

상부 전단벽 하부 프레임 구조를 갖는 시스템의 수직하중에 대한 거동

Behavior of the Wall System with Transfer Girder and Columns.

홍성길* 문종우** 박홍근***
Hong, Sung Gul Moon, Jong Woo Park, Hong Guen

ABSTRACT

This paper presents the results from a combination of strut-and-tie model and analytical study that investigated the ultimate strength of wall system with frame supports. Strut-and-tie models show reasonable force flows and upper bound solution is compared to the results from FEM analysis. The results shows that two main parameters - transfer girder depth and column width - yield good estimation of the ultimate strength of the system. Vertical and horizontal reinforcements of the transfer girder add few strength to the whole system. The proposed design strength formula shows good agreement with the results from FEM analysis.

1. 서론

상부 전단벽 하부 프레임 구조를 갖는 시스템(이하 전단벽-프레임 시스템)은 동일 건물에 상하로 두가지 이상의 용도를 경제적으로 배치하기 위하여 쓰여진다. 상부에 전단벽식 주거용도를 갖고 하부에 프레임 시스템의 상업, 주차시설을 두어 구조적으로는 상이한 시스템을 갖게된다.

건축적으로 유용한 전단벽-프레임 시스템은 구조적으로는 해석과 설계방법이 명확히 제시되지 않았다. 보가 없는 시스템의 경우는 전단벽 지지점의 넓이와 압축용력을 제한함으로써 시스템의 내력을 결정하고 설계할 수 있으나 보가 설치된 경우에 대해서는 명확히 제시된 바 없다.

본 연구에서는 전단벽-프레임 시스템의 거동을 스트럿-타이 모델을 이용하여 내력을 추정하고 이를 유한요소해석과 비교하여 내력 산출식을 유도하고 설계방법을 제안하고자 한다

* 정회원, 서울대학교 건축학과 조교수
** 서울대학교 건축학과 석사과정
*** 정회원, 서울대학교 건축학과 전임강사

2. 트러스 모델

전단벽-프레임 시스템의 일반적인 거동은 춤이 큰 보의 아치거동과 유사하다. 모델 1은 전단벽 전체의 하중을 두 개의 집중하중으로 치환하여 아치거동을 하는 트러스 모델이다. 이 모델은 전단벽 단부에 일어나는 응력집중현상을 단적으로 보여주며 비교적 간단하게 전단벽-프레임 시스템을 모형화하지만 전단벽 하부, 혹은 보의 위치에 큰 단면적의 인장 타이를 위치시켜야 한다. 전단벽 하부의 보(Transfer Girder)는 휨재가 아니며 인장타이 혹은 전단벽이 연장된 두께가 다른 부분으로 간주되어야 한다.

트러스 모델 2는 전단벽을 여러개로 분할하여 각각의 요소가 하나의 트러스 모델을 이루어 하중이 전달되는 모형이다. 이 모델에서는 전단벽에 배근된 수평철근을 인장 타이로 이용할 수 있어 모델 1에서의 큰 인장 타이는 필요하지 않게 된다.

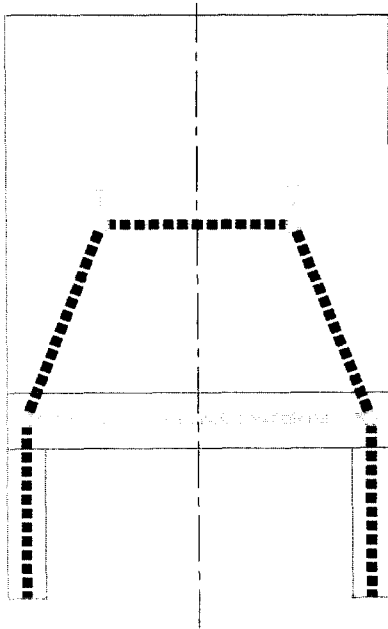


그림 1 트러스 모델 1

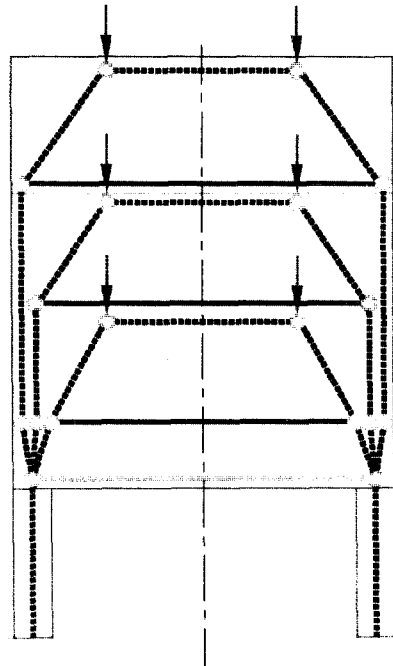


그림 2 트러스 모델 2

3. 상한치 이론에 의한 내력

가상일 원리에 의한 상한치 이론을 적용하여 전체 시스템이 붕괴할 때의 최대 내력을 구할 수 있다.

