

すべり土塊および抗土圧構造物の 固有振動数を考慮した地震時滑動量の推定法

三浦均也¹・小濱英司²・吉田望³・渡邊潤平⁴

¹豊橋技術科学大学建設工学系助教授 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

E-mail: k-miura@tutrp.tut.ac.jp

²港湾・空港技術研究所主任研究員 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail: kohama@pari.go.jp

³東北学院大学工学部教授 (〒980-8511 仙台市青葉区土樋一丁目3-1)

E-mail: yoshidan@tjcc.tohoku-gakuin.ac.jp

⁴豊橋技術科学大学建設工学系大学院学生 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

E-mail: r023641@res.cc.tut.ac.jp

質点とバネ、ダッシュポットからなる固有振動数を考慮できる一自由度振動モデルの底部に滑動を表現するスライダーを配置した振動・滑動モデルにより、地震時における抗土圧構造物およびすべり土塊の滑動量を評価する方法を提案する。これにより所定の地盤振動に対して振動系の滑動量を数値的に算出することが可能になる。振動系を剛体系に置き換えたものがNewmarkの堤体のすべり変形算定法で用いられる剛体モデルに等価であるが、振動・滑動モデルによる解析結果では滑動量は固有振動数に強く依存して大きく変化することを示す。また、滑動量を周波数に対してプロットすることにより、地震動に固有な一種のスペクトルが得られることを示し、その実際問題への利用法について説明する。

Key Words : *Sliding mass, Retaining structure, Sliding during earthquake, Natural frequency Response spectrum*

1. はじめに

盛土構造物や抗土圧構造物の性能規定型設計においては、地震力による構造物の変形の評価が地震による構造物の被害の程度および地震後における構造物の性能を評価する上で重要である。土構造物の地震時における変形挙動は地盤材料の非線形性や間隙水圧発生特性の影響を強く受けるなどの理由により一般に複雑である。有限要素法などの数値解析手法を変形解析に適用する場合でも動的物性や解析条件の設定は複雑でかつ確定的ではないために、その計算結果の精度や信頼性が要求を満たせないのが現状である。本研究では、すべり土塊や抗土圧構造物が地震時に慣性力を受け滑動する場合の滑動量を比較的簡単に推定する方法を検討する。

すべり土塊や抗土圧構造物の振動特性と滑動特性をモデル化するために、質点-バネ（ダッシュポット）-スライダーから構成される一自由度の振動・滑動モデルを設定した。質点にはすべり面の傾斜や土圧に対応する水平力が作用した状態で基盤振動による応答振動をして、スライダーが滑動しながら永久変位が発生する過程を数値的に解析した。このモ

デルは、バネを剛とすればNewmark¹⁾が盛土構造物の地震時滑動量の推定のために提案している剛体の滑動に基づく方法に等価になる。また、澤田ら²⁾は盛土の降伏変形を求めるために地盤材料の連続体としての変形を弾・完全塑性モデルで解析して耐震設計の道筋を示しているが、本研究では土塊や構造物底面などに明瞭なすべり面を設定して、そのすべり量を解析している。

まずサイン波形の基盤振動を受ける場合の振動・滑動モデルの基本的な応答特性を比較・検討し、滑動量を推定する際の振動系の固有振動数の重要性を明らかにする。また、滑動量が固有振動数と水平力ならびに底面摩擦抵抗の関数であることを図示する。次に、典型的な地震動に対する振動・滑動モデルの応答を検討する。滑動量の固有振動数依存性は地震波においても顕著であり、また、地震波の特性に依存して変化することを明らかにする。滑動量と固有振動数の関係は振動・滑動系の減衰率および底面の摩擦抵抗をパラメータとして一種の応答スペクトルの形に整理でき、このスペクトルを用いることにより土塊や抗土圧構造物の滑動量が比較的簡単に推定できることを説明している。

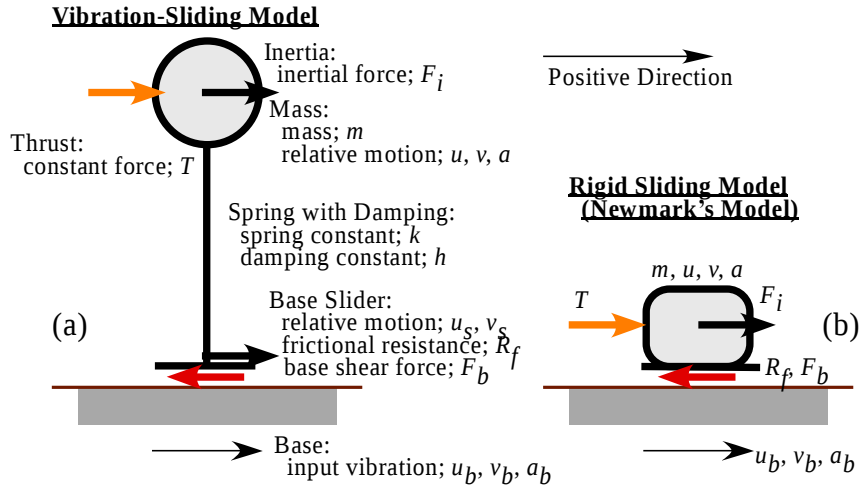


図-1 (a) 質点、バネ（ダッシュポット）、スライダーからなる振動・滑動モデル
(b) Newmark¹⁾の方法に相当する剛体・滑動モデル

2. 振動・滑動モデル

図-1(a)は質点 m 、バネ k （ダッシュポット c を伴う）およびスライダーからなる一自由度の振動モデルを示している。質点にはすべり面の傾斜あるいは常時の土圧に相当する水平力 T が継続して作用し、質点はこの水平力を受けながら基盤振動 u_b に対して応答する（質点の相対変位を u とする）。スライダーはすべり面における摩擦抵抗力あるいは抗土圧構造物の底面摩擦抵抗に対応する抵抗力 R_f を有しており、振動応答中に底面せん断力 F_b が摩擦抵抗 R_f 達すると滑動する（スライダーの滑動量を u_s とする）。基盤振動中にはスライダーが水平力 T の方向に滑動して変位 u_s が累積することになる。振動・滑動系においてバネを完全に剛とすると Newmark¹⁾ が堤体盛土の地震時変形の解析のために提案している剛体滑動モデルと等価なものが得られる。これを図-1(b)に示している。

Newmark³⁾ に代表されるように、基部に弾塑性モデルを採用して構造物の地震時応答における構造物の塑性変形の影響を考慮した、塑性率をパラメータとした塑性応答スペクトルの検討が行われている。本研究で用いた振動・滑動モデルはこれらにおいて弾・完全塑性モデルを用いた場合と等価となる。ただし、本研究では一定の水平力を与えることにより、振動中に蓄積する滑動量に着目している。

