

지반-구조물 상호작용을 고려한 복합제어시스템의 최적설계

박관순 · 박장호^{*†}

동국대학교 건축공학과 · *아주대학교 건설시스템공학과
(2011. 12. 19. 접수 / 2012. 4. 5. 채택)

Optimal Design of Integrated Control System Considering Soil-Structure Interaction

Kwan Soon Park · Jang Ho Park^{*†}

Department of Architectural Engineering, Dongguk University

*Department of Civil System Engineering, Ajou University

(Received December 19, 2011 / Accepted April 5, 2012)

Abstract : For the vibration control of earthquake-excited buildings, an optimal design method of integrated control system considering soil-structure interaction is studied in this paper. Interaction between soils and the base of the building is simply modeled as lumped parameters and equations of motion are derived. The equations of motion are transformed into the state space equations and the probabilistic excitations such as Kanai-Tajumi power spectral density function is introduced. Then an optimization problem is formulated as finding hybrid or integrated control systems which minimizes the stochastic responses of the building structure for given constraints. In order to investigate the feasibility of the optimization method, an example design and numerical simulations are performed with ten-story building. Finally, numerical results are compared with a conventional design case that soil-structure interaction is not considered.

Key Words : earthquake, vibration control, soil-structure interaction, integrated control system optimal design method

1. 서론

전 세계적으로 지진의 발생빈도가 증가하고 있으며 그 크기도 점점 커지고 있다. 이로 인하여 지진 및 자연재해로 인한 구조물의 피해가 증가함에 따라 동적하중에 의한 구조물 거동에 대한 관심이 높아지고 있다. 각국에서는 내진설계 개념을 도입하여 지진이 발생하였을 때 구조물에서 발생할 수 있는 과도한 변위를 줄이고자 하고 있으며, 우리나라에서도 내진설계 개념을 적극적으로 도입하여 건축물의 설계에 반영하고 있다. 동적하중에 의해 구조물에 발생하는 진동을 저감하기 위하여 강성을 증가시키는 방법이 외도 구조물의 에너지 흡수능력을 높일 수 있는 제진장치(vibration control device)를 이용하여 구조물의 동적응답을 제어하려는 많은 연구와 시도가 이루어지고 있다¹⁻³⁾. 제진장치는 외부로부터의 에너지 공급 유무에 따라 수동형 제어시스템(passive con-

trol system)^{4,5)}, 능동형 제어시스템(active control system)⁶⁾, 준능동형 제어시스템(semi-active control system)⁷⁻⁹⁾ 및 이들을 조합한 복합 제어시스템(integrated or hybrid control system)^{10,11)}으로 분류할 수 있다. 능동형과 준능동형 제진장치는 센서, 제어기, 하중재하기 등으로 구성이 되며, 성능이 우수하고 다양한 불확실성에 적극적으로 대처가 가능하지만 구성이 복잡하고 상대적으로 고가이다. 수동형 제진장치는 가격이 저렴하며 유지관리가 용이하나 다양한 진동수를 포함한 지진하중에 대한 대처 능력이 상대적으로 부족하다. 따라서 이들을 혼합한 복합 제어시스템을 적절히 구성하면 경제성과 성능을 동시에 추구할 수 있는 효과적인 제어시스템의 구축이 가능하다.

지진으로 인한 건물의 동적 거동은 건물의 고유주기와 감쇠에 영향을 받는다. 뿐만 아니라 작용한 지진파의 크기와 주파수 성분 그리고 지반조건 및 건물과 지반의 상호작용 등도 건물의 동적 거동에 영향을 미치는 주요한 인자라고 할 수 있다. 따라서

[†] To whom correspondence should be addressed.
jangho@ajou.ac.kr

건물의 동적 응답을 저감하기 위한 제어시스템의 구축에는 이러한 인자들에 의한 영향을 고려하고 설계에 반영하여야 최적의 제진성능을 얻을 수 있을 것이다. 그러나 제어시스템에 대한 대부분의 연구가 건물의 동적 거동에 영향을 미치는 주요한 인자로 건물의 고유주기와 감쇠 및 지진파의 크기와 주파수 성분을 고려하고 있으나, 지진에 대한 건물의 제어 시스템 설계에 지반-구조물 상호작용을 고려한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 논문에서는 기존의 연구에서는 고려되지 않은 지반-구조물 상호작용의 영향을 고려하여 지진에 대한 건물의 복합 제어시스템 최적설계법에 대하여 연구하였다. 지반-구조물 상호작용을 설계에 적합한 형태로 모델링한 운동방정식으로부터 상태공간방정식을 유도하였다. 지진파의 특성을 확률적으로 모델링한 PSD(power spectral density)함수를 얻어진 방정식과 결합하고 이를 풀어서 얻어진 확률응답을 최소화하는 최적화 문제를 구성하였다. 최적화 방법으로는 유전자 알고리즘(genetic algorithm)^{12,13)}을 사용하였으며, 이로부터 주어진 건물에 대한 복합 제어시스템의 최적설계를 수행하였다. El Centro 지진(1940)과 Kobe 지진(1995)을 사용하여 지진응답 해석을 수행하고 지반-구조물 상호작용이 복합 제어시스템의 최적설계에 미치는 영향과 효과를 살펴 보았다.

