

단부 횡보강이 없는 세장한 전단벽의 내진성능

Earthquake-Resistance of Slender Shear Wall with no Boundary Confinement

박 홍 군* 강 수 민** 조 봉 호* 홍 성 곁*
Park, Hong Gun Kang, Su Min Cho, Bong Ho Hong, Sung Gul

ABSTRACT

Experimental and numerical studies were done to investigate seismic performance of slender shear wall with no boundary confinement. 1/3 scale-specimens that model the plastic region of long slender shear walls subjected to combined axial load and bending moment were tested to investigate strength, ductility, capacity of energy dissipation and strain distribution.

The experimental results show that the slender shear walls fail due to early crushing in the compressive boundary, and then have very low ductility. The measured maximum compressive strain is 0.0021, which is much less than 0.004 being commonly used for estimation of ductility.

The experimental result indicates that the maximum compressive strain is not a fixed value but is affected by moment gradient along the shear wall height and distance from neutral axis to the extreme compressive fiber.

1. 연구 배경

국내에서는 Fig. 1에 나타난 바와 같은 벽식구조가 공동주택의 구조형식으로 널리 사용되고 있다. 근래 들어와 이러한 벽식구조형식이 30층까지의 고층건물에도 널리 사용됨에 따라 벽식구조의 내진성능의 확보가 중요한 과제로 떠오르고 있다



Fig. 1 Typical Plan of Bearing Wall System

일반적으로 고층벽식구조에 사용되는 전단벽의 하부는 콘크리트강도의 약 15-20%에 달하는 비교적 큰 압축력이 작용하며, 지진하중이나 풍하중에 의한 큰 휨모멘트가 작용한다. 특히 지진발발시 소성힌지가 집중되는 전단벽 하부의 연성도확보는 매우 중요하며 변위연성도요구량을 만족시키기 위해서는 전단벽하부에서 큰 회전연성도가 요구된다. 연성도보강이 없는 전단벽이 이러한 큰 회전연성도요구량을 만족시키는지의 여부가 불확실하며, 특히 Fig. 1에 나타난 바와 같이 평면의 크기에 비하여 벽량이 부족한 장방향 전단벽의 경우 내진연성도의 확보여부가 우려된다

현재까지 국내외에서 수행된 전단벽에 대한 연구결과에 의하면 휨의 지배를 받는 전단벽은 강도와 연성도에서 뛰어난 성능을 발휘하며 지진하중에 대한 에너지흡수능력이 큰 것으로 알려져 있다.^(27,9,11,13)

* 정희원 서울대학교 건축학과 조교수
** 정희원 서울대학교 건축학과 박사과정

이와 같은 연구결과에 따라서 Wallace, Woods, Priesley 등을 비롯한 많은 연구자들은 연성도보강이 없는 벽체에 대하여 압축단의 변형도가 0.004에 이를 때까지 벽체의 연성도가 유지된다고 가정하며 이러한 가정을 벽체의 연성도설계법에 적용하고 있다.

하지만 부재파괴시 압축단부의 최대변형도는 부재의 크기 및 형상, 부재내 압축변형도 또는 응력의 분포양상, 콘크리트강도 등에 영향을 받는다. 연성도설계시 일반적으로 인정되고 있는 최대변형도 ≈ 0.004 의 가정은 일반적인 보에 대한 실험결과 또는 단면의 길이와 높이가 작고 압축력을 많이 받지 않는 벽체에 대한 실험결과에 근거하고 있다. 그러나 현재 국내에서 건설되고 있는 고층벽식구조의 전단벽하부는 비교적 큰 압축력과 일정한 휨모멘트를 받으며 휨강성의 크기에 비하여 세장한 단면을 가지고 있어서 일반적인 보 또는 기존실험에 사용된 전단벽과는 부재의 형상, 변형도 또는 응력의 분포양상 등에서 많은 차이를 보인다. 이러한 세장한 벽체의 연성도는 기존 연구에서 검증된 벽체의 연성도와 다를 수 있으며 따라서 기존의 연구결과를 이러한 세장한 벽체의 내진성능평가에 적용하기는 어렵다.

