

深部地盤構造の不整形性が濃尾平野の地震動伝播性状に及ぼす影響に関する研究

名古屋大学環境学研究所都市環境学専攻博士前期課程2年
福和研究室 成田忠祥

1. はじめに

1995年に起こった兵庫県南部地震の経験より、地盤構造が不整形性を有している場合、地盤増幅特性が一次元応答では説明できず、二次元的に考える必要があることを我々に改めて痛感させた。また、2003年に起こった十勝沖地震において、震源から遠く離れた盆地構造を有する苫小牧の石油タンクがスロッシング現象により炎上したことは、深部地盤構造と後続位相との関係の重要性を我々に知らしめる契機となった。

濃尾平野においても、深部地盤構造に不整形性を有していることは平成11年度より実施されている地下構造調査より明らかになっている。図1に示した平成13年度の地下構造調査結果より、濃尾平野西部に基盤段差、名古屋市周辺の黄金の深部地盤構造に基盤の窪みが発見され、「震災の帯」同様、局所的な被害が懸念されている。また、図2に示したH/Vスペクトルの一次卓越周期より、濃尾平野は東北東から西南西に向かって堆積層が厚くなっており、三次元的に不整形性を有した堆積盆地である。来るべき東海・東南海地震が長周期地震動であることを考えても、また、今までマグニチュードが大きい長周期地震動が超高層建築物の連立する都市部を直撃した経験がないことを考えても、濃尾平野の三次元的な不整形地盤構造と後続位相との関係について解明していく必要がある。

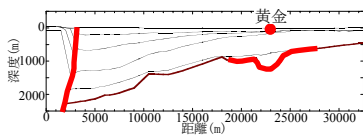


図1 平成13年度地下構造調査結果①

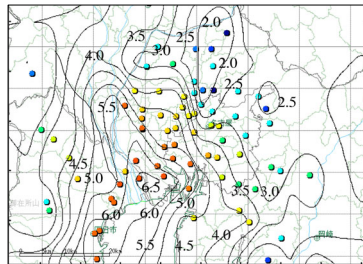


図2 H/V スペクトルの一次卓越周期

2. 基盤の窪みが波動伝播性状に与える影響

図3に示す長軸X/短軸Yをパラメータにした沖積谷、埋没谷モデルを対象に二次元FEM解析を行った。なお、入力波として、中心周期0.5秒のRicker波をSH波場において下方鉛直入射した。図4に沖積谷モデルにおける波の伝播及び二次的に生成される波の模式図を示す。X/Y=2のモデルは、繰り返し反射することで波が盆地の中央部に集まっているのに対し、X/Y=1のモデルは、直達波の焦点効果が起きている位置が

盆地の中央部に近づいている。また、基盤反射波が回折されて二次的に盆地内を伝播する波がX/Y=2のモデルは波面が広がるように伝播しているのに対し、X/Y=1のモデルは波面が一点に集まるように伝播している。表面波として盆地内を行き来する波の伝播は盆地形状が円に近づくにつれて顕著ではなくなると言える。埋没谷モデルにおける波動伝播は、沖積谷モデルの焦点位置より窪みの中央部に近づき、二次的に生成される波は地表面応答には寄与しないと考えられる。

次に、振動数領域において検討するため、図5に伝達関数、図6に伝達関数の最大値分布を示す。沖積谷モデルにおいて、図5よりX/Y=4のモデルでは盆地内を繰り返し反射し、二次的な生成波と干渉し合うことにより、盆地内全体で増幅しているが、X/Y=1のモデルでは盆地中心部付近の狭帯域で増幅特性を示す一方、岩盤と堆積層の境界付近では波が疎になるため増幅特性は低減されている。また、図6より、X/Yが大き

