

3. 強震動と地盤および構造物の被害

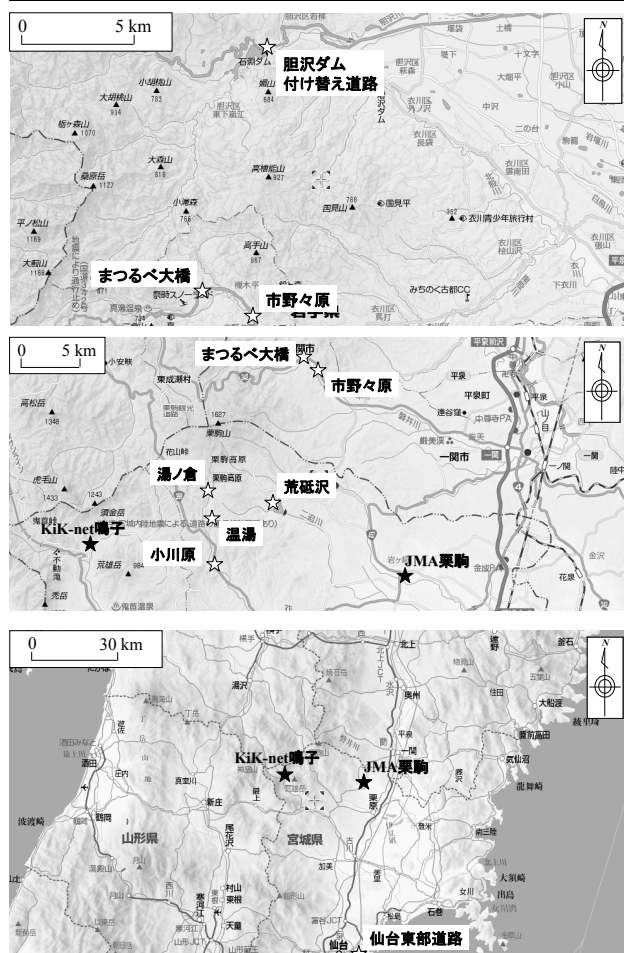
3.1 被災地域における地震動の推定

3.1.1 検討対象地点

表－3.1.1 に地震動推定の検討対象地点の一覧を示す。検討対象地点は、計 10 地点である。図－3.1.1 には、検討対象地点の位置関係図を示す。仙台東部道路を除く、計 9 地点は、2008 年岩手・宮城内陸地震の震源近傍に位置する。地震動の推定手法としては、表－3.1.1 に示すとおり①検討対象地点周辺の本震観測記録の適用性を確認する方法、②強震波形計算¹⁾、③サイト特性置換手法²⁾のいずれかの手法を検討対象地点の特徴に応じて採用した。

表－3.1.1 検討対象地点と地震動推定手法の一覧

検討対象地点			推定手法
道路	胆沢ダム 付け替え道路	谷子沢大橋	石淵ダムの強震記録の適用性
		赤倉大橋	石淵ダムの強震記録の適用性
		焼石トンネル	サイト特性置換手法
	祭時(磐井川)	まつるべ大橋	サイト特性置換手法
	仙台東部道路	仙台東 I.C. 周辺	仙台東 I.C. の強震記録の適用性
河道閉塞	磐井川水系	市野々原	サイト特性置換手法
		小川原	強震波形計算
	一迫川水系	温湯	強震波形計算
		湯ノ倉	強震波形計算
斜面崩壊	二迫川水系	荒砥沢地すべり	強震波形計算



図－3.1.1 地震動推定の検討対象地点

3.1.2 仙台東部道路

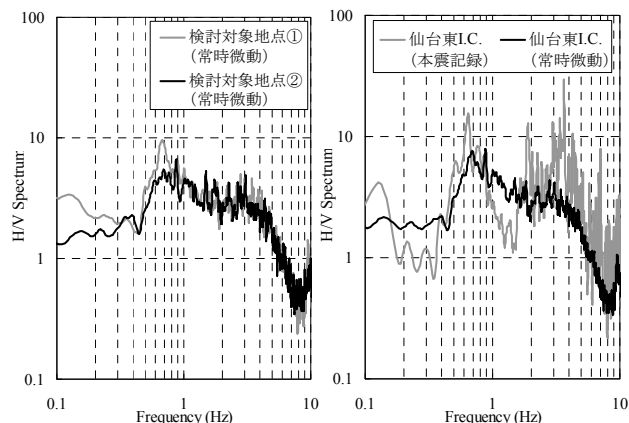
図－3.1.2 に仙台東部道路における検討対象地点(2008 年岩手・宮城内陸地震において支承などが損傷)と仙台東 I.C. の位置関係を示す。仙台東 I.C. では強震観測が行われており本震の観測記録が得られている。検討対象地点は仙台東 I.C. から約 700m と近いので、地震動に対して影響を及ぼす諸要因のうち震源特性と伝播経路特性は両地点に対してほぼ等しいと考えられる。しかし、距離が近くとも、サイト特性(地盤震動特性)が大きく異なれば、地震動が大きく異なることもある。そこで、今回、両地点において常時微動計測(写真－3.1.1 参照)を実施し、両地点の地盤震動特性に違いが見られるか検討した。その結果、検討対象地点と仙台東 I.C. における常時微動 H/V スペクトルの形状やピーク周波数は概ね一致することがわかった(図－3.1.3)。従って両地点の地盤震動特性はほぼ同等であると考えられる。以上のことから、検討対象地点での推定地震動として、仙台東 I.C. の本震記録(図－3.1.4)を用いることができると考えられる。なお、図－3.1.3 には参考のため仙台東 I.C. の本震記録に対する H/V スペクトルも示しているが、常時微動 H/V スペクトルとの類似が認められる。



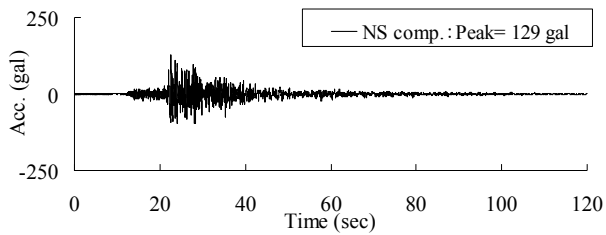
図－3.1.2 検討対象地点(仙台東部道路)



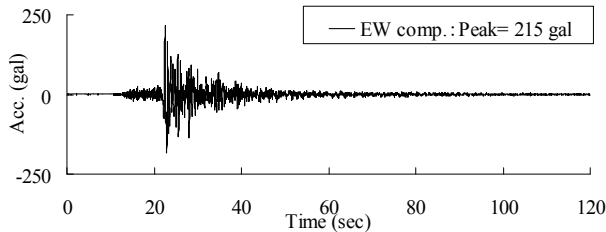
(a) 仙台東 I.C. (b) 微動計測地点①
写真－3.1.1 常時微動計測状況(仙台東部道路)



図－3.1.3 H/V スペクトルの比較(仙台東部道路)



(a) NS 成分



(b) EW 成分

図-3.1.4 仙台東 I.C.での本震記録
(仙台東部道路検討対象地点での推定地震動)

3.1.3 一迫川流域および二迫川流域

(1) 検討対象地点

図-3.1.5 に一迫川流域および二迫川流域での地震動推定地点を示す。具体的には、河道閉塞を引き起こした湯湯、湯ノ倉、小川原(一迫川流域)および大規模な斜面崩壊が発生した荒砥沢地すべり(二迫川流域)の計4地点である。検討対象地点周辺には、既存の強震観測点が少なく、更に対象地点毎にサイト特性が異なっている可能性が高いことから、経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法¹⁾を用いて検討対象地点における地震動を推定した^{3),4)}。



図-3.1.5 検討対象地点(一迫川流域および二迫川流域)

(2) 断層モデルの設定

(a) 特性化震源モデルの構築

2008年岩手・宮城内陸地震の波形インバージョン結果⁵⁾を参考に特性化震源モデルの構築を行った。図-3.1.6に示す波形インバージョンによる最終すべり量分布において、特にすべり量の大きい領域(同図中**(b)**)に矩形のアスペリティを配した特性化震源モデルを試行錯誤の結果により構築した。

表-3.1.2 に特性化震源モデルの断層パラメータ一覧を示す。アスペリティの面積は48km²(長さ8km×幅6km)、地震モーメントは4.0E+18Nm、ライズタイムは0.58sec、分

割数は5×5×5である。 Q 値については、東日本の内陸部での推定値⁶⁾を採用した。

(b) 強震波形計算手法

本研究では、強震動計算手法として、統計的グリーン関数法のバリエーションの1つである古和田の方法⁷⁾を適用した。すなわち、まず、地震基盤での地震動を評価し、次に、地震基盤での地震動をフーリエ変換し、振幅に後述する各検討対象地点でのサイト増幅特性を乗じ、更に、後述する各検討対象地点での中小地震記録を周波数領域で振幅1に調整して乗じ、最後に、フーリエ逆変換を行った。

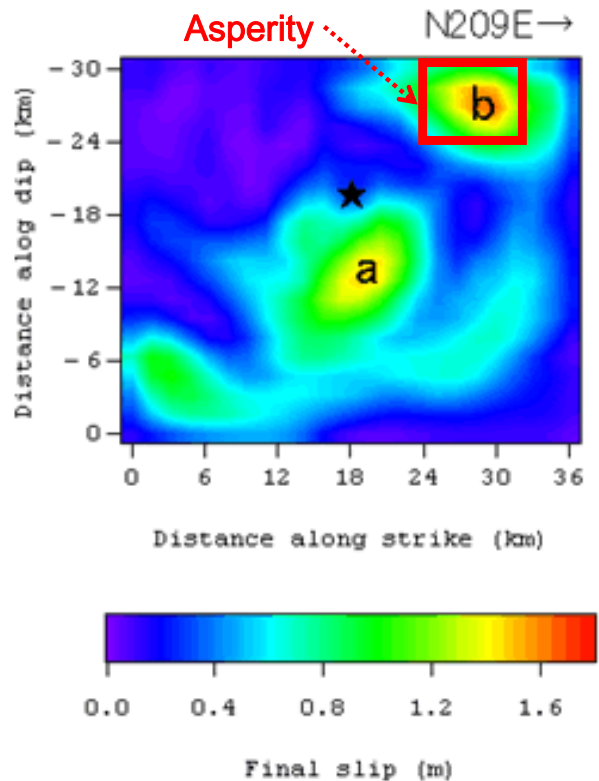


図-3.1.6 特性化震源モデル

表-3.1.2 断層モデルパラメータ

巨視的	断層長さ (km)	36
	断層幅 (km)	30
	走向 (deg.)	209
	傾斜 (deg.)	51.0
微視的	地震モーメント (dyne・cm)	4.0×10^{25}
	長さ (km)	8.0
	幅 (km)	6.0
	ライズタイム (sec)	0.58
その他のパラメータ	破壊開始点位置	N39.028 E140.880
	破壊開始点深さ (km)	8.0
	破壊伝播方向	破壊開始点より放射状
	Q 値	$Q=166f^{0.76}$
	密度 (g/cm ³)	2.7
	せん断波速度 (km/sec)	3.5
	破壊伝播速度 (km/sec)	2.6

