

論文 質量偏心を有する RC 造建物の立体地震弾塑性挙動

傅 金華^{*1}・林 三雄^{*2}・井上範夫^{*3}・柴田明徳^{*4}

要旨：地震の際、質量偏在は建物にねじれ振動をもたらす。本研究では、中高層建物に相当する 7 層と 15 層の純ラーメン鉄筋コンクリート造建物を解析対象とし、偏心質量と偏心率の関係を調べ、立体弾塑性地震応答解析を通じて、質量偏心が建物の弾塑性挙動に与える影響を検討した。解析結果に基づいて、並進変位に対する回転変位の比率を決め、建物の各フレームの最大変形を推定した。

キーワード：中高層 RC 造、質量偏心、地震動、立体、弾塑性

1. はじめに

建物を設計する際に、偏心をできるだけ起こらないように要求される。しかし、現実には、建物の用途、機能及び建築計画上の種々の制約から、建物の平面に質量が対称に分布できない、あるいは剛性の高い耐震壁が対称に配置できない時もある[1]。この質量の偏在による質量偏心は、地震の際建物にねじれ振動を生じさせることになる。このため、建物の質量偏在の部分に過大変形を生じ、局所的な応答が増大されることが考えられる。特に、入力地震動が大きい場合、建物の挙動が弾性域を超え、塑性域でのねじれ振動を生じ、質量偏在の所にもっと大きな被害をもたらす恐れがある。今まで低層のシンプルなモデルに力点を置いた研究が多くなされているが、中高層建物の弾塑性偏心挙動については不明点がまだ多く残されている。従って、本研究では、最上層の質量偏在による 1 方向質量偏心を生じた中高層鉄筋コンクリート(RC)造建物を解析モデルとし、1 方向及び 2 方向地震入力に対して、立体弾塑性地震応答解析を通じて、質量偏心が建物の弾塑性挙動に与える影響を検討した。

2. 解析モデル

本解析は中高層建物に相当する 7 層と 15 層の純ラーメン鉄筋コンクリート造建物を解析対象とする[2]。建物の 1 層の階高は 5 m であり、2 階以上は 4 m である。また、この 2 種類の建物は同じ平面配置を持ち、その平面図は図 1 に示す通りである。本解析は建物の最上層のみに質量を Y 方向に偏在させ、つまり 1 方向質量偏心に限って検討する。図 1 の(a)は偏心をもたらす質量が最上層平面の中央にある偏心のないモデルであるが、図(b)はこの質量の変動によりもたらされた偏心のあるモデルである。表 1 に建物の部材の配筋及び断面寸法を示す。建物のすべての部材の主筋の降伏強度は 440kg/cm^2 、コンクリート強度は 7 層モデルの場合 $F_c = 300\text{kg/cm}^2$ 、15 層モデルの場合 $F_c = 360\text{kg/cm}^2$ 。また、建物の各層単位面積当たりの重量は 1.33t/m^2 である。

本解析では、剛床仮定を用い、建物を構成する各フレームを剛床でつなぐ擬似立体解析プログラム TERAP(Torsional Earthquake Response Analysis Program)を用いた[3]。ここで、すべての部材はその端部に剛域を持った線材にモデル化し、剛域の位置は部材の接合部までとした。部材

*1 (株)ピー・エス、建築技術部、工博(正会員)

*2 (株)ピー・エス、建築技術部部長(正会員)

*3 東北大学助教授、工学部建築学科、工博(正会員)

*4 東北大学教授、災害制御研究センター、工博(正会員)

の解析モデルとしては、すべての部材について、材端弾塑性曲げバネモデルを用いた。建物の支持条件は固定とする。また、各部材のせん断挙動は弾性とし、軸方向の伸び縮みを考慮していない。曲げバネの復元力モデルは修正 TAKEDA モデルを用いた。

3. 偏心率の設定

本解析では、建物の最上層に偏った水タンク及びペントハウスなどがあると仮定し、7, 15 層建物の最上層の偏心率が0.15, 0.30になるように偏心質量を決めた。つまり偏心率0.15, 0.30に対して、7層モデルの場合、偏心質量はそれぞれ171.9(t)と451.6(t)であり、15層モデルの場合、偏心質量はそれぞれ163.3(t)と422.3(t)である。表2に各モデルの固有周期を示す。建物が1軸偏心なので、偏心モデルと無偏心モデルのY方向の周期は変わらないが、質量偏心によりX方向の固有周期が増加し、Z方向の回転周期が小さくなっている。また、建物にAi分布の水平力が作用することを想定し、建築基準法に従い、建物の偏心率を求めた[4]。図2に建物の各層の偏心率を示す。この図を見ると、最上層のみに偏心質量がある場合でも、偏心の影響は最上層のみでなくその下の層にも及ぶ。偏心率の分布は上から下に向って漸減の傾向がある。最上層の偏心率を0.30に設定した場合、下層部の偏心率が0.15を超えたのは7層、15層モデルとも最上層の

