

형상비가 다른 T형벽체의 유효폭 산정을 위한 비선형 FEM 해석

A Study on Nonlinear FEM Analysis for the Effective Widths of T-shaped Structural Walls with Different Aspect Ratios

조남선* 하상수** 오영훈*** 이리형****
Cho, Nam-Sun Ha, Sang su Oh, Young-hun Lee Li-Hyung

ABSTRACT

In domestic, irregular walls such as T, L, H and Box shapes are considered as rectangular wall in the design of bearing wall apartment building. The strengths of walls, therefore, can be underestimated in case of using the current design process. Irregular walls are connected to each other as rigid joint so that part of the load can be resisted by the wall perpendicular to the load direction. This resistance can be caused by the effective width of perpendicular wall. This additional resistance by the perpendicular wall increases the strength of structural walls.

The objective of this study is to evaluate the effective widths of flanged walls with different aspect ratios by using FEM analyses. the results from finite element method are compared with effective flange widths of some code provisions.

키워드 : T형 벽체, 유한요소해석, 유효폭, 형상비

Keyword : T-shaped structural wall, FEM analysis, effective width, aspect ratio

1. 서 론

건축물을 구성하는 구조요소인 전단벽은 건축물이 고층화됨에 따라 지진력, 풍력과 같은 횡하중에 효과적으로 저항하기 때문에 주요 횡력저항요소로서 사용되고 있다. 전단벽과 골조가 함께 사용되면 전단벽은 횡하중에 저항할 뿐만 아니라 골조의 가새역할을 하기 때문에 그 자체의 구조역학적 장점과 더불어 수직 연결구조로서 활용할 수 있는 공간적 장점을 갖추고 있으므로 그 역할과 기능이 증대하다고 볼 수 있다. 이와 같은 전단벽구조의 장점을 활용한 대표적인 구조방식으로는 골조-전단벽구조와 국내의 아파트 건물에 많이 채택되고 있는 벽식구조를 들 수 있다. 벽식구조 아파트 건물의 주요 벽체들은 연직하중과 수평하중을 모두 부담하는 내력벽과 전단벽의 역할을 동시에 수행하도록 하고 있는데 현행 설계방식은 장방형 단면에 대한 설계식을 사용하고 있다. 그러나 대부분의 벽체가 장방형인 경우보다는 T형, H형, L형, BOX형 등 다양한 이형단면을 가지게 되며 이렇게 이형단면을 가지는 벽체는 단부보강근 등으로 인하여 각 벽체의 접합부는 과다하게 배근되고 있는 실정이다. 실제로 이러한 이형벽체의 접합부는 강접합으로 연결되어 있기 때문에 단변방향(이하 '복부'라 한다)의 횡력에 대해 장변방향(이하 '플랜지'라 한다)의 벽체가 어느정도 유효한 거동을 보일 것이라 예상된다. 이에 본 연구에서는 이형벽체의 구조성능 평가 실험을 토대로 높이와 복

* 한양대학교 건축공학과 석사과정

*** 한양대학교 연구조교수(STRESS)

** 한양대학교 건축공학과 박사과정

****한양대학교 건축공학과 교수

부길이를 다르게 하여 형상비가 다른 T형 벽체의 비선형유한요소해석을 수행하여 그 결과로부터 플랜지의 유효폭을 평가하였다. 또한 평가된 유효폭 결과는 기존 설계기준과 Wallace에 의해 제안된 유효폭과 비교·분석하였다.

