

고장력 볼트 이음부의 3차원 유한요소 해석

3D Finite Element Analysis of High Tension Bolted Joints

심재수¹⁾ · 김춘호²⁾ · 김동조³⁾
Shim Jae Soo · Kim Chun Ho · Kim Dong Jo

요약: 공용중인 교량은 시공시에 비해 이음부재 및 볼트에 각종 하중이 작용하는 상태이고, 시공중에 결함이 발생하였거나 시간이 지남에 따른 각종 결함이 발생되고 있다. 실험적인 연구에 의해 이러한 결함들이 있는 고장력볼트 이음부의 역학적 성질을 규명하기 위해서는 많은 재비용이 필요한 실정으므로 실험적으로 밝혀내기 어려운 결함이 있는 고장력볼트 이음부의 거동과 구조적 특성을 유한요소 해석을 통하여 규명하고 차후 실험에 의한 연구시 충분한 실험결과와 예측, 시험체의 설계 및 경제적인 실험적 연구의 수행을 위한 자료를 제공하는데 본 연구의 목적이 있다. 각종 결함이 발생하고 있는 교량을 대상으로 현장조사를 하여 결함의 발생위치 및 유형을 분석하고 가장 많이 발생하는 결함을 중심으로 표준모델에 결함을 주어 내부응력 분포 및 미끄러짐 거동에 대한 해석을 수행하였다. 정상체결된 고장력 볼트 이음부 및 볼트간격, 모재두께, 연단거리, 볼트 구멍 크기, 확공에 따른 결함을 가정하여 내부응력분포에 대한 구조해석을 수행하였다. 또한 고장력볼트 이음부의 미끄러짐 거동에 대해 해석하였는데 이 해석은 대변형을 고려한 기하학적 비선형, 접촉면의 비선형을 고려한 경계 비선형, 미끄러짐에 의해 항복강도를 초과하는 부분이 생길 수 있으므로 재료적 비선형 문제를 고려하여 해석하였다. 정상적으로 체결된 고장력볼트 이음부 및 볼트 축력의 감소에 따른 미끄러짐 해석을 수행하였다.

ABSTRACT: Bridges in common use are expected to have more varieties of load in their connected members and bolts than in construction. Faults in connection members or bolts occur so often according to the time flow. One of the purposes of this study is to find out the behavior and structural features of high-tension bolted joints with faults that are very difficult and cost much to find out through experimentation with finite element analysis. Another purpose of this study is to provide sufficient data, estimated experimental results, and the scheme of the test plate for an economical experimental study in the future. Surveys of bridges with a variety of faults and statistical classifications of their faults were performed, as was a finite element analysis of the internal stress and the sliding behavior of standard and defective bridge models. The finite element analysis of the internal stress was performed according to the interval of the bolt, the thickness of the plate, the distance of the edge, the diameter of the bolt, and the expansion of the construction. Furthermore, the analysis explained the sliding behavior of high-tension bolt joints and showed the geometric non-linear against the large deformation, and the boundary non-linear against the non-linear in the contact surface, including the material non-linear, to best explain the exceeding of the yield stress by sliding. A normally bolted high-tension bolt joint and deduction of bolt tension were also analyzed with the finite element analysis of bridge-sliding behavior.

핵심용어: 고장력볼트, 이음, 유한요소, 기하학적 비선형, 경계 비선형, 재료적 비선형, 미끄러짐

KEYWORDS: High Tension Bolt, Connection, Finite Element, Geometric Nonlinear, Boundary Nonlinear, Material Nonlinear, Sliding

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

공용중인 교량은 시공시에 비해 이음부재 및 볼트에 각종 하중이 작용하는 상태이고, 시간에 따른 볼트 축력의 감소, 이물질 혹은 부식에 의해 표면마찰 상태의 변화, 초기 마찰이음에서 지압이음으로의 변화 등에 의해서 역학적 성능저하 현

1) 정희원, 경희대학교 토목공학과 교수, 공학박사
(Tel. 031-201-2547, Fax. 031-202-8854, E-mail: jsshim@khu.ac.kr)
2) 정희원, 중부대학교 토목공학과 교수, 공학박사(chkim@joohgu.ac.kr)
3) (주)유신코퍼레이션, 공학석사(kdj@yooshin@co.kr)

본 논문에 대한 토의를 2005년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

상이 발생하게 되며, 이와 함께 시공중 볼트체결불량, 과대공, 이음판 용접 및 공용중 차량에 의한 볼트 진동 풀림 또는 볼트와 리벳이음의 병행 사용 등 각종 결함이 발생되고 있다.

그러나, 이음부의 성능저하 및 각종 결함상태를 적합하게 내하력 평가에 반영하고 이에 따른 합리적인 보수·보강방법 및 교량의 주부재인 주형을 연결하는 이음부의 안전성을 확보하기 위한 절대적인 기준이 마련되어 있지 않은 것이 현실이다.

시험적인 연구에 의해 역학적 성질을 규명하기 위해서는 수많은 변수가 고려되어야 하고 이를 위해 많은 시간, 경비 및 노동력을 필요로 하므로 사실상 모든 제 변수를 고려한다는 것은 매우 어려운 실정이다.

