

제형의 절곡형상 웨브가 적용된 보의 전단성능 검토

Review on Shear Capacity of Trapezoidal Corrugated Web Girder



이 서 행*
Lee, Seo-Haeng



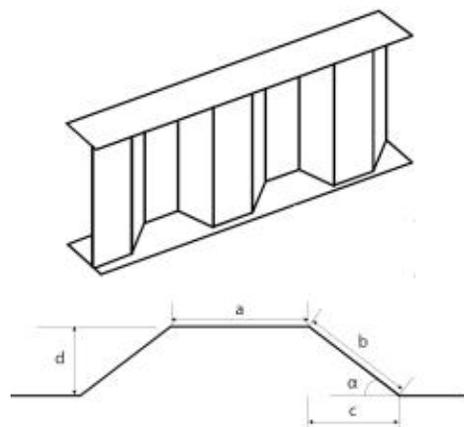
유 정 한**
Yoo, Jung-Han

1. 서론

장스팬 건물에 유리하여 단층 공장과 같은 곳에 주로 사용되는 시스템인 PEB (Pre-Engineered Building)는 응력분포에 따라 변단면의 형상으로 제작하는 경제적인 시스템이다¹⁾. 그러나 최근에 국내외에서 적설하중과 풍하중에 의해 PEB 구조로 제작된 건축물이 붕괴되는 사례가 증가하였다. 국내 외에서는 이를 대체할 절곡형의 강판을 웨브로 사용한 보를 개발하여 적용하고 있다²⁾.

교량 등의 토목분야에서도 사용되는 절곡형 강판은 Sine파형 또는 <Fig. 1>과 같이 수평패널과 경사패널로 이루어져 사다리꼴의 절곡형상을 갖는 부재를 말한다. 절곡형 강판을 웨브로 사용하면 평판 웨

브에 비해 높은 면외 방향 강성을 갖는다. 전단력에 대해서도 높은 강성을 나타내기 때문에 전단보강재를 생략할 수 있으며, 얇은 두께로 제작 가능하여 일반 평판 보에 보강재를 용접한 거더에 비해 30~60%의 자중을 감소시킬 수 있어³⁾ 경량화에 유리하다. 또한 절곡형 강판을 보의 웨브에 적용하면 아코디언 효과로 인해 웨브는 전단력에만 저항하며 상·하부 플랜지의 프리스트레스 효율을 높일 수 있다⁴⁾.



<Fig. 1> Trapezoidal corrugated web

* 서울과학기술대학교 건축과 석사과정
Dept. of Architecture, Seoul National University of Science and Technology

** 서울과학기술대학교 건축학부 부교수
School of Architecture, Seoul National University of Science and Technology

이와 같은 장점으로 국내외 항공, 교량 등에 적용되었으며, 건축물의 장경간 및 고층화 흐름에 절곡형 웨브의 적용은 상당히 큰 이점이 있을 것으로 보인다.

절곡형 강판 관련 선행 연구 및 실제 교량에 적용된 사례들은 경사패널 길이 b에 대한 수평 패널의 길이 a의 비 ($\beta = a/b$)는 2.0 이하가 대부분이며, 건축물에 적용할 β 는 2.0 이상으로 예상된다⁵⁾.

본 기사에서는 건축물에 적용에 적합한 절곡형 강판이 적용된 보의 전단성능을 평가하기 위해 절곡형 강판 기준인 Eurocode 및 이론식을 분석하였으며, 제형의 절곡형 강판의 웨브가 적용된 선행 실험연구결과를 토대로 유한요소해석 모델을 검증하여 검증된 해석모델을 바탕으로 절곡형상에 따른 전단성능에 대한 영향을 변수해석을 통해 설계기준과 비교하였다.

