

좌굴방지가새가 설치된 철골건물의 초과강도계수

Overstrength Factors of Buckling Restrained Braced Frames

김진구* 박준희**
Kim, Jin-koo Park, Jun-hee

국문요약

본 논문에서는 좌굴방지가새(BRBF)가 설치된 중저층 철골조 구조물의 초과강도계수를 평가하였다. 해석 모델의 설계변수로는 건물의 층 수, 경간의 길이, 가새의 항복강도, 지진하중의 크기, 반응수정계수 등 다양하게 설정하였다. 초과강도계수는 ATC-19에서 제시하고 있는 방법에 따라 정적 비탄성해석을 이용하여 산정하였다. 해석결과에 따르면 본 연구에서 구한 BRBF의 초과강도계수는 AISC/SEACOC에서 BRBF에 관하여 제시한 초과강도계수 값보다 전체적으로 크게 나타났다.

주요어 : 좌굴방지가새, 초과강도계수, 내진설계, 정적 비탄성해석

ABSTRACT

In this study the overstrength factors of medium to low-rise buckling restrained braced frames (BRBF) were evaluated. Various design variables, such as number of stories, span length, yield strength of the brace, level of earthquake load, and the response modification factors. The overstrength factors were obtained using the nonlinear static analysis following the procedure proposed by ATC-19. According to the analysis results, the overstrength factors obtained from this study were generally larger than those proposed in 'AISC/SEACOC Recommended Provisions for BRBF'.

Key words : buckling restrained braced frames, over-strength factors, seismic design, nonlinear static analysis

1. 서 론

가새골조는 횡력을 저항하는 효율에 있어서 매우 합리적인 구조시스템이지만, 압축가새가 항복한 후 횡력에 대한 시스템의 저항력이 급격히 떨어지고, 반복하중에 대한 이력거동 또한 불안정하게 되는 단점이 있다. 최근 미국, 일본, 및 대만 등 강진 지역을 중심으로 가새 부재를 각형 또는 원형 강관 속에 설치하고, 빈 공간에 콘크리트를 충전하여 압축가새의 좌굴을 방지한 좌굴방지가새(Buckling-Restrained Braces, 이하 BRB)가 내진 설계 및 보강 용도로 적용되고 있다. 이러한 추세를 반영하여 AISC (American Institute of Steel Construction)와 SEAOC (Structural Engineers Association of California)은 Recommended Provision for Buckling-Restrained Braced Frames (BRBF)⁽¹⁾를 발표하여 설계에 적용하도록 하고 있다.

초과강도계수는 구조물이 실제 보유한 강도에 대한 설계 강도의 비로 나타내며, 초과강도계수가 발생하는 원인으로서는 부재의 공칭강도를 초과하는 실제 강도의 영향, 설계시 적용하는 안전율, 중력하중의 영향, 시공의 편의를 위해 필요한 단면적보다 큰 부재를 사용하는 경우 등 다양하다. 이러한 초과강도계수는 연성도 계수와 함께 반응수정계수를 구성하는 중요한 요소로 작용하며, IBC-2000⁽²⁾에서는 특수한

부재를 설계하기 위한 특별 하중조합에 적용된다. 즉 구조물에서 차지하는 중요성으로 인하여 특별하게 요구되는 부재나 구성요소의 설계에 있어서, 초과강도계수를 포함한 특별 하중조합에 의해 산정되는 지진력에 안전하게 저항하도록 규정하고 있다. 따라서 내진설계기준에서 초과강도계수의 역할은 매우 중요하다고 할 수 있다.

