

北陸地方のK-NET, KiK-net観測点における サイト特性と地形分類, 標高との対応

西川 隼人¹・宮島 昌克²

¹正会員 舞鶴工業高等専門学校 (〒625-8511 京都府舞鶴市宇白屋234)

²正会員 金沢大学大学院教授 自然科学研究科 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

本論文では北陸地方のK-NET, KiK-net観測点を対象にサイト特性を求め、標高や地形分類などの地盤条件との対応を調べた。まず、得られた各観測点のサイト特性と標高の相関を調べたところ、対象とする振動数が低いほど両者の相関が高い傾向が見られた。観測点を地形分類ごとに分類し、サイト特性の平均値を求めたところ、丘陵に分類された観測点では1~3Hzで増幅が大きくなり、また、後背湿地と三角州・海岸低地の平均的サイト特性では4Hzよりも低振動数で増幅が大きかった。最後に地形分類ごとのサイト特性の変動係数を求めたところ、山地や丘陵、後背湿地では全体的に変動係数が小さい傾向にあり、砂礫質台地や谷底低地では振動数によっては変動係数が大きかった。

Key Words :Hokuriku region,K-NET, KiK-net, site effect, topographical classification, altitude

1. 序論

著者ら¹⁾は北陸地方の観測点を対象に地盤条件とサイト特性の関係を調べている。地盤条件を表すパラメータとして、地盤の卓越周期と表層地盤の平均S波速度を用いており、これらの地盤条件と周期1秒前後のサイト特性の平均値の間に良好な相関関係があることを示している。上記の研究では地盤条件とサイト特性の関係を調べる際に周期1秒前後のみを解析対象としているが、地震動予測においてはもっと広い周期帯におけるサイト特性を評価することが望ましい。

本論文では北陸地方のK-NET, KiK-net観測点を対象に周期1秒前後だけでなく、より広い周期帯を対象にサイト特性と地盤条件の対応を検証した。観測点のサイト特性評価において、既往研究²⁾では石川、福井両県のK-NET, KiK-net観測点のみを解析対象としていたのに対し、本論文では富山県や岐阜県の観測点も解析対象地点に含めた。地盤条件として若松ら³⁾が全国を対象にまとめた地形・地盤メッシュマップの地形分類データを用いて、地形分類によるサイト特性の傾向を評価した。また、地盤条件を表すパラメータとして各観測点の標高を用い、サイト特性との関係を調べた。

2. 解析データ

ここでは今回、解析対象とした地震の諸元や対象とした観測点、解析データ数に関して説明する。

(1) 解析対象地震

本論文では北陸地方周辺で発生した地震を解析対象地震とした。対象とした地震には福井県や福井、石川県の県境付近の地域、石川県の西方沖の他に、能登地方で発生した地震が含まれている(図-1)。表-1にあるように解析対象とした地震は1997~2005年に発生した23地震であり、地震のマグニチュード M_{JMA} は3.6~6.2、震源深さは6~24kmである。

(2) 観測点

対象とした観測点は福井県嶺北地方、石川県、富山県や岐阜県の一部の地域に位置している(図-2)。解析対象とした観測点の条件として、表-1に示す地震で3つ以上の地震記録が得られている観測点とした。福井県嶺北、石川県では全てのK-NET, KiK-net観測点で上記の条件を満たしたが、富山県、岐阜県の観測点は対象とした地震の震源からの距離が遠いため、地震波形が記録されにく

