

커플링 보의 접합방식에 따른 복합 벽체 시스템에 관한 연구

A Study on Hybrid Wall System on Connection Type of Coupling Beam

윤 현 도* 박 완 신** 한 병 찬*** 윤 여 진****
Yun, Hyun-Do Park, Wan-Shin Han, Byung-Chan Yun, Yeo-Jin

Abstract

The Hybrid Wall System(HWS) building composed of center core reinforced concrete walls and exterior steel frame has open space around the center core walls. It is necessary to develop design methodologies for the HWS building that the coupled shear walls withstand the most of lateral load and expect the most energy dissipation at the coupling beams and at wall foots. Major factors considered in this paper are connection type of coupling beams and scale of story. The studies of the system are investigated in terms of shear force, overturning moment, maximum lateral displacement, story drift ratio, and dynamical characteristics under the action of vertical and lateral forces such as wind and seismic loads.

요 지

철근콘크리트 코어 벽체와 외부 철골골조로 구성된 복합벽체시스템은 중앙 코어 전단벽 주변의 오픈공간을 갖는다. 이와 같은 복합 벽체시스템은 연결된 벽체가 대부분의 횡하중에 저항하고 벽체저면과 커플링 보에서 대부분의 에너지를 소산할 수 있는 설계기법을 개발하는 것이 필요하다. 본 연구논문은 커플링 보의 접합방식 및 층규모를 주변수로 수직하중 및 풍하중과 지진하중을 받는 복합 벽체시스템에 대하여 전단력, 전도모멘트, 최대 횡변위, 층간변위비 및 동적특성을 규명하였다.

Keywords : Hybrid Wall System(HWS), Shear Force, Overturning Moment, Seismic Loads.

핵심 용어 : 복합벽체 시스템, 층간변위, 전단력, 전도모멘트, 지진하중

* 정희원, 충남대 건축공학과 교 수, 공학박사

** 정희원, 충남대 건축공학과 대학원 박사과정

*** 정희원, 충남대 건축공학과 강 사, 공학박사

**** 정희원, 건양대 토목시스템 공학과 교수, 공학박사

E-mail : salshin@hanmail.net 018-414-6281

• 본 논문에 대한 토의를 2003년 9월 30일까지 학회로 보내 주시면 2004년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

철근콘크리트 부재는 압축력에 강하고 철골 부재는 휨과 전단력에 대한 저항능력이 우수하다는 특성을 가지고 있으므로 이 두 가지 구조부재를 적절하게 조합한다면 현재 건축물에 이용되고 있는 재료만을 이용하여 가장 합리적인 구조시스템을 개발할 수 있을 것이다. ^{(1)~(3)} 철근콘크리트 구조와 철골로 구성된 복합 벽체시스템(HWS)은 건축물의 기능성을 향상시키는 중앙 코아 병렬 전단벽 주변의 오픈공간(Open Space)을 갖으며 벽체를 슬립 폼(Slip Form)공법으로 시공하고 미리 벽체에 설치된 매립철판(Embedded Plate)에 주변 철골 골조의 보를 용접이나 볼트 접합하는 시공성이 우수한 구조방식으로 국내·외에서 널리 적용되고 있는 실정이다. ^{(4)~(6)} 그러나 복합 벽체 시스템에서 주요한 횡하중 저항요소와 병렬 전단벽은 입력된 지진에너지의 대부분을 병렬 전단벽의 커플링 보(Coupling Beam)에서 소산하므로 이러한 커플링 보를 철근 콘크리트 부재로 설계할 경우, 커플링 보의 굵이 깊게 되어 층고가 낮은 건물에 대해서는 부적절하고 내진성능의 개선을 위해서는 복잡한 배근상세를 따라야 하며 변형능력은 다소 제한된다. 이러한 이유로 Roeder와 Popov⁽⁷⁾의 가새골조에서 철골 커플링 보(Steel Link Beam)에 대한 연구결과에 착안하여 병렬 전단벽에서 재래식 철근콘크리트 커플링 보를 철골보로 대체하여 이용하는 방안을 모색하고 있다. 복합 벽체 시스템에서 병렬 전단벽의 커플링 보를 철골보로 대체시 철근콘크리트 전단벽에 철골보를 매립하는 방식(강접)과 매립 철판을 벽체에 설치후 철골보를 접합하는 방식(편접)을 고려할 수 있으며 강접시 구조적인 효과는 기대되지만 시공상 많은 문제점을 내포하고 있다. 반면, 편접시 구조적인 효율은 저하될 것으로 예상되지만 시공성은 매우 우수할 것으로 판단된다.

