다이아프램의 간격, 단면 형상비는 뒤틀림 뒹 법선 응력에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

동일 법선 응력비를 기준으로 지간장이 30m인 경우, 중간 다이아프램의 간격이 대체로 짧아야 하며, 지간장이 길어질수록 중간 다이아프램의 간격이 넓어지는 경향을 보인다. 또한, 단면 형상비가 작아질수록 법선 응력비는 작게 평가되었으며, 단면 형상비가 커질수록 법선 응력비가 크게 평가되는 것으로 판단된다.

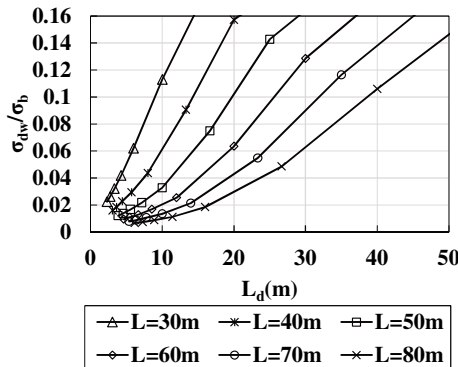
정량적인 비교를 위하여, Fig. 9.와 10.의 유한요소해석결과를 이용하여, 법선 응력비가 5%, 10%일 때의 중간 다이아프램 간격을 분석하여 영향변수별 분석을 수행하였다.



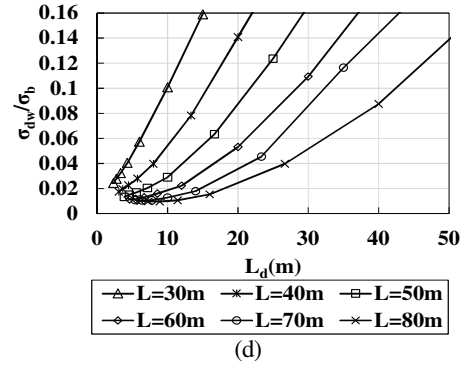
(a)



(b)



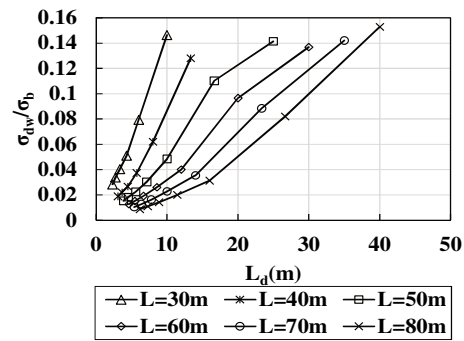
(c)



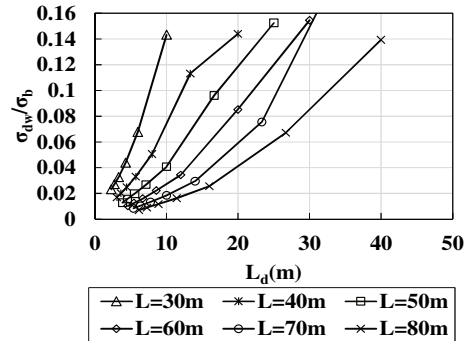
(d)

Fig. 9. when $t_f=20\text{mm}$, stress ratios and intermediate diaphragm spacing relations

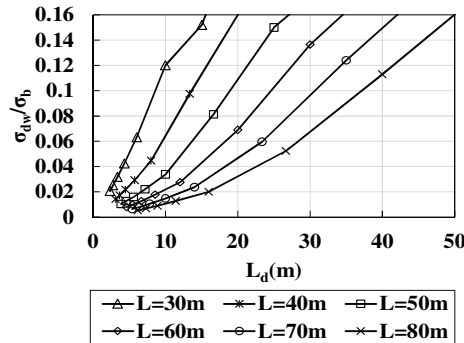
(a) $H/B=1.5$; (b) $H/B=1$; (c) $H/B=0.67$; (d) $H/B=0.5$



(a)



(b)



(c)