振動・滑動モデルのバネとダッシュポットの定数 k と c は以下のように定義する。

$$c = m \cdot 2h\omega_o, \quad k = m\omega_o^2 \quad (1)$$

ここで、 $(\omega_o = 2\pi f_o)$ は固有角振動数、 h は減衰定数である。非滑動時および滑動時の振動・滑動モデルの運動方程式は以下ようになる。

$$(\text{非滑動時}) \quad |F_b| < R_f \text{ and } \dot{u}_s \cdot F_b < 0$$

$$\begin{aligned} \dot{u}_s &= \Delta u_s = 0 \\ m\Delta\ddot{u} + c\Delta\dot{u} + k\Delta u &= -m\Delta\ddot{u}_b \\ \Delta F_b &= c\Delta\dot{u} + k\Delta u \end{aligned} \quad (2)$$

表-1 サイン波を用いた解析の基本的な条件。

質量	$m=1000 \text{ kg}$
固有角振動数	$\omega_o=2\pi \text{ (rad/s)}; f_o=1.0\text{Hz}$
減衰比	$h=0.2$
水平力	$T=0.3mg$
せん断抵抗力	$R_f=0.5mg$
(滑動余裕度)	$D_{sm}=(R_f-T)/mg = 0.2$
基盤振動	$a_b=\sin \omega_b t = \sin 2\pi t \text{ (10 cycles)}$

(滑動時)

$$\begin{aligned} \Delta F_b &= \pm R_f - F_b \\ m\Delta\ddot{u} &= -\Delta F_b - m\Delta\ddot{u}_b \\ c(\Delta\dot{u} - \Delta\dot{u}_s) + k(\Delta u - \Delta u_s) &= \Delta F_b \end{aligned} \quad (3)$$

一方、剛体・滑動モデルの運動方程式は以下のようにになる。

$$(\text{非滑動時}) \quad |F_b| < R_f \text{ and } \dot{u}_s \cdot F_b < 0$$

$$\begin{aligned} \Delta\ddot{u} &= \Delta\dot{u} = \Delta u = 0 \\ \Delta F_b &= -m\Delta\ddot{u}_b \\ \Delta\dot{u}_s &= \Delta u_s = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

(滑動時)

$$\begin{aligned} F_b &= \pm R_f \\ m\Delta\ddot{u} &= -\Delta F_b - m\Delta\ddot{u}_b \\ \dot{u}_s &= \dot{u}; \quad u_s = u \end{aligned} \quad (5)$$

質点およびダッシュポットの運動の時刻歴は直接積分法により数値的に計算し、係数 β は $1/4$ 、時間増分は $\Delta t = 0.00001 \text{ s}$ とした。

3. サイン波の下での基本的な滑動応答特性

本節では、基盤の加速度がサイン波形で与えられた場合について振動・滑動モデルを解析し、基本的

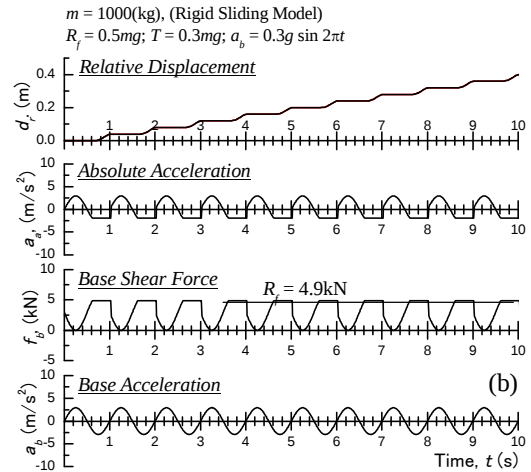
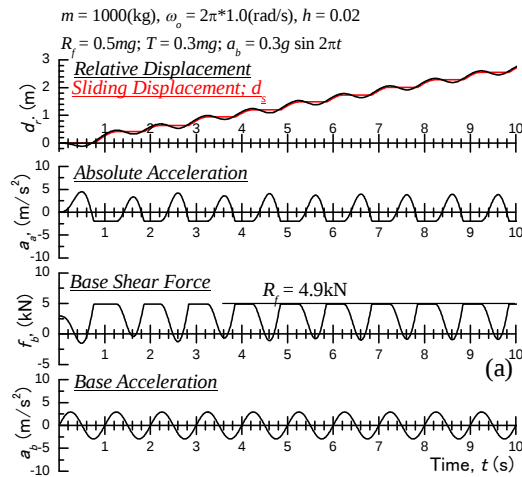


図-2 サイン波基盤振動を受ける際の振動・滑動時刻歴 (a) 振動・滑動モデル, (b)剛体・滑動モデル

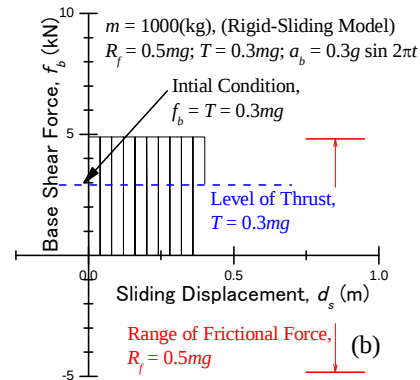
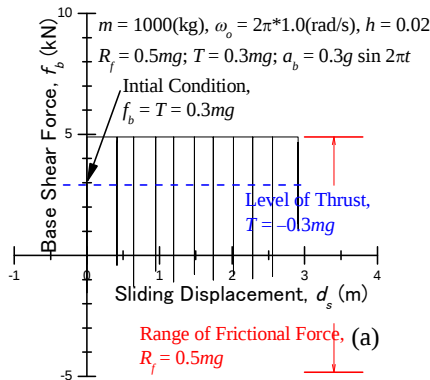


図-3 サイン波基盤振動を受ける際のスライダの挙動 (底面せん断力—すべり変位 関係)
(a) 振動・滑動モデル, (b)剛体・滑動モデル

な応答特性を検討する。基本となる解析条件を表-1に列挙している。基盤振動は振幅が $0.3g$ のサイン波 10 サイクルである。

図-2 には基本条件における振動・滑動モデルと剛体・滑動モデルの応答を時刻歴で対比して示している。下段より、基盤振動加速度、底面せん断力、質点の絶対加速度、質点の相対変位の順である。図-2(a)の最上段にはスライダーにおける滑動変位を赤線で書き込んでいる。図示のように、両者とも基盤振動への応答により底面せん断力がせん断抵抗力に達するとすべりが発生している様子が分かる。このとき、剛体・滑動モデル (図-2(b)) では、質点は振動せずに蓄積される一方であるが、振動・滑動モデル (図-2(a)) では質点の応答振動を伴いながら滑動による変位が蓄積されていることが分かる。図-3 はスライダーの働きを明らかにするために、底面せん断力とスライダーにおける滑動変位の関係を示している。1 サイクルごとに底面せん断力はせん断抵抗力に達し、滑動変位が蓄積されていることが分かる。図-2(a)の振動・滑動モデルにおいて1 サイクルごとに生じる滑動変位が一定でないのは、

