

TS 제진공법으로 내진보강된 철근콘크리트 골조의 내진성능(Part 2:해석적 연구)

정명철¹, 송정원², 송진규^{3*}

Seismic Performance of RC Frame System Retrofitted with TS Seismic Strengthening Method(Part 2:Analytical Study)

Myung-Cheol Jung¹, Jeong-Weon Song², Jin-Kyu Song^{3*}

Abstract: In this study, the nonlinear time history analysis of seismic retrofitted structures with TS damper for seven ground motion records was conducted for the purpose of verifying the seismic strengthening effect of TS seismic retrofitting method. Through comparison of the interstory drift ratio and the energy dissipation amount of the non-reinforced structure obtained and those of retrofitted structures with TS damper from the nonlinear time history analysis, the interstory drift ratio was reduced by about 30% and the amount of energy dissipation through the structure was halved. As a result, it was confirmed that the damping performance of the TS seismic retrofitting method is excellent.

Keywords: Seismic rehabilitation, Vibration control system, TS(Tension-Spring) damper, Vibration control brace, Drift ratio, Energy dissipation

1. 서론

현행 내진설계의 기본 개념은 반응수정계수를 사용한 등가 정적해석법을 바탕으로 구조물의 비탄성 변형을 전제로 하고 있다. 이러한 경우 지진 발생 후 구조물의 비탄성 변형으로 인한 균열과 잔류변형이 수반될 수밖에 없으며 이에 따른 복구 비용이 상당히 소요되기 때문에 최근에는 구조체의 손상을 저감 시키는 방법으로서 제진 구조에 대한 관심이 증가하고 있다(An, 2014; Lee, 2015). 제진구조의 경우 구조체에 제진을 위한 별도의 장치를 설치하여 이 장치의 감쇠기능을 통해 지진에너지를 소산을 도모하게 되는데 장치의 설치·해체가 용이하여 구조물 신축 시 뿐 아니라 기존 구조물의 내진보수보강에도 매우 적합한 방법이다. 이러한 제진장치가 효율적으로 사용되기 위해서는 장치 자체의 성능에 대한 연구결과 뿐 아니라 제진장치가 설치되었을 때 구조체의 성능에 관한 실험적·해석적 연구의 축적이 필요하며, 많은 연구자들에 의하여 다양한 제진장치와 이를 적용한 구조체의 성능에 관한 연

구가 활발히 진행되고 있다(An, 2014; Lee et al., 2003; Oh et al., 2000; Oh et al., 2005; Park, 2009).

이에 본 연구에서는 스프링을 포함한 가새와 프레임으로 구성되어 스프링을 통한 감쇠기능과 프레임을 통한 강성 및 강도를 보유한 멀티 제진장치를 개발하여 해당 장치가 설치된 구조물의 성능을 평가함으로써 제진장치의 성능을 검증하고 이를 통하여 실무적용의 편의와 관련 연구 자료의 축적에도 도모하고자 하였다.

구조물의 성능평가를 위해 제진장치가 설치되지 않은 구조물과 제진장치가 설치된 구조물을 모델링하여 시간이력해석을 수행하여 층간변위비와 에너지 소산을 비교하였다. 구조물에 설치된 제진 장치의 비선형 거동특성은 「TS 내진공법으로 내진보강된 철근콘크리트 골조의 내진성능(Part 1)」의 실험결과 중 V-EX 실험체의 이력곡선을 이용해서 모델링하였으며, KBC 2016(Architectural Institute of Korea, 2016)에 명시된 대로 7개 이상 지진파에 대한 시간이력해석을 통해 얻어진 층간변위비의 평균값으로 보강 전·후의 성능차이를 비교하였다. 구조물의 비선형 해석 모델링과 비선형 시간이력해석에는 Perform 3D(Computers and Structures Inc., 2006)를 사용하였다.

