

単純化モデルによる建物と地盤の動的相互作用に関するオンライン応答実験

日大生産工(学部) 谷脇 紗和 日大・理工(院)志村 晃一
日大生産工 神田 亮 日大・理工 安達 俊夫

1. 序論

震源より波動として伝播した入射波が建物の基礎に反射し、残りの成分は建物上部に伝わって、その振動を引き起こす。一方、振動する建物は、新たな震源となり地盤を振動させる。このような現象を建物と地盤の動的相互作用^(例えば1)という。

この現象は、建物の減衰や固有周期に少なからず影響し、よって、その耐震性を考える上で非常に重要である。

一方で、土質の力学的特性は、液状化などを含み、複雑である。これら構造物と地盤における波動の相互的やり取りは、当然、地盤を介して行われるため、土質の力学的特性が複雑であれば、現象の複雑さに拍車をかけることになる。

例えば、近年普及しつつある免震構造では、建物と基礎部分にクリアランスを必要とするため、免震基礎の擁壁は、土圧が分布荷重として作用する片もち形式と解釈できる。このような形式の基礎構造が、強震時にどのくらいの土圧を受けるかは、土質の非線形な力学的特性とともに、動的相互作用を考慮して決定されるべきであろう。

いくつかの研究機関では、かなりの労力と費用を費やし、大振動台を用いて建物の建つ地盤そのものを振動させ、この現象を再現しようとしている。これに対し、動的相互作用に地盤の非線形挙動を組み込み、しかも、簡易にこの現象を再現²⁾できれば、この現象を把握する上で少なからず有益であろう。

以上のことを踏まえて本論文では、三軸圧縮試験機を用いたサブストラクチャ・オンライン応答実験法により、建物と地盤の動的相互作用を再現する手法を示すと共に、その一例として、システムの開発を行うことを目的とする。

2. 振動系モデルと振動方程式

本研究では、現象を詳細に再現することには限界があるが、オンライン応答実験を実施する上での簡便性を考慮して、杉村らの提案した単純化モデル²⁾を採用することにした。その単純化モデルを図1に示す。

対象とする振動系は、地盤、基礎構造、上部構造の三つからなるものとする。また、各部分は一次モード応答が卓越するものとし、一質点の一自由度系に置換する。基礎部分と上部構造を二連層として、基礎と地盤を相互作用ばねで連結した。地盤の変位 x_0 、このモデルの足元からの各質点における相対変位は x_1 、 x_2 、 x_3 とする。また、地動加速度 $\ddot{x}_0$ 、各質点の応答速度、応答加速度は $\dot{x}_1$ 、 $\dot{x}_2$ 、 $\dot{x}_3$ および $\ddot{x}_1$ 、 $\ddot{x}_2$ 、 $\ddot{x}_3$ とする。各部分の質量、剛性は、図1のように、 m_1 、 m_2 、 m_3 、 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_s とし、これらの物理量は、地盤、基礎構造、上部構造、各部分の一次モードに寄与するように設定する。この振動系における減衰は、各モードに対する直交性を有するものとしてモデル化した。その振動方程式を以下に示す。

$$[m]\{\ddot{x}\} + [c]\{\dot{x}\} + [k]\{x\} = -\ddot{x}_0[m]\{i\} \quad \dots (1)$$

ただし、

$$[m] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \quad \dots (2)$$

$$[k] = \begin{bmatrix} k_1 + k_s & -k_s & 0 \\ -k_s & k_2 + k_s + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \quad \dots (3)$$

$$[c] = [m] \sum_{b=0}^{n-1} a_b ([m]^{-1}[k])^b \quad \dots (4)$$

$$\{x\} = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} \quad \dots (5) \quad \{i\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad \dots (6)$$

($\{\dot{x}\}$ 、 $\{\ddot{x}\}$ についても(5)と同様)

Pseudo-Dynamic Test for Simulating Dynamic Behavior
with Interaction between Buildings and Grounds Using a Simple Vibration Model

Sawa TANIWAKI, Koichi SIMURA, Makoto KANDA and Toshio ADACHI

3 振動系の固有値解析

相互作用を含む動的挙動を支配する重要なパラメータとして、建物の固有周期と地盤の固有周期の大小関係があげられる。この関係によって建物への入力が大きく変化するからである。これらの事実を考慮して、建物及び地盤を次のように設定した。上部構造は、2階、8階、16階建ての三種類である。それらの建物の固有周期 T_b は、0.1sec, 0.5sec, 1.0secである。また、地盤は、その固有周期 $T_g=0.5$ secであるような一般的に中程度の固さのものとした。これらのパラメータを用いて、単純化モデルの基本的な振動特性を把握するために、まず、固有値解析を行った。それらの結果のうち固有周期を表1に、固有ベクトルを図2に示す。

