

콘크리트와 철골보로 합성된 복합 병렬 전단벽 구조의 거동 및 설계

Behavior and Design of Hybrid Coupled Shear Wall Composed of Concrete Wall and Steel Beam



박완신*
Wan-Shin Park



윤현도**
Hyun-Do Yun



구해식***
Hae-Sihk Koo



이재연****
Jae-Yeon Lee



이원호*****
Waon-Ho Yi

1. 머리말

복합구조(Hybrid Structure)는 서로 다른 종류의 구조부재를 조합하여 각 부재의 역학적인 특성이나 시공상의 이점을 활용할 수 있어 이 구조형식을 개발하려는 노력이 국내외에서 활발하게 진행되고 있다. 즉, 철근콘크리트 부재는 압축력에 강하고 철골 부재는 휨과 전단력에 대해 강한 특성을 가지고 있으므로, 이 두 가지 구조부재를 적절히 조합한다면, 현재 건축물에 사용되고 있는 재료만을 이용하여 최적의 구조형식을 개발할 수 있을 것이다.

특히, 복합구조 중 효율적인 내진저항 시스템으로 널리 알려져 있는 복합 병렬 전단벽(Coupled shear walls)은 일반적으로 구조물의 코어부분을 구성하는 개구부에 의해 분리된 슬래브나 인방보에 의해 연결되어 병렬 전단벽으로 거동하게 되며 이러한 병렬 전단벽은 바람이나 지진 등의 횡하중으로부터 유발된 전도모멘트의 상당 부분을 커플링 보의 커플링 효과에 의한 골조 작용(Frame action)을 통하여 저항함으로써 <그림 1>과 같이 횡력에 효율적으로 저항하게 된다.

병렬 전단벽에 대한 국내·외 연구¹⁻³⁾는 1964년 알래스카 지진이 후, 병렬 전단벽 구조에서의 철근콘크리트 커플링 보의 응답을 개선시키기 위한 노력이 이루어졌고, 또한 몇몇 연구자들에 의해 철근콘크리트 커플링 보의 에너지 흡수능력과 연성을 증진시키기 위한 새로운 접근방법에 대하여 연구가 시도되었다. 1974년 Paulay와 Binney¹⁾에 의해서 개발된 대각선 보강된 경간(span)과 깊이(depth)의 비율이 2.0을 넘지 않는

보의 경우 반복하중에 대하여 내진성능이 크게 향상됨을 알 수 있었으며, 일반 수평 및 수직철근만으로 보강된 보에 비하여 대각선 보강근에 의해 보강된 경우 내진성능이 향상됨을 증명하였다. 또한, 이러한 실험에서 경간과 깊이의 비율이 2.5에서 5.0에 이르는 실험체들의 경우 대각선 방향의 보강이 낮은 경사 때문에 그리 효과적이지 않았으며 이로 인하여 전단저항 성능이 저하되는 것으로 보고되고 있다. 이후로 Tassios²⁾ 및 Ganalo³⁾ 등에 의해 다양한 배근상세를 갖는 철근콘크리트 커플링 보의 내진성능을 규명하기 위한 실험적 연구가 다양하게 진행되었다.

그러나 이러한 철근콘크리트 커플링 보의 깊이가 상당히 깊게 되어 층고가 낮은 건물에서는 사용이 제한된다는 단점을 가진다. 이러한 단점의 대안으로 철골 커플링 보, 합성 커플링 보 및 유사변형 경화형 커플링 보를 적용한 복합 병렬 전단벽에 대한 연구가 최근에는 박완신⁴⁾, Shahrooz⁵⁾, Harries⁶⁾, Canbolat⁷⁾ 및 윤현도⁸⁾ 등을 중심으로 국내·외적으로 활발하게 진행되고 있다.

본고에서는 복합 병렬전단벽에 대한 연구동향 및 커플링 보

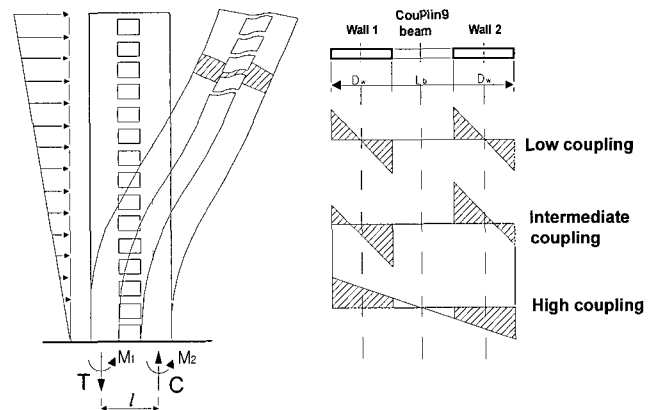


그림 1. 병렬 전단벽의 거동

* 정희원, 미국 Cincinnati대학교 토목공학과 Post.-Doc
wiseroad@cnu.ac.kr

** 정희원, 충남대학교 건축공학과 교수

*** 정희원, 경남대학교 건축공학과 교수

**** 정희원, 목원대학교 건축공학과 교수

***** 정희원, 광운대학교 건축공학과 교수

의 종류를 분석하고 복합 병렬 전단벽 중, 현재 국내에서 널리 사용되고 있는 철골 커플링 보를 적용한 복합 병렬 전단벽을 대상으로 이에 대한 설계방법을 검토한 후, 진술한 설계방법에 의해 각 파괴양상을 변수로 한 철골 커플링 보의 파괴양상 및 동적 거동특성을 소개하고자 한다.

2. 복합 병렬 전단벽

2.1 병렬 전단벽에 대한 연구동향

〈표 1〉은 복합 병렬 전단벽에 대한 국내·외 연구동향을 요약하여 나타낸 것으로 표에 나타난 바와 같이 윤현도⁸⁾, Shahrooz⁵⁾, Harries⁶⁾, Gong⁹⁾, Popov¹⁰⁾ 및 Canbolat⁷⁾ 등 다수의 연구자들에 의해 병렬 전단벽 접합부와 철골, PS철골 및 합성 커플링 보의 연성과 에너지 소산능력을 향상시키기 위하여 새로운 설계개념 및 보강상세 등과 같은 다양한 접근방법을 모색하여 실험적 연구를 수행하였고 또한, 윤현도⁸⁾, Tawil¹¹⁾, Santhakmar¹²⁾, Chaallal¹³⁾ 등에 의해 커플링 보의 유효강성 및 층 규모를 고려하여 병렬전단벽의 동적 거동 특성 및 강도특성을 예측하기 위한 유한요소해석 및 비선형 동적해석에 대한 해석적 연구를 수행하였다.

국내·외 연구자들에 의해 수행된 복합 병렬 전단벽에서 각 커플링 보의 종류에 따른 연구동향을 요약하면 다음과 같다.

