

K-NET穴水観測点周辺地盤の地震動応答特性

後藤 浩之¹・澤田 純男²・小林 望³・山田 浩二⁴

¹京都大学防災研究所助教 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail:goto@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

²京都大学防災研究所教授 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail:sawada@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

³京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail:kobayashi@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

⁴(株) 阪神コンサルタンツ (〒541-0042 大阪市中央区今橋1-6-19)

E-mail:yamada@hanshin-consul.co.jp

2007年能登半島地震で局所的な被害が発生した穴水町では、浅い地盤構造が局所的に変化していることが指摘されている。本研究では、弾性波探査で得られているK-NET穴水観測点周辺の浅い地盤構造を用いてその地震動応答特性を調べた。K-NET観測点に向かって層境界深さが深くなる地盤構造が見られるため、直下の層境界深さによる1次元的影响と、層境界の不整形性により励起される波の2次元的影响とが考えられるが、地表波形に対しては1次元的影响が支配的であることを示した。また本震の再現解析では、K-NET観測点から50mほど離れた地点での最大速度はその8割程度となることを示した。ただし地盤内ひずみに関しては、水平方向の工学せん断ひずみ成分が最大で0.3%を示すため不整形性の影響が無視できないと考えられる。

Key Words : Noto-Hanto Earthquake, Anamizu, site response, two dimensional effect

1. はじめに

2007年能登半島地震 ($M_j=6.9$) では石川県の能登半島を中心として人的被害、構造物の被害が発生した¹⁾。石川県輪島市、七尾市、穴水町では最大震度である震度6強を観測し、気象庁輪島観測点と防災科学技術研究所強震観測網 (K-NET) の穴水観測点 (ISK005) ではおよそ100cm/sの最大速度の地震動を記録している。

穴水町の被害は町中心部において空間的に一様ではなく、駅前商店街に被害が集中するなど被害が局所的であることが報告されている²⁾。穴水町の複数の地点で実施された余震観測から、比較的硬質な地盤が露出した地点の記録とK-NET穴水観測点の記録とのスペクトル比が1.0-1.5Hzで10倍程度の増幅が認められ、微動1点観測による被害地域のH/V卓越周期に対応するとの報告がある³⁾。また、表面波探査とラムサウディングとを用いた地盤探査を実施して、穴水町が深さ20mまでの浅い地盤構造が局所的に変化している地域であること、地盤の不整形性の影響が考えられるとの報告もある²⁾。

著者らは穴水町の局所的な地盤構造の変化が地震動に与える影響に着目して、小規模なS波浅層反射法探査システムによりK-NET穴水観測点が設置され

ている大町西児童公園の詳細な構造を明らかにした⁴⁾。本報告では、この地盤構造に基づいて実施した地盤の応答解析結果について報告し、K-NET穴水観測点周辺地盤の地震動応答特性について定量的に議論する。

2. K-NET穴水観測点周辺の浅層地盤構造

K-NET穴水観測点 (K-NET ISK005) は穴水駅の北およそ400mに位置する大町西児童公園内に設置されている。公園は長辺方向60m、短辺方向29mの矩形を成し、長辺方向がほぼN30°Eを向く。公園の東面は河道、西面、南面は道路、北面は住宅敷地に面している。

著者らは、2007年11月に同児童公園内で小規模なS波浅層反射法探査を実施した⁴⁾ (図-1)。長辺に平行な測線L (Line-L) について測線長40mの観測、短辺に平行な測線S (Line-S) について測線長15mの観測を実施して、それぞれについて反射断面図を得ている。測線Sでは水平な反射面が認められたが、測線LではK-NET観測点に向かって反射面が深くなる傾向が見られた。

