

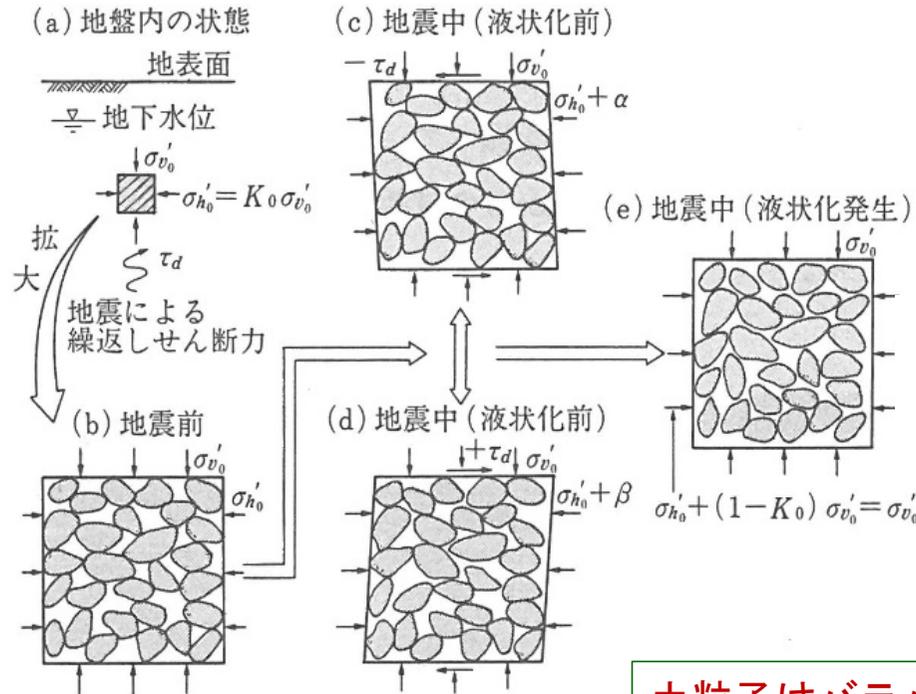
市街地および個々の住宅における液状化調査・対策の動向

—能登半島地震による7つの都市の被害も含む—

1. 液状化によって種々の構造物に生じる被害の特徴
2. 能登半島地震による住宅地の液状化被害
3. 液状化により戸建て住宅がめり込み沈下し傾くメカニズム
4. 造成宅地で液状化が発生し易い原因と一般のハザードマップに記載されていない理由
5. 液状化の判定を行う地盤調査方法と最近開発された簡易地盤調査方法
6. 国土交通省で出された住宅地向けの液状化ハザードマップの作成方法
7. 地盤工学会で出された簡易地盤調査による住宅のめりこみ沈下量・傾斜角の計算方法
8. 個々の住宅の液状化対策方法
9. 市街地全体の液状化対策方法

1. 液状化によって種々の構造物に生じる被害の特徴

液状化発生のメカニズム



σ_{v_0}' は土粒子間力で支え、間隙水圧は静水圧

土粒子の噛み合わせが徐々にはずれ、 σ_{v_0}' は土粒子間力と間隙水圧で分担

土粒子はバラバラになり
 σ_{v_0}' は間隙水圧だけで支えて過剰になる
 →地表に砂とともに噴出
 →圧縮により地盤が沈下

液状化が発生する条件

- ①地下水位以下の、
- ②緩く堆積した、
- ③砂層に、
- ④震度5弱程度以上の地震が襲った場合

地下水位が深いと液状化する層が薄くなったり、深い層が液状化しても地表まで過剰間隙水圧が伝播してこなくて構造物が被害を受け難い。

液状化による被害が発生し易い条件

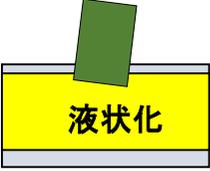
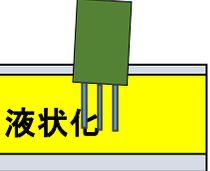
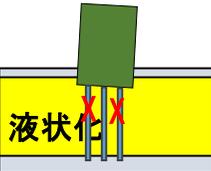
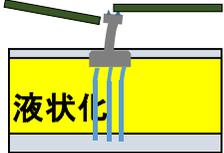
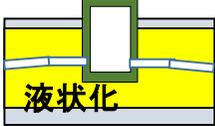
- ①地下水位が浅く、
- ②緩く堆積した、
- ③砂地盤に、
- ④震度5弱程度以上の地震が襲った場合

液状化により各種構造物で生じる被害形態(1)

直接基礎の構造物：地表に建てられた建物やタンクなど種々の構造物は**自重により沈下**する。

杭基礎の構造物：杭先端地盤が液状化すると沈下する。また、先端は液状化しなくても表層が液状化すると**水平方向の地盤反力が減少**し、水平方向に大きく変形し、杭が破損したり、上部の橋桁が落橋する。

地中構造物：地中に埋まっているマンホールや防火水槽、下水道管など軽い構造物は**浮き上がる**。
 “ドロ水”の単位体積重量は水より重く、17~19kN/m³もあるため、コンクリート製の構造物でも中に空洞があれば浮き上がる。

構造物	被害形態
直接基礎構造物	<p>沈下・傾斜</p>  <p>液状化</p>
杭基礎構造物	<p>沈下・傾斜</p>  <p>液状化</p> <p>杭の曲げ</p>  <p>液状化</p> <p>上部構の過大な変形</p>  <p>液状化</p>
地中構造物	<p>浮上り</p>  <p>液状化</p> <p>抜け</p>  <p>液状化</p> <p>破損</p>  <p>液状化</p>

被害事例



液状化による戸建て住宅の模型の沈下・傾斜を再現した振動台実験



東京電機大学
の中型振動台
(3m×2m)を
用いた実験例

液状化により各種構造物で生じる被害形態 (2)

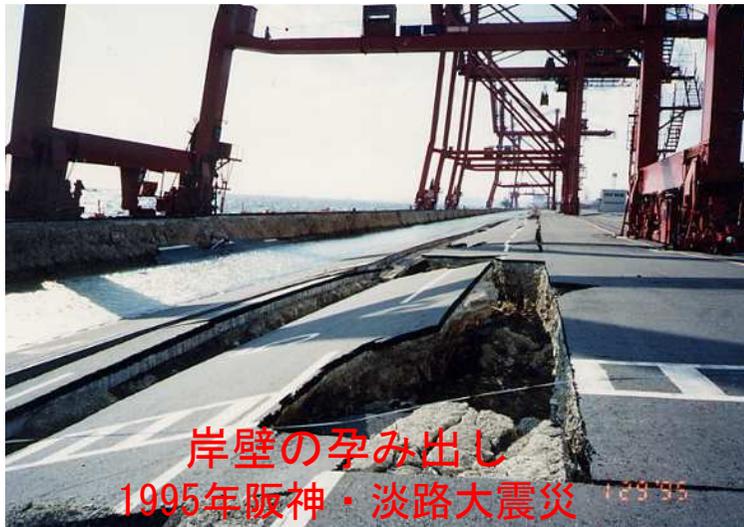
岸壁や護岸および背後地盤：背後の地盤が液状化すると岸壁や護岸に加わる**土圧が増える**。また基礎下の地盤が液状化すると支持力がなくなる。これらにより岸壁や護岸が海や川に向かって孕み出す。

土構造物：河川堤防やアースダム、鉱さい集積場といった土構造物では**地盤の強度やせん断剛性が減少**するため、滑ったり沈下する。

岸壁や護岸および背後地盤：岸壁や護岸の孕み出しにより液状化した地盤が**水平方向に流動**し、直接基礎の構造物の基礎は引き裂かれ、杭基礎の変形、埋設管の引っ張られて被害が生じる。

緩やかな傾斜地盤：岸壁・護岸背後地盤の流動と同様に各種構造物の被害を甚大にする。

構造物	被害形態
岸壁・護岸構造物	<p>矢板の孕み出し ケーソンの前傾・沈下</p>
土構造物	<p>すべり 沈下</p>
地盤全体の流動	<p>岸壁・護岸背後地盤</p> <p>緩やかな傾斜地盤</p>