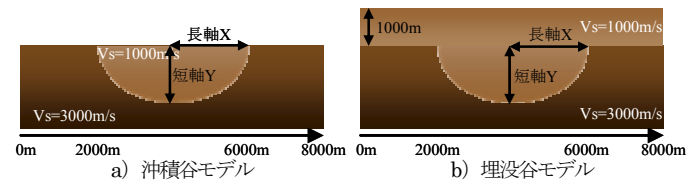


図3 解析モデル

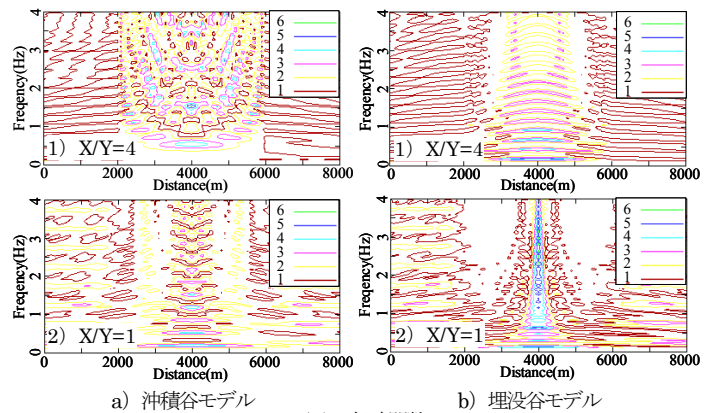


図5 伝達関数

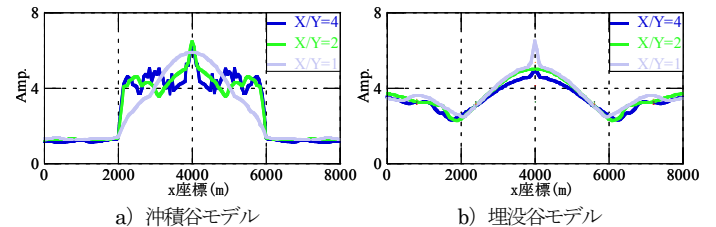


図6 伝達関数の最大値分布

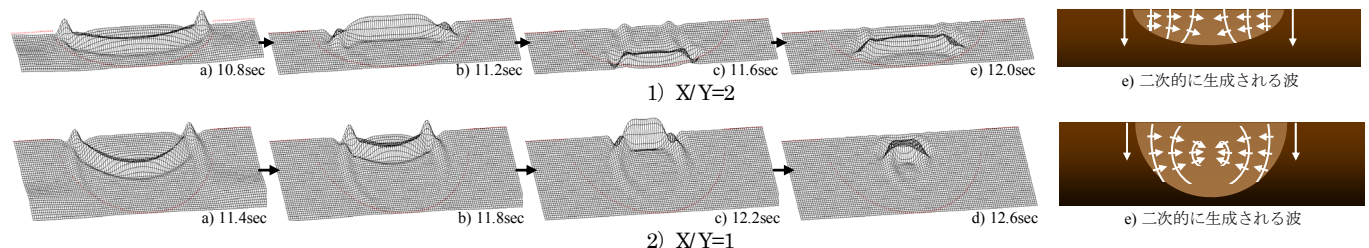


図4 沖積谷モデルにおける波の伝播及び二次的に生成される波の模式図

い時は地点間の差が大きく、局所的な増幅特性を示しているが、 X/Y が 1 に近づくにつれて盆地中央部に向かって単調に増幅しており包括的な形状となっている。以上の結果より、沖積谷では、 X/Y が大きい時は盆地内の多重反射及び二次的な生成波との干渉が支配的であり、 X/Y が 1 に近づくにつれて直達波の焦点効果が支配的となる。一方、埋没谷モデルにおいて、図 5 より、 $X/Y=4$ のモデルでは 1Hz 以下の比較的広い範囲で増幅特性を示している一方、 $X/Y=1$ のモデルでは 4Hz までの広い振動数領域において非常に狭い範囲で大きな増幅特性を示しており、焦点効果が顕著に現れている。また、図 6 において、 X/Y の大小に関わらず、窪み中心部に向かって単調に増幅度が大きくなっており、窪み形状を反映したような形状となっている。以上の結果より、埋没谷の焦点効果は基盤のアスペクト比によって決まり、濃尾平野の地下構造のような X/Y が大きいモデルにおいても増幅特性を示す可能性があると言える。

