개구부를 갖는 철근콘크리트 전단벽의 전단강도 저감률

배백일¹⁾ · 최윤철²⁾ · 최창식¹⁾ · 최현기^{1)*}

¹⁾ 한양대학교 건축공학부 ²⁾ 청운대학교 건축설비소방학과

Shear Strength Reduction Ratio of Reinforced Concrete Shear Walls with Openings

Baek-II Bae,¹⁾ Yun-Cheul Choi,²⁾ Chang-Sik Choi,¹⁾ and Hyun-Ki Choi^{1)*}

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²⁾Dept. of Architectural Environmental Engineering and Building Service, ChungWoon University, Hongseong 350-803, Korea

ABSTRACT There are many types of remodeling, however, engineers and architectures preferred to merge two or more separate units to one very spacious unit. Performing this type of remodeling, in the case of wall dominant apartments, requires partial removal of structural wall causing a concern of structural integrity. However, there are insufficient studies about partial removal, that is, openings. Presently, ACI standard have no clear way to evaluate the effect of opening on the structural wall. AIJ has the provision about strength reduction factor ' γ '. However, this reduction factor cannot exactly evaluate the reduction effect of openings because this factor ' γ ' was determined through the elastic analysis. Therefore, in this study, 2 structural wall specimens were tested and many test results from previous studies were collected. Using these data, this study performed statistical analysis about strength of structural wall which have the opening in wall panel. And this study performed parametric study verifying shear strength reducing effect by opening area. In the results of statistical study, previous reduction factor show very conservative results because this equation did not consider other factors, reinforcement ratio and aspect ratio of openings, which was affect the shear strength of shear walls. Therefore we performed parametric study based on the test data and suggest new equation for shear strength reduction factor ' γ '.

Keywords : shear wall, opening-wall area ratio, shear strength reduction factor

1. 서 론

높은 횡강성이 요구되는 고층 건축물에서 지진이나 바람과 같은 횡하중 저항요소로서 전단벽의 사용은 매우 효율적인 구조시스템이다. 철근콘크리트 내력벽(structural wall)의 일종인 전단벽의 내진성능은 과거의 지진에 대한 피해조사 및 기존 전단벽에 대한 연구 결과로부터 이미 입증되었다.¹⁻³⁾ 이러한 전단벽에 대한 대다수의 연구는 전단벽의 연성적 거동확보를 위한 내진성능 개선에 집중되어 왔으며, 특히 개구부가 설치되지 않은 전단벽을 대상으로 진행되어 왔다. 이러한 연구 결과를 바탕으로 현행 IBC⁴⁾ 및 ACI⁵⁾ 규준에서는 대칭 및 비대칭 단면의 개구부를 갖지 않는 전단벽에 대한 설계방법만을 제시하고 있는 실정이다.³⁾

개구부가 설치된 전단벽에 대하여서는 일본을 중심으

로 80년대 중반 青山博之,⁶⁾ 小野正行⁷⁾에 의해 수행된 전단벽의 개구부 영향 및 보강상세에 관한 연구 결과가 발표되었으며 Ali와 Wight⁸⁾는 개구부가 휨이 지배적인 벽체의 경계부재에 근접하여 설치된 경우 개구부가 벽체의 전단 압축파괴에 끼치는 영향을 평가하기 위한 실험을 실시하였다. Taylor⁹⁾ 등은 벽체의 저면에 개구를 갖는 휨항복형 벽체에 대한 휨 거동구멍 및 변위기초설계법에 따른 경계부재의 횡보강근량 산정방법을 검증하기 위한 실험 연구를 실시하였으며, Yanez¹⁰⁾ 등은 개구부 배열 및 개구부 크기 등을 주요 변수로 한 비정형 개구부를 갖는 전단벽의 내진성능 평가를 수행하였다. 국내에서는 최창식, 윤현도^{3,11,12)}에 의해 개구부 크기, 위치, 형상 및 개구부 설치에 따른 연결부재에 관한 실험 및 해석적 연구를 수행하여 개구부를 갖는 전단벽의 전단강도와 변형능력에 관한 연구 결과와 전단 내력의 상실에 대한 보강방법을 발표하였다.

개구부가 설치된 전단벽의 경우 개구부가 설치되지 않은 벽체와 동일하게 트러스 기구에 의한 저항을 하지만 개구부 설치에 따른 벽면의 압축지주의 유효면적이 감소

*Corresponding author E-mail: chk7796@naver.com
Received September 2, 2009, Revised March 29, 2010,
Accepted April 25, 2010
©2010 by Korea Concrete Institute

됨에 따라 개구부의 크기, 위치, 형상 등의 변수가 전체적인 거동 및 전단강도에 큰 영향을 끼치게 된다. 그러나 현행 국내 기준은 전단벽의 변형능력 및 전단강도 특성에 개구부의 영향을 명확하게 규정하고 있지 않다.

