

ねじれ振動を伴う建物の弾塑性応答解析

—復元力特性の第2勾配が応答に及ぼす影響—

中村 満喜男・小高 昭夫

Torsionally Coupled and Elasto-Plastic Response Analysis of the Building

—on the Effects that Second Modulus
of the Hysteresis Characteristic affects the Response—
Makio NAKAMURA and Teruo ODAKA

In this paper, the dynamic effects that second modulus of the hysteresis characteristic affects the response, are investigated. Hysteresis characteristic is bi-linear type. Dimensionless Quantity which is the amount of second modulus divided by first modulus, is introduced and the elasto-plastic response analysis is done for dimensionless quantity γ from 0.0 to 1.0 ($\gamma=0.0$ for perfect elasto-plastic, $\gamma=1.0$ for elastic). The used ground motion is El-Centro 1940.5.12 NS component and maximum acceleration is 100 gal.

The resultants which have the frequency ratio (ω_θ/ω_x) and eccentric distance (e/ρ) as the parameter, are investigated by the form of the response spectrum. In the result, when frequency ratio is small and uncoupled natural period T_x is long, it becomes clear that second modulus strongly affects the response spectrum.

1. 序

過去の地震による被害報告¹⁾や、建物のねじれ振動に関する数多くの研究²⁾³⁾より、ねじれ振動に起因すると考えられる地震被害例が多く示されている。しかしながら建物のねじれ振動性状を示す為のパラメーターの数が多すぎる為、その振動性状を統一的に表すには致っていないのが研究の現状であると言える。

建物が地震時にねじれ振動を生ずる主な原因は、1. 質量の偏在 2. 剛性の偏在 3. 強度の偏在 4. 地震動に含まれるねじれ成分 等々と考えられる。1と2は偏心距離によって評価され、3は各部材・各フレームの弾塑性状態を考慮する事によって評価される。4は地震動が地盤を伝播する事に起因する。わが国では、建物を設計する際新耐震設計法によって偏心率 Re が15/100以下になる様に指導しており、設計上の要請でやむを得ず Re が15%を越える時は保有水平耐力の検討を義務づけている。外国にあっては少し考え方に違いがあり、設計用の偏心距離を次式で与えている⁴⁾。 $e_x = e_a + \beta \cdot D$ ここで e_a は動的偏心距離、 β は係数、 D は建物の平面寸法である。 e_x が与えられ設計が行われるが、わが国ではこの

あたりの考え方は明らかにされていない。

近年この様なねじれ振動の研究に関して Christopher L. Kan, Anil K. Chopra⁵⁾⁶⁾等は1層建物の弾性及び弾塑性解析を確率論手法を用いて行い、振動数比 ω_θ/ω_x がねじれ振動を分析する上で重要な役割をはたすことを示している。山崎⁷⁾は1軸偏心にはモーダル解析、2軸偏心には確率論手法を用いて2方向入力作用する場合の解析を行い、振動数比 ω_θ/ω_x を2.0~2.5以上にすることを提案している。著者等⁸⁾⁹⁾はねじれ振動をする1層及び3層建物の固有値解析より基礎的な振動性状を明らかにすると共に、エルセントロ地震 NS 成分等3つの地震波に対する弾性及び弾塑性応答解析を行い、その最大応答を偏心距離 e/ρ ・振動数比 ω_θ/ω_x ・連成のない並進の固有周期 T_x についてまとめ、ねじれ振動を抑えるには振動数比を大きくする事、偏心距離を小さくする事が必要であると結論を示している。

本論文はねじれ振動が復元力特性の第2剛性(第2勾配)によって受ける影響について研究したものである。この第2剛性は実在の建物にあっては、使用材料と建物平面の構造要素の配置具合等によって当然変化するもの

