

# 反復荷重을 받는 철근콘크리트 低型 剪斷壁의 履歷舉動에 關한 實驗의 研究 (I)

Experimental Study on the Hysteretic Behavior of R/C Low-Rise Shear Walls under Cyclic Loads

— 長方形 斷面(Rectangular Shape)의 耐力 과 延性を 中心으로 —

○ 최창식\* 이윤재\*\* 윤현도\* 이리형\*\*\*  
Choi, C. S. Lee, Y. J. Yun, H. D. Lee, L. H.

## ABSTRACT

Results of an experimental investigation of low-rise reinforced concrete shear walls with rectangular cross section under cyclic loads are discussed and evaluated. Two half scale models of test specimens with height to length ratio of 0.75 were experimented. The dimension of all walls is 1500mm wide x 950 mm high x 100 mm thick for all specimens and the section of all boundary at both ends is 100 mm x 200 mm.

Main variables are : horizontal shear reinforcement ratios and reinforcement details(including crossed diagonal shear reinforcements in SWR2 specimen)

In SWR2 specimen, maximum strength and consequently dissipating energy index were 1.15~1.21 and 1.48 times greater than those of SWR1 specimen, respectively.

## 1. 序論

鐵筋콘크리트 剪斷壁은 구조물의 내진설계상 가장 중요한 항하중 저항요소로 작용하고 있다. 특히 전단벽은 대지진(Severe Earthquake)발생시 구조물 전체의 내력을 확보함과 동시에 연성적인 거동을 수행하여야 한다.

이러한 전단벽중 높이에 대한 길이의 비 ( $h_w/l_w$ )가 2.0이하인 低型剪斷壁(Low-Rise Shear Walls)의 연성적인 변형능력을 확보하기 위해서는 수직철근의 횡향복을 선행시킴으로써 얻을 수 있으나, 횡모멘트에 대한 전단력의 비가 높아짐에 따라 설계 및 상세등 연구의 어려움으로 인하여 연성적인 변형능력에 관한 연구는 미흡한 실정이다.

이에 본 연구는 높이에 대한 길이의 비가 0.75이면서 장방형 단면 (Rectangular Cross Section)을 갖는 低型剪斷壁을 대상으로 하여, 전단 보강방법에 따른 내력과 연성적인 변형능력의 변화를 규명하고자 하며, 궁극적으로는 내진설계시 필요한 低型剪斷壁의 기초자료를 제공하고자 한다.

## 2. 實驗

### 2.1 試驗體 計劃

시험체는 連層剪斷壁의 최하 층부분을 약 1/2 크기로 축소한 모형 시험체로서, 1층 1스팬의 長方形 剪斷壁으로 구성되어 있다. 시험체의 형상 및 배근상황을 그림 1에 나타내었다.

각 시험체는 그림 2와 같은 축력 및 변형도 분포의 조건하에서 모멘트-축력 관계를 구한뒤, 이로부터 단면에서 요구되는 최대 휨모멘트 및 전단력을 구하였다.

시험체 양측 보강부위의 파괴로 내력이 결정되지 않도록 하고 압축축 콘크리트의 拘束效果 및 주근의 挫屈防止를 위하여 특히 기초 상부면에서 부터 높이의 1/3 이하의 범위에서 帶筋量을 증가시켰다.

\* 정희원, 한양대 대학원 박사과정

\*\* 한양대 대학원 석사과정

\*\*\* 정희원, 한양대 교수, 공학박사

시험체 일람표를 표 1에 나타내었다.

시험체 SWR1은 보편적인 수직 및 수평의 配筋方法을 사용한 시험체로서, 최대 휨 초과모멘트에 상응하는 전단내력을 보유 하도록 수평 보강근을 배근하였다. 이에 반해 SWR2 시험체의 보유 전단력은 SWR1 시험체와 동일하지만, 미끄러짐 전단 및 인장과 압축에 직접적으로 기여할 수 있도록 X자형 대각선 보강근으로 보강하였다. 그 보강량은 단면의 초과 휨내력에 요구되는 전단력의 약 30%를 부담하도록 하였다.

