

비좌굴가새가 설치된 골조의 비탄성거동

Inelastic Behavior of Steel Frames with Buckling Restrained Braced

김진구*
Kim, Jin-koo

박준희**
Park, Jun-hee

ABSTRACT

The seismic behavior of framed structure with Chevron-type buckling restrained braces were investigated and their behavior factors were evaluated following the procedure proposed in ATC-19 & ATC-34. Two types of structures, building frame systems and dual systems, with 4, 8, 12, and 16 stories were designed per the IBC 2000, the AISC LRFD and the AISC/SEAOC Recommended Provisions for BRBF. Nonlinear static pushover analyses were carried out to observe the plastic hinge formation and to identify the loads and the displacements at the yield and the ultimate states. Time history analyses were also carried out to compute the permanent displacement and the dissipated hysteretic energy. According to the analysis results, the response modification factors of model structures turned out to be larger than what is proposed in the provision in low story structures, and a little smaller in medium-story structures. The dual systems, even though designed with smaller seismic load, showed superior static and dynamic performances.

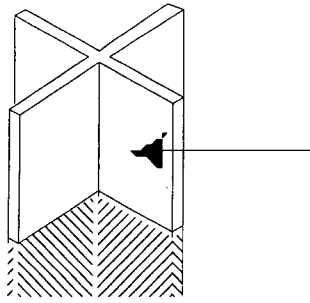
1. 서 론

최근에 지진이 발생했을 때 구조물의 거동을 살펴보면 강도의 증가와 안정적인 에너지 소산능력이 구조물의 한계상태 이내에서 층간변위와 전체 변위를 제어하는데 큰 역할을 한다. 그래서 구조물에 yielding metallic devices를 사용하여 지진하중을 흡수하는 개념이 이미 30년 전에 등장하였다. 또 다른 구조물의 에너지 소산 장치로 감쇠기와 가새가 있다.

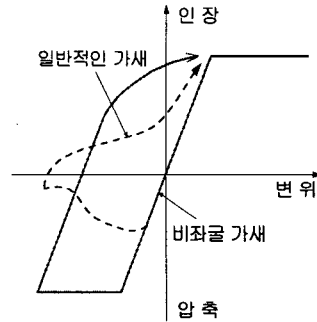
가새골조는 구조물의 탄성거동을 전제로 풍하중에 대한 저항력을 증진하기 위하여 개발되었다. 일반적으로 가새골조는 축방향 강성으로 횡력을 저항하기 때문에 비교적 작은 단면으로 큰 횡강성을 확보할 수 있어서 효과적인 시스템이지만, 압축가새가 항복한 후 횡력에 대한 시스템의 저항력이 급격히 떨어지는 단점이 있다. 이런 단점을 보완하고자 그림 1과 같이 최근 미국, 일본, 및 대만 등 강진 지역을 중심으로 가새 부재를 각형 또는 원형 강관 속에 설치하고, 빈 공간을 콘크리트로 충전하여 압축가새의 좌굴을 방지한 좌굴방지가새 (Buckling-Restrained Braces, 이하 BRB)가 내진 설계 및 보강 용도로 적용되고 있다. 이러한 추세를 반영하여 AISC 와 SEAOC 은 "Recommended Provision for Buckling-Restrained Braced Frames" (BRBF)⁽¹⁾를 발표하여 설계에 적용하도록 하고 있다.

본 연구에서는 구조시스템에 따라 BRBF의 거동을 알아보기 위하여 BRBF가 건물골조일 경우(BF)와 이중골조(DUAL)일 경우에 대하여 비탄성 정적해석과 비탄성 동적해석을 통하여 BRBF의 거동을 분석하였다.

구조시스템을 설계변수로 하여 BRBF의 반응수정계수에 대하여 AISC/SEAOC에서 제시하고 있는 값과 비교 후 평가하였다. BRBF의 정적 및 동적 비탄성 해석은 DRAIN-2DX⁽²⁾를 사용하여 수행하였다.



a) 비좌굴가새의 구성



b) 비좌굴가새의 이력거동

그림 1. 비좌굴가새의 형상

2. 예제 구조물의 설계

본 연구에서 사용한 BRBF는 AISC/SEAOC에서 제시한 기준에 따라 설계하였다. 구조물의 높이에 따른 응답 계수의 변화를 고려하기 위하여 그림 2에서와 같이 모든 층에서 층고가 3.6 m이고, x, y 방향으로 3 경간인 4, 8, 12, 16층 구조물에 대하여 설계하였다. BRB는 그림 3와 같이 외부 골조의 가운데 경간에 역V형으로 설치하였다. 건물골조 시스템은 횡력을 가새가 전부 저항하도록 설계하였으며, 이중골조는 기둥과 보의 접합부를 강점으로 하여 모멘트골조가 횡력의 25%를 저항하게 설계하였다.