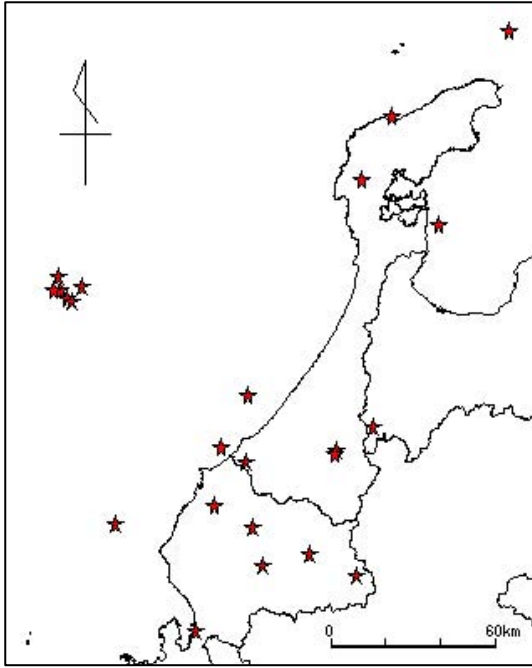


図-1 震央位置

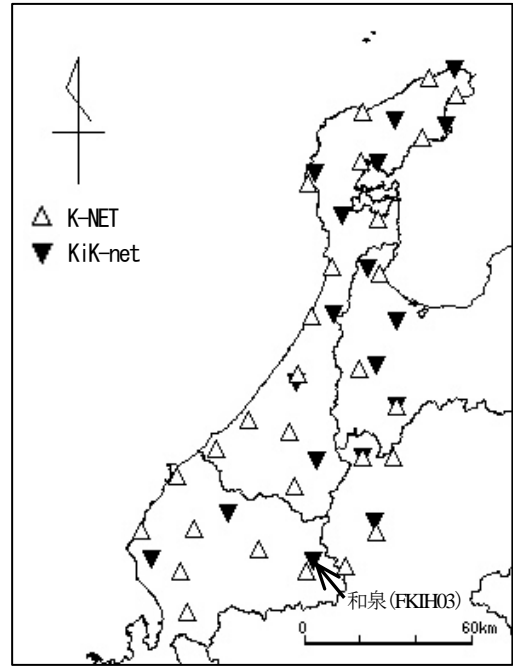


図-2 対象観測点

く、3つ以上の記録が得られている観測点が少なかった。対象とした観測点数はK-NET, KiK-netでそれぞれ28地点、18地点であり、地震記録の総数は403である。

3. 解析手法, 及び, 地盤条件とサイト特性の関係

本章ではサイト特性の評価手法, 及び, 解析結果について述べる。解析結果の考察においては, 対象観測点の標高とサイト特性の関係を調べるとともに, 地形分類ごとの平均的なサイト特性とばらつきを評価した。

(1) 解析手法

地震動スペクトルからサイト特性を抽出するために, 二段階回帰分析⁹⁾の手法を用いて諸特性を抽出した。解析においては, 地震動のS波部分の加速度フーリエスペクトルを対象とし, 振動数 f に対応する加速度フーリエスペクトルの常用対数(式(1)の左辺の項)が次式のように表されるものと仮定した。

$$\log A_{ij}(f) = S_i(f) - \log R_{ij} + b(f)R_{ij} + \sum_{k=1} \delta_{kj} g_k(f) \quad (1)$$

$A_{ij}(f)$ は i 番目の地震における j 番目の観測点の加速度フーリエスペクトルである。 $S_i(f)$ は i 番目の地震の震源特性を表わす係数, R_{ij} は i 番目の地震における j 番目

の観測点の震源距離(km)である。 $b(f)$ は距離減衰を表わす係数, $g_k(f)$ は k 番目の観測点のサイト係数, δ_{ij} はクロネッカーのデルタであり, $k=j$ の場合は1,それ以外では0である。 $A_{ij}(f)$ はS波到達から10秒間の区間を切り出し計算した。波形を切り出す際には両端にコサインテーパーを施したウィンドウをかけた。振動数領域においては0.5~10Hzを対象とし,バンド幅0.4HzのParzenウィンドウを用いてスペクトルを平滑化し,水平2成分をベクトル合成して解析に用いた。回帰分析によって式(1)の係数を求める際に基準となる観測点のサイト特性を固定して,各回帰係数を求めた。基準観測点としてKiK-net観測点の和泉(観測点コードFKIH03)を選んだ。この観測点は地表にS波速度400m/sの層が露頭している堅固な地盤である。拘束条件として,鶴来⁴⁾の手法から評価したサイト特性を用いた(図-3)。鶴来⁴⁾の手法によってサイト特性を評価する際に必要となるパラメータ(地震モーメント,コーナー振動数, Q_s 値)は既往の研究⁵⁾と同様の方法で設定した。対象とした地震は,福井県と石川県で発生した地震である。

(2) サイト特性と標高の関係

観測点 k のサイト特性 $G_k(f)$ は $10^{g_k(f)}$ で定義される。ある振動数帯におけるサイト特性の平均値の分布図の一例を図-4に示す。同図から明らかなように7~10Hzを対象とした場合はほとんどの観測点でサイト特性の平均値が2~5であり,2以下の観測点は石川県などの県境付近に集中している。サイト特性平均値が7以上の地点

