

東北地方太平洋沖地震の液状化による住宅被害の教訓

—住宅の液状化調査・対策はどうあるべきか—

真島 正人*

* MAJIMA Masato、(株)設計室ソイル 代表取締役社長、博士（工学）・東京都中央区日本橋 3-9-12 第6中央ビル 7F

■はじめに

東北地方太平洋沖地震では、津波被害や原発事故に隠れてやや影の薄い感はあるが、関東地方でも東京湾臨海部の埋立地盤や関東平野の沖積低地で大規模な液状化現象が発生し、人命の喪失は無かったもののライフラインの機能麻痺や戸建て住宅など小規模建築物の不同沈下など甚大な被害を受けた。津波被害の惨状も痛ましいが、救援の手が十分に届かず居住者自身の力で復旧しなければならない住宅の液状化被害も見るに堪えないものがある。

戸建て住宅の分野では、「地震に強い家づくり」の技術が進歩し揺れによる建物被害は大幅に減少している。しかし、液状化被害は一向に減少しない。今回の地震による住宅の液状化被害を顧みながら、将来襲来するであろう関東大地震や東海大地震などに備えて、戸建て住宅の液状化予測や対策はどうあるべきかを考えてみたい。

■液状化のメカニズム

液状化とは地下水位が高く緩い砂地盤が大きな地震力を受けると粒子間の水圧が上昇して液体ようになる現象である。液状化が発生すると地盤は抵抗力を失うため重い建物は沈下し、土より軽い地中構造物は浮き上がってしまう。また、地震が収まった直後には地下に貯まった水圧によって土と水が一体となって地上に吹き上げるため地盤沈下を起こす。（図-1参照）住宅など軽量構造物の被害は地盤が抵抗力を失うより地盤沈下の影響が大きい。液状化の可能性やその程度は、揺れの強さだけでなく揺れている時間（揺れの回数）にも支配される。前者は加速度や震度、後者はマグニチュードを指標としている。液状化が揺れの強さだけでなく回数に依存していることが一種の疲労破壊と言われる所以である。公表された観測データを見ると、今回の地震では揺れの強さに加えその長さが液状化被害を大きくしている。

■液状化に対する設計者の責務

液状化判定のための地震力に関する明確な法的基準はないが、建築基準法を解説した2007年版建築物の構造関係技術基準解説書によれば、液状化判定を行うための地表面加速度は損傷限界レベルで150gal以上、終局限界レベル

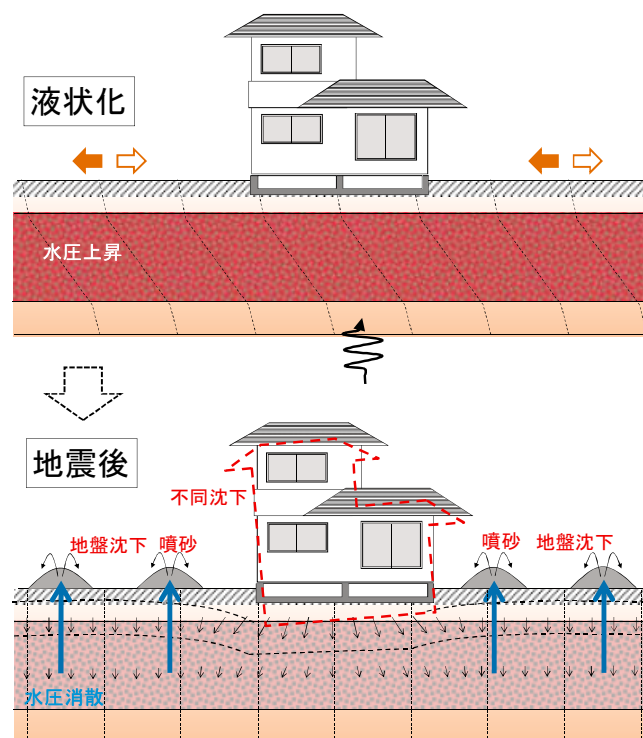


図-1 液状化後の地盤と建物の状態

で350gal以上の2種類を設定している。一方、日本建築学会基礎構造設計指針では、損傷限界用として200gal、終局限界用として350galを推奨し、一般建築物の設計ではマグニチュード $M=7.5$ 、 $a_{max}=200gal$ の地震力に対して液状化を判定し、液状化の可能性がある場合には液状化防止対策や液状化の発生を前提とした基礎補強が、高層ビルや公共性の高い重要建物では、終局限界状態 $M=8.0$ 、 $a_{max}=350gal$ の地震力に対する液状化判定と対策が義務づけられている。