このことを具体的に数式で表現すると以下ようになる。

$$A(f) = A_b(f) \cdot G(f) \cdot \frac{O(f)}{|O(f)|_p} \quad (3.1.1)$$

$A(f)$ は対象地震による地表での地震動のフーリエ変換で複素数、 $A_b(f)$ は対象地震による地震基盤での地震動のフーリエ変換で複素数、 $G(f)$ はサイト増幅特性で実数、 $O(f)$ は対象地点で得られた中小地震記録のフーリエ変換で複素数である。すなわち、上式における右辺第2項は堆積層が地震動の振幅に及ぼす影響を、右辺第3項は堆積層が地震動の位相に及ぼす影響をそれぞれ表している。

更に、本検討では、強震動計算に多重非線形効果⁸⁾を考慮した手法⁹⁾を採用した。具体的には、非線形パラメータとして堆積層における平均的なせん断波速度の低下率 ν_1 および堆積層における平均的な減衰定数の増分 ν_2 を用い、波形合成に用いるグリーン関数に対して予め補正を加えておくという方法である。本検討では試行錯誤の結果、 $\nu_1=0.90$ および $\nu_2=0.01$ (各検討対象地点で共通)と設定した。

(c) キャリブレーション

図-3.1.7 に検討対象地点周辺で本震の地震動を記録した強震観測点の分布を示す(同図中の★印)。最初にこれらの地点での地震動を計算し、震源モデルと計算手法の適用性を検討する。その際、図-3.1.8 に示す各地点におけるサイト増幅特性^{4),10)}を用いる。また、2008年6月16日の23時14分の余震(M5.3)による各地点での記録を位相特性として用いる^{3),4)}。図-3.1.9 は各地点における本震時の速度波形(観測波)と強震動計算の結果(推定波)を比較したものである。図-3.1.9 より、観測波形の振幅や継続時間などは地点間で大きく異なっている。特に、震源距離が比較的近い KiK-net 鳴子では振幅が小さく、継続時間も短いのに対し、K-NET 鳴子ではカルデラ内での地震動の増幅効果¹¹⁾により振幅が大きく、継続時間も長くなっている。一方、検討対象地点周辺の強震観測点における観測波と推定波は概ね一致している。このことは、検討対象地点におけるサイト増幅・位相特性を考慮して強震動計算を実施すれば、本震時における検討対象地点での強震波形をかなり精度良く推定できる可能性が高いことを示唆するものである。



図-3.1.7 強震観測点の分布(一迫川流域および二迫川流域)

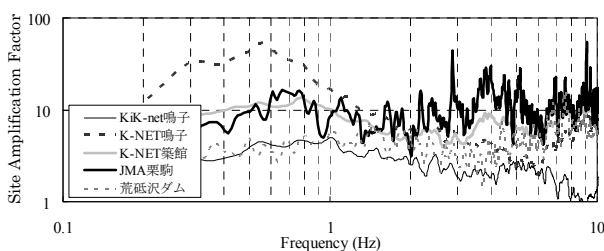


図-3.1.8 強震観測点におけるサイト増幅特性の比較^{4),10)}

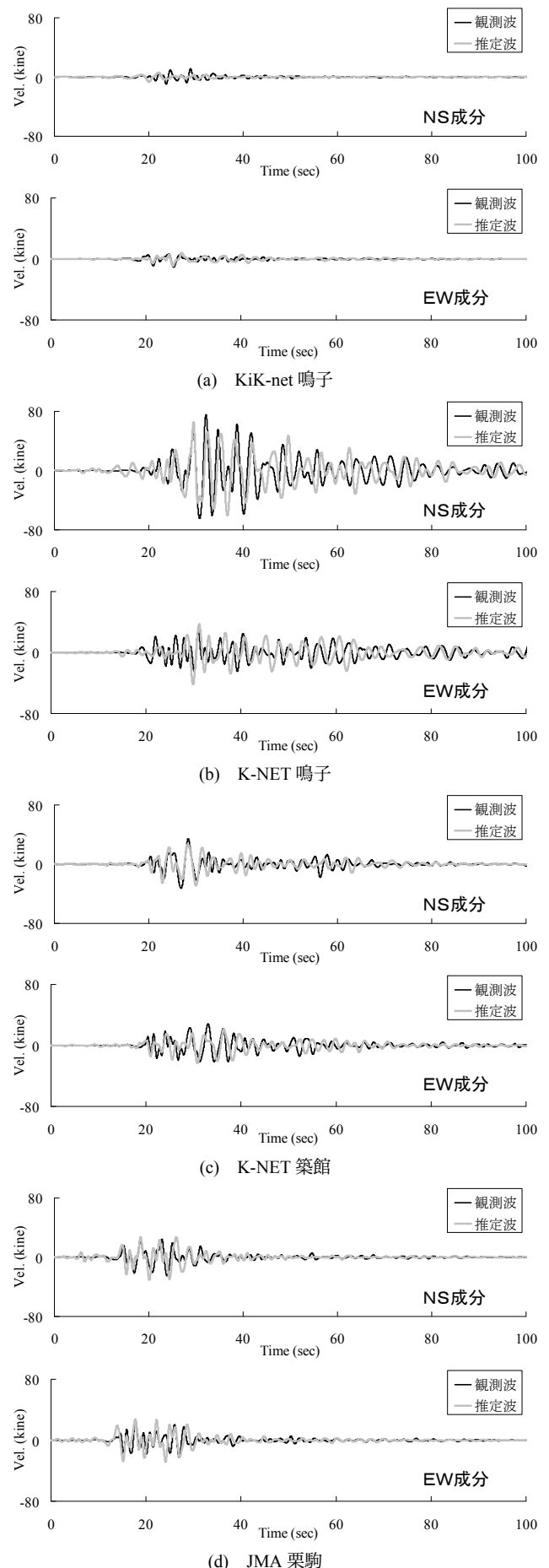
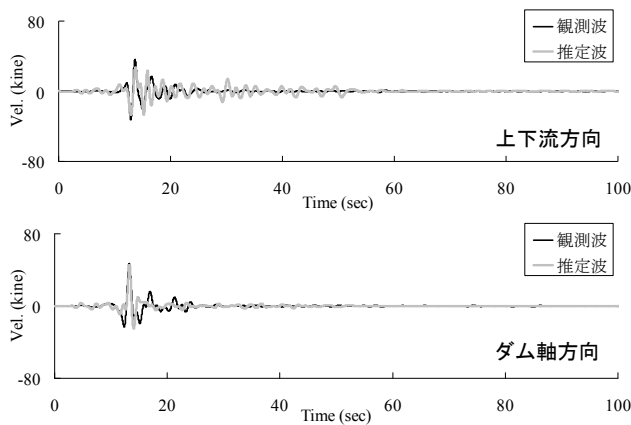


図-3.1.9 周辺の強震観測点での地震動の再現



(e) 荒砥沢ダム(基礎岩盤監査廊)

図-3.1.9 周辺の強震観測点での地震動の再現

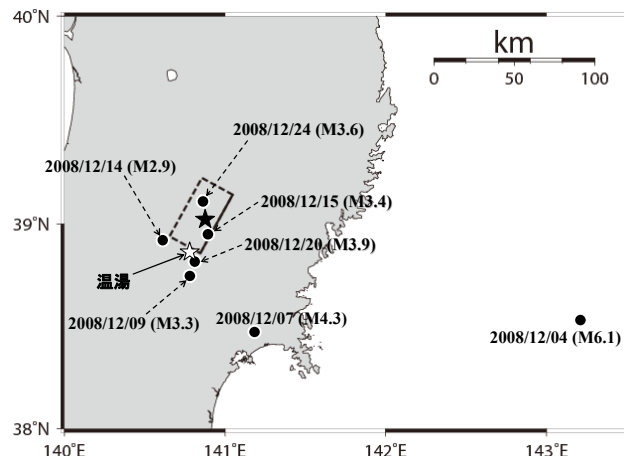


図-3.1.11 中小地震観測状況(温湯)³⁾

(3) 温湯

温湯(図-3.1.10 参照)では2008年11月から2009年2月までの約4ヶ月間、地震観測を実施した。図-3.1.11に得られた中小地震記録の震央分布³⁾を示す。温湯地点におけるサイト増幅特性は、S/N比が十分に高い地震観測記録を利用し、既存強震観測点とのスペクトル比に基づいて設定した。具体的には、温湯地点とKiK-net 鳴子で同時に得られた中小地震観測記録を対象に、幾何減衰を考慮したフーリエスペクトルの比率(温湯/KiK-net 鳴子)を計算し、この比率をKiK-net 鳴子における既存のサイト増幅特性¹⁰⁾に掛け合わせることによって設定した。図-3.1.12に温湯におけるサイト増幅特性の評価結果を示す。さらに、図-3.1.13に示すように、河道閉塞箇所近傍の常時微動計測地点(図-3.1.10 参照)と地震計設置地点のH/Vスペクトルの特性が比較的類似していることから、地震計設置地点でのサイト増幅特性を河道閉塞箇所にもそのまま適用する。

位相特性としては、2008年12月15日岩手県内陸南部の地震(M3.4)による温湯での観測波を採用した。この地震の位相特性を用いることの妥当性を確認するため、図-3.1.14では、KiK-net 鳴子における本震の位相特性をこの地震の位相特性に置換した速度波形(置換波)を本震による速度波形(観測波)と比較している。同図に示すとおり観測波と置換波が類似しているため、この地震の位相特性を用いることは妥当であると考えられる。

図-3.1.15には、上記で評価したサイト増幅・位相特性を考慮した強震波形計算を実施し、温湯の河道閉塞箇所での地震動を推定した結果を示す。

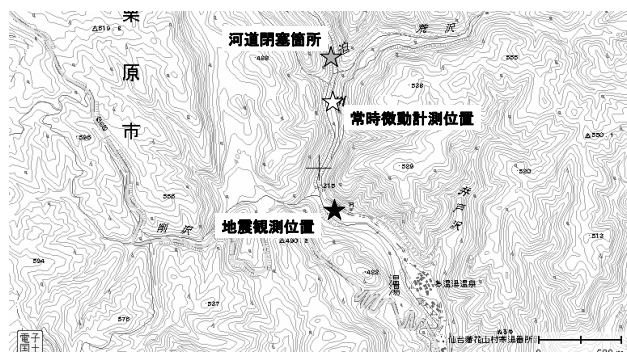


図-3.1.10 地震観測位置と河道閉塞箇所の位置関係(温湯)

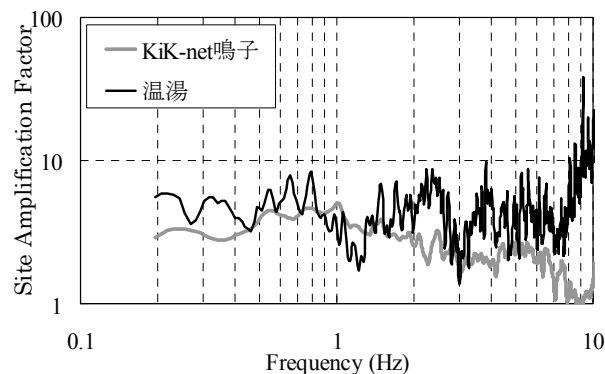


図-3.1.12 サイト増幅特性の評価(温湯)

