

# 개구부를 갖는 전단벽의 전단강도

## Shear Strength of R/C Shear Walls with Openings

윤 현 도\*      최 창 식\*\*      황 선 경\*\*\*      한 병 찬\*\*\*\*      박 완 신\*\*\*\*  
Yun, Hyun Do    Choi, Chang Sik    Hwang, Sun Kyung    Han, Byung Chan    Park, Whoan Shin

### Abstract

Results of 61 framed reinforced concrete shear walls with openings were reviewed to evaluate the current design provisions for nominal shear strength. Provisions for ACI 318-02 and AIJ Code pertaining to shear design of shear walls evaluated the applicability of shear walls with openings subjected to lateral and vertical loads. Evaluation of test results indicates that the nominal unit shear strength( $\Psi=1.0$ ) calculated using the provisions of ACI and AIJ does not represent the observed shear strength well. Based on the limited database considered in this study, A reasonable lower bound to the shear strength of high-strength concrete shear walls is found to be  $1.09\sqrt{f_{cu}}$  kgf/cm<sup>2</sup>.

### 1. 서론

철근콘크리트 전단벽은 지진 또는 바람과 같은 횡하중 저항요소로 널리 적용되고 있으며 전체 구조물의 횡하중 특성을 지배하는 요소가 된다. 특히 강진지역에서 강한 지진하중의 작용시 전단벽이 탄성적인 거동을 하도록 설계하는 것은 현실적으로 불가능하고 강진시 전단벽의 저면에서 비탄성 거동이 예상되므로 현재까지 국내외의 많은 연구자들은 철근콘크리트 전단벽의 연성적 거동을 확보를 위한 보강상세 및 설계기법<sup>1)</sup> 등에 관한 주제에 중점을 두고 연구를 진행하여 왔다. 이러한 결과를 근거로 국내의 전단벽에 대한 설계규준은 과거에 비하여 보다 합리적으로 개정 및 정비되었다.

현행 UBC 및 ACI 규준은 대칭 및 비대칭 단면으로 개구부를 갖지 않는 전단벽에 대한 설계방법을 제시하고 있으나 일부 전단벽의 경우 구조물의 기능상 개구부의 설치에 필연적이라 할 수 있으며 개구부가 적은 경우 개구부의 효과를 무시하고 현행 규준에 대한 적용이 합리적일 것으로 판단된다. 그러나 일부 전단벽에서는 개구부의 크기가 상대적으로 크거나 비탄성 예상되는 임계영역에 위치하기도 하므로 이러한 경우 개구부가 전단벽에 끼치는 영향에 대한 평가가 요구되고 있다. 특히 전단이 지배적인 형상비( $h/l$ )가 작은 전단벽의 경우 개구부는 전단벽의 전반적인 거동 및 항복이후 비탄성 거동에 대한 영향은 형상비가 큰 휨이 지배적인 벽체에 비하여 그 영향이 클 것으로 판단된다.

현행 UBC 및 ACI 규준에서는 개구부를 갖는 벽체에 대한 적절한 설계지침을 제시하지 못하고 있으나 상대적으로 개구부를 갖지 않는 전단벽에 대한 이에 대한 연구에 비하여 극히 적은 실정이다. Wight와 Ali는 개구부가 휨이 지배적인 벽체의 경계부재에 근접하여 설치된 경우 벽체의 전단 압축 파괴에 끼치는 영향을 평가하기 위한 실험을 실시하였으며 또한, Wallace와 Taylor 등은 벽체의 저면에 개구부를 갖는 휨항복형 벽체에 대한 휨거동 규명 및 변위기초설계법에 따른 경계부재의 횡보강근량 산정방법을 검증하기 위한 연구를 실시하였다. Yanez 등은 개구부 배열 및 개구부 크기 등을 주요 변수로한 비정형 개구부를 갖는 전단벽에 대한 내진성능 평가를 위한 연구를 수행하였다.

