

(7) アレー観測記録を用いた入射波分離の方法

清水建設研究所 赤尾嘉彦 横田治彦

§1 まえがき

地中および地表で観測される地震動には、数多くの地震波が含まれている。仮に、地盤が震源から観測点まで完全な水平多層構造をしているとしても、地震動の成分には実体波、その反射波、表面波がある。実際には、グローバルな波、地形や地盤の不均一による波、地震波以外のノイズ、などが含まれ、これらの全ての波が重なり合ったものが地震動として観測される。観測された地震動を利用して各種の解析を行うときに、どのような波の成分が含まれているかを知ることが意義のあることである。例えば、地震学においては、実体波の初動から断層の運動方向が分かり、表面波の分散性から地層構造を予測できる。また、耐震工学において、深さ方向および水平方向に広がりを持つ構造物の振動解析法を、実体波か表面波によって、さらにそれらがどの方向から伝播するかによって、本来は変えなければならない。しかし、観測記録から、実体波と表面波の成分を解析的に分離する方法は、まだ確立されていない。今回、電力共同研究として進められている、岩盤中でのアレー観測の記録が入手できた。岩盤中での記録は、ノイズが少なく、地表付近の複雑な地形や地層の影響を受けにくく、入射波、反射波、比較的長周期の表面波（短周期は、地表面近くに限られるので）の成分が、卓越していると思われる。そこで、この記録を用いて、入射角を考慮した S-H 波の数値的分離を試み、ラブ波の分離の可能性を考えてみた。

§2 観測と解析

東松山において、図 1 のようにアレーが配置され、No. 6 以外は全て岩盤内に、中心部には上から、No. 6, No. 2, No. 1, の地点に地震計が設置されている。観測期間中、岩盤内で 5 gal 以上記録した地震を表 1 に載せた。このうち、観測点と震源との位置関係から、表面成分の少ないと思われる No. 158 の地震を選び、観測された水平 2 成分を、Radial, Transverse, の成分に変換して、Transverse 成分について解析をした。解析法は、図 2 のように、均質岩盤中の上下 2 点 (A 点及び B 点) において、2 つの時系列記録 ($U_A(t)$, $U_B(t)$) が得られたとき、地震波が鉛直上下方向に伝播する 2 つの S-H 波 (入射波 f と反射波 g) だけだとすると、以下の方法で 2 つの波を分離することができる。

$f_A = f(t)$, $g_A = g(t)$, とし非減衰とすれば,

$$U_A = f_A + g_A = f(t) + g(t)$$

$$U_B = f_B + g_B = f(t+T) + g(t-T) \quad (1)$$

(T は A B 間の波動伝播時間)

(1) 式をフーリエ変換すると、

$$U_A(\omega) = F(\omega) + G(\omega)$$

$$U_B(\omega) = F(\omega)e^{i\omega T} + G(\omega)e^{-i\omega T} \quad \dots\dots\dots (2)$$

(2) の方程式を、 $F(\omega)$, $G(\omega)$, についで解くと、

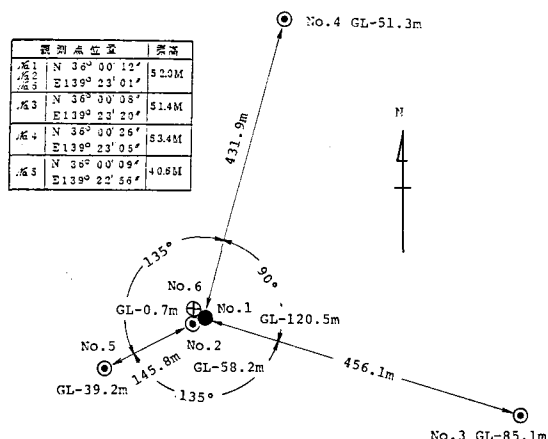


図 1 アレー配置図 (東松山観測所)

整理番号	震央位置	発生日	規模	震源深さ	震央距離	最大加速度
139	茨城県沖	'79.11.25	M 5.4	90 km	164km	7 gal
158	関東北部	'80. 2. 2	4.2	50	43	10
323	伊豆沖	'80. 6.29	6.7	10	121	6

表 1 岩盤内で 5 gal 以上の加速度を記録した地震

$$F(\omega) = \frac{-U_A(\omega)e^{-i\omega T} + U_B(\omega)}{e^{i\omega T} - e^{-i\omega T}} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$G(\omega) = \frac{U_A(\omega)e^{i\omega T} - U_B(\omega)}{e^{i\omega T} - e^{-i\omega T}}$$