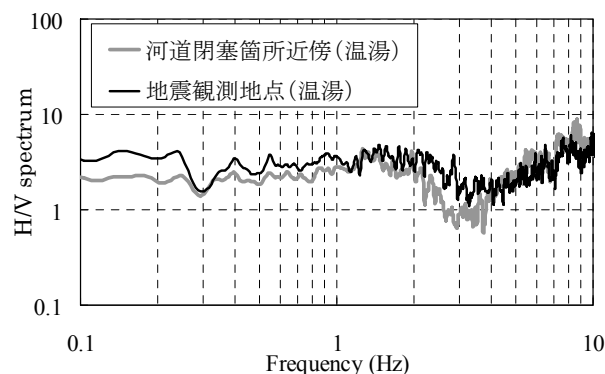
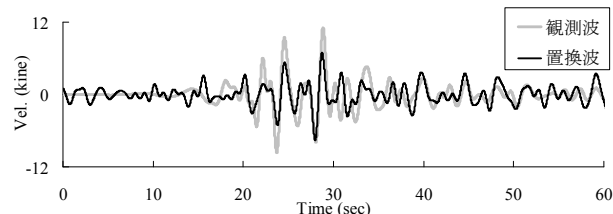
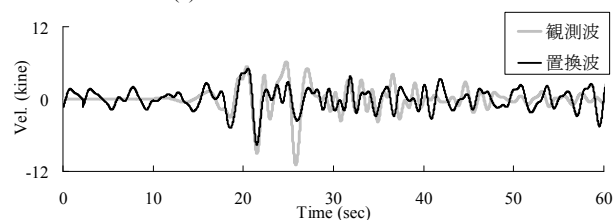


図-3.1.13 H/V スペクトルの比較(温湯)

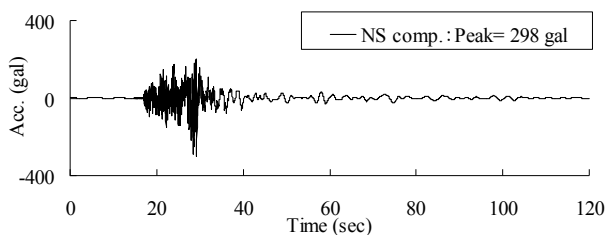


(a) KiK-net 鳴子 (NS 成分)

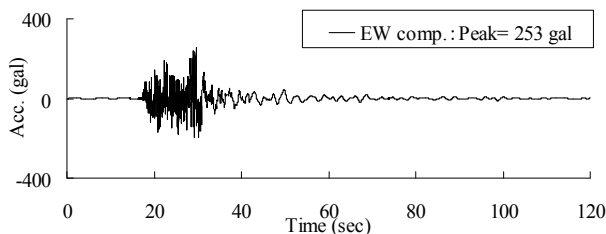


(b) KiK-net 鳴子 (EW 成分)

図-3.1.14 2008年12月15日の地震の位相特性の評価



(a) NS 成分



(b) EW 成分

図-3.1.15 推定地震動（温湯）

(4) 湯ノ倉

湯ノ倉での河道閉塞箇所(図-3.1.16 参照)では、本震の前後においても通電状況が整っていないことを考慮して地震観測の実施を断念した。そのため、河道閉塞箇所近傍の地点において常時微動計測を実施した(図-3.1.17 および写真-3.1.2 参照)。図-3.1.18 に示すとおり、河道閉塞箇所近傍(湯ノ倉)と地震観測地点(温湯)のH/Vスペクトルを比較すると、比較的低周波側(3~4Hz 以下)では両者は概ね一致している。一方、比較的高周波側(3~4Hz 以上)では両者に差異が見られるが、これは表層のごく薄い層の影響であると考えられる。高周波側での差異は少し計測場所を変えただけでも変化する可能性があり、湯ノ倉でのH/Vスペクトル(図-3.1.18 参照)が河道閉塞箇所を代表しているかどうか高周波成分に関しては不明であること、3~4Hz 以上の高周波成分が当該地域での被害を大きく左右した可能性は小さいと考えられることなどを考慮し、湯ノ倉でのサイト増幅・位相特性としては、温湯のもの(図-3.1.12 および図-3.1.14 参照)を採用することとした。

図-3.1.19 には、上記で評価したサイト増幅・位相特性を考慮した強震波形計算を実施し、湯ノ倉の河道閉塞箇所での地震動を推定した結果を示す。なお、強震波形計算では、湯ノ倉と温湯のサイト増幅・位相特性は同様と仮定しているが、アスペリティとの位置関係は湯ノ倉と温湯で若干異なっていることに留意されたい。



図-3.1.16 検討対象地点（湯ノ倉）

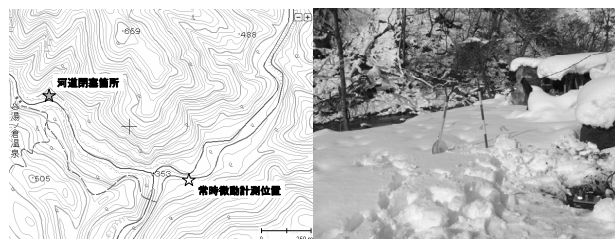


図-3.1.17 微動計測位置

写真-3.1.2 微動計測状況

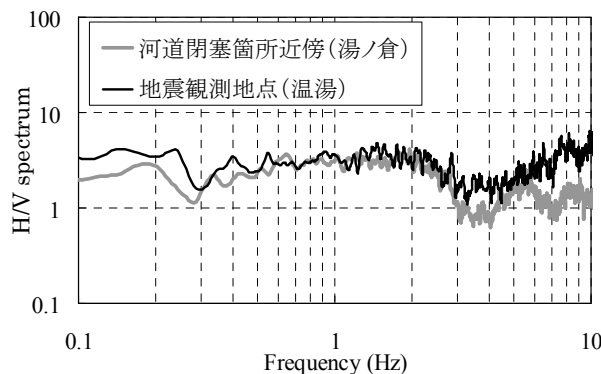
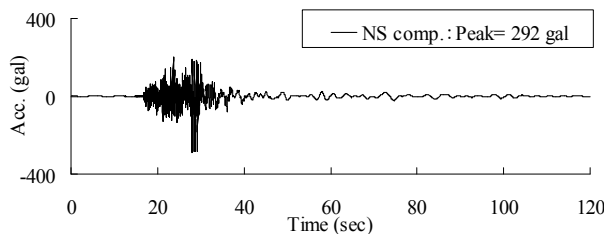
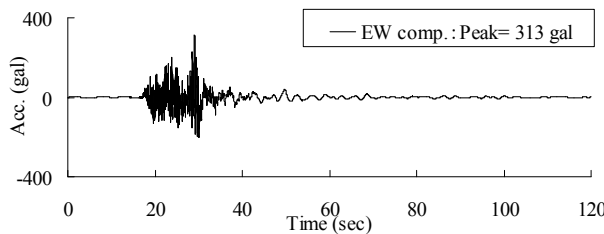


図-3.1.18 H/V スペクトルの比較（湯ノ倉）



(a) NS 成分



(b) EW 成分

図-3.1.19 推定地震動（湯ノ倉）

(5) 小川原

小川原(図-3.1.20 参照)では2009年12月から2010年1月までの約2ヶ月間、地震観測を実施した。図-3.1.21 に得られた中小地震記録の震央分布を示す。小川原地点におけるサイト増幅特性は、S/N 比が十分に高い地震観測記録を利用し、既存強震観測点とのスペクトル比に基づいて設定した。具体的には、小川原地点とK-NET 築館(観測記録の制約を考慮)で同時に得られた中小地震観測記録を対象に、幾何減衰を考慮したフーリエスペクトルの比率(小川原/K-NET 築館)を計算し、この比率をK-NET 築館における既存のサイト増幅特性¹⁰⁾に掛け合わせることで設定した。図-3.1.22 に小川原におけるサイト増幅特性の評価結果を示す。小川原では低周波側(0.2-0.5Hz)で非常に大きな増幅が見られることが一つの特徴である。位相特性としては、2009年12月27日岩手県内陸南部の地震(M3.4)による小川原での観測波を採用した。この地震の位相特性を

用いることの妥当性を確認するため、図-3.1.23 では、K-NET 築館における本震の位相特性をこの地震の位相特性に置換した速度波形(置換波)を本震による速度波形(観測波)と比較している。同図に示すとおり観測波と置換波が類似しているため、この地震の位相特性を用いることは妥当であると考えられる。図-3.1.24 には、上記で評価したサイト増幅・位相特性を考慮した強震波形計算を実施し、小川原の河道閉塞箇所での地震動を推定した結果を示す。

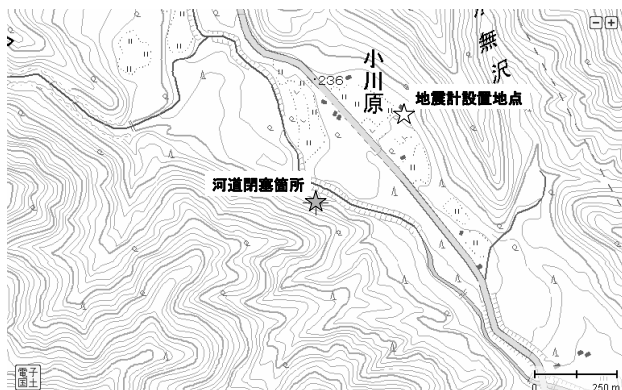


図-3.1.20 検討対象地点(小川原)

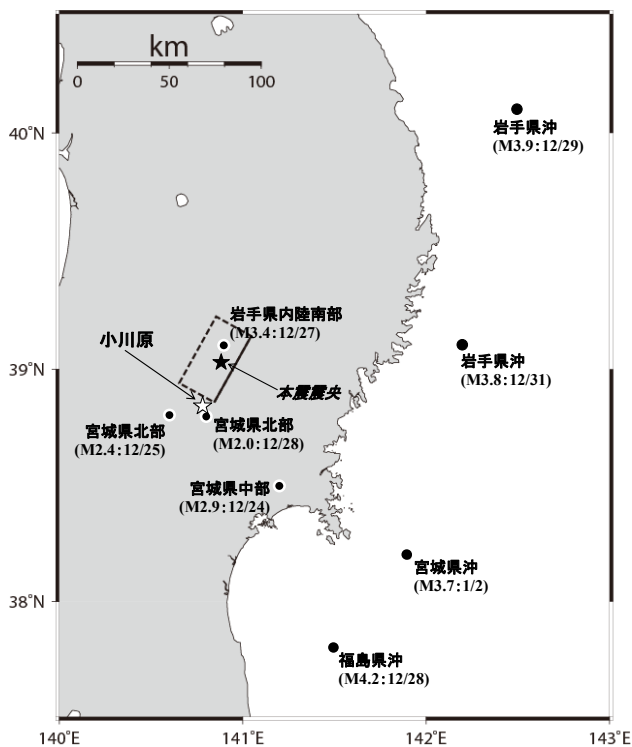


図-3.1.21 中小地震観測状況(小川原)

