

論文 斜め方向地震力に対する RC 造 10 階建ピロティ構造の保有水平耐力と柱の変動軸力

朱 彤*1・小島 菜奈*2・毎田 悠承*3・和泉 信之*4

要旨 : RC 造骨組の保有水平耐力計算では、主軸二方向の水平力に対して独立に計算しており、斜め方向地震力については具体的な規定はない。本研究では、RC 造ピロティ構造の 10 階建住宅を対象として、斜め方向地震力に対する静的弾塑性解析及び地震応答解析を実施し、斜め方向地震力に対する保有水平耐力と外柱の変動軸力を検討する。さらに、2 方向入力の時刻歴応答解析を実施する。これらの結果から保有水平耐力の二軸相関関係を評価する。また、外柱に桁行方向の骨組と梁間方向の骨組から作用する変動軸力を検討し、外柱に作用する地震時変動軸力の評価方法を考察する。

キーワード : 鉄筋コンクリート造, ピロティ構造, 静的弾塑性解析, 地震応答解析, 保有水平耐力, 柱軸力

1. はじめに

RC 造骨組の保有水平耐力計算では、X・Y 主軸二方向の水平力を独立に扱うため、斜め方向の保有水平耐力については規定されていない。そのため、保有水平耐力の X 方向と Y 方向の二軸相関関係については通常検討されていない。また、柱の軸力は変形性能に大きく影響を与えるが、保有水平耐力計算では斜め方向地震力を考慮した外柱の変動軸力の評価方法は具体的に規定されていない。

「鉄筋コンクリート構造保有水平耐力計算規準 (案)・同解説」¹⁾ (保耐規準) では、隅柱の軸力制限として、直交方向の変動軸力の 0.3 倍以上を加算することを推奨しているが、保有水平耐力計算における外柱の変動軸力の評価は十分に検討されているとは言えない。

そこで、本研究では、RC 造ピロティ構造の 10 階建住宅を対象として、斜め方向地震力に対する静的弾塑性解析及び地震応答解析を実施し、斜め方向地震力に対する保有水平耐力と外柱の変動軸力を検討する。さらに、二方向同時入力の時刻歴応答解析を実施する。これらの結果から保有水平耐力について X 方向と Y 方向の二軸相関関係を評価する。また、外柱に桁行方向の骨組と梁間方向の骨組から作用する変動軸力を検討し、外柱に作用する地震時変動軸力の評価方法を考察する。10 階建住宅 (図-1) は、X 方向がラーメン構造、Y 方向が耐震壁付きラーメン構造である。骨組モデルは、1 階において全スパンの耐震壁が抜けているピロティ構造 (図-2, ケース 1) と 1 階に壁がある連層壁構造 (図-2, ケース 2) の 2 ケースである。X 方向は梁曲げ破壊型の全体崩壊形である。Y 方向はケース 1 では 1 階柱曲げ破壊型の部分崩壊形、ケース 2 では 1 階壁曲げ破壊型の全体崩壊形である。

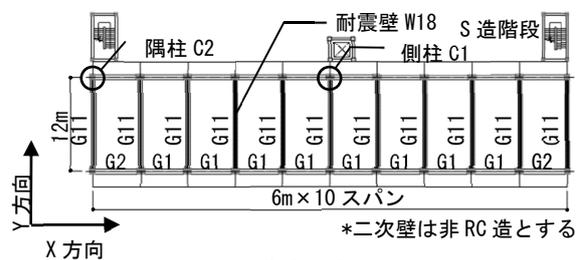


図-1 10 階建住宅の略伏図

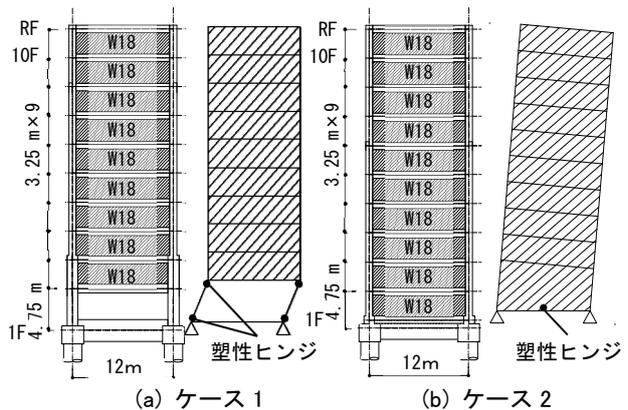


図-2 梁間方向の略軸組図と崩壊形

2. 骨組の部材断面

各ケースの保有水平耐力が必要保有水平耐力 (構造特性係数 D_s : X 方向 0.30, Y 方向 ケース 1 は 0.55, ケース 2 は 0.40) を満足するように部材断面を設定する。柱・梁・耐震壁の代表的な部材断面を表-1, 表-2, 表-3 に示す。ケース 1 では建築物の構造関係技術基準解説書²⁾ のピロティ構造に関する保有水平耐力の規定を満足している。ヒンジ柱では、保耐規準における A ランクのせん断補強指標を満足するように帯筋を配筋する。また、柱梁接合部では接合部降伏破壊³⁾が生じないものとする。

