

# (41) 不整形地盤の地震応答に与える回折波の影響

佐藤工業(株) 秋山伸一、吉田 望

## 1 はじめに

不整形地盤では、入射した地震波が水平方向に変化する地盤構造の影響を受けて、複雑に反射・屈折を繰り返したり、あるいは、二次的に表面波が発生するために、不整形地盤の地震時の応答は水平な成層地盤の場合と異なり、場所によって応答が大きく増幅されたり、地震動の継続時間が長くなったりすることが地震観測や数値解析結果から知られている<sup>1) 2)</sup>。さらに、不整形地盤の端部で表層が傾斜しているところでは、波動が反射・屈折を繰り返す過程で、成層地盤では見られない回折波が発生することも知られている。

従来、このような回折波は反射・屈折する波動と比べて不整形地盤の地震応答に及ぼす影響が少ないと言われてきた。しかし、丹羽・廣瀬らは波線理論と積分方程式法を用いた解析を行い、これらの結果を比較することにより、傾斜層の応答には回折波の影響を無視できない場合があることを指摘した<sup>4)</sup>。ところで、平野部に見られるような不整形地盤では、傾斜層の側方に水平な成層地盤が続いていることが多い。従って、不整形地盤の端部で発生した回折波は、傾斜層だけではなく、水平成層を含めた不整形地盤の地震応答にも影響を及ぼすことが考えられる。

本報では、不整形地盤のひとつとして傾斜層の側方に水平成層が広がる地盤を想定し、このような不整形地盤の端部で発生する回折波が地盤の地震応答に与える影響について検討した結果を報告する。

## 2 検討方法

傾斜層の波動伝播を平面波の多重反射で表わすと地盤内に変位の不連続面が形成され、物理的に不合理なことが起こるが、実際には不連続面の変位を連続にするように回折波が発生する<sup>3)</sup>。このような回折波は、波線理論のような解析法では評価できないので、ここでは、境界要素法<sup>5)</sup>により解析を行う。検討の対象は、表層地盤の側方が傾斜している不整形二層地盤である。地盤は2次元弾性体と仮定し、減衰は考慮しない。解析では、このような地盤に斜め方向から平面SH波が入射する場合を想定する。入射波は、次式で示すRicker-waveletとする。

$$f(t) = \frac{\sqrt{\pi}}{2} (a - 0.5) \exp(-a), \quad a = \left| \frac{\pi(t - t_0)}{t_p} \right|^2$$

$t_p$  は  $f(t)$  の Fourier 振幅の卓越周期、 $t_0$  は  $f(t)$  の絶対値が最大になる時刻である。

## 3 傾斜層における回折波の伝播性状

本報の目的は、傾斜層で発生した回折波が傾斜層から水平成層に向かってどのように伝播するかを調べることにあるが、その前に、傾斜層内での回折波の伝播性状を調べた。

図1に、傾斜角 $30^\circ$ の傾斜層と基盤によって構成される地盤モデルを示す。地盤の物性値は無次元量で与え、傾斜層と基盤の単位体積重量比 $\rho_1 / \rho_0 = 1.0$ 、せん断剛性比 $\mu_1 / \mu_0 = 0.25$ 、S波速度比 $C_1 / C_0 = 0.5$ である。この地盤に平面SH波が入射角 $135^\circ$ の方向から入射した時の地表面の変位応答を求める。

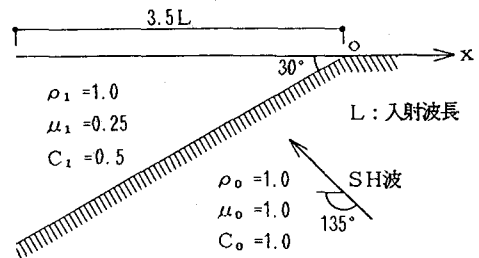


図1 傾斜層モデル

図2に数値解析の結果を示す。解析結果の縦軸に示す地表面の位置 $x$ は入射波の波長 $L$ で、また、横軸の時刻 $t$ は入射波の卓越周期 $t_0$ で無次元化して表わす。図2には、解析結果と比較できるように波線理論<sup>9)</sup>から求まる平面波の波線と変位の不連続面も示す。