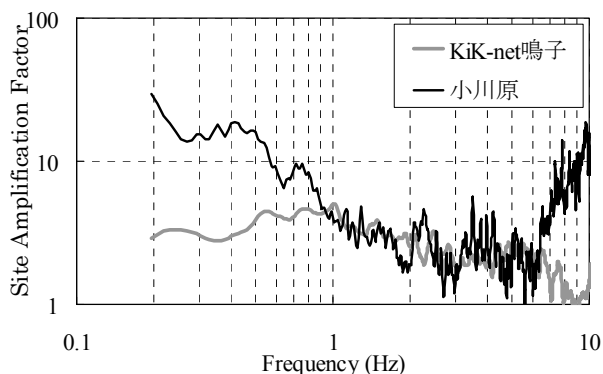
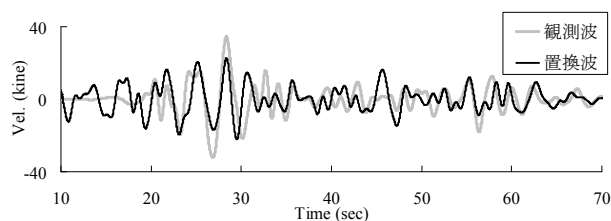
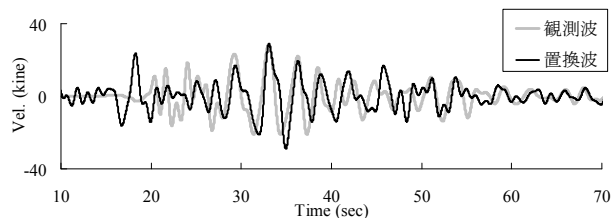


図-3.1.22 サイト増幅特性の評価(小川原)

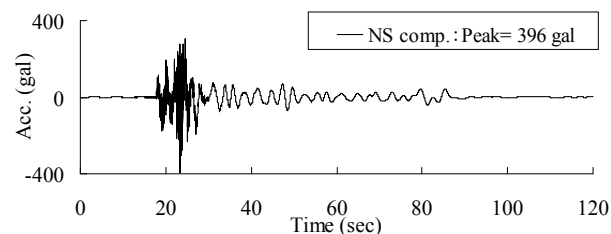


(a) K-NET 築館 (NS 成分)

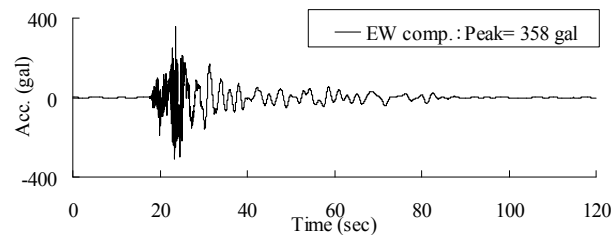


(b) K-NET 築館 (EW 成分)

図-3.1.23 2009 年 12 月 27 日の地震の位相特性の評価



(a) NS 成分



(b) EW 成分

図-3.1.24 推定地震動(小川原)

(6) 荒砥沢地すべり

写真-3.1.3 は、荒砥沢地すべりにおける余震観測地点¹²⁾である。さらに図-3.1.25 には、荒砥沢地すべりの余震観測点と荒砥沢ダムの強震観測点の位置関係¹²⁾を示す。これらの図より、荒砥沢地すべりでは、荒砥沢地すべり背後(L1)、荒砥沢地すべり土塊内部の谷底(L2)、顕著な変動が発生しなかった東側近傍の地すべり(L3)の計 3 箇所(地表)において余震観測結果が得られている¹²⁾。本検討では、荒砥沢地すべり背後(L1)および顕著な変動が発生しなかった東側近傍の地すべり(L3)での余震観測記録を利用して、強震波形計算により、これらの検討対象地点(L1, L3)における本震時の強震動を推定した。

荒砥沢地すべり(L1, L3)におけるサイト増幅特性は、S/N 比が十分に高い余震観測記録を利用し、強震観測点(KiK-net 鳴子)とのフーリエスペクトル比に基づいて設定した。具体的には、検討対象地点(荒砥沢地すべり(L1, L3))と KiK-net 鳴子で同時に得られた中小地震観測記録^{4),12)}を対象に、幾何減衰を考慮したフーリエスペクトルの比率(検討対象地点/KiK-net 鳴子)を計算し、この比率を KiK-net

鳴子における既存のサイト増幅特性¹⁰⁾に掛け合わせることで設定した。図-3.1.26に荒砥沢地すべり(L1, L3)におけるサイト増幅特性の評価結果を示す。

位相特性としては、2008年7月7日15:14の地震(M4.0)による荒砥沢地すべり(L1, L2)での観測波を採用した。この地震の位相特性を用いることの妥当性を確認するため、図-3.1.27では、KiK-net 鳴子における本震の位相特性をこの地震の位相特性に置換した速度波形(置換波)を本震による速度波形(観測波)と比較している。同図に示すとおり観測波と置換波が類似しているため、この地震の位相特性を用いることは妥当であると考えられる。

図-3.1.28には、上記で評価したサイト増幅・位相特性を考慮した強震波形計算を実施し、荒砥沢地すべりのL1およびL3位置での地震動を推定した結果を示す。

3.1.4 磐井川流域

(1) 市野々原

(a) サイト特性の評価

図-3.1.29に検討対象地点である市野々原での河道閉塞地点、その周辺の既存の強震観測点、大学機関による余震観測地点の分布状況をそれぞれ示す。さらに、図-3.1.30に示すように、河道閉塞箇所近傍の常時微動計測地点と東大余震観測地点¹³⁾のH/Vスペクトルの特性が比較的類似していることから、東大余震観測地点でのサイト特性は、河道閉塞箇所でのサイト特性と概ね同等であると考えられる。



写真-3.1.3 荒砥沢地すべりにおける余震観測地点¹²⁾

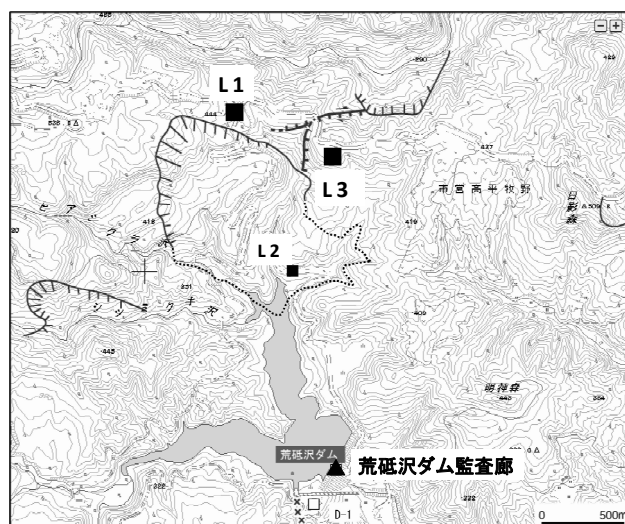


図-3.1.25 荒砥沢地すべりと荒砥沢ダムの位置関係¹²⁾

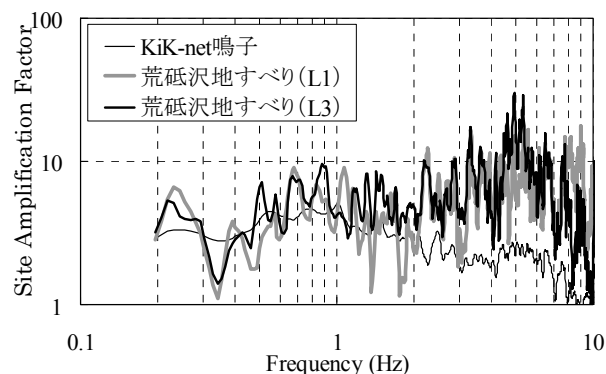


図-3.1.26 サイト増幅特性の評価（荒砥沢地すべり）

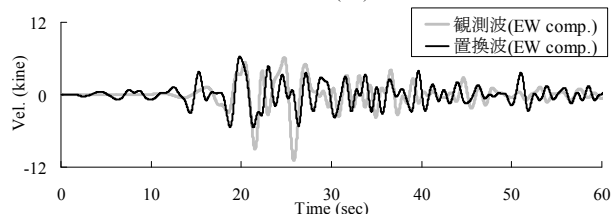
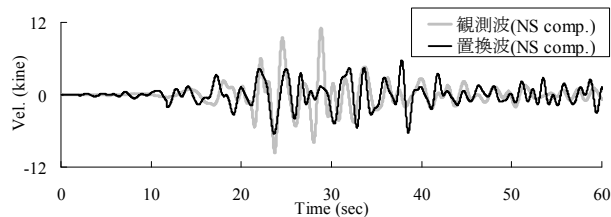


図-3.1.27 2008年7月7日15:14の余震の位相特性の評価

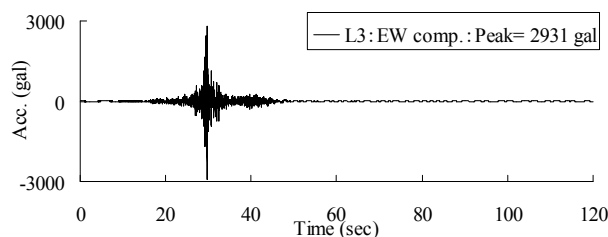
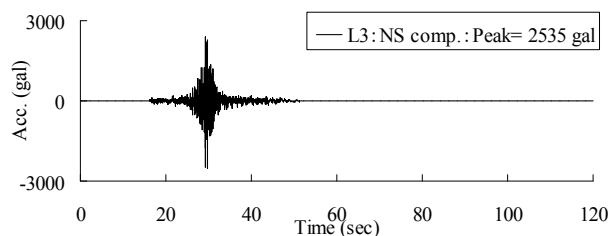
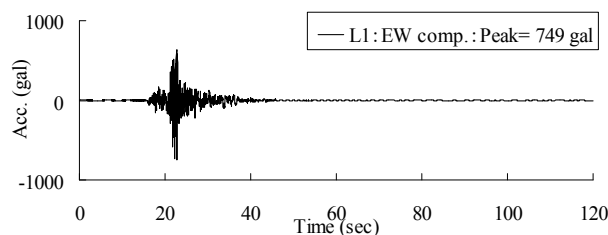
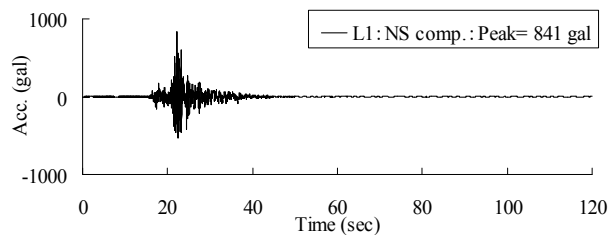


