

# 손상지수를 이용한 철근콘크리트 교각의 내진성능평가

## Seismic Performance Assessment of Reinforced Concrete Bridge Piers using Damage Indices

김 태 훈\*  
Kim, Tae Hoon

정 영 수\*\*  
Chung, Young Soo

신 현 목\*\*\*  
Shin, Hyun Mock

### ABSTRACT

This paper presents a nonlinear finite element analysis procedure for the seismic performance assessment of reinforced concrete bridge piers using damage indices. The accuracy and objectivity of the assessment process may be enhanced by the use of sophisticated nonlinear finite element analysis program. A computer program, named RCAHEST(Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology), for the analysis of reinforced concrete structures was used. Damage indices aim to provide a means of quantifying numerically the damage reinforced concrete bridge piers sustained under earthquake loading. The proposed numerical method for the seismic performance assessment of reinforced concrete bridge piers is verified by comparison with the reliable experimental results.

### 1. 서 론

세계적으로 지진의 규모와 빈도 및 그로 인한 피해가 증가 추세에 있는 현 상황에서 지진으로 인한 기반시설과 인명의 피해를 최소화 또는 방지하기 위해서는 구조물의 역학적 거동을 올바르게 예측하는 방법이 시급히 필요한 실정이다.

우리 나라에서도 지진 발생빈도와 그로 인한 피해 가능성이 증가하면서, 신축 또는 기존구조물의 지진거동 파악 및 내진설계 등에 많은 노력과 비용이 투입되고 있다. 특히 기반시설로서 중요한 역할을 수행하는 교량의 구성요소 중에서 교각은 지진하중에 대하여 매우 취약한 곳으로 내진설계 규정이 없었던 과거에 시공된 교각에 대한 내진성능 검토가 요구되고 있으며 내진설계가 되지 않은 교각을 현행 내진설계 규정에 만족시키기 위해서 교각을 전면 교체하는 것보다는 보강을 통하여 교각의 성능을 향상시키는 경제적인 방안에 관한 관심이 모아지고 있다. 따라서 지진하중 같은 반복하중을 받는 철근콘크리트 부재의 내진성능평가를 위한 적절한 해석기법의 개발이 이루어진다면, 해석적인 방법에 의해서 철근콘크리트 부재의 균열발생에서 파괴에 이르기까지의 거동을 예측함으로써 실제 철근콘크리트 교각구조의 지진응답특성의 파악과 내진설계 및 검토 등에 충분히 활용될 수 있을 것이다.

\* 정회원, 성균관대학교 건축·조경 및 토목공학 연구소 연구원, 공학박사

\*\* 정회원, 중앙대학교 토목공학과 교수, 공학박사

\*\*\* 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 교수, 공학박사

## 2. 비선형 유한요소해석 프로그램

### 2.1 철근콘크리트의 비선형 재료모델

철근콘크리트는 복합재료이며, 재료의 비선형성은 타구조재료에 비해 극히 복잡하다. 특히 균열발생 후의 비선형성은 현저하게 나타나며, 이러한 재료적 비선형성에 대해서는 철근콘크리트 요소의 직교이방성의 가정에 따라, 균열직각방향으로 콘크리트가 부담하게 되는 인장응력을 고려하기 위한 인장강성모델과 균열방향으로의 압축강성 저하를 고려하기 위한 압축강성모델 및 균열면에서의 전단전달효과를 고려하기 위한 전단전달모델을 각각 적용한다<sup>1,2)</sup>.

### 2.2 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST

이 연구에서는 저자 등에 의하여 그 동안 개발된 철근콘크리트 평면응력요소<sup>1,2)</sup> 그리고 경계면요소<sup>1,2)</sup> 등을 미국 버클리 대학의 Taylor가 개발한 범용 유한요소해석 프로그램인 FEAP<sup>3)</sup>에 이식하여 모듈화된 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST(Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)<sup>2)</sup>를 수정하여 사용하였다.

## 3. 손상지수를 이용한 내진성능평가 기법

손상지수는 구조물의 손상된 정도를 평가할 수 있는 편리한 방법으로서 하중 재하에 따른 구조물의 손상정도를 수치적으로 표현하며 전체 구조물의 성능특성을 나타내는 지수로서 최근 들어 기존 구조물의 비선형 거동특성의 파악과 내진성능 평가를 위하여 사용되는 경우가 많아지고 있다.