表-1 地震の諸元

	日付	M _{JMA}	緯度 (° N)	経度 (° E)	深さ (km)
1	1997/12/19	4.5	36.32	136.22	13
2	1998/11/16	4.8	37.67	137.42	12
3*	1999/11/7	5.0	36.06	135.79	15
4	2000/3/24	4.2	35.91	136.75	9
5*	2000/6/5	4.9	35.72	136.11	9
6*	2000/6/7	6.2	36.83	135.56	21
7	2000/6/13	4.3	36.81	135.59	20
8	2000/6/22	4.6	36.83	135.54	13
9	2001/1/22	3.7	37.20	136.79	18
10	2001/4/6	4.2	36.88	135.54	14
11	2001/4/14	3.8	37.05	137.10	19
12	2001/6/13	4.5	36.82	135.60	20
13	2002/4/22	3.5	36.39	136.83	11
14*	2002/8/18	4.7	36.13	136.18	11
15*	2002/9/8	4.2	35.97	136.57	10
16	2002/11/15	3.6	36.31	136.68	8
17*	2002/11/17	4.7	36.30	136.67	8
18*	2003/2/11	3.9	36.06	136.34	6
19	2003/2/22	3.6	36.49	136.32	17
20	2003/6/5	4.1	36.27	136.31	12
21	2003/10/12	4.7	36.85	135.64	24
22*	2004/10/5	4.8	35.93	136.38	12
23	2005/3/31	3.9	37.41	136.91	11

* : FKI03のサイト特性評価の際に対象とした地震

は内浦(観測点コードISKH03), 穴水(ISKH05)である。ISKH05ではS波速度構造が公開されていないが, ISKH03で速度構造が公開されており, 地表から深さ2mまではS波速度が110m/s, 深さ2~10mまでは200m/sの層が堆積している。ISKH03ではこのような表層地盤の影響で高振動数でのサイト特性が大きくなったと考えられる。対象振動数が0.5~1Hzの場合は能登地方の海岸に近く標高の低い観測点でサイト特性平均値が大きい傾向にある。図-5に標高とサイト特性の平均値の一例を, 図-6にある振動数帯ごとの標高とサイト係数平均値の決定係数を示す。図-6から明らかなように振動数が低いほど標高とサイト係数平均値の相関が高い傾向にある。一般的に標高が低い地点ほど基盤までの深度が大きく, 低振動数におけるサイト特性が大きくなると推測される。そのために対象とする振動数が低いほど標高とサイト係数の相関が高くなっていると考えられる。

(3) 地形分類ごとのサイト特性の特徴

ここでは得られたサイト特性の地盤条件による定性的

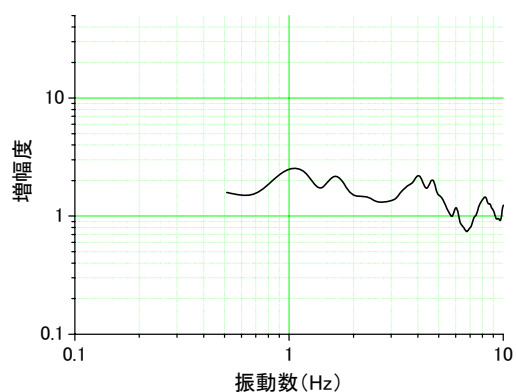
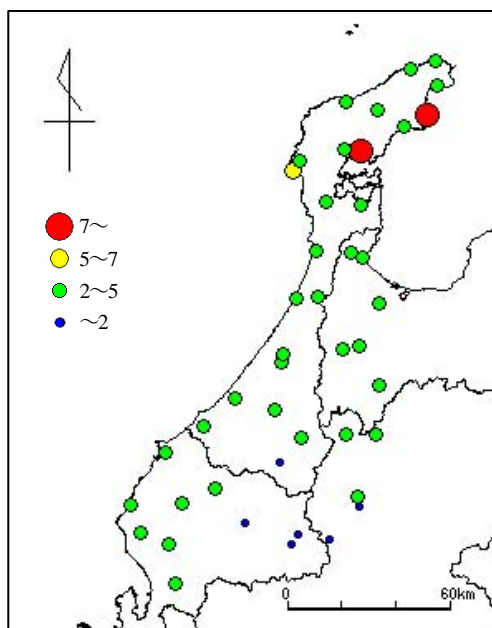
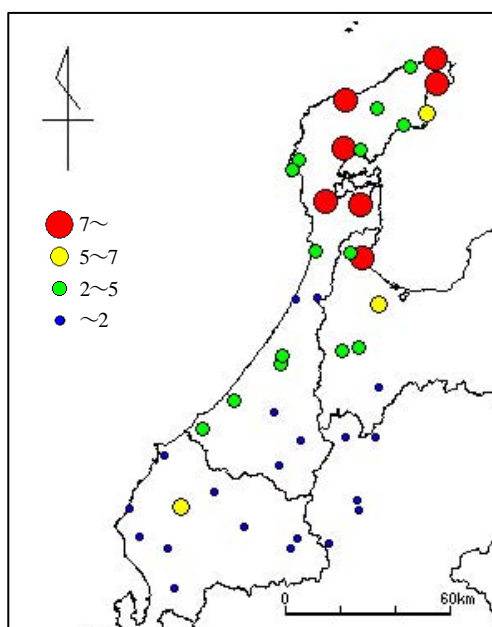