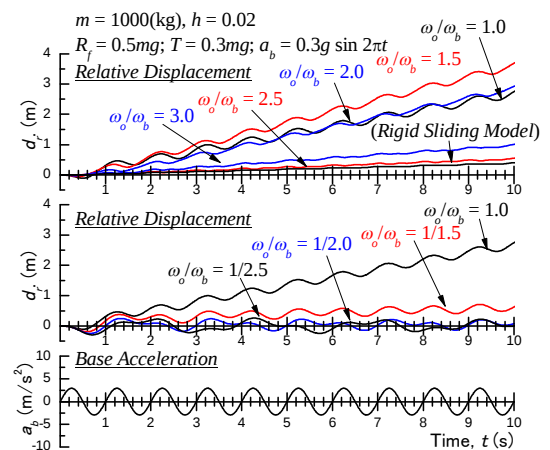


図-4 サイン波基盤振動に対する振動・滑動応答に及ぼす固有振動数の影響

初期条件の影響であり、一様な応答に至っていないためである。

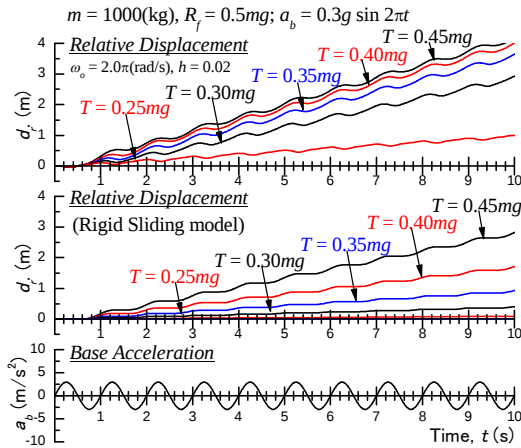


図-5 サイン波基盤振動に対する振動・滑動応答に及ぼす水平力の影響

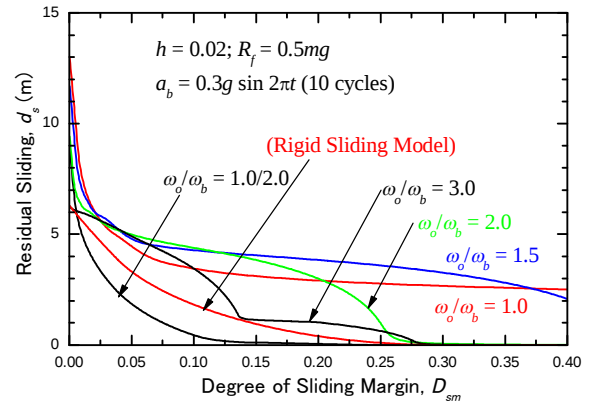


図-6 滑動余裕度の減少に伴う残留滑動量の増大傾向 (サイン波基盤振動に対する振動・滑動応答)

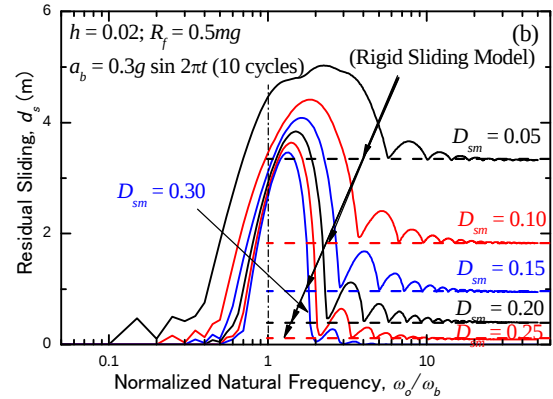
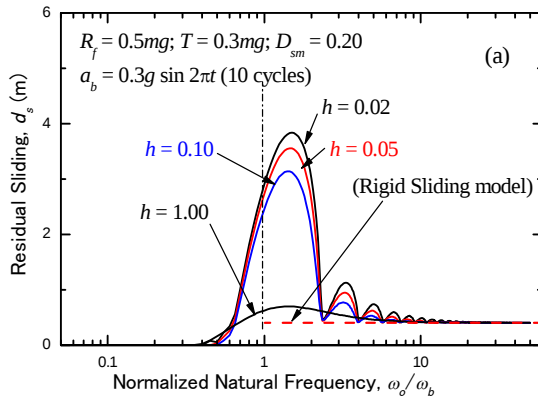


図-7 サイン波基盤振動に対する応答滑動スペクトル
(a) 減衰率をパラメータとして, (b) 滑動余裕度をパラメータとして

(1) 固有振動数の影響

図-2 と図-3 においては質点の相対変位やスライダの滑動変位のスケールが振動・滑動モデルでかなり大きくなっていることから分かるように、底部のせん断抵抗特性や水平力、基盤振動が同じ場合でも、滑動挙動はモデルの振動特性により大きく異なることが分かる。図-4 は振動・滑動応答に及ぼす固有振動数の影響を明らかにするために固有角振動数の基盤振動角振動数に対する比 ω_o/ω_b を広範に変化させて質点の変位を比較して示している。図には剛体・滑動モデルも比較のために示している。図示のように、滑動応答は固有振動数によって大きく変化している。共振現象に相当する $\omega_o/\omega_b=1$ の条件よりも系が少し硬くなり、大きな固有振動数を有する場合に滑動量は極大となることが分かる。また、系が軟らかくなり、固有振動が基盤振動数の半分 $\omega_o/\omega_b=1/2$ 程度になれば発生するすべり量は無視できるほど小さくなることも分かる。一般に、モデルの振動特性を無視して剛体・滑動モデルを用いる場合には、滑動量を過小に評価する危険性があるといえる。

(2) 水平力の影響

図-5 は水平力の影響を明らかにするために、水平力を広範に変化させた場合の振動・滑動モデルと剛体・滑動モデルの比較を示している。当然のように、水平力の増大に伴い滑動量が増大しているのは明らかである。水平力が比較的小さい場合には振動・滑動モデルと剛体・滑動モデルとの差は大きい、水平力が大きくなるにしたがい両者の差は比較的小さくなることは興味深い。

実はこのような数値解析を行ってみるとわかるが、滑動応答の計算においては、水平力そのものではなくせん断抵抗力と水平力の差が支配しており、水平力が異なっても、せん断抵抗力と水平力の差が等しければ滑動応答は全く変化しない。したがって、ここでは質点に作用する重力で無次元化することによって、下記のように新たに「滑動余裕度 D_{sm} 」を定義する。

$$D_{sm} = \frac{R_f - |T|}{mg}; \quad (\text{Degree of Sliding Margin}) \quad (6)$$