• 상한치 모델

전단벽의 하부가 압괴를 일으키면서 전단벽과 보의 중앙부분이 같은 변위를 일으키는 모델이다. 내부 에너지는 전단벽의 압괴와 보의 전단파괴시 늑근의 항복에 의해 일어난다. 콘크리트의 인장응력은 무시된다. 외력이 가한 일 W_E 와 파괴면에서 발생한 각각의 내부 에너지 W_i 는 다음과 같다.

$$W_E = \frac{L}{2} w \Delta, \quad W_{I⑩} = (B + \frac{d}{\tan \theta}) t f_c \Delta, \quad W_{I⑫} = \frac{b d}{\tan \theta} \rho_{ST} f_y \Delta,$$

$$W_{I⑬} = \mu A_s f_y \Delta, \quad W_{I⑭} = \frac{1}{2} b d (1 - \cos \theta) \frac{1}{\sin \theta} \Delta \quad (1)$$

식 (1)에 의한 구조물의 내력은 식 (2)와 같다.

$$P_u = wL = 2 \left[(B + \frac{d}{\tan \theta}) t f_c + \frac{b d}{\tan \theta} \rho_{ST} f_y + \mu A_s f_y + \frac{1}{2} b d (1 - \cos \theta) \frac{1}{\sin \theta} f_c \right] \quad (2)$$

t ; 전단벽 두께

$f_c = \nu f'_c$; 콘크리트 유효 압축강도

ρ_{ST} ; 보 늑근의 철근비

f_y ; 철근의 인장강도

A_s ; 보 주근의 단면적

b ; 보 폭

μ ; 철근의 마찰계수

식 (2)의 최소값은 $\theta = 90^\circ$ 일 경우이며 내력은 식 (3)과 같다.

$$P_u = 2 [B t f_c + \mu A_s f_y + \frac{1}{2} b d f_c] \quad (3)$$

4. 유한요소 해석에 의한 내력

• 해석 모델

해석 모델은 전체 스패 10m, 보깊이 60cm~200cm, 기둥 폭 50cm ~ 150cm의 범위로 하며 대칭면 좌측부분만을 해석한다. 콘크리트 압축강도 240 kg/cm², 철근 인장강도 4000 kg/cm²이며 전단벽의 수직 수평 철근비는 0.002로 한다. 보의 수평, 수직 철근비는 각각 0.014, 0.004이고 기둥의 경우 0.002, 0.02이다.

• 전단벽-프레임 시스템의 붕괴 기구

전단벽-프레임 시스템의 유한요소 해석에 의한 균열분포는 그림 4와 같다. 보에서는 기둥과 인접한 부분에서의 전단균열과 스패 중앙에서의 인장균열이 발생하였고, 벽에서는 단부에서의 압괴와 보 전단균열이 연장된 균열이 발생하였다.

보의 균열과 벽의 전단균열은 시스템을 항복에 이르게 하지 않으며 전단벽 단부의 압괴가 붕괴기구가 된다. 보의 중앙과 전단벽 하부는 트러스 모델에서는 인장타이의 역할을 하며 이 부분의 균열은 하중의 흐름을 바꾸거나 차단하지 않는 것이다.