図-2に測線Lの断面図を水平方向と鉛直方向のス

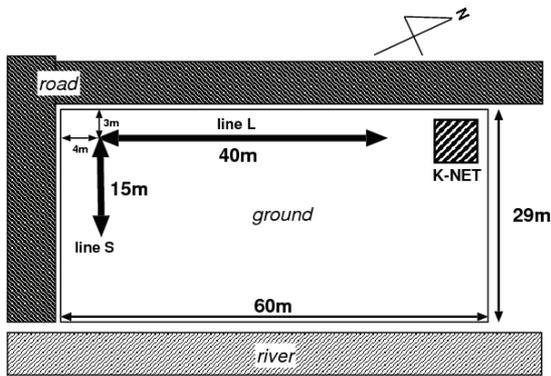


図-1 S波浅層反射法探査の測線配置

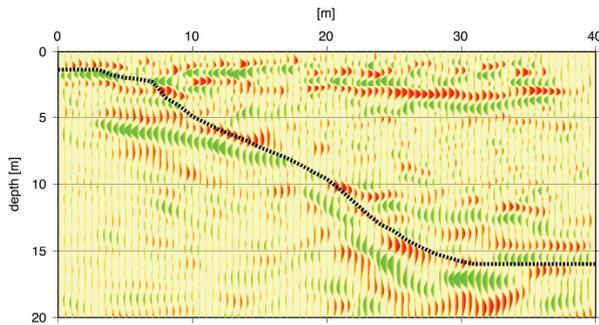


図-2 測線 L (Line-L) の反射断面図

ケールをあわせて示す。測線 S と交差する原点では反射面深さがおよそ2mであるが、K-NET観測点に向かって反射面が徐々に深くなり、測線30m地点では深さがおよそ16mに達する。なお、K-NET観測点では速度検層が実施されており、検層値に見られる層境界深さと反射面深さは調和的である。図-2に示した点線は、0-24mまでの区間についてS波屈折波走時による検証を行うために仮定した2層地盤モデルの層境界を表す⁴⁾。

3. 地震動応答特性

(1) 解析モデル

測線 L に見られる反射断面深さの変化が層境界深さの変化に対応すると考え、この地盤構造が地震動に与える影響について検討する。地盤は2層でモデル化する。0-24mまではS波屈折波走時による検証に利用した層境界と層速度を仮定し、1層目のS波速度を90m/s、2層目のS波速度を175m/sとする。24mからK-NET穴水観測点が位置する51mまでは反射断面を参考に境界面を設定し、層速度は0-24mまでのものと一致させる。0mより南側、51mより北側は層境界深さを水平に延長した水平な構造であると仮定する。各層の密度はK-NET観測点のボーリング情報を参考にしてそれぞれ1500kg/m³、1800kg/m³とする。

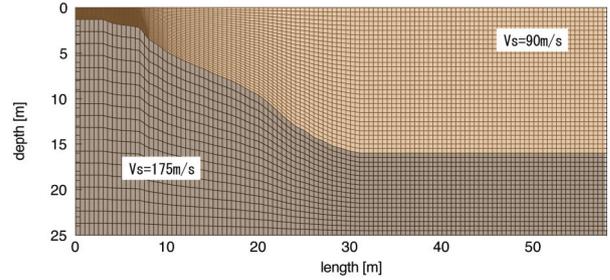


図-3 地盤の応答解析のFEMモデル

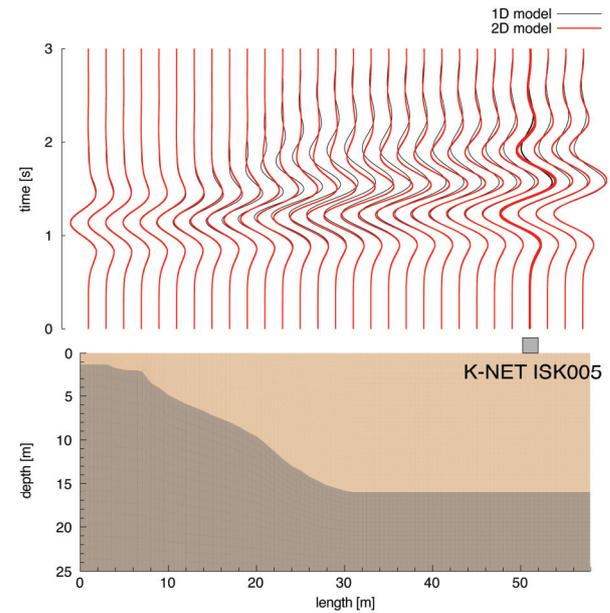


図-4 Ricker波入射に対する地表波形

K-NET穴水観測点で記録された能登半島地震の本震や余震の地震動が東西方向に卓越しているため、測線 L の断面では面外方向がほぼその卓越方向に相当する。このため本解析では2次元SH波動場を対象として解析を行う。解析手法は層境界の形状を表現するために有限要素法 (FEM) を用いる。ただし、本解析では地盤の非線形性は考慮しておらず、線形の議論に留めている。要素は4節点のアイソパラメトリック要素を用いて、K-NET観測点の直下では0.5m幅の正方形要素となるように、その他の地点では層境界深さに応じて鉛直方向の要素幅を変化させる (図-3)。本要素配置では、実体波に関して15Hzまでの周波数成分の精度が保証される。また、入力波は深さ25mに設定した弾性基盤から鉛直に平面波として入射させる。

