

## 포인트 힌지 모델을 적용한 철근콘크리트 교량의 지진응답 해석

### Earthquake Response Analysis of a RC Bridge employing a Point Hinge Model

이도형\*                      전종수\*\*                      박대효\*\*\*  
Lee, Do-Hyung              Jeon, Jongsu                  Park, Taehyo

---

#### ABSTRACT

Simplified modeling approach for the seismic behavior of a reinforced concrete bridge is investigated in this paper. For this purpose, a hysteretic axial-flexure interaction model was developed and implemented into a nonlinear finite element analysis program. Thus, the seismic response of reinforced concrete bridge piers was evaluated by the simplified point hinge representations. Comparative studies for reinforced concrete bridge piers indicated that the analytical predictions obtained with the new formulations showed a good correlation with experimental results. In addition, seismic response analysis of a reinforced concrete bridge utilizing the simplified point hinge model revealed the adequacy and applicability of the present development.

---

#### 1. 서론

미국의 지진역사에 있어서 가장 큰 지진중의 하나인 1994년에 발생한 노스리지 지진에서 많은 철근콘크리트 구조물, 특히 교량의 교각들은 해석기법 및 설계방법에 있어서 많은 진보가 있어왔음에도 불구하고, 여전히 취약성을 나타내었다.<sup>(1)</sup> 철근콘크리트 교량의 전반적인 내진응답은 주로 교각의 이력응답에 의해 좌우되기 때문에 이들 교각의 이력응답을 정확하게 예측할 수 있는 모델의 개발이 내진설계에 있어 주요한 요소가 되어진다.

이상적이고 정확한 해석을 위해서는 이들 모델들은 철근콘크리트 교각의 재료, 즉 철근과 콘크리트 각각의 재료거동에 기초를 둔 파이버요소(fiber element)의 사용이 요구되지만 이들 요소들을 이용한 대형 구조물의 동적 시간이력 해석은 많은 노력과 시간을 필요로 한다. 따라서 동적 시간이력 해석의 용이성을 위하여

---

\* 정회원 · 배재대학교 토목환경공학과 조교수

\*\* 학생회원 · 한양대학교 토목공학과 석사과정

\*\*\* 정회원 · 한양대학교 토목공학과 조교수

또 다른 해석방법으로서 철근콘크리트 부재의 물리적이고 실험적인 거동에 기초를 둔 거시적 모델 (macroscopic model)을 이용한 단순화된 포인트 힌지 모델 해석기법이 널리 사용되어져 왔다.<sup>(2)(3)</sup>

이 포인트 힌지 모델 해석방법은 철근콘크리트 부재의 비탄성 거동을 하나의 스프링 요소로서 모델링할 수 있기 때문에 복잡한 구조물을 단순화된 형태로 모델링하여 동적 시간이력 해석을 효과적으로 수행할 수 있는 장점이 있다.

포인트 힌지 모델을 이용한 대부분의 연구들은 일정한 축력의 작용하에서 수행되어져 왔다. 하지만 철근 콘크리트 교량의 교각들은 지진하중에 종속되어 있을 때 수직방향의 지진하중에 의해서 축력의 변화를 경험 하게 되는데, 최근 일련의 지진에서 알 수 있듯이 수직방향의 지진하중은 수평방향의 지진하중에 비해서 무시할 수 없을 정도로 큰 가속도 신호를 보여주었다. 수직방향의 지진하중은 철근콘크리트 교각의 축력에 시간에 따른 변화를 유발시켜, 부재의 강도, 강성, 연성 및 에너지 발산능력에 큰 영향을 미치게 된다.