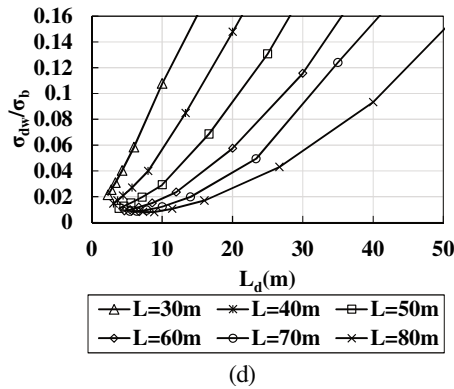


Fig. 10. when $t_f=30\text{mm}$, stress ratios and intermediate diaphragm spacing relations
(a) $H/B=1.5$; (b) $H/B=1$; (c) $H/B=0.67$; (d) $H/B=0.5$

4.2 단면 형상에 따른 중간 다이아프램 간격 분석

Fig. 11.과 12.는 박스 단면의 법선 응력비(σ_{dw}/σ_b)가 5%, 10% 인 경우에 대한 중간 다이아프램 간격(L_d)을 Fig. 9., 10.로부터 얻 어낸 결과이다. 해석결과, 중간 다이아프램의 요구간격은 박스 단 면 형상비(H/B), 지간장(L)의 영향을 매우 크게 받는 것으로 나 타났으며, 플랜지 두께(t_f)의 경우, 30mm 두께를 갖는 경우가 20mm를 갖는 경우보다 다소 간격이 작아짐을 알 수 있었다. 여러 변수 중에서 가장 큰 영향을 미치는 조건은 단면 형상비이다. 단면 형상비가 커질수록, 최소 요구 중간 다이아프램의 간격은 짧아지 는 경향을 보였다. 반면에, 단면 형상비가 작아질수록, 최소 요구 중간 다이아프램의 간격은 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 플랜지 폭(B)이 거더 높이(H)보다 넓은 경우, 중간 다이아프램의 간격이 넓어짐을 의미하며, 반대의 경우에는 중간 다이아프램의 간격이 좁아지는 경향을 보인다.

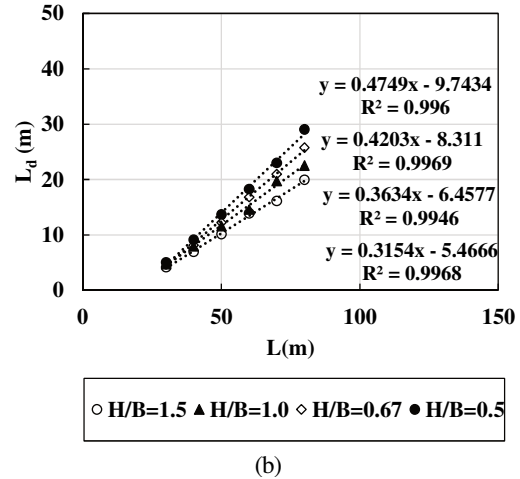
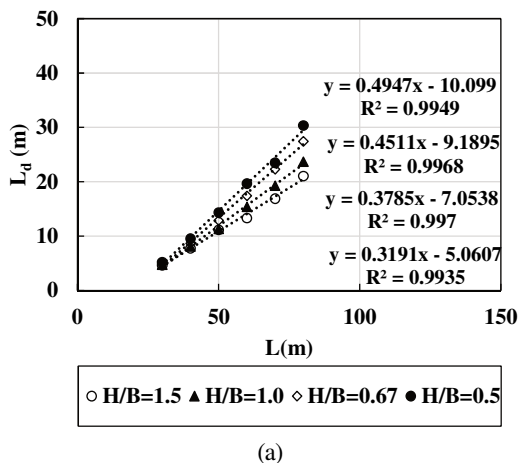
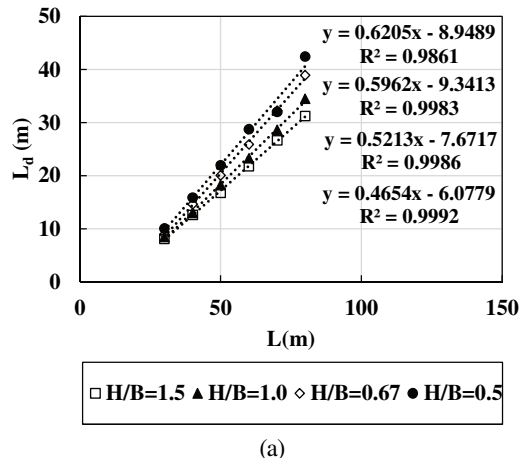


