

단부구속 효과에 따른 철근콘크리트 T형 벽체의 구조성능 평가에 관한 실험적 연구

Experimental Study of Structural Capacity Evaluation of RC T-shape Walls with the Confinement Effect

하 상 수^{*} 윤 현 도^{**} 최 창 식^{***} 오 영 훈^{****} 이 원 호^{*****} 이 리 형^{*****}
Ha, Sang-Su Yun, Hyun-Do Choi, Chang-Sik Oh, Young-Hun Yi, Waon-Ho Lee, Li-Hyung

ABSTRACT

The structural performance of a shear wall subjected to lateral loads is influenced by many factors, such as sectional shape, aspect ratio, vertical and horizontal reinforcement, lateral confinement and axial compression, etc. This experimental research is focusing to investigate the structural performance of T-shaped walls with different confining reinforcement.

Experimental results show that all specimens finally failed by the crushing of the concrete in the compression zone. Although the location and content of the lateral confinement is different, the results are very similar during the negative loading direction where the flange is compressed. However, when flange is subjected to tension, the location and content of the lateral confinement results in a large difference in the structural performance of T-shaped walls. Therefore, selection of location and content of the lateral confinement would be important aspect in the design of the nonsymmetric structural walls.

1. 서론

현재 국내에서는 벽식구조가 공동주택의 구조형식으로 널리 사용되고 있으며, 건축물이 고층화됨에 따라 벽식구조의 내진성능 확보가 중요한 과제로 떠오르고 있다. 고층 벽식구조의 주요한 횡력저항 요소인 전단벽은 중력 및 지진이나 바람과 같은 횡력에 의하여 큰 하중이 전달되므로 구조적 안전성을 확보하기 위하여 전단벽의 거동이 정확히 검토되고 설계에 반영되어야 한다. 또한, 전단벽은 고층 건축물이 전체적으로 안전하게 거동할 수 있도록 작은 횡하중시 탄성적인 거동을 함으로써 비구조체의 손상을 완전히 보호할 수 있어야 하고, 큰 횡하중시 탄성범위를 넘어 상당한 비탄성 변형 후에도 전체 건축물의 파괴 없이 효율적으로 저항할 수 있도록 설계되어야 한다. 그러나 강진작용시 피해가 전단벽 하부에 집중되어 국부적인 파괴가 발생할 수 있으며, 이런 국부적인 파괴가 건축물 전체의 안전성에 치명적으로 작용할 수 있다. 따라서, 전단벽 하부의 소성힌지 발생영역의 연성도 확보는 매우 중요하며, 연성능력의 확보는 적절한 횡구속 설계에 의하여 이루어진다.

* 정회원, 한양대학교 건축공학과 박사과정
** 정회원, 충남대학교 건축공학과 교수, 공학박사
*** 정회원, 대전대학교 건축공학과 교수, 공학박사
**** 정회원, 한양대학교 STRESS 연구조교수, 공학박사
***** 정회원, 광주대학교 건축공학부 교수, 공학박사
***** 정회원, 한양대학교 건축공학과 교수, 공학박사

본 연구는 과학기술부·한국과학재단 지정 한양대학교 초대형 구조시스템 연구센터의 연구비 지원과 (주) SK 건설의 실험체 제작지원에 의한 연구결과물의 일부로서 이에 감사 드립니다.

국내의 경우, 벽체의 내진설계를 위한 단부 횡보강 영역에 대한 기준이 마련되어 있지 않지만 ACI 318-99¹⁾의 경우에는 압축대의 절반($c/2$)을 횡보강 하도록 제안하고 있다. 그리고 Wallace²⁾는 최대 압축변형도 (ϵ_{cmax})가 0.004에 도달될 때까지 벽체의 연성도가 유지된다고 가정하여 0.004를 초과하는 부분을 횡보강 해야 한다고 제안하였다. 또한, 벽체 횡보강근의 수직 간격이나 범위에 대해서는 기둥의 횡보강 설계조항에 근거하여 설계되고 있으므로 벽체의 거동 특성을 반영한 횡보강 설계와 연성도 확보가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 T형 벽체의 강도 및 연성도 확보를 위한 횡보강근의 적절한 범위와 수직간격, 그리고 구속면적을 구조실험을 통해 평가하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험체 계획