### 2.2 材料 試驗

시험체에 사용된 콘크리트와 철근의 재료실험

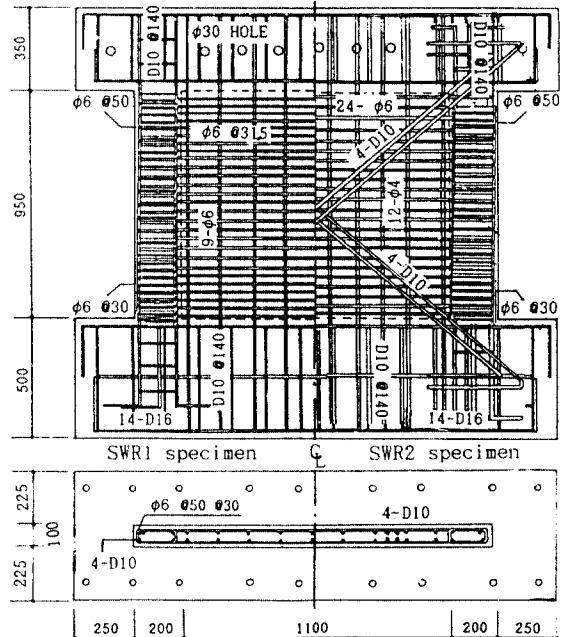


그림 1 시험체 형상 및 배근상황

표 1 시험체 일람표

Specimen	Shape	fc' kg/cm <sup>2</sup> (psi)	M — Vlw	Web Thk. cm(in)	Axial Load P (ton)	p/Abc — fc' (%)	Shear Rein.	Wall			Boundary Section		
								WxHxt cmxcmxcm	$\rho_v$ %	$\rho_h$ %	BxD cm	$\rho_f$ %	$\rho_s$ %
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
SWR1	■	420 (6000)	0.75	10(4)	15	9.3	Hor.	150x95x10	0.52	2.10	10 x 20	1.42	1.30
SWR2	■	420 (6000)	0.75	10(4)	15	9.3	Hor. + X	150x95x10	0.62*	2.10*	10 x 20	1.42	1.30

(3)콘크리트 설계기준강도 (4)전단스팬비, lw는 벽체의 전길이 (5)벽체두께 (6)축력, 자중은 제외  
 (7) Abc : 주변 보강부 단면적 (8) Hor. : 수평 보강근 (Horizontal Shear Reinforcements)  
 Hor. + X : 대각선 보강근 (Cross Diagonal Shear Reinforcements)  
 (9)벽체의 단면, h는 높이, t는 두께 (10)벽체의 수직철근비, \*는 대각선 보강근을 포함한 등가철근비  
 (11)벽체의 수평 철근비, \*는 대각선 보강근을 포함한 등가철근비  
 (12)단부보강부(Boundary Section) 단면 (13)수직 휨 철근비 (14) 대근(Hoop)비

표 2 철근의 인장강도

종 류	降伏強度 (t/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_y$ (x E-6)	引張強度 (t/cm <sup>2</sup> )	彈性係數 (t/cm <sup>2</sup> )	伸率 (%)
D10	2.44	2156	3.88	1937	26.0
$\phi$ 6	2.69	2152	4.29	1889	9.1
$\phi$ 4	3.81	2553	4.97	1910	5.5

표 3. 콘크리트의 압축강도

壓縮強度(kg/cm <sup>2</sup> )					彈性係數 (t/cm <sup>2</sup> )	슬럼프 (cm)
3일	7일	28일	77일*	86일		
326.7	337.6	372.0	403.4	419.1	229.1	12

\* SWR1, SWR2 시험체의 실험시 콘크리트 재령임

결과는 표 2와 표 3과 같다. 콘크리트의 설계기준 강도는 420kg/cm<sup>2</sup>으로 계획하였으며, 타설후 조기

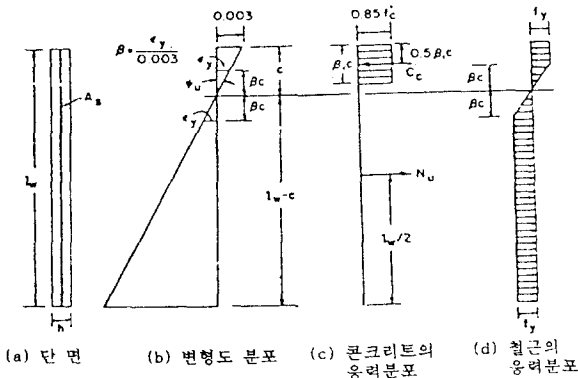


그림 2 응력도, 변형도 분포

강도를 얻기 위하여 증기양생을 하였다.

2.3 設置, 加力 및 測定方法

시험체 설치상황을 그림 3에 나타내었다. 횡력은 반력벽에 설치된 수평 전단력용 100t Actuator에 의해 시험체 상단 가력부에 연결된 형강을 통하여 가력되었으며, 축력은 시험체 상부의 프레임에 설치된 50t Actuator를 이용하여 최대 15.0t (양축 보강단면에 대하여 37.50kg/cm<sup>2</sup>의 압축응력도)을 실험 종료시까지 일정하게 가력하였다. 이때 벽판의 면외 좌굴을 방지하기 위하여 Actuator 및 시험체 양단부에 Guide Beam을 설치하였다. 가력은 變位制御法을 채택하였으며, 적용된 변위 이력은 그림 4에 나타난 것과 같다.

