

## KiK-net 永平寺観測地点の地震時伝達関数の逆解析 —速度構造と減衰特性の検討—

安井 譲<sup>\*1</sup>・南東 悠介<sup>\*2</sup>・藤田 亮介<sup>\*2</sup>・西川 隼人<sup>\*3</sup>

### Inversion Analysis of Seismic Transfer Function of KiK-net Eiheiji Observation Site

#### - Examination on Soil Velocity and Damping Structure -

Yuzuru Yasui, Yusuke Nanto, Ryosuke Fujita and Hayato Nishikawa

Ground velocity structures and the damping properties of the KiK-net Eiheiji observation point that may be used as a reference point of the input earthquake motion study were examined. The examination was done by optimizing the observed seismic transfer function by the genetic algorithm. In the inverse analysis, multi-stratified soil layer models of thickness 1m were used to evade the trade-off relationship between the soil velocity and the damping. As a result, in addition to the velocity structure, empirical values of the damping coefficients were obtained, and the empirical values for the horizontal motion was 11 (26.3 when S wave velocity larger than 500m/s) and for the vertical motion 53.2 (482 when P wave velocity larger than 1,000m/s), respectively. Moreover it was confirmed to be able to explain the observed transfer function by the deduced proposed soil model well compared with the published one.

#### 1. はじめに

独立行政法人防災科学技術研究所は全国の約 700 ヶ所の地点の地表と地下に強震計を設置して地震観測を行っており、観測されるデータはインターネットを通じて公開されている。この観測網 (KiK-net) <sup>1)</sup>による地震記録は、それぞれの地域において地震防災予測や地震防災対策を考える上で貴重なデータとなっている。福井県には 7 つの KiK-net 観測地点があるが永平寺地点(FKIH01)はごく表層を除いて全体に岩質で地下数十メートルの比較的浅い深さより硬質の安山岩 (基盤) が現れる構造をしていることから入力地震動の特性を論じる際の基準点として使用される可能性が高い。一方、基盤への入力地震動を推定するためにはそれ以浅の地盤の影響を取り除く必要があるため、地表の観測点と基盤の観測点の間の地盤の速度構造と減衰構造を正確に把握することが重要となる。実際、同地点の公表地盤速度構造を修正する必要があることがすでに指摘されている <sup>2)</sup>。そこで永平寺地点に着目して、地震時伝達関数を遺伝的アルゴリズムで逆解析して速度構造と減衰特性を照査・検討することとした。

---

\*1建設工学科, \*2同・卒業研究生, \*3舞鶴工業高等専門学校

ところで、逆算同定において速度と減衰の間にトレードオフの関係があり両者を精度よく求めることに問題があることが一般的に指摘されている。そこで、本論では地盤を深さ方向に1m厚さに細分割した成層地盤モデルを用いることによりこの関係の影響を回避することを試みている。逆算同定の結果、公表速度構造を修正した提案モデルを得るとともに減衰係数に関する経験値を得ることができた。

### 3. 観測地点と地震時伝達関数

図-1に対象とした永平寺地点を含む福井県内にある7つのKiK-netの観測点の位置を示した。同図には地震時伝達関数の計算に用いた地震の震央も示してある。また、表-1にはそれらの地震の諸元を示した。さらに表-2には永平寺地点の公表された速度構造（以後PS速度構造あるいはPSモデルと称する）に示したが、表層7mまでは $V_s=130\text{m/sec}$ ではないかとの指摘がある<sup>2)</sup>。なお、地震計は地表面とGL-103mの深さに設置されている。

地表面の観測地震波のスペクトルのGL-103mの観測波に対するスペクトルの比を11個の地震について計算したものを加算平均して地震時伝達関数を求めた。水平動については主要動のトランスバース成分についてS波到達から5秒間を、上下動については初期微動のP波到達から3秒間をそれぞれ切り出しそれに零データを付加して81.92秒としたものを計算に用いた。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。なお、スペクトルの平滑化ではバンド幅0.4HzのParzenウィンドウを用いた。図-8と図-9のグラフのうち「観測」がそれぞれ上記の要領で計算された水平および上下の伝達関数である。