지금까지 일반 구조물의 초과강도계수에 대한 연구는 많이 진행되어 왔다. Osteraas와 Krawinkler⁽³⁾는 모멘트골조, 가새골조의 초과강도계수에 대한 해석적 연구를 수행하였다. Uang⁽⁴⁾은 해석적인 연구를 통하여 4층 구조물이 12층 구조물 보다 약 40% 더 큰 강도를 보유하고 있고, 동일한 구조시스템에서는 지진 위험도가 낮은 지역에서 초과강도가 더 큼을 발견하였다. Vayas와 Spiliopoulos⁽⁵⁾는 2층에서 8층의 모멘트 골조에 대하여 2경간과 3경간일 때 국부적 연성수준, 수직하중의 수준 그리고, 접합부의 강성에 따른 초과강도를 구하였으며, 정형 골조의 초과강도는 다른 변수들에 크게 영향을 받지 않음을 발견하였다. Balendra와 Huang⁽⁶⁾의 연구 결과에 따르면, 중력하중이 증가할수록, 구조물의 높이가 낮아질수록 강도계수가 증가하였고, 반강접 모멘트골조의 강도계수는 강접된 골조에 비하여 50%정도 감소하는 것으로 나타났다. 가새골조는 가새의 설치형태에 관계없이 비슷한 강도계수와 연성계수를 나타내었다. 이와 같이 다양한 시스템의 초과강도계수에 대한 연구가 진행되어 왔으나, BRB가 설치된 가새골조의 초과강도계수에 대해서는 연구된 바 없다.

본 논문에서는 BRB가 설치된 구조물을 높이, 경간의 길

* 정회원 · 성균관대학교 건축공학과, 부교수(대표저자 : jinkoo@skkn.ac.kr)

** 성균관대학교 건축공학과, 석사과정

본 논문에 대한 토의를 2005년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2004. 9. 13 / 심사종료일 : 2004. 10. 27)

이 가새의 강도, 지진의 크기, 반응수정계수를 설계변수로 하여 비좌굴가새의 초과강도계수에 대하여 AISC/SEAOC Joint Committee⁽¹⁾에서 제시하고 있는 값과 비교 하였다.

2. 초과강도계수의 산정

그림 1은 일반적인 구조물의 횡력-변위 관계를 나타낸 것으로, 이를 바탕으로 구조물의 초과강도계수는 식(1)과 같이 구할 수 있다.⁽⁷⁾

$$R_o = \frac{C_g}{C_r} \tag{1}$$

여기서 C_u 는 구조물의 설계 밀면전단력, C_{ir} 는 구조물이 탄성적으로 거동하기 위하여 필요한 최대 밀면전단력이며, C_p 는 최대 비탄성변위에 해당하는 구조물의 밀면전단력을 나타낸다.

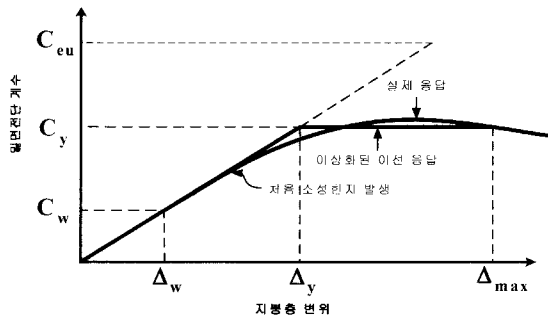


그림 1 구조물의 횡하중-변위 관계

구조물의 최대 비탄성변위에 해당하는 구조물의 밀면전단력 C_p 를 구하기 위해서는 먼저 변위응답의 한계상태 Δ_{max} 를 결정하여야한다. 본 연구에서는 BRBF의 한계상태를 Tsai 등⁽⁸⁾의 연구에서 제시된 붕괴방지 수준인 최대층간변위의 2.5%로 가정하였다. AISC/SEAOC Joint Committee⁽¹⁾에서는 BRB가 설치된 건물골조시스템과 이중골조시스템에 대하여 각각 2.0과 2.5의 초과강도계수를 제시하고 있다.(표 1)

3. 예제 모델의 설계

본 연구에서 사용된 BRB 가새골조는 AISC/SEAOC에서

제시한 기준에 따라 설계하였다. 구조물의 높이에 따른 응답계수의 변화를 고려하기 위하여 층고가 3.6 m이고, x, y 방향으로 3 경간인 4, 8, 12, 16층 구조물을 두 단계의 지진하중에 대하여 설계하였다. 경간 길이의 영향을 고려하기 위하여 각 높이의 구조물에 대하여 X축 과 Y축 방향의 경간의 길이를 9m와 12m로 변화시켰다. 구조물의 평면은 그림 2와 같이 정방향 평면이며, BRB는 그림 3과 같이 역V형으로 설치하였다.

