

1998年岩手県内陸北部地震による雫石盆地内での地震動の伝播特性に関する一考察

A Study on the characteristics of seismic wave propagation in Shizukuishi Basin caused by The NORTHERN IWATE PREFECTURE earthquake, 1998.

中村 晋
Susumu Nakamura

工博, 日本大学助教授, 工学部土木工学科(〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原1)

The objective of this report is to make clear the characteristics of seismic wave propagation in Shizukuishi basin based on the observed records due to The 1998 Northern Iwate Prefecture Earthquake whose fault mechanism is dip slip. To evaluate an incident angle of seismic wave to the basin, the particle orbit of velocity component in vertical plane and the frequency response function for inclined incident SV wave was investigated. Furthermore, two dimensional seismic response analysis was conducted to evaluate both effects of the inclined input motion and the irregularity of ground to the frequency characteristics and the wave form of the observed record on the basin. As a result of these, it is found that both inclined input motion and irregularity of ground around the fault strongly influence to generate the wave component whose predominant frequency is around 0.3Hz.

Key Word: 1998 Northern Iwate Prefecture Earthquake, Dip Slip Fault, Seismic Records, 2D FE Analysis, Inclined incident SV wave

キーワード: 1998年岩手県内陸北部地震, 逆断層, 地震記録, 2次元有限要素解析, 斜めSV入射

1.はじめに

1998年9月3日に発生した岩手県内陸北部地震は, 東西圧縮西傾斜の逆断層を震源機構とし, 気象庁マグニチュード(Mj)が6.1の地震である。震源近傍では計測震度6弱を記録し, 震源近傍の自然斜面の崩壊や断層変位に起因した地盤変状による構造物の被害などをもたらした¹⁾。前報²⁾では地盤構造を水平成層と仮定した3次元解析と断層近傍の地盤構造の不整形性を考慮した2次元解析の比較により, 断層下盤側の雫石盆地内で観測された地震記録の特性に, 断層近傍の不整形性が強く影響を及ぼすことを明らかにした。しかし, 観測記録を構成する周波数特性や波群の発生に及ぼす逆断層面を盆地側方境界面とする盆地地盤内での地震波の伝播特性の影響について分析が実施されていない。また, 2次元解析を実施する際, 震源深さが気象庁により示された約7kmであることを前提とし, 兵庫県南部地震による岩盤波をコントロール波とした神戸市内の堆積層の地震動特性に関する川瀬らによる議論³⁾を踏まえ, 平面波の鉛直入射とした解析のみを実施している。一方, 菊池³⁾は震源特性の分析により断層面の中心深度が2.5km程度と比較的浅いことを示しており, 前報での解析で用いた平面波の鉛直入射はかならずしも適切な入力条件となっていない可能性を有している。このことから, 1998年岩手県内陸北部地震により雫石盆地で観測された地震記録の特性を明らかにするためには, 前報での解析条件の見直しを含めた分析が必要である。

さらに, 1995年兵庫県南部地震以降の耐震設計基準類の改訂に伴い, 内陸性地震に対して地震動の評価を行うことは, 極めて重要となっている⁴⁾。東北日本地域には逆断層を震源機構とする活断層が多く存在し, 幾つかの中核都市はそれに近接した断層下盤側の比較的軟質な堆積層上に形成されている。しかし, 逆断層を含む不整形形状を有する地盤構造を対象とした地震動の伝播特性に関する研究は少ないのが現状である。このことから, 岩手県内陸北部地震による雫石盆地内での地震動の伝播機構を把握することは, 類似の断層機構を有する活断層を対象とした地震被害想定や設計入力地震動の評価を行う上で重要であると考えられる。

本論では, 岩手県内陸北部地震より雫石盆地で観測された地震記録の特性に含まれる盆地内での地震動伝播特性を明らかにするため, まず, 極震源近傍および雫石盆地内の地震記録の速度成分を用い, 周波数特性, 水平面および鉛直面内のオービットに基づき地震波の入射特性や波動伝播特性について分析する。次に, 地震波の入射特性の影響が顕著にあらわれる鉛直面内の地震動成分に着目し, Ricker waveletを入力波とした2次元面内解析により, 入力波の周波数特性や入射角に応じた応答性状と観測記録の特性との比較, さらにそれらに基づき盆地内での地震動の伝播性状について考察する。ここで, 解析モデルには前報で用いた断層近傍と雫石盆地の地盤構造に関する2次元有限要素モデル¹⁾を用いた。最後に, 極震源近傍での観測記録をコントロール波とし, その入射角に応じた2次元面内解析によ

