

지진의 상황을 그대로 재현한다

06

글_ 김철영 명지대학교 토목환경공학과 교수 cykim@mju.ac.kr

전 세계적으로 발생하고 있는 지진은 각종 구조물에 큰 피해를 주어 경제적 손실은 물론 많은 인명피해를 동반하게 된다. 따라서 지진의 강도나 빈도가 높은 지역은 물론이며 이러한 지진의 영향권에 있는 우리 나라에서도 우리가 살고 있는 집과 고층 건축물을 비롯하여 교량, 댐, 원자력발전소 등이 지진에 대하여 얼마나 안전한지 평가를 해야 할 필요가 있다.

내진 성능 평가에 관한 연구는 많은 연구자들이 활발하게 진행하고 있는데 이러한 연구의 결과는 최초 구조물을 건설할 때 어떻게 지어야 안전한지, 현재 사용하고 있는 구조물은 안전한지, 만일 안전하지 않다면 어떻게 보강해야 안전한지, 그리고 지진에 대한 피해가 있었다면 왜 피해가 발생했으며 앞으로는 어떻게 해야 이러한 피해를 막을 수 있는지 등등 많은 경우에 활용이 되게 된다.

이러한 내진 성능 평가는 다른 기술 분야와 마찬가지로 크게 이론적인 방법과 실험적



〈그림 1〉 지진으로 붕괴된 교량



〈그림 2〉 초기의 진동대 실험 장면

인 방법으로 이루어지게 된다. 이론적인 방법은 비용이 적게 들고 일단 확립이 되고 나면 다양한 응용이 가능하다는 이점은 있지만, 이론의 전개과정에서 필연적으로 수반되는 많은 단순화와 가정 때문에 특히 토목이나 건축 구조물과 같이 규모가 크고 복잡한 구조체는 실제의 현상을 제대로 파악하지 못하는 경우가 많다. 이에 반하여 실험적인 방법은 실제의 현상을 가장 직접적으로 연구할 수 있는 장점은 있으나, 대형이면서 복잡한 구조물을 실험하기 위하여 굉장히 큰 비용이 소요된다는 단점이 있다. 따라서 우리는 이론적인 방법과 실험적인 방법을 적절히 병행하여 경제적이면서도 정확한 결과를 얻기 위해 노력하는 것이다.

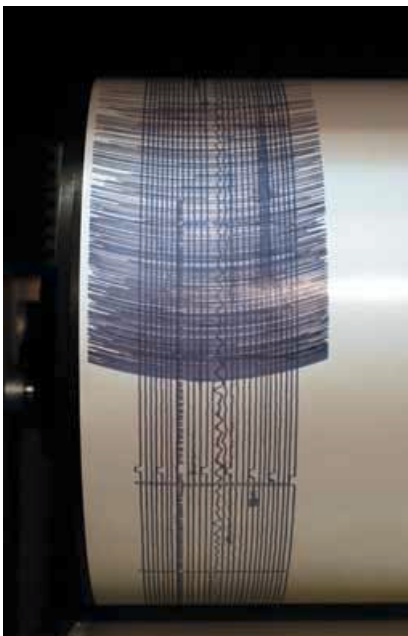
축소 모형으로 '진동대 실험' 하면 정확도 떨어져

실제 지진이 발생하였을 때 구조물이 어떻게 거동하는지를 규명하는 가장 직접적이고도 정확한 방법은 구조물을 '진동대' 라고 불리는 커다란 판 위에 올려놓고 진동대를 실제 지진이 일어나 지반이 움직이는 것과 똑같이 흔들어 주는 것이다. <그림 1>은 옛날 우리 나라 역사 기록에서 기술하고 있는 지진의 크기를 추정하기 위하여 진동대 위에 초가 모형을 올려놓고 진동대 실험을 하는 장면이다. 진동대 실험에 관심이 있는 독자라면 www.curee.org/projects/woodframe/video/task_1-1-1/index.html 등의 웹사이트에서 실제로 진동대를 움직이면서 실험하는 흥미 있는 동영상을 볼 수도 있다.

우리가 알고 싶어 하는 모든 경우를 이러한 진동대 실험에 의하여 연구한다면 가장 정확한 결과를 얻을 수 있겠지만, 여기에는 모형의 크기에 대한 현실적인 제한과 돈이 많이 들어간다는 문제점이 발생한다. 실제 우리가 그 거동을 알고 싶은 구조물이 수십층



<그림 3> 지진으로 파괴된 기둥



강진발생 후 로스앤젤레스 소재 캘리포니아 공과대학 '지진계 북' 장치에 보내진 진동표시



이상의 고층 건축물이나 한강의 교량과 같은 수백미터 길이의 긴 교량일 경우 이러한 대형 구조물을 실험하기 위해서는 그 크기를 일정한 비율로 축소한 축소 모형을 이용할 수밖에 없다. 그러면 과연 어느 정도 비율로 축소할지를 결정하여야 하는데 여기에는 역시 경제적인 효율성과 결과의 정확성이라는 두 가지 상반된 사항 사이에서 적절한 결정을 해야만 한다.