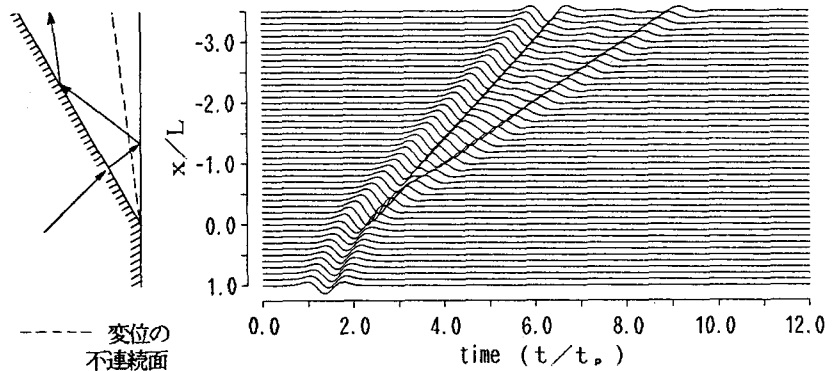


図2 傾斜層の波動伝播解析結果

図の波線から、傾斜層の地表面に現れる応答は直達波のみであり、地表面で反射した波動が傾斜層境界で反射し、再び地表面に現れることはない。一方、解析結果からは直達波と回折波の2本の走時が現われている。まず、直達波と回折波の変位振幅のピークを各地点毎に結んで水平方向の伝播速度を求めると、直達波の場合は、0.82であり波線理論から求まる値と一致する。また回折波の場合は、0.5となり、傾斜層のS波速度と一致している。次に、直達波の振幅は、観測点の位置 $x/L$ が-1.0から-3.5の範囲で、入射波振幅の2.64倍となり、波線理論から求まる値と一致する。ところが、 $x/L$ が0.0から-1.0の範囲では、直達波の増幅率はより大きく、例えば、 $x/L=-0.5$ では3.4倍である。これは、傾斜層端部で発生した回折波のピークが直達波とほぼ同じ時刻に現れるので、みかけ上、直達波の振幅が増幅されるためである。一方、回折波の走時は、 $x/L=-1.0$ 付近から直達波とは明瞭に区別できるようになる。回折波の振幅は、 $x/L=-1.0 \sim -2.0$ の間では、入射波振幅の2倍程度であり、傾斜層端部から離れるにつれ振幅は減衰し、 $x/L=-3.0$ では入射波振幅とほぼ同じ程度となっている。この結果は、従来から言われているように、変位の不連続面から離れるにつれ回折波は減衰するということと定性的に一致する。しかし、例えば基盤のS波速度が500m/s、傾斜層で250m/sの地盤に卓越周期1秒の地震波が入射した場合、入射波振幅より大きな振幅を持つ回折波が傾斜層端部から1.5km地点まで伝播することになる。従って、傾斜層端部から離れるにつれ減衰する回折波であっても、地震動の卓越周期が長周期になれば、回折波の及ぼす影響範囲が広がることも予想される。

#### 4 傾斜層の側方が水平成層となる地盤での回折波の伝播性状

ここでは、前節で行なった検討結果を基に、傾斜層で発生した回折波が水平成層地盤内をどのように伝播するかを調べる。検討対象の地盤モデルを図3に示す。地盤は、傾斜層の傾斜角が $30^\circ$ であり、水平成層では表層と基盤の境界までの深さが150mである。解析領域は傾斜層の端部から水平方向に1200mまでとする。地盤の物性値は、単位体積重量が表層と基盤で $2.0t/m^3$ 、S波速度は表層で250m/s、基盤で500m/sである。この地盤に平面SH波が入射角 $135^\circ$ の方向から入射するものとする。

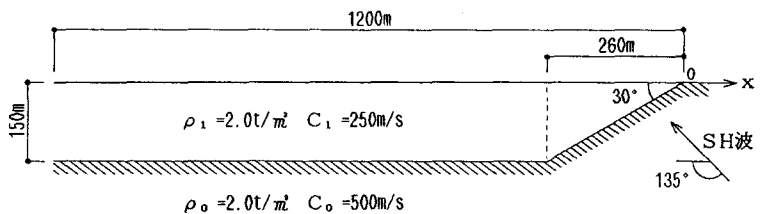


図3 傾斜層の側方が水平成層となる地盤モデル

図4に、前節と同様に、波線理論による不整形地盤内を伝播する波動の波線を示す。地表面で観測される波動は、図4に示すように4種類である。これらの波動のうち、②の波は、表層から基盤への入射角が $52.56^\circ$ である。臨界角は $60^\circ$ であるから②の波は水平な表層を全反射しながら伝播する。一方、③の波は表層から基盤への入射角が $69.30^\circ$ であり、水平境界での反射係数が0.2と小さいので、地表面での応答は小さい。また、④の波は表層から基盤への入射角が $7.44^\circ$ であり全反射波であるが、地表面に到達する地点が1300m以遠であり、本解析で対象としている領域の外である。従って、地表面で観測される主な波動は、①の直達波と②の全反射しながら伝播する多重反射波であり、これに傾斜層で発生する回折波が加わる。