2.2 커플링 보의 종류

2.2.1 철골 커플링 보

Harries⁶⁾ 등은 병렬 전단벽에서 철골 커플링 보의 내진성능을 향상시킬 목적으로 철골보에 스티프너를 보강하는 보강상세를 제안하였으며, 또한 최근 박완신⁴⁾ 등은 〈그림 2(a)〉에 나타난 바와 같이 접합부 배근상세에 따른 철골 커플링 보-벽체 접합부에 대한 실험 및 해석적 연구를 수행하여 내진성능 규명 및 해석기법을 구축하였다.

















2.2.2 PS 철골 커플링 보

Shen 등¹⁴⁾은 〈그림 2(b)〉에 나타난 바와 같이 병렬 전단벽 접합부의 배근상세를 단순화하기 위하여 철골 커플링 보를 철근 콘크리트 벽체에 매립하지 않고 비부착 긴장선 (prestressed tendon)을 사용하여 커플링 보를 벽체에 연결하는 새로운 시스템 개발을 모색하였으며 이를 적용하여 실험 및 해석적 연구를 수행하였다.

2.2.3 합성 커플링 보

Gong⁹⁾ 등은 철골 커플링 보에 하중이 작용되는 경우 횡좌굴이 발생하는 문제점 등으로 인하여 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 기성 철골 커플링 보를 철근콘크리트로 보강한 합성 커플링 보의 구조성능에 대한 연구를 수행하였고 인접 슬래브 효과를 고려한 커플링 보의 내진성능을 규명하였으며 시공

표 1. 복합 병렬전단벽의 연구 동향 분석^{1)~6)}

분야	연구주제	연구수준	국외 연구동향 분석	국내 연구동향 분석
복합 병렬 전단벽에 대한 연구	실험적 연구 커플링 보-벽체 접합부에 관한 연구	국외  4 국내  2	커플링 보의 지압강도 및 전단강도 특성에 관한 연구 다수 진행	커플링 보의 접합부 파괴 및 강도특성에 관한 연구 일부 진행
	철골, PS, 합성 및 HPFRCCs 커플링 보에 관한 연구	국외  4 국내  2	보강근 상세와 보강량에 따른 철근콘크리트 커플링 보의 전단 성능에 관한 많은 연구 진행	배근상세 및 각 파괴형태에 따른 커플링 보의 내진성능규명
	병렬전단벽에 관한 연구	국외  3 국내  1	보강근 상세에 따른 병렬전단벽의 거동 및 강도특성 규명	철골 커플링 보를 적용한 복합 병렬 전단벽의 내진성능 규명
해석적 연구	커플링 보-접합부 강도에 관한 이론적 연구	국외  0 국내  1	커플링 보-벽체 접합부 강도 및 배근상세에 따른 커플링 전단내력을 이론적으로 도출	지압파괴가 발생하는 철골 커플링 보-벽체 접합부의 강도식 제안
	복합 병렬 전단벽에 대한 탄성해석	국외  3 국내  1	병렬전단벽에 대한 탄성해석에 의한 거동특성 및 내력 규명	복합 병렬 전단벽의 탄성해석 연구가 일부 진행
	복합 병렬 전단벽에 관한 유한요소 해석(FEM)	국외  1 국내  1	접합부, 커플링 보 및 벽체의 국부적인 응력 규명 [ABAQUS 등]	철골 커플링 보를 적용한 복합 병렬 전단벽에 관한 유한요소 해석
	복합 병렬전단벽에 대한 거시적인 비선형 동적해석	국외  1 국내  1	다양한 보강상세에 따른 커플링 보에 대한 거시적인 해석모델을 개발하여 병렬전단벽의 동적특성 규명 [IDARC 등 다수]	다양한 배근상세를 갖는 커플링 보를 적용한 병렬 전단벽에 대한 해석기법 구축
	내진 설계기준 및 해석기법 구축	국외  2 국내  0	커플링 정도를 고려한 병렬전단벽의 내진설계기법 제시	접합부 배근상세에 따른 커플링 보 강도 예측 위한 해석기법 구축

1) 본 연구와 관련된 국내·외의 기존 문헌을 수집하여 그 수준을 기관자의 주관으로 작성한 것임.

사례는 <그림 2(c)>와 같다.

2.2.4 전단 플레이트 커플링 보

Pak Cheung Cheng 등¹⁵⁾은 철골 커플링 보의 전단내력을 향상시키고 시공성을 향상시키기 위한 방안으로서 <그림 2(d)>에 나타난 바와 같이 플렌지가 없는 웹 플레이트만으로 구성된 전단 플레이트 커플링 보를 개발하여 실험적 연구를 수행하였다.

2.2.5 퓨즈(Fuse) 철골 커플링 보

Shahrooz 등¹⁶⁾은 지진 발생 후 보수를 용이하게 하기 위한 시스템으로서 <그림 2(e)>에서 나타난 바와 같이 벽체면에 매립되는 매립부분과 커플링 보의 중간지점의 퓨즈부분으로 보를 3부분으로 구성되며 지진 발생시 커플링 보의 중간에 위치한 퓨즈의 웹 부분에서 항복하여 에너지를 흡수하도록 한 커플링 보이다.

2.2.6 유사변형 경화형 커플링 보

윤현도⁸⁾ 및 Canbolat⁷⁾ 등은 최근 철근콘크리트, 철골 및 합성 커플링 보 부재의 내진성능을 향상시키고 복잡한 배근상세와 과대 철근량을 갖는 부재를 보다 단순화하기 위한 방안으로서 인장성능 및 변형성능이 우수한 재료를 구조부재에 적용하여 내진성능 향상 및 커플링 보의 배근상세를 보다 단순화시키려는 연구가 국내·외에서 일부 진행되고 있다.

3. 복합 병렬 전단벽의 설계기법

본 장에서는 복합 병렬 전단벽 중에서 최근 국내에서 일부 사용되고 있는 철골 커플링 보를 적용한 복합 병렬전단벽을 선정하였으며 이를 구성하고 철근 콘크리트 전단벽, 접합부, 소요 매립길이 및 철골 커플링 보에 대한 설계방법을 소개하면 다음과 같다.

3.1 벽체

복합 병렬 전단벽에서 철근리트 전단벽의 설계는 전단력 또는 축력과 휨모멘트를 동시에 받는 경우를 고려하여 ACI 318-05규준에서 제시한 벽체의 최소 및 최대철근비 요구조건을 만족시키면서 내진 설계규준에 부합되도록 설계한다.

