

# 복부방향 수평하중을 받는 L형 벽체의 횡보강근 구속에 따른 구조성능 평가

## Evaluation of Structural Capacity of L-shaped Walls with Different Confinement Details Under Web-direction Lateral Force

조 남 선<sup>\*</sup>      하 상 수<sup>\*\*</sup>      최 창 식<sup>\*\*\*</sup>      오 영 훈<sup>\*\*\*\*</sup>      이 리 형<sup>\*\*\*\*\*</sup>  
Cho, Nam Sun    Ha, Sang Su    Choi, Chang Sik    Oh, Young Hun    Lee, Li Hyung

### Abstract

The compression toe of structural wall is designed to resist the axial compression and shear force caused by wind or earthquake. The performance of shear wall used in tall building is highly influenced by combined shear and axial force. For this reason, it is possible to result in local brittle failure because of concentrated damage in the potential plastic hinge region under severe earthquake. Thus, it is necessary to establish the lateral confinement details at the plastic hinge of shear wall so that shear wall can behave a ductile manner. The objective of this study is to evaluate the seismic performance of L-shaped walls with different confinement details. For this purpose, three wall specimens were tested experimentally and also analyzed using Nonlinear FEM package.

### 1. 서론

건축물을 구성하는 구조요소인 전단벽은 지진력, 풍력과 같은 수평하중에 효과적으로 저항하기 때문에 주요 횡력저항 요소로서 사용되고 있다. 또한, 전단벽이 골조와 함께 사용되면 전단벽은 수평하중에 저항할 뿐만 아니라 골조의 가새역할을 하기 때문에 그 자체의 구조역학적 장점과 더불어 수직연결구조로서 활용할 수 있는 공간적 기능을 갖추고 있으므로 그 역할과 기능이 중요하다고 볼 수 있다.

이와 같은 전단벽 구조의 장점을 활용한 대표적인 구조방식으로는 골조-전단벽구조와 국내의 아파트 건물에 많이 채택되고 있는 벽식구조를 들 수 있다. 건물의 벽체들은 T형, L형, H형, Box형 등 다양한 형태의 평면형상을 갖도록 계획되고 있지만, 장방형 단일벽체로 치환하여 설계되고 있어 다양한 형태의 이형단면의 특성을 반영한 단면설계가 수행되지 못하고 있는 실정이다. 벽체에 대한 연구는 외국의 경우 다양한 이형벽체의 연구가 활발히 진행해 오고 있으며, 특히 일본에서는 L형과 H형 단면을 중심으로 배근상세에 관한 연구가 활발히 진행중이다. 반면 국내에서는 장방형 단면을 대상으로 한 연구가 대부분이고 이형벽체에 대한 연구는 아직 충분하지 않은 실정이다.

\* 정회원, 한양대학교 건축공학과 석사과정

\*\* 정회원, 한양대학교 건축공학과 박사과정

\*\*\* 정회원, 대전대학교 건축공학과 교수

\*\*\*\* 정회원, 한양대학교 STRESS 연구조교수

\*\*\*\*\* 정회원, 한양대학교 건축공학과 교수

따라서, 본 연구에서는 다양한 이형벽체 중에서 L형 벽체를 선정하였다. L형 전단벽은 수평하중이 일방향으로 작용할 경우에는 L형 복부 벽체가 수평하중에 저항하게 되고, 수평하중이 이방향으로 작용할 경우에는 L형 벽체의 코너부에 높은 압축응력 상태가 되어 수평하중 조건에 따라 L형 벽체의 구조성능이 다르게 나타난다. 본 연구는 L형 벽체의 복부 방향으로 하중이 작용할 경우 벽체 복부 단부의 압축부분 또는 플랜지 벽체와 복부 벽체가 접합되는 부분의 압축영역에서 국부적인 파괴가 초래될 수 있으므로 L형 벽체의 강도 및 연성도 확보를 위해 압축구속 범위와 횡보강근양을 변수로 하여 실험을 실시하였다. 또한, 실험적 연구와 더불어 비선형 유한요소 해석을 수행하여 L형 벽체의 내진설계를 위한 단부 횡보강 영역에 대한 기초자료를 제시하고자 한다.

