

岩手県内陸北部地震(1998.9.3)による被害と地震動特性の分析

中村 晋*, 大角恒雄**
Susumu Nakamura, Tsuneo Ohosumi

*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)

**博士(工学), 主任研究員, 日本工営(株)中央研究所開発研究部(〒300-1259 茨城県稲敷郡茎崎町稲荷原2304)

本報告では, まず1999年台湾・集集地震と同様の逆断層を震源機構とする岩手県北部地震(Mj=6.1, 1998年9月3日)による被害および観測記録の特徴を示した。さらに, 観測された地震記録の特性に及ぼす断層近傍の地盤構造の影響を把握するため, 雫石盆地の地盤構造を推定し, 理論解析法と疑似3次元解析法を用いたシミュレーション解析による分析を行った。その結果, 観測記録には逆断層を震源機構とする地震動に共通する特徴が認められること, 断層下盤側の雫石盆地における観測記録には断層近傍の地盤構造の不整形性を含む断層から観測点までの地盤構造の影響を強く受けていることが明らかとなった。

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(Mj, 6.1)は, 1995年兵庫県南部地震以降に発生した1997年鹿児島県北部地震について, 地震動の揺れ強さの評価指標である計測震度が震度6弱を記録した。この地震は岩手山南西部に位置する西根断層群の活動に起因し, 岩手山の南西約10km(N39° 48', E140° 55'), 深さ約7kmを震源として発生してのものである。その震源機構は, 東西圧縮西傾斜の逆断層であると推定されている。さらに, この地震では断層変位に起因する地盤変状が地表面に表れたことなどをはじめ, 1999年台湾・集集地震と震源機構や被害に類似性が認められる。このような震源機構を有すると考えられる活断層が東北日本地域に多く存在し, それら活断層には内陸部の中核都市に近接しているもの(例えば福島西縁断層群など)も存在している。

一方, 1995年兵庫県南部地震以降, 耐震設計, さらに地震防災計画における地震被害想定を行う上で, 活断層などに起因する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¹⁾。1999年に発生したトルコ・コジャエリ地震²⁾, 台湾・集集地震³⁾による甚大な被害は内陸型地震の重要性の再認識と, 断層変位に伴う地表面の地盤変状が構造物に及ぼす影響といった新たな課題をもたらした。いずれにしても, 内陸型の地震に対しては, 地域固有の震源, 伝播, 増幅特性の3要素に基づいた評価が必要となる。

このことから, 岩手県内陸北部地震における地震動の発生・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て地震被害想定, または設計入力地震動を作成する上で重要であると考えられる。しかし, この地震では極震源近傍や雫石盆地内の第4紀の地盤上での地震観測記録が得られているものの, それら地震記録に含まれる波動の伝播・増幅特性を解明するために必要な深層地盤構造に関する詳細なデータは得られていない。

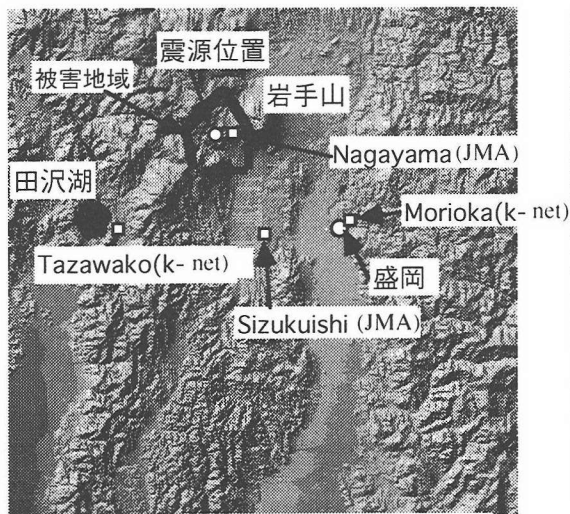
さらに, 内陸性地震に対する各種構造物の耐震設計を行う上で, 断層変位に伴う地盤変状が地表面に現れ, それに起因して地中構造物に被害が生じたという事実は貴重な資料であると考えられる。

本報告では, まず, 岩手県内陸北部地震による被害及び極震源近傍をはじめ観測された地震記録の特性を示す。次に, 極震源近傍及び雫石盆地内での観測された地震記録の特性に及ぼす震源や伝播・増幅特性の影響を明らかにすることを目的として実施した調査により推定された雫石盆地内での深層地盤構造⁴⁾を示す。その推定は, 常時微動の観測データを用いて空間自己相関関数法(SPAC法)等により算出した位相速度特性と仮定した地盤構造モデルに基づく理論位相速度との比較に基づいて行われたものである。最後に, 観測された地震記録の特性に及ぼす震源特性および断層近傍の地盤構造の影響を把握するために実施した震源断層を含む水平成層地盤における地震波動の解析, および断層近傍と雫石盆地の地盤構造を考慮した2次元有限要素法による面内と面外波動の組み合わせによる疑似3次元解析の比較⁵⁾も示す。

2.地震被害

被害は図-1, 2に示す様に自然斜面の崩壊や地表面に現れた地震断層に伴う地盤変状に起因した構造物の被害などの地盤系の被害が主であり, 人的被害は幸いにも雫石町国民休暇村で10人の負傷者に留まった。ここで, 地震断層に起因して生じた地表面の段差はこの地震の大きな特徴の一つであり, 電力施設等への被害をもたらした。また, 踏査の範囲内では液状化に伴う噴砂などの地盤変状は認められなかった。

一方, 建築物の被害は雫石町国民休暇村の天井版や岩手高原スキー場のロッジ内の施設スプリンクラーの落下(写真-1参照)など, 構造物本体ではなく付帯構造や設備にみられた。また, ペンション村においても, 家屋や石積に軽微な損傷が認められた程度であった。震源地域がゴ



□ :地震計位置(気象庁, K-net)

