Pure Bending이 작용하는 H-Beam의 도입축력 변화에 따른 고장력볼트 연결부 거동 분석

Analysis on the Sliding Load for Hign-Tension Bolt Joint of the H-Beam in Pure Bending

김춘호, 김상훈
중부대학교

Kim Chun-Ho, Kim Sang-Hoon
Joongbu Univ.

요약

고장력볼트에 의한 부재연결 방법 중 가장 대표적인 마찰이음은 사용성 측면에서의 한계상태는 미끄러짐이 발생한 상태라고 할 수 있다. 따라서, 한계상태를 고려한 설계를 위해서는 미끄러짐 내력을 정확히 파악할 필요가 있다. 현재 공용중인 강교에서 발생하는 볼트 연결부의 결함 중 볼트 도입축력 부족의 발생빈도가 가장 크지만 도입축력부족에 따른 결함의 연구는 미비한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 고장력 볼트 연결부의 미끄러짐 거동을 파악할 수 있는 모델 제시하기 위하여 범용 유한요소 구조해석 프로그램인 LUSAS를 이용하여 수치해석을 실시하였고, 오직 축력만이 작용하는 표준 시험체와 교량보다 비교적 구조계가 간단한 단순경간 강상형교를 모사한 full-size의 H-Beam시험편을 설계하여 설계볼트 도입축력 100%인 시험편의 도입축력을 기준으로 75%, 50%, 25%의 축력을 도입하여 정적 시험을 실시하여 마찰 문제로 인한 고장력 볼트 연결부의 내력을 수치해석한 결과와 비교·분석하고자 한다.

Abstract

Currently the bolt joint defect occurs from the steel bridge which is in the process of using but that investigation about each kind defect is lacking state. Research to see consequently the high strength bolt joint sliding conduct bring the model it used a structural analysis program LUSAS numerical analysis execution and a plan for Steel Box Girder Bridge copying full-size H-Beam and plan pretensioned bolt force 100%. 75%, 50% and 25% pretensioned force it acted in standard. And a hold an examination, against the sliding loads which it follows in the pretensioned force it will analysis.

I. 서 론

고장력 볼트의 접합은 리벳접합보다 신속하고 간편하게 현장에서 조립이 가능하고 경제적이며, 소음이 없기 때문에 강구조물의 현장 접합 방법으로 그 사용이 광범위하게 증가되고 있는 추세이다. 고장력 볼트에 의한 연결방법은 대단히 우수한 방법이지만, 하나의 이음에 많은 고장력 볼트를 배치시키는 경우에는 체결방법, 체결순서 등에 따라 이미 도입된 축력이 크게 변동하고, 체결이 완료된 볼트에 있어서도 시간이 경과함에 따라 도입된 축력이 감소하는 릴렉세이션이 문제로 된다[5]. 한편 고장력 볼트 이음부의 역학적 특성에 있어서도 많은 문제점이 내재되어 있는데, 마찰 이음에서 미끄러짐 내력, 마찰면의 상태와 마찰 계수와의 관계 등을 파악하는 것이 중요하다[6]. 현재 공용중인 강교에서 발생하는 볼트 연결부의 결함 중 볼트 도입축력 부족의 발생빈도가 가장 크지만 도입축력부족에 따른 결함의 연구는 미비한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 Pure bending이 작용하는 H-Beam의 고장력 볼트 연결부의 거동 특성을 파악하기 위하여 교량보다 비교적 구조계가 간단한 단순경간 강상형교를 모사한 full-size의 H-Beam시험편을 설계하여 설계볼트 도입축력 100%인 시험편의 도입축력을 기준으로 75%, 50%, 25%의 축력을 도입하여 정적 시험을 실시하였고, 고장력 볼트 연결부의 미끄러짐 거동을 파악할 수 있는 모델을 제시하기 위하여 범용 유한요소 구조해석 프로그램인 LUSAS를 이용하여 수치해석을 실시하였으며 마찰 문제로 인한 고장력 볼트 연결부의 내력 특성변화를 비교 분석하고자 한다.

