

슈퍼대골형 파형강판 볼트 이음부 휨강도 평가 실험 연구

박영석¹ · 최광수² · 박연철^{3*}

¹교수, 명지대학교, 토목환경공학과, ²前석사과정, 명지대학교, 토목환경공학과, ³선임연구원, 서울대학교, 건설환경종합연구소

Experimental Study on Flexural Strength of Bolted Connection in Extra-deep Corrugated Steel Plates

Park, Young-Suk¹, Cui, Guangzhu², Park, Yeun-Chul^{3*}

¹Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Yong-in, 17058, Korea

²Former master course, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Yong-in, 17058, Korea

³Senior researcher, Institute of Construction and Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul, 08299, Korea

Abstract - Experimental study was conducted to verify the flexural strength of bolted connections in box type structure using extra-deep corrugated steel plates. Ninety specimens considering two and three rows of bolt arrangement, web bolts and concrete filling were tested for bending. Specimens having three rows of bolts with web bolts showed the highest flexural strength and satisfied Korean Design Standard. Flexural strength of the bolted connections in concrete filled corrugated plates showed at least 2.2 times higher flexural strength compared to the strength of single plate. Therefore, flexural strength of the bolted connections in these structures could be considered as the plastic moment of two corrugated plates.

Keywords - Extra-deep corrugated steel plate, flexural strength, experimental study, bolted connections, steel structure

1. 서론

파형강판 구조는 골의 형태에 따라서 표준형과 대골형이 주로 사용되어 왔으나 최근에는 Fig. 1.과 같이 골 간격이 500mm인 슈퍼대골형 파형강판(Extra-deep Corrugated Steel Plate, EXDEC)이 개발되었다^[1]. 아치형 구조와는 달리 박스형 구조는 휨이 지배하는 구조로서 Fig. 2.와 같이 크라운부와 한치부에 큰 모멘트가 발생한다. 설계기준에서는 파형강판 자체의 휨강도를 단면의 소성모멘트(M_p)를 사용하여 제시하고 있다.

볼트 이음부에서는 휨강도 저하가 발생할 수밖에 없으나^[2] AASHTO^{[3],[4]}, CAS^[5], AS/NZS^[6]와 같은 해외 설계기준에서는

이음부의 강도 저하를 고려한 휨강도를 제시하지 않고 실험 또는 다른 설계기준을 준용하여 휨강도를 산정하도록 하고 있다. 이음부의 강도 저하를 고려한 휨강도를 제시하지 않고 실험 또는 다른

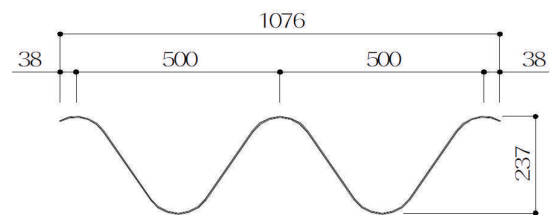


Fig. 1. Cross-section and dimensions of EXDEC

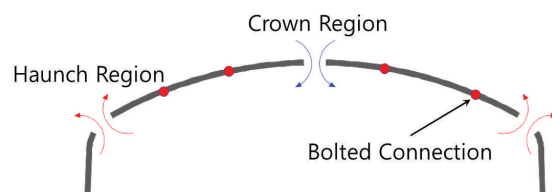


Fig. 2. Box type corrugated plate structure

Note.-Discussion open until April 30, 2019. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on September 30, 2018; revised October 07, 2018; approved on October 08, 2018.

Copyright © 2018 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-02-880-1538 Fax. +82-2-885-1081

E-mail. ryan1886@gmail.com

설계기준을 준용하여 휨강도를 산정하도록 하고 있다. 국내 강구조설계기준에서는 이음부의 휨강도를 단면 소성모멘트의 75% 이상으로 산정하도록 하고 있다.^[7] 그러나, 이음부의 볼트 개수 또는 배치에 따른 휨강도를 명확히 제시하지는 못하는 실정이다.