이에 이 연구에서는 개구부가 신설된 전단벽의 성능 평가를 위해 실험을 수행하였고 기 수행된 전단벽의 실험 결과를 통해 개구부 설치에 따른 전단벽의 전단강도 및 변형능력 특성을 분석하여 개구부 설치에 따른 전단벽의 전단강도 평가방법을 제안하고자 한다.

2. 전단벽의 전단설계 기준

2.1 ACI 318-08

현행 ACI 318-08⁵⁾ 기준에서는 전단 철근이 보강된 철근콘크리트 부재에 대한 전단강도는 콘크리트가 부담하는 전단 저항 능력 이외의 나머지 부분은 전단 철근이 부담한다고 가정하고 식 (1)과 같이 제안하고 있다. 그러나 개구부를 갖는 전단벽체의 전단설계규정은 마련되어 있지 않으며 취성적 파괴를 방지하고자 하한규정을 두고 있다.

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

여기서 V_n 은 철근콘크리트 벽체의 공칭 전단강도, V_s 는 철근의 기여분이며, 벽체의 경우 콘크리트의 기여분(V_c)은 임의의 단면에서 사균열 강도를 결정하는데 사용할 수 있도록 식 (2)와 (3)중 작은 값을 적용하도록 규정하고 있다.

$$V_c = 0.27\sqrt{f_{ck}}hd + \frac{N_u d}{4l_w} \quad (2)$$

$$V_c = \left[0.05\sqrt{f_{ck}} + \frac{l_w \left(0.1\sqrt{f_{ck}} + \frac{0.2N_u}{l_w h} \right)}{\frac{M_u}{V_u} - \frac{l_w}{2}} \right] hd \quad (3)$$

여기서 f_{ck} : 콘크리트 설계기준 압축강도, h : 벽체의 길이, d : 벽체의 두께, $l_w = 0.8h$, N_u : 벽체에 작용하는 압축력, M_u : 단면에 작용하는 계수 모멘트, V_u : 단면에 작용하는 계수 전단력이다.

단, 식 (3)에서 $(M_u/V_u - l_w/2)$ 의 값이 감소함에 따라 이 값이 음수가 되기 직전에 이르면 식 (2)가 좌우하게 되므로 $(M_u/V_u - l_w/2)$ 의 합이 음수가 되면 식 (2)만을 사용하여야 한다. 또한 전단벽체의 전단 철근의 기여분(V_s)는 식 (4)와 같이 규정하고 있다.

$$V_s = \frac{A_v f_y d}{s} \quad (4)$$

그러나 이러한 규정은 개구부의 영향을 고려하지 않은 것으로 개구부가 작다면 이와 같은 개구부의 영향은 무시할 수 있으나, 개구부가 상대적으로 크거나 위험영역에 있어 비탄성변형이 예상되는 경우 벽체의 거동에 개구부가 미치는 영향은 따로 고려되어야 한다.

2.2 AIJ 기준¹³⁾

AIJ 철근콘크리트 구조계산기준에서 개구부를 갖는 전단벽의 전단강도는 개구부가 없는 전단벽의 전단강도 산정식을 이용하도록 규정하고 있으며 $\rho_s \sigma_{sy}$ 가 $v f_{ck}/2$ 를 초과하는 경우 $\rho_s \sigma_{sy} = v f_{ck}/2$ 로 하도록 제안하고 있다.

$$V_u = t_u L_{ub} \rho_s \sigma_{sy} \cot \Phi + \tan \theta (1 - \beta) t_u L_{ua} v f_{ck} / 2 \quad (5)$$

$$\tan \theta = \sqrt{h/L_{ua} + t} - h/L_{ua} \quad (6)$$

$$\beta = (1 + \cot^2 \Phi) \rho_s \sigma_{sy} / (v f_{ck}) \quad (7)$$

여기서 σ_{sy} : 400 MPa이하, t_u : 벽체두께, ρ_s = 벽체의 전단보강근비, Φ : 트러스기구에서 압축지주의 경사각, $\cot \Phi = 1$ (전단벽의 전단강도 산정시), L_{ua} 및 L_{ub} : 아치 및 트러스 기구의 등가 벽체길이, v : 콘크리트 유효강도계수이다.

2.3 Hirosawa's equation

Hirosawa¹⁴⁾는 기존의 실험 결과를 근거로 아래와 같은 식 (8)을 전단벽의 전단강도 평가식으로 제안하였다.

$$Q_u = \frac{(0.068 \rho_w^{0.23} (17.7 + f_{ck}) / (M / (QD) + 0.12) + 0.85 \sqrt{\rho_w f_{ck}} + 0.1 \sigma_c) b_c j}{1} \quad (8)$$

여기서 ρ_w : 등가 인장철근비($100a_t/b_c d$), a_t : 인장축 경계부재의 주근의 단면적(장방형 단면일 경우 단부의 휨보강근 단면적), f_{ck} : 콘크리트의 압축강도, M : 위험단면에 작용되는 휨모멘트, Q : 벽체의 전단면에 대한 평균 축응력도, b_c : 등가벽두께, $j = 7d/8$, σ_c : 주변부재 축방향 응력도 이다.

