

## 液状化の発生メカニズムと現象

大川 秀雄\*

## 1. はじめに

新潟地震からちょうど30年経った。その間、液状化に関する研究が世界中で精力的に行われ、工学上の多くの知見が得られた。それらは地盤の液状化対策工法の開発やハザードマップ作成等に大きく寄与している。しかし、この2年間だけでも、能登半島沖地震、釧路沖地震、北海道南西沖地震、北海道東方沖地震と、大きな地震に見舞われる度に液状化による被害が発生した。「液状化」はマスコミが大きく取り上げたため多くの人が知ことなり、今では一般化した用語となっている。また、昨今は混迷する政界を揶揄して「液状化」という用法が出現するまでになっている。

以下に、液状化がどのようにして発生するか、すなわち発生メカニズムについての考察と、それからどのような現象が演繹できるかについて述べたい。

## 2. 過剰間隙水圧について

一般的に理解されている液状化の発生メカニズムは、非排水条件での動的せん断試験の結果を主たる考察対象として、以下のようにまとめられる。

- 1) 水中の緩い砂層が地震などで繰返しせん断応力を受ける。
- 2) 間隙水圧が徐々に上昇する。すなわち、過剰間隙水圧が徐々に大きくなる。
- 3) 過剰間隙水圧が砂層の初期有効応力と等しくなるまで上昇する。
- 4) このとき砂層は有効応力がゼロとなり、せん断抵抗力を失いせん断変形が著しく大きくなる。すなわち砂層の液状化である。

この考え方の根幹は、過剰間隙水圧が徐々に大きくなること、すなわち間隙水圧が「蓄積」することにある。ではなぜ間隙水圧が蓄積するのであろうか。これには、

- ① 砂のダイレイタンスーおよび除荷膨張特性に基づくモデル
- ② 非排水条件での有効応力経路と降伏面との関連に基づくモデル

などがある<sup>1)</sup>。いずれも土質力学をある程度勉強しなければ理解できない内容と思われる。

上述の一定体積条件での要素試験ではなく、砂槽振動実験を行うと「過剰間隙水圧の発生から消散、およびその結果起こる砂槽の沈下までの過程が観察できる」<sup>1)</sup>利点がある。均一な緩詰め砂層を作成し、砂層表面まで水を入れて（砂層表面と地下水を一致させて）

\* 新潟大学工学部建設学科

実際に実験すると、液状化によって砂層全体が均一に沈下し、表面には水の層ができる。この水の層をどのように見るかが問題である。液状化の基礎実験に、上向き浸透流によるボーリング実験がある。水中での浮力と上向き浸透流による抗力とが砂粒子の重量につり合えば、すなわち限界動水勾配  $i_c = (G - 1) / (1 + e)$  のときボーリングが発生する。この実験のイメージのためか、あるいは液状化に伴って発生する噴砂現象のイメージのためか、砂層が液状化すると上向きの流れが発生すると思われがちである。しかし、上述の砂槽実験ではそのような流れが発生したのではなく、ただ砂層が沈下したためにそこに水が残っただけと解釈される。なぜなら、図-1に示すように砂層内に発生した過剰間隙水圧は静水圧分布（液状化前の間隙水圧）と同様に深さ方向に線形分布であるため、水圧としての不平衡力が深さ方向（上下方向）に生じたことにはならず、したがって深さ方向に水は移動しえないからである。このときの間隙水圧分布は、限界動水勾配によるボーリングの場合と全く同じである。ではいったい何が異なるのであろうか。

