

街が沈む

—地盤の液状化—

関東学院大学 理工学部 教授

若松 加寿江 *Kazue Wakamatsu*

1. はじめに

東日本大震災から5年経過した。この震災の後も、わが国は土砂災害、火山災害、水害など犠牲者の記録を更新するような自然災害に見舞われてきた。地盤が液状化しても死傷につながることは稀であるが、ひとたび激しい液状化が起こると、地中から地下水が湧き出し、建物は沈み、ライフラインは寸断される。昨日までの快適な生活のすべてが奪われる。斜面や崖地で起こる土砂災害、川沿いの低地や窪地で起こる水害とは異なり、地形から予想しにくいのが液状化現象である。

液状化は古くからの市街地ではなく新興住宅地や工業団地に起こることが多いため、工場などの敷地全体が液状化すると、企業存続の危機にさらされかねない。本稿では液状化被害の実態を紹介すると共に、液状化しやすい地盤の見分け方と対策について解説する。

2. 東日本大震災における液状化被害

東日本大震災の液状化というと、メディアで頻りに紹介された浦安市を思い浮かべる方が多いことと思う。浦安市は市域の85%が1965～1980年にかけて造成された埋立地で、その大部分が液状化した。生活道路では、地中から噴きだした地下水が川のように流れ、約1万棟の住宅が地中に潜り込み、車や自転車をのみ込んだ(図1)。

しかし、液状化対策工法を施工してある一部の地区や、粘土質の土で造成された地区は液状化被害を免れた。

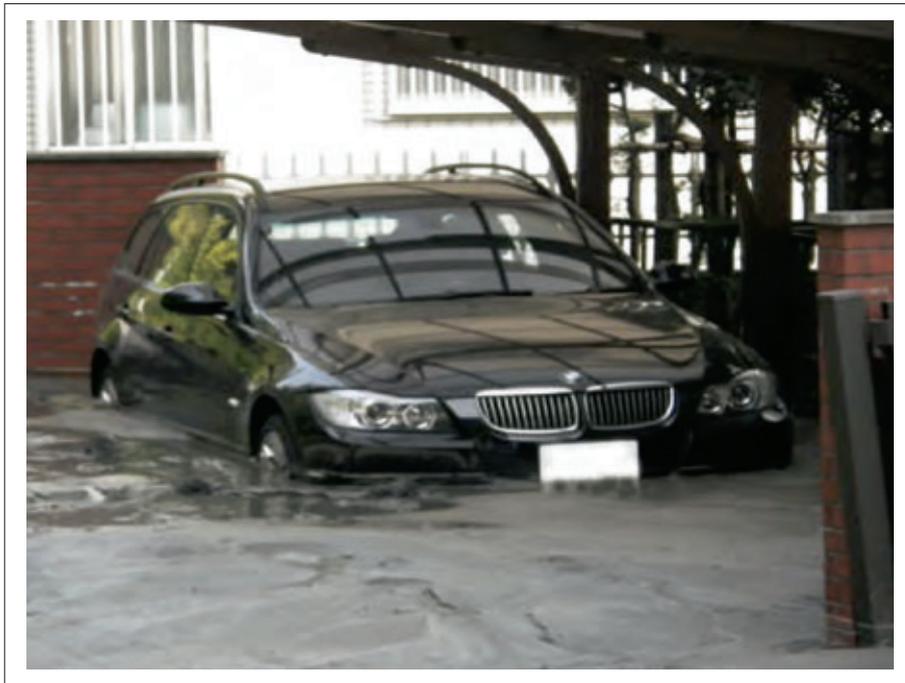
固い地層に打ち込まれた杭で支持されたマンションは被害がなかったが、ライフラインが液状化によって壊滅的被害を受けたため、「水なし、火なし、トイレ・風呂なし」の生活が数週間続いた。電気は震災当日一部が停電したが翌日には復旧した。ガスは19日後、上水道は26日後、下水道は35日後に応急復旧が完了した¹⁾。

被害を受けたのは浦安市など東京湾岸の埋立地だけではない。液状化は東北地方と関東地方の全都県の193の市区町村で発生した(図2)。その範囲は、南北約650 kmに及んでいる。関東地方に液状化地点が多いのは、関東地方がわが国最大の関東平野を擁する地域であり、液状化しやすい地盤が多いためである。図3は、利根川沿岸の稲敷市における液状化の状況である。地震の翌日撮影されたものであるが、洪水と見間違えるほどの水深だ。

3. 液状化は同じ場所で繰返し起こる

液状化現象について関心を寄せていただいたところで、液状化現象が発生するメカニズムを紹介したい。図4は、液状化前後の地中の砂粒の状態を拡大して模式的に表したものである。図の①～④では、土粒子の大きさや

