

비부착 긴장력이 거더의 횡비틀림 안정성에 미치는 영향

이종한¹, 이진준^{2*}, 카부야야 키쿠타³

The Influence of Unbonded Prestressing Force on the Lateral Torsional Stability of Girders

Jong-Han Lee¹, Kun-Joon Lee^{2*}, Kabuyaya Kighuta³

Abstract: An experiment was carried out to evaluate the lateral torsional stability of a girder with respect to the location and magnitude of prestressing force. The test of evaluating the lateral displacement and stability of a girder could cause an unexpected result due to various parameters, such as material nonlinearity, initial geometric imperfections, prestressing force, and loading and support conditions. Therefore, a small model testing was programmed to control the various parameters and assess the lateral torsional stability with respect to the prestressing force. This study proposed and fabricated an experimental apparatus that can satisfy the loading and in-plane and out-of-plane support conditions and also control the prestressing force. The result of the experiment showed that the lateral torsional stability increased when the prestressing force was applied in the bottom flange of the girder. As a result, this study proposed an analytical equation that can account for the effect of the prestressing force in the lateral torsional stability of a girder.

Keywords: Lateral torsional stability, Critical load, Prestressing force, Unbonded tendon, Girder

1. 서론

교량 거더의 횡방향 변형과 비틀림 안정성에 대한 연구는 주로 강재 거더교에서 이루어졌다. 강재 거더교는 수직 브레이싱(Bracing)이나 가로보(Cross-Beam) 등에 의해서 적절하게 지지되지 않으면 횡비틀림 좌굴(Lateral Torsional Buckling)에 의해 휨(Flexure) 강도가 현저하게 감소될 수 있다. 탄성 횡비틀림 좌굴은 탄성이론(Elastic Theory)에 근거하고 있으며, 비탄성 횡비틀림 안정성은 실험적 근사식에 근거하여 휨 강성(Flexural Rigidity), 비틀림 강성(Torsional Rigidity), 뒤틀림 강성(Warping Rigidity)을 평가한다.

2000년대 이후에는 프리캐스터 프리스트레스(Precast Prestress) 기술의 발전으로 콘크리트 교량에서도 거더 단면의 세장비(Slenderness)와 경간이 증가하였다. 이는 시공 중 거더의 횡방향 불안정성(Instability)과 전도(Rollover) 등에 의한 붕괴 사고를 유발시켰다. 따라서, 최근에는 프리캐스터 프리스트레스 콘크리트 교량 거더, 특히 I-형 거더의 횡방향 거동 및

횡비틀림 안정성(Lateral Torsional Stability)에 대한 관심이 높아지고 있다. 시공 중 거더의 횡방향 거동과 안정성에 대한 연구는 환경적 열효과 (Lee, 2012a; Lee, 2012b; Lee and Kalkan, 2012)와 풍하중의 영향 (Lee et al., 2015)을 고려한 연구가 주로 이루어졌다. 또한, 시공 중 탄성받침에 지지된 거더의 전도 안정성에 대한 연구도 수행되었다 (Lee et al., 2017; Lee, 2017).

콘크리트 보(Beam)에 대한 횡비틀림 안정성은 콘크리트 균열에 의한 횡방향 휨 강성과 비틀림 강성의 감소를 고려하여 평가하였다(Hansell and Winter, 1959; Massey, 1967; Revathi and Meon, 2006; Kalkan, 2009). 프리스트레스 콘크리트 보에 대해서는 몇몇의 해외 연구자들에 의해서 선행 연구가 이루어졌다. Magnel (1950)과 Molke (1956)에 의하면 부착텐던(Bonded Tendon) 프리스트레스 거더는 횡방향 좌굴현상이 발생되지 않으며, 비부착(Unbonded) 텐던에 의해서만 횡방향 불안정성이 발생할 수 있다고 하였다. 이러한 선행 연구는 탄성이론을 바탕으로 한 해석적인 연구에 근거하고 있으며, 실험적인 연구는 거의 수행되어지지 않았다.

최근에 Kalkan and Hurff (2012)은 직사각형 콘크리트 보에 대한 횡비틀림 안정성 실험을 수행하여 초기 기하학적 불완전성(Imperfection)과 긴장력(Prestressing Force)의 영향을 평가하였다. 이처럼 긴장력에 의한 거더의 횡방향 거동과 안정성에 대한 연구는 초기의 해석적 연구와 최근의 실험 연구로 매우 제한적으로 수행되어졌다.

¹정회원, 대구대학교 건설시스템공학과 조교수

²정회원, 대구대학교 건설시스템공학과 박사후연구원, 교신저자

³학생회원, 대구대학교 건설시스템공학과 석사과정

*Corresponding author: kunjoon@daegu.ac.kr

Department of Civil Engineering, Daegu University, Gyeongsan, 38453, Korea

• 본 논문에 대한 토의를 2018년 6월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 7월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

실제 교량 거더를 이용한 횡방향 거동 및 안정성 실험은 실험체의 제작기간과 제작비용이 과다하고, 실험체 설치와 경계조건 구현의 어려움이 있다. 특히, 실험 시 재료의 비선형성, 구조물의 초기 기하학적 불완전성, 프리스트레스 긴장력의 변화 등 많은 비용과 노력에 비해 예상치 못한 변수가 발생할 가능성이 매우 높다. 따라서, 본 연구에서는 재료적 비선형성을 무시하고 긴장력에 의한 횡비틀림 안정성을 평가할 수 있는 프리스트레스트 거더 축소 모형 실험안과 실험장치를 제안하였다.

