

## 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した八戸市箕子渡における強震動の推定

An Estimation on the Strong Motion in the Sugawatari, Hachinohe City  
based on Empirical Site Amplification and Phase Effects

秦 吉弥 Yoshiya HATA  
一井康二 Koji ICHII  
野津 厚 Atsushi NOZU

(日本工営(株)中央研究所)  
(広島大学大学院工学研究科)  
(独)港湾空港技術研究所)

青森県八戸市箕子渡における鉄道盛土は、これまで1968年十勝沖地震と1994年三陸はるか沖地震による強震動を受けている。前者の地震では盛土の崩壊が発生したのに対し、後者の地震では被災が確認されておらず、地震前の先行降雨による影響などが指摘されている。このような異なる地震における被災の有無を比較する場合、当該地点における強震動を精度良く推定することが必要不可欠である。本稿では、検討対象地点とその周辺の強震観測点のサイト特性の差異を利用した地震動の推定方法(サイト特性置換手法)を提案し、八戸市箕子渡に対して適用した事例を紹介する。

キーワード：サイト増幅特性，サイト位相特性，常時微動計測，1968年十勝沖地震，  
1994年三陸はるか沖地震 (IGC：D07，E08)

## 1. はじめに

青森県八戸市箕子渡(JR東北本線：八戸貨物駅～陸奥市川駅間648K300m)における鉄道盛土は、これまで1968年十勝沖地震と1994年三陸はるか沖地震による強震動を受けている。当該地点周辺の強震観測点である八戸港の最大加速度は、183gal(1968年十勝沖地震)および523gal(1994年三陸はるか沖地震)である<sup>1),2)</sup>。しかし、前者の地震では盛土の崩壊が発生したのに対し、後者の地震では被災が確認されていない<sup>3)</sup>。この原因の1つとして、1968年十勝沖地震の前の先行降雨による影響などが指摘されている<sup>3)</sup>。このような地点で、降雨の有無が及ぼした影響を詳細に比較検討するためには、当該地点における強震動を精度良く推定することは、必要不可欠である。

本稿では、検討対象地点とその周辺の強震観測点のサイト特性の差異を利用した地震動の推定方法を提案する。そして、1968年十勝沖地震ならびに1994年三陸はるか沖地震における八戸市箕子渡の地震動を推定した事例を紹介する。

## 2. 検討対象地点

検討対象地点は、図-1に示すとおり青森県八戸市箕子渡にあるJR東北本線八戸貨物駅～陸奥市川駅間の648K300m地点である。当該地点の周辺には、図-2に示すとおり3つの強震観測点(八戸港、JMA八戸、K-NET八

戸)が存在する。表-1には観測点ごとの緒元を示す。この表より、八戸港では、1968年十勝沖地震と1994年三陸はるか沖地震による加速度記録が得られており、1968年十勝沖地震よりも1994年三陸はるか沖地震のほうが最大加速度が大きい。

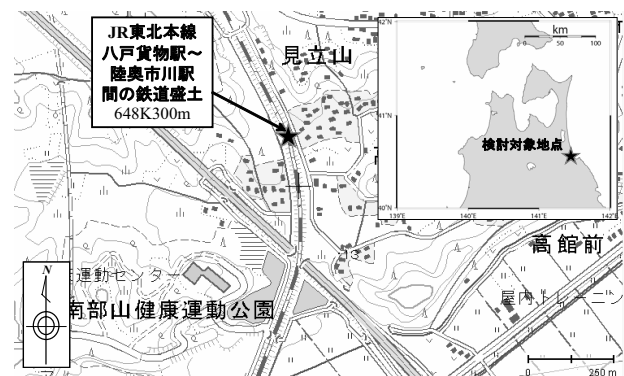


図-1 検討対象地点



図-2 検討対象地点周辺の強震観測点の分布

表-1 検討対象地点周辺の強震観測点と最大加速度

観測点名	観測開始	最大加速度 (gal)	
		十勝沖(1968)	三陸はるか(1994)
八戸港	1962年	183	523
JMA 八戸	1936年	観測記録なし	602
K-NET 八戸	1996年	観測記録なし	観測記録なし

### 3. 地震動推定手法

図-3 は本研究における強震動推定のフローである。なお、本提案手法は、新規手法であることを付記しておく。

まず、当該地点のサイト増幅特性を推定し、最近傍の八戸港におけるサイト増幅特性<sup>4)</sup>と比較検討を行う。そして八戸港の地震観測記録によるフーリエ振幅スペクトルに対して、当該地点と八戸港のサイト増幅特性の比率を掛け合わせることで、対象地震による当該地点のフーリエ振幅スペクトルを推定する。

次に、対象地震（1968年十勝沖地震および1994年三陸はるか沖地震）の位相特性と最も近い位相特性を有する中小地震をそれぞれ1つずつ選定する。また、当該地点のサイト増幅特性と最も近いサイト増幅特性を有する強震観測点（K-NET 八戸）を選定する。そして選定された中小地震による選定された地震観測地点でのフーリエ位相特性を補正することによって、当該地点のフーリエ位相特性を推定する。

最後に、推定したフーリエ振幅特性とフーリエ位相特性を用いて、合成波形の歪などが発生しないように、パーセン・ウィンドウを考慮した逆フーリエ変換を行うことによって、当該地点の1968年十勝沖地震ならびに1994年三陸はるか沖地震による強震動を推定する。

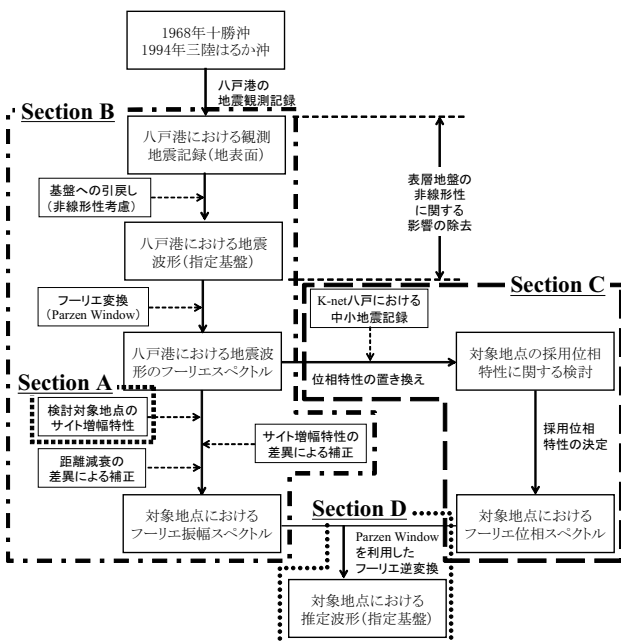


図-3 地震動推定フロー

### 4. 常時微動計測およびサイト増幅特性の設定

本章で述べる内容は、図-3中のSection Aに相当する。検討対象地点では、1968年十勝沖地震時、1994年三陸はるか沖地震時、さらに現在にいたるまで地震計が設置されていないため、サイト増幅特性が不明である。