실험체 계획을 위한 부재의 모델링은 50층 규모의 중심코아(철근콘크리트 전단벽)와 외부 철골조로 이루어진 복합구조에서 철근콘크리트 T형 전단벽을 선정하여 실제 부재 크기를 1/4로 축소하여 제작하였다. 실험체는 총 4개로서 ACI 기준에 의해 단부를 구속한 TC 실험체와 Wallace가 제안한 복부 단부의 구속영역을 적용한 TC-aw 실험체, 복부 양단부의 횡보강근 수직간격을 변화시킨 TC-b1 실험체와 TC-b2 실험체를 계획하였다. 본 연구는 단부횡구속 효과에 따른 T형 전단벽의 구조성능을 평가하기 위한 것으로서 이형벽체의 플랜지 부분과 복부 부분의 횡보강근의 구속면적과 수직간격을 주요 변수로 설정하였다. 이러한 변수들의 효과에 의해 T형 전단벽에서 파괴가 예상되는 복부 하부의 연성능력 확보 여부를 조사하였으며, 전단벽의 전체적인 구조성능의 변화를 파악하고자 하였다. 각 실험체의 형상 및 배근상황을 그림 1에 나타내었으며, 실험체의 변수별 상관도는 그림 2에서 보여주고 있다.

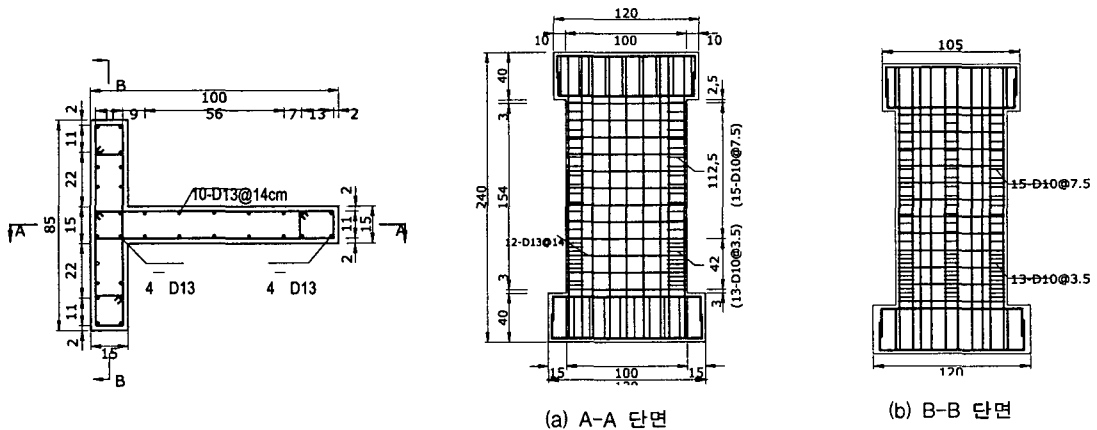


그림 1. 실험체 형상 및 TC 실험체의 배근상황 (단위: cm)

(1) 횡구속 면적

T형 벽체는 복부와 플랜지로 구성되어 있기 때문에 정·부 가력방향에 따라 상이한 이력 거동을 보이게 된다. 즉 플랜지가 인장을 받고 복부에 압축이 작용할 때 상대적으로 작은 압축면적으로 인하여 실험체가 복부의 하부압축대에서 콘크리트 압괴에 의해 이력거동이 지배될 수 있다. 따라서 콘크리트의 압축영역을 구속하여 주는 면적에 따라 부재의 내력이 증진될 수 있다. 복부 단부의 구속면적은 현행설계 방식에 따라 벽체길이의 15%($0.15l_w$)에 해당하는 부분을 구속한 실험체(TC)와 콘크리트 압

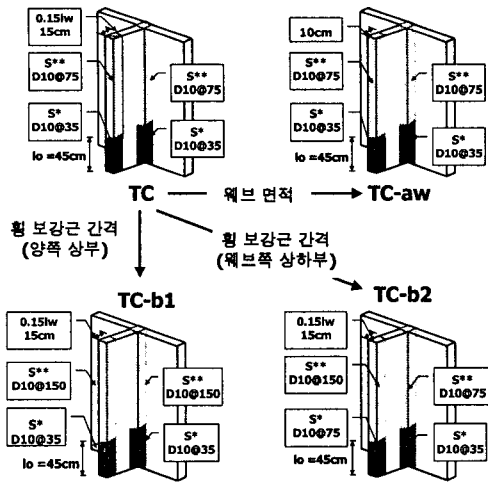


그림 2. 변수별 상관도

축 변형도가 0.004를 초과하는 범위에 대해 구속해야 한다는 Wallace의 제안을 적용한 실험체 (TC-aw)를 비교 분석하여 T형 전단벽 복부에서의 콘크리트 구속면적에 따른 전단벽의 최대내력과 변형능력 등을 검토하였다.

