

2024.3.22

第2回月面建設技術シンポジウム

研究
発表

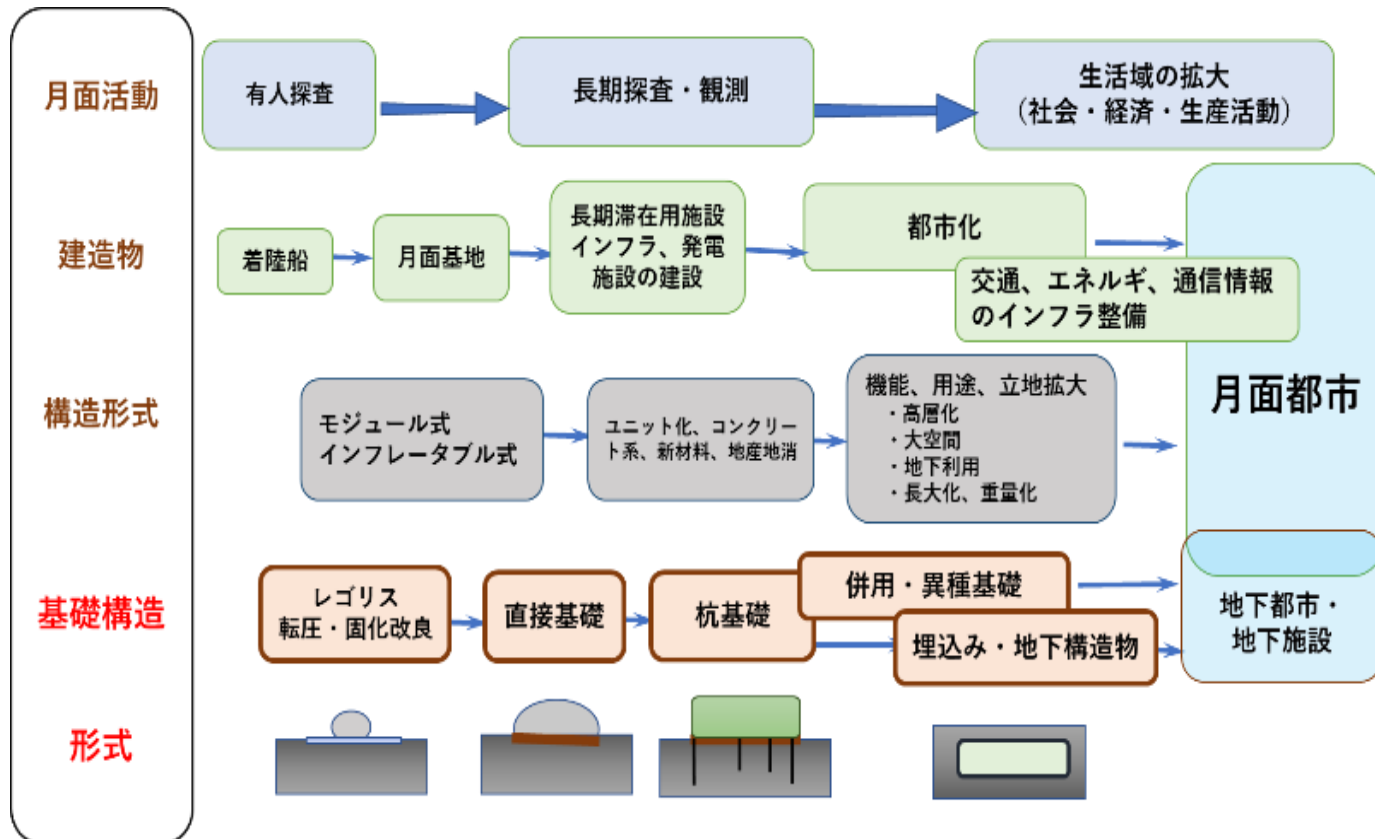
振動外乱に対する月面レゴリスと 構造物の応答性状に関する基礎研究

大阪大学
福井工業大学
三誠

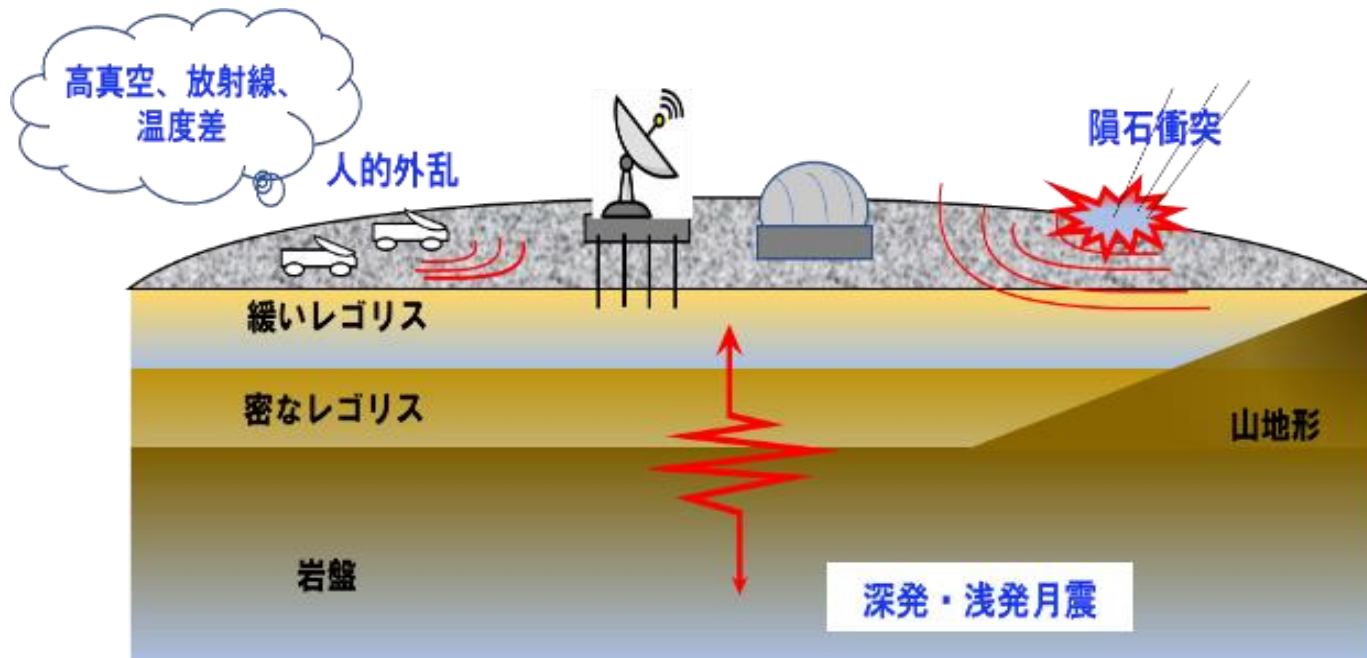
○中野尊治
宮本裕司
小林俊夫

- 人間の拠点となる基地や都市を月面に構築する上で、月面環境※における各種構造物の基礎の設計に関する研究を進める必要がある。

※例えば、低重力・高真空、レゴリス地盤、月震、etc.



- 月震や隕石衝突による月面震動、また人間活動による**振動外乱**に対して、各種建造物を安全に支持し維持するための基礎設計データを蓄積する。
