

鉛直地震動が建築構造物の動的応答性状に与える影響

楠 浩一¹・中埜良昭²・岡田恒男³

- 1 博(工) 東京大学生産技術研究所 助手 第一部 (〒106 東京都港区六本木7丁目22-1)
2 工博 東京大学生産技術研究所 助教授 第一部 (〒106 東京都港区六本木7丁目22-1)
3 工博 芝浦工業大学 教授 工学部建築工学科 (〒108 東京都港区芝浦3丁目9-14)

実地震動は鉛直成分を含む3次元に挙動する波であることを考えると、建築物に対しては水平地震動に対してのみ耐震設計を行うのが通例である現行設計法では設計時に想定した耐震性能を実地震動下で発揮できるか否かは疑問である。そこで、平成7年兵庫県南部地震を含む12波の地震記録から、建物の鉛直・水平振動周期の相違を考慮して鉛直方向の水平方向に対する加速度応答スペクトル比を求め、水平方向設計用スペクトルとかけ合わせることで鉛直方向設計用スペクトルを算出し、鉛直地震動を考慮した柱の曲げ設計法を提案した。更に、鉛直地震動の影響を考慮した鉄筋コンクリート造2スパン12層設計建物を対象として弾塑性地震応答解析を行い本設計法が実地震動に対する建物の耐震性能の向上に有効である事を確認した。

Key Words : Vertical Excitation, Reinforced Concrete, Column, Design Method, N-M Interaction, Response Spectrum ratio, Ratio of Natural Period

1. 序論

実地震波は3次元で挙動する波であり、建物には水平地震動と同時に鉛直地震動も入力する。鉛直地震動が入力することによって建物は水平方向とともに鉛直方向にも振動する。しかし、建築物に対する現在の設計法¹⁾や終局強度型耐震設計法²⁾では、鉛直地震動による影響を直接的には考慮していない。特に終局強度型設計法においては、その崩壊機構を規定通りに発生させることが重要である。そのため、実地震波に対する建物の耐震性能を向上させるために、鉛直地震動の柱に対する影響、梁、スラブの鉛直振動等、地震波の3次元挙動に対する建物の3次元挙動を把握する必要がある。柱に注目した場合、鉛直地震動を入力することにより柱に付加的に作用する変動軸力の影響で、柱断面の曲げ-軸力相互作用から設計時にヒンジを形成しないと想定した柱(以下、非ヒンジ想定柱)にヒンジが生じ、実地震動下では設計時に想定したものとは異なった崩壊機構を構造物が形成する可能性がある。

そこで、本論文では特に鉛直地震動が柱の挙動に与える影響に注目し、鉛直地震動が柱に与える付加変動軸力の影響を考慮する弾塑性地震応答解析を行い、その影響を検討し、鉛直地震動を考慮した柱の曲げ設計法を提案することを目的とする³⁾。

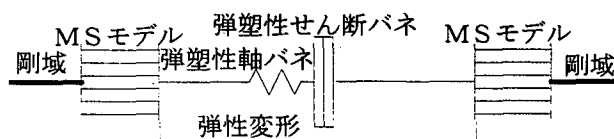


図1 部材のモデル化

2. 弾塑性地震応答解析および解析結果³⁾

部材断面各要素のN-M相互作用を考慮して弾塑性挙動を追跡する為、曲げ破壊は部材端部で発生すると仮定しコンクリートおよび鉄筋要素に断面を分割し、それぞれの要素を弾塑性軸ばねに置換したMS (Multi-Spring)モデルを端部に、独立した弾塑性軸ばね、せん断ばねを中央に配した部材モデル(図1)を用いる。対象建物は2スパン12層鉄筋コンクリート造建物とし、スパンは6.0m、階高は各階ともに3.0mである。対象建物は、日本建築学会刊行の「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」¹⁾、「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」²⁾、「鉄筋コンクリート造配筋指針・同解説」³⁾に従い、全梁端・1階柱脚が降伏する梁降伏型崩壊形となるよう設計した。

入力地震波はTaft EW・UD波の水平方向最大地動加速度を含む10秒間を使用する。建物に想定した崩壊機構を形成させるため、水平方向の最大地動加速度を0.700 Gに拡大する。解析パラメータは表1に示すよう