図-3.1.28 推定地震動（荒砥沢地すべり）

サイト増幅特性は、S/N 比が十分に高い東大余震観測地点での記録¹³⁾を利用し、既存強震観測点とのスペクトル比に基づいて設定した。具体的には、東大余震観測地点(=市野々原での河道閉塞地点)と KiK-net 一関東で同時に得られた中小地震観測記録を対象に、幾何減衰を考慮したフーリエスペクトルの比率(市野々原/KiK-net 一関東)を計算し、この比率を KiK-net 一関東における既存のサイト増幅特性¹⁰⁾に掛け合わせることで設定した。図-3.1.31 に市野々原におけるサイト増幅特性の評価結果を示す。ここに、市野々原の最近傍にあたる KiK-net 一関西では、2008 年岩手・宮城内陸地震による強震動により地盤の破壊が発生し、本震の前と後で地盤震動特性が変化し連続性が保たれていない可能性があるため¹⁴⁾、基準強震観測点として KiK-net 一関東を採用した。図-3.1.32 は、KiK-net 一関東における本震の位相特性を 2008 年 6 月 16 日 23 時 18 分の余震(M5.3)による位相特性に置換した速度波形(置換波)を本震による速度波形(観測波)と比較したものである。また、図-3.1.33 は、KiK-net 一関西に対して同様の検討を行ったものである。両地点においても、観測波と置換波は概ね類似しているため、対象地域においては、本震の位相特性と 6 月 16 日 23 時 18 分の余震の位相特性とは類似したものであったと言える。そこで、後にサイト特性置換手法により市野々原での地震動を推定する際には、市野々原における 6 月 16 日 23 時 18 分の余震観測記録の位相特性を利用する。

(b) サイト特性置換手法による地震動の推定

市野々原ではサイト特性置換手法²⁾により地震動の推定を行った。図-3.1.34 は、サイト特性置換手法における地震動推定のフローである。まず、基準強震観測点として市野々原の最近傍の KiK-net 一関西を選定し、本震における地中での地震観測記録を元に、地中～地表の伝達関数(本震以前の中小地震観測記録に基づいて予め算定しておく)を利用して、工学的基盤以浅の表層地盤の非線形の影響が含まれていない地表面相当の地震動(図-3.1.33:観測波)を計算する。そして計算した地震動に対して、パーセンウィンドウを考慮したフーリエ変換を実施し、KiK-net 一関西におけるフーリエ振幅を算定する。次に、算定したフーリエ振幅に対して KiK-net 一関西と市野々原の震源からの距離の差異に基づく幾何減衰による補正を施す。幾何減衰補正を施したフーリエ振幅に対して、サイト増幅特性(図-3.1.31 参照)の比率(市野々原/KiK-net 一関西)を掛け合わせることで、本震時の市野々原における地震動のフーリエ振幅を設定する。最後に、市野々原における 6 月 16 日 23 時 18 分の余震観測記録のフーリエ位相特性を利用し、因果性を考慮したフーリエ逆変換¹⁾を実施することにより、市野々原における本震時の地震波形を推定した(図-3.1.35



図-3.1.29 検討対象地点(市野々原)

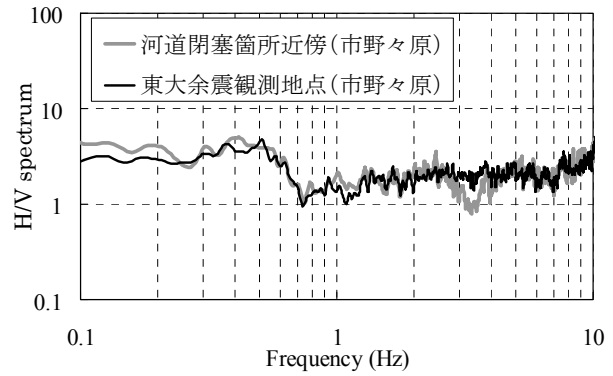


図-3.1.30 H/V スペクトルの比較(市野々原)

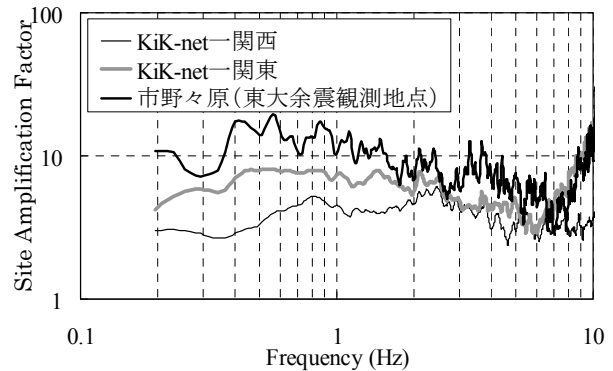
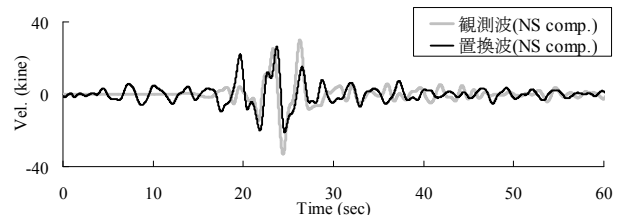
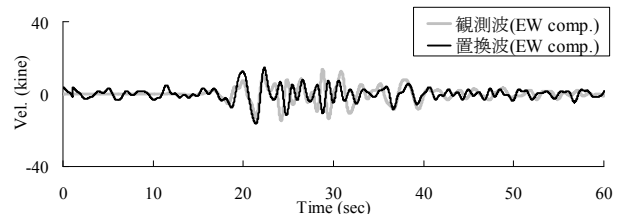


図-3.1.31 サイト増幅特性の評価(市野々原)

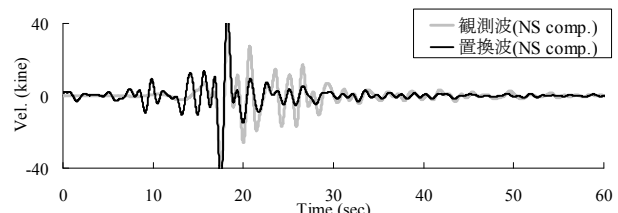


(a) KiK-net 一関東 (NS 成分)

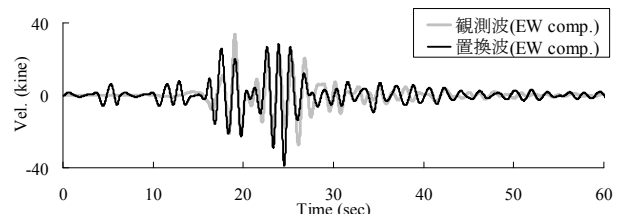


(b) KiK-net 一関東 (EW 成分)

図-3.1.32 2008 年 6 月 16 日 23:18 の余震の位相特性の評価



(a) KiK-net 一関西 (NS 成分)



(b) KiK-net 一関西 (EW 成分)

図-3.1.33 2008 年 6 月 16 日 23:18 の余震の位相特性の評価

参照)。この図より、3G 相当の強震動が得られているが、この結果においては地盤の非線形挙動は考慮されていないことに留意されたい。なお、ここで用いたサイト増幅特性置換手法は、震源モデルの構築という手順を経ることなく地震動の事後推定を行うことが出来るという利点を有している。今回の場合、一迫川流域および二迫川流域での地震動の推定に用いた震源モデルが、市野々原に対しては十分な適用性を有していないと判断されたので、サイト増幅特性置換手法を適用した。サイト増幅特性置換手法の問題点としては、上述のように中小地震のフーリエ位相特性をそのまま用いる方法であるため、本震波形に複数のアスペリティの寄与が表れるような場合に、適用性が低下する可能性が一般的にはあるということが挙げられる。しかしながら、今回の場合、図-3.1.33 に示すように当該地域において本震のフーリエ位相特性と6月16日23時18分の余震のフーリエ位相特性はほぼ同等であると考えられ、今回の場合にはこのことはほとんど問題にならないと考えている。

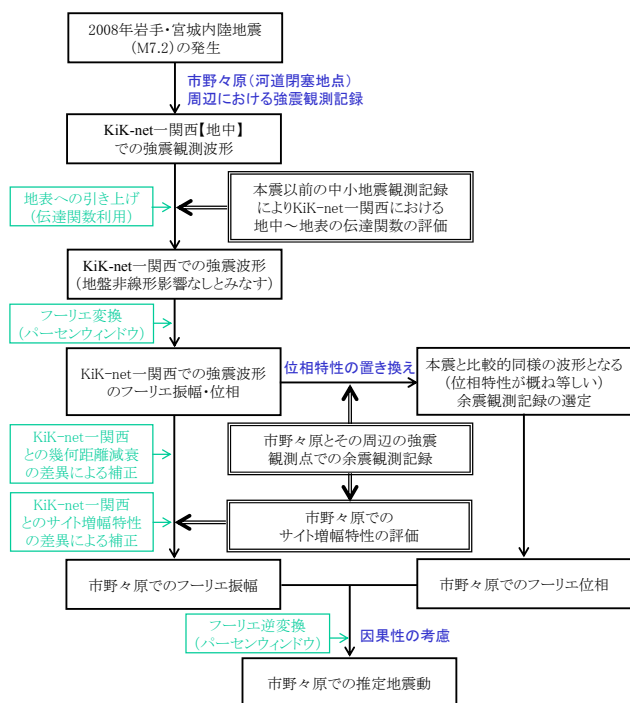


図-3.1.34 サイト特性置換手法による地震動の推定(市野々原)

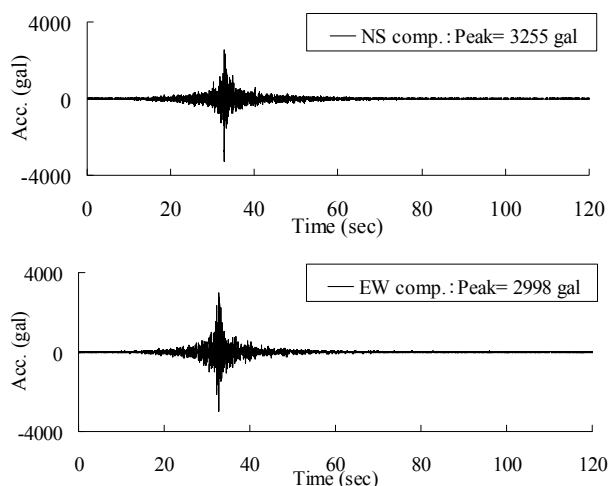


図-3.1.35 推定地震動(市野々原)

