

비좌굴 가새를 이용한 대공간 구조물 내진 보강 설계

Seismic Retrofit of Spatial Structures Using Buckling Restrained Brace

문희숙*
Moon, Hee-Suk

김기철**
Kim, Gee-Chul

강주원***
Kang, Joo-Won

이준호****
Lee, Joon-Ho

Abstract

In this study, the seismic performance and behavior characteristics of the upper truss structure of the large stadium are analyzed by nonlinear dynamic analysis. In the nonlinear dynamic analysis, the earthquake records were generated by site response analysis to simulate the nonlinear behavior of the relevant soil condition where the structure is located. Nonlinear dynamic analysis was performed using Perform-3D and the nonlinear properties of the substructure and the superstructure were determined in accordance with KISTEC guideline. According to the analysis results, excessive deformation occurred in the upper truss element, and plastic hinges exceeded the target performance in some members. Buckling-restrained brace is used for seismic retrofit of stadium structures and the analysis results shows the interstory drift satisfies the target performance level with dissipating the seismic energy efficiently.

Keywords : *Spatial structure, Nonlinear dynamic analysis, Seismic performance evaluation, Buckling-restrained brace, Seismic rehabilitation*

1. 서론

대공간 구조물은 내부 기둥 없이 넓은 공간을 효율적으로 계획할 수 있으며, 주로 경기장, 운동장 등의 용도로 사용된다. 이외에도 국가적 재난·재해 시 피난 시설로 사용되므로 구조적 안전성의 확보가 필요하다. 대공간 구조는 횡하중이 작용할 경우 수평 방향뿐만 아니라 수직 방향으로도 동적 응답이 발생한다¹⁾. 또한 대공간 구조물의 하부 지지 조건 및 형태, 지형 등에 따라 응답 특성이 다양하게 나타나며, 특히 하부 구조의 높이 차이는 수평 방향보다 연직 방향의 지진 응답에 큰 영향을 미치기 때문에

다양한 진동 특성에 대한 정확한 분석이 필요하다²⁾.

1995년 규모 9.0의 고베 지진과 2011년 규모 9.0의 동일본 대지진 등이 발생하였을 때 대공간 구조물은 상부 구조와 하부 구조의 결합부, 지붕 브레이스 및 부재, 천장에 부착된 장비들의 붕괴 등으로 인해 구조물의 기능을 상실하게 되었다. 국내에서는 2016년 9월 12일 경상북도 경주에서 발생한 규모 5.8의 지진에 이어 2017년 11월 15일 포항시 북구 지역에서 규모 5.4의 지진이 발생하였다. 포항 지진으로 인해 인명 피해 92명, 이재민 약 1,020명이 발생하였고 사유 시설물 31,000개소, 공공 시설물 644개소가 피해를 입은 것으로 집계되었다³⁾. 2017년 10월 국토교통부에서 조사한 전체 건축물의 내진 성능 확보율은 709만동 중 56만동인 7.9%에 불과하며 민간 건축물은 20.4%, 공공 시설물의 경우 55.7%이다. 국내 대공간 경기장 중 30%는 내진 설계가 반영되지 않아 정밀 점검에 따른 내진 보강이 시급한 실정이다.

한국시설안전공단이 2004년 발간한 “기존 건축물의 내진성능평가 및 향상요령”³⁾은 성능 기반 평가

* 정희원, 메트로티엔씨(주) 내진기술연구소 선임연구원
Metro T&C Co., Ltd.

** 정희원, 서일대학교 건축공학과 교수, 공학박사
School of Architecture, Seoil University

*** 정희원, 영남대학교 건축학부 교수, 공학박사
School of Architecture, Yeungnam University

**** 교신저자, 정희원, 메트로티엔씨(주) 내진기술연구소
소장, 공학박사
Metro T&C Co., Ltd.
Tel: 02-2008-1420 Fax: 02-2008-1429
E-mail: joonho.lee.97@gmail.com

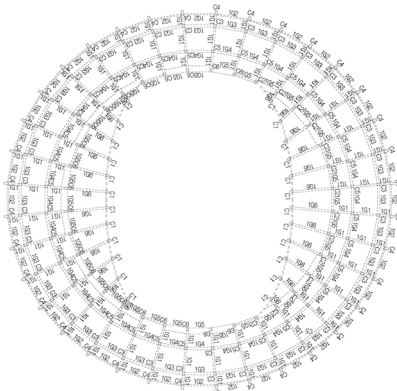
개념을 반영하여 2013년 개정되었다. 공단의 안을 이용하여 대공간 구조물의 내진 보강을 수행할 경우 지붕 트러스를 하중으로 치환하여 하부 구조에 대해 평가하는 방법이 관행처럼 사용되고 있다. 비선형 동적 해석을 위한 모델링과 해석에 많은 시간이 소요되기 때문이다.