(3)式を逆変換すれば、入射波 $f(t)$ 、反射波 $g(t)$ 、が求められる。また、岩盤の粘性減衰を複素せん断剛性率 μ^* を使って評価した。

$$\mu^* = \mu + i\omega\eta = \mu(1 + 2ih) \quad \dots\dots\dots(4)$$

μ : ラーメの定数 (せん断剛性係数)

η : 粘性定数

ω : 円振動数

h : 減衰定数 ($= 1/2Q$)

μ^* を用いると複素波数 K^* は次のようになる。

$$K^* = \omega \sqrt{\rho / \mu^*} \quad \dots\dots\dots(5)$$

ρ : 単位体積質量

以上より、(3)式は次のようになる。

$$F(\omega) = \frac{-U_A(\omega)e^{-iHK^*} + U_B(\omega)}{e^{iHK^*} - e^{-iHK^*}} \quad \dots\dots\dots(6)$$

H : A B 点間の距離

図3のように、入射方向が鉛直でないときは、 U_A 、 U_B 、の相互相関関数より、 A B 点間の最適な時間ずれを選択して、入射角を決める。すなわち、対象とする地震 (表1のNo. 158) のNo. 2とNo. 1の地点 (図1参照) の記録 (図4) の相互相関関数を求める。(図5、この図は両記録の分散を用いて正規化しており、両波形が完全に相似なとき、相互相関関数は最大値1.0になる) この結果から、最大のピーク値は時間ずれ0.08secのときで、0.63となる。

この時間ずれを2点間の平均せん断波速度720m/secで距離に直すと58mに相当し、これが入射波に原因するものならば入射角は 20° となる。(図3) 相互相関関数は、固有振動や地震波の周波数成分によってもピークが表われ、かならずしも最大値が、入射後の伝播によるものとは断言できない。しかし、この時間ずれが、入射波の伝播時間に相当すると考えて、妥当な値であること、最大値0.63というのは、相互相関関数としては非常に大きな値であり、大きな波動エネルギーを持った入射波によって表われたと考えるのが自然であることなどから、正しいと判断した。

以上のことを踏まえ、図3の記録から、減衰5%と2%(Q 値で10と25)の場合について計算した。(図6) ただし、反射角は入射角と逆向きで、同じく 20° とした。この計算において、(6)式の分母の絶対値が、極小になる周波数では、両隣の $F(\omega)$ または $G(\omega)$ の値で近似した。 Q 値が10、25というのは、岩盤の値として小さ過ぎる。(減衰が大き過ぎる)ところが、減衰を小さくすると、(6)式の分母が特定の周波数付近で0に近づくため、誤差が増幅され易い状態となる。物理的には、この周波数は、 A B 間の距離が半波長の整数倍になる波長に当る。減衰2%の場合 (図6のb)) では、この原因で、No. 2点の観測記録 (図4のa)) にない周波数成分が、解析波に表われている。図7は、No. 2点の観測記録 U_A と減衰2%として求めた入射波 f_A のパワースペクトルであるが、 f_A の方は一定周波数間隔で、 U_A の方よりも

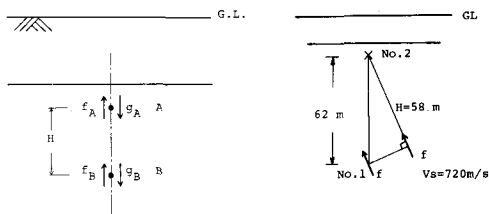


図2 鉛直の入射波と反射波 図3 斜め入射波

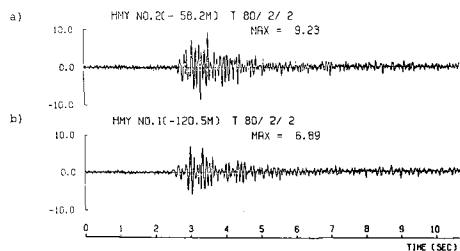


図4 観測記録 (a) No. 1点, (b) No. 2点)

