免震床の地震応答解析

Dynamic Response Analysis for Seismic Isolation Floor System

> 本報では摩擦要素を有する免震床システムの地震応答解析方法を取り上 げ,運動方程式の厳密解に基づいた時刻歴解析手法を提案する。免震床の性 能を確認するため,大型振動台による加振実験を行った。加振実験結果と本 報で提案する解析手法の計算結果とを比較し,本手法は十分な計算精度があ ることが確認できた。

> In this paper, we propose an analytical method for seismic isolation floor systems with a frictional component. Seismic isolation floor verification experiments were carried out using a shaking table. The results of the proposed method are compared with those of the experiments. They show that the new analytical method has enough computational accuracy for the dynamic response analysis of the seismic isolation floor system.

● 緒 言

近年,大きな被害をもたらした地震が全国各地で発生 しており,地震対策が脚光を浴びている。様々な地震対 策の技術が開発され,各種製品が販売されているが,そ の一つに免震床がある。当社は,既設の建物でも容易に 設置できる免震床を開発した。

免震床の設計には地震応答解析が必要となる。地震応 答解析問題の数値解析手法として有用性が広く認められ たものにNewmark- 法があり,文献¹⁾には,摩擦力の 不連続性を連続関数で近似する²⁾ことなく処理できる数 値解析法が提案されている。しかしながら,数値解析法 では摩擦系の振動に特有のすべり-止まり振動を高精度 に解析するには限界がある。

本報は,摩擦要素を含む免震床の地震応答を運動方程 式の厳密解により解析する手法を提案するものである。 本報の解析法は,数値解析法のような近似式は使わない ため,高精度の地震応答解析が可能となり,解析法の不 安定性も無い。本報では,別途実施した免震床の振動実 験の結果と比較することにより,解析法の有効性と安定 性を検証した。

2 免震床の概要

2.1 免震床の構造

当社は,既設の建物でも容易に設置できるというコン セプトを実現するため,免震床には重量鉄骨を使用する という従来の概念を打破し,軽量鋼材にて床フレームを 組むことに成功した。また,建物の躯体から縁を切りか つ荷重を支持するベアリングを60cmピッチで配置し, 床全面に摩擦低減を維持するステンレスプレートを敷き 込んだ。さらに,復元力を得るためのコイルバネと減衰 させるためのオイルダンパを外周に配置して,特長のあ る免震床(図1)を実現させた。



図1 免震床の構成 Fig. 1 Structure of Seismic Isolation Floor System.

2.2 免震床の特徴

当社の免震床の特長として, 低床:免震床によるデ ッドスペース高さを65mmに抑えた, 軽量:免震床の 重量を20kg/m³以下に抑えた, 高性能:入力加速度 を1/10程度に減衰できた, 施工性:ユニット化によ り施工時間が半減した, 低コスト:従来品より大幅に コストダウンできた,等があげられる。また,さらに安 価な免震床として,復元力無しのタイプもラインナップ 化した。

* 日立機材株式会社 テクニカルセンター

銭 志偉^{*} 小林淳彦^{**}

Zhiwei Qian Atsuhiko Kobayashi

^{**} 日立機材株式会社 関東製作所

^{*} Technical Center, Hitachi Metals Techno, Ltd.

^{**} Kantou Works, Hitachi Metals Techno, Ltd.

⑤ 免震床地震応答解析

3.1 免震床の力学モデル

図2に示すように,免震床を弾性バネ部,ダッシュポット部,すべり摩擦部を有する1自由度系にモデル化することができる。地動加速度 jǐt)を受ける場合,モデルの運動方程式が次式で与えられる。

 $m\ddot{x} + c\dot{x} + kx + f = -m\ddot{y}$(1)

ここで,

x, x, x, x: 免震床の相対変位, 速度, 加速度

- m:免震床の自重と積載荷重の総和
- c:オイルダンパの減衰係数
- k:コイルバネの弾性係数
- f:床が受ける摩擦力



図2 免震床の力学モデル

Fig. 2 Analysis Model of Seismic Isolation Floor.

本報では, すべり摩擦は**図3**に示すクーロン摩擦と呼ばれている摩擦モデルを取り扱う。摩擦力*f*は床すべり 速度 *x*の関数であり,

$$f = \begin{cases} \mu mg \cdot sign(\dot{x}) & \dot{x} & 0\\ 0 & \dot{x} = 0 \end{cases}$$
(2)

上式のµは摩擦係数である。



図 3 クーロン摩擦 Fig. 3 Coulomb Friction.

