

합리적 내진설계를 위한 실험기법

Experiment As An Aid To Structural Seismic Design



이 한 선*

1. 서 언

19세기 중반까지 해석역학(analytical mechanics)의 기본기법이 수학적인 면에 편중되긴 하여도 유럽에서 완료되었다고 볼 수 있고, 오늘에 이르기 까지 꾸준히 사용되고 있다. 이 이론의 공학적 응용을 위하여, 프랑스를 포함한 여러나라에서 동시에 실험역학(experimental mechanics)이 발전하게 되었으며 이것은 기술의 발전에 필수불가결 요소가 되었다. 때로는 실험적인 역학이 주 역할을 담당하기도 하였다. 더구나, 컴퓨터의 획기적인 발전에 의해, 새로이 각광을 받고 있는 계산역학(computational mechanics)도 현대기술에 있어서 매우 중요한 역할을 담당하게 되었다. 관련기술에 따라서 역학에 대한 해석, 실험 및 계산 분야의 담당임무가 달라질 수 있다.

예를 들어서, 재료의 구성방정식(constitutive equation)을 정립하기 위해서는 이상화된 시험체에 대한 매우 조심스러운 실험이 필요하다. 이렇게 얻어진 자료에 입각하여 수학적 모델이 수립될 수 있고 어떤 주어진 경계치문제(boundary-value

problem)의 解를 고전적 혹은 수치해석적 방법을 통해 구할 수 있게 된다. 이러한 문제는 역학상의 변수의 수와 형태가 증가함에 따라, 또 하중이력과 온도변화가 더욱 복잡해짐에 따라, 더욱 풀기가 어려워지게 된다. 결국 오늘날에 이르기까지도 해석적인 방법만으로 직접 신뢰성있는 답을 얻을 수 없는 경우에 다다를 수가 있는 것이다. 구조물에 대한 내진설계는 이러한 범주에 속한다고 볼 수 있다. 즉 이상화된, 수치적으로 얻을 수 있는 解와 구조물의 실제적 거동사이에는 매우 큰 불일치가 여전히 존재하고 있다. 구조물의 耐震問題에 있어서 많은 분야가 밝혀지지 않은 상태에 있다. 한예로서, 실제해석에 있어서 비탄성영역의 철골구조의 주기적 거동(cyclic behavior)에 대한 물성관계식(constitutive relation)은 지나치리 만큼 단순화되어 있어, 관련 설계기준들도 변형도경화현상(strain hardening)을 아주 간접적인 방법으로 고려하고 있을뿐이다. 또한 극심한 주기적하중아래서 볼트접합의 미끄러짐에 관한 거동은 거의 모델화되지 않고 있으며 보통 해석에서 인식조차 되지 않고 있다. 또한 콘크리트에서 보강근의 부착과 미끄러짐과 같은 매우 중요한 문제도 이제 겨우 이해되기 시작하고 있는 정도이다. 따라서 이러한 필요성에 의해서 모사된(simulated) 지진

* 정회원, 영남대학교 건축공학과 전임강사, 공학박사

하중에 대하여 실제 부재와 접합부를 직접 실험하지 않을 수 없게 된다. 큰 지진이 왔을 때의 현장 관찰과 더불어 이러한 실험결과들이 바로 설계에 대한 합리적 근거를 제공하게 된다.

이상의 이유에 의하여, 우선, 지진에 대한 구조물의 피해양상과 구조물의 특수거동 필요성에 대하여 설명하고 지진을 모사하는(simulating) 가상 실험기법에 대하여 언급한다.

2. 구조물에 대한 지진의 영향

지구의 지각은 그 두께가 20 내지 30km로서 내부의 마그마를 둘러싸고 있다. 이는 다시 균열(fissure)이나 단층(fault) 등에 의해 여러개의 판(plate)으로 나누어진다. 산이나 계곡의 완만한 지질학적(tectonic) 이동은 변형을 일으키며 이는 결국 단층을 통해 갑작스러운 미끄러짐을 초래하게 된다. 즉 이 미끄러짐이 발생하기전 많은 양의 변형에너지가 단층주위의 지각에 축적되어 있다가 일순간에 큰 미끄러짐이 일어나면서 이 에너지를 발산하게 되고 지각의 양면이 무변형(unstrained) 상태로 되돌아가게 된다. 이때 미끄러진 단층의 길이가 지진의 크기를 결정하게 되며, 큰 지진의 경우 수백 km에 달하기도 한다. 지진의 강도를 표현하기 위해 Richter 크기가 현재 주로 사용되고 있으며 이는 방출된 에너지와 직접 관계가 있다. Richter 크기로 8정도일 경우 극심한 지진으로 생각되며, 가능한 최대치로 보고있다. Richter 크기는 대수적(logarithmic)으로 표현되므로 지진의 강도는, 그 계수가 줄어들면 급격히 감소한다.

여기서 Richter 크기는 지진에 의해 방출된 에너지의 척도이므로, 지역에 따른 감지정도와는 무관하다. 따라서 오히려 다소 부정확한 척도이지만 거의 감지하기 어려운 상태인 I에서부터 극심한 손상을 나타낸 VII까지에 걸치는 주관적 관찰에 근거하여 Modified-Mercalli(MM) 세기지수가 사용되고 있다. 이 숫자는, 진앙으로 부터 지진의 영향이 급격히 감소하게 되므로, 어느 특정한 위치에서의 지진영향을 나타내기 위해 사용된다.

미끄러지는 단층으로 부터 발생하는 지진파는

지면의 진동을 초래한다. 지질학자들에 의해 얻어진 이들의 기록은 내진구조물의 합리적 설계를 위해 주요한 도구로 사용되고 있다. 현재 많은 지진 기록장치들이 세계도처에 설치되어 있으며 가장 잘 알려진 기록 지진파로서 그림 1의 El Centro EW 가속도기록파를 들 수 있다.

시간에 의한 적분으로써 속도 및 변위도 도출해 낼 수 있으며⁽¹⁾, 이들은 실험적 모의(simulation)