횡비틀림 실험은 지지조건과 하중조건을 우선적으로 구현할 수 있어야 한다. 따라서, 하중 가력 시스템은 거더의 횡비틀림 변형 발생 시에도 수직방향을 유지할 수 있게 하였으며, 거더의 지지점에서는 면내(In-plane)와 면외(Out-of-plane) 방향의 경계조건을 만족할 수 있게 하였다. 또한, 거더 시험체에 긴장력을 부가하며 동시에 긴장력의 크기를 모니터링 할 수 있는 장치를 설계하였다.

본 연구에서는 프리스트레스 긴장력의 위치와 크기를 실험 변수로 하여 거더의 횡비틀림 안정성 실험을 수행하였다. 실험결과 하부 플랜지에 긴장력이 작용하는 경우 횡비틀림의 안정성이 증가하였으며, 최종적으로 긴장력의 위치와 크기에 따라 탄성 횡비틀림 안정성을 평가할 수 있는 해석식을 제안하였다.

2. 실험계획

2.1 실험변수 및 시험체 제작

프리스트레스트 시험체 거더는 탄성 복원력이 우수하고, 소성변형이 잘 발생되지 않으며, 센서 부착성이 용이한 폴리 카보네이트(Polycarbonate)를 사용하여 제작하였다. 폴리 카보네이트의 물성치는 Table 1에 보인 바와 같이, 탄성계수는 약 2200 ~ 2600 MPa, 인장강도는 약 56 ~ 72 MPa이다.

Table 1 Material properties of polycarbonate (Units: MPa)

Elastic modulus	Ultimate strength	Reference
2380	63 ~ 72	Sindo ILS Co.
2300	65	Daehyun hitech Co.
2400	60 ~ 70	Polyfluo asia PTE. LTD.
2350	63.7	PT. SBP Indonesia Co.
2560	69	Kim et al. (2016)
2250 ~ 2500	56~67	Budinski (2009)

거더 시험체는 이축 대칭(Doubly-symmetric) I-형 단면으로 정의하였다. 단면의 형상비와 휨강성비는 최대 경간장 50 m인 미국 도로교통협회(AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials)의 표준거더 Type VI 와 유사하게 모형화하였다. Fig. 1은 모형 단면의 형상과 치수를 보여준다. 보의 총 길이는 1,000mm 이며, 단면의 폭-높이 비는 1.80, 폭-두께 비는 6.67이다. 약축(Weak-axis)에 대한 단면 2차 모멘트(Moment of Inertia)는 강축(Strong-axis)의 약 10%이다.

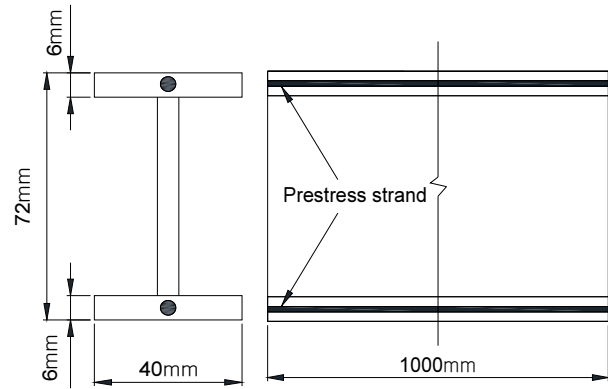


Fig. 1 Cross-section and geometry of the specimen

긴장력에 의한 횡비틀림 안정성을 평가하기 위하여 본 연구에서는 상부와 하부 긴장력을 실험변수로 설정하였다. 긴장력의 위치는 좌우의 편심 영향을 최소화하기 위하여 Fig. 1에 보인 바와 같이, 상부와 하부 플랜지의 중앙에 위치시켰다. 긴장력의 크기는 500, 1000 N로 증가시키면서 긴장력의 크기에 대한 영향을 고려하였다. 본 연구에서 고려한 실험변수와 시험체는 Table 2와 같다.

Table 2 Test variables and specimens

Specimens	Prestressing force (N)	
	Top flange	Bottom flange
SC	0	0
ST-500	500	0
ST-1000	1000	0
SB-500	0	500
SB-1000	0	100

2.2 시험체 설치

거더 시험체는 경계조건과 하중조건을 구현할 수 있는 프레임(Frame)을 제작하여 설치하였다. Fig. 2는 경계조건과 하중조건을 구현할 수 있는 프레임과 설치된 거더 시험체 모습이다. 시험체 거더의 경간장은 950mm이다.