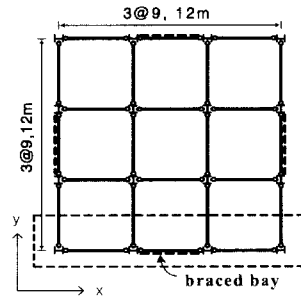


그림 2 해석 모델의 평면

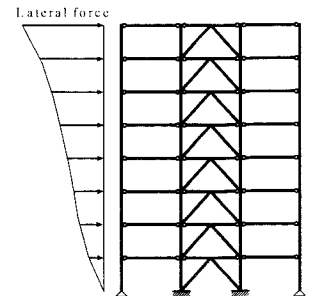


그림 3 8층 모델의 입면

지진하중의 크기에 따른 초과강도계수의 변화를 고찰하기 위하여, 설계지진하중은 IBC-2000(7)의 내진설계기준에 따라 강진지역 (설계스펙트럼 가속도 $S_{DS}=1.0g$, 지반조건 D, 내진설계범주 E)과 약진지역 ($S_{DS}=0.275g$, 지반조건 B, 내진설계범주 B) 두 가지 크기로 적용하였다. 해석 모델은 내진용도 그룹 II (중요도계수=1.25)에 해당하는 것으로 가정하였다.

제안된 기준에 따라 BRBF 건물골조시스템에 해당하는 반응수정계수 8 (표 1)을 기본적으로 적용하였고, AISC 내진규정⁽⁹⁾의 특수중심가새골조 (Special Concentric Braced Frame, SCBF)에 준한 6을 반응수정계수로 사용한 결과와 비교하였다. 지진하중은 가새가 모두 부담하도록 그림 4와 같이 기둥과 보의 접합부를 힌지로 설계하였다. AISC/SEAOC에서 제안한 기준에서는 BRB가 설치된 건물 골조 방식일 경우, 내진설계범주 D, E, F에 해당하는 구조물의 높이를 48 m로 제한하고 있다.(표 1) 이것은 IBC-2000의 SCBF에 대한 제한 사항을 준용한 것으로 보이며, 본 논문에서는 BRBF의 내진성능이 SCBF 보다 우수하다는 가정 하에, 내진설계범주 E에 해당하는 16층 구조물 (높이 57.6 m) 또한 해석 모델에 포함하였다.

BRBF의 설계에 있어서 기둥과 가새에 대한 세장비는 AISC 내진규정⁽⁹⁾의 SCBF에 대한 규정에 준하여 다음 식 (2)와 같이 적용하였다.

표 1 BRB가 설치된 골조의 설계 계수 및 높이 제한 (AISC/SEAOC Joint Committee)

	반응수정계수	초과강도계수	변위증폭계수	높이 제한			
				내진설계범주			
				B, C	D	E	F
BRBF (건물골조시스템)	8	2	5.5	NL (제한 없음)	160	160	160
BRBF (이중골조시스템)	9	2.5	5.5	NL	NL	NL	NL

$$\frac{KL}{r} \leq 5.87 \sqrt{\frac{E_s}{F_y}} \quad (2)$$

여기서 r 은 가새의 단면 2차반경, KL 은 유효길이, E_s 는 탄성계수, F_y 는 항복강도이다. 폭두께비 제한은 AISC의 내진 규정⁽⁹⁾ 표 I-8-1을 적용하였다. 보와 가새의 접합부는 압축가새와 인장가새에서 발생하는 불균형력(Q_b)을 고려하여 설계된 것으로 가정하였다. 일반적으로 BRB의 코어가 압축력을 받을 경우 외부 강관과 충전 콘크리트의 구속 효과로 인하여 인장력을 받는 경우에 비하여 항복강도가 크게 나타난다.(10-11) 압축 항복강도의 크기는 좌굴방지를 위해 가새 코어 부분의 구속정도에 따라 달라지는데, 인장력을 받을 때에 비하여 3~10%정도 증가하는 것으로 알려져 있다. 이러한 현상을 고려하여, 본 논문에서는 10%의 불균형력을 고려하여 설계하였다. 그림 4에서 인장가새의 수직 부재력 $P \sin \theta$ 와 압축가새의 부재력 $1.1P \sin \theta$ 가 서로 상쇄 되어 중력방향과 역방향으로 $0.1P \sin \theta$ 가 작용한다. 여기서 P 는 부재의 공칭 축 항복강도이다.