II. 수치해석

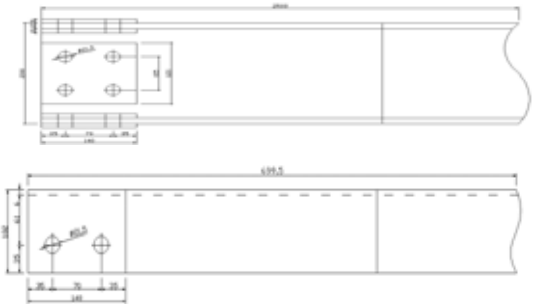
1. 수치해석기법[2][7]

기존의 유한요소해석은 많은 계산량에 비하여 정확도가 낮았다. 그 원인은 개별요소들이 볼트로 연결되어 하중을 받음으로써 연결면에서 발생하는 미끄러짐 및 접촉을 통해 발생되는 입

체적인 변형이 제대로 모사되지 않았기 때문이다. 본 연구에서는 임의의 부분이 접촉되거나 분리되어 있는 표면의 상대변위를 계산하거나 접촉과정에 대한 정확한 사전지식이 없는 경우, 접촉이 발생할 가능성이 높은 부분에 많은 수의 절점을 정의하고자 할 때 사용되는 미끄럼부(Slideline part)를 이용하여 고장력 볼트의 도입축력 때문에 마찰이음상태에 있던 모재와 덮판 연결부가 모재에 작용하는 Static하중으로 인해 마찰이음에서 지압이음으로 바뀌는 복잡한 역학적 거동을 하는 고장력볼트 연결부의 미끄러짐 및 비선형해석을 시행하여 시험적으로 밝혀내기 어려운 볼트 이음부의 거동과 구조적 특성을 규명하고자 한다.

2. H-beam의 고장력 볼트 연결부 수치해석

Pure Bending에 대한 고장력 볼트 미끄러짐 거동을 파악하기 위해 모재와 덮판, 고장력 볼트로 체결되어 있는 H-beam을 대칭성을 고려하여 [그림1]과 같이 전체모델의 1/4로 모델링하였고, 볼트의 경우 강체운동의 효과를 막기 위해 볼트와 와셔를 일체화시켰다.

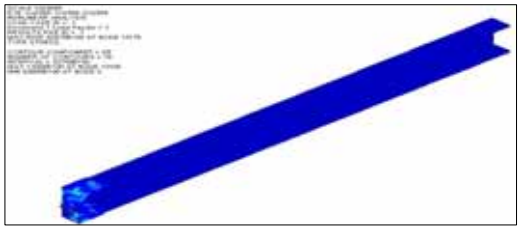


▶▶ 그림 1. 1.4모델 형상 및 치수

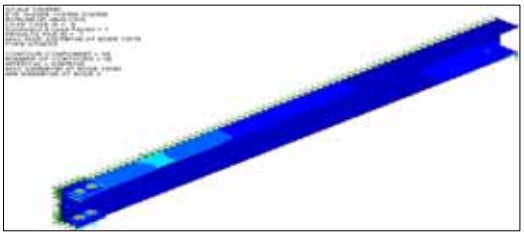
모재와 덧판의 접촉조건을 묘사하기 위해 미끄럼부(Slideline part)를 이용하여 접합면의 모재부분을 미끄럼선의 종속(Slave)으로 적용하고, 접합면의 덧판부분에 대해 주(Master)를 적용하였다. 또한 부재의 대칭성을 고려하여 대칭부재에 한하여 경계조건을 Guided-roller로 하였다. 하중재하의 경우, 도입축력을 나타내기 위해 와셔단면적과 동일한 크기로 덧판표면에 등분포하중을 압축력으로 재하시켰으며, 상재하중은 지점부에서 2m떨어진 곳에 zero에서부터 60ton까지 static하중으로 재하시켰다.

