

# 수직적 비정형성을 지니는 구조물의 내진성능평가

## Seismic Capacity Evaluation of the Structures with Vertical Irregularities

홍성걸\*                      김남희\*\*                      하태휴\*\*\*  
Hong, Sung-Gul              Kim, Nam-Hee              Ha, Tae-Hyu

---

### ABSTRACT

The vertical irregularities occurred in the structure may lessen the overall seismic capacity of the structure. Seismic capacity evaluation guidelines (e.g. FEMA 178, ATC-14) propose the criterion for the vertical irregularities of mass, stiffness and strength respectively. But, the criterion seems groundless and leads us to make a true/false decision only. This study is to draw a reasonable basis on which multi-level grading is possible based for the evaluation of existing buildings. Time history analysis for 3-, 5-, and 10-story steel frame structures has been performed using several earthquake data. ANN (Artificial Neural Network) is introduced to find the relative contribution factor of the irregularities along the irregular position. Also, the application system for the seismic capacity evaluation can be established using the trained ANN.

---

### 1. 서론

최근 지진위험도에 대한 관심이 증대되면서, 기존 건축물의 합리적인 내진성능평가에 대한 요구도가 증가하고 있다. 이와 관련하여 기존 축적된 지진피해자료나 경험을 바탕으로 약산식을 이용한 정성적인 초기평가에서부터 능력 스펙트럼에 의한 비선형해석을 이용한 정량적인 정밀평가에 이르기까지 다양한 연구가 이루어지고 있다. 정성적인 초기평가의 경우, 대부분 지반과 관련한 구조물의 안정성과 구조물이 정형성을 벗어나서 야기시킬 수 있는 문제점을 우선적으로 파악하여 평가하고 있다. 구조물의 비정형성은 수직 비정형과 수평 비정형으로 대별하여 살펴 볼 수 있으며, 이에 대한 평가기준은 현재 사용하는 설계기준에서 제시한 정형성에 대한 기준을 근거로 조건의 위배 유무에 따라서 참/거짓 평가를 하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 이러한 설계기준에서 제시한 비정형성 기준을 내진성능 평가에 도입함에 있어서 합리적인 근거를 도출하고, 참/거짓 평가보다는 정형성의 벗어남의 정도에 따라서 여러 단계의 등급으로 평가할 수 있는 기초자료를 만드는데 그 초점을 두고 있다. 또한, 비정형성이 발생하는

---

\* 서울대학교 건축학과, 조교수  
\*\* 서울대학교 지구환경시스템공학부, BK21 계약교수  
\*\*\* 서울대학교 건축학과, 석사과정

층위치에 따라서 구조물 전체에 미치는 영향을 살펴보고, 이러한 자료를 근거로 층가중치를 고려한 구조물의 내진성능 평가가 이루어질 수 있도록 신경망기법을 이용하여 시스템화 하였다. 본 연구는 질량 및 강성의 수직적 비정형성에 대한 영향을 중,저층규모의 구조물에 대해서만 제한적으로 살펴본다.

## 2. 해석 모델의 설정

본 연구에서는 수직적 비정형성의 거동을 정형성을 지닌 구조물과 대비해서 살펴보기 위하여 구조물 전체에 걸쳐서 동일한 층고, 강성과 질량을 가지는 정형성을 지닌 기준 모델을 선정하고, 비정형성의 범위는 내진설계기준에서 제시하는 수치들을 근거로 설정한다. 내진설계 기준에서 제시하는 수직적 비정형성에 대한 평가의 기준은 다음과 같다.

1. 질량 비정형: 임의의 층의 유효질량이 인접층의 유효질량의 150%를 넘으면, 질량 비정형성이 존재한다.
2. 강성 비정형: 임의의 층에서 수평강성의 크기가 상부층의 70%보다 작거나, 상부3개층 평균강성의 80%보다 작은 유연층 (soft story)에 존재한다.
3. 강도 비정형: 임의의 층의 층강도가 상부층 층강도의 80%보다 작은 강도를 갖는 연약층 (weak story)에 존재한다.

