

微動探査結果を用いた1994年三陸はるか沖地震の際の八戸東高校における地震動の推定

片岡俊一
(技術研究所)
柴慶治
(技術研究所)

§1. はじめに

1994年三陸はるか沖地震の際に、八戸市内では2棟の全壊建物を含む、多数の構造物が被害を受けた。八戸市内においては、建設省建築研究所が市庁舎に設置した強震計⁹⁾をはじめとして、気象庁あるいは八戸工業大学が設置した地震計があり、地震動についての情報は多い。しかしながら、被害分布は八戸市内においても一様ではなく²⁾、被災建物に入力した地震動を評価するためには、立地地盤の震動特性を評価する必要がある。

八戸市においては、多くの地盤柱状図が整理されている³⁾が、残念ながらS波速度についての実測例は公開されてない。毛呂⁴⁾は八戸市内で実施した185箇

所の常時微動の卓越周期を評価するために、宮城県で整理されたN値とS波速度との関係⁵⁾を用いている。また、坂尻は深度および地質年代等から地表からGL-100mまでのS波速度を評価し、増幅特性と地震観測結果を比較している⁶⁾。これらはS波速度に関する情報を与えるものの、直接的にS波速度を評価してはいない。

一方筆者らは、最近用いられるようになった微動探査法^{7)~9)}を市庁舎に隣接する三八城神社境内で実施し、S波速度構造を求めている¹⁰⁾。具体的には、アレー観測した微動からRayleigh波の位相速度を求め、付近の地盤柱状図の土質とN値から推定されるS波速度とを対比させることで、表層付近のS波速度構造を議論している。



図-1 観測点周辺地図

筆者らは更に、校舎の一棟が甚大な被害をうけた八戸東高校(以下、東高校)の地盤構造を推定するために、被災した建物と同じ敷地内においてもアレー微動探査を実施した。これは、市庁舎と東高校の地盤構造を基に、市庁舎の地震動記録から東高校における地震動を推定することを目的としたものである。

図-1に観測点周辺の地図を示す。市役所周辺の市街地は台地上に位置している。市役所の南側は、概ね台地出あるものの、一部海進によりできた谷が残っており複雑な地形となっている。例えば、八戸東高校の北側の道路は谷底であり、校舎は南側が高いゆるやかな傾斜地に立っている。一方、三八城神社の北から北西にかけては比較的急傾斜で沖積低地に続く。本八戸駅は、すでに沖積低地部分である。

以下、東高校における測定結果を述べ、地下構造推定、地震動の推定と評価を述べる。三八城神社については、参考文献10),11)を参照されたい。

§2. 測定概要と結果

2.1 測定概要

本観測に用いた測定器は、東京測振製の携帯用振動計SPC-35である。この装置には、同社製サーボ型速度計VSE-15Dが3台付属しており、5ch分の外部用入力端子を有している。本測定では、同社製サーボ型速度計VSE-12Cを5台使用することで、計8台の上下動センサーを用いた。入力信号は、16bitのA/D変換器によるデジタルデータに変換され、付属のノート型パソコンのハードディスクに保存される。

本測定では、2種類のセンサーを用いていることから、両者の位相特性の差を確認するために、測定が全

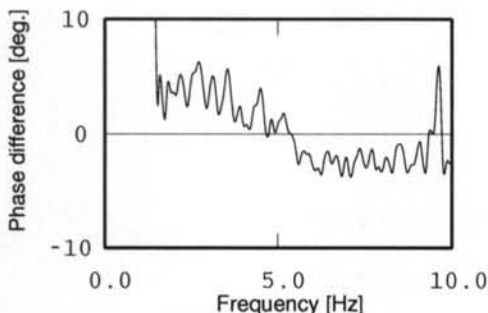


図-2 観測に用いたセンサー VSE-15D と VSE-12C との位相差

て終了した後に、全センサーを同一地点に並べ常時微動を測定した。なお、仕様書上の測定周波数範囲はVSE-15Dの場合0.25~70Hzあり、VSE-12Cは0.1~70Hzである。記録の比較の結果、同じ機種ではコヒーレンスは2Hzから10Hzまでほぼ1であった。異なる機種間の位相差の例を表わすと、図-2のようになった。なお、1Hzより低い振動数で位相の変化が大きいの、センサーの測定可能周波数範囲が異なるためである。異なる機種間であっても位相差は1.5Hz~10Hzの範囲で±5度程度であった。そこで、以降の解析には両センサーの位相特性の補正は実施しないこととした。ただし、各地点のデータ解析の初期段階で、数の多いVSE-12Cのみを使用した場合と全数を使用した場合の周波数-波数スペクトルの比較を行ない、両者が同様の結果となることを確認している。

