

## 調査報告

## 液状化過程における砂の微小変形特性の検討

Study on Deformation Characteristics of Sand at Extremely Small Strain during Liquefaction Process

古 関 潤 一\*

Junichi KOSEKI

## 1. はじめに

このたび、平成8年度三好研究助成金を頂いて、平成8年9月6日から10月17日までの42日間にわたり、フランスのEcole National des Travaux Publics de l'Etat (ENTPE, 国立土木工学校)で、液状化過程における砂の微小変形特性に関する研究に従事する機会を得た。ここでは、滞在先と研究内容の概要について報告する。

## 2. 滞在先の概要

ENTPEは、フランス南部のリヨン市郊外(正確にはVaulx-en-Velin市)に位置し、市の中心からは地下鉄とバスを乗り継いで約40分で行くことができる。1953年に公共事業省によってパリに創立され、1975年に現在のキャンパス(写真1参照)へ移転した。キャンパスは建築デザイン関係のEcole d'Architecture de Lyonと隣接しており、食堂等を共有している。

ENTPEはengineering schoolの一つであり、通常の大学よりも専門的な教育が実施されている。入学するためには、高校卒業後2年間の準備期間を経た後に実施される入学試験(科目は物理、数学等)に合格する必要がある(競争率は30倍程度とのことであった)。合計約500名の学生の多くは、公務員としての身分を有し、在学中も給料が支給される代わりに、卒業後は最低8年間公務員として勤務する義務を負っている。入学後3年間で修士号よりもやや上位の学位に相当する“DEA”や“DESS”を受けることができるが、博士号を取得するためには、さらに3年以上の研究活動が必要である。

ENTPEは以下の6つの研究室より構成されている(常勤のteaching staffは70名程度であるが、民間企業等に依頼している非常勤の講師も含めると計800名程度となることであった)。これらのうち、LGM, LASHとLETは、フランス国内の中心的研究組織(CNRS, National



写真1 ENTPEのキャンパス

Center for Scientific Research)としても認められている。

- 1) Geo-materials Lab. (LGM)
- 2) Habitat Sciences Lab. (LASH)
- 3) Environmental Sciences Lab. (LSE)
- 4) Transports Economics Lab. (LET)
- 5) City Space Society Interdisciplinary Lab. (RIVES)
- 6) Traffic, Transport Engineering Lab. (LICIT)

## 3. 研究内容の概要

前述したLGMにおいて、液状化過程における砂の微小変形特性に関して実験的研究と情報収集、意見交換を行った。

## 1) 研究の背景

1995年1月の阪神淡路大震災では、繰返しせん断応力を受けた飽和砂地盤の液状化が港湾施設やライフライン施設などの大規模な被害の一因となった。このような砂の液状化特性に関して、原位置での測定が比較的容易な微小ひずみレベルにおける砂のせん断剛性率との相関性に着目した研究が近年行われている。また、液状化を予測するための力学モデルにおいても、砂の弾性的な変形特性は基本的な物性の一つである。

\*東京大学生産技術研究所 第5部

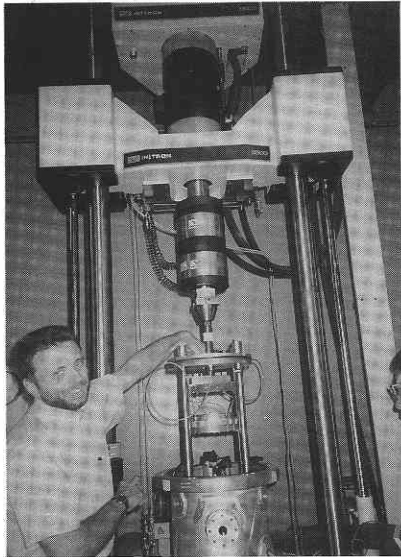
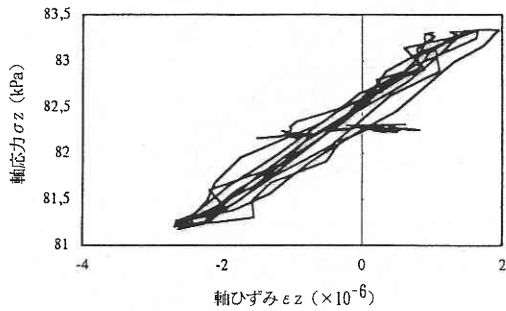


