

論文 開断面鉄筋コンクリートコア壁のねじり復元力に関する研究

丸田 誠*1・鈴木 紀雄*2

要旨：開断面鉄筋コンクリートコア壁を用いた高層建物が近年設計されるようになってきた。これらの壁は閉断面の壁に比べねじれ易く、純ねじりまたは水平力とねじりを組み合わせた荷重下での構造性状を把握するため構造実験が行われてきている。ここでは、開断面コア壁の純ねじりに対する復元力特性を提案し、実験結果との検証を行った。提案の復元力特性は初期剛性をねじり理論に基づき設定し、ひび割れ後の塑性性状はフランジ壁の曲げ、せん断性状に基づき設定する。復元力特性モデルは、コア壁が曲げ破壊型でもせん断破壊型でも、実験結果と良好な対応を示した。

キーワード：RCコア壁、ねじり、復元力特性、そり拘束

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート造（以下RCと称す）立体耐震壁（以下コア壁と称す）に地震力の多くを負担させる構造が増えつつある。このコア壁は建築計画上開断面となることが多い。このような場合、地震時にねじり振動が卓越することも考えられる。

H形やコ形断面RCコア壁の純ねじり性状や水平力ねじり性状について、近年弾塑性性状に関して実験的研究が行われている^{1)~3)}。これらの研究においては、ねじりに関してフランジが主に抵抗することが報告されている。本論文では、純ねじりに対する復元力特性を算定する手法を提案し、既往の純ねじりの実験結果と比較検討する。この算定手法では、初期剛性は次章に示す弾性ねじり理論により導き、ひび割れ以降の塑性化性状はフランジの曲げ及びせん断特性に依存するモデルとした。

2. ねじり（弾性）剛性

中実断面材や薄肉閉断面材のねじりでは、サンブナンねじりが卓越するのに対し、薄肉閉断面材ではサンブナンのねじり剛性は小さく曲げねじり（ワグナーねじれ）が卓越する。任意断面の曲げねじりのつりあい方程式⁴⁾は式(1)

で表される。

$$M_{\tau} = GK \frac{d\beta_0}{dz} - E\Gamma \frac{d^3\beta_0}{dz^3} \dots \dots (1)$$

記号や方向については図-1に示す。ここで M_{τ} ：ねじりモーメント、 GK ：サンブナンのねじり剛性（せん断弾性係数と定数-極2次モーメント-の積）、 E ：弾性係数、 Γ ：曲げねじり定数、 β ：ねじり回転角、 Z ：材軸距離である。 Γ は式(2)で表されるそり ω の変化を表す定数で断面形状によって異なる値である⁴⁾。

m ：板幅、 $\bar{\omega}_s$ ：そり関数の平均値、 ω_s ：そり関数

$$\Gamma = \int_0^m (\omega_s - \bar{\omega}_s)^2 t ds \dots \dots (2)$$

ねじり回転角 β_0 の一般解としては式(3)となる。

$$\beta_0 = \frac{M_{\tau}}{GK} + C1e^{\omega z} + C2e^{-\omega z} + C3 \dots \dots (3)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{GK}{E\Gamma}}$$

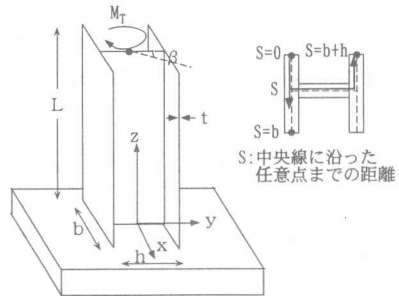


図-1 コア壁のねじり状態

*1 鹿島建設（株） 技術研究所（正会員）

*2 鹿島建設（株） 技術研究所・工博（正会員）

式(3)のC1, C2, C3の係数は, 両端部の拘束条件で決めることができる。開断面耐震壁の場合, 殆どが曲げねじりによる剛性であり, サンプナのねじりは無視できる程度に小さくなる。

この曲げねじりによる剛性は, せん断力による変形を考慮できないため, 頂部のせん断力 Q とせん断変形 δ_s による外部仕事 W_{ext} がせん断応力とせん断ひずみによる内部仕事 W_{in} と等価($W_{ext}=W_{in}$)となるように δ_s を求めることとする。ここで, 内部仕事 W のせん断力は, 鉛直応力が材軸方向に変化するため生じる断面内のせん断応力であり式(4)で表される。

$$\tau_s t = -E \frac{d^3 \beta_0}{dz^3} \int_0^s (\omega_s - \omega_s) t ds \quad \dots \dots (4)$$