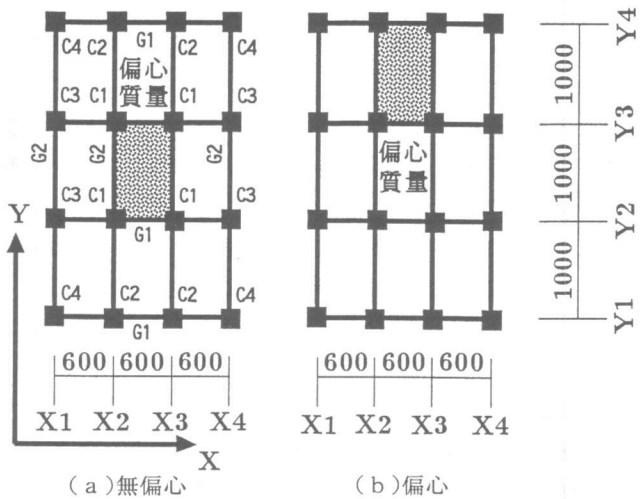


図1. 建物モデル(単位:cm)

表1(a) 7層建物の部材の断面寸法と配筋

階数		1	2～5	6～7	梁		基礎梁	2～3	4～6	7～R	
柱	断面	85×85	85×85	85×85		G1	断面	55×150	55×90	55×90	55×90
	C1 配筋	16-D38	16-D36	12-D35			上	6-D38	6-D38	6-D35	6-D35
	断面	85×85	85×85	85×85			下	6-D38	6-D38	5-D35	5-D35
	C2 配筋	16-D38	16-D36	12-D35			断面	55×150	55×90	55×90	55×90
	断面	85×85	85×85	85×85		G2	上	6-D38	5-D38	5-D35	5-D35
	C3 配筋	16-D38	16-D36	12-D35			下	6-D38	5-D38	5-D35	5-D35
	断面	85×85	85×85	85×85			注：柱の帯筋：U13φ10				
	C4 配筋	16-D38	16-D36	12-D35			注：梁の筋筋：U13φ20				

表1(b) 15層建物の部材の断面寸法と配筋

階数		1	2~3	4~6	7~8	9~11	12~15	注	
柱	C1	断面	100×100	100×100	100×100	100×100	100×100	柱の帯筋: U13φ10	
		配筋	16-D41	15-D41	12-D41	12-D41	12-D41		12-D38
	C2	断面	100×100	100×100	100×100	100×100	100×100		100×100
		配筋	16-D41	16-D41	12-D41	12-D41	12-D41		12-D38
	C3	断面	100×100	100×100	100×100	100×100	100×100	100×100	
		配筋	24-D41	24-D41	16-D41	12-D41	12-D41	12-D38	
	C4	断面	100×100	100×100	100×100	100×100	100×100	100×100	
		配筋	24-D41	24-D41	20-D41	16-D41	12-D41	12-D38	
階数		基礎梁	2~3	4~6	7~8	9~10	11~12	13~R	
梁	G1	断面	65×250	65×95	65×95	65×95	55×95	55×95	55×95
		上	8-D41	8-D41	8-D41	8-D38	7-D38	7-D38	7-D38
		下	8-D41	8-D41	8-D41	8-D38	7-D38	7-D38	7-D38
	G2	断面	65×250	65×110	65×110	65×110	55×110	55×110	55×110
		上	8-D41	7-D41	8-D41	7-D38	6-D38	6-D38	6-D38
		下	8-D41	7-D41	7-D41	7-D38	6-D38	6-D38	6-D38

表2. 建物の周期

モデル	7層モデル				15層モデル			
偏心率	0.15	0.30	0.15	0.30	0.15	0.30	0.15	0.30
方向	X	Z	X	Z	X	Z	X	Z
無偏心	0.65	0.52	0.69	0.54	0.96	0.79	0.98	0.80
偏心	0.66	0.51	0.72	0.52	0.97	0.78	1.01	0.78

