

RC 구조벽의 연성설계

Ductility Design of Structural Wall

강수민*
Kang, Su Min

박홍근**
Park, Hong Gun

김옥중*
Kim, Ook Jong

이도범***
Lee, Do Bum

ABSTRACT

Nonlinear numerical analysis was performed to investigate the behavioral characteristics and failure mechanism of flexure-dominated structural walls with partially confined boundary elements. Based on the results, deformability of walls with partially confined boundary elements was evaluated, and a design method which can determine depth of confined boundary element according to given ductility demand, was developed. Also, effective details of laterally confining re-bars were proposed for boundary elements with rectangular cross-section. The design method can be used to choose the spacing of confining re-bars assuring the confining effect and constructability.

1. 서 론

개정예정인 내진설계기준에 의하면, 아파트와 같은 공동주거 건물은 지반상황, 설계가속도, 중요도 등을 고려했을 때, 대부분의 경우 설계범주가 C 또는 D로 분류된다. 설계범주가 D인 공동주거 건물을 벽식구조로 건설하기 위해서는 특수전단벽을 사용하도록 되어 있다(Table 1 참조). 하지만 현재까지 국내기준에는 특수전단벽 구조에 대한 개념이나 상세가 정립되어 있지 못한 실정이다. 따라서 특수전단벽을 사용하기 위해서는 구조벽의 단부횡보강 설계방법과 지침이 마련되어야 한다. 또한 벽체 단부횡보강에 대한 설계방법을 제시하고 있는 ACI 기준을 면밀히 검토할 필요가 있다.

구조벽체에 대한 내진설계시 구조설계자들이 공통적으로 의문을 갖는 부분은 벽식구조에 대한 반응수정계수 R 의 적정성과 벽체단부에 대한 횡보강설치의 필요성 여부이다. 현재의 건축물하중기준(2000)¹⁾에서는 단부횡보강의 필요성을 규정하지 않고 있으며, 일률적으로 $R = 3$ 을 사용하고 있다. 또한 콘크리트 구조설계기준²⁾에서도 단부횡보강에 대한 기준을 규정하고 있지 않다. 개정 예정인 내진설계기준에서는 보통 전단벽 구조에서는 $R = 4.5$, 단부횡보강을 적용한 특수 전단벽 구조에서는 $R = 5.5$ 로 규정하고 있는데(Table 1 참조), 이에 대한 분류기준 역시 명확하지 않은 상태이다.

지진에 대한 비탄성응답을 추정하는 대표적인 설계개념으로서 등가변위개념(principle of equal displacement)에 의하면, 구조물의 비탄성거동능력을 감안하여 탄성거동시 요구되는 강도 Q_E 보다 $1/R$ 의 비율로 감소된 강도요구량 Q 에 대하여 설계할 수 있다. 다만, 이를 위하여 비탄성변형 Δ_u ($=R \times \Delta_s$)까지 연성거동을 유지할 수 있도록 연성설계가 이루어져야 한다. 즉, 이 변형요구량 Δ_u 에 의하여 소성힌지가 발생하는 벽체단부의 곡률요구량을 산정하여, 이 곡률요구량을 충족하도록 벽체 단면의 횡보강여부가 결정되어야 한다. 따라서 구조벽의 내진설계에서 반응수정계수 R 의 적정성 여부는 벽체의 변형능력과 관계가 있으며, 따라서 단면의 횡보강여부와 직접적으로 관계가 있다. 또한 단면의 횡보강여부는 곡률요구량 뿐만 아니라 단면의 형상, 콘크리트강도, 축력의 크기 등 다양한 설계변수에 의하여 영향을 받으므로 모든 벽체에 대하여 일정한 반응수정계수를 적용하는 설계방법보다는 설계자의 의도나 구조물의 특성에 따라서 다양한 반응수정계수를 적용하고 이에 필요한 변형요구량을 만족하도록 성능에 기초하여 설계하는 것이 바람직하며 이러한 구조벽의 성능기초설계를 위해서는 변형요구량, 단면의 형상, 콘크리트 강도, 축력 등의 다양한 설계변수의 영향을 반영할 수 있는 횡보강 설계방법의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 변형요구량을 만족하고 여러 설계변수를 고려할 수 있는

