

부재력 특성을 고려한 변위조절설계법 개발

Development of Drift Design Method Considering Characteristics of Member Forces

서 지 현* 박 효 선**
Seo, Ji Hyun Park, Hyo Seon

Abstract

Drift design using resizing techniques can be a very practical method in drift design of high-rise buildings since it cannot require sensitivity analysis and structural re-analysis. Resizing techniques has used the cross sectional areas as design variable and supposed that displacement participation factors are inversely proportional to structural weights. Efficiency of resizing techniques based on displacement participation factors may depend on proper selection of sectional properties as design variables. In this study, two different drift design methods with the different sectional properties as design variables are presented and applied to a 20-story structure.

1. 서론

최적화 기법을 이용한 고층건물의 최적설계는 다양한 분야에서 시도되고 있으나 요구되는 계산량과 해석시간, 또한 알고리즘의 안전성의 문제 등으로 인해 실무적용에는 아직 많은 한계를 가지고 있다.^{(1),(2),(3),(4)} 재분배 기법을 이용한 변위조절 설계법은 구조해석 결과를 이용하여 간단한 계산만으로 제어하고자 하는 변위에 대한 각 부재의 변위기여도⁽⁵⁾(Displacement Participation Factors)를 계산할 수 있으며 이를 최적화 문제로 치환한 후 물량을 분배함으로써 변위를 제어하는 실용적인 변위제어기법이다.^{(6),(7),(8),(9)} 재분배 기법을 이용한 변위조절설계법은 강 구조물에 적용할수 있는 재분배 기법이 개발되었으며, 이를 발전시켜 강접-전단벽 구조물에 적용 가능한 변위설계법이 제안되었다. 또한 재분배기법에 근거한 변위조절 설계법은 하중의 종류에도 영향을 받으므로 횡하중과 연직하중을 동시에 고려한 변위조절설계법이 제안되었으며, 또한 구조설계의 효율성을 높이기 위해 설계 변수의 그룹핑(Design Variable Linking Strategy)을 고려한 변위설계법이 제안되었다. 또한 현재 시공되어지고 있는 대부분의 주거용 초고층 건물들의 경우, 전단벽의 두께는 일정하며, RC 전단벽 강도를 조절하여 강도 및 강성설계를 하는 현실을 감안하여, RC부재의 콘크리트 강도를 설계 변수로 사용하여 전단벽의 강도를 조절하여 변위를 제어하고자하는 변위조절설계법이 제안되었다⁽⁹⁾. 또한 재분배 기법 적용 시 부재 단면적과 단면 2차 모멘트를 설계변수로 사용한 변위설계법이 개발되었다. 이러한 대부분의 재분배 기법을 이용한 방법이 부재 변위기여도는 부재 단면적에 선형 반비례한다는 가정하에 부재 단면적을 설계변수로 하여 변위를 제어하였다. 하지만 부재 변위기여도가 반드시 부재 단면적에 선형 반비례하는 것은 아니므로 본 논문에서는 부재별로 부재력 특성을 고려하여 부재별로 각각 다른 설계변수를 사용하여 변위를 조절하는 변위조절 설계법 제안하고자 한다..

* 연세대학교, 건축도시공학부 박사과정
** 정회원, 연세대학교, 건축도시공학부 부교수

2. 변위기여도

변위기여도는 제어하고자 하는 변위에 대한 각 부재들의 기여도를 나타내는 것으로서 구조해석 결과인 부재력을 이용하여 식 (1) 과 같이 구해진다.

$$\delta_i = \sum_{j=1}^m \delta_{ij} = \sum_{j=1}^m (\delta_{ij}^n + \delta_{ij}^m + \delta_{ij}^v) = \sum_{j=1}^m \left\{ \int_0^1 \frac{N_j^L N_j^U}{EA_j} dx + \int_0^1 \frac{M_j^L M_j^U}{EI_j} dx + \alpha \int_0^1 \frac{V_j^L V_j^U}{GA_j} dx \right\} \quad (1)$$

여기서 δ_{ij}^n , δ_{ij}^m , δ_{ij}^v 은 각각 i 번째 부재의 모멘트, 전단력, 축력에 의한 변위기여도를 나타내며, N , M , V 는 각각 축력, 모멘트, 전단력을 나타내며, 상첨자 L 과 U 는 각각 실재하중과 단위하중을 나타낸다. 이와 같이 i 번째 부재의 부재 변위기여도는 축력, 전단력, 모멘트에 의한 부재변위기여도의 합으로 구해진다.