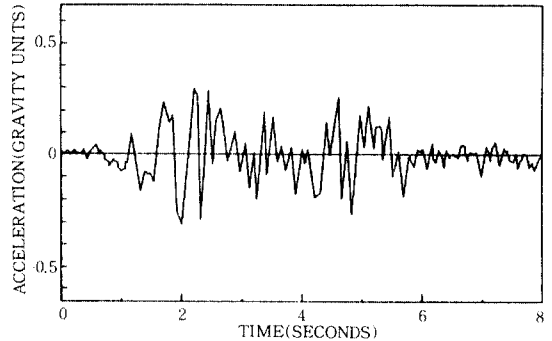


그림 1 El Centro NS 지진(1940.5.18)의 가속도 시간 이력

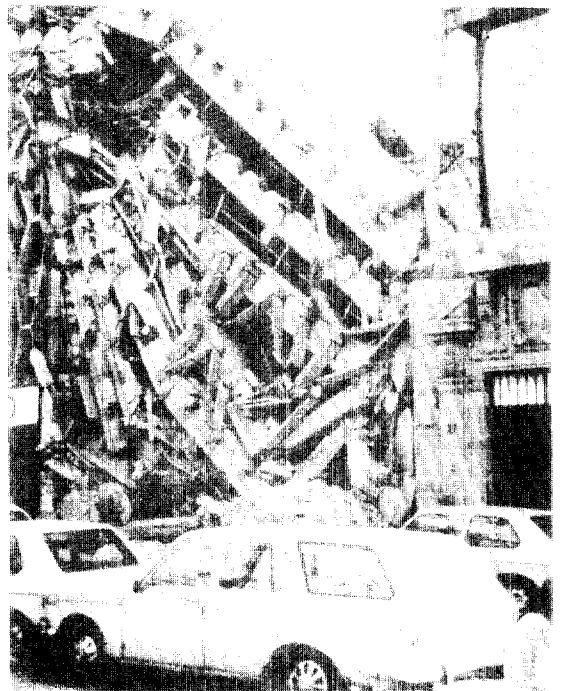


사진 1 1985 멕시코 시티 지진에 의해 붕괴된 철근콘크리트 건물

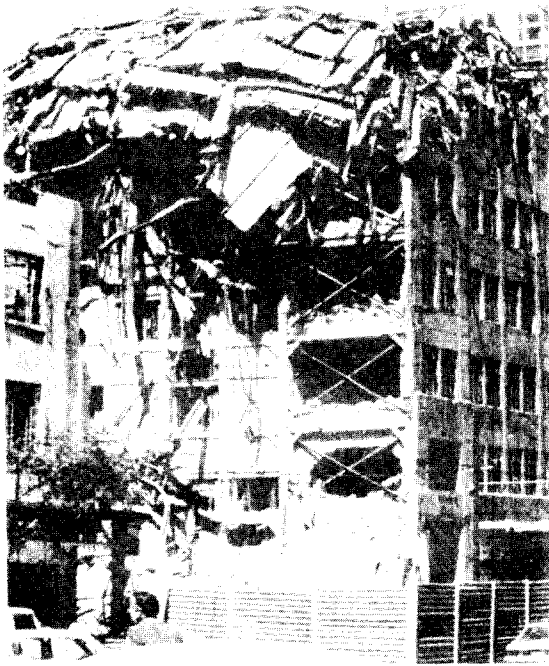


사진 2 1985 멕시코 시티 지진에 의해 붕괴된 11층 철골건물

를 위해 가용한 가장 좋은 정보가 되고 있다. 모든 해석적 및 실험적 연구가 이러한 자료에 의해 방향지워진다. 극심한 지진에 의해 야기될 수 있는 손상의 예가 사진 1 및 사진 2에 나타나 있다. 이 피해는 1985.9.19 멕시코시티에서 일어난 지진에 의한 것이다. 이 사진으로 부터 주목해야할 중요한 사항은 지진에 의해 발생할 수 있는 피해가능 정도이다. 즉, R.C구조물(사진 1)과 철골골조(사진 2)는 대파되었으며 이것은 가해진 하중조건이 부재와 접합부에서 비탄성 및 기하학적 비선형 거동을 일으키기에 충분한 크기라는 것을 기술자들에게 가르쳐 주고 있다. 문제의 이러한 복잡성으로 인하여 기술적으로 필요한 해답을 얻기 위해서는 실험적연구의 필요성이 명백하여지게 된다.

3. 내진설계에 있어서의 연성의 필요

지진영향을 모사하는(simulating) 실험기법을 언급하기 이전에, 내진설계에 있어서 연성(ductility)의 필요성을 지적하는 것이 중요하다. 원자력발전소와 같은 매우 중요한 시설과는 달리 보통

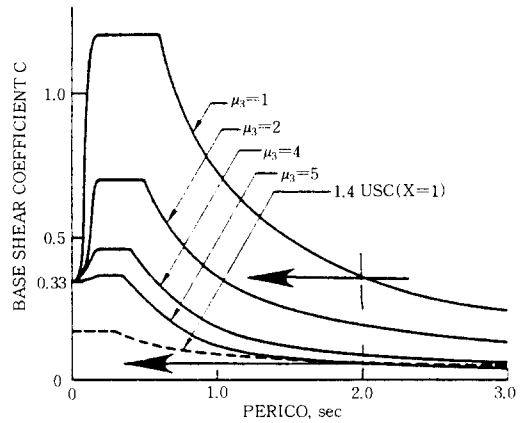


그림 2 다른 연성에 대한 밀면 전단계수 스펙트럼

구조물의 경제적인 설계는 부재와 접합부의 연성에 의존할 때만 성취가능하다. 구조물의 연성의 중요성은 그림.2에 나타난 다이어그램을 살펴봄으로써 알 수 있다. 여기서 최대수평지진가속도는 0.33g(g는 중력가속도)로 가정하고 있다. 이 그림에서 제일상부의 곡선은 각기 다른 고유주기에 따른 탄성응답스펙트럼을 나타내고 있다. 이 다이어그램에서 연성비 μ_s 는 구조물의 항복시 횡처짐에 대한 최대 횡처짐의 비를 의미한다.

소성변형에 의해 처짐이 증가하면 할수록, μ_s 의 값도 증가하게 된다. 해석적으로 대개 이 커브는 고유주기(횡축)가 증가함에 따라 떨어지는 경향을 나타내고 있다. 이 다이어그램에서 한 구조물이 설계되어야할 전체수평력은 밀면전단력계수 C(전체수평력을 구조물의 중량으로 나눈값)로 정의된다. 이 C값은 연성과 관련하여 급격히 변하는 것을 알 수 있다. 예를들어 2초의 고유주기를 가진 탄성구조물의 C값은 상부화살표에 해당하는 반면 $\mu_s=6$ 인 구조시스템에 대한 C값은 하부화살표로 나타나 있다. 이것으로 부터 연성의 보유로 인한 경제성의 성취는 분명해지게 된다.

따라서 부재와 접합부가 연성적이 되게 상세 설계하게 되며, 이는 지진에 의해 유발된 진동을 완화하는데 이바지하게 된다.

이러한 이유에 의해서 내진문제와 관련된 실험 연구에 있어서 비탄성거동을 유발하는 하중을 적용하는 것은 필수적이다.

다만, 현장에서의 실제건물에 대한 강제진동실험은 예외적으로 구조물에 손상을 끼치지 않도록 하여야 한다.