この結果より、このモデルの固有周期、固有ベクトルは、建物の固有周期 T_b と地盤の固有周期 T_g の関係により、 $T_b = T_g$ 、 $T_b > T_g$ 、 $T_b < T_g$ の三種類に、おおまかに分類できる。まず、 $T_b = T_g$ となる場合では、固有周期は1次と2次が、かなり近寄った値となっており、その値は、地盤と建物の固有周期にほぼ近い値となっている。1次、2次の固有ベクトルでは共に、建物の振動成分が大きいことがわかる。また、 $T_b > T_g$ となる場合では、1次固有周期は建物の固有周期に近くなり、2次固有周期は、地盤の固有周期とほぼ等しくなる傾向がある。1次の固有ベクトルでは建物、2次の固有ベクトルでは、地盤と基礎の振動成分が大きくなっている。さらに、 $T_b < T_g$ となる場合では、 $T_b > T_g$ とは逆に、1次固有周期は、地盤に、2次固有周期は、建物の固有周期と等しくなる傾向がある。1次の固有ベクトルでは地盤、2次の固有ベクトルでは建物の振動成分が大きくなっている。全体的に3次の固有ベクトルでは、基礎の振動成分が大きくなっているが、3次の固有周期は、1次、2次の値とはかけ離れており、通常地震力の周波数成分から考えると、あまり卓越しないと考えられる。

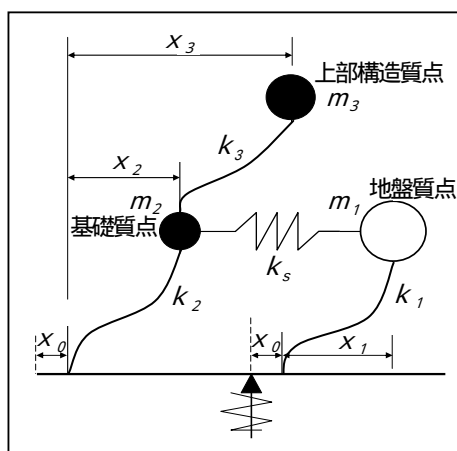


図1 単純化モデル²⁾

表1 建物と地盤の固有周期

上部構造		地盤		
		$T_g=0.5$ 秒		
階数	T_b	1次	2次	3次
2	0.1秒	0.49	0.11	0.04
8	0.5秒	0.52	0.49	0.07
16	1.0秒	1.02	0.49	0.08

(T_b は上部構造の固有周期、 T_g は地盤の固有周期)