따라서 본 연구에서는 축력의 변화를 고려하지 않은 경우와 고려한 경우에 대하여 각각의 포인트 힌지 거시적 모델을 개발한 후 대형구조해석 프로그램인 INDYAS<sup>(4)</sup>를 이용한 수치해석결과와 철근콘크리트 부재의 실험결과와의 비교 검증을 수행하였다. 또한 실제 지진하중하에서 심하게 손상을 입은 철근콘크리트 교량에 대해 해석적인 모델을 단순화한 형태로 개발한 후 내진 시간이력 해석을 수행하여 포인트 힌지 모델의 적합성 및 축력의 영향을 분석하였다. 포인트 힌지 거시적 모델을 이용한 내진 시간이력 해석을 수행하기 위해서는 잘 정의된 단조증가하중 하에서의 포락선 및 이력법칙들이 필요로 되는데 다음 절에서 설명되었다.

## 2. 포락선 및 이력 모델

### 2.1. 포락선

단조증가 하중상태 하에서의 포락선을 구하기 위하여 수정된 압축장 이론(Modified Compression Field Theory, 이하 MCFT)<sup>(5)</sup>이 유도되었다. MCFT는 단조증가 하중상태 하에서 강도 저하가 일어나기 전까지의 휨 강도와 휨 변형과의 관계곡선 뿐만 아니라 전단강도와 전단변형 사이의 관계식을 유도해 낼 수 있다. MCFT는 막 요소의 실험으로부터 개발되어 철근콘크리트 부재의 실험결과와의 좋은 상관관계를 보여주었다.<sup>(6)</sup> 이 이론은 적합성(compatibility), 평형성(equilibrium) 그리고 평균응력과 평균변형률(average stress-average strain) 사이의 관계식들로 이루어져 있다. 하지만 모델 개발시 사용되었던 콘크리트 압축부의 응력과 변형률 사이의 관계식은 횡방향 구속철근으로 구속된 심부콘크리트의 거동예측에는 적합하지 않기 때문에, 본 연구에서는 횡방향 구속철근으로 구속된 심부콘크리트의 압축응력과 압축변형률 사이의 거동 예측을 위하여 Mander et al.<sup>(7)</sup>에 의해서 제안된 모델을 사용하였다. Mander et al. 모델<sup>(7)</sup>은 단순성 뿐만 아니라 여러 다양한 형태를 갖는 단면에서의 적용이 용이한 이점이 있는 관계로 인하여 선택되었다. Mander et al. 모델<sup>(7)</sup>을 포함한 수정된 압축장 이론을 적용하여 단조증가 하중상태 하에서의 본 연구에서 제안된 철근콘크리트 부재의 포락선은 그림 1에 보여져 있고, 자세한 해석과정은 기 발표된 논문에서 찾아볼 수 있다.<sup>(8)</sup>

### 2.2. 이력모델

일정한 축하중 및 주기적인 수평하중이 작용하고 있는 철근콘크리트 부재의 이력응답 거동을 묘사하기 위하여 2.1. 절에서 언급된 포락선을 기본으로 하는 이력법칙 모델이 필요로 된다. 본 연구에서는 Takeda et al.<sup>(9)</sup>에 의해서 개발된 이력모델 법칙을 채택하였다. 이 모델은 철근콘크리트 부재 및 구조물의 지진응답 해석에 아주 광범위하게 사용되어 왔고, 실험결과와의 좋은 상관관계를 보여주었다.<sup>(10)</sup>

Takeda et al.에 의해서 제안된 이력법칙들을 기본으로 하여, 연속적으로 변화하는 축하중 하에서의 이력 모델을 개발하였다. 변화하는 축하중을 고려한 이력모델의 기본개념은 먼저 MCFT를 사용하여 일정한 축하중 상태에서 유도된 다양한 일련의 포락선들을 구한 후, 어떤 하중단계에서의 강성은 그 하중단계에서의 축하중에 대응하는 포락선으로의 매끄러운 이동을 시킴으로써 계산된다. 따라서 이 이동은 축하중의 변화에 따른 철근콘크리트 부재 강성의 증가 혹은 감소를 나타낸다. 아울러, 개발된 모델에서는 축하중의 변화에 따른 균열하중, 항복하중 및 최대하중의 변화 또한 고려되었다. 축하중의 변화에 따른 강성의 이동은 그림 2에 도식적으로 나타내었다.