4. 유사-정적 실험(Pseudo-Static Tests)

이것은 접합부, 부재 및 부분구조물의 거동을, 그의 강도와 연성확인과 관련하여, 관찰하기위해 가장 보편적으로 사용되는 실험기법이다. 통상, 미리 정해진 주기적인 하중 혹은 변위패턴을 시험체에 적용하여 강도 및 연성 등을 확인한다. 대표적인 한 예로서 그림 3(c)에 주어진 계단형 하중패턴을 들 수 있다. 일반적으로, 재하과정의 초기 탄성단계에는 실험이 작용하중의 크기로 조절되다가 비탄성거동이 시작하기 직전에 변위조절로 전환된다.

가장 간단한 경우에는 하나의 유압가력기가 재하를 위해 사용될 수도 있으며, 좀 더 복잡한 실험에서는 여러개의 가력기(actuator)들이 서로 관련되어 적용될 수 있다. 예를들면, 일부분은 중력하중을 나타내는 한편 일부분은 횡력을 적용하기 위해 사용된다.

이 실험에 필요한 장비는 두가지 기본형태로 이루어진다.

하나는 알려진 변위 및 하중을 가력하는데 필요한 장비이며, 또 하나는 변위측정장치이다. 주기하중(cyclic load)을 작용시키기 위해서 하중계(load transducer)를 부착한 유압가력기(hydraulic actuator)를 주로 사용하며 변위측정을 위해서는 LVDT(Linearly Variable Differential Transformer)나, Potentiometer를 사용한다. 최소한 하나정도의 XY-기록기가 실험진행을 감지하기 위해 사용되며, 이러한 연속적인 주요변수의 시간 이력을 관찰한다는 것은 매우 실험상 유익한 것이다. 실험 Data Scanner로서 저속인 경우 초당 5내지 10개 정도의 데이터를 읽을 수 있으며 고속인 경우 초당 2000개 정도의 데이터를 읽기도 한다.

유사정적실험의 예

이 실험기법의 대표적인 예로서 대한주택공사 주택연구소가 수행한 "P.C아파트의 내진설계규

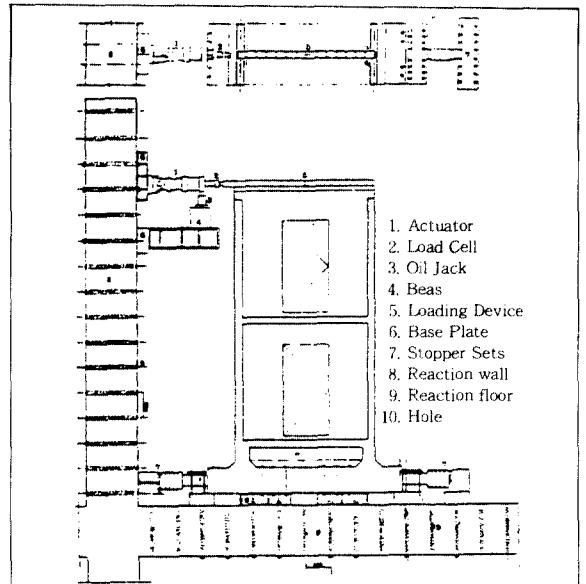
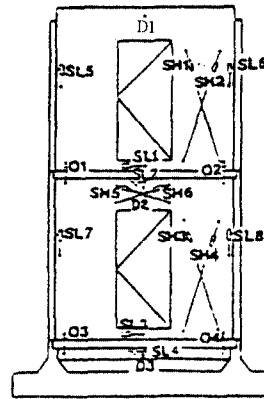


그림 3(a) 시험체의 설치



D : 횡 변위
SL : 미끄러짐
SN : 전단변형
O : 벌어짐

그림 3(b) 측정기기 부착위치

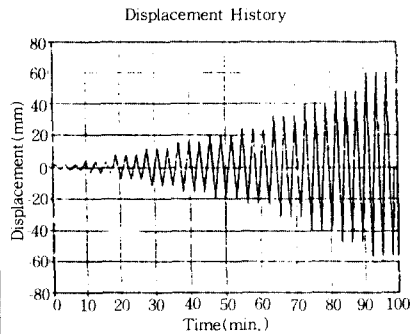


그림 3(c) 변위이력 곡선

준제정을 위한 실험연구,”의 일환으로 행해진 2층
 실물크기 P.C부분 구조물에 대한 실험을 들 수 있
 다.⁽¹⁹⁾ 실험장치설치상황은 그림 3(a)에 나타나
 있다. 여기에서 반력벽에 50ton MTS 가력기를
 설치하고 가력기구 (loading device)와 연결되어
 수평력을 가하였다. 가력은 변위제어방식을 택하
 였으며, 그림 3(b)에 나타난 센서 및 철근스트레
 인게이지를 포함하여 30개의 채널을 전부 읽어들
 이는데 3초가 소요되어 한 사이클당 60개 데이터
 포인트가 가능하도록 한 사이클당의 재하속도를 3
 분으로 하였다. 사용된 변위이력은 그림 3(c)와
 같다. 이 실험결과 한 시험체에 대하여 나타난 힘
 - 변위 이력곡선은 그림 4(a)에, 그 파괴형상은 그
 립 4(b)에 주어져 있다.

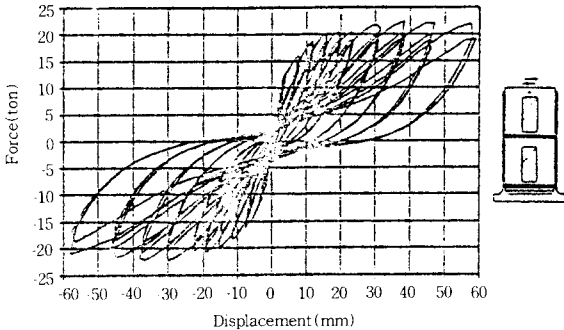


그림 4(a) 하중-변위곡선

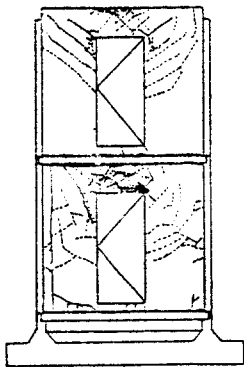


그림 4(b) 최종 균열 및 파괴양상 도면

5. 유사-동적실험(Pseudo-Dynamic Test)