2. 유한요소해석에 사용된 요소

본 해석에서는 전단벽의 항복이후 비선형적인 거동을 평가하기 위하여 기하 및 재료 비선형을 고려한 3차원 탄소성 해석(Elasto-plastic analysis)이 가능한 범용 유한요소 해석프로그램인 ANSYS를 사용하였다. 탄소성 해석을 위해서 해석용 모델에 사용된 콘크리트는 3차원 솔리드 구조체의 solid65를 사용하였고, 철근은 spar요소인 link8 요소를 사용하였다. 이러한 요소들의 구성모델요소의 개요는 다음과 같다

2.1 콘크리트 요소

콘크리트는 3차원 입체요소 solid65를 사용하여 모델링 하였으며, 이 요소는 그림 1과 같이 8개의 절점으로 구성되며 각 절점에 x, y, z방향의 자유도를 3개씩 가진다. 콘크리트에 대해서는 요소내의 적분점에서 균열 및 압괴강도를 부여하고 소성 및 크리이프 변형등을 고려할 수 있다. 콘크리트의 재료모델은 모든 방향에 대하여 재료적인 성질이 동일한 등방성(Isotropic)요소를 사용하였다. 콘크리트 재료에 적용된 물성치는 표 1에 나타내었다.

표 1. 콘크리트 재료특성

재료 물성치	
탄성계수	$2 \times 10^9 (\text{kg/cm}^2)$
인장강도	$30 (\text{kg/cm}^2)$
압괴강도	$300 (\text{kg/cm}^2)$
포아송비	0.167

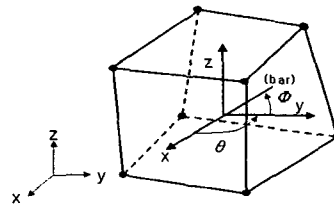


그림 1. 콘크리트요소와 요소내 철근방향

2.2 철근요소

철근은 spar요소인 link8을 사용하여 모델링하였다. 이 요소는 1축방향의 압축과 인장에 대한 거동을 표현하기 위한 것으로서 각 절점에서는 3방향의 자유도를 갖고 있다. 또한 그림 1과 같이 콘크리트 요소에서 철근의 방향을 지정해주게 된다. 철근의 재료 비선형성을 고려하기 위한 BKin(Bilinear Kinematic Hardening)모델의 응력-변형도 곡선과 재료물성치는 각각 그림 2와 표 2에 나타나 있다.

표 2. 철근 재료특성

재료 물성치	
탄성계수	$2 \times 10^9 (\text{kg/cm}^2)$
항복강도(kgf/cm ²)	4000
변형경화율	0.01
포아송비	0.3

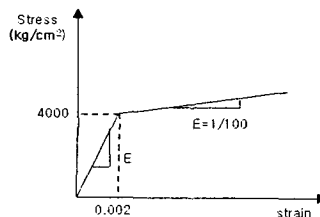


그림 2. 철근요소모델

3. 실험체의 유한요소해석

3.1 해석된 실험체 상황

본 연구의 실험은 한양대학교 초대형 구조 실험동에서 행해졌으며, 실험체 설치상황은 그림 3과 같다. 그림에서 보는 것과 같이 실험체는 일정축력과 반복 횡하중을 받도록 설치하였으며, 이를 위하여 실험체의 기초부분을 반력슬래브(Reaction Slab)에 볼트로 고정시켰다. 또한, 실험체 상부는 축력 및 횡력을 가하기 위한 가력보(Loading Beam)를 설치하였으며, 실험체 상부에 설치된 가력보의 양쪽에 100tf 가력기(Actuator)를 이용하여 실험이 종료될 때까지 일정축력($0.1f_{ck}A_g$)이 작용하도록 하였다. 횡력은 실험체의 상부에 수평방향으로 설치된 50tf 가력기를 사용하여 계획된 변위하중에 따라 최초 부재각 1/1000에서 부재각 1/50까지 각각 3사이클씩 반복하여 가력하였다.

3.2 실험체의 모델링

본 연구의 해석모델링은 실험체의 형상 및 배근 그리고 하중단계에 따른 가력방법을 실험과 동일하게 적용하였으며, 반력슬래브를 완전고정으로 하였다. 변위추정 역시 실험과 동일한 위치의 절점을 취하였으며, 해석은 비선형영역까지 수행하여 이 과정에서의 변위, 강도, 균열양상을 평가하였다. 비선형해석에서는 콘크리트와 철근의 부착파괴는 일어나지 않는 것으로 가정하였다. 가력보는 해석모델링에 적합한 형태로 재구현하여 축력 및 횡력에 의한 영향이 나타나지 않도록 충분한 강성체로 모델링하였다.