따라서, 시험적으로 밝혀내기 어려운 이음부의 결함에 따른 볼트 이음부의 거동과 구조적 특성을 유한요소 해석을 통하여 규명하고 차후 시험에 의한 연구시 충분한 시험결과의 예측, 시험체의 설계 및 경제적인 시험적 연구의 수행을 위한 자료를 제공하는데 본 연구의 목적이 있다.

1.2 연구 범위

〈표 1〉과 같이 각종 결함이 발생하고 있는 교량을 대상으로 현장조사를 하여 결함의 발생위치 및 유형을 분석하고 가장 많이 발생하는 결함을 중심으로 표준시험체를 모델링하고 내부응력 분포 및 미끄러짐 거동에 대한 해석을 수행하였다.

내부응력분포에 대한 해석은 정상체결된 고장력 볼트 이음부 및 볼트간격, 모재 두께, 연단거리, 볼트 구멍 크기, 확공에 따른 결함을 가정하여 구조해석을 수행하였다.

표 1. 조사교량의 결함위치 및 유형

구분	형식	연장	결함위치	결함유형
A교	Steel Plate Girder	450	하부플랜지, 수평브레이싱	볼트축력감소, 볼트누락
B교	Steel Plate Girder	813	하부플랜지, 수평브레이싱	볼트풀림, 볼트부식, 볼트체결불량
C교	Steel Box Girder	1640	하부플랜지, 수직브레이싱	볼트축력감소(볼트누락, 볼트체결불량, 볼트절단, 볼트풀림), 볼트부식, 확공
D교	Truss	554	브레이싱, BR-L, BR-K, 수직보강재, 세로보, BR-U, 상현재	볼트축력감소(볼트풀림, 볼트체결불량, 볼트누락, 볼트절단)
E교	Truss	194	브레이싱, BR-U, BR-K, TR-LCX, 상부플랜지, 수직보강재	볼트축력감소(볼트풀림, 볼트누락), 볼트부식, 너트누락

또한 고장력볼트 이음부의 미끄러짐 거동에 대한 해석은 대변형을 고려한 기하학적 비선형, 접촉면의 비선형을 고려한 경계 비선형, 미끄러짐에 의해 항복강도를 초과하는 부분이 생길 수 있으므로 재료적 비선형 문제를 고려하여 해석하였다. 또한 정상적으로 체결된 고장력볼트 이음부 및 볼트 축력의 감소에 따른 미끄러짐 해석을 수행하였다.

2. 고장력볼트 이음부의 구조해석

2.1 구조해석 모델링

2.1.1 유한요소 선정

유한요소 해석 프로그램은 범용 프로그램 LUSAS V13.3을 사용하였다. 정확한 거동을 규명하기 위하여 본 연구에서는 〈표 2〉 및 〈그림 1〉과 같은 8절점 Solid를 사용하여 3차원 모델링을 구성하였으며 각 절점의 자유도는 X, Y, Z 방향의 병진변위 u, v, w로 3이다.

2.1.2 수치해석 모델

〈그림 2〉와 같은 표준시험체를 사용하여 여러가지 변수를 가정한 후 볼트의 결함에 대한 영향을 검토하였다. 수치해석 모델링은 〈그림 3〉과 같이 기하학적 대칭성을 고려하여 전체 시험체의 1/8만 모델링 하였다. 모재와 이음판이 접촉하는 부분의 경계조건은 접촉요소인 Slideline 요소로 구성하였고 이음판의 경계면은 Master Surface로 모재의 경계면은 Slave Surface로 지정하였다. 판재와 볼트의 접촉면은 마찰을 고려하지 않은 Slideline 요소로 구성하였으며 볼트의 경계면은 Master Surface로 판재의 경계면은 Slave Surface로 지정하였다.

표 2. 8절점 SOLID 요소(HX8M)

구분	내용
Element Name	HX8M
Element Group	3D Continuum
Element Subgroup	Solid Continuum
Element Description	A 3D isoparametric solid element with an incompatible strain field. This mixed assumed strain element
Number Of Nodes	8. The element is numbered according to a right-hand screw rule in the local z-direction.
Freedoms	U, V, W: at each node.
Node Coordinates	X, Y, Z: at each node.

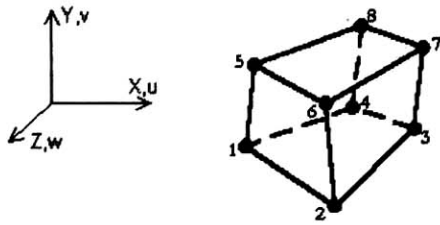


그림 1. 8절점 SOLID 요소 (HX8M)