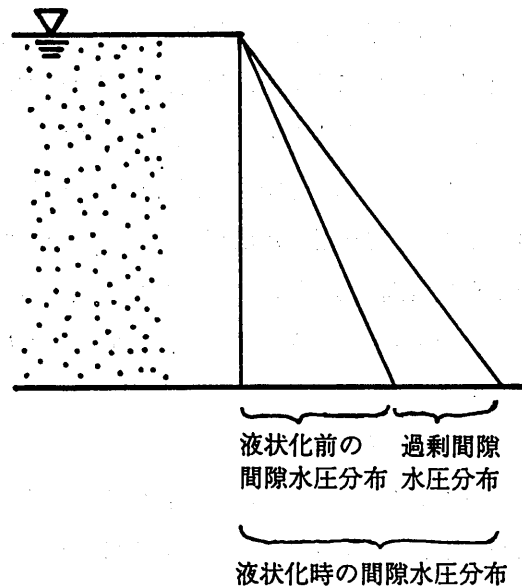


図-1 液状化時の間隙水圧分布

### 3. 砂粒子の沈降

ボーリング実験では、砂粒子は動かず（バランスによっては上向きに動くが）水が上向きに流れる。砂槽を用いた液状化実験では、水は動かず砂粒子が下向きに動く。これが両者の違いである。後者の場合は、「砂粒子の水中での沈降現象」と捉えることができる。すなわち、「液状化とは砂粒子の水中での沈降現象」と単純に捉えてもよいのではないかと考えられる。

この捉え方の下では、過剰間隙水圧の発生は以下のように説明される。

- ① 水の入ったシリンダーを考える。シリンダーの下で計測した全重量は水とシリンダーの重量の和である（図-2(a)）。

- ② 比重が水より大きい物体を、重さと体積が無視できる糸で吊るして水に入れる (図-2 (b))。物体の体積分だけ水位が上がり、この水の重量分だけ全重量が増える。すなわち、物体に作用する浮力が重量として増える。物体の残りの重量 (重量-浮力) は糸が負担している。

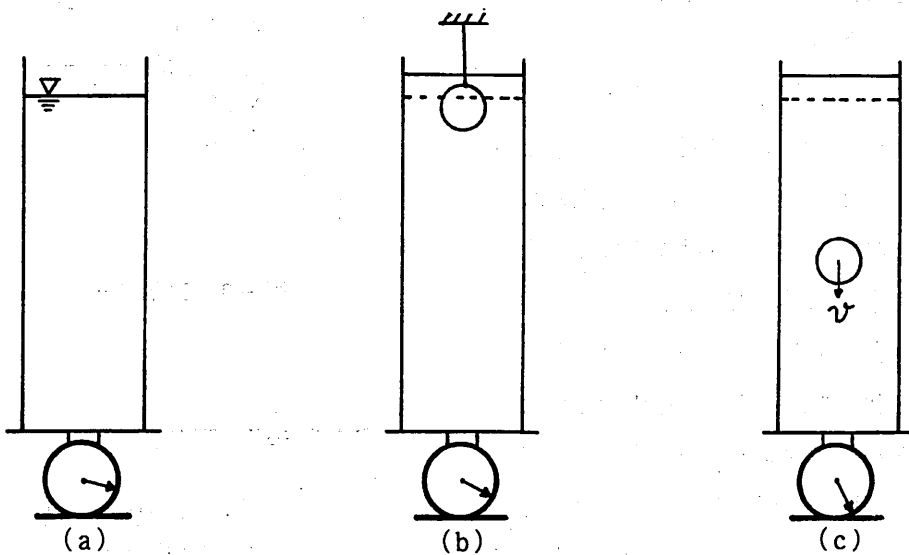


図-2 水中の物体による圧力の増加

- ③ 吊るしている糸を切る。それまで糸が負担していた重量はどうなるであろうか。

糸を切った瞬間は、シリンダーの下で計測した重量に変化はない。物体の沈降速度が徐々に増すとともに重量も増加し、一定速度に達すると糸が負担していた重量分だけ増加する。すなわち、①の状態からちょうど物体の重量分だけ増えたことになる (図-2 (c))。質量の保存則が成立している。この場合、沈降速度が一定ということは、沈降を妨げる抵抗力も一定であり、その大きさは②で糸が支えていた重量 (物体の重量-浮力) に等しい。この抵抗力の反力が圧力の増加としてシリンダー底面に作用することで、シリンダーの下での計測で重量増加として感知される。この糸が支えていた重量が水中重量であり、物体 (粒子) がたくさん積み重なった状態を考えれば有効応力に対応する。シリンダー底面で物体の沈降にともなって発生した圧力の増加分が過剰間隙水圧である。物体が球形で水を完全流体と仮定すれば、無限場におけるその圧力分布は理論的に計算できる<sup>2)</sup>。