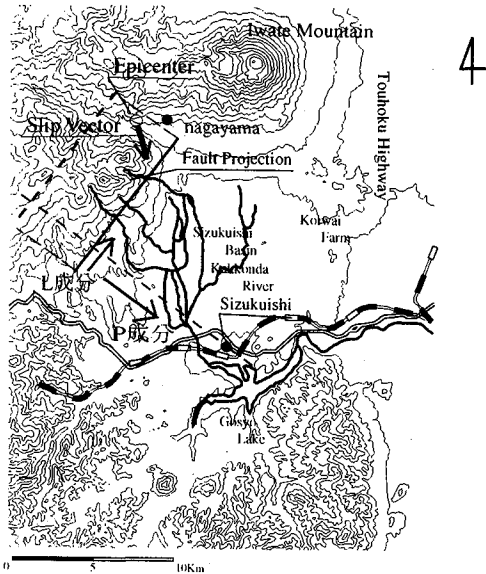


図-1 断層位置および極震源近傍と雫石盆地内の地震観測位置

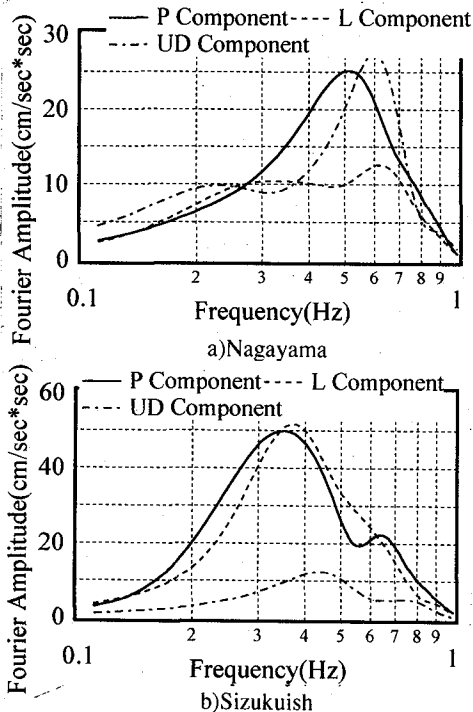


図-3 両地点における3成分の観測記録速度成分のフーリエスペクトル

る雫石盆地内で地震動伝播性状と、観測記録との比較に基づき盆地内での波動伝播特性を明らかにする。

2. 震源近傍及び雫石盆地内での観測記録の特性

まず、図-1に、菊池ら³⁾により推定された断層の諸元に基づく断層の地表への投影と、気象庁による2つの観測点位置を示す。ここで、Nagayamaは極震源近傍、Sizukuishiは雫石盆地内の観測点を示している。また、それら2つの観測点で得られた水平2成分および鉛直成

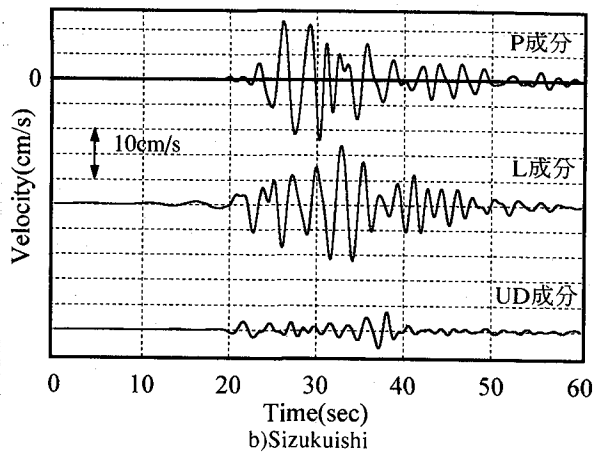
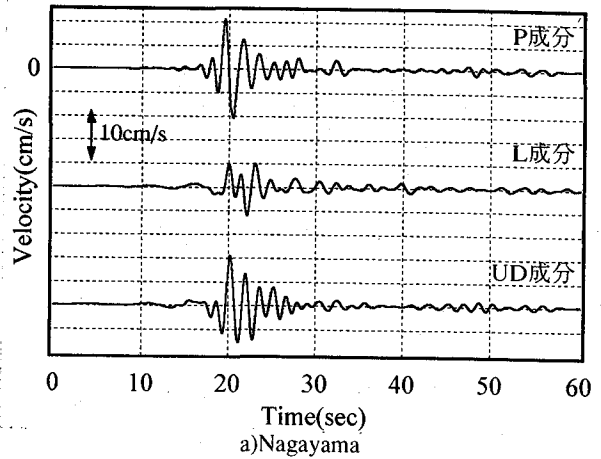
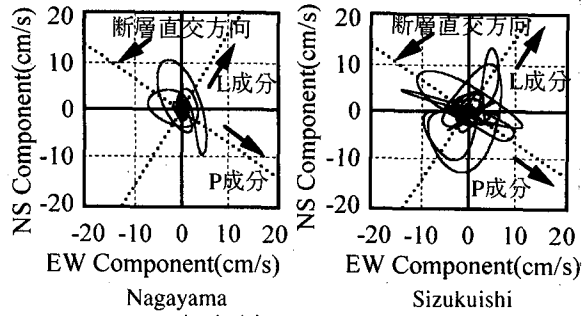


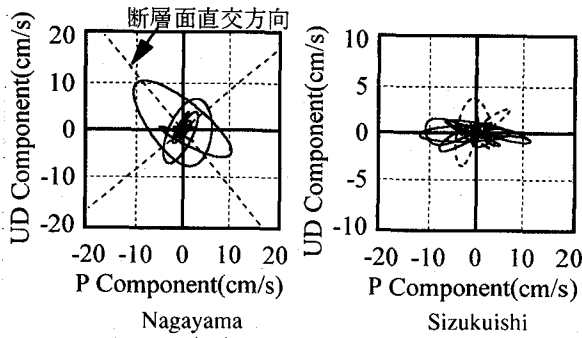
図-2 両地点における観測記録の速度成分波形

分の地震記録の速度成分波形を図-2、それらのフーリエスペクトル(Parzen Window, バンド幅0.2Hz)を図-3に示す。ここで、水平2成分は、断層上辺に対する直交方向成分(以後、P成分と呼ぶ)と平行方向の成分(以後、L成分と呼ぶ)について示している。また、Sizukuishiにおける水平成分の周波数特性は0.3から0.4Hz近傍にて卓越している⁴⁾ことから、図-2で示した波形は各速度成分(継続時間81.92秒)のウェーブレット変換および逆変換⁵⁾により求めた5および6次成分を含む成分波(0.13Hz-1.04Hz)であり、図-3はそのフーリエスペクトルである。その際、アナライジングウェーブレットはMeyer⁶⁾のウェーブレットを用いた。Nagayamaにおける波形の継続時間はSizukuishiに比べ極めて短く、卓越周波数は0.5または0.6Hzに認められる。さらに、鉛直成分の最大値がP成分とほぼ同程度であることも大きな特徴である。また、Sizukuishiでは、Nagayamaより低周波数側の周波数0.3から0.4Hzにてスペクトル振幅が卓越し、水平成分の振幅はNagayamaの5倍程度の大きさとなっている。

