

철근콘크리트 T형 벽체의 내진성능 영향인자에 관한 해석적 연구

A theoretical study on the factors for the seismic performance of RC T-shaped walls

하상수* 최창식** 오영훈*** 이리형****
Ha, Sang Su Choi, Chang-Sik Oh, Young-Hun Lee, Li-Hyung

ABSTRACT

The seismic performance of structural walls subjected to the cyclic lateral loads are influenced by various factors, like sectional shape, aspect ratio, reinforcement ratio, arrangement of reinforcement, and axial load ratio etc. In this research, reinforced concrete structural walls with the T-shaped cross section were selected. The seismic performance of T-shaped wall was affected by the many factors because T-shaped wall is irregular wall composed to two rectangular walls. Especially the seismic performance of T-shaped wall varies with the flange condition and the various factors including the flange condition were determined.

Therefore, the objective of this study is to understand the factors to improve seismic performance of RC T-shaped by using sectional analysis.

키워드 : T형 벽체, 반복 수평하중, 내진 성능, 단면해석, 형상비

Keyword : T-shaped wall, cyclic lateral load, seismic performance, sectional analysis, aspect ratio

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

벽식구조 아파트나 오피스 건축물에서 구조벽체는 수직하중뿐만 아니라 풍하중과 지진하중과 같은 수평하중을 효과적으로 저항하기 때문에 주요 횡력저항 요소로서 사용되고 있다. 따라서 구조벽체의 바람직한 설계는 건축물의 구조 안전성에 큰 영향을 준다. 기존의 구조벽체에 대한 연구는 구조벽체의 구조적 성능을 향상시키기 위한 방향으로 진행되었으나, 다른 구조부재에 비해 작용하는 하중과 그에 따른 응력분포가 복잡하게 분포하여 연구에 한계가 있기 때문에 기존에 연구된 벽체의 대부분은 직사각형 단일벽체를 중심으로 이루어졌다. 직사각형 단일벽체에 대한 많은 연구를 토대로 구조벽체에 대한 규준이 제안되었으며, 규준을 토대로 설계에 적용되고 있다. 규준에 적용된 구조벽체는 모두 단일벽체로서 2개 이상의 단일벽체로 이루어진 이형벽체에 적용하기 위해 각각의 이형벽체를 직사각형 단일벽체로 가정하여 설계되고 있다. T형, H형, L형, BOX형 등 다양한 단면형상을 가지는 이형벽체는 실제 거동시 각각의 단일벽체로 작용하지 않고, 일체로 작용하기 때문에 이형벽체를 직사각형 단일벽체로 가정하여 설계하는 것은 바람직하지 않다. 따라서 본 연구에

* 한양대학교 건축공학과 박사과정

*** 건양대학교 건축공학과 교수

** 대전대학교 건축공학과 교수

**** 한양대학교 건축공학부 교수

서는 여러 이형벽체 중 T형 벽체를 선정하여 T형벽체의 내진성능에 영향을 주는 요소에 대해 살펴보고자 한다. T형 벽체의 내진성능은 플랜지의 영향으로 직사각형 단일벽체보다 많은 요소들에 의해 다르게 나타나며, T형 벽체에서 플랜지 부분의 일부를 변화시킴으로써 다른 변수들이 동시에 바뀌게 됨에 따라 결과 분석에 주의해야 한다. 예를 들어 T형 벽체에서 플랜지 길이를 변화시킴에 따라 전체 철근비와 배근상태, 그리고, 웨브의 길이에 대한 플랜지 길이 비도 동시에 변화되므로 플랜지 길이를 변수로 하여 얻은 결과가 플랜지 길이의 영향만으로 나타난 결과라 단정지를 수 없다. 이러한 점을 감안하여 본 연구에서는 T형 벽체의 내진성능에 큰 영향을 주는 변수를 선정하고, 각 변수를 다시 세분화하여 단면해석 프로그램을 이용하여 얻은 결과를 통해 T형 벽체의 내진 성능을 파악하고자 한다.