3. 基盤段差が波動伝播性状に与える影響

図 7 に示した解析モデルを対象に二次元 FEM 解析を行った。なお、入力波として、中心周期 0.5、1、2、5 秒の Ricker 波を SH 波場、SV 波場において下方鉛直入射した。図 8 に基盤段差で生成されると考えられる波の模式図を示す。基盤段差で生成される波として、a) 基盤段差の下部から同心円状に伝播する波、b) d) 基盤段差面の基盤側を伝播し、堆積層側へ屈折することで伝播する波、c) 基盤地表面に波が到達した時、基盤段差の上部から同心円状に伝播する波、e) 堆積層の地表面に波が到達した時、基盤段差の上部から同心円状に伝播する波が考えられる。図 9 に示した中心周期 0.5 秒の時の波の伝播より、SH 波は a)、b)、d)、e) が、SV 波は b)、c) が明確に伝播している。また、SV 波は斜めに伝播していく波の減衰が大きい。これは、SH 波の斜め入射の理論 H/V が入射角に依存しないのに対し、SV 波の斜め入射の理論 H/V は、振動特性は入射角によりほとんど変化しないが、振幅値が入射角が大きくなるほど小さくなることに起因していると考えられる。次に、中心周期 0.5 秒の時の地表面応答波形及び走時を図 11 に示す。走時は明確に現れていた波を描いており、SH 波は a)、b)、d)、e) の波を、SV 波は b)、c) の波を示している。SH 波において、走時は 8000m まで地表面応答波形と対応がとれており、また、直達波と干渉している波は、b) の波であると考えられる。一方、SV 波において、(b) の屈折波は、基盤段差付近では対応がとれているが、段差から離れるにつれて地表面の応答波形が減衰しているため、対応がとれていない。一方 (c) で示した基盤段差の上部から同心円状に伝播する波は、堆積層を減衰せず伝播しており、図 10 の分散曲線より求めた 0.5 秒の Rayleigh 波速度で伝播すると仮定した走時と対応が良いこと、別途検証した鉛直動においても同時刻に波が伝播していることを考えると、基盤段差の上部で生成された波が Rayleigh 波であると考えられる。また、走時の対応性から、基盤段差の上部では、P 波速度で伝播する波が存在すると考えられる。

次に、最大加速度分布について検討する。図 12 に中心周期 0.5、1、2、5 秒の最大加速度分布を示す。SH 波は中心周期 2 秒まで入力波の周期特

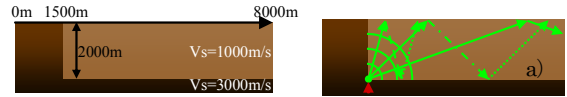


図 7 解析モデル

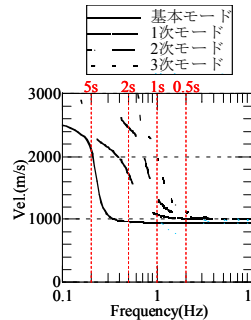


図 10 分散曲線 (位相速度)

