

平成23年7月29日

サムシングホールディングス株式会社

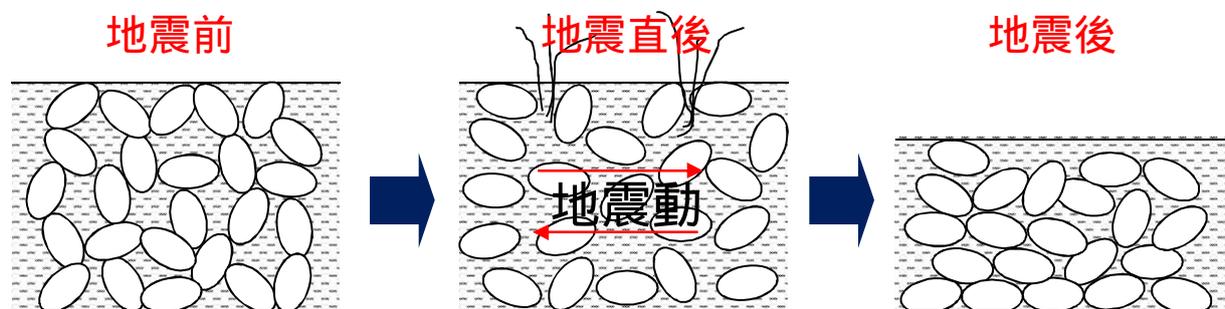
東北太平洋沖地震による液状化被害の状況とメカニズムについて
の見解および、今後の地盤調査・対策工設計に関する当社の方針
をお知らせ致します。

東北太平洋沖地震による四号建築物の液状化被害と今後の方針について

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は、M9という極めて大規模なプレート間地震で、東北地方から関東地方までの沿岸部の津波・液状化被害に加え、内陸部の谷埋め盛土に至るまで大きな被害をもたらしました。

本地震は、三つの地震が連続的に発生したこともあり、振動時間が極めて長くなったことが特徴であり、多くの建築物の被害は建築物そのものではなく、地盤の破壊であった点も特筆されるべき事項です。これらの大規模な地震被害は、我々地盤調査・地盤改良工事会社に対しても多くの反省点を示しました。

本報では、関東地方における被災事例を基に、今回の震災による被害のメカニズムについての見解を示すとともに、今後の地盤調査・対策工設計について当社の方針を示すものです。



技術に関するお問い合わせ

株式会社サムシング

<http://www.s-thing.co.jp/>

03 - 5566 - 0120 0120 - 28 - 3649

本件に関するお問い合わせ

サムシングホールディングス株式会社

<http://www.sthd.co.jp/>

03 - 5566 - 5555 (代表)

2011年東北太平洋沖地震による千葉県浦安市での四号建築物の液状化被害と今後の方針に関する一考察

株式会社サムシング 技術部 神村 真

概要

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は、M9という極めて大規模なプレート間地震で、東北地方から関東地方までの沿岸部の津波・液状化被害に加え、内陸部の谷埋め盛土に至るまで大きな被害をもたらした。本地震は、三つの地震が連続的に発生したこともあり、振動時間が極めて長くなったことが特徴であった。また、多くの建築物の被害は建築物そのものではなく、地盤の破壊であった点も特筆されるべき事項である。これらの大規模な地震被害は、我々地盤調査・地盤改良工事会社に対しても多くの反省点を示した。

本報では、関東地方における被災事例を基に、今回の震災による被害のメカニズムについての著者の見解を示すとともに、今後の地盤調査・対策工設計についての当社の方針を示す。

1. これまでの行政的対応と市場の対応

木造二階建て住宅は四号建築物と総称されるが、この建築物は特例措置が取られており、建築士が設計した場合、建築主事の審査を受ける必要がない。行政上、四号建築物の地盤に関する耐震性を検査できる状態にはないが、我々がそれを確認する必要がないわけではない。特に、調査・地盤改良工事を担当する我々が果たせたいであろう役割は多々あったと考えられる。

