

체결력을 고려한 콘크리트 삽입 앵커볼트의 간편 유한요소 모델

노명현¹ · 이상열^{2*} · 박규식¹

¹포항산업과학연구원 강구조연구소, ²안동대학교 토목공학과

Simplified Finite Element Model of an Anchor Bolt Inserted Through Concretes Considering Clamping Forces

Myung Hyun Noh¹, Sang Youl Lee^{2*} and Kyu Sik Park¹

¹Steel Structure Research Division Research Institute of Industrial Science & Technology, Incheon 406-840, Korea

²Department of Civil Engineering, Andong National University, Andong, 760-749, Korea

Abstract

In this study we proposed a simplified finite element model of anchor bolt system inserted through concrete structures considering clamping forces. The three different finite element types using LS-DYNA are applied for numerical efficiency of the anchor bolt modeling. Combined beam and solid elements are used to reflect the tension state at internal part of anchor bolt due to torques. The clamping forces due to torques are considered by introducing a compression for a nut plane modeled by beam elements. The numerical examples show good agreement with different element types. Parametric studies are focused on the various effects of different element types on the induced axial and shear forces of anchor bolts considering clamping forces.

Keywords : Anchor bolt, clamping force, finite element model, LS-DYNA

1. 서 론

교량에는 차량이 차도로부터 교량 바깥, 보도 등으로 벗어나는 것을 방지하기 위해서 설치하는 방호울타리, 중앙 분리대 외에도 가로등, 신호등, 표지판 등의 부대시설들이 설치된다. 최근 이러한 교량의 부대시설들을 통합하여 필요에 따라 추가적으로 연결하여 사용할 수 있는 모듈화에 대한 연구가 진행되고 있다. 이러한 시설물의 통합 모듈 시스템은 시공 및 유지관리 관점에서 여러 가지 장점을 갖고 있으나, 각 시설들을 구조적으로 안전하게 연결하는 것이 중요한 문제가 된다(Lee *et al.*, 2011; Powell, 1970). 특히, 콘크리트에 삽입된 앵커볼트는 교량 위에 설치하는 각종 도로시설물들을 측면 방향에서 연결할 수 있는 가장 기본적인 수단을 제공하는 역할을 한다(Park *et al.*, 2011; 2012). 이러한 앵커볼트는 공용 중에 발생하는 외력에 의해 다양한 응력상태를 경험하게 되고, 시간 경과에 따라 앵커볼트 축력감소와 앵커볼

트 자체 부식으로 인해 역학적인 성능저하가 유발되기도 한다. 특히, 시공 시 앵커볼트 체결력이 충분치 않을 경우 공용 중 인가되는 각종 진동에 의해 볼트와 너트의 풀림 현상이 초래되어 구조적으로 매우 위험한 상황을 초래할 수도 있다. 따라서, 앵커볼트로 연결된 부재의 구조적 안정성을 확보하기 위해서는 공용 중 발생하는 하중작용에 대해서 앵커볼트의 응력 및 체결력 변동상태를 면밀히 검토해 보아야 한다(Kim *et al.*, 2008; Shigley, 1989).

앵커볼트로 연결된 부재의 구조적 성능을 분석하기 위해서는 적절한 유한요소 모델링을 수행하는 것이 일반적이다. 일반적으로 볼트와 너트의 연결부에 대한 구조성능 분석은 Solid 요소를 사용한 3차원 정밀 해석을 수행하는 것이 가장 정확하고 효과적이다(Shim *et al.*, 2004). 그러나 3차원 정밀해석은 실제와 동일한 상태로 모델링하는데 있어 다소 난해하고 많은 절점수로 인해서 상당한 해석시간이 소요되기 때문에 수치해석적 관점에서 효율성이 떨어질 수 있다. 반면,

* Corresponding author:

Tel: +82-54-820-5847; E-mail: lsy@anu.ac.kr

Received July 12 2013; Revised July 30 2013;

Accepted July 31 2013

©2013 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

beam 요소를 사용한 1차원 간편 모델을 적절하게 혼용한다면, 앵커볼트의 구조성능을 정확하게 반영하면서도 완전한 3차원 해석에 비하여 적은 절점수로 인한 높은 수치해석적 효율성을 가져올 수 있다.

본 논문에서는 콘크리트에 삽입된 앵커볼트 시스템에 대하여 토크에 의한 체결력을 고려할 수 있는 다양한 유한요소 모델을 제안하고 이를 비교하여 앵커볼트로 연결된 부재에 대한 최적의 해석적 평가방법을 제공하고자 한다. 본 연구는 궁극적으로 다양한 변수를 고려한 시험연구의 시간과 비용 문제를 해결함과 동시에 충분한 변수를 고려하면서도 시험체의 거동을 정확히 예측하여 경제적인 시험 설계가 가능한 방법을 제공하는데 그 목적이 있다.

