

ガウス過程回帰モデルを用いた地盤の動的変形特性の予測評価

東北大学 学 ○菊地史佳 正 加村晃良 フ 風間基樹
宇都宮大学 正 海野寿康

1. 研究背景と目的

地盤の地震応答解析において、土のせん断剛性や履歴減衰率は動的変形特性試験の結果に基づき設定される。本試験は微小ひずみ～中ひずみレベルを対象に行われるため、結果には各種不確実性に起因するばらつきが含まれる。地盤の信頼性設計においては、不確実性を定量化する必要があるものの、データプロットの外れ値の判断や、動的変形曲線の描画は、技術者の力量・主観に委ねられるのが実情である。本研究では、ベイジアンモデリングであるガウス過程回帰を用いて、砂質土を対象とした動的変形特性試験の結果の不確実性定量化および動的変形特性曲線の客観的描画を試みることにした。

2. 手法

ガウス過程回帰モデルは、対象となる問題の専門知識（以降、ドメイン知識）に基づきカーネル関数を設計したり組み合わせたりすることにより、対象となるデータの特性を連続的に表現するものである。回帰モデルに対して、データに関する抽象的な知識を反映させ、さまざまな特性を持たせることができる、非常に柔軟なモデルである。また、ベイズ推定を用いているため、関数の分布から推定の不確実性が表現される。動的変形特性試験では、1つの供試体で一連のすべてのひずみ履歴に関する試験を行うため、前後のデータの影響を受けるガウス過程回帰を用いることができると判断した。本稿では、せん断ひずみ振幅に対するせん断剛性率および履歴減衰率の結果を用いることにした。事前分布には、各結果のプロットの分布形状からコサインカーネルが有効であると判断し、ガウス過程回帰で予測分布を出力し、平均値としての描画、信用区間（ベイズ統計学において母集団の値が95%の確率で存在する範囲）の推論および未観測データの予測を行った。

3. 室内試験方法および結果

動的変形特性試験は、排水条件と非排水条件の各々について中空ねじりせん断試験機にて実施した。一般的に本試験は非排水条件で実施されるが、乾燥砂の挙動を評価する際には、排水条件で実施される。

実験手法は両試験ともに、地盤工学会基準「土の変形特性を求めるための中空円筒供試体による繰返しねじりせん断試験方法」に従った。試験結果から得られるせん断剛性率 G と履歴減衰率 h についても、当該基準に基づき算出した。

本研究で用いた試料は豊浦砂であり、物性値は表1に示すとおりである。相対密度 Dr 60% 拘束圧 $\sigma'_c = 30$ kPa と、 Dr 90% $\sigma'_c = 45$ kPa の条件でそれぞれ実施した。試料は両方とも豊浦砂を用いたものの、別ロットであるため、各物性値が異なっている。

結果は、図2に示すとおりである。なお、排水条件と非排水条件の各実験は異なる環境で実施され（排水条件：宇都宮大学、非排水条件：東北大学）、非排水条件の結果では微小ひずみレベルのデータが欠損している。

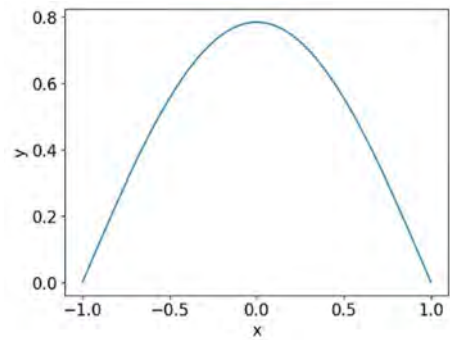
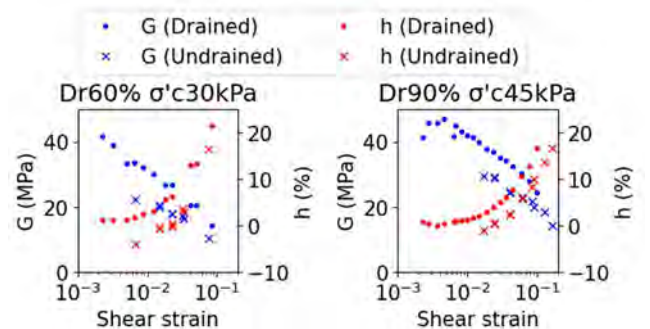


図1 Cosine kernel の基本形状

表1 各試験での豊浦砂の物性値

試験条件	G_s [g/cm ³]	e_{max}	e_{min}
排水条件	2.643	0.977	0.605
非排水条件	2.668	0.964	0.631



(a) Dr 60%, $\sigma'_c = 30$ kPa (b) Dr 90% $\sigma'_c = 45$ kPa

図2 動的変形特性試験の結果
(排水・非排水条件)