## 2. L형 벽체의 구조실험

### 2.1 실험체 계획

본 연구는 L형 벽체에서 복부방향으로 하중이 작용할 경우 플랜지 부분의 구속영역이 변화함에 따른 구조성능을 평가하기 위해 총 3개의 실험체를 계획하였다. 기준실험체인 LCX 실험체는 ACI 기준에 의해 단부를 구속한 실험체이고, LCX-a1 실험체는 코너부에 집중되어 있는 구속면적을 벽체 복부로 이동시킨 실험체이다. 그리고 LCX-a1b 실험체는 플랜지 부분의 횡보강근 수직 간격을 2배로 한 것을 제외하면 LCX-a1 실험체와 동일하다. 실험체의 형상 및 배근상황은 그림 1에서 보여주고 있다.

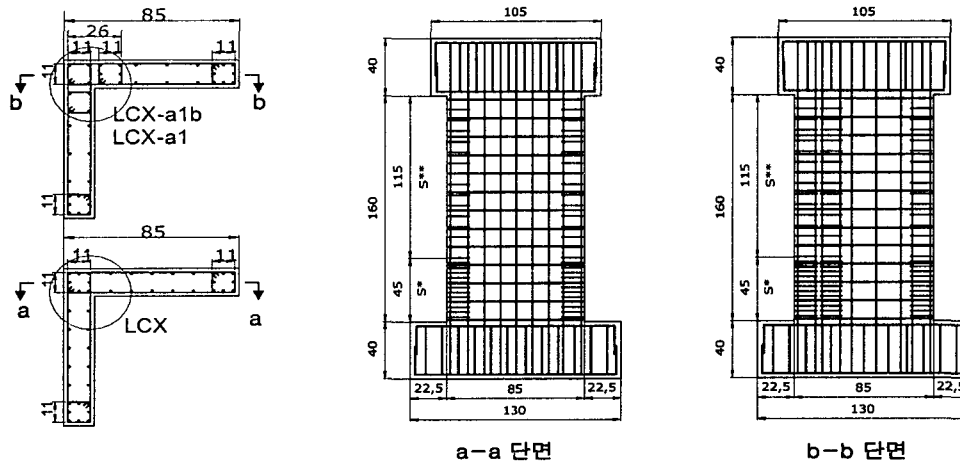


그림 1. 실험체 형상 및 배근상황

실험체 제작에 사용된 콘크리트는 굵은 골재의 최대치수 13mm, 슬럼프값 15cm인 설계기준강도  $350\text{kgf/cm}^2$ 로 하였으며, 철근은 D10과 D13의 철근을 사용하였다. 사용된 콘크리트의 탄성계수( $E_c$ )는 응력-변형도 곡선에서 최대응력의 1/4에 해당하는 응력에 대한 할선강성으로 산정하였다. 사용된 재료의 시험결과는 표 1 및 표 2에 나타나 있다.

표 1. 콘크리트 압축강도 시험결과

설계강도 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	압축강도( $\text{kgf/cm}^2$ )			탄성계수 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	슬럼프 (cm)
	3일	7일	28일		
350	212	266	384	$2.94 \times 10^5$	15.5

표 2. 철근 인장강도 시험결과

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

## 2.2 실험체 제작 및 실험방법

실험체 제작은 세운 상태로 하여 목재거푸집 형태를 만든 다음 치수에 맞게 철근을 배근한 후에 다시 거푸집 마무리하였으며, 콘크리트는 수직타설 되었다. 콘크리트 타설시 벽체면에서의 배블림이나 하부 기초판에서의 콘크리트 자중에 의해 콘크리트가 밖으로 솟구치지 않도록 하였다. 실험체 설치상황은 그림 2에 나타난 바와 같이 실험체의 하부기초판이 반력 슬래브에 완전고정 상태가 되도록 4개의 강봉( $\phi 70$ )으로 고정하였다. 일정 축하중( $0.10A_g f_{ck}$ )은 상부가력판에 설치된 스트롱 프레임 양단에 100tonf actuator를 이용하여 실험종료시까지 작용하였으며, 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 변위 이력은 강도와 강성의 저하에 대한 자료를 얻을 수 있도록 각각의 부재각 단계별로 3회씩 점증가력 하였다. 또한 실험체의 휨 및 전단변위, 곡률 등을 측정하기 위하여 하중 가력점, 복부, 플랜지 부분에 변위계(LVDT)를 설치하였으며, 내부 철근의 변형상태와 실험체의 항복 등을 결정하기 위하여 변형 게이지(Wire Strain Gage)를 수직철근 및 횡보강근에 부착하였다.