파형강판의 골 간격이 400mm인 대골형 파형강판에 대한 연구는 지속적으로 진행되어 왔으나^{[8],[9],[10],[11],[12]}, 슈퍼대골형 파형강판에 대한 연구는 이제 시작되는 단계이다. 본 연구에서는 슈퍼대골형 파형강판이 박스형 구조물에 적용되었을 경우 극한 휨강도를 구하기 위한 실험을 수행하여 원래의 파형강판 소성모멘트인 M_p 와의 비를 제시하였다.

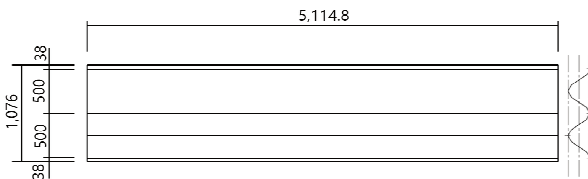
이음부가 없는 시험체를 사용하여 원강판의 소성모멘트 M_p 를 구하고, 이음부가 있는 직선 시험체를 사용하여 구하였다. 지간이 긴 박스형 구조에 주로 사용되는 콘크리트를 충전한 파형강판에 대한 극한 휨강도를 구하기 위한 실험을 수행하였다.

2. 실험 개요

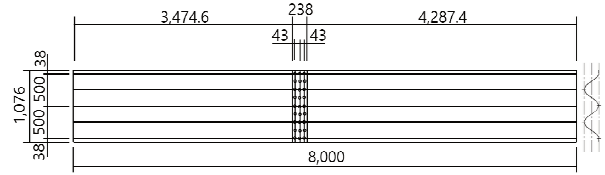
2.1. 시험체 종류

휨강도 실험에 사용된 파형강판의 두께는 4.0mm, 5.0mm, 6.0mm, 7.0mm, 8.0mm로 다섯 종류의 강판 두께를 사용하였다. 각각 강판 두께 별로 시험체의 형태는 Fig. 3.와 같이 여섯 가지 형태의 시험체를 사용하였다. Type-1은 이음부가 없는 강판으로 시험체 제원은 Fig. 3.(a)에 나타내었다. Type-2, 3, 4는 볼트 이음부가 있는 시험체로서 볼트의 배치 및 시험체의 제원은 Fig. 3.(b), (c), (d)에 나타내었다. 지간이 긴 경우에는 Fig. 4.와 같이 두 장의 파형강판을 마름모형으로 조립하여 콘크리트를 충전하여 사용한다. Type-5와 6은 마름모형 파형강판에 콘크리트를 충전시킨 경우로서 골이 만나는 면에 볼트를 체결하고 전단연결재를 용접하였다. 볼트의 배치 및 시험체 제원은 Fig. 3.(e), (f)에 나타내었다. 이음 볼트로는 M22, F13T 고장력 볼트를 사용하였고, 볼트 체결 시 위서를 적용하였다.

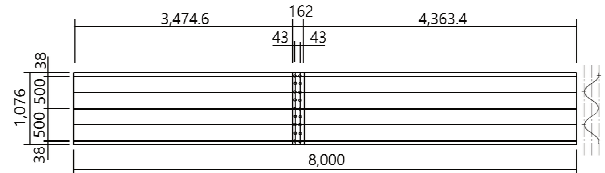
모든 시험체의 파형강판의 강종은 SS590을 사용하였고, 각 두께 및 Type 당 3개의 시험체를 사용하여 총 84개의 시험체가 사용되었다.



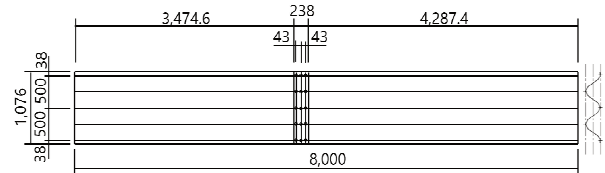
(a) Type-1: Corrugated plate without bolted connection



