

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 鋼筋混凝土槽縫牆動態剛度變化之研究

### Study of Dynamic Stiffness for Slitted R.C. Shear Walls

計畫編號：NSC88-2211-E-041-008

執行期限：87 年 8 月 1 日至 88 年 7 月 31 日

主持人：劉玉文 嘉南藥理學院

#### 一、中文摘要

本研究主要目的在瞭解槽縫牆受力行為後，將槽縫牆模擬為一等值柱，等值柱模式是將槽縫牆一端視為彈性束制的柱元件，牆體的載重與水平位移關係以三折線模擬，除正向荷重外，亦考慮反向變化及軸力作用情形，分析結果與試驗值比較，相當合理。三折線剛度衰減模式確定後，以剛度退化及強度退化及皺縮等三因素建立牆剛度恢復力環規則34個路徑。最後對不同階段的力環預測與試驗值迴圈比較，相當合理。

**關鍵詞：**槽縫牆、剛度、等值柱、恢復力環。

#### Abstract

The RC slitted wall has been recognized as an efficient energy absorption structure. It is modelled as an equivalent column in this study. One of the boundary conditions of this column is assumed to be elastically restrained, while the other one is clamped. The load-horizontal displacement relation of this column is taken to be tri-linear. The proposed model is first verified by comparing the analytical solutions with the experimental results, and they show satisfactory agreement. On the base of tri-linear stiffness variable models, the degrading of stiffness and strength, pinching behavior are setting up the hysteretic rule of slitted RC walls. The rule includes 34 paths and can be divided into four stages. Compared with the tests of slitted RC walls in the past by using the rules of this study, the difference between analysis and tests are acceptable.

**Keywords:** slitted wall, stiffness, equivalent column, hysteretic loop.

#### 二、計畫緣由與目的

鋼筋混凝土槽縫牆是將傳統鋼筋混凝土剪力牆按照一定間距設置垂直貫穿的槽縫，一片牆體分割成若干並排的牆柱單元，在水平力作用下，不會如剪力牆一般產生顯著的斜張裂縫而轉化成柱列彎曲的細微裂縫，也就是將剪力牆牆體剪力破壞模式轉變為撓曲破壞模式。牆體側位移容許值增大且韌性改善，避免如剪力牆斜裂縫出現後的剛度嚴重退化，顯示槽縫牆是一種很好的吸能構材，若能作為建築物之耐震元件，應比鋼筋混凝土剪力牆的抗震能力佳[1]。本研究主要目的在瞭解槽縫牆試驗行為後，將槽縫牆模擬為一等值柱，建立合理的等值柱分析模式以預測槽縫牆之強度、剛度衰減模式及恢復力環規則。

#### 三、槽縫牆試驗之行為與剛度變化分析

槽縫牆試驗依牆體高寬比、槽縫數、邊界柱有無、不同試驗加載，以探討槽縫牆能量吸收、極限強度及剛度衰減情形，[2-4]，各試體參數如表 1。試驗時，當第一片壓力單元產生對角剪裂時，水平載重會自動減低，形成第一道保險裝置，而後各牆柱單元互相擠壓，剛度慢慢爬升，水平載重也逐漸提升，當長斜向裂縫貫穿二片牆柱單元時，水平載重會第二次降低而達極限狀態。以試驗 P -  $\Delta$  曲線包圍之面積計算其吸收能量大小比較，槽縫牆的平均韌度約為傳統剪力牆的四倍[5]。

由槽縫牆試驗行為可看出施力梁在受力後會有旋轉與平移的現象，因此本文擬以一扭轉彈簧來模擬施力梁的剛度建立牆等值柱反曲點高度的關係，反曲點高度為 L，利用彈性束制端桿件之彎矩分配原理及試驗施力梁側位移及旋轉角度的梁測值計算等值柱兩端之彎矩，由桿端彎矩可得

反曲點高度，分析結果無邊界柱與有邊界柱低型槽縫牆分別平均為 0.72 與 0.66。

將槽縫牆各"牆柱單元"及邊界柱組合成一根"等值柱"，當牆體張力側產生張力裂縫時，利用鋼筋混凝土桿件斷面轉動慣量與對應外載重成正比之關係[6]，計算可得牆體開裂載重( $P_c$ )而對應之水平側向位移( $\Delta_c$ )則同時考慮牆體之撓曲與剪力變形[5]，計算公式如下：

$$P_c = 2\lambda \left( f_r + \frac{N}{A_g} \right) \frac{I_g}{W(H_w)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\Delta_c = \frac{(3r-1) \cdot P_c \cdot H_w^3}{5.25 E \cdot I_g} \quad \dots\dots\dots (2)$$