ただし、これまで住宅分野を対象とした簡易な液状化対策手法が明確に示されていなかったことも、住宅分野で液状化に対して特別な対策を行ってこなかった原因でもある。液状化対策工の効果の確認は実際に地震が発生しなければ検証することが困難なので、実績のない工法を市場に投入すること自体が困難と言える。

しかし、今回、液状化地域での多くの被害事例を収集できたことで、どの程度の対策を行うことで、被害を低減する事が出来るかが明確になってきた。このため、ここでは、現存する手法による対応と将来的な展望を示していく。

2. 液状化のメカニズムと液状化被害の状況

(1) 液状化のメカニズム

液状化のメカニズムを示す前に、地盤の自重（土圧）に関する基本事項について述べる。

地盤のせん断挙動を説明する上で最も重要な概念のひとつに有効応力という考え方がある。有効応力とは、実際に土粒子間に伝達されている応力のことで、地盤の重さによる圧力から発生している水圧を差し引くことで定義される。

液状化は、地震時の繰返しせん断中に $u(z)$ が増加することで $\sigma'(z)=0$ と到り、土粒子間に荷重が伝達されない状態に陥ることを意味している。

$$\sigma'(z) = \sigma(z) - u(z) = \sigma_t z - u(z) \quad (2-1)$$

ここで、 $\sigma'(z)$: 有効応力 (kN/m²) ; $\sigma(z)$: 全応力 (kN/m²) ; σ_t (kN/m³) : 湿潤単位体積重量 (kN/m³) ; $u(z)$: 間隙水圧 (kN/m²)

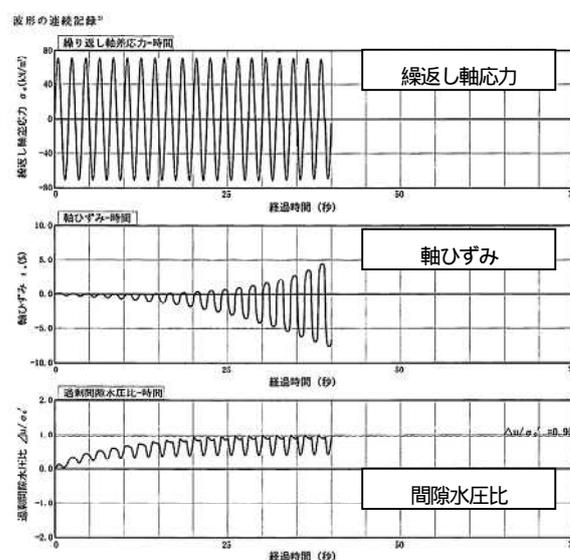


図 1 液状化強度試験結果の一例

図 1 に、繰返し三軸圧縮試験による液状化強度試験結果の一例を示す。ある一定圧力の応力を一定周期で繰返し与えると、間隙水圧が次第に増加し、やがて初期応力とほぼ一致する。同時に軸ひずみが次第に増加し始め、液状化に至る。

地盤には他の物質同様に固有周期があり、固有周期と類似した周期を卓越周期とする地震動が入力されると、地盤は共振するので、比較的小さい力(水平加速度)であっても地盤は液状化する可能性がある。また、地盤の固有周期と地震動の卓越周期にずれがあった場合でも、ある程度以上の大きさの繰返し応力を作用し続ければ、や

がて地盤は液状化する。

(2) 地盤と建築物の固有周期

昭和55年建設省告示1793号には、建築物基礎底部(支持杭を使用する場合は杭先端)直下の地盤の固有周期 T_c を地盤種別毎に定義している。液状化現象が発生しやすい緩い砂層は第三種地盤に相当するので、固有周期は0.8秒程度と判断出来る。また、この表から明らかなように、地盤が軟弱なほど固有周期は長くなる。

表1 地盤の固有周期

名称	内容	固有周期(秒)
第一種地盤	第三紀以前の地層またはこれと同等と認められるもの	0.4
第二種地盤	第一種、三種以外	0.6
第三種地盤	沖積層(盛土・埋立地を含む)	0.8