次に、両地点の観測記録の速度成分を用いた水平面および鉛直面内の粒子軌跡(以後、オービットと呼ぶ)を、図-4に示す。鉛直面内のオービットには、P成分を水平成分として用いた。水平面についてみると、NagayamaではP成分つまり逆断層の上下方向の断層変位の生じる方向の震動が卓越し、SizukuishiではP成分とL成分の振



a) 水平面内のオービット



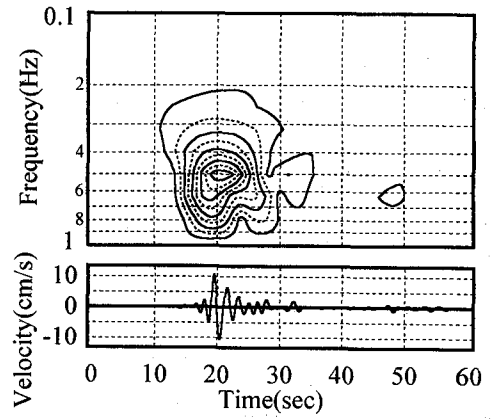
b) 鉛直面内のオービット

図-4 水平面内および鉛直面内の速度成分オービット
表-1 地盤構造モデル

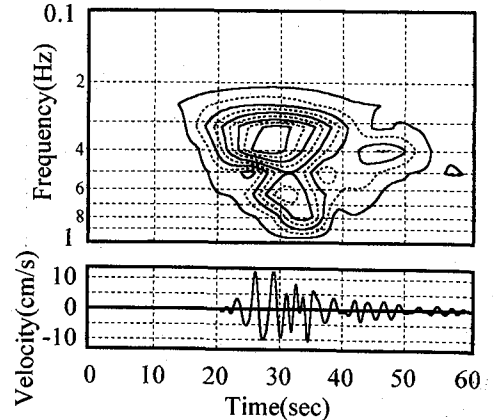
層番号	層厚 (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	単位体積重量 (kN/m ³)	Q値
1	40	300	2140	19.6	50
2	40	500	2500	19.6	100
3	450	1000	2500	22.54	100
4	800	1500	3960	22.54	100
5	-	2500	6630	24.5	200

幅が同程度となっているが、図-2に示した両成分の波形をふまえるとまずP成分が卓越し、次にL成分が卓越していることが分かる。また、鉛直面内のオービットのうちNagayamaに着目すると、主要動部分は断層面に直交する方向に卓越していることが分かる。これは、逆断層の震源過程より放射された地震動の震動性状と関連し、断層の破壊方向である断層の上方に生じる地震動の震動卓越方向と対応していると考えられる。このことは、Nagayamaを含む断層近傍地盤では、断層面に直交方向に卓越する震動が断層面に沿った斜め方向に伝播していることを示していると考えられる。

次に、零石盆地への地震波の入射特性を把握する上で重要な両地点のP成分を対象とし、速度波形の非定常スペクトルを図-5に示す。ここで、非定常スペクトルは神山による手法⁷⁾を用いた。Nagayamaは図-3のフーリエスペクトルと同様に0.5Hzにスペクトル強度の卓越する周波数特性を有する波群で構成され、Sizuikuishiは、0.3から0.4Hz近傍にスペクトル強度の卓越する波群とそれよりスペクトル強度は小さい、0.6から0.7Hzに卓越する波群の2つで構成されていることが分かる。ここで、



a) Nagayama



b) Sizuikuishi

図-5 水平成分(P成分)に関する非定常スペクトル特性

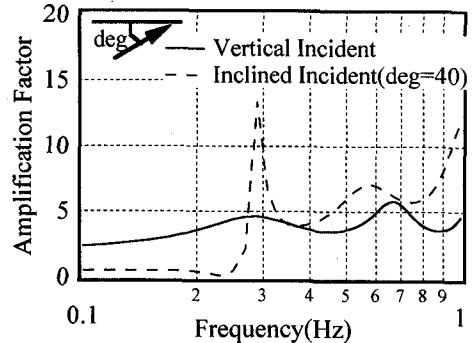
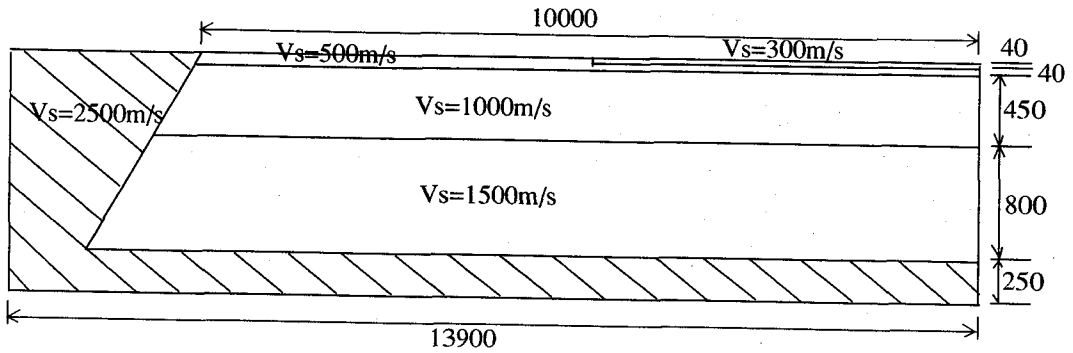


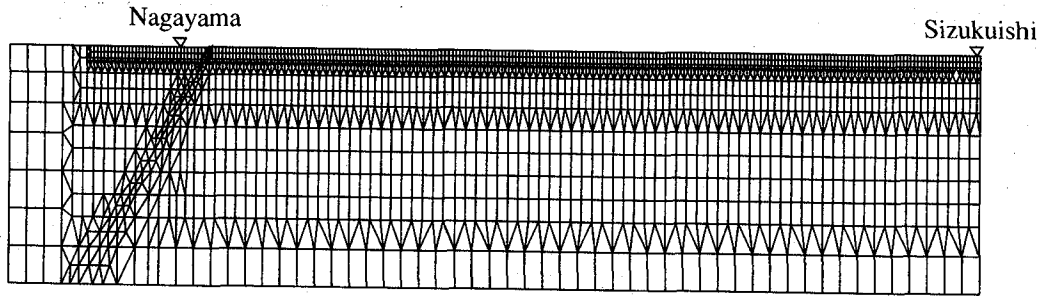
図-6 入射条件に応じたSizuikuishiの周波数応答関数の比較

速度波形の振幅が現れる前にスペクトルが現れているのは、非定常スペクトルを算出する際のフィルターの幅によって中心周波数近傍の定常波形の影響が現るためであると考えられる。フィルターの特性の調整が必要ではあるものの、その卓越周波数成分とその到達時間との関係には影響を及ぼしていないと考えられる。