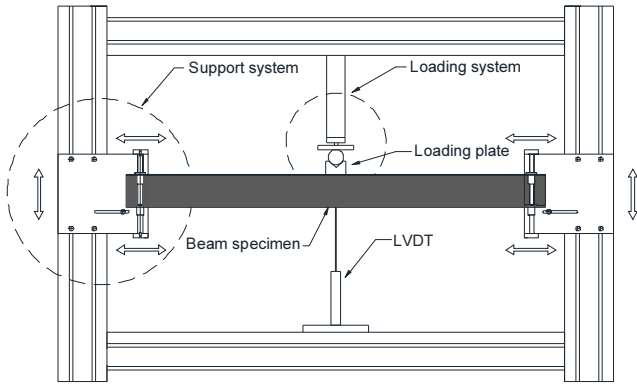


Fig. 2 Schematic view of test setup and instrumentation

지지 프레임 상부에는 수직하중 가력 시스템을 설치하였다. 거더 시험체 단부에는 긴장재에 긴장력을 부가할 수 있는 장치와 시험체의 변형과 함께 긴장력의 변화를 측정할 수 있는 장치를 설치하였으며, 이에 대한 설명은 3장에서 자세히 기술하였다. 하중의 변화와 함께 시험체의 수직 및 횡방향 변형량을 측정하기 위하여 Fig. 2에 보인 바와 같이, 시험체 중앙부에 와이어 변위계(LVDT: Linear Variable Differential Transformer)를 설치하였다.

프레임의 양측에는 시험체의 면내방향과 면외방향의 경계조건을 구현할 수 있게 하였다. 거더의 면내방향인 종방향(길이방향) 경계조건은 단순지지(Simply-supported) 조건으로 모사하였다. 면내방향 경계조건과 함께 횡비틀림 안정성을 평가하기 위해서는 면외방향, 즉 횡방향 경계조건이 추가적으로 요구된다. 횡방향 경계조건은 단면의 강축과 약축에 대한 회전, 즉, 면내와 면외의 휨 변형은 가능하고 보의 길이방향에 대한 회전 변형은 구속되어야 한다. 따라서, Fig. 3에 보인 바와 같이 I-형 거더의 상·하부 플랜지에서 횡방향 변위는 구속하고, 회전과 상하이동은 자유롭게 가능하게 하였다. 플랜지와의 접촉면은 윤활유에 의해 마찰 저항이 발생되지 않게 하였으며, 면내와 면외방향 경계조건은 같은 단면에서 작용되게 하였다.

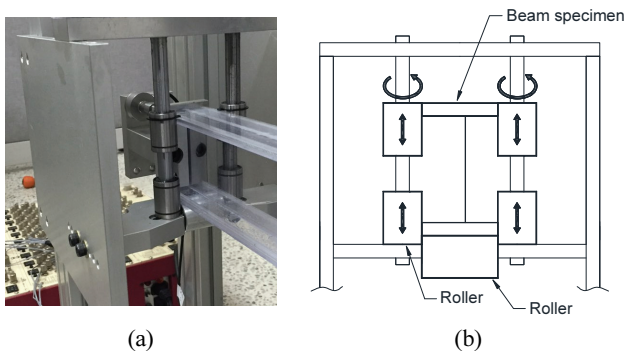


Fig. 3 Vertical and lateral support systems: (a) photograph and (b) operating mechanism

3. 계측장비 및 방법

3.1 하중 가력 및 측정

수직 하중은 거더의 횡방향 변형과 불안정성이 발생하더라도 항상 수직방향으로 거더에 전달되어야 한다. Fig. 4는 설치된 거더와 하중 가력 시스템을 보여준다. 수직 하중은 가압부의 단부에 점(Point) 상태로 접촉할 수 있는 볼(Ball)과 볼 지지체를 통해 거더 시험체에 전달된다. 볼 지지체는 볼의 이탈을 방지하며 볼 지지체에서의 횡방향 구속을 제거하기 위하여 Fig. 4(b)와 같이 볼-너치 (Ball-and-Notch) 형태로 설계하였다. 또한, 가압력에 의해 거더 시험체가 횡방향 및 비틀림 변형이 발생하더라도 구조물의 상부 지지체와 접촉하고 있는 볼은 항상 점 접촉상태로 유지된다. 따라서, 볼은 Fig. 4(b)와 같이 기울어진 방향과 관계없이 항상 수직된 방향으로 힘을 전달할 수 있게 된다. 가력되는 하중은 볼 상부에 설치되어 있는 로드셀(Load Cell)을 이용하여 측정하였다.

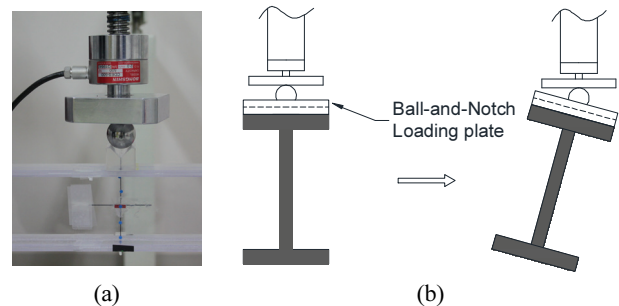


Fig. 4 Loading system: (a) photograph and (b) operating mechanism

3.2 변위 측정방법

거더의 횡방향 및 수직방향 변형은 길이방향의 회전변형과 같이 발생되기 때문에 독립적인 변형량을 직접적으로 측정할 수 없다. 따라서, 본 연구에서는 Zhao et al. (1995)가 제안하고 Kalkan and Hurff (2012), Lee et al. (2017a, 2017b)에 의해 개선되어진 측정 방법을 사용하였다. Fig. 5는 선행 연구자들에 의해 제시된 대표적인 측정방법으로, 거더의 중앙 단면에 2개의 횡방향 변위계(A, B)와 1개의 수직방향 변위계(C)를 설치한다.