설계지진하중은 IBC-2000⁽³⁾의 내진설계기준에 따라 $S_{DS} = 1.0g$, 지반조건 D, 내진설계범주 E를 적용하였다. 해석 모델은 내진용도그룹 II (중요도계수=1.25)에 해당하는 것으로 가정하였다. IBC-2000에서 BRBF의 반응수정계수를 제시하고 있지 않기 때문에 본 연구에서는 FEMA-450⁽⁴⁾에 따라 건물골조 시스템인 경우 반응수정계수는 8.0을 적용하고 이중골조시스템의 경우 9.0을 적용하였다. BRBF의 설계시 기둥에 대한 세장비는 AISC에서 SCBF (Special Concentric Braced Frames)에 대하여 제시하고 있는 규정⁽⁵⁾에 준하여 적용하였다.

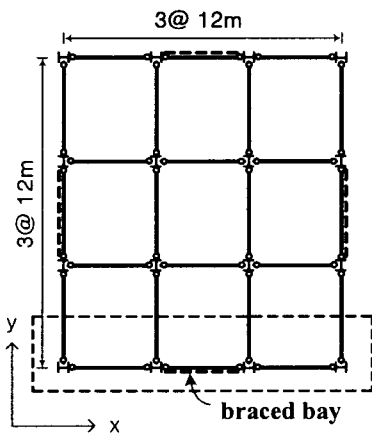
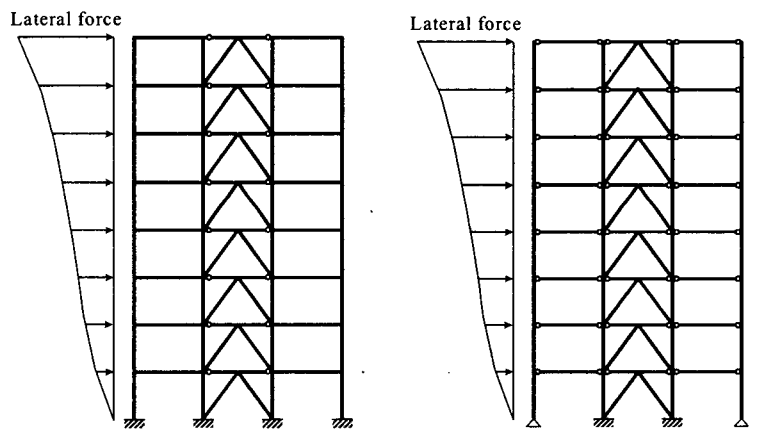


그림 2. 해석모델의 평면



a) 이중 골조시스템의 입면

b) 건물골조 시스템의 입면

그림 3. 예제모델의 입면

일반적으로 BRB의 코어가 압축력을 받을 경우 외부 강관과 충전 콘크리트의 구속 효과로 인하여 인장력을 받는 경우에 비하여 항복강도가 증가한다.^(6,7) 압축 항복강도의 크기는 좌굴방지를

표 1. 8층 구조물의 부재 크기

경간길이	층	내부 기둥	외부 기둥	내부 보	외부 보	가새
건물골조 시스템 (BF)	1 ~ 2	H 490×430×35×60	H 394×405×18×18	H 692×300×12×17	H 692×300×12×17	H 400×400×18×21
	3 ~ 4	H 410×410×25×43	H 388×402×18×21	H 692×300×12×17	H 692×300×12×17	H 400×400×18×21
	5 ~ 6	H 410×410×17×21	H 298×299×18×21	H 692×300×12×17	H 692×300×12×17	H 394×390×11×18
	7 ~ 8	H 244×252×11×11	H 200×200×18×21	H 692×300×12×17	H 692×300×12×17	H 338×351×13×13
이중골조 시스템 (DUAL)	1 ~ 2	H 500×500×30×50	H 414×405×18×28	H 692×300×12×17	H 900×300×20×32	H 344×348×10×16
	3 ~ 4	H 500×500×25×40	H 406×403×16×24	H 692×300×12×17	H 900×300×18×32	H 344×348×10×16
	5 ~ 6	H 414×405×18×28	H 400×400×13×21	H 692×300×12×17	H 900×300×16×28	H 300×300×10×15
	7 ~ 8	H 350×357×12×19	H 300×305×15×15	H 692×300×12×17	H 800×300×14×26	H 250×250× 9×14

