

[2227] 有開口耐震壁の破壊モードの判別式

竹原 雅夫*1・望月 洵*2・小野里憲一*3・飯田 正敏*4

1. はじめに

筆者らは、既往の報告[1]で無開口耐震壁の破壊モードを定義し、これを予測する判別式を壁板の圧縮ストラットの水平有効幅係数 ξ の関数として提案した。また耐震壁の最大層間変形角 R_b の下限値と ξ の関係式を実験結果をもとに提案した。このような判別式と下限値の予測は有開口耐震壁についても必要である。本研究は、有開口耐震壁の破壊モードの判別式と最大層間変形角の下限値を無開口耐震壁と同じように設定し、これを既往の実験と新に行った実験から検証することを目的としている。

2. 有開口耐震壁のマクロモデルと水平有効幅係数 ξ

有開口耐震壁の強度と破壊モードは、水平有効幅係数 ξ と密接に関わる。ここでは、有開口耐震壁のマクロモデルおよび強度と ξ の関係の概要を示す。マクロモデルにもとづく最大強度式については、圧縮ストラットの傾斜角を 45° に限定してすでに発表している[2]。図1は、より一般性を与えるため傾斜角を θ としたマクロモデルである。マクロモデルは、最大強度時において次の状態にあると仮定される。

- 1) 上・下梁は剛体で破壊しない。
- 2) 引張側柱下端は曲げまたは引張降伏しており、そのせん断力は小さく省略できる。圧縮側柱下端は曲げ降伏している。
- 3) 圧縮ストラット \textcircled{a} は $0.63\sigma_B$ の値で降伏している。圧縮ストラット \textcircled{c} と開口を横切る圧縮ストラットは除かれる。
- 4) 壁板の縦・横補強筋はすべて降伏している。ただし、開口を横切る縦補強筋は除かれる。

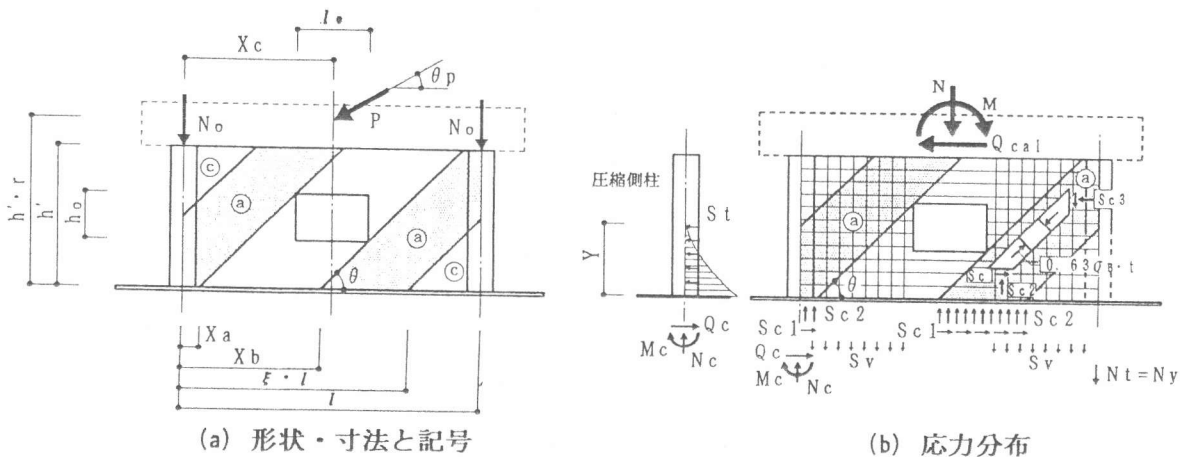


図1 マクロモデル

*1 東京建築専門学校、工修（正会員）
 *2 工学院大学教授 工学部建築学科、工博（正会員）
 *3 O. R. S事務所、工修（正会員）
 *4 工学院大学大学院 工学研究科建築学専攻