¹정회원, 에이엠지그룹 건축사사무소 대표이사

²정회원, 전남대학교 학술연구 교수

³정회원, 전남대학교 건축학부 교수, 교신저자

*Corresponding author: jgsong@jnu.ac.kr

School of Architecture, Chonnam National University, Gwangju, 61186, South Korea

•본 논문에 대한 토의를 2018년 4월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

2. 제진구조와 TS 내진공법

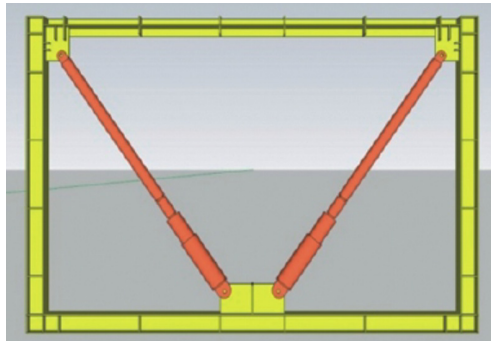
구조물의 내진성능을 확보하기 위하여 구조물이 지진하중에 대응하는 방식은 크게 구조물을 내진구조, 면진구조 및 제진구조로 설계하는 것으로 구분된다. 내진설계는 구조물의 강성과 강도를 증가시켜 구조체가 직접적으로 지진하중에 저항하도록 설계하는 방식이다. 면진구조는 건물 하부에 적층고무와 같은 진동 절연체를 설치하여 지반과 구조물체를 격리시키는 방식이다. 제진구조는 감쇠성능을 갖는 댐퍼(damper)를 구조물에 설치함으로써 입력된 지진에너지를 댐퍼에 의해

소산시키는 방법이다. 제진구조는 연직하중은 골조가, 수평하중은 골조와 댐퍼가 함께 부담하여 댐퍼를 통해 지진 에너지를 일부 소산시켜 주구조체의 손상을 최소화함과 동시에 지진 후에는 댐퍼의 교체를 통해 비교적 간단한 방법으로 원래의 내진성능 회복이 가능하도록 설계하는 방식이다. 이 때 사용되는 댐퍼가 기존의 구조물에 설치가 용이한 형태인 경우, 새로운 구조물의 신축 시 뿐 아니라 기존 구조의 내진 보수보강에도 적용 가능하기 때문에 그 적용성이 매우 뛰어난 방법이라 할 수 있다.

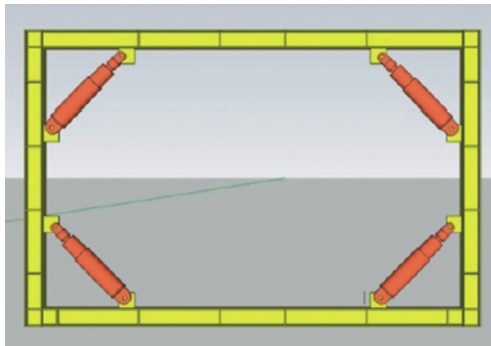
구조물의 진동을 줄이기 위해 사용되는 제진구조의 종류는 매우 다양하며, 현재에도 새로운 설계개념, 새로운 재료를 이용한 제진구조가 지속적으로 개발 적용되고 있다.

Fig. 1에 본 연구에서 대상으로 하는 TS 댐퍼의 개념을 나타내었다. TS 댐퍼는 장방형의 철골 프레임과 프레임에 설치되는 다수의 탄성스프링이 내재된 가새로 구성되어 있다. 가새가 인장을 받는 경우는 중앙에 위치한 스프링은 양쪽의 원형 강관 내부에 설치된 철판에 의해 압축을 받게 되고 바깥쪽에 설치된 스프링은 인장을 받게 된다. 반대로 가새가 압축을 받는 경우는 중앙에 위치한 스프링이 인장을 받게 되고 바깥쪽에 설치된 스프링은 압축을 받도록 설계됐다.

