

岐阜工業高等専門学校 正員 廣瀬康之
岐阜大学工学部 正員 中川建治

はじめに

制振および免震効果を発揮させる機構に関する研究が数多く報告されるようになってきたが、本研究では、構造物に新たな装置を設置するのではなく、積載物自体の滑動による制振効果に着目した。積載物が固定されていないような構造系に動的荷重が加えられた際、応答が大きくなって積載物の慣性力が構造物本体との間の最大静止摩擦力を超過すると、積載物が滑動を始めて共振現象を回避してしまうという耐震工学上極めて有効な現象が起こる。この様に積載物の滑動によって振動系(固有周期)が急変して共振点が移動させられて共振が抑制されたり、積載物が支柱や突起物に衝突する様な現象を組織的に追求する研究はあまり見られないようである。本研究では積極的に積載物の滑動を考慮しつつ非線形地震応答を追求することが主体となる。

動的解析モデルと地震応答解析

激増する乗用車とその路上駐車によって市街地の交通事情は悪化の一途を辿っている。このような状況に対して近年急速に建設され始めた立体駐車場は、都市の交通対策としては有効にその機能を果たしている。しかし立体駐車場は鉄骨構造物であって剛な壁面を備えていないので非常に振動し易く、中層建築構造物と

して同程度の高さを持つ事務所ビルの地震時動的応答特性とは自づから異なる特性を持っている。他方、立体駐車場は積載車両とパレット(搬送および支持用受け皿)との総重量と駐車場の骨組みと外壁等の総重量との比率が1.5~1.0程度であって各層で滑動可能な積載物の重量の比率が一般の高層建築構造物の場合と大きく異なる。もし地震応答時に積載物が最大静止摩擦力以上の慣性力を受けて架構上で滑動して摩擦力を発生させるならば、全質量の約半分の滑動質量が非常に有効な摩擦制振機構として作用することが推察されよう。

解析の対象とした立体駐車場は標準タイプのもので、概略の形状をFig-1に示す。主構のみのモデルPX1とガイドレールも考慮したモデルPX2の2種類を用意した。両モデル間で固有周期や固有振動モードに大差はなかったので、以後PX1についてのみ述べる。

動的解析の自由度は図中の黒丸印の10点の水平変位とし、他の自由度は静的力の釣合の系として瞬時に力と変位の応答関係を満たす(それらの変位に対応する慣性質量は0であって時間の遅れが無しに応答する)ものとして10自由度に変換したものである。したがって全ての部材の抵抗力は考慮されて自重だけは10自由度の変位点へ集中されたものとみなされよう。このモデル化(振動方程式の自由度の縮約)については付録において簡潔に説明する。

系の運動方程式の誘導や数値積分法は従来の線型振動(滑動現象以外)の解析手法とほぼ同様である。減衰力は線型減衰で、減衰係数の決定はL. Schenker²⁾の手法と同様である。床の水平変位 y_j も積載物の変位 u_j も絶対座標系で表してNewmarkの β 法($\beta=1/6$)を用いて数値積分する。

積載物 W_{mj} は最初は自重 W_{1j} と一体に扱われるが、慣性力が摩擦抵抗の限界を超えると独立な質量として滑動を開始する。最大静止摩擦係数 $\mu_{s,j}$ 、動摩擦係数 $\mu_{d,j}$ 、重力の加速度を g とすると

$$\text{滑動開始条件: } (W_{mj}/g)\ddot{y}_j \geq W_{mj}\mu_{s,j} \quad (1)$$

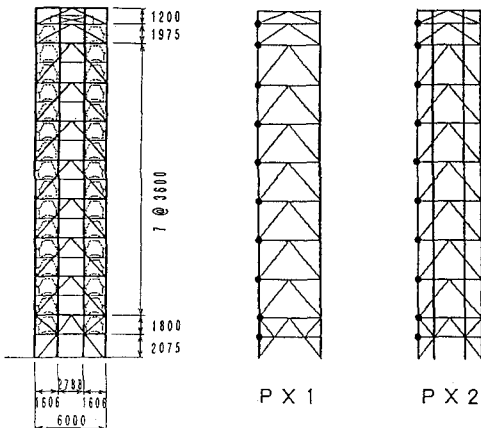


Fig-1 Model for Numerical Analysis

滑動中に作用する力:

$$\dot{y}_j - \dot{u}_j > 0 \text{ なら } F_j = W_{mj} \mu_{sj} \quad (2)$$

$$\dot{y}_j - \dot{u}_j < 0 \text{ なら } F_j = -W_{mj} \mu_{sj} \quad (3)$$

という外力で積載物は運動するが、柱に衝突したり落下したりしないものとする。本体の方は積載物の質量を自重から切り放す代わりに床面で $-F_j$ という外力を受けることになる。滑動開始後に再び床と一体運動する条件は次のように設定する。