모든 수직 및 수평 변위는 LVDT에 의해, 철근의 變形度는 주요위치에 부착된 W. S. G.에 의해 측정되었다.

3. 實驗結果 및 分析

각 시험체의 실험결과 일람표를 표 2에, 하중-변위 관계곡선 및 최종 파괴상황은 그림 5에 나타낸다.

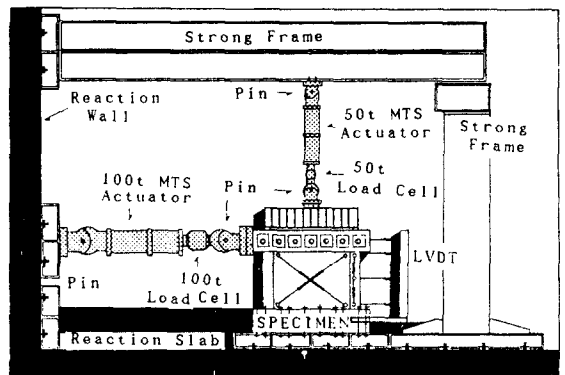


그림 3. 시험체 설치상황

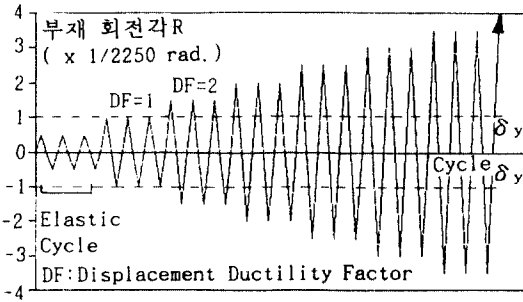


그림 4 변위이력(Loading History)

3.1 균열 및 파괴상황

SWR1 시험체의 초기 힘 균열은 부재각 1/600 (rad.) 정도에 달하였을 때 벽체 하부의 인장연단에서 미소하게 발생되었으며, 그때의 하중은 23.17t 이었다. 이후 부재각이 증가함에 따라 힘 균열은 상부로 진전되어 갔으며, 연성비 DF=1인 부재각 1/489 (rad.) 정도에서 힘-전단균열로 진전되었다.

그러나, 본 SWR1 시험체는 최대 힘 초과모멘트에 상응하는 전단내력을 보유 하도록 수평철근을 보강함에 따라 연성비 DF=6 (부재각 1/90 rad. 정도) 이후에서는 연성비가 증가되더라도 더 이상의 균열 진전 및 확산은 없는 반면, 벽체와 기초의 접합면에서 미끄러짐 전단(Sliding Shear)이 심각하게 발생되었다. 따라서, 최종파괴는 기초와의 접합면 부위에 집중적으로 형성된 연속형 균열면을 따른 미끄러짐 전단변형에 의하였으며, 이때 양단 보강부의 주근 및 대근(Hoop)이 파단되는 등 심각한 피해가 발생되었다.

반면에 SWR2 시험체의 초기 힘 균열은 부재각 1/800 (rad.) 정도에 달했을 때 벽체 하부의 인장연단에서 미소하게 발생되었으며, 그때의 하중은 24.15t 이었다. 이후 부재각이 증가함에 따라 벽체 전반에 걸쳐 피해가 확산되어 갔으며, 주 균열은 사인장력에 직접적으로 저항함으로써 전단변형 (Shear Distortion)을 억제하게 되는 대각선 보강근을 따라 형성되고 있다. 본 시험체의 최종파괴는 연성비가 커짐에 따라 힘-압축부분의 대각선 보강근이 좌굴함으로써 발생한 압괴(Web Crushing)에 의하였다.

표 4 실험결과 일람표

Spe.	fc'	u <sub>max</sub> √fc' kg/cm <sup>2</sup> (psi)	Vy ton	DF												Main Failure Mode
				1 (0.2%)			5 (1.0%)			7 (1.5%)			10 (2.0%)			
				V/Vy	K/Ky	Es t·cm	V/Vy	K/Ky	Es t·cm	V/Vy	K/Ky	Es t·cm	V/Vy	K/Ky	Es t·cm	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)
SWR1	403.4 (5738)	1.29 (4.88)	27.4	1.00	1.00	1.41	1.41	0.30	27.37	1.24	0.19	56.28	0.93	0.10	103.57	S.S.
SWR2	403.4 (5738)	1.56 (5.89)	32.1	1.00	1.00	1.77	1.46	0.31	34.43	1.42	0.22	83.64	1.33	0.14	174.39	W.C.

