

# モデル実験を用いた液状化現象の発生条件の解明

班員 上林 透也 塚 凜太郎 政氏 克善 山道 悠生  
担当教諭 山本 一博

キーワード：液状化現象、振動エネルギー、BPM、Gal

We conducted experiments to elucidate the conditions under which liquefaction occurs. We found that the greater the energy imparted to the sand and water, the more likely liquefaction is to occur, regardless of whether the shaking is vertical or horizontal, and that when a certain size of space is created, the ground settlement becomes smaller and the amount of water that appears on the ground surface decreases.

## 1 はじめに

私たちは地震による被害を小さくするという観点から、地震によって引き起こされる液状化現象に着目した。

本研究では、液状化現象の発生条件を明らかにすることを目的として、振動によって砂および水がもつエネルギーの大きさや振動の方向と、液状化現象の起こりやすさの関係をモデル実験を用いて解明し、地震の被害の縮小に役立てようと考えた。

### ◎液状化現象とは

通常の状態の地盤は、砂などの粒子同士が動き出さずにいる。液状化現象では、浅い水位の地下水が地震等の振動によって粒子間に入り込む。そして、振動がおさまって隙間が小さくなるように粒子が沈下した結果、地盤が全体的に沈下して水が地盤の表面にあらわれる。

## 2 研究方法

本研究における地盤の沈下とは、水槽の底から測った砂の表面の高さが、実験前より実験後に小さくなったこととする。

### ◎実験1 砂および水に与えるエネルギーと液状化現象の関係

両側面に底を0 cmとして、縦1 mm間隔で目盛りを付けた水槽(横14 cm、奥行き26 cm、高さ

18 cm)に、砂4400 g、水800 gを入れて全体をよくスコップで混ぜた。砂および水を計量するときOHAUS製の電子ばかりを使用した。砂の表面の高さは容器の目盛りで水槽の底から8.0 cmに合わせた。これを木の板(横22 cm、奥行き105 cm、厚さ1 cm)にのせ、木の板の両端に500 gのおもりを一つずつ同時に繰り返し落とす(図1)。おもりを落とす高さを木の板から10 cm、30 cm、70 cmと変化させ、液状化現象が発生するまでのおもりを落とした回数を記録した。



図1：実験1の木板に水槽をのせ、両端におもりを落とした様子

〈実験1での液状化現象の発生の基準〉

水槽に砂を入れた後水を入れて混ぜた。そのとき砂に圧力をかけないように砂の表面を水平にならしたとき、砂の表面は水槽の底から8.0 cmの位置になった。予備実験として手で木の板を振動させたところ液状化現象が発生し、砂の表面は水槽の底から6.5 cmの位置まで沈下した。さらに継続して水槽を揺らしても砂の表面が6.5 cmよりも沈下することがなかつ

た。そこで実験1では、砂の表面の高さが8.0 cmから6.5 cmに沈下したときに液状化現象が発生したと定義した(図2)。

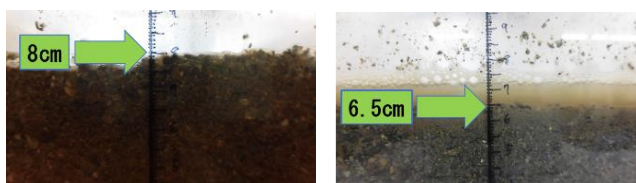


図2：実験1 実験前(左)と実験後(右)。このように8cmから6.5cmまで下がったとき、液状化現象が起こったとした

<BPM(Beat Par Minute)の定義>

振幅が設定した長さとなるような位置に二か所、印をつけた。印は木の板の動く方向の両端より外側に、バット(横19 cm、奥行き28 cm、高さ5 cm)の動く方向の上下より外側につけた。横揺れの場合は木の板の両端、縦揺れの場合はバットの底が印に1分間で触れた回数を揺れの回数とし、これをBPMと呼ぶ。タブレット端末内のメトロノームアプリ(Smart Metronome & Tuner - Tomohiro Ihara)でリズムをとり、それに合わせて水槽を揺らした。