3.2 접합부

복합 병렬 전단벽 시스템에서 철골 커플링 보가 철근콘크리트 벽체와 접합될 경우 접합부의 응력 전달기구가 다소 복잡하므로 아직까지 커플링 보와 철근콘크리트 벽체 접합부의 거동 및 하중 전달 메커니즘이 명확하게 규명되지 않아 이에 대한 내진 설계기준이 정립되지 못한 실정이지만 이에 대한 기존 연구결과^{20~23)}를 근거로 접합부 설계방법에 대하여 소개하고자 한다. <그림 3>은 벽체면에서 a 만큼 떨어진 거리에 하중 V_n 이 작용하는 경우, 매립단면 상·하부에서 콘크리트의 실제 및 이상화된 응력분포

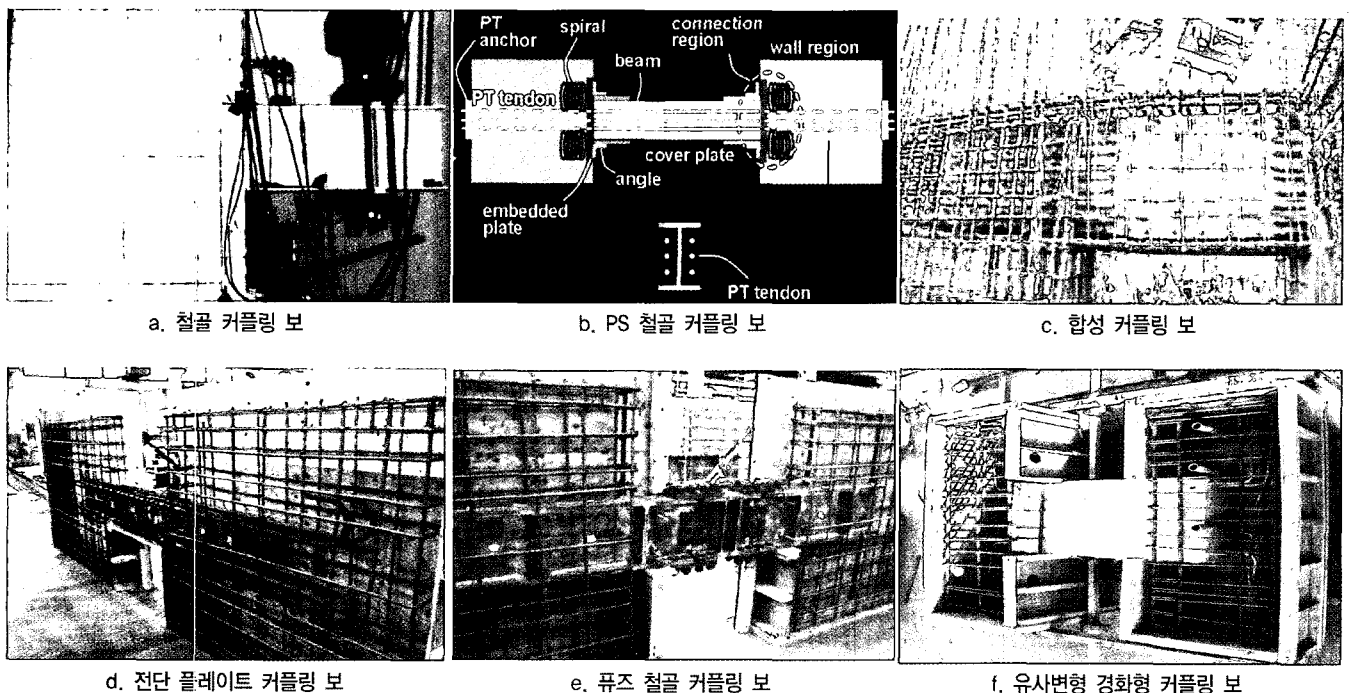


그림 2. 커플링 보의 종류.

를 나타낸 것이다. 복합 병렬 전단벽 접합부의 내력식 및 매립길이를 산정하기 위하여 <그림 5(b)>에서 나타난 바와 같이 철골 단면 하부의 포물선 압축응력 분포를 ACI 318-05 규준에서 제시한 등가의 직사각형 응력분포로 가정하였고 강재단면 상부에서는 Kent 등¹⁷⁾이 제안한 포물선 응력분포로 가정한다.

또한, 단면 상·하부 압축 변형률을 선형분포로 가정하여 C_b 작용선에 대한 모멘트 평형조건을 적용하면 복합 병렬 전단벽 접합부에 대한 전단력 V_n 은 다음 식(1)과 같다.

$$V_{n(theory)} = 0.85f_{ck}\beta_1bl_e \left(\frac{0.58 - 0.22\beta_1}{0.88 + a/l_e} \right), \quad (N) \quad (1)$$

박완신 및 윤현도¹⁸⁾의 선행 연구결과에 의하면, 콘크리트의 지압강도 f_b/f'_c 는 <그림 4>에서 나타난 바와 같이 보 폭/벽체 두께비(b/t)에 현저한 영향을 받는 것으로 나타났으며, 접합부 매립영역의 수평타이는, 주변 콘크리트를 구속하므로 보 폭/벽체 두께비의 따라 지압강도에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한, 콘크리트의 지압강도는 콘크리트의 압축강도 f_{ck} 보다는 인장강도 f_{sp} 에 비례하는 경향을 보이고 있으며 콘크리트의 인장강도는 콘크리트의 압축강도의 제곱근에 비례하는 것으로 보고되고 있다¹⁹⁾. 따라서 스테드 볼트 및 수평타이의 영향을 고려하면 복합 병렬 접합부 강도에 대한 내력 평가식은 다음 식 (2)와 같다.

$$V_{n(proposed)} = f_b\beta_1bl_e \left(\frac{0.58 - 0.22\beta_1}{0.88 + a/l_e} \right) + \frac{2(0.88l_e - a) \sum_{i=1}^n A_{si}f_{si}}{(0.88l_e - a)}, \quad (N) \quad (2)$$

스테드 볼트로 보강한 경우,

$$f_b = 4.5\sqrt{f'_c}(t/b)^{0.55}, \quad (\text{MPa})$$

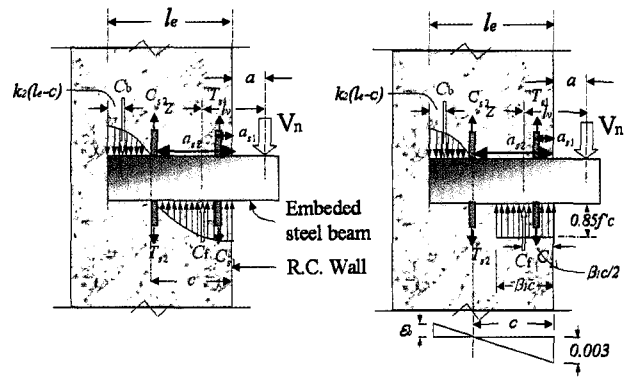
스테드 볼트 및 수평타이로 보강한 경우,

$$f_b = 4.5\sqrt{f'_c}(t/b)^{0.60}, \quad (\text{MPa})$$

<그림 5>은 기존 연구^{20~23)}에서 제안된 V_n (proposed) 식에 의한 계산값과 실험값을 비교하여 나타낸 것이다. 스테드 볼트가 없는 시험체의 경우 V_n (test)/ V_n (proposed) 값은 1.00이고, 스테드 볼트로 접합부를 보강한 시험체의 경우

1.02이며 스테드 볼트 및 수평타이에 의해 보강된 시험체의 경우 1.08로 본 제안식에 의한 예측값은 실험값과 매우 잘 일치하는 것으로 나타났다.