2. 지반-구조물-제어시스템 모델링

구조물이 암반지역에 위치할 경우, 지반운동에 의한 구조물의 거동은 지반과 구조물의 상호작용을 고려하지 않고 고정기초를 갖는 구조물로 가정하여 식 (1)과 같은 운동방정식으로 쓸 수 있다.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -M[1]\ddot{x}_g \quad (1)$$

여기서 M, C, K 는 각각 구조물의 질량, 감쇠 및 강성행렬을 나타내며, x 는 구조물의 지반에 대한 상대변위를, \ddot{x}_g 는 절대 수평 지반가속도를 의미한다.

그러나 암반지역이 아닌 경우에는 구조물의 특성과 지반의 특성에 따라 지반-구조물 상호작용이 발생하게 되며, 이로 인하여 암반지역에 건설되는 구조물과는 다른 동적 거동을 보이게 된다. Betti 등의 연구에 의하면 입력지진의 특성과 지반-구조물 시스템의 동적 특성에 따라 그 응답이 증가할 수도 있고 감소할 수도 있어 지반-구조물의 상호작

용의 영향을 고려하는 것이 바람직하다고 하였다¹⁴⁾. 지반-구조물 상호작용을 고려한 해석은 1970년 대부터 시작되었으며, 현재까지 해석적 방법, 수치적 방법, 실험적 방법을 포함한 다양한 방법들이 개발되어 사용되고 있다. 본 논문에서는 반복적 계산에 의하여 최적화 과정을 거치는 동안 많은 해석이 이루어져야 하므로 해석의 자유도를 크게 증가시키지 않는 것이 바람직하며 이에 따라 집중매개변수를 이용하여 기초와 지반에 대응되는 강성, 감쇠를 모델링하는 방법을 사용하였다. 본 연구에서는 Table 1에 제시된 Richart 등에 의하여 제시된 반무한체 지반에 놓인 원형 강체기초의 등가강성과 등가감쇠를 구하는 방법을 사용하였다¹⁵⁾.

Table 1. Equivalent stiffness and equivalent damping for rigid footing

	Stiffness coefficient	Damping coefficient
Horizontal translation	$k_h = \frac{8GR}{2-\nu}$	$c_h = \frac{4.6R^2}{2-\nu} \sqrt{\rho G}$
Vertical translation	$k_v = \frac{4GR}{1-\nu}$	$c_v = \frac{3.4R^2}{1-\nu} \sqrt{\rho G}$
Rocking rotation	$k_\psi = \frac{8GR^3}{3(1-\nu)}$	$c_\psi = \frac{0.8R^4 \sqrt{\rho G}}{(1-\nu)(1+B_\psi)}$

Table 1에서 ρ, G, ν 는 각각 기초지반의 밀도, 전단탄성계수, 포아송비를 의미하며, R 은 기초의 등가반경을 나타낸다.

Fig. 1은 지반의 등가강성과 등가감쇠를 이용한 지반-구조물 상호작용 모델을 나타낸다.

구조물이 커지면 기초의 크기가 커지고 이에 따라 회전(rocking rotation)에 대한 강성은 급격하게 커지게 되어 회전에 대한 지반-구조물 상호작용의 효과는 작아지게 된다. 이에 따라 수평 지반운동을 받는 지반-구조물 시스템의 모델은 기초지반의 등가 수평 강성 및 등가 수평 감쇠를 적용하여 나타낼 수 있고, 이에 대한 이산화된 운동방정식은 다음 식 (2)와 같이 쓸 수 있다.

$$M_s \ddot{x}_s + C_s \dot{x}_s + K_s x_s = -M_s [1] \ddot{x}_g \quad (2)$$

여기서, $M_s = \begin{bmatrix} m_b & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & \dots & 0 & 0 \\ & & \vdots & & \\ 0 & 0 & \dots & m_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & m_n \end{bmatrix}$,

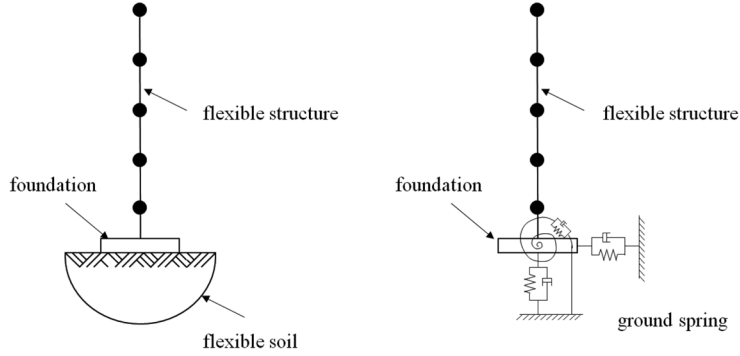


Fig. 1. Lumped parameter model considering soil-structure interaction.

