

## 주기하중을 받는 철근콘크리트 기둥의 휨-전단간의 상호거동

이도형

배재대학교 토목환경공학과

### Flexure-Shear Interaction Behavior of RC Columns under Cyclic Loading

Do Hyung Lee

**요 약** : 본 연구에서는 주기적인 하중하에서의 철근콘크리트 기둥의 이력응답거동을 예측할 수 있는 해석적인 모델의 개발을 다루고 있다. 철근콘크리트 기둥의 비탄성 휨, 전단 및 휨-전단 변형은 개발된 모델을 통하여 주기적인 변위하에서 검토되었다. 개발된 모델들을 포함한 해석치와 실험치와의 비교분석을 통하여 본 연구에서 개발된 모델들의 검증을 실시하였고, 이 비교분석을 통하여 휨-전단간의 상호작용의 중요성을 강조하였으며, 본 연구에서 개발된 모델들의 정확성, 효율성 및 타당성을 입증하였다.

**주요어** : 주기하중, 이력응답, 해석모델, 휨-전단 상호작용

**ABSTRACT** : This study is on the development of analytic model that can predict the hysteresis response of steel-concrete under the periodic loads. Analytic value and experimental value including developed model were compared and interpreted. From the comparing interaction between torque and shear was focused on the its importance.

**Key words** : periodic load, interaction, torque, shear response

#### 1. 서 론

외부하중에 대해 응답하는 수행능력에 기초를 둔 내진설계(performance based seismic design)의 최근의 경향은 철근콘크리트 구조물의 해석시, 보다 정밀한 해석적인 모델을 요구하고 있다. 최근, 1994년 미국의 노스리지 지진과 1995년 일본의 고베 대지진에서 처럼 많은 수의 철근콘크리트 교량교각들은 지진 하중하에서 취약성을 나타내었으며, 이들 부재들중 상당수가 심한 전단파괴를 일으켰다. 이러한 심한 파괴의 주원인은 이들 교각들이 위의 지진하중 (비록 위의 지진들이 설계기준지진하중을 초과했다 할지라도) 에

저항할 만큼의 충분한 전단강도와 연성을 가지고 있지 않았다는 것을 입증하였다. 따라서 주기하중 및 지진 하중하에서 전단강성, 전단강도 그리고 전단변위에 대한 응답을 예측할 수 있는 해석적인 모델에 대한 개발은 시급한 실정이다. 또한 위의 해석적 모델들은 전단 뿐만 아니라 다른 하중형태, 즉 휨과의 상호작용 또한 포함해야 한다. 최근까지의 연구결과 철근콘크리트 부재의 휨거동에 관한 예측은 비교적 정확하게 수행되어 지는 반면에 전단강도 및 전단변형에 관한 연구는 여전히 미비한 실정이다. 따라서 휨과 전단거동에 관한 철근콘크리트 부재, 특히 기둥에 관한 연구는 집중적인 연구의 대상이 되어왔다. 전단강도의 예측에 관한

Corresponding Author : 이도형(dohlee@mail.pcu.ac.kr)

원고접수일 : 2003년 9월 5일 게재승인일 : 2003년 11월 10일

다양한 모델들(Watanabe and Ichinose 1991; Priestley *et al.* 1994) 뿐만 아니라, 전단강도와 전단변형간의 응답을 예측할 수 있는 모델들(Vecchio and Collins 1986; Hsu 1988)이 많이 개발되었다.

하지만 이들 모델들은 단조증가하는 하중상태 하에서 개발되었기 때문에 지진하중과 같은 주기하중을 받는 철근콘크리트 부재의 응답거동 해석에로의 직접적인 적용은 어렵기 때문에, 주기하중하에서의 이력거동을 예측할 수 있는 정확한 모델이 필요하다. 최근까지 휨 이력응답 거동을 예측할 수 있는 모델들 (Takeda *et al.* 1970; Riddell and Newmark 1978; Saiidi and Sozen 1979) 그리고 전단 이력응답 거동을 예측할 수 있는 모델들 (Maruyama *et al.* 1984; Ozcebe and Saatcioglu 1989) 이 많이 개발되었다. 하지만 휨과 전단간의 상호작용에 의한 응답거동에 대한 연구는 최근까지도 아주 미비한 실정이다. 철근콘크리트 부재의 해석시, 전단변형을 무시할 경우, 휨변형을 과대평가하게 되고 동시에 전체변형을 과소평가하게 된다. 전체변형의 과소평가는 축력과 횡변위간의 응답을 과소평가하게 되어 부재의 안정성 검토에 심한 오류를 범하게 된다. 이렇듯 휨과 전단간의 상호작용에 관한 응답은 질적으로 인식하고 있는 반면에 이 거동의 양적인 연구는 아주 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 휨과 전단간의 비탄성 상호응답거동을 비교적 정확하게 예측할 수 있는 단순응답모델을 개발하여, 유한요소 구조해석 프로그램인 INDYAS (Elnashai *et al.* 2000) 에 연결시킨 후, 실험치와의 비교검증을 통해서 개발된 모델의 타당성을 입증하였다.