2. 앵커볼트의 유한요소 모델

2.1 볼트 모델링 방법

Fig. 1은 전단력이 작용되는 볼트 조인트에서의 연결부에 대한 힘의 평형에 대한 예시를 보여준다. 볼트의 체결로 인하여 판이 구속되어 있을때, 자연적으로 인장의 예비중(Preload)이 볼트 몸체에 작용된다. 반면, 압축의 체결력은 구속된 판에 작용되어 볼트 몸체의 인장력과 평형을 이루게 된다. 또한, 전단력이 볼트 조인트에 가해졌을때, 볼트와 판 사이에 상호작용으로 인하여 베어링 응력(bearing stress)이 발생하게 된다(John, 1998).

이와 같은 볼트 사이의 상호작용을 수치적으로 구현하기 위해서는 볼트 모델에 대한 고려가 필수적이다. 대표적인 볼트 유한요소 모델은 Fig. 2와 같이, 볼트를 beam 요소로 고려하고 근접 판과의 연결을 이산 스프링 요소를 통해 구현하는 방법과 볼트를 solid 요소를 통해 모델링하고 판과의 상호작용을 접촉을 통해 구현하는 방법 등을 들 수 있다. 후자의 방법을 통해 고장력 볼트 이음부의 거동과 구조적 특성을 3차원 해석적으로 규명한 연구 사례가 보고된 바 있다(Sim *et al.*, 2004).

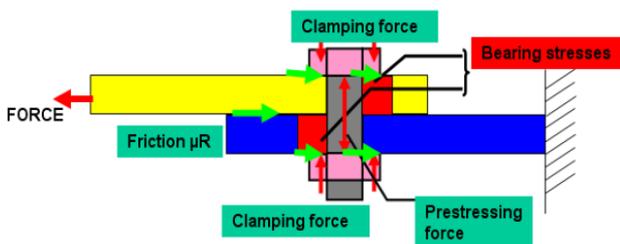


Fig. 1 An example of bolt joint with forces and stresses(Narkhede *et al.*, 2011)

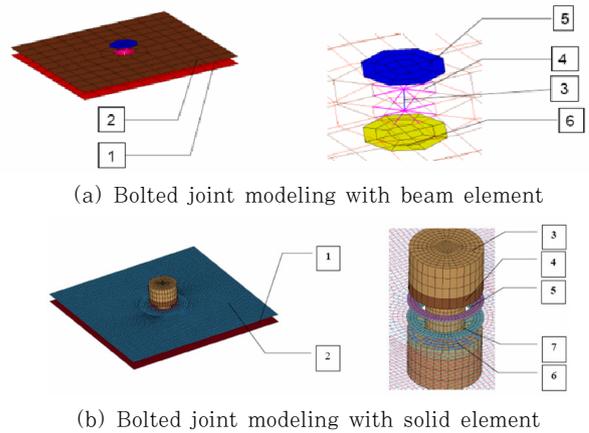


Fig. 2 Typical modeling technique for a bolt joint (Narkhede *et al.*, 2011)

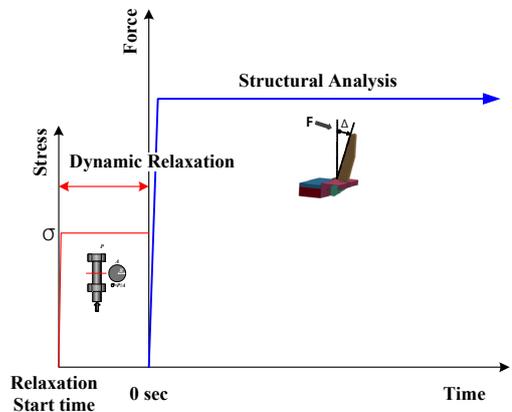


Fig. 3 Procedure for finite element structural analysis considering clamping force

한편, 볼트의 체결력을 고려한 구조물의 거동을 평가하기 위해서는 Fig. 3과 같이 실제 선형 또는 비선형 구조해석이 시작되기 전 가상의 시간동안 초기 응력을 고려한 dynamic relaxation 해석을 수행하여 체결력에 따른 응력 초기 상태(정적 평형 상태)를 획득하여 이 응력 정보로부터 연속해석을 수행하는 것이 일반적이다.

2.2 LS-DYNA를 이용한 유한요소 모델링

본 연구에서는 앵커볼트의 체결력을 고려한 연결부재 거동을 규명하기 위해 준정적 하중, 진동 및 좌굴하중, 충돌하중과 같이 구조해석 영역의 하중 확장성을 고려할 수 있는 내재적/명시적 해석이 가능한 범용 유한요소해석 프로그램인 LS-DYNA를 사용하였다(LSTC, 2007; Narkhede *et al.*, 2011). 특히 LS-DYNA는 30여 가지의 다양한 종류의 접촉 기능과 물리적 문제를 모사할 수 있는 강력한 기능을 가지고 있어 볼트-너트와 같은 접촉문제에 있어 매우 효과적임이 알려져 있다. Table 1은 LS-DYNA를 사용한 볼트-너트

Table 1 Material and element types of LS-DYNA for the bolt model in Fig. 2(a)

