



## KiK-net日野における2000年鳥取県西部地震と その前後の地震波の伝播時間

茂木秀則<sup>1)</sup>、川上英二<sup>2)</sup>、内海満希<sup>3)</sup>

1) 埼玉大学工学部建設工学科、准教授 博士 (工学)

e-mail : hmogi-2008f@kiban.civil.saitama-u.ac.jp

2) 埼玉大学工学部建設工学科、教授 工博

3) 埼玉大学工学部建設工学科、学生 (研究当時)

### 要 約

本研究では、KiK-net日野観測点における鳥取県西部地震の本震とその前後の観測記録のNIOM解析を行い、鉛直アレー内の伝播時間の変化を検討した。その結果、(1)2000年鳥取県西部地震では主要動において速度振幅RMS値が33 cm/sに達し、水平成分の伝播時間は0.197 sから0.35 s程度まで増加したこと、(2)本震後一ヶ月程度までは水平成分の伝播時間は緩やかに減少する傾向が見られるものの、それ以降はほぼ一定値を示し、本震前の値には戻っていないこと、(3)鉛直成分についても水平成分と同様に伝播時間の変化が生じたことなどを指摘した。また、上記の伝播時間に基づいて表層の物性変化を検討し、(4)2000年鳥取県西部地震主要動において最大剪断歪 $3 \times 10^{-3}$ 、剪断剛性率が20MPa (S波速度100 m/s)まで低下し、その後100 MPa (S波速度230 m/s)まで回復したこと、(5)一方、ポアソン比は0.46~0.47の比較的安定した値を示し、剪断歪への依存性がほとんどみられないことなどを指摘した。

キーワード： 2000年鳥取県西部地震, KiK-net日野, 地震波の伝播時間, NIOM法

### 1. はじめに

鳥取県西部地震(2000年10月6日13:30、 $M7.3$ )では鳥取県日野町と境港市において震度6強を観測し、住宅の倒壊などの大きな被害が生じた。震源のごく近傍には防災科学技術研究所によるKiK-net(Kiban-Kyoshin Net: 基盤強震観測網)の日野観測点があり、本震と数多くの余震の加速度記録が得られた<sup>1)</sup>。KiK-net観測点は地表と地中の2点の加速度計を有する鉛直アレー観測施設であり、得られた記録は地盤の非線形挙動を検討する上で極めて貴重なものである。

Kawakami et al.は鉛直アレー観測記録から伝播速度を精度良く推定する方法としてSIORM法<sup>2)</sup>やNIOM法<sup>3)-5)</sup>を展開し、様々なアレー観測記録に適用してその有効性を示している。また、NIOM法を柏崎刈羽原子力発電所内の鉛直アレー記録やKiK-net一関西における観測記録に適用して、強震時の非線形化とその後の回復過程を検討している<sup>6),7)</sup>。特に、KiK-net一関西の解析結果では、2008年岩手・宮城内陸地震本震後の剪断剛性率の低下が明瞭に認められたものの、その後の地震計の移設に伴い、本震後の回復過程の検討は本震から500日間に留まっており、より長期間にわたる検討が望まれる。

一方、土の非線形挙動は室内実験によって様々な条件のもとで詳細な検討がなされている<sup>8)</sup>。しかしながら、原位置における非線形挙動に関する実験は加振が困難であるため殆ど行われておらず、近年になって広く観測が行われるようになった鉛直アレー観測記録の解析を通して原位置における土質材料の非線形挙動について知見を積み重ねていくことが必要である。そこで本研究では、発生年が2000年と比較的早く、著しい強震動の発生から長期間の土質物性の検討が可能と考えられるKiK-net日野観測点における鳥取県西部地震の本震とその前後の観測記録のNIOM解析を行い、鉛直アレー内の伝播時間の長期間の変化を検討した。

## 2. NIOM解析の概要

### 2.1 NIOM解析

鉛直アレーの2点の観測記録を $f(t)$ 、 $g(t)$ とすると、両者は伝達関数 $H(\omega)$  ( $\omega$ は角振動数)を用いて以下のように関連づけることができる。

$$G(\omega) = H(\omega)F(\omega) \quad (1)$$

ここで、 $F(\omega)$ 、 $G(\omega)$ はそれぞれ、 $f(t)$ 、 $g(t)$ のフーリエ変換である。NIOM法<sup>3),4)</sup>は2点の観測結果から求めた $H(\omega)$ を用いて、観測記録 $f(t)$ を、 $x(0) = 1$ を満たす単純なパルス波形 $x(t)$  (入力モデルと称する)に置き換えたときの $g(t)$ に相当する波形 $y(t)$  (出力モデルと称する)を求めるものである。その際に、 $x(t)$ と $y(t)$ のそれぞれの波形が極力単純化されるように、入出力モデル $x(t)$ 、 $y(t)$ が決定される。具体的にはそれぞれ、次式で与えられる。

