

特 集 4
研 究 速 報

鉛直地震が建物の応答性状に与える影響に関する研究

The Effect of Vertical Excitation on Response Characteristics of Structures

楠 浩 一*・岡 田 恒 男*・中 埜 良 昭*・隈 澤 文 俊*
Kouichi KUSU, Tsuneo OKADA, Yoshiaki NAKANO and Humitoshi KUMAZAWA

1. 序 論

実地震波は3次元に伝わる波であり、建物には水平地震動と共に鉛直地震動が入力する。しかし、従来の設計法、更に1990年に日本建築学会より刊行された終局強度型耐震設計指針¹⁾においても鉛直地震動に対する設計は直接的には行われていない。そこで、地震時における鉛直地震動が建物の応答性状に与える影響を、特に柱部材に注目して検討を行った。鉛直地震動による軸力増加が柱に与える影響は①P-Δ効果の影響の増加、②曲げ耐力の変動、③水平剛性の変動、等が考えられ、これらが建物全体での強度と変形能に影響を及ぼす。そこで、上記3点を考慮し得る立体フレーム動的弾塑性地震応答解析を水平、鉛直同時入力に対して行った。

2. 解析モデル

解析対象物は一般事務所を想定したスパン長6m、階高3mの1スパン3階建築物モデルである(図1)。各部材の寸法と配筋を表1に示す。コンクリート強度は300

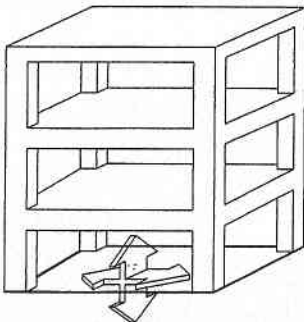


図1 建物略図

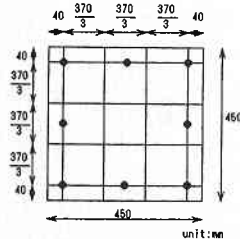


図2 断面要素分割

表1 各部材の寸法と配筋

部材	断面寸法 (cm)	主筋配筋
各階柱	45×45	上端 2-D22 1-D19 下端 2-D22
R階梁	25×40	上端 2-D22 1-D19 下端 2-D22 1-D19

横補強材：各部材とも D10@100

kgf/cm²、主筋強度は柱には3,500 kgf/cm²、梁には4,375 kgf/cm²を用いる。梁の剛性、耐力に対し、長さ0.1l (l：スパン長) のスラブの影響を考慮する。数値積分には平均加速度法を用い、積分時間刻みは1/1000秒で1/100秒刻みでデータ出力する。水平1次固有周期は0.4秒、鉛直1次固有周期は0.03秒である。

3. 部材のモデル化

I) 柱部材：柱断面各要素の弾塑性挙動を追跡するため、曲げ破壊は部材端部で発生すると仮定し、図2に示すように計33の要素に断面を分割し、それぞれの要素をばねに置換したMS (Multi-Spring) モデルを端部に、おのおの独立の弾塑性軸ばね、せん断ばねを中央に配した部材モデル(図3(a))に置換する。

II) 梁部材：作用する軸力は柱に比べ小さいと考え、材端

表2 各ばねの履歴モデル

ばね	履歴モデル
せん断ばね	耐力低下スリップモデル
軸ばね	軸剛性モデル
回転ばね	修正 Clough モデル
コンクリートばね	修正 Kent & Park モデル
鉄筋ばね	バイリニアールモデル

*東京大学生産技術研究所 第1部

研 究 速 報

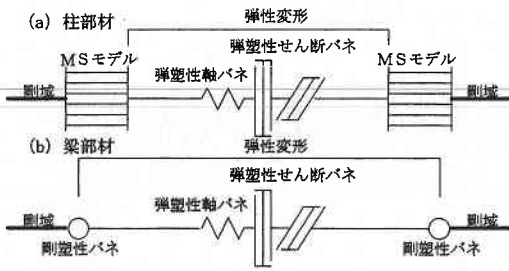


図 3 部材のモデル化

剛塑性ばねモデル (図 3(b)) に置換する。柱、梁共にばね以外の部分は弾性挙動すると仮定する。各ばねに用いたモデル^{2),3)}を表 2 に示す。

4. 不釣り合い力の解除

増分法による数値計算では仮定した復元力モデルによって決定される現ステップの剛性を用いて、次ステップへの増分外力から次ステップの変形を求める。この際、ステップ間で剛性の変化が生じると、得られた次ステップでは運動方程式を満足しない。この対処法として、繰り返し計算を行い不釣り合い力を生じさせない方法と、生じた不釣り合い力を、次ステップで節点外力として加える事により、解除する方法とがある。本解析では、次ステップで不釣り合い力と等価な節点外力を加える事により解除する方法を用いる。

