

## 基礎の振動特性に及ぼす地盤の構造特性の影響

## Influence of fabric characteristics of ground on the vibration behavior of foundation

北海道大学

○ 学生会員

藤田 真吉

Shinkichi Fujita

フェロー会員

三浦 清一

Seiichi Miura

ソウル大学

金 潤相

Yoon-Sang Kim

## 1. まえがき

世界有数の地震大国である日本では、地震時における正確な被害予測が必要不可欠である。予測法としては、FEM等の数値計算をパソコンで行うシミュレーションが現在主流であるが、そのためには最低でも①構造物の振動特性、②地盤の動的特性、③地盤と構造物の相互作用が考慮されている地盤-構造物系全体のモデル化が必要とされる。

これまで地盤、構造物それぞれについての研究は盛んに行われているが、地盤と構造物の相互作用については、地盤材料が示す力学的性質の非線形性や拘束圧依存性などが、その性質の把握を困難なものにしている。

このような背景から、本研究では実験的なアプローチで地盤と構造物の相互作用を解明することを目的とする。具体的には、要素試験により地盤材料の動的特性を調べ、砂地盤上における模型基礎の振動特性との関連を明らかにする。さらに、地盤の動的特性に大きく影響を及ぼす構造特性に注目し、基礎の振動特性への影響を調べる。

## 2. 要素試験 (繰返し三軸試験)

## 2.1 実験装置・実験方法

本研究で用いた三軸試験機はひずみ制御式である<sup>1)</sup>。供試体(直径 70mm、高さ 170mm)は MSP 法(Multiple Sieving Pluviation Method)により作成している。拘束圧 49,98,196kPa で圧密後に非排水条件で試験を行い、目標せん断ひずみ振幅は供試体の 0.001%~30%、供試体の相対密度は約 50%,70%,80%となっている。表 1 に試験で用いた珪砂 7 号の物理特性値等を示す。

表 1 珪砂 7 号の物理特性値

|                                            |       |
|--------------------------------------------|-------|
| 土粒子の比重: $G_s$                              | 2.717 |
| 50%粒径: $D_{50}$ (mm)                       | 0.18  |
| 均等係数: $U_c$                                | 1.82  |
| 最大乾燥密度: $\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> ) | 1.610 |
| 最小乾燥密度: $\rho_{dmin}$ (g/cm <sup>3</sup> ) | 1.255 |

## 2.2 試験結果

まず、要素試験から得られたせん断ひずみと等価せん断弾性係数・履歴減衰比の関係について示す。図 1 は拘束圧 98kPa で供試体の相対密度が約 80%である 3つの試験結果を描いたものである。この図では、せん断ひずみが増加するとせん断弾性係数は減少し、履歴減衰比は増加している。またプロットがほぼ一致することから、実験の再現性も確認された。図 2 は、拘束圧 98kPa での試験結果をまとめたものであり、供試体の相対密度約 45%,70%,80%の試験結果を比較できる。この結果からせん断弾性係数は相対密度に依存するが、履歴減衰比は相対密度によらないことが確認された。

図 3 では、拘束圧の影響を見るために相対密度が約 80%の試験結果を示しており、拘束圧が増加するとせん断弾性係数は増大し、履歴減衰比は減衰している。

図 4 では、せん断ひずみとせん断弾性係数の関係に着目して、縦軸にせん断弾性係数を  $\gamma_a=10^{-6}$  時の値で正規化したせん断弾性係数比を用いている。この図より、せん断ひずみとせん断弾性係数の関係は、拘束圧によって形は異なるが、1つの曲線で表わすことができる。

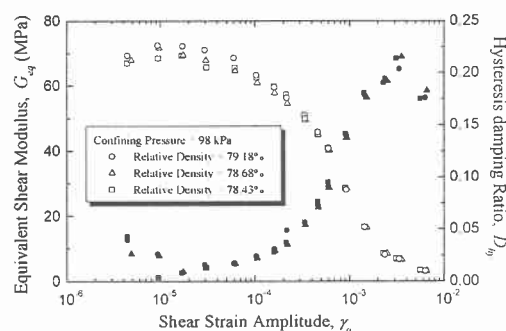


図 1 せん断ひずみとせん断弾性係数・履歴減衰比の関係 (拘束圧 98kPa, 相対密度約 80%)

