

U형 강박스 거더의 뒤틀림 거동에 의한 내부 수직브레이싱 부재력 평가

Evaluation of Internal Bracing Member Forces due to Distortional Behaviors of Tub Section Steel Box Girders

김 경 식¹⁾

Kim, Kyung Sik

요 약 : 본 연구에서는 비틀림 하중을 받는 U형 강박스 거더의 뒤틀림 거동을 해석적으로 분석하여 거더 내부에 설치되는 수직브레이싱의 각 부재에 발생하는 부재력을 산정하는 수식이 개발되었다. 편심하중 또는 거더의 곡률에 의해 발생하는 비틀림하중을 박스단면내 상대적인 변형과는 무관한 순수 비틀림 성분력과 박스 단면내 뒤틀림을 유발하는 뒤틀림 성분력으로 분해하여 뒤틀림 성분력과 이에 저항하는 내부 수직브레이싱의 상호작용 효과를 분석함으로써 각 부재에 발생하는 부재력을 비틀림하중의 함수로 도출하였다. 제안식의 타당성을 검증하기 위하여 편심하중을 받는 단경간 직선거더 및 전경간 일정한 곡률을 가지는 3경간 거더 예제를 선정하여 3차원 유한요소 모델링을 수행하고 해석을 통해 얻은 내부 수직브레이싱의 각 부재력을 제안식으로 산정된 값과 비교 분석하였다. 해석 및 제안식으로 결정된 각각의 부재력은 높은 수준으로 일치함을 보였다.

ABSTRACT : In this study, the distortional behaviors of tub-section steel girders subjected to torsional loading were analyzed, and predictor equations were developed for estimating the member forces induced in the internal bracing system installed in the steel tub girders. Torsional loadings originated either by eccentric vertical loading or girder curvature were decomposed into the pure torsional force component that does not affect the distortional box deformation, and into the distortional force component that directly induces box distortion. The axial member forces induced in the internal cross frames were formulated as a function of the magnitude of torsional loading through the analytical investigation of the interactions between the distortional force component and internal cross frames. To verify the proposed equations, three-dimensional finite element analysis (3D FEA) was conducted for the straight simple-span girder and the three-span continuous girder samples. Very good agreement was found between the member forces from the FEA and the proposed equations.

핵심용어 : U형 강박스, 내부 수직브레이싱, 부재력, 비틀림, 뒤틀림, 유한요소해석

KEYWORDS : tub section steel box, internal bracing, member force, torsion, distortion, finite element analysis

1. 서론

U형(tub section) 강거더와 콘크리트 바닥판으로 구성된 강/콘크리트 합성 박스 거더 시스템은 서로 다른 구조 재료의 각 강성(stiffness) 및 강도(strength)를 효율적으로 활용한 구조시스템으로 교량 등 도로 구조물로 많이 적용되고 있다. 본 합성 거더는 콘크리트 바닥판의 강도가 구현되는 시점부터 폐합단면을 구성하여 비틀림 하중에 대한 탁월한 저

항 능력을 발휘하므로 곡선교량 등에 특히 적용성이 높다. 그러나 콘크리트 바닥판이 굳어져 충분한 강도를 구현하기 전까지는 강박스 거더는 비합성 상태로 굳지 않은 콘크리트를 사하중으로 부담하여야 한다. 실제 시공 중 강박스 거더는 이러한 바닥판 타설 콘크리트뿐만 아니라 기타 시공하중까지 포함하여 부담하여야 하는데, 일반적으로 시공 중 비합성 사하중에 의해 강거더에 발생하는 응력은 전체 응력의 60%~70%를 차지할 정도로 큰 비중을 가지므로 전체 공정 중에

1) 교신저자. 청주대학교 토목환경공학과 교수
(Tel:043-290-8472, Fax:043-290-8466, E-mail: kkim@cju.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2011년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.



그림 1. 바닥판 타설전 상부 수평브레이싱 및 내부 수직브레이싱으로 보강된 U형 강거더 (Bradberry 등, 2005)

가장 주의해야 할 단계(critical stage)로 인식되고 있다 (Topkaya and Williamson, 2003). 박스 단면의 상부가 열려 있는 U형 강박스 거더는 상부플랜지 레벨에 설치된 수평 브레이싱으로 인하여 시공 중 비합성 단계에서 준폐합 단면(quasi-closed cross section)으로서의 거동을 보인다. 3개의 면이 판(plates)으로 이루어지고 나머지 한 면은 트러스 시스템으로 구성된 이러한 준폐합 단면은 특별히 곡선형 교량 연구 분야에서 일찍부터 관심의 대상이 되었다. 곡선형 교량은 상대적으로 큰 비틀림 하중을 받게 되는데, 폐단면이나 개단면이나의 문제에 따라 거더의 비틀림 상수가 수 백배 또는 그 이상의 차이가 날 수 있기 때문이다. 직선 거더의 경우 비틀림 하중은 편심을 가지는 수직력 성분에 의해 주로 발생하지만, 수평면 내 곡선 거더(horizontally curved girder)의 경우에는 자중과 곡률 그 자체만으로도 비틀림이 발생되며 그 크기는 M/R 간편법에 의하면 휨모멘트와 곡률 반경으로 나타낼 수 있다(Tung and Fountain 1970). 상부 수평브레이싱은 준폐합 단면을 이루어 순수 비틀림 성분에 저항을 목적으로 설치되며, 거더 길이방향으로 일정한 간격을 가지고 박스 안에 설치되는 내부 수직브레이싱(intermediate internal cross frame)은 뒤틀림 성분에 저항하여 박스 단면의 고유형상을 유지하는 기능을 목적으로 설치된다. 그림 1은 시공 중인 곡선형 U형 강박스 거더 교량의 예를 보여 주고 있는데 상부 수평브레이싱 및 내부 수직브레이싱의 설치 위치를 확인할 수 있다.

비틀림 하중 중에서도 특히 뒤틀림 성분은 박스단면의 고유형상을 변형시키는 원인이 되는데, 상부가 열려 있는 U형의 경우 상부 플랜지의 변형을 초래하여 이후 바닥판 타설시 시공을 어렵게 만드는 주요 이유가 된다. 이러한 박스 형상의 변형은 내부 수직브레이싱에 의해 조정될 수 있다. 선호되는 내부 수직브레이싱 형식은 그림 2에서 보인 X-프레임

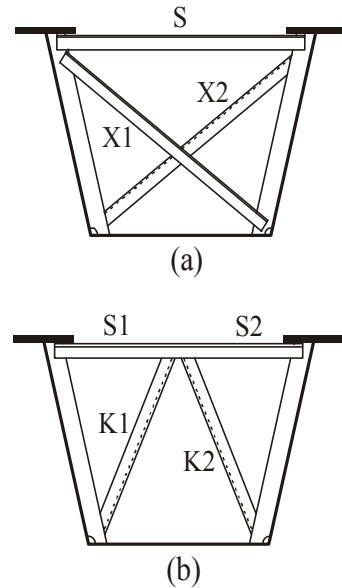


그림 2. U형 강거더 내부 수직브레이싱의 종류: (a) X-프레임; (b) K-프레임

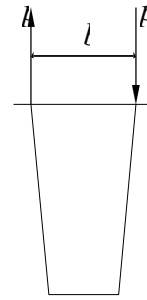
또는 K-프레임 타입이다. 현재 국내의 경우 박스 거더 내부의 뒤틀림을 방지하기 위한 내부 수직브레이싱에 대한 구체적인 규정 사항은 아직 결정된 것이 없다. 미국의 경우, AASHTO Guide Specifications for Horizontally Curved Steel Girder Highway Bridges(AASHTO 2003)와 Highway Structures Design Handbook(AISC 1986) 등의 설계 기준은 개념적인 수준에서 내부 수직브레이싱의 최소 강도(stiffness) 및 간격(spacing)에 대한 규정을 언급하고 있으나 부재력(member force)의 계산 등에 대한 구체적 방법론에 대한 사항은 포함되어 있지 않다.

