

단부 횡보강영역에 따른 전단벽 연성도의 변화

Variations in Ductility of Shear Wall with Length of Boundary Confinement

강수민* 오재은** 박홍근***
Kang, Su-Min Oh, Jae Eun Park, Honggun

ABSTRACT

Experimental studies were performed to investigate variations in ductility of shear wall with length of boundary confinement. Eight specimens containing different lengths of confinement zone, which model compressive zone in plastic regions of shear walls, were tested against eccentric vertical load. Stress-strain model for confined concrete was used to predict strength and ductility of the specimens, which was compared to the test results. The results obtained show that failure of the compressive zone occurs in a brittle manner when the stress of unconfined zone softened after the ultimate strength were reached. To enhance the ductility of shear walls with concentrated confinement zone such as barbell-type walls, the ultimate strength of the confinement zone needs to be increased, and for shear walls with distributed confinement zone the length of the confinement zone needs to be extended.

1. 서론

근래들어와 지진에 대한 구조물의 안전성을 구체적으로 확보하고 경제적인 내진설계를 위하여 연성도 요구량을 부재설계에 반영하는 내진역량스펙트럼(capacity spectrum method), 변위에 기초한 설계법(displacement-based design) 등을 채택하는 추세이다. 이러한 연성도설계법을 사용하기 위해서는 벽체의 단부보강으로 인하여 확보할 수 있는 벽체의 연성도를 정확히 예측할 수 있어야 한다.

국내의 경우^{1,2}, 벽체의 내진설계를 위한 단부횡보강영역 및 보강방법에 대한 기준이 마련되어 있지 않아서 연성설계를 적용할 수 없으며 ACI³의 경우에는 최소한 압축대의 절반($c/2$)을 단부에 횡보강하도록 하는 기준이 마련되어 있으나 이론적 배경이 미약한 경험적인 산출이며, 보강방법도 기둥의 보강방법을 그대로 사용하여 벽체의 거동적 특성을 반영하지 못하고 있다.

따라서, 벽체의 연성도요구량에 대한 횡보강영역 및 횡보강량을 결정할 수 있는 설계방법의 연구가 필요하다. 본 연구의 목적은 이러한 설계방법에 대한 기초적 연구로서 단부횡보강 영역에 따른 전단벽의 강도 및 연성도 변화를 실험적으로 고찰하는 것이다.

2. 실험연구

일반적으로 전단벽은 지진에 대한 극한 거동시에 벽체하부에 소성힌지가 집중되며 이 부분의 휨거동이 전단벽 전체의 거동에 지배적인 영향을 미친다. 또한 전단벽의 최종파괴 시점은 소성힌지영역에서 압축콘크리트의 파괴여부에 의해 좌우된다. 따라서 전단벽의 연성도는 소성힌지 영역에서의 압축축 최외단의 최대변형율(ϵ_{max}^c) 대 압축대 길이(c)의 비(ϵ_{max}^c/c)에 비례한다. 따라서 부재의 연성도를 파악하기 위해서는 부재파괴시 최대압축변형율을 정확히 예측할 수 있어야 한다.

*정회원, 서울대학교 건축학과 박사과정

**정회원, 서울대학교 건축학과 석사과정

***정회원, 서울대학교 건축학과 조교수

따라서 이번 실험은 고층전단벽 하부에 집중되는 소성힌지 영역에서 횡보강영역을 주요변수로 하여 횡보강된 벽체의 압축단부에서의 최대변형율을 구하여 벽체의 연성도를 평가하는데 그 목적이 있다.

고층벽식구조에 사용되는 전단벽의 폭은 매우 크므로 전단벽 전체를 실험하는 것은 어려우며 본 실험에서는 압축단부에 해당하는 부분을 연구대상으로 하였다. Fig. 1과 같이 벽체의 편심축하중을 가하여 벽체 단면에 선형의 변형율분포를 가지도록 실험장치를 계획하여 소성힌지 구간에서 벽체의 압축단부를 모델링하였다. 또한 소성힌지 구간에서 전단벽은 거의 동일한 모멘트를 받으므로 벽체의 높이에 따른 변형율의 변화는 실험변수에서 제외하였다. 축하중의 편심 크기를 조정하여 압축대의 길이가 약 1.2m 또는 2.4m가 되도록 변형율이 조정되었으며 횡가새철물을 사용하여 면의방향으로의 변형을 방지하였다. 축하중 가력을 위하여 RIST(포항산업과학연구원)의 1000 tonf 용량의 UTM을 사용하였으며 하중가력속도는 0.001(strain/min)으로 하였다.

