

# 동적 지반강성을 갖는 지반-구조물계의 실시간 하이브리드 진동대 실험

## Real-Time Hybrid Shaking Table Test of a Soil-Structure Interaction System with Dynamic Soil Stiffness

이 성 경\*      민 경 원†

Lee, Sung-Kyung      Min, Kyung-Won

(논문접수일 : 2006년 12월 30일 ; 심사종료일 : 2007년 4월 2일)

### 요 지

본 연구에서는 건물모델만을 물리적인 실험체로 이용하여 동적 지반강성을 갖는 지반-구조물계의 동적거동을 모사하기 위한 하이브리드 진동대 실험법을 제안하고 이를 실험적으로 검증하였다. 본 연구에서 제안되는 실험방법은 상부구조물과 진동대의 가속도를 계측하여 진동대 제어기로 피드백하고, 전체 지반-구조물계의 동적거동을 묘사하기 위해 요구되는 기초부분의 절대가속도 응답(가속도 피드백 방법) 또는 절대속도 응답(속도 피드백 방법)을 계산하여 진동대를 구동시키는 방법이다. 지반부분을 계산하기 위해서 이론적인 동적지반강성을 제안방법에 따라서 다르게 근사화하여 진동대 제어기에 반영함으로써 실험을 수행하였다. 기초 고정계 모델에 대한 실험으로부터 계측된 응답과 본 논문에서 가정된 지반-구조물계에 대한 실험으로부터 측정된 응답을 비교하고, 진동대 제어기에 반영한 동적지반강성과 실험데이터를 이용하여 식별된 동적지반강성을 비교함으로써 본 논문에서 제안된 실험방법의 유효성을 검증하였다.

**핵심용어** : 지반-구조물계, 동적 지반강성, 하이브리드 진동대 실험, 가속도 관측, 가속도 피드백, 속도 피드백

### Abstract

This paper proposes the real-time hybrid shaking table testing methods to simulate the dynamic behavior of a soil-structure interaction system with dynamic soil stiffness by using only a structure model as the physical specimen and verifies their effectiveness for experimental implementation. Experimental methodologies proposed in this paper adopt such a way that absolute accelerations measured from the superstructure and shaking table are feedback to the shaking table controller, and then the shaking table is driven by the calculated motion of the absolute acceleration (acceleration feedback method) or the absolute velocity (velocity feedback method) of foundation that is required to simulate the dynamic behavior of a whole soil-structure interaction system. The shaking table test is implemented by reflecting the dynamic soil stiffness, which are differently approximated from the theoretical one depending on the feedback methods, on the shaking table controller to calculate soil part. The effectiveness of the proposed experimental methods is verified by comparing the response measured from the test on a foundation-fixed structural model and that obtained from the experiment of a soil-structure interaction system under the consideration in this paper and by matching the dynamic soil stiffness reflected on the shaking table controller with that identified using the experimentally measured data.

**Keywords** : soil-structure interaction system, dynamic soil stiffness, hybrid shaking table test, acceleration observation, acceleration feedback, velocity feedback

### 1. 서 론

지구내부의 단층에서 지진이 발생할 경우, 지반은 상부구조물에 지진파를 전달해주는 매개체로서 작용함과 동시에 상

부구조물을 지지하는 역할을 한다. 지진공학적 측면에서 상부구조물을 지탱하는 지반의 역할을 고려할 때, 지반은 구조물의 진동에 영향을 미치고 이것은 다시 주변지반의 변형을 초래한다. 지반과 구조물의 상호작용(Soil-Structure Inter-

† 책임저자, 정회원 · 단국대학교 건축공학과 교수

Tel: 02-709-2731 ; Fax: 02-799-1154

E-mail: kwmin@dankook.ac.kr

\* 단국대학교 건축공학과 연구전임강사

• 이 논문에 대한 토론을 2007년 6월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2007년 8월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

raction: SSI)(Wolf, 1985)이라는 이러한 현상은 지진발생 시 건물의 거동이 건물자체는 물론 지반의 성질에도 크게 영향을 받는다는 것에 주목을 한 것으로서, 구조물의 내진설계에서 대상부지의 지반조건을 반영한 건물의 지진응답의 평가에 근거하여 지진하중을 설정하기 위한 필수적인 과정이다. 지반과 구조물의 상호작용 효과는 지반에 비하여 상대적으로 강한 건물이 연약지반에 건설될 때 현저하게 나타나며, 이러한 지반-구조물계의 동적특성으로서는 일반적인 내진설계에서 주로 취급하는 기초고정 모델에 비해서 구조물의 고유주기 및 감쇠비가 증가하고 결과적으로 구조물의 전체적인 동적거동이 변화한다.

예상되는 지진하중에 대한 지반-구조물계의 동적거동을 분석하고 상호작용효과에 영향을 미치는 구조물의 특징요인을 규명하기 위해서는 진동수 성분 및 최대크기 등이 서로 다른 지진하중에 대한 반복실험이 가능한 방법을 선택해야 하며, 인공지진 또는 계속지진을 인위적으로 발생시킬 수 있는 진동대를 이용하여 지진하중에 대한 지반-구조물계의 동적특성 및 영향요인을 평가하는 방법이 주로 이용되고 있다(坪井義勝 등, 1956, 田中宏志 등, 1979, 桑原芳郎 등, 1981, 太田外氣晴 등, 1982). 이러한 지반-구조물계의 실험방법으로서 소형 구조물 모형과 실리콘 등을 사용한 지반-구조물계의 진동대 실험이 여러 연구자들에 의해 수행되었으며, 최근에는 액상화 현상을 규명하기 위해 지반에 해당하는 모형으로서 모래를 사용하는 진동대 실험도 수행되었다(Yao 등, 2004). 그러나, 물리적인 지반모형을 사용하는 전통적인 실험방법에서는 실제의 지반-구조물계에서 나타나는 반무한 공간상의 방사감쇠(radiation damping) 현상을 적절히 묘사하기 위한 지반모형의 경계면 처리가 어렵다(Iguchi 등, 1993). 이러한 문제점을 해결하기 위해서, Konagai는 전체 지반-구조물계에서 상부구조물에 대한 실험과 지반에 해당하는 부분에 대한 수치계산을 동시에 수행하는 하이브리드 진동대 실험법을 제안 및 검증하였다(Konagai 등, 1998). 이와 같은 방법은 상부구조물 모형의 하부에 설치된 로드셀로부터 지반과 구조물 사이에 작용하는 상호작용력을 계측하여 진동대 제어기에 피드백하고, 또한 이산 파라미터 모델로 구성된 아나로그 회로를 진동대 제어기에 반영하여 지반에 해당하는 부분을 수치계산 하는 방법이다. 그러나, 계측기로서 로드셀을 이용하고 지반에 해당하는 강성을 아나로그 회로로 구성하는 방법은 상호작용력을 직접 계측할 수 있다는 장점이 있으나, 설치상의 문제 및 상부구조물의 대형화에 따른 로드셀 용량의 제한 등과 같은 실험수행시 제약이 있으며 또한 지반모델의 변경에 유연하게 대응할 수 없다는 단점이 있다.