## 2. 단순증가하중하에서의 포락선 및 이력응답모델

### 2.1 포락선

이력관계식에 사용될 단순증가 하중하에서의 포락선은 수정된 압축장 이론(Modified Compression Field Theory 1986, 이하 MCFT) 으로부터 유도되었다. 이 이론은 원래 막 요소의 실험으로부터 개발되었으며, 그후, 철근콘크리트 부재로 확대되어 실험치와의 좋은 상관관계를 보여주었다. 이 이론은 단순증가하중하에서, 강도저하가 일어나기 전까지의 휨강도와 휨변형

뿐만 아니라 전단강도와 전단변형사이의 관계식을 유도할 수 있는 장점이 있다. 이 이론은 크게 적합성 (compatibility), 평형성(equilibrium) 그리고 평균응력과 평균변형율(average stress-average strain) 사이의 관계식들로 이루어져 있다. 하지만 이 모델에서 사용된 콘크리트 압축부에서의 응력과 변형율 사이의 관계식은 횡방향 철근으로 구속된 심부콘크리트의 거동예측에는 적합하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 다양한 종류의 횡방향 구속철근으로 구속된 심부콘크리트의 압축영역에서의 응력과 변형율 사이의 정확한 거동예측을 위하여 Mander *et al.*(1988) 모델을 이용하여 이론식을 수정하였다. 언급된 내용들에 관한 완전한 해석절차는 기 발표된 논문에서 찾아볼 수 있다 (Lee 1999).

### 2.2 이력응답모델

하중의 재하 및 비재하, 그리고 하중의 재 재하에 관한 응답거동을 위하여 일련의 이력법칙 모델이 필요로 된다. 본 연구에서 사용된 이력법칙 모델로서, 휨 이력모델의 경우, Takeda *et al.*(1970)에 의하여 개발된 모델을 기본으로 하였다. 이 휨 이력모델은 철근콘크리트 부재 및 구조물의 응답해석에 아주 광범위하게 사용되었고 실험치와의 좋은 상관관계를 보여주었다. 전단 이력모델의 경우, Ozcebe and Saatcioglu (1989)에 의해서 제안된 모델을 기본으로 하였다. 위의 두 모델, 즉 휨과 전단 이력모델들이 비록 실험치와의 좋은 상관관계를 보여주었다 할 지라도, 제한된 실험데이터에 의해서 유도되었기 때문에 비탄성 시간 이력 해석에로의 직접적인 적용은 어려운 점이 있다. 따라서 본 연구에서는 위의 모델들의 비탄성 시간이력 내진해석에로의 직접적인 응용을 위하여 다양한 가정에 기초를 둔 새로운 모델들을 개발하였다. 이 새로이 개발된 모델들은 다음 절에서 설명하게 될 실험치와의 비교검증 및 분석을 통해서 그 타당성을 입증하였고, 새로이 개발된 모델들에 대한 설명은 기 발표된 논문에서 찾아볼 수 있다(Lee and Elnashai 2001).

### 2.3 해석프로그램

본 연구에서 개발된 휨과 전단간의 상호거동 이력

응답 예측을 위한 거시적인 모델은 파이버(fiber) 단면 해석을 이용한 유한요소 구조해석 프로그램인 INDYAS (Elnashai *et al.* 2000)에 연결시켰다. 이 구조해석 프로그램은 2차원 및 3차원 구조물의 비탄성 및 비선형 거동응답해석이 가능하며, 정적, 동적 및 고유치 해석을 수행할 수 있다. 이 프로그램은 여러 가지 다양한 요소와 단면 그리고 재료모델들을 포함하고 있으며, 이전의 많은 연구들로부터 이 프로그램의 적용성이 입증되어왔다. 따라서 본 연구에서는 개발된 모델들을 포함한 구조해석 프로그램 INDYAS 를 이용하여 실험치와의 비교검증 및 분석을 실시하였고, 그에 대한 자세한 설명은 다음 절에서 논의되었다.

