

비좌굴 가새골조의 층별 이력에너지 분포

A Story-wise Distribution of Hysteretic Energy in Buckling-Restrained Braced Frames

최 현 훈*
Choi, Hyunhoon

김 진 구**
Kim, Jinkoo

ABSTRACT

In this study a story-wise distribution of hysteretic energy in multi-story steel moment-resisting frame (MRF), buckling restrained braced frames (BRBF-R), and hinge-connected framed structures with buckling restrained braces (BRBF-H) subjected to various earthquake ground excitations was investigated. According to analysis results the hysteretic energy in MRF and BRBF-R turned out to be the maximum at the base and monotonically diminishes with increasing height. In top stories the plastic deformation of members is almost negligible. However the story-wise distribution of hysteretic energy in BRBF-H was relatively uniform over the height of the structure. This is considered to be more desirable because damage is not concentrated in a single story.

1. 서 론

지진으로 인한 구조물의 손상은 반드시 지진력이나 변위응답의 최대값에 비례하여 발생하는 것이 아니라 최대응답보다 작지만 누적되는 비탄성 변형에 의한 영향도 상당한 비중을 차지한다. 그러나 현행 내진설계 기준은 설계변수로 최대 지진력이나 최대 허용변위 등을 규정하고 있을 뿐 이력특성을 가진 지진하중에 의해 누적된 손상은 고려를 하지 않고 있다. 더욱이 설계지진 이상의 지진에 대하여 구조물이 비탄성 거동을 함으로써 지진에 의하여 입력되는 에너지를 소산하도록 하고 있어 설계기준을 만족하였다도, 건물의 지진 거동을 예측하기 어렵다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 최근에는 에너지 개념을 이용한 설계방법이 활발하게 연구되고 있다. 1956년 Housner가 단자유도계에서 입력에너지는 구조물의 속도응답에 비례한다는 연구결과를 발표한 이후, 많은 연구자들에 의하여 단자유도계 시스템에 입력되는 에너지와 소산되는 에너지에 대한 연구가 수행되었다.⁽¹⁻³⁾ Akbas 등⁽⁴⁾은 철골 모멘트저항골조 접합부의 실험결과를 바탕으로 누적된 소성 회전량(cumulative plastic rotation)을 산정한 다음 입력 에너지를 보 양단의 누적된 소성거동에 의하여 소산하도록 하는 설계법을 제시하였다. 그들의 연구에서는 소산되는 에너지는 상부층에서

* 학생회원 · 성균관대학교 건축공학과, 박사과정

** 정회원 · 성균관대학교 건축공학과, 조교수

하부층으로 갈수록 선형으로 증가한다고 가정하였다. Estes 등⁽⁵⁾은 다층 철골 모멘트저항골조에서 각 층별 이력에너지 요구량과 등가 단자유도계와 다자유도계의 에너지 요구량에 대한 비교 연구를 수행하였다. 이러한 기존의 연구들은 모두 모멘트저항골조에 국한하여 수행되었다.

본 연구에서는 비좌굴 가새(buckling restrained brace)가 설치된 철골조 구조물의 지진에 의한 에너지 소산 특성에 대하여 고찰하였다. 먼저 모멘트골조에서의 이력에너지 분포 상황을 검토하고, 비좌굴 가새가 설치된 구조물의 이력에너지 분포와 비교하였다. SAC steel project에서 제시하고 있는 로스엔젤레스 지역의 연암 지반, 연약 지반, 그리고 단층 부근에서 측정된 50년에 발생확률이 10%인 총 60개의 지진을 사용하였다.⁽⁶⁾ 이러한 연구를 통하여 누적된 손상을 포함한 구조물의 거동을 보다 합리적으로 예측하고 에너지에 근거한 설계법에 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

2. 에너지 방정식

지진하중을 받는 단자유도계 운동방정식을 상대변위 x 에 대하여 적분하면 에너지 방정식을 다음과 같이 구할 수 있다.⁽⁷⁾

$$\int m\ddot{x}dx + \int c\dot{x}dx + \int f_s dx = - \int m\ddot{g}dx \quad (1)$$