同告示には建築物の固有周期 T の算出手法も記載されている。木造建築物の本推定式の適用性の議論はあるが、仮に $h=13m$ 、 $\gamma=1$ とすれば、木造二階建て住宅の固有周期 T は0.39秒と推定できる。関東大震災の際には、山手において蔵などの強固な建築物の倒壊が目立ったと言われるが、これは、比較的強固な地盤と建築物の固有周期が類似していることに起因すると考えられる。

なお、加速度応答スペクトルと固有周期の関係は式(2-3-1),(2-3-2)で表わされる。式(2-3-1),(2-3-2)から固有周期が小さくなれば変位量は減少するが、加速度が増加することが分かる。

(3) 地盤と地震動

(2)から、軟弱地盤では地盤の固有周期が増加するので、作用する加速度は小さくなるが、変位量が増加する。一方、比較的強固な地盤の場合、固有周期 T が小さくなるので、変位量は減少するが加速度が増加する。図2に、2011年東北地方太平洋沖地震において千葉県成田市(成田国際空港)(震央からの距離:340km;最大加速度362gal(三成分合成))、千葉県千葉市中央区中央港(震央からの距離:371km;最大加速度168gal(三成分合成))で得られた加速度応答スペクトルをそれぞれ示す(気象庁:強震波形(平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震))。

震央からの距離は両地点ではほぼ等しいが、成田国際空港は洪積台地上に、千葉市中央区中央港は沿岸部の埋立地に位置する。応答スペクトルのピーク値が現れる周期(卓越

周期)は、成田国際空港で0.5秒程度、千葉市中央区中央港で1秒程度と地形と土質によって大きく変化することが分かる。なお、加速度と固有周期の関係は、式(2-2)の関係同様、固有周期が小さくなると加速度が増加する傾向を示している。

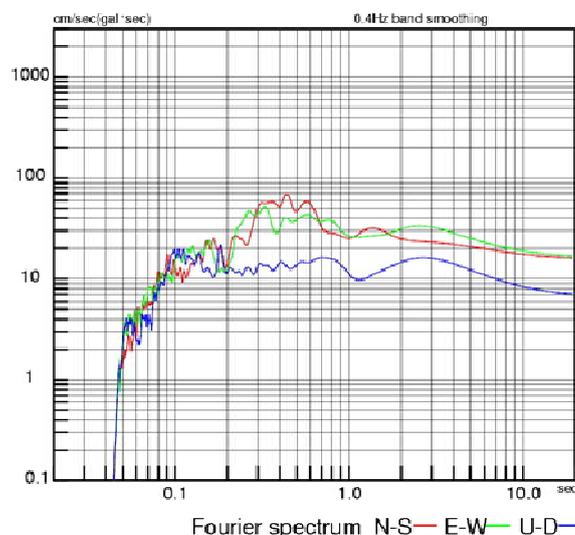
$$T=h \cdot (0.02+0.01 \cdot \gamma) \quad (2-2)$$

ここで、 T :建築物の固有周期(秒); h :建築物の高さ(m); γ :柱およびはりの大部分が木造又は鉄骨造である階(地階を除く)の高さの合計の h に対する比

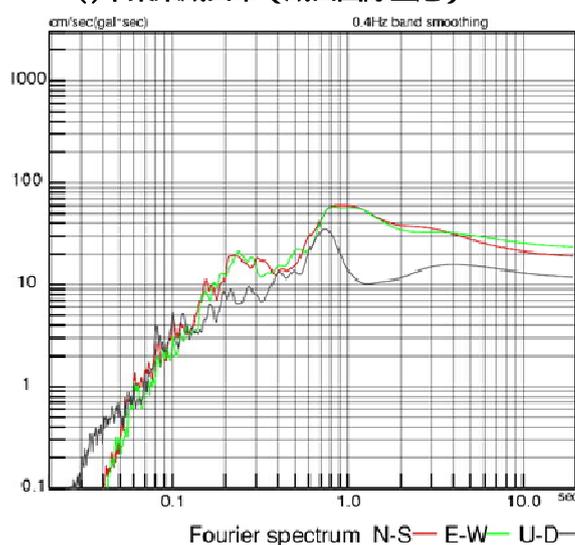
$$y_{\max}=(T/2) \cdot S_{v\max} \quad (2-3-1)$$