$$X(\omega_i) = N\Delta t \frac{1}{\sum_{n=0}^{N-1} \frac{1}{\left(1 + \frac{k_X}{c_X} \omega_n^2\right) (c_X + c_Y |H(\omega_n)|^2)}} \quad (2)$$

$$Y(\omega_i) = H(\omega_i)X(\omega_i)$$

ここで、 $\Delta t$ 、 $N$ はそれぞれ、観測記録の時間ステップとデータ数、 $c_X$ 、 $c_Y$ 、 $k_X$ 、 $k_Y$ はNIOM解析のパラメータで、本研究では $c_X = c_Y = 1$ 、 $k_X = k_Y = 0.0001 \text{ s}^2$ とした。最後に、得られた $X(\omega)$ 、 $Y(\omega)$ をフーリエ逆変換すると、単純化された時間領域の入力および出力モデル $x(t)$ 、 $y(t)$ が得られる。

### 2.2 観測記録

図1はKiK-net日野の地質とPS検層の結果<sup>1)</sup>とこれに基づいて求めた、各層内を伝播するP波とS波の伝播時間を示したもので、加速度計は地表と地中GL-100mの2カ所に設置されている。図1に示されるように地下20mまでの層のS波速度が小さく、2000年鳥取県西部地震の際にはこれらの層が非線形化したものとされる<sup>9)</sup>。

NIOM解析は公開されているKiK-net日野の観測記録<sup>1)</sup>のうち震央距離が300km以下の記録をすべて用いた。内訳は2000年鳥取県西部地震以前の地震が1999/1/27 22:09 ( $M3.1$ ) から2000/7/17 8:00 ( $M4.3$ ) までの11地震、2000年鳥取県西部地震以降は2000/10/9 1:14 ( $M3.4 \cdot$ 余震) から2014/4/11 7:43 ( $M3.9$ ) までの195地震、2000年鳥取県西部地震を含めて計207地震である。なお、300kmを基準とすることに特別な理由はなく、前報<sup>7)</sup>に合わせたためである。

NIOM解析は、鳥取県西部地震本震に対しては4s幅の時間ウィンドウを用い、2sずつ移動させながら、連続的に解析を行った。この際の移動ウィンドウの設定は水平成分と鉛直成分で共通である。一方、本震

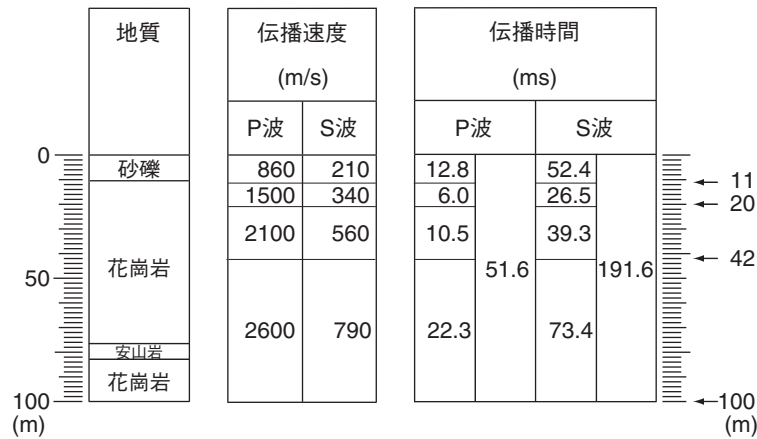


図1 KiK-net 日野観測点の地盤構造<sup>1)</sup>と地震波の伝播時間

以外の地震に対しては、振幅がそれほど大きいものではないため波形中の伝播時間の変化には着目せず、地震ごとに単一の伝播時間を求めることとした。このため、より安定した結果を得るために時間ウィンドウを数秒から20秒の長めに設定し、水平成分の解析では、P波初動後かつ主要動部分を含むように、また、鉛直成分では可能な限りP波の初動を含み、S波の立ち上がりを含まないような時間ウィンドウを設定した。上記の時間ウィンドウの両端は0.25 s間で切り落とすコサインテーパーとしている。