여기서 m , c , f_s 는 구조물의 질량, 감쇠, 복원력을 나타내고, \ddot{g} 는 지반의 가속도를 나타낸다. 식 (1)에서 첫 번째 항은 지반에 대한 상대운동과 관련된 질량의 운동에너지를 나타내고, 두 번째 항은 점성감쇠에 의하여 소산되는 감쇠에너지를 나타낸다. 세 번째 항은 회복 가능한 탄성변형에너지와 회복 불가능한 이력에너지로 구성된 구조물에 흡수된 에너지를 나타낸다. 그리고 우변 항은 지진에 의해 구조물에 입력되는 입력에너지를 나타낸다.

그림 1은 주기가 1.0초이고 탄성강도에 대한 항복강도의 비가 0.4인 비선형 단자유도계 구조물의 El Centro(1940, NS)지진에 대한 에너지 시간이력을 나타낸다. 비선형 구조물의 경우 대부분의 입력에너지가 감쇠에너지와 이력거동에 의한 이력에너지로 소산함을 알 수 있다. 따라서 비선형 구조물의 거동을 예측하고 항복 이후의 거동을 파악하기 위하여 이력에너지 요구량은 매우 중요하다고 할 수 있다.

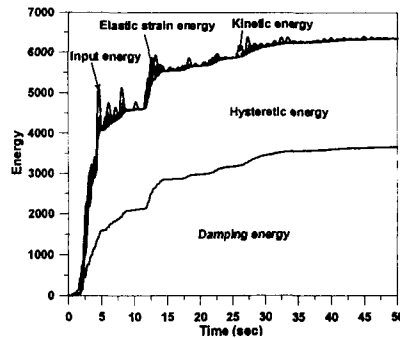


그림 1. 단자유도계의 에너지 시간이력

3. 비좌굴 가새골조 시스템

비좌굴 가새는 큰 지진하중을 받을 때 중심 철골부재가 전체 혹은 국부적인 좌굴이 발생하지 않고 큰 비탄성 변형이 발생하도록 중심부의 철골부재 주위를 강관과 콘크리트로 보강한 것으로 이전의 연구에 의하면 매우 안정적인 이력거동을 통하여 많은 에너지를 소산시킴을 알 수 있다.⁽⁸⁻⁹⁾

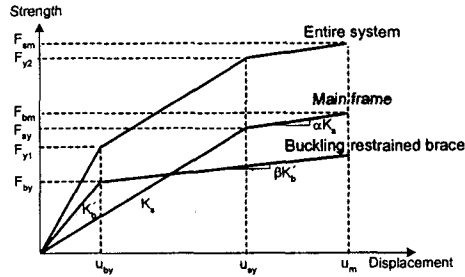


그림 2. 비좌굴 가새가 설치된 구조물의 힘-변위 관계

그림 2는 비좌굴 가새가 설치된 구조물의 힘-변위 관계를 나타낸다. 비좌굴 가새의 횡방향 강성 (K_b)은 다음 식을 이용하여 산정할 수 있다.

$$K_b = K_s \cos^2 \theta = \frac{A_b E_b}{L_b} \cos^2 \theta \quad (2)$$

여기서 K_s , K_b 는 각각 구조물의 횡강성, 비좌굴 가새의 축방향 강성이고, A_b 와 E_b 는 비좌굴 가새의 단면적과 탄성계수를 나타낸다. 또한 L_b 는 비좌굴 가새의 좌굴이 구속된 부분의 길이를, θ 는 설치된 비좌굴 가새와 보 사이의 각을 나타낸다.