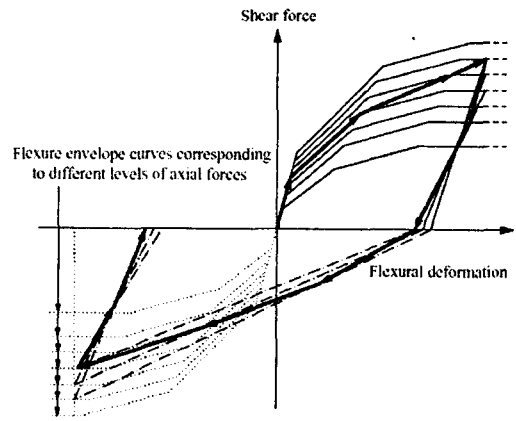
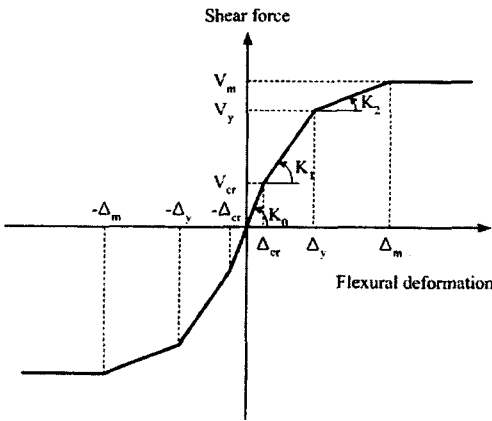


그림 1. 단조증가 하중상태하에서의 제안된 포락선      그림 2. 변화하는 축하중하에서의 강성의 이동

하지만 연속적으로 변화하는 축하중 상태에서 실험된 철근콘크리트 부재에 관한 연구가 극히 미비한 관계로 인하여 본 연구에서 개발된 모델은 일정한 축하중 상태에서 실험된 부재의 실험결과와의 비교검증을 실시하였다. 따라서 약간은 주관적이라 할 수 있기 때문에 축력의 변화를 고려한 모델의 타당성, 정확성, 및 응용성을 분석 제시하기 위하여 실제 지진에 의해서 파괴된 철근콘크리트 교량에 대하여 비선형 내진해석을 실시하였다.

### 2.3. 해석프로그램

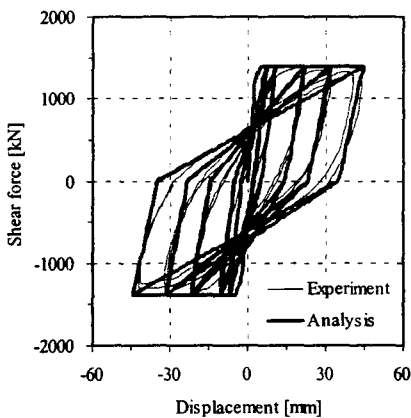
본 연구에서 개발된 축력의 변화를 고려하지 않은 경우 그리고 고려한 경우의 거시적인 휨 이력모델은 유한요소 구조해석 프로그램인 INDYAS<sup>(4)</sup>에 연결되었다. 이 프로그램은 2차원 및 3차원 구조물의 비탄성 및 비선형 응답거동 해석이 가능하며, 정적, 동적 및 고유치 해석을 수행할 수 있다. 이 프로그램은 이전의 많은 연구들로부터 그 적합성이 입증되어 왔으며, 본 연구에서 개발된 모델을 포함한 INDYAS 프로그램을 사용하여 부재단계에서의 검증 및 철근콘크리트 교량의 내진해석을 실시하였고 다음절에서 논의되었다.

