

## 日本国内における地盤系オンライン実験に関する研究の変遷

## Outline of Paper about Geotechnical Pseudo-Dynamic Test in Japan

○池上誠<sup>1</sup>, 山田雅一<sup>2</sup>, 道明裕毅<sup>2</sup>, 浅野一輝<sup>1</sup>\*Makoto Ikeue<sup>1</sup>, Masaichi Yamada<sup>2</sup>, Yuki Domyo<sup>2</sup>, Kazuki Asano<sup>1</sup>

Abstract: In 1982, pseudo-dynamic test was used in geotechnical. The method was confirmed to be useful for the analysis of liquefaction ground. Since then, studies on pseudo-dynamic test have been conducted. In this paper, We investigated transition of its study from development to the present. In geotechnical, pseudo-dynamic test have been improved. As a result, according to the approach to the multi-layered ground, it met a certain level as a method for study behavior during earthquakes. In addition, this method is the first to be applied to sand and clay grounds, and is used for various researches on prime and improved grounds.

## 1. はじめに

1964年に、新潟地震にて初めて大規模な液状化現象が観測されてから、液状化現象に関する研究が盛んに行われてきた。液状化時の地盤挙動を検討する手法の1つとしてオンライン実験がある。この手法は、実験と解析を同時に行うことで地震時の地盤挙動を検討する手法であり、実験により得た復元力を用いて振動方程式を解くことで、復元力特性をモデル化せず地震応答解析を行うことができる。そのため、液状化地盤のように復元力特性が非常に複雑となるものに対して、その有用性が高いと言える。

日本国内では2011年東方地方太平洋沖地震にて広範囲で液状化現象が観測された。今後、液状化に関する研究がより積極的に行われていく中で、オンライン実験に関しても更なる発展が望まれるであろう。その際の糧になればと考え、過去に行われた研究の変遷を追うと共に、研究内容の整理を行う。

## 2. オンライン実験手法

地盤系オンライン実験（オンライン地震応答実験、仮動的実験、擬似動的実験とも呼ばれる）は、コンピューターによる計算と実供試体を用いた要素実験をオンライン化することで実験機を制御し、そこから得られた測定値を用いて地盤挙動を解析する手法である。この手法では、検討対象となる地盤を質点系でモデル化し、振動方程式を解き、応答変位を求める。そして、その応答変位に相当するせん断ひずみを要素実験により土要素に与えることで得られた復元力を用いて再び振動方程式を解き、応答変位を計算する。このサイクルを繰り返すことによって、復元力特性を実験により得ながら地盤の地震応答解析を行うことができる。

## 3. 地盤系オンライン実験に関する研究の変遷

本報では、これまでオンライン実験を用いた論文として、地盤工学分野（砂地盤・粘土地盤・地盤改良等）を対象とした日本国内の研究（全89編）について記す。なおここで対象とした論文は、論文タイトルまたはキーワードに”オンライン地震応答実験”、”仮動的実験”、”疑似動的実験”が含まれているものとした。Figure 1に、年度毎に発表された対象論文をまとめた。地盤系オンライン実験に関する報告は、本報告でまとめた論文の中では89編中、88編が8つの研究機関を中心に発表されていた。それぞれの研究機関毎の論文数を累積したものを同図中に併せ示す。同図より、地盤系オンライン実験はシステムや実験手法の複雑さから限られた研究者の間で研究が進められてきたことが見て取れる。しかし、今もなお研究が行われていることからオンライン実験の独自性と有用性が確かなものであると言えるだろう。また過去のオンライン実験に関する研究内容について、大まかではあるがその変遷をまとめたものをFigure 2に示す。

## 3.1 地盤系オンライン実験の開発

1982年に片田、伯野<sup>1)</sup>によって地盤系オンライン実験が初めて開発され、砂の液状化挙動がオンライン実験を用いて比較的正確に追えることを報告した。その後、Kusakabeら<sup>2)</sup>によってオンライン実験の多層地盤への適用と共にサブストラクチャ化が行われた。これによって、実験によって得た復元力とモデル化された復元力特性を組み合わせることにより、多層からなる地盤の検討を比較的容易に行うことを可能にした。このサブストラクチャ法の適用により、地盤系オンライン実験は実用性という点において一定の水準を満たしたと言える。

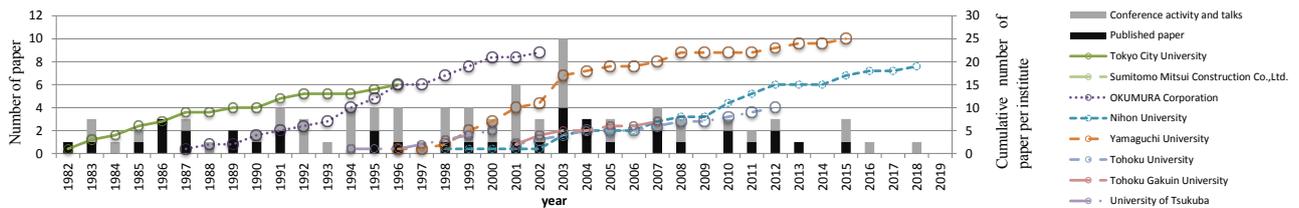


Figure 1. Number of papers related to pseudo-dynamic test

### 3.2 オンライン実験の実用と更なる改良

サブストラクチャ・オンライン実験の開発以降は、様々な地盤の検討がオンライン実験を用いて行われるようになったと共に、実験手法についても、更なる改良が行われるようになった。本項ではそれらの研究について紹介する。

