

단부에 Interlocking Spiral을 가진 전단벽의 거동에 관한 연구

Study for the Structural walls with Interlocking Spirals on the boundary

홍성걸* 김록배** 정하선*** 구광현****
Hong, Sung Gul Kim, Loc Bae Jeong, Ha Sun Ku, Kwang Hyun

ABSTRACT

This paper propose a new seismic detail for ductility enhancement by interlocking spiral reinforcement in the potential yield regions of a wall. Through the theoretical consideration and experiment program, confinement with interlocking spirals lead the structural walls to ductile behavior. All specimens show stable hysteretic behavior and good energy dissipation capacity. Also the increase of shear strength mainly induces a flexural failure mode. As interlocking spiral are used in lapped splice region, they increase the bond strength and prevent a early tensile failure caused by the loss of bond stresses. Consequently, the confinement with interlocking spirals may result in a lower value of force reductions factor, newly proposed detail will be provide more economical design.

1. 서론

벽체는 횡하중을 저항하는데 효율적인 부재이다. 그러나 적절히 단부와 전단 보강되지 않은 전단벽의 경우 취성적인 거동으로 말미암아 강진시 큰 피해를 줄 수 있으므로 비선형 변형이 형성되는 소성흔지 발생 부분에서 연성적인 거동과 안정적인 에너지 소산 능력이 보장되어야 한다.

이를 위해 우리 나라 규준에서는 아파트 벽식 구조물을 설계할 때 벽체 단부 하단 부분을 띠철근으로 보강하는 방법을 사용하고 있지만 이는 신뢰할 만한 내진 성능을 갖는다고 보기 어렵다. 본 연구에서는 이에 대한 대안으로써 단부를 interlocking spiral로 보강한 경우를 제시하여 보강 방법에 따른 성능의 차이를 고찰하고 이에 대하여 실험을 수행, 검증하도록 한다. 아울러 제안된 대안이 안정된 단부 보강 방법인지의 여부와 반응 수정 계수 R에 미치는 영향에 대해서도 검토하고자 한다.

* 정회원, 서울대학교 건축학과 조교수
** 정회원, 전 서울대학교 건축학과 석사과정
*** 정회원, 현대건설 기술연구소 연구위원
**** 정회원, 서울대학교 건축학과 석사과정

2. 기존 연구의 고찰 - Interlocking Spirals

Interlocking spiral은 그림 1에서와 같이 두 개의 횡철근이 서로 맞물려서 하중에 대하여 저항할 수 있도록 한 상세이다. Interlocking spiral을 사용하면 띠철근을 사용하였을 때보다 효과적으로 콘크리트 코어를 구속시킬 수 있고 보조 띠철근 등이 필요 없으므로 철근량을 감소시킬 수 있으며 시공 과정의 간소화를 도모할 수 있다는 등의 장점이 있다. 기둥에서 나선 철근을 사용하였을 경우 소성 힌지 영역에서의 철근비는 NZS 3101¹⁾에서 식 2.2의 값 이상일 것을 요구한다.

$$\rho_s = 0.45 \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_{yh}} \left(0.5 + 1.25 \frac{P}{\phi f'_c A_g} \right) \text{ or } 0.12 \frac{f'_c}{f_{yh}} \left(0.5 + 1.25 \frac{P}{\phi f'_c A_g} \right) \quad \text{식 2.2}$$

위 식에서 사용된 기호들은 다음과 같다. A_g =단면의 총면적, A_c =나선철근의 외측으로부터 측정된 콘크리트 코어 면적, f'_c =콘크리트 압축강도, f_{yh} =나선 철근의 항복강도, P =설계 축하중, ϕ =강도 감소 계수.