これらの仮定のもとで、最大せん断強度式は傾斜角 45° の場合と全く同じ方法で、次のように求められる。

$$Q_{cal} = Q_w + Q_c \quad \dots\dots(1)$$

$$Q_w = S_{c1} (X_a + \xi \cdot l - X_b) \quad \dots\dots(2)$$

$$Q_c = \sqrt{2 \cdot M_c \cdot S_t} \quad \dots\dots(3)$$

$$\xi = \eta + \left\{ \eta^2 + \frac{S_v}{S_{c2}} + \frac{2}{S_{c2} \cdot l} \left\{ \eta \sqrt{N_y \cdot D \cdot S_t} + N_o + N_y \left(\frac{D}{2l} + 1 \right) \right\} + \frac{1}{l^2} \left\{ 2l (X_a + X_b) \eta - X_a^2 + X_b^2 - 2 S_v \cdot l_o \cdot X_c \cdot \frac{1}{S_{c2}} \right\} \right\}^{1/2} \quad \dots\dots(4)$$

ただし、 $\xi > 1.0$ の場合、 $\xi = 1.0$ とする。ここで、 $\eta = \frac{\tan \theta p}{2} - \frac{h' \cdot r}{l}$ 、 $S_t = S_{c3} - S_h$
 $S_{c1} = 0.63 \sigma_B \cdot t \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta$ 、 $S_{c2} = 0.63 \sigma_B \cdot t \cdot \sin^2 \theta$ 、 $S_{c3} = 0.63 \sigma_B \cdot t \cdot \cos^2 \theta$ である。
 傾斜角 θ は、簡単のため、壁版の h' / l に応じて次のように定める。

$$\left. \begin{array}{l} h' / l = 1.0 \text{ の場合、} \theta = 45^\circ \\ h' / l = 1.67 \text{ の場合、} \theta = 60^\circ \\ 1.0 < h' / l < 1.67 \text{ の場合、} \theta = 45^\circ \text{ と } \theta = 60^\circ \text{ の直線補間値} \end{array} \right\} \quad \dots\dots(5)$$

式(5)は、傾斜角を変数として扱う筆者らの元モデル[3]による解析結果を考慮して決められたものである。

記号

Q_{cal} : 最大せん断強度	S_h : 横補強筋の単位長さあたりの降伏強度
Q_c : 圧縮側柱下端のせん断力	S_t : 側柱に作用する単位長さあたりの水平応力
Q_w : 圧縮ストラット@の負担せん断力	M_c : 圧縮側柱下端曲げ強度[4]
N_y : 引張側柱の引張降伏強度	t : 壁厚
D : 柱のせい	$g\sigma_y$: 主筋の降伏強度
σ_B : コンクリートの圧縮強度	P_g : 主筋比(%)
S_v : 縦補強筋の単位長さあたりの降伏強度	P_s : 壁筋比(%)

4章で引用する試験体の式(1)~(5)による最大せん断強度の解析結果を表1と図2に示す。試験体のうち、斜め補強筋のあるものは、斜め補強筋のない場合の最大せん断強度の解に斜め補強筋の全降伏強度の水平成分を累加して求めた。実験値と解析値の対応は極めてよく、 ξ の妥当性を示している。この ξ は、物理的には $\xi = 1.0$ の場合に引張側柱は降伏していないことを、 $\xi < 1.0$ の場合に降伏していることを意味する。

3. 有開口耐震壁の破壊モードの定義と判別式

破壊モードそのものはQ-R曲線の特徴を表すものであり、その判別式も、有開口耐震壁の開口の大きさが小さくなったとき無開口耐震壁をも判別できるものでなければならない。このことを考慮して、有開口耐震壁の破壊モードの定義とその判別式は無開口耐震壁のそれと同じものとし、次のように表す。