위해 가새 코어 부분의 구속정도에 따라 달라지는데, 인장력을 받을 때에 비하여 압축력을 받을 때가 3~10%정도 크게 나타난다. 이러한 현상을 고려하여, 본 논문에서는 압축가새가 인장가새보다 항복강도가 10%크게 설계하였다.

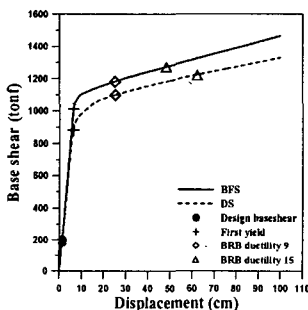
기둥의 재질은 SM490 ($F_y=3.3 \text{ tonf/cm}^2$), 보와 가새는 SS400 ($F_y=2.4 \text{ tonf/cm}^2$)을 적용하였다. 고정하중과 적재하중은 각각 500kgf/m^2 , 250kgf/m^2 으로 모든 층에 일정하게 적용하였다. 실무의 관행을 반영하기 위하여 2개 층을 동일하게 설계하였으며, 두 층 중 하부 층의 부재의 크기를 작용하는 하중에 의한 응력과 부재 내력의 비가 0.98에서 0.99 사이가 되도록 결정하였다. 8층 해석 모델의 부재 크기는 표 1과 같다.

3. 구조시스템에 따른 거동분석

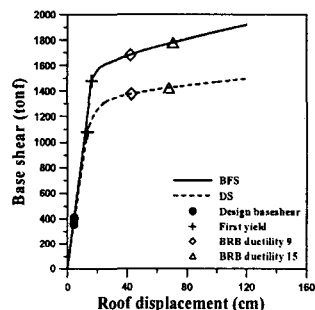
3.1 비탄성 정적해석

비선형 정적해석(Pushover analysis)은 구조물의 성능을 평가하는 대표적인 방법의 하나로 구조물에 일정한 하중 분포를 주어 점진적으로 증가시킴으로써 붕괴 메커니즘 형성에 따라 구조물의 성능을 평가하는 방법이다. 하중 분포는 역삼각형과 구조물의 1차 모드 형태의 하중이 일반적이다. 이러한 Pushover 해석방법은 고차모드에 의한 영향을 고려할 수 없으며, 구조물의 입체적인 거동을 표현할 수 없다는 몇 가지 단점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 등가고유모드를 이용하여 횡 하중을 분배하였다.

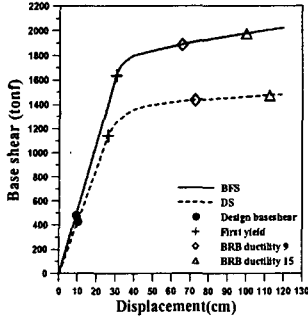
예제 구조물의 비탄성 정적해석은 DRAIN-2DX⁽²⁾를 사용하여 최대 층간변위가 2.5 %를 초과할 때까지 변위 제어모드로 수행하였다. 중력하중은 고정하중만을 고려하였고, 보와 기둥, 가새의 항복 후 강성비는 2%로 가정하였다. 구조물의 힘-변위 관계를 보면 설계변수에 따라 그림 3과 같이 층수가 증가할수록 시스템의 항복강도가 증가하고 강성이 작아지는 것을 알 수 있다. 구조물의 설계시 구조시스템에 따라 서로 다른 반응수정계수에 의하여 설계하중을 산정하였기 때문에 구조시스템을 설계변수로 한 경우 이중골조시스템의 항복강도가 건물골조시스템의 항복강도보다 작은 것을 알 수 있다.



