

時間領域における 基盤入力地震動同定手法の基礎的研究

鈴木 亜季¹・酒井 久和²・隠田 歩乃加³

¹ 学生会員 法政大学大学院 デザイン工学研究科都市環境デザイン工学専攻

(〒162-0843 東京都新宿区市谷田町 2-33)

E-mail: aki.suzuki.7h@stu.hosei.ac.jp

² 正会員 法政大学教授 デザイン工学部都市環境デザイン工学科

(〒162-0843 東京都新宿区市谷田町 2-33)

E-mail: hisakai@hosei.ac.jp

³ 非会員 首都高技術株式会社 技術部 道路交通技術課

(〒105-0001 東京都港区虎ノ門 3-10-11 虎ノ門 PF ビル)

E-mail: h.inda@shutoko-eng.jp

地震後の被災した地盤－構造物系の構造物の被害メカニズムを解明するためには、再現シミュレーション解析がしばしば採用され、この解析を行うには基盤入力地震動が必要である。しかし、当該地点において基盤入力地震動が記録されていることは稀で、一般的に地表の観測記録から算定される。算定は周波数領域での等価線形解析に頼らざるを得ないが、強震時の算定精度が悪く、高精度の推定手法が長年切望され続けている。本研究では、時間領域の基盤入力地震動の同定手法を開発し、多自由度線形系の一様地盤に対して、周期 0.1 秒と 2 秒の基盤入力地震動の同定を時間領域で試みた。結果、限られた条件下ではあるものの、高精度の同定結果が得られた。

Key Words: incident seismic wave, earthquake response analysis, time domain, identification methodology

1. はじめに

近年日本では、首都直下型地震や南海トラフ地震が切迫している。そのため、地震後の被災した地盤－構造物系の構造物の被害メカニズムを解明する必要がある。このためには、再現シミュレーション解析がしばしば採用される。この地盤－構造物系の地震応答解析を行うには、基盤入力地震動が必要である¹⁾が、当該地点において基盤入力地震動が記録されていることは稀であり、一般的に地表の観測記録から算定される。現在用いられている基盤入力地震動の算定手法は、1972 年に開発された SHAKE²⁾を代表とした周波数領域による解析である。この解析手法は、フーリエ変換を用いて運動方程式を周波数領域で解く手法で、等価線形化手法により近似される。しかし、強震時に等価線形化手法による周波数領域の解析による地震動評価を行うと、地盤の非線形性が考慮できず、解析精度が悪くなる。

一方、時間領域による解析は、逐次積分を用いて時々

刻々積分していく解法であり、経時的な地盤物性の変化の表現が可能である。そのため、地盤の非線形な応力－ひずみ関係を再現でき、実現に近い基盤入力地震動の推定を行うことが可能である。よって、基盤入力地震動の高精度な推定を行うためには、非線形性の再現性が高い時間領域での解析が望ましいと考えられる。

これまで時間領域における基盤入力地震動の推定法は、土岐ら³⁾のカルマンフィルターを用いた方法、須藤ら⁴⁾の EK-WLI 法⁵⁾を用いた方法などがあるが、いずれも線形の系にとどまっている。時間領域での解析で、実観測記録から基盤入射波を時間領域で基盤入射波を推定する研究は、国内外研究事例がほとんど無く、例えば、①酒井ら⁶⁾の運動方程式の定式化を行い、時間領域において逐次積分し、地表の地震観測記録から基盤入力地震波を数学的逆算に基づく手法、②酒井ら⁷⁾の兵庫県南部地震のポートアイランドの工学基盤の観測記録との誤差に対するロバスト性についての検討、③野津⁸⁾の鉛直アレーによる基盤面より上方の地盤の応答を先に求め、粘性

境界の式をあとから適用して基盤入射波を推定する方法
④鈴木¹⁰⁾のシステム同定の一手法であるインパルス応答マトリクスの特異値分解を用いて、優位なモード形状を選択し、反復的に誤差を修正していく手法などにとどまっている。

以上の研究では、いずれも地盤パラメータの設定方法や大規模モデルへの適応には難しいなど課題を残しており、地表の観測記録から基盤入力地震動を推定できる時間領域における実用的な手法は未だ確立されていない。そのため本研究では、実用的な時間領域における基盤入力地震動の同定を目指し、基礎的検討を行った。