이 외에 NZS¹⁵⁾ 및 CEB-FIP¹⁶⁾ 기준에서는 장방형 전단벽체에 개구부가 설치된 경우 독립된 벽체로 가정하거나 병렬 전단벽으로 고려하여 설계하도록 권장하고 있다. 또한 휨에 의해 지배되는 벽체에 대해서는 벽체 개구부 주변의 응력 흐름을 고려하여 STM으로 설계하도록 권장하고 있다.

2.4 벽체에 설치된 개구부의 영향

현행 AIJ 철근콘크리트 구조계산기준에서는 개구부를 갖는 전단벽의 전단강도는 개구부가 없는 전단벽의 내력 산정식에 강성 및 내력을 저감하는 강도 저감률(reductions

factor)을 도입하여 개구부가 있는 벽체의 내력을 평가하고 있다. 개구부를 갖는 전단벽의 강도식의 경우 탄성 판이론 및 응력 분포상태를 대략적으로 가정하여 개구부의 면적에 따른 전단벽의 강도 저감을 추정하기 위하여 강도 저감률(γ)을 산정하여 식 (5) 또는 (8)과 곱하여 산정하도록 하고 있다. 여기서 강도 저감률(γ)은 식(9), (10)과 같이 산정한다.

$$\gamma = \min[\gamma_1 = 1 - l_0/l, \gamma_2 = 1 - \sqrt{h_0 l_0 / hl}] \quad (9)$$

$$\gamma = \min[\gamma_1 = 1 - 2l_0/l, \gamma_2 = 1 - \sqrt{2h_0 l_0 / hl}] \quad (10)$$

여기서 식 (9)는 단일한 개구부를 갖는 전단벽의 강도 저감률을 나타내고 식 (10)은 2개 이상의 개구부를 갖는 벽체의 강도 저감률을 나타내며 각각에 대해 l_0 : 개구부의 길이, h_0 : 개구부의 높이, l : 벽체의 길이, h : 벽체의 높이이다.

그러나 AIJ 철근콘크리트 구조계산 기준에서 제안하고 있는 강도감소율에서는 개구부의 위치 및 형상 등에 대한 영향이 고려되지 않아 Ono⁷⁾ 등은 개구부의 크기 및 위치 형상등의 영향을 고려할 수 있도록 강도 저감률을 다음과 같이 제안하였다.

$$\gamma_u = \sqrt{\frac{\sum A_c}{hl}} \quad (11)$$

여기서 $\sum A_c$ 는 벽체의 사균열 경사각을 45도로 가정할 때 압축장을 형성하는 벽면 면적의 총합이고 hl 은 벽체의 면적이다. 식 (8)은 벽체에 발생된 대각선 균열에 의해 형성된 압축장의 유효면적이 벽면에 위치한 개구부에 의해 감소되는 영향을 고려할 수 있도록 제안된 것이다.

개구부에 대한 직접적인 설계 반영은 일본의 연구 결과가 유일하므로 개구부가 발생한 전단벽의 내력 감소 비율을 정량적으로 평가하기 위해 일본 건축학회에서 제안하고 있는 전단강도 감소율을 사용하여 기존 연구자들^{12,17-20)}의 실험체를 대상으로 분석을 실시하였다.

선정된 실험체는 전단의 지배를 받는 1 이하의 형상비를 갖는 저형 전단벽체(squat shearwall)이며, 콘크리트의 강도는 27 MPa 이하로 설정하였다. 벽체의 두께는 70~100 mm 사이에 분포되어 있다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이 대부분의 실험체의 강도 저감률은 AIJ의 강도 저감률(벽체-개구부 길이비, 벽체-개구부 면적비)과는 다르게 분포하고 있음을 알 수 있다.

제시된 강도 저감 계수는 개구부 설치에 따른 콘크리트의 유효단면적 감소에 의한 휨력 지지능력을 감소시키는 방법을 통해 결정되기 때문에 이러한 현상이 나타나는 것으로 판단되며, 그 외의 전단지지 구성 요소에(벽체의 철근비, 개구부의 형상비, 개구부의 위치 등) 대한 영향평가가 추가적으로 고려되어야 할 것이다. 또한, 현행 AIJ에서 제안하고 있는 강도저감방법은 탄성판이론

Fig. 1 Reduction rate of shearwalls with opening

Fig. 2 Detail of test specimens (unit : mm)

및 벽체의 응력분포상태를 대략적으로 가정하여 도입된 방법으로, 균열발생 이후 최대 내력 하에서의 적용 가능성에 대한 확신은 없다.