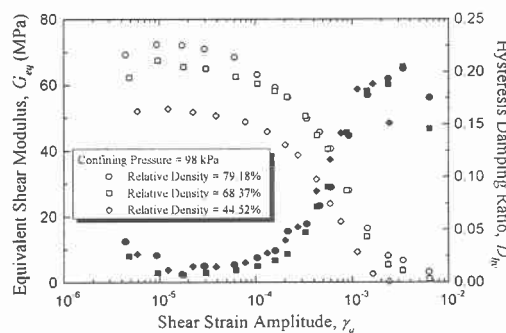


図 2 せん断ひずみとせん断弾性係数・履歴減衰比の関係 (拘束圧 98kPa での比較)

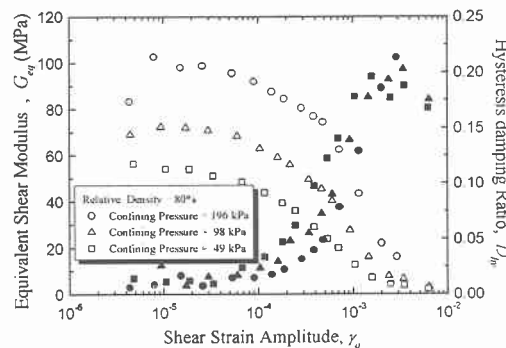


図 3 せん断ひずみとせん断弾性係数・履歴減衰比の関係 (相対密度約 80%での比較)

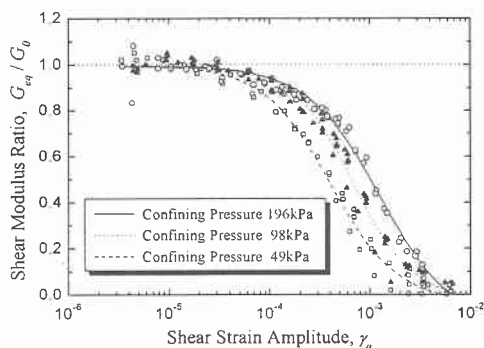


図4 せん断弾性係数比とせん断ひずみの関係

### 3. 模型試験

#### 3.1 実験装置・実験方法

模型試験では振動台上の土槽内に砂地盤を作成した後、所定の位置に加速度計を設置し、地盤表面に模型基礎を置いて振動を加える。高さ40cmの砂地盤は8層に分けて堆積させる。各層を堆積させた後に振動台で加振して、所定の締固めを行い5cmの高さにするが、振動させる前にタンピング・ロッキングを加えて構造特性を変化させることもできる。なお、地盤の相対密度は土槽に入れる砂の質量を調節することで決定されている。基礎を砂地盤上に水平になるように設置した後は、振動台を50gal, 20Hzで3分間加振させ、地盤と構造物の密着性を高めるようにしている。図5に振動台の全体図と加速度計の配置を示す。

本実験シリーズでは振子試験とハンマー試験が行われた。振子試験は振子の衝突によって模型基礎を自由振動させ、その振動特性を調べるものである。一方、ハンマー試験は硬質ゴム製のハンマーで土槽底部にインパクトを与えることにより、地盤内を下から上に伝播するせん断波を発生させ、振動が地盤から入力する場合の基礎の振動特性を調べる。その試験方法を図6に示す。