그러므로 본 연구에서는 중·고층 건축물의 시공성 및 기능성 향상을 위하여 적용되는 복합 벽체 시스템의 주요한 횡하중 저항요소인 병렬 전단벽에서 커플링 보의 접합방식(강접합 또는 편접합)에 따른 횡하중에 대한 저항능력, 변형특성 및 경제성을 비교·분석하여 복합 시스템에 대한 기초적인 자료를 제시하는데 그 목적이 있다.

2. 대상건물

2.1 대상건물의 개요

본 연구에서 선정된 복합벽체 시스템을 적용한 연구대상 건물은 Fig. 1과 같이 장변 77.4m, 단변 31.75의 기준층 평면이 1~50층까지 반복되었다.

구조시스템의 세장비가 6.32(200.7m/31.75m)로서 실버빌딩(Silver Building)의 범주에 속한다. 또한 이 구조시스템은 철골 커플링 보와 연결된 중앙 코아의 전단벽과 전단벽 주변의 SRC기둥, 이들을 연결하는 내·외부 철골 보로 구성된다. 특히 20, 30, 40 및 50층 건물의 경우 횡변위를 제어하여 사용성에 대한 요구조건을 만족시키기 위해 해당층에 벨트트러스를 설치하였다. 또한 모든 하중조건에 대하여 해석결과 값(전단력, 전도모멘트)을 비교·분석하기 위하여 Fig. 1에서와 같이 장변방향(10Type) 및 단변방향(12Type)의 임의 벽체를 선정하였다.

2.2 설계조건 및 하중

모델 건물의 용도는 주상복합 건물을 기본으로 하였고 기준층의 층고는 4.7m, 기계실은 4m로 가정하였으며 기계실은 10F, 20F, 30F, 40F 및 50F에 위치한다. 설계 하중은 고정 및 활하중, 풍하중 및 지진 하중을 고려하였다.

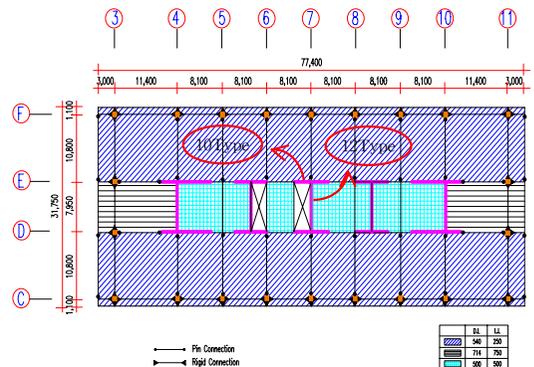


Fig. 1 대상건물의 기준층 평면

2.2.1 수직하중(Vertical Load)

고정하중과 활하중의 합인 수직하중의 경우 건물의 용도를 사무실, 주거공간 및 기계실로 가정하여 국내 건축물 하중 설계기준에 준하여 산정하였으며 연구대상 건물의 각 층 및 실별로 산정하여 정리하면 Table 1과 같다.

2.2.2 풍하중(Wind Load)

풍하중은 대전의 지역적 상황을 고려하여 건축물 하중 설계기준에 따라 설계속도압 (q)은 기본풍속 30m/sec (100년 주기), 중층 건물이 산재해 있는 지역으로 노풍도 B, 가스트 계수(Gust Factor) 2.0, 지형에 의한 풍속할증계수는 경사, 산 및 언덕이 없는 지역으로 1.0인 강제구조물로 가정하여 산정하였다. 또한 풍하중은 대상건물 각 슬래브의 다이어프램 효과 (Diaphragm Effect)를 고려하였으며 평면의 중심에 정적으로 작용하는 것으로 가정하였다.

Table 1 바닥하중 (단위: kgf/m²)

실명	Story		사무실		주거공간		기계실	
	사무실	주거공간	사무실	주거공간	사무실	주거공간	사무실	주거공간
1~9F, 11~21F	504	505	509	549	721			
21~29F, 31~34F	504	505	-	549	721			
35~39F, 41~47F	504	505	509	549	721			
48~49F	504	505	509	549	721			
10, 20, 30, 40, 50F	504	505	549	721	1028			

2.2.3 지진하중(Seismic Load)

일반적으로 건축물의 내진해석은 등가정적해석 (Equivalent Static Analysis)과 응답스펙트럼 해석 (Response Spectrum Analysis) 등이 적용되고 있다.