写真 2 試験装置の説明をする Di Benedetto 教授

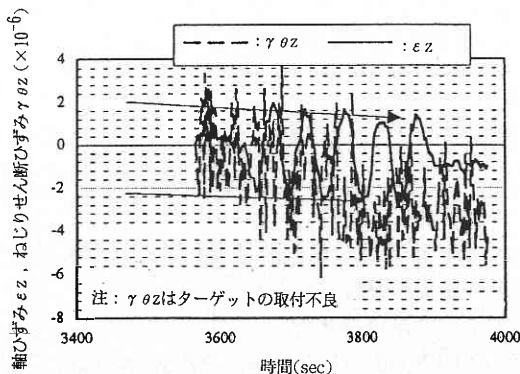
しかしながら、液状化過程におけるこのような砂の微小変形特性については、試験装置の荷重精度と測定精度の制約により、これまで十分な検討はなされていなかった。そこで、砂の微小変形特性の測定方法に関する基礎的な資料を得るために、LGM に最近導入された高精度の試験装置(写真 2 参照)を用いて次に述べる試験を行った。

2) 微小変形特性の測定

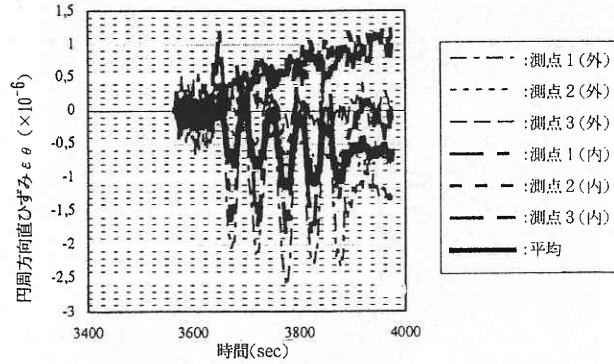
気乾状態の Hostun 砂を用いて中空円筒状の供試体(外



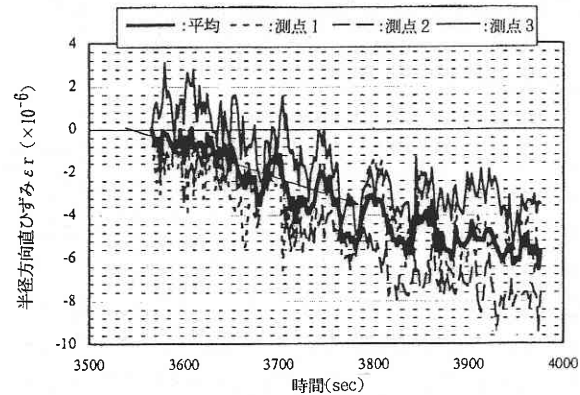
(a) 軸ひずみと軸応力の関係



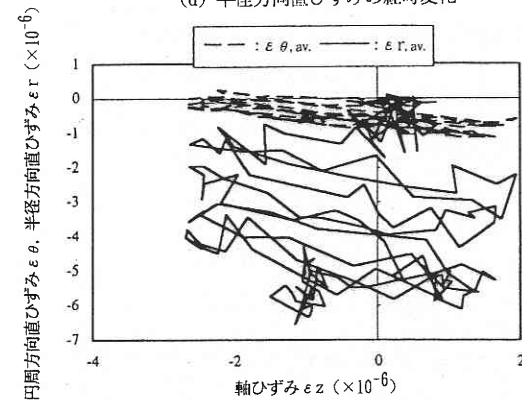
(b) 軸ひずみとねじりせん断ひずみの経時変化



(c) 円周方向直ひずみの経時変化



(d) 半径方向直ひずみの経時変化



(e) 軸ひずみと円周・半径方向直ひずみの関係

図 1 10<sup>-6</sup> レベルの軸ひずみ振幅で繰返し荷重した場合の試験結果

- (a) 軸ひずみと軸応力の関係
- (b) 軸ひずみとねじりせん断ひずみの経時変化
- (c) 円周方向直ひずみの経時変化
- (d) 半径方向直ひずみの経時変化
- (e) 軸ひずみと円周・半径方向直ひずみの関係

径20cm, 内径16cm, 高さ12cm) を作成し, いくつかの異なる静的な応力状態のもとで10<sup>-6</sup>~10<sup>-5</sup>程度の極めて微小なひずみレベルで軸応力とねじりせん断応力をそれぞれ独立に繰返し荷重し, このときの変形特性を測定した. あわせて, 圧電素子と bender element を用いて供試体内の弾