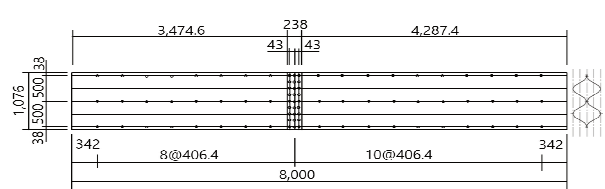
(b) Type-2: 3 rows, with web bolts



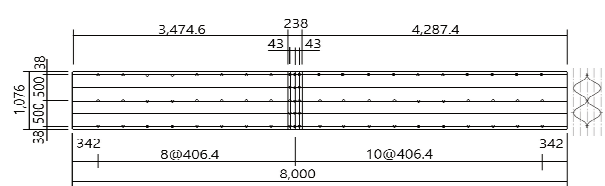
(c) Type-3: 2 rows, with web bolts



(d) Type-4: 3 rows, without web bolts



(e) Type-5: concrete filled, 3 rows, with web bolts



(f) Type-6: concrete filled, 3 rows, without web bolts

Fig. 3. Six types of specimens for the bolted connections (unit: mm)

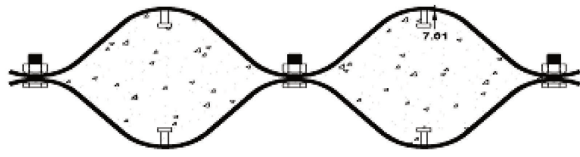


Fig. 4. Cross-section of concrete filled specimen

2.2. 실험 방법

휨 실험에 사용된 4점 재하 실험장치 구성 및 제원을 Fig. 5.에 나타내었다. Type-1 시험체의 지간은 4,500mm이고 지점으로 부터 가력점까지의 거리는 1,550mm이다. 이음부를 가지고 있는 다른 모든 시험체들은 지간이 7,500mm이고 지점과 가력점까지의 거리는 2,550mm이다.

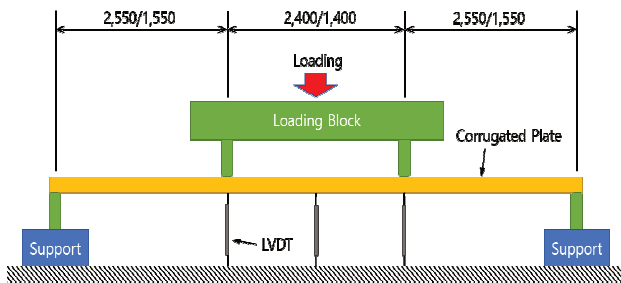
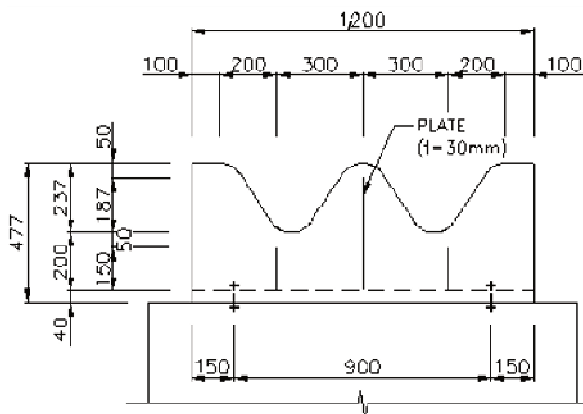
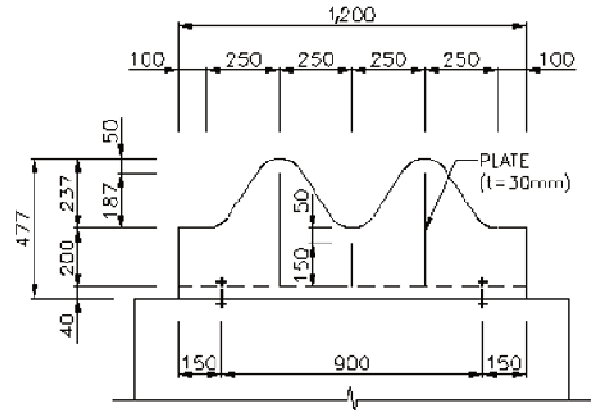


Fig. 5. Four-point loading test setup (unit: mm)

가력부와 지점부에는 Fig. 6.과 같이 강판과 동일한 파형을 가지는 지그를 설치하여 파형강판과 완전히 밀착되도록 하였다. 이를 통해 하중 재하부에서 파형강판의 단면 전체가 고르게 하중을 받을 수 있도록 하였다. 파형강판의 중앙 경간과 가력위치 하부에 LVDT를 설치하여 수직 변위를 측정하였다.



