

민감도 해석을 이용한 전단벽-골조 구조시스템의 강성최적설계

Stiffness-based Optimal Design of Shear Wall-Frame Structure System using Sensitivity Analysis

김 호 수†

Kim, Ho-Soo

이 한 주*

Lee, Han-Joo

(논문접수일 : 2005년 5월 25일 ; 심사종료일 : 2006년 2월 13일)

요 지

본 연구에서는 민감도 해석을 이용하여 전단벽-골조 구조시스템의 횡변위를 정량적으로 제어할 수 있는 강성최적설계방안을 제시하고자 한다. 이를 위해 먼저 골조와 전단벽요소 사이의 변위자유도 적합성 문제를 해결하기 위한 요소강성행렬을 구성하며, 또한 수학적계획법의 일반성을 유지하면서도 큰 규모의 문제도 효율적으로 다룰 수 있는 근사화 개념을 도입하여 횡변위 구속조건식을 설정한다. 아울러 전단벽 및 골조부재의 단면특성 관계식을 설정함으로써 설계변수의 수를 줄여주고, 이를 이용하여 강성행렬도함수의 산정을 용이하게 한다. 특히 골조의 경우 초기에 주어진 단면형상이 최적설계 과정동안 계속 유지된다는 가정을 이용하여 최적설계결과에서 구해진 단면특성에 따라 부재단면크기를 산출하고, 전단벽은 사용자의 의도에 따라 두께 또는 부재길이를 재산정하는 방안을 강구한다. 이와 같이 제시된 강성최적설계기법의 효용성을 검토하기 위해 두 가지 형태의 20층 전단벽-골조 구조물의 예제가 고려된다.

핵심용어 : 전단벽-골조 구조시스템, 강성최적설계, 횡변위 제어, 민감도 해석, 단면 재산정 기법

Abstract

This study presents the effective stiffness-based optimal technique to control quantitatively lateral drift for shear wall-frame structure system using sensitivity analysis. To this end, the element stiffness matrices are constituted to solve the compatibility problem of displacement degree of freedom between the frame and shear wall. Also, lateral drift constraint to introduce the approximation concept that can preserve the generality of the mathematical programming and can effectively solve the large scaled problems is established. And, the section property relationships for shear wall and frame members are considered in order to reduce the number of design variables and differentiate easily the stiffness matrices. Specifically, constant-shape assumption which is uniformly varying in size during optimal process is applied in frame structure. The thickness or length of shear wall can be changed depending on user's intent. Two types of 20 story shear wall-frame structure system are presented to illustrate the features of the stiffness-based optimal design technique.

keywords : shear wall-frame structure system, stiffness-based optimal design, lateral drift control, sensitivity analysis, resizing technique

1. 서 론

고층구조물의 경우 일반적으로 중력방향 하중보다 풍하중, 지진하중과 같은 횡하중이 설계에 더 큰 영향을 미친다. 따라서 횡력에 대한 저항성능의 확보를 위한 횡하중 저항시스템의 적용방안과 그에 따른 구조물의 횡변위 제어

문제는 구조물의 사용성, 뿐만 아니라 $P-\delta$ 효과 등에 의한 이차적 응력의 유발로 인한 구조물의 안전성에도 큰 영향을 주는 중요한 요소이다. 횡하중 저항요소를 적정위치에 적정단면을 효과적으로 배치하면 효과적으로 횡력에 대한 저항성능을 증가시킬 수 있을 뿐만 아니라 경제적인 측면에서도 매우 유리하다고 할 수 있다. 그러나 고층구조물의

† 책임저자, 정회원 · 청주대학교 건축공학부 교수
전화: 043-229-8483 ; Fax: 043-229-8483
E-mail: hskim@cju.ac.kr

* 정회원 · 청주대학교 건축공학부 겸임교수

• 이 논문에 대한 토론을 2006년 6월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2006년 9월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

거동특성이 대단히 복잡하여 구조변경에 따른 거동변화를 예측하는 일이 쉽지 않기 때문에 정성적 방법에 의한 횡변위 제어는 경우에 따라 여러 번의 반복해석에도 불구하고 최적의 선택을 놓치는 경우가 많다. 더구나 골조와 전단벽의 상호작용이 고려된 고층구조물의 경우 감도해석을 수행하기 위해서는 골조와 전단벽 요소사이의 변위자유도의 적합성 문제를 먼저 해결하여야 한다.

전단벽 구조물에 대한 최적화는 Saka(1992)에 의해 최적정기준법에 근거하여 실시된 바 있다. 그러나 최적정기준법은 문제의 규모에 상대적으로 영향을 덜 받고 최적설계에 가까운 값을 제공하는 이점이 있으나, 이는 명확한 이론적 기초가 없고 종종 최적해에 도달하지 못하는 경우가 발생한다. 이에 비해 수학적계획법은 정확한 이론적 기초와 어느 형태의 제약조건도 고려할 수 있는 일반성이라는 장점을 가지고 있으나, 비교적 간단한 문제에서조차 많은 비용을 유발시키고 문제의 규모가 커질 경우 계산시간의 급격한 증가 때문에 적용상 어려움이 많다. 근래에는 이러한 단점을 보완하기 위해 근사화 개념(Schmit 등, 1974 ; Kirsch, 1991)을 수학적계획법에 도입하여 큰 규모의 문제도 효율적으로 다룰 수 있는 방안이 강구되고 있다.