* 정회원, 대림산업 기술연구소, 연구원

** 정회원, 서울대학교 건축학과, 교수

*** 정회원, 대림산업 기술연구소, 연구팀 부장

Table 1 개정예정인 내진설계기준에 의한 지진력 저항시스템에 대한 설계계수

지진력저항시스템에 대한 설계계수					
기본 지진력 저항시스템	반응수정 계수 R	변위증폭계 수 C_0	내진설계 범주에 의한 구조시스템과 건물높이(m)제한		
			A, B	C	D
1. 내력벽 시스템					
A. 철근콘크리트 보통 전단벽	4.5	4	제한없음	제한없음	허용안됨
B. 철근콘크리트 특수 전단벽	5.5	5	제한없음	제한없음	49
2. 건물골조 시스템					
:	:	:	:	:	:
E. 철근콘크리트 특수 전단벽	6	5	제한없음	제한없음	49
F. 철근콘크리트 보통 전단벽	5	4.5	제한없음	제한없음	허용안됨
:	:	:	:	:	:
4. 특수 모멘트골조를 가진 이중시스템					
:	:	:	:	:	:
E. 철근콘크리트 특수 전단벽	8	6.5	제한없음	제한없음	제한없음
F. 철근콘크리트 보통 전단벽	7	6	제한없음	제한없음	허용안됨
:	:	:	:	:	:
*시스템의 상세 규정에 대한 검증된 자료를 제시하는 경우에는 허용할 수 있음.					

구조벽의 횡보강길이 산정설계식과 단부 횡보강 상세를 제안하여 RC 구조벽체의 연성설계방법을 개발하고자 한다.

2. ACI 기준의 검토

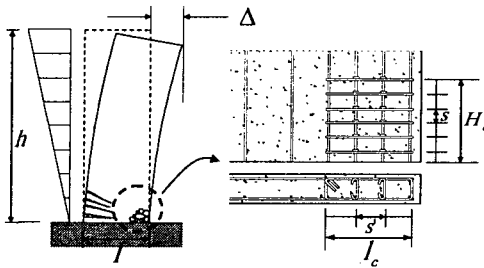


Fig.1 Ductility Design of Structural Wall

Table 2 특수전단벽에 대한 ACI 318-02 기준

	응력기준	변위기초설계기준
(1)단부횡보강 적용여부	maximum compressive stress $\geq 0.2f_{ck}$	$c \geq l/600(\Delta/h)$
(2)단부횡보강 영역 수평길이(l)	the larger of $d/2$ or $(c-0.1l)$	
(3)단부횡보강 영역 수직길이(H)	the larger of l or $M/4V_u$	
(4)단부횡보강 철근량(A_{sh})	$A_{sh} = 0.3(s h_c f_{ck} / f_y) [(A_g / A_{ch}) - 1]$	
(5)단부횡보강근 수직간격(s)	$s \leq l/4$	
(6)단부횡보강근 수평간격(s')	$s' \leq 366$ mm	

개정예정인 내진기준은 IBC 2000을 근간으로 한다. 따라서 개정예정인 내진기준에서 특수전단벽의 연성설계는 ACI 기준을 따를 것으로 판단된다. 따라서 ACI 기준에서 정의된 특수전단벽에 대한 설계 방법 및 상세를 검토해야 한다. 특수전단벽의 단부횡보강적용 여부는 Table 2와 같이 응력기준과 변위기초설계기준에서 판단할 수 있다. ACI 318-95 기준 이전에는 응력기준으로만 단부횡보강 여부를 결정하였으나 내진설계에서 단부횡보강은 근본적으로 구조물의 변형능력을 확보하기 위해서 설치하는 것이므로 응력기준으로 단부횡보강 여부를 판단하는 것은 불합리하다. 따라서 ACI 318-99 기준 이후에는 변위기초설계기준으로 단부횡보강여부를 결정할 수 있도록 하였다. 압축대의 길이 $c \geq l/600(\Delta/h)$ 인 경우, 벽체단부의 변형도가 0.003보다 크다고 가정하여 단부횡보강을 실시하도록 하였으며 $d/2$ 와 $(c - 0.1l)$ 중에서 큰 값을 단부횡보강길이로 산정하고 있다. $d/2$ 는 최소한의 횡보강 영역을 규정하기 위한 값이고 $(c - 0.1l)$ 는 압축축 콘크리트의 변형률이 0.003 이상인 부분을 횡보강하기 위하여 제안된 값이다.⁴⁾ 하지만 ACI 기준에서는 횡보강길이 산정을 위한 값임에도 불구하고 압축대 길이 c 의 산정에 횡보강 효과를 고려하지 않기 때문에 과설계를 초래할 수 있다. 또한 ACI 기준에 의해서 단부횡보강을 실시한 경우, 벽체의 변형능력이 어느 정도 증가하는지 판단할 수 없다. 뿐만 아니라 ACI 기준은 단부횡보강길이가 벽체에 요구되는 변형량과 직접적으로 관계를 맺지 못하고 있으며 벽체의 설계상세로 인한 거동특성의 변화에 대한 고려도 부족하다.