2. 절곡형 강판 전단 이론 및 설계식

2.1 절곡형 강판 전단 좌굴이론

절곡형 강판의 전단 좌굴이론에 대해서 기본이 되는 이론식을 소개하고자 한다. 절곡형 강판의 전단좌굴은 크게 국부좌굴, 전체좌굴, 연성좌굴(Interactive buckling)으로 나뉜다. 우선 국부좌굴은 절곡형상의 절곡형 강판 중 한 패널에서 발생하는 것으로, 판 좌굴이론을 토대로 한 Timoshenko and Gere(1961)⁶⁾이 국부좌굴이론식을 제시하였다.

$$\tau_{cr.L} = \frac{k_L \pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t_w}{a}\right)^2 \quad (1)$$

$$\text{where, } k_L = 5.34 + 4 \left(\frac{a}{h_w}\right)^2$$

전체좌굴은 좌굴이 절곡형 강판 웨브 전반에 발생하는 것으로, Easley(1975)⁷⁾의 이론식을 기본으로 하고 있으며 k_G 의 경우 연구자들마다 다른 식을 제시하고 있으나 전체좌굴응력에 큰 차이를 미치지 않는 범위 내에서 제시되고 있다.

$$\tau_{cr.G} = \frac{k_G D_x^{1/4} D_y^{3/4}}{h_w^2 t_w} \quad (2)$$

$$\text{where, } D_x = \frac{Et_w^3}{12(1-\nu^2)} \frac{w}{s}$$

$$D_y = \frac{EI_y}{w}$$

$$w = a + c$$

$$s = a + b$$

연성좌굴(Interactive buckling)은 국부좌굴과 전체좌굴의 복합작용으로 발생하는 가장 명확하지 않은 거동으로 많은 선행 연구가 이에 대한 명확한 거동을 표현하기 위해 수행되었다. 이론식의 경우 위에서 언급한 국부좌굴과 전체좌굴을 어느 정도 고려하며, 웨브 항복을 포함하는지 여부에 따라 다르다. 그 중, Abbas(2002)⁸⁾의 연구에서는 식 (4)와 같이 항복을 고려하지 않으며 $n=2$ 를 사용한 식을 제시하였다.

$$\frac{1}{\tau_{cr.I}} = \left(\frac{1}{\tau_{cr.L}}\right)^n + \left(\frac{1}{\tau_{cr.G}}\right)^n + \left(\frac{1}{\tau_y}\right)^n \quad (3)$$

$$\tau_{cr.I} = \sqrt{\frac{\tau_{cr.L} \tau_{cr.G}}{\tau_{cr.L}^2 + \tau_{cr.G}^2}} \quad (4)$$

2.2 구조설계 기준

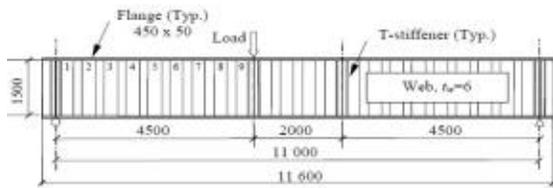
Eurocode3(2006)⁹⁾의 Annex D에서는 절곡형 강판을 적용한 보에 대한 전단강도 기준을 제시하고 있다. 전단강도의 계산은 식 (5)와 같이 국내 강구조 설계기준에서 제시하는 식과 유사하며 앞에 감소계수 χ_c 를 추가하고 있다.

$$V_{bw,Rd} = \chi_c \frac{f_{yw}}{\sqrt{3}} h_w t_w \quad (5)$$

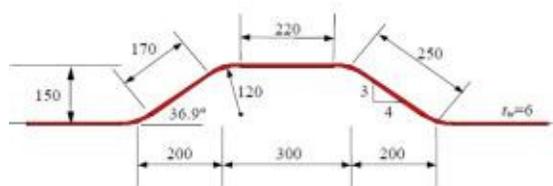
여기서 χ_c 는 식 (1), (2)를 가장 보수적인 조건으로 하여 간략화 한 뒤 각각의 국부좌굴과 전체좌굴에 대한 감소계수를 산정하여 그 중 최소값을 적용하는 방식이다.