すぐ下の層のみである。つまり、偏心率が大きく影響を受けるのは偏心質量のある層とその下の隣接する幾つかの層であると言えよう。また、15層モデルの場合、最上層から下の7層の偏心率の分布はほとんど7層モデルと同じである。

4. 弾塑性地震応答性状

本解析においては、入力地震動としてはEL-CENTRO波(1940)と八戸港湾波を用いた。建物の塑性化の進んだ状態における力学性状を把握するために、EL-CENTRO波のNS成分及び八戸港湾波のEW成分を75 KINEに規準化し、その直交成分にも同じ

倍率をかけた。また、本解析においては、次に示す3ケースの解析を行った。EL-CENTRO波のNS成分或いは八戸港湾波のEW成分を無偏心モデル及び偏心モデルのX方向のみに入力する1方向解析が2ケース、偏心モデルに対してX方向入力と同時に、建物のY方向にも入力する2方向解析が1ケースである。建物の支持条件は固定とする。解析にはNewmarkの β 法を用い($\beta=0.25$)、減衰定数は0.05とし、瞬間剛性比例型とした。継続時間は10秒とする。

4.1 建物の並進層間変位

図3に建物のX方向の重心位置の最大層間並進変位を示す。図(a)(b)はそれぞれ7層と15層モデルの解析結果である。偏心率が0.30の時の7層モデルの解析結果(EL-CENTRO波入力)を除けば、偏心と無偏心モデルの並進層間変位の差はほとんどない。偏心モデルの場合、2方向入力による解析結果は1方向入力と比べてその違いがほとんど見られない。また、偏心率の変化から見ると、図(a)に示す7層モデルの場合、偏心率の増大につれて、下層部の変位は小さくなるが、図(b)に示す15層モデルの場合、逆にその下層部の変位はやや大きくなる。しかし、大局的には偏心率による重心位置の並進層間変位には大きな変化が見られない。また、無偏心モデルの部

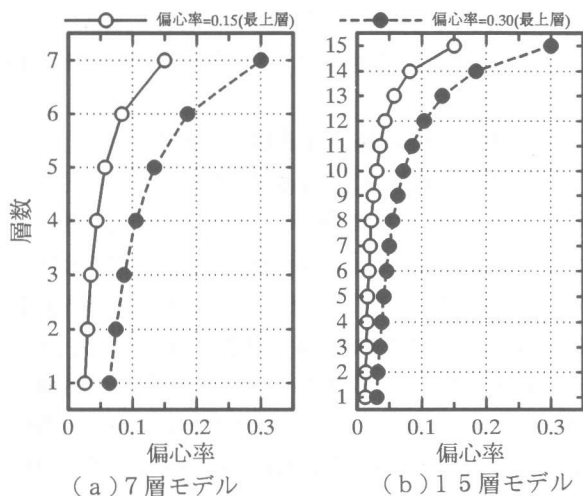


図2. 建物の偏心率

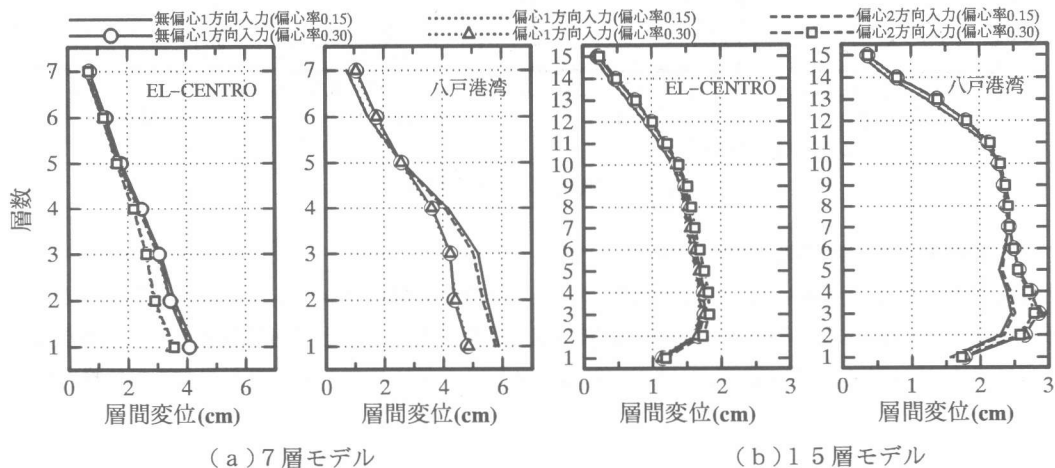


図3. 建物の最大並進層間変位

材の塑性化については、7層モデル場合、梁はほとんど曲げ降伏している。EL-CENTRO 波を15層モデルに入力する時、曲げ降伏したのは10階の梁のみで、その最大塑性率は1.18である。

