

### 3.3.3 大型液状化実験の挙動把握および地盤特性把握

## 目 次

### (1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 2 ヶ年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）
- (e) 平成 17 年度業務目的

### (2) 平成 17 年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の成果
  - 1) 地盤変位計測システムの提案と検証
  - 2) 地中変位計の改良と設置
  - 3) アルバニー珪砂の室内要素試験
- (c) 結論ならびに今後の課題
- (d) 引用文献
- (e) 成果の論文発表・口頭発表等
- (f) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

### (3) 平成 18 年度業務計画案

## (1) 業務の内容

(a) 業務題目 大型液状化実験の挙動把握および地盤特性把握

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
東京大学大学院 工学系研究科	教授	東畑郁生	towhata@geot.t.u-tokyo.ac.jp
東京大学大学院 工学系研究科	助手	本多剛	honda@geot.t.u-tokyo.ac.jp
東京大学大学院 工学系研究科	博士課程 2年	Ramin Motamed	motamed@geot.t.u-tokyo.ac.jp
東京大学大学院 工学系研究科	博士課程 2年	清田隆	kiyota@iis.u-tokyo.ac.jp
東京大学大学院 工学系研究科	修士課程 1年	佐藤純一	junichi@geot.t.u-tokyo.ac.jp

(c) 業務の目的

本研究は、液状化時の地盤の物性と変形挙動を把握するために実物大模型実験に適用できる地盤内の変位計測システムを確立し、模型実験時の地盤挙動の計測を実施する。さらに、模型実験から得られる地盤挙動と室内要素試験から得られる土の物性から地盤特性の把握を行う。

(d) 2カ年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成17年度：

地盤内変位計測システムの実物大模型実験の適用性の検討  
地中変位計の作製と計測の実施  
室内要素試験による液状化した土の物性の把握

2) 平成18年度：

平成17年度の室内要素試験による液状化した土の物性の把握の継続  
実物大模型実験での地盤変位計測と地盤挙動の解析

(e) 平成17年度業務目的

実物大振動台実験での地盤内変位計測システムの構築を目的として、近年発展の著しいITテクノロジーを地盤模型実験の分野に取り込むことを狙い、RFID タグを地中に埋設して地中変位の時刻歴を三次元的に記録するシステムの可能性を検討した。検討の結果、RFID タグによる地盤変位計測システムでは模型実験で期待される数センチの変位計測精度を満足することが出来なかった。そこで、事前に自作検討していた加速度計を利用した一次元変位計測システムについても検討を行った。これは蝶番で板を連結して地中に埋設するもので、板にはそれぞれ加速度計が付設されている。大型実験での使用に当たっては、

測定器の強度増加と測定誤差をできる限りなくすための改良を行った。

さらに、地盤の液状化時の物性を把握するために中空ねじり試験装置を用いた室内要素試験を実施した。

## (2) 平成 17 年度の成果

### (a) 業務の要約

近年発展の著しい I T テクノロジーを地盤模型実験の分野に取り込むことを狙い、RFID タグを地中に埋設し、これから発せられる電磁波を受信して地中変位の時刻歴を三次元的に記録するシステムの可能性を検討した。結論から述べると、使用されている電磁波の波長が長く、模型実験で期待される数センチの変位計測精度を満足することが出来なかった。仮に短い波長の装置が利用できたとしても、次には模型地盤中の水による電磁波の吸収減衰が著しく、ふたたび実験の要求精度を満たす見通しが立てられなかった。

そこで、研究室で事前に自作検討していた加速度計利用の一次元変位計測システムに切り替えた。これは蝶番で板を連結して地中に埋設するもので、傾斜計の原理を使用している。計測誤差をできる限りなくすために、周辺地盤と比重をあわせたプラスチック材料を使用し、蝶番には砂がかみこんで自由な回転を阻害したりせぬように改良した。

またアルバーニ珪砂の液状化時の物性を把握するために、中空ねじり試験装置を用いた室内要素試験を実施した。

### (b) 業務の成果

#### 1) 地盤変位計測システムの提案と検証

##### a) RFID (Radio Frequency Identification) システムによる位置計測システムの検討

近年発展の著しい I T テクノロジーを地盤模型実験の分野に取り込むことを狙い、RFID タグを地中に埋設し、これから発せられる電磁波を外部に設けたアンテナで受信して地中変位の時刻歴を三次元的に記録するシステムの可能性を検討した。この検討は機器の自作をも念頭において動的電磁波理論の学習を実行した他、市販されている或いは近々発売予定の種々のタグの仕様検討をも含んでいる。そこで、検討した RFID タグの仕様と問題点について述べる。

RFID (Radio Frequency Identification) システムは、微小なタグに電子情報を記録させ、電波や電磁波によってタグの識別と位置の特定を可能にするシステムである。このシステムは次の 3 つの機能から構成されている (図 1)。

- ・ 電子情報を記録できるタグ
- ・ 電波や電磁波によってタグと通信を行う無線リーダー
- ・ 複数の無線リーダーからタグの情報を収集・解析するソフトウェア

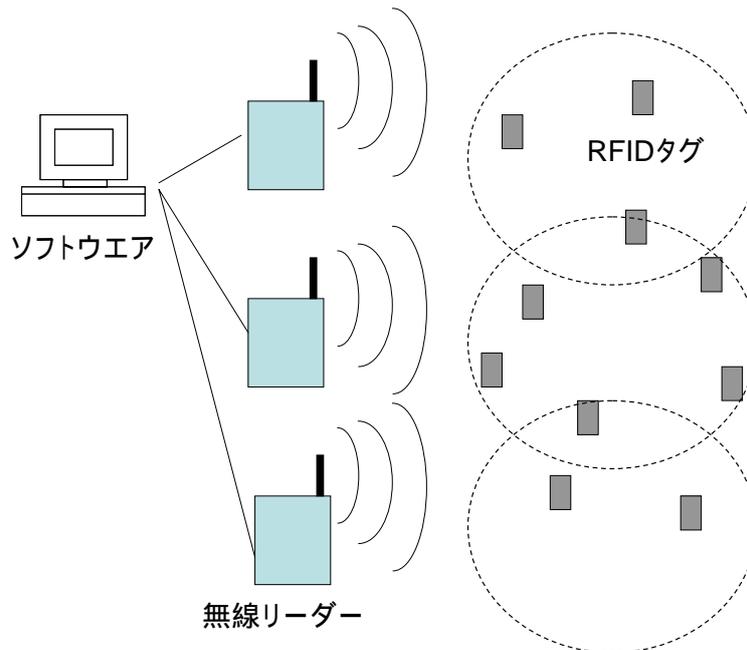


図1 RFID タグを位置計測システム

) RFID 無線リーダー

RFID システムの無線リーダーは次の動作を行う。

- ・ ソフトウェアからの命令を受信する。
- ・ タグとの通信を行う。

この無線リーダーは通信を行うためのアンテナと組にして使われ、タグとのデータ通信の情報の保存と、タグとソフトウェアの橋渡しを行う。

) RFID タグ

RFID タグは電子回路とアンテナからなる装置であり、この電子回路は電子情報を保存することができるメモリを搭載している。このメモリは読み取り専用の領域と読み書き可能な領域の2つのセクションに分かれている。前者には、工場集荷時に記録されるシリアルナンバーといった情報が書き込まれており、後者にはユーザーが独自に繰り返し読み書きできる情報が格納される。また RFID タグには、タグへの電源供給方法の違いによってアクティブとパッシブの2タイプがある。前者は、タグの回路上に電源を供給する回路があり、後者はこの回路を持たないものである。それぞれの特徴として次の点があげられる。

