

# 철근콘크리트 교량의 단순화된 내진응답해석

## Simplified Seismic Response Analysis of a RC Bridge

이 도 형\*      전 종 수\*\*      박 대 효\*\*\*  
Lee, Do Hyung      Jeon, Jong Su      Park, Tae Hyo

### ABSTRACT

In this paper, simplified modeling approach describing the hysteretic behavior of reinforced concrete columns is discussed. The inelastic response of a reinforced concrete column or pier subjected to cyclic deformation reversals or earthquake ground motion is evaluated by use of lumped hysteretic representation. For this purpose, the hysteretic model under axial force variation is developed and implemented into a nonlinear finite element analysis program. The analytical predictions obtained with the new formulation are compared with test results and reveal accuracy and applicability in terms of strength and stiffness. In addition, comparison between results with and without axial force variation stresses the importance of the proposed approach.

### 1. 서론

지진하중은 많은 구조물에 다양한 형태의 손상 및 파괴를 일으켰고, 철근콘크리트 교량도 예외는 아니었다. 따라서 최근까지 철근콘크리트 교량의 지진하중에 의한 파괴원인에 대해 많은 연구가 진행되어 왔다. 그 결과, 재료의 구성모델, 해석절차 및 기법의 진보, 그리고 대상구조물의 적절한 이상화를 통한 철근콘크리트 교량의 내진 응답해석에 있어서의 진보된 기법은 적절한 정확성과 함께 구조물의 수치적인 정량화를 가능하게 하여왔다. 그럼에도 불구하고, 예측할 수 없는 지진하중의 특성으로 인하여 교량들의 파괴원인에 대한 정확한 규명에 많은 어려움을 겪어왔다. 특히 최근의 큰 지진들<sup>1,2)</sup>에서 알 수 있듯이, 비록 이 지진하중들이 설계지진하중을 초과했는지라도, 철근콘크리트 교량은 지진하중에 대하여 여전히 많은 취약성을 보여주었다. 따라서 지진하중에 종속되어 있는 철근콘크리트 교량의 파괴원인을 예측할 수 있는 단순하면서도 합리적인 해석모델의 개발이 중요시되어 왔다.

현재 유한요소 해석은 많은 정밀한 요소들을 요구하고 있는 관계로 인하여, 철근콘크리트 교량과 같은 대형 구조물의 효과적인 해석에 많은 어려움을 겪어왔다. 따라서 본 연구에서는 지진하중에 종속되어 있는 철근콘크리트 교량에 대해 단순하면서도 효과적인 스프링 힌지 모델을 개발하였다. 이 힌지 모델은 비탄성 구조해석 프로그램인 INDYAS<sup>3)</sup>에 연결되어, 주기적인 수평하중에 종속되어 있는 철근콘크리트 부재의 이력응답 거동뿐만 아니라 철근콘크리트 교량의 시간이력 해석에까지 적용되어 좋은 비교결과를 보여주었고 다음절부터 설명되어져 있다.

\* 정회원, 배재대학교 토목환경공학과 조교수

\*\* 정회원, 한양대학교 대학원

\*\*\* 정회원, 한양대학교 토목공학과 조교수

## 2. 거시적 모델

### 2.1. 이력응답모델의 포락선

이력응답거동을 수행하기 위하여 필요로 되는 포락선은 단조하중 상태하에서 강도의 저하가 일어나기 전까지의 힘과 전단 각각의 하중-변위 곡선의 관계식을 구할 수 있는 수정된 압축장 이론(Modified Compression Field, 이하 MCFT)<sup>4)</sup>으로부터 유도되었다. MCFT는 막 요소의 실험으로부터 개발되어 철근콘크리트 부재의 실험결과들과 좋은 상관관계를 보여주었다<sup>5)</sup>. 하지만 MCFT에 사용되었던 콘크리트의 압축응력과 압축변형률 사이의 관계식은 횡방향 철근으로 구속된 심부콘크리트의 응답거동에 적합하지 않기 때문에, 본 연구에서는 이를 고려하기 위하여 Mander et al.<sup>6)</sup>에 의해서 제안된 모델을 사용하였다. Mander et al. 모델<sup>6)</sup>을 포함한 MCFT로부터 포락선을 구하는 자세한 설명은 기 발표된 논문에서 찾아볼 수 있고<sup>7)</sup>, 본 연구에서 제안된 포락선은 그림 1에 보여져 있다.