2. 基盤入力地震動の同定手法

本研究で提案する基盤入力地震動の同定手法の概要について記す。まず推定ターゲットとなる任意の基盤入力地震動（目標基盤入力地震動）を設定し、地震応答解析（図-1 左側）により、地表の加速度応答（目標観測記録）を算定する。次に目標観測記録のみ既知とし、入力地震動のサンプル波（仮入力地震動）を用いて、地震応答解析を行い、地表の応答加速度（仮応答加速度）波形を求める。算定された仮応答加速度波形と、目標観測記録の波形が整合するまで、繰り返し仮入力地震動の振幅を再調整し（図-1 右側）、基盤入力地震動を同定する。

用いた地震応答解析プログラムは、多自由度系減衰モデルの運動方程式（式(1)）と、Newmark の β 法¹¹⁾による式(2)(3)に基づく式(4)の逐次積分法で構築し、表1に示す解析条件を用いて手法の妥当性を検討した。また、使用した目標基盤入力地震動波形は図-2、図-3に示す周期0.1秒と周期2秒の正弦波である。

$$[M]\{\ddot{y}\} + [C]\{\dot{y}\} + [K]\{y\} = -[M]\{\ddot{z}\} \quad (1)$$

$$\dot{y}_{i+1} = \dot{y}_i + (1 - \gamma)\Delta t \ddot{y}_i + \gamma \Delta t \ddot{y}_{i+1} \quad (2)$$

$$y_{i+1} = y_i + \Delta t \dot{y}_i + (0.5 - \beta)\Delta t^2 \ddot{y}_i + \beta \Delta t^2 \ddot{y}_{i+1} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \{\ddot{y}_{i+1}\} = & ([M] + \gamma \Delta t [C] + \beta \Delta t^2 [K])^{-1} \left\{ -[M]\ddot{z}_{i+1} \right. \\ & - [C](\{\dot{y}_i\} + (1 - \gamma)\Delta t \{\ddot{y}_i\}) \\ & - [K](\{y_i\} + \Delta t \{\dot{y}_i\} \\ & \left. + \left(\frac{1}{2} - \beta\right)\Delta t^2 \{\ddot{y}_i\}) \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ はそれぞれ質量、減衰、剛性マトリクス、 $\dot{y}_{i+1}$ 、 y_{i+1} はステップ($i+1$)での速度ベクトル、

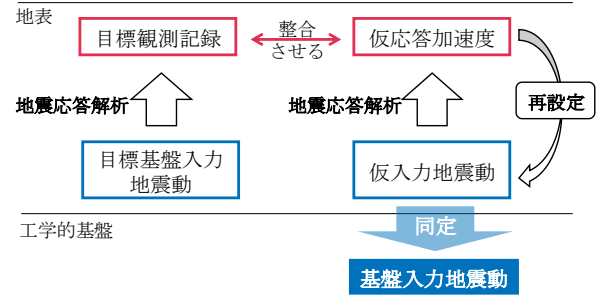


図-1 基盤入力地震動の同定プログラムの概要

表-1 解析条件

層厚 H	(m)	20.0
地層分割数		10
同定時の計算時間間隔 Δt	(s)	0.001
単位体積重量 W_{unit}	(kN/m ³)	16.0
せん断波速度 V_s	(m/s)	200.0
Newmark の β 法の積分パラメータ γ		0.5
Newmark の β 法の積分パラメータ β		1/4

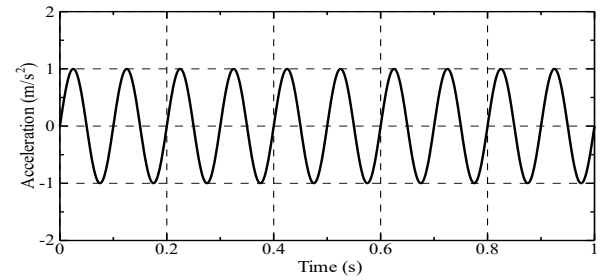


図-2 目標基盤入力地震動（周期0.1秒）

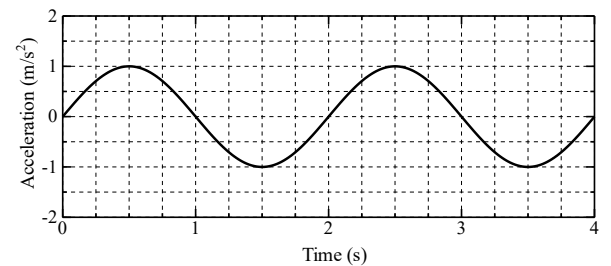


図-3 目標基盤入力地震動（周期2秒）

変位ベクトル、 $\{\ddot{y}_{i+1}\}$ は未知加速度ベクトル、 $\ddot{z}_{i+1}$ は基盤入力加速度、 γ 、 β は Newmark の β 法の時間積分パラメータである。