반면 일본에서 1980년대부터 Aoyama를 시작으로 80년대 후반 Kabeyasawa, 90년대 후반부터 Ono

\* 정회원, 충남대학교 건축공학과 부교수

\*\* 정회원 대전대학교 건축공학과 부교수

\*\*\* 정회원 우송대학교 건축학과 강의전담교수

\*\*\*\* 정회원 충남대학교 강사

등을 중심으로 개구부를 갖는 전단벽에 대한 연구를 진행하여 왔다. 이러한 연구결과를 근거로 일본건축학회(Architectural Institute of Japan) 철근콘크리트 구조계산규준<sup>2)</sup>에서는 개구부의 면적비(等価開口周比 =  $\sqrt{h_o l_o / h l}$ ,  $h_o$  및  $l_o$ 는 개구부 높이와 폭,  $h$ 와  $l$ 은 벽체의 높이와 폭)에 따라 강성 및 내력을 저감하는 저감율 및 개구부 주변의 보강근량을 산정하는 방법을 제안하고 있으나 이러한 보강근량의 산정방법은 탄성 판이론 및 간략화한 응력분포상태를 가정함으로써 균열발생이후 및 최대내력하에서는 적용 가능성이 의문시되고 있다. 또한, 현행 AIJ 규준에서는 개구부의 면적비 0.4이상의 경우 벽판부분을 무시하고 단순한 골조로 고려하여 내력 및 강성을 산정하도록 규정하고 있어 다소 실제적인 거동과 다르게 규정하고 있다.

이에 본 논문에서는 개구부의 면적비 0.16~0.75인 개구부를 갖는 바벨형 단면의 전단벽에 대한 기존 실험결과를 근거로 개구부를 갖는 전단벽의 전단강도 특성을 분석하고 이를 근거로 현행 규준식 및 경험식에 대한 적용 가능성을 평가하고자 한다.

## 2. 전단벽의 전단저항기구

전단벽의 전단저항기구는 전단이 지배적인 깊은 보를 포함한 보와는 다르며 이는 전단벽과 보의 크기, 경계조건 및 하중의 작용상태가 다르기 때문이다. 따라서 보의 전단저항기구를 근거로 현행 규준에서 규정하고 있는 전단벽의 공칭 전단강도식을 개구부가 설치된 전단벽에의 적용 가능성을 검토하고 또한 개구부를 갖는 전단벽의 전단강도에 대한 기존 제안식의 적용 가능성을 평가하기 위하여 전단벽의 전단저항기구에 대한 개구부 영향 평가가 선행되어야 한다.

전단벽의 전단저항기구의 주요한 요소는 그림 1에 나타난 바와 같이 벽면에 형성된 대각선 압축지주(Strut)와 벽체에 보강된 수평 및 수직철근(형상비에 따라 수평 또는 수직철근이 지배적인 요소로써 역할)이 구성하는 트러스 기구에 의해 외력에 저항한다. 이외에도 균열면에서 골재의 맞물림 작용, 기초와 벽체의 경계면에서 벽체에 작용되는 축하중 및 경계면에 교차되는 철근에 의해 형성된 전단마찰기구 등에 의해 외력에 저항한다.

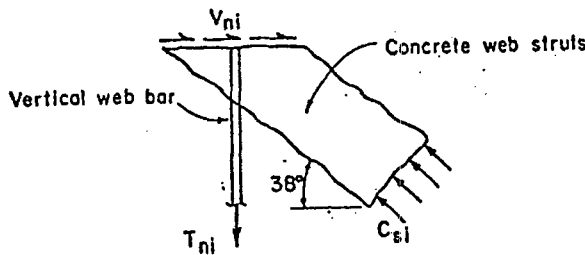
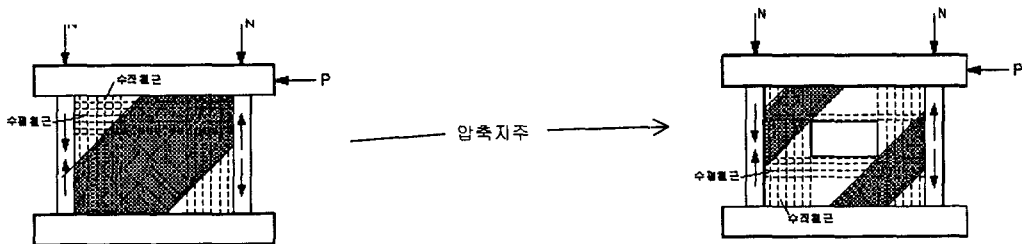