이에 따라 본 연구에서는 골조와 전단벽요소 사이의 변위자유도 적합성 문제를 해결하기 위한 요소강성행렬을 구성하며, 또한 큰 규모의 문제도 효율적으로 다룰 수 있는 근사화 개념을 도입하여 횡변위 구속조건식을 설정한다. 아울러 전단벽 및 골조부재의 단면특성 관계식을 설정함으로써 설계변수의 수를 줄여주고, 이를 이용하여 강성행렬도함수 산정을 용이하게 한다. 또한 골조의 경우 초기에 주어진 단면형상이 최적설계 과정동안 계속 유지된다는 가정을 이용하여 최적설계결과에서 구해진 단면특성에 따라 부재단면크기를 산출하고, 전단벽은 사용자의 의도에 따라 두께 또는 부재길이를 재산정하는 방안을 강구한다. 특히 강도구속조건에 대한 초기설계가 먼저 수행된 후 횡변위 구속조건에 따른 강성최적설계가 이루어지며, 또한 시공성을 고려하여 부재그룹핑방법이 도입된다. 이와 같이 전단벽-골조 구조물의 횡변위 제어 방안의 효율성을 검토하기 위해 두 가지 형태의 20층 전단벽-골조 구조물의 예제가 고려된다.

2. 강성최적설계 기법

2.1 횡변위 민감도 구성

강성최적설계를 위해 먼저 식 (1)과 같은 횡변위 구속조건식을 설정한다.

$$u_i(x) - d_i h_i \leq 0 \tag{1}$$

여기서, $u_i(x)$ 는 최상층의 횡변위를 나타낸다. 또한 d_i 는 최상층 허용 횡변위비를 나타내며, h_i 는 건물의 전체높이를 나타낸다. 부재단면의 변화에 따른 변위를 구조 재해석을 수행하지 않고 근사적으로 구할 수 있는 일차 테일러 전개식을 횡변위 구속조건식에 도입하여 정리하면 식 (2)와 같다.

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

여기서 윗첨자 'o'는 현 설계단계에 대한 값들을 나타내며, x_i 는 변위제어 최적화 과정을 통해 구해져야할 설계변수인데, 본 연구에서는 부재 i의 단면적으로 한다. 또한 $\partial u_i / \partial x_i$ 는 최상층 변위에 대한 민감도인데 가상하중법을 적용하여 구하면 식 (3)과 같다

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = - \{b\}_i^T [K]^{-1} \frac{\partial [K]}{\partial x_i} \{U\} = - \{V\}_i^T \frac{\partial [K]}{\partial x_i} \{U\} \tag{3}$$

여기서, $\partial [K] / \partial x_i$ 는 강성행렬에 대한 도함수이며, $\{b\}_i$ 는 최상층 변위와 전체 변위를 연관시켜 주는 상관벡터이다.

특히 식 (2)와 같이 근사화된 횡변위 구속조건식에서 $d_i h_i - u_i^o$, $(\partial u_i / \partial x_i)^o$, $x_i - x_i^o$ 를 각각 Δu_i , C_{ii} , Δx_i 로 대체하면 음함수 형태의 변위구속조건식은 식 (4)와 같이 간소화된 양함수 형태가 된다. 또한 C_{ii} 는 횡변위 민감도로서 매 단계마다 횡변위 구속조건식을 구성하기 위해 재산정된다.

$$\Delta u_i - \sum_{i=1}^n C_{ii} \Delta x_i \geq 0 \tag{4}$$

2.2 단면특성관계식의 설정

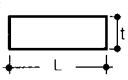
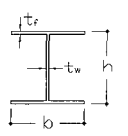
복합구조시스템의 경우 여러 종류의 단면특성들이 구조물의 강성에 기여하게 된다. 이런 경우 식 (5)와 같은 단면특성관계식을 설정하여 줌으로써 전체 설계 변수의 수를 줄일 수 있다. 또한 이를 통해 강성행렬에 대한 도함수를 손쉽게 산정할 수 있다.

$$S_{ik} = \xi_{ik} x_i^{\xi_{2k}} + \xi_{3k} \tag{5}$$

여기서, S_{ik} 는 부설계변수로 부재 i의 단면적외의 다른 단면특성을 나타내고, x_i 는 주설계변수로 본 연구에서는 부재 i의 단면적을 나타낸다.

표 1은 전단벽과 H형 단면에 대한 단면특성관계식을 적용한 경우를 나타낸 것이다.

