

실시간 하이브리드 실험법을 이용한 동조액체기둥감쇠기가 설치된 구조물의 지진응답 제어성능 평가

Performance Evaluation of Controlling Seismic Responses of a Building Structure with a Tuned Liquid Column Damper using the Real-Time Hybrid Testing Method

정희산* · 이성경** · 박은천*** · 민경원†

Hee-San Chung, Sung-Kyung Lee, Eun Churn Park, Kyung-Won Min

Key Words : Real-Time Hybrid Testing Method(실시간 하이브리드 실험법), Tuned Liquid Column Damper(동조액체기둥감쇠기), Shaking Table(진동대),

ABSTRACT

In this study, real-time hybrid test using a shaking table for the control performance evaluation of a U-shaped TLCD controlling the response of earthquake-excited building structure is experimentally implemented. In the test, the building structure is used as a numerical part, on which a U-shaped TLCD adopted as an experimental part was installed to reduce its response. At first, the force that is acting between a TLCD and building structure is measured from the load cell attached on shaking table and is fed-back to the computer to control the motion of shaking table. Then, the shaking table is so driven that the error between the interface acceleration computed from the numerical building structure with the excitations of earthquake and the fed-back interface force and that measured from the shaking table. The control efficiency of the TLCD used in this paper is experimentally confirmed by implementing this process of shaking table experiment on real-time.

1. 서론

초고층 건축 구조물이나 교량과 같은 대형 구조물의 동적 특성을 규명하기 위해 실험실 실험을 수행하는데는 적용성에 있어서 규모 및 무게 제한 그리고 많은 비용이 수반하여 실현하기 매우 어렵다. 따라서 전체 구조물의 거동을 예측하기 위해 일반적으로 상사법칙에 의한 축소모형을 제작하거나 또는 전체구조물에서 중요한 부분만을 실험한 결과에 의존한다.(1)(2),(3)

한편, 최근에는 바람 또는 지진 하중을 받는 초고층 구조물의 내진성능을 향상시키기 위해 건물에 부가적인 질량을 설치하여 구조물의 에너지를 소산시키는 기술이 개발되고, 실제 많은 건축 구조물에 적용되고 있다. 최근에는 동조액체기둥감쇠기(tuned liquid column damper, TLCD)을 이용하여 부가적인 질량을 추가하는 시스템이 주목을 받고있다.(4) TLCD는 외부 동적하중의 동적응답 저감을 위해 가장 많이 사용되는 동조질량감쇠기(tuned mass damper, TMD)와 유사한 제어 특성을 가지고있다. 특히 TLCD의 운동방정식을 지배하는 점성은 액체 속도의 절대값의 함수이기 때문에, 운동방정식은 비선형이며 TLCD의 동적특성

은 가진하는 힘의 크기와 특성 그리고 가진에 의한 TLCD가 설치된 층의 구조물 응답에 의존적이다.(5)

본 논문에서는 지진 하중을 받는 건축구조물의 TLCD의 진동제어 효과를 실시간 하이브리드 진동대 실험법(real-time hybrid shaking table testing method, RHSTTM)을 통해 실험적으로 평가한다. RHSTTM은 TLCD-구조물 상호작용 시스템의 실험을 수행함으로써 물리적 구조물 모델을 요구하지 않고 단지 TLCD만을 이용한다. 실시간으로 해석모델의 제어력을 계속하고 진동대 통합제어기를 상태공간으로 표현한 사용자가 정의하는 지진 하중으로 가진하여 상호작용 시스템에서의 구조물의 응답을 구한다. 또한, 진동대 가속도의 오차를 최소화하기 위하여 진동대 역전달함수가 정의되고 상태공간 필터로 진동대 통합제어기에 포함되어 수행된다. 진동대는 진동대와 TLCD사이에 위치한 로드셀의 전단력 신호를 계속하고 피드백 계인을 곱하여 TLCD가 설치된 층의 절대가속도를 구현한다. RHSTTM에 의해 계속된 TLCD가 설치된 단자유도 구조물의 응답과 기존 진동대 실험법에 의해 계속된 응답의 비교는 각각 시간영역과 진동수영역에서 정확하게 일치함을 비교한다.