図1 液状化して地中から噴き出した土砂にのみ込まれた自動車¹⁾



数、地盤全体の体積は変わらず、また砂粒の間のすきまは地下水で満たされているとする。

①は砂粒がかみ合って、いわばスクラムを組んだ状態になっており、物を支える力、すなわち支持力を発揮している状態である。地盤は固体となっている。

ところが、②のように地震の揺れなどの力が繰り返し加わると、砂粒の間のスクラムが一時的に外れる。しかし、急激に体積収縮して、より密な構造に移行できないため、③のように地下水の中に砂の粒が浮いた状態になり、地盤は液体となる。こうなると、これまで砂粒にかかっていた土や構造物の重みが地下水に加わり、粒子の間にある地下水の圧力（水圧）が高くなる。水鉄砲と同じ原理で、地上に砂混じりの地下水を噴き出すことになる。

地震の揺れがおさまると、水中に漂っていた砂粒は④のように沈殿して、再び新しい骨格（スクラム）構造が形成され、地盤は固体となり、支持力は回復する。しかし、一度地中に潜り込んだり傾いたりしてしまった建物や工作物が元の状態に戻ることはない。

以上のように液状化現象とは、地震などの

図2 東日本大震災による液状化被害箇所(赤丸)²⁾

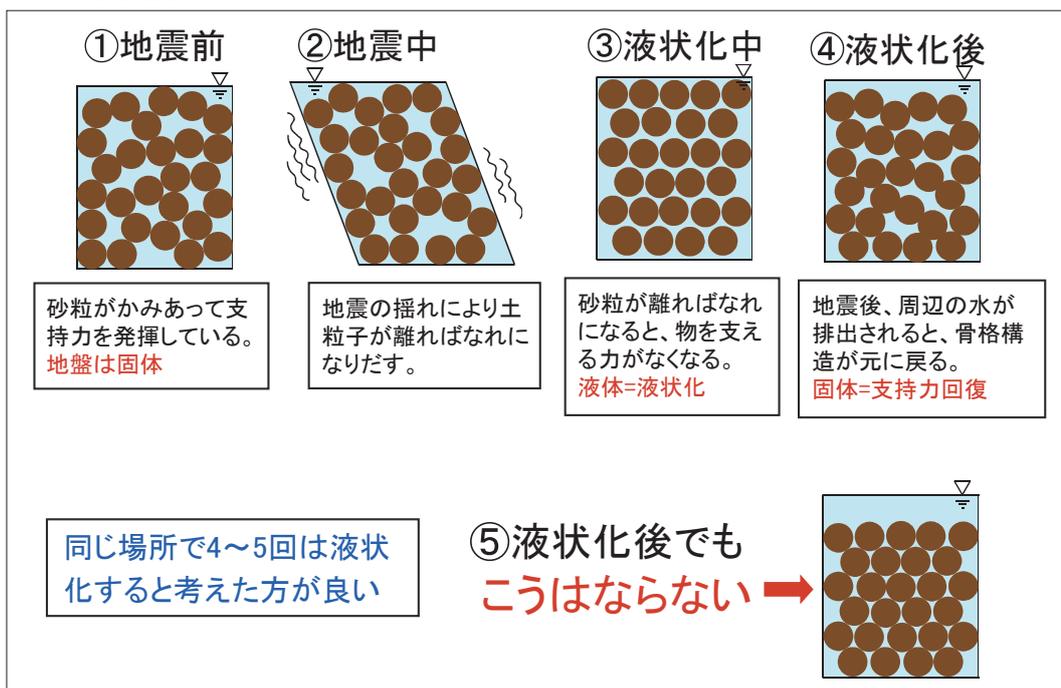


図3 液状化による湧水で冠水した土地



稲敷市より提供

図4 液状化現象のメカニズム



揺れで地盤が一時的に液体のようになり構造物などを支える力がなくなる現象である。

液状化が起こる地盤条件は以下のとおりである。

(1) 地盤

砂を多く含む地盤で緩く堆積して、締め固まっていない地層である。図4①の砂粒の間

の隙間が大きいほど弱い揺れで砂粒の骨格構造が崩れて液状化しやすい。

(2) 地下水の水位

地下水位以下の地層で起こる。つまり地下水位が浅い土地が液状化しやすい。

(3) 地震の強さ

地震動が大きく、地震の揺れが強い場合に起こる。

以上の3つの条件がすべてそろえば地盤は液状化する。ただし、地盤の液状化に対する抵抗力（例えば、上記（1）の混じりけのない緩い砂が厚く堆積している土地や、（2）の地下水の水位が高いなど）が、地震力（3）を上回れば液状化しない。これらの相対的な力関係で決まるため、絶対的な評価はできないが、液状化に対する抵抗力の弱い地盤が液状化し始める揺れの強さの目安は、過去の経験では震度5強である。