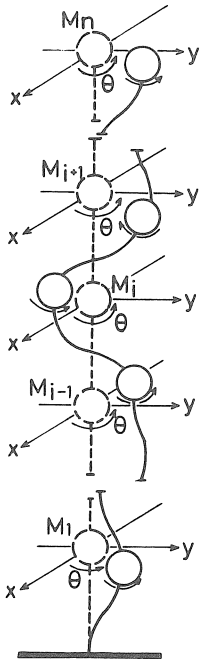


図1 多層建物の振動モデル

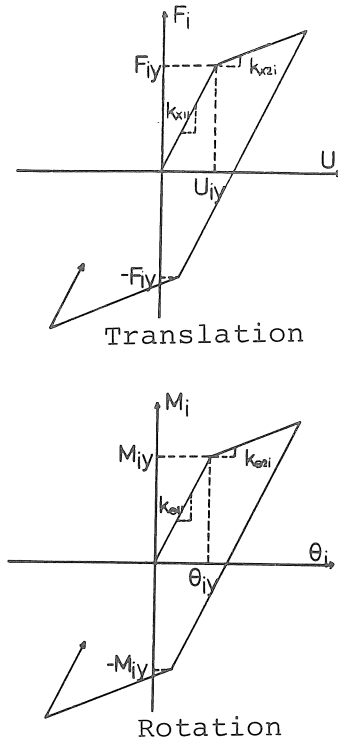


図2 i層のBi-linear型復元力特性

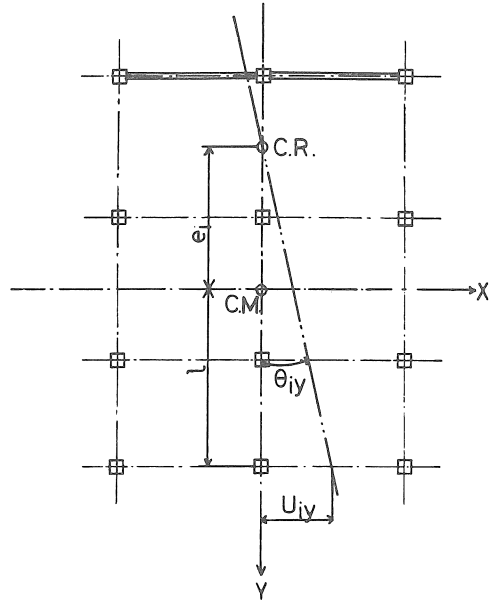


図3 i層の降伏変位と降伏回転角の関係

である。第2剛性を第1剛性で割った無次元の第2剛性 γ をパラメーターとして導入し結果をまとめている。建物はねじれ振動の影響の分析が容易である様に1層建物でしかも1次元の単純モデルで扱われる。解析結果が多層建物にも適用できる様に、1層建物を表わす振動系のパラメーターの数値の範囲は広く取られている。各種振動パラメーターを使って建物をモデル化し、El-Centro 1940 5・12 NS成分に対する弾塑性応答解析を行い、若干の結果を得てその考察を行っている。

以下その方法および結果について順を追って述べる。

2. ねじれ振動を伴う建物のモデル化と振動方程式

汎用性を考慮してモデル化・振動方程式は多層建物について述べる事にする。建物は質量が各床レベルに集中した集中質量系と考えられ、各層ごとの水平変位に対する復元力特性とねじれ角に対する復元力特性が考えられる。図1の様に建物は高さ方向に集中質量が離散的に分布する1次元モデルとしてモデル化される。各層の集中質量は地震時にX方向・Y方向に並進し、 θ 方向に回転するものとする。各層の復元力特性は図2の様に並進・回転共 Bi-linear 型の復元力特性を有するものとする。建物を1次元モデルで扱っている為、層ごとの復元力特

性をより正確で複雑な形で取扱う事は意味がなく、復元力特性の最も基本的とも言える Bi-linear 特性による応答性状を概念的に把握する事があらゆる解析に先立ってまず必要と考えられる。Bi-linear 特性における第2剛性の第1剛性に対する比を無次元第2剛性(第2勾配) γ_1 とし、本論文は特に γ_1 が地震応答に及ぼす影響について検討を加えている。実在の建物では並進と回転の降伏変位 $U_{iy} \cdot \theta_{iy}$ は各層内においてお互いに影響を及ぼし合うと思われるが、本論文の様に1次元モデルで建物を扱う限り正確にこのカップリングを評価する事は不可能であり、簡単の為に降伏変位 $U_{iy} \cdot \theta_{iy}$ は独立でカップリングはないとして解析を行った。従って θ_{iy} があらかじめ決定されていなければならないが、これは次式によって降伏変位 U_{iy} より決定されると考えた。

$$\theta_{iy} = U_{iy} / (e_i + l) \tag{1}$$

ここに θ_{iy} : i層の降伏回転角

e_i : i層の偏心距離

l : x軸から最も外にあるラーメンまでの距離

すなわち剛心まわりの降伏回転角は、最も外側の構面のラーメンが降伏変位 U_{iy} に達すると等価な変位を引起すに必要な回転角とし、図3にその関係を示している。

表1 1層建物の弾塑性応答解析に用いられる各種パラメーターとその数値

T _x (sec)	ω_e/ω_x	m_i/m_1	e/ρ	k_2/k_1 (= γ)
0.4	0.8	1.0	0.0	0.0
0.6			0.2	0.25
0.8			0.4	0.5
1.0			0.6	0.75
1.2			0.8	1.0
1.4	1.5	1.0	0.0	0.0
1.6			0.2	0.25
1.8			0.4	0.5
2.0			0.6	0.75
2.2			0.8	1.0
2.4				
2.6				

