

철근콘크리트 전단벽의 지진해석

Seismic Analysis of Reinforced Concrete Shear Wall

김 태 훈* 박 지 홍** 박 재 근*** 최 강 룡**** 신 현 목*****
Kim, Tae Hoon Park, Ji Hong Park, Jae Guen Choi, Kang Ryong Shin, Hyun Mock

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the seismic behavior of reinforced concrete shear wall subjected to earthquake motions. A computer program, named RCAHEST(Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology), was used for the analysis of reinforced concrete structures. A 4-node flat shell element with drilling rotational stiffness is used for spatial discretization. The layered approach is used to discretize behavior of concrete and reinforcement through the thickness. Material nonlinearity is taken into account by comprising tensile, compressive and shear models of cracked concrete and a model of reinforcing steel. The smeared crack approach is incorporated. Solution of the equations of motion is obtained by numerical integration using Hilber-Hughes-Taylor(HHT) algorithm. The proposed numerical method for the seismic analysis of reinforced concrete shear wall is verified by comparison of analysis results with reliable experimental results.

1. 서 론

최근 내진부재로 철근콘크리트 전단벽의 사용이 계속 증가하고 있는 추세에 있는데, 이는 전단벽이 골조와 상호작용을 함으로써 지진과 같은 수평력에 효율적으로 저항하기 때문이다. 특히, 구조물의 과도한 횡방향 변위를 방지하고 전체 구조계의 일체성을 높이는데 크게 기여를 하고 있다. 따라서, 내진부재로서의 전단벽에 대한 이력특성을 예측하는 것은 매우 중요한 일이다⁽¹⁾. 그러나 최근까지도 이러한 전단벽의 이력특성은 균열을 포함한 철근콘크리트의 특성, 철근의 항복, 그리고 반복하중의 영향 등 여러 인자와의 상호작용에 의해 복합적으로 나타나기 때문에 대부분 실험

* 정회원 · 성균관대학교 건축, 조경 및 토목공학연구소 연구원, 공학박사
** 성균관대학교 토목환경공학과 석사과정
*** 성균관대학교 토목환경공학과 박사과정 수료
**** 한국원자력안전기술원 구조부지실 실장
***** 정회원 · 성균관대학교 토목환경공학과 교수, 공학박사

에 의존하여 파악하는 실정이다^{(2),(3)}.

이 연구는 콘크리트와 철근의 비선형 특성을 고려한 재료모델과 동적해석 알고리즘을 사용하여 지진하중을 받는 철근콘크리트 전단벽의 지진응답을 해석적으로 예측할 수 있는 기법을 제시하는데 그 목적이 있다.

이 연구에서는 기존의 저자 등에 의하여 개발되었던 면내회전강성도를 갖는 철근콘크리트 셸요소⁽⁴⁾를 사용하여 지진하중을 받는 철근콘크리트 전단벽의 거동특성을 예측하고자 한다. 사용된 요소는 2차원 구성방정식과 층상화기법을 이용하여 임의 하중을 받는 철근콘크리트 셸구조에 대한 역학적 거동, 즉 탄성, 비탄성, 극한영역 등 모든 응력상태에 걸친 하중과 변형의 관계와 균열의 진행, 콘크리트와 철근의 응력추적 등을 정확히 해석할 수 있는 3차원 철근콘크리트 셸요소로서 3차원 Beam-Column 요소와 조합하여 사용할 수 있도록 일반적인 셸요소의 자유도에 부재회전 방향의 자유도인 drilling 회전강성도가 도입되어 있다. 이와 함께 하중의 지속시간 및 크기, 질량의 크기, 그리고 감쇠효과 등을 고려하여 철근콘크리트 부재의 동적 거동특성을 예측하도록 하였다.

2. 비선형 유한요소해석 프로그램

2.1 철근콘크리트 셸요소

유한요소해석에서 요소의 선정은 중요하며, 요소범위의 적용과 해석결과의 정확성에 영향을 미친다. 이 연구에서 사용된 철근콘크리트 셸요소는 2차원 구성방정식과 층상화기법을 이용하여 임의형상의 철근콘크리트 셸구조에 대한 역학적 거동, 즉 탄성, 비탄성, 극한영역 등 모든 응력상태에 걸친 하중과 변형의 관계와 균열의 진행, 콘크리트와 철근의 응력추적 등을 정확히 해석할 수 있는 3차원 철근콘크리트 셸요소이다⁽⁴⁾.