其中  $\lambda$ ：填縫材係數，無填縫材時為 1.0 但填石棉板則為 1.2； $I_g$ ：不考慮鋼筋的等值柱斷面未發生撓曲開裂前之轉動慣量( $\text{mm}^4$ )； $N$ ：軸壓力(N)； $A_g$ ：牆體各牆柱單元剖面積( $\text{mm}^2$ )； $W$ ：牆體各牆柱單元寬度(mm)； $H_w$ ：施力點到牆底的距離(mm)。  $\Delta_c$ ：槽縫牆之反曲點高度與等值柱高度之比值。

槽縫牆屈服點是指牆柱單元外側主筋達到 0.002 應變時，對應之載重值稱為屈服載重( $P_y$ )，利用 RC 桿件斷面受彎矩之應力及應變關係整理，屈服載重點對應之位移( $\Delta_y$ )也考慮撓曲及剪力變形的效應，計算如下：

$$P_y = \frac{f_y \times (\sum I_{eff})}{n \times a \times (H)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\Delta_y = \frac{(3r-1) \cdot P_y \cdot H_w^3}{5.35 E \cdot \sum I_{eff}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中  $a$ ：牆柱單元或邊界柱最外側鋼筋至中性軸的距離(mm)；

$n$ ：鋼筋與混凝土間之彈性模數比值。

作用於槽縫牆之水平力逐漸增加達到極限時，槽縫會有閉合現象，各牆柱單元體連成一體可視為整片牆板，且載重達到槽縫牆屈服階段後，斜裂縫將貫穿整個牆體，利用牆板與等值斜撐的關係模擬該階段之牆體行為，可得極限載重( $P_u$ )及其對應之水平側向位移( $\Delta_u$ )如下：

$$P_u = 2\alpha_u (0.003 A_d E) \cos \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\alpha_u = [6.6 \left( \frac{P_u}{P_y} \right) - 1.7 (1 + 15 \left( \frac{N_u}{f_c A_g} \right))] \Delta_y \quad \dots\dots\dots (6)$$

其中  $A_d$ ：斜桿斷面積( $\text{mm}^2$ )，計算式為

$$A_d = (2 \sum A_g \cot \alpha_u) / (15 + \sin^2 \alpha_u) ;$$

$\alpha_u$ ：強度修正係數，計算式為

$$\alpha_u = 0.52\lambda + 0.814 \tan \alpha_u - 0.674 ;$$

$\alpha_u$ ：為牆體對角線與水平方向間之夾角。

#### 四、恢復力環規則

RC結構之恢復力環規則依據文獻[7]建議之三個次要參數：剛度退化、強度退化、及皺縮效應等，上節所述槽縫牆剛度變化的三折線模式加上這三個指標特性，可建立出在非線性往復載重中的物理性質與數學規則，進而簡化在地震反應模擬時的結構受力與位移關係[5]，說明如下：

##### 1. 剛度退化因子修正：

由於剛度退化因子之特性是在加載過程中卸載或卸載過程中突然加載的特性表現。理論上，該因子的特點是所有的反向加壓均會指向某個相同點。本研究26個試體中發現此因子表現相當明顯，其規則是在彈性階段指向反向開裂點，但在屈服階段則指向反向屈服點。

##### 2. 強度衰減因子修正：

反覆載重試體之強度衰減主要是由於受到雙向裂縫相互交織，導致混凝土擠碎剝落造成強度驟減。但在單向重覆載重試體因裂縫發展有一定之方向，混凝土不易剝落，故強度衰減不明顯。且由試驗資料觀察得知裂縫之大量形成乃於載重達 $P_y$ 時才會大量產生。因此強度衰減規則是利用正向加載及反向加載所消耗之能量，建立強度衰減修正式及位移放大修正關係式。

##### 3. 皺縮效應修正：

該效應之產生係由於牆體並非為純彎曲構材，有伴隨剪力效應的狀況參雜才會使卸載線的斜率突然趨向水平線的效應。本研究試體在彈性階段並不明顯而未予考

慮，在屈服階段正向的皺縮效應指向每次衰減包絡線的開裂點，而在Y軸截距為反向開裂載重值之0.75倍對應點，然後繼續延伸，一直到與通過反向開裂點的水平線相交後才轉換斜率。