Fig. 11. when σ_{dw}/σ_b is equal to 5%, intermediate diaphragm spacing vs. span length. (a) $t_f=20\text{mm}$, (b) $t_f=30\text{mm}$

지간장에 대해서는, 지간장이 증가할수록 중간 다이아프램의 간격은 선형적으로 증가하는 경향을 보인다. 이는 중간 다이아프 램의 간격은 지간장의 함수로 표현될 수 있고, 그 함수의 관계는 선 형적인 관계를 가진다는 것을 의미한다. 이는, 기존의 Hanshin (1988)기준에서 제시되고 있는 중간 다이아프램 간격과 지간장의 관계가 선형적인 것과 같은 결과로 평가할 수 있다.

플랜지 두께에 대해서는 다른 변수들에 비해서는 미미한 차이 가 발생하였다. 플랜지의 두께가 증가하게 되면, 단면의 휨 강성과 뒤틀림 강성이 증가되므로 법선 응력비에 영향을 미칠 것으로 판 단되나, 그 영향은 지간장과 단면 형상비에 비해서는 작게 나타났 다. 하지만 플랜지의 두께가 두꺼운 30mm인 경우, 보다 짧은 다이 아프램의 간격이 요구됨을 확인하였다.



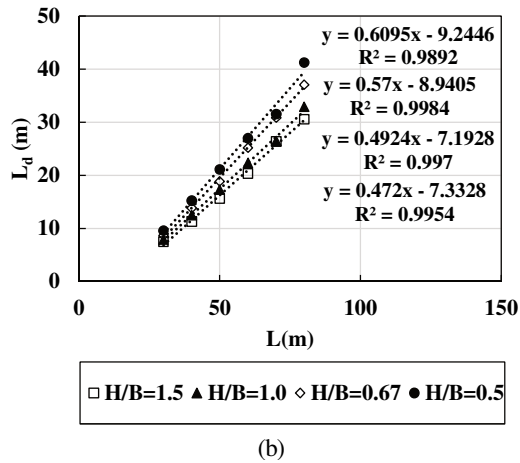


Fig. 12. when σ_{dw}/σ_b is equal to 10%, intermediate diaphragm spacing vs. span length (a) $t_f=20\text{mm}$, (b) $t_f=30\text{mm}$

4.3 설계기준과 해석결과의 비교

Fig. 13.은 박스 단면의 법선 응력비(σ_{dw}/σ_b)가 5%, 10%인 경우에 대한 중간 다이아프램의 간격(L_d)을 기존 설계기준의 중간 다이아프램 간격식과 비교한 결과를 보여준다.

대체적으로 해석결과에 의해 결정된 중간 다이아프램의 간격은 기존 Hanshin(1988)의 설계식에 비하여 매우 여유가 있는 결과가 도출되었다. 법선 응력비가 5%인 경우에는 일부 구간(30m)을 제외하면 대부분의 경우 Hanshin(1988) 설계식이 보수적으로 평가되며, 법선 응력비가 10%인 경우에는 30m에서 80m 전구간에 대하여, 기존 설계식보다 높은 구간에서 중간 다이아프램 간격이 도출되었다.

법선 응력비는 설계기준별로 상이하게 규정되어 있다. Hanshin(1988)의 설계식의 경우, 법선 응력비가 5%인 해석결과에 의해 도출되었고, AASHTO의 경우에는 최대 법선 응력비를 10%로 규정하고 있다. 국내의 경우에는 도로교 설계기준 2010에서는 Hanshin(1988)의 규정으로부터 수정된 설계식이 사용되기도 하였으나, 2014년의 도로교설계기준에서는 법선 응력비에 관련한 언급이 없는 상태이다.

만약 AASHTO(2014)의 기준을 따르게 되면 법선 응력비는 10% 이하이어야 한다. 이러한 경우에는 현재 시공되고 있는 중간 다이아프램 간격 5~6m는 매우 보수적인 설계가 될 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 지간장 40m이상의 구간에서는 AASHTO(2014)에서 규정된 최대중간다이아프램간격 12m를 상회하는 것으로 나타나, 기존의 설계기준을 그대로 사용할 경우 매우 보수적인 것으로 평가되었다.