$$\text{滑動停止条件: } |\dot{y}_j - \dot{u}_j| < \varepsilon \quad \text{かつ} \quad (4)$$

$$|(W_{mj}/g)\ddot{y}_j| \leq W_{mj} \mu_{sj} \quad (5)$$

減衰定数を $c_1=0.02$, $c_2=0.05$, $c_3=0.1$, 4次以上は $c_k=1.0$ として、入力地震波として EL CENTRO 地震(1940.5)の加速度(NS)成分を最大振幅により調整したものを設定して応答を求めた。最大静止摩擦係数 $\mu_{sj} = 0.4$, 動摩擦係数 $\mu_{sj} = 0.3$ として、主構の第1層上端の軸力と曲げモーメントを求めたものを Fig-2 に示す。図中の直線は積載物が固定されている場合であり、折線は滑動する場合を示す。

おわりに

過大な地震応答を受けた場合、積載物は滑動する方が耐震工学的には有利であり、地震動が大きい程この様な制振効果が期待される。今後、構造物本体と積載物の重量比を変更したり、摩擦係数を変更して系全体の動的特性を検討することは興味ある研究である。

本研究の数値計算では瀧上工業の宮下友幸氏のお世話になった。また、構造物のデータは富士変速機(株)の提供による。深甚な謝意を表したい。

参考文献 1) 日本産業機械工業会:地震時立体自動倉庫の安全化に関する調査研究報告書, 1981.6

2) L.Schenker: The Dynamic Response of Tall Structures to Lateral Loads, EM, ASCE, Vol.82, No.2, 1956.4

付録: 構造物の節点変位の自由度の縮約について

構造物の自由振動方程式を行列表示で略記すると $[M_0]\{\ddot{y}\} + [C_0]\{\dot{y}\} + [S_0]\{y\} = \{0\}$ (A-1) となる。ここで、剛性行列 S_0 と変位ベクトル y は節点のすべての自由度を要素として構成されているが、ベクトル y を動的応答の解析変数として残す変数ベクトル u_1 と、解析の対象(自由度)から割愛する変数ベクトル u_2 とに分割する。質量マトリックス M_0 の各要素もベクトル \ddot{u}_1 の加速度とともに慣性力になるように集約してベクトル \ddot{u}_2 に対応する質量は0になる(慣性力が生じないので静的釣合力を瞬時に発揮する)ように置換する。従って減衰力を省略して次式になる。

$$\begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} S_1 \\ \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (A-2)$$

ここで S_1 は S_0 を再配列しただけのものであり、 u_2 を消去するために、 $S_1^{-1} = F_1$ を左より乗じると

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} M_1 \ddot{u}_1 \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \dots\dots (A-3)$$

$$F_1 = \begin{bmatrix} f_1 & f_2 \\ f_3 & f_4 \end{bmatrix} \text{ と、すると、} \quad \dots\dots (A-4)$$

$$[f_1][M_1] \ddot{u}_1 + u_1 = 0 \quad \dots\dots (A-5)$$

$$[f_3][M_1] \ddot{u}_1 + u_2 = 0 \quad \dots\dots (A-6)$$

$f_1^{-1} = S$ を導いて(A-5)へ乗じると

$$[M_1] \ddot{u}_1 + [S] u_1 = 0 \quad \dots\dots (A-7)$$

という u_1 系だけの振動方程式が与えられる。これは省略された u_2 変位群とそれに関連する部材群の効果、慣性による挙動の遅れを0とする静的釣合復元力として従属させた振動方程式である。(A-6)は時々刻々の応答 u_1 より u_2 変位群を導いたり部材力を導くために活用されるべきものである。

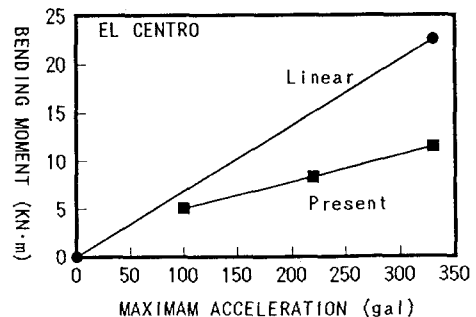
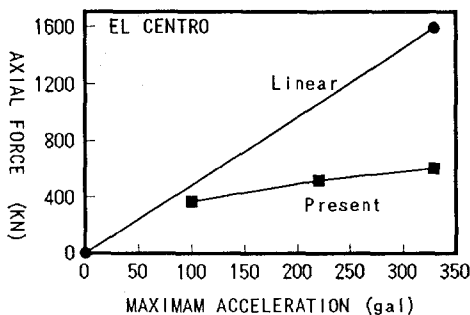


Fig-2 Dynamic Response of PX1