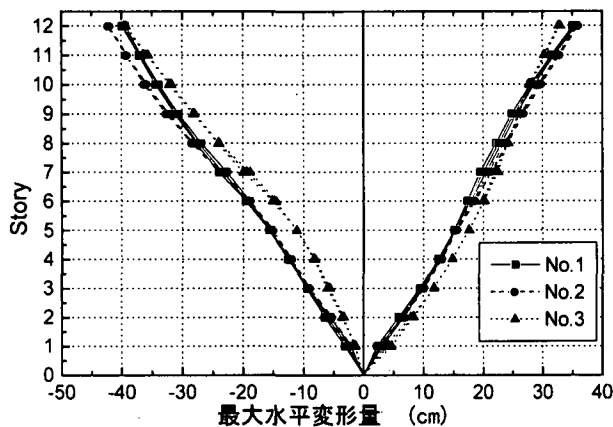


図2 最大水平変形量分布

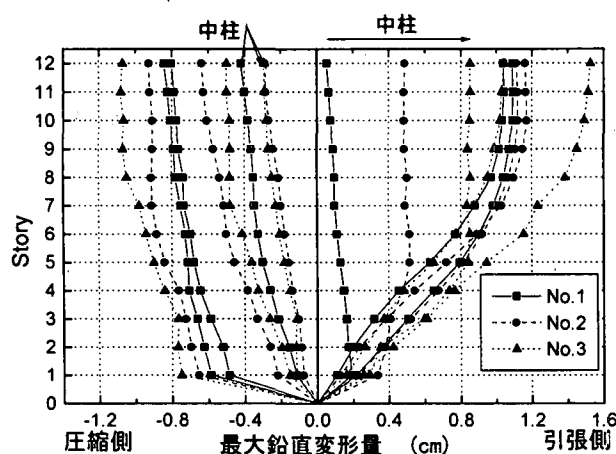


図3 最大鉛直変形量分布

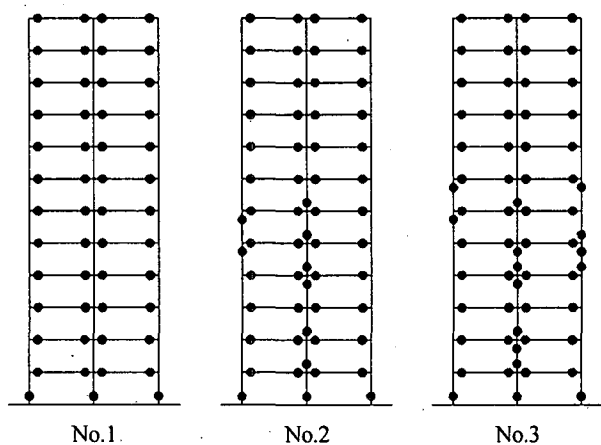


図4 最終降伏位置

に、水平地震動入力のみでのNo.1、鉛直地震動の最大地動加速度の水平方向に対する比率を原波と同一とした(0.59) No.2、鉛直・水平方向を同レベルとしたNo.3の3ケースである。

モード解析の結果、1次モードは水平1次モードで卓越周期は0.798 sec、2次モードは水平2次モードで卓越周期は0.287 sec、5次モードは鉛直1次モードで卓越周期は0.084 secである。1・5次モードに対して1%の初期剛性マトリクス、および質量マトリクスを用いたレー

表1 解析パラメータ

ケース	最大地動加速度 (G)	
	水平方向	鉛直方向
No.1	0.700	0.000
No.2	0.700	0.413
No.3	0.700	0.700

リー型減衰を仮定する⁴⁾。

解析結果を以下に示す。各解析ケースでの水平方向最大変形量分布を図2に、鉛直方向最大変形量分布を図3に示す。図2から、鉛直地震動入力レベルは水平方向最大変形量分布に対して大きな影響を与えていないことが分かる。それに対して図3から鉛直方向最大変形量分布に関しては、特に中柱引張側で鉛直地震動入力により変形量が大きく増加している。最終降伏位置を図4に示す。図4から鉛直地震動を入力しないNo.1では設計時に想定した崩壊機構を形成しているが、入力する水平・鉛直地震動レベルの比を原波と同一としたNo.2では、特に中柱低層部の比ヒンジ柱にヒンジが発生している。さらに、水平・鉛直地震動レベルを同一としたNo.3ではその傾向が増大している。これは、中柱では設計時に転倒モーメントによる変動軸力がほぼ0となり、かつその支配面積の差から鉛直方向1次振動モードにおいて鉛直地震動による変動軸力が外柱に比べて大きくなるためであると考えられる。

