

## 地盤系サブストラクチャ・オンライン地震応答実験における数値積分法の検討 —10 層系地盤に対する安定性—

### Study on Numerical Integration Method in Geotechnical Substructure-Online Earthquake Response Experiment —Stability of 10-layer ground—

○中島克海<sup>1</sup>, 山田雅一<sup>2</sup>, 道明裕毅<sup>2</sup>, 井上健太<sup>3</sup>\*Katsumi Nakajima<sup>1</sup>, Masaichi Yamada<sup>2</sup>, Yuki Domyo<sup>2</sup>, Kenta Inoue<sup>3</sup>

Abstract: In this paper, we examined the stability of the impulse acceleration method used for the substructure pseudo dynamic test for geotechnical engineering. The stability condition of the impulse acceleration method requires small incremental time for the highest order natural period. We examined the 3-layer ground. In this report, we examined ten layers. We investigated by comparing the substructure pseudo dynamic test result and time history response analysis result. As a result of examination, response acceleration, response velocity, response displacement in each model showed high correlation. The stability of the impulse acceleration method in the model used in this report was confirmed.

#### 1. はじめに

前報その<sup>1)</sup>では、地盤系サブストラクチャ・オンライン地震応答実験による多質点モデルのための数値積分法を検討するために、3 層系の砂地盤に対して陽解法(衝撃加速度法)を用いたサブストラクチャ・オンライン地震応答実験を行い、数値解析結果との比較を行った。

本報では、解析対象となる質点数が増えた場合の地盤系サブストラクチャ・オンライン地震応答実験の安定性を検討する。数値積分法に陽解法を用いる場合、系の最小の固有周期に対しても安定条件を満足する必要がある。液状化を対象とした検討では、一般に地表面付近を対象としているため、本報では、深さ 18m の 10 層系の砂地盤に対する実験を行い、その実験結果と時刻歴応答解析結果の比較を行った。

#### 2. 実験概要

本報では 10 層からなる地盤モデルを対象に、サブストラクチャ・オンライン地震応答実験を行った。

10 層からなる地盤条件のパラメータを Table1 に示す。本報で実施したサブストラクチャ・オンライン地震応答実験で想定する 10 層地盤は、地下水位 3.6m の深さ 18m とし、1, 2 層目を層厚 1.8m の不飽和砂層、3~10 層目を層厚 1.8m の飽和砂層とした。また、時刻歴応答解析と比較するために不飽和層である 2 層目をオンライン地震応答実験層とした。実験層以外の各層は非線形解析層とした。モデルの初期状態での固有周期を同表にあわせ示した。実験に用いた試料は豊浦砂 ( $\rho_s=2.631\text{g/cm}^3$ ,  $e_{\max}=0.98$ ,  $e_{\min}=0.61$ ), 供試体は JGS 0550 に準拠し、空中落下法により中空円筒状(高さ 10cm, 外径 10cm, 内径 6cm)に作製し、圧密後の相対密度

$Dr=60\%$ とした。Fig.1 に入力地震動の加速度波形を示す。入力地震動は、前報その 1 と同様のもの<sup>2)</sup>を用い、最大加速度は 200gal とした。地震動の刻み時間  $\Delta t$  は 0.001 秒とし、時刻歴応答解析結果については比較のために  $\Delta t=0.01$  での検討も併せて行った。実験の詳細については、前報その 1 を参照されたい。

#### 3. 実験結果

サブストラクチャ・オンライン地震応答実験結果(以下、実験結果と称す)より得られた応答加速度、応答速度、応答変位を Fig.2 (a) ~ (i) に示す。なお、本報では 10 層の実験結果より 3 層分(深度 1.8~3.6m 付近, 7.2~9.0m 付近, 16.2~18m 付近)の結果を抜粋した。同図には、実験結果を点線で示し、 $\Delta t=0.001$  での時刻歴応答解析結果を黒の実線、 $\Delta t=0.01$  の解析結果をグレーの実線で併せ示した。同図より、点線で示した地震