図-1 地震被害地域周辺の地形及び地震動検討位置

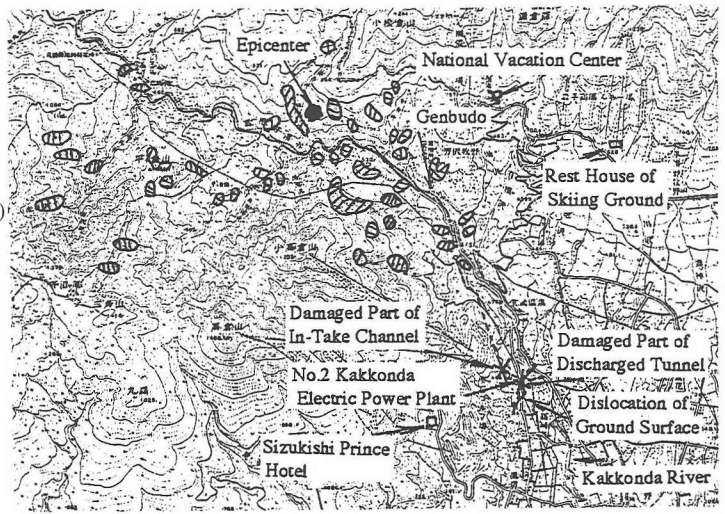


図-2 被災地域の被災概要

ルフやスキーなどのリゾート観光地域であるが盛岡市などから比較的近いことから規模の大きな施設が少ないというものの、雫石プリンスホテル等の規模の大きな建築物の被害は小さいといえる。

以下に、地震断層に起因する地表面の変状、斜面崩壊及び電力施設の被害について示す。

2.1 地表面の地盤変状

地震後、雫石盆地西縁に地震断層と推定される段差が地表面に出現した。段差は図中に示すように湯根田第二発電所の北東方向に約200m、南南東方向に約200m(写真-3参照)、その南端から山祇神社方向に約350m(写真-4参照)と総延長約750mが目視で観察された。それらの位置は、雫石ゴルフ場の東端の断層崖に平行している。その段差の西側は東側より約20-30cmほど隆起している。

地表面に地震断層の影響の表れる内陸性の地震の規模はMjが6.8程度以上との指摘⁵⁾がある。ここで報告する岩手県北部地震はMjが6.8以下で地表面のその影響が表れた地震としても貴重な記録であると考えられる。

2.2 斜面崩壊

震源に近い湯根田川流域に50箇所以上、松川流域に数カ所の自然斜面の崩壊が生じ、湯根田川沿い道路の一部が寸断され、電柱の倒壊(写真-5参照)も見られた。また、この地域の観光名所のひとつである玄武洞付近では、その上部斜面の崩壊による大量の土砂が湯根田川に流下・堆積し、写真に示すようにダムを形成していた。

この斜面崩壊の要因には、地震動の強さのみならず地震直前の8月に東北地方を見舞った集中豪雨により斜面表層の堆積層が水分をかなり含んでいたことなども考えられる。その集中豪雨による降雨量は、湯根田川の本流である北上川上流部で連続雨量が240mm以上に達していた。

2.3 電力施設の被害

地表面の地盤変状が見られた湯根田川中流に位置して

いる東北電力(株)湯根田第二発電所の導水路及び放水路に被害が見られた。同発電所は、1953年より運転を開始している流れ込み式発電所である。

導水路は暗渠と開渠形式のRC構造であり、被害は図-2に示すように発電所に近い開渠部の約12m区間生じた。被害は写真-5に示すように両壁に水路方向にそった斜のひび割れである。また、放水路はRC構造の馬蹄形のトンネル及び暗渠で構成され、被害は発電所に近いトンネル部の約30m区間にみられた。その被害区間におけるトンネル内の損傷状況を図-3に示す。図に示すように、損傷は側壁および天井にトンネル軸方向に沿った幅1~3mmのひび割れが生じている区間23mと、トンネル左側壁が25cm程度内部に押し出されたり右側壁や右下インバート部が崩壊し周辺の転石を含む土砂が流入する(写真-6参照)など損傷の大きな区間7mに分けることができる。

これら被害のうち導水路トンネルの被害は、地震断層の影響と考えられる地表面の段差位置と対応することから、断層の動きに伴う地盤変状に起因して生じたものと推定される。さらに、その段差に直交方向の地表面変状の分布に関する詳細な調査⁶⁾も実施されていることから、その被災機構の解明が今後期待される。

3. 観測された地震記録の特性

まず、計測震度6弱を記録またそれに相当する記録の得られた最近の地震による観測記録との比較により岩手県内陸北部地震の特徴を把握するため、震源近傍における気象庁の臨時観測点Nagayamの地震記録(NS成分)と他の地震記録の加速度応答スペクトル(h=5%)との比較を図-4に示す。比較には、1994年三陸はるか沖地震における八戸港で観測された記録(Hachi-P, EW成分)、1995年兵庫県南部地震における神戸大学(KBU, NS成分)、ポートアイランド地中GL-80m(PI, NS成分)で観測された記録、1997年鹿児島県北部地震による阿久根(AKUNE, NS成分)、宮城野(MIYAGINO, EW成分)で観測された記録の最大加速度

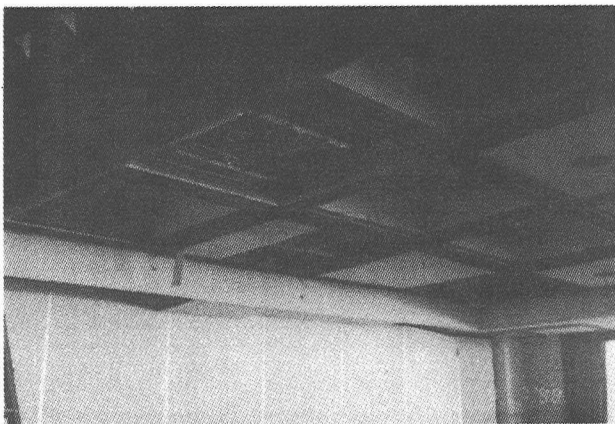


写真-1 国民休暇村天井版の落下



写真-2 地震断層による地表面段差
(湯根田第二発電所の南東より)