3. 鉛直地震動の影響を考慮した柱の曲げ設計法⁴⁾

本節では、2節での検討結果を踏まえて、鉛直地震動による付加変動軸力を考慮した柱の曲げ設計法を提案する。しかし、構造物が経験するであろう鉛直方向入力の最大入力を規定することは従来の水平地震動に対する設計と同じく、非常に困難である。そこで、建物の耐震性能のバランスを考え設計時に考慮する水平方向地震荷重に見合う鉛直方向地震荷重を考慮することが妥当であると考えられる。従って、次のような手順で鉛直方向地震荷重を算出する。

- ① 設計時に想定する建物の水平方向加速度弾性応答スペクトルモデル S_{ah}^* を作成する
- ② 建物の水平方向に対する鉛直方向の加速度応答スペクトル比モデル $R_{\frac{V}{H}}$ を作成する。
- ③ 水平方向加速度弾性応答スペクトルモデルと加速度応答スペクトル比モデルを掛け合わせることで鉛直方向設計用スペクトルを算出する。
- ④ 鉛直方向設計用スペクトルから求められる1質点系での鉛直方向地震力を各節点に振り分け、各節点での鉛直方向地震荷重を算出する。

①では、通常設計時に考慮する、水平地震動による水平方向の弾性加速度応答スペクトルは図5のように考えることができる。これは最大応答加速度を1.0GとしたRt曲線⁵⁾を基準としているが、式(1)⁹⁾に従って短周期部分を低下させた形となっている。ここで、Tは建物周期、Tcは S_{ah}^* が一定となる上限の周期である。

$$S_{ah}^*(G) = \begin{cases} 0.4 + 1.2 \frac{T}{T_c} & (T < dT_c) \\ 1.0 & (dT_c \leq T < T_c) \\ 1 - 0.2 \left(\frac{T}{T_c} - 1 \right)^2 & (T_c \leq T < 2T_c) \\ \frac{1.6T_c}{T} & (2T_c \leq T) \end{cases} \quad (1)$$

②では、水平方向に対する鉛直方向の加速度応答スペクトルの比率を算出する。この際、一般的に建物の水平・鉛直方向振動周期には大きな開きがあり、建物に生じる最大応答加速度の比率を求めるためにはその開きを考慮する必要がある。建物の水平・鉛直振動周期 T_H ・ T_V の比（以下、周期比）は次のような6つの仮定により式(4)の様に表わすことが出来る。

- I) 軸方向変形と水平変形の各剛性に相関が無い
- II) 剛床仮定が成立する
- III) 柱のサイズ・スパンは建物全体で全て同じである
- IV) 柱部材のモーメント分布は逆対称分布である
- V) 部材にせん断変形は生じない
- VI) 部材断面は長方形である

各方向の日減衰での運動方程式は式(2)のようになる。

$$\begin{cases} (-\omega_H^2[M] + [K_H])\{u_H\} = 0 \\ (-\omega_V^2[M] + [K_V])\{u_V\} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

さらに、上記6つの仮定から建物の水平、鉛直方向の固有角振動数 ω_H 、 ω_V は式2において、 $[K_V] = a[K_H]$ とおくと、式3のように独立に計算し得る。

$$\begin{aligned} & (-\omega_V^2[M] + [K_V])\{u\} = 0 \\ & \therefore \omega_V = \sqrt{a}\omega_H \end{aligned} \quad (3)$$

よって建物の水平振動周期 T_H と鉛直振動周期 T_V の比（以下、周期比）は式(4)のように表せる。

$$\frac{T_H}{T_V} = \sqrt{\frac{K_V}{K_H}} = \sqrt{\frac{\frac{EA}{H}}{\frac{12EI}{H^3}}} = \sqrt{\frac{AH^2}{12I}} = \sqrt{\frac{bDH^2}{12 \frac{bD^3}{12}}} = \frac{H}{D} \quad (4)$$

ここでH：階高、D：柱せい、b：柱幅、E：ヤング係数、I：断面2次モーメント、A：断面積である。

検討に用いた地震波は1987年千葉県東方沖地震の際に東京大学生産技術研究所千葉実験所で観測された地震波（以下Chiba）、Taft地震波、El Centro地震波、Hachinohe地震波、平成7年兵庫県南部地震の際に7ヶ所の地方気象台で観測された地震波（以下、Kobel～7）、同じく平成7年兵庫県南部地震の際に神戸ポート