비틀림 하중에 의한 강박스 거더의 뒤틀림 현상에 대한 연구는 1970년대 후반 Heins(1978)와 철강 제조사 United States Steel(1978) 등에 의해 제한적으로나마 진행되기 시작하였다. 이후 1990년대 들어 U형에 설치되는 상부 수평브레이싱과 내부 수직브레이싱에 대한 부재력을 해석적으로 산정하여 수식으로 제안되는 연구가 시도되었다(Fan and Helwig, 1999; 2002). Fan and Helwig(2002)는 강박스 거더 내 수직브레이싱에 발생하는 부재력은 그 위치에서 발생하는 거더의 비틀림모멘트의 크기와 수직브레이싱의 간격의 함수로 결정될 수 있음을 보였다. Kim(2004)은 내부 수직브레이싱의 설치 간격 및 거더의 곡률효과에 대한 다양한 매개변수 연구를 수행하였다. 최근 들어 단일 대각 부재 형식(single diagonal type)의 수평 브레이싱 시스템에 대해서는 더욱 정교한 예측식이 제안되었다(Kim and Yoo, 2006a). 또한 상부 수평브레이싱과 내부 수직브레이싱의 부재간 상호작용 효과에 기인하여 각각의 부재력이 동

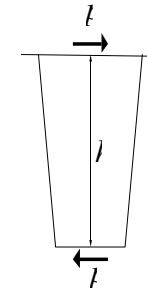
시에 증가될 수 있음이 새롭게 규명되었다(Kim and Yoo 2006b). 국내에서는 U형 강박스 거더의 비틀림 거동에 대한 다수의 실험적 연구가 진행되었다(심낙훈, 박영석, 2006; 심낙훈 등, 2004). 또한 이광일(2010)은 상부수평 브레이싱에 발생하는 부재력 산정에서 제작시 초기결함(initial imperfection)의 영향을 고려하였다.

외부 하중으로 재하되는 비틀림모멘트는 거더의 상대적인 비틀림 강성(relative torsional stiffness)에 따라 St. Venant 비틀림(St. Venant torsion)과 뒹 비틀림(warping torsion)의 조합에 의해 저항된다. 박스 거더 시스템에서는 St. Venant 비틀림 강성이 뒹 비틀림 강성에 대하여 지배적으로 크기 때문에 비틀림에 의한 뒹 응력(torsional warping stress)은 박스 거더의 설계에서는 고려되지 않는 것이 일반적이다(Kollbrunner and Basler, 1969). 그러나 재하되는 비틀림모멘트 하중의 크기에 따라 U형 박스 거더의 단면은 본래의 평행사변형 고유형상에서 각 변형(angular deformation)에 의해 찌그러지는 변형이 발생할 수 있는데, 이러한 단면 뒤틀림(distortion) 현상의 결과로 발생하는 뒹 응력은 뒤틀림에 의한 뒹 응력(distortional warping stress)으로 불린다. 박스 거더 시스템에서 순수 비틀림에 의한 뒹응력의 크기는 상대적으로 미소한 반면 뒤틀림에 의한 뒹 응력은 상당한 수준에 이를 수 있으므로 박스 단면의 뒤틀림 변형을 방지하기 위해서는 적정 수준의 강성을 가지는 내부 수직브레이싱의 설치가 필수적이다(Heins, 1978; Fan and Helwig, 2002). 거더에 재하되는 비틀림 모멘트 하중은 순수 비틀림 성분(pure torsional component) 및 뒹틀림 성분(distortional component)으로 분리될 수 있다. 순수 비틀림 성분은 박스 거더의 전단중심에서 모멘트 합력이 제로(zero)를 이루어 박스 단면의 변형에 기여하지 않는다. 그러나 뒹틀림 성분은 박스 단면에 대한 변형을 직접적으로 유발시키는 성분이므로 이 성분에 대한 분리 및 추출이 가능하다면 박스 단면의 뒤틀림 변형을 막기 위해 설치되는 수직브레이싱의 부재력 산정도 가능하게 된다.

본 연구에서는 비틀림 모멘트 하중을 받는 U형 강박스 거더의 기본적인 거동에 대한 해석적 분석이 진행된다. 두 가지 방식의 비틀림 하중 즉, 편심하중 효과와 거더 곡률 효과에 의한 비틀림 하중으로부터 뒤틀림에 기여하는 하중 성분을 추출해 낸다. 추출된 뒤틀림 하중성분에 근거하여 강박스 거더 내부에 일정 간격으로 설치된 내부 수직브레이싱에 발생하는 부재력을 산정하는 수식을 해석적 방법으로 개발한다. 해석적 방법으로 산정된 부재력은 유한요소해석으로 산정된 부재력과 비교되어 그 타당성이 검증된다.



(a) 수직하중 조합



(b) 수평하중 조합

그림 3. 비틀림을 발생시키는 하중 조합

2. 이론적 배경

박스 거더 단면내 뒤틀림 현상은 외부로부터의 비틀림 모멘트 하중의 일부 또는 전부가 단면내에서 St. Venant 전단류(shear flow) 방식에 의한 저항으로 진행되지 못할 때 발생된다(Kollbrunner and Basler 1969). 박스 거더의 비틀림을 유발하는 우력(force couple)은 그 발생 근원에 따라 그림 3에 보인 바와 같이 크기는 같고 방향이 서로 반대인 두 개의 수직력 또는 수평력의 조합으로 모사가 가능하다. 박스 거더 단면의 무게중심(center of gravity)에서 벗어나는 편심을 가지는 중력방향 하중은 그림 3(a)에 보인 바와 같이 상부플랜지와 복부판의 접점에 작용하는 등가의 수직하중 조합으로 표현이 가능하다. 추가적으로, 수평면내 거더의 곡률 효과는 그림 3(b)에 보인 바와 같이 거더 바닥 및 상부플랜지 레벨에 각각 작용하는 수평하중 조합으로 표현이 또한 가능하다(Tung and Fountaion, 1970). 이러한 수평하중 성분은 수직방향 휨(vertical bending) 작용으로 상부 및 하부 플랜지에 발생하는 축력성분의 합이 곡선 교축 효과에 의해 일직선상에서 평형을 이루지 못하는 특성(non-collinearity of resultant forces)에 의해 발생된다. 평면내 곡선 교축 효과에 의해 필연적으로 발생하는 이러한 수평성분은 곡률을 가지는 거더의 플랜지 부분요소의 평형을 통해 설명될 수 있다. 그림 4에는 곡률반경 R을 가지는 거더에서 길이가 ds인 플랜지 부분요소를 보여주고 있다. 거더의 휨작용에 의해 플

