液状化発生に対するメカニズムと対策法

主に小規模建築物を対象として

講演者　竹下良美

株式会社　総合地質コンサルタント代表

目　　次

1. 液状化発生のメカニズム
1.1 なぜ、液状化が大きな問題になった？
1.2 液状化地区の範囲
1.3 液状化地区の地形的特徴
1.4 液状化現象のメカニズム
1) 液状化の概念
2) 液状化時の砂地盤の強度
3) 液状化のメカニズムの基本概念
4) 噴砂について
5) 液状化現象のまとめ

2. 液状化－特に噴砂－に対する対策工
2.1 液状化を防ぐ及び発生後の被害を少なくする基本策
2.2 建築物に対する対策工の種類と利用に対しての問題点
2.3 噴砂抑制工法の新提案

液状化対策のためには、液状化の概念・発生理論さらには「土」の概念をまず理解することから始まります。難しい用語が出ますが諦めてお聞きください。その場合は、話の途中で質問されて結構です。

§１　地震時における砂地盤の液状化現象のﾒｶﾆｽﾞﾑ

1.1 なぜ、液状化が大きな問題になった？

ここ最近、地震が起きるたびに液状化の被害が増えてきました。過去においても、液状化の記録は残されていましたが、生活圏内での被害が増えた結果、地震による被害のなかでも相対的に大きな割合になったこと。さらに宅地造成において施工及び施工管理が簡易な砂質土による盛土の範囲が増えたことが原因と考えられます。

一つには、建物自体が過去の経験を生かした耐震化により地震対策がなされたのに対して、それを支える基礎地盤に対しては注目度が低かったことによります。

現在の「国土交通省告示1113号H13.7.2」には、確かに「地震時における液状化のおそれのある場合には、･･･有害な損傷、変形及び沈下が生じないことを確かめなければならない。」と記載されています。

この告示には、支持力その他の事例については詳細に記載されているのに対して液状化のおそれのある場合の定義なり、具体的な確認方法が記載されていない事に大きな原因があると思います。

また、液状化の恐れの判定においても、比較的簡単にできる「液状化の影響が地表面に及ぶ程度の判定方法(200gal相当)小規模建築物基礎設計指針」－日本建築学会2008でさえ、検討するにはGL-5m以浅の土を採取して、簡易粒度試験と地下水位の測定が必要になります。

また、判定の結果でその可能性が高い結果になっても、建築確認審査時点で、それに対しての要求がないかぎり、その資料は記録として残されるだけになります。

支持力不足は、建築構造物に速やかに現れるため、施工側の責任において必要事項であるのに対して、液状化現象は地域が限定されているうえ、全ての地震で起きる確率はなく、必要絶対事項にあてはまらないためと考えられていることも原因と思われます。

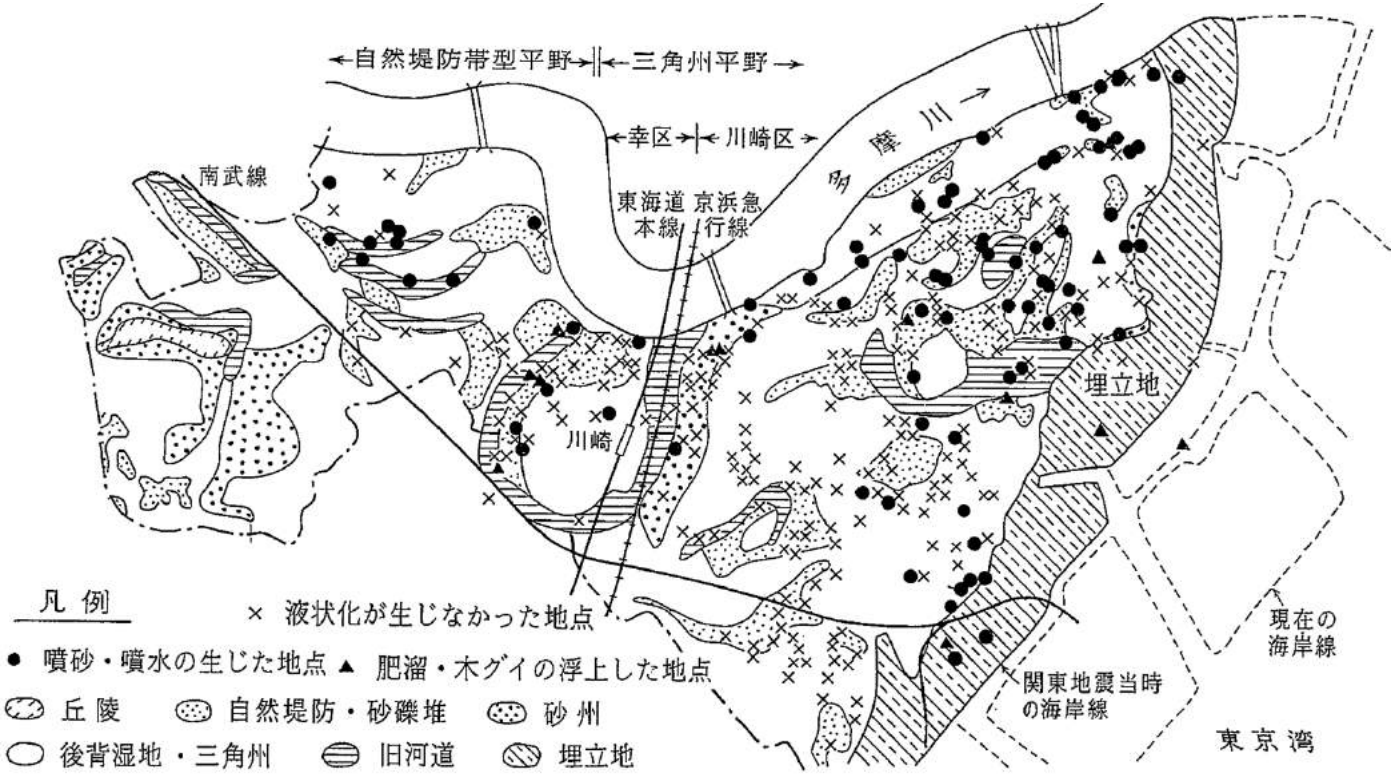
なお、これからお話しすることは、筆者の経験と各種の書籍を組み合わせて自分なりに理解したことですから、考え方や思い違いが有るかもしれませんので、詳しくは参考文献と照らし合わせてください。

1.2 液状化地区の範囲

今回、液状化の地点として、埋め立て地が注目されていますが、過去の1例を挙げてみます。次の図から見て判るように、多摩川の河口において関東大震災時では**埋立地域より**緩い砂質土が分布する**沖積低地**に多発していることが判ります。

また、地図上の盛土の土層を調べたところガラ等の混入するいわゆる雑土で、砂質土系でないことが判りました。すなわち、埋立地域に液状化が発生しやすいのでなく、埋立に使用した材料(土質・土性)に起因しているといえます。当然埋め立て地ですから、地下水が浅く存在しています。

昭和50年前後の残土・ガラの違法埋立地域はある意味では地盤強度を高める結果にもなり、液状化の恐れの少ない地盤でもあります。



液状化の発生しやすい地盤は、ご存じのように、地下水位で飽和された緩い砂質土地盤であります。

このような砂質土は、自然に堆積した地盤では、有楽町層上部層と呼ばれる縄文海進以降(約1万年前)の河川性の砂質土の堆積地域であるため、単純に言うと沖積低地の殆どの地区にあたります。また、今回の震災で突然大きく報道された山砂を用いた地下水面以下の盛土地盤も対応しますが、盛土施工時の状態で、当然大きく異なります。なお、盛土における液状化については、ずいぶん前から懸念されていました。ただ、今回の建物の不同沈下が全て液状化で生じた現象か、不明な点が残されています。単純に「締固めが緩い地盤」を基礎にした場合でも地震で不同沈下します。