Component	Material	Element type/ Thickness
1	MAT24	SHELL, ELFORM
2		SHELL, ELFORM
3	MAT100	BEAM, ELEFORM
4	SDMAT6	CONTACT SPRING
5	MAT20	SHELL, ELFORM
6	MAT20	SHELL, ELFORM

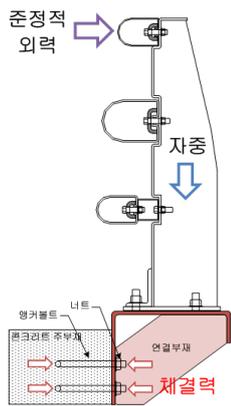


Fig. 4 Analysis model of anchor bolts

연결부 시스템에 적용되는 재료와 요소의 선택에 대한 예를 보여준다.

본 연구에서는 LS-DYNA를 사용하여 다양한 요소를 적용하여 앵커볼트의 모델링을 한 후 구조성능을 비교 분석하였다. 유한요소 해석에 있어서 앵커볼트 시스템을 3차원적으로 상세하게 모델링하는 방법보다는 앵커볼트의 정확한 거동을 예측하면서도 해석 효율성을 고려한 단순화된 앵커모델을 제시하고자 한다.

Fig. 4는 본 연구에서 수행하는 콘크리트 주부재와 앵커볼트로 연결된 부대시설 모듈의 해석 모델을 보여준다. 모듈식 교량의 콘크리트 바닥판에 방호울타리를 추가적으로 측면 부착하여 설치하는 경우, Fig. 4에서 보이는 바와 같이 앵커볼트를 콘크리트에 삽입한 후 너트의 채결력에 의하여 연결하게 된다.

Fig. 5(a)~(c)는 본 연구에서 검토한 채결력을 고려한 세 가지 종류의 앵커볼트 시스템에 대한 유한요소 모델을 보여준다. 먼저, 모델 I은 앵커볼트를 beam 요소로 고려하여 단순화하였고, 표준 토코 조임에 의한 채결력을 고려하기 위하여 너트를 직접 모델링하는 방법보다는 너트와 접촉하는 연결부재 면에 압축력을 도입하는 방식을 채택하였다. 앵커볼트 채결력과 너트 마찰력에 의한 하중전달을 모사하기 위하여 앵커볼트 beam 요소와 연결부재 볼트 홀 테두리 절점

Table 2 Analysis cases

Case	Model	Weight	Clamping force	External Force
Case 1	Model I	O	O	X
Case 2		O	O	O
Case 3	Model II	O	O	X
Case 4		O	O	O
Case 5	Model III	O	O	X
Case 6		O	O	O

들은 nodal rigid로 연결하였다. Fig. 5(a)와 같이 beam 요소의 끝단에는 앵커볼트의 내부 긴장 상태를 유도하기 위하여 하중을 부여하였다. 이러한 모델링은 힘의 평형상태를 만족하면서도 절점수를 줄일 수 있는 장점을 갖는다. 한편, 모델 II의 경우는 앵커볼트를 1차원 beam 요소로, 너트를 2차원 shell 요소로 모델링하였고, 앵커볼트 반대쪽의 너트면 전체에 압축력을 도입하였다. 또한, 너트면 중에서 앵커볼트 부에 해당하는 부분에는 볼트의 긴장상태를 유도하기 위해 인장력을 부여하였다. 특히, 앵커볼트 및 너트부는 연결부재 판과 contact으로만 접촉하도록 구성하여 외력에 의한 하중 전달을 고려할 수 있도록 하였다(Fig. 5(b) 참조). 반면, 모델 III은 Fig. 5(c)에서 보는 바와 같이 앵커볼트와 너트를 실제와 동일한 3차원 솔리드 요소로 모델링하고, 너트 부 중에서 연결 부재쪽 방향은 압축력을 앵커볼트와 너트가 만나는 지점은 인장력이 작용되도록 모델링하였다. 모델 III 역시, 앵커볼트 및 너트부와 연결부재판이 contact 조건만으로 접촉하여 하중이 전달되도록 구성하였다.

본 연구에서 수행하는 유한요소 모델링은 beam, shell, 그리고 solid 등의 서로 다른 요소를 적절하게 결합하여 사용하면서도 역학적 거동을 최대한 만족시킬 수 있도록 하였으며, 제시한 세 가지 모델 중에서 가장 간편하면서 효율적인 방법을 매개변수 수치해석을 통하여 결정하고자 하였다. 세 가지 볼트 모델과 자중, 채결력, 외력을 고려한 해석 케이스가 Table 2에 제시된다.

3. 수치해석 결과 및 분석

Figs. 6~8은 본 연구에서 제시한 세 가지 유한요소 모델에 대한 시간에 따른 변위, 축력, 및 전단력을 보여준다. 여기서, 작용되는 하중은 준정적 외력, 자중, 그리고 채결력이 고려되었다. 세 가지 모델링에 대한 해석결과는 Table 3에 요약 제시된다.