$$C_s = \begin{bmatrix} c_h + c_1 & -c_1 & \dots & 0 & 0 \\ -c_1 & c_1 + c_2 & \dots & 0 & 0 \\ & & \vdots & & \\ 0 & 0 & \dots & c_{n-1} + c_n & -c_n \\ 0 & 0 & \dots & -c_n & c_n \end{bmatrix},$$

$$K_s = \begin{bmatrix} k_h + k_1 & -k_1 & \dots & 0 & 0 \\ -k_1 & k_1 + k_2 & \dots & 0 & 0 \\ & & \vdots & & \\ 0 & 0 & \dots & k_{n-1} + k_n & -k_n \\ 0 & 0 & \dots & -k_n & k_n \end{bmatrix},$$

$x_s = \begin{bmatrix} x_b \\ x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_b \\ x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$, x_b 는 지반에 대한 기초의 상

대변위, x_i 는 i 층의 지반에 대한 상대변위, m_b 는 기초의 질량, m_i 는 i 층의 질량, c_h 는 지반의 수평방향 감쇠비, c_i i 층의 감쇠비, k_b 는 지반의 수평강성, k_i 는 i 층의 강성을 의미한다($i=1, \dots, n$).

식 (2)로 주어지는 지반-구조물 시스템의 임의의 층에 수동형 감쇠장치와 능동형 제진장치를 설치하면 운동방정식은 다음 식 (3)과 같이 쓸 수 있다.

$$M_s \ddot{x}_s + [C_s + C_p] \dot{x}_s + K_s x_s = -M_s [1] \ddot{x}_g + B_t u \quad (3)$$

여기서, C_p 는 수동형 감쇠장치로 인하여 추가되는 감쇠행렬을, B_t 은 능동형제진장치의 위치를 나타내는 행렬을, u 는 공급되는 제어력벡터를 나타낸다. 상태벡터 x_t 를 다음과 같이 정의하면,

$$x_t \equiv \begin{bmatrix} x_s \\ \dot{x}_s \end{bmatrix} \quad (4)$$

지반-구조물-제어 시스템의 상태공간방정식(state space equation)을 식 (5)와 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{x}_t = A x_t + B_u u + B_t \ddot{x}_g \quad (5)$$

$$\text{여기서, } A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M_s^{-1} K_s & -M_s^{-1} (C_s + C_p) \end{bmatrix},$$

$B_u = \begin{bmatrix} 0 \\ M_s^{-1} B_u \end{bmatrix}$, $B_t = \begin{bmatrix} 0 \\ -[1] \end{bmatrix}$ 를 의미한다. 능동 제어에 있어서 최적제어이론 등을 적용하여 얻어진 gain matrix를 $G(s)$ 라 하면, 제어력 u 는 다음의 식 (6)과 같이 주어지며,

$$u = -G x_t \quad (6)$$

이때, 최적제어이론 중 널리 알려진 LQR(linear quadratic regulator) 방법¹⁶⁾을 사용하면, 식 (7)로 주어지는 성능지수를 최소화하는 gain matrix G 을 구할 수 있다.

$$J_p = \int_0^\infty [x_t^T Q x_t + u^T R u] dt \quad (7)$$

여기서, Q 와 R 은 각각 가중행렬로서 설계변수가 된다. gain matrix G 는 가중행렬 Q 와 R 이 결정되면, 식 (8)로 표현되는 Riccati 방정식의 해인 S_r 을 구하여 식 (9)로 표현된다.

$$(A - B_u G)^T S_r + S_r (A - B_u G) - S_r B_u R^{-1} B_u^T S_r + Q = 0 \quad (8)$$

$$G = -R^{-1} B_u^T S_r \quad (9)$$

3. 최적화 문제

제어시스템은 주어진 하중과 제약조건 등에 대하여 최적의 제어 효과를 얻도록 설계되는 것이 좋다. 제약조건으로는 일반적으로 비용적인 요소가 되며, 사용 가능한 제어력이나 에너지, 설치할 에너지 흡수기구의 총량 등이 될 수 있다. 한편, 지진에 대

한 제어시스템의 설계를 위해서는 지진하중이 정적이 되어야 하는데 지진은 미래의 발생 가능한 불확실한 사건이므로 이러한 특성을 반영할 수 있으며, 설계에 이용하기가 간편한 것이 바람직하다. 이 연구에서는 입력지반운동을 하나의 동적 필터(filter)로 표현하는 방법을 사용하였으며, 입력지반운동의 모형으로서 가장 널리 사용되고 있는 Kanai-Tajimi 필터^{17,18)}를 사용하여 복합 제어시스템의 설계최적화 문제를 구성하였다. Kanai-Tajimi PSDF(Power Spectral Density Function) 모델은 다음과 같다.

