

18. 東京で観測された新潟県中越地震強震波形の長周期成分解析

Long Period Ingredient Analysis of the Mid Niigata Prefecture Earthquake in 2004 Wave Form Observed in Tokyo

地象部 廣島 実、小川 好、岡田佳久

1. はじめに

この報告は、2004年10月23日に発生した新潟県中越地震の際に、東京で観測された強震記録の長周期成分について解析したものである。

地震波は、実体波と表面波に大別される。このうち、一般に耐震設計上問題となる大きな地震動は、震源が近い場合の実体波、特に横ゆれの原因となるSH波である。一方、表面波は、震源近くでは実体波の振幅に比べて大きくないことから、耐震工学上問題とならないが、震源から遠く離れた堆積平野などの観測地点では、表面波の伝播するときの距離減衰が実体波に比べて小さいことや、卓越周期が深い堆積層の地盤を反映することなどの理由で、長周期の表面波が大きな振幅で観測されることがある¹⁾²⁾。

この種の表面波は、その卓越周期が実体波の約1秒以下に対し、関東平野では数秒～10秒程度と長周期であるのが特徴であり、近年の構造物の大型化にともない、耐震工学の対象の範疇になってきている。実際、過去の被害地震の中には表面波によるものと考えられる事例がいくつか報告^{例えば³⁾}されており、東京が位置する関東平野などの堆積平野では、地震の発生位置によっては、表面波による地震被害も懸念される。

先般の新潟県中越地震の震央は、東京から約200kmの遠方に位置し、震源深さも13kmと比較的浅い地震であった。これは、上述した長周期が卓越する地震条件と合致しており、当所で得られた新潟県中越地震の強震波形では、周期4～6秒前後の長周期帯に表

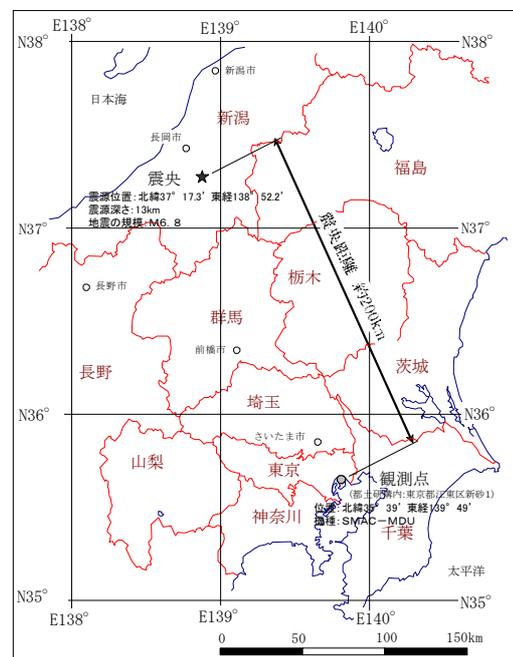


図-1 新潟県中越地震の震央と観測点(都土研構内)の位置

面波に起因すると考えられる卓越周期が現れている。

一方、阪神淡路大震災以後、正確な地震動予測のための深部地下構造調査が、全国の主要都市部を対象に各自治体によっておこなわれた。この成果として、観測地点における地震基盤面までの深部地下構造が明らかにされ⁴⁾、表面波の理論分散曲線や卓越周期を解析的に求めることが可能となった。

本報告では、当所で得られた波形のうち、主要動に後続する長周期の波動が表面波(ラブ波とレイリー波)であることを確認するとともに、上述した深部地下構造モデル等を用い、長周期成分の卓越周期について解析を試みた。