최초의 변위계 길이(A_0, B_0, C_0)와 거더 변형에 의해 변화된 길이(A_f, B_f, C_f)의 기하학적인 관계를 이용하여 식 (1)에 의해 변위계 설치 위치에서의 거더의 횡방향 변형량(B_x)과 수직 변형량(B_y)을 계산할 수 있다. 이를 바탕으로 도심에서의 독립적인 수직 변형량과 횡변형량, 회전량을 계산한다. 구체적인 계산방법은 선행 연구를 참고한다 (Zhao et al., 1995; Kalkan and Hurff, 2012; Lee et al., 2017a & 2017b)

$$(B_0 - B_x)^2 + B_y^2 = B_f^2 \quad (1a)$$

$$(C_0 - B_y)^2 + B_x^2 = C_f^2 \quad (1b)$$

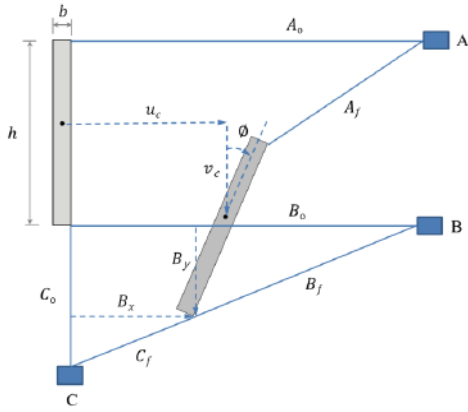


Fig. 5 Measurement method for the vertical and lateral displacements, taken from Lee et al. (2017a)

3.3 긴장력 가력 및 측정

설치된 거더 시험체에 프리스트레스 긴장력을 가하기 위하여 긴장재에 긴장력을 가하는 장치와 그 크기의 변화를 모니터링할 수 있는 장치를 고안, 제작하였다. 시험체를 관통한 긴장재의 한 쪽 단부에는 긴장재에 긴장력을 부가할 수 있는 가압부를 다른 쪽 단부에는 초기 긴장력과 긴장력의 변화를 측정할 수 있는 측정부를 설계하였다.

긴장력을 가하는 방법은 볼트(Bolt)와 너트(Nut)의 원리를 이용하였다. Fig. 6(a)에 보인 바와 같이 볼트를 회전시켜 너트부를 외측방향으로 이동시킴으로써 긴장재에 긴장력을 부가한다. 즉, 너트부가 나선선에 의해 이동된 거리에 따라 긴장재에 부가되는 초기 긴장력을 조절할 수 있다.

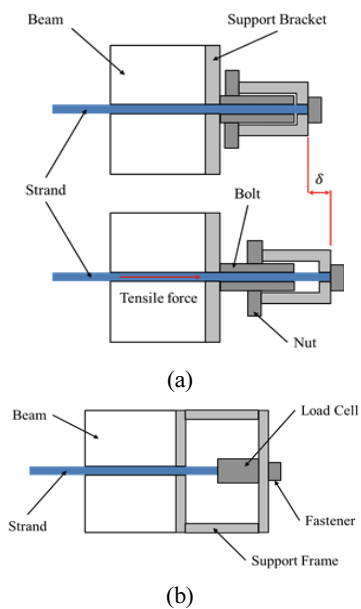
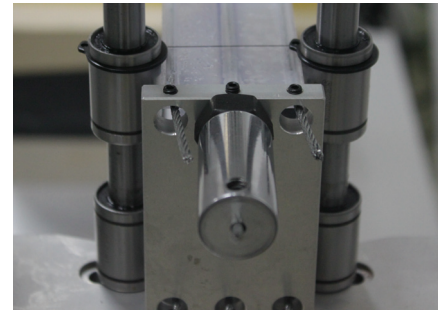
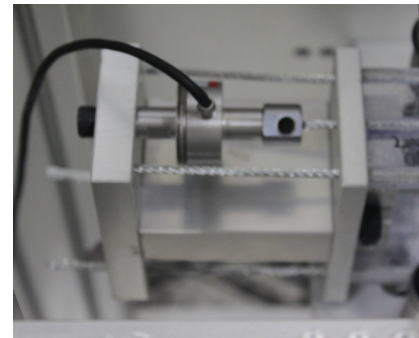


Fig. 6 Measurement method of prestressing force: (a) applying prestressing force and (b) measurement of prestressing force

거더의 다른 쪽 단부에는 긴장재에 가해지는 초기 긴장력과 하중 가력에 의해 발생하는 긴장력의 변화를 측정할 수 있는 장치를 설치하였다. Fig. 6(b)에 보인 바와 같이 로드셀을 긴장재에 결합함으로써 초기 긴장력 뿐만 아니라, 하중 가력에 의한 변화량을 측정할 수 있다. Fig. 7은 실제 실험에 적용된 긴장재 가력부분과 긴장력 측정부분을 보여준다.