内部仕事 W_{in} は式(5)で表される。

$$W_{in} = t \int_0^L \int_0^b \frac{\tau_s^2}{2G} ds dz \quad \dots \dots (5)$$

頂部のせん断力 Q は式(6)で, 外部仕事 W_{ext} は式(7)で表される。

$$Q = \int_0^b \tau_s t ds \quad \dots \dots (6)$$

$$W_{ext} = \frac{1}{2} Q \delta_s \quad \dots \dots (7)$$

$W_{ext}=W_{in}$ から δ_s を算出する。せん断変形により付加されるねじり回転角 β_s は式(8)となる。

$$\beta_s = \frac{2\delta_s}{h} \quad \dots \dots (8)$$

よって全体回転角 β 及び全体, 曲げ及びせん断のねじり剛性は式(9)~(12)で表される。

$$\beta = \beta_0 + \beta_s \quad \dots \dots (9)$$

$$K_T = M_T / \beta \quad \dots \dots (10)$$

$$K_{T0} = M_T / \beta_0 \quad \dots \dots (11)$$

$$K_{TS} = M_T / \beta_s \quad \dots \dots (12)$$

初期剛性は, 以上の方法で算定する。

3. 復元力特性算定法

既往の実験から塑性化後は, ねじりに対する抵抗力の大部分をフランジが負担することが分かっている^{1)~3)}。図-2に示すように純ねじり状態では, 壁両端でそりが完全拘束され, それぞれのフランジ壁は逆対称曲げ状態となり, そのせん断力 V あるいは曲げモーメント M_f と変形 δ から立体壁のねじりモーメント M とねじり回転角 β を式(13)で求めることができる。

$$M = V \cdot h, M = 2 \cdot M_f \cdot h / L, \beta = 2 \cdot \delta / h \quad \dots (13)$$

そこで, ねじりに対する弾塑性の復元力特性を, 個々のフランジに基づいて算定することにする。フランジの復元力特性は, 曲げの特性とせん断の特性をそれぞれTri-linearに設定する。よって, ねじりの復元力特性も図-3に示すように, 曲げとせん断の特性を組み合わせたものとなる。

図-4に代表的なH形とコ形の開断面壁の曲げとせん断の評価部分を示す。曲げに関しては, フランジ単体での曲げ解析でなく, 全体断面を弱軸方向に曲げ解析し, その半分のモーメントをそれぞれのフランジが負担することとする。

コ形では曲げ耐力が小さくなる方向の解析結果を用いる。これは, ねじり耐力が片側フランジの耐力で決まるためである。曲げ解析は, 平面保持の断面解析法(ファイバーモデル)