본 연구에서는 연구대상 건물의 건설부지는 대전 서구지역으로 등가정적해석을 수행하기 위해 하중 산정시 지역계수 0.11 (A1), 중요도 계수 1.2, 지반계수 1.0(S1), 반응수정계수는 모멘트 연성골조인 이중골조방식으로 6.0을 사용하였다.

50년 동안에 발생할 확률이 10%를 초과하는 지진 자료를 근거한 응답스펙트럼 해석시 연구대상 건물의 최대주기를 15초로 고려하였다.

2.3 사용재료

커플링 보로 연결된 병렬 복합벽체 시스템에 사용된 재료의 역학적 특성은 SRC기둥 및 코아 콘크리트 벽체의 콘크리트 설계기준 압축강도 400kgf/cm², 탄성계수 3.7×10⁵kgf/cm²이고 수평철근과 수직철근의 항복강도 4,000kgf/cm², 탄성계수 2.0×10⁶kgf/cm²이며 SRC 기둥과 및 커플링 보에 사용된 강재의 경우 SS 400의 일반 구조용 압연강재로서 항복강도 4,000kgf/cm², 탄성계수는 2.1×10⁶kgf/cm²으로 가정하였다.

Table 2 모델별 설계 변수

		분 류					비 고
구조시스템		이중골조 시스템(Dual Frame System)					반응수정계수 6.0적용
층 구분		10층	20층	30층	40층	50층	
콘크리트 설계기준 압축강도		400kgf/cm ²					전층 동일적용
철근의 설계기준 항복강도		4,000kgf/cm ²					
철골 커플링보의 항복강도		4,000kgf/cm ²					
벽두께(cm)		20	20	40	60	100	
SRC기둥		H498×432×45/70, □ 60×60					층 규모에 따라 동일 적용
커플링 보		H808×302×16/30					층 규모에 따라 동일 적용
층고(m)	기준층	4.7m					
	2층 이상	4.0m					
주 고려대상 설계 하중조건		고정하중, 활하중, 풍하중, 지진하중					정적, 동적해석 수행
커플링 보의 집합 방식		Rigid Connection			Pin Connection		*50SR, 50SH
벨트 트러스의 설치위치		없음	10층	15층	20층	10개층 마다	

*50SR, 50SH에서 50S:층규모, R: 강접합(Rigid Connection), H: 핀접합(Pin Connection)

3. 구조해석 및 결과

본 연구에서는 Table 2와 같은 설계변수를 대상으로 주검토 설계하중인 풍하중과 지진하중을 고려하여 층 규모 및 철골 커플링 보의 접합방식에 따라 병렬 복합 벽체시스템에 대해 범용 구조해석 프로그램 MIDAS GEN 4.3.2 Version을 이용하여 3차원으로 모델링한 후, 정적 및 동적 구조해석을 수행하였으며 각 부재의 부재적인 밀면전단력, 전도모멘트값을 비교·분석하였다. 풍하중의 경우 100년 재현주기 풍속에 대하여 UBC 규준의 허용 횡변위 한계인 H/500, 지진하중의 경우 응답스펙트럼 해석결과에 의한 층간변위에 반응수정계수 및 Table 3에서와 같이 할증계수(Scale-Up Factor)를 곱한 값이 UBC 규준의 허용 층간변위 한계인 0.015h이내를 만족하도록 하여 구조시스템의 정적 및 동적거동특성을 비교·분석하였다.

또한 최대응력비가 1.0을 초과하지 않는 한도 이내에서 부재의 단면을 설계하였고 경제성을 평가하기 위해 핀접합 및 강접합된 경우의 물량을 서로 비교·분석하였다.

3.1 밀면전단력(Base Shear)

밀면전단력은 내진설계에서 중요한 요소 중 하나이다. 국·내외에서 일반적으로 사용되는 내진설계 규준은 주로 등가정적해석법이며, 설계전단력과 모멘트는 밀면전단력의 함수로서 표현된 횡력이 작용하는 골조의 정적해석으로부터 얻어진다.