(a)



(b)

Fig. 7 Photos of the prestressing equipments installed at the both ends of the beam specimen: (a) applying the prestressing force to a strand and (b) measurement of the prestressing force

4. 실험결과 및 고찰

4.1 하중-변위 곡선

긴장력의 위치와 크기에 따른 거더의 횡비틀림 실험을 수행하여 수직방향과 횡방향, 비틀림 변형을 측정하였다. Fig. 8은 긴장력을 작용하지 않은 SC 거더 시험체의 하중-변위 곡선이다. 상부 플랜지는 하중의 증가와 함께 횡방향 변형이 점진적으로 증가하였으나, 상부 플랜지는 횡비틀림 불안정성이 발생하는 임계하중(Critical Load) 근처에서 급격하게 증가하였다. 이는 하중 증가와 함께 상부 플랜지의 횡방향 변형이 비틀림 변형과 함께 발생됨을 의미한다.

긴장력이 적용된 ST 및 SB 거더 시험체의 하중-변위 곡선은 Fig. 9에 나타내었다. SC 시험체의 임계하중과 비교 시 상부 플랜지에 긴장력이 작용된 ST 시험체는 횡비틀림 불안정

성을 유발시키는 임계하중이 감소되었다. 반면에 하부 플랜지에 긴장력이 작용된 SB 시험체는 임계하중이 증가하는 경향을 보였다. 또한, 긴장력의 크기가 증가함에 따라 임계하중의 차이를 확인할 수 있었다.

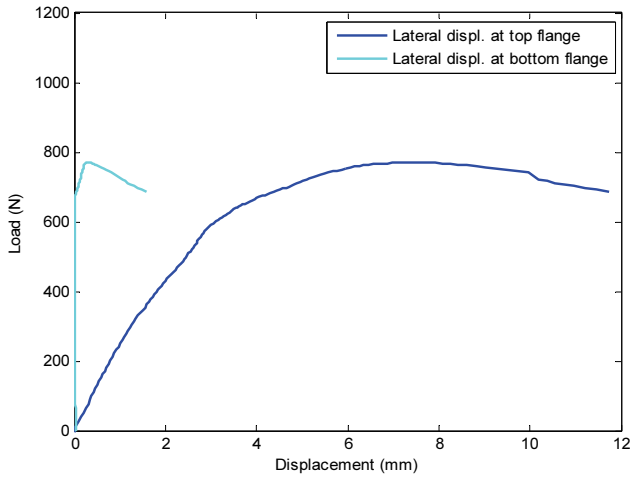


Fig. 8 Load and lateral displacement curves for the SC beam specimen

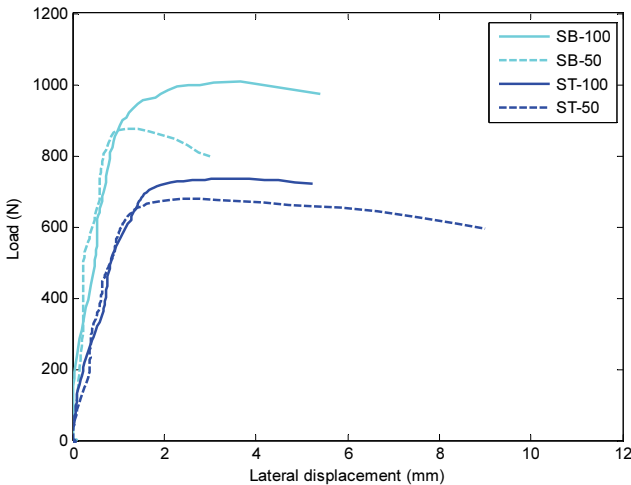


Fig. 9 Examples of load and lateral displacement curves for the ST-50, ST-100, SB-50, and SB-100 beam specimens

4.2 긴장력과 임계하중

수직하중을 받는 I-형 거더의 횡비틀림 임계하중 M_{ocr} 은 다음과 같이 계산할 수 있다 (Kirby and Nethercot, 1997; Chen and Lui, 1987).

$$M_{ocr} = C_b \frac{\pi}{L} \sqrt{\frac{EI_y GJ}{1 - (I_y/I_x)}} \sqrt{1 + w^2} \quad (2)$$

$$w = \frac{\pi}{L} \sqrt{\frac{EC_w}{GJ}} \quad (3)$$

여기서, I_x 와 I_y 는 각각 강축과 약축에 대한 단면 2차 모멘트, EI_y = 휨강성, GJ = 비틀림 강성, EC_w = 뒤틀림 강성, L = 보의 지간이다. C_b 는 하중의 작용위치 및 단면의 경계조건을 고려한 계수이다.

식 (2)는 프리스트레스 긴장력이 작용되지 않은 보 구조물의 탄성 횡비틀림 안정성을 평가하기 위한 것이다. 긴장력이 작용되는 경우는 Fig. 10과 같이 압축력에 대한 기둥 안정성 (Column Stability)과 긴장력 편심에 의한 모멘트를 고려한 횡비틀림 안정성으로 구분하여 고려되어야 한다. 거더 시험체에 기둥 불안정성을 유발시킬 수 있는 임계하중은 탄성계수가 2200 MPa 일때 약 1560 N 이다. 거더 시험체에 작용된 프리스트레스 긴장력은 500, 1000 N 으로 기둥의 불안정성을 유발하는 임계하중보다 낮은 하중 범위에 있다. 실제 프리스트레스 거더에 적용되는 긴장력도 기둥의 불안정성을 유발하지 않는 범위내에 있다. 또한, Fig. 11과 같이 긴장재 일축인장 실험을 실시하여 약 1100 N 까지 하중을 가한 후 제거 하였을 때 잔류변형 없이 원래의 상태로 회복하였다. 따라서, 적용된 긴장력 500, 1000 N는 탄성범위내에 있음을 확인하였다.

