

招待論文

液状化の発生メカニズムを考える

CONSIDERATION ON THE MECHANISM OF LIQUEFACTION

大川秀雄*

Hideo OHKAWA

*正会員 工博 新潟大学教授 工学部建設学科
(〒950-21 新潟市五十嵐2の町8050)*Key Words*: mechanism of liquefaction, settling of sand particles, excess pore water pressure, reliquefaction, post-liquefaction

1. はじめに

新潟地震(1964)からちょうど30年後、1995年兵庫県南部地震が発生した。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、液状化発生危険度の判定や各種の液状化対策工法の開発等で社会に大きく寄与してきた。しかし、最近の数年間だけでも、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、そして兵庫県南部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。とりわけ、兵庫県南部地震では、ポートアイランド、六甲アイランドを中心に液状化による被害は甚大であり、それまで議論の対象とならなかつたり、考慮外であつたりしたことが、にわかになら注目されるようにもなった。また、これらの被害を経験して「液状化」は多くの人が知ることとなり、今では一般化した用語となっている。

ところで、兵庫県南部地震で見られた液状化関連の現象は、真に我々研究者の予測外、想像外の現象であつたのであろうか。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、著者が以前から考えていたことを述べ、この問題を考えるための一つの材料を提供したい。

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砂のダイレイタンシ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。いずれも土質力学を勉強しなければ理解できない内容であろう。

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」¹⁾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(砂層表面と地下水面を一致させて)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。しかし、水面の位置は液状化前と全く同じである。この水の層をどのように見るかが重要である。液状化の基礎的実験として、上向き浸透流によるボイリング実験がある。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 $i_c = (G_s - 1)/(1 + e)$ のときボイリングが発生する。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つ

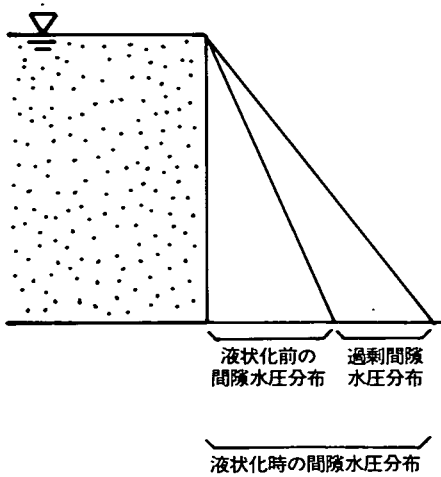


図-1 液状化時の間隙水圧分布

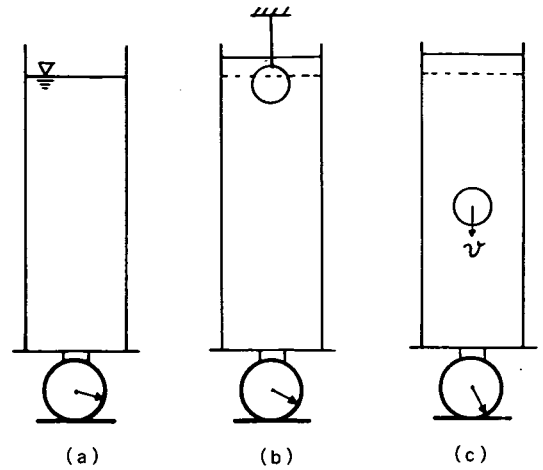


図-2 水中の物体による圧力の増加

ただけと解釈できないであろうか。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直線分布である。このことは液状化によって高比重の砂・水混合流体ができたと考えることができる。その混合流体の圧力分布は、液状化時の間隙水圧分布と同じものであり、圧力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ない。言い換えれば、混合流体としての水頭は深さ方向に一定値であり、したがって深さ方向に混合流体は移動しえないことになる。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。

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）対象領域の外から、さらに言えば下から供給された水が上向きに流れる。この場合、粒子の水中重量を水の上向き流れがちょうど支えていることになる。これに対し、均一な地盤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。この場合、外から水の供給はない。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である」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、思考実験により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。シリンダーごと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り上げて水に入れる（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。