観測記録のサンプリングレートは2007/11/10 1:47 ( $M4.3$ ) まで200 Hz、観測機器の更新に伴い<sup>10)</sup> 2008/3/8 3:52 ( $M4.1$ ) の記録から100 Hzとなっている。本研究では式(2)をフーリエ逆変換する際に後続のゼロを加えてデータ数を16倍に増やし、時間ステップを観測記録の時間ステップの1/16に内挿している。

### 3. 解析結果

#### 3.1 入出力モデル

KiK-net 日野の記録のNIOM解析は他の観測点の例<sup>3)-7)</sup> と比べて、伝播時間を示すピークが不明瞭であることが多く、特にEW成分に顕著であった。このため、本研究ではEW成分とNS成分に加えて、N-60°E、N-30°E、N+30°E、N+60°Eの成分に対してもNIOM解析を行い、6方向成分の入出力モデルをスタッキングして水平動(S波)の平均的な伝播時間を推定した。なお、上記の理由で6方向成分のNIOM解析結果をスタッキングしているが、これは試行錯誤的に行ったものであり、その妥当性については今後検討する必要がある。鉛直成分は通常通り一組の地中と地下の鉛直成分の波形から求めた。

図2にこのようにして求めた入出力モデル波形の例を示す。(a)が2000年鳥取県西部地震よりも前の地震の例(1999/8/21 5:33,  $M5.4$ )、(b)2000年鳥取県西部地震の本震主要動部分(公開記録の18~22 s) (c)2000年鳥取県西部地震の余震(2000/10/9 1:14,  $M3.4$ )、(d)解析を行った最後の地震(2014/4/11 7:43,  $M3.9$ )である。図中、黒破線と赤実線がそれぞれ、スタッキング後の水平成分の入力モデル波形(単純化された地表の波形)と出力モデル波形(単純化された地中の波形)、青線は鉛直成分の出力モデル波形である。鉛直成分は出力モデル波形のみを示しているが、解析には前述のように地表と地中の鉛直成分の波形を用いている。また、各図中の数値は水平成分については出力モデルの最大振幅のピークと2番目の振幅のピークの時間、鉛直成分では出力モデルの最大振幅のピークの時間を示す。

例えば、図2(c)の水平成分の結果をみると、出力モデル(赤線)には-0.2197 sと-0.1534 sに明瞭なピークが現れている。このことから、地表面に時刻0 sにパルス波が生じたとするとき(入力モデル・図中細破線)に、地中ではこのピークを与える二つのパルス波が-0.2197 sと-0.1534 sに通過したと解釈することができる。一方、PS検層の結果(図1)ではS波の伝播時間は0.1916 sとなっており、多少大きめであるが、鳥取県西部地震の極めて強い強震動の直後の非線形化の影響も考えられることを考慮して-0.2197 sのピーク

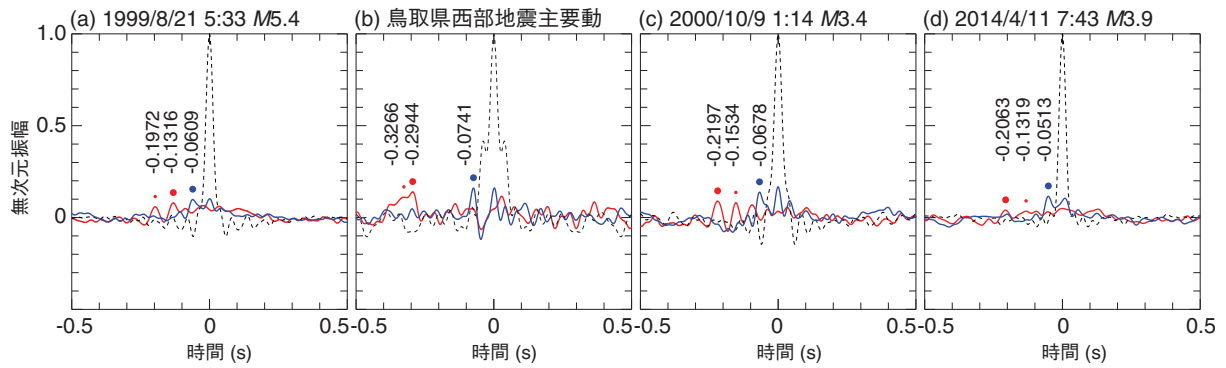


図 2 KiK-net 日野観測記録の NIOM 解析例. (a)1999/8/21 5:33、M5.4、深さ  $D=70$  km、震央距離  $R=231$  km、(b)2000 年鳥取県西部地震主要動部 (18~22 s)、(c)2000/10/9 1:14、M3.4、 $D=13$  km、 $R=2$  km、(d)2014/4/11 7:43、M3.9、 $D=14$  km、 $R=115$  km. 赤線と青線はそれぞれ、水平成分（スタッキング後）、鉛直成分を示す。黒破線は水平成分の入力モデル  $x(t)$  を示す。