アイランドで観測された地震波⁶⁾（以下、KPI）の計12波である。各地震波とも水平成分として2成分が観測されているが、最大地動加速度の大きな成分を検討に用いた。本論文では第1種地盤を例に取り、図5に示す加速度応答スペクトルの最大速度応答で水平地震動記録を基準化し、その水平地震動の拡張に伴って鉛直地震動記録を拡張した。さらに、図5に対する各地震波の鉛直方向加速度応答スペクトル比を式(4)の周期比を用いて算出した結果を図6に示す。このスペクトル比は設計時に仮定した水平方向加速度応答値が建物に生じるとき、実地震動下で生じる可能性のある鉛直方向加速度応答値を表すこととなる。ここで、減衰定数は5%、H/D=6.0を使用した。加速度応答スペクトル比は式(5)に示すような曲線でほぼ包絡された。このスペクトル比は構造物の保有すべき水平方向と鉛直方向の耐震性能の比率を表すこととなる。

$$R_{\frac{V}{H}} = \begin{cases} 0.625T_h^2 + 0.4 & (0 \leq T_h \leq 2.0) \\ 3.0 & (2.0 \leq T_h) \end{cases} \quad (5)$$

③では、式(1)と式(5)をかけ合わせることで、鉛直方向設計用スペクトルを算出する。鉛直方向設計用スペクトルを最大速度で基準化した各地震波の鉛直方向加速度応答スペクトルとあわせて図7に示す。

④では、この鉛直方向設計用スペクトルから1質点系での鉛直方向地震力を算出する。その地震力を建物フレームの各節点に振り分け、鉛直方向地震荷重を算出する。既往の文献⁷⁾等から鉛直方向振動モードは1次モードが卓越すると仮定し、各構造物の鉛直方向振動1次モードに従い鉛直方向力を各部材に振り分け、鉛直方向節点力を算出する。つまり、 $\{N_i\} = \beta \cdot \{W_i\} u_i$ で各節点力を算出する。ここで、 $\{N_i\}$ ：鉛直方向節点力、 β ：1次の刺激係数、 $\{W_i\}$ ：節点集中重量、 $\{u_i\}$ ：1次のモードベクトルを表す。

水平方向外力に対する設計において柱に作用する圧縮軸力が非常に高い場合、鉛直地震動による付加変動軸力が圧縮側に作用するとき建物に悪影響を与える可能性がある。そこで、本設計法においては鉛直方向節点力が建物に対して引張側および圧縮側に作用した時に対して、より厳しい条件に対して柱の設計を行う。

4. 鉛直地震動の影響を考慮した試設計建物に対する弾塑性地震応答解析

本設計法の有効性を確認するため、2節で用いた2スパン12層建物を図6に示す鉛直方向設計用スペクトルを用いて再設計した建物を対象に水平・鉛直地震動同時入力下での弾塑性地震応答解析を行った。入力地震動、解析パラメータ、減衰特性、部材のモデル化等