最後に、表-1に示す前報¹⁾で求めたSizuikuishi位置の地盤構造モデルを用い、地盤構造を水平成層と仮定することによりS波重複反射理論に基づいて求めた周波数応答関数を図-6に示す。ここで、S波とは、伝播直交方向に震動成分を有する平面波(SV波)とし、その入射条件は鉛直入射、さらに断層面に沿って伝播するとした斜め入射(以後、斜め入射と呼ぶ)の2つとした。斜め入射



a)地盤構造および物性モデル



b)有限要素モデルおよび検討位置

図-7 雫石盆地の地盤構造・物性および2次元有限要素モデル

に対しては、周波数0.3Hz近傍の応答が顕著に卓越し、図-3, 5に示した観測記録の周波数特性ともよく対応している。鉛直入射に対しては、斜め入射と同様に0.3Hz近傍に卓越はみられるが、その応答倍率は他の卓越周波数や斜め入射時の値に比べ小さい。この斜め入射に対する周波数応答特性、およびNagayamaにおける鉛直面内の速度成分のオービットの特性は、雫石盆地における地震動の伝播特性を評価する際の入力条件として、断層面に沿った方向の斜め入射を用いることの妥当性を示唆していると考えられる。

これらより、観測記録のP成分は、盆地内への地震動の入射特性に起因した応答特性を示し、盆地内の地震動の伝播特性を分析する上で有用であると考えられる。

3. Ricker Waveletを用いた2次元応答解析

3.1 解析手法および地盤構造モデル

雫石盆地内での地震動の伝播特性へ及ぼす地震波の入射角や盆地端部の断層面に起因する不整形性の影響を把握するため、2次元有限要素解析を実施する。解析には図-1に波線で示した断層上辺に直交し、Sizuishiを通る鉛直断面の図-7に示す地盤構造および物性モデル、および2次元有限要素モデル¹⁾を用いる。その際、入力波の入射角の影響が現れる解析モデルの面内を伝播する地震動を対象とした解析を実施する。有限要素モデルの領域は、盆地側で表-1のせん断波速度2500m/sを有する層の厚さ250mを考慮した深度1.58km、地表面断層端より水平方向に雫石盆地側10.0km、断層上盤側3.9kmをモデル化した。両側面にはエネルギー伝達境界、

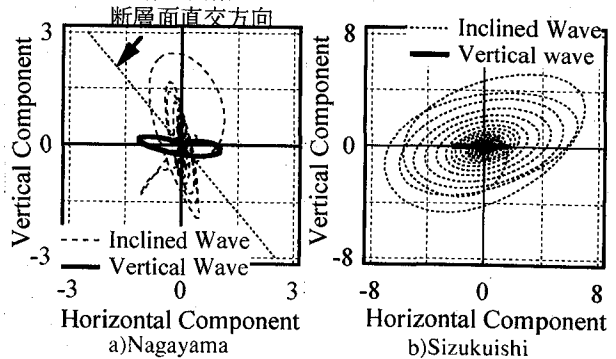


図-8 入射角に応じたNagayama,Sizuishiの鉛直面内のオービット

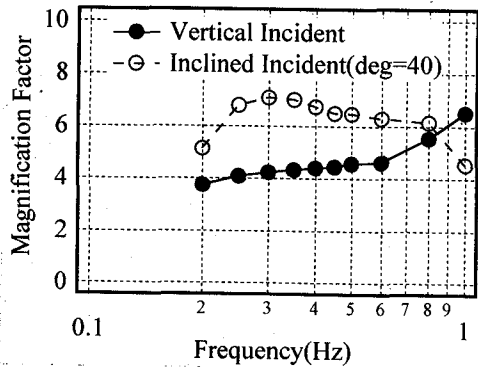
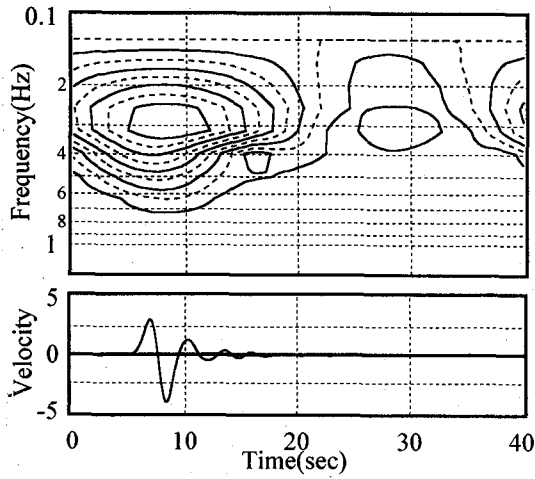


