

I - B212

多層地盤モデルにおける直接波の幾何減衰近似式

地熱エンジニアリング（株） 正会員 赤尾嘉彦
 東京大学地震研究所 非会員 佃 為成

1. はじめに

強震動に関する様々な解析、たとえば、Hadley and Helmberger (1980) や Irikura (1982) らの経験的グリーン関数法、Hanks (1982) や Gusev (1983) らの震源スペクトルの推定解析、Papageorgiou and Aki (1983) や Takemura and Ikeura (1988) らの強震動の推定などにおいて、実体波の幾何減衰として $1/R$ (R :震源距離)が用いられている。この幾何減衰は一様均質な媒体中に点震源があった場合の実体波の三次元的拡散による振幅の距離減衰の解であるが、現実の不均質な地盤構造にこの幾何減衰がどの程度成り立つか疑問である。

本論文では、従来の距離減衰式 $1/R$ が遠距離においては真の値から大幅にずれることを示し、実際の距離減衰を近似する新しい式を提案した。

2. 前提条件

本研究で検討対象とするのは、水平成層構造と見なせる地盤における直達P波と直達S波の幾何的拡散による距離減衰である。一般に、地震を発生する地殻部分の地震波速度は速く、地震動を観測する地表付近の地盤の地震波速度は遅い。そこで、水平方向には均一で鉛直方向には深くなるに従い地震波速度が速くなる実地的な地盤構造モデルを想定したときに、直接波の幾何減衰について検討した。

幾何減衰(geometrical spreading)の定義には、波面の幾何学的拡大による減衰を指す場合 [Aki & Richards (1980), p.98] と、それに震源と観測点の物性の違いによる増幅(波動インピーダンス比)を掛け合わせたものを指す場合 [宇津 (1977), p.75] がある。ここでは前者の定義を用いることにする。また、地震波束線(ray tube)内においては波動エネルギーは常に保存され、伝播に伴う媒質内部の摩擦減衰や、不連続面での反射によるエネルギー損失、自由表面での応答は考えない。

実際の地盤構造は、弾性波速度などの変化が連続的な場合もあるし、不連続な場合もある。それぞれの地域の地盤構造において、震源から観測点までの程度反射によってエネルギーが減少するか一般化できない。そこで、本論文ではAki & Richards の定義による純粋な幾何減衰だけを計算する。

表1 シミュレーションに用いた地盤構造

a) Palm Springs/California				
Layer	top depth (km)	P-wave (km/s)	S-wave (km/s)	density (ton/m ³)
1	0.00	5.50	2.90	2.30
2	5.50	6.20	3.50	2.60
3	16.00	6.70	3.90	2.70
4	32.00	7.80	4.50	3.00

b) Yumenoshima/Tokyo				
Layer	top depth (km)	P-wave (km/s)	S-wave (km/s)	density (ton/m ³)
1	0.00	1.80	0.68	2.00
2	1.50	2.80	1.50	2.30
3	2.30	5.60	3.00	2.60
4	5.00	6.00	3.40	2.70
5	15.00	6.70	3.90	3.00
6	31.00	7.50	4.40	3.35

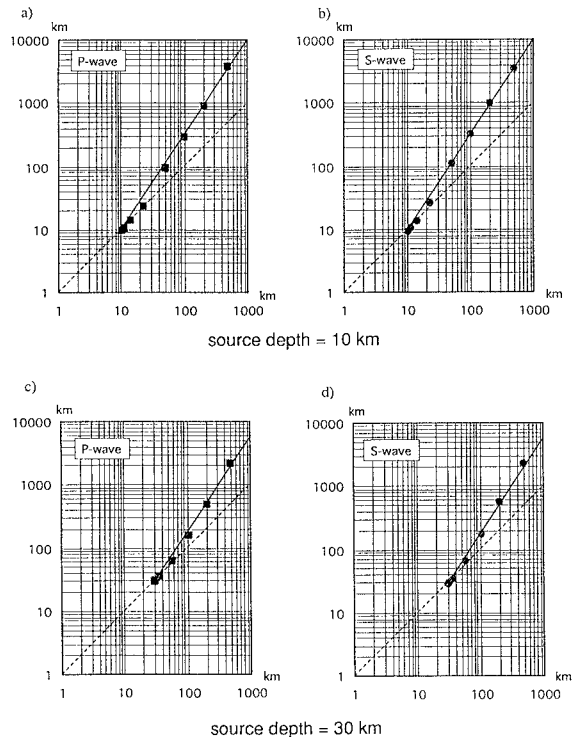


図1 硬質地盤における直接波の幾何減衰

キーワード：距離減衰式，幾何減衰，直接波，地震波

連絡先（岩手県岩手郡滝沢村鶴岡字笹森72番地 地熱エンジニアリング(株)・tel 019-684-4114・fax 019-684-6231）

3. 水平多層構造での数値シミュレーション

水平成層構造として、表1のような硬質と軟質の2種類の地盤構造を仮定して、直接波の幾何減衰の数値シミュレーションをおこなった。硬質地盤の代表としてカリフォルニア州パームスプリングスの地盤を想定した。軟質地盤の代表として東京夢の島の構造を想定した。この2種類の地盤構造に対して、深さ10kmと30kmに震源を設定した場合の幾何減衰を数値計算した。図1, 2は2つの地盤構造について直達P波および直達S波の幾何減衰Dを計算したものである。計算ポイントは震央距離が2km, 5km, 10km, 20km, 50km, 100km, 200km, 500kmの8ポイントである。図の横軸は震源距離Rを、縦軸は等価減衰距離(=1/幾何減衰)を表す。また、図中の点線は1/R減衰を、黒丸と黒四角は数値計算した幾何減衰を表す。