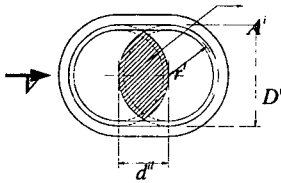


그림 1 Interlocking Spiral을 가진 벽체의 단면

또한 CALTRANS code²⁾에서는 나선 철근이나 interlocking spiral이 사용되었을 경우에 식 2.2에서 ϕ 를 제외하고 계산한 값 이상이어야 하며 그 때의 철근비는 식 2.3에서와 같이 계산한다.

$$\rho_s = \frac{4\pi r_1 A_{sp}}{2(\pi r_1^2 - 0.5A_i)s} \quad \text{식 2.3}$$

A_{sp} , s 는 각각 나선 철근의 단면적과 간격을 나타내며, r_1 , A_i 는 그림 1에 정의되어 있다.

3. 실험 계획 및 방법

3.1 비교 모델의 선정 및 제작

모델의 재원은 단부를 보강하지 않은 WP 시험체, 단부를 띠철근과 보조 띠철근으로 보강한 WT8 시험체, interlocking spiral로 보강한 WS8 시험체이다. 또한 interlocking spiral의 경우 중심 사이의 간격이 거동에 미치는 영향을 고려하기 위해서 WS5 시험체를 제작하였으며 겹침 이음에 대한 interlocking spiral의 성능을 확인하기 위해 WT 시험체와 WS 시험체에 대해 각각 기초에서 뽑은 철근과 겹침 이음하여 벽체 철근을 세운 시험체 - WT8_s, WS8_s - 를 제작하였다.

제작된 6개의 시험체 모두 높이=300cm, 폭=100cm ($M/Vl_u=3$)이며 콘크리트의 압축 강도와 극한 변형률은 각각 $f'_c=270\text{kg/cm}^2$, $\epsilon_{cu}=0.003$ 이다. 철근은 $f_s=4000\text{kg/cm}^2$ 의 것을 사용하였다. 수평철근 간격은 현행 아파트 벽체 시공에 따라 모두 20cm로 하였고, WT 시험체의 띠철근 역시 20cm 간격으로 하였다. WS 시험체의 나선 철근 피치는 WP 시험체의 띠철근량과 철근량을 비슷하게 유지하기

위해 6cm로 하였다. 벽체 배근은 일반적인 아파트 벽체 시공에 준하였다.

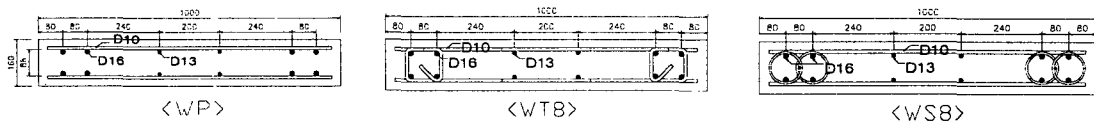


그림 2 비교 모델

각각의 시험체의 횡방향 철근의 체적 철근비는 콘크리트 구속 부분에 대하여 WT8 시험체 0.039, WS8 시험체 0.021이다. 그리고 전단 강도는 WP 시험체 367.0kN, WT8 시험체 416.3 kN, 그리고 WS8 시험체 486.6kN이다. 콘크리트에 의한 전단강도 V_c 는 콘크리트 구조설계기준³⁾에 의해 산출하였고 띠철근 및 수평전단철근에 의한 전단력 전달은 45° 압축 스트럿에 근거한 식에 의해 산출하였다. interlocking spiral에서 전달되는 전단력은 H. Tanaka와 R.Park의 연구⁴⁾에 의해 등가의 단면적을 산정하여 계산하였다.

3.2 실험 방법 및 수행

축력은 20층 아파트의 1층 벽체에 작용하는 고정하중을 재현하기 위해 $0.1 A_g f'_c$ 에 해당하는 376.32 kN의 하중을 두 개의 25 ton 액츄에이터로 일정하게 유지하였다. 횡력은 반력벽에 설치된 100 ton 액츄에이터로 변위 제어 방식의 반복하중을 가력하여 변위 이력에 대한 하중 변위 결과를 얻었다. 횡력의 가력 이력 변위는 실험체의 횡변위를 가력점의 높이로 나누어준 부재각으로 제어하였다. 각각의 부재각에 대해 2회의 변위 사이클을 진행하였으며, 하중 가력 이력은 그림 3에서 볼 수 있다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 거동 특성

WT8 시험체는 이력 사이클 +100 mm에서 압축측 주근이 좌굴로 벽체 단부가 심하게 손상되어 -100 mm 가력 후 시험을 종결하였다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 휨균열과 전단 균열이 많이 발생하기 전에 단부 주근 좌굴에 의한 수직 균열이 발생하였고 대부분의 균열이 소성 힌지 영역에 집중되어 있다.