*1 千葉大学大学院 融合理工学府創成工学専攻 博士前期課程 (学生会員)

*2 千葉大学 工学部建築学科

*3 千葉大学大学院 工学研究院 助教 博士 (工学) (正会員)

*4 千葉大学大学院 工学研究院 教授 博士 (工学) (フェロー会員)

3. 解析計画

3.1 解析方法

解析には立体フレームモデルを用いる。柱および耐震壁の曲げおよび軸力の評価はファイバーモデルによる。ファイバーモデルにおけるコンクリートはトリリニア剛性低減型³⁾とし、コンクリートの引張耐力は設定しない(図-3)。鉄筋は鉄鋼剛性逓減型³⁾とする。柱のせん断特性はバイリニア原点指向型、耐震壁のせん断特性はトリリニア原点指向型(図-4)とする。梁の履歴特性は材端ばねモデルのTAKEDAモデル(図-5)とする。なお、柱・梁・耐震壁の各耐力は保耐規準に準拠して算定する。

3.2 地震力

静的非線形解析では、外力分布はAi分布に基づく分布

とする。地震力の方向は、0度(X方向地震力)から90度(Y方向地震力)まで15度刻みで分割して設定する。

時刻歴地震応答解析では1方向入力と2方向入力を行う。1方向入力方向は、0度(X方向入力)から90度(Y方向入力)まで15度刻みで分割して設定し、入力倍率は0.5倍、1.0倍とする。2方向入力方向は、0度(X方向入力)と90度(Y方向入力)とし、入力倍率は1.0倍とする。検討用地震動には、実在2種地盤における法告示によるレベル2地震動(表-4、図-6)を用いる。その際、表層地盤の影響は地盤応答解析により考慮する。なお、直交方向(EW波)の工学的基盤における加速度応答スペクトルは法告示の2/3倍とする。内部粘性減衰は瞬間剛性比例型減衰(h1=3%)とする。なお、解析ではP-δ効果を考慮しない。本研究ではピロティ構造を主たる対象とするため、時刻歴地震応答解析ではケース1を対象とする。なお、ケース2については、今後の課題にしたい。

表-1 柱部材断面

階	符号	C1	C2	Fc	
ケース1 8-10F	$D_x \times D_y$	1050 × 800	850 × 800	30	
	主筋	X	6-D29		6-D29
		Y	2-D29		2-D29
	帯筋	X	4-S13@100		4-S13@100
Y		2-S13@100	2-S13@100		
ケース1 5-7F	$D_x \times D_y$	1050 × 800	850 × 800	36	
	主筋	X	6-D32		6-D32
		Y	2-D32		2-D32
	帯筋	X	4-S16@100		4-S16@100
Y		2-S16@100	2-S16@100		
ケース1 3-4F	$D_x \times D_y$	1050 × 800	900 × 800	42	
	主筋	X	6-D32		6-D32/2-D29
		Y	2-D32		2-D32
	帯筋	X	4-S16@100		4-S16@100
Y		2-S16@100	2-S16@100		
ケース1 1-2F	$D_x \times D_y$	1150 × 800	1000 × 800	48	
	主筋	X	6-D38		6-D38
		Y	6-D38		5-D38
	帯筋	X	6-S16@60		6-S16@60
Y		6-S16@60	6-S16@60		
ケース2 1-2F	$D_x \times D_y$	1050 × 800	850 × 800	48	
	主筋	X	6-D35/2-D29		6-D35/2-D29
		Y	2-D35		2-D35
	帯筋	X	4-S16@100		4-S16@100
Y		2-S16@100	2-S16@100		

*主筋：SD390 帯筋：USD785

表-3 梁部材断面

梁断面	G1			G2			G11			
	B [mm]	D [mm]	端部上端筋 (一段筋/二段筋)	B [mm]	D [mm]	端部上端筋 (一段筋/二段筋)	B [mm]	D [mm]	上端筋	
ケース1	RF	500	700	5-D22	500	700	5-D22	400	700	4-D22
	8-10F	500	750	5-D25/2-D19	500	750	5-D25	400	700	4-D22
	5-7F	550	750	5-D32/2-D29	550	750	5-D32/2-D29	400	700	4-D22
	3-4F	600	800	5-D35/2-D35	600	800	5-D35/2-D32	400	700	4-D22
	2F	600	850	5-D35/2-D35	600	850	5-D35/2-D35	700	1200	5-D38
ケース2	2F	600	850	5-D35/3-D35	600	850	5-D35/3-D35	400	700	4-D22