3.3 소요 매립길이



a. 실제 응력분포 b. 이상화된 응력분포
그림 3. 복합 병렬 전단벽 접합부의 실제 및 이상화된 응력분포

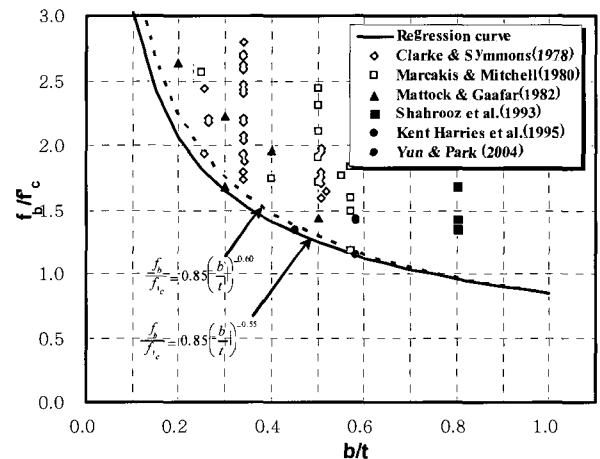


그림 4. b/t에 따른 f_b/f'_c 의 변화

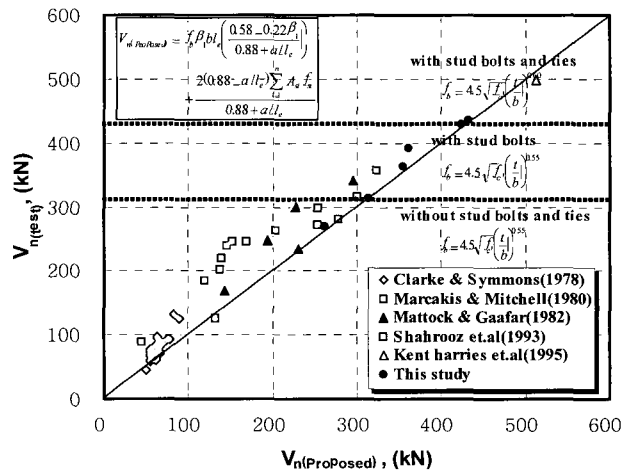


그림 5. 실험 및 제안식에 의한 값의 비교·분석

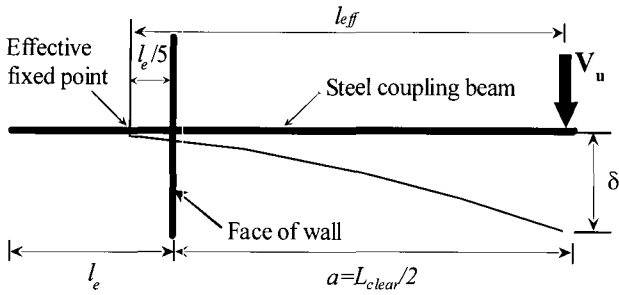


그림 6. 복합 병렬 전단벽의 유효 고정점

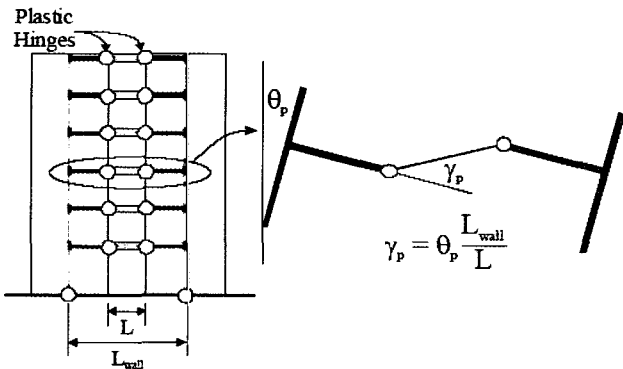


그림 7. 복합 병렬 전단벽의 회전각 특성

일반적으로 커플링 보의 소요매립길이는 병렬 전단벽의 항복 매커니즘을 이동시키기 때문에 병렬 전단벽의 전반적인 거동에 현저한 영향을 미친다. <그림 6>은 기존 연구결과²⁴⁾의 일부이며 매립영역의 철골 보 상·하부를 스티드 볼트 및 수평타이로 보강한 경우 유효 고정점(effective fixed point)을 나타낸 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 철골 커플링 보의 유효 고정점은 대략 매립길이의 1/5이며, 접합부 보강상세를 갖지 않는 Sharooz 등의 연구결과에서 도출된 값 $l_e/3$ 보다 다소 작게 나타났다. 이는 접합부 영역에 스티드 볼트 및 타이에 의해 보강하여 매립영역의 고정도를 증가시켰기 때문으로 판단된다. 따라서 철골 커플링 보-벽체 접합부 매립영역의 추가 보강 여부에 따라 유효고정점은 상이한 값을 보이므로 접합부 영역을 스

티드 볼트 및 수평타이 등에 보강하는 경우 접합부 강도, 커플링 보의 전단내력 및 소요 매립길이 산정시 이에 대한 영향을 고려해야 할 것으로 판단된다.

3.4 철골 커플링 보

병렬 전단벽 구조에서 철골 커플링 보는 전체 건축물의 에너지 소산능력을 지배하는 요소이므로 큰 비탄성 경험을 하게 된다. 병렬 전단벽이 우수한 거동을 확보하기 위해서는 접합부에서 파괴가 발생하기 전에 커플링 보에서 소성현상이 발생되어야 하며, 철골 커플링 보가 소정의 강도, 강성 및 우수한 변형능력을 발휘할 수 있어야 한다.

철골 커플링 보에 대한 설계는 AISC 내진설계 규준식에서 제시한 내력산정방법에 의하여 강도를 산정하며 전단항복형 커플링 보에 대하여 철골 커플링 보의 소성내력식에 1.5배하여 다음 식(3)과 같이 강도식을 예측한다.