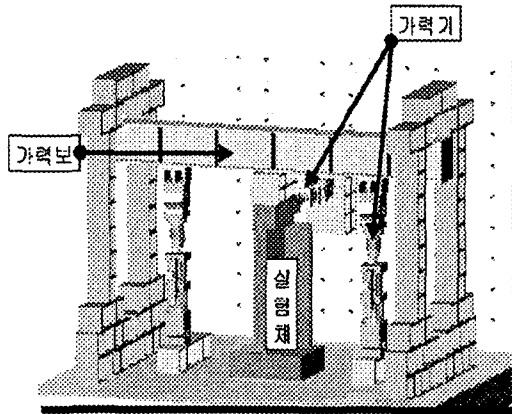


그림 3. 실험설치상황

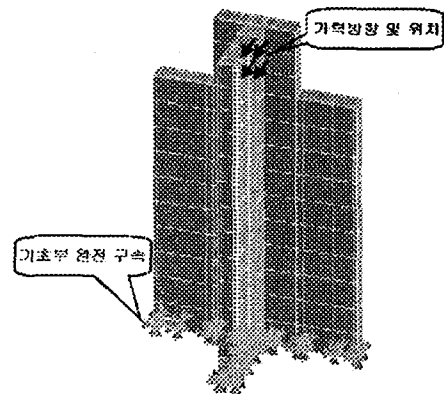


그림 4. 해석모델링

3.3 해석모델의 변수

본 해석에 사용된 실험체는 실험결과와 비교하기 위한 T, T-W75, T-H200 등 3개와 좀 더 정확한 분석을 위해 모델링된 I, T-I, T-W100, T-H300 등 4개 모두 7개의 실험체를 해석하였다. 여기서 형태를 변수로 한 I형 실험체는 현행 설계시 가정단면으로서 이형벽체와 비교하기 위한 실험체이며, T-I 실험체는 T형 실험체와 형상이 같은 것으로서 복부에 대한 플랜지의 정확한 영향을 평가하기 위해 I형 실험체와 같이 복부에만 축력을 가한 실험체이다. 그 외의 실험체는 높이를 변수로 한 휨거동 실험체 T-H200, T-H300와 복부길이를 변수로 한 전단거동 실험체 T-W75, T-W100으로 나누어 해석하였다. 각 실험체별 변수의 상관도는 그림 5와 같으며 실험체일람은 표 3에 나타내었다.

표 3. 실험체 일람표

No.	실험체명	단면형태	L _w (m)	h (m)	형상비 (h/L _w)	f _{ck} (kgf/cm ²)	축력비 (f _{ck} · A _g)	축력 면적	주요변수
1	I	I자형	0.5	1.5	3	300	0.1	복부(9cm)	-
2	T-I	T자형	0.5	1.5	3			복부(9cm)	I실험체와 동일한 압축면적
3	T	"	0.5	1.5	3			복부+플랜지 (40cm)	기준실험체
4	T-W75	"	0.75	1.5	2				복부길이변화 (전단거동실험체)
5	T-W100	"	1	1.5	1.5				높이변화 (휨거동실험체)
6	T-H200	"	0.5	2	4				
7	T-H300	"	0.5	3	6				