観測成分は速度とし、サンプリング周波数を200Hz、データ収録の基本長さはデータの取り扱いの容易さから150秒としている。アレーの大きさは以下に述べるように2種類とした。小さなアレー(以下、Sアレー)では、150秒のデータを2回、大きなアレー(以下、Mアレー)では3回収録した。さらに、参考の為アレー観測終了後、アレーの中心部付近で水平2成分と上下動の3成分微動観測も実施している。

2.2 観測結果

八戸東高校では、被害を受けた校舎と同じ敷地内のグラウンドにアレーを展開した。ただし、グラウンドと校舎とは、標高が2m程度異なっている。アレーの観測点を図-3に示す。センサーの配置は最短間隔を

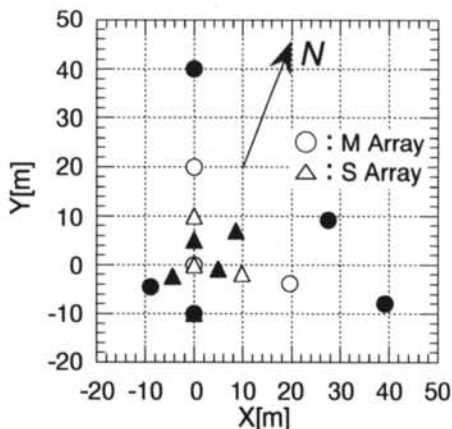


図-3 八戸東高校における観測点配置。白抜き：VSE-15D 黒塗：VSE-12C

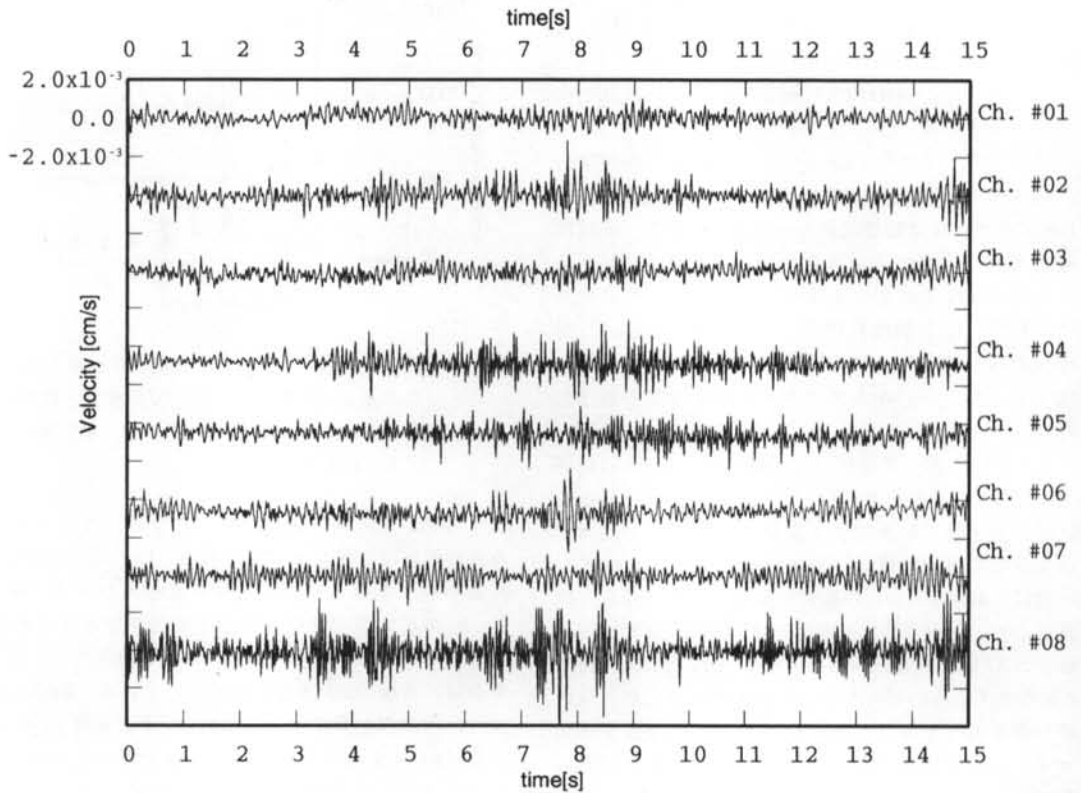


図-4 八戸東高校における微動観測波形の一例 (全て上下動)

