

고장력볼트 연결부의 미끄럼 및 소성해석에 의한 안전도 연구

방명석

충주대학교 안전공학과

(2003. 7. 1. 접수 / 2003. 11. 21. 채택)

The Safety Study on High Tension Bolted Splice by Sliding and Plastic Analysis

Myung-Seok Bang

Department of Safety Engineering, Chung-Ju National University

(Received July 1, 2003 / Accepted November 21, 2003)

Abstract : In this study is proposed the advanced elasto-plastic analytical method which can identify complex structural behaviors on the splice part of steel structures such as sliding and plastic contact problem between splice plates and bolts. Complicated boundary conditions and various manufacturing defects are considered in various analytical cases. In the design or repair phase the plastic behavior and ultimate strength of splice parts should be very carefully verified to extend the service life of steel structures.

Key Words : bolt, splice, sliding, contact, plasticity, axial force, prestress loss

1. 서 론

최근 구조물의 거대화 와 장대화에 따라 콘크리트 구조물에 비해 자중이 작고 강성이 큰 강구조물이 많이 건설되고 있다. 강구조물에서 일반적으로 많이 쓰이고 있는 연결방법으로는 용접에 의한 방법과 고장력볼트에 의한 방법이 있다. 용접에 의한 연결 방법 중 공장용접의 경우 공장용접 품질관리규정에 따라 실시하므로 연결의 신뢰성이 있다고 인정되고 있으나, 현장용접의 경우 용접기능공의 감소에 따른 인건비 상승과 이에 따른 기능도 저하, 현장기술자의 용접에 대한 인식부족, 현장용접 품질관리체제의 미비, 용접 후 검사 및 품질관리의 어려움 등으로 많은 문제점이 발생하고 있다. 그러므로 연결부의 품질관리가 비교적 쉬운 고장력볼트에 의한 연결이 많이 사용되고 있다. 고장력볼트를 사용한 연결방법의 가장 큰 특징¹⁾은, 축력을 도입하여 그 결과 생기는 연결재 사이의 압축력에 의해서 부재력을 전달하는 것이다. 따라서 고장력볼트 연결부에서는 볼트 및 리벳을 사용할 때 접합부에 생기는 전단력의 국

부적인 집중현상이 없으며, 응력전달이 원활하고 반복하중에 대해서도 높은 피로강도를 발휘할 수 있다.

지금까지 고장력볼트 이음부의 거동에 대한 연구는 시험을 통한 연구²⁾가 대부분이었다. 시험조건은 단순인장응력 하에서 행해진 것이 대부분이고, 휨응력이나 복합응력 하에서 실시된 경우는 매우 적다. 이 이유는 복합하중조건에서는 시험의 규모가 커지는 이유외에도, 시험적인 결과만으로 역학적 성질을 결정하기 위해서는 많은 변수의 가정이 필요한 데, 가정치와 실험결과와의 관계를 연계시키는 데 많은 어려움이 있다.

고장력볼트 연결부에 대한 해석적인 연구^{3,4)}는 매우 많은 연구가 실시되었으나 탄성후거동에 대한 해석결과는 아직 미흡하다. 강고 볼트연결부가 교량의 주부재인 주형의 세그먼트를 연결하고 있는 주요부위임에도 불구하고, 시간에 따른 볼트축력의 감소, 확공, 이물질 혹은 부식에 의해 표면마찰 상태의 변화, 초기 마찰이음에서 지압이음으로 변질 등 다양한 결함에 의한 치명적인 구조결함에 관한 합리적인 해석 및 평가방법이 마련되어 있지 않은 실정에 있다. 본 연구에서는 볼트연결부의 결함에 의

한 구조적손상 메카니즘을 미끄럼현상(Sliding), 접촉문제(Contact), 소성변형(Plastic deformation)을 고려하여 해석할 수 있는 비선형해석방법을 개발하고자 한다.