$$P - P^\infty = 1.5\mu URx / r^3$$

ここで、 $P^\infty$ は遠方での圧力、 $\mu$ は粘性係数、 $U$ は速度、 $R$ は球の半径、 $x$ と $r$ は図-3の座標である。砂層の液状化によって発生する過剰間隙水圧は、個々の砂粒子による圧力の増分を重ね合わせたものと解釈される (図-4)。ただし、この式では、粒子の前と

後とで圧力が逆対称となっているので、重ね合わせると値はゼロとなる。この矛盾は水の粘性を無視したことに起因し、実際のところは流体抵抗力がその全面での圧力上昇の積分値と等しくなっていると考えてよい。

このように過剰間隙水圧の発生を液状化に伴う二次的な（付随的な）現象と捉え直すことにすると、液状化発生の直接原因を他に求めなければならなくなる。これも単純に考えて、「砂粒子がお互いの噛み合わせや接触を失うこと」と解釈したらどうであろうか。そのためには、なんらかの外的な要因や場合によっては内的な要因が必要となる。例えば、地震や交通振動等による繰返しせん断力、衝撃力、浸透流による抵抗力、不飽和状態から飽和状態への移行による粒子間のサクシヨンの消失等、種々挙げることができる。何でもよいから粒子間の接触を失わせる、すなわち粒子をばらけさせる何

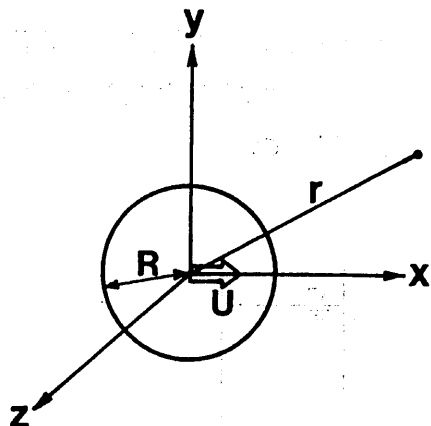


図-3 球形粒子

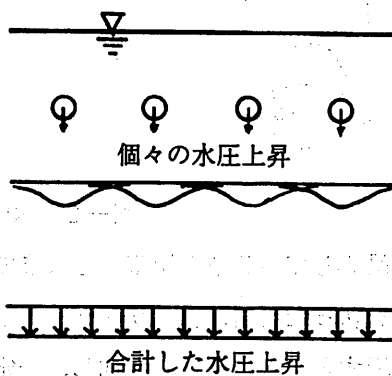


図-4 粒子による圧力の重ね合わせ

らかのエネルギーがあればよいと考えることにしたらどうであろうか。このように液状化の発生メカニズムを単純化すると、これから何が言えることになるであろうか。

#### 4. 液状化発生メカニズムからの演繹

「液状化とは、何らかの原因で砂粒子間の接触が失われ、砂粒子が水中を沈降している状態である。」と解釈すると、このことから何が言えるであろうか。

##### 1) 粒径の影響

まず、第一に言えることは、「間隙水圧の蓄積」の概念を液状化発生メカニズムからはずした結果、どのような粒径の土であっても液状化発生の可能性が出てくることになる。従来の考え方では、大粒径の土層、例えば砂利や礫の層では空隙が大きいので、間隙水圧が土層のどこかで上昇したとしても、すぐに消散して蓄積されないことになり、液状化し

