

液状化談義



工学博士 西尾 宣明

元・東京ガス(株) 基礎技術研究所

液状化研究事始め——新潟地震

与太郎 大家さん。3.11の震災からもう2年になりますね。

最近は大きな余震も少なくなって、なんか地震のことを忘れそうな気分になって来ましたよ。これじゃいけないんだと思うんですけど。

大 家 そうですね。東京の直下地震の確率が高くなっているとか、東海・東南海・南海の三つの地震が連動して大震災になる確率が高まっているとか、心配事が控えているようですから、のんびりはしてられないと思いますけどね。

とくに、津波の対策は何十年何百年先のことを考えて今からしっかりと始めなければ、東日本大震災の悲惨を何回でも繰り返すことになりますからね。

与太郎 そうなんだ。

もう一ぺん原発が津波でやられたりしたら、日本中住むところがなくなっちゃうかも知れませんからね。

大 家 そう思うでしょう？

与太郎 そういう大きな話になると自分がどうしたら良いかよく分かんないけど、大家さんに訊きたいと思っていたのは液状化のことなんですよ。

東日本大震災のときに浦安で起きた液状化。結構立派な家が傾いたり——あれは土台から沈んだり壊れた

りするからどうしようもないんですね。

あれって埋め立て地だから起きるんですか？

大 家 埋め立て地でよく起きていますが、第一の条件は砂地盤だということです。

与太郎 砂地盤ってそんなに危ないんですか？

大 家 いやいや。しっかりと締まった砂はとても強いんですよ。

問題はそれが地下水をたっぷり含んでいる時なんです。

1964年の新潟地震のときに、5階建ての県営住宅が基礎から根こそぎ傾いたのを知っていますか？

50年も前のことですから無理ですね。与太郎さんが生まれる前ですからね。

与太郎 それは液状化のためなんですか？

大 家 そうなんですけど、ひっくり返った住宅の基礎には杭が打たれていなかったんですよ。どうして分かりますか？

与太郎 手抜き工事ですか？

大 家 そうじゃないんですよ。とても良く締まった砂地盤だから、当時の基準では杭は要らなかったんですね。

しかし、この地震では至る所で液状化が起きたために、立派な橋の橋桁が全部落ちてしまったり、マンホールが地面の上に飛び出したり、下水管が路面まで浮き上がったり、水道管やガス管にも土砂が入ってしまっ

て復旧に苦労したりで、普通のいわゆる震災よりは液状化による被害が圧倒的に多かったんですね。

与太郎 液状化ってそれまで起きていなかったんですか？

大 家 もちろん、それ以前の地震、例えば関東地震などでも、横浜港の周辺では液状化がかなり起きていたと推測されていますが、新潟市のような近代的な都市でこういうことが大規模に起きたのは始めてだったんですね。

そして、この地震を契機として液状化の研究が本格的にされるようになったんです。

砂地盤が液状化しやすいのは

与太郎 砂地盤が水を含んでると液状化するって言いましたよね。

どうして砂地盤なんですか？

大 家 私たちの足元にある土はうんと大きく分けると砂質土、シルト、粘土の三つに分けられます。

それぞれを構成する土の粒子の大きさや成分も違うんですが、簡便な分類法としてその固形分の体積を1とした時の空隙の大きさによって

	間隙比
砂質土	0.7～1.2
シルト	1.2～2.0
粘 土	1.5～3.0

のように分類されたりします。

空隙の比率——土質工学の世界では「間隙比」と呼びますが、それが小さいほど良く締まった土ということになります。

与太郎 あれ？そんなら砂質土のほうが良く締まっているんでしょう？良く締まっているほうが液状化しやすいなんて変じゃないですか？

大 家 確かに変ですね。しかし、それは固形分の形や成分が違うからなんですね。砂質土はいわゆる砂粒が主成分ですね。岩石が粉々になったものです。

学界の定義では粒の大きさが75ミクロンから2ミリの範囲の粒が50%以上とされています。比較的粒が大きいから空隙の寸法も大きくて水が通りやすいという性質があります。

シルト、粘土となると粒子がもっと小さくなって、

化学的あるいは電気化学的な性質を持つ粒子も多くなります。そのため空隙の比率は大きいんですが構造は比較的しっかりしています。

空隙が大きい分、荷重をかけると圧縮されやすくて地盤沈下なども起きやすいですがね。ただ、空隙の寸法が毛細血管のように小さいので水は通しにくくなるし、水を加えて捏ねると文字通り粘土のようにドロドロになったりします。