(2) Ricker波入力に対する応答特性

地盤の地震動応答特性を確認するために、まずはRicker波を入力加速度とした解析を行う。層境界深さが大きく変化しているため、対象点下の地盤構造

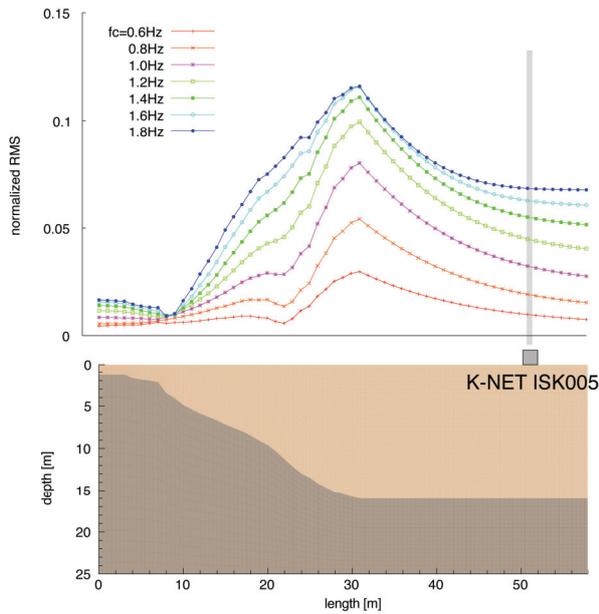


図-5 1D modelの速度波形の
2D modelの速度波形に対するRMS

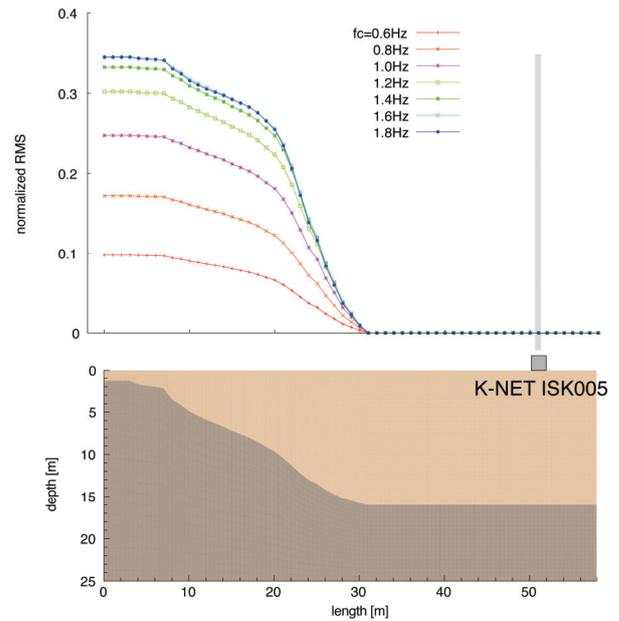


図-6 1D modelの速度波形の
K-NET観測点での速度波形に対するRMS

の1次元的影響と、不整形な層境界形状に起因して励起する表面波、屈折波などの2次元的影響とが複合的に作用する可能性が予想される。このため、有限要素法による層境界形状を反映した解析結果と、1次元的影響のみを考慮するために直下の層境界深さを持つ水平な地盤モデルを仮定してHaskell Matrix法⁵⁾で各点の応答を計算した結果とを比較する。

図-4は中心周波数1.2HzのRicker波を入力した場合の地表での加速度応答を示したものである。なお、本解析では地盤の減衰を考慮しない。図-4中の”1D model”は水平構造を仮定して直下の1次元構造の影響のみを反映した応答を、”2D model”は有限要素法により2次元の影響が含まれた応答を示している。すなわち、この応答の違いが不整形な層境界に起因する影響を表す。層境界深さが変化する領域のうち15-30mの範囲でピーク値に差が認められ、2次元の影響が示唆される。一方で30m以降は、K-NET観測点の応答を含めて後続波に違いは見られるもののピーク値に違いは見られず、ピーク値は1次元の影響が支配的であると考えられる。