図5に、卓越周期 $t_p=0.4$ 秒、1.0秒および2.0秒の入射波が入射した際の地表面応答を示す。

$t_p=0.4$ 秒の結果を見ると、直達波の後に複数の後続波が現れている。これらのうち、傾斜層から水平成層へ向かって伝播している後続波は、水平方向の伝播速度が250m/sであるから前節の検討結果から回折波である。回折波の振幅は、傾斜層から水平成層に向かうにつれ減衰しているが、地表面の位置 $x$ が-500mから-600m付近で傾斜層から入射した多重反射波が回折波とほぼ同時刻に地表面に現われるために、振幅が入射波の3.6倍程度まで増幅されている。さらに、 $x$ が-700mから-1200mま

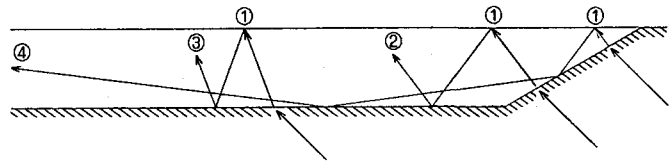


図4 波線図

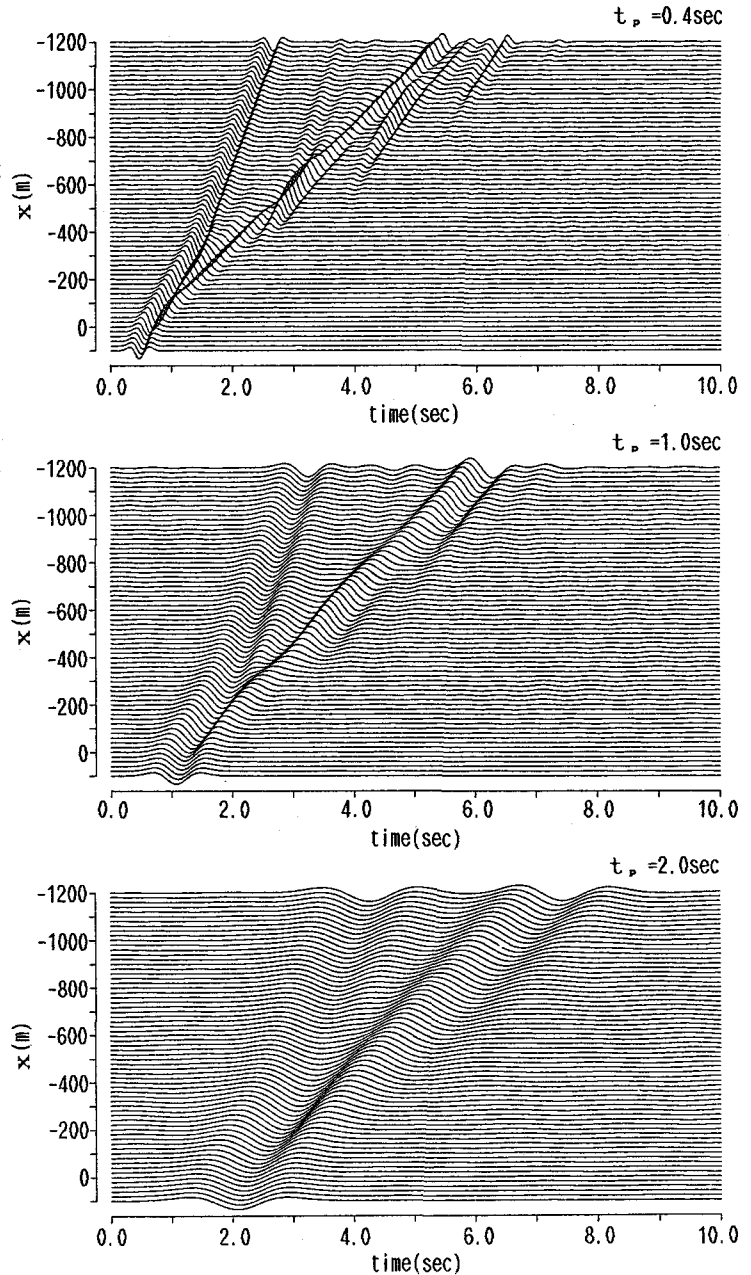


図5 傾斜層の側方が水平成層となる地盤の波動伝播解析結果

の間では、回折波が他の波動に干渉する様子は見られないが、回折波自身の振幅が $x=-700\text{m}$ では入射波に対して1.2倍程度であったものが $x=-1200\text{m}$ では2.4倍程度まで増幅しており、傾斜層における回折波の伝播性状とは異なっている。この理由のひとつとして、表層内を基盤に向かって伝播する回折波が水平境界で反射し、地表面に現れるためであると考えられる。

次に、 $t_p=1.0$ 秒と2.0秒の場合を見てみると、 $t_p=0.4$ 秒の場合とは異なり、後続波の主な走時曲線が一本見られる。まず、 $t_p=1.0$ 秒の場合、後続波のみかけの伝播速度は地表面上の位置により250m/sから320m/sまで変化している。振幅も入射波の1.7倍から3.5倍まで変化している。一方、 $t_p=2.0$ 秒の場合は、後続波のみかけの伝播速度と振幅はほぼ一定しており、伝播速度は約290m/s、また振幅は入射波の約2.9倍である。これらの結果から、 $t_p=0.4$ 秒のように入射波の卓越周期が短いと、回折波と多重反射波は同一地点で現れる時刻が異なるため、相互に干渉しあうことは少ないが、 $t_p=1.0$ 秒や2.0秒のように周期が長くなると、これらの波動の周期も長くなるので地表面に現れる時刻が異なってもお互いに干渉しやすくなるために、このように後続波も一本の走時曲線で表されることがわかる。ところで、 $t_p=1.0$ 秒の場合は、場所によって回折波と多重反射波のピークが現われる時刻がお互いに近くなったり離れたりするので、後続波の伝播速度や振幅も場所によって変化するのに対し、 $t_p=2.0$ 秒になると、周期の長さに対してピークの現われる時刻の差が相対的に小さくなるため、波動の干渉がほぼ一定した状態で起るので、後続波の伝播速度や振幅も一定しているものと考えられる。