(a) Fixture at loading points



(b) Fixture at supports

Fig. 6. Fixtures for loading points and supports (unit: mm)

3. 실험 결과

휨 실험 시 4점 재하 실험을 실시하였고 시험체의 극한 하중을 사용하여 극한 모멘트를 구하였다. 극한 모멘트는 최대하중이 작용할 때 순수 휨 상태인 지간 중앙부에서의 극한 모멘트로서 지점 반력과 지점에서 하중 재하점까지의 거리를 곱하여 구하였다. Type-1 시험체의 하중-변위 곡선은 Fig. 7.과 같고, 시험체가 휨 파괴를 일으킨 후의 사진은 Fig. 8.과 같다. 모든 시험체의 하중-변위 곡선은 최대 하중의 크기는 다르나 비슷한 변화 경향을 보였다. 볼트 이음부가 있는 시험체의 파괴 형상을 보면 압축부 파형 봉우리에서는 판의 국부적인 압축 좌굴이 발생하였고, 인장 부인 파형강판의 골 부분에서는 볼트 연결부 강판이 슬립을 일으킨 후 볼트 구멍이 찌그러지거나 강판이 찢어지는 현상이 발생하였다. 이러한 파괴 양상은 모든 시험체에서 유사하게 발생하였다. 그러나 판 두께 8.0mm인 콘크리트 충전 시험체(Type-5와 6)는 이음부의 연결 볼트가 파단되는 파괴 유형을 나타내었다.

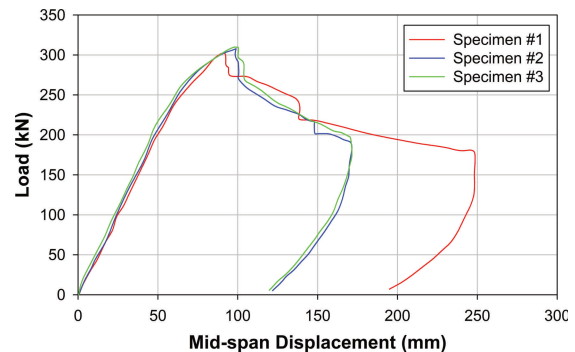


Fig. 7. Load-displacement curve of 4.0 mm thick Type-1



Fig. 8. Failure of Type-1

휨 실험으로 얻은 극한 하중으로부터 극한 모멘트를 구하였다. 파형강판 시험체의 폭은 1,076mm이지만 실제 구조물에서 파형강판이 접치게 되는 부분을 제외하고 1,000mm를 유효폭으로 산정하였다. Table 1은 4.0mm 두께의 파형강판 실험결과를 나타낸다. 각 Type 당 세 개의 실험체로부터 얻은 극한 하중이 매우 일정한 것을 볼 수 있다. 각 Type 별 극한하중의 표준편차는 0.3 kN/m부터 14.3kN/m의 범위에 있고 극한하중의 평균과 비교하여 매우 작다. 따라서 파형강판의 휨강도 산정을 위한 극한모멘트는 세 개의 실험체로부터 구한 값의 평균을 사용하였고 Table 2에 정리하였다.

Table 1. Bending test results of 4.0 mm thick plate

Specimen Types	Shear span (mm)	Ultimate load (kN/m)	Ultimate flexural moment (kN·m/m)
Type-1	1,550	303.7	235.3
		309.5	239.9
		310.1	240.3
Type-2	2,550	147.2	187.6
		142.1	181.1
		141.9	180.9
Type-3	2,550	114.9	146.5
		114.4	145.9
		114.5	145.9
Type-4	2,550	113.5	144.7
		109.2	139.2
		112.5	143.4
Type-5	2,550	431.9	550.6
		445.1	567.6
		460.4	587.1
Type-6	2,550	344.3	439.0
		324.0	413.0
		342.1	436.2

Table 2. Averaged ultimate flexural moment (unit: kN·m/m)

Thickness (mm) \ Types	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0
Type-1	238.5	303.4	383.1	470.4	555.0
Type-2	183.2	242.4	316.7	379.4	416.9
Type-3	146.1	194.6	265.2	-	-
Type-4	142.4	213.6	261.6	300.0	362.1
Type-5	568.4	831.6	1,090.6	1,256.8	1,464.0*
Type-6	429.4	644.0	824.8	938.4	956.7*