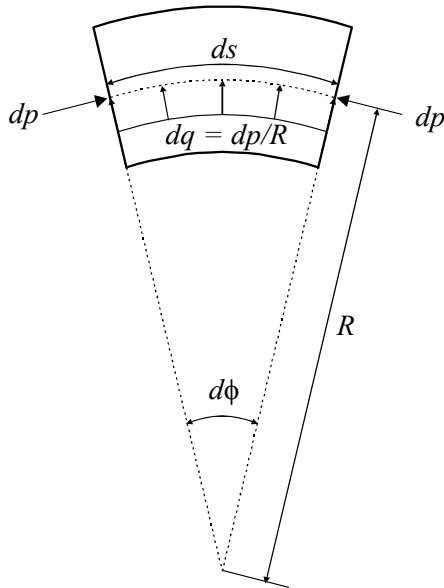


그림 4. 곡선 거더 플랜지의 부분 요소에 작용하는 횡방향 성분력

랜지 요소의 양측에 교축방향으로 크기 dp만큼 축방향력이 발생되지만 곡선 교축 효과에 의해 자체적으로 상쇄되지 못하고 크기 dq만큼의 반지를 방향(radial direction) 성분이 평면내 평형조건에 의해 발생하게 된다. 이러한 가상의 힘 성분 dq는 내부압력이 작용하는 2차원 고리 인장 이론(theory of hoop tension with internal compressive pressure)에 의해 $dq=dp/R$ 의 관계가 성립한다(Richardson, 1963). 휨작용에 의해 박스 거더의 상부 및 하부에 크기는 같으나 서로 반대방향으로 발생하는 반지를 방향의 힘 성분을 가정하고 교축방향으로 적분을 시도하면 그림 3(b)에 보인 수평하중 조합에 적용되는 우력의 크기 p에 대한 계산이 가능하다(Dabrowski, 1968; Heins and Hall, 1981; Nakai and Yoo, 1988).

박스 거더 시스템에서 뒤틀림(distortion)은 박스 단면에 작용하는 두 쌍의 내부 우력에 의해 발생하는 단면 형상의 각변형(angular deformation)으로 정의된다. 곡선 거더의 박스 단면내 각변형량, γ 에 대한 지배방정식은 Dabrowski(1968)에 의해 다음과 같이 4차의 미분방정식으로 주어진다.

$$\gamma^{iv} + 4\lambda^4 \gamma = \frac{1}{EI_{Dw}} \left(\rho \frac{M_x}{R} + \frac{m_z}{2} \right) \quad (1)$$

여기서,

$$\lambda = \sqrt[4]{K_{Dw} / 4EI_{Dw}} \quad (\text{length}^{-1})$$

K_{Dw} = 뒤틀림 뒹(distorsional warping)에 대한 박스 단면강성 (force/angle)

- EI_{Dw} = 뒤틀림 뒹강성(warping rigidity, force-length⁴)
- I_{Dw} = 뒤틀림 뒹상수(warping constant, length⁶)
- R = 곡률반경
- M_x = 내부 수직방향 휨모멘트
- m_z = 외부 비틀림모멘트 분포하중
- r = 단면기하상수로 구성되는 무차원 단면계수

식 (1)에서 보인 미분방정식은 Wright et al.(1968)에 의해 제안된 탄성지반위의 보(beam on elastic foundation, BEF)의 수직 처짐량에 대한 지배미분방정식과 유사한 형태를 보인다. 즉, 식 (1)에서 K_{Dw} 와 EI_{Dw} 대신에 보의 휨강성(flexural rigidity) 및 탄성지반의 스프링상수를 각각 대입하고, 우항의 괄호 안은 보에 작용하는 하중을 대입하면 식 (1)은 탄성지반위의 보에 대한 수직 처짐량에 대한 지배방정식이 된다. 박스 거더 단면의 뒤틀림 변형에 저항하는 내부 수직브레이싱의 역할은 탄성지반에 설치된 보의 수직 처짐에 저항하는 내부 지지점(intermediate supports)의 역할과 유사함을 미분방정식 (1)을 통해 유추할 수 있다. 이러한 유사(analogy)는 내부 수직브레이싱이 박스단면의 뒤틀림 변형에 어떻게 기여하는가에 대한 이해를 제공할 뿐 아니라 박스 뒤틀림의 정도를 공학적으로 산정하고 조정하고자 할 때 유용하게 활용될 수 있다.

3. 뒤틀림에 대한 제한

Heins and Oleinik(1976)의 연구에 근거하여 Heins (1978)는 박스 거더에 설치되는 내부 수직브레이싱의 간격과 수직브레이싱의 대각 부재(diagonal member)의 단면적에 대한 규정사항을 처음으로 제안하였다. 그러나 Heins의 규정은 외부로부터 받는 비틀림 하중의 크기와는 무관한 최소 요구 조건으로 제안되었는데, 곡률을 가지는 박스 거더는 내부에 수직브레이싱이 설치되어야 하며 그 설치 간격은 식 (2)에서 결정되는 s값보다 커서는 안 된다고 규정하였다.

$$s = L \sqrt{\frac{R}{200L - 7,500}} \leq 25 \text{ (ft)} \quad (2)$$

여기서, L 과 R 은 박스 거더의 길이 및 곡률반경을 각각 나타낸다. 또한 수직브레이싱을 구성하는 대각부재는 식 (3)에 보인 A_b 값 이상을 사용하도록 제안하였다.

$$A_b = 75 \frac{sb}{h^2} \frac{t_w^3}{h+b} \text{ (in}^2\text{)} \quad (3)$$

여기서, A_b 는 대각부재의 단면적(in² 단위), s 는 수직브레이싱 설치 간격, h 는 박스단면 높이, b 는 박스단면 폭, t_w 는 복부판의 두께를 각각 나타낸다. Highway Structures Design Handbook(1986)은 식 (2)와 (3)에서 보인 제한을 별다른 수정 없이 채택하였다.

AASHTO Standard Specifications(2002)와 AASHTO LRFD(2004)에서는 박스 거더의 내부 수직브레이싱에 대한 구체적인 규정은 없다. 그러나 AASHTO Guide Specifications의 10.2.2.3절에서는 뒤틀림에 의해 발생하는 축방향 응력의 크기가 휨에 의해 발생하는 축방향 응력 크기의 10%를 초과하지 않도록 내부 수직브레이싱이 설치되어야 한다고 명확히 규정하고 있다. 이러한 10% 규정은 외부 하중의 크기에 따라 달라지는 뒤틀림에 의해 발생하는 응력을 휨응력

을 기준으로 제한한다는 의미를 가지고 있으나 뒤틀림 응력의 산정방식에 대해서는 구체적인 규정은 없다. 또한 동 규정 동 절에서는 설치되는 수직브레이싱의 간격은 30ft(9.14m)을 넘지 않을 것을 규정하고 있다.

4. 뒤틀림에 의한 부재력 산정

박스 거더의 뒤틀림 거동(distortional behavior)은 외부로부터 거더에 가해지는 비틀림 하중의 크기 및 재하방식에 지배된다. 외부 비틀림 하중으로부터 뒤틀림을 유발하는 성분만을 분리해 낼 수 있다면 그 분리된 하중성분과 내부 수직브레이싱의 상호작용으로 수직브레이싱의 각 부재에 발생하는 부재력의 크기를 산정해 낼 수 있다. 그러나 뒤틀림을 유