#### 4. 恢復力環規則：

由上述三種因素之定性與定量控制，比較不同學者所提RC元件恢復力環規則之差異，採用Tekada規則概念修正，本研究恢復力環規則之剛度變化路徑分為彈性階段1種路徑，開裂階段11種路徑，屈服階段20種路徑，及破壞階段3種路徑。各階段之規則變化分別考慮加載、卸載、卸載中途加載及反向加載等四種不同的施力行為。

### 五、分析結果與討論

#### 1. 單向剛度分析比較

以前述槽縫牆剛度變化規則計算出各試體的開裂載重( $P_c$ )、屈服載重( $P_y$ )、極限載重( $P_u$ )及各階段對應之水平側向位移 $\Delta_c$ 、 $\Delta_y$ 、 $\Delta_u$ ，將分析值和試驗結果比較如表2及表3所示。比較得知分析的 $P_c$ 略小於試驗值，其比較誤差在10.5至-27.5%間；分析的 $P_y$ 與試驗值比較誤差在4.5至-13.8%間；分析的 $P_u$ 比試驗值略小。從表3之各階段水平側向位移比較，由於外觀判定三個階段的不確定性高，因此誤差難免偏大，但對整個試體的受力行為描述不受影響。將牆體承受各階段之水平載重與對應位移以三折線連結作為判斷破壞程度及試體韌性能力之重要依據。

#### 2. 恢復力環分析比較

本研究建立槽縫牆恢復力環規則後，建立恢復力環分析程式，以載重作為控制程式之關鍵值，分析結果與每一個往復載重試體之試驗迴圈比較。在彈性階段及開裂階段之預測路徑大致與試驗迴圈路徑符合，相差正負6%內；在屈服及破壞階段，大部份試體之預測路徑與試驗路徑相吻

合；唯有少數試體最後一個週次之迴圈程式無法執行而停止，其原因是預測強度衰減因子時誤差放大所致。

### 六、計畫成果自評

本研究計畫成果與計畫預期工作項目比較，除槽縫牆試體恢復力環分析程式改由自行設計外，其餘各項均已完成，並提供作為碩士生研究論文如文獻[5]。

### 七、參考文獻

1. Liou, Y. W. and Sheu, M. S., "Prediction of Lateral Stiffness for Fully Slitted RC Shear Wall", Journal of the Chinese Institute of Engineering, Vol.21, No.2, pp.221-232(1998).
2. 洪舜仁, "鋼筋混凝土低型槽縫剪力牆承受反向重覆載重之耐震行為研究", 國立成功大學建築研究所碩士論文(1987)。
3. 陳奕信, "低型鋼筋混凝土槽縫剪力牆承受反向重覆載重之剛度變化及耐震診斷研究", 國立成功大學建築研究所碩士論文(1988)。
4. 曾亮, "無邊界柱開口鋼筋混凝土槽縫剪力牆之耐震行為研究", 國立成功大學建築研究所碩士論文(1990)。
5. 吳政哲, "鋼筋混凝土槽縫牆之剛度研究", 國立成功大學建築研究所碩士論文(1998)。
6. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI318R-95)", Reported by Committee 318. American Concrete Institute (1995).
7. Sashi K. Kammath, Andrei M. Reinhorn, and Young. J. Park, "Analytical Modeling of Inelastic Seismic Response of RC Structures", J. Structural Engineering, ASCE, Vol.116, No.4, pp.996~1016, 1990.

表1 無邊界柱槽縫牆試體編號及基本參數表

試體分類	試體	槽縫料	$f'_c$	$f_y$	牆筋	配置	加載
(長×高×厚)	編號	(縫數)	(Mpa)	(Mpa)	垂直	水平	方式*2

*1 (100 × 50 × 10cm)	SSW21	無填縫料(3)	26.7	467.9	8-D10	4-D10	ML
	SSW23	無填縫料(3)	27.5	467.9	8-D10	4-D10	RR
	SSW28	石棉板(3)	26.5	467.9	8-D10	4-D10	MR
	SSW29	石棉板(3)	28.3	467.9	8-D10	4-D10	RR
*1 (100 × 50 × 10cm)	SSWB1	石棉板(2)	26.1	467.5	14-D10	4-D10	ML
	SSWB2	石棉板(2)	26.5	467.5	14-D10	4-D10	MR
	SSWB7	石棉板(2)	26.3	490.5	14-D10	4-D10	NR
	SSWB8	石棉板(2)	27.1	490.5	14-D10	4-D10	NR
*1 (100 × 50 × 10cm)	SSWBN2	石棉板(2)	29.7	467.5	14-D10	4-D10	MR
	SSWBN3	石棉板(2)	29.4	467.5	14-D10	4-D10	RR
	SSWBN4	石棉板(2)	29.6	467.5	14-D10	4-D10	NR
	SSWBN5	石棉板(2)	34.6	467.5	14-D10	4-D10	NL