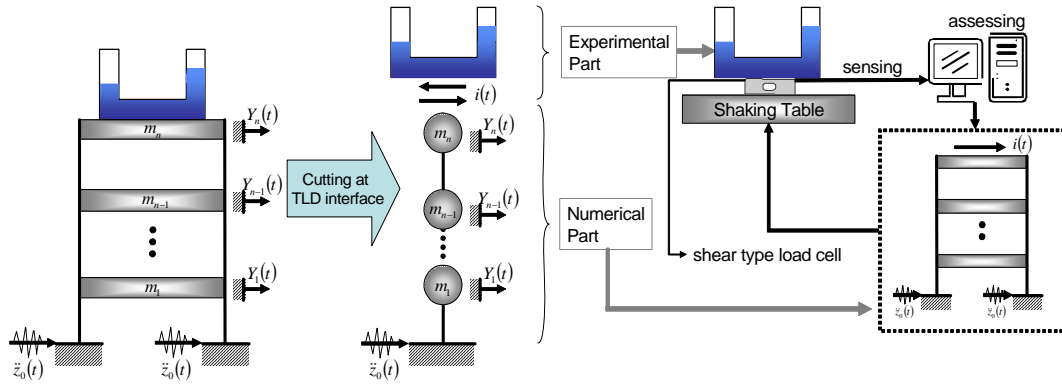


그림 1 실시간 하이브리드 실험법(RHSTTM)의 개념

$$[M]\{\ddot{Y}_i(t)\} + [C]\{\dot{Y}_i(t)\} + [K]\{Y_i(t)\} = \{p(t)\} \quad (1)$$

여기서, $\{Y_i(t)\}$ 는 i 번째 층의 절대변위이고, 외부하중의 위치벡터 $\{p(t)\}$ 는 $\{-i_e, 0, \dots, 0, c_1 \dot{z}_o + k_1 z_o\}^T$ 과 같다. 또한, 구조물의 질량, 감쇠, 그리고 강성 행렬은 식(2)와 같다.

2. 실시간 하이브리드 실험법

그림1은 RHSTTM 개념도를 보여준다. n 자유도를 가지는 구조물의 최상층에 설치되어 있는 TLCD의 전체 구조물 제어시스템은 그 경계면에서 상호 작용력을 받는 두 부분으로 분리된다. TLCD의 상부 부분구조의 밑면에서 측정되는 상호작용이 존재하는 상태와 하부 부분구조 즉 지반가속도 가진을 받고 상부에 상호작용력이 존재하는 상태의 구조물로 분리되며 상호작용력은 로드셀에 의하여 힘이 측정되어 결과적으로 진동대는 하부 부분구조의 최상층의 절대 가속도 응답과 동일하게 거동하게 된다. 실험 수행을 위해 상호작용력, 즉 TLCD에 의해 발생하는 제어력은 진동대에 부착된 로드셀에 의해 관측되고 피드백 되어 하부 구조물 계산에 이용되며 컴퓨터는 지반가속도와 상호작용력이 상부에 가진하는 형태로 수치 계산되어 다시 최상부의 응답이 진동대를 구동하는 형태로 실시간으로 실험이 이루어진다.

$$M = \begin{bmatrix} m_n & & & \\ & m_{n-1} & & \\ & & \ddots & \\ & & & m_1 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} c_n & -c_n & & & \\ -c_n & c_n + c_{n-1} & -c_{n-1} & & \\ & \vdots & \vdots & \ddots & \\ & & & -c_2 & c_2 + c_1 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} k_n & -k_n & & & \\ -k_n & k_n + k_{n-1} & -k_{n-1} & & \\ & \vdots & \vdots & \ddots & \\ & & & -k_2 & k_2 + k_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

n 자유도를 갖고 상부 제어력, $i_e(t)$ 과 지반가속도, $\ddot{z}_o(t)$ 를 각각 상부와 하부를 가진하는 수치해석부 구조물은 그림. 1의 점선안의 그림과 같으며 운동방정식은 식(1)과 같다.

식(1)처럼 제어 컴퓨터에서 실시간으로 수치해석부 계산을 하기 위하여 식(3)과 같이 상태공간 표현으로 변환되었다.