### 3. 철근콘크리트 부재 해석 및 검증

개발된 모델들의 타당성을 입증하기 위하여 개발된 모델을 포함한 해석적인 결과와, 기 발표된 논문의 실험치와의 비교검토가 수행되었다. 비교검증을 위한 시편은 크게 두가지로 나누어 수행되었다. 먼저, 휨 거동에 지배를 받는 시편들의 실험치와 해석치의 비교를 통하여 휨 이력모델의 검증을 수행하였고, 전단 거동에 주로 지배를 받는 시편들의 실험결과치와 해석치와

의 비교를 통하여 전단 이력모델 및 휨-전단 상호간의 응답거동, 즉 전단을 포함한 경우와 포함하지 않은 경우와의 비교분석 및 검증을 수행하였다.

#### 3.1 휨 거동에 지배를 받는 부재

Park *et al.*(1982)에 의해서 거의 실물크기의 철근 콘크리트 기둥실험이 실시되었고, 그중 두 개의 시편 UNIT 1과 UNIT 2가 본 연구의 비교분석 검증을 위해 선택되었다. 시편의 하중재하, 부재 및 단면의 형상과 치수, 그리고 사용된 철근에 관한 자세한 내용은 그림 1 에 나타나 있다.

그림 2(a)는 시편 UNIT 1 의 실험치와 전단을 포함하지 않은 해석치와의 이력응답거동 비교를 보여주고 있다. 비록 해석치의 초기강도가 실험치보다 약간 크다 할지라도 전반적인 비탄성 응답에 있어서 강도 및 강성의 저하를 비교적 정확하게 예측하였다. 그림 2(b)는 시편 UNIT 1의 실험치와 전단을 포함한 경우의 해석치와의 이력응답거동 비교를 보여주고 있다. 전단을 포함하지 않은 경우보다 전단을 포함한 경우의 해석치는 실험치와의 더 좋은 상관관계를 보여주는데 그 차이는 그다지 크지않았다. 이는 기대되었던 대로 휨에 지배를 받는 시편의 특성상, 전단의 효과는 작은