전단벽 단부에서는 압축강도 이상의 응력을 받는 영역이 발생하여 항복하고, 그와 인접한 부분에 하중 집중이 생겨 다시 항복하는 연속적인(progressive) 파괴가 일어나 전체 구조물이 항복

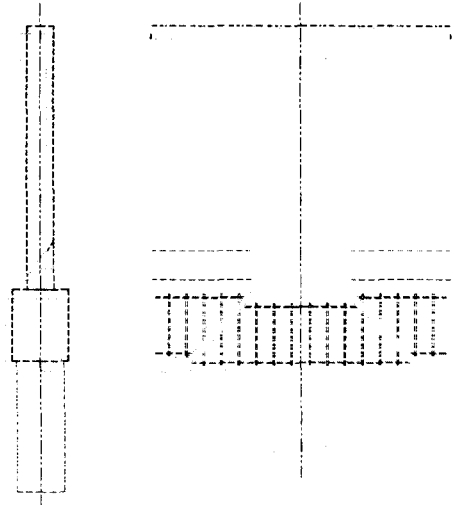


그림 3 상한치 모델

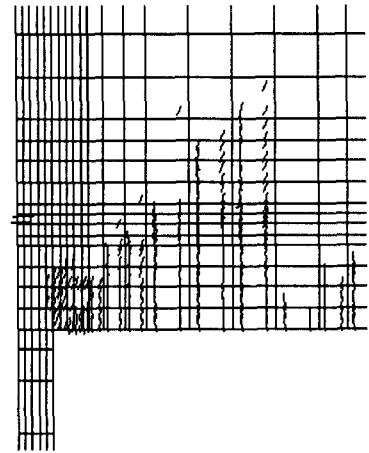


그림 4 항복 단계의 균열

하게 된다. 전단벽 단부에서의 응력 분포는 시스템의 내력을 결정하는 주된 인자이다.

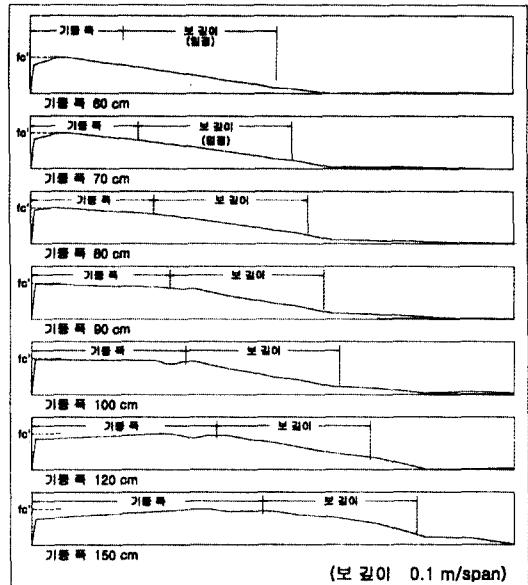
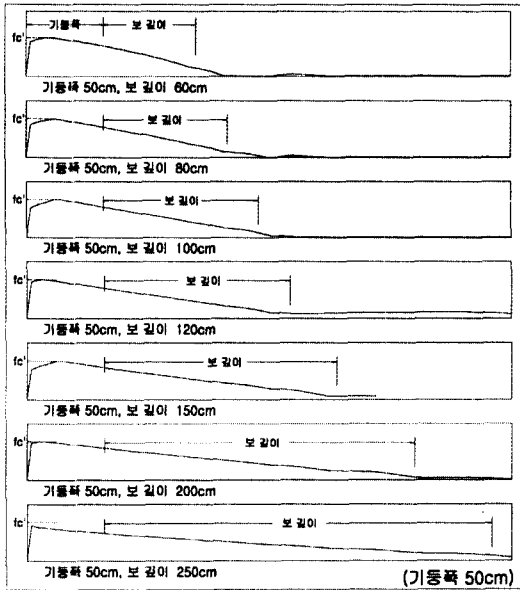


그림 5 보 깊이 변화에 따른 전단벽의 응력 (경간 10m)

그림 6 기동 폭 변화에 따른 전단벽의 응력

• 전단벽 단부 콘크리트 응력의 분포

그림 5, 6은 보의 깊이와 기동폭을 변화시키면서 구조물의 내력이 극한값에 이르렀을 때의 전단벽과 보가 접하는 부분의 응력을 나타낸다. 보의 직 상부의 응력은 최단부에서 항복을 한후 응력이 압축 강도 fc' 이하가 됨을 보여주며 그 안쪽으로 fc' 까지 증가하다가 감소하는 양상을 띤다. 이 감소하는 응력은 기동 안쪽면에서 보폭만큼 떨어진 지점에서 0에 접근함을 알 수 있다. 그 안쪽에서의 응력은 무시할 수 있을 만큼 작다.

이러한 분포는 콘크리트 보의 압축대의 응력-변형도 곡선과 유추하여 생각할 수 있고 일정한 패턴을 가지므로 평균응력을 구하여 트러스 모델 2에 적용하여 구조물 전체의 내력을 추정할 수 있다.