$$\Phi(\omega) = S_0 \frac{\omega_g^4 + (2\xi_g \omega_g \omega)^2}{(\omega^2 - \omega_g^2)^2 + (2\xi_g \omega_g \omega)^2} \quad (10)$$

여기서, S_0 는 white noise의 강도, ω_g , ξ_g 는 각각 매개변수들이다. 이 식을 단자유도 운동계에 white noise 입력으로 하여 상대지반가속도(relative ground motion)를 출력하는 미분방정식으로 표현하면 다음의 식 (11)과 같다.

$$\ddot{x}_r(t) + 2\xi_g \omega_g \dot{x}_r(t) + \omega_g^2 x_r(t) = w(t) \quad (11)$$

여기서, $x_r(t)$ 는 상대지반운동을, $w(t)$ 는 강도 S_0 를 갖는 white noise를 나타낸다. 절대지반가속도(\ddot{x}_g)를 상대지반가속도와 white noise의 차로서 다음의 식 (12)와 같이 정의하고,

$$\ddot{x}_g(t) = \ddot{x}_r(t) - w(t) = \begin{bmatrix} -\omega_g^2 & -2\xi_g \omega_g \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r \\ \dot{x}_r \end{bmatrix} \quad (12)$$

식 (12)와 식 (9)를 식 (5)에 대입하고 정리하면 다음과 같은 식 (13)이 얻어진다.

$$\begin{aligned} x_{aug} \equiv \begin{bmatrix} x_t \\ x_r \\ \dot{x}_r \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A - B_u G & -\omega_g^2 B_t & -2\xi_g \omega_g B_t \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\omega_g^2 & -2\xi_g \omega_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_t \\ x_r \\ \dot{x}_r \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} w(t) &\equiv A_{aug} x_{aug} + B_{aug} w(t) \end{aligned} \quad (13)$$

$S = E[x_{aug} \cdot x_{aug}^T]$ 라 하면 S 는 공분산행렬(covariance matrix)이 되며 정상상태에서 다음 식 (14)의 대수 Lyapunov 방정식 (algebraic Lyapunov equation)을 만족한다.

$$A_{aug} S + S A_{aug}^T + B_0 = 0 \quad (14)$$

식 (14)에서 B_0 는 비대각 요소가 모두 0이며 대각 요소는 $2\pi S_0$ 인 정방행렬이다. 이 식을 풀어서 S 를 구하면 지반운동 가속도입력의 PSDF가 주어졌을

때 지반-구조물-제어시스템에서 구조물의 rms(root mean square) 응답을 각 층별로 구할 수 있다. 이제 i -층에서의 rms 변위 응답을 σ_i 라 하면 다음과 같이 최적화 문제를 정식화할 수 있다.

Find the optimal solution $B_u^*, B_p^*, P(s)^*, G(s)^*$ which minimize J ,

$$J = \sum_{i=1}^n \sigma_i \quad (15)$$

subject to, $u_i \leq u_{\max} (i = 1, \dots, n_c)$ n_c =number of actuators

$p_i \leq p_{\max} (i = 1, \dots, n_p)$ n_p =number of passive devices

여기서, u_i 는 i -층 하중재하기의 제어력, p_i 는 i -층 제어장치의 용량, 하중재하기의 제어력의 최대제한값, 수동제어장치의 최대용량, B_u^* 는 최적하중재하기 위치, B_p^* 는 최적수동제어장치 위치, $P(s)^*$ 는 수동제어기의 최적분배, $G(s)^*$ 는 최적제어기를 각각 나타낸다. 정식화된 최적화 문제는 확률입력 지반운동인 Kanai-Tajimi PSDF가 입력으로 주어졌을 때 지반-구조물 상호작용을 고려하여 구조물의 각 층에서의 변위 응답의 합을 최소화하는 최적의 제어시스템을 구하는 문제이며, 제어력과 사용 가능한 수동형 제어장치의 용량의 제한값이 제약조건으로 작용하게 된다. 또한, 수동형 감쇠기의 배치 및 용량, 능동형 제어기의 설치위치와 gain matrix를 같이 결정해야 하는 동시최적화 문제가 된다.

4. 설계 예제 및 수치모사

지반-구조물 상호작용을 고려한 경우와 지반-구조물 상호작용을 고려하지 않은 경우에 대하여 예제 구조물에 대한 복합 제어시스템의 최적설계를 수행하고, 지반-구조물 상호작용을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 능동형 텐던의 설치위치, 가중행렬의 크기, 수동형 댐퍼의 분배량, 제어력 등을 비교하였다. 지반-구조물 모델에 각각 지반-구조물 상호작용을 고려한 제어기 최적설계 결과와 지반-구조물 상호작용을 고려하지 않은 제어기 최적설계 결과를 적용하여 El Centro 지진(1940)과 Kobe 지진(1995)에 대한 지진응답해석을 수행하고, 제어성능을 비교하였다.

