

구조물과 지반의 동적 상호작용을 고려한 진동대 시험에 관한 수치 시뮬레이션

Numerical Simulation on the Shaking Table Test considering Soil Structure Interaction

이성경*
Lee, Sung-Kyung

국문요약

본 논문에서는, 상부구조물과 진동대에서 측정된 가속도를 이용하여 구조물과 지반의 동적 상호작용을 고려한 진동대 시험을 수행하는 방법이 제안된다. 부분구조법을 기반으로 한 제안된 실험법은 상부구조물만을 실험체로 사용하고 지반모델에 대해서는 동적지반강성을 진동대 제어기에 반영하는 방법이다. 이 때, 실험부분인 상부구조물은 전체 구조물-지반계의 동적거동을 모사하기 위한 운동으로 진동대에 의해 가진된다. 먼저, 구조물-지반계의 운동방정식으로부터 유도된 수치 시뮬레이션 검증모델에 의해 제안된 방법의 타당성이 검증된다. 또한, 진동대의 전달함수를 고려한 시뮬레이션 모델로부터 진동대 시험에 의한 제안된 방법의 적용성이 수치 시뮬레이션에 의해 검증된다.

주요어 : 구조물과 지반의 동적상호작용, 부분구조법, 진동대 시험, 가속도 관측, 수치 시뮬레이션

ABSTRACT

This paper proposes a shaking table test considering the dynamic soil structure interaction (SSI) by using the accelerations measured from superstructure and shaking table. The proposed method based on the substructure method is that only superstructure is used as an experimental model and dynamic soil stiffness is reflected on the controller of shaking table for soil model. At the moment, an experimental superstructure is excited by a shaking table with the motion required to emulate the dynamic behavior of total SSI system. First, the validity of the proposed method is verified by the verification model of numerical simulation, which is derived from the equation of motion of SSI system under consideration. Also, the applicability of the proposed method to shaking table test is numerically verified from the simulation model incorporating the transfer function of shaking table.

Key words : dynamic soil structure interaction, substructure method, shaking table test, acceleration observation, numerical simulation

1. 서 론

지진하중에 의한 구조물의 응답을 적절히 평가하기 위해서는, 구조물과 지반의 동적상호작용을 고려할 필요가 있다. 임의의 기초에 대해서 선형지반이면, 무(無)질량기초 위에 단위 임펄스 상호작용력 또는 변위를 가했을 때, 기초의 변위응답 혹은 반력을 구하여 이를 상부구조물에 입력하는 부분구조법은 대표적인 구조물-지반계의 수치해석 방법중의 하나이다. Motosaka는 시간영역의 동적강성으로부터 비선형 구조물과 지반사이의 경계면에 작용하는 상호작용력을 계산하고, 이를 상부구조물에 입력하는 부분구조법 (본 논문에서는 비선형 부분구조법이라고 함)을 이용하여 원자력 발전소 건물을 대상으로 구조물과 지반의 동적상호작용을 고려한 수치해석을 수행하였다.⁽¹⁾⁻⁽³⁾ 그의 연구에서는 3차원 지반모델을 대상으로 동적강성을 평가하여 정밀해를 구한 반면, 수치해석의 난이도 및 연산 시간 등을 고려하면 이는 반드시 손쉬운 방법이라고는 할 수 없다. Wolf는 이러한 동적지반강성을 비교적 간단하게 평가하는 방법으로서, 적층지반, 운동기초 및 말뚝기초

등과 같은 다양한 지반조건과 기초형식에 적용 가능하고 정밀도가 높은 근사해로서의 콘 모델을 제안했다.⁽⁴⁾ 또한, 콘 모델을 이용하여 종래의 유연성 정식화가 아닌 강성 정식화에 의해 직접 지반의 동적강성을 평가하는 간략법을 제안하여 이를 적층지반에 발전시킨 방법론적 연구도 행해졌다.⁽⁵⁾

한편, 구조물-지반계의 실험에 대해서 생각해 보면, 지반 모형을 사용하는 기존의 진동대 실험에서는 지반의 비선형성을 고려할 수 있는 반면, 지반모형의 경계처리, 재료의 선택 및 지반모형에 비해서 구조물의 크기가 너무 작아지게 되는 문제점이 발생한다. 따라서, 상부구조물의 비선형성을 고려한 진동제어 실험을 수행하는 경우를 생각하면 상부구조물만을 시험체로서 이용하는 것, 지반의 영향에 대해서는 시험체의 신호를 되먹임하여 상호작용력에 대응하는 진동대 가진에 의해 지반의 영향을 고려한 진동실험에 대한 검토가 필요하다. 이러한 관점에서 Konagai는, 시험체의 밑면에 설치된 로드셀로부터 상호작용력을 관측하고 간단한 동적지반강성으로서 반무한 지반의 이산 파라미터 모델을 아나로그 회로로 구성한 진동실험을 수행하여, 임의의 기초형식에 대한 진동대 실험의 적용가능성을 제시했다.⁽⁶⁾ 그러나, 가속도계가 빈번히 사용되는 진동 제어실험, 실험수행 시 센서 설치의 용이성, 지반모델의

* 정회원 · 단국대학교 리모델링 연구소 연구전임강사, 공학박사
(대표저자:sungkyunglee@dankook.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2005년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2005. 6. 1 / 심사종료일 : 2005. 10. 6)

변경으로 인한 아나로그 회로의 재구성 및 제작에 따른 비용의 증가 등을 생각하면, 문헌 (6)의 방법은 실험의 수행이 용이하다고 할 수 없다.