性

地震動として El-Centro 1940. 5. 12 NS 成分が採用されている。地震動の最大加速度は100gal に正規化して用いられている。計算は最大応答が発生する時刻を考へて、地震動の始めから10秒間について行われ、時間のきざみ巾は0.005秒である。なお数値計算は式(2)を線形加速度法を用いて解いている。その他必要となる解析モデルの諸元は図5に示される1層建物から次の様に決めた。平面形状は600cm×600cm、層高は400cm、質量は50kg・sec²/cm、断面2次半径 ρ は500cm、減衰定数 h は0.05(通常のRC構造物を想定)である。降伏変位 U_y は地動最大加速度100gal が入力した時、振動系が必ず弾塑性状態になる様次式で与えられる。

$$U_y = 0.5 \times |U|_{\max} \quad (4)$$

ここに $|U|_{\max}$: 最大加速度100gal 入力に対する弾性応答変位の最大値

従って実際の設計業務の中で行われている様に、最大入力加速度100gal に対し弾性範囲内である様に設計し、最大入力加速度300gal で弾塑性状態となり、塑性率を検討すると言う過程とは、本論は入力加速度の与え方が基本的に違うので結果の考察を行う際には特に注意が必要である。

なお数値解析はまず第1に固有値解析が行われ、第2に弾性応答解析が行われ、第3に弾塑性応答解析が行われた。第1の固有値解析と第2の弾性応答解析、第3のうち完全弾塑性 $\gamma=0.0$ の場合についてはすでに著者等の文献⁽⁸⁾⁽⁹⁾に詳しく示されているので、ここでは本論文の目的である弾塑性応答解析における第2勾配の影響すな

わち γ によるパラメトリックな数値計算結果および考察について次に示す。

4. 結果とその考察

連成のない並進の固有周期 T_x を横軸にとり、縦軸にそれぞれの応答の最大値をプロットしたものが図6～図9に示されている。それぞれの図の内、一番左の図は縦軸に並進の最大応答変位 $|U|_{\max}$ をとってプロットした一種の変位応答スペクトルであり、中左の図は縦軸にねじれの最大応答角変位 $|\rho \cdot \theta|_{\max}$ をとってプロットした一種の角変位応答スペクトル、中右の図は縦軸に並進の最大絶対加速度応答倍率 $|\ddot{X} + \ddot{Y}_0|_{\max} / |\ddot{Y}_0|_{\max}$ をとってプロットした一種の並進の加速度応答スペクトル、一番右の図は縦軸にねじれの最大角加速度 $|\rho \cdot \ddot{\theta}|_{\max} / |\ddot{Y}_0|_{\max}$ をとってプロットした一種のねじれ角加速度応答スペクトルである。図中第2勾配の大きさが k_2/k_1 の数値で示され、それぞれに対応する応答スペクトルが折線で示されている。図6～図9は振動数比 $\omega_e/\omega_x = 0.8, 1.5$ 偏心距離 $e/\rho = 0.2, 1.0$ について示しているが、他の組合せのものに関する図は紙面の都合で省略した。

横軸に偏心距離 e/ρ をとって、偏心距離の違いによる影響をわかり易く示したのが図10～図12である。図に含まれるそれぞれ4つの図の縦軸の意味は図6～図9で示されたものと同様であり、それぞれの第2勾配に対応する応答スペクトルが折線で示されている。図は振動数比 $\omega_e/\omega_x = 0.8, 1.5$ 連成のない並進の固有周期 $T_x = 0.4, 2.0$ の組合せについて示されているが、他の組合せのものは紙面の都合で省略した。しかしながら考察は数値計算によって得られた表1の全組合せの結果を見て行われた。

図6～図9よりそれぞれのスペクトルについて順に考察を行うと次の様になる。

a) 変位応答スペクトルについて

1. スペクトルの形状は全体的に右上りで T_x が1.4秒を越えると急激に大きくなる。同じ振動数比を持つ時は偏心距離が大きい程スペクトル値は全体的に小さくなる傾向がある。
2. T_x が1.6秒より大きい範囲で、スペクトル値は第2勾配の違いによる影響を強く受け、第2勾配が大きい程スペクトル値が大きくなる傾向がある。
3. T_x が1.6秒より小さい範囲で、スペクトル値は第2勾配の違いによる影響をほとんど受けず、又第2勾配の大きさの順にもならず、かなり複雑な様子を示している。

