재분배 기법 적용에 따른 철근 콘크리트 전단벽-골조 시스템의 비선형 특성 평가

Evaluation of Inelastic Performance of a Reinforced Concrete Shear Wall-Frame System Designed by Resizing Algorithms

안 진 우† 최 세 운** 박 효 선*
An, Jin-Woo Choi, Se-Woon Park, Hyo Seon

요 지

반복적인 구조해석의 실행없이 부재 변위 기여도를 이용하여 부재 사이즈를 조절함으로써 건물의 변위를 만족시키는 재분배 기법은 실용적인 변위 설계법으로 인식되고 있다. 기존 연구에서 재분배 기법은 풍하중, 지진하중과 같은 횡하중을 받는 건물의 횡변위를 탄성범위 내에서는 효과적으로 제어할 수 있었으나, 재분배 기법에 따른 비탄성 성능 변화에 대한 연구는 미흡하였다. 본 연구에서는 재분배 기법에 의해 재설계된 구조물의 비탄성 성능변화를 확인하기 위해 7층 철근 콘크리트 전단벽-골조 시스템 예제에 재분배 기법을 적용하였다. 재분배 적용결과, 전단벽-골조 시스템의 상호작용 특성때문에 하층부에서는 전단벽의 물량이 증가하고 상층부에서는 골조의 물량이 증가하였다. 이러한 물량 재분배를 통해 초기 강성은 증가하였으며 연성 성능은 비슷한 수준으로 나타났다.

핵심용어 : 변위설계, 재분배 기법, 구조 최적화, Push-over, 비선형

Abstract

Recently, the resizing algorithms based on the displacement participation factors have been developed for sizing members to satisfy stiffness criteria. It is proved that this resizing algorithms made for utilizing worker's stiffness design are practical and rational due to the simplicity and convenience of the method. The resizing algorithm can be practically and effectively applied to drift design of buildings. However, the researches on the change of inelastic behavior by the resizing algorithm has been insufficient. To identify the effect on the inelastic behavior of buildings by the resizing method, this study used the reinforced concrete shear wall-frame example. Through the application of the resizing method, the weights of shear wall in the lower class and the weights of columns and beams in the upper class increased respectively. And the initial stiffness of the building increased and the ductility of the buildings had similar with that of the initial structure.

Keywords *: drift design, resizing algorithm, structural optimization, push-over, non-linearity*

1. 서 론

건축물의 강성 설계법으로서 단위 하중법을 이용한 재분배 기법이 개발되었으며, 다양한 규모의 건물을 대상으로 검증되었다(Chan 등, 1995; 2004; Park 등, 1997). 이 중 Park 등(1997)이 제시한 재분배 방법은 최적성기준법(Optimality Criteria)을 사용한 Chan 등(1995, 2004)의 재분배 방법과는 다르게 반복적인 구조해석을 요구하지 않으며, 알고리즘의 구현이 쉽고 그 내용이 단순하다. 이를 근간으로 실무의 적용성을 높이기 위해 추가 연구가 활발히 진행되어 왔다(서지현 등, 2004; Park 등, 2008; Seo 등, 2008).

이 재분배 기법은 최상층 변위에 대한 각 부재들의 변위기여도를 정량적으로 구한 후, 이를 근거로 단면수정계수를 산정하여 부재 단면을 재설계함으로써 건물의 변위를 효과적으

† 책임저자, 정회원·연세대학교 건축공학과 석사
* 교신저자, 정회원·연세대학교 건축공학과 교수
Tel: 02-2123-2794 ; Fax: 02-365-4668
E-mail: hspark@yonsei.ac.kr
** 정회원·연세대학교 건축공학과 박사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2011년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2012년 2월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

로 제어할 수 있다. 이 방법은 여러 연구(Park 등, 2002; 서지현 등, 2001)에 의해 탄성 범위 내에서는 효과적으로 적용할 수 있는 방법이라는 것이 증명되었지만, 강성설계의 실무화를 목표로 개발된 본 재분배 기법이 구조물의 비탄성 해석에서는 어떠한 거동양상을 보일지 연구해야 할 필요성이 요구되었다.

이러한 이유로 서지현 등(2006)은 철골 모멘트 저항골조 예제를 사용하여 재분배로 인해 재설계되기 전과 후의 설계안에 대하여 비선형 정적해석을 수행하여 비선형 특성을 비교하였다. 그 결과는 기둥과 거더만으로 구성된 모멘트 저항골조의 경우 거더의 변위기여도가 크기 때문에 재분배 기법을 적용하면 물량이 기둥에서 거더로 이동하게 된다는 것이 발견되었고, 이러한 물량의 이동은 탄성 범위에서는 강성 측면에서 유리하지만, 비선형 해석 시에는 기둥의 소성힌지 발생을 유발시킴으로서 구조물 전체의 연성 및 에너지 흡수력은 감소시키게 된다. 이러한 연성 능력의 감소에 대한 개선방안으로 권도형 등(2006)은 Seismic Provisions for Structural Steel Buildings(AISC, 2005)에 제시된 기둥-보 휨강도 비를 만족하지 못하는 재분배 후의 부재를 기둥-보 휨강도 비에 만족할 수 있도록 구조 정식화를 통해 구조물을 다시 설계하는 방법을 제안하였다.