2011年東日本大震災により東京湾岸で生じた液状化被害の特徴

- ▶ 青森県から神奈川県まで広い範囲で液状化した。
- ▶ 橋梁や中層建物などの被害は目立たなかった。
- ▶ 戸建て住宅、住宅地の平面道路、ライフライン、河川堤防は各地で甚大な被害を受けた。戸建て住宅や平面道路では液状化を考慮して建設が行われてこなかった。また、液状化を考慮していなかったライフラインが多く存在していた。
- ▶ 建物自体は被災しなかったアパートにおいても、入口の段差が発生し、ライフラインが被災したため、しばらくはマンション内で生活が出来ない状況に陥った。

浦安市での被災・無被災事例

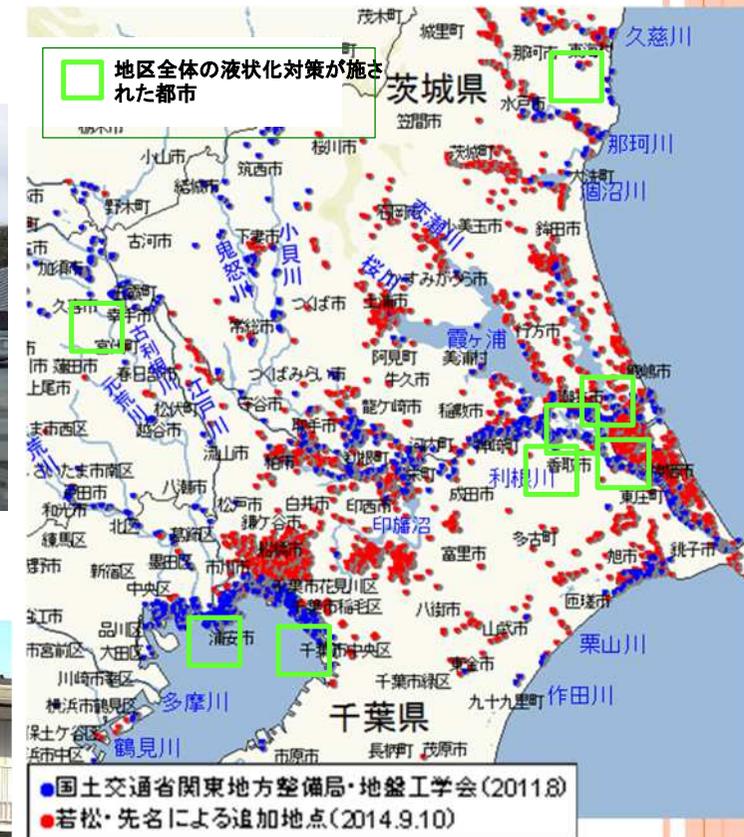
液状化を考慮して設計してあった高架橋は被害なし



戸建て住宅・道路・ライフラインでは甚大な被害発生



関東地方の液状化発生地点

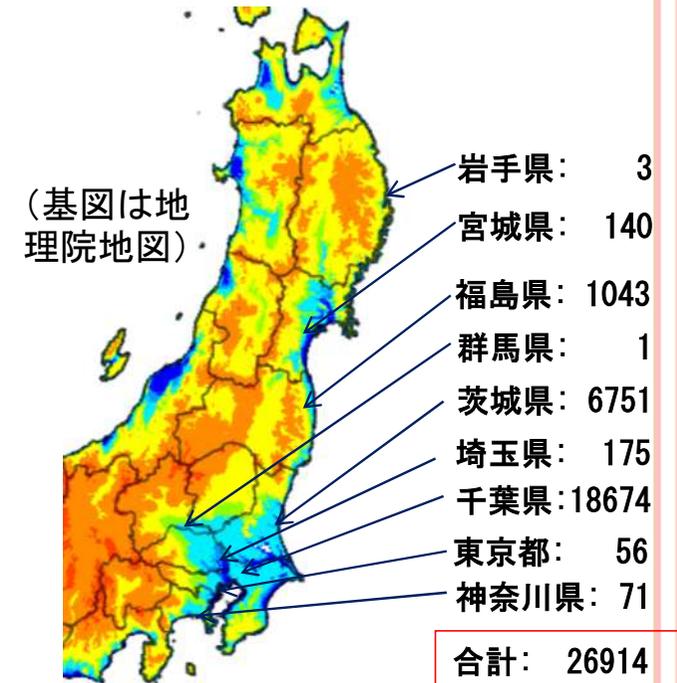


(若松・先名による)

東京湾岸の戸建て住宅の被害状況



東日本大震災での液状化による戸建て住宅の被害数



* 国土交通省都市局調べ (平成23年9月27日調査時点)