つまり, クーロン摩擦において, すべり状態(slip) では摩擦力 fは既知で($f = \pm \mu mg$), すべり速度 \dot{x} は 未知となり, 逆にとまった状態(stick)ではすべり速度 \dot{x} は既知で(\dot{x} =0), 摩擦力 fは未知となる。式(2)を 運動方程式(1)に代入すれば,

$$\ddot{x} + 2h \dot{x} + {}^{2}x = -\ddot{y} - \mu g \cdot sign(\dot{x})$$
.....(3)

が得られる。ここに,hと はそれぞれ減衰定数と円振 動数であり,

 $h = c(2\sqrt{mk})....(4)$

となる。

式(2)に示すように,クーロン摩擦は不連続な非線 形特性があるため,免震床振動時にすべりととまりの両 方の応答挙動がある。そのため,床応答の理論的な解析 は極めて難しい。本報では,直接積分による厳密解法で の免震床地震応答解析法を提案する。

3.2 地震応答解析の厳密解法(Nigam法)⁾

図4に,地動加速度の時刻歴の一部を示す。時刻歴は 与えられた地動加速度の離散値の間を線形に補間してい る。つまり,地動加速度 $\tilde{y}(t)$ の時刻歴は折れ線状にな っており,時間間隔 Δt において, $\tilde{y}(t)$ は時間の線形関 数となる。**図4**に示す区間 [$t,t+\Delta t$]において, を時 刻tを原点とする局部的な時間とおけば,地動加速度 $\tilde{y}($) は,

と表されるから,区間[*t,t*+∆*t*]における運動方程式(3)が,

$$\ddot{x} + 2h \dot{x} + {}^{2}x = -\ddot{y}_{t} - (\ddot{y}_{t+\Delta t} - \ddot{y}_{t})/\Delta t - \mu g \cdot sign(\dot{x})$$

$$0 \quad \Delta t.....(7)$$

と書ける。



図4 地動加速度時刻歴

Fig. 4 Earthquake Accelerogram.

(a) 免震床に復元力が無い場合

免震床に復元用のコイルバネと減衰用のオイルダンパ をはずした摩擦現象のみを利用した復元力無しのタイプ において, *k*=0および*c*=0となり,式(7)は

$$\vec{x}() = -y_t - (\vec{y}_{t+\Delta t} - \vec{y}_t) \Delta t - \mu g \cdot sign(\vec{x}) \dots (8)$$

となる。区間 [$t,t+\Delta t$] において, すべり速度 \dot{x} の符号 は不変と仮定すれば,式(8)より,加速度 \ddot{x} は時間 の線形関数である。式(8)を積分し,初期条件, = 0の時: $x = x_i$, $\dot{x} = \dot{x}_i$ を適用すれば, 速度 \dot{x})と変位 χ)が得られる。

$$\dot{\mathbf{x}}() = \dot{\mathbf{x}}_{t} - [\ddot{\mathbf{y}}_{t} + \mu g \cdot sign(\dot{\mathbf{x}}_{t})] - \frac{2}{2\mathcal{Q}_{t}}(\ddot{\mathbf{y}}_{t+\alpha} - \ddot{\mathbf{y}}_{t}).(9)$$
$$\mathbf{x}() = \mathbf{x}_{t} + \dot{\mathbf{x}}_{t} - \frac{2}{2}(\ddot{\mathbf{y}}_{t} + \mu g \cdot sign(\dot{\mathbf{x}}_{t})) - \frac{3}{6\mathcal{Q}_{t}}(\ddot{\mathbf{y}}_{t+\Delta t} - \ddot{\mathbf{y}}_{t})$$

ここに, = Δt をしておけば,時刻 $t + \Delta t$ における免震床の速度と変位を求めることができる。

$$\dot{x}_{t+\Delta t} = \dot{x}_{t} - \frac{\Delta}{2} [\ddot{y}_{t} + \ddot{y}_{t+\Delta t} + 2\mu g^{*} sign(\dot{x}_{t})].....(11)$$

$$x_{t+\Delta t} = x_{t} + \dot{x}_{t} \Delta t - \frac{\Delta f^{2}}{6} [2\ddot{y}_{t} + \ddot{y}_{t+\Delta t} + 3\mu g^{*} sign(\dot{x}_{t})]$$
.....(12)

式(11),(12)より時刻*t*+Δ*t*における運動方程式(7) の厳密解を求めることができ,解は常に安定となり, Newmark- 法等数値解析法の不安定現象は無い。

なお, \dot{x}_t と式(11)より求めた $\dot{x}_{t+\Delta t}$ の符号が異なる場合,区間[$t,t+\Delta t$]において, $\dot{x}=0$ となる点が存在する。式(9)に条件 $\dot{x}_{(0)}=0$ を適用すれば,速度が0となる時刻。を求めることができる。

図5に免震床運動状態が変化する様子を示す。すべり は時刻。に止まり,時刻」に始まる。本報では,すべり が始まる時刻」を2分法で求める。



図5 すべり状態の変化

Fig. 5 Change between Slip and Stick.