図-4は当該地点周辺の八戸市内の強震観測点のサイト増幅特性<sup>4)</sup>を比較したものである。ここに、JMA 八戸のサイト増幅特性は、強震観測記録に基づいて新たに評価した。この図よりK-NET 八戸では1.2Hz付近、JMA 八戸では4Hzおよび5Hzにピークを有しているのに対し、八戸港では全体的にフラットな形状であり1Hz以下の低周波成分が比較的卓越している。すなわち、各強震観測点のサイト増幅特性が大きく異なっていることが読み取れる。

そこで本研究では、当該地点ならびにその周辺の強震観測地点において常時微動計測を実施した。写真-1および写真-2に当該地点およびK-NET 八戸における常時微動計測状況を示す。当該地点の常時微動計測位置としては、図-5に示すように鉄道盛土648K300m地点における法尻位置の東側および西側とした。微動計測は、平坦性が確保できる盛土付近に微動計（速度計）を設置して計測を行った。計測時間は、1計測点あたり11分間とし、サンプリング周波数は100Hzとした。車両通行などの雑振動が大きい場合には、時間帯を変えて再度計測を実施した。

図-6には強震観測点、図-7にはK-NET 八戸と検討対象地点における常時微動計測結果(H/Vスペクトル)を示す。H/Vスペクトルの計算処理方法としては、微動の速度時刻歴に対して、まず0.1Hzのハイパスフィルターを施し、163.84秒の区間を3区間抽出し、バンド幅0.05Hzのパーセン・ウィンドウで平滑化したのちに、平均してH/Vスペクトルを算出した。評価する周波数範囲としては、0.3~10Hzとした。図-6に示すようにK-NET 八戸では1.2Hz付近、JMA 八戸では4Hzから6Hz付近にH/Vスペクトルのピークを有している。一方で、八戸港ではフラットなスペクトル形状を有している。これらの傾向は、上述した強震観測点のサイト増幅特性の傾向と類似しており、常時微動計測により計測地点の地盤震動特性（サイト増幅特性）を巨視的に把握できることを確認した。図-7に示すようにK-NET 八戸と検討対象地点のH/Vスペクトルを比較すると、巨視的なスペクトル形状は概ね類似している。しかし、K-NET 八戸では1.2Hz付近にピークを有しているのに対し、当該地点では東側ならびに西側で1.8Hz付近にともにピークを有している。

常時微動計測において、検討対象地点と最も地盤震動特性が類似していると判断されたK-NET 八戸における地震基盤から工学的基盤（対象標高GL.-20m）までのサイト増幅特性を図-8に示す。図-9に、本研究で求めた検討対象地点のサイト増幅特性（地震基盤から工学的基盤（対象標高GL.-20m））を示す。ここでは、検討対象地点とK-NET 八戸のH/Vスペクトルのピークの差異（図-7参照）に基

づいて、K-NET 八戸のサイト増幅特性（図-8 参照）に竹の方法を用いた補正<sup>5)</sup>を施した。具体的には、竹の方法<sup>5)</sup>とは、松の方法により得られた K-NET 八戸のサイト増幅特性（ピーク周波数 1.2Hz）に対して、検討対象地点の常時微動計測結果（ピーク周波数 1.8Hz）を考慮して周波数軸の補正を行うものである。よって、竹の方法によるサイト増幅特性は、周波数特性には信頼性を有しているものの、振幅特性の信頼性については、今後の検討課題である。

なお、松の方法<sup>6)</sup>とは、地震観測結果に基づいてサイト増幅特性を設定する方法であり、梅の方法<sup>6)</sup>とは、地震観測や常時微動計測を行わずに周辺の既存のサイト増幅特性を利用する方法であり、港湾・空港等でよく用いられる。