본 연구의 목적은 실험적 연구와 해석적 연구를 통하여 고층벽식구조에 사용되고 있는 세장한 전단벽의 내진성능을 평가하여 고층벽식구조물의 내진안전성 확보 및 효율적인 내진설계를 위한 기초자료를 제공하는데 있다. 이를 위하여 세장한 고층전단벽에 대한 축소모델에 대한 실험연구 시행하고, 이를 해석적 연구^(1,12)와 비교 검토하여 단부휨보강이 없는 세장한 벽체의 내진성능을 평가한다.

2. 연구대상 벽체 및 실험방법

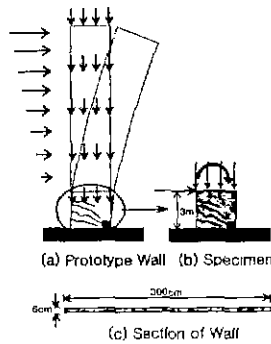


Fig. 2 Description of Wall Specimen

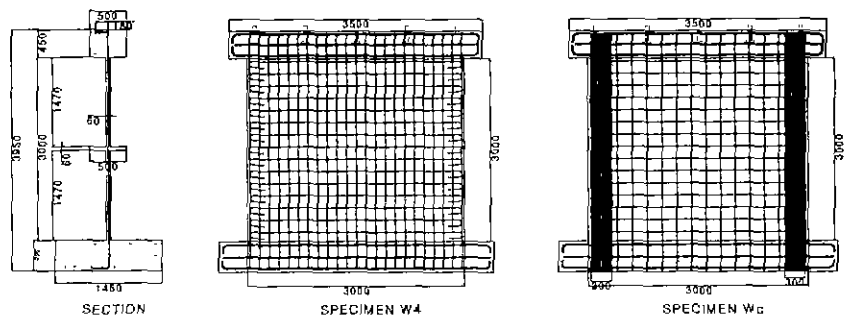


Fig. 3 Specimen Walls

실험연구를 위하여 전단벽의 폭이 10m, 두께가 20cm로 폭 대 두께비가 50이고 층고 2.6m에 28층의 고층전단벽을 30%로 축소한 벽체를 연구대상으로 하였다. 일반적으로 전단벽은 벽체 하부에서 소성현지가 집중된다고 예상할 수 있으며 이 부분의 휨 거동이 전단벽 전체의 거동에 지배적인 영향을 미친다. 따라서 실험의 효율성을 위하여 시험체는 소성현지를 포함하는 벽체하부영역으로 국한하였다. 축소시험체 단면 형상과 하중조건은 Fig. 2에 나타나 있다. 고층벽식구조물에 사용되는 전단벽의 하부에 중력하중이 $0.1A_g f_c \sim 0.2A_g f_c$ 정도 전달되며 따라서 시험체에 가해지는 압축력은 $0.138A_g f_c (60\text{tonf})$ 로 하였다. 수평 하중은 역삼각형 형태의 횡하중을 가정하였으며 이 횡하중분포에 의하여 발생하는 휨모멘트와 전단력이 같도록 축소시험체의 하중조건을 구성하였다. 시험체로서 Fig. 3에 나타난 바와 같은 W4와 Wc를 제작하였다. 벽체는 $3000 \times 3000 \times 60$ (높이(h) \times 폭(l_w) \times 두께(t), 단위: mm)의 크기로서 폭 대 두께비가 50으로 실제 전단벽의 폭 대 두께비와 동일하게 설계하였다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 W4에는 수직철근이 균등하게 배근되고 Wc에는 수직철근이 단부에 집중배근된다. 철근과 콘크리트

트의 재료적 성질은 Table 1에 나타난 바와 같다. Fig 2(b)와 같이 이상화된 모멘트와 전단력, 축하중이 실제 구조체 하부에서 가해지는 하중과 동일하도록 가력장치를 계획하여 가력기에 의해 가해지는 하중의 비는 가력기(a): 가력기(b): 가력기(c)=1 : 2.3 : (-)2.3으로 정해진다. 그리고 축력은 유압잭(oil jack)에 의해서 가력된다. 실험장치는 다음 Fig. 4와 같다.