表1 解析結果

NO.	試験体名	Qexp (tf)	Rb	Qcal (tf)	Qexp	ξ	ξ̄	出典
					Qcal			
1	WAR45L-1	8.1	7.1	10.3	0.78	1.00	0.84	[5]
2	WAR45L-2	9.3	7.1	12.9	0.72	1.00	0.84	
3	WAR45S-1	9.6	8.3	7.5	1.28	1.00	0.84	
4	WAR45S-2	12.3	8.0	13.1	0.94	1.00	0.84	
5	WAR30L-2	12.4	5.8	14.4	0.86	1.00	0.90	
6	WAR30S-1	10.7	5.7	11.2	0.96	1.00	0.90	
7	WAR30S-2	11.2	5.8	13.2	0.85	1.00	0.90	
8	WAR15L-1	16.4	5.5	16.7	0.98	1.00	0.95	
9	WAR15L-2	12.3	7.1	15.2	0.81	1.00	0.95	
10	WBR45L-1	8.6	8.7	8.6	1.01	1.00	0.84	
11	WBR45L-2	9.7	8.0	9.5	1.03	1.00	0.84	
12	WBR45S	9.6	8.1	8.3	1.15	1.00	0.84	
13	M-I -10-20-0	41.8	15.9	36.2	1.15	1.00	0.97	[6]
14	M-I -10-20-0	33.0		35.7	0.92	1.00	0.97	
15	M-I -15-30-0	37.0	13.6	40.4	0.92	0.99	0.94	
16	M-I -15-30-0	39.0		40.4	0.97	0.99	0.94	
17	M-I -20-40-0	34.0	15.2	35.4	0.96	1.00	0.92	
18	M-I -20-40-0	33.5		35.4	0.94	1.00	0.92	
19	M-II -15-30-9	39.4	13.9	40.0	0.99	0.97	0.91	
20	M-II -15-30-9	40.3		40.0	1.01	0.96	0.91	
21	M-II -15-30-13	40.1	14.4	35.0	1.15	1.00	0.95	
22	M-II -15-30-13	38.0		35.3	1.08	1.00	0.95	
23	M-II -15-30-2.1	40.9	12.5	40.2	1.02	1.00	0.95	
24	M-II -15-30-2.1	41.9		40.5	1.03	1.00	0.95	
25	M-II -15-30-PL	39.6	14.3	39.6	1.00	0.89	0.84	
26	M-II -15-30-PL	39.1		39.7	0.99	0.88	0.83	
27	M-III-15-30-9	32.9	11.9	34.0	0.97	0.96	0.91	
28	M-III-15-30-9	32.0		34.1	0.94	0.94	0.89	
29	M-III-15-30-2.1	36.4	12.0	35.7	1.02	0.84	0.78	
30	M-III-15-30-2.1	31.8		35.7	0.89	0.83	0.77	
31	SSC-2	110.0	6.4	101.7	1.08	0.94	0.85	[7]
32	SSC-3	105.7	7.7	90.7	1.17	1.00	0.87	
33	SSC-3C	106.6	7.5	96.8	1.10	0.98	0.86	
34	SSC-3M	112.0	10.0	88.5	1.27	1.00	0.88	
35	SSC-3N	103.8	7.5	85.1	1.22	0.94	0.81	
36	NO.1	112.9	9.3	77.7	1.45	1.00	0.88	
37	NO.2	102.3	8.4	91.7	1.12	1.00	0.88	
38	NO.3	101.2	8.3	86.2	1.17	1.00	0.88	
39	SSC-4	86.5	7.5	78.2	1.11	1.00	0.83	
40	RSC-3	111.3	5.0	94.2	1.18	0.96	0.82	
41	RSC-3C	118.3	7.4	107.4	1.10	0.87	0.71	[8]
42	WO4AX-0	59.4	8.3	45.6	1.30	0.76	0.53	
43	WO4AX-1	62.3	8.7	52.0	1.20	0.76	0.53	
44	WO4AX-2	66.5	9.5	56.1	1.19	0.77	0.53	
45	WO4AX-3	67.9	13.8	61.4	1.11	0.77	0.53	
46	WO3X-1	66.2	7.3	62.5	1.06	0.71	0.52	
47	WO3X-2	70.2	8.7	69.2	1.02	0.71	0.52	[9]
48	WO-A	39.9	5.9	33.8	1.18	0.67	0.38	
49	WO-8X6	43.6	9.2	39.7	1.10	0.68	0.39	
50	WO-8X10	45.7	12.2	44.5	1.03	0.67	0.38	
51	WO-A8x6	43.6	10.0	39.7	1.10	0.68	0.39	[10]
52	WO-A2	53.5	7.6	41.0	1.30	0.81	0.59	
53	WO-12x13	62.8	20.0	71.2	0.88	0.79	0.56	
54	93SW001	12.1	20.0	11.6	1.04	0.65	0.42	
		12.0	20.0	11.6	1.04	0.65	0.42	
55	93SW002	14.3	19.6	14.1	1.01	0.70	0.49	
		14.9	13.7	14.1	1.06	0.70	0.49	
56	93SW003	15.9	15.0	17.1	0.93	0.76	0.58	
		16.9	18.9	17.1	0.99	0.76	0.58	
57	93SW004	20.8	9.7	25.0	0.83	0.87	0.71	
		21.2	9.6	25.0	0.85	0.87	0.71	
平均値					1.04			
標準偏差					0.14			
変動係数					0.13			