3. 문제의 정식화

최적화 기법의 효율성은 최적화 문제의 정식화에 의해 상당부분 결정된다. 본 연구에서 목적함수는 제어하고자 하는 건물 최상층의 변위(δ_i)가 최소화하는 것으로 하였으며, 최상층 변위는 각 부재들의 변위기여도의 합으로 표현된다. 제약함수는 물량 분배 전후의 물량 변화가 없는 것으로 가정하였다.

$$\text{Minimize } \delta_i = \sum_{j=1}^m \frac{\delta_{ij}}{\beta_j} \quad (2)$$

$$\text{Subject to } \sum_{j=1}^m W_j = \sum_{j=1}^m \beta_j W_j \quad (3)$$

여기서 β_j , W_j 는 각각 j 번째 부재의 물량 수정계수, 물량을 나타내며, m 은 전체 부재수를 나타낸다. 식 (2)에서 변위기여도는 물량에 선형반비례 한다는 가정을 내포하고 있으며, 물량은 단면적으로 표현될 수 있으므로 설계변수는 단면적이 사용되었다. 하지만 실제로 식 (1)과 같이 축력, 전단력, 모멘트의 부재력별 변위기여도의 합으로 표현된 부재 변위기여도는 물량에 선형 반비례하지는 않는다. 그러므로 본 연구에서는 각 부재별로 가장 지배적인 부재력별 변위기여도를 구하고, 이와 관련된 부재 성능을 수정함으로서 변위를 최소화 하는 방법을 제안하였다. 본 연구에서 목적함수는 다음과 같이 수정하여 표현될 수 있다.

$$\text{Minimize } \delta_i = \sum_{j=1}^m \frac{\delta_{ij}}{\beta_j^{(n, m, s)}} \quad (4)$$

여기서, $\beta_j^{(n, m, s)}$ 는 부재력 특성을 고려한 j 번째 부재의 축력, 모멘트, 전단력에 의한 변위기여도 중 가장 지배적인 변위기여도(δ_{ij}^{\max})와 관련된 단면 성능을 변경시키는 수정계수이다. j 번째 부재의 지배적인 부재력별 변위기여도는 식 (5)과 같이 구해지며, 지배적인 부재력별 변위기여도와 관련된 단면 성능은 식 (6),(7),(8)과

같이 수정된다.

$$\delta_i^{\max} = \max \{ \delta_i^n, \delta_i^m, \delta_i^s \} \quad (5)$$

$$A_i^{\text{new}} = A_i^{\text{ini}} \times \beta_i^n, \quad \text{when } \delta_i^{\max} = \delta_i^n \quad (6)$$

$$I_i^{\text{new}} = I_i^{\text{ini}} \times \beta_i^m, \quad \text{when } \delta_i^{\max} = \delta_i^m \quad (7)$$

$$A_s_i^{\text{new}} = A_s_i^{\text{ini}} \times \beta_i^v, \quad \text{when } \delta_i^{\max} = \delta_i^v \quad (8)$$

여기서, A , I , A_s 는 각각 단면적, 단면 이차 모멘트, 전단면적을 나타내며, ini , new 는 각각 초기단계와 재분배 후 단계를 나타낸다.

4. 적용

본 20층 강집-골조 전단벽 구조물은 높이 80M, 밀면길이 36M이며, 160개의 철골 부재와 20개의 철근 콘크리트 전단벽으로 구성되어 있다. 초기 설계된 철골 부재의 종류와 전단벽의 두께는 표 1과 같으며 구조물 형상은 그림 8과 같다. 철골 부재의 항복강도 및 탄성계수는 각각 2400kgf/cm^2 , $2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 이며, 철근의 항복강도는 4000kgf/cm^2 이다. 풍하중은 대한건축학회 「건축물 하중기준 및 해설」에 따라 분담면적을 8m로 가정하여 산정하여 건물에 +x, -x 방향으로 작용시켰다. 사하중과 활하중은 각각 보에 4000 kgf/m , 1600 kgf/m 의 등분포 하중으로 가정하였다. 제어하고자하는 건물 최상층변위는 건물 높이의 0.2%(16cm)로 가정하였다. 본 예제는 AID-ASD 83의 하중 조합에 대한 강도조건을 만족한다. 그림 1은 20층 예제 구조물의 단면도를 나타내며, 그림 2는 강도설계 모듈과 결합된 변위조절설계 모델을 나타낸다.