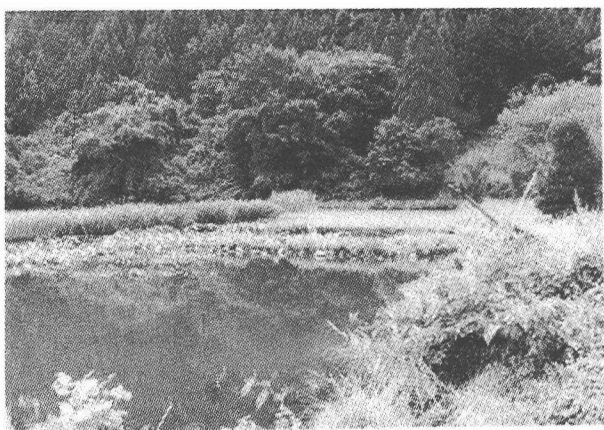


写真-3 地震断層による地表面段差
(山祇神社方向で水田の奥が隆起)

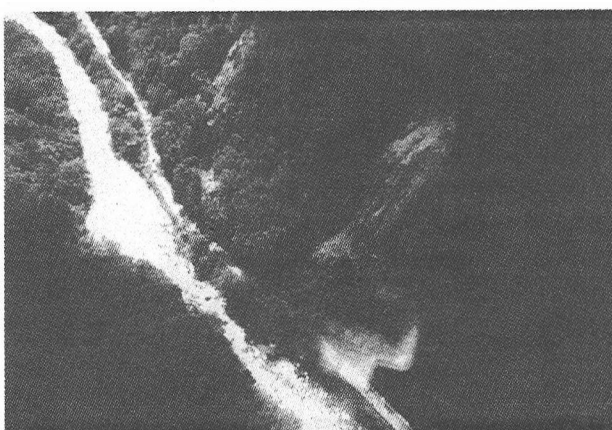


写真-4 斜面崩壊による道路の寸断
(岩手大学農学部 太田助教授提供)

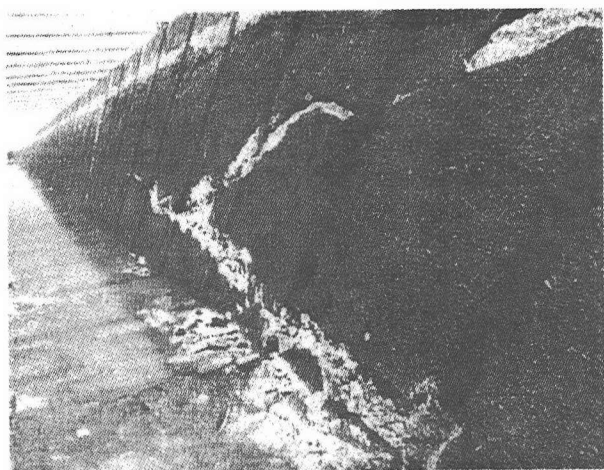


写真-5 導水路開渠の破損

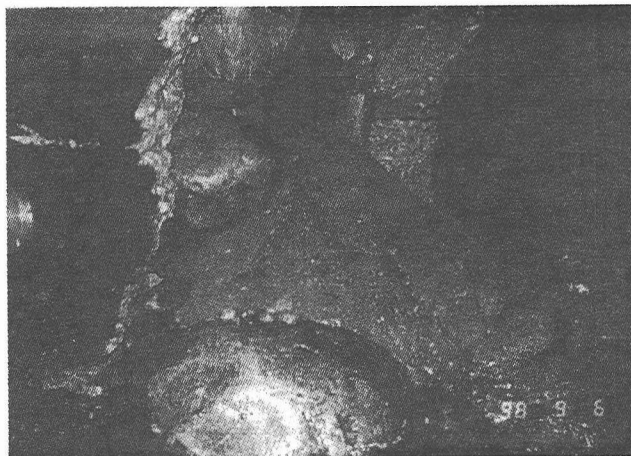


写真-6 放水路トンネルの破損

の得られた成分を対象とした。これより、周波数2.0Hzより低周波数側のスペクトル振幅は他の地震より小さく、MIYAGINOと同程度の値となっているが、それより高周波数側、特に4Hz近傍では最も大きな値となっている。

次に、岩手県内陸北部地震で観測された記録の特徴を示す。まず、国立防災科学技術研究所が実施している強震観測網(以後、K-netと呼ぶ)で得られた東北地域の強震記録の最大加速度分布を図-5に示す。震源の近傍に着目すると、震源(×印)の西方つまり断層の上盤側における最

大加速度50galの等振幅線は東側つまり下盤に比べ西側への広がりをもつ逆断層特有の傾向が見られる。

次に、図-1に示した気象庁の観測点の内、極震源近傍のNagayamaと雫石盆地内の千刈田Sizukuishi、さらにK-netによる震源西方の田沢湖(Tazawako)、震源東南方向の盛岡市(Morioka)の4地点で観測された強震記録の加速度時刻歴を震源の西方に位置するTazawako、震源近傍のNagayama、震源より東方に位置する他の2観測点の順に図-6に示した。極震源近傍では地震波の到達直後に最大値