- 将来に月面構造物を設計するための**外力**を評価する際の応答性状や評価手法について検討する。



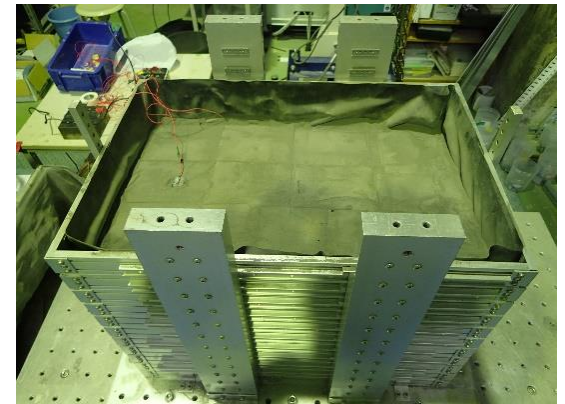
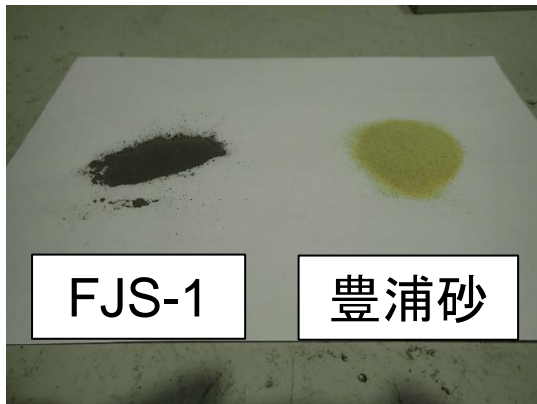
○ レゴリス模擬土「FJS-1」を用いて以下の検討を行う。

(1) 室内土質試験

- ・ 静的三軸圧縮試験
- ・ 繰返し三軸圧縮試験 ⇒ 動的特性を把握

(2) 振動台実験

- ・ 単独のレゴリス地盤 ⇔ シミュレーション解析も実施
- ・ 各種基礎(直接基礎・杭基礎・埋込み基礎)