3. 수치해석 결과고찰

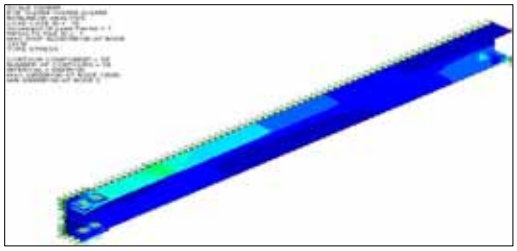
수치해석 결과 [그림3]에서 나타난 바와 같이 도입축력 96.07kN이 작용하였을 때 응력은 179.46Mpa로 탄성 구간 내에 있는 것을 알 수 있다. [그림4]의 하중 108.82kN이 작용하였을 때 응력은 198.87Mpa로 도입축력이 작용하였을 때와 마찬가지로 재료가 탄성 구간 내에 있는 것을 알 수 있다. [그림5]는 하중이 225.49kN이 작용하였을 때에 응력이 259.87Mpa로 탄성 구간을 벗어나 소성거동을 하고 있고, 볼트 홀 주위부터 소성영역이 진행됨을 알 수 있다.



▶▶ 그림3. 도입축력 96.07kN 작용 시 응력분포도

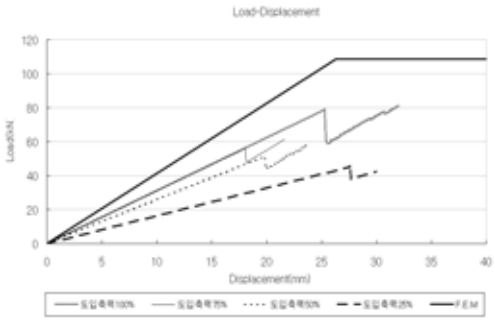


▶▶ 그림 4. 하중 108.82kN 작용 시 응력분포도



▶▶ 그림 5. 하중 225.49kN 작용 시 응력분포도

[그림6]에서 미끄러짐이 발생한 하중 108.85kN에서 기울기가 0이 된 것으로 보아 미끄러짐으로 인해 재료의 휨 강성이 감소되었으므로 마찰이음에서 전단(지압)이음으로 전환 되었다. 또한, 완전 탄소성재료를 사용하여 볼트와 H-Beam과의 접촉조건을 묘사하기 위해 미끄럼부(Slideline part)를 사용하여 모델링하여 수치해석 한 결과, 미끄러짐 하중은 422.29kN으로 도입축력 100%의 미끄러짐 하중(388.64kN)과 약 8%의 차이를 보이므로 미끄럼부(Slideline part)를 사용한 해석기법으로 부터 미끄러짐의 거동 상태를 충분히 파악할 수 있는 모델이 됨을 알 수 있다.

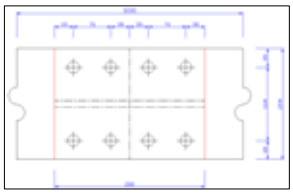


▶▶ 그림 6. 하중-변위곡선

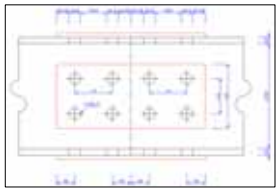
Ⅲ. 시 험

1. 시험편 설계[1][3][4]

시험편은 재료가 항복되기 전에 미끄러짐이 발생되도록 휨, 전단을 검토하여 설계하고자 한다. 시험편은 H200×204의 강재를 설계하였고, 시험에 사용된 시험편은 모재와 접합판 그리고 고장력 볼트 세트로 구성되어 있다. 모재와 접합판은 SS400의 강재를 사용하였다. 고장력 볼트는 육각형 고장력 볼트로 F10T, M20을 사용하였다. 또한, 볼트연결부위의 제원은 [그림7] [표 8]과 같다.



