

수평하중을 받는 전단벽 아웃리거 시스템의 거동특성 평가

Structural Behavior Characteristics Evaluation of Shear Wall Outrigger System Subject to Horizontal Loads

김 호 수* 이 한 주** 홍 석 일*** 임 영 도****
Kim, Ho-Soo Lee, Han-Joo Hong, Seok-Il Lim, Young-Do

ABSTRACT

This study presents an effective stiffness-based optimal technique to consider floor rigid diaphragm action and a technique to evaluate the structural behavior characteristics and efficiency for tall shear wall outrigger system subject to horizontal loads. To this end, isoparametric plane stress element with rotational stiffness is used for shear wall element and stiffness gradient is calculated. Also, the approximation concept to solve effectively the large scaled problems, member grouping technique and resizing technique are considered. To verify the effectiveness and usefulness of this technique, the efficient evaluation method for three types of 50 story model with core and outrigger system is presented.

Keywords: Structural Behavior Characteristics Evaluation, Stiffness-Based Optimal Design Technique, Displacement Sensitivity Analysis, Shear Wall Outrigger System, Floor Rigid Diaphragm Action

1. 서 론

일반적으로 고층구조물의 경우 횡력에 대한 저항 성능을 확보하기 위해 여러 형태의 구조시스템을 고려하고 있으며, 그 중에서 건물의 일부 층에 아웃리거 시스템을 배치하여 횡변위를 효과적으로 제어하는 방안도 강구되고 있다. 이에 따라 국내에서도 아웃리거 구조시스템의 거동특성 평가에 대한 연구^{6,7)}가 진행되어 왔으나, 기존의 연구⁷⁾에서는 구조물의 전체물량을 일정한 수준으로 맞추고 그 수평변위를 이용하여 정량적인 평가를 하고자 하였다. 그러나 고층건물의 구조시스템 대안선정 등에 실용적인 데이터를 제공하기 위해서는 구조물의 수평변위를 일정수준으로 하고, 이 때의 전체물량을 비교하

는 것이 더 바람직할 것이다. 이에 따라 아웃리거 시스템의 수평변위를 일정하게 최적제어 하고, 최적 설계결과를 이용하여 시스템의 거동특성 및 효율성을 평가하는 방안이 제시된 바 있다⁶⁾. 그러나 이 연구에서는 강막작용기능이 고려되지 않아 오프셋 아웃리거 시스템의 거동특성을 올바르게 반영했다고 보기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 전단벽 아웃리거 시스템에 대해 강막작용이 고려된 횡변위 최적제어 방안을 강구하고, 이를 이용하여 거동특성 및 효율성을 정량적으로 평가하는 방안을 제시하고자 한다.

전단벽이 포함된 구조물에 대한 기존의 연구^{4,5)}에서는 전단벽을 수직적으로 춤이 깊은 선형보로 다루고 있으며, 전단벽과 골조를 연결하는 보는 전단벽에 연결되는 부분에 강역을 갖는 것으로 가정한 전단벽 연결보 요소를 사용하고 있다. 이 요소들이 골조와 전단벽 요소사이의 변위자유도의 적합성 문제를 반영하고 있긴 하지만, 간소화된 모델링에 기인한 해석오차가 발생한다. 따라서 본 연구에서는

* 정회원, 청주대학교 건축공학부 교수

** 정회원, 청주대학교 산업과학연구소 전임연구원

*** 정회원, 청주대학교 건축공학부 박사과정

**** 아키텍처 엔지니어링 소장

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

이러한 해석오차를 줄일 수 있는 회전강성을 갖는 등매개변수 평면응력요소⁸⁾를 전단벽요소로 사용하며, 민감도해석을 위해 전단벽요소에 대한 강성도함수를 산정한다.

또한 강성최적설계기법에는 큰 규모의 문제도 효율적으로 다룰 수 있는 근사화 개념이 도입되며, 주설계변수와 부설계변수를 연결시켜주는 단면특성관계식, 최적설계결과 도출된 주설계변수값에 따른 부재단면크기의 재산출 방안 등이 고려된다.