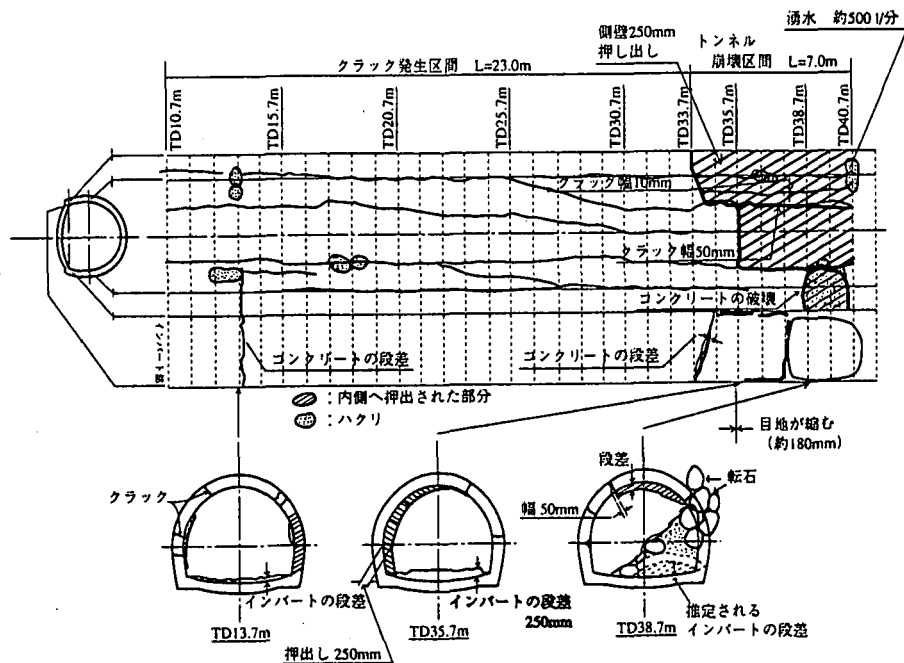


図-3 放水路トンネル内の損傷状況

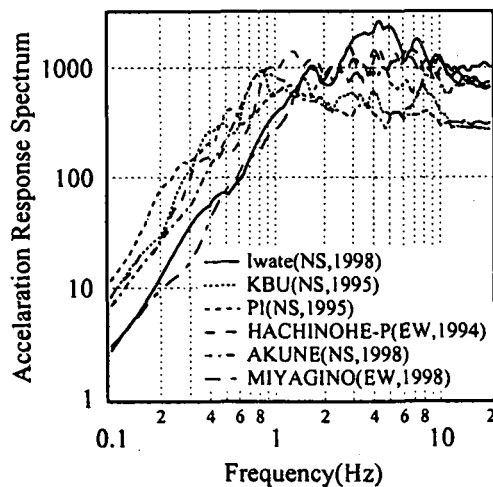


図-4 震度6弱を記録した既往の地震記録の加速度応答スペクトル(h=5%)との比較

を示し、水平成分の最大値はNS成分が714.9gal、上下動成分で708.3galと兵庫県南部地震における震災の帯近傍の値にも匹敵するかなり大きな値となっている。しかし、主要動部分の継続時間は5秒程度と短いことがわかる。震源の西方のTazawakoもP波の位相が初動部に見られるものの継続時間や包絡形状は震源近傍と良く似た特性を示している。一方、震源より東方の2つの観測点では、最大振幅は震源西方より小さいものの継続時間が長くなっている。特に、SizukuishiのEW成分は、地震波が到達してから10秒後に最大値を示すとともにそれ前後以降に長周期の成分が卓越している傾向がみられる。次に、この加速度記録を数値積分することにより得られた速度成分の水平面内の軌道を震源近傍の2つの観測点について図-7に示す。これより、極震源近傍のNagayamaでは北西から南東方向と南北方向に震動が卓越し、Sizukuishiでは地震波到達後の10秒(図中実線)はほぼ震源近傍と震動の卓越方向が対応しているが、それ以降の震動方向は東西方向に卓越する傾向(図中波線)が認められる。

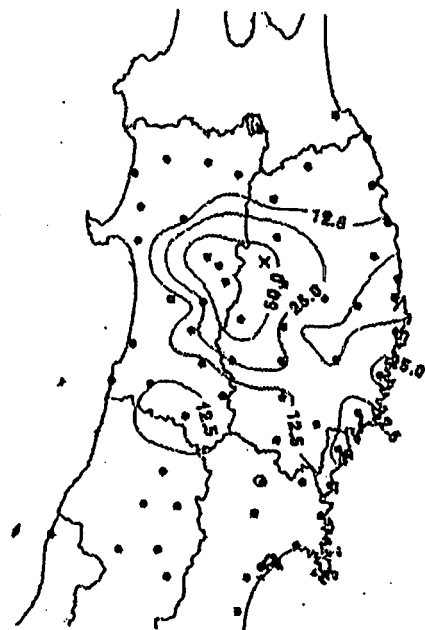


図-5 最大加速度分布
(国防防災科学技術研究所のURL;
<http://www.k-net.bosai.go.jp/>による)

その4地点の周波数特性を比較するため、各地点における水平2成分より求めたベクトルフーリエスペクトル⁷⁾を図-8に示す。これより、震源近傍では3.4Hz、1.7Hzに卓越周波数が認められるが、Sizukuishiでは0.4Hz近傍に卓越周波数がみられ、そのスペクトル振幅は震源近傍より大きな値となっている。しかし、5Hz以上のやや高周波数帯域では他2地点のスペクトル振幅より小さな値となっている。また、他地点においても、周波数0.3から0.4Hzに卓越が認められる。Sizukuishiにおける低周波数帯域の地震動特性を把握するため、EW成分に関する震源近傍との非定常スペクトルの比較を図-9に示す。これより、地震波の到達より10秒周辺以降の周期1秒以上の成分には分散性波動つ

