

密閉容器で繰り返し再現する液状化実験各種

独立行政法人 防災科学技術研究所 納口恭明

1. はじめに

地震による地盤の液状化現象のデモンストレーションは古くから行われており、教育素材としては古典的なものの一つである。本論文では、地中の軽いものが液状化で浮上する現象、地上の重いものが液状化で地中に沈降する現象、液状化によってビルが傾く現象など、液状化現象がつくりだす様々な形態を、いつでも、どこでも、何度でも、すばやく簡単に見せることを目的につくった地盤液状化実験ボトル「エッキー」とその原理を説明する。また、噴砂のメカニズムについて考察する。

2. エッキーの科学

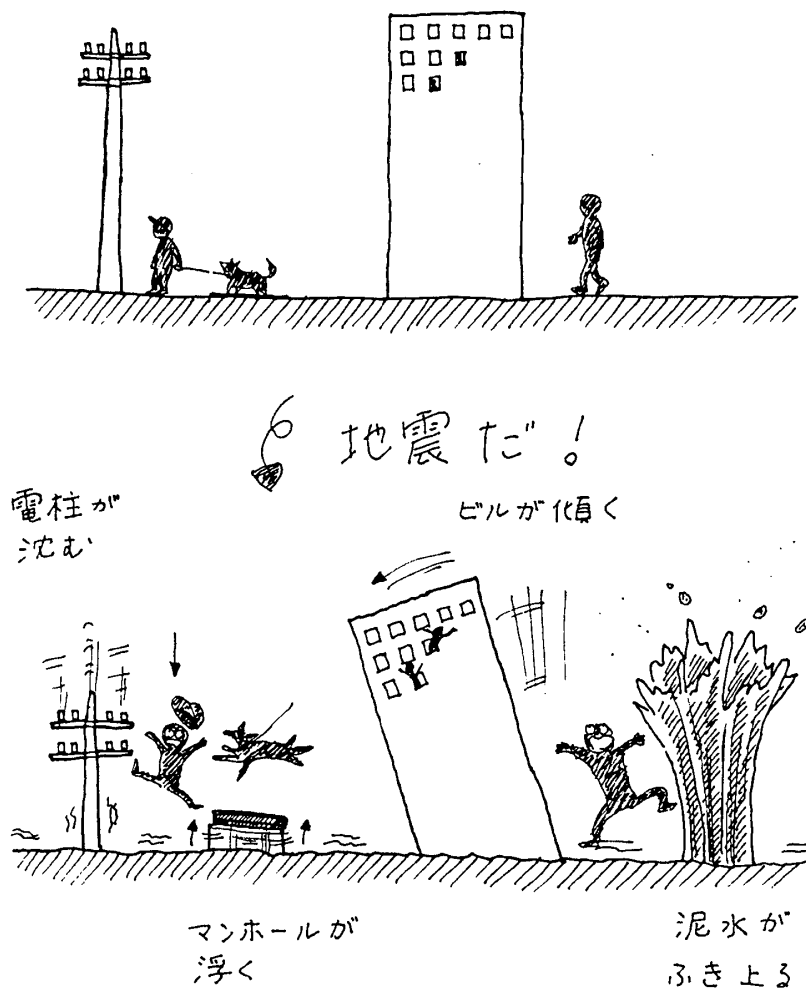


図1 地震による地盤の液状化で起こる現象各種

液状化現象は、緩く堆積し、かつ水で飽和した砂地盤が地震のような力学的な刺激により、砂粒子が隙間を埋めながら沈降・再堆積する過程で現れてくるもので、地表に暮らすわれわれの眼には図 1 のような現象となって現れる。液状化現象に対する基本的な理解はすでに確立されており¹⁾、その実験も青少年向けの科学イベントのレベルまで行われるようになっている。筆者はこれをさらに簡便にする目的で密閉容器の中で、一切容器を開けることなしに、いつでも、どこでも、何度でも実験のできる液状化実験ボトル「エッキー」をつくった。^{2), 3)}エッキーは 500cc のペットボトルに砂 100cc とマップピン数個を入れ、水でいっぱいにしただけの簡単なものである(図 2)。