따라서, 프리스트레스 보 구조물의 탄성 횡비틀림 임계하중 M_{cr} 은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$M_{cr} = M_{ocr} + M_{pre} \quad (4)$$

여기서, M_{ocr} 는 식 (2)로부터 계산되어지며, M_{pre} 은 긴장력의 작용 편심에 의해 발생하는 모멘트이다. Fig. 10과 같이 긴장력 F 가 단면의 도심에서 하부방향으로 편심 e 만큼 떨어져서 작용하는 경우는 $M_{pre} = F \times e$ 이다. 반대로 상부에 편심 e 만큼 떨어져서 작용하는 경우는 음(-)의 값이 된다.

식 (4)에 의해 계산되어진 횡비틀림 임계하중값과 실험값을 Table 3에 비교하였다. 프리스트레스 긴장력이 없는 SC 거더 시험체는 해석값과 실험 평균값의 비율이 0.99로 매우 유사하게 나타났다. 하부 플랜지에 500, 1000 N 긴장력이 작용된 SB-500, SB-1000 시험체는 SC 시험체에 비해 임계하중이 비례적으로 각각 약 10, 20% 증가하였다. 제안식 (4)에 의해 계산되어진 임계하중은 긴장력이 500, 1000 N 일 때 실험값과 유사하게 약 9, 18% 증가하였다. 긴장력이 상부 플랜지에 작용한 ST 시험체는 횡비틀림 임계하중이 감소하는 경향은 보였다. 그러나, SB 시험체와 달리 긴장력의 크기에 따라 비례적으로 감소하지는 않았다. 이는 시험체 설치 시 수직하중의 편심, 횡방향 경계조건에서의 마찰 저항, 거더의 초기 기하적 변형 등의 영향으로 판단된다.

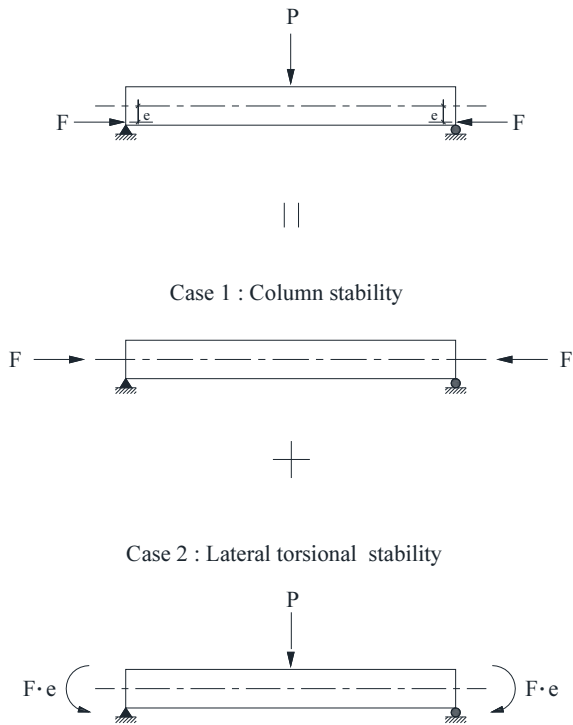


Fig. 10 Stability analysis of a prestressed beam

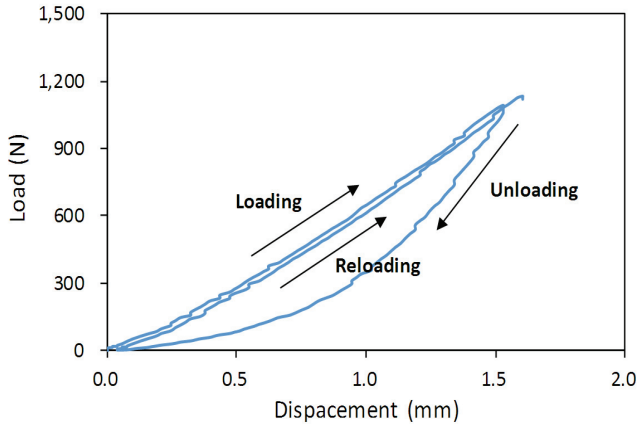


Fig. 11 Load and displacement hysteresis of the tendon

Table 3 Mean critical loads from the measurements and proposed equation

Specimens	Critical load (N)		$\frac{P_{cr}^e}{P_{cr}^m}$
	Measured (P_{cr}^m)	Predicted (P_{cr}^e)*	
SC	777	772	0.99
ST-500	634	703	1.11
ST-1000	722	636	0.88
SB-500	858	840	0.98
SB-1000	934	908	0.97

* Modulus of elasticity E is taken as 2200 MPa.