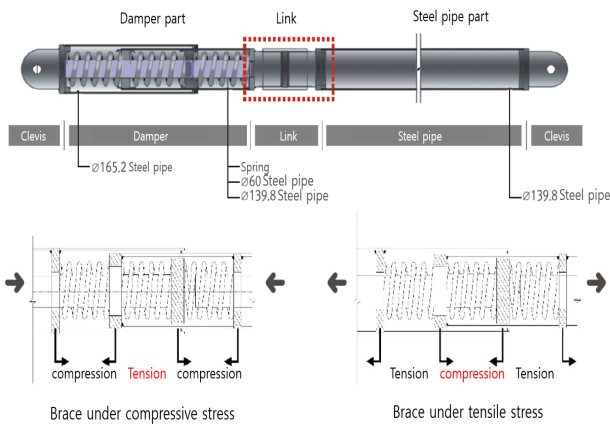
TS 댐퍼는 구조물의 내부 뿐 아니라 외부에도 부착이 가능하여 최적의 디자인 구현이 가능하다. TS 댐퍼를 이용한 내진보강기법은 기초보강이 필요하지 않고, 길이조절 장치를 이용한 길이 조절이 가능하며, 프레임으로 인한 강도와 강성에 대한 보강효과까지 기대할 수 있어 시공성 및 경제성의 측면에서 유리한 공법이다.



(a) Shape of system(V-brace system)



(b) Shape of system(D-brace system)



(c) Concept of brace

Fig. 1 Concept of TS system

3. 구조물의 성능평가

3.1 비선형 시간 이력해석

비선형 시간이력해석은 재료 및 부재의 비선형 특성과 동적 특성을 반영하여, 구조물의 변위, 속도 및 가속도 응답을 구할 수 있는 구조물의 동적응답을 가장 정확히 확인할 수 있는 방법이다. 시간이력해석은 구조물에 동적하중이 작용할 경우의 동적 평형방정식의 해를 구하는 것으로, 구조물의 동적특성과 가해지는 하중을 사용하여 임의의 시간에 대한 구조물거동(변위, 속도, 가속도 및 부재력 등)을 계산한다. 지진하중을 받는 구조물에 대한 동적 평형방정식은 식 (1)과 같다.

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = -M\ddot{x}_g(t) \quad (1)$$

여기서, M 은 질량행렬(Mass Matrix), C 는 감쇠행렬(Damping Matrix), K 는 강성행렬(Stiffness Matrix)을, \ddot{x}_g , x , \dot{x} , \ddot{x} 는 각

각 지진하중, 변위, 속도와 가속도를 의미한다.

본 연구에서는 탄성강성, 항복내력, 최대내력, 항복 후 강성비, 최대내력 후 강성 및 강도 저감, 이력형상 등 비탄성 거동 특성 입력이 용이한 비선형해석 프로그램인 Perform 3D (Computers and Structures Inc., 2006)를 사용하여 대상 구조물에 대한 비선형 시간이력해석을 수행하였다.

3.2 해석 모델

대상 건물은 층고 3.8 m, 4층의 비내진 상세를 갖는 철근콘크리트조의 학교 건축물로 정하였으며 Fig. 2에 해석모델 수립을 위한 평면과 댐퍼의 위치를 나타내었다.

Fig. 3에 나타낸 바와 같이 프레임요소인 기둥과 보의 양 단부에 “Semi-Rigid Moment Connection”과 “Rotation Type”의 “Moment Hinge”를 사용하고 이 두 요소를 연결하는 선요소로서 “RC cross section”을 사용하여 보의 양 단부에서 모멘트 소성힌지에 의한 항복이 발생하는 것을 모사하도록 모델링하였다. “Semi-Rigid Moment Connection”과 “Moment Hinge, Rotation Type”에는 식 (2)와 FEMA 356(FEMA, 2000)의 백본커브 입력 변수 값을 기준으로 입력하였다.