③吊りしている糸を切る。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、計測される重量に変化はない。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)）。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。この重量増加はどのような形で伝達されたのであろうか。答は圧力である。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、シリンダーごとの計測で重量増加として感知されるのである。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。すなわち、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。

このことを、流体力学の観点から少し述べよう。動かない球形粒子の回りを流体が流れて行くとき、その圧力分布は理論的に次の式で計算できる²⁾。

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

ここで、 P_{∞} は遠方での圧力、 μ 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。

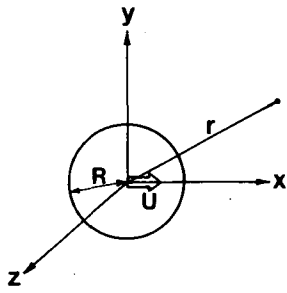


図-3 球形粒子の運動

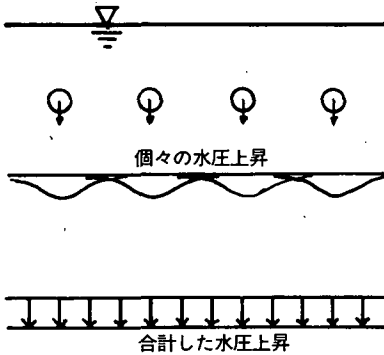


図-4 粒子による圧力の重ね合わせ

この式の意味することは、流体中の圧力が粒子の存在で変化することである。球形粒子が静水中を一定速度で沈降するときは、動くものが流体から粒子に代わったものの相対的關係に変化はなく、基本的には同じである。したがって、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、物体の前と後とで圧力が正と負で逆であり、重ね合わせるとゼロとなってしまう。また、Stokesの定理で速度を与えると、進行方向前方での圧力の積分値は物体の水中重量の1/2となる。これらは粒子を挟む前後の境界条件の扱いに起因し、静水中での沈降においては流体抵抗力がその前面(この場合は下方)での圧力上昇の積分値と等しくなっている。このことは、ここで示した思考実験過程とは別に、運動量保存則から単純、かつ直接的に導くこともできる³⁾。

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、浸透流による流体

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、すなわち粒子構造を破壊させる何らかの要因(エネルギーと言ってもよい)があればよいと考えることにしたらどうであろうか。不遜な言い方で失礼があればお許し願いたいですが、これまで行われてきた要素試験を主体とした研究の多くがこの点の解明に当てられてきたのではなかろうか。

さて、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

第一に言えることは、「過剰間隙水圧の蓄積」の概念を液状化発生メカニズムからはずした結果、どのような粒径の地盤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、大粒径の地盤、例えば砂利や礫の層では空隙が大きいため、間隙水圧が地盤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になる。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、液状化発生条件には関係しないことになる。ただし、大粒径であれば、また粒子形状によって粒子間のかみ合いが強ければ、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。すなわち、液状化は起きにくい。

(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。液状化する地盤層厚が大きければ、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。そして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、一樣と見なせる一つの液状化領域に注目すると、粒子が沈降すれば、下の非液状化部分を底面としてその上に堆積して行くから、その液状化領域の下ほど早く液状