이 연구에서는 비선형 유한요소해석시 계산되는 각 요소의 가우스 적분점에서의 변형률로부터 직접 요소레벨의 손상지수를 산정하였다. 신뢰성 있는 비선형 유한요소해석은 구조물의 강성저하, 강도저감, 피로손상, 그리고 이력곡선의 에너지 방출 등을 고려하고 있으므로 손상정도를 평가하기에 충분한 정보를 보유하고 있다고 할 수 있다.

구조물의 손상지수와 구조물의 상태와의 관계는 보수가 가능한 손상지수 값 0.1은 주철근의 항복이 일어나기 전으로서 경미한 휨균열이 발달한 상태로, 보수가 불가능한 손상지수 값 0.4는 주철근이 항복한 후 매우 큰 휨 또는 전단균열에 의해서 콘크리트의 피복이 박리된 상태로, 파괴 시점의 손상지수 값인 0.75는 주철근의 파단이 일어나기 시작한 상태로, 그리고 손상지수 값 1.0은 주철근이 대부분 파단되어 붕괴된 상태로 설명할 수 있다.

위의 관계를 콘크리트 및 철근에 각각 적용하여 요인별 손상지수를 정하고 그 중 큰 값을 요소레벨의 손상지수로 하는 것으로 한다(표 1).

표 1 요소레벨의 손상지수

Item		Failure Criterion ( $\epsilon_{cu}$ or $\epsilon_{tu}$ )	Damage Index ( $D.I._e$ )
Concrete	Compressive and Shear	$0.004 + \frac{1.4 \rho_s f_{yh} \epsilon_{sm}}{f'_{cc}}$	$1 - ftg_c \left( \frac{2 \epsilon_{cu} - \epsilon_{cs}}{2 \epsilon_{cu}} \right)^2$
Steel	Tensile	0.10	$1.20 \left( \frac{\epsilon_{ts}}{2 ftg_r \epsilon_{tu}} \right)^{0.67}$

- \*  $\rho_s$  = transverse confining steel ratio;  $f_{yh}$  = yield stress of the confining steel
- $\epsilon_{sm}$  = steel strain at maximum tensile stress;  $f'_{cc}$  = confined concrete compressive strength
- $ftg_c$  = fatigue parameter for concrete;  $ftg_r$  = fatigue parameter for steel
- $\epsilon_{cs}$  = compressive strain in analysis step;  $\epsilon_{ts}$  = tensile strain in analysis step

#### 4. 해석 예 및 고찰

이 연구에서 제안한 해석기법과 모델의 타당성을 검증하기 위해서 그림 1에 나타난 것과 같은 철근 콘크리트 교각의 실험체<sup>4)</sup>를 선정하였다. 이 실험체를 해석 예로 채택한 이유는 손상지수를 이용한 내진성능평가 기법의 유사동적실험에의 적용성을 확인하기 위해서이다. 세부적인 구조제원, 재료물성, 그리고 재하방법 등은 참고문헌<sup>4)</sup>에 자세히 설명되어있다.