が S 波の伝播時間を表すものと判断される。一方、 $-0.1534$  s のピークも明瞭なものであること、他の地震の出力モデルにもみられることが多いことから、このピークも何らかの波動成分に対応していることも考えられる。このため、水平成分の伝播時間の読み取りでは、 $-0.4 \sim -0.1$  s の範囲から振幅の大きい順に二つのピークを読み取り、PS 検層の結果ならびに前後の地震との連続性を考慮して S 波の伝播時間を判定した。

一方、鉛直成分についてはほとんどの場合で明瞭なピークが得られたため、最大のピークのみを読み取った。このピークの時間は P 波の伝播時間に相当する<sup>3),4)</sup>。図 2 を見ると P 波の伝播時間も鳥取県南部地震とその前後で変化が見られることがわかる。

なお、このように水平成分のピークが不明瞭になることの原因として、観測小屋のロッキング振動 (7~8 Hz) の影響<sup>11)</sup> や観測地点近傍の地形の影響<sup>12)</sup> など、地中から地表へ直達する波動による震動以外の成分が観測記録に多く含まれていることが考えられる。また、NIOM 解析によって得られる伝播時間には地震波の入射角や到来方向の影響も含まれるものと考えられるが、本観測点の水平成分は前述のようにばらつきが大きく、これらの影響を定量的に分析することが困難と考えられたため、KiK-net 日野の基盤層の S 波速度がそれほど大きいものではないことも考慮し、本研究では鉛直入射を前提に解析を行った。

### 3.2 伝播時間の変化

図 3 に解析を行ったすべての地震について、得られた伝播時間を時間の経過順に示す。図 3(a) が鳥取県西部地震以前の 11 地震、(b) 鳥取県西部地震の本震、(c) 鳥取県西部地震以降の余震や小地震の結果である。得られた伝播時間は (a) 鳥取県西部地震以前の 11 地震では発生順に、また、(c) 鳥取県西部地震以降の地震では本震発生時刻からの経過日数を横軸に取りプロットしている。一方、本震記録では 4 s 間の NIOM 解析を 2 s ずつ移動させながら連続的に解析を行っており、結果の表示にはそれぞれの時間ウィンドウの中央の時刻を横軸に用いている。図中の赤丸が水平成分、青丸が鉛直成分の伝播時間を示す。水平成分は読み取った二つのピークのうち最大のピークを大きい赤丸で、2 番目のピークを小さい赤丸で示している。各図の下には、それぞれの NIOM 解析に用いた時間ウィンドウ毎の地震動の強さの指標として、地表の観測記録から求めた速度振幅の RMS 値 (水平 2 成分の平均値) を示している。速度波形の算定に際しては、すべての観測記録に対して同一条件でかつ安定した波形を得るために、すべての波形に 0.2 Hz から 0.5 Hz の間に低振動数成分を遮断するチェビシェフフィルタを施した後に数値積分を行った。

図 3(a) の鳥取県西部地震以前の地震の結果では、0.13 s 付近に最大のピークが生じている場合が多いが、PS 検層の結果から 0.2 s 付近のピークが S 波の伝播を表すピークと考えられる。このため、主に 2 番目のピークから読み取った平均値 ( $0.1966$  s · 7 地震) を本震以前の初期値として細破線で示している。鉛直成分の初期値は 0.0590 s である。なお、水平成分における 0.13 s 付近のピークは本震以降の小地震の結果 (図 3c) に