2. 強震記録と表面波の伝播方向

図-1 に新潟県中越地震の震央と観測点（都土研構内）の位置を示す。2004 年 10 月 23 日に発生した新潟県中越地震 (M6.8、震源深さ 13km、震央位置 N37° 17.3' E138° 52.2') では、新潟県川口町で最大加速度 1675gal (EW 方向)、震度 7 を記録した。観測点 (位置 N35° 39' E139° 49'、機種: SMAC-MDU) が位置する東京は、震央から約 200km の南東方向であり、震度 4 (大手町) を記録している。図-2 に観測点での強震記録を示す。加速度時刻歴波形についてみると、NS 成分で最大加速度 20gal 程度であるが、継続時間 100 秒付近以降にも振幅が継続している。フーリエスペクトルは、各成分とも実体波に起因すると考えられる卓越周期が 1 秒以下に見られるものの、NS 成分で 5.5 秒、EW 成分で 6.5 秒、UD 成分で 3.5、5.0 秒付近に卓越周期が認められる。これは、実体波と異なる表面波が励起された結果の卓越周期と推測される。

図-3 に、新潟県中越地震の震央からの表面波の伝播方向を示す。観測地点からみた震央方向は、真北から約 30° の北西方向である。表面波が震央方向から伝播されると仮定すれば、その進行方向は概ね北から南方向である。したがって、表面波のうちレイリー波については、その振動の運動方向が表面波の進行方向の鉛直面となるので、強震記録の NS、UD 成分に顕著に現れることになる。同様に、ラブ波の振動の運動方向は表面波の進行方向に直角の水平面となるため、強震記録の EW 成分に着目する。

3. 強震記録の長周期成分解析

3.1 粘弾性 (1 自由度 1 質点系) モデルの速度応答波形

図-2 の観測点の強震波形の各周期成分の特性を抽出するため、1 自由度質点系の応答が狭帯域フィルターになることを利用して、固有周期が 1 から 10 秒までの応答波形を減衰定数 10% として計算した。図-4(1)(2)(3) に 3 成分の速度応答波形を示す。周期 1 秒の応答波形では、各成分とも継続時間の初期に主要動が認められ、継続時間とともに振幅が収束していく典型的な実体波の応答を示している。一方、周

