

부분재해석 기법을 이용한 고층건물 횡변위제어

Lateral Drift Control of High-rise Buildings using Partial Reanalysis Algorithm

이 재 철* 김 치 경*

Lee, Jae-Cheol Kim, Chee-Kyeong

(논문접수일 : 2008년 10월 8일 ; 심사종료일 : 2009년 1월 21일)

요 지

본 논문은 부재 단위의 강성 재설계를 통해 전역 자유도 변위의 정량적 조절이 가능한 변위조절 기법의 개발을 목적으로 하고 있다. 이를 위해 부분적 강성변경이 발생했을 때 전체 구조물을 재해석하지 않고 관심있는 특정 위치의 변위와 부재력만을 실시간 응답수준에서 재계산할 수 있는 부분재해석 기법을 적용하였다. 부분재해석 기법은 복잡한 미분계산이나 반복적인 구조해석을 수행하지 않아도 되는 단순한 기본개념의 기법으로서 계산이 효율적이고 강성변경 후의 변위를 바탕으로 변위에 대한 민감도를 계산하기에 수렴 속도가 빠른 장점을 가진다. 부분재해석 기법을 통해 전역 자유도에 대한 강성 변경 부재의 변위기여도를 계산하고 변위기여도에 따라 해당 부재의 강성을 변경시킴으로써 반복적 구조해석이나 민감도 해석없이 특정 변위를 최소의 물량만으로 정량적으로 제어하는 변위조절 설계법을 제시하였다. 예제를 통한 검증결과, 부분재해석 기법이 고층건물의 횡변위제어에 효과적으로 활용될 수 있음을 확인하였다.

핵심용어 : 부분재해석, 횡변위제어, 부재강성변경, 강성등가하중

Abstract

This paper aimed at the development of a lateral drift control method that is able to quantitatively control the lateral drift of global node. For this, we applied an efficient partial reanalysis algorithm. By using this algorithm, we could recalculate the displacement and member force of the specific node without reanalyzing the entire structure when member stiffness changes partially. The theoretical concepts of the algorithm are so simple that it is not necessary to solve the complicate differential equation or to repeat the analysis of entire structure. The proposed method calculates the drift contribution of each member for the global displacement according to the variation of section sizes by using the algorithm. Then by changing the member sizes as the order of drift contribution, we could control the lateral drift of global node with a minimum quantity of materials. 20 story braced frame structure system is presented to illustrate the usefulness of proposed method. It is shown that the proposed method is very effective in lateral drift control and the results obtained by proposed method are consistent with those of commercial analysis program.

Keywords : partial reanalysis, lateral drift control, member stiffness change, equivalent load for stiffness

1. 서 론

고층건물에서는 안전성 확보를 위한 강도설계보다 풍하중이나 지진하중에 의한 횡변위 제어와 같은 사용성 확보를 위한 강성설계가 더 중요한 구조설계 결정요소로 작용한다. 최근의 초고층건물 구조계획 사례에서도 구조시스템이나 물량이 주로 사용성 문제에 의해 결정되는 경향을 볼 수 있다.

일반적으로 초고층건물의 구조계획시, 구조설계자는 건축적 요구에 의해 미리 결정된 평면형상 및 부재배치 내에서 강도설계에 의해 안전성을 만족시킨 후 사용성을 검토하고 최적의 단면을 선택하는 절차를 거치게 된다. 이때 안전성은 해당 구조부재의 단면성능을 직접 변화시킴으로써 만족시킬 수 있으나 사용성은 특정 구조부재의 단면성능 변화만으로는 만족시키기 어려운 한계가 있다. 이에 따라 개별 부재의 단면

* 책임저자, 정희원 · 동명대학교 건축공학과 조교수
Tel: 051-629-2468 ; Fax: 051-629-2459
E-mail: jcleee@tu.ac.kr

* 정희원 · 선문대학교 건축학부 교수

* 이 논문에 대한 토론을 2009년 4월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2009년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

성능을 어느 정도로 변경시키는 것이 사용성 문제에 효과적인지 판단하기 어려우며 경험과 직관에 의존한 반복적인 설계 과정에도 불구하고 최적의 선택을 담보하기 힘든 실정이다.

본 연구는 이와 같은 구조물의 사용성 문제에 수반되는 한계를 극복하기 위한 정량적 강성설계 기법의 개발을 궁극적 목적으로 수행되었다. 즉, 부재 단위의 강성 재설계를 통해 전역 자유도 변위의 정량적 조절이 가능한 변위조절 기법의 개발을 목적으로 하고 있다.

이를 위해 본 연구에서는 부분적 강성 변경이 발생했을 때 전체 구조물을 재해석하지 않고 관심있는 특정 위치의 변위와 부재력만을 실시간 응답수준에서 재계산할 수 있는 부분재해석 기법을 적용하였다. 부분재해석 기법을 통해 전역 자유도에 대한 강성 변경 부재의 변위기여도를 계산하고 변위 기여도에 따라 해당 부재의 강성을 변경시킴으로써 반복적 구조해석이나 민감도 해석없이 특정 변위를 최소의 물량만으로 정량적으로 제어하는 변위조절 설계법을 제시하고 예제를 통해 검증하였다.