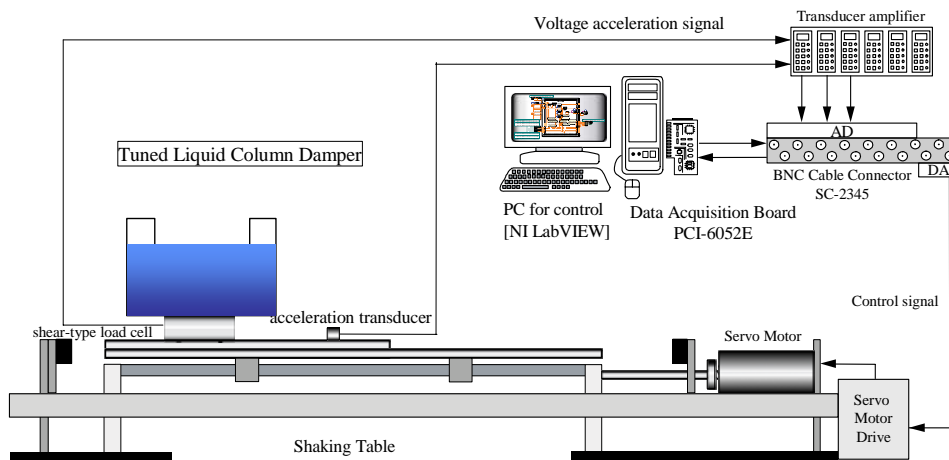


그림 2 진동대를 이용한 RHSTTM 개요

$$\begin{aligned} \dot{z} &= A_c z + B_c u \\ Y &= C_c z + D_c u \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, $2n$ 의 크기를 갖는 상태변수 벡터 z 는 구조물의 상대변위와 상대속도인 상태변수 $\{x_i, \dot{x}_i\}^T$ 로 구성되어 있으므로, x_i 는 $X - z_o$ 와 같다. 그리고, 입력벡터 u 는 2개의 요소를 갖는 $\{-i_e, \ddot{z}_o\}^T$ 로 구성되어 있다. 구조물 절대가속도 응답인 출력벡터 Y 는 크기 n 으로 구성되고, 각각 $2n \times 2n$, $2n \times 2$, $n \times 2n$, 그리고 $n \times 2$ 의 크기를 갖는 행렬 A_c, B_c, C_c , 그리고 D_c 는 다음 식(4)-(5)와 같다.

$$A_c = \begin{bmatrix} 0_{n \times n} & I_{n \times n} \\ -M^{-1}K - M^{-1}C & -M^{-1}b \end{bmatrix}, \quad B_c = \begin{bmatrix} 0_{n \times 1} & 0_{n \times 1} \\ M^{-1}b & -1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$C_c = [-M^{-1}K \quad -M^{-1}C], \quad D_c = [M^{-1}b \quad 0_{n \times 1}] \quad (5)$$

여기서, $0_{n \times n}$ 과 I 는 각각 $n \times n$ 의 크기를 갖는 영행렬 및 단위행렬이다.

3. 실험시스템

제안된 실험법을 실험적으로 검증하기 위한 실험 시스템은 그림2와 같다. 진동대에 위에 장착된 TLCD는 진동대에 의해 1방향으로 가진되며 TLCD가 수평방향으로 운동하는 동안 TLCD의 밀면 전단력을 측정하기 위한 전단형 로드셀은 TLCD와 진동대 사이에 설치되었다. 또한 진동대의 운동을 모니터링하기 위해 진동대 바닥에 가속도 센서를 설치하였다. 디지털 제어기의 가진 및 데이터 수집은 실시간 디지털 시그널 프로세서(digital signal processor, DSP)를 통해 이루어지며, DSP의 주요업무는 가속도 및 로드셀의 힘을 아

날로그 입력으로 통해 AD(analog to digital)변환을 하며 LabVIEW를 통해 계산된 명령신호를 DA(digital to analog)변환을 수행한다. 8채널 데이터수집 시스템은 NI PCI-6052E의 DSP보드와 NI SC2345 BNC케이블 커넥터가 연결되어있다. 그림 2는 데이터 수집보드의 DA채널을 통해 보내어진 명령신호에 의해 진동대가 구동되는 모습과 로드셀 및 가속도 센서에 의해 AD채널을 통해 데이터수집을 하는 과정을 보여준다. 그러나 명령신호에 의한 진동대의 운동은 진동대 동적 특성 및 가진 시스템에 의한 시간 지연 및 오차가 발생한다. 특히 명령신호와 진동대에 부착한 가속도센서에서 계측된 신호가 상이하기 때문에 이러한 동적특성을 상쇄시키기 위하여 진동대에 가우시안 분포를 따르는 백색잡음 신호를 가진하여 그 명령신호와 계측 가속도를 비교하였고, 전달함수를 계측하였다. 그리고 그 역전달함수를 극전적합하여 기반가속도를 진동대 역전달함수를 통과한 명령신호를 진동대에 보낼 수 있도록 설계하였다. 진동대 역전달함수는 다음식과 같다.

