

# 비내진 상세를 가진 1:5 축소 철근콘크리트 골조의 비선형 거동에 대한 실험과 해석의 상관성 연구

## A Study of Correlation between Experiment and Analysis of Nonlinear Behaviors of A 1:5 Scale RC Frame with Nonseismic Details

이 한 선\*                      우 성 우\*\*                      허 윤 섭\*\*  
Lee, Han-Seon              Woo, Sung-Woo              Heo, Yun-Sup

### ABSTRACT

A series of dynamic and static tests were conducted to observe the actual responses of a 1:5 scale 3-story reinforced concrete(RC) frame which was designed only for gravity loads. One of the major objectives of these experiments are to provide the calibration to the available static and dynamic inelastic analysis techniques.

In this study, the experimental results were simulated by using a nonlinear analysis program for reinforced concrete frame, IDARC-2D. The evaluation of the degree of the simulation leads to the conclusion that while the global behaviors such as story drifts and shears can be in general simulated with the limited accuracy in the dynamic nonlinear analysis, it is rather easy and simple to get the fairly high level of accuracy in the prediction of global and local behaviors in the static nonlinear analysis by using IDARC-2D.

### 1. 서론

철근콘크리트(RC) 구조물의 거동을 묘사하기 위해 여러 가지 모델들이 제안되고 있다. Negro 등<sup>(1)</sup>은 이러한 모델을 세 가지 수준 즉, (1)재료 수준에서의 모델, (2)Global member-type model, (3)Fiber model로 구분하였다. 본 연구에서는 Global model을 채택하고 있는 IDARC 2D<sup>(2)</sup>를 사용하여 해석을 수행하였다. 우선, 중력하중에 대해 설계된 1/5 축소 3층 RC 구조물에 대해 진동대 실험 및 정적 일방향 가력 실험을 수행하였으며, 실험결과에 근거하여 해석 모델을 수립하였다. 본 연구에서는 구조물의 거동을 가장 잘 묘사할 수 있는 적절한 해석 변수를 찾아내고, 이를 통해 구한 응답을 실험결과와 비교함으로써 IDARC 2D에 의한 해석 결과의 신뢰성을 평가하고자 한다.

### 2. 해석모델

실험에 사용된 재료의 실험 결과를 근거로 재료모델을 결정하였으며, 단면모델은 실제 단면 형상, 배근 상태 및 재료 특성 등을 고려하여 모멘트-곡률 관계 모델로 표현하였다. IDARC 2D에서는 구조물의 이력거동의 특성을 나타내기 위해 "Park hysteretic model"을 사용하여 강성감소 현상( $\alpha$ ), 강도저하 현상( $\beta$ ) 및 핀칭 현상( $\gamma$ ) 등의 영향을 고려한다. 본 연구에서는 이러한 변수를 조정하여, 실험과

\* 경희원, 고려대학교 건축공학과 부교수

\*\* 경희원, 고려대학교 건축공학과 박사과정

가장 유사한 결과를 나타내는 값을 최종 값( $\alpha = 0.5$ ,  $\beta(\text{연성}) = 0.0$ ,  $\beta(\text{에너지}) = 0.04$ ,  $\gamma = 0.7$ )으로 선정하였다. 부재모델에서는 단면 연성의 변화를 고려하기 위해 spread plasticity formulation과 yield penetration model을 사용하여 부재의 연성행렬을 구하고 이로부터 강성행렬을 산출하여 부재의 강성 변화를 모델링한다. 구조물의 해석모델에서는 상사성의 법칙에 따라 질량을 보상하기 위해 부가된 무게를 집중하중으로 나타내었으며, 보의 경우 세 요소로 나누었고 감쇠비는 4%로 가정하였다.

### 3. 동적거동의 비교

Taft N21E 지진파를 사용하여 진동대 실험을 수행하였다.<sup>(5)</sup> 입력지진파의 최고가속도의 크기를 0.12g, 0.2g, 0.3g, 0.4g로 조정하여 전체 응답, 국부 응답 및 파괴양상을 관찰하였다.

해석으로부터 구한 기본주기(0.26초)는 진동대 실험 이전의 자유진동실험으로 구한 값(0.23초)과 거의 일치하며, UBC-97의 경험식에 의한 고유주기 산정식에 따라 계산된 값은 0.197초로 나타났다.

