

土研資料 第1219号

土木研究所資料第一二一九号

有限要素法による盛土・地盤系の振動解析

昭和52年3月

建設省土木研究所

土木研究所資料

有限要素法による盛土・地盤系の振動解析

昭和52年3月

建設省土木研究所

概 要

本資料は、盛土等の土構造物の地震時挙動を解明するための一手法として有限要素法による振動解析をいくつかの単純なモデルについて適用し、モデルの振動挙動に影響を及ぼす諸因子について検討を試みた計算結果をとりまとめたものである。用いたプログラムは土の非線型な動的変形特性を等価線型法により表わし、反復法により解くようになっている。検討した因子の主要なものは、モデルの寸法、水位条件、物性、入力レベル、入力波形、モデルの作成法、入力方式等である。

昭和52年3月

動土質研究室室長

沢	田	健	吉
古	賀	泰	之
間		三	男

目 次

概 要	
1. ま え が き	1
2. 使用プログラムの概要	2
2-1 基盤加振の場合 (LUSH-1)	2
2-2 外部荷重の場合 (LUSH-2)	3
2-3 計算結果とその OUTPUT	3
3. 本解析の対象	4
3-1 対象モデル	4
3-2 振動挙動に影響を与える因子	7
3-3 計算条件	9
4. 解析結果	16
4-1 計算結果の評価法	16
4-2 モデル(の形状)による影響	16
4-3 モデルの寸法による影響	17
4-4 水位条件による影響	21
4-5 物性による影響	23
4-6 入力レベルによる影響	24
4-7 入力波による影響	31
4-8 メッシュの分割法及び境界条件による影響	34
4-9 振動数応答関数の場所的分布について	36
4-10 応答加速度の分布について	38
4-11 応力の分布について	38
4-12 水平加振により引起される鉛直振動	39
4-13 鉛直加振の場合	39
4-14 外部荷重が作用する場合	40
4-15 解析結果のまとめ	41
5. 振動実験結果との比較	43
5-1 振動実験と計算の条件の違い	43
5-2 考 察	43
6. 結 論	49
7. 参 考 文 献	50

1. ま え が き

この資料は、盛土等の土構造物の地震時挙動を解明するための一手法として有限要素法による振動解析をいくつかの単純なモデル（特にこれまでに実施したいくつかの振動実験模型を念頭において）について適用し、モデルの振動挙動に影響を及ぼすと思われる諸因子について検討を試みた結果をとりまとめたものである。検討した主な因子は次のとおりである。

- (1) モデル（の形状）による影響
- (2) モデルの寸法による影響
- (3) 水位条件による影響
- (4) 物性による影響
- (5) 入力レベルによる影響
- (6) 入力波形による影響
- (7) メッシュの分割法による影響
- (8) 境界条件による影響
- (9) 入力方式による影響

2. 使用プログラムの概要

この解析に用いたプログラムの主体は米国カリフォルニア大学において開発された LUSH と呼ばれるプログラムである。ここではさらに入力方式を多少変えて入力することができるようにしたプログラムも用いたので、従来の LUSH を LUSH-1、入力方式を変えたものを LUSH-2 と名づけた。以下にそれぞれのプログラムの概要を示す。

2-1 基盤加振の場合 (LUSH-1)¹⁾

このプログラムは、2次元平面ひずみ状態の構造の振動応答を取扱う有限要素法のプログラムである。特に土のような材料の動的応答に対する強い非線型性を等化線型化法を用いてせん断定数、減衰定数をひずみレベルの関数として表わし、反復法によりひずみレベルに適合するこれらの定数を決定することにより導入している。またプログラムは地震波のような非定常入力に対する応答を計算することを対象としており、その結果として生ずる各要素中のせん断ひずみの非定常過程の内、その最大値を基準としてあるひずみレベル (有効ひずみという) を求め、それに対応するせん断定数、減衰定数を全過程に対して用いて、非線型材料の応答計算を近似的に行なう。応答計算はすべて振動数領域で行ない、各振動数成分に対する応答は系の振動数応答関数 (Amplification Function) に入力地震波のフーリエ係数を乗することにより求める。剛性は複素剛性^{注)}を用い、速度非依存型の減衰を導入している。入力地震波は対象モデルを支持する剛な基盤へ任意の一定方向への加速度の時間過程として入力される (図-1 参照)。図-2 にこのプログラムの

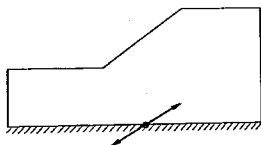


図-1 LUSH-1の入力説明図

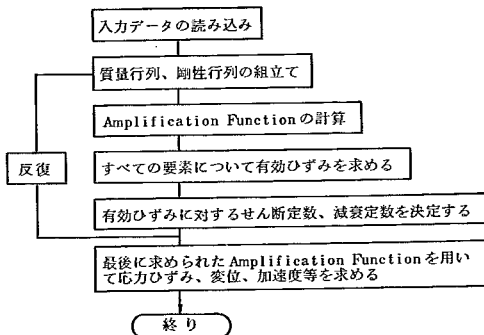


図-2 プログラムの流れ

注) 複素剛性 G^* は次式で与えられている。

$$G^* = G (1 - 2\beta^2 + i \cdot 2\beta \sqrt{1 - \beta^2})$$

ここに、 G は割線せん断剛性係数と考えられる。 β は、減衰定数とされている。

全体的な流れを示す。

次にこのプログラム中に用いられたいくつかの記号の内、この資料を見ていく上で必要なものを説明する。

FCT 最大せん断ひずみに対する有効せん断ひずみの割合

GCURV 種々のせん断ひずみレベルにおけるせん断定数を最小のせん断ひずみにおけるせん断定数で正規化した置

BCURV 種々のせん断ひずみレベルにおける減衰定数を最大の減衰定数で正規化した値

2-2 外部荷重の場合 (LUSH-2)

このプログラムにおける計算の流れはLUSH-1の場合と同様である。ただし入力はい任意節点に水平又は鉛直方向への荷重の時間過程として入力される(図-3参照)。

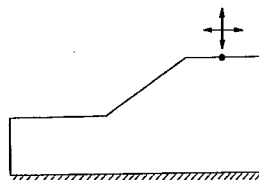


図-3 LUSH-2の入力説明図

2-3 計算結果とそのOUTPUT

このプログラムによる計算結果として、OUTPUTを指定することにより出力される主なものは次のとおりである。

- (1) 繰返し計算中で、各要素に用いた剛性・減衰定数
- (2) 各要素に生じた応力とせん断ひずみの最大値とその時刻
- (3) 各節点の加速度の最大値
- (4) 各節点の変位の時間過程
- (5) 各節点の加速度の時間過程
- (6) 各節点の応答加速度を入力とする加速度及び速度スペクトル
- (7) 各節点の振動数応答関数

3. 本解析の対象

3-1 対象盛土

解析の対象としたモデルは、図-4(a)~(h)に示すM0~M5'である。すなわち、

M0 …… 層厚 0.5、1、2、5、10mの水平地盤

M1 …… 層厚 4 mの水平地盤

M2 …… 高さ 3 mの盛土・地盤系 (のり勾配 1 : 1.5)

M2' …… M2に対して1/2の大きさ

M3 …… 高さ 3.5 mの盛土・地盤系 (のり勾配 1 : 2)

M4 …… 高さ 3.5 mの盛土・地盤系 (のり勾配 1 : 3、非対称形)

M5 …… 高さ 3 mの剛体・地盤系

M5' …… M5に対して1/2の大きさ

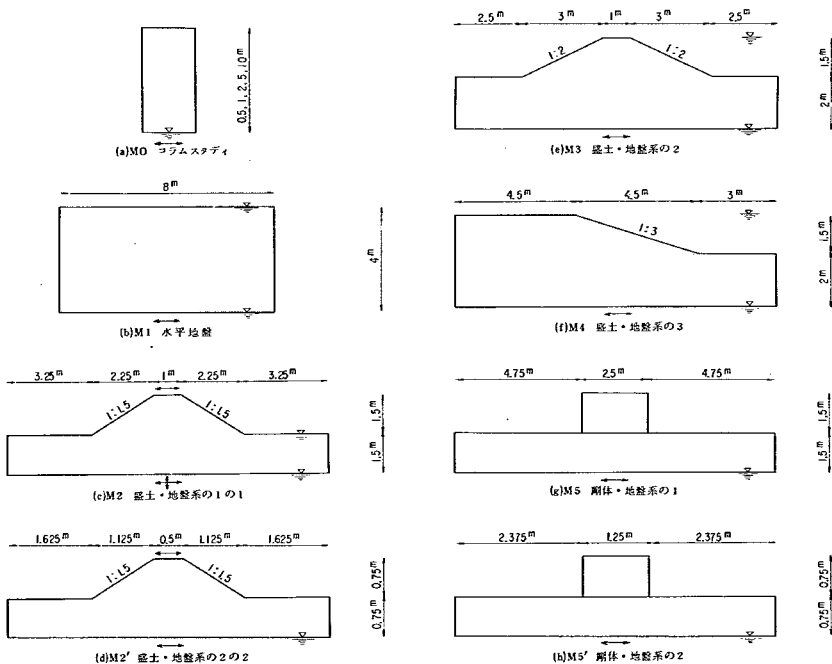


図-4 解析モデル概要

次に、これらのモデルに対して主として用いたメッシュ分割法を図-5(a)～(f)に示す。M1については、

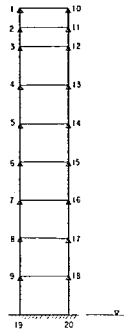


図-5(a) 解析モデル M0

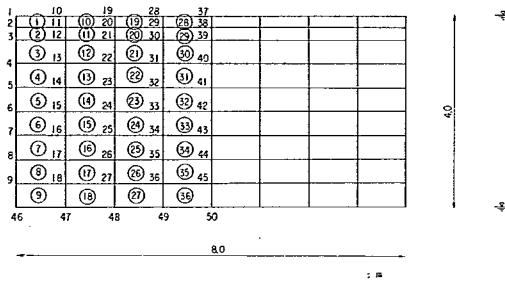


図-5(b) 解析モデル M1

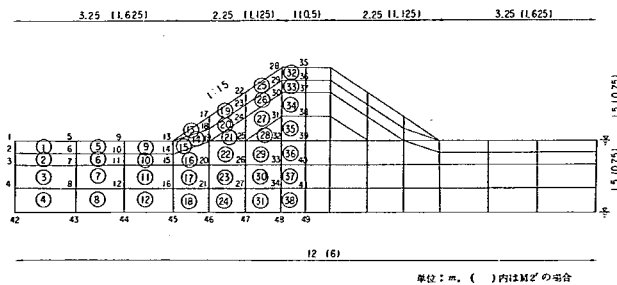


図-5(c) 解析モデル M2、M2'

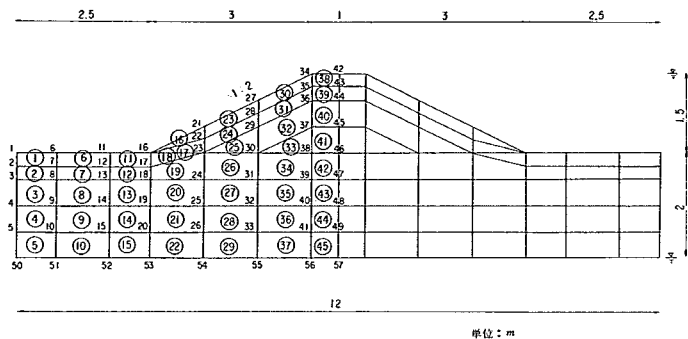


図-5(d) 解析モデル M3

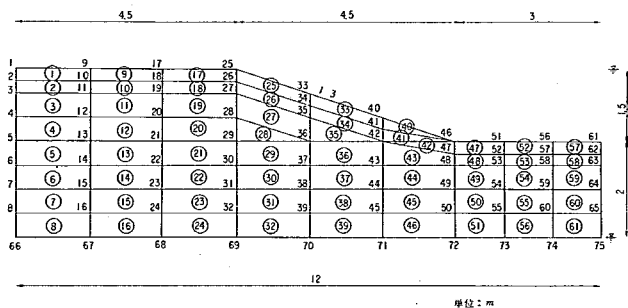


図-5(e) 解析モデル M4

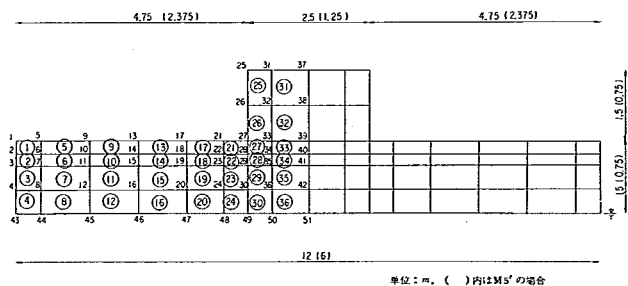


図-5(f) 解析モデル M5、M5'

メッシュの分割法・境界条件の与え方の影響についても調べたが、この場合のメッシュの分割法について別途述べる。また、境界条件についても後述する。すなわち、M1、M2、M2'、M3、M5、M5'の大型・対称モデルについては、片側だけを解析対象とした。なお、今回の解析では非対称モデルM4の盛土の端面の境界条件は、対称モデルの対称軸での境界条件と同じにしたため、出発したモデルを離れてM4についても反対側に対称な盛土が存在すると考えてもよい。

3-2 振動挙動に影響を与える因子

計算条件は、3-3において述べるが、その前に1.まえがきにおいて述べた検討した主な因子について具体的に説明する。なお、(1)~(8)については、水平地震動入力に対する検討であり、入力の方向、作用方法を変えた場合のことは(9)に述べる。