ないと結論されることとなる。しかし、新解釈でいけば、砂利であろうが礫であろうが粒子間接触が失われるだけのエネルギーが与えられればよいことになり、液状化発生には何等問題が生じない。ただし、大粒径であればその接触を失わせるためのエネルギーは、一般に大きくなければならない。

## 2) 液状化継続時間

前項の大粒径の場合、液状化している時間は短くなるはずである。なぜなら、「液状化を水中での土粒子の沈降」と捉えるからには、液状化の継続時間は「粒子の沈降時間」に他ならないこととなる。沈降時間は、土粒子の沈降距離と沈降速度で決まる。液状化する層厚が大きければ、また緩ければ緩いほど、層の上面の粒子の沈下量すなわち沈降距離が大きくなる。また粒子径が小さいほど沈降速度が小さくなる。これらの条件は沈降時間を長くする要因として働く。すなわち、液状化継続時間が長くなる。また、粒子が沈降すれば非液状化層の部分で底面としてその上に堆積して行くから、液状化層の内部では下ほど早く液状化が終了し、上は長く液状化していることになる。

この他にも沈降速度に関係するファクターとして、振動の影響と、土粒子密度（混み具合）が挙げられる。条件によって異なるようであるが、振動場では静水場より沈降速度が小さくなるようであり、また、土粒子密度が大きくなればやはり小さくなる。以上の考え方を応用すれば、砂礫層の液状化の証拠としてクラスティック・ダイクを挙げることが可能となることを、青木 滋先生（新潟大学積雪地域災害研究センター教授）からご指摘を戴いた（図-5）。また、電力中央研究所の北海道南西沖地震に関する一連の調査<sup>3)</sup>からも、礫層の液状化の可能性が指摘され始めている。

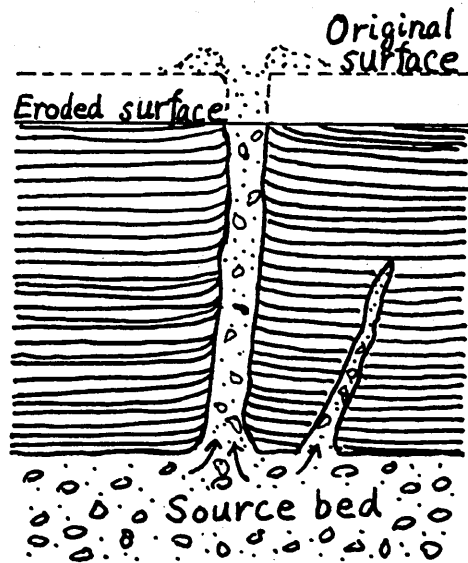


図-5 クラスティック・ダイク

## 3) ドレーン工法の効果

液状化対策工法としてグラベルドレーン工法を代表にいくつかあり、実際に多く施工されている。この工法の根幹の考え方は、間隙水圧の蓄積を妨げることで液状化を防止しようとするものである。しかし前述のような考え方、すなわち液状化した結果として過剰間隙水圧が発生するとした考え方からすれば、液状化の発生防止にはあまり意味がないこと

になる。むしろドレーン工法の効果は、地盤が液状化した後に発揮されると考えられる。すなわち、発生した過剰間隙水圧、さらに言えば液状化層内の余分な水をすみやかに抜くことで、液状化層内の粒子沈降を早く終わらせることにある。すなわち液状化継続時間を短縮させるのである。液状化による地盤や構造物の被害は、液状化継続時間内に生ずる変位量によって左右されるから、この液状化継続時間を短縮させることには意味がある。

なお、グラベルドレーン内やその近傍での過剰間隙水圧測定値が、初期有効応力値まで達していないことをもって、その効果を云々したり液状化を防止できたとする例がある。これは間違いである。なぜなら、個々の粒子の抗力に対応するわずかな圧力のトータルが過剰間隙水圧であることからすれば、そのような測定点での過剰間隙水圧はドレーン部分では沈降粒子がないことから、原理上初期有効応力値まで上昇できないからである（図-6）。