4. 예제 구조물과 지진하중

다층 구조물에서 층별 이력에너지 분포 형태를 파악하기 위하여 3경간과 5경간의 저층 (3층), 중저층 (8층), 중층 (20층) 구조물에 대하여 비탄성 동적해석 프로그램인 DRAIN-2D⁽¹⁰⁾를 이용하여 비선형 시간이력해석을 수행하였다. 예제 구조물은 철골 모멘트저항골조(MRF), 비좌굴 V 가새가 설치된 비좌굴 가새골조(BRBF-R), BRBF-R의 보 양단과 1층 기둥을 힌지로 접합한 힌지접합 비좌굴 가새골조(BRBF-H) 등 모두 18개이며, 동일한 하중 조건에 따라 설계 되었다. 각 예제구조물의 경간은 7.3m이고, 1층의 층고는 5.5m, 2층 이상은 모두 3.7m이다. 모든 층의 질량은 0.1598 Ton이고 구조물의 감쇠비는 2%로 가정하였다. 각 예제 구조물의 모드별 주기, 질량참여계수는 표 1에 나타나 있다.

해석에 사용된 지진하중으로는 SAC steel project에 제시된 LA지역의 연암 지반(soft rock), 연약한 토사 지반(soft soil), 단층 부근 지반(near fault)에서 각 지반별로 20개의 지진을 사용하였다. 그림 3은 각 지진의 응답스펙트럼을 나타내며, 다양한 특성을 가진 지진기록이 반영되었음을 알 수 있다.

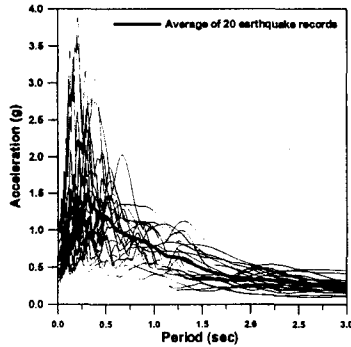
표 1. 예제 구조물의 동적 특성

(a) 3 경간 구조물

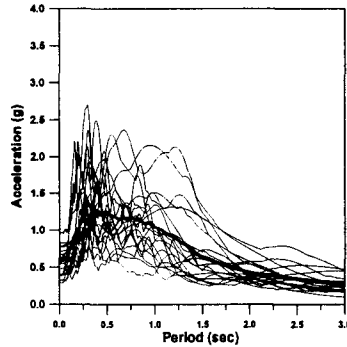
| 유형 | | MRF | | | BRBF-R | | | BRBF-H | | |
|------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|
| | | 3층 | 8층 | 20층 | 3층 | 8층 | 20층 | 3층 | 8층 | 20층 |
| 주기 (초) | 1차 모드 | 0.454 | 1.168 | 2.705 | 0.318 | 0.747 | 2.015 | 0.449 | 0.987 | 3.721 |
| | 2차 모드 | 0.138 | 0.420 | 0.946 | 0.108 | 0.275 | 0.652 | 0.155 | 0.361 | 0.942 |
| 질량 참여계수 | 1차 모드 | 0.931 | 0.829 | 0.771 | 0.924 | 0.809 | 0.719 | 0.908 | 0.790 | 0.648 |
| | 2차 모드 | 0.061 | 0.116 | 0.132 | 0.066 | 0.133 | 0.169 | 0.082 | 0.152 | 0.224 |

(b) 5 경간 구조물

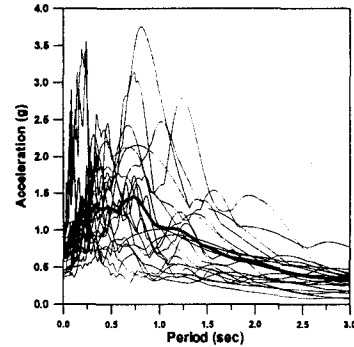
| 유형 | | MRF | | | BRBF-R | | | BRBF-H | | |
|------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|
| | | 3층 | 8층 | 20층 | 3층 | 8층 | 20층 | 3층 | 8층 | 20층 |
| 주기 (초) | 1차 모드 | 0.458 | 1.144 | 2.572 | 0.320 | 0.732 | 1.830 | 0.448 | 0.974 | 3.471 |
| | 2차 모드 | 0.140 | 0.413 | 0.915 | 0.109 | 0.274 | 0.622 | 0.155 | 0.365 | 0.911 |
| 질량 참여계수 | 1차 모드 | 0.932 | 0.829 | 0.783 | 0.925 | 0.812 | 0.740 | 0.909 | 0.791 | 0.655 |
| | 2차 모드 | 0.059 | 0.115 | 0.120 | 0.065 | 0.129 | 0.152 | 0.081 | 0.148 | 0.223 |