4. 1. 단면적을 설계변수로 한 경우 (CASE I)

초기에 결정된 부재와 하중에 의한 부재력을 이용하여 제안된 변위설계 모델로 구조물 최상층 변위를 예측하면, 변위는 11.73cm로 예측되며, 이는 상용 구조해석 소프트웨어에서 구해진 11.60cm와 거의 일치한다. 변위설계 모델에 따라 단면적을 설계 변수로 하여 물량을 수정하면, 전체 물량의 증감없이 변위는 8.54cm로 초기 변위의 73%로 감소한다. 보의 변위기여도는 보 물량이 증가함에 따라 감소하였으며, 기둥과 전단벽의 변위기여도는 기둥과 보 물량의 감소에도 불구하고 감소하였다. 물량 재분배후 예측 변위가 허용변위를 만족하므로 변위를 만족시키기 위한 추가 물량을 필요치 않다. 하지만 강도체크 단계에서 물량은 2.4%증가하며, 변위는 8.39cm로 감소한다. 예측된 변위를 검증하기 위해 변경된 구조물을 상용 구조해석 소프트웨어를 이용하여 재해석하였다. 상용 구조해석 소프트웨어를 이용하여 구한 변위는 7.16cm로서 예측 변위 8.39cm와는 17%의 오차를 보인다. 이러한 오차는 부정정 구조물에서 부재 강성이 달라지면서 응력 재분배가 일어났기 때문이다. 수정된 단면적 성능에 대한 상용 구조해석 소프트웨어를 통해 얻어진 부재력과 부재 성능을 이용하여 변위설계 모델로 재해석 하면 7.28cm의 변위를 얻을 수 있으며 이는 상용 구조해석 소프트웨어의 해석 변위인 7.16cm와 근사한 값이다. 초기 모델에서 층간변위는 0.75cm로 16층에서 발생하였으나, 변위설계 후 14층에서 최대 0.49cm로 감소하였다. 표 1은 설계변수를 단면적으로 했을 경우, 변위조절 설계에 따른 물량과 변위기여도의 변화를 나타낸다. 그림 3, 4는 단면적을 설계변수로 사용하였을 경우 변위기여도와 물량의 변화를 나타낸다.

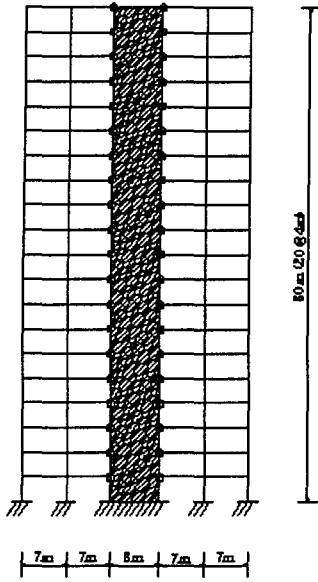


그림 1. 20층 예제 단면도

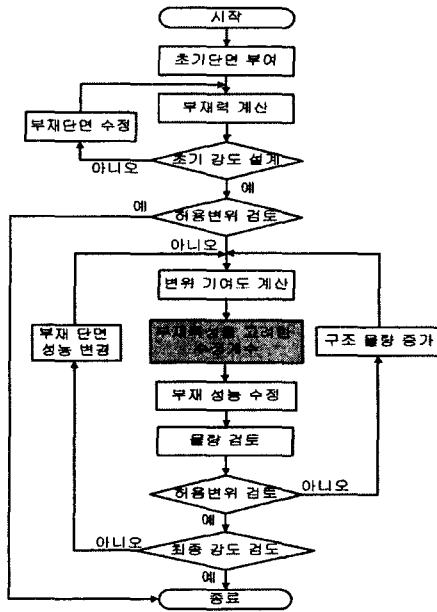


그림 2. 고층 구조물의 변위설계 모델

표 1. 물량과 변위기여도의 변화 (CASE I)