3. 실험 개요 및 실험 결과

실험체는 개구부 없는 기준 실험체와 개구부가 설치된 실험체로 분류된다. 기준 실험체는 2,600 mm × 6,000 mm, 두께 100 mm의 벽체를 대상으로 실험크기의 1/2로 축소하여 제작하였으며 개구부의 크기는 1,800 mm × 2,100 mm로 가정하였다. 이는 개구부 면적비가 23%로서, 출입문의 형태를 갖도록 계획되었으며 AIJ기준에서 제한하고 있는 한계 개구부 면적비(0.4 ≤ $[\sqrt{h_0 l_0 / hl}]$, 이 실험체 기준 16%) 초과한 실험체이다. 실험체의 제작에 사용된

Table 1 Test results

Specimen		P_{cr} (kN)	P_y (kN)	P_u (kN)	P_n (kN)			$\frac{P_u}{P_n}$			$r_{reduction\ ratio}$		δ_y	δ_u	θ_y	θ_u	μ
					ACI	AIJ	Hirosawa's	ACI	AIJ	Hirosawa's	r_{test}	r_{AIJ}					
WB-solid	+	320	560	740	672	655	862	1.10	1.12	0.86	-	-	8	12	0.61	1/108	1.5
	-	290	600	800				1.19	1.22	0.93	-	-	13.5	18	1.03	1/71	1.3
WB-0.23	+	280	420	555	-	340	448	-	1.63	1.24	0.25	0.52	7	10	0.53	1/130	1.4
	-	250	365	487				-	1.43	1.09	0.40		8	12	0.61	1/108	1.5

P_{cr} : initial crack load, P_y : yield load, P_u : maximum load (testing value), P_n : maximum ultimate design strength (retrofit strength)
 δ_y : displacement corresponding to the P_y , δ_u : displacement corresponding to the P_u , θ_y : drift corresponding to the yielding
 θ_u : deformation capacity, μ : displacement ductility ratio, r_{AIJ} : strength reduction factor(using AIJ Provisions), r_{test} : strength reduction factor(using test results)

Fig. 3 Test results and analytical results - crack pattern

콘크리트의 강도는 21 MPa이며, 철근은 D6, 인장강도 375 MPa이다. 실험체의 상세는 Fig. 2에 나타나있다.

벽체는 휨 파괴 보다는 전단 파괴가 주요 파괴모드로 나타났으며, 각 실험체의 파괴형상은 Fig. 3과 같다. 파괴형태를 살펴보면 초기 균열의 발생위치는 벽체와 기초 저면이었으며, 항복하중에 도달하기 전까지 벽체의 중앙 부분으로 전단균열이 확산되는 양상을 보였다. 항복하중 이후 전단균열의 확산범위는 크게 증가하지 않았으나, 기준에 발생한 균열과 균열사이에서 새로운 균열이 다수 발생되어, 벽체 중앙부의 사인장 균열의 폭이 증대되어 콘크리트의 박리와 벽체의 부분적인 압괴로 최종파괴 되었다.

Fig. 4에 나타난 실험체의 하중-변위 관계를 통해 최대 내력을 살펴보면, 정가력의 경우 WB-Solid 실험체는 740 kN, WB-0.23 실험체는 555 kN을 나타내었다. 부가력

Fig. 4 Load-displacement relation

의 경우는 각각 800 kN과 487 kN으로 나타났다. 23% 면적의 개구부의 영향은 벽체의 강도를 정가력시 25%, 부가력시 40% 감소시키는 것으로 나타났다. 이는, Table 1에서 나타나는 바와 같이 AIJ 기준에 의해 결정되는 벽체의 내력 감소량(0.52)은 벽체의 성능을 과소평가하는 것으로 나타났다.

AIJ에서 제한하고 있는 개구부 면적비를 초과한 실험체의 실험 결과 개구부 설치에 따른 내력 감소는 크지 않은 것으로 나타났으며, AIJ에서 제안하고 있는 개구부 면적비에 따른 강도 감소율은 개구부에 의해 벽체에 형

Fig. 5 Strength reduction ratio about vertical reinforcement

Fig. 6 Strength reduction ratio about horizontal reinforcement

성되는 압축지주의 감소를 과대평가하여 실제 보유내력을 과소평가하고 있다.

AIJ의 강도 저감률의 효과적인 사용을 위해 전단벽의 전단 강도에 직접적인 영향을 미치는 주 변수로 생각되는 벽체에 배근된 수직 및 수평철근의 기여도 평가를 수행하였다. Figs. 5와 6은 개구부 설치에 따른 벽체의 강도 저감률을 수직 철근비와 수평 철근비에 따라 나타낸 것이다.

수평, 수직 철근비는 단위 면적당 철근의 강도를 통해 나타내었다. 추세를 살펴보면, 수직 철근비의 경우 보강근의 양이 증가함에 따라 감소계수 γ 가 이 규준식을 통한 평가값과 실험값 모두 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 실험 결과는 규준식을 통한 계산으로 인해 나타난 결과보다 큰 비율로 증가하는 것으로 나타났다. 수평 철근비의 경우 보강근비의 증가에 따라 감소계수(γ)는, 기준식을 통해 평가한 값은 감소하는 경향을 나타낸 반면 실험값은 증가하는 상반된 경향을 나타내었다. 즉, 현행 AIJ 규준의 전단강도 감소계수는 수직 또는 수평 보강근비에 대한 추가적인 고려를 하지 않고 있음을 알 수 있다.