해석결과, Contact으로 하중 전달하는 방식(Model II & III)보다 nodal rigid로 묶는 방식(Model I)이 하중전달이 잘 되어 지주 끝 단 변형이 감소하는 것으로 분석되었다. 또

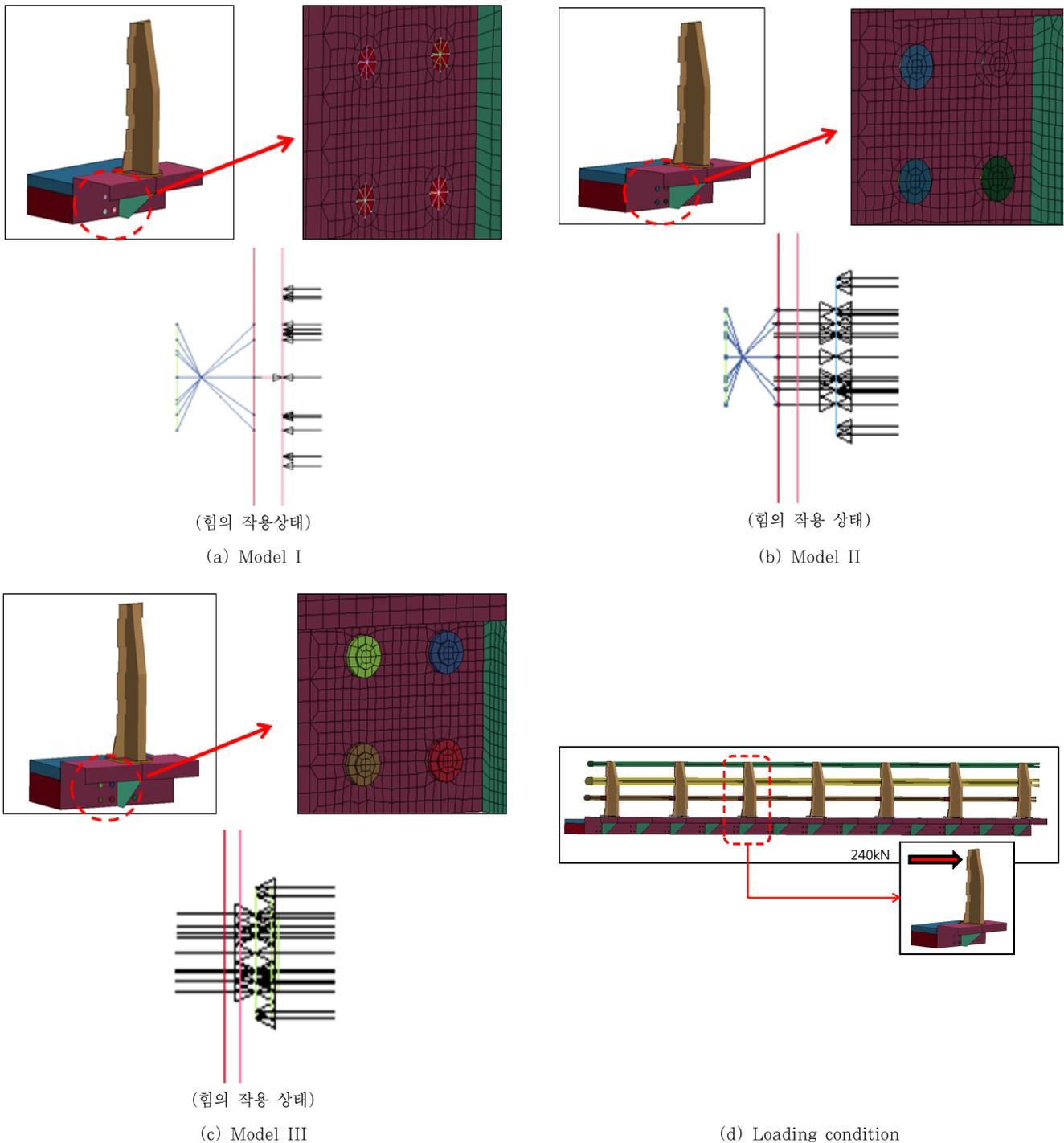
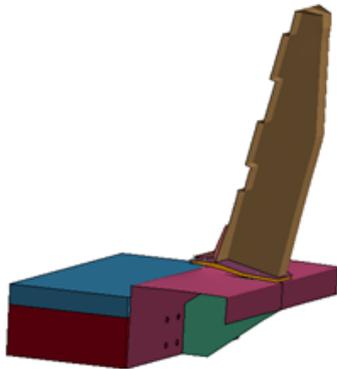


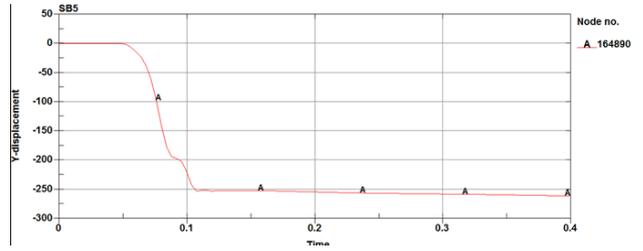
Fig. 5 Three different finite element models and loading condition of anchor bolts considering clamping forces

