

장체결 고장력볼트 인장연결의 구조거동에 관한 실험적 연구

정용휘¹ · 이승용^{2*} · 김경태³

¹박사과정, 한국교통대학교, 사회기반공학전공, ²교수, 한국교통대학교, 사회기반공학전공,

³강사, 한국교통대학교, 사회기반공학전공

An Experimental Study on the Structural Behavior of High Strength Long Bolt Tension Type Joints

Jeong, Yong Hwi¹, Lee, Seung Yong^{2*}, Kim, Kyong Tae³

¹Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Engineering, Korea National University of Transportation, Cheongju, 27469, Korea

²Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju, 27469, Korea

³Lecturer, Dept. of Civil Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju, 27469, Korea

Abstract - This paper was carried out as a basic study to apply a high strength long bolt tension type joints to a steel bridge. In order to evaluate the structural performance of the high strength long bolt tension type joints, an experimental specimen with the thickness of the end plate and rib plate as a variable was designed and manufactured. Introducing the high strength bolt fastening force and static tensile test, the load-displacement and load-strain relationship of the main members of specimen were analyzed. As a result, the deformation of the rib plate was found to be variously distributed according to the compression deformation of the anchor plate and the thickness of the rib plate. In addition, it is necessary to prevent compression deformation of the anchor plate with a sufficient thickness or a reinforcing plate.

Keywords - High strength bolt, Tension type joint, Anchor plate, Rib plate

1. 서론

고장력볼트 인장연결은 연결면을 서로 맞대어 직접 접촉시키고 고장력볼트를 체결하는 단체결 형식과 리브플레이트 및 앵커플레이트 등을 도입하여 고장력볼트를 체결하는 장체결 형식이 있다. 일반적으로 단체결 형식과 장체결 형식은 리브플레이트를 도입하여 작용력을 전달하는지의 여부로 분류하고 있으며, 단지 볼트길이를 단체결 및 장체결을 분류하는 것은 아니다.

단체결 형식의 고장력볼트 인장연결은 2개의 T플랜지를 고장력볼트에 의해 체결하여 연결하는 형식으로 장체결 형

식과 비교하여 구조가 간단하고, 제작 및 시공상의 장점이 많다. T웨브를 중심으로 볼트가 대칭으로 배치된 T연결뿐만 아니라 한 쪽에만 볼트가 배치된 L접합이나 시트앵글에 의한 연결 외에 건축구조물의 보-기둥 연결부 등의 엔드플레이트 연결에도 사용된다. 반면에 장체결 형식의 고장력볼트 인장연결은 강관의 연결에 이용되는 이중플랜지 연결과 동일한 연결법이며, 플랜지, 앵커플레이트 및 리브플레이트를 도입하여 고장력볼트 또는 봉강 등으로 엔드플레이트를 체결하여 연결하는 방법이다^[1].

고장력볼트 인장연결을 적용하기 위해 국내·외에서 다양한 연구가 진행되고 있으나 대부분 보-기둥 연결부에 관한 연구들이다^[2-5]. 강교량 부재의 연결부와 관련하여 단체결 형식의 고장력볼트 인장연결의 연구가 일부 진행되었으나^[6,7], 장체결 형식의 고장력볼트 인장연결에 대한 연구 및 국내 설계지침은 거의 없는 실정이다.

따라서 이 논문은 장체결 형식의 고장력볼트 인장연결을 강교량에 적용하기 위한 기초적 연구로 수행되었다. 장체결 인장연결의 구조성능을 평가하기 위하여 엔드플레이트 및

Note.-Discussion open until December 31, 2020. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on April 14, 2020; revised May 14, 2020; approved on May 16, 2020.

Copyright © 2020 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-43-841-5189 Fax. +82-43-841-5180

E-mail. sylee@ut.ac.kr

리브플레이트 두께를 변수로 하는 실험체를 설계, 제작하여, 고장력볼트 체결력 도입단계 및 정적 인장실험단계에서 주요 부재의 하중-변위 및 하중-변형률 관계를 분석하고 구조성능을 평가하였다.