ここで、終局限界状態とは、建物が建設された地域で500年程度の間想定される最大級の地震力に対して建物が破壊または転倒しない（人命が確保される）限界の状態をいい、損傷限界状態とは、建物の供用期間中（50～100年）に1回～数回遭遇する地震力に対して建物に損傷や過大な傾斜を生じない（大規模な補修をしなくても継続使用が可能）限界の状態をいう。

住宅用の液状化判定法 宅地の地盤調査はスウェーデン式サウンディング試験（SWS）が主体であるため、一般建築物を対象として実施されるような標準貫入試験

(SPT)に基づく液状化判定が実施されることは少ない。この点を考慮して、日本建築学会小規模建築物基礎設計指針では、図-2を利用して液状化による地表面の変状が建築物の被害に大きな影響を及ぼすか否かを判定する方法を推奨している。この判定法では一般的な地表面最大加速度200gal程度の地震動を想定すると、表層部に非液状化層が3m以上存在すれば地表面への影響は小さいと判定され、この数値が住宅を設計する際の一つの目安になっている。

住宅業界には「液状化については免責」という風潮があるが、平成13年国交省告示1113号第二項には「液状化のおそれのある地盤では建物に有害な沈下が生じないことを確かめなければならない」と明記されており、地震の規模によっては戸建て住宅だからと言って必ずしも免責とはならない。特に、液状化の検討を行っていない場合には設計責任を問われる可能性もある。

■今回の液状化被害に対する戸建て住宅設計者の瑕疵は存在するか

図-3に文部科学省防災科学研究所から公表された地表面最大加速度分布を示す。この図によれば、茨城県で500gal~1000gal、千葉県東京湾臨海部400gal以上、同県内陸部および東京都臨海部でも200gal~400galの最大加速度が観測されている。マグニチュードや観測された地表面最大加速度から判断して茨城県や千葉県、東京都臨海部では終局限界状態に相当する地震力が発生したとみなすことができる。これらの地域では液状化によって損傷限界を超える障害、例えば、沈下修正など修復が必要なダメージを建物を受けていたとしても、事前に液状化の検討をしていれば法律上は設計責任を問われることはないと判断さ

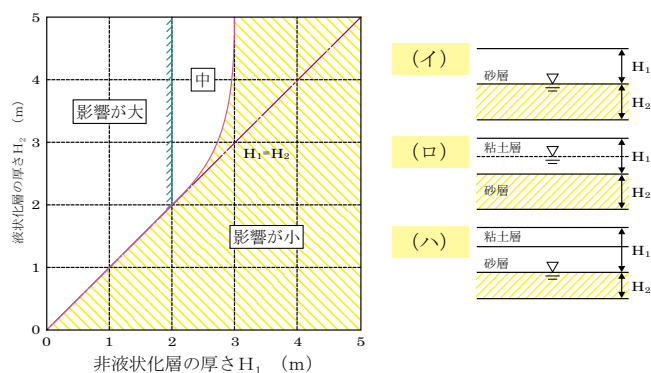


図-2 液状化の影響が地表面に及ぼす程度の判定
(地表面水平加速度値 200cm/s²)

