

堆積盆地内のやや長周期地震動の 伝播性状に関する基礎的研究

片岡俊一¹・大町達夫²

¹正会員 工修 清水建設(株)技術研究所 (135 江東区越中島3-4-17)

²正会員 工博 東京工業大学総合理工学研究科教授 人間環境システム専攻
(226 横浜市緑区長津田4259)

堆積盆地内において、やや長周期帯域の優勢な表面波が震央方向と異なる方向から伝播していることが、しばしば観測される。そこで本報告では、堆積盆地内の波動伝播性状を明確にするために、深さ一定の表層と鉛直境界を有する基盤の2層からなる単純なモデルを用いて、3次元波動伝播の数値計算を行った。その結果、波動伝播に影響を及ぼしている様々な因子が改めて確認された。また、震央方向から到来する波動に加えて、境界の影響を受けた波動が到来していた。今後、本結果を慎重に吟味し、やや長周期地震動の予測手法を確立したい。

Key Words : Basin, Long-period ground motion, Surface wave, Wave propagation, 3D-BEM

1. はじめに

これまで我々は、1995年兵庫県南部地震の際のやや長周期地震動の伝播性状を観測、数値シミュレーションの両面から検討してきた。その結果、やや長周期帯域では表面波が震央方向と異なる方向から伝播していることが分かった¹⁾。

表面波が、震央方向と異なる方向から到来することは、関東平野でも観測されている²⁾。このような性状をもたらす要因として、盆地の底部形状および震源と盆地内観測点の相対的な位置関係が考えられる。しかしながら、実地震を対象とした波動伝播シミュレーションでは、既にこの要因が含まれており、この要因の定量的な評価は困難である。

現在では、震源および地盤を3次元でモデル化した数値計算は可能である。しかしながら、地盤を3次元にモデル化することは量的にも質的にも容易ではない。一方、卓越した波動が、ある特徴的な方向から伝播することが前もって分かれば、この波動に限れば地盤を伝播方向に沿って2次元的にモデル化して取り扱うことが可能性となり、3次元計算に比較して量・質ともに簡便になる。現在では、このように震源を3次元的に、地盤を2次元的に扱う解析方法を2.5次元解析と呼ぶことが多い。

そこで、本報告では単純な震源と単純な形状をした地盤のモデルにより、地震動伝播のシミュレーションを行い、優勢な波動がどのような方向から到来するかを調べる。

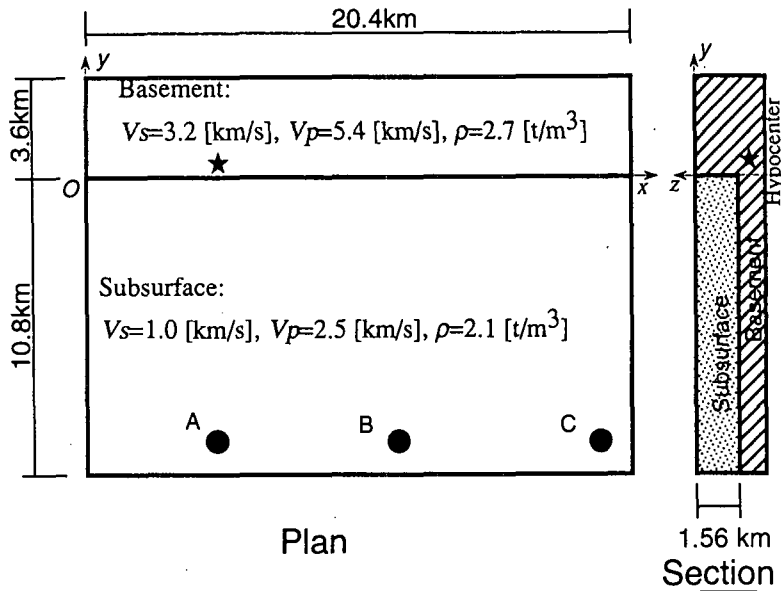
2. モデルの概要

本報告では図1に示すモデルを考える。地盤は、基盤と表層の2層構造であり、両者が鉛直な境界を有している。物性は、図中にも示してあるが、表層はS波速度、P波速度、密度の順に、1.0[km/s], 2.5[km/s], 2.1[t/m³]である。基盤層は、同様に3.2[km/s], 5.4[km/s], 2.7[t/m³]である。表層の厚さは1.56[km]とした。図には、x,y,z軸も記入してあるが、以降波動の伝播などを論じるときは、記述が簡単になるように、y軸の正方向を北、x軸の正方向を東と、地図のように表現する場合もあることを断っておく。