- レゴリス模擬土の静的および繰返し三軸圧縮試験を行った。

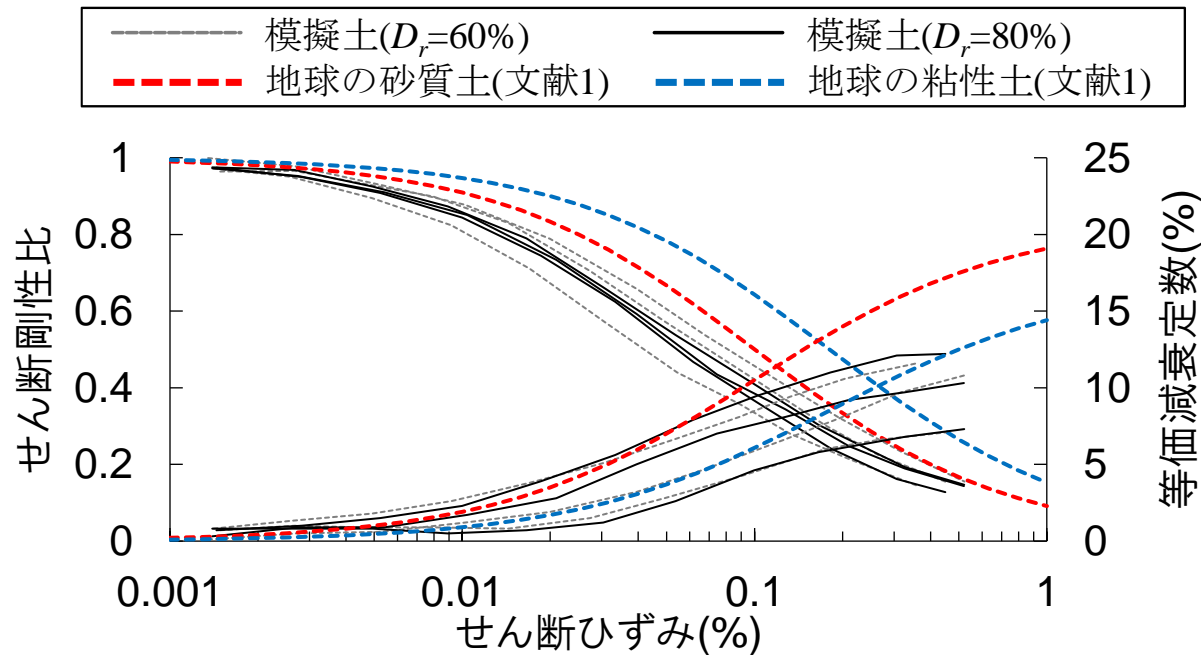
試験条件

- 相対密度 $D_r=60\%$ 、 80%
- 試験体を自立させるため加水・凍結して試験機に設置し、解凍後に試験を行った。
- 【繰返し試験】
拘束圧 $\sigma'_3=50\text{kN/m}^2$
載荷振動数：0.5、1.0、または2.0Hz



試験後の試験体

- せん断ひずみの増大につれて、せん断剛性比は低下し、等価減衰定数は増大する。(地球の土と同様の特性を示す)



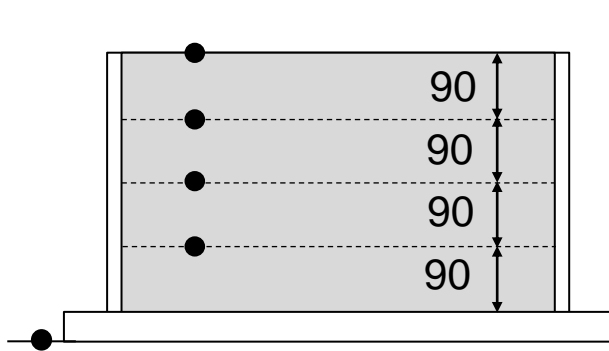
※文献1)古山田耕司, 宮本裕司, 三浦賢治: 多地点での原位置採取試料から評価した表層地盤の非線形特性, 第38回地盤工学会研究発表会, pp.2077-2078, 2003.

地盤・構造物の模型振動台実験

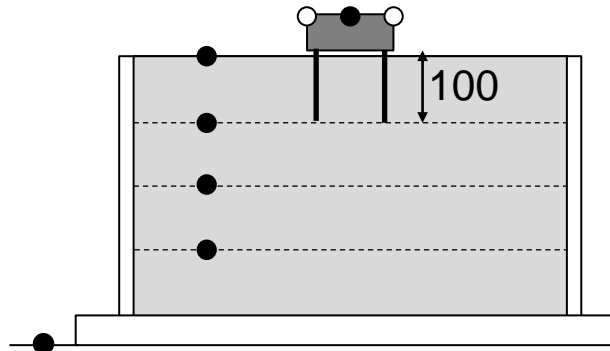
- 加速度計(水平動)
- 加速度計(鉛直動)

※錘質量:約5.4kg
※入力:ホワイトノイズ・5段階
(36~372cm/s²)

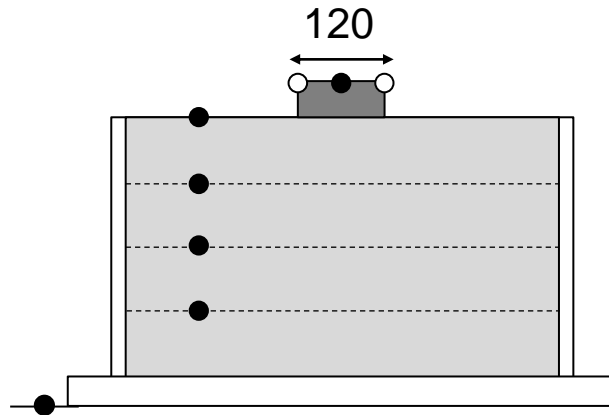
(unit: mm)