이상과 같은 연구배경으로, 저자는 가속도 관측에 의한 구조물-지반계의 진동대 실험에 대한 수치시뮬레이션을 검토해 왔다.⁽⁷⁾ 본 논문에서는, 간단한 예제로서 암반층 위에 연약층이 존재하는 2층의 지반을 콘모델화한 지반모델과 비선형 상부구조물을 대상으로하고, 진동대와 상부구조물의 가속도를 측정값으로 사용하여 구조물과 지반의 상호작용효과를 진동대 실험에 반영하는 방법을 새롭게 제안하고, 그 적용성과 타당성을 수치적 시뮬레이션에 의해 검증하는 것을 목적으로 한다.

본 논문의 구성으로서, 2절에서는 본 연구의 이론해(理論解)인 비선형 부분구조법에 의한 구조물-지반계의 수치해석 결과를 제시한다. 3절에서는 구조물-지반계의 시뮬레이션 검증 모델과 진동대의 전달함수를 고려한 시뮬레이션 모델로부터 구한 결과들을 2절에서 계산한 수치해석 결과와 비교함으로써, 이러한 모델들의 유효성을 검증한다. 마지막으로, 4절에서는 본 논문의 결과와 향후 연구에 대해서 논한다.

2. 비선형 부분구조법에 의한 구조물-지반계의 수치해석

2.1 구조물-지반계의 수치해석 모델

본 연구에서 취급하는 구조물-지반계의 해석 모델은, 1/10의 상사(相似)실험(상사비 $\lambda=10$)을 가정하고 그림 1과 같이 하부의 암반층과 상부의 연약층으로 구성된 2층 지반 위에 놓인 반경 1m의 원형 직접기초를 갖는 1절점 전단형 건물로 설정하였다.

그림 1과 같은 비선형 구조물-지반계의 운동방정식은 식(1)~(3)과 같이 표현되며, 이것은 시간영역의 동적유연성(dynamic flexibility)을 구하여 비선형 구조물과 지반 사이에 작용하는 상호작용력을 계산하고, 이것을 기초를 포함한 상부구조물에 입력하는 비선형 부분구조법을 나타내고 있다.

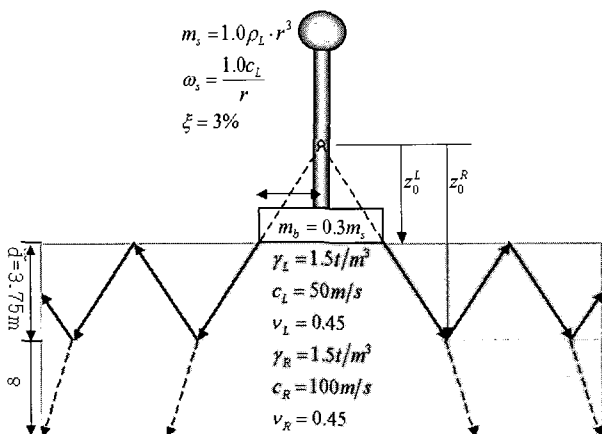


그림 1 수치해석 모델

$$\begin{bmatrix} m_s & 0 \\ 0 & m_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1(t) \\ \ddot{u}_0(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c & -c \\ -c & c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_1(t) \\ \dot{u}_0(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k(t) & -k(t) \\ -k(t) & k(t) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1(t) \\ u_0(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -R_b(t) \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서, m_b 와 m_s , 그리고, $u_0(t)$ 와 $u_1(t)$ 는 각각 기초와 상부구조물의 질량과 절대변위, c 는 상부구조물의 감쇠상수, $k(t)$ 는 상부구조물의 비선형성 즉, 강성이 시간에 따라 변화하는 함수라는 것을 나타낸다. 우변에 나타난 상호작용력을 유연성 정식화(flexibility formulation)에 의해 이산화 하면 다음 식과 같다.

$$\{R_b(t)\}_n = [F]_0^{-1} \cdot \left[\{u_0(t)\}_n - \{u_b^g(t)\}_n - \sum_{i=1}^{n-1} [F]_{n-i} \cdot \{R_b(t)\}_i \right] \quad (2)$$

여기서, n 는 이산화에 의한 시간 카운터, $u_b^g(t)$ 는 유효 기초입력진동이며, 이산화된 동적지반유연성은 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} [F]_{n-i} &= \frac{\Delta t}{6} \{ [F]((n-1-i) \cdot \Delta t) + 4 \cdot [F]((n-i) \cdot \Delta t) + [F]((n+1-i) \cdot \Delta t) \} \\ [F]_0 &= \frac{\Delta t}{6} \{ 2 \cdot [F(0)] + [F(\Delta t)] \} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, Δt 는 상사법칙을 만족하는 시간간격 $0.01/\sqrt{\lambda} \cong 0.003$ 초, $F(n \cdot \Delta t)$ 는 매(每) 시간당 계산되는 시간영역의 동적지반유연성이다.