破壊モードの定義

- a)せん断破壊モード：引張側柱下端は引張降伏していない。その最大層間変形角 R_b の下限値は 5×10^{-3} rad. 程度である。
 - b)曲げ・せん断破壊モード：引張側柱下端は引張降伏している。その最大層間変形角 R_b の下限値は $5 \sim 10 \times 10^{-3}$ rad. 程度である。
 - c)曲げ破壊モード：引張側柱下端は引張降伏している。その最大層間変形角 R_b の下限値は 10×10^{-3} rad. 程度である。
- ここで、 R_b は最大強度の 80% の水平線と力-変形曲線の包絡線との交点のうち大きいほうの層間変形角である。

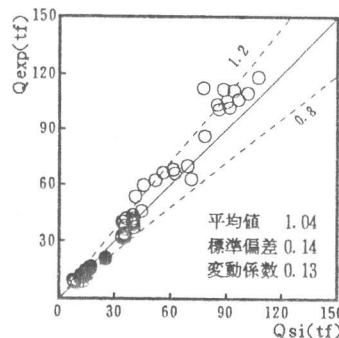


図2 $Q_{exp} - Q_{cal}$ の関係

破壊モードの判別式

$$\left. \begin{array}{l}
 \text{せん断破壊モード} \quad : \quad \bar{\xi} \geq 0.8 \\
 \text{曲げ・せん断破壊モード} \quad : \quad 0.8 > \bar{\xi} > 0.4 \\
 \text{曲げ破壊モード} \quad : \quad 0.4 \geq \bar{\xi}
 \end{array} \right\} \dots\dots(6)$$

ここで、 $\bar{\xi}$ は圧縮ストラットの置換水平有効幅係数で次の式で表される。

$$\bar{\xi} = \sqrt{\xi^2 l^2 + Xa^2 - Xb^2 / l} \dots\dots(7)$$

$\bar{\xi}$ は、有開口耐震壁の最大強度時の抵抗モーメントと等価な値をもつ無開口耐震壁の水平有効幅係数である。式(6)で $0.8 > \bar{\xi}$ としたのは、引張側柱下端が引張降伏していなくて、曲げ降伏している場合、最大強度以降の強度低下がいちじるしいせん断破壊モードを示す。しかし、2章のマクロモデルではこれを表現できないことを考慮したものである。