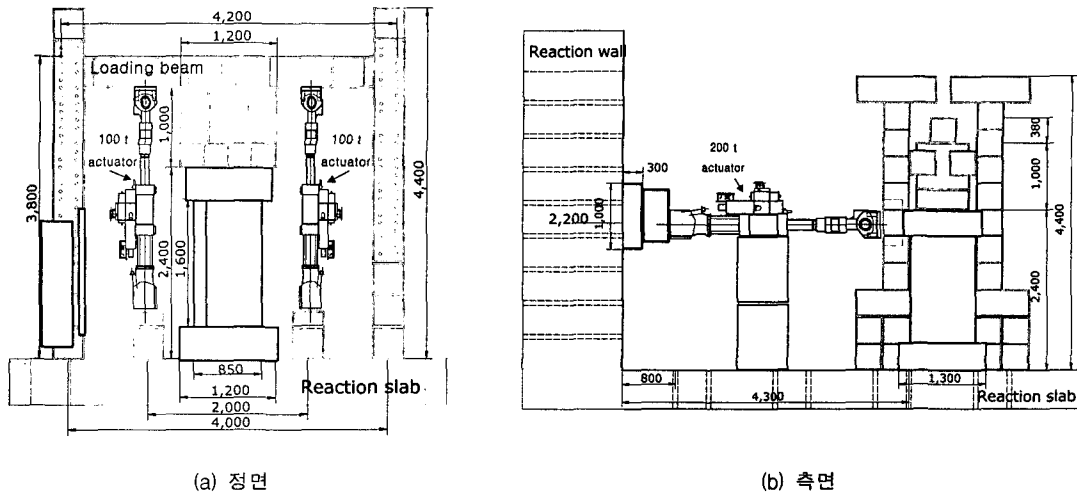


그림 2. 실험체 설치상황

## 3. 실험 결과

### 3.1 실험체 균열 및 파괴상황

정가력시 실험체의 초기 휨균열은 17.2~20.3tonf(부재각 1/400)의 수평하중이 작용하였을 때 플랜지 인장측 하단부에서 발생하였으며, 부가력시(부재각 1/600)에는 복부 인장측 하단부에서 발생하였다. 초기 휨균열은 수평하중이 증가하면서 부재각 1/300 정도에서 휨-전단균열로 진행되어 복부 중앙부분으로 균열이 진전되면서 서로 교차되어 나타났다. 플랜지 벽체의 균열은 모두 휨균열만 발생되었으며, 이 균열이 복부로 진전되면서 전단균열로 진행되었다.

수직균열 및 압괴는 실험체 모두 복부 끝단에서 부재각 1/50에서 발생하였으며, 플랜지 부분의 압괴는 정가력시 1/35에서 서서히 발생하기 시작하였다. 실험체의 최종파괴는 모두 복부 단부의 압괴로 인해 최종파괴 되었다.

### 3.2 하중-변위 곡선

실험체에 적용된 하중과 변위 관계를 그림 3에 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 기준실험체인 LCX 실험체의 최대내력이 56.1tonf으로 나타났으며, 구속면적을 벽체 복부로 이동시킨 LCX-a1

실험체와 플랜지 부분의 횡보강근 수직 간격을 2배로 한 LCX-a1b 실험체의 최대내력은 각각 45.5tonf  
과 43.9tonf으로 나타나 LCX 실험체보다 각각 19%, 22% 감소하는 것으로 나타났다. 부가력시에도  
LCX 실험체의 최대내력이 -46.3tonf로 가장 높게 나타났으며, LCX-a1 실험체와 LCX-a1b 실험체 보  
다 각각 6.7%, 19% 높게 나타났다.