2.2 지반모델

본 논문에서는, 그림 1과 같은 지반모델로서, 문헌(4)의 2층지반 콘모델을 이용하여 식(3)과 같은 시간함수의 동적지반유연성을 구했다. 이것은 물리적으로 2층지반 위에 놓인 무질량 기초에 크기 1의 단위 상호작용력을 작용시켰을 때, 무질량 기초의 응답변위를 의미한다. 문헌(4)에 의하면, 동적지반유연성 $F(t)$ 는 다음 식과 같다.

$$F(t) = \bar{u}_0(t) + 2 \cdot \sum_{j=1}^k [-\alpha(0)]^j \cdot \frac{\bar{u}_0(t-j \cdot T)}{1+j \cdot \kappa} \quad (4)$$

여기서, 반무한 지반 위에 놓인 무질량 기초에 단위 상호작용력을 작용시켰을 때의 기초의 응답변위 $\bar{u}_0(t)$, 저주파수 영역의 정확도를 개선하기 위한 반사계수 $-\alpha(0)$, 거리감쇠의 영향을 반영하기 위한 계수 κ , 지반의 적층효과에 따른 반사파(反射波)의 진행시간 T 는 다음과 같다.

$$\bar{u}_0(t) = \frac{c_L}{K \cdot z_0^L} \cdot \text{Exp} \left(-\frac{c_L}{z_0^L} \cdot t \right) \quad (5)$$

1) 구조물-지반계의 상호작용은 상부구조물의 관성력에 의한 상호작용과 기초에 입사하는 지진파에 의한 입력의 상호작용의 합으로 표현되며, 유효기초입력진동은 이러한 입력의 상호작용으로서 지진파 입사에 대한 무질량 강(剛)기초의 응답을 의미한다. 본 연구에서는 자유지반의 응답과 같다고 가정하였다.

$$-\alpha(0) = \frac{\frac{\rho_L \cdot c_L^2}{z_0^L + d} - \frac{\rho_R \cdot c_R^2}{z_0^R}}{\frac{\rho_L \cdot c_L^2}{z_0^L + d} + \frac{\rho_R \cdot c_R^2}{z_0^R}} = \frac{\rho_L \cdot c_L^2 - \rho_R \cdot c_R^2}{\rho_R \cdot c_R^2 + \rho_R \cdot c_R^2} \quad (v_L = v_R \text{ 일 때}) \quad (6)$$

$$\kappa = \frac{2d}{z_0^L}, \quad T = \frac{2d}{c_L} \quad (7)$$

여기서, $z_0^L/r = \pi(2-\nu_L)/8$ 과 $z_0^R/[r \cdot (z_0^L + d)/z_0^L] = \pi(2-\nu_R)/8$ 은 각각 상·하층 지반에서 콘모델의 경사를 나타내며, $\rho_L, \rho_R, c_L, c_R, \nu_L, \nu_R$ 은 각각 상부 연약층과 하부 암반층의 밀도, 전단파 속도, 포아송 비이고, d 는 상부 연약층의 깊이이다.

그림 2의 실선과 점선은 각각 식(4)와 식(5)에 의해 계산된 2층지반과 반무한 지반을 대상으로 한 시간영역의 동적지반유연성을 보여주고 있다. 2층 지반의 경우, 시간이 경과 함에 따라 지반의 적층효과가 나타나면서 거리감쇠의 영향에 의해 무질량 기초의 응답변위가 감쇠되는 것이 관찰된다. 이러한 동적지반유연성이 지반과 상부구조물 사이에 작용하는 상호작용력을 계산하기 위해 식(2)에 대입된다.

한편, 콘모델 지반의 주파수 영역의 동적유연성(dynamic flexibility)은 식(4)에 푸리에 변환을 취한 식(8)과 같으며, 이것은 그림 1과 같은 수치해석모델에 대한 진동대 실험을 수행하기 위해서 3절의 수치시뮬레이션 모델에 적용된다.

$$F(\omega) = \frac{1}{K + i\omega \cdot C} \cdot \left(1 + 2 \sum_{j=1}^n [-\alpha(0)]^j \cdot \frac{\text{Exp}(-j \cdot i\omega \cdot T)}{1 + j \cdot \kappa} \right) \quad (8)$$

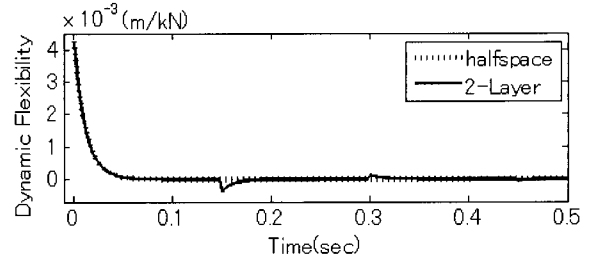


그림 2 콘모델의 동적지반유연성

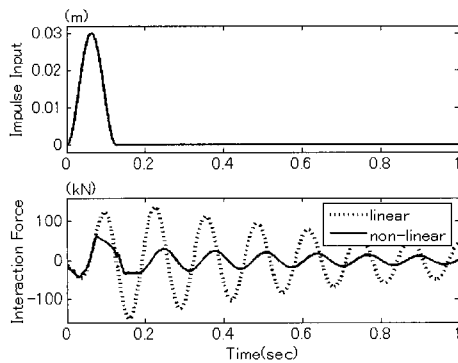
여기서, 정적지반강성계수 K 와 감쇠계수 C 는 다음과 같다.

$$K = \frac{\rho_L \cdot c_L^2 \cdot A_0}{z_0^L}, \quad C = P_L \cdot C_L \cdot A_0 \quad (9)$$

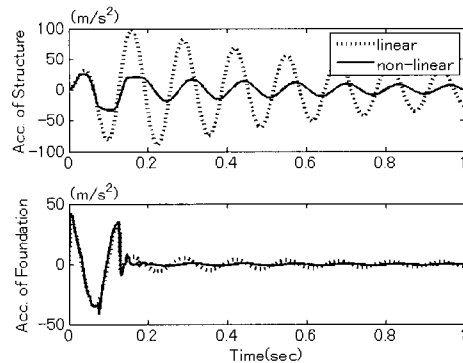
여기서, A_0 는 기초의 면적이다.