WS8 시험체는 steel head와 가력보 간의 체결 불안정 및 가력보의 손상 등으로 불안정한 이력을 보이고 있어, WT8 시험체와 WS5 시험체를 비교하였다. WS5 시험체는 이력 사이클 100 mm까지 수직 균열이 거의 발생하지 않았다. 휨 균열이 폭넓게 발생하였다. 이력 사이클 120 mm에서 벽체 하부 면의 좌굴로 시험체가 파괴되어 가력을 중단하였다.

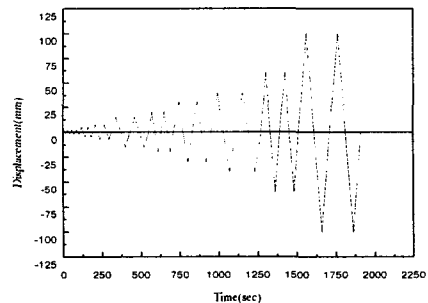


그림 3 하중 가력 이력

WT8_s 시험체는 겹침 이음부의 거동에 중점을 두었다. 가력 초반에는 안정적인 거동을 보였으나 이력 싸이클 60 mm 이후 인장측 단부 겹침 이음부에서 수평 균열이 발생한 후 이 부분을 기점으로 쪼개짐에 의한 수직 균열이 발생하였다.

WS8_s 시험체는 이력 싸이클 20(-100 mm)에서 벽체 인장측 단부의 피복 콘크리트가 박리되긴 했지만 주근 겹침 이음부에서의 균열은 발견되지 않았고 구속 콘크리트는 휨균열 외에 별다른 손상이 없었다. 같은 이력 싸이클(+100 mm)에서 벽체 동쪽 단부에서는 콘크리트의 쪼개짐에 의한 비교적 폭이 좁은 수직 균열이 관찰되었다. 이력 싸이클 20(100 mm)에서 횡하중의 감소가 두드러져 실험을 종료하였다

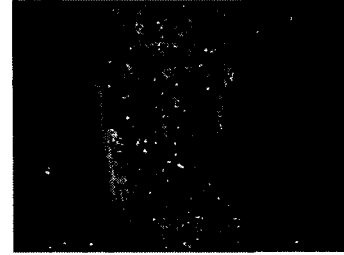
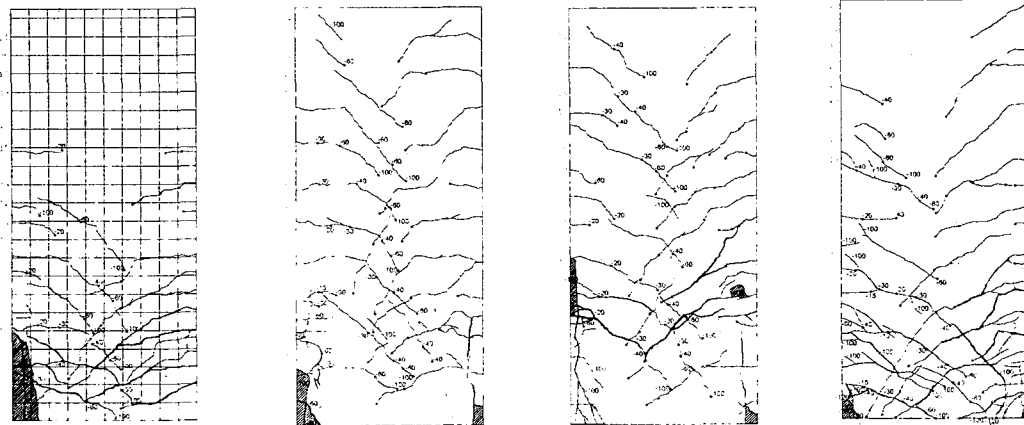


