

(42) 浮上りを伴う基礎・地盤系の振動実験とその解析

電力中央研究所 正 員 ○杉木 均
 埼玉大学工学部 正 員 渡辺啓行

1. はじめに

原位置のブロック起振実験により岩盤の弾性係数等を評価する場合、物理探査による地盤物性を用いてFEM解析で実験結果をシミュレートすると、固有振動数の計算値は実験値よりかなり大きな値となる。FEM解析結果を実験結果に近づけるべく種々の試行的検討を加えたところ、表層直下の剛性のみを検層時の値からゆるめた地盤モデルを用いると大、小の寸法のブロックとも同一地盤モデルに対してFEM解析結果が実験結果と比較的良好に一致するという結果が得られている。この表層の極く薄い部分の剛性低下は施工に伴うゆるみに起因すると考えられるが、掘削に伴うサーチャージの減少が表層の一部に剛性の低下をもたらすという岩盤の本質的特性に起因する場合もあるものと考えられる。しかし一方では、岩盤上のブロックがロッキングを伴いながら振動している場合、接地部分の岩盤の不整形などにより圧縮側と引張側の岩盤剛性の不均衡が生じることが考えられ、極端な場合には引張側で浮上りが生じることも考えられる。このような場合、ブロックに対する岩盤のばね定数はスウェーイ、ロッキングともソフトニング型の非線形性を呈することが考えられる。浮上りに伴うロッキングばねの非線形特性は、矢野達によって模型実験と解析により調べられている。本研究は、シリコンゴム製の模型地盤上の構造模型の振動実験を行い、表層部分の剛性低下や基礎の浮上りの影響を詳細に調べその特性を把握すると共に、地盤表面における滑りや剥離を伴う現象を解析できる非線形動的解析プログラムの検証を行うものである。

2. 実験方法

地盤模型と構造模型の模式図を図-1に示す。地盤模型は二液混合型の特性シリコンゴムを用いて、 $40 \times 30 \times 10$ cmの寸法で厚さ5 cmのアクリル板上に作製した。地盤の個数は、混合比によって剛性が変化する性質を利用して表層1 cmと2 cmを柔層とした二層地盤2個と全層を柔層とした一層地盤1個の計3種類である。上部構造モデルは、鋼製板ばねの一端に鋼性ブロックをマスとして取り付け、他端を $10 \times 10 \times 1$ cmの石膏製の基礎に取り付けたもの4種類である。マスの質量は一定であり板ばねの幅のみ変えることによって固有振動数を4通りに変化させてある。

実験の種類は各模型の物性および動的定数を求める物性試験、構造物地盤系の強い振動実験として浮上りを伴わない場合と浮上りを伴う場合の3種類に大別できる。物性試験のうち地盤については各層材料により別途小地盤模型と矩形断面梁を打設しておき、小地盤ではP-S検層を行い、梁については自由振動試験を行った。浮上りを伴わない振動実験は基礎を地盤に直接圧着させ、振動台上で水平方向に正弦加振し定常応答を求めるものである。3種の地盤と4種の構造物の12種類の組合せについて、振動台の加速度振幅を30, 50, 80 galと変化させ合計36ケースの実験を行った。浮上りを伴う振動実験は

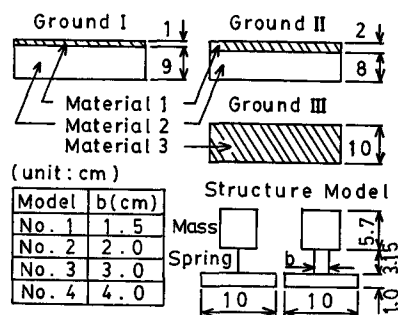


Fig. 1 Dimensions of Structure Models and Ground Models

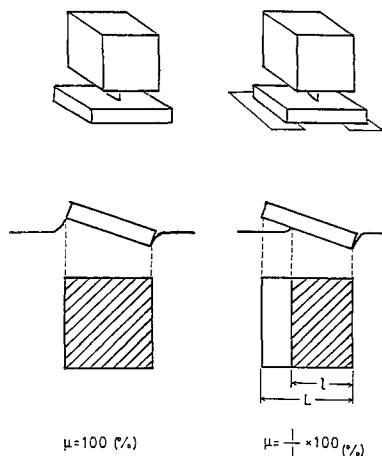


Fig. 2 Definition of Percentage of Contact Area (μ)

一層モデル(図-1, GroundⅢ)のみを地盤として用い、基礎底面と地盤との間に図-2に示すように紙を敷き荷地面積を変化させて定常応答を求めるものである。各モデルごとに図-2に定義する接地率を4種類とした16組合せの各々に加速度振幅を50, 80 galとした32ケース、図-1に示す構造模型2について、接地率を90, 80, 60%とした各々に加速度振幅を50, 60, 80, 100 galと変化させた12ケースの合計44ケースの実験を行った。