2.3 수치해석 결과

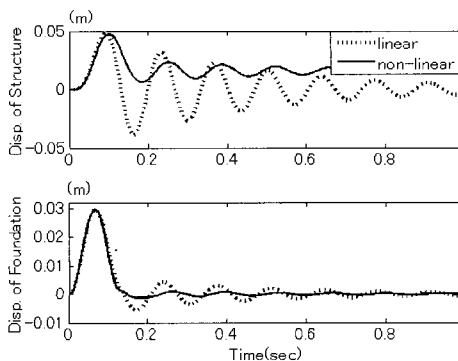
여기에서는 유효기초입력진동과 상부구조물의 복원력 특성을 변수로 설정하여 수치해석을 행하였다. 유효기초 입력진동은 최대 변위가 0.03m이며, 상부구조물의 주기와 일치하도록 지속시간 0.126초를 갖는 임펄스 파(波)와 1995년 일본 고베지진이 발생했을 때 JR나카토리 역에서 기록된 지진파를 이용했다. 또한, 상부구조물의 복원력 특성으로, 선형(점선)과 bilinear형의 복원력 모델 (항복하중은 36.75kN(임펄스 입력진동)과 5.39kN (지진 입력진동), 항복 후의 강성저하율은 10%)을 설정하여 식(1)의 수치해



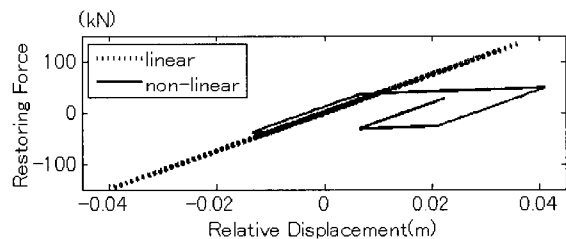
(a) 임펄스 입력진동(上)과 상호작용력(下)



(b) 구조물(上)과 기초(下)의 절대가속도

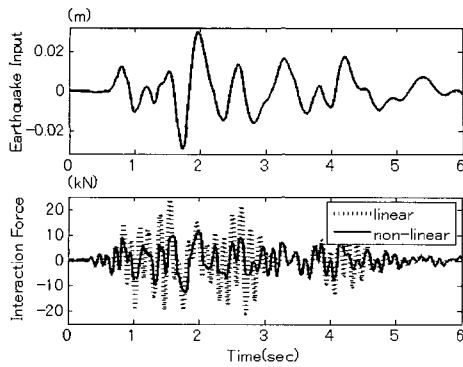


(c) 구조물(上)과 기초(下)의 절대변위

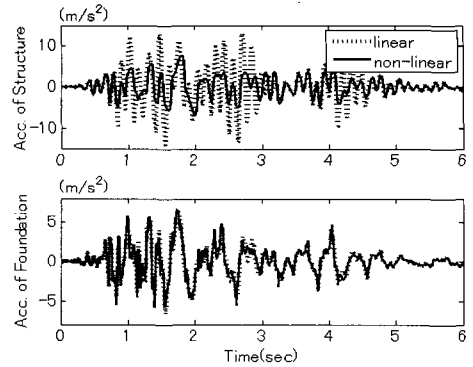


(d) 복원력 상대변위 관계

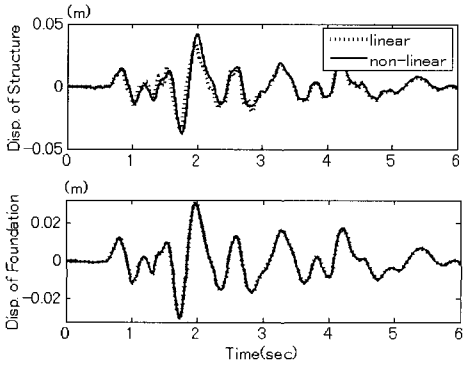
그림 3 임펄스 입력진동의 경우



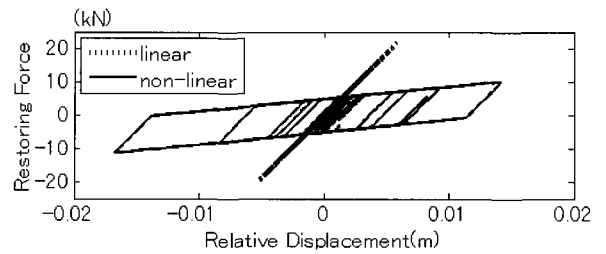
(a) 지진입력진동(上)과 상호작용력(下)



(b) 구조물(上)과 기초(下)의 절대가속도



(c) 구조물(上)과 기초(下)의 절대변위



(d) 복원력 상대변위 관계
그림 4 지진 입력진동의 경우

석을 수행하였다. 그림 3(a)~3(d)는 그림 3(a)(上)과 같은 임펄스 입력진동, 그림 4(a)~4(d)는 그림 4(a)(上)과 같은 지진 입력진동에 대한 식(1)의 수치해석 결과로서, 선형 상호작용응답(점선)에 대한 비선형 상호작용응답(실선)의 특징인 기본주기의 증가가 관찰된다. 또한, 임펄스입력진동에 대한 수치해석에서 비선형성이 더욱 현저하게 나타나는 것은 임펄스입력진동의 지속시간이 상부구조물의 주기와 동일하기 때문에, 지진응답 해석에 비해 상대적으로 상부구조물의 응답이 증폭된 것으로 판단된다.