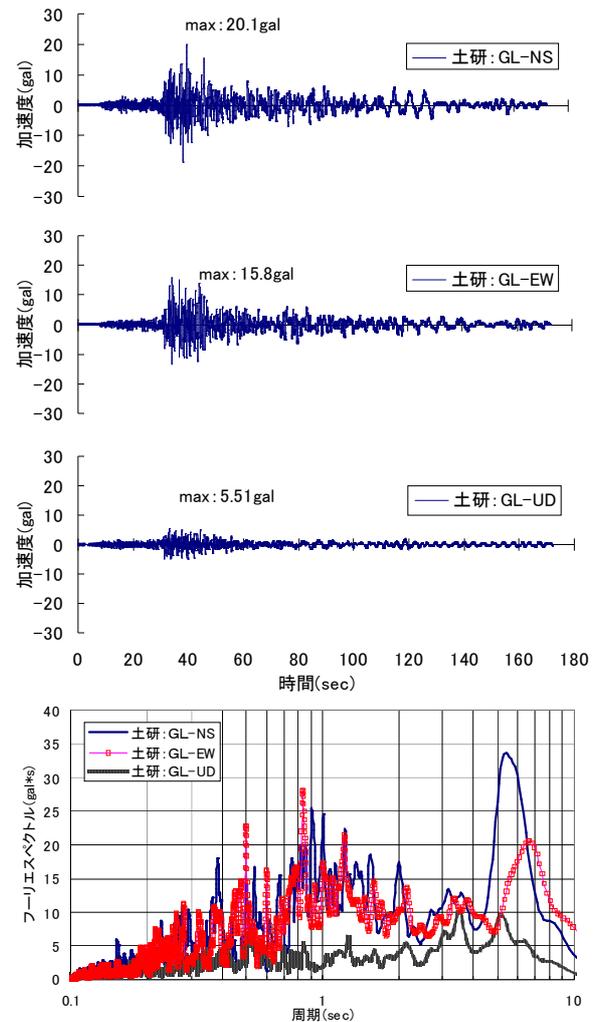


図-2 観測点 (土研) の加速度時刻歴波形とフーリエスペクトル

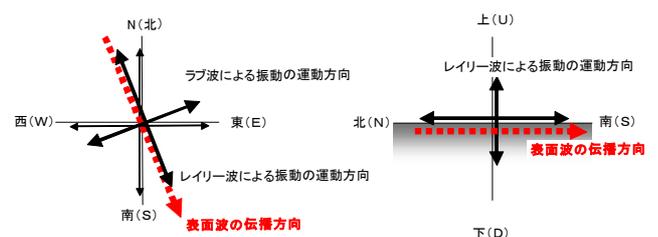


図-3 表面波の伝播方向

期 5 秒以上になると、各成分とも継続時間 100 秒付近から大きな振幅が認められる。これは、実体波より遅れてくる表面波の長周期成分が励起された結果と考えられる。

図-5 は、強震記録の 50~100 秒と 100~150 秒を抽出した各成分についてのフーリエスペクトルである。NS 成分については周期 5.5 秒の卓越周期が、EW

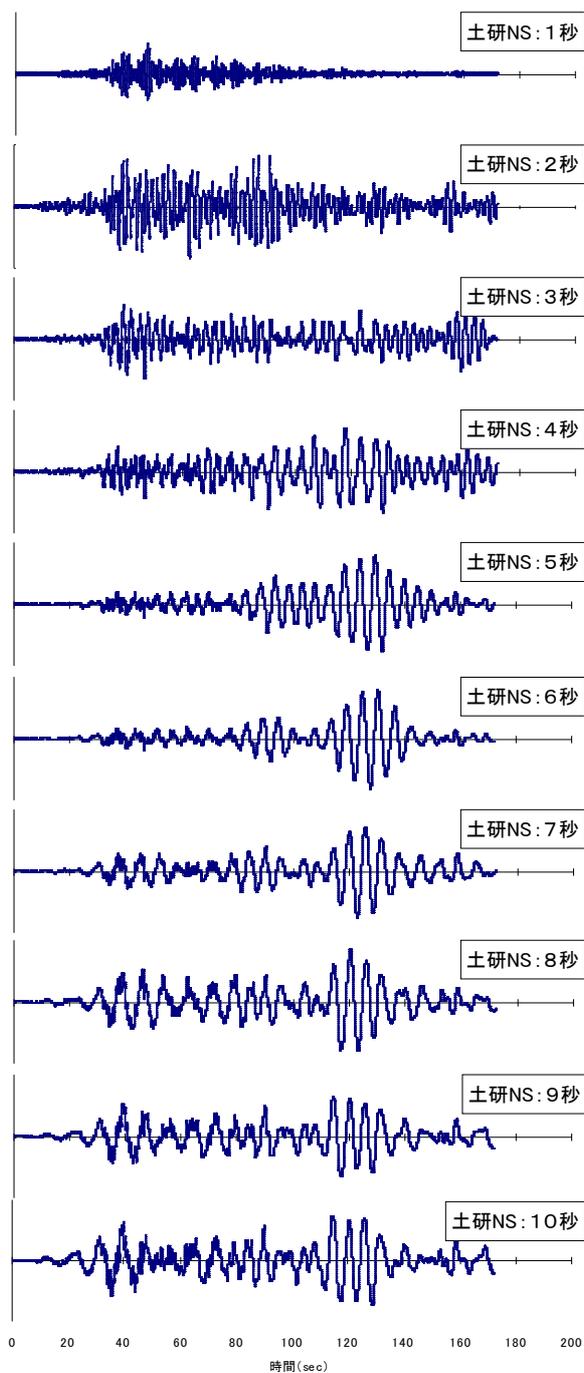


図-4(1) 各周期の速度応答波形(NS成分)