b) ねじれ角変位応答スペクトルについて

1. スペクトルの形状は右上りで、振動数比が大き

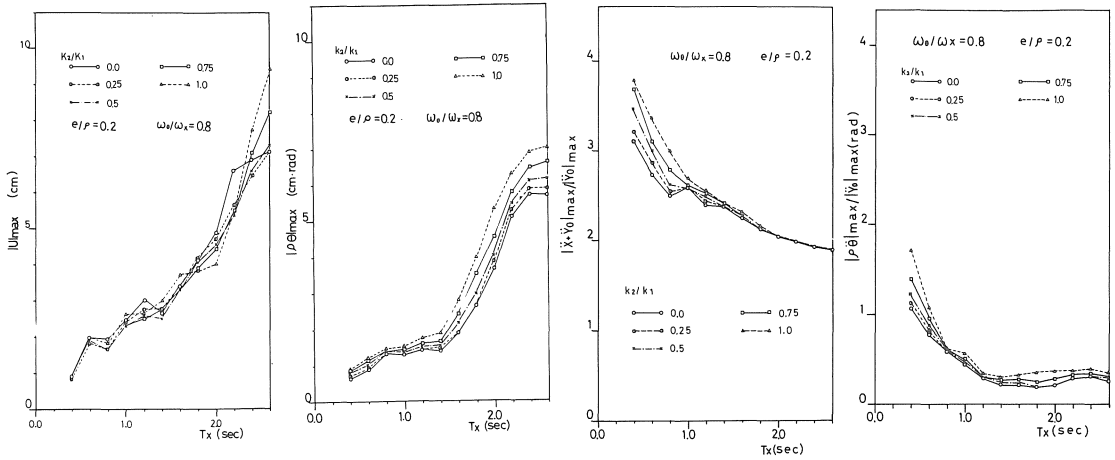


図6 振動数比0.8, 偏心距離0.2の第2勾配をパラメーターに示した変位応答スペクトル・角変位応答スペクトル・加速度応答スペクトル・角加速度応答スペクトル (El-Centro 1940.5.12 NS, 100gal 入力)

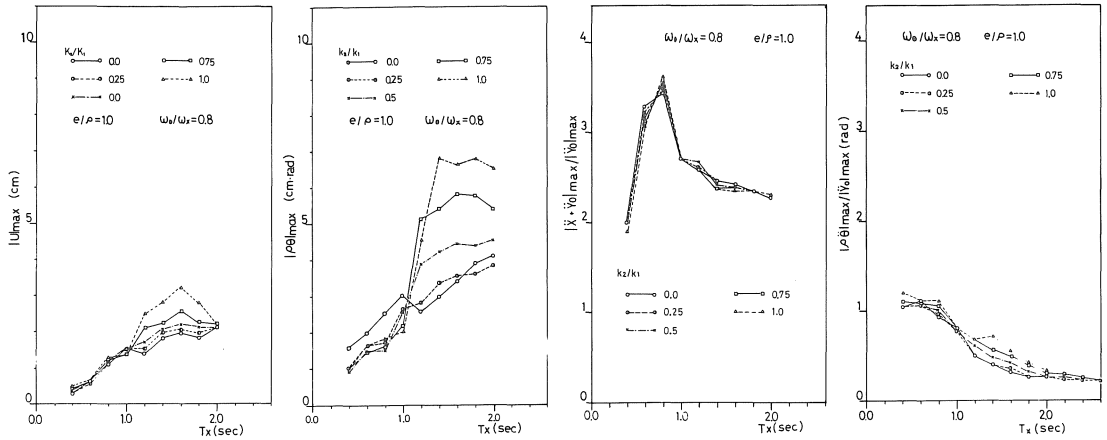


図7 振動数比0.8, 偏心距離1.0の第2勾配をパラメーターに示した変位応答スペクトル・角変位応答スペクトル・加速度応答スペクトル・角加速度応答スペクトル (El-Centro 1940.5.12 NS, 100gal 入力)