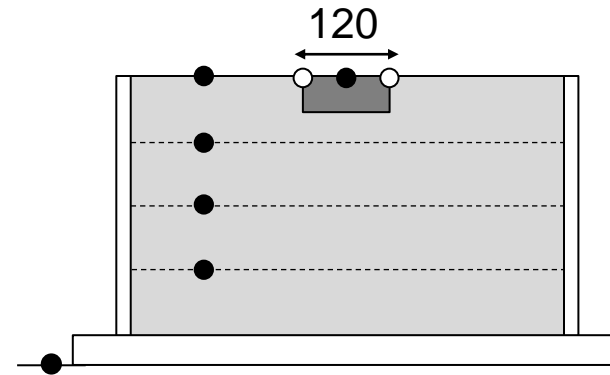
(a) 地盤のみ



(b) 杭基礎



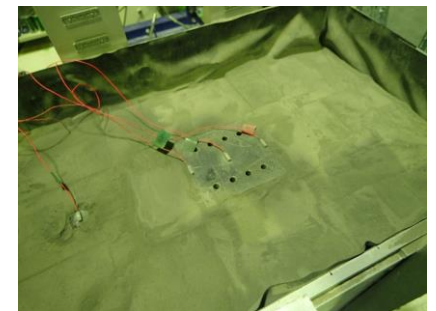
(c) 直接基礎



(d) 埋込み基礎



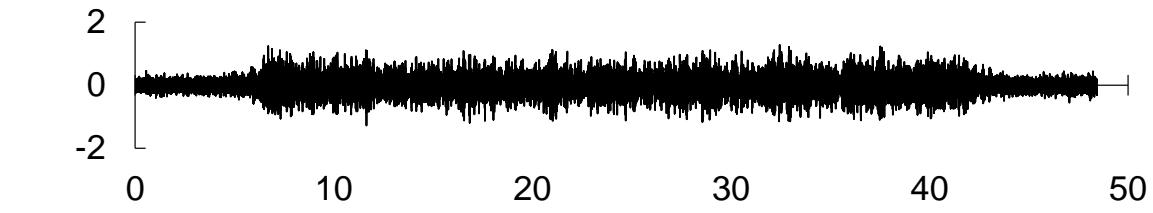
杭基礎: 直径8mmの
アクリル丸棒からなる。



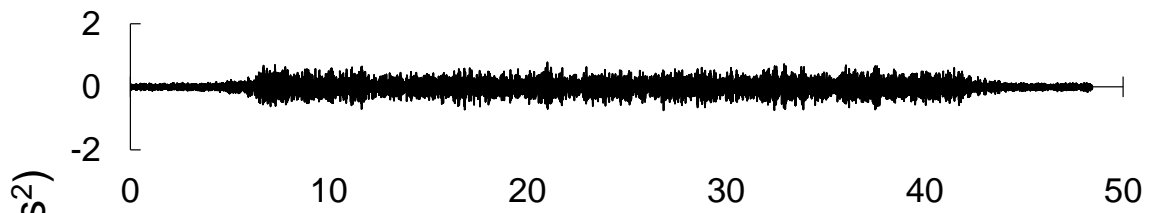
埋込み基礎: 基礎上面を
地表レベルに一致させた。

レゴリス地盤の応答結果(時刻歴波形)

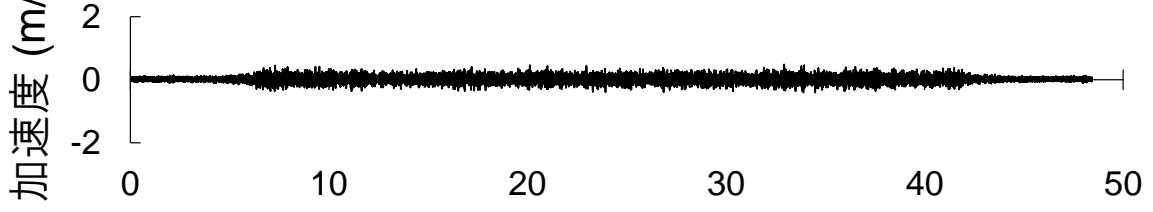
GL
(地表)