滑動余裕度が $D_{sm}=0$ の場合は常時においてすでに滑動に対して不安定であることに対応し、滑動余裕度

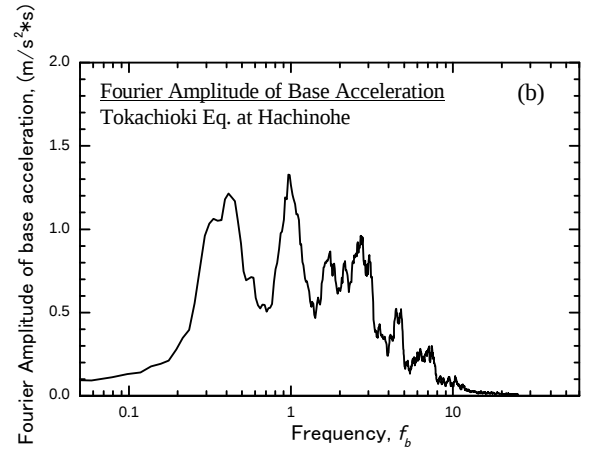
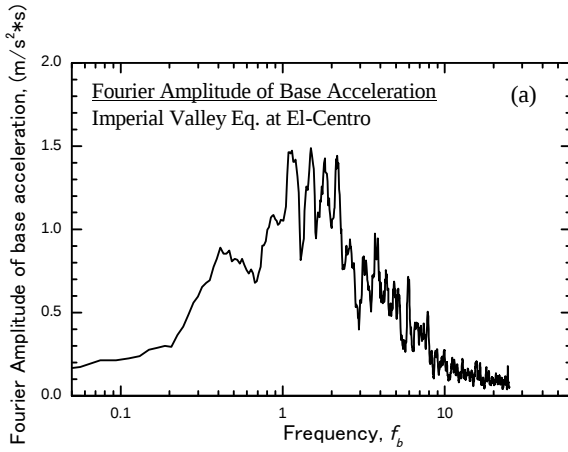


図-8 地震波のフーリエ加速度振幅スペクトル

(a) Imperial Valley Earthquake at El-Centro (N-S) (b) Tokachi-oki Earthquake at Hachinohe (N-S)

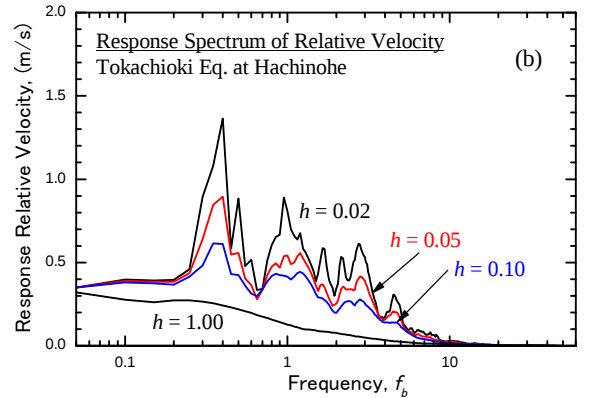
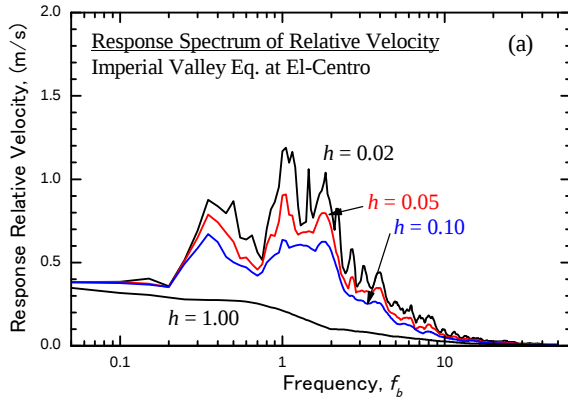


図-9 地震波の相対速度応答スペクトル

(a) Imperial Valley Earthquake at El-Centro (N-S) (b) Tokachi-oki Earthquake at Hachinohe (N-S)

が基盤振動の最大加速度よりも小さい $D_{sm} < |a_b|_{max}$ 場合には振動が増幅しない剛体・滑動モデルでは滑動が生じないことに対応している。以下では、水平力をパラメトリックに変化させてその影響を検討する場合には、適宜滑動余裕度 D_{sm} を用いる。

図-6はサイン波形（10サイクル）の基盤振動終了後における残留滑動量を滑動余裕度 D_{sm} に対してプロットしたものである。図には剛体・滑動モデルの結果も比較のために示しているが、モデルの振動特性によらず D_{sm} の減少に伴って残留滑動量は増大する傾向が明らかで、特に $D_{sm} < 0.05$ の範囲では急激に増大する傾向が認められる。固有振動数が高い $\omega_b/\omega_b = 2.0$ または $\omega_b/\omega_b = 3.0$ においては、残留滑動量と滑動余裕度との関係に不規則な屈曲点が現われるが、それより低い固有振動数では関係は滑らかで単調な傾向を示している。

(3) 滑動応答スペクトル

これまで示してきたことを総合して、滑動余裕度 D_{sm} と減衰率 h をパラメータとして残留応答滑動量を振動モデルの正規化した固有振動数 ω_b/ω_b に対

して整理することが可能である。このようにして得られた図-7 は一種の応答スペクトルといえるもので、ここでは新たに「滑動応答スペクトル」と呼ぶことにする。図-7(a)では減衰率 h をパラメータとし、図-7(b)では滑動余裕度 D_{sm} をパラメータとしている。

図-7(a)は減衰率の増大に伴い応答滑動量は全体的に減少する傾向にあることを示している。応答滑動量は固有振動数が基盤振動数の1.5倍から2.0倍の範囲 ($1.5 < \omega_b/\omega_b < 2.0$) で極大（最大）値を取り、減衰率が減少することによって極大値を取る固有振動数は若干大きくなる傾向にあるが、その変化はわずかである。応答滑動量は固有振動数依存性が極めて顕著である。すなわち、a)モデルが軟らかく基盤振動数の半分程度以下 ($\omega_b/\omega_b < 0.5$) では応答滑動量は工学的には無視できるほど小さいといえる。b)モデルが硬く基盤振動数の2.5倍以上 ($2.5 < \omega_b/\omega_b$) になるとすべり応答は変動しながらほぼ一定値に収束する傾向を示し剛体・滑動モデルで得られる応答滑動量に漸近している。c)この解析条件では、減衰率が $h=0.02$ では、すべり量の極大値は剛体・滑動モデルによる応答滑動量の約10倍に達する。