4. 유한요소해석 모델의 검증

개구부에 따른 정량적 내력 감소량을 추정하기 위해

Fig. 7 Analytical modeling

Fig. 8 Analytical results vs. test results

이 연구에서는 면적비 및 형상, 위치를 주요 변수로 해석적 연구를 수행하였다. 비선형 유한요소해석은 실험 결과를 대상으로 수행하였다.

비선형 유한요소해석은 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS/Standard²¹⁾를 사용하였으며, 해석에 사용된 모델은 Fig. 7과 같이 구성하였다. 콘크리트는 평면응력 상태의 2차원 4절점 쉘 요소(CPS4R)를 적용하였으며 철근은 트러스(T2D2) 요소를 사용하였다. 콘크리트의 모델은 콘크리트의 최대 하중 이후의 거동이 표현 가능한 concrete damaged plasticity²¹⁾로 정하였다. 여기서 적용 모델 관계식은 1축 압축시에는 Hognestad²²⁾의 모델, 인장 강성시에는 Okamura²³⁾ 모델을 사용하였다. 전단벽의 콘크리트와 철근의 부착-슬립 관계식은 CEB-FIIP Model Code 1990¹⁶⁾에서 정의하는 모델로 이상화 되었으며, 개구부의 인위적 발생으로 인한 철근의 부착력 상실에 예상되는 부위에는 부착모델을 적용하지 않았다. 변위제어를 통해 횡방향 가력상황을 이상화 하였으며 축 하중을 고정하중으로 유지하였다.

해석 결과는 Table 2와 Fig. 8과 같다. 실험과 해석의 결과를 비교해본 결과 기준 실험체인 solid 실험체의 경우 최대 내력 및 최대 변위는 각각 4%와 6%의 오차를 보였으며, 개구부가 설치된 WB-0.23 실험체의 경우 최대 내력은 10% 크게 예측되었고 변위는 10% 작게 나타나, 개구부 유무와 상관없이 해석모델이 실험값을 비교적 잘 예측하는 것으로 나타났다. 또한 실험에 의한 파

Table 2 Analytical results

Specimen	Opening size (mm)	Experimental results		FEM Analysis		Exp./FEM		Strength reduction ratio (Test)	Strength reduction ratio (FEM)	Strength reduction ratio predicted by AIJ $\max[\frac{l_o}{l}, \sqrt{\frac{h_o l_o}{h l}}]$
		$P_{\max}$ (kN)	$\delta_{\max}$ (mm)	$P_{\max}$ (kN)	$\delta_{\max}$ (mm)	$P_{\max}$	$\delta_{\max}$			
Solid	-	740	12	706	11	1.04	1.09	-	-	-
WB-0.1	600×650	-	-	634	11	-	-	-	11%	31%
WB-0.23	900×1050	555	10	504	11	1.10	0.90	25%	28%	47%
WB-0.3	1,000×1175	-	-	492	12	-	-	-	30%	54%
WB-0.39	1,200×1250	-	-	439	17	-	-	-	37%	62%
WB-0.5	1,600×1175	-	-	327	12	-	-	-	53%	70%

괴 양상 및 해석에 의한 응력 분포는 Fig. 3과 같이 실제 파괴 양상과 유사하였다.

유한요소 모델의 적합성을 검증하기 위해 이 연구에서 수행된 실험 연구에 대한 유한요소해석 뿐만 아니라 기존에 연구되었던 실험체²⁴⁾에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 실험체는 이 연구에서 수행하지 못한, 좌우로 넓은 형태의 창문 형식의 개구부가 설치되어 있는 것으로 결정하였으며 실험체의 모델링은 위에서 기술한 방법과 같도록 하였다. 유한요소해석 결과 최대 하중 및 변위는 모두 3%의 오차를 보이며 실험 결과와 매우 유사하게 나타났다.

5. 변수해석

이 연구에서는 개구부 설치에 따른 장방형 전단벽에 대한 유한요소해석을 수행하여 검증한 결과 실험값과 비교적 일치하는 것으로 나타났다. 이에 제안된 해석모델을 바탕으로 개구부 면적비(10%, 23%, 30%, 39%, 50%), 형상비(0.24, 0.94), 위치(측면, 중앙)를 대상으로 변수해석을 수행하였다.

5.1 개구부 면적비에 따른 영향

Fig. 9는 변수해석 결과에 따른 하중-변위 관계를 나타낸 것이다. 개구부 면적이 확대됨에 따라 벽체의 유효면적 감소에 따른 강도 감소가 나타났으며 변형 능력이 감소되었다. 개구부 면적비에 따른 벽체의 내력감소량은 면적비에 따라 11%에서 64% 감소되는 것으로 나타났으며, 개구부 면적에 비례하여 감소되는 것으로 나타났다.