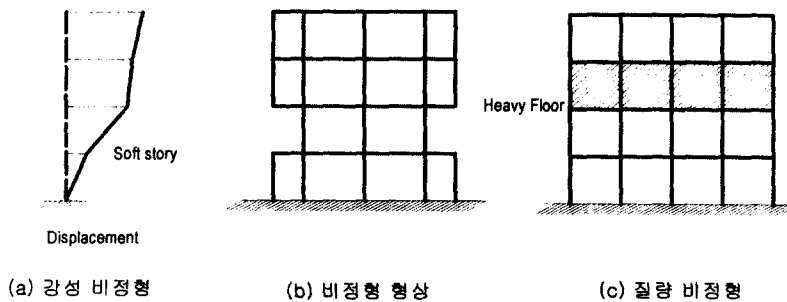


그림 1 수직적 비정형성을 지닌 구조물

해석모델은 그림2 에서와 같이 3층, 5층, 10층의 1-bay, 골조 구조물들을 대상으로 정하였다. 가력 가속도 자료는 El Centro, Sanfernando, Northridge, Parkfield, Kobe의 다섯 가지 지진가속도 자료를 이용하였다. 모든 가속도 자료는 PGA=0.11g의 상태로 축소 조정 하여 사용하였으며, 시간이력해석은Drain-2DX를 이용하여 수행하였다.

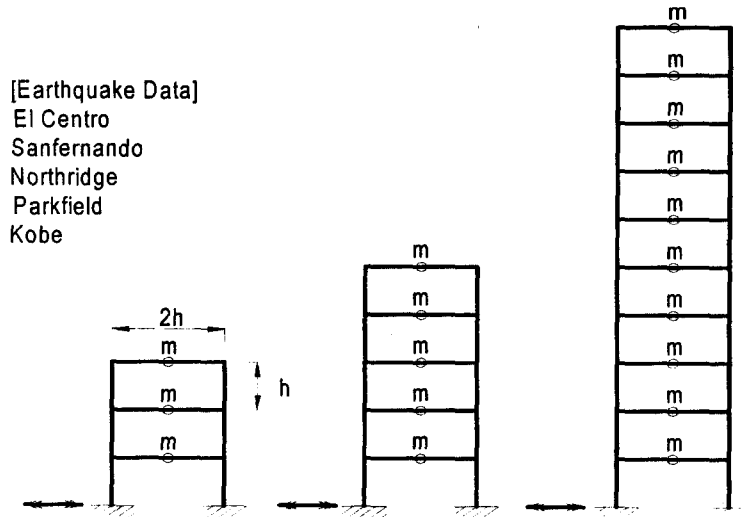


그림 2 해석 대상 구조물과 지진 데이터

### 3. 수직적 비정형성 정도에 따른 구조체의 거동

#### 3.1 질량 비정형성

5층 구조물의 최상층과 최하층에 생겨나는 수직적 질량 비정형에 따른 구조체 거동의 차이를 알아보기 위하여 그림2와 같은 해석모델을 구성하였다. 1층과 5층에 발생하는 질량 비정형의 크기는 일반층대비 0.5~5.0 사이의 11가지 값으로 설정하였다. 이렇게 설정된 모델에 Sanfernando 지진 가속도를 가력하여 그 거동을 살펴보고자 한다. 질량 비정형성에 따른 최상층 변위와 밀면 전단력의 변화양상은 그림3과 같다.