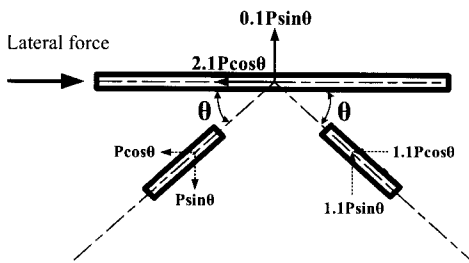


그림 4 BRBF의 보에 작용하는 불균형력

본 연구에서 기둥의 재질은 SM490 ($F_y=3.3 \text{ tonf/cm}^2$), 보 는 SS400 ($F_y=2.4 \text{ tonf/cm}^2$)이며, 가새 강도의 영향 파악하기 위하여, 가새는 SS400과 SM490 두 가지 경우를 고려하였다. 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. 표 2에는 8층 구조물의 부재 크기를 나타내었다.

표 2 8층 구조물의 부재 크기

경간길이	층	내부 기둥	외부 기둥	내부 보	외부 보	가새
9 m	1 ~ 2	H 420×415×25×45	H 300×305×15×15	H 390×300×10×16	H 390×300×10×16	H 300×295×14×15
	3 ~ 4	H 410×400×15×32	H 250×255×14×14	H 390×300×10×16	H 390×300×10×16	H 300×295×10×15
	5 ~ 6	H 344×354×16×16	H 200×204×12×12	H 390×300×10×16	H 390×300×10×16	H 300×290×12×12
	7 ~ 8	H 200×200×8×11	H 150×150×7×10	H 390×300×10×16	H 390×300×16×16	H 240×240×11×11
12 m	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

4. 초과강도계수의 산정

4.1 구조물의 비탄성 거동

예제 구조물들은 먼저 3차원으로 설계한 후, 그림 2의 평면에서 점선으로 표시된 X방향의 외부골조를 분리하여, DRAIN-2DX⁽¹²⁾를 이용한 비탄성 정적해석을 수행하였다. 중력하중은 고정하중만을 고려하였고, 보, 기둥과 가새의 항복 후 강성비는 2%로 하였다. $P-\Delta$ 효과를 정확하게 고려하기 위하여 그림 5와 같이 층별 수평변위가 동일하도록 가상 기둥(dummy column)을 강성이 무한한 링크로 연결하고, 여기에 내부골조에 작용하는 중력하중을 가하여 내부골조에 작용하는 수직하중의 효과를 고려하였다.