・アクティブタイプは、電源の供給回路を持っており、より遠くの地点とのデータ通信が可能である。この供給回路のバッテリーは、一般に、2 - 7年間の使用が可能である。デメリットは、そのコストの大きさにある。このアクティブタイプは、タグにより多くの機能を持たすことが可能であるが、その構造の複雑さのためにコストと大きさは増大すると言われている。

・パッシブタイプの構造はアクティブタイプに比べて簡単であり、これは無線リーダーから電磁波を用いて電気を供給することが可能なためである。またパッシブタイプのタグは小型・軽量・低価格であり、20年にわたっての使用が可能である。一方、通信可能な距

離はアクティブタイプに比べて短く、また高出力の無線リーダーを必要とする。

#### ） 周波数

RFID システムにおける重要な仕様の一つは周波数である。無線リーダーとタグ間の通信を可能としているのは電波や電磁波といったある周波数をもった波である。RFID システムにて実際に使われる周波数帯にはいくつかあり、一般に低周波数帯と高周波数帯の2つに分類される。この周波数帯の選択によって、無線リーダーとタグの通信距離、既存の電磁波を発生する機器との干渉、データの通信速度、アンテナのサイズが異なってくる。また、低周波数帯ではパッシブタグが使われ、高周波数帯ではアクティブタグが一般に使われる。

低周波数帯で用いられるパッシブタグは、電源供給の問題で数メートルの範囲内ではしか使用できないが、低周波数の波は直進性が低いために広い範囲に無線通信が可能である。例外として、パッシブタグを金属に取り付けた場合、この金属が電磁波を吸収するためにパッシブタグへの電源供給が損なわれるといった問題がある。今日、このような問題を解決する技術が開発されているが、新たに特殊な装置を取り付ける必要があるためにコストが非常に高くなっている。

高周波数帯で用いられるバッテリー内臓のアクティブタグの通信距離は、低周波数帯に比べて長くなる。しかしながら、高周波数帯で使用できる出力は電波法によって制限されているため、通信距離は劇的には増加しない。またタグが氷や水といった媒体に覆われていると、高周波数の電磁波は減衰し易い特性がある。実際に使用する上での問題として、タグを取り付けた標点が金属性の模型構造物の裏に回り込んだ場合には、無線リーダーから標点の位置を捉えることは困難である。特に、直進性の高い高周波数帯の電磁波を使用した場合、その傾向が顕著に現れるだろう。

周波数が影響する項目は通信距離だけではない。既存の通信システムとの干渉も周波数の影響を受ける。例えば、300 kHz 以下での周波数の干渉は非常に大きく、周波数が高くなるにつれて干渉は小さくなる。またデータの通信速度は高周波数のものほど速く、300 KHz から 300 MHz の周波数では通信速度が 1000 倍になる (Kbit/s から Mbit/s 単位になる)。この電磁波の干渉とデータの通信速度が RFID システムの性能に当たる。つまり、干渉が大きいシステムでは、無線リーダー間の距離を大きくする必要があり、またデータの通信速度が遅いと実際の計測時のサンプリング速度を満たさなくなる。また RFID システムで用いるアンテナの大きさは、電磁波の波長と同等である。すなわち、低周波数ほど大きなアンテナを使用し、高周波数ほど小さいアンテナを使用することができる。

#### ） 仕様の比較

一般に RFID システムは、アンテナの形式によって電磁誘導方式 (Inductive Coupling) と電波方式 (Propagation Coupling) の2つのグループに分類される。電波方式は、電磁誘導方式とは違い、電波エネルギーを電力パワーに変える。つまり、電磁波から電流とデータを取り出すことができる。

ここで、次の3種類の RFID システムの仕様と特徴を比較する (表1)。

表 1 RFID システムの仕様と特性

	RFID System		
	13.56 MHz	UHF	マイクロ波
周波数帯	13.56 MHz	400-1000 MHz	2450 MHz
アンテナの方式	電磁誘導方式	マイクロ波方式	マイクロ波方式
特徴	近距離での使用	広範囲での使用	広範囲での使用
通信距離	4 m まで	タグの寸法に依存	Passive (0.5~12m), Active (~30m)
タグの種類	Passive / active	Passive / active	Passive / active
タグの大きさ 形状	任意の形状 表面積：大	任意の形状 小型化可能	任意の形状 小型化可能
利点	水による吸収はない。	距離の二乗に比例して出力が減衰。	距離の二乗に比例して出力が減衰。
不利な点	金属の影響を受け易い。距離の6乗に比例して減衰。	吸収、反射、屈折、回折といった影響を受ける。	

) RFID システムの検証

以上の RFID システムの原理と仕様から、RFID システムの実物大振動台実験への適用可能性を検討する。電磁誘導方式は測定範囲が限定されている場合には優れているが、データの通信速度が低いことと、測定範囲が実物大振動台実験の土槽の大きさより若干小さいことを考慮すると適していない。電波方式は、データ通信速度が速く、広範囲の測定が可能である。またマイクロ波は土を通過することはできる。しかしながら、土が飽和されると電波方式では減衰といった問題が発生する。さらに、現在使用されている電磁波の波長が長く、模型実験で期待される数センチの変位計測精度を満足することが出来なかった。仮に短い波長の装置が利用できたとしても、次には模型地盤中の水による電磁波の吸収減衰が著しく、ふたたび実験の要求精度を満たす見通しが立てられなかった。

このように、RFID タグの検討に当初予定していた半年が経過した時点で、今年度の実験に同装置を使用することを断念し、研究室で事前に自作検討していた加速度計利用の一次元変位計測システムに原理を切り替えることにした。

b) 加速度計を用いた地中変位計の検証

本節では、液状化時の郡杭の挙動に関する 1 G 場での中型振動台模型実験から得られた地中変位計の計測結果を用いて、地中変位計の妥当性の検証をする。図 2 には液状化時の郡杭の挙動に関する 1 G 場での中型振動台模型実験の模型平面図を示す。地中変位計は図中の IN1, IN2, IN3 で示される 3 箇所に設置した。また、実験後の地盤変位量を観測するため、地盤内には色砂のマーカーを地中変位計の周囲に設置した。