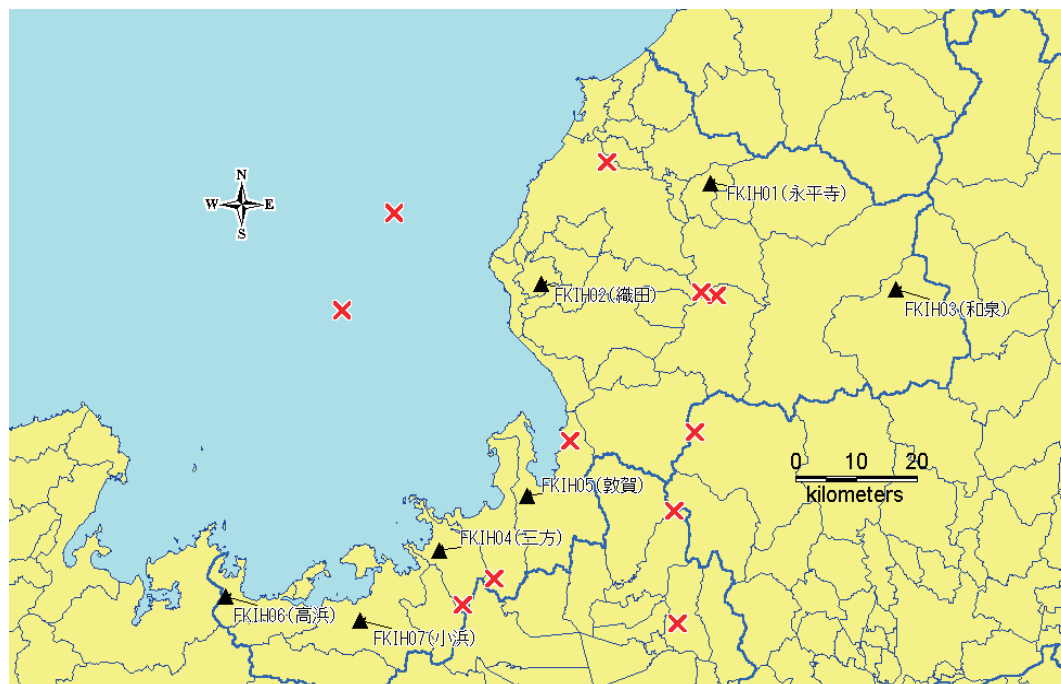


図-1 KiK-net 観測地点 (▲) と対象とした地震の震央 (×)

表-1 対象とした地震の諸元

	発生地域	発生日時	緯度 (°N)	経度 (°E)	深さ (km)	M <sub>JMA</sub>
1	福井県沖	1999年11月7日03:34:1.6	36.0583	135.7933	15	5
2	福井県嶺南	2000年6月5日09:54:41.2	35.7200	136.1100	9	4.9
3	福井県嶺南	2001年4月16日19:05:18.0	35.4800	135.9167	14	4.2
4	福井県嶺北	2002年8月18日09:01:1.8	36.1283	136.1767	11	4.7
5	滋賀県北部	2002年11月19日18:36:15.	35.4533	136.3050	14	3.9
6	福井県嶺南	2003年3月13日21:04:56.0	35.5183	135.9733	14	4.2
7	岐阜県美濃中西部	2003年12月23日14:34:40.	35.6183	136.3000	9	4.4
8	福井県嶺北	2004年10月5日08:33:51.4	35.9333	136.3767	12	4.8
9	岐阜県美濃中西部	2007年1月22日02:16:7.8	35.7333	136.3367	13	4.5
10	若狭湾	2007年8月31日23:36:57.2	35.9150	135.6967	16	4.4
11	福井県嶺北	2007年12月21日14:22:54.	35.9383	136.3483	7	4.5