$$\theta_y = \frac{V(l_c/2)^2}{3EI_c} \quad (2)$$

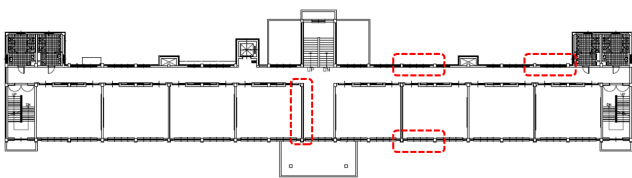


Fig. 2 Location of TS dampers

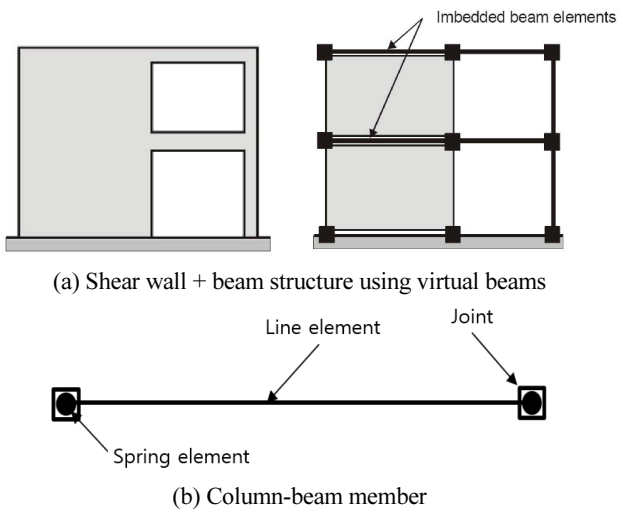


Fig. 3 Nonlinear model idealization of structure

여기서, V 는 설계전단력이며, l_c 는 보의 길이를, I_c 는 유효 단면적을 나타낸다.

댐퍼의 비선형 재료특성은 대각가새 2개를 이용하여 “Inelastic Steel Material with Buckling”을 사용하여 모델링하였다.

골조와 TS댐퍼로 구성된 비선형해석모델의 해석 결과는 「TS 내진공법으로 내진보강된 철근콘크리트 골조의 내진성능(Part 1)」의 외부 부착형 TS 댐퍼가 설치된 골조의 실험결과와의 비교를 통하여 해석의 결과가 실험에서 골조의 거동을 최대한 유사하게 구현해 낼 수 있도록 보정하였으며, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 비선형해석 결과 변위비 0.67% 이전의 강도와 강성을 과대평가하는 경향이 있었으며, 이로 인하여 누적에너지 양은 실험결과와 해석결과에서 각각 5,375 kN·mm, 6,386 kN·mm로 산정되어 해석결과가 실험결과에 비하여 18% 가량 과다 평가하는 경향이 나타났다. 그러나 변위비 0.67% 이후에서의 강도 및 강성의 변화와 핀칭의 구현에 있어 실험과 매우 유사한 결과를 보여주었다.

3.3 입력 지진파

KBC 2016(Architectural Institute of Korea, 2016)에서는 최소 3개 이상의 지반운동을 사용하여 비선형 해석을 할 것을 권장하고 있다. 본 구조물의 해석에는 인공지진파 2개를 포함한 총 7개의 지진파를 사용하였다. 해당 지반 운동과 7개의 지진파를 통해 산정된 평균 응답 스펙트럼을 Figs. 5, 6에 나타내었으며, 7개의 지반운동을 이용하여 시간이력 해석을 하였으므로 각 지진파를 통하여 나온 응답의 평균값을 기준으로 해석의 결과를 평가 하였다.

