

東日本大震災における 東京湾岸の液状化の特徴

1. 東北と関東における液状化発生箇所の概要
2. 東京湾岸の液状化発生と地盤の概況
3. 浦安における液状化発生と被害の特徴

東京電機大学理工学部 安田進

1. 東北と関東における液状化発生箇所の概要

東北地方の液状化地点



黄点: 吉田, 風間, 仙頭による
赤点: 安田による

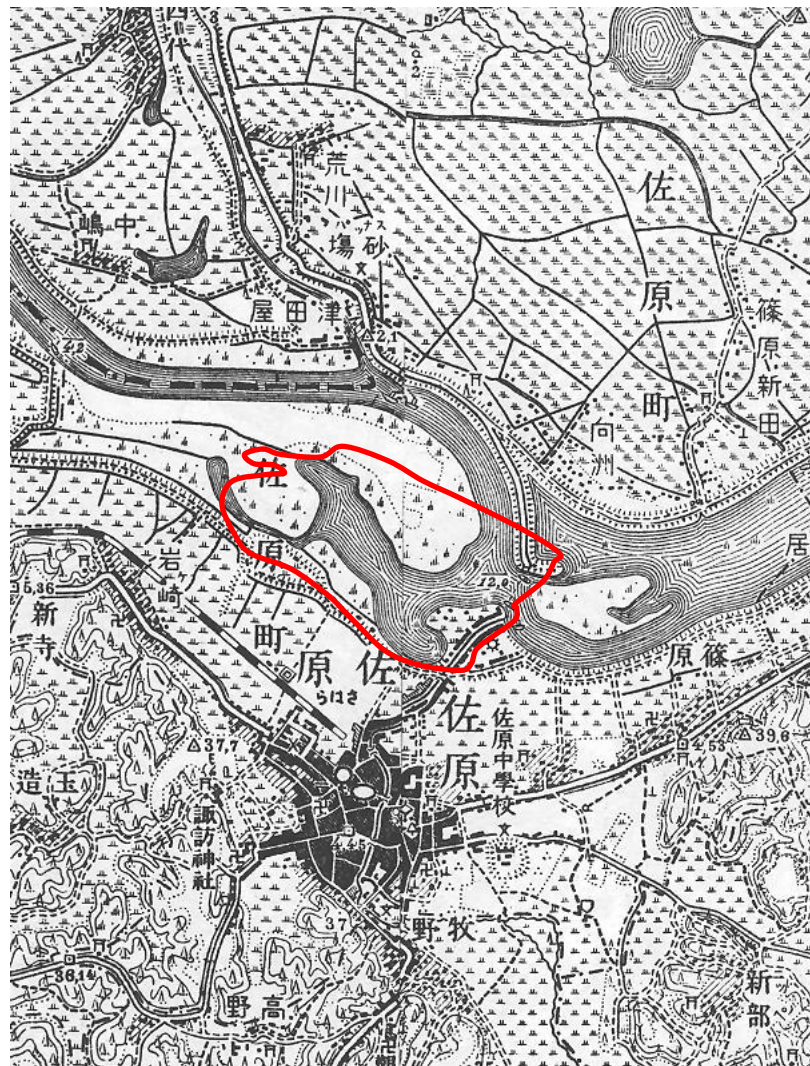
分類	主に発生した地区
海岸の埋立地	東京湾岸, 太平洋岸
平野の川, 池などの埋立地	関東や東北の河川沿い
丘陵の造成宅地における池などの盛土地	宮城・福島・茨城県内の造成地
河川堤防の基礎地盤や堤体	関東や東北の河川堤防
埋設管の埋戻し土	福島県など
砂鉄を採取するために掘削し埋め戻した土	旭市

関東地方の液状化地点

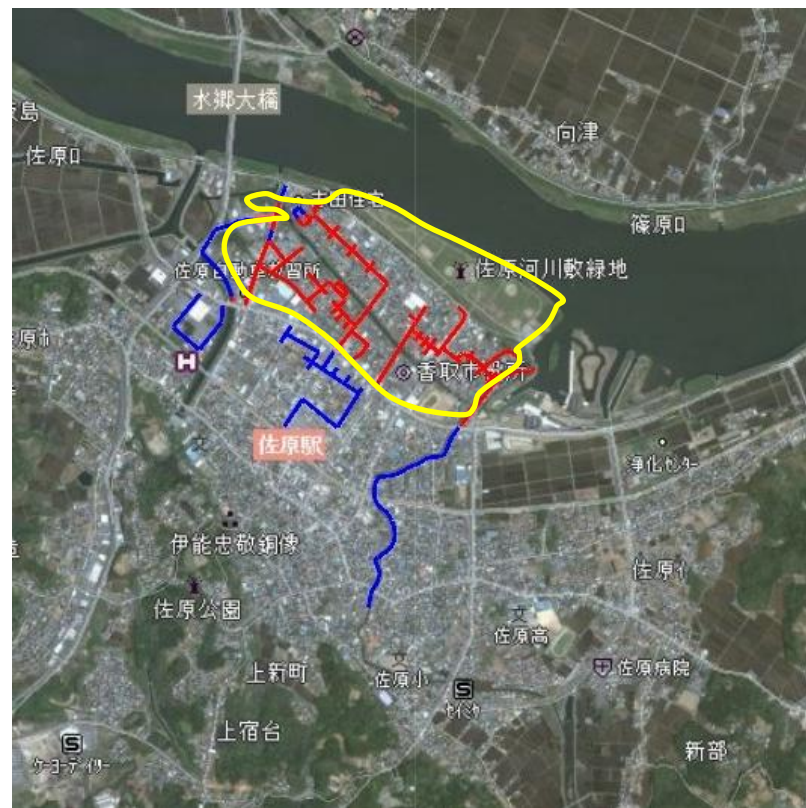


国土交通省関東地方整備局のホームページより(関東地方整備局から地盤工学会に調査を依頼されて作成したもの)





明治39年測



	総数	液状化による被災数(暫定値)
全壊	199	43
大規模半壊	1003	802
半壊	1067	717
一部損壊	2556	997
その他	373	なし
合計	5198	2559

関東地方の河川堤防の被害

(1) 被災939箇所(9月13日現在)のうち

- ・亀裂・陥没がHWL以深の大規模被災: 55箇所
- ・中規模被災: 149箇所
- ・軽微な被災: 735箇所

(2) 大規模被災55箇所のうち, 51箇所が液状化

(3) 液状化による51箇所のうち

- ・基礎地盤の液状化: 7割
- ・堤体の液状化: 1割
- ・基礎地盤・堤体の複合: 2割

(4) 空洞が予想された構造物621施設のうち, 126箇所にグラウトなど復旧補修



江戸川右岸57.8km付近(西関宿)



利根川右岸39.00km



小貝川右岸31.7km



東北地方の液状化

液状化発生地点

- ・海岸，港湾
- ・河川沿い，河川堤防
- ・仙台空港
- ・丘陵の造成地
- ・下水道の埋戻し土

液状化した箇所に津波が襲った被害も発生

- ・女川
- ・閑上



湿地盛土地の液状化





2. 東京湾岸の液状化発生と地盤の概況



注:

1. この範囲内にも地盤改良を施したりしていて、液状化していない区域も含まれる。
2. 震央から最も遠い液状化地点: 南房総市池之内, $\Delta=440\text{km}$ (距離は若松による)

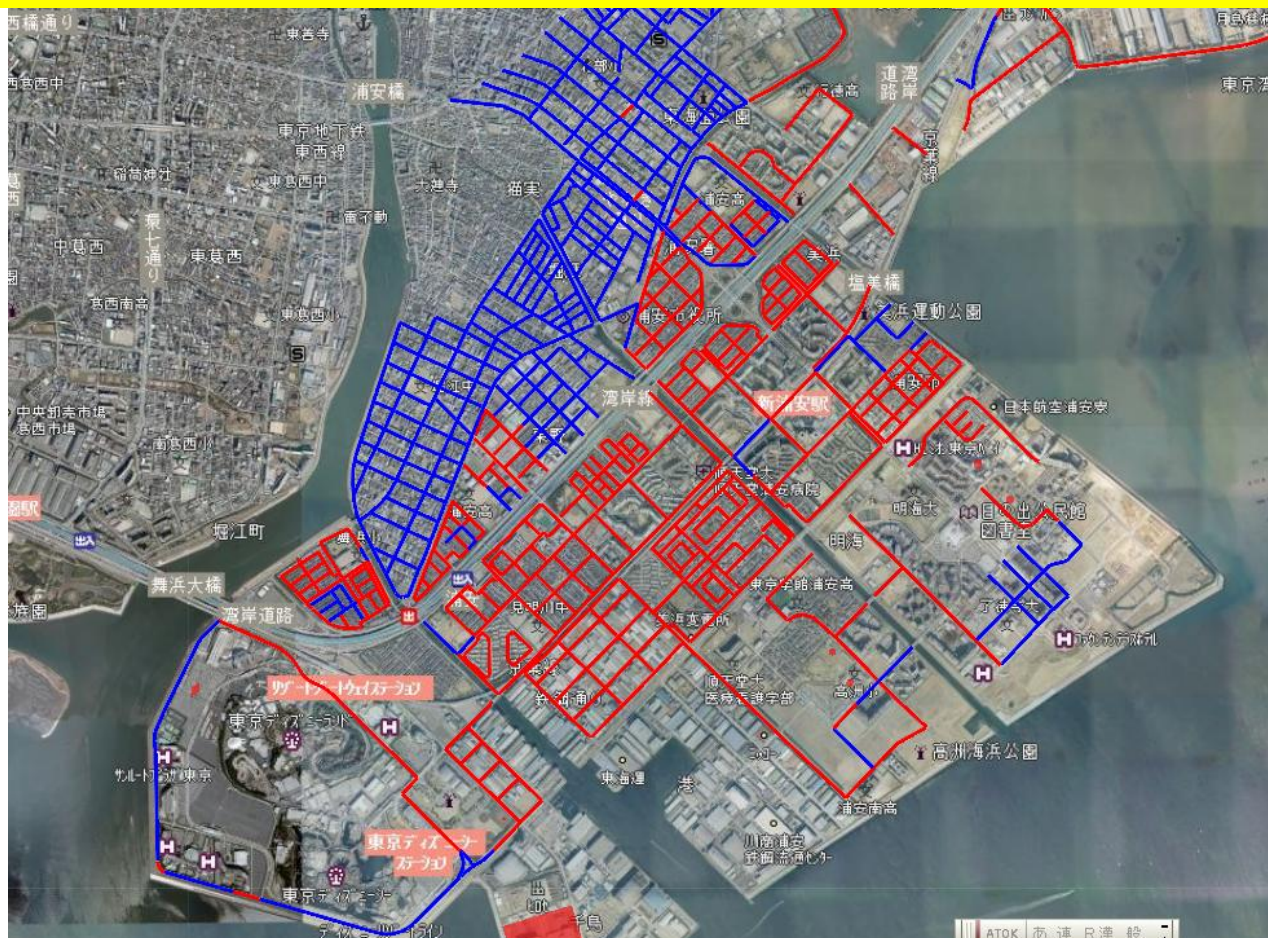
筆者達の調査期間:3月12日～23日, 調査方法:徒歩や車による
液状化の判断方法:

赤の実線:道路や脇に噴砂があり明らかに液状化している

赤の破線:道路や脇に噴砂らしきものがあり液状化していると思われる

青の実線:道路や脇に噴砂が見あたらない

今回の調査の問題: ・範囲が大変広がった。 ・住宅地での噴砂の片付けはすごく早かった。 ・地震翌日は交通大渋滞。 ・地震3日目あたりからガソリン不足。 ・電車は東電の計画停電のため不通。