1 質点系で表すと、各節点での運動方程式は

$$M \cdot \alpha_i + C \cdot V_i + R_i = -F_{ex}$$

M : 質量 α_i : 加速度 V_i : 速度 C : 減衰係数

R_i : 復元力 F_{ex} : 外力

で与えられる。i(A) ~ i+1(B) ステップで剛性の変化が生じたとする (図 4)。

i+1 ステップでは B 点で運動方程式を満足することとなる。しかし、現実には C 点で運動方程式を満足する必要がある。

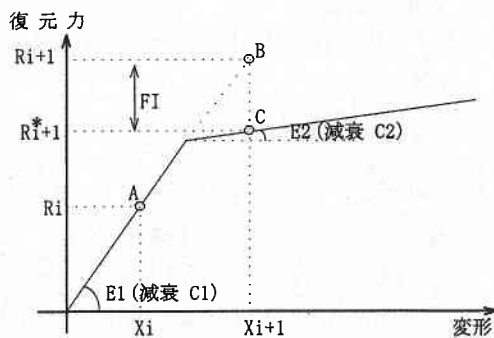


図 4 不釣り合い力

各点での釣り合いは

$$A : M \cdot \alpha_i + C_1 \cdot V_i + R_i = -F_{ex(i)} \tag{1}$$

$$B : M \cdot \alpha_{i+1} + C_1 \cdot V_{i+1} + R_{i+1} = -F_{ex(i+1)} \tag{1}$$

$$C : M \cdot \alpha_{i+1} + C_2 \cdot V_{i+1} + R_{i+1}^* = -F_{ex(i+1)} \tag{2}$$

となる。そのため、次ステップで解除すべき不釣り合い力は式(1)-式(2)で与えられ、

$$\begin{aligned} & (C_1 - C_2) V_{i+1} + (R_{i+1} - R_{i+1}^*) \\ & = (C_1 - C_2) V_{i+1} + FI \end{aligned}$$

となる。瞬間剛性比例型で減衰を与える場合、運動方程式を満足させるためには減衰力も釣り合い力として解除する必要がある。そこで、本解析では減衰力の解除を行った。

また、MS モデルを用いた部材では、応答解析ステップ間での各ばねの剛性変化に伴い、柱部材の軸方向は部材両端の MS モデル、軸方向弾塑性ばねの 3 箇所に不釣り合い力が生じる。しかし、軸方向の不釣り合い力として次ステップで加えられる節点外力は 1 箇所としたため、解析では軸方向弾塑性ばねの不釣り合い力のみを次ステップで解除し、MS モデルでは軸方向弾塑性ばねの不釣り合い力と等しくなる様断面要素のばねの変形量を調節し計算を進める。

5. 入力地震波

入力地震波として鉛直地震動と水平地震動の最大加速度の比を決定するため、動的弾塑性解析に先立ち、東京大学生産技術研究所千葉実験所の地震応答観測施設で 1983 年 8 月 10 日 ~ 1990 年 8 月 1 日に観測された 142 波の地震波の南北、東西、上下の 3 成分を用い検討を行った。この中で最大の加速度記録は 1987 年 12 月 1 日の千葉県東方沖地震によるもので、南北: 277.6 gal, 東西: 399.4 gal, 上下: 125.5 gal である。水平、上下地震動の最大加速度の比を図 5 に示す。平均値は 0.425, 最頻値は 0.455 となる。この値は震源距離、地震の規模等の影響を受けるが、田中貞二等が日本で観測された地震記録を用いて行った研究結

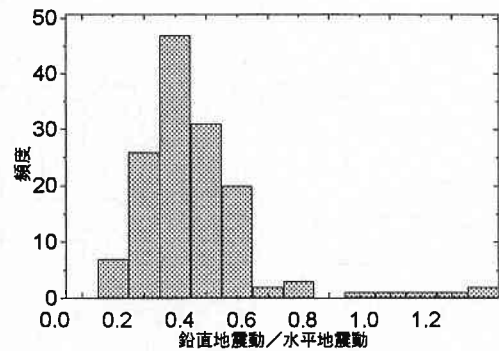


図 5 最大加速度の比

果⁴⁾とよい対応を示している。

入力地震波には千葉県東方沖地震の際に千葉実験所で観測された地震波の水平成分と上下成分を使用する。継続時間は観測された地震波の最大加速度振幅を含む15秒間を用い、建物を想定した崩壊機構に到着させるため、水平方向の最大加速度を0.816に拡大した。鉛直方向の水平方向に対する最大加速度比は0.0 (Case 1), 平均的な値と考えられる0.4 (Case 2), 鉛直地震動を水平地震動と同程度とする1.0 (Case 3) の3通りである。