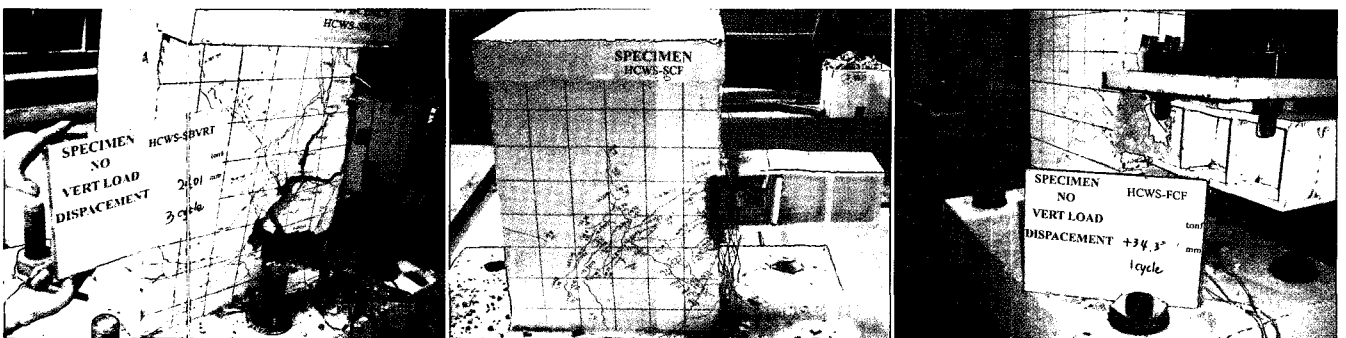
$$V_u = 1.5 V_p = 1.5 \times 0.6 F_y (h - 2t_f) t_w, \quad (N) \quad (3)$$

여기서, V_u 는 계수전단력, V_p 는 커플링 보의 소성내력, F_y 는 강재의 설계기준 항복강도, h 는 철골 커플링 보의 춤, t_f 는 플랜지의 두께이며 t_w 는 웨브의 두께이다.

또한, 휨항복형 커플링 보에 대하여 소성모멘트 내력에 상응하는 전단내력 V_f 은 다음 식 (4)와 같다.

$$V_f = 1.35 \frac{2M_n}{L\phi_s} = 1.5 \frac{2M_n}{L}, \quad (N) \quad (4)$$

여기서, M_n 은 커플링 보의 휨모멘트 내력, ϕ_s 는 강재의 강도감수 계수(=0.9)이며, L 은 커플링 보의 유효길이이며 기존 연구결과⁵⁾에 의하면, 스티드 볼트 및 수평타이에 의한 접합부 보강시 철골 커플링 보의 유효 고정점은 대략 매립길이(l_e)의



a. 접합부 파괴형 시험체

b. 전단 항복형 시험체

c. 휨 항복형 시험체

그림 8. 파괴 양상

1/5이므로 커플링 보의 유효길이(L)는 커플링 보의 순경간(L_{clear})에 벽체면에서 유효 고정점까지의 거리 1/5에 2배 한 값으로 다음 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$L = L_{clear} + 2l_e/5 \quad (5)$$

〈그림 7〉은 철근 콘크리트의 부재각을 나타낸 것이다. 커플링 보의 회전각은 커플링 보를 설계하는데 매우 중요하다. 이 회전각 값은 복합 병렬 전단벽에서 벽체 하부 및 커플링 보의 단부에 소성힌지의 발생의 붕괴 매커니즘을 결정하는데 중요한 척도이다. BSSC 내진 설계기준²⁴⁾에 의하면, 커플링 보의 전단회전각 γ_p 는 다음 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma_p = \frac{\theta_p L_{wall}}{L} \quad (6)$$

상기의 식(6)에서 철골 또는 합성 커플링 보의 유연성(flexibility)은 식(5)의 커플링 보의 길이를 증가시킴으로써 증가될 수 있다. 이와 같은 접근 방법은 차후 층간변위각 등의 사용성에 대한 요구조건을 검토하는데 중요하게 활용된다.

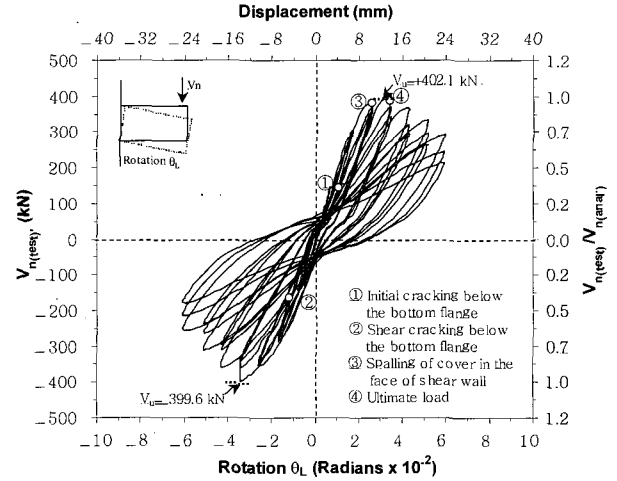
전술한 식(2)는 접합부 강도를 예측하기 위한 식이며 식(3) 및 (4)는 전단 및 휨항복형 시험체의 전단내력을 예측하는 식으로 각 파괴양상에 따른 내진성능을 평가하기 위하여 접합부 강도식과 커플링 보의 내력식을 비교하고 $l/(M_n/V_n)$ 비를 적절하게 변화시켜 접합부 파괴형(SBVRT)과 전단(SCF) 및 휨항복형(FCF) 시험체로 실험체를 계획하여 실험적 연구를 수행한 결과를 소개하면 다음과 같다.

4. 철골 커플링 보의 구조적 거동 특성

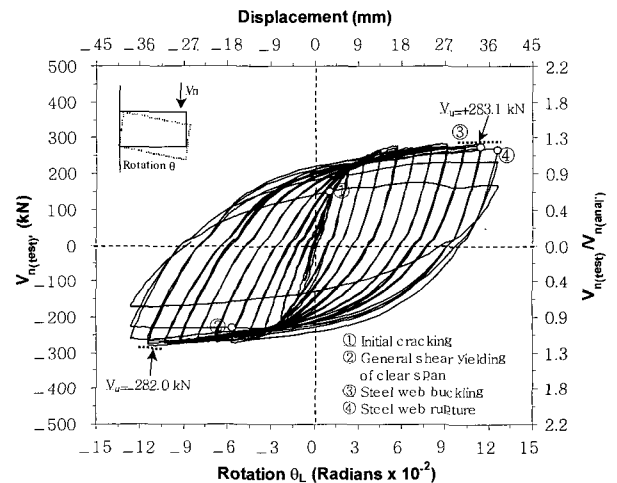
4.1 파괴양상

〈그림 8〉은 접합부 파괴형, 전단 및 휨항복형 시험체의 파괴양상을 나타낸 것이다. 〈그림 8(a)〉에 나타난 바와 같이 접합부 파괴형 시험체의 파괴양상은 부재각 0.0017 rad.에 해당하는 변위이력의 첫 번째 사이클 부가력시 철골 보 플랜지와 벽체하부의 계면에서 수평균열이 발생한 후, 하중이 증가됨에 따라 수평균열이 경사균열로 전이되어 하부로 진전하였다. 부재각 0.06 rad.에 이르러 벽체의 외면에서 접합부 영역으로 약 300 mm 깊이까지 콘크리트가 탈락되며 파괴되는 피해를 보였으며 철골보 플랜지 하부 콘크리트 벽체에 피복박리가 집중적으로 발생되어 최종파괴되는 양상을 보였다. 전단항복형 시험체의 파괴양상은 〈그림 8(b)〉에 나타난 바와 같이 부재각 0.0017 rad.에 해당하는 변위이력의 두 번째 사이클 부가력시