(a) 연암 지반



(b) 연약한 토사 지반



(c) 단층 근처

그림 3. 지반 별 응답스펙트럼

5. 이력에너지 분포

해석모델의 각 층별 이력에너지 요구량을 파악하기 위하여 DRAIN-2D+(10)를 이용하여 비선형 시간이력해석을 수행하였다. 보와 기둥의 단부에서만 소성힌지가 발생하고 항복후 강성비는 초기강성의 2%이고 비좌굴 가새는 인장과 압축에서의 항복용력이 같은 이선형 거동을 하며 항복 이후의 강성은 없는 것으로 가정하였다. 각 층별 이력에너지는 모멘트골조의 경우는 해당 층의 기둥과 보에서 소산된 에너지를 더하였고, 비좌굴 가새골조의 경우는 보와 기둥 그리고 그 층의 비좌굴 가새의 이력에너지의 합으로 나타내었다. 모멘트 골조와 비좌굴 가새골조 그리고 힌지접합 비좌굴 가새골조의 각 층에서 소산된 이력에너지는 그림 4~6에 나타내었다. 굵은 실선은 각 지진하중에 대한 결과의 평균값을 나타낸다.

MRF와 BRBF-R, BRBF-H 구조물 모두 연암 지반에서 단층 근처 지반으로 갈수록 전체적인 이력에너지 요구는 증가함을 알 수 있다. 높이에 따른 이력에너지 분포를 보면 MRF의 경우 2층부터 상부층으로 갈수록 대략 선형적으로 작아지지만 1층에서의 이력에너지는 상당히 많이 증가하였다. MRF의 경우 내진설계기준에서는 일반적으로 강기둥-약보의 구조물 형식을 권장하고 있는데

이러한 개념에 의하면 상부층의 보와 1층 기둥의 밀면에 소성변형이 집중됨을 알 수 있다. 이것은 8층 모멘트저항골조의 보와 기둥에서 발생한 층별 이력에너지지를 나타낸 그림 7(a), 7(b)를 보면 더욱 명확하게 알 수 있다. 기둥의 경우 상부층에서 발생한 이력에너지지는 무시할 정도로 작지만 1층에서 많은 이력에너지지가 발생함을 알 수 있다. 보에서는 역삼각형 형태의 분포를 가지고 이력에너지지가 발생함을 알 수 있는데 상부층의 이력에너지지 분담은 하부층에 비하여 매우 작았다.

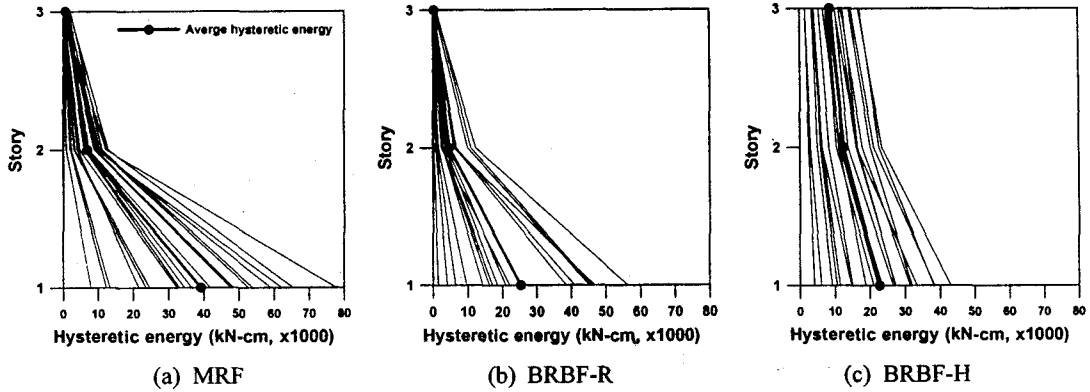


그림 4. 3경간 3층 구조물의 층별 이력에너지 요구(연암 지반)