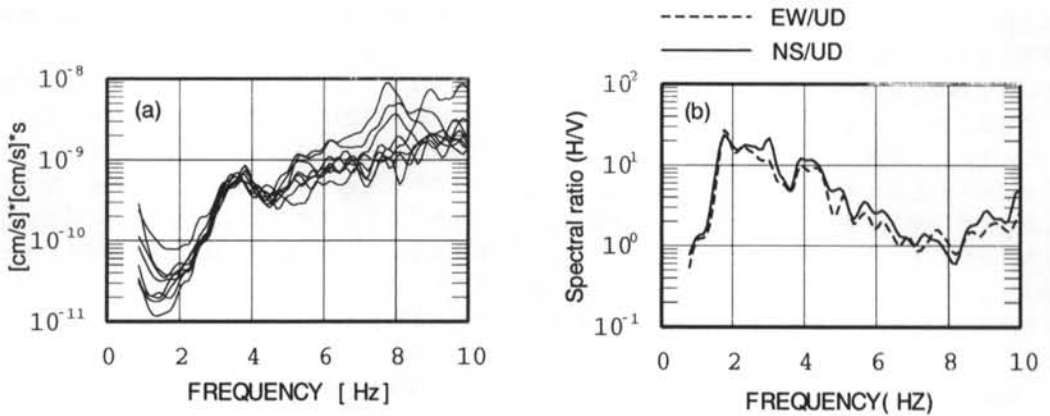


図-5 八戸東高校における観測記録のパワースペクトル(a)とH/Vスペクトル(b)

5mとしたもの(Sアレー)と、最短間隔を約10mとしたもの(Mアレー)の2種類を用いた。

Mアレーの際の観測波形の一例を図-4に示すが、観測点毎に振幅が異なることが分かる。これは、交通

振動が原因と考えている。各地点の上下動のパワースペクトルを重ねて図-5(a)に示すが、2Hz程度から7Hz程度まで観測点によらずほぼ同一の振幅となっている。また、8Hzでピークとなる観測点が3地

点ほどある。さらに、水平動のパワースペクトルを上下動のパワースペクトルで除して平方根を取った、H/Vスペクトルを図-5(b)に示すが、単峰性のピークではなく、2~4Hzの広い範囲でスペクトル比が大きくなっている。

アレーデータからCaponの方法¹²⁾により周波数-波数スペクトル(以下、F-Kスペクトル)をもとめた。F-Kスペクトルは観測記録を小区間に区切り、小区間毎に求めた。クロススペクトルの算出にはスペクトルを平滑化する必要があるが、これは各区間のデータをFFTにより周波数域データに変換した後に、対象振動数を中心に7つの振動数のスペクトルを平均化すること、いわゆるスペクトルの平滑化で処理した。

Sアレーのデータを用いて、6Hzから11Hzの範囲でF-Kスペクトルを求めた。その際には、前述した小区間の長さは、解析対象振動数の波が最低10波含まれる長さを基準と考え、2.56秒としている。Mアレーでは、4Hzから6Hzの範囲を対象に、5.12秒を区間長とした。結局Sアレーの場合は116個、Mアレーの場合は87個のF-Kスペクトルが得られた。各区間のF-Kスペクトルのピークを与える波数に対して、平均値と標準偏差を求め、波数の平均値と平均値プラスマイナス標準偏差の値を、位相速度に変換して図-6に示す。図には、アレーの最小観測点間隔の2倍を波長とした場合の位相速度と観測点の最大間隔の2倍を波長とする位相速度も引いてある。一般に前者は空間的エイリアジングから定まる低速度側の検出限界と考えられている。高速度側の検出限界は経験的に最大観測点間隔の2~4倍とすることが多いが、ここでは2倍¹³⁾としている。