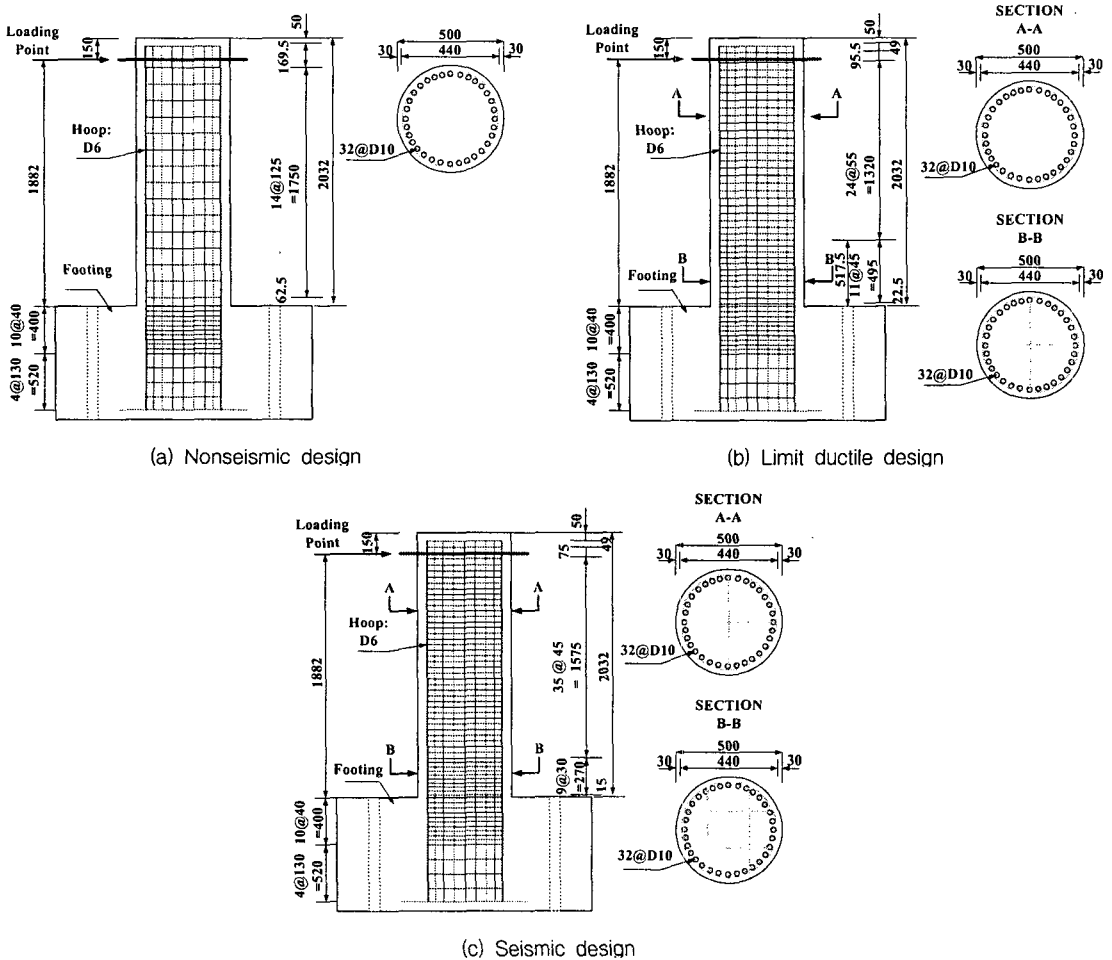


그림 1 실험체의 제원

이 실험체에 대한 해석결과를 실험결과와 비교하여 표 2에 나타내었다. 이로부터 이 연구에서 제안하고 있는 손상지수에 의한 내진성능평가 기법은 각 하중단계의 손상이나 파괴를 전반적으로 잘 평가

하고 있음을 알 수 있다.

표 2 재하 단계별 손상지수

Sequential input acceleration	Test specimen					
	Nonseismic design		Limited ductile design		Seismic design	
	Experiment	Analysis	Experiment	Analysis	Experiment	Analysis
0.154g	Cracking	0.24	Cracking	0.15	Cracking	0.12
0.220g		0.29		0.20		0.15
0.300g		0.32		0.20		0.18
0.400g		0.36		0.29		0.25
0.500g	Spalling	0.41		0.36		0.30
0.600g	Buckling	0.47	Spalling	0.44		0.39
0.700g	Fracture	0.54	Buckling	0.54	Spalling	0.48
0.800g		0.63		0.63		0.60
0.900g		0.99	Fracture	0.72	Fracture	0.68
1.000g		0.99		0.99		0.94

## 5. 결 론

이 연구를 통하여 다양한 하중을 받는 철근콘크리트 교각의 탄성, 비탄성, 그리고 극한영역에 이르는 비선형 거동을 정확하게 해석할 수 있었으며, 동시에 손상지수를 이용하여 내진성능평가가 가능한 비선형 유한요소해석 프로그램 RCAHEST(Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Technology)를 개발하였다. 이 해석프로그램은 철근콘크리트 평면응력요소, 경계면요소 등을 사용하여 철근콘크리트의 교각의 재료적 비선형성을 고려할 수 있도록 하였다.

## 감사의 글

이 연구는 한국과학재단 지원, 지진공학연구센터(KEERC)의 연구비 지원에 의하여 이루어졌음을 밝히며 지원에 감사드립니다.

## 참고 문헌

- Kim, T. H., Lee, K. M., Yoon, C. Y., and Shin, H. M., "Inelastic Behavior and Ductility Capacity of Reinforced Concrete Bridge Piers under Earthquake. I: Theory and Formulation," Journal of Structural Engineering, ASCE, 2003, Vol. 129, No. 9, pp. 1199-1207.
- 김태훈, "비선형 유한요소해석을 이용한 철근콘크리트 교각의 내진성능평가," 박사학위 논문, 성균관대학교, 2003.
- Taylor, R. L., FEAP - A Finite Element Analysis Program, Version 7.2, Users Manual, Volume 1 and Volume 2, 2000.
- Chung, Y. S., and Park, J. H., "Seismic Performance Evaluation of RC Bridge Piers with Limited Ductility by Pseudo Dynamic Test." KEERC-MAE Joint Seminar on Risk Mitigation for Regions of Moderate Seismicity, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2001.