図-3 和泉(FKI03)のサイト特性



(1) 7~10Hz



(2) 0.5~1Hz

図-4 サイト特性平均値の分布図

な傾向を調べるために、若松らが全国を対象にまとめた地盤・地形メッシュマップ³⁾のデータに基づき地形分類ごとにサイト特性を分類し、各分類の平均的なサイト特性を求めた(図-7)。観測点数が1つの地形分類を除いて、各地形分類のサイト特性平均値の特徴を見ると山地や砂礫質台地、扇状地などではいずれの振動数でも増幅度が小さく、丘陵では1~3Hzで増幅が大きい。また、後背湿地と三角州・海岸低地の平均的なサイト特性では4Hzよりも低振動数で増幅度が大きい。

地盤構造がサイト特性に及ぼす影響を調べるために、後背湿地と三角州・海岸低地に分類された観測点において表層地盤の最下層のS波速度が300m/s程度以上の層が存在する観測点のみを対象にしてS波伝達関数を求めた(図-8)。伝達関数算出の際に参考としたS波速度構造を図-9に示す。S波伝達関数の1次固有振動数が1~4Hz付近に存在していることから、対象観測点では表層地盤の影響によって1~4Hzでの増幅が大きくなったと考えられる。S波伝達関数を求めた観測点の表層20mの平均S波速度は100~230m/s程度であり、伝達関数評価の対象としなかった観測点の表層20mの平均S波速度は対象とした観測点と同程度である(100~150m/s程度、図-10)。なお、図-10に示す観測点では深さ20mまでにS波速度が300m/s以上の層は存在していない。以上の考察から、伝達関数評価の対象としなかった観測点でも表層地盤の影響で4Hzよりも低振動数で増幅度が大きくなったものと推測される。丘陵に分類された観測点では4地点中、2地点でしかボーリングデータが公開されていないので、地盤構造のサイト特性への影響を評価しなかった。これらの観測点のサイト特性と地盤構造の関係についての検証は今後の課題としたい。

続いて、地形分類ごとのサイト特性のばらつきを調べるために観測点が複数の地形分類におけるサイト特性の変動係数を求めた(図-11)。山地は全体的に変動係数が小さく、振動数による変動も小さい。対象振動数では増幅度が大きくなかったために、変動係数が小さかったと考えられる。また、振動数によって差があるものの、丘陵、後背湿地でも全体的に変動係数が小さい傾向にある。これらの地形分類では観測点のサイト特性の形状が似ており、増幅度にも大きな違いが見られなかった。そのため、変動係数が小さかったものと考えられる。一方、砂礫質台地や谷底低地では振動数によっては変動係数が大きい。砂礫質台地ではISKH05とISKH06、谷底低地ではISK003やISKH03のように特定の振動数で増幅度の大きい観測点が含まれており、これらの観測点の影響で変動係数の大きい振動数帯が見られたものと考えられる(図-12)。なお、上述のサイト特性のばらつきの傾向が他地域の観測点でも見られるかどうかについては今後、検証