2. 실험체 형상 및 실험방법

장체결 인장연결 실험체는 SM275 강재를 사용하여 제작하였으며, 실험체의 체결에 사용된 고장력볼트는 열처리를 실시한 M22 전산볼트를 볼트 양단에 너트와 함께 체결하였다. 실험체에 사용된 전산볼트의 인장실험을 실시하여 얻어진 기계적 성질을 Table 1에 나타내었다. Table 1로부터 전산볼트의 기계적 성질은 항복강도 760.7 MPa, 인장강도 874.0 MPa로서 F8T 등급을 만족하는 것을 알 수 있다.

한편 실험체의 형상은 Fig. 1에 나타내었으며, Fig. 1과 같이 실험체는 앵커플레이트, 엔드플레이트, 리브플레이트,

플랜지 및 고장력볼트로 구성되어 있다. 각 부재의 치수는 Table 2와 같으며, 앵커플레이트와 플랜지의 두께는 각각 25 mm 및 34 mm로 고정하였으며, 리브플레이트는 두께를 각각 10 mm, 19 mm, 25 mm, 엔드플레이트는 두께를 각각 19 mm, 25 mm로 제작하여 엔드플레이트와 리브플레이트의 두께를 변수로 설계 및 제작하였다.

Table 2. Plate thickness by specimen type

Specimen	End plate (mm)	Rib plate (mm)	Remarks
E19-R10	19	10	· Anchor plate: 25 mm
E19-R19		19	
E19-R25		25	
E25-R10	25	10	· Flange: 34 mm
E25-R19		19	
E25-R25		25	

Table 1. Tensile test result of high strength bolt

Bolt diameter (mm)	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)
22.0	760.7	874.0

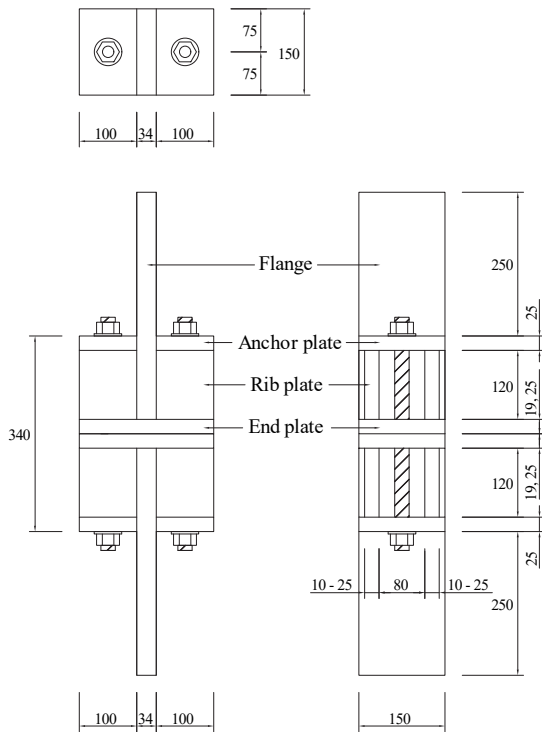


Fig. 1. Shape and dimensions of specimen (Unit: mm)

고장력볼트의 체결은 마찰연결에서 적용하고 있는 토크 제어법을 이용하여, 2개의 고장력볼트에 각각 축력 225 kN을 도입하였다. 고장력볼트의 체결은 예비체결과 본체결로 나누어 예비체결에서는 도입축력의 60 %를 체결하고, 본체결에서 표준도입축력까지 체결하였다. 체결토크값의 계산은 다음 식 (1)과 같으며, 이로부터 계산된 체결토크값은 658 N·m이다.

$$T = k \cdot d \cdot N \quad (1)$$

여기서, T: 체결토크(N·m)

k: 토크계수(k = 0.133)

d: 고장력볼트의 공칭직경(mm)

N: 설계볼트축력(N)

장체결 고장력볼트 실험체의 정적 인장실험은 Fig. 2와 같이 1,000 kN 용량의 유압시험기(한국 M&T Korea)를 사용하였으며, 인장실험체 플랜지의 상·하 단부측에 힌지를 두어 인장가력을 실시하였다.

고장력볼트의 체결 및 인장실험 시에는 실험체 각 부위의 상대변위 및 변형률을 측정하기 위하여 Fig. 3과 같이 변위계와 변형률게이지를 부착하였다. Fig. 3에서 C와 LVDT는 각 측정위치에 설치된 변위계의 위치를 나타내고 있으며, 변형률게이지의 기호 및 방향은 Table 3에 나타내었다.