$$G_n^{-1}(s) = \frac{0.6s^5 + 94s^4 + 10,746s^3 + 498,200s^2 + 167,124s + 108,216}{s^5 + 204s^4 + 15,900s^3 + 8,252s^2 + 4,676s + 405} \quad (6)$$

여기서, 라플라스 변수 s 는 $i\omega$ 와 같다.

통합제어기 컴퓨터에서 위의 역전달함수를 적용하여 실험 수행하기 위해 식(6)과같이 상태공간 형식으로 변경하였다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_s &= A_s x_s + B_s r(t) \\ c(t) &= C_s x_s + D_s r(t) \end{aligned}$$

여기서, $x_s, r(t)$, 그리고 $c(t)$ 는 각각 상태벡터, 기준신호, 그리고 진동대의 제어신호를 나타낸다.

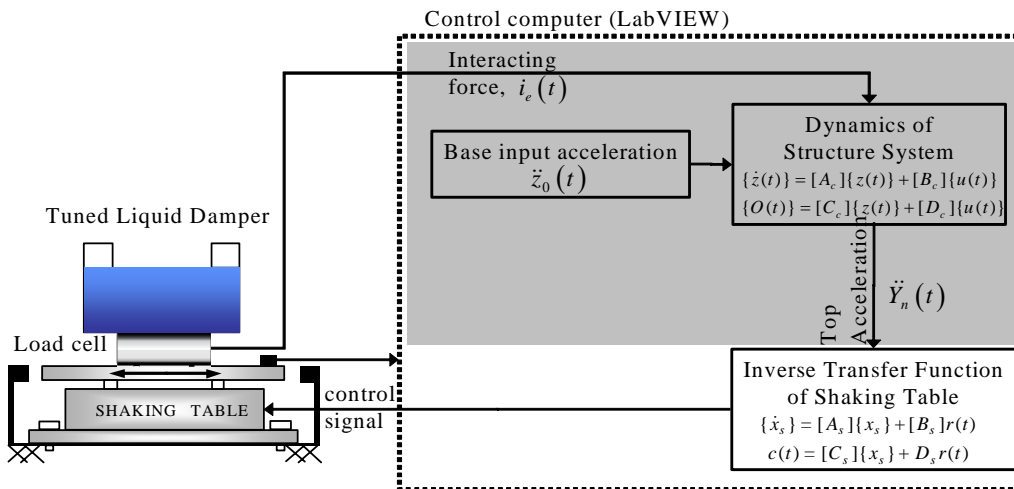
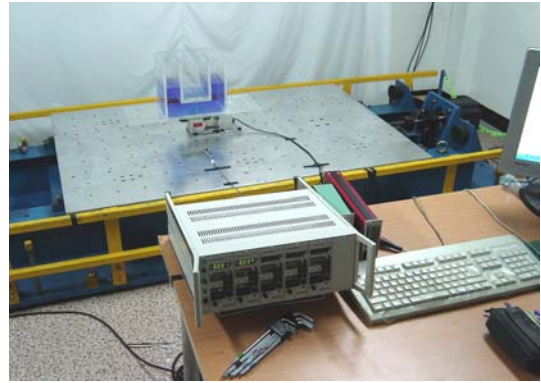