따라서, 최근에는 상부구조물의 가속도 계측을 바탕으로 한 지반-구조물계의 실시간 하이브리드 진동대 실험방법에 대한 수치 시뮬레이션을 수행하였으며(Lee 등, 2002, 이성경, 2005), 정적 지반강성을 갖는 지반-구조물계를 대상으로 하여 하이브리드 진동대 실험을 제안하고 이를 실험적으로 검증하였다(이성경 등, 2006). 그러나, 상부구조물의 가속도 계측을 이용하여 지반-구조물계의 진동대 실험을 수행한 기존의 연구에서는 반무한 공간의 지반을 모델화하기 위해서 지반의 강성과 감쇠를 단순히 상수로 표현하여 병렬로 연결한 Voigt 모델을 사용하였으며, 일반적인 적층구조를 이루는 지반의 모델에 사용되는 것으로서 실수부(강성)와 허수부(감쇠)가 모두 진동수에 따라 변화하는 이른바 동적 지반강성은 고려되지 않았다(이성경 등, 2006).

본 연구에서는 동적 지반강성으로 표현되는 적층지반 위에 직접기초를 갖는 구조물에 대한 하이브리드 진동대 실험법을 제안하고 이를 실험적으로 검증하였다. 본 연구에서 제안되는 실험방법은 그림 1과 같이 상부구조물과 진동대의 가속도를 계측하여 진동대 제어기로 피드백하고, 전체 지반-구조물계의 동적거동을 묘사하기 위해 요구되는 기초부분의 절대가속도 응답(이하, 본 논문에서는 가속도 피드백이라 함) 또는 절대속도 응답(이하, 본 논문에서는 속도 피드백이라 함)을 계산하여 진동대를 구동시키는 방법이다. 일반적인 지반-구조물계의 동적상호작용에서는 기초의 수평 및 회전방향의 운동이 포함되어 이들에 따른 각각의 동적 지반강성을 고려하여야 한다. 특히, 기초의 회전운동에 따른 상부구조물의 주기 및 감쇠의 증가에 미치는 영향이 크다. 그러나, 본 연구에서는 실험방법의 제안 및 검증에 주안점을 두고 있고 제안 실험법의 검증에 사용된 진동대가 그림 1과 같이 수평의 1방향으로만 구동되는 것이기 때문에, 수평방향만의 동적 지반강성을 고려하고 기초의 회전에 의한 회전방향의 동적 지반강성은 고려하지 않았다. 또한, 본 연구에서는 그림 1의 상부구조물로서 기존연구와 동일한 실험체를 사용하였으며, 진동대의 거동을 임의대로 조정하기 위해서 명령신호(reference signal)에 따라 진동대의 운동을 제어하는 컨트롤러(2자유도 컨트롤러)도 기존연구와 동일하게 설정하였다(이성경 등, 2006).

논문의 구성으로서는 먼저, 여기서 제안되는 진동대 실험법의 검증대상이 되는 부분구조법에 의한 지반-구조물계의 수치해석 모델에 대해서 논의한다. 다음으로 제안방법을 실험적으로 검증하기 위한 지반-구조물계의 진동대 컨트롤러를 구성한다. 마지막으로, 제안방법의 실험적 검증을 위해서 가정한 지반-구조물계에 대한 수치해석과 진동대 실험결과를 시간영역과 진동수영역에서 비교하여 제안실험법의 유효성을 검증하였다.

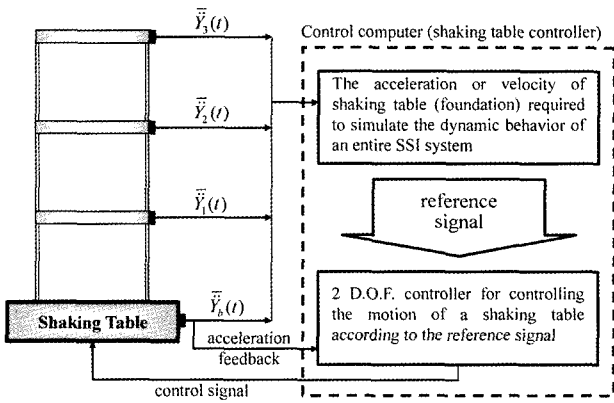


그림 1 지반-구조물계에 대한 진동대 실험의 개략도

2. 지반-구조물계의 수치해석 모델

부분구조법은 지반과 구조물을 일체로 모델링하여 동적 상호작용을 계산하는 유한요소법(Finite Element Method : FEM)과는 달리 돌을 분리하여 모델링한 후 이들 사이의 경계조건을 만족하도록 운동방정식을 정식화하여 전체 상호작용계에 대한 수치해석을 수행하는 방법으로서, 건물 또는 지반모델의 변경에 따라 유연하게 대응하여 동적상호작용을 계산할 수 있다는 장점이 있다. 이와 같이 지반과 구조물을 별개로 모델링하는 부분구조법의 개념이 실험과 수치해석을 동시에 수행하는 하이브리드 실험법의 개발에 많이 이용되었다.