成分では周期6.5秒の卓越周期が50~100秒に比べ、100~150秒間に大きな振幅となっている。これは、長周期成分が遅れて励起されていることを示しており、地震継続時間の後半部のほとんどの揺れは表面波によるものであったことを示唆している。一方、UD成分については、継続時間50秒以降に長周期成分が卓越しており、50~100秒間では周期3.5秒に、100~150秒間では周期5秒に卓越周期が認められる。

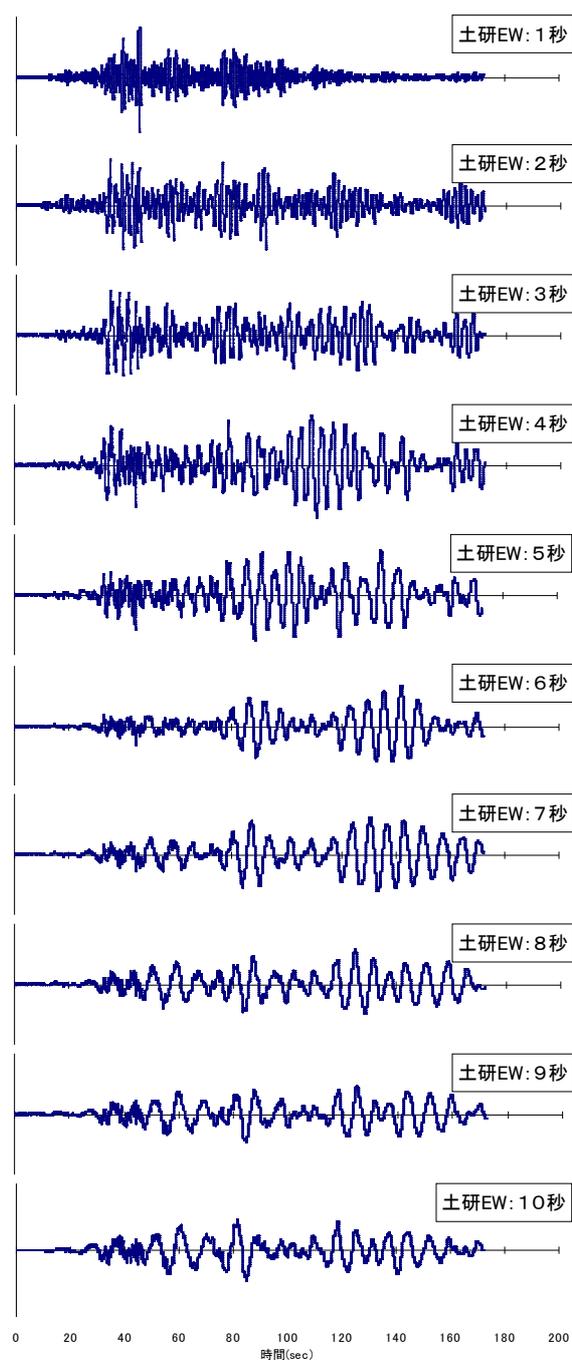


図-4(2) 各周期の速度応答波形(EW成分)

3.2 観測された長周期成分の位相差

図-6は、図-4で示した1質点系の速度応答波形のうち、周期5~10秒の各周期について観測記録50~100秒の部分抽出し、NS成分とUD成分を比較したものである。この図から、すべての周期でNS成分の位相に対してUD成分の位相差は概ね $(1/2)\pi$ となっている。したがって、地表面の運動方向はN→D→S→Uの順番となり、表面波の進行方向N→Sに対して逆回転の円運動(または楕円運動)となる。これ