그림 3 실시간 하이브리드 실험법 수행을 위한 제어기 설계



(a) 기존의 TLCD-구조물 진동대 실험법

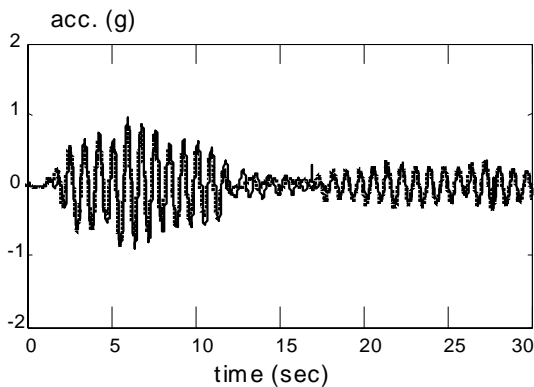


(b) 실시간 하이브리드 TLCD 실험법

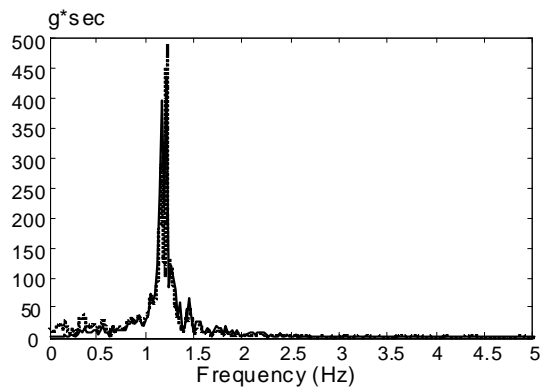
그림 4 TLCD가 설치된 구조물의 진동대 실험사진
4. 실험적 검증

그림 1의 RHSTTM을 수행하기 위해서는 통합제어기에 수치해석 부분과 진동대 구동시스템을 통합시켜야 한다. 그림 3은 RHSTTM을 수행하기 위한 블록다이어그램을 나타낸다. 그림 3의 어두운 부분에서 계산되는 과정인 예측된 두 입력신호 $i_e(t)$ 와 예측되진 않았지만 사용자의 정의에 의해 미리 생성된 지진 데이터 신호인 상호적인 힘을 이용하

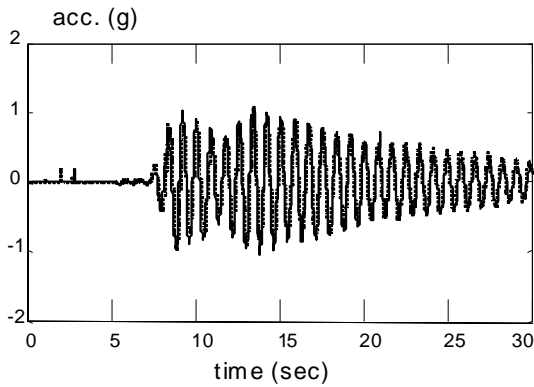
여 수치해석 부분의 절대가속도가 얻어진다. 진동대의 운동은 구조물의 최상층의 응답으로 계산되는 절대가속도와 실제 진동대의 가속도 응답 사이의 오차를 최소화시키는 역 전달함수를 통해 통합제어기에 의해 구동된다. 따라서, 진동대는 TLCD가 설치된 구조물의 최상층으로 구동되고, 상부 실험부분 구조물인 TLCD를 가진시킨다.



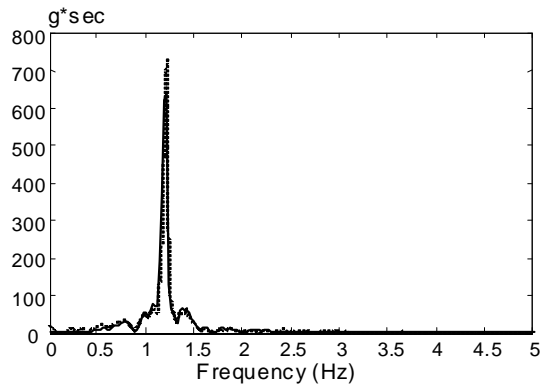
(a) El Centro 지진 (시간영역)



(b) El Centro 지진 (주파수영역)



(c) Kobe 지진 (시간영역)



(d) Kobe 지진 (주파수영역)

그림 5 기존 진동대 실험법과 실시간 하이브리드 실험법의 지진응답 제어 결과 비교

RHSTTM을 실험적으로 검증하기 위해서는 첫째, 그림 4(a)에 나타난 실제 TLCD-구조물을 대상으로 실험을 수행하는 기존의 진동대 실험을 수행한다. 다음으로 그림 4(a)의 구조물 모델의 시스템 식별을 수행하여 식별된 감쇠, 강성, 그리고 질량 행렬을 수치해석적 부분으로 구성하여 통합제어기에 결합시켜 실험을 수행한다. 마지막으로 제어된 경우의 수행된 두 실험 결과를 비교한다.