れる。仮に地表面最大加速度が200gal以下の地域で住宅が液状化による被害を受けたとしても、現行の液状化判定で想定しているのはM=7.5~8.0であり、M=9.0は想定外の地震規模である。また、液状化の発生した地域の地盤調査データを見ると、表層部に非液状化層(図-2のH1)が5m程度の厚さで堆積した地盤でも、住宅で不同沈下障害を生じているケースが少なくない。つまり、今回の地震は前記小規模建築物基礎設計指針で推奨されている液状化判定法を適用できない大規模地震であり、現行の液状化判定はこのような巨大で継続時間の長い地震に対応したのではないので、設計者が直ちに責任を問われることはない。ただし、2007年新潟中越沖地震での最大加速度は300gal以上を観測し、地表面付近に非液状化層が3m以上存在した地盤上の建物でも10cm以上の不同沈下が生じ沈下修正を余儀なくされた事例も報告されている。図-2の液状化判定法の基になった東京大学名誉教授・石原博士の論文を見ると、300gal以上の加速度では非液状化層が6m以上存在しなければ住宅ではその影響によって被害を受け

る可能性のあることを示唆している(図-4)。この地震による被害は極一部の地域であったため、住宅を対象とした液状化判定法や対策が見直されることはなかったが、今回生じた広範囲に及ぶ住宅被害を見ると、考え直すべき時が来ているように思われる。

■宅地の液状化危険性を評価するには

液状化の危険性のある程度の精度で予測できなければ、対策の必要性の判断や有効な対策も実施できない。地盤調査としてSPTと粒度試験を実施するに越したことはないが、宅地で最初からこれらの試験を実施する

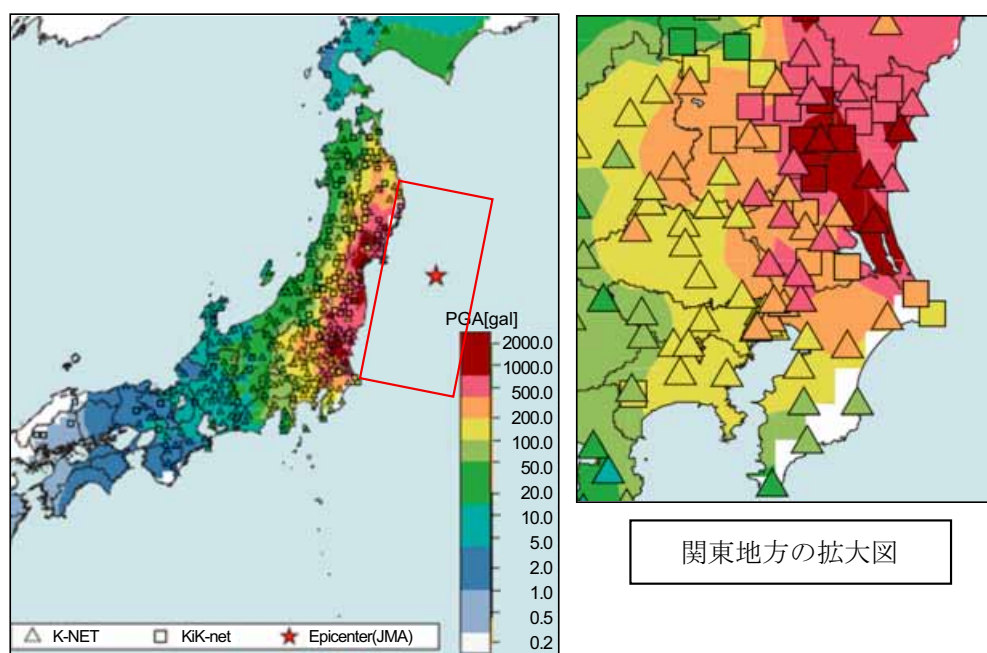


図-3 地表面最大加速度 (公表先: 防災科学研究所)