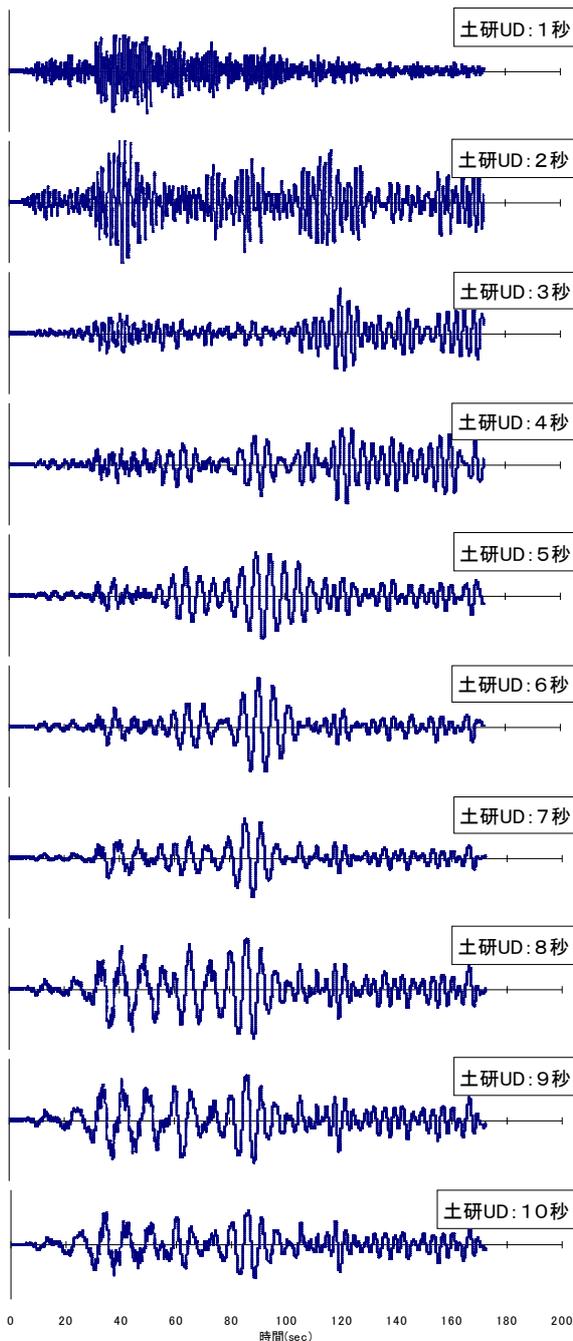


図-4(3) 各周期の速度応答波形(UD成分)