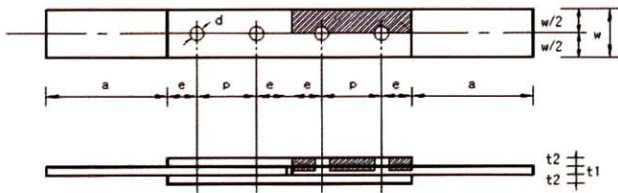


그림 2. 표준시험체

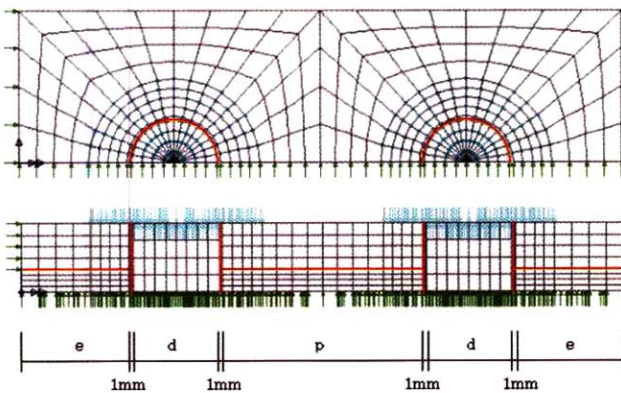


그림 3. 유한요소 모델링

2.1.3 사용한 재료

시험에 사용된 볼트는 고장력볼트는 M22 (F10T)이고 도로교표준시방서의 표준볼트축력 22.6tonf을 도입하였다고 가정하였다.

볼트의 지름은 22mm이고 볼트 구멍의 크기는 24mm로 가정하였으며 와셔의 바깥지름의 크기는 44mm를 적용하였다. 또한 M22볼트의 유효단면적 $A_e = 303.4mm^2$ 이다. 볼트에 도입된 축력은 와셔의 저면에 등분포로 작용한다고 가정하였다.

모재와 볼트의 화학 및 기계적 성질은 <표 3> 및 <표 4>과 같다.

표 3. 모재 및 이음판의 화학성분 및 기계적 성질

강재 종류	화 학 성 분					기 계 적 성 질			
	C	Si	Mn	P	S	항복 강도 (kgf/cm ²)	인장 강도 (kgf/cm ²)	탄성 계수 (kgf/cm ²)	신장률 (%)
SWS	0.1	0.3	1.2	0.01	0.00	3756	5396	2.1E6	23.0
490B	6	8	3	2	9				

표 4. 고장력볼트의 기계적 성질

볼트 종류	기 계 적 성 질			
	항복강도 (kgf/cm ²)	인장강도 (kgf/cm ²)	탄성계수 (kgf/cm ²)	신장률 (%)
M22 (F10T)	9,000	11,000	65.7	20.5

2.2 고장력볼트 이음부의 내부응력분포에 관한 구조해석

현장조사를 통하여 밝혀진 볼트이음부의 각종 결함에 대한 구조적거동 및 영향을 규명하기 위하여, 먼저 결함이 없는 표준시험체의 거동을 분석한 후 각종 결함의 영향을 모사해석을 통해 분석하였다. 고려한 주요변수는 볼트간격, 모재두께, 연단거리, 볼트구멍의 크기이며 이에 따른 최대 내부응력 크기의 변화는 다음과 같다. 여기서, 결함의 의미는 정상 체결되지 않은 모델을 제외한 경우를 의미한다.

내부응력분포는 볼트에 가해지는 정적인 하중에 의해 볼트와 모재 및 이음판의 내부응력분포를 알아내기 위한 해석으로 미소변형 문제이고 정상적인 체결력에 의해 체결된 경우 재료가 탄성영역을 벗어나는 부분이 없으므로 선형 해석을 수행하였다.

2.2.1 무결함 표준시험체

무결함 표준 모델의 내부응력 분포는 <그림 4>와 같으며, 해석모델의 주요치수는 볼트간격 75mm, 모재두께 12mm, 이음판두께 12mm, 연단거리 40mm, 시험편의 폭 80mm 이고 도입축력은 표준도입축력인 22.6 tonf이다.

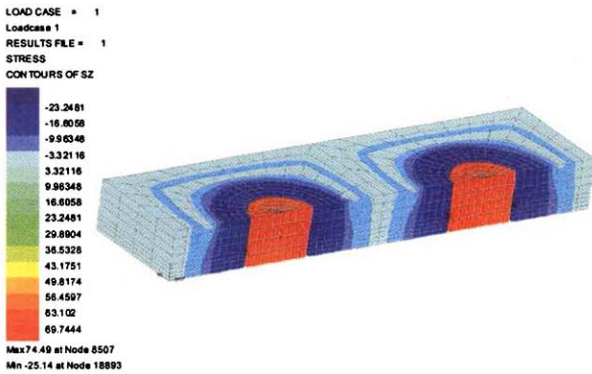


그림 4. 무결함 표준 모델의 내부응력분포

그림 4와 같이 모재와 이음판의 접합면에서 최대응력이 발생하였으며 응력 성분은 주응력 성분이다. 볼트에 도입된 축력의 크기에 따른 모재 및 이음판에 발생하는 최대 내부응력의 크기 및 항복응력과의 비를 <표 5>에서 나타내었다. 여기서, 보정된 항복응력이란 볼트 체결 시 비틀림 하중의 영향에 의해 평균 10%의 항복응력이 감소된다고 가정한 항복응력이다. (참고문헌 4)

표 5. 도입된 볼트축력에 따른 볼트의 내부응력

구분	볼트 장력 (kgf)	최대응력 (A) (kgf/cm ²)	항복응력 (B) (kgf/cm ²)	보정된 항복응력(C) (kgf/cm ²)	A/B (%)	A/C (%)
표준 볼트축력	22600	7449	9000	8100	82.8	92.0
실제 볼트축력	20500	6,756.84	9000	8100	75.1	83.4

2.2.2 볼트간격에 따른 내부응력분포

볼트간격을 최소 50mm, 60mm, 90mm, 110mm 및 150mm까지 증가시켜 가면서 그 영향을 분석하였다.

