

I-B 183 固有モードで構成される半無限成層地盤のインパルス応答についての検討

佐藤工業 正会員 秋山伸一
早稲田大学 正会員 宮原 玄

1. はじめに

筆者らは、地盤内を伝わる実体波と表面波の関係を調べる目的から、これまでに半無限成層地盤における面外波動のインパルス応答を、Love 波とリーキングモードの重ね合わせによって定式化している¹⁾。本文では、この定式化に沿った数値計算により算出されるインパルス応答を示し、波線理論を用いてインパルス応答の性質について検討した結果を述べる。

2. 定式化の概要

インパルス応答の定式化で対象となる地盤モデルを Fig.1 に示す。このモデルは半無限基盤と厚さ H の表層地盤で構成されている。図中の $\mu_j, C_j (j=0,1)$ は、各々基盤と表層のせん断剛性およびせん断波速度を示す。

Fig.1 において、加振点 S に加振力 P のインパルスが作用すると、観測点 R の応答は振動数と波数の二重積分の式で表される。二重積分のうち、波数についての積分は径路の変更により、Love 波モードの極の留数と分岐点周りの積分の和で与えられることが知られている。一方、分岐点周りの積分についても径路を Riemann 面下葉上に拡張して変更すると、リーキングモードの和で示すことができる。このリーキングモードは Love 波と同様に面外波動の特性方程式から与えられる固有モードの一種である。

したがって、インパルス応答は次式に示すように最終的にこれらの固有モードの重ね合わせによって表現される。

$$u_1(x, z, t) = \frac{P}{\mu_1 \pi} \sum_n \operatorname{Re} \int_{\Gamma} A(\omega, \xi_n) \cos \eta_1 z \cdot e^{i(\alpha x - \xi_n x)} d\omega \quad (0 \leq z < H) \quad (1)$$

$$u_0(x, z, t) = \frac{P}{\mu_1 \pi} \sum_n \operatorname{Re} \int_{\Gamma} A(\omega, \xi_n) \cos \eta_1 H \cdot e^{i(\alpha x - \xi_n x) - i\eta_0(z-H)} d\omega \quad (H \leq z) \quad (2)$$

ここに、

$$A(\omega, \xi_n) = \frac{\cos \eta_1 h}{\xi_n} \left(\frac{\mu_0 \mu_1}{\eta_0} \cdot \frac{\eta_1^2 - \eta_0^2}{\mu_1^2 \eta_1^2 - \mu_0^2 \eta_0^2} + iH \right)^{-1}$$

$$\eta_j = \sqrt{k_j^2 - \xi_n^2}, \quad k_j = \omega / C_j \quad (j=0,1)$$

上式において、 i は虚数単位、 ω は角振動数、 ξ_n は Love 波やリーキングモードの n 次の固有値を示す。さらに、Fig.2 には ω の積分経路 Γ の取り方を示す。図中の ω_{cn} は、 n 次の cutoff frequency を示す。Fig.2 より、Love 波モードの区間では積分経路は実軸上を進むのに対して、リーキングモードの場合は複素平面内を複雑に進む経路となる。

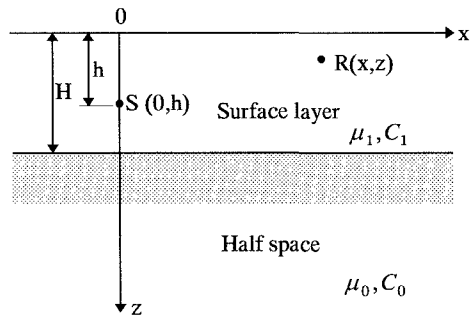


Fig.1 A two-layered model for the formulation

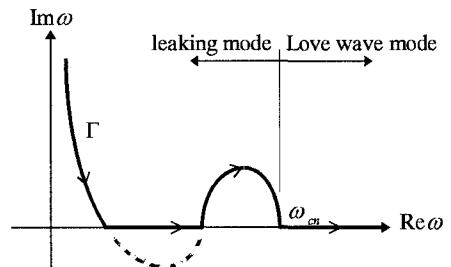


Fig.2 Path of the integration in the ω -plane

Table 1 Constants of the model.