3. 구조물-지반계의 시뮬레이션 모델

그림 5는 시뮬레이션 모델의 개념도로서 실제의 실험에서 측정해야 할 기초($\ddot{u}_0(t)$)와 상부구조물($\ddot{u}_1(t)$)의 응답은, 2절의 비선형 부분구조법으로부터 계산한 그림 3(b)와 그림 4(b)의 가속도를 관측치로 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 기초와 구조물에 설치되어 있는 가속도계

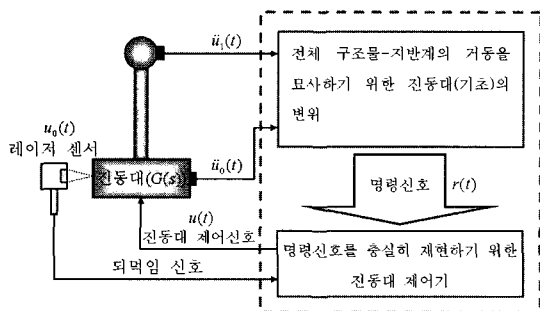


그림 5 시뮬레이션 모델의 개념도

로부터 가속도를 측정하여 전체 상호작용계의 운동을 묘사하기 위해 진동대(기초)가 움직여야 할 변위가 계산된다. 또한, 진동대의 제어신호 $u(t)$ 와 그 변위 $u_0(t)$ 사이의 전달함수가 $G(s)$ 인 진동대 실험의 경우, 진동대에 입력해야 할 변위가 명령신호로서 진동대 콘트롤러에 보내지며, 레이저 변위센서로부터 측정되는 진동대의 변위가 진동대 제어기에 되먹임(feedback)되어 명령신호와 오차가 최소화 되도록 실제의 진동대가 제어된다. 3절에서는 이와 같은 가정된 실험시스템에 대해서 수치 시뮬레이션을 수행한다.

3.1 문제 정식화 및 시뮬레이션 검증모델

여기에서는 이상과 같은 구조물-지반계의 진동대 실험에 관한 시뮬레이션 검증모델에 대해서 설명한다. 식(1)의 운동방정식을 기초의 변위에 관해서 정리하면, 식(1)과 같은 전체 구조물-지반계의 운동을 묘사하기 위해서 진동대(기초)에 입력해야 할 변위가 얻어진다.

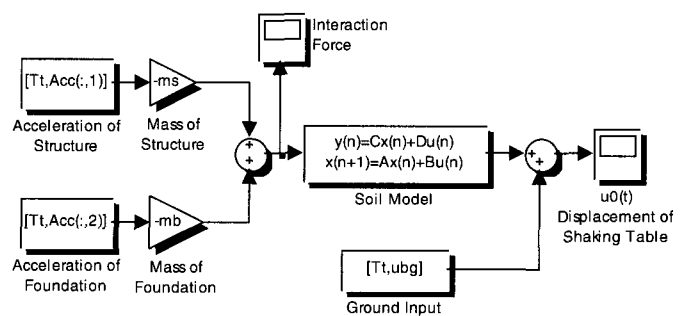


그림 6 시뮬레이션 검증모델

$$u_0(t) = u_b^g(t) + \int_0^t F(t-\tau) \cdot \underbrace{[-m_s \cdot \ddot{u}_1(\tau) - m_b \cdot \ddot{u}_0(\tau)]}_{\text{상호작용력}} \cdot d\tau \quad (10)$$

그림 6은 위 식(10)에 따라 진동대와 상부구조물의 절대가속도를 측정하고 지반모델을 필터화하여 진동대의 변위를 계산하는 과정을 보여준다. 이것은 그림 5에서 점선 내부의 진동대에 입력해야 할 변위에 관한 시뮬레이션 검증모델로서, "Tt"는 시뮬레이션 시간 벡터, "Acc"는 그림 3(b)와 그림 4(b)의 구조물과 기초의 가속도, "ubg"는 그림 3(a)(上)과 그림 4(a)(上)의 유효기초입력진동을 나타낸다. 여기에서는 그림 6의 시뮬레이션 검증모델로부터 계산된 상호작용력과 진동대의 변위를 정밀해와 비교한다.

여기에서, 동적지반유연성(dynamic soil flexibility)에 대한 필터 (본 논문에서는, 지반필터로 칭함)는 식(8)을 라플라스 변환하는 것에 얻어지며, $F_2(s)$ 의 실수부와 허수부가 수렴하는 값으로서 $n=30$ 으로 설정하였다.

$$F(s) = F_1(s) \cdot F_2(s) = \left(\frac{1}{C \cdot s + K} \right) \cdot \left(1 + 2 \cdot \sum_{j=1}^{30} [-\alpha(0)]^j \cdot \frac{\exp(-j \cdot T \cdot s)}{1 + j \cdot \kappa} \right) \\ = \left[\frac{1}{C \cdot s + K} \right] \cdot \left[1 + 2 \cdot \left(-\alpha(0) \cdot \frac{\exp(-Ts)}{1 + \kappa} + \dots + \alpha(0)^{30} \cdot \frac{\exp(-30Ts)}{1 + 30\kappa} \right) \right] \quad (11)$$

위 식(11)과 같이, 지반필터는 반무한지반과 적층효과 부분으로 나누어지며, 적층부분의 시간지연 항을 부분분수의 형태로 나타내기 위해서 식(12)와 같이 2차의 Pade'

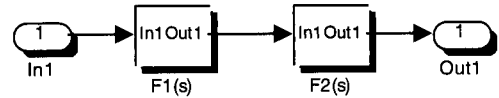


그림 7 동적지반유연성의 등가 치환 필터

Approximation⁽⁸⁾을 이용하였다.