표 1 전단벽과 H형 단면의 단면특성관계식

단면형상	단면특성관계식	계 수
	$A = t \times L$	
	$I_Z = \frac{L^2}{12} \cdot A$	$\xi_1 = \frac{L^2}{12}, \xi_2 = 1.0; \xi_3 = 0.0$
	$I_Y = \frac{t^2}{12} \cdot A$	$\xi_1 = \frac{t^2}{12}, \xi_2 = 1.0; \xi_3 = 0.0$
	$I_X = L^2 \left[\frac{1}{3} - 0.21 \frac{t}{L} \left(1 - \frac{t^4}{12L^4} \right) \right] \cdot A$	$\xi_1 = L^2 \left[\frac{1}{3} - 0.21 \frac{t}{L} \left(1 - \frac{t^4}{12L^4} \right) \right], \xi_2 = 1.0, \xi_3 = 0.0$
	$A_{SY} = A_{SZ} = \frac{5}{6} \cdot A$	$\xi_1 = \frac{5}{6}, \xi_2 = 1.0; \xi_3 = 0.0$
	$A = b \times h - (b - t_w)(h - 2t_f)$	
	$I_Z = \frac{1}{12} [(h - 2t_f)^2 \cdot A + b h h^2 - (h - 2t_f)^2]$	$\xi_1 = \frac{1}{12} (h - 2t_f)^2, \xi_2 = 1.0, \xi_3 = \frac{1}{12} b h h^2 - (h - 2t_f)^2$
	$I_Y = \frac{1}{12} \left[-\frac{1}{(b - t_w)} \cdot A + 2t_f b^3 + \frac{b h \times t_w^3}{(b - t_w)} \right]$	$\xi_1 = -\frac{1}{12(b - t_w)}, \xi_2 = 1.0, \xi_3 = \frac{1}{12} 2t_f b^3 + \frac{b h \times t_w^3}{(b - t_w)}$
	$I_X = \frac{1}{3} \times \left[-\frac{t_w^3}{(b - t_w)} \cdot A + 2b t_f^3 + \frac{b h \times t_w^3}{(b - t_w)} \right]$	$\xi_1 = -\frac{t_w^3}{3(b - t_w)}, \xi_2 = 1.0, \xi_3 = \frac{1}{3} 2t_f b^3 + \frac{b h \times t_w^3}{(b - t_w)}$
	$A_{SZ} = \frac{5}{6} A - (h - 2t_f)t_w$	$\xi_1 = \frac{5}{6}, \xi_2 = 1.0, \xi_3 = -\frac{5}{6} (h - 2t_f)t_w$
	$A_{SY} = A - 2(b - t_w)t_f$	$\xi_1 = 1.0; \xi_2 = 1.0, \xi_3 = -2(b - t_w)t_f$

2.3 민감도 해석 및 설계정식화

전체 강성행렬은 식 (6)과 같이 구조물을 구성하는 각 요소들의 강성행렬의 조합으로 나타낼 수 있고, 각 요소의 강성행렬은 강성행렬에 기여하는 단면특성에 대한 강성행렬의 조합으로 나타낼 수 있다.

$$[K]_T = \sum_{i=1}^n [k]_i = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^t [k]_{ik} \quad (6)$$

여기서, i : 요소번호, k : 단면특성 종류번호

$[K]_T$: 구조물의 전체 강성행렬

$[k]_i$: 요소 i 의 강성행렬

$[k]_{ik}$: k 번째 단면특성에 의해 기여되는 요소 i 의 강성행렬

전단벽-골조 구조시스템의 경우 강성최적설계를 수행하기 위해서는 골조와 전단벽사이의 변위자유도 적합성을 만족시키기 위해 전단벽과 연결보에 대한 적절한 강성행렬이 적용되어야 한다. 해석에서 전단벽은 수직적으로 춤이 깊은 보로서 다루어질 수 있다. 또한 전단변형에 대한 영향이 매우 크므로 이를 강성행렬에 포함시켜야 한다(Ghali 등, 1983). 따라서 본 연구에서는 그림 1과 같은 전단벽 요소를 사용하며 강성행렬은 식 (7)과 같다.

여기서, E 는 탄성계수, G 는 전단탄성계수, I 는 단면이차모멘트, h 는 전단벽의 높이이고, A 은 전단면적을 나타낸다.

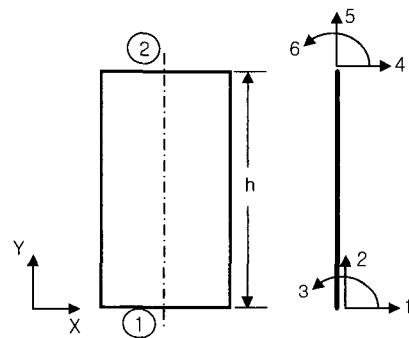


그림 1 전단벽 요소

$$K_1 = \begin{bmatrix} a & 0 & c-a & 0 & c \\ 0 & d & 0 & 0 & -d & 0 \\ c & 0 & f-c & 0 & g \\ -a & 0 & -c & a & 0 & -c \\ 0 & -d & 0 & 0 & d & 0 \\ c & 0 & g-c & 0 & 0 & f \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서, $a = \frac{12EI}{(1+\alpha)h^3}, c = -\frac{6EI}{(1+\alpha)h^2}, d = \frac{EA}{h},$

$f = \frac{(4+\alpha)EI}{(1+\alpha)h}, g = \frac{(2-\alpha)EI}{(1+\alpha)h}, \alpha = \frac{12EI}{h^2GA_s}$

연결보는 그림 2와 같이 전단벽에 연결되는 부분에 강역을 갖는 것으로 가정하며, 강성행렬은 식 (8)과 같다.