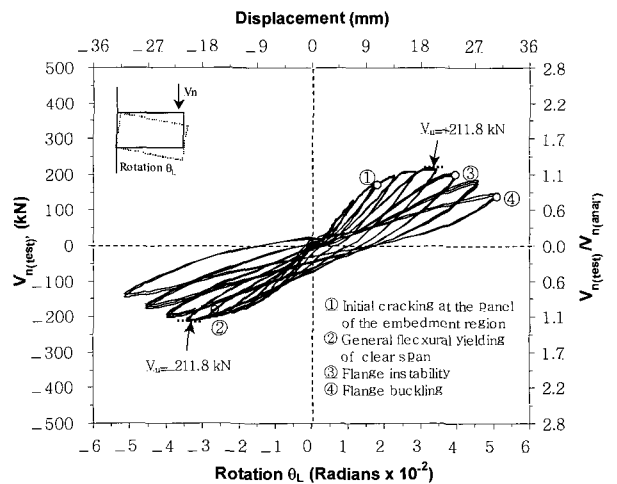
철골 보 플랜지 상부에서 미세 수직균열이 발생한 후, 하중이 증가됨에 따라 부재각 0.0046 rad.에 이르러 철골 보 웨브가 항복하였다. 이후 벽체 매립영역의 피복박리가 발생하였고, 부



a. 접합부 파괴형 시험체 (SBVRT)

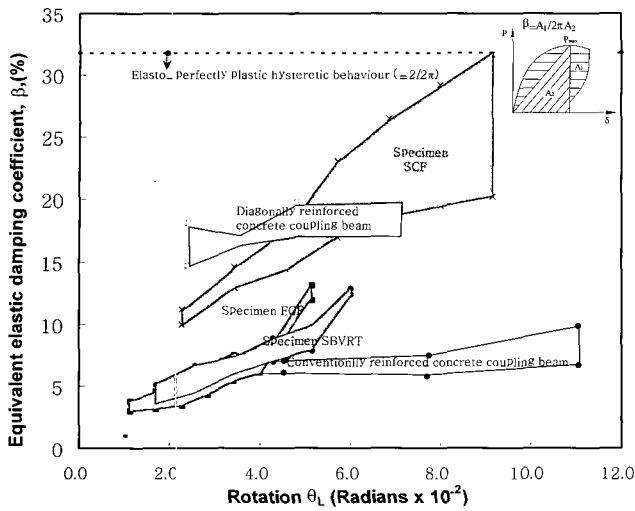


b. 전단 항복형 시험체 (SCF)

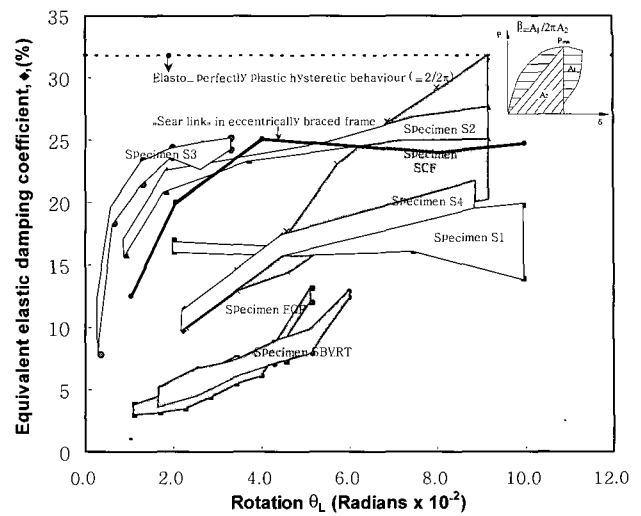


c. 휨 항복형 시험체 (FCF)

그림 9. 하중-부재각 관계 곡선



a. 접합부(SBVRT)파괴형, 전단(SCF) 및 휨(FCF) 항복형 시험체



b. 기존 연구결과와의 비교

그림 10. 등가 탄성 감쇠계수

재각 0.013 rad.에서는 철골보 웹가 좌굴하여 최종파괴되는 양상을 보였다. 휨항복형 시험체의 파괴양상은 <그림 8(c)>에 나타난 바와 같이 부재각 0.0014 rad.에 해당하는 변위이력의 세번째 사이클 정가력시 매립영역의 철골보 웹 부분에서 미세 수평균열이 발생한 후, 하중이 증가됨에 따라 부재각 0.0017 rad.에 이르러 철골보 플랜지가 항복하였으며 매립된 철골보 상·하부영역에서 국부적인 지압응력에 의해 콘크리트의 압괴가 발생되었다. 또한, 최대강도 도달한 후, 부재각 0.0046 rad.에 이르러 철골보가 횡좌굴이 발생되며 최종파괴되었다. 모든 대상 시험체는 의도된 파괴양상을 보였으며 그림 8과 같은 시험체별 각 파괴양상을 근거로 볼 때, 지진 피해 후 보수·보강 등을 종합적으로 고려한다면 전단항복형이 가장 합리적인 파괴형태로 판단된다.

4.2 하중-부재각 관계 곡선

<그림 9>는 각 시험체의 하중-부재각 관계곡선을 나타낸 것이다. <그림 9(a)>에서 나타난 바와 같이 접합부 파괴형 시험체의 경우, 최대강도 이후 강도가 급격하게 감소되는 불안정한 이력곡선을 보이고 있었다. 또한, 정 및 부가력시 각 사이클별 강도 및 강성이 상이한 값을 보이고 있으며 이는 부가력시 철골보 하부에서 인장균열이 발생하여 접합부의 강성을 감소시켰기 때문으로 판단된다. 전단항복형 시험체의 경우, <그림 9(b)>에서 나타난 바와 같이 철골 웹가 항복한 후, 최대강도에 이르기까지 내력의 감소 없이 부재각이 증가되는 안정된 거동을 보였다. 그러나, 최대강도 이후, 부재각 0.0014 rad. 해당하는 정가력의 두번째 사이클에서 철골 커플링 보의 국부좌굴에 의해 내력이 급격하게 감소하였다. 휨항복형 시험체의 경

우, <그림 9(c)>에서 나타난 바와 같이 최대강도 이후 내력이 접합부 파괴형 시험체에 비해 완만하게 감소하는 경향을 보이고 있으나, 전반적으로 전단 항복형 시험체에 비해 다소 불안정한 거동을 보이고 있다. 이는 항복 이후 철골보 플랜지가 매립영역의 콘크리트를 국부적으로 지압하여 콘크리트의 압괴에 의한 영향에 기인한 것으로 판단된다.