Table 2의 (4), (5), (6)항은 단부횡보강 상세에 대한 ACI 기준이다. (4)항은 피복콘크리트의 박리로 인한 강도감소를 코어콘크리트의 강도증가로 만회하기 위한 횡보강 철근량에 대한 규정으로서 피

복의 탈락 이후에도 강도감소 없이 연성도를 유지하기 위한 조항이다. 하지만 이 규정은 원형기둥의 나선철근량에 대한 식으로부터 띠철근 구속효과를 단순 저감하여 만든 기준으로서 직사각형 형태 단면에 사용되는 횡보강근의 간격이나 횡보강의 상세에 따른 유효구속효과의 변화를 적절히 고려하지 못한다⁹⁾. 따라서 (5)항에서 수직간격에 제한을 두어 효과적인 횡보강효과를 나타낼 수 있도록 하고 있다. 국내에서 벽식구조에 사용되는 구조벽의 경우, 벽체 두께가 일반적으로 200mm 내외여서 (5)의 규정을 따른다면 벽체의 수직간격은 50mm보다 작아야 한다는 것을 의미한다. 이러한 수직간격을 충족시키려면 상당히 많은 횡보강량을 필요로 하며 실제 50mm 미만의 간격으로 횡보강근을 설치하는 것은 시공상의 어려움이 따른다. 또한 (6)의 규정은 지나치게 대각철근(cross-tie)이나 겹침 후프(overlapping hoops)의 간격 s' 를 크게 허용하고 있는데 벽체단부의 단면형상은 긴 장방향으로 s' 의 간격이 작을수록 횡보강효과가 커질 것으로 기대되며 따라서 실제 벽체에 (6)의 조항에 따라 s' 의 간격을 크게 하여 단부 횡보강설계를 실시할 경우, 합리적인 횡구속 효과를 발휘하기 힘들 것으로 예상된다. ACI 내진기준에서 횡보강 상세에 대해 위와 같은 문제점들이 발생하는 이유는 벽체 단부의 거동적, 형태적 특성이 기둥과 상이함에도 불구하고, 기둥의 횡보강상세를 그대로 따르고 있기 때문이다. 따라서 벽체 단부의 효과적인 횡보강 상세설계 방법을 개발하기 위하여 직사각형의 압축단부에 대한 철근의 횡구속 효과를 연구해야 한다.