2. 기존연구 고찰 및 차별화 방안

김호수 등은 민감도 해석을 이용해 전단벽 및 전단벽-골조 구조물의 횡변위를 제어할 수 있는 강성최적설계 방안을 제시하였다(김호수 등, 2006; 이한주 등, 2005). 이때 민감도 해석을 위해서는 골조와 전단벽요소 사이의 변위자유도 적합성 문제를 해결하기 위한 요소강성행렬을 구성하여야 하며, 이 과정에서 복잡한 미분 연산을 수행하여야 한다. 또한 고층건물의 부재 및 자유도수를 감안하였을 때 반복적인 구조해석이 거듭 요구되는 민감도 해석은 실용성이 떨어질 수 있다.

서지현 등은 기존 구조해석 결과에 의한 부재력을 이용하여 횡변위에 대한 각 부재들의 변위기여도를 비교적 간단한 계산을 통하여 구할 수 있는 재분배기법에 의한 변위조절 설계법을 제시하였다(서지현 등, 2006; 2004). 그러나 재분배기법에 의한 변위기여도는 강성변경이 일어나기 전의 변위에 대한 영향을 반영한 것으로서 부재에 강성변경이 일어난 후 부재력의 변화로 인해 변동되는 변위기여도를 반영하기 어렵다.

이에 앞서 국내보다 먼저 강성설계의 중요성을 인식한 선진 외국에서는 1990년대 초부터 에너지 이론에 근거한 실용적 변위조절 설계법이 다수 소개된 바 있다. Baker는 에너지 이론을 이용하여 횡변위에 상대적으로 영향이 많은 부재를 선택하고 단면성능을 수정함으로써 반복적 구조해석이나 민감도 해석없이 횡변위를 제어하는 기법을 제시하였다(Baker,

1990). 또한 Chan 등은 고층 철골 구조물을 대상으로 다수의 횡변위 제한요소를 적용한 자동 재분배기법을 제안하였다(Chan 등, 1993).

이상의 연구와 비교해 본 논문에서 제시하는 부분재해석 기법을 이용한 설계법은 민감도 해석에 비해 복잡한 미분계산이나 반복적인 구조해석을 수행하지 않아도 되는 단순한 기본 개념의 변위조절 설계법이다. 또한 재분배기법에 의한 변위기여도보다도 계산이 효율적이고 강성변경 후의 변위를 바탕으로 변위에 대한 민감도를 계산하기에 수렴 속도가 빠른 장점을 가진다.

다만 부분재해석 기법에 의한 변위조절 설계법은 여러 부재의 강성변경 시 부재간 상관관계에 의하여 예측변위가 달라지는 한계를 가지고 있다. 하지만 추후 연구과제의 진행을 통해 본 논문에서 제시한 알고리즘을 여러 부재 변경에 대한 부분재해석과 그에 따른 민감도 해석으로 확장함으로써 이 부분에 대한 해결방안을 제시할 예정이다.

3. 부분재해석 기법에 의한 변위 민감도 해석

3.1 변위 민감도 해석 개요

일반적으로 고층 구조물에 적용되는 횡변위 구속조건은 최상층 변위와 층간변위 제한이 있으나, 본 논문은 최상층 변위 제어를 중심으로 기술하며 층간변위 제어도 동일한 기법이 적용될 수 있다. 최상층 변위구속조건식은 다음 식으로 요약된다.

$$u_i(x) \leq d_i h_i \tag{1}$$

여기에서 x 는 구조물 강성 등의 설계변수, $u_i(x)$ 는 최상층의 횡변위를 의미하고 d_i 는 최상층 허용 횡변위비율, 그리고 h_i 는 건물의 전체높이를 나타낸다. 즉 구조물 강성을 나타내는 설계변수 x 를 조절하여 최상층의 횡변위 $u_i(x)$ 를 건물 전체높이 h_i 의 목표 비율 d_i 이하로 제어하는 것이다.

이러한 횡변위 구속조건은 다음 식에서 보는 바와 같이 일차 테일러 전개식을 최상층 변위구속조건식에 도입하고, 부재단면 재설계를 통하여 다음 식을 만족하는 최적의 설계변수 x_i 들을 찾아냄으로써 만족될 수 있다. 여기에서 윗 첨자 '0'는 현 설계단계에서의 값들을 나타낸다.

$$d_i h_i - u_i^0 - \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right)^0 (x_i - x_i^0) \geq 0 \tag{2}$$

위 식에서 $\partial u_i / \partial x_i$ 는 최상층 변위에 대한 각 설계변수의 민감도인데, 이를 구하기 위하여 김호수 등은 각 설계변수에 대한 구조물 강성행렬의 도함수를 사용하였고(김호수 등, 2006), 서지현 등은 각 부재의 변위기여도계수를 구하는 방법을 사용하기도 하였다(서지현 등, 2006). 하지만 강성행렬에 대한 도함수, 또는 변위기여도계수를 구하기 위해서는 복잡한 계산 알고리즘과 엄청난 계산량을 필요로 하며, 변위기여도계수는 각 부재 강성 변화에 따른 응력재분배 효과가 반영되지 않아 민감도로서 정확성이 떨어지는 단점이 있다.

3.2 제안 기법의 개념

식 (2)에서 각 설계변수의 민감도 $\partial u_i / \partial x_i$ 를 계산하기 위한 또 다른 한 가지 방법은 각 부재의 강성을 변경해 가며 재해석한 후 최상층 변위를 확인하는 것이다. 이 방법은 개념적으로 단순하고, 각 부재 강성 변경 후 응력재분배 효과도 반영할 수 있는 장점이 있지만, 각 부재의 단면개수만큼 재해석을 수행하여야 하므로 계산량 면에서 매우 비효율적이고 비현실적이다.