하지만, 엄격한 Hanshin(1988)기준을 따라 법선 응력비를 5%로

제한할 경우, 교량의 길이가 30m인 경우, 6m이하의 짧은 다이아프램 간격이 필요하므로 현재 설계되고 있는 5, 6m의 간격에 대해서는 매우 신중한 설계검토가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

하지만, 현재 우리나라에서는 기본적으로 5~6m의 중간 다이아프램 간격을 최소 간격으로써 이용하고 있기 때문에, AASHTO(2014)와 같이 법선 응력비를 10%를 사용하는 것이 경제적인 설계를 유도할 수 있을 것으로 판단된다.

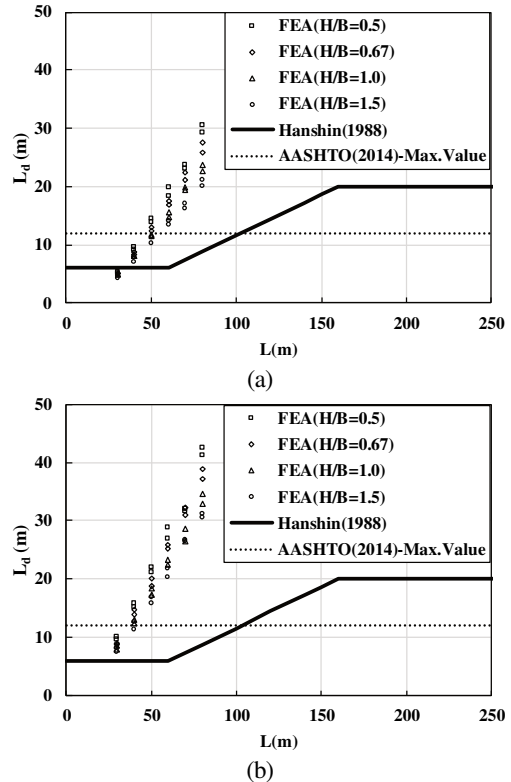


Fig. 13. Comparisons of intermediate diaphragm spacings (L_d) and design codes

(a) σ_{dw}/σ_b is equal to 5%, (b) σ_{dw}/σ_b is equal to 10%

4.4 적정 중간 다이아프램 간격 결정

Fig. 11. 과 12.의 적정 중간 다이아프램의 간격(L_d)은 단면의 형상에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 설계단계에서 적정 다이아프램 간격을 보다 직관적으로 결정하기 위하여 중간 다이아프램 간격에 대한 설계식을 제안하고자 한다. 중간 다이아프램의 간격을 결정하는 변수는 유한요소해석결과를 반영하여, 지간장(L), 단면 형상비(H/B)를 변수로 하는 식을 제안하였다. 플랜지의 두께(t_f)도 영향을 미치지만, 플랜지의 두께가 두꺼운 30mm인 경우에, 조밀한 다이아프램 간격이 필요하기 때문에, 본 연구에서는 보수적으로 30mm의 플랜지 두께를 갖는 경우에 대

한 식을 제안하였다.

따라서, 본 연구에서는 식(6)과 같이 중간다이아프램 간격과 지간장의 관계에 대한 선형적인 관계식을 이용하여, 계수 a 와 b 에 대해 단면 형상비에 대한 회귀분석을 수행하였다. 이때, 단면 형상비와 계수와의 관계는 선형으로 가정하였다.

$$L_d = aL + b \quad (6)$$

Fig. 14와 15의 회귀분석을 수행한 결과, 계수 a 와 b 에 대해서는 다음과 같은 선형적인 관계식이 성립될 수 있다.