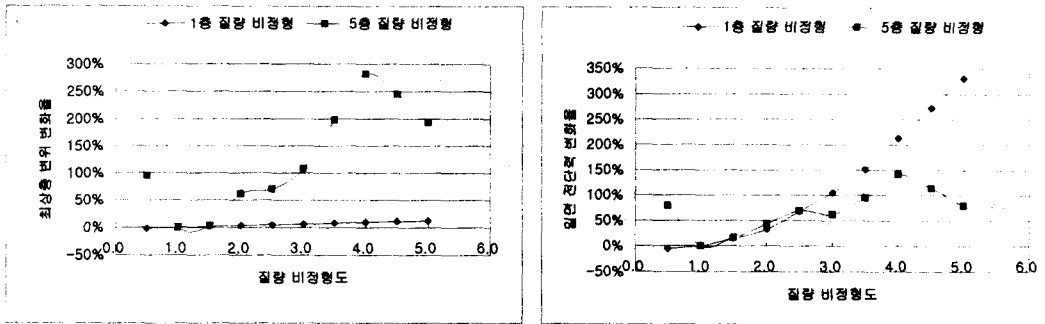


그림 3 질량 비정형성의 정도에 따른 구조물 거동의 변화

그림3 에서 알 수 있는 바와 같이 최상층 변위의 변화 정도는 상층부의 질량 비정형에 크게 영향을 받고있고, 반대로 밀면 전단력의 변화정도는 하층부의 질량 비정형에 비교적 민감하게 반응하는 것을 알 수 있다.

또한 상층부에 생기는 질량의 감소가 최상층의 변위와 밀면 전단력의 변화 모두에 생각보다 큰

영향을 미치고 있다는 것을 알 수 있다. 반면에 최상층과 최하층에서의 질량 증가는 인접층 대비 50%로 규정되어 있는 현재의 기준보다는 좀 더 완화된 기준을 사용할 수도 있을 것으로 보인다.

### 3.2 강성 비정형성

강성 비정형성이 구조물의 거동에 미치는 영향에 대해 알아보기 위하여, 강성의 비정형성이 발생할 경우 구조물의 거동에 가장 큰 영향을 미칠 것이라고 생각되는 최하층부에 일반층대비 0.3~1.0의 강성 불균형을 가하고 해석을 수행하였다.

구조물의 최하층부에 전반적으로 큰 강성 비정형성이 생길수록 구조물의 거동에 큰 변화를 일으킨다는 것은 직관적으로도 판단할 수 있는 점이다. 하지만 그림4에서 볼 수 있는 것과 같이 지진파의 특성에 따라서 그러한 변화의 정도는 크게 달라지게 된다. 이는 각 지진파가 지니는 주기의 차이때문이라고 생각된다. 어쨌든간에 상위층 층강성의 70%미만, 또는 상위 3개 층 강성 평균의 80%를 강성 불균형의 기준으로 삼는 현재의 일반적인 기준치를 지진의 특성에 대한 고려 없이 그대로 사용하는 것은 무리가 있다고 생각된다.

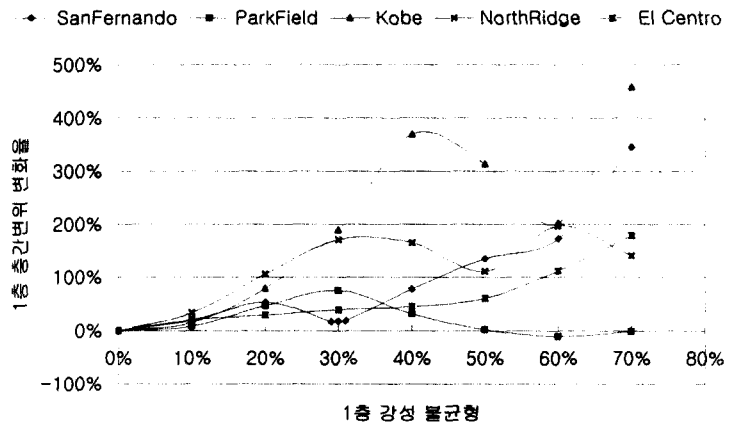


그림 4 강성 비정형성의 정도에 따른 1층 층간변위의 변화를

또한 건물 최하층에 발생하는 강성 비정형이 구조물의 높이에 따라 어떤 영향을 미치는지 알아보기 위해 Sanfernando 지진에 대한 해석 결과를 나타낸 것은 그림5와 같다. 10층과 5층의 두가지 모델에 대해서, 약간의 차이는 있지만 같은 지진파에 대해서는 전반적으로 비슷한 거동의 변화를 보여주고 있음을 알 수 있다.