〈그림 4〉 기둥의 부분구조계 실험 장면

실제 구조물을 일정한 비율인 상사율로 축소된 모형으로 실험을 할 경우에는 축소율이 크면 클수록, 다시 말해서 모형이 실제에 비하여 작으면 작을수록 실제와 다른 거동을 보이는데, 이를 '사이즈 이펙트'라고 한다. 즉, 실제와 유사한 거동을 모사하기 위해서는 축소모형도 동일한 재질로 만드는 것이 바람직한데, 교량이나 초고층 건축물 등 대형 구조물의 1/100 축소모형을 동일한 재료로 만드는 것은 불가능하다. 또한 콘크리트 같은 경우에는 비록 외형의 치수는 일정한 비율로 축소하여 모형을 만들 수 있다고 해도 콘크리트 내부의 골재나 철근, 더 미세하게는 시멘트의 입자 등을 모두 상사율을 만족시키는 모형을 만드는 것은 불가능하다. 더욱이 지진에 관한 동적인 실험에서는 모형의 거동이 길이나 넓이 등의 치수의 상사율뿐만 아니라 질량의 상사율에도 밀접하게 연관되어 있어서 이들을 모두 고려한 축소모형을 만들고 또 모형실험의

결과에서 실제 거동을 유추하는 것은 매우 어려워 실제의 거동을 잘못 이해할 가능성도 있다.

모형실험과 컴퓨터 수치해석의 결합

축소모형이 필연적으로 가지게 되는 규모효과에 의한 오차를 줄이기 위하여 전체 구조물의 거동을 지배하는 중요한 부재에 대하여는 이 부재만을 따로 떼어내 실물 크기로 제작하여 실험을 하기도 한다. 예를 들어서 강한 지진이 왔을 경우 건축물에서 1층의 기둥이 주로 〈그림3〉과 같이 파괴되거나, 또는 〈그림 1〉과 같이 교각이 파괴됨으로써 전체 교량이 붕괴되었다고 하면 이 기둥 또는 교각만 따로 떼어내 〈그림 4〉와 같이 실험하면 이 부재가 어떻게 파괴가 되었으며, 이러한 파괴를 방지하기 위하여 유사한 부재들을 어떻게 보강을 해야 하고, 또 새로 지어지는 구조물에서는 어떻게 설계하여야 하는지 등을 연구하게 된다.

