

株式会社 構造計画研究所 奥 村 光 男
株式会社 構造計画研究所 ○多 田 和 美
Earthquake Engineering Technology 宇 高 竹 和

1 はじめに

有限要素法は連続体の解析法として極めて有効な手法であり、近年、地盤-構造物系の動的相互作用問題に盛んに用いられている。しかしながら、半無限領域である地盤からある有限の領域を取り出してモデル化するために、モデル境界での波動の反射等の問題が生ずる。地盤中を下方から上昇伝播してくる地震動は、構造物等により攪乱、反射された上で、本来周囲の地盤に逸散していくはずであるが、単純な境界条件を用いた有限要素モデルではモデル境界で反射され再び構造物の入力となる。この問題を解決するためには、有限要素モデルの解析領域を大きくとり、モデル境界で反射された波動が構造物の応答に及ぼす影響を低減すれば良いのであるが、現状ではコンピュータの容量及び解析費用等との兼ね合いから自から制限がある。最近では、特別な境界条件を用いて、モデル境界での波動の反射を処理するのが一般的になっている。

このような境界処理の一手法として、モデル側面境界での波動の逸散を評価するエネルギー伝達境界があり、その有効性はすでに確認されている〔1, 2〕。モデル底面での境界処理は、モデル底面に地震動が入力されるため、境界での波動の反射ばかりではなく、入力地震動の規定法にもかかわり、重要な問題である。著者等はこの点に着目し、モデル底面での境界処理の手法として、ダッシュポットを用いた底面粘性境界を導入し、上昇波のみによる解析を試みた。

本報は、種々の地盤の物性値に対して、モデル底面の境界条件を粘性境界とした場合と剛体基盤とした場合とを比較して、底面粘性境界の有効性について検討したものである。

2 底面粘性境界と上昇波入力

モデル底面の境界条件としては、これまで剛体基盤が一般に良く用いられているが、剛体基盤とした場合にはFig. 1に示す如く、自由地盤においてモデル底面レベルに逆合積により引き戻したトータルモーション（上昇波E+下降波F）をFEM部に入力して解析を行うことになる。しかしながら、下降波は上部の地盤及び構造物により反射された波動であり、自由地盤中の下降波とFEM部の下降波は同一ではあり得ない。剛体基盤を用いた解析の問題点は、トータルモーションの入力により下降波をも規定してしまう点にある。従ってモデル底面を剛体基盤とする場合には、構造物等で反射された波動が地盤中で減衰し、トータルモーションが自由地盤中のそれとほぼ等しくなる位置に底面を設定する必要がある。

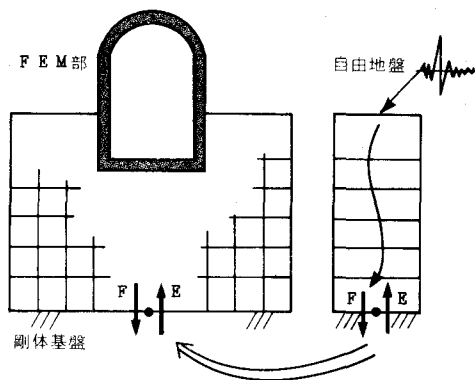


Fig. 1 剛体基盤によるトータル・モーションの規定

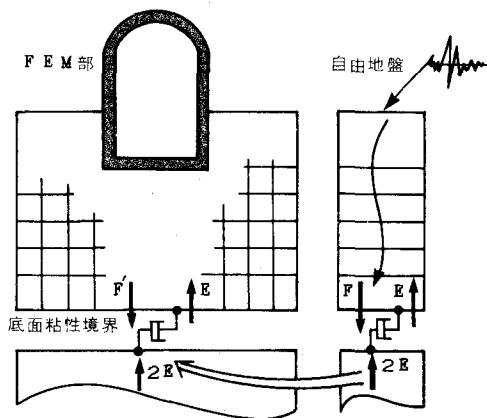


Fig. 2 底面粘性境界による上昇波の規定

ある。

モデル底面より下方の地盤の半無限性は、Fig. 2 に示す如く、底面粘性境界を用い、ダッシュポット下端での地震動として上昇波の二倍、すなわち露頭基盤とした場合の地震動を与えることによりシミュレートすることができる〔3, 4〕。この場合、FEM部の構造物等で反射された下降波Fはダッシュポットにより吸収される。

以上の理由により、底面粘性境界を用いた場合は、剛体基盤を用いた場合よりもモデル底面の設定位置を構造物に近づけることができると考えられる。

3 解析モデル及び条件

解析に用いたモデルはFig. 3 に示すような構造物であり、地盤に関しては表層及び岩盤からなる二層構造とした。表層はせん断波速度 $V_s = 200 \text{ m/sec}$ の弱層とし、岩盤の V_s は 500, 1000 及び 1500 m/sec の三種を考慮した。また、モデル底面の設定位置として構造物の基礎下端より 63 m 及び 15 m とした二つのモデルMODEL1, MODEL2を用い、それぞれ底面の境界条件を粘性境界とした場合及び剛体基盤とした場合について解析を行った。なおモデル側面の境界条件はエネルギー伝達境界とした。