- (2) 콘크리트 실제 압축강도 (3) u<sub>max</sub>는 최대 전단응력도(=V<sub>max</sub>/Acv, Acv는 벽체 전단면적)
- (4) 항복강도(전단력) (5), (8), (11), (14) V는 해당 연성비별 전단력
- (6), (9), (12), (15) 시칸트강성(Secant Stiffness) K = V/δ (해당 연성비 별) 항복강성 Ky = Vy/δy
- (7), (10), (13), (16) 에너지 소산능력(Energy Dissipation Capacity)의 누적값
- (17) S.S. : Sliding Shear W.C. : Web Crushing

3.2 荷重-變位 曲線

그림 5에 나타난 각 시험체의 荷重-變位 관계로부터 전체적인 거동을 파악하고 강도와 강성의 변화 및 에너지 소산능력에 대한 비교와 평가를 하고자 한다.

(1) 최대 강도 및 강성 변화

비탄성 변형이 진행되는 동안 부재 회전각 (연성비)의 증가에 따른 최대 강도변화를 나타내면 그림 6과 같다.

그림 5와 표 4에 의하면 SWR1 시험체의 최대강도는 연성비 DF (Displacement Ductility Factor) = 5 (부재 회전각 R = 9/2250 rad.)에서 39.0t으로 나타나고 있으며, 이때의 중간변위는 11.06mm로 충고의 1% 정도에 해당된다. 반면 SWR2 시험체의 최대강도는 연성비 DF=6 (부재 회전각 R=10/2250 rad.)에서 47.06t으로 SWR1 시험체에 비해 21%의 강도상승이 나타나고 있으며, 이때 중간변위는 13.04mm로 충고의 1.16% 정도에 해당된다. 또한, 최대강도 이후의 강도저하를 비교해 볼때, 중간변위가 충고의 1.5% 정도(연성비 DF=7)에 달했을 때의 강도는 SWR1 시험체에서 34.42t으로 최대강도의 88.3%인 반면, SWR2 시험체에서는 45.59t으로 최대강도의 96.9%이었으며, 연성비 DF=8 (중간변위가 충고의 1.64% 정도)에서의 하중은 SWR1 시험체에서 31.13t으로 최대강도의 79.8%인 반면, SWR2 시험체에서는 43.95t으로 최대강도의 93.4%였다. 또한 중간변위가 충고의 2.0% 정도 (연성비 DF=10)에 달했을 때의 강도는 SWR1에서 25.73t으로 최대강도의 66.0%로 강도저하가 심각한 반면, SWR2 시험체에서 42.75t으로 최대강도의 91.0%로 강도를 잘 보존하고 있음을 알 수 있다.

그림 5의 하중-변위 관계곡선과 그림 7의 루프강성(Loop Stiffness) 변화 및 표 4에 나타난 시칸트 강성 변화에 의하면, 연성비별 강성저하는 전체적으로는 유사한 양상을 보이나, SWR2 시험체 강성의 저하정도가 SWR1 시험체에 비하여 다소 양호하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

(2) 에너지 消散能力

대진진시에 입력된 지진에너지를 안정된 이력거동을 통하여 소산할 수 있다는 것은 내진 성능상 중요한 관건이 되며, 저형 전단벽 (Low-Rise Shear Walls)에 있어서는 전단 스펙비가 작기 때문에 그