*Fcは柱と同一とする 主筋：SD390

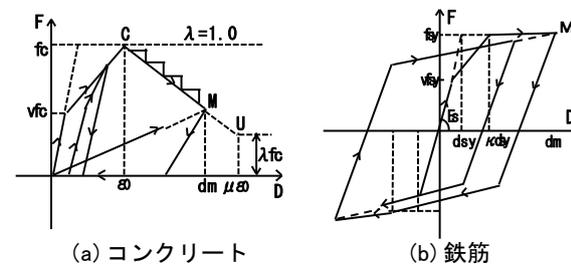


図-3 ファイバーモデルの応力歪関係

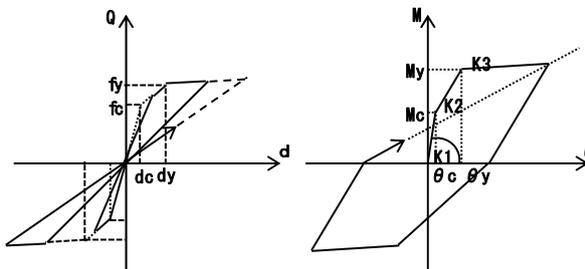


図-4 原点指向型モデル 図-5 TAKEDAモデル

表-2 耐震壁部材断面

耐震壁断面	W18	
	厚さ[mm]	
1-10F	縦筋	D10@150ダブル(SD295A)
	横筋	D10@150ダブル(SD295A)

*Fcは柱と同一とする

表-4 検討用地震動

波形名称	最大速度 [cm/s]	最大加速度 [cm/s ²]	継続時間 [s]
レベル2地震動			
Code-EL.-NS	48.7	371.6	60.0
Code-EL.-EW	42.5	206.5	60.0

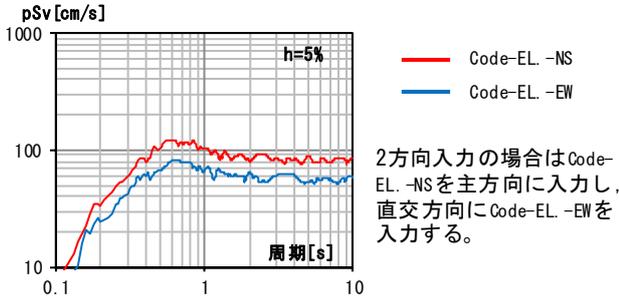


図-6 検討用地震動の擬似速度応答スペクトル

3.3 保有水平耐力の二軸相関係数

保有水平耐力について X 方向と Y 方向の二軸相関関係について、式 (1) による二軸相関係数 (α) により評価する。また、必要保有水平耐力の二軸相関関係は、本研究では式 (2) による。

$$\left(\frac{C_{BXi}}{C_{BX}}\right)^\alpha + \left(\frac{C_{BYi}}{C_{BY}}\right)^\alpha = 1 \quad (1)$$

$$\left(\frac{C_{BXi}}{D_{SX}}\right)^2 + \left(\frac{C_{BYi}}{D_{SY}}\right)^2 = 1 \quad (2)$$

ここで、 C_{BXi} 、 C_{BYi} は斜め方向入力時の C_B の X 方向成分、Y 方向成分、 C_{BX} 、 C_{BY} は X 方向、Y 方向の C_B 、 D_{SX} 、 D_{SY} は X 方向、Y 方向の D_S である。なお、 C_B は崩壊形が形成された時点である。

3.4 柱変動軸力の直交方向係数

斜め方向地震力に対する柱の変動軸力について、式 (3) 及び式 (4) により評価する。 a は X 方向地震力による変動軸力に考慮する Y 方向地震力の比率である。 b は Y 方向地震力による変動軸力に考慮する X 方向地震力の比率である。ここで、 xN は 0 度から 45 度までの地震力による変動軸力である。 yN は 45 度から 90 度までの地震力による変動軸力である。また、 N_X は 0 度の地震力による変動軸力、 N_Y は 90 度の地震力による変動軸力である。