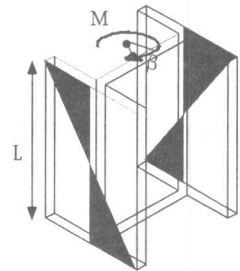


図-2 コア壁の応力状態

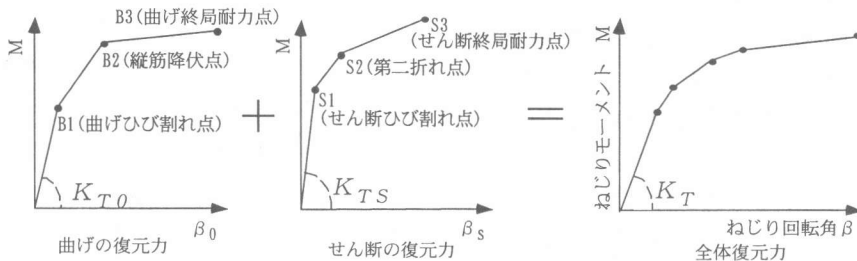


図-3 復元力特性の設定

で行う。せん断に関しては、フランジ断面のみで評価する。

3.1 曲げの復元力特性

○初期剛性 K_{T_0} は、式(11)中で示した剛性、ただしサンプナンねじりの項(式(1)の2項目前半)は小さいため M_T 算出時に無視しても良い。

○第一折れ点B1は、フランジの曲げひび割れモーメント(M_{fcr})から式(14)で算定する。

$$M_{fcr} = 2 \cdot M_{fcr} \cdot h / L \quad \dots \dots (14)$$

$$\beta_{fcr} = K_{T_0} / M_{fcr}$$

○第二折れ点B2は、フランジの最外縁の鉄筋が降伏する曲げ降伏モーメント(M_{fy})時とする。曲げ解析から M_{fy} 時曲率 ϕ_{fy} が算定される。曲げモーメント分布(図-2)と曲率分布が一致するとすれば ϕ_{fy} 時の回転角 β_{fy} が算出できる。

$$M_{by} = 2 \cdot M_{fy} \cdot h / L \quad \dots \dots (15)$$

$$\beta_{fy} = \phi_{fy} \cdot h / 3$$

○終局耐力点B3は、フランジの最大モーメント(M_{fu})から算定する。全塑性式⁶⁾を用いてもいいが、ここでは、平面保持解析によるフランジ圧縮側のコンクリートひずみ ϵ_{v_0} が0.004の時の M_{fu} 、 ϕ_{fu} を用いる⁶⁾。これより式(15)と同様に M_{bu} 、 θ_{bu} が求まる。なお、初期剛性をここでは式(11)のねじり剛性 K_{T_0} としたが、この値は各フランジの初期剛性をねじり剛性に変換した値と殆ど変わらない。(4.2節で記述)よって、平面保持解析の $M-\phi$ 関係から曲げの復元力を直接求めることもできる。

3.2 せん断の復元力特性

○初期剛性 K_{T_S} は式(12)による。

○第一折れ点S1は、フランジのせん断ひび割れ点(V_{cr})から、式(16)で算定する。この V_{cr} は主応力度式から求める。

$$V_{cr} = Af \cdot \sqrt{(ft \cdot (ft + \sigma_0))} / \kappa$$

$$M_{sc1} = V_{cr} \cdot h \quad \dots \dots (16)$$

$$\beta_{sc1} = M_{sc1} / K_{T_S}$$

ここで Af :フランジ単体の断面積、 ft :コンク

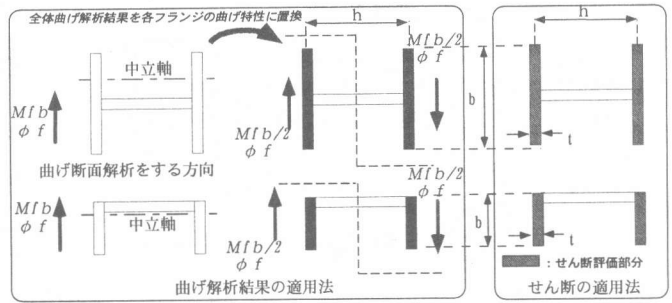


図-4 復元力特性評価部分

リートの引張強度($0.33\sqrt{\sigma_B}$ (N/mm²)) σ_B :コンクリート圧縮強度), σ_0 :軸応力度, κ :3/2

○第二折れ点S2は、文献6)による。

$$M_{s2} = 1.35 \cdot M_{sc1}$$

$$\beta_{s2} = 3 \cdot \beta_{sc1} \quad \dots \dots (17)$$

○終局耐力点S3は、フランジのせん断耐力点(V_u)から式(18)で算定する。この V_u は文献7)に基づく。ただし、ここでは開断面壁を対象としているおり、両側にウェブは付かないため l_w 、 l_{wa} はフランジの長さ b とする。この時のフランジの部材角 R_u は4/1000(rad)とする。コンクリート強度 σ_B が60N/mm²を越える場合、有効圧縮強度係数 ν はCEB式 $\nu = 3.68 \sigma_B^{-0.333}$ を用いる。この式(18) V_u の記号は文献7)を参照されたい。

$$V_u = t_w \cdot l_w \cdot p_s \cdot \sigma_{sy} \cdot \cot \phi + \tan \theta \cdot (1 - \beta) t_w \cdot l_{wa} \cdot \nu \cdot \sigma_B / 2$$

$$M_{su} = V_u \cdot h \quad \dots \dots (18)$$

$$\beta_{su} = R_u \cdot L \cdot 2 / h$$

4. 実験結果との比較

4.1 対象とする実験

3章で示した復元力特性を文献1)の実験結果と比較検討する。試験体は図-5に示すようなH形、コ形断面を有する実物の約1/12.5の縮尺模型であり、表-1にその諸元を表-2に使用材料の一覧を示す。実験は図-6に示すように、一定軸力 N を載荷後、頂部に純ねじりモーメント M を作用させ正負繰り返し加力を行った。制御はねじり回転角により行い、最終破壊まで行った。H3, C1, C2試験体がフランジの曲げ破壊及び曲げせん断破壊、他の試験体はフランジのせん断破壊で最終に至った。