\*1 : 分類環豐為無界柱槽縫牆 分類環豐為有界柱槽縫牆 分類環豐為有界柱且受軸向重之槽縫牆

\*2 : 加載方式說明: ML 為單向加載, MR 為單向漸大重疊加載, RR 為雙向重疊加載, NR 為不規則重疊加載

表 2 槽縫牆試體預測載重與試驗結果比較

分 類	試體編號	開裂載重 (P <sub>c</sub> : kN)			屈服載重 (P <sub>y</sub> : kN)			極限載重 (P <sub>u</sub> : kN)		
		試驗	分析	誤差 (%)	試驗	分析	誤差 (%)	試驗	分析	誤差 (%)
	SSW21	34.1	32.6	4.4	97.9	94.5	- 3.5	116.5	117.2	0.6
	SSW23	44.3	33.0	-25.5	98.2	96.2	- 2.0	119.2	119.0	- 0.2
	SSW28	43.7	35.1	-19.7	112.9	107.8	4.5	140.8	136.6	- 3.0
	SSW29	43.3	37.9	-12.5	115.5	117.6	1.8	144.8	141.1	- 2.6
	SSWB1	49.0	42.4	-13.5	146.2	136.4	- 6.7	184.4	171.8	- 6.8
	SSWB2	58.9	42.7	-27.5	137.4	136.8	- 0.4	182.4	173.1	- 5.1
	SSWB7	49.0	42.6	-13.1	146.1	145.0	- 0.8	178.5	172.4	- 3.4
	SSWB8	49.2	43.1	-12.4	149.1	143.8	- 3.6	165.8	175.0	5.5
	SSWBN2	68.7	76.0	- 9.6	209.1	210.7	0.8	249.9	240.0	- 4.0
	SSWBN3	68.7	75.9	10.5	206.0	210.4	2.1	229.4	238.8	4.1
	SSWBN4	69.1	76.0	10.0	218.7	206.0	- 5.8	244.1	239.6	- 1.8
	SSWBN5	103.0	78.1	- 24.2	234.7	202.3	-13.8	254.5	259.0	1.8

表 3 槽縫牆試體預測位移與試驗結果比較

分 類	試體編號	開裂位移 (c : mm)			屈服位移 (y : mm)			極限位移 (u : mm)		
		試驗	分析	誤差 (%)	試驗	分析	誤差 (%)	試驗	分析	誤差 (%)
	SSW21	0.4	0.17	-57.5	2.8	2.24	-20.0	10.8	14.6	35.2
	SSW23	0.3	0.17	-43.3	2.7	2.27	-15.9	17.4	14.7	-15.5
	SSW28	0.3	0.20	-33.3	3.5	2.77	-20.9	16.9	18.4	8.9
	SSW29	0.3	0.19	-36.7	3.5	2.75	-21.4	18.2	17.1	- 6.0
	SSWB1	0.4	0.32	-20.0	4.1	3.17	-22.7	22.7	21.0	- 7.5
	SSWB2	0.4	0.32	-20.0	3.4	3.17	- 6.8	19.8	21.1	6.6
	SSWB7	0.4	0.32	-20.0	5.2	3.36	-35.4	26.8	20.7	-22.8
	SSWB8	0.4	0.32	-20.0	4.3	3.33	-22.6	26.3	21.1	-19.8
	SSWBN2	0.6	0.55	- 8.3	3.4	4.6	35.3	11.7	11.5	- 1.7
	SSWBN3	0.5	0.55	10.0	3.3	4.6	39.4	10.5	11.4	8.6
	SSWBN4	0.4	0.55	37.5	3.1	4.5	45.2	12.1	12.1	0.0
	SSWBN5	0.6	0.53	-11.7	4.6	4.4	- 4.3	13.1	15.1	15.3