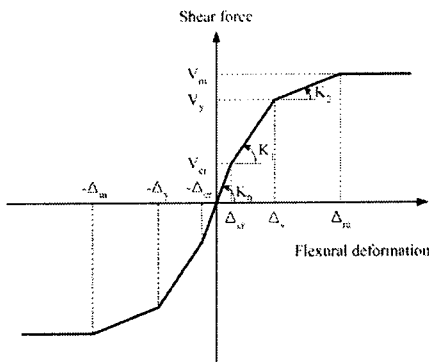


그림 1 제안된 포락선

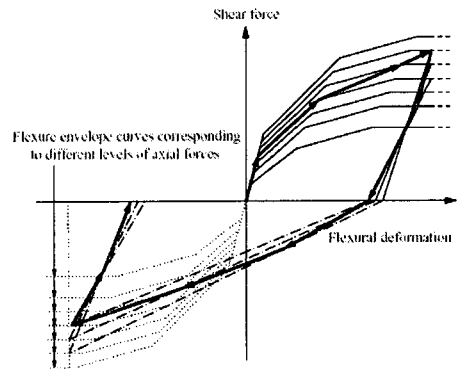


그림 2 변화하는 축하중에 따른 강성의 차이

### 2.2. 이력응답모델

주기하중이 작용하고 있는 철근콘크리트 부재의 이력응답 거동을 묘사하기 위하여 Takeda et al.<sup>8)</sup>에 의해서 제안된 이력법칙을 채택하였다. 이 모델은 이력법칙의 단순성 및 정확성에 기인하여 철근콘크리트 부재 및 구조물의 이력응답 해석에 널리 사용되어왔다<sup>9)</sup>. 본 연구에서는 Takeda et al.<sup>8)</sup>에 의해서 제안된 이력법칙들을 기본으로 하여 연속적으로 변화하는 축하중을 고려한 이력모델을 개발하였다. 연속적으로 변화하는 축하중의 효과를 고려한 기본개념은 MCFT를 이용하여 일정한 축하중 상태에서 일련의 포락선들을 유도한 후, 이 포락선들로부터 각 하중 혹은 시간단계에 대응하는 축하중에 의해 강성의 변화를 계산하는 것이다. 이러한 강성의 변화는 축하중의 변화에 따른 부재 거동의 경화 또는 연화를 나타낸다. 변화하는 축하중에 따른 강성의 이동에 대한 도식적인 설명이 그림 2에 나타나 있고, 개발된 이력응답모델에 관한 자세한 언급은 참고문헌에서 찾아볼 수 있다<sup>10)</sup>.

### 2.3. 해석프로그램

본 연구에서 개발된 연속적으로 변화하는 축하중을 고려한 거시적인 이력응답 모델은 유한요소 구조해석 프로그램인 INDYAS<sup>3)</sup>에 연결되었다. 이 프로그램은 여러 가지 다양한 재료의 거동모델 및 단면을 가지는 2차원 및 3차원 구조물의 비탄성 및 비선형 응답거동 해석이 가능하며, 정적, 동적 및 고유치 등 다양한 해석을 수행할 수 있다. 이 프로그램은 이전의 많은 연구들로부터 그 적합성이 입증되어 왔으며, 본 연구에서 개발된 모델을 포함한

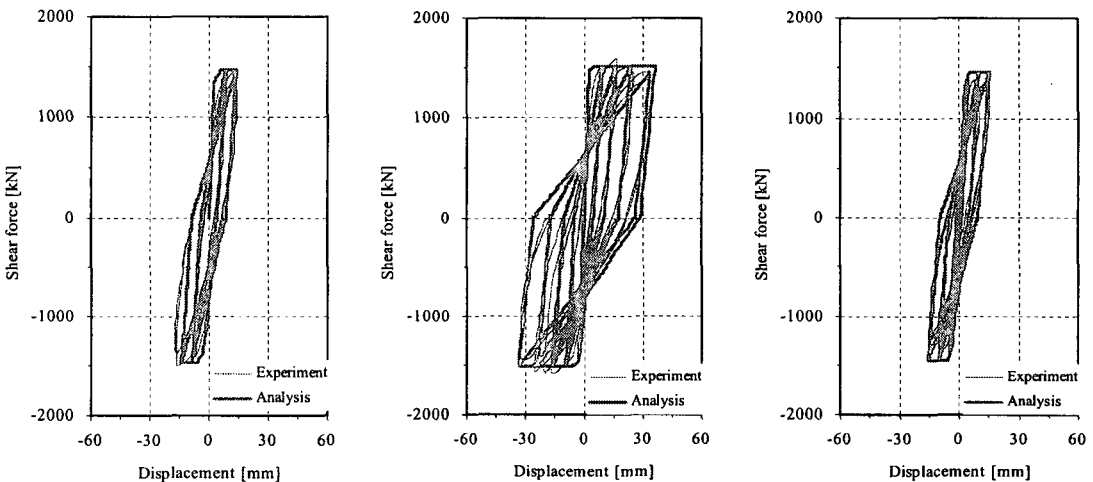
INDYAS<sup>3)</sup> 프로그램을 사용하여 부재단계에서의 검증 및 철근콘크리트 교량의 내진해석을 실시하였고 다음절에서 논의되었다.