4. 最大層間変形角の下限値曲線

筆者らは、無開口耐震壁の実験から、最大層間変形角 R_b の下限値 ${}_L R_b$ を圧縮ストラットの水平有効幅係数 ξ の関数として、次の式を求めた[1]。

$${}_L R_b = 3.02 / \xi + 2.23 \dots\dots(8)$$

有開口耐震壁についても3章で述べたと同じ理由で式(8)を用いる。ただし、 ξ を $\bar{\xi}$ とし、式(7)で求める。ここで引用する試験体は、すべて中央開口のもので、縦横補強筋の44体、縦横補強筋に斜め補強筋を加えた9体、および5章で述べる実験の4体である。図3は、引用した試験体のうち $Q - R$ 曲線が明示されているものから求めた R_b をプロットしたものである。図3(a)は開口周比 ($= \sqrt{h_o \cdot l_o / h' \cdot l'}$) を、図3(b)は h' / l' をパラメータに試験体を区分けしてある。 $\bar{\xi}$ の大きい範囲で開口周比が大きいものが必ずしも R_b が大きくない。これは、試験体がせん断破壊モードで終わっていることにもとづく。圧縮ストラットの限界歪は $\epsilon_u = 0.003$ 程度であるから、その傾斜角を 45° とすると開口周比に関係なく最大強度時の層間変形角は 5×10^{-3} rad. 程度にな

るからである。図3(b)は、明確に h'/l' の大きいものほど Rb が大きい。これは、 Rb に曲げ変形も含まれていることで説明できる。下限曲線は最大層間変形角の下限値をよく限界づけている。大きくずれている試験体No. 48は、側柱のせん断破壊を伴う圧壊で破壊したものである。

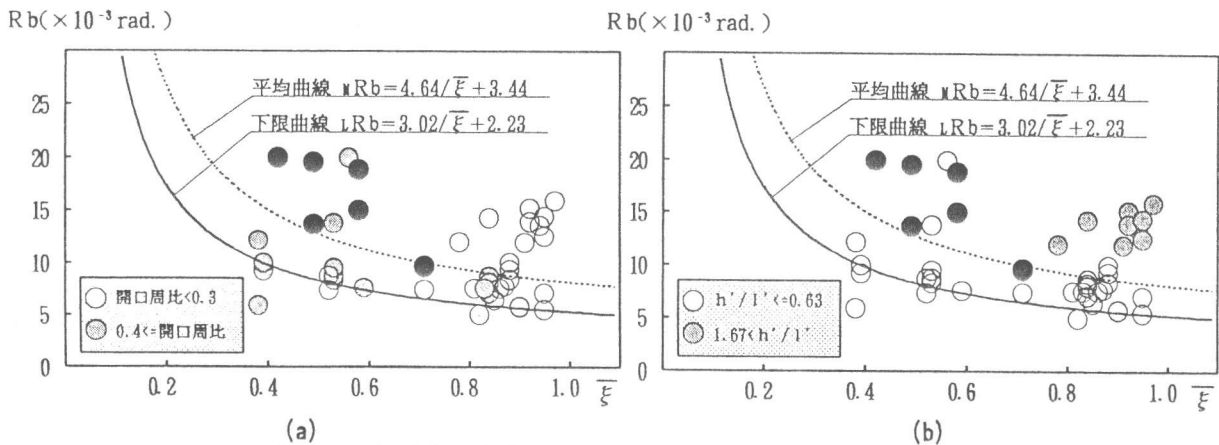


図3 水平有効幅係数 ξ - 最大層間変形角 Rb の関係

5. 検証のための実験

4章の試験体には ξ の小さいものが少ない。このため、 ξ の小さい試験体の水平加力実験から破壊モードの判別式と Rb の下限曲線の検証を行う。図4に試験体の形状と寸法、配筋方法および加力方法を示す。連層耐震壁を意図して上梁は剛強である。側柱はせん断破壊しないように十分に補強されている。加力サイクルは、最大強度または $R = 10 \times 10^{-3} \text{ rad.}$ まで $R = 1 \times 10^{-3} \text{ rad.}$ ごと2回、それ以降は $R = 2 \times 10^{-3} \text{ rad.}$ ごと1回で、変位制御で行った。表2に試験体の諸性質を表1に ξ を示す。表中の ξ から93SW0-1は曲げに近い、93SW0-2, 3は曲げ・せん断の、および93SW0-4はせん断の破壊モードで終わると予測された。