본 연구는 이러한 선행 연구에 이어서 철근 콘크리트 전단벽-골조 시스템의 예제를 대상 구조물로 하여 기존 재분배 기법(서지현 등, 2006)에 의해 재설계되기 전과 후의 구조물에 대한 비탄성 성능을 비교, 분석하고자 한다. 본 연구에서는 Bertero 등(1984)의 7층 철근 콘크리트 전단벽-골조의 실험 및 해석 모델을 예제 구조물로 선정하고, 이 초기구조물과 재분배 기법에 의해 설계된 구조물에 각각 비선형 정적해석을 수행하여 각 구조물의 비선형 특성을 비교 평가하였다.

2. 변위 설계법

본 연구에서 사용하는 재분배 기법(서지현 등, 2006)을 이용한 변위 설계법은 초기 강도 설계를 만족하는 구조물을 대상으로 재분배 기법을 적용하여 변위를 제어하고, 다시 강도검토를 수행함으로서 강성 설계와 강도설계를 동시에 만족시킬 수 있는 방법이다.

2.1 변위기여도 산정

재분배 기법은 단위 하중법에 근거하여 부재에 축적되는 변형 에너지를 이용하여 물량 분배량을 결정하게 된다. 재분배 기법에서 물량 분배의 근거가 되는 동적 변위기여도는 단위 하중법을 이용하여 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$\delta_t = \sum_{i=1}^{m} \zeta_i = \sum_{i=1}^{m} \left\{ \int_0^l \frac{N_i^S N_i^U}{EA_i} dx + \alpha \int_0^l \frac{V_i^S V_i^U}{GA_i} dx + \int_0^l \frac{M_i^S M_i^U}{EI_i} dx + \int_0^l \frac{T_i^S T_i^U}{GI_{pi}} dx \right\} \quad (1)$$

여기서, δ_t와 ζ_i는 제어되어야 할 구조물 최상층 변위와 i번째 부재의 변위기여도를 나타낸다. N_i, V_i, M_i, T_i는 횡하중과 단위하중에 의한 부재력을 나타내며, 각각 상첨자 S, U로 구분된다. E, G는 탄성계수와 전단탄성계수를 나타내며, A_i, I_i, I_π는 각각 i번째 부재의 단면적, 단면 2차모멘트, 극단면 2차 모멘트를 나타내며, m은 전체 부재수를 나타낸다. 식 (1)에 의해 변위기여도가 계산되며, 각 부재의 변위기여도는 최상층 변위에 대해서 각 부재의 기여도를 의미하므로 변위를 제어하는데 효과적인 부재(Active member)를 찾을 수가 있다. 변위기여도에 근거하여 각 부재의 물량의 증가시키거나 감소시킴으로서 변위를 제어하게 된다. 변위기여도를 통해서 변위 제어에 효과적인 부재와 그렇지 않은 부재를 구분할 수는 있지만, 변위 제어를 위해서 얼마만큼의 물량을 증감 시켜야 할지는 알 수 없다. 이러한 물량의 증가 및 감소량은 다음의 정식화를 통해서 결정된다.

2.2 구조 최적화를 위한 정식화

목적함수는 구조물 최상층 변위 δ_t를 최소화하는 것으로 한다. 이 때 구조물 최상층 변위는 모든 부재의 변위기여도를 더한 값이며, 각 부재의 변위기여도는 부재 단면의 변화에 반비례하는 것으로 가정한다. 제약함수는 재분배 전·후의 물량이 변화없는 것으로 한다.

$$Miminize \ \ \delta_t = \sum_{i=1}^{m} \frac{\zeta_i}{\beta_i} \quad (2)$$

$$Subject\ to \sum_{i=1}^{m} \beta_i \rho_i A_i L_i = \sum_{1}^{m} \rho_i A_i L_i \quad (3)$$

식 (2), (3)은 라그랑지 승수(λ_L)를 도입하여 무제약 최소화 문제로 치환될 수 있다.

$$\delta_t = \sum_{i=1}^{m} \frac{\zeta_i}{\beta_i} + \lambda_L \left(\sum_{i=1}^{m} \beta_i \rho_i A_i L_i - \sum_{1}^{m} \rho_i A_i L_i \right) \quad (4)$$

식 (4)와 같은 가 목적함수의 최적해를 찾기 위해 β_i, λ_L에 대해서 미분한 후 영(zero)으로 둔다.

$$\frac{\partial \zeta_i}{\partial \beta_i} = -\frac{\zeta_i}{\beta_i^2} + \lambda_L \rho_i A_i L_i = 0 \qquad i = 1, m \tag{5}$$

$$\frac{\partial \zeta_i}{\partial \lambda_L} = \sum_{i=1}^{m} \beta_i \rho_i A_i L_i - \sum_{i=1}^{m} \rho_i A_i L_i = 0 \tag{6}$$

식 (5), (6)을 정리하면, 단면 수정계수 β_i는 식 (7)과 같이 구해진다.

$$\beta_i = \sqrt{\frac{\zeta_i}{\rho_i A_i L_i}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{m} \rho_i A_i L_i}{\sum_{i=1}^{m} \sqrt{\zeta_i \rho_i A_i L_i}} \tag{7}$$

식 (7)에 얻어진 단면 수정계수에 의해서 전체 구조물량의 변화없이 초기 설계된 부재 성능이 수정된다.