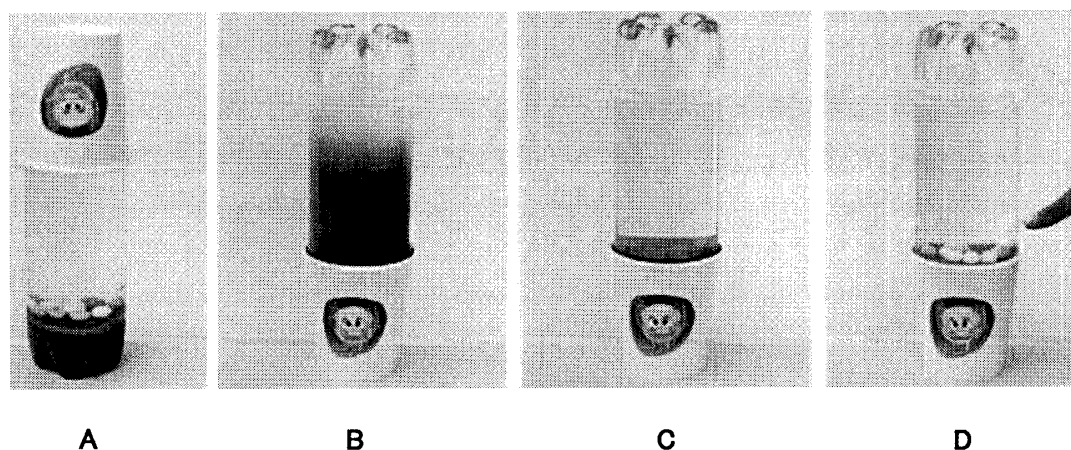


図 2 地盤液状化実験ボトル「エッキー」。A: 500cc のペットボトルに市販のマップピン数個と砂 100cc を入れ、水で完全に満たし、ふたを閉め、紙コップをかぶせる。B、C: これを逆さにして、砂を静かに沈澱させる。このとき、マップピンは砂の中に完全埋まっている。D: ボトルを軽く指先ではじくと、埋まっていたピンが砂の表面に浮き上がる。

エッキーは透明な密閉容器の中に砂と構造物を模擬するマップピンのような物体を入れ、完全に水で容器を満たしたものである。この容器をシェイクし、静かに砂を沈澱させることによって、空隙の大きい液状化可能な砂水がつくられる(図 3)。

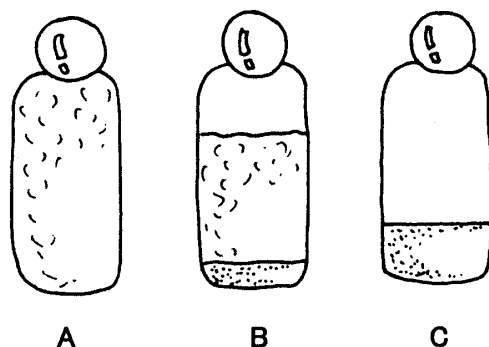


図 3 砂と水を完全に混合した状態から砂が沈澱するまでの模式図。A: 完全に砂と水が混合した状態。B: 砂が沈澱している状態。C: 砂が容器の底に完全に沈澱した状態。この間に 3 種類の密度状態が存在する(砂水が混合しながら沈澱している混相流の密度、水だけの密度、砂が完全に沈澱している状態の砂水の密度)。

この時、マップピンの平均密度がシェイクして沈降している砂水混相流の密度よりも大きい
が、底に沈澱した砂水層の密度よりも小さいとき、はじめマップピンは砂水沈澱層に埋まり、液状化
の発生とともに浮かび上がる(図 4)。