ここで注意しなくてはならないのは、液状化後の地盤の状態である。図4の⑤のようになるというイラストをよく見かける。⑤のように砂粒が隙間なく堆積すれば、次に地震が起きても液状化は起こらない。しかし、実際には、図4の①に近いゆるい状態に堆積すると考えられている。厳密には地下の深い所では地震前より少し締め固まる。

従って一度地盤が液状化しても、次に大きな地震が来れば再び液状化する（再液状化）可能性がある。実際、数十年の間に4回繰返し液状化が発生したことが確認されている場所はいくつかある。東日本大震災の時も100箇所以上が再液状化による被害であった。

4. どんな場所が液状化しやすいか

ある敷地に液状化が起こりそうな地層が存在するか否かは以下のような試験を行う。

- ・ボーリング調査
土の種類と堆積状況と地下水位を調べる。
- ・標準貫入試験
地盤の硬さを調べる。
- ・粒度試験
土が液状化しやすい土かを調べる。

以上の試験をして、液状化が起こりうる土（砂がちの土）が存在するか否か、存在する場合は深さや厚さなどを調べる必要がある。

しかし、このような調査は高額な上、土地購入前に行うことはできない。次善の策として、土地選びの段階で以下の（1）～（3）をまず調べるとよい。

(1) 液状化ハザードマップを確認する

液状化ハザードマップは、多くの地方自治体が作成しており、国土交通省のホームページ³⁾で全国のハザードマップを探することができる。

ハザードマップを見る場合の留意点は、ハザードマップで想定している気象庁震度階級の震度や加速度^{※1}を確認することである。例えば、「液状化の危険性が小さい」と表示されていても、想定している揺れを上回る地震が来たときは液状化が起きる可能性がある。ハザードマップは自治体が液状化危険度の地域的傾向をつかみ、また市民の防災意識を啓発することを目的として作成されており、個々の敷地の液状化危険度を必ずしも精度良く評価しているとは限らない。液状化危険度の「目安」として捉えた方がよい。

(2) 過去に液状化の履歴があるか否かを確認する

過去の液状化の履歴は、インターネットで公開されている地域も一部あるが、わが国の西暦745年から2008年までの過去の液状化履歴は、文献4)に網羅されている。DVD版の地図集になっており、インデクスマップがついているので全国の液状化履歴を地図上で容易に確認することができる。前述のように、液状化は繰り返す災害のため、過去に液状化の履歴が多い地域は警戒する必要がある。

※1
加速度
地震動の強さを表す指標の一つで、単位は cm/sec² またはガル (gal)。震度との関係は文献7) 参照。

(3) 地形や土地利用履歴から液状化が 起こりやすい土地か否かを判断 する

地形や土地利用履歴から判断できる液状化が起こりやすい土地は、6項目ある。わが国で過去に起きた液状化発生の事例約16,500地点の分析から得られた土地条件である⁴⁾。東日本大震災の際にも、この条件に該当する場所の被害が特に甚大だった。

- ・若い（新しい）埋立地
- ・旧河道、旧池沼（昔の川筋や池、沼）
- ・大河川の沿岸（とくに氾濫常襲地）
- ・海岸砂丘の裾や砂丘間低地
- ・砂鉄や砂礫を採掘した跡地の埋戻し地盤
- ・丘陵や台地の谷や沢を埋め立てた造成地

上記項目は地盤が人工的に改変された土地、川筋の変動や氾濫によって新しく土砂が堆積した土地、風で運ばれた砂が堆積している土地（砂丘地帯）のうち地下水位が浅い場所である。前章で述べた（1）砂を多く含む地盤で、締め固まっていない地層、（2）地下水位以下の地層（地下水位が浅い土地）の条件を満たす土地ということになる。本稿では、頁数の制約から上記条件の解説は割愛するが、日本建築学会のウェブサイト⁵⁾で筆者が詳しく解説している。

5. 液状化に備える

構造物直下の地盤が液状化すると、固い地層に達する杭で支持されていない建物などは傾き地中に沈み込む（図5）。住宅などが傾くと戸の開け閉めの不具合や隙間風の発生などの障害だけでなく、めまい・吐き気・頭痛などの健康障害を生じることがある。個人差があるが、床の傾斜角が1/100（0.6度）程度に達すると、ほとんどの人に健康障害を生じて建物の水平復元工事を行わざるを得なくなる⁵⁾。被害の程度、建物の規模・構造や地盤条件にもよるが、戸建て住宅の沈下傾斜修復には、200～1,000万円程度の費用と1～6週間程度の工期が必要である⁵⁾。また、沈下修正工法の選定や設計のために地盤調査が必要となる。