震源の位置は、図中に星印で示してある点で、走向は図中のx軸方向、傾斜角は90度として、点震源として扱った。震源深さは2.0kmで、堆積層下面より下になっている。滑りはrakeを15度有した右横ずれであり、滑り量は1mとした。震源時間関数はライズタイム1秒のramp関数である。

このモデルでは、表層厚さが変化しないために、表面波の特性が伝播に伴って変化することはない。よって、伝播速度(位相)速度から、表面波と対応づけることが容易となる。

2層の平行成層構造とした時の表面波の振幅スペクトル³⁾を算出し、図2に示す。振幅スペクトルとは、メディアムレスポンスを波数で除したものであり、Love波の場合は水平動の励起され易さを、Rayleigh波の場合には上下動の励起され易さを表している。図2(a)のLove波の場合には、基本モードは0.16Hzでピークとなっている。これは、4分の1波長則から求められる表層の卓越振動数



Hypocenter: position(4.8, 0.6, -2.0)
 A: position:(4.8, -9.6), epicentral distance:10.20km, Back azimuth:N360E
 B: position:(12.0, -9.6), epicentral distance:12.49km, Back azimuth:N325E
 C: position:(18.6, -9.6), epicentral distance:17.16km, Back azimuth:N307E

図1 計算モデルの概要

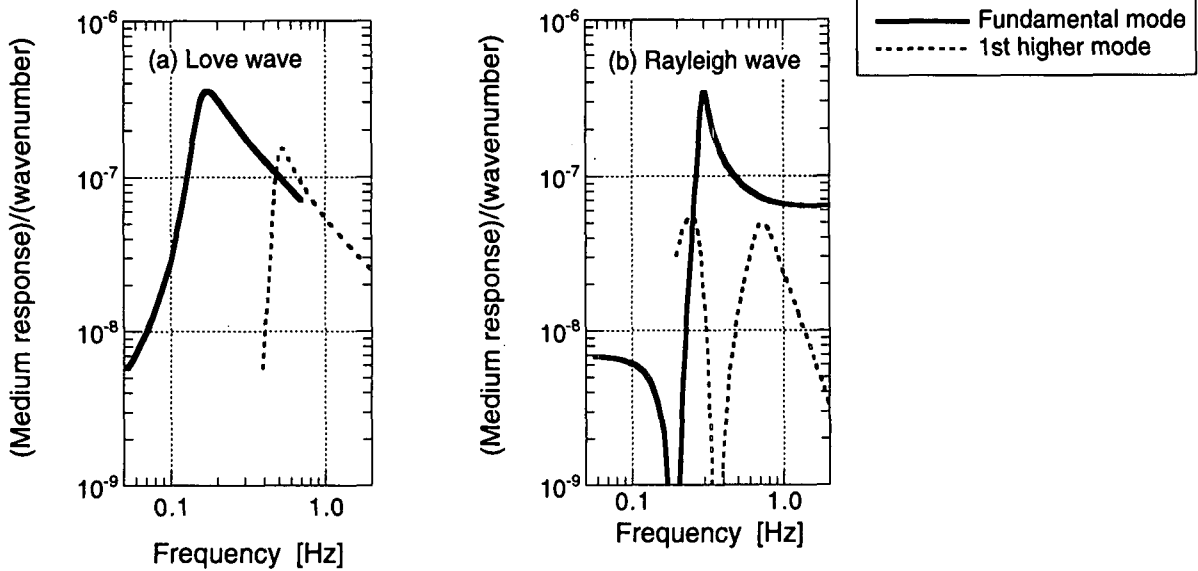


図2 地盤モデルを平行成層と仮定したときの表面波の振幅スペクトル

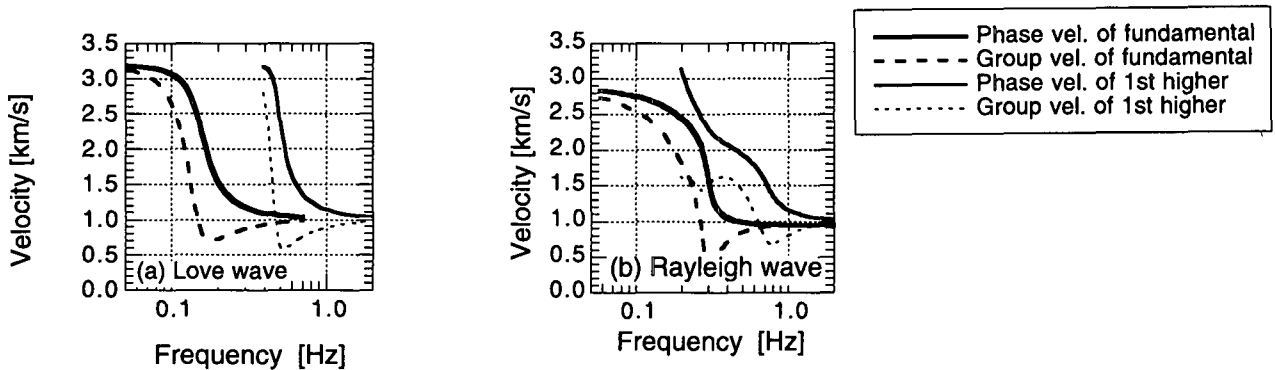


図3 地盤モデルを平行成層と仮定したときの表面波の理論分散曲線

に対応している。Rayleigh波の場合には基本モードは約0.3Hzでピークとなっているが、1次高調モードもほぼ同じ振動数でピークになることが分かる。

同様の仮定でもとめた、理論分散曲線を図3に示す。当然のことであるが、振幅スペクトルのピークの位置で、群速度最小となる。約0.15Hzから0.30Hzの間では、Rayleigh波の位相速度のほうがLove波より速く、この振動数範囲ではRayleigh波の方が、Love波よりも先に到来することが分かる。

地震動シミュレーションは、振動数領域の3次元境界要素法によった⁹⁾。基本解は、全無限体のものを用い、表層表面の節点間隔は0.6km、基盤層では1.2kmとした。計算は、0.01Hz間隔で0.64Hzまで行った。計算に当たり、地盤の減衰は考慮していない。

3. 結果と考察

図1に示した堆積層上の観測点A、B、C地点における速度波形を紹介し、考察を述べる。