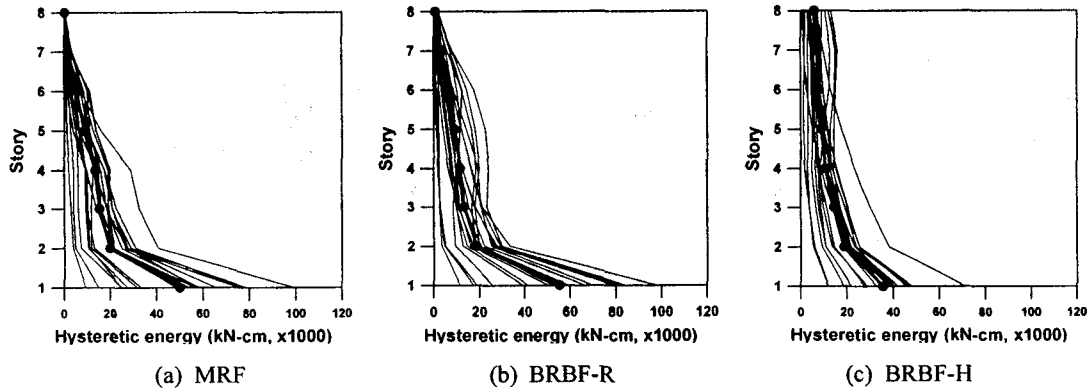


그림 5. 3경간 8층 구조물의 층별 이력에너지 요구(연암 지반)

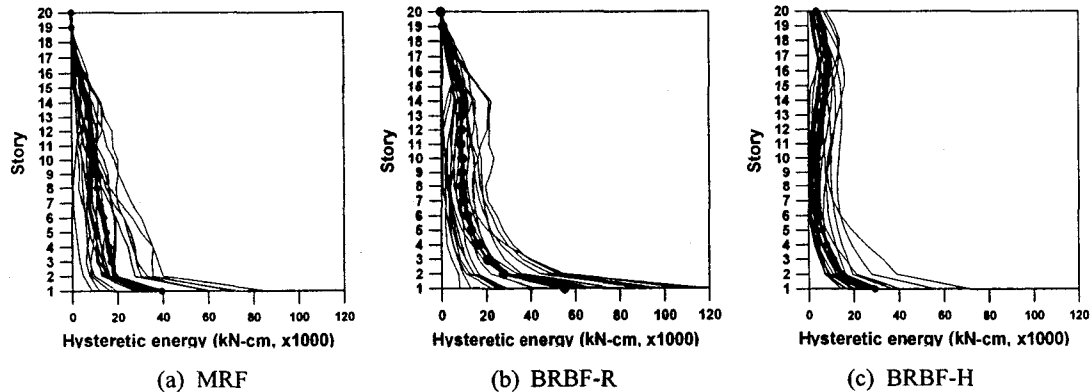
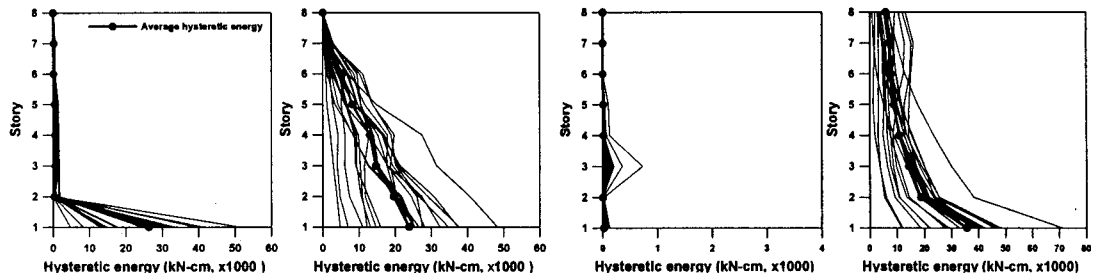