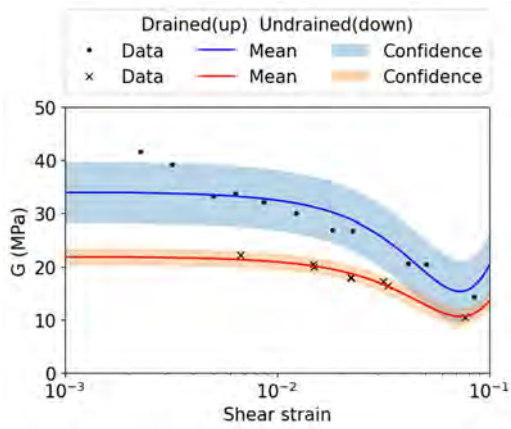


図3 セン断剛性率の予測分布 (Dr 60% $\sigma'_c = 30$ kPa)

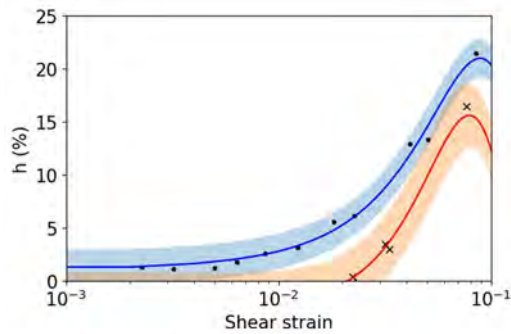


図4 履歴減衰率の予測分布 (Dr 60% $\sigma'_c = 30$ kPa)

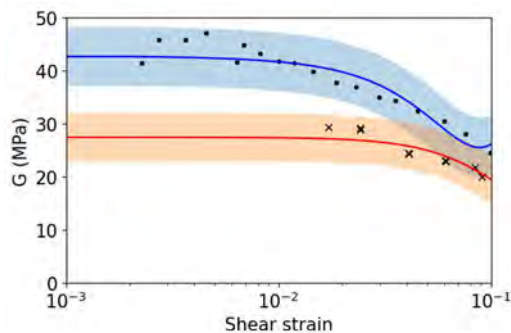


図5 セン断剛性率の予測分布 (Dr 90% $\sigma'_c = 45$ kPa)

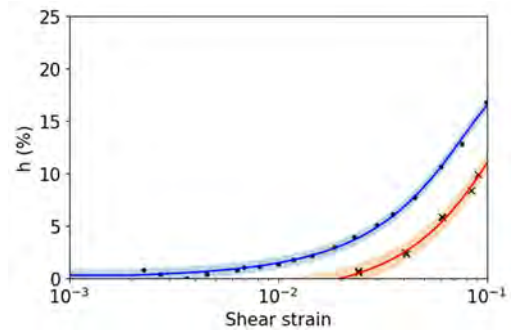


図6 履歴減衰率の予測分布 (Dr 90% $\sigma'_c = 45$ kPa)

4. ガウス過程回帰による予測評価

せん断剛性率および履歴減衰率の実験データに対して、ガウス過程回帰モデルを用いて予測（曲線形状）を

示したものが図3から図6である。黒い点が実験結果、青および橙で塗りつぶされた区間がその予測分布における信用区間であり、幅が広いほどデータにばらつきがあることを示す。これらより、室内試験で得た実験データにどの程度のばらつきが含まれているのか視覚的にとらえることができる。

せん断剛性率の予測分布では、信用区間の幅が大きく、履歴減衰率のデータより相対的に信頼性が低いことが分かる。大きいところでせん断剛性率 10 MPa 以上（平均値に対して $\pm 38\%$ ）の幅がある。加えて、データ数が多いほど信用区間の幅が狭まるといった傾向は見られなかった。よって、データの信頼性は、個数よりも個々の精度に依存する可能性が示唆される。

せん断剛性率よりも履歴減衰率の方が信用区間の幅が狭い傾向については、せん断剛性率は割線から表現されるのに対して、履歴減衰率は積分値から求められることが関係していると考えられる。なお、せん断ひずみレベル 10^{-1} 付近で実現象と整合しないグラフがあることについては、その先のひずみ領域のデータが無いこと Cosine kernel の周期性が表れているものである。この点については、実験における対象ひずみレベルの設定や、カーネル関数の選定上の課題であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、ガウス過程回帰モデルを用いて、動的変形特性試験の結果の不確実性定量化および動的特性曲線の客観的描画を実施した。今回実施した条件においては、特に微小ひずみ領域におけるせん断剛性率の予測分布の信用区間の幅が大きく、不確実性を含むことが示された。また、データ数を 12 から 19 に増やしても信頼性が上がる傾向は見られなかった。

今回の解析ではドメイン知識に基づきカーネル関数を設定しているため、その選定は更なる検討を要する。また、試験データが有する各種不確実性に起因するばらつきの定量化も求められる。

謝辞 本稿で用いた試験結果の一部は、宇都宮大学学生の番場恵梨子氏に実施頂いたものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 森賀新, 木田悠歩, 須山敦 : Python ではじめるベイズ機械学習入門, 講談社, 2022.
- 2) 地震工学委員会・性能設計に対応した繰返しせん断試験検討小委員会 : 性能設計のための土の繰返しせん断試験の標準化 その1 解析側から見た問題点, 土木学会論文集C(地圏工学), Vol.75, No.2, p.146-154, 2019.