볼트간격이 도로교 설계기준에 규정된 75mm이하에서는 최대 내부응력이 증가하는 현상을 볼 수 있으나, 75mm 이상 150mm 이하의 간격에서의 최대 내부응력의 크기는 거의 변하지 않았다. 이 결과에 의하면 도로교 표준시방서(참고문헌 1)의 표준볼트간격과 최대 볼트간격에 대한 기준을 준수하면 인접볼트의 응력 중첩에 의한 효과는 없으나 75mm이하에서는 응력 중첩의 효과로 급격한 응력증가 현상이 발생하지만 그 크기는 크지 않다. <그림 5>는 볼트 간격의 증가에 따른 최대응력의 변화경향을 나타낸다.

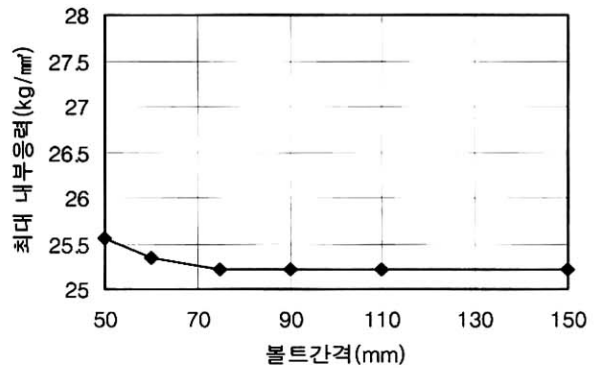


그림 5. 볼트간격에 따른 내부응력분포

2.2.3 모재의 두께에 따른 내부응력분포

모재의 두께와 이음재의 두께가 동일한 경우에서부터 모재 두께가 14mm, 16mm, 18mm, 20mm 및 24mm까지 증가시켜 가면서 최대응력 변화를 분석하였다.

<그림 6>에서와 같이 이음재 두께에 대한 모재두께 비를 1에서 2까지 증가시킬 경우에 내부 최대응력의 크기도 정확하게 선형적으로 증가함을 알 수 있으나 응력 증감치는 매우 작음을 알 수 있다. 따라서 모재 두께에 따른 내부응력의 영향은 크지 않음을 알 수 있다.

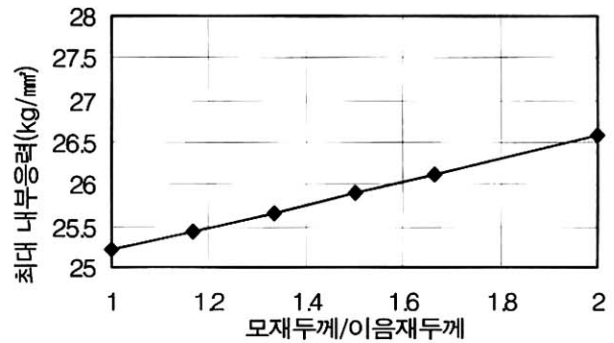


그림 6. 모재두께에 따른 내부응력분포

2.2.4 연단거리에 따른 내부응력분포

연단거리의 불량이 볼트내부응력 분포에 미치는 영향을 분석하기 위하여 연단거리를 25mm, 27mm, 30mm, 35mm, 및 50mm까지 증가시켜 가면서 최대응력의 변화를 분석하였다. 그 결과 <그림 7>에서와 같이 도로교 표준시방서(참고문헌 1)의 최소연단거리 40mm 보다 작은 연단거리의 경우에는 최대응력이 급격히 증가하였고 40mm이상의 연단거리에서는 내부응력의 변화가 거의 없다.

따라서, 최소연단거리의 준수는 필요함을 알 수 있다.

심 확공은 모재에 손상을 줄 수 있으므로 가능한 피해야 할 항목이나 부득이한 경우 이음판 위에 추가의 덧판을 시공하는 등의 대책이 필요하다.

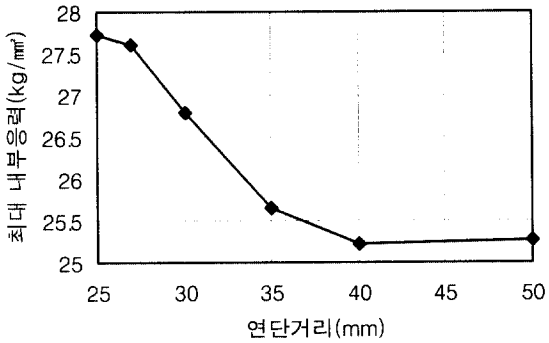


그림 7. 연단거리에 따른 내부응력분포

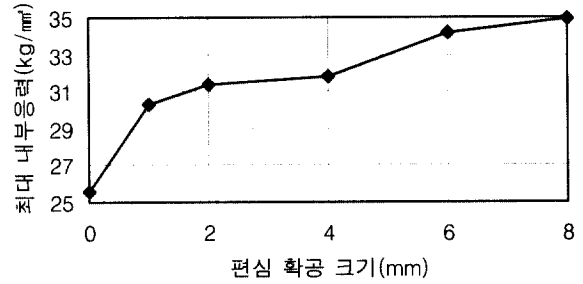


그림 9. 이음판의 편심확공에 의한 내부응력분포

2.2.5 볼트구멍 크기에 따른 내부응력분포

볼트연결부의 시공시 볼트구멍이 시방기준보다 크게 시공되는 경우에 대한 응력 분포를 분석하였다. 볼트구멍크기 24mm, 26mm, 28mm, 및 30mm까지 증가시켜 가면서 최대 내부응력의 변화를 분석하였다.