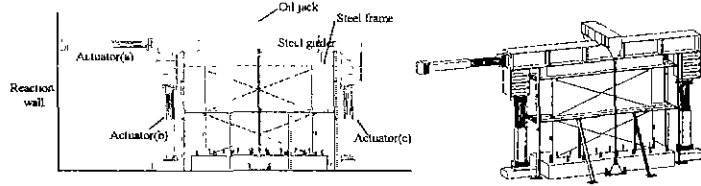


Fig. 4 Test set-up

Table 1. Characteristics of specimen

Specimen	Concrete		Reinforcement					Axial force (tonf)
	f_{ck} (Kgf/cm ²)		Vertical		Horizontal	Yield Stress F_y (Kgf/cm ²)	Ultimate Stress F_u (Kgf/cm ²)	
	Strength	Strain	Each end (0.1 lw)	Middle (0.8 lw)				
W4	235	0.0019	0.004	0.004	0.0025	2980	4320	60
Wc	240	0.0021	0.0254	0.0025	0.0025	2980	4320	60

3. 실험결과 및 결과분석

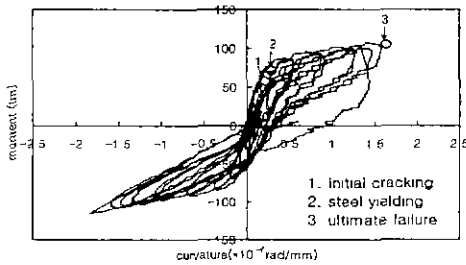


Fig. 5 Moment-Curvature Curve (W4)

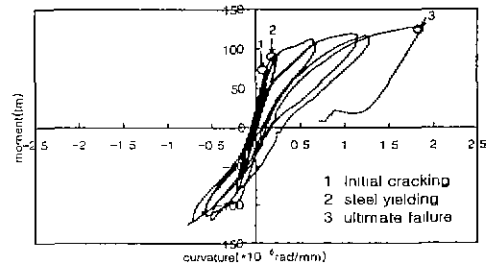


Fig. 6 Moment-Curvature Curve (Wc)

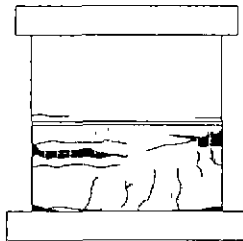


Fig. 7 Crack Pattern at Failure (W4)

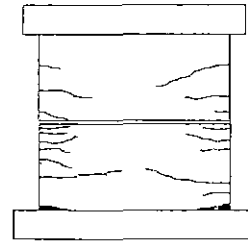


Fig. 8 Crack Pattern at Failure (Wc)

Fig 5, 6은 시험체 W4, Wc의 모멘트-곡률곡선이고 Fig 7, 8은 최종파괴 단계에서의 W4, Wc의 균열양상을 나타낸 그림이다.

Fig 9, 10은 시험체 W4, Wc에 대하여 실험결과와 유한요소 수치해석결과를 비교한 것이다. 유한요소해석결과는 일반적으로 압축파괴시 압축변형도로 인식되는 0.004에 이를 때까지의 거동을 나타낸 것

이다. Fig 9, 10에 나타난 바와 같이 시험체 W4, Wc의 연성도는 해석결과에 크게 미치지 못하는데 이는 벽체압축단부의 취성과파괴때문이다. 따라서 시험체의 압축파괴시 변형도는 일반적으로 예상할 수 있는 변형도인 0.004에 크게 미치지 못함을 알 수 있다. 또한 압축파괴시 벽체의 인장측에는 일부 철근에서만 항복이 일어났으며 따라서 벽체의 지진에너지 흡수능력을 좌우하는 철근의 소성이력이 거의 일어나지 않아서 시험체 W4, Wc의 에너지 흡수능력은 미미한 것으로 나타났다.