Table 1. Ground condition

Layer No.	Layer thickness H (m)	Wet density $\rho_w$ (g/cm <sup>3</sup> )	Void ratio e	Effective overburden pressure $\sigma'_v$ (kN/m <sup>2</sup> )	Initial shear modulus $G_0$ (kN/m <sup>2</sup> )	Reference strain $\gamma_r$ (%)	Natural period T(sec) [degree]
1	1.8	1.499	0.756	22.7	$4.17 \times 10^4$	0.019	0.345 [1]
2*	1.8	1.499	0.756	79.5	$5.96 \times 10^4$	—	0.132 [2]
3	1.8	1.929	0.756	124.4	$8.83 \times 10^4$	0.049	0.084 [3]
4	1.8	1.929	0.756	151.8	$9.63 \times 10^4$	0.055	0.061 [4]
5	1.8	1.929	0.756	179.1	$1.04 \times 10^5$	0.061	0.049 [5]
6	1.8	1.949	0.719	206.7	$1.19 \times 10^5$	0.071	0.041 [6]
7	1.8	1.949	0.719	234.6	$1.25 \times 10^5$	0.076	0.035 [7]
8	1.8	1.970	0.682	262.8	$1.42 \times 10^5$	0.097	0.032 [8]
9	1.8	1.970	0.682	291.3	$1.48 \times 10^5$	0.10	0.028 [9]
10	1.8	1.970	0.682	319.8	$1.54 \times 10^5$	0.11	0.025 [10]