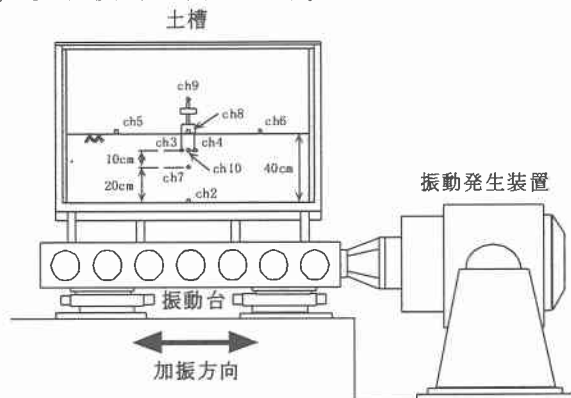


図5 実験装置全体図と加速度計の配置図

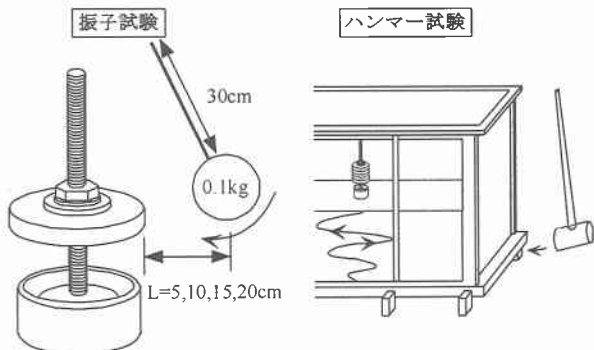


図6 試験方法

### 3.2 試験結果

#### 3.2.1 振子試験

振子試験では基礎の振動特性を評価するパラメータとして角振幅 $A_\theta$ 、振動周期 $T$ 、減衰比 $h$ を求める。減衰する波において、振動周期は前後の波の周期を平均して求め、角振幅は加速度計の振幅を用いて式(3)で求められる。なお、 $A_{top}$ は基礎上端の加速度計の振幅、 $A_{bottom}$ は基礎下端の加速度計の振幅、 $H$ は模型基礎の高さである

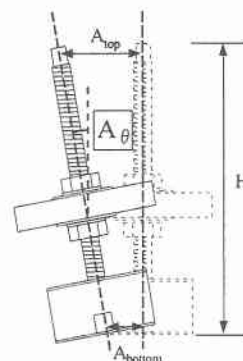


図7 角振幅の定義

(図7参照)。一方、減衰比は角振幅を用いて式(4)で求める。

$$A_\theta = \frac{A_{top} - A_{bottom}}{H} \quad \text{式(3)}$$

$$h = \frac{\ln(A_{\theta n} / A_{\theta n+1})}{\sqrt{\{\ln(A_{\theta n} / A_{\theta n+1})\}^2 + 4\pi^2}} \quad \text{式(4)}$$

図8は角振幅と振動周期・減衰比の関係を示している。図より、角振幅が減少すると振動周期と減衰比は、徐々に小さくなる傾向が確認される。しかし、その関係はインパクトの強さに関わらず1つの曲線になっている。さらに相対密度の異なる場合の試験結果をまとめると、図9(a)より、角振幅と振動周期の関係は相対密度に依存し、相対密度が大きくなるほど振動周期は短くなることが分かった。一方、図9(b)では、角振幅と減衰比の関係は相対密度に依存しないことが確認された。

また、角振幅と振動周期の関係を調べる為に、角振幅 $10^{-6}$ 時の値で振動周期を正規化すると、相対密度が異なる試験結果全てを1つの曲線で表すことができ、振動周期と角振幅の関係に相対密度は影響しないことが確認された(図10)。なお、図9,10で見られる傾向は、要素試験のせん断ひずみとせん断弾性係数・履歴減衰比の関係と同様である。