$$n \cdot S_{v\max}=2/T \cdot S_{v\max} \quad (2-3-2)$$

ここで、 y_{\max} :変位応答スペクトル; $n \cdot S_{v\max}$:加速度応答スペクトル(m/sec^2); n :円振動数(回); $S_{v\max}$:速度応答スペクトル(m/sec); T :固有周期(秒)



(i)千葉県成田市(成田国際空港)



(ii)千葉県千葉市中央区(中央港)

図2 加速度応答スペクトル(気象庁)

(4) 浦安市での事例

図3に、液状化被害の多かった浦安市富岡2丁目付近でのボーリング柱状図を示す。この図から、GL-7m 付近までN値が2程度の緩い砂質土で、GL-7-14m 付近まではN値が10を超える砂質土、さらにその下位にはN値1程度の粘性土層が厚く堆積している。砂層が上部有楽町層、その下位の粘性土層が下部有楽町層に相当すると考えられる。千葉県地質環境インフォメーションバンク所蔵の柱状図を見ると、沖積地層は、昭和20年代の海岸線付近でGL-20m 付近まで、高洲地区でGL-60m 付近まで達している。2.(2)から、千葉市中央区の埋立地での計測された2011年東北地方太平洋沖地震での加速度応答スペクトルは、周期1秒付近にピークがあり、第三種地盤の固有周期は0.8秒程度とほぼ一致する。このことから、当該地の地震動は地盤と共振したものと考えられる。また、当該地は軟弱地層が厚く、地震動が増幅されたものと推測される。

図4に2011年3月11日に千葉市中央区中央港および2007年7月16日(新潟県中越沖地震)に新潟県出雲崎町でそれぞれ計測された加速度波形を示す。中越沖地震で記録された新潟県出雲崎の地震動は、加速度が500gal

を超える大きな値であるが、地震動の継続時間は10秒程度と短い。

一方、2011年の千葉市中央区の記録は、加速度は100gal程度と小さいものの、地震動の継続時間が3分以上に及んでいることが分かる。なお、2011年千葉市中央港での加速度は合成値でも200gal程度の大きさであるが水平変位量は水平方向のみの合成値で20cm程度であったことが記録されているが、この値は、震源地に近い石巻市泉町の記録(水平方向のみの合成値で13cm程度)を大きく上回る。

図1に示すように、比較的小さな応力の振幅でも、地盤のせん断強度に対して大きな値であれば液状化は発生する。特に、2011年東北地方太平洋沖地震の場合、地震の継続時間が従来の断層型地震に比べて非常に長いことが、大規模な液状化被害に至った原因と考えられる。

なお、場所によって液状化被害が異なった事は、現段階(2011年7月)は明確な理由が報告されていないが、浦安市内のボーリング柱状図を見ると、地下水位以深の埋土層厚や、埋立時期、埋立工事の手法などと関連性があるのではないかとされている。