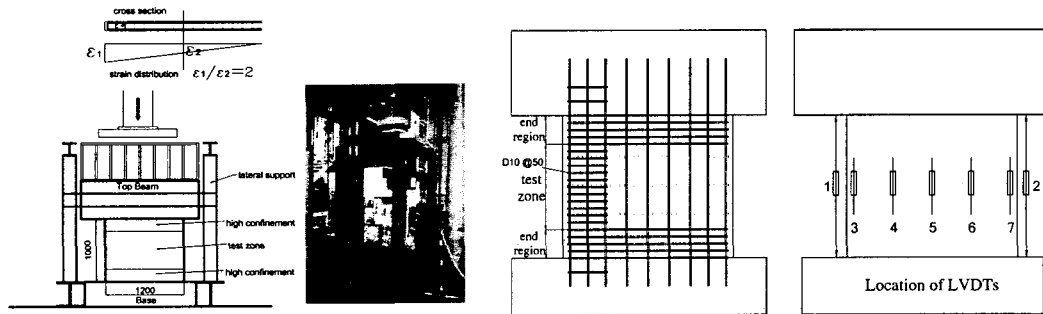


Fig. 1 Test Set-up and Specimen

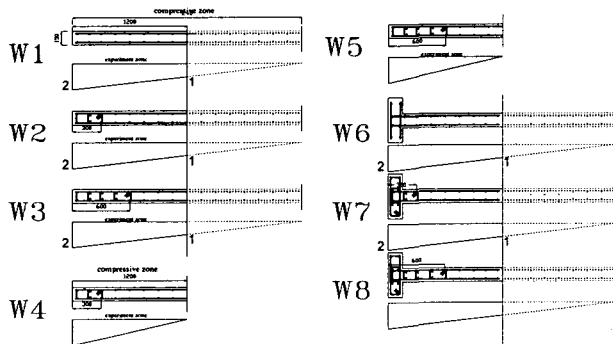


Fig. 2 Specimen

Fig. 1과 같이 LVDT를 설치하여 벽체의 각 부분에서의 수직압축변형율을 측정할 수 있도록 하였다. 시험체는 상부가력보, 벽체의 압축영역, 기초로 구성되어 있다. 각각 시험체에 대한 변수는 횡구속영역, 변형율분포, 벽체형상으로 Fig. 2에 각각 시험체의 상세가 나타나 있다. 시험체에 사용된 재료성질은 표 1과 같다.

W2-5의 횡구속철근의 수직간격은 5cm 이고 W7-8은 10cm이다. 각각의 시험체 벽체부분의 상하양단에는 많은 양의 횡구속철근을 사용하여 LVDT가 설치된 벽체의 중앙부에서 파괴가 일어나도록 유도하였다

Table. 1 Properties of Specimens

Specimen		f_{ck} (kgf/cm^2)	Vertical Reinforcement		Reinforcement for Confinement (at the boundary of specimen)				Ultimate Strain	
			ρ_v	f_y (kgf/cm^2)	ρ_x	ρ_y	$\rho_s=\rho_x+\rho_y$	f_y (kgf/cm^2)	Left End	Right End
W1	I type	335	0.007	3275	-	-	-	-	0.00193	0.0011
W2	I type	335	0.007	3275	0.0284	0.0170	0.0454	3153	0.00246	0.00105
W3	I type	285	0.007	3275	0.0284	0.0136	0.0420	3153	0.00344	0.00102
W4	I type	293	0.007	3275	0.0284	0.0170	0.0454	3153	0.00193	0.00008
W5	I type	273	0.007	3275	0.0284	0.0136	0.0420	3153	0.01031	0.00024
W6	T type	293	0.007	3275	-	-	-	-	0.00553	0.001455
W7	T type	282	0.007	3275	0.0144*	0.0210*	0.0353*	3153	0.00604	0.002546
W8	T type	282	0.007	3275	0.0191*	0.0255*	0.0446*	3153	0.00701	0.00259