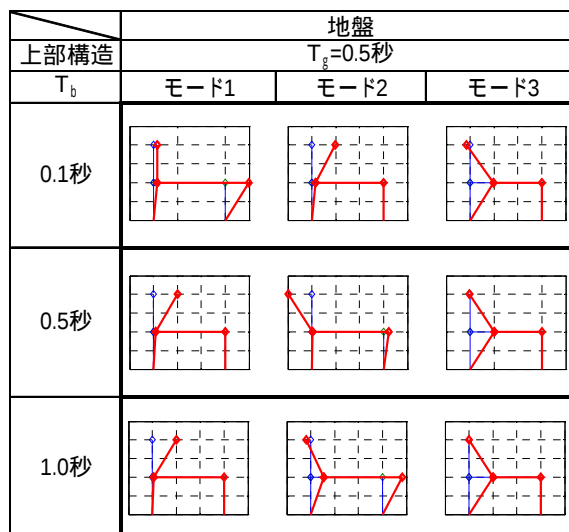


図2 固有ベクトル

4 応答解析

4 - 1 解析概要

本章では、実現象に、より即した観点からこの振動現象を分析するために時刻歴応答解析を行う。使用したモデル及びパラメータは前章と同様とした。時刻歴応答解析は、全復元力特性が弾性範囲の場合及び相互作用及び地盤の復元力特性が弾塑性範囲について行った。弾塑性の復元力モデルとしては、地盤及び相互作用にそれぞれHardin・Dmievichモデル³⁾(以下、H-Dモデル)、Kondanarモデル⁴⁾を適用した。ここで用いる数値積分法はオンライン応答実験によく用いられる陽なNewmark β法とした。入力地震波はモデルの基本特性を把握するために広い周波数領域(0.05~20Hz)にわたってパワーを有する人工地震波を用いた。実際の地震波としてEl centro地震波も用いた。人工地震波の作成方法は、参考文献²⁾を参照のこと。このような人工地震波とEl centro地震波を用い、弾性範囲では、共に地震波を最大50galレベルとし、時間刻みは0.01secとする。弾塑性範囲では、最大300galレベル、時間刻み0.01secとする。

4 - 2 弾性範囲の応答結果

弾性範囲の応答加速度のフーリエスペクトル({地動加速度+ 応答加速度} と地動加速度の)比を図3に示す。応答解析の結果も、固有値解析の結果と同様にそれぞれの振動特性が分かれた。すなわち、 $T_b = T_g$ では、1次

固有周期と2次固有周期がほぼ等しいので、それらの周波数成分付近で地盤、基礎、上部構造の各応答値は、ともに卓越している。 $T_b > T_g$ では、1次固有周期付近で、建物の応答が、2次固有周期付近では、地盤の応答が卓越している。応答値の増幅率は、 $T_b = T_g$ の約4分の1以下となる。 $T_b < T_g$ では、1次固有周期付近では、地盤の応答が、2次固有周期付近では、建物の応答が卓越している。応答値の増幅率は、 $T_b > T_g$ と同様、約4分の1以下となる。

次に、建物の応答加速度 $\ddot{x}_i + \ddot{x}_s$ と相互作用力による加速度 $k_s(x_i - x_s)/m_s$ の時刻歴を図4に示す。 $T_b = T_g$ では、相互作用力に対し、応答加速度では、 $60^\circ \sim 120^\circ$ くらいの位相遅れが生じている。相互作用力を、建物の足元に作用する入力と考えれば、建物は、相互作用力に共振状態にあるといえる。 $T_b > T_g$ では、相互作用力に対し、建物上部の応答加速度は、 180° の位相遅れが生じている。 $T_b < T_g$ では、相互作用力と建物上部の応答加速度では、卓越する振動成分が異なっている。これは、建物が相互作用力よりも、地震加速度に responding しているためである。今、相互作用力を入力とし、建物がその入力に response すれば、これらの関係は、一自由度系の伝達関数の考えで説明できる。それらを模式的に図5に示す。 $T_b = T_g$ の場合は、その位相が、 90° 付近でまさに入力に対し、出力は、共振状態となる。その時、応答の振幅は、何倍かに増幅される。 $T_b > T_g$ の場合は、その位相が、 180° 付近で、応答の増幅は、減衰定数がある程度小さければ1以下となる。図4からは、把握しにくいので、 $T_b < T_g$ の場合は、その位相は、 0° 付近で、応答の増幅は、1倍となる。これらの結果から、 $\ddot{x}_i$ 、 $\ddot{x}_s$ に対し、一自由度系の弾性振動現象を表していると言える。

4 - 3 弾塑性範囲の応答結果

弾塑性範囲の時刻歴応答解析から得られた履歴曲線を図6に、フーリエスペクトル比を図7に示す。地盤のみ弾塑性挙動を示す場合、地盤と相互作用ばねの両方が弾塑性挙動を示す場合とも、結果はほぼ弾性時と同様な傾向を示している。地盤のみ弾塑性挙動を示す場合では、地盤ばねの塑性化による剛性低下によって、若干の周期の伸び、また、履歴エネルギーにより、応答の増幅率は低下している。これは、 T_g が大きいほど、すなわち、地盤が軟らかいほど著しい。

5 まとめ

建物と地盤の相互作用に関するサブストラクチャ・オンライン応答実験を実施するために、上部構造、基礎、地盤をそれぞれ1質点系に置換し、基礎と地盤を相互作用ばねで、結合した三自由度の簡易モデルを示した。また、その特性を知るために、固有値解析、弾性及び弾塑性応答解析を行い、以下のような知見を得た。