$$K_2 = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 & -a & 0 & 0 \\ 0 & d & e_1 & 0 & -d & e_2 \\ 0 & e_1 & f_1 & 0 & -e_1 & g \\ -a & 0 & 0 & a & 0 & 0 \\ 0 & -d & -e_1 & 0 & d & -e_2 \\ 0 & e_2 & g & 0 & -e_2 & f_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서, $a = \frac{EA}{\gamma L}$, $d = \frac{12EI}{(1+\mu)\gamma^3 L^3}$,

$$e_1 = -\frac{6EI}{(1+\mu)\gamma^2 L^2} + \frac{12EI}{(1+\mu)\gamma^3 L^3},$$

$$f_1 = \frac{(4+\mu)EI}{(1+\mu)\gamma L} + \frac{12EI}{(1+\mu)\gamma^2 L^2} + \frac{12EI^2}{(1+\mu)\gamma^3 L},$$

$$e_2 = -\frac{6EI}{(1+\mu)\gamma^2 L^2} + \frac{12EI}{(1+\mu)\gamma^3 L^3},$$

$$f_2 = \frac{(4+\mu)EI}{(1+\mu)\gamma L} + \frac{12EI}{(1+\mu)\gamma^2 L^2} + \frac{12EI^2}{(1+\mu)\gamma^3 L},$$

$$g = \frac{(2-\mu)EI}{(1+\mu)\gamma L} + \frac{6EI(d+b)}{(1+\mu)\gamma^2 L} + \frac{12EIb}{(1+\mu)\gamma^3 L},$$

$$\mu = \frac{12EI}{\gamma^2 L^2 GA}$$

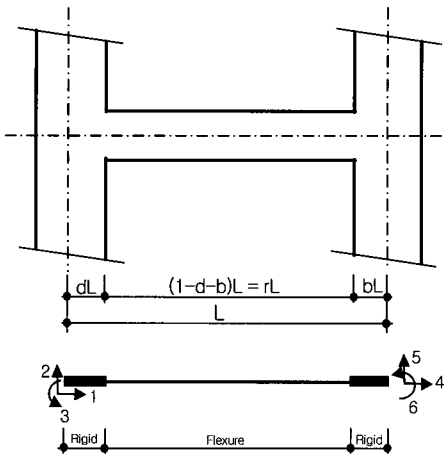


그림 2 연결보 요소

설계변수 x_i 에 대한 전체 강성행렬의 민감도해석을 수행하기 위해 식 (6)의 전체 강성행렬을 x_i 에 대해 편미분하여 정리하면 식 (9)와 같이 된다.

$$\frac{\partial [K]_T}{\partial x_i} = \frac{\partial [k]_i}{\partial x_i} = \sum_{k=1}^t \left(\frac{\partial [k]_{ik}}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

여기서 $\partial [k]_{ik} / \partial x_i$ 는 체인룰(chain rule)을 이용하여 식 (10)과 같이 유도된다.

$$\frac{\partial [k]_{ik}}{\partial x_i} = \frac{\partial [k]_{ik}}{\partial S_{ik}} \cdot \frac{\partial S_{ik}}{\partial x_i} \quad (10)$$

또한 $\partial S_{ik} / \partial x_i$ 는 단면특성관계식에 의해 식 (11)과 같이 정리되고, $\partial [k]_{ik} / \partial S_{ik}$ 는 $[k]_{ik}$ 가 부설계변수인 각각의 단면특성에 대해 선형관계이므로 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial S_{ik}}{\partial x_i} = C_{1k} C_{2k} x_i^{(C_{2k}-1)} \quad (11)$$

$$\frac{\partial [k]_{ik}}{\partial S_{ik}} = \frac{[k]_{ik}}{S_{ik}} \quad (12)$$

식 (10)~(12)를 식 (9)에 대입하여 정리하면 식 (13)과 같이 요소 i 의 단면적에 대한 전체 강성행렬의 민감도를 구할 수 있다.

$$\frac{\partial [K]_T}{\partial x_i} = \sum_{k=1}^t \left[\frac{[k]_{ik}}{S_{ik}} \cdot C_{1k} \cdot C_{2k} \cdot x_i^{(C_{2k}-1)} \right] \quad (13)$$

본 연구의 강성최적설계법은 현재 단계의 최상층 변위가 허용변위를 초과할 경우 허용변위와 같아지도록 제어되면서 이에 필요한 강성의 변화량이 최소가 되도록 하는 것을 목적으로 한다. 또한 각 부재의 중량계수를 고려함으로써 최소강성뿐만 아니라 최소중량에 대한 사항도 포함되도록 한다. 이는 식 (14)와 같이 표현된다.

$$\text{Minimize : } \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \omega_i \Delta x_i^2 \quad (14a)$$

$$\text{Subject to : } \Delta u_t - \sum_{i=1}^n C_{it} \Delta x_i = 0 \quad (14b)$$

$$x_i^L \leq x_i \leq x_i^U$$

여기서 ω_i 는 부재의 중량계수이다. 설계최적화문제는 식 (15)와 같은 라그랑지 함수의 최소화로서 정식화되며, λ 는 라그랑지 승계수이다.

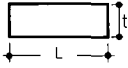
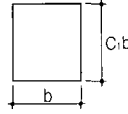
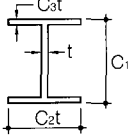
$$L(\Delta x_i, \lambda) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \omega_i \Delta x_i^2 + \lambda \left(\Delta u_t - \sum_{i=1}^n C_{it} \Delta x_i \right) \quad (15)$$

2.4 단면 계산정 방안

본 연구에서 제시되는 강성최적설계방안은 근사화 개념을 이용하기 때문에 근본적으로 반복과정을 수반하게 된다. 임의의 최적설계과정을 통해 구해진 최적의 부재 단면적을 다음 단계에 반영하기 위해서는 부재 단면크기를 재산정하여야 한다. 이를 위해 골조구조물의 경우에는 초기에 주어진 단면형상이 반복되는 최적설계과정 동안 계속 유지되면서 단면크기가 변경되는 것으로 가정하고, 전단벽의 경우에는 사용자의 의도에 따라 벽체의 두께나 길이가 변경되는 것으로 가정한다. 또한 최적설계의 최종단계에서 구해지는 부재의 단면크기도 같은 방법으로 산정된다. 표

2는 전단벽 및 골조부재의 몇 가지 단면형상에 대해 최적의 부재 단면적을 이용하여 부재 단면치수를 구하는 예를 보여준다.