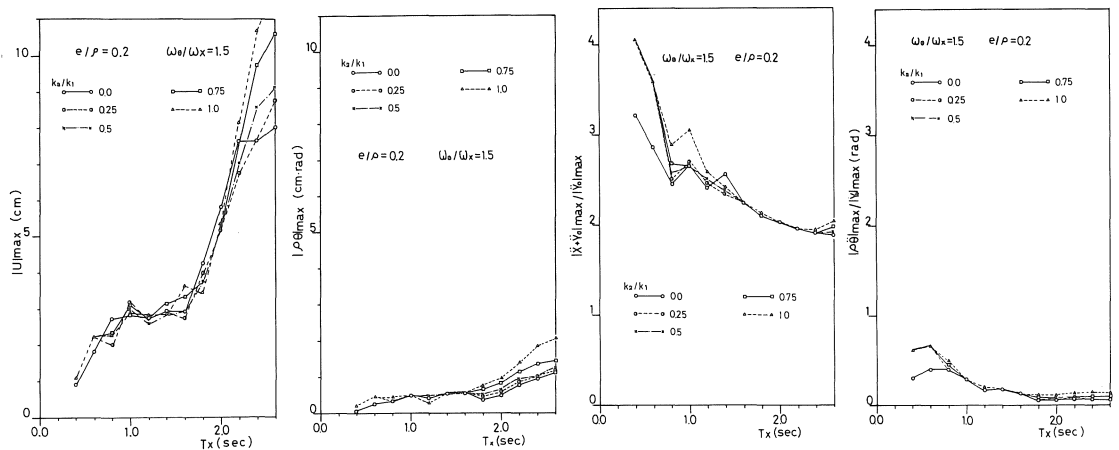


図8 振動数比1.5, 偏心距離0.2の第2勾配をパラメーターに示した変位応答スペクトル・角変位応答スペクトル・加速度応答スペクトル・角加速度応答スペクトル (El-Centro 1940.5.12 NS, 100gal 入力)

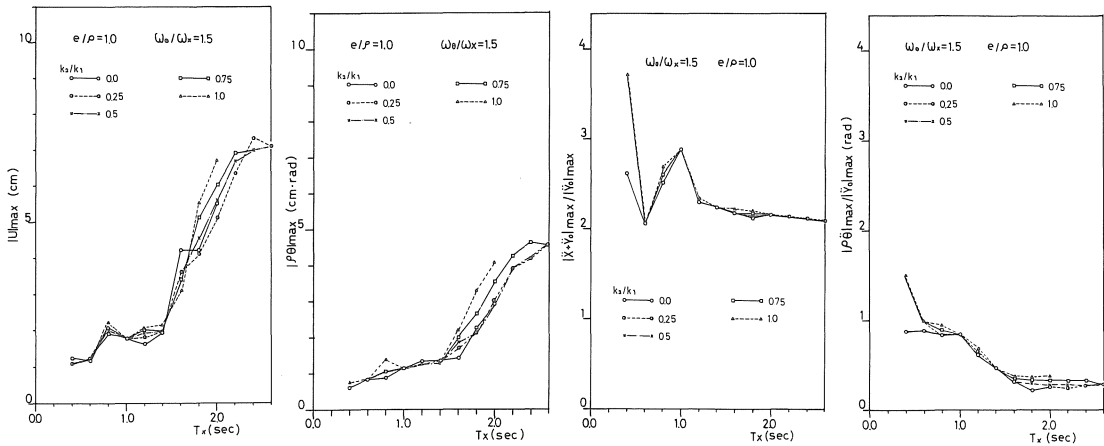


図9 振動数比1.5, 偏心距離1.0の第2勾配をパラメーターに示した変位応答スペクトル・角変位応答スペクトル・加速度応答スペクトル・角加速度応答スペクトル (El-Centro 1940.5.12 NS,100gal 入力)

なるとスペクトル値は T_x の全範囲でかなり小さくなる。又当然の事ではあるがスペクトル値は偏心距離が大きい程全体的に大きくなる。

2. 振動数比が0.8, 偏心距離が0.2の時, スペクトル値は T_x の全範囲で第2勾配の大きさの順になっている。しかし他の振動数比, 偏心距離の組合せに対して, その様なきれいな関係は見られない。
 3. 第2勾配の違いによってスペクトル値の異なる影響は T_x が1.2~1.4秒より大きい範囲で大きく現われ, その範囲では第2勾配の大きさの順にスペクトル値も大きいと言える。 T_x が1.2秒以下では第2勾配の影響も小さく, スペクトル値は必ずしも第2勾配の順にはならない。
 4. 第2勾配の違いによってスペクトル値が異なる影響は振動数比が小さく, 偏心距離が大きく, T_x が大きい場合に顕著である事がわかる。
- c) 並進の加速度応答スペクトルについて
1. スペクトルの形状はおおむね右下りの折線であり, スペクトル値は2.0~4.0の範囲にある。振動数比と偏心距離によってスペクトル値の大きさはほとんど変らない。
 2. 第2勾配の違いによってスペクトル値が異なる影響は偏心距離が0.2で T_x が1.2秒より小さい範囲で顕著に現われる。又その範囲でスペクトル値は第2勾配の大きさの順に大きい。
 3. T_x が1.0秒を越える範囲でスペクトル値はいずれの振動数比, 偏心距離に対しても第2勾配の影響を受けない。
- d) ねじれ角加速度応答スペクトルについて
1. スペクトルの形状は緩な右下りの折線であり, ス