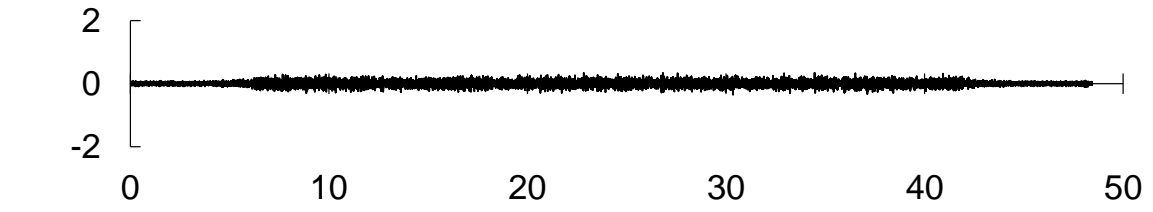
GL-90mm



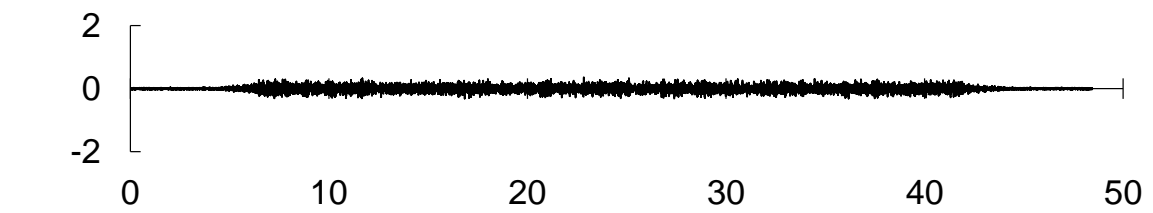
GL-180mm



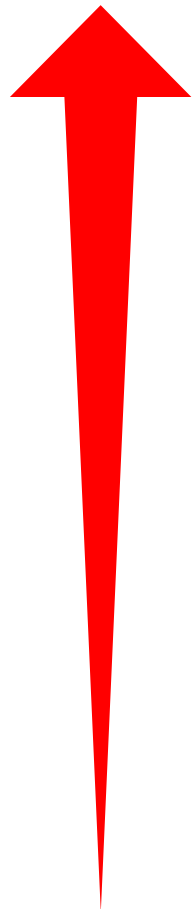
GL-270mm



GL-360mm
(振動台)



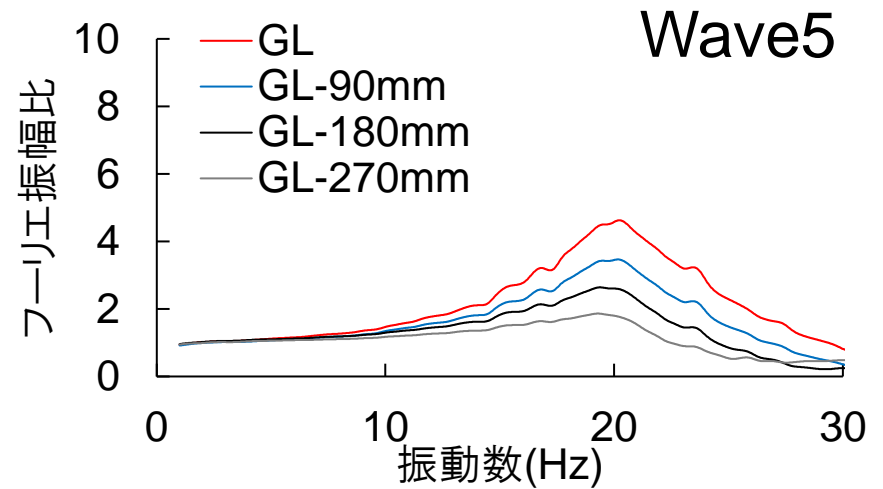
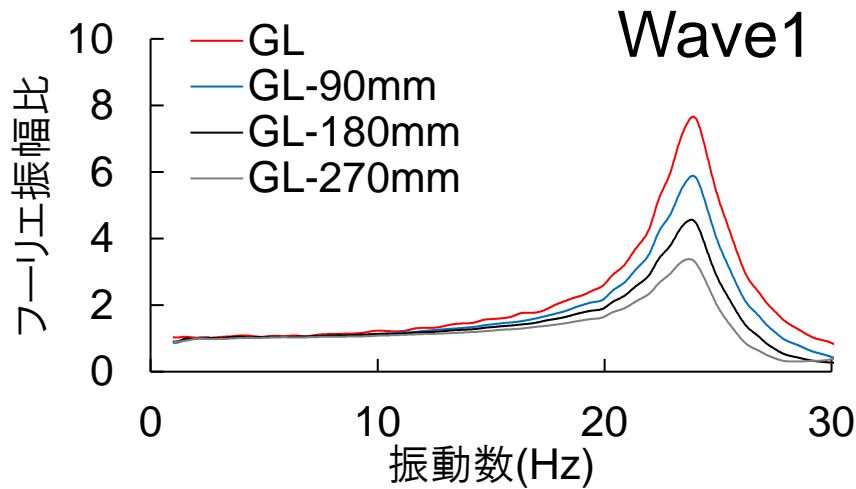
増幅



