

지진시 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동 및 연성능력에 관한 해석적 연구

Analytical Study on Inelastic Behavior and Ductility Capacity of Reinforced Concrete Bridge Columns under Earthquake

김 태 훈*
Kim, Tae-Hoon

신 현 목**
Shin, Hyun-Mock

ABSTRACT

The purpose of this study is to find inelastic behavior and ductility capacity of reinforced concrete bridge columns under earthquake. 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. In boundary plane at which each member with different thickness is connected, due to the abrupt change in their stiffness local discontinuous deformation can be taken into account by introducing interface element. Also an analytical model is developed to express the confining effects of lateral tie which depend on the existence or nonexistence and the amounts of transverse confinement, etc. The proposed numerical method for inelastic behavior and ductility capacity of reinforced concrete bridge columns will be verified by comparison with 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.

강한 지진을 받는 구조물은 대부분 비탄성 거동을 보이게 되며 이런 경우 구조물이 효과적으로 저항하도록 하기 위해서는 적절한 강도와 연성을 확보해야 한다. 현행 내진설계 규준은 이러한 요구를 충족시키기 위해 각 단위부재 및 접합부에서의 상세설계를 규정함으로써 부재수준에서 뿐만 아니라 구조물 전체의 연성거동을 구현하고 있다. 구조물의 효율적인 연성거동을 유도하기 위

* 성균관대학교 토목환경공학과 박사과정, 학생회원

** 성균관대학교 토목환경공학과 교수, 정회원

한 설계기준들은 주로 단위부재의 실험결과에 의존하여 검증, 수립되기 때문에 구조물 전체의 거동을 예측하는 데는 부적합하며 전체거동에 대한 분석은 해석적인 방법을 통하여 이루어질 수밖에 없다. 따라서 지진하중 같은 반복하중을 받는 철근콘크리트 부재의 전체거동에 대한 적절한 해석 기법의 개발이 이루어진다면, 해석적인 방법에 의해서 철근콘크리트 부재의 균열발생에서 파괴에 이르기까지의 거동을 예측함으로써 실제 철근콘크리트 교각의 지진응답특성의 파악과 내진설계 및 검토 등에 충분히 활용될 수 있을 것이다.

이 연구는 지진하중 같은 반복하중을 받는 철근콘크리트 교각에 대한 비선형 이력거동 및 연성능력을 해석적으로 예측할 수 있는 기법을 제시하는데 그 목적이 있다. 철근콘크리트 부재의 거동은 콘크리트의 균열, 철근의 항복, 철근과 콘크리트의 부착작용 및 균열 면에서의 전단전달효과와 등과 같은 재료적인 특성에 크게 지배되기 때문에, 이를 해석적으로 예측하기 위해서는 각각의 재료적인 특성을 정확하고 신뢰성 있게 표현할 수 있는 재료모델의 구축이 선행되어야 하며 이러한 요소수준의 재료모델은 유한요소법을 이용한 부재수준의 검증을 통하여 그 적용성을 확인할 필요가 있다. 이 연구에서 대상으로 하고 있는 철근콘크리트 교각 등과 같은 구조물은 보, 기둥, 기초 등 서로 다른 종류의 부재들로 이루어져 있기 때문에 기둥과 기초부 등의 경계면에는 철근의 정착슬립(anchorage slip) 등의 불연속 변위가 발생하게 되는데 이러한 변위는 구조물의 강도에는 큰 영향을 미치지 않지만 구조물 전체 변위의 약 30%에 달하고 있다⁽¹⁾. 따라서 구조물의 연성능력을 올바르게 평가하기 위해서는 부재 경계면에서의 불연속 변위를 무시할 수 없으며 이를 고려하기 위한 경계면요소(interface element)의 개발이 필요하다. 이 연구에서는 저자들에 의하여 기 보고된 반복하중을 받는 철근콘크리트 부재의 역학거동에 관한 연구⁽²⁾에 사용된 경계면요소를 수정·보완하여 철근콘크리트 교각의 연성능력을 예측하기 위한 해석기법을 제시하고자 한다.