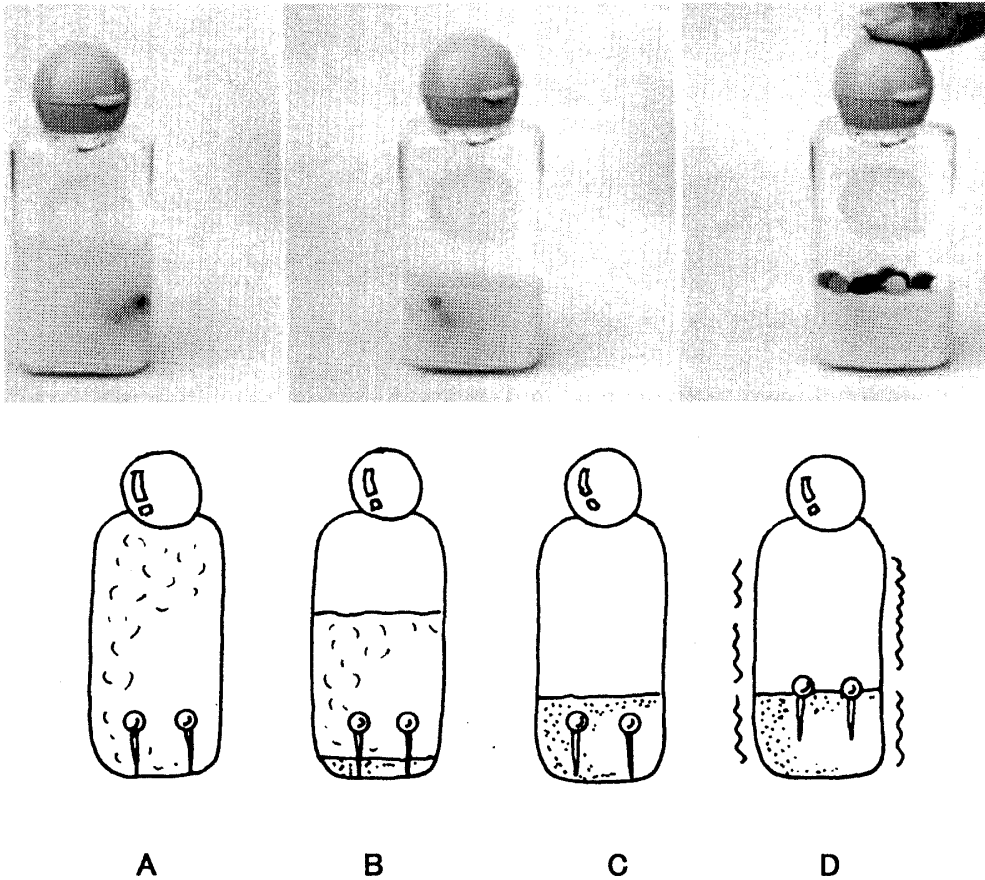


図 4 砂に埋まっていたものが浮き上がる実験。実際の現象ではマンホールが浮かび上がる現象に対応している。

一方、マップピンの平均密度が、シェイクして沈降している砂水混相流の密度より小さく、水も密度
より大きいとき、マップピンは沈降している砂水混相流と水の境界面に浮上したまま、その境界面の
沈降とともに沈降していく。そして、すでに沈澱している砂水層にピンの先端が達したところでピンの
沈降は停止し、沈澱した砂水層の表面に突き刺さったようにして突っ立つ。そして、液状化の発生とと
もに、ピンの部分は砂水沈澱層に沈み込む(図 5)。