ペクトル値は0.2~2.0の値を有する。折線はおおむね第2勾配の大きさの順になっている。

2. スペクトル値は全体的に振動数比が小さい程大きな値を有する傾向がある。しかし偏心距離の大きさには依存性があまり見られない。
3. 第2勾配の違いによるスペクトル値の差は T_x が0.4秒で一番大きく, T_x が大きくなるとだんだん小さくなる傾向がある。又 T_x が1.6秒以上の範囲でスペクトル値はほぼ一定となる。

図10~図13よりそれぞれのスペクトルについて順に考察を行うと次の様になる。

a) 変位応答スペクトルについて

1. 同じ振動数比に対し T_x が大きくなるとスペクトル値も全体的に大きくなる。
2. 第2勾配の違いによってスペクトル値が異なる影響は全体的に T_x が大きい程顕著であり, 偏心距離が大きい程大きくなる傾向がある。又スペクトル値は偏心距離の違いによって, 必ずしも第2勾配の大きさの順になる事はなく複雑な様相を呈している。 T_x が短い場合, スペクトル値は偏心距離の影響をほとんど受けないし, 第2勾配の違いによる影響もほとんど現れない。
3. 注意すべきは, 振動数比が大きく, T_x が長く, 偏心距離が大きい時, 第2勾配の違いによりスペクトル値が大きく変動する事である。

b) ねじれ角変位応答スペクトルについて

1. 変位応答スペクトルと同様, 同じ振動数比に対し T_x が大きい程スペクトル値は全体的に大きくなっている。又特に弾性応答に対して考察された⁹⁾様に, 弾塑性応答に対してもスペクトル形状は横軸 e/ρ

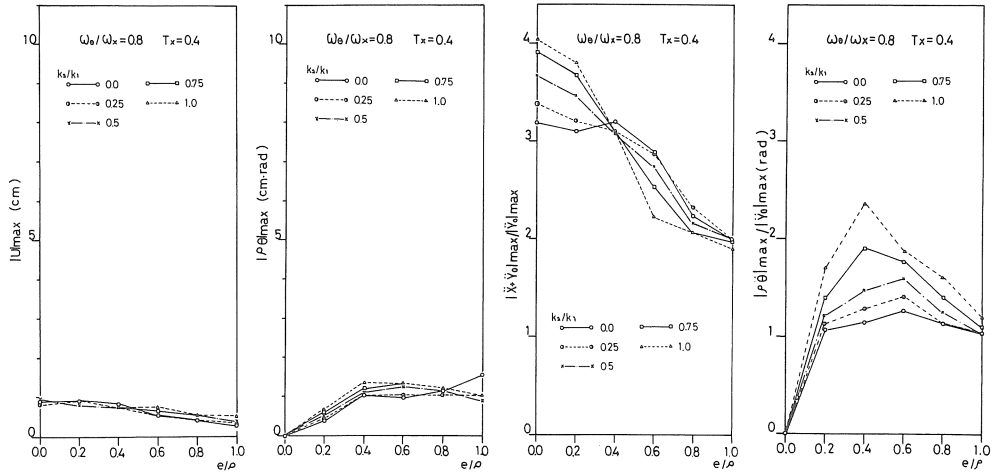


図10 振動数比0.8, 固有周期0.4の第2勾配をパラメータに示した変位応答スペクトル・角変位応答スペクトル・加速度応答スペクトル・角加速度応答スペクトル (横軸は偏心距離)

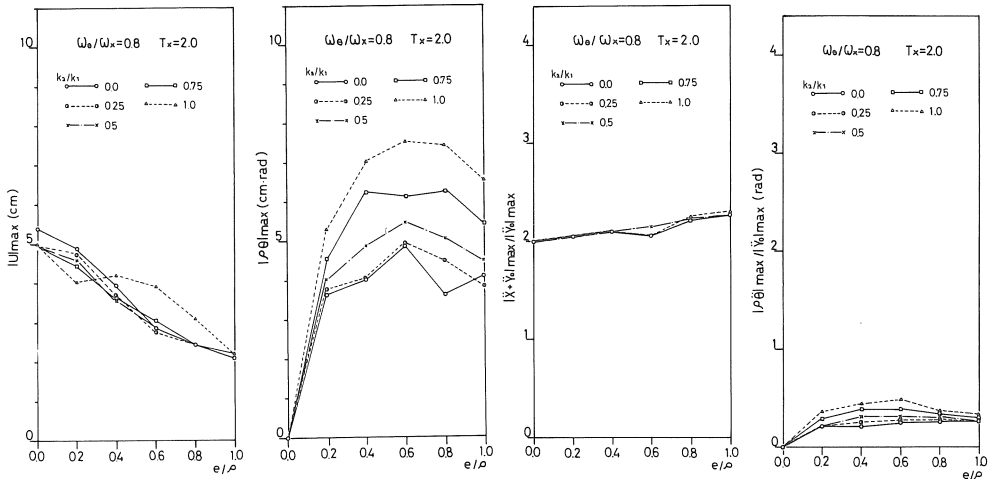


図11 振動数比0.8, 固有周期2.0の第2勾配をパラメータに示した変位応答スペクトル・角変位応答スペクトル・加速度応答スペクトル・角加速度応答スペクトル (横軸は偏心距離)