* Bolt failure at joint

휨 실험으로부터 구한 Table 2의 평균극한모멘트를 강판의 공칭두께 및 공칭강도에 대한 표준값으로 환산하기 위하여 보정을 할 필요가 있다. 강판 두께에 대한 보정은 소재인장실험용 실측 강판 두께에 대한 공칭 두께의 비를 곱하여 계산하였고, 강도 보정은 소재인장실험 항복강도에 대한 해당 강판의 설계항복강도의 비를 곱하여 계산하였다. 시험체에 사용한 SS590 강재의 강판 두께 및 강도 보정계수는 각각 Table 3과 4와 같다.

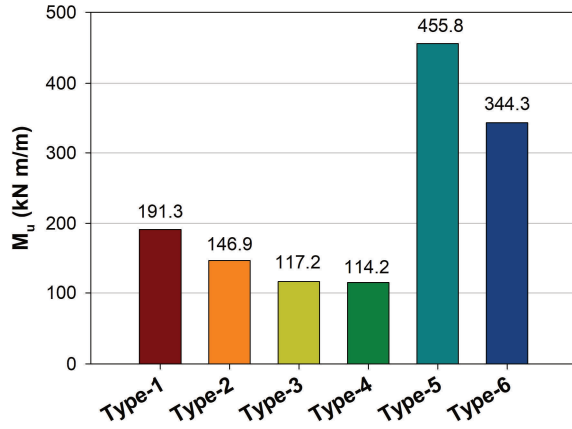
Table 2의 평균극한모멘트에 Table 3과 4의 강판 두께 별 강도에 대한 보정계수를 사용하여 구한 보정 극한강도 M_u 를 Fig. 9에 나타내었다.

Table 3. Thickness correction factors

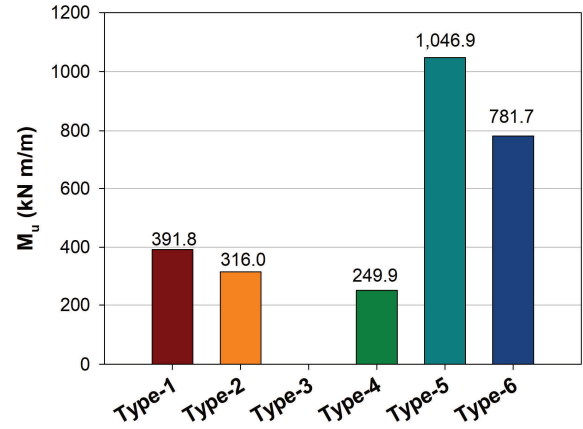
Nominal thickness (mm)	Measured thickness (mm)	Correction factor
4.0	4.03	0.99
5.0	5.10	0.98
6.0	6.08	0.99
7.0	7.17	0.98
8.0	7.99	1.00

Table 4. Strength correction factors

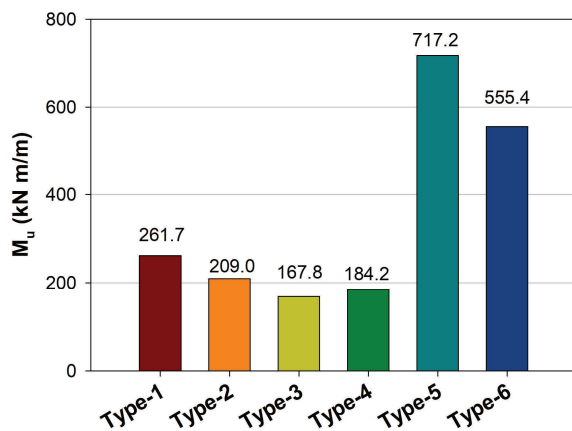
Nominal thickness (mm)	Nominal yield strength (MPa)	Measured yield strength (MPa)	Correction factor
4.0	450	559	0.81
5.0		513	0.88
6.0		539	0.83
7.0		528	0.85
8.0		532	0.85



