

좌굴제어 가새를 가진 가새골조의 성능향상에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Performance Evaluation of Steel Frame with Buckling Control Brace

이 상 주*
Lee, Sang-Ju

한 상 을**
Han, Sang-Eul

노 삼 영***
Noh, Sam-Young

Abstract

This research presents two methods to prevent local buckling from circular tube brace and then verify their performance capacity through a cyclic loading test. As control methods on local buckling, one is to restrict local buckling as attaching cover plate at range of buckling. And the another is to exclude danger of buckling as inserting contraction device with rod and spring at the center of brace. The purpose of this research is to develop structural device for restriction of local buckling or for exclusion of its. And we investigate appliance of suggested methods through an experiment. We also estimate the improvement of performance capacity in a quantitative respect.

요 지

본 연구에서는 원형강관 가새의 국부좌굴에 의한 내력감소를 배제하기 위하여, 가새의 국부좌굴 거동을 파악하고 좌굴제어 방법을 찾고자 한다. 좌굴을 제어하기 위한 방법으로, 하나는 좌굴 영역에 커버플레이트를 설치하여 좌굴을 구속함으로써 변형능력을 확보하고자 하는 것이며, 다른 하나는 가새 중앙부에 강봉과 스프링을 이용한 수축장치를 삽입하여 압축 시 좌굴의 위험을 배제하는 것이다. 본 연구의 목적은 국부좌굴을 구속하거나 배제하기 위한 좌굴제어시스템을 제안하고, 실험을 통하여 제안한 방법의 적용성을 조사, 검토하는 것이다. 또한 좌굴제어에 따른 성능향상을 정량적으로 평가하는 것이다.

Keywords : Steel structures, Circular tube brace, Cover plate, Spring device, Deformation capacity, Local buckling

핵심 용어 : 강구조, 원형강관 가새, 커버플레이트, 스프링장치, 변형능력, 국부좌굴

* 정회원, 한양대학교 BK21지속가능건축기술전문인력양성사업단 계약교수

** 정회원, 인하대학교 교수

*** 정회원, 한양대학교 교수

E-mail : kyotolsj@empal.com 031-419-6182

• 본 논문에 대한 토의를 2007년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 2008년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

내진설계의 개념이 구조물의 변형능력을 확보하고자 하는 성능설계 개념으로 전환됨에 따라 성능설계의 개념을 도입한 하나의 방법으로 가새골조 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 가새는 구조물의 수평 전단력을 분담할 뿐만 아니라 본 구조물의 심각한 손상이 일어나지 않도록 하는 에너지 흡수요소, 즉 이력형 내진댐퍼로서 구조물의 변형능력을 향상시키는데 큰 효과를 가진 것으로 평가되고 있다.

그러나 가새는 축력에 의해 수평력을 분담하는 부재로서 인장력을 대상으로 설계되기 때문에 세장한 부재로 설계 가능하지만, 좌굴에 대한 고려를 하지 않으면 안 된다. 좌굴의 발생은 개개 부재의 내력을 현저히 저하시킬 뿐만 아니라 전체구조물への 안정성에도 크게 영향을 미치는 요인이므로 이를 구속하여 소요의 내력과 변형능력을 향상시킬 필요가 있다.

수동적인 제진장치의 한 방법으로 가새의 에너지흡수 능력을 증대시켜 내진성능을 향상시키고, 좌굴을 방지할 목적으로 많은 연구가 수행되었다. 예를 들면, Fujimoto, Nakashima, Inoue 등은 저항복강을 가새에 적용하고 접합부를 제외한 부재 전체의 좌굴을 구속하는 비부착 가새(unbonded brace)에 대한 이론을 전개하고 실험을 통하여 그 효과를 평가하고 있다. 또한 Inoue 등은 구속되지 않은 접합부에 주목하여 비구속 길이 등에 대한 연구를 수행하여 설계조건을 제시하고 있다. 최근에 들어 적극적인 방법으로 에너지 흡수를 위한 이력형 강재 댐퍼를 적용한 연구도 그 성과가 발표되고 있으며, 대한건축학회·한국면진제진협회·한국복합화건축기술협회에서 공동으로 개최한 세미나에서는 면진·제진 설계지침(안)을 제안하고 있다.