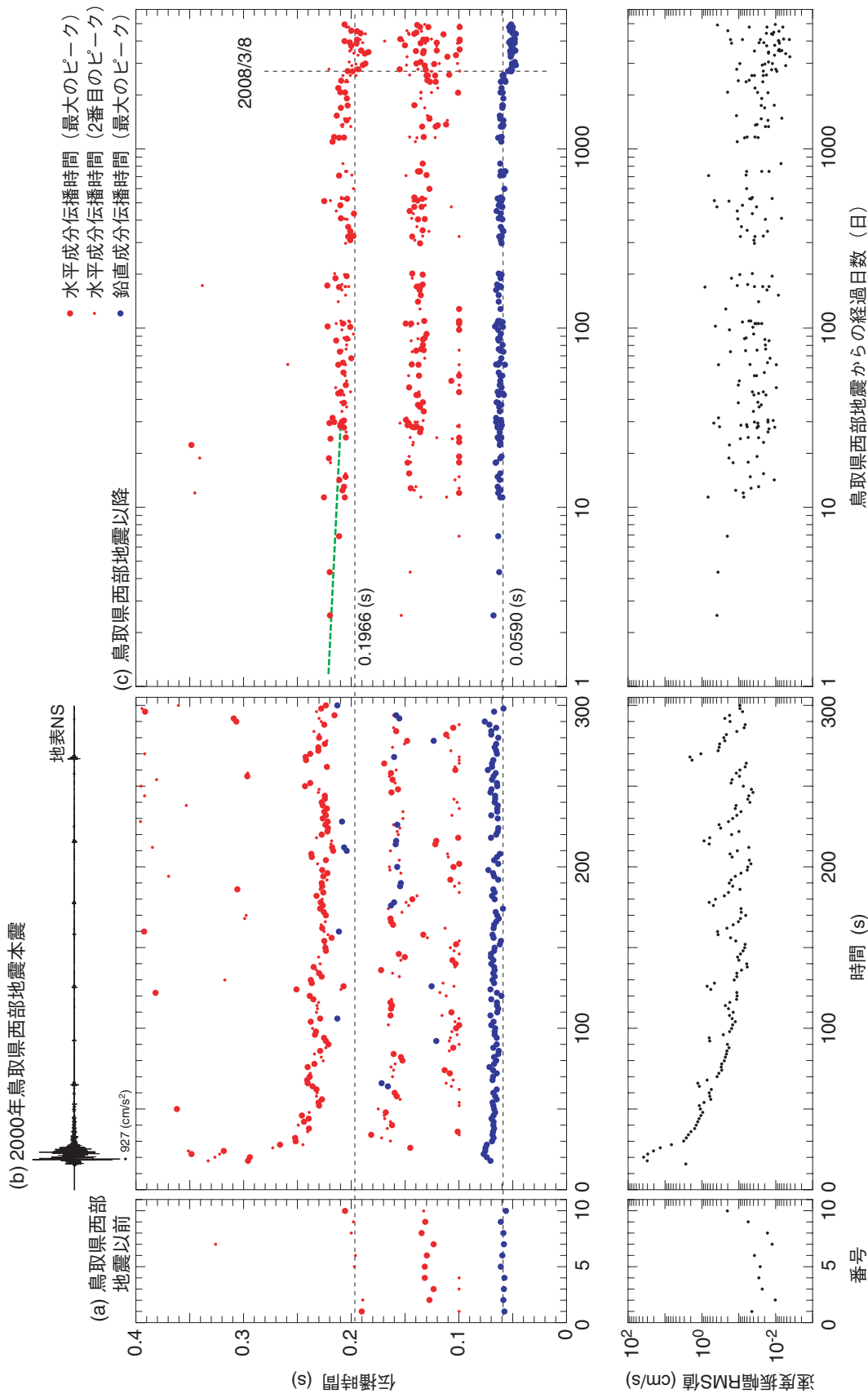


図3 (a)鳥取県西部地震以前、(b)鳥取県西部地震以降の伝播時間、(c)鳥取県西部地震以降の伝播時間、(d)鳥取県西部地震以前から求めた本震からの伝播時間を示す。(b)上部に鳥取県西部地震本震の地表NS成分の加速度波形を示す。また、各図の下には、地震動強度の指標としてNIOM解析の時間ウィンドウ毎の速度振幅のRMS値(地表の水平2成分の平均値)を示す。

も明瞭に現れており、KiK-net日野における何らかの波動伝播の特徴を反映したものであるが、本研究においてはこのピークの原因を特定することはできなかった。しかしながら、PS検層によるS波の伝播時間が0.1916sとされることと、鳥取県西部地震本震とその後の結果との連続性を考慮すれば、0.2s付近のピークがS波の伝播をあらわすものと考えerことは妥当であろう。

図3(b)の鳥取県西部地震本震中の水平成分の伝播時間の変化をみると、主要動部分(20s付近)の伝播時間の増加が著しく0.35sに達している。このときの速度振幅のRMS値は33cm/sであった。その後、地震動が収まるにつれて伝播時間は減少し、コーダ部では0.23s程度まで回復しているが、初期値には戻っていないことがわかる。それ以降の地震においても余り明瞭ではないものの図3中の緑破線に示すように本震後一ヶ月程度までは緩やかに減少する傾向が見られるが、それ以降は2008/3/8の記録まで経過日数によらずほぼ一定の範囲に分布しており、本震以前の値よりも大きい伝播時間を示していることがわかる。同様に、鉛直成分も鳥取県西部地震主要動で比較的明瞭な伝播時間の増加を示している。その後は伝播時間が徐々に減少し、1000日程度で本震前の初期値に回復していることがわかる。