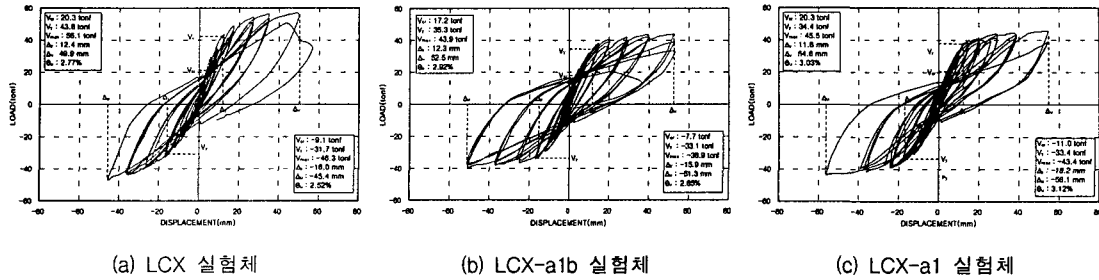


그림 3. 실험체별 하중-변위 곡선

표 3. 실험결과

실험체명	실험값(tonf)			$\Delta_y$ (cm)	$\Delta_u$ (cm)	$\mu$	$\theta_u$ (%)	
	$V_{cr}$	$V_y$	$V_{max}$					
LCX	+	20.3	43.8	56.1	12.4	49.9	4.02	2.77
	-	9.1	31.7	46.3	16.0	45.4	2.84	2.52
LCX-a1b	+	17.2	35.3	43.9	12.3	52.5	4.27	2.92
	-	7.7	33.1	38.9	15.9	51.3	3.23	2.85
LCX-a1	+	20.3	34.4	45.5	11.8	54.6	4.63	3.03
	-	11.0	33.4	43.4	16.2	56.1	3.46	3.12

$V_{cr}$ : 균열하중,  $V_y$ : 항복하중,  $V_{max}$ : 최대하중,  $\Delta_y$ : 항복변위  
 $\Delta_u$ : 최대변위  $\mu$ : 변위연성비,  $\theta_u$ : 최대 부재각

각 실험체의 실험결과를 표 3에 나타내었다. 표에 나타난 바와 같이 정가력시 최대내력이 부가력시보다 크게 나타났다. 실험체의 항복은 정가력시 1/150, 부가력시에는 1/112 정도의 부재각에서 발생하는 것으로 나타났다. 변위연성비는 최대변위에 대한 항복변위( $\Delta_u/\Delta_y$ )의 비로 정의하였으며, LCX-a1 실험체가 정가력시 4.63, 부가력시 3.46으로 가장 우수한 변위연성비를 보여주고 있다. 이때, 최대변위는 최대강도( $V_{max}$ )의 80%를 유지하는 상태에서의 변위로 평가된 것이며, 항복변위( $\Delta_y$ )는 Park등에 의해 제안된 방법과 수직철근의 항복상태를 검토하여 평가하였다. 최상부 변위각은 정가력시 2.7~3.0, 부가력시에는 2.5~3.1의 범위로 나타나 UBC-97에서 제시하고 있는 2.0~2.5%를 모두 만족하는 변형능력을 보여주고 있다.

#### 4. 비선형 유한요소해석

##### 4.1 유한요소해석에 사용된 요소

본 실험체의 유한요소해석에서는 비선형 거동을 평가하기 위하여 기하 및 재료 비선형을 고려한 3차원 탄소성 해석이 가능한 범용 유한요소 해석프로그램인 ANSYS를 사용하였다. 탄소성 해석을 위해서 해석용 모델에 사용된 콘크리트는 3차원 솔리드구조체의 SOLID65를 사용하였고, 철근은 SPAR 요소인 LINK요소를 사용하였다. 콘크리트 요소는 8개의 절점으로 구성되며, 각 절점에 x, y, z방향의 자유도를 3개씩 가진다. 또한 요소의 적분점에서 균열 및 압괴강도를 부여하고 소성 및 크리프 변형 등을 고려할 수 있다. 콘크리트의 재료모델은 모든 방향에 대하여 재료적인 성질이 동일한 등방성요소를 사용하였다. 철근 요소는 축방향의 거동을 표현하기 위한 것으로서 각 절점에서는 3방향의 자유도를 가지며 그림 4와 같이 콘크리트 요소에서 철근의 방향을 지정해주게 된다. 철근의 재료 비선형성을 고려하기 위한 BKIN(Bilinear Kinematic Hardening)모델은 그림 5와 같고 콘크리트 및 철근의 재료물성치는 재료실험결과를 사용하였다.