그림 4 벽체 주근의 좌굴 (WT8)



WT8

WT8_s

WS8_s

WS5

그림 5 벽체 균열 양상

4.2 하중-변위 관계

다음의 그림 6은 횡하중과 최상부 변위와의 관계를 나타낸 그래프이다. 최대 횡하중은 WT8, WS5 시험체에서 각각 203.2 kN, 224.35 kN이며 최대 변위는 100 mm, 120 mm이다. 두 시험체 모두 변위가 60 mm일 때 항복하였다. WT8 시험체는 항복 이후 하향 곡선을 나타내는 반면 WS5 시험체는 항복 이후 상향 안정된 곡선을 보인다. 이는 변위 연성도의 측면에서 WS5 시험체가 효과적임을 증명하는 것이다.

겹침 이음된 시험체의 경우 최대 횡하중은 WT8_s, WS8_s의 경우 각각 217.7 kN, 220.4 kN으로 겹침 이음이 없는 시험체의 경우와 비슷하였다. WT8_s 시험체의 경우 이력 싸이클 60 mm에서 인장측 겹침 이음부의 쪼개짐이 발생하였는데 그림 6에서 볼 수 있듯이 이후 벽체의 에너지 흡수 능력이 현저하게 감소함을 알 수 있다. 이에 반하여 WS8_s 시험체는 항복 이후에도 WS5 시험체의 경우와 마찬가지로 안정적인 거동을 보이고 있어 나선 철근이 겹침 이음부의 거동에 효과적임을 알 수 있다.

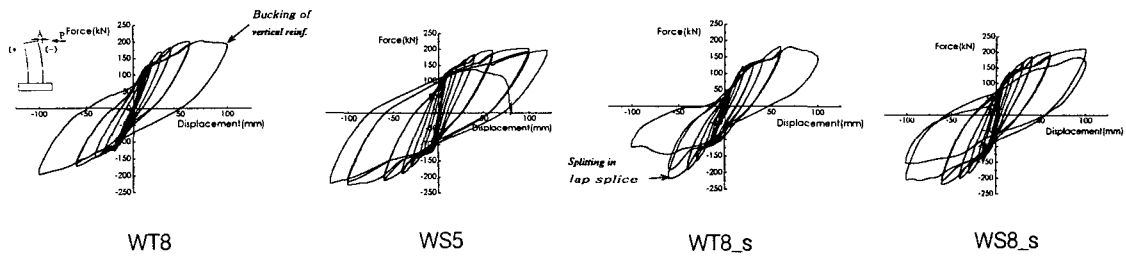


그림 6 하중-변위 관계의 이력 곡선

4.3 연성도

그림 7과 그림 8은 각각 힘과 변위, 모멘트와 곡률과의 관계를 나타낸 그래프이다. 그림 7에서 얻은 변위는 상부의 액츄에이터에서 얻은 값을 근거로 하였다. 그림 7에서 알 수 있듯이 WS 시험체가 WT 시험체에서보다 20% 정도 증가한 변위 연성도 값을 갖는다.(해석치에서는 각각 $\mu_d = 12.84, 8.19$) 곡률 측정은 시험체 전체의 평균 곡률로 축하중을 주고 있는 두 개의 액츄에이터에서 측정된 변형률의 차이를 두 액츄에이터 간의 거리로 나누어 산출하였다. 곡률 연성도는 WS 시험체가 WT 시험체보다 15% 정도 크다.