이와 같이 제시된 고층 구조시스템의 강성최적설계 기법을 이용하여 50층 규모의 코아시스템, 코아 아웃리저 시스템, 오프셋 아웃리저 시스템 모델을 대상으로 효율성 평가방안을 제시하고, 강성최적설계기법의 효율성을 검토하고자 한다.

2. 전단벽 요소 및 강막작용

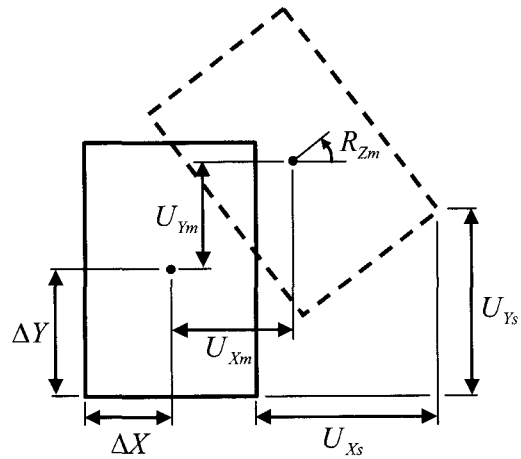
2.1 회전강성을 갖는 등매개변수 평면응력요소

전단벽과 골조가 동시에 존재하는 구조물을 해석할 경우 전단벽은 평면응력요소로 주로 모형화되며 골조는 보요소로 모형화된다. 이 때 평면응력요소와 보요소가 만나는 절점에서 적합조건이 만족되지 않는 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 회전자유도를 갖는 평면응력요소를 이용하고자 한다. 그러나 많은 경우 회전자유도를 갖는 평면응력요소의 경우 대부분 일반화된 좌표계를 이용하여 요소내의 변위를 가정하고 있다. 이 경우 요소 내부의 변위장과 일반화된 좌표계 사이의 관계를 규정할 수 있는 행렬식(A^{-1} 행렬)을 계산할 필요가 있다. 반면에 등매개변수 요소의 기본적인 개념은 요소 내부의 변위와 절점변위 사이의 관계를 형상함수를 이용하여 직접 구하는데 있으므로 이 경우에는 A^{-1} 행렬을 계산할 필요가 없다⁸⁾. 따라서 본 연구에서는 등매개변수 유한요소의 개념을 이용한 회전자유도를 갖는 평면응력요소를 이용하여 구조 해석 및 변위민감도 해석을 수행하고자 한다.

2.2 강막작용 특성

바닥판의 강막작용(Floor Rigid Diaphragm Action) 특성을 고려하기 위해 기하학적인 상대이동을 구속하

는 강체연결기능을 사용한다. 즉, 각 층의 대표절점을 주절점으로 하고 나머지 절점을 종속절점으로 할당한 다음, 각 절점간의 거리가 일정하게 유지되도록 구속조건식을 설정한다. <그림 1>과 (1)식은 j 절점에 대한 주절점과 종속절점의 변위에 대한 관계식을 나타낸 것이다.



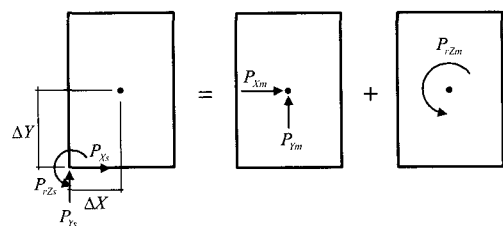
<그림 1> 주절점과 종속절점의 변위관계

여기서 아래첨자 'm'은 주절점을 나타내고, 's'는 종속절점을 나타낸다. 또한 (1)식은 (2)식과 같이 벡터형식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} U_{Xsj} \\ U_{Ysj} \\ U_{Zsj} \\ R_{Xsj} \\ R_{Ysj} \\ R_{Zsj} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Delta Y \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -\Delta X \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_{Xm} \\ U_{Ym} \\ U_{Zsj} \\ R_{Xsj} \\ R_{Ysj} \\ R_{Zm} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$\{U\}_{sj} = [\beta]_j \{U\}_{mj} \quad (2)$$

종속절점 j 에 작용하는 수평하중은 (3)식과 같은 관계식을 이용하여 주절점으로 치환할 수 있으며, 이 식을 벡터형식으로 나타내면 (4)식과 같다.