6. 減衰

水平、鉛直各1自由度のモデルに対し、卓越周期に対して瞬間剛性比例型で5%の減衰を与えた場合の弾性加速応答スペクトルを図6に示す。鉛直振動と水平振動の減衰力の関係についての検討例が少なく、従来の水平1方向入力での解析と同じく水平方向の卓越周期に対して5%の減衰を与えると、図6に示すように、水平方向に比べて非常に周期の短い鉛直方向に大きな減衰力が生じる。そこで、鉛直振動と水平振動の減衰力の関係は今後の検討とし、今回の解析では鉛直地震動の影響に注目するものとして、瞬間剛性比例型で鉛直振動に対して3%の減衰を考慮することとする。

7. 解析結果

鉛直地震動による応答への影響が顕著となる8~15秒間において、1階柱脚断面での両最外縁コンクリートの歪み、

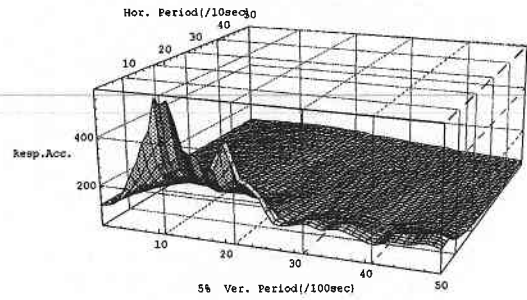


図6 鉛直方向応答加速度スペクトル

材端モーメント、正方向変形時圧縮縁コンクリートの応力度、1階相対応答変形量、鉛直地震動を加えた事により1階柱に作用する付加軸力の時刻歴をおおのこの解析 Case について図7に示す。

I) 時刻(A)までは1階柱脚に作用するモーメントは3 Case ともほぼ等しく、圧縮縁のコンクリートが最大応力度に到達後断面の歪みが大きく増加し、1階柱脚のモーメントが鉛直地震動の影響により異なり始める。II) 時刻(B)ではコンクリートが残留応力度に到着した後、図8に示すように Case 1のみ歪みの増加が少ない。そのため、Case 1, Case 2では1階柱脚断面の歪みが増大し、1階の相対応答変形が増加しているのに対して、大きな鉛直地震動を入力した Case 3では変形は他に比べて小さくなっている。これは、時刻(B)で作用しているモーメントは全 Case 共ほぼ同じで、Case 3では大きな圧縮付加軸力が作用してい

