

論文 有開口耐震壁のせん断剛性に関する研究

小野正行*¹

要旨：既往の鉄筋コンクリート造有開口耐震壁の実験資料と弾性域における著者提案のせん断剛性低下率の式を適用して、有開口耐震壁の弾性域から塑性域までのせん断剛性低下を明らかにし、その耐震設計資料を提供している。

キーワード：鉄筋コンクリート造、弾性、塑性、開口、せん断剛性、低下率

1. はじめに

有開口耐震壁の剛性評価は変形計算の他に、耐震壁を有する建物の応力計算をする際にも必要になる。このため、可能な限り精算によって求めることが望ましいが、現状では、基礎の回転剛性、弾性域から塑性域におけるせん断剛性、開口形状および付帯ラーメンの断面形状の影響などについての資料が必ずしも十分ではなく、一般的な形で実務設計に用いられるまでにはなっていない。したがって、著者は、開口の大きさや形状以外に、無開口耐震壁よりも有開口耐震壁のほうの剛性に影響を及ぼすと考えられる柱断面形状を考慮した弾性域におけるせん断剛性低下率の算定式や算定図表を提案している [1]。

本研究の目的は、著者の提案した弾性域におけるせん断剛性低下率の算定式および著者の行った実物大の約1/3の大きさの鉄筋コンクリート造有開口耐震壁の実験資料を用いて、弾性域から塑性域までのせん断剛性について検討を行い、その耐震設計資料を得ようとするものである。

2. せん断剛性低下率の算定式および鉄筋コンクリート造有開口耐震壁の試験体の諸元

著者は、弾性域における有開口耐震壁の無開口耐震壁に対するせん断剛性低下率 α_s の算定式を次式のように提案した [1]。

$$0.1 \leq \gamma \leq 0.53$$

$$\alpha_s = (0.025/0.0303^\gamma) \times \alpha\beta + (0.6/0.55^\gamma) / (1.55/\gamma^2)^\eta \quad (1)$$

$$0.53 < \gamma \leq 1.00$$

$$\alpha_s = (5.2/717.24^\gamma) \times \alpha\beta + (0.6/0.55^\gamma) / (1.55/\gamma^2)^\eta \quad (2)$$

但し、 $\alpha\beta = 2bD/tl'$ (bD : 柱断面積、 t : 壁厚、 l' : 柱のうちのりスパン)、 $\gamma = 2l_w/h'$ (l_w : 袖壁長さ)、 $\eta = h_o/h'$ (h_o : 開口高さ、 h' : 柱のうちのり高さ)

既往の鉄筋コンクリート造有開口耐震壁の試験体の形状・寸法を図-1およびその諸元を表-1に示す[2],[3],[4]。試験体は、実物大の約1/3の大きさである。開口は壁板中央にあり、開口周比が0.2~0.6の大きさの開口を有する19体の試験体である。試験体には、FWt- ξ -nの記号を付け、 t は壁厚、 ξ は開口周比、 n は同一の開口周比でも柱主筋本数や鉄筋径およびコンクリートの圧縮強度の相違を示す。加力方法は、柱頭部に一定の軸方向力($N=20\text{ton}$)を作用さ

* 1 近畿大学教授 九州工学部建築学科 (正会員)

せ、変位制御で一変位振幅一サイクルの正負交番漸増繰返しの水平加力である。変位制御は基礎上端からはりの材軸線までの高さ $h = 115\text{cm}$ でのより中央の水平変位 δ により行った。4箇所の位置で柱の材軸方向の伸縮を求め、曲げ変形 δ_B を求めた。せん断変形角 R_s は $(\delta - \delta_B) / h$ より求めた。