<그림 2> 주절점과 종속절점의 하중관계

$$\begin{pmatrix} P_{Xm} \\ P_{Ym} \\ P_{Zsj} \\ P_{rXsj} \\ P_{rYsj} \\ P_{rZm} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \Delta Y - \Delta X & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} P_{Xsj} \\ P_{Ysj} \\ P_{Zsj} \\ P_{rXsj} \\ P_{rYsj} \\ P_{rZsj} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\{P\}_m = [\beta]_j^T \{P\}_s \quad (4)$$

3. 전단벽 아웃리거시스템의 변위민감도 해석

강막작용을 고려하지 않은 전체좌표계에 따른 정적 힘의 평형조건식은 다음 (5)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{P\}_s = [K]_s \{U\}_s \quad (5)$$

강막작용을 고려하기 위해 힘에 대한 주절점과 종속절점의 관계식인 (6)식에 (5)식을 대입하고 변위에 대한 주절점과 종속절점에 대한 관계식 (2)를 대입하여 정리하면 (7)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{P\}_m = [\beta]_j^T \{P\}_s \quad (6)$$

$$\{P\}_m = [K]_m \{U\}_m \quad (7)$$

여기서, $[K]_m = [\beta]_j^T [K]_s [\beta]$

강막작용을 고려한 변위에 대한 민감도를 구하기 위해 (7)식을 설계변수 x_i 에 대해 편미분하여 전체 변위에 대한 도함수에 대해 정리하면 (8)식과 같이 된다. 여기에서 하중은 설계변수의 변화와 무관한 것으로 가정된다.

$$\frac{\partial \{U\}_m}{\partial x_i} = -[K]_m^{-1} \frac{\partial [K]_m}{\partial x_i} \{U\}_m \quad (8)$$

여기서, x_i 는 주설계변수로서 본 연구에서는 부재 i 의 단면적을 나타낸다. 임의의 j 절점과 강막작용이 고려된 전체변위에 대한 관계식은 (9)식과 같이 나타낼 수 있다. 여기에서 $\{b\}_j^T$ 는 j 절점과 전체변위를 연결해주는 연결벡터이다.

$$\{u\}_j = \{b\}_j^T \{U\}_s = \{b\}_m^T \{U\}_m \quad (9)$$

여기서, $\{b\}_m^T = \{b\}_j^T [\beta]$

j 절점에 대한 변위민감도를 구하기 위해 (9)식을 x_i 에 대해 편미분하고 (8)식을 대입하여 정리하면 (10)식과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \{u\}_j}{\partial x_i} &= \{b\}_m^T \cdot \frac{\partial \{U\}_m}{\partial x_i} \\ &= -\{V\}_m^T \frac{\partial [K]_m}{\partial x_i} \{U\}_m \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, $\{V\}_m^T = \{b\}_m^T [K]_m^{-1}$

위의 (10)식에서 강성행렬에 대한 도함수는 다음 (11)식과 같이 나타낼 수 있는데, 여기서 $[T]$ 는 요소 좌표계를 전체좌표계로 변환시켜주는 변환행렬이다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial [K]_m}{\partial x_i} &= [\beta]_j^T \frac{\partial [K]_s}{\partial x_i} [\beta] \\ &= [\beta]_j^T \left\{ [T]^T \frac{\partial [k]_i}{\partial x_i} [T] \right\} [\beta] \end{aligned} \quad (11)$$

요소의 강성행렬 $[k]_i$ 는 (12)식과 같이 강성행렬에 기여하는 단면특성에 대한 조합으로 나타낼 수 있다.

$$[k]_i = \sum_{k=1}^t [k]_{ik} \quad (12)$$

여기서, i : 요소번호

k : 단면특성 종류번호

t : 강성행렬에 기여하는 단면특성의 종류수

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

따라서 요소강성의 도함수는 (13)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial [k]_i}{\partial x_i} = \sum_{k=1}^t \left(\frac{\partial [k]_{ik}}{\partial x_i} \right) \quad (13)$$

여러 종류의 단면특성들이 요소강성에 기여하게 될 경우 적절한 단면특성관계식을 설정하면 전체 설계 변수의 수를 줄여 줄 수 있으며, 강성 도함수를 구하는데 편리하다. 따라서 본 연구에서는 (14)식과 같은 단면특성관계식을 이용한다.

$$S_{ik} = \xi_{1k} x_i^{2k} + \xi_{3k} \quad (14)$$

여기서, S_{ik} 는 부설계변수로 부재 i 의 단면적외의 다른 단면특성들을 나타낸다.