하지만 기존 이력형 내진댐퍼 가새를 적용하기 위해서는 많은 수고가 필요하다고 사료되며, 초기의 목적인 교체의 용이성에도 그 한계가 존재하리라 판단된다. 본 연구에서는 원형강관을 가새에 사용하며 좌굴을 제어하기 위한 두 가지 방법을 제안하고, 적용에 따른 성능을 실험을 통하여 검토한다. 좌굴을 제어하기 위한 방법으로, 하나는 좌굴 영역에 커버플레이트

를 설치하여 좌굴을 구속함으로써 변형능력을 확보하고자 하는 것이며, 다른 하나는 가새 중앙부에 스프링을 이용한 수축장치를 삽입하여 압축 시 좌굴의 위험을 배제하고자 하는 것이다.

본 연구의 목적은 좌굴을 구속하거나 배제하기 위한 좌굴제어시스템을 제안하고, 실험을 통하여 이들 시스템의 성능향상을 평가하며, 구조물への 적용성을 검토하는 것이다.

2. 실험개요

본 실험에서는 가새를 가진 강구조물을 구성하는 부분 단일 프레임을 실험대상으로 하여, 원형강관을 사용한 가새를 설계한다. 가새에는 Fig. 1에 나타난 커버플레이트를 이용한 좌굴구속 장치 및 강봉과 스프링으로 구성된 좌굴제어 장치를 적용한다. 이들 좌굴구속 및 좌굴제어 장치를 설치한 시스템의 좌굴제어 정도 및 제어에 따른 성능을 파악하기 위하여, 먼저 원형강관 가새를 가진 단일 프레임에 반복 수평하중을 가하여 그 좌굴위치 및 형상, 좌굴내력 등 이력거동을 평가한다. 그리고 좌굴제어장치를 각각 적용한 실험체의 실험을 수행하여 얻어진 결과로부터 제어장치의 유무에 따른 이력거동을 비교, 분석하고, 그 적용에 따른 성능의 증대효과를 평가한다.

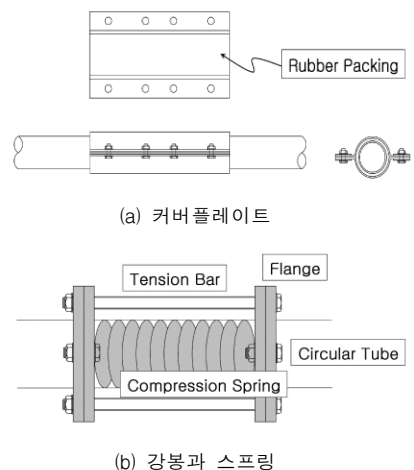


Fig. 1 좌굴 제어 장치

2.1 실험체의 설계

Fig. 2에 나타낸 것과 같이, 본 연구에서는 프레임을 지지대 위에 설치하고 대각선 방향으로 원형강관 가새를 설치하였다. 프레임의 기둥을 지지대 위에 베이스 플레이트를 사용하여 볼트로 접합하였으며, 기둥과 보의 용접에 의해 접합하였다. 또한 기둥 또는 보의 접합부에 예상되는 국부좌굴을 배제하기 위하여 스티프너를 설치하였으며, 프레임의 횡좌굴을 방지하기 위해 횡좌굴 구속대를 설치하였다. 그리고 가새는 양단 거셋플레이트에 용접 접합하여 볼트접합에 의해 프레임에 접합하였다. 이러한 설계를 통하여 기둥상단에 연결된 액추에이터를 이용하여 프레임에 수평하중을 가함으로써 가새에 인장 및 압축력이 반복적으로 도입되도록 설계하고 있다. 단 실험에서는 동일 프레임을 반복적으로 사용하고, 가새만 교체한다.