(1) モデル(の形状)による影響

これは、解析対象を3-1に述べたM0~M5'に設定することに相当する。これにより、一定の法則により定まる物性をもつモデルが、その形状(のり勾配等)を異にするときの振動特性(振動数応答関数等)の差を考察する。

(2) モデルの寸法による影響

これは、層厚を種々に変えたM0、寸法比が $\frac{1}{2}$ であるM2とM2'、M5とM5'の比較により調べる。物性が一様弾性体の場合、寸法比による振動特性の変化は次元解析等により簡単に算定され相似則の根拠となっているが、物性が非線型の場合は、このような試算によらざるをえない。

(3) 水位条件による影響

地盤や盛土・地盤系に地下水、周辺水が存在することにより、単位体積重量の変化、有効応力状態の変化、それに伴う剛性率・減衰特性の変化が生じ、振動挙動も変化するが、それがどの程度のものであるかを調べる。なお、水没斜面の場合には、周辺水と斜面との間に動水圧等の動的相互作用が生ずるが、これについては今回の解析では考慮せず、水浸による有効応力の変化のみを考慮した。

(4) 物性による影響

地盤や盛土を構成する土の動的変形特性は土により異なるが、ここではこれまで振動実験に用いた材料が、山砂であることを考慮し、砂について提唱されている変形特性を原則として1種類のみ用いることにした。また、この変形特性は本質的に非線型であるが、比較的簡単に用いられる弾性解の適用性についても調べた。

(5) 入力レベルによる影響

土の変形特性が非線型であるために、入力振動のレベル(大きさ)により振動特性が変化する。この変化の性状を調べた。

(6) 入力波形による影響

既に2.使用プログラムの概要で述べたように、このプログラムでは、土の動的変形特性のひずみ依存性という非線型性を、非定常な地震波入力によって生ずる各要素における非定常なひずみ応答結果から

ある有効ひずみという各要素ごとには異なる一定の基準値を定めてそれに対応する剛性率、減衰定数で代表させるという近似手法を用いている。この基準となるひずみ応答結果は、地震動に含まれる振動数成分と、地盤又は盛土・地盤系の固有振動数によって変る。したがって、例えば最大値が同じ大きさの地震波を入力させても、その振動数成分によっては地盤又は盛土・地盤系の振動挙動は異なり、したがってひずみ応答結果も変る。したがって、各要素に設定される剛性率、減衰定数も変ることになる。このように異なった入力によって、振動挙動・振動特性がどのように変化するかを調べる必要がある。

また、実験的に振動数応答関数を求める方法としては、入力振動として正弦波を用い、加速度を一定にしたまゝ振動数をステップ的に変え、模型の各点の加速度の入力加速度に対する応答倍率を求めるという方法が通常とられる。このような方法をとった場合には、有効ひずみは最大ひずみと一致し、物理的意味は明らかである。このような実験方法に対応した正弦波入力により解析的に振動数応答関数を求め、地震波入力により求めた振動数応答関数と比較する必要がある。

(7) メッシュの分割法による影響

メッシュの数は計算時間等の制約があり、できるだけ少ない方が望ましいが、むやみに少なくするとそれはそれだけ、モデルの自由度を減らすことになり、自ら妥協点が存在すると考えられる。また、対称形のモデルを片側だけで計算することは問題がないかということも検討する必要がある。

(8) 境界条件による影響

モデルの境界における境界条件は種々考えることができるが、今回の計算では次のものを原則とした。

入力方向が水平の場合、端部及び対象軸上の節点は水平方向自由、鉛直方向拘束とする。

入力方向が鉛直の場合、端部及び対象軸上の節点は鉛直方向自由、水平方向拘束とする。

但し、解析対象としたモデルM1、M2、M3、M4を、これまでに実施した模型振動実験のモデルに直接対応させると、端部は土槽側壁に接することになり、必ずしも上に原則とした境界条件が適当ではないかもしれない。例えば、水平加振の場合、土槽側壁は地盤を完全に水平に自由に振動させるものではなく、むしろ、そこで水平相対変位が拘束されると考える考え方もありうる。現実にはこの両者の中間的な拘束条件であろうが、その評価が難しいので、M1についてはいくつかの境界条件を変えて計算を行なう。

(9) 入力方式による影響

既に、2使用プログラムの概要で述べたように、今回使用したプログラムでは、固定基盤から加速度入力(LUSH-1)を行なうことを、モデル内の任意節点に外部荷重入力(LUSH-2)を行なうことが可能である。LUSH-1の場合は、振動台又は基盤からの地震入力と考えることができる。この振動方向として、水平及び鉛直の場合について計算を行なった。LUSH-2の場合は、交通荷重あるいは起振機による振動と考えることができる。この振動方向としては、水平及び鉛直が可能であるが、今回は水平方向入力のみとした。

3-3 計 算 条 件

(1) 計 算 CASE

計算条件は、表-1に示すとおり、モデル、入力方式（適用プログラム）、入力方向（水平・鉛直）

表-1 計 算 条 件

モデル	プログラム	土の物性	GWL (M)	入 力 波	入力方向	入力レベル (GAL)	FCT	備 考
M0	LUSH-1	非線型	0.0	地震波	水平	20, 50, 100, 200	0.65	高さ (H=0.5, 1.0, 2.0, 5.0 10.0m) による違い。
	"	"	0.0	"	"	40	"	地震波による違い
	"	"	0.0	"	"	20	0.5 0.7 0.8	FCTによる違い
	"	"	0.0	正弦波 (3~12Hz)	"	20, 50, 100	1.0	
M1	LUSH-1	非線型	0.0	地震波	水平	20, 40, 100	0.65	モデル化法 図-34の(B)に相当
	"	"	4.0	"	"	"	"	
	"	"	0.0	"	"	20, 40, 100	"	モデル化法 図-34の(A)に相当
	"	"	4.0	"	"	"	"	
	"	"	4.0	"	"	20	"	(C)
	"	"	4.0	"	"	"	"	(E)
	"	"	4.0	"	"	"	"	(D)
	"	"	4.0	"	"	"	"	(F)
M2	LUSH-1	非線型	0.0	地震波	水平	20, 40, 100, 200	0.65	モデルM2水平振動
	"	"	1.5	"	"	"	"	
	"	非線型	0.0	地震波	鉛直	20, 40, 100, 200	0.65	モデルM2鉛直振動
	"	"	1.5	"	"	"	"	
	"	非線型	0.0	正弦波 (5~20Hz)	水平	20, 40, 100	0.65	
	"	線型	0.0	地震波	水平	20	0.65	モデルM2線型応答
	"	"	0.0	正弦波 (13, 15, 17Hz)	"	"	1.00	
	LUSH-2	非線型	0.0	地震波	水平	外部荷重F (kg/m) 1028, 4114, 10280	0.65	モデルM2外部加振 非線型応答
	"	"	0.0	正弦波 (8, 12, 14Hz)	"	"	0.65	
	"	線型	0.0	地震波	"	(kg/m) 1028	0.65	モデルM2外部加振 線型応答

モデル	プログラム	土の物性	GWL (M)	入力波	入力方向	入力レベル (GAL)	FCT	備考
M2	LUSH-2	線型	0.0	正弦波 (14, 15, 16Hz)	水平	1028 (kg/m)	1.0	モデルM2' 外部加振線型応答
M2'	LUSH-1	非線型	0.0	地震波	"	20, 40, 100	0.65	モデルM2' 非線型応答
	"	"	0.0	正弦波 (7~25Hz)	"	"	0.65	
	"	線型	0.0	地震波	"	20	0.65	モデルM2' 線型応答
	"	"	0.0	正弦波 (23, 25, 26)	"	"	1.0	
	LUSH-2	非線型	0.0	地震波	"	外部荷重 (kg/m) 515, 2057, 5143	0.65	モデルM2' 外部加振非線型応答
	"	"	0.0	正弦波 (10, 15, 20)	"	"	0.65	
	"	線型	0.0	地震波	"	F = 515kg/m	0.65	モデルM2' 外部加振線型応答
	"	"	0.0	正弦波 (23, 25, 27)	"	"	1.0	
M3	LUSH-1	非線型	0.0	地震波	"	20, 40, 100	0.65	モデルM3非線型応答
	"	"	3.5	"	"	"	"	
M4	LUSH-1	非線型	0.0	"	"	20, 40, 100	"	モデルM4非線型応答
	"	"	3.5	"	"	"	"	
M5	LUSH-1	線型	0.0	地震波	"	20	0.65	モデルM5線型応答
	"	"	0.0	正弦波 (15Hz)	"	"	1.0	
	LUSH-2	"	0.0	地震波	"	F = 1028kg/m	0.65	モデルM5 外部加振線型応答
	"	"	0.0	正弦波 (15Hz)	"	"	1.0	
M5'	LUSH-1	"	0.0	地震波	"	20	0.65	モデルM5' 線型応答
	"	"	0.0	正弦波 (21Hz)	"	"	1.0	
	LUSH-2	"	0.0	地震波	"	F = 515kg/m	0.65	モデルM5' 外部加振線型応答
	"	"	0.0	正弦波 (21Hz)	"	"	1.0	

によってCASEを大別し、その他に土の物性、水位、入力波の種類、入力方向、入力レベル、FCT (p. 3参照)、境界条件、メッシュの寸法等の種々の条件により分けた。なお、各計算CASE又はその集合の主たる目的を表-1中の備考欄に述べた。

(2) 入力波

入力波としては、実地震波の一部分をとり出したもの (1.6~2.3sec) 及び正弦波 (3~10波) を用いた。地震波のほとんどはAkashiと呼ぶものを用い、特に入力地震波の影響を調べる場合のみTsuru-

kawa, Masaki Bridgeと呼ぶ波形を用いた。それぞれの波形は図-6(a)-(c)に示す。

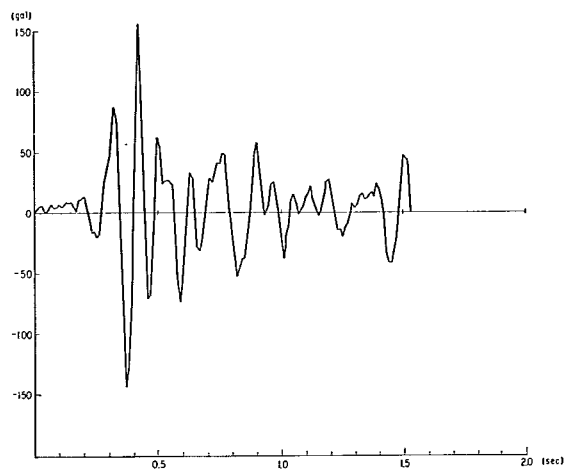


図-6(a) 計算に用いた地震波 (Akashi)

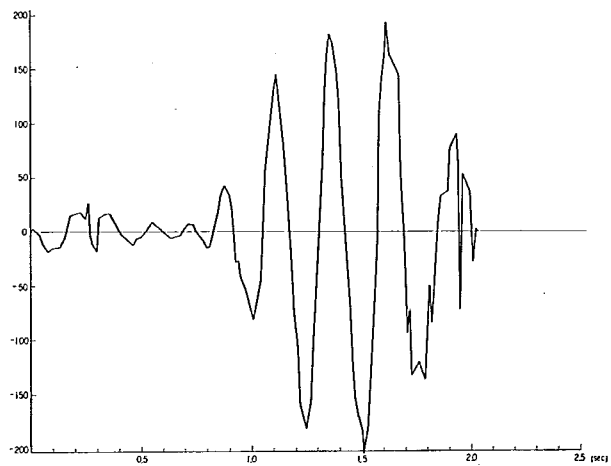


図-6(b) 計算に用いた地震波 (Tsurukawa)

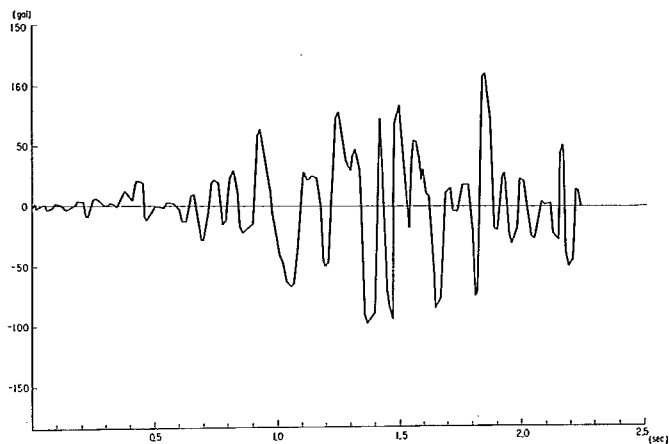


図-6(c) 計算に用いた地震波 (Masaki Bridge)

(3) 物 性

地盤・盛土については、砂を想定した。但し、M5、M5'の地盤上の物体はコンクリートを想定した。
それぞれの物性は次のように与えた。

砂

非線型解析の場合

Richart ら²⁾によれば、丸い粒径の砂について、ひずみ振幅 $\gamma < 10^{-4}$ で

$$G_{\max} = \frac{2630 (2.17 - e)^2}{1 + e} (\sigma'_m)^{0.5} \quad e < 0.8$$

$$(\text{lb/in}^2) \quad (\text{lb/in}^2)$$

$$\text{or } G_{\max} = \frac{31560 (2.17 - e)^2}{1 + e} (\sigma'_m)^{0.5}$$

$$(\text{lb/ft}^2) \quad (\text{lb/ft}^2)$$

$e = 0.7$ として

$$G_{\max} \approx 40100 (\sigma'_m)^{0.5} \quad (\sigma'_m, G_{\max} : \text{lb/ft}^2)$$

$$1g/\text{cm}^3 = 6243 \text{ lb/ft}^3 \text{ ゆゑ、} G_s = 27, e = 0.7, w = 13\% \text{ として}$$