与太郎 ふーん。そうなのか。でも、砂の場合も液状化するとドロドロになるんじゃないですか？

大 家 そう。一時的にドロドロになるんですね。

ただし、粘土のようにベトベトしたドロドロではなくてさらさら流れやすいものです。しかも、水を通しやすいからすぐに過剰な水を吐き出して落ち着いてしまいます。つまり、液状化しやすいけれども落ち着きやすい。落ち着いた後は液状化しにくくなります。

もっとも、より強い地震がくればまた液状化することもありますかね。

与太郎 そうですか。それで、液状化するといろいろ悪いことが起きるんでしょう？

液状化はどこで起きるか

大 家 もちろんそうです。でも、砂地盤なら必ず液状化するというわけではない。液状化するためには地盤が地下水で飽和していることが条件です。

与太郎 飽和って言うとは？

大 家 砂粒の間の空隙が完全に水で満たされているということです。

砂地盤は大きな川の流域、その中でも河口に近いところに出来やすいから、そういったところは大抵の場合地下水位も高くして飽和した地盤が多いですがね。

与太郎 今度の地震では埋め立て地の液状化が多かったようですね。

大 家 そうですね。海岸の埋め立てには大抵は海底の土が使われますからね。その海底には川で運ばれた砂が一杯です。それで、埋め立て地は液状化しやすい砂地盤になることが多い。また、地下水位も比較的高い。

与太郎 地下水位が高いっていうのは、地面に近いってことですか？

大 家 そうです。

埋め立てた地盤の高さがかりに海面から2メートル

とすれば、地下水位は少なくとも地面から2メートル下ぐらいのところには来るでしょうね。

普通、地下水位は陸上の方が高いし、海面だって満潮の時は結構高くなるから、地下水位は海面よりも高いことが多いでしょう。

与太郎 じゃあ、地面から1メートル位よりも深いところでは液状化する危険も大きいんですね。

大 家 そういうことです。

与太郎 そうすると表面の地盤は液体みたいになった砂の上に浮いたような形になるんですか？そうするとうんと揺れやすくなるんでしょうね。

大 家 逆に液状化した砂の上の地盤はあまり揺れなくなります。

与太郎 ええ!? 本当ですか？

大 家 液体は地震の揺れを伝えませんからね。船に乗っていれば地震の揺れを感じないのと同じことですよ。

与太郎 でも、テレビには路面がゆっくり左右に動いてるのが映ってましたよ。

大 家 液体は地震の横波を伝えませんから、一旦液状化してしまうとその上に載った地盤には直接地震動は伝わりません。あれは少し離れた、液状化していない隣の地盤から伝わった力で動かされていたと思います。ほら、随分ゆっくり動いていたでしょう？

直接下から来る地震波の振動があんなにゆっくりということはありません。

与太郎 じゃあ、液状化すると何が怖いんですか？

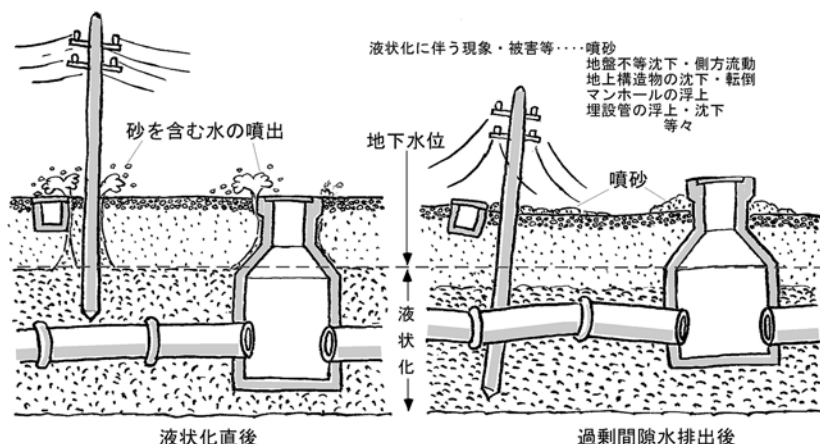
大 家 表面の地盤が横滑りし易くなりますね。深いところで液状化すると護岸が根こそぎ海側に傾いたりします。