2.2 유한요소해석 프로그램의 작성

유한요소해석 프로그램을 작성하는 방법은 사용목적에 맞는 전용 프로그램을 새롭게 작성하는 방법과 사용자가 개발한 요소를 추가할 수 있는 모듈화된 범용 유한요소해석 프로그램을 이용하는 방법으로 구분될 수 있다. 전자의 방법은 전용프로그램으로서 입력자료의 작성이 간단하고 해석시간을 줄일 수 있는 장점이 있는 반면에 이미 개발된 또는 앞으로 개발될 다른 종류의 요소와 조합으로 사용하기가 곤란하다.

이 연구에서는 후자의 방법을 택하여 저자 등에 의하여 그 동안 개발된 철근콘크리트 셸요소⁽⁴⁾ 등을 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP⁽⁵⁾에 이식하여 모듈화된 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST(Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)를 사용하였다.

3. 비선형 동적해석 기법

구조물의 비선형응답은 운동방정식의 점층 증가방식의 수치적분에 의하여 구해지며 주로 직접

적분법이 사용되고 있다. 이러한 직접적분법 중 연구에 실제 많이 이용되는 해석법은 Newmark 법과 Hilber-Hughes-Taylor(HHT) 법이다. HHT 법은 Newmark 법이 갖고 있는 단점인 수치적 감쇠효과를 유도할 때 발생하는 정확도의 감소를 보완한 해석방법으로서 Hughes에 의해 그 수렴성과 안정성이 검증되었다⁽⁶⁾.

이 연구에서는 비선형 관계로 나타나는 동적 증분 평형방정식은 Hilber-Hughes-Taylor(HHT) 법에 의한 시간에 대한 수치적분과정과 수렴에 도달하기 위한 반복계산과정을 거침으로써 해를 구하였다.

Hilber-Hughes-Taylor 법은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$R(t_{n+a}) = F(t_{n+a}) - P(u_{n+a}, \dot{u}_{n+a}, \ddot{u}_{n+a}) = 0 \quad (1)$$

여기서 R 은 잔류력(residual force)벡터로서 불평형하중(unbalanced load)을 나타내며, F 는 시간의 함수로 주어지는 등가의 절점하중(equivalent nodal force)벡터 그리고 P 는 등가의 내력(equivalent internal force)벡터를 의미한다. 또한, u_{n+a} 는 변위, \dot{u}_{n+a} 는 속도 그리고 \ddot{u}_{n+a} 는 가속도를 의미한다.

4. 해석 예 및 고찰

이 연구에서 제안한 해석기법과 모델의 타당성을 검증하기 위해서 그림 1에 나타난 것과 같은 프랑스 원자력청에서 실험한 전단벽체⁽⁷⁾를 선정하였다. 이 실험체를 해석 예로 채택한 이유는 지진하중을 받는 철근콘크리트 전단벽의 지진거동을 정량화 시킨 실험이기 때문이다.

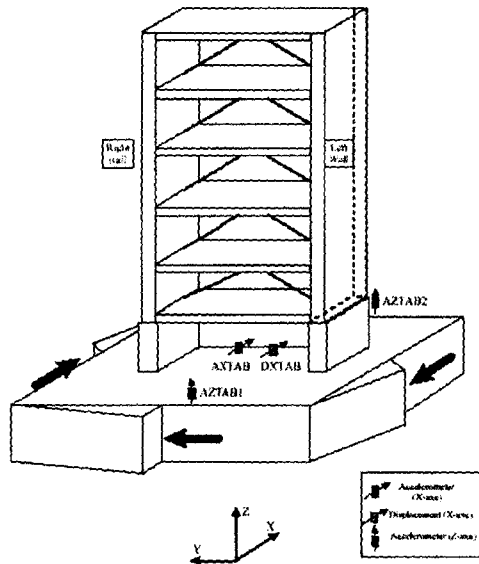


그림 1. 실험체(Camus)의 형상

이 연구에서 해석한 실험체(Camus)는 6개의 floor로 연결된 2개의 5층 철근 콘크리트 전단벽체로 기초는 shaking table에 고정되어 있다. 실험체의 전체 높이는 5.10m이며, 각 층에는 콘크리트 및 강재 블록을 상하로 연결하여 질량을 추가하였다. 실험체의 총 질량은 약 36tons이고, 각 floor에 추가되는 콘크리트 및 강재 블록의 질량을 제외한 floor만의 질량은 1.3tons이다. 세부적인 구조제원, 재료물성, 그리고 재하방법 등은 참고문헌⁽⁷⁾에 자세히 설명되어있다.