表-1 PS 速度構造

層 No.	厚さ (m)	深さ (m)	V <sub>p</sub> (m/s)	V <sub>s</sub> (m/s)
1	4	4	500	150
2	2	6	2500	1000
3	14	20	5000	1650
4	44	64	5000	2100
5	39	103	5000	2500

#### 4. 逆解析の概要

遺伝的アルゴリズム (GA) <sup>3),4)</sup>を用いて観測による伝達関数  $R_o(f_i)$  を計算によるもの  $R_c(f_i)$  で近似させることにより速度構造  $V_{si}$  と減衰構造  $n_{si}$  を逆算する。即ち、式(1)で示される評価関数  $E$  を最小にするような地盤構造を求める。ここで、計算による伝達関数は  $S$  波構造モデルを用いて重複反射理論により算定するものとし、最適化の振動数範囲は 1Hz から 10Hz とする。また、同式の  $f_i$  は  $i$  番目の振動数で、 $N$  はその総数である。

GA による逆算では、地盤を深さ方向に 1 m ピッチで層分割したモデルを用いるものとし、各層の  $S$  波速度  $V_{si}$  と減衰係数  $n_{si}$  を未知数とする。このとき、層数は最下層を含めて 104 層となる。 $V_{si}$  の探索範囲は既存の PS 検層データの 0.5 倍～1.5 倍を原則とし、 $n_{si}$  の探索範囲は 3～20( $V_{si}$  の目標値が 500m/sec 以上のとき 3～50)とした。ここに、所謂減衰定数  $h_{si}$  と減衰係数  $n_{si}$  の間には式(2)のような関係があるものとしており、また、単位体積あたりの質量  $\rho_i$  は  $S$  波速度  $V_{si}$  と式(3)のような関係 <sup>5)</sup>があるものとしている。

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{R_c(f_i) - R_o(f_i)\}^2 \quad \cdots (1)$$

$$h_{si} = \frac{n_{si}}{V_{si}} \quad \cdots (2)$$

$$\rho_i = 1.4 + 0.67\sqrt{V_{si}/1,000} \quad \cdots (3)$$

なお，GA 探索のその他の条件は以下のものである。即ち，試行回数：10，世代数：100，個体数：50，ビット数：8，交叉確率：0.7，突然変異確率：0.01 とし，グレイコード，動的突然変異およびエリート選択を考慮している。

各層の P 波速度  $V_p$  の場合も同じように、地盤を 1m ピッチで層分割し，各層の P 波速度  $V_{pi}$  と減衰係数  $n_{pi}$  を未知数とする。 $V_{pi}$  の探索範囲は既存の PS 検層データの 0.5 倍～1.5 倍を原則とし， $n_{pi}$  の探索範囲は 3～1000 ( $V_{pi}$  の目標値が 1000m/sec 以下のとき 3～100) とした。ここに，所謂減衰定数  $h_{pi}$  と減衰係数  $n_{pi}$  の間には式(4)のような関係があるものとしている。