Fig. 10은 강도 감소율에 대한 정량적 평가를 위해 개구부 면적비를 달리한 전단벽의 해석 결과를 최대 하중으로 나타낸 것이다. 개구부 면적의 증가와 함께 전단강도 감소율 γ 의 감소가 나타나고 있다. 여기서 실선은 면적비에 따른 AIJ 전단강도 감소 규준에 의한 감소율의 변화를 나타내며, 점선은 AIJ 기준에서 개구부 길이-벽체 길이의 비율에 의해 전단강도 감소율이 결정될 경우의 감소율을 나타낸다. 비선형 유한요소해석의 결과를 살

(a) Load-displacement relation (legend : opening ratio)

(b) Opening to wall area ratio = 0.1 (c) Opening to wall area ratio = 0.3

(d) Opening to wall area ratio = 0.39 (e) Opening to wall area ratio = 0.5

Fig. 9 Analytical results about various opening ratio

펴보면 AIJ 기준에서 적용하는 면적비에 의한 감소율이 해석 범위 전체에 있어서 더 크게 나타난 것을 알 수 있다. 또한 선형 감소로 대변되는 개구부-벽체 길이비에 의한 감소율보다는 낮은 감소율을 가지고 있음을 알 수 있다. 즉, AIJ 기준은 현재 개구부의 영향을 과대하게 평가하고 있으며 개구부의 설치 이후 보존되는 요소들(철근의 부착력, 연결보의 보유 전단 내력 등)의 영향을 과소평가하고 있는 것으로 판단된다.

Fig. 10 Shear strength reduction according to the opening ratio

5.2 개구부 형상비에 따른 영향

개구부 형상에 의해 산정되는 강도 저감률을 파악하기 위해 벽체 중앙부에 동일한 면적비를 갖는 개구부를 대상으로 개구부 형상비(세로/가로 비) 조절하여 해석을 수행하였다.

해석 결과 각각 265 kN, 500 kN의 최대내력을 나타내었다(Fig. 11). 이는 기준 실험체에 비해 63%, 29%의 내력이 감소된 것으로 응력 분포도에서 나타나는 것과 같이 벽체 중앙부를 관통하여 형성되는 대각선 압축지주가 중앙부에 위치한 개구부에 의해 개구부를 중심으로 상/하로 분산되었기 때문이다. 또한 잔류 벽체의 길이에 영향을 미쳐 벽체 내에 발생하는 압축지주의 폭이 더 좁아졌기 때문으로 판단된다.

5.3 개구부의 형태 및 위치에 따른 영향

개구부의 수평 및 수직 위치에 따른 해석을 수행하기 위해 출입문 형태의 개구부 및 창문형태의 개구부를 선

(a) Load-displacement relation

Fig. 11 Analytical results about various aspect ratio of opening

택하여 각 형태별 위치에 따른 벽체의 내력 평가를 위해 변수해석을 수행하였으며 해석 결과는 Fig. 12와 같다. 창문 형태의 개구부가 벽체 상부 및 중앙부를 중심으로 좌우로 배치되었을 경우(Fig. 12(a), (b)) 유사한 내력 감소를 보였다. 그러나 수직 방향으로 큰 출입문 형태의

Fig. 12 Analytical results about various location and shape of opening

Fig. 13 Other effects for reduction ratio of shear strength of shearwalls

개구부를 갖는 경우 가력 지점 쪽으로 개구부가 설치된 경우 내력 감소는 8%를 나타내었다. 이는 상부 연결보에서 시작된 유효압축 면적이 개구부 없는 전단벽과 동일한 면적을 갖게 되기 때문으로 사료된다.

6. 변수해석을 통한 강도감소 계수 제안

전단벽에 있어 개구부의 영향을 평가하기 위한 직접적인 방법은 개구부의 면적을 고려한 강도 감소계수를 개구부 없는 전단벽체의 전단 내력에 곱하는 방법만 제시되어 있을 뿐이며 나머지 방법은 스트럿-타이 모델에 의한 가정에 근거한 해석이다. 그러나 강도 저감률을 사용하는 이 방법은 실험 및 유한요소해석 결과 강도 감소 계수 산정에 있어 개구부에 대한 영향을 과대 평가하여 벽체의 내력을 과소평가하고 있다. 이는 벽체에 신설된 개구부의 평가에 있어 개구부의 형상비, 수직 수평철근의 영향, 개구부 상부 연결부재의 응력 분담 효과를 무시하고 있기 때문으로 판단된다. 또한 개구부의 한계 면적에 있어 기준에서 제한하고 있는 개구부 면적비는 과도한 안전율을 채택하고 있는 것으로 사료된다.

실험 및 해석적 연구 결과, 개구부의 면적 및 형상비, 철근비 등이 벽체의 잔존 내력에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다. 이에 이 연구에서는 해석에 의해 결정된 형상비의 영향과 실험 결과에서 나타난 전단보강근비의 영향을 주요 변수로 하여 비선형 회귀 분석을 수행하였다. 개구부의 형상비에 대한 벽체의 전단 내력 감소율에 대한 비선형 회귀 분석 결과 Fig. 13과 같이 선형 형태의 회귀 곡선을 도출하였으며, 전단 보강근비의 경우도 비슷한 경향을 나타내고 있다.

