

Spiral 철근 배근된 전단벽 단부의 내진성능 연구를 위한 예비 고찰

Preliminary Study on Boundary Detailing of Structural Wall with Spirals

김 록 배* 홍 성 곁**

Kim, Loc Bae Hong, Sung Gul

ABSTRACT

The necessary strength and ductility to avoid structural damage under moderate earthquake can be achieved by properly detailed transverse reinforcement in the plastic hinge zone. However, most structural walls have a higher aspect ratio (M/Vl_w) without well confined boundary regions. Therefore there is a need for adequate detailing in the plastic hinge zone, particularly boundary regions. In this paper, the fabricated interlocking spirals is introduced as a new seismic detailing for ductile behavior of the structural walls to be able to substitute for existing complicated detailing with ties. This paper also investigates the behavior characteristics of structural walls with interlocking spirals including confinement of the concrete and strength associated with flexure and shear.

1. 서론

내진 설계의 목표는 지진의 평균 재현주기에 대한 기능수행수준과 붕괴방지수준을 만족하도록 설계하는 것으로 강진에 대해서는 비탄성거동을 확보하여 경제적인 설계를 피하는 것이다. 이러한 비탄성 거동에 충분한 연성의 확보를 위하여 ATC에서는 내력벽 방식의 철근콘크리트 구조물에 대해 지진응답수정계수(R)를 4.5로 규정하고 이에 따른 상세를 규정하고 있다. 국내에서도 1996년 이후 내진설계 개념이 본격적으로 수행되었으나 벽체에 관해서는 아직까지 내진 성능 확보를 위한 합리적 방안의 확보가 미비한 상태이다. 국내 규준은 $R=3.0$ 으로 규정하고 있고 대한주택공사에서는 $R=3.5$ 에 대해 띠철근에 의한 단부 보강법을 제시하고 있지만 정확한 실험이나 해석적 근거에 바탕한 것이 아니어서 합리적인 값이라 하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 지진 발생시 벽체 소성힌지 발생부분이 효율적으로 연성거동을 하도록 보강 상세를 제시하였다. 아울러 효과적인 보강을 통해 재료를 절감하고, 현재의 복잡한 단부보강상세를 대신하여 시공성이 우수한 상세 개발을 모색하였다.

2. 벽체 내진설계

2.1 벽체 손상도 분류

*정회원, 서울대학교 건축학과 석사과정

**정회원, 서울대학교 건축학과 조교수

FEMA 306⁽⁶⁾에서는 캔틸레버 R/C벽체를 지진으로 인한 손상정도에 따라 다음과 같이 분류하였다.

분류	거동 모드	거동 특성
RC1A	연성 휨	과도하지 않은 수직철근에 수평철근을 충분히 배근한 벽체. 균열폭이 넓은 휨 균열과 콘크리트 박리가 소성힌지 내에 집중. 전단균열은 폭이 좁게 나타남. 벽체연성을 확보하는 바람직한 설계로 큰 손상도 하에서도 콘크리트 심부의 손상이나 철근의 좌굴, 파단 등이 적음.
RC1B	휨/사인장	수평철근량이 적고, 수직철근량이 많은 벽체. 형상비 (M/Vl_w) 2 정도의 벽체에서 많이 발생하지만 철근량에 의해 우선적으로 좌우. RC1A의 거동과 비슷하지만 손상 정도가 심할 경우에는 폭이 넓은 전단 균열이 발생.
RC1C	휨/복부 압괴	수평철근 충분하고 휨보강근 과도한 벽체, 축력이 크게 작용하는 낮은 벽체, 또는 경계부재나 플랜지를 가진 벽체. 손상정도가 심할 경우 복부의 박리 시작.
RC1D	휨/미끄럼 전단	수평철근 충분하고 높이가 낮은 벽체(특히 시공준), 축력이 적고 플랜지나 경계부재가 있는 벽체. 소성힌지영역에서 휨균열이 단면을 가로질러 발생하여 잠재적인 미끄럼면이 되며, 손상도가 클 경우 콘크리트 성능이 저하되고 이 균열을 따라 미끄러짐이 발생.
RC1E	휨/경계 압축	수평철근이 충분하고 단부가 충분히 구속되어 있지 않은 벽체나 형상비 (M/Vl_w)가 큰 벽체. 일반적으로 RC1A형태와 비슷한 거동을 보이지만 손상도가 클 경우 단부에 콘크리트 박리와 압괴가 발생. 휨강도는 충분하지만 단부의 횡보보강근이 수직철근의 좌굴을 방지하고 콘크리트를 적절히 구속하기에 부족. 손상도가 클 때 소성힌지영역 단부에 수직균열과 박리가 생기는데 이 경우 단부 수직철근에 좌굴이 일어나고 콘크리트는 심부까지 심하게 손상.