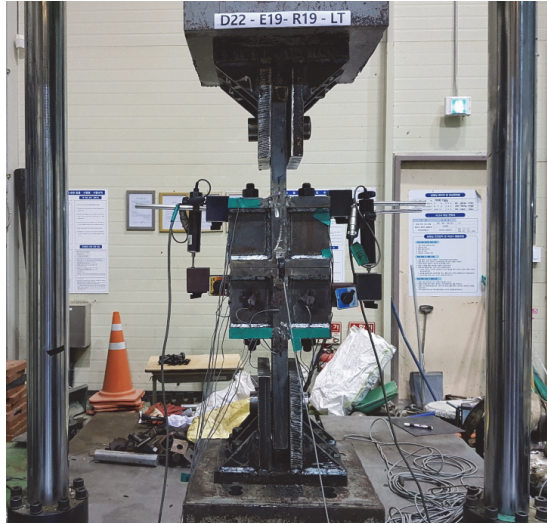


Fig. 2. Static tensile test

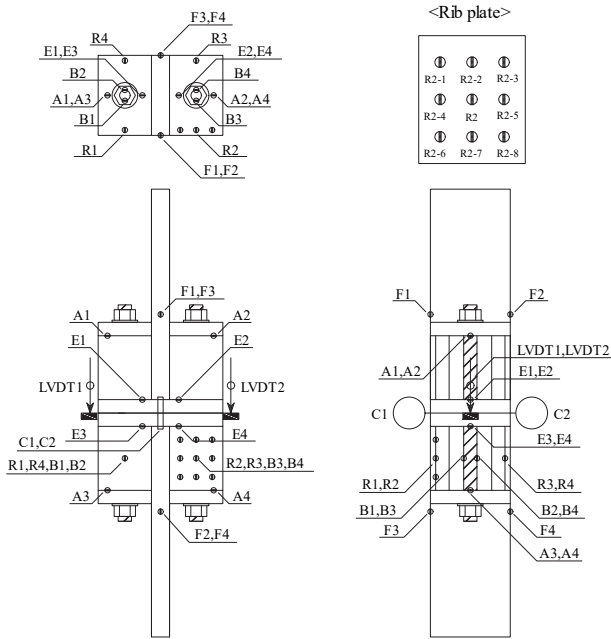


Fig. 3. Location of measuring sensors

Table 3. Explanation of symbols for strain gauge

Symbol	Installation location	Direction
A	Anchor plate	Traverse
E	End plate	Traverse
R	Rib plate	Longitudinal
F	Flange	Longitudinal
B	Bolt	Longitudinal

3. 실험결과 및 분석

3.1 고장력볼트 체결에 의한 변형률 분포

고장력볼트의 체결력 도입에 의한 각 강재의 변형률을 Table 4 및 Fig. 4에 나타내었다. Table 4 및 Fig. 4로부터 고장력볼트는 체결력 도입에 따라 볼트축에 인장력이 발생하므로 가장 큰 변형률이 발생하였으며, 고장력볼트와 직접적으로 접촉하고 있는 앵커플레이트가 다른 부재에 비해서 상대적으로 큰 휨인장 변형률을 나타내었다. 고장력볼트에 비해 충분한 단면적을 확보하고 있는 리브플레이트와 하중이 직접적으로 전달되지 않는 엔드플레이트와 플랜지는 매우 작은 압축 변형률이 발생함을 알 수 있다.

Table 4. Comparison of strains induced by fastening of high strength bolt

Specimen	Strain ($\times 10^{-6}$)				
	Anchor plate	End plate	Rib plate	Flange	Bolt
E19-R10	571	-58	-67	-48	1,496
E19-R19	451	-40	-13	-32	1,222
E19-R25	416	6	-21	-33	1,335
E25-R10	614	-25	-71	-45	1,518
E25-R19	451	-22	-34	-39	1,353
E25-R25	484	-4	-1	-45	1,660