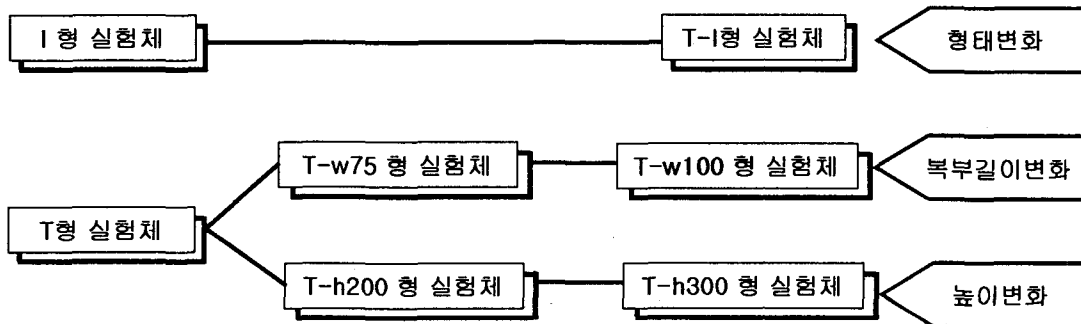


그림 5. 변수별 상관도

4. 해석결과

4.1 하중변위관계의 비교

비선형 유한요소해석은 실제로 실험된 T, T-H200, T-W75 실험체의 실험결과와 비교하여 해석결과의 적합성을 검증한 후 실험되지 않은 실험체들을 해석하였다. 해석으로 얻어진 하중-변위곡선과 실험 결과를 비교하여 그림 6과 표 4에 나타내었으며, 실험에서 구한 실험체의 항복강도는 Offset-method를 적용하여 구한 것이며, 해석에서 구한 항복강도는 탄성해석 종료시점에서 평가한 것이다.

표 4. 실험체의 항복강도와 항복변위

실험체	항복강도(tonf)				항복변위(mm)				실험치/해석치 (항복강도)		실험치/해석치 (항복변위)	
	실험치		해석치		실험치		해석치		+	-	+	-
가력방향	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
T	7.41	4.55	7.5	4.33	10.14	7.6	9.67	11.58	0.99	1.05	1.04	0.66
T-W75	10.61	10.67	10	8.33	8.24	7.4	2.69	5.28	1.06	1.28	3.06	1.4
T-H200	5.84	2.76	5.5	3	13.3	8.4	12.6	13.06	1.06	0.92	1.05	0.64

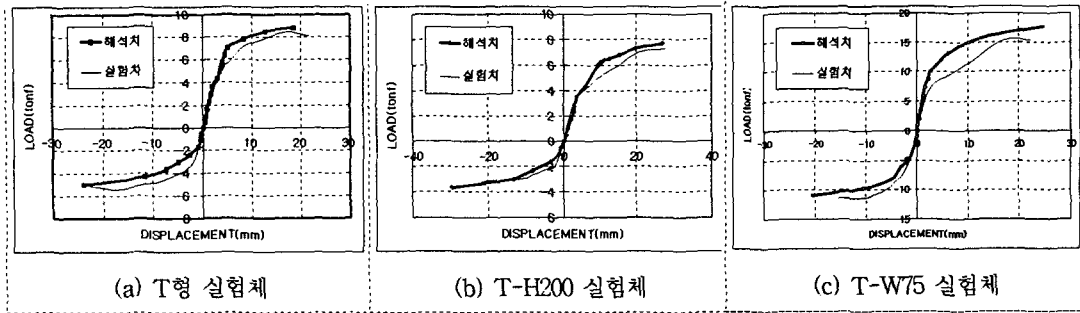


그림 6. 실험체의 하중-변위곡선

그림 6에 의하면 비선형 유한요소의 해석결과는 실험결과의 강성, 항복강도와 항복변위 등을 대체로 양호하게 평가하고 있다고 판단된다. 다만 T-W75실험체는 강성과 변위에서 실험결과와 비교적 많은 차이를 보여주고 있는데, 이는 실험체의 미끄러짐, 부착파괴 등과 같은 특성에 기인한다고 사료된다.