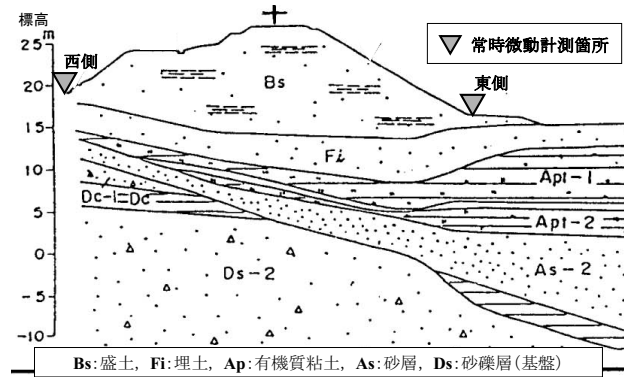


図-5 検討対象地点の常時微動計測位置（文献<sup>3)</sup>に加筆）

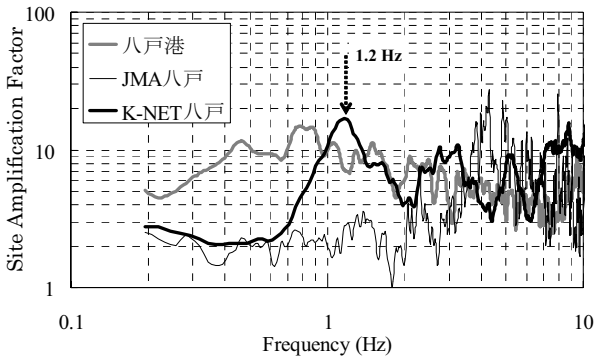


図-4 強震観測点のサイト増幅特性<sup>4)</sup>の比較（推定結果）

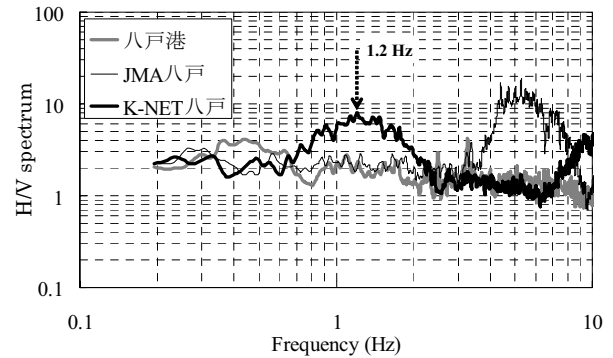


図-6 強震観測点における H/V スペクトル（計測結果）



写真-1 検討対象地点における常時微動計測状況

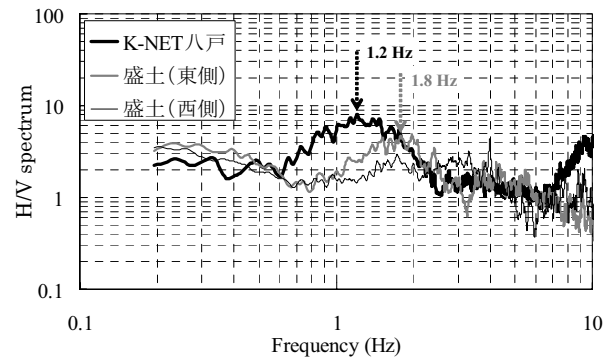


図-7 K-NET 八戸と対象地点(東側・西側)における H/V スペクトル（計測結果）



写真-2 K-NET 八戸における常時微動計測状況

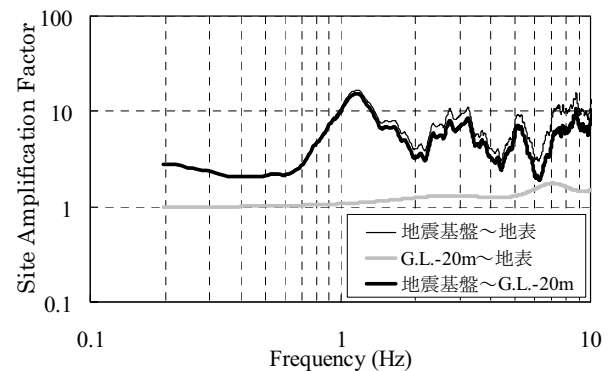


図-8 K-NET 八戸におけるサイト増幅特性（推定結果）  
（地震基盤から工学的基盤（対象標高 G.L.-20m））



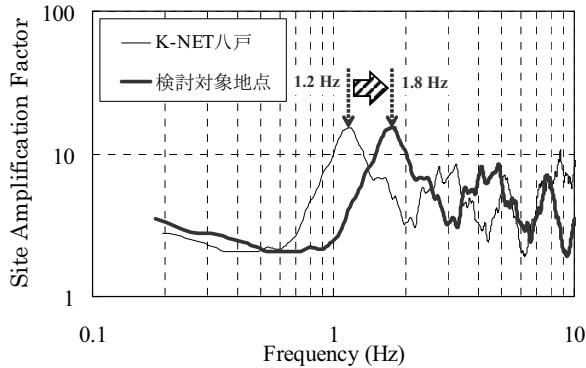


図-9 竹の方法<sup>5)</sup>を用いた検討対象地点におけるサイト増幅特性の推定 (推定結果)  
(地震基盤から工学的基盤 (対象標高 G.L.-20m))

### 5. 振幅特性の設定

本章で述べる内容は、図-3 中の Section B に相当する。図-10 に設定した検討対象地点のサイト増幅特性 (図-9 参照) と八戸港のサイト増幅特性の比較を示す。さらに同図には、両地点のサイト増幅特性の比率 (検討対象地点/八戸港) についても示している。ここで、サイト増幅特性は、地震基盤から工学的基盤 (対象標高 G.L.-20m) 相当のものである。同図より、1.8Hz, 5Hz, 8Hz 付近では検討対象地点のほうが大きいものの、対象周波数帯では全体的に八戸港のほうが大きいことがわかる。特に、低周波数領域において、両地点のサイト増幅特性の差異が顕著に表われている。

対象地震 (1968 年十勝沖地震および 1994 年三陸はるか沖地震) 時における検討対象地点における地震動のフーリエ振幅スペクトルの推定の流れは以下のとおりである。

- ① 検討対象地点の最近傍にあたる八戸港 (図-2 参照) における地表面観測波を工学的基盤 (対象標高 G.L.-20m) 相当波に引き戻し計算を行う。引き戻し計算の実施にあたっては、地盤の非線形性を考慮した解析コード DYNEQ<sup>7)</sup>を使用した。
- ② 上記①で表層地盤の非線形性が除去された八戸港における工学的基盤 (対象標高 G.L.-20m) 相当波のフーリエ振幅スペクトルを計算した。なお、フーリエ変換の実施にあたっては、0.05Hz のパーセン・ウィンドウを考慮した。
- ③ 上記②で計算した八戸港における工学的基盤相当波のフーリエ振幅スペクトルに対して、検討対象地点と八戸港のサイト増幅特性の比率 (図-10 参照) を掛け合わせることによって、検討対象地点における工学的基盤相当波のフーリエ振幅スペクトルを推定した。
- ④ 上記①～③の手順を対象地震である 1968 年十勝沖地震のケースおよび 1994 年三陸はるか沖地震のケースについてそれぞれ実施した。

図-11 に検討対象地点における断面方向および延長方向 (後述の図-15 参照) の工学的基盤相当波の推定フーリエ振幅スペクトルを、1968 年十勝沖地震のケースおよび 1994 年三陸はるか沖地震のケースについてそれぞれ示す。この図より、検討対象地点と八戸港における地震基盤～工学的基盤のサイト増幅特性に差異があるため、フーリエ振幅スペクトルにも差異が生じている。なお、サイト増幅特性を利用してフーリエ振幅スペクトルを推定する方法は、比較的信頼性が高いことが一般に知られている<sup>9)</sup>。