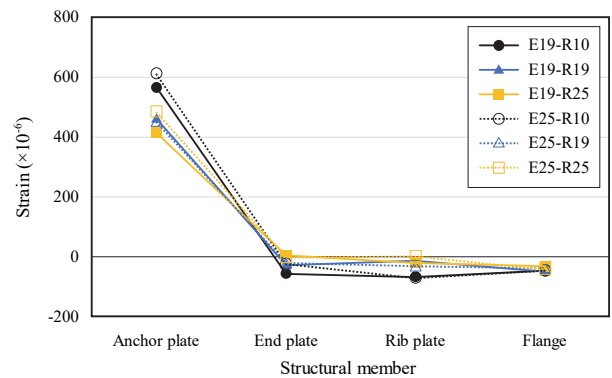


Fig. 4. Comparison of strains for each structural member

고장력볼트 체결력 도입에 의한 고장력볼트의 변형률과 앵커플레이트의 부담 비율을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에

서 수직축은 체결력 도입 시 각각의 고장력볼트의 변형률을 나타내고 있으며, 수평축은 변형률비율(= 앵커플레이트 변형률/고장력볼트 변형률 $\times 100$)을 나타내고 있다.

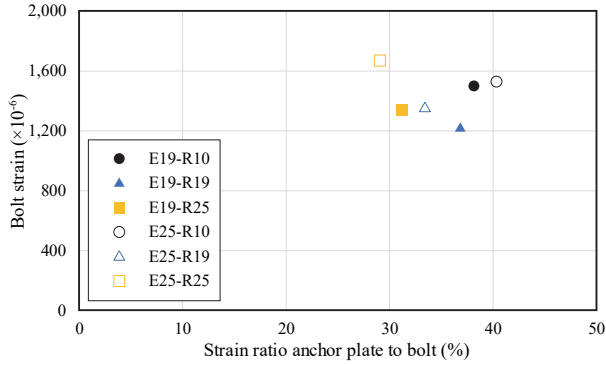


Fig. 5. Ratios of anchor plate strain to bolt strain

Fig. 5에서 리브플레이트 두께가 10 mm로 가장 작은 R10 실험체에서 앵커플레이트의 부담 비율이 38% - 40%로 가장 크게 나타났으며, 리브플레이트 두께가 25 mm로 가장 큰 R25 실험체에서 앵커플레이트의 부담 비율이 29% - 31%로 가장 작게 나타났다. 이는 리브플레이트의 두께 차이에 따른 앵커플레이트와 리브플레이트 접합부 강성의 변화가 리브플레이트에 발생하는 변형에 영향을 주는 것으로 판단된다.

한편 고장력볼트 체결력 도입 단계에서 앵커플레이트의 변형률과 리브플레이트의 부담 비율을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 수직축은 체결력 도입 시 각각의 앵커플레이트의 변형률을 나타내고 있으며, 수평축은 체결력 도입 시 각각의 리브플레이트의 변형률을 나타내고 있다.

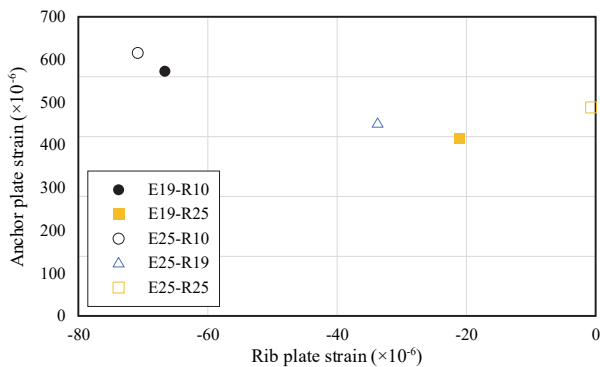


Fig. 6. Ratios of rib plate strain to anchor plate strain

Fig. 6에서 리브플레이트 두께가 10 mm로 가장 작은 R10 실험체의 리브플레이트 변형률은 압축 변형률을 보이고 있

으며, 리브플레이트 두께가 25 mm로 가장 큰 R25 실험체에서 리브플레이트의 변형률은 리브플레이트의 두께가 10 mm 및 19 mm인 실험체보다 작은 변형률을 보이고 있다. 이는 리브플레이트의 두께 차이에 따른 앵커플레이트와 리브플레이트 접합부 강성의 변화가 리브플레이트에 발생하는 변형에 영향을 주는 것으로 판단된다.

3.2 정적 인장실험 시 파괴양상 및 변위 분포

정적 인장실험 시 모든 실험체는 Fig. 7과 같이 고장력볼트가 항복하여 파단되는 볼트파괴형으로 나타났다.