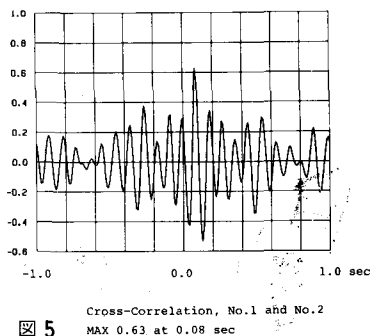


図5

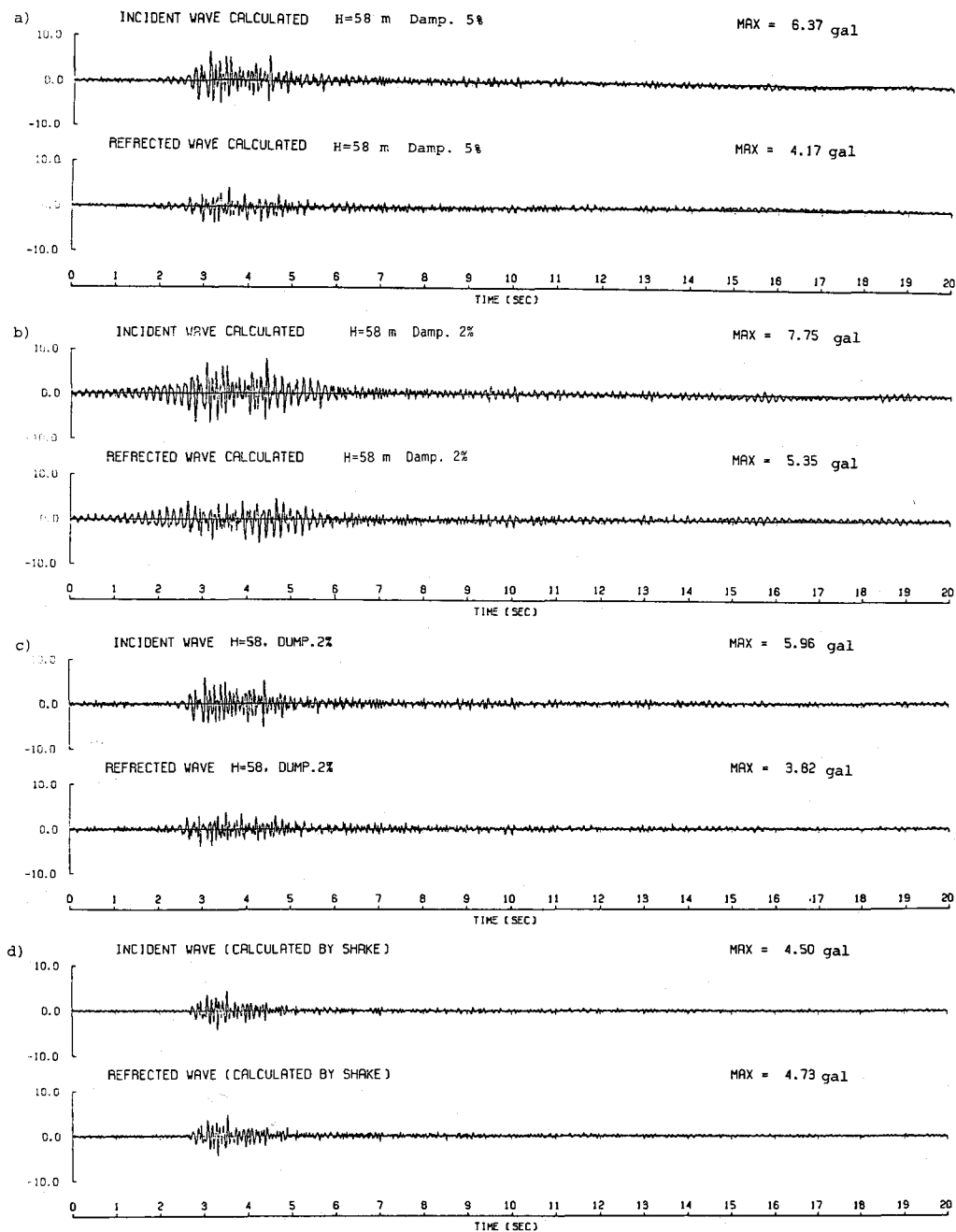


図6 a), b) は, No. 1点とNo. 2点の観測記録より計算したNo. 2点での入射波と反射波で, c) は b)を改良したもの。また d) はNo. 2点での観測記録より, 重複反射理論で入射波と, 反射波を計算したもの。ただし, a)は減衰5%, b), c), d)は減衰2%の場合。

相当大きな値になっている。これを解決するために、誤差の生じ易い周波数帯において、 f_A と g_A のパワースペクトルの和が、 U_A のパワースペクトルを越えないように、比例的にフーリエ変換 F_A と G_A を小さくした。(波形は図6のc)に、スペクトルは図7のc)に対応)