また逆に、地中深くで液状化しても、その影響が地表面や建物の基礎に影響を与えなければ、液状化の影響は受けなかった地域として判断されることになります。
そのため、**液状化の発生地点と液状化の被害地域とは同じではありません**。

すなわち、液状化を発生させない方法と別に、液状化が発生したとしてもそれによる被害を防ぐ方法があるということです。

液状化による被害と地盤工学的項目を次にまとめました。

噴砂による被害が多いことが判ります。

液状化による被害と地盤工学的項目の関連

液状化による被害	地盤工学的項目
建物が沈下･傾斜して使用に耐えない	→ 有効応力の減少による基礎地盤の支持力低下 ・噴砂による地盤沈下
浄化槽等の軽い地下構造物が抜け上がる	→ 液状化による地盤の液性化
水道ｶﾞｽの埋設管が折れたり等で利用できない	→ 地盤の液性化＋地震動 ・噴砂による地盤沈下
道路盛土が沈下したり割れたりして通行できない	→ 剪断抵抗の減少による側方流動 ・噴砂による地盤沈下
橋台や橋脚が動き橋桁が落ちる	→ 支持力低下＋地盤の液性化よる主動土圧の増加
ｱｰｽﾀﾞﾑの堤体や堤防がすべり、越流する	→ 地盤の液性化＋地震動＋側方流動 ・噴砂による地盤沈下
岸壁が傾き、港が使用できなくなる。	→ 主動土圧の増加＋前面受動土圧の減少 ・噴砂による地盤沈下

・液性化:「変形特性が0に近い含水が多い土」に変化すること(私の造語)
・側方流動の原因には、地盤の液状化に伴い固有周期が変化し、長周期の振動に弱い地盤になることも原因の一つとして考えられる。

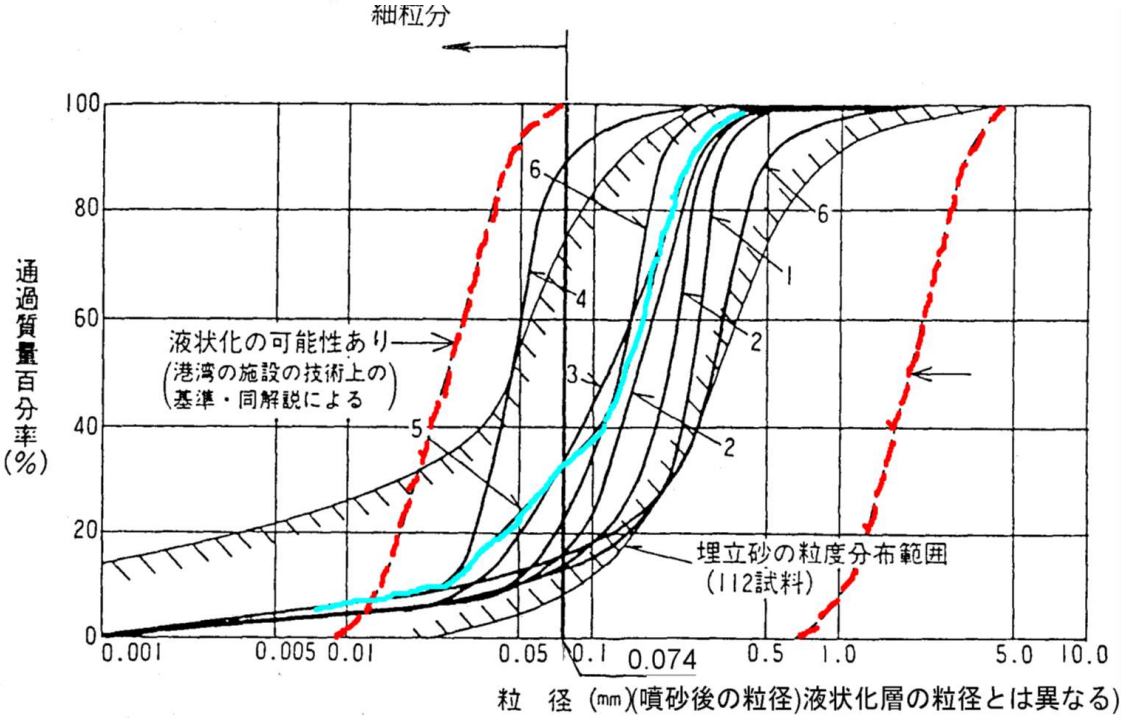
1.3 液状化地区の地形的特徴

液状化の恐れのある地形的特徴をまとめた表を載せておきます。

表 5.6.1　微地形から見た液状化可能性 [5.6.4)]

地盤表層の液状化可能性の程度	微地形区分
大	自然堤防縁辺部，比高の小さい自然堤防，蛇行州，旧河道，旧池沼，砂泥質の河原，砂丘末端緩斜面，人工海浜，砂丘間低地，堤間低地，埋立地，湧水地点(帯)，盛土地*
中	デルタ型谷底平野，緩扇状地，自然堤防，後背低地，湿地，三角州，砂州，干拓地
小	扇状地型谷底平野，扇状地，砂礫質の河原，砂礫州，砂丘，海浜

*：崖・斜面に隣接した盛土地，低湿地，干拓地・谷底平野の上の盛土地を指す．これ以外の盛土地は，盛土前の地形の区分と同等に扱う．



1　千葉市新港　　4　千葉市高洲
2　千葉市中央　　5　千葉市美浜
3　市原市姉ケ崎　　6　浦安市海楽

小規模建築物等のための
液状化マップと対策工法　1994

左図から判るように、千葉県の東京湾周辺地域の液状化は1987年の千葉県東方沖地震から問題視されていた地域です。

今回の被害は、前回の轍を踏んだ後も目立った対策をせずにいたため、同じことが繰り返されただけと判断できます。

さらに、砂質土主体とした地下水面が浅い地域の盛土(水位がないところでの盛土も時間とともに毛細管現象により地下水が上昇します)は、液状化の発生が高いことが、それ以前から指摘されていたことは周知の事実です。

行政による指導不足すなわち、人災的な面も否めません。

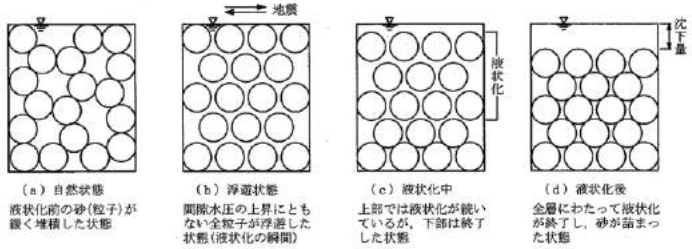
1.4 液状化現象のメカニズム

1） 液状化の概念

今回の震災後、新聞･テレビ･ラジオを始めインターネット上に液状化の発生メカニズムを解説した記事等が多数見受けられますが、焦点のずれた解説も多く、多くの方が液状化現象のメカニズムを誤って理解しているようです。