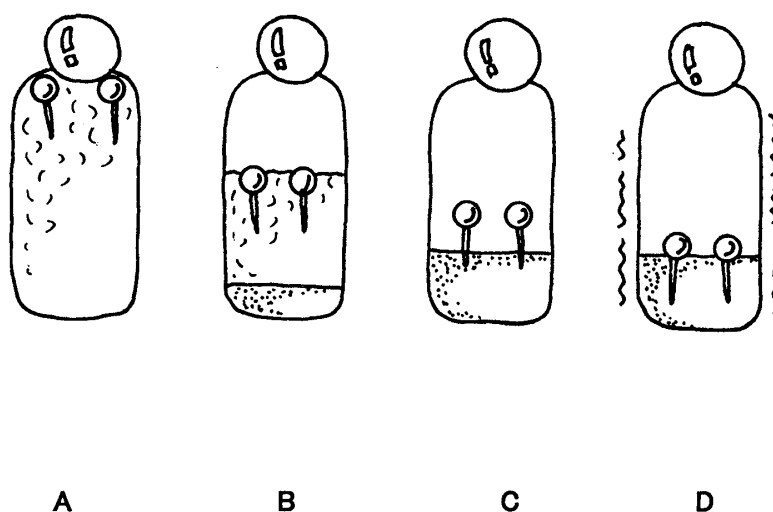
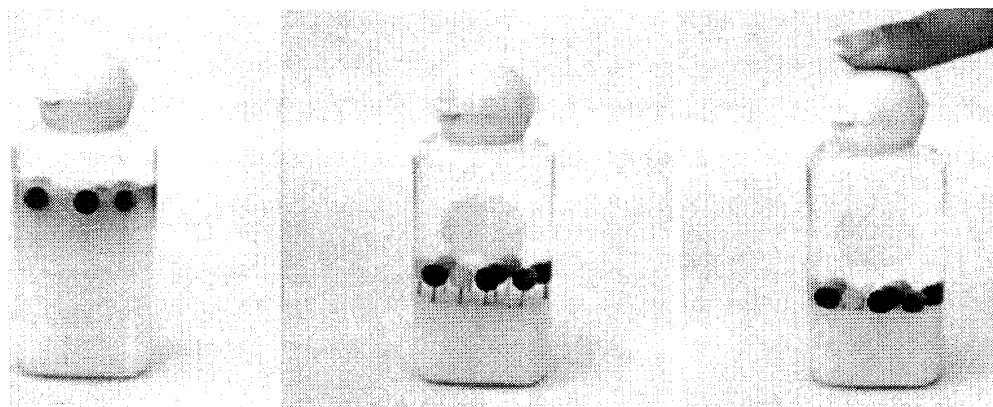


図 5 砂の表面にあったものが砂の中に沈み込む実験。実際の現象では電柱が地中に沈み込む現象に対応している。

平均比重の異なる2種類のマッピングを使えばこれらの現象をひとつの容器の中で同時に示すこともできる(図 6)。また、図 4 のような場合、容器に入れる砂の比率を多くすることで、シェイクした状態の砂水混相流の密度大きくすることができるので、図 5 で示すような実験に移行することもできる。

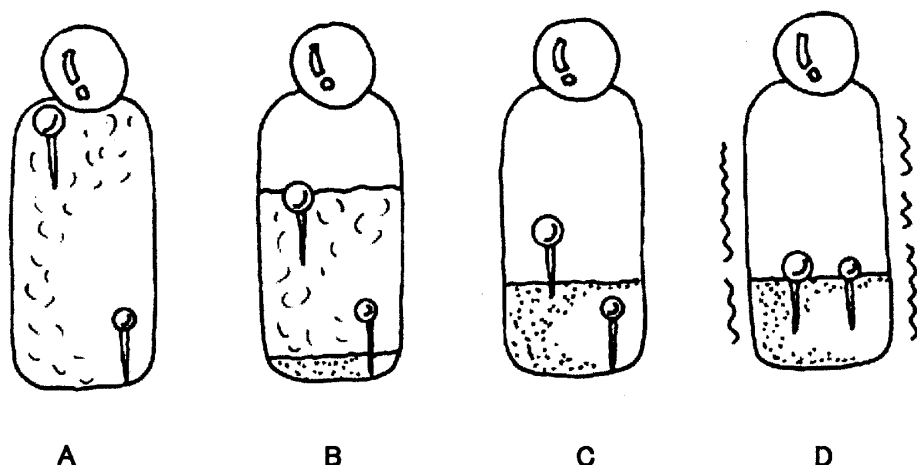


図 6 平均密度の異なる 2 種類のピンを使うことで同じ容器の中で浮き上がる現象と沈み込む現象を同時に再現することも可能である。

はじめからマップピンの先端が密閉容器の底に達していて、これ以上沈み込むことができない場合、図 7 のようにピンは傾く。これは高層ビルが液状化で傾く現象を模擬する。