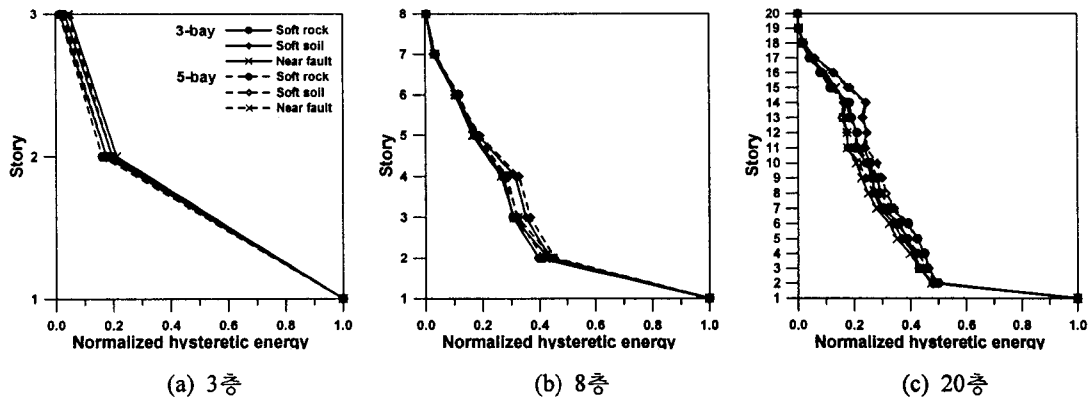
그림 6. 3경간 20층 구조물의 층별 이력에너지 요구(연암 지반)

즉 지진에 의하여 구조물에 입력된 에너지가 모든 층에서 균등하게 분배되는 것이 아니라 일부층에 집중됨으로써 그 층에 심각한 손상을 발생시킴을 알 수 있다. 보-기둥 접합부가 강접인 BRBF-R의 경우 전체시스템의 높이에 따른 이력에너지의 분포를 보면 모멘트골조와 비슷한 분포 형태를 보이고 있다. 그러나 20층의 경우 모멘트골조와 다르게 5층에서 14층까지는 각 층별 이력에너지 요구량이 거의 균등하게 나타났다. 힌지접합된 BRBF-H의 층별 이력에너지 분포는 그림 4~6에 나타난 바와 같이 MRF나 BRBF-R에 비하여 층별로 보다 균등하게 분포됨을 알 수 있다. 구조물의 상부층에서도 이력거동에 의하여 입력에너지를 소산시킨다. 특이한 것은 20층 비좌굴 가새골조의 경우 하부층에서 상부층으로 갈수록 이력에너지가 감소하다가 상부층에서 다시 증가하고 있다. 이러한 현상은 표 1(a)에 나타난 예제 구조물의 동적특성을 보면 20층 비좌굴 가새골조의 1차 모드 질량참여율은 64.8%이고 2차 모드 질량참여율은 22.4%로 구조물의 거동이 2차 모드에 의해 많은 영향을 받음을 알 수 있다. 따라서 고차 모드의 영향과 캔틸레버 변형으로 인하여 이력에너지 분포가 중간층에서는 작아졌다가 상부층에서 다시 증가되는 현상이 발생한 것으로 사료된다. 기둥과 보 그리고 비좌굴 가새에서 발생한 이력에너지를 나타낸 그림 7(c), 7(d)에 따르면 대부분의 손상은 비좌굴 가새에 집중되어 발생함을 알 수 있다. 또한 이력에너지도 1층을 제외한 모든 층에서 거의 일정하게 발생하는 것을 볼 수 있다.

지반 특성과 경간 수에 따른 이력에너지의 분포 형태를 살펴보기 위하여 모든 경우에 대하여 1층의 이력에너지를 기준으로 나타내었다. 그림 8~10을 보면 지반 조건과 경간 수에 따른 평균 이력에너지의 분포형태는 큰 변화를 보이지 않는다. MRF와 BRBF-R은 1층에서의 이력에너지요구가 급격하게 증가하지만 BRBF-H는 두 시스템에 비하여 변화량이 작음을 알 수 있다.