これらの結果から、後続波の振幅は入射波の2倍から3倍程度あり、直達波の振幅と比べても同程度、あるいは、それ以上のこともある。このような波動は傾斜層で発生した回折波や多重反射波が水平成層中を伝播することによって発生するものであり、水平基盤から入射した波動からは発生しない波動である。

## 5 まとめ

本報では、不整形地盤内を伝播する回折波の影響を調べることを目的として、簡単な地盤モデルを用いて、境界要素法による地震応答解析を行った。その結果、以下ようになる。

- ① 傾斜層で発生する回折波は、従来から指摘されているように、傾斜層の端部から離れるにつれ変位振幅は減衰するが、端部付近では振幅も大きく、直達波と重なりあうこともあるので、端部付近では地震応答が大きくなることもある。
- ② 水平成層を伝播する回折波は、傾斜層を伝播する場合と異なり、変位振幅が次第に増幅されることがある。これは、水平基盤で反射した回折波が地表面に現れるためであると考えられる。
- ③ 水平成層では、回折波が他の多重反射波と重なりあうことにより、直達波よりも振幅の大きな後続波が発生することがある。

## 参考文献

- 1) 鳥海勲、大阪平野の地震動特性、日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)、487-488, 1980.
- 2) Bard, P.-Y. and M. Bouchon, The seismic response of sediment-filled valleys. Part I. The case of incident SH waves, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 70, 1263-1286, 1980.
- 3) Ishii, H. and R. M. Ellis, Multiple reflection of plane SH waves by a dipping layer, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 60, 15-28, 1970.
- 4) 丹羽義次・廣瀬壯一、傾斜層を有する地盤における理論的地震動解析、土木学会論文報告集、第337号、57-66, 1983.
- 5) 秋山伸一・宮原玄、境界要素・有限要素の結合解法による非均質地盤の動的応答解析、第40回土木学会年次講演会概要集、821-822, 1984.