2. 접촉탄소성 문제의 수치해석기법

2.1. 기본적인 적용이론

고장력볼트 연결부에 나타나는 접촉문제에서 강판과 볼트 사이의 마찰현상은 하중경로에 종속적이므로 마찰현상을 해석할 때에는 하중경로를 추적할 수 있는 비선형 증분해석이 필요하다. 증분해석을 위하여 기준상태에서는 두 접촉물체가 평행상태에 있고, 물체내의 응력상태를 이미 알고 있다고 가정한다. 각 증분 단계에서 증분 양이 충분히 작다고 가정하고 선형지배방정식을 구성한다.

일반적으로 구조물에 대한 문제를 수식화하여 해석할 때에는 Lagrangian 수식이 Eulerian 수식보다 훨씬 자연스럽고 효과적이다. Lagrangian 수식은 Marcal과 Rice⁴⁾에 의하여 유한요소법에 의한 응력해석에 도입되었으며 이들은 모든 변수를 초기상태로 표현하였다. 그러나 소성변형은 현재 응력상태에 따라 그 수식이 표현되므로 모든 변수를 초기상태로 표현하는 수식 방식은 적용하기가 불편하다. 이 점을 개선하기 위해서 McMeeking과 Rice⁵⁾에 의하여 제안된 Updated Lagrangian(UL) 수식은 매 증분과정에서 증분 후의 상태를 초기상태로 변환하는 방식으로 소성해석을 수행하기 때문에 적용하기가 편리하다. 그리고 접촉문제(Contact problem)는 기하학적 비선형해석에서 접촉에 의한 대변형을 고려해야 하므로 기하학적 비선형 해석을 수행한다.

2.2. 연결부 미끄러짐 및 접촉문제 해석기법

접촉과정에 대한 사전지식이 없이 임의의 부분이 접촉되거나 분리되어 있는 접촉면의 상대변위나 응력을 해석할 때는, 접촉이 발생할 가능성이 높은 부분이나 높은 응력구배를 가진 부분에 요소를 집중적으로 만들어 미끄러짐부(Slideline part)를 정의하여 해석하는 방법을 사용한다. 초기도입축력 때문에 마찰이음상태에 있던 모재와 연결부가 외력으로 인해 미끄러짐이 발생하여 마찰이음에서 지압이음으로 바뀌고, 이 결과로 소성접촉문제가 발생하는 경우에 해석기법은 다음과 같다.

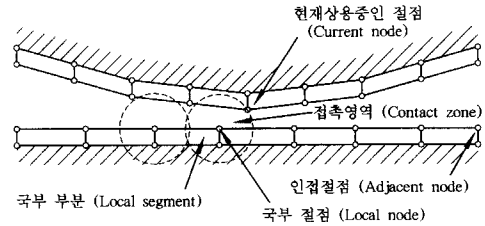


Fig. 1. Decision method of contact area

2.2.1. 미끄러짐부 구성요소

미끄러짐부는 2차원 또는 3차원 고체요소의 접촉에 의한 상대변형 모델링에 사용되며, 각 미끄러짐부는 주표면(Master surface)과 종속표면(Slave surface)의 두가지 표면으로 구성된다. 미끄러짐부의 정의에 필요한물성치는 미끄러짐부의 강성, 마찰계수, 접촉영역 감지계수, 미끄러짐 연장거리 등으로 강성과 마찰계수는 물성치로 입력하고 나머지는 해석전에 초기치를 가정하여 해석하면서 조정한다.