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1+e} = 1.59 (g/\text{cm}^3) = 99.3 \text{ (lb/ft}^3)$$

$$\gamma_{\text{sat}} = \frac{(G_s + e) \gamma_w}{1+e} = 20 (g/\text{cm}^3) = 1248 (\text{lb/ft}^3)$$

$$\gamma' = \gamma_{\text{sat}} - 1 (g/\text{cm}^3) = 1.0 (g/\text{cm}^3) = 624 (\text{lb/ft}^3)$$

$$\gamma_t = \frac{G_s (1+w) \gamma_w}{1+e} = 1.79 (g/\text{cm}^3) = 1120 (\text{lb/ft}^3)$$

となる。

σ'_m は主応力方向を水平及び鉛直として次の簡便式によった。

$$\sigma'_m = \frac{1+2K_0}{3} (\sigma'_v + p_v)$$

σ'_v : 土の重量による土被り圧

p_v : 外圧による土圧

σ'_v , p_v は図-7のようなすべての位置について静的応力解析や応力分布計算式によらず(有効単位体積重量)×(深度)という簡便式によった。

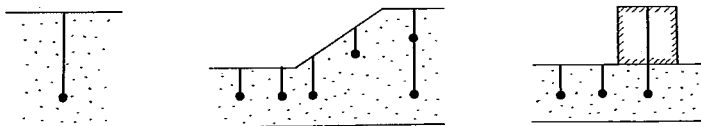


図-7 上載圧の計算説明図

K_0 もすべての位置で次の一定値を用いた。

$$K_0 = 1 - \sin \phi', \quad \phi' = 35^\circ, \quad K_0 = 0.4264$$

これは、剛性率に及ぼす σ'_0 の影響がその平方根に比例するものであり、推定誤差の影響は比較的小さいと考えたためである。なお、振動応答のみならず、安定性をも検討する場合には、動的応力に先立つ静的応力状態が重要な点であり、この場合にはもっと慎重に応力状態を推定しなければならない。このことに関しては、別途報告する。

一般のひずみレベルにおける剛性率 G は Hardin-Drnevich の提案する³⁾ 次式によった。

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + \gamma/\gamma_r} \quad \gamma_r = \frac{\tau_{\max}}{G_{\max}} \quad \dots\dots\dots \text{規準ひずみ (reference strain)}$$

$$\tau_{\max} = \sqrt{\left(\frac{1+K_0}{2} \sin \phi'\right)^2 - \left(\frac{1-K_0}{2}\right)^2} \quad (\sigma'_v + p_v) = 0.4722 \sigma'_m$$

減衰定数 β は次式によった。³⁾

$$\frac{\beta}{\beta_{\max}} = 1 - \frac{G}{G_{\max}}$$

ここに $\beta_{\max}$ はひずみが大いときの減衰定数で通常の計算では 0.333 とした。さらに減衰特性の影響を調べるためにこの $\beta_{\max}$ の値を変えた場合もある。これから図-8 のようにして $G/G_{\max}$ 、 $\beta/\beta_{\max}$ を求めた。

これらの式を用いて $G/G_{\max}$ を計算した例を図-9(a)(b)に示す。

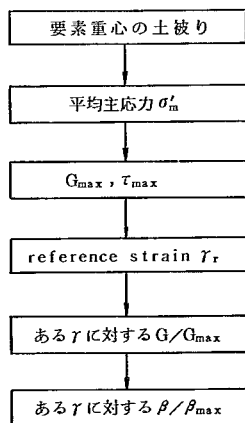


図-8 剛性率及び減衰定数の計算法

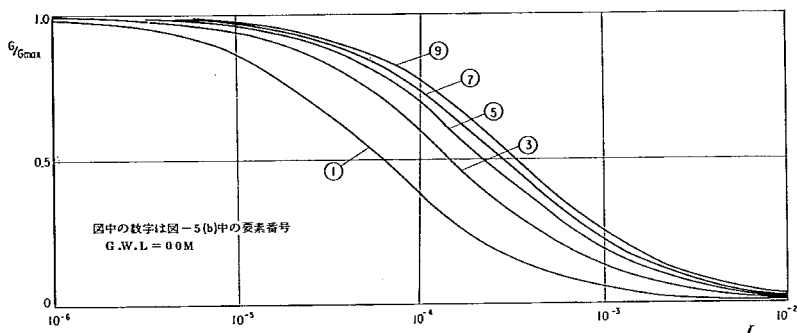


図-9(a) 計算に用いた物性の例 (剛性率) (その1)

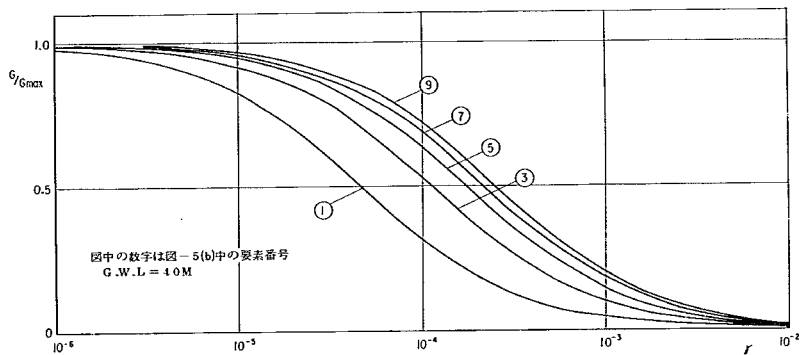


図-9(b) 計算に用いた物性の例 (剛性率) (その2)

線型解析の場合

剛性率、減衰定数は各要素について線型 (一定値) とするが、場所ごとの拘束圧による差は考慮し、各要素について $r = 10^{-6}$ の値を用いた。したがって、

$$\frac{\beta}{\beta_{\max}} = \left(\frac{r/\gamma_r}{1 + r/\gamma_r} \right) r = 10^{-6} \quad \text{とした。今回の計算範囲では } \beta = 0.001 \sim 0.005 \text{ 程度である。}$$

4. 解析結果

4-1 計算結果の評価法

このプログラムにより計算されたOUTPUTされるものは、既に2-3計算結果とそのOUTPUTで述べた。このようにいくつかある計算結果から、それぞれに影響を与えらると思われる因子(1.まえがき参照)の影響度をできるだけ一般的なものとして取り出し評価する方法は必ずしも単純ではない。OUTPUTされる計算結果は、すべて多少の差はあれ、各因子の影響を含んでいるものであるから、それぞれのOUTPUTにより各因子の影響度を見出すことが可能であろう。しかし、そのすべてを行なうことは煩雑であるので、ここでは各影響因子ごとに注目するOUTPUTを適宜変えて結果を述べ、又考察を加える。ここで計算結果を見るときに注目した項目は次のようなものである。

(1) 応答時間過程に注目する場合

- ① 応答変位・加速度の時間過程とその最大値
- ② 応力の最大値

(2) 振動数特性に注目する場合

- ① 振動数応答関数全体
- ② ①における共振振動数(固有振動数)とその振動数における応答倍率

(3) 応答値の分布に注目する場合

- ① 応答変位・加速度又はそれらの最大値の分布
- ② 応力の最大値の分布

この中で、最も多く注目したのは、振動特性である。これは、これまでに実施してきたすべての模型振動実験において、定常正弦波加振により、振動数応答関数を求めているからであり、我々にとってなじみやすいものであるからである。

4-2 モデル(の形状)による影響

今回計算対象としたモデルは、寸法・形状はまちまちであり、この項目を検討する上で必ずしもふさわしいとはいえないが、例えば、M3、M4は地盤及び盛土厚が同じであり(1.5mと2.0m)、振動特性を比較してみることは無意味ではないであろう。図-10に両者の比較例を示す。入力加速度の最大値は2.0GALである。縦軸は振動数ごとの応答倍率である。この図からいえることは、地盤及び盛土厚が同じであっても盛土の形状が異なれば振動特性は変わるということである。この両者のモデルでは、M4の方が相対的に盛土部分の占める割合が大きく、そのため1次共振点がやや低下している。

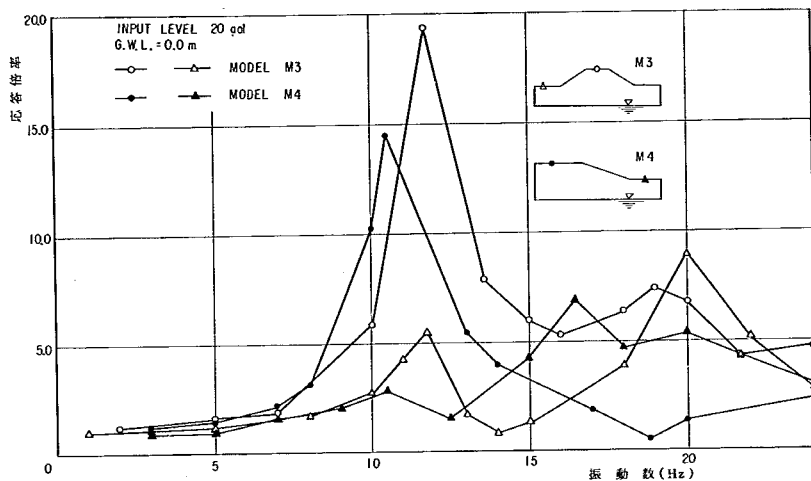


図-10 モデルの形状による振動特性の違い (M3, M4)

4-3 モデルの寸法による影響

モデルM0の層厚Hを0.5~10 mに変えた場合の振動特性の変化を図-11~13に示す。図-11は入力加速度が20 GALの場合の天端の振動数応答関数を示したものである。但し、振動数軸は、それぞれの1次共振振動数 f_r で割って無次元化してある。これにより、1次共振点 f_r での応答倍率 M_r が層厚Hによりかなり異なることになる。図-12、13は、この f_r 及び M_r がHとともにどのように変るかを図示したものである。図-12には、剛性率が拘束圧の $\frac{1}{2}$ 乗に比例する弾性体の場合の $f_r \propto H^{-3/4}$ の関係をこの非線形の場合のH=2 mのところをとるように描いた。この関係式は他のHのところでは入力が大きくなれば精度はやや悪くなるが、全体的にかなりよく一致していると見ることができる。すなわち、ある層厚である入力レベルにおける地盤の固有振動数が分っている場合には、剛性率が比例する拘束圧のべき乗を知ることで、他の層厚の地盤についてその入力レベルに対する地盤の固有振動数を大略推定することができる。これは、地盤が一様線型弾性体の場合は $f_r \propto 1/H$ の関係に相当するものである。

図-13のHと M_r の関係を見て興味深い点は、 M_r がHに対して極小値となる点がある点である。この傾向は、入力加速度が大きいはど著しい。これは、このプログラムが入力波の振動数特性と地盤の固有振動数の相互の関係に依存する有効ひずみを用いているために現れたものであり入力波の振動数特性により変わるものともできるが、あるいは、次のように考えることもできよう。層厚の小さいところでは、平均的な拘束圧が小さいため変形性が大きくなり、増幅率が大きくなる。層厚の大きいところでは、平均的な拘

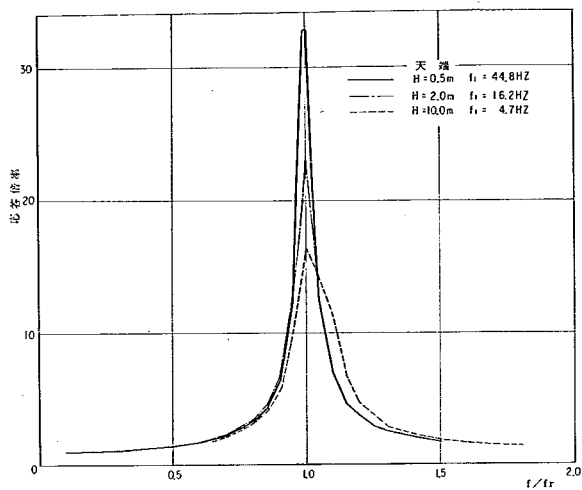


図-11 層厚による振動特性の違い (M0)

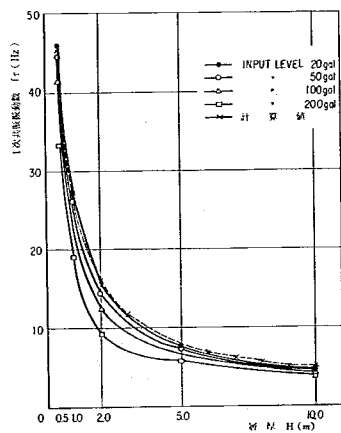


図-12 層厚と1次共振振動数の関係 (M0)

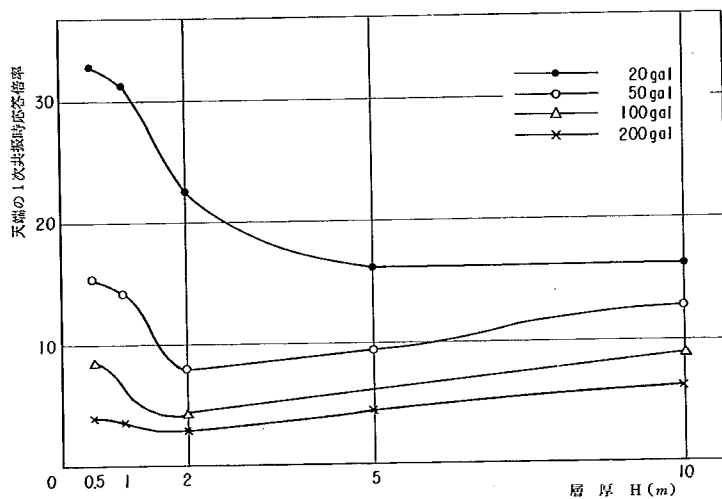


図-13 層厚と1次共振時応答倍率の関係 (M0)