$$h_{pi} = \frac{n_{pi}}{V_{pi}} \quad \cdots (4)$$

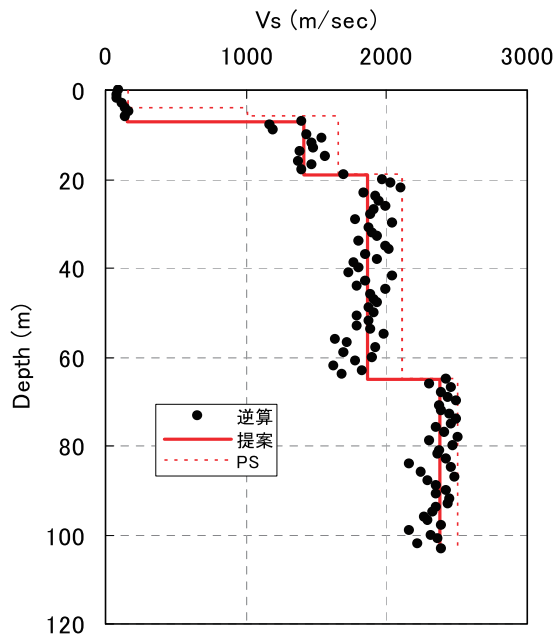


図-2 S 波速度構造

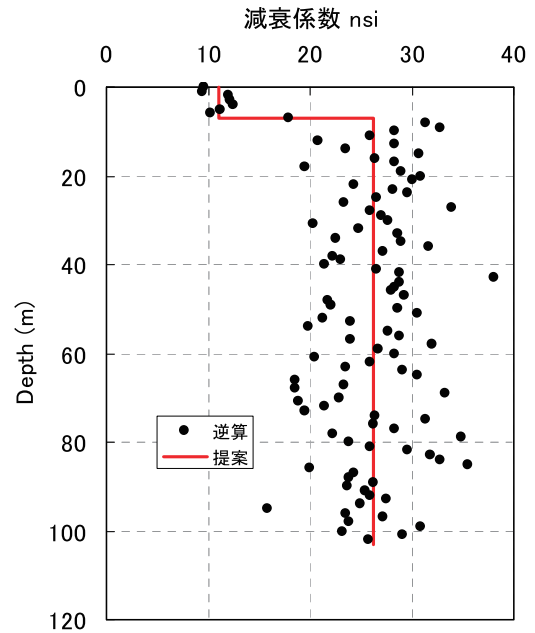


図-3 減衰係数  $n_{si}$  の深さ分布

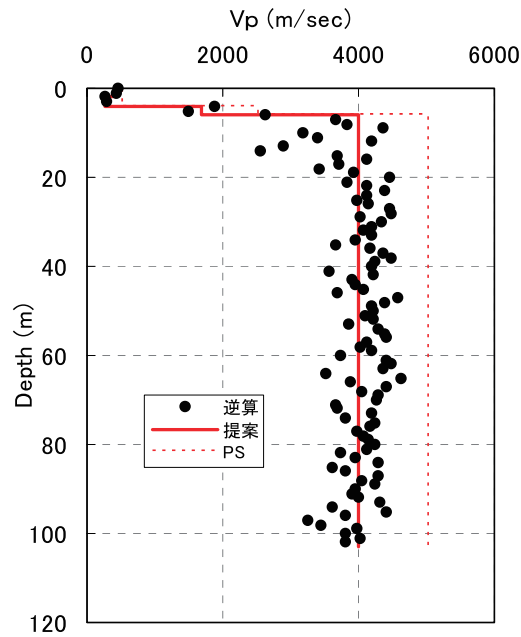


図-4 P波速度構造

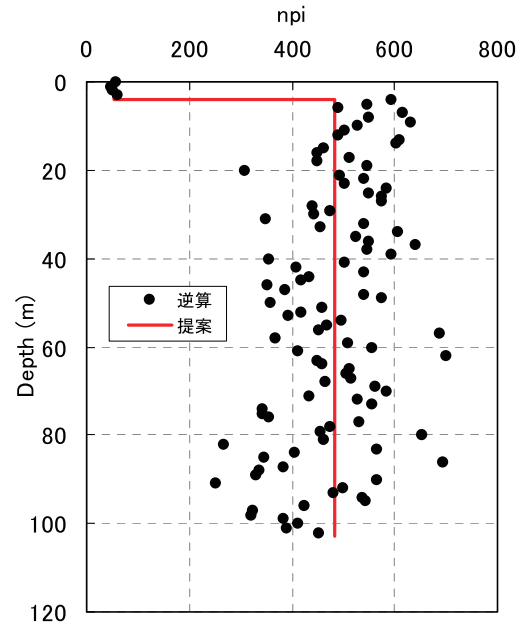


図-5 減衰係数  $n_{pi}$  の深さ分布

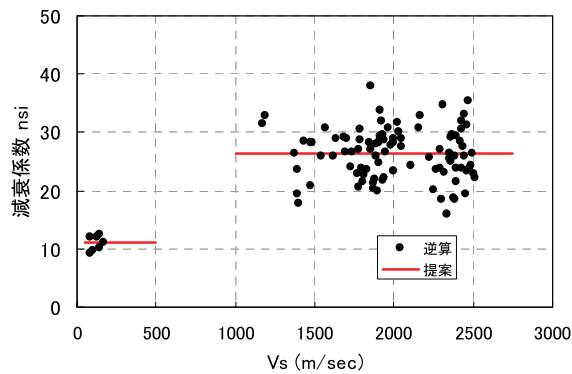


図-6 減衰係数  $n_{si}$  と  $V_{si}$  との関係

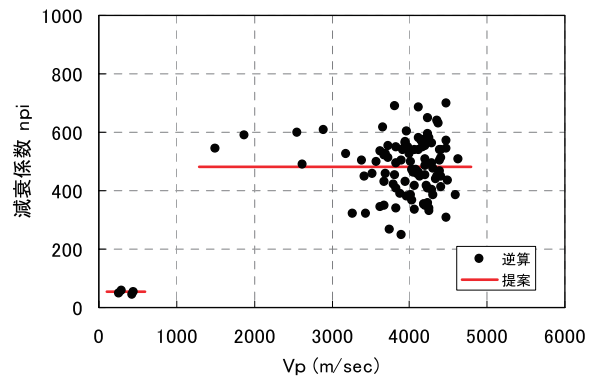


図-7 減衰係数  $n_{pi}$  と  $V_{pi}$  との関係

## 5. 速度構造と減衰特性の同定

図-2 に逆算した S 波速度  $V_{si}$  の深さ方向分布を示した。同図には公表されている速度構造 (PS) も示してある。図-3 には減衰係数  $n_{si}$  の深さ方向の分布を示したが、地表面近くで小さく、深くなるとほぼ一定値をとる傾向を示すことがわかる。同様に、図-4 と図-5 にそれぞれ P 波速度  $V_{pi}$  と減衰係数  $n_{pi}$  の深さ方向の分布を示した。さらに、図-6 に S 波速度  $V_{si}$  と減衰係数  $n_{si}$  の関係を、図-7 に P 波速度  $V_{pi}$  と減衰係数  $n_{pi}$  の関係をそれぞれ示した。図-6 から  $n_{si}$  の値は、S 波速度 500m/sec 以下で 11、500m/sec 以上で 26.3 と、既往の提案値<sup>6)</sup>より大きめに得ら