一方、2008/3/8の地震以降とそれ以前の地震の伝播時間には不連続な変化がみられる。KiK-net日野では2008年1月15日に新型強震計の運用が開始されており<sup>10)</sup>、2008/3/8の記録が新型強震計による初めての公開記録である。このことから、伝播時間のこの変化は観測設備の更新が原因とも考えられる。ばらつきのない鉛直成分に着目すると、伝播時間の変化は0.008s程度の減少(およそ0.059sから0.051s)であり、地中加速度計の設置深度の変化に換算すると20m程度浅くなったことに相当するが、著者らには実際の原因が何であるかは現在確認できていない。

### 3.3 剪断剛性率とポアソン比

#### 3.3.1 算定方法

本研究では地盤の物性として表層(地表からGL-20m)の平均的な剪断剛性率ならびにポアソン比を取り上げ、剪断歪との関係を検討した。

KiK-net日野においては20m以深では非線形化が生じなかった<sup>9)</sup>とされることから、20m以深の伝播時間を変換値と仮定し、次の手順で算定した。図1に示すようにPS検層の結果に基づくS波とP波の伝播時間がそれぞれ、0.1916s、0.0516sであるのに対し、本震以前のNIOM解析による伝播時間の平均値が水平成分0.1966s、鉛直成分0.0590sであったことから、この違いを比例配分して20m以深のP波とS波の伝播時間 $T_{BS}$ 、 $T_{BP}$ を求めた。

$$T_{BS} = 0.1127 \times 0.1966 / 0.1916 = 0.1156 \text{ (s)} \quad (3)$$

$$T_{BP} = 0.0328 \times 0.0590 / 0.0516 = 0.0375 \text{ (s)} \quad (4)$$

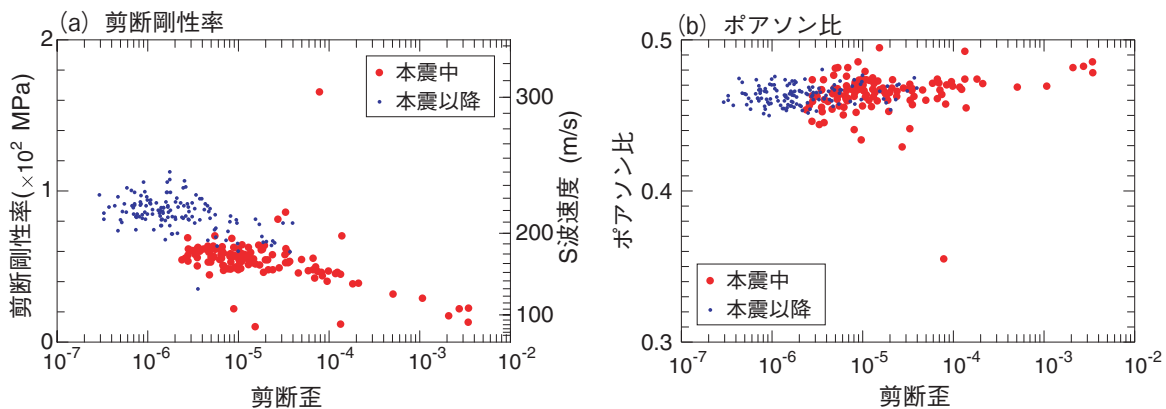


図4 (a)剪断剛性率と剪断歪の関係、(b)ポアソン比と剪断歪の関係。図中赤丸が本震中の結果、青丸が本震以降、2007/10/22 8:04 (M3.0) までの地震の結果を示す。

ここで、0.1127 s、0.0328 sはPS検層による20 m以深のS波とP波の伝播時間である。 $T_{BS}$ 、 $T_{BP}$ の値をNIOM解析から得られた伝播時間から引いて表層の伝播時間を求めた。