Fig. 2는 커플링 보의 접합방식에 따른 병렬복합벽체시스템의 밀면전단력을 나타낸 그림으로 대체적으로

층 규모가 커질수록 X방향에 대해서는 270.4~1,215tonf로 지진하중이, Y방향에 대해서는 424.6~4,222tonf로 풍하중이 지배적인 것으로 나타났다.

3.2 전단력 및 전도모멘트

Fig. 3은 층 규모 및 커플링 보의 접합방식에 따른 병렬 복합 벽체시스템의 X 및 Y방향 풍하중에 대하여 10 및 12Type의 벽체가 부담하는 밀면전단력을 나타낸 것으로 X 및 Y방향 풍하중 작용시 핀접합된 커플링 보로 연결된 병렬 전단벽의 경우 각각 34.68~258.38tonf와 164.61~1,522.38tonf범위로 강접합된 경우와 대등한 경향을 보이고 있었다. 이는 커플링 보의 접합방식과는 무관하게 벽체가 밀면전단력의 대부분을 부담하였기 때문으로 사료된다.

Fig. 4는 층 규모 및 커플링 보의 접합방식에 따른 병렬 전단벽의 X 및 Y방향 풍하중에 대하여 10 및 12Type의 벽체가 부담하는 전도모멘트 분포를 비교하여 나타낸 그림이다. X방향 풍하중 작용시 핀접합된 병렬복합 시스템의 경우 680~13,415tonf·m범위로 강접합된 경우에 비해 1.06~1.19정도로 크게 나타났으며 층 규모가 커질수록 그 경향이 현저하게 나타났다.

특히 벨트 트러스가 설치된 경우가 설치되지 않은 경우에 비해서 전도모멘트가 7~14%정도 현저하게 감소하는 경향을 보였다. 그러나 Y방향 풍하중 작용시 전도모멘트가 76.96~15,700.30tonf·m범위로 강접합된 경우와 유사한 경향을 보이고 있었다. 또한 모든 경우 전도모멘트에 대해 검토한 결과, UBC 규준에 준하여 구조물 자체의 총 중량이 건물의 중심에 작용하는 안정모멘트의 2/3보다 작은 것으로 나타났다.

Table 3 병렬복합벽체 시스템의 할증계수(V_s/V_t)

접합방식		강접합 (Rigid Connention)					핀접합 (Pin Connection)				
		10	20	30	40	50	10	20	30	40	50
Vs (tonf)	X방향	221	421	608	924	992	221	421	608	924	992
	Y방향	221	421	608	924	992	221	421	608	924	992
Vt (tonf)	X방향	220	306	557	816	919	190	259	444	611	795
	Y방향	228	278	471	569	695	228	278	471	569	695
Vs/Vt	X방향	1.00	1.38	1.09	1.13	1.08	1.16	1.63	1.37	1.51	1.25
	Y방향	0.97	1.52	1.29	1.62	1.43	0.97	1.52	1.29	1.62	1.43