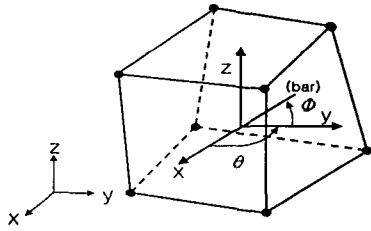


그림 4. 콘크리트요소와 요소내 철근방향

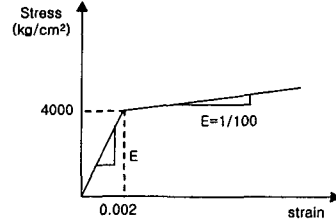
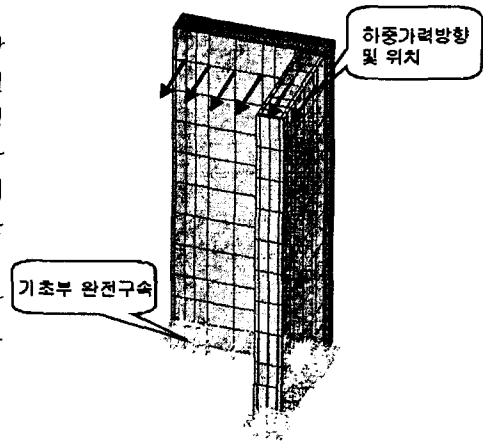


그림 5. 철근요소모델

#### 4.2 해석모델링

본 연구의 해석모델링은 그림 6과 같이 실험체의 형상 및 배근 그리고 하중단계에 따른 가력방법을 실험과 동일하게 적용하였으며, 실험체 밀면은 완전고정상대로 모델링하였다. 변위측정 역시 실험과 동일한 위치의 절점을 취하였으며, 해석은 비선형영역까지 수행하여 이 과정에서의 변위, 강도, 균열양상을 평가하였다. 또한 해석과정에서는 콘크리트와 철근의 부착과괴는 일어나지 않는 것으로 가정하였다. 또한 실험체의 비대칭으로 인한 비틀림이 일어나지 않도록 1방향의 자유도를 구속하였다. 가력보는 해석모델링에 적합한 형태로 재구현하여 축력 및 횡력에 의한 영향이 나타나지 않도록 충분한 강성체로 모델링하였다.



#### 4.3 응력도 및 균열도

그림 6. 해석모델링

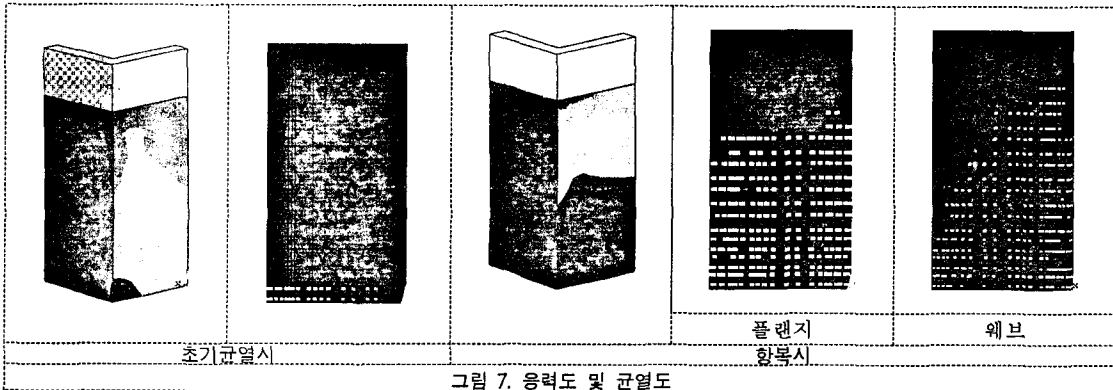


그림 7. 응력도 및 균열도

그림 7은 초기균열 발생시 및 항복시의 응력분포와 균열양상을 보여준다. 초기균열 발생시 최대응력은 복부를 중심으로 플랜지 폭의 35% 정도의 범위의 접합부 하부에 분포하고 있으며, 균열은 플랜지 폭방향으로 72cm 길이까지 발생되었다. 또한 항복시 응력은 도심선상의 플랜지 부근에서 최대로 나타났으며, 플랜지의 균열은 높이방향으로 160cm까지 휨균열이 분포하며 복부의 균열은 접합부로부터 시작된 전단균열이 복부를 관통하는 것으로 나타났다.