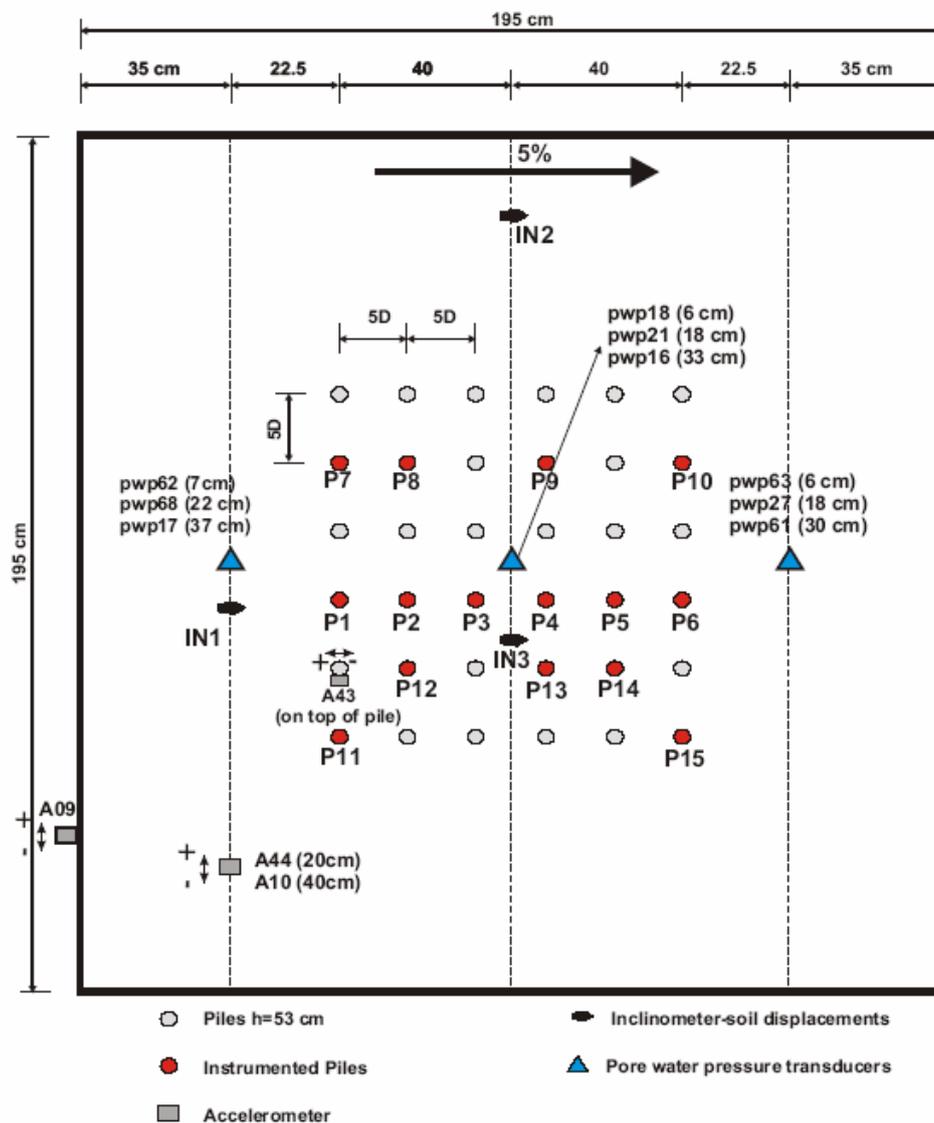


図2 液状化時の群杭の挙動に関する1G場での中型振動台模型実験の模型平面図

この地中変位計は、7つのアクリル製の板（厚さ3mm）を鉄製のリングで繋ぎ合わせたものである（写真1）。図3には、地中変位計の側面図を示す。そして、それぞれの板には加速度計が取り付けられており、加速度の静的成分からそれぞれの板の傾斜量を算定し、地盤の変位量を計測する。

実験結果としてIN1の地中変位計における加速度計の時刻歴と各アクリル板の水平変位量の時刻歴、所定の時間における水平変位のプロファイルを、それぞれ図4、図5、図6に示す。同様にIN2とIN3の計測結果を図7から図12に示す。これらの図から得られた地盤の水平変位量は地盤内に設置した色砂の変位量と良く一致した。その証拠として、写真2に実験終了後の地中変位計と色砂の位置関係を示す。この図より、地中変位計による地盤内変位の計測の精度は十分に高いことが分かる。