Table 2. Material properties of an example building

	Mass (kg)	Stiffness (N/m)	Damping (N·sec/m)
1st floor	525,500	574.5×10^6	1% Rayleigh damping of the first and second modes
2nd floor	497,000	574.5×10^6	
3rd-10th floor	420,700	514.5×10^6	

Table 3. Material properties of soil and footing

R = equivalent radius of footing	10 m
ρ = mass density of foundation soil	2100 kg/m ³
G = shear modulus of the soil	9.06×10^7 N/m ²
ν = Poisson's ratio of the soil	0.35

4.1. 대상 지반-구조물-제어시스템

대상 구조물은 1차 고유진동수로 1.27 Hz를 갖는 10층의 건물로서 전단빌딩으로 모델링하였으며 각 층의 질량, 강성 및 감쇠는 Table 2와 같다. 기초 지반은 지반-구조물 상호작용의 효과를 얻기 위하여 단단한 토사지반으로 가정하여 지반의 물성치를 Table 3과 같이 가정하였다.

설계 대상인 복합 제어시스템은 능동형 텐던 제어시스템과 선형감쇠기의 조합으로 선정하였으며, 총 3개의 능동형 텐던 제어시스템(active tendon control system)과 선형감쇠기를 각 층에 적절히 배치하고 동시에 최적의 제어를 설계하는 것으로 최적화 문제를 구성하였다. 설계에 있어서 Kanai-Tajimi PSDF 모델의 파라미터로 $\omega_g = 5\pi \text{rad/s}$, $\xi_g = 0.6$, $S_0 = 0.0871 \text{m}^2/\text{s}^3$ 을 적용하였으며, 이때 사용 가능한 선형감쇠기의 총량은 5,000kNsec/m 이하, 3개가 설치되는 능동형 텐던의 rms 제어력의 총

합은 30,000kN 이하로 제한하였다. 능동제어기의 설계에 있어서 가중행렬은 $Q = \begin{bmatrix} K_s & 0 \\ 0 & C_s + C_p \end{bmatrix}$ 로 하였으며, 행렬 R 의 요소들은 설계변수로 하였다.

4.2. 설계 결과 및 수치모사

앞에서 정의된 최적화 문제는 불연속적인 정수 값과 연속적인 실수값이 함께 설계변수에 포함되어 있으므로 미분학에 기초한 일반적인 최적화 방법으로는 그 해를 찾기가 어렵다. 따라서 이 연구에서는 해를 찾는 방법으로 유전자 알고리즘^{23,24)}을 사용하였다. 유전자 알고리즘을 적용하는데 있어서 한 세대는 50개의 개체로 이루어져 있으며, 교배는 2점교배(2-point crossover)를 사용하였고, 교배확률(crossover probability)은 85%, 돌연변이 발생확률(mutation probability)은 2.5%로 하였다. Fig.2는 지반-구조물 상호작용을 고려한 모델에 대한 최적화 과정을 나타내며, 반복횟수가 1400회 이후 최적해에 수렴함을 알 수 있다.

지반-구조물 상호작용을 고려한 모델에 대한 최

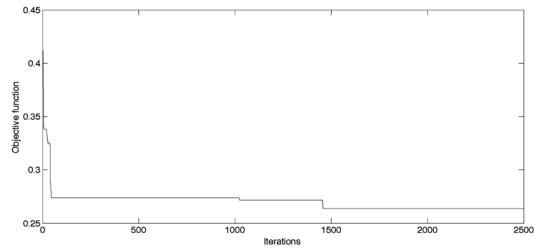


Fig. 2. Optimization process.

Table 4. Summary of optimized design variables

with SSI			without SSI		
Active Tendon	Passive Damper		Active Tendon	Passive Damper	
	Floor	Capacity(N/sec)		Floor	Capacity(N/sec)
Optimal Install Location; 3 rd Floor 4 th Floor 7 th Floor	1	0.64×10^5	Optimal Install Location; 3 rd Floor 5 th Floor 6 th Floor	1	3.47×10^5
	2	3.85×10^5		2	2.78×10^5
	3	3.85×10^5		3	7.64×10^5
	4	0.64×10^5		4	9.02×10^5
	5	6.41×10^5		5	2.08×10^5
Weighting Matrix $R = 10^{-15} \times \begin{bmatrix} 3.03 & & \\ & 9.13 & \\ & & 8.83 \end{bmatrix}$	6	5.13×10^5	Weighting Matrix $R = 10^{-10} \times \begin{bmatrix} 2.86 & & \\ & 4.98 & \\ & & 7.21 \end{bmatrix}$	6	5.56×10^5
	7	6.41×10^5		7	1.39×10^5
	8	8.33×10^5		8	8.33×10^5
	9	9.62×10^5		9	4.86×10^5
	10	5.13×10^5		10	4.86×10^5
	Σ	5.00×10^6		Σ	5.00×10^6