$$xN = N_X + aN_Y \quad (3)$$

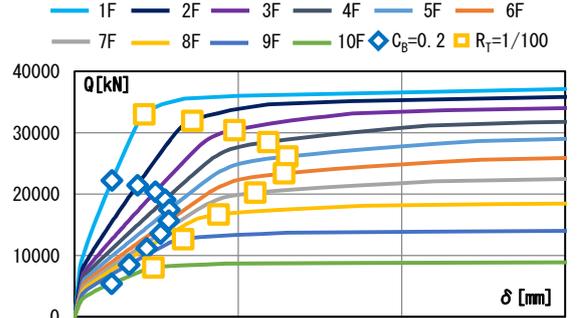
$$yN = bN_X + N_Y \quad (4)$$

xN 及び yN は、静的解析では C_B が 0.2 である時及び全体水平変形角 (R_T 、外力分布の重心位置付近の床の水平変形角)が 1/100 時、動的解析では入力 0.5 倍及び 1.0 倍において算出する。

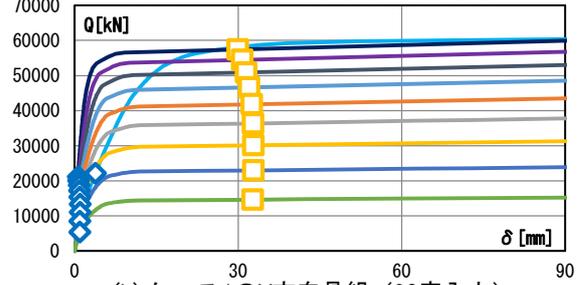
4. 静的解析による保有水平耐力と外柱の変動軸力

4.1 保有水平耐力

静的非線形解析によるケース 1 の層せん断力 (Q) と層間変位 (δ) との関係を図-7 に示す。



(a) ケース1のX方向骨組 (0度入力)

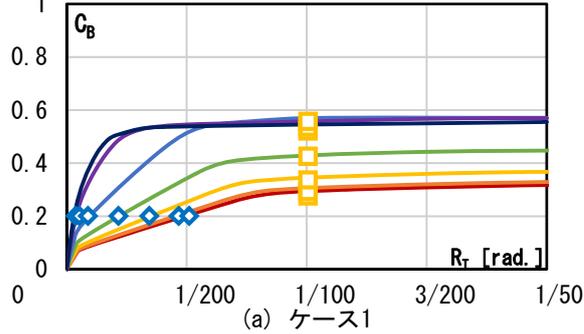


(b) ケース1のY方向骨組 (90度入力)

図-7 層せん断力と層間変位との関係



(a) ケース1



(b) ケース2

図-8 ベースシア係数と全体水平変形角との関係

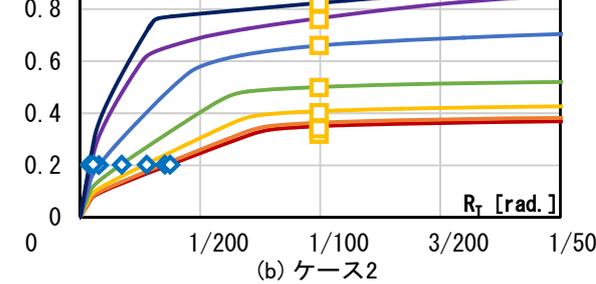
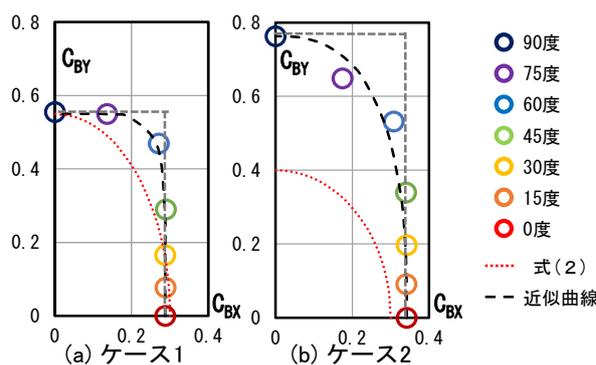


図-9 静的解析による C_B の二軸相関関係



(a) ケース1 (b) ケース2

ケース1のX方向では梁曲げ破壊型の全体崩壊形を形成し、崩壊形形成時のベースシア係数(C_u)は0.31である。崩壊形形成時の R_T は1/125であり、層間変形角(R)の最大値は1/47(6階)である。ケース2のX方向ではケース1と同様の崩壊形を形成し、 C_u は0.33である。なお、ケース1とケース2との C_u の差は、重量及び直交壁の軸力負担の違い等によるものである。