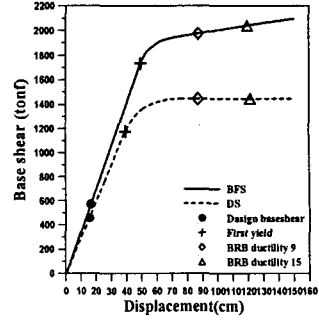
a) 4층 pushover



b) 8층 pushover



c) 12층 pushover



d) 16층 pushover

그림 4. 구조시스템에 따른 층별 pushover

3. 1. 1 소성힌지 분포에 의한 거동 분석

구조물의 비탄성거동은 항복이후에 각 부재에서 발생하는 소성모멘트에 의한 회전각 즉, 소성힌지에 대한 분포를 이용하면 가장 잘 파악될 수 있다. 이러한 구조물의 소성힌지분포는 구조물의 붕괴 메커니즘을 반영할 수 있으며, 비탄성지진거동에 대한 응답을 평가하고 판단하는데 유용하게 이용된다. 본 논문에서는 지진하중에 대하여 비탄성영역에서 발생하는 모든 소성힌지를 회전각 0.02(radian)에 대한 상대적인 크기로써 비교하였다.

횡력분담율에 따른 소성힌지분포를 그림 5에서 살펴보면, BF인 경우 1층 기둥에 소성힌지가 집중되어 발생하는 것을 알 수 있다. 그러나 모멘트골조가 횡력을 일부 저항할 경우 가새의 연성도가 최대인 곳을 중심으로 인접 층에 소성힌지가 골고루 분포하는 것을 알 수 있다.

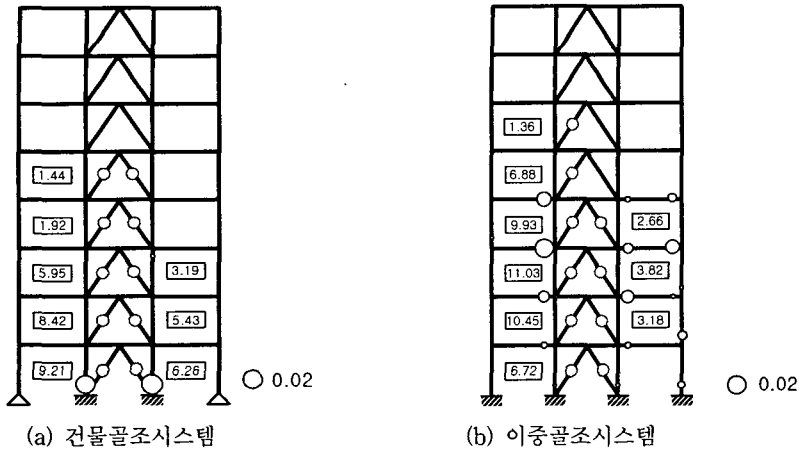


그림 5. 구조시스템에 따른 소성힌지분포와 가새의 연성도

3. 1. 2 변위응답에 의한 거동 분석

8층 구조물의 횡력분담율에 따른 층간변위와 층전단력의 관계를 그림 6에 나타내었다. 그림 6을 이선형화하여 그림 7의 b)와 같이 층연성도를 구하였다. 건물골조시스템인 경우 저층부에 층연성도가 집중되는 현상이 나타나며, 횡력에 대하여 가새와 모멘트골조가 저항하는 이중골조시스템은 1층에서 5층까지 연성도가 골고루 분포하는 것을 알 수 있다. 즉 BF인 경우 저층부의 가새에 횡력에 대한 모든 손상이 집중되며 상부층으로 손상을 전달하지 못한다. 그러나 DUAL인 경우 전 층에 골고루 손상이 전달되는 것을 알 수 있다.