図4は、各地点の速度波形と水平面内の粒子軌跡である。図には、平行成層構造を仮定したP波、S波の到来時刻も示してある。水平面内の軌跡は図中に横線を引いた時刻のものである。各地点の波形の先頭は、破壊開始の0.5秒まえとしてそろえてある。図5は、図4に示した波形のフーリエスペクトルである。

まず波形全体であるが、各地点ともS波到来時刻以降の後続位相の部分の振幅が大きく、表面波が卓越していることが分かる。また、遠方の観測点で上下動が顕著であり、振動の継続時間が長いことが指摘できる。スペクトルを見ると、水平動では約0.2Hzに、上下動では0.3Hzに卓越が見られる。この卓越は、表面波によるものであることが、前述の図から分かる。

A地点の波形は、水平面の軌跡からx方向（断層平行方向）が卓越していることが分かる。特に、x成分の最大値の時点では、軌跡にあるようにx方向にのみ振動しており、Love波に対応するものと考えられる。この位相に関して、到来時刻と位相速度から発生地点を推測すると、本来の震源となる。

A地点の上下動は、見かけ上逆分散の傾向を示しているが、これは高調モードの影響と考えられる。つまり、震源の近傍においては、あらゆるモードの表面波が発生するためであろう。逆に言えば、震源近傍の表面波を評価する場合には、高調モードまでを考慮すべきであることを示唆している。また、理論的には、水平横ずれの場合のずれと直交方向のP波の遠地項のラディエーションパターン係数はゼロである。つまり、本モデルでは、y軸方向のP波の放射は非常に小さいことが推察される。本モデルではRayleigh波を励起するために断層の滑りにrakeを持たせたが、ここで観測されたRayleigh波は副次的に生成された可能性もある。

B地点の水平面内の軌跡を見ると、震央方向からまずRayleigh波が到来し、次にLove波が到来していることが推測される。上下動と水平動の関係を見ると、Rayleigh波と言った時刻では、y成分とz成分の位相が90度ずれて

おり、Love波と判断した時刻においてはz成分の振幅は小さい。なお、別途行った、センブリンス解析においても波動の到来方向はRayleigh波、Love波ともに震央方向であることを確認している。

z成分では、2つの波群が認識される。前のものは、到来時刻や方向から判断して、震源から発生したRayleigh波と考えられる。しかしながら、後ろの波群については、震源あるいは鉛直境界から発生したとすると、かなり遅い速度で伝播していることになる。アレー解析によれば、位相速度は前の波群と変わらないことが分かっているので、今後発生メカニズムについて究明していきたい。

c地点の波動もB地点と同様に、まずRayleigh波が到来し、次にLove波が到来している。ただし、軌跡の卓越方向はB地点のものに比べて、南北の方向性が強いように見える。つまり、波動は震源方向よりも北側から到来していることになる。次の時点の軌跡ではx成分が卓越しており、これがLove波であるならば、北側から到来していることになる。