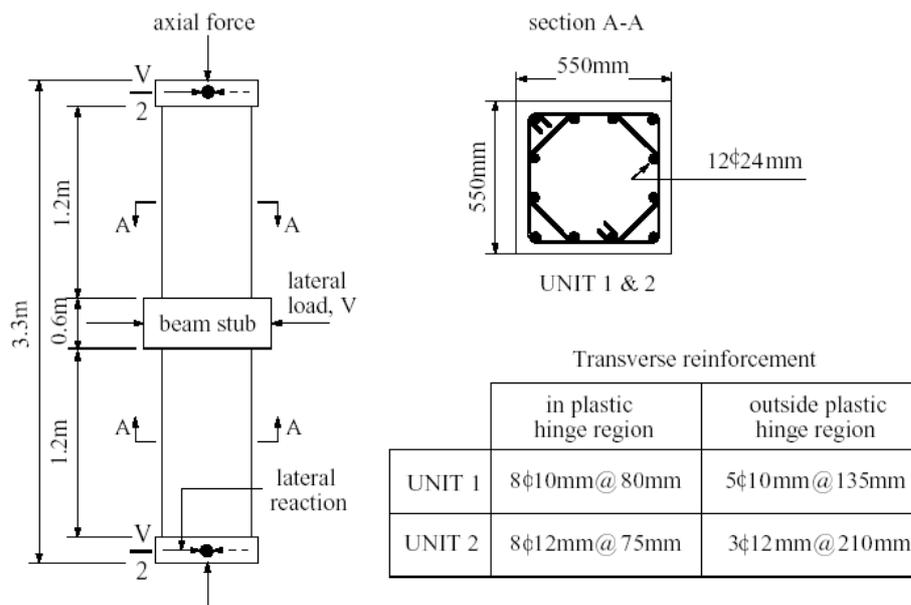


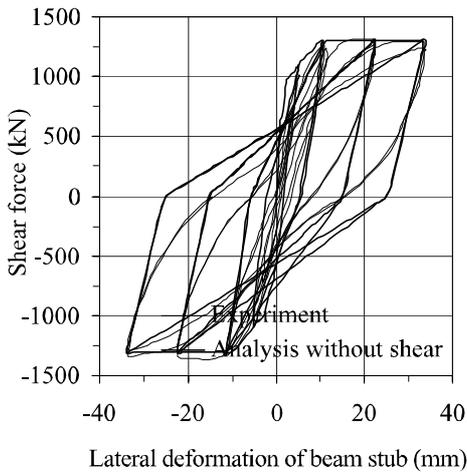
그림 1 시편의 하중재하, 부재의 형상 및 치수 그리고 철근의 상세 (Park *et al.* 1982)

것을 알 수 있다.

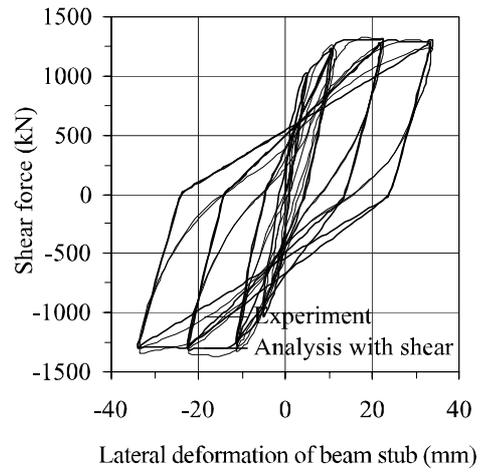
그림 3(a)와 (b)는 시편 UNIT 2에 대한 전단을 포함하지 않은 경우와 전단을 포함한 경우의 해석치와 실험치와의 비교를 보여주고 있다. 그림 2에서의 시편 UNIT 1과 마찬가지로 강도와 강성의 저하 그리고 에너지 발산능력에 있어서 실험치와의 좋은 상관관계를

보여주고 있다.

해석결과로부터 얻은 최대강도와 실험치와의 비교는 표 1에 보여져 있다. 표 1에서 보여주고 있는 것처럼, 해석치와 실험치와의 차이는 대략적으로 5% 미만에서 좋은 상관관계를 보여주고 있다.

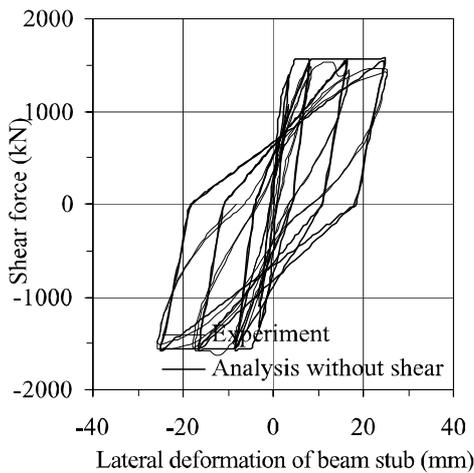


(a)

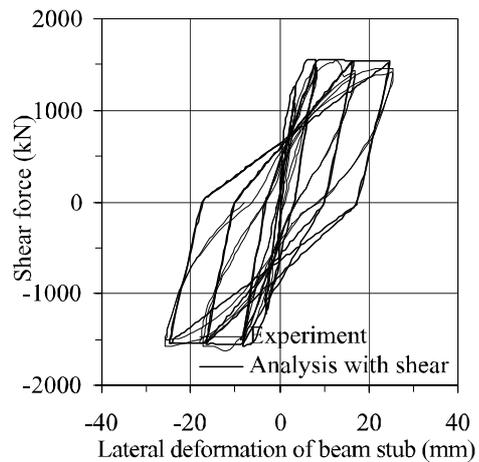


(b)

그림 2 시편 UNIT 1 의 이력응답 비교



(a)



(b)

그림 3 시편 UNIT 2 의 이력응답 비교

표 1 시편 UNIT 1 과 UNIT 2 의 해석치와 실험치 사이의 최대강도 비교

시 편	최대강도 (kN)		
	MCFT	INDYAS	Experiment
UNIT 1	1310	1293	1367
UNIT 2	1600	1562	1630