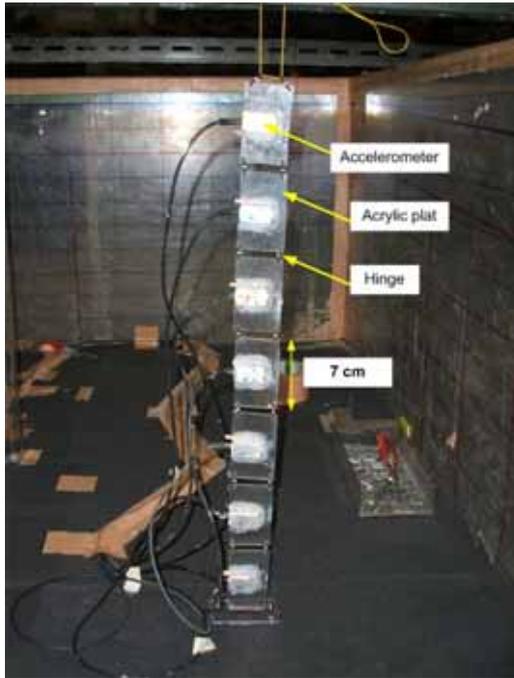


写真1 中型模型実験での地中変位計

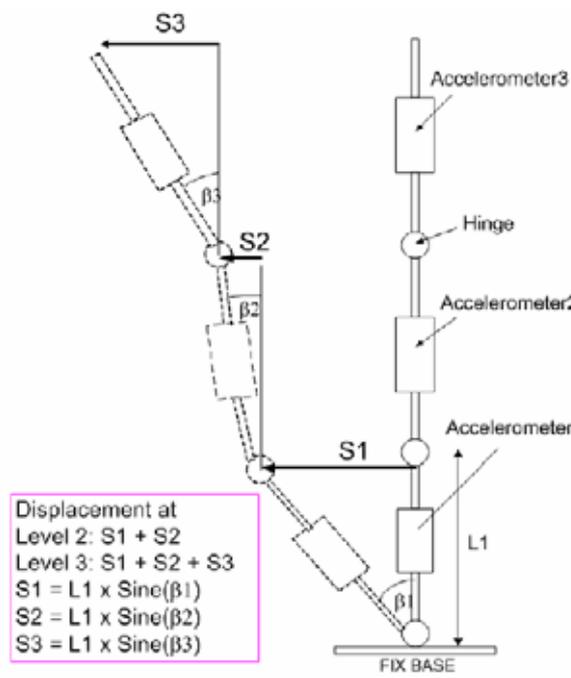


図3.地中変位計の概要

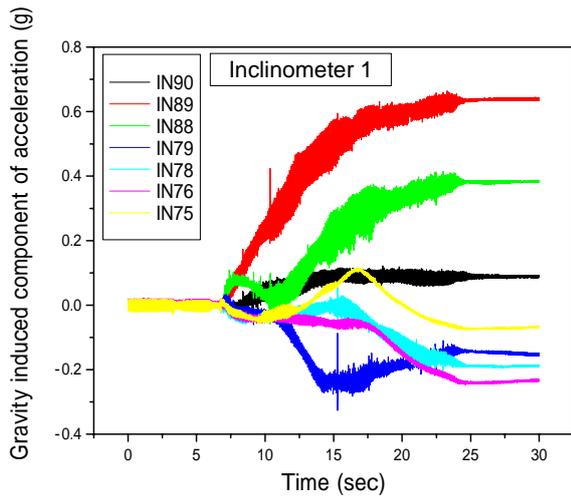


図4 地中変位計 (IN1) の加速度

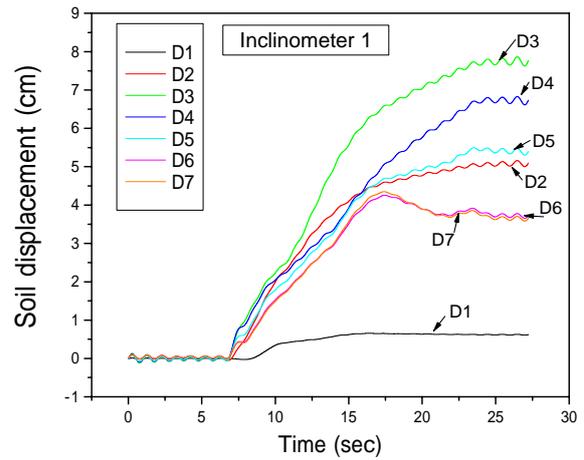


図5 地中変位計 (IN1) の水平変位

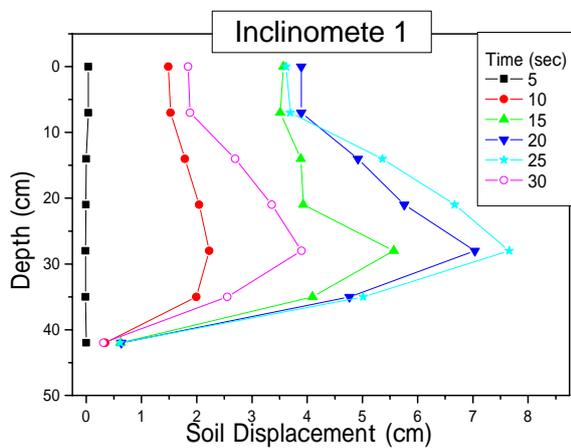


図6 地中変位計 (IN1) の変形モード

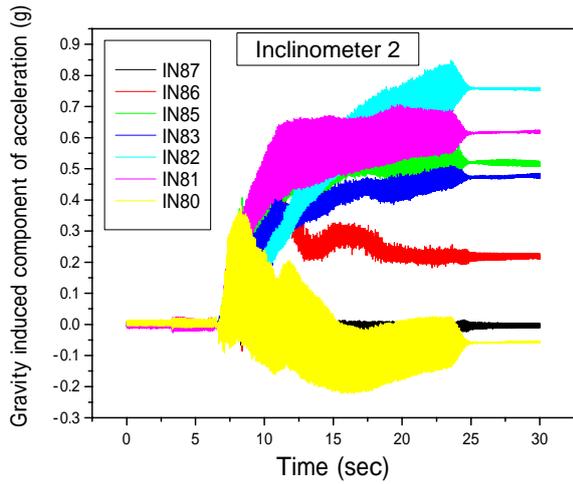


図 7 地中変位計 (IN2) の加速度

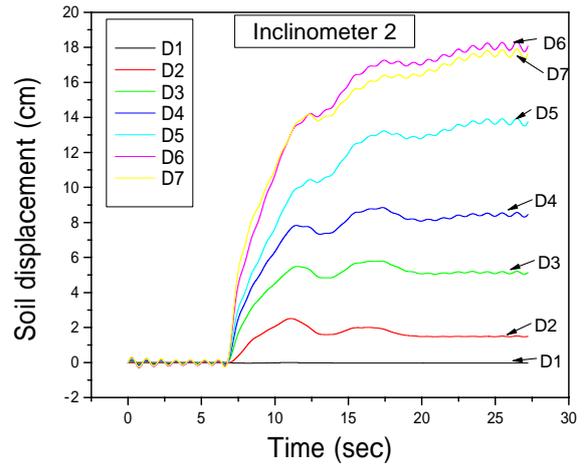


図 8 地中変位計 (IN2) の水平変位

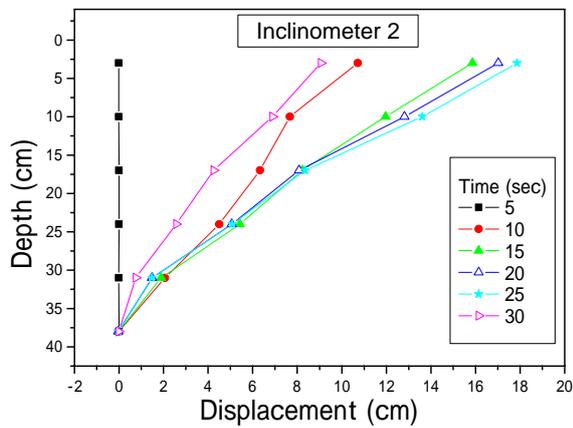


図 9 地中変位計 (IN2) の変形モード

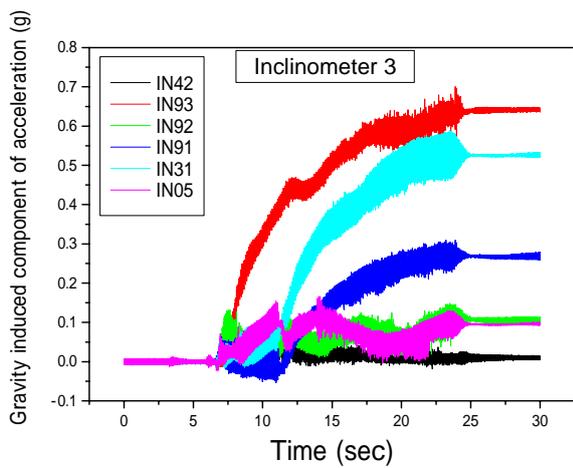


図 10 地中変位計 (IN3) の加速度

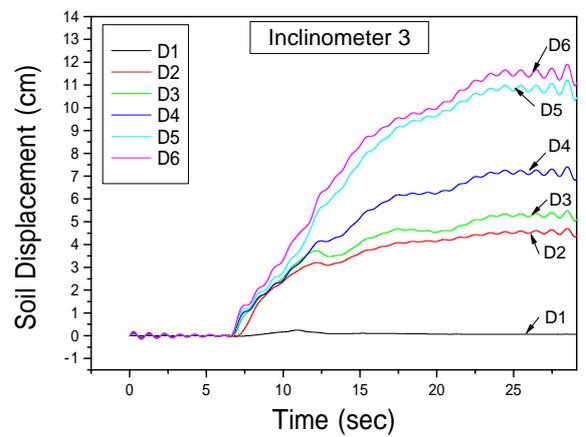


図 11 地中変位計 (IN3) の水平変位

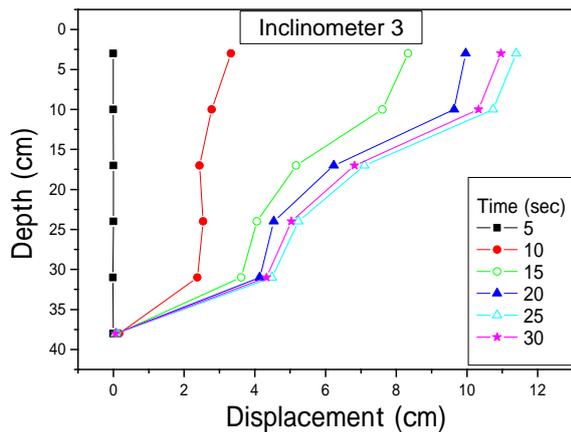


図 1 2 地中変位計 ( IN3 ) の変形モード



写真 2 実験終了後の地中変位計と色砂の位置関係

## 2) 地中変位計の作製と計測の実施

これまで小型模型実験で使用してきた地中変位計を実物大振動台に適用するに当たって、計測器の強度の増加、計測の誤差要因を排除すべく、地中変位計の改良を行なった。ここでは、今回使用した地中変位計に施した改良点と地中変位計の設置方法について説明する。また、地中変位計の詳細な原理と地中変位の算定方法についても説明する。なお、この地中変位計はプラスチック板に加速度計を固定したものを連結したものであり、これは佐々木ら<sup>1)</sup>が発案したものである。

a) 設置場所

地中変位計の設置場所には、側方流動による地盤の変形が大きく発生する次の3箇とした(図13)。

- ) 矢板と基礎杭の間
- ) 基礎杭内
- ) 基礎杭回り(基礎杭と容器側壁の間)

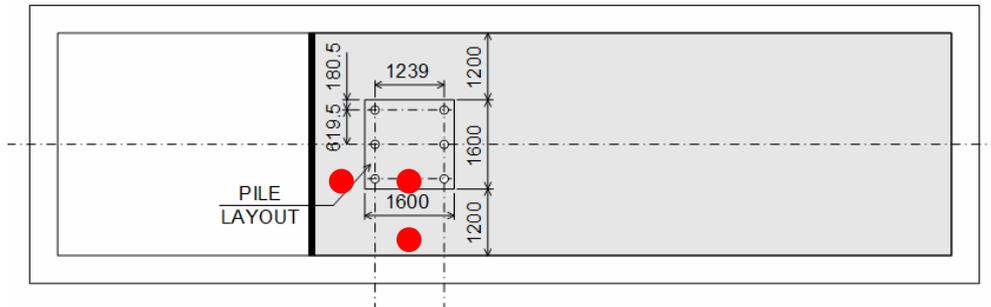


図13 地中変位計の設置位置

b) 地中変位計の構造と設置方法

従来、当研究室で用いていた小型模型実験での地中変位計の概略図を図14に、その写真を写真1に示す。この図を見て分かるように、小型模型実験では計測器の大きさに制約があるために薄いプラスチック板を2つのリングで繋いだ簡素な造りとなっている。このような構造でも小型模型実験では十分な精度を得ることはできているが、計測の誤差要因として次の点が挙げられる。