물량 (단위: tonf)		초기	재분배후	강도체크후	재해석
		기둥	82.78	67.98	75.32
보		71.87	89.57	91.35	91.35
전단벽		219.80	216.90	216.90	216.90
전체		374.45	374.45	383.57	383.57
변위기여도 (단위: cm)	기둥	1.71	1.65	1.55	1.89
	보	3.08	1.33	1.28	1.96
	전단벽	6.94	5.56	5.56	3.42
전체		11.73	8.54	8.39	7.28
최상층 변위 (단위: cm)	상용				
	소프트웨어	11.60	-	-	7.16

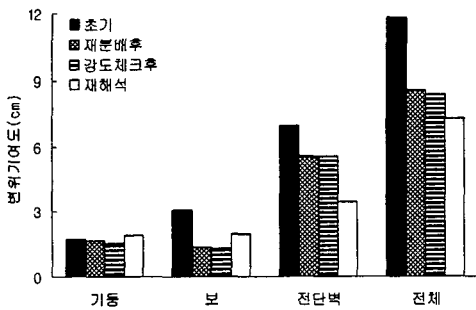


그림 3. 변위기여도 (CASE I)

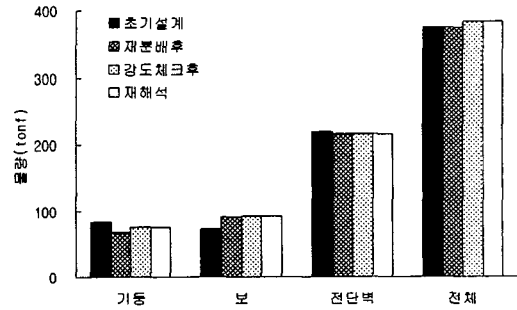


그림 4. 물량 (CASE I)

4. 2. 부재력 특성을 고려한 설계변수를 사용한 경우 (CASE II)

초기 해석 결과는 CASE I과 동일하다. CASE II에서는 재분배시 부재력 특성을 고려하여 부재별로 다른 설계변수를 사용한다. 즉, 각 부재별로 가장 지배적인 부재력별 변위기여도를 구하고, 이에 해당하는 부재 성능을 수정하여 변위를 최소화 시키는 방법이다. 초기 해석시 변위는 11.73cm에서 부재력 특성을 고려하여 재분배하면, 예측변위는 9.43cm로 초기 변위의 80.4%로 감소한다. 표 2는 부재력 특성을 고려한 설계 변수를 사용한 경우의 변위기여도와 물량의 변화를 나타낸다. 재분배후 물량은 6.2% 감소하는데 이는 CASE I 과는 달리 수정계수를 지배적인 부재력별 변위기여도와 관련된 단면성능에 직접 곱하여 부재 성능을 수정했기 때문이다. 대부분의 보 부재는 휨에 의해서 지배되므로 CASE I과 비교하여 재분배후 보의 변위기여도와 물량이 상이함이 알 수 있다. 재분배후 예측 변위 9.43cm는 허용변위를 만족하므로 변위제어를 위한 추가 물량은 필요치 않으나, 강도체크 단계에서 물량이 다소 늘어나며, 변위는 9.34cm로 초기 변위의 79.6%로 감소한다. 예측된 변위를 검증하기 위해 변경된 구조물을 상용 구조해석 소프트웨어를 이용하여 재해석하였다. 상용 구조해석 소프트웨어를 이용하여 구한 변위는 8.79cm로서 예측 변위 9.35cm와는 5.9%의 오차를 보이며, 이는 CASE I 보다는 적은 오차이다.