(2) 횡보강근 구속범위 및 수직간격

UBC 97 기준에 제시되어 있는 Zone 4 지역에 대한 단부횡보강 상세를 기준으로 해서 그림 2의 변수별 상관도에 나타난 바와 같이 횡보강근의 수직간격을 변화시킨 TC-b1 실험체와 TC-b2 실험체를 비교하여 적절한 횡구속 범위에 대해서 검토하고자 한다.

2.2 재료 시험

실험체 제작에 사용된 철근과 콘크리트의 기계적 특성을 표 1과 표 2에 나타내었다. 철근의 탄성계수(E_s)

는 응력-변형도 곡선에서 탄성한계점과 원점에 대한 할선강성으로 산정하였다. 사용된 콘크리트의 경우, 굵은 골재의 최대치수 13mm, 슬럼프값 15cm인 설계기준강도 350kgf/cm^2 로 하였으며, 콘크리트의 탄성계수(E_c)는 응력-변형도 곡선에서 최대응력의 1/4에 해당하는 응력에 대한 할선강성으로 산정하였다.

표 1. 철근 인장강도 시험결과

호칭 규격	항복강도 (kgf/cm^2)	항복변형도 ($\times 10^{-6}$)	탄성계수 (tonf/cm^2)	인장강도 (kgf/cm^2)	연신률 (%)
D10	3650	2252	1.831×10^6	4820	20.3
D13	3620	1924	1.825×10^6	4920	17.8

표 2. 콘크리트 압축강도 시험결과

설계기준 강도 (kgf/cm^2)	압축강도 (kgf/cm^2)			탄성계수 (kgf/cm^2)	슬럼프 (cm)
	3일	7일	28일		
350	212	266	384	2.94×10^5	15.5

2.3

실험체 제작 및 실험방법

실험체 제작은 철근배근, 콘크리트 타설, 실험체 운반, 실험체 설치 등을 고려하여 세운 상태로 하여 목재거푸집 형틀을 만든 다음 치수에 맞게 철근을 배근한 후에 다시 거푸집 마무리하였다. 콘크리트 타설시 벽체면에서의 배블림이나 하부 기초판에서의 콘크리트 자중에 의해 콘크리트가 밖으로 솟구치지 않도록 하였다. 실험체 설치상황은 그림 3에 나타난 바와 같이 실험체는 하부기초판이 완전고정 상태가 되도록 $\phi 70$ 인 강봉으로 반력슬래브에 설치하였으며, 횡력이 가해지는 동안 일정 축하중 ($0.06A_g f_{ck}$)을 가력하기 위해 상부가력판에 설치된 스트롱 프레임 양 끝에 100 tonf actuator를 이용하였다. 횡력은 반력벽에 설치된 200tonf actuator를 이용하여 변위제어 방식으로 가력하였다. 횡력의 가력방식은 실험체의 횡변위를 가력점의 높이로 나누어 준 부재각(1/600, 1/400, 1/300, 1/200, 1/150, 1/100, 1/75, 1/50, 1/35, 1/25)으로 제어하였으며, 각 단계에 적용된 변위이력은 강도와 강성의 저하에 대한 자료를 얻을 수 있도록 각 사이클별 3회씩 점증가력하였다. 실험이 진행되는 동안 발생하는 균열은 가력방향의 사이클에 따라 구분하여 표시하였고, 사이클 단계마다 사진으로 기록하였다. 또한, 실험체 외부에 설치한 변위계(LVDT)와 내부철근에 부착한 변형계이지(Wire Strain Gauge)로부터 얻은 변형과 actuator에 부착된 로드셀로부터 강도 및 강성, 변위연성비, 최대부재각, 에너지 소산면적 등을 분석하여 T형 전단벽의 구조성능을 평가하였다.