4.2 比較結果

表-1 試験体一覧

試験体名	H1	H2	H3	H4	C1	C2
断面	H形				コ形	
縦筋	D4@75	D6@100	D6@100	D6@66	D6@100	D6@66
横筋	D4@80	D6@100	D6@100	D6@50	D6@100	D6@50
Ps (%)	0.39	0.80		1.21	0.80	1.21
軸力比	0.1		0		0.1	
共通事項	コンクリート設計基準強度 F_c60N/mm^2					
	柱型部主筋 4-D10					
	柱型部拘束筋 □2-D6@150					
	Ps: 壁筋比で縦横筋のうち小さい方の値を採用					

表-2 使用材料の力学的性質

(コンクリート)

試験体名	圧縮強度 σ_B (N/mm^2)	引張強度 σ_t (N/mm^2)	ヤング係数 $E_c (\times 10^4)$ N/mm^2
H1	68.5	4.06	3.18
H2	65.0	3.95	3.06
H3	66.4	4.00	3.10
H4	67.6	4.03	3.14
C1	70.0	4.11	3.24
C2	71.2	4.14	3.30

(鉄筋)

鉄筋種類	降伏点 σ_y (N/mm^2)	引張強度 σ_t (N/mm^2)	伸び ϵ_u (%)
D4	285	360	26.0
D6	365	419	17.9
D10	423	515	15.4

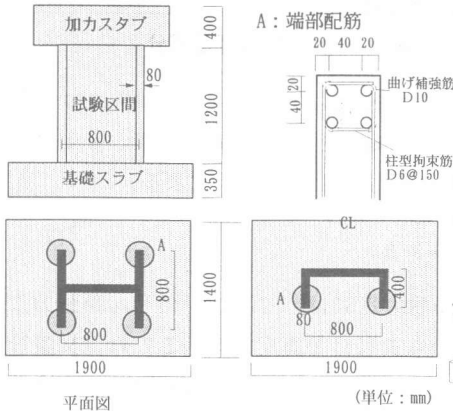


図-5 試験体概要

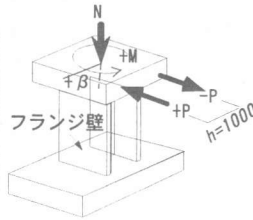


図-6 加力概要

に基礎内に40d定着されていると仮定し、鉄筋降伏時の中立軸を計算値し求めた量であり荷重(外力)に比例するとした。純ねじりの場合、各フランジは逆対称モーメントとなるため基礎と加力スタブ両方から抜け出ることとなる。

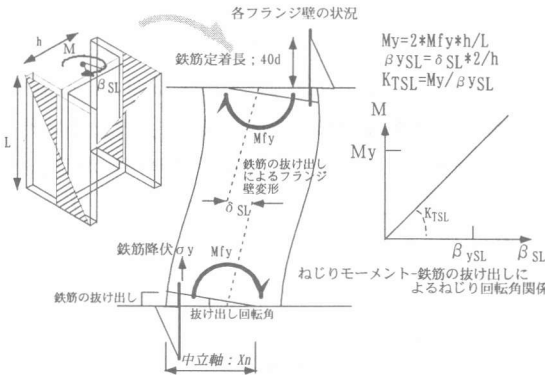


図-7 鉄筋の抜け出し変形概要

各初期剛性を比較すると、精算解であるねじり理論に基づいた K_{cal1} と略算解であるフランジ壁の初期剛性から求めた K_{cal2} は、 K_{cal2}/K_{cal1} が 0.92~0.99 とほぼ一致する。これは、フランジの面外剛性やウェブの剛性がねじり剛性にあまり寄与しなかったためと思われる。よって、ねじり理論を用いずフランジ壁の弾塑性性状から、ねじりの復元力特性を設定することもできる。ただし、本試験体以外で壁が厚くなった場合等では、精算解 K_{cal1} と略算解 K_{cal2} の差が大きくなることも予想される。実験結果 K_{exp1} は計算結果より小さく、鉄筋の抜け出し変形を除いた剛性 K_{exp2} は逆に若干大きい結果となった。