図6に免震床地震応答解析のフローチャートを示している。

図7に,免震床(摩擦係数は0.05)がEL CENTRO NS 地震における挙動をシミュレートした結果を示してい る。これにより,クーロン摩擦を含む振動における特有 な絶対加速度の頭打ちやすべりと止まりを繰返す現象 等,普通の減衰振動とは異なった振動特性が明らかに表 されている。

(b) 免震床に復元力がある場合

免震床に復元用のコイルバネと減衰用のオイルダンパ が装備される場合の運動方程式は式(7)となる。区間 [$t,t+\Delta t$]において,余関数と特別解の2つの部分から なる運動方程式の一般解とその微分が得られる。

$$x()=(a \cos\sqrt{1-h^{2}} + b\sin\sqrt{1-h^{2}})e^{-h} + \frac{y_{2}}{2} + \frac{y_{1} - 2hy_{2}}{3} \dots (13)$$
$$\dot{x}()=(-a \sin\sqrt{1-h^{2}} + b\cos\sqrt{1-h^{2}})\sqrt{1-h^{2}}e^{-h} - (a \cos\sqrt{1-h^{2}} + b\sin\sqrt{1-h^{2}})h e^{-h-\tau} + \frac{y_{2}}{2} \dots (14)$$



図6 応答解析のフローチャート

Fig. 6 Flowchart for Seismic Response Analysis.





Fig. 7 Response Wave of Friction Damped Floor System.

上式のy1とy2は,

$y_i =$	- ÿ t -	µ <i>g∙sigr</i> (<i>x</i> ́)	 	(15)

であり,積分定数aとbは初期条件,

= 0の時: x=x, x=x,

によって決まる。

 $a = x_t + a_1 y_1 + a_2 y_2$(17)

運動方程式の解である式(13)と(14)に局部的な 時間 を = Δt と代入すれば,時刻t+ Δt における変位と 速度を次の形で表すことができる。

 $x_{t+\Delta t} = p_1 a + p_2 b + p_3 y_1 + p_4 y_2 \dots (19)$

式(17) (20)中のパラメータ*a*_i, *b*_i, *p*_i, *q*_iは*h*, , , *Δt*のみにより決まった定数であり,応答解析の最初 に1回計算しておくだけで良い。 式(19),(20)は大変簡単な計算式ではあるが,近 似式は使っていないので,運動方程式の時刻 t+ Δtにお ける変位と速度の厳密解を表している。この2式を順次 に使い,免震床応答の全時刻歴が求められる。よって, 本報に提案した地震応答解析方法は一般的に使われてい る数値解析法(例えば,Newmark-法)に比べて,精 度や計算速度ともに格段に優れており,不安定現象も無 い。

応答解析手順は**図**6に示す通りとなる。式(20)よ り計算した速度 $\dot{x}_{t+\Delta t}$ と初期速度 \dot{x}_{t} とは異符号である場 合,**図5**に示すように速度 $\dot{x}($)は0となる点。(とま りが始まる点)および、(すべりが始まる点)を求める 必要がある。本報では,これらの値を前述の2分法で求 めた。

3.3 地震応答解析結果と動的加振実験値との比較

免震床免震効果を確認するために,実際の地震波を用 いて大型振動台による実大実験を行った。免震床上の応 答加速度は1/5~1/10に低減され,その優れた性 能が確認された。図8は,ある鉄筋コンクリート造5階 建築物の5階床に兵庫県南部地震の神戸海洋気象台の NS波を入力した場合の免震床の応答加速度について, 実験結果と本解析法による計算結果を比較したものであ る。これにより,本報に提案した免震床の地震応答解析 は実用上十分な数値シミュレーションができることが確 認された。



図8 免震床加振実験値と解析結果の比較

Fig. 8 Response wave of excitation test and present method.

④ 結 言

摩擦力の不連続関数を含む地震応答解析において,広く使われた数値解析手法であるNewmark-法で高精度の数値解析には限界があることがわかった。本報では摩擦要素を含む免震床の運動方程式の厳密解による地震応答解析方法を提案し,免震床の大型振動台による加振実験データと比較・検証した結果,解析法の有効性と安定性が確認できた。

参考文献

- 山本,他:摩擦·接触要素を含む構造物の非線形振動について,日本建築学会構造系論文報告集, 483(1996), p.71
- 2)岡本,他:すべり方式免震システムを有する橋梁の 地震時挙動特性,土木学会論文集,513(1995), p.191
- 3)大崎:建築振動理論,彰国社,(1996)



 ・法定

 Zhiwei Qian
 日立機材株式会社 テクニカルセンター



小林淳彦 Atsuhiko Kobayashi 日立機材株式会社 関東製作所