본 연구에서 제안하는 민감도 해석 기법은 각 부재의 강성을 단면크기별로 변경하며 재해석하여 각 부재의 민감도를 계산하되, 전체 구조물을 재해석하지 않고 강성을 변경한 부재 부분만을 재해석하는 부분재해석 기법을 사용한다. 김치경이 발표한 바 있는 “적응형 부구조물화를 이용한 부분재해석(PRAS : Partial Reanalysis using Adaptable Substructuring)” 알고리즘은 구조물에 부분적인 강성 변경이 있을 때 전체구조물을 재해석하지 않고도 관심을 두고있는 변위(이하 “관심변위”라 함) 또는 부재력을 직접 구할 수 있는 기법이다(김치경, 2004).

다음은 상기 PRAS 알고리즘을 이용하여 최상층 변위에 대한 각 부재의 변위 민감도를 해석하는 개념적 절차이다.

- (1) 초기해석을 실시하고, 횡변위 제어조건이 설정되어 있는 관심변위(자유도)를 선택한다. 그림 1(a)에서 관심변위인 최상층 횡변위가 별표로 표시되었다.
- (2) 관심변위에 대한 민감도 해석을 수행할 부재를 선택

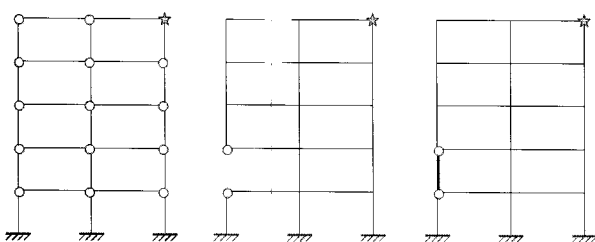


그림 1 부분재해석 기법의 개념적 절차

한 후 적응형 부구조물화 기법에 의하여 해당 부재에 직접 연결된 자유도와 관심자유도만으로 구조물강성행렬을 정적응축한다. 정적응축 후 남게되는 이러한 자유도들을 합쳐 이후에는 잔류자유도라 칭하기로 한다.

- (3) 그림 1(b)에서 보는 바와 같이 정적응축된 구조물강성행렬에서 선택부재의 요소강성행렬을 제거한다.
- (4) 그림 1(c)에서 보는 바와 같이 강성이 변경된 선택부재의 요소강성행렬을 선택부재의 요소강성행렬이 제거된 구조물강성행렬과 결합한다.
- (5) 변경된 응축 구조물강성행렬을 이용하여 관심변위를 계산한 후, 초기 관심변위와의 차이를 구하면 이 값이 해당 선택부재의 관심변위에 대한 민감도이다.
- (6) 모든 부재에 대하여 (2)~(5)단계를 반복함으로써 모든 부재의 민감도를 구할 수 있다.

이상의 과정에서 주목할 부분은 2단계에서 구조물강성행렬을 정적응축하는 방법이다. 일반적으로 정적응축 과정은 가우스소거 등의 방법으로 수행되는 연립방정식 풀이 과정과 동일하며 결국 동일한 계산량을 요구한다. 반면 본 연구에서는 초기 해석 과정에서 계산된 초기구조물 강성행렬에 대한 역행렬을 반복적으로 이용하여 정적응축을 위한 추가의 계산량을 최소화하는 적응형 부구조물화 기법을 이용함으로써 계산 효율을 극대화한다.

제안 기법의 또 하나 장점은 정적응축 후 남게되는 잔류자유도에 관심자유도를 포함시킴으로써 전체 구조물에 대한 재해석없이 각 부재 강성 변경에 따른 관심자유도 변위를 바로 구할 수 있다는 점이다.

다음 절에서는 이상에서 기술한 부분재해석 개념의 상세 계산 절차를 제시한다.

3.3 부분재해석 상세 절차

매트릭스법 또는 유한요소법에 의한 구조해석 시 평형방정식은 식 (3)으로 구성되고, 식 (4)에 보는 바와 같이 강성행렬의 역행렬을 구함으로써 해를 구할 수 있고, 특히 횡변위 제어의 대상이 되는 최상층 횡변위, 즉 관심변위를 확인한다.

$$Ku = r \tag{3}$$

$$u = K^{-1}r \tag{4}$$

여기에서 K 는 구조물강성행렬을, u 는 변위벡터, r 은 하중 벡터를 의미한다.

다음 단계는 적응형 부구조물화 기법을 이용하여 특정 선

택부재의 강성을 일정비율로 변경한 후의 관심변위를 구하는 것이다. 이를 위하여 구조물강성행렬을 재구성하여 식 (5)에 보는 바와 같이 잔류자유도와 소거자유도로 블록화하고, 잔류자유도 각각에 단위하중을 주어 잔류자유도에 발생하는 변위벡터 F_r 을 구한다. 이 식에서 아래첨자 r 은 잔류자유도를, c 는 소거자유도를 의미하고, I 는 대각요소가 1인 단위행렬(identity matrix)을, 0은 영행렬로서 이들의 열(column) 수는 잔류자유도 수와 같다.

$$\begin{bmatrix} K_{cc} & K_{cr} \\ K_{rc} & K_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_c \\ F_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} \quad (5)$$

이때 식 (4)의 초기해석 시 구해진 역행렬을 이용하면, 추가의 역행렬 계산없이 단위하중으로 구성된 새로운 하중벡터에 대한 후방대입만으로 F_r 을 구할 수 있다.