Fig. 12는 긴장력의 위치와 크기에 따른 횡비틀림 실험임계 하중값과 식 (4)에 의해 계산되어진 임계하중값을 비교한 것이다. 해석값에 의하면 횡비틀림 임계하중은 긴장력의 크기에 따라 선형적으로 변화하였다. 긴장력이 단면 도심의 하부에 작용하는 경우는 횡비틀림 안정성을 증가시키는 방향으로 비례적으로 증가하였고, 상부에 작용하는 경우는 횡비틀림 안정성을 감소시켰다. 실험값과 비교 시 앞서 기술한 바와 같이 하부에 긴장력이 작용한 경우는 해석값과 매우 유사한 경향과 값을 보였다. 상부에 긴장력이 작용한 경우는 실험값이 해석값과 유사하게 횡비틀림 안정성을 감소시키는 경향을 보였지만, 긴장력의 크기에 따른 비례적인 감소 경향은 나타나지 않았다. 일반적인 경향 도출을 위해서는 거더의 초기 변형 측정과 함께 추가적인 실험변수를 고려한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

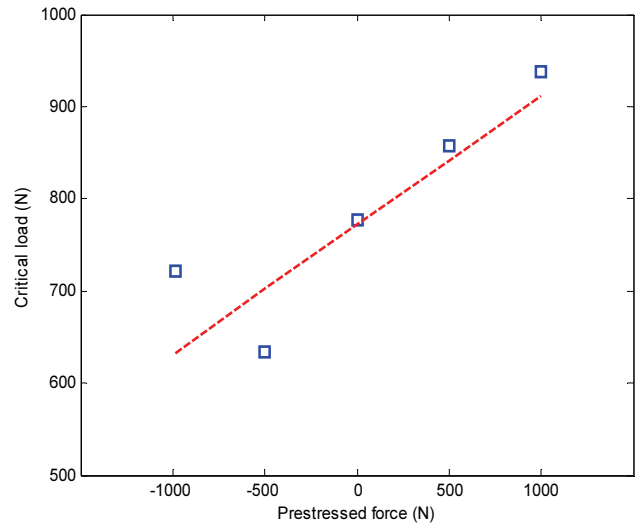


Fig. 12 Comparison of the critical loads measured from the test and those from the proposed equation

5. 결론

본 연구에서는 비부착 긴장력이 횡비틀림 안정성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 프리스트레스트 거더 축소 모형 실험안을 제시하였다.

수직 하중 가력 시스템은 거더 상부 표면과 가압부가 점 상태로 접촉할 수 있도록 볼 지지체로 설계하였다. 볼 지지체는 볼-너치 형태로 볼의 이탈을 방지하면서 볼 지지체에서의 횡방향 구속을 제거하였다. 또한, 시험체 상부와 볼 접촉상태는 거더 시험체가 횡방향 및 비틀림 변형이 발생하더라도 수직 방향으로 가압될 수 있도록 하였다.

하중 시스템과 함께 횡비틀림 실험은 면내 및 면외방향

경계조건을 만족하여야 한다. 따라서, 거더의 상·하부 플랜지에서 횡방향 변위는 구속하면서, 자유 회전과 상하이동이 가능하게 함으로써 약축에 대한 회전 변형을 가능하게 하였다.

또한, 거더 시험체에 프리스트레스 긴장력을 부가하기 위하여 긴장재의 한 쪽 단부에는 긴장력을 가하는 부분, 다른 쪽 단부에는 긴장력의 크기를 측정하는 부분으로 설계하였다. 긴장재에는 볼트와 너트의 원리를 이용하여 볼트를 회전시켜 너트 부를 외측방향으로 이동시킴으로써 긴장력을 부가하였다.

긴장력의 위치와 크기에 따른 횡비틀림 안정성 실험결과, 하부 플랜지에 긴장력이 작용된 거더 시험체는 횡비틀림 안정성이 증가되었다. 반면에, 상부 플랜지에 긴장력이 작용된 시험체는 횡비틀림 불안정성을 유발하는 임계하중이 감소하였다.

따라서, 프리스트레스 거더에 적용되는 긴장력은 기둥의 불안정성을 유발시키지 않는 범위내에서 작용 긴장력의 편심에 의한 영향을 고려하여 횡비틀림 안정성을 평가하여야 한다. 본 연구에서는 긴장력의 위치와 크기에 따라 탄성 횡비틀림 안정성을 평가할 수 있는 해석식을 제안하였다. 제한된 실험으로 결론의 일반화는 어렵지만, 긴장력의 크기에 비례하여 긴장력이 단면 도심의 하부에 작용하는 경우는 횡비틀림 안정성을 증가시키는 방향으로, 상부에 작용하는 경우는 감소시키는 방향으로 작용하였다.

본 연구 결과는 제한적인 실험변수와 측정에 의한 것으로 일반적인 경향 도출을 위해서는 긴장력의 크기와 위치 등의 좀 더 다양한 실험변수와 거더의 초기 변형 등을 고려한 향후 연구가 필요하리라 여겨진다.

감사의 글

이 논문은 2017년 대구대학교 학술연구비 일부 지원에 의해 수행되어졌다.

References

Budinski, K. G., and Bundinski, M. R. (2009), *Engineering Materials: Properties and Selection*, Prentice Hall Career & Technology, 9th Edition, Pearson, London, Appendix B: Properties of Selected Engineering Materials.

Chen, W. F., and Lui, E. M. (1987), *Structural Stability: Theory and Implementation*. New York: Elsevier.

Daehyun hitech Co., *Engineering Plastic Characteristics and Usage*, Siheung, Korea, http://www.daehyun21.co.kr/product_pop/pop_pc.html.