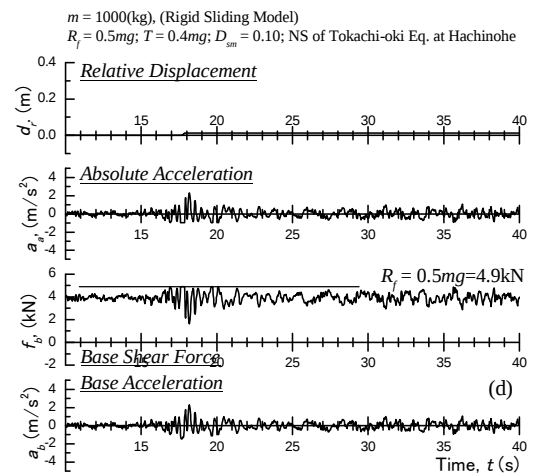
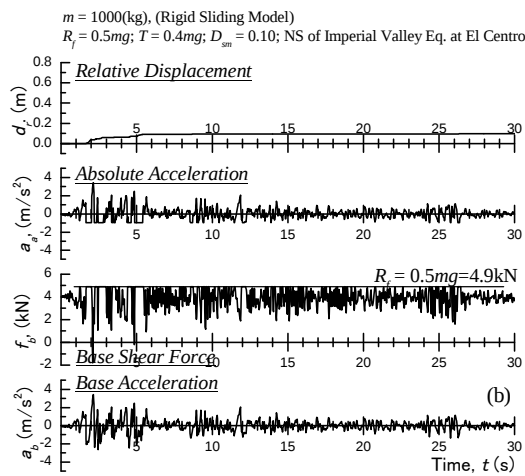
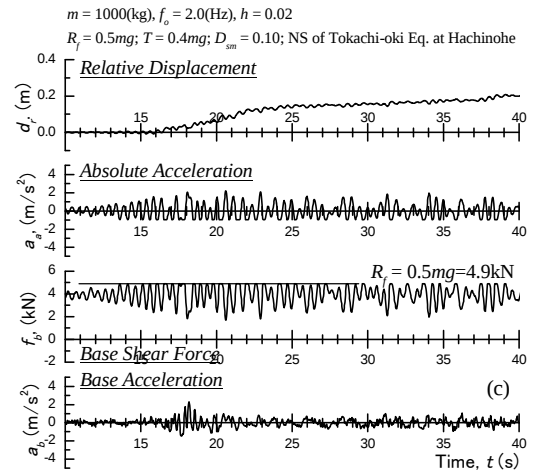
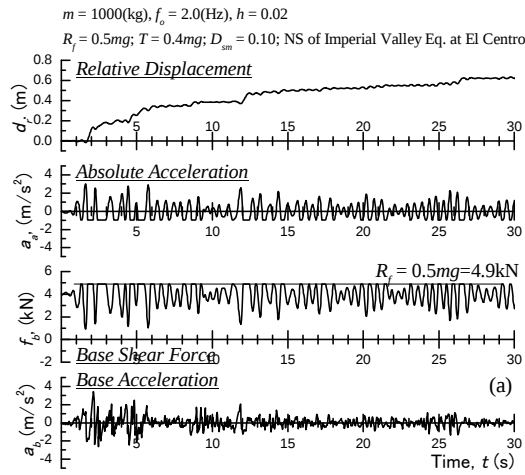


図-10 振動・滑動応答時刻歴、
El-Centro (N-S) (a) 振動・滑動モデル、(b) 剛体・滑動モデル(N-S)、
Hachinohe (N-S) (c) 振動・滑動モデル、(d) 剛体・滑動モデル(N-S)

図-7(b)に示す滑動余裕度をパラメータとする滑動応答スペクトル群は、応答滑動量の滑動余裕度の減少に伴う特徴的な増大傾向を示している。応答滑動量が極大となる固有振動数は滑動余裕度の減少に伴い増加する傾向にあり、滑動余裕度が $D_{sm}=0.10$ では基盤振動数の約 2.0 倍の条件 ($\omega_b/\omega_b=2.0$) で極大値が得られる。滑動余裕度の影響はすべての固有振動数で見られるが、特に固有振動数が大きな範囲でその影響は顕著である。周波数が大きくなるにつれて応答滑動量は剛体・滑動モデルの滑動量に漸近する傾向が滑動余裕度毎に認められる。固有振動数が基盤振動数の 2 倍を超える範囲では ($2.0 < \omega_b/\omega_b$) 応答滑動量は滑動余裕度の減少に応じて明瞭に増大している。

4. 地震波の下での滑動応答特性

本節では広く設計や研究で用いられている 2 つの

表-2 地震波を用いた解析の基本的な条件。

質量	$m=1000 \text{ kg}$
固有角振動数	$\omega_o=4\pi \text{ (rad/s)}; f_o=2.0\text{Hz}$
減衰比	$h=0.2$
水平力	$T=0.4mg$
せん断抵抗力	$R_f=0.5mg$
(滑動余裕度)	$D_{sm}=(R_f-T)/mg = 0.1$
基盤振動	$a_b=\sin \omega_b t=\sin 2\pi t \text{ (10 cycles)}$

地震波を基盤振動として採用した。El-Centro波とHachinohe波の基本的な特性としてフーリエ加速度振幅スペクトルと相対速度応答スペクトルをそれぞれ図-8と図-9に示す。解析した振動モデルの基本特性は表-2に挙げた通りで、ここでは滑動余裕度を $D_{sm}=0.1$ としている。

図-10は振動・滑動モデルと剛体・滑動モデルが 2 種類の地震波を受けたときの振動・滑動応答の時刻歴を示している。図の形式は図-2と同じで、最下段が基盤振動加速度、それから上に底面せん断力、