今回曲げ復元力算定には、平面保持仮定の断

表-3に各試験体毎に2章で提案した初期剛性計算値 K_{cal1} とフランジ壁の初期剛性 $K_f (=K_s K_b / (K_s + K_b))$, K_s : フランジ壁のせん断剛性, K_b : フランジ壁の曲げ剛性) から算出した剛性 $K_{cal2} (=2 * K_f / h)$ を示す。実験結果も実測値 K_{exp1} と、基礎からの鉄筋の抜け出し変形分を実測値より差し引いた剛性 K_{exp2} も併せて示す。この基礎からの鉄筋の抜け出し変形は文献5)に示されている方法で算出した。すなわち、図-7に示すように最外縁の鉄筋が降伏時

表-3 初期剛性算定結果

試験体	① K_{cal1}	② K_{cal2}	②/①	③ K_{exp1}	③/①	④ K_{exp2}	④/①
H1	115000	111000	0.97	65100	0.57	115000	1.00
H2	111000	108000	0.97	71500	0.64	141000	1.27
H3	113000	109000	0.96	53800	0.48	131000	1.16
H4	112000	111000	0.99	81400	0.73	144000	1.29
C1	29000	26700	0.92	22600	0.78	36300	1.25
C2	29500	27200	0.92	23000	0.78	36600	1.24

注) ①~④単位: kNm/rad

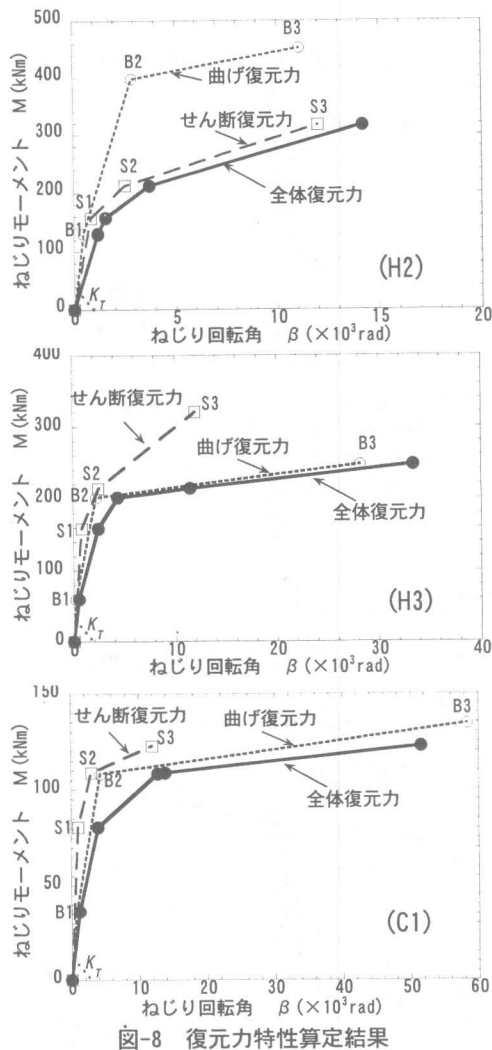


図-8 復元力特性算定結果

面解析法（ファイバーモデル）⁸⁾を用いた。

H2, H3, C2について算定した復元力を曲げ・せん断・全体に分け図-8に示す。実験ではH2がせん断破壊, H3が曲げ破壊, C2が曲げせん断破壊と破壊性状が異なった試験体であるが、曲げとせん断両方の復元力特性を設定することで、