표준 볼트구멍크기 24mm보다 큰 확공 시험편의 경우 축력의 작용면적이 줄어들기 때문에 <그림 8>과 같이 최대 내부응력이 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이는 확공의 크기정도가 응력집중에 큰 영향을 주기 때문에 판의 손상을 일으킬 수 있으므로 시공시 관리가 필요한 항목임을 알 수 있다.

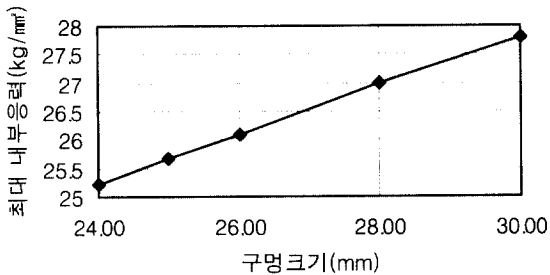


그림 8. 볼트구멍 크기에 따른 내부응력분포

2.2.6 이음판의 편심 확공에 의한 내부응력분포

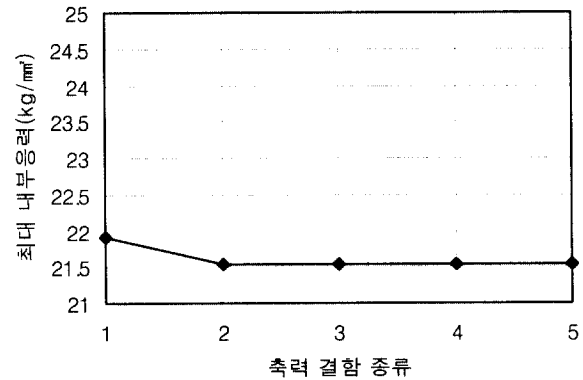
시공시 모재와 이음판의 볼트 구멍이 일치하지 않아 이음판의 구멍을 한쪽으로 확장하여 볼트를 체결한 경우에 해당한다. 이음판의 볼트 구멍을 한쪽으로 1mm, 2mm, 4mm, 6mm 및 8mm를 확장하였을 경우에 대하여 최대 내부응력의 크기를 분석하였다.

그 결과 <그림 9>와 같이 축력의 작용 면적이 줄어들어 내부응력의 크기가 증가하고 또한 편심에 의해 응력이 한쪽으로 집중되어 확공의 크기가 커질수록 응력의 크기가 크게 증가함을 알 수 있다. 따라서 볼트 구멍 불일치로 인한 이음판의 편

2.2.7 축력의 도입이 불량하거나 탈락에 의한 내부응력분포

볼트의 축력이 순차적으로 손실되거나 볼트가 탈락되는 경우, 판의 응력분포에 미치는 영향을 분석한다. 해석모델은 볼트의 수가 4개인 경우를 선정하였으며 볼트의 축력손실이나 탈락은 5가지 경우에 대하여 해석하였다. 볼트는 편의상 우측 볼트부터 b1, b2, b3, b4라 한다.

<그림 10>은 축력이 손실되거나 탈락한 경우에 내부응력분포의 변화를 보여주고 있다. 판사이의 미끄러짐이 발생하지 않은 경우에는 응력변화가 거의 없음을 보여주나, 전체 축력의 감소에 의한 판의 미끄러짐 발생, 볼트의 전단변형, 판의 소성 지압응력 발생을 고려할 경우에는 응력의 변화가 급격히 발생할 것으로 판단된다. 그러나, 이는 볼트와 판의 탄소성 접촉변형과 면사이의 비선형 마찰변형을 동시에 고려할 때 분석이 가능할 것으로 판단된다.



- 1 : 정상적으로 체결
- 2 : b1볼트의 축력이 20% 감소
- 3 : b1볼트의 축력이 50% 감소
- 4 : b1볼트가 탈락
- 5 : b1볼트 탈락, b3볼트의 축력이 50% 감소

그림 10. 축력 결함에 따른 내부응력분포

2.3 고장력볼트 이음부의 미끄러짐 거동에 관한 구조해석

볼트 축방향으로의 큰 축력을 받고 있는 고장력볼트 이음부의 모재에 인장하중이 작용하는 경우 판사이의 마찰강도보다 큰 인장하중이 작용하면 판사이에는 미끄러짐 현상이 발생한다. 판사이의 마찰변형은 대변형이 되므로 기하학적 비선형 문제가 된다. 미끄러짐 이전에는 하중이 판 사이의 마찰에 의해 전달되나 미끄러짐 이후에는 판과 볼트 사이의 지압에 의해 하중이 전달된다.