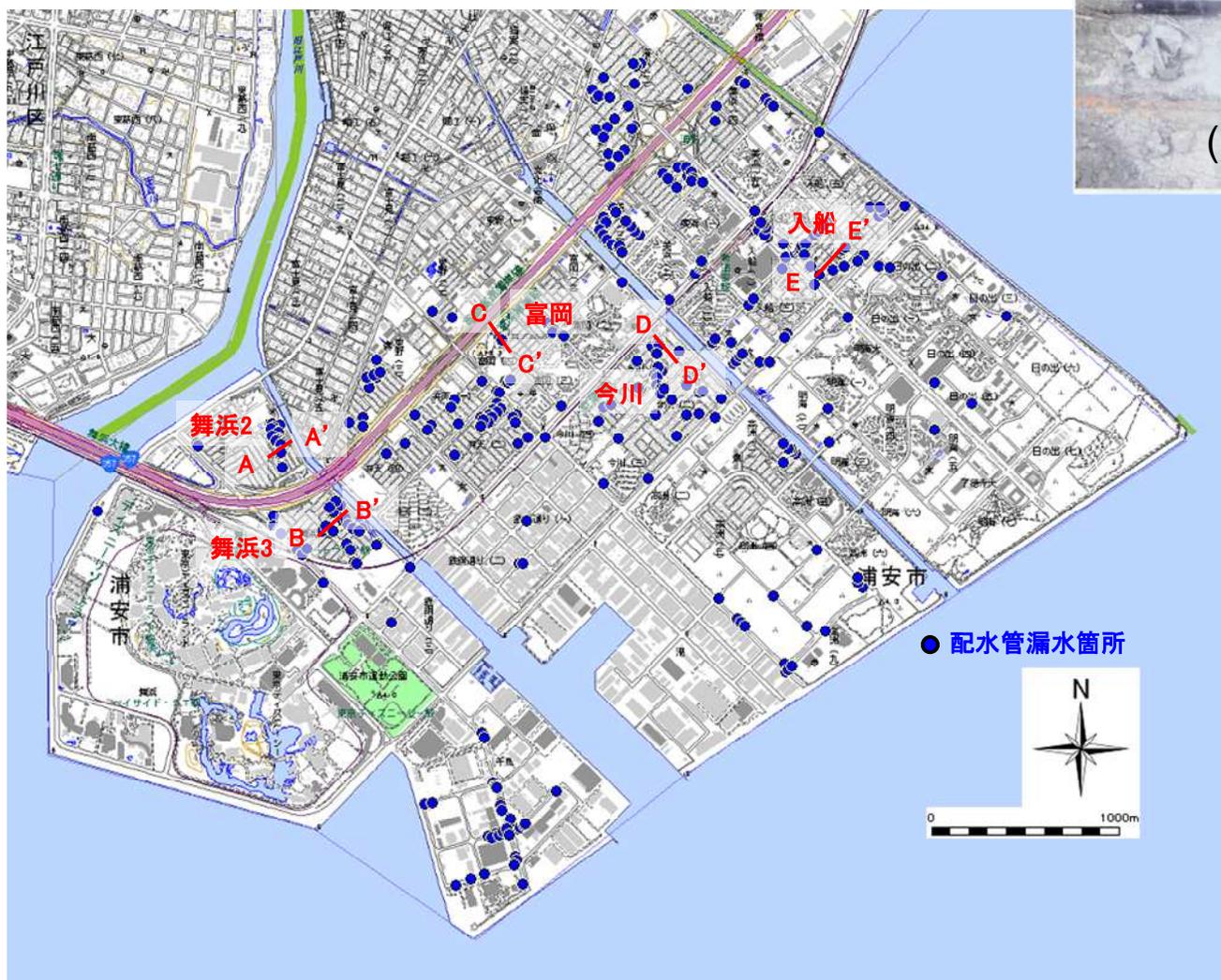
* 津波により家屋が流出した場合等については、上記被害件数に計上されていない。

東京湾岸の市街地の平面道路の被害状況



東京湾岸の上下水道、ガス、通信の地中埋設管の被害例（浦安での配水管被害箇所）

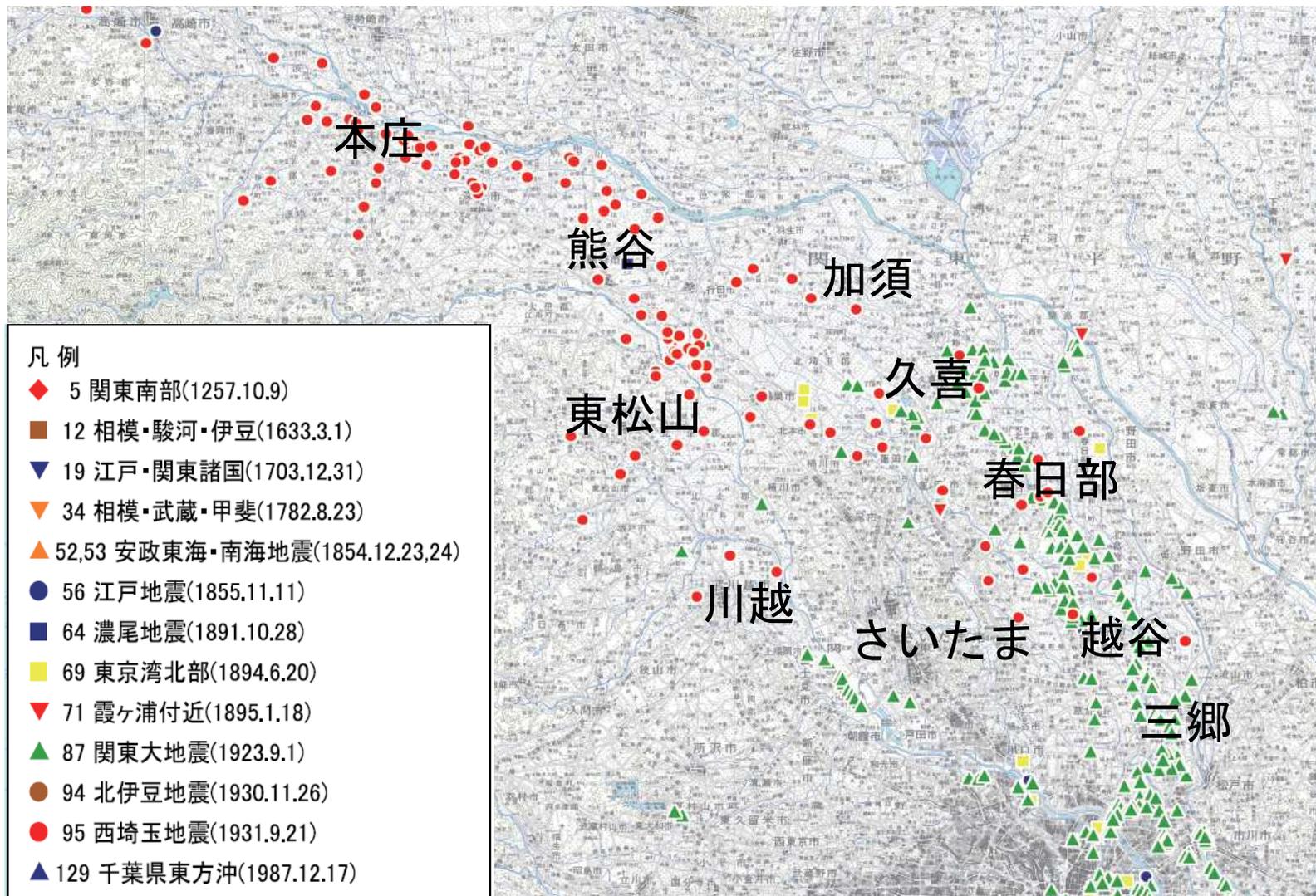
浦安市内の配水管漏水箇所



安田進・石川敬祐・五十嵐翔太・田中佑典・畑中哲夫・岩瀬伸朗・並木武史・斉藤尚登：東日本大震災における浦安市の水道管被害メカニズムの解明，日本地震工学会論文集，第16巻，第3号，pp.183-200，2016.

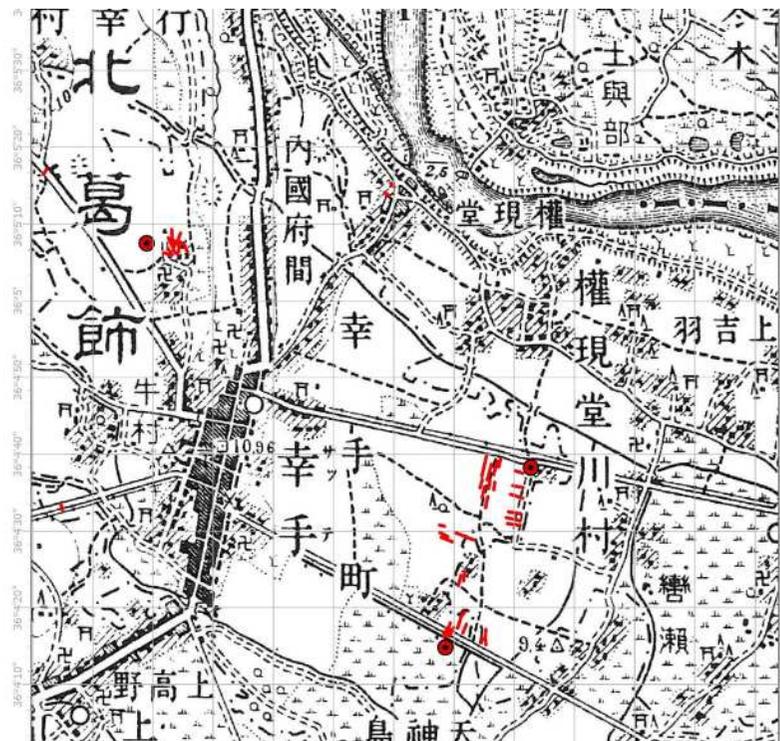
過去の地震時における埼玉県内で液状化が発生した箇所

①1923年関東地震と1931年西埼玉地震による液状化発生箇所



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.

