

# RC 원형교각의 내진설계를 위한 전단성능곡선

## Shear Capacity Curve Model for Seismic Design of Circular RC Bridge Columns

이 재 훈\*      고 성 현\*\*      최 진 호\*\*      권 순 흥\*\*\*  
Lee, Jae Hoon      Ko, Seong Hyun      Choi, Jin Ho      Kwon, Soon Hong

---

### 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 modified shear capacity curve model is proposed and 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 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

지진하중에 대한 전단성능 모델은 전단강도만을 검토하는 기존의 전단설계법과는 다른 이런 새로운 개념과 모델이 필요한 이유는 두 가지로 정리될 수 있다.

첫째, 지진하중에 의하여 소성힌지가 발생하는 경우에는 반복하중 작용에 따라 심부 콘크리트의 손상이 증대되어 단조중가 하중이 작용하는 경우보다 전단강도가 감소하기 때문에 기존의 일반하중에 대한 전단강도 계산법으로는 오차가 크다. 둘째, 휨-전단 파괴가 발생하는 경우 휨 작용과 전단 작용 간의 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.

본 연구에서는 외국의 내진설계기준에 채택되어 있거나 타 연구자에 의하여 제안된 전단성능곡선 모델의 특징을 분석하고 새로운 전단성능곡선 모델을 제안하였으며, 실물크기 기둥실험체의 실험결과와의 비교를 통하여 각 모델의 적용성을 검증하였다.

---

\*정회원, 영남대학교 토목공학과 교수

\*\*정회원, 영남대학교 토목공학과 박사과정

\*\*\*정회원, 영남대학교 토목공학과 석사과정

## 2. 수정모델의 제안 및 각 모델의 특징

### 2.1 수정 제안모델의 제안

Priestley 등의 모델을 기본 형태로 하여 식 (1)~(5)와 같이 수정한 모델을 제안하였다. 변위연성도에 따른 콘크리트의 전단강도  $V_c$ 는, Priestley 등의 모델의 경우 변위연성도 2, 4, 8을 기준으로 4개의 구간으로 구성되어 있다. 그러나 4개의 구간을 채택함에 따라 모델이 다소 복잡한 형태가 되었으며, 변위연성도 4와 8 사이의 전단강도가 매우 완만하게 감소하여 큰 차이를 보이지 않으며, 휨-전단 파괴가 가능한 변위연성도로서 채택한 8은 다소 큰 값이라고 생각된다. 따라서 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  $\theta$ 로  $40^\circ$ 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.

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

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

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

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

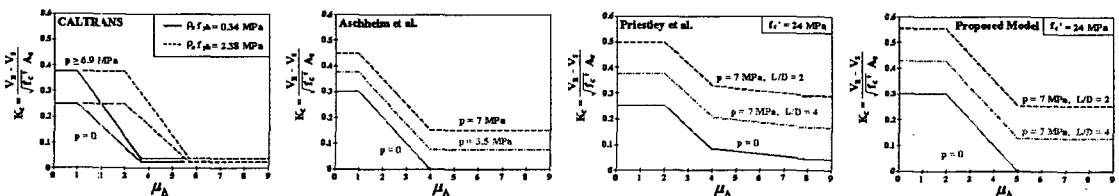
$$V_p = 0.85 P \tan \alpha = 0.85 P \frac{D_c}{2L} = 0.85 P \frac{D}{3L} \quad (5)$$

### 2.2 각 모델의 특징 및 비교

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.

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

그림 1은 콘크리트의 전단강도와 축력의 영향을 각 모델별로 나타낸 것이다. 그림에서  $p$ 는 교각에 작용하는 축력  $P$ 를 교각의 총 단면적으로 나눈 응력을 나타낸다. 그림 1에 나타난 바와 같이,  $p$ 가 0인 경우 CALTRANS 모델과 Priestley 등의 모델은  $K_c$ 의 최대 값으로 0.25를 사용하며 최소 값으로 0.025와 0.042를 각각 사용한다. Aschheim 등의 모델과 제안모델은  $K_c$ 의 최대 값으로 0.3을 사용하며, 최소 값으로 0을 사용함으로써 변위연성도가 4 또는 5 이상으로 매우 큰 경우 반복하중에 따른 콘크리트의 손상에 따라 콘크리트의 전단강도를 무시한다.



(a) CALTRANS 모델 (b) Aschheim 등의 모델 (c) Priestley 등의 모델 (d) 제안모델  
그림 1 각 모델의 콘크리트에 의한 전단강도 및 축력의 영향에 따른 전단강도

CALTRANS 모델은 다른 모델과는 달리 횡방향 철근량이 고려되는 것이 특징이다. Aschheim 등의 모델, Priestley 등의 모델, 제안모델은 그림 1의 (b), (c), (d)에 나타난 바와 같이 변위연성도의 크기와 관계없이 동일한 축력 효과로 전단강도를 구성한다. 그러나 축력의 효과를 고려하는 방법 및 크기는 모델 별로 큰 차이를 나타낸다.

축력에 의한 전단강도의 정량적인 비교는 그림 2에 나타나 있다. CALTRANS 모델은  $\rho_s f_{yh}$  이 2.38 MPa인 경우를 일점쇄선으로 나타내었는데, 변위연성도에 따라 축력의 영향을 고려하고 최대 6.9 MPa로  $p$ 를 제한하므로, 변위연성도가 3.0 이하인 경우  $K_p$ 는 0.125의 값을 나타낸다. 점선으로 나타낸 Aschheim 등의 모델은 특별한 변수를 고려하지 않으므로 어떠한 경우에도 단순히 축력에 비례하는 단일한 값을 사용하며, 이 값은 Priestley 등의 모델과 제안모델에서 형상비(L/D)가 3인 경우와 유사하다. Priestley 등의 모델(이점쇄선)과 제안모델(실선)은 전단지간-두께 비율(또는 형상비, L/D)을 고려하는 합리적인 접근방법을 적용하므로 형상비가 감소할수록 전단강도가 감소하게 된다. 따라서 그림 2에서 알 수 있는 바와 같이 형상비(L/D)가 4 미만인 경우에는 CALTRANS 모델보다 큰 전단강도를 제공하며, 형상비(L/D)가 3 내외가 아닌 경우에는 Aschheim 등의 모델보다 크거나 작은 전단강도를 제공한다.