Fig. 11은 시험체 W4의 실험, 비선형 유한요소해석, 약산에 의한 모멘트-곡률 곡선을 비교하고 있다. Fig. 11에서 실험값은 주기하중시 휨모멘트의 최대값으로 구성된 곡선(envelop)이며 약산법은 단면에서 직선의 변형도 분포를 가정하고 평형조건을 사용하여 구한 값이다. 연구대상벽체에 대하여 국내 내진설계 기준에 의한 변위연성도조건($\mu_d=3$)을 만족하기 위한 곡률요구량은 참고문헌(11)에 의하여 구하면 W4 하단부 소성힌지영역($0.5l_w$)에서의 곡률요구량은 3.9×10^{-6} (rad/mm)이다. 그런데 Fig. 11에 나타난 바와 같이 시험체 W4의 압축파괴시 곡률은 1.6×10^{-6} (rad/mm)로서 이는 변위연성도조건을 만족하기 위한 곡률요구량에 크게 미치지 못한다. 그 이유는 앞서 밝힌 바와 같이 시험체가 조기 압축파괴를 일으켰기 때문으로 이때, 압축의단의 평균 변형도는 0.0017로서 일반적으로 예상할 수 있는 압축 변형도 0.004에 크게 미치지 못한다. Fig. 11에서 약산수치해석과 유한요소해석결과 압축변형도가 0.004에 이를 때까지 지연될 수 있다면 벽체가 연성도조건을 만족할 수 있는 충분한 곡률값을 가질 수 있음을 알 수 있다.

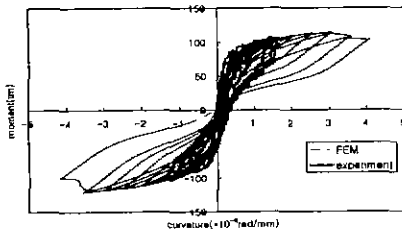


Fig 9 Comparison of Experiment and Numerical Analysis (W4)

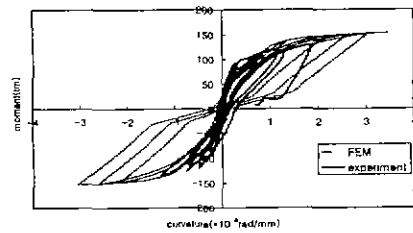
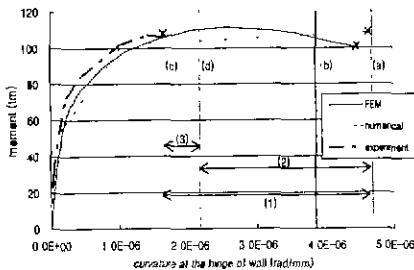


Fig 10 Comparison of Experiment and Numerical Analysis (Wc)



- (a) curvature at $\epsilon_c=0.004$ calculated with linear strain distribution
- (b) curvature demand based on $\mu_d=3$
- (c) experimental curvature at failure of W4
- (d) curvature at $\epsilon_c=0.0017$ calculated with linear strain distribution
- (1) overall difference between calculated and experimental curvatures = (2) + (3)
- (2) difference between calculated curvature at $\epsilon_c=0.004$ and $\epsilon_c=0.0017$
- (3) difference between calculated curvatures with linear and nonlinear strain distributions

Fig 11. Comparison of Experimental and numerical ductility

Fig. 12는 LVDT에 의하여 측정된 벽체하단부의 수직변형도 분포와 유한요소해석결과를 비교하고 있다. Fig. 12에 나타난 바와 같이 실험 결과에 의한 압축파괴시 최대 변형도는 0.0021이다. 이는 평균변형도(0.0017)보다 약간 큰 값을 나타내지만 역시 0.004에는 훨씬 미치지 못하여 조기압축파괴가 일어났음을 알 수 있다. 또한 하중이 증가할수록 변형도분포가 선형에서 비선형으로 바뀌어 철근항복 이후 압축측으로 변형도가 집중되는 현상을 보이고 있다. Fig 12.(b)의 유한요소해석결과도 이같은 현상을 뒷받침하고 있으며 참고문헌(14)에도 언급된 바 있다. 이러한 단부에 압축변형도가 집중되는 현

상은 유한요소해석을 통한 변수연구결과 전단력이 큰 경우에 보다 확연히 나타나며 Fig. 11에 나타난 바와 같이 벽체가 긴 경우 이러한 압축응력도의 집중은 조기압축파괴를 가속화할 수 있다.