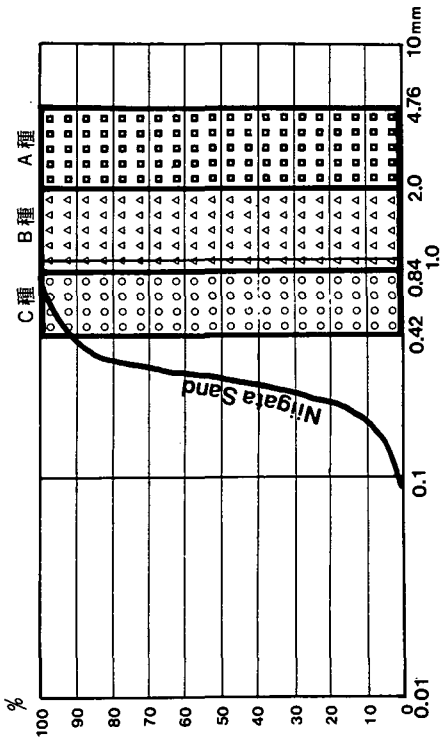


図-5(a) 砂の分級範囲

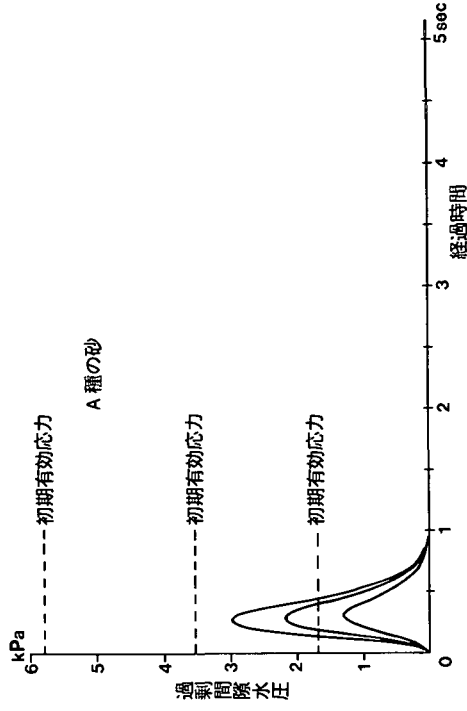


図-5(b) A種の砂の液状化による過剰間隙水圧

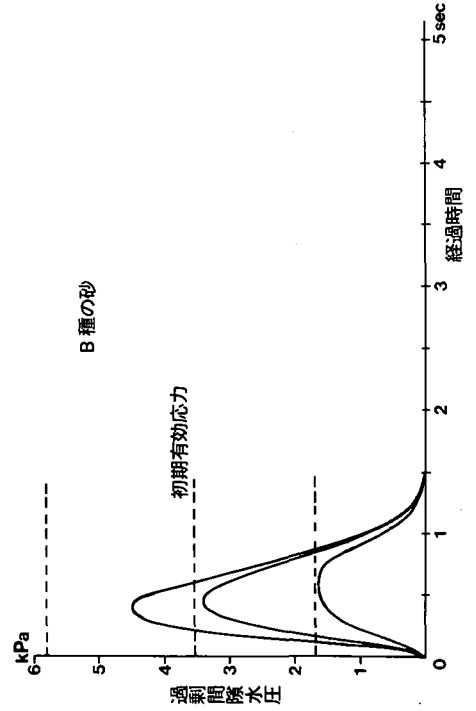


図-5(c) B種の砂の液状化による過剰間隙水圧

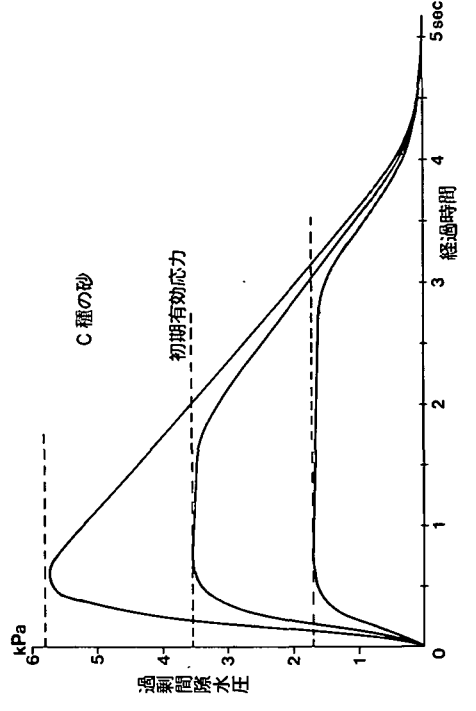


図-5(d) C種の砂の液状化による過剰間隙水圧

表-1 砂の分級範囲

種類	C種	B種	A種
標準網ふるい (mm)	0.42~0.84	0.84~2.00	2.00~4.76
土粒子の密度 (g/cm ³)	2.676	2.671	2.667
飽和密度 (g/cm ³)	1.831	1.905	1.923
初期間隙比	1.016	0.846	0.806