한편 식 (5)에서 구한 F_r 은 잔류자유도에 대한 유연성행렬이고, 다음 식 (6)에서 보는 바와 같이 F_r 의 역행렬을 구함으로써 잔류자유도로 응축된 구조물강성행렬 \bar{K} 을 계산할 수 있다.

$$\bar{K} = F_r^{-1} \quad (6)$$

이와 같이 구해진 응축 구조물강성행렬 \bar{K} 는 관심변위에 대한 민감도 계산을 위해 강도를 변경한 선택부재의 요소강성행렬 K_i 와 선택부재를 제외한 구조물의 잔류자유도에 대한 응축 강성행렬 \bar{K}_u 의 합으로 표현될 수 있다. 즉 \bar{K}_u 는 그림 1(b)에 보는 바와 같이 선택부재가 제거된 구조물의 잔류자유도에 대한 응축 강성행렬이다.

$$\bar{K} = \bar{K}_u + K_i \quad (7)$$

$$\bar{K}_u = \bar{K} - K_i \quad (8)$$

강성이 변경된 선택부재의 요소강성행렬 K_i^{new} 을 \bar{K}_u 와 결합함으로써 그림 1(c)에 보는 바와 같은 잔류자유도로 응축된 새로운 구조물강성행렬 \bar{K}^{new} 를 계산할 수 있다.

$$\bar{K}^{new} = \bar{K}_u + K_i^{new} \quad (9)$$

마지막으로 다음 식에 의하여 선택부재 강성 변경 후 변위벡터를 구하고, 초기해석 대비 관심변위의 변화량이 해당 선택부재의 관심변위에 대한 민감도가 된다.

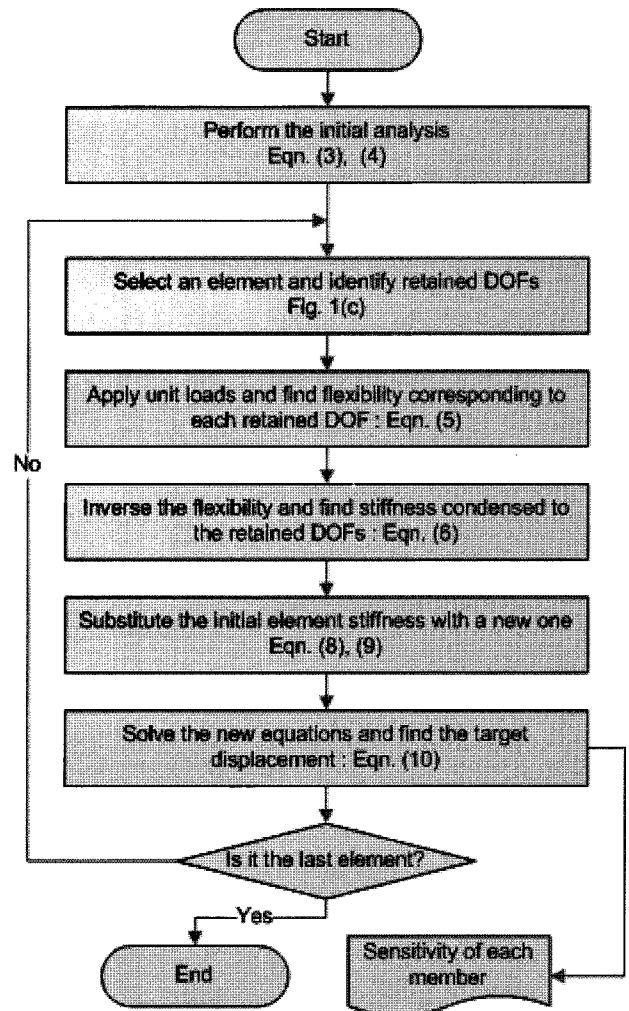


그림 2 부분재해석 알고리즘 절차

$$\bar{K}^{new} u_r^{new} = \bar{r} \quad (10)$$

여기에서 \bar{r} 은 잔류자유도로 응축된 하중벡터로서 초기 응축 구조물강성행렬 \bar{K} 에 초기해석 시 계산된 변위벡터 중 잔류자유도에 해당하는 요소만으로 구성된 변위벡터 u_r 을 곱하여 계산할 수 있다.

$$\bar{r} = \bar{K}u_r \quad (11)$$

이상의 과정을 순서대로 정리하면 그림 2와 같다.

3.4 계산 효율 분석

본 절에서는 관심변위에 대한 부재 민감도 계산 시 본 연구에서 제안한 부분재해석 기법에 의하여 계산할 때 소요되는 계산량을 정량적으로 산정하여 이를 전체 구조물 해석 시 계산량과 비교해 봄으로써 제안 기법의 효율성을 평가한다.