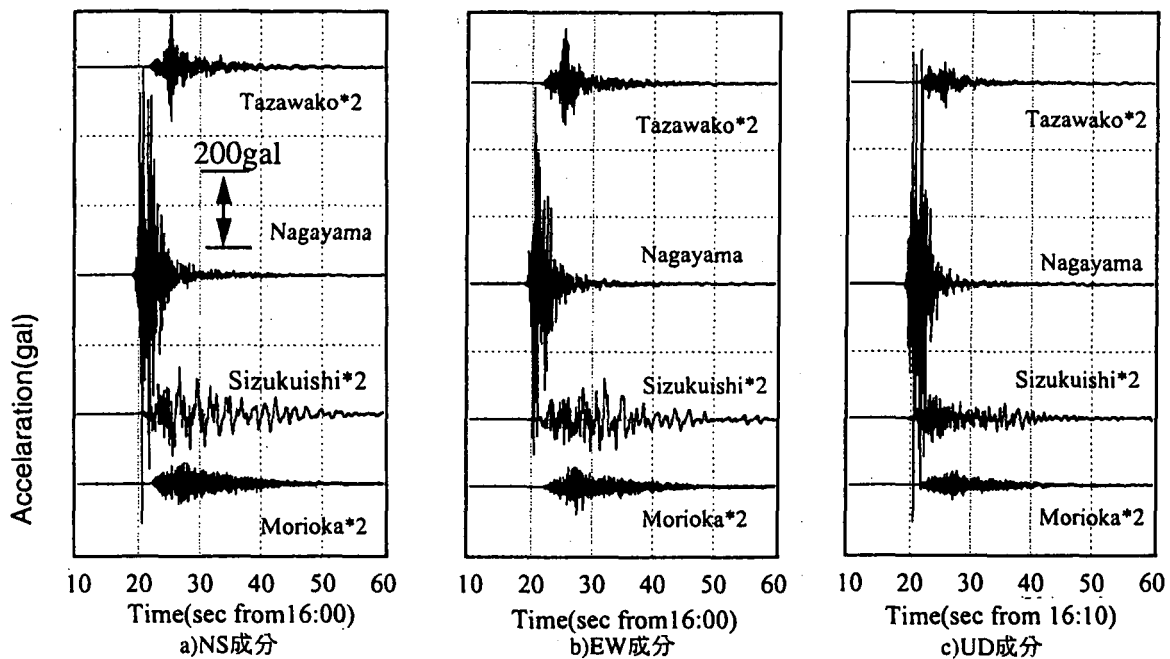


図-6 震源近傍の4地点における加速度時刻歴

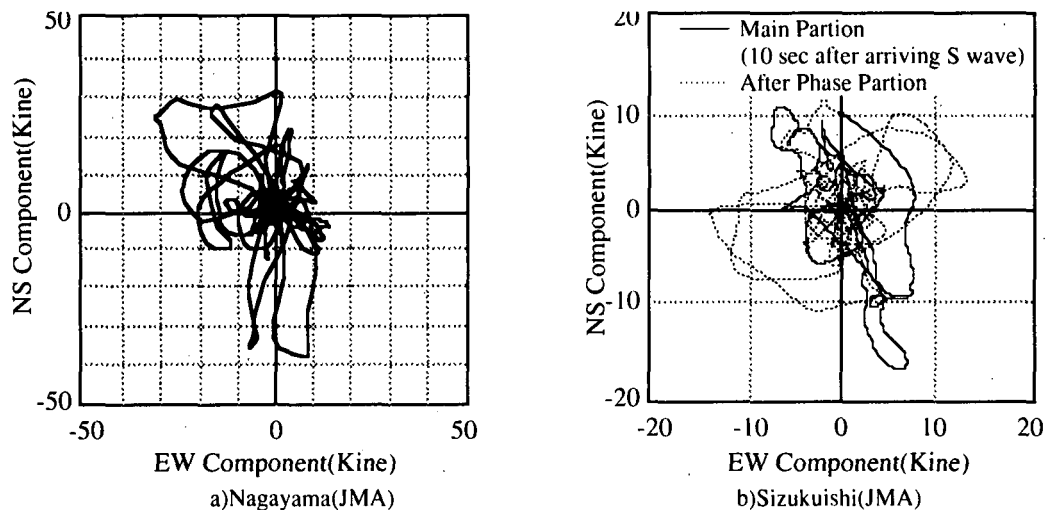


図7 震源近傍の地震動の水平面内の速度ベクトル

まり表面波の特性が顕著に現れている。

4. 常時微動に基づく地盤構造の推定⁴⁾

雫石盆地内の深部地下構造を把握するためのアレー観測は、図-10に示すように強震観測点近傍の雫石総合運動場にて、半径20m、50m、150mの3種類について実施した。ここで、半径20m、50mのアレー観測は、中心点及び円周上の3点での同時観測であり、半径150mの観測では、中心点及び円周上の1点の2点同時観測を円周上の点を移動しながら実施した。深部地盤構造の推定は、最近よく用いられている空間自己相関関数法(SPAC法)⁸⁾⁹⁾により算出した表面波の位相速度と、仮定した地盤構造によるRayleigh波の理論位相速度特性が整合する様に試行錯誤的に推定した。測定にはサーボ型の速度計(東京測振製：VSE-15D)を用い、計測はサンプリング周波数を100Hzとし、速度の上下成分を3分間実施した。

4.1 位相速度の推定

まず、アレー半径20m、50mの空間自己相関関数は、円形アレー上のi点と中心点間の空間自己相関関数をを中心点から円形アレー上の各測点に対する方位平均することにより算出した。また、アレー半径150mの空間自己相関関数は盛川らにより提案されている2sSPAC法、つまり2点間の空間自己相関関数を単純平均することにより算出した。各アレー半径に対する空間自己相関関数は、測定記録より抽出開始時刻を10秒づつずらしながら40.96秒区間を8区間抽出し、Parzen Windowにより平滑化処理を行うことにより算出した。その際に用いたバンド幅は、アレー半径に応じて対象周波数帯が異なることから、半径150mについて0.2Hz、他は0.4Hzとした。