4.3 에너지 소산면적

<그림 10>은 부재각에 따른 커플링 보의 등가 탄성 감쇠계수 β 를 비교하여 나타낸 것이다. 본 연구에서는 각 시험체의 에너지 소산능력을 비교하기 위하여 등가 탄성 감쇠계수 (equivalent elastic damping coefficient) β 를 다음 식(7)과 같이 정의하였다.

$$\beta = \frac{A_1}{2\pi A_2} \quad (7)$$

<그림 10(a)>에서 나타난 바와 같이 전단항복형(SCF) 시험체의 β 값은 접합부 파괴형(SBVRT) 및 휨항복형(FCF) 시험체의 값에 비해 현저하게 크게 나타났으며, Shiu 및 Park 등²⁵⁾의 실험결과와 비교할 때, 일반 및 대각선 보강근을 갖는 철근 콘크리트 커플링 보에 비하여 크게 나타났다. 그러나, 전단항복형(SCF) 시험체는 부재각이 증가됨에 따라 에너지 소산능력의 감소폭은 접합부 파괴 및 휨항복형 시험체와 일반 및 대각 보강근을 갖는 철근콘크리트 커플링 보에 비하여 크게 나타났다. 또한 Popov 등의 실험결과와 비교할 때, <그림 10(b)>에 나타난 바와 같이 부재각 0.062 rad.이후 전단항복형(SCF) 시험체의 β 값은 편심가새골조의 연결보(link beam)에 비해 현저하게

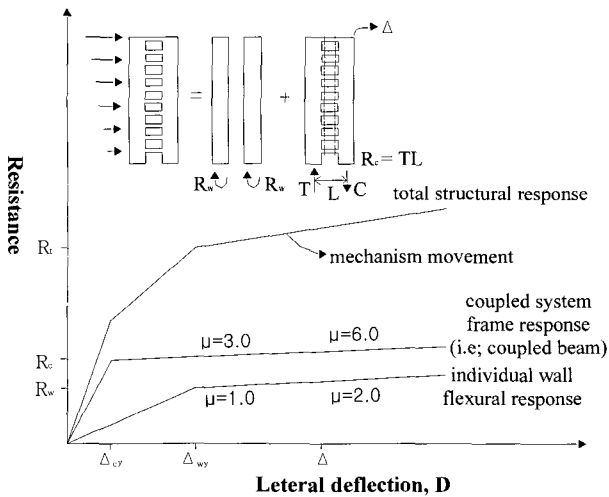


그림 11. 복합 병렬 전단벽의 연성

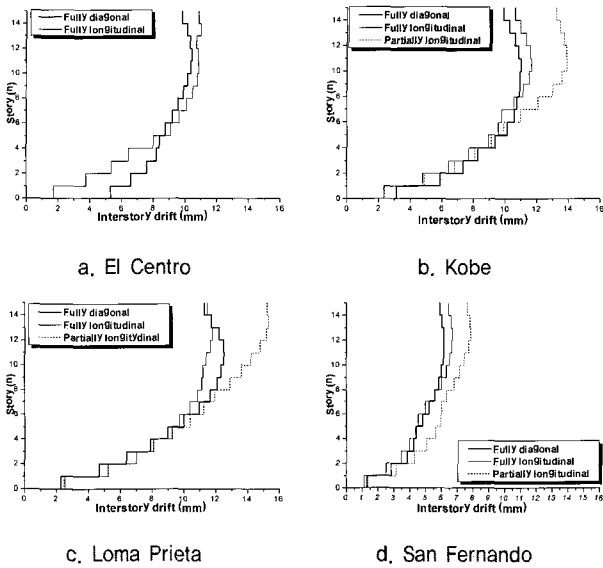


그림 12. 층간변위

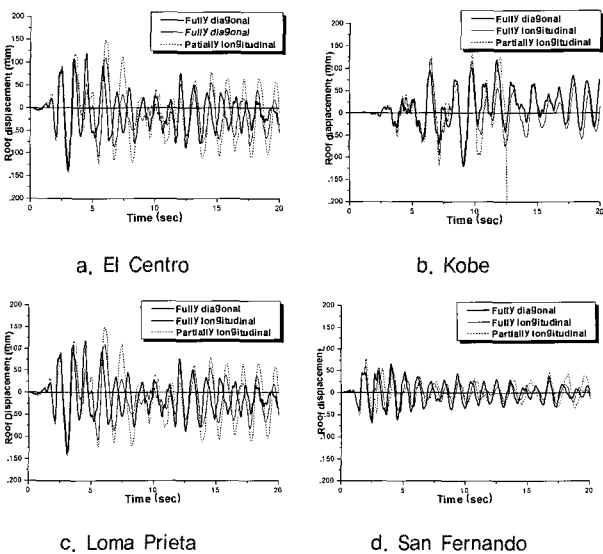


그림 13. 시간이력에 따른 최상층 변위

크게 나타났다. 전술한 실험결과를 고찰하면, 전단항복형 시험체가 접합부 파괴형 및 휨항복형 시험체에 비해 내진성능이 탁월한 것으로 나타났으며 복합 병렬 전단벽이 우수한 성능을 확보하기 위해 $l/(M_n/V_n)$ 비를 변화시켜 철골 커플링 보를 전단항복형으로 설계하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

5. 복합 병렬 전단벽의 동적 거동 특성

〈그림 11〉은 개개 전단벽 주각의 응답과 보의 커플링 작용에 의한 골조응답의 합으로서 병렬 전단벽 시스템의 이상화된 응답을 나타낸 것이다. 그림과 같이 전단벽에서 현저한 변형이 발생함에도 불구하고 전단벽의 연성비는 커플링 보의 연성비보다 더 작게 나타났다. 병렬 전단벽 시스템이 최대내력(R_t)에 도달할 때, 소성현지를 커플링 보로 이동시키기 위해서는 커플링 보는 현저한 비탄성 변형을 경험해야 한다. 또한, 건축물이 연성적으로 거동하기 위해서는 커플링 보의 연성요구량은 전단벽의 연성요구량을 초과해야 한다. 만일, 커플링 보가 소요 연성비를 확보하지 못한다면 조기 파괴가 발생하여 전단벽의 보유강도(R_w)에 이를 수 있으나 전체 구조물의 최대내력에 도달할 수 없게 된다. 〈그림 12, 13〉은 고인성 시멘트 복합체(HPFRCs)를 적용한 상이한 배근상세를 갖는 복합 병렬 전단벽에 대하여 시간이력에 따른 층간변위와 최상층변위를 나타낸 것이다. 그림과 같이 대각보강근 상세를 갖는 복합 병렬 병렬전단벽의 거동은 일반배근상세를 갖는 경우에 비해 층간 변위 및 횡변위가 작게 나타났으며, 또한 동일한 조건에서 완전(fully) 병렬 전단벽이 부분적(partially)으로 연결된 병렬 전단벽에 비해 대체적으로 횡변위 및 층변위가 작게 나타났다. 따라서 병렬 전단벽의 거동은 커플링 정도에 의해 현저한 영향을 받는 것으로 나타났으며 또한 Loma Prieta 지진기록에 대한 동적해석결과 층간변위가 El Centro, Kobe 및 San Fernando에 의한 값보다 대체적으로 크게 나타났다.