표 1 전체 구조물 해석과 부분구조물 해석의 평형방정식 풀이 계산량 평가 비교

Process	Total Reanalysis		Partial Reanalysis for the Change of an Element		
	Forward Reduction	Backward Substitution	Flexibility Matrix (Eqn. 5)	Condensed Stiffness (Eqn. 6)	Solve new equations (Eqn. 10)
Number of Operations	$0.5NM^2$	$2NM$	$2NML$	$2.5L^3$	$0.5L^3+2L^2$
	$0.5NM^2+2NM$		$2NML+3L^3+2L^2$		
Example (40 nodes per a story, 50 stories)	345,600,000	5,760,000	74,880,000	5,493	1,437
	351,360,000		74,886,930		

(N : 전체 자유도 수, 2×M : 강성행렬 밴드 폭, L : 잔류자유도 수)

효율성 비교는 구조해석 시 계산량이 집중되어 있는 평형방정식 풀이 과정에 대하여 계산부하가 큰 승제연산 수를 기준으로 하며 밴드화된 강성행렬이 사용되는 것으로 가정한다.

평형방정식의 해는 크게 전방소거와 후방대입으로 구성되며, 방정식 수를 N이라 할 때 계수소거에 $0.5N^3$, 후방대입에 $2N^2$ 의 승제 연산량이 소요된다. 한편 강성행렬의 밴드폭을 2M이라 할 때 연산량은 각각 $0.5NM^2$, $2NM$ 으로 줄어들게 된다. 이를 바탕으로 두 기법의 관심 변위 계산에 소요되는 연산량을 비교하면 표 1과 같다. 즉 전체 구조물 해석 시 구조물강성행렬의 전방소거와 후방대입에 $0.5NM^2+2NM$ 승제연산이 필요하다.

한편 제안된 기법에서는 선택부재가 직접 연결된 자유도 수와 관심자유도 수를 합친 잔류자유도 수를 L이라 할 때, 식 (5)에 의하여 잔류자유도에 대한 유연성행렬 F_r 계산 과정과 식 (6)에 의한 응축 구조물강성행렬 \bar{K} 계산, 그리고 식 (10)에 의한 관심변위 계산이 요구된다. 식 (5)에 의한 유연성 계산은 초기해석 시 계산된 역행렬을 이용하여 각 잔류자유도에 작용하는 단위하중벡터에 대한 후방대입만으로 구할 수 있으므로 $2NML$ 의 계산량이 요구된다. 다음으로 응축 구조물강성행렬의 크기는 잔류자유도 수 L이므로, 식 (6)의 역행렬 계산에 $2.5L^3$, 식 (10)의 관심변위 계산에 $0.5L^3+2L^2$ 의 승제연산이 필요하다.

한 층에 40개의 절점을 갖는 50층 건물을 해석하는데 필요한 연산수를 비교한 예를 표 1에 나타내었다. 여기에서 한 절점은 6개의 자유도를 가지므로, 한 층의 자유도 수와 같게 되는 강성행렬의 1/2 밴드폭 M은 240이고, 전체 자유도 수 N은 12,000이며, 2개의 절점에 연결되는 보요소를 기준으로 부재자유도 12에 관심자유도인 최상층 횡변위 하나를 더하여 잔류자유도 수 L은 13이 된다.

4. 부분구조물 민감도를 이용한 변위제어 설계

이상에서 상술한 바와 같이, 본 연구에서 제안하는 변위조절 설계법은 부분재해석 기법을 이용한다. 부분재해석 기법

은 대상 구조물을 강성변경부분과 강성고정부분으로 구분하고 강성고정부분을 양 부분이 공유하는 자유도만을 갖는 부구조물로 응축한 후, 강성변경부재들과 강성고정부분 부구조물의 결합으로 전체 구조물을 모델링함으로써 최종 평형방정식의 자유도수를 공유자유도수 정도로 줄이는 기법이다(김치경, 2004). 이를 통해 일단 초기 해석이 한번 수행되면 이후 부분적 강성변경에 따른 재해석시 계산량을 획기적으로 줄일 수 있음을 정량적으로 확인하였다.

부분재해석 기법에 의한 변위기여도는 구조해석 결과에 의한 부재력을 이용하여 횡변위에 대한 각 부재들의 변위기여도를 계산한 것으로 민감도 해석에 의한 민감도계수나 재분배기법에 의한 변위기여도와 같은 의미를 갖는다. 그러나 민감도 해석에 의한 민감도계수 방법에 비해 상당히 적은 계산량을 필요로 하며, 재분배기법에 의한 변위기여도와는 달리 각 부재 강성 변화에 따른 응력재분배 효과를 반영할 수 있는 장점을 가지고 있다.

본 논문에서 제안한 변위조절 설계법은 현재 단계의 최상층변위가 허용변위를 초과할 경우 모든 부재의 순차적 단면 크기 변경을 통해 변위기여도를 계산해 낸 후, 단위면적당 변위기여도가 높은 일부 부재의 단면크기만을 변경함으로써 최상층변위를 허용변위 이하로 제어하면서 이에 필요한 물량의 변화량은 최소가 되도록 하는 것을 목적으로 한다.

본 논문에서 제안하는 부분재해석 기법을 이용한 변위조절 설계법의 절차는 그림 3과 같다.