入力地震動はFig. 4 に示すような応答スペクトル特性を持つ模擬地震動を、基礎下 63 m (MODEL1の底面位置) における露頭基盤上の地震動として設定し、岩盤の物性ごとに自由地盤の波動伝播解析を行い、その結果をMODEL1及びMODEL2の自由地盤に規定した。

4 解析結果

解析結果は、モデル中央線上の最大加速度分布及び構造物中央頂部A点 (Fig. 3 参照) の加速度応答スペクトル (減衰 5%) により示す。なお、図中のVISCOUSは底面粘性境界を、RIGID BASEは剛体基盤を示す。以下では岩盤の物性値別に結果の検討を行う。

(1) $V_s = 500 \text{ m/sec}$

深さの異なる二つのモデルMODEL1とMODEL2の最大加速度分布を底面粘性境界と剛体基盤についてFig. 5 に示した。粘性境界の場合には、MODEL1とMODEL2で最大加速度分布が一致しているのに対し、剛体基盤の場合には、MODEL2ではMODEL1の応答を近似できず、構造物頂部の加速度応答で二割程度の差が生じている。

MODEL1のA点での加速度応答スペクトルを、粘性境界と剛体基盤とを比較してFig. 6 に示した。この図より粘性境界

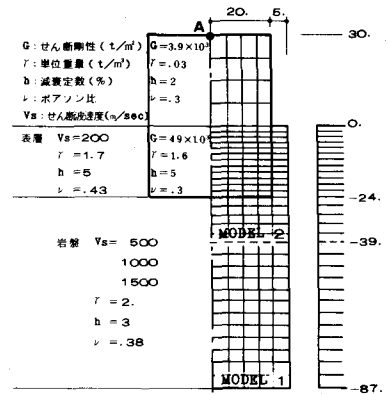


Fig. 3 解析モデル

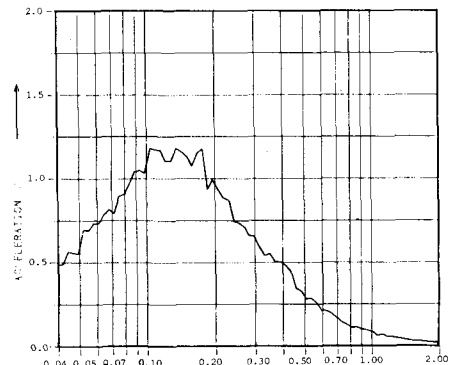


Fig. 4 ACCELERATION RESPONSE SPECTRUM OF INPUT MOTION

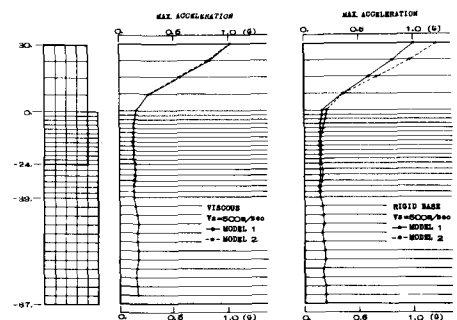


Fig. 5 最大加速度分布 $V_s = 500 \text{ m/sec}$

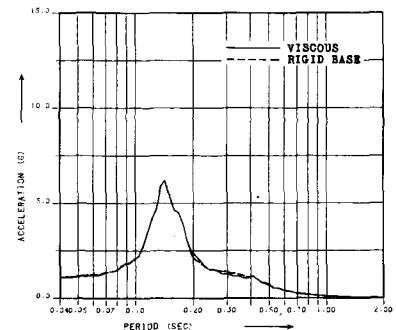


Fig. 6 ACCELERATION RESPONSE SPECTRUM AT NODAL POINT A (TOP OF STRUCTURE) $V_s = 500 \text{ m/sec}$

と剛体基盤の場合の応答が良く一致していることから、MODEL 1 の場合には構造物の応答が底面の境界条件の影響を受けず、粘性境界でも剛体基盤でも正当な応答を評価できたと言える。

粘性境界と剛体基盤について、MODEL 1 と MODEL 2 の A 点での応答スペクトルを比較して Fig. 7, 8 に示した。Fig. 7 に示す粘性境界の場合の応答スペクトルが、両モデルで良く一致しているのに対し、Fig. 8 に示す剛体基盤の場合の応答スペクトルには差が生じている。