유한요소해석은 그림 2와 같이 요소수는 237개, 절점수 284개를 사용하여 한쪽 벽체만을 모델링하여 사용하였으며 각 floor에 가해지는 자중 및 추가되는 콘크리트와 강재 블록의 질량은 양쪽 벽체로 절반씩 나누어지는 것으로 모델링하였다. 또한 각 floor의 아래와 위에 연결되는 콘크리트와 강재 블록의 질량이 서로 상이하기 때문에 각 층의 질량은 질량중심을 고려하여 배치하였다. Shaking table은 강재로 모델링하였으며, shaking table과 지반과의 연결에는 스프링 요소를 사용하였다. 이때 스프링 요소의 강성은 400 MN/m이다.

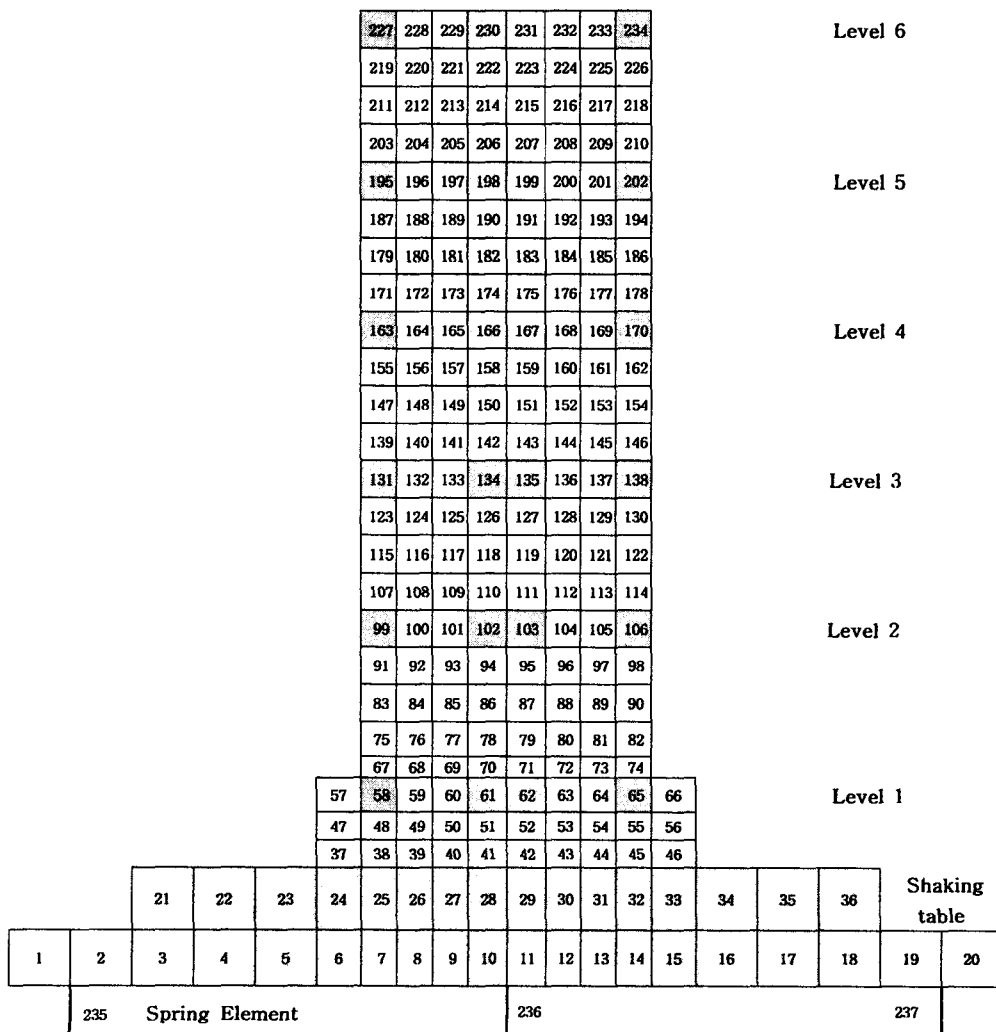


그림 2. 유한요소모델

실험체(Camus)의 고유 진동수는 실험을 실시하기 전 first mode는 7.24Hz, second mode의 고유진동수는 33Hz, 그리고 연직방향 eigenmode의 고유 진동수는 20Hz로 측정되었다. 이 연구의 해석모델을 적용한 해석결과는 first mode의 고유 진동수가 7.56Hz로 실험 결과와 약 4.4%의 오차를 보였고, second mode의 고유 진동수는 33.56Hz로 약 1.7%의 오차를, 그리고 eigenmode의 고유 진동수는 22Hz로 약 10%의 오차를 보여 실험결과와 비교적 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다.