본 연구에서는 비선형 동적 해석으로 대공간 경기장 예제 구조물 지붕 트러스 구조의 내진 성능 및 거동 특성을 분석하고, 비좌굴 가새(Buckling-Restrained Brace, BRB)를 이용한 보강 방안을 제시하였다.

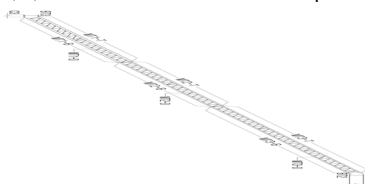
2. 예제 대공간 구조물 내진 성능 평가

2.1 예제 구조물 개요

예제 구조물은 종합 경기장이며 하부 구조는 철근 콘크리트조, 상부 지붕 구조는 철골조로 구성되어 있다. 1층 경기장의 외부 지름은 75.5m, 내부 경기장의 가로와 세로 길이는 각각 52.2m, 36.6m이다. 1층 모멘트 골조의 층고는 4.5m이며, 관람석의 층고는 각각 3.8m, 3.5m, 3.0m로 구성되어 있다. 지붕 트러스는 32.5m 경간의 트러스가 방사형으로 분포되어 있으며, 트러스의 형태를 유지하고 면외 좌굴



(a) 1st floor structural plan



(b) Spatial roof truss

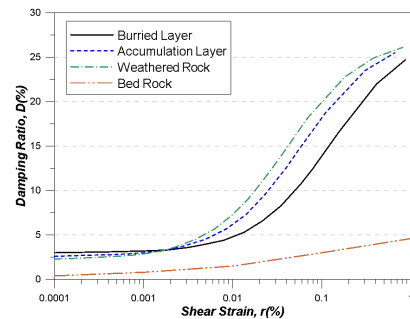
〈Fig. 1〉 Spatial stadium structure

을 방지하기 위한 트러스가 4.54m마다 원형으로 배치되어 있다. 하부 모멘트 골조를 구성하는 보와 기둥 및 지붕 트러스의 부재 리스트를 <Table 1~3>에 나타내었다. 콘크리트의 압축 강도와 철근의 항복 강도는 각각 21MPa, 275MPa이며, 지붕 트러스는 SRT275, SS275를 사용하여 설계되었다.

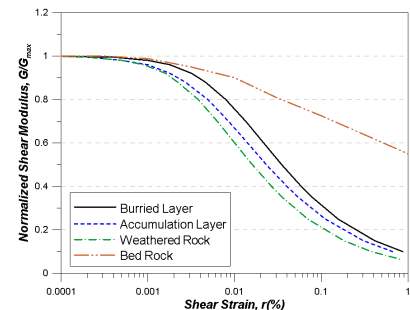
지역 계수 0.176, 지반 조건 'S_d'에 해당하는 단주기 설계 스펙트럼 가속도($S_{D,S}$)는 0.535, 주기 1초의 설계 스펙트럼 가속도($S_{D,1}$)는 0.232이다. 연면적 5,000m² 이상 운동 시설의 중요도는 1이므로 내진 1등급이며, 요구되는 성능 수준은 2,400년 재현 주기 지진의 2/3 수준 지진 하중에 대한 인명 안전 (Life Safety, LS)이다⁴⁾.

2.2 입력 지진파 선정

본 연구에서 사용된 지진 기록은 구조물이 위치한 해당 지반 조건의 비선형 거동을 모사하기 위해 부지 응답 해석을 통해 생성하였다. 지반의 비선형 물성은 <Fig. 2>와 같이 국내 기존 연구 결과를 통한 데이터베이스를 바탕으로 적용하였으며, SHAKE 프로그램⁵⁾을 이용하여 부지 응답 해석을 수행하였다.