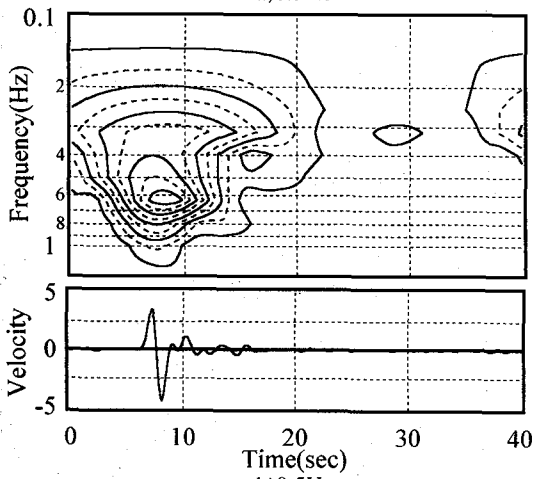
図-9 入射条件に応じたSizuishiの中心周期毎の応答倍率の比較

下端には粘性境界を設定した。要素サイズは、各層の遮断周波数が2Hz程度とし、その周波数に対する波長の4また5分の1となるように設定した。

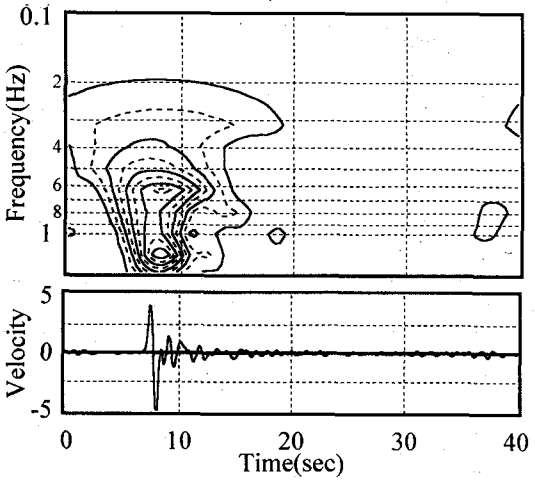
入力波には、両観測点での観測記録速度成分の卓越周波数を含む0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.5, 0.6, 0.8および1.0Hzを中心周波数とした無次元単位振幅のRicker waveletを加速度波として用いた。その入力



a)0.3Hz

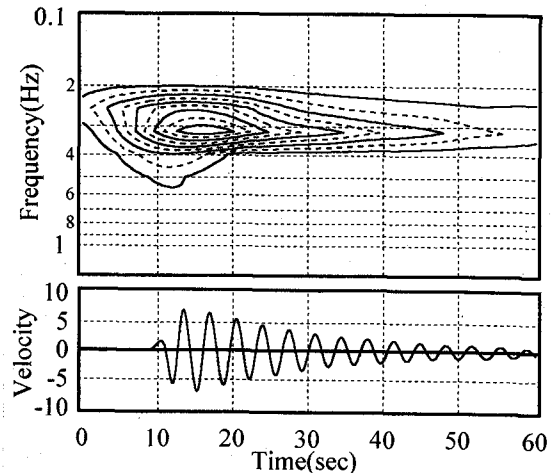


b)0.5Hz

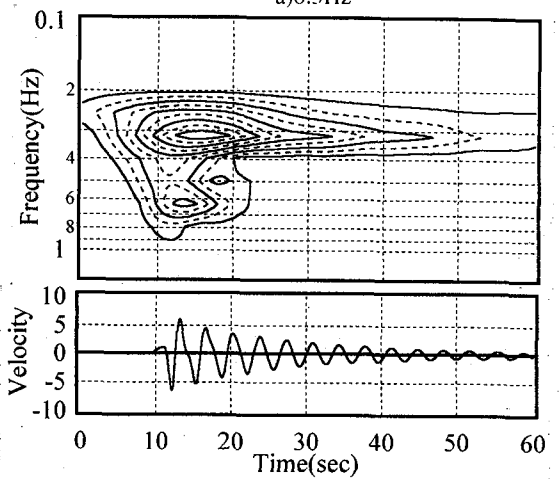


c)0.8Hz

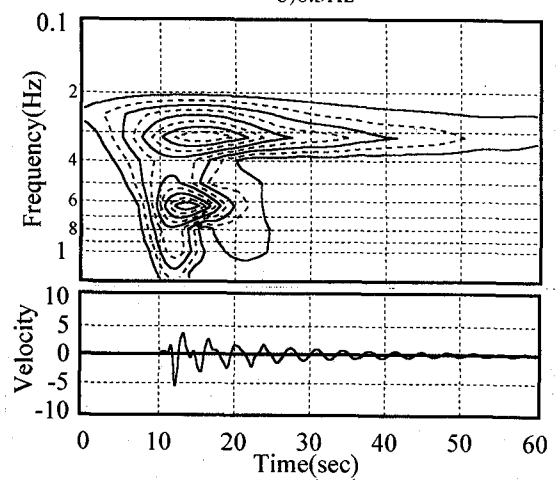
図-10 鉛直入射波に対する非定常スペクトル



a)0.3Hz



b)0.5Hz



c)0.8Hz

図-11 斜め入射波に対する非定常スペクトル

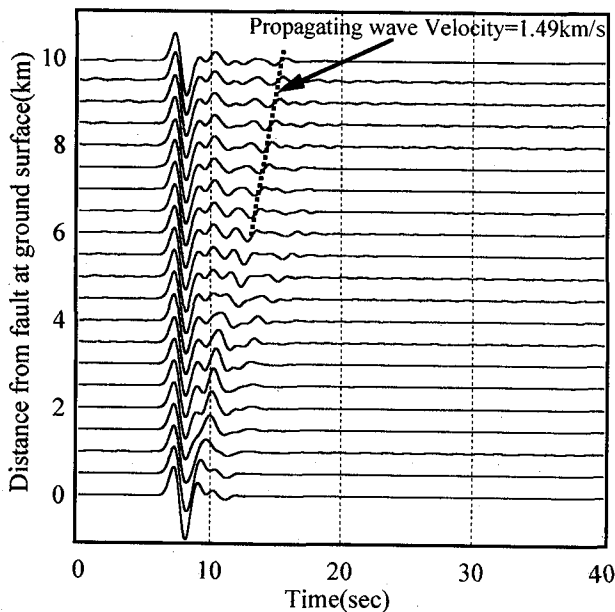
条件として、前報⁷⁾で用いた平面波の鉛直入射と、前章の図-6に示す周波数応答関数の算出に用いた入射角を断面平行方向の40度とする斜め入射の2つとした。