실험은 그림 3과 같이 인공지진인 Nice signal과 San Francisco signal을 이용하여 표 1과 같이 서로 다른 PGA값을 가지는 RUN1부터 RUN5까지의 지진입력 데이터를 생성하여 사용하였다.

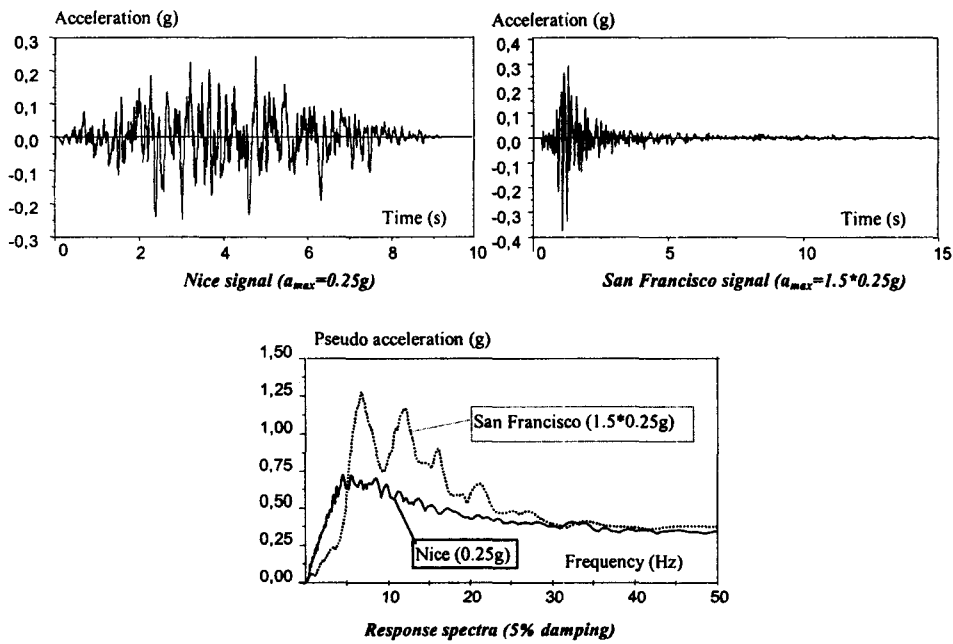


그림 3. 입력지진의 유형

표 1. 입력지진

Tests	Run1	Run2	Run3	Run4	Run5
Maximal horizontal acceleration	0.25g	0.13g	1.11g	0.41g	0.72g
Signal	Nice	San Francisco	San Francisco	Nice	Nice

그림 4 ~ 그림 8은 이 연구의 해석모델을 적용한 유한요소해석과 실험에 의한 변위응답을 나타내고 있다. 여기서의 변위는 상대변위로 level 6과 level 1에서의 변위의 차를 나타낸다.