これらより、 $V_s = 500 \text{ m/sec}$ とした今回のモデルの場合、底面粘性境界は極めて有効であり、粘性境界を用いれば基礎下端から 15 m 程度の位置にモデル底面を設定しても、構造物の応答を正当に評価し得た。

(2) $V_s = 1000 \text{ m/sec}$

底面粘性境界と剛体基盤の場合の最大加速度分布を、MODEL 1 と MODEL 2 とを比較して Fig. 9 に示した。粘性境界の場合には MODEL 1 と MODEL 2 で加速度分布にあまり違いは無いが、剛体基盤の場合には構造物頂部で二割程度の差が生ずる。しかし、粘性境界でも岩盤が $V_s = 500 \text{ m/sec}$ の場合ほどの一致を見ることはできない。

MODEL 1 の A 点の加速度応答スペクトルを、粘性境界と剛体基盤とを比較して Fig. 10 に示した。この図より、粘性境界と剛体基盤による応答スペクトルはほぼ一致していると言えるが、 $V_s = 500 \text{ m/sec}$ に比較するとやや差がある。

A 点での加速度応答スペクトルを MODEL 1 と MODEL 2 とを比較して Fig. 11, 12 に示した。Fig. 11 の粘性境界による応答スペクトルが MODEL 1 と MODEL 2 で良く一致しているのに対し、Fig. 12 の剛体基盤による応答スペクトルには両モデルで差が生じている。

これらより、 $V_s = 1000 \text{ m/sec}$ の場合、底面粘性境界を用いても MODEL 2 ではモデル底面の深さが不十分であり、剛体基盤の場合には MODEL 1 でも不十分であると言えよう。

(3) $V_s = 1500 \text{ m/sec}$

底面粘性境界と剛体基盤の場合の最大加速度分布を、MODEL 1 と MODEL 2 とを比較して Fig. 13 に示した。この図より、粘性境界でも剛体基盤でも MODEL 1 と MODEL 2 では最大加速度分布に差が生じている。

MODEL 1 の A 点での加速度応答スペクトルを粘性境界と剛体基盤の場合とを比較して Fig. 14 に示した。底面の境界条件の相違による応答の差は、 $V_s = 1000 \text{ m/sec}$ の場合よりも更になくなっていく。