Fig. 7. Failure mode of specimen

정적 인장실험 시 실험체의 하중-변위 곡선을 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에서 모든 인장실험체가 초기하중 100 kN 이전에는 고장력볼트의 체결력에 의해 변위가 거의 발생하지 않으나, 하중 100 kN 이후에는 하중의 증가와 함께 부재 및 고장력볼트의 일체거동으로 변위가 선형적으로 증가하고, 하중 300 kN 이후에는 고장력볼트의 항복에 의해 변위가 크게 증가함을 알 수 있다.

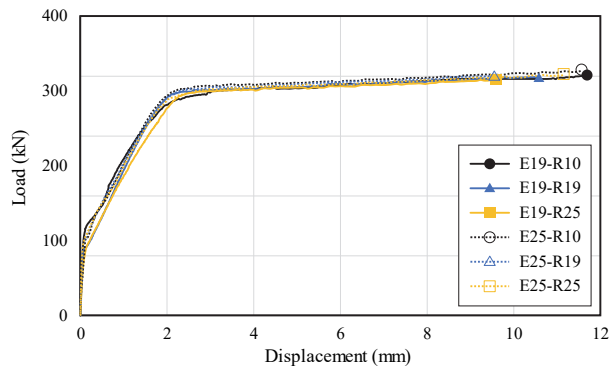


Fig. 8. Load - displacement curves by tensile test

하중-변위 곡선에서는 모든 인장실험체가 엔드플레이트 및 리브플레이트의 두께 변수와 관계없이 변형이 가장 큰 고장력볼트에 의해 변위가 지배적으로 발생하여 볼트파괴 양상을 나타내기 때문에 모든 실험체가 유사한 양상의 하중-변위 분포를 나타낸 것으로 판단된다.

3.3 정적 인장실험 시 변형률 분포

정적 인장실험 결과로부터 모든 실험체의 최대하중에 근접한 하중 310 kN에서 각 부재와 고장력볼트의 변형률 값을 Table 5에 나타내었다. Table 5를 보면, 고장력볼트 체결력 도입 단계에서의 변형률 분포를 나타낸 Table 4의 결과와 유사하게 정적 인장실험시에도 고장력볼트에 가장 큰 변형률이 발생하였으며, 고장력볼트와 직접적으로 접촉하고 있는 앵커플레이트가 다른 부재에 비해서 상대적으로 큰 휨인장 변형률을 나타내었다.

Table 5. Strains of specimens at load of 310 kN

Specimen	Strain ($\times 10^{-6}$)				
	Anchor plate	End plate	Rib plate	Flange	Bolt
E19-R10	3,012	-3	-158	257	31,391
E19-R19	2,916	32	-8	340	30,185
E19-R25	3,262	5	66	372	35,662
E25-R10	3,374	13	-142	323	23,564
E25-R19	2,815	1	-30	373	29,190
E25-R25	3,350	9	58	350	29,042

리브플레이트의 변형률을 보면 리브플레이트의 두께가 가장 큰 R25 실험체는 인장 변형률을 나타내고 있지만 리브플레이트의 두께가 10 mm 및 19 mm인 실험체는 압축 변형률을 나타내고 있다. 이는 리브플레이트의 두께 차이에 따라 리브플레이트 내부의 응력 분포 차이가 나타난 것이라고 판단된다. 한편 엔드플레이트의 변형률은 엔드플레이트 및 리브플레이트의 두께의 변화에도 차이가 거의 나타나지 않았다.

정적 인장실험 결과, 각 부재 및 고장력볼트의 하중-변형률 곡선을 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에서 0 kN 이전의 하중은 고장력볼트 체결 시의 변형률을 나타낸 것이다.

Fig. 9에서 모든 부재가 하중 100 kN 전후로 변형률 분포가 다른 양상을 나타내었는데, 이는 하중 100 kN 이후부터 실험체 각 부재 및 고장력볼트의 일체거동에 의한 것으로 판단된다.