표 2. 물량과 변위기여도의 변화 (CASE II)

물량 (단위: tonf)		초기	재분배후	강도체크후	재해석
	기둥		82.78	67.78	73.59
보		71.87	66.50	67.21	67.21
전단벽		219.80	216.90	216.90	216.90
전체		374.45	351.18	357.69	357.69
변위기여도 (단위: cm)	기둥	1.71	1.66	1.60	1.59
	보	3.08	2.20	2.08	2.55
	전단벽	6.94	5.56	5.56	4.77
	전체	11.73	9.43	9.35	8.91
최상층 변위 (단위: cm)	상용	11.60	-	-	8.79
	소프트웨어				

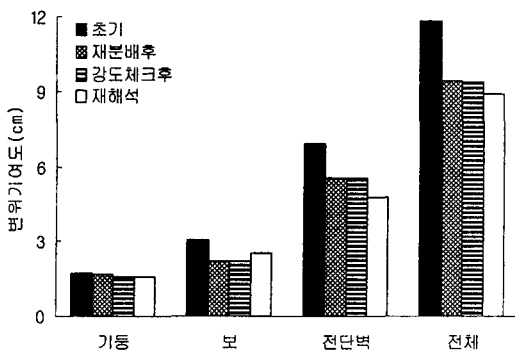


그림 5. 변위기여도 (CASE II)

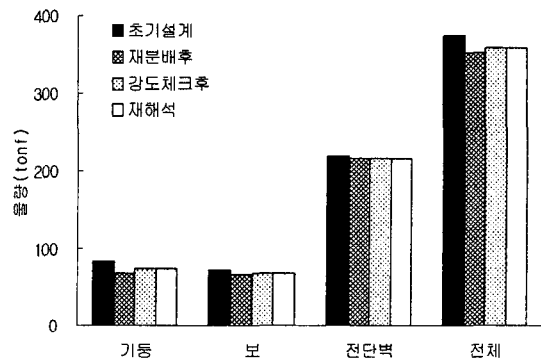


그림 6. 물량 (CASE II)

수정된 단면성능에 대한 상용 구조해석 소프트웨어를 통해 얻어진 부재력과 부재 성능을 이용하여 변위설계

모델로 재해석 하면, 8.91cm의 변위를 얻을 수 있으며 이는 상용 구조해석 소프트웨어의 해석 변위인 8.78cm와 근사한 값이다. 초기 모델에서 층간변위는 0.75cm로 16층에서 발생하였으나, 변위설계 후 14층에서 최대 0.61cm로 감소하였다. 표 2는 부재 특성을 고려한 설계변수를 사용하여 재분배 했을 경우, 변위조절 설계에 따른 물량과 변위기여도의 변화를 나타낸다. 그림 7, 8은 변위와 층간변위를 나타낸다. 변위와 층간 변위는 CASE I이 작게 나오지만 물량은 CASE II가 오히려 작음을 알 수 있다.