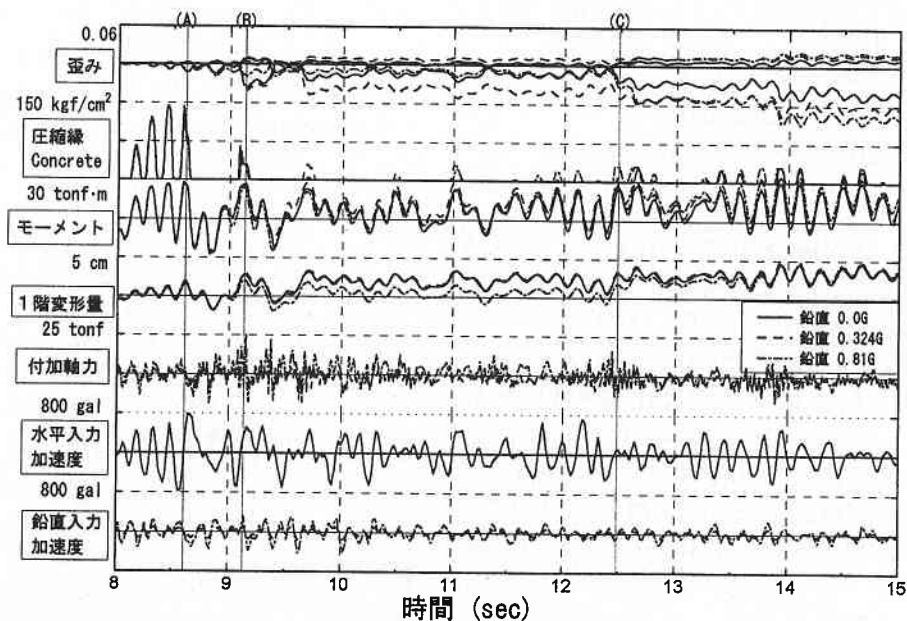


図7 諸値の応答時刻歴

研究速報

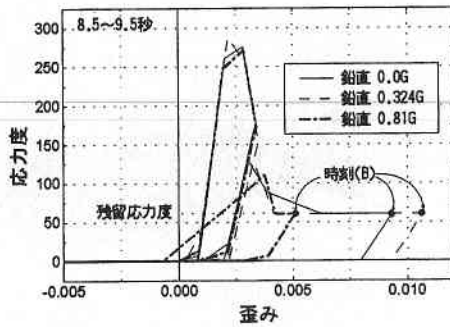


図8 コンクリートの履歴

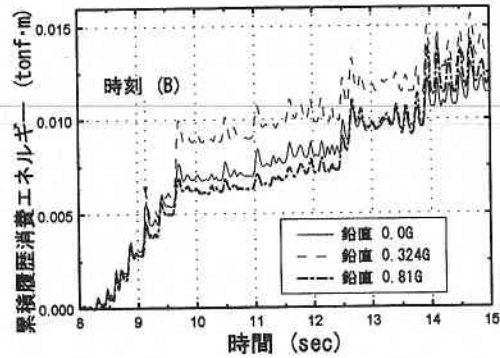


図10 累積履歴消費エネルギー時刻歴

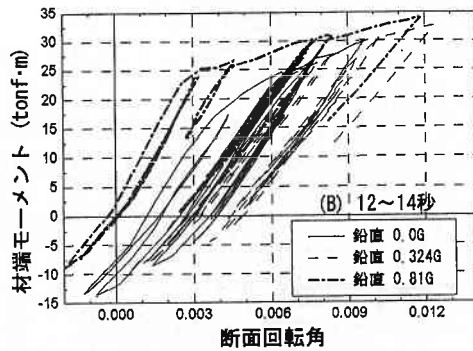
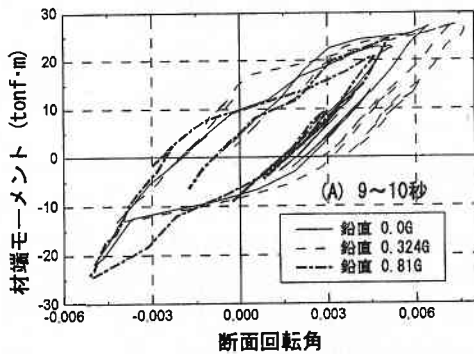


図9 圧縮側コンクリートの M-φ の関係

での1階柱脚断面の曲げ特性に対する累積履歴消費エネルギーを示す。Case 2では9秒付近でコンクリートが残留応力度に達したため、その後断面の回転が増大し、累積履歴消費エネルギーは鉛直地震動を入力しないCase 1を超えている。また、Case 3では12秒付近までは上述の理由により回転量が少なく、そのため、累積履歴消費エネルギーは小さくなっているが、14秒以後は断面の破壊の進行により急速に増加し、最終的には鉛直地震動を入力しないCaseを上回る。

8. 結 論

鉛直地震動が建物に及ぼす影響を検討するため動的弾塑性立体フレーム解析プログラムにより、1スパン3階建建物の解析を行った。得られた知見を以下に示す。①鉛直地震動は小振幅レベルでは建物の水平応答変形量にあまり影響は与えないが、圧縮側コンクリートが残留応力度に達した後は、柱の破壊の進行に影響を与え、更に建物の応答に影響を及ぼす。②コンクリートの圧壊に伴う応答変形の増大をMSモデルによって表現できる。

(1994年7月8日受理)

参 考 文 献

- 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 日本建築学会 (1990).
- 2) 李康寧, 小谷俊介, 青山博之: 変動軸力の効果を考慮したRC平面骨組の弾塑性地震応答: コンクリート工学年次論文報告集10-3, 1988.
- 3) 青山博之編著: 鉄筋コンクリート建物の終局強度型耐震設計法: 技報堂.
- 4) 田中貞二, 福島美光, 坂上実, 吉沢静代: 強振計記録の最大加速度データに関する統計的考察: 第7回日本地震工学シンポジウム (1986).

る事を考慮すると、中立軸の移動により断面の曲率、圧縮側コンクリートの歪みが減少し、残留応力度到達後の歪みの増加が少なくなったためである。Ⅲ) 時刻(C)でのモーメントによりCase 3でも圧縮側コンクリートの歪み、断面の曲率が急速に増加し、14秒付近で断面の歪みはCase 1, Case 2を上回る。そのため、Case 3における1階柱脚の断面回転角-材端モーメント関係では、図9(a)に示すように9~10秒間の正側回転量は小さいが、図9(b)のように12~14秒間では急激に増加している。Ⅳ) 図10に8~15秒間