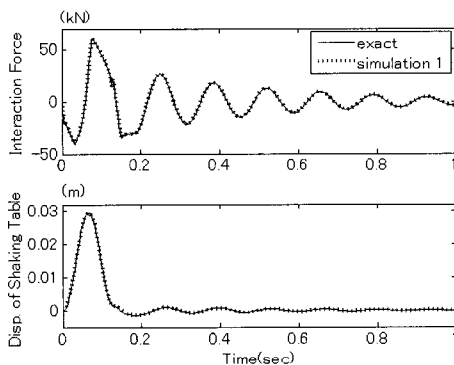
$$\exp(-Ts) \cong \frac{12 - 6 \cdot (Ts) + (Ts)^2}{12 + 6 \cdot (Ts) + (Ts)^2} \quad (12)$$

따라서, 식(11)과 같은 지반필터는 그림 7과 같이 표현되며, 그림 6의 "Soil Model"은 이를 이산상태 공간방정식의 형태로 나타낸 것이다.

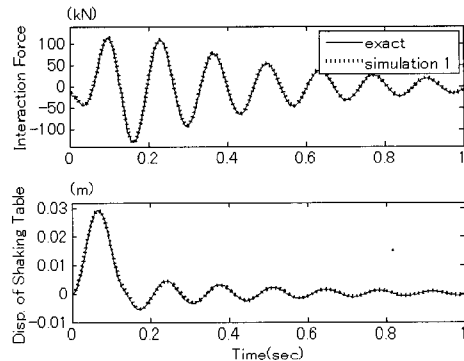
그림 8 ~ 9는, 수치해석으로부터 구한 그림 3(b) 또는 그림 4(b)와 같은 절대가속도를 그림 6의 시뮬레이션 검증모델에 입력하여 진동대(기초)의 변위를 출력한 결과를, 그림 3(c)(下) 혹은 그림 4(c)(下)의 기초의 절대변위와 비교하였으며, 또한, 그림 6의 시뮬레이션 모델로부터 구한 상호작용력을 그림 3(a)(下) 혹은 그림 4(a)(下)와 같은 수치해석으로부터 구한 상호작용력과 비교한 것으로, 선형과 비선형의 경우에 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

3.2 진동대의 전달함수를 고려한 시뮬레이션 모델

여기에서는 문헌(9)의 동전형(動電型) 가진기를 진동대로 가정하여 수치시뮬레이션을 수행하였다. 그림 10은 문

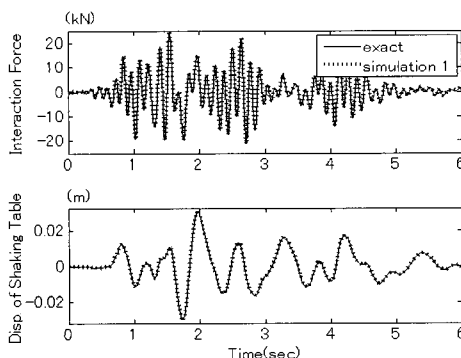


(a) 선형

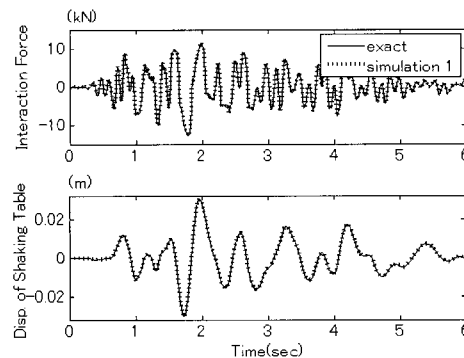


(b) 비선형

그림 8 임펄스응답 수치해석과 시뮬레이션 결과와의 비교



(a) 선형



(b) 비선형

그림 9 지진응답 수치해석과 시뮬레이션 결과와의 비교

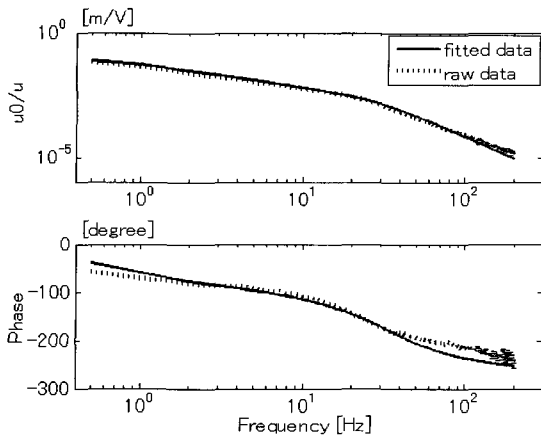


그림 10 진동대의 전달함수

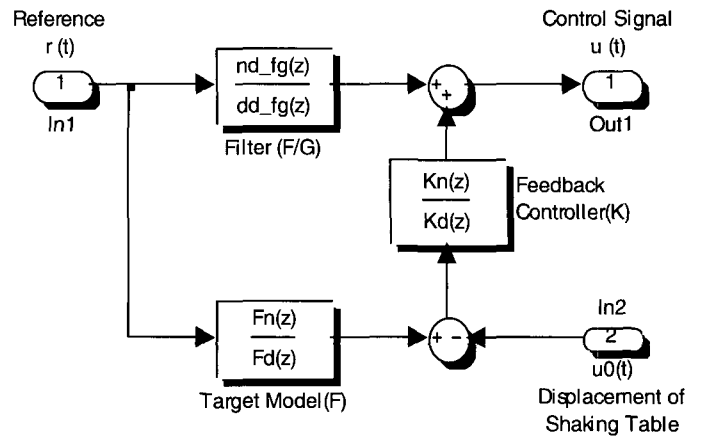


그림 11 2자유도 진동대 제어기

현(9)에 사용된 진폭증폭기의 입력전압과 진동대의 변위사이에 실험적으로 측정된 전달함수(점선)와 시뮬레이션 모델에 반영하기 위해 이를 필터화 시킨 전달함수(실선)를 비교한 것이다.