それぞれ特徴のあるマルチリニアの復元力特性が得られる。これらの算定結果（全体復元力）と実験結果を比較し図-9に示す。曲げ及びせん断ひび割れ、鉄筋（最外縁縦筋）降伏、終局耐力の各特性点について実験結果と算定結果（全体復元力）を比較し表-4に示す。ここでの実験結果は、鉄筋の抜け出しによるねじり回転角を除いた値を用いた。初期剛性は算定結果と実験結果ではほぼ一致した。各折れ点以降の剛性は若干異なるが最終変形は、算定復元力と実験結果ではほぼ一致している。せん断破壊した試験体H1, H2, H4では、算定せん断耐力の実験値/算定値がそれぞれ1.13, 1.24, 1.28と算定結果が実験結果より低いため、終局耐力値及び変形が実験結果より小さいが、これは算定式⁷⁾自体が設計式であり、既往実験のせん断耐力の下限值近くを表しているためである。今後は、マクロモデル等⁹⁾を用い内蔵柱型の平板壁のせん断耐力を求め、更に精度良く実験をシミュレートしていきたい。ただし、全体的に見ると提案したねじり復元力特性は実験結果を概ねシミュレートできており実用的には十分と考えられる。

5. まとめ

開断面RCコア壁を対象として、その純ねじり状態の復元力特性を設定した。初期剛性は、ねじり理論に基づき設定した。ひび割れ以降の塑性性状は、各フランジ壁の曲げ・せん断性状を各3折れ線にモデル化し、ねじりの復元力特性に変換し設定した。以上により提案した復元力特性は、既往の開断面壁の純ねじり実験を概ね良好にシミュレートできた。

表-4 各特性点における実験結果と算定結果結果の比較

現象 試験体	曲げひび割れ点				せん断ひび割れ点				縦筋降伏点				終局耐力点				破壊形
	実験値		算定値		実験値		算定値		実験値		算定値		実験値		算定値		
	M (kNm)	β ($\times 10^3$ rad)	M (kNm)	β ($\times 10^3$ rad)	M (kNm)	β ($\times 10^3$ rad)	M (kNm)	β ($\times 10^3$ rad)	M (kNm)	β ($\times 10^3$ rad)	M (kNm)	β ($\times 10^3$ rad)	M (kNm)	β ($\times 10^3$ rad)	M (kNm)	β ($\times 10^3$ rad)	
H1	160	1.5	130	1.1	225	3.4	160	1.6	—	—	—	—	278	12.3	254	13.9	S
H2	147	1.1	130	1.2	226	2.7	157	1.6	355	11.8	—	—	394	17.6	317	14.2	S
H3	80	0.6	60	0.5	187	6.7	158	2.5	196	7.6	201	4.4	243	19.8	247	33.4	F
H4	139	0.8	132	1.2	275	4.0	159	1.8	267	3.7	370	14.8	477	27.8	374	15.4	S
C1	39	1.2	36	1.2	88	5.2	81	4.0	100	7.0	108	12.8	129	21.3	123	51.6	SF
C2	55	1.9	36	1.2	93	5.3	81	3.9	109	7.3	110	13.0	153	40.9	141	71.2	F

注) 破壊形式 S:せん断破壊 F:曲げ破壊 SF:曲げせん断破壊 (実験結果)