次に、本研究で用いた仮入力地震動の振幅調整法の手順を示す。まず目標観測記録から、同定する基盤入力地震動が必ず含まれるように、仮入力地震動の振幅の最大値、最小値を設定する。次に振幅の最大値、最小値間を20分割し、仮入力地震動の振幅値を21パターン設定する。設定した21の加速度の振幅値からの仮応答加速度

を算出し、目標観測記録と誤差が少ない、目標観測記録と最も整合性が高い振幅を特定する。この時特定した、整合性が高い仮入力地震動の振幅値を中央値とし、目標基盤入力地震動の振幅の最大値、最小値を再度設定する。この手順を目標観測記録と整合するまで繰り返した。目標基盤入力地震動を周期 2 秒の正弦波で推定した結果を図-4 に示す。図より、同定波形は、振動特性、振幅特性ともにまったく異なる推定結果となっていることが読み取れる。この結果は周期 0.1 秒のケースでも同様の結果が得られた。

3. 同定手法の改良

上記で記した手法では、同定波形は、振動特性、振幅特性ともにまったく異なる推定結果となったことから、以下の 2 点の改良を行った。

(1) 整合性を評価するステップ幅の設定

減衰を有する時刻歴応答解析の性質上、地表まで地震波が伝播する時刻以前に微小な応答を示すことから、各ステップの目標観測記録との整合性を評価する際に、地表に伝わるまでの伝播時間より長い時間幅で仮応答加速度の整合性を評価した。整合性を評価する時間の評価ステップ幅 ST_{width} は以下のように設定する。

$$ST_{pass} = \frac{H}{V_s \times \Delta t} \quad (5)$$

$$ST_{width} = ST_{pass} + M \times 10 \quad (6)$$

($M = 1 \sim 10$)

ここで ST_{pass} は地震波が地表面に伝播するまでの時間に対応する解析ステップ数、 H 、 V_s は均質なサンプル地盤の層厚、せん断波速度を示している。 M は整合性を評価するパターン数で ST_{width} として、 ST_{pass} に 10~100 ステップ追加する 10 種類を用意する。この時の仮入力地震動波は同定するタイムステップ以降振幅が一定の波とする (図-5 参照)。同定時には、10 種類の結果から最も整合性の高い波を採用する。同定フローを図-6 に示す。ここで、目標観測記録との整合性評価において、設定した評価ステップの目標観測記録との平均絶対誤差 (式(7))、二乗平均平方根誤差 (式(8))、標準誤差 (式(9)) の 3 方法を採用した。

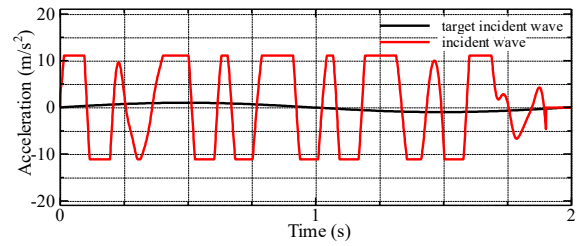


図-4 仮入力地震動の振幅調整法導入後の同定基本解析結果 (周期 2 秒)