1.2 연구방법 및 범위

T형 벽체의 내진성능은 T형 단면에 작용하는 응력분포에 따라 달라지며, 이러한 응력분포가 벽체 하단부에 집중되면 벽체는 취성적인 파괴양상을 보이게 된다. 이러한 파괴를 막기 위해 벽체 하단부의 강도 및 강성을 향상시키기 위한 횡 철근의 구속이 필요하다. 횡 철근은 압축영역의 콘크리트와 철근을 구속하여 벽체의 강도와 연성을 향상시키는 중요한 변수가 되며, T형 단면에 작용하는 응력분포의 상태에 따라 횡 철근의 구속범위가 결정된다. T형 벽체에 작용하는 변형을 분포를 산정하여 횡 철근의 구속범위를 결정하였다. 이론식에 의해 결정된 면적만큼 횡 철근으로 구속시켜 단면해석에 통해 얻은 결과를 비교함으로써 T형 벽체의 내진성능에 영향을 주는 요소를 파악할 수 있다. 이론식에 의해 결정된 횡 철근 구속은 변수에 따라 다르게 나타나지만, 본 연구에서는 변수에 관계없이 벽체 길이의 20%에 해당하는 부분을 횡 철근으로 구속한 상태에서 단면해석을 수행하였다. 연구방법 및 범위는 그림 1과 같다.

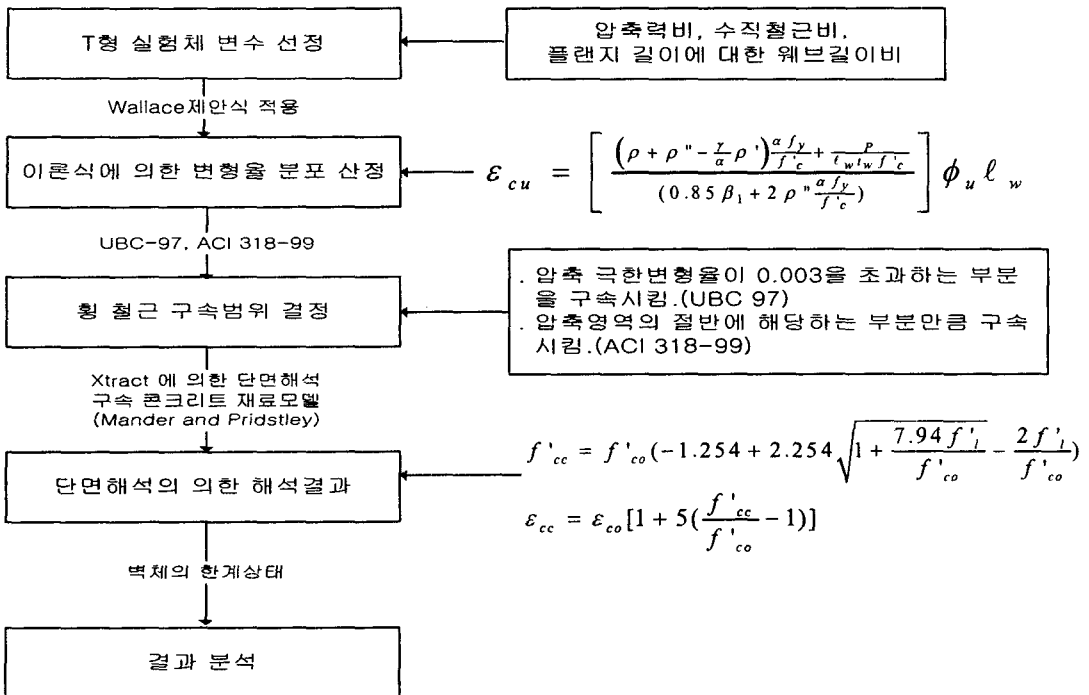


그림 1 연구방법 및 범위

2. T형 실험체 변수 선정

본 연구에서는 T형 벽체의 내진성능에 영향을 주는 압축력비, 수직철근비, 플랜지 길이에 대한 웨브 길이 비를 변수로 하였다. 각 실험체의 일람은 표 1과 같다.