(a) Damping



(b) Normalized shear modulus of elasticity
〈Fig. 2〉 Nonlinear property of soil layer

〈Table 1〉 Material property of column

Section	Size (mm)	Rebar data			
		Main	Hoop		
			End	Center	
C1	500×540	20 - 6 - D22	2 - D10 @150	2 - D10 @300	
C2	500×500	20 - 6 - D22	2 - D10 @150	2 - D10 @300	
C3	540×540	16 - 5 - D22	2 - D10 @150	2 - D10 @300	
C4	730×730	28 - 8 - D22	2 - D10 @150	2 - D10 @300	
C5	450×450	12 - 4 - D22	2 - D10 @150	2 - D10 @300	
C6	540×540	20 - 6 - D22	2 - D10 @150	2 - D10 @300	

〈Table 2〉 Material property of girder

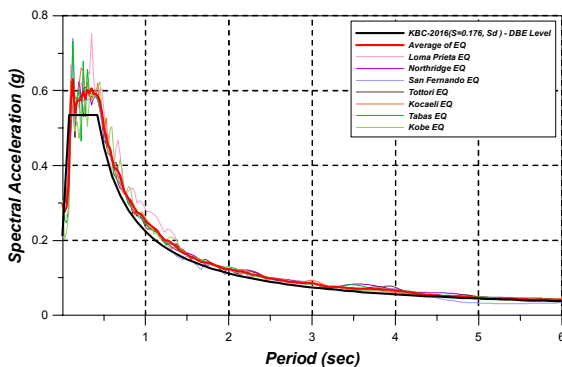
Section	Size (mm)	Rebar data					
		Exterior		Interior		Stirrup	
		Top	Bottom	Top	Bottom	End	Center
1G1	800×500	12 - D22	8 - D22	12 - D22	8 - D22	2 - D10 @125	2 - D10 @125
1G2	600×350	6 - D22	3 - D22	3 - D22	3 - D22	2 - D10 @120	2 - D10 @240
1G3	500×800	10 - D22	6 - D22	6 - D22	6 - D22	2 - D10 @125	2 - D10 @250
1G4	400×800	8 - D22	4 - D22	4 - D22	4 - D22	2 - D10 @125	2 - D10 @250
1G5	350×500	8 - D22	3 - D22	3 - D22	3 - D22	2 - D10 @100	2 - D10 @200
1G6	500×800	10 - D22	5 - D22	5 - D22	5 - D22	2 - D10 @150	2 - D10 @150
2G1	400×700	8 - D22	8 - D22	8 - D22	8 - D22	2 - D10 @150	2 - D10 @150
2G2	300×600	5 - D22	3 - D22	3 - D22	3 - D22	2 - D10 @125	2 - D10 @250
2G3	500×700	10 - D22	5 - D22	5 - D22	5 - D22	2 - D10 @150	2 - D10 @250
3G1	400×600	6 - D22	4 - D22	4 - D22	4 - D22	2 - D10 @125	2 - D10 @250
3G2	300×600	5 - D22	3 - D22	3 - D22	3 - D22	2 - D10 @125	2 - D10 @250
3G3	300×600	5 - D22	3 - D22	3 - D22	3 - D22	2 - D10 @125	2 - D10 @250
RG1	300×600	5 - D22	3 - D22	3 - D22	3 - D22	2 - D10 @125	2 - D10 @250
RG2	300×600	5 - D22	3 - D22	3 - D22	3 - D22	2 - D10 @125	2 - D10 @250

〈Table 3〉 Material property of truss

Section	Size	Material
MT1_T&B	B - 150×150×6	SRT275
MT2_T&B	B - 100×100×4.5	SRT275
MT3_T&B	B - 90×90×3.2	SRT275
BT1_T&B	B - 50×50×3.2	SRT275
BT2	H - 294×200×8×12	SS275
BT3	H - 294×200×8×12	SS275
MT1_D	B - 50×50×3.2	SRT275
MT2_D	B - 40×40×2.3	SRT275
MT3_D	B - 40×40×2.3	SRT275
BT1_D	B - 40×40×2.3	SRT275

※ T&B : Top chord & Bottom chord
D : Diagonal member

비선형 동적 해석을 위한 지진 기록은 PEER Ground Motion Database⁶⁾를 통해 암반에서 계측된 VS,30이 760m/s 이상인 7개를 선정하였다. 부지 응답 해석 후 DBE 레벨 스펙트럼에 대해 경기장 구조물 기본 진동 주기의 0.2배부터 1.5배 사이에 해당하는 주기에 대해서 1.3배의 90%가 넘도록 배율을 조정하였다.



