

골조-전단벽 구조물의 횡변위제어를 위한 동적 민감도 해석

Dynamic Sensitivity Analysis For Lateral Drift Control Of Frame-Shear Wall Structures

이 한 주* 김 지 연** 한 승 백** 남 경 연** 김 호 수***
Lee, Han-Joo • Kim, Ji-Youn • Han, Seung-Baek • Nam, Kyung-Yun • Kim, Ho-Soo

ABSTRACT

This study presents stiffness-based optimal design to control quantitatively lateral drift of frame-shear wall structures subject to seismic loads. To this end, lateral drift constraints are established by introducing approximation concept that preserves the generality of the mathematical programming and can efficiently solve large scale problems. Also, the relationships of sectional properties are established to reduce the number of design variables and resizing technique of member is developed under the 'constant-shape' assumption. Specifically, the methodology of dynamic displacement sensitivity analysis is developed to formulate the approximated lateral displacement constraints. The 12 story frame-shear wall structural models is considered to illustrate the features of dynamic stiffness-based optimal design technique proposed in this study.

Keywords : *Dynamic Displacement Sensitivity, Stiffness-Based Optimization, Frame-ShearWall*

1. 서 론

고층건물의 경우 수평하중 저항시스템의 적용방안과 수평변위 제어문제는 사용성 측면뿐만 아니라 안전성 측면에서도 매우 중요한 요소중 하나가 된다. 특히 지진이나 바람 등의 수평하중을 고려할 경우 정적뿐만 아니라 동적 거동특성도 고려하여야 한다. 그러나 고층 구조물의 동적거동에 따른 수평변위의 제어는 매우 복잡하여 구조변경에 따른 거동변화를 예측하는 일이 쉽지 않다. 또한 구조엔지니어의 경험에 의존하는 정성적 방법에 의한 횡변위제어는 경우에 따라 여러 번의 반복해석에도 불구하고 최적의 선택을 놓치는 경우가 많다. 이에 따라 국내에서도 횡변위를 정량적으로 최적제어하는 연구가 진행되어 왔다(이한주, 김호수, 2006). 그러나 기존 연구에서는 동적하중에 따른 변위제어에 있어서 골조구조물에 대해 제한적으로 적용 가능하다. 따라서 본 연구에서는 골조구조뿐만 아니라 삼차원 골조 전단벽 상호작용 구조물의 횡변위를 정량적으로 제어할 수 있는 방안을 마련하고자 한다. 이를 위해 수학적 일반성을 가지면서 큰 규모의 문제도 효율적으로 다룰 수 있는 근사화 개념을 도입하여 횡변위 구속조건식을 설정한다. 아울러 구조부재의 단면특성 관계식을

* 청주대학교 산업과학연구소 전임연구원, 공학박사 Email : han_joo@hanmail.net

** 청주대학교 건축공학부 석사과정 Email : grinn@hanmail.net, hojinsos@naver.com, kotd81@hanmail.net

*** 청주대학교 건축공학부 교수, 공학박사 Email : hskim@cju.ac.kr

설정함으로써 설계변수의 수를 줄여주고, 초기에 주어진 단면형상이 최적설계 과정동안 계속 유지된다는 가정을 이용하여 최적설계결과에서 구해진 단면특성에 따라 부재단면크기를 산출하는 방안을 강구한다. 특히 근사화된 횡변위 구속조건식을 정식화 하기위해 동적 변위민감도해석 방안이 마련된다. 이와 같이 제시된 동적 강성최적설계 기법의 효용성을 검토하기 위해 12층 규모의 삼차원 골조-전단벽 구조물을 적용하고자 한다.

2. 골조-전단벽 구조물의 동적 변위민감도

2.1 동적 변위민감도

일반적으로 지진하중을 받는 구조물의 동적해석에는 응답스펙트럼 해석법과 시간이력해석법이 사용되는데, 본 연구에서는 KBC 2005규준(대한건축학회, 2005)에서 제공하는 설계스펙트럼 가속도를 이용한 응답스펙트럼 해석법을 이용한다. 또한 모드별 응답의 조합은 SRSS법을 적용하며, 이를 이용한 j절점의 변위응답은 다음 (1)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_j = \sqrt{\sum_{r=1}^f \{\nu^{(r)} S_D(T_r) (\psi_j^{(r)})\}^2} = \sqrt{\sum_{r=1}^f P_j^{(r)^2}} \quad (1)$$

여기에서, $\nu^{(r)} = \sum_{j=1}^f m_j \psi_j^{(r)}$: 모드참여계수, $S_D(T_r)$: T_r 에 대응하는 변위벡터값

$\psi^{(r)}$: M에 대해 정규화된 고유벡터, T_r : r차 고유주기

j절점의 동적 변위민감도를 구하기 위해 (1)식을 x_i 에 대해 편미분하면, (2)식 및 (3)식과 같이 구성된다.