### 3. 부재단계에서의 증명

개발된 이력응답모델을 검증하기 위하여 개발된 모델을 포함한 해석결과와 기 발표된 논문의 실험결과와의 비교 검토를 수행하였다. 연속적으로 변화하는 축하중 상태에서 수행된 철근콘크리트 기둥에 대한 실험적인 연구 결과가 아주 미비한 관계로 인하여 일정한 축하중하에서 수행된 실험결과와 비교 검토를 수행하였고, 따라서 변화하는 축하중에 따른 응답거동을 조사하고자 실제 지진하중에 의해서 손상된 철근콘크리트 교량에 대해 비탄성 시간이력 해석을 수행하였다. 본 연구에서 개발된 모델의 여러 단면형태 및 작용 축하중에 따른 응용성을 검토하고자 Priestley et al.<sup>11)</sup>과 Park et al.<sup>12)</sup>에 의해서 각각 실험된 횡방향 띠철근으로 구축된 정사각형 단면과 횡방향 나선철근으로 구축된 정팔각형 단면을 갖는 철근콘크리트 기둥에 대해서 검토를 수행하였다. 시편에 관한 자세한 언급은 기 발표된 논문에서 찾아볼 수 있다<sup>11,12)</sup>. 대표적인 경우로서 본 논문에서는 Priestley et al.<sup>11)</sup>에 의해서 실험된 시편 Unit 3과 Unit 4, 그리고 Park et al.<sup>12)</sup>에 의해서 실험된 Unit 4를 선택하였고, 단면의 재료상세는 표 1에 주어져 있다. 표 1에서 보는 바와 같이 선택된 시편들은 다양한 압축강도, 작용하중, 그리고 횡방향 항복강도를 보여주고 있다.

표 1 철근콘크리트 기둥 시편의 단면 재료상세

시편	압축강도 (MPa)	작용 압축하중 (kN)	종방향 철근		횡방향 철근	
			철근비	항복강도 (MPa)	철근비	항복강도 (MPa)
Priestley et al. Unit 3	26.6	4300	0.0243	303	0.0112	300
Priestley et al. Unit 4	32.9	3785	0.0243	303	0.0080	423
Park et al. Unit 4	23.5	4265	0.0179	375	0.0350	294



(a) Priestley et al. Unit 3

(b) Priestley et al. Unit 4

(c) Park et al. Unit 4

그림 3 개발된 모델을 포함한 해석결과와 실험결과 사이의 하중-변위 이력응답곡선 비교

표 2 각각의 연성도에 따른 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 3	1005.6	1469.6	1364.8	1469.6	1459.3	1469.6	-	-	-	-
Priestley et al. Unit 4	898.7	1440.9	1531.7	1513.9	1660.7	1513.9	1509.6	1513.9	1457.3	1513.9
Park et al. Unit 4	753.0	708.9	1308.1	1388.0	1390.7	1450.8	1395.9	1450.8	-	-

그림 3(a)와 (b)는 각각 Priestley et al.에 의해서 실험된 시편 Unit 3과 Unit 4, (c)는 Park et al.의 시편 Unit 4의 해석결과와 실험결과와의 하중-변위 이력응답 곡선을 비교해 주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 선택된 시편 모두 전반적인 비탄성 거동, 즉 강도, 강성의 저하 그리고 에너지 소산능력이 있어서 좋은 상관관계를 보여주고 있다. 하지만 해석결과와 실험결과 사이에 약간의 차이가 있는 것을 볼 수 있는데, 이는 본 연구에서는 고려되지 않은, 균열위치에서의 국부응력, 철근과 콘크리트 사이의 미끄러짐, 그리고 콘크리트 박리 등의 영향으로 사료된다. 표 2는 각각의 연성도에 따른 실험결과와 해석결과 사이의 최대강도 비교를 보여주고 있다. 표 2에서 알 수 있듯이 해석결과와 실험결과 사이의 차이는 연성도의 단계가 증가함에 따라서 감소하였고, 대략적으로 개발된 모델을 포함한 해석결과는 4~6 % 내외에서 실험결과와 좋은 상관관계를 나타내었다.