z成分では、B地点と同様に2つの波群が認識され、両者の時間差はB地点のそれよりも大きくなっている。後半の位相については、前述したように今後の課題としたい。

本論文の課題の一つである、波動が震央方向から到来しないことについて考えてみる。例えば鉛直境界において水平方向のスネルの法則により波動の伝播方向が変わると仮定すると、遠方になるに従って震源から放射された波動の鉛直境界における入射角が大きくなるので、表層の屈折角度が小さくなり、見かけ上北側から伝播しているようになる。但し、震源が境界に近い場合、震源の射出角が大きく変化しても、観測点から見た場合には屈折波が生ずる点の方位はほぼ同じとなるために、非常に精度の高いアレー解析が必要となる。また、表層側の代表速度をどうするか、解決が必要である。

4. おわりに

本報告では、堆積盆地内で表面波がどのように伝播するかを、単純なモデルによる数値計算結果で検討した。

単純なモデルゆえに、震源の放射特性や表面波の高調モードの影響など、波動伝播に影響を及ぼしている様々な因子が改めて確認できた。しかしながら、現段階では計算された波動すべてについての説明は完結していない。

今後、観測点と震源との相対位置の関係あるいは震源の放射特性の影響を評価し、さらに有限断層の影響も考慮して、やや長周期地震動の予測手法を確立したい。

謝辞: 本論で使用した計算プログラムは、片岡正次郎博士（カリフォルニア工科大学土木学科客員研究員）が開発されたものである。片岡博士には、境界要素法の基礎からプログラムの使用まで、様々な指導を頂いた。記して謝意を示す。