(2) まつるべ大橋

図-3.1.36 に検討対象地点であるまつるべ大橋とその周辺の強震観測点の分布を示す。まつるべ大橋の近傍には、KiK-net 一関西が存在し(図-3.1.37 参照)、本震時に非常に大きな強震動が観測されている。図-3.1.38 は、まつるべ大橋(写真-3.1.4 参照)と Hi-net 一関東での2008年7月15日12時58分から2400秒間(40分間)の地表における常時微動の加速度時刻歴であり、当該時間帯においていくつかの小地震が発生している。ここに、Hi-net 一関東における常時微動観測記録は、もともとは地中において得られた速度波形であり、これを加速度波形に変換した後に、地中〜地表の伝達関数(本震以前の中小地震観測記録に基づいて予め算定しておく)を利用して地表の加速度波形に変換したものである。なお、当該時間帯において、まつるべ大橋の最近傍にあたる Hi-net 一関西では、常時微動記録は得られていない。図-3.1.39 は、図-3.1.38 で示した微動時刻歴に対して2120~2220秒間の時間断面を切り出したものであり、ほぼ同時刻にまつるべ大橋と Hi-net 一関東において小地震による観測記録が得られている。図-3.1.40 は、この小地震によるフーリエスペクトルをまつるべ大橋と KiK-net 一関東で比較したものである。この図より、1Hz以上の比較的高周波領域では、まつるべ大橋と KiK-net 一関東でのスペクトルの傾向が概ね類似しているものの、小地震の規模が小さい(マグニチュードは不明)ことに起因して、1Hz未満の比較的低周波の成分はほとんど含まれていない。なお、当該スペクトルは、両地点でのS-P時間と地震基盤での弾性波速度から震源距離の差異を推定し、まつるべ大橋を基準に幾何減衰による補正を施したものである(当該地震の震源位置は知られていないのでこのような形で補正を行った)。図-3.1.41 は、図-3.1.40 で示したフーリエスペクトルの比率(まつるべ大橋/KiK-net 一関東)を計算したものである。ここでは、信頼性に劣る1Hz未満の低周波領域を無視して、1Hz以上の高周波領域でのスペクトル比率を採用した。図-3.1.42 はまつるべ大橋でのサイト増幅特性を評価した結果である。1Hz以上の高周波領域では、KiK-net 一関東とのスペクトル比率に基づいて算定し、1Hz未満の低周波領域では、まつるべ大橋近傍の KiK-net 一関西でのサイト増幅特性¹⁰⁾を採用した。図-3.1.43 は、KiK-net 一関東における本震の位相特性を2008年7月15日13時33分頃の余震(震源位置・マグニチュード不明;図-3.1.39 参照)による位相特性に置換した速度波形(置換波)を本震の速度波形(観測波)と比較したものである。観測波と置換波が概ね類似していることから、対象地域においては、本震の位相特性と7月15日13時33分頃の余震の位相特性とは類似したものであったと言える。そこで、サイト特性置換手法によりまつるべ大橋での地震動を推定する際、まつるべ大橋における7月15日13時33分頃の余震観測記録の位相特性を利用する。図-3.1.44 は、前述したサイト特性置換手法により本震時におけるまつるべ大橋での地震動を推定した結果である。この図より、4G 相当の強震動が得られているが、この結果においては地盤の破壊を含む非線形挙動は考慮されていないことに留意されたい。さらに、上述したとおり1Hz未満の低周波領域では、フーリエ振幅の信頼性が劣ることに留意する必要がある。



図-3.1.36 検討対象地点（まつるべ大橋）

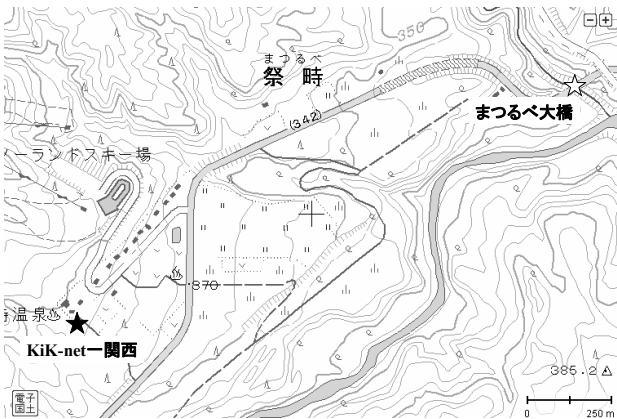


図-3.1.37 まつるべ大橋と KiK-net 一関西との位置関係

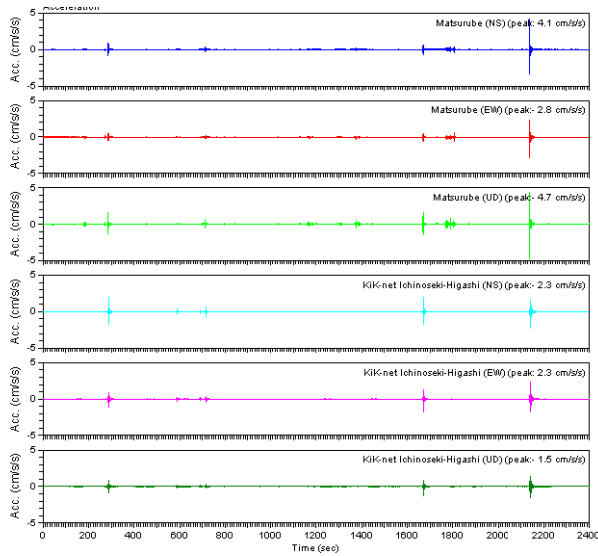


図-3.1.38 まつるべ大橋と Hi-net 一関東での微動の時系列 (2008 年 7 月 15 日 12 時 58 分から 40 分間)



写真-3.1.4 まつるべ大橋での常時微動計測状況 ((株)ニュージェック 山田氏・羽田氏 提供)

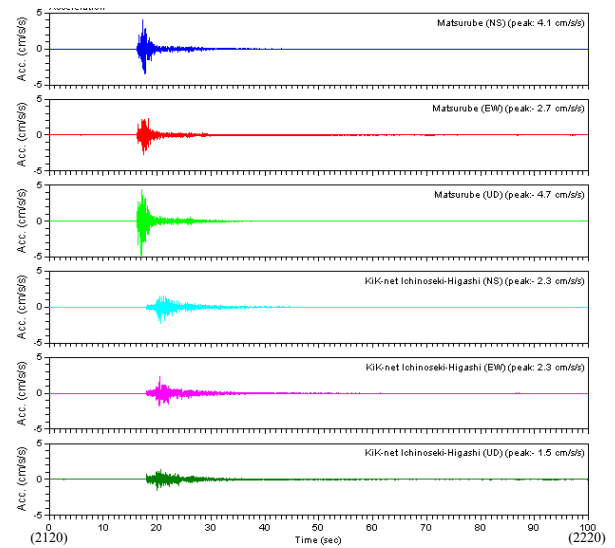
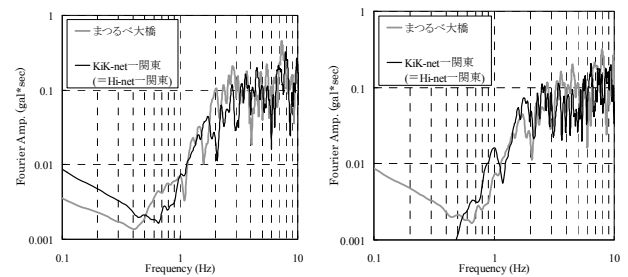


図-3.1.39 まつるべ大橋と Hi-net 一関東での微動の時系列 (2120~2220 秒間；図-3.1.38 の時間断面を切り出し)



(a) NS 成分

(b) EW 成分

図-3.1.40 まつるべ大橋と Hi-net 一関東のフーリエ振幅の比較 (2008 年 7 月 15 日 13 時 33 分頃の余震)

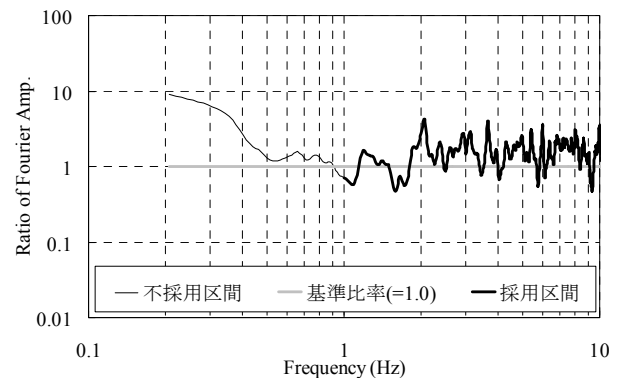


図-3.1.41 フーリエスペクトルの比率 (まつるべ大橋／Hi-net 一関東)

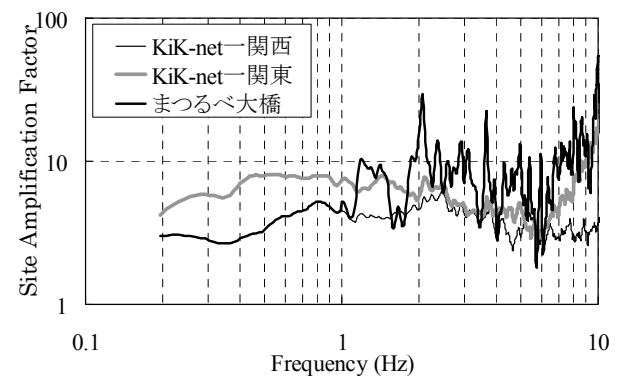
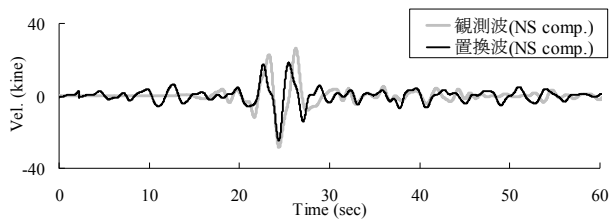
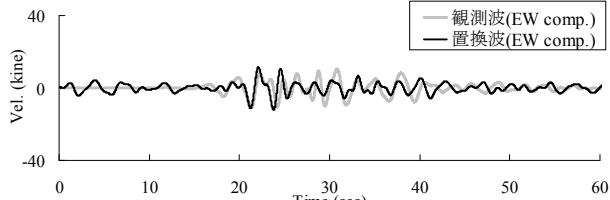


図-3.1.42 サイト増幅特性の評価（まつるべ大橋）

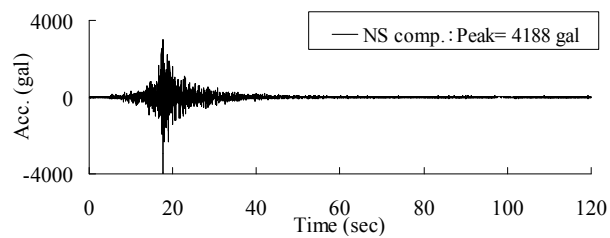


(a) KiK-net 一関東 (NS 成分)

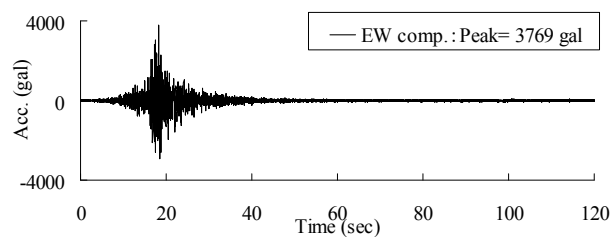


(b) KiK-net 一関東 (EW 成分)