그림 3의 하중-변위 이력응답곡선의 비교와 표 2의 최대강도 비교에서 알 수 있듯이 본 연구에서 개발된 모델은 단면의 형태, 다양한 재료상세에 대해서 좋은 일치를 보여주고 있는데, 이는 개발된 모델의 다양한 응용성을 강조해주고 있다. 좀 더 명확한 적용성 및 타당성을 조사하고자 실제 지진하중에 의해서 손상을 입은 철근콘크리트 교량에 대해서 본 연구에서 제안된 모델을 사용하여 내진해석을 실시하였고 다음절에서 설명되었다.

#### 4. 철근콘크리트 교량의 내진해석

##### 4.1. 대상교량

본 연구에서 개발된 축하중의 변화를 고려한 이력응답모델의 타당성을 좀 더 명확하게 입증하기 위하여 1995년 일본 고베 대지진에서 심하게 손상을 입은 철근콘크리트 교량에 대하여 내진해석을 실시하였다. 이 교량은 Hanshin Expressway Route 3의 일부분으로서, 세 개의 단일교각 P663, P664, 그리고 P665로 이루어져 있다. 이 대상교량의 상부구조는 6개의 강 주형 위의 슬래브로 구성되어 있으며, 하부구조는 지름이 각각 2300mm(P663)과 2500mm(P664, P665)인 원형의 철근콘크리트 단면으로 이루어져 있다. 모든 교각들은 교각의 중간높이 부분에서 심한 손상을 입었으며, 그림 3은 P664의 손상형태를 보여주고 있다.



그림 4 P664의 손상형태

##### 4.2. 해석 모델

본 연구에서는 대상교량에 대하여 두가지 경우의 해석모델을 구성한 후 시간이력 내진해석을 수행하였다. 우선, 재료거동에 기본을 둔 파이버 요소 해석모델을 이용하여 대상교량을 해석한 후, 개발된 이력응답모델을 포함한 해석모델과의 비교검토를 수행하였다. 또한 거시적 힌지 모델의 경우에 대하여 교각의 축하중 변화에 대한 예민성을 조사하고자, 축하중의 변화를 고려하지 않은 경우와 축하중의 변화를 고려한 경우로 각각 나누어서 해석을 수행하였다.

### 4.3. 시간이력 내진해석

시간이력 해석의 수행시 사용된 입력 지진파는 JMA Kobe station에서 기록된 지진파로서, 횡방향(0.829g), 종방향(0.632g), 그리고 축방향(0.341g)의 세 가지 지진파를 동시에 고려하여 시간이력 해석을 수행하였다. 그림 5와 6은 각각 P665의 횡방향 변위 시간이력 응답과 밀면전단력 시간이력 응답거동을 보여주고 있다. 그림 5에서 보는 바와 같이 전반적인 비탄성 변위 및 진동주기에 있어서 개발된 모델을 포함한 해석결과는 파이버 단면을 이용한 해석결과와 좋은 상관관계를 보여주고 있다. 그림 6의 횡방향 밀면전단력의 시간이력 응답 비교에서도 그림 5에서 같은 경향을 보여주고 있다.