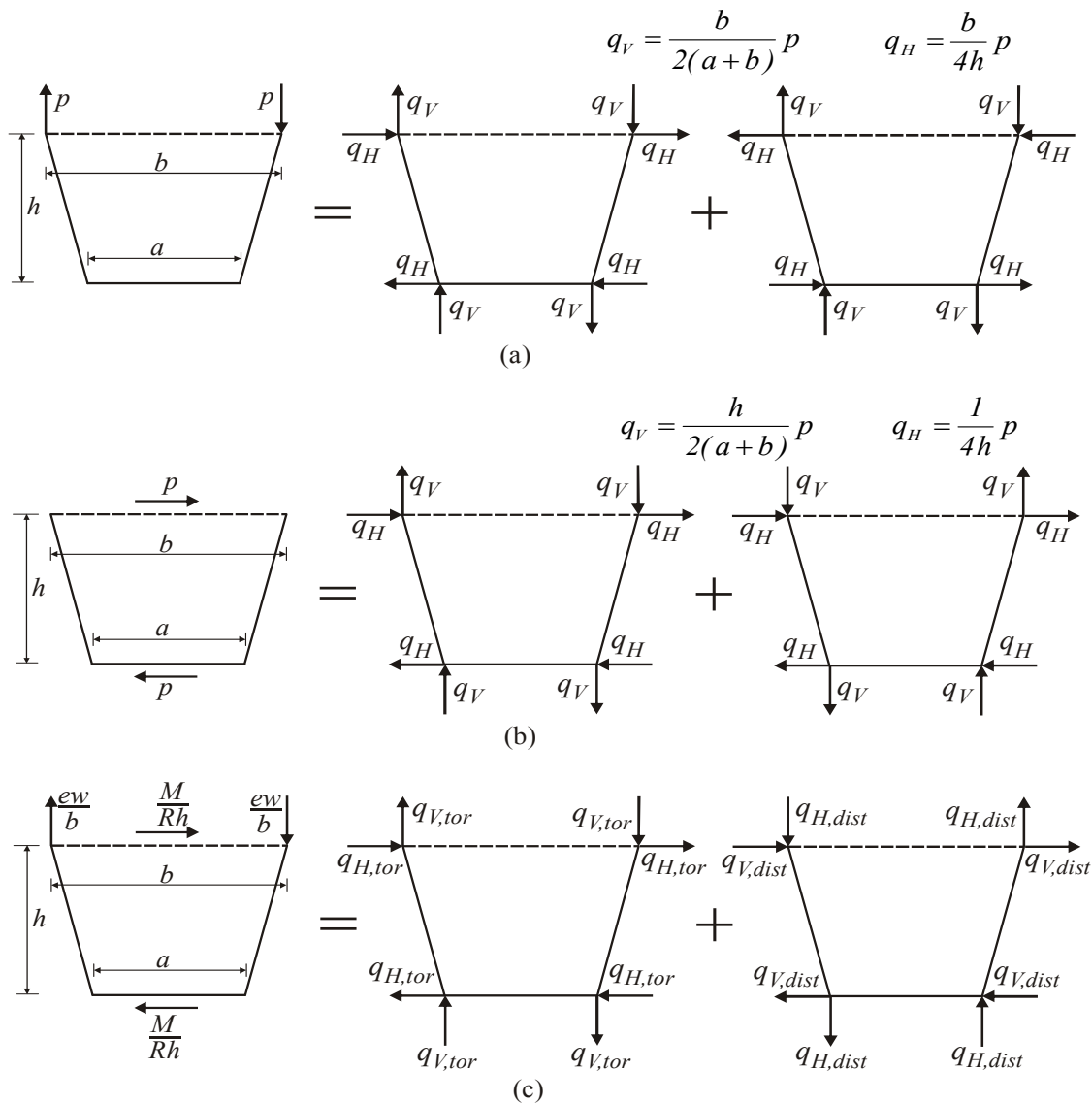


그림 5. 비틀림 하중에 대한 순수비틀림 성분 및 뒤틀림 성분의 분리:
 (a) 수직 하중에 의한 성분 분리; (b) 수평 하중에 의한 성분 분리; (c) 수직 및 수평 하중의 성분 분리 조합

발하는 성분 자체는 일반적으로 외연적이지 않고 박스 거더에 재하되는 비틀림 하중에 내연적으로 포함되어 있다. 외부의 비틀림 하중 중에서 순수 비틀림만을 유발하는 성분, 즉 전단중심에서 전단류의 합력이 제로(Zero)를 이루는 성분은 박스의 뒤틀림에는 관여되지 않는다. 외부 편심하중 및 거더 곡률효과에 의한 박스 거더의 순수 비틀림 및 뒤틀림 성분을 각각 분리하면 그림 5(a) 및 5(b)의 우측에 보인 바와 같이 각 꼭지점에 재하되는 수평 및 수직하중의 조합으로 표현이 가능하다. 이 때, 수평 및 수직 성분의 크기 p_H 및 p_V 는 우력의 크기 p 와 박스 단면 치수에 의해 결정된다(Fan and Helwig 2002). 무게중심으로부터 편심 e 만큼 떨어진 지점에 분포하중 w 에 의한 등가의 비틀림 모멘트를 그림 5(a)에 보인 수직하중 조합으로 환산하면 $p = ew/b$ 가 된다. 이와 유사하게 그림 4에서 기술하였듯이 곡률 반경 R 과 휨모멘트 M 에 의한 등가의 비틀림모멘트를 그림 5(b)에 보인 수평하중 조합으로 표현하면 $p = M/Rh$ 가 된다(Tung and Fountain 1970). 수직하중 조합 및 수평하중 조합을 함께 나타내면 그림 5(c)의 좌측에 보인 바와 같고, 이 때 그림 5(c)의 우측에 보인 순수 비틀림 성분 및 뒤틀림 성분을 구성하는 수평 및 수직방향 하중의 크기는 다음과 같이 계산된다.

$$q_{V,tor} = \frac{I}{2(a+b)} \left(\frac{M}{R} + \frac{a}{b} ew \right) \quad (4)$$

$$q_{H,tor} = \frac{I}{4h} \left(\frac{M}{R} + \frac{a}{b} ew \right) \quad (5)$$

$$q_{V,dist} = \frac{I}{2(a+b)} \left(\frac{M}{R} - \frac{a}{b} ew \right) \quad (6)$$

$$q_{H,dist} = \frac{I}{4h} \left(\frac{M}{R} - \frac{a}{b} ew \right) \quad (7)$$

식 (4)~(7)에 보인 성분력은 편심하중에 의해 발생하는 비틀림 하중과 곡률에 의해 발생하는 비틀림 하중을 모두 포함하고 있다. 또한 각 성분력은 편심하중 및 거더곡률에 의한 회전방향이 같다는 가정 하에 도출되었으므로 편심 e 는 수직하중이 거더 무게중심축의 바깥쪽(convex side)에 재하될 때 양의 값을 가지고, 무게중심축의 안쪽(concave side)에 재하되면 음의 값을 가진다.

내부 수직브레이싱의 각 부재에 발생하는 축력의 크기를 예측하는 수식을 유도하기 위한 기본 가정은 다음과 같다.

- (1) 비틀림 하중으로부터 추출 분리된 뒤틀림 성분만이 박스 단면의 뒤틀림 변형에 기여한다.

- (2) 박스 거더 단면의 뒤틀림 변형 발생시 복부판과 상·하부 플랜지의 각 교차점에서 판의 회전 저항 능력은 무시되고, 박스 내부 수직브레이싱에 의해 저항된다.
- (3) 두 개의 대각부재가 서로 교차된 형식의 X-프레임이 일정 간격으로 박스 거더 내 교축 수직면에 설치된다.