표 1 실험체 일람표

실험체명	웨브			플랜지			P f _{ck} A _v (%)	$\frac{l_w}{l_f}$	t _w (cm)	f _{ck} (kgf/cm ²)	f _y (kgf/cm ²)	주요변수
	l _w (cm)	ρ _{wh} (%)	ρ _{wv} (%)	l _f (%)	ρ _{fh} (%)	ρ _{fv} (%)						
TWA1	100	0.25	0.2	100	0.25	0.2	0	1.0	15	240	4,000	압축력비
TWA2	100	0.25	0.2	100	0.25	0.2	5	1.0	15	240	4,000	
TWA3	100	0.25	0.2	100	0.25	0.2	10	1.0	15	240	4,000	
TWA4	100	0.25	0.2	100	0.25	0.2	20	1.0	15	240	4,000	
TWA5	100	0.25	0.2	100	0.25	0.2	25	1.0	15	240	4,000	
TWB1	100	0.25	0.5	100	0.25	0.5	10	1.0	15	240	4,000	수직 철근비
TWB2	100	0.25	1.0	100	0.25	1.0	10	1.0	15	240	4,000	
TWB3	100	0.25	1.5	100	0.25	1.5	10	1.0	15	240	4,000	
TWB4	100	0.25	2.0	100	0.25	2.0	10	1.0	15	240	4,000	
TWC1	200	0.25	0.2	100	0.25	0.2	10	2.0	15	240	4,000	$\frac{l_w}{l_f}$
TWC2	400	0.25	0.2	100	0.25	0.2	10	4.0	15	240	4,000	
TWC3	600	0.25	0.2	100	0.25	0.2	10	6.0	15	240	4,000	
TWC4	800	0.25	0.2	100	0.25	0.2	10	8.0	15	240	4,000	

l_w : 웨브 길이, l_f : 플랜지 길이, ρ_{wh} : 웨브 부분의 수평철근비, ρ_{wv} : 웨브 부분의 수직철근비

ρ_{fh} : 플랜지 부분의 수평철근비, ρ_{fv} : 플랜지 부분의 수직철근비, t_w : 벽체 두께, P : 압축력

T형 실험체의 각 변수별 내진성능을 파악하기 위해 먼저 웨브 길이 100 cm, 플랜지 길이 100 cm인 T형 단면을 가정하고 웨브와 플랜지에 배근된 수평철근비를 0.25%로 고정시킨 상태에서 압축력비, 수직철근비, 플랜지 길이에 대한 웨브 길이의 비를 변화시켰다. 표 1에 음영으로 표시한 부분은 각 변수를 세분화한 것을 나타낸 것이다. 표 1에 나타난 바와 같이 압축력비는 0%~25%까지 변화시켰으며, 수직철근비의 변화는 TWA3 실험체와 동일한 조건에서 웨브와 플랜지의 수직철근비를 0.5%~2.0%까지 변화시켰다. 그리고, 플랜지 길이에 대한 웨브 길이의 비는 2.0~8.0까지 변화시켰다.

3. 이론식에 의한 변형율 산정 및 단면해석

횡 철근의 구속범위는 Wallace에 의해 제안된 극한변형율 산정식⁴⁾을 근거로 하여 결정된다. Wallace에 의해 제안된 극한변형율 산정식은 식 (1)과 같다.

$$\epsilon_{cu} = \left[\frac{\left(\rho + \rho'' - \frac{\gamma}{\alpha} \rho' \right) \frac{\alpha f_y}{f_c} + \frac{P}{l_w t_w f_c}}{(0.85 \beta_1 + 2 \rho'' \frac{\alpha f_y}{f_c})} \right] \phi_u l_w \text{ ----- 식 (1)}$$

여기서, ρ' : 압축철근비(= $A'_s/t_w \ell_w$) ρ : 인장철근비(= $A_s/t_w \ell_w$)
 P : 압축력, t_w : 벽체두께, ℓ_w : 벽체길이, ϕ_u : 극한 곡률
 α : 철근의 초과강도 계수 (=1.5), γ : 철근의 변형율경화 계수 (=1.25)

식 (1)에 나타난 $\phi_u \ell_w$ 는 Wallace와 Mochale⁵⁾에 의해 식 (2)와 같이 제시되었으며, 부재각은 바닥 면적에 대한 벽량비 형태로 나타낼 수 있다. 식 (1)은 직사각형 벽체벽체 뿐만 아니라 T형 벽체와 L형 벽체와 같은 이형벽체에도 적용이 가능하며, 바벨형 벽체도 이와 유사한 표현으로 유도할 수 있다.