S,Mアレーで別個に観測した6.0Hzでは、Sアレーから求められる位相速度は、最大観測点間隔の2倍とした経験的上限值を超えており、Mアレーの場合より大きな位相速度を与えている。しかしながら、その差は平均値では45m/sであり、標準偏差程度のばらつきを許せば、Sアレーの結果もMアレーの結果と同じと考えてよいので、安定した結果と考えられる。そこで、6.0Hzの結果はMアレーのものを用いることとして、それ以外に関しては両アレーの結果を連続的に使用し、地下構造を推定する。

§3. 地下構造の推定

地下構造の推定は、観測位相速度を最も適切に表

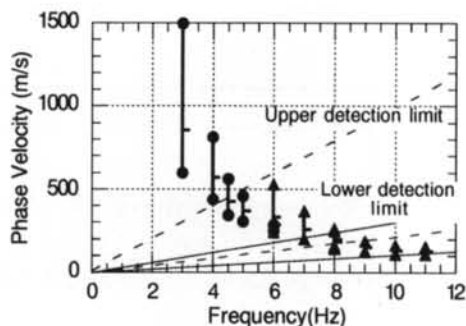


図-6 F-Kスペクトルのピーク波数の平均値とその標準偏差から算出した平均位相速度と観測結果のばらつき。黒丸はMアレー、黒三角はSアレーの結果

現する地盤モデルを求めることになる。ここで用いる逆解析には、準ニュートン方的一种であるBFGS法に基づいて開発されているプログラムコード¹⁴⁾を、Rayleigh波の位相速度から地下構造を推定するために改良した紺野によるプログラム¹⁵⁾を使用している。変数は、各層のS波速度と層厚としている。Rayleigh波の分散曲線を算出するためには、P波速度(V_p)と密度(ρ)も必要となるが、これは紺野¹⁵⁾と同様にS波速度(V_s)から以下のように定めている。

$$V_p = 925 + 1.46 V_s \quad [\text{m/s}]$$

$$\rho = 1.66 + 4.71 \times 10^{-4} V_s \quad [\text{g/cm}^3]$$

また、観測値と理論値の適合度合の判定は、標準偏差の逆数を重みとして判定している。

このような逆解析では、初期モデルの設定が重要である。既報では¹⁰⁾、微動探査を実施した地点の周辺の地盤柱状図を参考に初期モデルを作成した。しかしながら、本地点では近接した地点で適切な深さまで調査されている地盤柱状図を見つけることが出来なかった。そこで、図-7に示す三八城神社の地下構造¹⁰⁾と同様な構造をした初期モデルを複数作成し、逆解析を行った。図-7の内、GL-5mまでは表土、GL-5m~10mはローム、GL-10m~14mが砂レキ、GL-14m~18mがローム、GL-18m~34mがシルト、GL-34m以上は深層をイメージしている。また、既報¹⁰⁾では図示したものより深い構造についても推定しているが、ここでは図示した範囲のみを利用する。

結果は初期モデルにより主として中間層で異なったが、層序が三八城神社と対応するものを最終結果とした。推定された地下構造を図-8に示す。アレーの大きさからこれより深い地下構造を推定すること

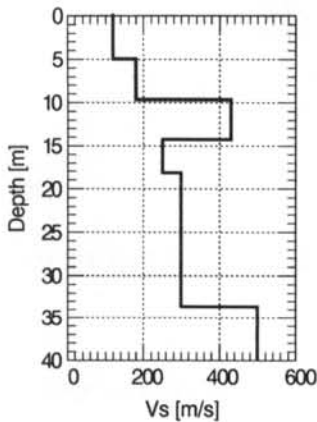


図-7 三八城神社における推定 S 波速度構造

は適切ではない。また、観測位相速度と理論分散曲線を比較して図-9に示す。

ここで、層序がほぼ同じであることを選定理由に選んだのは、この付近の地盤が海岸線の進出により堆積して形成された地盤と考えたからである。また、推定された地下構造から Rayleigh 波の水平動と上下動の振幅比を求めると、そのピークは4Hzとなり、図-5(b)のピーク振動数と対応している。