그림 2는 본 연구의 실험적 검증대상이 되는 지반-구조물계의 수치해석 모델로서, 암반층과 표층으로 구성된 2층 지반을 가정하여 이 위에 직접기초를 갖는 3층 전단형 실험체 건물을 나타내고 있다. 2층의 지반모델은 표층의 깊이가  $d=50\text{cm}$ , 포아송의 비는  $\nu_1 = \nu_2 = 0.3$ , 전단파 속도가  $V_{s1} = 416.7\text{cm/s}$ 와  $V_{s2} = 616\text{cm/s}$ 이고, 단위용적중량은  $\gamma_1 = 10.1\text{kN/m}^3$ 과  $\gamma_2 = 11.7\text{kN/m}^3$ 로 상정하였다. 그림 2에서 본 연구에 사용된 상부구조물은 기존 연구와 동일한 실험체를 대상으로 하였고, 표 1은 상호작용 효과를 고려하지 않은 기초고정 모델에 대해서 진동대 실험을 수행하여 얻은 가속도 데이터를 이용하여 실험체의 강성과 감쇠계수를 식별한 결과이다. 각 층의 질량은  $1.32\text{ kg}$ 으로 측정되었다 (이성경 등, 2006).

그림 3은 부분구조법에 의한 지반-구조물계의 수학적 모델로서, 유효기초입력  $Y_b^g(t)$ 가 동적지반강성의 실수부  $k_b^g(\omega)$ 와 허수부  $c_b^g(\omega)$ 를 통하여 전체 상호작용계에 강제변위로서 작용한다. 그림에서 보는 바와 같이 지반 모델이 변경되면, 그에 따른 유효기초입력과 동적지반강성으로 교체하여 전체 모

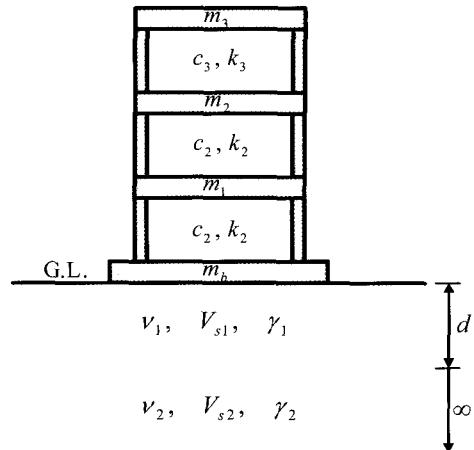


그림 2 2층 지반에 의해 지지되는 직접기초를 갖는 상부구조물

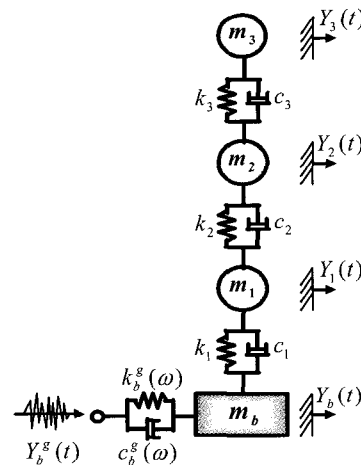


그림 3 부분구조법에 의한 지반-구조물 모델

델을 구성할 수 있으며 기초와 지반 사이에 작용하는 상호작용력도 변화하게 된다.

표 1 실험구조물의 파라미터 식별 결과

층	1	2	3
$c_i$ (N · s/cm)	0.9	0.8	0.4
$k_i$ (N/cm)	43.1	44.1	54.9

따라서, 전체 지반-구조물계는 상부구조물의 하부에서 상호작용력이 작용하게 되며 기초를 포함하는 상부구조물과 상호작용력이 서로 평형을 이루는 식 (1)과 같은 진동수영역에서의 운동방정식으로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} S_{ss}^s(\omega) & S_{sb}^s(\omega) \\ S_{bs}^s(\omega) & S_{bb}^s(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Y_s(\omega) \\ Y_b(\omega) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -R_b(\omega) \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기에서,  $Y_s(\omega)$ 와  $Y_b(\omega)$ 는 각각 상부구조물과 기초의 절대변위  $Y_s(t)$ 와  $Y_b(t)$ 에 대한 푸리에 변환을 나타내고, 상부구조물의 동적강성  $[S^s(\omega)]$ 는 식 (2)과 같다.

$$\begin{bmatrix} S_{ss}^s(\omega) & S_{sb}^s(\omega) \\ S_{bs}^s(\omega) & S_{bb}^s(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [K_{ss}] & [K_{sb}] \\ [K_{bs}] & [K_{bb}] \end{bmatrix} + i\omega \begin{bmatrix} [C_{ss}] & [C_{sb}] \\ [C_{bs}] & [C_{bb}] \end{bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} [M_{ss}] & [M_{sb}] \\ [M_{bs}] & [M_{bb}] \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기에서,  $[M_{ss}], [C_{ss}], [K_{ss}]$ 는 각각 상부구조물의 질량, 감쇠, 강성행렬로 표 1과 같은 파라미터로 이루어진 3층 전단형 모델을 나타내고, 그 외의 항들은 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} [M_{sb}] &= [M_{bs}]^T = [000], & [M_{bb}] &= m_b \\ [C_{sb}] &= [C_{bs}]^T = [00 - c_1], & [C_{bb}] &= c_1 \\ [K_{sb}] &= [K_{bs}]^T = [00 - k_1], & [K_{bb}] &= k_1 \end{aligned} \quad (3)$$

기초와 지반사이에서 작용하는 상호작용력  $R_b(\omega)$ 는 식 (4)와 같이 동적지반강성과 기초와 지반의 상대변위의 곱으로 표현된다.