②1923年関東大震災における埼玉県の液状化被害例

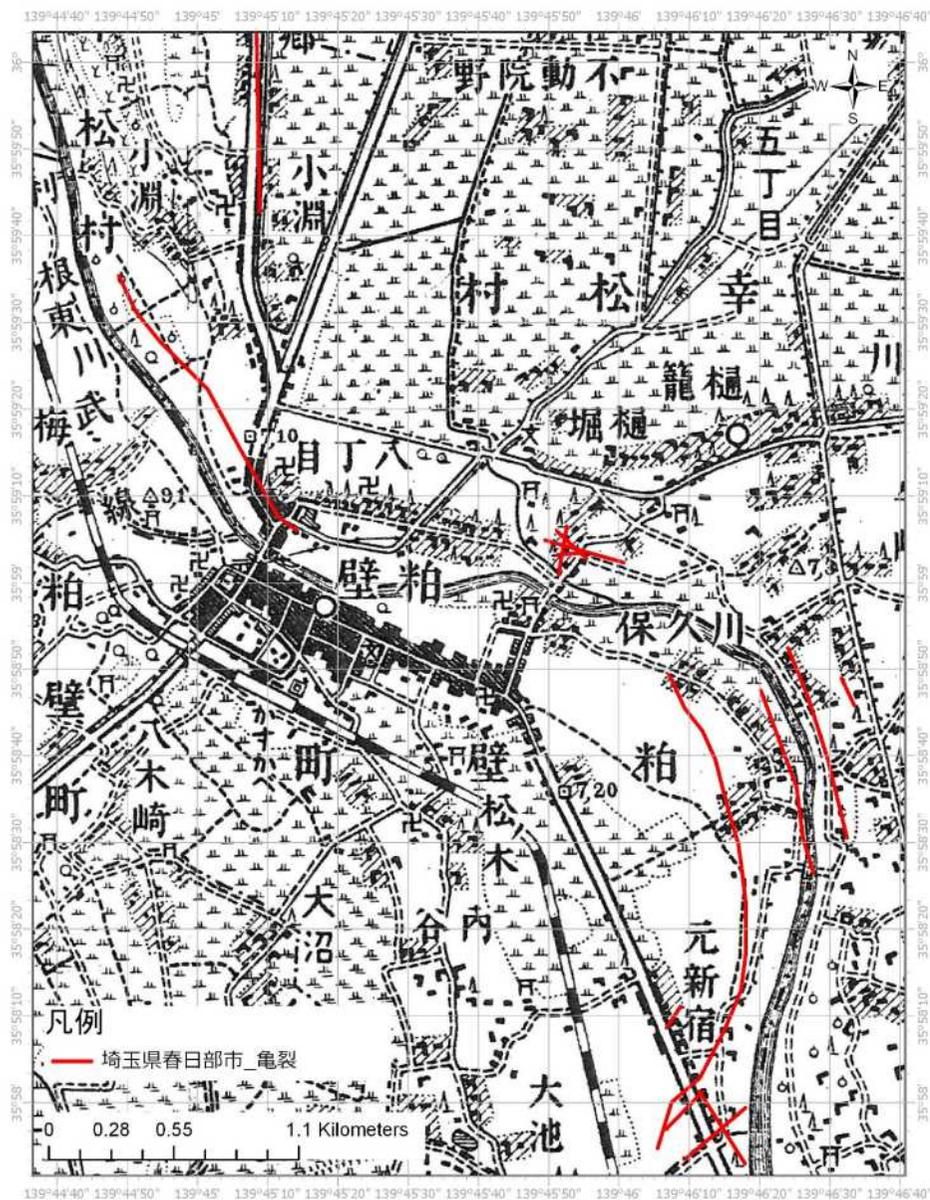


地質調査所によると、幸手の旧市街を取り巻く宅地や田畑に多数の地割れや噴砂孔を生じ、多量の砂水を噴出。

中川や古利根川沿いにも地割れが発生との証言もあった。



地質調査所によると、古利根川の北岸の畑、宅地、道路で川に並行な地割れ群ができた。その中でも杉戸小学校から杉戸駅にかけて大きな地割れや陥落地帯ができ、校舎などが傾斜・倒壊した。地割れや陥落地帯の幅は、最大5.4mもあり、多量の水、砂、浮石を噴出し、校庭が傾斜・倒壊した。



地質調査所によると、古利根川沿いの宅地、畑に多数の地割れができ、多量の砂水を噴出したため付近一帯15cm湛水し、砂も12cm堆積した。川久保の生垣が、古利根川の方に最大1.5m移動するなど、地盤の永久変位も発生した。地割れによって引き裂かれて半壊した家屋が少なかった。

また、元新宿では、国道4号線を斜めに横切る地割れが100mの間隔で2本でき、2本の地割れにはさまれた箇所は1m近く沈下したなどの証言もあった。

2011年東日本大震災により埼玉県で液状化した箇所

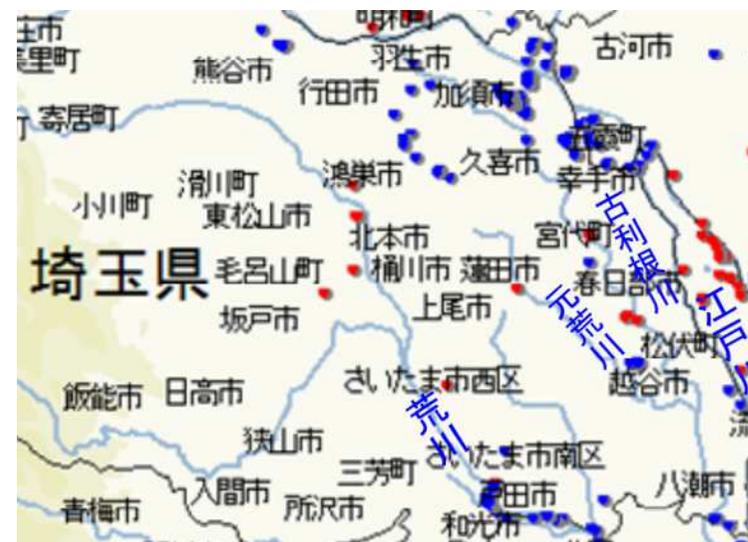
埼玉県でまとめられた液状化が発生した市町村



液状化が発生した市町村

https://www.pref.saitama.lg.jp/a1102/ekijyouk_ahasseibunpu.html

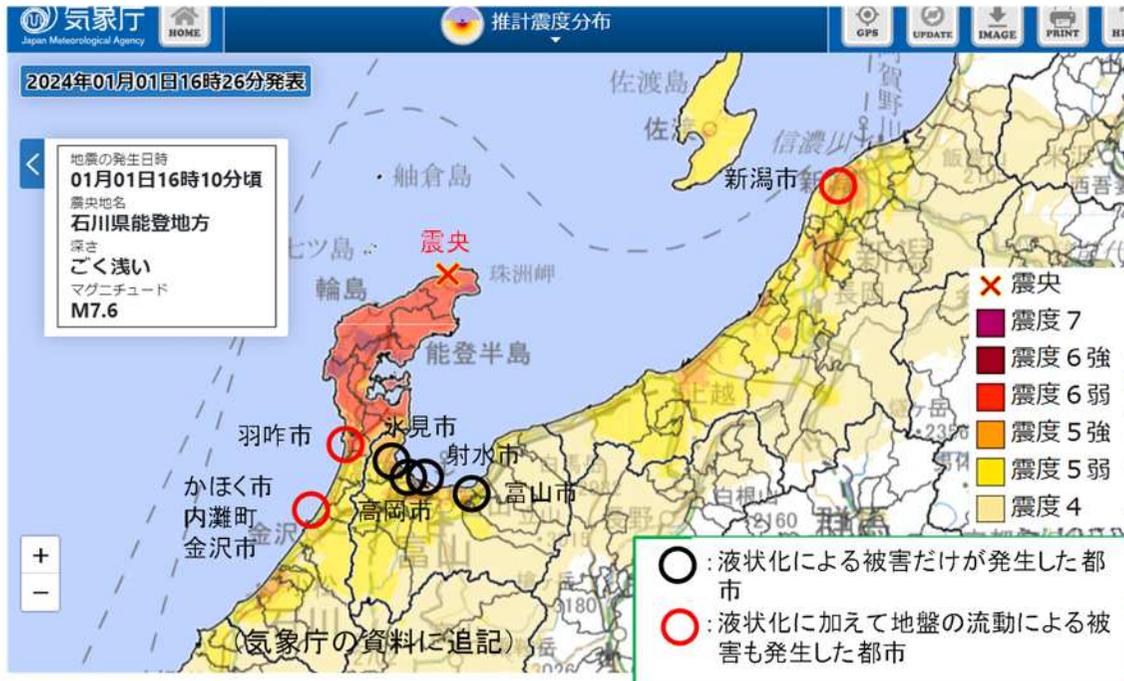
若松・先名がまとめた液状化発生地点
(埼玉県内の切り取った図)



●国土交通省関東地方整備局・地盤工学会(2011.8)
●若松・先名による追加地点(2014.9.10)

若松加寿江・先名重樹：2011年東北地方太平洋沖地震による関東地方の液状化発生条件と土地条件，日本地震工学会論文集，Vol.15，No.2，pp.25～44，2015.