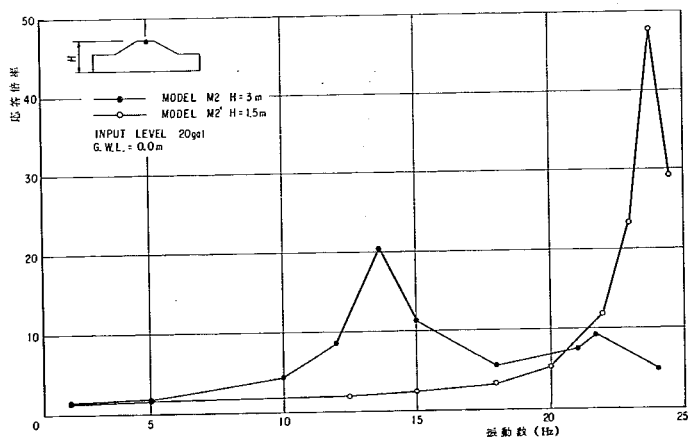


図-14 モデルの寸法による振動数特性の違い (M2、M2')

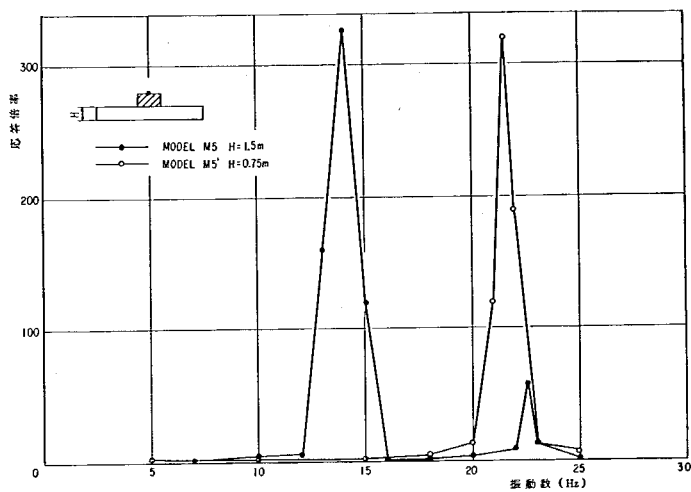


図-15 モデルの寸法による振動数特性の違い (M5、M5')

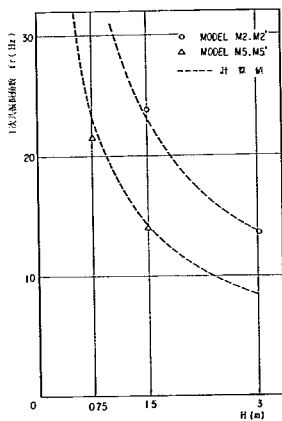


図-16 層厚と1次共振振動数の関係 (M2、M2'; M5、M5')

束圧が大きいために変形性は小さいが、平均的な減衰も小さく増幅率が大きくなる。この結果として、 M_r のHに対する極小値が存在する。

又、M2とM2'、M5とM5'は寸法比が2の盛土・地盤系の例である。この場合の振動特性の変化を図-14、15に示す。

又、先のM0の場合と同様に層厚と1次共振振動数の関係を図-16に示す。層厚HとしてM2、M2'の場合には、地盤+盛土厚、M5、M5'の場合には地盤厚をとった。この場合も、 $f_r \propto H^{-3/4}$ なる関係式を描いたが、推定精度はよいといえよう。

4-4 水位条件による影響

モデルが、不飽和湿潤の場合と、部分的又は全体的に飽和水浸の場合の振動特性の変化を図-17～20に示す。これらの図から、どのモデルについても、水浸している場合に1次共振点 f_r やその点での応答倍率 M_r 等の低下が見られる。この低下の割合はモデル、水浸条件、入力レベル等により異なるが今回計算した範囲では、 f_r で11～18%、 M_r で2～42%であり、 M_r の変動の幅の方が大きい。共振点の低下の原因は、飽和による単位体積重量の増加及び拘束圧の低下による剛性率の低下によって、せん断波速度が低下することで説明できる。応答倍率の低下は、次のように考えられる。拘束圧の低下により、規準ひずみ（これは拘束圧の $1/2$ 乗に比例する）が低下し、同じひずみの大きさに対して、大きい減衰定数

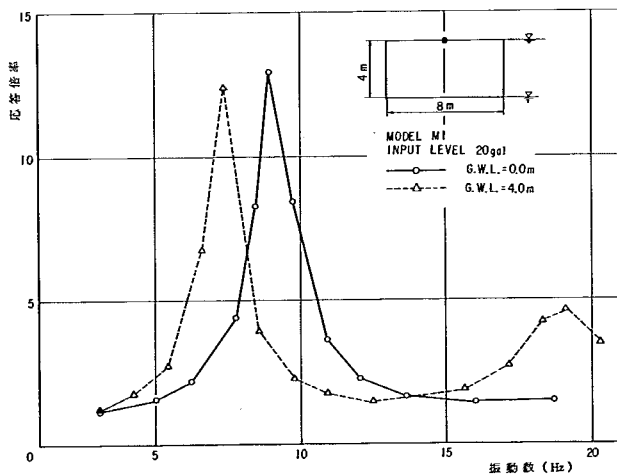


図-17 水位による振動特性の違い (M1)

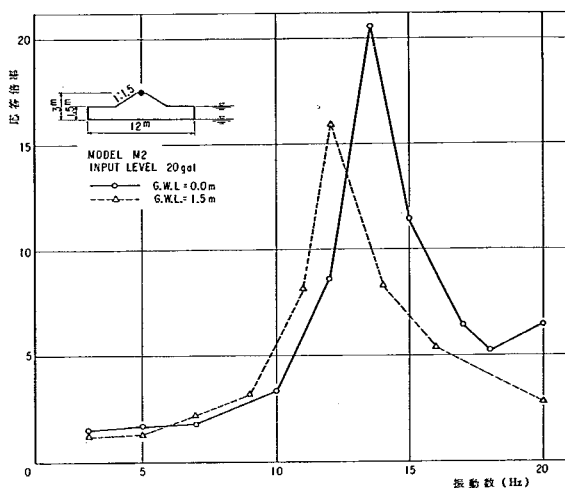


図-18 水位による振動特性の違い (M2)

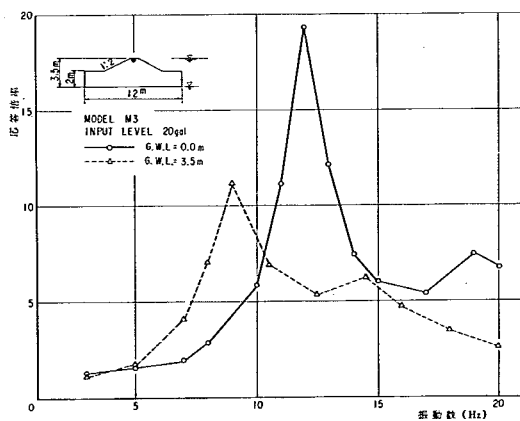


図-19 水位による振動特性の違い (M3)

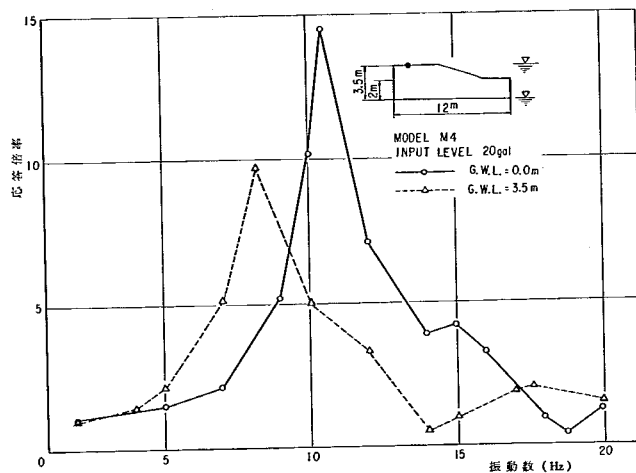


図-20 水位による振動特性の違い (M4)

を与える。したがって、応答倍率が低下することになる。

4-5 物性による影響

今回の計算で物性による影響として調べたものは、非線型で減衰のひずみ依存性 (BCURV) は同じで減衰定数の最大値 β_{max} を変えたものと、線型 1 種である。この場合の線型物性は、2-3 で述べたように今回の計算に用いた非線型物性の内、 $\gamma = 10^{-6}$ のところでの値を用いている。この場合は、1 次共振振動数 f_r とその点での応答倍率 M_r が β_{max} とともにどのように変るかを図-21、22 に示す。これから、 f_r は減衰にほとんど依存しないが M_r は減衰に大きく依存し、減衰定数の設定の重要さが分る。

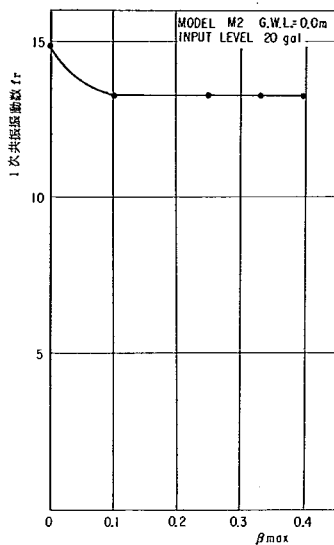


図-21 減衰定数による1次共振振動数の変化 (M2)

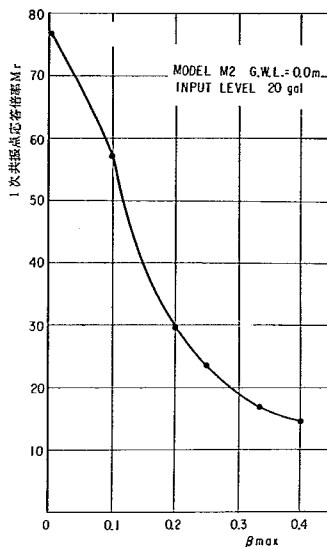


図-22 減衰定数による1次共振応答倍率の変化 (M2)

4-6 入力加速度のレベルによる影響

入力レベルによる振動数特性の変化を示す例を図-23~26に示す。当然のことではあるが、軟化性の非線型特性を考慮する場合には、入力加速度が増加することにより共振振動数の低下及び振動数特性の平坦化が生ずる。

この入力レベルに対する1次共振振動数 f_r 及び応答倍率 M_r の関係を図-27に示す。このように、入力レベルに対する低減の割合は応答倍率において著しい。

これまでのところ、計算によって得られる振動特性の内、振動応答倍率に関する特性を主として1次共振点 f_r における振動応答倍率 M_r で見てきたが、この値自体の意味するところは、その1次共振振動数の定常波が入力されたときに励起される最大応答倍率が M_r であるということであり、現実の地震波が種々の振動数成分を有する不規則波であることを考慮するとこの M_r は地震波に対して現実を生ずる応答倍率に対しては過大なものとなっているであろう。次にこの1次共振点での応答倍率 M_r の代りに、応答過程の最大加速度 a_t の入力加速度のレベル(最大値) a_g に対する倍率 a_t/a_g を a_g に対してまとめたものが図-28である。さらに、この a_t/a_g をこれまで用いた M_r と比較したものが図-29である。これらの図から、現実的な応答倍率 a_t/a_g も入力加速度 a_g の増加につれて低下することが分る。但しこの低下の割合は、 M_r 程著しいものではない。逆にいえば、入力レベルが小さくとも、 a_t/a_g は M_r ほど大きくならない。 M_r 対

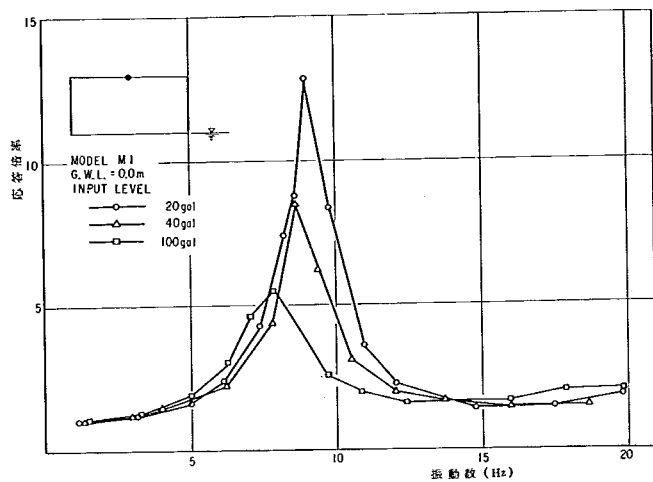


図-23(a) 入力レベルによる振動特性の変化 (M1)

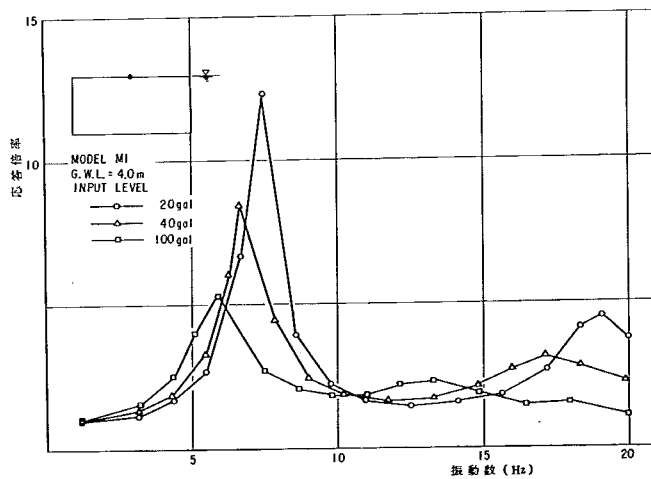


図-23(b) 入力レベルによる振動特性の変化 (M1)