실험에 이용된 구조물은 TLCD가 설치되지 않은 단자유도 구조물로서 폭 0.6m, 높이 1.0m, 그리고 질량 169.7kg이다. 가진하는 지반가속도는 El Centro 지진파와 Kobe 지진파가 구조물의 절대 가속도를 계측하기 위한 진동대의 가속도로 이용되었다. 기존 진동대 실험을 통해 계측된 가속도 응답을 이용하여 시스템 식별이 수행되었다. 그러나, 식별된 파라미터값은 입력된 지진파에 따라 약간 다르게 나타났다. 두 지진파의 평균값을 이용하여 식별한 구조물의 동적특성은 구조물의 고유주기, 평균감쇠, 그리고 평균강성은 각각 1.23 Hz, $14.6 N \cdot s/m$, 그리고 $9914.3 N/m$ 으로 나타났다. 기존 연구에서 제시된 것과 같이 TLCD의 고유주기는 TLCD 수조 안에 물의 높이를 조절하여 구조물의 고유주기와 동조시켰다.(5)

그 다음으로는 TLCD의 지진응답제어성능평가 실험이 수행되었다. 그림 4(a)와 같이, 기존 TLCD가 설치된 실제 구조물의 응답저감 평가를 위한 진동대 실험이 수행되었다. 진동대의 안전한 실험을 위하여 최대 가속도가 100gal로 크기를 조절한 지진 데이터를 이용하였다. 그 다음으로, 실제 구조물을 제거한 후 수치해석적 부분으로 구조물을 통합제어기에 설정한 후 TLCD가 설치된 구조물의 RHSTTM이 그림 4(b)와 같이 수행되었다. 본 실험이 수행되기 위하여 그림 3의 어두운부분에 나타난 통합 제어기의 수치해석적 부분이 식별된 구조물의 파라미터를 반영하도록 설정하였다. 그림 3에서 나타난 연속적인 필터는 기존의 실험법과 동일한 시간 간격이 0.01초인 디지털 필터로 변환되었다.

기존의 실제 구조물을 이용한 진동대 실험과 RHSTTM을 이용하여 TLCD에 의해 제어된 응답이 각각 시간 영역과 주파수 영역에 따라 그림 5에 비교되어있다. 그 결과 본 논문에서 제시된 RHSTTM을 이용한 TLCD 지진응답 제어 성능 평가의 타당성이 실험적 결과에 의해 기존 진동대 실험법과의 일치하는 것으로 나타났다.

5. 결론

본 논문에서는 TLCD가 설치된 건축 구조물의 지진응답 제어성능을 실험적으로 검증하기 위하여 진동대를 이용한 RHSTTM이 수행되었다. 진동대를 이용한 RHSTTM에 의해 얻어진 구조물의 응답과 실제 TLCD가 설치된 축소모델 단자유도 구조물의 진동대 실험에 의해 계측된 구조물

의 응답을 비교하였다. 그 결과 물리적인 구조물을 사용하지 않고 수치해석적으로 구성된 구조물을 이용한 실험법과의 일치하는 것으로 나타났다.

후 기

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

참 고 문 헌

- (1) Horiuchi, T., Inoue, M., and Konno, T., 2000, "Development of a real-time hybrid experimental system using a shaking table", Proceedings of the twelfth World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 0843
- (2) Iemura, H., Igarashi, A., and Takahashi, Y., 1999, "Substructured hybrid techniques for actuator loading and shaking table tests", Proceedings of the first International Conference on Advances in Structural Engineering and Mechanics, pp. 821-826
- (3) Igarashi, A., Iemura, H., and Suwa, T., 2000, "Development of substructured shaking table test method", Proceedings of the twelfth World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 1775
- (4) Samali, B., Kwok, K., and Gao, H. 1998, "Wind Induced Motion Control of a 76 Storey Building by Liquid Dampers", Proceedings of Second World Conference on Structural Control, Vol. 1, pp. 1473-1480.
- (5) Yalla, S. K., 2001, "Liquid Dampers for mitigation of structural response: Theoretical Development and Experimental validation", Ph.D. Thesis, University of Notre Dame, pp.53-57