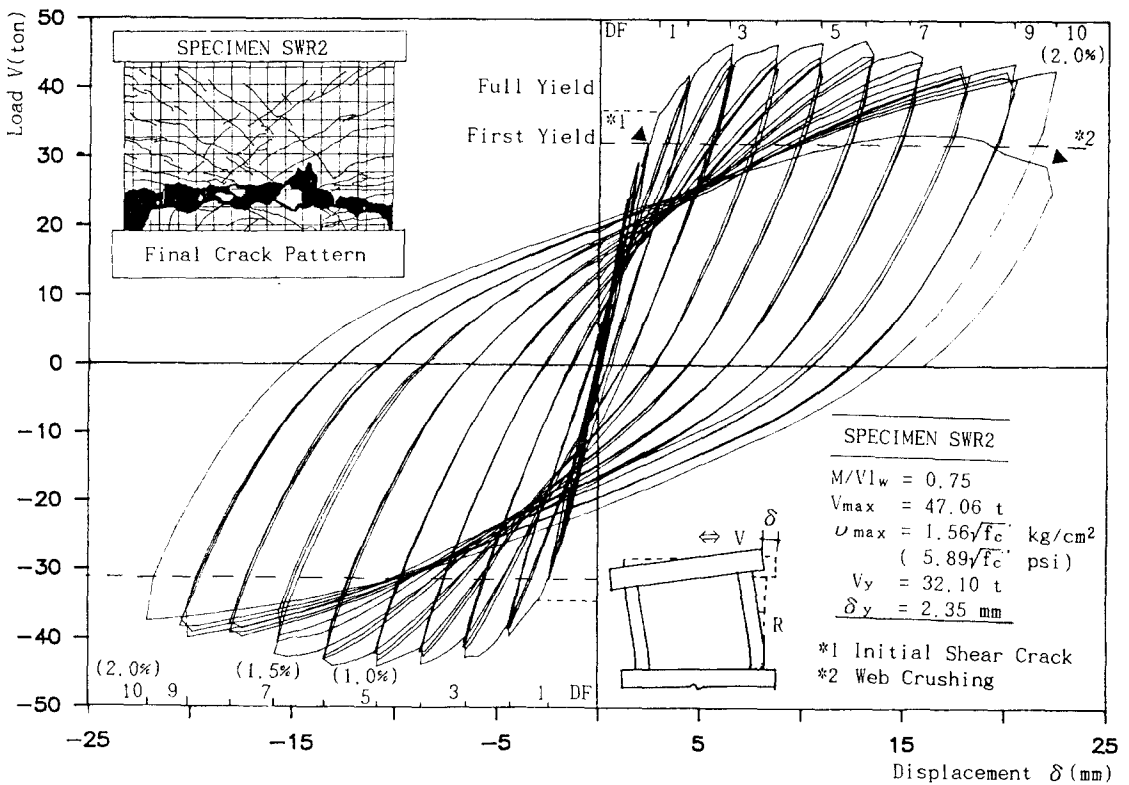
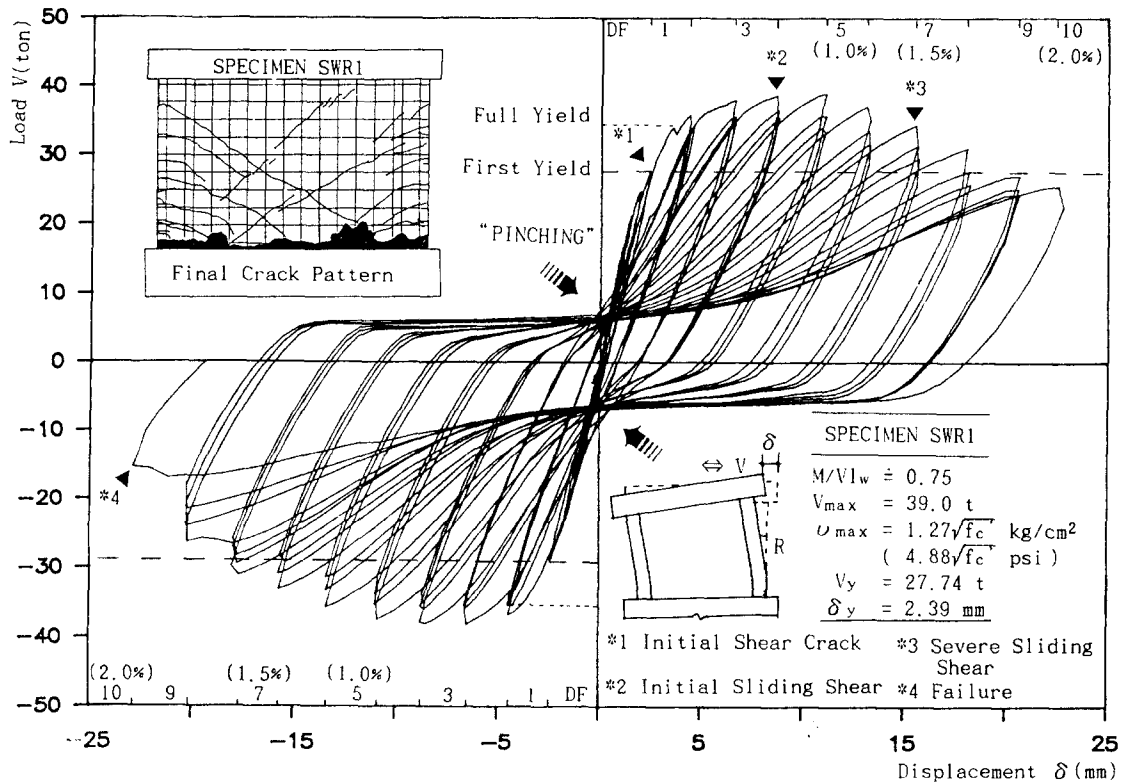