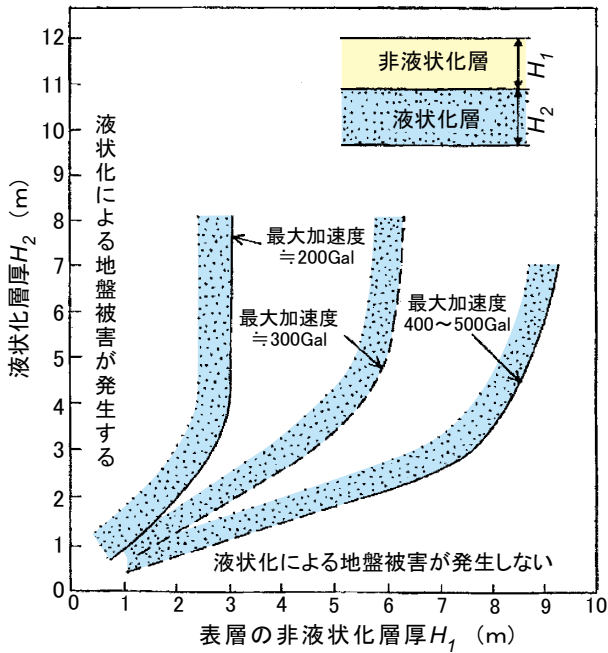


図-4 表層の非液状化層厚および深部の液状化層厚と地表での液状化発生との関係 (石原)

ことは経済的な制約でなかなか難しい。そこでまず、既存の資料と通常実施するSWSに基づいて液状化の可能性を大まかに評価し、これらでは判断できない場合に限り、液状化の判定が可能な地盤調査の実施を推奨する(図-5)。既存の資料とは、地形図、地盤図、近隣ボーリングデータ、液状化履歴図、地方公共団体が発行する地域防災マップなどである。これらのデータと対象敷地のSWSから液状化の可能性を判定し、液状化の可能性のない地域である場合には追加の調査や対策は必要としない。

液状化の可能性を拭いきれない場合には、SPTと粒度試験、または、三成分コーン貫入試験(CPT)などの地盤調査を追加して液状化判定を実施する。CPTであれば連続的にデータが得られ、粒度試験も必要としない。SWSの結果と粒度試験を合わせて液状化判定を行うこともできるが、精度が落ちることに留意する必要がある。

■戸建て住宅に有効な液状化対策は

戸建て住宅では経済性や敷地の制約上、格子状深層混合処理工法や締固め砂杭工法など抜本的な液状化対策が困難なことが多い。図-6は新築予定の戸建て住宅に適用可能な対策を示したものである。

① 基礎からべた基礎への変更：基礎剛性を高めて不同沈下を抑制することを目的とした対策。建物のバランスがよく、かつ、液状化しても地表面への影響小(液状化層が薄い、液状化層が深く厚さまもほぼ均一)と判定されれば、対応できると考えられる。

② 表層地盤改良：液状化層の一部または全体を層状改良することにより、液状化層厚を減少させ、かつ、地盤剛性の向上(不同沈下抑制)を目的とした対策。液状化深さが3m以内、改良厚さが2m以内であれば、対応可能と考え