図-3.1.43 2008 年 7 月 15 日 13:33 頃の余震の位相特性の評価



(a) NS 成分



(b) EW 成分

図-3.1.44 推定地震動（まつるべ大橋）

3.1.5 胆沢ダム付け替え道路

(1) 検討対象地点

図-3.1.45 に胆沢ダム付け替え道路とその周辺の強震観測点の分布を示す。胆沢ダム付け替え道路の付近には石淵ダムが存在し、本震の観測記録が得られている。図-3.1.46 には、胆沢ダム付け替え道路における検討対象地点である赤倉大橋、谷子沢大橋、焼石トンネルに対する石淵ダムの位置関係を示す。検討対象地点周辺には、他に既存の強震観測点は少ないことから、石淵ダムでの本震記録をそのまま適用するか、または、サイト特性置換手法²⁾を適用するかについて検討を行った。



図-3.1.45 検討対象地点（胆沢ダム付け替え道路）



図-3.1.46 胆沢ダム付け替え道路の位置関係

(2) 谷子沢大橋・赤倉大橋

谷子沢大橋・赤倉大橋は石淵ダムから約 1km と近いので、地震動に対して影響を及ぼす諸要因のうち震源特性と伝播経路特性は両地点に対してほぼ等しいと考えられる。しかし、距離が近くとも、サイト特性（地盤震動特性）が大きく異なれば、地震動が大きく異なることもある。そこで、今回、谷子沢大橋・赤倉大橋と、強震記録の得られている石淵ダム段丘部において常時微動計測（写真-3.1.5 参照）を実施し、両地点の地盤震動特性に違いが見られるか検討した。その結果、谷子沢大橋・赤倉大橋と石淵ダム段丘部における常時微動 H/V スペクトルの形状やピーク周波数は概ね一致することがわかった（図-3.1.47）。従って両地点の地盤震動特性はほぼ同等であると考えられる。

以上のことから、谷子沢大橋・赤倉大橋での推定地震動として、石淵ダム段丘部での本震記録（図-3.1.48）を用いることができると考えられる。



(a) 石淵ダム段丘部周辺 (b) 谷子沢大橋・赤倉大橋

写真-3.1.5 常時微動計測状況（谷子沢大橋・赤倉大橋）

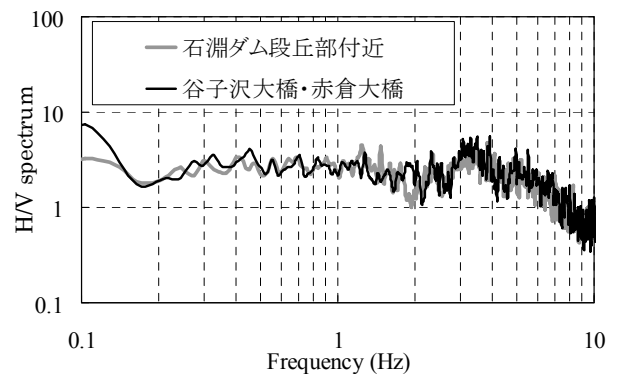


図-3.1.47 H/V スペクトルの比較（谷子沢大橋・赤倉大橋）

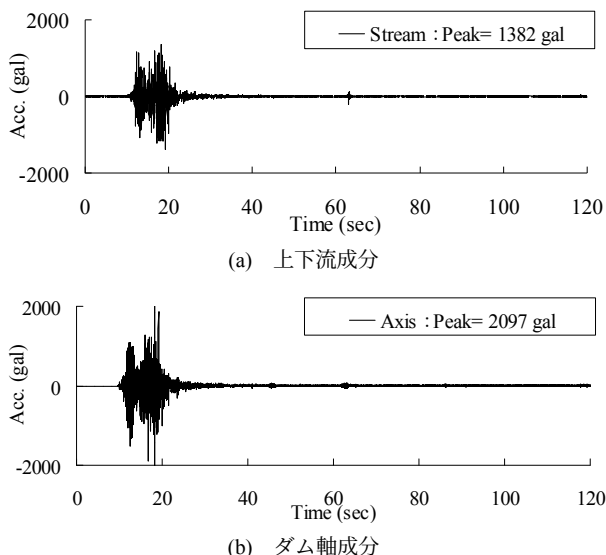


図-3.1.48 推定地震動（谷子沢大橋・赤倉大橋）

(3) 焼石トンネル

図-3.1.49 に検討対象地点である焼石トンネルとその周辺の強震観測点の分布を示す。焼石トンネルの地盤震動特性を強震記録の得られている石淵ダム段丘部および KiK-net 金ヶ崎と比較するため、先ほど紹介した石淵ダム段丘部に加え、焼石トンネル西側ならびに東側出口付近および KiK-net 金ヶ崎において常時微動計測(写真-3.1.6 参照)を実施した。図-3.1.50 には、各計測地点での常時微動に対する H/V スペクトルを比較したものを示す。この図より、焼石トンネル西側出口と東側出口では、H/V スペクトルの特性が類似しており、焼石トンネルでの地盤震動特性(サイト特性)は、1 つで代表できる可能性が高いことが読み取れる。一方で、焼石トンネルでの H/V スペクトルの特性と、周辺の強震観測点である石淵ダム段丘部および KiK-net 金ヶ崎の H/V スペクトルの特性を比較した場合、類似しているとは言えない。つまり、焼石トンネルでのサイト特性として石淵ダム段丘部や KiK-net 金ヶ崎のものを補正することなくそのまま利用することは難しい。

図-3.1.51 は、焼石トンネル東側出口付近と Hi-net 金ヶ崎(=KiK-net 金ヶ崎)での地表における常時微動の加速度時刻歴であり、当該時間帯において小地震(2010 年 1 月 14 日 17 時 51 分頃発生した岩手県内陸北部の地震(M2.6): 図-3.1.52 参照)が発生していることが読み取れる。ここに、Hi-net 金ヶ崎における常時微動観測記録は、もともとは地中において得られた速度波形であり、これを加速度波形に変換した後に、地中～地表の伝達関数(本震以前の中小地震観測記録に基づいて予め算定しておく)を利用して地表の加速度波形に変換したものである。なお、当該時間帯において、焼石トンネルの最近傍にあたる石淵ダム段丘部では、常時微動記録は得られていない。図-3.1.53 は、当該小地震によるフーリエスペクトルを焼石トンネルと KiK-net 金ヶ崎で比較したものである。この図より、約 1Hz 以上の比較的高周波領域では、焼石トンネルと KiK-net 金ヶ崎でのスペクトルの傾向が概ね類似しているものの、小地震の規模が小さい(マグニチュード M2.6)ことに起因して、約 1Hz 未満の低周波数側では観測精度は十分でないと考えられる。

なお、当該スペクトルは、焼石トンネルを基準として両地点の幾何減衰の差異による補正を施したものである。図-3.1.54 は、図-3.1.53 で示したフーリエスペクトルの比率(焼石トンネル/KiK-net 金ヶ崎)を計算したものである。ここでは、信頼性が十分でない判断した 1.3Hz 未満の低周波領域を無視して、1.3Hz 以上の高周波領域でのスペクトル比率を採用した。図-3.1.55 は、焼石トンネルでのサイト増幅特性を評価した結果である。1.3Hz 以上の高周波領域では、KiK-net 金ヶ崎とのスペクトル比率に基づいて算定し、1.3Hz 未満の低周波領域では、焼石トンネル近傍の石淵ダム段丘部でのサイト増幅特性を採用した。なお、石淵ダム段丘部でのサイト増幅特性は石淵ダム段丘部における強震記録に基づいて設定した。

以上の情報をもとに、サイト特性置換手法により、石淵ダム段丘部での本震時の強震観測記録から焼石トンネルでの本震時の地震動を推定した。その際、フーリエ位相については、現地での適切な地震観測記録が得られていないことから、2008 年 6 月 14 日 9 時 52 分頃の余震(M4.6)による石淵ダム段丘部での観測記録を採用した。結果を図-3.1.56 に示す。この図より、1G を超える推定強震動が得られている。ただし、上述したとおり約 1.3Hz 未満の低周波領域では、フーリエ振幅の信頼性が劣ることに留意する必要がある。一方、フーリエ位相特性については、6 月 14 日 9 時 52 分頃の余震の記録を用いることに関しては、この余震記録を用いたサイト特性置換手法による石淵ダム段丘部での本震時の地震動の推定結果(KiK-net 金ヶ崎での本震記録をもとにしたもの)が観測結果と良く一致することから妥当であると考えられるが、石淵ダム段丘部での記録をサイト特性の異なる焼石トンネルでの地震動の推定に適用している点で課題が残されている。



図-3.1.49 検討対象地点(焼石トンネル)

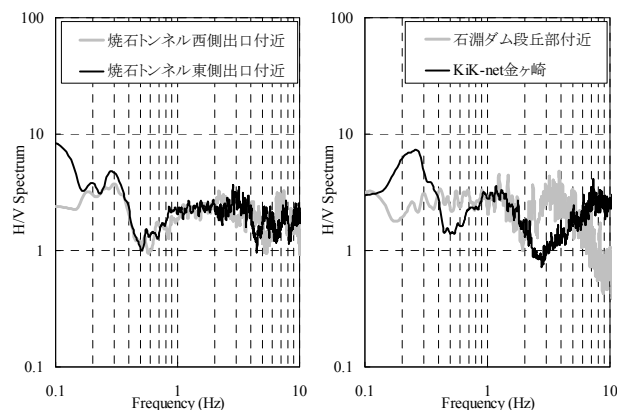


図-3.1.50 H/V スペクトルの比較(焼石トンネル)



(a) 西側出口付近 (b) 東側出口付近
写真-3.1.6 常時微動計測状況(焼石トンネル)

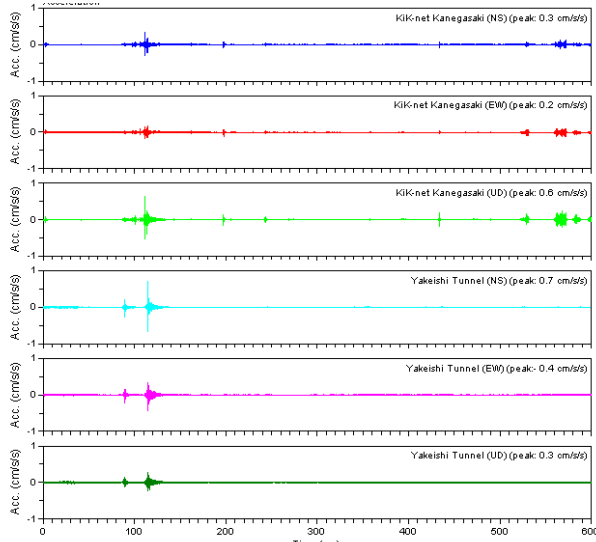


図-3.1.51 常時微動の時刻歴の比較
(焼石トンネルと Hi-net 金ヶ崎)