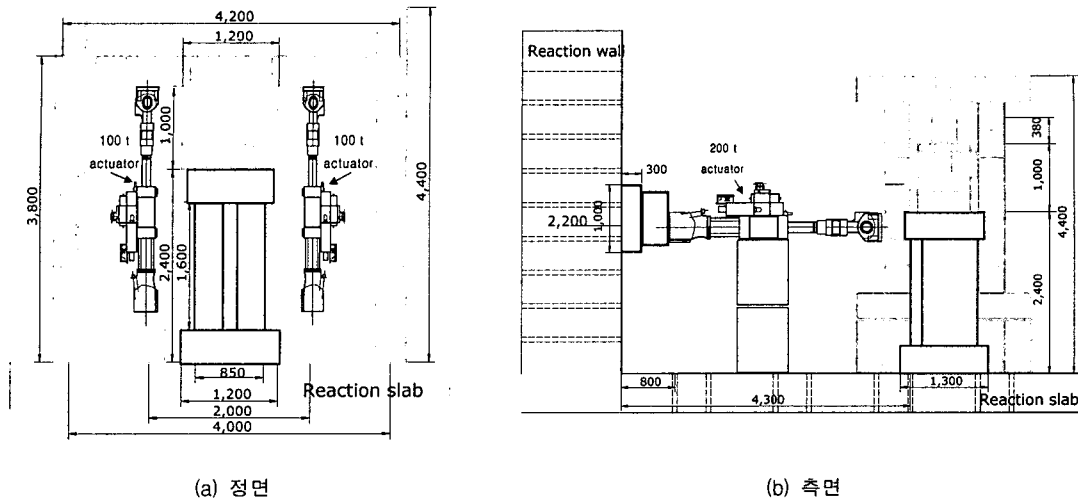


그림 3. 실험체 설치상황

3. 실험 결과

3.1 실험체 균열 및 파괴상황

실험체의 초기 휨균열은 부재각이 1/400에 도달되었을 때 복부의 하단부분(하부 기초판에서 15cm~20cm 높이)에서 발생하였으며, 플랜지 부분에서의 초기 균열은 부재각 1/300에서 발생되었다. 또한, 부재각이 증가함에 따라 휨균열은 휨-전단균열로 진행되었으며, 실험체 높이방향으로 새로운 휨균열이 추가적으로 발생하였다. 이런 현상은 복부하단부에서 콘크리트 압괴가 발생하기 전까지 계속 나타났으며, 복부와 플랜지 끝부분에서 발생한 균열이 진전되면서 복부 중앙부분에 이들 균열이 서로 교차하여 나타났다. 콘크리트 압괴는 TC 실험체인 경우 부재각 1/50에서 발생되었으며, 복부구속 면적을 작게 한 TC-aw의 실험체는 부재각 1/75에서 발생되었다. 그리고 복부횡보강근의 수직간격을 넓힌 TC-b1 실험체와 TC-b2 실험체는 부재각 1/100에서 발생되었다. 플랜지에서 콘크리트 압괴 및 수직 균열은 실험 종료시까지 발생되지 않았다. 모든 실험체의 최종파괴 상황은 복부하단부에서의 콘크리트 압괴로 인해 최종파괴되었다.

3.2 하중-변위 곡선

실험체에 적용된 하중과 변위 관계를 그림 4에 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 TC 실험체(그림 4(a))는 현행 기준에 의해 철근을 배근한 것으로, 실험체중 가장 큰 최대내력(77.4 tonf : 부재각 1/35)을 보였으며, Wallace가 제안한 복부 단부구속면적(10cm)을 가지는 TC-aw 실험체(그림 4(b))의 경우, 최대내력이 74.8 tonf(부재각 1/35)으로 나타났다. 반면, 복부와 플랜지 부분의 횡보강근의 수직간격을 변화시킨 TC-b1 실험체(그림 4(c))와 TC-b2 실험체(그림 4(d))는 최대내력이 각각 60.4 tonf, 54.8 tonf 으로 나타나 TC 실험체보다 각각 22.0%, 29.2% 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 부가력시에 각 실험체의 최대내력(TC 실험체 : 51.8 tonf, TC-aw 실험체 : 46.4 tonf, TC-b1 실험체 : 50.9 tonf, TC-b2 실험체 : 46.8 tonf)은 거의 비슷한 값을 보여주고 있다.