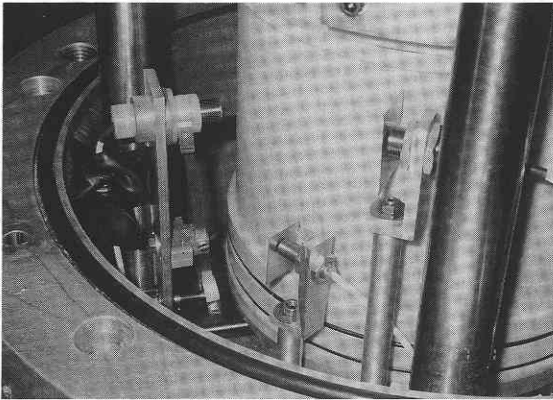
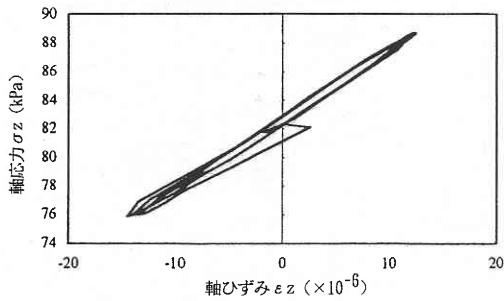


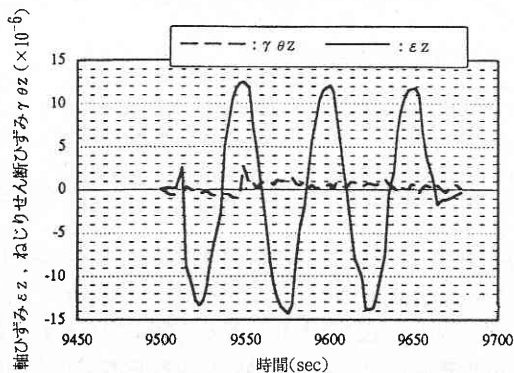
写真3 局所的なねじりせん断ひずみと供試体外径の測定

性波速度の測定を実施した。

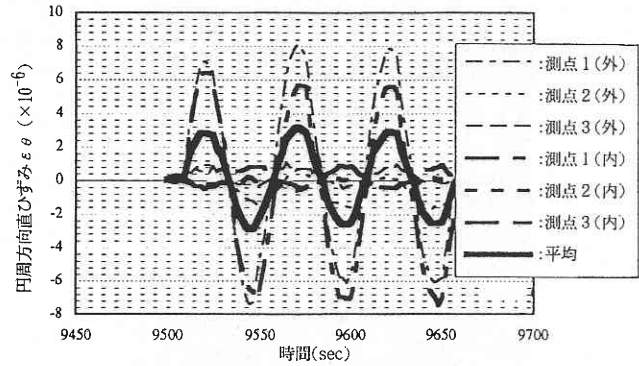
繰返し载荷時の測定結果の例を図1~4に示す。図1と図2は、それぞれ $10^{-6}$ と $10^{-5}$ レベルの軸ひずみ振幅で繰返し载荷した場合、図3と図4は、それぞれ $10^{-6}$ と $10^{-5}$ レベルのねじりせん断ひずみ振幅で繰返し载荷した場合の結果である。軸方向とねじり方向の载荷精度と測定精度に関しては、図1(a)及び図3(a)に示すように、本試験装置は $10^{-6}$ レベルの極めて微小なひずみにおいても十分な性能を有していることがわかる。一方で、それぞれの独立性は各図の(b)に示すように必ずしも保たれてはいないが、これは供試体の上面の整形精度の影響を受けている可能性が考えられる。また、図1(b)ではねじりせん断ひずみが大きく変動