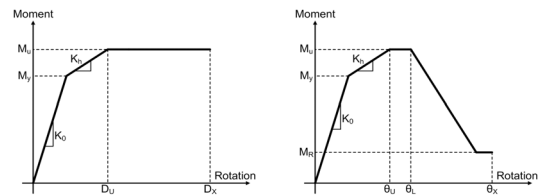
〈Fig. 3〉 Response spectrum for analysis

2.3 비선형 동적 해석에 의한 내진 성능 평가

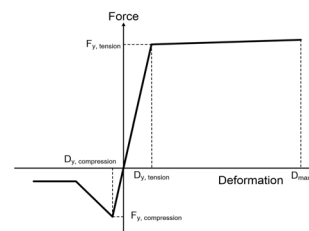
예제 구조물 하부 모멘트 골조의 내진 성능과 상부 지붕 트러스의 이력 거동을 분석하기 위해 Perform-3D⁷⁾를 이용하여 비선형 동적 해석을 수행하였다. 하부 및 상부 구조의 비선형 물성치는 한국 시설안전공단의 “기존 시설물(건축물) 내진성능 평가요령(2013)”³⁾을 따라 입력하였다.

구조물의 진동 주기는 1차 모드에서 0.957초이며, Z방향 질량 참여율이 87.3%로 지붕에서 비틀림이 발생하였다. 2차와 3차 모드에서는 지붕 트러스의 처짐과 변형이 발생하였다. 2차 모드의 주기는 0.837초, 질량 참여율은 X방향으로 88.2%이며, 3차 모드의 주기는 0.849초, 질량 참여율은 Y방향으로 90.6%로 나타난다.

해석 결과에 따르면 하부 모멘트 골조는 목표 층간 변형각 1%(Life Safety, LS)를 만족하지만, 지붕 트러스의 경우 소성힌지의 발생으로 인해 X방향과 Y방향 평균 층간 변형각이 각각 1.32%, 1.34%로 허용 층간 변형각을 초과한다. 모멘트 골조 상부의 지붕 트러스는 4.54m마다 설치된 벨트 트러스의 수직 높이를 층간 변위로 설정하였다.

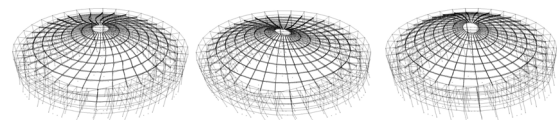


(a) Beam element (b) Column element



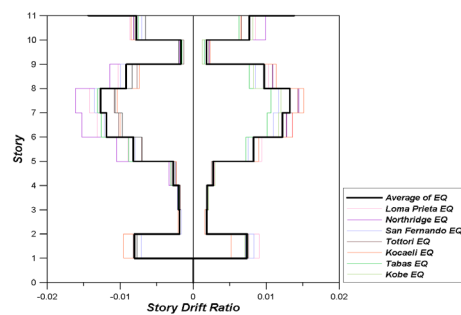
(c) Truss element

〈Fig. 4〉 Nonlinear property used in nonlinear dynamic analysis

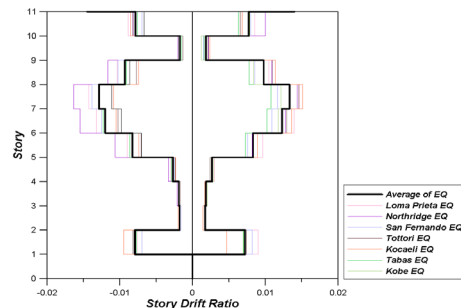


(a) 1st mode (b) 2nd mode (c) 3rd mode

〈Fig. 5〉 Mode shapes on example structure



(a) X-Dir.