그림 5 하중-변위 곡선 및 최종파괴 상황

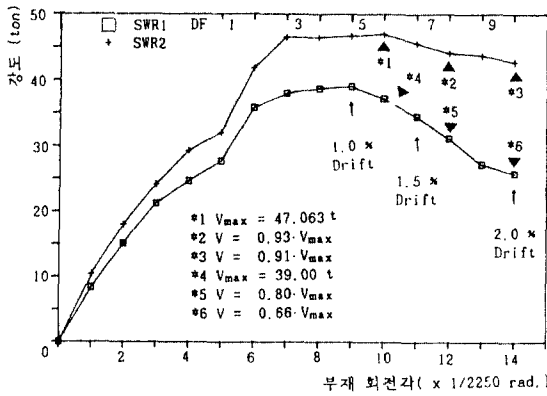


그림 6 부재 회전각별 강도저하의 비교

중요성은 더욱 커진다.

그림 8에서는 각 사이클 별 하중-변위 곡선으로 둘러싸인 면적으로 평가된 에너지 소산량을 비교하고 있다. 이 그림 및 표 4에 의하면, 연성비가 증가함에 따라 X자형 대각선 전단 보강근을 갖는 SWR2 시험체의 에너지 소산량이 하중 반전후 초기에 심각한 강성 저하가 나타나 이력루프가 꼬이러드는 핀칭현상이 심각한 SWR1 시험체에 비해 상당히 증진된다. 즉, 전체 에너지 소산량에 있어서는 SWR2 시험체가 17439.5 (t·mm)로 SWR1 시험체의 1.68배, 중간변위가 충고의 1.5%(연성비 DF=7)인  $R=11/2250$  (rad.)의 부재 회전각(+ 사이클)에서는 SWR2 시험체의 에너지 소산량이 933.45 (t·mm)로 SWR1 시험체의 1.69배였다. 따라서, 에너지 소산지표  $E_i$  ( $E_i = E_t / V_y \cdot \delta_y$ ,  $E_t$ 는 총에너지 소산량,  $V_y$ ,  $\delta_y$ 는 각각 항복시의 전단력 및 변위)를 구해보면, SWR2 시험체에 있어서 231.18로 156.22인 SWR1 시험체의 1.48배로 높게 나타나고 있음으로 판단해 볼 때, X자형 대각선 전단 보강근은 에너지 소산능력을 증진시키는데 매우 효과적임을 알 수 있다.

5. 결론

이상의 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 연층전단벽의 최하층으로서 구성되어진 장방형 저형 전단벽인 본 시험체는 힘 항복형의 騷動을 보여주었으며, 연성비가 증가함에 따라 SWR1 및 SWR2

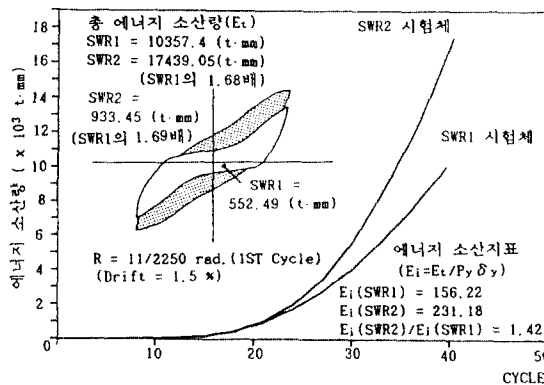


그림 8 사이클별 에너지 소산능력 비교

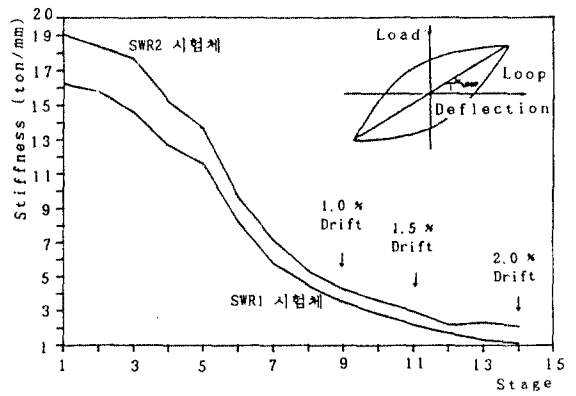


그림 7 각 스테이지별 루프 강성변화

는 각각 미끄러짐 剪斷 (Sliding Shear), 斜壓壞 (Web Crushing)에 의하여 파괴가 선행되었다.