그림 1 횡하중을 받는 전단벽의 전단저항요소



(a) 개구부가 없는 벽체

(b) 개구부를 갖는 벽체

그림 2 횡하중을 받는 전단벽의 전단저항기구

그림 2는 개구부 유무에 따른 전단벽내에서의 압축지주 형성을 모식화하여 비교한 것이다. 그림 2(a)는 개구부가 설치되지 않은 벽체로 전단벽 상부에 수평하중의 작용시 벽체 중앙부에 형성된 폭 넓은 대각선 압축지주 및 벽체의 철근이 형성하는 트러스 기구에 의해 외력에 저항하는 기구가 형성된다. 반면 그림 2(b)와 같이 벽체에 개구부가 설치된 전단벽의 압축지주는 벽체에 설치된 개구부로 인하여 그림 2(a)와는 다르게 나타나며 특히 개구부의 위치 및 크기에 따라 압축지주의 면적은 급격하게 변화된다. 따라서 개구부를 갖는 전단벽의 전단강도 평가를 위한 기준 및 제안식에서는 개구부의 영향을 간접적으로 고려하기 위하여 개구부 면적비를 반영하고 있다.

### 3. 개구부를 갖는 전단벽의 전단강도식

#### 3.1 ACI 318<sup>3)</sup>

현행 ACI 기준에서는 개구부를 갖는 전단벽에 대한 설계규정을 마련하고 있지 않으며 개구부를 갖지 않는 벽체의 전단설계 규정에서는 전단벽체 콘크리트의 압괴에 의한 취성적인 파괴를 방지하기 위하여 전단벽의 공칭 전단강도를 다음과 같은 값 이하가 되도록 규정하고 있다.

$$V_n = A_{cv}(\alpha_c \sqrt{f_{ck}} + \rho_n f_y) \leq 2.64 \sqrt{f_{ck}} h d \quad (1)$$

여기서,  $A_{cv}$ 는 벽체의 유효 단면적,  $\rho_n$ 는 수평철근비,  $\alpha_c$ 는 형상비( $h_w/l_w$ ) 1.5이하에서 0.80이고 형상비 2이상에서 0.53이며 그 사이는 직선보간하여 산정한다.

#### 3.2 AIJ 기준<sup>2)</sup>

현행 일본 철근콘크리트 구조계산 기준에서는 개구부를 갖는 전단벽의 응력계산 및 단면산정을 위하여 1) 개구부가 큰 경우(等価開口周比 > 0.4)는 골조로 가정하여 강성 및 강도를 산정하며 2) 개구부가 작은 경우(等価開口周比 ≤ 0.4)에는 응력 및 단면산정시 개구부와 관련된 저감율을 개구부가 설치되지 않은 전단벽의 내력에 곱하여 산정하도록 규정하고 있다.

AIJ 철근콘크리트 구조계산 기준에서는 개구부를 갖는 전단벽의 전단강도는 개구부가 설치되지 않은 전단벽의 전단강도 산정식(2)에 의해 구하도록 규정하고 있으며  $\rho_s \cdot \sigma_{sy}$ 가  $\nu \cdot f_{ck}/2$ 를 초과하는 경우  $\rho_s \cdot \sigma_{sy} = \nu \cdot f_{ck}/2$ 로 제한하고 있다.

$$V_u = t_w \cdot L_{wb} \cdot \rho_s \cdot \sigma_{sy} \cdot \cot \phi + \tan \theta (1 - \beta) t_w \cdot L_{wo} \cdot \nu f_{ck} / 2 \quad (2)$$

여기서  $\tan \theta = \sqrt{(h/L_{wo})^2 + 1} - h/L_{wo}$ ,  $\beta = (1 + \cot^2 \phi) \rho_s \cdot \sigma_{sy} / (\nu \cdot f_{ck})$ ,  $\sigma_{sy}$ 는 벽체 전단보강근의 신뢰강도로 4,000kgf/cm<sup>2</sup>이하이며,  $t_w$ 는 벽체두께,  $\rho_s$ 는 벽체의 전단보강근비,  $\phi$ 는 트러스기구에 있어서 압축지주의 경사각이며  $\cot \phi = 1$ ,  $L_{wo}$  및  $L_{wb}$ 는 아치 및 트러스 기구의 등가 벽체길이,  $\nu$ 는 콘크리트의 유효강도계수이다.