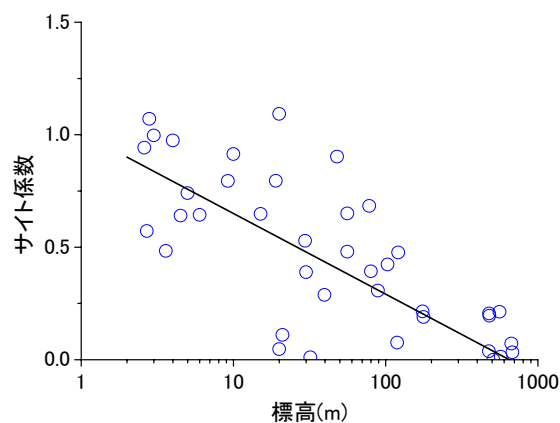


図-5 標高とサイト係数平均値の関係(0.5-1Hz)

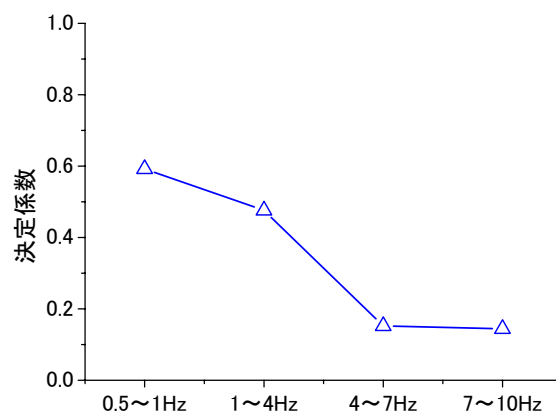


図-6 振動数ごとの標高とサイト係数平均値の決定係数

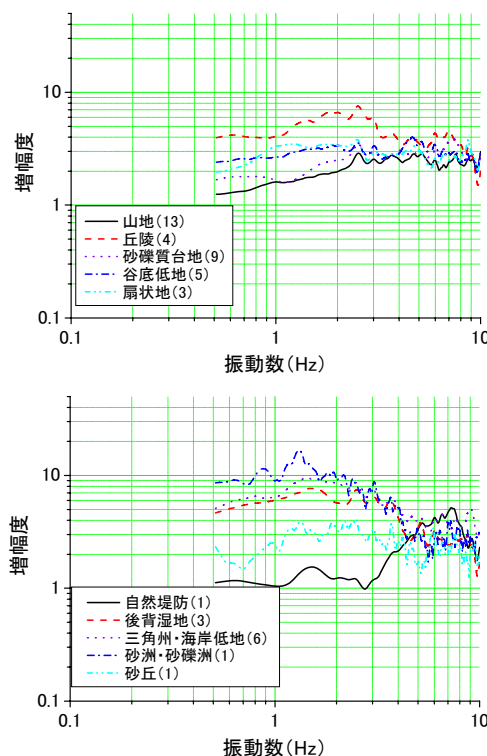


図-7 地形分類ごとの平均的なサイト特性(図中の凡例の数字は分類ごとの観測点数を示す)

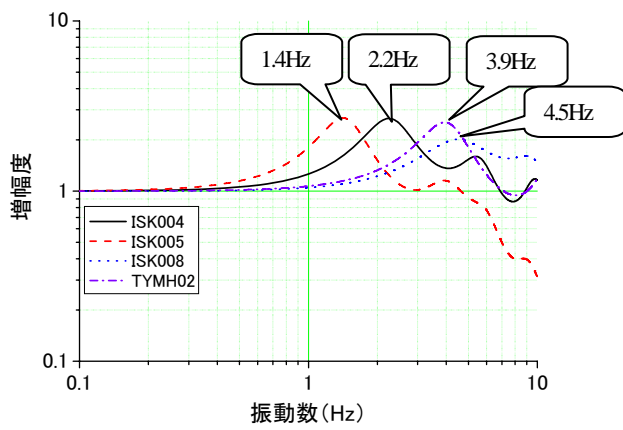


図-8 S波伝達関数(TYMH02以外は三角州・海岸低地の観測点)