적설계의 결과와 지반-구조물 상호작용을 고려하지 않은 고정기초(fixed base) 모델에 대한 최적설계의 결과를 Table 4에 정리하였다. 결과를 보면 지반-구조물 상호작용을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우 능동형 텐던의 설치위치 뿐 아니라 가중행렬의 크기, 수동형 댐퍼의 분배량 모두 다른 결과를 보여주고 있다. 수동형 댐퍼의 분배량에 있어서는 지반-구조물 상호작용을 고려한 모델의 경우는 8층과 9층에 각각 전체용량의 16.7%와 19.2%가 배치되는 등 상당한 용량이 구조물의 상층부에 배치되는 것으로 나타났다. 반면 지반-구조물 상호작용을 고려하지 않은 고정기초 모델의 경우는 4층과 8층에 각각 전체용량의 18.0%와 16.7%가 배치되는 등 수동형 댐퍼가 구조물의 상층부와 하층부에 분산되어 배치되는 것으로 나타났다. 가중행렬의 크기는 지반-구조물 상호작용을 고려한 경우가 그렇지 않은 경우에 비하여 상대적으로 작은 값을 갖고 있다.

최적설계된 복합 제어시스템의 제어성을 알아보기 위하여 El Centro 지진과 Kobe지진에 대하여 시간이력해석을 수행하였다. Fig. 3은 El Centro 지진에 대한 지반-구조물 상호작용을 고려한 지반-구조물-제어시스템 모델과 제어를 설치하지 않은 지반-구조물 모델에서의 최상층 변위응답, 바닥전단력(base shear), 전도모멘트(overturning moment)의 시간이력을 비교하여 도시한 것이다. 제어를 설치할 경우 제어가 없는 경우에 비하여 최상층 변위 응답은 약 30% 이하 수준으로 떨어졌으며, 전단력과 전도모멘트도 유사한 결과를 보이고 있다.

Fig. 4는 El Centro 지진과 Kobe지진에 대하여, 지

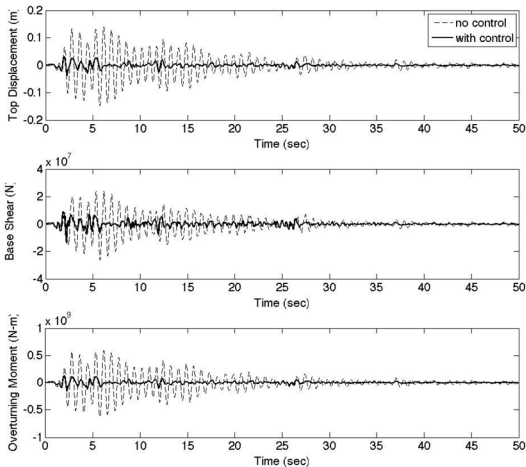


Fig. 3. Time histories of top displacement, base shear and overturning moment (El Centro Earthquake).

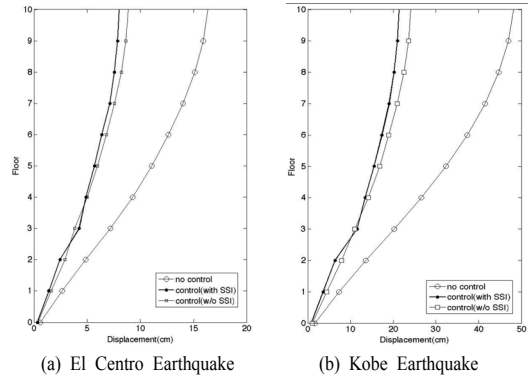


Fig. 4. Maximum displacement.

반-구조물 시스템에 각각 지반-구조물 상호작용을 고려한 제어기 최적설계 결과를 적용한 경우와 지반-구조물 상호작용을 고려하지 않은 제어기 최적설계 결과를 적용한 경우 그리고 제어를 설치하지 않은 경우에 대한 각 층에서의 최대 변위 응답을 비교하여 도시한 것이다. El Centro 지진과 Kobe지진 모두에 대하여 지반-구조물 시스템에 지반-구조물 상호작용을 고려한 제어기 최적설계 결과를 적용한 경우가 전체적으로 가장 작은 최대 변위 응답을 보이고 있다. 지반-구조물 상호작용을 고려한 경우를 비제어시와 비교하면 모든 층에서 응답이 크게 감소하였으며, 구조물의 상부로 갈수록 그 차이는 점점 커지고 있다. 또한 지반-구조물 상호작용을 고려한 지반-구조물-제어시스템 모델을 지반-구조물 상호작용을 고려하지 않은 지반-구조물-제어시스템 모델과 비교하여 보면 3층에서 응답이 약간 크게 나타났을 뿐 다른 구간에서는 응답이 작게 나타났으며, 최상층에서는 약 10%의 차이를 보이고 있다.