이러한 결과를 통해 식 (12)를 통하여 비선형 회귀 분석을 수행하였다.

$$\gamma = k_1 \sqrt{\frac{A_0}{A}} \times \frac{1}{\rho_h f_y} \times \frac{l_0}{h_o} + k_2 \quad (12)$$

Fig. 14 Ex-cal. comparison using modified strength reduction factors

SPSS를 사용한 비선형 회귀 분석의 결과 식 (12)에 사용된 계수들은 다음과 같이 나타났다.

$$\gamma = 0.7 \sqrt{\frac{A_0}{A}} \times \frac{1}{\rho_h f_y} \times \frac{l_0}{h_o} + 0.15 \quad (13)$$

식 (13)의 적합성을 검증하기 위해 위 식을 통한 강도 감소율과 기준식을 이용한 강도 감소율을 실험 결과와 비교한 결과 Fig. 14에서 나타내는 바와 같이 오차의 평균은 12.3%에서 1.5%로, 표준 편차는 0.174에서 0.090으로 감소하였다.

7. 결 론

이 연구에서는 개구부의 설치에 따른 전단벽의 강도 감소 특성을 파악하기 위하여 실험 및 비선형 유한요소 해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 개구부를 갖는 전단벽체의 성능 평가에 있어 개구부 면적비를 고려한 AIJ 기준의 강도 감소율은 벽체의 보유성능을 과소평가하는 경향을 보였다. 이

는 벽체 전단 지지능력 중 콘크리트의 분담능력만을 고려하기 때문으로 판단된다.

- 2) 개구부 평가에 있어 한계 개구부 면적비($0.4 \leq [\sqrt{h_0 I_0 / h I}]$, 이 실험체 기준 16%) 갖는 실험체의 경우 강도 감소율은 AIJ에서 제안한 감소율 보다 낮게 나타났다.
- 3) 1/2 축소 전단벽 실험 결과를 근거로 검증된 유한요소해석모델에 의한 해석 결과는 개구부 유무에 상관없이 실험 결과와 비교적 일치하는 것으로 나타났다.
- 4) 실험을 통해 검증된 해석 모델을 사용하여 개구부 면적비(10%, 23%, 30%, 39%, 50%)를 대상으로 하여 변수해석을 수행한 결과, 개구부 면적비 및 형상비에 큰 영향을 받는 것으로 나타났으며, 기존 문헌을 토대로 통계 분석을 실시한 결과 내력감소율은 벽체의 면적비에 비례하여 감소되는 것으로 나타났다으나 기준에서 제시하고 있는 감소량에 비해 작은 것으로 나타났다.
- 5) 실험 및 해석을 통해 제안된 강도 감소율 산정식은 기존 문헌의 통계분석 결과 AIJ에서 제안하고 있는 방법에 비해 실험 결과를 잘 예측하는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이다(R01-2008-000-11381-0).

참고문헌

1. Arnold, C., "Northridge Earthquake of January 17, 1994: Reconnaissance Report, Volume 1 Architectural Background," *Earthquake Spectra*, 11, 1995, pp. 443~452.
2. Paulay, T. A. and Priestley, M. J. N., *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Building*, John Wiley & Sons, 1992, pp. 362~389.
3. 윤현도, 최창식, "개구부를 갖는 철근콘크리트 바벨형 전단벽의 전단강도와 변형능력," 대한건축학회 논문집, 20권, 3호, 2005 pp. 11~12.
4. International Code Council, "International Building Code," 2006, pp. 277~342.
5. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete(ACI318-08) and Commentary (ACI318-08)," American Concrete Institute, Michigan, 2008, pp. 160~168.
6. 青山博之, 鐵筋コンクリート造開口耐震壁の報強設計法に關する研究, 東京大覺青山研究室, 1991, pp. 55~62.
7. 小野正行, "鐵筋コンクリート造有開口耐震壁の彈塑性性狀に關する研究," 近畿大覺 博士學位論文, 2000, pp. 23~41.
8. Ali, A. and Wight, J. K., *Reinforced Concrete Structural*

Walls with Staggered Opening Configurations under Reversed Cyclic Loading, Report No. UMCE 90-05, Dept. of Civil Eng'g., Univ. of Michigan, Ann Arbor, Michigan. 1990, pp. 13~65.