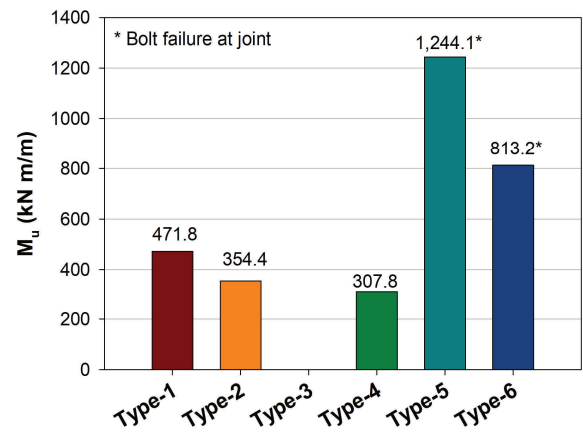
(a) Plate thickness of 4.0 mm



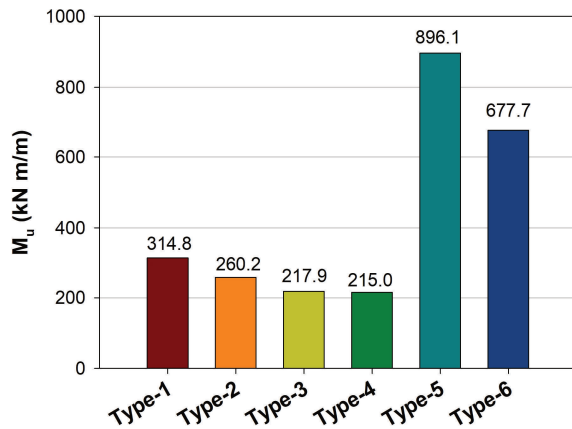
(d) Plate thickness of 7.0 mm



(b) Plate thickness of 5.0 mm



(e) Plate thickness of 8.0 mm

 Fig. 9. Corrected ultimate flexural strength M_u


(c) Plate thickness of 6.0 mm

4. 볼트 이음부 휨강도 평가

파형강판의 휨강도 계산에 사용되는 단면의 소성모멘트 M_p 는 이론적으로 다음의 식으로 구한다.

$$M_p = f_y \times Z \quad (1)$$

여기서 f_y 는 강판의 설계항복강도(MPa)이고 Z 는 파형강판의 단면계수(mm^3/m)이다.

슈퍼대골형 파형강판의 두께별 소성단면계수 Z 와 실험에 사용된 강재인 SS590에 대한 항복강도를 사용하여 구한 극한 소성모멘트 M_p 를 Table 5에 나타내었다. Fig. 9.에서의 극한강도 M_u 와 Table 5에서의 단면의 소성모멘트 M_p 의 비를 구하여 Table 6에 나타내었다. 이를 통해 볼트 이음부로 인한 휨강도의 저하를 평가할 수 있다.

볼트 이음부가 있는 시험체에서는 이음부가 없는 시험체와 비교하여 극한강도 저하가 발생했고 각 Type 별 극한 휨강도 비율이 모든 시험체에서 비슷한 양상을 보인다. 복부볼트가 없는 경우에는 있는 경우에 비해 휨강도 저하가 크게 발생하였다. 3열 배치의 경우 복부볼트가 있는 Type-2에 비해 복부볼트가 없는 Type-4는 10% 이상의 극한강도 저하를 보였다. 콘크리트를 충전한 Type-5와 6 시험체에서도 복부볼트가 있는 Type-5에 비해 복부볼트가 없는 Type-6은 약 30% 이상의 극한 강도 저하를 나타냈다. 이러한 결과는 복부볼트의 사용으로 유의미한 정도의 휨강도 향상을 기대할 수 있음을 보여준다.

볼트 배열에 따라 극한 강도 변화도 확인되었다. Type-2와 3의 극한강도를 비교해보면 볼트를 3열 배치한 경우와 비교하여 2열 배치한 경우 모든 두께의 강판에서 약 15% 이상의 강도저하가 확인되었다.