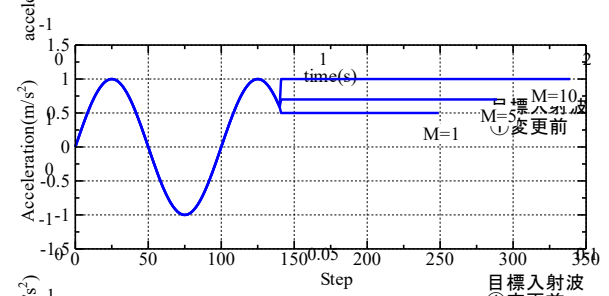


図-5 設定した仮入力地震動波形(0.14 秒)同定後

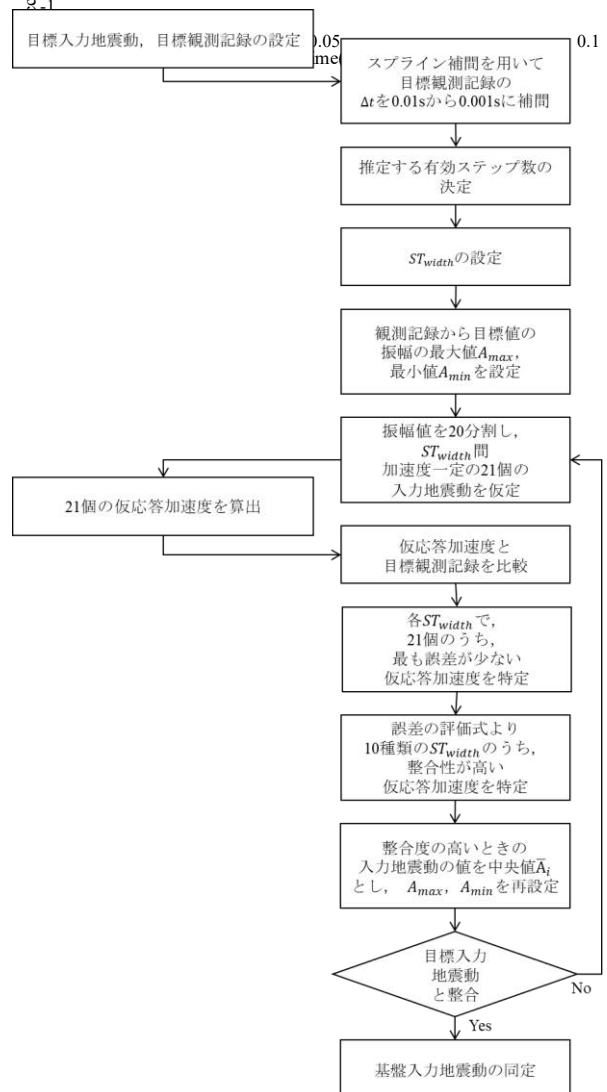


図-6 基盤入力地震動の同定フロー

$$r(j) = \sqrt{\frac{1}{ST_{width}} \sum_{i=1}^{ST_{width}} ACC_{error}} \quad (7)$$

($j = 1 \sim 21$)

$$r(j) = \sqrt{\frac{1}{ST_{width}} \sum_{i=1}^{ST_{width}} (ACC_{error})^2} \quad (8)$$

($j = 1 \sim 21$)

$$r(j) = \sqrt{\frac{1}{ST_{width}(ST_{width} - 1)} \sum_{i=1}^{ST_{width}} (ACC_{error})^2} \quad (9)$$

($j = 1 \sim 21$)

ここで ACC_{error} は、目標観測記録と設定した 21 パターンの仮応答加速度のそれぞれの絶対誤差を示す。

最も同定精度の高い二乗平均平方根誤差を用いた推定結果を図-7、図-8に示す。図より、目標基盤入力地震動を周期 2 秒の正弦波のケース、周期 0.1 秒のケースのどちらにおいても周期特性・振幅特性をともに改善され、精度が格段に向上したが、時間が進むにつれ波形が乱れている。

(2) 評価ステップ幅に対する重み付け

評価ステップ幅の設定後、波形が乱れる原因を分析した結果、いずれの整合性を評価する方法においても、同定波形に高周波の誤差が生じる時刻と、最適解となる時の整合性評価の時間幅が大きくなる時刻が一致している。二乗平均平方根誤差を用いた推定時に、最適解となる時の評価ステップ幅 ST_{width} の分布を図-9、図-10に示す。このことから評価ステップ幅が小さい方が同定精度が高いと考えられ、各ケースに整合性評価の時間幅が小さい方が優位となる重み付けを行った。また、一般に観測記録は、0.01 秒もしくは 0.02 秒で観測されていることが多いことから、0.01 秒ごとにサンプリングした観測記録を、スプライン補間により補間した。同定結果を図-11、図-12に示す。図-11より、目標基盤入力地震動が周期 2 秒の正弦波のケースでは 3~4 秒で推定波形にわずかな乱れが生じたが、全体的に同定精度が大幅に向上し、振幅も設定した目標基盤入力地震動と一致した。一方で図-12より、目標基盤入力地震動を周期 0.1 秒の正弦波のケースでは、周期 2 秒のケースと同様に全体的に同定精度が大幅に向上したが、振幅は目標基盤入力地震動の全般的に 0.9 倍で推定され過小評価となった。特に 1step 目