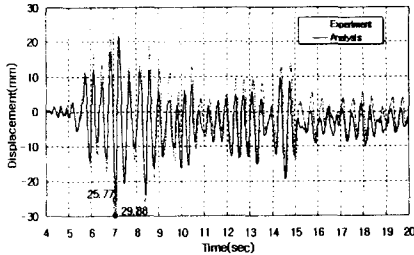


그림 1 옥상층 변위 이력의 비교

옥상층 변위에 대한 시간이력의 거동 양상과 그 최대값을 기준으로 하여 해석모델을 결정하였으며, 그 결과 최대값에서는 약 4.11mm(14%)의 차이가 있으며 반응 후반부에 약간의 위상차를 보이고 있으나, 전반적으로 실험결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다(그림 1).

층관성력의 합에 의해 얻어진 밀면 전단력과 기둥 전단력의 합에 의해 얻어진 밀면 전단력을 각각 1층 층간변위에 대해 나타내면, 밀면 전단력 및 변위의 최대값은 두 경우 모두 거의 일치하는 양상을 보였으나 에너지면에서는 층관성력의 합에 의해 얻어진 밀면 전단력의 소산 에너지가 큰 것을 볼 수 있다. 해석과 실험을 비교해보면 강도에서 약 20%의 차이가 나며, 1층에서의 층 강성은 유사하나 해석의 경우 실험에서처럼 뚜렷한 항복현상을 보여주고 있지 않다(그림 2). 또, 2층에서의 층 강성은 실험과 해석이 유사하게 나타났다. 흡수된 에너지의 양은 해석이 실험보다 약 30% 작게 나타났다. 각 층별 에너지 분포를 살펴보면 실험의 경우 51%(1층) : 43%(2층) : 6%(3층)이고, 해석의 경우 43% : 40% : 17%로 나타나 해석에서 1, 2층에서의 에너지 소산 집중현상을 과소평가하고 있음을 보여주었다.

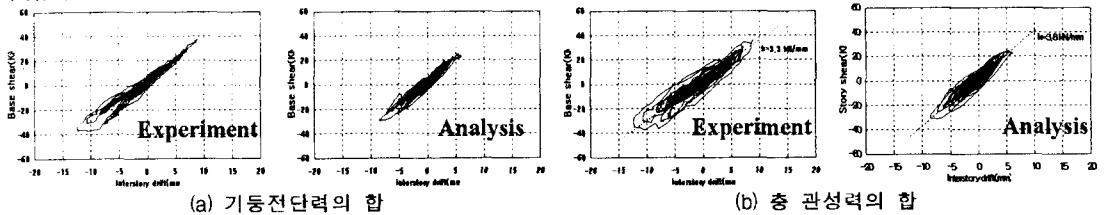


그림 2 밀면 전단력-1층 층간변위

해석과 실험의 최대 밀면 전단력 차이는 그림 3에서 보는 바와 같이 해석에서의 2차 혹은 고차모드의 영향 때문이라고 할 수 있다. 이 그림에서는 1층에서의 가속도 이력은 해석이 실험과 비슷하거나 다소 크게 나타나지만 2층과 3층 가속도 이력은 고차모드의 영향으로 실험과는 다른 양상을 보여주고 있다. 이는 이러한 가속도 이력으로부터 구한 층 관성력의 합(밀면 전단력)이 실험 값보다 적게 나타나고 있는 이유를 잘 설명하고 있다.

그림 4와 5에서는 Taft 0.4g 후의 실험과 해석에서 보여진 균열양상과 소성힌지 분포를 나타내었다. 실험의 경우 2층 바닥 외부 접합부의 보 단부와 1층 외부기둥에서 균열이 발생하였으나 해석의 경우 소성힌지의 위치가 다르게 나타났다. 또, 2층 내부기둥 하부의 경우 해석에서는 소성힌지가 발생하였

으나, 실험의 경우 다른 부분에 비해 회전각이 크게 나타났음에도 불구하고 균열이 나타나지 않았다.