• 보와 기동단면의 영향

그림 7은 기동폭 스펠 비(B/L)가 0.05에서 0.15까지 변할 때 보의 깊이에 따른 내력의 변화를 보여준다. 기동의 폭과 보의 깊이는 전단벽 하부 압축응력을 받을 수 있는 영역을 넓혀주는 역할을 하므로 이와 정비례하여 내력을 증가함을 알 수 있다.

보의 깊이, 기동의 폭은 내력 산정의 중요한 인자임을 알 수 있다.

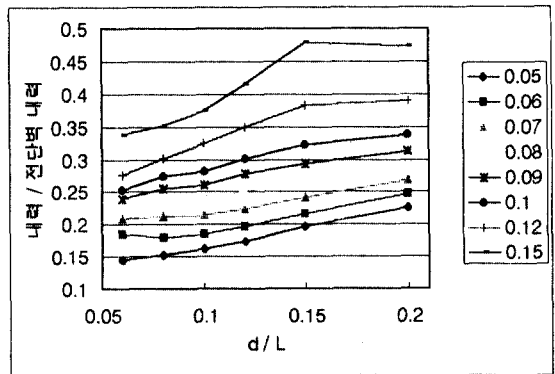


그림 7 보깊이 변화에 따른 내력

• 전단벽과 보의 배근의 영향

전단벽 단부에 보강되는 철근은 배근된 양만큼 내력을 증가시킨다. (그림 8 참조) 전단벽 단부의 콘크리트의 변형율이 거의 한계에 이르기 때문에 이보다 먼저 항복하는 철근은 먼저 소성상태에 들어가 내력을 발휘한다.

보에 배근되는 주근과 늑근은 전체 구조물의 내력 증가에 거의 기여를 못한다. (그림 9) 이것은 전단파괴가 붕괴기구가 아니고 전단벽의 수평근이 모든 수평력을 흡수하기 때문이다.

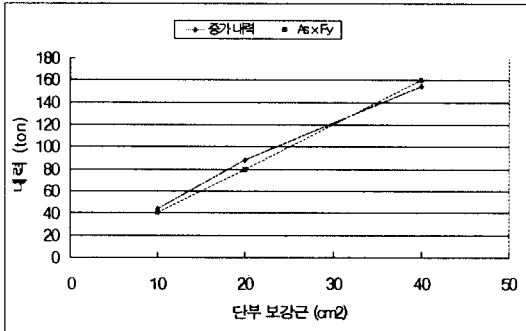


그림 8 전단벽 단부 보강근에 의한 내력 증가

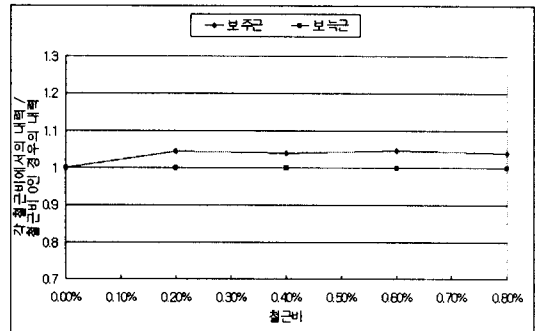


그림 9 보 철근의 영향

그림 9의 철근비는 $\rho_{주근} = \frac{A_s}{bd}$, $\rho_{늑근} = \frac{A_{ST}}{b_s}$ 으로 산출된다.

5. 내력 산출식 제안

해석 결과 전단벽-프레임 시스템의 극한 내력은 보 깊이와 기둥의 폭, 두가지 인수에 지배를 받으며 철근을 고려하지 않을 때 다음의 내력 산출식을 유도할 수 있다.

$$P_u^* = f_c' t [0.85 B + 0.45 d] \tag{4}$$

• 제안식과 해석 결과와의 비교

식 (4)에 의한 내력과 해석결과를 비교하면 표 (1)과 같다. 표에 의하면 제안식에 의한 내력이 해석 결과보다 평균 8 % 더 큰 것으로 나타났다.