2. 철근콘크리트의 비선형 재료모델

철근콘크리트는 복합재료이며, 재료의 비선형성은 타구조재료에 비해 극히 복잡하다. 특히 균열발생후의 비선형성은 현저하게 나타나며, 이러한 재료적 비선형성에 대해서는 철근콘크리트 요소의 직교 이방성의 가정에 따라, 균열직각방향으로 콘크리트가 부담하게 되는 인장응력을 고려하기 위한 인장강성모델과 균열방향으로의 압축강성 저하를 고려하기 위한 압축강성모델 및 균열면에서의 전단전달효과를 고려하기 위한 전단전달모델을 각각 적용한다^(3,4).

균열이 분산하여 분포된 철근콘크리트 부재의 변형거동은 사용된 균열개념에 크게 영향을 받는다. 본 연구에서는 제 2 균열의 발생을 제 1 균열과 직교방향으로 발생하도록 제한하여 콘크리트의 강성이 과대평가 되는 직교 고정균열모델과 달리, 실제 주응력의 방향과 직각으로 발생하도록 한 비직교 고정균열모델을 적용함으로써 콘크리트의 강성을 보다 사실적으로 평가하였다^(3,4).

콘크리트 속의 철근에 대한 항복후 거동은 철근만의 특성과 함께 부착효과 등이 동시에 고려되어야 한다. 콘크리트 속의 철근응력은 일정하지 않고 균열면에서 최대가 된다. 철근의 응력-변형을 관계가 탄성영역에 있는 경우에는 철근만의 구성모델을 적용하면 된다. 그러나, 균열면에서 철근이 최초로 항복하게 되면 철근의 평균응력-평균변형을 관계는 더 이상 탄성관계가 성립하지 않는다. 균열부분을 제외하면 철근의 응력은 항복응력보다 작기 때문에, 철근만의 응력-변형을

관계에서 볼 수 있는 항복고원현상은 나타나지 않으며 즉시 변형을 경화현상을 보인다. 이 연구에서는 포락선부분에 대한 철근의 항복후 거동을 일정한 변형을 경화율을 갖는 것으로 저자 등이 제안한 trilinear 모델을 사용하여 고려하였다^(3,4).

3. 경계면요소의 모델

3.1 경계면 직각방향에 대한 모델

기초로부터의 철근의 정착슬립에 관한 해석모델은 Shima 등이 제안하고 있는 정착길이가 긴 경우의 철근의 변형률-슬립(slip) 관계식⁽⁵⁾을 기본적으로 사용하였다. 다만, Shima 등의 제안모델은 철근의 정착슬립에 관한 실험으로부터 제안된 실험식으로서 실제구조물에서 발생하는 철근직각방향의 변형에 따른 경계면에서의 손상은 고려되지 않고 있다. 이에 본 연구에서는 Shima 등의 제안모델에 부착력의 저하구간을 설정하고 해석의 정도를 크게 해치지 않는 범위에서 유한요소해석에 적용하기에 편하도록 수정 제안된 철근의 변형률-슬립 관계를 사용하였다(그림 1).

1) 재하시(Loading)

$$\text{철근항복전, } s = \epsilon_s \cdot (6 + 3500 \cdot \epsilon_s) \quad (1)$$

$$\text{철근항복후, } s = 0.007 \cdot (f_u - f_y)(\epsilon_s - \epsilon_{sh}) + s_y/2 + 0.06$$

$$s \leq 0.02 \cdot (f_u - f_y)(\epsilon_s - \epsilon_{sh}) + s_y \quad (2)$$

여기서, s 는 $(\frac{Slip}{D})(\frac{f_c}{200})^{2/3}$, D 는 철근의 직경, f_c 는 콘크리트의 일축압축강도, ϵ_s 는 철근의 변형률, f_u 는 철근의 인장강도, f_y 는 철근의 항복강도, ϵ_{sh} 는 철근의 변형률 경화율이 시작될 때의 변형률 그리고 s_y 는 $\epsilon_y \cdot (6 + 3500 \cdot \epsilon_y)$ 이다.