4.2 응력도 및 균열도

그림 7은 초기균열 발생시 및 항복시의 응력도와 균열양상을 보여준다. 초기균열 발생시 최대응력은 복부를 중심으로 전체 플랜지 폭의 45%정도의 범위에 분포하고 있으며, 항복시 균열양상은 기초부로부터 43cm (0.28h)부분까지 플랜지 전체에 걸쳐 균열이 발생하였다. 이처럼 초기균열시부터 항복까지 플랜지부분의 응력이 전이됨에 따라 정확한 유효폭을 산정하기 위해서는 항복시점에서의 응력상황을 고려하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

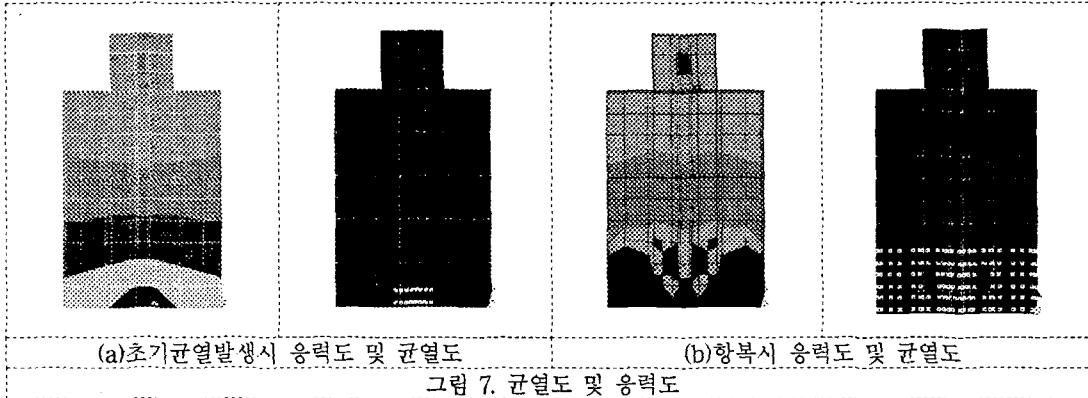


그림 7. 균열도 및 응력도

4.3 반력 및 변형도

그림 8은 플랜지 외측 밀면에 위치한 인장철근 절점들의 반력과 그 위치에서 발생하는 변형도를 도식화한 것이다. 모든 실험체에서의 플랜지 내 반력 분포는 복부를 중심으로 양쪽의 플랜지로 완만한 곡선을 나타내며 T-H300실험체와 T-W100실험체의 응력 변동폭이 가장 작은 것으로 나타나 플랜지 전면이 유효하게 작용할 것으로 예상된다. 또한 변형도에서는 휨거동실험체와 전단거동실험체의 변형특성이 두드러지게 나타났