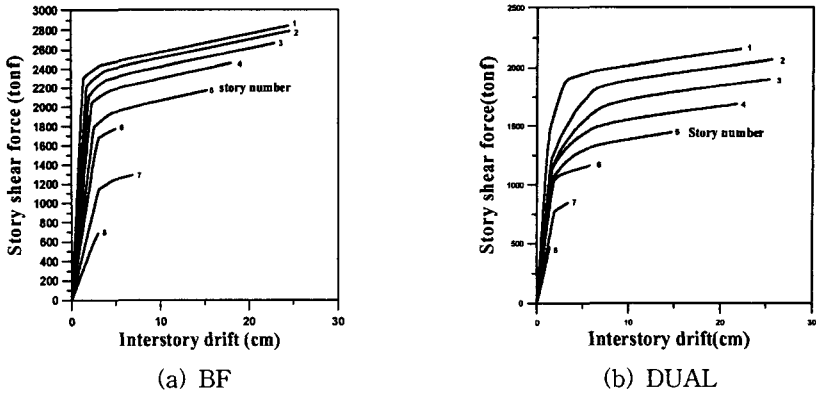


그림 6. 구조시스템에 따른 구조물의 층전단력-층간변위

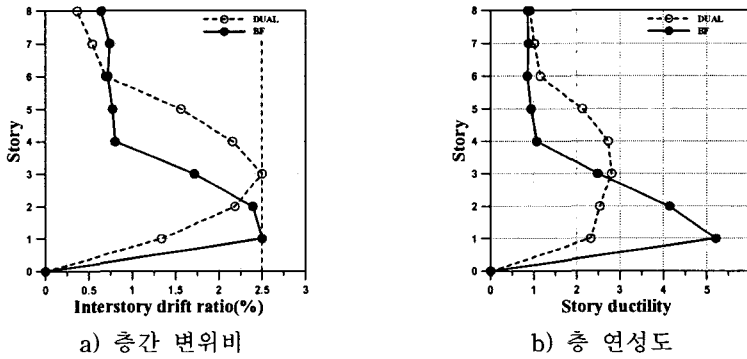


그림 7. 한계상태에서 8층 구조물의 층간변위와 층연성도

3. 2 비탄성 동적해석

BRBF가 설치된 구조물의 거동을 파악하기 위하여 DRAIN-2DX를 이용하여 경간 12m인 4층, 8층, 12층, 16층 구조물에 대하여 비탄성 동적 해석을 수행하였다. 지진하중은 그림 8과 같이 El Centro 와 인공지진 4개를 PGA 0.4g로 조정하여 해석하였다.

이중골조의 경우 MRF와 BRBF가 구조물에 가해지는 횡력을 함께 저항하기 때문에 횡력분담율에 따른 비좌굴가새의 거동을 보면 그림 9의 a)와 같이 이중골조의 경우 층별 최대변위는 작아졌다. 이것은 이중골조 시스템으로 모멘트골조가 횡력을 가새와 함께 저항하는 경우 이력거동 하는 동안 에너지를 많이 소산하기 때문에 지진하중에 대한 BRBF의 이력에너지를 보면 그림 10과 같이 모멘트골조가 횡력을 분담하면 이력거동에 따른 에너지도 커지는 것을 알 수 있다.

그림 11은 횡력분담율에 따른 BRBF의 잔류변위에 대한 결과로서 5개의 지진하중에 의한 해석결과를 평균한 것이다. 모든 층에서 이중골조시스템이 건물골조시스템보다 지붕층의 잔류변위는 작아졌다. UANG과 KIGGINS에 의한 결과⁽⁸⁾와 같이 이것은 구조물에 가해지는 횡력에 대하여 모멘트골조가 가새의 항복 후에 복원기구조로 사용되어 횡력에 저항한 것을 의미한다.

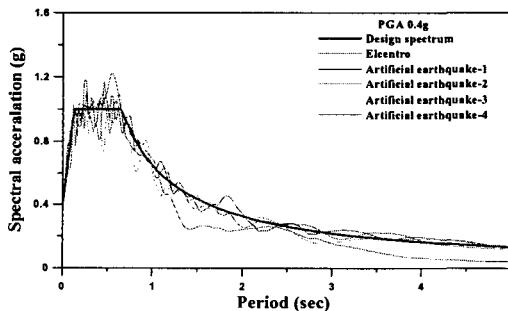
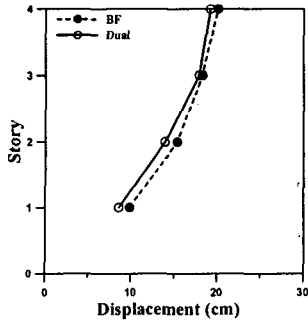
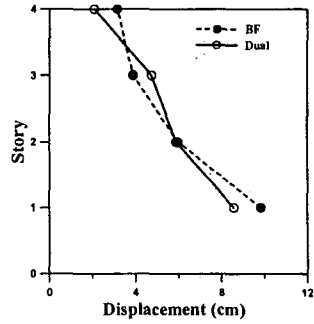


