

내진설계를 위한 전단성능곡선 모델의 평가

Evaluation of Shear Capacity Curve Model for Seismic Design

고성현*

이재훈**

Ko, Seong Hyun

Lee, Jae Hoon

ABSTRACT

Since the columns with flexure-shear failure have lower ductility than those with flexural failure, shear capacity curve models shall be applied as well as flexural capacity curve in order to determine ultimate displacement for seismic design or performance evaluation. In this paper, a proposed modified shear capacity curve model is compared with the other models such as the CALTRANS model, Aschheim et al.'s model, and Priestley et al.'s model. Four shear capacity curve models are applied to the 4 full scale and 7 small scale circular bridge column test results and the accuracy of each model is discussed. It may not be fully adequate to drive a final decision from the application to the limited number of test results, however the proposed model provides the better prediction of failure mode and ultimate displacement than the other models for the selected column test results.

1. 서론

철근콘크리트 교각은 축방향 철근량과 횡방향 철근량의 비율, 축력의 크기, 전단지간-두께 비율(M/V_D, 또는 형상비-aspect ratio)에 따라 파괴거동이 다르다. 이러한 변수들 중 파괴거동에 가장 큰 영향을 주는 인자는 전단지간-두께 비율로서, 일반적으로 전단지간-두께 비율(캔틸레버 교각은 형상비와 동일함)이 1.5~3.0 내외인 교각의 경우는 초기에는 휨 거동을 보이다가 최종단계에서는 전단에 의해 파괴되는 휨-전단 거동을 보인다. 이러한 형상비의 교각이 Loma Prieta 지진(1989), Northridge 지진(1994), Kobe 지진(1995) 등에서 전단 또는 휨-전단 복합 거동에 의하여 파괴된 사례가 보고된 후, 외국에서는 지진하중에 대한 기존의 전단설계법에 대한 검증과 새로운 전단설계법에 대한 연구가 진행되어왔다. 지진하중에 대한 전단성능 모델은 전단강도만을 검토하는 기존의 전단설계법과는 다른 개념과 모델이 필요한 이유는 두 가지로 정리될 수 있다. 첫째, 지진하중에 의하여 소성힌지가 발생하는 경우에는 심부 콘크리트의 손상이 증대되어 단조증가 하중이 작용하는 경우보다 전단강도가 감소하기 때문에 기존의 일반하중에 대한 전단강도 계산법으로는 오차가 크다. 둘째, 휨-전단 파괴가 발생하는 경우 휨 작용과 전단 작용간의 지배 거동의 정도에 따라 극한(파괴)변위가 다르므로 변위를 고려하지 않고 전단강도만을 검토하는 기존의 전단설계법으로는 합리적인 내진 전단설계법으로의 발전이 제한적이다. 따라서 변위연성도를 고려하여 전단강도가 변화하는 전단성능곡선 모델이 개발되어왔다.

* 정회원, 영남대학교 토목공학과 박사과정

** 정회원, 영남대학교 토목공학과 교수

본 연구에서는 CALTRANS에서 채택되어 있는 모델, Aschheim & Moehle, Priestley 등에 의하여 제안된 전단성능곡선 모델들과 이재훈 등에 의해 제안된 새로운 전단성능곡선 모델에 대하여 4개의 실험물크기 및 7개의 축소모형 기둥실험체의 실험결과와의 비교를 통하여 각 모델의 적용성을 검증하였다.

2. 수정제안모델의 특징

이재훈 등에 의하여 제안된 전단성능곡선 모델은 식 (1)~(5)와 같다. 변위연성도에 따른 콘크리트의 전단강도 V_c 는, 수정모델은 식 (3)과 같이 변위연성도 2와 5를 기준으로 3개의 구간으로 구성하였다. 단 콘크리트의 전단강도는 Aschheim과 Moehle의 모델과 같이 k 값을 최대 0.3과 최소 0을 택하였다. 전단철근의 전단강도 V_s 는 휨-전단 균열이 발생하는 각도 θ 로 40° 를 택하고, 원형단면에 대하여는 식 (4)를 사용한다. 축력의 영향에 따른 전단강도 V_p 는 Priestley 등의 모델과 동일하게 적용한다. 단 식 (5)의 $\tan \alpha$ 를 나타내는 변수 중 D_c 는 원형단면인 경우 단면지름의 2/3배를 채택하여 식 (5)의 마지막 항을 적용한다.