2.1.1 프레임의 설계

프레임 구조가 항복 시 수평변위가 0.01rad(부재길이 1m인 경우 10mm)를 넘지 않도록 좌굴처짐각법

과 모멘트분배법을 이용하여 프레임과 가새의 단면을 설계한다. 좌굴처짐각법을 이용하여 대상 프레임 구조의 수평력(P)에 대한 변위(u_B)를 구하면,

$$u_B = R_C h = \frac{4+6\beta}{1+6\beta} \cdot \frac{h^2}{2AEK_C} P, \quad \beta = \frac{K_B}{K_C} \quad (1)$$

와 같이 표현되며, 여기에서 R_C 는 기둥의 회전각이고, β 는 기둥과 보의 강성비이며, 보항복형으로 가정하여 기둥과 보의 강성비를 3:2로 설계한다.⁽³⁾ 단 보의 축강성이 큰 것으로 가정하여 모멘트분배법을 이용하여 수평력에 대한 각 부재단부의 모멘트를 계산한다.

2.1.2 가새의 설계

가새는 양단 핀접합으로 가정하여 축력을 받는 부재로 고려하고 아래와 같은 조건하에 설계한다.

- 1) 프레임과 가새의 수평강성비를 2:1로 하여 가새가 전체 수평력의 1/3을 분담한다.⁽³⁾
- 2) 가새는 원형강관을 사용하고, 교체가 가능하도록 볼트접합에 의해 프레임에 접합한다.

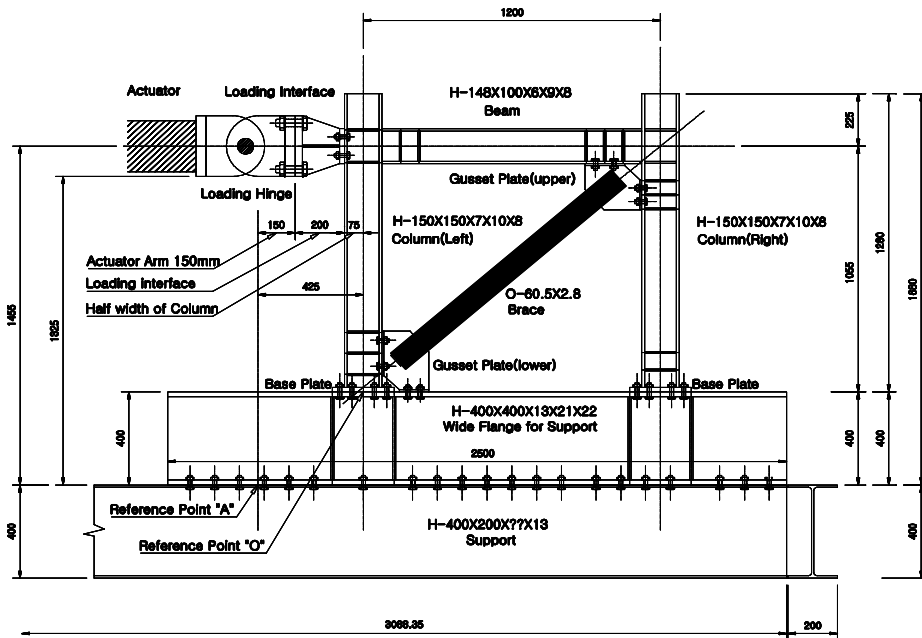


Fig. 2 실험체 배치도

2.2 재하 및 계측계획

본 실험에서 재하상황은 하중 500kN의 재하능력을 가진 액츄에이터를 기둥-보 집합부에 핀접합으로 연결하여 반복변위 재하력을 부여한다(Fig. 5). 재하제어변위는 인장실험결과를 사용하여 계산된 전소성모멘트에 대응하는 기둥의 부재회전각에 대한 수평변위(약 5mm)를 기준으로 하고, 재하사이클은 재하진폭을 2, 3, 4배로 점증시키면서 재하한다. 재하는 각 진폭에 대하여 2사이클씩 재하하고, 진폭이 5배에 도달하면 그 진폭으로 중국상태라고 판단될 때까지 재하를 계속한다.