$\partial[k]_{ik}/\partial x_i$ 는 (14)식과 체인룰(chain rule)을 이용하여 구하면 다음 (15)식과 같이 된다.

$$\frac{\partial[k]_{ik}}{\partial x_i} = \sum_{k=1}^t \left[\frac{[k]_{ik}}{S_{ik}} \cdot \xi_{1k} \cdot \xi_{2k} \cdot x_i^{(\xi_{2k}-1)} \right] \quad (15)$$

4. 강성최적설계의 정식화

일반적으로 전단벽 아웃리저 시스템이 적용된 고층 구조물에 적용되는 횡변위 구속조건에는 최상층 및 층간변위 구속조건이 있는데, 본 연구에서는 먼저 (16)식과 같은 최상층 변위구속조건을 대상으로 한다.

$$u_t(x) \leq d_t h_t \quad (16)$$

여기에서 $u_t(x)$ 는 최상층의 횡변위를 나타낸다. 또한 d_t 는 최상층 허용 횡변위비를 나타내며, h_t 는 건물의 전체높이를 나타낸다.

부재단면의 변화에 따른 변위를 구조 재해석을 수행하지 않고 근사적으로 구할 수 있는 일차 테일러 전개식을 최상층 횡변위 구속조건식에 도입하여 정리하면 (17)식과 같이 된다.

$$d_t h_t - u_t^0 - \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial u_t}{\partial x_i} \right)^0 (x_i - x_i^0) \geq 0 \quad (17)$$

여기서 윗첨자 '0'는 현 설계단계에 대한 값들을 나타내며, i 는 부재번호, x_i 는 변위제어 최적화 과정을 통해 구해져야할 설계변수인데, 본 연구에서는

부재 i 의 단면적이 된다.

$d_t h_t - u_t^0$, $(\partial u_t / \partial x_i)^0$, $x_i - x_i^0$ 를 각각 Δu_t , C_{it} , Δx_i 로 대치하면 음함수 형태의 변위구속조건식은 (18)식과 같이 간소화된 양함수 형태가 된다. 또한 C_{it} 는 횡변위민감도로서 매 단계마다 횡변위구속조건식을 구성하기위해 재산정된다.

$$\Delta u_t - \sum_{i=1}^n C_{it} \Delta x_i \geq 0 \quad (18)$$

제시된 강성최적설계법은 횡변위를 목표변위로 제어하면서 구조물의 중량을 최소화하는 것을 설계 목표로 한다. 이를 정식화하면 (19)식과 같다.

$$\text{Minimize} : \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \omega_i \Delta x_i^2 \quad (19a)$$

$$\text{Subject to} : \Delta u_t - \sum_{i=1}^n C_{it} \Delta x_i \geq 0 \quad (19b)$$

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

여기서 ω_i 는 부재 i 의 중량계수를 나타내고, x_i^L , x_i^U 는 각각 부재 i 의 최소 및 최대 허용 단면적을 나타낸다.

특히 고층 구조물의 실용적인 설계를 위해서는 부재의 그룹화를 고려해야한다. 본 연구에서는 설계 변수연결기법(design variable linking technique)³⁾ 개념을 이용하여 부재의 그룹화를 표현하고자 한다. 설계변수 연결기법은 설계문제의 의미를 변화시키지 않으면서 설계변수의 개수를 감소시킨 근사해석 기법이다. 설계변수의 연결기법은 몇 개의 독립변수가 모든 요소의 크기를 조절할 수 있도록 요소를 그룹화하고 미리 선택된 그룹의 상대적 크기를 고정 시킴으로써 구현된다.