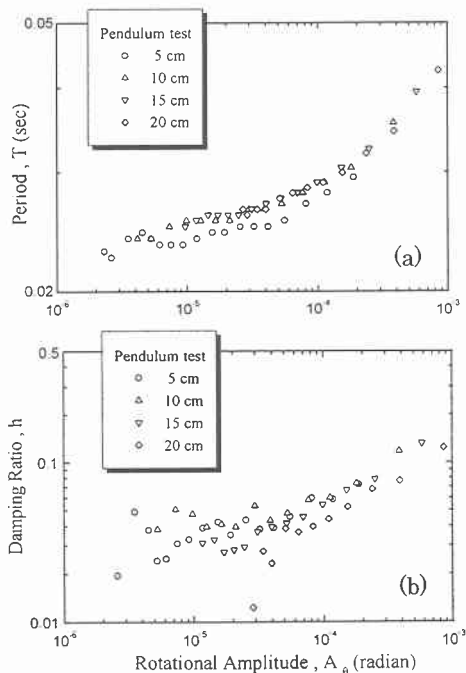


図8 角振幅と振動周期・減衰比との関係

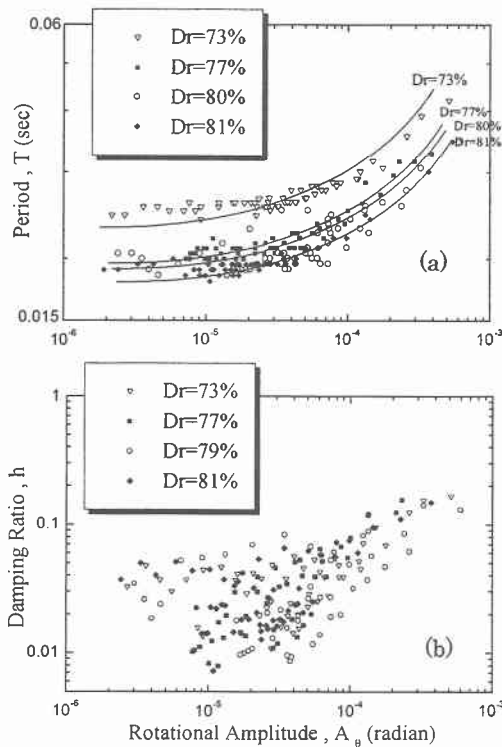


図9 角振幅と振動周期・減衰比との関係  
(相対密度 73%, 77%, 80%, 81%)

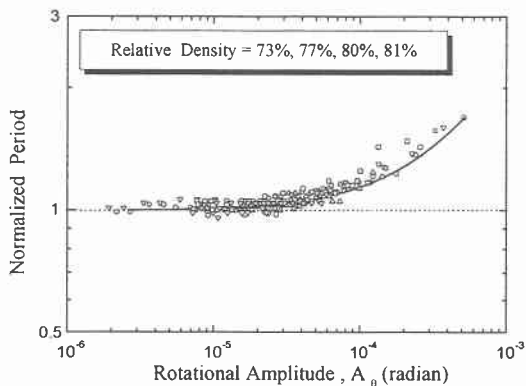


図10 正規化した角振幅と振動周期の関係

### 3.2.2 ハンマー試験

ハンマー試験では各加速度計のデータをフーリエ解析のプログラム<sup>2)</sup>にかけて、フーリエスペクトルを求める。地盤表面の加速度計(ch5,6)の平均値で基礎・上端・下端の加速度計の値を正規化したフーリエスペクトルを図11に示す。ここでの正規化は、下から伝播してくるせん断波は地盤表面以下の地盤や土槽、振動台等の影響を受けているので、その影響を取り除く目的で行っている。図11の示すように、約20Hz～60Hzの間に卓越する周波数が見られるので、これを基礎の固有周波数とした。この場合、固有周波数38.76Hz、固有周期0.0258sとなる。図12で、この固有周期を同じ実験ケースでの振子試験の結果と比較すると、角振幅と振動周期の関係を表す曲線とほぼ一致している。つまり、振動させる方法が異なっているに関わらず、振子試験・ハンマー試験時における基礎の振動特性は同じ傾向である。これは、基礎の挙動に関して多くの情報を得ることのできる振子試験の結果を解析することで、実際に問題とされる、地盤から伝播するせん断波によって基礎が振動する場合の振動特性を把握できることを示している。

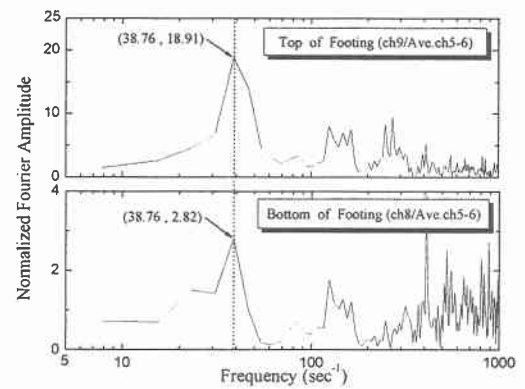


図11 基礎の上端・下端から求めたフーリエスペクトル

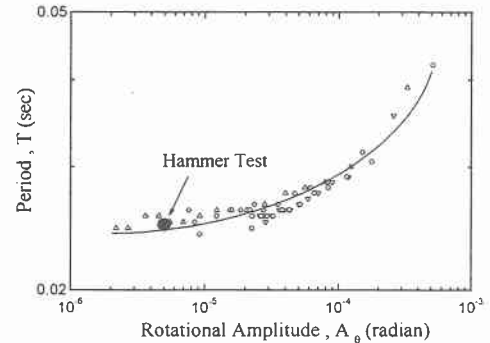


図12 ハンマー試験の結果のプロット

## 4. 基礎の振動特性と地盤の動的特性の関連

要素試験で求めた「せん断ひずみ・等価せん断弾性係数・履歴減衰比」と、振子試験で求めた「角振幅・振動周期・減衰比」の相関から、地盤材料の動的特性と基礎の振動特性の関連を説明する。

