

時間領域における基盤入射波推定法の再考

野津 厚¹

¹正会員 港湾空港技術研究所 地震防災研究領域（〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1）

E-mail: nozu@pari.go.jp.

鉛直アレーによる強震観測記録をもとに、時間領域で基盤入射波を推定する方法について再考した。既往の方法としては、基盤面より上方の地盤の振動を表す運動方程式と粘性境界の式を連成し、通常は入力項目である基盤入射波を出力項目とする方法が提案されている。それに対してここでは、これらを連成させることなく、基盤面より上方の地盤の応答を先に求め、粘性境界の式を後から適用して基盤入射波を推定する方法を考案した。この方法によれば、これまで順方向の解析に用いられてきた任意の地震応答解析プログラムを、ソースを書き換えることなく基盤入射波の推定に利用できる。提案法の適用事例として、兵庫県南部地震におけるポートアイランドの鉛直アレー観測記録をもとに、基盤入射波の推定を行った。

Key Words: incident wave, time domain, vertical array, viscous boundary

1. はじめに

地盤の地震応答解析には大きくわけて時間領域の解析と周波数領域の解析がある¹⁾。このうち周波数領域の解析は、地盤の応力～ひずみ関係のモデル化が線形または等価線形^{例えば 2)}に限られるため、地盤のひずみレベルが著しく大きい場合には不向きであると考えられる³⁾。したがって、地盤のひずみレベルが著しく大きくなるようなケース、特に過剰間隙水圧の顕著な上昇を伴うようなケースにおいては、現時点では時間領域の解析手法を選択するのが一般的であると考えられる。

しかしながら、地盤のひずみレベルが大きくなる場合であっても、周波数領域の解析が選択されるケースは現時点でも存在する。その一つは、強震観測記録をもとに基盤入射波を推定する場合である。

過去の事例では、兵庫県南部地震の直後に、周波数領域での基盤入射波の推定が数多く行われている^{例えば 34)}。これは、時間領域における基盤入射波の推定手法が当時未確立であったことが一つの理由であると考えられる。その後、酒井ほか⁵⁶⁷⁾により、時間領域における基盤入射波の推定法の提案も行われた。しかし、現状、この方法が大きく普及するには至っていないと考えられる。これは、後述の通り、通常の順方向の解析（基盤入射波を入力する解析）に用いられる運動方程式をそのままでは用いることができず、順方向の解析にこれまで用いられてきた地震応答解析プログラムをそのままでは使用できないことも一つの理由であると考えられる。

そこで本研究では、この点について再考し、基盤面より上方の地盤の応答を先に求め、粘性境界の式（後述）を後から適用して基盤入射波を推定する方法を新たに考案した。この方法によれば、これまで順方向の解析に用いられてきた任意の地震応答解析プログラムを、ソースを書き換えることなく基盤入射波の推定に利用できる。

なお、本研究では、鉛直アレーによる強震観測が行われており、工学的基盤とみなすことのできる深度で強震記録が得られていることを前提とする。基盤入射波を推定する問題としては、これ以外に、地表での観測記録をもとにする問題も考えられるが、時間領域の解析では時間軸をさかのぼることが本質的に困難であるため、本研究では対象としない。

また、本研究では、酒井ほか⁵⁶⁷⁾の研究と同様、水平成層地盤に鉛直下方からS波が入射する場合を考える。最近では、より進んだ研究として、2次元的地盤に下方から入射したS波を推定しようとする研究もある⁸⁾。しかし、この場合は、2次元の構造物の影響により、様々な方向に反射波が進行すると考えられ、これを一般的な粘性境界の式で取り扱うことは難しいため、本検討では対象外とする。

2. 提案法

提案法は粘性境界の式⁹¹⁰⁾に基づいているので、まずはその概要を述べる。水平成層地盤に鉛直下方からS波が入射する場合を考え、反射波も鉛直下方に帰っていくものとする（図-1）。このとき、基盤における変位