- ) 流動方向の直交方向に力を受けると、リングが傾斜してしまう。
- ) リングを付けているプラスチックの穴に砂が入り、摩擦によって変形が拘束される。
- ) 個々の板の比重の管理が手間であり、その比重の精度が落ちる可能性がある。

そして実物大振動台実験においてこの地中変位計を使用するに当たっては、計測器の大型化に伴う部品の強度増加と、上記の誤差要因がどの程度影響するかを推定することは困難であったためにこれらの誤差要因を排除した機構を考える必要があった。

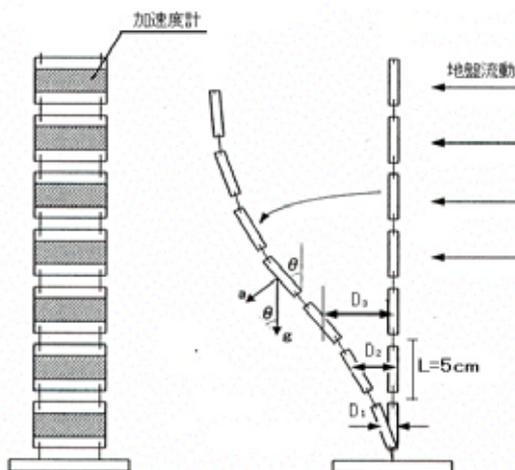


図14 従来の地中変位計の概略図

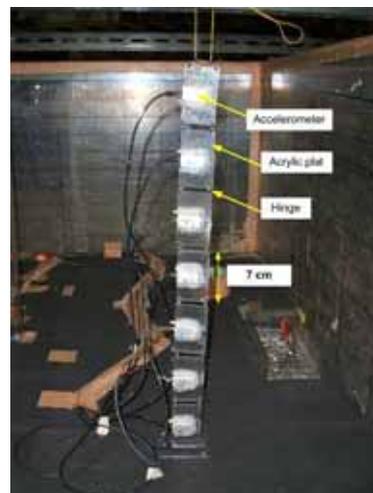


写真1 地中変位計の設置状況(既出)

そこで、地中変位計の板に用いる材料としてガラス繊維入りのエポキシ樹脂を使用した。このエポキシ樹脂は強力接着剤として使われる材料であり、その強度は非常に大きい。またガラス繊維を充填しているため、強度や衝撃に対する耐性が大きい点が大型実験に適している。この材料の比重は、ガラス繊維の充填量によって異なるが、市販されているもので 1.8 ～ 2.0 であり、液化化地盤の飽和単位体積重量に近い。今回は、比重 2.0 のガラス繊維入りエポキシ樹脂（引張強度：約 200 MPa）を使用したもので、特に比重の調整をする作業は必要なかった。なお、この板の厚さは 6 mm である。

図 1 5 には今回作製した地中変位計用の板( 支点間長さ 300 mm、幅 40 mm、厚さ 6 mm )を示す。板の厚さが 6 mm と厚くなったため、この板の接続には蝶番と同じ構造にした。具体的には、板の両端を噛み合うように切込みをつけ、その中心に直径 3.2 mm の穴を作り、直径 3 mm のステンレス製のピンを取り付けた。これにより、流動方向に直行する方向からの力の影響を抑え、ピン部の砂の混入を防ぐことが可能となった。

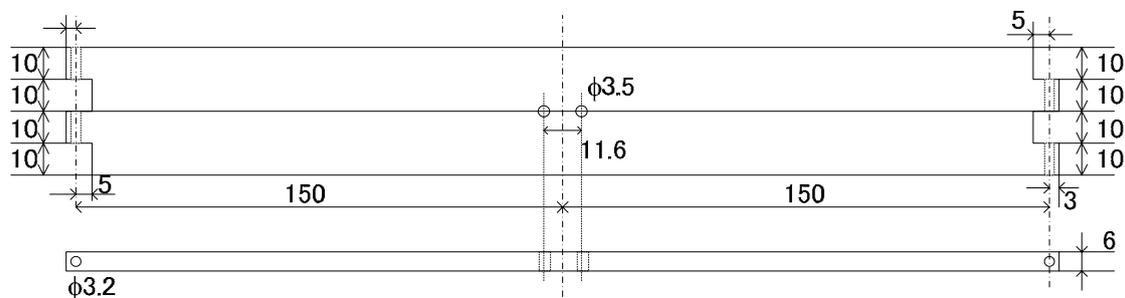


図 1 5 地中変位計用プレート(単位 mm)

設置に当たっては、加速度計の固定には M3 x 10 mm のネジを使用して加速度計を直接固定する。非液化化層のプレートには加速度計を設置しないことにした（1 地点当たり、プレート 15 枚、加速度計 13 個）。地中変位計プレートの支点間が 300 mm、底面の非液化化層厚が 700 mm であることを考慮して、容器底面に 100 mm のスペーサー（図 1 6）を設置する。高さの微調整はこのスペーサーの上板位置の変更によって行なう。地中変位計はこのスペーサー上で固定される（図 1 7、写真 3）。このスペーサーと容器底面の固定には接着剤を使用した。写真 4 には地盤作成時の設置状況を示す。

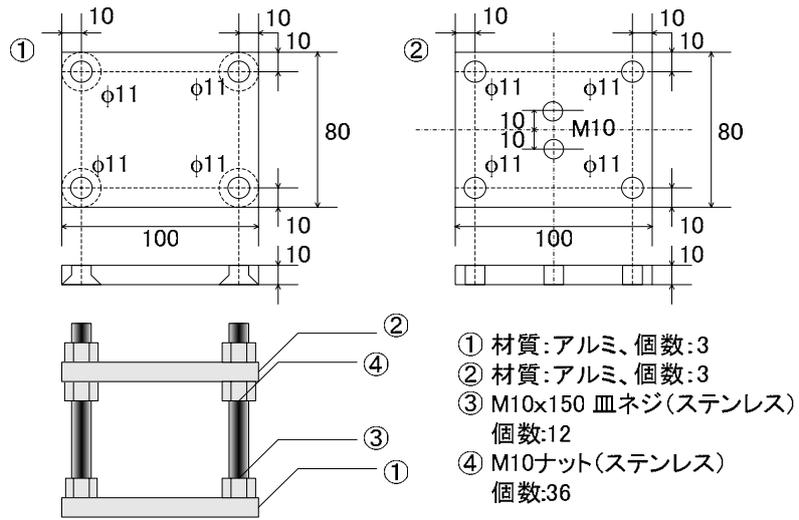


図 1 6 地中変位計固定用のスペーサー (単位)

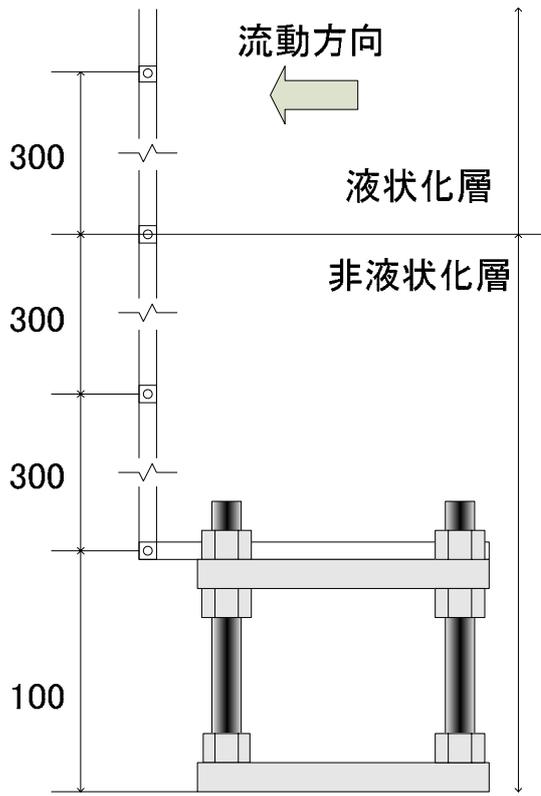


図 1 7 地中変位計の固定 (単位 mm)