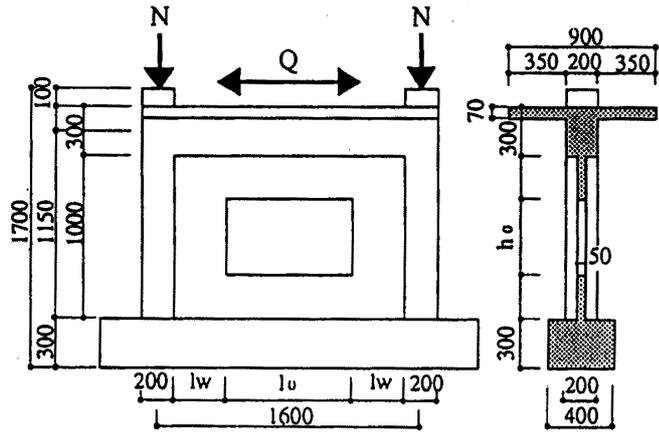


図-1 既往の試験体資料の形状・寸法 (単位: mm)

3. 始源せん断剛性

本研究では、無開口耐震壁と有開口耐震壁の始源せん断剛性 oK_{cal} 、 ξK_{cal} 、 ξK_{ex} を次式により求め、表-2に示す。

1) 無開口耐震壁

$$oK_{cal} = A_w \cdot cG / \kappa_w'$$

2) 有開口耐震壁

$$\xi K_{cal} = r_s \cdot oK_{cal}$$

$\xi K_{ex} = Q / R_s$ {水平荷重 (Q) - せん断変形 (R_s) 曲線の一サイクルにおける正側加力時 (水平変位 δ では $0 \sim 0.6\text{mm}$ 間) の直線部分の勾配}

但し、 A_w : 壁厚 \times 柱中心間距離 ($t1$)、 cG : コンクリートのせん断弾性係数 (コンクリートの重量 2.3t/m^3 、ポアソン比 $1/6$ を使用)

κ_w' : 断面形状で決まる係数 [5]、 r_s : 式 (1) と式 (2)

表-2に、 r_s の値と $ex r_s (= \xi K_{ex} / oK_{cal})$ の値を示す。 r_s の値は実験値から求めた $ex r_s$ の値よりも大きい。

4. せん断塑性係数

本研究では、せん断塑性係数 ($o\beta_{cal}$ 、 $\xi\beta_{cal}$ 、 $\xi\beta_{ex}$) を次式により求めた。

$$o\beta_{cal} = (Q / R_s) / oK_{cal} \quad \xi\beta_{cal} = (Q / R_s) / \xi K_{cal}$$

表-1 既往の試験体資料の諸元

試験体名	n- ϕ	t (cm)	P_s (%)	$h_o \times l_o$ (cm \times cm)	σ_B	cG ($\times 10^4$)
FW5-0.199	6-D13	5	0.64	27 \times 27	245	9.96
FW5-0.273-1	4-D10	5	1.28	37 \times 37	267	10.40
FW5-0.273-2	4-D10	5	0.64	37 \times 37	253	10.12
FW5-0.273-3	4-D13	5	0.64	37 \times 37	275	10.55
FW5-0.273-4	6-D13	5	1.28	37 \times 37	268	10.42
FW5-0.273-5	6-D13	5	0.64	37 \times 37	240	9.86
FW5-0.307	6-D13	5	0.64	47 \times 37	270	10.46
FW5-0.367-1	4-D13	5	0.64	37 \times 67	312	11.24
FW5-0.367-2	4-D13	5	0.64	37 \times 67	261	10.28
FW5-0.367-3	4-D13	5	0.64	67 \times 37	353	11.96
FW5-0.367-4	4-D13	5	0.64	67 \times 37	284	10.72
FW5-0.414-1	4-D10	5	0.64	47 \times 67	243	9.92
FW5-0.414-2	6-D13	5	0.64	47 \times 67	232	9.96
FW5-0.443-1	4-D10	5	0.64	47 \times 77	232	9.69
FW5-0.443-2	6-D13	5	0.64	47 \times 77	222	9.48
FW5-0.519-1	4-D10	5	0.64	57 \times 77	232	9.69
FW5-0.519-2	6-D13	5	0.64	57 \times 77	197	8.93
FW5-0.528	4-D13	5	0.64	57 \times 90	313	11.26
FW5-0.594	6-D13	5	0.64	67 \times 97	259	10.24