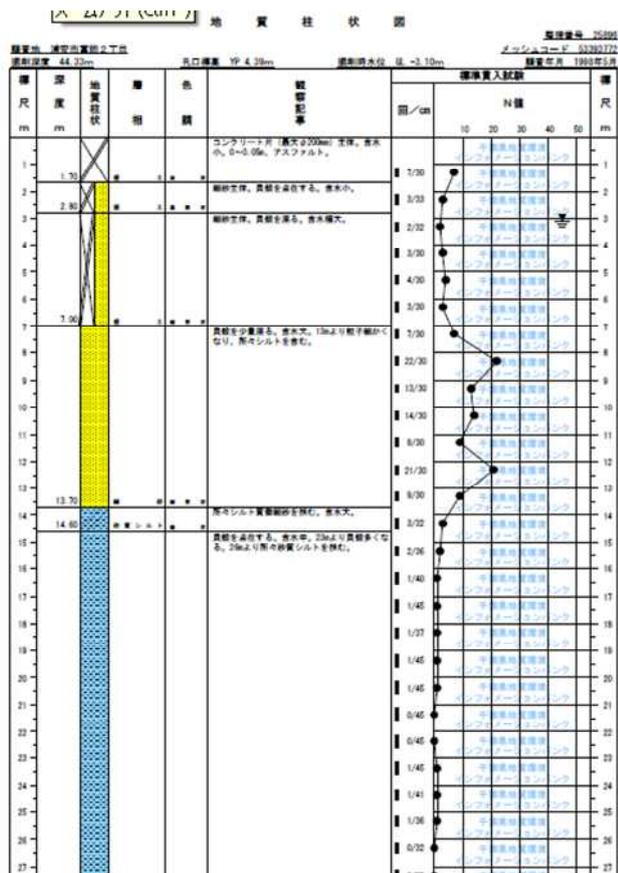


図3 浦安市のボーリング柱状図
(千葉県地質環境インフォメーションバンク)

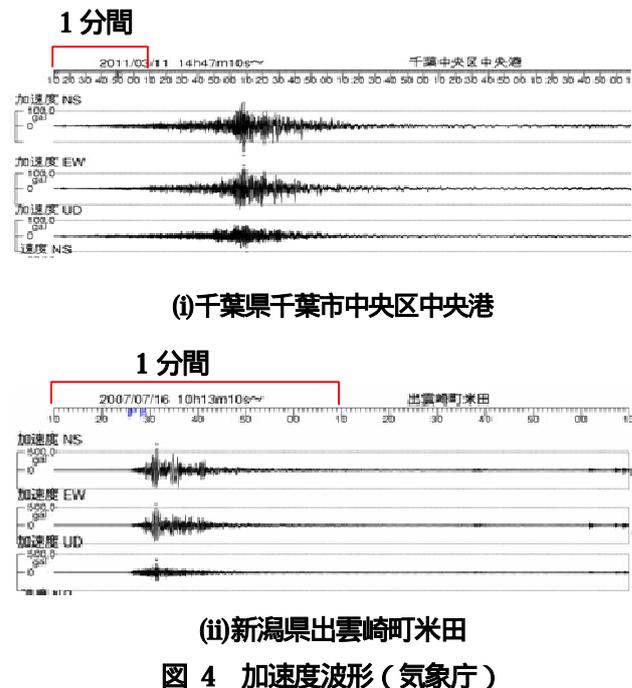


図4 加速度波形(気象庁)

3. 浦安地区での当社データから見る課題

図5に浦安市弁天地区での当社調査データを示す。このデータのみを見れば、住宅地盤としては良好な地盤として判断されるのが一般的な判断だと思われる。当社では、これまで液状化については注意喚起程度の取り扱いとしており、積極的な液状化対策の提案はしてこなかつ

た。一方、図6に当社が調査した、または地盤改良(柱状改良)を行った場合の改良体長と建築物の傾斜角の関係を示す。なお、ここで対象とした建築物は木造二階建ての四号建築物に限る。図6から、当該地では無改良物件(改良長がゼロの物件)が多く、この場合、傾斜角が増加する傾向にあることが分かる。なお、この図で地盤改良を行った物件は、軟弱地盤に起因する不同沈下対策として行われており液状化対策ではない。しかし、軟弱地盤対策であっても改良長が長い(恐らく改良体先端が埋土層下の自然堆積地盤に到達している)場合、傾斜角が小さくなる傾向にあることが分かる。また、図7に、無改良物件での最大傾斜角の頻度分布を示す。図から、5/1,000以下の傾斜角のものも多く見られるが、調査件数(30棟)のうち80%程度は5/1,000を超える傾斜角で、無改良の場合、大きな被害が出る事が分かる。また、無改良物件の傾斜角は15/1,000付近に集中している。表2には罹災証明での住家被害認定基準を示す。表2と図7から、液状化の可能性のある地域で地盤対策を行わなかった場合、大部分が半壊程度の被害になる可能性が高いことが分かる。