化が終了し、上は長く液状化していることになる。

このことは、粒径を変えた層を打撃による衝撃で、全体を同時に液状化させる実験を行うことで検証できる。表-1 および図-5(a) は川砂をふるい分けして得た、3種の粒径範囲である。いずれも砂層厚 90 cm とし、砂層表面と水位を一致させて行ったものである。間隙水圧計は地表から 20, 45, 75 cm であり、それぞれの過剰間隙水圧の変化を示したものが、粒径の大きいものから図-5の(b), (c), (d)に示した。図より、上の位置ほど液状化時間が長いこと、粒子が下へ通過して過剰間隙水圧計の位置より上にある粒子が時間とともに減って行くため、最大過剰間隙水圧もそれに伴って僅かながら減少して行くことなどが読み取れる(図(d)の下の本の線)。また、粒子径および間隙水圧計の位置によらず、液状化開始時の過剰間隙水圧の上昇線は深さにかかわらず一致すること、液状化終了時の減衰線は粒径が小さいほどなだらかであることが分かる。なお、図(b), (c)は、砂層厚が不足しているため、初期有効応力まで過剰間隙水圧が上昇していないことを示している。値が小さいことから、液状化に至っていないと判断するのは誤りである。粒子が沈下できる距離が、沈下速度が一定となるのに必要な距離と比べて短いからである。これらの結果を詳細に解析すると、粒子の沈降速度、沈降速度が一定になるまでの時間、そして単位時間当たりの通過粒子数などを見積もることができる。

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(ここでは、混み具合を指す)が挙げられる。条件によって異なるが、水平振動場では静止場(振動のない場で、砂層の場合は衝撃により液状化させ、単一粒子沈降の場合は、いわゆる静水場のこと)より沈降速度が小さくなるようであり、土粒子密度が大きくなればやはり沈降速度が小さくなる。また、鉛直振動場では沈降速度が水平振動場より大きくなった。粒子沈降は重力場の問題であり、したがって鉛直振動場では、重力方向と振動方向が一致するためこの様なことが起きても不思議はない。

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⁴⁾を挙げるのが可能となることを、青木滋名誉教授(当時、新潟大学積雪地

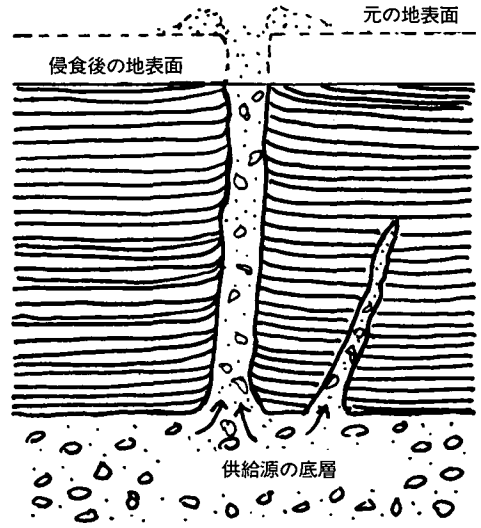


図-6 CLASTIC DIKES⁴⁾

域災害研究センター教授、土質工学会副会長) からご指摘を戴いた(図-6)。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⁵⁾からも、礫層の液状化の可能性が指摘されていた。

(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、実際に多くの地盤で施工され効果を発揮している。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効果がある。これは、水が抜けることで砂粒子の周囲の水が少なくなり、沈降距離が見かけ上短くなるからである。しかしながら、沈下量が小さくなることは考えにくい。いずれにしても、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は大いに意味があり、この点において効果がある。

なお、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⁶⁾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

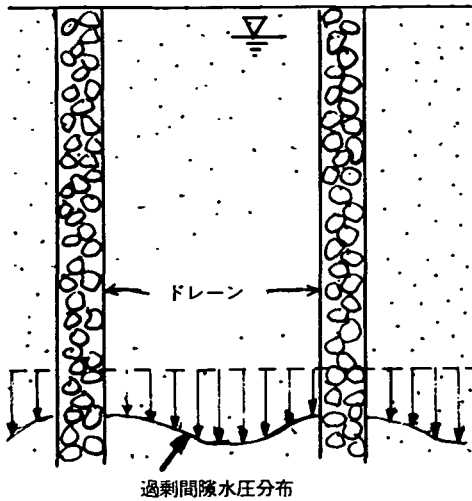


図-7 ドレーンによる過剰間隙水圧分布

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合計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、また、地表面に直接的に連通する水の通り道があることによる過剰間隙水圧の低下によって、原理上初期有効応力値まで上昇できるはずがないからである(図-7)。