注) 柱断面: $b \times D = 20\text{cm} \times 20\text{cm}$ はり断面: $b \times D = 20\text{cm} \times 30\text{cm}$
 $n-\phi$: 柱主筋本数-径 t : 壁厚 P_s : 壁筋比 $h_o \times l_o$: 開口寸法
 σ_B : コンクリートの圧縮強度 cG : コンクリートのせん断弾性係数 (kg/cm^2) $\kappa_w' = 0.936$ (初期剛性に関する形状係数)

表-2 $\circ K_{cal}$, ξK_{cal} , ξK_{ex} , r_s , $ex r_s$ の値

試験体名	$\circ K_{cal}$ ($\times 10^6$)	ξK_{cal} ($\times 10^6$)	ξK_{ex} ($\times 10^6$)	r_s	$ex r_s$
FW5-0.199	85.14	68.00	37.81	0.799	0.444
FW5-0.273-1	88.88	60.28	51.11	0.678	0.575
FW5-0.273-2	86.52	58.68	50.62	0.678	0.585
FW5-0.273-3	90.20	61.18	49.07	0.678	0.544
FW5-0.273-4	89.04	60.39	56.71	0.678	0.637
FW5-0.273-5	84.27	57.15	38.87	0.678	0.461
FW5-0.307	89.38	56.85	52.66	0.636	0.589
FW5-0.367-1	96.08	57.69	49.74	0.600	0.518
FW5-0.367-2	87.87	53.36	43.51	0.600	0.495
FW5-0.367-3	102.19	51.81	45.64	0.507	0.447
FW5-0.367-4	91.66	46.51	34.35	0.507	0.375
FW5-0.414-1	82.85	44.62	38.33	0.539	0.463
FW5-0.414-2	84.79	45.66	41.17	0.539	0.485
FW5-0.443-1	82.85	36.41	23.77	0.439	0.287
FW5-0.443-2	81.04	35.62	31.12	0.439	0.384
FW5-0.519-1	82.85	24.94	24.00	0.301	0.290
FW5-0.519-2	76.34	22.98	18.93	0.301	0.248
FW5-0.528	96.23	26.43	24.70	0.274	0.257
FW5-0.594	87.54	16.99	15.15	0.194	0.173

$$\xi \beta_{ex} = (Q/R_s) / \xi K_{ex}$$

但し、 Q/R_s : R_s 時のせん断剛性で Q は水平荷重である。 R_s と Q は正側と負側加力で若干異なるので平均値を採用した。

試験体2体の Q/R_s とせん断塑性係数の値を表-3に示し、図-2に $\circ \beta_{cal}$ 、 $\xi \beta_{cal}$ 、 $\xi \beta_{ex}$ と R_s の関係を示す。図-2中の実線は回帰線を、矢印は水平耐力時を示す。図-2から、 R_s が大きくなるにつれ剛性が低下し、同一 R_s 時の $\xi \beta_{cal}$ 、 $\xi \beta_{ex}$ は、開口が大きくなるほど剛性低下は少ない。 $\circ \beta_{cal}$ は逆になる。本論文では、2体の試験体についてしか示していないが、他の試験体についても同じ傾向にある。開口周比が0.5以下の試験体の壁板の斜めひび割れの発生は $R_s = (0.2 \sim 0.4) \times 10^{-3} \text{ rad}$ 付近、開口周比が0.5以上の試験体の壁板の斜めひび割れの発生はかなり大きな R_s で見られた。