다음 식은 위 그림 10의 필터화된 전달함수로, 그림 5의 진동대의 전달함수 $G(s)$ 로서 사용된다.

$$G(s) = \frac{U_0(s)}{U(s)} = \frac{42360.539}{0.002464s^3 + 0.87851s^2 + 111.7511s + 449.29} \quad (13)$$

3.1절에서 구한 기초의 변위를 실제 진동대로 충실히 구현하기 위해서는, 위 식(13)과 같은 진동대의 동적특성을 충분히 반영한 진동대 제어기가 필요하게 된다. 여기에서는 목표치의 응답특성(reference)을 개선하기 위하여 목표모델 $F(s)$ 와 되먹임 제어기 $K(s)$ 를 각각 독립적으로 설계할 수 있고, 그림 11과 같이 진동대의 변위와 명령신호가 입력되어 제어신호를 출력하는 2자유도 진동대 제어기^{(9), (10)}를 이용하여 시뮬레이션을 실시하였다. 이것이 그림 5에서 점선 내부의 진동대 제어기에 해당된다.

여기에서, 목표모델 F 에 관해서는, 그림 11의 필터 F/G 또는 $G^{-1}F$ 가 안정되도록 하면서 최소차수를 갖게 하기 위해 3차의 저주파 통과 필터로 설계하였다.

$$F(s) = \frac{3875784585}{s^3 + 314.159s^2 + 49348.022s + 3875784585} \quad (14)$$

또한, 되먹임 제어기 K 는, 문헌(9)와 동일한 민감도 및

상호감도함수에 대한 진동수 가중함수를 이용하여 설계하였다.^{(11), (12)}

$$K(s) = \frac{K_n(s)}{K_d(s)}$$

$$K_n(s) = (4.07 \times 10^8)s^4 + (2.02 \times 10^8)s^3 + (3.878 \times 10^8)s^2 + (2.659 \times 10^8)s + (1.039 \times 10^4)$$

$$K_d(s) = s^5 + (5.656 \times 10^8)s^4 + (7.692 \times 10^8)s^3 + (3.776 \times 10^8)s^2 + (1.939 \times 10^8)s + (1.855 \times 10^4) \quad (15)$$

이상과 같은 진동대의 전달함수와 진동대의 운동을 제어하기 위한 2자유도 제어기를 반영하여 그림 12와 같은 수치시뮬레이션 모델이 구성된다. 이것은 그림 6과 같은 시뮬레이션 검증모델에 점선부분을 추가한 모델로서, 그림 5와 같이 가정된 진동대 실험을 상정한 것이다.

그림 13과 14는, 그림 12와 같은 수치 시뮬레이션 모델에 의해 계산된 진동대의 변위(점선)와 2절의 수치해석에서 계산한 기초의 변위(그림 3(c)(下), 그림 4(c)(下))를 비교한 것으로서, 두 결과가 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는, 상부구조물만을 실험체로 이용하고 지반의 영향에 대해서는 동적지반강성을 진동대 제어기에 반영하여, 상부구조물과 진동대로부터 측정된 가속도를 이용한 구조물-지반계의 진동대 실험법을 제안하였다. 제안된

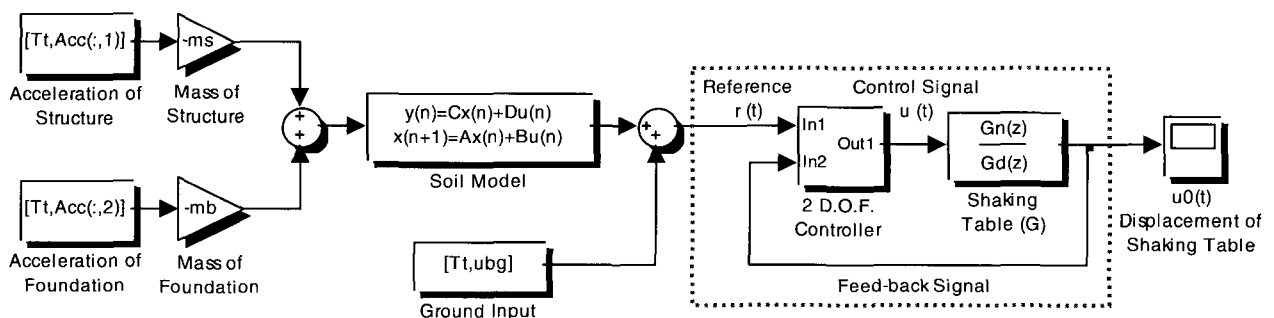
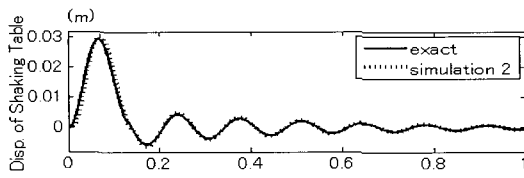
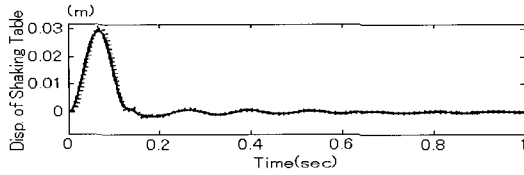