$$V_n = V_c + V_s + V_p \quad (1)$$

$$V_c = k \sqrt{f'_c} A_e \quad (2)$$

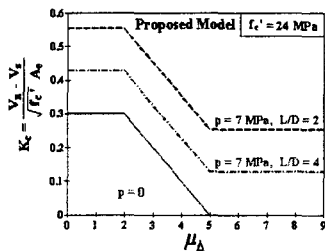
$$\left(\begin{array}{l} \mu_\Delta \leq 2: k = 0.3 \\ 2 \leq \mu_\Delta \leq 5: k = 0.3 - \frac{1}{10} (\mu_\Delta - 2) \\ 5 \leq \mu_\Delta: k = 0 \end{array} \right) \quad (3)$$

$$V_s = \frac{\pi}{2} \frac{A_{sp} f_{yh} D_{sp}}{s} \cot 40^\circ \quad (4)$$

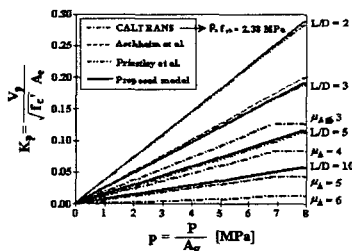
$$V_p = 0.85 P \tan \alpha = 0.85 P \frac{D_c}{2L} = 0.85 P \frac{D}{3L} \quad (5)$$

CALTRANS, Priestley 등, Aschheim 등, 제안 모델의 4 가지 모델에서 전단강도를 구성하는 세 가지 성분, 즉 콘크리트의 전단강도, 축력의 영향에 따른 전단강도, 전단철근에 의한 전단강도를 정량적으로 비교하기 위하여, 식 (2)에 나타나 있는 콘크리트 압축강도 f'_c 의 제곱근 앞의 상수 k 와 같은 형태로 환산하여 식 (6)과 같이 전단강도를 표현하였다. 여기서 K_t 는 총 전단강도, K_c 는 콘크리트의 전단강도와 축력의 영향을 고려한 전단강도, K 는 축력이 없는 경우의 콘크리트의 전단강도, K_p 는 축력의 영향에 따른 전단강도, K_s 는 전단철근에 의한 전단강도를 의미한다. 그림 1은 콘크리트의 전단강도와 축력의 영향, 축력에 의한 전단강도와 전단철근에 의한 전단강도를 각 모델별로 나타낸 것이다.

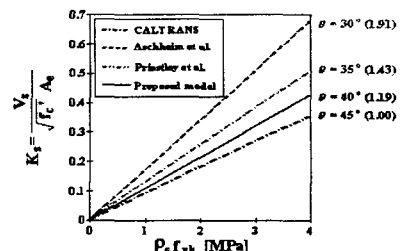
$$V_n = K_t \sqrt{f'_c} A_e = (K_c + K_s) \sqrt{f'_c} A_e = (K + K_p + K_s) \sqrt{f'_c} A_e \quad (6)$$



(a) 콘크리트에 의한 전단강도



(b) 축력의 영향에 따른 전단강도
그림 1 전단강도 영향인자



(c) 전단철근에 의한 전단강도

3. 실험결과들에 대한 모델 평가

실험모형 기둥 실험체들의 하중-변위 결과와 각 모델들을 비교하여 그림 2에 나타내었으며 그 결과를 평가하였다. 표 1은 각 모델에 의한 파괴형태의 예측결과를 나타낸다. Aschheim 등의 모델은 4개

중 1개의 실험체에 대하여, Priestley 등의 모델은 4개 중 2개의 실험체에 대하여 파괴형태 예측에 오류를 보였다. CALTRANS 모델과 제안모델은 모든 실험체에 대하여 실험결과와 동일한 파괴형태를 예측하였다. 그림 3에 7개의 축소모형 실험체의 횡하중-변위 곡선과 제안모델을 비교하였다. 대부분의 경우 휨-전단 거동을 보인 실험결과들에 대하여 휨-전단파괴를 예측하였으나 전단파괴 거동을 보인 SH-22-0 실험체의 경우에는 모든 모델들이 파괴변위를 예측하지 못하였다.