마찰계수는 마찰면의 처리에 따라 다르나 시방서에 규정된 0.4를 사용하였다. 이 경우 표준모델에서 정상적으로 체결된 경우의 미끄러짐 하중은 36.16tonf 이다.

정상적으로 체결된 경우와 도입축력 부족에 따른 미끄러짐 해석을 수행하였다.

2.3.1 표준모델의 미끄러짐 해석

해석모델의 주요치수는 볼트간격 75mm, 모재두께 20mm, 이음판두께 12mm, 연단거리 40mm, 시험편의 폭 80mm 이고 도입축력은 표준도입축력인 22.6 tonf이다. 볼트에 도입된 축력을 고정시키고 모재에 작용한 인장력을 증가시켜 가면서 해석하였으며 미끄러짐 발생시 대변형 문제가 되므로 기하학적 비선형을 고려하고 응력의 증가로 탄성 범위를 벗어나는 부분이 생기므로 재료적 비선형 문제를 고려하여 해석을 수행하였다. 또한 모재와 이음판, 볼트와 이음판 사이의 접촉 문제를 고려하였다.

편의상 이후에 진행되는 해석에서 모재의 인장력이 작용하는 측인 바깥쪽 볼트의 명칭을 b1이라 하고, 안쪽 볼트의 명칭을 b2라 한다.

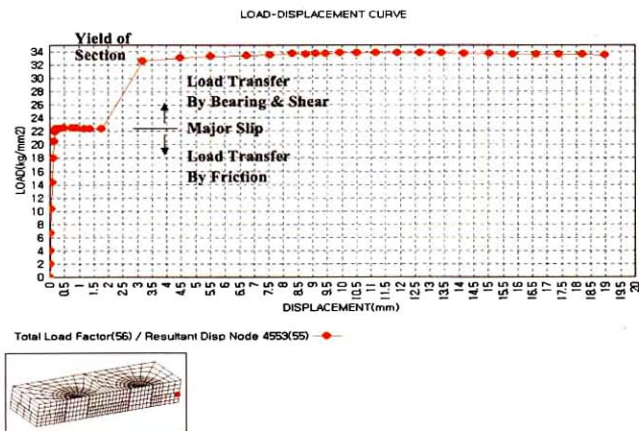


그림 11. 표준모델의 미끄러짐 거동

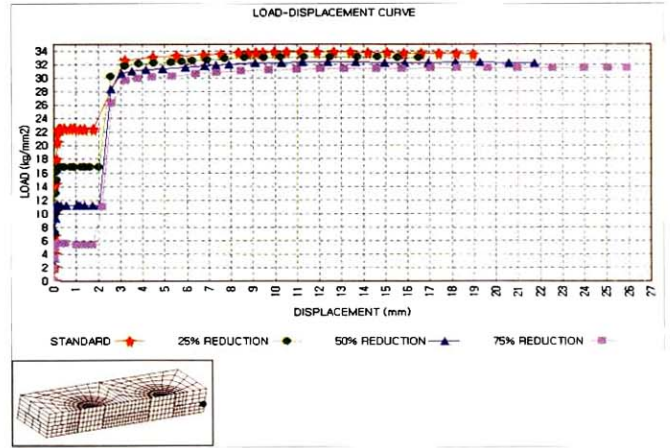


그림 12. 전체 볼트 축력감소에 따른 미끄러짐

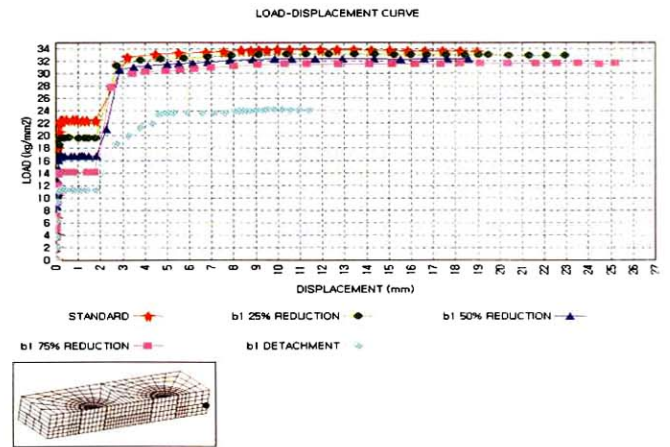


그림 13. 바깥 볼트(b1) 축력 감소에 따른 미끄러짐

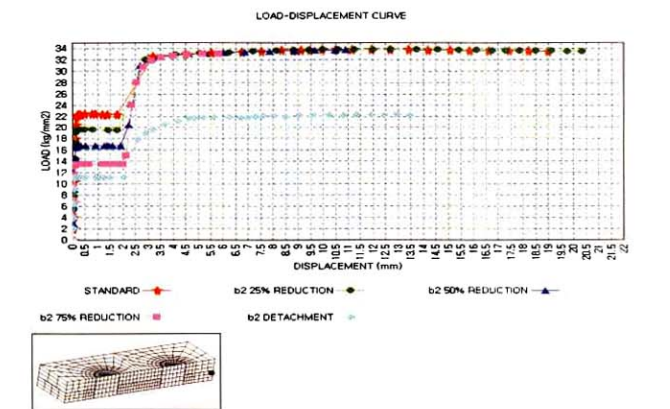


그림 14. 안쪽볼트(b2) 축력감소에 따른 미끄러짐

〈그림 11〉은 표준 모델 모재의 하중-변위 곡선을 보여준다. 주미끄러짐 하중이 작용하기 전에는 마찰에 의해 단면이 크게 저항하나 미끄러짐 발생 이후에는 볼트와 판이 접촉할 때까지 저항 없이 미끄러진다. 볼트와 판이 접촉한 이후에는

모재의 단면이 항복할 때까지 지압에 의해서 저항하고 모재의 단면이 항복한 이후에는 큰 변형이 일어나게 된다.