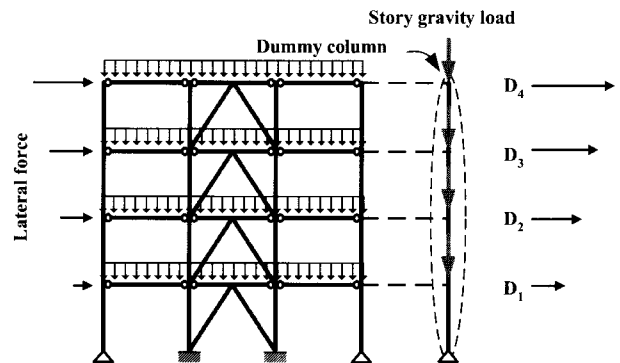


그림 5 $P-\Delta$ 효과를 고려한 해석모델

비탄성 정적해석 (pushover 해석)은 횡력을 1차 모드 형상에 비례하도록 점진적으로 증가시키며, 구조물의 한계변위인 최대층간변위 2.5% 까지 변위 제어모드로 수행하였다. 그림 6~8은 강진에 대하여 설계한 해석 모델의 층수, 경간의 크기, 가새의 강도 등을 변화시키며 구한 밀면전단력과 지붕층 변위를 나타낸 곡선이며, 그림에는 설계 밀면전단력, 가새의 최초 항복점, 최대 층간변위가 2.5%에 도달하는 지점 등이 표시되어 있다. 그림 6에 따르면 층 수가 증가할수록 시스템 항복강도가 증가하고 강성이 작아지는 것을 알 수 있다. 그러나 16층 구조물의 강도는 12층 구조물보다 약간 작아지는 것을 볼 수 있다. 모든 해석 모델에서 설계 밀면전단력에 비하여 항복강도가 상당히 큰 것을 관찰할 수

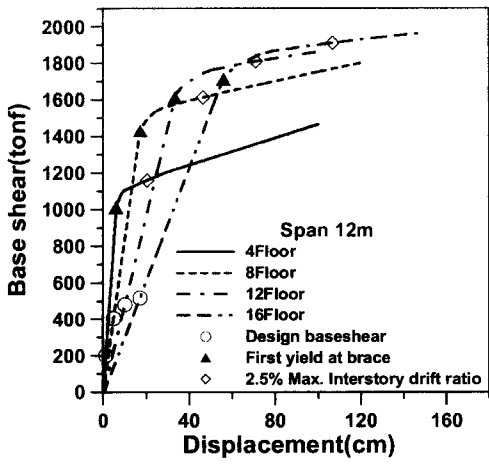


그림 6 해석모델의 pushover 곡선(12 m span)

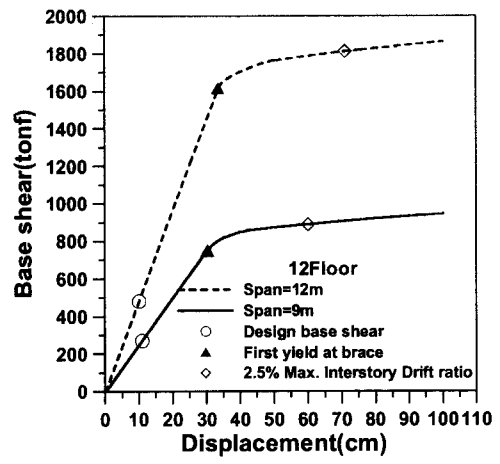


그림 7 경간 길이에 따른 pushover 곡선(12-story structure)

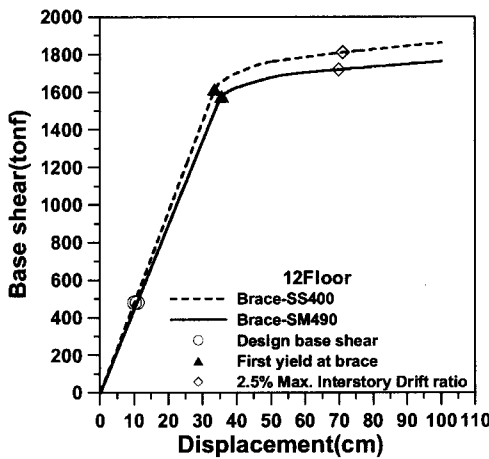


그림 8 가새의 강도에 따른 pushover 곡선(12-story structure)

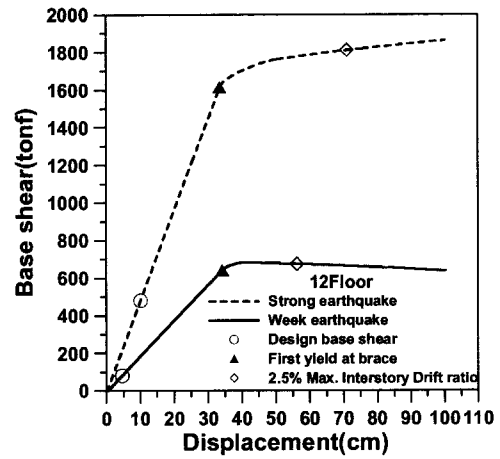


그림 9 지진 크기에 따른 pushover 곡선(12-story structure)