### 3. 이력모델의 검증

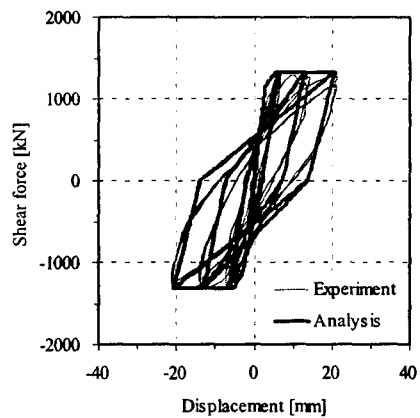
개발된 이력 모델의 타당성을 검증하기 위하여 개발된 모델을 포함한 해석결과와 기 발표된 논문의 실험 결과와의 비교 검토가 수행되었다. 연속적으로 변화하는 축력하에서 수행된 철근콘크리트 기둥에 대한 실험적인 연구결과가 극히 제한적인 관계로 인하여 일정한 축력하에서 수행된 실험결과와 비교 검토를 수행하였고, 축력의 변화를 고려한 이력모델은 철근콘크리트 교량의 비선형 시간이력 내진해석을 통해서 모델의 타당성 및 응용성을 분석 제시하였다. 본 연구에서 개발된 모델의 여러 단면형태로의 응용성을 검토하고자, Priestley et al.<sup>(11)</sup>과 Park et al.<sup>(12)</sup>에 의해서 각각 실험된 횡방향 띠철근으로 구속된 정사각형 단면과 횡방향 나선철근으로 구속된 정팔각형 단면을 갖는 철근콘크리트 기둥에 대해서 검토를 수행하였다. 대표적인 경우로서, 본 논문에서는 Priestley et al.<sup>(11)</sup>에 의해서 실험된 시편 Unit 1과 Park et al.<sup>(12)</sup>에 의해서 실험된 Unit 3을 선택하였고, 단면의 재료상세는 표 1에 주어져 있다. 시편에 관한 자세한 언급은 기 발표된 논문에서 찾아볼 수 있다.<sup>(11)(12)</sup>

표 1. 철근콘크리트 기둥 시편의 단면 재료상세

시편	압축강도 (MPa)	작용 압축하중 (kN)	횡방향 철근		종방향 철근	
			체적비	항복강도 (MPa)	체적비	항복강도 (MPa)
Unit 1	28.4	1920	0.0243	303	0.0075	300
Unit 3	21.4	2719	0.0179	375	0.0200	297



(a) Unit 1 (Priestley et al.<sup>(11)</sup>)



(b) Unit 3 (Park et al.<sup>(12)</sup>)

그림 3. 개발된 모델을 포함한 해석결과와 실험결과와의 이력응답곡선 비교

그림 3(a)와 (b)는 각각 Priestley et al.과 Park et al.의 시편 Unit 1과 Unit 3의 해석결과와 실험결과와의 이력응답곡선을 비교해 주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 Unit 1과 Unit 3 모두 해석결과와 실험결과와의 초기강도 및 강성이 실험결과에 비해서 약간 큰 것을 볼 수 있는데 이는 단조증가하중 하에서 유도된 포락선의 영향으로

사료된다. 즉, 시편의 실험시 미끄러짐(slip) 및 균열하중 이후 콘크리트 박리(spalling) 등의 영향으로 인하여 일어날 수 있는 초기강성의 저하 때문인 것으로 판단된다. 그럼에도 불구하고, 개발된 모델을 포함한 해석결과는 단면의 형태와 관계없이 강도, 강성 및 에너지 발산능력 등의 전반적인 비탄성 거동에 관하여 좋은 일 결과를 보여주고 있다. 표 2는 각각의 연성도에 대응하는 실험결과와 해석결과의 최대강도를 보여주고 있다. 표 2에서 알 수 있듯이 연성도의 단계가 증가함에 따라서 실험결과와 해석결과와의 차이가 감소하였고, 대략적으로 개발된 모델을 포함한 해석결과는 4~12 % 내외에서 실험결과와의 비교적 정확한 상관관계를 나타내었다.