ここで得られた位相速度と周期の関係を図-11に示す。図には、8区間について算出した空間自己相関関数により求めた位相速度の平均値(図中シンボル)とその±σ区間も合わせて波線で示した。図に示す様に、位相速度は約1500m/sから300m/sの間で変化している。

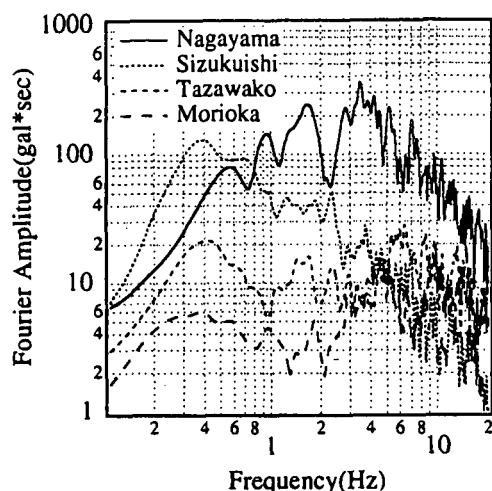


図-8 4地点におけるフーリエスペクトルの比較

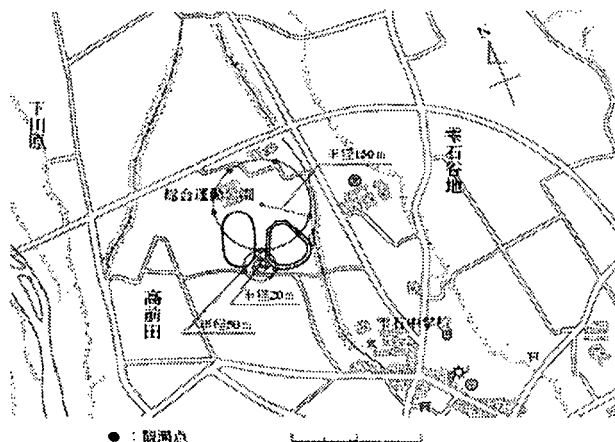


図-10 常時微動観測点の配置

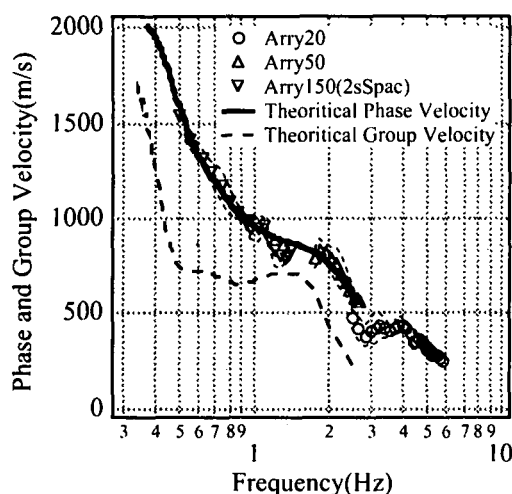
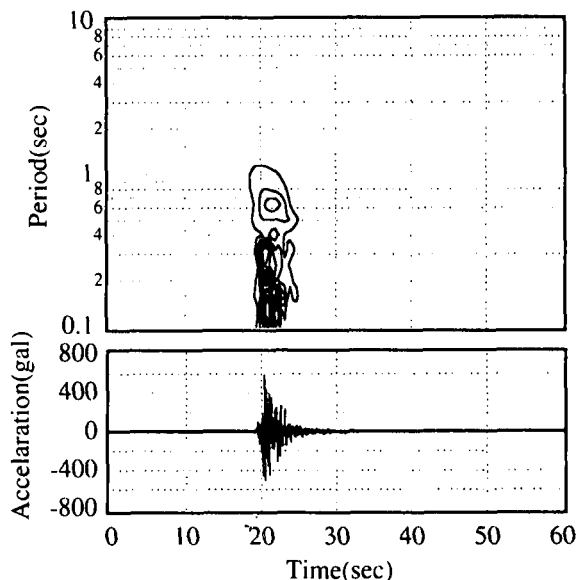


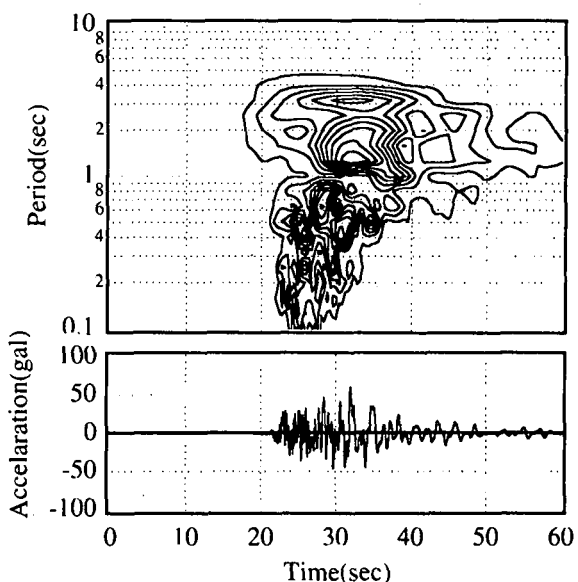
図-11 Spac法により得られた位相速度とRayleigh波の理論位相速度の比較

4.2 地盤構造の推定

雫石盆地の深層地盤の詳細構造については不明であるが、東西方向断面に対する概略的地質構造¹³⁾は、表層には第4紀の堆積層、それ以深には鮮新世以前の比較的堅い岩質層の5層構造となっている。最表層の物性は、高周波数成分の位相速度特性より、せん断波速度300m/s、ポアソン比は0.48、単位体積重量は20.0kN/m³、他の4層も表に示した値に仮定し、各層の層厚を変化させながら算出した



a)Nagayama



b)Sizuikuishi

図-9 非定常スペクトルの比較(EW成分)