(a) 기둥-MRF (b) 보-MRF (c) 기둥과 보-BRBF-H (d) 비좌굴 가새-BRBF-H
 그림 7. 기둥, 보와 비좌굴 가새의 이력에너지 분포(8층 구조물, 연암 지반)



(a) 3층 (b) 8층 (c) 20층
 그림 8. MRF의 지반 조건과 경간에 따른 평균 이력에너지의 분배비

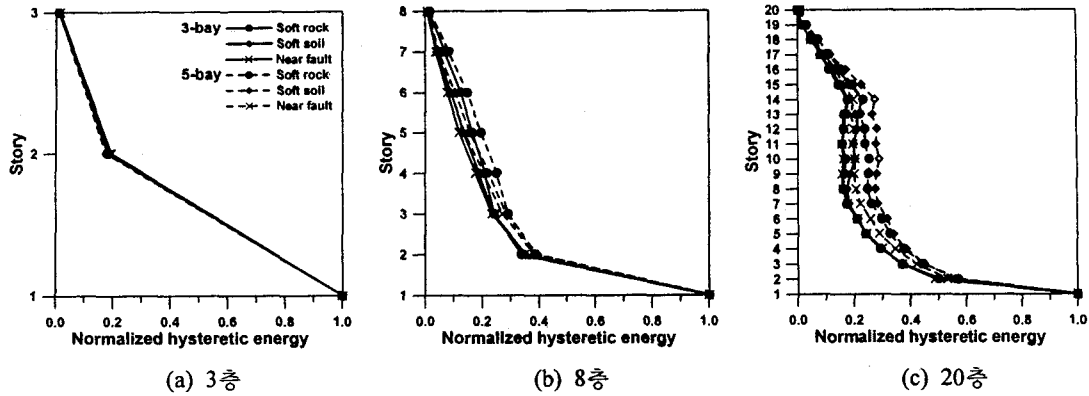


그림 9. BRBF-R의 지반 조건과 경간에 따른 평균 이력에너지의 분배비

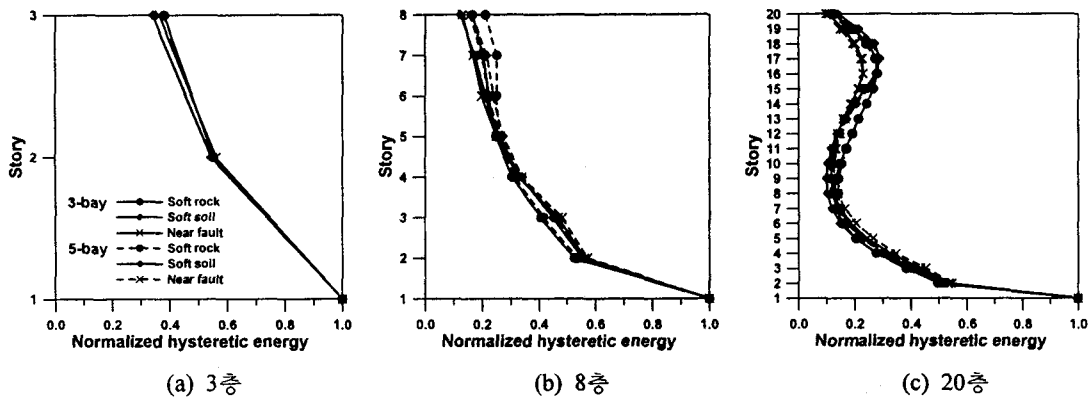


그림 10. BRBF-H의 지반 조건과 경간에 따른 평균 이력에너지의 분배비

6. 결 론

구조물의 이력 에너지 소산에 대한 기존의 연구는 대부분 단자유도계에 국한되었으며, 다층 건물에 있어서는 소산되는 에너지는 단순히 선형으로 분포한다고 가정하는 것이 일반적인 방법이다. 본 연구에서는 철골 모멘트저항골조, 비좌굴 가새골조, 보와 기둥이 힌지로 접합된 비좌굴 가새골조의 지반 조건과 경간 수에 따른 층별 이력에너지 분포 형상에 대하여 연구하였다.