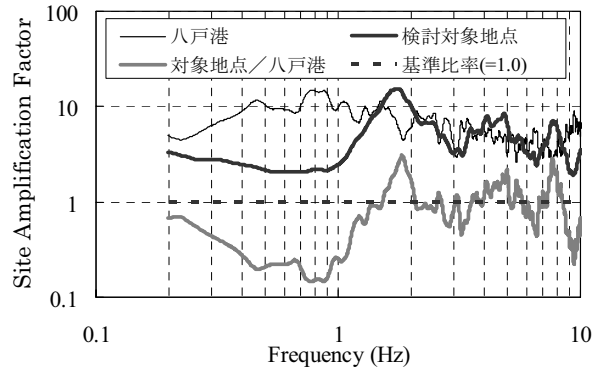
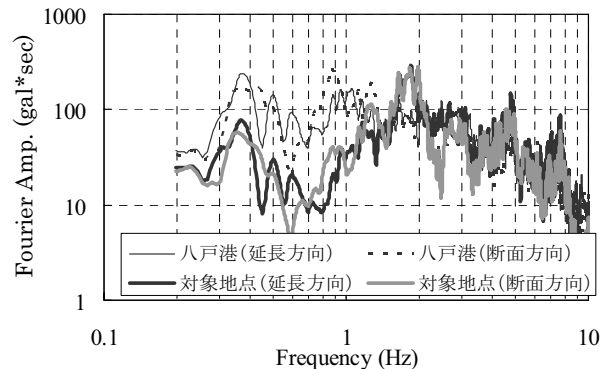
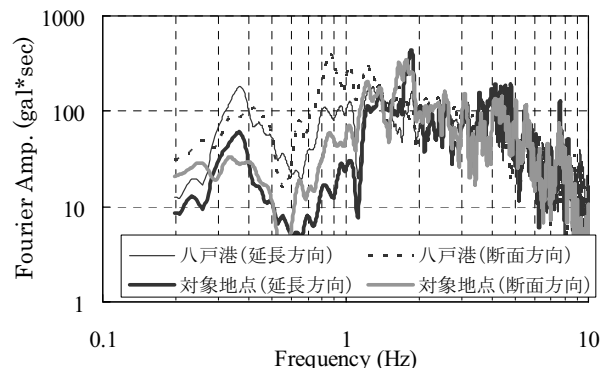


図-10 検討対象地点と八戸港におけるサイト増幅特性の比較 (推定結果)



(a) 1968 年 十勝沖地震



(b) 1994 年 三陸はるか沖地震

図-11 工学的基盤相当波におけるフーリエ振幅スペクトルの比較 (推定結果)

## 6. 位相特性の推定

本章で述べる内容は、図-3中のSection Cに相当する。

### 6.1 中小地震記録を利用した位相特性の選定

両地点のサイト増幅特性が類似していれば、両地点のサイト位相特性も類似している可能性が高い<sup>8)</sup>。そのため検討対象地点のフーリエ位相特性は、検討対象地点と最も近いサイト増幅特性を有する K-NET 八戸のフーリエ位相特性を補正することによって設定すべきである。しかしながら対象地震（1968年十勝沖地震および1994年三陸はるか沖地震）時において八戸市役所敷地内（K-NET 八戸）には、地震計が設置されていない。そのため対象地震による K-NET 八戸における観測波のフーリエ位相特性を直接利用することは不可能である。

そこで本研究では、対象地震のフーリエ位相特性と最も近いフーリエ位相特性を有する中小地震を、八戸港の地震観測記録において探し出した。結果的には、図-12に示すとおり、1968年十勝沖地震と青森県東方沖の地震（2003年12月8日；M4.9）、1994年三陸はるか沖地震と岩手県沖の地震（2004年8月10日；M5.6）のサイト位相特性がそれぞれ類似していることを確認した。なお、同図には1968年十勝沖地震の断層モデルおよび1994年三陸はるか沖地震の断層モデル<sup>9),10)</sup>についても図示している。

図-13は、1968年十勝沖地震における八戸港での観測記録の速度波形（観測波）と観測波のフーリエ振幅特性を用いて、フーリエ位相特性のみ2003年12月8日の青森県東方沖の地震のフーリエ位相特性に置き換えた合成速度波形（置換波）を水平2成分について比較したものである。この図より両成分ともに観測波と置換波が非常に類似しており、選定した中小地震記録が対象地震の位相特性に近いことが確認できる。

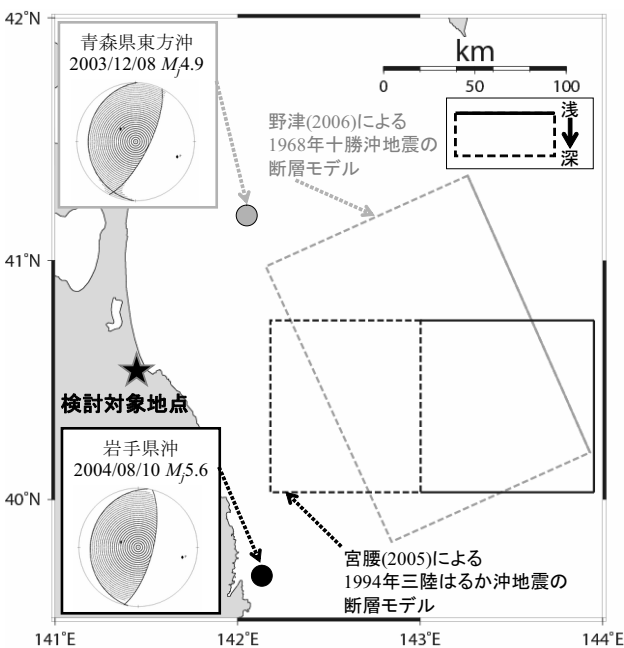
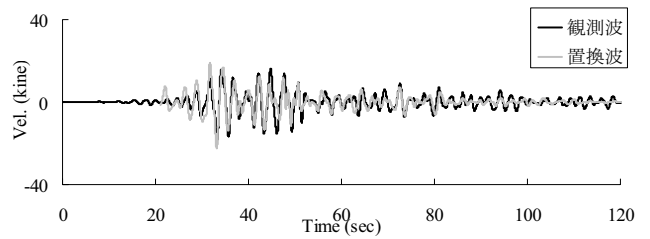