は、レイリー波の地表付近での理論的な運動方向と一致しており、観測された長周期成分のNS、UD方向が、レイリー波の挙動である可能性を裏付けている。

4. 深部地下構造モデルから計算的に求めた理論分散曲線および表面波の卓越周期

ここでは、地震基盤面を含む深度約 3000m 付近までを対象とした関東平野（東京都）地下構造調査⁴⁾で明らかになった地下構造モデルを用い、観測地点

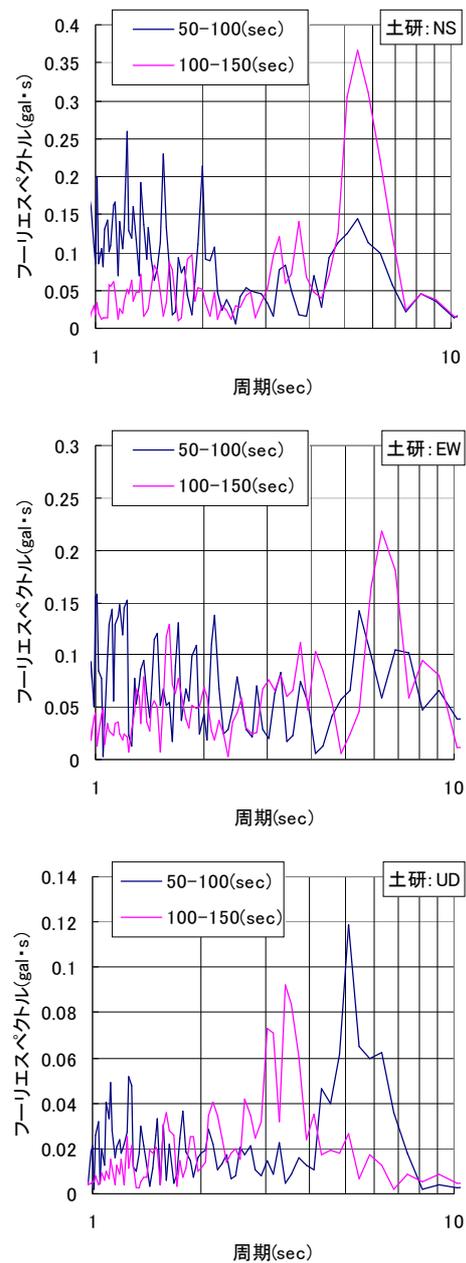


図-5 観測記録(50-150sec)のフーリエスペクトル

での表面波の理論分散曲線および卓越周期について解析を行った。

ここで表面波の分散とは、実体波にはない表面波特有の性質で、周波数によって速度が異なることをいう（速度の周波数依存性）。この分散は、地下構造に対応して決まることがわかっており、下式の関係がある。