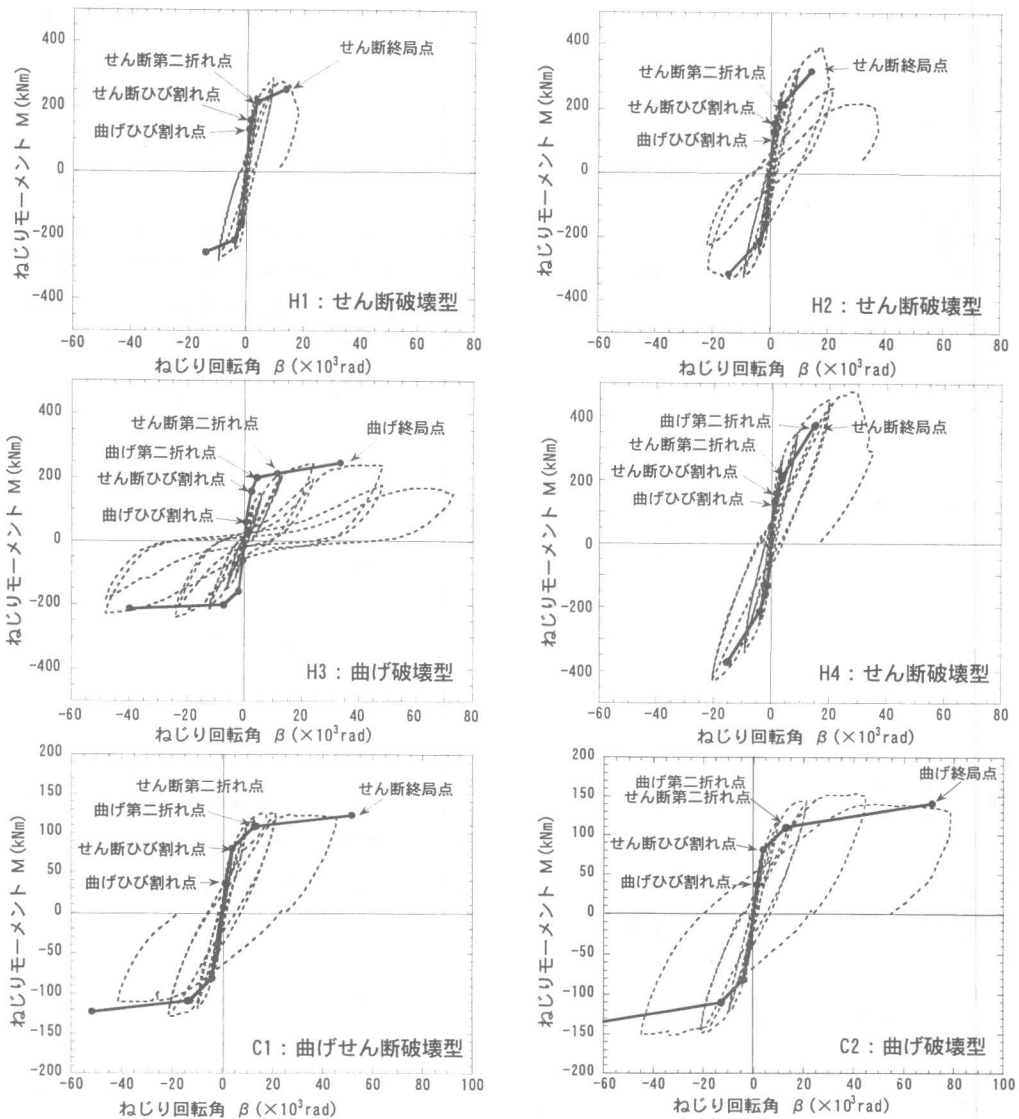


図-9 復元力特性算定結果と実験結果の比較

＜謝辞＞

検討に用いた実験研究は、東京都立大学北山研究室と鹿島の共同で行い、実験は都立大学で実施した。ご協力いただいた北山助教授、小山先生、森田さん及び北山研究室の皆様へ感謝いたします。

参考文献

- 1) 森田, 小山, 北山, 永井「鉄筋コンクリート開断面耐震壁のねじれ性状に関する研究」JCI年次大会論文集, 20-3, PP557~582, 1998.7
- 2) 丸田, 西岡, 鈴木「H形コア壁の曲げねじり性状に関する研究」鹿島技術研究所年報, Vol.46, PP91~96, 1998.9
- 3) 荒井, 柴田, 城, 岡野; 純捩りを受ける鉄筋コンクリート開断面耐震壁の破壊性状, JCI年次大会論文集,

PP421~424, 1980.6

- 4) 例えば, 藤本; 鉄骨の構造設計, 技報堂, 1991
- 5) 稲田; 原子炉建屋立体耐震壁の復元力特性に関する研究(その2) M~φ関係および荷重変形関係スケルトンカーブの検討, AIJ構造系論文報告集, 第378号, pp16~pp25, 1987.8
- 6) (社)日本電気協会・電気技術基準調査委員会; 原子力発電所耐震設計技術指針(JEAG4601), pp79~pp81, 1991
- 7) 日本建築学会 鉄筋コンクリート造建物の終局強度耐震計指針・同解説, pp122~pp131, 1990
- 8) 小西, 丸田, 別所, 鈴木; 鉄筋コンクリート造L型断面耐震壁に関する実験的研究, JCI年次大会論文集, Vol119-2, pp.1083~pp.1088, 1997.6
- 9) JCI: RC耐震壁のマクロモデルとミクロモデルに関するパネルデスカッション論文集, 1988.1