4.2 建物の層間回転変位と層間並進変位の比

建物の重心位置の層間並進変位が最大になる時、各フレームの層間変位もほぼ最大値に達すると考えられる。図5は建物の重心位置の層間並進変位が最大値に達する時、床の回転半径の所に生じたねじれによる層間回転変位と重心位置の層間並進変位の比(図4)である。両モデルとも偏心率の増加につれて、変位比は大きくなる傾向がある。EL-CENTRO波と八戸港湾波の解析結果を比べると、EL-CENTRO波による回転変位はやや大きい。また、八戸港湾波の場合、下層部の層間回転変位比は小さい。本例では、1方向入力と2方向入力の結果を見ると、7層、15層両モデルとも1方向入力の結果と比べて、2方向入力による変位比は小さくなる傾向が見られる。偏心率が同じである場合、両地震波とも層数(周期)の増加につれて、回転変位比は小さくなる。地震波の違いを無視し、両地震波の解析結果を総合すると、偏心率が0.15の場合、7、15層モデルの平均回転変位比はおおよそ0.15と0.07であり、偏心率が0.30の場合、7、15層モデルの平均回転変位比はおおよそ0.35と0.15であることが分かった。

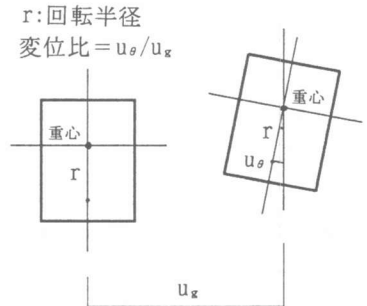


図4. 並進変位と回転変位

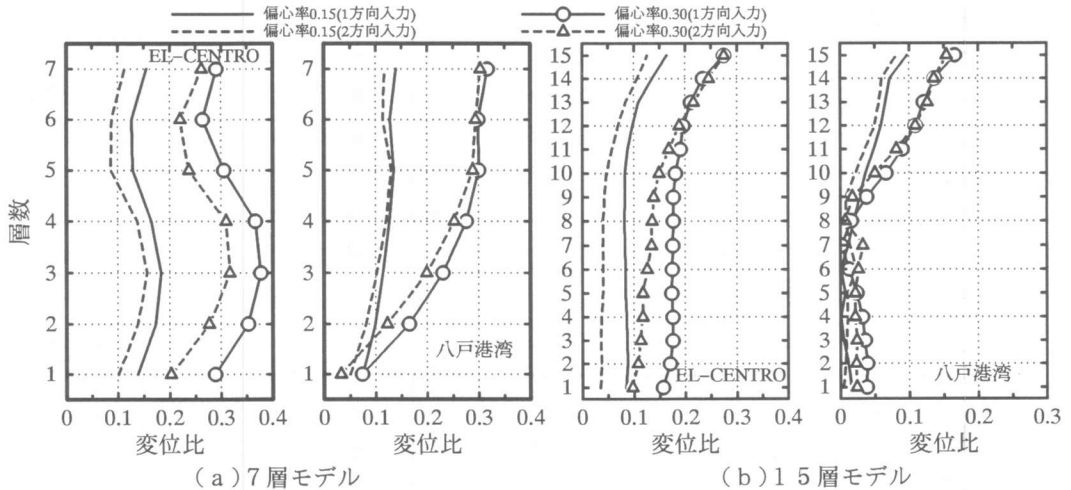


図5. 回転変位と並進変位の比

4.3 各フレームの層間変位の最大値

偏心建物は地震時において、ねじれ振動により、建物の外側のフレームに大きな変位を生じると考えられる。従って、このフレームの変位の最大値を推定することは耐震設計にとって重要である。式(1)に示している Kan 及び Chopra の式によれば、各フレームの変位をおおまかに推定することができる[5, 6]。

$$u_x = (1 + k \cdot d / r) u_g \quad (1)$$

ここで、 u_x は各フレームの最大層間変位、 u_g は重心位置の最大層間並進変位、 k は前節で求めた層間回転変位比、 d は層の重心から各フレームまでの距離、 r は床の回転半径である。重心位置の最大層間並進変位については、前節の解析から分かるように、偏心モデルと無偏心モデルは大差がないため、 u_g は無偏心モデルの解析結果を用いてもよい。したがって、層間回転変位比 k が分かれば、ねじれ解析をせずに、各フレームの最大層間変位を概ね推定することができる。層間回転変位比 k の推定については、地震波の種類によるばらつきが考えられるが、ここでは、前