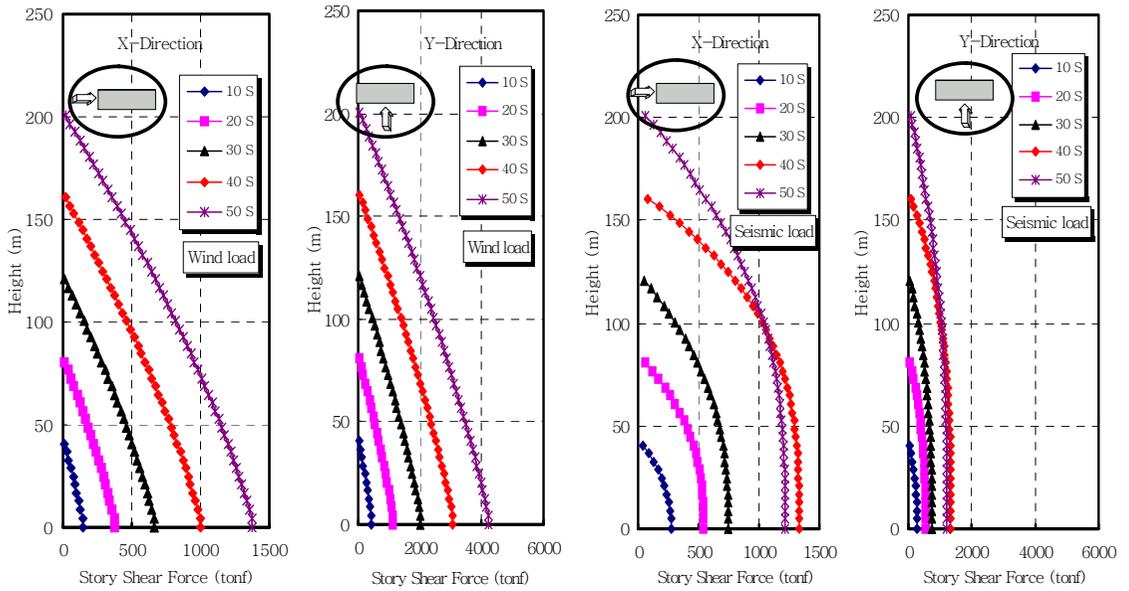


Fig. 2 풍하중 및 지진하중에 의한 밀면전단력

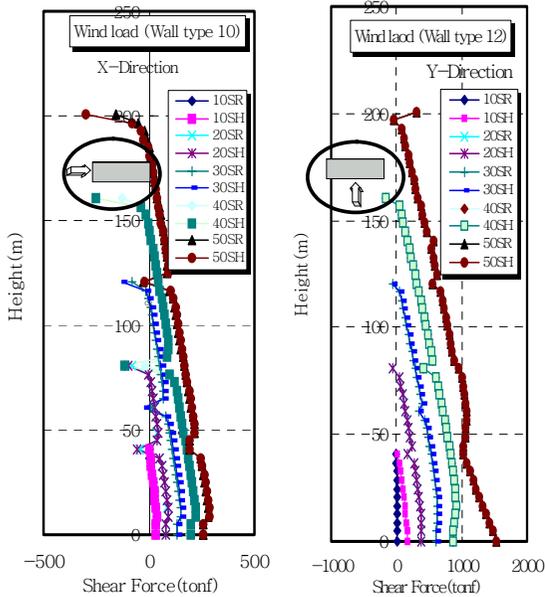


Fig. 3 풍하중에 의한 벽체가 부담하는 전단력

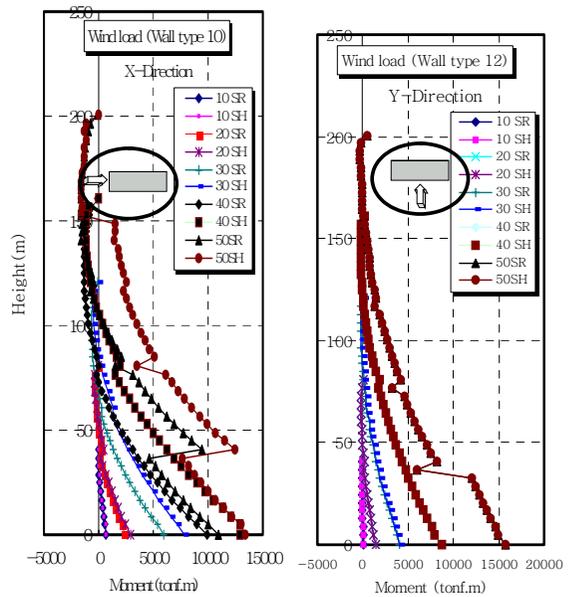


Fig. 4 풍하중에 의한 벽체가 부담하는 전도모멘트

3.3 복합 벽체시스템의 동적특성

일반적으로 건축물의 동적특성은 여러 가지 진동모드의 성분으로 나누어 고려한다. 중·저층 건물의 경우 1차 모드가 구조물의 거동에 큰 영향을 미치므로 지진하중을 등가정적 횡하중으로 단순화하여 정적해석을 수행하는 방법이 사용되나, 본 연구에서는 고층 건물의 경우이므로 1차 모드의 중요성이 낮아지고 고차 모드의 영향이 증가하게 되므로 동적해석법을 사용하여 구조물의 동적특성을 정확하게 규명하였다.

3.3.1 횡변위(Lateral Displacement)

Fig. 5는 커플링 보로 연결된 병렬 복합시스템의 커플링 보 접합방식에 따라 풍하중과 지진하중에 의한 횡변위를 나타낸 그림이다.