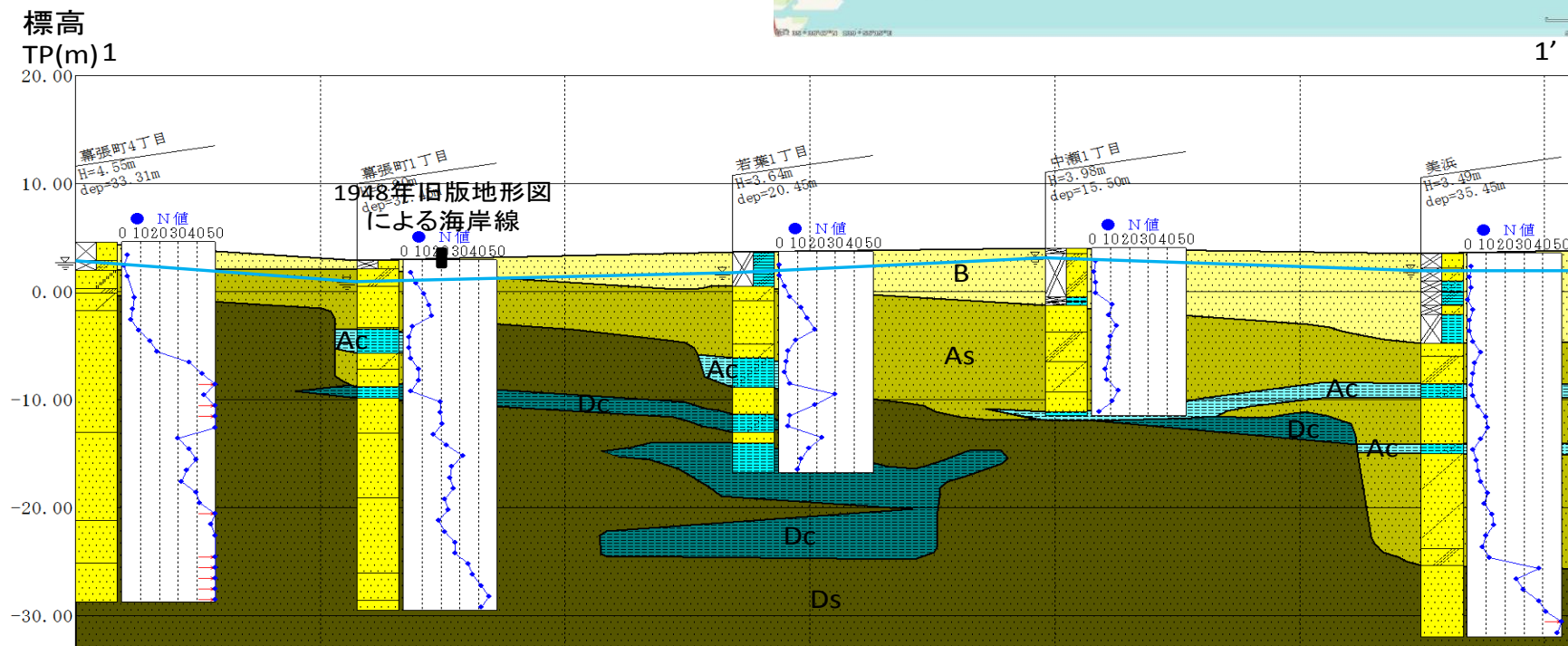
標高
TP(m) 1



習志野1-1'想定土層断面図



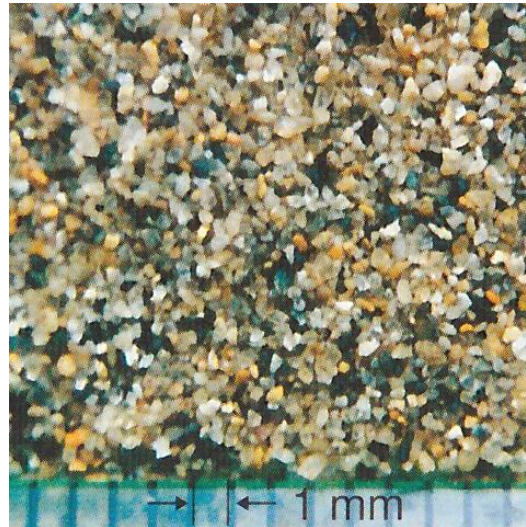
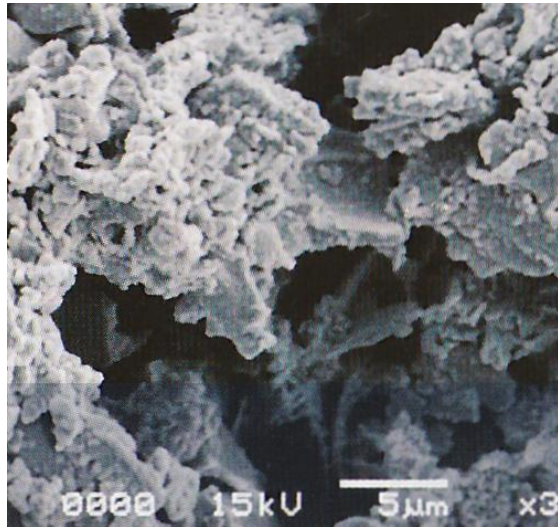
ボーリングデータは千葉県地質環境イン
フォメーションバンクによる。断面図描画
ソフトは中央開発(株)のものを使用。



噴砂あり

千葉市美浜区2-2'想定土層断面図

土の粒径による分類



細粒分		粗粒分						石分	
粘土	シルト	砂			礫			石	
		細砂	中砂	粗砂	細礫	中礫	粗礫	粗石	巨石

粒径 [mm]	0.005	0.075	0.25	0.85	2	4.75	19	75	300
	(5μm)	(75μm)							



標準貫入試験

N値 : 63.5kgのハンマーを
76cmの高さから落下させ、
30cm貫入するために要し
た打撃回数

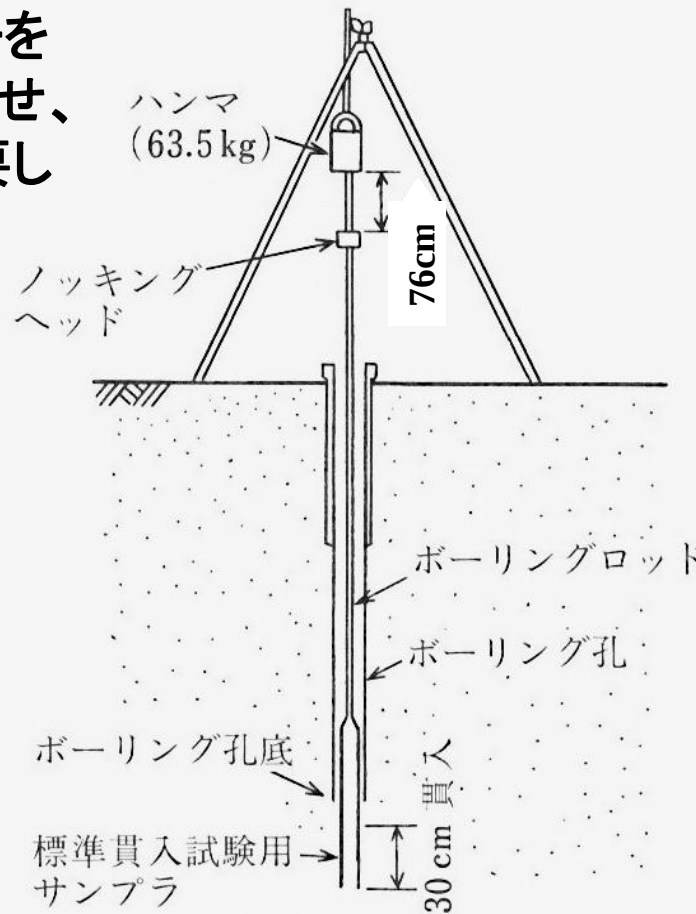
液状化簡易判定でN値
を用いる理由

液状化し易い土の3つ
の条件が判断できる

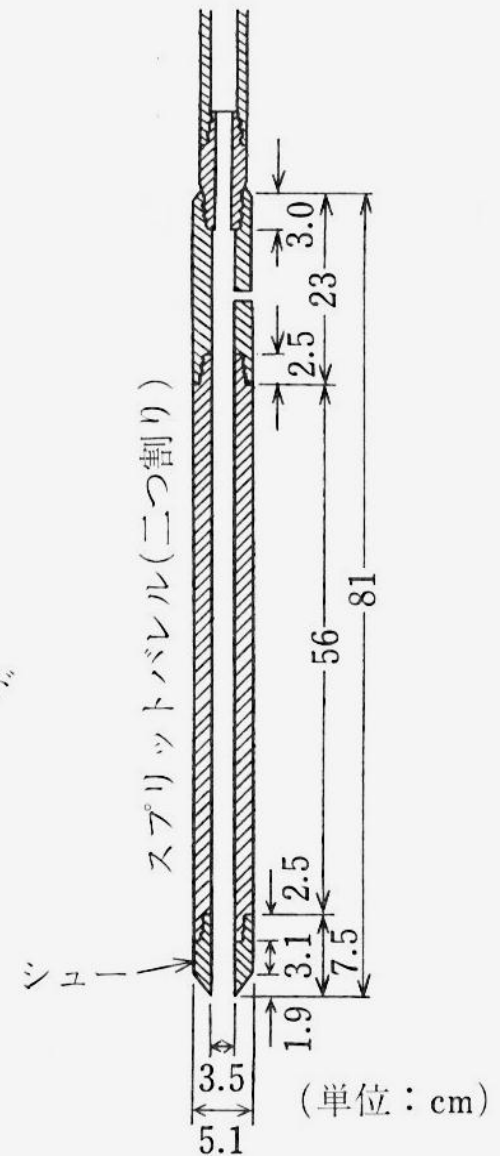
①砂質土：標準貫入
試験用サンプラーで
採取した土の粒度試
験より

②緩く堆積：N値より

③地下水位が浅い：
ボーリング



(a) 試験方法



(b) 標準貫入試験用
サンプラ

浦安の土質特性

(注;この表に示す数値は平均値であり、地点によりかなりばらついている)

調査時点	項目	盛土	浚渫土	沖積砂質土
地震前	N_1 値	8.5	5.5	12.9
	細粒分含有率 (%)	30.9	43.8	30.9
	粘土分含有率 (%)	17.0	13.4	8.7
地震後	N_1 値	16.5	6.1	10.7
	細粒分含有率 (%)	34.0	45.0	30.9
	粘土分含有率 (%)	10.7	15.4	8.0

浦安市:浦安市液状化対策技術検討調査委員会第3回委員会
資料(<http://www.city.urayasu.chiba.jp/menu11324.html>)をもとに作成

3. 浦安における液状化発生と被害の特徴

(1) 液状化発生および地盤の変状の特徴

- ① 浦安の震度は5強と揺れの振幅はあまり大きな値ではなかったが、広い範囲で激しい液状化が生じた。なお、継続時間は長く、また、29分後に大きな余震が襲った。
- ② 多量の噴水・噴砂が発生した。
- ③ 広域にわたって地盤が沈下し、支持層まで打設してある杭の抜け上がりが多く発生した
- ④ 幹線道路の歩道や生活道路などでは盛り上がりや迫上がりが各地で発生した。ただし幹線道路自体はほとんど無被害であった。

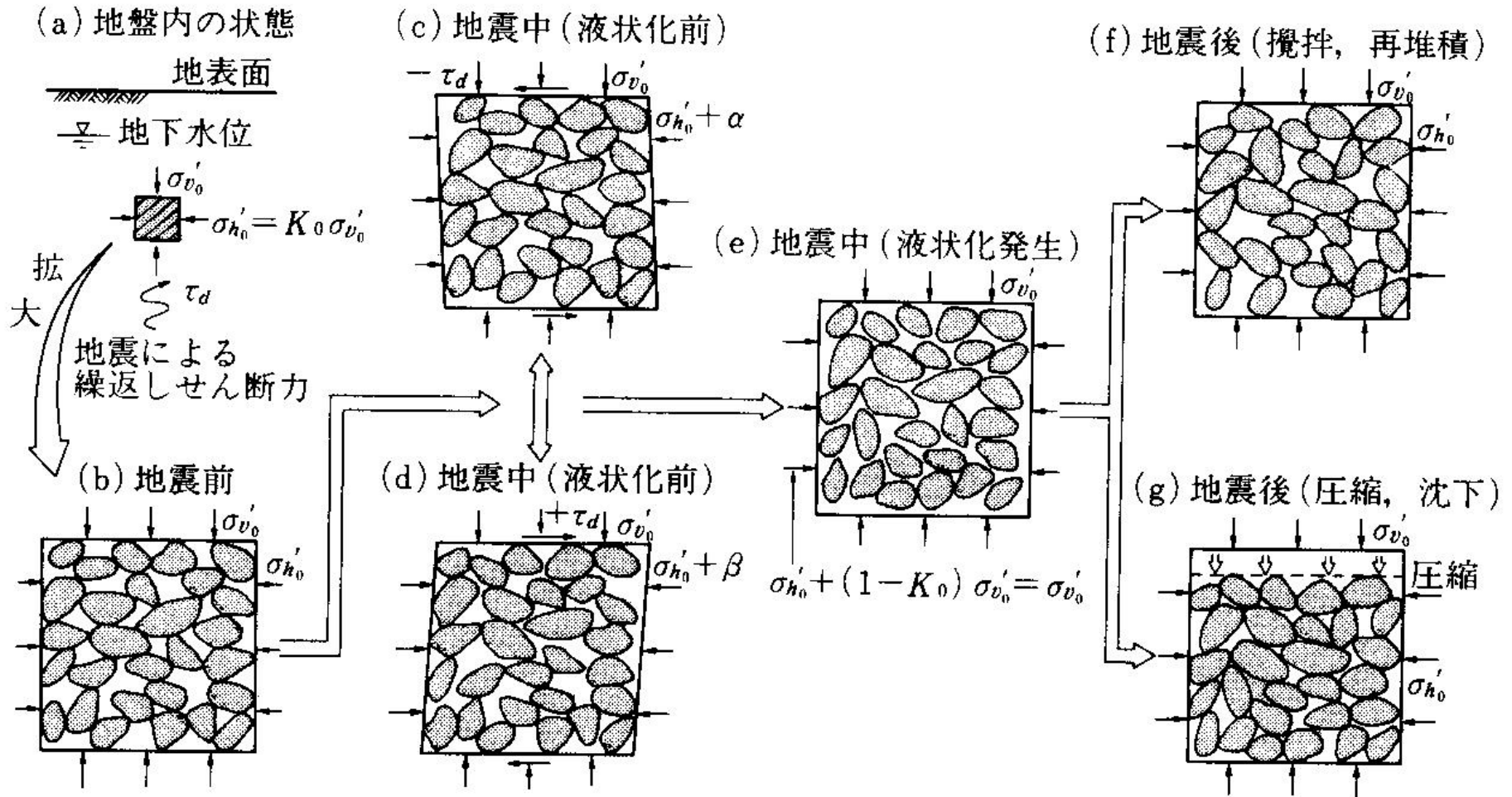


(2) 液状化による構造物の被害の特徴

- ⑤ 数多くの戸建て住宅が大きく沈下・傾斜した。
- ⑥ 杭で支えられている中・高層アパートや高架橋，橋梁などの大型構造物はほとんど無被害だった。ただし，建物自体に被害がなかったといえども，周囲の地盤は沈下したため大きな段差が発生し，また，埋設管が被害を受けた。したがって，住民の方々は不便な生活を余儀なくされた。
- ⑦ 下水道管，ガス導管，水道管など埋設管が多く被災した。一般埋設部に加えて宅地内への取り付け管も被災した。
- ⑧ 電柱は各地で大きく沈下・傾斜し，電線が垂れ下がって通行の妨げになる所も発生した。
- ⑨ 護岸はあまり孕み出さなかった。



液状化が発生するメカニズムの模式図



液状化が発生し易い地盤と地震動の条件

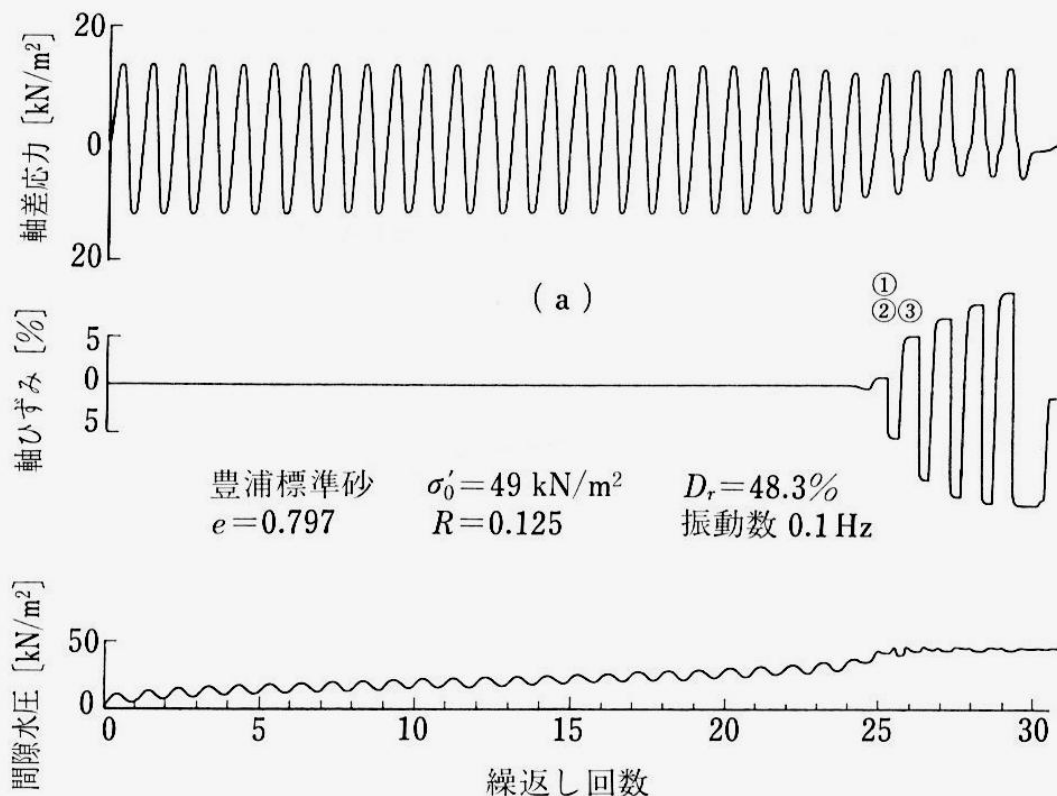
地盤の条件：①砂質土が、②緩く堆積し、③地下水が浅い地盤（地下水位以下しか液状化しない）