入力加速度のRicker波の中心周波数 f_c を変化させて、地表の波形に与える影響を平均二乗偏差(RMS)の分布から調べる。まず、2次元の影響を調べるために地表各点の速度波形について1D modelと2D modelの差のRMSを計算し、1D modelの最大速度値でこれを正規化する。なお、RMSは波形の継続時間を包括するように0-5秒の範囲で計算する。図-5に入力したRicker波の中心周波数毎の正規化したRMS値の分布を示す。中心周波数が高周波数寄りになると1D modelと2D modelの差が増加するが、RMSのピーク位置は30mでほぼ一定である。K-NET観測点の位置でみるとRMS値は1.8Hzの場合においても

8%程度である。本震の卓越周期がおよそ1.0Hz、余震の卓越周期がおよそ1.2Hzであることを考慮すると、実震動の卓越周期に対しての2次元の影響はRMS値で5%程度である。

一方、1次元の影響を抽出するため、1D modelで計算した地表各点の速度波形と、同じく1D modelで計算したK-NET観測点位置の速度波形との差のRMSを調べる。図-6にRicker波の中心周波数毎に正規化したRMS値の分布を示す。層境界深さの変化と対応してRMS値が増加する傾向が見られ、1.8Hzの場合には0-10mの領域で35%程度の差となる。1.0-1.2Hzに着目した場合でも25-30%程度のRMS値が認められ、これは図-5に示した2次元の影響によるRMS値5%よりも顕著な値であることがわかる。すなわち、本地盤モデルでは直下の層境界深さが変化することによる影響が地表波形に対して支配的である。

(3) 本震記録の再現解析

次に、能登半島地震本震の解析を行う。K-NET観測点では本震時の地表記録が得られているため、まず地盤が線形であると仮定して深さ25mにおける入力波形を算出する。具体的には、有限要素法から地盤の2次元の影響を含む応答関数を求め、0.2-5.0Hzのバンドパスフィルタを施した観測波形のN120°E成分から、これを除して入力波形を求める。求めた入力波形を深さ25mに入力して地盤の応答計算を行い、地表の速度波形を計算する。なお、本解析では地盤の減衰を考慮し、1次固有周期、2次固有周期についての減衰定数が2%となるようなRayleigh減衰を与える。図-7に地表各点の速度波形を示す。各点にはK-NET観測点で観測された速度波形のN120°E成分も併せて示している。

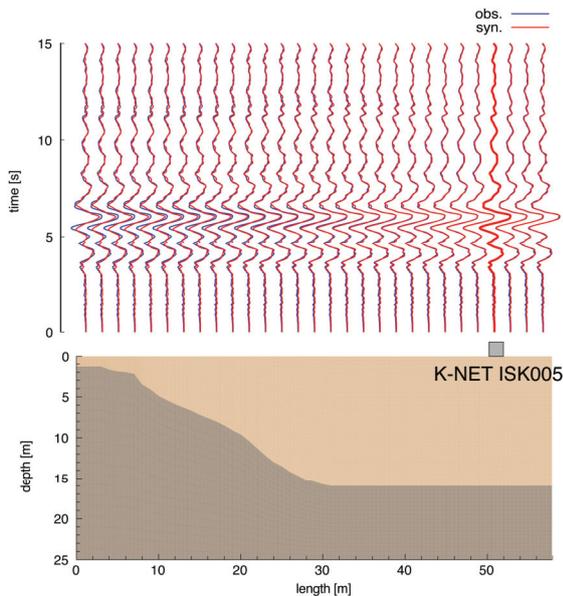


図-7 本震記録の再現解析における地表速度波形

層境界深さが浅い領域 (0-10m) ではK-NET観測点での観測波形と差が見られるが、30m以降では観測波形との差は顕著ではない。0-10m地点の速度波形の最大値は観測された最大速度の8割程度の80cm/s程度である。Ricker波の解析で検討したように速度波形に対する2次元的な影響が顕著でないことから、1次元的な層境界深さがK-NET観測点位置と異なることにより最大速度値に差が見られると考えられる。