2) 제하 및 재재하(Unloading and Reloading)

$$s = A \cdot (\epsilon_s - B)^2 + C \quad (3)$$

$$s = D \cdot (\epsilon_s - E)^2 + F \quad (4)$$

여기서, A 는 $-\frac{C}{B^2}$, B 는 $e_{\max} + e_{\text{res}} + e_3$, C 는 $s_{\max} + \frac{s_{\max} \cdot e_3^2}{(e_{\max} + e_3)^2 - e_3^2}$,

e_{\max} 는 철근의 최대탄성변형률, e_{res} 는 철근의 잔류변형률, s_{\max} 는 최대슬립, D 는 $\frac{F}{E^2}$,

E 는 $e_{\min} + e_{\text{res}} - e_3$, F 는 $s_{\min} + \frac{s_{\min} \cdot e_3^2}{(e_{\min} - e_3)^2 - e_3^2}$, e_{\min} 는 철근의 최소탄성변형

률, s_{\min} 는 최소슬립 그리고 e_3 는 $\frac{3}{3500}$ 이다.

두께가 서로 다른 부재의 경계면에 압축력이 작용하면 두께가 큰 부재는 깊이방향에 따라 3차원적으로 압축응력의 크기가 변화하게 된다. 이 연구에서는 3차원적인 응력 분포에 의해 부가되는 경계면에서의 관입을 2차원 해석으로 고려하기 위해서, 경계면이 가상의 높이 h_i 를 갖고 압축 응력에 저항하여 경계면이 변형한다고 가정함으로써 3차원적인 응력분포의 영향을 간접적으로 고려하였다(그림 2).

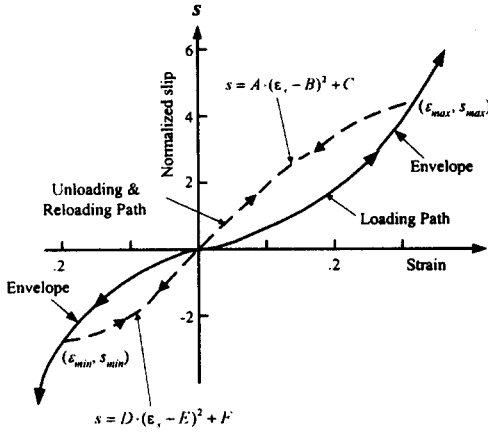


그림 1. 철근의 변형률-슬립 관계

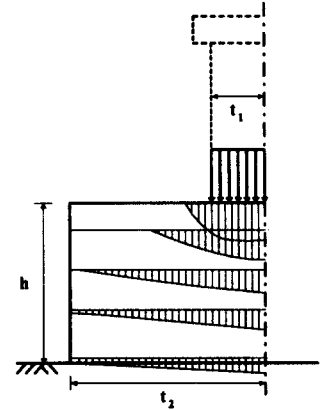


그림 2. 경계면에서의 3차원적인 효과

경계면의 압축응력 σ_c 와 변위 ω 와의 관계는 탄소성파괴모델의 압축변형률 ϵ 를 경계면에서의 압축변위 ω 로 치환하면 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_c = E_0 K_0 (\epsilon - \epsilon_p) = E_0 K_0 \frac{(\omega - \omega_p)}{h_i} = K E_0 K_0 (\omega - \omega_p) \quad (5)$$

여기서, $K E_0$ 는 경계면의 초기압축강성, ω 와 ω_p 는 압축변위와 소성변위 그리고 K_0 는 파괴 파라미터를 나타낸다.

3.2 경계면의 전단전달 모델

경계면의 전단변형 δ 는 경계면에서의 미끄러짐 δ_c 과 국소적인 응력에 의해 부가된 전단변형 δ_m 과의 합으로써 고려할 수 있다. 경계면의 전단응력 τ_c 와 전단변위 δ 와의 관계는 Li · Maekawa의 접촉면 밀도함수⁽⁶⁾에 근거한 콘크리트 균열면에서의 응력전달 구성식을 수정하여 사용 하였으며 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\tau_c = K_{st} \delta \quad (6)$$

$$\sigma_\alpha = -\frac{f_{st}}{2} \left[\frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left(\frac{1}{\beta} \right) - \frac{\beta}{1 + \beta^2} \right] \quad (7)$$

여기서, K_{sf} 는 경계면의 전단강성, σ_{cs} 는 경계면의 압축응력, f_{sk} 는 $18 f_c^{\frac{1}{3}}$ 그리고 β 는 $\sqrt{\tau_c / (f_{sk} - \tau_c)}$ 이다.