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_i} = \frac{1}{u_j} \sum_{r=1}^f P_j^{(r)} \cdot \frac{\partial P_j^{(r)}}{\partial x_i} \quad (2)$$

$$\frac{\partial P_j^{(r)}}{\partial x_i} = \frac{\psi_j^{(r)}}{\partial x_i} \nu^{(r)} S_D(T_r) + \psi_j^{(r)} \frac{\partial \nu^{(r)}}{\partial x_i} S_D(T_r) + \psi_j^{(r)} \nu^{(r)} \frac{\partial S_D(T_r)}{\partial x_i} \quad (3)$$

동적 변위민감도 해석을 수행하기 위해서는 골조와 전단벽에 대한 강성과 질량 도함수를 구하는 것이 필요하다. 이를 위해 설계변수를 주설계변수와 부설계변수로 나누어 단면특성관계식을 설정하고, 요소강성행렬을 강성행렬에 기여하는 단면특성에 대해 조합되어 있다는 개념을 이용한 강성 및 질량도함수를 사용한다 (이한주, 정성진, 김호수, 2006).

2.2 모드 및 고유치의 도함수

모드 도함수($\partial \nu^{(r)} / \partial x_i$)를 구하기 위해 모드참여계수를 x_i 에 대해 편미분하면 (4)식과 같이 된다.

$$\frac{\partial \nu^{(r)}}{\partial x_i} = \frac{\partial \psi^{(r)}}{\partial x_i} M\{1\} + \psi^{(r)} \frac{\partial M}{\partial x_i} \{1\} \quad (4)$$

고유벡터와 고유치 도함수를 산정하기 위해 (5)식과 같은 고유치문제를 (6)식과 같이 대치하고, ψ 의 계수

매트릭스를 F로 가정한다.

$$[K - \Omega_r M] \psi^{(r)} = 0 \quad (5)$$

$$F^{(r)} \psi^{(r)} = 0 \quad (6)$$

여기서, Ω_r : r차 고유치, $F^{(r)} = K - \Omega_r M$

임의의 f-벡터가 정규직교계 $\psi^{(1)}, \dots, \psi^{(f)}$ 와 1차 결합하게 된다는 점을 주목하면 고유벡터에 대한 도함수는 (7)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \psi^{(r)}}{\partial x_i} = \sum_{p=1}^f a_{r,p} \psi^{(p)} \quad (7)$$

여기서, $p=r$: $a_{r,r} = 0$

$$p \neq r : a_{r,p} = \left(\psi^{(p)} \left[\frac{\partial K}{\partial x_i} - \Omega_r \frac{\partial M}{\partial x_i} \right] \psi^{(r)} \right) / (\Omega_r - \Omega_p)$$

고유치의 도함수($\partial \Omega_r / \partial x_i$)를 구하기 위해 식 (6)의 양변에 $\psi^{(r)}$ 을 곱하고 x_i 에 대해 편미분하면 (8)식과 같이 구성된다.

$$\frac{\partial \psi^{(r)T}}{\partial x_i} F \psi^{(r)} + \psi^{(r)T} \frac{\partial F}{\partial x_i} \psi^{(r)} + \psi^{(r)T} F \frac{\partial \psi^{(r)}}{\partial x_i} = 0 \quad (8)$$

(8)식의 제 1 항과 3 항은 (6)식에 의해 '0'이 되며, (8)식에 (5)식을 대입하여 고유치 도함수에 대해 정리하고 정규모드의 직교성을 적용하면 (9)식과 같이 된다.

$$\frac{\partial \Omega_r}{\partial x_i} = \psi^{(r)T} \left[\frac{\partial K}{\partial x_i} - \Omega_r \frac{\partial M}{\partial x_i} \right] \psi^{(r)} \quad (9)$$

2.3 스펙트럼 가속도 및 주기에 따른 도함수

변위벡터 $S_D(T_r)$ 에 대한 도함수 $\partial S_D(T_r) / \partial x_i$ 는 체인룰을 이용하여 (10)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial S_D(T_r)}{\partial x_i} = \frac{\partial \{S_D(T_r)\}}{\partial T_r} \frac{\partial T_r}{\partial \omega_r} \frac{\partial \omega_r}{\partial \Omega_r} \frac{\partial \Omega_r}{\partial x_i} \quad (10)$$

$$\text{여기서, } \frac{\partial T_r}{\partial \omega_r} = -\frac{2\pi}{\omega_r^2}, \quad \frac{\partial \omega_r}{\partial \omega_r^2} = \frac{\partial (\omega_r^2)^{1/2}}{\partial \omega_r^2} = \frac{1}{2} \frac{1}{\omega_r}, \quad \omega_r : \text{고유진동수}$$