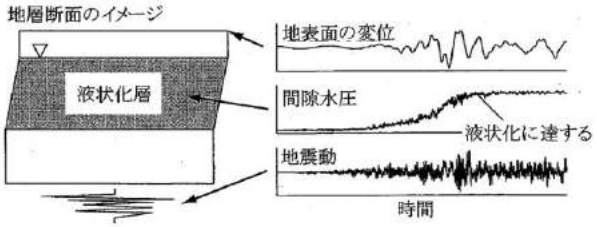
例えば、前述の小規模建築物基礎設計指針」－日本建築学会2008に記載された文章を転記しますが、ここでは、過剰間隙水圧の発生原因は不明瞭でかつ液状化した後は砂粒子は密になると記載されています。更に間隙水圧は地震動の到達とともに上昇し、間隙水圧が砂粒子を直接浮遊させるエネルギーになっているように記載されています。

地震時に液状化しやすい地盤は，地下水位が高く，かつ緩く堆積した砂質地盤であり，埋立地盤など人工造成地盤や比較的最近に堆積した沖積層がそれに該当する場合が多い．さらに，埋立地では，砂以外のたとえばシルトや礫が多く含まれる地盤でも液状化が発生する場合があることが確認されている．



液状化のメカニズム

液状化に至るまでの地震動と間隙水圧・地表面変位について巨視的な視点で図示したものである．液状化しやすい飽和した砂質地盤の下方から地震動が入射すると地下水の圧力（間隙水圧）が徐々に上昇し（過剰間隙水圧），ついには上限値（初期有効上載圧）に達して液状化に至り，液状化した層は非常に軟らかくなり，液状化後の地表面の変位が大きくなる[5,6,1]．



液状化に至る地盤全体の挙動[5,6,1]

まず、地盤工学的観点からの液状化の定義は

［間隙水圧が上昇して、有効応力が減少した結果、飽和砂質土が剪断強さを失うこと］

（土木工学用語辞典)と、記載されています。

すなわち、噴砂現象や地盤の沈下等の液状化発生に伴う現象と液状化(した地盤)と区別して考えることが重要です。

2) 液状化時の砂地盤の強度

土(主に砂質土)の強さ(剪断強度)は、次の式であらわされます。

土の剪断強度τ ＝有効応力σ‘ × tanφ ＋ c

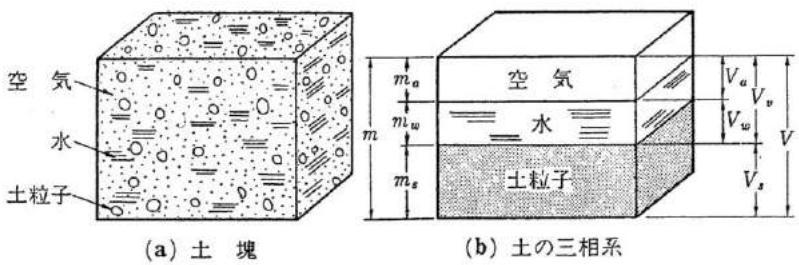
注)上式で判るように、粘性土が主に有する粘着力cは有効応力(上載荷重)に作用されない値なので、砂質土と違って、液状化対象層ではないことが判ると思います。(但し、地すべり・擁壁の土圧計算等で有効応力法での場合は、粘性土も砂質土と同じく内部摩擦角だけになりますが、話が複雑になるので、ここでは粘性土の場合は全応力(UU=非圧密・非排水状態)の条件としておきます。実際には中間層が多く、φ・cとも完全に「0」と言う地盤は少ないので、砂質土でも式にc(粘着力)入れておきました。

ここで、**土**：**土粒子**＋**水**＋**空気**の**混合物**で疑似弾性体を示すほどの**構造を有する物**

（良く耕された畑の土のように押しても、全く戻らない土は対象外です。一般的に土壌と呼ばれます）

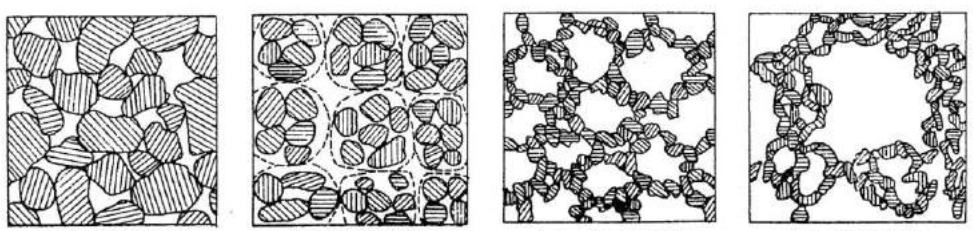
ここで、まず「土」の概念をご説明させて頂きます。最初は、土の構造です。

土の相構成の模式化



(a) 土　塊　　(b) 土の三相系

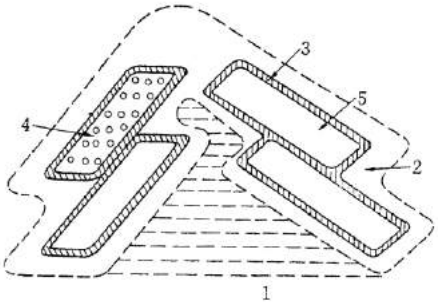
土塊の模式図



(a) 単粒構造　(b) 団粒構造　(c) 蜂の巣構造　(b) 綿毛構造

土　の　構　造

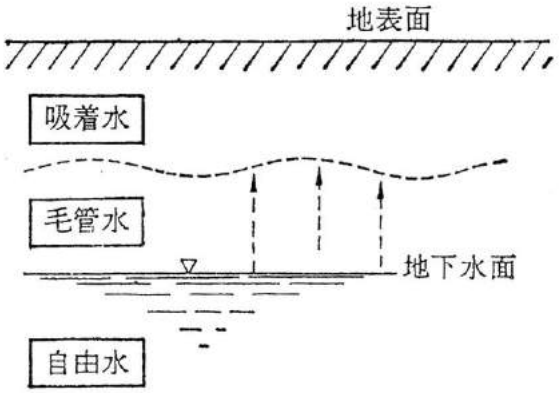
次は、地盤中に存在する水の状態について、ご説明します。

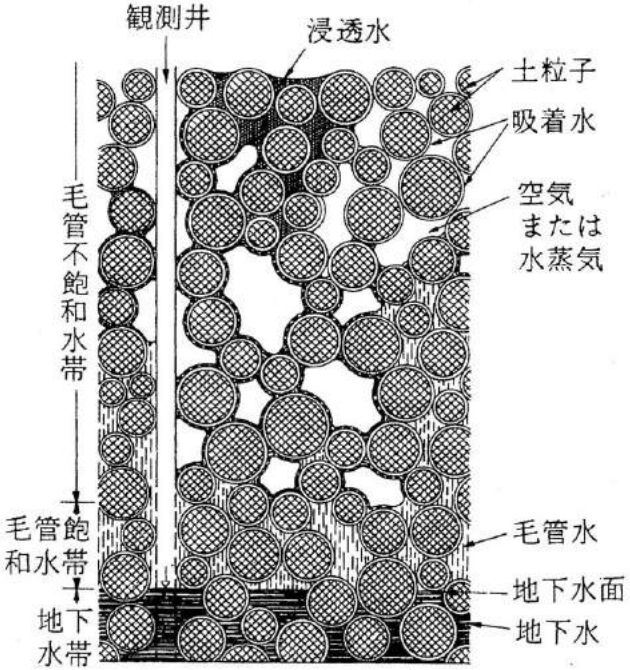


1. 間隙水，2. 吸着水，3. 結晶水，4. 構造水
5. 土粒子

土中水の分類

砂の土粒子は、粘土に比較して同じ体積なら当然数が少なく、吸着水の量は少なくなりますが、その分間隙水の入込む量が大きくなります。これが液状化に際しての問題です。





土中の毛管現象と 水の分布状態

この中で、液状化の問題になるのは、地下水面を構成する地下水です

なお、地震時に強度が低下するのは砂質土だけではありません。道路橋示法書耐震設計指針によると GL−3m以浅の 粘性土シルト質土の内一軸圧縮強度が20kN/㎡以下のものは地震動により強度を失うことも考えるようにとされています。(このような低強度の粘性土の分布範囲配は少なく、港湾や沼沢地の周辺程度です。)