현행 건설기준에는 이음부의 휨강도를 단일 강판 소성모멘트의 75% 이상으로 평가한다. 실험결과는 4.0mm 보다 두꺼운 파형강판은 볼트를 3열배치하고 복부볼트를 사용하는 경우 단일 강판 소성모멘트의 84% 이상 강도가 발현되는 것을 확인하였다. 복부볼트가 없거나 볼트를 2열로 배치하는 경우에는 설계기준에서 제시하는 이음부 휨강도보다 낮은 강도를 보였다.

시간이 길어 휨모멘트가 크게 발생하는 경우에 두 장의 강판을 조립하고 콘크리트를 충전하여 사용한다. 이 경우 콘크리트가 충전되지 않으면 볼트 이음부에서는 단일 강판 두 장의 휨강도보다 큰 강도저하가 발생되어야 한다. 그러나 콘크리트를 충전시킴으로써 복부볼트가 있는 Type-6에서는 2.9~3.1배 정도의 휨강도를 발휘하고, 복부볼트가 없는 경우에도 4.0mm 강판을 제외하고는 2.2배 이상의 휨강도를 발휘한다. 3열 배치 및 복부볼트를 사용한 Type-2의 경우 단일 강판 이음부의 휨강도에 비해 콘크리트를 충전한 시험체인 Type-5의 휨강도는 최소 3배 이상의 휨강도를 발휘함을 알 수 있다.

Table 5. Plastic section modulus and plastic moment of SS590

Plate Thickness (mm)	Plastic Section Modulus, Z (mm ³ /m)	Plastic Moment, M _p (kN · m/m)
4.0	441.0	198.4
5.0	552.2	248.5
6.0	663.8	298.7
7.0	769.2	346.1
8.0	879.8	395.9

Table 6. Ratio of ultimate flexural strength and plastic moment, M_u /M_p

Thickness (mm) \ Types	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0
Type-1	0.96	1.05	1.05	1.13	1.19
Type-2	0.74	0.84	0.87	0.91	0.90
Type-3	0.59	0.68	0.73	-	-
Type-4	0.58	0.74	0.72	0.72	0.78
Type-5	2.30	2.88	3.00	3.02	3.14*
Type-6	1.74	2.24	2.26	2.26	2.06*

* Bolt failure at joint

5. 결론

박스형 파형강판 구조물의 휨이 발생하는 구간에서의 볼트 이음부 휨강도 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1) 얇은 강판이 휨을 받을 때 극한상태에서 압축을 받는 부분에서는 판의 국부좌굴이 발생하고 인장을 받는 부분에서는 볼트 구멍이 찌그러지거나 찢어지고, 두꺼운 강판에서는 볼트 파단이 발생하였다.

2) 동일한 3열 볼트 배열의 경우에 복부볼트의 추가만으로도 휨강도가 10% 이상 증가되었다. 또한 볼트를 3열 배치하는 경우에 2열 배치에 비해 15% 이상의 휨강도가 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 실험 결과로부터 슈퍼대골형 파형강판의 휨 설계에는 3열 이상의 볼트 배열과 복부볼트를 사용하는 것이 구조적으로 효율성 증가에 기여하는 것을 확인하였으며 현행 강구조 설계기준을 만족시킬 수 있다.

3) 두 장의 강재 사이에 콘크리트를 충전하는 경우 단일 강판 이음부에 비해 매우 큰 휨강도 증가를 보여준다. 볼트 이음부로 인한 휨강도 저하가 있음에도 불구하고 콘크리트를 충전하는 경우 단일 강판의 2.2배 이상, 볼트 이음부 강판의 2.9배 이상의 휨강도 증가를 확인하였다. 이러한 실험 결과에 의하면 콘크리트를 충전한 파형강판의 이음부 휨강도로 단일 강판 두 장의 소성모멘트를 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구에서의 실험은 청암건설과 포스코 철강솔루션 마케팅 팀의 지원으로 이루어졌으며 두 기관에 대해 감사드립니다.