복합 벽체시스템의 변형 형태의 경우 10층 및 20층 중·저층 건물의 변형형상은 저층부에서는 전단변형이 지배적인 형상을 보이고 있으며 30, 40 및 50층으로 층규모가 커질수록 전단변형보다는 휨변형 형태가 지

배적인 형상을 보이고 있다. 특히 편집합된 30, 40 및 50층의 경우 X방향 풍하중에 대해 최상층의 층변위가 각각 4.42, 5.52, 6.55cm로 강접합된 경우에 비해 1.76~2.58배 크게 나타났으며, Y방향에 대해 각각 13.89, 28.63 및 41.13cm로 강접합된 경우에 비하여 1.01~1.05배 크게 나타났으나 모든 경우 UBC 내진설계기준에서 규정하는 변위한계인 H/500을 만족하는 것으로 나타났다.

이상의 결과로부터 복합 벽체 시스템의 주요 횡하중 저항 요소인 병렬 전단벽의 커플링 보 접합방식은 복합 벽체 시스템의 횡하중 저항능력에 주요한 영향을 미치고 있는 것으로 나타났다.

한편 벨트트러스의 위치에 따른 해석결과를 비교·분석한 결과 벨트 트러스가 위치한 해당층에서 층변위가 편집합된 병렬 복합 벽체시스템의 경우 1.94~41.13cm 범위로 벨트트러스를 설치하지 않은 경우에 비하여 20~45%정도 변위 저감효과가 나타났으며, 8~28%정도의 저감효과를 보인 강접합된 병렬복합 시스템에 비하여 그 경향이 두드러지게 나타났다.

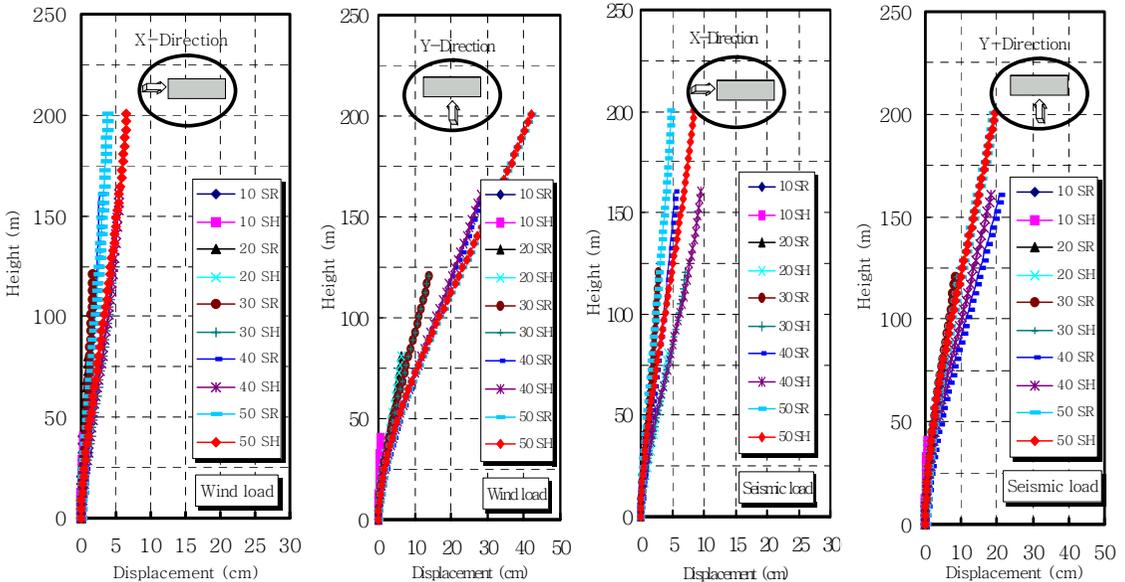


Fig. 5 복합벽체 시스템의 풍하중 및 지진하중에 따른 변위

3.3.2 층간변위비(Story Drift Ratio)

층간변위비는 유리창이나 벽 등의 비구조적인 요소에 피해를 예상하여 구조물의 안정성 및 사용성을 간접적으로 평가하는 척도이다.

Fig. 6은 커플링 보의 접합방식에 따른 풍하중 및 지진하중에 대하여 복합 벽체 시스템의 층간변위비를 나타낸 그림이다. X, Y방향 풍하중 작용시 커플링 보가 편접합된 병렬전단벽을 갖는 복합 벽체 시스템의 경우 층간변위비가 각각 0.00005~0.00048와 0.00018~0.003의 범위로 강접합된 경우와 비교하여 대등하게 나타났다.