표 2. 각각의 연성도에 대응하는 실험결과와 해석결과와의 최대강도 비교

시 편	각각의 연성도에 따른 최대강도 (kN)									
	$\mu = 1$		$\mu = 2$		$\mu = 4$		$\mu = 6$		$\mu = 8$	
	실험결과	해석결과	실험결과	해석결과	실험결과	해석결과	실험결과	해석결과	실험결과	해석결과
Priestley et al. Unit 1	1180.3	1380.0	1336.6	1380.0	1372.7	1380.0	1343.7	1380.0	1328.2	1380.0
Park et al. Unit 3	567.1	584.4	1225.5	1316.6	1267.7	1316.6	1258.1	1316.6	-	-

#### 4. 철근콘크리트 교량의 내진응답 해석

##### 4.1. 대상교량

본 연구에서 개발된 축력의 변화를 고려한 이력모델의 타당성을 입증하기 위하여 1994년 미국 노스리지 지진에서 심하게 손상을 입은 철근콘크리트 교량에 대하여 내진해석을 수행하였다. 이 교량은 산타모니카에 있는 La Cienga-Venice Boulevard undercrossing인 I-10의 Collector-Distributor의 일부분으로서, 많은 기둥으로 이루어진 Bent 5, 단일 교각들인 Bent 6, 7, 8, 그리고 전단벽으로 이루어진 Bent 9로 구성되어 있다. 이 대상교량의 모든 Bent의 기둥들은 지름이 1219 mm인 원형 철근콘크리트 단면으로 이루어져 있다. Bent 6과 8은 전체 높이에 걸쳐 심한 균열과 박리 등이 발생되었으나, Bent 7은 손상을 입지 않았다. 그림 4는 Bent 6의 파괴형태를 보여주고 있고, 교량에 대한 자세한 언급은 기 발표된 논문에서 찾아볼 수 있다.<sup>(13)</sup>



그림 4. Bent 6 교각의 손상형태

##### 4.2. 해석 모델

축력의 변화를 고려한 이력응답모델의 타당성을 검증하기 위하여 대상교량에 대하여 두가지 경우의 해석 모델을 구성한 후 시간이력 내진해석을 수행하였다. 우선, 재료거동에 기본을 둔 파이버 요소 해석모델을 이용하여 대상교량을 해석한 후, 개발된 이력응답모델을 포함한 포인트 힌지 모델을 이용한 대상교량의 해석결과와의 비교검토를 수행하였다. 또한, 포인트 힌지 모델의 경우, 교각의 축력변화에 대한 예민성을 조사하고자, 축력의 변화를 고려하지 않은 경우와 축력의 변화를 고려한 경우로 각각 나누어서 해석을 수행하였다.

### 4.3. 시간이력 내진해석

시간이력 내진해석에 사용된 입력 지진파는 La Cienega-Venice undercrossing에 가장 가까운 관측소인 Santa Monica에 있는 시청 부지에서 기록되었으며, 횡방향(0.883g), 종방향(0.346g), 그리고 축방향(0.230g)의 세 가지 지진파를 동시에 고려하여 시간이력 해석을 수행하였다.

그림 5와 6은 각각 Bent 6의 횡방향 변위 시간이력 응답과 밀면전단력 시간이력 응답거동을 보여주고 있다. 그림 5에서 보는 바와 같이 최대 진폭이 일어나는 13초 부근에서 포인트 힌지 모델이 파이버 요소 모델에 비해서 15% 정도 큰 값을 보여주는데 이는 포인트 힌지 모델 포락선의 선형화 과정에서 일어나는 오차로 사료된다. 그럼에도 불구하고 전반적인 진동주기에 있어서는 좋은 상관관계를 보여주고 있다. 그림 6의 횡방향 밀면전단력의 시간이력 응답 비교에서도 전반적으로 정확한 일치치를 보여주고 있다.