また、この解析において地盤内に発生した工学せん断ひずみ分布の最大値を抽出し、図-8に示す。水平方向 (xy方向) の工学せん断ひずみは1次元の水平構造では表現できない成分であるため、2次元的な影響と捉えることができる。この成分が層境界に傾斜がある20mを中心とした範囲で最大0.3%程度の値を示しており、地盤材料の非線形性が無視できないひずみレベルに達していることから、地盤内の工学せん断ひずみに関しては層境界の不整形性の影響が考えられる。

4. まとめ

K-NET穴水観測点周辺の深さ0-25mまでの地盤に対する地震動応答解析を実施した。Ricker波を入力とした場合の地表波形に対して層境界の不整形性が及ぼす2次元的な影響はRMSで5%程度、直下の層境界深さによる1次元的な影響はRMSで25-30%であるため、直下の層境界の深さの影響が支配的であると考えられる。本震記録の再現解析の結果、K-NET観測点から50m程離れた層境界深さの浅い地点で、速度

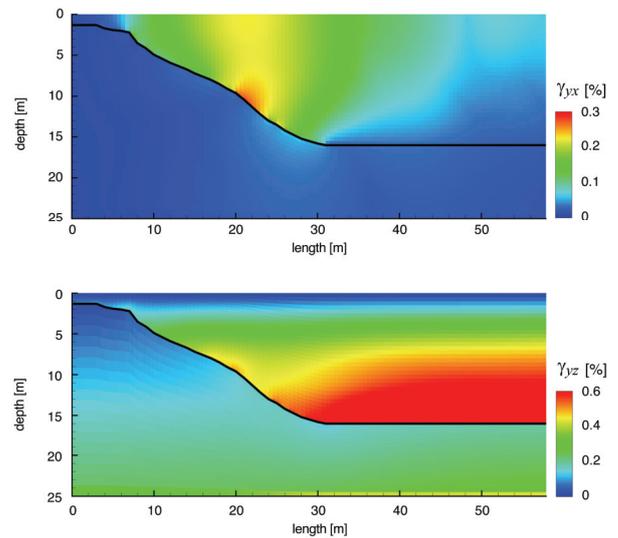


図-8 地盤内の工学せん断ひずみ分布
(上：水平成分，下：鉛直成分)

波形の最大値がK-NET観測点の最大速度の8割程度となることを示した。また、地盤内の工学せん断ひずみに関しては層境界の不整形性の影響によりおよそ0.3%の工学せん断ひずみが発生することを示した。

ただし、本解析は線形範囲に限ったものであり、ひずみレベルを見れば本来は地盤材料の非線形性を考慮する必要がある。非線形性を考慮した分析は今後の課題であるが、本解析結果の工学せん断ひずみ値は非線形性を考慮した場合に比べて過小評価寄りの結果である可能性は強調しておく。

謝辞： 本研究では防災科学技術研究所の強震動観測網 (K-NET) の記録を使用しました。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 内閣府：平成19年 (2007年) 能登半島地震について (第34報)，2009。
- 2) 建築研究所：平成19年 (2007年) 能登半島地震建築物被害調査報告，2007。
- 3) Iwata, T., Asano, K., Kuriyama, M. And Iwaki, A.: Non-linear site response characteristics of K-NET ISK005 station and relation to the earthquake disaster during the 2007 Noto-Hanto Earthquake, Central Japan, Proc. of 14th WCEE, No.01-1026, 2008.
- 4) Kobayashi, N., Goto, H., Yamada, K. and Sawada, S.: Shallow S-wave seismic reflection survey around the K-NET Anamizu site, Proc. of ICOSSAR 2009, in printing.
- 5) Haskell, N.A.: Crustal reflection of plane SH waves, *J. Geophys. Res.*, pp.4147-4151, 1960.

CHARACTERISTICS OF SITE RESPONSE AROUND K-NET ANAMIZU STATION

Hiroyuki GOTO, Sumio SAWADA, Nozomi KOBAYASHI and Koji YAMADA

During the 2007 Noto-Hanto Earthquake, a damage distribution in Anamizu town was not uniform. Some reports discussed a relationship between the damage distribution and the shallow subsurface structure up to approximately 20m depth. We numerically simulate the site response of the shallow subsurface structure around K-NET Anamizu station, where we revealed the detailed structure. The amplification of ground motions mainly depends on the depth of the layer boundary beneath the reference site. For the simulation of mainshock, PGV at the site located 50m away from the K-NET station is about 80% of the observed PGV at the K-NET station, and the simulated engineering shear strain for the horizontal component is about 0.3% at a maximum.