2.2.2. 미끄러짐 거동의 해석과정

미끄러짐부(Slideline part)에 사용되는 절점과 요소(Segment)는 Fig. 1과 같다. 접촉표면의 상호작용을 고려하고 외력에 의한 부재관통을 막기 위해 벌칙함수방법(Penalty function method)을 사용한다. 미끄러짐부의 해석과정⁶⁾은 각 접촉대상절점의 접촉여부에 대한 연속적인 추적으로 시작하며, 현재 사용중인 절점에서 가장 근접한 국부절점을 찾기 위해 근접한 모든 절점에 대해 국부절점 찾기를 수행한다. 접촉영역에서 급격히 변화하는 표면기하형상에 대해서는 세밀한 검토를 위해 현재 사용중인 절점과 국부요소절점(Local segment node) 사이의 최소거리를 찾는다. 즉, 현재 사용중인 절점과 국부절점 사이의 거리보다 현재 사용중인 절점과 인접요소절점(Adjacent segment node) 사이의 거리가 크게 되면 이 과정을 중지한다. 다음으로 접촉영역(Contact area) 감지과정인데 접촉영역은 각 국부절점 주위에 정의된다. 접촉은 현재 사용중인 절점이 접촉영역내에 위치할 때 발생한다. 접촉영역은 각 미끄러짐면(Slideline surface)에 대해 다른 값을 가지며 요소길이(Segment length)가 변함에 따라 연속적으로 수정된다.

접촉영역반경은 접촉영역 감지매개변수와 두 이웃하는 접촉 절점사이의 최대 거리의 곱으로 나타난다. 접촉영역 감지 매개변수는 인접한 접촉영역의 겹침을 방지하기 위하여 명시적(Explicit) 동적해석

에서는 5/9, 내재적(Implicit) 동적해석과 정적해석에서는 10/9를 사용한다. 만일 0.5보다 작은 값을 사용하면 접촉면에서 관통이 발생하는 것을 인식할 수 없게 된다. 접촉감지를 위한 사전해석을 하지 않고 해석하는 경우에는 영역매개변수 값을 100과 같은 큰 수를 사용하면 된다. 각 접촉절점의 강성은 이웃하는 요소의 강성크기에 요소크기를 고려하여 결정한다. 이와 같은 해석과정을 통해 고장력볼트 이음부를 해석할 때, 연결판의 접촉면을 주요소(Master part), 모재의 접촉면을 종속요소(Slave part)로 정의하였으며, 접촉면의 마찰을 고려하기 위하여 일반적인 강재에서 사용되는 마찰계수 0.4를 사용하였다. 연결부재와 볼트사이의 접촉에는 마찰을 고려하지 않는 비마찰해석을 수행하며, 연결부재와 볼트를 각각 주요소와 종속요소로 사용하였다. 기하학적 비선형해석에 해당하는 미끄러짐 및 접촉해석은 하중제어방법에 속하는 Modified Newton-Raphson방법과, Arch-length방법을 병용하여 사용하였다.

3. 볼트연결부 수치해석

3.1. 수치해석 모델링

연결부의 미끄러짐 거동을 파악하기 위한 부재 모델링에서 대칭성을 고려하여 Fig. 2와 같이 전체 모델의 1/8로 모델링하였다. 구속조건은 각 대칭단면에 대해 대칭단면방향을 구속시켰으며, 볼트의 경우 강제운동의 효과를 막기 위해 임의의 한 절점을 완전 고정시켰다.

모재와 연결판의 접촉조건을 묘사하기 위해 접합면의 모재부분을 미끄러짐의 종속요소(Slave part)로, 접합면의 연결판을 주요소(Master part)로 적용하였다. 도입축력은 와서단면적과 동일한 크기로 연결판 표면에 등분포하중을 압축력으로 재하시키고, 볼트 표면에 대해 같은 크기의 인장력을 등분포하중으로 재하시켰다. 이와 같은 하중조건 하에서 휨인장력이 나 순수인장력을 나타내는 외부하중을 모재 우측면