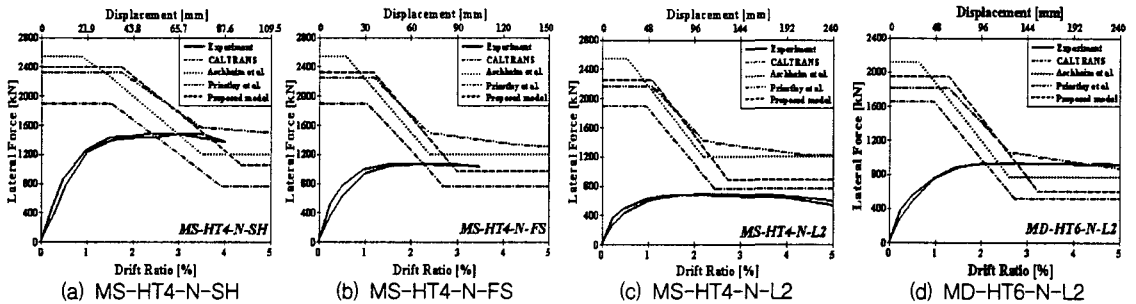


그림 2 축소모형 기동 실험결과에 대한 각 모델의 적용

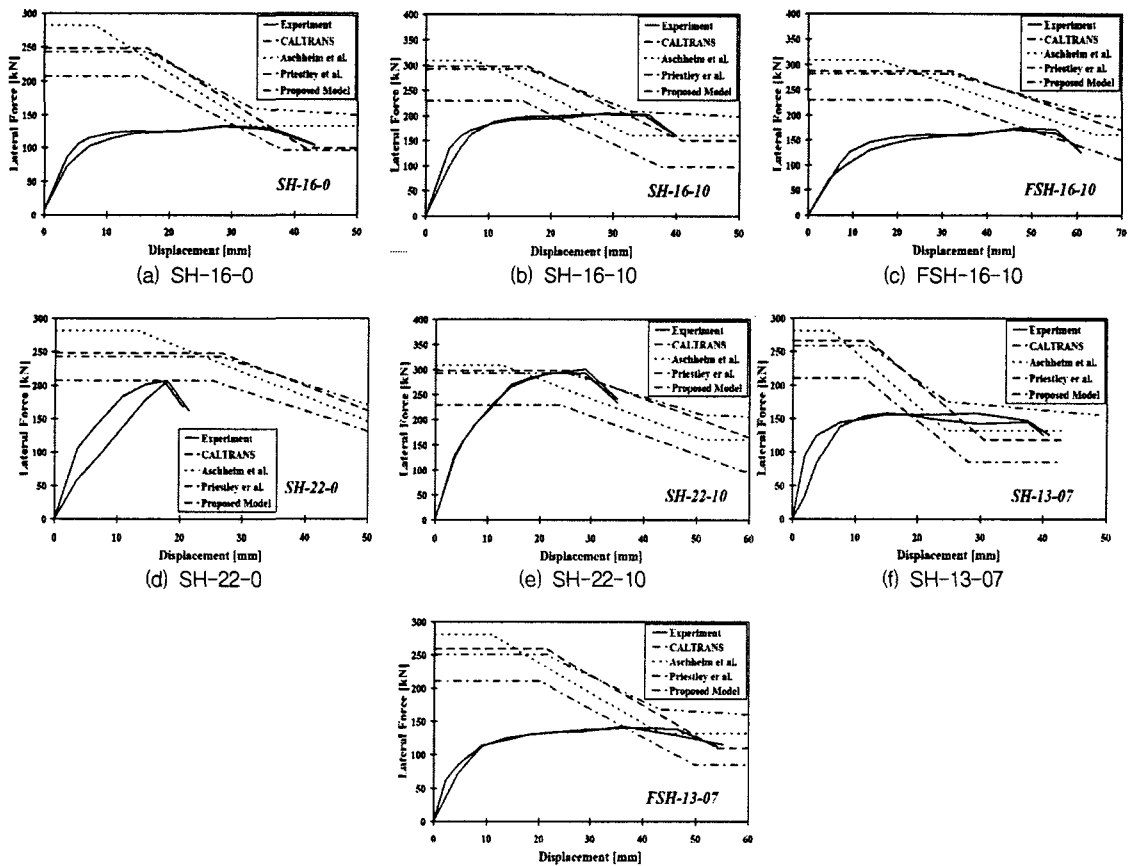


그림 3 축소모형 기동 실험결과에 대한 각 모델의 적용

전단파괴 또는 휨-전단 파괴를 보인 11개의 실험체에 대하여 각 모델을 적용한 극한변위는 그림 2와 3에서 횡하중-변위 포락선과 각 모델의 전단성능곡선이 교차하는 위치의 변위로 결정된다. 표 1에 나타난 바와 같이 실험에 의한 기둥의 극한변위와 전단성능곡선 모델들에 대하여 파괴 극한변위와 예측값을 비교하였다. CALTRANS 모델이 전단에 대하여 가장 보수적인 성향을 예측하였고, 거의 대부분의 경우에 휨-전단 파괴를 예측하였다. Priestley 등의 모델은 실물모형 또는 축소모형에 대한 휨-전단 실험결과와는 다르게 대부분 휨파괴를 예측하는 것으로 나타났다.

표 1에 나타난 바와 같이, 형상비 1.75~4.0에 대한 실험결과들에 적용하여 평가한 결과는 제안 모델이 가장 실험결과와 유사한 결과를 보였으며 극한변위 값도 다른 모델에 비하여 가장 근접한 결과를 나타내었다.

표 1 파괴형태의 실험결과 및 각 모델에 의한 예측결과

Specimens	L/D	Ultimate displacement (mm)					Ultimate displacement ratio to test result			
		Test	CAL-TRANS	Aschheim & Moehle	Priestley et al.	Proposed model	CAL-TRANS	Aschheim & Moehle	Priestley et al.	Proposed model