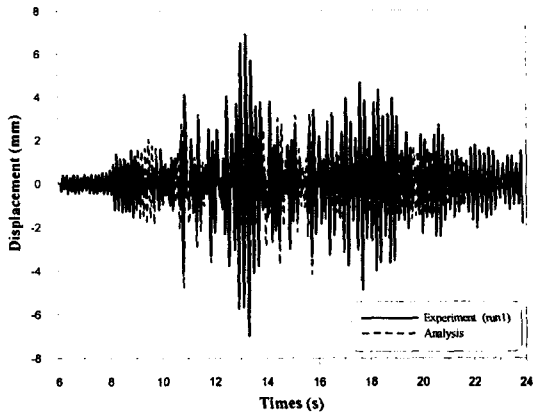


그림 4. 변위응답 RUN1

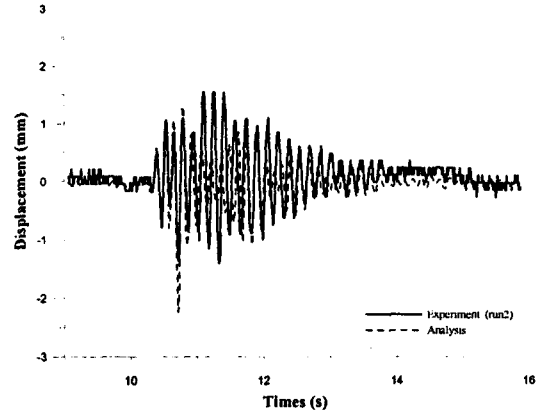


그림 5. 변위응답 RUN2

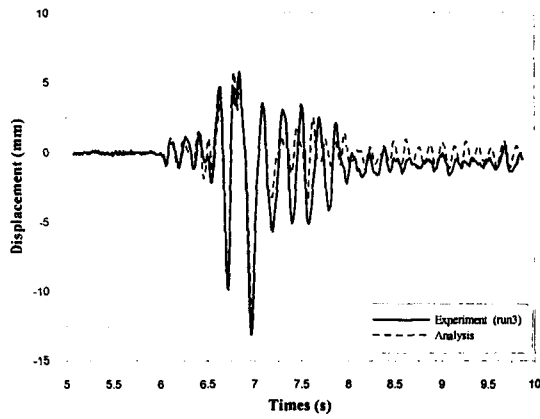


그림 6. 변위응답 RUN3

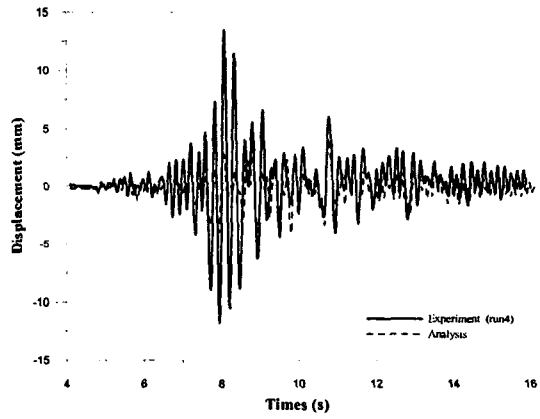


그림 7. 변위응답 RUN4

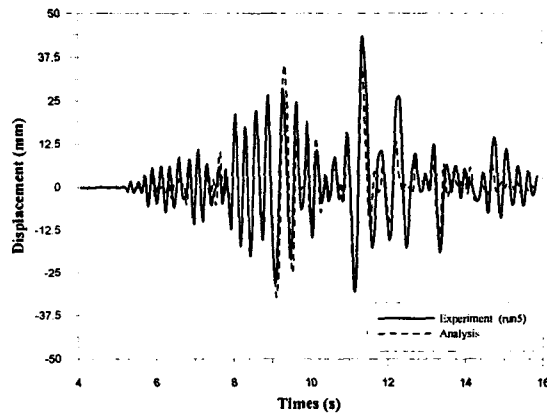


그림 8. 변위응답 RUN5

5가지 입력데이터에 대한 구조물의 거동 특성을 분석해 본 결과 최대 상대변위의 크기에서 약간의 차이를 보이고 있으나 상대변위의 주기 및 지진하중에 대한 전체적인 거동 특성은 비교적 잘 추적하고 있음을 알 수 있다. 그러나 RUN4의 경우에는 실험과 해석결과가 다소 차이를 보이

고 있다. 그 이유는, RUN4의 경우 RUN5와 같이 인공지진파인 Nice signal을 이용한 지진인데 반하여 그림 9와 같이 주파수 성분이 서로 차이를 보이고 있으며, RUN4의 경우에는 RUN5와 달리 지진 가속도 입력 데이터에 미소한 진동들이 너무 많아 해석에서 전체적인 구조물의 지진하중에 대한 응답을 정확하게 추적하지 못한 것으로 판단된다. 이는 같은 signal을 사용하는 RUN5를 RUN4의 크기로 조정해서 임의로 생성한 지진 가속도 입력데이터인 RUN4-5를 이용해서 해석한 결과가 RUN4의 실험결과에 근접함으로서 알 수 있다. 즉, 그림 10과 같이 구조물의 응답주기는 다소 차이를 보이고 있으나 실험의 상대변위의 크기는 잘 추적하고 있음을 알 수 있었다. 따라서 RUN4의 경우에는 지진 가속도 주파수 성분의 차이와 입력데이터의 미소 진동들이 해석에 영향을 미친 것으로 판단된다.