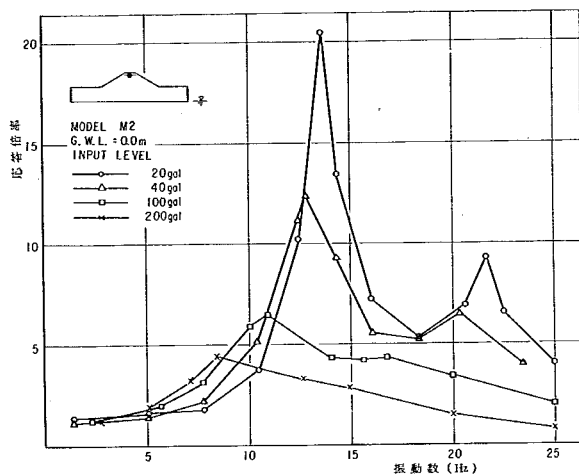


図-24(a) 入力レベルによる振動特性の変化 (M2)

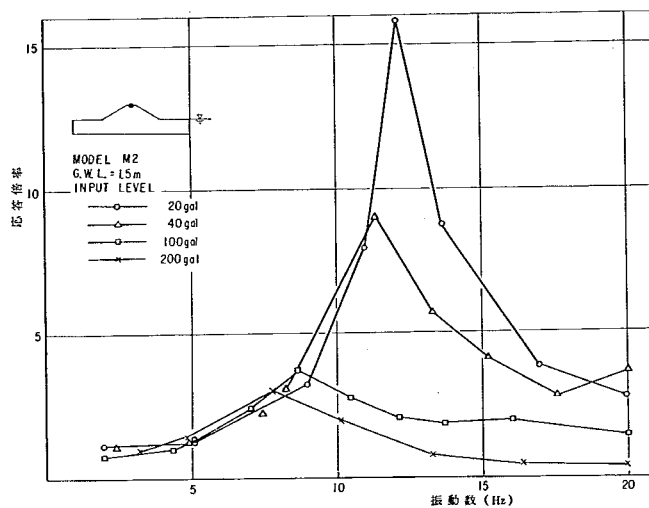


図-24(b) 入力レベルによる振動特性の変化 (M2)

441

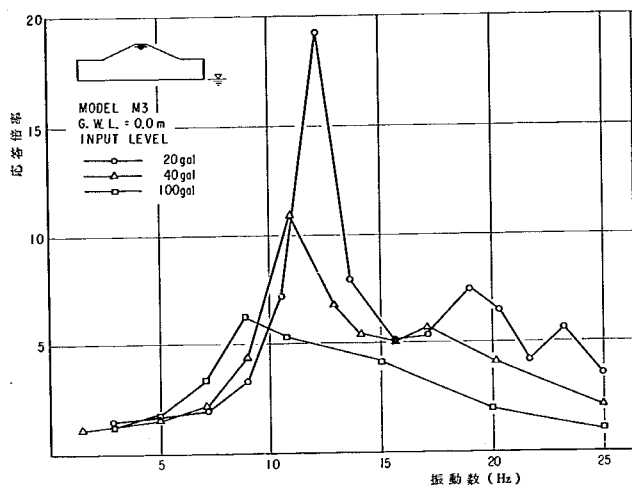


図-25(a) 入力レベルによる振動特性の変化 (M3)

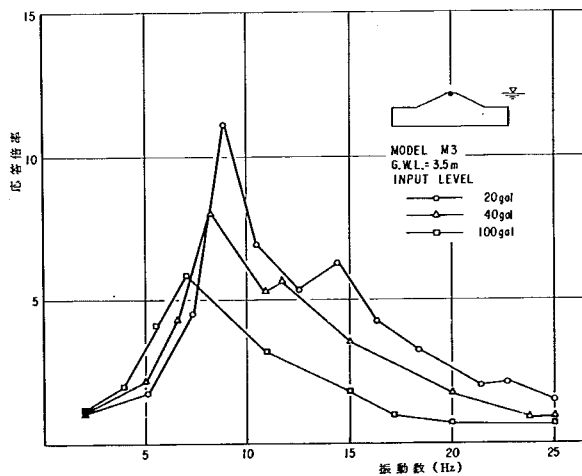


図-25(b) 入力レベルによる振動特性の変化 (M3)

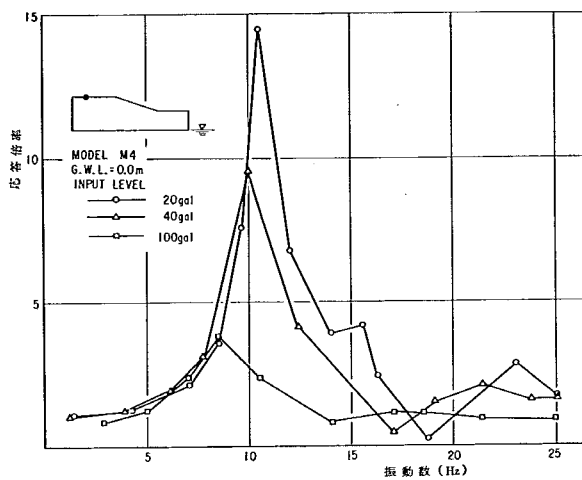


図-26(a) 入力レベルによる振動特性の変化 (M4)

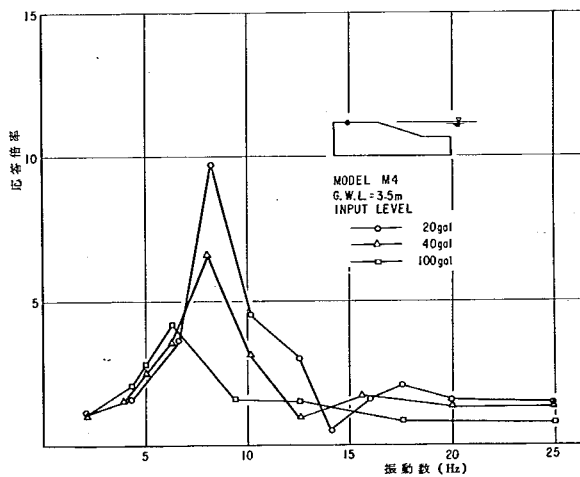


図-26(b) 入力レベルによる振動特性の変化 (M4)

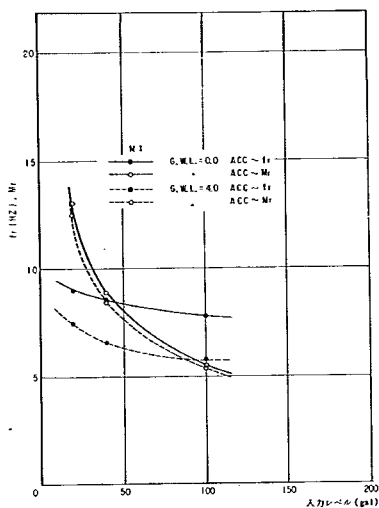


図-27(a) 入力レベルによる1次共振振動数及び応答倍率の変化(M1)

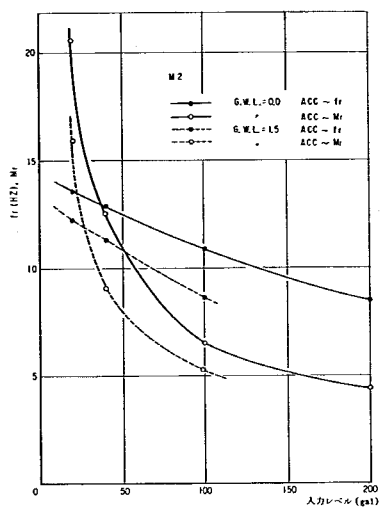


図-27(b) 入力レベルによる1次共振振動数及び応答倍率の変化(M2)

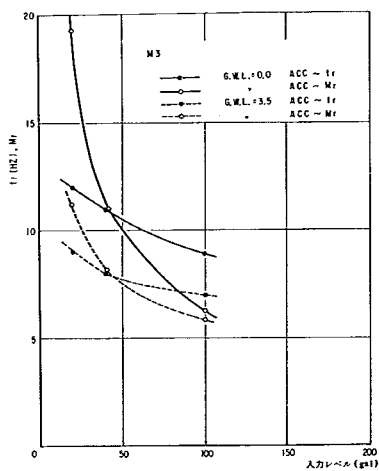


図-27(c) 入力レベルによる1次共振振動数及び応答倍率の変化(M3)

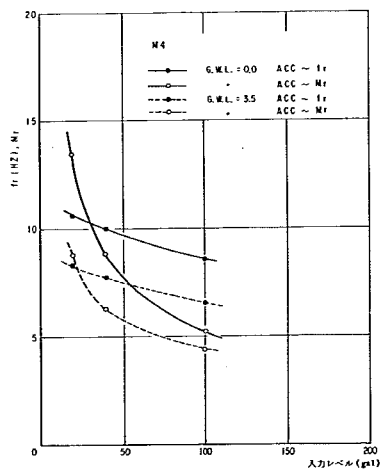


図-27(d) 入力レベルによる1次共振振動数及び応答倍率の変化(M4)

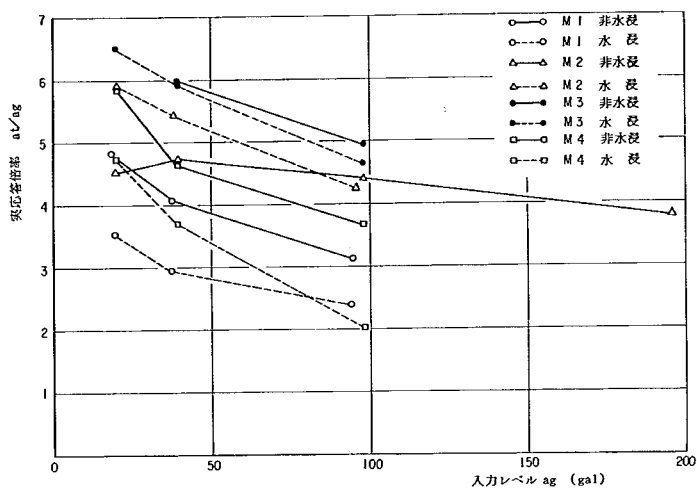


図-28 入力レベルに対する実応答倍率の変化(M1、M2、M3、M4)

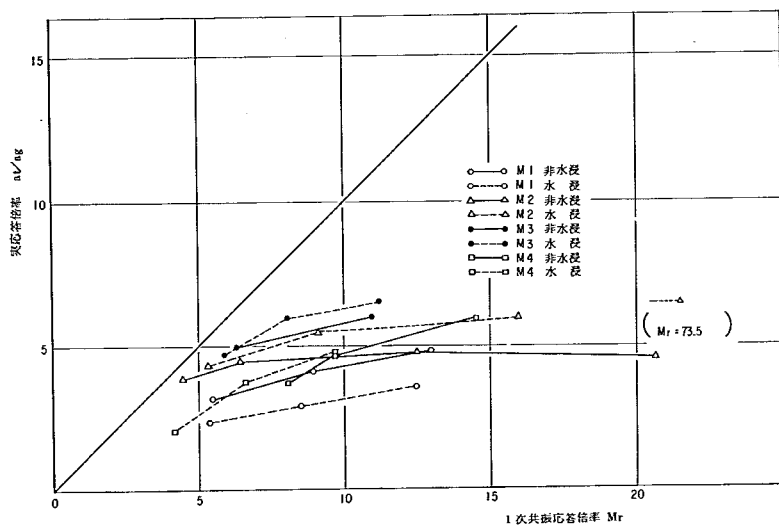


図-29 1次共振応答倍率と実応答倍率の関係(M1、M2、M3、M4)

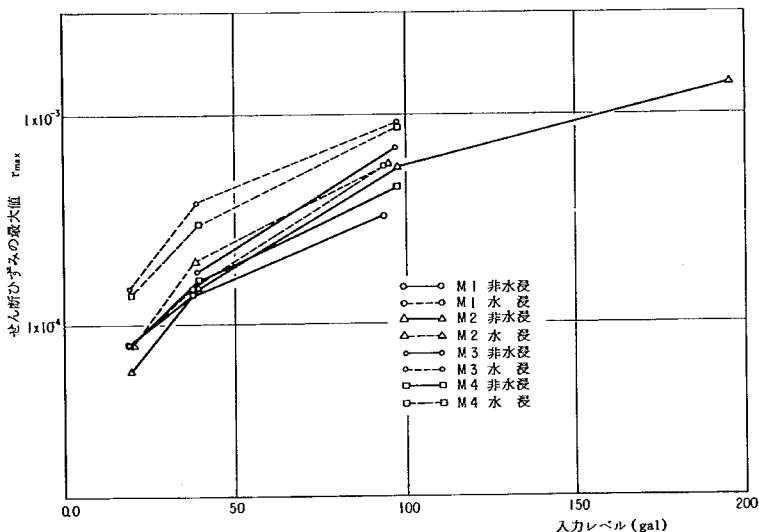


図-30 入力レベルによるせん断ひずみの変化(M1、M2、M3、M4)