한, Model I과 III은 외력의 작용 유무에 상관없이 축력과 전단력이 매우 유사하게 나타나고 있다. 반면, 앵커볼트를 beam 요소로 고려하고 contact 조건으로 하중전달을 고려한 Model II(Case 3 & Case 4)의 경우는 볼트에 발생하는 축력과 전단력이 다소 과소평가되고 있는 것으로 분석되었다. Case 1/3/5의 경우 외력이 없으므로, 지주 끝단의 변형은 발생하지 않았고, Case 2/4/6의 부대시설 모듈에서 발

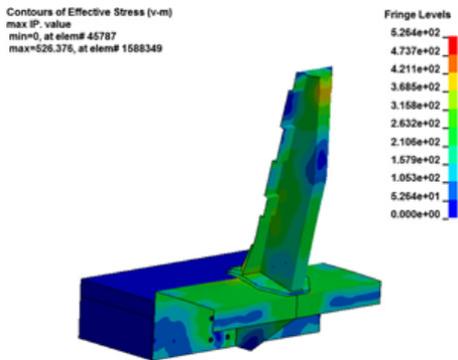
생하는 응력의 경우는 모듈과 지주를 연결하는 지점에서 과도한 하중이 걸려 발생하는 것으로 분석되었다. 한편, 240 kN의 외력과 자중에 의해서 앵커볼트의 응력상태는 모두 인장상태가 유지되는 것으로 평가되었다. 해석결과를 종합적으로 고려할 때, Model I과 III은 외력 작용 유무에 상관없이 유사한 예측 결과를 보이고 있음이 관찰된다. 따라서, Model I은 다른 두 모델에 비하여 모델링이 간편하면서 Model III



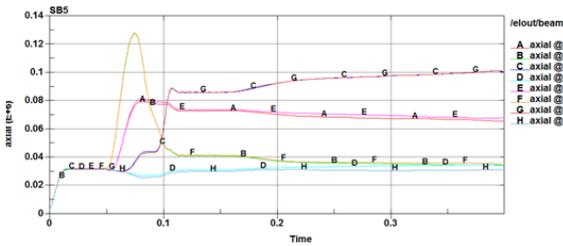
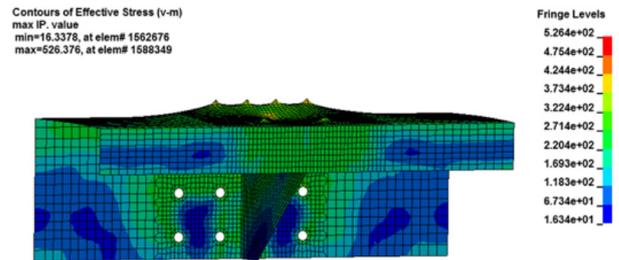
(a) Deformed shape



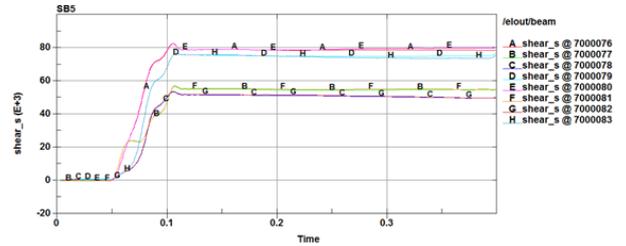
(b) Displacement for increased time



(c) Stress contours



(d) Axial forces



(e) Shear forces

Fig. 6 Displacements and stress resultants(Model I)

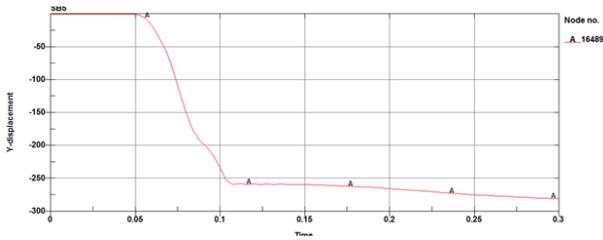
와 같이 3차원 해석을 한 결과와 비교했을 때도 유사한 결과를 보인다는 점에서 수치적 효율성을 갖고 있는 모델인 것으로 분석된다.

추가적으로, Model I을 통한 앵커볼트 모델링 방법을 부분 구조 모델이 아닌 전체 구조 모델을 대상으로 검토한 결과, 앞서 도출된 해석결과와 마찬가지로 nodal rigid로 묶는 Model I의 볼트 모델링 방식이 하중전달이 잘 이루어고 있음이 확인되었다. 해석을 통해 도출된 응력분포 및 지주 끝단 변위, 앵커볼트 최대 축력과 전단하중을 받는 앵커볼트의 위치가 Fig. 9에 제시되어 있다. 240kN의 동일한 크기의 외력에 대해서 앞서 검토한 부분 구조모델에 비해 전체 구조 모델이 하중에 대한 저항성능이 증가함으로써 지주 끝단의 변형도 감소하고 있음이 확인된다. Fig. 9(c)의 앵커볼트에 걸리는 하중에 대한 해석결과가 Table 4에 제시되어 있다.