이상과 같은 내력산정식과 일본 철근콘크리트 구조계산 기준에서 규정하고 있는 내력저감율  $\gamma$ 를 이용하여 개구부를 갖는 전단벽의 전단내력을 평가하도록 규정하고 있다. 여기서 식(3)은 단일한 개구부 설치시 강도저감율이고 식(4)는 2개이상의 개구부 설치시 강도저감율을 나타낸다.

$$\gamma = \min[\gamma_1 = 1 - l_o/l, \gamma_2 = 1 - \sqrt{h_o l_o / h l}] \quad (3)$$

$$\gamma = \min[\gamma_1 = 1 - 2l_o/l, \gamma_2 = 1 - \sqrt{2h_o l_o / h l}] \quad (4)$$

이상과 같은 기준식외에도 Hirosawa 제안식<sup>4)</sup> 및 이론적인 방법에 의한 여러 제안된 모델(Macro 및 Micro Model)이 있다.

본 논문에서는 ACI, AIJ 및 Hirosawa가 제안한 전단강도에 AIJ 철근콘크리트 구조계산 기준에서 규정하고 있는 강도저감율을 고려한 계산결과와 개구부가 설치된 기존 전단파괴형 전단벽의 실험결과를 비교하여 강도저감율을 반영한 전단강도 평가방법의 적용가능성을 검토하고 아울러 기존 실험결과를 근거로 개구부가 설치된 전단파괴형 전단벽의 전단강도 특성을 규명하고자 한다.

### 4. 선정 시험체

본 연구에서 선정된 시험체는 1982년 이후 일본 콘크리트학회 및 건축학회 논문<sup>5)~12)</sup>에 발표된 개구부가 설치된 전단파괴된 총 61개의 독립 전단벽이다.

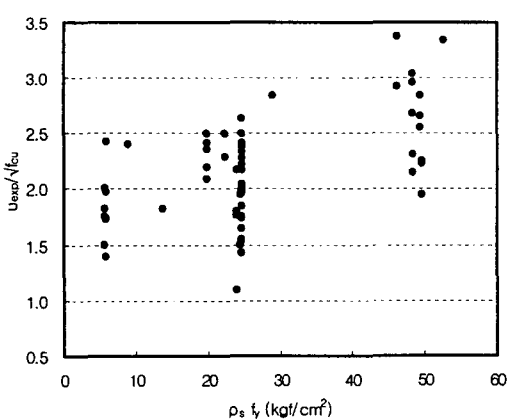
#### 4.1 시험체의 특성

모든 선정 시험체의 단면은 대칭상태이며 단면형상은 바벨형 단면으로 구성되었다. 선정 시험체의 형상비는 0.53에서 1.33범위이며 각 시험체의 콘크리트 압축강도 범위는 198에서 434kgf/cm<sup>2</sup>범위로 폭 넓게 나타났다. 선정 시험체의 수평철근비는 0.25에서 1.19% 범위를 보였으며 특히 전단벽의 전단내력에 주요한 영향을 끼치는 수직철근비와 항복강도의 곱은 5.7에서 52.6kgf/cm<sup>2</sup>범위를 보였다. 시험체의 벽체 두께는 3에서 10cm범위, 모든 시험체에 9에서 63.2tonf범위의 축하중이 작용되었다.