그러나 이러한 부분 구조계 실험도 한 가지 문제점을 가지고 있다. 그것은 전체구조물



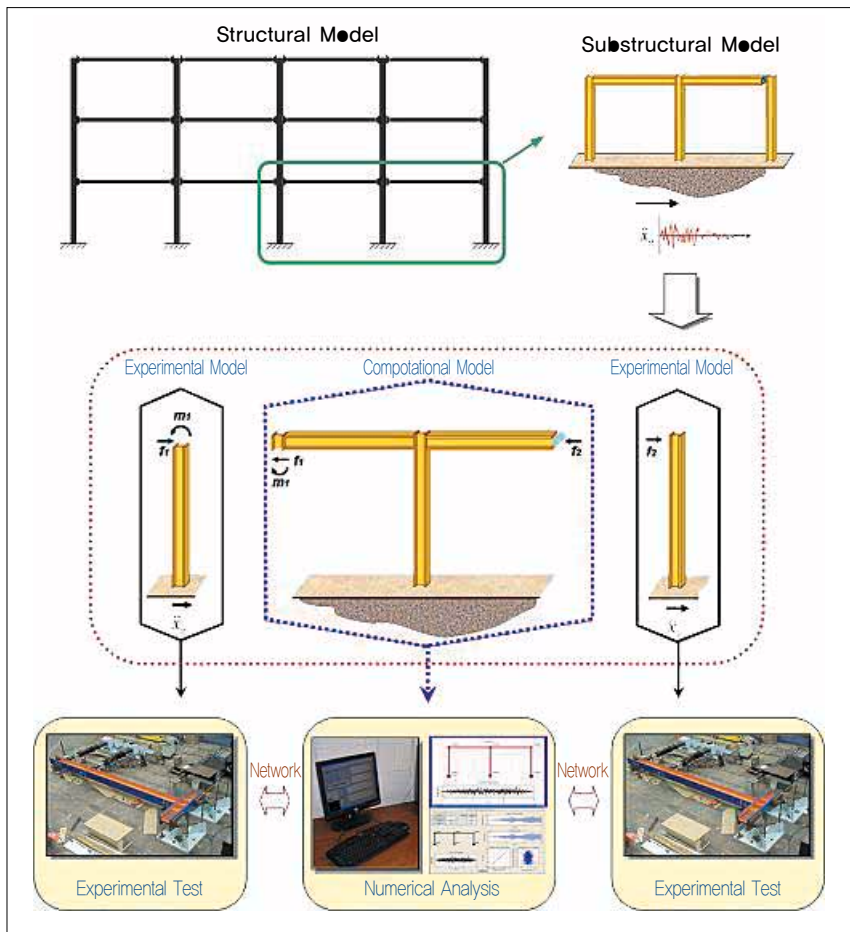
지진으로 갈라진 도로

에서 일부분만 떼어내어서 실험을 할 경우 이 부분 구조계가 전체 구조물에서 받고 있던 조건들을 그대로 재현하기 힘들다는 것이다. 즉, <그림 4>의 기둥의 윗부분은 전체 구조물 속에서는 다른 부분과 일체로 연결되어 있어서 다른 부분의 거동이 이 부재로 전달되고 또 이 부재의 거동이 다른 부재에 영향을 미치게 되는데 이러한 현상이 고려될 수 없다. 하이브리드라는 말은 두 가지 이상의 성질이 다른 요소가 결합한 것을 의미하는데, 여기서 하이브리드 실험이란 모형을 이용한 실험과 컴퓨터를 이용한 수치해석을 결합하여 실시간으로 연동시킴으로써 보다 실제에 가까운 거동을 연구하려고 하는 새로운 실험기법을 뜻한다.

<그림 5>에서 보듯이 실제 구조물은 매우 크고 복잡한 구조계를 가지고 있어서 이 전체를 축소하여 실험하기에는 모형의 크기가 실제에 비하여 매우 작아 오차가 커지게 된다. 또한 중요한 기둥만 떼어내어서 실험하기에는 그 기둥이 실제 구조물내에서 받고 있던 환경을 재현하기가 불가능하다. 따라서 부분 구조기법을 이용하여 전체 구조물에서 일부분을 떼어낸 후, 다시 여기서 중요한 기둥들은 실제 크기로 제작하여 직접 실험

을 하는 동시에 나머지 부분은 컴퓨터 수치해석으로 그 거동을 모사하려는 하이브리드 실험기법을 고안하게 되었다. 뿐만 아니라 과거에 비하여 성능이 대폭 향상된 유압장비들을 사용하고, 또한 실험치를 계측하는 계측기와 수치해석을 실시하는 컴퓨터를 광통신을 이용하여 연결함으로써 실험의 결과가 수치해석의 입력으로, 그리고 수치해석의 결과가 다시 실험의 제어 신호로 연동되도록 하여 보다 실제에 가까운 거동을 모사할 수 있다.

초기의 하이브리드 실험기법은 실험 장비를 제어하는 컴퓨터와 수치해석을 담당하는 컴퓨터가 같은 장소에 위치하고 이를 직접 근거리 네트워크로 연결하여 실험하였으나, 최근에는 이를 더욱 발전시켜 수치해석을 담당하는 컴퓨터와 실험 장비를 제어하는 컴퓨터들이 모두 원격지에 떨어져 있을 경우 초고속 네트워크를 이용하여 연결하는 방법도 개발되고 있다. 즉, <그림 5>에서 실험해야 할 기둥의 숫자가 많아져서 한 실험시설에서 이를 동시에 실험할 수 없을 경우 서울, 대전, 대구, 광주, 부산 등 각 지역의 실험시설에서 분산하여 실험하고, 이들 실험장비를 제어하는 컴퓨터와 또 다른 지역에 위치한 수치해석용 컴퓨터를 초고속 통신망을 이용하여 연결함으로써 원격지에서 수행되는 실험과 해석을 실시간 연동하는 하이브리드 실험도 가능해질 전망이다. **SD**



<그림 5> 실험과 컴퓨터 수치해석이 결합한 하이브리드 실험



글쓴이는 서울대학교에서 박사학위를 받았으며 하이브리드 구조실험센터 부센터장, 대한토목학회 학회지 편집간사장, 건설교통부 서울지방국토관리청 설계자문위원을 지냈다.