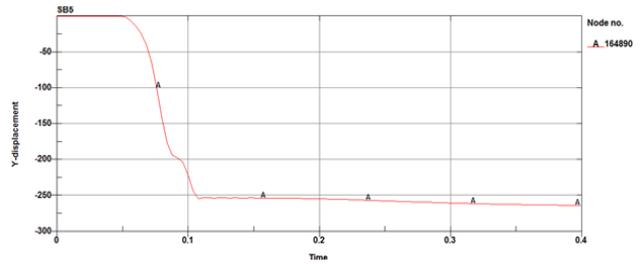
Table 3 Displacements and stress results for each case of three models

Case	Model	Stress (Module)	Displacement (Post tip)	Axial force (Bolt)	Shear force (Bolt)
Case 1	Model	180.0MPa	-	32kN	0.5kN
Case 2	I	526.4MPa	261.8mm	100kN	83kN
Case 3	Model	8.4MPa	-	1kN	0.4kN
Case 4	II	532.9MPa	282.2mm	40kN	52kN
Case 5	Model	27.2MPa	-	50kN	0.4kN
Case 6	III	526.5MPa	264.0mm	100kN	80ton

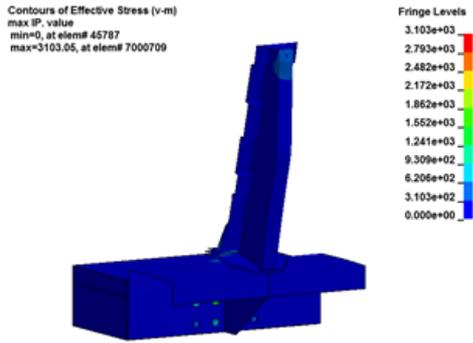
해석결과, 볼트에 걸리는 하중은 모두 인장력이며, 모두 M24(F10T) 볼트의 허용 하중 범위를 만족하고 있는 것으로 나타났다. 또한, 예상과 동일하게 외력이 작용하는 지주 근처의 앵커볼트 지점에서 최대 하중이 발생하는 것으로 분석되었다.