모멘트저항골조의 경우 이력에너지는 상부층으로 갈수록 줄어드는 역삼각형 형태를 보였고 상부층에서는 이력거동이 거의 일어나지 않았다. 보-기둥 접합부가 강접인 비좌굴 가새골조의 경우 전체시스템의 높이에 따른 이력에너지의 분포를 보면 모멘트저항골조와 비슷한 분포형태를 보이고 있다. 그러나 20층의 경우 모멘트저항골조와 다르게 5층에서 14층까지는 각 층별 이력에너지 요구량이 거의 균등하게 나타났다. 힌지접합 비좌굴 가새골조는 상부층에서도 소성거동에 의하여 이력에너지를 발생하였기 때문에 구조물 전체에 걸쳐 비교적 균등하게 이력에너지가 발생하였다. 모멘트저항골조는 저층, 중저층과 중층 구조물에서 모두 비슷한 분포 양상을 보였는데 20층 힌지접합 비좌굴 가새골조는 중간층에서 이력에너지가 줄었다가 상부층에서 다시 증가하였다. 이는 고차모드의 영향 때문인 것으로 사료된다. 연암 지반, 연약한 토사 지반, 단층 근처의 지반 조건에 따른 이력에너지 분포를 살펴보면 세 가지 구조시스템 모두 지반 조건에 관계없이 비슷한 분포양상을 보였다. 이러한 결과는 3 경간 구조물과 5경간 구조물에서도 동일하게 나타났다. 따라서 전

체 시스템에 요구되는 소성에너지를 적절한 방법으로 쉽게 구할 수 있다면, 본 연구에서 파악한 층별 에너지 분포비에 따라, 에너지를 소산하기 위하여 필요한 부재의 크기를 산정할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2002-000-00025-0) 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Zahrah, T., and Hall, J., "Earthquake energy absorption in SDOF structures," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 110, No. 8, 1984, pp.1757~1772.
2. Uang, C.M., and Bertero, V.V., "Use of energy as a design criterion in earthquake-resistant design," Report No. UCB/EERC-88/18, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, 1988.
3. Chou, C.C., and Uang, C.M., "Evaluation of site-specific energy demand for building structures," Seventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Boston, Massachusetts, 2002.
4. Akbas, B., Shen, J., and Hao, H., "Energy approach in performance-based seismic design of steel moment resisting frames for basic safety objective," *The structural design of tall buildings*, Vol. 10, 2001, pp.193~217.
5. Estes, K.R., and Anderson, J.C., "Hysteretic energy demands in multistory buildings," Seventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Boston, Massachusetts, 2002.
6. Somerville, P., Smith, H., Puriyamurthala, S., and Sun, J., "Development of Ground Motion Time Histories for Phase 2 of the FEMA/SAC Steel Project," SAC Joint Venture, SAC/BD-97/04, 1997.
7. Chopra, A.K., *Dynamics of Structures*, Prentice Hall, 1995.
8. Clark, P.W., Aiken, I.D., Tajirian, F.F., Kasai, K., Ko, E., and Kimura, I., "Design procedures for buildings incorporating hysteretic damping devices," *Int. Post-SmiRT Conf. Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibrations of Structures*, Cheju, South Korea, 1999.
9. Huang, Y.H., Wada, A., Sugihara, H., Narikawa, M., Takeuchi, T., and Iwata, M., "Seismic performance of moment resistant steel frame with hysteretic damper," *Proceedings of the Third International Conference STESSA*, Montreal, Canada, 2000.
10. Tsai, K.C., and Li, J.W., "DRAIN2D+, A general purpose computer program for static and dynamic analyses of inelastic 2D structures supplemented with a graphic processor," Report No. CEER/R86-07, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, 1997.