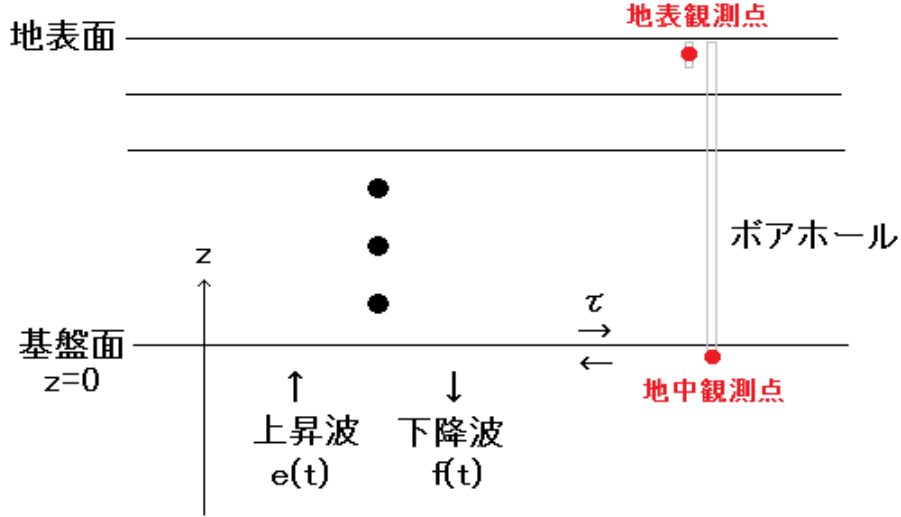


図-1 本研究で対象とする条件

$u(t, z)$ は次式のように表すことができる.

$$u(t, z) = e\left(t - \frac{z}{\beta}\right) + f\left(t + \frac{z}{\beta}\right) \quad (1)$$

ここに z は鉛直上向きにとった座標（基盤面で $z = 0$ とする）、 $e(t)$ は上昇波、 $f(t)$ は下降波、 β は基盤のS波速度である．式(1)の両辺を t で微分し $z = 0$ とくと

$$\dot{u}(t, 0) = \dot{e}(t) + \dot{f}(t) \quad (2)$$

となる．また、式(1)の両辺を z で微分し、両辺に基盤のせん断剛性 $G = \rho\beta^2$ を乗じ（ ρ は基盤の密度）、 $z = 0$ とくと

$$\tau(t, 0) = \rho\beta\{-\dot{e}(t) + \dot{f}(t)\} \quad (3)$$

となる．ここに $\tau(t, z)$ は基盤におけるせん断応力である．式(2)(3)から $\dot{f}(t)$ を消去すると、

$$\tau(t, 0) = \rho\beta\{\dot{u}(t, 0) - 2\dot{e}(t)\} \quad (4)$$

が得られる．これが粘性境界の基礎式である．通常の順方向の地震応答解析では、基盤面より上方の地盤の振動を表す運動方程式と式(4)を連成し、 $2\dot{e}(t)$ （いわゆる2E波）を既知として与え、運動方程式を解く．

一方、基盤入射波の推定方法である酒井ほか⁵⁹⁾の方法では、基盤面より上方の地盤の振動を表す運動方程式と式(4)を連成するところまでは順方向の解析と同じであるが、基盤での観測記録 $\dot{u}(t, 0)$ を既知として与え、 $2\dot{e}(t)$ を出力する．すなわち未知量と既知量が順方向の

問題とは入れ替わっているの、運動方程式の係数行列が変化し⁵⁹⁾、順方向の問題を解くために書かれた解析プログラムをそのままでは利用できない．この点が、本手法が広く普及しているとは言えない理由の一つではないかと考えている．

ところで、基盤面より上方の地盤の地震応答計算において、基盤面での観測記録を既知として与えることは、Dirichlet境界条件を与えることに相当し、境界条件としては必要十分である．よって、基盤面より上方の地盤の地震応答計算は、式(4)との連成を考えるとなく、独立に進めることができる．そして、いったんそれを行えば、基盤面でのせん断応力が求まるので、式(4)を用いることで2E波が得られる．2E波を求める式としては、式(4)を変形した次式がわかりやすい．

$$2\ddot{e}(t) = \ddot{u}(t, 0) - \frac{\dot{\tau}(t, 0)}{\rho\beta} \quad (5)$$

以上が提案法の手順である．この手順によれば、これまで順方向の解析に用いられてきた任意の地震応答解析プログラムを、ソースを書き換えることなく基盤入射波の推定に利用できることになる．

なお、ここまでは媒質境界としての基盤面の深さに地中地震計があるという設定（図-1）で説明を進めてきたが、地中地震計の深さは媒質境界の深さより深くても構わない．その場合、地中地震計の深さに仮想的な「基盤面」を設定すれば、ここまでの議論と同じ議論が展開できる．