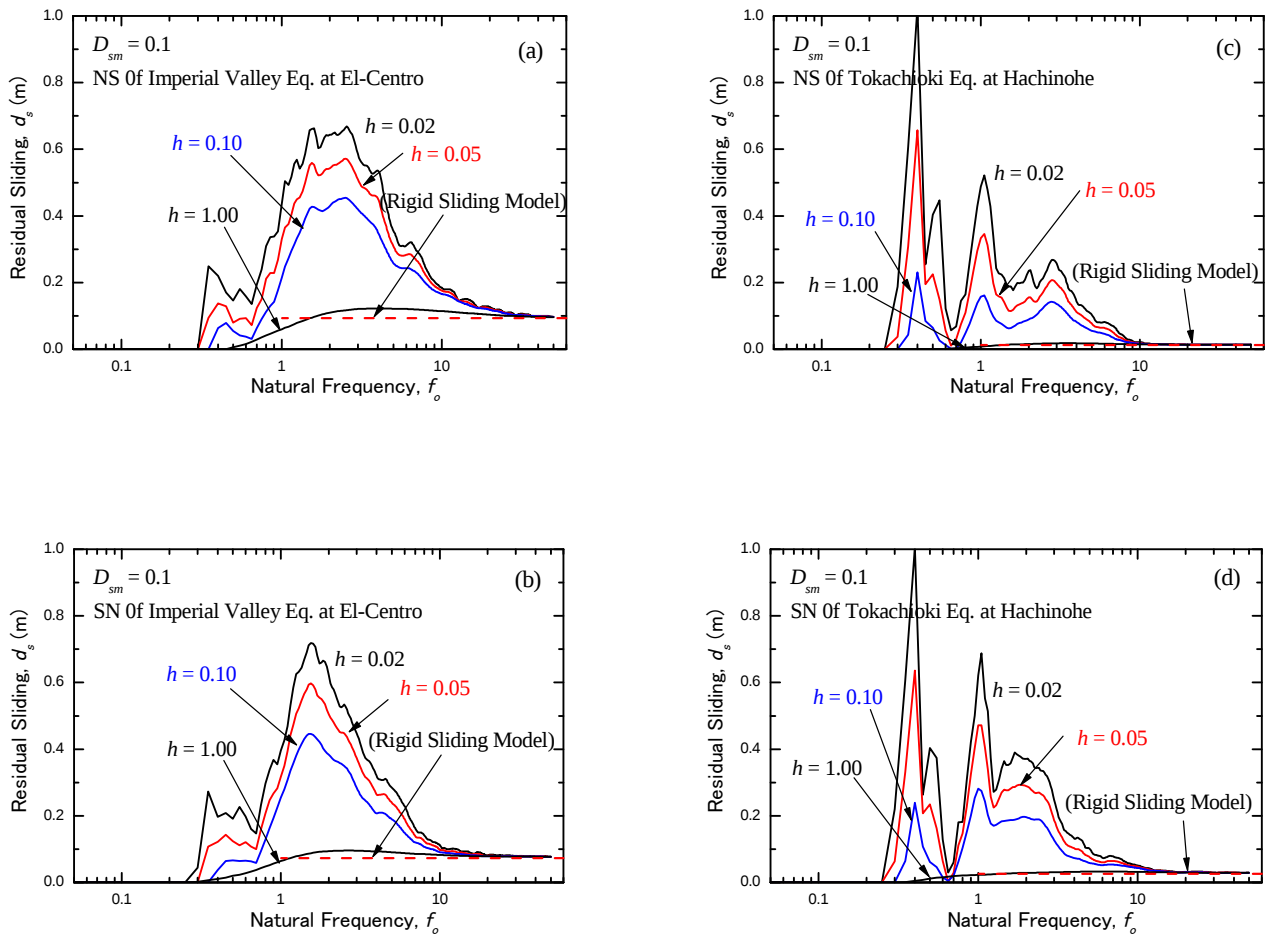


図-12 減衰定数をパラメータとした滑動応答スペクトル
El-Centro (a) N-(+) S-(-) (b) S-(+) N-(-), Hachinohe (c) N-(+) S-(-) (d) S-(+) N-(-)

絶対加速度，質点の相対変位となっている．底面せん断力 F_b がせん断抵抗力 R_f に等しくなるとスライダで滑動が発生し滑動による変位がその度に蓄積されていくことが分かる．この条件では2種類のモデルともEl-Centro波で応答滑動量が大きくなっている．また，剛体・滑動モデルに比べて振動・滑動モデルでは応答滑動量は数倍大きなものとなっており，サイン波の場合と同様に固有振動数の依存性が顕著であることが分かる．

図-11は固有振動数の影響を示すために，より広い固有振動数における2種類の地震波での滑動応答の時刻歴を示している．図示のように両地震波において固有振動数の影響は顕著であり，El-Centro波では2Hzで，Hachinohe波では1.0Hzで応答滑動量は最大となっている．一方，剛体・滑動モデルによる応答滑動量は，2種類の地震波においてかなり小さく，数分の一である．サイン波の場合と同様に剛体・滑動モデルでは応答滑動量がかなり過小に評価される危険性がある．

(1) 滑動応答スペクトル

図-12は2種類の地震波を受けたときの滑動応答スペクトルを減衰率をパラメータとして求め，固有周波数に対してプロットしている．通常の応答スペ

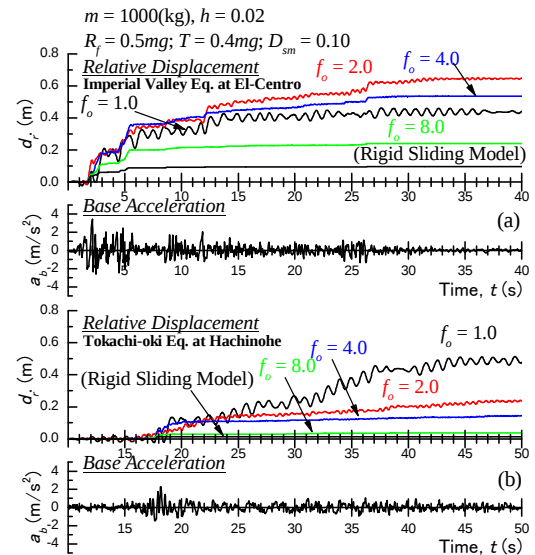


図-11 振動・滑動応答時刻歴における固有振動数の影響 (a) El-Centro (N-S) (b) Hachinohe (N-S)

クトルの場合には加速度や速度，変位の最大値に着目するが，本研究における滑動の場合には同じ地震波でも水平力の方向との関係で滑動量に差が出ると予想できる．そこで，図-12(a)と(b)，図-12(c)と(d)