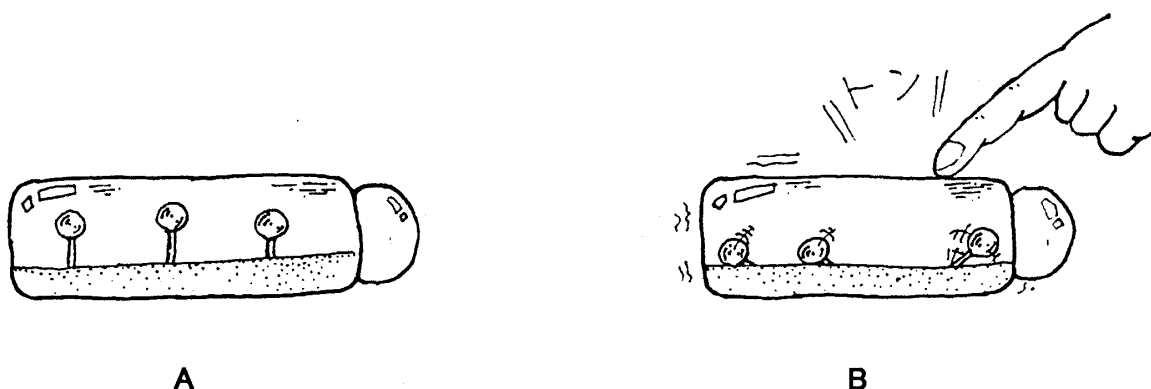


図 7 重心が高く不安定なものが傾く実験。

これまで、容器に入れる物体をマップピン、液体を水、粉体を砂としてきたが、上記の条件が満たされれば他の物質でもかまわない。液状化の相似については触れなかったが容器に入れる粉体と液体は容器のサイズによって異なり、流体中を単独で沈降する粉体粒子の終速度を代表速度とし、液状化する粉体層の厚さを代表長さとするようなフルード数によって支配される。²⁾したがって、たとえばガラスビーズを使った水の中での液状化実験では、容器を小さくすればそれに応じてガラスビーズの粒径を小さくする必要がある。³⁾

また、用いる粉体は暗黙のうちに流体よりも密度の大きいものを考えてきたが、粉体のほうが流体よりも密度が小さい場合も、同じように考えられるので、自然現象としては存在しないかもしれないが、すべてがエッキーとは逆さの「逆さエッキー」をつくるのが理論的に可能である。

ところで、われわれがふつう目にするような地震で起きる液状化現象は地表で起こり、決して水中

で起こるわけではない。この実験が水で完全に満たした容器の中で行っているのは、何度も繰り返し実験できるためという理由ばかりではなく、不飽和の土層で起こるであろうさまざまな液状化現象そのものとは関係しない複雑な要素を排除するためでもある。

3. 宮地と兼子による噴砂の方法

液状化に伴って発生する現象には上記の、「浮く」、「沈む」、「傾く」といった現象の他に噴砂現象と呼ばれる下層の砂が地下水とともに吹き上がる現象がある。宮地と兼子はペットボトルを用いたエッキーと同様に完全に水で満たされた飽和砂層でこれらを再現する方法を発見した⁴⁾。

ペットボトルに粒径の異なる2種類以上の粉体を入れ、水で完全に飽和させる。ここでペットボトルをシェイクし(図 8A)、粒子を均一に攪拌したのち静止しておく。こうして粉体粒子を沈澱させると粉体粒子は沈降速度の差によって自然に層構造が形成される(図 8B)。粒径の大きい粒子は沈降速度も大きいため下層になり、粒径の小さい粒子は沈降速度が小さいため上層になる。ここで、ボトルに振動を与えると下層の水が下層の粉体粒子をとまって、チャンネルをつくって砂と水の境界面に噴出してくる。

4. レーリー・テイラー不安定による説明

筆者はそのメカニズムを、粉体層の粒径の違いによる透水性の差が生み出すレーリー・テイラー不安定であると考えた。レーリー・テイラー不安定とは密度が異なる2種類の流体が密度の小さい流体を下にし、密度の大きい流体を上にして存在した場合生ずる密度不安定現象である。