また、鉛直アレーでは、基盤での記録と同時に、地表や中間層での記録が得られると考えられる．したがって、上記の手順において基盤面より上方の地盤の地

表-1 FLIPによる解析のための地盤モデル¹³⁾

層厚 (m)	材料	密度 (g/cm ³)	初期せん断剛性 (kPa)	基準有効拘束圧 (kPa)	内部摩擦角 (度)
3.4	まさ土	1.8	79380	63	36
4.6	まさ土	1.8	79380	63	36
1.0	シルト	1.7	74970	143	30
8.0	まさ土	1.8	79380	63	36
13.0	粘性土	1.7	74970	143	30
30.0	砂質土	1.8	79380	63	36
23.0	粘性土	1.7	74970	143	30

*第2層と第4層では過剰間隙水圧の発生を考慮しており、そのパラメタは
変相角28度, W1=6.0, P1=0.5, P2=0.8, C1=2.43, S1=0.005.

*レーレー減衰定数 β は0.002.

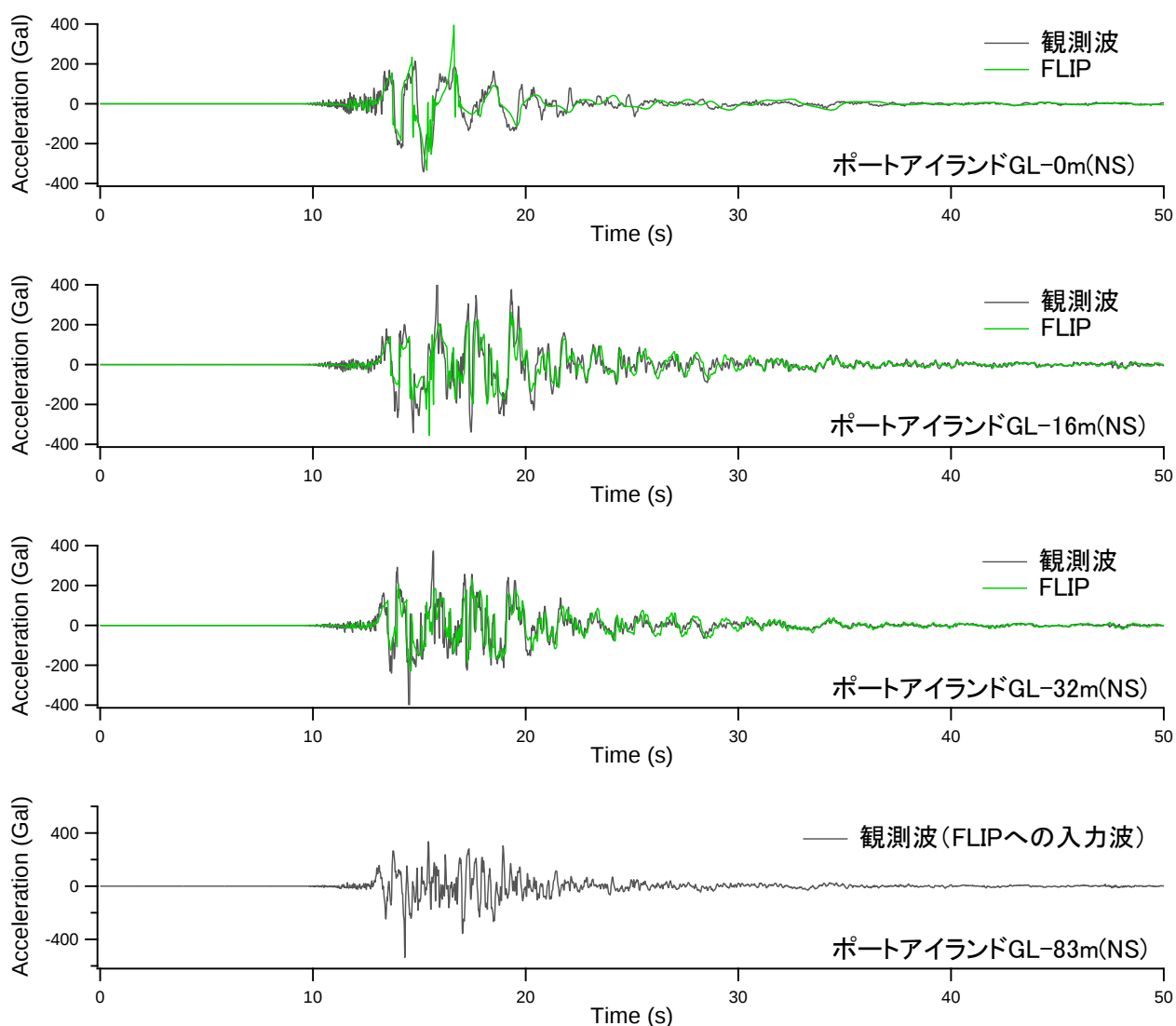


図-2 GL-83mの観測波を入力したFLIPの解析結果(加速度波形)