<加速度>

地震の揺れの大きさを再現するために加速度をもとにしてBPMを決定した。加速度の単位はGalを用いた。1 Galは $1 \text{ cm/s}^2$ である。実験で用いた加速度(Gal)の値は各震度で目安とされている加速度(Gal)の範囲の中央値とし、設定した(表1)。加速度はアプリ(地震計-震動測定器-MYSTIC MOBILE APPS LLC)で測定した。

<実験2、3での液状化現象の起こりやすさを比較するときの基準>

振動させた際に砂の表面が何cm沈下したのかを比較した。沈下するほど液状化現象は起こりやすいと考えた。

### ◎実験2 振動方向と液状化現象の関係

実験1と同じ水槽に砂4400 g、水800 gを入れて、スコップで全体をよくかき混ぜた後に砂の

表面の高さを水槽の底から8.0 cmの位置に合わせた。そして振幅7.5 cm、震度4、5弱、5強相当の加速度で、縦方向と横方向それぞれに1分30秒間揺らした(図3)。横方向では水槽をおいた木の板の下に2つの筒(長さ46 cm、直径5 cm)を置き、木の板を手で押し引きし、縦揺れでは水槽を手で上下に上げ下げした。



図3：実験2(横方向の揺れ)の様子

表1：震度とGalの関係<sup>[1]</sup>

震度と加速度とBPMの目安		
震度	加速度	BPM
4	20~60Gal	120
5弱	60~110Gal	180
5強	110~200Gal	245

### ◎実験3 振幅、振動数と液状化現象の関係

実験1と同様の水槽に砂4400 g、水800 gを入れて、全体をスコップでよくかき混ぜた後に砂の表面の高さを水槽の底から8.0 cmの位置に合わせた。振幅5.0, 8.0, 11.0, 14.0, 17.0 cmそれぞれに対してBPM48, 98, 147, 196, 245で、計25通りの組み合わせをつくり、横方向に1分30秒間揺らした。その後、砂の表面の高さが何cm沈下したかを記録した。

## 3 結果

### ◎実験1 砂および水に与えるエネルギーと液状化現象の関係

おもりを落とす高さが10 cmのとき、90回おもりを落としても3回の試行のすべてで液状化現象が起こらなかった。高さが30 cmのとき、1回目の試行で90回おもりを落としても液状化現象が起こらなかった。2回目の試行では29回、3回目では15回で液状化現象が起こった。高さが70 cmのときは、1回目の試行で20回、2回目で20回、3回目で19回で液状化現象が起こった。このようにおもりを落とす高さを高くするほど、液状化現象は少ない回数で起こった(図6)。

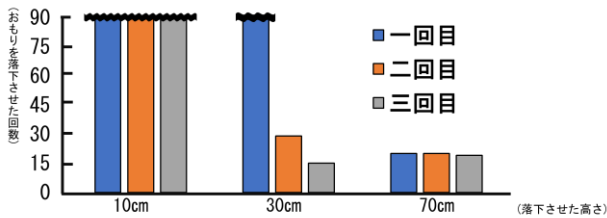


図6: 液状化現象がおこるまでのおもりを落とした回数

### ◎実験2 振動方向と液状化現象の関係

横揺れではBPM120・加速度40 Galのとき、1回目から3回目の試行で砂の表面の沈下は起こらず、BPM180・加速度85 Galのとき、平均0.7±0.35 cm、BPM245・加速度155 Galのとき平均0.9±0.17 cm沈下した。縦揺れではBPM120・加速度40 Galのとき平均0.2±0.17 cm、BPM180・加速度85 Galのとき平均0.7±0.67 cm、BPM245・加速度155Galのとき平均0.8±0.83 cm沈下した。このように縦揺れ、横揺れで砂の表面の沈下のしやすさに差はみられなかった(表2、3)。