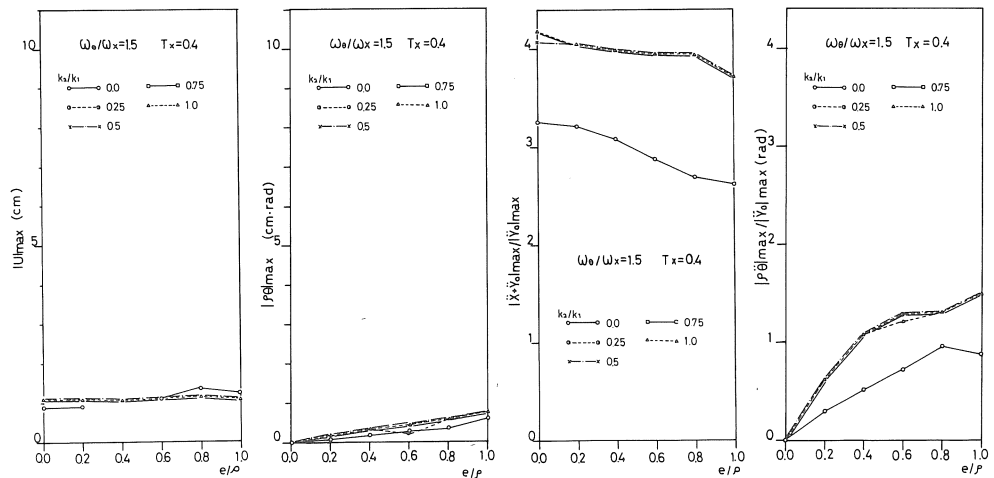


図12 振動数比1.5, 固有周期0.4の第2勾配をパラメータに示した変位応答スペクトル・角変位応答スペクトル・加速度応答スペクトル・角加速度応答スペクトル (横軸は偏心距離)

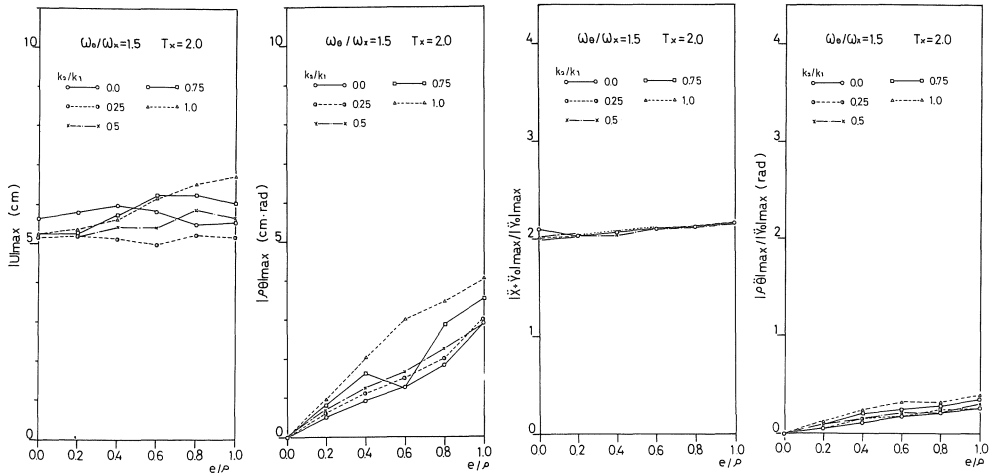


図13 振動数比1.5, 固有周期2.0の第2 勾配をパラメーターに示した変位応答スペクトル・角変位応答スペクトル・加速度応答スペクトル・角加速度応答スペクトル (横軸は偏心距離)