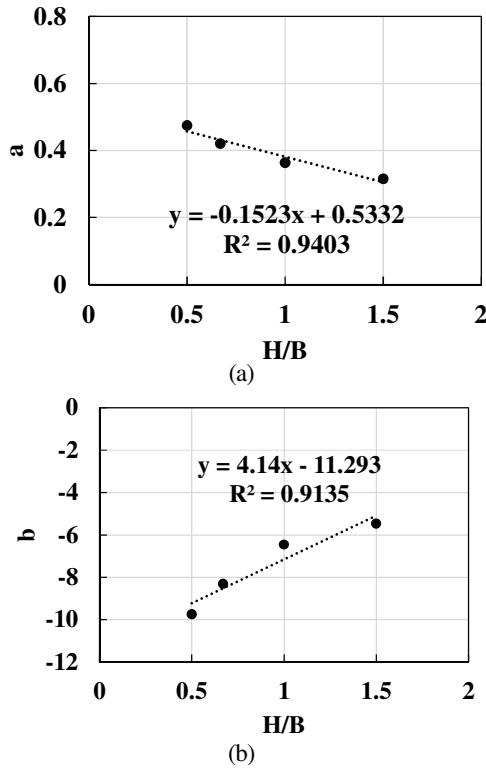


Fig. 14. Regression analysis results when $\sigma_{dw}/\sigma_b=5\%$
(a) Coefficient a , (b) Coefficient b

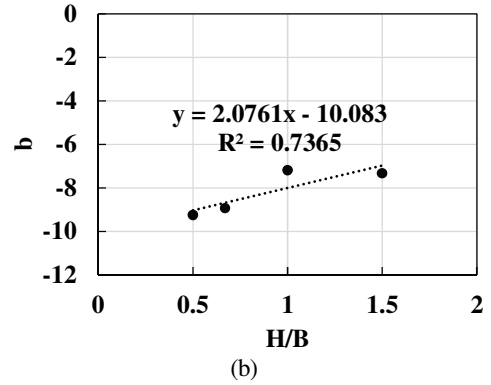
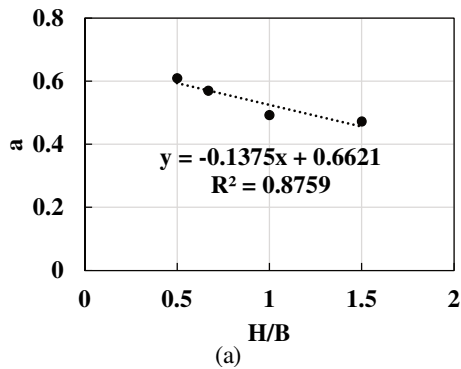


Fig. 15. Regression analysis results when $\sigma_{dw}/\sigma_b=10\%$
(a) Coefficient a , (b) Coefficient b

i) 법선 응력비가 5%인 경우

$$a = -0.1523 \frac{H}{B} + 0.5332 \quad (7)$$

$$b = 4.14 \frac{H}{B} - 11.293 \quad (8)$$

ii) 법선 응력비가 10%인 경우

$$a = -0.1375 \frac{H}{B} + 0.6621 \quad (9)$$

$$b = 2.0761 \frac{H}{B} - 10.083 \quad (10)$$

따라서, 단면의 형상비와 지간장을 반영한 적정 중간 다이아프램 간격식은 다음과 같이 구할 수 있다.

i) 법선 응력비가 5%인 경우

$$L_d = (-0.1523L + 4.14) \frac{H}{B} + 0.5332L - 11.293 \quad (11)$$

여기서, $30m \leq L \leq 80m$

ii) 법선 응력비가 10%인 경우

$$L_d = (-0.1375L + 2.0761) \frac{H}{B} + 0.6621L - 10.083 \quad (12)$$

여기서, $30m \leq L \leq 80m$

5. 결 론

본 연구에서는 실용적인 교량의 단면 형상비(H/B)와 지간장(L)에 대한 매개변수 연구를 수행하였으며, 이를 고려한 중간 다이아프램 간격(L_d) 제시를 위한 연구를 수행하였다. 본 연구로부터 도출된 결과는 다음과 같다.

실무에서 사용되고 있는 박스 단면의 단면 형상비는 0.5에서 1.5에 이르기 까지 다양한 단면으로 설계가 되므로 이를 해석연구에 반영하였다. 또한, 매개변수로 사용된 지간장은 실제 시공된 기하형상을 사용하여 보다 실용적이고 정확도가 높은 매개변수 연구를 수행하였다.

유한요소해석 결과, 지간장, 중간 다이아프램 간격, 단면형상비는 법선 응력비에 매우 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 거더의 길이가 길어질수록 다이아프램의 간격이 넓어지는 경향을 보인다. 또한, 단면의 형상비가 작아질수록 법선 응력비는 작게 평가되었으며, 반대의 경우 법선 응력비가 크게 평가되었다.