街の中で一番目立つのは水と砂が建物との境目や路肩、舗装の継ぎ目などから噴き出すことです。その結果地面には不等沈下が生じます。

しっかりと杭が打たれた建築物との間の不等沈下も起きますね。そのために水道やガスなどの引込み管が損傷を受けることもあります。

管が壊れたところからは砂が流れ込んだりして、手に負えない状態になることも多いです。

与太郎 マンホールも浮き上がったりするんでしょ



図① 液状化の被害の一例

う？水道管は沈んでガス管は浮き上がるなんて話を聞きましたけど？（図①）

大 家 飽和した砂地盤の比重は1.7前後、その比重のまま液体になるので、比重の小さいマンホールは浮き上がることが多いですね。水道管は鉄管ならば浮きも沈みもしないでしょう。口径が大きいガス管はやや比重が小さいから浮くかもしれません。しかし、元々深さが1メートル半もあるかないかぐらいですから浮いてもほんの少しですね。

浮いて困るのは下水道管です。比重が小さいから浮きやすいし、マンホールもかなり深く造られるからとくに浮きやすいですね。それに、きちんと勾配を持つように作られているから、浮き上がって深さが変わってしまうと下水管の役をしなくなります。

与太郎 ふうん。そうなのか。それで困っちゃうんだ。大家さんは現役のとき埋設管の研究してたっていうから、いろいろ知ってるんですね。

大 家 現場も沢山見ているし、液状化の実験なんかも結構したことがありますよ。

与太郎 テレビでたまに液状化の説明がありますね。池上彰さんなんかやりましたね。あれはみんな専門家に聞いたことをそのまま話してると思うんですが、砂地盤が揺されると液体になるその仕組みがイマイチピンと来ないんですよ。

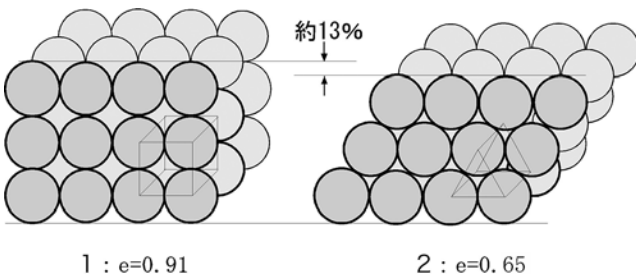
液状化の仕組み

大 家 そうでしょうね。難しい理屈も含めて、しかも分かりやすいように説明するというのは矛盾してい

ますからね。大抵はマンガを使って分かったような感じにさせるだけなんです。

しかし、与太郎さんはもう少しよく分かりたいらしいから、それ相応に説明してみますね。当然かなり理屈っぽくなりますがね。

まず、砂粒を同じ大きさのビー玉のようなもので表しますね。これはほかのマンガのような説明と同じです。これが規則正しく並んで上からの荷重をしっかりと支えることができるようになっているものとします。代表的な並び方をこのように2種類描いてみました。



図② 砂層構造のビー玉モデル

左側の図は砂粒が立方体の頂点に来るように並んでいる場合です。この時、ビー玉に対する空隙の比率、つまり空隙比 e は0.91になります。

与太郎 これってちょっとジャングルジムに似てますね。

大 家 そう言えばそうですね。

ところで、砂質土の空隙比は大体0.7～1.2ということですから、このジャングルジムは空隙比という点ではちょうど普通の砂質土に相当することになります。

与太郎 この右側のはどういうものですか？

大 家 これはビー玉が正三角形の形に積まれたものです。しかし、この紙の奥行き方向には左側と同じ

く正方形の頂点にビー玉が置かれているものとします。この時は空隙比が0.65になりますから、砂質土としてはとても良く締まった状態に相当します。

与太郎 それで、地震が来るとこの土だかビー玉のジャングルジムがどうにかなるんですね？

大 家 そういことです。

比較的近い地震だと最初にゴツゴツゴツッと上下動の揺れが来ますね。それはP波というもので、あまり大きな揺れにはなりません。続いて来るのがS波で、大きく横揺れします。これで家が倒れたり、家の中では食器棚が倒れたりするわけです。