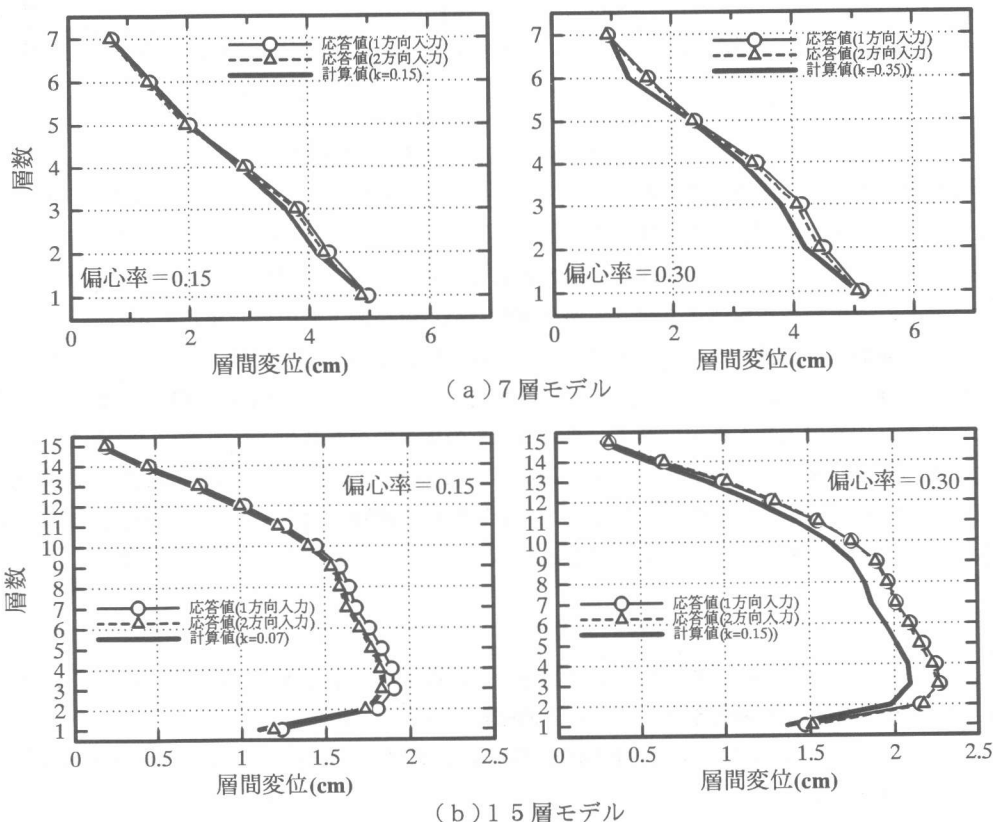


図6. Y4フレームの最大層間変位(EL-CENTRO波)

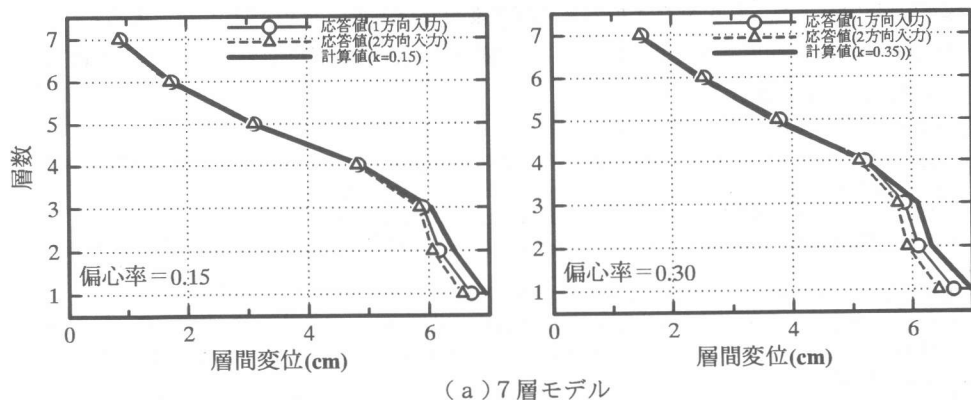


図7. Y4フレームの最大層間変位(八戸港湾波)