내부 수직브레이싱으로 X-프레임 또는 K-프레임이 주로 사용된다고 앞서 언급하였으나, K-프레임의 경우 상부 스트럿 부재는 내부 수직브레이싱의 구성요소이면서 또한 상부 수평브레이싱 시스템을 구성하는 요소이기도 하다. 그러므로 K-프레임의 상부 스트럿 부재에는 뒤틀림 성분 뿐만 아니라 준폐합단면을 구성하는 상부 수평브레이싱의 구성요소로서 순수 비틀림 성분에도 저항하게 된다. 본 연구에서는 뒤틀림 성분에 의한 부재력 산정에 초점을 맞추고 있으므로 두 개의 대각부재가 뒤틀림에만 저항하는 방식인 X-프레임만을 고려하였다. 박스 단면에서 복부판 및 플랜지가 연결되는 박스의 각 꼭지점에 재하되는 뒤틀림 성분력의 크기 및 방향이 구체적으로 결정되면 내부 수직브레이싱을 구성하는 부재에 발생하는 부재력의 크기는 힘의 평형 조건으로 구해질 수 있다. 그림 6에는 박스 단면의 네 꼭지점에 수평 및 수직 방향의 집중 하중, H와 V로 구성된 뒤틀림 성분력 조합을 받고 있는 X-프레임 타입의 내부 수직브레이싱을 보여준다. 그림 6에서 확인되듯이 뒤틀림 성분력 조합에는 박스 단면 전체의 회전을 일으키는 비틀림모멘트는 발생되지 않는다. 외부에서 작용하는 하중은 부재의 내력으로 저항되는 힘의 평형 원리에 의하면 다음의 식 (8)과 같이 X-프레임의 각 대각 부재(diagonal member)에 발생하는 축력의 크기 X 를 산정할 수 있다.

$$X = \pm(H \cos \gamma + V \sin \gamma) \quad (8)$$

여기서, H와 V는 박스의 뒤틀림 성분력을 구성하는 외부로부터의 수평 및 수직 하중이고, γ 는 대각부재가 수평방향으로 설치되는 스트럿(strut)과 이루는 각도를 나타낸다. 두 개의 대각 부재에는 뒤틀림의 방향에 따라 각각 크기는 같고 작용의 방향이 반대인 힘이 작용한다. 즉, 한 부재에는 인장력으로, 또 다른 부재에는 압축력으로 박스 단면의 뒤틀림에 저항한다. 박스 단면에 주어진 기하학적 크기를 고려하면 대각부재와 스트럿 사이각 γ 에 대한 다음 식이 성립한다.

$$\cos \gamma = \frac{a+b}{2L_x} \quad (9a)$$

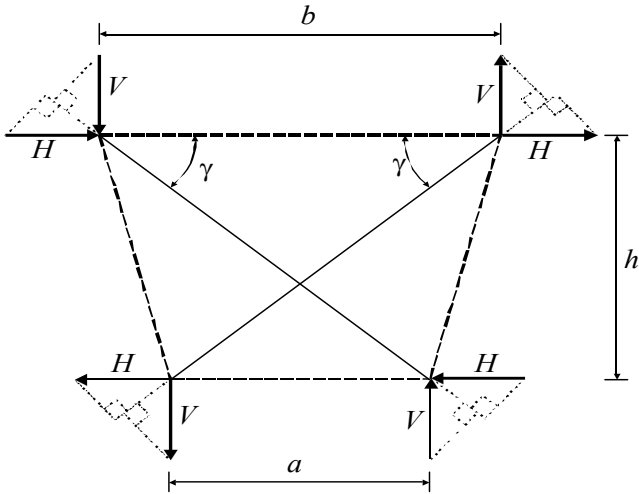


그림 6. X-프레임이 설치된 박스 단면에 작용하는 뒤틀림(distortion) 성분력

$$\sin \gamma = \frac{h}{L_x} \quad (9b)$$

여기서, a 와 b 는 그림 6에 보인 바와 같이 각각 박스 단면의 상부 및 하부 플랜지 레벨에서의 박스 폭을, L_x 는 X-프레임을 구성하는 각 대각부재 길이를 나타낸다. 편심하중 및 곡률효과에 의한 비틀림 모멘트는 거더 길이 방향(교축 방향)으로 연속적으로 분포하여 재하된다. 그러므로 교축방향으로 일정 간격마다 설치되는 내부 수직브레이싱의 각 부재가 직접적으로 저항하는 힘의 크기는 그림 5와 식 (4)~(7)에서 보인 단위 길이 당 작용하는 하중 성분(distributed force component, force per length unit)의 크기에 내부 수직브레이싱의 설치간격을 곱하여 계산될 수 있다. 즉, 내부 수직브레이싱의 설치간격을 s_x 라 하면 그림 6에서 보인 H 와 V 는 식 (4)~(7)에서 보인 $q_{H,dist}$ 와 $q_{V,dist}$ 에 근거하여 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$V = \frac{s_x}{2(a+b)} \left(\frac{M}{R} - \frac{a}{b} ew \right) \quad (10)$$

$$H = \frac{s_x}{4h} \left(\frac{M}{R} - \frac{a}{b} ew \right) \quad (11)$$

식 (9a), (9b), (10), 그리고 식 (11)을 식 (8)에 대입하면 내부 X-프레임의 각 대각부재에 발생하는 부재력의 크기 X 를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$X = \pm \frac{s_x}{8L_x} \left(\frac{a+b}{h} + \frac{4h}{a+b} \right) \left(\frac{a}{b} ew - \frac{M}{R} \right) \quad (12)$$

식 (12)에서 \pm 기호는 같은 크기의 하중이 인장과 압축으로 발생됨을 의미한다.

5. 예제 해석 및 부재력 비교

본 절에서는 해석적 방법으로 유도된 내부 수직브레이싱의 부재력 산정식의 타당성을 검토하기 위하여 수식으로 산정된 부재력을 3차원 유한요소 모델링을 통한 해석 결과와 비교 검토를 수행한다. 예제 해석으로 직선형 단경단 거더 및 곡선형 3경간 연속 거더 두 가지 구조형식에 대하여 수행하였다.

해석적 방법에 의한 산정식에 대한 검증은 목적으로 하는 본 예제해석에는 범용 유한요소해석 패키지 프로그램인 ABAQUS(2005)가 사용되었다. 상부 수평브레이싱 및 내부

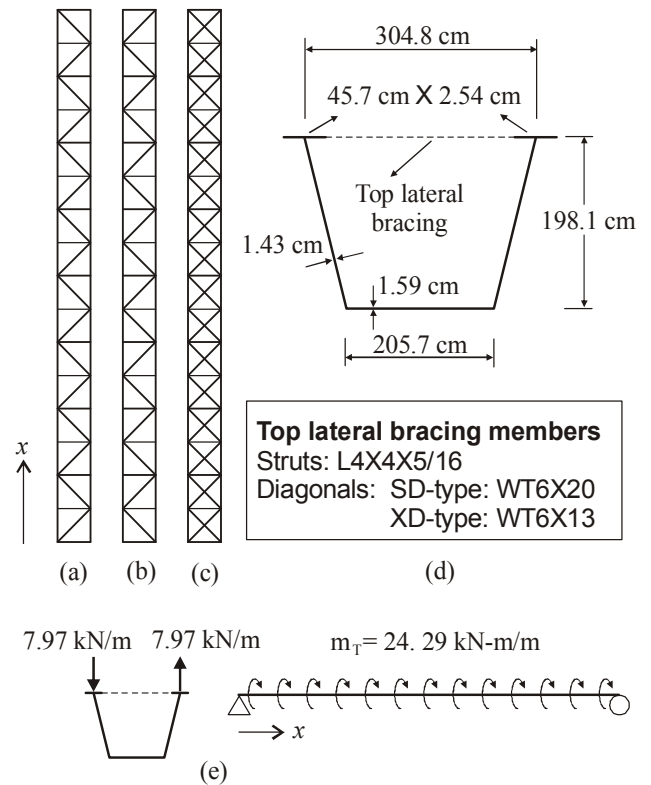


그림 7. 단경단 거더 예제

- (a) SD Type A; (b) SD Type B (c) XD Type
- (d) 박스단면 구성 및 브레이싱 부재 (e) 비틀림 하중 재하

수직브레이싱을 구성하는 각 부재의 모델링에는 3차원 트러스 요소가 사용되었고, 상부 및 하부 플랜지와 복부판의 경우에는 3차원 셸 요소가 사용되었다. 또한 박스거더의 지점부의 다이아프램 역시 3차원 셸 요소로 모델링되었다. 상부 수평 및 내부 수직 브레이싱 시스템으로 보강된 U형 강거에 대한 선형 탄성 해석 수행시 적용된 강의 탄성계수와 포아송비는 200 GPa 및 0.3으로 각각 가정되었다.