ケース1のY方向では1階柱の柱頭柱脚曲げ破壊型の層崩壊形を形成し、 C_u は0.55である。崩壊形形成時の R_T は1/112であり、 R の最大値は1/48(1階)である。ケース2のY方向では1階壁曲げ破壊型の全体崩壊形を形成し、 C_u は0.76である。崩壊形形成時の R_T は1/143であり、 R の最大値は1/126(8階)である。

地震力の入力方向のベースシア係数(C_B)と全体水平変形角(R_T)の関係を図-8に示す。ケース1では、地震力の入力方向が45度まで C_B は入力方向が増加するに伴い増大し、45度の C_B はX方向(0度)の C_B の1.36倍である。地震力の入力方向が60度以降では C_B はY方向(90度)とほぼ等しい。一方、ケース2では、 C_B は地震力の入力方向が増加するに伴い増大し、ケース1に比べて大きい。45度の C_B はX方向(0度)の C_B の1.36倍であり、Y方向(90度)で最大となる。

4.2 保有水平耐力の二軸相関関係

地震力の各入力方向における C_u を図-9に示す。ケース1の C_u は、45度方向が0.45であり、75度方向が最も大きく0.57である。ケース2の C_u は、45度方向が0.52であり、Y方向が最も大きく、0.76である。

C_u の相関曲線は両ケースとも楕円に近い形状であり、二軸相関係数(a)はケース1では約2.60、ケース2では約2.90である。

4.3 1階外柱の変動軸力

1階外柱として隅柱(C2柱)及び側柱(C1柱)における方向別の圧縮変動軸力比(σ)を図-10に示す。 σ は N をコンクリートの圧縮軸耐力($D_x \times D_y \times F_c$)で除した比率とする。 N は C_B が0.2時及び R_T が1/100時とする。 C_B が0.2時では、隅柱の N は斜め方向入力時が大きい。 R_T が1/100時では、ケース1の隅柱では、地震力の入力方向が45度まで N は入力角度の増加に伴い増大し、45度方向の N はX方向(0度)の N の2.11倍である。

4.4 1階外柱の変動軸力の直交方向係数

地震力の入力方向別に1階外柱の変動軸力の直交方向係数 a 及び b の推移を図-11に示す。なお、側柱では式(4)の yN が N_y より小さいため、 b は算定しない。

a は隅柱と側柱では地震力の入力角度の増加に伴い大きくなる。 a は45度が最大であり、 C_B が0.2時ではケース1の隅柱が引張軸力時0.29、圧縮軸力時0.42であり、ケース2の隅柱が引張軸力時0.32、圧縮軸力時0.37であ

る。また、 R_T が1/100時の a はケース1の隅柱が引張軸力時0.47、圧縮軸力時0.67であり、ケース2の隅柱が引張軸力時0.31、圧縮軸力時0.34である。 R_T が1/100時の隅柱の a は、文献4)に示される全体崩壊形の直交方向の軸力係数0.50に比べてケース2ではやや小さいが、ケース1のピロティ柱の圧縮軸力時はやや大きい。また、隅柱や側柱の a は、ケース1がケース2に比べて大きいことがわかる。このように外柱の変動軸力の直交方向係数は直交方向の崩壊形と保有水平耐力を考慮して設定することが望ましい。