2.3 재분배 적용 전후의 비선형 특성 평가

본 연구에서 사용한 재분배 기법의 절차는 그림 1과 같다. 처음에는 일반 구조설계 절차를 따라 초기단면을 부여하고, 이후 구조해석을 통해 부재력 계산 및 강도설계 단계를 거쳐 초기 설계안을 얻는다. 이렇게 얻게 된 설계안은 재분재 적용 전 설계안으로서 재분배 적용과는 독립적으로 비선형 해석을 실시하여 비선형 특성을 평가한다. 초기 설계안에 대한 재분배에 의한 재설계는 식 (1)을 이용하여 변위기여도를 계산하고, 식 (7)을 이용하여 각 부재의 단면 수정계수를 계산하고, 이를 기반으로 하여 각 부재의 단면을 수정, 강도 검토 등의 단계를 통해 재설계된다. 재분배에 의한 재설계가 완료되면 종료하게 되는데, 본 연구에서는 재분배 전의 설계안과의 비탄성 성능을 비교하기 위해 재설계안에 대하여 독립적으로 비선형 해석을 수행하도록 한다.

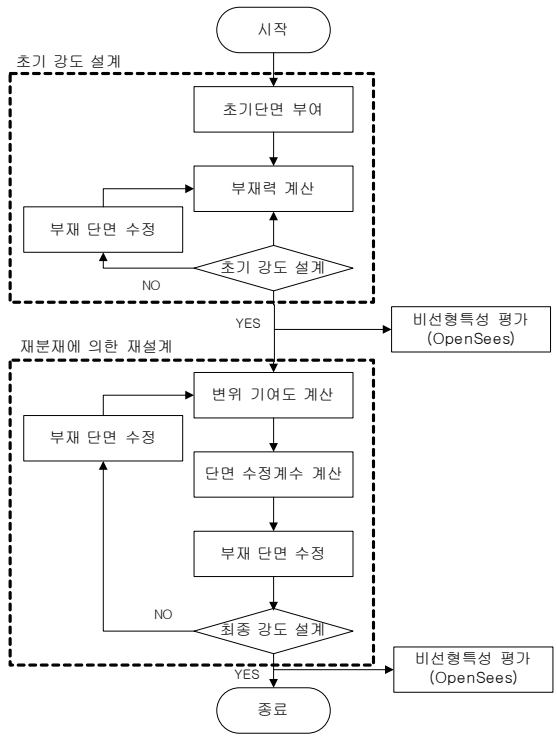


그림 1 재분배 적용 전후의 비선형 평가 모델

3. 예제 모델

재분배 기법의 결과 및 비선형 성능의 평가를 위해서 Bertero 등(1984)의 7층 철근 콘크리트 전단벽-골조 예제를 선택하였다. 본 평가에 적용된 대상 건물(그림 2, 3)은 7층의 전단벽과 골조가 조합된 건물로서 철근콘크리트 구조이다. 1층의 층고는 3.75m이며, 2층 이상은 3m로 총 건물의