2.2 벽체 설계 개선 방향

일반적인 아파트 벽체는 단부가 적절히 구속되어 있지 않고 형상비 (M/Vl_w)가 매우 크기 때문에 강진시 적절한 응답이나 효과적인 에너지 소산을 기대할 수 없는 휨/경계압축거동을 보일 것으로 사료된다. 따라서 강진에 효과적인 RC1A의 연성휨거동으로 유도하기 위해 소성힌지 부분의 보강은 필수적이다. 그러나 경계부재나 주근의 집중 배근 등으로 단부를 보강할 경우 복부의 압괴강도가 휨강도보다 적게 되어 복부압괴가 일어날 수 있으므로 보강으로 인한 벽체의 휨강도 증가는 방지되어야 한다. 이를 위해 소성힌지 영역 내에서 수직철근의 항복을 유도하여 벽체의 연성거동을 확보하고 면의 좌굴이나 점침이음, 정착부분에서의 부차파괴를 방지하여야 한다. 또한 소성힌지 영역에서는 전단변형이 커져 소성회전강성을 감소시키므로 전단변형의 증가를 억제해야 한다. 이러한 사항들을 고려하여 성능이 우수하고 시공이 편리한 내진 상세의 대안으로 interlocking spiral을 통한 단부구속을 제안하였다.

3. 비교 모델의 재원

본 연구에서는 단부 보강하지 않은 벽체(WP)와, 기존의 띠철근으로 단부 구속한 벽체(WT), 그리고 새로운 단부 보강 방법으로서 interlocking spiral에 의한 벽체(WS)를 비교하였다.(그림 3.1)

이론적 접근의 용이성을 위해 벽체 모델은 비교적 작게 선정하였다. 벽체의 높이는 300cm, 폭은 100cm ($M/Vl_w=3$)로 하였다. 재료 재원은 콘크리트의 극한 강도 $f_c=240kg/cm^2$, 콘크리트의 극한 변형률 $\epsilon_{cu}=0.003$, 철근의 항복강도 $f_s=4000kg/cm^2$ 으로 가정하였다.

수평철근의 간격은 현행 아파트 벽체 시공에 따라 세 모델 모두 20cm로 하였고, WT모델의 띠철근 역시 20cm 간격으로 하였다. WS 모델의 나선 철근의 피치는 WP 모델의 띠철근량과 철근량을 비슷하게 유지하기 위해 6cm로 하였다.

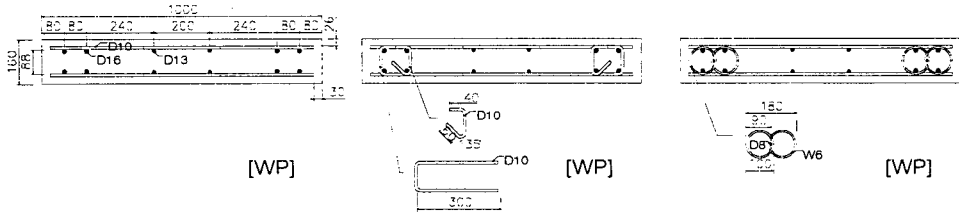


그림 3.1 비교 모델

4. 콘크리트 변형률-응력 특성

횡방향 압축응력 f_2 에 대해 구속시 콘크리트의 압축강도 f_1 은 식 4.1과 같이 증가한다.⁽¹⁾

$$f_1 = f_c + k_1 f_2, \quad k_1 = 4.1 \quad \text{식 4.1}$$

나선철근의 경우 f_2 는 보강철근량 ρ_s , 보강철근응력 f_{sp} 에 대해 $f_2 = f_{sp} \rho_s / 2$ 로 표현할 수 있다.