부재의 그룹화기법을 적용하여 최적설계문제를 다시 정식화하면 (20)식과 같이 된다.

$$\text{Minimize} : \frac{1}{2} \sum_{\ell=1}^m \omega_{\ell}^* \Delta x_{\ell}^{*2} \quad (20a)$$

$$\text{Subject to} : \Delta u_t - \sum_{\ell=1}^m C_{\ell t}^* \Delta x_{\ell} \geq 0 \quad (20b)$$

$$x_{\ell}^L \leq x_{\ell} \leq x_{\ell}^U$$

여기서 ℓ 은 그룹번호를 나타내고, m 은 전체 그룹 평수를 나타내며, $\omega_i^* = \sum_{i=1}^m \omega_i \cdot L_{i\ell}$; $C_{i\ell}^* = \sum_{i=1}^m C_{i\ell} \cdot L_{i\ell}$ 이다. 또한 $L_{i\ell}$ 은 부재 i 를 그룹 ℓ 에 연결시켜주는 행렬이다. 위의 최적설계문제를 라그랑지 승계수법을 이용하여 풀면 (21)과 같은 해를 얻을 수 있다.

최적화 문제는 (20)식으로부터 라그랑지 함수의 최소화로서 정식화되며, 최적설계과정은 구조물의 횡변위가 목표 제어값에 수렴할 때까지 (21)식을 최소화하는 반복과정과 부재단면을 재산정하는 것을 포함된다.

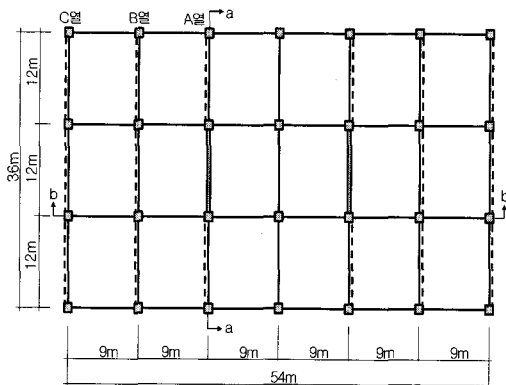
$$L(\Delta x_i, \lambda) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \omega_i^* \Delta x_i^2 + \lambda \left(\Delta u_i - \sum_{i=1}^m C_{i\ell}^* \Delta x_i \right) \quad (21)$$

여기서 λ 는 라그랑지 승계수이다.

5. 전단벽 아웃리저 시스템의 거동 특성 평가

강성최적설계기법을 이용하여 50층 규모의 전단벽 코아시스템, 코아 아웃리저시스템 및 오프셋 아웃리저 시스템 등 세 가지 모델을 대상으로 거동특성 및 효율성을 정량적으로 평가하는 방안을 제시하고자 한다. 이를 위해 먼저 강성최적설계기법을 이용하여 수평변위를 허용최상층변위로 최적제어하고, 최적설계 결과를 토대로 아웃리저 시스템의 거동특성과 효율성을 평가한다.

적용모델은 <그림 3>과 같이 장변 54m, 단변 36m, 높이 175m, 세장비 4.86의 철근콘크리트 50층 건물



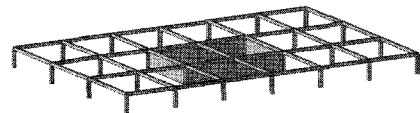
<그림 3> 아웃리저 시스템의 적용모델

이며, 층고는 3.5m이다. 아웃리저는 25층과 50층에 각각 배치되며, 골조를 구성하는 모든 보, 기둥, 전단벽은 강절점으로 연결되어 있다고 가정한다.

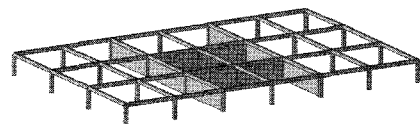
적용모델은 아웃리저 시스템의 종류 및 위치에 따라 <그림 4>와 같이 분류하였으며, 모델명은 <표 1>과 같다.