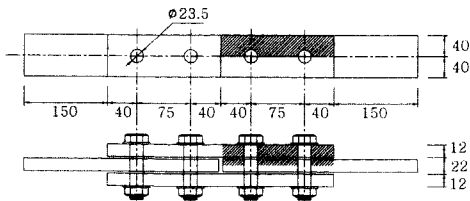


Fig. 2. 1/8 parts of analytical modelling

에 등분포하중으로 재하시켰다. 여기에서 도입축력과 외력은 동시에 재하되는 것이 아니라 도입축력이 작용하는 상태에서 외력을 작용시켰다. 고장력볼트에 의해 압축력을 받고 있는 이음부의 미끄러짐 및 접촉 탄소성해석을 위해 사용된 3차원 요소는 HX8(8-Noded HeXahedral Element)⁶⁾이다. 이 요소는 8절점을 갖는 3차원 직육면체형의 블록요소(Solid element)이다. 본 연구에서 쓰인 연결부의 재료비선형 해석을 위한 소성모델은 일반적으로 강재에 쓰이는 Von Mises 모델을 사용하였다. 탄성해석에는 등방성(Isotropic), 소성해석에는 Von Mises 모델, 응력경화해석에는 운동학적 방법(Kinematic)을 사용하였다. 강성도 행렬 계산시 사용된 적분법은 전단구속(Shear locking)현상을 막기 위해 감차적분을 사용하였다.

3.2. 수치해석 결과 분석

Fig. 3 과 Fig. 4, Fig. 5는 연결판의 와서 부분에 볼트의 도입축력 22.6tonf의 압축력을 받고 있는 상태에서 주형인 모재에 12tonf의 인장력이 작용할 때 연결판의 해석결과이다. Fig.3은 주응력방향을 나타내는데, 연결판의 우측 볼트 주위의 점(1,2,3,4)은 소성변형이 발생한 경계점을 나타내며 경계점 내부가 소성영역이고 외부는 탄성거동을 보여준다.

Fig. 4는 면내하중인 모재의 인장력과 도입축력에 의한 뒤틀림변형이 발생한 결과이다.

모재의 경우 우측 단면에 등분포의 형태로 인장하중이 작용하고 있을 때 우측볼트 주위가 좌측볼트 주위 보다 큰 변형이 발생함을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 연결판에 작용하는 도입축력과 더불어 모재의 인장력이 연결판의 뒤틀림에 직접적인 영향을 주는 것을 알 수 있는데 인장력이 작용하는 우측이 먼저 소성변형을 보여주고 있다.

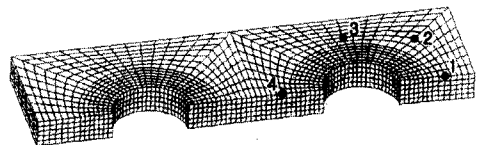
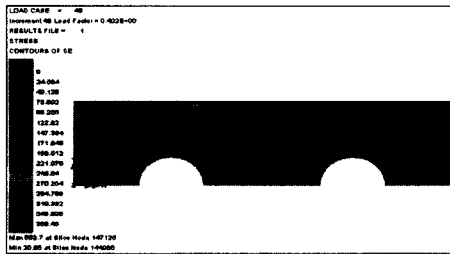


Fig. 3. Boundary point of plastic strain

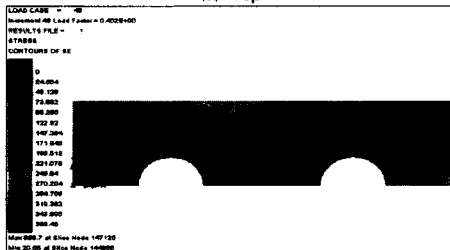


Fig. 4. Deformed shape of splice

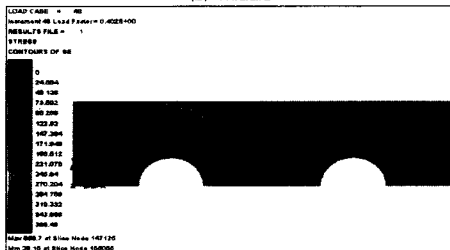
Fig. 5는 연결판의 두께방향으로 응력분포를 보여 주고 있다. 해석시에 응력-변형률 곡선은 탄소성(Bilinear elasto-plastic) 재료모델을 사용하고, 마찰계수(미끄러짐계수)는 도로교 표준시방서⁷⁾에서 제시하고 있는 0.4를 사용하였다. 이는 소형시험편에서 후피(Mill scale)를 제거하고 시험하는 경우 미끄러짐 계수는 평균 0.5이상을 얻을 수 있으나, 미끄러짐 하중의 변화나 볼트축력의 감소를 고려하여 0.4로 택한다는 규정에 근거하여 0.4를 사용하였다. 연결판의 경우에 도입축력의 크기가 12.3tonf 일 때 위치 3(Fig. 3)에서 최대변형률이 0.002으로 항복변형률(0.002)에 도달하고, 도입축력이 22.6tonf 에서는 연결판의 상부에 작용하는 압축력의 영향으로 소성영역이 확대되어 연결판의 두께방향으로 응력분포가 다르게 나타나고 있음을 Fig. 5를 통해서 알 수 있다. 볼트사이의 경우에 상면에서는 소성영역이 발생하나 중하위면에서는 탄성거동을 함으로서 이러한 영향으로 찌그러짐이 발생하게 됨을 Fig. 4와 Fig. 5가 보여준다.