우선 내부 X-프레임이 설치된 단경간 직선 U형 박스 거더에 대한 해석이 수행되었다. 그림 7에는 직선형 단경간 거더 예제에서 사용된 상부 수평브레이싱으로 보강된 준폐합 단면 강박스 거더에 대한 정보를 보여준다. 예제에 사용된 단경간 직선 거더의 길이는 48.768 m이고 16개의 상부 패널로 구성되었다. 박스 거더의 양단에는 판(plate) 형식의 다이어프램이 설치되었고, 각 패널은 상부 플랜지 레벨에 설치된 스트럿 부재로 구분된다. 그림 7(a)와 (b)에서는 각 패널 당 하나의 대각부재가 인접 패널에 설치된 부재와 연결되어 연속적으로 설치되는 단일 대각부재 형식인 SD(single diagonal) Type의 두 가지 가능한 배치인 SD Type A와 SD Type B를 도시하였다. 그림 7(c)에서는 상부 수평브레이싱 시스템의 각 패널당 두 개의 대각부재가 사용된 XD(crossed diagonal) Type을 보였다. X-프레임 형식의 내부 수직브레이싱은 두 개의 패널 간격으로 총 8개가 설치되었다. 그림 7(d)에는 박스 단면 치수 및 사용된 브레이싱 부재를 보이고 있는데 각 부재의 상세한 단면특성은 AISC (2001)에서 참조될 수 있다. 그림 7(e)에는 재하된 비틀림 하중 및 축방향 분포 비틀림 모멘트 하중을 나타내었다. 본 직선 거더 예제에서는 곡률에 의한 비틀림 효과는 배제되므로 부재력을 산정하는 식 (10)~(12)에서 M/R 항은 고려되지 않는다.

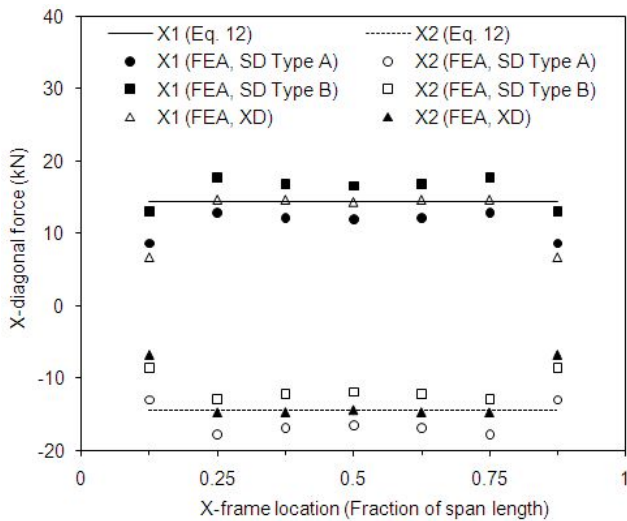


그림 8. 단경간 직선 거더 내 설치된 X-프레임에 발생한 부재력 비교

그림 8은 직선 단경간 예제에 대한 유한요소해석과 제안식에 의해 도출된 내부 X-프레임의 각 대각부재 X1과 X2의 부재력을 비교하여 보여준다. 그림 8을 통해 XD Type의 상부 수평브레이싱 시스템이 설치된 경우 식 (12)로부터 계산된 부재력의 크기는 유한요소해석으로부터 얻어진 결과와 높은 수준으로 일치함을 확인할 수 있다. 각 패널당 하나의 대각부재가 설치된 SD Type의 경우를 살펴보면, 유한요소해

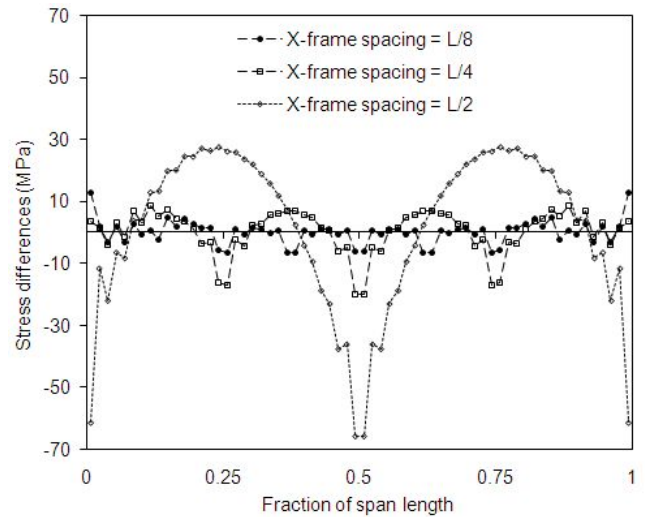


그림 9. 박스 뒤틀림(distortion)에 의한 하부 플랜지에 발생한 뒤틀음력(warping stress) 효과

석 결과 값은 Type A와 B사이에 약간의 불일치가 발생하고 있음이 확인되었다. 이론적 전개에 의하면 두 개의 대각부재 X1과 X2에는 같은 크기의 인장력과 압축력이 각각 발생하여야 하지만 유한요소해석 결과는 인장력과 압축력의 크기에서 편차를 보이고 있다. 이러한 불일치의 이유로는 박스 거더상부를 보강하는 패널당 하나인 상부수평브레이싱 부재와 내부 수직브레이싱 부재가 접하는 지점에서의 국부적 효과에서 찾아 볼 수 있다. 그림 7(e)에 보였듯이 직선 거더에 비틀림을 유발시키기 위해 상부 플랜지 중심에 크기는 같으나 방향이 반대인 분포 우력(distributed couple)을 재하하였는데 박스 상부 평면내 교축을 중심으로 각 패널 평면내 좌우 대칭을 보이는 XD Type과는 다르게 SD Type은 대칭적이지 못하다. SD Type의 경우, 비록 X-프레임이 수직 평면내에서 대칭을 보이고 있으나 X-프레임의 X1 및 X2 부재 중에서 단 하나의 부재만이 상부 수평 브레이싱의 대각부재와 연결되어 있다. 즉, 내부 수직브레이싱의 구성 부재와 상부 수평 브레이싱의 부재가 국부적인 상호작용의 크기만큼 X-프레임의 두 부재의 인장력과 압축력의 차이가 발생하게 되는 메커니즘으로 설명될 수 있다. 이러한 상부 수평브레이싱 시스템과 내부 수직브레이싱의 상호작용 효과가 각 부재력에 미치는 영향에 대해서는 Kim과 Yoo(2006b)가 깊이 있는 연구를 수행한 바 있다. 국부효과에도 불구하고 SD Type을 가지는 X-프레임의 압축력 및 인장력의 크기를 평균값으로 취하면 XD Type을 취한 경우의 X-프레임 부재력과 일치하고 있는 것은 흥미로운 사실이다. 또한 그림 8에서 확인되듯이 다이어프램이 설치된 단경간 박스거더의 양쪽 지지점에서 가까운 X-프레임 부재에는 다이어프램의 강성에 영향을 받아 상대적으로 작은 크기의 부재력이 발생되었다.