그러므로 식 (4)에 안전계수(강도 저감 계수)와 철근의 영향을 반영하여 식 (5)와 같은 설계 제안식을 구할 수 있다. 전단벽 단부의 보강근은 100% 내력을 발휘하므로 이를 반영한다.

$$P_u = \phi [f_c' t \{0.85 B + 0.45 d\} + f_y A_s] \tag{5}$$

A_s ; 단부 보강 철근의 단면적 (cm²)

ϕ ; 강도 저감 계수

표 1 제안식과 유한요소 해석결과와의 비교 (해석결과 내력 / 제안식에 의한 내력)

		기둥 폭 / 스패 (B / L)								
		0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.12	0.15	
보 깊이 / 스패 (d / L)	0.06	1.07	1.22	1.24	1.21	1.19	1.16	1.10	1.13	
	0.08	1.00	1.07	1.15	1.17	1.17	1.17	1.13	1.11	
	0.1	0.96	1.00	1.06	1.11	1.11	1.12	1.14	1.12	
	0.12	0.92	0.96	1.02	1.06	1.10	1.12	1.15	1.18	
	0.15	0.92	0.94	0.98	1.02	1.05	1.09	1.16	1.27	
	0.2	0.88	0.91	0.93	0.96	0.97	1.00	1.05	1.12	
									평 균	1.08

6. 설계 방법 제안

식 (5)에 의한 내력이 계수하중 P_u 보다 크도록 단면크기를 정한다. 내진설계에 의한 전단벽 배근의 단부보강근도 내력산정에 포함한다. 보의 주근은 ACI의 최소 철근비를 반영하여 배근하며 늑근은 기둥 안쪽 보의 균열을 줄이는 역할을 하므로 보강한다. 전체 시스템의 내력은 기둥의 내력을 넘지 않도록 한다.

7. 결론

전단벽-프레임 시스템의 항복은 전단벽과 보가 인접한 부분에서 벽의 압괴형태로 나타나며 취성적인 성격을 갖는다. 이 상태의 전단벽의 응력은 콘크리트 보의 압축영역과 유사한 분포를 보이며 일정한 영역내의 범위내에 작용하는 압축응력의 합은 전체 시스템의 성능이 된다.

(1) 전단벽-프레임 시스템의 내력은 보의 휨강성의 영향을 받지 않으며 보와 기둥의 단면치수에 비례한다. 전단벽하부의 보의 전단벽의 하중을 받아 이를 기둥에 전달하지 않는다. 다만 전단벽 단부의 응력집중을 분산시켜 보가 없는 경우보다 더 넓은 압축응력대를 형성시킨다.

(2) 인장타이로서의 보의 역할은 거의 없다. 아치거동에 의한 수평 인장력은 전단벽의 철근을 통하여 흡수되며 보의 주근은 시스템 내력에 영향을 끼치지 못한다. 보의 늑근도 전체 시스템의 내력과 상관관계는 없지만 기둥과 인접한 부분의 전단균열을 줄이는 역할을 하므로 충분히 배근한다.

(3) 전단벽-프레임 시스템의 내력은 기하학적 조건-기둥폭과 보깊이-에 의하여 결정되어지며 이에 근거하여 설계가 가능하다. 식 (5)는 트러스 모델에 근거한 가정과 유한요소 해석 결과와 근사하게 일치하며 실무에서 설계식으로 사용할 수 있다.

(4) 본 연구는 정형의 조건을 갖는 비교적 단순한 경우의 전단벽-프레임 시스템을 다루었으나 이를 바탕으로 다스팬 연속보 프레임, 개구부를 갖는 전단벽, 비대칭 전단벽 등을 포함한 시스템의 연구를 수행할 수 있다.

• 참고 문헌

- Nielsen, M.P. "Limit Analysis and Concrete Plasticity", Prentice-Hall Inc., Englewood Cliff, New Jersey, 1984, 420pp.
- A. Muttoni, J. Schwartz, B. Thürlimann, "Design of Concrete Structures with Stress Fields", Birkhäuser, Basel, Boston, Berlin, 1997, 143pp.
- Klaus J. Rückert, Jörg Schlaich, "IABSE Workshop Strut-and-Tie Model", New Delhi, 1993, pp. H1-17, I1-4.
- K. H. Tan, S. Teng, F. K. Kong and H. Y. Lu, "Main Tension Steel in High Strength Concrete Deep and Short Beams", ACI Journal, Proceedings V. 94, No. 6, November-December, 1997, pp. 752-768.
- CIRIA Guide 2: "The Design of Deep Beams in Reinforced Concrete," Ove Arup and Partners, Construction Industry Research and Information Association, London, 1977