計測装置は圧電子型加速度計(10G)〜チャージアンプ系を用い、その信号を電磁オシログラフに同時記録するようにした。加速度計は、構造模型質点の頂部、基礎上面および地盤表面の3点で水平方向に、基礎両側面と上下方向に配置した。使用した振動台は最大加振力5(ton-G)の水平軸油圧サーボ型である。

3. 物性試験結果と考察

前述した小地盤模型について測定したP波速度、S波速度を各材料の混合比と共に表-1に示す。ここで材料3は模型作製後1年以上経過したものである。これらの値は、材料1と2に対しては矩形断面梁の自由振動実験により、材料3については一層地盤(GroundⅢ)の振動実験により検証を行った。矩形梁は片持梁として固定台から吊った場合と傾立させた場合について自由振動させた。材料2の例では、吊った場合と傾立させた場合の固有振動数はそれぞれ3.50 Hzと2.36 Hzと大きな差を生じたが、これは自重による曲力の影響である。梁の曲げ振動理論において軸力を考慮し、表-1の物性値を用いると固有振動数は3.62 Hzと2.55 Hzと計算されれば良い一致が認められている。材料3についてはGroundⅢの振動実験による固有振動数は13.5 Hzであったが、表-1のS波速度と層厚から計算される固有振動数は13.6 Hzとなり両者の一致は非常に良い。以上を総合すると、地盤模型の弾性定数についてはP-S検層で測定した値が十分正確なものであると言うことができる。

地盤の減衰特性は、GroundⅢの例では、共振曲線から求めた減衰定数hは固有振動数 $f_0 = 13.5$ Hzに対して0.125であり、梁の自由振動の対数減衰率から求めたhは材料1の値を近似的に用いると $f_0 = 2.43$ Hzに対して0.04となることから、内部摩擦あるいは粘性によるものと考えられ、Voigt型の固有振動数依存性に類似した特性をもつと言える。

次に上部構造のみの振動実験結果を図-3に示す。一方、静的水

Table 1 Material Properties of Ground Models

Material No. Properties	Material 1 New(1:1)	Material 2 (3:4)	Material 3 Old(1:1)
ρ (g/cm ³)	0.962	0.969	0.979
V_p (cm/sec)	1050	1370	1210
V_s (cm/sec)	443	760	543
G (kgf/cm ²)	0.193	0.571	0.295
E (kgf/cm ²)	0.537	1.459	0.811
ν	0.392	0.278	0.374
ω (rad/sec)	Tension	15.2	21.99
	Compression		14.83

ω : Natural Circular Frequency
of Rectangular Column of Material

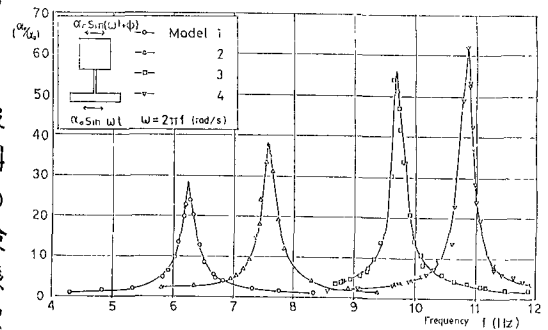


Fig. 3 Resonant Curves of Four Unit Structure Models

Table 2 Fundamental Characters of Structure Model

Structure Model	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4
m_a (g)	1422	1423	1423	1427
m_b (g)	3	4	7	9
h_s (cm)	6.615	6.614	6.603	6.603
m_e (g)	1912	1856	1867	1790
k (kgf/cm ²)	2.989	4.284	7.034	8.504
h (%)	1.44	1.26	0.885	0.860
f_0 (Hz)	6.23	7.57	9.67	10.86

Foundation

	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4
m_f (g)	228	227	245	746
I (g cm ²)	1919	1910	2062	2071
h_f (cm)	0.385	0.386	0.397	0.397

Table 3 Resonant Frequencies of Structure-Ground Systems (Without Uplift)

		unit (Hz)			
Structure		Model 1	Model 2	Model 3	Model 4
Ground I		5.25	6.10	7.10	7.55
Ground II		4.95	5.60	6.45	6.80
Ground III		4.90	5.40	6.25	6.45

平载荷による荷重へたわみ関係は直線となり、これらの関係から求めたばね定数を用い、マスの回転慣性を考慮して計算した固有振動数は実験値との一致が良好である。表-2には構造物の諸元をまとめて示す。