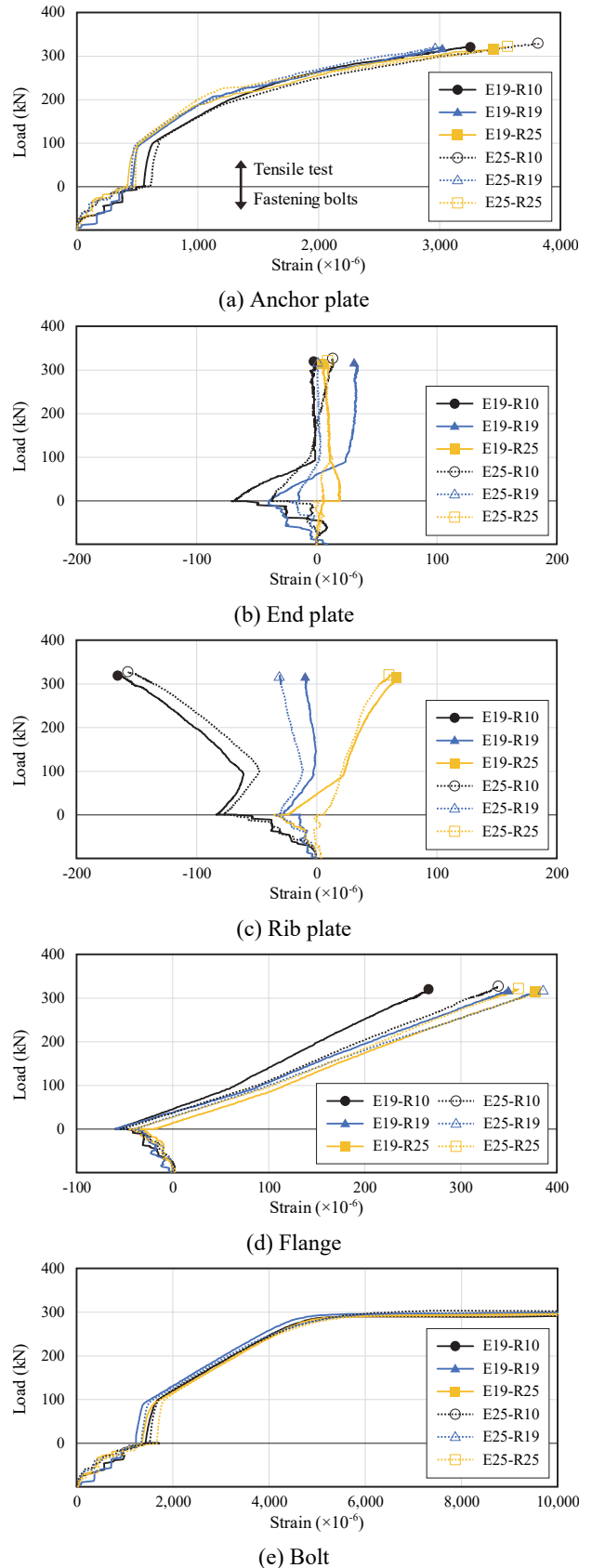


Fig. 9. Load - strain curves by bolt fastening and tensile test

Fig. 9(a)에서 앵커플레이트의 변형률이 하중 200 kN 부근에서 변화하는 것은 앵커플레이트의 항복에 의한 것으로 판단된다. Fig. 9(b)에서 엔드플레이트는 엔드플레이트와 인접한 리브플레이트의 좌굴변형에 의한 간접응력만이 전달되어 변형은 거의 없는 것으로 나타났다.

한편 Fig. 9(c)에서 리브플레이트는 두께 증가에 따라 압축변형에서 인장변형으로 변화되는 것으로 나타났으며, 리브플레이트의 응력분포에 대해서는 Table 6 및 Fig. 10에서 검토하였다. Fig. 9(d)에서 인장하중을 직접받는 플랜지는 하중 증가에 따라 변형률이 선형적으로 증가하는 양상을 보이고 있다. Fig. 9(e)에서 인장하중에 의해 변형률이 가장 크게 나타난 고장력볼트는 Fig. 7의 하중-변위 곡선과 유사한 양상으로 나타났다.

3.4 정적 인장실험 시 리브플레이트의 변형률 분포

리브플레이트는 Fig. 10과 같이 중앙부는 앵커플레이트, 엔드플레이트 및 플랜지와 용접연결로 일체화되어 있으며, A-A' 단면은 오픈되어 있다. 이때 리브플레이트 단부 A-A' 단면은 중앙부에 압축하중을 받는 3차 부정정 라멘과 유사한 구조거동을 한다고 볼 수 있다.