재하 및 변위의 계측위치를 Fig. 6에 나타낸다. 하중계측은 액츄에이터 로드단부에 부착된 로드셀을 이용하고, 변위계측은 액츄에이터 반대쪽에 LVDT 변위계를 설치하여 계측한다. 그리고 가새에는 중앙부와 양단부에 변형도 게이지를 부착하여 변형도를 계측한다.

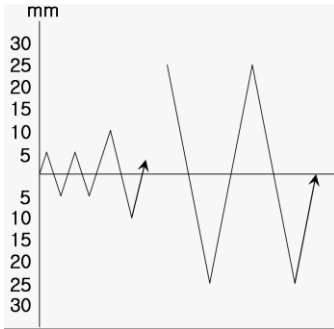


Fig. 5 재하 사이클

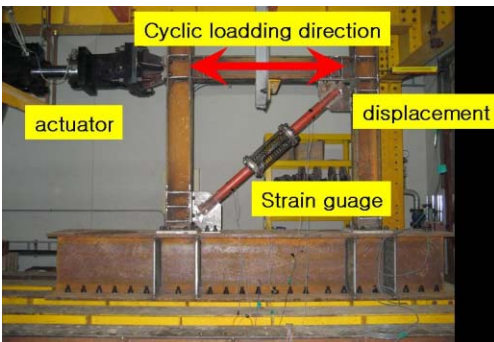


Fig. 6 재하 및 계측 상황

3. 실험결과 및 고찰

반복재하실험에 의한 결과를 정리하여 아래에 기술한다. 먼저 실험 중에 관찰된 좌굴발생 및 진전 상황에 대하여 기술하고, 계측된 하중-변위 곡선을 나타낸다. 그리고 이 이력곡선에 근거하여 최대내력과 변형능력을 고찰한다.

3.1 이력특성과 파괴현황

3.1.1 좌굴발생 및 진전 상황

각 시험체의 변형상태를 Fig. 7에 나타낸다. 일반가새를 설치한 경우, 좌굴의 발생은 예상한 것과 같이가새의 중앙부에서 발생하였으며, 그 형태는 구면외 좌굴로 나타났다. 또한 이 좌굴은 구조물의 횡좌굴에도 크게 영향을 미치고 있음이 확인되었다. 좌굴은 수평변위가 10mm에서부터 발생하여 수평변위를 증가시킬수록 반복횟수가 거듭될수록 증대되어 결국 가새 중앙부에 완전파단으로 평가할 만한 균열이 발생하였다.

보강가새를 설치한 경우, 수평변위가 증가하고 반복횟수가 거듭됨에 따라 커버플레이트의 양쪽 끝부분의 가새에 좌굴이 발생하였다. 좌굴은 수평변위가 15mm 정도에서 발생하기 시작하여, 좌굴위치가 이동된 것 이외에는 일반가새와 동일하게 그 변형정도가 크고 급속하게 진전되었다.

좌굴제어를 위해 제어가새를 설치한 경우, 수평변위가 증가하고 반복횟수를 거듭하여도 좌굴은 발생하지 않았다. 압축 시 수축변형은 제어장치의 플랜지에 볼트로 체결된 강봉에 흡수되었다.

3.1.2 하중-변위 곡선

Fig. 8~10에 각 시험체의 하중과 변위관계를 나타낸다. Fig. 8에 나타낸 일반가새를 설치한 경우(OB 시험체)의 하중-변위관계를 고찰해 보면, 압축 시 발생한 가새 중앙부의 좌굴에 의해 진폭 15mm부터 내력이 저하되고 있음을 알 수 있다. 또한 내력이 저하된 이후에도 같은 진폭에 대해서 내력이 계속적으로 감소하고 있음을 알 수 있다. 인장 시에는 전체적으로 안정적인 거동을 보이나 같은 진폭이 반복되는 경우

내력이 저하됨을 알 수 있다.