유한요소해석 결과, 기존 설계기준인 Hanshin(1988)기준은 매우 보수적인 설계를 유도하므로 개선이 필요한 것으로 판단된다. 법선 응력비가 5%인 경우, 30m의 지간장을 갖는 거더에서는 5m 이하의 중간 다이아프램 간격이 필요한 것으로 판단되며, 법선 응력비가 10%인 경우에는 현재 시공되고 있는 5, 6m의 중간 다이아프램 간격은 매우 보수적인 설계를 유도할 것으로 판단된다.

유한요소해석 및 회귀분석 결과, 중간 다이아프램의 간격은 거더의 길이에 대하여 매우 선형적인 관계를 가진다. 이는 기존의 Hanshin(1988) 기준과 같은 경향을 보였다. 또한, 박스 단면의 단면 형상비에 대한 회귀분석결과도 매우 선형적인 결과를 보였다.

본 연구의 제안식은 실제 단면에 근거한 변수해석을 바탕으로 단면 형상비, 지간장을 변수로 하는 간략한 중간 다이아프램 간격식을 제안하였다. 국내 교량의 치수에 기반한 해석연구를 통하여, 보다 실용적인 중간 다이아프램 간격 제시가 가능할 것으로 판단되며, 설계 시 중간 다이아프램의 간격을 직관적으로 결정할 수 있어서, 구조 해석의 양을 줄이는 등 실용적인 설계에 기여할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(18CTAP-C117271-03)과 행정안전부장관의 지진방재분야 전문인력 양성사업의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌(References)

- [1] Dabrowski, R. (1968) *Curved Thin-Walled Girders Theory and Analysis*, Cement and Concrete Association, UK.
- [2] Oleinik, J.C., and Heins, C.P. (1975) Diaphragms for Curved Box Beam Bridges, *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol.101, No.10, pp.2161-2178.
- [3] 坂井藤一, 長井正嗣(1977) 鋼箱桁橋の中間ダイアフラム設計法に関する一試案, 土木学会論文報告集, 土木学会, 巻261号, pp. 21-34.
Sakai, F., and Nagai, M. (1977) A Recommendation on the Design of Intermediate Diaphragms in Steel Box Girder Bridges, *Proceedings of Japan Society of Civil Engineers*, Japan Society of Civil Engineers, Vol.261, pp.21-34 (in Japanese).
- [4] 中井博, 村山泰男(1981) ダイアフラムを有する曲線箱桁橋のずり応力の解析と設計への応用, 土木学会論文報告集, 土木学会, 第309号, pp.25-39.
Nakai, H., and Murayama, Y. (1981) Distortional Stress Analysis and Design Aid for Horizontally Curved Box Girder Bridges with Diaphragms, *Proceedings of Japan Society of Civil Engineers*, Japan Society of Civil Engineers, Vol.309, pp.25-39 (in Japanese).
- [5] Steel Structure Study Committee of Hanshin Expressway Public Corporation (1988) *Guidelines for the Design of Horizontally Curved Girder Bridges (Draft)*, Hanshin Expressway Public Corporations, Japan.
- [6] 이성행, 신효경, 김경남, 정경섭(2016) 강박스거더교의 설계 유효온도 산정을 위한 실험적 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제28권, 제6호, pp.449-458.
Lee, S.H., Shin, H.K., Kim, K.N., and Jung, K.S. (2016) An Experimental Study for Estimation of Effective Temperature for Design in Steel Box Girder Bridge, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.28, No. 6, pp.449-458 (in Korean).
- [7] 황의승, 김도영, 장성호(2017) 강박스거더 철도교량의 동적거동 및 진동저감 방안 분석, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제29권, 제6호, pp.487-495.
Hwang, E.S., Kim, D.Y., and Jang, S.H. (2017) Analysis of Dynamic Response and Vibration Mitigation for Steel Box Girder Railway Bridges, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.29, No.6, pp.487-495 (in Korean).
- [8] 김도형, 이성철(2018) 절곡강판을 적용한 강박스거더 압축플랜지의 탄성좌굴 및 극한 거동, 한국강구조학회논문집, 한국강