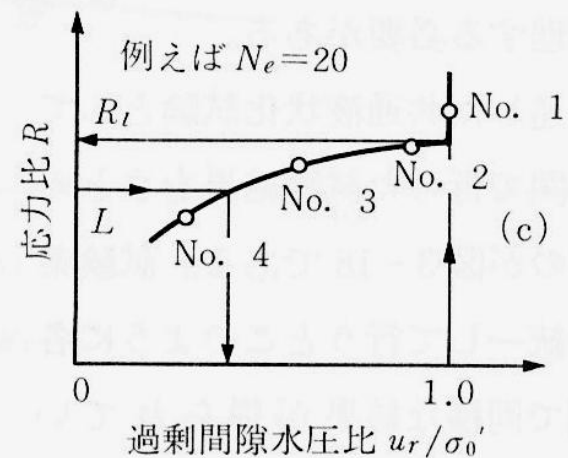
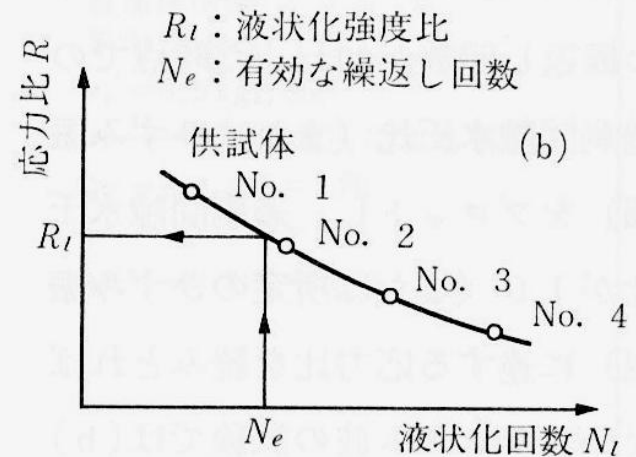
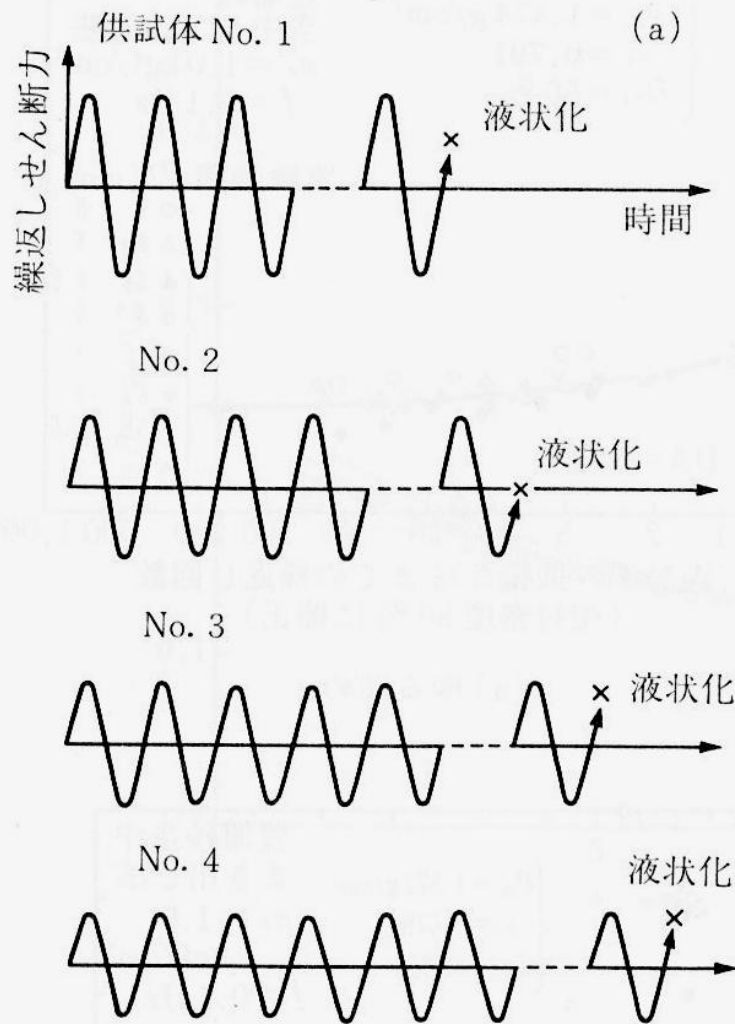
地震動の条件：地震動が大（気象庁震度階で5弱程度以上）

ある深さの土の液状化強度を試験する方法

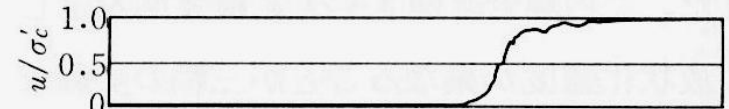
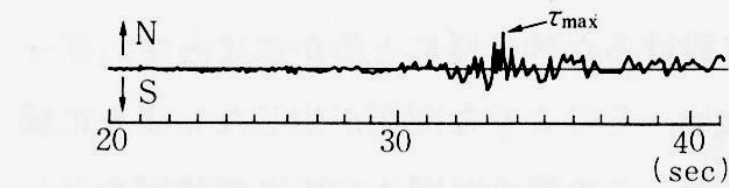
① サンプラーを用いた不攪乱試料採取

② 室内液状化試験(繰り返し三軸試験や繰り返しねじりせん断試験にて)

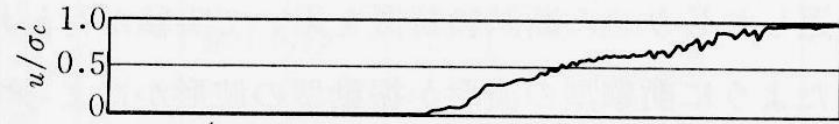
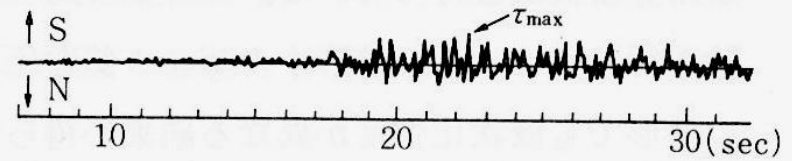
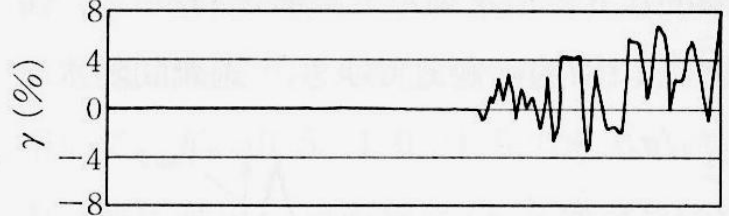




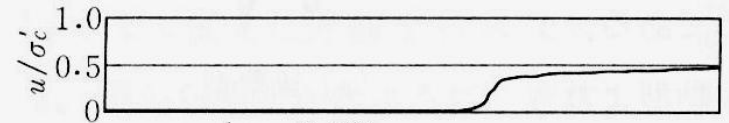
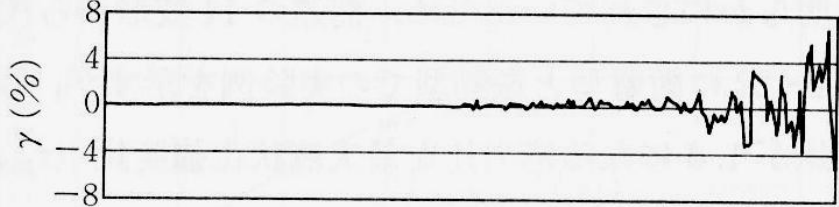
繰返しせん断力の振幅が小さくても、多くの回数の繰返しせん断力を与えると液状化する。



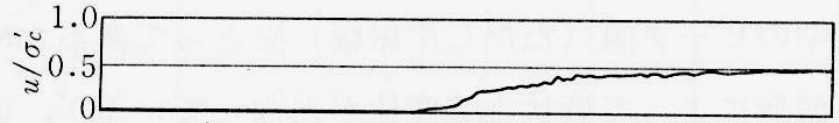
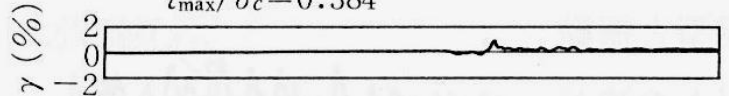
$$\tau_{max}/\sigma_c = 0.479$$



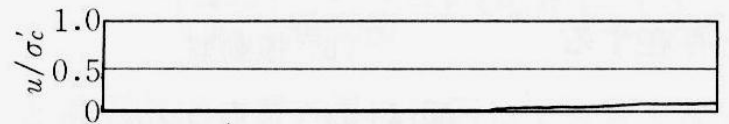
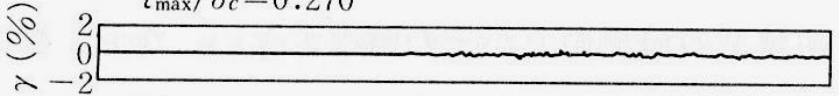
$$\tau_{max}/\sigma_c = 0.289$$



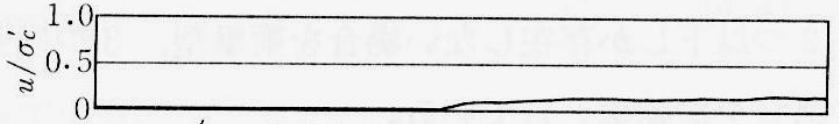
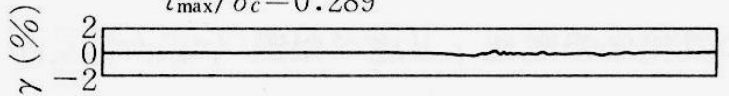
$$\tau_{max}/\sigma_c = 0.384$$



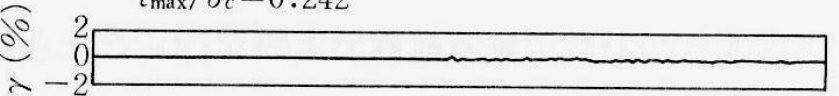
$$\tau_{max}/\sigma_c = 0.270$$



$$\tau_{max}/\sigma_c = 0.289$$



$$\tau_{max}/\sigma_c = 0.242$$

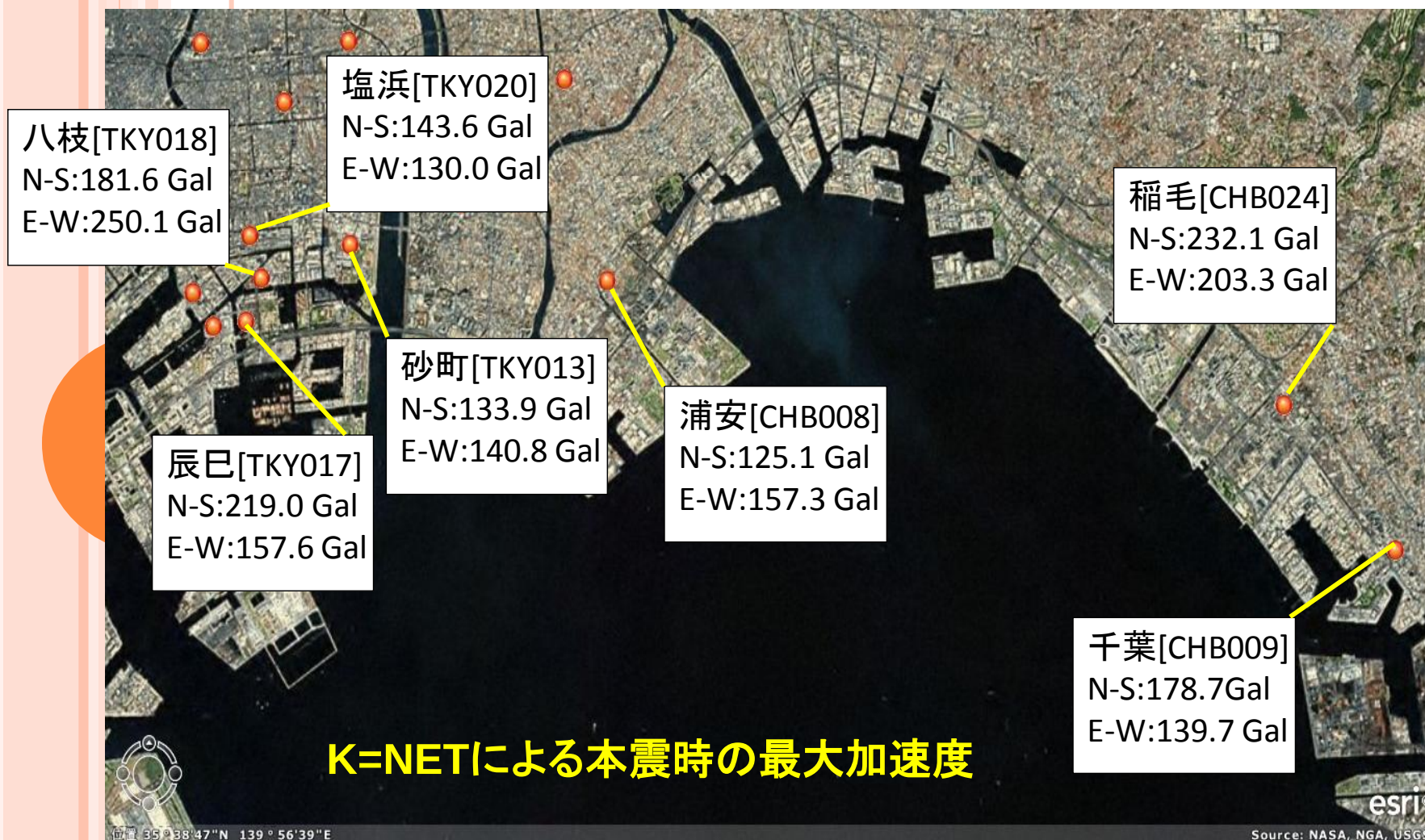


(a) 衝撃型波形

(b) 振動型波形

実際の地震波でも継続時間が長いと波数が多くなるので小さな振幅でも液状化が発生する

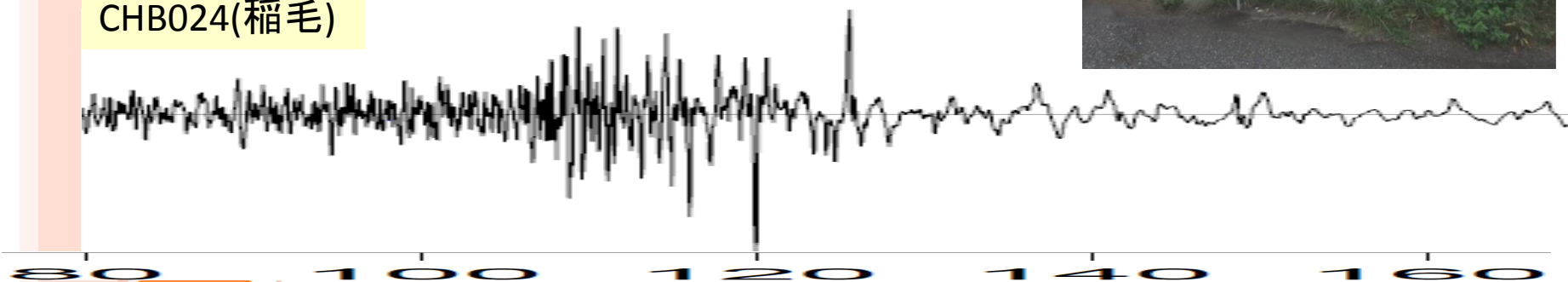
特徴① 浦安の震度は5強と揺れの振幅はあまり大きな値ではなかったが、広い範囲で激しい液状化が生じた。