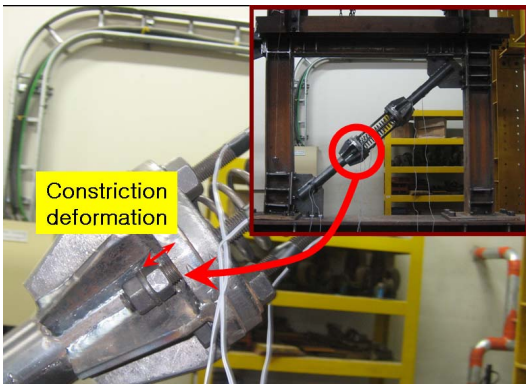
보강가새를 설치한 경우(CB시험체)를 살펴보면 진폭 15mm 이상에서는 내력의 증가를 보이지 않고 있을 뿐만 아니라 같은 진폭에서 내력이 저하되고 있음을 알 수 있다. 이는 커버플레이트 양끝부분에 발생한 가새 좌굴의 영향으로 판단된다. 이러한 거동은 시기가 약간 늦지만 일반가새의 경우와 동일한 거동으로 평가할 수 있다. 따라서 커버플레이트를 설치하는 경우에는 구속길이의 확장 등의 더 많은 고려가 있어야 할 것으로 판단된다.

제어가새를 설치한 경우(SB시험체)는 실험종료 시까지 안정된 이력거동을 나타내고 있다. 하중-변위관계로부터 강봉과 스프링을 가진 제어장치를 설치하는 경우 좌굴의 위험이 배제될 뿐만 아니라 안정된 거동을 기대할 수 있음을 확인할 수 있다.



(a) OB - 중앙부 좌굴

(b) CB - 양끝부 좌굴



(c) SB - 스프링장치의 수축변형

Fig. 7 가새의 좌굴 및 수축변형

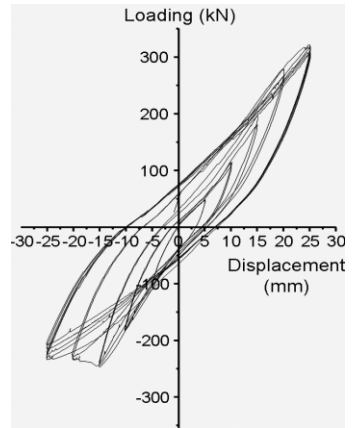


Fig. 8 일반가새(OB)

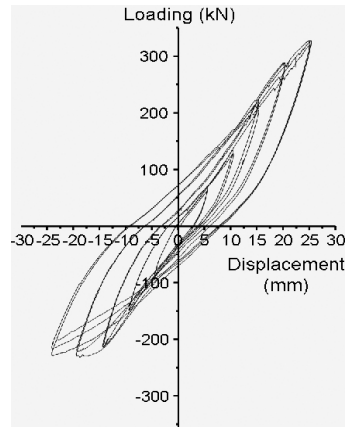


Fig. 9(a) 보강가새(CB-a)

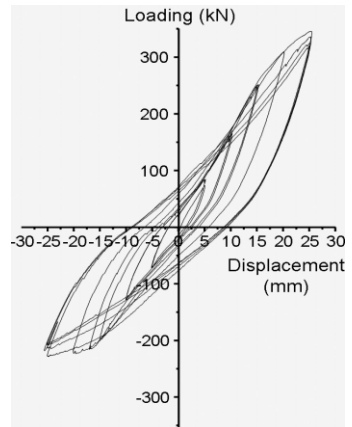


Fig. 9(b) 보강가새(CB-b)

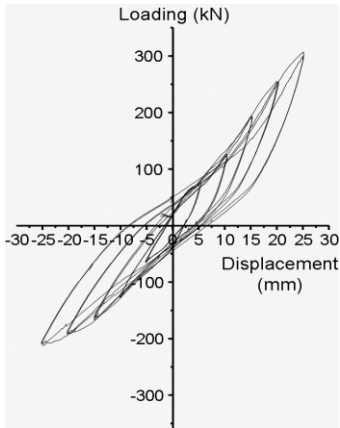


Fig. 10(a) 제어가새(SB-a)

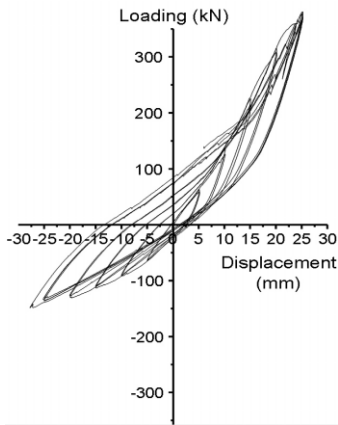


Fig. 10(b) 제어가새(SB-b)