2. 能登半島地震による住宅地の液状化被害



液状化による住宅被害数に関する2月時点での国土交通省の推定

新潟県：約9500件
 石川県：約3500件
 富山県：約2000件
 合計：約15000件

実際にはまだ多い。現在自治体で集計中。

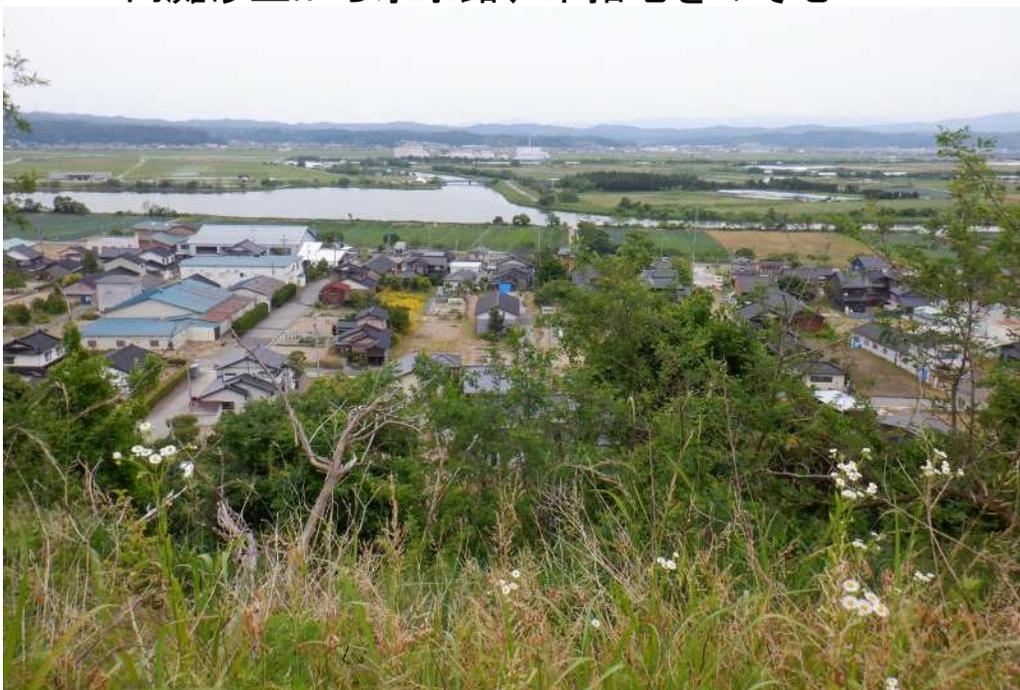
東日本大震災では約27000件

微地形	液状化した都市
砂丘内陸側縁辺部	内灘町、かほく市、金沢市、羽咋市、新潟市
旧河道	新潟市、羽咋市、富山市
砂州	氷見市、射水市
埋立地	高岡市
水田上の盛土地	高岡市

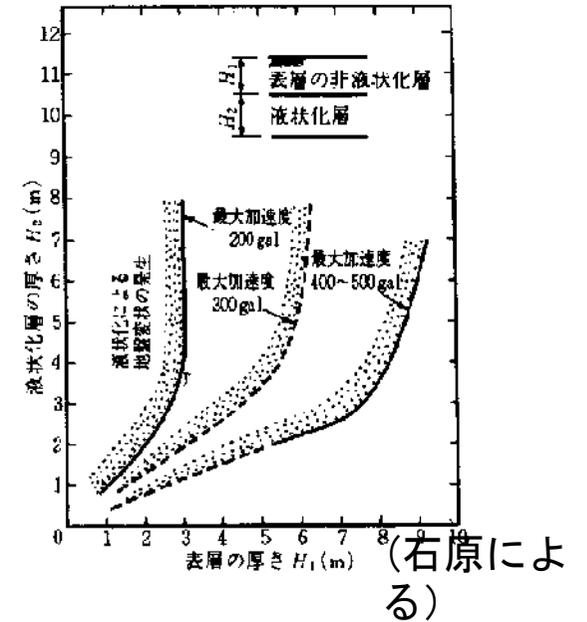
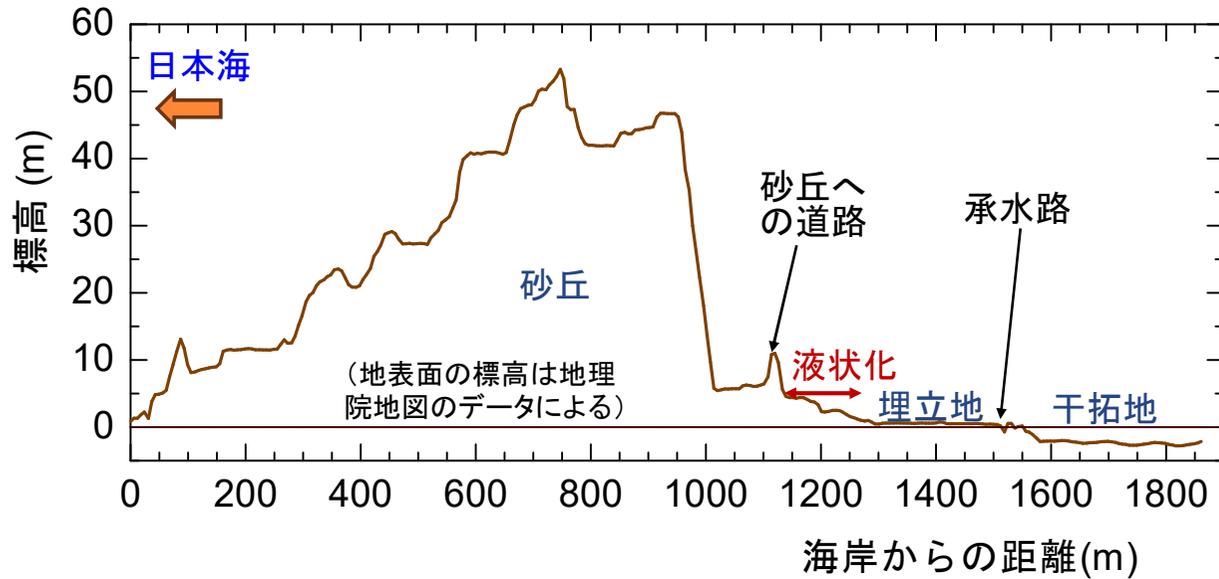
石川県の特徴的な被害