Rayleigh波の理論位相速度と、観測により得られた位相速度との対応の良い層厚を試行錯誤的に算出し、表-1に示す。図には、両位相速度が最も整合する際の地層構造モデルに対する理論位相速度を示しており、両者はよく一致している。

5.断層震源モデルに基づく地震動特性の分析⁴⁾

5.1 解析手法および条件

解析には、断層震源を有する成層地盤に対する理論地震動解析法と有限要素解析法の2つの手法を用いる。前者の手法には、Saikia⁶⁾により提案された断層震源を有する成層地盤における地震動を推定する手法(以後、Saikia手法と呼ぶ)を用いる。この手法は他の理論的手法と同様、断層の破壊過程を直接考慮できるが、対象地盤モデルは図-12に示す様に断層を含む成層地盤であり、断層近傍の

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)
1	40	300	2140	19.6
2	40	500	2500	19.6
3	450	1000	2500	22.54
4	800	1500	3960	22.54
5	-	2500	6630	24.5



図-12 理論解析法による地盤構造モデル

地盤構造の不整形性は考慮できない。一方、後者の手法は、断層破壊過程を直接考慮できないが、断層近傍の地盤構造の不整形性の影響を直接考慮することができる。

有限要素解析は、図-13に示す雫石盆地内での強震観測点を含む断層直交方向、つまり図中の破線に沿った地盤の深部構造モデルを用いる。Saikia手法では、表-1に示した地層構造と地盤物性を有する図-13に示す成層地盤モデルを解析地盤構造モデルとして用いた。有限要素解析では、図-14に示す様に断層上盤側は基盤層、断層下盤つまり雫石盆地側は、成層地盤と仮定し、Saikia手法のモデルと同様に表-1に示した地盤構造モデルを用いた。

さらに、盆地内での波動の伝播特性は、断層直交方向の解析断面の地表に、地震観測点を含み、ほぼ1km間隔で設定した図-13に示す5点を対象とし、両手法で得られた地震動の時刻歴の比較により検討する。比較の対象とする地震動の時刻歴は、周波数1.0Hz以下の低周波数成分を対象とし、水平面内における断層直交方向成分(L成分)と断層方向成分(P成分)の速度成分とした。

断層震源モデルを規定する断層パラメーター⁴⁾は表-2に示すとおりである。断層面は図-13に示す様に西根断層群の北端に設定し、断層破壊の伝播様式は断層の長さ方向(南北方向)に様な速度 V_r で破壊するものと仮定した。

疑似3次元有限要素解析における入力地震動は、水平成分のみの平面波の鉛直入射として入力した。

4.2 雫石盆地内での波動伝播特性

まず、2つの手法により得られたSizukuishにおけるPおよびL成分の解析波と観測波の比較を図-15に示す。これより、Saikia手法による解析波は、いずれの成分も観測波の初動部分との対応が認められるものの、主要動部分全体とは対応せず、後続位相も発生していない。一方、有限要素解析による解析波は、いずれの成分も観測波の主要動部分、さらに後続位相とも比較的良好な対応が認められる。このことは、雫石盆地内での強震記録の特性は、成層地盤としてではなく、断層から観測点間、特に断層

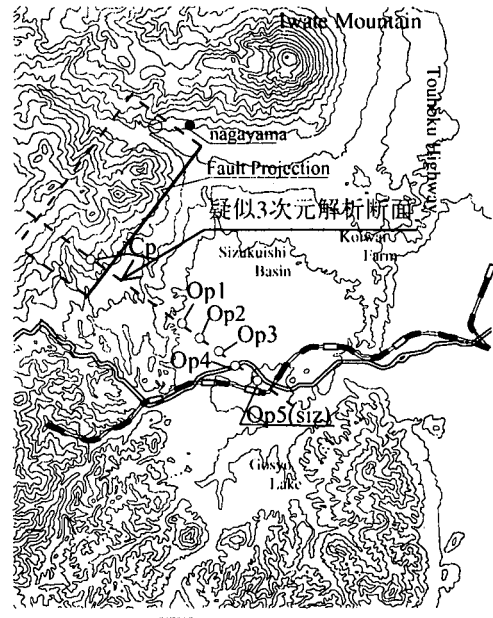


図-13 断層面に対する疑似3次元解析の解析断面と検討位置

表-2 断層パラメーター

パラメーター		値
静的 パラメーター	長さ	10km
	幅	5km
	平均ずれ量 (= $M_0/\mu S$)	0.5m
	断層の傾き角(δ)	40度
地震モーメント(M_0)		6.9×10^{17} N・m
断層の破壊速度 $V_r(=0.72V_s)$		1.8km/s
立ち上がり時間		0.55秒

近傍の地盤構造の不整形性が強く影響していることを示している。

次に、断層近傍の地盤構造の不整形性が盆地内での波動の伝播特性に及ぼす影響を把握するため、図-13に示した解析断面上の5点における有限要素解析によるL成分の波形を図-16に示す。これより、後続の波群は伝播性の波動であることが分かる。

6. あとがき

本報告では、まず1999年台湾・集集地震と同様の逆断層を震源機構とする岩手県北部地震による被害および観測記録の特徴を示した。さらに、観測された地震記録の特性に及ぼす断層近傍の地盤構造の影響を把握するため、雫石盆地の地盤構造を推定し、理論解析法と疑似3次元解析法を用いたシミュレーション解析による分析を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ①震度6弱を記録した震源近傍の観測記録は、同程度の震度を記録した他の地震による記録の特性と比べ、2.0Hzより低周波数側でのスペクトル振幅が小さい。
- ②観測記録には逆断層を震源機構とする地震動に共通する特徴が認められる。