▶▶ 그림 7. 연결부 평면도



▶▶ 그림 8. 연결부 정면도

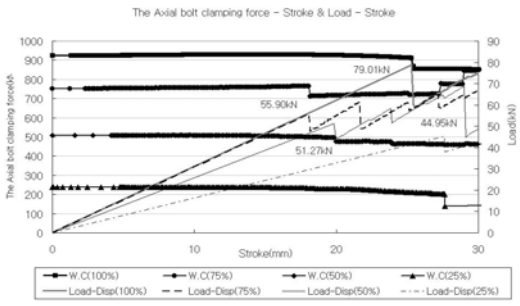
고장력 볼트 연결부의 정적시험은 설계볼트 도입축력(100%)이 되도록 토오크치를 56.2kgf · m로 가했고 하중제어장치로는 50tonf의 Actuators에 거치 시킨 후 변위제어로 110kN까지 하중을 가하는 방법으로 시험을 하였다. 시험 시 정적계측장비는 UCAM-60A를 사용하였다. 볼트체결은 수동식 토크렌치를 사용하는 토크제어법을 통해 체결하였다. 정적시험을 위한 하중제어 시 가력방법은 변위제어 방법으로 하중을 가하였다. [그림9] [그림 10]은 각각 시험편 전체 형상과 볼트연결부의 상세이다.

▶▶ 그림 9. 시험편 전체 형상

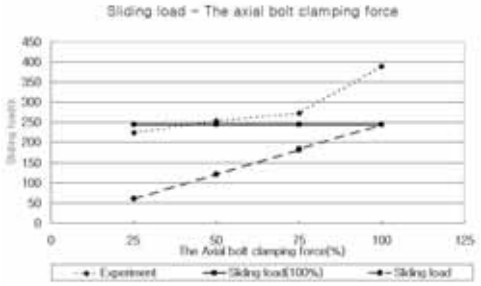
▶▶ 그림 10. 볼트 연결부 상세

2. 시험결과 및 고찰

Pure Bending이 작용하는 H-Beam의 고장력볼트 연결부의 정적 시험을 실시하여 도입축력감소에 따른 미끄러짐 하중을 측정 및 평가 한 결과, 미끄러짐이 발생되는 순간에 볼트축력이 감소함을 [그림12]에서 알 수 있다. 도입축력과 미끄러짐 하중(ρ), 그리고 설계허용 미끄러짐 하중(ρ_a)은 [표1]에 정리하였다. 토크렌치를 사용하여 볼트를 체결하여도 볼트체결 순서와 접촉면 상태, 볼트체결 시 조이는 힘의 크기에 따라 볼트에 도입되는 축력이 일정하게 도입되지 않음을 와셔셀로 측정된 도입축력 값이 다르게 측정된 결과를 통하여 확인하였다. 도입축력 변화에 따른 미끄러짐 하중은 [그림13]에서 알 수 있듯이 도입축력 100%~75%구간에서 감소율이 크고, 도입축력 75%이하에서 선형으로 일정하게 감소되는 것을 확인 할 수 있다. 또한, [표1]의 시방서 기준의 설계 도입축력 100%에 대한 안전율(ρ/ρ_a)에서 안전율 1.0이상을 확보하기 위해서 설계 도입축력의 75% 이상을 확보하여야 함을 확인하였다.



▶▶ 그림 12. 도입축력-변위 곡선과 하중-변위곡선



▶▶ 그림 13. 미끄러짐하중과 도입축력관계

[표 1] 실험결과정리

		도입 축력 (100%)	도입 축력 (75%)	도입 축력 (50%)	도입 축력 (25%)
도입축력 (kN)	실험 결과	463.1	376.21	254.54	119.19
	시방서 기준	517.79	388.34	258.89	129.44
설계도입 축력에 대한 비율(%)	실험 결과	89	97	98	92
	시방서 기준	100	100	100	100
미끄러짐 하중(kN)	실험 결과	388.64	275.16	252.16	222.61
	시방서 기준	243.67	243.67	243.67	243.67
시방서 기준 (설계 도입축력 100%)에 대한 안전율(ρ/ρ_a)		1.59	1.13	1.03	0.91