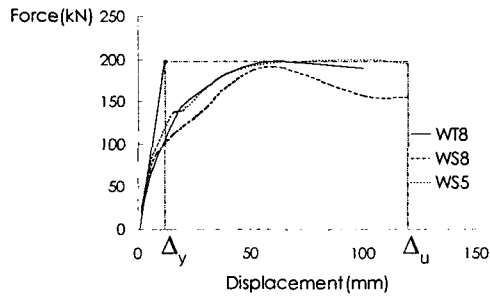


그림 7 시험체 상부에서의 변위-힘 곡선

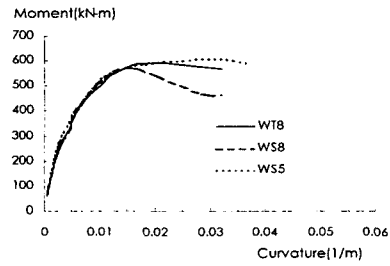


그림 8 모멘트-곡률 관계

4.4 Energy Dissipation Capacity

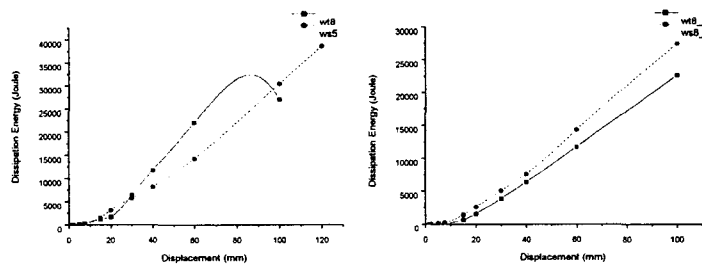


그림 9 Dissipation Energy

그림 6에서 각각의 이력 싸이클에 대하여 Dissipation Work를 구하여 Dissipation Energy를 그림 9에 나타내었다. 최대 에너지는 겹침 이음을 하지 않은 경우 WT8 시험체 27000J(Joule), WS5 시험체 38641J로 interlocking spiral이 사용된 경우에 43% 정도 더 많은 Dissipation Capacity를 가지고 있다. 또한 겹침 이음을 한 경우에는 WT8_s 시험체 22617J, WS8_s 시험체 30947J로 약 37% 정도 WS8_s 시험체가 더 큰 값을 갖고 있었다. 또한 WT8 시험체는 WT8_s 시험체에 대하여 19% 증가한 양의 에너지를 가지고 있는데 반하여 WS5 시험체는 WS8_s 시험체보다 25%의 증가한 에너지 소산 능력을 나타내었다. 따라서 겹침 이음을 하는 경우에 나선철근이 더욱 효과적이라고 할 수 있다.

5. 결론

제안한 interlocking spiral의 단부 보강 방법에 의한 전단벽의 내진 성능 특성은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 1) 벽체의 전단강도는 일반적으로 복부에서 부담하는 것이나 spiral 단부 보강은 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.
- 2) 압축시 단부 주근 좌굴 억제, 콘크리트 파쇄 파괴 지연, 콘크리트 구속 효과 등으로 띠철근 보강한 벽체보다 연성도가 증가한다. 실험 결과 곡률 연성도는 15%, 변위 연성도는 20% 정도 증가한다. 이러한 벽체 연성도 증가는 현행 전단벽에 대해 3.0으로 규정된 반응수정계수(R)를 상향 조정할 수 있는 근거가 될 수 있다. 따라서 지진 하중 크기를 감소시킬 수 있으므로 결국 구조체 물량의 감소로 인한 경제적인 이득을 예상할 수 있다.
- 3) 아파트 벽체 시공시 바닥 부분의 겹침 이음에 interlocking spiral의 사용은 겹침 이음부에서 부착 강도를 증가시켜 겹침 부착 저하로 인한 콘크리트의 조기 인장 파괴의 가능성을 낮춘다.

감사의 글

본 연구는 현대건설 주식회사(2000.3 -2001.2)와의 공동연구과제 “전단벽 하단부 겹침이음의 내진성능 개선을 위한 설계방법 연구(과제번호 00ASTR01)”이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 1) The Concrete Design Committee, "NZS 3101:Part1:1995 CONCRETE STRUCTURE STANDARD", 1995
- 2) State of California, Department of Transportation, Division of Structures, "CALTRANS Structures Seismic Design References", 1990
- 3) 건설교통부 제정, "콘크리트 구조설계기준", 한국콘크리트학회, 대한건축학회, 1999
- 4) H. Tanaka and R. Park, "Seismic Design and Behavior of Reinforced Concrete Columns with Interlocking Spirals", ACI Structural Journal, March-April 1993, pp. 192-203