Table. 5에는 지반-구조물 시스템에 각각 지반-구조물 상호작용을 고려한 제어기 최적설계 결과를 적용한 경우와 지반-구조물 상호작용을 고려하지 않은 제어기 최적설계 결과를 적용한 경우 그리고 제어를 설치하지 않은 경우에 대하여 최대 전단력, 최대전도모멘트, 요구되는 순간최대 제어력을 정리하였다. El Centor 지진에 대하여 지반-구조물 상호작용을 고려한 경우를 비제어시와 비교하면 최대변위응답과 마찬가지로 최대바닥전단력과 최대전도모멘트도 크게 줄었으며, 최대바닥전단력과 최대전도모멘트가 각각 45%, 76% 감소하였다. 또한 지반-구조물 상호작용을 고려한 경우를 지반-구조물 상호작용을 고려하지 않은 경우와 비교하여 보면 최대바닥전단력은 약 14%, 최대전도

Table. 5 Maximum base shear, overturning moment and control force

El Centro Earthquake					
Response	No Control	Control			
		with SSI		without SSI	
Maximum base shear (N)	2.4739×10^7	1.3947×10^7		1.6286×10^7	
Maximum overturning moment (N-m)	6.2980×10^8	1.5395×10^8		2.6266×10^8	
Maximum control force (N)	-	3rd floor	26.67×10^6	3rd floor	16.47×10^6
	-	4th floor	9.70×10^6	5th floor	12.25×10^6
	-	7th floor	10.76×10^6	6th floor	9.78×10^6
Kobe Earthquake					
Response	No Control	Control			
		with SSI		without SSI	
Maximum base shear (N)	7.3069×10^7	3.5835×10^7		4.3596×10^7	
Maximum overturning moment (N-m)	1.9931×10^9	5.0593×10^8		7.9339×10^8	
Maximum control force (N)	-	3rd floor	66.60×10^6	3rd floor	41.52×10^6
	-	4th floor	23.95×10^6	5th floor	29.61×10^6
	-	7th floor	25.97×10^6	6th floor	23.66×10^6

모멘트는 약 41% 정도 작게 나타났다. Kobe 지진에서 대해서도 전반적으로 El Centro 지진에 대한 응답과 유사한 경향을 보였다. 지반-구조물 상호작용을 고려한 경우를 비제어시와 비교하면 최대바닥전단력은 약 51% 감소하였으며, 최대전도모멘트는 약 75% 감소하였다. 지반-구조물 상호작용을 고려한 경우를 지반-구조물 상호작용을 고려하지 않은 경우와 비교하여 보면 최대바닥전단력과 최대전도모멘트가 각각 18%, 35% 작은 응답을 보이고 있다.

한편, 필요 최대제어력을 살펴보면 El Centro 지진과 Kobe 지진의 두 경우 모두 상층부보다는 하층부에 설치된 하중재하기에서 보다 큰 제어력이 요구되는 것으로 나타났다. 지반-구조물 상호작용을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 관계없이 최저층에 설치된 하중재하기에서 더 많은 제어력이 요구되고 있으며, 이러한 경향은 지반-구조물 상호작용을 고려한 경우에 더욱 두드러지게 나타나고 있다. 지반-구조물 상호작용을 고려한 모델의 경우는 3층에 설치된 하중재하기에서 4층이나 7층에 설치된 하중재하기보다 2배 이상 큰 순간 제어력이 요구되고 있음을 알 수 있다.

이상의 결과들을 정리하여 보면 지반-구조물 상호작용을 고려하여 제어기 최적설계를 수행하는 것이 그렇지 않은 경우에 비하여 구조물의 변형 및 구조물에 작용하는 부재력 등을 보다 효과적으로 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 또한 다른 특성을 지닌 입력지진에 대하여 해석을 수행한 결과가 서로 유사한 경향을 보이고 있는 것은 지반-구조물 상호작용을 고려한 제어기의 최적설계가 합리적으로 이루어진 것을 의미한다고 볼 수 있을 것이다.

5. 결론

지진으로 인한 건물의 동적 응답은 다양한 인자들로부터 영향을 받으며, 제어시스템의 구축에 있어서는 이러한 인자들에 의한 영향이 적절히 고려되고 설계에 반영되어야 제어시스템이 최적의 성능을 발휘할 수 있다. 본 논문에서는 지진하중을 받는 빌딩 구조물의 제어시스템의 설계에 있어서, 지반-구조물 상호작용을 고려하여 복합 제어시스템을 최적설계하는 방법에 관하여 연구하였다. 지반-구조물 상호작용이 고려된 운동방정식을 상태공간방정식으로 변환하고 Kanai-Tajimi 필터와 결합된 시스템을 이용하여 능동형 제진장치와 수동형 댐퍼의 동시최적화 문제를 구성하였다.

예제 지반-구조물 모델에 대하여 지반-구조물 상호작용을 고려한 경우와 지반-구조물 상호작용을 고려하지 않은 경우에 대한 제어기 최적설계를 수행하였다. 두 결과에서 지반-구조물 상호작용을 고려할 경우 제어기의 위치, 제어력, 가중행렬의 크기, 수동형 댐퍼의 분배량 등에 상당한 변화가 발생함을 확인하였다. 이는 지반-구조물 상호작용이 고려되어야 하는 경우에는 그렇지 않은 경우에 비하여 제어기의 배치와 용량의 산정 등이 달라져야함을 보여준다.