§ 4. 八戸東高校における推定地震動

我々が推定した三八城神社と八戸東高校の地下構造はVsが500m/sの層が共通の層であり、それより浅い地層構成が異なっている。また、Vs500m/sの層は周辺的大型建造物の支持層となっている。そこで、八戸市庁舎で観測された1994年三陸はるか沖地震の記録を三八城神社における地下構造を用いて、Vs500m/s層までもどした後に、東高校の地下構造を用いて東高校での地震動を推定する。

一般には、地表の記録を地中の地震動に変換する際には、地盤の減衰が大きな影響を及ぼす。しかしながら、ここではほぼ同じ地層を対象にして地中から更に地表の地震動に変換するので、減衰の設定方法の影響は小さいと考え、各層振動数によらずに1%を仮定している。また、本来ならばVs500m/sの層ではなく、地震基盤における地震動を推定した後に地表の記録を推定する方が妥当であるが、ここでは両地点がそれほど離れていないので、Vs500m/sの層より深い構造は同じであると仮定して、地震動を推定す

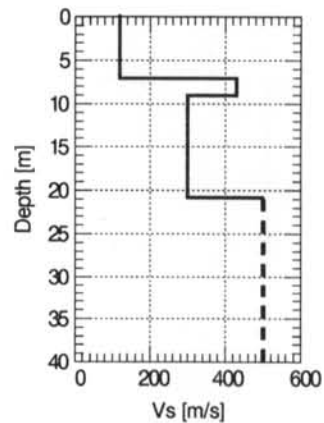


図-8 八戸東高校における推定 S 波速度構造

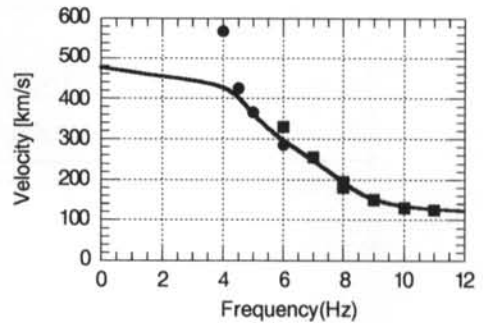


図-9 推定地下構造から算出した理論分散曲線（実線）と観測値との比較

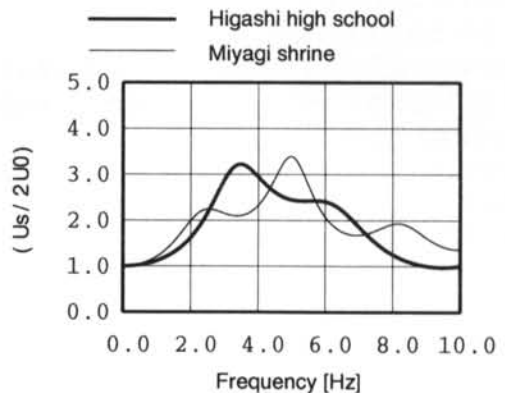


図-10 三八城神社（細線）と東高校（太線）の地下構造から定まる増幅特性の比較

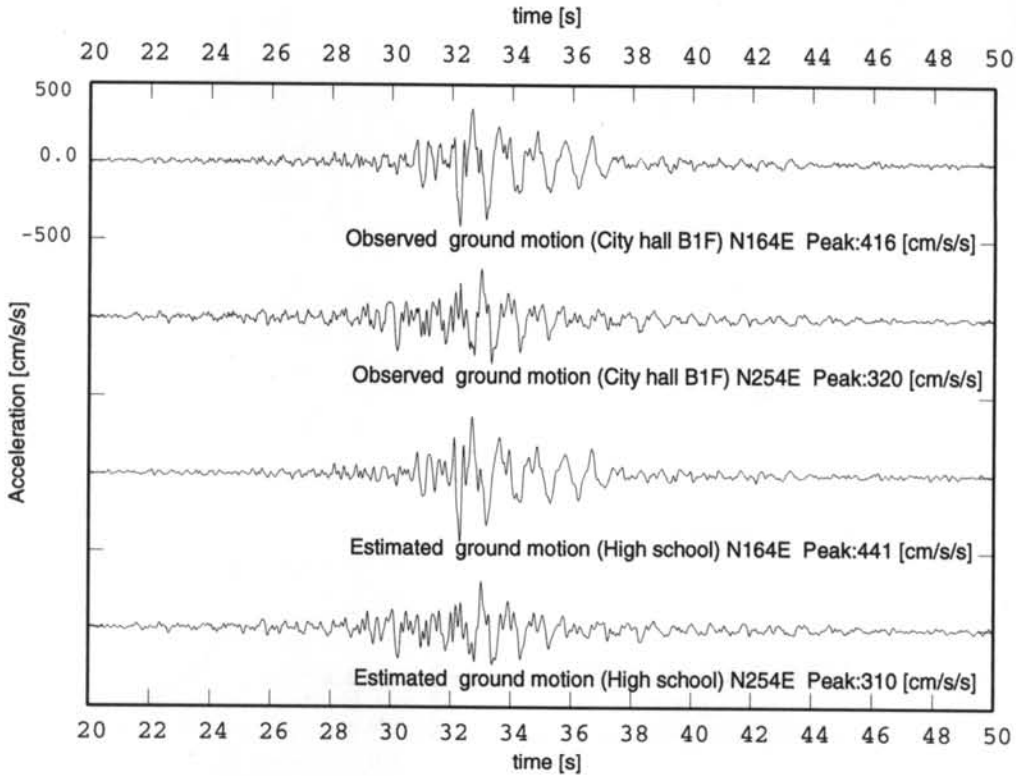


図-11 八戸市庁舎における観測記録（上段）と東高校における推定加速度地動（下段）

る。
東高校におけるアレー観測地点は、実際に被害にあった校舎と標高差が2m程度ある。被害建物への入力地震動の評価のためには、この標高差も考える必要があるようにも思える。一方、校舎は地中2m程度に独立基礎を有しており、地震動の詳細な入力機構は不明である。さらに、市庁舎における観測記録に含まれている建物-地盤系の相互作用効果あるいは地盤の非線形特性など考慮すべき問題は多い。しかしながら、本検討では第1段階として、推定された地下構造を用いて線形の範囲で地震動を推定すると、どの程度の地震動になるのかを見てみる。

