

清水建設大崎研究室 正会員 ○赤尾 嘉彦
 東京大学地震研究所 正会員 伯野 元彦

1. はじめに

構造物-地盤の動的相互作用効果を考慮した地震動の数値計算法には、①質点法、②差分法、③有限要素法、④積分方程式法の4つの基本的な方法がある。また、水平成層の地盤だけの解析には波動方程式と境界条件から⑤厳密解¹⁾²⁾が導かれている。その外に、これらの手法を組み合わせた手法がある。たとえば、⑥質点法と有限要素法、⑦差分法と有限要素法³⁾⁴⁾、⑧有限要素法と積分方程式法⁵⁾などが提案されている。このうち有限要素法系の解析(③,⑥,⑦)では解析モデル形状を任意に選べるが、その他の解析ではモデル形状をある程度限定しなければならない。また、積分方程式法系の解析(④,⑧)や厳密解法(⑤)では周辺地盤の半無限性を考慮できるが、その他の解析ではこれが難しく、厳密な意味での地盤震動の数値解析とは言い難い。一方、解析領域の内側に震源がある場合には、解析領域の外側の地盤との境界(無限境界)に特別な境界条件を設定して逸散波を吸収する方法⁶⁾⁷⁾が考えられていた。最近、有限要素法の無限境界にその吸収境界の一つを用い特別な考慮をすることで、外側から入射する地震波に対しても正しい解が得られる手法⁸⁾が提案された。しかし、この手法が適用できるのは入力地震波が鉛直下方から入射する実体波の場合に限られている。著者らは⑨厳密解と有限要素法を組み合わせる手法⁹⁾を考えた。この手法では入力地震波が斜め入射の実体波でも表面波でも可能である。また、無限境界での逸散波の計算は特別な方法を用いたが、従来の方法⁶⁾⁷⁾を用いることもできる。そこで、この手法の基本的な考え方について述べてみたい。

2. 変位の波動成分

Fig.1のように水平均一な地盤の中に構造物があり実体波が入射してきたとき、地震波による変位は入射波と反射波と逸散波の3成分から成っていると考えられる。入射波は入力の実体波であり、反射波は入射波が水平均一な自由表面で反射された波動である。逸散波は構造物や地盤の不均一性(たとえばFig.2のようにa)建屋の底面で反射された入射波,b)入射波と反射波の欠如,c)建屋の自由振動)によって生じ、全変位から入射波と反射波を除いた成分と定義される。地盤が水平に層をなしているときや入力地震波が表面波のときは、入射波と反射波の明確な区別ができない。ところが、入射波と反射波の和はfree fieldの応答であり、地震動をfree field motionと逸散波に分けると全ての場合に適用できる。

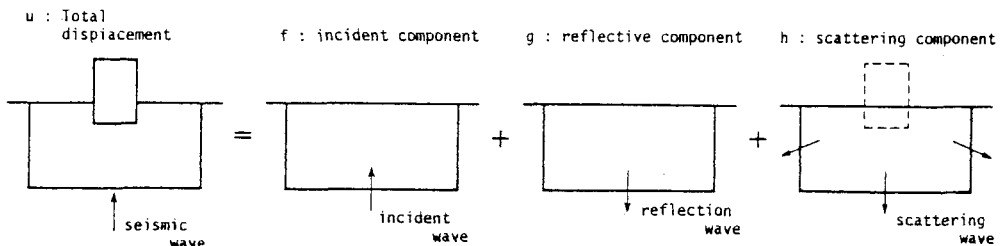


Fig.1 Three different components of displacement caused by seismic wave.

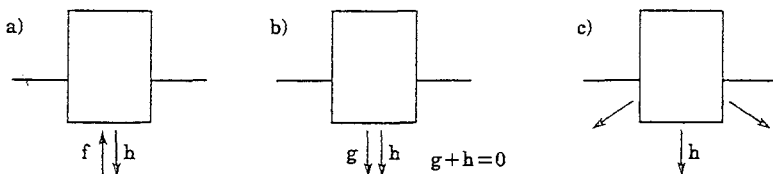


Fig.2 Major types of mechanism yielding a scattering wave.