安達ら<sup>3)</sup>は、砂地盤に対して1質点系オンライン実験での液状化現象の再現性を確かめると共に、表層地盤の液状化予測における合理的な評価尺度について検討を行った。藤井ら<sup>4)</sup>は、盛土周辺地盤を3つのゾーンに分類し、それぞれにオンライン実験を用いた。その結果から液状化地盤上の盛土について、地震時の地盤挙動を明らかにした。山口ら<sup>5)</sup>は、埋立層-沖積粘土層地盤に対してオンライン実験を行い、埋立層の液状化程度には下層の沖積粘土層のせん断強度が影響を与えることなどを確認した。高橋直樹ら<sup>6)</sup>は、砂、粘土について、層序の異なる8つのケースに対してオンライン実験を行い、粘土の圧密状態及び層厚が地盤の地震動特性に与える影響について検討した。山口ら<sup>7)</sup>は、軟弱粘土地盤についてオンライン実験を行い、地表面の最大加速度の上限値は地盤の動的なせん断強度とせん断剛性によって推定できることを確認した。以上のように、様々な地盤に対してオンライン実験による検討が行われ、知見を得ると共に実験手法の適用範囲が広がられてきた。近年は、より特異な地盤にまで適用範囲が広がられていると言えるだろう。

実験手法の改良分野においては、仙頭ら<sup>8)</sup>が、排水を可能にしたオンライン実験を開発し、不規則繰り返しせん断載荷後、再圧密試験を行った。その結果から、再圧密体積ひずみは累加せん断ひずみと相関があることなどを確認した。また、高橋啓久ら<sup>9)</sup>は、 $K_0$ 状態を満足させたオンライン実験を開発し、実験を行った。その結果から砂地盤の残留せん断ひずみは間隙水圧の上昇によって地盤の剛性が低くなった後も大きく蓄積することを確認した。このように、実験手法の改良が進められることにより、オンライン実験で再現できる地盤条件が拡大していると言える。

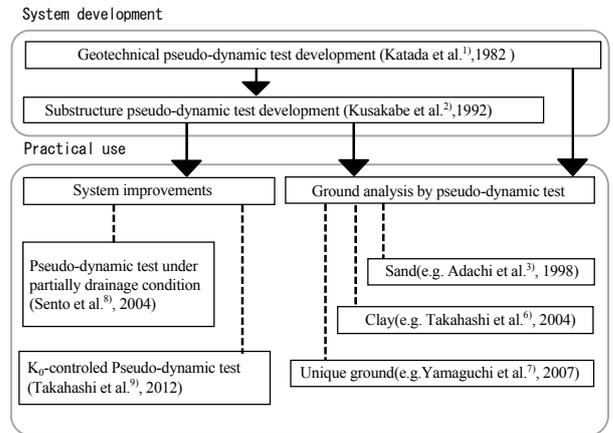


Figure 2. Flow of pseudo-dynamic test development

### 4. おわりに

地盤系オンライン実験は、実験と解析を組み合わせた手法であり、そのシステムの複雑さから、限られた研究機関によって研究がなされてきた。一方で、そのシステムの複雑さゆえに工夫ができる点も多く、現在までに、様々な改良が行われてきた。特に、多層地盤モデルへの適用、サブストラクチャ化により解析手法としての進化は一定の水準に達したと言えるだろう。しかし、現在においてもオンライン実験には改善の余地があり、今後も様々な改良法が提案されることが考えられる。また、過去の研究によってオンライン実験の妥当性や有用性が示されてきた。これからも地盤の解析や地盤改良土の効果の検証においてオンライン実験が利用されると考えられる。

### 5. 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, pp.21-28, 1982.2
- 2) Sin Kusakabe, Satoshi Morio: THE DEVELOPMENT OF A SUBSTRUCTURE ON-LINE TESTING SYSTEM FOR SEISMIC RESPONSE ANALYSIS OF A GEOTECHNICAL SYSTEM, SOIL AND FOUNDATIONS, VOL.35,NO.2, pp.117-125, 1995.6
- 3) 安達俊夫, 山田雅一, 関原宏行, 榎並昭: 表層地盤の液状化発生時の地震動強さに関する仮動的実験, 日本建築学会構造系論文集, 第505号, pp.85-91, 1998.3
- 4) 藤井照久, 兵動正幸, 日下部伸, 福田賢二郎: オンライン地震応答実験による飽和地盤上の盛土の挙動, 土木学会論文集, No.652, III-51, pp.229-243, 2000.6
- 5) 山口晶, 風間基樹, 日下部伸: 神戸人工島地盤のオンライン地震応答実験, 土木学会論文集, No.701, pp.181-195, 2002.3
- 6) 高橋直樹, 兵動正幸, 吉本憲正, 山本陽一: 粘土・砂互層地盤の地震動特性に関するオンライン地震応答実験, 土木学会論文集, No.764, III-67, pp.207-219, 2004.6
- 7) 山口晶, 吉田望, 飛田善雄: 軟弱粘土地盤のせん断特性と地震時の地盤挙動の関係, 日本地震工学論文集, 第7巻, 第1号, pp.1-13, 2007.8
- 8) 仙頭紀明, 風間基樹, 渦岡良介: 非排水繰り返しせん断履歴後の再圧密実験と体積収縮特性のモデル化, 土木学会論文集, No764, pp.307-317, 2004.6
- 9) 高橋啓久, 吉田純也, 仙頭紀明, 森友宏, 渦岡良介, 風間基樹:  $K_0$ 制御オンライン地震応答実験による地震後残留変形評価, 土木学会論文集 Vol.68, No.2, pp.274-285, 2012.5