図-10は、三八城神社と東高校の地下構造から求まる増幅特性を比較したものである。図からは、三八城神社では卓越振動数が5Hzであるのに対して、東高校では3Hz強であり、地盤特性が異なることが分かる。また、東高校の推定地下構造の卓越振動数が3Hz強であることは、常時微動の観測結果と対応する。

図-11は、市庁舎における観測記録と東高校にお

		PGA	PGV	SI
		[cm/s/s]	[cm/s]	[cm/s]
Observed (City hall)	N164E	416	45.0	54.5
	N254E	320	28.5	35.8
Estimated (High school)	N164E	441	41.1	51.2
	N254E	310	25.1	31.9

表-1 観測記録と推定地動の地震動強さ指標の比較

ける推定地動を比較したものであるが、両者はよく似ていることが分かる。参考のために、地震動指標を比較したものを表-1に示すが、このような指標ではほとんど変わりが無い。

図-12に観測記録と推定地動の速度応答スペクトル（減衰定数5%）を比較する。地盤の増幅特性を反映して、周期0.3秒付近で、推定地動が観測記録をやや上回るほかは、大きな差はない。ただし、被害を受けた校舎の推定固有周期は約0.3秒との報告¹⁰⁾もあるので、周期0.3秒付近の地盤増幅は大きな影響があ

る。

§ 5. まとめ

八戸市において常時微動をアレー観測し、位相速度を求め、表層の地下構造を推定することを試みた。三八城神社の結果については既に報告しているが、この地下構造と市庁舎での観測記録から東高校における地震動を推定してみた。

東高校における推定地動の最大振幅は、ほぼ市庁舎での観測記録と同じであった。ただし、被害を受けた校舎の固有周期に近い成分が地盤構造により増幅されている。

一方、八戸市街地の地下には逆転層があるようであり、微動探査から地下構造を推定するためには、精度の高い観測および解析が必要である。特に、東高校については、適切な初期モデルが無かったために、推定された地下構造については、さらに様々な面から検討する必要がある。

謝辞 八戸東高校における観測には、東京都立大学西川孝夫教授、青森県教育庁財務課沢田正明氏のお手を煩わせた。また、大澤憲一八戸東高校校長には、測定に当たり便宜をはかっていただいた。記して感謝の意を示す。