する相対関係から、 M_r が大きくとも、 a_t/a_g には一定のある上限（この場合 6.5 程度）があることが推定される。これは、 M_r が主として材料の減衰特性から定まるのに比べ、 a_t/a_g は減衰特性に加えて系の固有振動数と入力波の特性（振動数成分とそれぞれの繰返し回数・連続性）によるためである。極端な場合、非常に減衰の小さい線型の場合、 $M_r = 73.5$ に対して $a_t/a_g = 6.4$ である。このように、定常応答時の値ともいふべき M_r は系の減衰特性を推定することには有意義であろうが、現実の地震時に生ずる倍率と考えることは不合理である。

次に、入力レベルと共にモデル内のせん断ひずみの最大値がどのように変化するかを図-30 に示す。この図から、入力加速度が 20 gal でせん断ひずみは 10^{-4} 程度、100 gal で 10^{-3} をやや下回ることがわかる。せん断ひずみが 10^{-4} 程度では、物性に非線型性が若干現われる領域であり、入力加速度が 20 gal 程度であっても物性の非線型性の合理的な評価が必要である。

4-7 入力波による影響

振動数特性に及ぼす入力波の波形の影響を考察するために、入力波としての地震波の種類を変えたものと、振動数応答関数を正弦波から求めたものを計算した。この結果を、図-31~33 に示す。正弦波に対する振

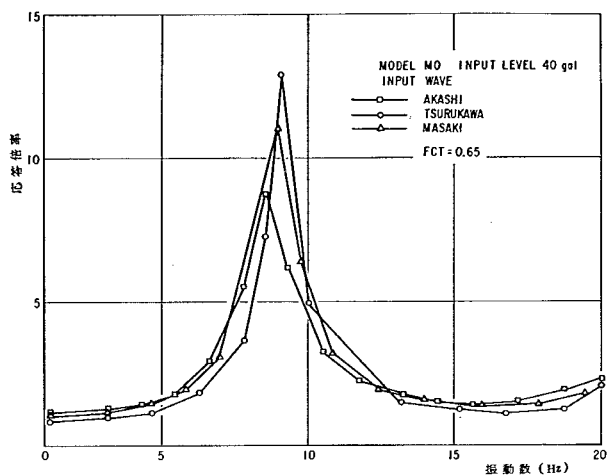


図-31(a) 入力波による振動特性の変化 (M0)

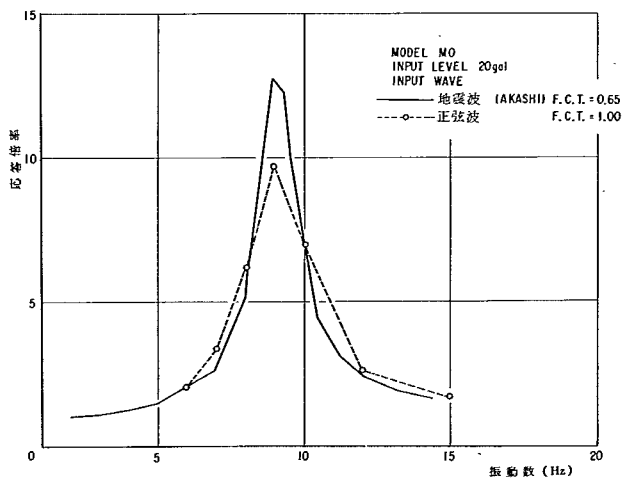


図-31(b) 入力波による振動特性の変化 (M0)

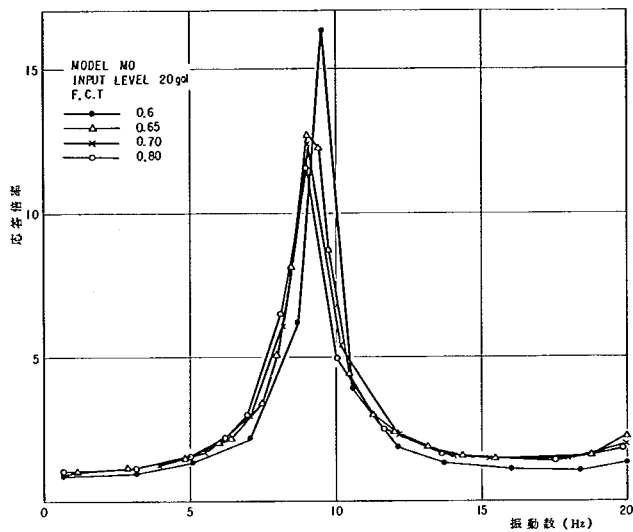


図-31(c) 入力波による振動特性の変化 (M0)

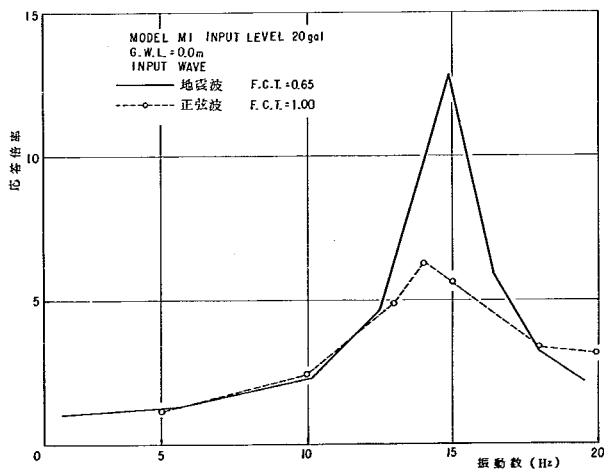


図-32 入力波による振動特性の変化 (M1)

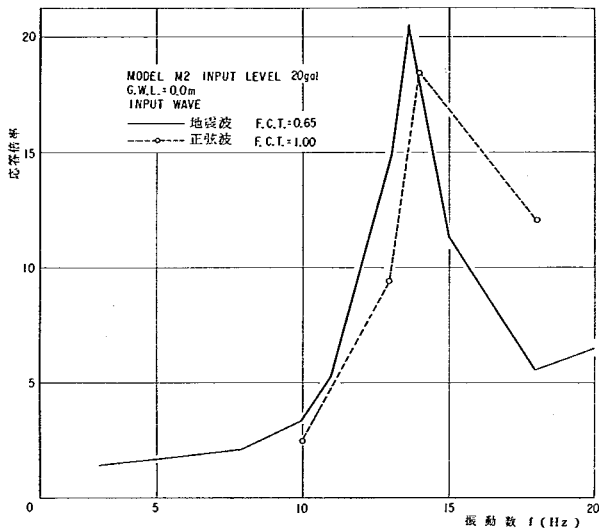


図-33 入力波による振動特性の変化

動数応答関数は、応答値の振幅を用いて計算した。これらの結果は、最大せん断ひずみを有効ひずみに換算する係数FCTにも依存するので、計算に用いたFCTの値を図中に記入した。これらの図から次のことがわかる。

- (1) FCTが同じ場合、地震波の種類によって得られる振動数応答関数は異なるが、その差は比較的小さい。FCTの設定は、入力加速度の最大値を変えることも共通するものと思われたが、振動特性の変化に与える影響はそれほど大きくない。
- (2) 正弦波を用いて求めた振動数応答関数は、地震波で求めたものよりかなり平坦になることがあるが、これは計算振動数間隔が粗いことにもよるかもしれない。

4-8 メッシュの分割法及び境界条件による影響

対象モデルをメッシュに分割し、境界条件を設定し計算モデルを作成する方法が計算結果にどのように影響するかをモデルM1について調べた。検討したモデル化法を図-34に示す。それぞれについて、これまでのように振動数応答関数を図-35に示す。これらの結果から次のようにいえよう。まず、振動数応答関数

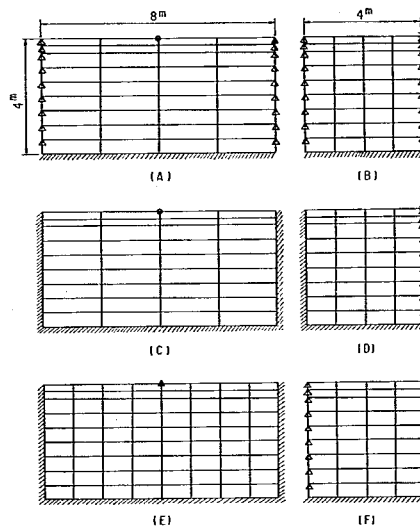


図-34 検討したメッシュの分割法及び境界条件(M1)

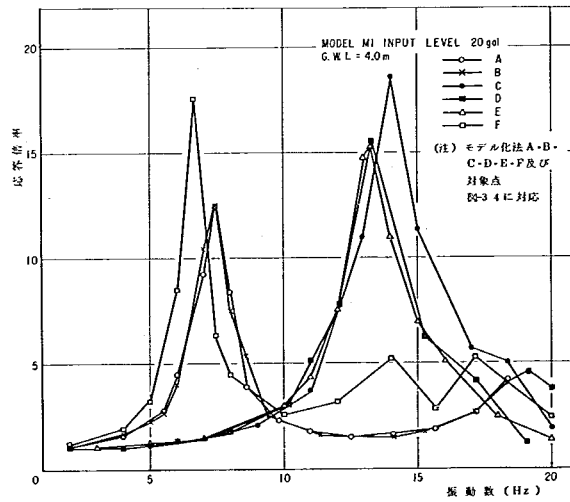


図-35 メッシュ分割法及び境界条件による振動特性の違い(M1)

450

が2つのグループに大別されるが、共振振動数の低いグループは側面に完全拘束部がない場合 (A、B、F) で、共振振動数の高いグループは側面に完全拘束部がある場合 (C、D、E) であり、側面拘束により共振振動数が高くなることで理解できる。それぞれのグループ内の差異を見るとA、Bは対称軸上の点の振動数応答関数を見る限り、全く一致している。これはAにおいて対称軸が振動の鉛直成分に対する節となり結果的に鉛直振動成分がないことから理解できる。一方、B、Fの違いは下の右境界において鉛直方向の自由度があるためである。したがって、対称モデルについて水平振動に対して計算をする場合、対称軸の鉛直自由度をゼロとし片側だけをモデル化してもよい。次に側面拘束のC、D、Eを見るとD、Eは全く一致しているが、Cは若干異なっている。先の例から推定すれば、この三者は全く一致してもよいはずであるが、そうはなっていない。これはメッシュの大き

さに起因すると考えられる。Cは側面拘束がある場合のモデル化としてはメッシュが大きすぎて自由度が少ないと思われる。これが、A、Bの場合には目立たなかった点である。又、端部からの水平距離Lにより共振点の応答倍率がどのように変るかを図-36に示す。A、Bの場合、当然のことながら境界からの距離Lによる応答倍率の違いはない。したがってモデルM0で代用することが可能である。C、D、E、Fは、いずれも境界から離れるに従って鉛直方向の自由度が増し、それにつれ水平応答倍率も増加している。

4-9 振動数応答関数の場所的分布について

これまでの振動数応答関数は主として、振動が大きくなると思われる天端で見えてきたが、次に振動数応答関数が場所的にどのように異なるかを調べる。図-37にモデルM2についていくつかの点での振動数応答関数、図-38に振動数応答関数の分布を示す。図-37により、一つの系の中でも場所により共振点等は異なることがわかる。この場合天端の1次共振点は地盤自体の1次共振点よりも低いのは当然であるが、この場合のように盛土と地盤とが連成振動する場合には、盛土の共振により地盤部に若干の共振を引起し、それが見かけ上地盤の1次共振になる。そして、地盤自体の1次共振点が系として見たときの2次共振点となる。

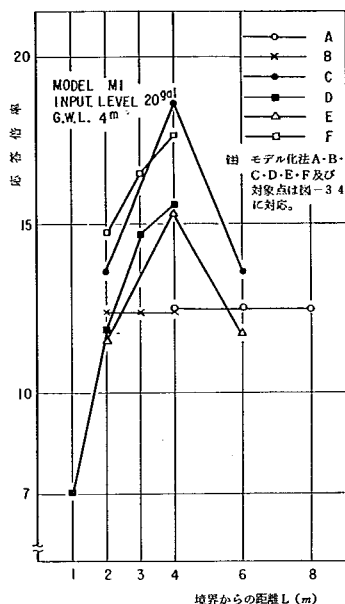


図-36 境界からの距離による振動特性の変化

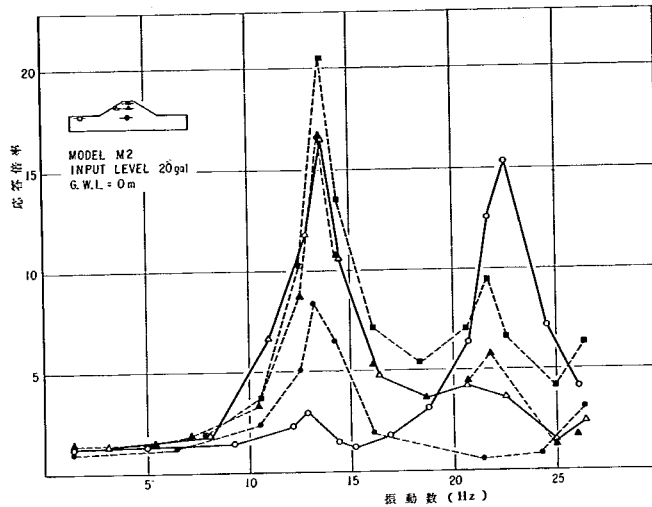


図-37 振動特性の場所による違い (M2)

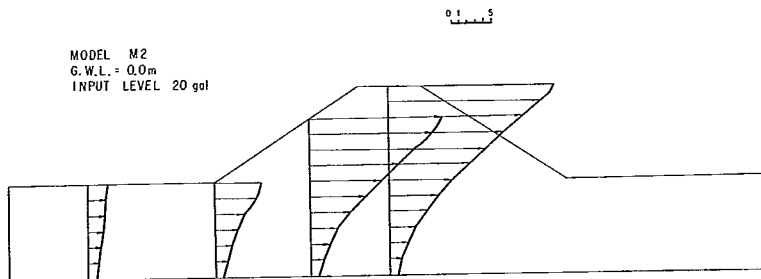


図-38 1次共振応答倍率の分布 (M2)