$$V(f = fn) = F\{(Vs1, h1, \rho1), (Vs2, h2, \rho2) \dots (Vsn, hn, \rho n)\}$$

ここに Vs は S 波速度、h は層厚、 ρ は密度である（ただし、レイリー波は、P 波速度 Vp も必要）。すな

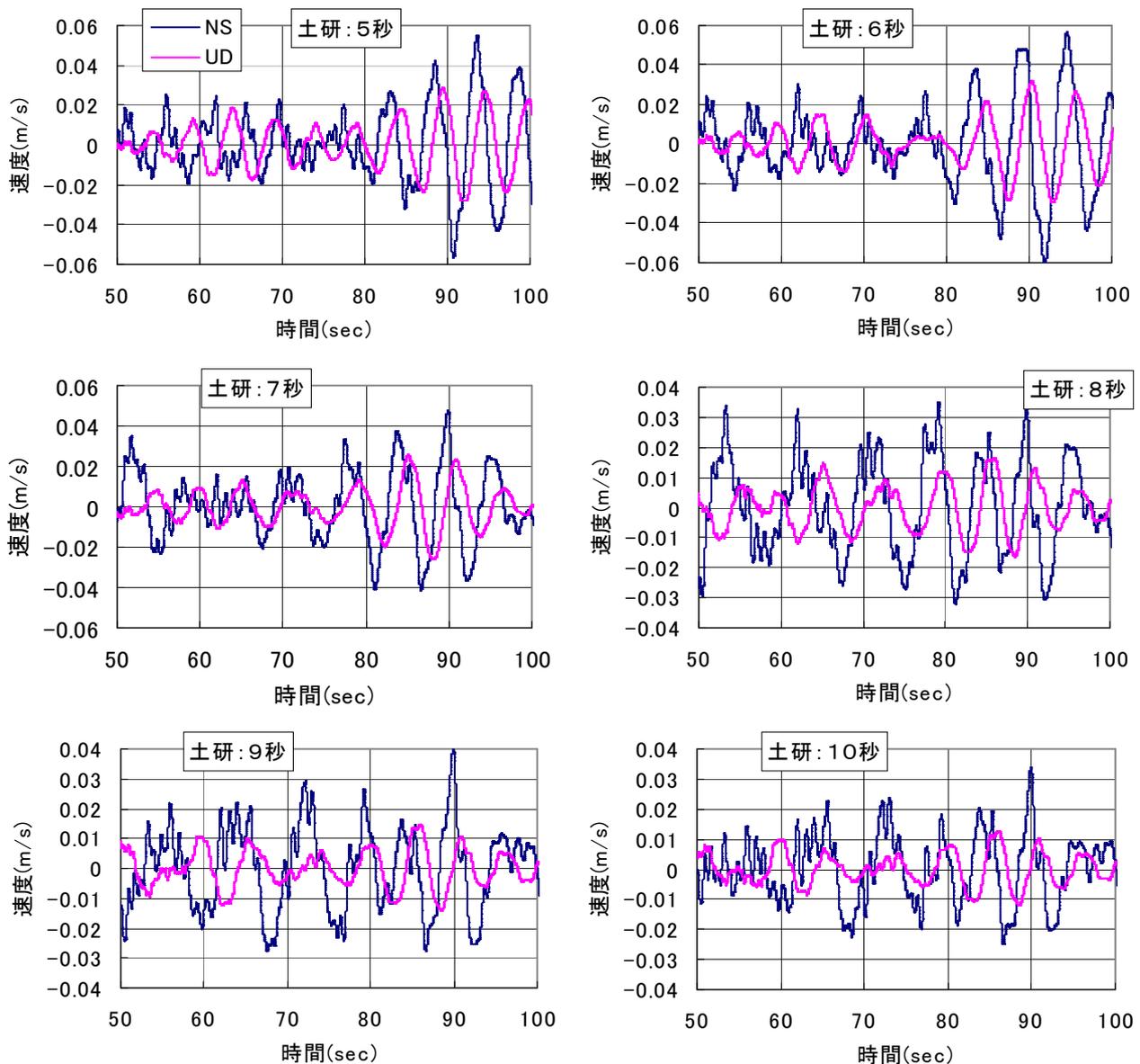


図-6 NS-UD 成分波形比較

わち、地下構造の各パラメータが既知であれば、分散曲線は計算で求めることができる。

表-1 は、理論分散曲線を求める際に使用した地下構造モデルと計算条件の一覧である。深度 170m 以深(層番号 5 以上)については、上記調査結果(強震観測地点の近傍である江東区東陽で実施された微動アレー探査結果による)を元に設定した。観測地点付近の深部地下構造についてみると、深度 2500m 以深(層番号 8)が地震基盤面とされる先新第三系基盤である。その上部(層番号 7)に層厚約 800m の三浦層群、さらに上部(層番号 6)は下部上総層群である。なお、深度 170m より浅については、観測地点の位置で実施された大深度地盤ボーリング調査結果⁵⁾をもとに設

定した。

図-7 に理論分散曲線の計算結果を示す。なお、表面波の位相速度 U の計算は、水平な地層モデルに対して平面で伝播する表面波を想定した正規モード解で行った。また、群速度 U は円振動数 ω の波数 ξ による微分 ($d\omega/d\xi$) で求め、位相速度 c との関係は下式のとおりである。

$$U = d\omega / d\xi, \quad \xi = \omega / c$$

ここに、上式で求めた群速度 U の極値が、卓越周期(卓越振動数)となる。図に示す計算結果では、レイリー波の卓越周期は約 4 秒である。これは、前述した強震記録のレイリー波の挙動と考えられる NS 成分および UD 成分の卓越周期 5.5 秒、5 秒に対し、

概ね近い値となっている。同様に、ラブ波の計算結果については卓越周期約 7 秒であり、強震記録のうちラブ波の運動方向を顕著に示す EW 成分の卓越周期 6.5 秒と近い値となった。

5. まとめ

検討結果をまとめると次のとおりである。

東京で観測された新潟県中越地震の強震記録では、表面波によると推定される長周期成分が卓越し、観測地点と震央方向の関係から、強震記録の NS、UD 成分をレイリー波、EW 方向をラブ波の運動方向と仮定して各成分の周期特性を解析した。

① その結果、継続時間 100～150 秒の後半部分では、周期 4 秒以上の長周期の卓越周期が励起され、その周期は、NS 成分で 5.5 秒、EW 成分で 6.5 秒、UD 成分で 5 秒であった。