이 실험기법은 On-line Computer-Contral 기법
 이라고도 하며 1975년 동경대학의 Takanashi 교
 수에 의해 처음으로 시작되었으며,⁽³⁻⁴⁾ U.S.
 Japan 공동연구프로그램의 일환으로 실물크기 7
 층 철근콘크리트조 및 6층 철골조구조물에 대하여
 Tsukuba에 위치한 BRI(Building Research In-
 stitute)에서 적용되었다. 이 실험은 성공적으로
 수행되기는 하였어도 다자유도(MDOF)시스템의
 실험에 있어 증대한 콘트롤상의 문제점들을 발견
 하여 횡력분포모양이 일정한 단자유도(SDOF) 시
 스템으로 보고 실험을 수행하였다. 또한 이 실험
 은 하중적용의 속도가 매우 느리게 수행되었다.⁽⁵⁾
 미국에서는 U.C. Berkeley의 Mahin교수에 의해
 주도적으로 이 분야 연구가 수행되었다. 이러한
 연구의 결과, 이 실험기법의 이론적인 가능성을
 확인할 수 있었으며 이 방법의 신뢰성과 정확성에
 대한 지침을 제공하였다.⁽⁶⁾ 이 가력속도 (loading
 rate)가 한 실험당 여러날이 소요되었던 것이 근래
 에는 실제 지진하중과 같은 속도까지 적용할 수
 있을 정도로 발전하였다.⁽²⁰⁾ 유사동적실험에 있어
 서, 다자유도 구조시스템의 동적평형은 일정한 시
 간차 간격을 가진 시각들에만 성립하게 되어있다.
 이 과정에서 단계적 해법 (step-by-step sol-
 ution)의 기본등식은 다음과 같다.

$$m a_i + c u_i + r_i = f_i \quad (1)$$

여기서 m 와 c 는 질량 및 점성감쇠행렬이며 : a_i ,
 u_i 및 r_i 는 시각 $i\Delta t$ 에서의 가속도, 속도 및 복원력
 벡터를 뜻하며 f_i 는 외부하중벡터이다.

보통질량은 각 자유도에 집중되어 있는 것으로
 보아 m 은 대개 대각행렬(diagonal matrix)이다.
 또한 감쇠행렬 c 는 가용한 실험결과에 근거하여
 결정된다. 중앙차분법을 사용하면, 속도와 가속도
 는 다음과 같이 근사해로 나타내질 수 있다.

$$u_i = \frac{d_{i+1} - d_{i-1}}{2\Delta t} \quad (2)$$

$$a_i = \frac{d_{i+1} - 2d_i + d_{i-1}}{\Delta t^2} \quad (3)$$

여기서 d_{i-1} , d_i 와 d_{i+1} 은 연속적인 하중단계에서의 변위벡터를 나타낸다. 식(1),(2) 및 (3)을 사용하여 다음과 같은식을 얻는다.

$$d_{i+1} = [m + \frac{\Delta t}{2}c]^{-1} [\Delta t^2(f_i - r_i) + (\frac{\Delta t}{2}c - m)d_{i-1} + 2m d_i] \quad (4)$$

주어진 지진에 대하여 f_i 는 이미 결정되어진 것이며, r_i 는 실험을 통하여 측정된 값으로서 식(4)는 일정한 시간간격 Δt 에 대하여 풀 수 있게 되고, 각 시각에서의 변위증분이 계산될 수 있다. 이 과정이 그림 5에 잘 나타나 있다. Δt 를 0.01초 정도로 하면 충분히 정확한 값을 얻을 수 있다.⁽⁶⁾ 유사-정적실험에 사용된 실험장치들이 유사-동적실험에도 대체로 그대로 사용할 수 있다. 단, 매우 정확한 변위조절시스템이 사용되어야만 하며, 이것은 적절한 연결(on-line)컴퓨터의 사용과 신속한 데이터취득시스템 뿐만아니라 매우 민감한 서보밸브(servo valve)사용을 필요로 한다.⁽⁶⁾

구조물의 지진거동에 대한 이 새로운 실험기법은 앞으로 좀더 발전할 것으로 보이며, 그 결과 여러면에서 이보다 고가의 진동대에 의해 얻어진 연구결과에 버금가는 성과를 얻고 있다. 더욱이, 여기에 사용되는 시험체는 크기에 제한을 받지 않음

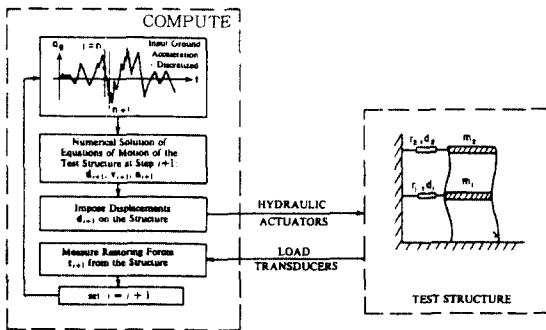
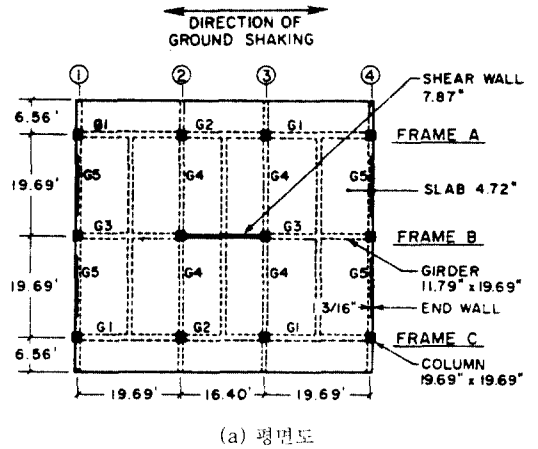


그림 5 유사동적실험의 기본개념도

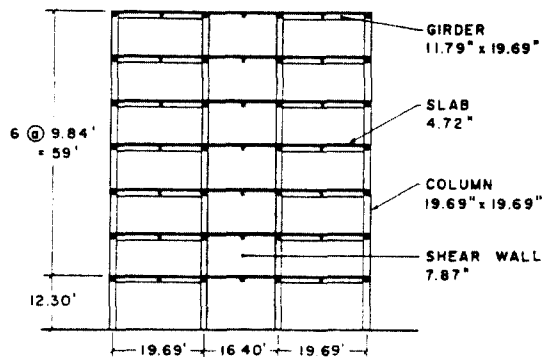
며 오직 기존 실험기구의 용량내에만 들면 된다. 부분구조물(subassemblage)에 대한 연구도 비교적 쉽게 수행될 수 있다. 현재 주요연구과제로는 Substructuring기법을 사용한 유사동적실험과 실제 지진과 같은 속도로 실험을 수행하는 것이 대표적인 것으로 대두되고 있다.