K-NETによる本震の記録

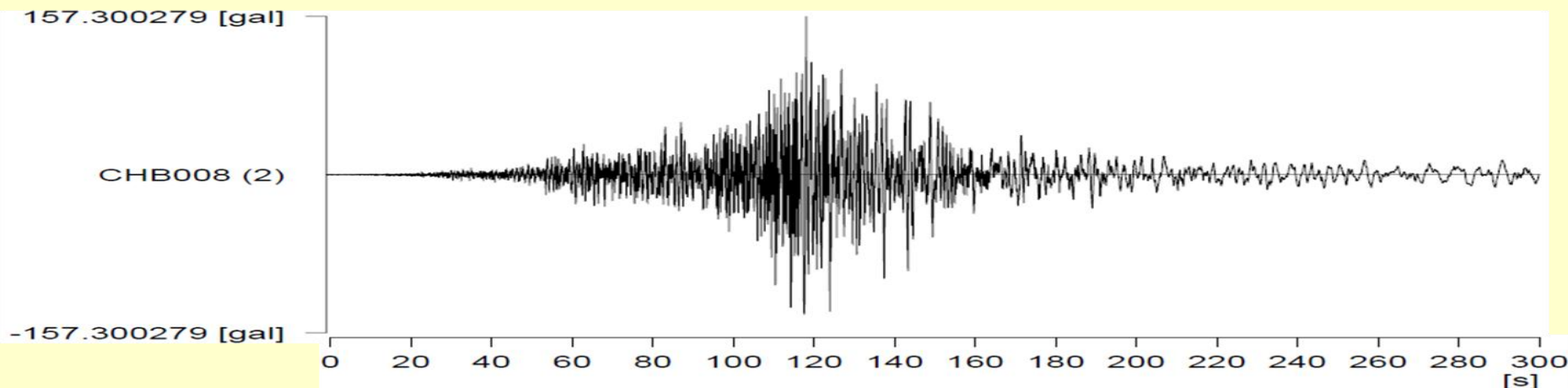
液状化が発生した稲毛の波形

CHB024(稲毛)



液状化が発生しなかった浦安の波形

浦安 最大加速度 157.300279(gal)



本震と29分後の余震の最大加速度の比較(K-NET, 合成加速度)

茨城・千葉側では29後の余震で液状化した箇所もある

IBR009 古河
14:46 205.5Gal
15:15 68.5Gal

IBR010 下妻
14:46 436.1Gal
15:15 244.2Gal

CHB004 佐原
14:46 310.3Gal
15:15 244.6Gal

TKY017 辰巳
14:46 149.5Gal
15:15 75.6Gal

CHB005 銚子
14:46 184.0Gal
15:15 315.9Gal

TKY006 小金井
14:46 127.2Gal
15:15 39.4Gal

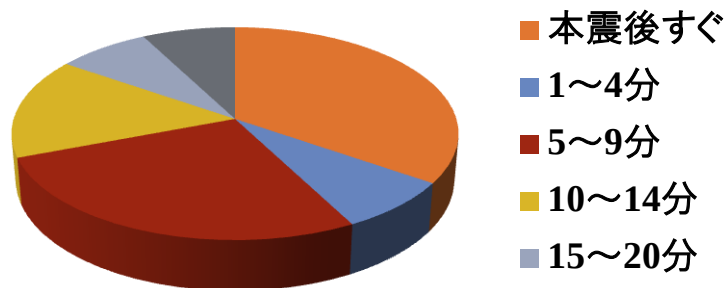
CHB012 東金
14:46 225.8Gal
15:15 285.3Gal

CHB008 浦安
14:46 174.3Gal
15:15 82.3Gal

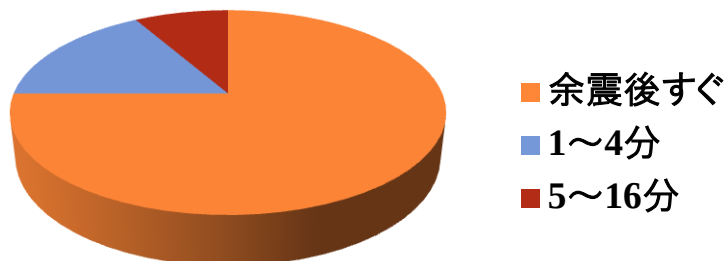
赤点: 余震 > 本震
黄点: 余震 > 1/2 本震
青点: 余震 < 1/2 本震



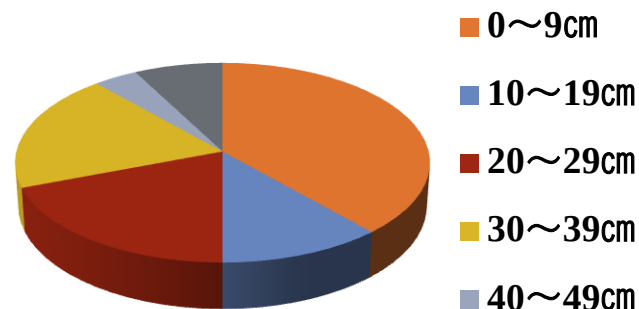
入船の皆さんからのアンケート



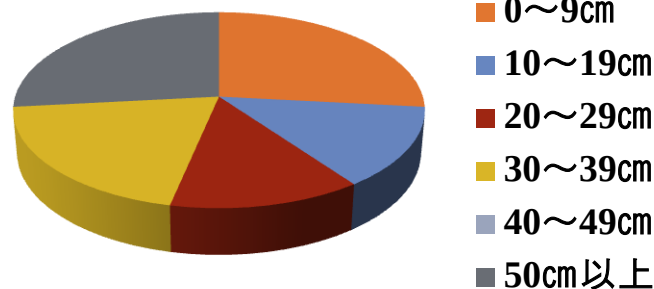
本震後噴水発生時間



余震後の噴水発生時間



本震後噴水高さ



余震時の噴水高さ

考えられる原因

- ・本震の継続時間が非常に長く、多くの繰返しせん断力が加わった。
- ・29分後に発生した大きな余震が液状化の発生や甚大な被害を生じさせた可能性がある。

特徴②、③: 噴砂の量が非常に多く地盤の沈下量も大きかった。



翌日の運動公園

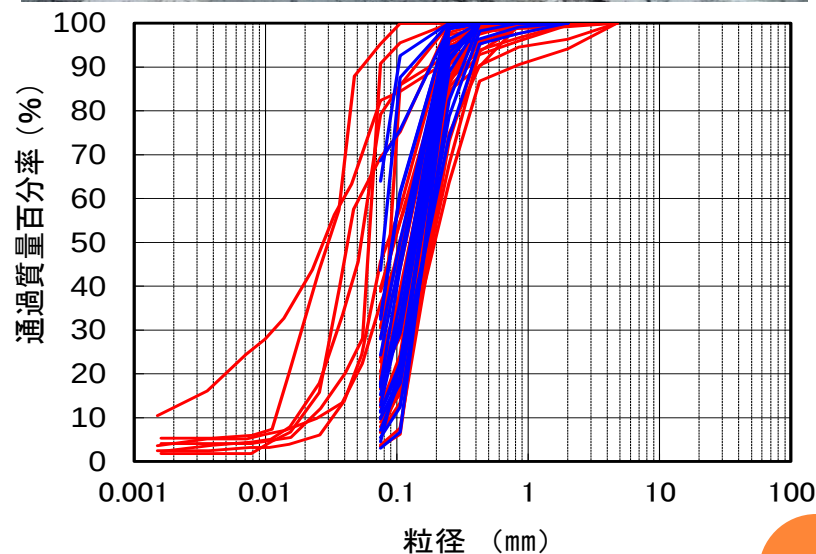


積み上げられた噴砂の山



ニュージーランドのクライストチャーチでも噴砂量が多かった

Bexleyでの同じ位置での噴砂の厚さの比較



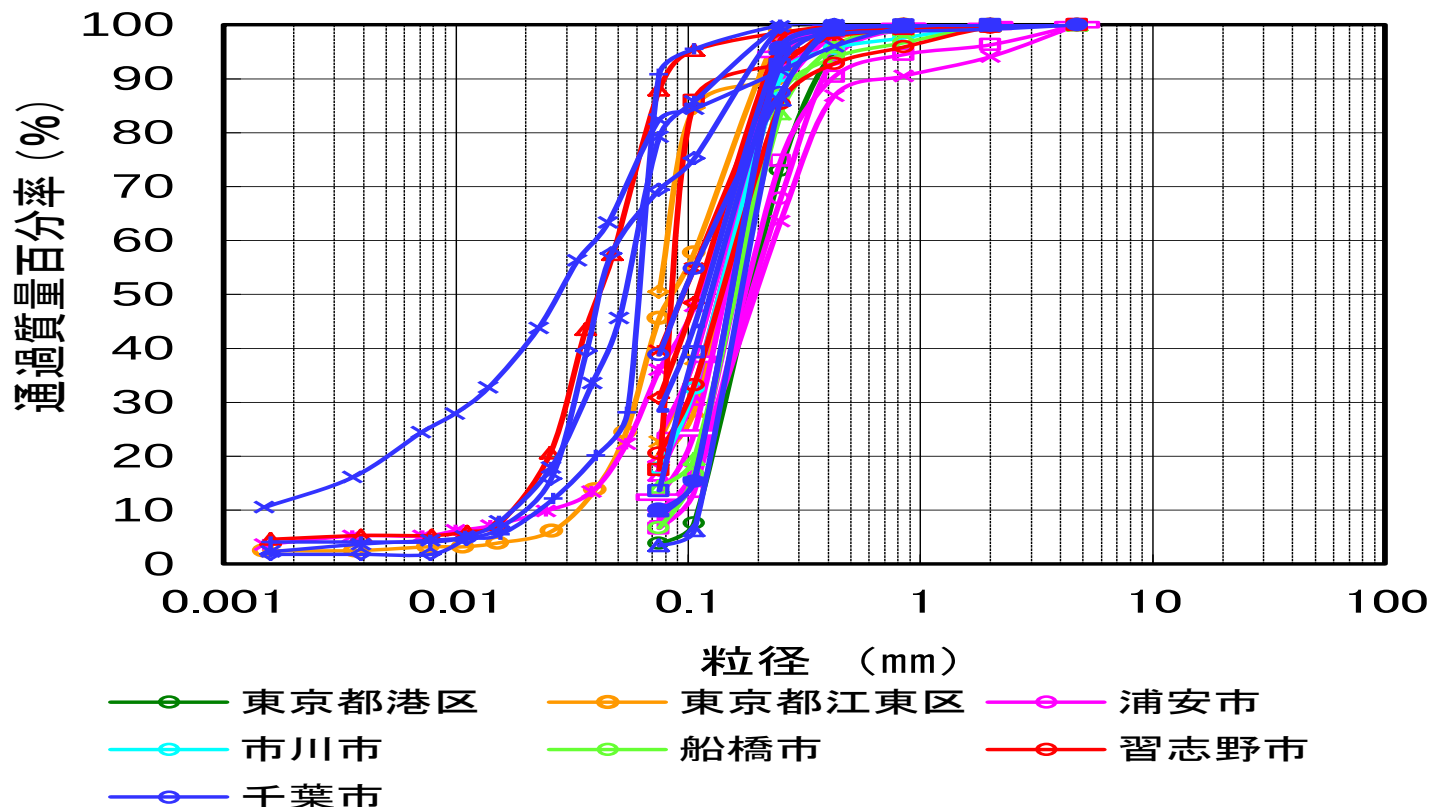
— 東京湾岸部の噴砂

— Christchurchの噴砂

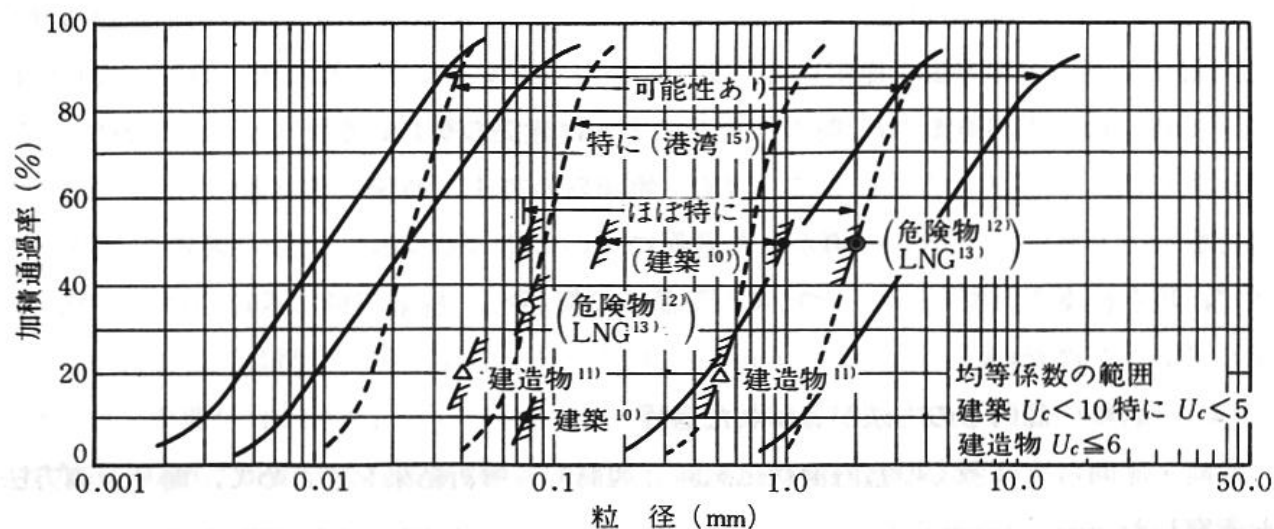
(今回の調査より)