그림 8. 응답 스펙트럼



a) 층별최대변위



b) 최대층간변위비

그림 9. 구조시스템에 따른 최대변위와 층간변위비

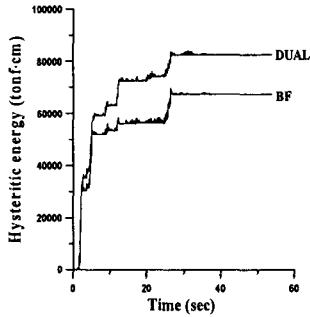


그림 10. 이력에너지

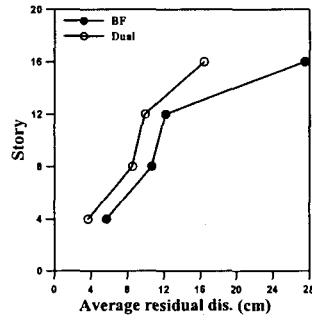


그림 11. 지붕층 평균 잔류변위

3. 3 반응수정계수의 산정

ATC-19⁽⁹⁾ 및 ATC-34⁽¹⁰⁾에 따르면 반응수정계수는 식 (1)과 같이 초과강도계수(R_o), 연성계수(R_μ), 잉여도계수(R_r)와 감쇠계수(R_ζ) 등의 항으로 구성된다. 부가감쇠장치가 없는 구조물인 경우 R_ζ 은 1이 되고, 잉여도가 충분하다고 가정하면 R_r 또한 1이 된다. 이러한 조건들이 충족된다면, 반응수정계수는 초과강도계수와 연성도계수를 식 (2)와 같이 구한 후 이들의 곱으로 산정한다.

ATC-34에 따라 구조물의 연성계수를 산정하기 위해서는 구조물 한계상태에서의 최대응답을 정의하여야 한다. 본 논문에서는 기둥의 소성현지 회전각과 가새의 연성도를 고려하여 목표변위를 층간변위의 2.5%로 정하였다. 이것은 Tsai 등⁽¹¹⁾에 의해 얻어진 BRB의 붕괴방지 수준과 일치한다.

구조시스템에 따른 구조물의 거동계수는 설계시 반응수정계수가 DUAL보다 BF를 크게 하였기 때문에 그림 13과 같이 초과강도계수는 BF가 크게 나오지만 DUAL의 경우 BRB와 MRF가 횡력에 대하여 저항하기 때문에 연성도 계수가 크다. 전체적으로 구조물이 저층일수록 반응수정계수는 크고, 건물골조시스템일 경우 보다 이중골조시스템일 경우가 크게 나타났다.

$$R = R_o R_\mu R_\zeta R_r \quad (1)$$

$$R_\mu = \frac{C_{eu}}{C_y}, \quad R_o = \frac{C_y}{C_w} \quad (2)$$

여기서 C_w 는 구조물의 설계 밀면전단력, C_{eu} 는 구조물이 탄성적으로 거동하기 위하여 필요한 밀면전단력이며, C_y 는 최대 비탄성변위에 해당하는 구조물의 밀면전단력을 나타낸다.(그림. 12)

