

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  
 -3 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 3-layer ground -

○松田健<sup>1</sup>, 山田雅一<sup>2</sup>, 道明裕毅<sup>2</sup>, 井上健太<sup>3</sup>

\*Takeru Matsuda<sup>1</sup>, Masaichi Yamada<sup>2</sup>, Yuki Domyo<sup>2</sup>, Kenta Inoue<sup>3</sup>

Abstract: In this study, we conducted substructure pseudo dynamic test and examined the influence of explicit method on experimental results. In order to investigate the effect of numerical integration on pseudo dynamic test, explicit method is used, a comparison of the experimental result and the time history response analysis result of three layer ground model. In the three layer ground model used in this report, there was hardly any difference between the experimental result and the analytical result of the explicit method, and its stability was confirmed.

1. はじめに

液状化現象が発生するような地盤の復元力特性は、破壊近くになるにつれて複雑な挙動を示すことが知られている。そのような地盤の地震時挙動を検討するために、片田・伯野は実験と解析を組み合わせた地盤系オンライン実験システムを提案した<sup>1)</sup>。この地盤系オンライン実験システムは、その後、日下部によりサブストラクチャ・オンライン地震応答実験システムとして多質点系への拡張が行なわれた<sup>2)</sup>。

日下部は、数値積分に陽解法（衝撃加速度法）を用いており、これは復元力特性のモデル化を必要としないため、特に微小なひずみ域から強い非線形性を示す地盤への適用性は高いと言える。

一方で、この陽解法は、解の安定条件が非常に厳しく、特に多質点系のモデルを対象とした場合には注意が必要であることが知られている<sup>3)</sup>。

本報告では、数値積分法による地盤系サブストラクチャ・オンライン地震応答実験結果への影響を検討するために、陽解法を用い、初期の検討として地表付近の地盤を簡易にモデル化した 3 層系の砂地盤に対する実験結果と時刻歴応答解析結果の比較を行った。

2. 地盤系オンライン地震応答実験における数値積分法

数値積分法については古くから様々な手法があるが、時刻歴応答解析で広く用いられている手法が加速度法である<sup>3)</sup>。この加速度法は、大きく陰解法と陽解法に分類され、地盤系オンライン地震応答実験ではこの加速度法における陽解法が用いられている<sup>2)</sup>。陽解法とは、現在の時刻 t の応答値から時刻 t+刻み時間 Δt における応答を求める時間積分法である。連立 1 次方程式を解く必要がなく、単純な代数計算で決定されるため時間ステップあたりの計算時間は陰解法に比べて少なくなる。しかし、解の安定条件が厳しく固有周期に対して Δt を大きくしすぎると計算結果が発散することがある。また、地震時の地盤挙動に関する検討では、一般に高次モードが影響を及ぼすことは少ないが、陽解法を用いる場合

には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。すなわち、高次モードに対しても安定条件を満たす必要があるため、多自由度の解析においては非常に小さな Δt が必要となる。この解の安定条件への試みとして、日下部<sup>2)</sup>は復元力の更新を数ステップに 1 回とし、解の安定条件の確保と同時に刻み時間に対する実験時間の短縮化、および実験誤差の回避を図っている。中島ら<sup>4)</sup>は Thomas ら<sup>5)</sup>の知見をもとに、陽解法の一部に陰解法を適用する混合積分法を提案した（オペレータ・スプリッティング法）。また、酒井ら<sup>6)</sup>は、線形加速度法と衝撃加速度法を組み合わせた無条件安定となる数値積分法を提案している（非反復時間積分法）。

本研究で用いたサブストラクチャ・オンライン地震応答実験の時刻歴応答解析では、次の運動方程式を用いた。

$$[M]\{\ddot{y}\} + [C]\{\dot{y}\} + [R] = -[M]\ddot{y}_0 \quad (1)$$

ここに、[M]は質量マトリックス、[C]は減衰マトリックス、[R]は復元力マトリックス、 $\ddot{y}$ は絶対加速度、 $\dot{y}$ は相対速度、 $\ddot{y}_0$ は入力加速度である。減衰マトリックスにはレーリー減衰を用いた。なお、第 1 ステップは線形加速度法、第 2 ステップ以降は陽解法を用いた。

3. 実験概要

本報告では、日下部らの知見を基に±10<sup>-5</sup>のせん断ひずみが発生した後の全てのステップを対象に、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を行った。