まず、角振幅は基礎の傾きの程度を示し、この傾きは基礎地盤のせん断ひずみを誘発するものであるから、角振幅とせん断ひずみにはある相関が存在するはずである。履歴減衰比と減衰比についても同様であると言える。さらに、等価せん断弾性係数と基礎の振動周期の関係は、振子試験の結果からも同様の傾向が見られたが、図13に示す簡単なバネモデルを用いても説明できる。

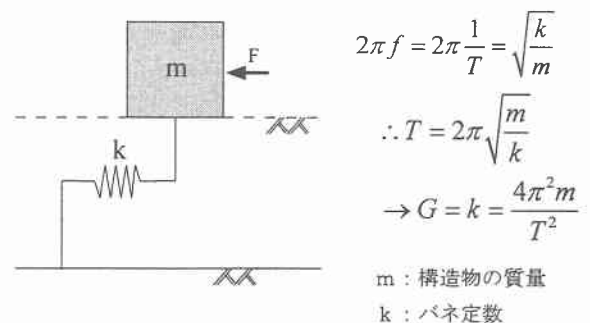


図13 地盤と構造物の簡単なバネモデル

図14では要素試験の結果と振子試験の結果を比較している。図14(a)では、せん断弾性係数と振動周期をせん断ひずみ=角振幅=10<sup>-5</sup>時の値で正規化したものを比較している。なお、バネモデルよりせん断弾性係数は1/T<sup>2</sup>に比例するので、このことを考慮して振動周期は1/T<sup>2</sup>の値を正規化している。図14(b)は、履歴減衰比と減衰比をせん断ひずみ=角振幅=10<sup>-5</sup>時の値で正規化したものの比較である。図から、それぞれの関係が極めて類似した挙動を示すことが確認できる。

以上より、要素試験・模型試験から求めたパラメータそれぞれが対応していて、同様の傾向を示すことを確認できた。さらに、「せん断ひずみ・等価せん断弾性係数・履歴減衰比」は地盤材料の動的特性を、「角振幅・振動周期・減衰比」は基礎の振動特性を適切に評価する値である。つまり、地盤材料の動的特性と基礎の振動特性の間にはある関連が存在し、正確な地盤材料の動的特性が把握できれば、基礎の振動特性の予測も可能であると言える。

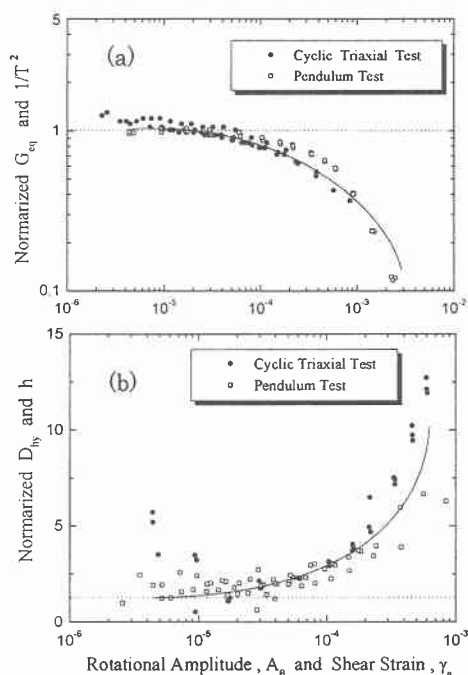


図 14 要素試験の結果と模型試験の結果の比較

## 5. 地盤の構造特性の影響

地盤材料の動的特性と基礎の振動特性に関連があることが分かったので、次に地盤の構造特性が基礎の振動特性に及ぼす影響について調べる。本研究では、地盤の構造特性が異なる地盤として、空中落下法のみで作成した地盤、タンピングを加えた地盤、ロッキングを加えた地盤、そして応力履歴が異なる地盤を用意した。タンピングは 30cm 四方の板が先端についた棒で地盤表面全体を 20 回ずつ締固め、ロッキングは約 7cm の長さの釘を先端についた棒で地盤表面全体を約 1000 箇所突き固める。応力履歴が異なる地盤を作成する場合は、地盤を空中落下法のみで作成後、振動台で加振して地盤を沈下させる。この沈下によって相対密度が増加し、この時の振動の強さにより任意の応力履歴を加えたものとする。表 2 に実験ケースを示し、地盤の相対密度と構造特性について説明する。