4. 실험결과

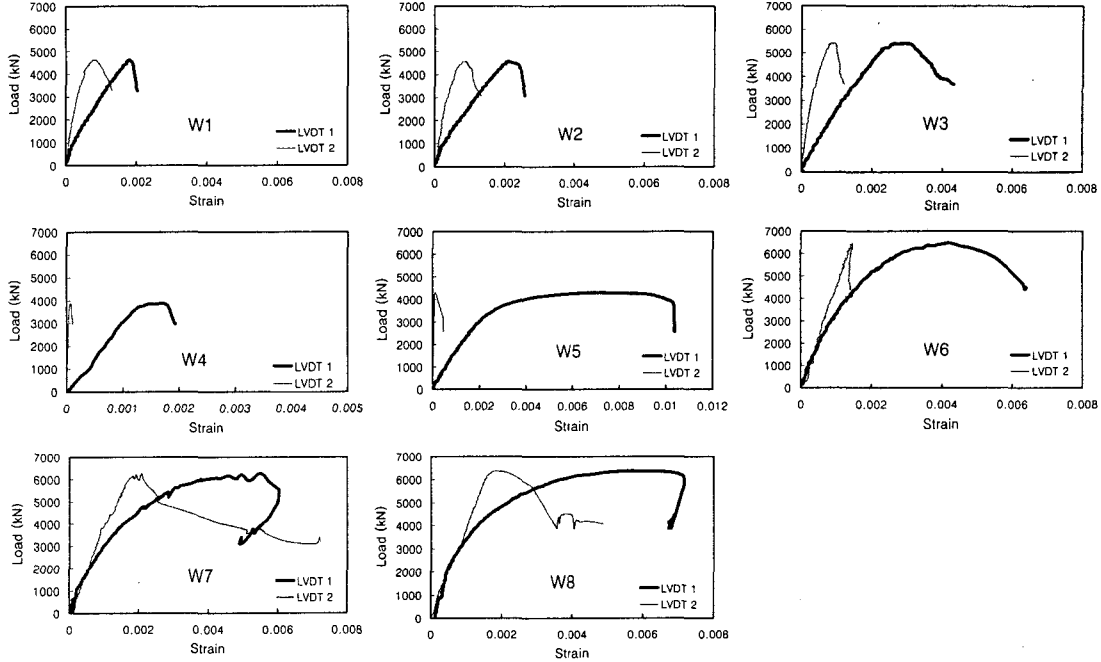


Fig. 3 Load vs. Vertical Strain (LVDT 1, 2)

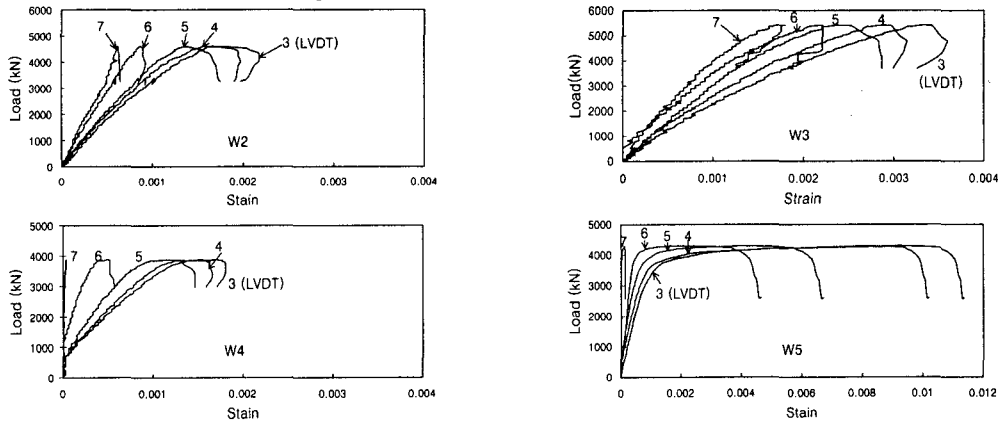


Fig. 4 Load vs. Vertical Strain (LVDT 3,4,5,6,7)