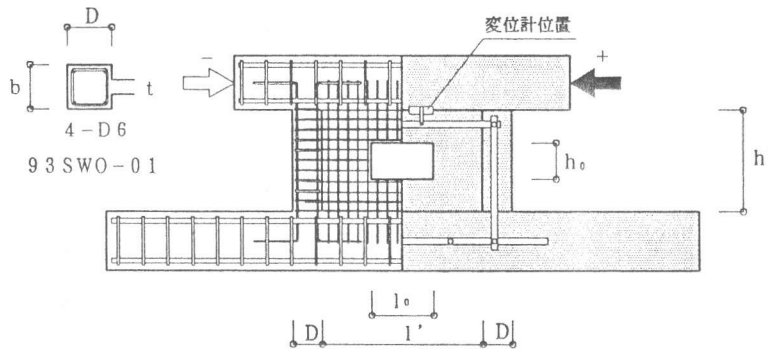


図4 試験体

表2 試験体の諸性質

試験体名	t (cm)	P_g (%)	$g\sigma_y$ (kgf/cm ²)	P_s (%)	σ_B (kgf/cm ²)
93SW0-01	4.0	0.89	3945	0.82	375
93SW0-02	4.0	1.38	3945	0.82	375
93SW0-03	3.8	1.98	3981	0.86	391
93SW0-04	4.2	3.53	3956	0.77	391

【共通項目】

柱 $b \times D = 12 \times 12$ (cm)
 壁寸法 $h' \times l' = 40 \times 65$ (cm)
 開口寸法 $h_0 \times l_0 = 14 \times 25$ (cm)
 壁筋の降伏強度 $s\sigma_y = 5042$ (kgf/cm²)
 帯筋の降伏強度 $w\sigma_y = 3945$ (kgf/cm²)
 開口周比 = 0.37
 $h'/l' = 0.62$

図5は93SW0-1と93SW0-2のQ-R曲線で、図6は最終時破壊状態である。両試験体とも、引張側柱下端の引張降伏が計測され、最大荷重には開口両側壁板の圧壊で達している。表1に最大せん断強度の解析値と実験値/解析値を、また図3に●印で正負加力域の±Rbを示す。最大せん断強度は解析によって精度よく評価できている。最大層間変形角は平均曲線上またはこれより上側にプロットされている。