震応答計算を行う際、地表や中間層での計算結果を観測結果と比較して、地盤の地震応答計算が精度よく行われていることを確認することが望ましい。

以上を踏まえ、提案法の手順をまとめると以下の通りとなる。

- ①土質調査結果に基づいて対象地点の地盤モデルを作成する。
- ②基盤面での観測記録を既知として与え、基盤面より上方の地盤の地震応答計算を、適切な構成則を用いて時間領域で行う。

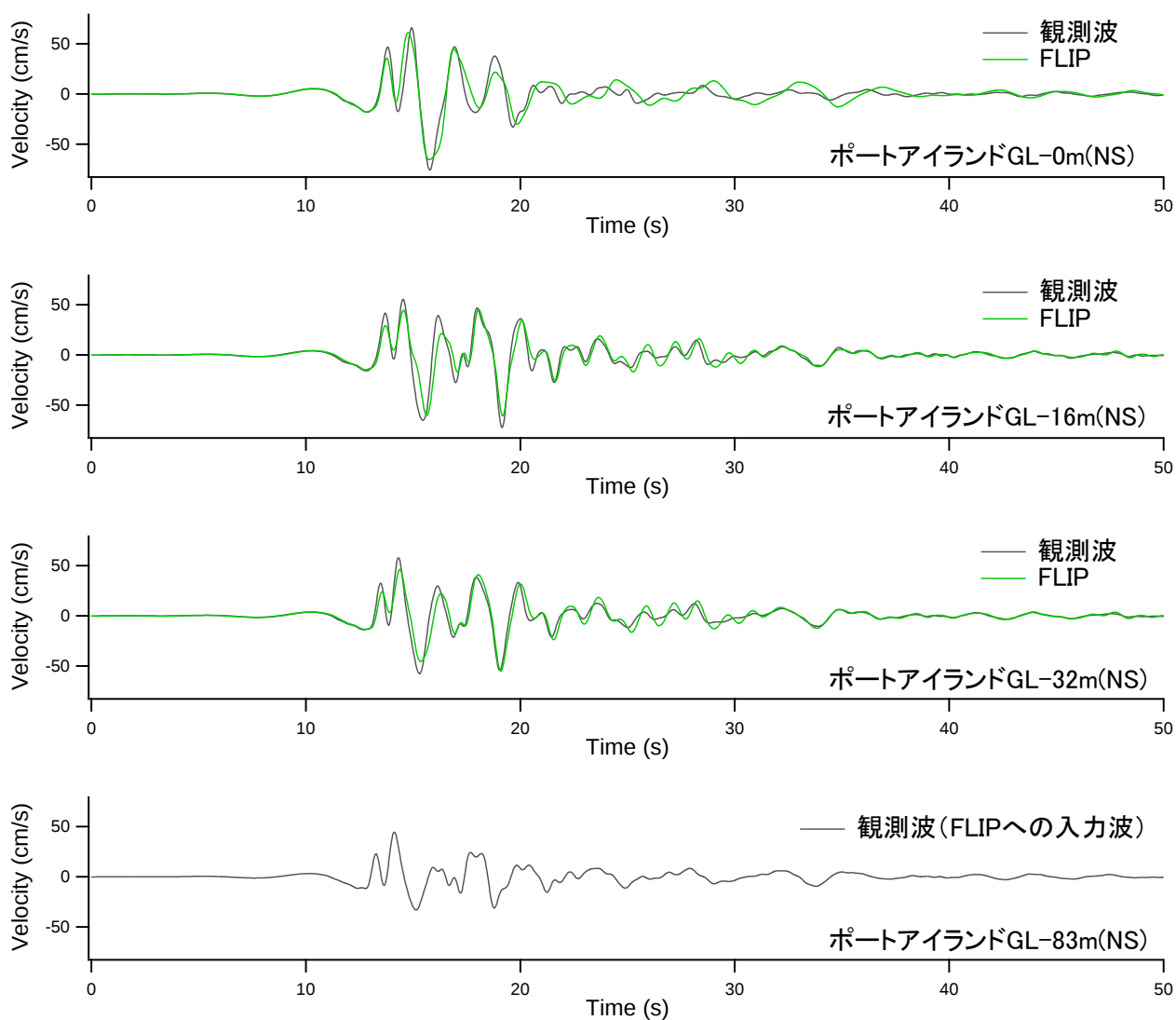


図-3 GL-83mの観測波を入力したFLIPの解析結果（速度波形）

- ③地表や中間層での計算結果を観測結果と比較して、地盤の地震応答計算が精度よく行われていることを確認する。
- ④精度が不十分であれば地盤モデルのチューニングを行う。
- ⑤基盤面でのせん断応力の時刻歴を出力し、式(5)により2E波を求める。

3. 数値計算例

ここでは、提案法の適用事例として、兵庫県南部地震におけるポートアイランドの鉛直アレー観測記録をもとに、基盤入射波の推定を行った。

解析には有効応力解析プログラムFLIP¹⁰⁾を用いた。解析に必要な地盤モデルは表-1のものをを用いた。表-1の物性は、神戸港の岸壁を対象とした2次元の有効応力解析¹²⁾に用いられたパラメタを参考に設定¹³⁾したものである。