Fig. 3은 시험체에서 벽체의 양단에서 측정된 변형률과 하중의 관계를 나타낸 곡선들이다. 시험체 W1은 압축단부에서의 최대변형도가 0.0019인 지점에서 취성파괴하였다. 따라서 고층전단벽의 하부와 같이 압축대가 크고 극한응력을 받는 면적이 큰 전단벽체는 단부횡보강이 없는 경우, 최대변형률이 압축강도에 해당하는 변형률에서 취성파괴한다고 볼 수 있다. W2와 W3 역시 2:1 변형률분포의 벽체인데, W2의 경우(횡보강 30cm)는 단부보강이 없는 W1과 거의 같은 연성도와 강도를 나타내며 취성파괴하였다. W3(횡보강 60cm)는 W1에 비하여 연성도와 강도가 각각 78%, 38%증가하였으나 압축단부에서의 최대변형도 0.0034는 일반적으로 단부횡보강이 없는 벽체의 최대변형률(0.004)에 못 미치는 값이다. 따라서 횡보강이 없는 벽체에 최대변형률을 0.004로 사용하는 일반적인 연성도 설계는 안전측이 아니며 압축대의 길이와 연성도 요구량에 맞게 단부횡보강영역을 결정해야한다.

압축대의 길이가 1.2m인 벽체의 경우에도, 단부횡보강영역이 30cm인 경우(W4)에는 압축단부의 최대

변형율이 0.002 부근에서 취성파괴를 일으켰다. 그러나 단부횡보강영역이 60cm(W5)인 경우에는 변형율이 0.0103에 이르는 매우 우수한 연성능력을 나타내고 있다. T형 시험체(W6-8)의 경우는 T형압축단부의 특성상, 압축력의 대부분을 단부쪽에서 지지하고 면외방향으로의 안정성이 확보되기 때문에 일자형 벽체에 비해 우수한 연성능력을 보인다. 보강영역이 30cm, 60cm로 늘어날수록 연성도가 향상되는 것을 W7과 W8의 실험결과를 통해서 볼 수 있다.

시험체 W1-5에서는 벽체의 중앙부에서도 변형율을 측정하였는데, 이는 Fig.4에 나타나 있다. 횡보강 영역이 충분하지 못하여 취성파괴를 일으킨 W2, W3, W4의 경우 중앙부에서 변형율과 하중의 관계는 다음 두가지 양상으로 나타난다. 극한하중이후에 하중이 감소하는 동안, 변형율이 줄어드는 경우(unloading curve)와 변형율이 늘어나는 경우(softening curve)로 분류할 수 있다. 벽체의 압축파괴는 하중이 줄어도 변형율이 늘어나는 부분에서 일어난다고 볼 수 있으며 이러한 거동을 보이는 영역은 횡보강된 부분의 인접한 횡보강되지 않은 부분임을 Fig.4를 통하여 확인할 수 있다.

5. 결과분석

횡보강된 벽체의 단부에서의 변형율과 하중과의 관계를 분석하기 위해서는 횡보강된 영역에서의 응력-변형율 관계가 정의되어야 한다. 철근으로 횡보강된 벽체에 중심축압력이 가해질때의 응력-변형율 관계는 J. B. Mander(1988)³⁴에 의해서 제안되었는데, 횡보강 철근의 배근형식과 횡보강 철근의 배근간격, 재료성질 등을 변수로 하였다. Fig. 5와 같은 형식의 벽체에서 유효횡구속계수(K_e)를 다음 관계식으로 구한다.

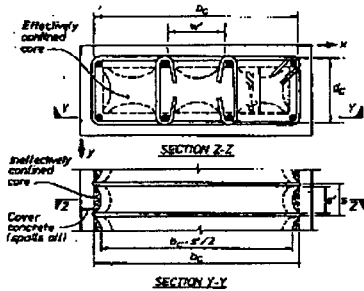


Fig. 5 벽체의 배근형식

$$K_e = \frac{(1 - \sum \frac{W_i'^2}{6 b_c d_c})(1 - \frac{s'}{2 b_c})(1 - \frac{s'}{2 d_c})}{(1 - \rho_{cc})}$$

그리고 유효횡구속 계수로부터 각 축에 대한 유효횡압력(f_{lx} , f_{ly})을 구한후, William and Warnke(1977)에 의해 제안된 파괴면을 이용하여 유효횡압력에 의하여 증가된 최대압축강도(f_{cc})를 정의한다.

$$f_{lx} = K_e \rho_x f_{yh} \quad f_{ly} = K_e \rho_y f_{yh}$$

여기서, ρ_x , ρ_y = 각 축방향의 코어단면에 대한 횡구속철근비

f_{yh} : 횡구속 철근의 항복강도

f_{cc} 가 정의되면 그에 해당하는 변형율(ϵ_{cc})과 전체 응력-변형율 관계는 다음과 같이 정의된다.