4. 浮上りを伴わない構造物・地盤系の強制振動 実験結果と考察

オシログラフに記録された入力加速度と応答加速度から求めた各上部構造模型と地盤系の共振曲線の例を図-4, 5に示す。図から構造物地盤系の固有振動数が増加すると応答倍率が低下し、上部構造模型のみの減衰と逆であることが認められる。これは前述したように地盤模型の減衰が内部摩擦によるもので、全体系の減衰が地盤の減衰に支配されることに起因する。また、表層の柔層の厚さが増すにつれて減衰が増加しており、材料2より材料1, 3の方が粘性が大きいことを示している。

表-3には36ケース全ての実験で測定された固有振動数を示す。これを上部構造模型ごとに地盤模型の種類(柔層の厚さ)に対する固有振動数の変化として示すと図-6を得る。以上の図表より得られる重要な情報は以下の通りである。

- i) 入力加速度によらず、いずれの構造物・地盤系の固有振動数も一定であり、浮上りを伴わない場合に系は線形振動を維持する(図-4, 5)。
- ii) 上部構造の剛度が高いほど、柔層の厚さの増加に伴う固有振動数の低下の程度が著しい。このことは、上部構造の剛度が低くなるにつれて、表-2に示すように連成系の固有振動数は上部構造のそれに接近し、自己振動が卓越するため相互作用が低下し地盤剛性の影響が少なくなることに起因するものと考えられる(表-3, 図-6)。

上記 ii) は、接地率100%ではないが、図-8に示される基礎上面の水平方向の応答倍率において上部構造の剛性が小さいほど応答倍率が小さくなる傾向からも推測される。

5. 浮上りを伴う構造物・地盤系の強制振動実験結果と考察

接地率80%, 加速度振幅 $\alpha = 80 \text{ gal}$ の場合の各モデルの応答倍率を図-7に、接地率を変化させたときの

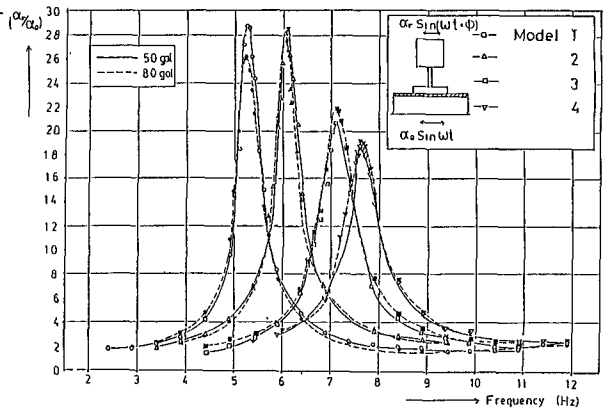


Fig. 4 Resonant Curves at the Top of Structure-Ground Systems (Without Uplift, Ground I)

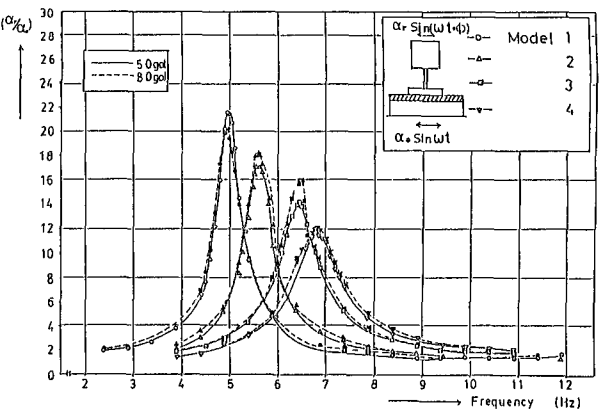


Fig. 5 Resonant Curves at the Top of Structure-Ground Systems (Without Uplift, Ground II)

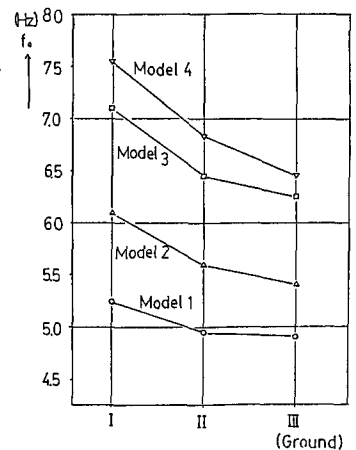


Fig. 6 $f_0 \sim$ Ground No. Relation for Each Structure Model (Without Uplift)

基礎上面の応答倍率を図-8に示す。図-7には構造模型2に対する計算結果も実験値と併せて示してある。表-4は接地率に応じた各連成系の固有振動数の変化であり、これらを図化したのが図-9(a)である。(b)図は加速度振幅 α_0 に対する固有振動数の変化である。これらの図から次のように言える。