写真 3 地中変位計の組み立て例

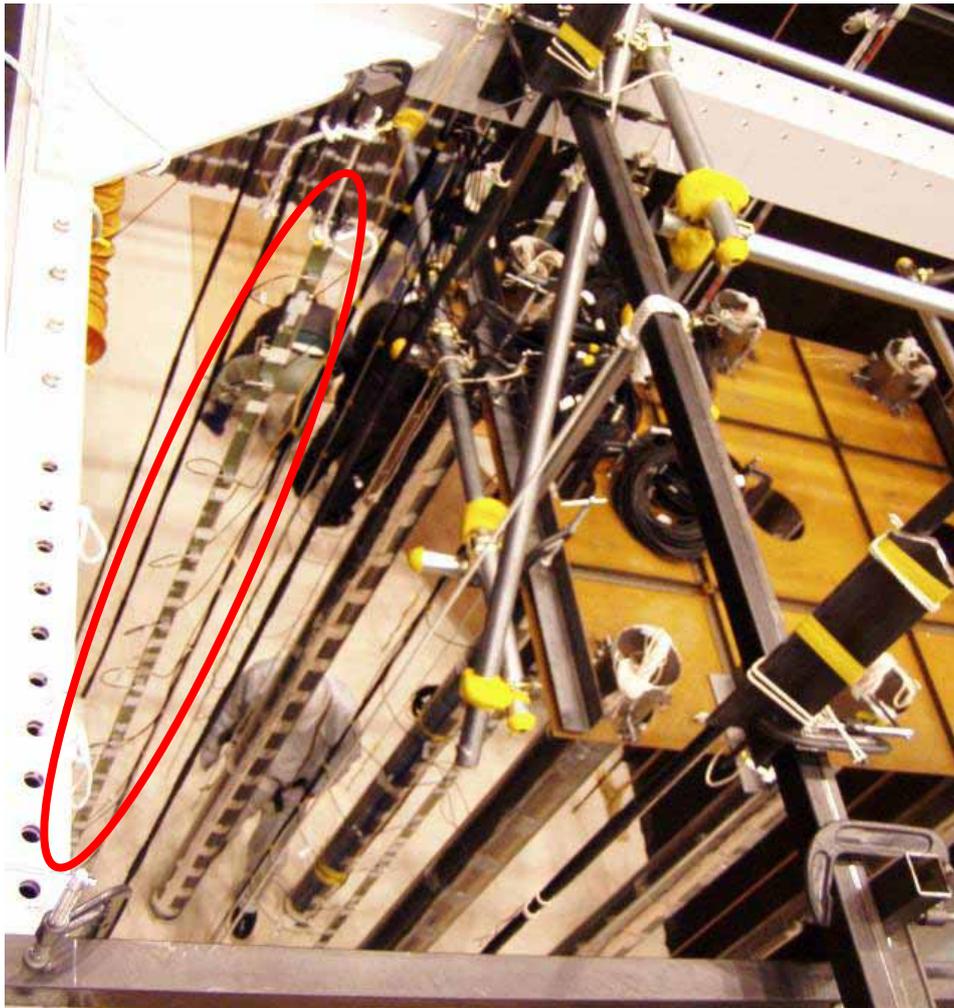


写真 4 地中変位計の設置状況

c) 水平変位量の算定方法

水平変位の算定は次の手順で行う(図18)。

) 加速度計の時刻歴を FFT により振動成分と漸増成分に分ける。ここで求めた漸増成分は、地盤流動によって変位計に生じた重力の傾斜方向成分である。なお、不規則波による加振では、フィルターの敷居値を何通りかの値に変えて検討する必要がある。

) この FFT で取り出した漸増成分を利用して、各板での傾斜量から水平変位量を算定する。

) それぞれの板で算定した水平変位量を基盤底面から積分することで、その深さでの水平変位量とする。

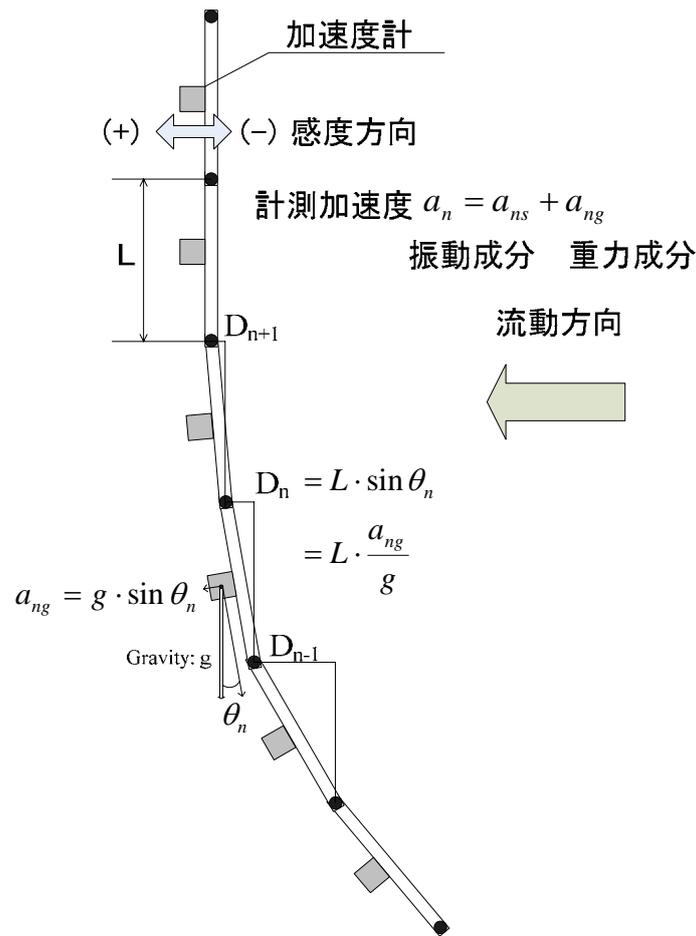


図 1 8 水平変位量の算定方法

### 3) アルバニー珪砂の室内要素試験

本研究では、実物大実験で用いられるアルバニー珪砂の液状化時の粘性特性を調べるために中空ねじり試験装置を用いた室内要素試験を実施した。

写真 5 には室内要素試験に用いた中空ねじり試験装置を示す。この試験機は、軸方向のペロフラムシリンダーによる応力制御の载荷コントロールが可能となっている。



写真 5 室内要素試験に用いた中空ねじり試験装置

実験には写真 6 に示すアルバニー珪砂を使用した。このアルバニー珪砂の粒径加積曲線を図 1 9 に示す。アルバニー珪砂の土粒子密度は、 $2.646 \text{ g/cm}^3$  である。この砂の物性を豊浦砂の物性と比較すると、平均粒径は豊浦砂に比べて若干粗い。また最大・最小間隙比は、 $e_{\max} = 0.741$ 、 $e_{\min} = 0.470$  と豊浦砂に比べて間隙比が低く、両者の間隙の範囲も小さいといった特徴がある（豊浦砂は、 $e_{\max} = 0.971$ 、 $e_{\min} = 0.615$  である）。