表層の剪断剛性率 $\mu$ 、ポアソン比 $\nu$ は上記の方法で求めた伝播時間から得られるP波速度 $\alpha$ とS波速度 $\beta$ を用いてそれぞれ、次式で算定した。

$$\mu = \rho\beta^2 \quad (5)$$

$$\nu = \frac{(\alpha/\beta)^2 - 2}{2\{(\alpha/\beta)^2 - 1\}} \quad (6)$$

ここで、密度 $\rho$ は $1.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ の一定値と仮定した。剪断歪については、波動の一次元的な伝播に伴う位相差によって生じる歪の算定式<sup>13)</sup>

$$\varepsilon = -\frac{\partial u(z,t)}{\beta \partial t} \quad (7)$$

を参考に、観測記録の速度振幅RMS値 $V_{RMS}$ を用いて、次式で推定した。

$$\bar{\varepsilon} = V_{RMS}/\beta \quad (8)$$

ここで、 $u$ は水平動の変位振幅、 $\bar{\varepsilon}$ は剪断歪の平均的な値を意味する。また、 $V_{RMS}$ は図3に示す速度振幅RMS値を用いた。

### 3.3.2 剪断剛性率とポアソン比の結果

図4は剪断歪と(a)剪断剛性率ならびに(b)ポアソン比の関係をまとめたものである。図中赤丸が鳥取県西部地震、青丸がそれ以降の小地震の結果である。2008/3/8以降の地震や水平成分と鉛直成分のどちらかで妥当な伝播時間が求められなかった地震の結果は予め取り除いている。

鳥取県西部地震本震では地震動の開始後すぐに主要動に達しており、図4(a)の剪断剛性率の結果では、最大剪断歪 $3 \times 10^{-3}$ に対して20MPa (S波速度100 m/s) まで剪断剛性率が低下した後、コーダ部で60~70 MPa (S波速度180~200 m/s) まで回復していく過程が読み取れる。それ以降の小地震では時間的な回復による剪断剛性の増加もあるため、100 MPa (S波速度230 m/s) と本震中の値よりも大きな値を示している。一方、ポアソン比の結果(図4b)は0.46~0.47の比較的安定した値を示し、剪断歪への依存性はほとんどみられないが、大歪 ( $1 \times 10^{-3}$  以上) ではポアソン比がわずかながら増加する傾向も見られる。推定されたポアソン比とS波速度を飽和地盤に対するポアソン比とS波速度の関係<sup>8)</sup>と比較すると、飽和土の実測値の範囲にあり、得られた値は地盤の物性値として不合理なものではないと考えられる。

## 4. まとめ

KiK-net日野観測点における鳥取県西部地震の本震とその前後の観測記録のNIOM解析を行い、アレー内の伝播時間の変化を検討した。以下に得られた主な知見を列挙する。

1. KiK-net日野における2000年鳥取県西部地震以前のS波とP波のアレー内の伝播時間はそれぞれ、0.197 s、0.059 sと推定された。
2. 2000年鳥取県西部地震では主要動において速度振幅RMS値は33 cm/sに達し、水平成分の伝播時間は0.35 sまで増加した。その後、伝播時間は減少し、コーダ部では0.23 s程度まで回復しているが、初期値には戻っていない。
3. 水平成分の伝播時間は本震後一ヶ月程度までは緩やかに減少する傾向が見られた。一方、それ以降は経過日数によらずほぼ一定の範囲に分布しており、依然として本震以前の値よりも大きい伝播時間を示している。

4. 鉛直成分でも伝播時間の変化がみられ、鳥取県西部地震主要動で明瞭なP波の伝播時間の増加とその後の回復過程が確認された。
5. 2000年鳥取県西部地震では最大剪断歪 $3 \times 10^{-3}$ に対して20MPa (S波速度100 m/s) まで剪断剛性率が低下した後、コーダ部で60~70 MPa (S波速度180~200 m/s) まで回復していく過程が読み取れた。また、その後の小地震では100 MPa (S波速度230 m/s) まで回復したことが明らかになった。
6. 一方、ポアソン比は0.46~0.47の比較的安定した値を示し、剪断歪への依存性はほとんどみられない。
7. 2008/3/8の地震以降の伝播時間にはそれ以前の結果と不連続な変化がみられた。この変化は観測機器の更新によるものと考えられる。