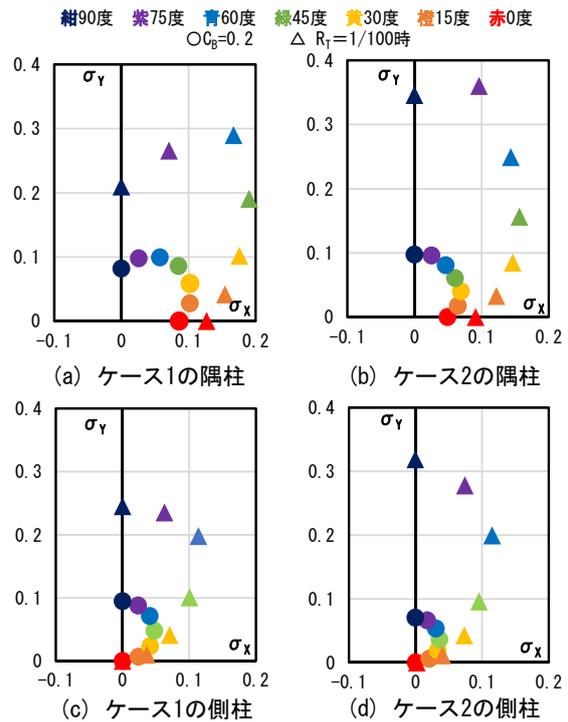


図-10 静的解析による1階柱の圧縮変動軸力比

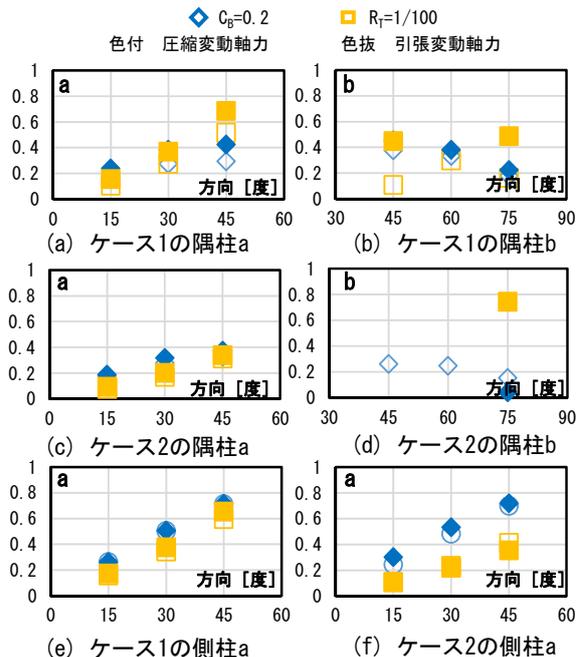


図-11 静的解析による1階柱の変動軸力係数

一方、 b は Y 方向（90 度）の変動軸力が大きく、ケース 1 とケース 2 で異なる。

C_B が 0.2 時の b は、ケース 1 の隅柱が引張軸力時 0.38、圧縮軸力時 0.45 であり、ケース 2 の隅柱が引張軸力時 0.26 である。 R_T が 1/100 時の b は、ケース 1 の隅柱が引張軸力時 0.38、圧縮軸力時 0.48 である。

5. 動的解析によるベースシア係数と外柱の変動軸力

5.1 層間変形角と層せん断力

1 方向入力（CODE-EL-NS 波）による各層の最大応答層間変形角（ R_{max} 、床重心位置の入力方向変形角）の高さ方向分布を図-12 に示す。入力倍率の増大に従い、層間変形角が増大している。 R_{max} は地震動の入力角度が 0 度から 45 度までは中間層が大きくなり、1.0 倍入力では 1/99（0 度入力、7 階）である。地震動の入力角度が 60 度から 90 度までは R_{max} は 1 階が大きくなり、1.0 倍入力では 1/103（90 度入力、1 階）である。2 階以上は連層耐震壁があるため、 R_{max} は各層でほぼ一定である。

5.2 ベースシア係数の二軸相関関係

1 方向入力によるベースシア係数（ C_B ）を図-13 に示す。 C_B は入力角度の増加に伴い増大し、Y 方向（90 度）で最大となる。

ベースシア係数（ C_B ）は、地震動の入力角度が 0 度では 0.5 倍入力が 0.15、1.0 倍入力が 0.29 であり、地震動の入力角度が 90 度では 0.5 倍入力が 0.48、1.0 倍入力が 0.56 である。0.5 倍入力では、部材はひび割れが発生しているが、曲げ破壊しておらず、鉄筋は弾性域である。1.0 倍入力では、部材の一部に塑性ヒンジが生じているが、崩壊形は形成していない。

0.5 倍入力では、45 度の C_B は 0.32 であり、X 方向（0 度）の C_B の 1.87 倍である。1.0 倍入力では、45 度の C_B は 0.49 であり、X 方向（0 度）の C_B の 1.67 倍である。

ベースシア係数の相関曲線は楕円に近い形であり、二軸相関係数（ α ）は 0.5 倍入力では約 2.25、1.0 倍入力では約 1.65 である。

5.3 外柱の圧縮変動軸力

隅柱（C2 柱）と側柱（C1 柱）における 1 方向入力方向別の 1 階柱の圧縮変動軸力比（ σ ）を図-14 に示す。なお、 σ は静的解析と同様に N をコンクリートの圧縮軸耐力で除した比率とする。また、 N は 0.5 倍入力時及び 1.0 倍入力時とする。

隅柱の σ は斜め方向で大きく、側柱の σ は Y 方向（90 度）でほぼ最大となる。隅柱では、45 度方向の N は X 方向（0 度）の N に比べて 0.5 倍入力時では 1.90 倍であり、1.0 倍入力時では 1.44 倍である。側柱では、45 度から 75 度の変動軸力は Y 方向（90 度）に比べて 1.0 倍入力時では 0.76~0.93 程度である。