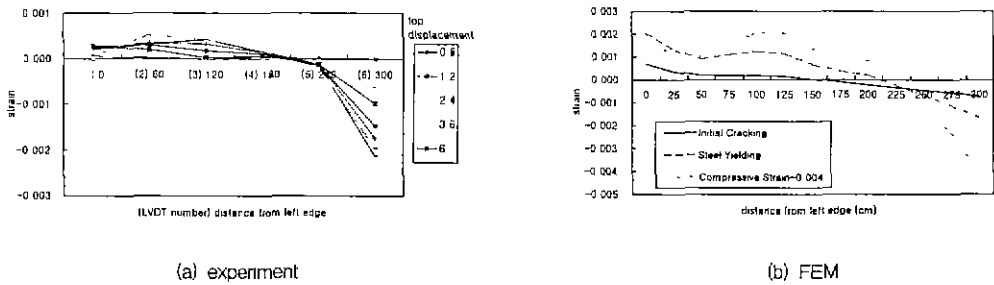


Fig 12. Strain Profile along Wall Cross Section

4. 토론

Fig. 13(a)는 보-기둥과 같이 단면이 작거나 길이와 높이가 작은 벽체의 단면 폭과 벽체의 높이에 따른 변형도분포를 나타내고 있으며 Fig. 13(b)는 고층의 세장한 벽체 하부에서의 변형도 분포를 나타내고 있다. 일반적으로 콘크리트 압축강도에 대한 종국변형도는 압축강도에 따라 0.0018~0.0025영역에 분포한다. Fig. 13(a)와 같은 부재의 파괴시 압축단부의 최대변형도를 이보다 큰 0.004 또는 그 이상으로 가정할 수 있는 이유는 부재의 폭 또는 높이에 따라 변형도가 급격히 변화하는 경우, 국부적으로 변형도가 종국변형도를 초과하여도 인근재료의 구속효과에 의하여 취성파괴를 지연할 수 있기 때문이다. 이러한 현상에 근거하여 Wallace, Priesley 등은 전단벽의 연성도설계시 압축변형도가 0.004 이상인 압축대에만 확보강하도록 제안하고 있다. 그러나 Fig. 13(b)에 나타난 바와 같이 고층의 압축대의 길이가 긴 벽체의 하단의 소성허전 영역에서는 압축대의 긴 길이로 인하여 단면상의 변형도 분포가 완만하며 일정한 휨모멘트로 인하여 높이에 따라라도 변형도 크기가 거의 일정하다. 따라서 벽체의 외단부는 일정한 압축력을 받는 기둥으로 간주할 수 있으며 벽체의 압축단부는 확보강되어 있지 않은 경우 압축강도에 해당하는 변형도에 이르면 더 이상 내력을 발휘할 수 없으므로 취성파괴가 일어날 수 있다.

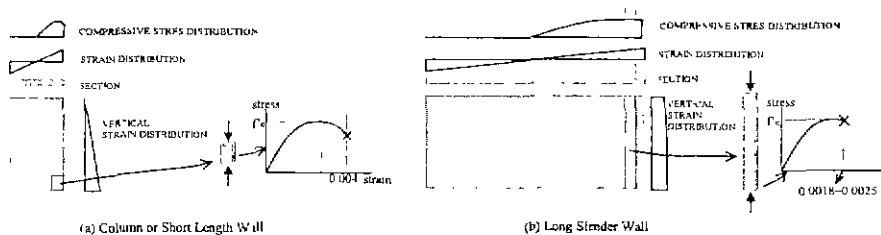


Fig. 13 Compressive Stress-Strain Relationship upon Failure

특히 강성에 비하여 작은 두께의 전단벽에서 면외방향으로 작은 우발적 편심에 의해서도 이러한 조기압축파괴가 보다 가속화될 수 있다. 따라서 전단벽의 파괴시 최대압축변형도는 일반적으로 인식되는 0.004등의 고정값이 아니며 단면상 압축대의 길이가 길수록 높이에 따른 모멘트의 기울기에 완만할수록 작은 값을 취해야 함을 알 수 있다.⁽⁸⁾

5. 결론

고층 벽식 구조에서 주요한 구조요소로 사용되고 있는 전단벽에 대한 실험 및 해석연구를 실시하였다. 이 연구를 통하여 전단벽의 내진성능에 대한 주요한 연구결과는 다음과 같다.