$$\phi_u \ell_w = 0.0025 \left[1 - \frac{1}{2} \frac{h_w}{\ell_w} \right] + 2 \frac{\delta_u}{h_w} \text{-----식 (2)}$$

$$\frac{\delta_u}{h_w} = 0.00023 \frac{h_w}{\ell_w} \sqrt{\frac{1}{p}}$$

여기서, h_w : 벽체높이, δ_u/h_w : 부재각, p : 바닥면적에 대한 벽량비

식 (1)을 이용하여 T형 실험체 단면에 발생하는 압축변형율을 산정하고, 압축변형율이 0.003을 초과하는 부분을 횡 철근의 구속범위로 결정하였다. 단면해석은 구속된 콘크리트의 역학적 특성을 고려할 수 있는 프로그램(UCFyber)¹⁾을 이용하였다. UCFyber는 횡철근에 의해 구속된 콘크리트의 모델을 고려할 수 있으며, 구속된 콘크리트의 변형률-응력 관계는 Mander와 Priestley⁶⁾가 제안한 모델을 이용하였다.

4. 해석결과 분석

벽체에 작용하는 하중단계에 따라 벽체의 한계상태는 달라지며, 동일한 하중 조건에서도 변수에 따라 벽체의 한계상태가 달라지므로 T형 벽체의 내진성능을 평가하기 위해서는 같은 한계상태에서 결과를 비교하여야 한다. M.J.N. Priestley⁷⁾는 크게 δ_y (항복상태, yield state), δ_s (사용 한계상태, serviceability limit state) 그리고 δ_u (극한 한계상태, ultimate limit state)로 구분하여 벽체의 한계 상태를 정의하였다. δ_s 는 압축변형율 ($\epsilon_c=0.003$)과 인장변형율($\epsilon_s=0.015$) 중 먼저 도달될 때의 상태를 말하며, δ_u 는 $\epsilon_c=0.018$ 과 $\epsilon_s=0.060$ 중 먼저 도달될 때의 상태를 말한다. 해석 결과 분석은 항복상태, 사용 한계상태, 극한 한계상태로 나누어 각각을 비교하였다. 이론식에 의해 결정된 횡 철근 구속면적과 해석결과 비교를 표 2에 나타내었다. 표 2에 나타난 바와 같이 이론식에 의한 극한 압축변형율은 각 변수(압축력비, 수직철근비, 플랜지 길이에 대한 벽체 길이의 비)들이 증가할수록 같이 증가하고 있음을 알 수 있다. 극한 압축변형율이 0.003을 초과하는 부분에 대한 횡 구속 범위는 압축력비를 0%~0.25% 증가시킬 때 횡 구속면적이 $0 \ell_w \sim 0.40 \ell_w$ 만큼 증가하였으며, 수직철근비는 $0.46 \ell_w \sim 0.69 \ell_w$ 만큼 그리고 수직철근비를 일정하게 유지시킨 상태에서 벽체길이비를 증가시켰을 경우에는 $0.20 \ell_w \sim 0.52 \ell_w$ 만큼 증가하고 있다.

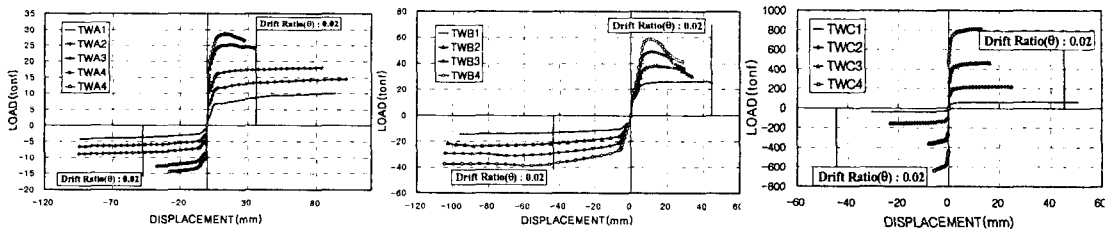
그림 2에 각 변수별 하중-변위 곡선을 비교하여 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 압축력비가 증가할수록 강도는 증가하고 있으나, 연성은 감소하는 것으로 나타났으며, 수직철근비를 증가시킬 경우에도 이와 비슷한 경향을 보여주고 있다. 특히, TWA1, TWA2, TWA3, TWC1 실험체를 제외한 모든 실험체는 웨브가 압축을 받는 경우, UBC-97에서 제안하고 있는 변형성능(2%)를 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 이러한