このことから、液状化が発生した場合、何の対策もしなければ何らかの不同沈下被害を受けるが、液状化の被害を受けない地層まで改良体が入入されている場合、軟弱地盤に対する不同沈下対策工であっても、液状化による被害を軽減できる可能性があることが分かる。

これらのデータについては、さらに詳細な検討が必要であるが、以下のことを示唆している。

無改良家屋の50%が15/1,000を超える傾斜角となっているが、軟弱地盤対策として地盤改良を行った家屋の傾斜角は10/1,000以下に抑制されており、従来の工法によって何らかの地盤改良を行うことで液状化被害を低減できる。

軟弱地盤対策工として設計した柱状改良体であっても、非液状化層以深に改良体を根入れしたものについては、建築物の傾斜角を5/1,000以下に抑えることが出来る。

無改良でも被害が軽微なものがあり、その原因を調査する必要がある。

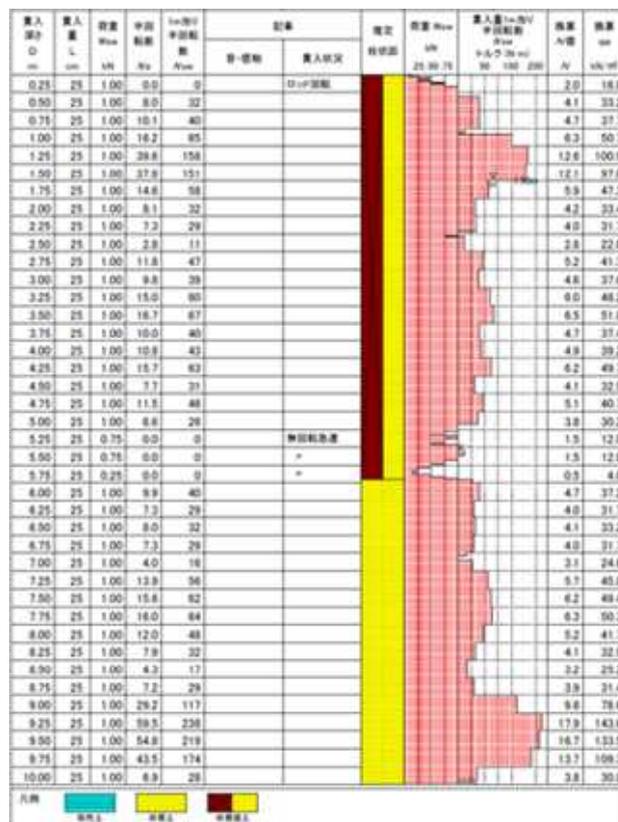


図5 SWS試験結果(株)サムシング

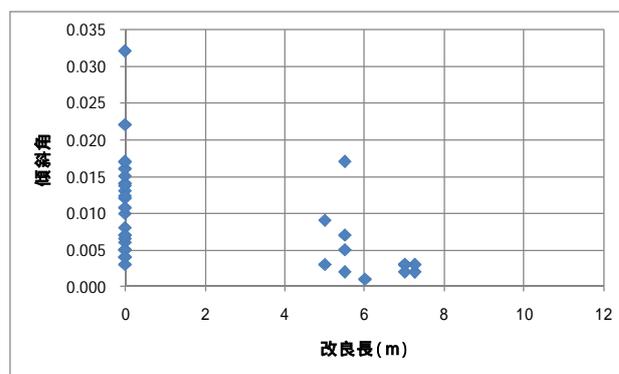


図6 改良長と建築物の最大傾斜角の関係(株)サムシング

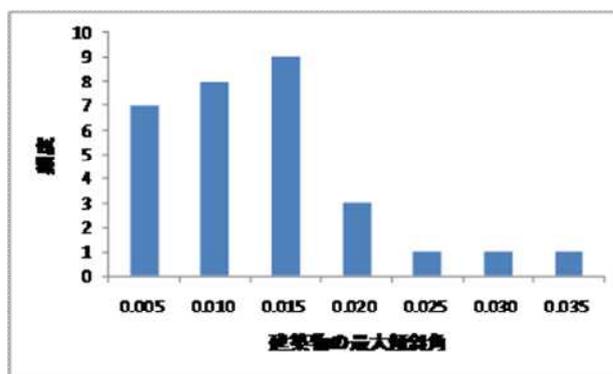


図7 無改良家屋の最大傾斜角の頻度分布(株)サムシング

表 2 罹災証明での住家被害認定基準

傾斜角	住家被害認定基準
50/1,000 以上	全壊
17/1,000 ~ 50/1,000 未満	大規模全壊
10/1,000 ~ 17/1,000 未満	半壊
10/1,000 未満	一部損壊、無被害

4. 今後の方針

(1) 地盤調査

これまで、四号建築物については地震時対策について行政指導がされてこなかった。この点は、国土交通省や千葉県、茨城県の建築指導課が、『平成 13 年国土交通省告示 1113 号は構造設計を伴う建築物を対象とするもので、四号建築物を対象としていない』とした発言からも伺える(日経ホームビルダー6月号 2011年)。当社でも、SWS 試験結果のみでは液状化の可能性を示す程度の評価に留まる事から、注意喚起に留まる内容のみであった。また、一部報告書では、このことも遵守出来ていなかった。これらのことから、今後は、以下のことを徹底する事とする。