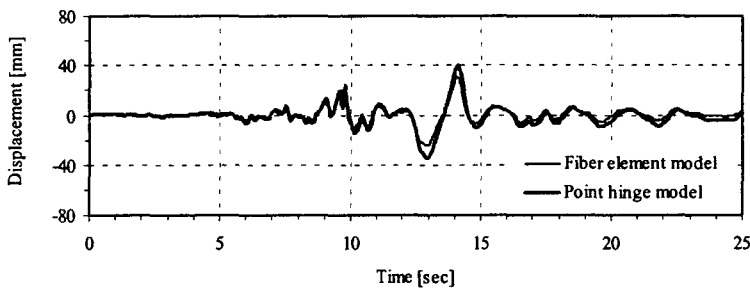


그림 5. Bent 6의 횡방향 시간이력 응답 비교

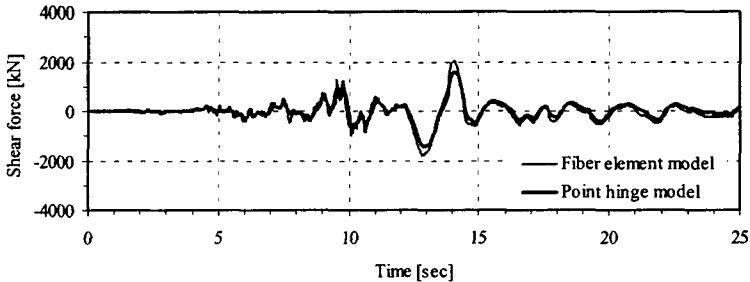


그림 6. Bent 6의 횡방향 밀면전단력 시간이력 응답 비교

또한, 철근콘크리트 교량 교각의 축력의 변화에 대한 예민성을 검토하기 위하여 축력의 변화를 고려하지 않은 경우와 축력의 변화를 고려한 경우의 이력응답곡선을 비교하였는데 이는 그림 7에서 보여주고 있다. 그림 7(a)와 (b)는 Bent 8의 축력의 변화를 고려하지 않은 경우와 축력의 변화를 고려한 각각의 경우에 있어서 횡방향 이력응답거동을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이, 축력의 변화를 고려한 경우의 이력응답 거동은 고려하지 않은 경우보다 강성의 저하정도가 심하였으며 그에 따른 변위의 증가와 함께, 하중지지능력

또한 현저하게 감소하는 것을 알 수 있었다. 따라서 철근콘크리트 교량의 내진해석시 축력의 변화에 대한 고려가 이루어져야 한다는 것을 알 수 있었다.