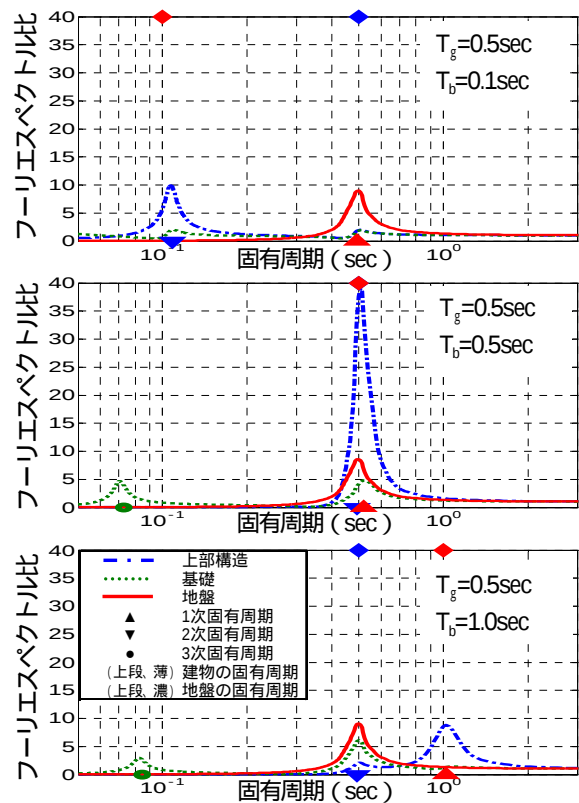


図3 フーリエスペクトル比(弾性)

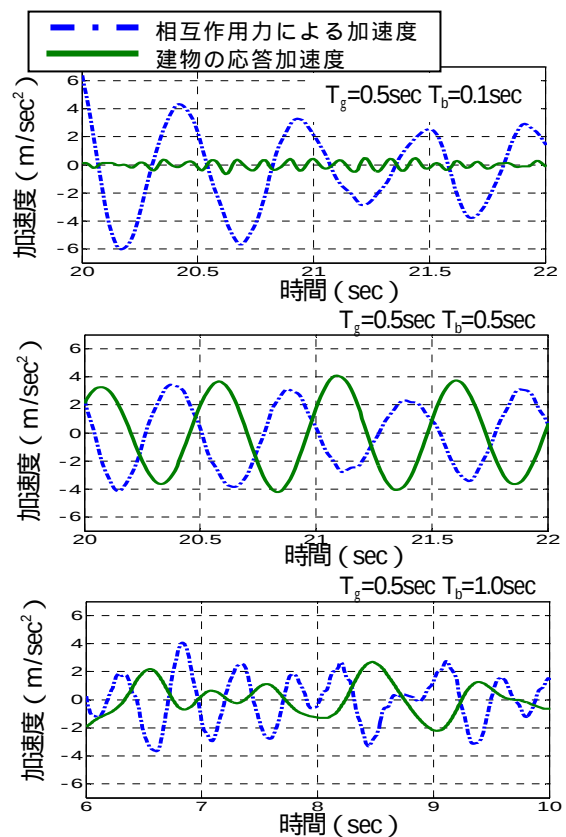


図4 相互作用力と応答加速度の時刻歴

(1) 固有値解析の結果から、建物と地盤の固有周期の関係によって、その振動特性が $T_b = T_g$ 、 $T_b > T_g$ 、 $T_b < T_g$ で分けられることがわかった。それは、弾性、弾塑性解析でも同様な傾向を示す。

(2) 相互作用力は、 $T_b = T_g$ では、建物に対し、共振的に作用する。 $T_b > T_g$ では、応答を低減する方向に作用する。 $T_b < T_g$ では、ほぼ応答倍率が1となる。

(3) $\ddot{x}_b$ と $\ddot{x}_g$ は、一自由度弾性応答の関係にあり、建物の応答は、入力地震波よりも相互作用力の方が支配的である。

「参考文献」

- 1) 日本建築学会，入門・建物と地盤との動的相互作用，(1996)
- 2) 杉村義広，徐挺，単純化モデル解析による建物と地盤の動的相互作用，(2001)
- 3) Y. OHSAKI，，“DYNAMIC NONLINEAR MODEL AND ONE-DIMENSIONAL NONLINEAR RESPONSE OF SOIL DEPOSITS”，1982
- 4) Kondner，R. L.，，“Hyperbolic Stress-Strain Response：Cohesive Soils，” Proc. ASCE，Vol. 89，No. SM1，pp. 115~143，1963. 2
- 5) R. Clough & J. Penzien.，，“DYNAMICS OF STRUCTURES”