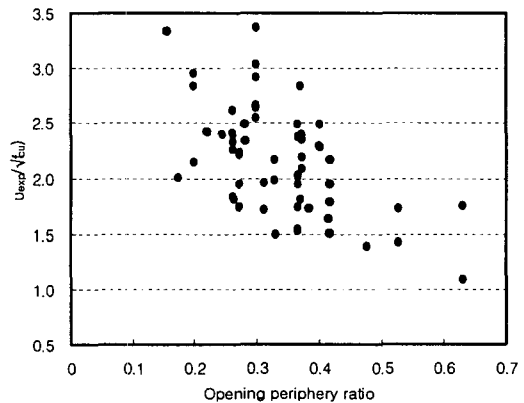
#### 4.2 전단벽의 전단강도 특성

본 절에서 전단벽 시험체의 전단강도( $v_{exp}$ )는 최대 전단력을 벽체의 유효단면적에서 벽체에 설치된 개구부 면적을 저감한 면적으로 나누어 산정한 최대 평균 전단응력 [ $V_{exp}/(t_w \cdot l - h_o \cdot l_o)$ ]으로 정의한다. 모든 선정된 개구부를 갖는 전단벽 시험체는 17.76kgf/cm<sup>2</sup>의 전단응력에 저항할 수 있는 것으로 나타났으며 1이하인 개구부를 갖지 않는 전단벽에 대한 본 연구자인 윤현도의 연구결과<sup>13)</sup>와 비교하여 볼 때 각각 1.35배 높은 결과를 보이고 있으나 이는 콘크리트 압축강도의 차에 따른 것으로 판단된다.  $\rho_s \cdot f_y$  및 개구부의 면적비(Opening periphery ratio)에 따라 개구부를 갖는 전단벽의 전단강도는 다소 분산된 경향을 보였으나  $\rho_s \cdot f_y$ 가 증가됨에 따라 증가되는 경향을 보였으며 이는 개구부를 갖지 않는 전단벽과 유사하게 나타났다. 또한 개구부의 면적비가 증가됨에 따라 단면에 작용되는 평균전단응력은 감소되었다.

그림 3은 선정된 개구부를 갖는 전단벽의 전단강도를 콘크리트 압축강도 제곱근값으로 무차원화하여 나타낸 것으로 그림에 나타난 바와 같이 선정된 전단벽 시험체의 전단강도는  $1.09\sqrt{f_{cu}} \sim 3.36\sqrt{f_{cu}}$  kgf/cm<sup>2</sup>범위로 나타났으며 본 연구자의 개구부를 갖지 않는 보통강도 전단벽에 대한 연구결과인  $1.09\sqrt{f_{cu}} \sim 6.25\sqrt{f_{cu}}$ kgf/cm<sup>2</sup>에 비하여 최저값은 대등하게 나타났으나 최대값은 0.54배 낮은 값을 보이고 있다. 그림 3으로부터 본 연구에서 선정된 개구부를 갖는 보통강도 콘크리트 전단벽의 평균 전단강도에 대한 하한값은  $1.09\sqrt{f_{cu}}$  (0.34 $\sqrt{f_{cu}}$ MPa)정도로 나타났다. 현행 ACI 규준에서는 압축지주의 급격한 압괴를 억제하기 위하여 독립 전단벽의 평균 전단응력을  $2.64\sqrt{f_{cu}}$  kgf/cm<sup>2</sup>로 제한하고 있으며 본 연구에서 선정된 총 61개의 개구부를 갖는 전단벽 시험체중 16%를 제외한 모든 전단벽 시험체의 전단강도는 ACI 규준에서 정하고 있는 평균 전단응력에 대한 제한값이하에서 파괴되는 것으로 나타났다.



(a) 벽체의 수평 철근비와 항복강도의 곱



(b) 벽체의 개구부면적/벽체면적 비

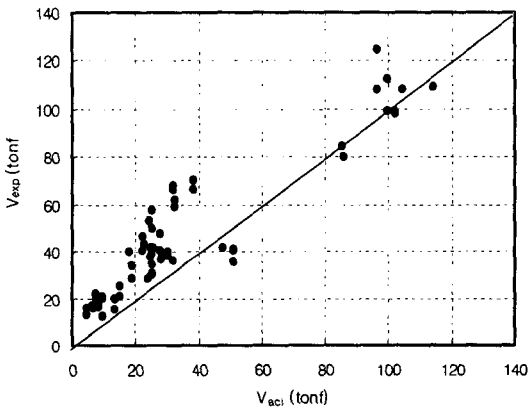
그림 3 무차원 평균 전단응력과 벽체 철근량 및 개구부 특성의 관계

#### 5. 개구부를 갖는 전단벽의 전단강도

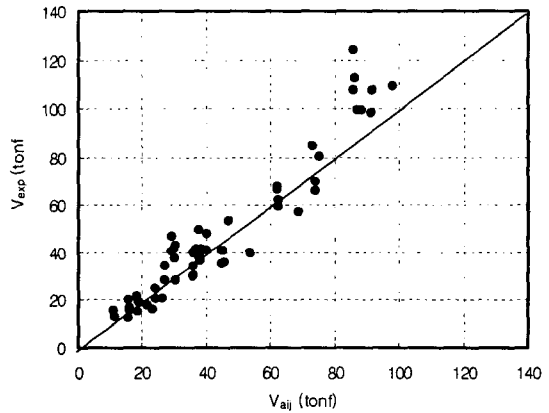
그림 4는 ACI 및 AIJ 규준에 의해 계산된 공칭 전단강도에 AIJ 철근콘크리트 구조계산 규준에서