行政省庁からの発行物から液状化被害が想定される地域については、日本建築学会提案の簡易な液状化判定を行う事とする。

簡易液状化判定の結果、液状化の影響大と推測された箇所については、原位置から土質試料を採取し、土質確認および細粒分含有率試験の実施を提案する事とする。

で提案した調査を実施する場合、非液状化層がどの地層であるかを明確化する。

地下水の計測に当っては計測時間を明記し、潮位・季節等による変動があることを明示する。なお、地下水水位の変動が予測可能な場合は、液状化判定に当っては、地下水水位の最高位を採用する事とする。

(2) 地盤改良提案

(1) で示したように、四号建築物において検討されてきた地盤のリスクは軟弱地盤に起因する不同沈下のみであった。今後は、液状化の可能性が高い地域については、液状化の発生をある程度考慮した地盤改良仕様の提案を行うとともに、その旨を明示する事とする。なお、設計に際しては以下の点に留意する事とする。

なお、建築基礎構造設計指針(日本建築学会)は、建築物に求める地震時の性能を損傷限界状態(設計したも

のが想定外力によって、修復可能な範囲で被害を受けることを前提としている)としているので、当社における設計条件は、これに基づく事とする。すなわち、想定した地震が発生した場合に、建築物はある程度の損傷を受ける。設計条件・想定する損傷の程度を以下に示す。

液状化発生地域での軟弱地盤対策工

液状化の危険性が高い地域では、改良体先端部は非液状化層に貫入し、根入れを 1m 以上確保する。なお、非液状化層が地盤調査で確認されていない場合は、浦安市での実績に基づき、 $N > 5$ の自然堆積層を非液状化層として扱う。なお、顧客に対しては、液状化発生時の被害の抑制を目的とした仕様を採用しており、液状化対策工ではない旨を明示することとする。

液状化対策工の設計指針

【液状化対策工の定義】設計上想定した範囲内の地震によって液状化が発生した場合に、これによって建築物が著しく傾斜することを防止する工事のことをいう。

【対策工性能の明示】提案する対策工の性能を、顧客に明示すること。

【液状化発生時の許容傾斜角】特に指定のない場合、液状化発生時の許容傾斜角は、罹災証明の発行基準において半壊となる基準(傾斜角 10/1,000 を超える)に準じる。ただし、傾斜とは、健全な状態を維持した基礎の傾斜とする。