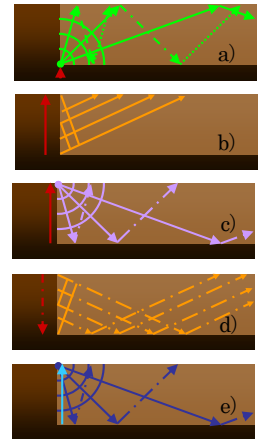


図 8 基盤段差で生成される波の模式図

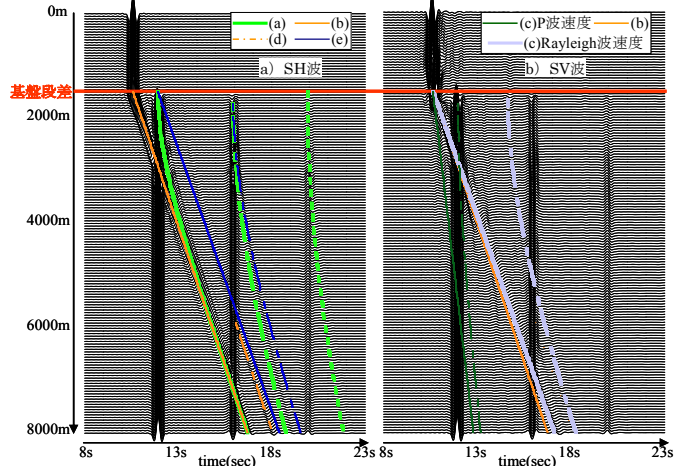


図 11 地表面応答波形及び走時

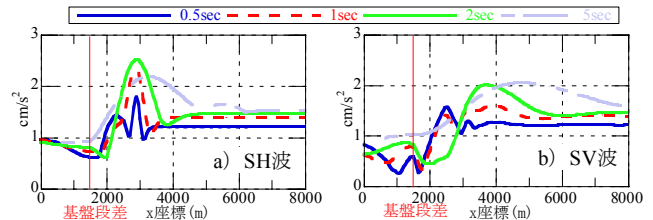


図 12 最大加速度分布

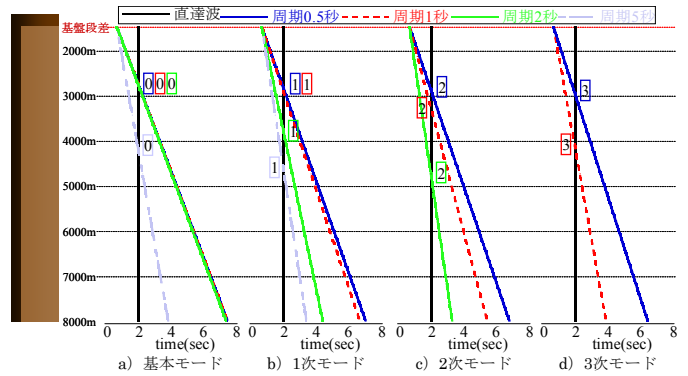


図 13 各モードにおける Rayleigh 波と直達波との干渉位置

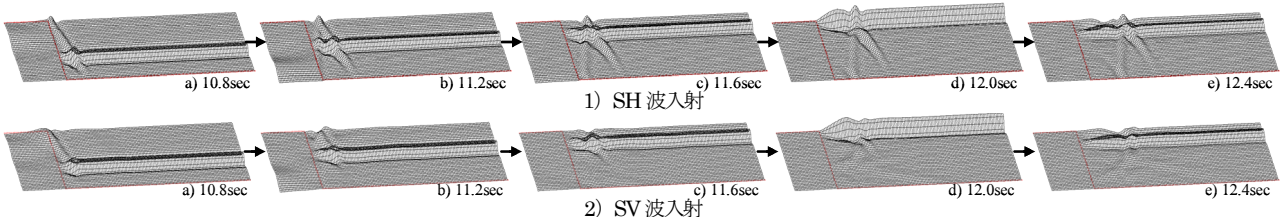


図 9 SH 波及び SV 波入射時の波の伝播

性に依らず、2900m 付近で最大値を示している。これは、前述したように、SH 波の時は実体波同士の干渉により増幅特性が生じることに起因している。一方、SV 波において、入力波の周期が長くなるにつれて干渉位置が基盤段差から離れていく傾向がある。これは、SV 波において、最大応答が直達波と Rayleigh 波の干渉により起こっていることに起因していると考えられる。よって、この表面波と直達波の干渉効果について検討するため、図 13 に各モードにおける Rayleigh 波と直達波との干渉位置を示す。直達波と Rayleigh 波の走時が重なる位置が干渉位置となり、それぞれ周期毎、モード毎に色分けして干渉位置を示している。図 12 より中心周期 0.5 秒の最大応答は 2600m 付近で生じている。図 13 より a)、b)、c)、d) の各モードにおいて直達波と表面波の干渉位置があまり変化せず、中心周期 0.5 秒の応答分布は各モードの影響を受けていると考えられる。また、中心周期 1 秒の最大応答は 2600m、3200m、4000m 付近で生じているが、2600m は a)、b) より基本モード及び 1 次モード、3200m は c) より 2 次モード、4000m は d) より 3 次モードにおける Rayleigh 波と直達波の干渉によると考えられる。また、中心周期 2 秒の最大応答は 3600m 付近、中心周期 5 秒の最大応答は 4000m 付近で生じているが、それぞれ b) より 1 次モードにおける Rayleigh 波と直達波の干渉が優勢であると考えられる。一般的に基本モードが最も Rayleigh 波の振幅が大きく、高次モードになるほど振幅値は低くなるが、直達波と表面波の位相特性が合わなければ基本モードにおいて増幅せず、位相が合えば高次モードにおいても増幅特性を示すと考えられ、SV 波では高次モードまで考慮して増幅特性を考える必要があると言える。