この横揺れは地盤の深いところでは小さくても、軟らかい地盤では増幅されて、地表面に近いほど大きくなります。そのため、地盤にはせん断変形が生じます。

与太郎 せん断変形ってずらすような感じだけ？

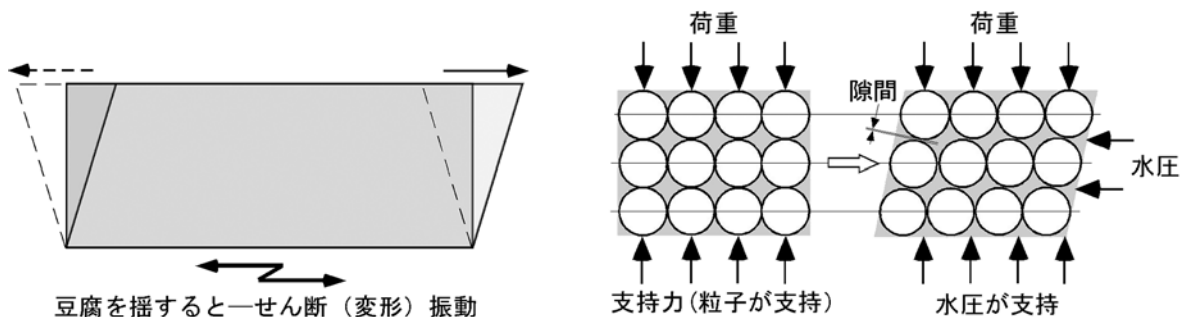
大 家 そうです。皿に豆腐を載せて皿を横に揺らすと、豆腐はこの左側の絵のように右に左に菱形に変形しますね。これがせん断変形です。(図③)

ビー玉のジャングルジムがせん断変形を受けたらどうなりますか？

与太郎 えーと、この縦の列が斜めになるんでしょう？

あれ!? ビー玉同士が離れちゃいますね。これでいいんですか？

大 家 いいんです、いいんです。縦の列のビー玉同士が離れたらビー玉は上からの荷重を支えることができませぬ。そうすると今までビー玉が支えていた荷重を空隙の水——空隙水と言いますが——それが肩代わりして支えることになります。当然空隙水の圧力は上昇します。ビー玉はその空隙水に浮かんでいるようなものです。これが液状化というものです。



図③ せん断変形すると隙間ができて砂粒の支持力がなくなる

ビー玉の代わりに水が荷重を支えるようになれば、当然水圧は上昇します。水圧が上がればどこか弱いところを見つけて噴き出そうとします。

与太郎 それで、砂も一緒に地面の上に噴き出すんですね。そして地面は沈下するんだ。

大 家 噴き出すだけでなくどこか横のほうに流れる先があれば、地盤の沈下や変形はもっと大きくなるでしょうね。

与太郎 そうなのか。

大 家 しかし、砂粒は比重が水の2.5倍以上もありますから、いつまでも水の中に浮かんでいるわけには行きません。間もなく沈澱して行きます。

そうすると余った水だけがどこかに噴き出して、更に地面は沈下します。

沈澱した砂——この場合はビー玉ですが——これが先の図の右側のような形に沈澱したとすれば、液状化した砂層の厚さは元の厚さから1割以上減少します。

与太郎 そうすると液状化した層の厚さが1メートルなら沈下は10センチ、2メートルなら20センチってことですか？

大 家 そういうことです。ただ、砂粒はビー玉とは違って大きさも形もいろいろですし、液状化しやすい砂層の厚さも場所によって違いますから、沈下の程度も場所によって違ったりするでしょうね。

与太郎 でも、沈下した後は間隙比が小さくなるんでしょう？つまり、地盤が締まるってことですよね。そうすると次の地震では液状化はしなくなるんですか？

大 家 いいところに気がつきましたね。

マンホールは浮き上がる

与太郎 大家さん、テレビであの池上彰さんが浦安の液状化の話をしたとき、マンホールが地上に突き出したのは浮き上がったんじゃなくて、周りの地盤が沈下したからだって言っていましたよ。

大 家 確かに、マンホールの底が深くて液状化しない地盤まで届いていると浮力が働かないから、周りの地盤が沈下したために浮き上がったように見えることもありますね。でも、その場合はせいぜい10センチや20センチという程度です。