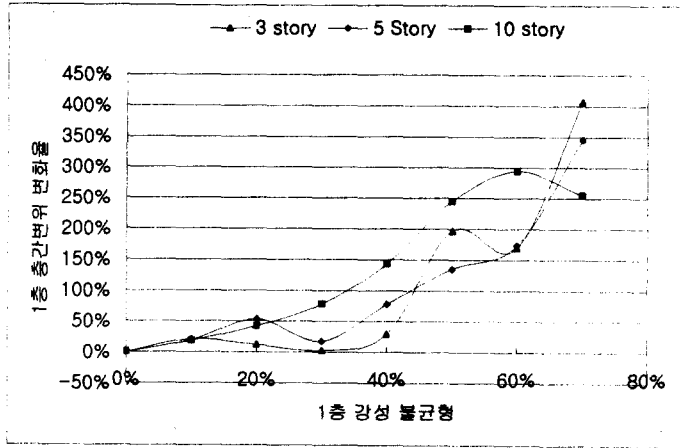


그림 5 구조물의 높이에 따른 강성비정형성에의 반응

그림6을 통해서, 질량비정형과 강성비정형이 건물의 거동에 일으키는 영향의 정도에 대해서 간접적인 비교가 가능하다. 현재 강성비정형의 기준으로 사용되고 있는 30%라는 기준치가 일으키는 건물의 거동 변화는 질량비정형 110~120%정도에서 발생하는 거동변화수준과 일치한다. 말하자면, 현재 사용되는 강성 비정형성의 기준은 질량 비정형성의 기준에 비해 훨씬 엄격한 편이라고 생각해 볼 수 있다.

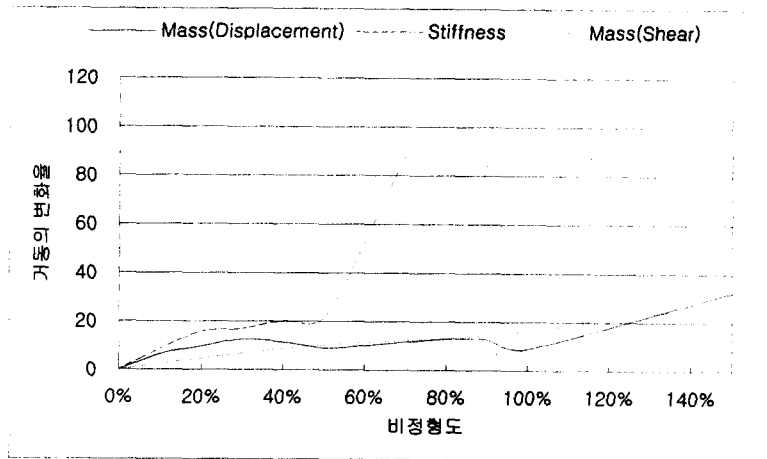


그림 6 강성과 질량 비정형성에 따른 거동의 변화

#### 4. 수직 비정형의 위치에 따른 구조체의 거동

지금까지는 수직 비정형성의 정도에 따른 구조체 거동의 변화에 대해서 살펴보았다. 이제는 수직 비정형성이 발생하는 위치가 구조체의 거동에 어떤 영향을 미치는 지에 대해 좀 더 구체적으로 생각해 보도록 하자. 예를 들어, 앞서서도 이미 가정했듯이, 저층부에 발생하는 강성의 부족은 상층부에 발생하는 강성 비정형보다 건물의 거동에 보다 큰 영향을 미친다고

생각할 수 있다. 이러한 단순하고 순차적인 개념을 수치적으로 나타내기 위하여, 인공신경망(Artificial Neural Network) 개념을 이용하기로 하였다. 사용된 인공신경망에 대한 개괄적인 내용은 다음과 같다.