3. 해석모델의 검증

본 기사에서는 ABAQUS를 이용하여 Sause et al.(2003)¹⁰⁾의 문헌에서 실시한 실험연구를 통해 해석모델의 검증을 실시하였다. 해당 문헌은 교량의



(a) Elevation of girder

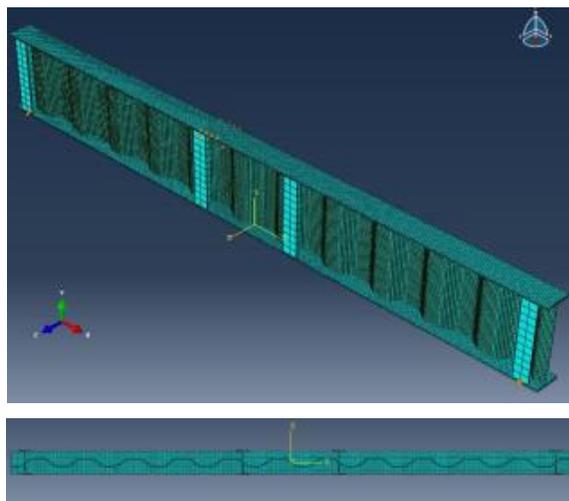


(b) Shape of corrugated web



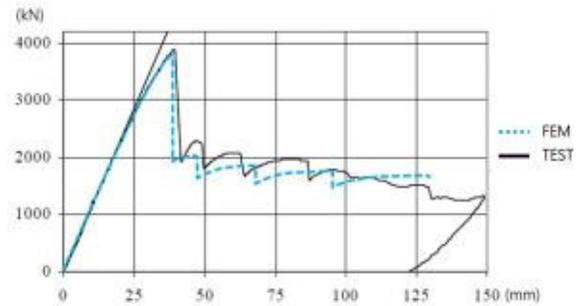
(c) Arrangement of girder

〈Fig. 2〉 Shape and layout of experiment¹⁰⁾



〈Fig. 3〉 Finite analysis model

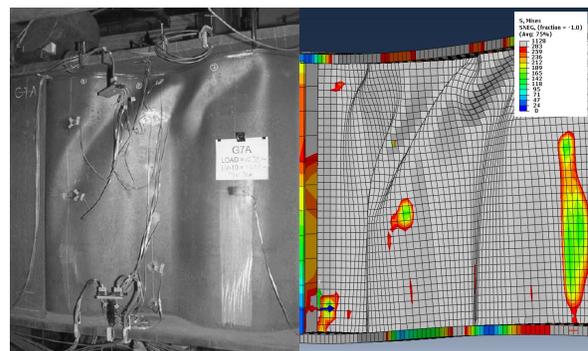
적용과 관련한 실험이며 $\beta = 1.2$ 이고, α 의 경우 36.9° 로 제작되었다. 사용된 강재는 HPS-485W이며, 실험체는 〈Fig. 2〉와 같이 보의 길이 11.6m, 웨브 높이 1,500mm, 두께 6mm이다. 〈Fig. 3〉과 같이 모델링하였다.



〈Fig. 4〉 Comparison of load-deflection graph between test and FEA

전체적인 비교를 위해 거동을 나타내는 하중-변위 그래프를 통하여 해석결과를 실험결과와 비교하였다. 전체적인 거동은 강성, 최대전단강도, 최대강도 이후 거동이 실험결과와 상당히 비슷하며 최대강도의 경우 약 2.18%의 오차를 보였다. 최대강도 도달 이후 웨브의 좌굴로 강도가 급격히 감소하였다.

〈Fig. 5〉와 같이 실험결과에서 좌굴이 나타난 부분을 등가응력도(Von-Mises stress)를 통해 비교해보았다. 연성좌굴에 가까운 거동을 보인 것과 좌굴이 발생한 형상과 위치가 유사하였으며, 전단응력의 크기 오차는 약 2.0%로 나타났다. 이는 해석모델이 실험체를 유사하게 모사하는 것으로 사료된다.