그러나 식 4.1은 콘크리트가 균일한 횡유압을 받는다는 가정에서 도출된 것으로 실제 콘크리트는 철근에 의해 일정한 간격으로 횡구속되므로 아치작용에 의해 위의 식보다 횡구속의 효율이 적다. 또한 횡단면상에서 보면 원형 띠철근이나 나선 철근으로 구속할 경우 단면 전체가 고르게 구속되는 반면 띠철근에 의한 구속은 주근 근처의 구석과 단면의 코어부분에서만 효과적이다.(그림 4.1) 이에 식 4.1의 f_2 는 유효구속계수 (k_e)에 의해 적절히 수정되어야 한다.(식 4.2) 여기서 A_{cc} 는 구속 면적을, A_e 는 유효구속 면적을 나타낸다.⁽³⁾

$$f_1' = k_e f_2, \quad k_e = \frac{A_e}{A_{cc}} \quad \text{식 4.2}$$

대부분 아파트 벽체의 두께가 15cm에서 20cm정도로 ($d_c = 9cm \sim 14cm$) 현재 단부 구속을 위한 띠철근이 수직 방향으로 20cm 내외로 시공되고 있는 점을 감안한다면 k_e 가 매우 작아 띠철근 사이의 콘크리트는 거의 구속효과가 없다고 볼 수 있다. 반면 WS 모델의 구속된 부분의 k_e 값은 0.674로 이 때 콘크리트 (f_{cc})의 압축강도는 $314kg/cm^2$ 이다. 구속 콘크리트의 변형률-응력 곡선은 그림 4.2와 같다.⁽²⁾ 여기에서 콘크리트 구속시 압축강도와 연성도가 상당히 증가하는 것을 확인할 수 있다.

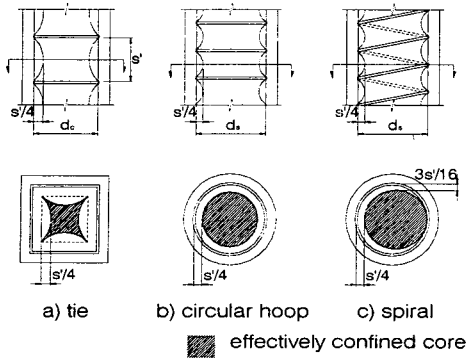


그림 4.1 유효 구속 면적의 비교

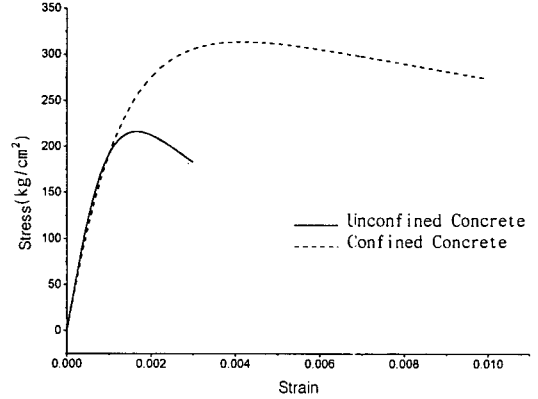


그림 4.2 콘크리트의 변형률-응력 곡선(WP, WS)

5. 휨강도

벽체는 압축력과 횡하중에 의한 휨을 동시에 받는 구조물이다. 본 연구에서 모델에 가해지는 축하중은 일반적으로 아파트 벽체에 가해지는 $0.1A_g f'_c$ 에 해당하는 38.4ton을 가정하였고, 일반 설계법으로 각 모델의 휨 강도를 산정하였다. WS 모델의 경우 구속단부의 압축강도가 314kg/cm^2 이므로 이를 휨 강도에 고려하였다. 반면 WT 모델은 k_e 값이 매우 작기 때문에 콘크리트 압축강도의 증가는 거의 기대할 수 없다. 그러므로 WT 모델의 휨강도는 WS 모델과 같은 강도로 간주할 수 있다.