表2: 横揺れと砂の表面の沈下の大きさ (cm)

	BPM		
	120	180	245
加速度 (Gal)	40	85	155
震度	4	5弱	5強
試行1	0	0.3	1.0
試行2	0	0.7	1.0
試行3	0	1.0	0.7
平均	0	0.7	0.9

表3: 縦揺れと砂の表面の沈下の大きさ (cm)

	BPM		
	120	180	245
加速度 (Gal)	40	85	155
震度	4	5弱	5強
試行1	0.5	0.5	1.0
試行2	0	0.7	0.8
試行3	0	0.8	0.7
平均	0.2	0.7	0.8

### ◎実験3 振幅、振動数と液状化現象の関係

表4に揺れの振幅とBPMを変化させたときに砂の表面が何cm沈下したかを表した。実験3の中でBPMが速すぎるために人力で行うことができない実験があった。そのため行っていない実験は表中で×マークで示している。図7のように砂に空間ができたときは★マークで表した。

砂と水槽の壁の間に隙間、または砂にひび割れができたことが目視で確認できたとき、砂に空間ができたとする。★の右に書かれている数字が大きいほど大きな空間が発生したとした(表4)。空間の大小は目視で判断した。★2以上の大きさの空間ができたとき、砂の表面に水が現れなかった。砂および水に与えるエネルギーを大きくするほど液状化現象は起こりやすくなったが、振幅14.0 cm BPM245以上では容器中の砂が偏り、砂と壁の間に大きな空間ができた(図7)。生じる空間が大きいほど砂の沈下は小さくなった。

また、振幅が同じとき、砂の沈下が大きいほど砂の表面に多くの水が確認できた。

表4: 振幅、振動数を変化させたときの地盤沈下の大きさ (cm)

	BPM				
	49	98	147	196	245
振幅5cm	0	0	0	0.5	0.7★1
振幅8cm	0	0	0	0.9	0.3★2
振幅11cm	0	0	0.5	0.7★1	0★3
振幅14cm	0.3	0.7	0.6	0.4★3	×
振幅17cm	0	0.5	0.7	×	×

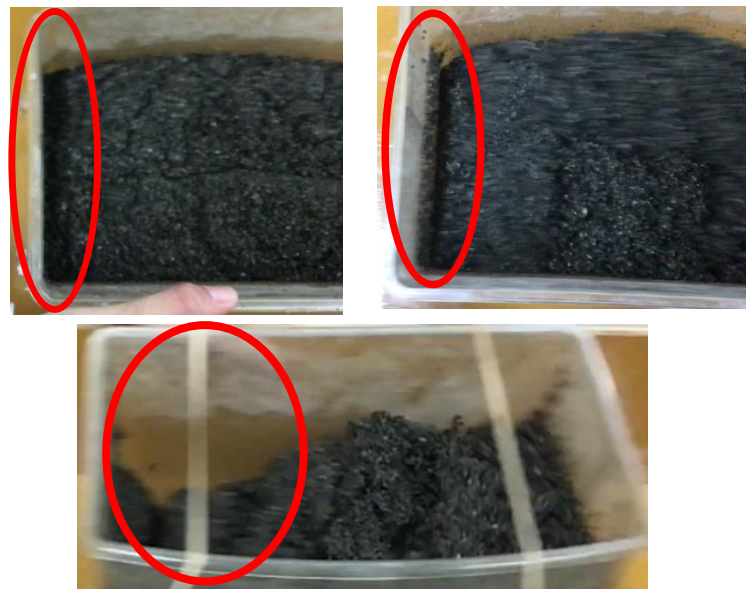


図7: ★1 相当の空間(振幅 11 cm、BPM196) ○で示した部分(左上)  
★2 相当の空間(振幅 8 cm、BPM245) ○で示した部分(右上)  
★3 相当の空間(振幅 14 cm、BPM196) ○で示した部分(下)