3.4 비선형 시간 이력해석 결과

총 7개의 지진파에 대한 시간이력해석 수행의 결과로 얻은 구조물 각 층의 층간 변위비를 Fig. 7에 나타내었다. 그래프의

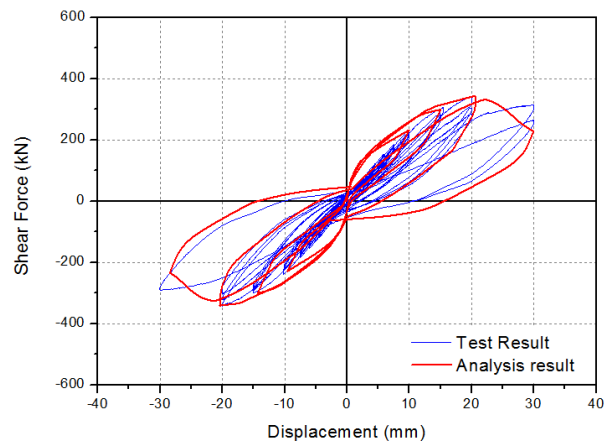


Fig. 4 Force-displacement curves of V-EX specimen

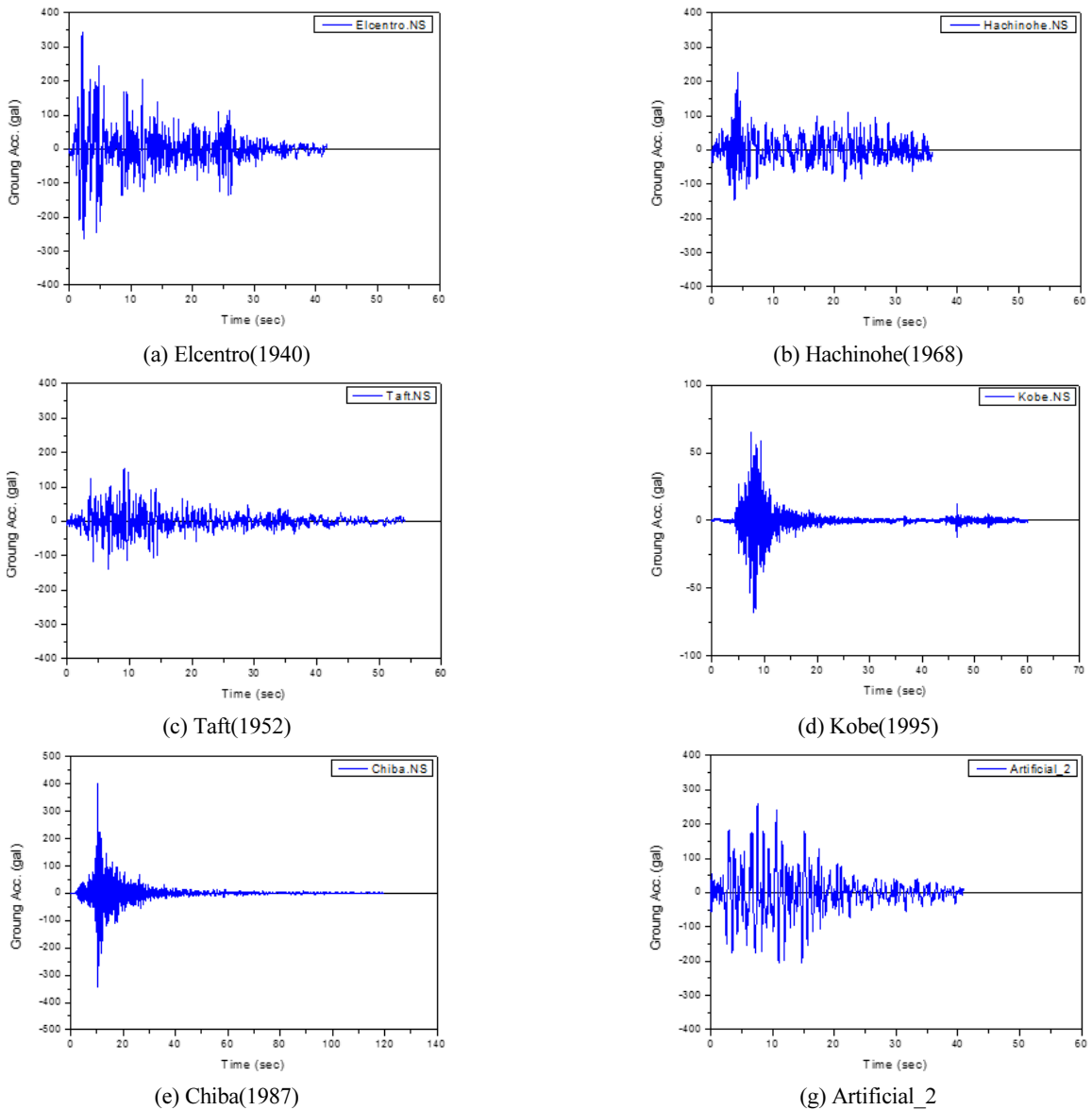


Fig. 5 Ground motion records used for time history analysis

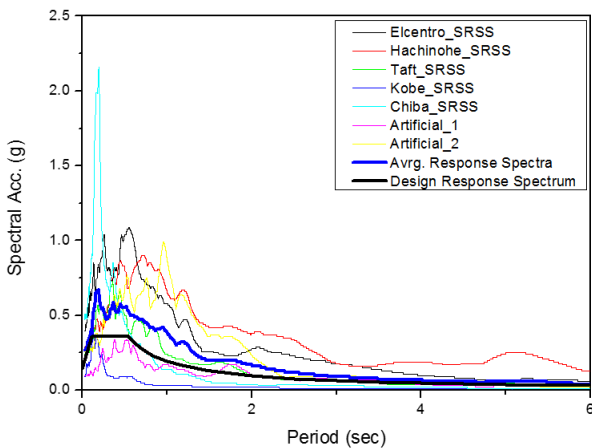
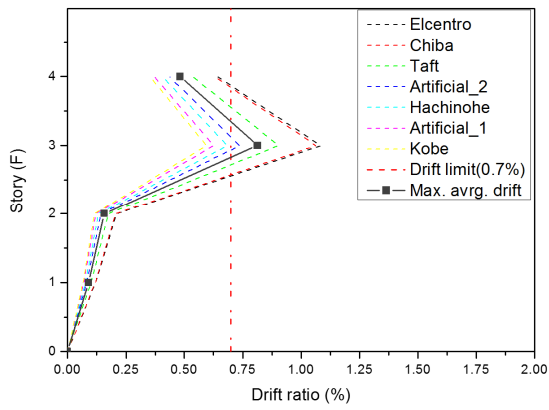


Fig. 6 Calculation of the average spectral response