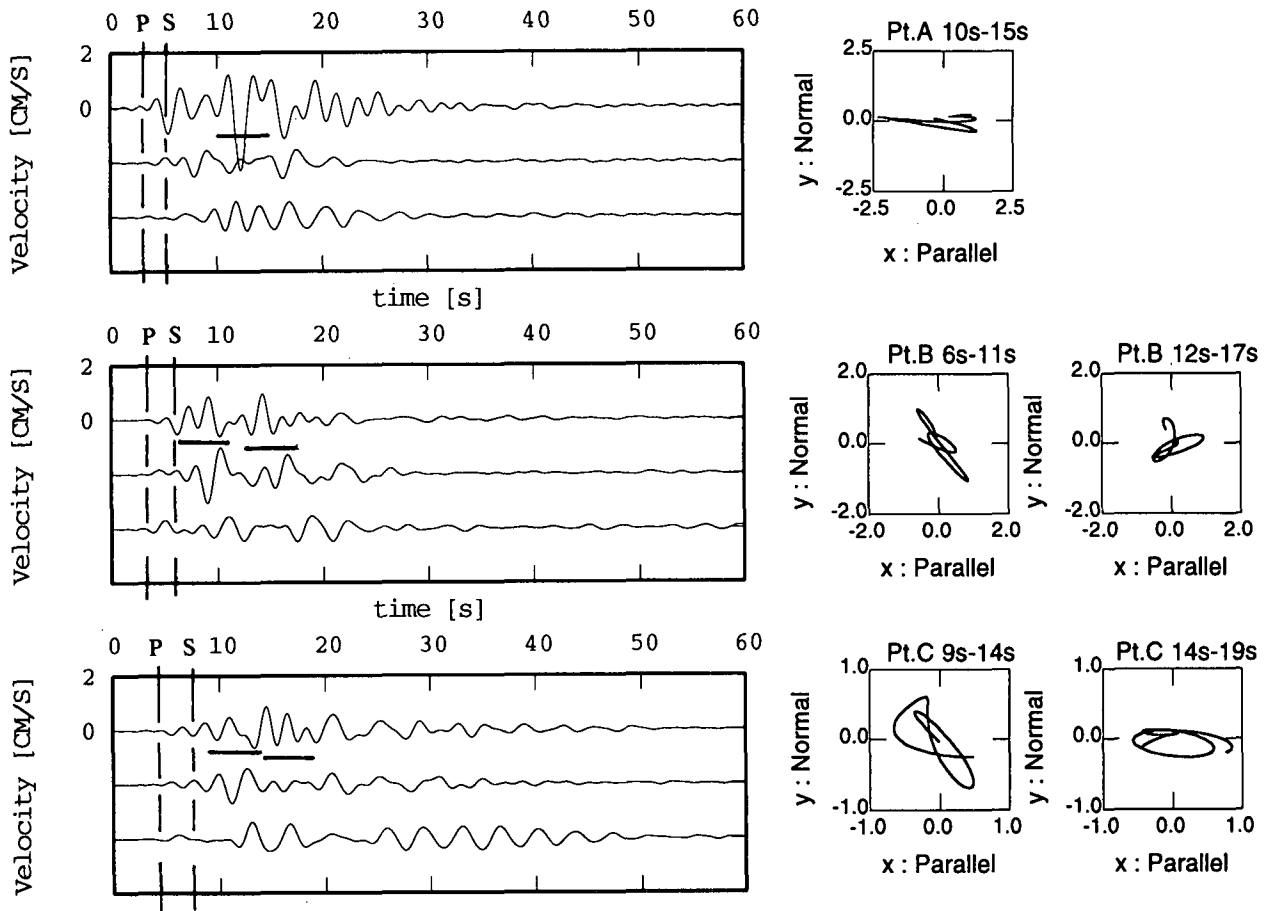


図4 3地点における速度波形とその水平面内軌跡

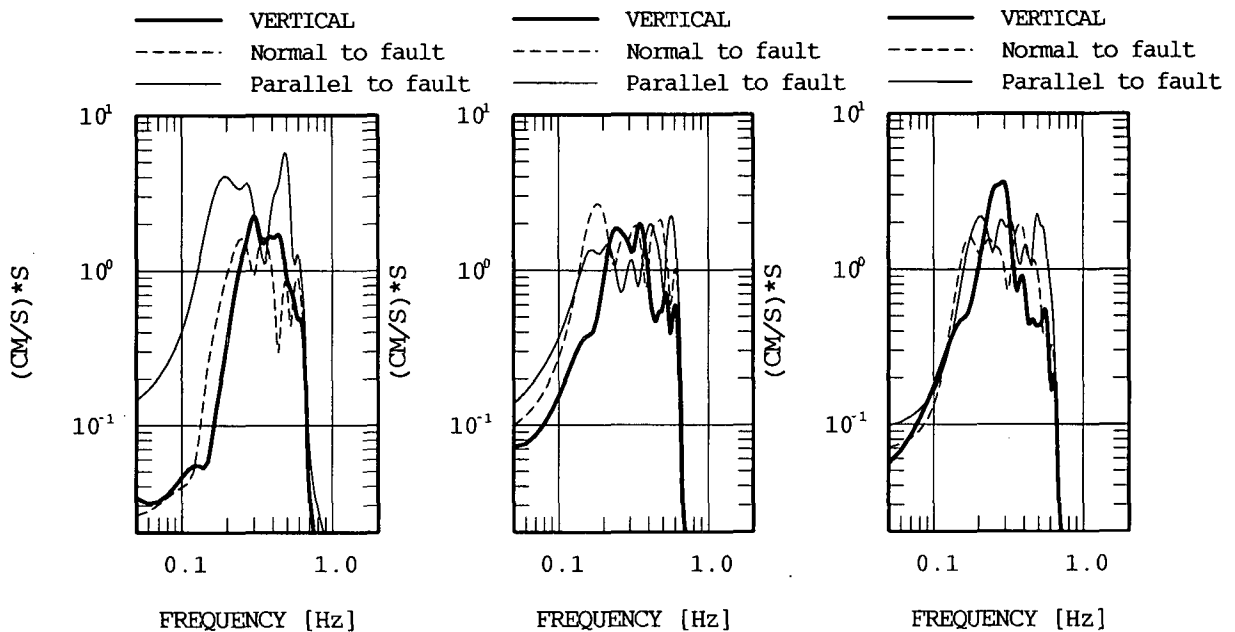


図5 3地点における速度波形のフーリエスペクトル

参考文献

- 1) 片岡俊一, 片岡正次郎, 大町達夫: 観測記録と数値シミュレーションから推定される1995年兵庫県南部地震によるやや長周期地震動の伝播特性, 自然灾害科学, 第16巻, 2号, 1997 (掲載予定).
- 2) Kinoshita, K., H. Fujiwara, T. Mikoshiba and T. Hoshino: Secondary Love waves observed by a strong-motion array in the Tokyo lowlands, Japan, *J. Phys. Earth*, vol.40, 99-116, 1992.
- 3) 大町達夫: 振動学的手法によるLove波の再定式化へのアプローチ, 東京工業大学土木工学科研究報告, No. 33, pp. 65-75, 1984. 7.
- 4) 片岡正次郎: 三次元境界要素法による1995年兵庫県南部地震のシミュレーション, 東京工業大学土木工学科研究報告, No. 54, pp. 11-20, 1996. 6.