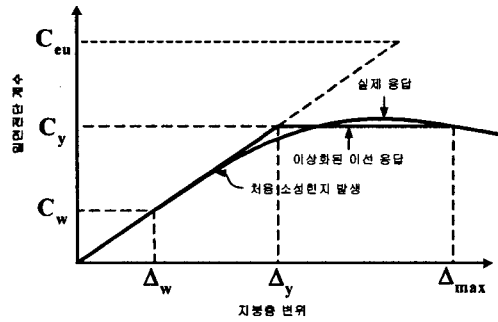


그림 12. 구조물의 하중-변위 곡선

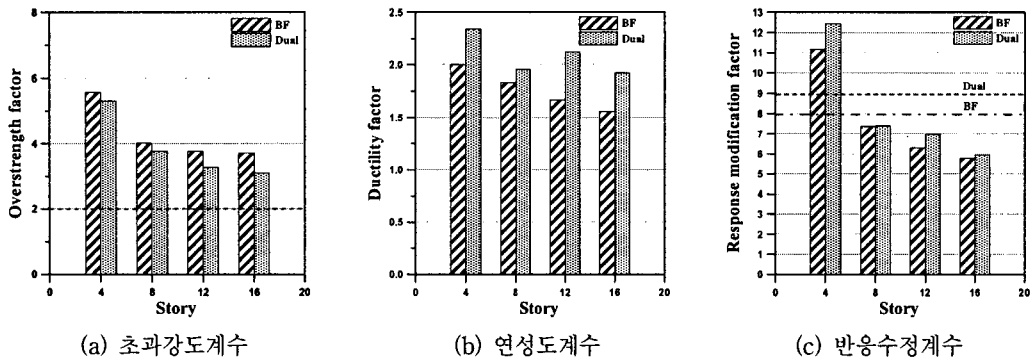


그림 13. 구조시스템에 따른 반응수정계수의 산정

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설핵심기술 연구개발사업(03산학연C04-01)에 의한 것입니다.

4. 결 론

본 연구에서는 BRBF를 AISC/SEAOC에 따라 설계하고 DRAIN-2DX를 이용하여 비탄성 정적해석과 비탄성 동적해석을 수행하였다. BRBF의 비탄성거동을 구조시스템에 따라 구조물의 변위 응답과 소성인지 분포를 통하여 분석하고 기둥의 소성인지각과 가새의 연성도를 고려하여 목표변위를 층간변위가 구조물 높이의 2.5%로 산정하였다. 이때의 초과강도계수와 연성도계수를 산정하고 반응수정계수를 기준에서 제시하고 있는 값과 비교하여 평가 하였다.

- (1) BRBF가 BF일 경우 횡력을 가새가 전부 저항하기 때문에 구조물의 층 변위는 DUAL 보다 증가하게 된다. 또한 DUAL의 경우 가새가 항복하면 구조물의 변형에 대한 복원 능력이 BF 보다 뛰어나기 때문에 잔류변위가 작게 나타났다.
- (2) 비탄성 정적해석을 통하여 이중골조가 건물골조보다 항복점은 낮으나 모멘트 골조에 의하여 구조물의 항복이후의 연성능력이 추가되어 구조물의 설계시 건물골조보다 구조 부재의 물량을 줄임으로써 경제적으로 설계할 수가 있다. 그러나 그에 따른 접합부의 연성설계가 고려되어야한다.
- (3) 반응수정계수는 설계변수에 따라 달라진다. 일반적으로 저층 구조물에서는 AISC/SEAOC에 제시된 값보다 크고, 중층 이상으로 갈수록 작게 나타난다. 따라서 중층 이상의 구조물에서는 반응수정계수를 낮추어 설계강도를 높이거나, 구조시스템을 이중골조를 사용함으로써 충분한 연성을 확보하여, 지진에 대한 안정성을 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. AISC/SEAOC, Recommended Provision for Buckling-Restrained Braced Frames,(draft), 2001
2. Prakash, V., Powell, G. H., and Campbell, S., "DRAIN-2DX, Static and Dynamic Analysis of Plane Structure," NISEE, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1993.
3. ICC, *International Building Code*, International Code Council, 2000
4. BSSC, "NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures," FEMA-450, Federal Emergency Management Agency, Washton DC, 2000.
5. AISC, "Seismic Provisions for Structural Steel Buildings," AISC, Chicago, IL, 2002.
6. Black, C., Makris, N., and Aiken, I., "Component testing, stability analysis and characterization of buckling restrained unbonded braces," Report No.PEER-2002/08, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, 2002.
7. Merritt, S., Uang, C. M., Benzoni G., "Subassembly testing of corebrace buckling-restrained braces," Report No.TR-2003/01, Department of Structural Engineering University of California, San Diego La Jolla, California 92093-0085, 2003.
8. Chia-Ming UANG and Shawn KIGGINS, " Reducing residual drift of buckling-restrained braced frames as dual system," The 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, B.C., Canada, 2004.
9. ATC, "Structural response modification factors," ATC-19, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1995, pp. 5~32.
10. ATC, "A critical review of current approaches to earthquake-resistant design," ATC-34, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1995, pp. 31~36.
11. Tsai, K.C., Weng, Y. T., Lin, M. L., Chen, C. H., Lai, J. W., and Hsiao, P. C., "Pseudo dynamic tests of a full-scale CFT/BRB composite frame: displacement based seismic design and response evaluations," The 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, B.C., Canada, 2004.