유사동적실험의 예

대표적인 예로서 U.S-Japan 공동연구프로그램의 일환으로 일본 Tsukuba의 BRI(Building Research Institute)에서 행한 두개의 실물크기 건물에 대한 유사-동적실험예를 들 수 있다.^(8~10) 이중 하나는 7층 철근콘크리트 실물크기모델로서 그림 6에 그 평면과 단면이 주어져 있다.⁽¹¹⁾ 이 시



(a) 평면도



(b) 단면도

그림 6 7층 철근콘크리트 실물크기 Tsukuba 모델

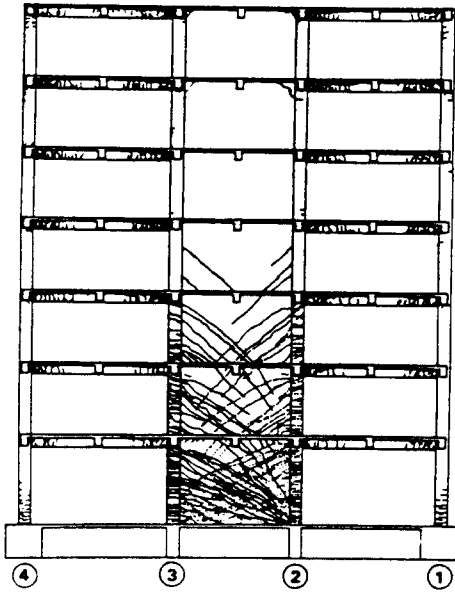


그림 7 Tsukuba 모델에서의 벽의 균열양상

험체는 바닥이 고정되고 횡방향으로 반력벽에 지지된 유압가력기에 의해 횡력이 가해지게 되어 있다. 이 시험체는 0.024g 및 0.107g로 조절된 Miyagi-Oki 지진입력파에 대해 1.3초간(PSD-1 및 PSD-2) 또, 최대지반가속도 0.327g로 조정된 Taft 지진에 대해 10초간(PSD-3), 최대지반가속도 0.357g로 조정된 Hachinohe 지진에 대해 6.5초간(PSD-4) 걸린것으로 하여 실험을 수행하였다. 실험완료후 진단벽에 나타난 균열패턴이 그림 7에 주어져 있다. PSD-3시험에 대한 밀면전단력 대 지붕변위의 이력곡선이 그림 8에 주어져 있

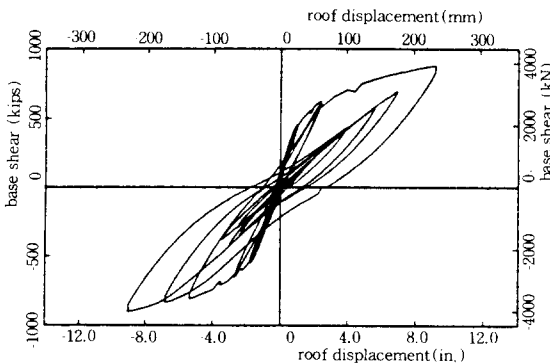


그림 8 Tsukuba 모델에 대한 밀면 전단력과 지붕변위의 이력곡선

는데, 구조물의 강성이 사이클수가 증가함에 따라 저하되고 있음을 알 수 있다. 이 복잡한 실험을 통하여, 700개 이상의 채널이 데이터 취득을 위해 사용되었으며, 이중 8개가 가력기용이며 200개는 변위측정용 기타 516개는 변형도 측정용이었다. 각 층변위는 LVDT를 사용하여 측정하였다.

6. 진동대실험(Shaking Table Tests)

세계적으로 여러크기의 많은 진동대 혹은 지진 모의실험기가 사용되고 있다. 그중에서 최근의 것으로는 1000톤의 중량을 강진수준으로 진동시킬 수 있으며 이 기기는 실물크기 원자력핵용기를 실제적인 수준의 지진세기로 실험할 수 있다.⁽¹²⁾ 현재 미국에 있는 것으로 가장 큰것은 University of Californic, Berkeley의 EERC(Earthquake Engineering Research Center)에 소재한 것으로 그의 주요특징은 다음과 같다.^(13~14)

철근콘크리트조의 진동대는 6.1ⁿx6.1ⁿ의 평면크기를 가지며 그림 9과 같이 1.5ⁿ두께의 철근콘크리트벽과 바닥으로 둘러싸여 있다. 진동대의 무게는

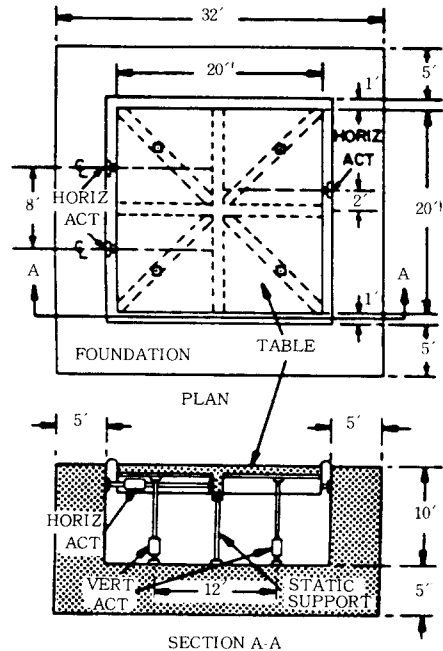


그림 9 U.C.Berkeley EERC가 보유한 진동대

약 45ton으로 거의 같은 수준의 무게를 가진 구조 시험체에 그림 1에 주어진 EI Centro지진의 두배에 가까운 세기의 수평가속도를 줄 수 있는 능력을 가지고 있다. 동시에 수직방향으로 이 지진의 수직요소의 두배에 가까운 세기의 진동을 가할 수 있다. 우선 진동대와 시험체 자체의 하중이, 진동대 하부에 있는 공간에 공기압을 주입함으로써, 자체적으로 평형을 유지하도록 하고 있다. 그다음, 테이블은 3개의 MTS 20톤급 수평가력기와 4개의 MTS 10톤급 수직가력기를 동작시킴으로써 움직이게 된다. 이 가력기는 모두 하부의 큰 기초에 연결되어 있다. 가력기(actuator)의 작동을 위해 90kw 전동모타가 달린 4개의 펌프에 의해 3000psi의 유압이 주어진다. 가력기에 대한 서보밸브(servovalve)는 수평방향으로 635mm/sec, 수직방향으로 380mm/sec로 최대 속도를 제한하고 있다. 저주파수영역에서의 양호한 작동을 위하여 수평방향으로 $\pm 130\text{mm}$, 수직방향으로 50mm로 그 변위영역이 제한되어야 한다. 4Hz에서 15Hz에 걸친 주파수영역에서, 적재되지 않은 진동대만의 최대가속도는 수평으로 1.5g 수직으로 1g이 되고있다. 이 진동대의 동적응답특성은 그림 11에 주어져 있으며, 데이터취득 및 처리시스템은 그림 10에 나타나있다. 지진동은 일반적으로 숫자화된 가속도 시간이력으로 주어