以上述べたことより、液状化対策のうち液状化発生を抑制するには、粒子相互のかみ合いが外れないようにすることが原則的に求められる。そのためには、粒子間に結合力を持たせる方法、密にすることによって外れ難くする方法を挙げることができる。

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と、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⁹⁾

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、上層が液状化中であれ液状化終了時点であれ、全土被り圧を受けた被圧水となる。従って上層の液状化が終了した時点では、被圧水の圧力は上層の底

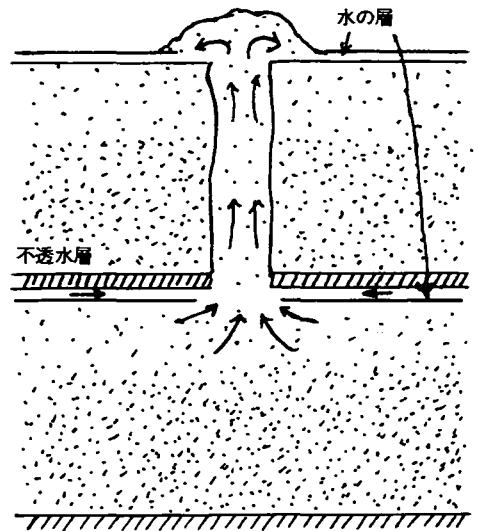


図-8 不透水層と噴砂

面での間隙水圧、すなわちその位置での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-8)。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に不連続はない。そのため噴砂は起きない。これらのことは、地震の終わり頃や終わってから噴砂が発生することや、被圧水がなくなるまで噴砂が長時間続くことなどよく知られている事実と一致する。

なお、ごく一般的に見られる状態である地下水面が地表面下にある場合の、地下水面より上の層や、砂質土表面に粘性土を盛土したり、舗装等で覆われている地盤でも同様なことが言える。ただし、この場合は液状化の初期段階から間隙水圧の不連続が存在するから、噴砂が最初から出てもおかしくはないが、一般にその圧力差は小さい場合が多く、したがって大きな噴砂とはならないことが多いであろう。

(2) 地盤の移動⁹⁾

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⁹⁾。最近になって、その移動メカニズム¹⁰⁾について議論がなされるようになり、種々の検討が加えられている。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。

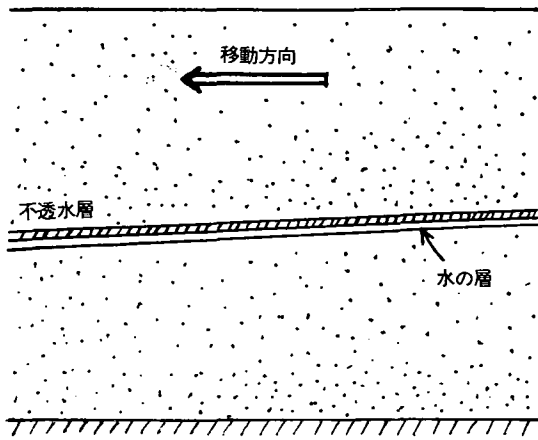


図-9 傾斜した不透水層による地盤の移動

しかし、砂層中に緩く傾斜した不透水層や難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間の摩擦抵抗力（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-9）。当然のことながらこの場合、上層は固体的性質を有していなければならない。上層が液状化中で液体状であれば、底面の傾きの如何にかかわらず動きようがない。なお、不透水層の下の水は被圧水となり、傾きの下方ほどその上載の層厚が大きく圧力が大きいため、水は不透水層にそって上方へ流れる。このため、水の層の形で長時間維持されることがないことが、水平な不透水層の場合（例えば図-8）と異なることである。

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。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ほとんどであろうし、人工埋立の地盤も同じことである。それが液状化して再び沈降堆積するのであるから、本質的な地盤の粒子構造や性質は変化していないと考えられるからである。すなわち下方に少し平行移動しただけと見なすことができる。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はずである。地震による振動には、土粒子構造を破壊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、地震動継続中ではこの効果によって密度が大