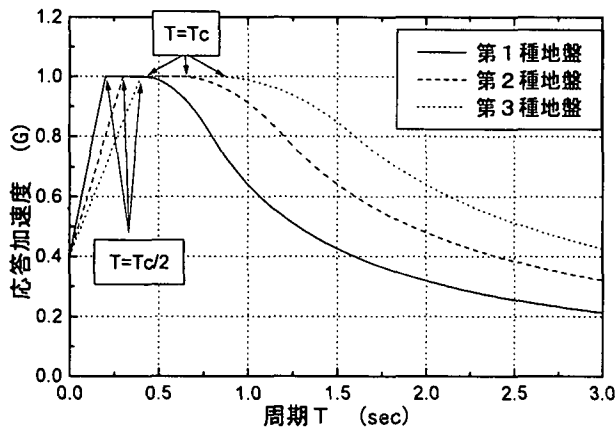


図5 水平地震動に対する設計用スペクトル

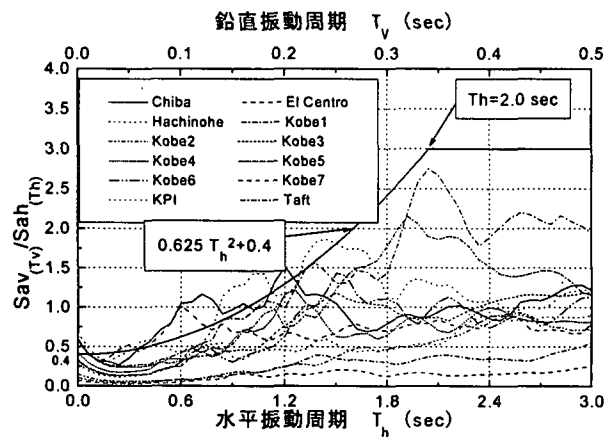


図6 加速度応答スペクトル比

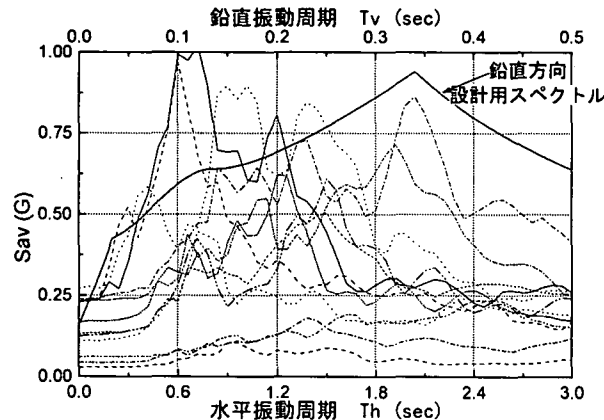


図7 鉛直方向加速度応答スペクトルと設計用スペクトル

の解析仮定に関しては2節と同様とした。最終降伏位置を図8に示す。入力する鉛直地震動レベルの水平方向に対する比を原波と同一としたNo.2では、図4と比較して、比ヒンジ柱の降伏が抑制され、設計時に想定した崩壊機構を形成していることが分かる。また、入力する鉛直地震動レベルを水平方向と同一としたNo.3では、5階外柱柱脚の2点で降伏が生じているものの、図4と比較して柱の損傷が大きく抑制されていることが分かる。以上のことから、本設計法手法が実地震動に対する構造物の耐震性能向上に有効であることが確

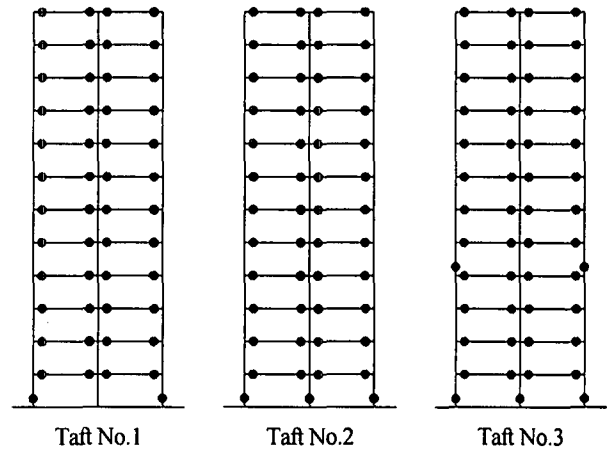


図8 最終降伏位置

認された。

5. 結論

鉛直地震動が建物の動的応答性状を検討するため、水平・鉛直同時入力で2スパン12層鉄筋コンクリート造建物の弾塑性地震応答解析を行いその影響について検討するとともに、鉛直地震動の影響を考慮した柱の曲げ設計手法を提案した。得られた知見を以下に示す。

- ① 鉛直方向地震動入力では建物の水平方向の応答変形には大きな影響を与えないが、鉛直方向の応答変形に大きな影響を与える。
- ② 設計時に転倒モーメントによる変動軸力がほぼ0となり、かつ支配面積から鉛直地震動による変動軸力が外柱に比べて大きくなる中柱に損傷が集中し、非ヒンジ想定柱においてもヒンジが発生する可能性がある。
- ③ 従来の設計で用いられる水平方向地震力に対して、建物が持つべき耐震性能の比率を考慮した鉛直方向地震力を求める鉛直方向設計用スペクトルを作成した。
- ④ 製作した鉛直方向設計用スペクトルを用いて試設計を行った建物では、鉛直方向地震動による柱非ヒンジ部分の降伏を抑制することが出来、本設計法が建物の耐震性能の向上に有効であることを示した。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説、1991年
- 2) 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年
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造配筋指針・同解説、1986年
- 4) 楠 浩一：鉛直地震動が建物の動的応答性状に与える影響に関する研究、平成8年度東京大学学位論文、1997年
- 5) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説、1993年
- 6) 関西地震観測研究協議会
- 7) 吉村浩二・菊池健児：地震動の上下成分が中低層鉄筋コンクリート造有壁架構の動的弾性挙動に及ぼす影響、日本建築学会論文報告集、第344号、昭和59年