6. 맺음말

최근 서로 다른 종류의 구조부재를 조합하여 각 부재의 역학적 특성이나 시공상의 이점을 활용하는 구조형식을 개발하려는 노력이 국내·외적으로 진행되고 있는 것은 매우 바람직한 현상이다. 본 기사는 기존 연구결과를 근거로 철골 커플링 보를 적용한 복합 병렬 전단벽의 내진성능을 향상시키기 위한 접합부 보강상세, 보강 상세에 따른 접합부 내력식, 설계 개념별 거동 특성 및 복합 병렬 전단벽의 동적특성을 각각 소개하였다. 이러한 내용을 근거로 판단하여 볼때, 접합부의 비탄성 변형시 접합부 영역을 스티드 볼트 및 수평타이로 보강한 경우, 철골 커플

링 보의 유효고정점은 매립길이의 1/5인 것으로 평가되며 병렬 전단벽의 소요 매립길이 설계시 이에 대한 영향을 고려해야 할 것으로 판단된다. 또한, 전단항복형인 시험체는 접합부 파괴형인 및 휨 항복형 시험체와 일반 및 대각 보강 철근 콘크리트 커플링 보에 비해 내진성능이 우수한 것으로 나타났으며 복합 병렬 전단벽이 우수한 성능을 확보하기 위해 $l/(M_n/V_n)$ 비를 변화시켜 철골 커플링 보를 전단항복형 파괴가 발생하도록 설계하는 것이 바람직한 파괴형태라 할 수 있다. 이러한 국내의 연구 데이터는 국내 구조실무에 적용이 가능한 유용한 자료로서, 이러한 신 구조시스템의 효율적이고 합리적인 설계기법을 마련하기 위해서는 각 연구자들의 지속적인 심도 있는 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다. □

참고문헌

1. Paulay, T., and Binney, J. R., "Diagonally Reinforced Concrete Beams for Shear Walls," ACI Special Publication SP 42-Shear in Reinforced Concrete, 1974, pp.579~59.
2. Tassios, T. P., Moretti, M., and Bezas, A., "On the Coupling Behavior and Ductility of Reinforced Concrete Coupling Beams of Shear Walls," ACI Structural Journal, Vol.93, No.6, 1996, pp.711~720.
3. Galano, L., and Vignoli, A., "Seismic Behavior of Short Coupling Beams with Different Reinforcement Layouts," ACI Structural Journal, Vol.97, No.6, 2000, pp.876~885.
4. 박완신 등, "접합부 상재에 따른 철골 커플링 보", 대한건축학회 논문집(구조계), 제 20권(12), 2004, pp.61~68.
5. Shahrooz B. M., "Seismic Design and Performance of Composite Coupled Walls," J. Structural Div., ASCE 119(11), 1993, pp.3291~3309.
6. Harries, K. A., "Seismic Design and Retrofit of Coupled Walls using Structural Steel," Department of Civil and Applied Mechanics, McGill University, Montreal, Canada, 1995.
7. Canbolat, B. A., Parra-Montesions, G. and Wight, J. K., "Effect of Fiber Reinforced Cementitious Composites on the Seismic Behavior of RC Coupling Beams", in FIP-Symposium-Concrete Structures in Seismic Regions, 2003.
8. 윤현도, 박완신, "접합부/철골 커플링 보 강도비에 따른 복합 병렬 전단벽의 내진거동", 대한건축학회 논문집(구조계), 제 21권(1), 2005, pp.83~90.
9. Gong B., Shahrooz B. M., Gillum A. J., "Cyclic Response of Composite Coupling Beams," ACI Committee 335 Special Publication, 1997.
10. Popov, E. P., and Kasai, K., "A Study of Seismically Resistant Eccentrically Braced Frames," Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, Report No. UCB/EERC-86/01, 215pp.
11. Sherif El-Tawil, P. E., M.ASCE, Christopher M. Kuenzli, and Mohammad Hassan, "Pushover of Hybrid Coupled Walls. I: Design and Modeling," Journal of Structural Engineering, 128(10), 2002, pp.1272~1281.
12. Santhakmar, A. R., "Ductility of Coupled Shear Walls," Doctoral thesis, University of Canterbury, New Zealand, 1974.
13. Chaallal, O., Gauthier, D., and Malenfant, P., "Classification Methodology for Coupled Shear Walls," ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.122, No.12, 1996, pp.1453~1458.
14. Shen et al., "Nonlinear Behavior of Posttensioned Hybrid Coupled Wall Subassemblages," ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.128, No.10, 2002, pp.1290~1300.
15. Pak Cheung Cheng., "Shear Capacity of Steel-Plate Reinforced Concrete Coupling Beams," Department of Civil and Structural Engineering, Hong Kong University, Hong, 2004.
16. Shahrooz., "The Next Generation of Coupling Beams." Report No. UC/CII-05/01, Cincinnati Infrastructure Institute, University of Cincinnati, 2005, 346pp.
17. Kent, D. C., and Park, R., "Flexural Members with Confined Concrete," Journal of Structural Division, ASCE, Vol.97, ST7, Jul., 1971, pp.1969~1990.
18. Park W. S., Yun H. D., "Bearing Strength of Steel Coupling Beam-Reinforced Concrete Shear Wall Connections" Nuclear Engineering and Design, 2005(in press).
19. Mattock, A. H., and Gaafar, G. H., "Strength of Embedded Steel Sections as Brackets," ACI Journal, V.79(9), Mar.~Apr., 1982, pp.83~93.
20. Park W. S., Yun H. D., "Seismic behaviour of steel coupling beams linking reinforced concrete shear walls" Engineering Structure, Vol.97, No.6, 2005, pp.876~885.
21. Park W. S., Yun H. D., Chung J. Y., and Kim Y. C., "Experimental Studies on Seismic Behavior of Steel Coupling Beams" Structural Engineering and Mechanics, Vol.20, No.6, 2005, pp.876~885.
22. 윤현도, 박완신, 등, "철골 커플링 보-벽체 접합부의 전단 패널 메커니즘", 대한건축학회 논문집(구조계), 제21권(5), 2005, pp.43~50.
23. 윤현도, 박완신 등, "철근콘크리트 벽체에 매립된 철골 커플링 보 접합부의 전단강도", 대한건축학회 논문집(구조계), 제 20권(5), 2004, pp.43~50.
24. Building Seismic Safety Council(BSSC), "1997 Edition NEHRP Recommended Provision for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures(FEMA 302) and Commentary(FEMA 303)," Washington.D.C. 1998.
25. Shiu, K. N., Barney, G. B., Fiorato, A. E., and Corley, W. G., "Reversed load Tests of Reinforced Concrete Coupling Beams." Proceedings of the Central American Conference on Earthquake Engineering, El Salvador, 1978, pp.239~249.