4. 濃尾平野の三次元不整形地盤構造が継続位相に与える影響

4.1 濃尾平野と継続時間の関係

濃尾平野に対して西から伝播する岐阜県美濃中西部地震（1998 年 4 月 22 日）、東から伝播する静岡県中部地震（2001 年 4 月 3 日）、遠方地震である鳥取県西部地震（2000 年 10 月 6 日）を対象に、濃尾平野における速度波形の継続時間分布を図 14 に示す。ここでは、包絡波形の最大振幅を基準とし、その 50%の振幅が最初に生じる時刻から最後に生じる時刻までを継続時間と定義した。遠方地震である鳥取県西部地震は、愛知県・三重県境～名古屋西部～名古屋市南部にかけて、継続時間が長くなっており、図 2 に示した H/V スペクトルの一次卓越周期の分布と対応がよい。鳥取県西部地震は、震源が遠く浅いため、様々な種類の波動を含み、濃尾平野では長周期成分を多く含んだ表面波が優勢となっているため、堆積層が厚い地域で継続時間が長くなっていると考えられる。一方、地震波が西から伝播する岐阜県美濃中西部地震及び東から伝播する静岡県中部地震では、継続時間が伸長している地域が異なる。岐阜県美濃中西部地震は、濃尾平野南部において、やや東に向かって継続時間が長くなっているのに対し、静岡県中部地震は、明らかに濃尾平野西部に向かって継続時間が長くなっている傾向がある。このような地震波の到来方向の差異について検討するため、図 15 に示す濃尾平野の傾斜構造を表現した解析モデルを対象に、二次元 FEM 解析を行った。入力波としては、図 16 に示す岐阜県美濃東部地震（2001 年 1 月 6 日）の KIK-net の羽島における地中計の EW 方向速度波形記録を用い、SV 波場において鉛直下方入射、右から 30°入射、左から 30°入射した。図 17 に入力方向毎の地表面継続時間分布を示す。鉛直下方入射時はやや左上がり、右から 30°入射時は左上がり、左から 30°入射時はやや右上がりの傾向を示しており、実測記録の結果と調和的である。この継続時間分布の傾向は、基盤が傾斜しているため、鉛直下方入射時は、屈折した直達波が堆積層の厚い方向へ向か

って伝播していき、右から 30°入射時は、その傾向が顕著となり、左から 30°入射時は逆にその傾向が緩和されるためと考えられる。以上の結果より、濃尾平野のような傾斜構造を有している盆地では、継続時間分布は、地震波の入射方向によって変化し、一意に堆積層が厚い地域ほど継続時間が長いと言い切れないという知見を得た。