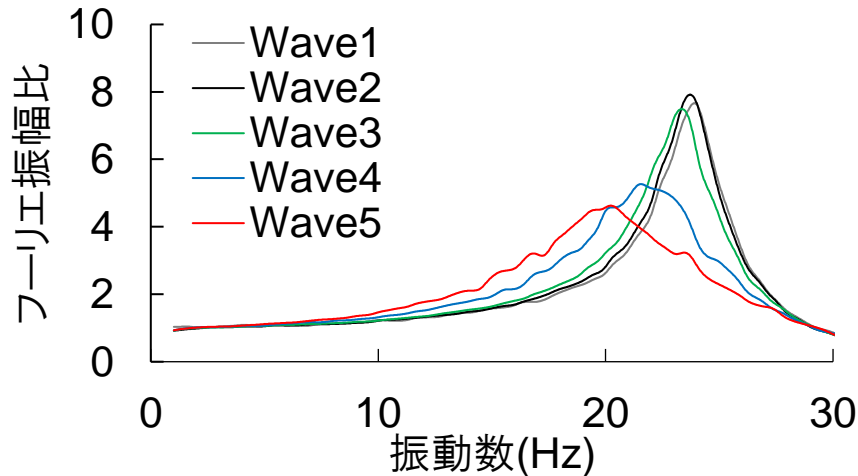
時刻 (s)

加速度時刻歴波形(Wave1)

レゴリス地盤の応答結果(振動数特性)

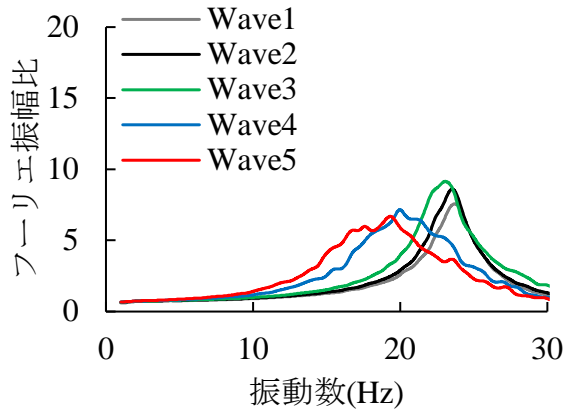


地表・地中の水平応答 (分母は振動台水平加速度)

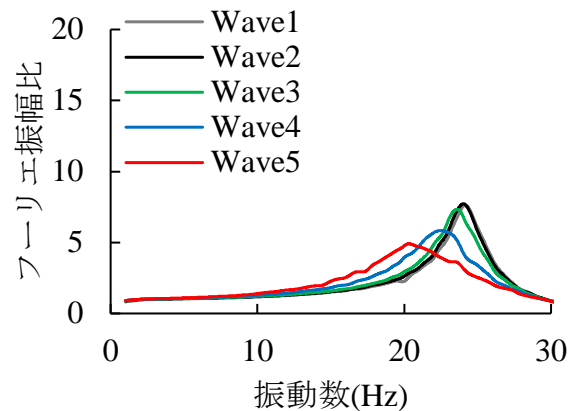


入力振幅による比較 (地表 / 振動台)

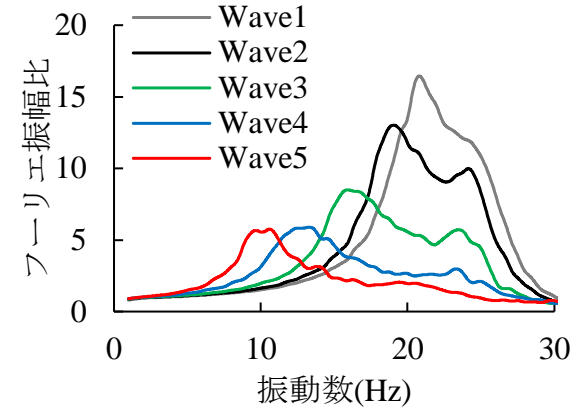
基礎応答のフーリエ振幅比(水平応答)



直接基礎

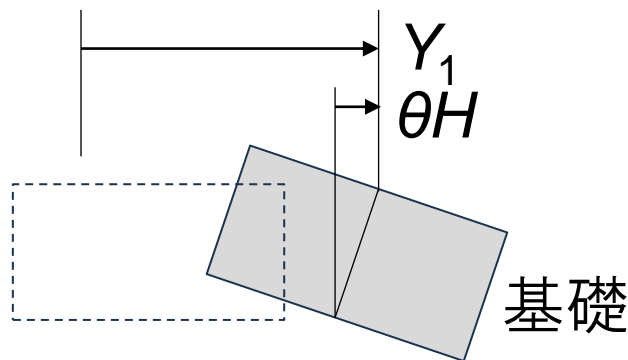


埋込み基礎



杭基礎

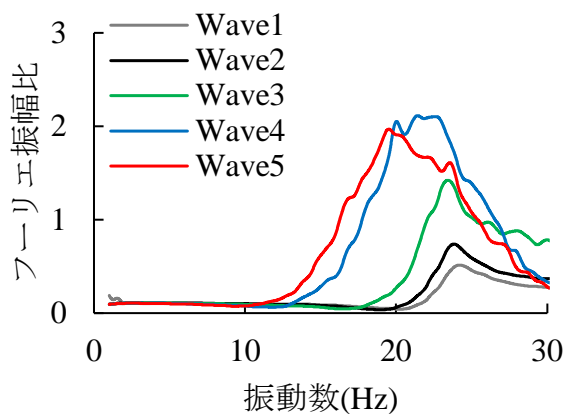
構造物頂部の水平応答(分母は振動台水平加速度)