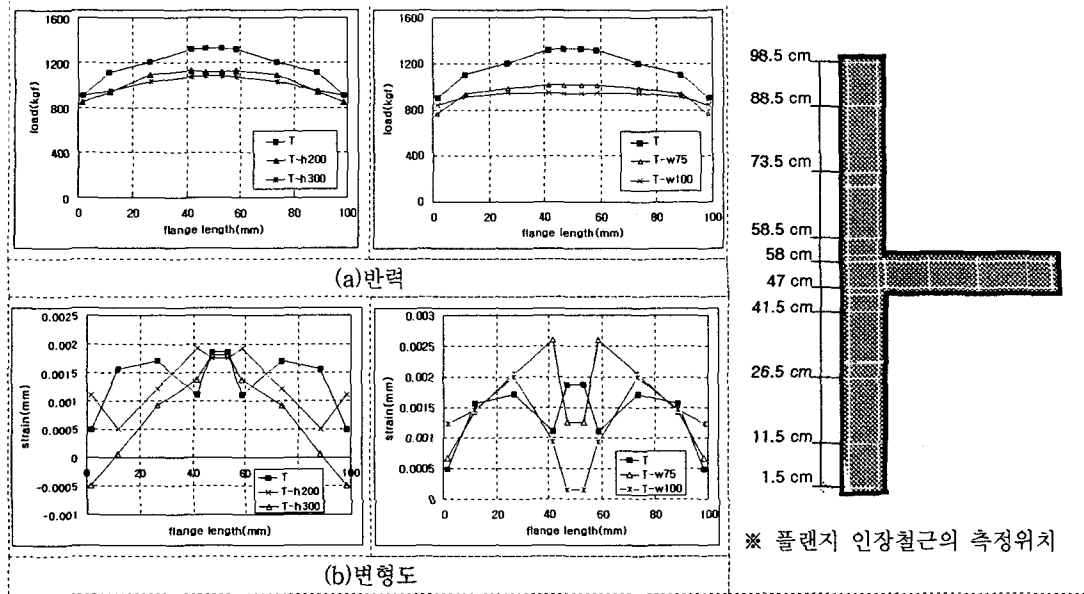


그림 8. 플랜지 위치에 따른 반력 및 변형도

는데 휨거동실험체 계열의 변형도는 역 V자형태로 접합부 부분의 변형도가 가장 크게 나타났고, 전단거동실험체는 역 W자 형태로 전단스팬비가 작아질수록 그 최대점이 플랜지로 이동됨을 알 수 있다. 이는 전단스팬비의 감소로 인한 횡력저항 강성이 커져 접합부의 변형이 상대적으로 플랜지부분보다 작게 나타나는 것으로 판단된다.

5. 유효폭의 산정

5.1 유효폭의 산정방법

이형벽체의 유효폭 개념은 튜브구조의 전단지체(shear-lag)현상으로부터 설명할 수 있다. 튜브구조는 횡력방향과 평행한 기둥이 복부 역할을 하고, 수직인 방향의 기둥이 플랜지 역할을 하여 횡력에 저항한다. 횡력과 평행한 면에 있는 기둥은 보의 강성에 의해 전단지체현상이 일어나며, 이 경우 복부와 플랜지가 강접합되어 있다면 복부 기둥에 생기는 응력은 플랜지 기둥에 전달되어 영향을 주게된다.

PCI에서 제안되고 있는 유효폭의 개념은 전단지체현상으로 인해 발생하는 기초반력의 분배를 그림 9에서 보는 것과 같이 기초반력 분포도를 증가면적으로 환산하여 유효폭으로 산정하고 있다.

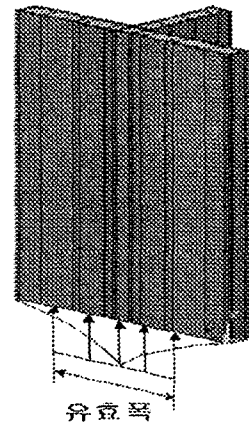


그림 9. 유효폭의 산정

5.2 플랜지내 유효폭의 제안

표 5은 이형벽체의 유효폭에 대한 각 기준 및 제안을 정리하여 나타낸 것이다.

표 5. 기준과 기존연구자의 유효폭제안

기준 및 제안자	유효 폭	변 수
PCI	① 벽체 복부 길이의 1/2 ② 건물 높이의 10%	벽체높이 복부길이
ACI	① 벽체높이의 25% ② 인접한 벽체 복부간 거리의 1/2	벽체높이 복부길이
CSA	① 복부면으로부터 인접한 벽체 복부의 거리의 1/2 ② 벽 높이의 10%	복부길이 벽체높이
Wallace	① 벽 높이의 h/4	복부높이

표 6은 각 기준을 본 연구의 실험체에 적용하였을 때의 유효폭을 산정한 결과와 유한요소 해석결과로부터 산정된 유효폭을 정리한 것이다. 여기에서 각 수치들은 (유효폭×2)+복부두께로 계산하였다. 또한 변수에 따른 실험체의 유효폭의 차이를 평가하기 위하여 실험체의 유효폭을 휨거동실험체는 높이비(유효폭/높이)로 전단거동실험체는 벽체 복부길이비(유효폭/복부길이)로 유효폭을 나타내었다. 그 결과, 전단스팬비 3, 4, 6을 갖는 휨거동실험체의 유효폭비는 0.13h~0.18h로 PCI에서 규정하고 있는 0.1h과 ACI 기준의 0.25h의 중간정도의 유효폭으로 평가되었다. 전단스팬비 2, 1.5을 갖는 전단거동실험체는 0.43l_w ~ 0.45l_w의 유효폭으로 평가되어 PCI와 ACI 및 CSA에서 정하고 있는 0.5l_w와 상당히 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