内灘砂丘内陸側縁辺部での被害

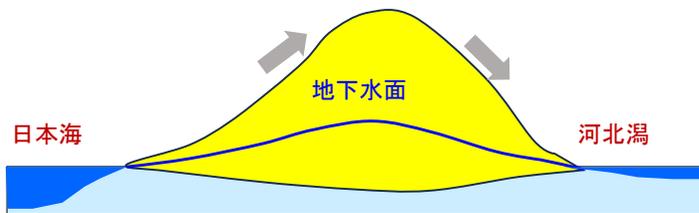
内灘砂丘から承水路、干拓地をのぞむ



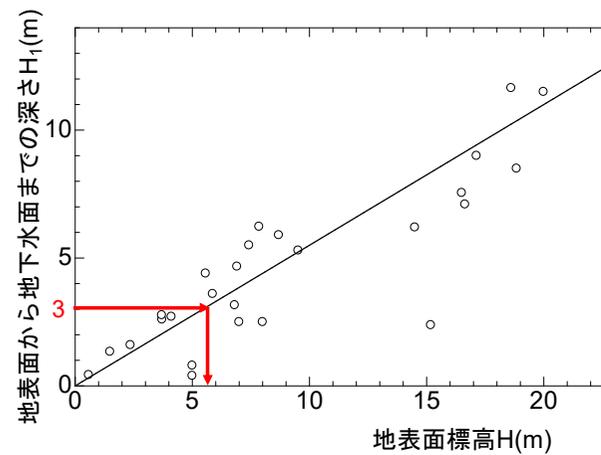
X-X'断面



推定される地下水面分布



地表面標高と地下水面の深さ



一般に地下水位3mより深いと地表面で液状化被害が発生しないので、標高が3~6mより高い所では、液状化被害が発生しないことになる。

X-X' 測線

流動による引張りと沈下

流動による引張り亀裂

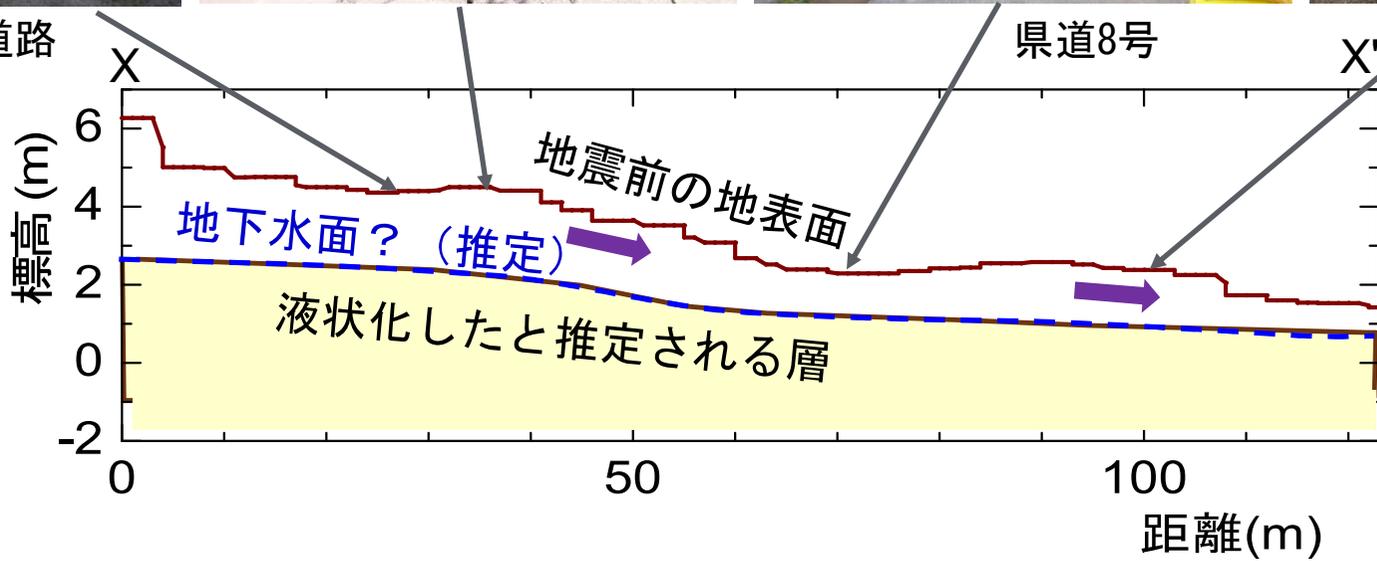
流動による圧縮と押上げ

流動による引張り亀裂



一つ砂丘側の道路

県道8号



(地表面の標高は地理院地図のデータによる)

Y-Y' 測線

段差を伴う引張り亀裂

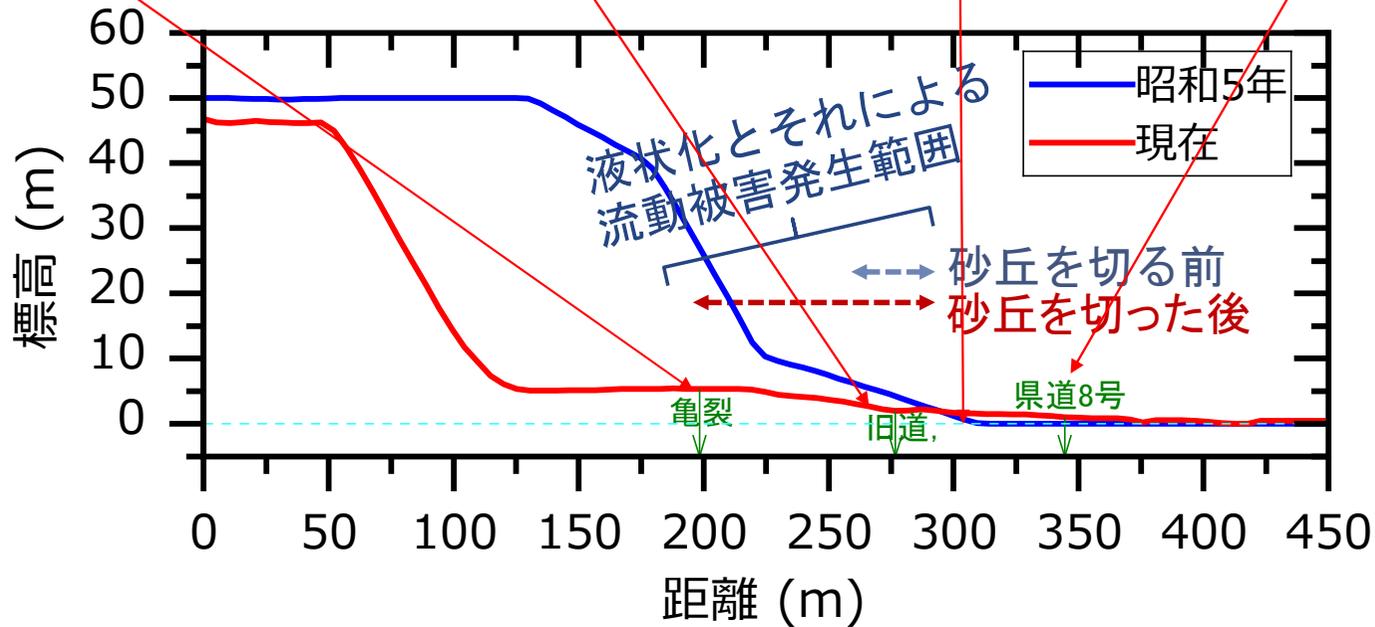
旧道への宅地の流れ出し

被災と無被災の境付近

無被害の県道8号

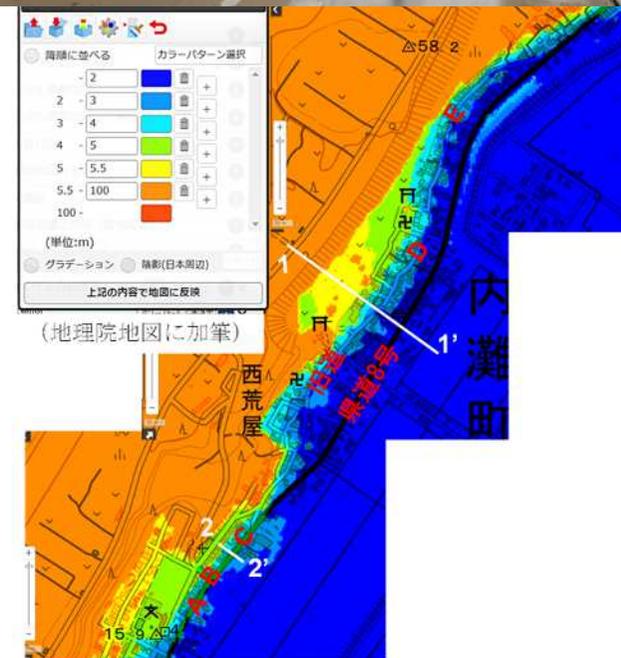


➤ 宮坂・西荒屋では昭和36年～39年にかけて、集落背後の砂丘崖の砂を切って埋立が行われた。



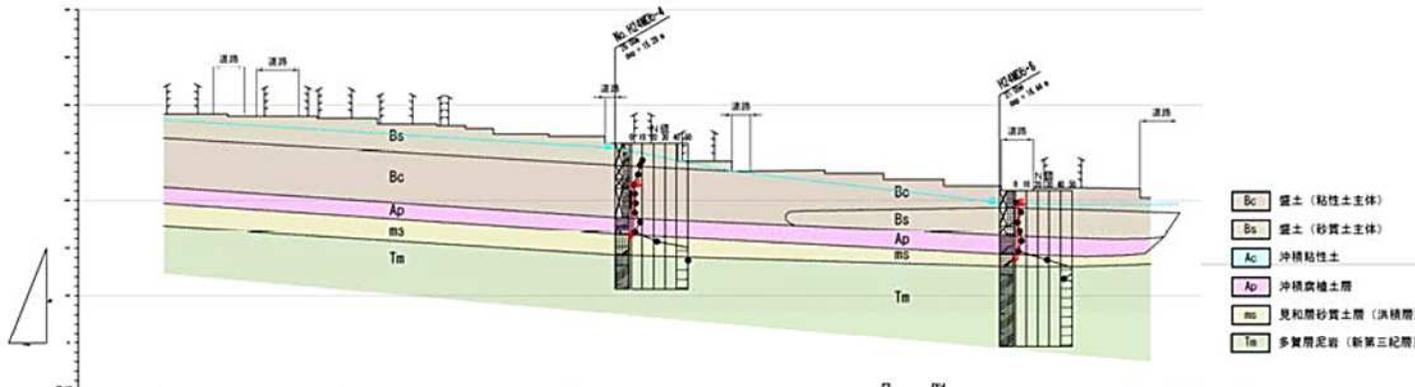
➤ 砂丘を切る前の断面だと、液状化と流動範囲は狭かったのではないかな？

その他の地点で生じた特徴のある被害



類似の地盤の流動事例；

東日本大震災時に東海村の台地の盛土造成地で発生した流動被害



(東海村による)