(地盤工学会調査団報告書より)

今回東京湾岸で生じた噴砂の粒径加積曲線

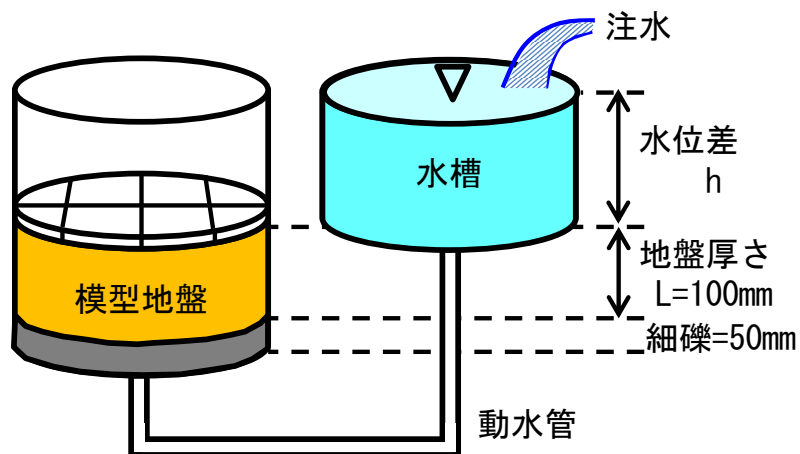


過去の地震時の噴砂から考えられてきた液状化しやすい砂の粒径加積曲線

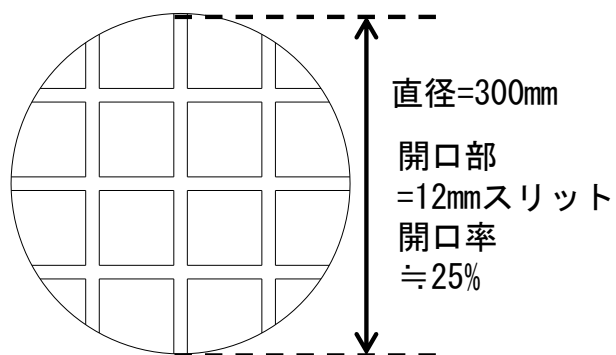


原因解明のための模型実験の試み

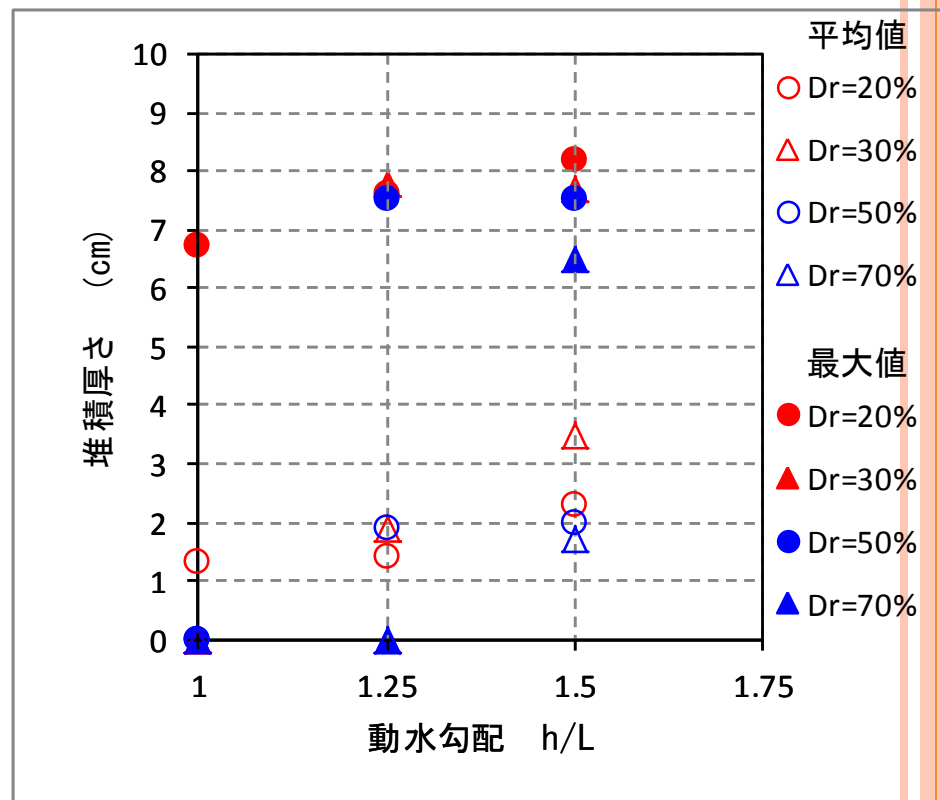
＜実験1、ボイリング実験＞



a) 擬似液状化試験装置

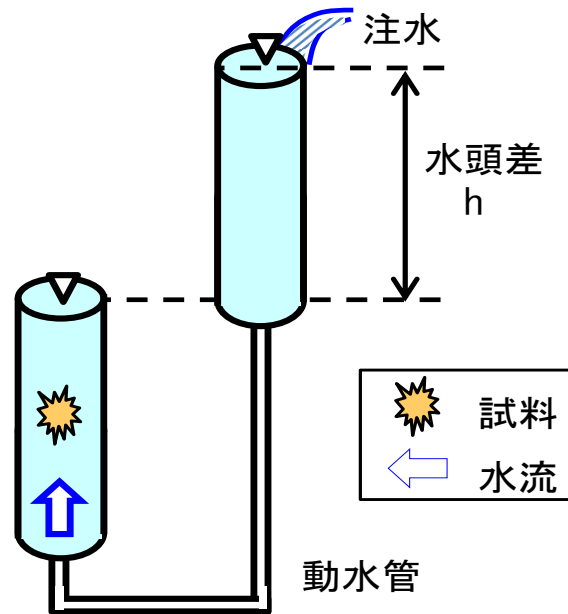


b) ブロック配置図



噴出から3分間での噴砂堆積厚さ

<実験2、沈降実験>



考えられる原因

- ①細かい砂(シルト質砂や砂質シルト)が液状化して透水係数が小さく長時間噴水が続き, 余震でも噴水が加速して噴砂量増大。
- ②土粒子が細かいと噴水と共に砂が地表に上がってき易い。
- ③地表に上がった多量の噴砂を取り除いたため地盤の沈下量が加算。

特徴④: 幹線道路の歩道や生活道路などでは盛り上がりや迫上がりが各地で発生した。ただし幹線道路自体はほとんど無被害であった。



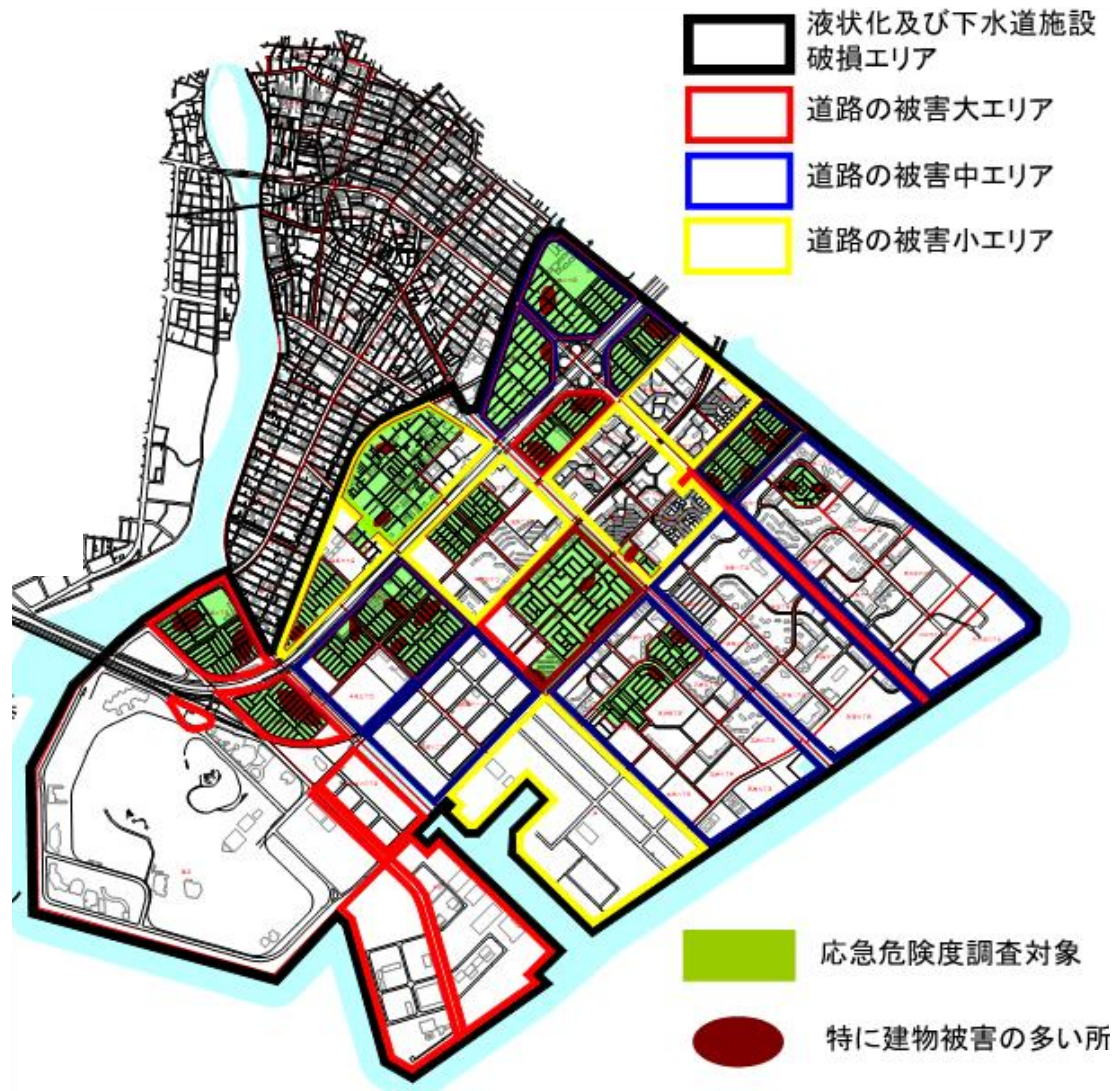


考えられる原因

液状化が発生した後も揺すられ続け、また、液状化した状態で余震を迎えて大きくスロッシング的揺動をしたからか？



特徴⑤: 数多くの戸建て住宅が数多く大きく沈下・傾斜した

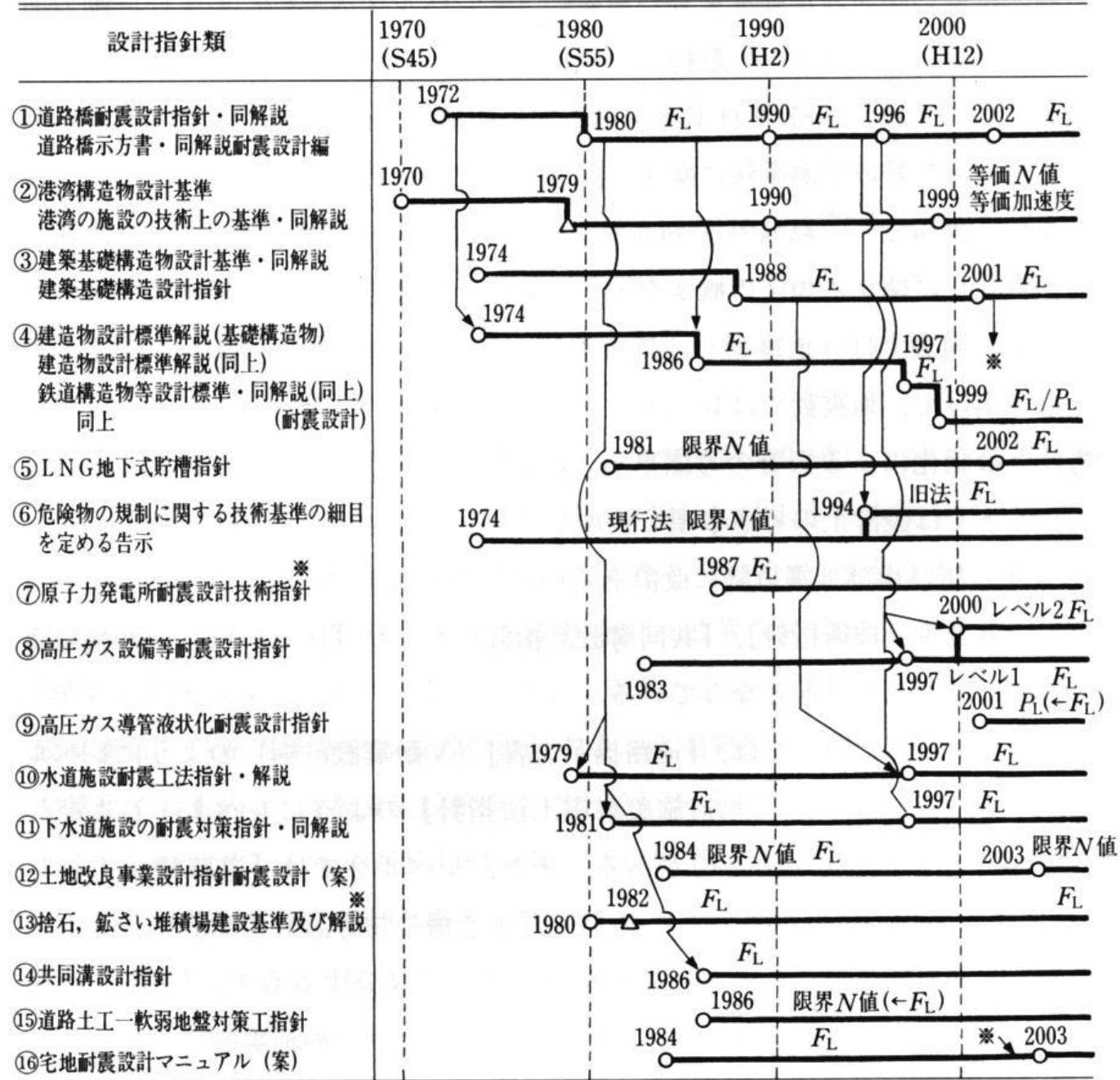


浦安市: 浦安市液状化対策技術
検討調査委員会第1回委員会
資料, 2011. より

[http://www.city.urayasu.chiba.jp/
menu11324.html](http://www.city.urayasu.chiba.jp/menu11324.html)