9. Taylor, C. P., Cote, P. A., and Wallace, J. W., "Design of Slender Reinforced Concrete Walls with Openings," *ACI Structural Journal*, Vol. 95, No. 4, 1998, pp. 420~433.
10. Yanez, F. V., Park, R., and Paulay, T., "Seismic Behavior of Reinforced Concrete Structural Walls With Regular and Irregular Openings," *Pacific Conference on Earthquake Engineering*, New Zealand, 1991, pp. 67~78.
11. 최윤철, 최현기, 최창식, "슬래브가 있는 전단벽의 구조적 거동에 대한 개구부의 영향," 콘크리트학회 논문집, 20권, 1호, 2008, pp. 3~11.
12. 최윤철, 최현기, 최창식, "개구부 신설에 따른 전단벽의 보강기법 특성," 대한건축학회 논문집, 24권, 1호, 2008, pp. 71~78.
13. 日本建築學會, 鐵筋コンクリート構造計算基準同解説, 1998.
14. Hirosawa, "Past Experimental Results on RC Shear Wall and Analysis on Them," BRI, 1975, pp. 20~60.
15. New Zealand Standards Association, "NZS 3101:1995, Concrete Structure Standard," NZS, pp. 1~14.
16. Comité Euro-International du Béton, CEB-FIP Model Code 1990, 1991, pp. 211~216.
17. 윤현도, 김선우, 박완신, 김효진, 최창식, 최기봉, "개구부 설치를 위해 부분적으로 절단한 철근콘크리트 장방형 전단벽의 구조성능," 대한건축학회논문집, 21권, 6호, 2005, pp. 33~40.
18. Hiroyuki Aoyama, Daisuke Kato, Hideo Katsumata, and Youji Hosokawa, "Strength and Behavior of Postcast Shear Walls for Strengthening of Existing Reinforced Concrete Building," *Proceedings of Eighth World Conference on Earthquake Engineering*, 1984, pp. 485~492.
19. Lin, C. Y. and Kuo, C. L., "Behavior of Shear Wall with Opening," *Proceedings of 9th World Conference on Earthquake Engineering*, 1988, pp. 535~540.
20. Toshimi Kabeasawa and Takumi Kimura, "Ultimate Strength Reduction of Reinforced Concrete Shear Walls with Opening," *Transactions of the Japan Concrete Institute*, Vol. 11, 1989, pp. 609~610.
21. ABAQUS Theory Manual Ver. 6.5, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., 2005, pp. 4.5.2-1~13.
22. Hognestad E., "A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members," Bulletin No. 399, Engineering Experiment Station, University of Illinois, Urbana, Illinois, Vol. 49, No. 22, 1951, pp. 55~71.
23. Okamura, H., Maekawa, K., and Sivasubramaniyam, S., "Verification of Modeling for Reinforced Finite Element, Finite Element of Reinforced Concrete Structures," *Proceedings of Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures*, ASCE, 1985, pp. 528~543.
24. Ono, M. and Tokuhiro, I., "Experimental Studies on Elastoplastic Behaviors of Reinforced Concrete Shear Walls with Various Kinds of Openings," *Kinki University Study Report*, Vol. 14, 1985, pp. 33~63.

요 약 리모델링에는 여러 형태가 있을 수 있다. 그 중 건축주나 리모델링 수행자가 선호하는 방법이 두 개의 주거 공간을 하나로 만들어 평면 확장을 목표로 하는 세대 병합형 리모델링이다. 그러나 이러한 방법을 현재 국내에서 리모델링 대상이 되고 있는 벽식 구조의 아파트에 적용할 경우 주요 횡력 저항 요소인 전단벽에 큰 손상을 가하게 될 수 있다. 그러나 아직 이러한 주요 구조 부재인 철근콘크리트 전단벽에 개구부가 발생할 경우의 명확한 손상 정도를 정의해주는 연구는 진행되고 있지 않은 실정이다. 현행 ACI 기준은 이러한 철근콘크리트 전단벽 내의 개구부에 대한 명확한 고려 방안을 제시하지 않고 있다. 반면 AIJ 기준은 철근콘크리트 전단벽 내부의 벽체에 대한 고려 방안으로 강도 저감률 γ 를 제시하고 있다. 그러나 이 강도 저감률은 탄성 판 이론으로부터 제시된 것으로 철근콘크리트 부재에 있어서의 강도 저감률을 제대로 표현하지 못하고 있는 실정이다. 그러므로 이 연구에서는 AIJ에서 제시하고 있는 강도 저감률 γ 에 대하여 현재까지 진행되었던 실험 결과에 대한 통계적 분석과 유한요소해석을 통한 변수 분석을 통해 개구부에 의한 강도 저감률에 대한 연구를 수행하였다. 통계적 분석 결과 현재 제시되어 있는 강도 저감률은 개구부의 벽체 면적에 대한 비율만을 변수로 설정하여 그 저감률이 실험 결과보다 크게 나타나고 있었다. 또한 개구부의 형상비를 면적과 통합적으로 고려하며 철근비에 대한 고려를 하지 못하는 것으로 나타났다. 이에, 기존의 실험 결과와 이를 토대로 한 유한요소해석을 통한 변수분석을 수행하여 새로운 강도 저감률을 제안하였다.

핵심용어 : 전단벽, 개구부-면적 비, 전단강도 저감률