② また、強震記録の長周期成分のうち、NS、UD 成分の位相差は $(1/2)\pi$ であり、レイリー波の理論的な運動方向と一致した。

③ 一方、実測された地震基盤を含む大深度地盤モデルを用い、表面波の理論分散曲線を計算した結果、レイリー波の卓越周期は約 4 秒、ラブ波卓越周期は約 7 秒となり、強震記録の卓越周期と近い値となった。

以上の検討結果から、東京で観測された新潟県中越地震の地震動は、表面波による長周期成分が卓越していたことをある程度確認できた。

表-1 地盤モデルと計算条件

層番号	深度 (m)	層厚 (m)	密度 ρ (t/m ³)	S波速度 Vs(m/s)	P波速度 Vp(m/s)
1	27.8	27.8	1.6	111	1300
2	50.9	23.1	1.61	230	1500
3	121.6	70.7	1.99	393	1800
4	170	48.4	1.98	487	1800
5	502	332	1.7	740	1990
6	1617	1115	2	920	2250
7	2411	794	2.1	1590	3240
8	2411>		2.5	3230	5630

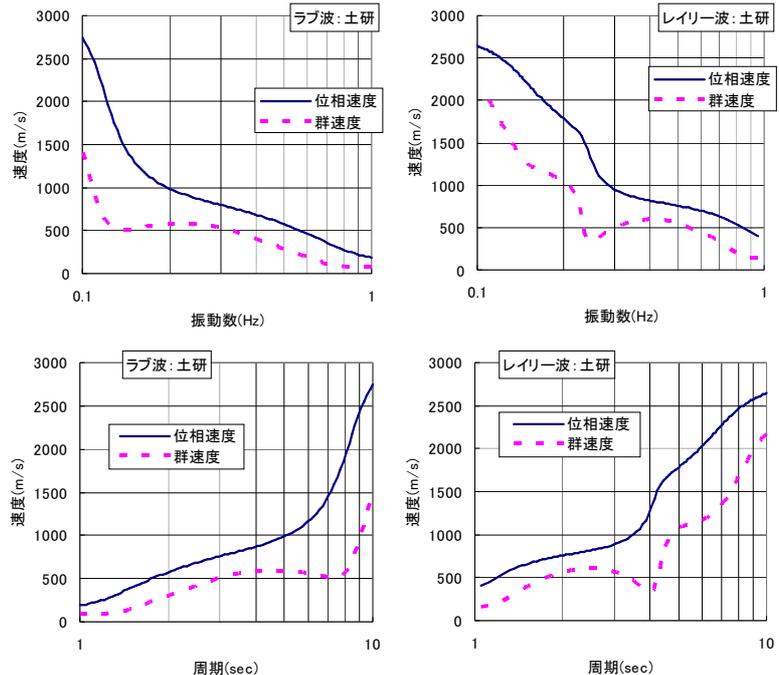


図-7 分散曲線 (計算結果)

このことは、今後、地震発生が懸念される例えば、東海、東南海地震や宮城県沖地震など東京から遠方の巨大地震の際に、関東平野での長周期による地震被害について検討の必要性が示唆されるものである。

参考文献

- 1) 小川好(1979)：表面波による粘弾性地盤の地震応答の研究、昭 54. 都土木技研年報、269-287
- 2) 小川好(1993)：ロマ・ブリータ地震で観測された表面波の特性、平 5. 都土木技研年報、267-274
- 3) 工藤一嘉(1986)：やや長周期の地震動、土木学会日本海中部地震震害調査委員会編集、1983 年会日本海中部地震震害調査報告書、土木学会、70-77
- 4) 東京都土木技術研究所(2004)：「平成 15 年度 地震関係基礎調査交付金 23 区内微動アレイ探査委託(その 2) 報告書」平成 16 年 3 月
- 5) 東京都土木技術研究所(1996)：「東京都(区部)大深度地下地盤図-東京都地質図集 6-」、平成 8 年 3 月
- 6) 嶋悦三：わかりやすい地震学、鹿島出版会