제안하고 있는 강도감소율을 곱하여 산정된 개구부를 갖는 전단벽의 전단강도에 대한 계산값과 본 연구에서 선정된 61개의 개구부를 갖는 전단벽의 실험결과로부터 산정된 전단강도를 비교하여 나타낸 것이다. 이외에도 ACI 규준의 적용시 유효단면적에서 개구부에 의해 결손면적을 제외하고 전단내력을 산정한 방법도 강도감소율을 고려한 방법과 큰 차이를 보이지 않았으며 일본 Hirosawa 제안식은 AIJ 규준식과 유사한 경향을 보였으며 제안식에 의한 계산값은 AIJ 규준식에 비하여 높게 평가되었다.

그림 4에 나타난 바와 같이 AIJ 및 Hirosawa 제안식에 의한 계산결과는 안전측이며 실험값을 합리적인 범위내에서 평가하고 있으나 현행 ACI 규준식은 계산결과에 전단에 대한 강도감소계수 (Strength reduction factor)를 고려한다면 안전측인 경향을 보이고 있으나 실험값을 지나치게 과소평가하는 경향이 있어 개구부를 갖지 않는 전단벽의 전단강도식에 AIJ 규준에서 제안하고 있는 강도감소율을 그대로 적용하는 방식은 합리적이 못한 것으로 판단된다. 아울러 개구부를 갖는 전단벽의 전단에 대한 유효 단면산정시 개구부에 의한 결손단면을 제외하는 방식도 전술한 강도감소율을 고려하는 방식과 유사한 경향을 보였다. 이상과 같은 결과로부터 개구부를 갖는 전단벽의 전단설계 규준에 대한 관련 연구 및 수립이 시급히 요구되는 것으로 판단된다.

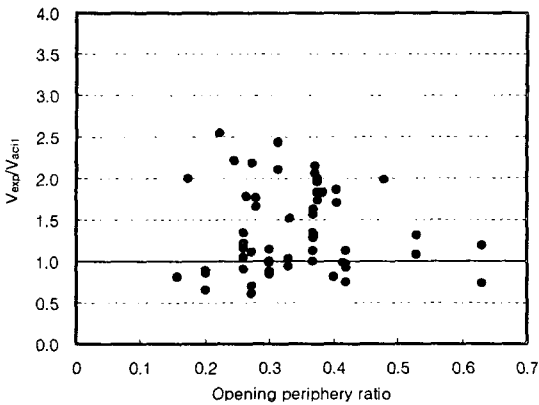


(a) ACI 규준

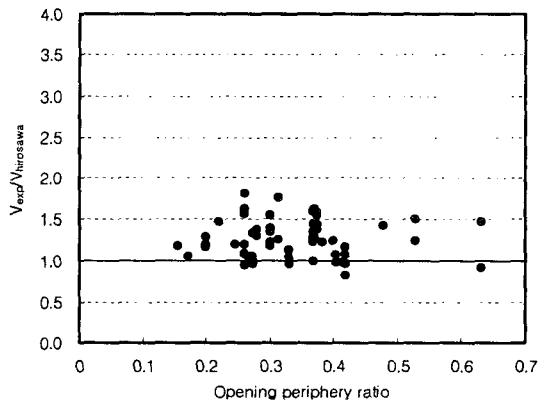


(b) AIJ 규준

그림 4 각 규준에 의한 계산결과와 실험결과의 비교



(a) 개구부 면적비에 따른  $V_{exp.} / V_{aci}$  변화



(b) 개구부 면적비에 따른  $V_{exp.} / V_{hirosawa}$  변화

그림 5 개구부 면적비에 따른 규준 및 제안식에 의한 계산값과 실험값의 비교

그림 5는 ACI 규준에 의한 개구부를 갖는 전단벽의 전단내력산정시 강도감소율을 고려하지 않고 유효단면적 산정시 개구부 면적을 제외하는 방식 및 Hirosawa 제안식에 의한 계산값과 실험값의 비에 대하여 개구부 면적비를 비교하여 나타낸 것이다. 다소 분산된 결과를 보이고 있으며 개구부의 면적비가 계산값과 실험값의 오차에 큰 영향은 없는 것으로 판단되며 또한 AIJ에서 개구부 면적비 0.4 이상인 경우 AIJ 개구부를 갖는 전단벽에 대한 강도평가식을 적용하지 않고 골조로 고려하도록 규정하고 있으나 본 연구범위내에서 개구부 면적비 0.4이상에도 AIJ 규준식의 적용상 큰 제한은 없는 것으로 나타났으나 이 범위내의 실험결과가 많지 않으므로 이에 대한 지속적인 주의도 요망된다.