(a) Top



(b) Middle



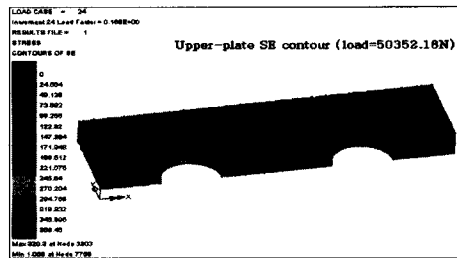
(c) Bottom

Fig. 5. Stress distribution of splice plate

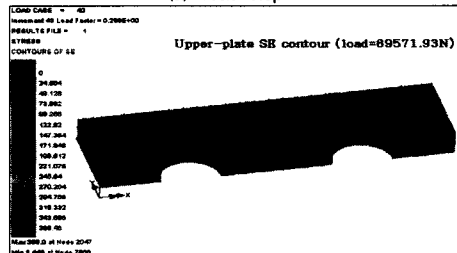
Fig. 6은 연결판의 하중증가에 따른 소성영역분포의 변화를 나타내고 있다. 볼트에 의한 도입축력의 영향으로 볼트 구멍주위에 압축력이 존재하면서 미끄러짐이 발생하기 전에는 마찰이음으로 모재와 연결판이 일체로 거동을 하지만, 미끄러짐이 발생한 후에는 지압이음으로 바뀌게 된다. Fig. 6에서 하중단계 I (Load step I)은 미끄러짐 발생 전, 하중단계 II는 미끄러짐 발생 후, 하중단계 III는 소성변형에 도달한 하중단계를 나타낸다.

하중단계 III에서 소성영역이 45°방향으로 전파되어 가는 것을 볼 수 있는 데, 이는 인장하중에 의한 최대주응력 방향으로 소성영역이 전파되어감을 알 수 있다.

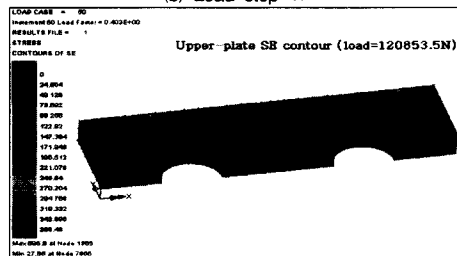
Fig. 7은 모재의 하중증가에 대한 소성영역분포 변화를 나타내고 있다. 모재의 인장응력의 영향으로 모재 우측볼트 주변이 먼저 소성영역에 도달하였고 서서히 좌측볼트 주변으로 소성영역이 확대되어가고 있음을 알 수 있다.



