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

Development of Pseudo-Dynamic Tests system by using Substructure method

○堂野前大貴¹, 山田雅一², 橋本貴統³ *Daiki Donomae¹, Masaichi Yamada², Takanori Hashimoto³

Abstract: The objective of this study is development of pseudo-dynamic tests system by using substructure method. In this paper, pseudo-dynamic tests using the saturated sand were conducted, and then examined its application.

1. はじめに

液状化に対する解析で用いられる有効応力解析では、応 力~ひずみの履歴曲線や過剰間隙水圧を数式でモデル化し て数値解析することで地盤の応答を求めている.一方で,応 答が急変するような復元力特性を示す地盤は、モデル化が 困難とされている. このような地盤に対応する手段として, 実験と解析を組み合わせ複雑なモデル化を行うことなく実 験から直接復元力や過剰間隙水圧を計測し解析に反映させ ることができるオンライン地震応答実験システムが片田・ 伯野ら 1)によって提案された. しかし多層からなる地盤の 全てをオンライン層にすることは、システムが高価になる ばかりでなく実験も複雑化するため、実用化が困難である. この問題に対する一つの取り組みとして解析とオンライン 実験を組み合わせたサブストラクチャ・オンライン地震応 答実験システムが日下部ら2 により提案された. この手法 は、多層から成る地盤の中でも複雑な復元力特性を示す可 能性のある土層にのみオンライン地震応答実験を適用し、 その他の層には数値解析を用いる.これにより多層地盤の 応答を比較的容易に評価することが可能となる.

本報告の目的は、大きな非線形性を示す液状化地盤の応 答を求める際のオンライン実験の有用性を示すことである. そのために、原地盤の応力状態の再現性に優れた中空ねじ りせん断試験機によるサブストラクチャ・オンライン地震 応答実験システムを構築し、弾性供試体と乾燥砂を用いて、 それぞれ検証実験を行った.また飽和砂を用いた実験を行 い、オンライン実験結果と一次元有効応力地震応答解析プ ログラム YUSAYUSA-2³による解析結果を比較し検討した.

2. 開発システムのアルゴリズム

本システムの実験アルゴリズムを以下に要約する.

- 1) 第1ステップは線形加速度法により応答変位を求める.
- 第2ステップ以降は、衝撃加速度法により応答変位を求める.応答変位に相当する計算せん断ひずみの最大値 γ_{c max}が 2×10⁻⁵以下の場合は、初期剛性 G₀を用いた 弾性計算を行う.
- 3) 計算せん断ひずみの最大値である $\gamma_{c max}$ が 2×10⁻⁵を越
- 1:日大理工・院・建築 2:日大理工・教員・建築 3:日大理工・学部・建築

えたらオンライン地震応答実験に移行する.

- (供試体が目標せん断ひずみγcに達した際のせん断応力τ 等の測定を行う.
- 6) 測定したせん断応力 τ.に対し誤差補正を行う.
- 7)ので誤差補正を行ったせん断応力でを用い応答計算を行う.
- 8) 解析層については構成式を用いて、計算せん断ひずみγ_c に相当するせん断応力τを計算する.(本研究では構成式 にH-Dモデル⁴を用いる.)
- 9) 次のステップへの応答値を受け渡し,所定のステップ数まで4) 以降を順次繰返し実行する.
 機器の制御および各センサーからのデータの取得,数値
 解析などはすべて PC によって操作・処理する.なおプログラムには LabVIEW を用いた.
- 3. システムの検証実験
- 3.1 実験概要

実験条件を Table 1 に示す. Casel では本システムのアル ゴリズムの妥当性を確認するために, 弾性供試体(高さ 10cm, 外径 10cm, 内径 6cm)を用いた検証実験を行った. 対象と する地盤は上層の 2 層をオンライン実験層(弾性供試体), 下層の 2 層を非線形解析層とした.入力地震波は, EL centro-NS 成分(最大加速度 50gal)を用いた. Case2 では中小ひず みレベルでのアルゴリズムを確認するためにオンライン実 験層に乾燥砂を用いた実験を行なった.