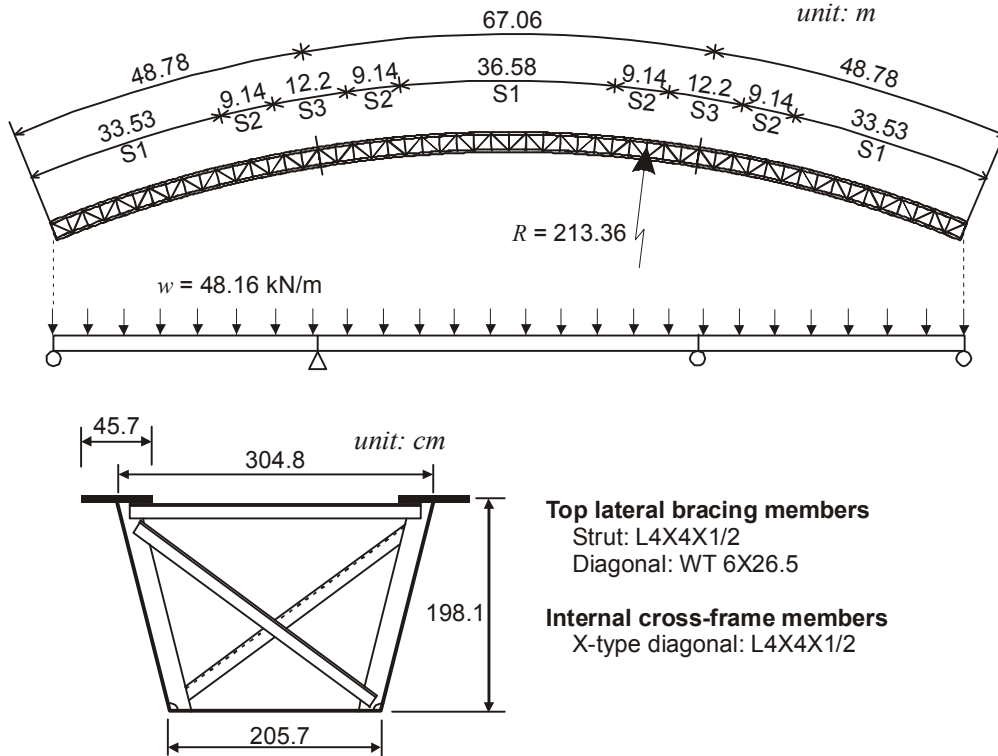


그림 10. 3경간 연속 곡선 거더 예제의 경간 및 단면 구성

앞서 언급하였듯이 박스 단면의 뒤틀림에 의한 뒹음력 (distortional warping stress)의 크기는 내부 수직브레이싱의 설치 간격에 의해 조정될 수 있다. 그림 9에는 비틀림 하중을 받는 단경간 직선 박스 거더에 설치되는 내부 수직브레이싱의 설치 간격을 변수로 하였을 때 복부판과 접하는 하부 플랜지 양단에서 교축방향으로 발생한 응력의 차이를 보여준다. 이 축방향 응력은 휨에 의한 영향은 고려되지 않은 뒹음력이며, 그 차이는 박스단면의 뒤틀림에 의해 하부플랜지에 발생한 뒹음력의 상대적 크기에 해당한다. 내부 수직브레이싱의 설치 개수가 많을수록 그 간격은 줄어들어 뒤틀림에 의한 뒹음력을 크게 줄일 수 있다는 것을 그림 9에서 확인할 수 있다.

표 1. 3경간 연속 거더 박스에 사용된 판두께

단면표시	상부플랜지	복부판	하부플랜지
S1	25.4 mm	14.3 mm	15.9 mm
S2	25.4 mm	14.3 mm	25.4 mm
S3	57.2 mm	14.3 mm	47.0 mm

다음으로 SD Type의 상부 수평 브레이싱 및 내부 X-프레임으로 보강된 3경간 연속 곡선 거더에 대한 예제해석이 수행되었다. 앞서 보인 직선 거더 예제에서는 곡률에 의한 효과를 확인할 수 없었지만 이번 예제를 통해서도 편심하중의 효과를 배제하고 곡률에 의한 거더의 비틀림 거동 및 박스 단

면의 뒤틀림 현상에 대한 분석이 가능하다. 예제에 적용된 3경간 연속 곡선 U형 강거더는 48.78m + 67.06m + 48.78m로 각 경간이 구성되었으며 전경간에 적용된 곡률반경은 213.36m이다. 스트럿으로 구분되는 패널은 16 + 22 + 16로 총 54개로 구성되었다. 박스 단면의 크기는 단경간 직선 예제와 동일하지만 박스를 구성하는 상·하부 플랜지 및 복부판의 두께는 정모멘트 구간, 부모멘트 구간 및 전이 구간으로 나누어 서로 다른 3가지의 조합이 사용되었다. 내부 수직브레이싱은 앞서 수행한 예제와 같이 두 패널 간격으로 설치되었다. 축경간의 교대부 및 내부 지점이 놓이는 교각부에는 판 형태의 다이아프램이 설치되어 전단 지압 및 박스 뒤틀림 등에 의한 변형을 방지하였다. 두 개의 상부 플랜지 중앙선을 따라 동일하게 각 24.8kN/m의 분포 수직 하중을 재

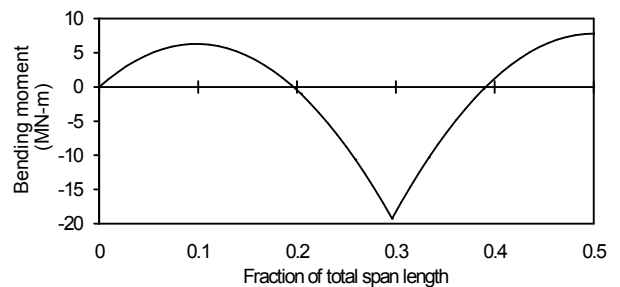


그림 11. 3경간 연속 곡선 거더 예제의 휨모멘트도

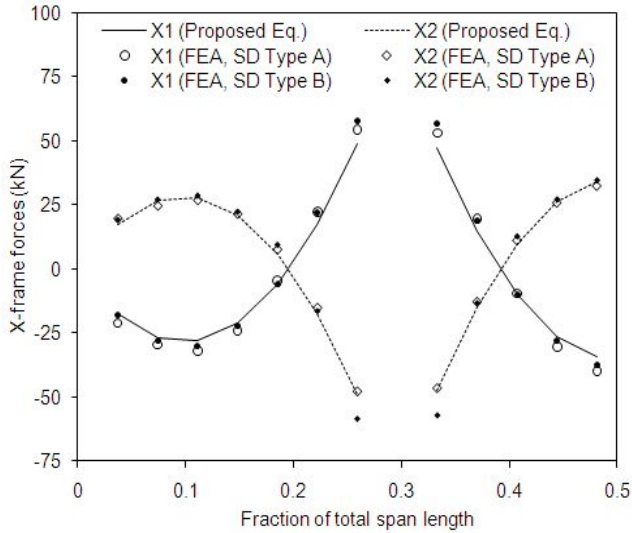


그림 12. 3경간 연속 곡선 거더 내 설치된 X-프레임에 발생한 부재력 비교

하하여 편심 하중 효과는 없도록 하였다. 기타 박스 단면 구성, 판 두께 등에 관한 구체적인 정보는 그림 10에서 확인이 가능하다. 본 곡선 거더 예제에서는 편심하중 효과는 배제되므로 식 (12)에서 ew항은 고려되지 않는다. 그림 11에는 M/R항의 계산을 위한 휨모멘트를 나타내었다. 내부 수직브레이싱이 설치되는 위치에서의 휨모멘트의 크기를 취하여 각 브레이싱의 부재력 산정식에 적용하였다.