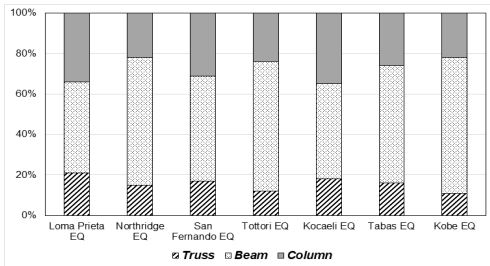


(b) Y-Dir.

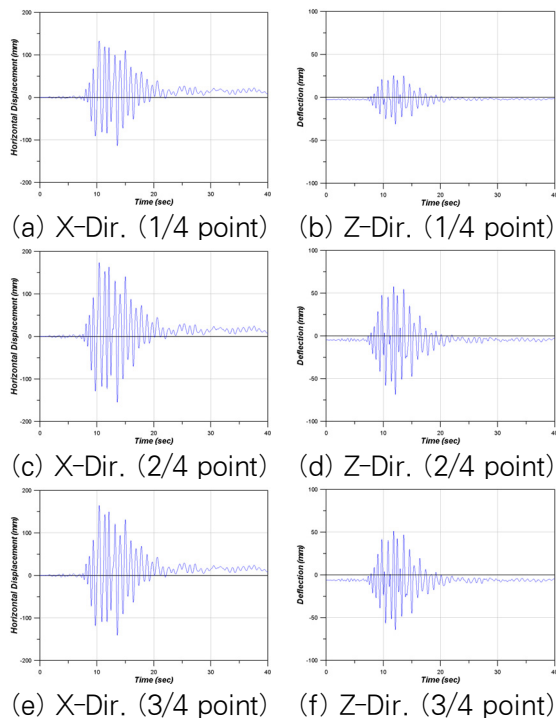
〈Fig. 6〉 Interstory-drift ratio on example structure

지진 기록 7개에 대한 부재별 에너지 평균 소산량을 비교한 결과, 트러스는 15.7%이며 보와 기둥은 각각 56.6%, 27.8%의 에너지 소산량을 보인다.

지진 기록 중 1번에서 구조물 지붕 트러스의 1/4 구간별 수평 변위와 처짐은 <Fig. 7>과 같다. 2/4 지점과 3/4 지점에서의 수평 변위는 1/4 지점에 비해 약 24.3%, 31.7% 증가하며 처짐은 약 33.6%, 25.8% 증가한다.



<Fig. 7> Energy dissipation ratio of example structure



<Fig. 8> Horizontal displacement and deflection of each layer of example structure

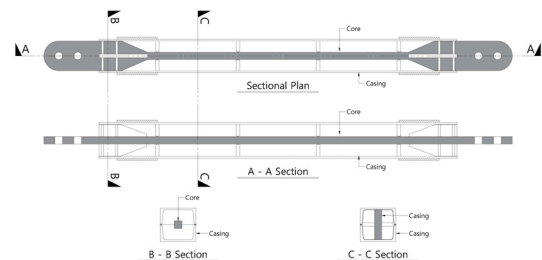
3. 비좌굴 가새를 이용한 내진 보강

비좌굴 가새(Buckling-Restrained Brace, BRB)는 철골 중심 부재(Core)를 철골 튜브 속에 배치하고 두 요소 사이를 콘크리트 등으로 충전하여 중심 부

재가 압축력을 받을 때 좌굴에 대한 저항 성능이 뛰어나고 안정적인 이력 거동을 확보한 요소이다. 비좌굴 가새에 대한 연구는 Yoshino & Karino(1971)⁸⁾가 철판을 철근 콘크리트 패널로 감싸고 두 재료가 부착되지 않도록 비부착 재료를 두 요소 사이에 삽입하여 만든 부재에 대한 반복 하중 실험으로부터 시작되었다. 현재 널리 사용되고 있는 형태의 비좌굴 가새는 MacKerell et al.(1998)⁹⁾이 제안하였다. 비좌굴 가새는 부가적인 에너지 소산 장치로 개발되어 일본에서는 보조 장치로 사용되고 있지만, 미국에서는 보조 에너지 소산 장치로 사용될 뿐만 아니라 기존 가새 골조의 대안인 주요 횡하중 저항 시스템으로도 적용하고 있다. 튜브 내부에 충전된 모르타르와 철골 중심 부재가 서로 부착되지 않고 잘 미끄러지도록 얇은 두께로 감싼 비부착 재료(Unbonding material)는 프와송 효과(Poisson effects)에 의해 철골 중심 부재의 수축(Contraction)과 신장(Elongation) 시 전단력이 전달되는 것을 방지한다.