## 6. 결론

기 발표된 논문을 근거로 선정된 61개 전단파괴형 개구부를 갖는 전단벽의 전단강도 특성에 대한 분석결과, 개구부를 갖는 전단벽이 저항할 수 있는 평균 전단강도는  $1.09\sqrt{f_{cu}} \text{ kgf/cm}^2$  ( $0.34\sqrt{f_{cu}} \text{ MPa}$ )로 나타났으며 본 연구자가 제안한 형상비 1이하이며 개구부를 갖지 않는 보통강도 콘크리트 전단벽의 평균 전단강도와 대등한 값을 보이고 있으나 Wood<sup>14)</sup>에 의해 제안된 개구부를 갖지 않는 형상비 2이하인 전단벽의 전단강도 하한값  $1.60\sqrt{f_{cu}} \text{ kgf/cm}^2$  ( $0.50\sqrt{f_{cu}} \text{ MPa}$ )은 개구부를 갖는 전단파괴형 전단벽에 있어서는 안전측이지 못한 것으로 판단된다.

현행 개구부를 갖지 않는 전단벽의 전단강도 평가를 위한 ACI 및 AIJ 규준식에 AIJ에서 전단벽의 개구부 면적과 벽체 전체 면적의 비에 근거하여 평가하는 강도감소율을 고려하는 방식에 의한 전단강도 평가방법은 전단에 대한 강도감소계수를 고려한다면 두 규준식 모두 안전측으로 평가되고 있으나 ACI 규준식은 실험값을 지나치게 과소평가하는 경향이 있어 경제적인 측면에서 합리적이지 못함으로 이에 대한 지속적인 연구와 검토가 요구된다.

## 참고문헌

1. R.G.Oesterle et al(1980), "Reinforcement detail for earthquake-resistant structural walls," Concrete International, pp.55~66.
2. 日本建築學會(1988), "鐵筋콘크리트構造計算規準 同解説."
3. ACI Committee 318(2002), "Building Code Requirements for Structural Concrete(ACI 318-02) and Commentary(ACI 318R-02)," American Concrete Institute, Michigan.
4. Hirosawa(1975), "Past experimental results on R.C shear walls and analysis on them," BRI
5. 東浦 章 外3人(1990), "高配筋耐震壁の復元力特性に及ぼす開口の影響," 日本建築學會構造系論文報告集, pp.39~48.
6. 武田 寛 外3人(1986), "鐵筋콘크리트造雜 壁付き柱の耐力及び變形性状に關する實驗的研究," 日本建築學會大會學術講演概要集, pp. 397~398.
7. 小池考平 外3人(1980), "有開口鐵筋콘크리트耐震壁の變形と耐力について," 日本建築學會論文報告集 第239號.
8. 全大翰 外3人(1988), "鐵筋콘크리트造開口耐震壁の補強方法と靱性," 콘크리트工學年次論文報告集, 10-3, pp. 415~420.
9. 壁谷澤 壽海 外2人(1988), "鐵筋콘크리트造開口耐震壁の補強法に關する實驗的研究," 콘크리트工學年次論文報告集, 10-3, pp. 409~414.
10. 加藤大介 外1人(1988), "鐵筋콘크리트造開口壁のせん斷補強法に關する研究," 콘크리트工學年次論文報告集, 10-3, pp. 403~408.
11. 野村設郎 外2人(1984), "鐵筋콘크리트縱開口壁の耐震性能に關する研究," 日本建築學會構造系論文報告集, pp.1909~1910.
12. 東 洋一 外5人(1982), "斜めワイヤーメッシュで補強した鐵筋콘크리트開口壁に關する研究," 日本建築學會構造系論文報告集, pp.1477~1478.
13. 윤현도, 최창식, 이리형(1993), "철근콘크리트 저형 전단벽의 전단강도," 대한건축학회 논문집, 9(7), pp. 163~171.
14. Sharon L. Wood(1990), "Shear Strength of Low-Rise Reinforced Concrete Walls," ACI Journal, 87(1), pp.99~107.