

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層系地盤に対する陽解法の適用性—

Study on Numerical Integration Method in Geotechnical Substructure-Online Earthquake Response Experiment -Applicability of Explicit Method for Three-Layered System Ground-

○小島薫¹ 山田雅一² 道明裕毅²Kaoru Kojima¹, Masaichi Yamada², Yuki Domyo²

Abstract: In this paper, numerical integration method was investigated to substructure pseudo dynamic system. From the results of this test, it was shown that the explicit scheme is an effective numerical integration method for unsaturated and three-layered ground model.

1. はじめに

液化現象が発生するような地盤の地震時挙動を検討するために、片田・伯野ら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¹⁾。この地盤系オンライン実験システムは、日下部らによりサブストラクチャ・オンライン実験システムとして多質点系への拡張が行なわれた²⁾。

日下部らは、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³⁾。この解の安定条件への試みとして、中島ら⁴⁾は Thomas⁵⁾らの知見をもとに、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⁶⁾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）。

本報告では、上記の数値積分法による地盤系サブストラクチャ・オンライン実験結果への影響を検討するために、陽解法を用い、3層系の不飽和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. 数値積分法

2.1 陽解法（衝撃加速度法）

数値積分法については古くから様々な手法があるが、地震応答解析で広く用いられている手法が加速度法である³⁾。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²⁾。陽解法とは、現在の時刻 t の値から時刻 $t + \Delta t$ 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

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、地震時の耐震性に関する検討では、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。

3. 実験概要

3.1 地盤モデル

地盤モデルを Table 1 に示す。検討対象とする地盤は、深さ 30m の3層地盤とし、地表面付近の1層目を実験層とした。

3.2 実験システム

オンライン実験には中空ねじりせん断試験機を用いた。なお、サブストラクチャ・オンライン実験システムの詳細は文献⁷⁾を参照されたい。

3.3 実験試料

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）に製作し、相対密度 $D_r = 60\%$ の不飽和地盤とした。

3.4 解析条件および実験条件

解析条件および実験条件を Table 1 に示す。解析層には、H-D モデルを用いた。入力地震波は、El Centro -NS 成分（最大加速度 270gal, 刻み時間 0.01 秒）を用いた (Figure 1)。数値解析には、陽解法（衝撃加速度法）を用いた。

Table 1. Experimental conditions

Layer No.	Soil classification	Layer thickness (m)	G_0 (kN/m^2)	ρ_s (g/cm^3)	D_r (%)
1(test)	Toyoura sand	10	8.6×10^3	2.631	60.0
2	Toyoura sand	10	3.9×10^3	2.631	—
3	Toyoura sand	10	3.9×10^3	2.631	—

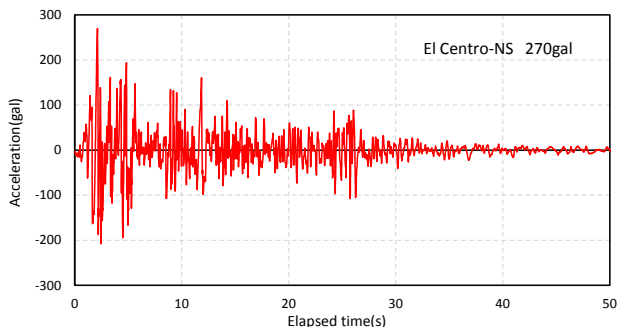


Figure 1. Incident seismic wave

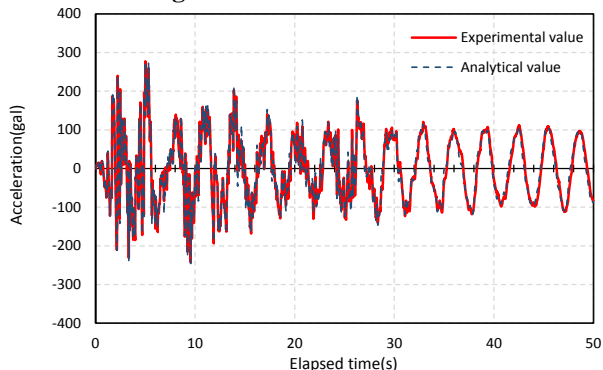


Figure 2. Time history response (Acceleration)