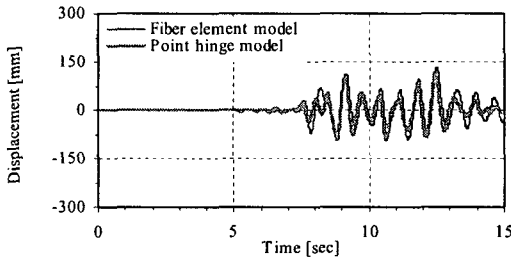


그림 5 P665의 횡방향 시간이력 응답 비교

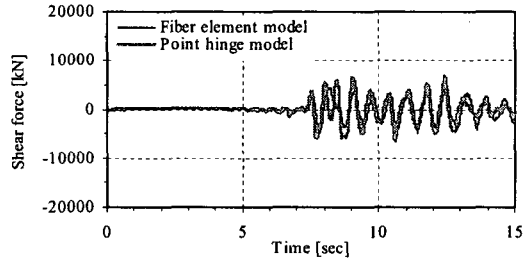
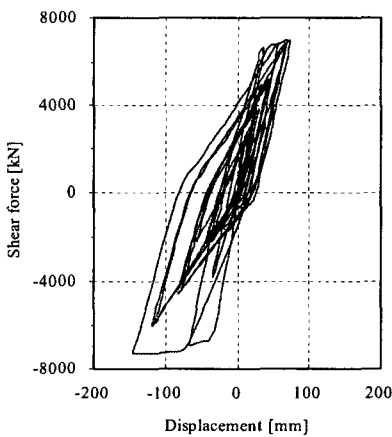
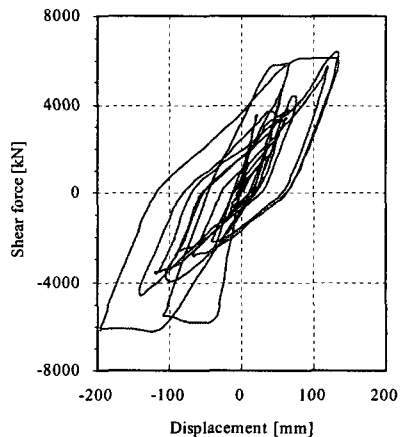


그림 6 P665의 횡방향 밀면전단력 시간이력 응답 비교

또한 철근콘크리트 교량 교각의 축하중의 변화에 대한 예민성을 검토하기 위하여 축하중의 변화를 고려하지 않은 경우와 고려한 경우의 하중-변위 이력응답곡선을 비교하였는데 이는 그림 7에서 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 축하중의 변화를 고려한 경우의 이력응답 거동은 고려하지 않은 경우보다 강성의 저하정도가 심하였으며 그에 따른 변위의 증가와 함께, 하중지지능력 또한 현저하게 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한 에너지 소산능력에 있어서도 큰 차이가 있음을 알 수 있었다. 따라서 철근콘크리트 교량의 내진해석시 축하중의 변화를 고려하지 않을 경우에는 변위의 과소평가 따른 전반적인 교량의 안전성에 큰 오류가 있을 것으로 사료되어 철근 콘크리트 교량의 내진해석시 축하중의 변화에 대한 고려가 이루어져야 한다는 것을 알 수 있었다.



(a) 축하중의 변화를 고려하지 않은 경우



(b) 축하중의 변화를 고려한 경우

그림 7 축하중의 변화를 고려하지 않은 경우와 고려한 경우 P664의 횡방향 이력응답곡선

## 5. 결론

본 연구에서 개발된 축하중을 고려한 거시적인 이력응답 모델을 이용한 해석결과는 다양한 형태의 단면과 재료 상세를 갖는 철근콘크리트 기둥의 실험결과와 좋은 상관관계를 보여주었다. 아울러 수행된 철근콘크리트 교량의 내진해석에 있어서도 개발된 모델의 타당성 및 응용성이 입증되었다. 특히 하중-변위 이력응답곡선의 비교에서 알 수 있듯이 축하중의 변화가 철근콘크리트 교각의 응답거동에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있었으며, 이는 본 연구에서 개발된 모델의 중요성을 강조하였다.

## 감사의 글

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

## 참고문헌

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. Elnashai, A.S., Bommer, J.J., Baron, C.I., Lee, D. and Salama, A.I., "Selected Engineering Seismology and Structural Engineering Studies of the Hyogo-Ken Nanbu (Great Hanshin) Earthquake of 17 January 1995," *ESEE Research Report*, No. 95-2, Imperial College, London, 1995.
3. 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.
4. 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.
5. Vecchio, F.J. and Emara, M.B., "Shear Deformations in Reinforced Concrete Frames," *ACI Structural Journal*, Vol. 89, No. 1, 1992, pp.46-56.
6. 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.
7. 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.
8. 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, 1970, pp.2557-2573.
9. Otani, S. and Sozen, M.A., "Simulated Earthquake Tests of R/C Frames," *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 100, No. 3, 1974, pp.687-701.
10. Lee, D.H., "Inelastic Seismic Analysis and Behaviour of RC Bridges," Ph.D. Thesis, Imperial College, London, 1999.
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.