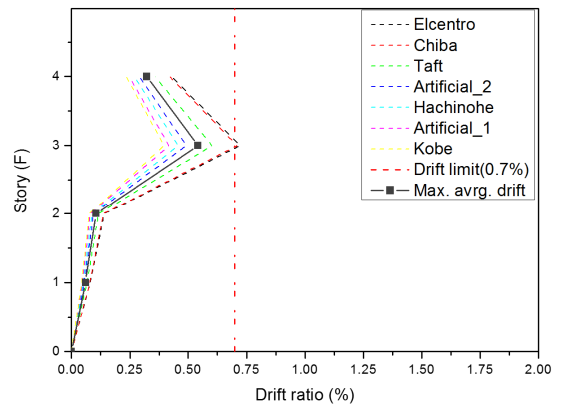
X축과 Y축은 각각 구조물의 층간변위비 값과 구조물의 층을 나타내며, 기준이 되는 층간 변위비는 내진설계되지 않은 조적채움벽이 있는 RC 모멘트골조시스템의 인명안전 수준의 허용층간 변형각인 0.7을 적용하였다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2013).

보강 전, 7개 지진파에 대한 층간변위비 평균값이 X 방향에서 인명안전 수준의 변위비 제한 조건을 만족하지 못하였으나, 보강후 X방향과 y 방향에서 모두 최대 층간변위비 조건을 충분히 만족 하였다. 결론적으로 TS 댐퍼 보강 이전과 이후 X 방향과 Y 방향에서 각각 33%, 28%의 최대 층간변위비 감소 효과가 있었다.