3. 특수전단벽의 단부횡보강 설계방법제안

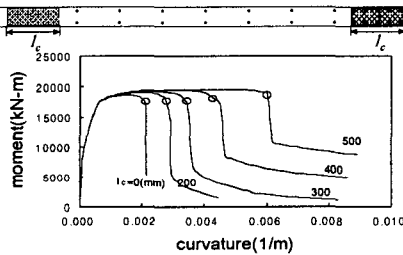


Fig. 3 Numerical Analysis for Wall with Boundary Element

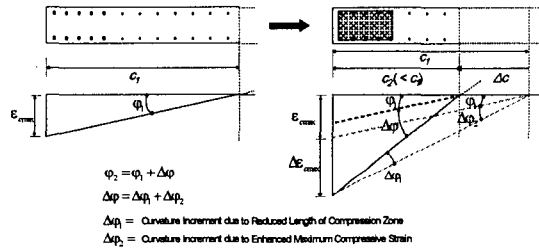


Fig. 4 Curvature Enhancement due to Boundary Confinement

Table 3 소성힌지영역에서의 곡률성능, 요구량 및 횡보강길이

횡보강에 의한 곡률성능	$\phi_c = \left[\frac{1}{1 - \frac{P + P_{us} + (A_s - A'_s) f_y}{f_{cc} A_{cc}}} \right] \phi_{c0} \quad (1)$ <p>여기서 P_{us} = 웨브부분의 철근의 항복강도, $f_{cc} A_{cc}$ = 횡보강영역에서 요구되는 강도, P = 압축력</p>
소성힌지영역에서의 곡률요구량	$\phi_{max} = \frac{40\Delta - 11\phi_y h^2}{40l_p(h - 0.5l_p)} + \phi_y \quad (2)$
소성힌지영역에서의 횡보강길이	$l_c = \frac{(A - l\phi_{cc})[P + P_{us} + (A_s - A'_s) f_y]}{A f_{cc} (t - 2t_c)} \quad (3)$
횡보강근의 수직, 수평 간격	<p>a) 식 (2)에 의해 $s' \leq (l_c d_c) / (2l_c - d_c)$ 일 때,</p> $s = 10.2 A_{sh1} \left(\frac{l_c + s'}{l_c} \right)^{0.45} d_c^{-0.55} (f_y / f_{ck}) \quad (4)$ <p>b) 식 (2)에 의해 $s' > (l_c d_c) / (2l_c - d_c)$ 일 때,</p> $s = 9.5 A_{sh1} \left(\frac{l_c + s'}{l_c} \right)^{0.55} d_c^{-0.45} (f_y / f_{ck}) \quad (5)$

의 강도증가로 인하여 압축대의 길이가 줄어들어 변형능력이 크게 증가하기 때문이다(Fig. 4 참조). 해석결과에 기초하여 횡보강된 벽체의 최대변형능력 ϕ_c 을 나타내는 곡률성능을 횡보강 되지 않은 벽체의 곡률성능 ϕ_{c0} 으로 나타내면 Table 3의 식 (1)과 같다. 식 (1)을 이용하면 단부횡보강된 벽체의 최대곡률성능을 단면상세, 횡보강상세 그리고 벽체에 가해진 압축력 등을 고려하여 구할 수 있다. 설

단부횡보강된 벽체의 변형능력을 연구하기 위하여 비선형수치해석을 수행하였으며 이를 위하여 단면 해석 프로그램 UcFyber⁸⁾를 사용하였다. 비선형수치해석을 통하여, 단부횡보강된 벽체의 모멘트-곡률관계를 분석하여 연성도를 파악하였다. 해석결과를 살펴보면 단부횡보강영역이 증가함에 따라서 최대강도에 해당하는 변형능력이 크게 증가함을 알 수 있다(Fig. 3 참조). 이는 횡보강으로 인하여 콘크리트의 연성능력이 증가하고 이와 더불어 횡구속된 콘크리트

계변위 Δ 가 주어졌을 때 벽체하부 소성힌지영역에서 요구되는 곡률은 Priestley가 제안한 방법에 의해 식(2)와 같이 구할 수 있다⁵⁾. 식(2)는 곡률 요구량을 나타내고 식(1)은 횡보강상세에 따른 벽체단면의 곡률성능을 나타내므로 단면의 곡률요구량과 곡률성능을 등가로 하여 소성힌지영역에서의 횡보강 길이를 구할 수 있으며 이는 다음 식(3)과 같다.⁶⁾ 식(3)을 이용하면, 소성힌지 구간에서 요구되는 횡보강길이 l_c 를 벽체의 설계변위 Δ 와 벽체에 가해지는 축하중 P , 벽체크기(h, l), 단면의 철근배근형태를 고려하여 구할 수 있다. 식(3)을 살펴보면 벽체의 횡보강길이는 압축력과 설계변위가 증가하면 늘어나고 횡보강 되지 않은 단면의 최대곡률 ϕ_{cr} , 횡보강영역의 강도 f_{cr} , 형상비 h/l 이 커지면 줄어든다. 식(3)은 단부 횡보강으로 인한 벽체의 곡률성능을 반영한 식으로 ACI 기준에 비교해서 경제적인 설계가 가능하며 이 식을 이용하여 단부 횡보강한 경우 성능에 기초한 벽체의 연성설계가 가능하다.