この値はスウェーデン式サウンディングの0.5kN自沈に相当します。国土交通省告示1113号H13.7.2のGL−5m以内

に0.5kN自沈があった場合には、30kN/㎡以下なので、有害な損傷、変形及び沈下が生じないことを確かめなければならない。と言う文章に符合します。(但し、宅盤地域に於いては、この条件の土質は有機質土が主体となり、特殊土としての取り扱いが必要になります。)

φ :土の持つ内部摩擦角で、応力を受けた時の土粒子同士の最大すべり抵抗又はかみ合わせ強度。
粘土では、接点の面積が小さくなるので小さな値となります(三軸圧縮試験の破壊包絡円の接線の勾配で求められます。)

c:土の持つ粘着力(土粒子同士の接着力的な強度で、粘土は粒子が小さいが、数多いので砂に比較して大きくなります)

ここで、先程の式で完全飽和された土(砂質土)には、空気の要素がありませんので、

有効応力σ'＝全ての応力σ（ある条件下では一定）－ 間隙水圧U（水の強さ分）

となります。ここで、地震動による繰り返し剪断応力によって生じる過剰間隙水圧をUdとすると

$$\tau = ((\sigma - U) - Ud) \times \tan\varphi = (\sigma' - Ud) \times \tan\varphi$$ となります。

液状化による過剰間隙水圧が大きくなると、土の強度が小さくなり、これにより地震動により地盤が液状化することがお判りになると思います。すなわち、粘着力のない砂は完全に強度が0になることもあります。洪積地盤の砂が対象外なのは、時代とともに、土粒子間に電気的イオンや化学的結着力が働いて、見掛け上の粘着力cが生じているためです。

もう少し例を挙げると

直接基礎形式とした場合の地盤の剪断強度から決る許容支持力は、次式で求まります。

qa＝1/3(ic･α ･C･Nc＋ir･β ･γ 1･B･Nr＋iq･γ 2･Df･Nq)･･1式

(国土交通省告示第1113号(平成13年改訂)

qa：長期許容支持力 (kN/m2)

ic＝iq＝(1-θ/90)2　　ir＝(1-θ/φ)2

θ：基礎に作用する荷重の鉛直方向に対する傾斜角(°)　0と仮定する

C：基礎底面下にある地盤の粘着力 (kN/m2)

φ：基礎底面下にある地盤の内部摩擦角 (°)

γ1：基礎底面下にある地盤の単位体積重量 (kN/m3)(厳密には有効応力)

γ2：基礎底面より上方にある地盤の単位体積重量 (kN/m3)(厳密には有効応力)

B，L：基礎形状

α，β：形状係数 円形以外α1.0＋0.2 B/L　β0.5－0.2 B/L

Nc，Nr，Nq：支持力係数　（せん断抵抗角φの関数）

剪断抵抗角により決まる設計用支持力係数

土のせん断抵抗角φ	0	5	10	15	20	25	28	32	36	40<
Nc	5.1	6.5	8.3	11.0	14.8	20.7	25.8	35.5	50.6	75.3
Nr	0.0	0.1	0.4	1.1	2.9	6.8	11.2	22.0	44.4	93.7
Nq	1.0	1.6	2.5	3.9	6.4	10.7	14.7	23.2	37.8	64.2

Df：基礎根入れ深さ（m）

ここで、砂質土の場合、粘着力が0なので、1式は次のようになります。

qa＝1/3(ir･β ･γ 1･B･Nr＋iq･γ 2･Df･Nq)･･2式

また、前述の有効応力は、γ 1,γ 2とほぼ一致しますから、間隙水圧により有効応力低下した分だけ支持力が小さくなります(地下水面以下では通常、土の重さから水圧分10kN/m2だけを引いています)。

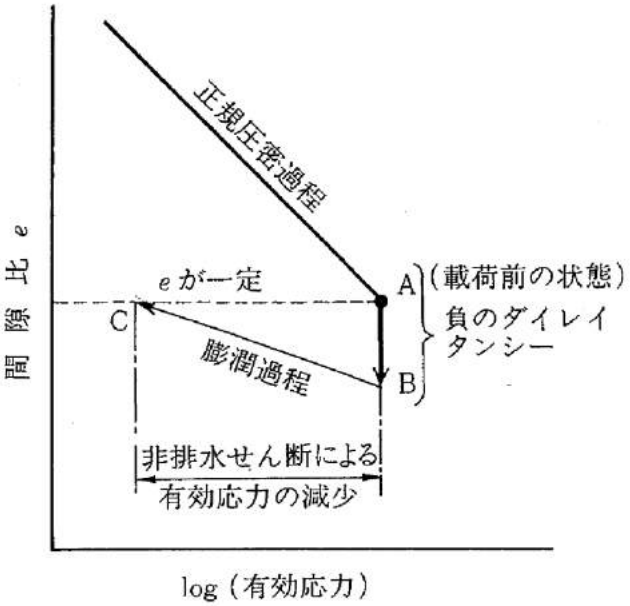
更にそれに掛かるNrは、粘性土のみに影響するNcと異なり、剪断抵抗角が25度以下になると急激に小さな値を示す関数です。そのため、後述するダイレイタンシーが発生した場合剪断抵抗角自体も小さくなりますから、両者が相まって、砂質土の支持力は急激に小さくなります。

3) 液状化のメカニズムの基本概念

これを理解して頂くために、更に難しい話をいたします。私自身が専門家ではありませんので、次に述べる話は私自身が完全に理解していません。その点はご容赦ください。

ここで、ダイレイタンシーという難しい言葉が必要になります。一般に土(粒状体)が剪断破壊を起こすと剪断部付近の土の体積が膨らむことを言います。すなわち剪断破壊により土粒子間の構造が壊され 、それまでの緊張が途切れることにより発生します。すなわち、体積膨張すると土の間隙比が大きくなり、その結果土粒子間の接着力が弱くなり、土の剪断強度が低下します。

液状化におけるﾒｶﾆｽﾞﾑの第一歩は、繰返しの地震動により、逆に体積が縮まる負のダイレイタンシーが発生することです。



まず、開かれた空間における飽和された緩い砂質土が繰返し剪断力を受けると、負のダイレイタンシーが発生し水が逃げ、土の間隙比が減少しますが、間隙水圧は元のままですので有効応力は変化せず、土の強度自体は変わりません。但し、水が逃げた分の体積が減少することにより、液状化層より上の地盤が沈下(いわゆる土が締まる)します。

次に、閉じられた空間で同じようなことが発生すると、間隙比自体は変化できないため、負のダイレイタンシーと同時に有効応力が減少し、過剰間隙水圧が発生します。土の強度は液状化により低下しますが、有効応力が減少しても、その分水圧が大きくなるので土の持つ全応力(支持力全体)に変化はありません。ですから、深いところで液状化現象が起きても、液状化層に接していなければ、その周囲の地盤や建物に変化はありません。

4) 噴砂について

しかし、実際の地盤では、完全に閉じられた系はなく、完全に開いた系もまれです。そのため、前記の挙動を示しながら発生した過剰間隙水圧を持つ水は、地下深いほど大きな圧力を持ちますので、より圧力の小さい地表に向かって上向きの力が生じます。