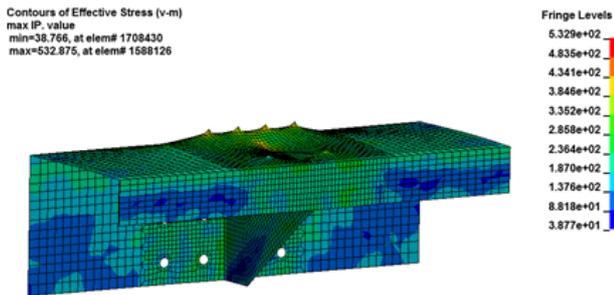
(a) Displacement for increased time



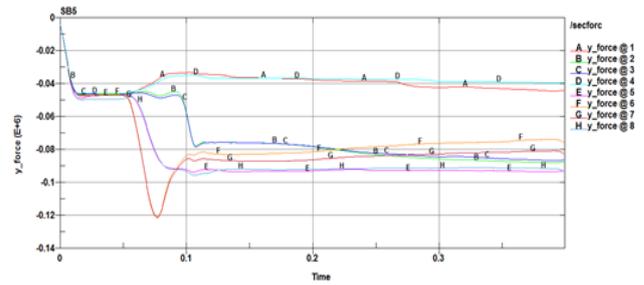
(a) Displacement for increased time



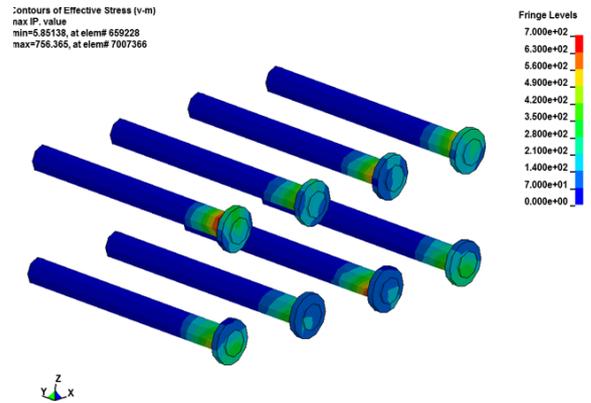
(b) Stress contours



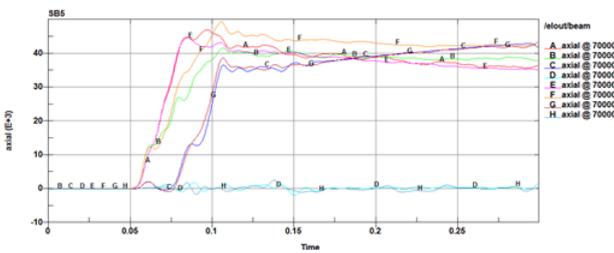
(b) Stress contours



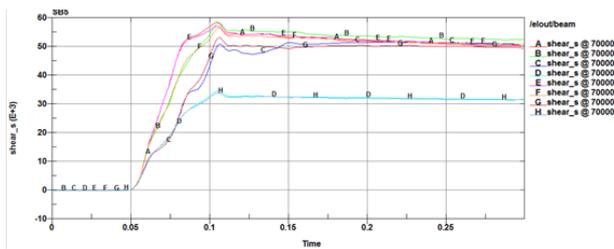
(b) Axial forces



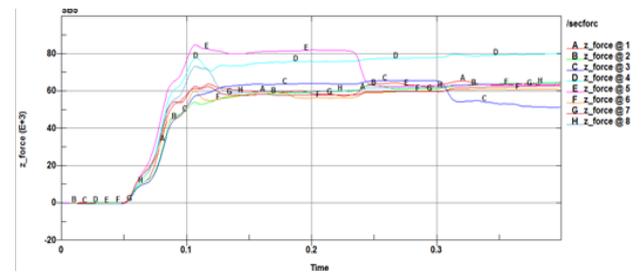
(c) Stress contours at bolts



(c) Axial forces



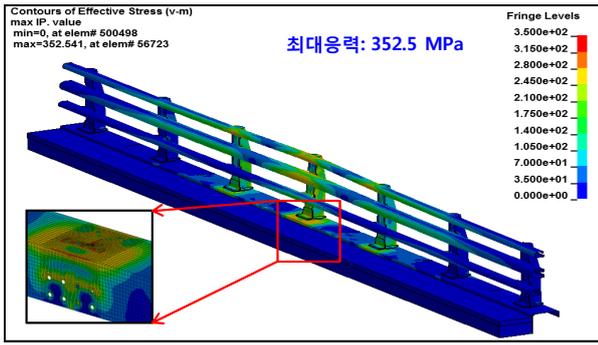
(d) Shear forces



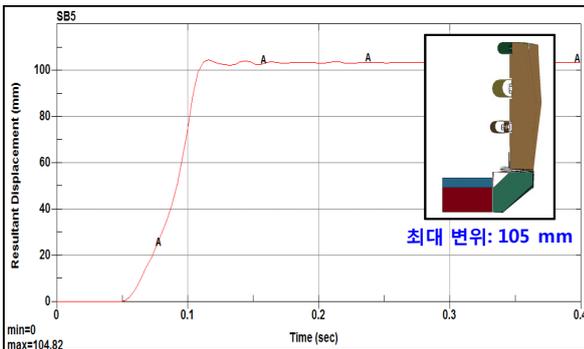
(d) Shear forces

Fig. 7 Displacements and stress resultants(Model II)

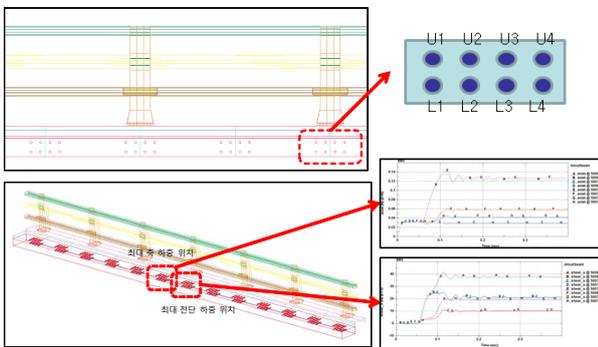
Fig. 8 Displacements and stress resultants(Model III)



(a) Stress contours



(b) Tip displacement of post



(c) Location of maximum axial & shear force for anchor bolts

Fig. 9 FE analysis results(Full structural model)

Table 3 Displacements and stress results for each case of three models

Location of anchor bolts	Allowable force (kN)	Axial force (kN)	Shear force (kN)	Axial stress (MPa)	Shear force (MPa)
U1	140	57.8	37.0	219.7	75.2
U2		127.3	21.1	518.0	51.3
U3		123.1	21.5	190.0	42.1
U4		57.5	38.1	247.3	89.1
L1		28.1	19.5	72.7	38.1
L2		41.9	10.5	164.8	21.7
L3		43.1	9.6	107.8	22.8
L4		29.2	19.1	54.0	47.8

4. 요약 및 결론

본 연구는 콘크리트에 삽입된 앵커볼트를 이용하여 각종 부대시설을 통합적으로 설치한 모듈을 교량의 콘크리트 바닥판에 측면으로 부착할 경우, 체결력을 고려하며 콘크리트에 삽입된 앵커볼트의 구조성능을 규명할 수 있는 간편하면서도 정확한 유한요소 모델을 제시하였다. LS-DYNA를 사용한 수치해석 모델링은 크게 앵커볼트는 beam(Model I, II) 혹은 Solid(Model III) 요소로 나누어 수행하였으며, 토크 조임에 따른 앵커볼트 긴장상태를 반영하였다. 토크 조임에 따른 체결력을 고려하기 위해 Model I과 같이 너트면에 압축력을 도입하거나 Model II와 같이 너트를 shell 혹은 Solid(Model III)로 고려하여 작용 토크 조임 값으로 산정되는 체결력과 등가의 하중을 도입하였다. 또한, 외력 작용 시 체결력과 마찰력에 의한 앵커볼트의 하중 전달은 Nodal rigid(Model I) 혹은 Contact(Model II 및 III) 조건으로 고려하였다.