復旧時の地下水
位低下による液
状化・流動対策

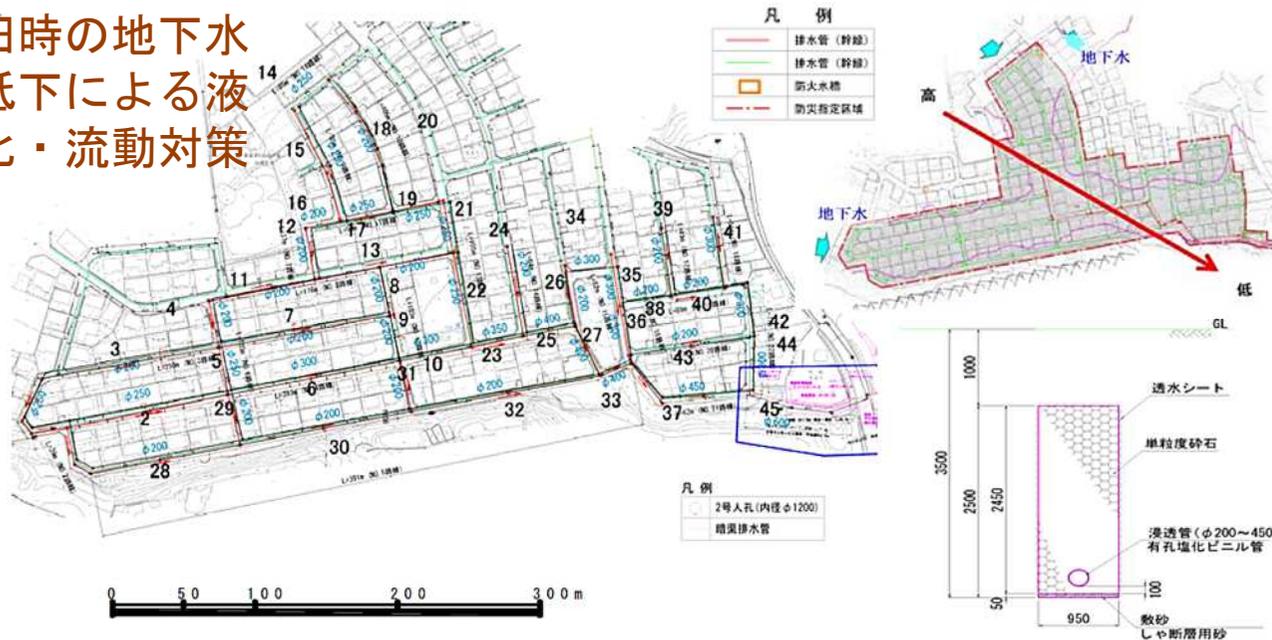


図 17 緑ヶ丘団地における地下水低下用排水パイプ配置¹⁾

砂質土で締固め不十分で
盛った盛土造成地でも発
生の可能性あり

橋本隆雄・大山丈吉・安田
進：東日本大震災による東海
村南台団地・緑ヶ丘団地の被
害分析及び復旧対策について、
地盤工学会特別シンポジウム
—東日本大震災を乗り越えて—
—, pp. 366-374, 2014.

ハザードマップの限界

実際に液状化した区域となかなか合わない



(国土地盤情報データベース¹⁾に加筆)