<参考文献>

- 1)大川出, 北川良和, 鹿嶋俊英, 小山信: "最近の大地震時の八戸市内の地震動と特徴", 日本建築学会大会講演概要集, 構造, pp.273-274, 1995.
- 2)毛呂眞: "1994年三陸はるか沖地震における建築被害の概要", 土と基礎, Vol.43, No.11, pp.15-20, 1995.
- 3)(社)青森県建築士会, (社)日本建築学会東北支部青森支所: "青森県建築地盤図", 1980.
- 4)毛呂眞: "八戸市地盤の卓越周期とその特定方法", 日本建築学会東北支部研究委員会構造部会, 地盤と耐震設計, 1990.
- 5)宮城県: "宮城県地震地盤図作成報告書", 北海道地図, 1985.
- 6)坂尻直巳: "1994年三陸はるか沖地震および1995年岩手県沖地震の被害分布と地盤の震動特性", 土と基礎, Vol.43, No.11, 1995, pp.9-14.
- 7)Horike M.: "Inversion of Phase velocity of long-period microtremors to the S-wave-velocity structure down to the basement in urbanized areas", Journal of Physics of the Earth, Vol.33, 1985, pp.59-96.
- 8)岡田広, 松島健, 森谷武男, 笹谷努: "広域・深層地盤探査のための長周期微動探査法", 物理探査, Vol.43, No.6, 1990, pp.402-417.
- 9)時松孝次, 宮寺泰生: "短周期微動に含まれるレイリー波の特性と地盤構造の関係", 日本建築学会構造系論文報告集, 第439号, 1992, pp.81-87.
- 10)片岡俊一, 柴慶治: "常時微動による八戸市庁舎周辺のS波速度構造の評価", 日本建築学会技術報告集, 第3号, 1996, pp.59-62.

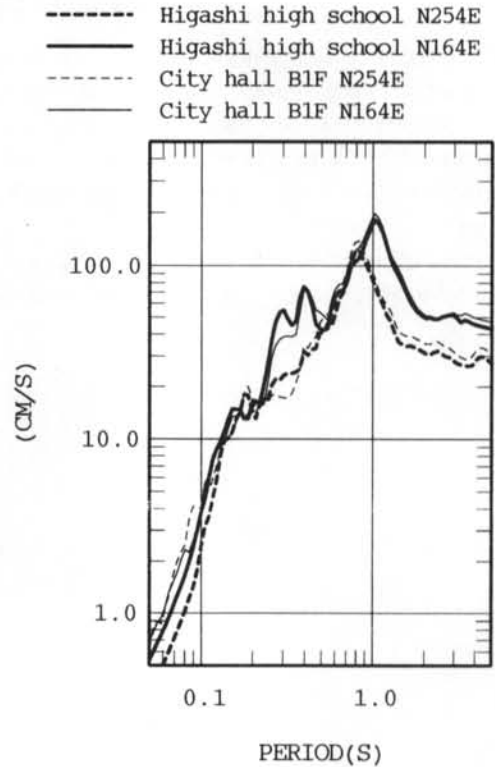


図-12 観測記録(細線)と推定地動(太線)の速度応答スペクトル($h=0.05$)の比較

- 11) 片岡俊一, 柴慶治: "アレー微動探査による八戸市内の表層速度構造", 三陸はるか沖地震シンポジウム論文集, 八戸工業大学, 1998, pp.1-8.
- 12) Capon J.: "High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis", Proceedings of the IEEE, Vol.57, No.8, 1969, pp.1408-1418.
- 13) 佐藤智美, 川瀬博, 片岡俊一, 早川崇, 西村功, 中村亮一: "アレー観測微動による都市部における地下構造探査法(その2) 検知限界に対する検討と地下構造", 日本建築学会大会講演概要集, 構造, 1994, pp.495-496.
- 14) 茨木俊秀: "FORTRAN77最適化プログラミング", 岩波書店, 1991, pp.141-166.
- 15) 紺野克昭: "レイリー波の分散曲線の近似計算法の提案と地下構造推定への応用", 土木学会論文集No.577/I-41, 1997, pp.89-105.
- 16) 北山和宏, 溝部錦伸: "青森県立八戸東高校管理棟の耐震性能", 三陸はるか沖地震の被害と耐震設計-十勝沖地震の教訓は生かされたか-, シンポジウム資料, 日本建築学会構造委員会, 1997, pp.51-64.