2.3.2 볼트 축력 감소에 따른 미끄러짐 해석

현장조사 결과 가장 크게 문제가 되고 있는 볼트 축력 도입 부족에 대하여 미끄러짐 해석을 수행하였다. 볼트의 위치에 따른, 그리고 도입된 볼트 축력의 결합율에 따른 해석을 하여 거동을 분석하였다.

전체 볼트에 축력의 감소가 있을 경우, 바깥쪽 볼트(b1)에 축력의 감소가 있을 경우, 안쪽 볼트(b2)에 축력의 감소가 있을 경우에 대하여 각각 25%감소, 50%감소, 75%감소, 탈락의 결합을 모사한 의사시험체의 구조해석을 실시하여 그 거동을 분석하였다.

〈그림 12〉는 전체 볼트의 축력 감소율에 따른 미끄러짐 거동을 보여 주고 있고, 〈그림 13〉은 바깥쪽 볼트(b1)의 축력 감소율에 따른 미끄러짐 거동을 보여주고 있으며, 〈그림 14〉는 안쪽 볼트(b2)의 축력 감소율에 따른 미끄러짐 거동을 보여주고 있다. 각각의 그림을 보면 바깥쪽 볼트에 축력 결합이 발생할 경우 저항강도가 더 떨어짐을 확인할 수 있다.

축력이 감소함에 따라 미끄러짐 하중도 선형적으로 감소하나 미끄러짐 이후 모재의 강도에 여유가 많기 때문에 모재의 단면이 항복에 이를때까지 지압에 의한 강도는 커진다. 그러나 볼트가 탈락한 경우에는 미끄러짐 강도와 지압강도 모두 현저히 떨어지는 것을 볼 수 있다. 미끄러짐이 발생하여 볼트와 이음판이 닿게 되면 초기 축력에 의해 항복응력에 가까운 높은 응력이 걸려 있던 볼트에 추가의 응력이 발생하게 되고 볼트가 항복응력에 도달하면 볼트 머리가 떨어져 나가는 볼트 탈락현상이 발생할 가능성도 높아진다. 따라서 낮은 미끄러짐 강도에 의해 미끄러짐이 발생되고 볼트가 탈락하게 되면 이음부 전체의 저항능력이 현저히 떨어지게 되어 이음부의 파괴를 유발하게 된다.

그러므로 볼트 축력의 관리는 고장력볼트 이음부의 관리에 있어서 가장 중요한 항목이라 할 수 있다. 현재 공용중인 교량에 체결되어 있는 고장력볼트의 축력을 현장에서 측정할 수 있는 계기가 거의 없는 실정이고 초음파, 전자력 등에 의해 축력을 측정하는 장비가 개발되어 있긴 하나 아직 현장에서 실용적으로 사용하여 볼트 축력의 감소를 정확하게 측정하지는 못하고 있다. 또한 공용중인 교량의 보수·보강 기준이 마련되어 있지 않아 신설교량의 설계기준에 맞추어 보수·보강이 이루어지고 있는 형편이므로 공용중인 교량의 정확한 축력 감소의 측정과 축력 감소에 따른 보수·보강 지침의 마련 또한 시급하다 할 수 있다.

3. 결론

본 논문은 고장력볼트 이음부의 결합에 따른 내부응력분포와 미끄러짐 거동을 파악하여 고장력볼트 이음부의 결합 원인을 밝혀내고 결합에 따른 보수·보강 기준을 마련하는데 있어 해석적인 접근을 하였다는데 취지가 있다.

구조해석을 통한 결론은 다음과 같다.