建物が杭基礎などで支持されており建物自体には被害がなくても宅地内の地盤が液状化すると、屋外に設置された浄化槽、エアコンの室外機、燃料タンク、給湯器などに被害を受け、使えなくなることがある。また、水道・ガスなどの配管類の屋内への引き込み部分での接合部の破損や、地盤沈下によって下水の排水勾配が変化し下水が流れないなど、様々な障害が起きる可能性がある。

以上のような液状化被害を防止・軽減するための最も有効な方法は、建物直下の地盤の改良である。地盤改良の原理は、前述の「液状化が起きる地盤条件」の（1）と（2）を除去してしまうことである。すなわち、

- ・地盤を締め固める。
- ・地盤に薬液などを注入して固結させる。
- ・地下水位を低下させる。

この3種類の工法がある。実際に対策を行う場合は、専門家と相談して地盤調査を行った上で地盤や敷地条件、施工性、近隣への影響、費用などを考慮して最も適した工法を選

図5 地中に沈み込んだ建物



筆者撮影

ぶ必要がある。

住宅などの小規模建築物の液状化対策を行う場合は、一般的には震度5程度、地表での最大加速度が200 cm/sec²（ガル）程度の揺れを想定して対策が行われる⁶⁾。それ以上の強さの地震に耐えるようにするためには、当然のことながら費用の増加を伴う。いずれの場合も、想定した地震の揺れによって液状化する地層の深さを適切に予測することが重要であり、せっかく地盤改良をしても改良深度が不十分だと対策効果が得られないこともある。

地盤改良をせずに建物の液状化被害を低減する方法としては、杭基礎など建物の基礎を強化する方法がある。しかし、液状化の発生そのものは抑止できないことから「被害低減」対策と考えるべきであろう。

上記の地盤改良も建物の基礎を強化する方法もかなりの費用がかかり、戸建て住宅のような小規模建築物を対象とした液状化対策で安価で万全な方法はないのが現状である。次善の策としては、地震保険に加入する（液状化被害も適用される）、ライフラインが止まった場合に備えて飲料水の備蓄、風呂の水を常時溜めておく、災害用簡易トイレを備える、などの備えが必要になる。災害復旧費のための預金というのも一つの選択肢であろう。

ただし、企業の場合は被災しても重要業務の継続が求められるため、損害を最小限に抑えるための地震対策の一環として地盤や構造物の液状化対策が必要である。

6. おわりに

大きな自然災害に見舞われる度にハード対策の不十分さ、避難勧告の発令の遅れ、ハザードマップの不備など行政側の落ち度が指摘される。その一方で、被災した住民の声として「これまでこんな災害はなかった」「こんな事

が起こるとは思ってもみなかった」など、大部分の住民が災害に対して無防備に近かったことが浮き彫りになる。

近い将来発生することが想定されている南海トラフの巨大地震や首都直下地震をはじめとして、わが国ではいつどこで大きな地震に見舞われても不思議はない状況にある。

東日本大震災の液状化被害を経験して、わが家やわが社の建つ土地が「液状化被害を受けやすい土地だとは知らなかった」という状況は回避したい。本稿が読者の自助の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 浦安市：東日本大震災への対応，第1回浦安市液状化対策技術調査委員会資料1-4，2011。 <http://www.city.urayasu.lg.jp/shisei/johokoukai/shingikai/shichoukoushot-su/1002796/1002934.html>
- 2) 若松加寿江・先名重樹：2011年東北地方太平洋沖地震による東北地方と関東地方の液状化発生地点とその特徴，第14回日本地震工学シンポジウム論文集，2281-2290，2014。
- 3) 国土交通省：ハザードマップポータルサイト <http://disa-portal.gsi.go.jp/>
- 4) 若松加寿江：日本の液状化履歴マップ 745-2008，東京大学出版会，2011。
- 5) 日本建築学会復旧・復興支援WG：液状化被害の基礎知識，2015。 <http://news-sv.aij.or.jp/shien/s2/ekijouka/>
- 6) 国土交通省都市局：宅地の液状化可能性判定に係る技術指針について，2013。 http://www.mlit.go.jp/report/press/toshi06_hh_000009.html
- 7) 気象庁：震度と加速度。 <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/kaisetsu/comp.htm>

わかまつ かずえ

早稲田大学理工学研究科建設工学専攻修了。博士（工学）。東京大学生産技術研究所研究員・国立研究開発法人防災科学技術研究所研究員等を経て、2008年4月より現職。専門は地震地盤工学・都市防災工学。