その結果地表までの浸透流が発生し、水圧が小さいと噴水・大きいと砂さらには礫を含む泥水が噴砂(文字からでは砂だけですが、砂だけが噴出することはありません)として認められます。

かつ、開いた系になるので剪断強度の低下で家が不同沈下し、また、負のダイレイタンシーで地盤及び建物が沈下します。また、閉じた系すなわち液状化層の上部に非液状化層が水平に分布している場合、過剰間隙水圧は水平方向に移動しようとしますが、地震動で非液状化層に割れ目が生じると、そこに過剰間隙水が集中し、**割れ目の幅が小さいほどダルシーの法則で、砂等も噴出させるほど水圧が強く**なります。

次に、私が、越谷周辺で地盤調査した時の実際の例でお話しします。
道路上で、ﾎﾞｰﾘﾝｸﾞ調査を行っていたところ、GL−1mの標準貫入試験のN値が「0」で非常に軟らかい粘性土だと思ったら、トロトロ状態の砂でした。その後、ｹｰｼﾝｸﾞを挿入したところ、泥水状体の地下水が地表付近まで上昇しました。

すなわち、完全に閉じた系であるため、上載荷重(舗装や車両等)で過剰間隙水圧が発生していたところ掘削の振動により、液状化したのです。そこに穴を開けたので、噴砂が発生したのです。当然この後深く掘ると、地下水は、砂の上面まで下降しました。そこで、地下水が高いので事前工法として、ｳｪﾙﾎﾟｲﾝﾄを提案しました。施工に入ると担当者から、緩い砂どころか重機でも掘れない締まり度の良い砂が出現して大変だったとの問い合わせがありました。そうです、地下水が充分絞られた砂地盤は、固砂(かたずな)に変身してしまったのです。なお、地盤沈下により工事現場付近の塀が傾いたとの話も聞きました。

なお、噴砂の現象は、従来からの土質用語で言うとクイックサンド状態(すなわち、インディ･ジョーンズの世界に描かれた底なし沼とか人食い沼と呼ばれる液状化状態)から更に動水勾配が大きくなってボイリング現象が発生し、地盤中の弱い部分(例えばありの巣や木の根の腐った跡の空隙)や地震による裂け目に、水道が生じパイピング現象が発生することです。改めて、この名称で呼ぶ必要はありません。

クイックサンド･ボイリングの名称は、根切り工事の際の事故の例として、パイピングは堤防の漏水現象(オランダの土手を守った少年の話で有名)として古くから知られています。

古くから知られていると言うことは、それに対する予防策や対策工法がすでに確立していると言って過言ではないと思います。

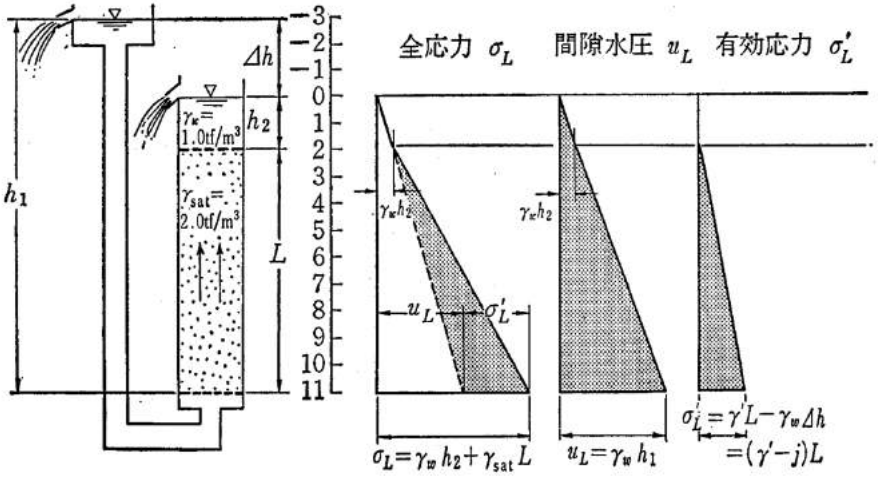


図-3.26 定常流状態の応力分布

$$
\begin{aligned}
\sigma_L' = \sigma_L u_L &= (\gamma_w h_2 + \gamma_{sat} L) - \gamma_w h_1 \\
&= \gamma_w h_2 + \gamma_{sat} L - \gamma_w (\Delta h + h_2 + L) \\
&= (\gamma_{sat} - \gamma_w) L - \gamma_w \Delta h \\
&= \gamma' L - \gamma_w \Delta h \\
&= \left(\gamma' - \frac{\Delta h}{L}\gamma_w\right) L
\end{aligned}
$$

$\Delta h/L$は，動水傾度（前述）であり，これをiとすると括弧内の第2項は$i\gamma_w$となる。$i\gamma_w$はまたjと書き単位体積当たりの浸透力である。浸透力を考慮した，見かけの単位体積重量をγ''とすると

$$\sigma_L' = (\gamma' - j)L = \gamma'' L$$

となる。動水傾度を大きくしていくとjが大きくなりやがてγ''は0になる。その状態では，せん断抵抗力がなくなる。これをクイックサンドという。これを越えるとボイリング現象が生じ地盤に水みちができる。これをパイピングという。γ''が0の状態の動水傾度を限界動水傾度i_cという。

これら一連の定義は、「間隙中を上昇する水の浸透力によって砂がその粒子間の力を失い砂の剪断抵抗が全て失われて懸濁液のようになることで、動水勾配が限界動水勾配になったときの状態を、完全液状化状体と呼ぶこともあります。」

空気が入った不飽和砂質土では、せん断力で圧力が高くなると、間隙水圧が大きくなる前にボイルの法則により空気が圧縮し、またヘンリーの法則に基づき水中に溶け込んでしまいます。そのため間隙比が変化しても体積が変化しないために、有効応力の低下は見られないつまり、過剰間隙水圧の発生が押さえられることにより、液状化は発生しにくいことになります。

最近の報道では液状化した地盤を「流体」であると表現していますが、完全な流体として考えると液状化した地盤は、その場所に止まることはできず散逸してしまうことになります。そのため、液状化した地盤も「土」として考えた場合、「変形特性が0に近い含水が多い土」として解釈していた方が事前及び発生後の対策が考えやすいと思われます。先ほどの減少として、側方流動をあげましたが、この場合も若干なりとも地表面が傾斜しているところで発生しています。

すなわち、繰り返し剪断応力を受けた時、徐々に砂同士の接点での接着力が微小(0でない)になったときに液状化が発生したと考えるのが土質力学的な約束事になっています。 この微小の時点とは、初期の有効応力が半分程度になった時と実験的に確かめられています。

なお、以上の話は緩い飽和砂質土の場合でありまして、密に締まった飽和砂質土でも、同じ現象が発生しますが、有効応力が半分程度になるには、地震の振動時間が短かすぎます。

5) 液状化現象のまとめ

ここまでの話で、ある程度液状化のメカニズムについてご理解できたと思います。

要点をまとめると、

1. 開いた系の地下水で飽和された緩い砂地盤は、繰り返しの剪断応力を受けると、負のダイレイタンシーとともに、過剰間隙水圧が発生することにより「土」の強度低下が起こり、地盤沈下が発生します。
　具体的な例として、液状化層の地耐力の低下によりその地盤を基礎とする建物等や停止中の車両等の沈下。