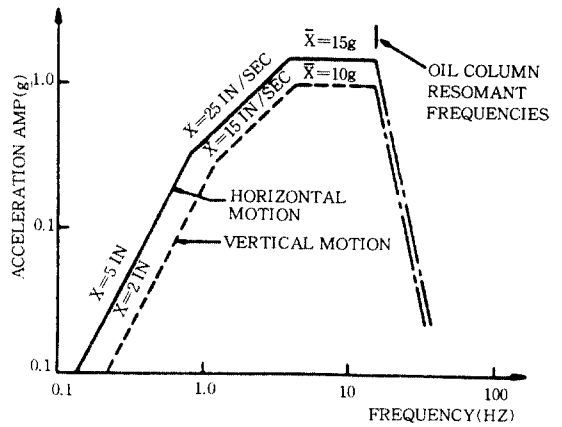


그림 11 University of California의 진동대 동적응답특성

지기 때문에, 이들은 D/A(Digital-to-Analog)변환기로 아날로그테이프에 전이되며 이것은 다시 Control Console에 전달되게 된다. 실험중, 시험체에 부착된 스트레인게이지, LVDT 및 가속도계(accelerometer)로 부터 아날로그신호가 데이터취득시스템중의 A/D(Analog-to-Digital)변환기로 전달된다. 128개 아날로그 채널에서 채널당 매초 100개 샘플에 달하는 신호처리가 가능하다. 이렇게 얻어진 데이터는 우선 마그네틱 디스크에, 그리고 마그네틱 테이프로 전달된다. 이 시스템의 기본 컴퓨터를 이용하여 실험데이터의 후처리가 이루어진다. 보통 시험모델은 실물보다 작기 때문에, 동적상사성(dynamic similitude)을 확보하기 위하여 모델에 따라 콘크리트블럭이나 납덩이를 부착하게 된다. 마찬가지로 상사성의 이유에 의해, 축소모델에 대해서는 실제 지진파의 시간축이 일정비율로 축소되게 된다.

진동대실험의 예

U.C.Berkeley의 EERC에 1972년 처음 진동대가 설치된 이후 많은 관련연구가 수행되어 왔다. 여기에는 철골 및 철근콘크리트구조의 단순화된 모델, 공장건물의 배관시설, 뿐만아니라 실물크기 조적조주택, 변전설비 등의 실험이 포함된다. 후자의 경우는, 특히 유사-정적 혹은 유사-동적 실험이 부적절하고 이들에 대한 해석적모델의 수

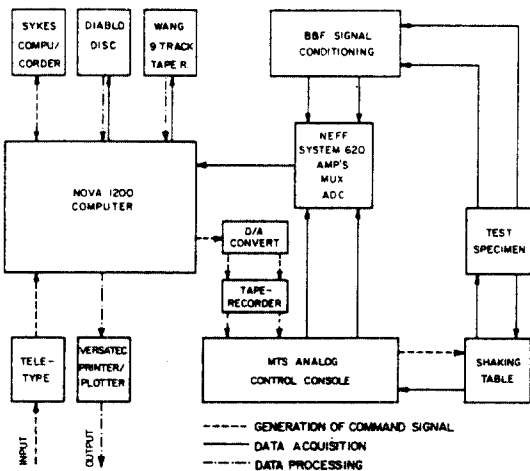


그림 10 진동대 시스템 블록 다이어그램

립도 불가능하므로, 이의 진동대실험은 매우 의의가 있다고 할 수 있다. 이러한 진동대실험들 중의 한예로서 1/5축소 7층 철근콘크리트구조물에 대한 실험과 관련하여 몇가지 언급하고자 한다. ^{(11,15,16).}

이 연구는 U.S.-Japan 공동연구프로그램의 일환으로 수행되었으며 일본 Tsukuba에서 유사-동적실험으로 행해진 실물크기시험체와 대비를 이루는 축소모델실험이다. 이와 비슷한 경우로서, Tsukuba의 실물크기 6층 철골구조실험과 0.3-축소모델의 Berkeley 실험이 마찬가지로 대비를 이루고 있다. 진동대위에 놓인 모델의 사진이 사진 3에 나타나 있다. 이 시험체의 중간평면구조에 대한 측정기기 설치상세가 그림 12에 주어져 있다. 여기서 주목할것은 많은 가속도계가 사용된 것과 1층의 모든 기둥에 축력측정용 기기(transducer)가 내부적으로 설치된 점, 벽판넬의 전단 변형측정을 위한 대각선 측정기기부착등이다. 이 시험체에는 조정된 Miyagi-Oki 및 Taft 지진기록이 진동대 입력지진파로 사용되었다. 실험중 각층바닥에는 45kg짜리 납덩이들이 동적상사 정확보를 위해 부착되었다. 또한 마찬가지로의 이유에 의해 진동대속도가 축소율 1/5에 따라 $\sqrt{5}$ 배만큼 증가하였다. 사진 3에 나타나 있듯이 두가지의 형태의 기준프레임이 변위측정을 위해 설치되었다. 하나는 진동대밖에 정적으로 남는 것이고

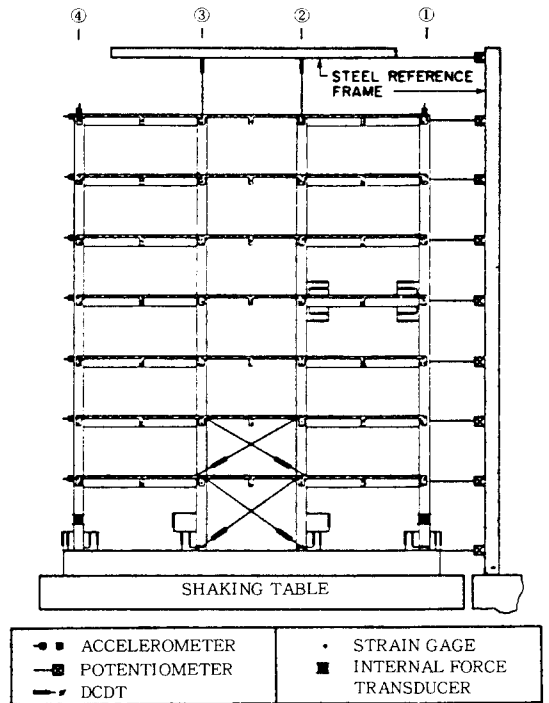


그림 12 중간평면구조에 대한 측정기기 설치상황

하나의 진동대와 더불어 움직이는 것이다. 최대가속도 0.403g로 조정된 Taft 지진입력과 실험완료 후 발생한 균열모습이 그림 13에 나타나 있어 그

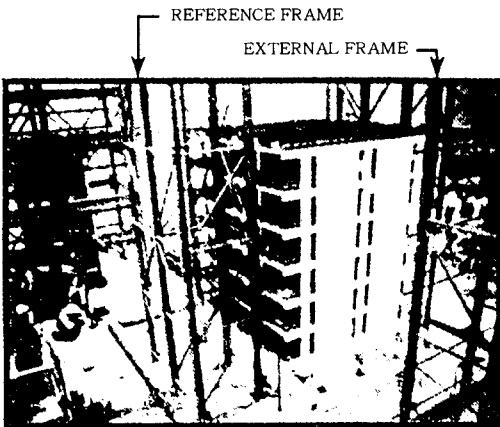
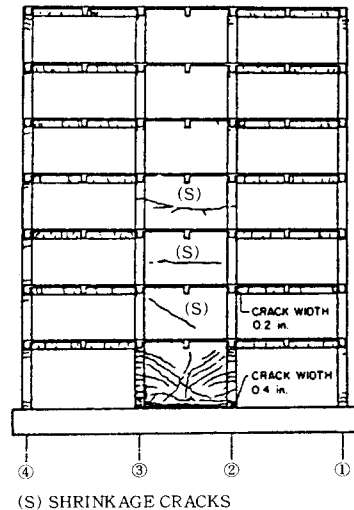


사진 3 1/5 축소 모델의 진동대 실험전경



(S) SHRINKAGE CRACKS

그림 13 최대가속도 0.403g로 조정된 Taft 지진 입력과 실험 완료 후 발생한 균열모습

림 7과 비교할 수 있다. 이 연구프로젝트는 Berkeley에서 콘크리트구조물에 대하여 행한 실험중 가장 복잡한 것이다.