- (1) 정상체결된 고장력 볼트 이음부의 내부응력은 항복응력에 도달하지는 않았으나 볼트의 경우 항복응력에 가까운 응력상태가 됨을 확인하였다.
- (2) 볼트간격에 따른 최대내부응력의 크기에는 큰 영향이 없으나 시방서에 규정된 최소 볼트 간격 이하에서는 응력의 간섭에 의해 최대내부응력이 증가됨을 확인하였다.
- (3) 모재 두께가 증가함에 따라 최대내부응력의 크기도 선형적으로 증가하였으나 그 크기가 크지 않다.
- (4) 시방서에 규정된 최소 연단거리 이하에서는 볼트의 체결력에 의해 모재의 최대 내부응력이 증가하였으므로 최소연단거리의 준수는 필요하다.
- (5) 볼트 구멍이 커지게 되면 이음판에 닿는 와셔의 면적이 줄어들기 때문에 최대내부응력의 크기가 증가한다. 작은 크기의 확공에서는 큰 영향이 없으나 과도한 확공은 내부응력의 큰 증가를 가져오므로 피해야한다.
- (6) 시공시 볼트 구멍이 일치하지 않아 이음판의 구멍을 한쪽으로 확공한 경우에는 축력 작용 면적이 줄어들고 동시에편심의 영향에 의해 내부응력이 크게 증가하므로 시공시 대책이 필요한 항목이다.
- (7) 정상적으로 체결된 고장력 볼트 이음부의 마찰강도는 설계된 마찰강도와 같게 나타났으며 미끄러짐 이전에는 마찰에 의해, 미끄러짐 이후에는 지압에 의해 저항한다.
- (8) 볼트 축력의 감소는 마찰강도를 저하시키고 낮은 인장하중에서 볼트가 미끄러져 판과 접촉하게 되어 볼트가 먼저 탈락하게 된다면 기대한 이음부의 강도를 얻을 수 없으므로 볼트 축력의 관리는 매우 중요한 항목이며 이에 대한 보수·보강 지침이 차후 마련되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- 건설교통부 (1996) 도로교표준시방서.
- 건설교통부 (1997) 강도료교상세부설계지침.
- 건설교통부 (2001) 도로교 콘크리트 상판의 잔존수명 예측을 위한 전문가 시스템 개발에 관한 연구.
- 동부건설주식회사 기술연구소 (1994) 고장력 볼트 및 T/S 볼트 시공지침.
- 박용명, 성택룡 (2000) 내후성강재 고장력볼트 이음부 미끄럼계수 평가 실험(I), 한국강구조학회논문집, 제12권 2호, pp.167~175.
- 박용명, 성택룡 (2000) 내후성강재 고장력볼트 이음부 미끄럼계수 평가 실험(II), 한국강구조학회논문집, 제12권 2호, pp.177~185.
- 이승용 (1998) 고장력 볼트 이음부의 역학적 거동에 영향을 미치는 제인자의 평가, 한양대학교 석사학위논문.
- 이승용, 장동일 (1998) 고장력 볼트 이음부의 정적 및 피로 거동에 관한 연구(I) : 마찰면의 표면처리 조건의 영향, 대한토목학회논문집, 제18권 제I-4호, pp.507~ 515.
- 이승용, 조선규, 장동일 (1998) 고장력 볼트 이음부의 정적 및 피로거동에 관한 연구(II) : 볼트 구멍 크기의 영향, 대한토목학회논문집, 제18권 제I-5호, pp.725~ 736.
- 이승용, 경갑수, 장동일 (1999) 방청처리한 고장력 볼트 이음부의 틸렉세이션 및 미끄러짐 거동에 관한 실험적 연구, 대한토목학회논문집, 제19권 제I-5호, pp.697~ 705.
- 이승용, 경갑수, 박용걸 (2001) 고장력 볼트 마찰이음에서 모재 틈새간격의 영향, 대한토목학회논문집, 제21권 제 2-A호, pp.269~278.
- 이승용, 경갑수, 성기태 (2000) 채움판을 갖는 고장력 볼트 이음부의 미끄러짐 거동, 대한토목학회논문집, 제20권 제6-A호, pp.1005~1015.
- 장기택 (1995) 볼트 접합부의 비선형 해석을 위한 수치해석 방법에 관한 연구, 한국과학기술원 석사학위논문.
- 조선규, 홍성욱 (1997) 표면상태에 따른 고장력볼트 마찰이음부의 거동에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 제9권 3호, pp.421~430.
- 최일윤, 이승용, 경갑수, 장동일 (1996) 축력 및 표면조도를 감소시킨 고장력 볼트 이음부의 정적 및 피로거동, 대한토목학회논문집, 제16권 제I-5호, pp. 607~619.
- 최일윤 (1995) 고장력볼트 마찰이음의 피로거동에 관한 연구, 한양대학교 석사학위논문.
- 최준혁 (1996) 고장력 볼트 마찰이음부의 정적 및 피로거동에 관한 실험 및 해석적 연구, 한양대학교 석사학위논문.
- 한국강구조학회, 1995, 강구조편람 제2권 강구조의 접합.
- Arthur P. Boresi, Richard J. Schmidt, Omar M. Sidebottom, Fifth Edition (1993) Advanced Mechanics of Materials, John Wiley & Sons
- Bathe (1996) Finite Element Procedures, Prentice Hall.
- David S. Burnett (1987) Finite Element Analysis, Addison Wesley.
- James A Swanson and Roberto T. Leon (2000) Bolted Steel Connections : Tests in T-Stub Components, *Journal of Structural Engineering*.
- John W. Fisher and John L. Rumpf (1965) Analysis of Bolted Butt Joints, *Journal of the Structural Division*, Proc. of the ASCE, Vol.91, ST5, pp.181~203.
- Jun Yang and John T. DeWolf (2000) Relaxation in High-Strength Bolted Connections Using Galvanized Steel, *Journal of Bridge Engineering*.
- V. Kradinov, A. Barut, E. Madenci, D.R. Ambur, (2001) Bolted Double-lap Composite Joints under Mechanical and Thermal Loading, *International Journal of Solids and Structures*.
- William B. Bickford (1993) Mechanics of Solids : Concepts and Applications, IRWIN

(접수일자 : 2004. 4. 6 / 심사일 2004. 4. 30 / 심사완료일 2004. 7. 26)