T형 벽체의 전체적인 거동은 플랜지보다는 복부에 있는 콘크리트와 철근에 의해 결정되며, 특히 정가력시 항복 이후의 거동은 복부하단 부분의 콘크리트 압축영역이 최대내력 및 연성에 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

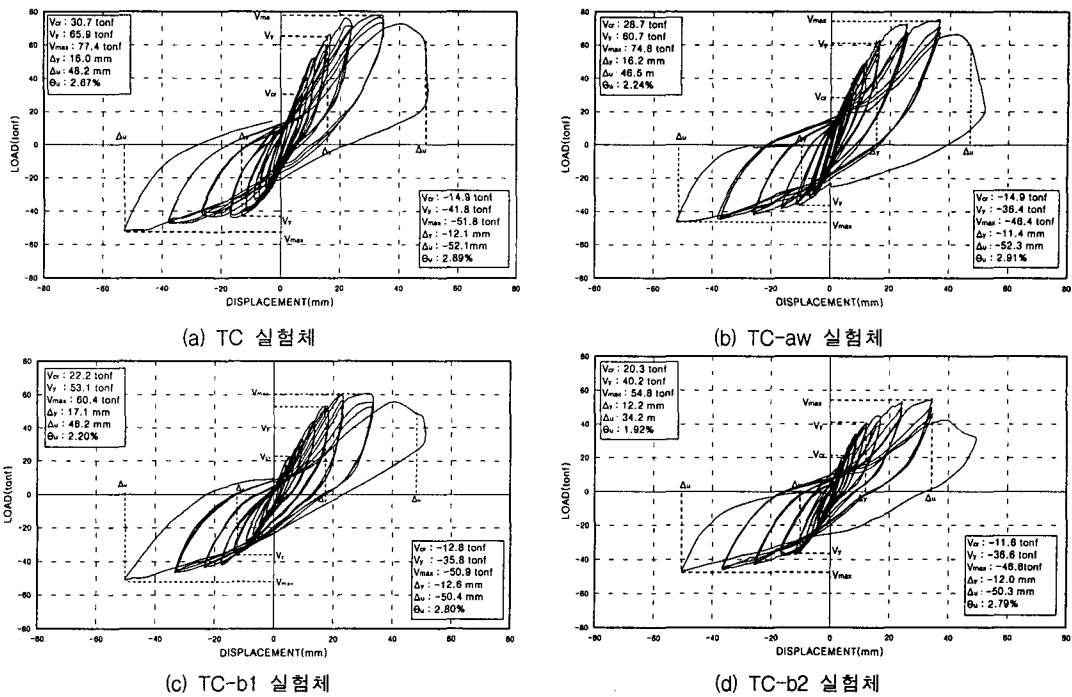


그림 4. 하중-변위 곡선

3.3 강도, 강성 및 변위연성비의 비교

각 실험체의 강도, 강성 그리고 변위연성비 등을 비교하기 위해 반복 이력 곡선을 단조화하여 그림 5에 나타내었으며, 실험결과를 표 3에 나타내었다. 변위연성비는 최대변위에 대한 항복변위 (Δ_u / Δ_y)의 비로 정의하였다. 최대변위는 최대강도 (V_{max})의 80% 이상을 보유하는 변위이며, 항복변위 (Δ_y)는 항복강도 (V_y)에 대응하는 변위이다. 그림 5에서 보는 바와 같이 정가력에서는 변수에 따라 차이가 있음을 보여주고 있는 반면, 부가력시 각 실험체의 내력과 변형능의 특성은 거의 유사한 양상을 보여주고 있다. 이러한 양상은 플랜지 부분의 콘크리트와 수직철근의 기여에 의한 것으로

표 3. 실험결과

실험체명	실험값(tonf)			이론값(tonf)		(1)/(2)	(1)/(3)	Δ_y (cm)	Δ_u (cm)	μ	θ_u (%)	
	V_{cr}	V_y	$V_{max}^{(1)}$	ACI 식 ⁽²⁾	AIJ 식 ⁽³⁾							
TC	(+)	30.7	65.9	77.4	42.45	69.60	1.83	1.11	16.0	48.2	3.01	2.67
	(-)	14.9	41.8	51.8	42.45	34.77	1.23	1.49	12.1	52.1	4.07	2.89
TC-aw	(+)	28.7	60.7	74.8	42.45	69.60	1.77	1.07	16.2	46.5	2.87	2.24
	(-)	14.9	36.4	46.4	42.45	34.77	1.10	1.33	11.4	52.3	4.38	2.91
TC-b1	(+)	22.2	53.1	60.4	42.45	69.60	1.42	0.87	17.1	48.2	2.82	2.20
	(-)	12.8	35.8	50.9	42.45	34.77	1.20	1.46	12.6	50.4	3.67	2.80
TC-b2	(+)	20.34	40.2	54.8	42.45	69.60	1.30	0.79	12.2	34.2	2.80	1.92
	(-)	11.6	37.4	46.8	42.45	34.77	1.11	1.35	12.0	50.3	3.95	2.79