(a) Load step I

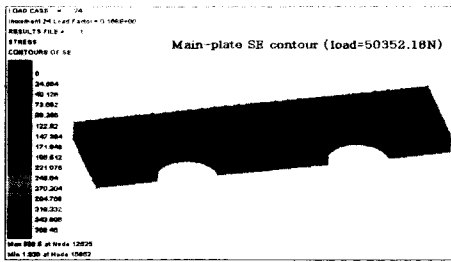


(b) Load step II

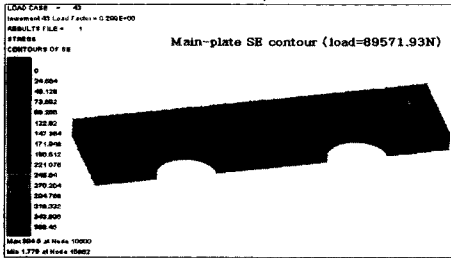


(c) Load step III

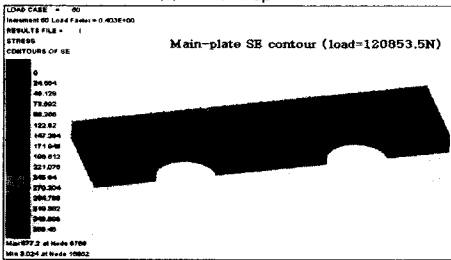
Fig. 6. Plastic region propegation of splice



(a) Load step I



(b) Load step II



(c) Load step III

Fig. 7. Plastic region properagation of girder



Fig. 8. Deformation shape of girder

Fig. 8에서는 모재의 경우 우측 단면에 등분포의 형태로 인장하중이 작용하고 있을 때 우측볼트 주위가 좌측볼트 주위 보다 큰 변형이 발생함을 알 수 있다. 그러나 두께방향에 대해서는 Fig.7에서처럼 상하면의 응력분포가 동일하게 전파됨으로서 뒤틀림 현상이 발생하지 않음을 Fig. 8이 보여주고 있다.

4. 결 론

고장력볼트 연결부 결합에 대한 미끄러짐 및 접촉·탄소성해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 고장력볼트에 의해 축력을 받으며 미끄러짐 및 접촉·탄소성거동을 하는 연결부의 해석방법을 제안하였다. 본 연구를 통하여 볼트연결부의 정확한 안전도 파악을 위해서는 미끄러짐 및 접촉문제와 탄소성거동을 고려한 해석이 필요함을 알 수 있다.

2) 수치해석결과 고장력볼트 연결부를 구성하는 연결판과 모재가 마찰이음에서 지압이음으로 바뀐 후에는 하중증가에 따른 소성영역의 분포가 다르게 변해가므로 소성설계 및 보수보강시에는 이를 고려한 대책이 필요하다. 즉, 연결판은 하중증가에 따라서 뒤틀림으로 들뜸형태의 파손이 발생하고 모재는 단순인장파단이 발생하므로 각 부재에 맞는 대책이 강구되어야 한다.

3) 향후 연구과제로 복잡한 구조거동을 하는 고장력 볼트연결부에 대한 정확한 규정 마련이 필요하다. 또한 탄성후거동(postelastic behavior)에 대한 실험적연구가 쉽지 않은 상황에서 많은 해석적연구가 있어야 할 것이다.

참고문헌

- 1) 박용명, 성택룡, “내후성장재 고장력볼트 이음부 미끄럼계수 평가 실험(I,II)”, 한국강구조학회 논문집, 제12권, 제2호, pp. 167-175, 2000.
- 2) 송준혁, 김종규, 강희용, 양성모, “체결력에 따른 볼트 결합부의 접촉응력분포계수 평가”, 한국공작기계학회지, 제8권, 제2호, pp. 73-79, 1999.
- 3) 김성훈, 이승용, 최준혁, 장동일, “고장력볼트 이음부의 내부 압축응력 분포”, 한국강구조학회 논문집, 제9권, 제2호, pp. 171-179, 1997.
- 4) H. D. Hibbit, P. V. Marcal and J. R. Rice, “A Finite Element Formulation for Problem of Large Strain and Large Deformation”, Int. J. Solids Struct., Vol. 6, pp. 1069-1086, 1970.
- 5) R. M. McMeeking and J. R. Rice, “Finite Element Formulations for Problems of Large Elastio-Plastic Deformation”, Int. J. Solids Struct., Vol. 11, pp. 601-616, 1975.
- 6) LUSAS, “Powerfull FE technology for specialist applications”, Ver. 13.4 FEA Ltd., 2002.
- 7) 건설교통부, “도로교 표준시방서”, 1996.