MS-HT4-N-SH	1.825	88	54	66	-	79	0.61	0.75	-	0.90
MS-HT4-N-FS	2.5	105	66	-	-	86	0.63	-	-	0.82
MD-HT6-N-L2	4.0	240	101	115	206	130	0.42	0.48	0.86	0.54
SH-16-0	1.75	43	31	-	-	37	0.72	-	-	0.86
SH-16-10	1.75	40	20	26	-	32	0.50	0.65	-	0.80
FSH-16-10	2.25	60	49	-	-	-	0.82	-	-	-
SH-22-0	1.75	21	-	-	-	-	-	-	-	-
SH-22-10	1.75	35	11	19	23	26	0.31	0.54	0.66	0.74
SH-13-07	1.825	40	19	22	-	27	0.48	0.55	-	0.68
FSH-13-07	2.38	55	37	42	-	52	0.67	0.76	-	0.95

4. 결론

국내에서 수행된 실물모형 및 축소모형 기둥 실험체를 대상으로 전단성능곡선 모델을 평가하였다. 제한된 범위의 소수 실험결과에 대한 적용으로서 일반화하기는 어려울 것이지만, 실험결과와 비교 검토한 결과 제안모델이 파괴형태의 예측과 변위성능 예측의 정확도에서 가장 우수한 것으로 평가되었다.

참고문헌

1. Priestley, M. J. N., Seible, F., and Calvi, G. M., "Seismic Design and Retrofit of Bridges," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1996, 686pp.
2. 이재훈, 고성현, 이대형, 정영수, "반복 횡하중을 받는 원형교각의 휨-전단 거동", 한국콘크리트학회 논문집, 제 16권 6호, 2004년 12월, pp 823 - 832.