지반-구조물 시스템에 지반-구조물 상호작용을 고려한 제어기 최적설계 결과를 적용한 경우를 지반-구조물 상호작용을 고려하지 않은 제어기 최적설계 결과를 적용한 경우와 비교해 보면 구조물의 변형 및 구조물에 발생하는 부재력이 더 많이 감소함을 확인하였으며, 이는 경제적인 제어기의 설계를 위해서는 지반-구조물 상호작용이 고려되어야 함을 의미한다.

또한 복합 제어시스템은 구조물의 응답을 크게 감소시킴으로서 큰 제진효과가 있음을 확인하였으며, 지반과 구조물 간의 상호작용을 무시할 수 없는 경우 정확한 제어효과 산정 및 실제 적용 설치되는 하중재하기의 용량산정을 위하여 지반-구조물 상호작용을 고려한 해석 및 설계가 바람직하며 이 연구에서 제시한 방법이 효율적으로 제어장치를 설계하고 지진응답을 정확히 산정하는데 유용할 것이다.

감사의 글 : 이 논문은 2010년도 동국대학교 연구년 지원에 의하여 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) T.T. Soong, G.F. Dargush, *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*, New York, John Wiley & Sons, 1997.
- 2) T.T. Soong, *Active, Hybrid and Semi-Active Control*, John Wiley & Sons, 2005.
- 3) Fujino, Y., Soong, T. T. and Spencer Jr., B. F., "Structural control: basic concepts and applications," *Proceedings of the ASCE Structures Congress, XIV*, 1996, pp. 1277~1287.
- 4) 황재승, 송진규, 강경수, 윤태호, "Toggle시스템을 이용한 구조물의 진동제어", 한국지진공학회 학술발표대회 논문집, 제7권, 제1호, pp. 491~498, 2003.
- 5) 민경원, 김형섭, "지진하중을 받는 구조물의 성능에 기초한 마찰감쇠기 설계", 한국지진공학회 논문집, 제7권, 제6호, pp. 17~24, 2003.
- 6) 임채욱, 문석준, 박영진, "AMD를 이용한 건물의 능동 진동 제어를 위한 강인 포화 제어기의 유용성에 관한 실험적 검증", 한국지진공학회 논문집, v.10 n.2, 통권 48호, 2006, pp. 83~90.
- 7) 이상현, 황재승, 민경원, 이명규, "MR감쇠기를 장착한 토글가새시스템을 이용한 건축구조물의 지진응답제어", 한국전산구조공학회 논문집, 제19권, 제3호, pp.239~245, 2006.
- 8) 김민섭, 옥승용, 박관순, "MR감쇠기의 준능동 퍼지제어기법을 이용한 인접구조물의 지진응답제어", 한국지진공학회 논문집, 제13권, 제3호, pp. 39~50, 2009년 6월.
- 9) 정찬국, 정형조, 최강민, 이인원, "스마트 수동 제어 시스템을 이용한 면진 건물의 내진 성능 개선", 한국지진공학회 논문집", v.10 n.6, 통권 52호, 2006, pp. 37~46.
- 10) 박관순, 고현무, 옥승용, "다단계 목표계획법을 이용한 복합구조제어시스템의 통합최적설계", 한국지진공학회 논문집, 제7권, 제5호, 2003, pp. 93~10.
- 11) 박규식, 정형조, Spencer, B. F., Jr., 이인원, "수동, 능동, 반능동 및 복합 시스템을 이용한 사장교의 지진응답 제어", 한국지진공학회 논문집, v.7 n.1, 통권 29호, 2003, pp. 17~30.
- 12) Goldberg, D. E. (1989), *Genetic algorithm in search, optimization and machine learning*, Addison-Wesley
- 13) Holland, J. H. (1975), *Adaptation in natural and artificial systems*, University of Michigan Press
- 14) Betti, R., Abdel-Grhaffar, A. M., and Niazzy, A. S. , "Kinematic Soil-Structure Interaction for Long-Span Cable-Supported Bridge," *Earthquake Engineering and Structural Dyanmics*, Vol. 22, pp. 415~430, 1993.
- 15) Richart, F.E., Woods, R.D. and Hall, J.R., *Vibrations of Soils and Foundations*, Prentice-Hall inc., 1970.
- 16) Kirk, D. E. (1970) *Optimal Control Theory - An Introduction*, Prentice Hall.
- 17) Kanai, K., "Semi-empirical formula for the seismic-characteristics of the ground," *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, University of Tokyo, Vol. 35, 1957, pp. 309~325.
- 18) Tajimi, H., "A statistical method of determining the maximum response of a building structure during an earthquake," *Proceedings of 2nd World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo, Japan, Vol. 2, 1960, pp. 781~897.