$$R_b(\omega) = S_b^g(\omega) \cdot [Y_b(\omega) - Y_b^g(\omega)] \quad (4)$$

여기에서, 지반모델의 동적지반강성  $S_b^g(\omega)$ 는 적층지반 위에 놓인 무질량 기초의 상부에 단위변위를 작용시켰을 경우 발생하는 지반의 반력에 대한 이론해를 제공하는 박층요소법(Thin Layer Method)(AIJ, 1999)에 의해 계산되었으며, 그림 4에서 실선으로 표시된 실수부와 허수부를 나타낸다. 여기에서, 지반의 강성을 나타내는 실수부가 진동수 증가에 따라 음수로 변화하게 되는데, 이것은 지반의 반력이 기초의 변위와 동일한 방향으로 작용한다는 것을 의미하는

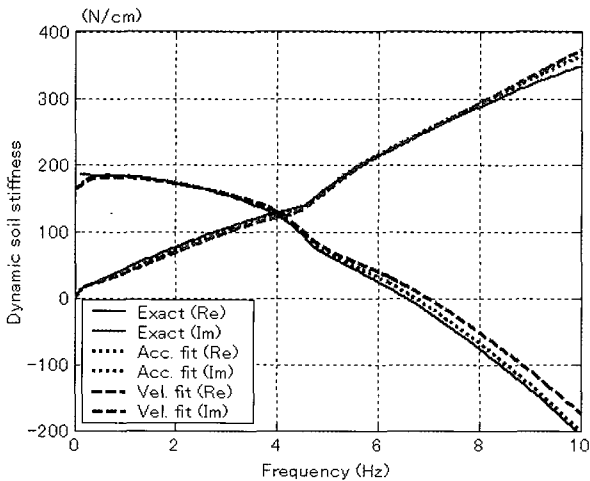


그림 4 동적지반강성

것으로서 진동수에 따라 하중과 변위사이의 위상이 변하기 때문에 나타나는 현상이다.

이상과 같이, 부분구조법에 의한 지반-구조물계의 운동방정식을 나타내는 식 (1)의 좌변에는 구조물만이 표현되고 우변에는 지반의 영향이 나타나며, 하부에서 입력하중으로 작용하는 상호작용력에 의해 가진되는 상부구조물은 식 (5)와 같은 동적평형을 만족시킨다. 이것은 식 (1)의 행렬방정식을 연립방정식으로 변환하여 양변을 서로 더함으로써 유도될 수 있다.

$$m_b \ddot{Y}_b(\omega) + \sum_{i=1}^3 m_i \ddot{Y}_i(\omega) = -R_b(\omega) \quad (5)$$

식 (5)는 물리적인 측면에서, 기초를 포함하는 상부구조물이 하부에서 상호작용력에 의해 가진될 때, 상부구조물의 내력은 층간에서 서로 상쇄되고 상부구조물과 기초에 발생하는 관성력들의 합력이 입력하중인 상호작용력과 동적인 평형을 이룬다는 것을 의미한다. 따라서, 임의의 지반-구조물계의 동적거동을 구현하기 위해 하부에서 가진해야 하는 상호작용력을 상부구조물에 대한 실험체의 절대가속도 정보로부터 간접적으로 예측할 수 있다.

### 3. 지반-구조물계의 진동대 실험

지반-구조물계의 하이브리드 진동대 실험을 위해서는 상정한 지반모델에 대한 동적지반강성을 진동대 콘트롤러에 반영해야 한다. 여기에서는 그림 4와 같이 이론해로부터 구한 동적지반강성을 제안되는 피드백 방법에 따라서 근사화된 필터를 제시하여 지반-구조물계의 실험을 수행하기 위한 진동대 콘트롤러를 설계하고 이를 검증한다. 진동대 실험시스템은 기존연구에 소개되어 있다(이성경 등, 2006).

#### 3.1 가속도 피드백

식 (4)와 같은 상호작용력은 변위 합성적분(convolution integral)에 의한 표현으로서, 이를 가속도 합성적분에 의한 표현으로 변환하면 식 (6)과 같다(Motosaka 등, 1990).

$$R_b(s) = -{}_a S_b^g(s) \cdot [\dot{Y}_b(s) - \dot{Y}_b^g(s)] \quad (6)$$

여기서, 라플라스 변수  $s = i\omega$ 이며,  ${}_a S_b^g(s)$ 는 가속도 피드백 실험을 수행하기 위해서 이론해로부터 구한 동적지반강성의 오차가 최소화되도록 함으로써 얻은 필터로서 식 (7)

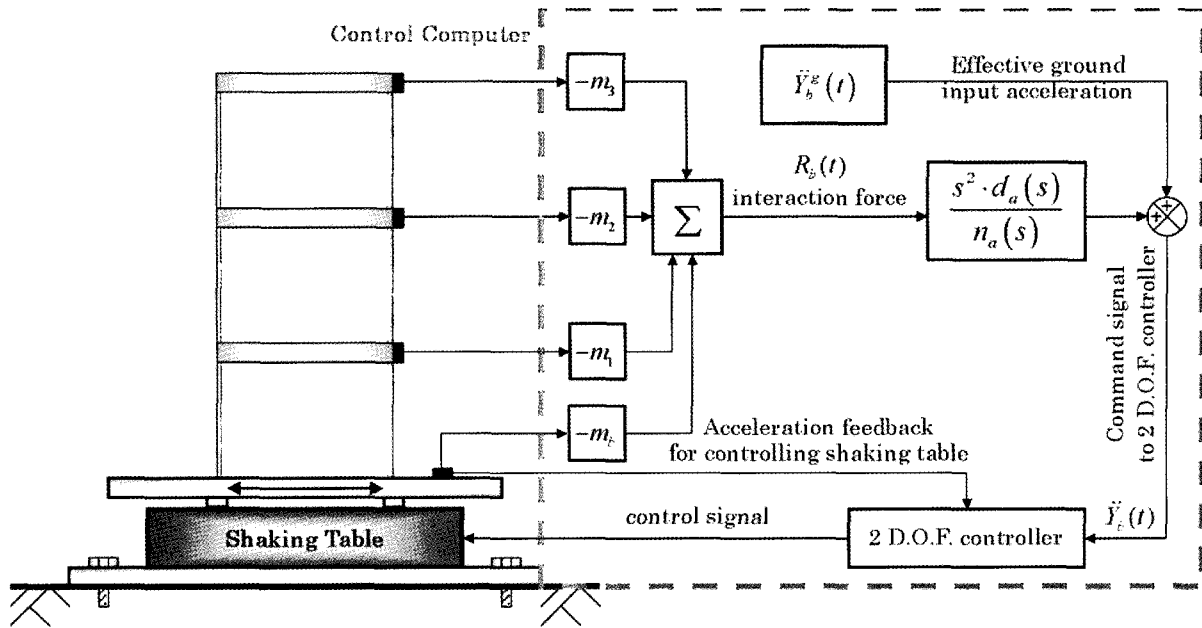


그림 5 구조물-지반계의 진동대 콘트롤러 (가속도 피드백)