まず、GL-83mにおける観測波（NS成分、ただし設置方位誤差に関する補正⁹⁾を施したもの）（図-2および図-3の下段）を入力した地震応答計算を行い、地盤モデルの妥当性を確認するために、他の地震計が設置されている深度（GL-0m, -16m, -32m）における波形を出力し、観測波との比較を行った。その結果を図-2および図-3の1～3段目に示す。観測結果の再現性は非常に良好であり、このことから、表-1の地盤モデルは、対象地点における地盤の動的特性を表現するモデルとして適切であると考えられる。

次に、GL-83mにおけるせん断応力の時刻歴を出力し（図-4）、これを時間微分し、 $\rho\beta$ で除すことにより式(5)の右辺第2項を求めた（図-5）。ここで $\rho = 2.0 \text{ g/cm}^3$ 、 $\beta = 363 \text{ m/s}$ とした。

さらに、これと観測波を加えることにより、最終的に2E波を算定した。算定した2E波を観測波（E+F波）と比較して図-6に示す。得られた2E波は、観測波と位相特性がよく似ており、振幅は観測波より大きい。振

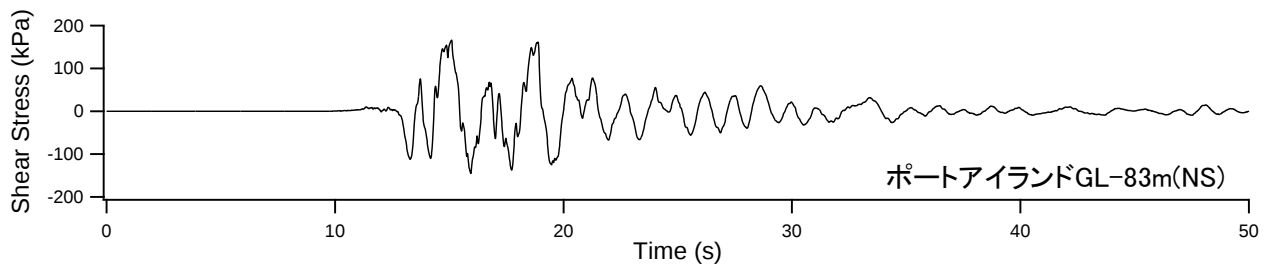


図-4 GL-83mにおけるせん断応力の時刻歴

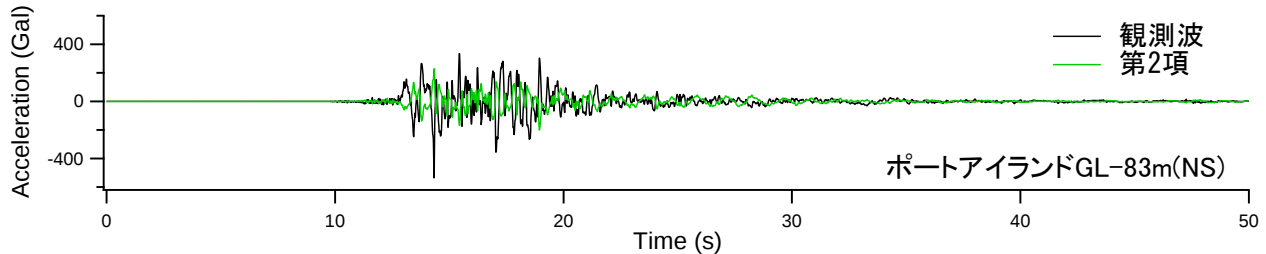


図-5 式(5)の右边第2項 (第1項すなわち観測波との比較)