예제 구조물의 지붕 트러스 내진 보강에 사용된 비좌굴 가새는 <Fig. 9>와 같으며, 철골 중심 부재를 철골 튜브 속에 배치하고 콘크리트 충전재 대신 철골 마디를 사용하여 좌굴을 방지하였다. 심재와 접합부가 연결되어 단면적이 변하는 구간은 케이싱 외부의 보강재를 이용하여 응력 집중에 의한 부러짐을 방지하였다. 이러한 비좌굴 가새를 사용할 경우 요소 자체의 무게를 줄일 수 있고 비부착 재료를 사용하지 않아도 되는 장점이 있다.

본 논문에서는 지붕 트러스 부재 중 MT1, MT2, MT3의 경사재를 비좌굴 가새로 보강한 3가지 모델에 대해 비선형 동적 해석을 수행하였다. 보강 전 구조물의 X방향과 Y방향의 1차 모드 거동과 층간

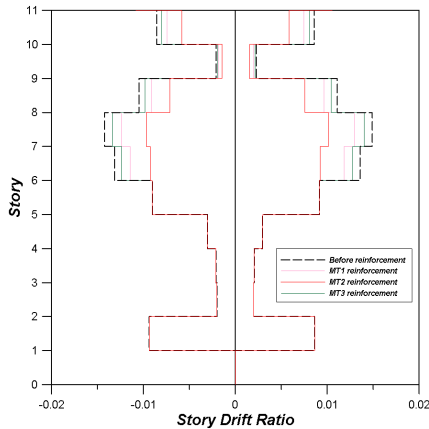


<Fig. 9> Buckling-Restrained Brace (BRB)

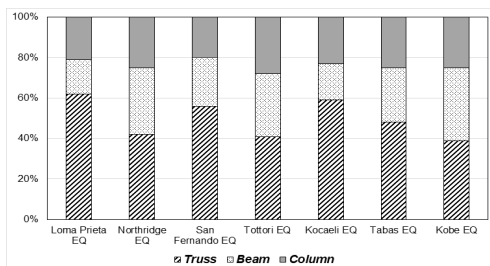
변위비가 동일하여 보강 후 해석 결과는 X방향에 대한 지붕 트러스의 1/4 구간별 수평 변위와 처짐, 층간 변위를 비교하였다.

MT2를 비좌굴 가새로 보강한 결과, 보강 전에 비해 층간 변위비가 35.5% 감소하여 목표 성능인 LS를 만족한다. MT1과 MT3을 보강한 결과, 보강 전에 비해 층간 변위비가 각각 14.4%, 6.7% 감소하였으나 목표 성능에는 만족하지 못한다. 비좌굴 가새 보강 전에 비해 평균적인 에너지 소산량은 트러스의 경우 7개의 지진 기록에 대해 33.9% 증가하였으며, 보와 기둥은 각각 30.5%, 3.9% 감소하는 것을 확인할 수 있다.

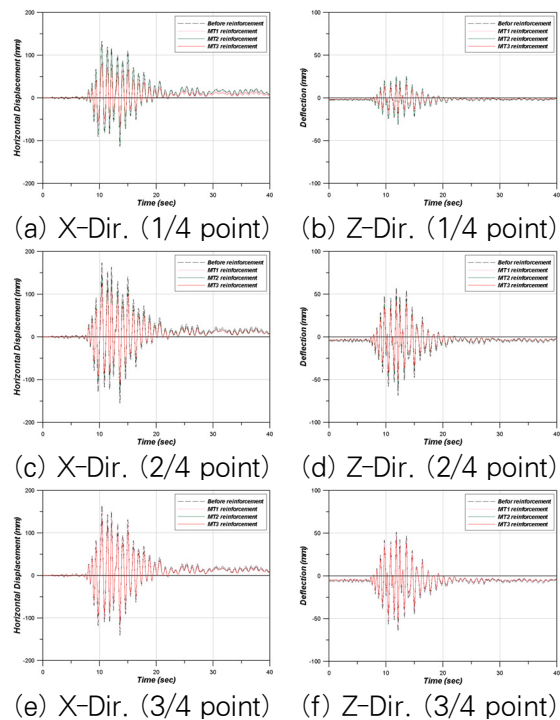
비좌굴 가새로 MT1을 보강한 경우 처짐과 수평 변위가 각각 14.2%, 16.4% 감소하고, MT3을 보강한 경우 각각 18.1%, 19.9% 감소한다. MT2의 경우 처짐과 수평 변위가 각각 28.1%, 32.7% 감소하므로 MT1과 MT3을 보강하는 것보다 변형량이 효과적으로 감소하는 것으로 보인다.