표 2 전단벽 및 골조부재의 단면치수

단면형상	단면적	단면치수
	$A = t \times L$	(t가 고정인 경우) $L = A/t$ (L이 고정인 경우) $t = A/L$
	$A = c_1 \times b^2$	$h = c_1 b, b = \sqrt{\frac{A}{c_1}}$
	$A = 2c_2c_3t^2 + (c_1 - 2c_3)t^2$	$t = \sqrt{\frac{A}{2c_2c_3 + c_1 - 2c_3}}$ $b = c_2t, h = c_1t, t_f = c_3t$

3. 강성최적설계 과정

강성최적설계를 위한 전체 최적화과정은 다음과 같은 단계로 이루어진다.

- (1) 초기 부재단면크기를 가정한다. 주로 강도구속조건에 따라 산정된 부재 단면크기를 초기단면으로 가정한다.
- (2) 구조해석을 수행하여 변위제어를 수행할 것인지 여부를 결정한다.
- (3) 변위제어가 필요할 경우 변위제어를 위한 정보를 읽는다.
- (4) 횡변위 민감도 해석을 수행한다.
- (5) 구해진 횡변위 민감도 계수를 이용하여 최적설계 해를 구하고 각 부재의 단면크기를 재산정한다.
- (6) 재산정된 단면크기의 최소 및 최대크기 제한을 검토한다.
- (7) 재산정된 부재단면에 따른 구조해석을 수행한다.
- (8) 구해진 변위에 대한 수렴성 검토를 수행한다. 수렴조건은 허용변위와 현단계에서 구해진 최상층변위의 차이가 허용변위의 0.5%이내일 경우, 또는 전단계의 최상층 변위와 현재 단계의 최상층 변위의 차가 전단계 변위의 0.5%이내 인지를 검토하는 것이다.

이와 같이 각 단계별 최적단면이 선정되면 다시 단계 4로 되돌아가서 수렴조건이 만족될 때까지 단계 4부터 단계 8까지 과정을 반복한다. 그림 3은 제시된 강성최적설계 알고리즘의 구성도를 나타낸 것이다.

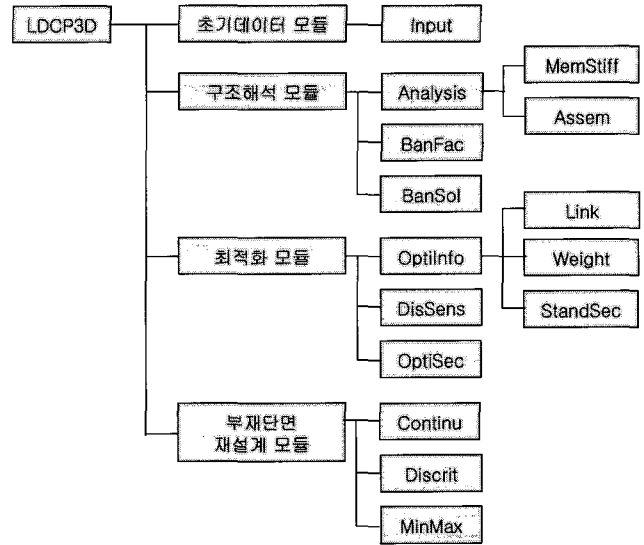


그림 3 강성최적설계 알고리즘의 구성도

4. 적용사례 및 결과분석

본 연구에서 제시된 전단벽-골조 구조시스템의 횡변위 제어방안의 효율성을 비교·검토하기 위하여 그림 4와 같은 병렬전단벽(모델 A)과 전단벽을 갖는 골조구조물(모델 B) 두 가지 형태의 20층 적용예제 모델이 고려된다.

두 적용모델의 층고는 3.0m이고, 적용하중은 각 층의 레벨에서 수평집중하중으로 작용하는 것으로 가정한다. 적용모델의 초기부재의 크기는 표 3과 같이 부재종류별로 전층에 같은 단면으로 가정한다.

표 3 초기부재단면

모델	부재종류	단면크기(mm)
모델 A	기둥	폭 : 400, 춤 : 400
	연결보	폭 : 200, 춤 : 400
	전단벽	두께 : 200
모델 B	기둥	폭 : 400, 춤 : 400
	보	폭 : 300, 춤 : 600
	연결보	폭 : 200, 춤 : 400
	전단벽	두께 : 200

횡변위제어 과정중 재설계되는 골조부재의 단면크기는 초기에 주어진 단면과 형상의 비율이 같다는 가정에 따라 재설계되고, 전단벽은 부재두께만이 재조정되도록 한다. 허용최상층변위는 건물전체높이의 1/600인 10.0cm로 하