X방향 지진하중 작용시 편접합된 병렬 전단벽을 갖는 30, 40 및 50층의 병렬복합시스템의 경우 층간변위비가 각각 0.0043, 0.0057 및 0.0032로 강접합된 경우에 비해 1.7~2.33배 크게 나타났으나, Y방향 지진하중 작용시 0.0056, 0.01 및 0.0077%로 강접합된 경우에 비해 1.01~1.03배 범위로 거의 대등하게 나타났다. 또한 모든 조건의 복합 벽체 시스템에 대하여 층간변위비는 0.00005~0.010범위로 현행 UBC 내진설계규준의 허용층간변위비의 한계값(≤ 0.015) 이내이므로 사용성에 대한 요구조건을 모두 만족하는 것으로 나타났다.

3.4 경제성 검토

구조시스템간의 경제성 여부를 결정하는 요소는 크게 철근, 콘크리트, 거푸집, 철골 등 재료비와 같은 내적인 요소와 공법별 공사시간에 따른 노무비, 공기량 및 거푸집량 등과 같은 외적요소로 구성되어 있다. 본 연구에서는 커플링보와 벽체를 연결하는 접합부의 공법이 전체 공사비에 비해 크게 영향을 끼치지 않는다고 가정하고 공사재료비 중 단위평면당 거푸집 공사비도 근사적으로 같다고 가정하여 경제성 평가시 공사의적인 요소도 무시하였다. 따라서 본 연구에서는 공사재료비 중 콘크리트물량, 철근량과 철골의 물량을 산출하여 비교·분석하여 경제성을 검토하였다.

Fig. 7, 8 및 9는 복합벽체 시스템의 주요 횡하중 저항요소인 병렬 전단벽의 커플링 보가 편접합된 경우와 강접합된 경우 콘크리트물량, 철근량 및 강재량을 산출하여 비교한 그림이다. 병렬 전단벽에서 편접합된 커플링 보를 사용한 10 및 20층의 복합 시스템의 경우 소요 콘크리트 양은 각각 2,306, 5,222ton으로 강접합된 경우에 비해 1.01~1.02배로 큰 차이를 보이지 않고 있다.