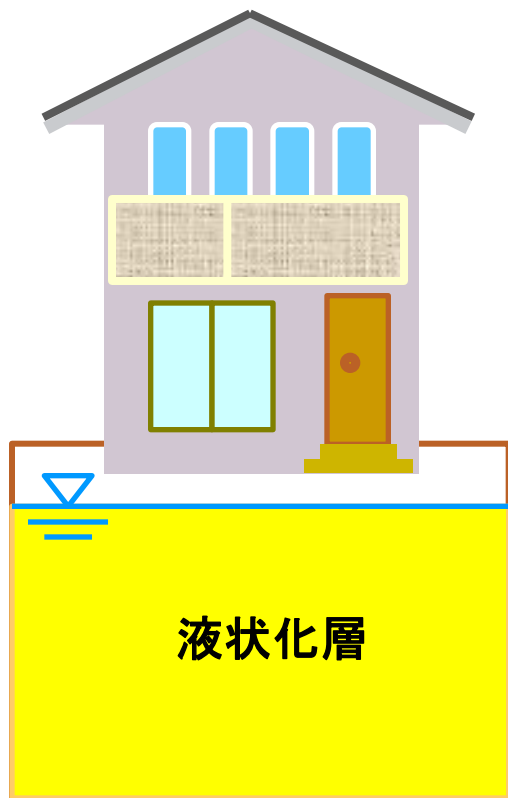
各設計基準類で液状化考慮されるようになった年(地盤工学会)

一般の木造2階建ての住宅が該当する4号建築物では、認定を受けた型式に適合する建築材料を用いる建築物と建築士の設計した建築物については、建築確認申請の審査を簡略化して構わないとなっており、一般に液状化を考慮されずに建てられてきている。



沈下、傾斜に与えた29分後の余震の影響の一つの考え方

本震で液状化した時の
状態



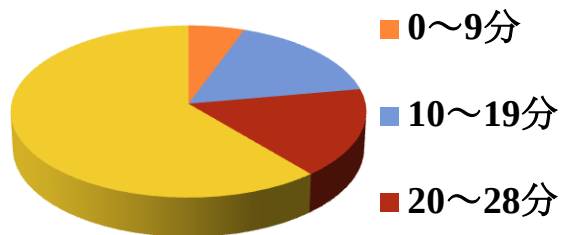
基礎より少し下方で
液状化したため余り
沈下しなかった。

余震時に液状化した時
の状態

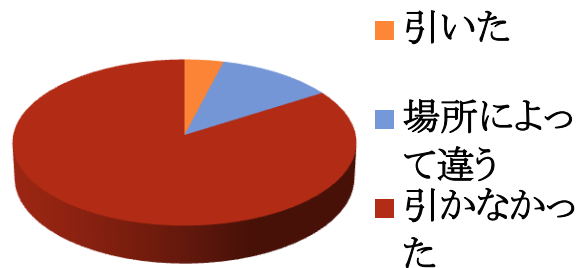


地下水位が地表面まで上がった
状態で余震を迎え、基礎の深
さで液状化したため大きく沈
下、傾斜した。

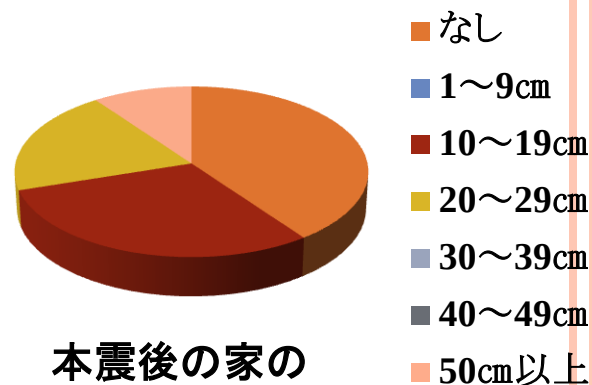
入船の皆さんからのアンケート



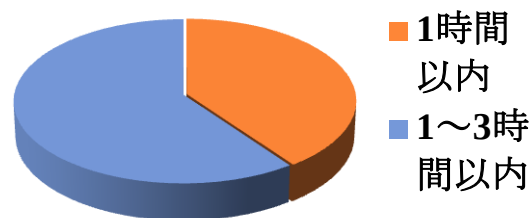
本震後噴水が止まった時間



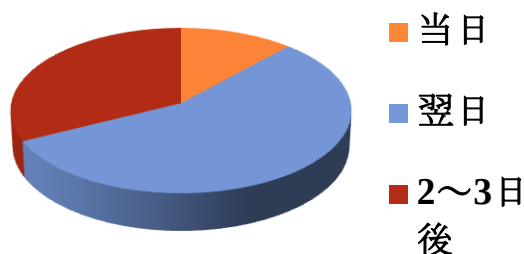
29分後の余震前に溜まった水が引いたか



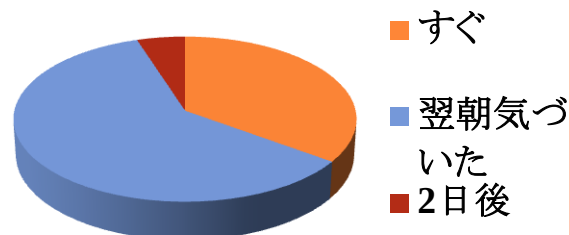
本震後の家の沈下量



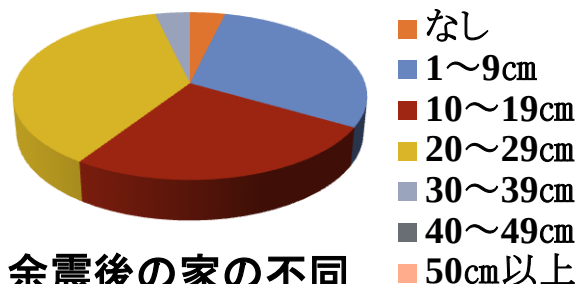
余震後に噴水が止まったのを見た時間



余震後水が引いた時間



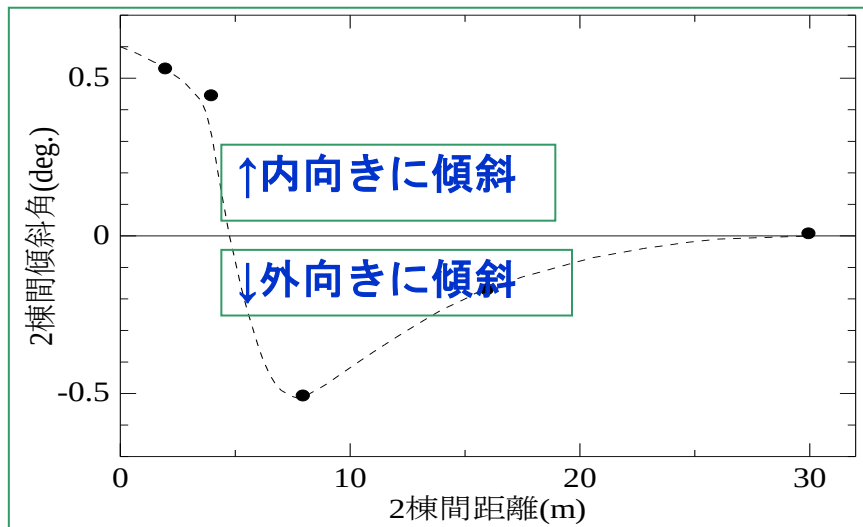
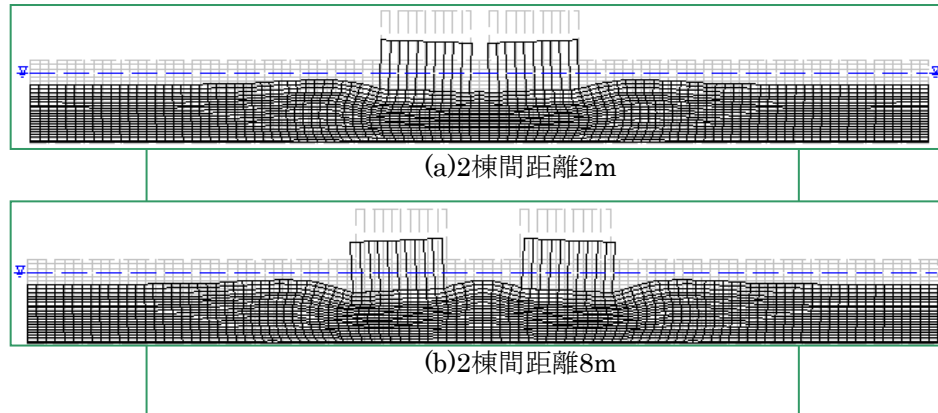
余震後家が沈下した時間



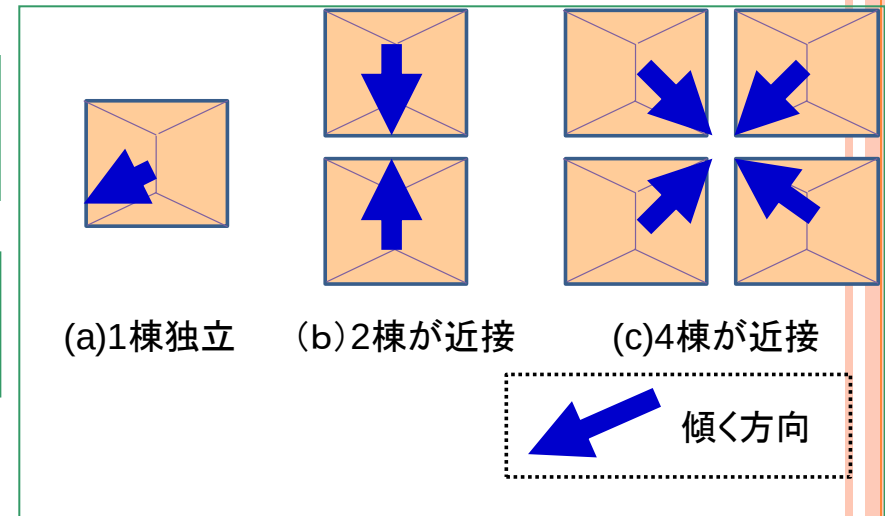
余震後の家の不同沈下量



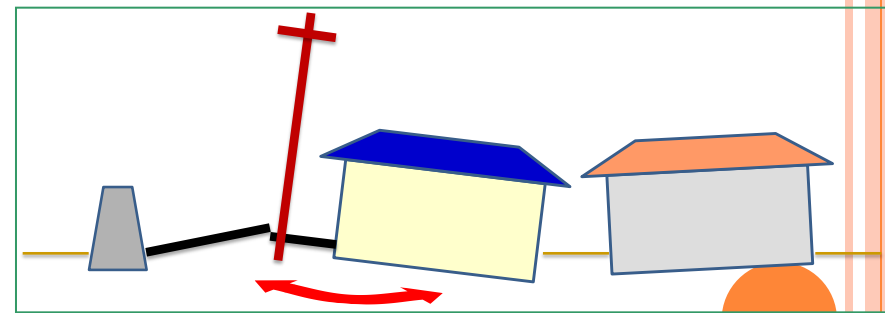
住宅が近接している地区では隣接する建物に影響された可能性がある。



2棟間距離と2棟間傾斜角の関係の解析例



近接する家屋が傾斜する方向の
の 패턴の概念図

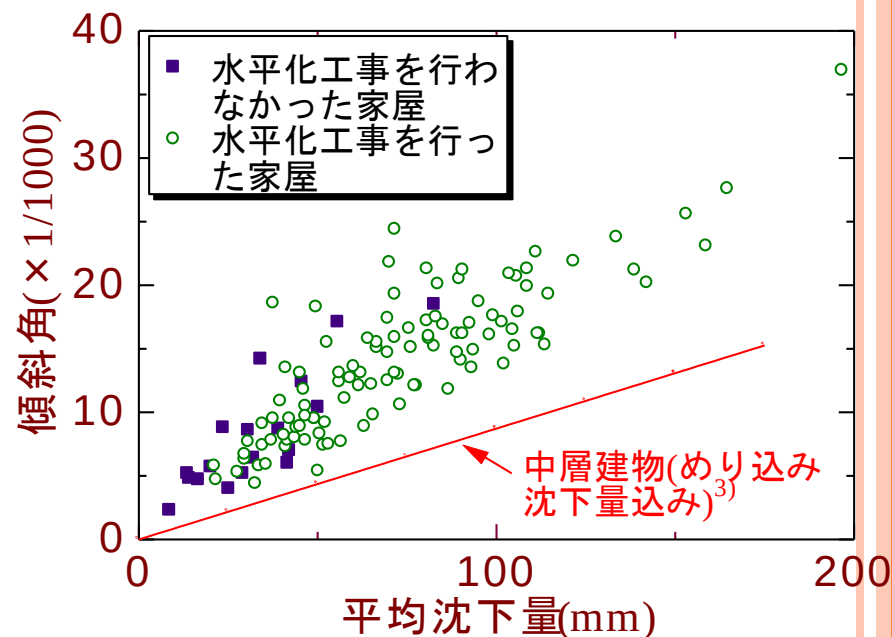


考えられる原因

- 1) 戸建て住宅では一般に液状化を考慮してこなかった。
- 2) 地震動の加速度振幅はレベル1程度であったが、継続時間が長く余震もあったため、液状化の激しさはそれ以上のレベルであった。
- 3) 本震で地表まで水位が上がって沈下しやすい状態のまま29分後の大きな余震を迎えたため、余震で大きく沈下した。
- 4) 家屋が密集しており、隣りあう家屋の影響によって傾斜しかった地区もあった。
- 5) スロッシング的揺動によってさらに変位、沈下した家もあったのではないかな。