그림 12 진동대의 전달함수를 고려한 시뮬레이션 모델

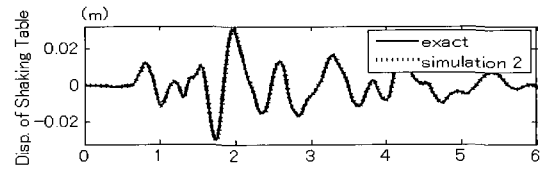


(a) 선형

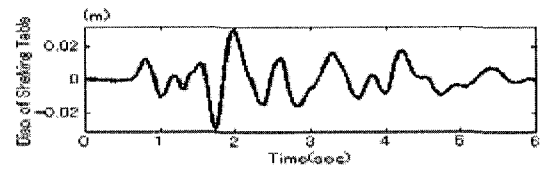


(b) 비선형

그림 13 임펄스응답 수치해석과 시뮬레이션 결과와의 비교



(a) 선형



(b) 비선형

그림 14 지진응답 수치해석과 시뮬레이션 결과와의 비교

실험법은, 상부구조물과 진동대의 가속도 관측으로부터 전체 구조물-지반계의 동적거동을 묘사하기 위해 필요한 기초의 변위를 계산하고, 이를 바탕으로 상부실험체인 구조물 모델을 진동대에 의해 가진하는 것이다.

먼저, 전체 구조물-지반계의 운동방정식으로부터 유도된 기초의 변위를 시뮬레이션 검증모델에 반영하여 제안된 실험법을 수치적으로 검증하였다. 이 때, 지반모델을 시뮬레이션 모델에 반영하기 위해서 2층 콘 모델의 동적 지반강성을 반무한 지반과 적층효과 부분으로 분리하였고, 적층효과 부분에 나타나는 특징인 시간지연 항에 2차의 Pade' Approximation을 적용하여 라플라스 변수 s 의 부분분수의 형태로 나타내는 방법을 보였다.

다음으로, 실제 측정된 진동대의 전달함수를 시뮬레이션 모델에 반영하여 제안방법을 진동대 시험에 적용하기 위한 타당성을 수치적 시뮬레이션에 의해 검증하였다.

본 논문에서는 지반의 수평운동만을 취급하였다. 따라서, Rocking 운동이 구조물의 진동모드 변화 및 수평운동에 끼치는 영향은 매우 크기 때문에, 말뚝기초 및 부정형 지반 위의 기초 등과 같은 일반적인 기초에 대해서 본 제안법을 적용하기 위해서는 Rocking 운동의 영향도 고려되어야 할 것이다. 즉, 수평운동 뿐만 아니라 Rocking 운동에 대한 동적지반강성을 유한요소 해석법이나 경계요소법을 사용하여 수치해석적으로 계산하고, 이를 라플라스 변수 s 의 부분분수 형태로 필터화하여 진동대 제어기에 반영하면 본 논문의 제안법이 적용될 수 있다.

본 논문의 제안법은 선형지반을 대상으로 하고 있다. 따라서, 지반의 비선형성을 고려하기 위해서는 비선형 지반의 동적강성을 등가선형화 하여 필터로 구성하면 지반의 비선형성을 어느 정도 반영한 본 논문의 제안법이 적용 가능하다고 판단된다.

감사의 글

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(04산학연C103A1010004-04A0204-00110)에 의한 것임

참고 문헌

1. Motosaka, M. and Nagano M. "Recursive evaluation of convolution integral in nonlinear soil-structure interaction analysis and its applications," *Journal of Structural and Construction Engineering (AIJ)* 1992; 436: pp. 71-80 (in Japanese).
2. Motosaka, M. and Nagano M., "Dynamic partial uplift analysis of a structure on a 3-D layered half-space based on recursive evaluation of interaction forces using dynamic stiffness of the unbounded soil in the frequency domain," *Journal of Structural and Construction Engineering (AIJ)* 1993; 451: pp. 79-88(in Japanese).
3. 日本建築学会：入門・建物と地盤との動的相互作用, 1996. pp. 288-301.
4. John P. Wolf, *Foundation Vibration Analysis Using Simple Physical Models*, Prentice Hall, 1994.
5. 中村尚弘：多層地盤上の剛基礎のインピーダンスの簡便な評価法と建屋の時刻歴応答解析への応用、日本建築学会構造系論文報告集, 第544号, pp.23~30, 2001年6月.
6. Konagai, K., Nogami, T and Katsukawa, T., "Suzuki T., Mikami A., Real time control of shaking table for soil-structure interaction simulation," *Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering*, 1998; 598/I-44: pp. 203-210 (in Japanese).
7. Lee, S. K., Motosaka, M and Sato, T., "Simulation of Shaking Table Test of Soil-Structure-Interaction System Based on Nonlinear Substructure Method," *Proceedings of AIJ conference*, 2001; B-2: pp. 881-882 (in Japanese).
8. Eugene, M. Grabbe, Simon, Ramo and Dean, E. Wooldridge, *Handbook of Automation, Computation, and Control Volume 2 Computers and Data*

- Processing*, John Wiley & Sons, 1959.
9. 内山泰宏、山内佳門、上野和良、藤田政之：適用フィルターを付加した2自由度制御系による動電型加振機の制御、計測自動制御学会、第42回自動制御連合講演会、SS26、1999年11月.
 10. 杉江俊治、藤田政之：フィードバック制御入門、コロナ社, 1990, pp. 168-178.
 11. システム制御情報学会：制御系設計、朝倉書店、1994. pp. 159-180.
 12. Bahram, Shahian and Michael, Hassul *Control System Design Using MATLAB*, Prentice Hall, 1993, pp. 395-440.
 13. A. M. Reinhorn, T. T. Soong, R. C. Lin and M. A. Riley "Active Bracing System:A Full Scale Implementation of Active Control," *Technical Research Laboratory NCEER-92-0020*, August 14, 1992.