4. 철근콘크리트 교각의 연성능력

지진하중에 의하여 구조물에 입력된 에너지는 구조부재의 변형에 의하여 변형에너지로 소산되므로 충분한 연성도의 확보가 필요한 것이다. 지진하중을 받는 구조물의 비탄성 변형수준의 척도인 변위연성도는 일반적으로 다음 식으로 정의된다.

$$\mu = \frac{\delta_{ultimate}}{\delta_{yield}} \quad (8)$$

여기서, δ_{yield} 는 시스템의 항복변위이고 $\delta_{ultimate}$ 는 시스템의 극한변위를 의미한다.

실험에서는 시스템의 항복변위와 극한변위를 정량적으로 평가하기가 어렵기 때문에 하중-변위 곡선으로부터 그림 3에서와 같은 간접적인 방법이 일반적으로 사용된다⁽⁷⁾.

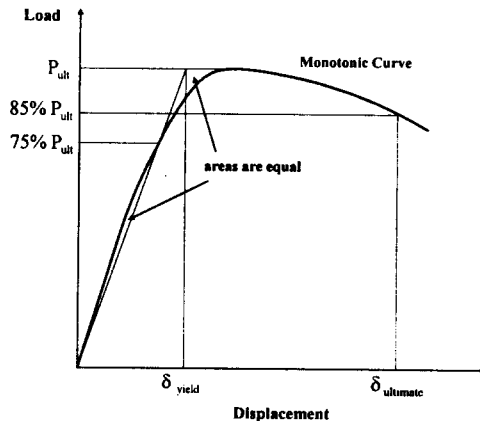


그림 3. 항복과 극한변위의 정의

유한요소해석의 해석결과는 최대 내력과 변위 뿐 아니라 내부의 응력 및 변형률의 정보도 갖고 있으므로 실험에서와 같은 방법으로 항복변위 및 극한변위를 평가하는 것은 효율적인 방법이라 할 수 없다. 따라서 이 연구에서는 이들 변위를 직접적인 방법으로 평가하였다. 즉, 항복변위는 시스템 내의 위험단면의 가우스 적분점에서의 철근의 변형률이 항복변형률의 1.5배에 도달하였을 때의 기준점의 수평변위로, 극한변위는 위험단면의 가우스 적분점에서의 철근 또는 콘크리트의 변형률이 각각의 파괴기준 변형률에 도달하였을 때의 기준점의 수평변위로 정하였다. 다만, 앞의 시스템의 항복변위는 특정요소의 철근의 항복을 의미하기보다는 전체구조체로서의 항복을 의미하고 있고, 실제의 구조물에 적용할 경우 항복변위시 위험단면의 철근은 이미 항복한 후이기 때문에 유한요소해석을 통한 직접적인 방법에서도 이를 고려하여 정하였다.

5. 수치예제 및 고찰

이 연구에서 제안한 해석기법과 모델의 타당성을 검증하기 위해서 그림 4에 나타난 것과 같은 실험체⁽⁸⁾를 선정하였으며 실험체의 재료물성은 표 1과 같다.