표 6. 기준과의 해석결과 비교

실험체명	제안된 유효폭							FEM해석에 의한 유효폭		
	PCI		ACI		CSA		Wallace	해석치	높이비 (lef/h)	복부길이비 (lef/l _w)
	l _w /2	h/10	l _w /2	h/4	l _w /2	h/10	h/4			
T	59	39	59	84	59	39	119	64.93	0.18 h	0.56 l _w
T-H200	59	49	59	109	59	49	109	65.62	0.14 h	-
T-H300	59	69	59	159	59	69	159	91.36	0.13 h	-
T-W75	84	39	84	84	84	39	119	77.24	-	0.45 l _w
T-W100	109	39	109	84	109	39	119	95.49	-	0.43 l _w

6. 결 론

이상의 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) ANSYS를 사용한 비선형유한요소해석은 강성, 항복강도, 변위등에서 대체로 양호한 범위의 해석결과를 얻을 수 있었다.
- (2) 비선형 유한요소해석결과로부터 산정된 T형 벽체의 유효폭은 높이비 0.13h~0.18h로 PCI의 0.1h와 ACI, CSA에서 규정하고 있는 0.25h의 중간정도의 유효폭을 나타내며, 복부길이는 0.43l_w~0.45l_w의 범위로 l_w/2로 하는 기준들과 유사한 결과를 얻었다. 따라서 형상비에 따른 유효폭은 복부의 길이가 길수록 높이가 높을수록 커지는 것을 알 수 있다.
- (3) 해석결과, 플랜지가 있는 경우는 없는 경우에 비해 최대내력이 72%까지 증가하는 결과를 보여주었다. 따라서 제안된 유효폭을 고려한 전단벽 단면의 설계강도 검토와 적절한 배근설계가 요구된다.

감사의 글

본 연구에 적극적인 지원을 해주신 한양대학교 초대형 구조시스템 연구센터 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. ANSYS Swanson Analysis System, Inc., ANSYS User's Manual for Release 5.5.
2. 대한주택공사 주택연구소, "벽식구조 아파트에서의 이형벽체 구조성능 평가실험", 2001.1.
3. PCI, "PCI design handbook Precast and Rrestressed Concrete", Third Edition, Prestressed Concrete Institute, 1985.
4. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary", American concrete Institute, 1999.
5. John W. Wallace, "New Methodology for Seismic Design of RC Shear Walls", Journal of Structural Eng, ASCE, Jan. 1995, pp.75~87.
6. T. Paulay, M. J. N. Priestley and A. J. Synge, "Ductility in Earthquake Resisting Squat Walls", ACI Structural Journal, July-Aug, 1982, pp.257~269.
7. 오영훈, "벽식구조 아파트 건물의 전단벽에 대한 반응수정계수 평가", 한양대 박사학위논문, 1998.
8. 이은진, "T형 벽체의 유효폭에 관한 유한요소 해석", 대한건축학회 춘계학술발표대회, 2001.
9. 강병국, "형상비에 따른 고강도 콘크리트 T형 벽체의 유효폭에 관한 연구", 한양대 석사학위논문, 2001.
10. Canadian Standards Association, "Concrete Design Handbook", 1995
11. A. E. Cardenas and D. D. Magura, "Strength of High-Rise Shear Walls Rectangular Cross Section", PCA Research and Development Bulletin, Skokie, Illinois, 1972, pp.1~25.
12. L. D. Lefas, M. D. Kotsovos and N. N. Ambraseys, "Behavior of Reinforced Concrete Structural Walls: Strength, Deformation, Characteristics, and Failure Mechanism", ACI Structural Journal, Jan-Feb, 1990, pp.23~31.
13. Kypros Pilakoutas, Amr Elnashai, "Cyclic Behavior of Reinforced Concrete Cantilever Walls, Part II : Discussion and Theoretical Comparisons", ACI Structural Journal, July-August 1995, pp.425~434.
14. 박천석, "비선형 유한요소해석에 의한 복합구조 접합부의 전단강성에 관한 연구", 대한건축학회논문집 109호, 1997.11.