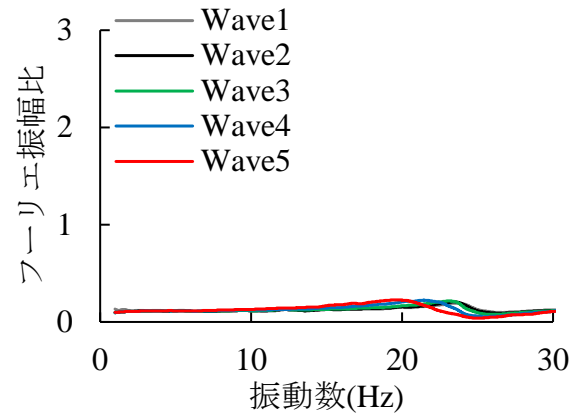
$$Y_1'' / Y_0''$$

- Y_0 : 振動台の絶対変位
- Y_1 : 基礎頂部の絶対変位
- θ : 基礎のロッキング回転角
- H : 基礎の高さ

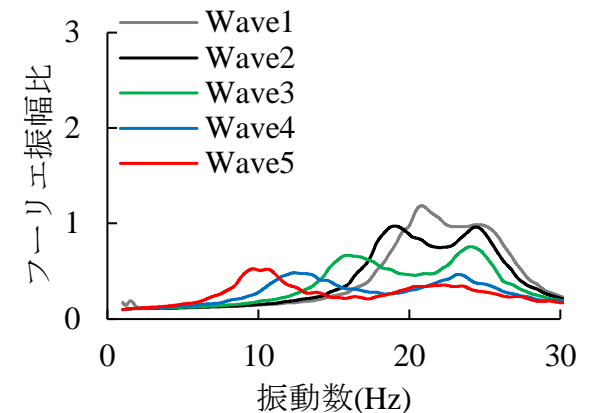
基礎応答のフーリエ振幅比(回転による応答)



直接基礎

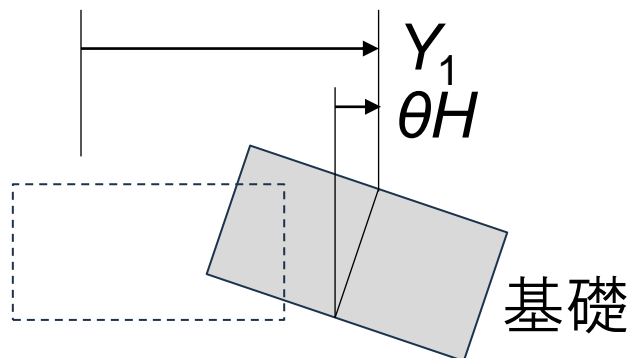


埋込み基礎



杭基礎

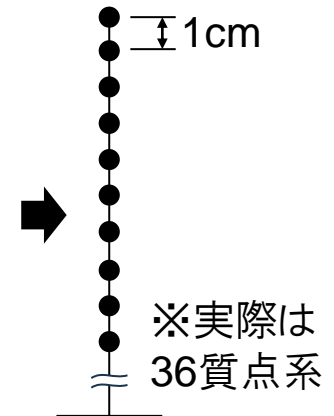
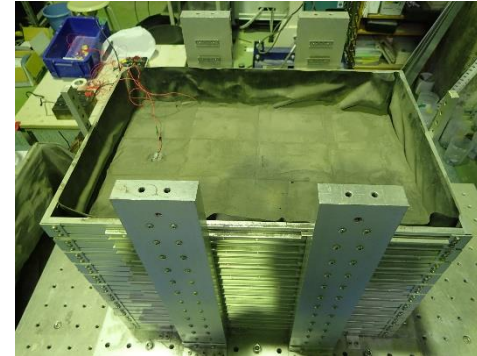
構造物頂部のロッキング成分による水平応答(分母は振動台水平加速度)