6. 전단

6.1 단부균열 발생전

콘크리트에 의한 전단강도 V_c 는 콘크리트 구조설계기준⁽⁵⁾에 의해 산출하였고 띠철근 및 수평철근에 의한 전단력 전달은 45° 콘크리트 압축 스트럿에 근거한 식에 의해 산출하였다. WS 모델 단부 구속 부분의 보강철근에 의한 전단력 산정은 Tanaka와 Park⁽⁴⁾의 interlocking spiral에 대한 연구에 기초하였다. 이 연구에서는 spiral interlocking 정도의 가정에 따라 완벽하게 맞물려 있을 경우, 횡보강 철근과 등가인 경우, 그리고 전단력에 효과적이지 못한 경우의 세 가지 가정에 대해 고찰하였는데 실험에 의해 두 번째 가정이 합리적임을 밝혔다.(식 6.1)

$$V_s = \frac{\pi}{4} (2A_{sp} f_{yh}) \frac{D'}{s} + (2A_{sp} f_{yh}) \frac{d_{it}}{s} \quad \text{식 6.1}$$

6.2 단부수평균열 발생 후

일반적으로 아파트 벽체의 경우 단부에서는 휨에 의한 수평균열이 먼저 발생하고 균열이 차츰 진행함에 따라 복부에서 전단에 의한 사균열이 발생한다.(그림 6.1) 단부구속을 위한 띠철근과 나선 철근은 이 수평균열면 내에 존재하므로 수평균열 후 단부에서 횡보강근에 의한 전단력 산정시 45° 콘크리트 압축 스트럿을 가정한 식을 적용하는 것은 타당하지 않다.

반복 하중에 의해 벽체의 양쪽 단부에 수평균열이 발생하였을 경우 압축측 단부는 전단 마찰력과 철

근의 인장력에 의해, 인장측 단부는 철근의 인장력에 의해, 그리고 벽체 복부는 콘크리트의 압축스트레트 및 철근의 트러스 작용에 의해 전단력을 전달한다. 이렇게 볼 때 초기 균열후 벽체의 전단력 전달은 크게 세 부분으로 나누어 산출하여야 한다.

1) 압축측 단부

하중 역전에 의한 압축측 단부는 수평 균열이 닫히게 된다. 이 경우 콘크리트 골재 사이의 상호작용과 마찰, 보강철근의 인장력, 장부작용으로 전단력을 효과적으로 전달할 수 있다. 이 경우 전단강도는 식 6.2와 같이 산정할 수 있는데 $\sin \alpha_f$ 에 관한 항은 전단마찰에 관한 부분으로 마찰 계수 μ 를 곱해주고 $\cos \alpha_f$ 의 항은 철근의 인장력에 의한 부분이다. 그리고 $C_u \mu$ 는 일정한 압축력이 가해질 때 콘크리트의 마찰에 의한 전단력 전달을 나타낸다.

$$V_n = A_v f_y (\mu \sin \alpha_f + \cos \alpha_f) + C_u \mu \quad \text{식 6.2}$$

WS 모델의 경우 spiral이 균열면과 약 30°의 각을 갖기 때문에 전단력을 전달할 수 있다. 이 때 압축력을 받을 경우 전단마찰력을 감소시킬 수 있으므로 압축력을 받는 spiral의 기여는 고려하지 않는다. WP 모델과 WT 모델은 $\alpha_f = 0$ 이므로 콘크리트의 기여부분인 $C_u \mu$ 만을 고려한다.

