

積載物が滑動する系の動的特性に関する研究

岐阜工業高等専門学校 正会員 ○ 廣瀬 康之
岐阜大学工学部 正会員 中川 建治

1 はじめに

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たり、積載物の摩擦や質量相互の衝突等でエネルギーが逸散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の地震応答を追求することが主体となる。実物大共試体を用いて数種類の地震動に対する動的応答を実験で求め、積載物の滑動による共振の回避現象を観測した。さらに簡単な数値計算によっても同様な動的特性を導き得たので、これらの結果を簡単にまとめて報告する。

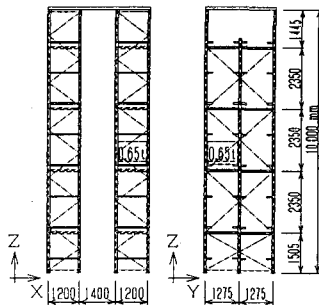


図-1 振動実験の共試体

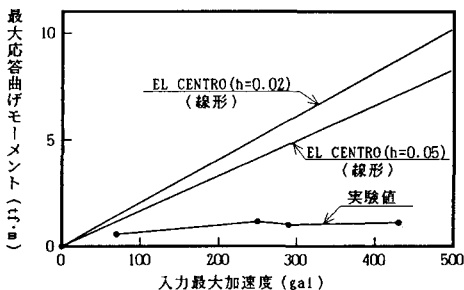


図-2 振動実験による柱脚の応答断面力

2 振動実験と実験結果

共試体の形状と寸法を簡単に図-1に示す。積載物は、鋼材を段ボール紙で包んだ物を単位としてパレットの上に積み上げたもので重量は0.65tあり、各棟各層に積載する。積載物と構造物本体との最大摩擦係数は0.73である。入力加速度は過去に観測された地震加速度に一樣に係数を乗じて最大加速度を調整したもので、3次元の成分を同時に再現して入力するので実際の地震動に極めて近いものとなっている。

もし、滑動せずに線型振動として入力地震加速度に応答するなら、最大応答は入力最大加速度の大きさに比例する筈である。しかし実験の結果は図-2に示すように柱脚の断面力の応答は線型振動の理論値とはならず、入力加速度の増加に伴わずに低レベルに保たれていて共振現象が回避されていることがわかる。

3 数値計算におけるモデル

数値計算用の解析モデルは次のような極端なモデル化によって2種類用意する。モデルAは図-3に示すような構造で曲げせん断系のN層ラーメンとして地震加速度は平面内の水平方向のみを考慮することにする。解析用の自由度は2Nとみなすことが可能となって数値計算の能率化が期待できる。モデルBは図-5に示すように共試体に近い高次不静定系を設定する。動的解析の自由度は図中の黒丸印の8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8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8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）については当日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）の解析手法とはほぼ同様である。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 、も積載物の変位 u 、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_m は最初は自重 W_s 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 μ_{s1} 、動摩擦係数 μ_{d1} 、重力の加速度を g とすると

$$\text{滑動開始条件: } (W_m/g)\ddot{y}_j \geq W_m\mu_{s1} \quad (1)$$

滑動中に作用する力:

$$\dot{y}_j - \dot{u}_j > 0 \text{ なら } F_j = W_m\mu_{d1} \quad (2)$$

$$\dot{y}_j - \dot{u}_j < 0 \text{ なら } F_j = -W_m\mu_{d1} \quad (3)$$

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。

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

$$|(W_m/g)\ddot{y}_j| \leq W_m\mu_{s1} \quad (5)$$

4 数値解析結果による検討

入力地震加速度は1940年5月EL CENTROのNS方向のものである。減衰定数と摩擦係数を一定とし入力最大加速度を変化させて、線形振動と滑動を伴う場合の柱の断面力の絶対最大値の状況を求めて図-4、図-6に示す。大きな応答に成ると滑動が生じて最大応答が入力最大加速度に比例しないことが納得されよう。

実験結果においては非常に応答の小さい時点で滑動

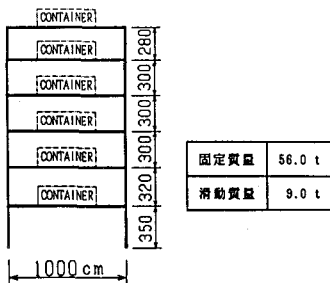


図-3 モデルA

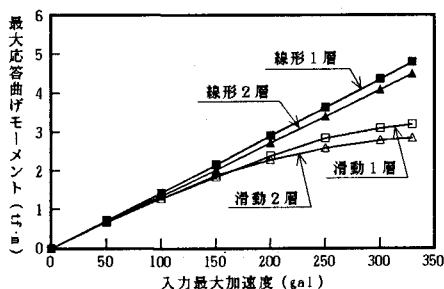


図-4 モデルAの応答断面力

が観測されるが、モデルAでは最大地震加速度が150gal程度で滑動が生じ始めている。これは摩擦係数の推定値の誤差にも起因するが、実験では地震の鉛直方向の加速度を入力している為に最大摩擦係数が一定でも最大静止摩擦力が鉛直方向の加速度応答に関連して変動することによるものである。

5 最後に

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ることは実物大実験の結果からも数値計算の結果からも実証された。支柱が細くたわみ易い構造でありながら、自重に比較して大きな重量物を支えている場合に、過大な地震加速度を受けて大きな変形を生じつつも安定しているのはこの滑動の特性が機能しているからである。今後、数値解析用に開発されたプログラムを活用して床ごとに積載物と床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。

本研究における実験は、(株)ダイフク設計部の信川俊二氏(共同研究者)の担当によるものである。

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, 昭和56年6月 2) L. Schenker: The Dynamic Response of Tall Structures to Lateral Loads, Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 82, No. 2, 1956. 4

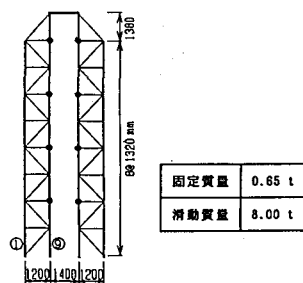


図-5 モデルB

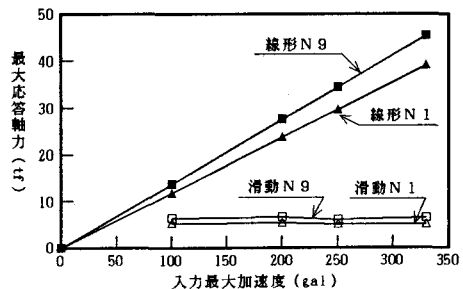


図-6 モデルBの応答断面力