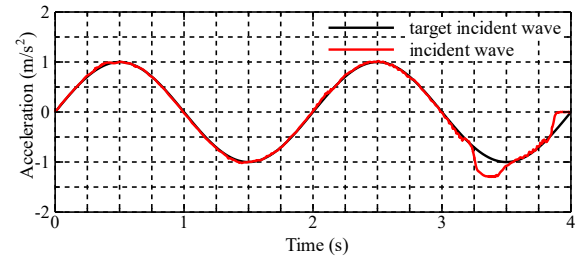


図-7 整合性を評価する時間幅の設定後の同定基盤入力地震動 (周期 2 秒)

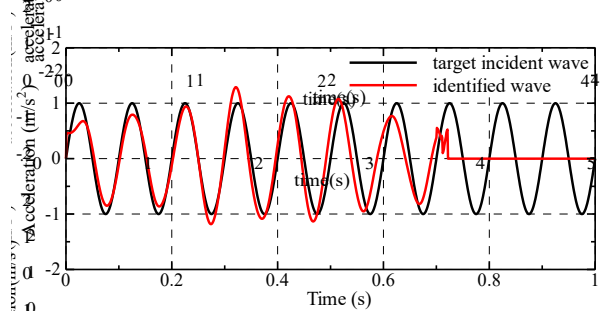


図-8 整合性を評価する時間幅の設定後の同定基盤入力地震動 (周期 0.1 秒)

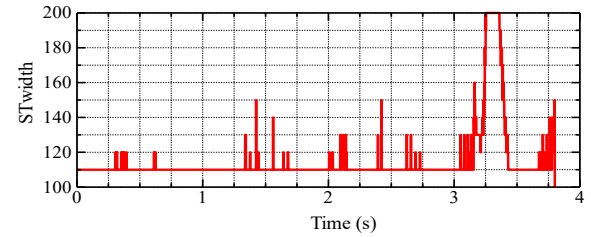


図-9 最適解となる時の評価ステップ幅の分布 (周期 2 秒)

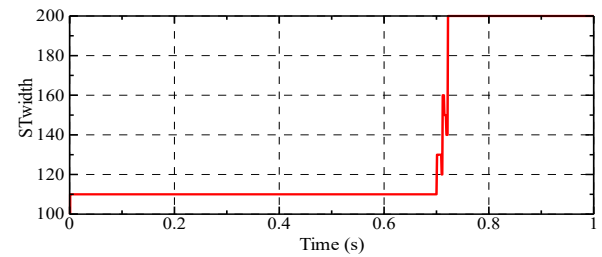


図-10 最適解となる時の評価ステップ幅の分布 (周期 0.1 秒)

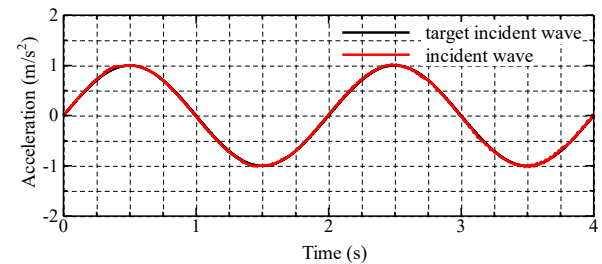


図-11 評価ステップ幅に対する重み付け後の同定基盤入力地震動 (周期 2 秒)