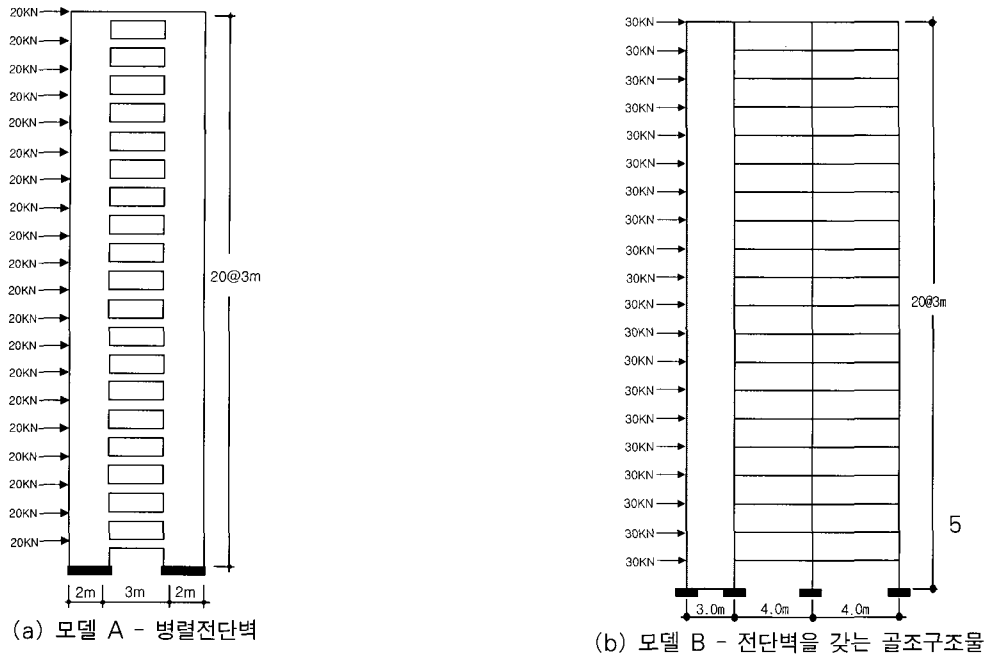


그림 4 20층 적용예제 모델

표 4 반복과정에 따른 설계이력

(a) 모델 A					(b) 모델 B				
그룹	Group-1		Group-2		그룹	Group-1		Group-2	
반복수	변위(cm)	중량(kN)	변위(cm)	중량(kN)	반복수	변위(cm)	중량(kN)	변위(cm)	중량(kN)
1	20.94	1267.2	20.94	1267.2	1	23.10	1824.0	23.10	1824.0
2	17.46	1327.3	17.35	1332.0	2	18.38	1933.5	18.05	1949.0
3	15.33	1385.4	15.25	1392.9	3	15.56	2050.1	15.34	2072.0
4	13.85	1440.7	13.80	1450.0	4	13.72	2165.0	13.59	2189.9
5	12.77	1492.3	12.73	1503.2	5	12.47	2271.1	12.38	2298.1
6	11.95	1539.9	11.93	1552.3	6	11.55	2365.2	11.50	2393.5
7	11.30	1583.3	11.28	1596.9	7	10.89	2445.7	10.86	2475.0
8	10.79	1622.4	10.76	1637.1	8	10.40	2512.4	10.38	2542.8
9	10.37	1657.2	10.35	1672.8	9	10.04	2564.5	10.02	2597.8
10	10.02	1687.9	10.02	1704.3					

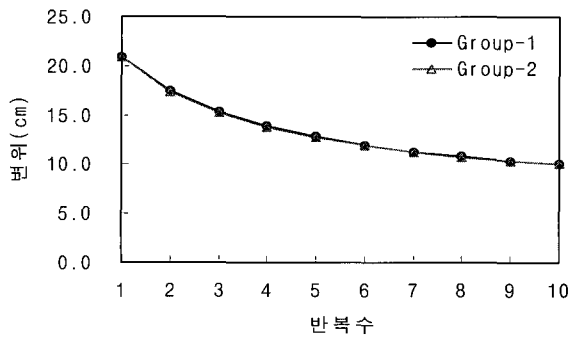
고, 최적설계의 수렴은 제어된 횡변위와 제어하려는 횡변위의 차이가 0.5%이내 일 때 만족되는 것으로 가정한다.

특히 본 연구에 적용된 부재 그룹화 기법에 대한 영향을 알아보기 위해 두 모델 모두 그룹단위를 다음과 같이 두 가지로 설정하여 횡변위제어를 수행한다.

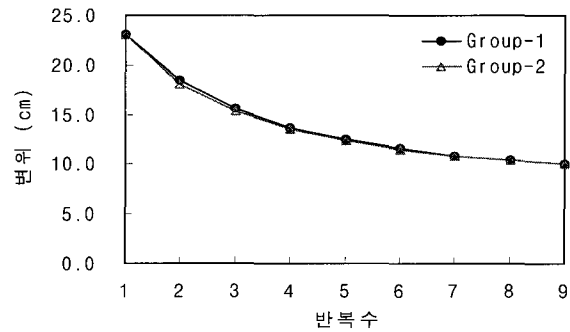
- Group-1 : 같은 종류의 부재는 매 1개층마다 같은 그룹으로 설정
- Group-2 : 같은 종류의 부재는 매 4개층마다 같은 그룹으로 설정