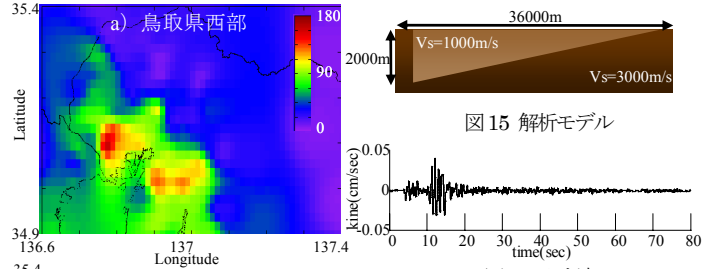


図 15 解析モデル

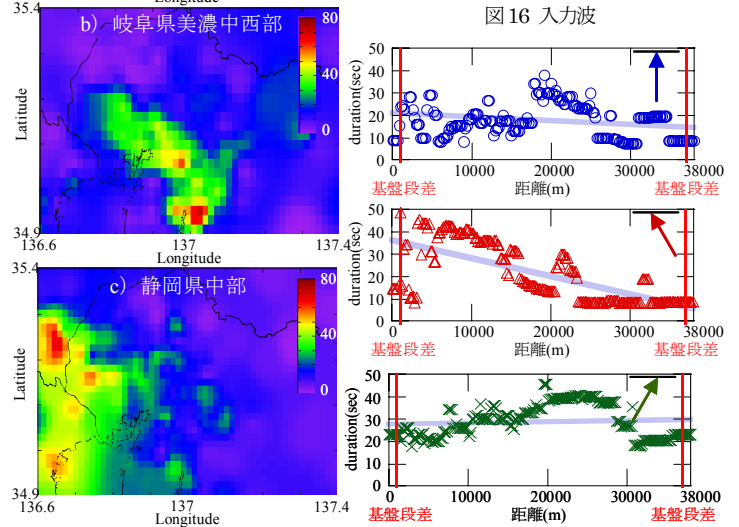


図 14 継続時間分布 (実測)

図 17 入力方向毎の継続時間分布 (解析)

4.2 濃尾平野における Rayleigh 波の伝播性状

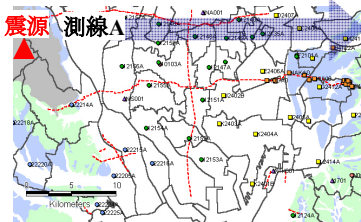


図 18 震央位置及び測線 A

地盤震動の継続時間に影響を及ぼす Rayleigh 波に着目し、濃尾平野における Rayleigh 波の伝播性状について検討した。検討に用いた地震動は、岐阜県美濃中西部地震（1998 年 4 月 22 日）である。震央位置及び検討に用いた測線 A を図 18 に示す。測線 A に含まれる観測地点における a) 鳥取県西部地震（2000 年 10 月 6 日）の H/V スペクトル及び 1 次卓越周期、b) 中心周期 2 秒、c) 中心周期 3 秒、d) 中心周期 4 秒の Gauss 型フィルター波形及び包絡波形を図 19 に示す。なお、各観測地点は、震央距離に応じて配置している。中心周期の違いにより、異なる速度で伝播しているが、周期が長くなるにつれて、伝播速度が一樣に速くなっているとは言えない。これは、エアリー相の影響を群速度の伝播速度が受けていることが一因として考えられる。また、中心周期 2 秒のフィルター波形は濃尾平野東部まで伝播しているのに対し、中心周期 3 秒のフィルター波形は、12135A まで、中心周期 4 秒のフィルター波形は 12149A までしか明確な伝播が見られない。

このような伝播性状は、Rayleigh 波の振幅に起因していると考え、図 20 に示した堆積層厚さ H を変化させたモデルを対象に、深さ変化に伴う Rayleigh 波の振幅について検討した。図 21 に Rayleigh 波の分散曲線、図 22 に Rayleigh 波の振幅 (Medium Response)、図 23 に