2)  $1.56\sqrt{f_c}$  kg/cm<sup>2</sup> ( $5.89\sqrt{f_c}$  psi)의 다소 높은 전단응력도를 경험한 SWR2 시험체는 X자형 대각선 보강근으로 전단보강됨에 따라 동일한 단면적의 보편적인 전단보강근을 갖는 SWR1 시험체 (최대 전단응력도  $1.29\sqrt{f_c}$  kg/cm<sup>2</sup> ( $4.88\sqrt{f_c}$  psi)에 비하여 최대 강도는 21%증대되었고, 에너지 소산지표는 1.48배로 높게 나타났다. 이로 볼 때 약  $1.5\sqrt{f_c}$  kg/cm<sup>2</sup> 이상의 전단응력도를 경험한 장방형 저형 전단벽에 있어서도 X자형 대각선 보강근은 미끄러짐 전단 변위 역제에 따라 하중 반전후 초기에 나타나는 핀칭 (Pinching)현상을 제거 시킴으로써 안정된 이력거동을 얻을 수 있음과 동시에 강도 및 강성의 저하를 방지하는데 매우 효과적인 것으로 판단된다.

3) 중간변위가 충고의 1.64%(연성계수 DF=8)에 달했을 때, X자형 대각선 보강근으로 전단보강된 SWR2 시험체는 최대강도의 93.4%의 내력을 보존하고 있는 반면, 보편적인 방법으로 보강된 SWR1 시험체의 강도는 79.8%로 그 저하 정도가 심각하다. 또한 연성비 DF=10(중간변위가 충고의 2.0%)에 달했을 때, SWR1 시험체의 강도는 최대강도의 66.0%로 그 저하가 심각한 반면 SWR2 시험체의 강도는 최대강도의 91.0%로 강도를 잘 보존하고 있다. 이러한 것으로 판단하여 볼 때, 장방형 저형 전단벽에 사용된 X자형 대각선 전단 보강근은 중간변위가 충고의 약 1.8%(연성비 DF=9)까지는 연성적인 거동에 효과적 인 것으로 판단된다.

4) X字形 대각선 보강근을 사용한 SWR2 시험체는 연성비 DF=8(중간변위가 충고의 1.64%) 전후에서 발생한 사압파 (Web Crushing)에 의한 대각선 보강근의 압축좌굴에 따라 급격하게 강도가 저하됨으로써 최종파괴에 이르렀다. 따라서 중간 사이클의 이력거동을 개선시키기 위해서는 대각선 보강근의 압축좌굴을 방지할 수 있도록 대각선 보강근의 양단부에 대근(Hoop)으로 보강함이 바람직한 것으로 판단된다.

끝으로 본 연구는 한국과학재단의 목적기초 연구비 지원하에서 이루어진 연구의 일부로서 관계관 제위께 감사를 표하며, 실험중 물심양면으로 도움을 주신 해사기술연구소 이호섭 부장님, 신병천 박사님 이하 연구원 여러분께 감사의 뜻을 전합니다.

参 考 文 献

- 1) A. J. Syngge, "Ductility of Squat Shear Walls", Department of Civil Engineering, Univ. of Canterbury, Research Report 80-8, February 1980, 142 pp.
- 2) Lee, L. H., Choi, C. S., Oh, Y. H., "Strength and Deformation Capacity of Low-Rise R/C Shear Walls with Boundary Elements under Cyclic Loads," Proc. of the Third Colloquium on Shell and Spatial Structures, Taegu in Korea, Aug. 7-10, 1990.
- 3) Lee, L. H., Choi, C. S., "Hysteretic Behavior of Low-Rise R/C Shear Walls Subjected to Inelastic Load Reversals", The Third Asia-Pacific Conference on Structural Eng. & Construction, Shanghai, China, April 23-26, 1991
- 4) Ogata, K., and Kabeyasawa, T., "Experimental Study on the Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Shear Walls Under the Loading of Different Moment-to-Shear Ratios", Transactions, Japan Concrete Institute, Tokyo, V. 7, 1985, pp. 717-724.
- 5) Ozcebe, G. & Saatcioglu M., "Hysteretic Shear Model for Reinforced Concrete Members," J. of Structural Eng., ASCE, Vol. 115, No. 1, Jan., 1989, pp. 132-149
- 6) R. G. Oesterle, J. D. Aristizabal-Ochoa, K. N. S hui, and W. G. Coley, "Web Crushing of Reinforced Concrete Structural Walls", ACI Jou., May-June 1984, pp. 231-241
- 7) 이리형, 최창식, 오영훈, "비탄성 반복하중을 받는 전단벽의 이력거동에 관한 실험적 연구", 대한건축학회 논문집 제6권 6호, 1990, 12
- 8) 이리형, 최창식, 윤현도, "비탄성 반복하중을 받는 철근콘크리트 전단벽의 비성형 해석", 대한건축학회 논문집 제6권 6호, 1990, 12