図-12 位相特性として選定した中小地震

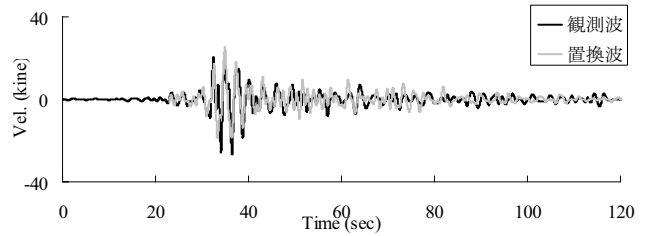
図-14は、図-13の1968年十勝沖地震のケースと同様に、1994年三陸はるか沖地震におけるサイト位相特性について検討を行ったものである。その結果、2004年8月10日の岩手県沖の地震がサイト位相特性として選定された。

### 6.2 位相特性波形の設定

対象地震による推定地震動は、図-15に示すとおり対象鉄道盛土 648K300m 地点の断面方向(N64°E)および延長方向(N26°W)について算定する。そのためフーリエ位相特性についても断面方向および延長方向の水平2方向についてそれぞれ設定した。



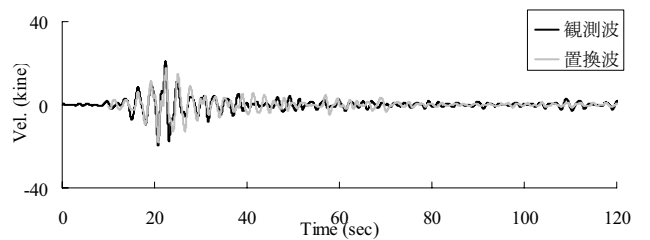
(a) NS 成分



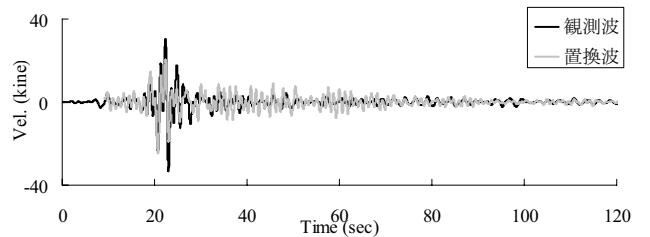
(b) EW 成分

図-13 位相特性選定の妥当性確認

【1968年十勝沖地震】（推定結果）



(a) NS 成分



(b) EW 成分

図-14 位相特性選定の妥当性確認

【1994年三陸はるか沖地震】（推定結果）

図-16は、青森県東方沖の地震(2003年12月8日;M4.9)によるK-NET八戸での観測記録の工学的基盤(対象標高G.L.-20m)相当波の断面方向成分(同図(a))に対して、サイト特性の差異に応じた時間軸の補正を行った波形(同図(b))を示したものである。

具体的な時間軸の補正方法は、K-NET八戸のサイト増幅特性のピーク周波数(1.2Hz)と検討対象地点のサイト増幅特性のピーク周波数(1.8Hz)の差異(図-9参照)を考慮して、K-NET八戸での位相特性波形の時間軸を1.5倍(1.8Hz/1.2Hz)に縮小している。そして、これが検討対象地点での位相特性を与える波形となる。これは、群遅延時間スペクトルのピーク周波数とサイト増幅特性のピーク周波数が概ね一致することが知られているため、サイト位相特性を与える波形をその条件を満たすように補正するものである。なお、この程度の補正であれば、波形合成の際の震源特性や伝播経路特性には影響を与えない。

図-17は、図-16と同様の時間軸補正を延長方向成分について実施し、1968年十勝沖地震による検討対象地点の延長方向成分の位相特性波形を設定したものである。

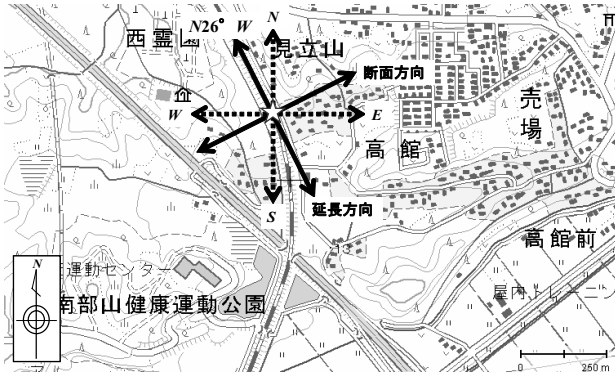
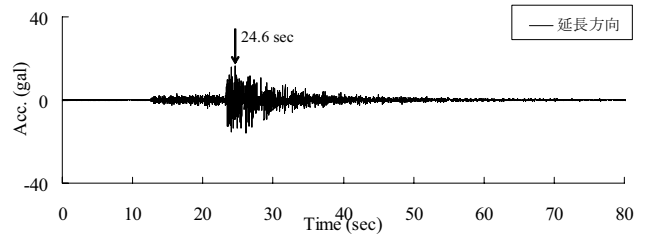


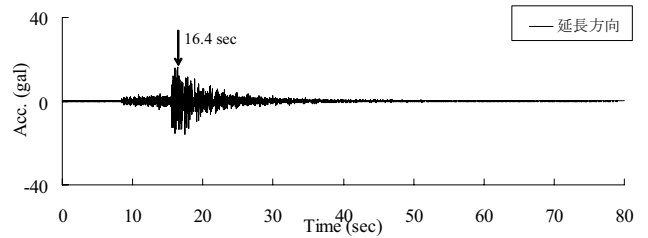
図-15 地震動推定の水平2方向(断面・延長方向)成分

図-18は、岩手県沖の地震(2004年8月10日;M5.6)によるK-NET八戸での観測記録の工学的基盤(対象標高G.L.-20m)相当波の断面方向成分(同図(a))に対して、時間軸の補正を施し、1994年三陸はるか沖地震による検討対象地点における断面方向成分の位相特性波形(同図(b))を示したものである。