2. 不完全に閉じた系の箇所で発生した液状化層では、噴砂が発生する場合があります。液状化の基本である過剰間隙水圧の発生だけでは、砂が浮遊することはありません。
　砂が浮遊するには液状化した土(剪断強度が失われた砂地盤)が移動する必要があります。浸透流がその働きをしますが、実際には液状化層自体が揺れていますので、一つの力だけには限定できないかと思います。
　具体的な例として、ボイリング中の地盤に接するそれより軽い構造物の浮き上がり。
　液状化に伴う浸透流で移動する土(砂地盤)は、比重2前後の重い流動体(正確には変形特性が0に近く含水が非常に多い土)になっています。

3. 噴砂現象は地盤の液状化を確認できる重要な目安です。但し、地表面がアスファルト等で硬くなっていると噴砂が途中で止まってしまい、気付かないことがあります。また噴砂により硬い表面の下には砂が移動して空隙や空洞となっていて、後で陥没事故を起こすことがあります。

4. 軟弱な粘性土においても、繰り返しの剪断応力を受ける局部的な微小な剪断破壊が全体に伝播し、ダイレイタンシー(体積膨張) により地盤強度が失われる。
　具体的な例として、軟弱土を用いた盛土(田んぼの畦等)や水路沿いの堤防の崩壊。

　改めて、申し上げますが液状化における最初の過剰間隙水圧の発生については不明な点が多いので、参考に私見を述べさせて頂きます。

　まず液状化が起こりやすい一部(粒径の揃った細～中砂主体の部分)で、砂粒子間に存在する水(地下水)が振動により、体積圧縮に伴い過剰間隙水圧が生じ、局部的に液状化します。それに伴い、その付近の土粒子が再配列のために動くことにより、更に過剰間隙圧を持つ地下水の範囲が広がっていきます。ある程度の広がりを持つと地表にまで影響が現れてきます。そのため、地震直後から若干時間差をおいて噴砂が発生するのだとと思います。
　ですから、振動幅が大きくても、振動時間が短いと、液状化範囲は地表部では狭い範囲になりますし、地下深部だけで終了してしまうことになります。

ここで注意。しばしば公的な記事(国土交通省北陸地方整備局)に軟らかい土を踏み続けていると、軟らかくなって水が浮き出てくると書いてありますが、このような現象は定義からも明らかのように液状化による現象ではありません。

軟らかい土は、含水が多いので、足踏みをやり続けると直ぐに地盤強度が弱くなって土の構造がほぼ完全に破壊され、ヘドロ状体になって土の中の水が土粒子と分離してしまうことが一つです。分離されると「含水が少なくなった土」＋「地下水」になり、この時点で、最初の土は異なる物が生成されてしまいます。

このような現象は、トラフィカビリティーが小さい(悪い)土の代表であるローム層に良く見られます。粘土に比較すると含水が少ない土のように見られていますが、ロームは構造がしっかりとした土なので構造の隙間に多量の水(間隙水や吸着水)を蓄えています(粘性土の含水比が概ね60%なのに対してロームは120%前後)。

そのため、強い圧縮力を受けるとやはり構造が壊れ、水が浸み出してきます。乗用車なら難なく通れる道が、砂利を満載したトラックのタイヤがスリップしてしまう現象のことです。(但し、ローム層は地震動程度では土の構造が壊れることはありません。)

また、液状化を起こす地震の震動の状況によっては、負のダイレイタンシーの状態で液状が収束するとは思えず、多くの場合は、ダイレイタンシーの状態で終わるために、液状化した地盤が再び周辺の地下水を取り込み、元の緩い飽和砂質土になり易いので、液状化は繰り返されてしまいます。

今までのことは、液状化層の堆積状況を水平として考えた場合で、もし沼地や池等の凹地に、砂質土を投げ込むように盛土した場合には、地震動の揺れが増幅することは明らかです。そのような地域は、液状化の判定に対して、より大きな加速度(一般的な150～200gal→350gal)での検討を行っておく必要があるかと思います。

なお、今回の地震により、液状化の発生が多くの地点で発生した原因に、揺れの時間的長さが挙げられます。地盤が膨張したり・圧縮したりする場合、繰り返しが多ければより地盤の持っている締まりをゆるめることになります。
土は、力の作用を受けると体積が変化し、そのことが土の強度に大きく起因しているからです。

当然ですが、揺れの長さは震源地での地震規模の大きさが原因ですので、液状化についてはその地点の震度だけで、液状化の発生程度の割合を議論することは意味がないと思います。

2. 液状化ー特に噴砂ーに対する対策工

2.1液状化を防ぐ及び発生後の被害を少なくする基本策

根本的な対策は、対象層の地盤改良(締まり度の増強等)や地下水位の低下が必要 になります。しかし、地下水位を低下させることは地盤沈下を引き起こし、実際には困難と考えられます。そのため、発生しても災害を出さない対策工を考えることが重要です。

経費と液状化の発生確率で、実際の対策法を考えることが必要になります。

1. 盛土・埋土で人工地盤を作る時

・粒径のそろった砂質土は使用しない。不揃いの土(均等係数の悪いすなわち粒径が粘土～礫までの広い範囲を有する土)を使用する。かつ、充分転圧を行う。

・周囲や下から雨水・地下水が流入しないように、地山との境に縁を切る設備(例えば遮水性の土木用シートを全面に)を設ける。

・地山が液状化の恐れのある地盤の場合には、盛土前に排水縦ドレーン等を設け過剰間隙水を排出し、地盤を締め固める。又は、岩塊等の比重が大きいものでキャッピングする。
すなわち、液状化しても憤砂させないことが必要で、これらは、締固め効果もあり、これだけでも対策工になります。

2. 液状化の恐れのある地盤(地域)に建築物を作る時の地盤調査

・周囲(地形)から判断して、液状化の恐れのある地域の場合や規模の大きな建物の場合は機械ボーリングでN値と試料から、その恐れを判断します。
戸建ての場合は今はやりのスウェーデン式サウンディングでも結構ですが、本来の手動式にして感触・音から砂質土かどうかを判断します。地下水位が高いかどうかは同時に推定できます。これらの調査が大前提です。(但し、日本建築学会:「建築基礎構造設計指針2001改訂」で検討する場合はボーリングになります)

3. 液状化の恐れのある地盤(地域)に建築物を作る時の留意点

・調査の結果、液状化の恐れが高いと判定された場合は、建物等の建築物は杭・深層改良等を液状化層の下まで施工する。その際、液状化層より上位の地盤の剪断強度は0とする。(砂層の下位の粘土は軟らかいので主に周面摩擦力で支持させることになります)

建物の周囲は土間ｺﾝｸﾘｰﾄ以上の強度で、割れ目ができない構造として、噴砂が地表に至るまでの距離をなるべく長くして、地表への噴砂や噴砂口位置を建物からなるべく遠い位置として噴砂による被害を防ぎます。

本来は急傾斜地と同様に、危険度ﾏｯﾌﾟに記載された地域の中でその危険度が高いと判定された場合には建築規制を行い、対策工を実施した時のみに建築確認が下りるようにすべきかもしれません。

液状化発生の場所の殆どが、液状化対象層の下位には、軟弱な粘性土層が分布し、中間支持層・支持層は深い位置に分布しています。

そのため、現在補強工法は、液状化の恐れのある層(砂質土)に支持させているのが現実です。

浦安市のホームページによると深層改良工法を実施した建物でも液状化により被災した家屋が多数存在しております。これは、深層改良工法では施工的に液状化層の下まで、改良先端が届かないことや下位に軟弱地盤が分布しているためです。