これらの結果は、ここで提案している破壊モードの判別式、およびRbの下限曲線の妥当性を示している。

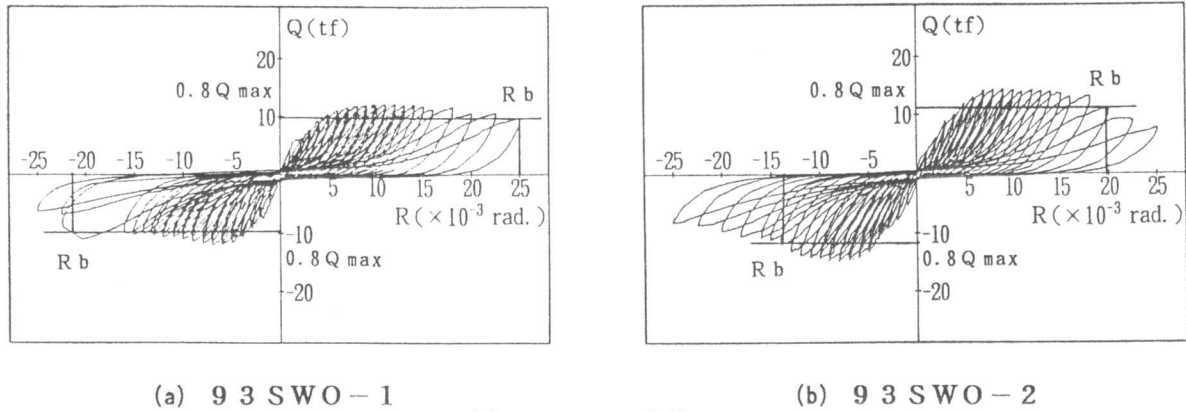


図5 Q-R曲線

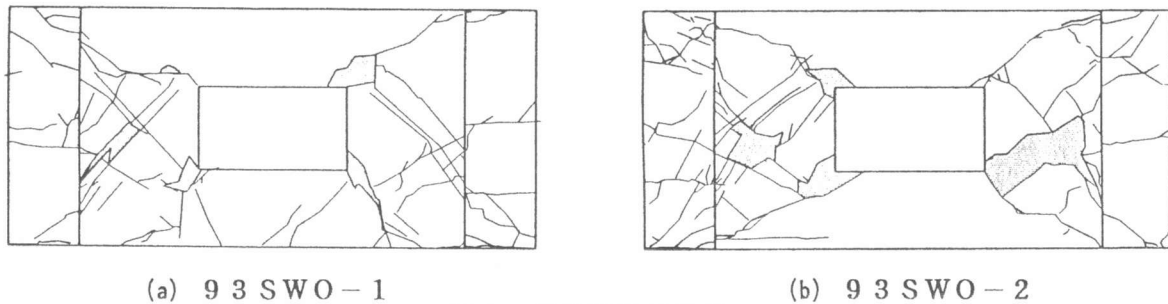


図6 最終時破壊状態

6. 結び

本研究で、有開口耐震壁の破壊モードの定義とその判別式、および最大層間変形角の下限曲線を、圧縮ストラットの置換水平有効幅係数 $\bar{\xi}$ を導入して無開口耐震壁の場合と同じ形で提案した。さらに、既往の実験と新に行った実験によって、破壊モードの定義と判別式、および最大層間変形角の下限曲線が妥当であることを検証した。ただし、試験体数の不足からこれらの適用域は $\bar{\xi} > 0.4$ に限定される。

参考文献

- 1) 小野里憲一・望月 洵・竹内克己・谷本和彦:耐震壁の強度と破壊モードの制御、第14回コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14、No.2、pp.891-896、1992
- 2) 竹原雅夫・望月 洵・小野里憲一・鈴木京司:有開口連層耐震壁の最大強度式、第14回コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14、No.2、pp.885-890、1992
- 3) 望月 洵・竹原雅夫・小野里憲一:マクロモデルによる有開口連層耐震壁の最大強度式の解析、第14回コンクリート工学年次論文報告集、Vol.12、No.2、pp.569-574、1990
- 4) 日本建築学会:建築耐震設計における保有水平耐力と変形性能(1990)、pp.396-397
- 5) 望月 洵・竹原雅夫:スリップ破壊する有開口連層耐震壁の強度と変形に関する研究、第8回コンクリート工学年次講演会論文集、Vol.8、pp.701-704、1986
- 6) 積木紀男ほか:有開口鉄筋コンクリート耐震壁の変形と耐力について—壁板中央に壁板と相似な開口を有する壁体における開口の大小、斜め補強筋・壁筋量の影響に関する実験的研究、日本建築学会論文報告集、第293号、pp.69-83、1980、7
- 7) 渡部 丹ほか:建屋の復元力特性に関する研究(その13)開口を有する耐震壁の実験、社団法人建築研究振興協会、1986、6
- 8) 青山博之ほか:鉄筋コンクリート造開口耐震壁の補強方法及び特性、第10回コンクリート工学年次論文報告集、Vol.10、No.2、pp.415-420、1988
- 9) 加藤大介・石塚正治:鉄筋コンクリート造有開口壁のせん断補強法に関する研究、第10回コンクリート工学年次論文報告集、Vol.10、No.2、pp.403-408、1988
- 10) 加藤大介・村上幸靖:鉄筋コンクリート造有開口壁のせん断補強およびせん断耐力評価に関する実験的研究、第11回コンクリート工学年次論文報告集、Vol.11、No.2、pp.573-578、1989