## 謝 辞

本研究では、独立行政法人防災科学技術研究所による KiK-net 基盤強震観測網の観測記録を使わせて頂いた。関係各位に深謝の意を表す。三名の匿名査読者の方々には、本論文の改善にかかる有益なコメントを頂いた。記して新謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 防災科学技術研究所: 防災科学技術研究所強震観測網(K-NET,KiK-net)、[www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/](http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/) (閲覧日2015年10月25日) .
- 2) Kawakami, H. and Bidon, P.: A simplified input output relation method using AR model for earthquake wave propagation analysis, *Earthq. Engng. Struct. Dyn.*, Vol.26, 1997, pp.1041-1057.
- 3) Haddadi, H. R. and Kawakami, H.: Modeling wave propagation by using Normalized Input-Output Minimization (NIOM) method for multiple linear systems, *Structural Eng./Earthquake Eng.*, JSCE, Vol. 15, 1998, pp. 29s-39s.
- 4) Kawakami, H. and Haddadi, H. R.: Modeling wave propagation by using Normalized Input-Output Minimization (NIOM), *Soil Dyn. Earthq. Engng.*, Vol. 17, 1998, pp. 117-126.
- 5) Hadaddi, H. R. and Kawakami, H.: Effect of liquefaction on ground motion during the Hyogoken-nanbu earthquake, 1995, in Japan by using NIOM method, *The Effect of Surface Geology on Seismic Motion*, Irigura, Kudo, Okada and Sasatani (eds), Balkema, Rotterdam, Vol. 2, 1998, pp. 1015-1022.
- 6) 茂木秀則、Shrestha, S. M., 川上英二、岡村真也: 柏崎刈羽原子力発電所内の鉛直アレーにおける新潟県中越沖地震とその前後のS波速度の経時変化、*日本地震工学会論文集*, Vol. 9, No.v1, 2009, pp. 19-31.
- 7) Mogi, H., Shrestha, S. M., Kawakami, H. and Kawamura, J.: Nonlinear soil behavior examined on the basis of propagation time observed at the KiK-net Ichinoseki-Nishi vertical array, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 103, No. 1, 2013, pp. 180-195.
- 8) 石原研而: 土質動力学の基礎、鹿島出版会、p.205、1976.
- 9) 山添正稔、加藤研一、山田有孝、武村雅之: KiK-net伯太および日野地点の地盤構造の推定と2000年鳥取県西部地震時の基盤地震動の再評価、*日本地震工学会論文集*, Vol. 4, No. 4, 2004, pp.107-125.
- 10) 防災科学技術研究所: 新型強震計設置開始のお知らせ、[www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/news/oldkik/kik06start.html](http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/news/oldkik/kik06start.html) (閲覧日2015年10月25日) .
- 11) 日比野 浩、前田 寿朗、吉村智昭、倉内 信幸: KiK-net日野における観測小屋の影響を考慮した鳥取県西部地震の基盤地震動評価、その1 微動観測および地震観測から評価した観測小屋の影響、*日本建築学会大会講演概要集*, 2003, pp.165-166.
- 12) 清水光男、片山吉史、笹井友司、三浦房紀: 鳥取県西部地震の鉛直アレー記録による表層地盤の非線形性、*土木学会第56回年次学術講演会*, I-A094, 2001, pp.188-189.
- 13) 佐藤忠信他、土木学会編: 動的解析と耐震設計、第2巻、動的解析の方法、土木学会、1989、p. 193.

(受理: 200X年X月XX日)



## **Propagation Time of Seismic Waves at KiK-net Hino Observation Site during, before and after the 2000 Tottori-ken Seibu Earthquake**

MOGI Hidenori<sup>1)</sup>, KAWAKAMI Hideji<sup>2)</sup> and UTSUMI Maki<sup>3)</sup>

1) Member, Associate Professor, Saitama University, Dr. Eng.

2) Member, Professor, Saitama University, Dr. Eng.

3) Ex-student, Saitama University, B. Eng.

### **ABSTRACT**

The 2000 Tottori-ken Seibu earthquake caused severe damage in Tottori and Shimane Prefectures. The KiK-net Hino observation site, operated by the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, is situated near the seismic fault. The vertical array records observed at the site provide valuable information about a wave propagation at a large strain level. In this study, the temporal changes of propagation times of seismic waves were examined based on Normalized Input-Output Minimization (NIOM) analysis. These examinations revealed that (1) the S-wave propagation time increased from 0.197 s to about 0.35 s due to nonlinear behavior of soils; (2) gradual decrease of the propagation time of S wave was observed a thousand days after the mainshock, however, the propagation time was still larger than the value before the mainshock; and (3) the P-wave propagation time also increased due to the principal motions during the mainshock. Subsurface soil properties were also examined based on the above results and pointed out that (4) an abrupt decrease of the shear rigidity to 20 MPa at a strain of  $3 \times 10^{-3}$  during the principal motion of the mainshock, and a gradual increase up to 100 MPa after the mainshock were observed, whereas (5) the Poisson ratio was about 0.46 to 0.47 and almost independent of strain level.

*Key Words : The 2000 Tottori-ken Seibu Earthquake, KiK-net Hino Observation Site, Propagation Time of Seismic Waves, NIOM Analysis*