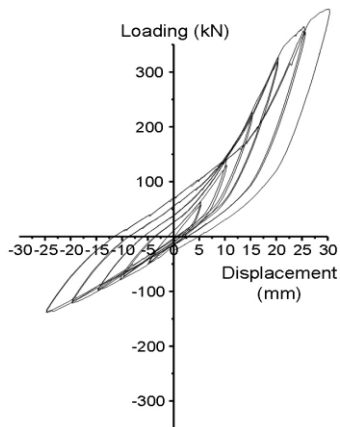


Fig. 10(c) 제어가새(SB-c)

3.2 최대내력 및 변형능력

실험결과 얻어진 하중-변위 곡선으로부터 각 실험체의 최대내력을 비교·분석하여 표 3에 나타낸다. 먼저 최대내력에 대하여 고찰해 본다. OB실험체의 경우 가새가 인장이 되는 경우 300kN 이상이며, 압축이 되는 경우 240kN 정도이다. 또한 CB실험체의 경우 각각 300kN과 200kN이며, 압축 시 최대내력은 OB실험체에 비해서도 작은 값을 보였다. 그리고 인장과 압축 시 내력감소는 국부좌굴의 영향이라고 판단되지만, 좌굴에 의한 내력감소는 압축내력에 크게 영향을 미치거나 인장내력에 크게 영향을 미치지 않았다는 것을 알 수 있다.

SB실험체의 경우, 최대내력은 가새가 인장이 되는 경우 300kN 이상이며, 압축이 되는 경우 220kN이다. 좌굴은 발생하지 않았으며 인장 시에는 강봉에 의해 안정된 내력증가를 나타내고 압축 시에는 프레임만에 의해 외력이 저항하므로 내력의 증가는 없으나 안정된 이력거동을 보였다.

각 실험체의 실험완료시 최종내력을 근거로 변형능력을 고찰해 보면, OB실험체의 경우 좌굴에 의한 내력감소는 진폭 15mm(층간변위각 0.0015rad)에서 시작되었고, 진폭이 커짐에 따라 두드러지며, 진폭 25mm(층간변위각 0.0025rad)에서는 압축 시 최대내력의 약89%까지 감소하였다. CB실험체의 경우도 커버플레이트로 보강된 끝부분에 발생한 좌굴로 인해서 더 이상의 압축내력의 증가는 나타나지 않았다. 최종내력은 압축시 최대내력의 약90%까지 감소하였다. 결과적으로 커버플레이트에 의한 좌굴구속효과는 평가하기 어렵다. 이는 좌굴구속영역이 짧아 가새에 생긴 좌굴의 영향이므로 구속효과를 얻기 위해 구속영역을 확장시킬 필요가 있을 것으로 판단된다.

SB실험체의 경우 압축 시의 내력이 인장에 비하여 60~70%의 수준이며 이는 가새가 압축력에 저항하지 않고 수축함을 나타내고 있다. 또한 인장, 압축 시의 두 경우에 대해서 최대진폭 25mm까지도 내력의 저하 없이 안정된 이력거동을 보이고 있다. 이로써 좌굴제어효과뿐만 아니라 프레임의 변형능력 향상에도 기여하고 있음을 알 수 있다.

Table 3 최대내력비교

| 구분 | 시험체 | 내력저하시점 | 최대압축내력 kN | 최종내력 kN | 내력비 |
|--------|------|--------|--------------|------------|-------|
| 일반가새 | OB | -15mm | -247 | -219 | 0.887 |
| 커버플레이트 | OB-a | -20mm | -231 | -208 | 0.900 |
| | OB-b | -25mm | -228 | -207 | 0.908 |
| 스프링장치 | SB-a | - | -212 | -212 | 1.000 |
| | SB-b | - | -201 | -201 | 1.000 |
| | SB-c | - | -208 | -208 | 1.000 |

단, 내력저하시점은 좌굴발생 이후 처음으로 내력이 저하하는 시점을 나타냄
최종내력은 +25mm 2cycle에 있어서의 내력
내력비는 최대압축내력에 따른 최종내력의 비를 나타냄

4. 결론

본 연구의 결과를 요약하면 아래와 같다.