- i) 浮上りを伴うことにより固有振動数は浮上りを伴わない場合より低下しく(図-9)、共振曲線もソフトスプリング型の非線形ばねのものに類似している(図-7)。
- ii) 基礎上面の共振曲線には浮上りに伴う固有振動数の低下が接地率の減少に応じて著しくなる傾向が模型頂部と同じように(図-9)認められる。また、上部構造の剛性が低い程、基礎上面の応答倍率は小さくなり、構造物頂部の応答倍率は大きくなっており4. ii) で述べたことを裏付けている。
- iii) 構造物地盤系の固有振動数は接地率の低下につれて低下して行く。その程度は $\alpha_0=80$ galでは上部構造の剛性が高いほど著しく、 $\alpha_0=50$ galでは剛性の高いModel 4ではほとんど変化せず剛性の低いModel 1で固有振動数の低下が認められる。上部構造の剛性が高い場合、地盤との相互作用としてロッキング振動が卓越してくるが、入力加速度が小さいと浮上りには致らずロッキングばねの低下はなく、50 galでModel 4の固有振動数の低下が生じなかったものと考えられる。Model 1では自己振動が卓越するが、振動モードはスウェイ振動であり、水平地盤反力は接触面積が小さいほど小さくなりロッキングを生じなくても固有振動数が低下するものと考えられる(図-9(a))。加速度振幅 α_0 が大きくなるとスウェイのみならずロッキングに伴う浮上りの影響が加わり固有振動数の低下が多小著しくなる。

6. 模型実験の数値解析

基礎と地盤の間にジョイント要素を挿入し表-1, 2の物性値を用いて、接地率80%とした構造模型2の共振点付近をFEM解析した。解析手法については文献 1) を参照されたい。数値解を実験結果と共に図-7に示す。浮上りによる地盤反力の欠如に伴う固有振動数の低下を良好にシミュレートしていると言える。参考文献 1) 渡辺, 栃木: 滑り剥離を伴う基礎・地盤の動的相互作用に関する研究, 土木学会論文報告集 (投稿中)

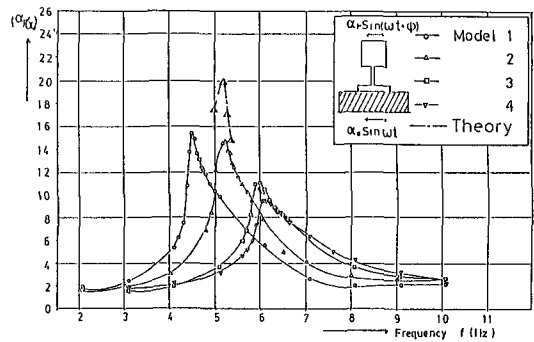


Fig. 7 Resonant Curves at the Top of Structure-Ground Systems (Followed by Uplift, Ground III, $\alpha_0=80$ gal, $\mu=80\%$)

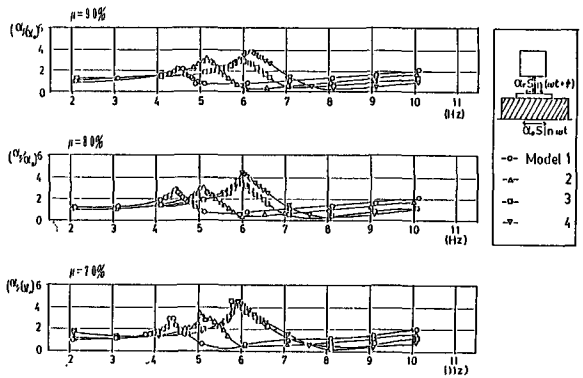


Fig. 8 Resonant Curves at the Base of Structure-Ground Systems (Followed by Uplift, Ground III, $\alpha_0=80$ gal)

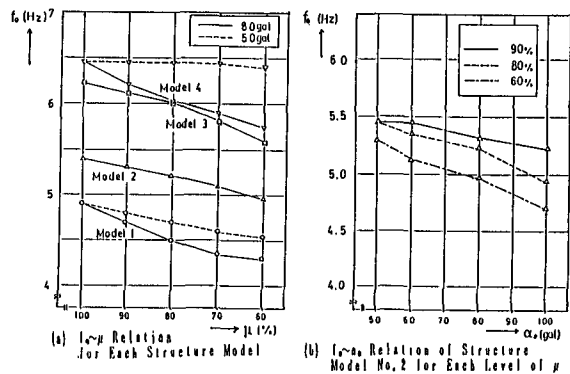


Fig. 9 Variation of Natural Frequency of Structure-Ground System due to Uplift and Intensity of Input Motion

Table 4 Resonant Frequency of Structure-Ground Systems (Followed by Uplift)

Model No.	unit (Hz)				
	100 %	90 %	80 %	70 %	60 %
Model 1	4.90	4.69	4.50	4.35	4.32
Model 2	5.40	5.32	5.23	5.10	4.97
Model 3	6.25	6.12	6.00	5.80	5.60
Model 4	6.45	6.20	6.06	5.90	5.76