참고문헌(References)

- [1] 황성목, 이종화, 김문겸(2017) EXSCor 파형강판의 구조성능 검증, 2017년도 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 대한토목학회, pp.145-146.
Hwang, S.M., Rhee, J.W., and Kim, M.K. (2017) Verification of Structural Performance of Extra Strength Corrugated Plate, *Proceedings of 2017 KSCE Convention*, Korea Society of Civil Engineers, pp.145-146 (in Korean).
- [2] 황원섭, 강승표, 위영민(2004) 파형강판 이음부 강도 및 응력 분포특성에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제16권, 제3호, pp.365-375.
Hwang, W.S., Kang, S.P., and Wi, Y.M. (2004) Strength and Stress Distribution Behavior for the Connections of Corrugated Steel Plates, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.16, No.3, pp.365-375 (in Korean).
- [3] American Association of State Highway and Transportation Officials (2014) *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications* (7th Ed.), USA.
- [4] American Association of State Highway and Transportation Officials (2010) *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications* (3rd Ed.), USA.
- [5] Standards Council of Canada (2006) *Canadian Highway Bridge Design Code* (CAN/CSA-S6-06), Canada.
- [6] Standards Australia/Standards New Zealand (2011) *Buried Corrugated Metal Structures, Part 1: Design Methods* (AS/NZS 2041.1:2011), Australia/New Zealand.
- [7] 국가건설기준센터(2016) 강구조 부재 설계기준(하중저항계수 설계법, KDS 14 31 10).
Korea Construction Standards Center (2016) *Design Standards for Steel Members (Load and Resistance Factored Design, KDS 14 31 10)*, Korea (in Korean).
- [8] 장중민(2014) SS490 대골형 파형강판의 보강형태에 따른 휨 성능 평가 실험연구, 석사학위논문, 명지대학교.
Jang, J.M. (2014) *A Study on Flexural Strength for Deep Corrugated Steel Plate of Reinforcement Type*, Master's Thesis, Myongji University, Korea (in Korean).
- [9] 최문성(2005) 파형강판 구조물의 이음부 압축강도와 휨강도에 대한 평가, 석사학위논문, 한양대학교.
Choi, M.S. (2005) *Evaluation of Compressive Seam Strength and Flexural Strength of Corrugated Structural Plates*, Master's Thesis, Hanyang University, Korea (in Korean).
- [10] 이경모(2004) 대골형 파형강판 휨강도에 대한 연구, 석사학위논문, 서울산업대학교.
Lee, K.M. (2004) *A Study on Flexural Strength for Deep Corrugated Steel Plate*, Master's Thesis, Seoul National University of Science and Technology, Korea (in Korean).
- [11] 문성환, 오상훈(2015) 원형 파형강판의 전단 및 휨 성능평가에 관한 연구: 전단 및 휨강도 설계식 제안, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제27권, 제5호, pp.455-470.
Moon, S.H., and Oh, S.H. (2015) A Study on Shear and Flexural Performance Evaluation of Circularly Corrugated Plate, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.27, No.5, pp.455-470 (in Korean).
- [12] 문지호, 이종원, 최병호, 이학은(2007) 균일한 휨모멘트가 작용하는 파형강판 복부판 I-거더의 횡-비틀 좌굴강도 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제19권, 제5호, pp.463-472.
Moon, J.H., Yi, J.W., Choi, B.H., and Lee, H.E. (2007) Evaluation of Lateral-Torsional Buckling Strength of I-Girder with Corrugated Web Under Uniform Bending, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.19, No.5, pp.463-472 (in Korean).

요 약: 슈퍼대골형 파형강판을 사용한 박스형 구조물의 볼트이음부 휨강도를 규명하기 위한 실험 연구를 수행하였다. 볼트의 배치, 복부볼트 적용 유무, 콘크리트 충전 여부 등을 고려해 84개의 시험체에 대한 휨 실험을 하였다. 볼트를 3열로 배치하고 복부볼트를 추가하는 경우 가장 큰 휨강도를 나타냈으며 강구조설계기준의 이음부 휨강도를 만족시켰다. 두 장의 강판 사이에 콘크리트를 충전하는 경우 이음부로 인한 휨강도 저하가 있음에도 불구하고 복부볼트 유무에 따라 단일강판의 2.2배 또는 2.9배 이상의 휨강도 증가를 확인하였다. 따라서 콘크리트 충전 파형강판의 이음부 휨강도로 단일강판 두 장의 소성모멘트를 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어: 슈퍼대골형 파형강판, 휨강도, 실험 연구, 볼트 이음부, 강구조