Ⅳ. 결 론

Pure bending이 작용하는 H-Beam의 고장력볼트 연결부의 거동 특성을 파악하기 위하여 설계볼트 도입축력 100%인 시험편의 도입축력을 기준으로 75%, 50%, 25%의 축력을 도입하여 정적 시험을 실시하였고, 고장력볼트 연결부의 미끄러짐 거동을 파악할 수 있는 모델을 제시하기 위하여 범용 유한요소 구조해석 프로그램인 LUSAS를 이용하여 수치해석을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 수치 해석 결과 미끄러짐이 발생한 하중 108.85kN에서 기울기가 0이 된 것으로 보아 미끄러짐으로 인해 재료의 휨강성이 감소되었으므로 마찰이음에서 전단(지압)이음으로 전환 되었다.
2. 미끄러짐이 발생한 하중 108.85kN에서 응력 값은 198.87Mpa로서 항복 응력 값인 235.35Mpa보다 작으므로, 재료가 탄성 구간 내에서 탄성거동을 하고 있음을 확인하였다.
3. 완전 탄소성재료를 사용하여 볼트와 H-Beam과의 접촉조건을 묘사하기 위해 미끄럼부(Slideline part)를 사용하여 모델링하여 수치해석 한 결과, 미끄러짐 하중은 422.29kN으로 도입축력 100%의 미끄러짐 하중(388.64kN)과 약 8%의 차이를 보이므로 미끄럼부(Slideline part)를 사용한 해석기법으로 부터 미끄러짐의 거동 상태를 충분히 파악할 수 있는 모델이 됨을 알 수 있다.
4. 토크렌치를 사용하여 볼트를 체결하여도 볼트체결 순서와 접촉면 상태, 볼트체결 시 조이는 힘의 크기에 따라 볼트에 도입되는 축력이 일정하게 도입되지 않음을 와셔셀로 측정된 도입축력 값이 다르게 측정된 결과를 통하여 확인하였다.
5. 미끄러짐이 발생하는 순간에 볼트도입축력이 감소함을 본 연구를 통해 확인하였다.
6. 도입축력 변화에 따른 미끄러짐 하중은 [그림13]에서 알 수 있듯이 도입축력 100%~75%구간에서 감소율이 크고, 도입축력 75%이하에서 선형으로 일정하게 감소되는 것을 확인 할 수 있다. 또한, [표1]의 시방서 기준의 설계 도입축력 100%에 대한 안전율(ρ/ρ_a)에서 안전율 1.0이상을 확보하기 위해서 설계 도입축력의 75% 이상을 확보하여야 함을 확인하였다. 따라서, 고장력볼트의 축력 도입 시 75%이상의 여유도를 확보하여야 한다.
7. 현재 공용중인 교량에서 미끄러짐이 발생한 볼트 연결부위는 설계 도입축력의 75%이상을 확보하지 못한 경우 발생된다. 또한, 미끄러짐이 발생되는 순간에 볼트의 축력이 감소하므로 유지관리 시 미끄러짐이 발생된 부재의 연결부에 관해서 세심한 주의와 관찰이 필요하다.
8. 추후 연구 과제로 Pure Bending이 작용하는 고장력볼트 연결부의 피로시험을 수행하여 기존의 축력만 받는 피로시험의 결과와 비교·분석하여야 할 것이다.

▌참 고 문 헌▐

[1] 건설교통부, 도로교 표준시방서. 2003.
[2] 김찬일 “Pure Bending이 작용하는 H-Beam의 고장력 볼트 이음부 미끄러짐 해석”, 중부대학교 석사학위 논문.
[3] 동부건설 기술연구소, 고장력볼트 및 T/S볼트 시공지침. 1995
[4] 박준훈 “Pure Bending이 작용하는 H-Beam의 고장력 볼트 연결부 미끄러짐 내력 측정 및 평가”, 중부대학교 석사학위 논문.
[5] 이승용, 장동일, “고장력볼트 이음부의 정적 및 피로거동에 관한 연구(Ⅰ)”, 한국강구조학회논문집, 제9권 3호, pp.421-430, 1997.
[6] J. W. Fisher and J. L. Rumpf, "Analysis of Bolted Butt Joints", Procedure of ASCE, Vol. 91 No. ST5, pp.181-203, 1965.
[7] LUSAS Theory Manual 1, Ver. 13.8