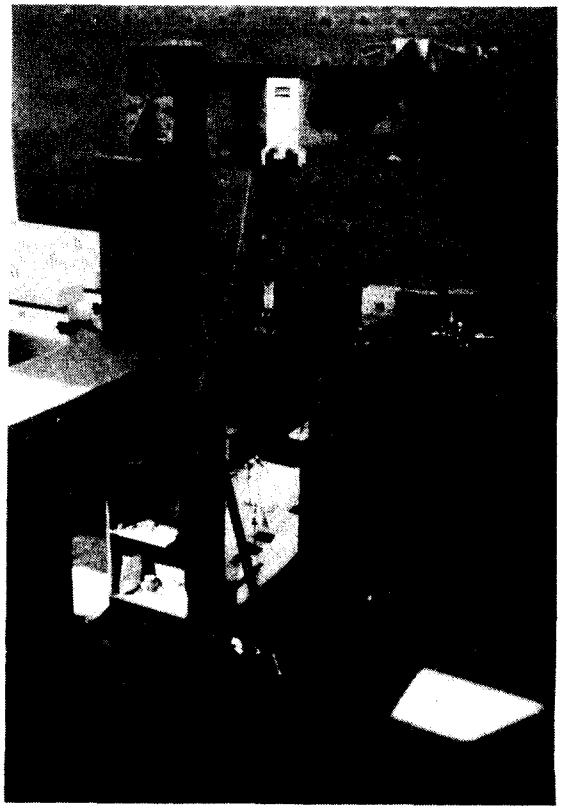


사진 1 시험체 설치상황

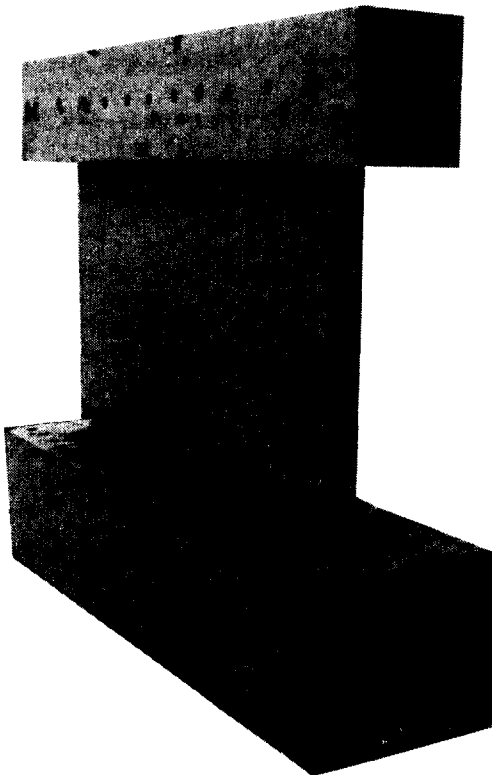


사진 2 SWR2 시험체의 최종파괴 양상

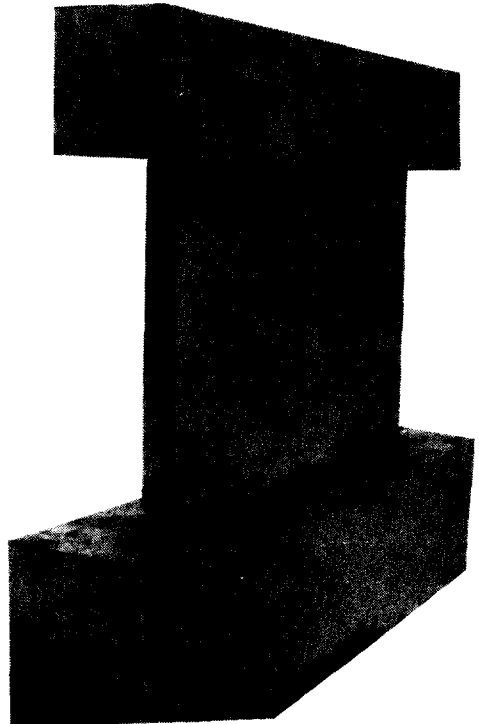


사진 3 SWR1 시험체의 최종파괴 양상