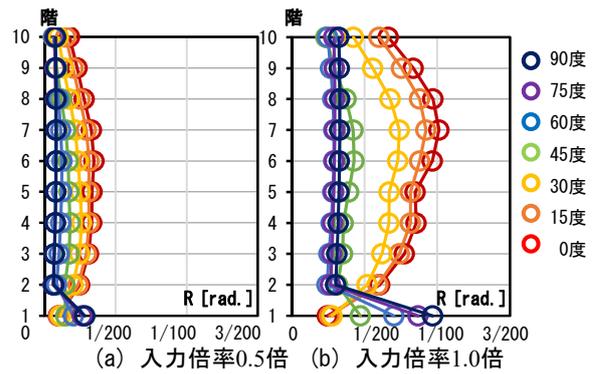


図-12 最大層間変形角の高さ方向分布

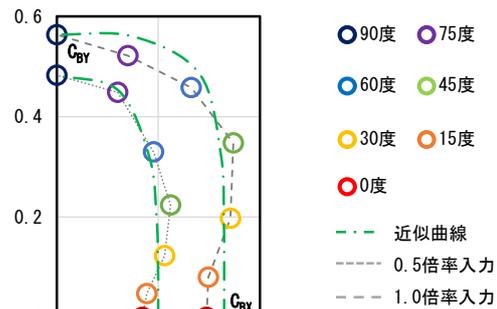


図-13 動的解析による C_B の二軸相関関係

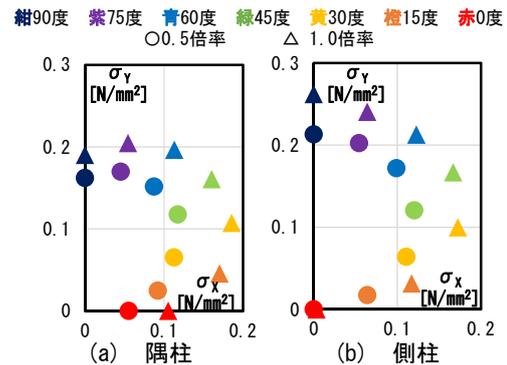


図-14 1方向入力による1階柱の圧縮変動軸力比

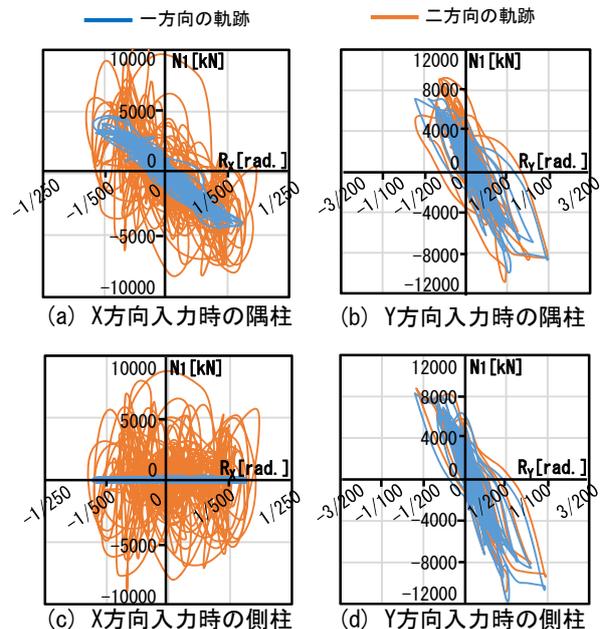


図-15 1階柱変動軸力と1階層間変形角との関係

5.4 直交方向地震動の影響

1方向入力及び2方向入力における1階柱変動軸力(N_I)と1階層間変形角(R_I)との関係を図-15に示す。なお、入力倍率は1.0倍である。1方向入力では、X方向入力はNS波を0度方向に、Y方向入力はNS波を90度方向に入力する。一方、2方向入力では、X方向入力はNS波を0度方向に、EW波を90度方向に入力し、Y方向入力はEW波を0度方向に、NS波を90度方向に入力する。

2方向入力の隅柱 N_I は1方向入力に比べてX方向入力時では2.32倍、Y方向入力時では1.29倍である。2方向入力の側柱 N_I は1方向入力に比べてX方向入力時では直交方向の影響が大きい、Y方向入力時では0.89倍である。また、2方向入力の R_I は1方向入力に比べてX方向入力時では1.19倍、Y方向入力時ではほぼ同等である。

5.5 外柱の変動軸力の直交方向係数

入力方向別に外柱の変動軸力の直交方向係数 a 及び b の推移を図-16に示す。なお、側柱の b は静的解析と同様に算定しない。また、2方向入力時(1.0倍入力)の a 及び b を縦軸に示す。