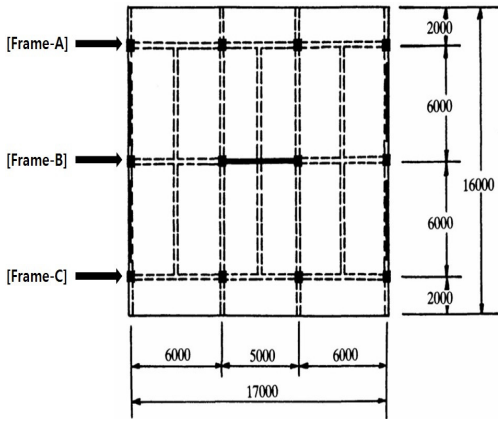


그림 2 평면도

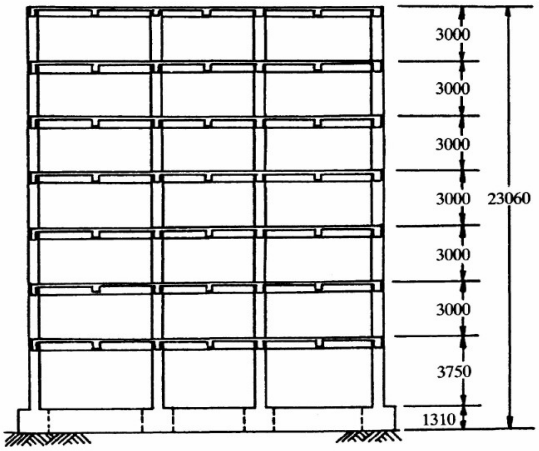
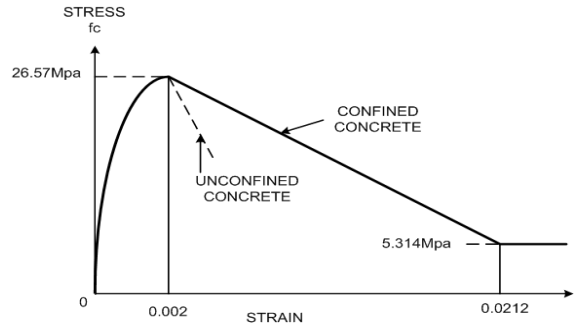
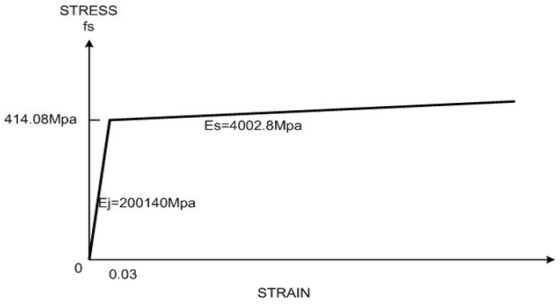


그림 3 입면도



(a) 콘크리트



(b)철 근

그림 4 재료 모델

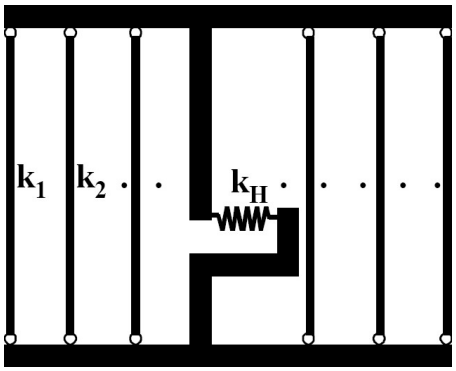
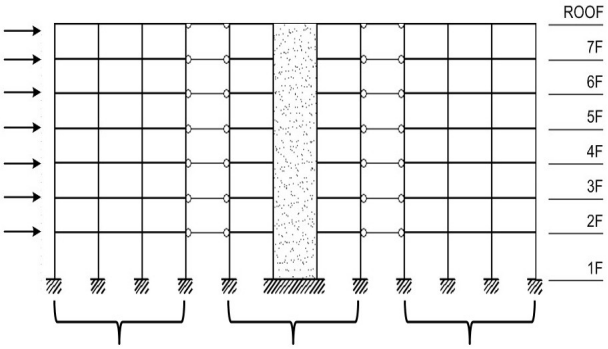


그림 5 다중 수직선 요소 모델(Vulcano 등, 1988)

높이는 21.75m이다. 구조물의 대칭을 고려하여 지진방향으로 외측 골조를 Frame-A, 내부의 벽체가 있는 골조를 Frame-B, 다시 외측 골조를 Frame-C로 정하였다.

예제 건물의 해석 모델링은 Opensees를 이용하여 수행하였다(Silvia 등, 2006). 해석 모델링에 사용된 건물의 기둥과 보의 단면 수치 및 철근의 배근, 콘크리트와 철근의 재료물성치, 적용 하중 등은 Charney 등(1982)를 참고하였다. 콘크리트와 철근에 해당되는 비탄성 재료 모델은 그림 4와 같다. 콘크리트의 경우 인장강도는 무시하였으며, 1층 기둥의 경우 띠철근으로 인한 구속효과를 위하여 재료를 구속 콘크리트로 모델링하였다. 또한 철근은 압축과 인장의 동일한 응력-변형률 관계가 적용되었다.

벽체의 해석 모델로는 그림 5와 같은 Vulcano 등(1988)



(a) Frame A (b) Frame B (c) Frame C

그림 6 횡방향 해석을 위한 모델링

이 제안한 다중수직선요소 모델(Multiple Vertical Line Element Model, MVLEM)을 채택하였다. 이 모델은 휨변형을 모델링하기 위해 복수의 수직 트러스요소가 상하부의 강체보에 연결되고 전단변형은 단일 전단스프링을 통해 모델링된다. 전단스프링의 높이는 기존 연구로부터 각 벽체 높이의 40%에 해당되는 지점을 선정하였고, 면외 강성은 무시하였다. 전단스프링의 강성(K_s)은 식 (8)을 이용하여 구한다.

$$K_s = \frac{GA_w}{\chi h} \tag{8}$$

식 (8)에서 G, A_w, χ, h는 각각 전단탄성계수, 전단벽체의 단면적, 전단변형 형상계수, 벽체의 높이를 나타낸다. 참고로 식 (8)에 의해 계산된 재분배 적용 전후의 1층 전단강성값은 각각 2181.52kN/mm, 2531.00kN/mm이다.