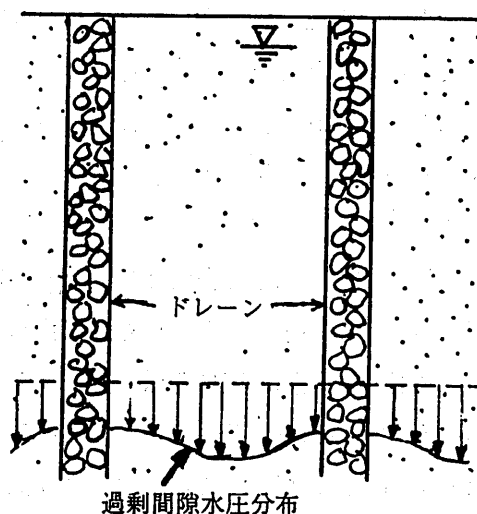


図-6 ドレーンによる過剰間隙水圧分布

## 5. 地盤の不均一性

実地盤は、粒度や密度のばらつきがあったり、異なった地層を挟んでいたりして、不均一であることが普通であると考えられる。砂地盤内にシルトや粘土の水を通しにくい層があったら液状化がどのようなことになるであろうか。均一な砂層を対象とした場合には見えなかった現象が見えてくる。

### 1) 噴砂現象

砂層内に水平な不透水層があって、その上下のそれぞれの砂層で液状化が起きたとしよう。そうするとそれぞれの砂層内で砂粒子の沈降が起きて、それぞれの層の上面に水の層が出来てしまう。不透水層の下の水の層は、液状化終了時点では全土被り圧を受けた被圧水となる。その圧力は上層の底面での間隙水圧、すなわち静水圧より大きな圧力となる。この圧力差のため、不透水層の亀裂や弱いところを破って被圧水が上層に貫入し、その砂を巻き込みながら地表まで達したのが噴砂である（図-7）。なお、液状化の最中では、間隙水圧は図-1の分布であるため、上下の砂層間に圧力の不連続はない。そのため噴砂は起きない。地震の終わり頃や終わってから噴砂が発生することはよく知られていること