液状化現象が起こると砂は隙間を埋めながら沈降しその結果として水が上方向に排出される。兼子・宮地の方法で用意された粉体層に振動が与えられ、それらが液状化した場合を考える。このとき、はじめに粒径が大きく透水性の良い下層の粉体層から排出された水が、粒径が小さく透水性の小さい上層の粉体層の下部に溜る(図 8C)。その結果、この粒子濃度の低いほとんどが水からなる低密度層と、その上の液状化している粒子濃度の大きい高密度層との間に密度不安定が発生する。この密度不安定が、噴砂パターンを生み出す(図 8D)。このとき噴砂パターンの代表波長は密度不安定が発達する上部の粉体層の厚さによって変化することになる。これは、実験結果と一致するものである。

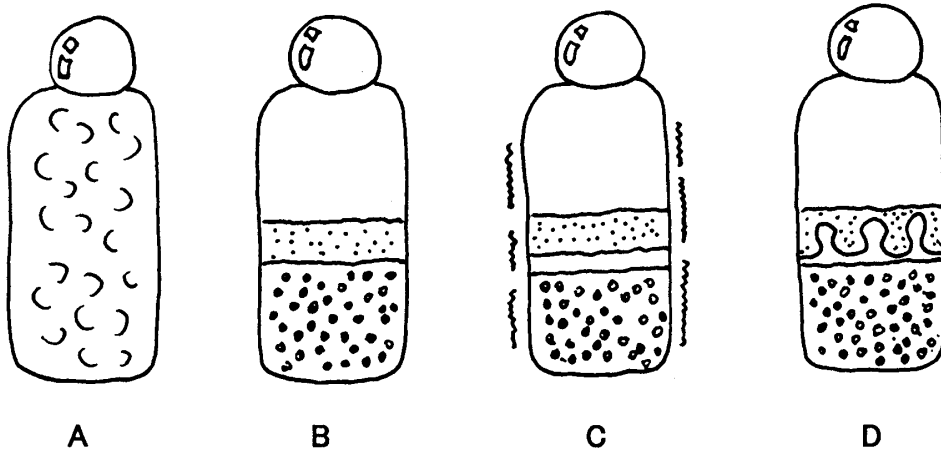


図8 粒径の異なる2種類の粉体の液状化に伴うレーリー・テイラー不安定とパターンの形成。

ところで、このような密度不安定は、必ずしも宮地・兼子の方法で用意された粉体層でなくとも起こりうる。例えば、砂層中の構造物近くでは液状化により排出された水が構造物下面で滞留し、濃度の薄い領域が形成されそこで密度不安定となって、地表に吹き出すこともある。この場合、透水性のない構造物の固体壁が宮地・兼子の方法での粒径の小さい粉体粒子層と同じ役割をしていることになる。

いずれにしても、水平方向に一様な地盤であっても鉛直方向に透水性の不均質がある場合、レーリー・テイラー不安定が発生し、その結果、下層地下水のチャネリングによる排出が発生し、その水に引きずられるように下層の砂も排出される。ただし、その実態はほとんどが水である。また、その排出路のパターンの波長は不安定の成長する距離である上層の厚さとともに長くなる。

5. おわりに

ここで、述べたのとまったく同じ液状化現象はわれわれの目に触れることはほとんどない。それは地表面が水中にあるような状況は海底、湖底といったところでしか実現しないからである。ただし、表面の不飽和土層を介して乱された形で現れるにしても、その本質を推定することは可能である。観測例はほとんどないが、地震直後には液状化現象の典型的な地表形態など出現している可能性は大きい。

参考文献

- 1) 岡二三生:「地盤液状化の科学」(近未来社, 2001).
- 2) 納口恭明:防災科学技術研究所報告 61(2001)49.
- 3) 納口恭明:「感性でとらえる地盤液状化の科学おもちゃエッキー」(防災科学技術研究所, 2003).
- 4) 宮地良典・兼子尚知:地質ニュース 570(2002)26.