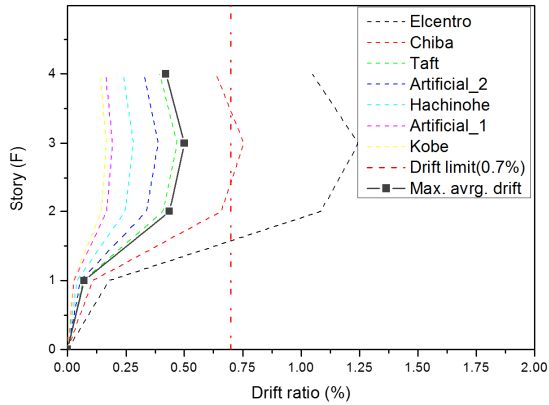
Fig. 8에 7개 지진파 중 엘센트로 지진파에 대한 댐퍼 보강



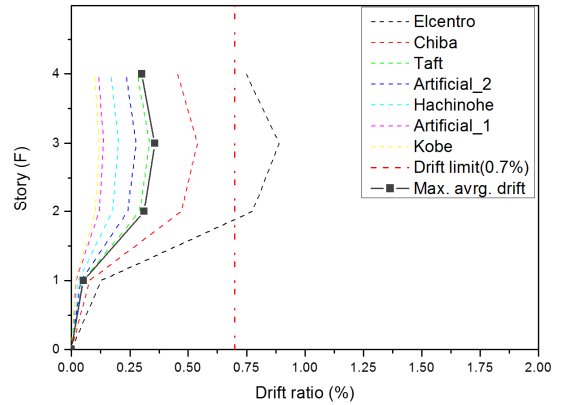
(a) X-dir. (Before reinforcement, Max. avg. drift: 0.81%)



(b) X-dir. (After reinforcement, Max. avg. drift: 0.54%)

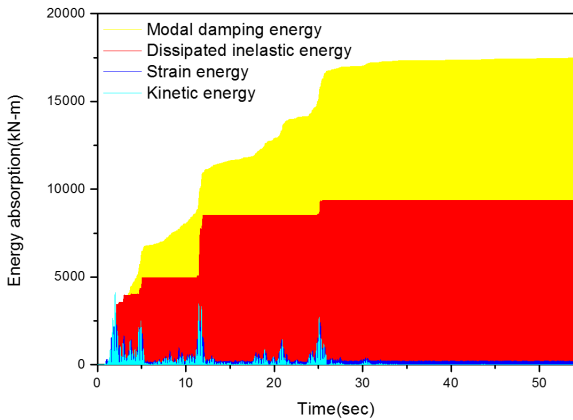


(c) Y-dir. (Before reinforcement, Max. avg. drift: 0.5%)

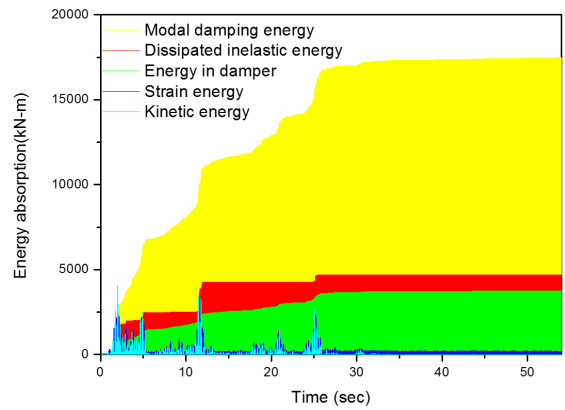


(d) Y-dir. (After reinforcement, Max. avg. drift: 0.35%)

Fig. 7 Interstory drift ratio



(a) Before reinforcement



(b) After reinforcement

Fig. 8 Energy dissipation for Elcentro EW

전·후 대상 구조물의 에너지 소산량을 나타내었다. 그래프의 X축과 Y축은 각각 지반운동의 지속시간과 에너지 소산량을 나타낸다.