과 같은 부분분수로 표현되며, 그림 4에서 'Acc. fit'에 해당한다.

$${}_a S_b^g(s) = \frac{n_a(s)}{d_a(s)} = \frac{\prod_{k=1}^5 (s - p_{ak})}{\prod_{k=1}^3 (s - z_{ak})} \quad (7)$$

여기서, 분모와 분자의 근은 각각 다음과 같다.

$$z_{a1} = -1.49, z_{a2} = -5.0 + 2.87i, z_{a3} = -5.0 - 2.87i \quad (8)$$

$$p_1 = -1.32, p_2 = -3.13 + 3.16i, p_3 = -3.13 - 3.16i, p_4 = -4.16 + 2.89i, p_5 = -4.16 - 2.89i \quad (9)$$

식 (6)과 같은 가속도 합성적분을 이용하여 정식화된 상호작용력으로 상부구조물 실험체를 가진하기 위해서 요구되는 진동대(기초)의 가속도 응답은 다음 식과 같이 식 (7)을 식 (6)에 대입하고 진동대의 가속도에 대해서 정리하여 구한다.

$$\ddot{Y}_b(s) = \frac{s^2 \cdot d_a(s)}{n_a(s)} \cdot R_b(s) + \ddot{Y}_b^g(s) \quad (10)$$

식 (10)에 나타난 상호작용력은 식 (5)로부터 알 수 있는 것처럼 진동대와 상부건물 실험체의 가속도를 측정하여 구할 수 있다. 그림 5에서 점선으로 둘러싸인 부분이 식 (10)을 바탕으로 하여 설계된 진동대 콘트롤러를 개략적으로 보여주며 진동대의 운동을 직접적으로 제어하는 컴퓨터의 제어알고리즘에 반영된다. 상호작용력이 상부구조물과 진동대에서 관

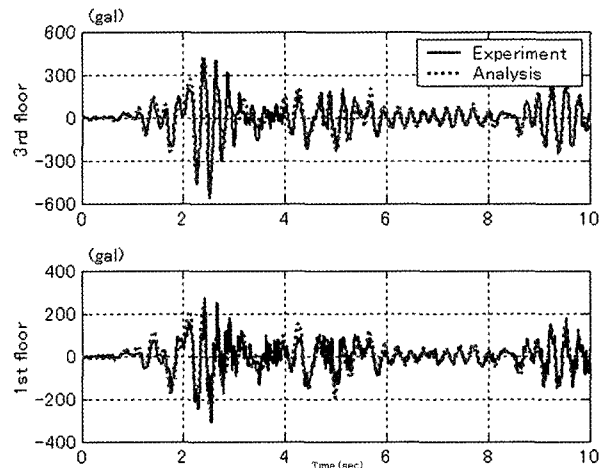


그림 6 수치해석과 실험결과와의 비교(가속도 피드백)

측된 관성력에 의해 간접적으로 구해지고, 동적지반강성을 통과함과 동시에 유효지반입력진동을 더하여 진동대에 의해 가진되어야 할 가속도가 계산된다. 진동대는 계산된 가속도를 명령신호로 하여 제어컴퓨터에 의해 구동되어, 결과적으로 상부구조물은 식 (6)과 같은 가속도 합성적분을 이용하여 정식화된 상호작용력에 의해서 가진된다.

실제 진동대 실험은 그림 5와 같이 제어컴퓨터의 제어알고리즘에 반영된 필터들을 이산화된 필터로 변환하여 수행하며, 본 연구에서는 제어용 상용프로그램인 LabVIEW(Robert, 2001)를 사용하여 진동대 실험을 수행하였다. 그림 6는 식 (1)에 의해 계산된 가속도응답(점선)과 실험결과(실선)를 비교한 것으로 두 결과들이 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있으며, 그림 7은 기초고정모델에 대한 실험(이성경 등, 2006)(점선)

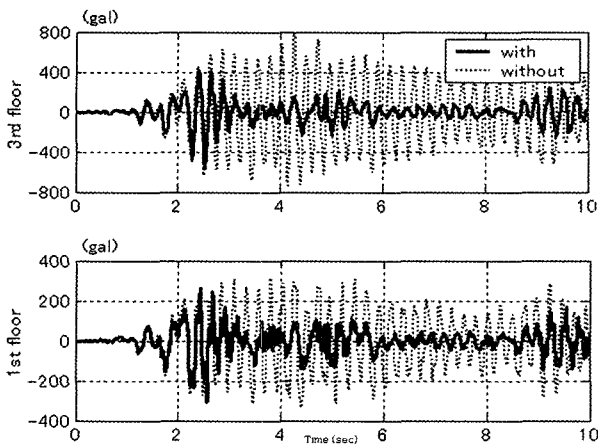


그림 7 기초고정모델과 구조물-지반계와의 실험결과 비교 (가속도 피드백)

과 그림 5와 같은 지반-구조물계의 실험결과(실선)들에 대한 가속도 응답을 비교한 것이다. 기초고정계에 대한 지반-구조물계의 일반적인 특성으로서, 건물의 감쇠비 증가에 따른 응답의 감소효과가 확연히 드러나는 것을 알 수 있다.