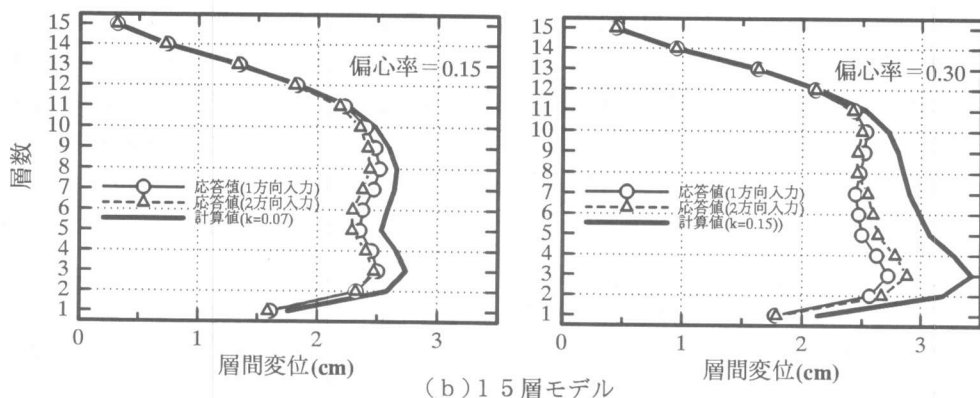


図 7. Y4フレームの最大層間変位(八戸港湾波)

節の2種類の地震波の解析結果に基づき、偏心率と層数(周期)をパラメータとして、1層から最上層まで同じ平均層間回転変位比 k を用いた。図6, 7に重心に近く変位が最も大きくなるY4フレームの弾塑性解析による層間変位の最大応答値と式(1)による計算値を示す。7層モデルの場合、計算値と解析の応答値はよく合う。偏心率から見ると、最上層の偏心率が0.15のモデルについては、計算値と解析値はほぼ一致しているが、最上層の偏心率が0.30の15層モデルについては、EL-CENTRO波の場合(図6)、計算値は応答値よりやや小さく、八戸港湾波の場合(図7)、中間層の計算値は応答値より大きめに評価している。その他の場合計算値と応答値は大差がない。さらに多くの地震波を用い、検討する必要があるが、EL-CENTRO波と八戸港湾波の場合、偏心率が0.15と0.30の時、本解析の建物と同じぐらいの周期を持つ建物に対して、以上の層間回転変位比 k を選べば、建物の各フレームの最大層間変位をおおまかに推定できると考えられる。

5.まとめ

本研究では、EL-CENTRO波と八戸港湾波を用い、質量偏心を有する7, 15層のRC造建物の立体弾塑性地震応答解析を通じて、以下の結論を得られた。

1. 建物の上層部に質量偏心を生じた場合、偏心の影響は下層部までに及ぶ。偏心率の分布は上から下まで減少する傾向がある。
2. 建物の層間回転変位比は偏心率の増加につれて大きくなる。EL-CENTRO波と八戸港湾波を用いた場合、偏心率が0.15の時、7, 15層モデルの平均回転変位比はおおよそ0.15と0.07、偏心率が0.30の時、7, 15層モデルの平均回転変位比はおおよそ0.35と0.15である。
3. 建物の平均層間回転変位比を用いて、平面解析の最大層間変位から各フレームの最大層間変位をおおまかに推定できる。

【参考文献】

- 1) 傅 金華・柴田明徳・井上範夫・斉藤大樹：偏心のある立体RC壁フレーム構造の動的弾塑性挙動，第9回日本地震工学シンポジウム，Vol. 2, pp. 1591-1596, 1994. 12
- 2) 斉藤大樹・傅 金華：質量偏心解析，PRESSS 指針分科報告会，1993
- 3) 佐武直紀・柴田明徳・渋谷純一：2軸曲げ相互作用を考慮した立体骨組の弾塑性応答解析，東北大学建築学報，第26号，1987. 3
- 4) 構造計算指針・同解説：日本建築センター，1988
- 5) Kan, C. L., Chopra A. K.: Linear and Nonlinear Earthquake Response of Simple Torsionally Coupled Systems, report No. EERC 79/03, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California, February 1979.
- 6) 山崎 裕：2方向強震動による偏心構造物の非線形応答，日本建築学会論文報告集，第310号，pp. 61-68, 1981年12月