#### 4.4 하중-변위 관계의 비교

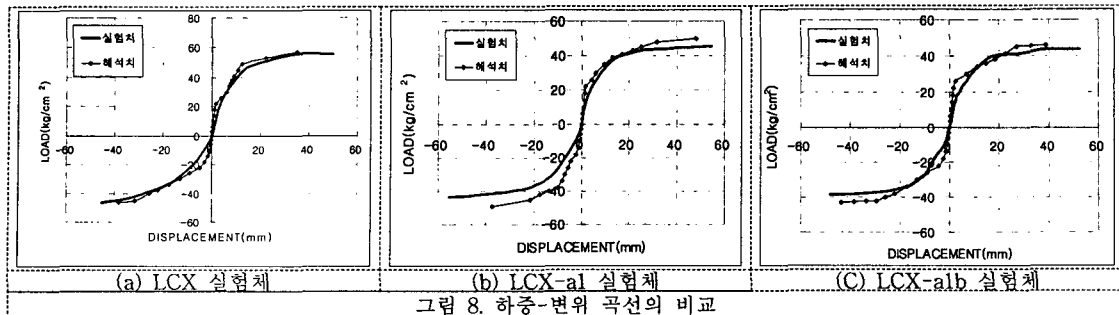


그림 8. 하중-변위 곡선의 비교

그림 8은 LCX, LCX-a1, LCX-a1b 실험체를 대상으로 한 비선형 유한요소해석의 결과를 실험과 비교한 것이다. 해석으로 얻어진 하중-변위 곡선은 실험에서 얻어진 결과를 대체로 양호하게 평가하고 있다고 판단된다. 다만 강성과 변위에서 실험결과와 약간의 차이를 보여주고 있는데, 해석상에서는 비틀림에 의한 영향과 부차과피는 일어나지 않는다고 가정한 것에서 비롯된 것이라고 사료된다.

## 5. 결론

복부방향으로 수평하중을 받는 L형 전단벽에 대한 구속면적과 횡보강근 수직간격에 따른 벽체의 구조성능을 평가한 실험적 연구와 해석으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 초기 휨균열은 17.2~20.3tonf(부재각 1/400)의 수평하중이 작용하였을 때 플랜지 인장측 하단부에서 발생하였으며, 콘크리트 압괴는 복부 끝단 하부에서 부재각 1/50 발생하였다. 실험체의 최종파괴는 모두 복부 끝단 하부의 콘크리트 압괴로 인해 최종파괴 되었다.
- (2) 구속면적을 벽체 복부로 이동시킨 LCX-a1b 실험체와 LCX-a1 실험체의 최대내력은 기준실험체보다 작게 나타났지만, 변위연성비와 최상부 변위각으로 평가한 변형능력은 기준실험체 보다 우수하게 나타났다.
- (3) 비선형 유한요소해석은 강성, 항복강도, 변위 등에서 대체로 양호한 범위의 해석결과를 얻을 수 있었다.

## 감사의글

본 연구는 과학기술부·한국과학재단 지정 한양대학교 초대형 구조시스템 연구센터의 연구비 지원과 (주) SK 건설의 실험체 제작 지원으로 이루어진 연구의 일부로 이에 감사 드립니다.

## 참고문헌

1. John W. Wallace, "Evaluation of UBC-94 Provisions for Seismic Design of RC Structural Walls" Earthquake, Volume 12, No. 2, May 1996.
2. S. L. Wood, "Influence of Web Reinforced on the Cyclic Response of Structural Walls," ACI SP 127-11, pp. 454~477.
3. ANSYS Swanson Analysis System, Inc., ANSYS User's Manual for Release 5.5.
4. 溝口光南, 荒井康辛 (1993), "二方向水平力を受ける鉄筋コンクリートL型開断面耐震壁の弾塑性性狀に関する實驗的研究", 日本建築學會構造系論文報告集 第450號 1993年8月. pp71~80.
5. 溝口光南, 荒井康辛 (1994), "二方向水平力を受ける鉄筋コンクリートL型開断面耐震壁の弾塑性性狀に関する實驗的研究(その2)", 日本建築學會構造系論文報告集 第464號 1994年10月. pp101~108.
6. 이리형, 최창식, 오영훈 (1990), "비탄성 반복하중을 받는 철근콘크리트 전단벽의 이력거동에 관한 실험적 연구", 대한건축학회논문집, 제6권 6호 통권32호, pp. 239~248.
7. 한상환, 오영훈, 이리형 (1999), "벽체단부의 횡보강근 양에 따른 변형능력의 평가," 콘크리트학회논문집, 제11권 6호, pp. 101~112.