きくなると考えられる。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、振動振幅、振動周波数、振動継続時間が挙げられる。

兵庫県南部地震後に南芦屋浜の埋立層で行われたテストピット調査で、砂層に乱れが見られなかったとの報告¹¹⁾があるが、元の地盤が一樣な状態に近ければそのような結果が得られたことは首肯される。ところで、何らかの自然作用で、あるいは人為的作用で幾分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液状化強度が小さな状態に変化することになる。考えにくい事例ではあるが、液状化し易くなることもありうる点は、大いに注意すべきことであろう。

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十数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」に対して私自身の捉え方が形成されてきた。研究の初期段階で恩師の木村孟教授（現在、東京工業大学学長）から、ここで述べた過剰間隙水圧の発生メカニズムについて、「鶏と卵の関係を論じていることになりはしないか」とのご指摘をいただいた。そうかも知れないと当時思ったりもしたが、考察を深めるに従い、液状化として捉えるべき事象が広がること、個々の現象の理解が容易になること、そして何よりも、再液状化の問題を含め Post-liquefaction の現象を考える上で、本論文で述べた考え方が極めて重要であることを確信するようになった。しかしながら、筆者の努力不足もあって、全体を通して考察結果を発表する機会に恵まれなかった。この度貴重な誌面の提供を賜り、衷心より感謝申し上げる次第である。諸賢のご意見ご批判を賜るとともに、議論を深めるための話題提供となれば幸いである。

ところで、先輩諸兄の文献を改めて読み直すと、以前は読み取れなかった箇所に、筆者と同じような考え方をしていると思われる表現¹²⁾に出会うことがある。浅学非才を恥じるばかりである。

最後に、本論文で述べた考え方になかなか理解が得られない中、何人かの方々から親切な励ましを頂戴した。幾度か研究続行を放棄しかかったが、これまでなんとか続けられたのは、まさにそのお陰である。また、多くの実験を担ってくれた研究室の諸君の支えも

あった。記して感謝申し上げる次第である。

なお、本論文は新潟応用地質研究会誌第43号(1994.12)掲載の「液状化の発生メカニズムと現象」に加筆と修正を行ったものであり、実験結果の多くは省いた。考え方の筋が見えにくくなることを危惧したためである。

参考文献

- 1) 吉見吉昭：砂地盤の液状化，第二版，pp. 13-18，技報堂出版，1991.
- 2) Schlichting, H.: *Boundary-Layer Theory*, translated by Kestin, J., 6th ed., pp. 105-108, McGraw-Hill, 1968.
- 3) 例えば，本間仁：水理学，pp. 186-187，丸善株式会社，1967.
- 4) Shrock, R. R.: *Sequence in Layered Rocks*, p. 212. McGraw-Hill, 1948.
- 5) 国生剛治，田中幸久，河井正，鈴木浩一，楠建一郎，本荘静光，阿部信太郎，遠田晋次，夏坂幸彦：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，第29回土質工学研究発表会発表講演集，pp. 783-784，1994.
- 6) 例えば，近藤浩市，古関潤一，松尾修：液状化対策としてのドレーン工法の効果に関する動的遠心模型実験，第31回土質工学研究発表会発表講演集，pp. 1173-1174，1996.
- 7) Wibawa, B., Ohkawa, H. and Okuma, T.: An Experimental Study of Sand Boiling Due to Liquefaction, *J. JSNDS*, pp. 42-59, 1990.
- 8) 大川秀雄，内藤和重，神立秀明：粘土層を挟んだ砂層地盤の流動実験，第29回土質工学研究発表会発表講演集，pp. 939-940，1994.
- 9) 河上房義：第2章地震時の土の力学的性質，地震と地盤，土質工学会および土質工学会関西支部，p. 41，1965.
- 10) 新潟地震30年事業実行委員会，学術技術誌編集委員会：新潟地震と防災技術，pp. 291-295，1994.
- 11) 南荘淳，久保田耕司，森田悠紀雄：阪神高速5号湾岸線埋立層のテストピット調査，第31回土質工学研究発表会発表講演集，pp. 371-372，1996.
- 12) 文献9) の pp. 42-43.

(1997.3.31 受付)