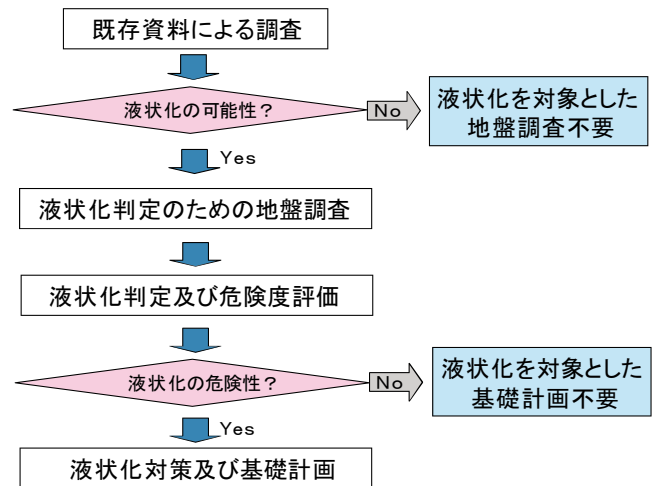


図-5 液状化検討フロー

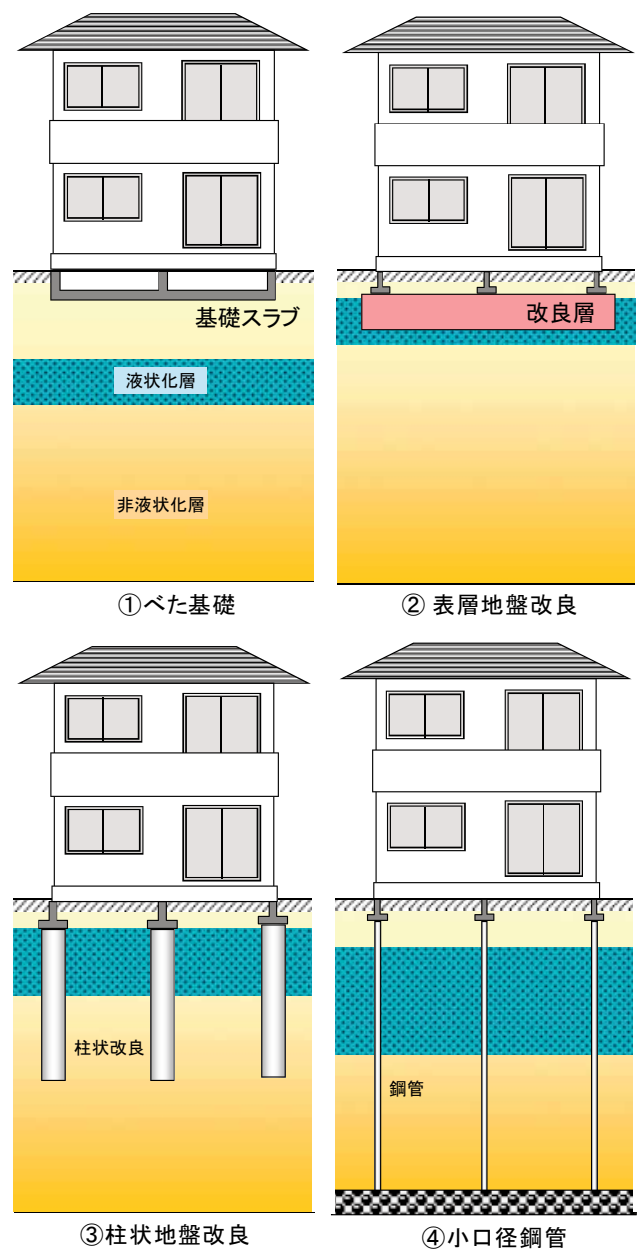


図-6 新築住宅に適用可能な液状化対策

られる。

③ 柱状地盤改良：過去の被災事例や振動台による液状

化実験によれば、建屋の応答加速度は液状化直前が最大となり、液状化後は地盤のエネルギー吸収効果により低下するという報告に基づいた考え方である。つまり、液状化後は建屋から基礎への慣性力が極めて小さいことを前提として、水平力に対する検討は液状化前の水平地盤反力を用いに行い、液状化後は鉛直支持性能のみ確保することを目的としたものである。改良体先端地盤が液状化せず、かつ、液状化層の周面摩擦抵抗を無視しても鉛直支持力を確保できれば、対応できると考えられる。当然、6~8m付近までに液状化しない先端支持が可能な硬質層が存在すれば適用できる。

④ 小口径鋼管・コンクリート杭：柱状改良と同様な考え方で対応するものである。ただし、小口径鋼管材は柱状改良体より極端の細長いので、座屈に対する配慮が必要となる。

一方、既存住宅を対象とした液状化対策となると、建物から敷地境界までの距離が十分に確保することが難しく、これまでに実施されたことは殆どないと言っている。

考えられる方法としては、図-7に示すように、建物外周部をシートパイルや注入固化壁で囲い、その変形抑止効果によって間隙水圧の上昇を抑え、仮に、ある程度水圧が上昇しても建物荷重によって地盤が側方に流動するのを抑制して建物の沈下を低減するものである。ただし、シートパイルを打設するにしても施工機械の作業スペースとして幅3m程度は必要となり、住宅密集地での適用は難しい。地盤注入工法は注入パイプを人力や小型の機械を地盤中に挿入できるので、より現実的な対策方法である。