<표 1> 적용모델의 분류

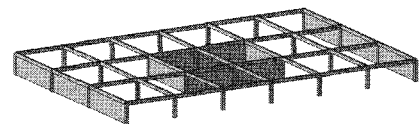
아웃리저 여부 및 위치	모델명
코아시스템	Core System
코어 아웃리저 시스템 (A열)	Core Outrigger
오프셋 아웃리저 시스템 (C열)	Offset Outrigger



(a) 코아시스템



(b) 코어 아웃리저 시스템



(c) 오프셋 아웃리저 시스템

<그림 4> 적용모델 분류

허용 최상층변위는 건물 전체높이의 1/500인 35.0cm로 하였으며, 최적설계의 수렴은 제어된 횡변위와 제어하려는 횡변위의 차이가 0.5% 이내일 때 만족되는 것으로 가정하였다. 또한 수평풍하중은 노풍도 A, 기본풍속 35m/sec, 중요도 계수 1.0, 풍력계수는 바람이 불어오는 방향 0.8, 불어가는 방향 0.6의 총 1.4로 가정하여 각 층의 레벨에서 수평집중하중으로 작용하는 것으로 계산하였다[9].

구성부재의 재료는 설계압축강도가 240 kgf/cm²인 콘크리트로 가정하였으며, 각 부재의 초기 단면 크기는 <표 2>와 같으며, 부재들은 기둥, 보 및 전단벽 각각 5개층 단위로 같은 그룹으로 하였으며, 아웃리저는 층별로 같은 그룹으로 설정하였다.

<표 2> 초기부재 단면크기(mm)

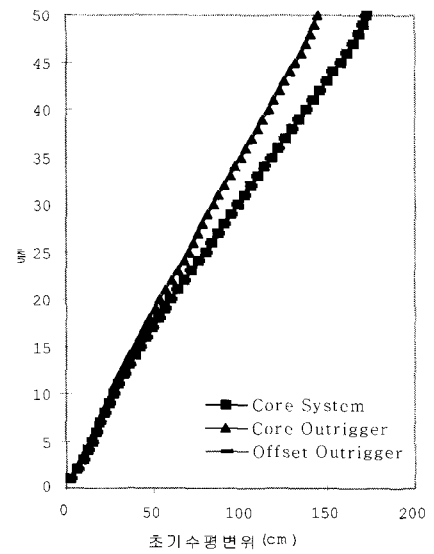
부재종류	단면크기
기둥	폭 : 500, 춤 : 500
보	폭 : 300, 춤 : 600
전단벽, 아웃리거	두께 : 200

<그림 5>는 각 모델들의 강막작용이 고려된 경우와 고려되지 않은 경우에 대한 초기단계의 수평변위를 나타낸 것이고, <표 3>은 각 시스템의 최상층 변위를 나타낸 것이다.

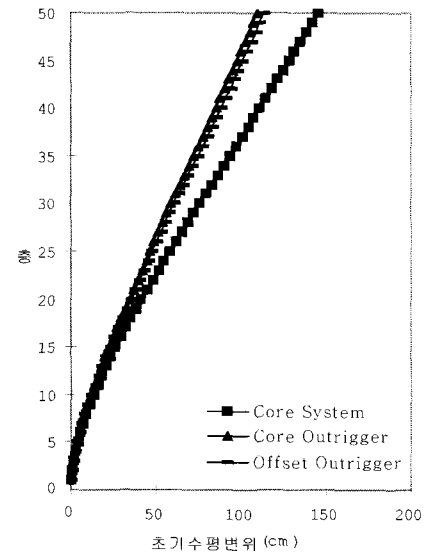
<표 3> 초기단계의 수평변위 및 감소율

적용모델	강막작용이 고려되지 않은 경우	강막작용이 고려된 경우
	수평변위 (cm)	수평변위 (cm)
Core System	172.9	145.1
Core Outrigger	144.5	109.6
Offset Outrigger	172.1	113.1