に対し極大値をとる傾向を示している。

2. T_x が小さい値に対し, 第2 勾配の違いによるスペクトル値の差はほとんど見られない。 T_x が大きくなると, 振動数比が小さい値に対して, 偏心距離の全範囲で第2 勾配の違いによるスペクトル値の差が非常に大きい事は特に注意を要する。
3. スペクトル値はおおむね第2 勾配の大きさの順になっている事がわかる。

c) 並進の加速度応答スペクトルについて

1. 振動数比が小さく, T_x が小さい図10において, 第2 勾配の違いによってスペクトル値が異なる影響が強く現われている。又偏心距離が0.4より大きい範囲と小さい範囲で, スペクトル値は第2 勾配の小さい順と大きい順となって, まったく逆になっている。さらに完全弾塑性の場合のみが他の第2 勾配に対するスペクトル値と全く異なる値をとる現象が, T_x が小さい時に見られる。これらの事実は履歴による減衰効果が複雑にからみ合っていると考えられる。
2. T_x が大きい時, スペクトル値は偏心距離によってほとんど変化せず一定であり, 第2 勾配の違いによってスペクトル値が異なる影響も見られない。

d) ねじれ角加速度応答スペクトルについて

1. スペクトル値は同じ振動数比に対し T_x が小さい程全体的に大きい値となる。又スペクトル値は偏心距離に対して極大値をとる傾向が見られ, 特に振動数比が小さく T_x が小さい場合にこの現象は顕著である。
2. 第2 勾配の違いによってスペクトル値が異なる影響は振動数比が小さい程, T_x が短い程顕著に現われる。又完全弾塑性の場合のみスペクトル値が他の第

2 勾配に対する値と異なる現象が T_x の小さい範囲で見受けられる。スペクトル値はおおむね第2 勾配の大きさの順になっている。

全体を通じて言える事は, ねじれ振動における第2 勾配の影響と言う点にまとを絞って言う次の様になる。振動数比 ω_θ/ω_x が小さくて, 連成のない並進の固有周期 T_x が大きい時に第2 勾配の影響が応答に強く現われ, 建物全体の持つ復元力特性の第2 勾配が注意深く適切に評価されなければならない事が明らかとなった。

3. むすび

本研究はねじれを伴う建物の振動現象がわりと多くの構造・振動パラメーターによって変動する事をふまえ, 実際の地震災害に対して最も重要な要素の一つである復元力特性の第2 勾配の大きさが並進とねじれの振動の最大応答値に及ぼす影響を明らかにしたものである。復元力特性の第2 勾配が実際の建物ではどの程度の値を取り得るのかは, 建物を構成する材料或いは建物の耐震要素(柱・耐力壁等々)の平面配置具合によって大きく支配されると考えられ, 建物別ごとに適切に見積られるべき量であると考えられる。本論はその様な量を一つのパラメーターとして扱い, 第2 勾配を弾性から完全弾塑性に致る5つのポイントに分け, それぞれについて応答解析を行い結果をまとめ, 現象全体の考察を行い, 第2 勾配の評価が応答に重要な影響を及ぼす場合について指摘した。

謝辞

本研究は昭和57年度修士論文「ねじれ振動を伴う建物の弾塑性応答解析」磯貝哲也をもとに解析され, 使用し

たプログラムはその時に作製されたものである。又今回の数値計算は昭和58年度建築工学科卒研究生 阿部・磯部・佐野 の3君の手によった。以上の事を記し関係各位に対する筆者の感謝の意を表わす次第である。

なお数値計算はすべて愛知工業大学電子計算機センター UNIVAC 1100 を使って行われた。

参考文献

- 1) 日本建築学会：1978年宮城県沖地震災害調査報告
- 2) 岡田恒男他：1968年十勝沖地震による八戸市立図書館の被害に関する考察，日本建築学会論文報告集，第167号，昭和45年
- 3) 小野瀬順一，今野真弓：鉄筋コンクリート構造のねじれ被害と偏心率，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和57年10月
- 4) W. K. Tso, K. M. Denpsey: Seismic Torsional Provisions for Dynamic Eccentricity, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 8, 1980
- 5) Christopher L. Kan, Anil K. Chopra: Simple

Model for Earthquake Response Studies of Torsionally Coupled Building, ASCE, Vol. 107, No. EM5, October, 1981

- 6) Christopher L. Kan, Anil K. Chopra: Torsional Couplings and Earthquake Response of Simple Elastic and Inelastic System, ASCE, Vol. 107, No. ST8, August, 1981
- 7) 山崎裕：偏心構造物のねじれ応答特性，Proceedings of Japan Earthquake Engineering Symposium, 1982
- 8) 磯貝哲也，中村満喜男，小高昭夫：ねじれ振動を伴う建物の弾塑性応答解析—その1. 建物のモデル化と固有値解析—，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和58年9月
- 9) 中村満喜男，磯貝哲也，小高昭夫：ねじれ振動を伴う建物の弾塑性応答解析—その2. 1層および3層建物の応答解析—，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和58年9月

(受理 昭和59年1月17日)