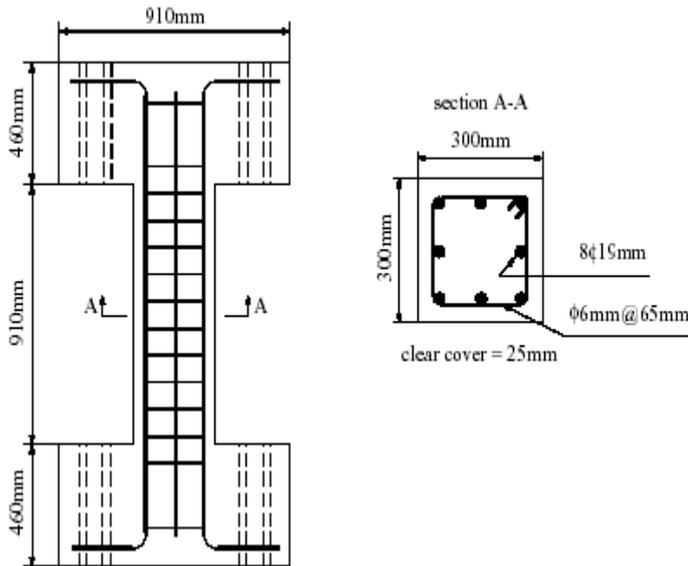


그림 4 시편의 형상과 치수 그리고 철근상세 (Maruyama et al. 1984)

### 3.2 전단거동에 지배를 받는 부재

Maruyama et al. (1984) 에 의해서 전단에 지배적인 짧은 철근콘크리트 기둥들에 대한 실험이 실시되었고, 본 연구에서 개발된 모델들의 비교검증을 위하여 압축의 축력을 받고 있는 대표적인 시편 120C-U 를 선택하여 해석치와 실험치와의 비교를 수행하였다. 시편의 상세는 그림 4에 나타나 있다.

그림 5(a)는 시편 120C-U 의 실험치와 전단을 포함한 경우의 해석치와의 비교를 나타내 주고 있다. 압축의 축력의 영향으로 강성저하의 비율이 상당하였는데, 전단을 포함한 해석치도 같은 경향을 나타내어 좋은 상관관계를 보여주고 있다. 반면에, 그림 5(b)는 시편 120C-U의 실험치와 전단을 포함하지 않은 경우의 해석치와의 비교를 보여주고 있다. 그림에서 보는 것처럼 전단을 포함하지 않은 경우의 해석치는 완전히 부적절한 것을 알 수 있는데, 이는 바로 본 연구에서

개발된 모델의 중요성을 강조해 주고 있다. 즉, 전단에 지배적인 거동을 나타내는 철근콘크리트 부재거동의 해석시 휨-전단간의 상호작용 응답거동을 예측할 수 있는 모델의 필요성을 강조해 주고 있다.

표 2는 시편 120C-U 의 여러 연성단계에서 실험치와 전단을 포함한 해석치와의 최대강도 비교를 보여주고 있다. 표 2에서 볼 수 있는 것처럼 대략적으로 10% 내외에서 좋은 상관관계를 보여주고 있다.

### 4. 결 론

휨과 전단거동에 관한 이력응답모델이 본 연구에서 개발되었으며, 비선형 정적 및 동적 구조해석 프로그램인 INDYAS에 연결되었다. 개발된 모델의 타당성을 검증하기 위하여 휨과 전단에 각각 지배적인 철근콘크리트 부재의 실험치를 선택하여 해석치와의 비교검토