■液状化によって傾いてしまった住宅の復旧対策は

液状化後には地盤沈下が生じ一見砂層が締め固まったように思える。つまり、緩い砂層が締め固まり今後同程度の地震が発生しても再液状化は発生しないように思える。確かに、砂の間隙に存在する水のみがスムーズに抜ければ砂層は締め固まり再液状化は起こらない。しかし、現実には地盤中で高まった水圧が圧力の低い地表面に向かって猛烈な勢いで移動する。その際、水だけでなく土砂をまき込んで吹きあげるため、地盤はかえって緩められてしまう場合も多い。よって、一度液状化を経験した地盤では深い位置に存在する粘性土分の少ない、いわゆるきれいな砂を除いて再液状化してしまう危険性が高い。また、粘性土分を多く含んだ砂層や液状化層の上部に堆積した粘性土層では一旦上昇した水圧が消散するのに暫く時間が掛かる。つまり、圧密による地盤沈下が終息するまでにある程度の時間が掛かる。既存住宅の下部地盤を今後液状化しないように抜本的な液状化防止対策を施すことは難しいので、①沈下修正を行いつつ液状化しても住宅が被害を受けない、あるいは、②液状化しても軽微な損傷に留め多額の補修費を必要としない、の二つから選択せざるを得ない。

住宅の沈下修正工法には、小口径鋼管を反力とするアン

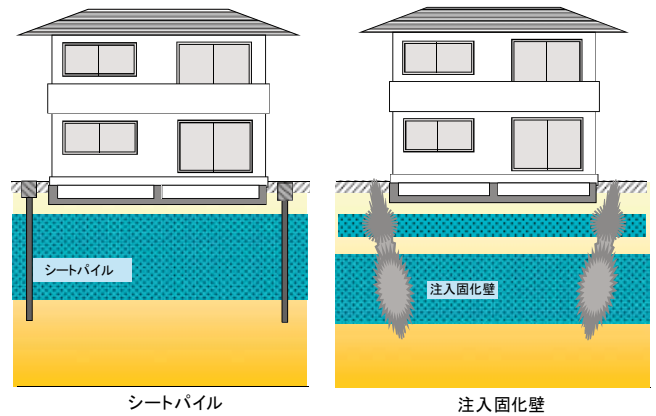


図-7 既存住宅に適用可能な液状化対策

ダーピングやサイドピング、地盤への薬液注入、基礎下地盤を反力とするジャッキアップなどあるが、工事を行う際には下記の点を踏まえて、計画する必要がある。

- ・液状化した砂層はどの深さに存在するのか。
- ・再液状化の可能性のある地盤か。
- ・沈下終息までに暫く時間が掛かる地盤か。
- ・どのような基礎形式か。（布基礎、べた基礎）
- ・敷地の余裕はどの程度か。
- ・不同沈下量はどの程度か。
- ・躯体が損傷を受けているか。

また、居住者の希望として

- ・単に沈下修正すればよいのか。今後液状化しても不同沈下を生じない対策とするか。
- ・沈下修正工事にどの程度のコストを掛けられるか。

■おわりに

戸建て住宅を対象とした液状化予測と対策について述べたが、今回のように極稀に起こる地震により液状化被害が発生したからと言って、それが直ちにビルダーや設計者の責任に結びつくわけではない。肝心な点は、液状化に目を背けたり、表層に3m以上の非液状化層が存在しているからと言って液状化検討を省略するのではなく、どの程度の地震力で液状化の可能性があり被害が予想されるのか、あるいは、対策の必要性があるか否かを居住者に判り易く伝え、居住者との話し合いによって対策の採否や方法を決定することである。今後、この手順を怠れば設計責任を追及されても仕方がない。理論上の最大地震まで液状化被害を防止するか否かは議論すべきところであるが、巨大地震を見据えた対策を居住者が希望するようであれば、当然居住者の負担すべき金額も増えることになる。

最後に今回の地震で被災された方々に謹んでお見舞い申し上げます。