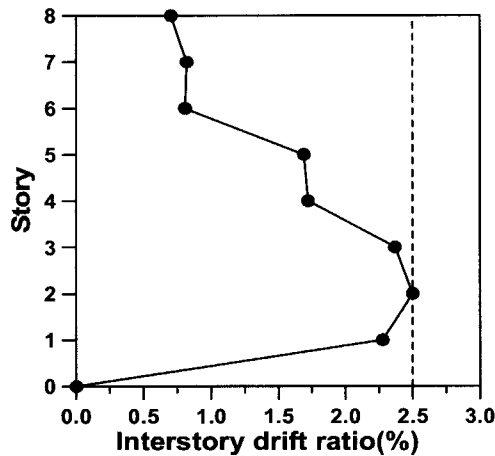


그림 10 8층 구조물의 층간변위비

있다. 그림 7은 12층 모델의 경간의 길이가 9 m와 12 m일 때 힘-변위 관계를 나타내며, 중력하중의 영향으로 경간이 12 m 일 때의 항복강도는 9 m인 경우에 비하여 두 배 이상 증가하는 것으로 나타났다. 그림 8은 가새의 항복강도가 증가하면 시스템 항복강도 또한 증가하지만, 그 차이는 그리 크기 않음을 나타내고 있다. 그림 9는 12층 구조물의 설계지진하중이 증가할수록 시스템 강성 및 항복강도가 증가함을 나타내는데, 설계 밀면전단력 또한 증가하므로 초과강도계

수는 오히려 작아지는 것을 알 수 있다. 그림 6과 9에서는 층수가 높아질수록, 지진의 크기가 작을수록 $P-\Delta$ 효과의 영향을 많이 받아, 항복후의 강성이 더욱 작아지는 현상이 나타나는 것을 알 수 있다.

8층 구조물의 최대 층간변위비가 2.5%에 도달 할 때 모든 층에서의 층간 변위비를 그림 10에 나타내었다. 층간변위가 저층부에 집중되어 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

그림 11은 이 때 발생한 소성힌지 분포와 가새의 항복변형비를 나타내었다. 소성힌지가 저층부에 집중되어 발생하고, 층간변위비가 최대인 2층에서 가새의 항복변형비가 최대가 되는 것을 알 수 있다. 일반적인 가새골조의 경우 압축가새가 좌굴한 후 인장가새와의 불균형력이 발생하여 연결된 보가 항복하는 현상이 발생하나, BRBF인 경우 압축가새의 좌굴이 방지되어 불균형력이 크지 않으므로, 보에는 소성힌지가 발생하지 않음을 알 수 있다. 2층 가새의 최대 항복 변형비 (최대변형도에 대한 항복변형도의 비)는 13.52로 나타났다는데, FEMA-356(13)에서 붕괴방지 수준에 대한 인장가새의 변형한도를 항복 변형의 14배로 규정한 것과, Black 등 (14)의 실험적 연구에서 BRB가 연성비 20에서도 안정된 이력거동을 보인 점을 감안하면, 아직 가새의 파괴 수준에 이르지 않은 것으로 판단된다.