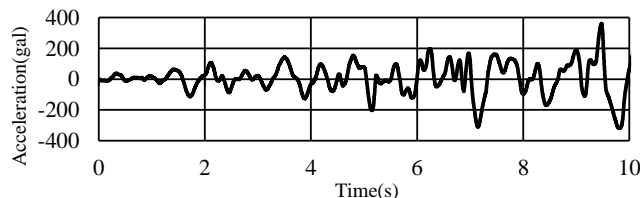


Fig. 1. Input ground motions

Table 1. Ground condition

Layer NO.	Layer thickness H (m)	Wet density ρ <sub>w</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Void ratio e	Effective overburden pressure σ <sub>v</sub> ' (kN/m <sup>2</sup> )	Initial shear modulus G <sub>0</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	Reference strain γ <sub>r</sub> (%)	Natural period T(sec) [degree]
1*	3	1.439	0.829	37.1	4.26 × 10 <sup>4</sup>	—	0.239 [1]
2	3	1.892	0.829	111.0	8.45 × 10 <sup>4</sup>	0.046	0.101 [2]
3	3	1.892	0.829	156.5	9.81 × 10 <sup>4</sup>	0.056	0.061 [3]

\*Experiment layer

1 : 日大理工・学部・建築 2 : 日大理工・教員・建築 3 : 日大理工・院 (前)・建築

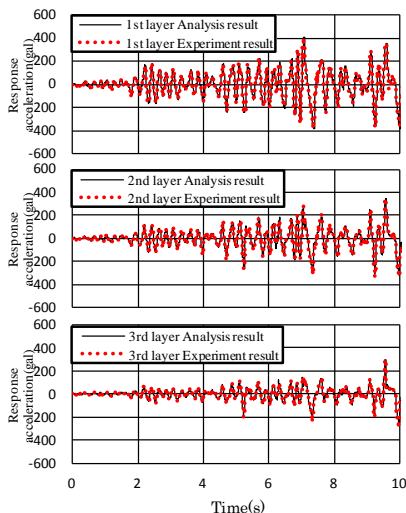


Fig. 2. Response acceleration time history

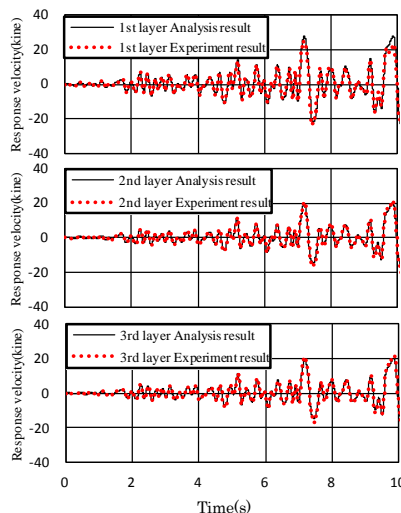


Fig. 3. Response velocity time history

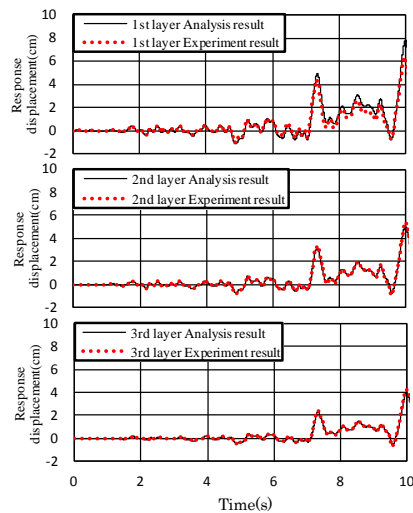


Fig. 4. Response displacement time history

本実験で用いた地盤条件を Table 1 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地盤は、地下水位 3m の深さ 9m, 3 層地盤とし, 1 層目を層厚 3m の不飽和砂層, 2, 3 層目を層厚 3m 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 1 層目をオンライン地震応答実験層, 他の層を非線形解析層とした。オンライン地震応答実験には中空ねじりせん断試験機を用い, 解析層には, H-D モデル<sup>7)</sup>を用いた。また, 本システムでは, 大ひずみ域に至っても精度よく実験を行うことが可能な接線剛性による誤差補正方法を用いた。なお, 実験システムの詳細は文献<sup>8)</sup>を参照されたい。各モデルの初期状態での固有周期を Table 1 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, 圧密後の相対密度を  $D_r=40\%$  とした。初期せん断剛性は, 1 層目 (実験層) には, 供試体に  $\pm 10^{-5}$  のせん断ひずみを与えて得られたせん断力-せん断ひずみ関係から求めた値を用いる。2, 3 層目は, Iwasaki らの経験式<sup>9)</sup>によって求めた値を用いる。なお, 初期せん断剛性の算出に用いる間隙比は, 全層とも相対密度を 40% と仮定した。