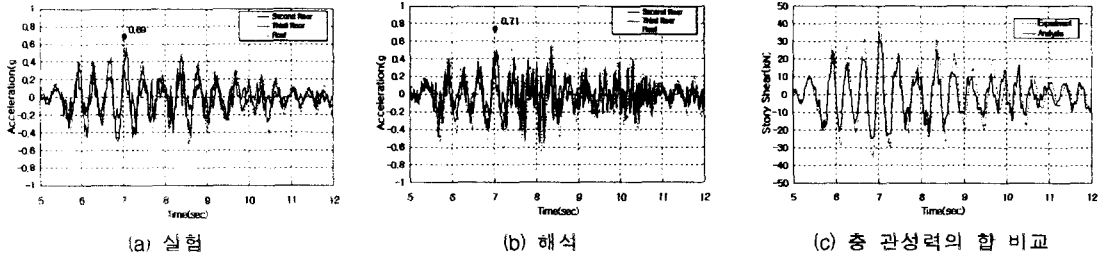


그림 3 층 가속도와 밀면 전단력의 비교

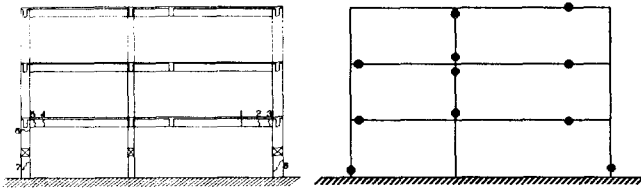


그림 4 균열 양상(실험)      그림 5 소성힌지의 분포(해석)

#### 4. 정적 거동의 비교

Taft 0.4g의 진동대 실험 후에 구조물의 강도 및 변형 등에 대한 최대 능력을 알아보기 위해 일방향 횡가력 실험<sup>(6)</sup>을 수행하여 해석결과와 비교하였다. 해석의 경우 극한 상태에서 슬래브의 기여도가 커짐을 고려하기 위해 T형보의 유효 폭

을 두 가지로 모델링 하였다(T형보의 유효 폭=293mm(PUSH-I), T형보의 유효 폭=840mm(PUSH-II)). 그림 6에서는 횡하중과 옥상층 변위와의 관계를 나타내고 있다. 이 그림으로부터 1) IDARC 2D

는 최종 파괴시 취성파괴를 묘사할 수 없고, 2) PUSH-I와 PUSH-II의 극한 강도가 모두 실험 값보다 낮으며, 3) 슬래브의 기여도를 최대로 고려하더라도 해석과 실험에서의 최대 강도 차이를 설명할 수 없다는 사실을 알 수 있다. 실험에서 구조물의 최대 강도는 51.4kN이고 초기 강성은 1.69kN/mm이며, 변위 연성비는 1.57(47.2/26)로 나타났다. 해석에서는 PUSH-II의 경우 최대 강도는 42.9kN이고 초기 강성은 3.33kN/mm로 나타났고, 변위 연성비는 약 4(54.7/13)정도로 나타났다.

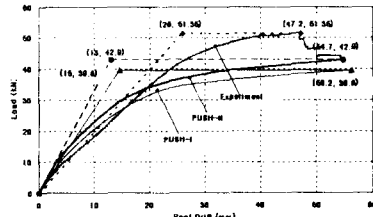


그림 6 횡하중-옥상층 변위

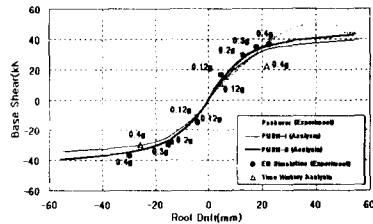
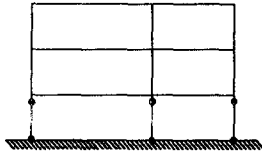


그림 7 밀면 전단력-옥상층 변위

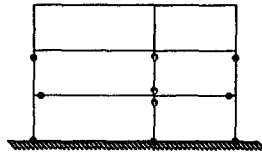
그림 7에서는 횡하중과 옥상층 변위와의 관계와 각 지진모의 실험에서의 최대 밀면 전단력과 그 때의 옥상층 변위를 함께 나타내었다. Taft 0.3g까지는 거의 탄성거동을 보이며 Taft 0.4g에서 뚜렷하게 항복이 발생하였다. 이 그림으로부터 정적 일방향 가력 해석이 구조물의 전체적인 항복현상을 예측하는데 신뢰성이 있다는 것을 알 수 있다.

실험에서는 그림 8(a)의 약층 파괴 메카니즘(메카니즘 1)을 보여주었고, 해석의 경우는 그림 8(b)의 경우와 같은 메카니즘 2의 형태를 보여준다. PUSH-I와 PUSH-II 해석에 사용된 단면을 사용하여 "Simple Plastic Analysis"를 수행해보면 PUSH-II의 단면에 대한 메카니즘 1의 극한 강도는 38.9kN으로 나타나 메카니즘 2(38.2kN)와 거의 차이가 없음을 알 수 있다.