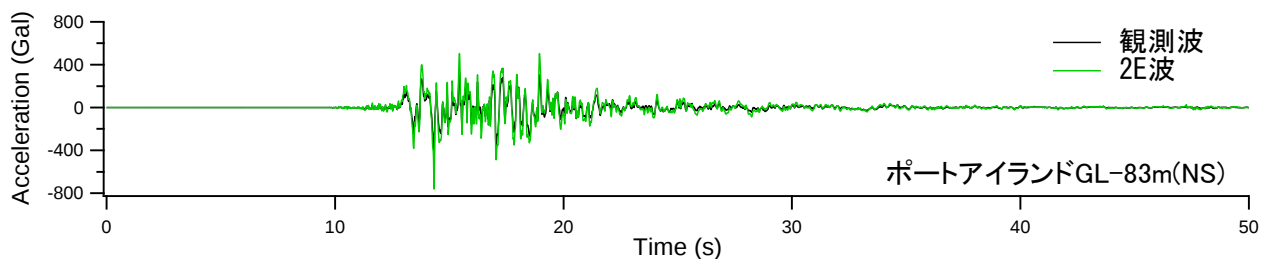


図-6 最終的に求められた2E波 (観測波すなわちE+F波との比較)

幅が観測波より大きいのは、観測波においては上昇波と下降波の最大値同士が加算されることはまずないのに対し、2E波の最大値は上昇波の最大値の2倍となるためである。

念のため、ここで得られた2E波を粘性境界を介してFLIPに入力し、各深度での応答の計算結果を、GL-83mの観測波を入力した先述の解析結果と比較してみた。結果を図-7に示す。両者の結果はよく整合していることがわかる。

著者は以前に同じ地点における基盤入射波(2E波)を周波数領域における等価線形解析(SHAKE)²⁾により求めたことがある⁴⁾。そのときに求めた波形と、今回新たに時間領域の解析で求めた2E波との比較を行ってみた。結果を図-8に示す。また、図-9は図-8の10~30秒を拡大したものである。これらの図からわかるように、両者は結果的には大きく異なるものとはなっていない。したがって、この場合に関して言えば、等価線形解析でも2E波の推定は上手くできていたと解釈できる。このとき著者が実施した等価線形解析では、GL-83mの観測波を入力し、他の深度での観測結果を(FLIPの場合ほどではないにせよ)ある程度再現できることを確認したうえで、基盤入射波の推定を行っている⁴⁾。このような手続きを踏んだことにより、ひずみレベルが大き

い場合であるにも関わらず、等価線形解析で基盤入射波を良好に推定できていたとも解釈できる。

4. まとめ

鉛直アレーによる強震観測記録をもとに、時間領域で基盤入射波を推定する方法について再考した。既往の方法としては、基盤面より上方の地盤の振動を表す運動方程式と粘性境界の式を連成し、通常は入力項目である基盤入射波を出力項目とする方法が提案されている。それに対してここでは、これらを連成させることなく、基盤面より上方の地盤の応答を先に求め、粘性境界の式を後から適用して基盤入射波を推定する方法を考案した。この方法によれば、これまで順方向の解析に用いられてきた任意の地震応答解析プログラムを、ソースを書き換えることなく基盤入射波の推定に利用できる。

提案法の適用事例として、兵庫県南部地震におけるポートアイランドの鉛直アレー観測記録をもとに、有効応力解析プログラムを用いて基盤入射波の推定を行った。推定された基盤入射波は、著者が以前に周波数領域における等価線形解析により推定したものと、結