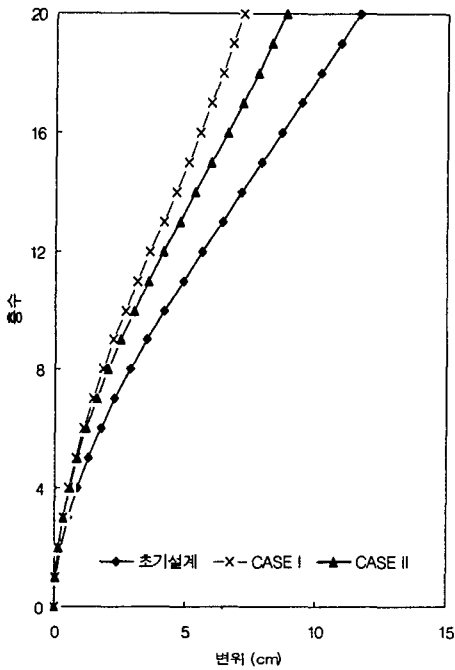


그림 7. 변위

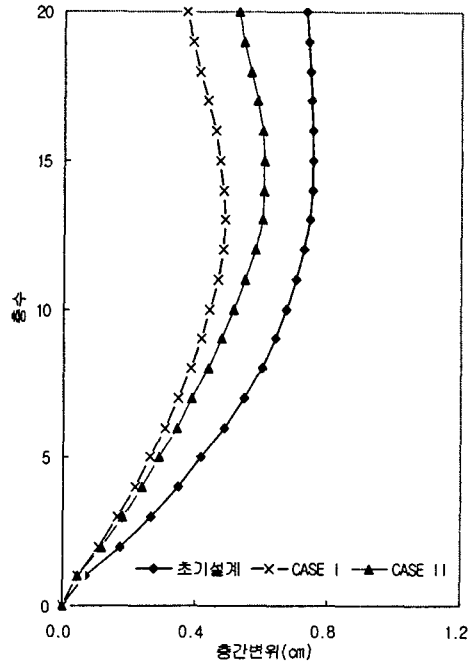


그림 8. 층간 변위

5. 결론

선행 연구^{(6),(7),(8),(9)}에서 단면적을 설계변수로 하여 재분배가 이루어졌으나, 변위기여도가 반드시 단면적에 선형 반비례 하지는 않으므로, 본 연구에서는 부재력 특성을 고려하여 부재별로 지배적인 부재력별 변위기여도를 구하고 이에 해당하는 단면 성능을 설계 변수로 사용하여 부재 성능을 변경시킴으로써 변위를 제어하였다. 이러한 방법을 20층 예제 구조물에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 일률적으로 단면적을 설계변수로 사용한 경우, 변위조절 설계 후 변위, 층간변위는 각각 38%, 35% 감소하며, 물량은 2% 증가하였다.
- 2) 부재력 특성을 고려하여 설계변수를 사용한 경우, 변위조절 설계 후 변위, 층간 변위는 각각 24%, 19% 감소하였으며, 물량은 5% 감소하였다.
- 3) 부재력 특성을 고려하여 설계변수를 사용한 경우가 변위, 층간 변위의 감소율은 작았지만, 물량 측면에서는 더 유리함을 알 수 있었다.

4) 부재력 특성을 고려한 설계변수를 사용한 경우가 변위설계후 예측 변위와 변경된 단면 성능에 대한 재해석 변위와의 오차가 적음을 알 수 있는데, 이는 단면적을 통한 간접적인 부재 성능 조절이 아닌 직접적인 부재 성능을 조절했기 때문인 것으로 사료된다.

이상과 같이 부재력 특성을 고려하여 변위설계를 하는 경우, 물량 측면에서도 효과적이고, 변위 예측에서도 정확성을 높일 수 있는 방법임을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부의 산·학·연 공동연구개발사업 (과제번호: C102A1000004-02A0200-00410)의 일부로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Chan, C. M., and Grierson, D. E., "An efficient resizing techniques for the design of tall buildings subject to multiple drift constraints", The Structural Design of Tall Buildings, Vol. 2, No. 1, 1993, pp. 17-32.
2. Chan, C. M., Grierson D.E., Sherbourne A. N. 1995. "Automatic optimal design of tall steel building frameworks", Journal of Structural Engineering, ASCE, 121(5), 838-847
3. Chan, C. M. Optimal lateral stiffness design of tall buildings of mixed steel and concrete construction. The Structural Design of Tall Buildings, 10: 155-177.
4. Panagiotis A. Makris, Christopher G. Probatidis. 2002. Weight minimization of displacement-constrained struss structures using a strain energy criterion, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 191: 2159-2177
5. Park, H. S., and Park, C. L., "Drift control of high-rise buildings with unit load method", The Structural Design of Tall Buildings, Vol. 6, No. 1, 1997, pp. 23-35.
6. Park, H. S. and Ahn, S. A. " Resizing Methods for Drift Control of Tall Steel Structures ", Structural Steel PSSC' 98 Vol 2. pp 1017-1022.
7. 서지현, 박효선 "재분배기법을 이용한 고층 구조물의 수평변위 설계법", 대한 건축학회 논문집, 제17권 제9호, 2001, pp3-80.
8. Park, H. S., Hong, K. P., and Seo, J. H., "Drift Design of Steel-Frame Shear-Wall Systems for Tall Buildings", The Structural Design of Tall Buildings, Vol. 11, 2002, pp. 35-49.
9. 서지현, 박효선 "실용적인 철골 프레임-전단벽 시스템의 변위조절법 개발", 한국 강구조학회 학술발표대회 논문집, 2003, pp578-583.