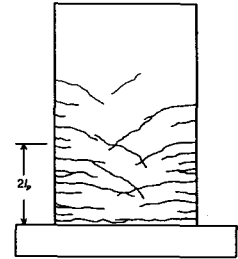


그림 6.1 벽체 균열 양상

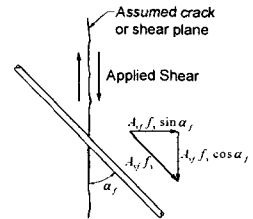


그림 6.2 균열면에 기울어진 철근

2) 인장측 단부

인장측 단부는 균열이 벌어지면서 전단에 대한 콘크리트의 기여가 0이 된다. 그러므로 WP 모델의 경우 이 부분에서의 전단력은 0이라고 할 수 있다. WT 모델 역시 횡 보강근이 균열면과 평행하기 때문에 전단에 대해 거의 저항하지 못한다. 그러나 WS 모델은 나선 철근이 전단면에 적절한 기울기를 갖고 있으므로 전단에 저항할 수 있다. 여기서 나선 철근에 의한 전단력은 식 6.3과 같다.

$$V_n = A_v f_y \cos \alpha_f \quad \text{식 6.3}$$

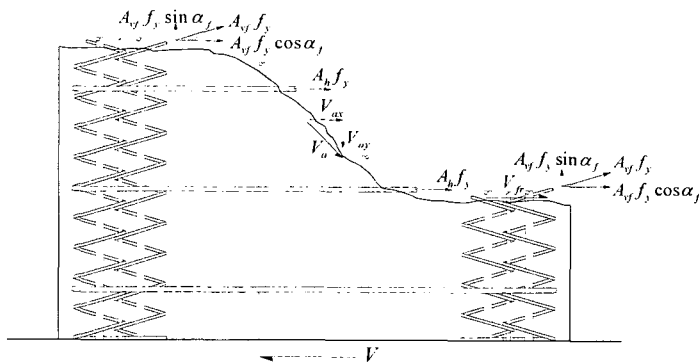


그림 6 균열면에서의 전단력 전달

3) 복부

손상도가 커질수록 양쪽 단부의 수평 균열이 진행되어 전단에 의한 복부 사균열로 발달한다. 이 부분은 일반적인 방법으로 전단력을 산정할 수 있으므로 전단강도가 모두 같게 간주할 수 있다.

7. 결론

제안한 interlocking spiral의 단부 보강 방법에 의한 전단벽의 내진성능 특성은 다음과 같이 예상된다.

- 1) 벽체 휨거동의 측면에서 볼 때 spiral의 구속효과로 ϵ_{cu} 의 증가가 월등하며 소성힌지에서 발생할 수 있는 압축축에서의 주근좌굴, 콘크리트의 파쇄파괴 시기를 지연시켜 예상외의 연성거동을 기대할 수 있다.
- 2) 벽체의 전단강도는 일반적으로 복부에서 부담하는 것이나 spiral 단부보강은 부수적으로 단부의 초기 균열 후 전단 강도 증가를 예상할 수 있다. 이러한 전단강도의 증가는 주요 파괴양상이 휨파괴로 발달할 가능성을 높여 벽체가 휨 항복 이후 안정적 이력 곡선을 유지할 것으로 기대된다.
- 3) 인장축의 경우 cut-off 철근의 겹침이음부에서 부착강도를 증가시켜 겹침 부착저하로 인한 콘크리트의 조기 인장파괴의 가능성을 낮출 수 있다.

참고문헌

1. Richart, F.E., Brandtzaeg, A. and Brown, R.L.(1928), "A Study of the Failure of Concrete Under Combined Compressive Stresses", University of Illinois Eng. Experimental Station, Bulletin No.185, 104pp.
2. Popovics, S.(1973), "A Numerical Approach to the Complete Stress-Strain Curves of Concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 3, No. 5, pp.583-599.
3. Mander, J.B.(1984), "Seismic Design of Bridge Piers", PhD thesis, University of Canterbury Christchurch New Zealand, Department of Civil Engineering.
4. Tanaka, H. and Park, R.(1993), "Seismic Design and Behavior of Reinforced Concrete Columns", ACI Structural Journal.
5. 건설교통부 제정(1999), "콘크리트 구조설계기준", 한국콘크리트학회·대한건축학회
6. ATC(1999)., "Evaluation of Earthquake Damaged Concrete and Masonry Wall Buildings", FEMA 306.