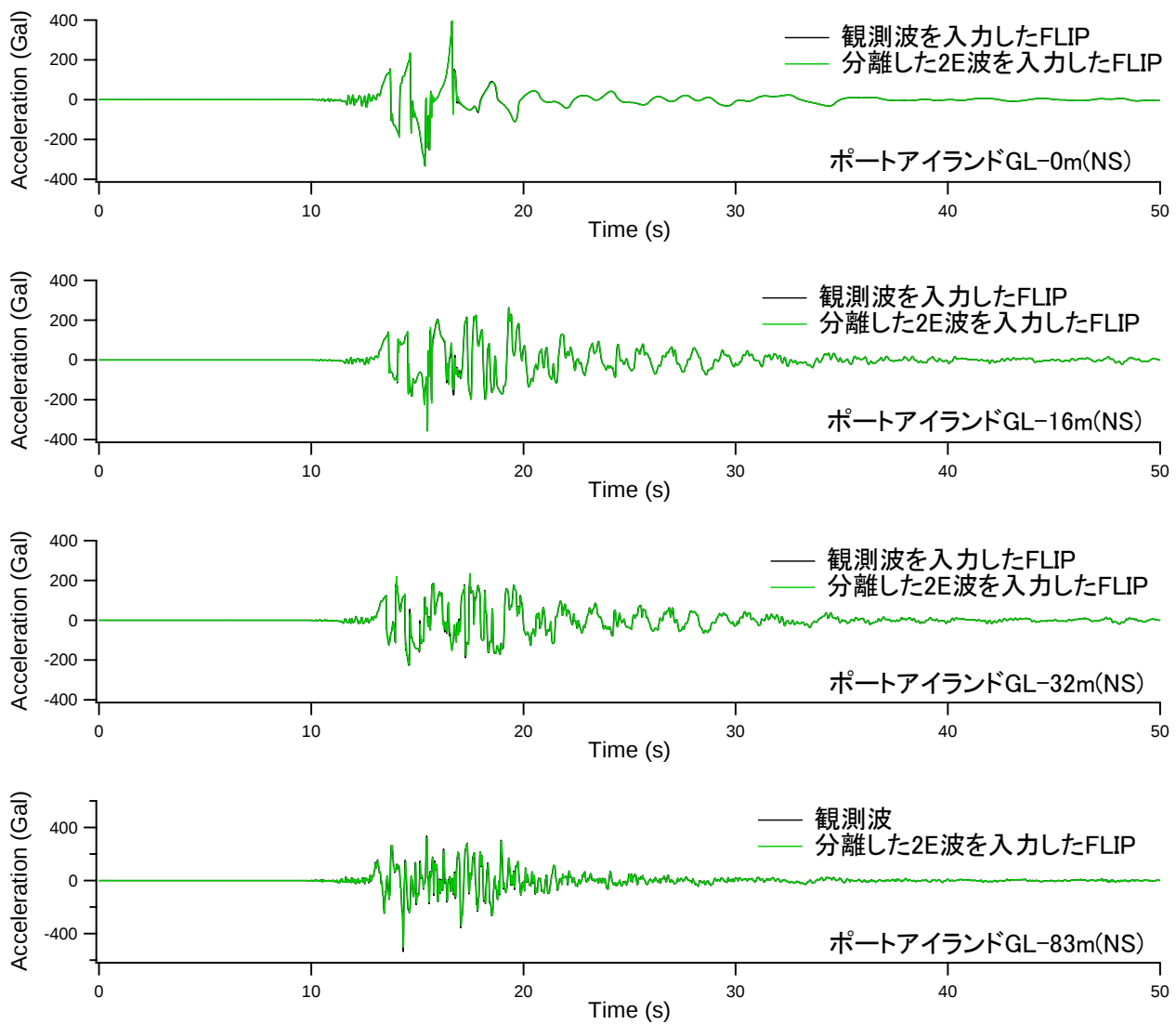


図-7 分離した 2E 波を入力した FLIP 解析結果と GL-83m の観測波を入力した FLIP 解析結果

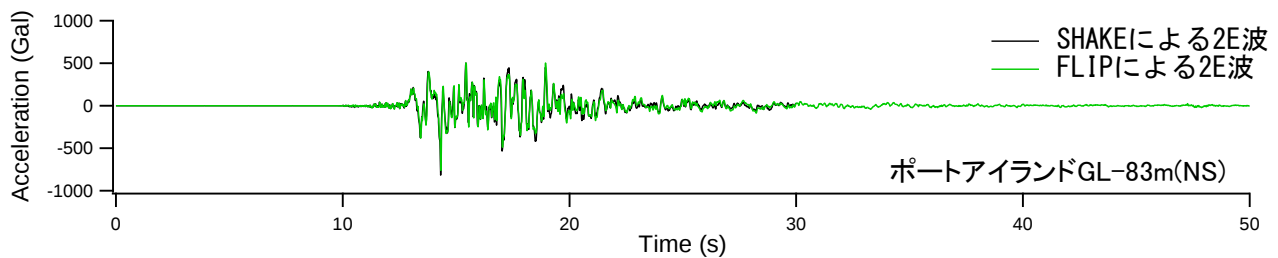


図-8 最終的に求められた 2E 波と、SHAKE により求められた 2E 波

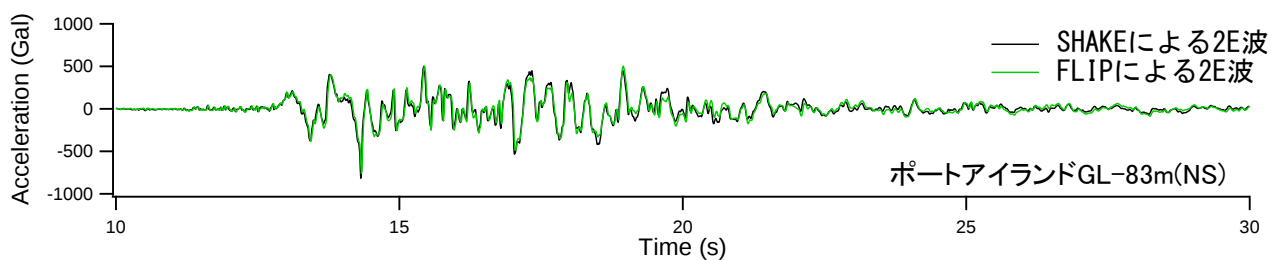


図-9 図-8 の 10～30 秒を拡大したもの

果的に大きく異なるものではなかった。

基盤入射波の推定に時間領域の解析を用いることの

メリットは、言うまでもなく、詳細な地盤の応力～ひずみ関係を取り込むことである。提案法を活用する

ことにより、基盤入射波の高精度な推定に対する敷居が従来より低くなることが期待できる。

参考文献

- 1) 吉田望：地盤の地震応答解析，鹿島出版会，2010.
- 2) Schnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B.: SHAKE – A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, EERC Report, Vol.72, No.12, University of California, Berkley, 1972.
- 3) 末富岩雄，吉田望：兵庫県南部地震における地盤の非線形挙動，第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，土木学会，pp.65-72，1997.
- 4) 野津厚：距離減衰式から推定した基盤加速度と設計震度の関係，港湾技研資料，No.893，1997.
- 5) 酒井久和，澤田純男，土岐憲三：時間領域での基盤入力地震動の推定法に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.577/I-41，pp.53-64，1997.
- 6) 酒井久和，澤田純男，土岐憲三：ポートアイランドにおける時間領域での基盤入力地震動の推定，土木学会論文集，No.612/I-46，pp.373-378，1999.
- 7) 酒井久和：構造物の動的非弾性応答解析における非反復時間積分法と地震工学への応用に関する研究，京都大学博士論文，1998.
- 8) 野田利弘，山田正太郎，浅岡顕，澤田義博：表層地盤の多次元非線形性を考慮した基盤上昇波推定法，地震学会秋季大会，S15-20，2016.
- 9) Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R.L.: Finite dynamic model for infinite media, Proc. ASCE, EM4, pp.859-877, 1969.
- 10) 土岐憲三：構造物の耐震解析，新体系土木工学 11，技報堂出版，1981.