V_{cr} : 균열하중, V_y : 항복하중, V_{max} : 최대하중, Δ_y : 항복변위, Δ_u : 최대변위
 μ : 변위연성비, θ_u : 최대 부재각

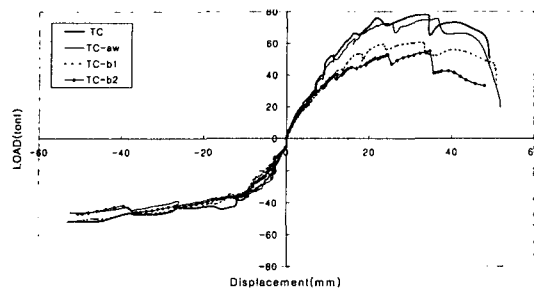


그림 5. 단조화 곡선 비교

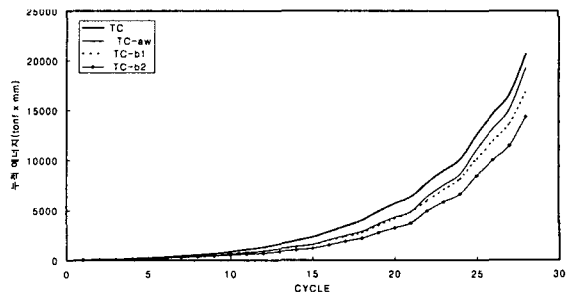


그림 6. 누적에너지 비교

서 플랜지 부분이 압축을 받을 경우는 충분한 콘크리트의 압축영역을 확보할 수 있지만, 인장을 받는 플랜지는 플랜지 부분의 수직철근들이 휨강도 상승에 기여하면서 복부의 압축부 콘크리트의 변형능력에 의해 최대내력과 변형성능이 좌우된다는 것을 확인할 수 있었다. 에너지소산능력은 하중-변위 곡선에 의해 둘러싸인 면적으로 평가되며, 가력 사이클단계별로 평가한 에너지를 누가한 누적에너지를 그림 6에 나타내었다. 그림 6에 나타난 바와 같이 횡보강근의 구속면적이 넓을수록, 횡구속 철근의 수직간격이 좁을수록 에너지소산능력이 우수한 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구는 T형 전단벽에서 복부 및 복부와 플랜지의 교차부분의 콘크리트를 구속하기 위한 횡보강근의 적절한 수직간격을 평가하고자 하였으며, 실험연구로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 초기 휨균열은 부재각이 1/400에 도달되었을 때 복부의 하단부분에서 발생하였으며, 전단균열은 휨균열이 복부 중앙으로 그리고 플랜지에서 발생된 균열이 복부로 진행되면서 발생하였다. 모든 실험체의 최종파괴는 압축변형을 받는 복부하단부에서 철근 좌굴과 콘크리트 압괴로 최종파괴 되었다.
- (2) 압축구속면적과 횡보강근의 간격에 따라 최대내력, 변형성능, 에너지소산면적 등이 다르게 나타났으며, 특히 복부가 압축을 받는 정가력시에 그 영향이 큰 것으로 나타났다.
- (3) 플랜지가 인장을 받는 정가력시 최대내력은 압축변형을 받게 되는 복부 부분 압축대 콘크리트의 최대 변형능력에 의해 변화하는 것으로 나타났다.
- (4) 플랜지가 압축을 받는 부가력시에는 플랜지의 유효단면적이 복부에 비해 상대적으로 크기 때문에 플랜지 부분의 압축면적과 횡보강근의 역할은 복부에 비해 영향이 적을 것으로 판단되며, 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

5. 감사의 글

본 연구는 과학기술부·한국과학재단 지정 한양대학교 초대형 구조시스템 연구센터의 연구비 지원과 (주) SK 건설의 실험체 제작지원에 의한 연구결과의 일부로서 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete(318-99) and Commentary(318-99), ACI, 1999.
2. John W. Wallace (1996), "Evaluation of UBC-94 Provisions for Seismic Design of RC Structural Walls" Earthquake Spectra, EERI, Volume 12, No. 2, May 1996.
3. T. Paulay and M.J.N. Priestley, "Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings," John Wiley & Sons, Inc, 1992.
4. 대한주택공사 주택연구소, "이형벽체의 구조성능 평가실험에 의한 배근상세개발," 2001. 2.