その結果として、地盤の応答倍率は一見、2次共振点の方が大きいことになる。同じ高さの点の振動数特性を見ると地盤より上部の盛土中央とのり面部とではほとんど変わらないが、地盤より下では先に述べたように全く異なった特性を示している。次に図-38により応答倍率は浅部で著しく大きくなるが、その増大の仕方は浅いところで著しい。これは、拘束圧減少により剛性が低下するためである。

4-10 応答加速度の分布について

図-38に対応する例で、応答加速度の場所的分布を図-39に示す。この場合も、同じ高さであっても盛土下と地盤部とでは、応答加速度が異なること及び浅部で加速度の増加率が大いことは振動数応答関数で見たことと同様である。

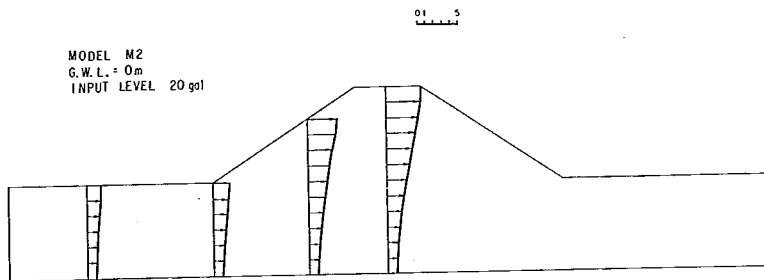


図-39 実応答倍率の分布 (M2)

4-11 応力の分布について

前と同じモデルについて、最大せん断応力の分布を図-40に示す。この図により、せん断応力は深いところほど大きい、深さが増すにつれてその増加の割合は小さい。

砂地盤の液状化解析を行なう場合に、動的水平せん断応力と有効上載圧の応力比を求めることがよく行なわれるが、ここでも図-40についてそのような応力比をとってみると図-41のようになる。したがって地下水位以下でこの応力比が大きい順序はのり先から離れた地盤、のり先に近い地盤、盛土下地盤となり、液状化の生ずる可能性は盛土から離れたところから生ずる可能性が高いことを示している。

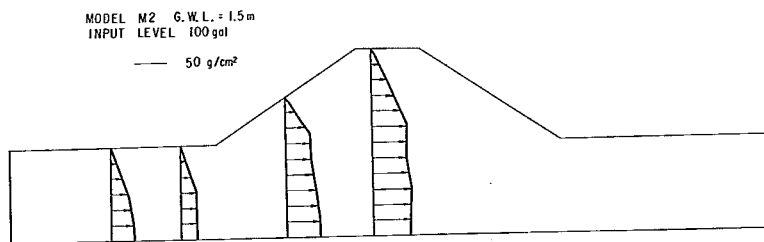


図-40 最大せん断応力の分布 (M2)

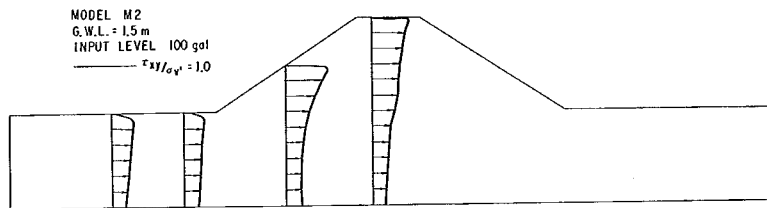


図-41 せん断応力・有効上載圧比の分布 (M2)

4-12 水平加振により引起される鉛直振動

以上水平加振に対して、水平振動の振動応答関数、応答倍率等に注目してきたが、最後に水平加振時に鉛直振動がどの程度引起されるかを調べたものが図-42である。この場合、図-29のように入力加速度の最大値 a_g に対して注目点の鉛直加速度の最大値 a_v がどの程度になるかを示している。注目した点の位置は図中に示したように、鉛直変位を拘束した境界からできるだけ離れたところとしている。この場合、図-29

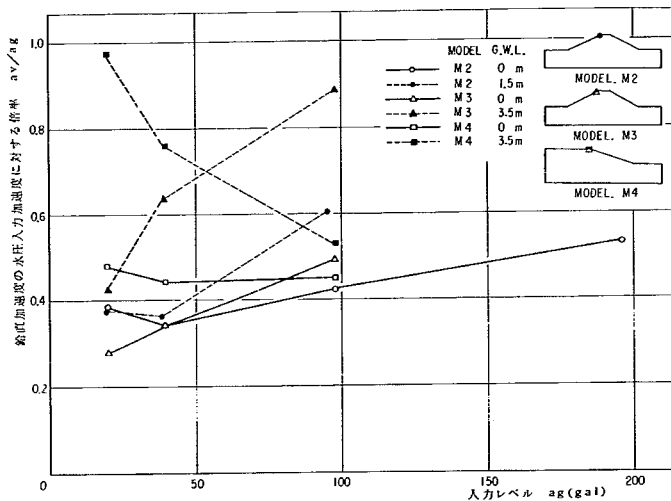


図-42 水平加振による鉛直振動 (M2、M3、M4)

とは異なり、鉛直加速度の応答倍率は入力レベルとともに必ずしも一様に低下傾向を示さなかった。水平振動によって励起される鉛直振動は、モデル、入力レベルによって異なるが、今回の計算条件の範囲内で大略基盤の水平振動に対する 0.3~1 倍程度とかなり大きな値を示している。

4-13 鉛直加振の場合

基盤から鉛直加振を行なった場合の振動数応答関数の例を図-43に示す。この図を水平加振の場合の図-14と比較して顕著なことは、共振点が約 1.8 倍、その点での応答倍率が 2.9 倍高くなっていることである。水平加振の場合、系には水平せん断振動が卓越するのに反し、鉛直加振の場合、系には縦振動が卓越することを考えれば、共振点が高くなる点は当然である。又、鉛直加振により生ずるひずみの最大値を調べてみると 10^{-5} のオーダーであり、水平加振の場合の図-27と比べて、鉛直加振により生ずるせん断ひずみが水平振動の場合よりはるかに小さいことがわかる。したがって、鉛直加振の場合に応答倍率が高くなる点が理解できる。又、この場合の最大せん断応力の分布は図-44に示すとおりであり、水平振動の場合の図-40と比べてはるかに小さいことが分る。なお、動的せん断応力が比較的大きくなるのは盛土のり面の下部の地盤である。

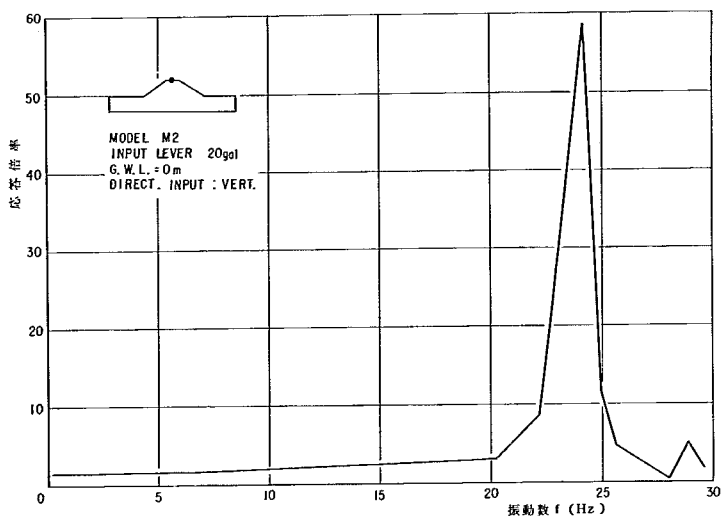


図-43 鉛直加振の場合の振動特性 (M2)

MODEL M2
G.W.L. = 1.5m
INPUT LEVEL 100 gal
VERT

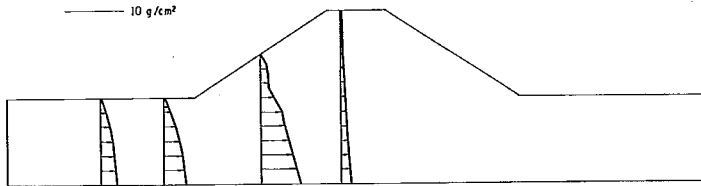


図-44 鉛直加振の場合の最大せん断応力の分布 (M2)

4-14 外部荷重が作用する場合

外部荷重として、天端中央に水平荷重が作用した場合をLUSH-2により検討した。この場合、平面ひずみとして解析を行なっているので、外部荷重も奥行方向に様に荷重が作用することになる。この様子を図-45に示す。この荷重の最大値 F_{max} がどの程度のものであるかは、盛土部分の重量 W に対する

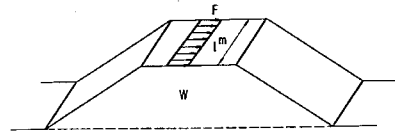


図-45 外部荷重の作用状態説明図

比で評価することができよう。加速度の最大値の分布の例を図-46に示す。この例により、外部荷重を作用させた場合には、その影響は作用点の極く近傍のみであることがわかる。この場合生ずるせん断ひずみは作用点の付近で約5%と非常に大きいものであるがそのために減衰が大きく周辺にその影響が伝わらないこ

MODEL M2
 $F_{max} = 1.028$
 $W = 8.746$
 $F_{max}/W = 0.1174$

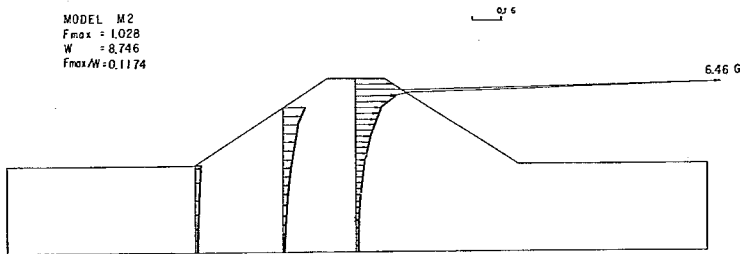


図-46 外部荷重が作用した場合の加速度分布 (M2)

とになる。

4-15 解析結果のまとめ

以上の計算結果から明らかにされたことは次のような事項である。

- (1) 盛土高が同じであってもその形状により振動特性はかなり変る。
- (2) モデルの寸法により振動特性は変る。これには、拘束圧の変化に伴う剛性率、減衰定数の変化による影響が1つの原因として考えられる。
- (3) 水位上昇により共振振動数は若干低下する。応答倍率も低下するが、その低下の程度は幅広い。これは、水浸による剛性率の低下、規準ひずみの低下が原因である。
- (4) 減衰定数の大きさにより共振点はほとんど影響を受けないが、応答倍率は大きく影響される。
- (5) 非線型物性を考慮することにより、入力加速度の大きさが増加するにつれ、振動数特性は低振動数領域に移動し平坦になる。
- (6) 地震波に対して生ずる実応答倍率は、共振点での応答倍率よりかなり小さい。この傾向は、特に入力加速度が小さいときに著しい。
- (7) 地震波に対する有効ひずみの概念を用いて求めた振動数応答関数と正弦波に対する応答から逐時求めた振動数応答関数とはかなり異なり、後者の方がかなり小さくなる。
- (8) 対称形モデルに水平加振をする場合、対称軸上で鉛直方向固定した片側モデルで計算してよい。
- (9) 盛土・地盤系の場合、振動数応答関数等の振動特性は盛土部では同一高さにおいてはほぼ同一であるが、地盤部ではかなり異なる。
- (10) 水平振動により誘起される鉛直加速度はかなり大きく、入力水平振動の大きさに対して0.3~1倍程度となることがある。
- (11) 鉛直加振に対して生ずるひずみ、応力は水平加振の場合に比べはるかに小さく、今回の計算例では1次共振点は1.8倍、応答倍率は2.9倍となった。
- (12) 外部加振の場合、その影響は作用点近傍の局部に留まる。

5. 振動実験結果との比較

5-1 振動実験と計算の条件の違い

以上の解析の対象としたモデルのほとんどは、既に述べたように我々がこれまでに実施してきた模型振動実験のモデルになぞらえて定めたものである。ここで、これまでの計算結果を実験結果と若干比較してみた。実験時に計測・整理した項目は種々あるが、今回の解析結果と直ちに比較できるものは、加速度に関するもので、小入力ときの振動数応答曲線及び大入力ときの加速度分布である。

振動数応答曲線を比較する場合の問題点として次のような点があげられる。

(I) 実験上の問題点

- (1) 振動数応答曲線を求めるときの実験台加速度が振動数ごとに一定でない。
- (2) 加速度波形は必ずしも基本振動数のきれいな正弦波ではなく、一般には基本振動数以外の高い振動数成分を含んだものとなっている。データの整理法としては、記録波形から目分量で高振動数成分をカットするか、あるいはローパスフィルターにより基本振動数の約 1.5 倍以上の振動数成分をカットする方法をとった。

(II) 計算上の問題点

- (1) 実験モデルは土槽前後面の壁の影響のために厳密には 3 次元の振動をしていることになるが、解析計算に用いたプログラムは平面ひずみ状態について適用されるものである。
- (2) 土槽の端面を境界条件としてとりこむときの拘束状態の評価法。
- (3) 土の動的特性の推定法

大入力ときの加速度分布についても両者に存在する基本的な問題点は同じであり、小入力の振動数応答曲線の一致度がよくなれば、大入力ときにも適合性は高くなると考えられる。