3.2 地震観測点位置の応答性状

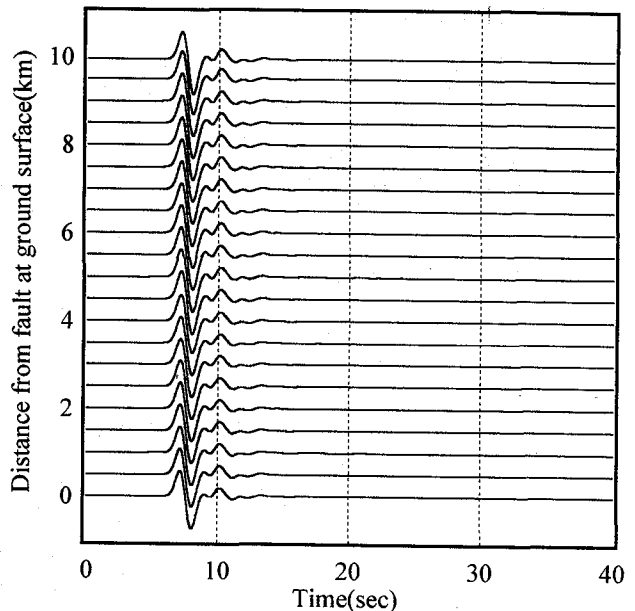
まず、NagayamaとSizukuishiにおける鉛直面内の速度成分のオービットを図-8に示す。Nagayamaでは、鉛直入射に対してほぼ水平成分の震動が卓越しているが、

斜め入射に対する主要動部分の卓越震動方向は、表層の低速度層を解析モデルで考慮していないために断面直交方向より急勾配とはなっているものの、図-4に示した地震観測記録の傾向と類似している。また、Sizukuishiのオービット形状は、鉛直入射に対しては水平成分が極めて卓越しているが、斜め入射に対しては水平方向の卓越する楕円型となっている。

次に、Sizukuishiでの応答性状のうち、入射条件に応

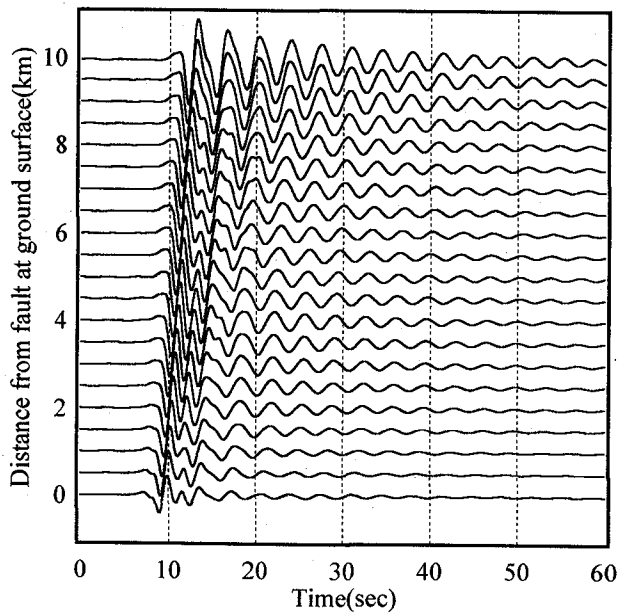


a)2次元地盤モデル

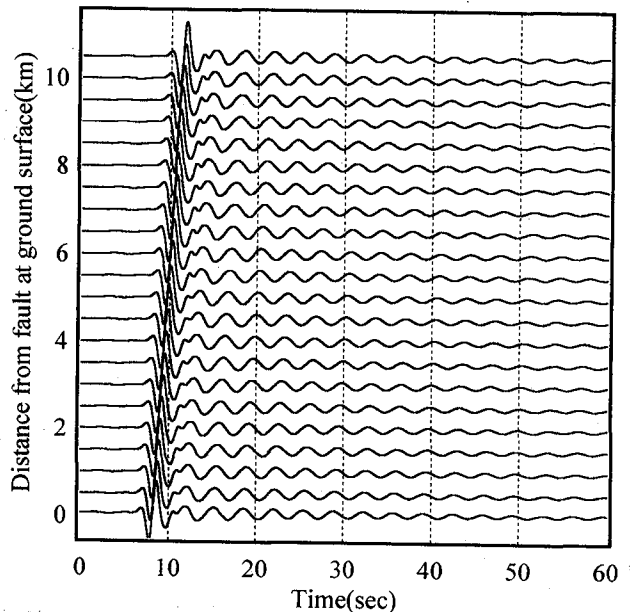


b)成層地盤モデル

図-12 鉛直入射に対する2次元地盤モデルと成層地盤モデルの地表面応答波形の比較(中心周波数:0.5Hz)



a)2次元地盤モデル



b)成層地盤モデル

図-13 斜め入射に対する2次元地盤モデルと成層地盤モデルの地表面応答波形の比較(中心周波数:0.5Hz)

じた入力波の中心周波数と入力波に対する地表面での最大応答加速度の応答倍率との関係を図-9に示す。2つの入射条件に対する傾向は図-6の周波数応答関数と同様となっている。特に、斜め入射に対して、0.3Hzにて応答が大きくなる傾向は、図-6の傾向と類似している。

最後に、Sizukuishi, Nagayamaでの観測記録の速度成分の卓越する周波数0.3Hzおよび0.5Hz、さらにそれらより高周波数側の0.8Hzを中心周波数とした入力波に対するSizukushiにおける応答速度波形の非定常スペクトルを鉛直入射、斜め入射に対して、それぞれ図-10, 11に示す。鉛直入射に対する卓越周波数は、0.3Hz入射に対して0.3Hz、0.5Hz入射に対して0.6Hz、0.8Hz入射に対して0.6および1.2Hzにみられ、それら周波数は入力波の