그림 12는 3경간 연속 곡선 거더 예제에 대한 유한요소해석과 본 연구에서 제안된 수식에 의해 도출된 내부 X-프레임의 각 대각부재에 대한 부재력을 함께 보여 준다. 그림 12를 통해 알 수 있듯이 제안식은 유한요소해석 결과와 잘 부합하고 있으며, 상부 수평브레이싱 시스템의 배열 순서 즉, SD Type A와 B에 의한 부재력 차이는 단경간 예제의 경우와는 다르게 크게 나타나지 않는다. 박스 내 다이아프램이 설치된 내부 지점부 주변의 부재에는 상대적으로 높은 다이아프램의 강성효과에 의해 국부적으로 부재력의 변화가 있는 것으로 관측되었다. 유한요소해석 결과와 비교해 보면 측경간 교대부 주변보다는 높은 수준의 부모멘트가 발생하는 내부 지점부, 즉 교각부 주변에서 X-프레임이 받는 국부효과와 영향이 더 큰 것으로 파악되었다.

6. 결론

비틀림 하중을 받는 U형 강박스 거더의 단면 뒤틀림 거동에 대한 해석적 분석이 수행되었다. 박스 단면의 뒤틀림을 방지하기 위해 박스 거더 내부에 설치되는 수직브레이싱의 각 부재에 발생하는 부재력을 산정하는 수식에 대한 해석적 개발이 시도되어 성공적으로 유도되었다. 편심하중 또는 거더의

곡률에 의해 발생하는 비틀림하중을 순수 비틀림 성분과 박스 단면내 각변형을 유발하는 뒤틀림 성분으로 분해한 후, 추출된 뒤틀림 성분력과 내부 수직브레이싱의 상호작용 효과를 분석함으로써 각 부재에 발생하는 축력의 크기를 편심하중, 휨모멘트, 박스단면의 기하학적 치수 및 내부 수직브레이싱의 설치 간격 등의 함수로 도출하였다. 제안식의 타당성을 검증하기 위하여 편심하중을 받는 단경간 거더와 전경간 일정한 곡률을 가지는 3경간 연속 거더 예제를 선정하여 3차원 유한요소 모델링을 수행하였고 해석을 통해 얻은 부재력을 제안식으로 산정된 값과 비교 분석하였다. 유한요소해석 및 제안식으로 결정된 내부 수직브레이싱 부재의 축력은 수준으로 일치함을 보였다. 내부 X-프레임을 구성하는 두 개의 대각부재에는 크기가 같은 부재력이 발생하였으나 박스 뒤틀림의 정의대로 압축과 인장의 서로 다른 축력 상태로 구현되었다. 브레이싱 구조형식보다 매우 높은 강성을 가지는 판(plate)형식의 다이아프램이 설치된 박스 거더 주변에서는 강성차이에 의한 국부적 효과가 나타났다. 이러한 국부효과에 의해 단경간 거더의 경우 다이아프램이 설치된 양단 주변에서 부재력은 예측에 비해 다소 낮아지는 경향이 있었고, 연속 거더의 경우 다이아프램이 설치된 내부 지점부 부근에서 부재력은 다소 높게 평가되었다.

본 연구의 성과는 박스 단면의 변형을 최소화하기 위해 설치되는 내부 수직브레이싱에 요구되는 강성 및 간격의 결정을 위해 진행될 연구에 대한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

참고 문헌

심낙훈, 박영석(2006) 실물모형 시험체를 이용한 U형 강박스 거더의 상부 수평브레이싱에 관한 실험적 연구: 비틀림 강성, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제22권, 제4호, pp.447-455.

심낙훈, 오귀환, 박영석(2004) 축소모형 시험체를 이용한 U형 강박스거더의 실험적 연구-II: 비틀림 거동, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제24권, 제4A호, pp.837-843.

이광일 (2010) U형 강박스거더의 W형 상부수평브레이싱 부재력 산정에 관한 실험적 연구, 박사학위논문, 명지대학교.

AASHTO (2003) *Guide specifications for horizontally curved steel girder highway bridges*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.

AASHTO (2004) *AASHTO LRFD bridge design specifications*, American Association of State Highway and Transportation Official, Washington, D.C.

- ABAQUS Inc. (2005) ABAQUS Analysis user's manual, Pawtucket, RI.
- AISC (1986) Highway Structures Design Handbook. American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.
- AISC (2001) Manual of Steel Construction. American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.
- Bradberry, T.E., Cotham, J.C., and Medlock, R.D. (2005) Elastomeric Bearings for Steel Trapezoidal Box Girder Bridges, TRB 2005 Annual Meeting, paper number 05-2526, pp.1-25.
- Dabrowski, R. (1968) Curved thin-walled girders: Theory and analysis. Cement and Concrete Association, U.K.
- Fan, Z. and Helwig, T.A. (1999) Behavior of steel box girders with top flange bracing. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 8, pp.829-837.
- Fan, Z. and Helwig, T.A. (2002) Distortional loads and brace forces in steel box girders. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 128, No. 6, pp.710-718.
- Heins, C.P. (1978) Box girder bridge design - State of the art. *Engineering Journal*, American Institute of Steel Construction, Vol. 15, No. 4, pp.126-142.
- Heins, C.P. and Hall, D.H. (1981) Designer's guide to steel box girder bridges. Bethlehem Steel Corporation, Bethlehem, PA.
- Heins, C.P. and Oleinik, J.C. (1976) Curved box beam bridge analysis. *Computers and Structures*, Vol. 6, No. 2, pp.65-73.
- Kim, K. (2004) *Research on horizontally curved box girders*, Ph.D. dissertation, Auburn University, Auburn, AL.
- Kim, K. and Yoo, C.H. (2006a) Brace forces in steel box girders with single diagonal lateral bracing systems. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 132, No. 8, pp.1212-1222.
- Kim, K. and Yoo, C.H. (2006b) Interaction of top lateral and internal bracing systems in tub girders. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 132, No. 10, pp.1611-1620.
- Kollbrunner, C.F. and Basler, K. (1969) Torsion in structures, Springer-Verlag, New York, NY.
- Nakai, H. and Yoo, C.H. (1988) Analysis and design of curved steel bridges. McGraw-Hill Book Company, New York, NY.
- Richardson, G. and Associates (1963) Analysis and design of horizontally curved steel bridge girders. United States Steel, Structural Report No. ADUCO 91063.
- Tung, D.H.H. and Fountain, R.S. (1970) Approximate torsional analysis of curved box girders by the M/R method. *AISC Engineering Journal*, Vol. 7, No.3, pp.65-74.
- United States Steel Corporation (1978) Steel/concrete composite box-girder bridges: A construction manual, Pittsburgh, PA.
- Wright, R.N., Abdel-Samad, S.R., and Robinson, A.R. (1968) BEF analogy for analysis of box girder. *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 94, No. 7, pp.1719-1743.

(접수일자 : 2010. 9. 19 / 심사일 2010. 10. 7 /
심사완료일 2011. 3. 29)