먼저 바닥판의 강막작용이 고려된 경우를 살펴보면, 코아시스템에 비해 코아 및 오프셋 아웃리거의 경우가 20%이상 변위가 덜 발생하였다. 반면에 강막작용이 고려되지 않은 경우에는 코아 아웃리거의 경우만 16.4% 덜 발생하였고, 오프셋 아웃리거의 경우는 코아시스템과 거의 차이가 없는 것을 알 수 있다. 이는 오프셋 아웃리거 시스템의 거동특성에 기인한 것이다. 즉, 코아가 있는 구조물에 오프셋 아웃리거가 사용될 경우, 아웃리거에는 서로 다른 횡변위를 구속하려는 전단력이 아웃리거 윗면과 아랫면에 발생하고 결과적으로 오프셋아웃리거가 위치한 층에서 코아의 휨에 저항하는 전단우력이 발생된다. 여기에 외부기둥이 아웃리거 끝단에 설치되면, 아웃리거에서 발생하는 회전을 구속하기 위해 아웃리거 양끝단의 기둥들에 인장 및 압축의 커플축력이 발생되며, 이로 인해 아웃리거에 전단력이 발생되고 이는 다시 슬래브의 면내강성을 통해 코아로 전달된다^{1),2)}. 즉, 바닥슬래브가 기둥에서 발생하는 커플축력을 전단력의 형태로 코아에 전달하기 때문이다. 따라서 오프셋 아웃리거시스템의 거동특성을 반영하기 위해서는 바닥슬래브의 강막작용을 고려해야 하며, 오프셋 아웃리거 시스템이 횡하중에 효과적으로 저항하도록 하기 위해선 바닥슬래브의 면내강성이 충분히 확보되어야한다.



(a) 강막작용이 고려되지 않은 경우

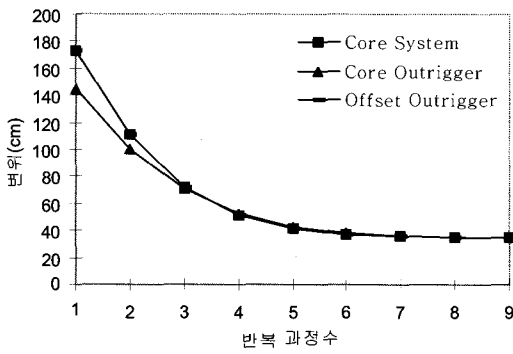


(b) 강막작용이 고려된 경우

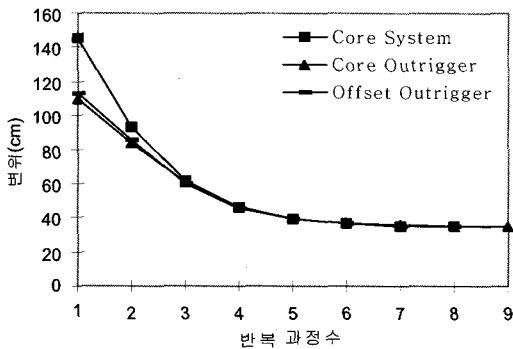
<그림 5> 예제모델의 초기수평변위

<그림 6>은 반복과정에 따른 변위이력을 나타낸 것이다. 네 모델 모두 강막작용의 고려여부에 상관없이 8, 9회의 반복과정을 통해 목표제어변위값인 35.0cm로 수렴되었으며, 수렴되는 동안 안정적으로 변위가 제어되는 것이 보여진다.

수평변위가 일정한 수준으로 제어된 고층구조물의 중량감소율(E_w)은 아웃리거시스템에 대한 효율성과 같은 의미로 볼 수 있으며, 중량감소율식은 (22)식과 같다. 여기서 W는 구조물 전체 중량을 나타낸다.



(a) 강막작용이 고려되지 않은 경우



(b) 강막작용이 고려된 경우

<그림 6> 반복과정에 따른 변위이력

$$E_w = \frac{W_{core} - W_{outrigger}}{W_{core}} \times 100(\%) \quad (22)$$

또한 코아 아웃리저 시스템에 대한 오프셋 아웃리저 시스템의 효율성 저감률(R_{Woff})은 코아구조물의 전체중량에 대한 오프셋 아웃리저 시스템과 코어아웃리저 시스템의 중량차로부터 (23)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{Woff} = \left(\frac{W_{offset} - W_{core,outrigger}}{W_{core}} \right) \times 100(\%) \quad (23)$$

<표 4>는 (22)식을 이용하여 최적설계결과 구해진 시스템별 중량에 따른 효율성을 나타낸 것이다.