中心周波数近傍で周波数応答関数の卓越する周波数と対応している。一方、斜め入射に対しては、入力波の周波数によらず共通に0.3Hzに卓越周波数を有している。さらに、鉛直入射と同様に、入力波の中心周波数に近い周波数応答関数の卓越周波数での応答が大きくなっている。特に、Nagayamaにおける観測波の卓越周波数0.5Hzを入力波とした際の非定常スペクトルの卓越周波数やそのスペクトル強度の等高線分布形状は図-5に示したSizukushiにおける速度成分の非定常スペクトルの特性と良い対応を示している。

3.3 雫石盆地内での波動伝播性状

雫石盆地内での地震動の伝播特性を把握するため、

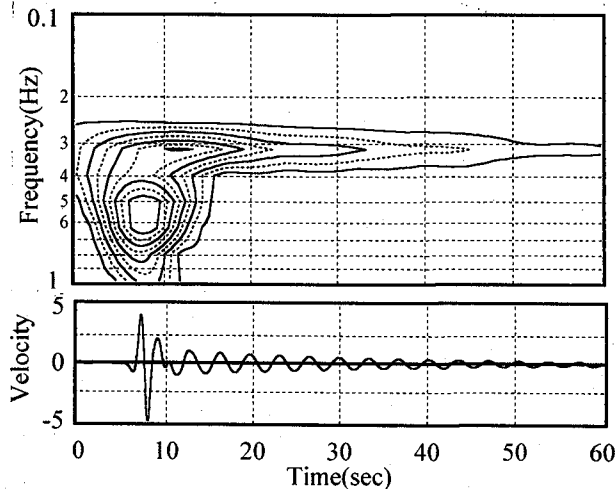


図-14 斜め入射に対する成層地盤の応答のSizukuishiにおける非定常スペクトル

両入射角に対する中心周波数0.5Hzの入力波より地表面で得られた断層位置からSizukuishiまでの0.5km毎の速度波形を図-12, 13に示す。さらに、両図には、速度波形を示した位置における地盤を水平成層と見なした地盤モデルに対する鉛直および斜め入射に対する地表面の速度波形(ここでは成層地盤応答と呼ぶ)も合わせて示す。鉛直入射に対しては、主要動部の最大振幅レベルや波形形状が両地盤モデルではほぼ同程度であるが、不整形地盤モデルでは主要動部が到達した後、水平方向への伝播性を有すると考えられ波群が認められる。その水平方向伝播速度は1.49km/sであり、表-1に示した地盤モデルより得られるRayleigh波の基本モードに関する理論位相速度の値と対応している。この様な水平方向への伝播性を有する波群の生成は他の中心周波数でも同様に認められる。さらに、それらの水平方向伝播速度はそれぞれの中心周波数に対応するRayleigh波の基本モードに関する理論位相速度と対応している。このことから、それら波群は盆地端部で生成されたRayleigh波であると考えられる。しかし、その波群の振幅レベルは主要動部に比べ小さい。一方、斜め入射に対しては、両地盤モデルとも最大振幅を有する波の到達後、地盤内を水平方向多重反射しながら伝播する波群が認められる。しかし、最大振幅が生じた後の波の振幅レベルは、成層地盤応答に比べ、地盤の不整形性を考慮した2次元有限要素解析による応答の方が大きいことが分かる。その傾向は断層位置より離れるにつれ顕著であり、継続時間が著しく長くなる傾向も合わせて認められる。図-14にSizukuishiにおける成層地盤の速度応答波形の非定常スペクトルを示す。図より、主要動部以降の波群は0.3Hz成分により構成されているが、2次元有限要素解析による応答の特性と比べ、主要動部における0.3Hzの成分のスペクトル強度は小さいことが分かる。ここで示した入射条件に応じた両地盤モデルの応答の差異より、断層面の存在に伴う地盤構造の不整形と入力波

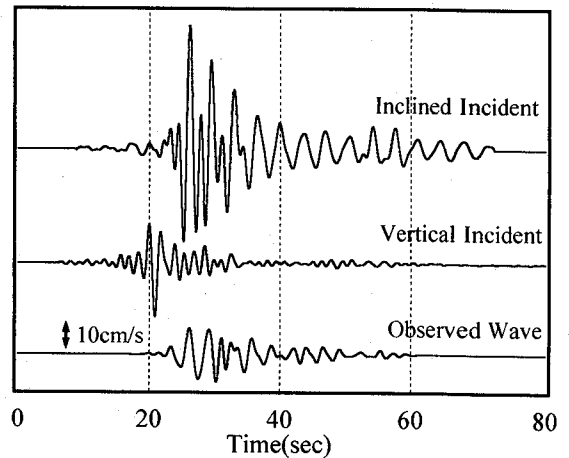


図-15 Sizukuishiにおける入射角に応じた応答速度波形と観測波の比較

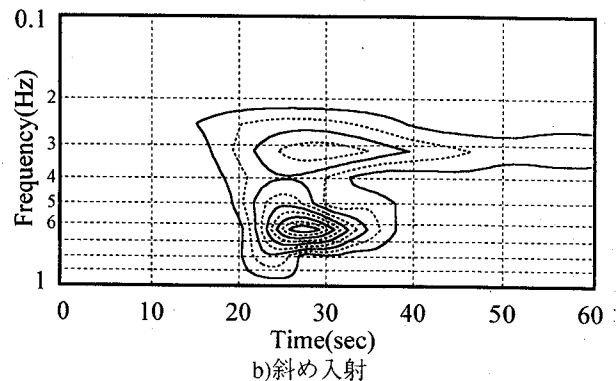
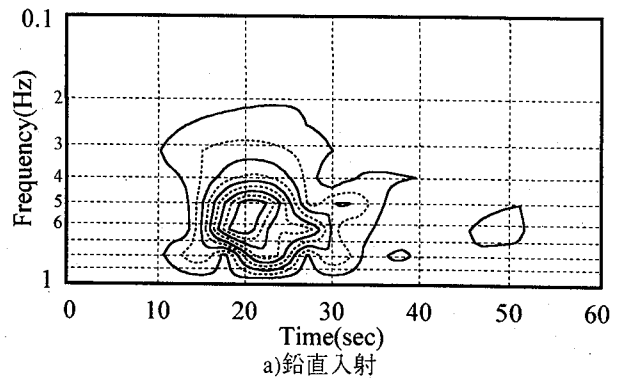