1方向入力時では、 a は隅柱及び側柱ともに地震動の入力角度が大きくなる程大きくなる。一方、 b は地震動の入力角度が大きくなる程側柱では大きくなる。 a は45度が最大であり、0.5倍入力時では隅柱が引張軸力時0.69、圧縮軸力時0.78であり、側柱が引張軸力時0.62、圧縮軸力時0.65である。また、1.0倍入力時の a は隅柱が引張軸力時0.49、圧縮軸力時0.75であり、側柱が引張軸力時0.47と圧縮軸力時0.61である。隅柱の b は、0.5倍入力時では75度圧縮時最大0.62であり、1.0倍入力時では45度圧縮時最大0.61である。なお、1.0倍入力時の応答変形は静的解析における R_T が1/100時の変形よりやや小さく、直交方向係数 a は R_T が1/100時の値に比べてやや大きい。

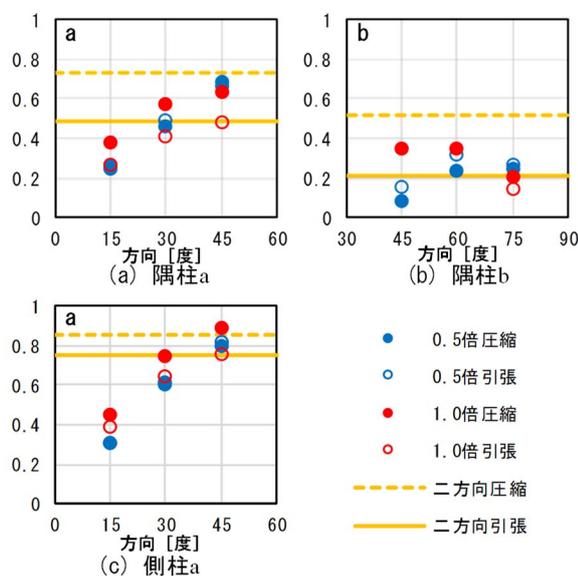


図-16 動的解析による1階柱の変動軸力係数

2方向入力時の1階外柱の a は、隅柱が引張軸力時0.49、圧縮軸力時0.73であり、側柱が引張軸力時0.76、圧縮軸力時0.86であり、隅柱の圧縮軸力時を除いて1方向入力45度と概ね同程度である。また、隅柱の b は、最大0.52である。

6. まとめ

RC造ピロティ構造の10階建住宅を対象として静的弾塑性解析及び地震応答解析を実施し、斜め方向地震力に対する保有水平耐力と外柱の変動軸力を検討した。

本解析の範囲内であるが、以下の知見を得た。

- 1) 静的解析によるケース1(ピロティ構造)の C_u は、45度方向が0.45であり、75度方向が最も大きく0.57である。ケース2(連層壁構造)の C_u は、45度方向が0.52であり、Y方向が最も大きく0.76である。
- 2) 静的解析による崩壊形形成時の C_u 相関曲線は楕円に近い形状であり、保有水平耐力の二軸相関係数(α)はケース1では約2.60、ケース2では約2.90である。
- 3) 静的解析による1階外柱の変動軸力の直交方向係数 a は隅柱と側柱では地震力の入力角度の増加に伴い大きくなる。一方、 b はY方向の変動軸力が大きいため、隅柱と側柱では異なる。
- 4) 静的解析による R_T が1/100時の a はケース1の1階隅柱が引張軸力時0.47、圧縮軸力時0.67であり、ケース2の1階隅柱が引張軸力時0.31、圧縮軸力時0.34であり、ケース1がケース2に比べて大きい。
- 5) 1方向1.0倍入力時の C_B 相関曲線は楕円に近い形であり、二軸相関係数(α)は0.5倍入力では約2.25、1.0倍入力では約1.65である。
- 6) 1方向1.0倍入力時の1階外柱の a は45度が最大であり、隅柱が引張軸力時0.49、圧縮軸力時0.75であり、側柱が引張軸力時0.47、圧縮軸力時0.61である。
- 7) 2方向入力時の1階隅柱の a は引張軸力時が0.49であり、圧縮軸力時が0.73であり、1方向入力45度と概ね同程度である。

今後、階数の異なるピロティ構造における斜め方向地震力に対する外柱の変動軸力などについて報告したい。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造保有水平耐力計算規準(案)・同解説、2016.4
- 2) 国土交通省住宅局建築指導課ほか：建築物の構造関係技術基準解説書、pp.730-748、2015.6
- 3) 構造システム(株)：SNAPVer.7テクニカルマニュアル、2015.11.
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説、1990.10