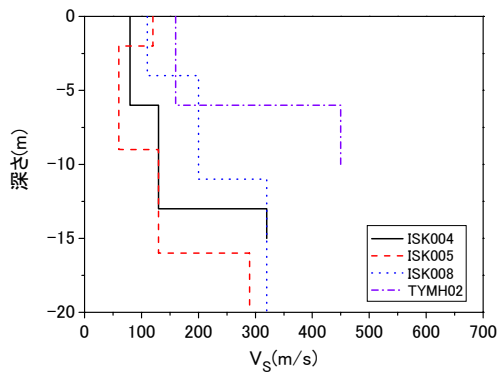


図-9 S波速度構造

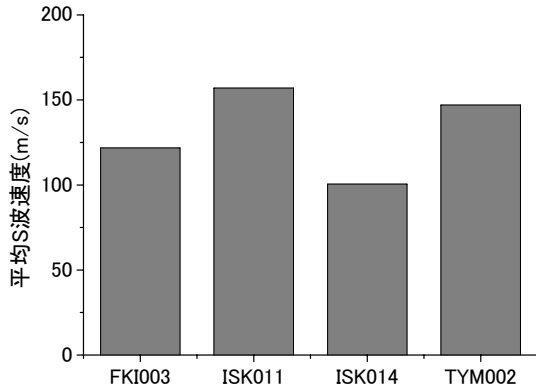


図-10 三角州・海岸低地, 後背湿地に分類された観測点における表層20mの平均S波速度

する必要がある。

以上のように地形分類によってはサイト特性に大きなばらつきが見られた。地盤条件による定性的な傾向を見るだけならば、分類ごとの平均的なサイト特性を評価するだけで十分であると考えられるが、地盤条件から面的にサイト特性を評価する場合には標高などのパラメータを導入して、地形分類ごとのサイト特性のばらつきを減じる必要がある。今回は地形分類ごとの観測点数が十分でなかったため、分類ごとに標高とサイト特性の関係を

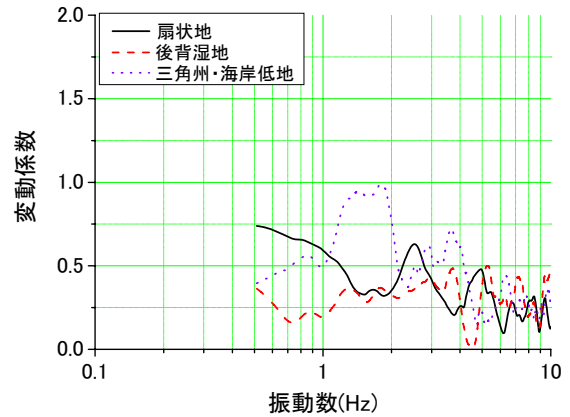
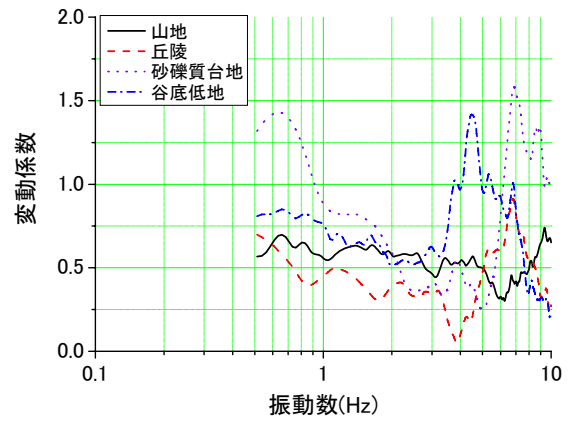
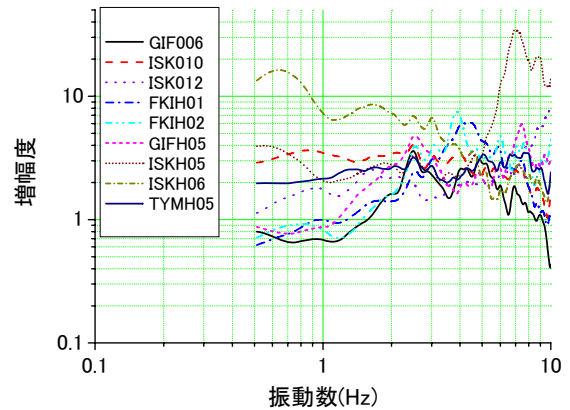
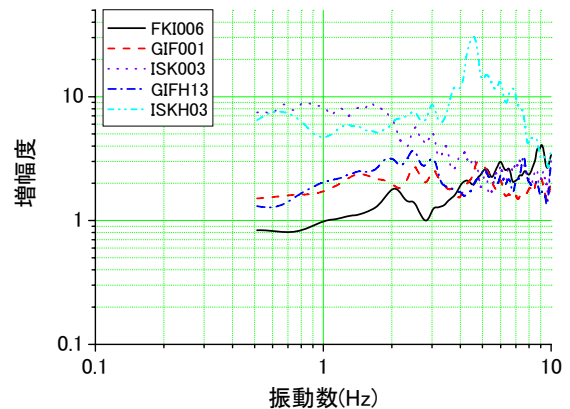