- 1) 일반가새의 경우, 예상한 것과 같이 가새 중앙부에서 좌굴이 발생하여 내력이 감소할 뿐만 아니라 구조물의 횡좌굴에 크게 영향 미침을 알 수 있다.
- 2) 커버플레이트로 일반가새의 중앙부를 보강한 경우, 커버플레이트 양끝부분의 가새에 국부좌굴이 발생하여 심각한 손상이 관찰되었으며, 이로 인해 일정 수평변위 이상에서는 내력이 증가하지 않을 뿐만 아니라 같은 진폭의 반복 시에 내력이 감소하는 것을 알 수 있었다. 본 실험에서는 그 보강효과를 평가하기 어렵고, 더 효과적으로 좌굴을 방지하고 내력의 증대 및 변형능력을 확보하기 위해서는 더 넓은 범위에 걸쳐 보강해야 할 것으로 판단된다.
- 3) 강봉과 스프링을 가진 제어장치를 가새 중앙부에 설치한 경우, 가새에 손상 없이 안정된 이력거동을 구현할 수 있고, 최종내력에 근거한 변형능력도 우수한 것으로 판단된다.

좌굴제어 및 변형능력 향상효과가 검증된 제어장치에 대하여, 구조물에 양방향 배치를 계획함으로써 안정되고 변형능력이 탁월한 구조물 설계가 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 2005년 건설교통기술평가원(과제번호:05건설핵심C02) 및 과학기술부 우수연구센터육성사업인 한양대학교 친환경건축 연구센터(과제번호:R11-2005-056-04004-0)의 연구비 지원으로 이루어진 것으로, 이에 감사의 의를 표합니다.

참고문헌

1. 대한건축학회, 한국면진협회, 한국복합화건축기술협회, "예측불허 하중에 대비한 내진·면진·제진 설계 및 시공 - 면진·제진 설계지침(안)" 공청회, 공동세미나 배포자료, 2007.
2. 김진구, "횡변위를 고려한 고층건물의 예비설계에 관한 고찰", 한국강구조학회지 학술기사, 1995, pp. 15-20.
3. 井上一郎, 小野聰子: 履歴ダンパーの適正耐力分担率と加構の設計耐力, 構造工學論文集, Vol. 41B, 1995, 3, pp. 9-15.
4. 井上一郎, "建築鋼構造の理論と設計", 京都大學學術 出版會, 2003.
5. Hasegawa, H., Takeuchi, T., Iwata, M., Yamada, S. and Akiyama, H., "Experimental study on dynamic behaviour of unbonded braces." AIJ J. Techno. Des. No. 9, 1999, pp. 103-106.
6. Inoue, K. and Kuwahara, S., "Optimum strength ratio of hysteretic damper." Earthquake engineering and structural dynamics, Vol. 27, No. 6, 1998, pp. 577-588.
7. Nakashima, M., Saburi, K. and Tsuji, B., "Energy input and dissipation behaviour of structures with hysteretic dampers", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 25, No. 5, 1996, pp. 483-496.
8. Oh, S. H., Kim, Y. J., Ryu, H. S. and Kang, C. H., "Hysteretic Characteristics of Beam-to-Column Connections with Energy Absorption Elements at Beam Bottom Flanges," KIJ J., v. 22 n. 8, 2006, pp. 29-36.
9. Minlang Lin, Kenchyuan Tsai, Pochien Hsaio and Chengyu Tsai, "Compressive behavior of buckling-restrained brace gusset connections", The First International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering (AESE) in 2005, Nagoya, Japan.
10. Fujimoto, M. and Wada, A. etc., "Unbonded brace encased in buckling restraining concrete and steel tube", Journal of Structural Engineering, Vol. 34B, 1998.

금행(접수일자 : 2007년 6월 25일)