図6のd)に減衰2%とし、重複反射理論で計算した入射波と反射波を示す。

§3 応用の可能性・まとめ

今回の解析の対称とした地震動は、表面波の成分がほとんど含まれないものであった。もし、実体波と表面波が共存するときは、同一直線上にない3地点以上での記録があれば、分離が可能であろう。仮に、入射S-H波が最も卓越していて、次にラブ波が卓越しているとすると、3つの観測記録(U_A, U_B, U_C)を最もよく満足する入射波 f を求め、次に入射波成分を除いたもの($U_A' = U_A - f_A, U_B' = U_B - f_B, U_C' = U_C - f_C$)から、同じ手法でラブ波が求められる。ただし、この領域をラブ波が通過するとき、位相の分散性がない(波形がくずれない)と仮定しなければならない。もし、ラブ波が特定の周波数付近に集中しているならば、この条件は満たされる。また、岩盤内の波の成分が、入射波と反射波だけであり、同一岩盤内の鉛直線上の3地点の記録が得られれば、3つの方程式から、入射波、反射波減衰が得られる。

アレー観測によって、一地点の観測だけでは得られない、地震波に関するデーターを得られる。その中でも、地震波成分の分離は重要なものである。耐震工学にとって、完全に分離された地震波成分は、構造物の振動解析に利用できるばかりでなく、半経験的な断層モデルによる地震波の予測にも応用できる。

〔謝辞〕

当解析に用いた地震記録は、「岩盤強震アレー観測委員会」(表俊一郎委員長)¹⁾による各地の観測記録のうち、東松山観測所で得られた記録である。
参考文献 1) 表俊一郎 他 「アレー観測による岩盤の強震地動に関する研究、その1, その2」

日本建築学会大会 昭和55年9月

2) 阿部康彦 他 「構造物底面直下の地震観測波形からの上昇波と下降波の分離について」

日本建築学会大会 昭和48年10月

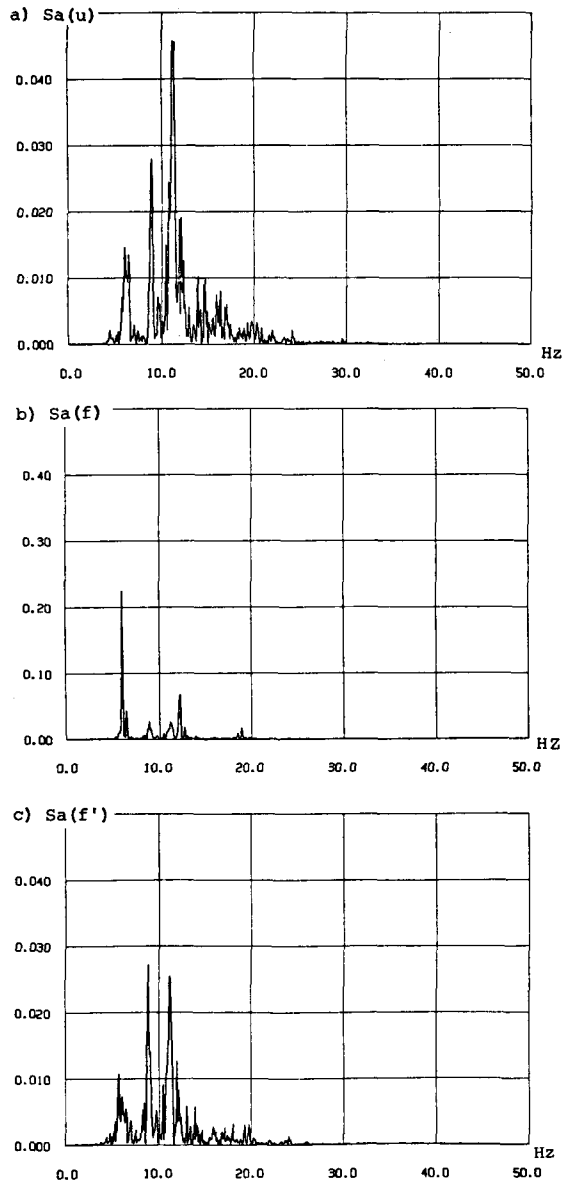


図7 地震波のパワースペクトル

aは観測記録(Transverse成分), bは理論入射波の, cは誤差の生じ易い周波数帯を修正した入射波の加速度のパワースペクトル