표 4는 반복과정에 따른 설계이력을 나타낸 것이다. 또한 그림 5는 반복과정에 따른 변위이력을 나타낸 것이다. 적

용모델 A와 B의 초기변위가 각각 20.94cm와 23.10cm 이었는데, 해석결과 두 모델 모두 그룹핑 단위에 상관없이 허용최상층변위인 10.0cm로 제어되었다. 반복수를 살펴보면 모델 A에는 10회, 모델 B는 9회의 반복과정을 통해 허용변위값으로 안정적으로 수렴됨을 알 수 있다. 이러한 결과는 제안된 설계 알고리즘내에 근사화 개념이 도입되어 수학적계획법을 보완함으로써 변위가 안정적으로 제어될 뿐만 아니라 고층건물과 같은 큰 규모의 문제도 적은 반복과정으로 풀려질 수 있음을 보여준다. 또한 중량의 변화를 살펴보면 모델 A의 초기중량이 1267.2kN이었는데, 최적설계결과 최종중량은 1697.9kN(Group-1), 1704.3kN(Group-2)으로 Group-1은 25.4%, Group-2는 25.7%



(a) 모델 A



(b) 모델 B

그림 5 반복과정에 따른 변위이력

증가하였다. 모델 B의 초기중량은 1824.0kN이었는데, 해석결과 최종중량은 2564.5kN(Group-1), 2597.8kN(Group-2)으로 Group-1은 28.9%, Group-2는 29.8% 증가하였다. 최종물량에 있어서 두 모델 모두 4개층 단위로 그룹화한 Group-2가 1개층 단위로 그룹화한 Group-1에 비해 큰 것으로 나타났지만, 그 차이가 1%정도로 차이가 크지 않음을 알 수 있다. 이와 같이 반복수, 변위수렴도 그리고 최종중량에서도 서로 다른 단위의 그룹핑에 대한 영향이 거의 없음을 알 수 있다.

표 5는 부재별 분담설계중량을 나타낸 것인데, 모델 A의 경우 횡변위를 제어하기 위해 증가된 물량의 79.4%를 전단벽이 그리고 20.6%를 연결보가 그룹핑 단위에 상관없이 분담하는 것으로 나타났다. 또한 모델 B에서는 증가된 물량을 전단벽이 48%, 기둥이 24%, 연결보가 22%, 보가 6% 분담하는 것으로 나타났다.

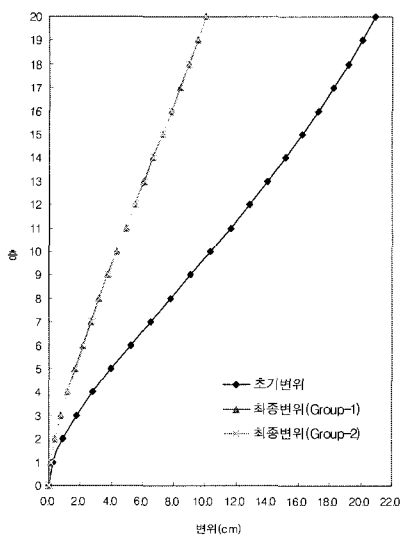
표 5 부재별 분담설계중량 (kN)

(a) 모델 A

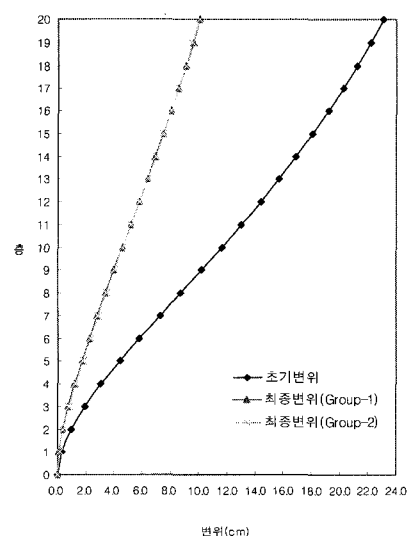
그룹	Group-1		Group-2	
	전단벽	연결보	전단벽	연결보
초기중량	1152.0	115.2	1152.0	115.2
최종중량	1486.2	201.7	1499.2	205.1
차이	334.2	86.5	347.2	89.9
분담율(%)	79.4	20.6	79.4	20.6

(b) 모델 B

그룹	항목	전단벽	연결보	기둥	보
Group 1	초기중량	864.0	153.6	460.8	345.6
	최종중량	1215.0	318.6	641.10	389.7
	차이	351.0	165.0	180.3	44.1
	분담율(%)	47.4	22.3	24.4	6.0
Group 2	초기중량	864.0	153.6	460.8	345.6
	최종중량	1234.0	324.4	647.3	392.1
	차이	370.0	170.8	186.5	46.5
	분담율(%)	47.8	22.1	24.1	6.0