이유는 이론식에서 결정된 양만큼 횡 철근 구속이 이루어지지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 벽체의 각 한 계상태의 전단력을 항복상태에 대한 전단력비로 비교해 볼 때 변형성능을 만족하는 실험체는 항복하중에 대한 전단력비가 점증적으로 증가하고 있는 반면, 변형성능이 확보되지 않은 실험체는 항복하중을 지나 최대강도 후 내력이 급격히 저하되거나 또는 파괴되는 양상을 보이고 있다.

표 2 해석 결과

실험체명	Vy (tonf)	Vmax (tonf)	Δy (mm)	Δu (mm)	μ (Δu/Δy)	δy		δs		δu		εcu		
						Vy/Vy (X10 ⁻³)	θy (X10 ⁻³)	Vy/Vy (X10 ⁻⁴)	θs (X10 ⁻⁴)	Vy/Vy (X10 ⁻⁴)	θu (X10 ⁻⁴)	이론식 식 (1)	횡철근 구속범위	
TWA1	+	6.0	10.24	3.96	103	26.0	1	2.66	1.49	4.0	1.60	6.98	0.0029	0 l _w
	-	2.2	4.3	3.74	93.8	25.1	1	2.32	1.34	1.36	1.76	6.30		
TWA2	+	10.7	14.5	4.76	107	22.5	1	2.95	1.21	2.19	1.37	10.7	0.0036	0.10 l _w
	-	4.3	6.62	3.85	94.2	24.5	1	2.39	1.23	1.38	1.46	6.34		
TWA3	+	14.9	17.5	5.17	37.7	7.29	1	3.21	1.15	1.50	1.17	2.37	0.0043	0.20 l _w
	-	6.2	8.9	3.95	95	24.1	1	2.5	1.20	1.40	1.38	6.4		
TWA4	+	22.3	25.2	5.46	17.1	3.13	1	3.38	1.12	0.93	-	-	0.0057	0.35 l _w
	-	9.9	12.7	4.13	37.1	8.98	1	2.56	1.21	1.61	-	-		
TWA5	+	25.3	28.7	5.64	13	2.30	1	3.49	1.11	0.89	0.55	2.67	0.0064	0.40 l _w
	-	11.8	14.6	4.19	27.9	6.66	1	2.62	1.20	1.72	-	-		
TWB1	+	21.9	24.8	5.55	13.8	2.49	1	3.44	1.13	1.19	0.47	2.71	0.0073	0.46 l _w
	-	8.7	14.9	3.98	121	30.4	1	2.47	1.38	1.97	1.63	6.38		
TWB2	+	29.5	36.4	5.33	8.55	1.60	1	3.30	1.23	0.66	0.48	2.69	0.0106	0.60 l _w
	-	12.8	24.0	4.04	83.6	20.7	1	2.51	1.46	1.72	1.82	6.59		
TWB3	+	33.6	46.3	4.85	7.78	1.60	1	3.01	1.38	0.60	0.61	2.64	0.0129	0.66 l _w
	-	16.9	31.8	4.09	69	16.9	1	2.54	1.50	1.67	1.88	6.91		
TWB4	+	37.3	55.3	4.57	7.33	1.60	1	2.83	1.48	0.57	0.77	2.1	0.0145	0.69 l _w
	-	21	39.3	4.14	57	13.8	1	2.57	1.52	1.66	1.82	6.82		
TWC1	+	50.3	62.8	2.49	55.9	22.5	1	1.54	1.16	0.84	1.24	3.77	0.0043	0.20 l _w
	-	28.1	36.1	1.96	30.4	15.5	1	1.21	1.17	0.81	1.29	3.04		
TWC2	+	173.9	220.3	1.22	25.9	21.2	1	0.76	1.17	0.41	1.26	1.83	0.0057	0.35 l _w
	-	126.8	160.9	1.02	23.1	21.7	1	0.63	1.13	0.35	1.24	1.56		
TWC3	+	367.2	463.6	0.81	18	22.2	1	0.50	1.17	0.27	1.26	1.21	0.0070	0.45 l _w
	-	274.3	359.1	0.7	7.85	11.2	1	0.43	1.21	0.26	-	-		
TWC4	+	630.4	806.5	0.61	13.5	22.3	1	0.38	1.19	0.21	1.27	0.91	0.0084	0.52 l _w
	-	515.9	639.2	0.54	5.78	10.8	1	0.33	1.17	0.19	-	-		