TS댐퍼가 설치되지 않은 경우와 TS댐퍼가 설치된 경우의 에너지소산 분포를 비교한 결과 TS댐퍼가 설치된 경우 구조

체의 비탄성 변형으로 인해 소산되는 에너지의 50%가량이 댐퍼를 통해 소산되는 것을 알 수 있었다. 이를 통해 댐퍼가 변위 제어 및 에너지의 소산을 통하여 주 구조체의 손상을 방지하는데 기여하고 있음을 확인 하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 「TS 내진공법으로 내진보강된 철근콘크리트 골조의 내진성능(Part 1)」의 실험 중 외부 부착형 V형 TS 댐퍼가 적용된 4층 학교 건물을 대상으로 비선형 해석을 수행하였다. 댐퍼 보강된 전·후에 대하여 비선형 동적 시간이력해석을 수행하고 그 결과를 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 모델링 관련 기술-대각가새 2개를 이용하여 Perform-3D에서 제공하는 Inelastic Steel Material with Buckling의 비선형 재료 특성으로 이력특성을 구성하였다.
- 2) 외부 부착형 V형 TS 댐퍼가 설치된 골조의 해석결과 골조의 초기강성을 과대평가하는 경향이 있었으나, 핀칭현상과 에너지 소산량은 유사하게 재현하고 있음을 확인 하였다.
- 3) 외부 부착 방식의 TS 댐퍼를 설치한 대상 구조물의 시간이력 해석의 결과 7개 지진파에 대한 층간변위비 평균값이 TS 댐퍼 보강 이전과 이후 X 방향과 Y 방향에서 각각 33%, 28%의 최대 층간변위비 감소효과가 있었으며, 엘센트로 지진파에 대하여 구조체의 손상을 통한 에너지의 소산량이 약 50% 정도 감소하였다.

이를 통해 TS 댐퍼 공법을 적용한 구조물의 내진보강 유효성이 검증되었다고 판단된다.

References

An, T. S. (2014), Seismic performance of structures installed with cantilever-type steel dampers, Korea University, Seoul, Korea.
Architectural Institute of Korea (2016), Korean Building Code-Structure,

KBCS, Architectural Institute of Korea, 220-221.
Computers and Structures Inc. (2006), PERFORM Components and Elements for PERFORM 3D and PERFORM-Collapse ver 4, CSI, Berkeley, CA.
FEMA (2000), Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C.
Lee, C. H. (2015), Structural performance of SAFE dampers combining shear-type friction damper and non-uniform steel strip damper, Korea University, Seoul, Korea.
Lee, S. J., Park, J. Y., Oh, S. H., and Yoon, Y. H. (2003), The Structural Behavior of the Braced-Frame System with Slit-plate Dampers, *Proceedings of Autumn Annual Conference of the Architectural Institute of Korea*, Architectural Institute of Korea, Seoul, 133-136.
Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2013), Assessment criteria for existing facilities (buildings) seismic performance evaluation, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 104-107.
Oh, S. H., and Chang, I. H. (2000), Experimental Study on Hysteretic Characteristic of Braced Framed with Slit Plate Damper, *Architectural Institute of Korea, Proceedings of Autumn Annual Conference of the Architectural Institute of Korea*, Architectural Institute of Korea, Seoul, 349-352.
Oh, S. H., Kim, Y. J., Ryu, H. S., Choi, H. B., and Kang, C. H. (2005), Hysteresis Behavior of Beam-to-Column Connections with Elasto-Plastic Hysteretic Dampers In order to reduce the carbon dioxide exhaust, *Proceedings of Autumn Annual Conference of the Architectural Institute of Korea*, Architectural Institute of Korea, Seoul, 635-638.
Park, J. Y. (2009), Seismic performance of non-seismic RC frames retrofitted with steel dampers, Chung-ang University, Seoul, Korea.

Received : 01/10/2018

Revised : 01/24/2018

Accepted : 01/26/2018

요 지 : 본 연구에서는 TS 내진보강공법의 내진보강 효과 검증을 목적으로 7개의 지진파에 대한 TS 댐퍼(Tension Spring-Damper)로 내진보강된 구조물의 비선형 시간이력해석을 수행하였다. 비선형 시간이력 해석을 통해 얻어진 무보강 구조물의 층간변위비와 에너지소산 양과 비교한 결과 층간변위비가 약 30% 가량 감소하였고, 구조체를 통한 에너지 소산의 양은 반감되었다. 이를 통해 TS 내진보강공법의 제진성능이 우수함을 확인하였다.

핵심용어 : 내진보수보강, 제진공법, TS 댐퍼, 제진브레이스, 댐퍼 보강 골조