최적중량에 따른 시스템별 효율성을 살펴보면, 강막작용이 고려된 경우 코아시스템에 비해 코아 아웃리저의 경우가 10.48%, 오프셋 아웃리저의 경우가 7.81% 더 효율적인 것으로 나타났다. 반면에 강막 작용이 고려되지 않은 경우에는 코아 아웃리저의 경우가 6.44% 효율적인 것으로 나타났고, 오프셋

<표 4> 최적설계에 의한 구조물 전체중량

적용모델	강막작용이 고려되지 않은 경우		강막작용이 고려된 경우	
	최종중량 (tf)	효율성 (%)	최종중량 (tf)	효율성 (%)
Core System	49640.2	기준	45541.2	기준
Core Outrigger	46443.8	6.44	40769.3	10.48
Offset Outrigger	49673.8	-0.07	41983.8	7.81

아웃리저의 경우는 효율성이 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 초기단계에서와 같이 오프셋 아웃리저 시스템의 거동특성에 기인한 것으로 아웃리저의 거동특성을 반영하기 위해서는 바닥판의 강막작용을 고려해야 함을 알 수 있다.

(23)식을 이용하여 오프셋 아웃리저의 효율성 저감율을 구해보면, 코아 아웃리저에 비해 강막작용이 고려된 경우 2.67%, 강막작용이 고려되지 않은 경우 6.51% 효율성이 저감되는 것으로 나타났다.

6. 결 론

본 연구에서는 수평하중을 받는 전단벽 아웃리저 시스템의 거동특성을 평가하기 위해 강성최적설계 기법 및 50층 규모의 전단벽 아웃리저 시스템모델을 제시하였으며, 해석결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 강성최적설계기법을 이용하여 8, 9회의 반복과정을 통해 적용모델의 횡변위를 안정적이고 정량적으로 제어할 수 있었다.

2) 강막작용이 고려된 경우, 제시된 거동특성 및 효율성 평가방안을 통해 코아 아웃리저 및 오프셋 아웃리저의 경우가 코아시스템에 비해 각각 10.48%, 7.81% 더 효율적이고, 오프셋 아웃리저 시스템이 코아 아웃리저 시스템에 비해 2.67% 효율성이 저감된다는 정량적인 정보를 얻을 수 있었다.

3) 회전강성을 갖는 등매개변수 평면응력요소를 전단벽요소로 사용함으로써 골조와 전단벽요소사이의 변위자유도 적합성문제를 해결하고 해석오차를 줄일 수 있었다.

4) 강막작용을 고려하여 변위민감도와 강성최적설계를 정식화함으로써 메모리 및 계산효율을 높일 수 있었고, 오프셋 아웃리저 시스템에 대한 거동특

성을 잘 반영할 수 있었다.

본 연구에서 제시된 전단벽 아웃리저 시스템의 거동특성 및 효율성 평가 방안은 고층구조물의 구조계획 및 설계단계에서 구조엔지니어에게 큰 도움을 줄 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Smith, B. S. and Coull, A., Tall Building Structures: Analysis and Design, John Wiley and Sons, 1991
2. Smith, B. S et al, Offset Outrigger Concept for Tall Building Structures, Tall Building Structures - A World View. Proceedings of 67th Regional Conference, Council on Tall Buildings and Urban Habitat, 1997, pp.103~112
3. G.N. Vanderplaats, Numerical Optimization Techniques for Engineering Design of Optimal with Applications, McGraw-Hill, New York, 1984
4. 김호수, 이한주, "민감도 해석을 이용한 전단벽-골조 구조시스템의 강성최적설계," 전산구조공학회 논문집, 19권 1호, pp.63~71, 2006. 3
5. 이한주, 김호수, "수평하중을 받는 합성골조-전단벽 구조시스템의 횡변위 제어 방안," 대한건축학회 논문집, 21권 8호, pp.59~65, 2005. 8
6. 이한주, 정성진, 김호수, "강성최적설계기법을 이용한 아웃리저 시스템의 거동특성 및 효율성 평가," 한국공간구조공학회 논문집, 5권 3호, pp.120-127, 2005. 9
7. 김영민, 박상준, 김호수, 홍성목, "오프셋 아웃리저 시스템의 구조적 거동특성 및 효율성에 관한 연구," 대한건축학회 논문집, 16권 1호, pp.43~52, 2000. 1
8. 정성진, 곽순섭, 김호수, "회전강성을 갖는 등매개변수 평면응력요소의 개발," 대한건축학회 논문집, 16권 9호, pp.35-41, 2000. 9
9. 대한건축학회, 건축물 하중기준 및 해설, 2000