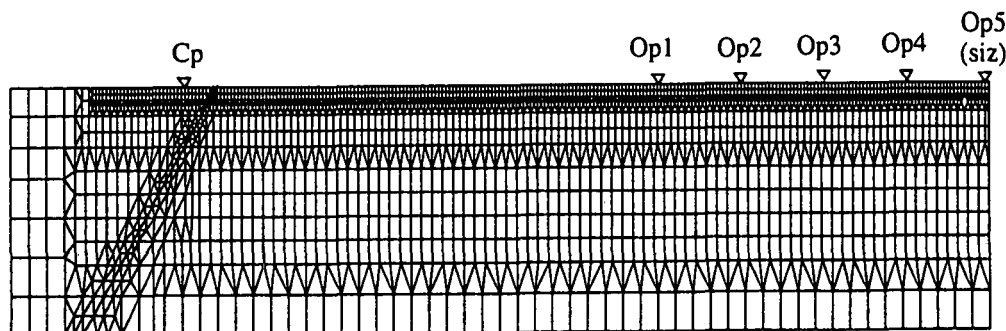
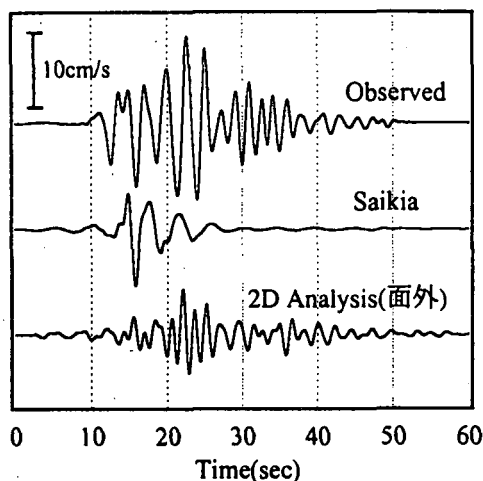
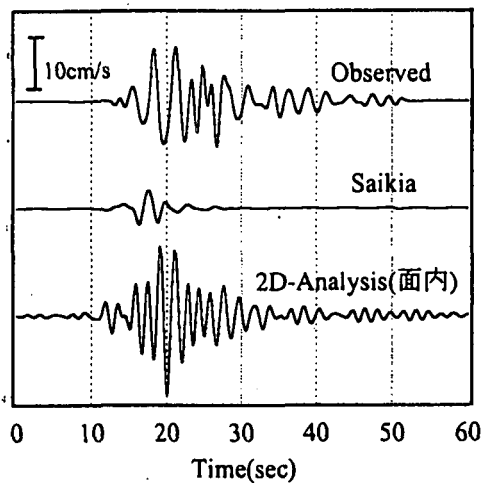


図-14 2次元有限要素モデル



a)断層方向



b)断層直交方向

図-15 Sizuishiにおける観測波と各手法により得られた解析波の比較

③断層下盤側の零石盆地における観測記録には、震源特性の影響のみならず断層近傍から観測点までの地盤構造の影響を強く受けている。

最後に、この地震の被害調査は地震工学委員会・地震被害調査小委員会の活動の一環として、東北大学・風間基樹教授、京都大学・小林晃助教授とともに実施したものであることを記して両氏に感謝の意を表します。さらに、斜面崩壊の資料は岩手大学農学部・太田岳史助教授、電力施設の被害は東北電力(株)岩手支社電力部狩野義郎氏より提供いただいたことを記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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
- 2) 土木学会編：THE 1999 KOCAELI EARTHQUAKE, TURKEY -Investigation into Damage to Civil Engineering Structures-, 1999
- 3) 土木学会編：THE 1999 JI-JI EARTHQUAKE, TAIWAN -Investigation into Damage to Civil Engineering Structures-, 1999
- 4) 中村晋，大角恒雄，福元俊一：岩手県内陸北部地震(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
- 5) 武村雅之：日本列島における地殻内地震のスケール則-地震断層の影響及び地震被害との関係，地震，第2輯，第51巻，pp.211-228，1998
- 6) 越谷信他：1998年9月3日岩手県内陸北部の地震に伴う地震断層，活断層研究，17，pp.9-20，1998

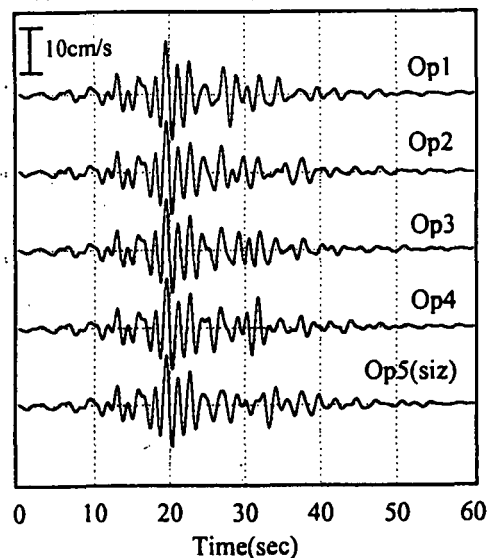


図-16 有限要素解析によるL成分波形

- 7) 中村晋：ベクトルスペクトルによる地震動の増幅特性評価とその適用，土木学会論文集，No.519/I-32，pp.161-173，1995.7
- 8) Aki,K,S：Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Waves, with Specific Reference to Microtremors. Bull. Earth. Res. Inst.,35,pp.415-456, 1957
- 9) H., Morikawa et al：Estimation of Phase velocities from Microtremors observed at two sites, Proc. 2nd Int. Conf. Earthquake Geotechnical Engineering,pp.19-24, 1998
- 10) 工業技術院地質調査所監修(1996)：理科年表読本，コンピュータグラフィック日本列島の地質，丸善(株)