### 3.2 속도 피드백

식 (4)와 같은 상호작용력을 속도 합성적분에 의한 표현으로 변환하면 식 (11)과 같다(Motosaka 등, 1990).

$$R_b(s) = \frac{v S_b^g(s)}{s} \cdot [\dot{Y}_b(s) - \dot{Y}_b^g(s)] \quad (11)$$

여기서,  $v S_b^g(s)$ 는 속도 피드백 실험을 수행하기 위해서 근사화된 동적지반강성에 해당하는 필터로서 식 (12)와 같은 부분분수로 표현되며, 그림 4에서 'Vel. fit'에 해당한다.

$$v S_b^g(s) = \frac{n_v(s)}{d_v(s)} = \frac{\prod_{k=1}^5 (s - p_{vk})}{\prod_{k=1}^4 (s - z_{vk})} \quad (12)$$

여기서, 분모와 분자의 근은 각각 다음과 같다.

$$z_{v1} = -1.49, z_{v2} = -9.61, z_{v3} = -5.0 + 2.87i, z_{v4} = -5.0 - 2.87i \quad (13)$$

$$p_{v1} = p_{a1}, p_{v2} = p_{a2}, p_{v3} = p_{a3}, p_{v4} = p_{a4}, p_{v5} = p_{a5} \quad (14)$$

식 (11)과 같은 속도 합성적분을 이용하여 표현된 상호작용력으로 상부구조물 실험체를 가진하기 위해서 필요한 진동대의 속도는 다음 식과 같이 식 (12)를 식 (11)에 대입하고 진동대에 의해 가진되어야 하는 속도에 대해서 정리하여 얻어진다.

$$\dot{Y}_b(s) = \frac{s \cdot d_v(s)}{n_v(s)} \cdot R_b(s) + \dot{Y}_b^g(s) \quad (15)$$

식 (15)에 나타난 상호작용력은 가속도 피드백에 의한 방법과 마찬가지로 진동대와 상부건물 실험체의 가속도를 측정하여 구할 수 있다. 그림 8에서 점선으로 둘러싸인 부분이 식 (15)를 바탕으로 하여 설계된 진동대 콘트롤러이다. 상호

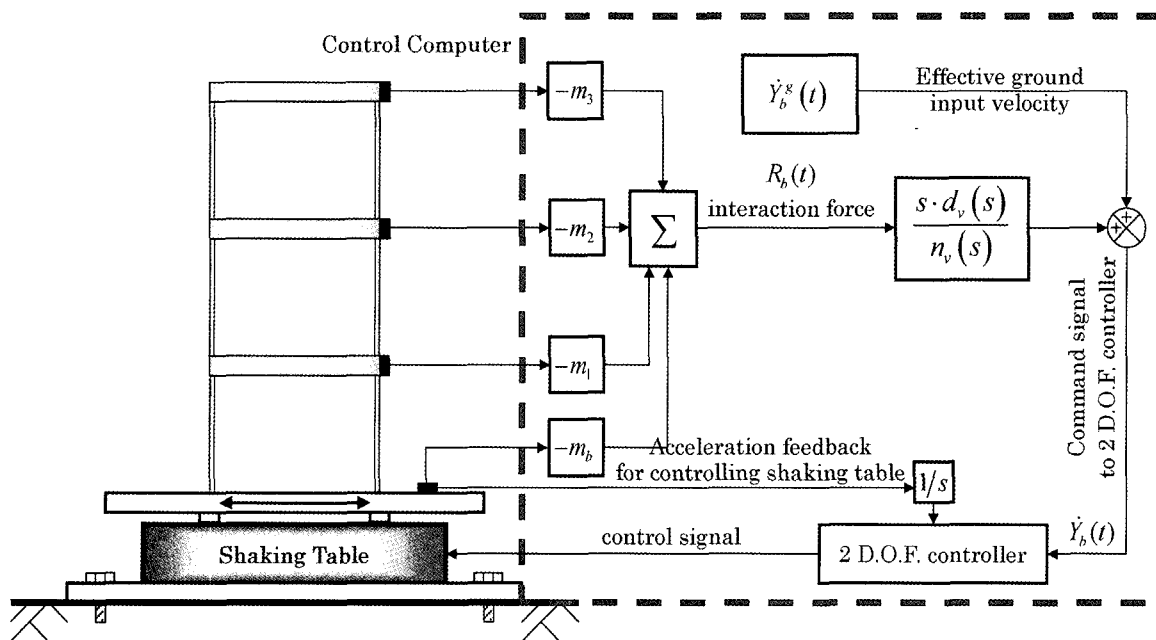


그림 8 구조물-지반계의 진동대 콘트롤러 (속도 피드백)

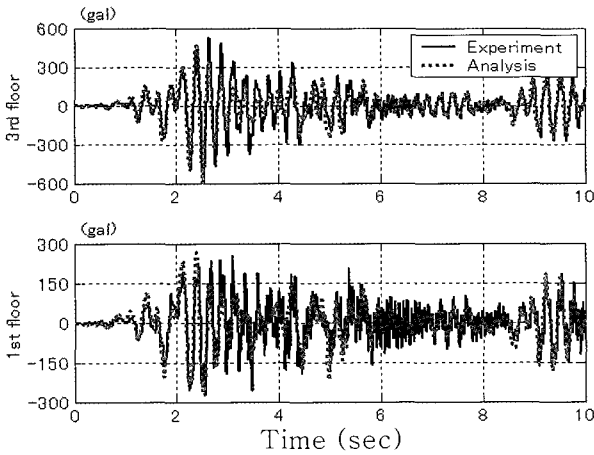
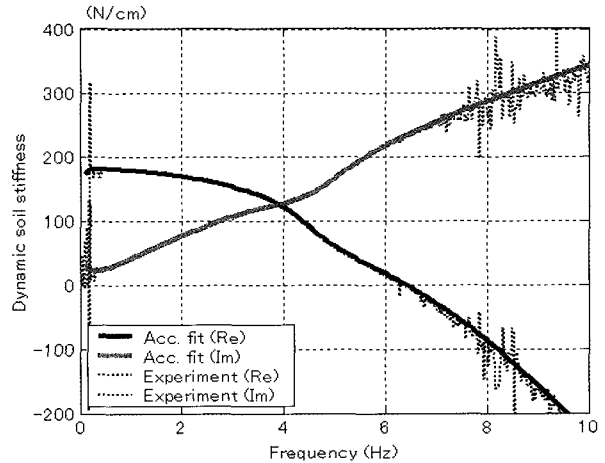