$$\theta''H/Y_0''$$

- Y_0 : 振動台の絶対変位
- Y_1 : 基礎頂部の絶対変位
- θ : 基礎のロッキング回転角
- H : 基礎の高さ

- 地盤を質点系でモデル化し、時刻歴応答解析を実施した。
- 地盤の非線形特性は**双曲線(H-D)モデル**とした。



(1) 初期剛性

初期剛性を深さの0.5乗に比例させた。(砂と同様)
比例定数は、**Wave1入力時の応答**から推定した。

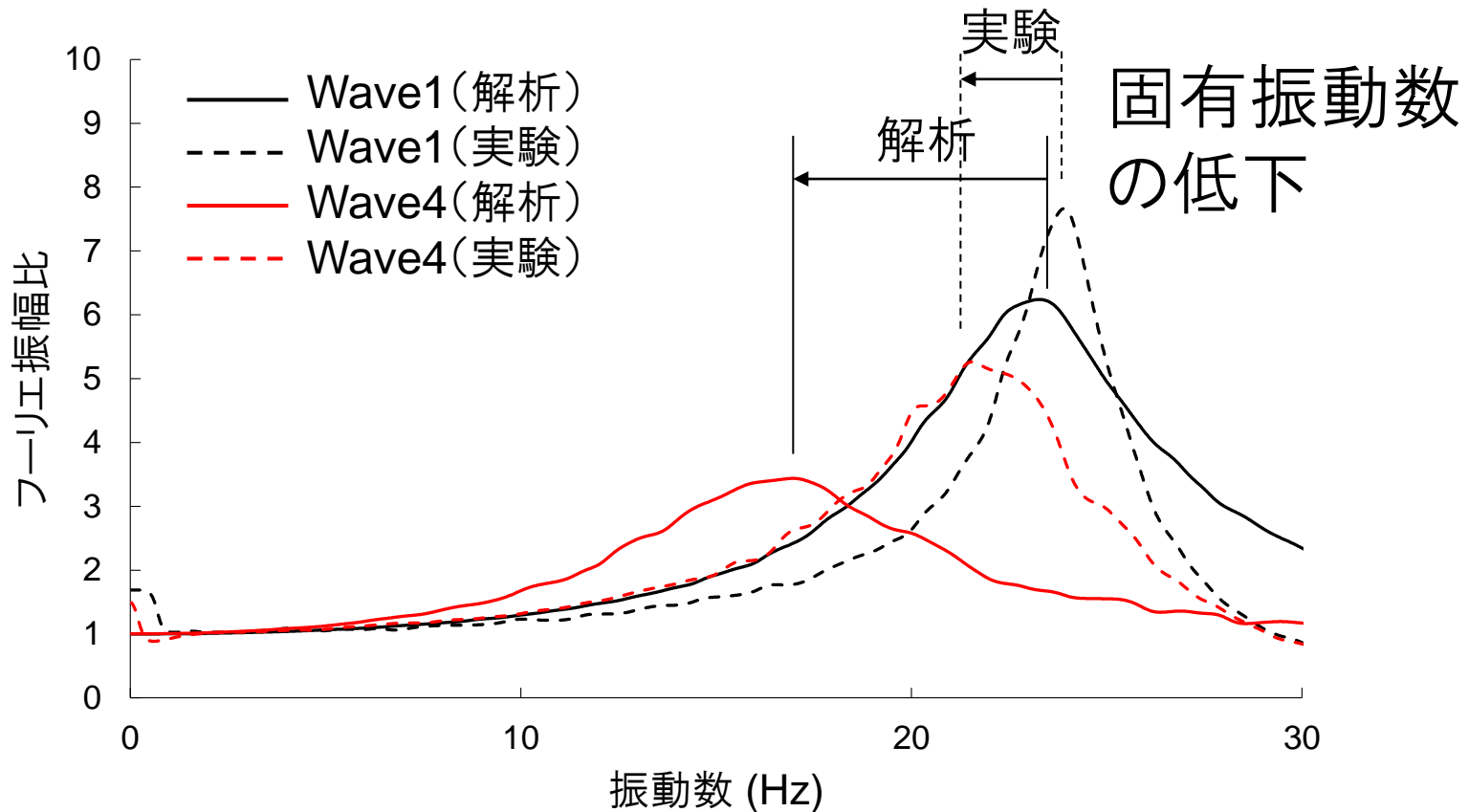
(2) 非線形パラメータ

繰返し三軸圧縮試験の結果を参考に決定した。

- **Rayleigh減衰**を用い、弾性1次・5次固有振動数における減衰定数を10%とした。

レゴリス地盤の応答解析(結果)

- Wave1: 地盤の固有振動数は実験と解析で対応。
- Wave4: 解析では、実験に比べ固有振動数の低下が顕著。



地表の水平加速度応答 (分母は振動台水平加速度)

レゴリス模擬土の土質試験と振動台実験を行い、各種基礎形式をもつ月面構造物の応答性状に関する基礎データを得た。

- ① 繰返し三軸圧縮試験の結果より、レゴリス模擬土の動的変形特性を、地球の砂質土のものと比較した。
- ② レゴリス地盤と各基礎の非線形応答を検討した。直接基礎と比較して、埋込み基礎と杭基礎ではロッキング成分による水平応答が抑制された。
- ③ 繰返し三軸圧縮試験による動的変形特性を考慮して、レゴリス地盤の応答解析を行った。解析では実験に比べ、地盤の非線形性がより強調される結果となった。

低拘束圧下の乾燥したレゴリスの土質特性がどのような影響を与えているか、また月面環境における低重力と真空中での構造物とレゴリス地盤の応答特性については、今後さらに検討を進める必要がある。

※本発表は、下記の論文の内容に解析結果を追加したものである。

Miyamoto, Y., Nakano, T. and Kobayashi, T.: Fundamental Study on Response Properties of Structures Constructed on Lunar Regolith, *Open Journal of Earthquake Research*, Vol.13, No.1, pp.24-40, 2024.2.