7. 실제구조물에 대한 현장동적실험(Field Dynamic Testing)

현장에 실제로 서있는 구조물에 대한 비파괴(nondestructive)동적실험은 외국의 경우 건축물, 댐 등에 많이 사용되어 왔으며, 특히 그 구조물이 새로운 특징을 가질 때 더욱 그렇다. 현장동적실험에 의해 얻어지는 수치는 고유주기, 모드형태(mode shape) 및 감쇠능력등이다. 어떤 구조물의 동적특성을 결정하고 수학적모델을 검증하는 수단으로 사용될 뿐만 아니라 이 실험기법은 실제로 감쇠계수 결정을 위한 몇안되는 접근방법의 하나를 제공하고 있다. 단지 이 실험은 일반적으로 구조거동의 선형거동범위에 국한된다. 여기서는 강제(forced) 및 주변(ambient) 진동시험에 국한하여 언급한다.

7.1 강제진동시험(Forced Vibration Test)

회전-질량 발진기 혹은 진동기기가 대상구조물에 정착이 된다.⁽¹⁸⁾ 이 기기는 두개의 주격모양의 물체(rotor)를 회전시키는 전기모터로 구성되어 있다.

이 Rotor는 동일한 수직샤프트를 중심으로 반대방향으로 회전하므로써, 결과적으로 정현(sinusoidal)의 일방향 힘을 발생하게 된다. 적절한 속도와 큰 질량을 부착할 경우 3ton정도의 힘을 발생시킬 수 있다.⁽¹⁷⁾ 이 진동주파수는 회전속도의 측정에 의해 결정된다. 보통 두개의 발진기를 일정한 거리 떨어지게 위치시킴으로써 비틀림운동을 유발시킬 수 있다. 가속도계가 수평가속도 측정을 위해 사용되며, 이 신호는 증폭기(amplifier)를 지나 데이터취득시스템에 전달된다. 발진기의 주파수를 0.2Hz에서 10Hz까지 변화시키면서 발진주파수에 따른 측정가속도 크기를 기록함으로써 공명주파수를 결정하게 된다. 모드형태를 결정하기 위해서는 이 모드형태를 정하는데 필요

한 수만큼의 위치에 가속도계를 부착하고 실험이 되풀이 된다. 감쇠계수는 다음관계식에 의해 정규화된(normalized) 주파수-응답곡선으로부터 얻어진다.

$$\xi = \frac{\Delta f}{2f} \quad (5)$$

여기서 ξ 는 감쇠계수이며, f 는 공명주파수, 그리고 Δf 는 공명응답크기의 $1/\sqrt{2}$ 배의 크기에 해당되는 두개 주파수들의 차이를 뜻한다.

7.2 주변진동시험(Ambient Vibration Test)

이 방법은 비용이 적게들고 신속하여, 강제진동 실험결과에 견주어 볼 때 훌륭한 결과를 얻을 수 있는 장점이 있다. 이 시험의 주 특징은 매우 민감한 지진계(seismometer)의 사용이다. 바람에 의한 건물의 진동은 이 시험에 필요한 발진효과를 제공한다. 증폭된 아날로그신호는 기록과 함께 바로 숫자화된다. 선형모델에 근거를 둔 건축물의 진동실험에서는 최소한 2개층에서의 운동을 동시에 측정하여야 한다. 상대적인 응답크기와 위상이 모드형태(mode shape)를 결정하는데 필요하다. 기록된 진동의 주파수 구성요소(frequency content)를 알아보기 위해 Fourier변환기법이 사용된다.⁽¹⁷⁾ 구조물의 각 지점에서의 측정된 응답크기와 위상을 비교함으로써 모드형태를 알아낼 수 있게 된다. 강제진동과 마찬가지로, 주변진동시험자료는 고유주파수, 진동모드 및 감쇠계수의 결정에 필요한 정보를 제공한다.

현장동적시험의 예

44층 쌍둥이 타워중 하나에 대한 강제 및 주변 진동실험결과가 한예로서 제시된다.⁽¹⁷⁾ 각 타워의 평면은 일변길이가 77.6m인 정삼각형 형태로 되어 있다. 공명주파수를 일기위한 강제진동실험에서는 발진기가 42층바닥에 대칭축을 따라 42.7m 떨어지게 위치시켰다. 가력주파수 對 가속도응답 최대치가 발진기의 주파수 영역을 섭렵(sweeping)하면서 기록된다. 동-서방향의 2차모드에 대

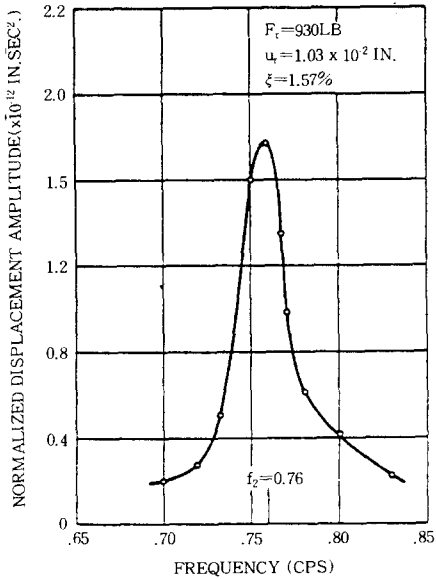


그림 14 2차모드(E-W)에 대한 주파수 응답곡선

한 정규화된(normalize) 주파수응답커브가 그림 14에 주어져 있다. 이 커브는, 일정한 힘에 대한 응답을 구하기 위해, 응답가속도 최대치(amplitude)를 해당가력주파수의 제곱으로 나누어줌으로써 얻을 수 있다.