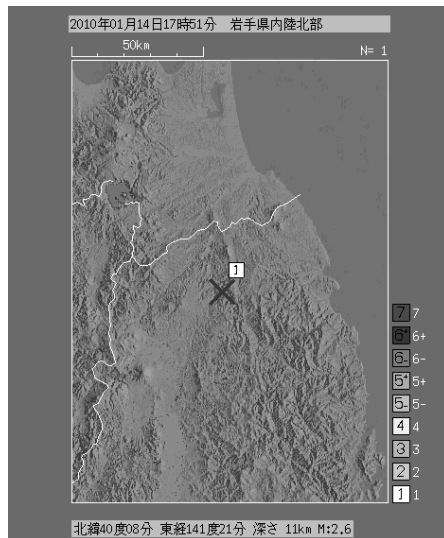
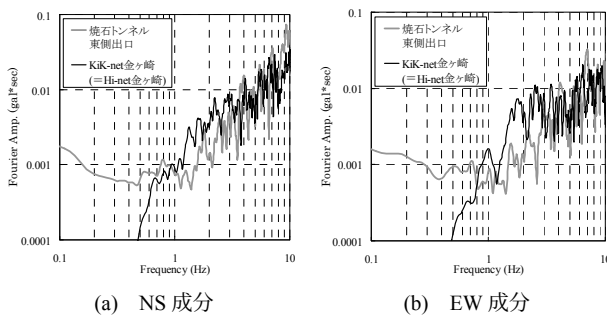


図-3.1.52 焼石トンネルでの常時微動計測時に発生した地震



(a) NS 成分 (b) EW 成分
図-3.1.53 焼石トンネルと Hi-net 金ヶ崎のフーリエ振幅の比較
(2010 年 1 月 14 日 17 時 51 分頃の地震)

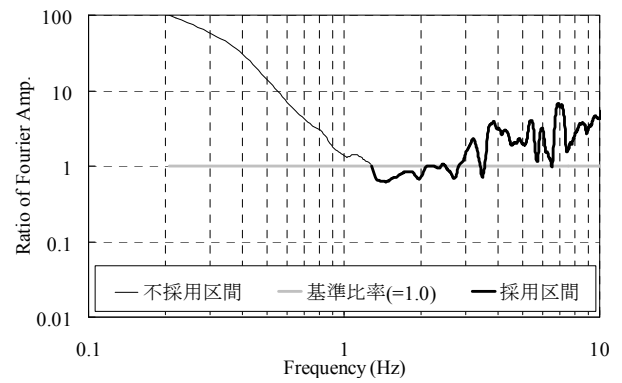


図-3.1.54 フーリエスペクトルの比率
(焼石トンネル/Hi-net 金ヶ崎)

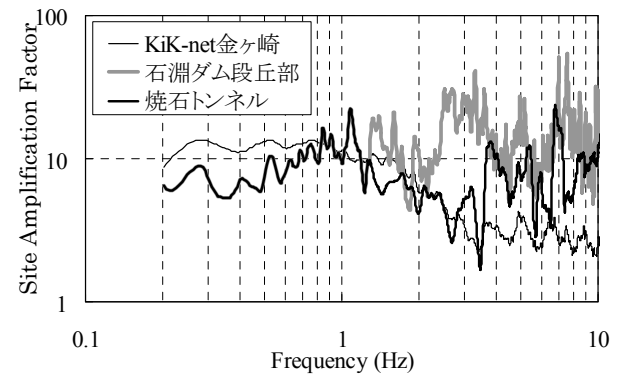
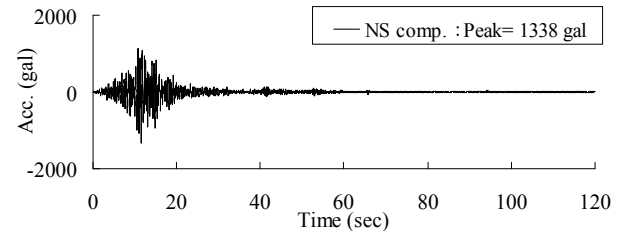
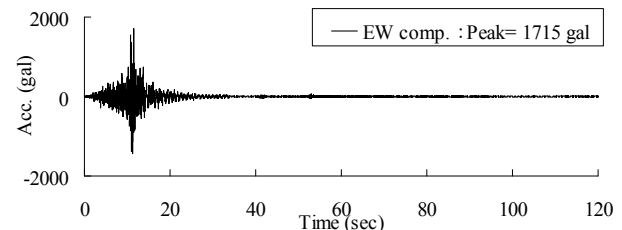


図-3.1.55 サイト増幅特性の評価(焼石トンネル)



(a) NS 成分



(b) EW 成分

図-3.1.56 推定地震動(焼石トンネル)

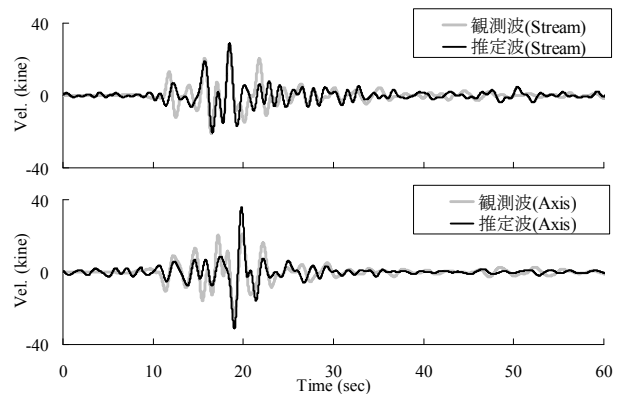


図-3.1.57 サイト特性置換手法の適用性確認(石淵ダム段丘部)

3.1.6 まとめ

本節では、2008 年岩手・宮城内陸地震の震源近傍の被災地域などにおける地震動を強震波形計算¹⁾やサイト特性置換手法²⁾などを用いて推定した結果を報告した。

サイト特性の差異などに起因して中山間地域における被災地点での地震動にかなり大きな地点間の差異が生じている可能性が高いことを示した。これは、単純な距離減衰式などで被災地域の地震動を推定することが困難であることを示唆するものである。本節で示したように、地震観測記録や微動観測記録を利用して被災地域の地震動を推定するための技術が確立してきたので、大地震後に被災地域において余震観測¹⁵⁾を行うことの意義はこれまで以上に明確になったと考えている。特に、地震後の早い時期に余震観測を行うことは、精度の良い観測記録を短期間に多数取得することにつながるので、有意義であると考えられる。また、地震動の事後推定を行う場合だけでなく、構造物の耐震設計のために想定地震による地震動を評価しようとする場合にも、サイト特性をできるだけ正確に評価結果に反映させることは重要である。本節の結果は、構造物の建設予定地点における中小地震観測の推進^{16),17)}の必要性についても示唆している。なお、本検討は、限られた調査期間内に得られた知見に基づいて実施したものであり、検討対象地点での与条件(余震観測の有無など)に起因して、推定地震動の信頼性に優劣があることに留意する必要がある。今後、中小地震観測を実施し、サイト特性を再評価するなどして、推定地震動の精度を高めていく取組みが必要である。

謝辞

ここでは、多くの機関が実施した強震観測記録、余震観測記録および常時微動計測記録を利用させていただきました。まず、独立行政法人防災科学技術研究所の強震観測網 K-NET, KiK-net および Hi-net のデータを使わせて頂きました。市野々原での強震動評価は、三宅弘恵准教授(東京大学地震研究所)よりご提供いただいた一関市蔵美町字板川(観測点コード: ITG000)での余震観測記録に基づいて実施させていただきました。盛川仁准教授(東京工業大学大学院)および後藤浩之助教(京都大学防災研究所)には、矢櫃ダム周辺での地震観測記録をご提供いただきました。また、まつるべ大橋での強震動評価では、(社)土木学会地震被害調査委員会の活動の一環として実施したまつるべ大橋での常時微動計測記録を山田雅行氏および羽田浩二氏((株)ニュージェック)よりご提供いただきました。先名重樹博士((独)防災科学技術研究所)には、まつるべ大橋の右岸部および左岸部などでの常時微動計測結果をご提供いただきました。さらに、吉見雅行博士((独)産業技術総合研究所)には、2008 年岩手・宮城内陸地震の震源近傍での余震観測に関する情報を提供していただきました。深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 野津厚, 長尾毅, 山田雅行: 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法の改良-因果性を満足する地震波の生成-, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.3, pp.808-813, 2009.

- 2) 秦吉弥, 一井康二, 野津厚: 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した八戸市簗子渡における強震動の推定, 地盤と建設, Vol.27, No.1, 2009.
- 3) 秦吉弥, 大角恒雄, 野津厚: 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法に基づく 2008 年岩手・宮城内陸地震における温湯温泉での地震動の推定, 土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集, I-331, pp.661-662, 2009.
- 4) 秦吉弥, 大角恒雄, 野津厚, 釜井俊孝: 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法に基づく 2008 年岩手・宮城内陸地震における荒砥沢地すべり地での地震動の推定, 日本地すべり学会誌, 2010.(投稿中)
- 5) 野津厚: 2008 年岩手・宮城内陸地震の震源モデル-デジタルデータ付き-, 港湾空港技術研究所地盤・構造部耐震構造研究チーム研究ノート, Vol.30, 2008.
http://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bsi/taisin/research_jpn/research_jpn_2008/japanese_research_30.html
- 6) 佐藤智美, 巽誉樹: 全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性, 日本建築学会構造系論文集, Vol.556, pp.15-24, 2002.
- 7) 古和田明, 田居優, 岩崎好規, 入倉孝次郎: 経験的サイト増幅・位相特性を用いた水平動および上下動の強震動評価, 日本建築学会構造系論文集, Vol.512, pp.97-104, 1998.
- 8) 野津厚, 盛川仁: 表層地盤の多重非線形効果を考慮した経験的グリーン関数法, 地震, 第 2 輯, Vol.55, pp.361-374, 2003.
- 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手法-因果性と多重非線形効果に着目した改良-, 港湾空港技術研究所資料, No.1173, 2008.
- 10) 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.
- 11) 野津厚, 山田雅行, 長尾毅: 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した盆地生成表面波のシミュレーション-九州地方のカルデラを例として-, 土木学会論文集 A, Vol.62, No.4, pp.891-905, 2006.
- 12) 釜井俊孝: 平成 20 年(2008 年)岩手・宮城内陸地震による斜面災害, 自然災害科学, Vol.27, No.2, pp.189-198, 2008.
- 13) 木村武志, 竹本帝人, 塚越大, 坂上実, 三宅弘恵, 瀧一: 2008 年岩手宮城内陸地震における震源近傍の強震動, 日本地震学会講演予稿集 2008 年秋季大会 (Programme and Abstracts, The 7th General Assembly of Asian Seismological Commission and the 2008 Fall Meeting of Seismological Society of Japan), X1-022, 2008.
- 14) Aoi, S., Kunugi, T. and Fujiwara, H.: Trampoline effect in extreme ground motion, *Science*, Vol.322, pp.727-730, 2008.
- 15) たとえば, 秦吉弥, 大角恒雄, 野津厚: 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法に基づく 2007 年能登半島地震における能登空港での強震動推定に関する試み, 第 44 回地盤工学研究発表会講演論文集, No.753, pp.1505-1506, 2009.

- 16) 野津厚：重要構造物の建設予定地点における地震観測を推進しよう，土木学会第 62 回年次学術講演会，土木学会研究討論会講演概要集，2007.
- 17) 野津厚：地震動の新しい考え方，基礎工，Vol.37, No.9, pp.9-12, 2009.