(a) 모델 A



(b) 모델 B

그림 6 초기 및 최종단계의 횡변위

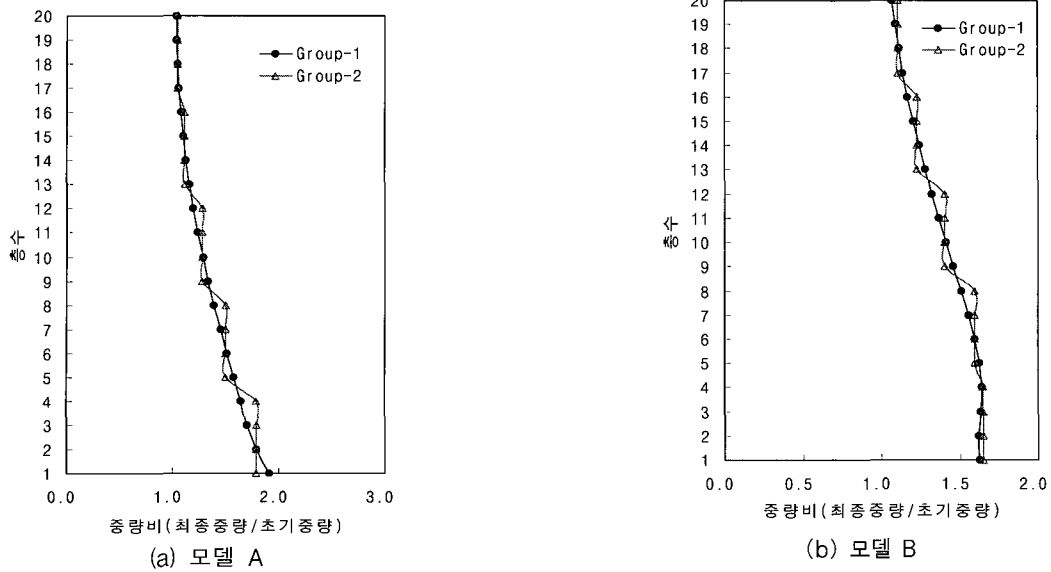


그림 7 층별 중량비

표 6은 초기단계와 최종단계에서의 최대층간변위를 나타낸 것이고, 그림 6은 초기 및 최종단계의 횡변위를 나타낸 것이다.

표 6 최대 층간변위

모 델	모 델 A		모 델 B	
그 룹	Group-1	Group-2	Group-1	Group-2
초기단계	1.30	1.30	1.46	1.46
최종단계	0.59	0.59	0.60	0.59

초기단계에서는 모델 A의 경우 1.3cm, 모델 B의 경우 1.46cm 의 최대 층간변위가 나타났는데, 최적설계후 최종 단계에서 두 모델 모두 1/500정도의 층간변위비인 0.6cm 이내로 제어되는 것을 알 수 있다.

그림 7은 층별 중량비(최종중량/초기중량)를 나타낸 것인데, 저층부에서 많은 물량이 요구되며 고층으로 갈수록 물량변동이 적음을 알 수 있다. 즉 횡하중에 의해 발생하는 변형에 대한 저항성능을 확보하기 위해선 구조물의 낮은 층의 횡강성을 증대시키는 것이 효과적임을 알 수 있다. 이를 통해 저층에서 부재단면크기가 증대되고 고층으로 갈수록 단면크기가 점차적으로 줄어드는 것은 시공성이나 실용적인 측면에서 바람직하다고 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 전단벽-골조 구조시스템의 정량적인 횡변위제어를 위해 근사화 개념 및 민감도해석기법을 이용한

강성최적화방안을 제시하였으며, 알고리즘의 효율성을 검토하기 위해 두 가지 형태의 모델에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 제안된 알고리즘내에 수학적 계획법의 일반성을 유지하면서도 큰 규모의 최적화문제를 효율적으로 풀 수 있는 근사화 개념을 도입함으로써 두 적용모델 모두 10회 이내의 반복과정을 통해 안정적으로 횡변위를 제어할 수 있었다.
- 2) 골조와 전단벽요소 사이의 변위자유도 적합성 문제를 해결하기 위해 요소강성행렬이 구성되었으며, 구성부재의 단면특성관계식이 설정되어 설계변수의 수를 줄여 줌으로써 변위민감도해석 및 단면 계산정방안의 효율성을 증진시킬 수 있었다.
- 3) 알고리즘내에 적용된 부재그룹핑 기법은 그룹핑 단위의 변화에도 불구하고 최적설계결과에 거의 영향을 주지 않음을 알 수 있었다. 또한 부재 그룹핑 기법을 통해 시공상, 설계상의 요구조건을 만족시킬 수 있으며, 설계변수를 줄여 줌으로써 계산량과 계산시간을 절약할 수 있었다.
- 4) 횡변위를 허용변위로 제어하는데 있어서 증가되는 물량을 각 부재별 부담률로 분석해본 결과 전단벽이 가장 큰 기여를 하였고, 그 다음으로 기둥, 연결보, 보의 순서로 기여하고 있음을 알 수 있었다.
- 5) 두 예제의 층별 중량비를 분석한 결과 횡하중에 대한 횡변위 저항성능을 확보하기 위해선 저층레벨에서의 횡강성 및 소요강성을 증대시키는 것이 효과적임을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서 제시된 최적화 알고리즘은 서로 다른 부재시스템이 혼용된 고층구조물의 강성최적설계에 큰 도움을 줄 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(03산C04-01)에 의한 것임.

참 고 문 헌

이한주, 김치경, 김호수(2002) 횡강성 영향행렬을 이용한 고층건물의 횡변위제어 및 단면재산정 방안, 한국전산구조공학회논문집, 15(2), pp.271~279.

- Ghali, A., Neville, A. M.(1983) *Structural Analysis*, Chapman & Hall, New York.
- Kirsch, U.(1991) Reduced Basis Approximations of Structural Displacements for Optimal Design, *AIAA Journal*, 29, pp.1751~1758.
- Saka, M. P.(1992) Optimum Design of Multistory Structures with Shear Walls, *Computers & Structures*, 44(4), pp.925~936.
- Schmit, L. A., Farshi, B.(1974) Some Approximation Concepts for Structural Synthesis, *AIAA Journal*, 11, pp.489~494.
- Vanderplaats, G. N.(1984) *Numerical Optimization Techniques for Engineering Design of Optimal with Applications*, McGraw-Hill, New York.