$\partial S_D(T_r) / \partial T_r$ 을 구하기 위해 국내 KBC 2005규준에 적용된 설계스펙트럼 가속도를 이용하여 (11)식과 같이 산정한다.

$$T \leq T_o : \frac{\partial S_D(T_r)}{\partial T_r} = \frac{0.6}{\omega_r^2} \frac{S_{PS}}{T_o}$$

$$T_0 \leq T \leq T_S : \frac{\partial S_D(T_r)}{\partial T_r} = 0 \quad (11)$$

$$T_S \leq T : \frac{\partial S_D(T_r)}{\partial T_r} = -\frac{S_{D1}}{\omega_r^2} \frac{1}{T_r^2}$$

여기서, T : 구조물의 고유주기 (초) , $T_0 = 0.2S_{D1}/S_{DS}$, $T_S = S_{D1}/S_{DS}$

S_{DS} : 단주기 설계스펙트럼 가속도 , S_{D1} : 주기 1초의 설계스펙트럼 가속도

3. 강성최적화 방안

제시된 설계법은 횡변위를 목표변위로 제어하면서 구조물의 중량을 최소화하는 것을 설계목표로 한다. 또한 일반적으로 고층구조물에 적용되는 횡변위 구속조건에는 최상층 및 층간변위 구속조건이 있는데, 본 연구에서는 최상층 변위구속조건을 대상으로 한다. 이를 정식화하면 (12)식과 같다(이한주, 김호수, 2006).

$$\text{Minimize} : \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \omega_i \Delta x_i^2 \quad (12a)$$

$$\text{Subject to} : \Delta u_t - \sum_{i=1}^n C_{it} \Delta x_i \geq 0 \quad (12b)$$

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

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

최적화 문제는 (12)식으로부터 라그랑지 함수의 최소화로서 정식화 된다.

$$L(\Delta x_\ell, \lambda) = \frac{1}{2} \sum_{\ell=1}^m \omega_\ell \Delta x_\ell^2 + \lambda \left(\Delta u_t - \sum_{\ell=1}^m C_{t\ell} \Delta x_\ell \right) \quad (13)$$

여기서 λ 는 라그랑지 승계수이다. 최적설계과정은 구조물의 횡변위가 목표 제어값에 수렴할 때까지 (13)식을 최소화하는 반복과정과 부재단면을 재산정하는 것을 포함한다.

4. 적용예제

동적 강성최적설계의 효율성을 살펴보기 위해 그림 1과 같은 12층 골조-전단벽 모델을 고려한다. 적용모델의 베이 및 스펠간격은 9m이고, 층고는 4.0m이다. 모든 구성 부재의 접합부는 강절점으로 가정한다. 콘크리트의 설계압축강도는 24MPa를 적용하고, 각 층의 질량은 1200kN/g로 가정하였다. 또한 지진하중은 KBC 2005규준에 따라 적용하였으며, 지진하중 산정을 위한 계수는 표 1과 같다. 동적해석을 위해 응답스펙트럼해석법을 이용하였고, 모델링은 각 층별로 평면상의 두 직각 방향에 대한 변위와 수직축에 대한 회전을 포함하는 3개의 자유도를 갖는 3차원 모델을 사용한다. 허용최상층 변위는 8.0cm로 설정하고, 최적설계의 수렴은 제어된 횡변위와 제어하려는 횡변위의 차이가 0.5%이내일 때 만족되는 것으로 가정하였다. 각 부재의 초기 단면크기는 표 2와 같고, 부재들은 기둥, 보, 전단벽은 각각 3개층 단위로 같은 그룹으로 설정한다.