表-3 Q/R_s 、 $\circ \beta_{cal}$ 、 $\xi \beta_{cal}$ 、 $\xi \beta_{ex}$ の値

FW5-0.273-5				
R_s	Q/R_s	$\circ \beta_{cal}$	$\xi \beta_{cal}$	$\xi \beta_{ex}$
0.219	28.12	0.334	0.492	0.723
0.892	18.33	0.218	0.321	0.472
1.742	13.72	0.163	0.240	0.353
2.665	10.96	0.130	0.192	0.282
3.530	9.30	0.110	0.163	0.239
4.487	8.00	0.095	0.140	0.206
5.391	7.03	0.083	0.123	0.181
6.353	6.09	0.072	0.107	0.157
7.295	5.17	0.061	0.090	0.133
9.259	3.56	0.042	0.062	0.092

FW5-0.594				
R_s	Q/R_s	$\circ \beta_{cal}$	$\xi \beta_{cal}$	$\xi \beta_{ex}$
0.223	13.97	0.160	0.822	0.922
0.977	9.52	0.109	0.560	0.629
1.897	7.12	0.081	0.419	0.470
2.900	5.55	0.063	0.327	0.366
3.829	4.47	0.051	0.263	0.295
4.843	3.69	0.043	0.222	0.249
5.776	3.26	0.037	0.192	0.215
6.820	2.82	0.032	0.166	0.186
7.793	2.36	0.027	0.139	0.156
9.766	1.89	0.022	0.111	0.125

注) R_s : ($\times 10^{-3}$ rad.)

Q/R_s : ($\times 10^6$ rad.)

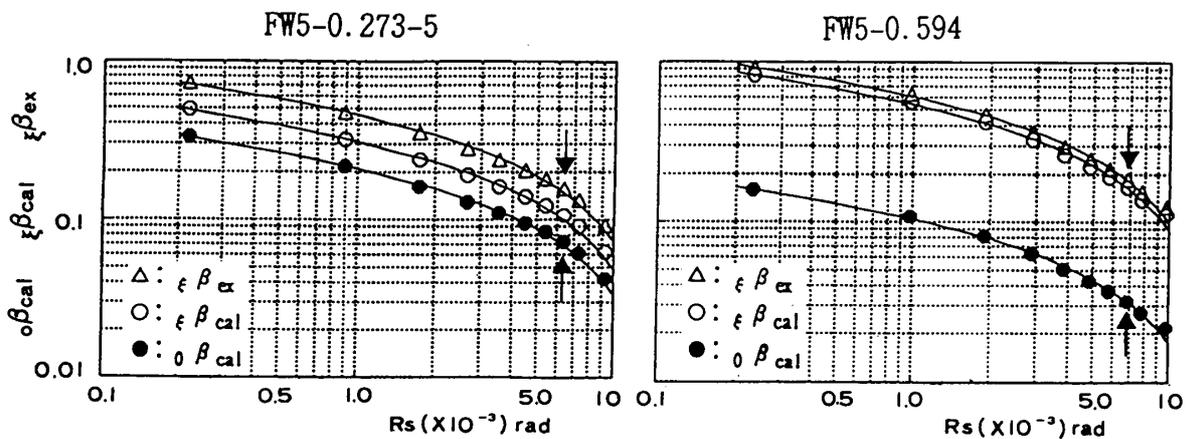


図-2 $\circ \beta_{cal}$ 、 $\xi \beta_{cal}$ 、 $\xi \beta_{ex}$ と R_s の関係

図-2の回帰式から、19体の試験体の $R_s = (0.2 \sim 10) \times 10^{-3} \text{rad}$ の時のせん断塑性係数 $o\beta_{cal}$ 、 $\xi\beta_{cal}$ 、 $\xi\beta_{ex}$ と開口周比 ξ の関係を図-3に示す。図-3中の実線は回帰直線であり、その回帰式 $o\beta_{cal}^*$ 、 $\xi\beta_{cal}^*$ 、 $\xi\beta_{ex}^*$ は、次式のように定義される。

$$o\beta_{cal}^*, \xi\beta_{cal}^*, \xi\beta_{ex}^* = f(R_s) \times \xi + b(R_s) \quad (3)$$