である。また、被圧水がなくなるまで噴砂が続くことになり、これも地震後1週間も水が出続けたなどの事例と一致する。

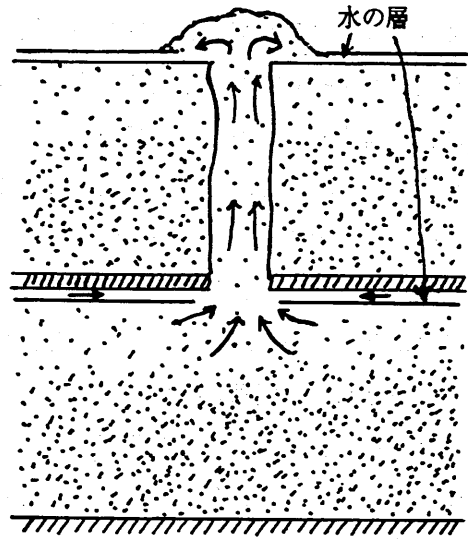
なお、砂質土表面に粘性土を盛土している地盤でも同様なことが言える。

## 2) 地盤の移動

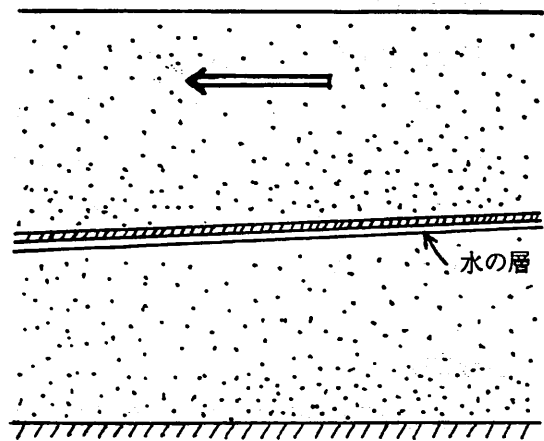
新潟地震で発生した液状化で、地盤が大きく動いたことは当時からよく知られていた<sup>4)</sup>。最近になって、その移動メカニズムについて議論が出ている<sup>5)</sup>。液状化層が傾斜している場合や、河川などがあって横方向の拘束がない場合に、液状化によって地盤が移動することは容易に理解できる。しかし、地表面が水平で側方にそのような条件が存在しない場合、水平方向の力の不均衡が生じないため、地盤が移動することを説明できない。

しかし、砂層中に緩く傾斜した不透水層の存在を仮定すれば、説明できる。不透水層によってその下に水の層が形成される。そのため上層と下層との摩擦抵抗力（せん断抵抗力）が失われるため、上層は傾斜にそってずれようとする（図一

8）。この場合、不透水層の下の水は、不透水層にそって上方へ流れるため、水の層の形で長時間維持することが出来ないことが、水平な不透水層の場合（例えば図一7の場合）と異なることである。



図一7 噴砂



図一8 傾斜した不透水層による地盤の移動

## 6. 再液状化について

液状化地盤の再液状化については種々の議論がある。「液状化を砂粒子の水中での沈降」と捉えれば、液状化した地盤は、液状化前とあまり変わっていないと考えることができる。なぜなら、河口等に発達した緩い地盤は、もともと上流から運ばれてきた土砂が水中沈降で堆積して形成されたものが多いであろう。それが液状化して再び沈降堆積するのである

から、本質的な地盤の性質は変化していないと考えられるからである。ただし、液状化によって地盤中の水が多かれ少なかれ絞り出されるのであるから、どこかの部分で地盤密度が大きくなっている。地震による振動は、土粒子をばらけさせる作用を有するとともに、振動締固めの効果も持っていると考えられる。すなわち、液状化によって沈降再堆積した液状化層底部では、この効果によって密度が大きくなっていると考えられる。しかし、この密度が大きくなる部分の厚さは、室内での小規模な実験結果から推定すると、たいした厚さではない。したがって一度や二度の液状化では、全体的には地盤の液状化強度の上昇にほとんどつながっていないことになる。なお、振動締固めの効果に影響を与えるファクターとして、振動の振幅、振動の周波数、振動継続時間が挙げられる。

ところで、何らかの自然作用で、あるいは人為的作用で大きな液状化強度を有する地盤が、著しく大きな振動で液状化したとしよう。すると沈降再堆積によって以前よりかなり液状化強度が小さな状態に変化することになる。大いに注意すべき事例であろう。

## 7. おわりに

新潟に在住する一研究者にとって、液状化を避けては通れないことを10年ほど前に痛感して以来、基本的な原理実験を細々と続けてきた。その中で、「液状化」に対して自身の捉え方が形成されてきた。そこでこの紙面を拝借して、個々の実験結果等はすべて省略して、言いたいことの骨子のみをご披露申し上げた次第である。諸賢のご意見ご批判を賜れば幸いである。

### 〈参考文献〉

- 1) 吉見吉昭(1991)：砂地盤の液状化，第二版，技報堂出版，pp.13-18.
- 2) Schlichting, H. (1968)：Boundary-Layer Theory, translated by Kestin, J., 6th ed., McGraw-Hill, pp.105-108.
- 3) 国生剛治他(1994)：北海道南西沖地震による岩屑なだれ礫層の液状化（その1～その5），第29回土質工学研究発表会発表講演集，pp.783-797.
- 4) 河上房義(1965)：第2章地震時の土の力学的性質，地震と地盤，土質工学会，p.41.
- 5) 新潟地震30年事業実行委員会，学術技術誌編集委員会(1994)：新潟地震と防災技術，pp.291-295.