수직 부재의 두께 차이에 따른 압축하중을 받는 3차 부정정 라멘구조의 모멘트 분포를 Fig. 11에 나타내었으며, Fig. 11(a)는 수직부재의 두께비가 0.4이고, Fig. 11(b)는 수직부재의 두께가 1.0이다. Fig. 11에서 수직 부재의 두께비가 높아질수록 모멘트 반곡점의 위치는 $0.56h$ 에서 $0.33h$ 로 낮아지며, 수직 부재의 상부는 정모멘트, 하부는 부모멘트가 작용하는 것을 알 수 있다.

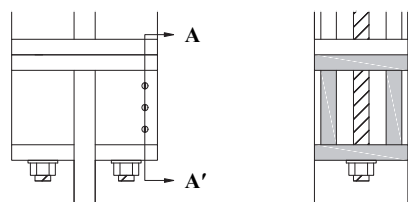


Fig. 10. Details of rib plate

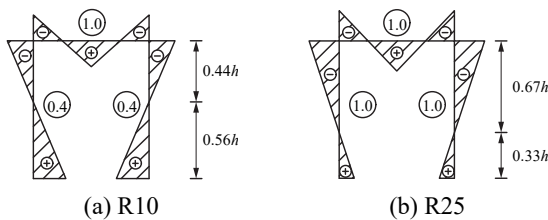


Fig. 11. B.M.D of rib plate

리브플레이트 단부 A-A' 단면의 변형률 분포를 Table 6 및 Fig. 12에 나타내었다. Table 6과 Fig. 12에서 R2-3 위치는 Fig. 10의 하부 부모멘트 부분에 해당되며, R2-5는 중앙부, R2-8은 상부 정모멘트 부분에 해당된다.

Table 6. Strains of rib plate at load of 310 kN

Specimen	Strain ($\times 10^{-6}$)		
	R2-3	R2-5	R2-8
E19-R10	-185	-128	68
E19-R19	-110	22	252
E19-R25	-30	90	332
E25-R10	-266	-152	2
E25-R19	-147	-24	203
E25-R25	-45	57	301

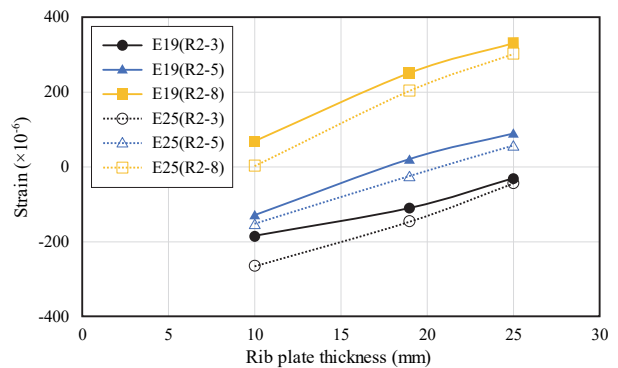


Fig. 12. Strain distribution of rib plate

Table 6 및 Fig. 12에서 앵커플레이트의 압축변형으로 인해 앵커플레이트와 리브플레이트의 접합부(R2-8)는 Fig. 11의 정모멘트 부분과 같이 인장변형을 보이며, 엔드플레이트와 리브플레이트의 접합부(R2-3)는 Fig. 10의 부모멘트 부분과 같이 앵커플레이트의 압축변형에 영향을 받지 않아 고장력볼트 체결에 의한 전형적인 압축변형만을 보였다. 한편 리브플레이트의 두께가 증가할수록 인장 변형률 범위가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 Fig. 11의 두께비 증가에 따라 정모멘트 범위가 증가하는 것과 동일한 거동을 하는 것으로 판단된다.

이상으로부터 리브플레이트의 변형은 앵커플레이트의 압축변형과 리브플레이트 두께에 따라 다양하게 분포되는 것으로 나타났으며, 이는 앵커플레이트의 압축에 의한 영향으로 판단된다. 부재 중에서 압축변형이 가장 크게 발생한

앵커플레이트는 고장력볼트 항복 이전에 부재가 항복하는 것으로 나타났으며, 압축변형을 방지하기 위하여 앵커플레이트의 충분한 두께 확보 또는 좌굴방지를 위한 보강판 등의 적용이 필요하다고 판단된다.