구조물의 비탄성 응답을 파악하기 위해 비선형 모델을 사용하였고, 대상모델은 기초위에 고정되어 있는 것으로 가정하였다. 또한 각 층의 바닥은 전단거동을 묘사하기 위해 강막작용을 하는 것으로 가정하였고, 보-기둥 접합부는 강절로 가정하였다.

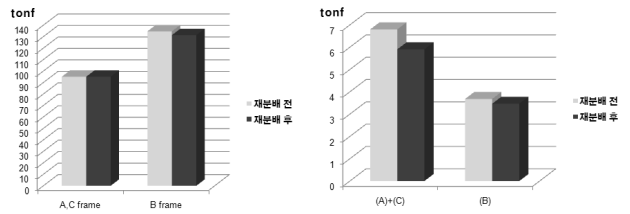
해석 구조물(그림 8)은 평면에서 지진 방향으로 3개의 경간을 가지고 있으며, 프레임과 프레임의 연결은 힌지로 연결된 강체보로 단부에 휨 강성을 해제하고 수평력만 전달되도록 하였다.

구조물의 비탄성 성능을 평가하는 방법에는 정적 비선형해석을 이용하는 방법(권건업 등, 2004), 비선형 동적해석을 이용하는 방법(박주남 등, 2007; Yun 등, 2002) 등이 있는데, 본 연구에서는 비선형 정적해석을 이용하였다. 그리고 구조물의 비탄형 성능을 평가하는 지표로는 최대 층간변위, 최상층 변위, 연성율 등이 있다(Liu, 2003). 본 연구에서는 FEMA 356에서 제시하고 있는 최대 층간변위율 지표를 이용하였다.

4. 재분배 기법 적용결과

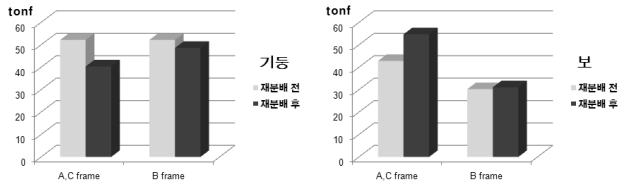
재분배 기법 적용에 따른 물량 분배 양상을 그림 7부터 그림 13에 정리하였다. 재분배에 의한 부재 사이즈 변화를 통하여 골조로 이루어진 A, C Frame의 경우 기둥과 보의 물량은 하층부에서는 증가하고 상층부로 올라갈수록 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 전단벽이 포함된 B Frame의 경우, 내부 기둥은 하층부에서 물량이 증가하고, 상층부로 갈수록 물량이 줄어드는 양상을 보이나, 외부 기둥과 보의 경우에는 하층부 물량이 줄어들고 상층부로 갈수록 물량이 늘어나는 A, C Frame과는 반대의 양상을 보이고 있다. 이러한 결과는 철근 콘크리트 전단벽-골조 시스템의 거동특성 상 재분배시 물량이 상대적으로 기여도가 큰 전단벽으로 분배되었기 때문인 것으로 여겨지며, 재분배 전,후 물량의 흐름을 보면 골조의 물량은 하부층에서는 감소하고 상부층에서는 증가하는 경향을 보이며, 전단벽의 물량은 하부층에서 증가하고 상부층에서는 감소하는 경향을 보인다.

강접골조-전단벽 구조 시스템은 횡하중을 구조물 하층부에서는 전단벽이 부담하고, 구조물 상부층에서는 골조가 부담하며, 상층부와 하층부에서 강접 골조와 RC 전단벽이 서로 구속하는 거동 특성(inter-action)으로 횡하중에 효과적으로

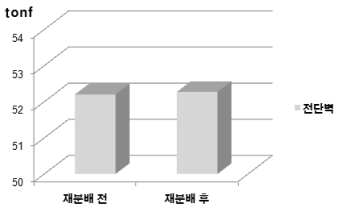


(a) 전체 총물량 비교 (b) 전체 철근 물량 비교

그림 7 전체 물량 비교



(a) 기둥 부재 물량 비교 (b) 보 부재 물량 비교



(c) 전단벽 부재 물량 비교

그림 8 각 부재별 물량 비교

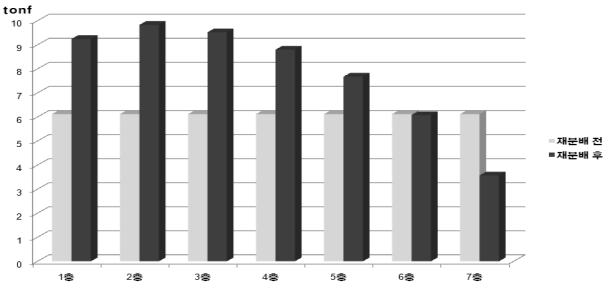


그림 9 각 층별 보 물량 비교(A Frame)