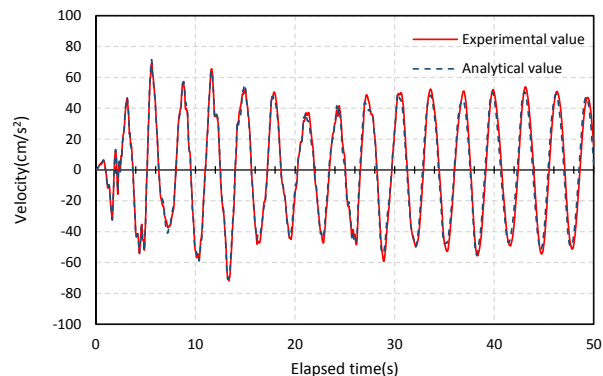


Figure 3. Time history response (Velocity)

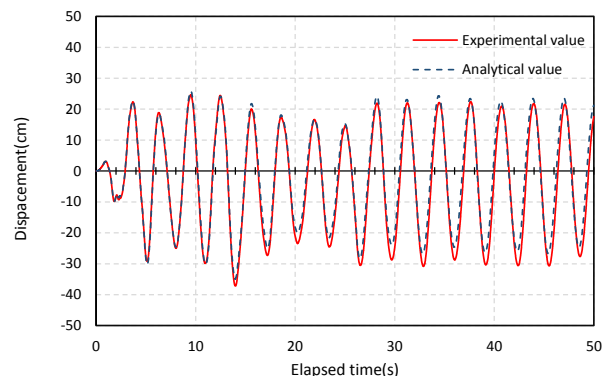


Figure 4. Time history response (Displacement)

また、実験結果の妥当性を検証するため、全層を解析層として同条件下で時刻歴応答解析を併せ行った。

4. 実験結果

Figure 2,3,4 に、陽解法を用いたサブストラクチャ・オンライン実験による実験結果から得られた 1 層目 (実験

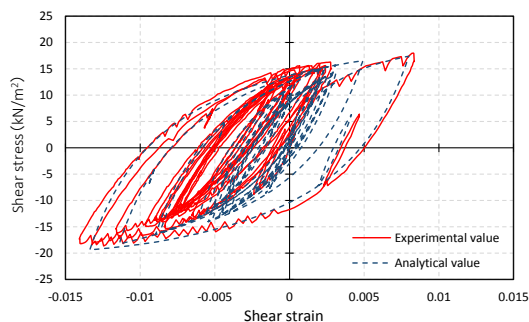


Figure 5. Relationships between shear stress and shear strain

層) の応答加速度, 応答速度, 応答変位を実線で示す。なお、同図中には全層を解析層とした時刻歴応答解析結果を点線で併せ示した。Figure 2 より、実線で示したオンライン実験結果と点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 Figure 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。

Figure 5 には、サブストラクチャ・オンライン実験結果から得られた 1 層目 (実験層) のせん断応力-せん断ひずみ関係を実線で示す。また、同条件での時刻歴応答解析結果を破線で併せ示した。同図より、不飽和地盤における微小ひずみ域での実験結果と、H-D モデルを用いた時刻歴応答解析結果を比較すると概ね良い相関を示していることがみてとれる。

以上の結果より、3 層系不飽和砂地盤を対象とした陽解法によるサブストラクチャ・オンライン実験の有用性を確認した。

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、数値積分法の違いが実験結果に及ぼす影響について検討した。3 層系の不飽和砂地盤においては、陽解法の実験値と解析値に差はほとんど見られず、その有用性を確認した。

【参考文献】

- 1) 片田敏行, 伯野元彦: オンライン実験による液状化地盤の非線形振動解析, 土木学会論文集, 第 318 号, pp21-28, 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, 2002
- 4) 中島正愛, 石田雅利, 安藤和博: 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 pp107-117, 1990
- 5) Hughes, T.J.R, Pister, K.S. and Taylor, R.L.: Implicit-Explicit Finite Elements in Nonlinear Transient Analysis, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, pp159-182,1979
- 6) 酒井久和, 澤田純男, 土岐憲三: 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, pp137-147, 1995
- 7) 堂野前大貴, 山田雅一, 橋本貴統: サブストラクチャ法を用いたオンライン地震応答実験システムの開発, 日本大学理工学部学術講演会公演論文集, 第 60 号, pp190-191, 2016