〈Fig. 10〉 Interstory-drift ratio (X-Dir.)



〈Fig. 11〉 Energy dissipation ratio of retrofitted structure



〈Fig. 12〉 Horizontal displacement and deflection of each layer of retrofitted structure

4. 결론

본 논문에서는 비선형 동적 해석을 통해 대공간 경기장 건축물의 지붕 트러스 내진 성능을 평가하고, 비좌굴 가새를 이용하여 내진 보강 설계를 수행하였다.

기존 구조물의 내진 성능 평가 결과, 하부 구조의 경우 목표 성능 수준을 만족하지만 지붕 트러스는 과도한 층간 변위비와 처짐, 수평 변형이 발생하기 때문에 안정성 확보를 위한 구조 보강이 필요하다. 비좌굴 가새를 이용하여 지붕 구간별로 지붕 트러스의 경사재를 보강하여 동적 해석을 수행한 결과, MT2를 보강한 경우 보강 전에 비해 처짐과 수평 변위가 각각 32.7%, 28.1% 감소하며 층간 변위비는 35.5% 감소하여 목표 성능 수준을 만족한다. 보강 전 지붕 트러스의 경사재는 압축 좌굴에 대한 비탄성 에너지가 감소되어 변형이 크게 발생하였다. 경사재를 비좌굴 가새로 보강한 결과, 가새가 안정적으로 거동하여 비탄성 에너지가 증가하기 때문에 구조 보강에 효과적이었다.

감사의 글

본 논문은 2018년도 서일대학교 학술연구비에 의해 연구되었습니다.

References

1. Kato, S., Ueki, T., & Mukaiyama, Y., "Study of Dynamic Collapse of Single Layer Reticular Domes Subjected to Earthquake Motion and the Estimation of Statically Equivalent Seismic Forces", *International Journal of Space Structures*, Vol.12, No.3-4, pp.191~203, 1997
2. Takeuchi, T., Ogawa, T., & Kumagai, T. (2009). State-of-Arts Views on Response Control Technologies for Metal Space Structures. *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures Symposium 2009, Valencia*, pp.277~288
3. Kwon, H. K., "Actual situation of earthquake countermeasures from Pohang earthquake", *Journal of Korea Infrastructure Safety Corporation*, Vol.49, pp.2~9, 2017
4. KBC-2016, "Korean Building Code and commentary", *Architectural Institute of Korea*, 2016
5. Idriss, I. M., & Sun, J. (1992). *User's manual for SHAKE91 : a computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits*. University of California
6. Pacific Earthquake Engineering Research Center. PEER Strong Ground Motion Database. Retrieved from <https://peer.berkeley.edu/peer-strong-ground-motion-database>
7. Computer and Structures, Inc. (2006). *PERFORM-3D User Guide Version 4*. Retrieved from http://www.dinochen.com/attachments/month_0811/PERFORM3DUserGuide.pdf
8. Yoshino, T., & Karino, Y. (1971). Experimental study on shear wall with braces. *Proceedings of annual meeting of the Architectural Institute of Japan*, Japan
9. MacKerell, A. D., Bashford, D., Bellott, M., Dunbrack, R. L., Evanseck, J. D., Field, M. J., ... Karplus, M., "All-atom empirical potential for molecular modeling and dynamics studies of proteins", *The Journal of Physical Chemistry B*, Vol.102, No.18, pp.3586~3616, 1998

- Received : October 31, 2018
- Revised : November 07, 2018
- Accepted : November 12, 2018