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{cc} [1 + 5(\frac{f_{cc}}{f_{cc}} - 1)] \quad , \quad f_c = \frac{f_{cc} x r}{r - 1 + x^r}$$

$$\text{여기서 } x = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}} \quad , \quad r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}}$$

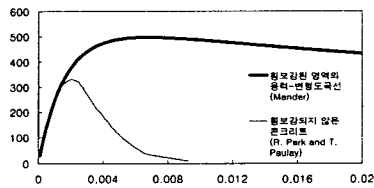


Fig. 6 Stress-Strain Relationship of Confined concrete

Fig. 6은 압축강도가 330kgf/cm²인 콘크리트의 횡보강되지 않았을 때의 응력-변형율 관계곡선과 시험체 W2 단부에서와 같이 횡보강된 경우의 횡보강된 영역에서의 응력-변형율 관계곡선이다.

횡보강된 영역에서의 응력-변형율관계를 위와 같은 방식으로 정의하면 시험체에 가해지는 하중과 시험체의 압축연단에서의 변형율관계를 정의할 수 있게 된다. Fig. 7과 같이 압축대를

효과강되지 않은 영역과 효과강된 영역으로 분리하고, 압축연단에서의 변형율이 정의되면 각각의 영역에서의 변형율 분포가 결정된다. 이 변형율 분포에 따라서 Fig. 6과 같이 정의된 변형율-응력 관계에서 각각의 응력을 찾아내어 각각의 영역에 대해 적분하면 시험체에 가해지는 하중을 찾을 수 있다.

위와 같은 방식으로 시험체 W2, W3, W5, W6, W7, W8의 하중과 압축연단에서의 변형율 관계를 구한 것을 실험결과와 비교해 보면 다음 Fig. 8과 같다. Fig. 8의 곡선을 살펴보면 대체로 초기강성과 최대값은 일치하나 시험체의 압축연단에서의 최대변형율은 분석값보다 작은 것을 알 수 있다. 또한,

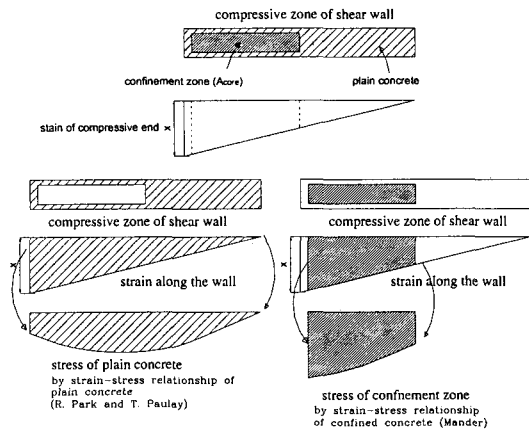


Fig. 7 Load vs. Strain of Compressive end

실험에서 벽체가 받을 수 있는 하중이 증가하는 동안은 압축파괴를 일으키지 않으나 하중이 줄어드는 부분에서 압축파괴를 일으키고 있다.

Fig. 6을 살펴보면 횡보강된 콘크리트는 횡보강되지 않은 콘크리트에 비해서 강도와 변형도가 매우 큰 것을 알 수 있다. 따라서 시험체의 압축파괴는 횡보강되지 않은 영역 중 변형율이 가장 큰 부분, 즉 횡보강되어 있는 영역과 인접한 횡보강되지 않은 부분에서 일어난다고 볼 수 있으며 이는 Fig. 4에서 보여진 결과와도 일치한다. 파괴가 일어나는 순간의 횡보강되지 않은 영역에서 최대변형율을 살펴보면 W2의 경우는 0.00212, W3는 0.00283, W5는 0.00515, W7는 0.00527, W8는 0.00537 이다. 이와 같은 차이가 나는 것은 횡보강영역과 변형율 분포, 벽체형상의 차이에 기인한다. W2와 W3은 횡보강영역이 적고 변형율분포가 완만하여 횡보강되지 않은 넓은 영역에서 극한 응력을

