

低浸透率層を含む二層系の液状化実験：層厚依存性

Liquefaction experiments with a low permeability upper layer : dependence on layer thicknesses

*水野 萌¹、隅田 育郎¹*Moe Mizuno¹, Ikuro Sumita¹

1. 金沢大学大学院自然科学研究科

1. Graduate school of Natural Science and Technology, Kanazawa University

地下水に浸かっている緩い地盤は地震発生時に液状化しやすく、その上部が細粒層に覆われていると、特徴的な水平の長さスケールを持った噴砂や火炎構造が形成されることが良く知られている。土質力学の分野では水平振動下における液状化のモデル実験が行われており、細粒層厚/粗粒層厚の比が大きくなるに従い噴砂の数や面積が減少することが報告されている(山口他, 2008)。しかしこれらの結果の物理的な解釈はなされていない。また層厚比にのみ着目しており、各々の層厚が及ぼす影響については十分に分かっていない。本研究では、二層の厚さの組み合わせを変えたセルを用いて液状化のモデル実験を行い、層厚と液状化・噴砂現象の関係を定量的に調べ、その物理を明らかにすることを目的としている。

液状化モデルのセルとして、ケースに粒径の異なる二種類のガラスビーズを入れて水で満たしたものをを用いる。上層の粒径は0.05mm、下層の粒径は0.22mmである。上層の浸透率は下層の32分の1となり、低浸透率層を形成する。各層厚を0~40mmの範囲で変化させ、14種類のセルを用いて実験を行った。実験方法としてはセルをよく振り攪拌した後、振動台の上に固定し5秒間鉛直振動を与える。振動条件として周波数を100Hz、加速度を 30m/s^2 (重力加速度の約3倍)とした。実験は高速カメラを用いて撮影し、詳細な画像解析を行った。

圧密に加えて、火炎構造の形成と噴砂が大部分の実験で起きた。これらは二層境界における重力不安定の結果と理解できる(Yasuda & Sumita, 2014, 2016)。下層よりも上層が厚くなると火炎構造や噴砂が形成されず、圧密のみが起きた。下層厚が22~26mmの場合に限定して上層厚依存性を詳しく調べたところ、上層が厚くなると、火炎構造の波長は増大し、振幅成長率は減少するという傾向がみられた。火炎構造の波長には上限値が存在するようである。また火炎構造の最大振幅には極大値があり、上層が十分厚くなると最大振幅が減少するという傾向が見られた。振幅成長率の値を用いてすべての実験結果を分類すると、下層が薄い場合には成長率が上層厚と下層厚の両方に依存するが、下層が十分厚い場合には主として上層厚に依存することが分かった。実験結果を理論的に考察する。粉粒体同士の間摩擦応力 σ はクーロンの摩擦の法則 $\sigma = \mu \Delta \rho \phi g z \dots (1)$ に従い、深さ z に比例して増大する。ここで μ は摩擦係数、 $\Delta \rho$ は粒子と水の密度差、 ϕ は充填率、 g は重力加速度、 z は深さである。振動によって与えられる慣性力と摩擦力の比は「慣性力/摩擦力 $\propto 1/z$ 」となり、臨界深さ以上では「慣性力<摩擦力」のため、液状化しないと考えられる。そのため、上層が厚くなるに伴って二層境界付近の粒子層は流動化しにくくなると考えられる。

粘性流体のRayleigh-Taylor不安定の線形論(Whitehead & Luther, 1975)の結果によると、不安定の波長 λ および振幅成長率 p は次式で表される。 $\lambda \propto \varepsilon^{1/3} h \dots (2)$, $p \propto \varepsilon^{-2/3} h \dots (3)$ ここで、 ε は二層境界直上の上層と二層境界直下の流動層との実効粘性率の比、 h は流動層の厚さである。以上より上層厚の増大に伴い λ は増大、 p は減少するという結果は、 ε が大きくなることで説明できる。測定した λ と p の値を式(2)(3)に代入して ε を求めると、上層が厚くなるにつれて ε が3から495へと増加するという結果が得られた。上層厚の増大に伴う ε の増加はクーロンの摩擦の法則から推測される結果と整合的である。本実験結果は、上層厚の増大に伴って二層境界直上の粒子間の摩擦が増大し、流動化した粉粒体の実効的な粘性率が増大したためと理解できる。

キーワード：液状化、地震、低浸透率層、重力不安定、層厚依存性

Keywords: Liquefaction, earthquakes, low-permeability layer, gravitational instability, thickness dependence