写真 6 アルバニー珪砂（左）と豊浦砂（右）

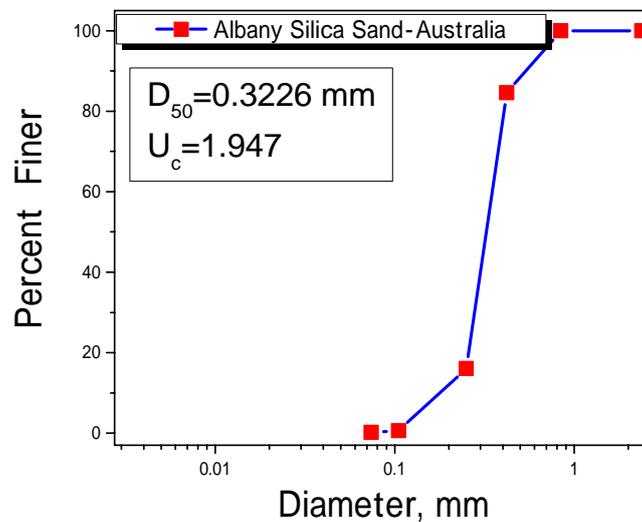
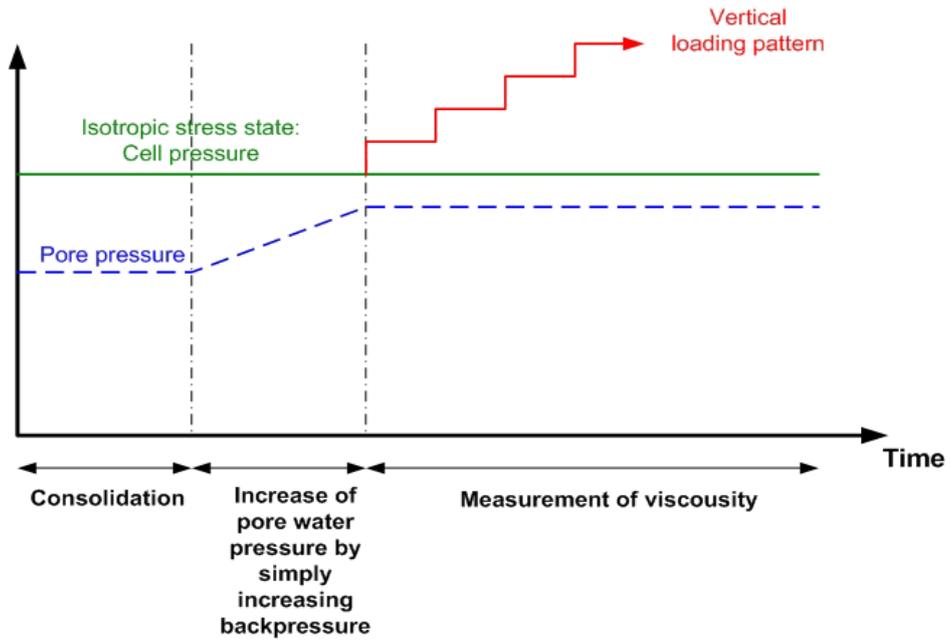


図 1 9 アルバニー珪砂の粒径加積曲線

試験手順は、相対密度が約 72 % の供試体を空中落下法で作製し、 $100 \text{ kPa}$  の拘束圧で等方圧密を行った。当方圧密後に供試体内の間隙水圧を静的に増加させることで、液状化時の低拘束圧の状態を再現した。そして、軸方向に段階的にステップ載荷を行うことで、ひずみ速度と粘性応力の関係は液状化砂の粘性係数を求めた。図 2 0 には試験時の載荷手順を示す。



\* Reference: Chaminda et al., 2005

図 2 0 試験の荷重手順 (Chaminda et al. 2005<sup>2)</sup>)

図 2 1 には粘性応力の求め方を示す。段階荷重により急速な応力増加とひずみ増加は発生した後、クリープ過程を経て定常状態となる。複数の段階荷重での定常状態での点を結び、静的な応力ひずみ関係であるリファレンスカーブを求める。そして、このリファレンスカーブと実際に測定された値の差を粘性応力とした。図 2 2 には軸差応力と軸差ひずみの時刻歴の一例を、図 2 3 には応力ひずみ関係の一例を示す。

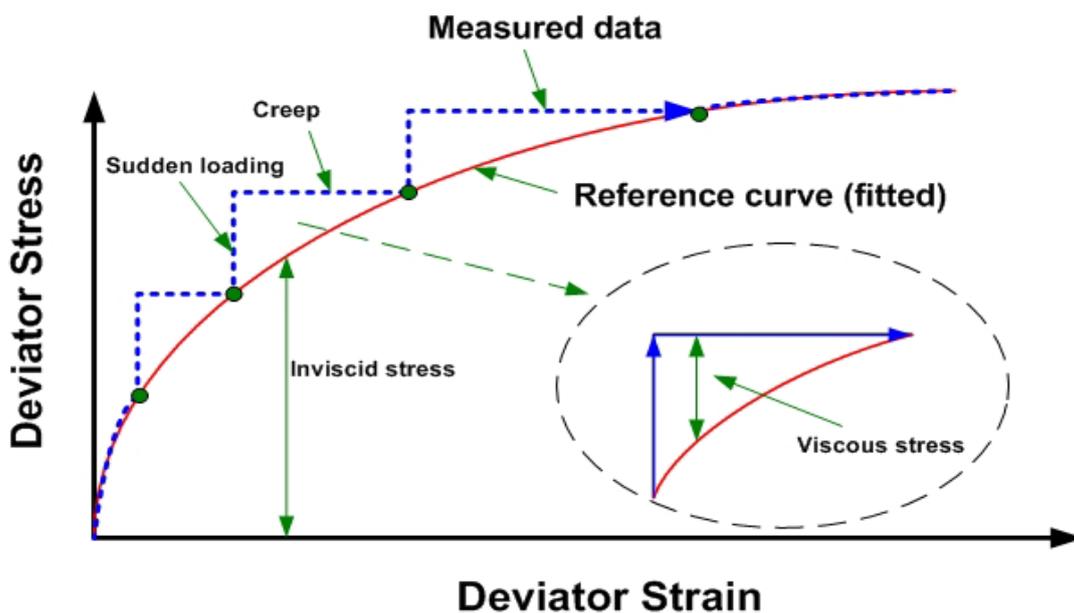


図 2 1 粘性応力の定義 (Chaminda et al. 2005<sup>2)</sup>)