図-19では、図-18と同様の時間軸補正を延長方向成分について実施し、1994年三陸はるか沖地震による検討対象地点の延長方向成分の位相特性波形を設定したものである。

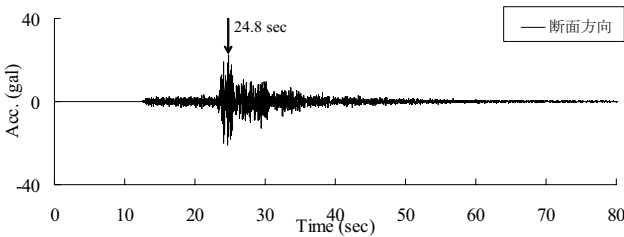


(a) K-NET 八戸

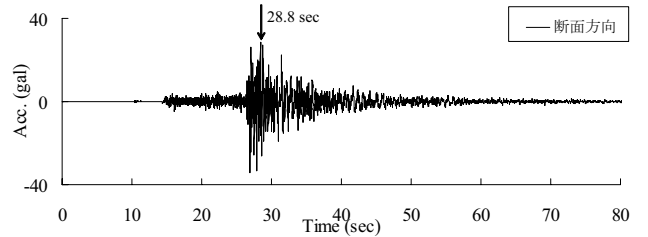


(b) 検討対象地点

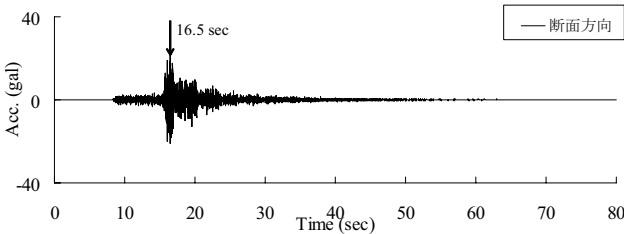
図-17 位相特性波形の設定【延長方向】  
(1968年十勝沖地震)(推定結果)



(a) K-NET 八戸

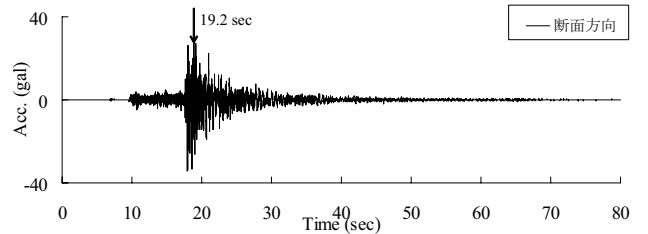


(a) K-NET 八戸



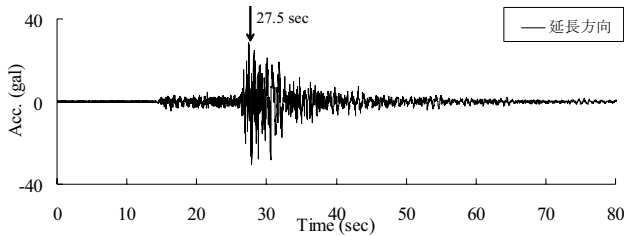
(b) 検討対象地点

図-16 位相特性波形の設定【断面方向】  
(1968年十勝沖地震)(推定結果)

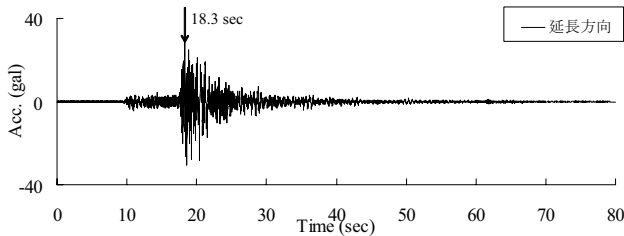


(b) 検討対象地点

図-18 位相特性波形の設定【断面方向】  
(1994年三陸はるか沖地震)(推定結果)



(a) K-NET 八戸



(b) 検討対象地点

図-19 位相特性波形の設定【延長方向】  
(1994年三陸はるか沖地震) (推定結果)