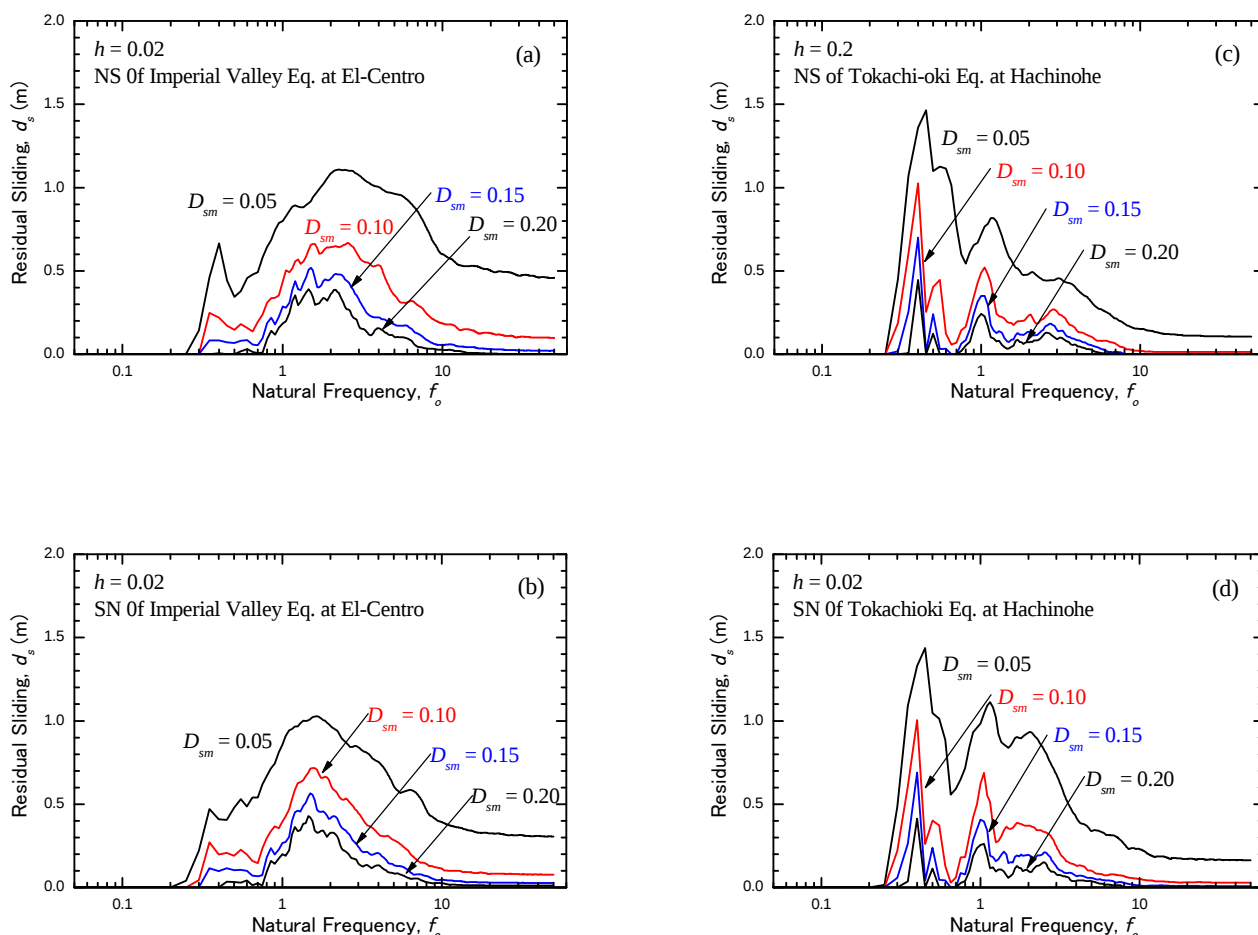


図-13 減衰定数をパラメータとした滑動応答スペクトル
El-Centro (a) N-(+) S-(-) (b) S-(+) N-(-), Hachinohe (c) N-(+) S-(-) (d) S-(+) N-(-)

では加速度の記録の方向を入れ替えて振動・滑動応答を解析している．図示のように，基盤振動の方向の影響は確かに認められる．すなわち，El-Centro波ではおよそ2Hzを中心とする比較的応答滑動量が大きくなる振動数帯が図-12(a)では(b)よりも広がっている．また，Hachinohe波では，2Hz付近で顕著な差が見られ，図-12(c)では(d)よりも2倍程度の応答滑動量となっている．しかし，この基本的な解析条件では，全体的な傾向に大きな違いは見られてない．

El-Centro波においては2Hzを中心とする比較的広い振動数帯で応答滑動量が大きくなっている．これは図-8(a)と図-9(a)が示す加速度振幅スペクトルと相対速度応答スペクトルに見られる1.0～3.0Hzにわたる広い振動数帯での大きな値と直接関連していると思われる．また，Hachinohe波においては0.5Hz付近と1.0Hzでスペクトルに明瞭なピークが見られる．このピークについても図-8(b)と図-9(b)が示す加速度振幅スペクトルと相対速度応答スペクトルが示す明瞭な2つのピークに関連していると思われる．

以上のように大きな残留応答滑動量を示す周波数領域については，フーリエ・スペクトルや応答スペクトルからおおよそ知ることができるとと思われる．

El-Centro波では0.2Hz，Hachinohe波では0.3Hz以

下の周波数では応答滑動は無視できるほど小さいことが分かり，その後2・3のピークを示した後，高い周波数領域では減衰定数の値によらず一定値に収束している．図示のような値は剛体・滑動モデルで得られる比較的小さな応答滑動量に一致している．

図-13は滑動余裕度 D_{sm} をパラメータとして解析した滑動応答スペクトルを示している．図-12と同様に地震時の加速度記録の極性を入れ変えて実施した解析結果も示している．ここでも基盤振動の極性の影響は見られるものの，ここで検討した滑動余裕度 D_{sm} の範囲では，応答滑動量がピークとなる振動数を変えるなど全体の傾向を左右するような影響はないようである．サイン波の場合と同様に滑動余裕度の減少に伴い応答滑動量は顕著な増加傾向を示している．

図-14は，2種類の地震波における残留滑動量と滑動余裕度の関係を示している．El-Centro波では0.4，2.0Hz，Hachinohe波では0.4，1.0Hzに着目している．また，比較のために剛体・滑動モデルによる結果も一緒に示している．図示のように残留応答滑動量は滑動余裕度の減少によって急激な増加傾向を示している．しかし，この関係は固有振動数に依存して大きく異なっている．また，地震動によって

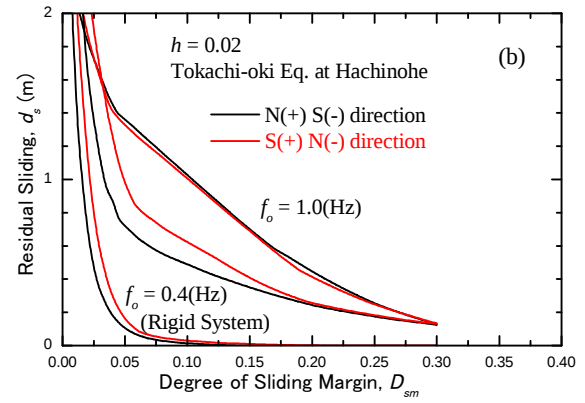
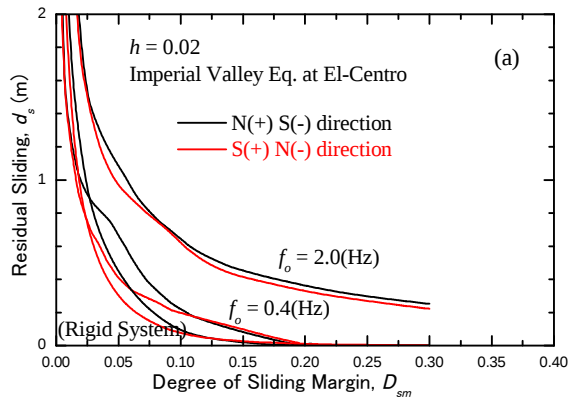


図-14 残留応答滑動量の滑動余裕度に対する関係 (a) El-Centro (N-S), (b) Hachinohe (N-S)

もこの関係は異なり，固有の関係となっている．

5. 実際問題への適用について

これまでの章では，質点とバネ，ダッシュポット，スライダーからなる固有振動数を考慮できる振動・滑動モデルを提案した．モデルを用いて振動時における応答による振動と滑動を解析した結果，滑動による残留応答滑動はモデルの固有振動数に対して一種の応答スペクトルの形で提示できることが分かった．

本節では，堤体の滑動による変形と港湾における重力式岸壁を例に取り，その振動・滑動モデルへのモデル化の方法について簡単に説明する．

(1) 堤体のすべりへの適用

図-15は地震時において堤体の肩部分に生じるすべりの様子を模式的に示している．すべり土塊底部のすべりを代表する傾斜角を α としている．土塊の質量を M としている．この場合，図-1に示した振動・滑動モデルに作用している水平力 T はすべり土塊の背後に堤体から作用する力ではなく，重力 W のすべり面に平行な成分である．

$$m = M, \quad T = Mg \sin \alpha \quad (7)$$

土塊の固有振動数と減衰率の決定は常時微動観測や弾性波探査などが役に立つかもしれないし，また，アースダムの地震時挙動に関する種々の研究成果が参考になるかもしれない．