れた。また、図-7 から  $n_{pi}$  の値は、P 波速度 1,000m/sec 以下で 53.2、1,000m/sec 以上で 482 と得られた。

## 6. 提案モデル

表-3 と表-4 に逆算値を深さ方向に集約して定めた S 波と P 波に関する提案モデルの諸元を示した。同表には S 波と P 波の速度とこれらに対応する減衰係数を示してある。図-8 に提案モデルの水平伝達関数を、逆算値と PS モデルのものとを比較して示した。また、図-9 に提案モデルの上下伝達関数を、逆算値と PS モデルのものとを比較して示した。水平・上下とも、提案モデルは観測値をよく近似できている。

表-3 S 波構造の提案モデルの諸元

厚さ (m)	深さ (m)	質量 (ton/m <sup>3</sup> )	Vsi (m/sec)	nsi (m/sec)
4	4	1.61	98	11.0
3	7	1.66	152	
12	19	2.19	1410	26.3
46	65	2.32	1870	
38	103	2.43	2380	

表-4 P 波構造の提案モデルの諸元

厚さ (m)	深さ (m)	質量 (ton/m <sup>3</sup> )	Vpi (m/sec)	npi (m/sec)
2	2	1.61	440	53.2
2	4		270	53.2
2	6	1.66	1680	482.0
1	7		4010	
12	19	2.19		
46	65	2.32		
38	103	2.43		