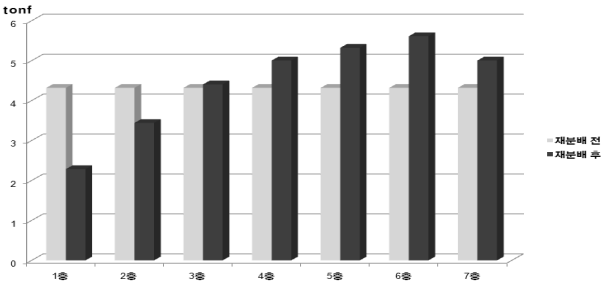


그림 10 각 층별 보 물량 비교(B Frame)

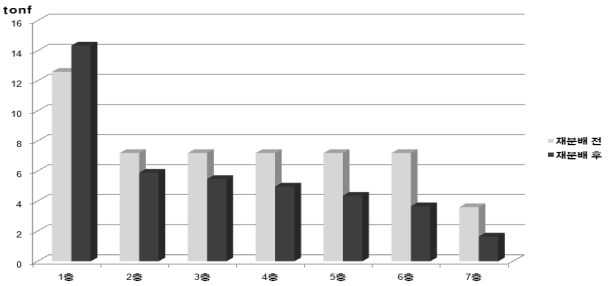


그림 11 각 층별 기둥 물량 비교(A Frame)

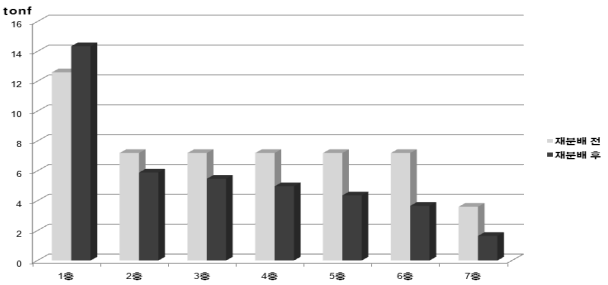


그림 12 각 층별 기둥 물량 비교(B Frame)

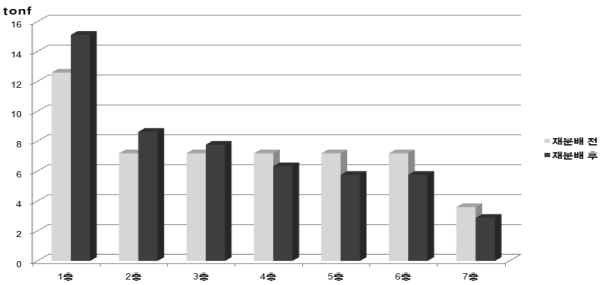


그림 13 각 층별 전단벽 물량 비교

저항하는 시스템이다. 재분배 기법 적용에 따른 물량 분배의 결과는 강접 골조-전단벽 구조 시스템의 횡하중 저항 메커니즘을 더욱 더 효과적으로 발휘될 수 있도록 설계되었다는 것을 알 수 있으며, 이 결과로 건물의 초기강성이 더 커졌음을 해석결과 분석을 통해 확인할 수 있다.

5. 비선형해석 결과분석

본 연구의 7층 예제 건물을 탄성 재분배 기법을 이용하여 아래 그림 14와 같이 동일한 물량 제약조건을 가지고 물량을 재분배함으로써 최상층 변위를 50% 가까이 줄어들게 한 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 탄성 재분배로 인한 초기 강성 증가는 이미 여러 논문(Park 등, 2002; 서지현 등, 2001)을 통하여 입증이 되었으나, 본 연구의 주제에서 언급한 재분배된 철근 콘그리트 전단벽-골조 건물의 비탄성 거동 성능에 대한 평가가 제대로 이루어지지 않아 재분배 기법에

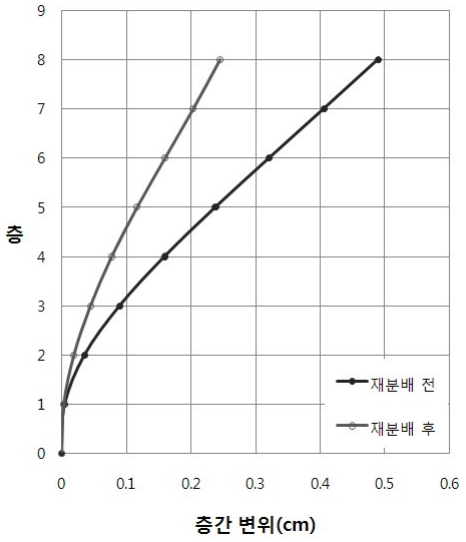


그림 14 탄성 재분배 전·후의 층간 변위

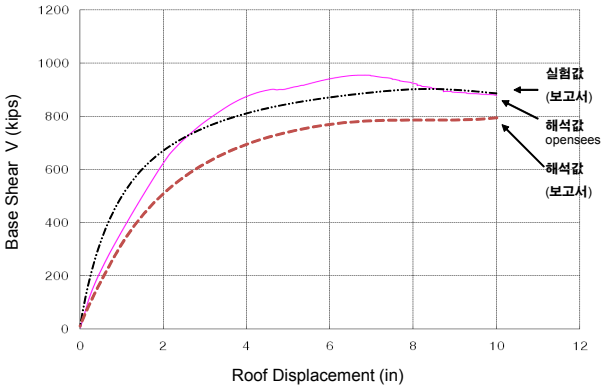


그림 15 비선형 모델링 검증을 위한 Push-over curve 비교

재설계되기 전과 후의 설계안에 대하여 비선형 정적해석을 수행하여 비탄성 성능을 비교하였다.