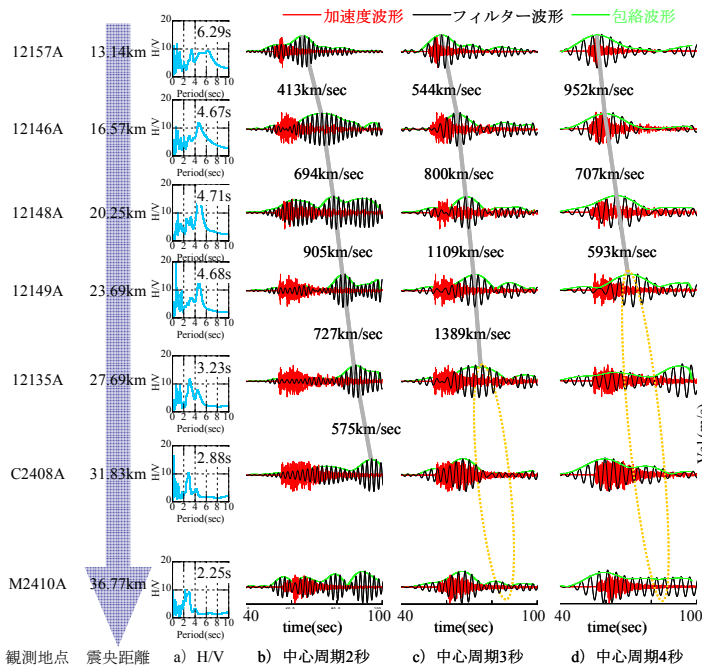


図 19 H/V スペクトル及び各中心周期の Gauss 型フィルター波形及び包絡波形

Rayleigh 波 H/V スペクトルを示す。これらの図を比較すると、分散曲線のエアリー相に相当する振動数で Rayleigh 波の振幅が最大値を示しており、一方、H/V スペクトルは最小値を示している。すなわち、エアリー相において、Rayleigh 波の振幅が最も大きくなるとともに、H/V スペクトルより水平動に比べ、鉛直動が卓越するため、Rayleigh 波のオービット形状は縦長の軌跡を描くと考えられる。一方、H/V スペクトルのピーク位置である地盤の卓越振動数より低振動数側において、Rayleigh 波の振幅は最小値を示している。すなわち、地盤の卓越振動数では、エアリー相とは逆で、オービット形状は横長の軌跡を描くが、描く軌跡が非常に小さいオービットとなると考えられる。

解析で得た知見を基に、前述した実測記録の Rayleigh 波の伝播性状に関して検討すると、中心周期 3 秒のフィルター波形において、明確な伝播が見えなくなった C2408A の 1 次卓越周期は 2.88 秒であり、この地点においては 3 秒の Rayleigh 波の振幅は非常に小さくなっていると考えられ、また、中心周期 4 秒のフィルター波形においても、明確な伝播が見えなくなった 12135A の 1 次卓越周期は 3.23 秒であり、この地点において 4 秒の Rayleigh 波の振幅は非常に小さくなっていると考えられる。以上の結果より、実測記録においても、解析結果同様、地盤の卓越周期より長周期側は Rayleigh 波の振幅が非常に小さくなると言える。

次に、濃尾平野における中心周期 2 秒及び 3 秒の Gauss 型フィルター波形の伝播性状について Semblance 解析を用いて検討した。Semblance 解析とは、N.S.Neidell ら²⁾により提案された表面波の伝播特性を推定する方法である。図 26 に中心周期 2 秒の Rayleigh 波の伝播性状を示す。なお、矢印の向き及び大きさが伝播方向及び伝播速度を表し、図中に示した数字は伝播速度を表している (単位は m/sec)。サイト毎に伝播速度の差が大きく、全体として、北東になるにつれて伝播速度は速くなっている。伝播方向としては濃尾平野を回り込むように伝播しており、従来の表面波が同心円状に伝わるという仮定と異なる。一方、図 27 に示した中心周期 3 秒の Rayleigh 波の伝播性状において、サイト毎に伝播速度の差が小さく、同心円状に伝播している。このような周期特性の違いによる Rayleigh 波の伝播性状の違いは、図 25 より周期が長くなるほど深