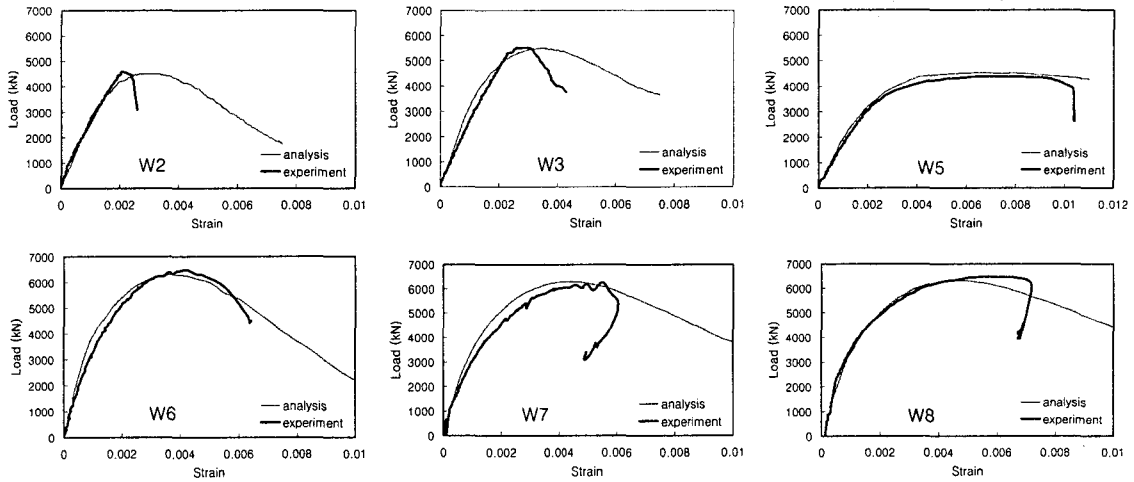


Fig. 8 Comparison of Experiment and Numerical Analysis

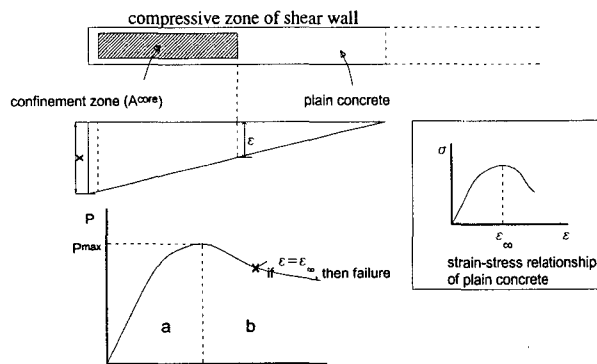


Fig. 9 Maximum Compressive Strain of Shear Wall with Boundary Confinement

받으므로 횡보강되지 않은 영역에서 1축압축강도에 해당하는 변형율 이상의 연성도를 나타내기 어렵다. 반면 W5는 횡보강영역이 넓고 변형율분포가 상대적으로 급격하게 변하므로 하중의 대부분을 횡보강된 영역에서 지지하며 또한 극한응력을 받는 횡보강되지 않은 영역이 비교적 적으므로 큰 변형율을 나타낼 수 있다. W7과 W8의 경우는 압축단부에서 큰 강도를 발휘하는 요소가 있어서 하중의 대부분을 국부보강영역에서 받으므로 횡보강되지 않은 부분에서 큰 변형도를 나타낼 수 있다. 따라서 연성도를 증가시키기 위해서는 일자형 벽체의 경우, 횡보강길이를 증가시켜야 하며, 압축단부에 기둥과 같이 강도가 큰 요소가 있는 경우에는 국부보강영역의 강도를 증가시켜야 전체벽체의

연성도를 증가시킬 수 있다.