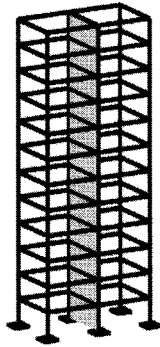


그림 1. 12층 골조-전단벽 모델

표 1. 지진하중산정을 위한 적용계수

항목	계수값
지역계수	0.11
지반종류	S_D
중요도계수	1.2
반응수정계수	5.5

표 2. 초기부재 단면크기(mm)

부재	폭	높
보	300	600
기둥	400	400
전단벽	두께 : 150	

그림 2 는 반복과정에 따른 횡변위를 나타낸 것인데, 10회의 반복과정을 통해 목표제어변위값인 8.0cm로 수렴되었으며 수렴되는 동안 변위가 안정적으로 제어되는 것을 알 수 있다. 그림 3은 층별 중량비를 나타낸 것으로 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 효과

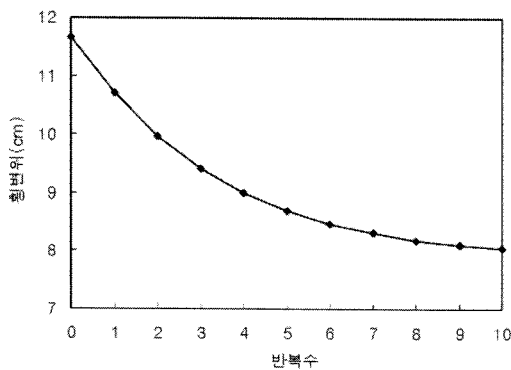


그림 2. 6층 RC 골조모델의 변위이력

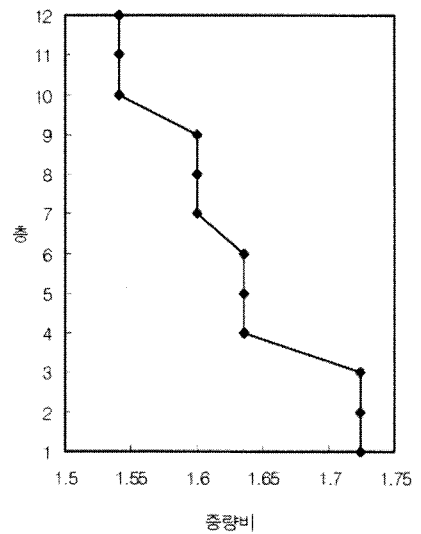


그림 3. 층별 중량비
(최종설계중량/초기설계중량)

적임을 알 수 있다. 또한 층별 물량이 저층에서 고층으로 갈수록 차츰차츰 줄어들므로 시공성이나 실용성 측면에서 바람직한 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 동적 변위민감도를 이용하여 지진하중을 받는 삼차원 골조-전단벽 구조물의 횡변위를 정량적으로 제어할 수 있는 방안을 제시하고자 하였으며 이를 예제에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 동적변위 민감도기법에 근사화 개념을 도입하여 초기의 최적화 문제를 간단한 대수학적인 형태를 갖는 근사화된 양함수형태의 문제로 대체시킴으로써 알고리즘의 효율성을 증대시켰다.
- 2) 예제적용 결과, 10회의 반복과정을 통해 안정적으로 횡변위를 제어하는 것으로 나타났으며, 최적 부재크기가 저층에서 고층으로 차츰차츰 줄어들므로 시공성과 실용성면에서 바람직한 것으로 판단된다.
- 3) 근사화기법이나 부재 그룹화기법을 통해 시공상, 설계상의 요구조건을 만족시킬 수 있으며 아울러 설계변수를 줄여줌으로써 계산양이나 시간면에서 큰 효율을 가져올 수 있었다.
- 4) 동적 변위민감도 기법을 이용한 삼차원 골조-전단벽 구조물의 동적 강성최적화기법은 고층골조의 초기 구조계획 및 대안 설계단계에서 구조실무에 큰 도움을 줄 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(03산C04 -01)에 의해 수행되었음.

참고문헌

- 대한건축학회 (2005), 건축구조설계기준, 기문당, 서울
- 이한주, 김호수 (2006), “동적 변위민감도 해석을 이용한 고층 RC 골조 구조물의 정량적인 횡변위 제어 방안,” 한국공간구조학회 논문집, 6권 3호, pp.103-110
- 이한주, 정성진, 김호수 (2006), “강막작용을 고려한 전단벽 아웃리거 시스템의 강성최적설계기법,” 대한건축학회 논문집, 22권 7호, PP.59-66
- Kirsch, U. (1991), “Reduced Basis Approximations of Structural Displacements for Optimal Design,” AIAA Journal, Vol. 29, pp.1751-1758
- Schmit, L. A. and Farshi, B. (1974), “Some Approximation Concepts for Structural Synthesis,” AIAA Journal, Vol. 11, pp.489-494
- Taranath, B. (1982), Structural Analysis & Design of Tall Building, McGraw-Hill
- Vanderplaats, G. N. (1984), Numerical Optimization Techniques for Engineering Design of Optimal with Applications, McGraw-Hill, New York