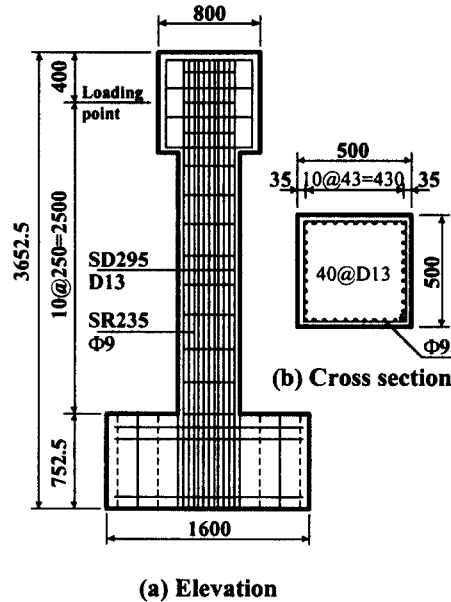


그림 4. 실험체의 제원

본 연구의 해석에 의한 최대하중과 변위연성도를 실험결과와 비교하여 표 2와 그림 5에 정리하였다. 이 표에서 실험에서의 항복변위 및 극한변위는 그림 3에서와 같이 정하였으며, 해석에 의한 항복변위 및 극한변위는 전장에서 기술한 바와 같이 직접적인 방법으로 평가하였다. 해석결과와 실험결과와의 비교로부터 이 연구에서 제안한 항복변위 및 극한변위의 평가는 타당하다고 할 수 있다.

표 1. 실험체의 재료물성

Specimen number	Specimen height (m)	Concrete compressive strength (MPa)	Yield of steel bar (MPa)		Number of loading cycle	Shear span ratio (h/d)	Hoop rein. ratio (%)	Axial stress (MPa)
			Long.	Hoop				
P-10	2.50	31.3	308.3	272.2	10	5.4	0.10	0
P-11	2.50	32.1	308.3	272.2	10	5.4	0.20	0
P-13	2.50	32.8	308.3	272.2	10	5.4	0.31	0
P-17	1.75	33.1	308.3	272.2	10	3.8	0.10	0
P-56	2.50	42.5	369.7	370.2	10	5.4	0.10	0.49
P-57	2.50	40.0	369.7	370.2	10	5.4	0.10	0.98
P-58	2.50	39.2	369.7	370.2	10	5.4	0.10	1.96

표 2. 실험과 해석의 결과 비교

Specimen	Test				Analysis				(1) / (5)	(2) / (6)	(3) / (7)	(4) / (8)	
	V_{max}	δ_y	δ_u	μ	V_{max}	δ_y	δ_u	μ					
	kN (1)	mm (2)	mm (3)	(4)	kN (5)	mm (6)	mm (7)	(8)					
P-10	161.8	12.41	83.10	6.7	156.2	15.0	77.0	5.1	1.04	0.83	1.08	1.31	
P-11	162.1	12.39	83.17	6.7	158.9	15.0	88.0	5.9	1.02	0.83	0.95	1.14	
P-13	156.3	12.34	96.95	7.9	159.2	14.0	87.0	6.2	0.98	0.88	1.11	1.27	
P-17	231.8	7.83	31.88	4.1	222.1	8.0	47.0	5.9	1.04	0.98	0.68	0.69	
P-56	175.0	14.63	58.31	4.0	189.3	17.0	55.0	3.2	0.92	0.86	1.06	1.25	
P-57	182.6	16.08	64.33	4.0	205.3	17.0	80.0	4.7	0.89	0.95	0.80	0.85	
P-58	194.4	20.13	60.31	3.0	214.2	18.0	54.0	3.0	0.91	1.12	1.12	1.00	
									Mean	0.97	0.92	0.97	1.07
									Standard deviation	0.06	0.10	0.17	0.24