万が一、液状化で建物が不同沈下する場合に備えて、ジャッキアップしやすいような基礎としておく。例えば出っ込み引っ込みの少ない形状のべた基礎でかつ基礎の脇を掘れるスペースを確保し、更に建物への引き込み管はフリシキブル素材を使用しておくことも、費用対効果の点で一つの対策です。

次に、非液状化層が薄くて、噴砂が起こりやすいと考えられる場合は、建物を取り囲むように過剰間隙水の逃げ道(噴水位置)を事前に設けておくことも有効と考えられます。すなわち、液状化層まで排水縦ドレーン(穴を掘って単粒砕石５号(20-13)程度や有孔塩ビ管を挿入)等を設置しておきます。 但し、時間とともに目詰まりを起こすので、メンテナンスが必要になります。(現実には有効なメンテナンスの方法はありません)。さらに、液状化による噴水後に、緩い砂地盤が締固った砂になるので、地盤が締ったり、空洞が発生する恐れがありますので、噴砂による被害よりは明らかに被害は少なくなりますが、それでも建物が不同沈下する恐れはあります。

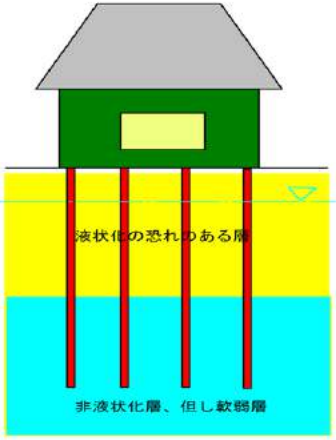
浄化槽等の地中埋設物は、浮き上がり対策としてのｱﾝｶｰ施工が考えられますが実際には難しく、上部を駐車場にする場合は少しでも重い(厚く)ｺﾝｸﾘｰﾄで覆うか、重たい(浄化槽本体との平均比重2.1程度)基礎と一体化させておくことも有効と考えられます。また、浄化槽の底面及び周囲を粘性土で包むように覆うことでも、直接噴砂の通り道に接しないのである程度の効果が期待されます。また、逆に過剰間隙水圧を消散させるために、単粒砕石５号(20-13)程度で覆うことも考えられます。両者とも厚さは50cm程度は必要になります。

今回の液状化の被害を受けて、色々な対策法や復旧工法が見聞されていますが、全てに一長一短があります。重要なことは「液状化は繰り返す・建物には寿命がある・ﾗｲﾌﾗｲﾝは個人では対処できない」ことも併せて考える必要があるかと思います。

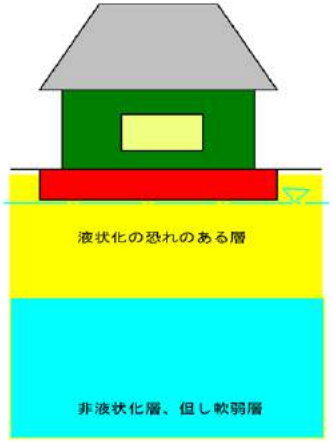
さらに、「雨降って地固まる」のことわざは、台地等の地下水が深い場合で、埋め立て地や沖積低地では「雨降って、液状化の心配」が増えます。

2.2 建築物に対する対策工の種類と利用に対しての問題点

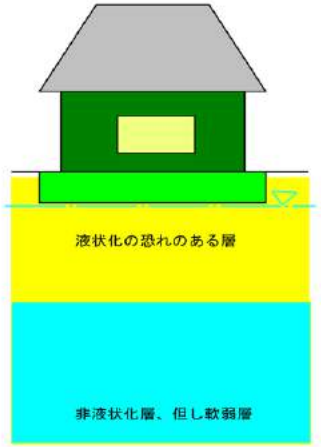
1)新築建築物に対する主な対策工の種類と問題点



杭基礎、但し杭先端は液状化層下位まで打設
支持力は、支持層または周面摩擦力に期待する杭

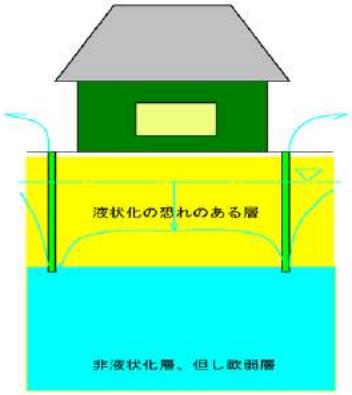


表層改良工法(基礎下３ｍ)
・浅層混合改良
・動的締固め(砕石添加)

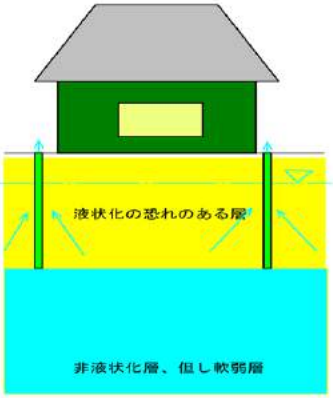


置換え工法(浮き基礎形式)
・コンテナ型プラスチックボックス工法(スーパージオ工法)
・発泡スチロール工法(コロンブス工法)

すでに述べてきたことを
図化したものです。



強制地下水低下工法
・ウェルポイント工法
・ディープウェル工法
建築後では、地盤沈下が発生するため不可



砕石ドレーン又は透水性パイプ打設
過剰間隙水圧の発生を防ぐ

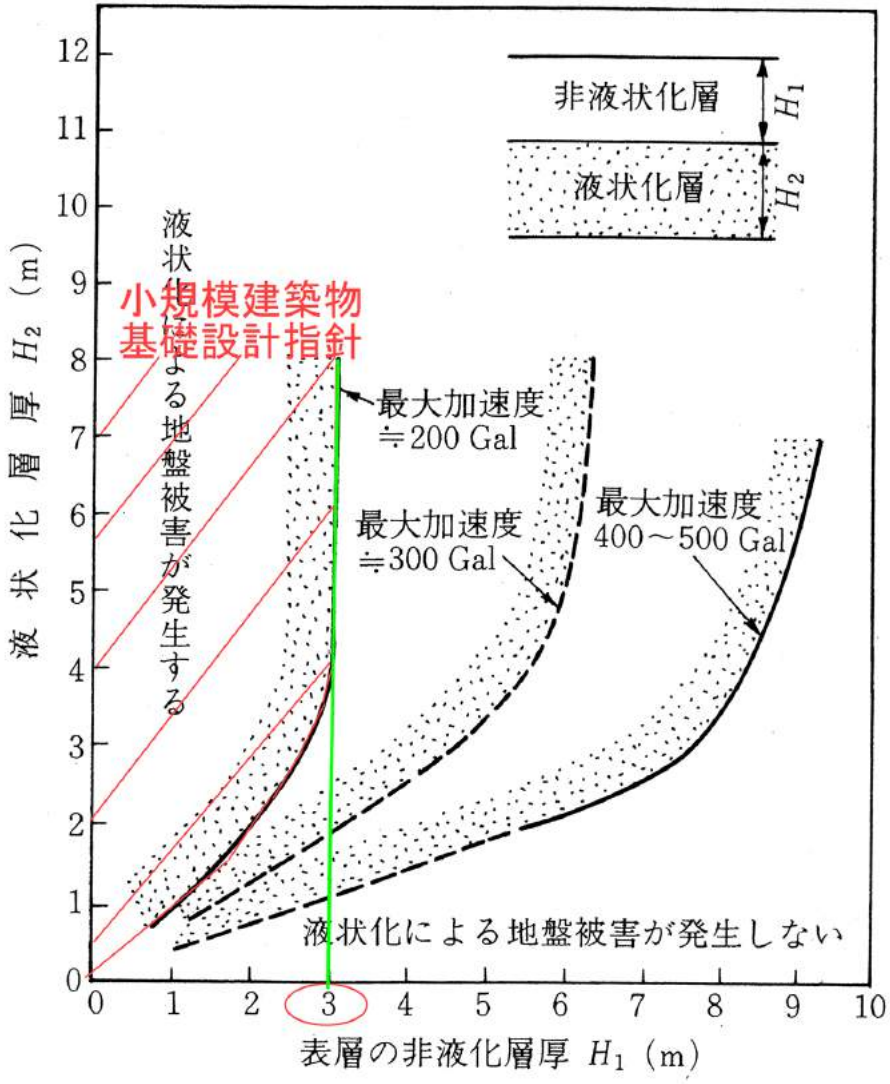
1)液状化の下位層で建物を支持させる工法
摩擦杭では支持力が小さく、支持杭では費用が高い