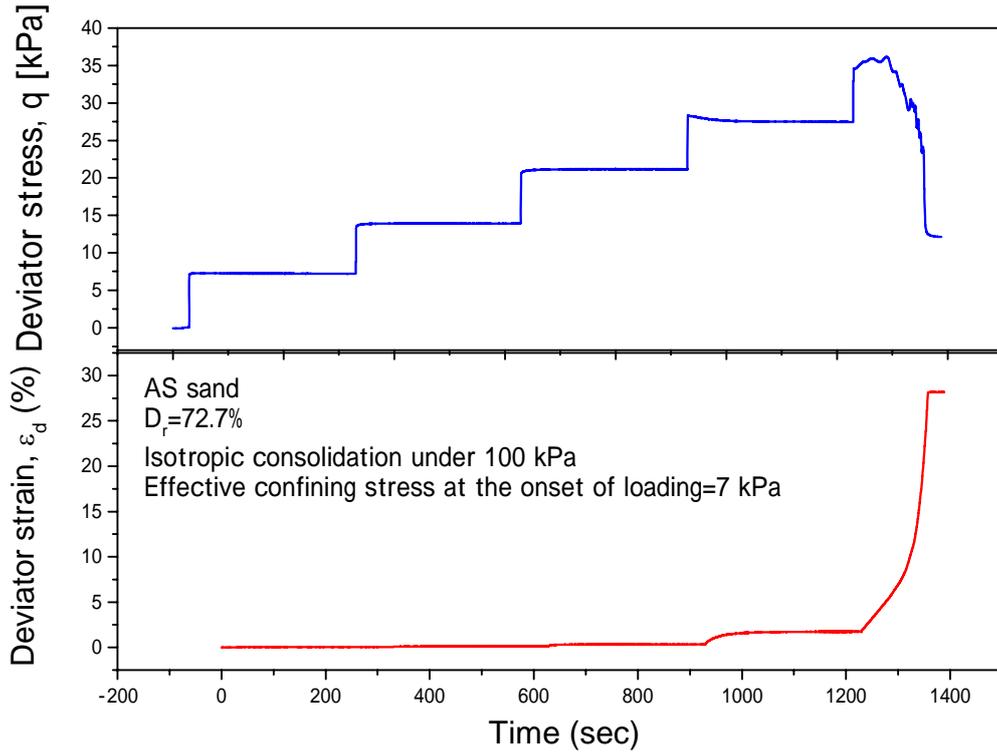


図 2.2 軸差応力と軸差ひずみの時刻歴の一例

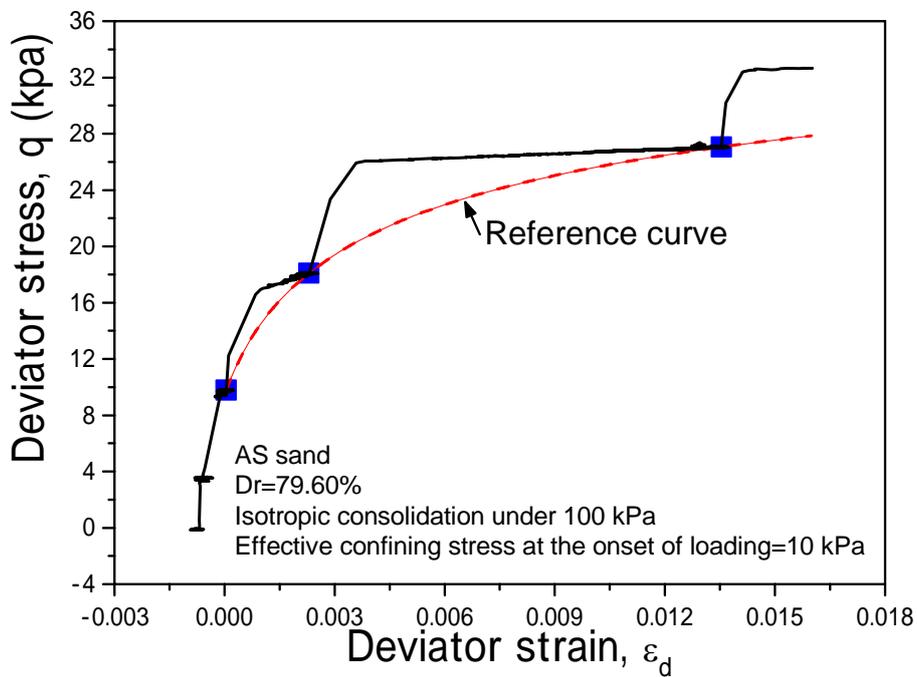


図 2.3 軸差応力と軸差ひずみの関係

以上の過程を経て求めた、ひずみ速度と粘性応力の関係を図 2.4 に示す。図 2.4 より、ひずみ速度が 0 付近での粘性応力は 0 に収束せず、ある値を持ったビンガム流体的な傾向

があることが分かる。平均有効応力が 17 kPa より大きい供試体では、ひずみ速度の大きい領域で砂のダイレタンシー特性の挙動が強く現れるために、粘性応力が大きくなった。また、平均有効応力の増加につれて粘性係数が小さくなるという豊浦砂とは異なる結果が得られた。

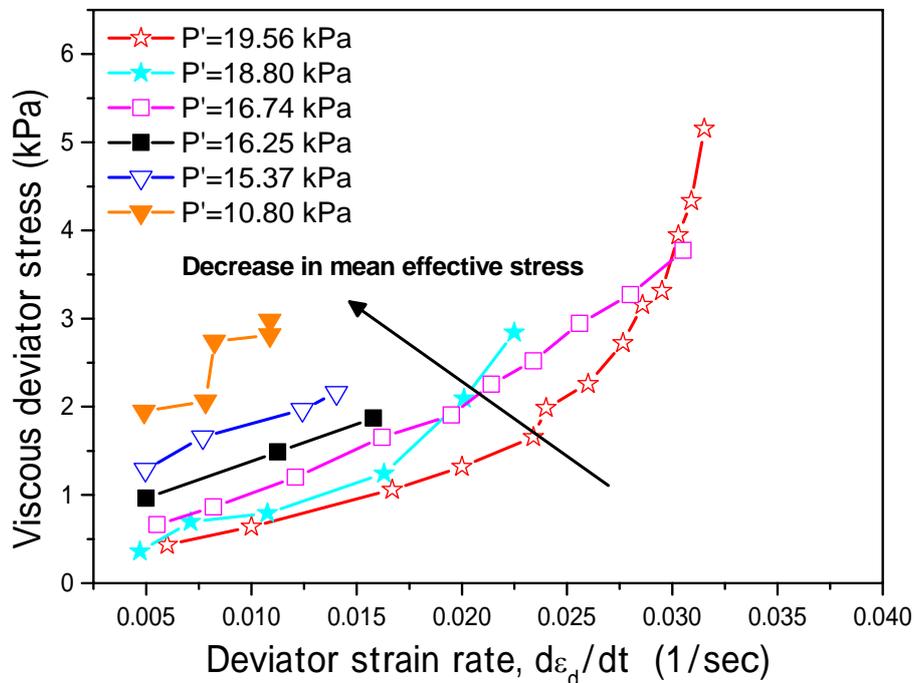


図 2.4 ひずみ速度と粘性応力の関係

(c) 結論ならびに今後の課題

1) RFID システムを用いた変位計測システムは、現在の技術レベルを考慮すると、飽和砂中の地盤内変位の測定時の変位計測の分解能、無線リーダーとタグ間の通信の品質といった面で問題があることが分かった。

2) 加速度計を用いた地中変位計の製作においては、既存の小型模型実験用の地中変位計の強度や精度の向上を図るための対策を施した。この結果については、3月23日に行われた実験結果を詳細に検討する必要がある。

3) 室内要素試験から液状化時のアルバーニ珪砂の挙動として、ひずみ速度が0付近での粘性応力は0に収束せず、ある値を持ったビンガム流体的な傾向を持つことが分かった。また、平均有効応力の増加につれて粘性係数が小さくなるという豊浦砂とは異なる結果が得られた。この点については、実験数を増やして検討を重ねる予定である。

(d) 引用文献

1) 佐々木康，常田賢一，松本秀應，佐谷洋一，森利弘：偏荷重が作用する地盤の液状化による地盤流動特性に関する研究，土木研究所資料，3000号，1991。

2) Chaminda, P. K. G., Towhata, I., and Nishimura, S.: Laboratory Investigation on Rate-Dependent Properties of Sand Undergoing Low Confining Effective Stress, Soils and Foundations, Vol. 45, No. 4, 43-60, 2005.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

なし

(f) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

### (3) 平成18年度業務計画案

・ 平成17年度に行われた実物大振動台実験の結果から、今回作製した地中変位計による地盤内変位の計測結果の妥当性を検討する。その方法として、他の変位計側結果との比較や実験終了後の地盤変位の測量結果と比較してデータの整合性について検証する。

・ 平成17年度に続き、アルバニー珪砂の室内要素試験を実施して液状化時の地盤挙動を推定するための基礎データの蓄積を行う。

・ 平成17年度及び平成18年度の実物大振動台実験の結果について詳細に検討し、大型液状化実験の挙動把握および地盤特性把握を行う。