以上のように、実験条件・計算条件の間にはいくつかの差異があるが、このような計算手法が、このような盛土・地盤系の振動性状を解析する上で、どの程度の近似解を与えるか、又、結果に差異があるとすればどこにその原因があるかを考えてみるために、実験結果及び計算結果を比較してみる必要がある。

5-2 考察

まず、モデル M1、M2、M3、M4 について、実験及び計算により振動数特性を求めた結果を図-47~50 に示す。この場合、計算による振動数特性は、地震波応答に対して $FCT=0.65$ を用いて計算したものである。この地震入力の大きさは実験加速度に近い値としている。

これらの図から顕著なことは次のとおりである。

- ① 一般に 1 次共振振動数は実験値の方がかなり高い。
- ② 1 次共振振動での応答倍率は、浅いところで実測値の増大が著しい。
- ③ 表面より 1 m 下の測点では、計算値の応答倍率の方が高い。

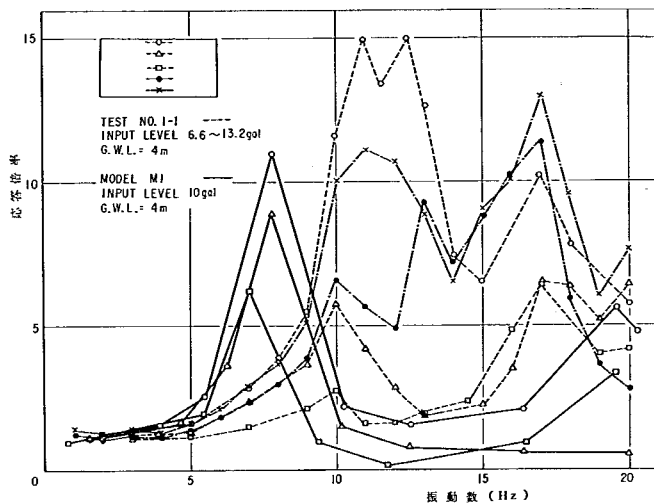


図-47 実験及び計算による振動特性の比較 (M1)

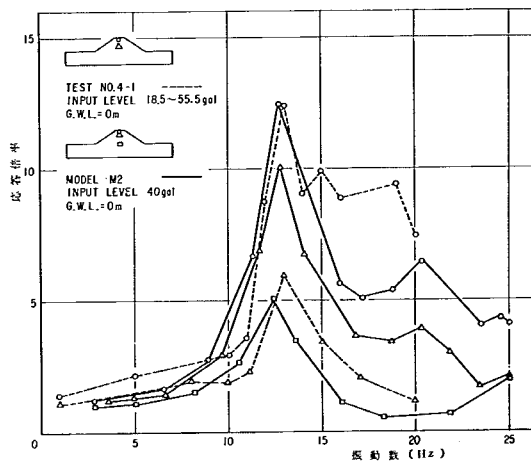


図-48 実験及び計算による振動特性の比較 (M2)

449

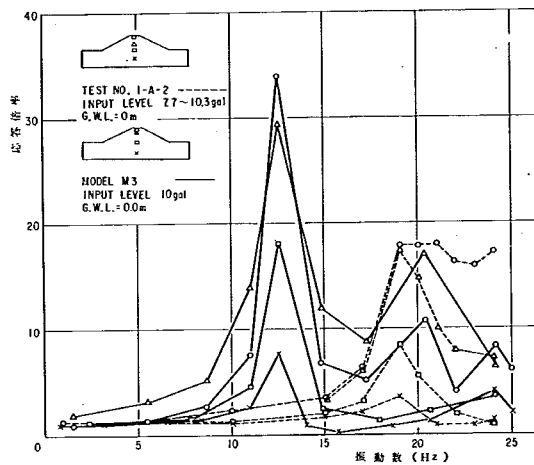


図-49 実験及び計算による振動特性の比較 (M3)

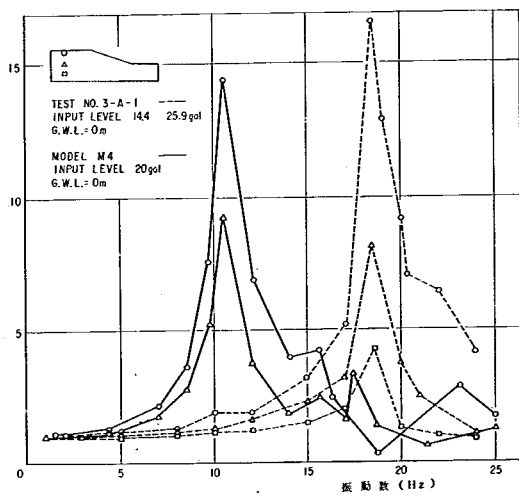


図-50 実験及び振動特性の比較 (M4)

- ④ 浅いところで1次共振振動数より高い振動数のところでの応答倍率は、実測では計算値ほど著しく低下しない。

これらの差異を生じた原因は先に比較上の問題点としてあげたが、今回それらを詳細に検討することができなかった。ここでは、計算結果に対して影響する要因をいくつかとりあげ、それらがこの振動数応答曲線をどのように変化させる可能性があるかを定性的に述べるに留める。

(1) 振動数応答曲線の求め方の違い

p.34で述べたように実験時のように正弦波入力に対する応答から振動数応答曲線を求めると曲線は平坦になる。

(2) 実験時に存在する前後面の壁の影響

畑中は土堰堤の振動に関する3次元的考察として、矩形状地山に両側面及び底面が固定された三角形断面の盛土を粘弾性挙動を示すせん断振動をするものとして自由振動解を求め、その3次元的に考えた場合の固有周期が2次元的に考えた場合の固有周期より高くなることを示した。⁴⁾ このように、同一の剛性を有する材料からなる盛土・地盤系であっても、それを囲む壁の拘束による影響のために固有周期等の振動特性は変わる。

前後面の壁の存在により完全に2次的な場合よりも固有周期が短くなる、すなわち見かけの剛性が増加することは明らかであるが、もう一度、盛土・地盤系が土槽によって囲まれていることが2次元的挙動と異なったものになっている影響を分析すると次のように考えられる。

- ① 壁の拘束により、振動系として3次元になること。このことによる影響は材料の物性が線型であっても生ずる。
- ② ①の結果として、2次元的な場合と3次元的な場合とで生ずるひずみの大きさが変わる。このことにより材料の物性がひずみ依存性のものであれば、発揮される剛性・減衰定数が異なり、振動特性が変わる。

畑中によってとり扱われた3次元的影響は、明らかに①のみであり、②については厳密には本格的な3次元振動解析が必要である。これについては別の機会に譲るとして、ここでは次のように定性的な考察に留めた。

モデルとしては、我々が既に若干の考察を行なった⁵⁾図-51のような線型粘弾性体(Voigt体)の水平地盤の特別な例として加振方向長さ $a = \infty$ の場合を考え、物性が同一であった場合に(線型の範囲内で)、共振振動数や応答倍率が前後面の壁により(c により)どのように変わるかを求める。

一般に $c \neq 0$ の場合の1次共振振動数を f_2 、

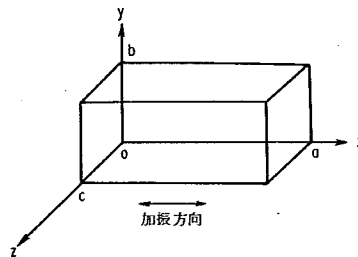


図-51

そのときの応答倍率を M_2 , $c = \infty$ の場合のそれぞれを f_1 , M_1 とする。近似式として次式を得る。

$$f_2 = \frac{V_s}{4b} \sqrt{1 + 4 \left(\frac{b}{c} \right)^2}$$

$$M_2 = \sqrt{\left(\frac{8}{\pi^2 h_{00}} \right)^2 + 1}$$

$$f_1 = \frac{V_s}{4b}$$

$$M_1 = \sqrt{\left(\frac{2}{\pi h_0} \right)^2 + 1}$$

ここに

V_s : セン断波速度 $= \sqrt{G/\rho}$, G : 剛性率 , ρ : 密度 , h_{00} , h_0 : 減衰定数 (サフィックス 00 , 0 は元来減衰定数が振動の次数に依存するところから来ている) この場合

$$h_{00} = h_0 = \frac{\eta}{2} , \quad \eta = \frac{1}{V_s} \sqrt{\frac{\mu'}{\rho}} , \quad \mu' : \text{セン断粘性係数}$$

これらの式から明らかなように、共振振動数 f^2 は寸法比 c/b により影響を受けるが、応答倍率 M_2 、 M_1 は寸法の影響を受けないことになる。これは M_2 が $c/b \rightarrow \infty$ において M_1 になるであろうことを考えるとややおかしいが、これらの式が多項式の第 1 項のみをとるという非常にラフな近似式であることによるのかもしれない。いくつかの c/b 、 η について f_2 、 M_2 、 f_1 、 M_1 を計算した結果を図-52、53 に示す。図-52 は寸法比 c/b により共振振動数 f_2 、 f_1 の比がどのように変化をするかを調べたものである。今回計算対象としたモデルの形状はすべてがこのような水平地盤状でもなく、このような寸法による共振振動数の変化率は種々に変わるものであるが、 c/b として 0.5~1 付近の値を参考にすると、土槽壁により共振振動数は 2 次元の場合と比べて 1.4~4 倍位になる可能性がある。次に、応答倍率の変化率は図-53 に示すとおり η によってほとんど影響を受けず土槽壁により 2 次元の場合に対して 1.3 倍弱になるという結果になった。

(3) 水平方向の振動を拘束しないとした端面の影響

例えば、 M_1 の場合、これまで用いてきた水平方向の振動を拘束しないという境界条件を用いた場合、図-36 から明らかなように境界からの距離によって振動特性が異なるはずはないのであるが、図-47 に示したとおり振動数応答関数は壁からの距離により異なったものとなっている。このことは、このような境界条件が合理的でないことを意味する。この端面の拘束を考慮すると、共振振動数及び応答倍率は増加する。

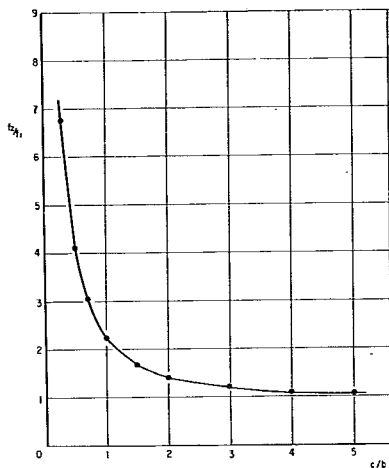


図-52 寸法比による共振振動数の違い

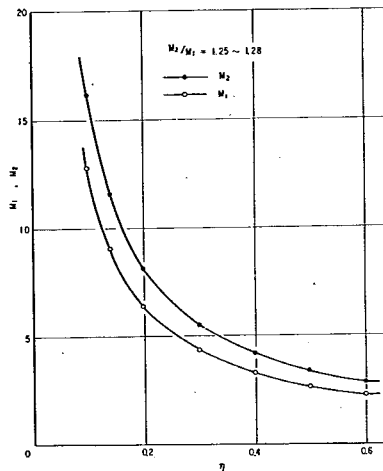


図-53 寸法比による共振時応答倍率の違い

- (4) 水平振動によって起こされる鉛直振動により上載圧が減少し剛性が低下することの影響

図-42に示したように、水平振動によっても鉛直振動成分がかなり生ずるが、これにより上載圧が変動し剛性率が変化する可能性がある。これにより、浅い部分での応答倍率は増加する可能性がある。

- (5) 加速度測定が土中に埋設された加速度計という異物によりなされている影響

模型の加速度を測定している加速度計は模型から見れば異物であり、それ自体の密度差や埋設時の回りの締め固度が不十分であったりすると小さいながらも埋設物体として模型と異なった振動をするかもしれない。これがロッキングのようなものであると、加速度計で測定された加速度は真の値より大きめになっているであろう。このような傾向は拘束圧の小さい浅部ほど大きいであろう。

以上、今回のようなFEMによる盛土・地盤系の振動解析と模型実験の結果との差について定性的考察を行なった。今後、機会があれば、これらの各点の可能性につき詳細な検討を行ないたい。

6. 結 論

今回の解析により得られた知見は各章ごとに述べられているので、ここでは改めて述べず、全体を通しての主要な考察及び今後の問題点をまとめて結論とする。

- (1) この計算プログラムのもとになっている有効ひずみの概念は、計算上やむをえない手段かもしれないが、結果的には、本来の振動数応答関数とは若干異なった振動数応答関数を与える。
- (2) 計算結果は用いる物性、入力波形の影響を大きく受けるので、実際例にあたっては、合理的評価、選定が必要である。
- (3) 計算テクニックとしては、境界条件の設定の仕方に留意すべきである。
- (4) 本質的に3次元の挙動を示す模型実験の解析等に使うことはかなり難しい。
- (5) 今後、静的応力状態と動的応力状態及びそれに対する土の動的変形特性を合理的に組み入れた動的安定解析に進める必要がある。

7. 参 考 文 献

- 1) 香川：震動応答解析法 — 有限要素法のプログラムについて — 、防災科学技術研究資料第 17 号、1975
- 2) Richart, F.E., Hall, J.R. and Wood, R.D. : Vibrations of Soil and Foundations, Prentice-Hall, 1970; p.
- 3) Hardin, B.O. and Drnevich, V.P. : Shear Modulus and Damping in Soils : Design Equations and Curves, Journal of SM, ASCE, Vol. 98, SM7, 1972
- 4) 畑中：土堰堤の振動に関する 3 次元的考察 — 自由振動について — 、土木学会誌、Vol. 37, No.10, 1952
- 5) 古賀他：水浸砂層の液状化沈下現象に関する振動実験、土木研究所資料、1063 号、1975