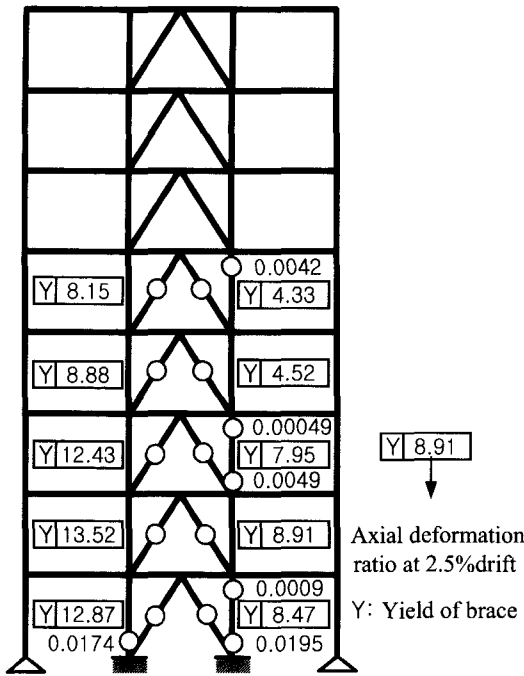


그림 11 기둥의 소성한지 분포와 가새의 항복변형비

4.2 설계 변수에 따른 초과강도계수의 변화

그림 12는 경간의 길이 및 적용된 반응수정계수에 따른 초과강도계수를 나타낸 것으로, 모든 경우에서 AISC/SEAOC 기준에 제시된 값인 2.0을 초과하는 것을 알 수 있다. 경간의 길이가 긴 12m일 경우가 9m일 경우보다 초과강도계수가 크게 나타나는데, 이는 경간이 증가함에 따라 중력하중에 의하여 보에 발생하는 모멘트의 크기가 증가하고, 따라서 부재의 공칭강도가 더 크게 설계되기 때문이다. 또한 구조물의 높이가 4층에서 8층으로 높아짐에 따라 초과강도계수가 급격하게 감소하지만, 층고가 더 높아질수록 그 차이는 작아짐을 알 수 있다. 이는 Uang(4)의 연구결과와 일치한다고 할 수 있다.

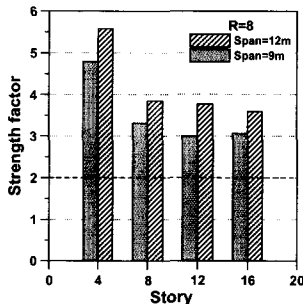


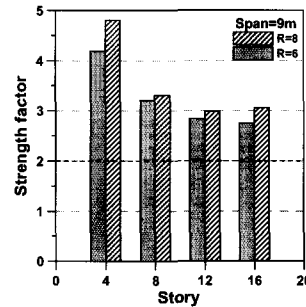
그림 12 경간 길이에 따른 초과강도계수의 비교

그림 13은 설계지진력을 산정하기 위한 반응수정계수가 초과강도계수에 미치는 영향 비교한 것으로, 계수의 크기를 6으로 낮춘 경우, 초과강도계수 또한 약간씩 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 반응수정계수가 감소하면 설계 지진력이 증가하고, 따라서 중력하중의 영향이 상대적으로 감소하

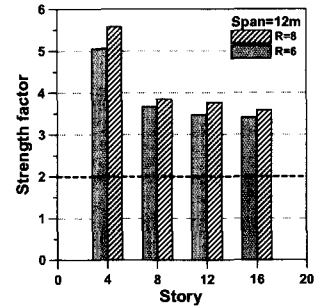
기 때문인 것으로 판단된다.

가새의 강도를 변수로 한 경우 (그림 14), SS400 재질의 가새 부재를 사용한 경우, SM490인 경우 보다 초과강도계수가 대체적으로 크게 나타났다. 이러한 현상은 부재의 항복강도가 커질수록 요구되는 가새의 단면적은 작아지고, 가새의 축력이 작용하는 내부기둥의 단면도 작아지기 때문에, 시스템의 초과강도계수가 작아지는 것으로 사료된다. 그러나 4층 및 8층의 구조물에서는 그 차이가 크지 않은 것으로 나타나 일반적인 결론을 도출하기 위해서는 좀더 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

그림 15는 지진하중의 크기에 따른 초과강도계수의 변화를 나타낸 것으로, 약진 ($S_{DS}=0.275g$, 지반조건 B)에 대하여 설계된 해석모델의 초과강도계수가 강진 (설계스펙트럼 가속도 $S_{DS}=1.0g$, 지반조건 D)에 대하여 설계된 모델의 결과 보다 2배 이상 증가하는 것으로 나타났다. 이 경우 또한 상대적인 중력하중의 영향이 커지기 때문인 것으로 판단된다.