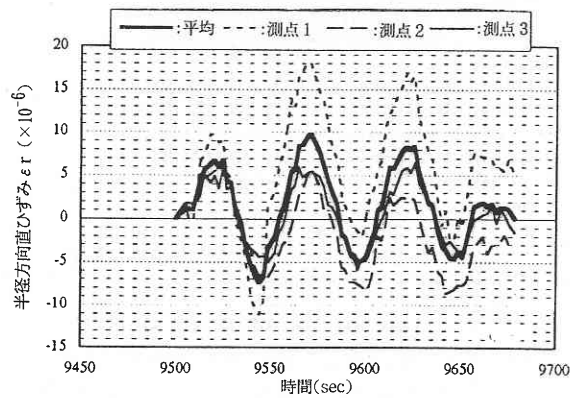
(a) 軸ひずみと軸応力の関係



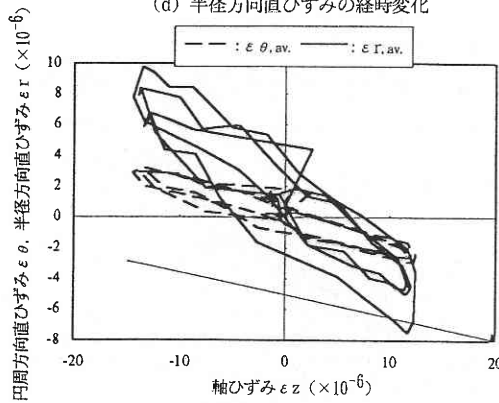
(b) 軸ひずみとねじりせん断ひずみの経時変化



(c) 円周方向直ひずみの経時変化



(d) 半径方向直ひずみの経時変化



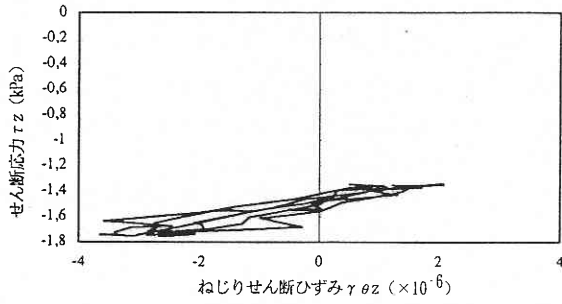
(e) 軸ひずみと円周・半径方向直ひずみの関係

図2  $10^{-5}$ レベルの軸ひずみ振幅で繰返し载荷した場合の試験結果

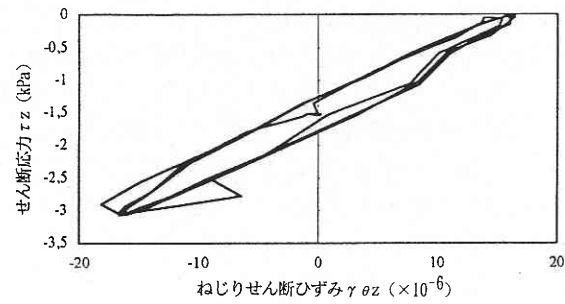
- (a) 軸ひずみと軸応力の関係
- (b) 軸ひずみとねじりせん断ひずみの経時変化
- (c) 円周方向直ひずみの経時変化
- (d) 半径方向直ひずみの経時変化
- (e) 軸ひずみと円周・半径方向直ひずみの関係

しているが、その後、供試体に取り付けた変位計のターゲットの固定度を改善することにより、図2(b)に示すように良好なデータが得られた。

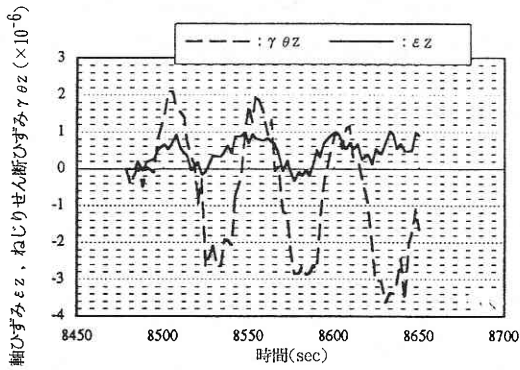
半径・円周方向の直ひずみは、それぞれ3箇所測定した供試体の内径と外径の変化より算定したが、各図の(c)と