以上の結果より、直接波の幾何減衰の厳密解は震央距離が大きくなると従来式(1/R)よりずれが大きくなり、震央距離500kmでは10倍ほどの差が生じる。

4. 近似式の提案

図3のように一様均質な半無限媒体の表面に、層厚hの非常に薄く非常に低速度の層がある場合について考える。仮に、表層の低速度層の速度変化が半無限媒体から連続的であるとする、半無限媒体と表層の境界面では地震波の反射は生じず、地表面まで波動エネルギーは保存される。すなわち、立体角 $d\Omega$ 、放射角 θ で放射された地震波束線は境界面では dS' 面を通過し、地表面では dS'' 面に投影される。地表面付近で地震波速度が十分に小さければ、地表面では波線がほぼ真上を向いて波面は地表面とほぼ平行になる。このとき表層厚hが震源深さHに対して十分に小さければ、 dS'' 面と dS' 面の面積と等しいと見なせる。従って、エネルギー密度の幾何減衰Wと振幅の幾何減衰Dは以下の近似式で表わせる。

$$W = d\Omega / dS'' = H/R^3$$

$$D = \sqrt{d\Omega / dS''} = H^{0.5} / R^{1.5}$$

ただし、 $dS'' = dS' = dS / \cos \theta = R^2 d\Omega / H$

図1, 2において、幾何減衰の厳密解と近似式による推定値を比較する。それぞれの震源の深さに相当する震源距離10kmと30kmのところから僅かな誤差範囲内で近似式 $H^{0.5}/R^{1.5}$ の線の付近にあることがわかる。軟弱地盤の遠距離地点において僅かな誤差が見られる以外、対数軸上ではほとんど差がみられない。

5. まとめ

従来、強震動などの幾何減衰は $1/R$ (R:震源距離)が用いられてきた。ところが、各種の水平成層構造に対して幾何減衰を計算すると、直接波は $H^{0.5}/R^{1.5}$ で近似的に減衰することが明らかになった。数値シミュレーションでは、表層付近のごく軟弱層までモデル化しても提案する近似式と計算結果はよく一致することを確認した。この結果は表層に軟弱層がある場合も含め、各種の地盤に幾何減衰 $H^{0.5}/R^{1.5}$ が適用できることを示している。

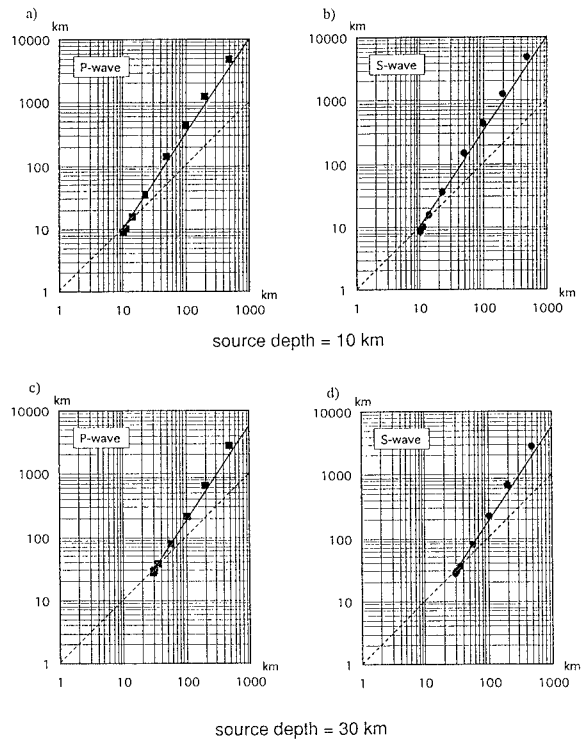


図2 軟弱地盤における直接波の幾何減衰

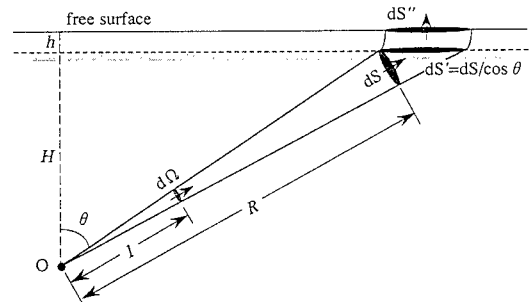


図3 表層に低速度層のある半無限媒質でのray tubeの拡散の状況