- (1) 먼저 부분재해석 기법을 이용하여 초기 구조모델의 최상층변위와 각 부재의 단면크기별 변위기여도 및 단위면적당 변위기여도를 계산한다.
- (2) 단위면적당 변위기여도가 큰 순서로 각 부재별 단면 크기를 정렬한다.
- (3) 최상층변위 제어를 위해 요구되는 변위감소 요구량을 입력한다.
- (4) 요구되는 변위의 감소를 위해 변경이 필요한 부재 번호와 단면크기를 검색한다. 이때 동일 부재 번호인 경

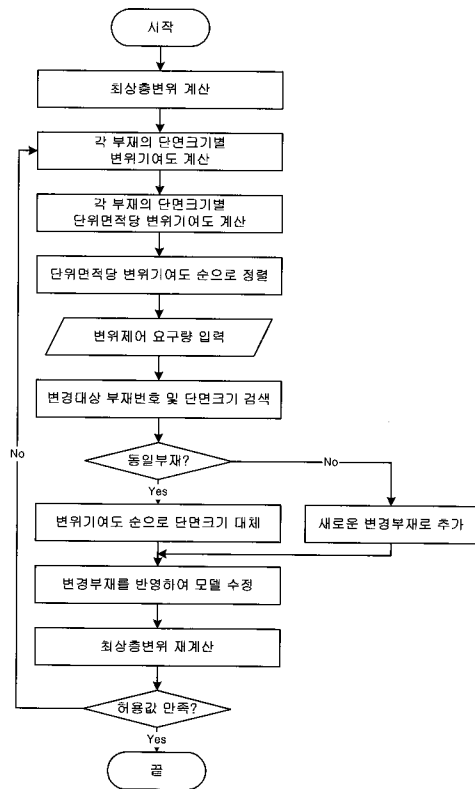


그림 3 부분재해석 기법을 이용한 변위제어 절차

우에는 요구되는 변위를 만족할 때까지는 단위면적당 변위기여도는 작더라도 변위기여도가 큰 단면크기로 대체하여 선택한다. 부재 번호가 다른 경우에는 요구 변위를 만족할 때까지 새로운 변경부재로 추가시킨다.

- (5) 변경부재를 반영해 모델을 수정한 후, 부분재해석 기법의 재실행을 통해 최상층변위와 각 부재의 단면크기별 변위기여도 및 단위면적당 변위기여도를 다시 계산한다.
- (6) 최상층변위가 허용값을 만족할 때까지 (2)~(5)의 과정을 반복한다.

부분재해석 기법은 거의 실시간 수준에서 재해석이 가능하기 때문에 각 부재별로 다양한 강성변경을 적용시킨 결과를 효과적으로 분석할 수 있다. 즉, 부분재해석 기법은 특정 부재 단면크기의 변경과 같은 미세한 강성의 변경이 최상층변위에 미치는 영향을 정량적으로 분석하는데 효과적으로 활용할 수 있다. 기존의 변위제어 설계법에서는 부재 그룹핑을 통해 몇 개의 부재 그룹 수준에서 강성변경이 수행되었으나 본 논문에서 제안한 부분재해석 기법을 이용하면 각각의 개별적인 부재 수준에서 발생하는 연속적인 강성변경의 효과를 적은 계산량으로 검토할 수 있다.

일반적으로 부재의 강성증가로 인해 최상층변위는 비선형

적으로 감소한다. 개별 부재 수준의 강성변경의 경우에는 앞서 설명한 부분재해석 변위조절 설계절차의 변위감소 요구량의 값을 충분히 작게 하여 반복 적용시킴으로써 이러한 비선형적 감소경향을 완화시킬 수 있다.

그러나 다수 부재의 강성변경이 동시에 발생하는 경우, 본 논문에서 제시한 부분재해석 기법에서는 최상층변위의 비선형성을 반영하지 못해 예측변위에 오차가 발생하는 한계가 있다. 본 연구진은 부재간 강성변경 효과의 상관관계 분석을 통해 다수 부재 강성변경에 따른 문제를 해결하기 위한 연구를 수행할 예정이다.

5. 적용 예제

본 논문에서 제시한 변위조절 설계법의 효율성을 검토하기 위하여 그림 4와 같은 20층 철근콘크리트 골조 가새 구조물의 변위설계에 적용하였다.

적용모델의 층고는 4.0m이고, 적용하중은 각 층 레벨에서 수평방향으로 집중하중이 작용하는 것으로 가정하였으며 적용모델의 초기부재 크기는 표 2와 같다. 사용재료는 콘크리트의 경우 $f_{ck}=24\text{MPa}$, 철골의 경우 SS400으로 가정하였다.