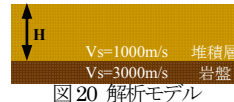


図 20 解析モデル

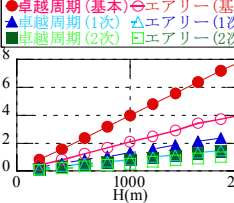


図 24 エアリー相と周期の関係

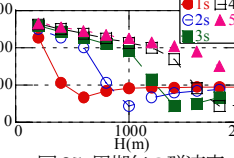


図 25 周期毎の群速度

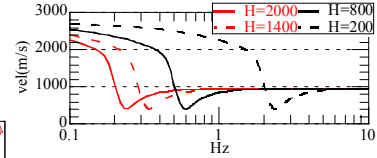


図 21 分散曲線 (群速度)

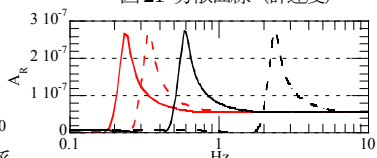


図 22 Medium Response (振幅)

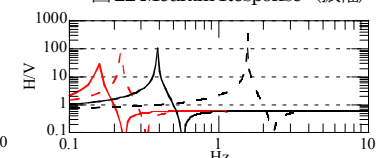


図 23 H/V スペクトル

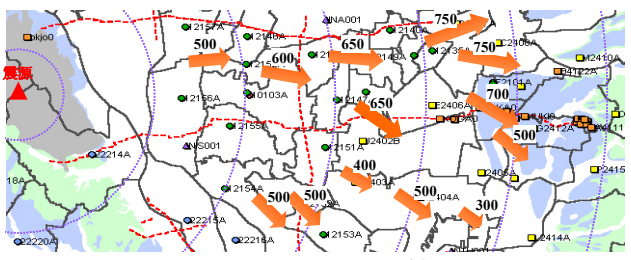


図 26 中心周期 2 秒の Rayleigh 波伝播性状

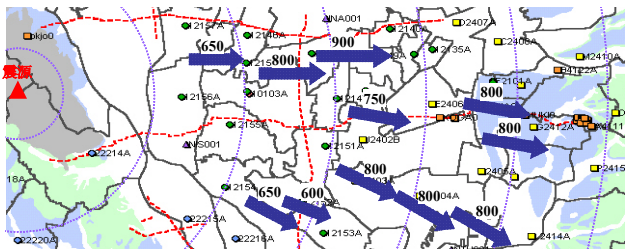


図 27 中心周期 3 秒の Rayleigh 波伝播性状

さ変化に伴う群速度変化が少なくなること起因していると考えられる。

5. まとめ

本論では、a) 基盤の窪み、b) 基盤段差、c) 三次元不整形地盤構造に起因する濃尾平野の震動性状について検討してきた。a) 基盤の窪みに関して、1) 沖積谷では、X/Y が大きい時は盆地内の多重反射及び二次的な生成波との干渉が支配的であり、X/Y が 1 に近づくにつれて焦点効果が支配的となる、2) 埋没谷モデルでは、焦点効果は基盤のアスペクト比によって決まり、濃尾平野の地下構造のような X/Y が大きいモデルにおいても増幅特性を示す可能性がある、という知見を得た。b) 基盤段差に関して、1) SH 波は実体波同士の干渉により増幅特性が生じる、2) SV 波は最大応答が直達波と Rayleigh 波の干渉により起こり、高次モードまで考慮して増幅特性を考える必要がある、という知見を得た。c) 三次元不整形地盤構造に関して、1) 濃尾平野のような傾斜構造を有している盆地では、継続時間分布は地震波の入射方向によって変化する、2) エアリー相において、Rayleigh 波の振幅が最も大きくなり、地盤の卓越振動数より低振動数側では最小値を示す、3) 周期特性の違いにより濃尾平野の Rayleigh 波伝播性状は異なる、という知見を得た。

参考文献

1) 愛知県平成 13 年度濃尾平野地下構造調査
2) Neidell, N.S. and M.T. Taner: Semblance and other coherency measures for multichannel data, Geophysics.36, pp.482-497, 1971