式(3)の $f(R_s)$ 、 $b(R_s)$ と R_s の関係を図-4に示す。図-4中の実線は回帰直線であり、その回帰式は、次式のように定義される。

$$f(R_s) = A \cdot \log R_s + B \quad (4)$$

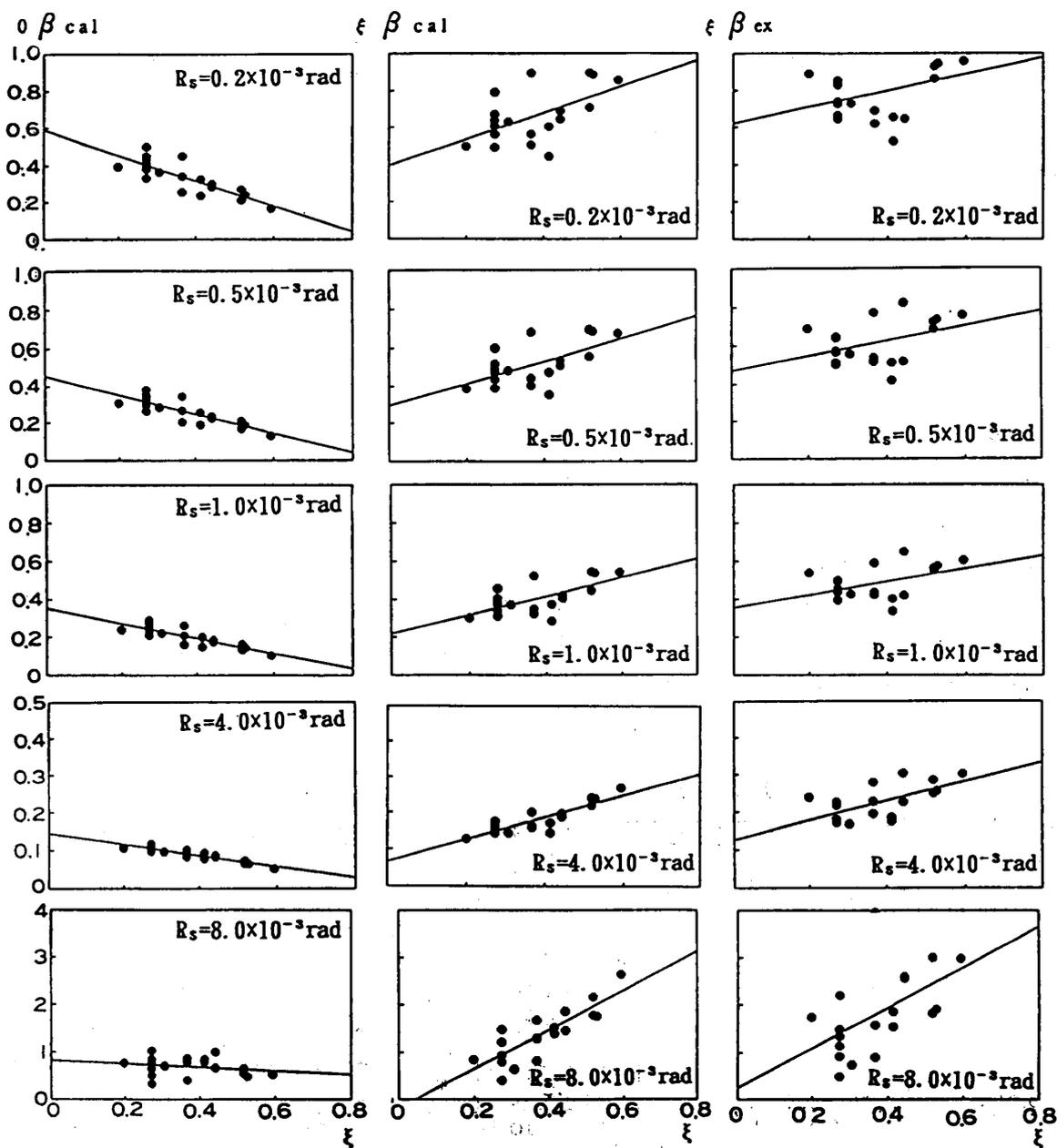


図-3 $o\beta_{cal}$ 、 $\xi\beta_{cal}$ 、 $\xi\beta_{ex}$ と開口周比 ξ との関係および回帰直線

$$b(R_s) = C \cdot \log R_s + D \quad (5)$$

図-5に、実験から求められる R_s 時の式(3)、式(4)および式(5)を用いて算定されるせん断塑性係数 $\circ\beta_{cal}$ 、 $\xi\beta_{cal}$ 、 $\xi\beta_{ex}$ と $\circ\beta_{cal}$ 、 $\xi\beta_{cal}$ 、 $\xi\beta_{ex}$ の関係をFW5-0.273-5、FW5-0.594の試験体について示す。図-5から、 $\circ\beta_{cal}$ と $\circ\beta_{cal}$ 、 $\xi\beta_{cal}$ と $\xi\beta_{cal}$ 、 $\xi\beta_{ex}$ と $\xi\beta_{ex}$ の関係はほぼ一致している。図-6に、2体の試験体のせん断塑性係数 $\circ\beta_{cal}$ 、 $\xi\beta_{cal}$ 、 $\xi\beta_{ex}$ と τ/σ_B (せん断応力度: $\tau = Q/2 \cdot t_{lw}$) との関係を示す。せん断塑性係数はせん断応力度 τ の増加とともに、ほぼ直線的に小さくなる。