3. 地震動解析

周辺地盤が水平成層をなしているとき(領域内の地盤は水平成層である必要はない)、free field motionは厳密解から得られる。また、不均一構造をなす解析領域は有限要素法で数値で解析を行う。この領域は自由表面と無限境界で囲まれていて、境界条件は自由表面に応力=0、無限境界に強制変位(free field motion+逸散波)を与える。逸散波は未知であるが、Fig.3のように有限要素領域の外側にある領域(外側領域)を設けて逸散波だけの計算を行う。この領域は内側境界と自由表面と(外側)無限境界で囲まれていて、有限要素領域と部分的に重なっている。ここでは逸散波が内側境界から無限境界の方向にだけ伝播し、境界条件は逸散波が入射する内側境界に強制変位(逸散波)、自由表面に応力=0を与え、無限境界は波動エネルギー吸収境界を付ける。

この解析を時系列で考えると、ある時刻 t までの外側領域上の逸散波変位 h と有限要素領域上の地震動変位 u が得られていたとする。次の時刻 $t+\Delta t$ の変位境界を除く有限要素領域上の変位 u と、内側境界を除く外側領域上の逸散波 h は、それぞれ有限要素法と外側領域内の解析(差分法や有限要素法)で求めることができる。ところで、変位境界上の変位 u は外側領域内の逸散波 h とfree field motionの和から、内側境界上の逸散波 h は有限要素領域上の変位 u からfree field motionを除いた成分として求めることができ、結局全ての節点の次の時刻の u と

h が求まる。

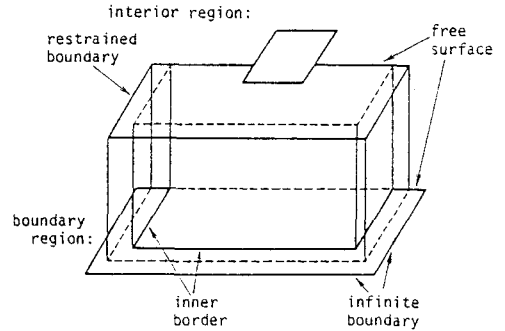


Fig.3 Separation of analitical region.

4. 他の解析との比較

従来の有限要素法では解析上、入射波、反射波、逸散波などに分離することではなく、側面境界ではfree field motionとの差に減衰を入れて逸散波成分を取り除いたが、底面境界ではこれができなかった。Kunar⁸⁾らは粘性境界⁶⁾を応用し、底面から入射波成分だけを入力して反射波と逸散波を吸収させる方法を提案した。著者ら³⁾も以前同じ方法を試みたが、入射波と反射波(free field motion)を入力して逸散波だけのエネルギーを吸収させる方がより扱い易いと考えてこの方法⁹⁾を提案し、表面波にも適用できることを示した。また、積分方程式法は主に周波数領域の解析であるが、この方法は時間領域の解析に限られる。

5. まとめ

- a) 有限要素法による、任意の実体波や表面波を入力とする地震動解析理論を提案した。
- b) 入力地震波は変位で与え、逐次積分法で時間積分をする。
- c) モデル形状は任意に与えることができ、周辺地盤は水平多層構造まで許される。

[参考文献]

- 1) Haskell(1953) Bull.Seism.Soc.Am., Vol.43, pp.17-34
- 2) 鏡味,小林(1970)建築学会論文報告集,No.173, pp.31-36
- 3) 赤尾,伯野(1979)土木学会15回地震工学研究発表会pp.137-140,(1981)土木学会36回年次会第1部門
- 4) 大槻,他(1980)土木学会35回年次会第1部門
- 5) Wong (1982) Bull.Seism.Soc.Am., Vol.72, pp.1167-1183
- 6) Laysmer, et al. (1969) Am.Soc.Civil Eng., Vol.95, EM4, pp.859-877
- 7) Smith (1974) J.Comp.Phys., Vol.15, pp.492-503
- 8) Kunar, et al. (1980) Earthq.Eng.Struc.Dynam., Vol.8, pp.361-374
- 9) 赤尾,伯野(1982)第6回日本地震工学シンポジウムpp.1625-1632,(1983)土木学会論文報告集掲載予定