- (1) 본 실험 연구결과에 의하면 단부 횡보강이 되지 않은 세장한 전단벽은 압축단부의 조기압축파괴에 의하여 취성파괴현상을 나타낼 수 있으며 이로 인하여 연성도 요구량을 확보하기 어렵다. 특히 압축력이 크고 큰 휨모멘트를 지지해야 하는 고층벽식구조의 전단벽에서 조기압축파괴 현상이 두드러질 것으로 예상된다. 따라서 고층 전단벽의 내진안전성을 확보하기 위해서는 내진설계규준에서 규정하고 있는 연성도요구량을 반영할 수 있도록 연성도 설계가 이루어져야 한다.
- (2) 실험결과 벽체단부의 압축변형도가 콘크리트 1축 압축강도에 해당하는 변형도인 0.002에 다다른 시점에서 벽체의 조기 압축파괴가 발생하였으며 이로 인하여 벽체의 연성도가 크게 저하되는 결과를 나타냈다. 따라서 압축변형도 0.004이상의 영역에서만 횡보강을 제안하는 기존의 연성도 설계방식은 안전측이 아니며 연성도 설계시, 사용 콘크리트의 1축압축강도에 해당하는 변형도(약 0.002)이상의 영역에서는 연성도 확보를 위한 횡보강이 이루어져야 한다.
- (3) 실험과 해석연구결과 벽체에 압축변형도가 집중되어 수직변형도 분포가 비선형임이 밝혀졌다. 이는 전단력의 영향으로 인하여 압축응력이 벽체의 단부에 집중되기 때문이다. 실험결과는 변형도분포를 선형으로 가정한 해석결과보다 작은 연성도로 나타내며, 이는 압축응력이 벽체단부에 집중됨으로 인하여 벽체의 연성도 저하를 가속화시킬 수 있다는 사실을 나타낸다.
- (4) 실험결과 시험체는 주기하중에 대하여 에너지 흡수능력이 현저하게 떨어짐을 알 수 있다. 이는 철근의 충분한 소성변형이전에 콘크리트의 압축파괴가 조기에 발생하였기 때문이다.

참고문헌

1. 박홍근, "이방성회전축모델을 이용한 철근콘크리트 연구조의 비선형 유한요소해석", 한국전산구조공학회, 1995.12
2. 서수연, 이리형, N. M. Hawkins, "전단벽의 최소 층변위 및 에너지 소산능력", 한국콘크리트학회, 제10권 6호, 1998.12
3. 유승욱, 한상환, 이리형, "전단벽의 단부보강효과에 따른 변형능력의 평가", 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제 10권 제 2호, 1998 11.
4. 윤현도, 이리형, "고축력을 받는 고강도 콘크리트 고층형 및 저층형 내력벽의 이력거동", 대한건축학회논문집 12 권 10호, 1996
5. 이리형, 최창식, 윤현도, 이용재, "반복하중을 받는 철근콘크리트 저형 전단벽의 이력거동에 관한 실험 연구", 한국콘크리트 학술발표회 논문집 제 3권 1호, 1991.5
6. 이희동, 한상환, 이리형, "철근콘크리트 벽체의 초과강도와 변형능력에 관한 평가", 대한건축학회 학술발표회 논문집, 제 18권 제 1호, 1998. 4
7. 진영주, 이동근, 이수근, "철근콘크리트 내진벽의 강도와 변형에 대한 실험적 연구", 한국콘크리트학회 학술발표 논문집, 제 5권 제 2호, 1993
8. ACI 318-99, Special provision for seismic design 21.6
9. International Conference of Building Officials (ICBO), Uniform Building Code(UBC), 1997
10. Park, H. "Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Planar Structures," PhD thesis, Univ. of Texas at Austin, Texas 1994
11. Paulay, T., and Priestley, M. J. N., "Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings," John Wiley and Sons, New York, 1992
12. Sasani M, "A Two-Level-Performance- Based Design of Reinforced Concrete Structural Walls", 6th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, 1998
13. Wallace, J. W. "Reinforced concrete Walls: Recent Research & ACI 318-2001", 6th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, 1998