2000年鳥取県西部地震による安倍彦名団地の家屋の 不同沈下と復旧事例



傾いた家の中では生活できない

- ・ めまい
- ・ はきけ
- ・ 頭痛



家をジャッキで持ち上げ、基礎を直した後、家を据え付け
1戸あたり180～600万円

沈下に関する被害認定の新判断基準と補助金額 (内閣府, 5月2日)

分類	判定基準 ¹⁾	災害救助法の 住宅の応急修 理制度	被災者生活再建支 援法の基礎支援金 ＋加算支援金
全壊	四隅の基礎や床の傾斜の平均が 20分の1以上	52万円 ²⁾	200万円 ³⁾
	床上1mまで沈下(雨天時に床上 1m浸水)		
大規模半 壊	四隅の基礎や床の傾斜の平均が 60分の1以上で20分の1未満	52万円 ²⁾	150万円 ³⁾
	床まで沈下(雨天時に床上浸水)		
半壊	四隅の基礎や床の傾斜の平均が 100分の1以上で60分の1未満	52万円 ²⁾	なし ³⁾
	基礎の天端25cmまで沈下(雨天 時に床下浸水)		

1)傾斜と沈下のどちらかの基準を満たせば支給される。

2)大規模災害の際に加算される場合がある。新たに住宅を建設・購入される場合には支給されない。

3)表の中の金額は補修する場合。新たに住宅を建設・購入する場合は300万円

viii 従来基準による建物被害認定結果と新基準適用後の結果

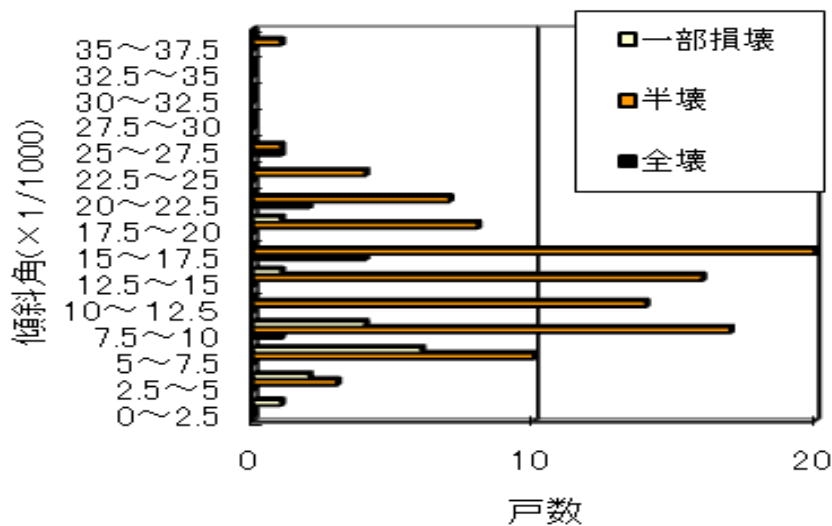
	建物被害認定調査	
	従来基準による 建物被害認定結果	新基準適用後の 建物被害認定結果
全壊	8	18
大規模半壊	0	1,541
半壊	33	2,121
一部損壊	7,930	5,096
被害なし	1,028	1,105
合 計	8,999	9,881

新基準欄については

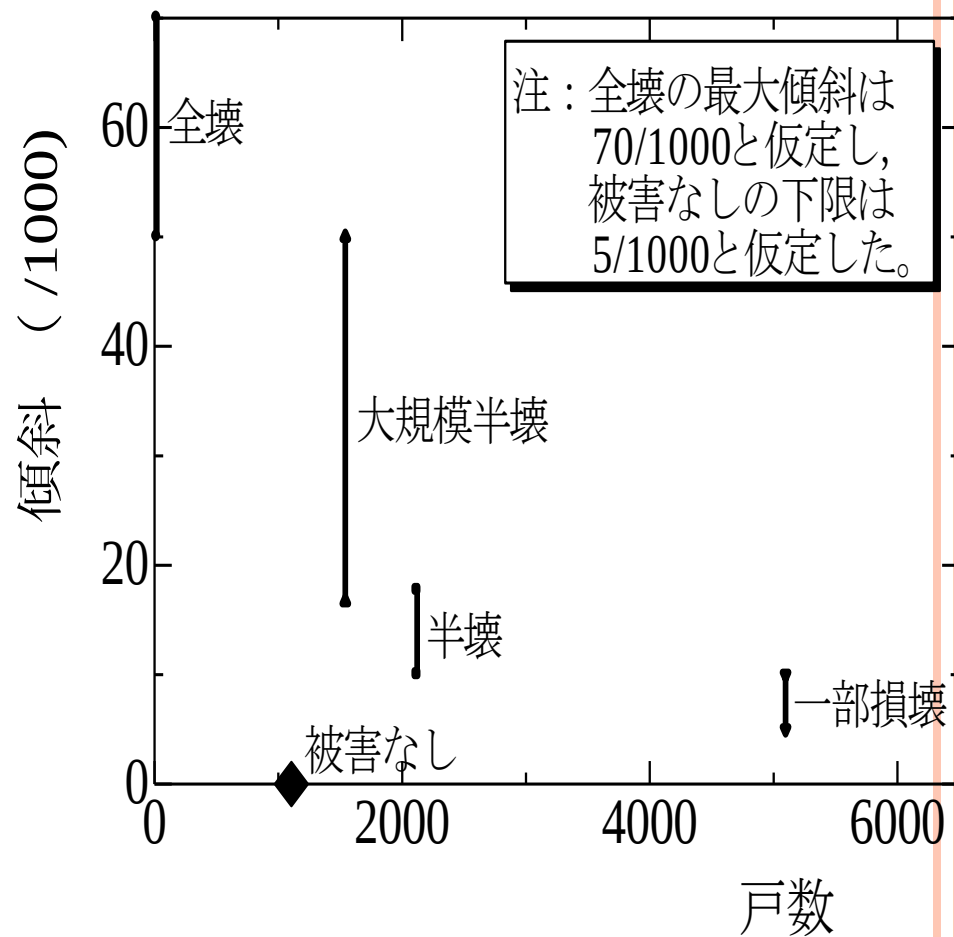
■平成23年7月15日現在の調査物件数

■5月2日付け被害判定の緩和後の新基準による

■傾斜の再調査(第1次再調査)や2次調査により、今後、総数および内訳が変更になる可能性がある



安倍彦名団地における家屋の傾斜角



浦安市の公表データから大まかに推定した傾斜角と戸数の関係

特徴⑦: 下水道管, ガス導管, 水道管など埋設管が多く被災した。一般埋設部に加えて宅地内への取り付け管も被災した。



被害の様子（正確にはまだ分からない）

a) マンホールが浮き上がった率は新潟県中越地震による長岡などの被害に比べて少ない。一方, マンホールの躯体ズレが多く発生し, また, 砂が多くはいりこんでいた。

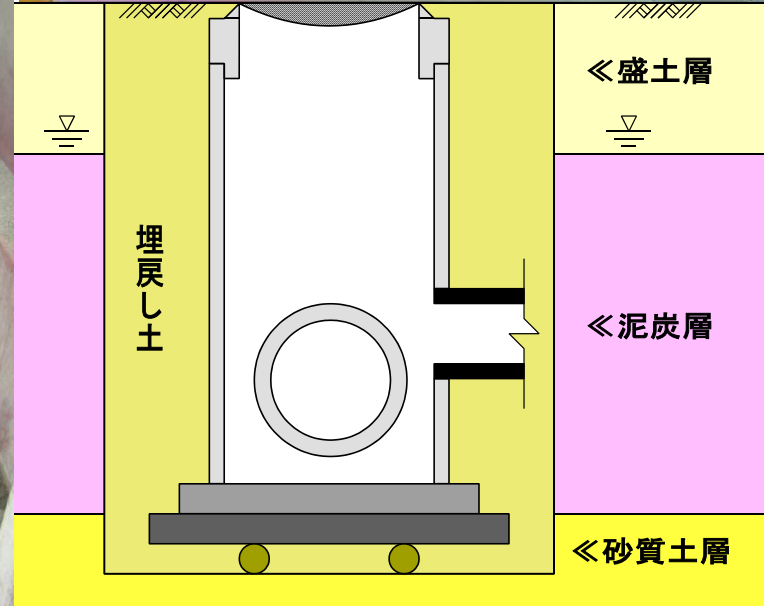
b) 管渠には蛇行やたるみが生じ, 継手はずれたものが多く発生した。また, 本管から宅地内に入る箇所被害が多く発生しているようである。

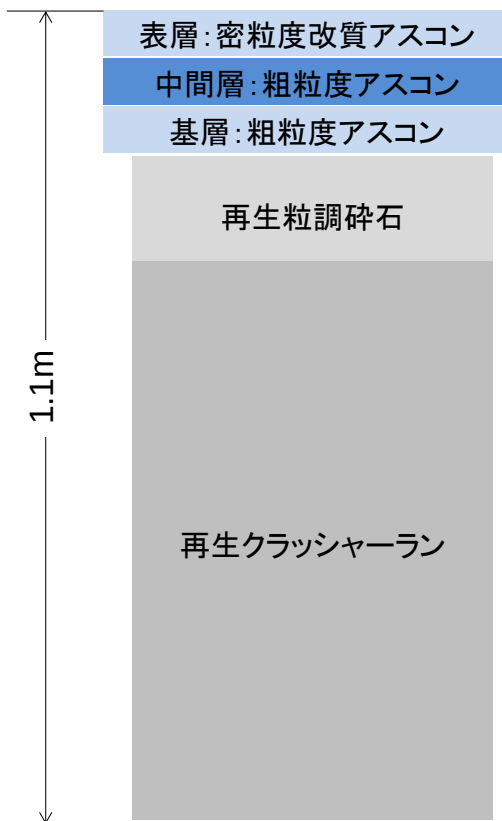
釧路沖地震、十勝沖地震、新潟県中越地震、新潟県中越沖地震では掘削埋め戻した土が液状化し、マンホールと管渠が浮き上がった。ただし、埋戻し土の液状化だけでは水平方向には動けない。

2004年新潟県中越地震

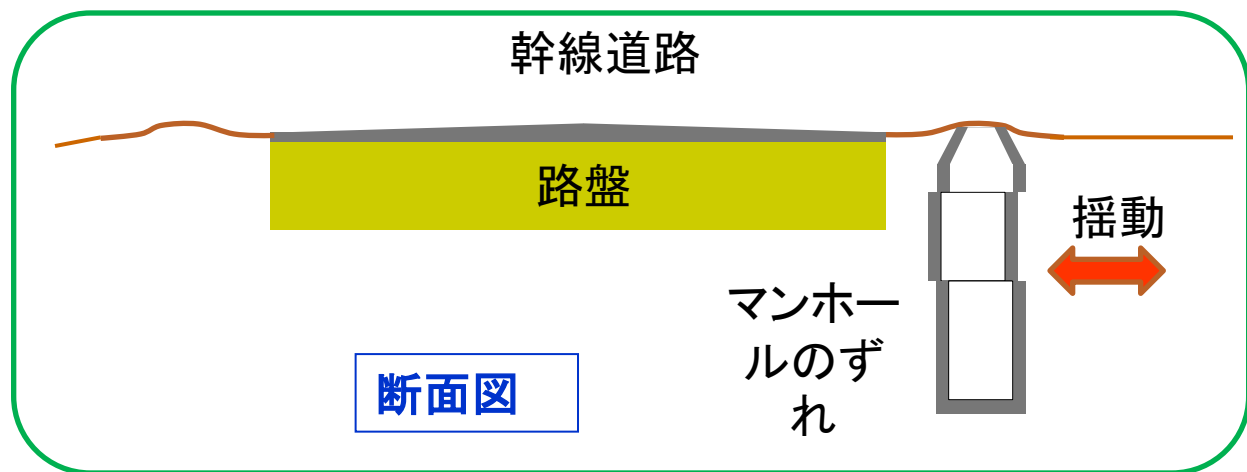


1993年釧路沖地震

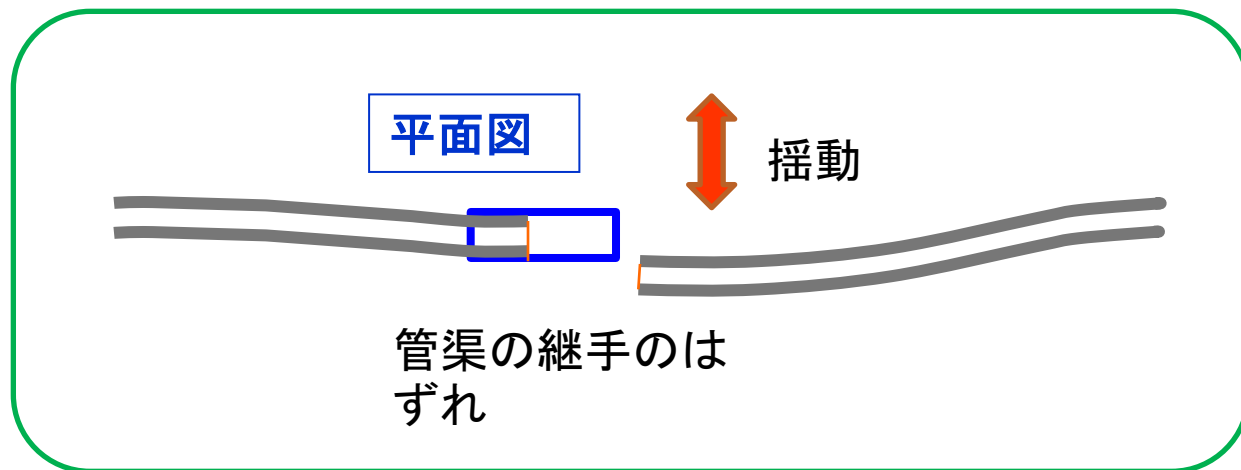




県道の構造例(浦安市のホームページを参照して作図)