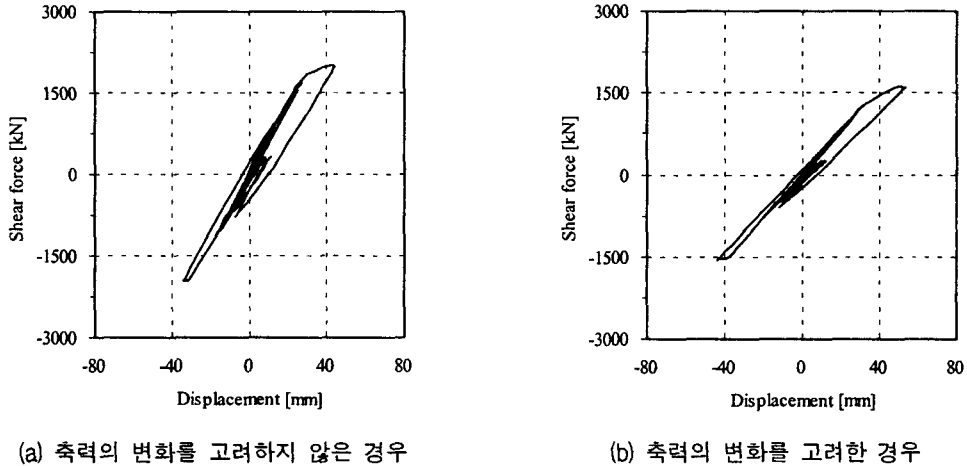


그림 7. 축력의 변화를 고려하지 않은 경우와 고려한 경우 Bent 8의 횡방향 이력응답곡선

## 5. 결론

본 연구에서는 거시적인 모델을 이용한 포인트 힌지 모델을 개발하여, 기 발표된 논문의 철근콘크리트 기둥 시편 및 실제 지진하중에 의해서 손상을 입은 철근콘크리트 교량에 대해서 내진해석을 수행하였다. 개발된 모델을 포함한 철근콘크리트 기둥에 대한 해석결과는 대략적으로 10% 내외에서 실험결과와의 좋은 상관관계를 보여주었다. 아울러, 연속적으로 변화하는 축력의 영향을 고려한 포인트 힌지 모델의 타당성을 제시하고자 수행된 철근콘크리트 교량의 시간이력응답 해석에서 보여준 것처럼, 복잡한 파이버 요소 모델을 이용한 해석결과와 좋은 상관관계를 보여주었다. 또한 철근콘크리트 교량 교각의 강도, 강성 및 변위능력은 축력의 변화에 크게 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 종합적으로, 복잡한 철근콘크리트 교량의 내진해석시, 본 연구에서 개발된 포인트 힌지 모델을 적용하여 비교적 정확하면서도 단순화된 시간이력 해석을 수행할 수 있을 것으로 사료된다.

## 감사의 글

"이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2002-003-D00366)." 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고 문헌

1. Broderick, B.M., Elnashai, A.S., Ambraseys, N.N., Barr, J.M., Goodfellow, R.G., and Higazy, E.M., "The Northridge (California) Earthquake of 17 January 1994: Observations, Strong Motion and Correlative Response Analyses," *ESEE Research Report No. 94-4*, Imperial College, London, 1994

2. Saatcioglu, M., Derecho, A.T., and Corley, W.G., "Modelling Hysteretic Behaviour of Coupled Walls for Dynamic Analysis," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.11, 1983, pp.711-726
3. Filippou, F.C., and Issa, A., "Nonlinear Static and Dynamic Response of Reinforced Concrete Frames," *Proceedings of Fourth U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Palm Springs, California, 1990
4. Elnashai, A.S., Pinho, R., and Antoniou, S., "INDYAS-A Program for INelastic DYnamic Analysis of Structures," *ESEE Research Report No. 00-2*, Imperial College, London UK, 2000
5. Vecchio, F.J., and Collins, M.P., "The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear," *ACI Structural Journal*, Vol.83, No.2, 1986, pp.219-231
6. Keshavarzian, M., and Schnobrich, W.C., "Analytical Models for the Nonlinear Seismic Analysis of Reinforced Concrete Structures," *Engineering Structures*, Vol.7, 1985, pp.131-142
7. Mander, J.B., Priestley, M.J.N., and Park, R., "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete," *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol.114, No.8, 1988, pp.1804-1826
8. Lee, D.H., and Elnashai, A.S., "Seismic Analysis of RC Bridge Columns with Flexure-Shear Interaction," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol.127, No.5, 2001, pp.549-553
9. Takeda, T., Sozen, M.A., and Nielsen, N.N., "Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes," *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol.96, No.12, pp.2557-2573
10. Vecchio, F.J., and Collins, M.P., "Predicting the Response of Reinforced Concrete Beams Subjected to Shear Using the Modified Compression Field Theory," *ACI Structural Journal*, Vol.85, No.3, 1988, pp.258-268
11. Priestley, M.J.N., Park, R., and Potangaroa, R.T., "Ductility of Spirally-Confined Concrete Columns," *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol.107, No.1, 1981, pp.181-202
12. Park, R., Priestley, M.J.N., and Gill, W.D., "Ductility of Square-Confined Concrete Columns," *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol.108, No.4, 1982, pp.929-950
13. Lee, D.H., and Elnashai, A.S., "Inelastic Seismic Analysis of RC Bridge Piers Including Flexure-Shear-Axial Interaction," *Structural Engineering and Mechanics*, Vol.13, No.3, 2002, pp.241-260