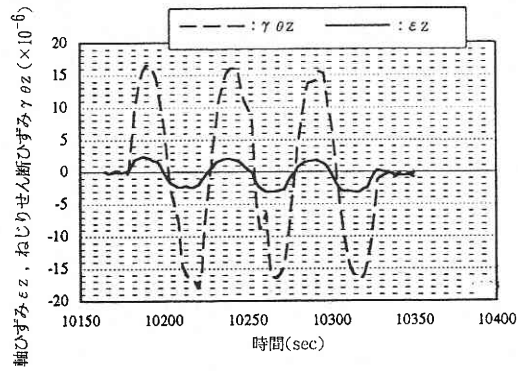
(a) ねじりせん断ひずみとせん断応力の関係



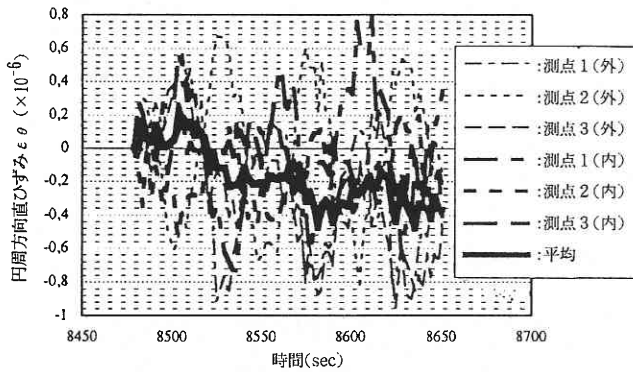
(a) ねじりせん断ひずみとせん断応力の関係



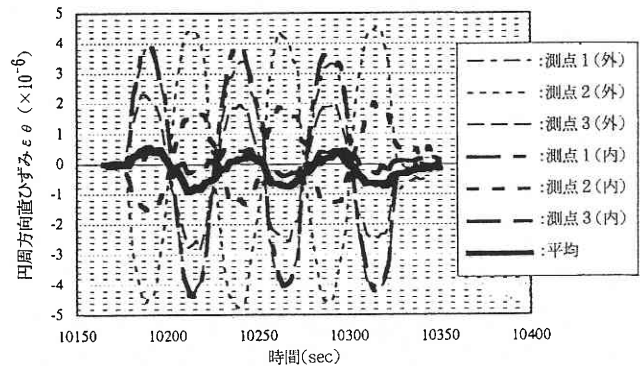
(b) 軸ひずみとねじりせん断ひずみの経時変化



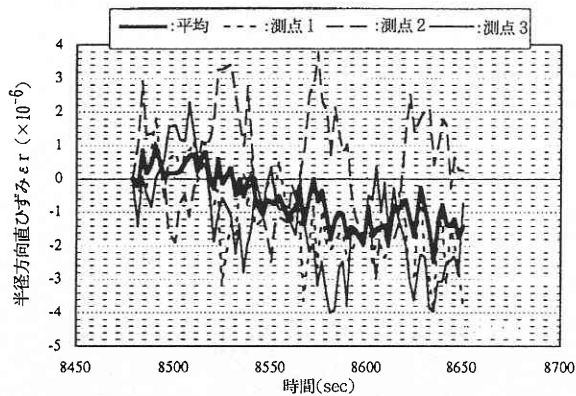
(b) 軸ひずみとねじりせん断ひずみの経時変化



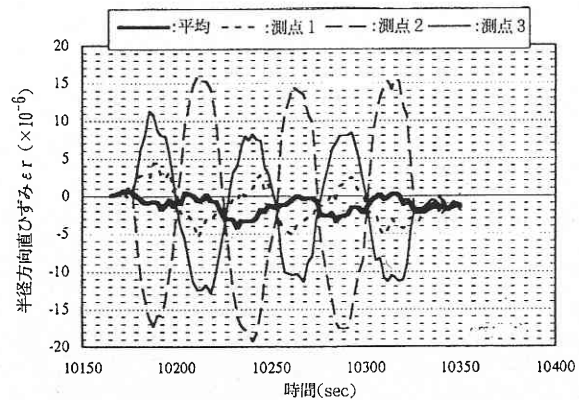
(c) 円周方向直ひずみの経時変化



(c) 円周方向直ひずみの経時変化



(d) 半径方向直ひずみの経時変化



(d) 半径方向直ひずみの経時変化

図3  $10^{-6}$ レベルのねじりせん断ひずみ振幅で繰返し载荷した場合の試験結果

図4  $10^{-5}$ レベルのねじりせん断ひずみ振幅で繰返し载荷した場合の試験結果

(d)に示すように測定箇所によるばらつきが大きかった。ただし、各データの平均値をプロットした図1と図2の(e)よりポアソン比を求めると、円周方向のひずみについては約0.2と妥当な数値が得られた。一方で、半径方向のひずみについては図1(e)ではドリフトが大きく、図2(e)では0.6程度のポアソン比となった。これらの測定方法については、今後も検討を継続する必要があると考えられる。

### 3) 砂の非排水せん断挙動の検討

LGMでは、飽和させた Hostun 砂の非排水三軸圧縮・伸張試験を実施していた。この結果を日本における異なる砂に対する既往の試験結果と比較し、密度と初期有効拘束圧の影響について検討した。また、せん断直前とせん断中のクリープの有無の影響について意見交換を行った。

## 4. おわりに

フランスでは、研究に対する取り組みかたから日常生活に至るまで、個人主義が徹底していることを実感した。

また、研究者との雑談の際に聞いた、「フランス人はパリにしか住めない人とパリには住みたくない人に大別される」という話が印象的であった。これは日本人と東京にもあてはまるのではなかろうか。

末筆ではあるが、今回の訪仏の機会を与えて頂いた財団法人生産技術研究奨励会と、滞在先において研究活動から生活関連の手配まで公私にわたり面倒を見て頂いた EN-TPE の Herve Di Benedetto 教授に深謝の意を表する。

(三好研究助成報告書 1996年10月25日受理)