그림 9 수치해석과 실험결과와의 비교(속도 피드백)



(a) 가속도 피드백

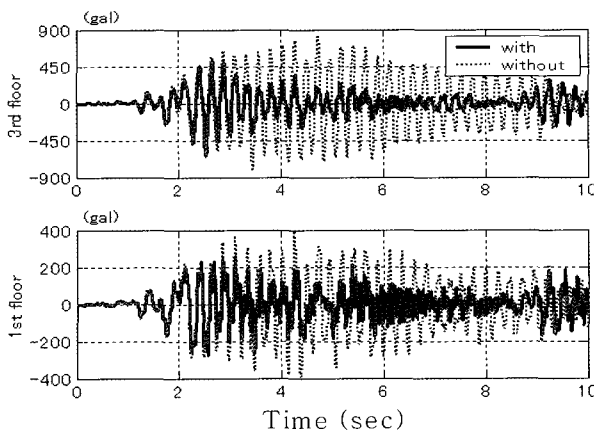
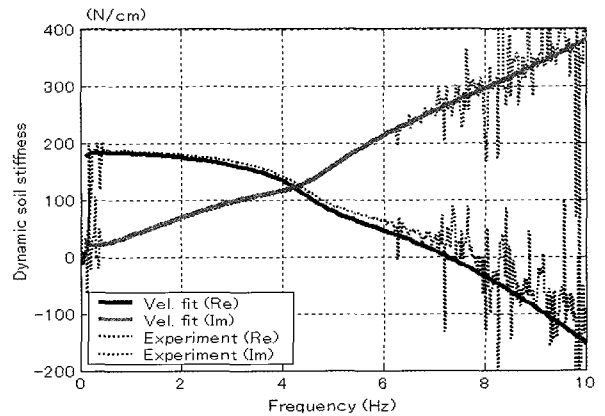


그림 10 기초고정모델과 구조물-지반계와의 실험결과 비교 (속도 피드백)



(b) 속도 피드백

그림 11 동적지반강성의 비교

작용력이 상부구조물과 진동대에서 관측된 관성력에 의해 구해지고, 필터화된 동적지반강성을 통과함과 동시에 유효지반 입력속도를 더하여 진동대에 의해 가진되어야 할 속도가 계산된다. 진동대는 계산된 속도를 명령신호로 하여 제어컴퓨터에 의해 구동되어, 상부 실험구조물이 식 (11)과 같은 속도 합성적분을 이용하여 정식화된 상호작용력에 의해서 가진된다. 속도피드백의 경우에는 명령신호로서 진동대의 속도가 2자유도 제어기에 입력이 되고 이 제어기에 피드백 되는 신호도 진동대의 속도가 필요하기 때문에, 진동대 테이블에 부착된 가속도계부터 측정된 가속도를 피드백하여 속도를 계산하기 위한 적분필터가 추가되었다.

그림 9은 식 (1)에 의해 계산된 가속도응답(점선)과 그림 8에 의한 속도피드백 실험에 의해 측정된 가속도(실선)를 비교한 것이다. 두 결과가 2.5초까지는 잘 일치하고 있지만, 2.5~8.5초 구간 사이에서 불일치하고 있는 것은 속도피드백의 경우에는 진동대의 속도를 측정하는 것이 필요하지만, 본 연구에서는 진동대 자체의 구동을 모니터 하기 위해서 가속도

센서를 사용하여 진동대가 정확히 구동되지 못하였기 때문에 생각되며 이러한 문제점은 그림 8의 제어알고리즘에서 적분필터를 제거하고 속도센서를 이용하여 진동대의 속도를 감지하면 해결될 것으로 판단된다. 그림 10은 기초고정모델에 대한 실험(이성경 등, 2006)(점선)과 그림 8과 같은 지반-구조물계의 실험결과(실선)들에 대한 가속도 응답을 비교한 것이다. 가속도 피드백 방법과 마찬가지로 지반-구조물계의 가속도 응답의 감소효과가 뚜렷하게 나타난다.

### 3.2 실험방법에 따른 동적지반강성의 식별

가속도 피드백 실험에 의한 동적지반강성은  $s = i\omega$ 라 하고 식 (7)을 식 (10)에 대입한 후,  ${}_a S_b^g(\omega)$ 에 대해서 정리하여 구한다.

$${}_a S_b^g(\omega) = i\omega c_b^g + k_b^g = \frac{-\omega^2 \cdot R_b^g(\omega)}{\ddot{Y}_b^g(\omega) - \dot{Y}_b^g(\omega)} \quad (16)$$

그림 5로부터 알 수 있듯이 상호작용력  $R_b(t)$ , 진동대의 가속도  $\dot{Y}_b(t)$ , 유효 기초입력 가속도  $\dot{Y}_b^g(t)$ 는 실험으로부터 계측 또는 주어진 데이터들이다. 이들 데이터를 푸리에 변환하여 식 (16)의 관계를 이용하면 그림 11 (a)와 같이 가속도 피드백 실험으로부터 동적지반강성(점선)을 구할 수 있다. 실선은 그림 4의 'Acc. fit'를 나타내며, 두 결과가 서로 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

속도피드백의 경우에도 가속도 피드백 실험과 마찬가지로  $s=i\omega$ 라 하고 식 (12)을 식 (15)에 대입한 후,  ${}_vS_b^g(\omega)$ 에 대해서 정리하여 실험적인 동적지반강성을 구한다.