실험결과를 분석해 볼 때, 벽체단부의 최대변형율은 횡보강되지 않은 영역에서의 최대변형율에 의해서 좌우된다고 볼 수 있으며, 벽체단부의 최대변형율을 안전측으로 구하기 위해서는 횡보강 되지 않은 영역의 최대변형율을 1축압축강도에 해당하는 변형율로 산정해야 할 것이다. 중심축압력을 받는 횡보강된 벽체의 경우는 횡보강된 철근의 파단에 의해서 파괴된다. 따라서 만약 횡보강영역이 압축대의 길이에 비하여 매우 크다면, 비횡보강영역의 파괴이전에 횡보강된 철근의 파단에 의한 파괴가 일어날 것이다. 하지만 단부일부에만 횡보강된 경우에는 이러한 파괴양상을 기대하기 힘들다.

위와 같은 분석을 종합해 보면, Fig. 9와 같이 횡보강된 벽체는 압축대가 받는 하중이 증가하는 동안(a영역)에는 파괴되지 않으므로 이 영역에서의 연성도를 보장할 수 있다. 반면, 압축대가 받는 하중이 감소하는 동안(b영역), 횡보강되지 않은 영역의 변형율(ϵ)이 1축압축강도에 해당하는 변형율(ϵ_{co})보다 큰 경우, 벽체의 압축대가 파괴된다고 볼 수 있으며 이때 벽체단부의 변형율을 벽체의 연성도 설계에 반영해야 한다.

6. 결론

횡구속철근으로 단부횡보강된 전단벽의 연성도를 평가하기 위하여 실험 및 해석연구를 실시하였다. 주요한 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 현재 우리나라에서 시공되고 있는 고층벽식구조물에서 사용되는 전단벽과 같이, 압축영역이 크고 극한응력을 받는 면적이 큰 벽체의 소성힌지영역에서 단부횡보강이 없는 경우, 벽체의 압축단부의 최대변형율은 콘크리트의 일축압축강도에 해당하는 변형율로 산정해야 한다. 최대변형율을 0.004로 사용하는 일반적인 연성도 설계는 안전측이 아니다.
- 2) 단부횡보강되어 있는 벽체의 압축단부에서의 파괴는 횡보강되지 않은 영역에서의 압축파괴와 횡보강영역에서 횡보강 철근의 파단에 의한 파괴의 양상으로 나타난다. 후자는 횡보강영역이 매우 큰 경우이기 때문에 일반적으로 단부횡보강된 벽체는 전자와 같은 파괴양상을 보인다.
- 3) 최대강도 이전에는 비횡보강영역의 응력이나 강도에 관계없이 연성도를 유지할 수 있으나 최대강도 이후에는 비횡보강영역의 응력감소로 인한 취성파괴가 발생하여 더 이상의 연성도를 기대할 수 없다. 따라서 연성도를 증가시키기 위해서 단부기둥을 설치하는 것과 같은 단부보강방법을 사용하는 경우에는 국부보강영역의 강도를 증가시켜야 하며, 압축대에 고르게 횡보강을 분포시킨 경우에는 횡보강 길이를 증가시켜야 한다.
- 4) 횡보강된 벽체의 압축단부에 강도 및 연성도를 산정하기 위해서 횡보강영역에서 횡구속효과를 나타낼 수 있는 변형율-응력 관계에 대한 연구가 필요하며, 본 연구에서 사용한 Mander의 제안식도 비교적 정확한 결과를 나타내고 있다.
- 5) 단부기둥 설치와 같이 국부적인 보강방법으로도 연성도를 향상시킬 수 있으며 따라서 ACI 318-99와 같이 압축영역의 1/2 이상의 길이에 걸쳐 연성도보강을 요구하는 것은 적절치 않다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(1999-1-31000-002-3)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 건축물 하중기준, 대한건축학회, 2000
2. 박 홍 근, 강 수민, "단부 횡보강이 없는 세장한 전단벽의 내진성능", 콘크리트학회논문집 제12권 5호 2000.10 pp.47-57
3. Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R.(1988) "Theoretical Stress-Strain Model For Confined Concrete" J. Struct. Engrg., ASCE, 114(8), 1804-1826
4. Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R.(1988) "Observed Stress-Strain Behavior of Confined Concrete" J. Struct. Engrg., ASCE, 114(8), 1827-1849
5. ACI 318-99, Special provision for seismic design 21.6