그림 9에서는 실험에서 최대 강도(옥상층 변위=47.2mm)에 도달할 때 주요부재의 회전각을 해석(PUSH-II)과 비교하여 나타내었으며 그 결과는 유사한 것으로 나타났다.

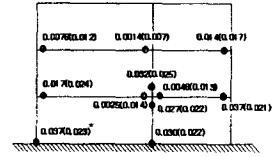


(a) 메카니즘 1



(b) 메카니즘 2

그림 8 파괴 메카니즘과 파괴 하중



\* Analysis (Experiment)

그림 9 회전각 비교 (unit : rad)

## 5. 결론

연구결과로부터 IDARC 2D의 취약점 및 신뢰성 확보를 위해 개선되어야 할 점을 정리하면 다음과 같다: 1)층간변위와 층 전단력등과 같은 구조물 응답을 적절하게 묘사하지 못함을 발견하였다. 이에 따라 이력거동을 묘사하기 위해 더 많은 혹은 적절한 해석 변수가 제시되어야 한다. 2)성능에 기초한 내진설계를 수행하기 위해서는 일반적으로 구조물의 주요부위(critical region)에서의 변형 능력 및 수요를 산정할 필요가 있다. 그러나 IDARC 2D는 부재 수준에서의 spread plasticity model을 사용하기 때문에 이러한 값을 바로 찾아내기가 어렵다. 3)실험에서는 취성파괴가 관찰되었으나 IDARC 2D에서는 이를 묘사하지 못한다. 따라서 이러한 구조물 거동을 묘사할 수 있는 프로그램 개발이 기대된다.

또한, 동적 및 정적 비선형 해석 결과를 실험과 비교해 보면, 정적 비선형 해석이 동적 비선형 해석에 비해 상대적으로 우수한 정확도 및 신뢰도를 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 능력 스펙트럼법(ATC-40)등을 사용하여 옥상층 변위와 같은 최대 응답을 정확히 산정할 수 있다면 IDARC 2D에 의한 비선형 정적해석을 사용하여 하중 및 변형에 대한 수요 및 성능을 비교적 정확히 예측할 수 있을 것이다.

## 감사의 글

이 연구는 1997년도 건설교통부 국책과제인 “우리나라 중·저층 철근콘크리트 건축물의 지진피해예측 및 보수보강법 연구”의 일부로 수행되었으며 이 지원에 대해 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Negro, P., and Colombo, A., "How Reliable Are Global Computer Models? Correlation with Large-Scale Tests", *Earthquake Spectra*, V. 14, No. 3, August 1998.
2. Valles, R.E., Reinhorn, A.M., Kunnath, S.K., Li, C., and Madan A., "IDARC 2D Version 4.0: A Program for the Inelastic Damage Analysis of Buildings", Technical Report NCEER-96-0010, State University of New York at Buffalo, 1996.
3. Reinhorn, A.M., Kunnath, S.K., and Valles, R.E., "IDARC 2D Version 4.0: A Program for the Inelastic Damage Analysis of Building," Users Manual, 1996.
4. 이한선, 우성우, 허윤섭 3명, "1/5 축소 3층 철근콘크리트 골조 모델의 제작기법 및 재료특성 연구", 한국콘크리트 학회 가을 학술발표회 논문집 제9권 2호, pp 575~580, 1997. 11.
5. Lee, H.S., Woo, S.W., "Earthquake Simulation Tests of A 1:5 Scale Gravity Load Designed 3-Story Reinforced Concrete Frame," *Journal of the Korea Concrete institute*, Vol. 10, No. 6, December 1998, pp. 241-252.
6. Lee, H.S., Woo, S.W., Heo, Y.S., and Song, J.G., "Pushover Tests of 1:5 Scale 3-Story Reinforced Concrete Frames," *Journal of the Korea Concrete institute*, Vol. 11, No. 3, July 1999, pp. 165-174.
7. Felber, Andreas J., "RESPONSE: A Program to Determine the Load-Deformation Response of Reinforced Concrete Sections", M.A.Sc. thesis, Department of Civil Engineering, University of Toronto, 1990, 148 pp.
8. Bracci, J.M., Reinhorn, A.M., and Mander, J.B., "Seismic Resistance of Reinforced Concrete Frame Structures Designed for Gravity Loads: Performance of Structural System," *ACI Structural Journal*, V. 92, No. 5, September-October 1995, pp. 597-609.