で目標入力地震動振幅の約 0.6 倍の誤差を同定する結果となった。

4. まとめ

本研究では、多自由度線形系の一様地盤に対して、周期 2 秒と周期 0.1 秒の基盤入力地震動の同定を時間領域で試みた。以下に本研究の成果を示す。

- ① 時間領域の解析で、地表面観測記録と整合する基盤入力地震動の振幅同定を試みた。しかし、基盤入力地震動が周期 0.1 秒、周期 2 秒どちらのケースにおいても、同定波形は、振動特性、振幅特性ともにまったく異なる推定結果となった。
- ② 減衰を有する時刻歴応答解析の性質上、地表まで地震波が伝播する時刻以前に微小な応答を示すことから、整合性を評価するステップ幅を設定し応答加速度との整合性を評価した。この際、整合性評価の方法として平均絶対誤差、二乗平均平方根誤差、標準誤差の3ケースで検証を行った。結果、二乗平均平方根誤差を用いたケースの同定精度が最も高く、周期 2 秒の正弦波のケース、周期 0.1 秒のケースのどちらにおいても周期特性・振幅特性をともに改善され、精度が格段に向上した。しかし、いずれのケースも時間が進むにつれ波形が乱れた。
- ③ ②のいずれの整合性を評価する方法においても、同定波形に高周波の誤差が生じる時刻と、最適な整合性評価のステップ幅が大きくなる時刻が一致していたことから、整合性評価のステップ幅が小さい方が優位となる重み付けを行った。結果、目標基盤入力地震動が周期 0.1 秒、周期 2 秒どちらのケースにおいても、全体的に同定精度が大幅に向上し、周期 2 秒のケースにおいては振幅も設定した目標基盤入力地震動と一致した。しかし、周期 0.1 秒の短周期のケースにおいては、振幅が全般的に 0.9 倍で推定され過小評価となった。

以上より、限られた条件下ではあるものの、短周期、長周期どちらの基盤入力地震動においても概ね高精度な同定結果が得られた。今後、短周期の基盤入力地震動のケースにおいて過小評価する原因の追究と、非線形地盤や多様な周波数特性に対する検討を行う予定である。

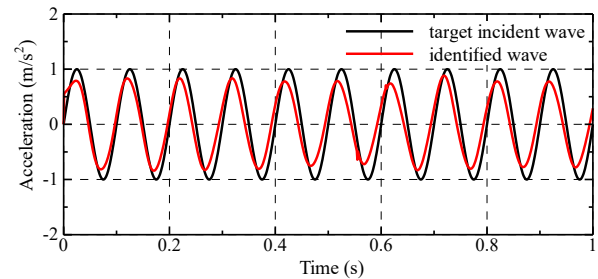


図-12 整合性評価の時間幅に対する重み付け後の同定基盤入力地震動（周期 0.1 秒）

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) Toki, K., Sato, T. and Kiyono, J.: Identification of structural parameters and input ground motion from response time histories, Proc. of the Japan Society of Civil Engineers, No.410/I-12, pp. 243-251, 1989.
- 4) 須藤敦史, 星谷勝, 柳河勇: 絶対応答を用いた地震動入力とシステムパラメータ同定, 構造工学論文集, Vol.41A, pp. 709-716, 1995.
- 5) Hoshiya, M. and Saito, E.: Structural identification by extended Kalman filter, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 110, No. 12, 1984.
- 6) 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, 1997.10.
- 7) 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, 1999.1.
- 8) 酒井久和, 澤田純男: 有効応力解析に基づく基盤入射波の推定, 土木学会論文集, 土木学会論文集, No. 752, I-66, pp.289-297, 2004.1.
- 9) 野津厚: 時間領域における基盤入射波推定法の再考, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.74, No.4 (地震工学論文集第 37 巻), pp.160-167, 2018.
- 10) 鈴木琢也: モーダル反復誤差修正法を用いた弾塑性地盤モデルにおける基盤入力動インバージョン, 日本建築学会構造系論文集, Vol.83, No.749, pp.1021-1029, 2018.7.
- 11) Newmark, N.,M.: A Method of computation for structural dynamics, Proc.ASCE, Journal of Engineering Mechanics Division, Vol.85, pp.67-94, 1959.

A NEW IDENTIFICATION METHODOLOGY FOR INCIDENT SEISMIC WAVE AT ENGINEERING BASEMENT BASE ON DYNAMIC RESPONSE ANALYSIS IN TIME DOMAIN

Aki SUZUKI, Hisakazu SAKAI and Honoka INDA

Incident seismic waves at the engineering basement are frequently used for the numerical simulation of damaged structures and generally estimated using earthquake observation accelerations recorded at ground surfaces. The estimation method commonly used is based on frequency domain analysis such as analytical code, SHAKE. However, the equivalent linear approximation for non-linear ground characteristics in the estimation cannot give high accurate incident waves during strong earthquakes.

In this research, we attempted to identify seismic incident waves at engineering basement based on the dynamic response analysis in time domain. As examples of identifying the seismic wave, the sinusoidal waves of the period of 0.1 and 2.0 seconds at the basement were input to a homogeneous multi-layer ground with linear characteristic in order to verify the availability of the proposed method. We introduced the weighted estimation step width to the procedure in identifying the input wave amplitude. As the results, the identified input seismic waves were decent accurate and the proposed method has a possibility of evaluating incident waves at engineering basement from ground surface observed records.