Fig. 1 に入力地震動の加速度波形を示す。入力地震動は, 1964 年新潟地震時に秋田県庁の地階で記録された強震記録を震央距離, 距離減衰の違いを考慮して「地盤と土構造物の地震時の挙動に関する研究委員会」(1989)<sup>10)</sup>が設定したものをを用いる。地震動の刻み時間  $\Delta t$  は 0.001 秒, 最大加速度は 350gal とした。

#### 4. 実験結果

Fig. 2~4 に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による実験結果から得られた実験層の応答加速度, 応答速度, 応答変位を点線で示し, 全層を解析層とした時刻歴応答解析結果を実線で併せ示した。Fig. 2 より, 点線で示したオンライン地震応答実験結果と実線で示した時刻歴応答解析結果における応答加速度時刻歴は, 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。それに伴い Fig. 3, 4 より応答速度, 応答変位においても実験結果と解析結果に良い相関が見て取れた。また, Fig. 5 に, 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による実験結果から得られた実験層のせん断応力の時刻歴を点線で示し, 全層を解析層とした時刻歴応答解析結果を実線で併せ示した。Fig. 5 より, 点線で示したサブストラクチャ・

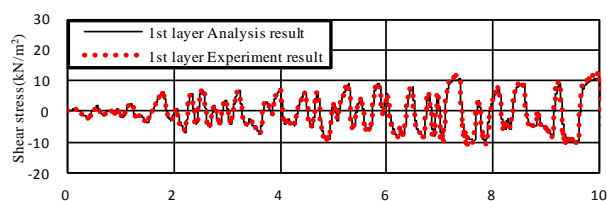


Fig. 5. Shear stress time history

オンライン地震応答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。

以上の結果より, 3 層系の砂地盤を対象とした陽解法によるサブストラクチャ・オンライン地震応答実験の安定性を確認した。

#### 5. まとめ

本研究ではサブストラクチャ・オンライン地震応答実験を行い, 陽解法が実験結果に及ぼす影響について検討した。本報で用いた 3 層系の砂地盤モデルにおいては, 陽解法の実験値と解析値に差はほとんど見られず, その安定性を確認した。

#### 【参考文献】

- 1) 片田敏行 他: オンライン実験による液化地盤の非線形 振動解析, 土木学会論文集, 第 318 号, pp.21-28, 1982.
- 2) 日下部伸: オンライン地震応答実験による地盤の動的挙動に関する研究, 山口大学大学院社会建築工学科博士論文, 1996.
- 3) 柴田明徳: 最新耐震構造解析 第 2 版, 森北出版, 2002.
- 4) 中島正愛 他: サブストラクチャ仮動的実験のための数値積分法-サブストラクチャ法を用いた仮動的実験の開発-, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 417 号, pp.107-117, 1990.
- 5) Hughes, T.J.R et al. : Implicit-Explicit Finite Elements in Nonlinear Transient Analysis, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, pp.159-182, 1979.
- 6) 酒井久和 他: 収束計算を行わない動的非線形 FEM のための時間積分法, 土木学会論文集, 第 507 号, pp.137-147, 1995.
- 7) Hardin, B.O. and Drnevich, V.P. : Shear modulus and damping in soils -design equations and curves-, Proc. Of the American Society of civil engineers, Vol.98, No.SM7, pp.667-692, 1972.
- 8) 粉谷拓実 他: 透水を考慮したサブストラクチャ・オンライン地震応答実験 -その 1 システム概要-, 平成 30 年度日本大学理工学部学術講演会予稿集, 2018.
- 9) Iwasaki, T. et al.: Effects of grain size and grading on dynamic shear modulus of sands, Soils and Foundations, Vol.17, No.3, pp.19-35, 1977.
- 10) 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集, pp.50-61, 1989.