본 연구의 해석 모델 선정 시 해석 모델의 Push-over Curve 수치값를 검증하기 위해서 Bertero 등(1984)의 보고서(UCB/EERC-84/05)를 참고하였다. 본 연구에서는 Opensees를 이용하여 모델링을 하였고, 이를 검증하기 위해 EERC 보고서에서 표기된 Push-over 실험값과 해석값을 그림 15와 같이 본 연구에서 얻은 해석값과 비교하였다.

본 연구에서는 재분배 기법이 적용된 건물의 비탄성 성능을 평가하기 위해서 초기 설계된 구조물과 재분배 기법에 의해 재설계된 구조물에 대해 push-over 해석을 실시하여 그림 16과 같이 비교하였다. 구조물 각 층의 층간변위가 FEMA 356에 제시된 다양한 성능 레벨을 만족하는지 확인하였다. FEMA 356에서 제안하는 전단벽의 성능 수준인 Immediate-occupancy(I.O.), Life-safety(L.S.) 및 Collapse-prevention (C.P.)는 층간 변위의 각각 0.5%, 1.0%, 2%로 제시되어 있으며, 본 연구에서도 구조물 각 층의 층간변위가 FEMA 356에서 제안한 성능수준에 도달한 경우와 각 층에서 성능 수준을 초과했을 때를 그림 16에 표현하였다. 재분배 기법 적용에 따라 초기강성이 증가한 것을 알 수 있으며, 초기 강성의 증가는 재분배 기법 적용에 따라 변위가 감소하는 것과 같은 맥

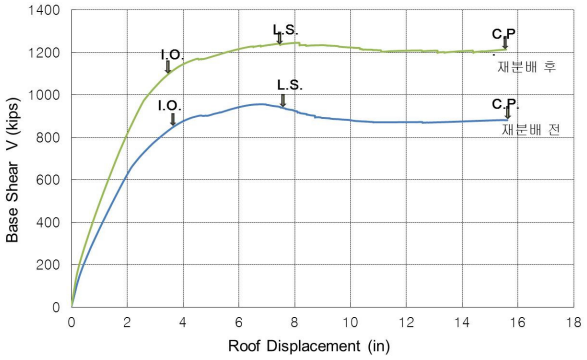


그림 16 재분배 전·후의 Push over curve 비교

표 1 성능 단계에서의 층간변위와 밑면 전단력(재분배 전, 후)

	구분	I.O. (0.5%)	L.S. (1%)	C.P. (2%)
재분배전	Base Shear (kips)	863.915	932.786	880.089
	Roof displacement (in.)	3.834	7.696	15.621
재분배후	Base Shear (kips)	1124.04	1239.62	1213.37
	Roof displacement (in.)	3.739	7.618	15.579

락에서 이해될 수 있다.

표 1은 push-over 해석으로 얻어진 재분배 전, 후의 최상층 변위와 밑면전단력을 보여준다. 기존에 재분배기법이 적용된 철골 모멘트 저항골조의 비선형 평가에서와는 대조적으로 재분배 기법이 적용된 구조물의 연성능력이라고 할 수 있는 Collapse-prevention(C.P.)의 수치가 재분배 전 초기 구조물의 C.P점과 크게 차이가 나지 않음을 확인함으로써 철근 콘크리트 전단벽-골조 예제의 연성능력이 재분배 전, 후에 비슷한 수준으로 유지되는 것을 확인할 수 있다. 이 결과는 철근 콘크리트 전단벽-골조 시스템의 경우 철골 모멘트 저항골조와는 다르게 거더보다 횡력에 대해 크게 저항하는 전단벽이 있기에 기둥의 물량이 과도하게 거더로 이동하지 않고 변위기여도가 가장 높은 전단벽으로 거더와 기둥의 물량이 동시에 이동하기 때문인 것으로 여겨진다.