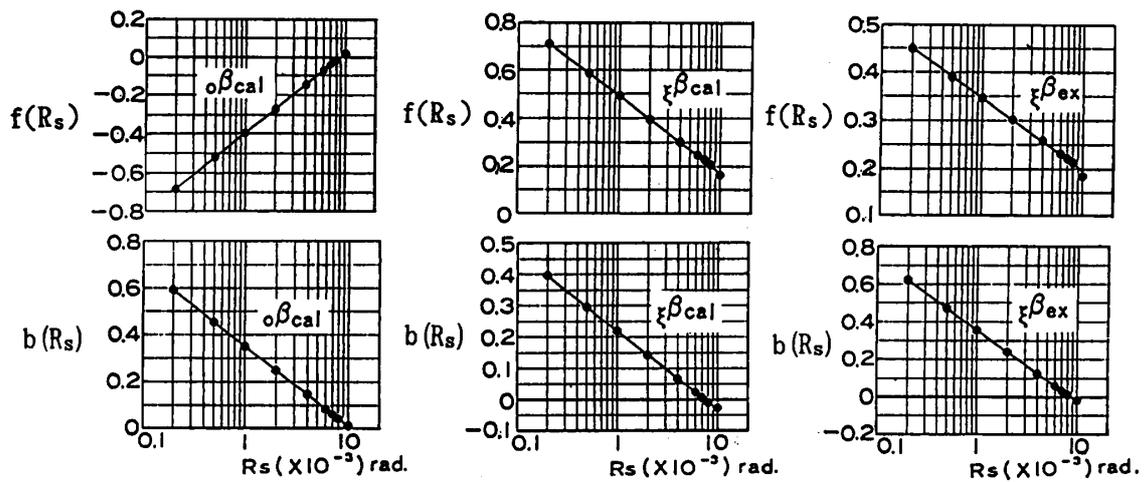


図-4 式(3)の $f(R_s)$ 、 $b(R_s)$ と R_s の関係および回帰直線

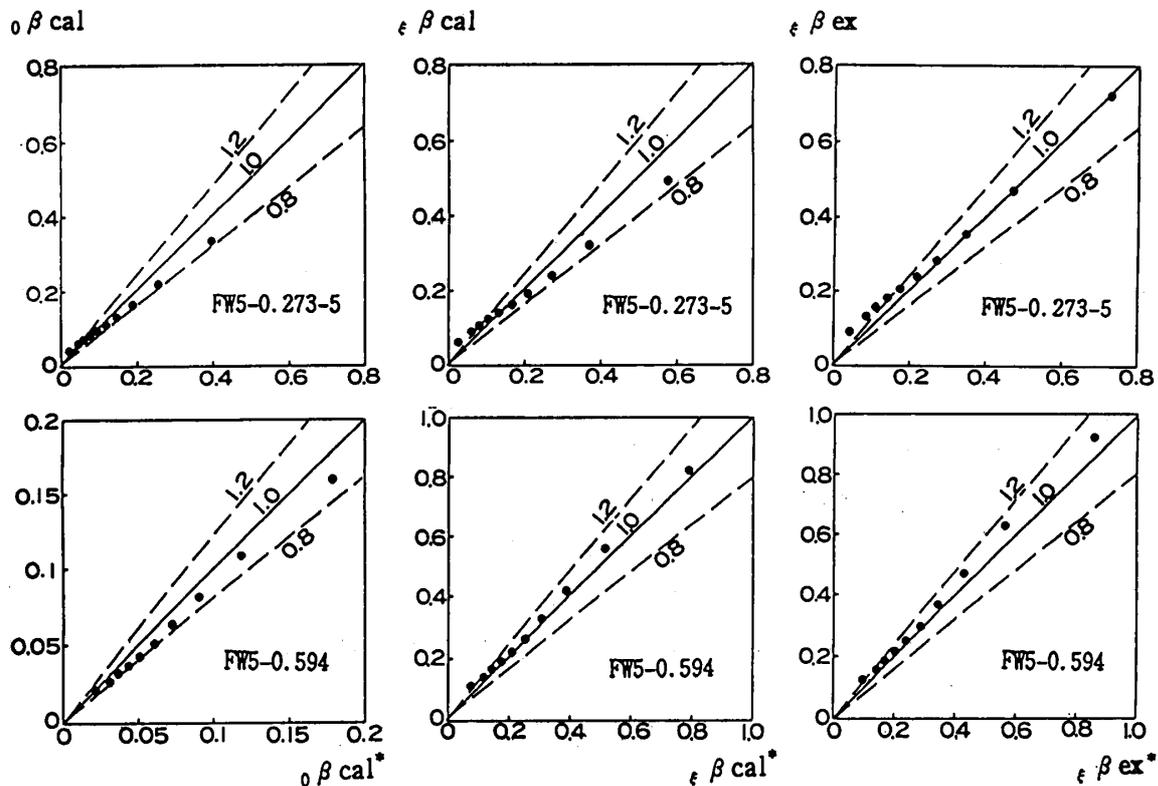


図-5 $\circ\beta_{cal}$ と $\circ\beta_{cal}$ 、 $\xi\beta_{cal}$ と $\xi\beta_{cal}$ 、 $\xi\beta_{ex}$ と $\xi\beta_{ex}$ の関係