これらより、 $V_s = 1500 \text{ m/sec}$ の場合、底面粘性境界の場合で

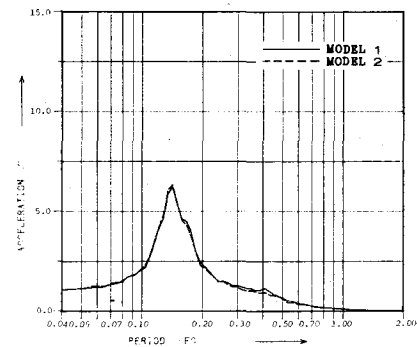


Fig. 7 ACCELERATION RESPONSE SPECTRUM AT NODAL POINT A (TOP OF STRUCTURE) $V_s = 500 \text{ m/sec}$, VISCOUS

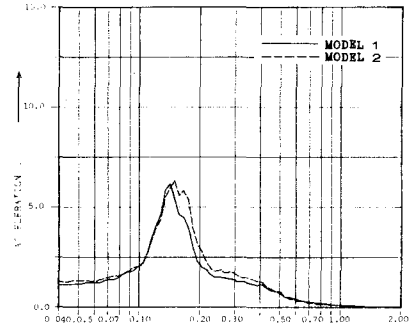


Fig. 8 ACCELERATION RESPONSE SPECTRUM AT NODAL POINT A (TOP OF STRUCTURE) $V_s = 500 \text{ m/sec}$, RIGID BASE

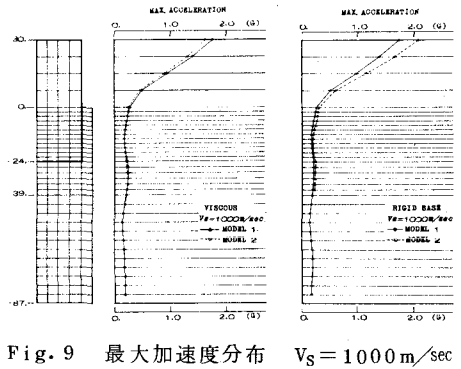


Fig. 9 最大加速度分布 $V_s = 1000 \text{ m/sec}$

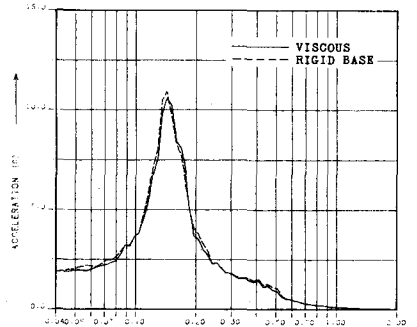


Fig. 10 ACCELERATION RESPONSE SPECTRUM AT NODAL POINT A (TOP OF STRUCTURE) $V_s = 1000 \text{ m/sec}$

も MODEL 1 の底面の深さでは不十分である可能性も考えられ、更に深いモデルとの比較検討をする必要がある。

5 まとめ

以上の解析結果より、岩盤の物性を $V_s = 500, 1000 \text{ m/sec}$ とした場合に底面粘性境界の有効性が確認された。すなわち、モデル底面に粘性境界を用いることにより、モデル底面の設定位置を剛体基盤よりもかなり構造物に近づけることができる。しかしながら、今回の解析結果が示す如く、剛体基盤は勿論のこと底面粘性境界を用いても、地盤の物性が剛になればなる程、モデル底面の設定位置を深くしなければならないと言える。これは、ダツシュボットの波動を吸収する効果は垂直に入射する波動に最も有効であり、入射角が大きくなる程吸収効果が低下する〔5〕のものであり、一方、せん断波速度が速くなれば波長も比例して長くなり、波動の距離に対する減衰性は低下する。これらのため、せん断波速度が大きい場合にも充分な粘性境界の効果を得るためには、底面位置を深く設定する必要があるものと考えられる。

今後、地盤のせん断波速度に応じたモデル底面の設定位置に関して、入力地震動のスペクトル特性や地盤及び構造物の固有周期との関係をふまえて検討する必要があるだろう。

参考文献

- [1] Lysmer, Udaka et al., "FLUSH", EERC 75-30, 1975.
- [2] 奥村, 多田, 宇高, "有限要素法による地盤-構造物連成系の相互作用解析における境界条件及び入力地震動の評価", 日本建築学会第3回電算機利用シンポジウム, 昭和56年3月。
- [3] Joyner, Chen, "Calculation of Nonlinear Ground Response in Earthquake", BSSA. Vol. 65, No. 5, 1975.
- [4] 和泉他, "成層地盤の地震応答解析・質点系と加速度入射波を用いた計算例", 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭和47年10月
- [5] Lysmer, Kuhlemeyer, "Finite Dynamic Model for Infinite Media", Proc. ASCE, Vol. 95, No. EM4, 1969.

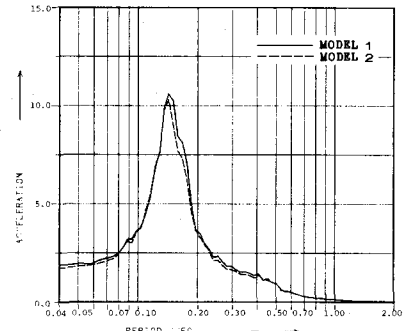


Fig. 11 ACCELERATION RESPONSE SPECTRUM AT NODAL POINT A (TOP OF STRUCTURE) $V_s = 1000 \text{ m/sec}$, VISCIOUS

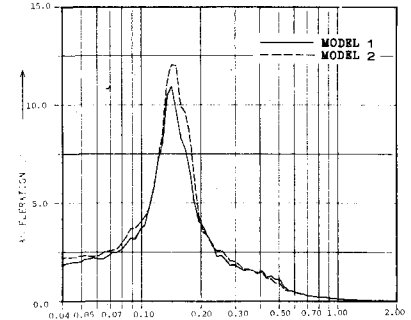


Fig. 12 ACCELERATION RESPONSE SPECTRUM AT NODAL POINT A (TOP OF STRUCTURE) $V_s = 1000 \text{ m/sec}$, RIGID BASE

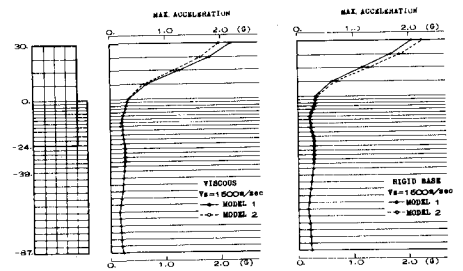


Fig. 13 最大加速度分布 $V_s = 1500 \text{ m/sec}$

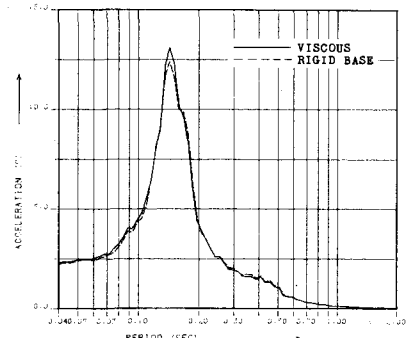


Fig. 14 ACCELERATION RESPONSE SPECTRUM AT NODAL POINT A (TOP OF STRUCTURE) $V_s = 1500 \text{ m/sec}$