供試体は各層の中点の有効上載圧を再現した. 実験に用い

Table 1. Experimental conditions

Case	層NO.	層厚	初期せん断剛性	密度
		(m)	(kN/m^2)	(g/cm^3)
1	1	5	4.3×10^{3}	1.96
	2	5	3.7×10^{3}	1.96
	3	5	2.3×10^{4}	2.6
	4	5	3.1×10^{4}	2.6
2	1	5	5.4×10 ⁴	1.48
	2	5	6.4×10^{4}	1.48
	3	5	2.3×10^{4}	2.6
	4	5	3.1×10^4	2.6

た試料は、豊浦砂 ($\rho_s=2.631g/cm^3$, $e_{max}=0.98$, $e_{min}=0.61$),供試体は空中落下法により中空円筒状 (高さ 10cm,外径 10cm,内径 6cm) で相対密度 $D_r = 60\%$ の地盤を想定した。入力地震波は、ELcentro-NS 成分 (最大加速度 200gal)を用いた。

3.2 実験結果

Casel の実験結果を Fig.1 に示す.また、同図中には弾性 解析結果を併せ示した.同図より、実験結果は弾性解析結果 と概ね良い対応を示している.このことより本システムの 小ひずみにおけるアルゴリズムが妥当であることが確認さ れた.

Case2の実験結果を Fig.2 に示す.また、同図中には上層 の2層も非線形解析層とした場合の解析結果を併せ示した. Fig.2 より、実験結果と解析結果に、多少の誤差が見られる ものの概ね良く対応していることから、本システムは中小 ひずみ領域においても妥当であることが確認された.







Fig.2. Pseudo-dynamic test results of dry sand

4. 飽和砂を用いた実験例

4.1 実験概要

実験条件を Table 2 に示す.対象とする地盤は検討実験同様,深さ 20m の4 層系地盤とし,上層の2 層をオンライン 実験層(飽和砂),下層の2 層を非線形解析層とした.なお,B値が 0.95 以上であることを確認した飽和砂地盤である.入力地震波は El Centro-NS 成分(最大加速度 270gal)を 用いた.

屋NO	層厚	初期せん断剛性	密度
眉NU.	(m)	(kN/m^2)	(g/cm^3)
1	5	4.5×10^{4}	1.93
2	5	5.3×10 ⁴	1.93
3	5	2.3×10^{4}	2.6
4	5	3.1×10^4	2.6

Table 2. Experimental conditions

4.2 オンライン実験と有効応力解析の比較

実験結果を Fig.3 に示す.また、同図中には一次元有効応力 地震応答解析プログラム YUSAYUSA-2 による解析結果を併せ 示した.同図より、実験では液状化により応力~ひずみ挙動が 急激に変化し、数式でモデル化するのは困難な応力~ひずみ関 係が示されているのに対して、有効応力解析では数式モデルに よるループを描き続けることから、液状化による動的挙動を十 分には捉えていないと考えられる.このことより、本システム は液状化挙動を再現するのに有効であることが示された.



Fig.3. Pseudo-dynamic test results of saturated sand

5. まとめ

本研究では、複雑な復元力特性を示す地盤に適用可能で あり、かつ原地盤の多層における評価を行うサブストラク チャ・オンライン地震応答実験システムの開発を行った.本 報では、本システムの概要及びアルゴリズムを示すととも に弾性供試体と乾燥砂を用いた検討実験を行い、本システ ムのアルゴリズムの妥当性を示した.また飽和砂を用いた 実験結果から有効応力解析の結果に比べて、本システムを 用いた実験結果の方が、実地盤の液状化挙動を再現するの に有効であることが示された.

【参考文献】

- 1) 片田敏行・伯野元彦:オンライン実験こ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) 吉田望, 東畑郁生: YUSAYUSA-2, SIMMDL-2 理論と使用法(改訂版 Version2.10), 2005. 7
- 4) Hardin, B.O. and Drnevich, V.P. : Shear Modulus and Damping in Soils : Design Equations and Curves, Proc, ASCE, Jour, SMFD, Vol.98, No.SM7, pp.667-692, 1972.