	Surface layer	Half space
$H(m)$	100	—
$h(m)$	50	—
$C_j(m/sec)$	500	1000
$\mu_j(kN/m^2)$	5.0×10^5	2.0×10^6

3. 数値解析

前述の定式化に従い、Table 1 に示す物性値を用いて計算された地表面のインパルス応答を Fig.3 に示す。Fig.3 より、応答のピークが現れる時刻は観測点によって連続的に変化しており、観測点が加振点から離れるとパルスが現れる時刻も遅くなることからわかる。また、最初に現れるパルスは、加振点の真上($x=0$ m)で振幅が最も大きく鋭い形状をしているが、加振点から離れると振幅は小さくなり、形状の鋭さも鈍くなる。さらに、観測点が加振点から離れると、応答の継続時間が長くなる。

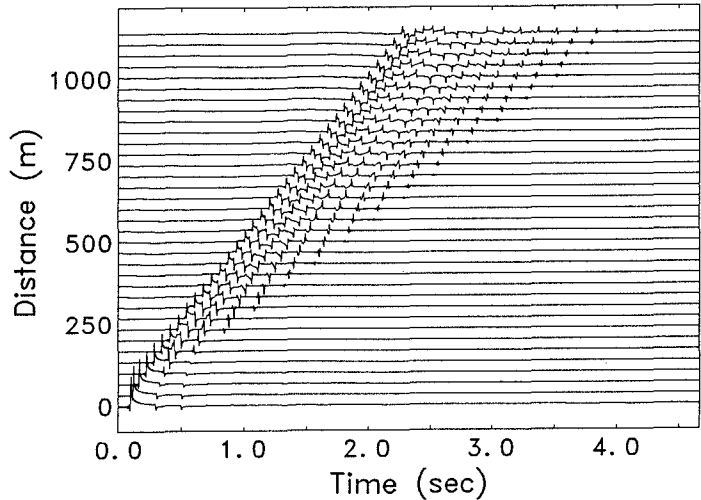


Fig.3 Impulsive response in the ground surface

次に、Fig.4 に示す走時曲線を用いて、インパルス応答の挙動について検討する。ここに示す走時曲線は、加振点を出発した波線が地表面に到達する位置と時刻の関係を波線理論によって表したものである。そこで、Fig.3 と Fig.4 を比べると、インパルス応答のピークが現れる位置と時刻は走時曲線に一致しており、パルスのピークは波線理論における反射波や先駆波に対応する。

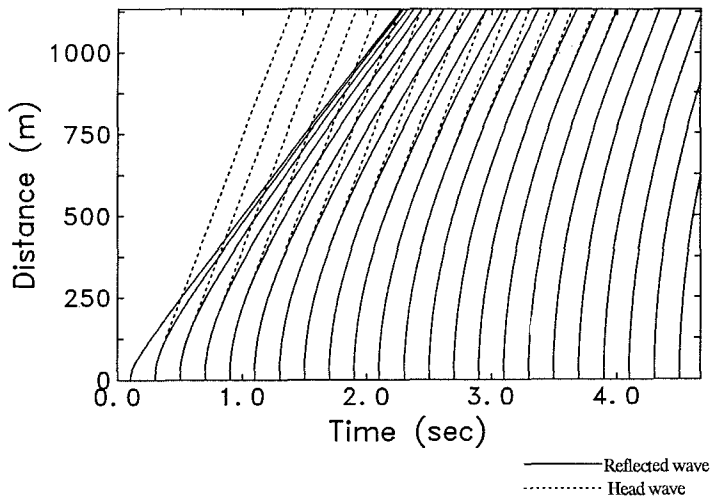


Fig.4 Travel-time curve

ところで、Fig.3 では、加振点の近傍で反射波のパルスは急速に減衰するのに対して、先駆波が現れる地点から先では再びパルスが明瞭に現れる。これらは次のように説明される。表層地盤を多重反射する波のうち、加振点近傍の波動は、基盤面での反射によってエネルギーの

一部が基盤内に放射されるため、地表面で観測されるパルスは減衰する。一方、先駆波が出現する地点では基盤面から臨界角で反射した波動が現れる。したがって、この地点から先では基盤面で全反射した波動が観測されることになる。このように基盤面で全反射する波には前述のような波動の減衰性はなく、地表面でパルスが現れることになる。

4. まとめ

ここに示した検討結果から、筆者らが先に示した固有モードの重ね合わせによって定式化されたインパルス応答のピークは、波線理論から導かれる走時曲線に一致する。さらに、インパルス応答の挙動についても波線理論の立場から説明することができる。したがって、本定式化によって計算されるインパルス応答は物理的にも整合性のとれたものであると言える。

参考文献

- 1) 秋山 宮原：固有モードの重ね合わせによって表現される半無限成層地盤のインパルス応答，第9回日本地震工学シンポジウム，pp.313-318，1994。
- 2) 秋山：特性方程式から与えられる固有モードを用いた半無限成層地盤におけるインパルス応答の定式化，土木学会論文集 No.519/I-32，pp.149-159，1995。