6. 결 론

본 연구에서 사용된 철근 콘크리트 전단벽-골조 예제를 통하여 재분배 기법이 적용된 구조물의 초기강성의 증가는 물론 연성과 같은 비탄성 능력 또한 초기 모델과 비슷한 수준으로 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 예제 구조물에서 재분배 기법을 적용한 후 Base Shear 값의 경우 C.P.(2%)에서 재분배 전보다 138%가 증가한 반면에 Roof displacement의 차이가 1%미만인 것으로 나타났다. 이러한 결과는 상층부와 하층부에서 강접 골조와 RC 전단벽이 서로 구속하는 거동 특성(inter-action)으로 인한 것으로 판단된다. 횡하중에 효과적으로 저항하는 시스템인 철근 콘크리트 전단벽-골조 시스템의 경우 철골 모멘트 골조와는 다르게 거더보다 횡력에 대해 더 크게 저항하는 전단벽으로 인하여 기둥의 물량이 과도하게 거더로 이동하지 않고 변위기여도가 가장 높은 전단벽과 그 다음으로 높은 거더 순으로 물량이 이동한다. 이러한 효과적인 물량이동으로 인하여 하층부에서는 전단벽의 물량이 상층부에서는 거더 및 기둥의 물량이 증가하여 기존 연구결과인 철골 모멘트 저항골조의 재분배 후 비선형 해석과는 대조적으로 강접 골조-전단벽 구조 시스템의 횡하중 저항 메커니즘이 효과적으로 발휘될 수 있는 물량 재분배가 이루어졌음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0018360).

참 고 문 헌

권건업, 한상환 (2004) WUF-B 접합부를 가진 모멘트골조의 내진성능 평가, 대한건축학회 논문집 구조계, 20(6), pp.27~34.

권도형, 서지현, 박효선 (2006) 재분배 기법의 비선형 특성 개선을 위한 기초 연구, 한국전산구조공학회 학술발표 논문집, 19(1), pp.535~540.

박주남, 최은수 (2007) 취약도 해석을 통한 빌딩구조물의 내진성능 비교 및 평가, 한국지진공학회 논문집, 11(3), pp.11~21.

서지현, 박효선 (2001) 재분배 기법을 이용한 고층 구조물의 수평 변위 설계법, 대한건축학회 논문집 구조계, 17(9), pp.73~80.

서지현, 박효선 (2004) 횡하중과 연직하중을 받는 고층건물의 변위설계를 위한 재분배 기법 개발, 한국전산구조공학회 논문집, 17(1), pp.49~58.

서지현, 권봉근, 박효선 (2006) 재분배 기법 적용에 따른 모멘트 저항골조의 비선형 특성평가, 한국강구조공학회 논문집, 18(3), pp.361~371.

AISC (2005), Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, Chicago, IL.

Bertero, V.V., Akran, A.E., Charney, F.A., Sause, R. (1984) U.S.-Japan Cooperative Earthquake Research Program: Earthquake Simulation Tests and Associated Studies of a 1/5th-scale Model of a 7-story Reinforced Concrete Test Structure. Report No. UCB/EERC-84/05, Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley.

Chan, C.M., Grierson, D.E., Sherbourne, A.N. (1995) Automatic Optimal Design of Tall Steel Building Frameworks, *Journal of Structural Engineering*, 121(5), pp.838~847.

Chan, C.M., Zou, X.K. (2004) Elastic and Inelastic Drift Performance Optimization for Reinforced Concrete Buildings Under Earthquake Loads, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 33, pp.929~950.

Charney, F.A., Berteo, V.V. (1982) An Evaluation of the Design and Analytical Seismic Response of a Seven-story Reinforced Concrete Frame-wall Structure. Report No. UCB/EERC-82/08, Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley.

Federal Emergency Management Agency (2000) Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Rep. FEMA 356, Wash-

ington, DC.

Liu, M. (2003) Development of Multiobjective Optimization Procedures for Seismic Design of Steel Moment Frame Structures, Ph.D. thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL.

Park, H.S., Park, C.L. (1997) Drift Control of High-rise Buildings with Unit Load Method, *The Structural Design of Tall Buildings*, 6(1), pp.23~35.

Park, H.S., Hong, K.P., Seo, J.H. (2002) Drift Control of Steel-frame Shear-wall Systems for Tall Buildings, *Structural Design of Tall Buildings*, 11, pp.35~49.

Park, H.S., Seo, J.H., Kwon, Y.H. (2008) Development of Drift Design Model for High-rise Buildings Subjected to Lateral and Vertical Loads, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 17(2), pp.273~293.

Seo, J.H., Song, W.K., Kwon, Y.H., Hong, K. (2008) Drift Design Model for High-rise Buildings Based on Resizing Algorithm with a Weight Control Factor, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 17(3), pp.563~578.

Silvia, A.K., Frank, M., Michael, H.S., Gregory, L. (2006) Opensees Command Language Manual, Open System for Earthquake Engineering Simulation.

Vulcano A., Bertero, V.V., Colotti, V. (1988) Analytical Modeling of RC Structural Walls, Proceedings, 9th World Conference on Earthquake Engineering (6), Tokyo-Kyoto, Japan.

Yun, S.Y., Hamburger, R.O., Cornel, C.A., Foutch, D.A. (2002) Seismic Performance Evaluation for Steel Moment Frames, *Journal of Structural Engineering*, 128(4), pp.534~545.

● 논문접수일 2010년 8월 2일
● 논문심사일
1차 2010년 8월 5일
2차 2011년 6월 7일
● 게재확정일 2011년 10월 4일