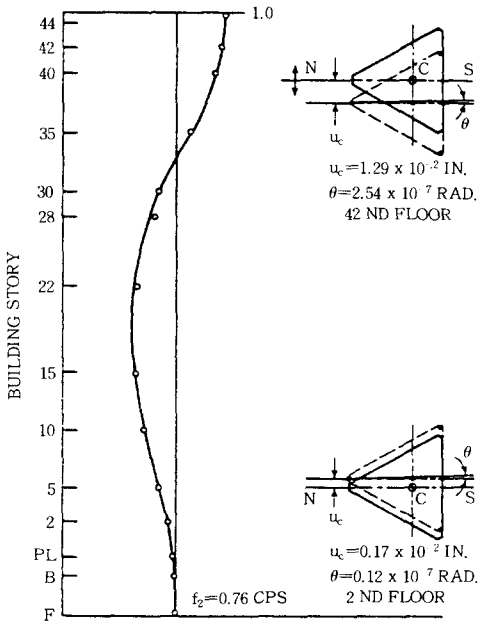


그림 15 주변 및 강제 진동실험에 의한 2차모드형태

모드형태(shape)는 이형태를 정하는데 충분한 수만큼의 층들에 가속도계를 이동설치함으로써 결정된다. 즉 새로이 가속도계가 설치된 층마다에 대하여 진동공명시험이 되풀이 된다. 한편 42층의 가속도계는 고정되어 있으며, 이들로 부터 얻어진 데이터는 그 결과를 정규화시키는데(normalized) 사용된다. 이러한 과정을 거쳐 얻어진 동서방향에 대한 횡모드형태가 그림 15에 주어져 있다. 이 그림에는 주변진동실험결과도 함께 나타나 있어, 두 시험결과의 일치성이 매우 뛰어나음을 알 수 있다.

8. 결 언

이 기사에서는 지진에 대한 구조물의 설계에 있어서 실험적인 지원이 필수불가결함을 보이고자 하였다. 이를 위해 몇가지 실험기법이 소개되었고, 많은 경우 해석적인 방법이 유사한 경우에 대한 유추의 수단을 제공하는 한편, 직접적인 실험적 접근방법은 이들 해석방법에 대한 기초근거를 제공함으로써 그 중요성이 매우 크다고 할 수 있겠다.

이 학술기사는 참고문헌(21)을 근간으로 하여 편집하였음을 밝혀둔다.

참 고 문 헌

1. Housner, G.W., "Strong Ground Motion," and "Design Spectrum," in Earthquake Engineering, ed. R.L. Wiegel, Prentice-Hall, 75-106 (1970).
2. Vekestos, A.S. and Newmark, N.M., "Effect of Inelastic Behavior on the Response of Simple Systems to a Strong Motion Earthquake," Proc.3rd World Conf. Earthquake Eng., New Zealand, II, 663-682(1965).
3. Takanashi, K., et al., "Nonlinear Earthquake Response Analysis of Structures by a Computer-Actuator On-Line System," Bul. Earthquake Resistant Res. Ins., Inst. of Industrial Sci., Univ. of Tokyo, 8(1975).
4. Okada, T., "Computer-Actuator On-Line System at Institute of Industrial Science, Univer-

- sity of Tokyo," A Brief Note, Session 2, First Planning Group Mtg., U.S.-Japan Cooperative Res. Prog. Utilizing Large-Scale Testing (Sept.1977).
5. Okomoto, S., et al., "A Progress Report on the Full-Size Seismic Experiment of a Seven Story Reinforced Concrete Building," Building Res. Ins., Ministry of Construction, Tsukuba, Japan(1982).
 6. Shing, P.-S.B.and Mahin. S.A., "Experimental Error Propagation in Pseudodynamic Testing," Rep. No. UCB EERC-83/12, Earthquake Eng. Rec.Ctr., Univ. of California, Berkeley(June.1983).
 7. Udagawa, K., Takanashi, K. and Kato. B., "Effects of Displacement Rates on the Behavior of Steel Beams and Composite Beams." 6th Mtg., U.S.-Japan Joint Tech. coordinating Mtg., Maul, HI(June 1985).
 8. Okomoto, S., et al., "Testing, Repair and Strengthening, and Reiesting of a Full-Scale Seven-Story Reinforced Concrete Building." SP-84, Earthquake Effects on Reinforced Concrete Structures, U.S-Japan Res., ACI (1985).
 9. Fourth, D.A., et al., "Construction of Full Scale Six Story Steel Test Structure," 4th U. S.-Japan Joint Tech. Coordinating Committee Mtg., Tsukuba, Japan(June 1983).
 10. Yamanouchi, H., et al., "Experimental Results on a K-Braced Steel Structure under Seismic Loading Utilizing Full-Scale Six-Story Test Structure," Proc., Annual Tech. Session of SSRC, San Francisco, CA(1984).
 11. Bertero, V.V., et al., "U.S.-Japan Cooperative Earthquake Research Program : Earthquake Simulation Tests and Associated Studies of a 1/5th-Scale Model of a 7-Story Reinforced Concrete Test Structure," Rep. No. UCB/EERC-84/05, Earthquake Eng. Res. Ctr., Univ. of California, Berkeley(June 1984).
 12. Committee on Earthquake Engineering Research, "Earthquake Engineering Research-1982." Commission on Engineering and Technical systems, Nat. Res. Council, Nat. Academy Press, Washington, D.C.(1982).
 13. Penzien, J., et al., "Feasibility Study for Large-Scale Earthquake Simulator Facility," Rep. No. EERC 67-1, Earthquake Eng. Res. Ctr., Univ. of California, Berkeley(1967).
 14. Stephen, R.M., et al., "Structural Dynamic Testing Facilities at the University of California, Berkeley," Rep. No.EERC 69-8, Earthquake Eng. Rec. Ctr., Univ. of California, Berkeley(Aug. 1969).
 15. Sause, R. and Bertero, V.V., "A Transducer for Measuring the Internal Forces in the Columns of a Frame-Wall Reinforced Concrete Structure," Rep. No. UCB/EERC-83/05, Earthquake Eng. Res. Ctr., Univ. of California, Berkeley(1983).
 16. Aktan, A.E., et a., "Experimental and Analytical Predictions of the Mechanical Characteristics of a 1/5-Scale Model of a 7-Story R/C Frame-Wall Building Structure," Rep. No. UCB/EERC 69-8, Earthquake Eng. Rec. Ctr., Univ. of California, Berkeley(1983).
 17. Petrovski, J., et al., "Dynamic Behavior of a Multistory Triangular-Shaped Building," Rep. No. EERC 76-3, Earthquake Eng. Res. Ctr., Univ. of California, Berkeley(Oct.1976).
 18. Hudson, D.E., "Dynamic Tests of Full-Scale Structures," in Earthquake Engineering, ed. R.L. Wiegel, Prentice-Hall, 127-150(1970).
 19. 이한선외 31명, "P.C 아파트 내진설계규준제정을 위한 실험연구," 대한주택공사 주택연구소, 연구 91-21, 1991.12.
 20. Nakashima, M., Kato, H., and Takoka, E, "Development of Real-Time Pseudo Dynamic Testing," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.21, pp.79-92, 1992.
 21. Popov, E.P., "Experiment As An Aid To Structural Seismic Design," The William M. Murray Lecture, Experimental Mechanics, pp.194-208, June, 1986. 