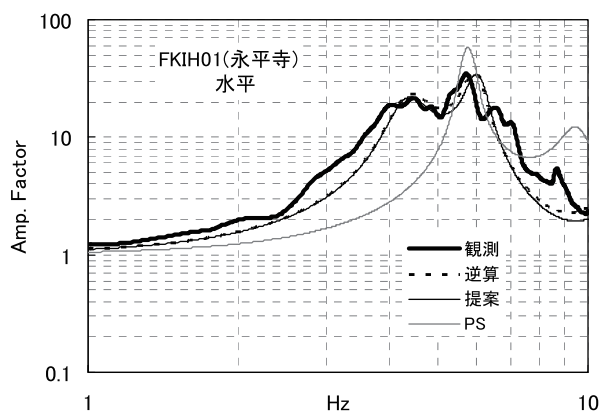


図-8 伝達関数（水平）

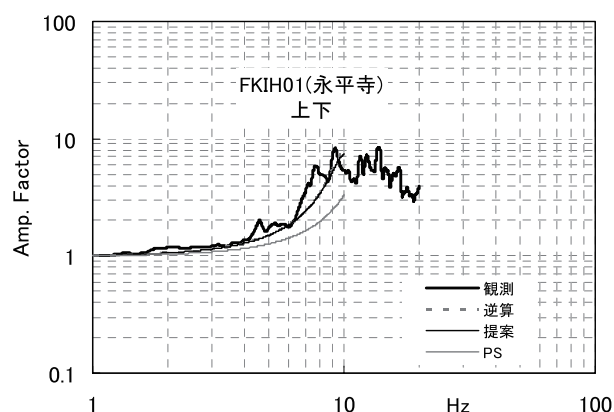


図-9 伝達関数（上下）

## 7. おわりに

入力地震動の特性を論じる際の基準点として使用される可能性が高い KiK-net の永平寺観測点の速度構造と減衰特性を検討した。検討は、地震時伝達関数を遺伝的アルゴリズムで最適化することにより速度構造と減衰特性を逆解析する方法によった。逆解析において、速

度と減衰とのトレードオフの関係を回避するために層厚 1m の細分割成層地盤モデルを用いた。その結果、S 波と P 波の速度の逆算値に加えて減衰係数の経験値を求めることができ、水平動の減衰係数は 11 (S 波速度 500m/s 以上で 26.3) で上下動の場合は 53.2 (P 波速度 1,000m/s 以上で 482) とそれぞれ得られた。さらに、逆算値をもとに作成した提案モデルは公表されている地盤モデルに比べてより良く伝達関数を説明できることが確認された。

#### 謝辞:

防災科学技術研究所の KiK-net のデータを使用致しました。速度と減衰とのトレードオフの問題について京都大学の川瀬博教授と鳥取大学の香川敬生教授から助言を得ました。細分割成層地盤モデルは鹿島小堀研究室の神田克久博士との対話がヒントになって期せずして想起されたものである。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 防災科学技術研究所：基盤強震観測網 KiK-net, <http://www.kik.bosai.go.jp/kik/>
- 2) 安井譲, 野口竜也：K-net 福井観測地点と KiK-net 永平寺観測地点の地盤速度構造の検討, 日本地震工学会・大会 - 2004 梗概集, pp.328-329, 2005.
- 3) 石田良平, 村瀬治比古, 小山修平：パソコンで学ぶ遺伝的アルゴリズムの基礎と応用, 森北出版, 1997
- 4) 山中浩明, 石田寛：遺伝的アルゴリズムによる位相速度の逆解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 468 号, pp.9-17, 1997 年 2 月.
- 5) 小林喜久二, 阿部康彦, 植竹富一, 真下貢, 小林啓美：地震動初期微動部の上下動・水平動スペクトル振幅比の逆解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.307-308, 1995.
- 6) 堀家正則：KiK-net データを用いた地盤入射波と地盤 Q 値の同定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.179-180, 2002.

(平成 21 年 3 月 31 日受理)