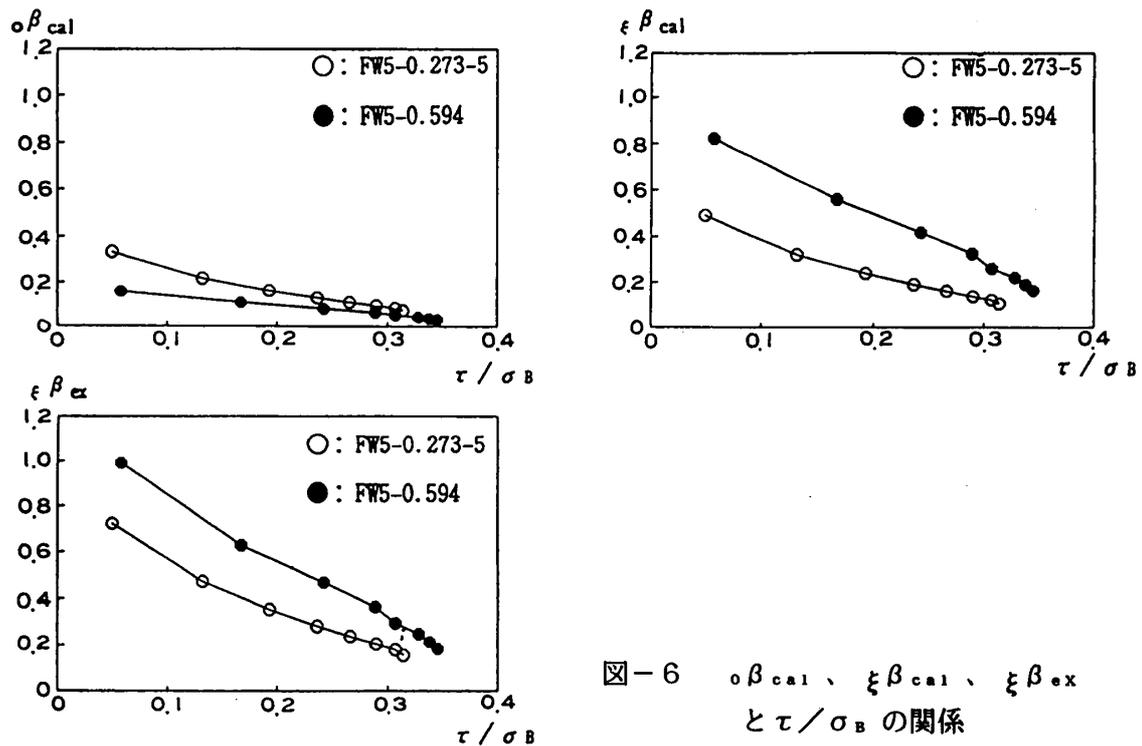


図-6 $o\beta_{cal}$ 、 $\xi\beta_{cal}$ 、 $\xi\beta_{ex}$ と τ/σ_B の関係

7. 結び

弾性域における著者提案のせん断剛性低下率の式(1)と式(2)および著者の行った19体の鉄筋コンクリート造試験体の実験資料を用いて、弾性域から塑性域までのせん断剛性低下について検討を行った結果、以下のことが知れた。

- (1) 弾性域における実験から求められるせん断剛性低下率は、式(1)と(2)より算定したせん断剛性低下率よりも小さい。
- (2) 式(3)、式(4)、式(5)から求めたせん断塑性係数は実験値のせん断塑性係数をよく捉えている。
- (3) せん断塑性係数はせん断応力度の増加とともに、ほぼ直線的に小さくなる。

本報告は壁厚比 (b/t) が1種類と限られたものであり、今後、壁厚比などの構造因子についての検討が残されている。

参考文献

- 1) 小野正行・徳広育夫：弾性域における有開口耐震壁のせん断剛性低下率に関する実験的研究 日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.59-60、1987・10
- 2) 小野正行・徳広育夫：鉄筋コンクリート造耐震壁の開口の影響による耐力低減率の提案、日本建築学会構造系論文集、No.435、pp.119-129、1992・5
- 3) 小野正行：有開口耐震壁の破壊性状におよぼすパラメータの影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.283-284、1994・9、
- 4) 小野正行：大きな開口を有する開口壁の弾塑性性状に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、pp.541-546、Vol.17、No.2 1995
- 5) 日本建築学：建築構造物のリミットアナリシス、第7章2節