〈Fig. 5〉 Local comparison of results between test and FEA

4. 변수해석

검증된 해석모델을 통해 변수해석을 실시하였다. 절곡형상에 따른 전단강도의 영향을 파악하기 위해 α 와 β 를 주요 변수로 했으며, 이에 따라 변하는 변수를 제한하여 변수해석을 수행하였다. α 는 30~45° 로 설정하였으며, β 는 우선적으로 1.0~2.0로 설정하였다. 해석결과는 <Table 1>과 같다.

<Table 1> Comparison between Eurocode3 and analysis results

Analysis model	Shear resistance		
	Eurocode3 ①	Analysis results ②	②/① (%)
(1)	1681.13	2249.59	134
(2)	1681.14	2317.51	138
(3)	1681.14	2308.56	137
(4)	1681.14	2314.35	138
(5)	2030.50	2563.12	126
(6)	1434.35	2131.25	149

모든 모델이 웨브의 전체적인 항복 또는 국부좌굴이 지배하는 거동으로 나타나게 변수를 설정하였으나, 대부분의 모델이 연성좌굴에 가까운 거동을 보이며 최대강도에 도달하였다. 전단내력 또한 Eurocode와 비교하였을 때 평균 1.37배 이상 크게 나타났다.

5. 결론

본 기사에서는 절곡형 강판을 적용한 보의 전단 성능에 관하여 이론적 배경을 바탕으로 해석모델의 검증 및 변수해석 결과를 살펴보았다. 절곡형상에 따른 전단내력에 끼치는 영향은 명확히 확인할 수 없었으나, 설계기준은 보수적인 가정을 토대로 전단성능에 대하여 상당히 안전측으로 설계식을 제시하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 건축물에 적절하고 안전하며 경제적인 절곡형 강판 웨브 보의 적용을 위해 개선된 설계식이 필요하며, 보다 심층적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

References

1. Park, M. W. and Do, B. H., "Pre-Engineered Metal Building System : Overview and Application", Journal of Korean Association for Spatial Structures, v.14 n.1, 2014, pp.12~21
2. Ju, Y. K. and Lho, S. H., "Evaluation of Structural Performance of Ultra-PEB", Journal of Korean Association for Spatial Structures, v.14 n.1, 2014, pp.22~26
3. Hamilton, R. W., "Behavior of welded girders with corrugated web", PhD Thesis, University of Maine, Orono, Maine, Canada
4. Metwally, A. E., and Loov, R. E., "Corrugated steel webs for prestressed concrete girders," RILEM, Materials and Structures, Vol. 36, No. 3, 2003, pp.127-134.
5. Kim, Y. S., Lho, S. H., Park, M. W., Do, B. H., Ju, Y. K. and Kim, S. D., "Shear Capacity of Corrugated Web Beam for Roof Frame of Industrial Buildings", Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol. 28, No. 9, 2012, pp.57~65.
6. Timoshenko, S. and Gere, J(1961), Theory of Elastic Stability 2nd Ed., McGraw-Hill Publishing Co.
7. Easley, J.(1975), "Buckling Formulas for Corrugated Metal Shear Diaphragms", Journal of the Structural Division, Vol.101, NO.7, pp.1403~1417
8. Abbas, H. H., Sause, R., Driver, R. G., "Shear strength and stability of high performance steel corrugated web girders" Proc., Annual Stability Conf., Structural Stability Research Council, pp.361-387
9. Eurocode 3(2006), Design of steel structures - Part 1-5: Plated structural elements, pp.51~52.
10. Sause, R., Abbas, H., Wassef, W., Driver, R., Elgaaly, M.(2003), "Corrugate Web Girder Shape and Strength Criteria", ATLSS Reports, Paper245.