## 4 考察

### ◎実験1 砂および水に与えるエネルギーと液状化現象の関係

おもりを落とす高さが高く、おもりの位置エネルギーが大きいかほど、容器の砂および水に与えるエネルギーも大きくなり、液状化現象が発生しやすくなると考えられる。

### ◎実験2 振動方向と液状化現象の関係

同じBPMで比較した際、縦揺れ、横揺れで砂の沈下のしやすさに大きな差がないことから、縦揺れ、横揺れで液状化現象の起きやすさに大きな差はないと考えられる(表2、表3)。

### ◎実験3 振幅、振動数と液状化現象の関係

砂に空間が発生するほど加速度が大きい揺れでは、加速度が小さい揺れのように砂粒が小さく振動して砂粒のすきまが小さくなるように沈下するのではなく、砂粒全体と水が一体となって大きく動き、砂粒のすきまの大きさが変化しないと考えられる(図8)。よってこのとき、砂の表面の沈下が小さくなり、水が砂の表面に現れにくくなると考えられる。また、この実験では★2以上の大きさの空間が砂の塊に発生すると水が表面に現れなくなったが、実際の地震でも水が砂の表面に現れなくなるような空間の大きさが存在すると考えられる。

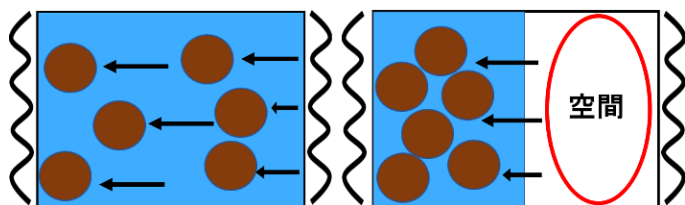


図8：通常の揺れ(左)と空間ができる振幅が大きい揺れ(右)

## 5 結論

縦揺れ、横揺れの違いは液状化現象の起こりやすさに大きく影響しない。また、★2以上の大きさの空間が発生しないとき、砂や水に与えるエネルギーが大きいかほど液状化現象は起こりやすい。そして、振幅が同じとき、砂の沈下が大きいかほど水は砂の表面に多くあらわれる。ただし★2以上の大きな空間が発生すると水が砂の表面にあらわれなくなる。

## 6 今後の展望

実験3では水槽の壁と砂の間に隙間が発生していたため、壁によって砂の動きが実際の地震の砂

の動きと違いが発生しているのではないかと考えた。このことから壁の存在は実験結果に影響を与えると考えた。今後は実験3と同様の実験を行い、その際の水槽の上層、中層、下層の砂の動きを細かく調べたい。

## 7 参考文献

(1)DAIME 株式会社ダイム技術サービス 加速度について

<http://www.daime.co.jp/gifujisin/data/skasokudo.html> (参照 2022-07-14)

(2)和田周 液状化(えきじょうか)とはなにかわかりやすくまとめた

<https://iqrafudosan.com/channel/liquefaction> (参照 2022-6-28)

(3)埼玉県庁 建築物の液状化対策について 埼玉県

<https://www.pref.saitama.lg.jp/a1106/ekijyouka-taisaku.html> (参照 2022-6-28)

(4)高一 液状化現象の手動実験 YouTube

<https://youtu.be/c2CNK2Dm2QE> (参照 2022-07-03)

(5)緊急連絡網・安否確認システム「オクレンジャー」 液状化現象による被害と対策

<https://www.ocrenger.jp/archives/1847/> (参照 2022-07-03)

(6)OBAYASHI-Thinking | 大林組 特集-液状化現象のメカニズム

<https://www.obayashi.co.jp/thinking/detail/pickup012.html>(参照 2022-07-03)

(7)株式会社レフトハウジング | Left Housing 液状化とは?被害や対策はどのようにするべき?

<https://left-h.co.jp/blog/softground/what-is-liquefaction/>(参照 2022-08-20)