#### 4.1 인공신경망의 설계

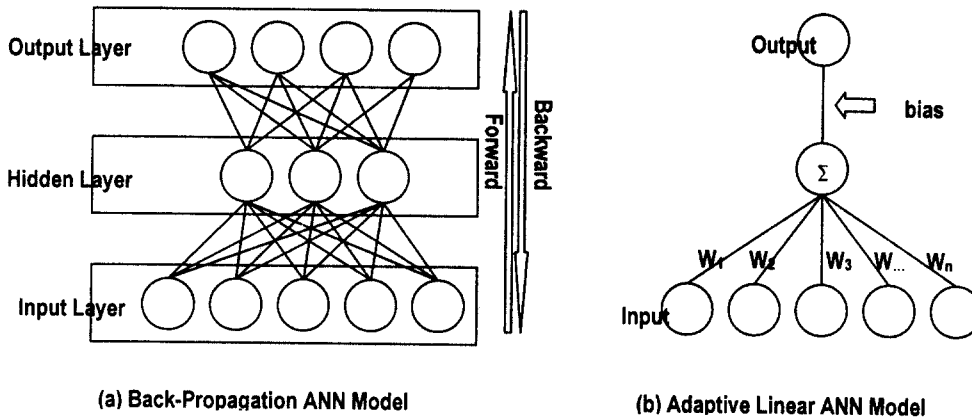


그림 6 ANN(인공신경망) topology

인공신경망은 그 topology에 따라서 여러가지 형상으로 나누어 진다. 가장 많이 사용되는 형태는 위의 그림6-(a)에 보이는 것과 같은 역전파 모델이다. 역전파 모델의 가장 큰 특징은 은닉층(Hidden Layer)를 지닌다는 점이며, 노드사이의 관계 설정에 따라서 다양한 모델을 구성할 수 있는 장점이 있다. Forward와 Backward 방향으로의 연산을 반복하면서 목표 출력치에 도달하는 훈련과정을 거쳐 신경망을 완성하게 된다. 본 연구에서 사용하게될 인공신경망의 형태는 그림6-(b)과 같은 Adaptive Linear(ADALINE) 형태의 신경망이다. 한가지의 출력치에 대하여 선형적인 접근만이 가능하다는 단점이 있지만, 연산속도가 빠르고 노드들간의 관계를 명확하게 파악할 수 있어 두 번째 모델을 선택하였다. 강성의 비정형에 대해서 인공신경망을 구성한다고 생각하면, 각 층에 발생하는 강성 비정형의 정도가 입력자료가 될 것이고, 출력 자료는 관심을 가지는 구조물의 거동에 따라 최상층 변위나 층간변위, 또는 전단력등을 사용할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 건물의 최상층에서 발생하는 변위의 증가 정도를 출력 자료로 삼았다. 미리 구성된 입력 자료와 출력 자료로 이루어진 data set을 이용하여 신경망의 학습이 이루어지게 되고, 학습을 통해 신경망을 구성하는 노드별 weight와 bias를 구할 수 있다. 학습된 신경망은 수직 비정형의 위치에 따라 구조물 거동이 변화하는 정성적인 정도를 찾아내거나, 임의의 비정형성을 지닌 구조물의 거동을 예상하는데 사용할 수 있다.

#### 4.2 신경망 학습의 결과

신경망을 학습 시키기 위해 임의의 강성 비정형성을 지닌 구조물들에 대한 해석을 통해서 data set을 마련하였다. 3층, 5층, 10층의 구조물이 보여주는 Sanfermando, Northridge, 그리고 El Centro 세

가지 지진에 대한 거동을 해석하여 학습자료를 작성하였다. 3층 구조물에 대해서는 13개의 강성 비정형 경우를 고려하였고, 5층 구조물에 대해서는 32개, 10층 구조물에 대해서는 31개의 학습 자료를 작성하였다. 즉 각 구조물의 relative height에서의 강성 불균형의 정도를 입력자료로 하고, 그를 해석해서 나온 최상층 변위를 출력자료로 하는 입력-출력 data set을 각각의 지진에 대해서 76쌍씩 작성하였다.

MATLAB의 Neural Network Toolbox를 이용하여, 이 값들을 -1과 1사이의 값으로 정규화하고, 정규화된 값들을 이용하여 신경망을 학습시키는 과정을 수행하였다. 5층의 구조물에서 나온 data set만을 이용하여 신경망을 학습시킨 결과가 표1과 같다. 강성 비정형의 정도에서 이미 거론되었듯이, 강성 비정형성의 위치에 따라 전체 구조물의 거동에 미치는 영향도 지진에 따라 약간씩 다른 값을 보여주고 있다. 물론 저층부에서 발생하는 강성의 불균형이 구조물 전체에 보다 큰 영향을 미치게 되는 전반적인 경향은 모두 같이 나타나고 있다.