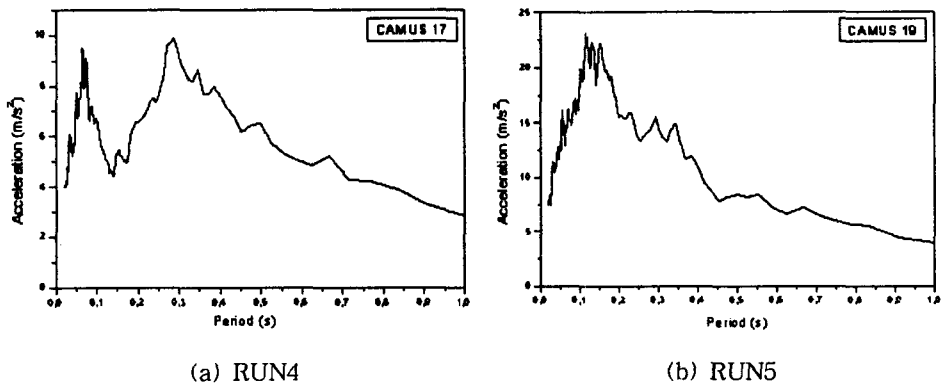


그림 9. 가속도 응답스펙트럼

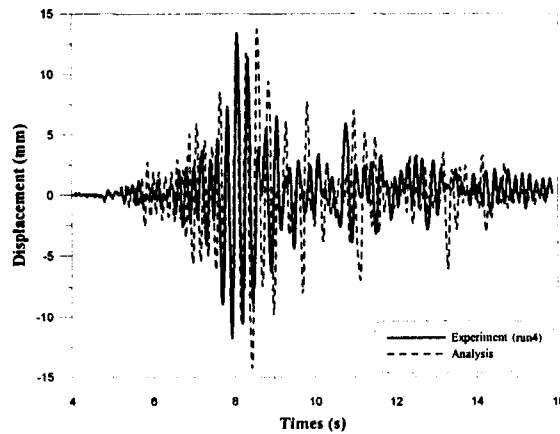


그림 10. 변위응답 RUN4-5

5. 결론

이 연구에서는 철근콘크리트 전단벽의 지진하중에 대한 거동특성의 예측을 위한 해석기법과 모델을 제시하였고 제안된 해석기법과 모델을 적용한 유한요소해석 프로그램을 사용하여, 철근콘크

리트 전단벽을 해석하였다. 실험결과와 비교·검토된 수치예제로부터 다음의 결론을 얻었다.

1) 재료적 비선형성을 고려하기 위해서 균열 발생후의 콘크리트의 인장강성 및 압축강성, 균열 면에서의 전단전달강성, 철근의 부착 등에 대한 각각의 구성방정식을 조합하여 유한요소해석에 적용함으로써 철근콘크리트 전단벽의 균열발생에서부터 철근의 항복 및 파괴에 이르는 모든 응력상태에 대한 비선형 거동을 정확하게 해석할 수 있었다.

2) 지진하중의 지속시간 및 크기, 질량의 크기, 그리고 감쇠효과 등을 고려하여 철근콘크리트 부재의 지진응답을 정확하게 예측하였다.

3) 지진하중을 받는 철근콘크리트 전단벽의 응답특성을 제대로 평가함으로써 중요한 철근콘크리트 구조물의 내진성능 평가 및 설계검토 등에 충분히 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 지진공학연구센터(KEERC)를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원 및 한국원자력안전기술원의 지원으로 수행되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Paulay, T., and Priestley, M. J. N., "Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings", John Willey & Sons, Inc., 1992.
2. 신현목, 김태훈, "RC 구조물의 비선형 해석 현황. 연구위원회 발표집", 한국콘크리트학회, 2001.
3. El-Attar, A. G., White, R. N., and Gergely, P., "Shake Table Test of a 1/8 Scale Three-Story Lightly Reinforced Concrete Buildings", Technical Report NCEER-91-0018, 1991.
4. Kim, T. H., Lee, K. M., and Shin, H. M., "Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Shells Using Layered Elements with Drilling Degree of Freedom", ACI Structural Journal, Vol. 99, No. 4, 2002, pp. 418-426.
5. Taylor, R. L. "FEAP - A Finite Element Analysis Program", Version 7.2, Users Manual, Volume 1 and Volume 2, 2000.
6. Hughes, T. J. R. "The Finite Element Method", Prentice-Hall, 1987.
7. Combescure, D. "IAEA CRP-NFE Camus Benchmark. Experimental Results and Specifications to the Participants", SEMT/EMSI/RT/02-047/A, 2002.