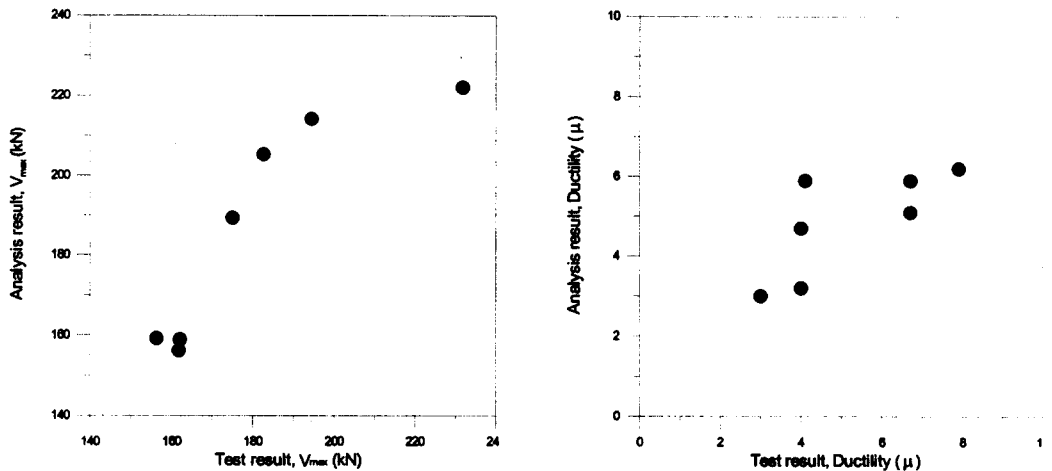


그림 5. 실험과 해석의 결과비교

6. 결론

본 연구에서는 지진시 철근콘크리트 교각의 비탄성 거동과 연성능력의 파악을 위한 해석기법과 모델을 제시하였고 제안된 해석기법과 모델을 적용한 유한요소 해석프로그램을 사용하여 반복하중을 받는 실험체를 해석하였다. 실험결과와 비교·검토된 수치예제로부터 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 제안한 해석기법과 모델이 철근콘크리트 교각의 전체적인 거동특성을 바르게 표현하고 있음

을 입증하였으며 단조증가하중에 대한 해석 또는 실험으로 제한되었던 부재의 강도를 유한요소 해석만으로도 예측이 가능하게 하였다.

2) 구조물의 연성능력을 올바르게 평가하기 위해서는 부재 경계면에서의 불연속변형을 무시할 수 없으며 이에 대한 충분한 고려가 필요하다.

3) 이 연구에서 제안된 직접적인 방법에 의한 항복변위 및 극한변위의 평가방법은 타당하며, 유한요소해석시 이 방법을 사용할 경우 보다 간편한 항복변위 및 극한변위의 평가가 가능하다.

4) 지진하중을 받는 철근콘크리트 구조물에서 필연적으로 발생하는 성능(강도, 강성등)저하가 구조물이 지니고 있는 연성도 및 에너지 소산성능과 밀접한 관련이 있으므로 각각의 구조부재에 발생한 손상의 정도를 고려할 수 있는 재료모델에 관한 연구를 차후의 연구과제로 다루고자 한다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지원, 지진공학연구센터(KEERC)의 연구비 지원에 의한 연구로서, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Saatcioglu, M., Alsiwat, J. M. and Ozcebe, G.(1992), "Hysteretic Behavior of Anchorage Slip in R/C Members," ASCE, Vol. 118, No. 9, pp. 2439-2458.
2. 유영화, 최정호, 신현목(1998), "횡방향 철근의 구속효과를 고려한 반복하중을 받는 철근콘크리트 부재의 비탄성해석", 한국지진공학회 논문집, 제2권, 1호, pp. 79-92.
3. 김태훈, 유영화, 신현목(2000), "반복하중을 받는 철근콘크리트 셸구조의 비선형 해석," 한국지진공학회 논문집, 제4권, 1호, pp. 35-49.
4. 김태훈, 유영화, 신현목(2000), "등가환산단면을 이용한 원형 철근콘크리트 교각의 비탄성 해석," 대한토목학회 논문집, (인쇄중).
5. Shima, H., Chou, L., and Okamura, H.(1987), "Micro and Macro Models for Bond Behavior in Reinforced Concrete," Journal of the Faculty of Engineering, University of Tokyo (B), Vol. 39, No. 2, pp. 133-194.
6. Li, B., Maekawa, K., and Okamura, H.(1989), "Contact Density Model for Stress Transfer across Cracks in Concrete," Journal of the Faculty of Engineering, University of Tokyo (B), Vol. 40, No. 1, pp. 9-52.
7. Park, R.(1998), "Ductility evaluation from laboratory and analytical testing," Proc. of the Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, Japan, Vol. VII, Balkema, Rotterdam, pp. 605~616.
8. Kawashima, K., Hasegawa, K., Nagashima, H., Koyama, T., and Yoshida, T.(1993), "Seismic Design Method of Reinforced Concrete Bridge Piers Based on Dynamic Strength and Ductility," Report of Public Works Research Institute, Vol. 190, Ministry of Construction (in Japanese).