표 1 5층 구조물의 강성비정형 데이터를 이용한 ANN 학습 결과

Earthquake	Weights					Bias
	1층	2층	3층	4층	5층	
Sanfernando	0.1794	0.6810	0.0743	-0.0305	-0.0985	0.2279
Northridge	0.9468	0.4798	0.0828	-0.0077	-0.0216	0.4757
El Centro	0.3773	0.3208	0.1341	0.0422	0.0068	0.2512
전체 set	0.1180	0.0747	-0.003	-0.0577	-0.067	-0.6649

3층, 5층과 10층의 자료를 전부 이용하여 같은 신경망을 학습시키면 그림7과 같은 결과를 얻어낼 수 있다. 건물의 층수에 따라서 입력노드의 수가 달라지게 되므로 층수에 대한 정보를 0~1사이에서 정규화시킨 10개의 값으로 입력노드를 임의로 지정한 후 구조물의 높이에 따른 강성 비정형 자료를 입력하는 방식을 택하였다. 그 결과를 그래프로 그려낸 것은 층별 강성 비정형에 의한 구조물 거동변화에 대한 상대적 가중치라고 가정할 수 있다.

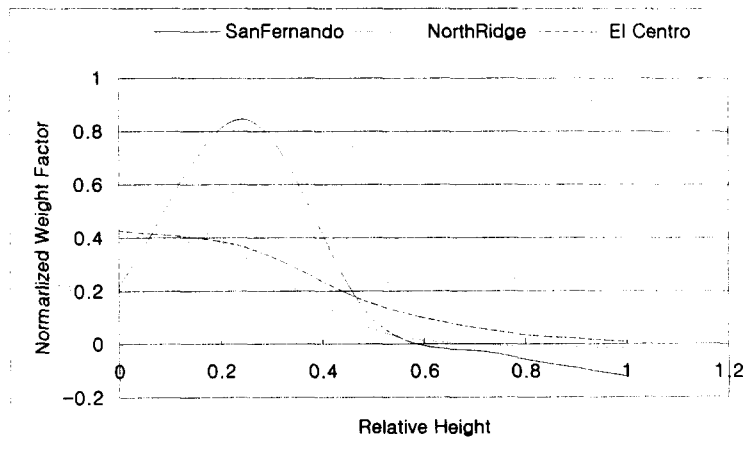


그림 7 강성비정형 데이터를 이용한 ANN 학습 결과

## 5. 향후 연구 방향

위에서도 이미 언급되었듯이 지진파의 특성에 따라 수직적 비정형성으로 인해 구조물이 보여주는 거동은 큰 차이를 보인다. 다양한 비정형성에 대한 구조물의 거동 및 지진파의 특성에 따른 구조물의 거동에 대해서도 지속적인 연구가 필요하다. 또한, 본 연구에서와 같이 신경망을 이용하여 구조물의 비정형성을 고려한 내진성능평가가 보다 용이하게 이루어질 수 있도록 응용시스템의 개발도 함께 진행되어야 할 것이다.

## 참고문헌

1. FEMA (1992), "NEHRP Handbook for the Seismic Evaluation of Existing Buildings", FEMA-178
2. ATC (1987), "Evaluating the Seismic Resistance of Existing Buildings", ATC-14
3. Howard Demuth (1998), "Neural Network Toolbox", MATLAB User's Guide 3.0
4. Nabil Kartam (1997), "Artificial Neural Network for Civil Engineers", ASCE
5. Joey Rogers (1997), "Object-Oriented Neural Networks in C++", Academic Press
6. Eggert V. Valmundsson (1997), "Seismic Response of Building Frames with Vertical Structural Irregularities", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.123, No.1, pp.30-41
7. Karen C. Chou (1997), "Fuzzy-Bayesian Approach to Reliability of Existing Structures", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.119, No.11, pp.3276-3290