4. 결론

장체결 형식의 고장력볼트 인장연결부의 구조성능을 파악하기 위하여 정적 인장실험을 실시하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 고장력볼트 체결력 도입 시 앵커플레이트와 고장력볼트에 변형이 가장 크게 발생하였으며, 리브플레이트의 두께가 커질수록 부담 비율이 작게 나타났다. 이는 리브플레이트의 두께 차이에 따른 앵커플레이트와 리브플레이트 접합부 강성의 변화가 리브플레이트에 발생하는 변형에 영향을 주는 것으로 판단된다.
- (2) 정적 인장실험 결과, 모든 실험체가 앵커플레이트 항복 후 고장력볼트의 항복으로 인해 판단되는 볼트 파괴형으로 나타났으며, 고장력볼트에 의해 변위가 지배적으로 발생하여 유사한 양상의 하중-변위 분포를 나타내었다.
- (3) 인장실험도 고장력볼트 체결 단계와 마찬가지로 리브플레이트의 변형은 앵커플레이트의 압축변형과 리브플레이트 두께에 따라 다양하게 분포되는 것으로 나타났으며, 이는 앵커플레이트와 리브플레이트 접합부 강성의 변화가 원인인 것으로 판단된다.
- (4) 압축변형이 가장 크게 발생한 앵커플레이트는 고장력볼트 항복 이전에 부재가 항복하는 것으로 나타났으며, 압축변형을 방지하기 위하여 앵커플레이트의 충분한 두께 확보 또는 좌굴방지를 위한 보강판 등의 적용이 필요하다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2016R1D1A1B03935301).

참고문헌(References)

- [1] Japanese Society of Steel Construction (2004) *Recommendation for Design of High Strength Tensile Bolted Connections for Steel Bridges* (JSS IV 05-2004), Japan (in Japanese).
- [2] Swanson, J.A., and Leon, R.T. (2001) Stiffness Modeling of Bolted T-Stub Connection Components, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.127, No.5, pp.498-505.
- [3] Piluso, V., Faella, C., and Rizzano, G. (2001) Ultimate Behavior of Bolted T-Stubs, I: Theoretical Model, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.127, No.6, pp.686-693.
- [4] Choi, S.M., Lee, S.H., and Kim, J.H. (2004) An Experimental Study on the Structural Characteristics of Tension Joints with High-Strength Bolted Split-Tee Connection, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.16, No.6, pp.737-745 (in Korean).
- [5] Yang, J.G., and Baek, M.C. (2013) Prediction Models for the Prying Action Force and Contact Force of a T-Stub Fastened by High-Strength Bolts, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol.25, No.4, pp.409-419 (in Korean).
- [6] Lee, S.Y., Choi, J.H., and Kim, K.T. (2015) An Experimental Study on the Static Load Capacity of T-Type Tension Joints with High Tension Bolt, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.27, No.1, pp.53-61 (in Korean).
- [7] Lee, S.Y., Jeong, Y.H, Choi, J.H., and Yeom, J.H. (2018) Stress Distribution of Long Fastening Tension Type High Strength Bolted Joints, *Proceedings of KSCE 2018 Convention*, Korean Society of Civil Engineers, pp. 307-308 (in Korean).

요 약: 본 논문은 장체결 형식의 고장력볼트 인장연결을 강교량에 적용하기 위한 목적으로 기초적 연구로 수행되었다. 장체결 인장연결의 구조성능을 평가하기 위하여 엔드플레이트 및 리브플레이트 두께를 변수로 하는 실험체를 설계, 제작하고, 고장력볼트 체결력 도입시 및 정적 인장실험시 주요 부재의 하중-변위 및 하중-변형을 관계를 분석하였다. 그 결과 리브플레이트의 변형은 앵커플레이트의 압축변형과 리브플레이트의 두께에 따라 다양하게 분포하는 것으로 나타났으며, 압축변형을 방지하기 위하여 앵커플레이트의 충분한 두께 확보 또는 좌굴방지를 위한 보강판 등의 적용이 필요하다고 판단된다.

핵심용어: 고장력볼트, 인장연결, 앵커플레이트, 리브플레이트