せん断抵抗力は土塊底部のすべり面における摩擦抵抗に関連しているので，内部摩擦角や粘着力で記述できる土のせん断強さから算定できるだろう．もしも，堤体材料のせん断抵抗が粘着力によらず内部摩擦角 ϕ で決まるならば，振動・滑動モデルのパラメータおよび滑動余裕度 D_{sm} は以下のように計算できる．

$$R_f = N \tan \phi = Mg \cos \alpha \tan \phi$$

$$D_{sm} = \frac{R_f - T}{mg} = \tan \phi \cos \alpha - \sin \alpha \quad (8)$$

$$\approx \tan \phi - \tan \alpha$$

もし傾斜角 α が十分に小さければ，上記のように滑動余裕度は単純化して表現できる．

(2) 重力式岸壁のケーソンの滑動への適用

図-16はマウンド上にケーソンを設置するタイプの重力式岸壁の常時と地震時において慣性力や外力が作用する様子を模式的に示している．ケーソンの質量を M ，底面摩擦抵抗角を ϕ_μ とすると振動・滑動モデルのパラメータは以下のように算定できる．

$$\begin{aligned} m &= M, \quad T = P_e - P_w, \\ R_f &= (Mg - F_v) \tan \phi_\mu, \\ D_{sm} &= (R_f - T) / mg \end{aligned} \quad (9)$$

ここで， P_w は前面に作用する静水圧， P_e は水圧も含めた全応力表示の土圧， F_v はケーソンの浮力である．ケーソンの固有振動数の評価には，著者らが行った複数の重力式岸壁の常時微動計測の結果が参考になるかもしれない⁴⁾．

地震時においては所定の基盤加速度における慣性力と前面動水圧，土圧の変動成分を評価する必要がある．動水圧はWestergaardが誘導したダムに作用する地震時動水圧の算定法が参考になる⁵⁾．土圧の変動成分の評価には震度法に基づいた地震時土圧が頼りになるかもしれないが，著者らが模型実験で明らかにしたように，慣性力とは逆位相の土圧の変動成分を考えることも可能である⁶⁾．これらの外力は慣性力に対応させて付加質量としてモデルに取り入れることが可能であり，質量等を以下のように修正することで対応できるだろう．

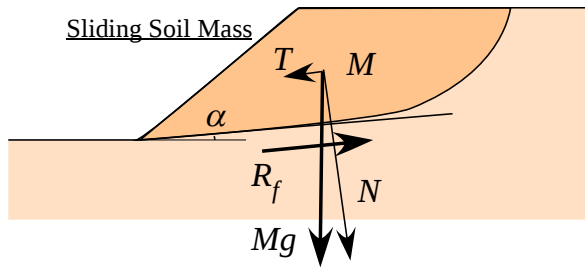


図-15 堤体の地震時におけるすべりを伴う変形のモデル化

$$m' = M \frac{F_i + \Delta P_w + \Delta P_e}{F_i},$$

$$D_{sm}' = \frac{R_f - T}{m'g} = D_{sm} \frac{m}{m'}, \quad (10)$$

$$\omega_o' = \omega_o \sqrt{m/m'}$$

5. ま と め

土塊や構造物の振動特性を考慮して地震時における滑動量を推定する方法を提案し説明した。質点にバネとダッシュポット、スライダーを組み合わせて地震時挙動を解析するための振動・滑動モデルを提示し、数値解析を実施することによって、地震時における滑動の発生特性およびモデルの適用性を示した。振動・滑動モデルによって得られる地震時応答滑動量を減衰率や滑動余裕度をパラメータとして固有振動数に対してプロットすることによって一種の応答スペクトルの形に整理できることがわかった。

参考文献

- 1) Newmark, N. M.: 'The 5th Rankine Lecture: Effects of Earthquakes on Dams and Embankments,' Geotechnique, Vol.5, No.2, 1965.
- 2) 澤田純男, 土岐憲三, 村川史朗: '片側必要強度スペクトルによる盛土構造物の耐震設計法,' 地震工学シンポ

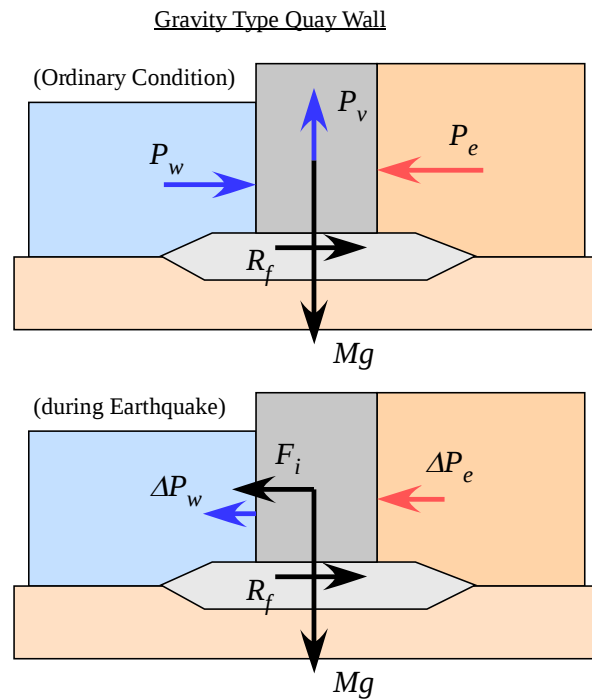


図-16 重力式岸壁の地震時におけるケーソンのすべりを伴う変形のモデル化

ジウム論文集, Vol.10, pp.3033-3038.

- 2) Newmark, N. M. and Hall, W. J.: 'A rational Approach to seismic design standards for structures,' Proc. of 5th EWCEE, Vol.2, pp.2266-2277, 1974.
- 3) 小濱英司, 三浦均也, 井上清隆, 大塚夏彦, 笹島隆彦, 佐藤謙司: "常時微動観測による重力式岸壁の振動特性," 地盤工学シンポジウム論文集, Vol.47, pp.179-186, 2002
- 4) Westergaard, H. M.: "Water Pressures on Dams during Earthquakes, Trans. ASCE, Vol.98, pp.418-432, 1933.
- 5) Kohama, E., Miura, K., Yoshida, N., Ohtsuka, N. and Kurita, S. 'Instability of Gravity Type Quay Wall Induced by Liquefaction of Backfill during Earthquake,' Soils and Foundations, Vol.38, No. 4, pp. 71-84, 1998.

(2005. 3. 14 受付)

ESTIMATION METHOD FOR EARTHQUAKE INDUCED SLIDING OF SOIL MASS AND RETAINING STRUCTURE REGARDING THE NATURAL FREQUENCY

Kinya MIURA, Eiji KOHAMA, Nozomu YOSHIDA and Jumpei WATANABE

The one-degree vibration-sliding model which consists of mass, spring with dashpot, and slider is defined, and its vibration and sliding response to base earthquake shaking was numerically analyzed. First, a fundamental response of the vibration-sliding model was examined under the uniform sinusoidal base shaking, and the significant effect of its natural frequency on the response is explained. Then, the response of the vibration-sliding model was examined under irregular earthquake base shaking. And it was found the relationship of the residual sliding of the mass with the natural frequency can be summarized in a kind of response spectrum, which may be used for the estimation of the residual sliding after earthquake.