- 구조학회, 제30권, 제4호, pp.217-224.
- Kim, D., and Lee, S.C. (2018) Elastic Buckling and Ultimate Strength Behaviors of Steel Box Girders with Folded Compression Flanges, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.30, No.4, pp.217-224 (in Korean).
- [9] 임다수(2002) 단일 강박스 거더교의 격벽 설계 최적화에 대한 고찰, 석사학위논문, 고려대학교.
- Lim, D.S. (2002) *A Consideration of the Diaphragm Design Optimization*, Master's Thesis, Korea University, Korea (in Korean).
- [10] 박남희, 임다수, 조선규, 강영중(2003) 강박스 거더교의 내부 다이아프램에 관한 매개변수 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제15권, 제3호, pp.231-239.
- Park, N.H., Lim, D.S., Cho, S.K., and Kang, Y.J. (2003) A Parametric Study on Intermediate Diaphragms of Steel-Box-Girder Bridges, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.15, No.3, pp.231-239 (in Korean).
- [11] 최영준, 박남희, 홍성수, 강영중(2003) 수평곡선 강박스 거더의 다이아프램 간격에 관한 고찰, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제23권, 제2A호, pp.345-353.
- Choi, Y.J., Park, N.H., Hong, S.S., and Kang, Y.J. (2003) A Consideration on Intermediate Diaphragm Spacing of Horizontally Curved Steel Box Girders, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol.23, No.2A, pp.345-353 (in Korean).
- [12] 박남희, 강영중(2004a) 3차원 쉘 요소를 사용한 다실 박스거더의 뒤틀림 해석: I. 확장된 방법의 제안 및 적용성, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제24권, 제3A호, pp.557-563.
- Park, N.H., and Kang, Y.J. (2004a) Distortional Analysis of Multicell Box Girders Using 3-Dimensional Shell Elements: I. Proposal and Application of an Expanded Method, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 24, No.3A, pp.557-563 (in Korean).
- [13] 박남희, 강영중(2004b) 3차원 쉘 요소를 사용한 다실 박스거더의 뒤틀림 해석: II. 확장된 방법에 의한 뒤틀림 해석, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제24권, 제3A호, pp.565-572.
- Park, N.H., and Kang, Y.J. (2004b) Distortional Analysis of Multicell Box Girders Using 3-Dimensional Shell Elements: II. Distortional Analysis Based on the Expanded Method, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol.24, No.3A, pp.565-572 (in Korean).
- [14] 박남희, 강영중(2004c) 보-스프링 요소를 사용한 다실박스거더의 뒤틀림 해석, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제24권, 제1A호, pp.219-224.
- Park, N.H., and Kang, Y.J. (2004c) Distortional Analysis of Multicell Box Girders Using a Beam-Spring Element, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 24, No.1A, pp.219-224 (in Korean).
- [15] 윤동용, 이성철(2005) 직선 강박스거더 교량 중간 다이아프램의 설치 간격, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제25권, 제2A호, pp.421-428.
- Yoon, D.-Y., and Lee, S.-C. (2005) Intermediate Diaphragm Spacing of Straight Steel Box Girder Bridges, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol.25, No.2A, pp.421-428 (in Korean).
- [16] 윤동용, 안성현, 이성철(2006) 강박스거더 교량의 프레임 형식 중간다이아프램의 설계, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제18권, 제5호, pp.515-523.
- Yoon, D.Y., An, S.H., and Lee, S.C. (2006) Design of Frame-Type Intermediate Diaphragm in Steel Box Girder Bridges, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.18, No.5, pp.515-523 (in Korean).
- [17] 김승준, 박남희, 강영중(2008) 하중분해법을 사용한 제형 다실박스거더의 뒤틀림 해석, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제28권, 제6A호, pp.779-788.
- Kim, S., Park, N.H., and Kang, Y.J. (2008) Distortional Analysis of Multicell Box Girders with a Trapezoidal Cross-Section Using Force-Decomposition Method, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol.28, No.6A, pp.779-788 (in Korean).
- [18] 이정화, 이기세, 임정현, 최준호, 강영중(2015) 곡선 강박스 거더의 휨-뒤틀림 응력비에 따른 중간 다이아프램 간격, 한국산학기술학회논문지, 한국산학기술학회, 제16권, 제9호, pp.6325-6332.
- Lee, J.-H., Lee, K.-S., Lim, J.-H., Choi, J.-H., and Kang, Y.-J. (2015) Spacing of Intermediate Diaphragms Horizontally Curved Steel Box Girder Bridges Considering Bending-Distortional Warping Normal Stress Ratio *Journal of the Korean Academia-Industrial cooperation Society*, KAIS, Vol.16, No.9, pp.6325-6332 (in Korean).
- [19] Nakai, H., and Yoo, C.H. (1988) *Analysis and Design of Curved Steel Bridges*, McGraw-Hill, USA.
- [20] Kang, Y.J., and Yoo, C.H. (1994) Thin-Walled Curved Beams, I: Formulation of Nonlinear Equations, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.120, No.10, pp. 2072-2101.
- [21] Park, N.H., Lim, N.H., and Kang, Y.J. (2003) A Consideration on Intermediate Diaphragm Spacing in Steel Girder Bridges with a Doubly Symmetric Section, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.25, pp.1665-1674.