被害状況の想像図



考えられる原因

スロッシング的な揺動による水平方向への力
ただし、今後さらに検討が必要

補足：戸建ての液状化対策方法の考え方の種類

(1) 新設の戸建て住宅に対する液状化対策

a) 団地全体の広い範囲での液状化対策

①地盤改良(密度増大、固結、間隙水圧消散など)を施して液状化の発生を防止する。

②杭によって液状化層下の支持層で支持する。ただし、周囲地盤が液状化して沈下するとライフラインに被害が生じたり、家の入口の段差ができたりする。

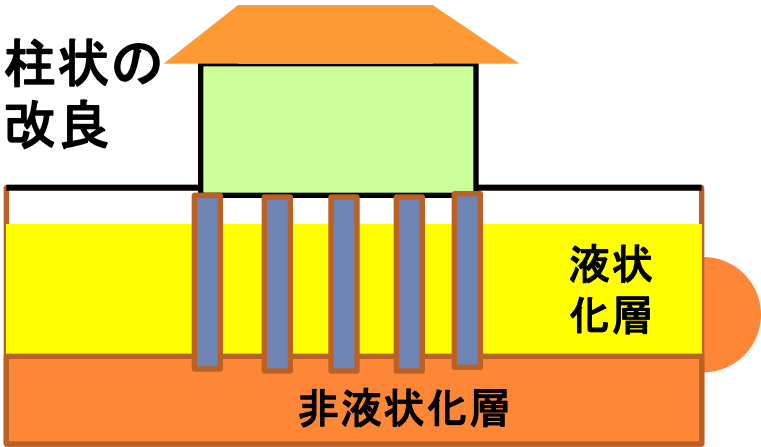
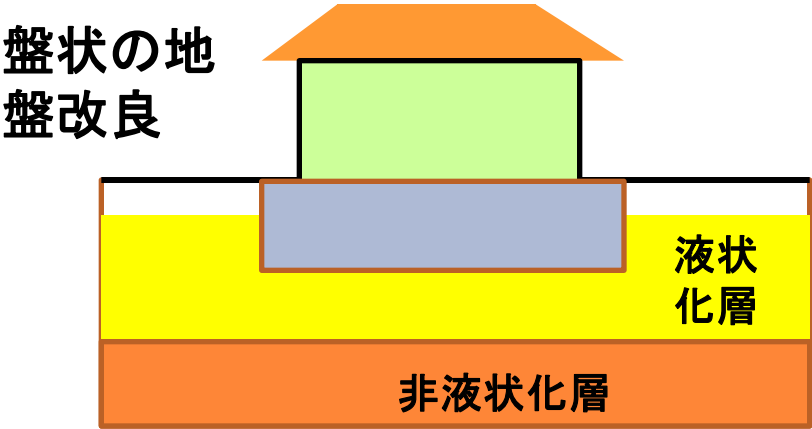
b) 既設の住宅団地内の個々の住宅における狭い範囲での液状化対策

①地盤改良を施す。ただし低騒音・低振動でさらに隣接構造物に影響を与えない工法を選定する必要がある。また、盤状の地盤改良であれば液状化層下端まで改良しなくても建物のめり込み沈下をかなり防げるが、柱状改良の場合には液状化層下の支持層上端まで改良する必要がある。

②杭によって液状化層下の支持層で支持する。ただし、周囲地盤が液状化して沈下するとライフラインに被害が生じたり、家の入口の段差ができたりする。

これまでに開
発されてきてい
る液状化の発
生を防止する
工法

改良原理	工法
密度の増大	サンドコンパクションパイル工法（動的締固め、静的締固め）、振動棒工法（通常型、吸水型）、重錘落下方法、バイブロフローテーション工法、圧入締固め工法(コンパクショングラウチング工法等)、バイブロタンパー工法、転圧工法、発破工法、群杭工法、生石灰工法、プレローディング工法
固結	深層混合処理工法、薬液注入工法、事前混合処理工法、高圧噴射攪拌工法
粒度の改良	置換工法
飽和度低下（地下水水位低下）	ディープウェル工法、排水溝工法
間 隙 水 圧 抑 制・消散	グラベルドレーン工法、人工材料系ドレーン工法、周辺巻立てドレーン、排水機能付き鋼材
せん断変形抑 制	地中連続壁

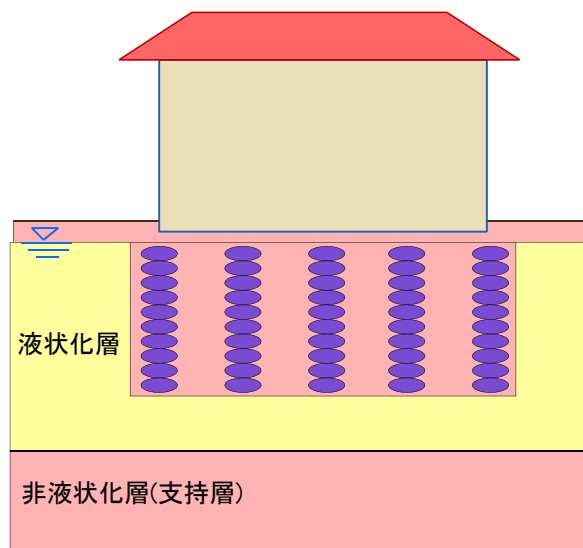


(2)既設の戸建て住宅に対する液状化対策

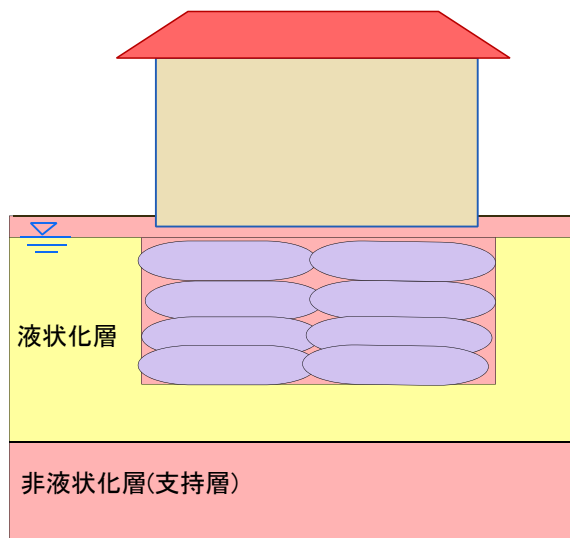
a) 戸建住宅で液状化の発生を防止する場合の対策方法

大型構造物で実績があり、宅地用に使し始めている工法

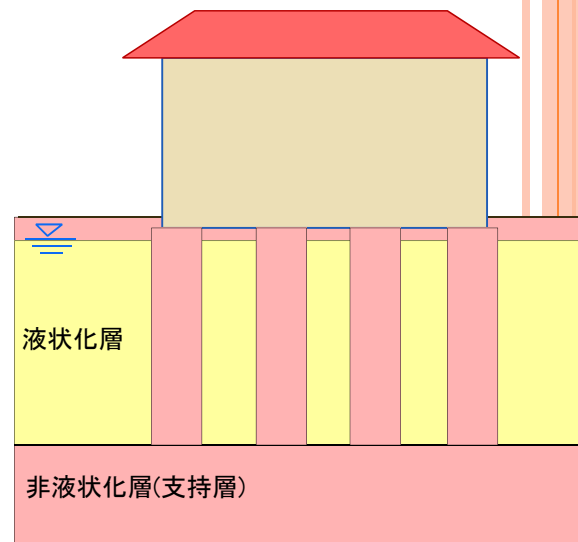
圧入締固め工法



薬液注入工法



高圧噴射攪拌工法



家の床に孔をあけて直下を地盤改良することも可能になってきた



b) 戸建て住宅で液状化が発生しても被害を軽減する場合

- ①アンダーピニング工法で杭で支える。
- ②タンクで行われているように建物の周囲に矢板を打設し沈下を防ぐ
(現在検討中)

c) 地域全体の液状化の防止を防ぐ場合

- ①地域全体の地下水位を低下させる。



2007年新潟県中越沖地震の復旧にあたって、柏崎市の山本団地では道路や敷地内に溝を掘りその中に穴あきのパイプを設置し地下水位を下げた。集めた水は斜面下の川に放流している。

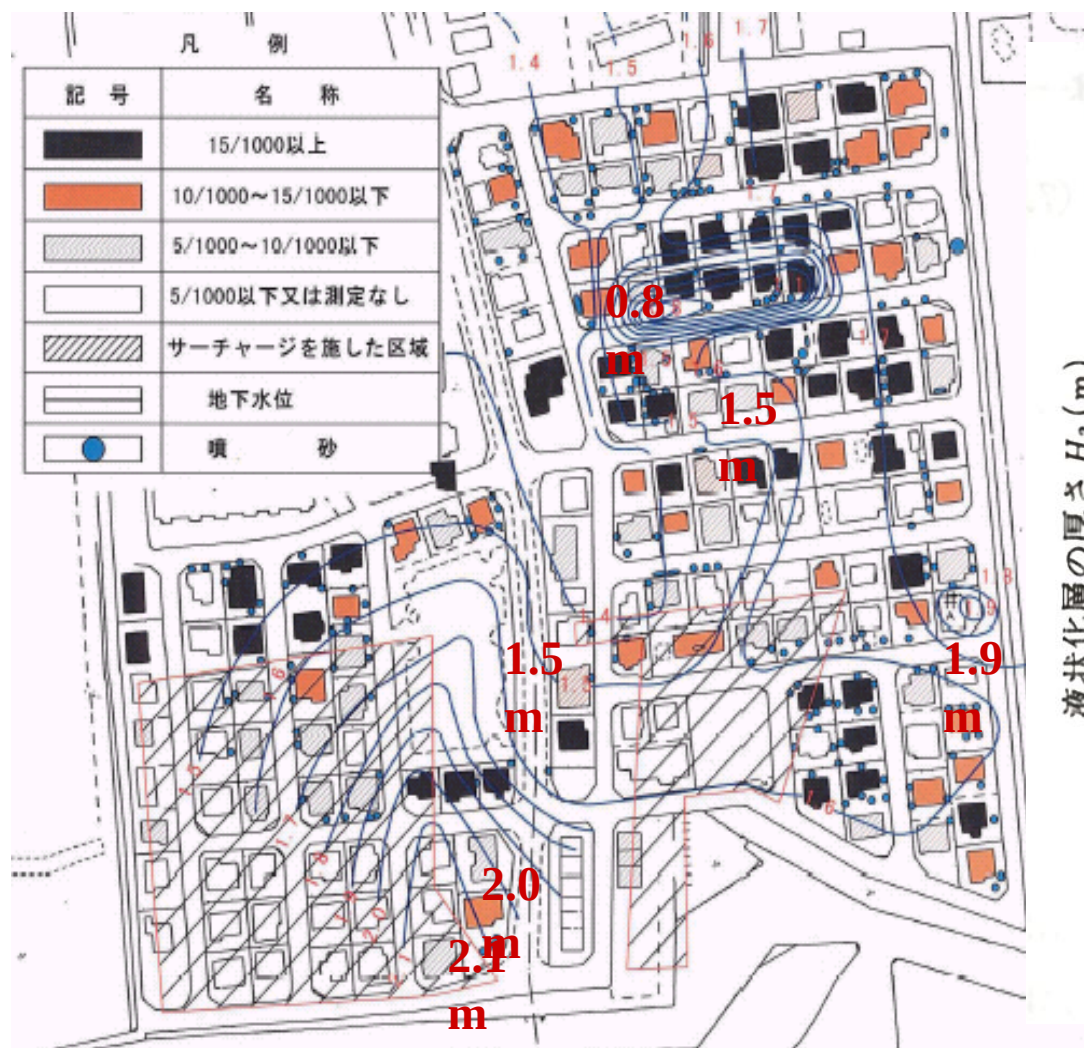
暗渠計画平面図



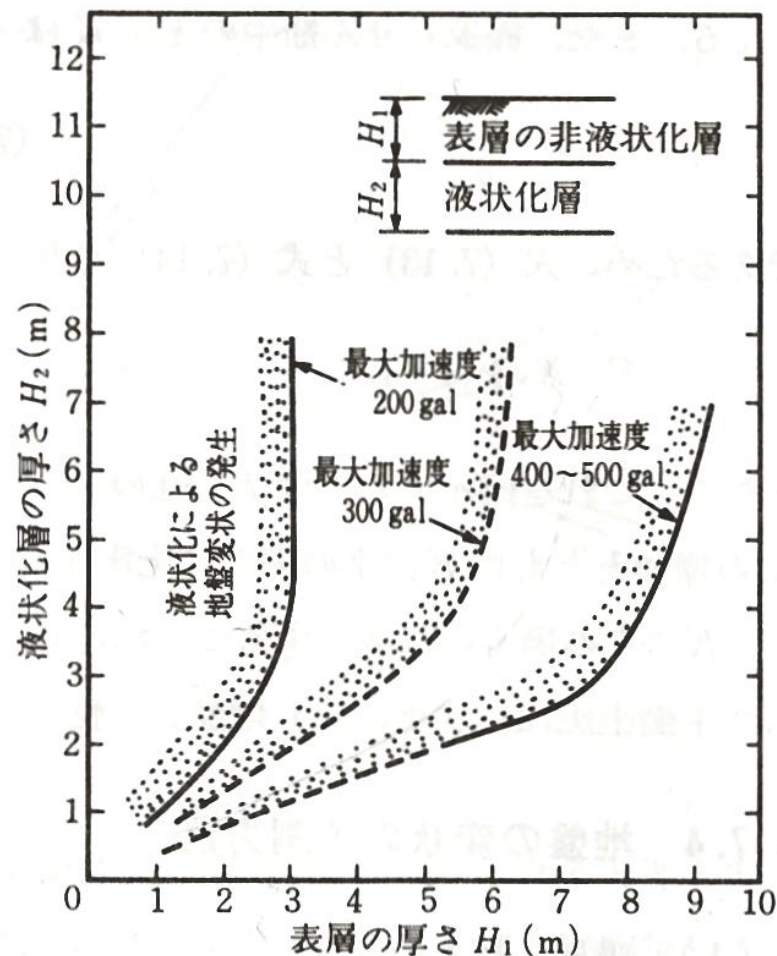
凡 例	
H19	道路内暗渠
	宅地内暗渠
	擁 壁 工
H20	道路内暗渠
	宅地内暗渠

長岡工業高等専門学校尾上篤生教授らの
地下水位観測結果:地下水位がおよそ2m程度下がっている。

安倍彦名団地における地下水位と 家屋の傾斜の関係の調査例



液状化層厚と表層の厚さと 被害の関係（石原による）



(3)液状化で沈下、傾斜した戸建て住宅の復旧方法

復旧にあたっての考え方

- ①沈下・傾斜した戸建て住宅は元の高さ以上に戻し、また、水平化する必要がある。（沈下修正）
- ②将来のことを考えると再液状化しないような対策をとるとか、液状化しても被害を軽減させる対策をとるといったことが望まれる。
- ③さらに、沈下修正と同時に液状化対策まで行える工法だと都合が良い。
- ④個々でなく広域で対策をとればさらに良い。



まとめ

- 東北から関東にかけて広い範囲で液状化が発生した。最も遠い液状化地点の震央距離は440kmであった。これにより多くの戸建て住宅や道路、ライフライン、河川堤防などが被害を受けた。
- 東京湾岸の液状化発生には長い継続時間や余震が影響したと考えられる。
- 液状化した後にも揺すられ続けたり、液状化したまま余震を迎えたので、地盤全体が揺動するような特殊な地盤変状が生じたと考えられる。
- 東京湾岸で液状化した地区で噴砂や地盤の沈下量が大きかった一つの原因は、液状化した砂が細粒だったことにあると考えられる。