초기 구조모델의 부재크기는 초기 강도설계를 통해 강도조건을 만족하는 부재로 선택하였으며 허용 최상층변위는 건

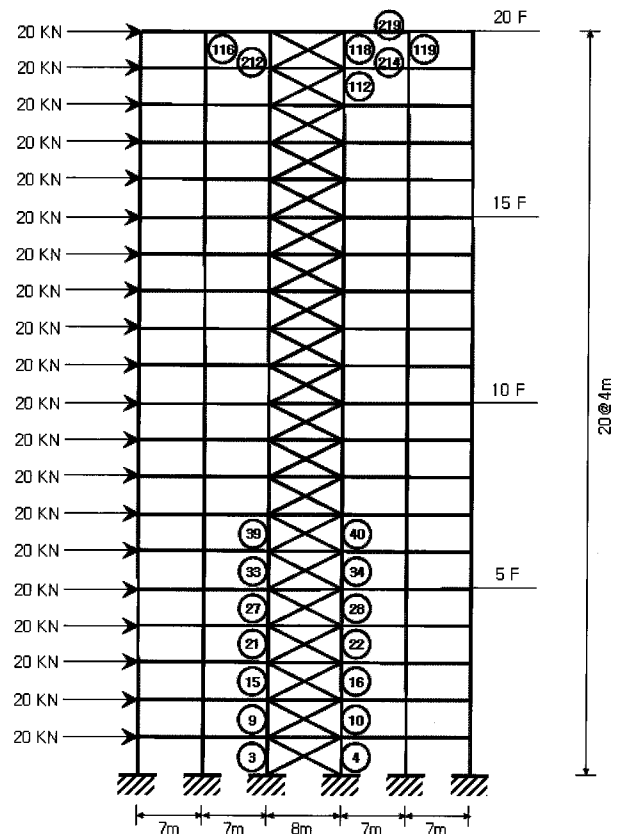


그림 4 20층 철근콘크리트 골조 가새 구조물 예제 모델

표 2 적용모델의 초기 설계 부재 크기(mm)

층	부재	기둥	보	가새
15~20	C3	200×200	200×300	H-300×300×10×15
10~15	C2	250×250		H-428×407×20×35
5~10	C2	250×250		
1~5	C1	300×300		

표 3 반복과정에 따른 예제 검토 결과

Step	요구변위 감소량 (mm)	변경 부재 번호	초기 단면크기 (mm×mm)	변경 단면크기 (mm×mm)	변위기여도 합계 (mm)	단면변경 후 변위 (mm)
1	20	3	300×300	400×550	20.3	248.9
		4	300×300	400×550		
2	20	9	300×300	400×600	21.2	228.2
		10	300×300	400×600		
		119	200×200	200×400		
3	20	15	300×300	350×650	23.0	203.7
		16	300×300	350×600		
		33	250×250	400×550		
		34	250×250	250×500		
4	20	21	300×300	400×600	22.3	182.1
		22	300×300	400×550		
		214	200×300	250×500		
		116	200×200	200×400		
		40	250×250	250×500		
5	20	39	250×250	400×500	23.4	161.7
		118	200×200	250×500		
		212	200×300	250×500		
		28	300×300	350×600		
		112	200×200	250×500		
		27	300×300	300×600		
6	2	219	200×300	300×600	5.9	155.8

물 전체높이의 1/500인 160mm로 하였다.

횡변위 제어 과정에서 채설제되는 골조부재의 단면크기는 폭의 경우 200mm에서 500mm까지 50mm 단위로 증가시켰으며, 층은 폭의 2배 이내의 범위로 가정하였다. 즉, 200×200~200×400, 250×250~250×500, 300×300~300×600, 350×350~350×700, 400×400~400×800, 450×450~450×900, 500×500~500×1000까지 총 56개의 단면에 대해 부재별로 단면크기를 변경해가면서 부분재해석을 수행하였다.

적용 예제의 경우, 보와 기둥의 부재 수는 220개, 단면개수는 56개로서 재해석 횟수는 총 12,320회(220×56=12,320)에 이른다. 부재 단면크기의 변경 이외에는 추가의 변화가 없는 이와 같은 방대한 양의 반복적 재해석을 빠른 시간 안에 수행할 수 있는 것이 부분재해석 기법이 가지는 장점이다.

초기 구조모델의 해석 결과, 최상층변위는 268.6mm로 허용값인 160mm를 만족하려면 약 109mm의 변위제어가 필요한 것으로 나타났다. 이때 초기단면을 어떻게 가정하는

표 4 변위제어 적용기법에 따른 물량증가율 비교

비교항목	적용기법	부분재해석	민감도해석	
			Group-1	Group-2
반복수		6	6	6
변위 (mm)	허용변위	H/500=160	H/500=120	H/500=120
	초기변위	268.6	209.4	209.4
	최종변위	155.8	119.5	119.3
물량 (kN)	초기물량	1284.2	1267.2	1267.2
	최종물량	1493.8	1539.9	1552.3
	물량증가율	16.3%	21.5%	22.5%

나에 따라 제어해야 할 변위요구량이 달라지므로 반복횟수에 영향을 줄 수 있다. 그러나 반복적 재해석을 빠른 시간 안에 수행할 수 있는 제안 기법의 장점을 고려하면 큰 영향은 없으며, 적용 예제와 같이 강도설계를 통해 강도조건을 만족하는 수준으로 초기 단면을 가정하는 것이 일반적이다.

본 예제에서는 부재 강성변경으로 인한 최상층변위의 비선형적 감소경향을 고려하여 부분재해석 기법을 통한 1회 변위 제어 요구량을 전체 변위제어 요구량의 약 20% 수준인 20mm로 설정하여 변위제어를 수행하였다. 그 결과, 21개 부재의 단면변경을 통한 총 6회의 반복계산 수행 후 최상층 변위를 허용값 이내로 제어할 수 있었다.

표 3은 반복과정에 따른 변경부재 번호와 변경 단면크기, 단면변경으로 인한 변위기여도 합, 단면변경 후의 변위 등 예제 검토 결과를 요약하여 나타낸 것이다. 그림 4에 부분재해석 기법의 적용을 통해 단면이 변경된 부재들을 표시하였으며, 주로 저층부 코어 기둥이 변위기여도가 커 단면변경 대상이 되었음을 알 수 있다.

골조 해석 전용 프로그램을 이용한 해석 결과는 초기변위 266.57mm, 부분재해석 기법을 통해 선정된 변경 부재로 수정한 후의 변위 155.03mm로서 부분재해석 기법에 의한 예측값 155.8mm와 0.5%의 수준의 오차를 보여 매우 정확한 결과를 얻을 수 있었다.