V_y : yield strength, V_{max} : maximum strength, Δ_y : displacement corresponding to the V_y, μ : displacement ductility ratio, Δ_u : displacement corresponding to the V_{max}, θ : deformation capacity (Δ_u / h_w), δ_y : yield state, δ_s : serviceability limit state, δ_u : ultimate limit state, NA : neutral axis



(a) 압축력비

(b) 수직철근비

(c) 플랜지 길이에 대한 웨브 길이비

그림 2 변수별 하중-변위 곡선 비교

6. 결 론

이상의 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 이론식에 의한 극한 압축변형율을 산정하고 이를 근거로 하여 횡 철근 구속이 필요한 범위를 파악하였다. 단면해석 결과, 횡 구속 범위가 충분한 경우에는 UBC-97에 제안하고 있는 변형성능을 만족하고 횡 구속이 충분치 않은 경우에는 규준에 미치지 못하였다.
- (2) T형 벽체에 작용하는 압축력비를 증가시키면, 강도는 증가하나 연성 및 변형성능을 감소하는 것으로 나타났다. 수직철근비와 웹 길이에 대한 플랜지 길이비를 증가했을 경우에도 이와 유사한 경향을 보여 주었다.
- (3) TWA1, TWA2, TWA3 실험체와 같이 충분하게 횡 구속되었을 때, 압축력비의 증가는 내력을 향상시키고, 압축력비를 10%로 일정하게 유지한 상태에서 횡 구속이 충분하지 않은 경우, 수직철근비를 증가하는 최대강도 후 웹이 압축을 받을 때 급격한 내력저하를 보이고 있다.
- (4) 압축력비를 10%로 일정하게 하고, 수직철근비를 0.2%로 유지시킨 상태에서 횡 구속이 충분하지 않은 경우 웹길이의 증가는 실험체의 최대 강도를 크게 향상시키는 반면, 규준에 크게 못미치는 변형성능에서 최대내력 후 내력저하 없이 파괴되는 양상을 보여주었다.

감사의 글

본 연구는 한양대 초대형구조시스템연구센터와 대진대학교 연구비 지원하에 이루어진 연구결과로써 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. C. Chadwel, "UCFYBER : Cross Section Analysis Software for Structural Engineers," University of California, Berkeley, 1999
2. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete(318-99) and Commentary (318-99)", 1999
3. International Conference on Building Officials, Uniform Building Code, Whittier, California, 1999
4. John W. Wallace, "Seismic Design of RC Structural Walls, Part I : New Code Format", Journal of Structural Eng. Div., ASCE, Jan. 1995, pp75~87
5. John W. Wallace, "Seismic Design of RC Structural Walls, Part II : Application", Journal of Structural Eng. Div., ASCE, Jan. 1995, pp.88~101
6. J. B. Mander, M.J.N. Priestley, "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete", Journal of Structural Engineering, Vol. 114, No. 8, August, 1988, pp.1804~1826
7. M.J.N. Priestley and M.J.Kowalsky, "Aspects of Drift and Ductility Capacity of Rectangular Cantilever Structural Walls", Bulletin of New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Vol.31, No.6, 1998, pp.73~85
8. 하상수, 오영훈, 최창식, 이리형, "단부구속효과에 따른 RC T형 벽체의 구조성능에 관한 실험적 연구" 대한건축학회 논문집, 제18권, 제6호, 2002.6, pp. 39-45
9. 하상수, 오영훈, 최창식, 이리형, "2방향 반복하중을 받는 L형 RC 벽체의 횡보강상세에 따른 내진성능의 평가" 대한건축학회 논문집, 제18권, 제5호, 2002.5, pp. 11-18