Hansell, W., and Winter, G. (1959), Lateral Stability of Reinforced Concrete Beams, *ACI Journal*, 31(3), 193-213.

Kalkan, I. (2009), Lateral Torsional Buckling of Rectangular Reinforced Concrete Beams, Ph.D. dissertation, School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta.

Kalkan, I., and Hurff, J. B. (2012), Experimental Techniques for Lateral Stability Testing of Beams, *Experimental Techniques*, 39, 1-6.

Kim, S., Koo, K. Y., and Lee, J. J. (2016), Laboratory Validation of Bridge Finite Model Updating Approach By Static Load Input/Deflection Output Measurement, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 20(3), 10-17.

Kirby, P. A., and Nethercot, D. A. (1997), *Design for Structural Stability*, Suffolk: Granada Publishing.

Lee, J. H. (2012a), Behavior of Precast Prestressed Concrete Bridge Girders Involving Thermal Effects and Initial Imperfections during Construction, *Engineering Structures*, 42, 1-8.

Lee, J. H. (2012b), Investigation of Extreme Environmental Conditions and Design Thermal Gradients during Construction for Prestressed Concrete Bridge Girders, *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, 17(3), 547-556.

Lee, J. H. (2017), Evaluation of the Lateral Stability of Precast Beams on an Elastic Bearing Support with a Consideration of the Initial Sweep Load, *Engineering Structures*, 143, 101-112.

Lee, J. H., and Kalkan, I. (2012), Analysis of Thermal Environmental Effects on Precast, Prestressed Concrete Bridge Girders: Temperature Differentials and Thermal Deformations, *Advances in Structural Engineering*, 15(3), 447-459.

Lee, J. H., Jung, C. Y., Choi, E., and Cheung, J. H. (2017a), Vision-Based Multipoint Measurement Systems for Structural In-plane and Out-of-plane Movements Including Twisting Rotation, *Smart Structures and Systems*, 20(5).

Lee, J. H., Kalkan, I., Lee, J. J., and Cheung, J. H. (2017), Rollover Instability of Precast Girders Subjected to Wind Load, *Magazine of Concrete Research*, 69(2), 68-83.

Lee, J. H., Kim, K. H., and Cho, B. (2015), Analysis of Lateral Behavior of PSC Bridge Girders under Wind Load During Construction, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 27(4), 377-385.

Lee, J. H., Park Y. M., Jung, C. Y., and Kim, J. B. (2017b), Experimental and Measurement Methods for the Small-Scale Model Testing of Lateral and Torsional Stability, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 11(2), 377-389.

Magnel, G. (1950), *Prestressed Concrete*, Concrete Publications Ltd., London.

Massey, C. (1967), Lateral Instability of Reinforced Concrete Beams Under Uniform Bending Moments, *ACI Journal*, 64(3), 164-172.

Molke, E. C. (1956), Auditorium Framed with Prestressed Roof Girders, *ACI Journal*, 28(4), 363-373.

Nethercot, D. A., and Rockey, K. C. (1971), A Unified Approach to the Elastic Lateral Buckling of Beams, *The Structural Engineer*, 49(7), 321-330.

Polyfluo Asia Pte. Ltd., *Engineering Plastic Characteristics and Usage*, Singapore, Singapore, <http://www.polyfluo.com/product/engineering-plastics>.

PT. SBP Indonesia Co., *Engineering Plastic Characteristics and Usage*, Cibitung Bekasi, Indonesia, <http://www.sbpindonesia.co.id/product-features>

Revathi, P., and Menon, D. (2006), Estimation of Critical Buckling

Moments in Slender Reinforced Concrete Beams, *ACI Structural Journal*, 103(2), 296-303.

Sindo ILS Co., Engineering Plastic Characteristics and Usage, Daejeon, Korea, <http://www.sindoils.com/FaManual035.htm>

Stoddard, W. P. (1997), Lateral-Torsional Buckling Behavior of Polymer Composite I-Shaped Members, PhD thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA.

Zhao, X. L., Hancock, G. J., and Trahair, N. S. (1995), Lateral Buckling

Tests of Cold-formed RHS Beams, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 121(11), 1565-1573.

Received : 11/13/2017

Revised : 12/14/2018

Accepted : 02/22/2018

요 지 : 본 연구에서는 프리스트레스 긴장력의 위치와 크기에 따른 거더의 횡비틀림 안정성 실험을 수행하였다. 거더를 이용한 횡방향 거동 및 안정성 실험은 재료의 비선형성, 초기 기하학적 불완전성, 긴장력의 변화, 하중조건과 지지조건 등 다양한 변수에 의해 예상치 못한 결과를 발생시킬 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 프리스트레스 거더 축소 모형 실험안을 제안하여 긴장력에 의한 횡비틀림 안정성을 실험을 수행하였다. 하중가력조건과 면내 및 면외 지지조건을 만족하며 긴장력을 조절할 수 있는 실험장치를 제안하고 제작하였다. 실험결과 하부 플랜지에 긴장력이 작용하는 경우 횡비틀림 안정성을 증가시켰으며, 최종적으로 긴장력의 위치와 크기에 따라 횡비틀림 안정성을 평가할 수 있는 해석식을 제안하였다.

핵심용어 : 횡비틀림 안정성, 임계하중, 긴장력, 비부착 텐던, 거더