図-11 地形分類ごとのサイト特性の変動係数



(1) 砂礫質台地



(2) 谷底低地

図-12 各分類のサイト特性

調べなかったが、今後は対象範囲を広げたり、気象庁観測点などを対象観測点に加えることにより、解析の対象とする観測点数を増やし、標高などのパラメータとサイト特性の関係を検証していくつもりである。

4. 結語

本研究では北陸地方のK-NET, KiK-net観測点を対象に広域的なサイト特性の評価のために、地形分類や標高などの地盤条件と各観測点のサイト特性の関係を調べた。その結果、対象とする振動数が低いほどサイト特性と標高の相関が高い傾向が見られた。標高が低い地点ほど基盤までの深度が大きく、低振動数におけるサイト特性が増幅され易いと推測される。そのために対象とする振動数が低いほど標高とサイト係数の相関が高くなったと考えられる。

得られたサイト特性の地盤条件による定性的な傾向を調べたために、地形分類メッシュのデータに基づき地形分類ごとの平均的なサイト特性を求めた。その結果、丘陵に分類された観測点では1~3Hzで増幅が大きく、また、後背湿地と三角州・海岸低地の平均的なサイト特性では4Hzよりも低振動数で増幅度が大きかった。後背湿地や三角州・海岸低地に分類された観測点では表層地盤構造の影響によって、4Hzよりも低振動数でサイト特性が大きくなったことが明らかになった。

最後に地形分類ごとのサイト特性のばらつきを表す変動係数を求めたところ、山地や丘陵、後背湿地では全体的に変動係数が小さい傾向にあり、砂礫質台地や谷底低地では振動数によっては変動係数が大きかった。

このように、地形分類によってはサイト特性のばらつきが大きいことが明らかになった。地盤条件から面的に

サイト特性を評価するために標高などのパラメータを導入して、地形分類ごとのサイト特性のばらつきを減じる必要がある。今回は観測点数が十分でないため、地形分類ごとに標高とサイト特性の関係を評価しなかったが、今後は解析対象観測点の数を増やし、地形分類ごとに標高などの地盤条件を表すパラメータとサイト特性の関係を検証していく予定である。

謝辞：解析には独立行政法人 防災科学技術研究所のK-NET, KiK-netの観測記録を使用させて頂きました。また、一部の図の作成の際に埼玉大学の谷謙二先生が開発された地理情報分析支援システムMANDARAを使用させて頂きました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 西川隼人, 宮島昌克 : 地盤条件と周期1秒前後のサイト増幅特性の関係, 第12回地震工学シンポジウム論文集, pp.254-257, 2006.
- 2) 若松加寿江, 久保純子, 松岡昌志, 長谷川浩一, 杉浦正美 : 日本の地盤・地形デジタルマップ(CD-ROM付), 東京大学出版会, 2005 (製品シリアル番号: JEGM1725) .
- 3) Fukushima, Y. and Tanaka, T. : A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.84, pp.757-783, 1990.
- 4) 鶴来雅人, 田居 優, 入倉孝次郎, 古和田明 : 経験的サイト増幅特性評価手法に関する検討, *地震* 2, Vol.50, pp.215-227, 1997.
- 5) 西川隼人, 北浦 勝, 宮島昌克 : 2000年石川県西方沖地震の強震動特性に関する考察, *土木学会論文集*, No.731, pp.257-266, 2003.

(2007. 4. 6受付)

EVALUATION OF SITE EFFECT OF K-NET, KiK-net IN HOKURIKU REGION AND ITS RELATIONSHIP TO TOPOGRAPHICAL CLASSIFICATION, ALTITUDE

Hayato NISHIKAWA and Masakatsu MIYAJIMA

We examined a relationship between topographical classification, altitude and site effect of K-NET, KiK-net stations in Hokuriku region in this study. The lower frequency of site effect, the more highly site effect correlate to altitude. The averaged site effect with respect to topographical classification were evaluated. The averaged site effect of observation sites at hill is large in frequency band between 1 to 3Hz, and those of delta coastal low land, back mash is large in frequency band lower than 4Hz. Moreover, coefficients of variation of site effect with respect to topographical classification were evaluated. We clarified that the coefficients of variation of site effect of mountain, hill and back marsh were small, and those of gravelly terrace and valley bottom law land were large in a arbitrary frequency band.