表 2 実験ケース

|       |                                            |
|-------|--------------------------------------------|
| Case1 | 空中落下法(AP)のみで作成した地盤(Dr=80%)                 |
| Case2 | タンピングを加えて作成した地盤(Dr=80%)                    |
| Case3 | ロッキングを加えて作成した地盤(Dr=80%)                    |
| Case4 | 300gal,20Hz で沈下させた地盤<br>Dr=72%→78%→80%     |
| Case5 | 400gal,20Hz で沈下させた地盤<br>Dr=73%→77%→80%→81% |

初めに、一般的な地盤改良法であるタンピング・ロッキングを加えた地盤と、ノーマルな地盤での試験結果を図 15 で比較する。図では、振動周期は Case1>Case2>Case3

となっており、振動周期が短くなるほど地盤のせん断剛性は高くなるので、地盤のせん断剛性は Case3>Case2>Case1 となる。ここで、本試験の模型基礎は全て同じ物を用いており、基礎の設置圧も地盤の相対密度も等しいので、地盤剛性に対して地盤密度・せん断ひずみ・拘束圧以外の影響因子があることが分かる。そこで、せん断剛性の違いは地盤の粒子構造の違いであると思われるので、せん断剛性が大きいほどランダムな配向を示す粒子が多いと考察される(図 15 参照)。この考察より、空中落下による粒子構造が最も弱い、ロッキングによる粒子構造が最も強いと考えると、地盤の構造特性による振動特性の変化は図 15 の Case1 の曲線と Case3 の曲線の間に収まると考えることができる。更に、空中落下法で作成した地盤を自然堆積地盤と考えると、一般的に密度増加を目的として行う地盤改良法が、粒子構造の面から見てもせん断剛性を改良できていることになる。

図 16 では、相対密度は全て 80%であるが、応力履歴が異なる地盤の試験結果を比較している。Case4 は相対密度 70%の地盤を 300gal,20Hz で、Case5 は 400gal,20Hz で沈下させて相対密度 80%にした地盤での試験結果である。同じ相対密度であるにも関わらず振動周期は Case1>Case4>Case5 になっており、地盤のせん断剛性が異なる。つまり同じ密度でも、過去に受けた振動の強さによって地盤のせん断剛性は変化することが確認された。また、Case4 と Case5 の関係から、受けた振動がより顕著な方がせん断剛性は高くなると言える。

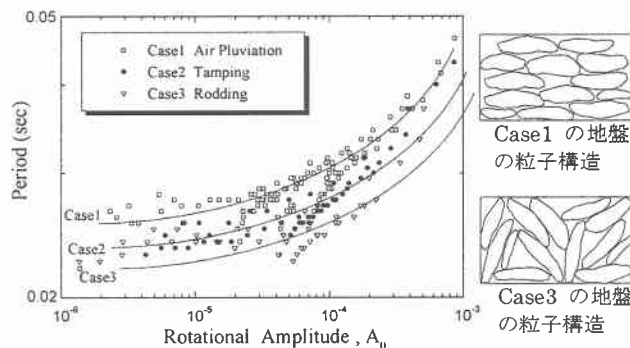


図 15 振動特性に及ぼす構造特性の影響と粒子構造の予測

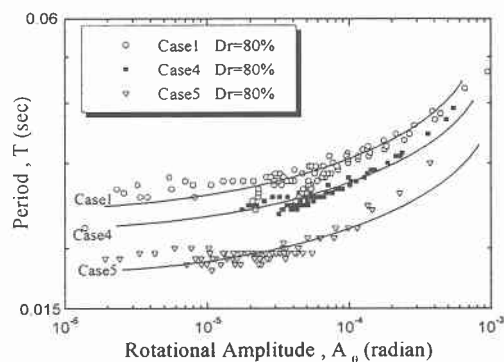


図 16 振動特性に及ぼす応力履歴の影響

## 参考文献

- 1) 阿曾 沼 剛：原位置および室内試験より求めた火山灰土の動的変形定数，地盤工学会北海道支部技術報告集第 41 号，pp21
- 2) 大崎 順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，pp.226-230