- 11) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, Soils and Foundations, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992.
- 12) 一井康二，井合進，森田年一：兵庫県南部地震におけるケーソン式岸壁の挙動の有効応力解析，港湾技術研究所報告，Vol.36，No.2，pp.41-86，1997.
- 13) 野津厚：非線形パラメタと有効応力解析を併用した強震動評価手法，地震工学論文集，土木学会，Vol.29，pp.114-122，2007.

A NEW PROCEDURE TO ESTIMATE INCIDENT SEISMIC WAVE IN TIME DOMAIN BASED ON VERTICAL ARRAY RECORDS

Atsushi NOZU

A new procedure was proposed to estimate incident seismic wave in time domain based on vertical array records. Conventional methods solve a simultaneous equation including the equation of motion for the response of ground above the bedrock and the basic equation for the viscous boundary, where, unlike ordinary forward analyses, the incident wave is output rather than input. In the new method, there equations do not constitute a simultaneous equation anymore; first, the response of the ground is calculated and then the incident wave is estimated based on the basic equation for the viscous boundary. In the new procedure, any program that has been used for the forward analyses can be used for the estimation of the incident wave, without rewriting the source code. As an application of the method, the incident wave was estimated based on the vertical array records at Port Island, Kobe, Japan, during the 1995 Kobe earthquake.