\*Experimental layer

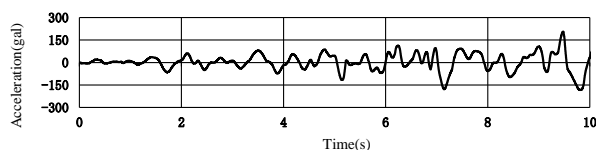


Fig.1. Input ground motion

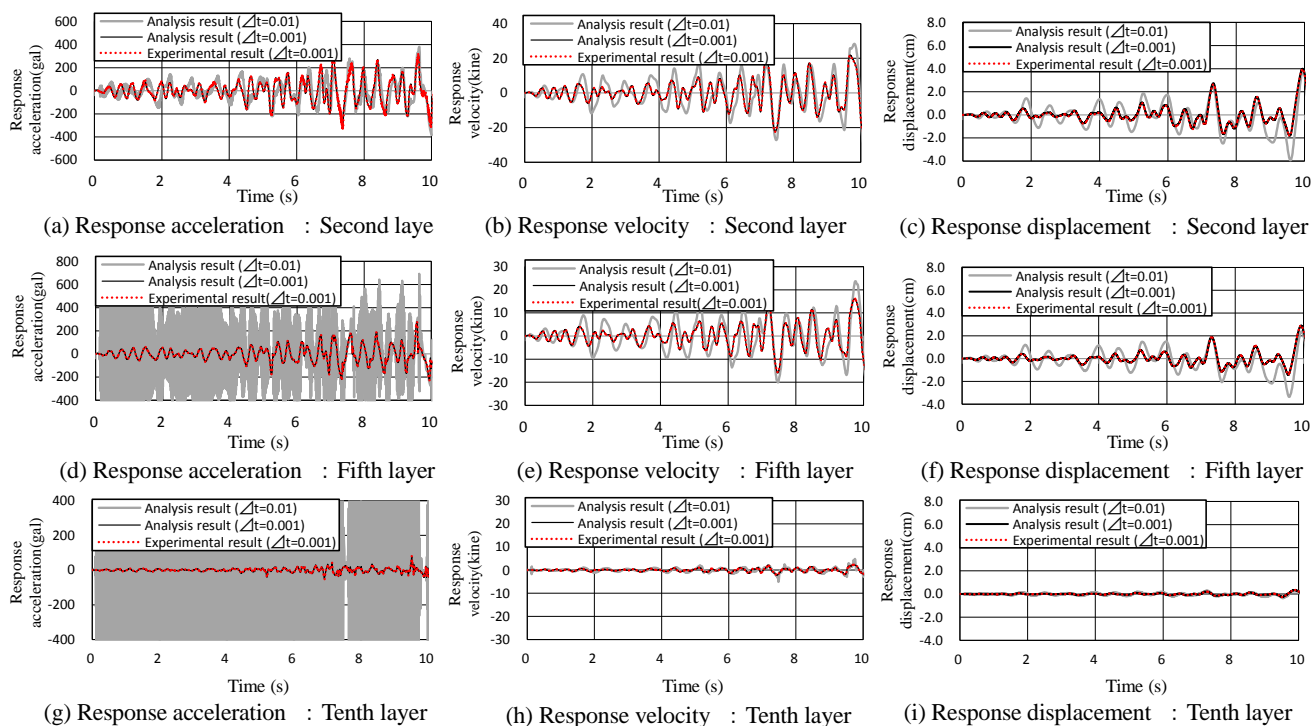


Fig.2. Response time history

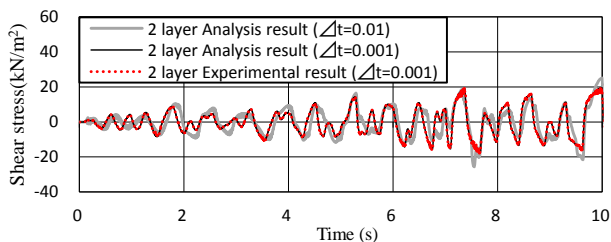


Fig.3. Shear stress time history

動の  $\Delta t=0.001$  を用いた実験結果と黒線で示した同一の地震動刻み時間による時刻歴応答解析結果は良い相関を示しており、陽解法の安定条件を満足していることがわかる。次に  $\Delta t=0.01$  における 10 層モデルの時刻歴応答解析結果と実験結果の比較を行った。同図 (d)、(g) より  $\Delta t=0.001$  の時のような良い相関はみられず陽解法の安定条件を満たしているとはいえない。加えて、地表面付近の層 (2 層目) の応答変位を比較すると、同図 (c) より  $\Delta t=0.001$  の解析結果は概ね同様の挙動を示しており、最大応答変位も 10 秒ごろに 4cm 程度を示している。  $\Delta t=0.01$  の解析結果はやや同様の挙動を示しているが、  $\Delta t=0.001$  の解析結果ほど正確な挙動ではないとわかった。また応答加速度は乱れが大きく  $\Delta t=0.01$  では良い解析結果は得られないことがわかった。

次に、オンライン地震応答実験で発生したせん断応力について比較する。 Fig.3 に、実験結果より得られた実験層のせん断応力の時刻歴を点線で示し、  $\Delta t=0.001$  での時刻歴応答解析結果を黒の実線、  $\Delta t=0.01$  の解析結

果をグレーの実線で示した。  $\Delta t=0.001$  において、点線で示した実験結果と実線で示した時刻歴応答解析結果におけるせん断応力時刻歴は、差違がほとんど確認されず、概ね良い相関を示していることが見て取れる。一方で、  $\Delta t=0.01$  の解析結果に着目すると実験結果と若干ではあるが、異なる挙動となっていることが見て取れる。これは先に述べた応答変位の差によるものと考えられ、それにより復元力特性にも差異がみられたと考えられる。

以上より、10 質点の地盤モデルを対象として、陽解法を用いたサブストラクチャ・オンライン地震応答実験の安定性を確認した。

#### 4. まとめ

本報告では、地盤系サブストラクチャ・オンライン地震応答実験のための数値積分法を確認するために、陽解法を用いて 10 層系の砂地盤を対象としたサブストラクチャ・オンライン地震応答実験を行った。その実験結果と、時刻歴応答解析結果を比較し、概ね良い相関を示したことから、本報で用いたモデルにおける数値積分法の安定性を確認した。

#### 【参考文献】

- 1) 松田健 他:地盤系サブストラクチャ・オンライン実験における数値積分法の検討 - その 1 3 層系地盤に対する安定性 -,平成 30 年度日本大学理工学部学術講演会予稿集,2018.
- 2) 土質工学会:地盤と土構造物の地震時の挙動に関するシンポジウム発表論文集,pp.50-61,1989.