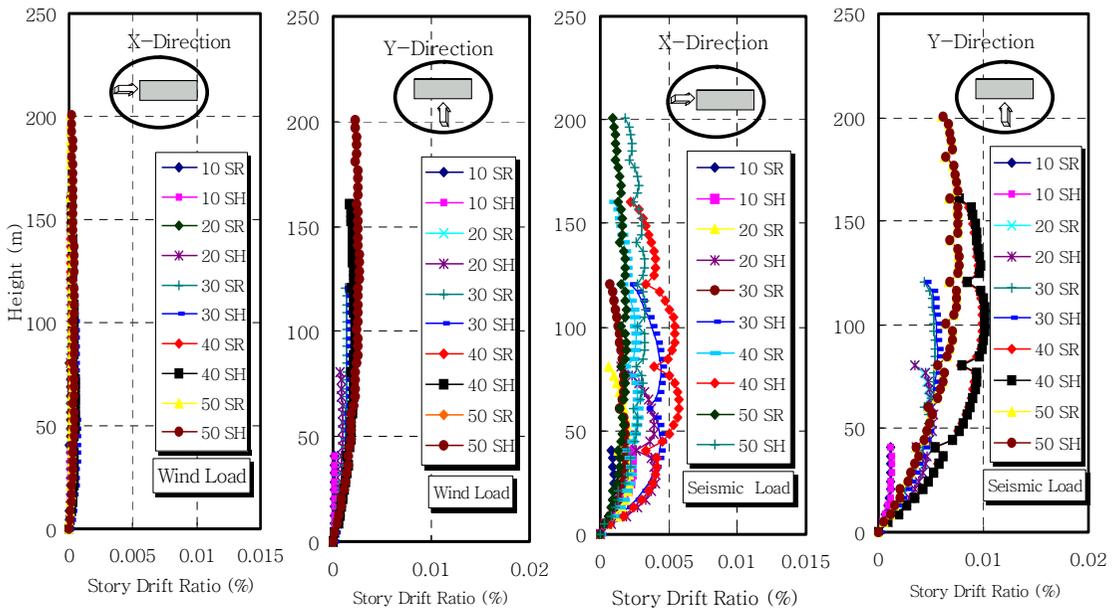


Fig. 6 복합벽체 시스템의 풍하중 및 지진하중에 따른 층간변위비

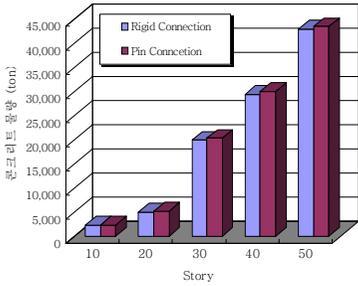


Fig. 7 콘크리트 물량 산출 비교

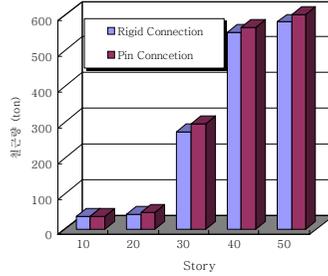


Fig. 8 철근량 산출 비교

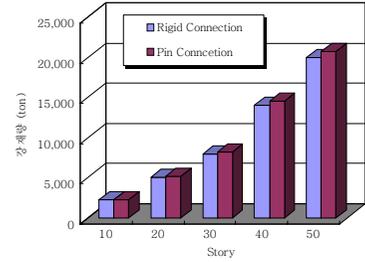


Fig. 9 강재량 산출 비교

특히 50층의 핀접합된 복합 벽체 시스템의 경우 콘크리트, 철근 및 강재량이 각각 43,590, 526.12 및 20,674ton으로 강접합된 경우에 비해 전체물량이 1.01~1.06의 범위로 층규모가 커짐에 따라 다소 증가하는 경향을 보였으나 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 핀접합된 보를 갖는 병렬전단벽 시스템이 강접합된 경우에 비해 유연하게 거동함으로써 구조물의 기본주기가 증가하여 동적계수를 감소시킴으로서 밀면전단력 및 전도모멘트가 감소하였기 때문으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 복합 벽체 시스템의 커플링 보 집합 방식을 주변수로 하여 구조해석을 수행하여 부재력 및 동적특성을 규명하고 경제성을 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 지진 발생시 커플링 보를 사용한 핀접합된 복합 벽체시스템의 밀면전단력은 층규모가 증가될수록 강접합된 전단벽의 커플링 보가 강접합된 경우에 비해 다소 크게 나타났다.
- 2) 풍하중과 지진하중에 대하여 복합 벽체 시스템의 벨트트러스 효과는 밀면전단력과 전도모멘트 제어에 탁월한 효과가 있는 것으로 나타났다. 또한 벨트 트러스가 위치한 곳에서 불연속점이 발생하여 처짐이 작게 나타났으며 특히 20층 이상의 고층 구조에 복합 벽체 시스템의 적용시 사용성을 확보하기 위하여 벨트 트러스의 적용이 요구되었다.
- 3) 핀접합된 커플링 보를 갖는 복합 벽체시스템의 층

변위 및 층간변위비는 강접합된 보를 갖는 복합 벽체 시스템에 비하여 크게 나타났으며 이러한 경향은 층 규모가 커질수록 현저하게 나타났다.

- 4) 병렬전단벽의 집합방식에 따른 콘크리트, 철근 및 강재량을 산출하여 비교함으로써 경제성을 평가한 결과 층 규모가 커짐에 따라 핀접합된 경우가 강접합된 경우에 비해 물량이 다소 증가되는 경향을 보이고 있으나 현저한 차이는 보이지 않는 것으로 나타났다.

감사의 글

한양대 초대형 구조시스템 연구센터의 연구비 지원에 의한 연구의 일부임

참고문헌

1. Bungale S.T., Structural Analysis and Design of Tall Building, N.Y. McGraw-hill, 1988.
2. Bryan Stafford Smith and Alex Coul, Tall Building Structures Analysis and Design, John Wiley & Son, 1991.
3. Joseph P.C., Structural Systems Selections in High-Rise Buildings.
4. Robert A.C., Structural Systems Design, Prentice-Hall, Englewood Cliff, N.J. 1983.
5. Wolfgang Schueller, The vertical Building Structure, VNR, 1990.
6. ACI Committee 442, "Response of Building to Lateral Forces", ACI Journal, Feb., 1971.
7. Roeder, C.W., and Popov, E.P.(1978). "Eccentrically Braced Steel Frame for Earthquakes." Journal of Structural Division, ASCE, 104(3), pp. 391-411.

(접수일자 : 2002년 10월 22일)