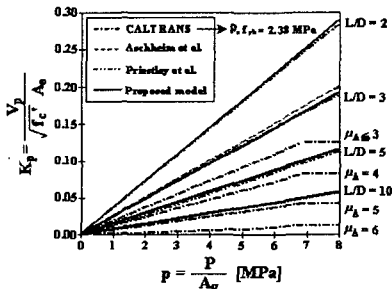


그림 2 축력의 영향에 따른 전단강도

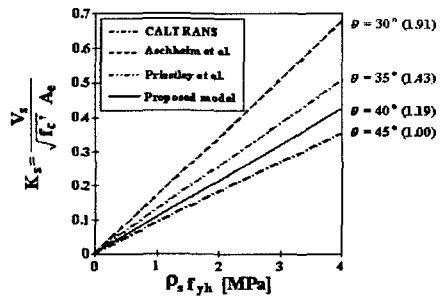
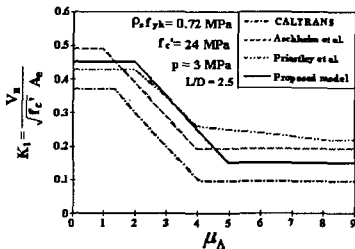
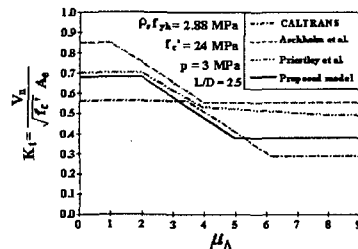


그림 3 전단철근에 의한 전단강도

그림 3은 전단철근에 의한 전단강도를  $K_s$  향으로 각 모델별로 나타낸 것이다. 각 모델들은 휨-전단 균열이 발생하는 각도  $\theta$ 로 45°, 40°, 35°, 30°를 각각 사용한다. 그림 3에 나타난 바와 같이 45°를 사용하는 경우를 기준으로 할 때 40°는 1.19배, 35°는 1.43배, 30°는 1.91배의 전단강도  $V_s$ 를 제공하게 된다.



(a)  $\rho_s f_{yh}$  이 0.72 MPa인 경우



(b)  $\rho_s f_{yh}$  이 2.88 MPa인 경우

그림 4 각 모델에 의한 전단성능

그림 4는 특정한 조건에 대하여 네 가지 모델의 적용결과를 나타낸 것이다. 그림 4의 (a)와 (b)는 캔틸레버 교각의 경우로서 형상비(L/D)가 2.5, 축력에 의한 응력  $p$ 가 3 MPa, 콘크리트의 압축강도가 24 MPa로 동일하지만 횡방향 철근량이 각기 다른 경우이다.

### 3. 모델 평가를 위한 실험결과 및 모델 적용

그림 5는 반복 횡하중에 의한 횡하중-변위 실험결과와 포락선과 각 모델의 적용결과를 나타낸다. 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.

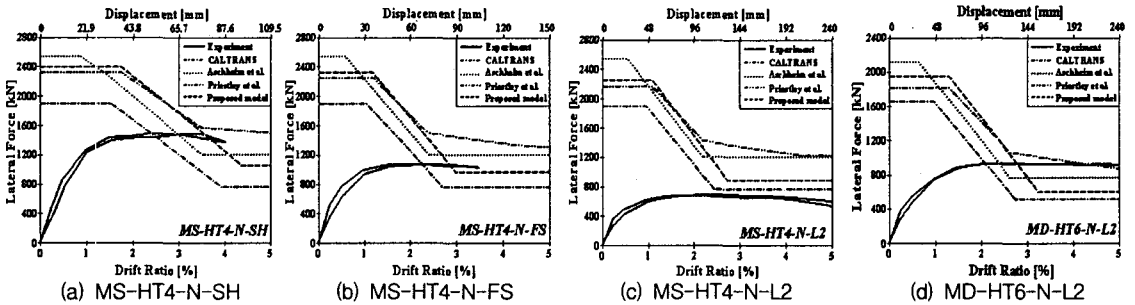


그림 5 횡하중-변위 실험결과에 대한 각 모델의 적용

표 1 파괴형태의 실험결과 및 각 모델에 의한 예측결과

Specimens	Failure mode				
	Test result	CALTRANS	Aschheim & Moehle	Priestley et al.	Proposed model
MS-HT4-N-SH	flexure-shear	flexure-shear (correct)	flexure-shear (correct)	flexure (wrong)	flexure-shear (correct)
MS-HT4-N-FS	flexure-shear	flexure-shear (correct)	flexure (wrong)	flexure (wrong)	flexure-shear (correct)
MD-HT4-N-L2	flexure	flexure (correct)	flexure (correct)	flexure (correct)	flexure (correct)
MD-HT6-N-L2	flexure-shear	flexure-shear (correct)	flexure-shear (correct)	flexure-shear (correct)	flexure-shear (correct)

### 4. 결론

Priestley 등의 모델을 기본 형태로 하여 수정한 전단성능곡선 모델을 제안하였고, CALTRANS 모델, Aschheim 등의 모델, Priestley 등의 모델, 제안모델의 특징을 비교하였으며, 국내에서 수행된 실물크기 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.