$${}_vS_b^g(\omega) = i\omega c_b^g + k_b^g = \frac{-i\omega \cdot R_b(\omega)}{\dot{Y}_b(\omega) - \dot{Y}_b^g(\omega)} \quad (17)$$

그림 8로부터 알 수 있듯이 상호작용력  $R_b(t)$ , 진동대의 가속도  $\dot{Y}_b(t)$ , 유효 기초입력 가속도  $\dot{Y}_b^g(t)$ 는 실험으로부터 계측 또는 주어진 데이터들이다. 이들 데이터를 푸리에 변환하여 식 (17)의 관계를 이용하면 그림 11 (b)와 같이 속도피드백 실험으로부터 동적지반강성(점선)을 구할 수 있다. 실선은 그림 4의 'Vel. fit'를 나타내며, 두 결과의 부합 정도가 양호한 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 건물모델만을 물리적인 실험체로 이용하여 동적 지반강성을 갖는 적층지반 위에 직접기초로 지지되는 구조물의 동적거동을 모사하기 위한 실시간 하이브리드 진동대 실험법을 제안하고 이를 실험적으로 검증하였다.

본 연구에서 제안된 가속도 및 속도 피드백 방법은 상부구조물과 진동대의 가속도를 계측하여 진동대 제어기로 피드백하고, 전체 지반-구조물계의 동적거동을 모사하기 위해 요구되는 기초부분의 절대가속도 응답 또는 절대속도 응답을 계산하여 진동대를 구동시키는 방법이다. 즉, 진동대 자체가 전체 지반-구조물계의 기초로 거동하도록 구동시키는 방법이다. 이 때 계산된 응답은 가속도 또는 속도 합성적분으로 정식화된 상호작용력을 이용하여 유도된다.

먼저, 전체 지반-구조물계에서 상부구조물의 각 층에 작용하는 관성력의 합과 상호작용력 사이에 동적평형이 성립한다는 부분구조법의 원리로부터, 상부구조물의 가속도 관측을 이용하여 상호작용력을 간접적으로 계측할 수 있다는 것을 보였다. 다음으로, 이론해로부터 구한 동적지반강성을 제안방법에 따라 등가의 필터로 치환하여 진동대 컨트롤러의 제어

알고리즘에 반영함으로써, 지반의 동적효과가 고려된 구조물의 응답을 계산하여 실험을 수행하였다. 마지막으로, 본 연구에서 가정한 지반-구조물계의 수치해석과 실험결과의 비교, 기초 고정계 모델에 대한 진동대실험으로부터 계측된 가속도 응답과 지반-구조물계에 대한 실험으로부터 측정된 가속도 응답의 비교 그리고 진동대 제어기의 제어알고리즘에 반영한 동적지반강성과 실험데이터를 이용하여 식별된 동적지반강성의 비교를 통하여 본 논문에서 제안된 실험방법의 타당성 및 유효성을 검증하였다.

#### 감사의 글

연구는 과학기술부/한국과학재단 우수연구센터육성사업(R11-2002-101-03004-0)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다. 또한 이 연구에 참여한 연구자는 「2단계 BK21사업」의 지원비를 받았음.

#### 참 고 문 헌

- 이성경 (2005) 구조물과 지반의 동적 상호작용을 고려한 진동대 시험에 관한 수치 시뮬레이션, 한국지진공학회논문집, 9(5), pp.21~28.
- 이성경, 민경원 (2006) 정적 지반강성을 갖는 구조물-지반계의 진동대 실험, 대한건축학회구조계논문집, 22(12), pp.3~12.
- 桑原芳郎, 土屋秀雄, 中山正昭, 萩原幸雄, 鈴木敏夫 (1981) 模型地盤を用いた地盤-構造物動的相互作用に関する基礎的實驗と解析, 日本建築學會大會學術講演梗概集, 構造系, 2068, pp.639~640.
- 田中宏志, 白阪靖人, 小久保 涉, 太田外氣晴, 原 昭夫, 丹羽正徳 (1979) 地中壁模型の振動台實驗とその解析的研究, (その1)~(その2), 日本建築學會大會學術講演梗概集, 54, pp.369~372.
- 太田外氣晴, 丹羽正徳, 五十嵐克哉, 金山弘雄, 内藤幸雄 他 (1982) 小型模型による構造物-地盤相互作用に関する基礎的實驗, (その1)~(その3), 日本建築學會大會學術講演梗概集, 構造系, 2073~2075, pp.665~670.
- 坪井義勝, 田治見 宏 (1956) 建物の地下逸散減衰に関する模型實驗(1), 日本建築學會大會學術講演梗概集, 54, pp.369~372.
- Architectural Institute of Japan (1999) An Introduction to Dynamic Soil-Structure Interaction, AIJ, Tokyo, Japan (in Japanese)
- Iguchi, M., Akino, K. (1993) Experimental and Analytical Studies for Soil-Structure Interaction



- (State-of-the-Art Report), 12th SmiRT, Div. K, Principal Division Lecture, pp.1~18.
- Konagai. K., Nogami. T.** (1998) Analog circuit to simulate dynamic soil-structure interaction in shaking table test, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 17, pp.279~287.
- Lee. S. K., Motosaka. M., Sato. T.** (2002) Numerical simulation on the shaking table test considering the dynamic soil-structure interaction and estimation of a dynamic soil stiffness, Proceedings of the 3rd World Conference on Structural Control, 2, pp.243~248.
- Motosaka. M., Nagano. M.** (1990) Basic investigation on the evaluation of interaction forces of unbounded soil in the time-domain substructure method, Proceedings of the 8th Japan Earthquake Engineering Symposium, pp.1137~1142 (in Japanese)
- Robert. H. B.** (2001) LabVIEW Student Edition 6i, Prentice Hall
- Wolf. J. P.** (1985) Dynamic Soil-Structure Interaction, Prentice-Hall, pp.273~396.
- Yao. S., Kobayashi. K., Yoshida. N., Matsuo. H.** (2004) Interactive behavior of soil-pile-superstructure system in transient state to liquefaction by means of large shake table tests, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24, pp.397~409.