(a) 경간 9m



(b) 경간 12m

그림 13 반응수정계수에 따른 초과강도계수의 비교

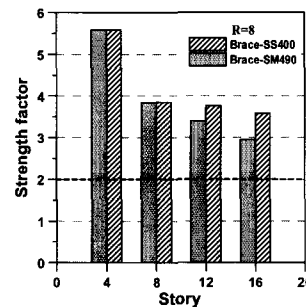


그림 14 가새 강도에 따른 초과강도계수의 비교

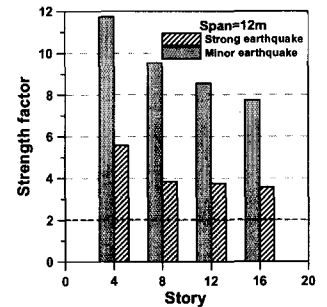


그림 15 설계지진에 따른 초과강도계수의 비교

5. 결론

본 연구에서는 비탄성 정적해석을 통하여 BRB가 설치된 중저층 철골구조물의 초과강도계수를 구하고, AISC/SEAOC에서 제시하고 있는 초과강도계수와 비교하였다. 건물의 높이, 경간, 지진의 크기, 가새의 강도, 반응수정계수 등 다양한 설계변수가 초과강도계수에 미치는 영향을 파악하였다. 해석 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 비탄성 정적해석결과 산정된 초과강도계수는 AISC/

SEAOC 기준에서 제시한 값인 2보다 상당히 크게 나타났으며, 기준에 제시된 바와 같이 상수가 아니라 여러 설계변수에 따라 달라지는 것으로 나타났다.

- (2) 구조물의 높이가 증가할수록, 경간이 짧아질수록 초과강도계수는 작아진다.
- (3) 가새의 강도가 증가하면, 초과강도계수는 작아진다.
- (4) 설계지진하중의 크기가 작은 경우 초과강도계수는 작아진다.
- (5) 동일한 수준의 지진하중에 적용되는 반응수정계수가 작을 경우 산정된 초과강도계수는 작아진다.

IBC 2000에서는 그 중요성으로 인하여 특별하게 요구되는 부재나 구성요소의 설계에 있어서, 초과강도계수를 포함한 특별하중조합에 의해 산정되는 지진력에 안전하게 저항하도록 규정하고 있다. 그러나 BRBF의 초과강도계수에 관한 본 연구의 결과에 따르면, 실제구조물의 초과강도계수는 기준에 제시된 값보다 상당히 큰 것으로 나타났다. 이러한 경우 규정된 초과강도계수를 포함한 특별하중조합을 적용한다 하더라도, 실제 발생할 수 있는 지진력을 과소평가할 수 있다. 따라서 특별하중조합이 적용되는 중요한 부재의 안전성을 충분히 확보하기 위해서는, 보다 많은 연구를 통하여 실제 상황에 맞는 초과강도계수의 크기를 산정할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초 연구사업(과제번호: R01-2002-000-00025-0)의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. AISC/SEAOC, "Reccomended Provision for BRBF," AISC/SEAOC, 2001.
2. ICC, *International Building Code*, International Code Council, 2000.
3. Osteraas, J. D., "Strength and ductility considerations in seismic design," PHD Dissertation Stanford University, Stanford, California, 1990.
4. Uang, C. M., "Establishing R (or R_w) and C_d factors for building seismic provisions," *Journal of Structural Engineering*, Vol.119, No.1, 1991, pp. 19-28.
5. Vayas, I. and Spiliopoulos, A., "Ductility and over-

strength of moment frames," *SDSS, Stability and Ductility of Steel Structures*, 1999, pp. 439-446.

6. Balendra, T. and Huang, X., "Overstrength and ductility factors for steel frames designed according to BS 5950," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 129, No. 8, 2003, pp. 1019-1035.
7. ATC, "Structural response modification factors," ATC-19, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1995, pp. 5-32.
8. 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.
9. AISC, *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*, AISC, Chicago, IL, 2002.
10. 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.
11. Merritt, S., Uang, C. M., and Benzoni G., "Subassemblage 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.
12. 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.
13. BSSC, *Prestandard and Commentary for The Seismic Rehabilitation of Building*, FEMA-356, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, 2000.
14. Black, C., Makris, N., and Aiken, I., "Component testing, stability analysis and characterization of buckling restrained braces," Final Report to Nippon Steel Corporation, Japan, 2002.