## 7. 地震動の推定

本章で述べる内容は、図-3中のSection Dに相当する。

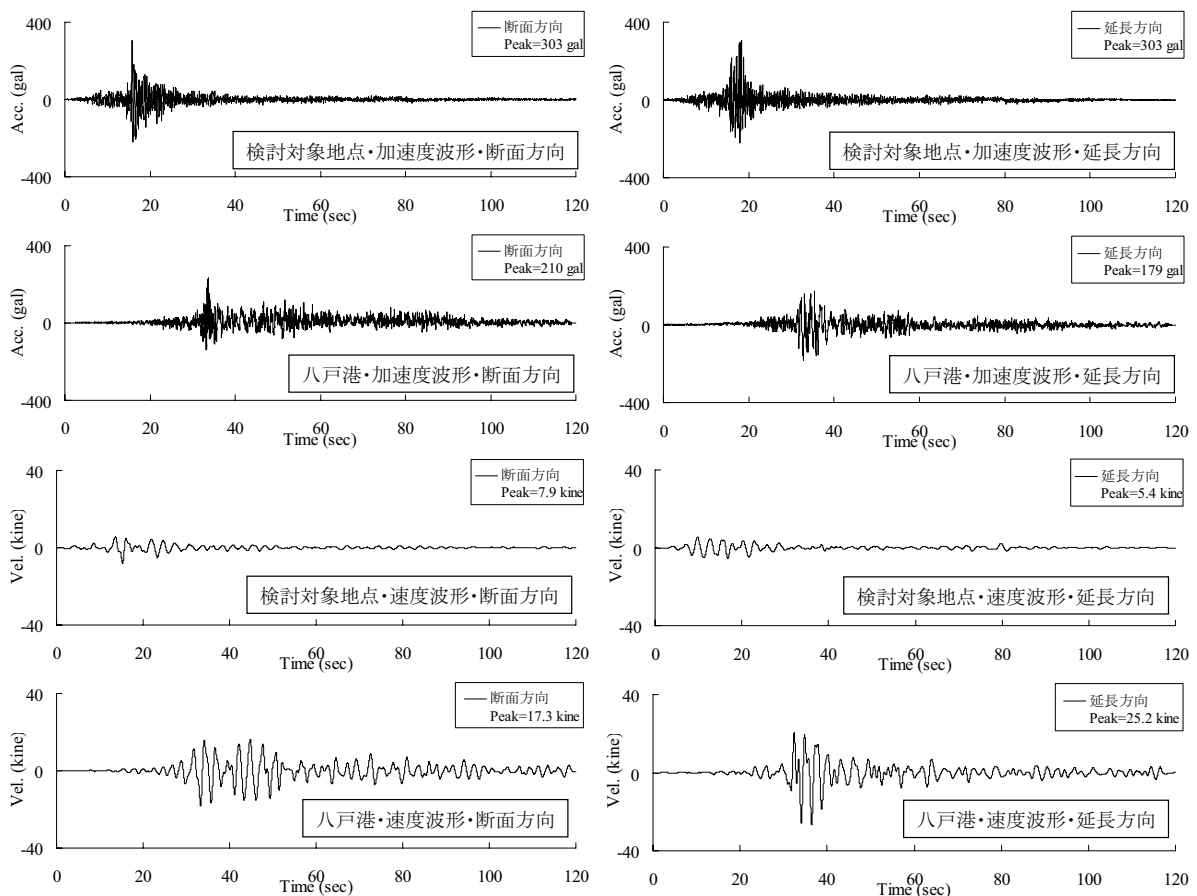


図-20 1968年十勝沖地震による工学的基盤(対象標高 G.L.-20m)相当波の比較(推定結果)

図-20および図-21は、対象地点に対して推定した1968年十勝沖地震および2003年三陸はるか沖地震による工学的基盤(対象標高 G.L.-20m)相当波である。これらの波形は、設定したフーリエ振幅特性(図-11参照)とフーリエ位相特性(図-16~図-19参照)を用いて、パーセン・ウィンドウを考慮した逆フーリエ変換を行うことによって推定した。なお、比較として示した八戸港の波形は、地表面での観測波を地盤の非線形性を考慮した解析コードDYNEQ<sup>7)</sup>を用いて比較対象基盤(標高 G.L.-20m)まで引戻したものである。

これらの図に示すように、検討対象地点では、両対象地震時において最大加速度 300gal 程度の地震動が作用したと推定される。また、対象地震の種類に関わらず、検討対象地点の推定波とその近傍の八戸港における観測波の差異は、最大速度値において顕著に表れている。

図-22および図-23は、検討対象地点の推定波と八戸港の観測波による加速度・速度応答スペクトルの比較である。これらの図より対象地震の種類に関わらず、検討対象地点の加速度・速度応答スペクトルは、短周期領域(0.1~0.6秒)において比較的卓越しており、八戸港と同程度の応答値を示している。一方で、長周期領域(0.6秒以上)では、両地点のスペクトルの差異が顕著に表れており、検討対象地点は八戸港に比べ、非常に小さな応答値を示している。

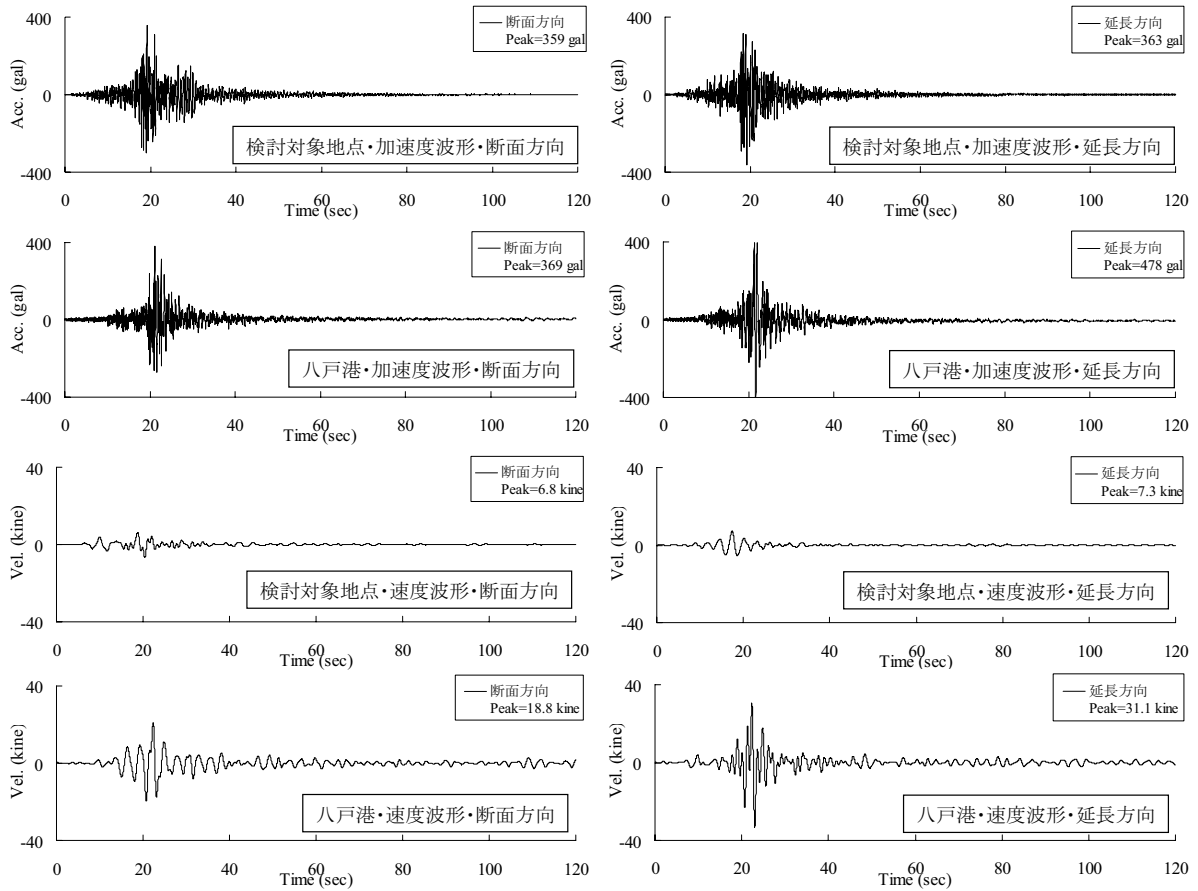
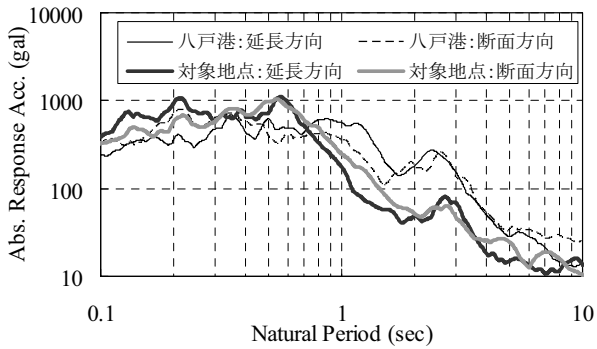
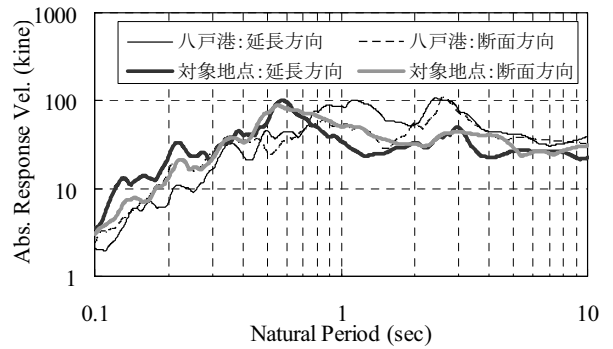