국내에서 많이 사용되는 벽식구조의 구조벽은 $t = 200$ mm의 비교적 얇은 벽체로서 횡보강 철근을 설치하기가 어렵다. ACI 기준에서 벽체단부에 적용하는 횡보강상세가, 기둥의 횡보강상세를 그대로 따르고 있기 때문에 효과적인 횡보강효과와 시공성을 확보하기 어렵다. 벽체 단부의 효과적인 횡보강상세설계 방법을 개발하기 위하여 직사각형의 압축단부에 대한 철근의 횡구속 효과를 Mander의 횡보강 콘크리트의 재료모델⁷⁾에 근거하여 연구하였으며 연구결과로서 강도와 연성도, 시공성 측면에서 충분한 성능을 발휘할 수 있는 상세를 제안하였으며 이는 식(4), (5)와 같다. 식(4)와 (5)에서 제안된 식은 횡보강근의 수직, 수평간격 그리고 횡보강량이 별개의 조합으로 되어 있는 것이 아니라 하나의 함수식으로 제안됨으로써 시공성, 재료성질 등을 고려하여 설계자가 능동적으로 단부횡보강 설계를 할 수 있게 하였으며 항상 일정한 수준의 횡보강 효과를 발휘하도록 하였다.

4. 결론

- (1) 개정예정인 내진설계기준에서는 단부횡보강된 특수전단벽의 사용을 채택하였다. 하지만 현재까지 국내에는 특수전단벽의 개념이 명확히 정립되지 못 하였으며 설계방법에 대한 연구도 부족한 상태이다.
- (2) 단부 횡보강된 특수전단벽의 철근배근방식, 철근비, 압축력, 횡보강상세 등의 설계변수를 고려하는 최대곡률성능을 정의하였고 벽체의 형상, 설계변위 등을 고려한 곡률요구량을 정의하여 벽체 단부의 횡보강 길이를 산정할 수 있는 방법을 제안하였다. 제안된 설계방법을 이용하면 벽체의 변형요구량을 효과적으로 만족할 수 있도록 단부횡보강길이를 결정할 수 있다.
- (3) ACI 318-02 내진기준에 의한 횡보강길이는 횡보강효과를 적절하게 고려하지 않으므로 비경제적인 설계가 될 수 있다. 반면에 제안된 방법은 횡보강효과를 적절하게 반영하고 있으며 다양한 설계변수를 고려할 수 있어서 성능에 기초한 벽체의 단부설계가 가능하다.
- (4) 효율적인 단부 횡보강효과와 시공성을 확보하기 위해서 현행 ACI 설계기준의 문제점을 파악하였고 단부 횡보강상세에 대한 분석을 수행하여 이를 근거로 하여 구조벽의 형태적, 거동적 특성을 반영한 횡보강근의 배치간격을 제안하였다.

참고문헌

1. 건설교통부, "건축물하중기준," 2000.
2. 한국콘크리트학회, "콘크리트구조설계기준," 2000.
3. American Concrete Institute, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-99), Special Provision for Seismic Design 21.6, 1999.
4. Wallace, J. W. and Orakcal, K., "ACI 318-99 Provisions for Seismic Design of Structural Walls," ACI Structural Journal, ACI, 99(4), 2002, pp. 499-508.
5. Paulay, T. and Priestley, M. J. N., "Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings," Wiley Interscience, 1992.
6. 강수민, "웁지배 구조벽체의 연성설계," 서울대학교 박사학위 논문, 2004.
7. Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R.(1988), "Theoretical Stress-Strain Model For Confined Concrete," J. Struct. Engrg., ASCE, 114(8), pp. 1804-1826.
8. Charles, Chadwell, Ucfyber - Cross Section Analysis Software, University of California, Berkeley, 1999.
9. Sakai, K. and Sheikh, S. A., "What Do We Know about Reinforced Concrete Columns? : A Critical Review of Previous Work and Code Provisions," ACI Structural Journal, ACI, 86(2), 1989, pp. 192-205.