新潟地震や釧路沖地震の時など沢山のマンホールが

もっと大きく浮き上がっていましたよ。

私が釧路で見たのなどは1メートルも地上に突き出していましたからね。路面の沈下は10センチか20センチ程度でしたから、その差は浮き上がりでしか説明が付きません。

与太郎 へえー。そんなに浮き上がるんだ。路面の沈下を差し引いても80センチか。マンホールって結構重いんでしょう？

大 家 コンクリートの比重は2.5ぐらいあるけれども、中身は大半が空気ですね。だから全体としての比重は水とどちらが大きいかわからない程度です。

その周囲の地盤が液状化して比重が2に近い液体になれば、浮力で簡単に浮き上がることができます。

比重が水の7.8倍もある鉄で造った船だって海に浮かぶのと同じことです。

与太郎 そういうことか。

液状化は内陸でも

与太郎 それから、今度の地震で埼玉県の栗橋っていう、大分内陸に入った方でも、液状化で住宅がずいぶん被害を受けたっていうニュースがあったけど、液状化は海岸沿いの埋め立て地ばかりじゃないんですね。

大 家 あれは利根川の流域の、昔沼だったところだそうですね。

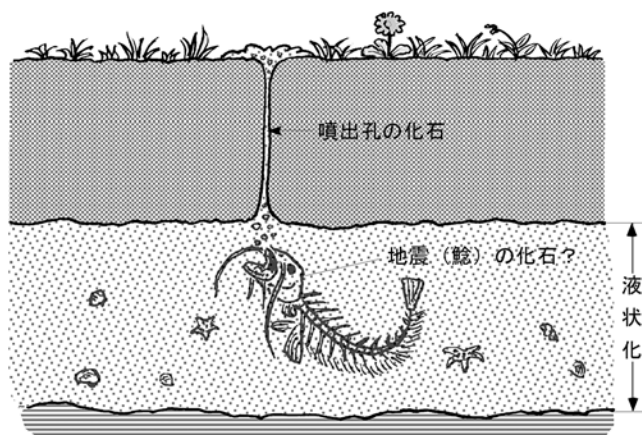
関東平野は大昔海の底になっていたようなところから、ああいう大きな川はしょっちゅう流れが変わって、流域には大体砂質の地盤が広がっていると見ていいですね。しかも150年前は沼だったと言うから余計に軟弱で揺れやすい地盤だったようですね。

与太郎 なるほど、そういうことか。

大 家 その栗橋から少し下流の利根川から江戸川が枝分かれするところに関宿^{せきやど}というところがありますが、そこで江戸時代に液状化が生じた跡と言う地質断面を見学したことがあります。実際、砂質の地層からやや粘土質の地層を通して地表に向かう1メートルから2メートルぐらいのパイピング——液状化した土が通ったパイプのような通りの道のことですが——その跡などもはっきり残っていました。

与太郎 へえー。液状化の化石ってことですね。

大 家 そういうことですね。



図④ 液状化の化石？

液状化は繰り返すか？

与太郎 そう言えば、今度の地震で、横浜の方は液状化の話がなかったですね。

一ぺん液状化するともう液状化しなくなるからかなあ。

大 家 確かに、一度液状化すると間隙水が多かれ少なかれ抜けて、砂はより密に詰まった状態になります。だから、程度の差はあっても、前よりも液状化しにくくなるのは確かでしょうね。砂粒の構成などによってもかなり違うでしょうがね。

与太郎 砂粒の構成っていうと？

大 家 たとえば、白い砂浜の砂のように粒が揃った砂ならば、一回液状化すると次はずっと強い地震が来ないと液状化しにくいでしょうね。

しかし、シルトとか粘土の成分が多く含まれているような砂だと間隙水が搾られにくいからあまり締まらない可能性があります。その場合は何回も液状化を繰り返す可能性があるでしょうね。

与太郎 同じ砂地盤でも古いところは液状化しにくいってこともあるんでしょう？

大 家 例えば江戸時代に造られた埋め立て地が、150年以上も前のことだからもう液状化はしにくだろうなどと思ったら大間違いですね。

地表面に近いと自分の重さだけで締まった地盤になるには気が遠くなるほどの時間が必要です。

地下水で飽和しているとその水も上からの荷重を支えてくれるので、土はなかなか締まらないということもあります。

数十メートルと言った深いところであれば、上の土の重さがあるから1千年1万年というような長い時間が経てば十分締まって、液状化などしない比較的しっかりした地盤になるでしょうがね。

与太郎 そんなに長い時間がかかるんですか？

大 家 土が自分の重さだけで締まって行くのにはずいぶん時間がかかると思いますよ。

その間に大きな地震があつて何回か液状化を経験すれば、かなり締め固められて液状化しにくくなるでしょうがね。

与太郎 ふうーん。そういうことか。なかなか難しいものなんですね。