【設計条件】指定のない場合、検討する地震の規模は 7.5M、加速度 200gal とする。地震規模についてはこれまでの基準に準拠し、加速度については 2011 年東北地方太平洋沖地震の際に東京湾岸部で計測された加速度に基づき定義した値である。

杭状地盤補強工法による液状化対策工

杭状地盤補強による液状化対策工を提案する場合、以下の点を考慮する。

- ・液状化発生による補強体周辺地盤の水平地盤反力係数の低減を行う。
- ・曲げ強度が不足する場合で、設計基準強度 F_c の調整で対応できる場合は、配合試験を計画提案する。
- ・ F_c での対応が困難(F_c 700kN/m²程度)な場合は、主要な改良体配置箇所(建築物隅角部や分担荷重の大きい箇所)で改良体を 4 本ラップ配置する等、断面積の増加で対応する。

・杭状地盤補強を採用する場合、液状化の発生によって未補強箇所の沈下や配管の破損等が発生する可能性があることを明示することとする。

【補足】

(1) 地震に対する安全性

地震がいつ発生し、どの程度の規模の地震になるかは誰にも分からない。全ての建築物をM9クラスで数分間揺れ続ける地震を想定しては、建築物の建設コストが増加し、投資活動が停滞する可能性がある。

建築基準法では、中地震時(震度5強程度)については修復できる程度の被害に留め、大地震(震度6強程度)時においては、死者が出ないように倒壊を防止するように配慮することを目指している。

我々地盤を専門とする者は、この点を理解し、過剰な安全性を追求することなく合理的な設計条件の設定に努めなければならない。

(2) 地盤条件を考慮した加速度設定

液状化検討の際に検討加速度を高く設定する傾向があるが、この加速度についても、地形を考慮した設定を心がけなければならない。

図8に、周期、加速度および震度の関係を示す。この図から、同一震度に対する固有周期と加速度は、下に凸な関係となることが分かる。このことは、同じ震度でも、様々な加速度と周期の組み合わせがあることを示しており、地盤物性を考慮することなく設計条件(加速度)を決定することの無意味さを理解することができる。

例えば、洪積台地を削った谷を埋立てた造成地等では、大きな加速度が入力される可能性があるが、沿岸部のように軟弱層が厚く堆積しているような箇所では、高加速度となる可能性は低い。(2011年3月11日に千葉県成田市中台付近の谷埋め盛土の造成地で計測された加速度は260galを超える値を示しているが、沿岸部での加速度は150~200gal程度であった。)

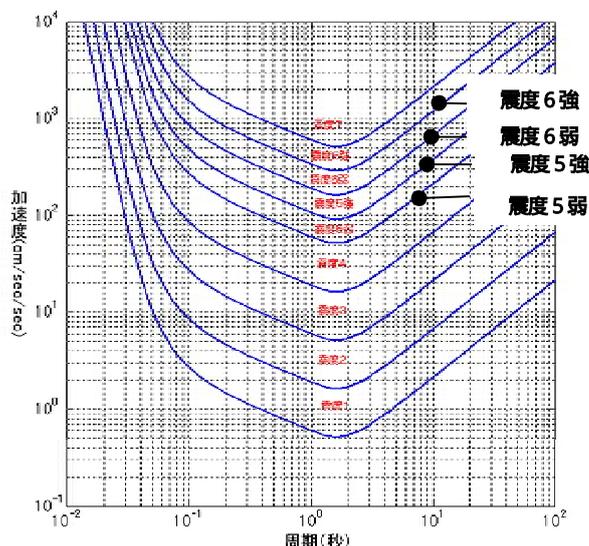


図8 加速度と固有周期および震度の関係(気象庁)

<参考文献等>

- 1) 気象庁ホームページ
- 2) 独立行政法人防災科学研究所 K-net
- 3) 千葉県地質環境インフォメーションバンク
- 4) 小坪清真:土木振動学,東北出版
- 5) 大西資生:最新耐震工学第3版,森北出版
- 6) 日経ホームビルダー,6月号,p15,2011年

(2011.7.19)