표 4는 본 논문에서 제안한 부분재해석 기법에 의한 변위 제어 결과의 효율성을 검토하기 위하여 민감도해석을 이용한 기존의 강성최적설계 결과와 비교한 것이다. 여기서 민감도 해석에 적용된 모델은 20층 규모, 층고 3.0m이고 적용하중은 본 논문에서 검토한 예제와 동일하다. 또한 부재 그룹화 기법에 따라 Group-1은 매 1개 층마다, Group-2는 매 4개 층마다 같은 종류의 부재를 같은 그룹으로 설정한 후의 결과를 나타낸다(김호수 등, 2006).

표 4에서 보듯이 허용변위 H/500 수준을 만족하였을 때 민감도해석을 이용한 강성최적설계 결과의 물량증가율을 비교할 경우 1개 층 단위로 그룹화한 Group-1과 4개 층 단위로 그룹화한 Group-2와의 차이는 1%정도로 크지 않았다.

그러나 본 논문에서 제안한 부분재해석 기법에 의해 부재를 그룹화하지 않고 개별적으로 조절하였을 때에는 물량증가 측면에서 5%이상의 추가적인 효율성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 이와 같이 부분재해석 기법을 통해 각 부재의 단면크기별로 강성변경 영향을 분석함으로써 부재 그룹화를 통한 변위조절 설계 결과보다 물량측면에서 더욱 경제적인 변위조절 설계가 가능함을 확인하였다.

6. 결 론

본 논문에서 제시한 부분재해석 기법을 이용한 변위조절 설계법은 전역 자유도에 대한 강성 변경 부재의 변위기여도를 계산하고 변위기여도에 따라 해당 부재의 강성을 변경시킴으로써 반복적 구조해석이나 민감도 해석없이 특정 변위를 최소의 물량만으로 정량적으로 제어하는 변위조절 설계법이다.

제안기법을 20층 철근콘크리트 골조 가새 구조물의 변위 설계에 적용하여 타당성을 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 부분재해석 기법을 이용한 변위조절 설계법은 일단 초기 해석이 한번 수행되면 이후 부재의 부분적 강성 변경에 따른 방대한 양의 반복적 재해석시 계산량을 획기적으로 줄일 수 있으며, 실시간 수준의 고속 해석이 가능하다.
- (2) 부분재해석 기법에 의해 선정된 부재별 단면크기를 순차적으로 적용해 나가는 본 논문의 변위조절 설계법의 결과는 일괄 강성변경을 통한 골조 해석 전용 프로그램의 결과와 비교해 볼 때 약 0.5% 수준의 오차를 보임으로써 매우 정확한 결과를 나타냈다.
- (3) 기존의 변위제어 설계법에서는 부재 그룹핑을 통해 몇 개의 부재 그룹 수준에서 강성변경이 수행되었으나 부분재해석 기법은 각각의 개별적인 부재 수준에서 발생하는 연속적인 강성변경의 효과를 적은 계산량으로 검토할 수 있으며, 물량증가 측면에서 추가적인 효율성을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.
- (4) 변위감소 요구량을 작게 하여 부분재해석 기법을 반복 수행함으로써 개별 부재의 강성변경으로 인한 최상층변위의 비선형적 감소경향을 완화시킬 수 있다.

현재 부재간 상관관계 분석을 통해 다수 부재의 강성변경으로 인한 최상층변위의 비선형적 감소경향을 파악하는 연구를 수행 중에 있다. 이 결과를 제안한 부분재해석 알고리즘에 반영하고 부분재해석 기법에 의한 부재변경 사항을 해석모델에 즉각적으로 반영할 수 있도록 사용자 인터페이스의 개선이 이루어진다면 제안한 변위조절 설계법이 초고층건물의 횡변위 제어에 실용적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2008년 교육과학기술부(지역거점연구단육성사업/바이오하우징연구사업단) 및 바이오하우징연구소의 지원을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

- 김치경** (2004) 부분적 강성 변화에 따른 효율적 부분 재해석 알고리즘, 한국전산구조공학회 논문집, 17(4), pp.459~467.
- 김호수, 이한주** (2006) 민감도 해석을 이용한 전단벽-골조 구조시스템의 강성최적설계, 한국전산구조공학회 논문집, 19(1), pp.63~71.
- 서지현, 박효선** (2006) 부재 그룹과 하중 조합을 고려한 고층 건물 변위조절 설계법, 한국전산구조공학회 논문집, 19(4), pp.357~367.
- 서지현, 박효선** (2004) 횡하중과 연직하중을 받는 고층건물의 변위설계를 위한 재분배기법 개발, 한국전산구조공학회 논문집, 17(1), pp.49~58.
- 이한주, 정성진, 김호수** (2005) 감도해석기법을 이용한 전단벽 구조물의 최적변위제어, 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집, pp.121~128.
- Baker, W.F.** (1990) Sizing Techniques for Lateral Systems in Multi-story Steel Buildings, *4th World Congress on Tall Buildings: 2000 and Beyond*, CTBUH, Hong Kong, pp.857~868.
- Chan, C.M., Grierson, D.E.** (1993) An Efficient Resizing Techniques for the Design of Tall Buildings Subject to Multiple Drift Constraints, *The Structural Design of Tall Buildings*, 2(1), pp.17~32.