- [22] American Association of State Highway and Transportation Officials (2003) *AASHTO Guide Specifications for Horizontally Curved Highway Bridges*, USA.
- [23] American Association of State Highway and Transportation Officials (2014) *AASHTO LRFD Bridge Design Specification*, USA.
- [24] 국토해양부(2010) 도로교설계기준.
Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2010) *Highway Bridge Design Standard*, Korea (in Korean).
- [25] 국토교통부(2016) 도로교표준시방서, 국토교통부.
Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2016) *Standard Specifications for Highway Bridges*, Korea (in Korean).
- [26] 국토해양부(2008) 도로교설계기준 (개정본), 국토교통부.
Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2008) *Highway Bridge Design Standard (Revision)*, Korea (in Korean).

- σ_b : 휨 법선 응력(MPa)
- ϕ : 곡률중심각(rad)
- H : 거더 높이(mm)
- B : 플랜지 폭(mm)
- t_f : 플랜지 두께(mm)
- t_w : 복부판 두께(mm)
- γ : 뒤틀림 강성비
- K_{dw} : 박스 단면의 뒤틀림 강성($N \cdot mm$)
- K_d : 중간 다이아프램의 뒤틀림 강성($N \cdot mm$)
- E : 강재의 탄성계수(MPa)
- I_w : 복부판의 단면2차모멘트(mm^4)
- α_0 : 뒤틀림 강성 계산을 위한 계수
- t_d : 중간 다이아프램 두께(mm)
- a, b : 회기분석 계수
- κ : 곡률중심각과 지간장에 대한 함수

기 호(Notation)

- L_d : 중간 다이아프램 간격(m)
- L_{ds} : 직선 강교의 중간 다이아프램 간격(m)
- L : 지간장(m)
- σ_{dw} : 뒤틀림 휨 법선 응력(MPa)

요 약: 교량의 박스 거더에 편심하중이 작용하게 되면 거더 단면에 뒤틀림이 발생하게 되는데, 이 뒤틀림은 박스 단면의 변형과 교축방향의 응력을 발생시키게 된다. 그렇기 때문에 박스 단면 내에 중간 다이아프램을 설치하여 이를 적절히 제어해야 한다. 기존 설계기준에서는 휨 법선 응력에 대한 뒤틀림 뒹 법선 응력비를 5내지 10%를 넘지 않도록 제한하고 있으나, 설계단계에서는 복잡하고 많은 구조 해석 단계가 필요하다. 본 연구에서는 이러한 구조해석을 간소화하기 위하여, 박스거더에 대하여 요구 중간 다이아프램의 간격 제시를 위해 유한요소해석을 통한 매개변수 연구를 수행하였다. 실제 강박스거더의 폭에 대한 높이비, 지간장 등의 매개변수를 이용하여, 강박스 단면 형상이 뒤틀림 및 중간 다이아프램의 간격에 미치는 영향을 분석하였다. 해석결과를 이용하여 휨 법선 응력에 대한 뒤틀림 뒹 법선 응력비가 각각 5%, 10%인 경우에 대해, 요구 중간 다이아프램 간격 설계를 위한 간편 설계식을 제시하였다.

핵심용어: 다이아프램, 강박스 거더, 단경간, 간격, 뒤틀림