図-16 Sizukuishiにおける入射角に応じた応答速度の非定常スペクトルの比較

の断層面に沿った方向の伝播の2つの条件の下で、0.3Hzの成分が増幅されていることが分かる。

4. 地震観測記録に基づく2次元応答解析

ここでは、Nagayamaにおける観測記録のP成分を入力波とし、鉛直入射および斜め入射に対して、前章と同様の2次元面内応答解析を実施し、Sizukuishiで得られた速度波と観測波の特性を比較する。ここで、Sizukuishiでの応答は、解析により得られた応答特性に、Nagayama相当位置における応答速度波形の到達時間および周波数特性が観測波と同じとなるような周波数フイ

ルターを乗じることにより算出した。

入射角に応じた速度波形と観測速度波形の比較を図-15、入射角に応じた応答速度の非定常スペクトルを図-16に示す。鉛直入射に対して、最大振幅は同程度の値となっているが、主要動の到達時間や波形形状などが異なっている。さらに、周波数特性は、周波数0.5から0.6Hzに卓越するスペクトル特性しており、図-5に示した観測波の特性と異なっていることが分かる。一方、斜め入射に対しては、最大応答値が観測値の4倍程度となっているが、到達時間や波形形状は観測波と比較的よく対応している。非定常スペクトルについてみると、図-5に示した観測波に認められる周波数0.3Hzに卓越する波群が認められるが、0.6Hzに卓越したスペクトル特性を有する波群が卓越していることが分かる。ここで、後者の波群は、前章で示した様にSizukuishi近傍での基盤面より入射した入力波に対する応答による卓越成分である。しかし、この解析では、入力波が基盤内を斜め方向に伝播している過程で地震動の減衰を考慮していないため、Sizukuishi近傍基盤への入力波を過大に評価している。このことから、Sizukuishiの応答は、断層近傍の地盤構造の不整形性の影響に比べ、近傍地盤への斜め入射の影響が大きく、図-14に示したSizukuishi近傍基盤を成層地盤とした斜め入射に対する応答と同様に0.6Hzに卓越した応答を示していると考えられる。

いずれにしても、岩手県内陸北部地震による雫石盆地におけるSizukuishiにおける観測記録に含まれる0.3Hzおよび0.6Hz近傍の波群の特性は、盆地内に入射する地震波の入射角および断層近傍の地盤構造の不整形性の双方の影響に起因して発生したことが明らかとなった。ただし、定量評価を行うためには、震源過程による地震波の放射、減衰過程および地盤構造の不整形性を考慮できる3次元解析が必要であると考えられる。

5.あとがき

本論では、岩手県内陸北部地震より雫石盆地で観測された地震記録の特性に含まれる盆地内での地震動伝播特性を明らかにするため、観測された地震記録の速度成分の分析、断層近傍から雫石盆地の地震観測点までの断層上辺に直交する方向の地盤構造の不整形を考慮した2次元有限要素モデルを用いた2次元面内解析を実施した。地震記録の分析では、主要な波群を構成する周波数特性、震源近傍での地震波の入射特性に着目した。2次元面内解析は、雫石盆地内での地震動の基本的な伝播性状を把握するため、まず、Ricker waveletを入力波とし、入力波の入射角や周波数特性をパラメータとした分析を行った。さらに、極震源近傍での観測記録をコントロール波とし、入射角に応じた2次元面内解析を実施した。

この結果、以下のことが明らかとなった。

- (1)断層近傍および雫石盆地への地震波の入射角は、Nagayamaにおける観測記録速度成分の鉛直面のオービットおよびSizukuishiにおける斜め入射波に対する周波数応答関数と観測記録の周波数特性との比較より、断層面に沿った方向であると推測される。
- (2)Sizukuishiにおける周波数0.3Hzにて卓越する波群は、盆地端部の逆断層面を側方境界とする不整形地盤部分へ地震波が断層面に沿って斜め方向に入射することにより生成された成分により構成されている。
- (3)Sizukuishiにおける0.6Hz近傍の卓越する周波数成分は、観測点近傍の基盤に地震波が斜め方向に入射することにより生じている。
ここで、以下の2つはまだ未解明であるが、震源から断層上盤側の山地形や不整形性を有する地盤構造を含む3次元的分析などがその解明には必要であるため、今後の課題としたい。
 - ・盆地端部における入射条件と地盤構造の不整形性に起因して発生する波動の発生機構の解明
 - ・盆地内でのP成分のみならずL成分や上下成分に関する地震動伝播特性の定量評価

参考文献

- 1) 中村晋, 大角恒雄, 福元俊一: 岩手県北部地(1998.9.3)で観測された地震記録の特性とそのシミュレーション解析, 構造工学論文集, Vol.48A, pp.555-566, 2002
- 2) 川瀬博, 松島信一: 「エッジ効果」に着目した単純な二次元盆地構造の三次元波動場解析-兵庫県南部地震の際の震災帯の成因-, 地震, 第2輯, 第51巻, pp.431-449, 1998
- 3) 菊地・山中: E I C地震学ノートNo.50, 東大震研情報センター, http://www.eic.eri.u-tokyo.ac.jp/EIC/EIC_News/980903.html, 1998.
- 4) レベル2地震動研究小委員会編: レベル2地震動研究小委員会の活動成果報告書, (社)土木学会-地震工学委員会, 2000.3
- 5) 佐々木文夫, 前田達哉, 山田道夫: ウェーブレット変換を用いた時刻歴データ解析, pp.9-20, 構造工学論文集, Vol.38B, 1992
- 6) Meyer Y.: Orthonormal Wavelets, in Wavelets, Springer, pp.21-37, 1989
- 7) 神山真: 強震地震動の非定常スペクトルの算出法に関する一考察, 土木学会論文報告集, 第24.5号, pp.55-62, 1976

(2002年9月13日受付)