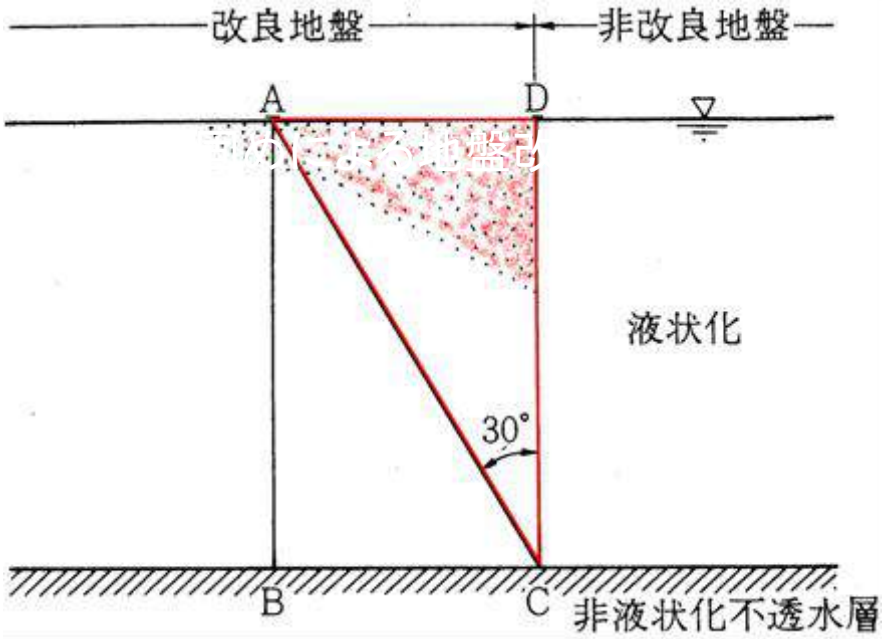
2)基礎を剛体や軽量置換にして不同沈下を少なくする工法
噴砂が発生した時は、被害を防げない

3)地下水を低下させ液状化を発生させない方法
地盤沈下が周辺まで発生する

4)液状化発生時の過剰間隙水圧を減少する方法
地盤が締まり、地盤が沈下する。

2)液状化対策(噴砂抑制)のために、非液状化層(改良地盤)を施工する場合の施工範囲





過剰間隙比(u/σu ‘)＞0.5より求めた範囲

液状化層の下端は、検討する最大gal数によって異なる。

噴砂抑制に対して非常に有効な方法であるが敷地面積が広く必要になる。

3)既存資料による従来の代表的な液状化対策工

※JGS関東「造成宅地の耐震対策に関する研究員会」メディア懇談会資料，液状化対策工法設計・施工マニュアル(案)，TF4メンバーからの意見に基づき再構成

ここに書かれていることは、一般的なことですが実際には大規模工法で、残念ながら戸建て住宅に適応することは困難と考えられます。

4)参考資料－液状化層判定の式－

学会・指針等で様々な検討式が提案され、それぞれの部門で利用されています。
その中で、主な液状化対象層検討基準は次の通りです。

- 日本建築学会:「建築基礎構造設計指針2001改訂」
- 日本建築学会:「小規模建築物基礎設計指針2008制定」
- 日本道路協会:「道路橋示法書・同解説　Ⅴ耐震設計編　平成24年版」
- 港湾の施設の技術上の基準を定める省令（平成十九年三月二十六日国土交通省令第十五号）

液状化層より上位に分布する非液状化層についても、それぞれの基準に従い検討します。
現在、国土交通省は液状化の判定式を現在最も危険側に算出される「建築基礎構造設計指針2001改訂」で統一する動きが見られます。すなわち、液状化最下部層から上位が液化検討の対象になります

なお、層としての液状化層の判定は、
土木では、現在でも層の平均FL値で、
建築では下位のPL法が利用されていました。

$$P_L = \int_0^{20} (1 - F_L)(10 - 0.5x)dx$$

ここで、P_L：液状化指数
F_L：液状化に対する抵抗率
x　：地表面からの深さ(m)

PL 値による液状化危険度判定区分

	PL=0	0＜PL≦5	5＜PL≦15	15＜PL
PL値による液状化危険度判定	液状化危険度はかなり低い。液状化に関する詳細な調査は不要	液状化危険度は低い。特に重要な構造物に対して、より詳細な調査が必要。	液状化危険度が高い。重要な構造物に対してはより詳細な調査が必要。液状化対策が一般に必要。	液状化危険度が極めて高い。液状化に関する詳細な調査と液状化対策は不可避

岩崎ら(1980)による

以上のように、液状化対策は一筋縄では解決できないことがお判りなったと思います。この原因としては、「液状化」に対して明快に科学的解明がされていないこと。地盤は工業製品と違い、複雑すぎて数字化できないこと。常に地下水が変動していること。
但し、埋土に関してだけは、粘性土を使用してこなかったことや充分締固め対策をしてこなかった人為的な問題として明言できます。

これらの点から、液状化対策はそれぞれの現象に対する対蹠的な対策工法にならざるを得ません。すなわち、根本的な解決策である液状化対象層の下位まで地下水を低下させることは、不可能であるためです。
そのため、ライフラインを除くとそれぞれの建物に対して、それに適した工法を選んでの対処工法を考えるしかありません。

その中で、低層建物に適した対策法を考えましたので、ご披露させていただます。

この対策法の基本的考え方は、噴砂を発生させる過剰間隙水を一時的に基礎に取り込み、再び地盤に戻すという、斬新なアイデアです。
詳しくは、別途AQUAラフト工法をご参考にしてください。

著者について

株式会社　総合地質コンサルタント　代表
　埼玉県川口市戸塚東１－２５－３３　TEL048-294-6976

新潟大学農学部農芸化学科入学－理学部地質鉱物学科　S49卒

その後、現在に至るまで地質コンサルタント～地質調査業務の会社に勤務。
H6現在の会社を設立。

地質調査及び鉱物の結晶形態学に関する著書・論文・特許等多数。

参考・引用文等

「土」の役割と建築物の関係(地盤の講習会資料)竹下良美(10年程前)
液状化対策の調査設計から施工まで　地盤工学会(1993)
小規模建築物等の液状化ﾏｯﾌﾟと対策工法　液状化対策検討委員会
ぎょうせい(1994)　土質工学数式入門　地盤工学会(1984)
小規模建築物基礎設計指針　日本建築学会(2008)
技術手帳－実務に役立つ土質工学用語の解説－地盤工学会(1978)
地質調査所［東京西南部地域の地質］(1984)
AQパイル工法(国土交通省認定杭)カタログ　AQパイル協会
AQUAラフト工法カタログ　AQパイル協会