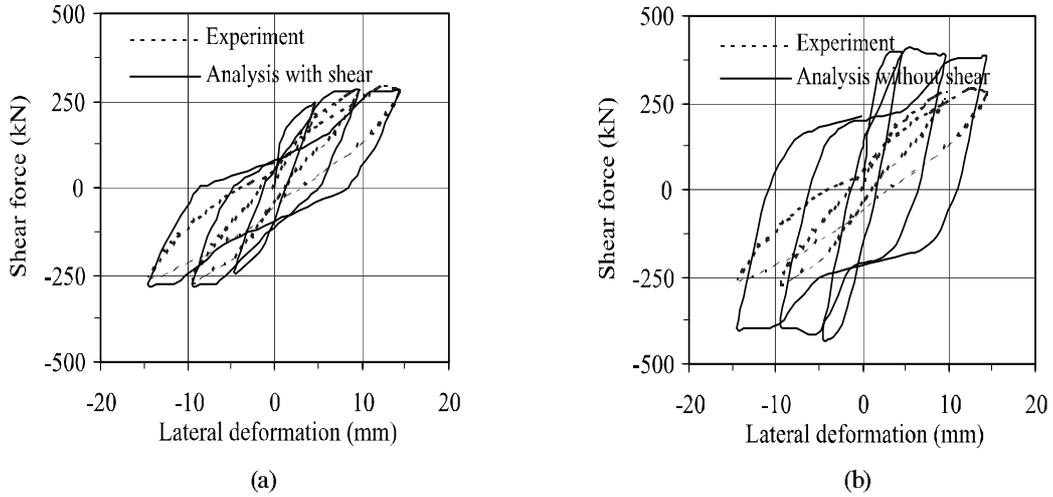


그림 5 시편 120C-U 의 이력응답 비교

표 2 여러연성단계에서 실험치와 전단을 포함한 해석치와의 최대강도 비교

시 편	각 주기에 대응하는 최대강도 (kN)					
	$\mu = 1$		$\mu = 2$		$\mu = 3$	
	실험치	해석치	실험치	해석치	실험치	해석치
120C-U	185.0	207.0	285.5	280.0	282.1	256.0

를 수행하였다. 본 연구에서 보여준 것처럼 전단응답은 파괴모드에 대단히 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있었다. 특히, 전단에 지배적인 철근콘크리트 부재의 거동 해석시, 휨거동에만 기본적인 유한요소해석은 전혀 타당하지 않았으며, 전단을 포함한 본 연구결과는 이들 부재의 강도, 강성 및 에너지 흡수능력을 비교적 정확하게 예측하였다. 따라서 철근콘크리트 부재의 이력응답 해석시 전단에 대한 고려가 이루어져야 된다는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

Watanabe, F. and Ichinose, T. (1991). Strength and ductility design of RC members subjected to combined bending and shear. Proceedings of workshop on Concrete Shear in Earthquake, University of Houston, Houston, Texas, pp. 429-438.  
 Priestley, M. J. N., Verma, R. and Xiao, Y. (1994). Seismic

shear strength of reinforced concrete columns. Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 120, No. 8, pp. 2310-2329.  
 Vecchio, F. J. and Collins, M. P. (1986). The modified compression field theory for reinforced concrete elements subjected to shear. ACI Structural Journal, Vol. 83, No. 2, pp. 219-231.  
 Hsu, T. T. C. (1988). Softened truss model theory for shear and torsion. ACI Structural Journal, Vol. 85, No. 6, pp. 624-635.  
 Takeda, T., Sozen, M. A. and Nielsen, N. N. (1970). Reinforced concrete response to simulated earthquakes. ST Division, Proceedings of ASCE, Vol. 96, ST12, pp. 2557-2573.  
 Riddell, R. and Newmark, N. M. (1978). Force-deformation models for nonlinear analysis. ST Division, Proceedings of ASCE, Vol. 105, ST12, pp. 2773-2778.  
 Saiidi, M. and Sozen, M. A. (1979). Simple and complex models for nonlinear seismic response of reinforced concrete structures. Structural Research Series No. 415, Civil Engineering Studies, University of Illinois, Urbana, IL.  
 Maruyama, K., Ramirez, H. and Jirsa, J. O. (1984). Short RC columns under bilateral load histories. Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 110, No. 1, pp. 120-137.

Ozcebe, G. and Saatcioglu, M. (1989). Hysteretic shear model for reinforced concrete members. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 1, pp. 132-148.

Elnashai, A. S., Pinho, R. and Antoniou, S. (2000). INDYAS-A Program for INelastic DYnamic Analysis of Structures, ESEE Research Report No.00-2, Imperial College, London UK.

Mander, J. B., Priestley, M. J. N. and Park, R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural*

*Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 8, pp. 1804-1826.

Lee, D. H. (1999). Inelastic seismic analysis and behaviour of RC bridges. Ph.D. thesis, Imperial College, London.

Lee, D. H. and Elnashai, A. S. (2001). Seismic analysis of RC bridge columns with flexure-shear interaction, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.127, No. 5, pp.546-553.

Park, R., Priestley, M. J. N. and Gill, W. D. (1982). Ductility of square-confined concrete columns. ST Division, *Proceedings of ASCE*, Vol. 108, No. ST4, pp. 929-950.

---