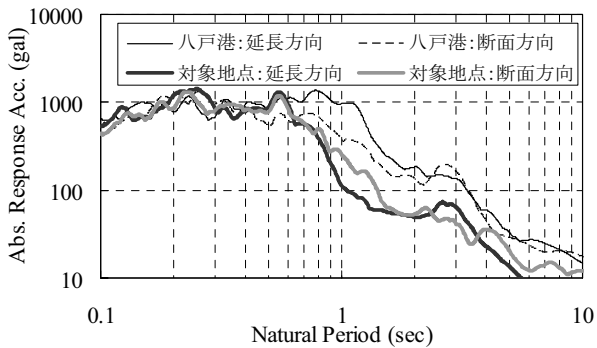
図-21 2003年三陸はるか沖地震による工学的基盤（対象標高 G.L.-20m）相当波の比較（推定結果）



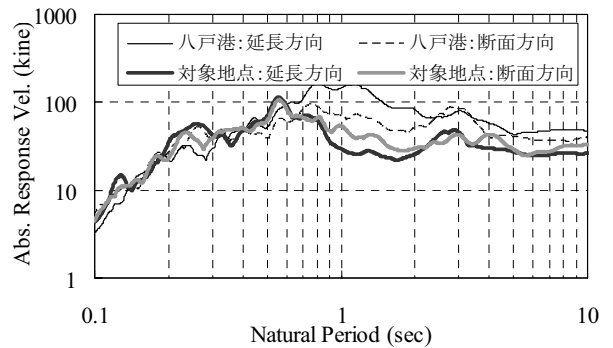
(a) 1968年 十勝沖地震



(a) 1968年 十勝沖地震



(b) 1994年 三陸はるか沖地震



(b) 1994年 三陸はるか沖地震

図-22 加速度応答スペクトルの比較（推定結果）

図-23 速度応答スペクトルの比較（推定結果）



## 8. まとめ

本稿では、検討対象地点とその周辺の強震観測点のサイト特性の差異を利用した地震動の推定方法(サイト特性置換手法)を提案し、1968年十勝沖地震ならびに1994年三陸はるか沖地震による青森県八戸市簗子渡における鉄道盛土地点での地震動を推定した事例を述べた。今後は、今回推定した地震動を入力動とした対象盛土の動的解析を実施し、盛土の被災における先行降雨の影響について検討を行っていく予定である。

## 謝辞

常時微動計測の実施にあたっては、柴尾享氏(広島大学大学院工学研究科)および田森賢太郎氏(広島大学工学部)の協力を仰いだ。また、防災科学技術研究所 K-NET および気象庁の波形を使用しました。また、(社)土木学会地震工学委員会性能を考慮した道路盛土の耐震設計・耐震補強に関する研究小委員会の委員の皆様には、貴重なご意見をいただきました。記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 土田肇, 倉田栄一, 須藤克子: 1968年十勝沖地震とその余震の港湾地域における強震記録, 港湾技研資料, No.80, 1969.
- 2) 佐藤幸博, 一井康二, 宮田正史, 森田年一, 井合進: 1994年三陸はるか沖地震の港湾地域における強震記録, 港湾技研資料, No.892, 1997.
- 3) 中村宏, 栗山道夫: 三陸はるか沖および十勝沖地震による鉄道盛土崩壊メカニズムの検討, 降雨と地震から危険斜面を守る地盤工学に関するシンポジウム論文集, 地盤工学会, pp.137-142, 1997.
- 4) 野津厚, 長尾毅, 山田雅行: スペクトルインバージョンに基づく全国の強震観測地点におけるサイト増幅特性とこれを利用した強震動評価事例, 日本地震工学会論文集, Vol.7, No.2, pp.215-234, 2007.
- 5) 長尾毅, 平松和也, 曾根照人, 野津厚: 撫養港における入力地震動のゾーニングに関する研究, 海洋開発論文集, 土木学会, Vol.23, pp.805-810, 2007.
- 6) (社)日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 上巻, pp.336-341, 2007.
- 7) 吉田望, 末富岩雄: 等価線形法に基づく水平成層地盤の地震応答解析プログラム, 佐藤工業(株)技術研究所年報, pp.61-70, 1996.
- 8) 澤田純男, 盛川仁, 土岐憲三, 横山圭樹: 地震動の位相スペクトルにおける伝播経路・サイト特性の分離, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, C4-11, pp.915-920, 1998.
- 9) 野津厚, 菅野高弘: 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価方法, 港湾空港技術研究所資料, No.1120, 2006.
- 10) 宮腰淳一, 檀一男, 岡崎敦: 特性化震源モデルによる1994年三陸はるか沖地震の強震動の再現, 日本地震学会秋季大会講演予稿集, No.B091, pp.100, 2005.

(2009年6月29日 受付)