유한요소 해석 결과로부터 Model I과 Model III가 축력과 전단력에 대하여 유사한 예측 값을 나타냈다. 따라서, 앵커볼트를 beam 요소로 사용한 Model I이 다른 두 모델에 비하여 모델링이 간편하면서 Model III와 같이 Solid 요소를 사용한 3차원 해석결과와 비교했을 때도 거의 같은 결과를 보이고 있다는 점에서 수치 해석적으로 효율적임을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트에 삽입된 앵커볼트의 간편 모델링 방법으로 Model I을 제안하고자 한다. 본 연구결과는 체결력을 고려한 콘크리트에 삽입된 앵커볼트 시스템의 효율적인 유한요소 해석을 위한 가이드라인을 제시할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 본 연구결과는 몇 가지 유한요소 모델링에 대한 시뮬레이션 매개변수 연구이므로, 향후 실제 실험을 통하여 좀 더 다양한 거동에 대한 예측을 검증하는 후속 연구의 필요성이 제기된다. 또한, 교량 난간은 자동차와의 충돌 가능성이 항상 존재하기 때문에 준정적 하중작용에 의한 연결부 거동의 안정성 검토 외에도 자동차 충돌하중에 대한 연결부 거동의 상세분석도 추가적으로 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업(10기술혁신 B01-모듈러 교량기술개발 및 실용화)의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

John H. (1998) Handbook of Bolts and Bolted Joints.

- Bickford & Sayed Nassar, Crc-Press.
- Kim, S.B., Choi J.K., Heo, I.S.** (2008) Ultimate Behavior of High-Tension Bolted Joints Considering Plate Thickness and Bolt Size, *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 21(5), pp.515~524.
- Lee, M.C., Kwon, K.Y., Kim, S.E.** (2011) Performance Analysis of Steel-FRP Composite Safety Barrier by Vehicle Crash Simulation, *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, 2(4), pp.11~18.
- LSTC** (2007) *LS-DYNA Keyword user's Manual*, Livermore Software Technology Corporation.
- Narkhede, S., Lokhande, N., Gangani, B., Gadekar, G.** (2010) Bolted Joint Representation in LS-DYNA to Model Bolt Pre-Stress and Bolt Failure Characteristics in Crash Simulations, *11th International LS-DYNA users Conference*, Detroit, pp.11~19.
- Park, Y. M., Jeon, M. H., Choi, M. K., Kim, C. H., Kim, I.G.** (2012) A Study on the Concrete Breakout Capacity of CIP Anchor Bolts under Shear Loading, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, 24(2), pp.207~215.
- Park, Y.M., Jeon, M.H., Lee, K.J., Kim, C.H.** (2011) A Study on the Concrete Breakout Capacity Evaluation of Medium-to-Large size CIP Anchor Bolts under Tension Loading, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, 23(4), pp.493~501.
- Powell, G.H.** (1970) *Computer Evaluation of Automobile Barrier Systems*, University of California, Berkely.
- Shigley** (1989) *Mechanical Engineering Design*, 5th Ed., McGraw-Hill.
- Shim, J.S., Kim, C.H., Kim, D.J.** (2004) 3D Finite Element Analysis of High Tension Bolted Joints, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, 16(4), pp.407~414.

요 지

본 논문에서는 앵커볼트의 체결력을 고려한 유한요소 모델을 제안함으로써 앵커볼트로 연결된 부재의 해석적 평가방법을 제안하였다. LS-DYNA를 사용한 유한요소 모델링은 복잡한 3차원 상재모델보다는 단순화된 앵커모델들을 적용함으로써 해석 효율성을 고려하였다. 앵커볼트는 Beam 혹은 Solid 요소로 토크 조임에 따른 앵커볼트 긴장상태를 반영하였고, 토크 조임에 따른 체결력을 고려하기 위해 너트면에 압축력을 도입하거나 너트를 Shell 혹은 Solid로 고려하여 작용 토크값으로 산정되는 체결력과 등가의 하중을 도입하였다. 외력 작용 시 체결력과 마찰력에 의한 앵커볼트의 하중전달은 nodal rigid 혹은 contact 조건으로 고려하였다. 체결력을 고려한 세 종류의 앵커모델을 적용한 해석결과, Model I과 Model III는 볼트 축력과 전단력이 매우 유사한 값으로 계산되었고, Model II의 경우, 볼트 축력과 전단력이 다소 과소평가되는 것으로 나타났다. Model I은 다른 두 모델에 비해 수치해석적으로 효율적인 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 앵커볼트, 체결력, 유한요소 모델, LS-DYNA