a) 国土交通省



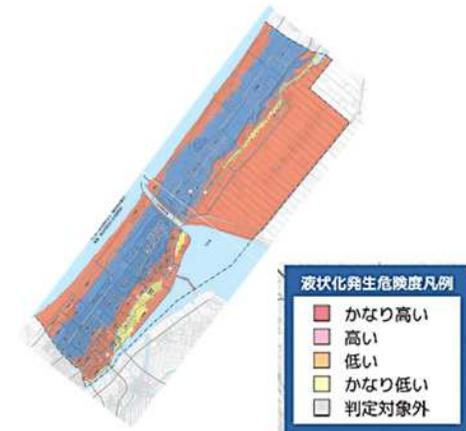
c) 金沢市



b) 北陸地方整備局

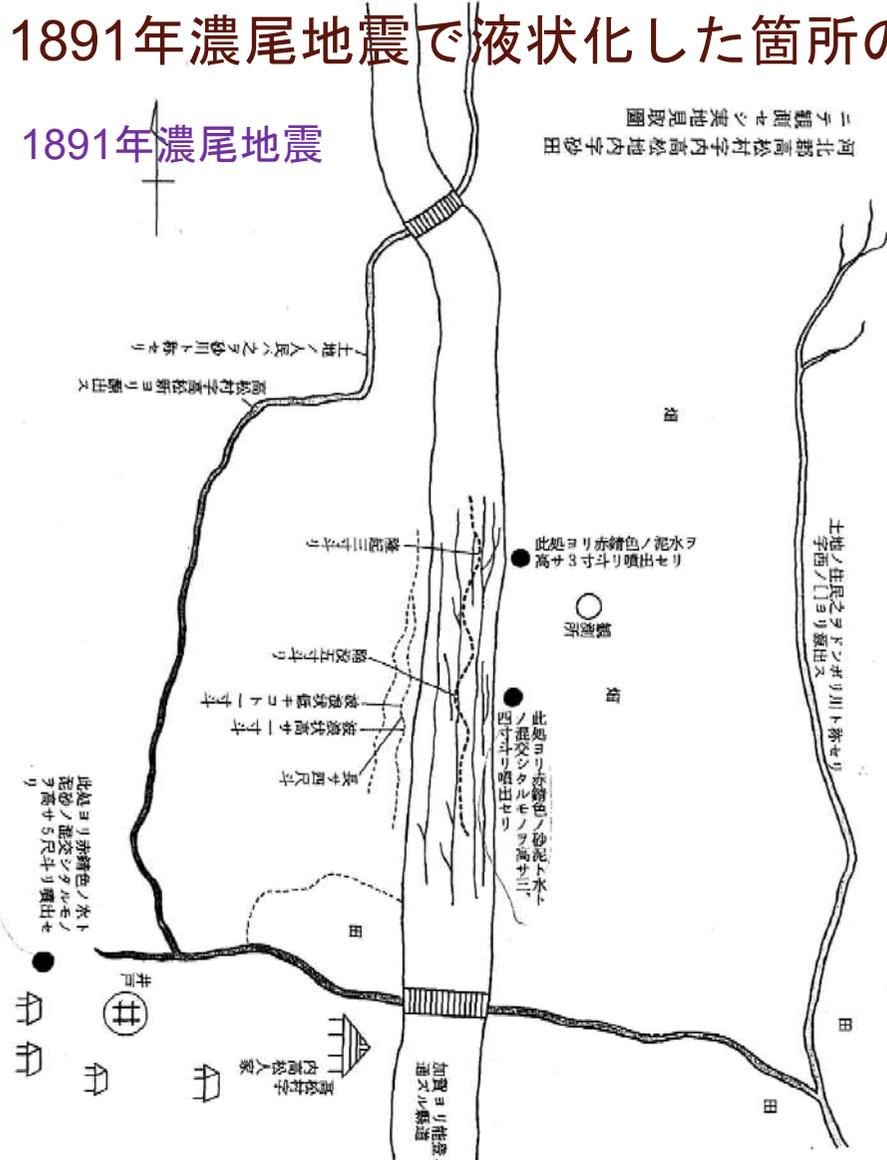


d) 内灘町



1891年濃尾地震で液状化した箇所の再液状化

1891年濃尾地震



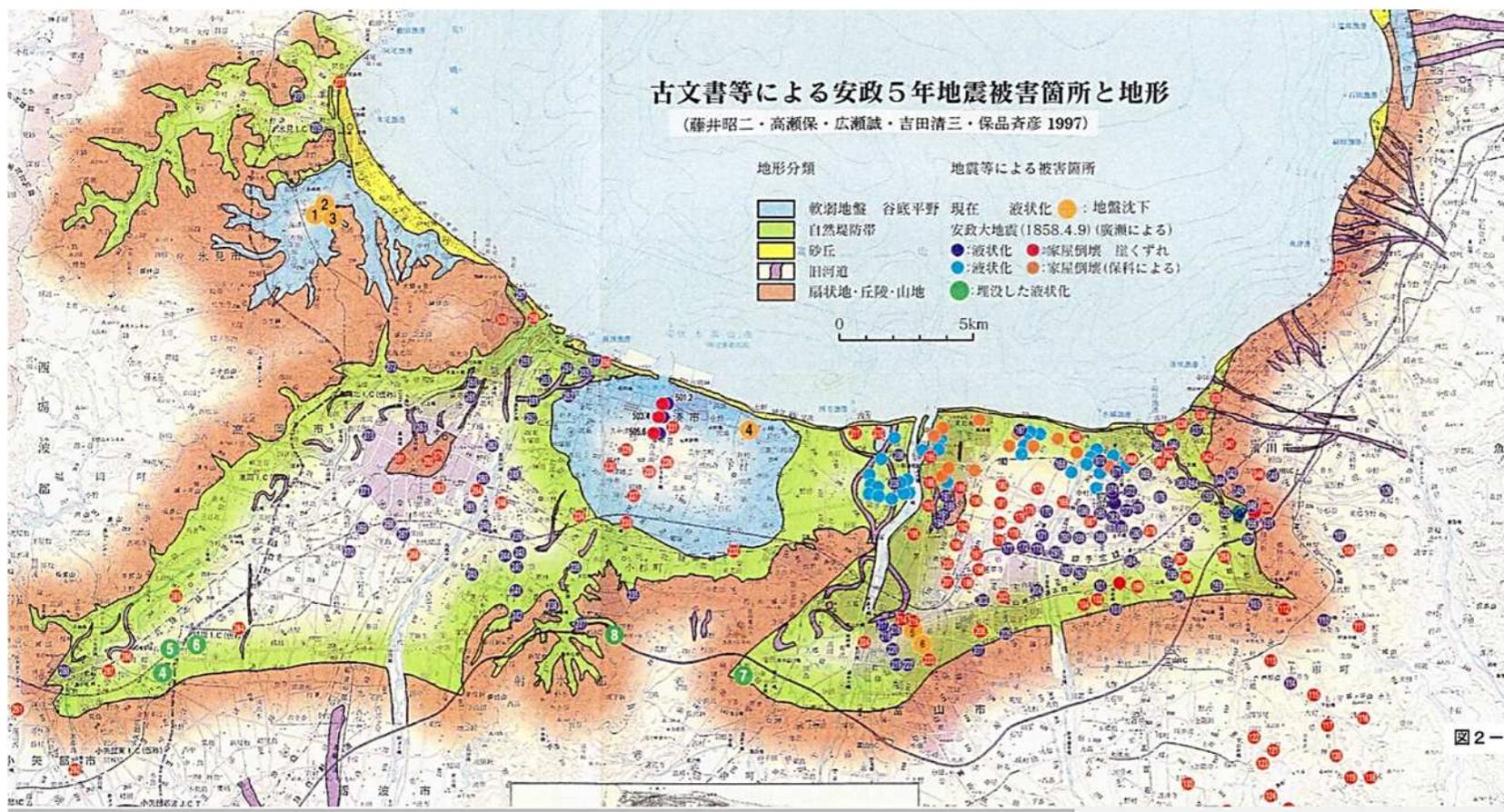
2024年能登半島地震



岐阜大学：郷土資料(10) 濃尾地震のアンケート調査報告 石川県の部、昭和54年.

富山県の特徴的な被害

1858年飛越地震による液状化地区



内閣府による

https://www.bousai.go.jp/kyoiku/kyokun/kyoukunnokeishou/rep/1858_hietsu_jishin/index.html

高岡市伏木

- 道路沿いに噴砂や変状があり液状化が発生したと思われる箇所
- 道路沿いに噴砂や変状がなく液状化していないと思われる箇所

実線：1月27日に自分で調査
破線：7月12日に高岡市の方に案内していただいて調査



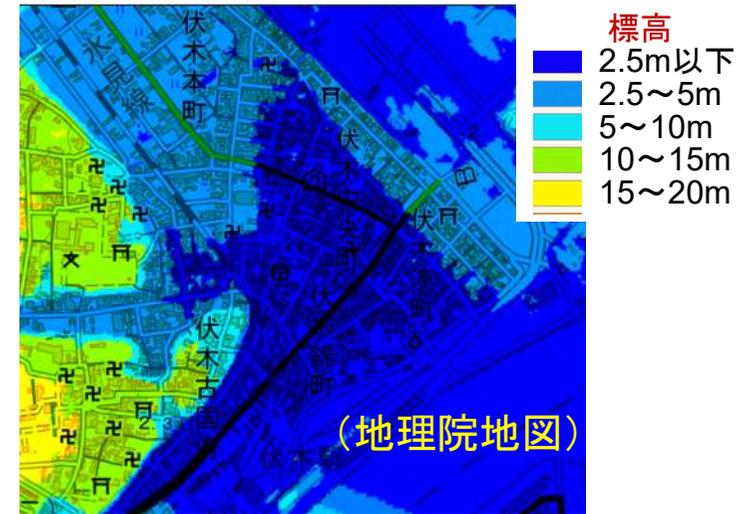
能登半島地震で液状化した範囲



微地形分類



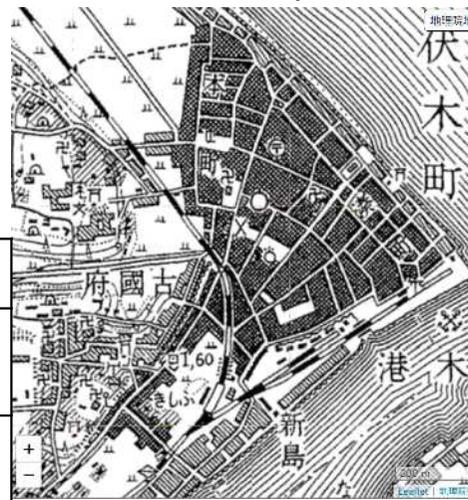
標高分布



飛越地震時の被害



旧版地形図 (国土地理院) 越中伏木地理志稿 1930年



- 飛越地震で液状化が発生した地区が166年後に再液状化した。
- 液状化発生地区は微地形では氾濫平野で特に液状化し易い微地形ではない。
- 詳細に調べると江戸時代に埋め立てられた土地

地名	被害状況
257 伏木	町中地割れ、水吹き出し浸水、地盤破れ、水砂噴出
258 伏木台場東	4箇所地割れ

新潟市の特徴的な被害

砂丘内陸側縁辺部での液状化および流動による被害

旧河道部の液状化による被害



(治水地形分類図による)

1964年新潟地震時の液状化発生地区との比較



- 今回液状化による被害が甚大であった善久、寺尾、天野とも1964年新潟地震の際に液状化が発生していた地区で、60年後の地震で再液状化したことになる。
- 他地区でも再液状化した箇所あり。
- 善久、天野は旧河道、寺尾は砂丘背後縁辺の緩やかに傾斜した地盤。

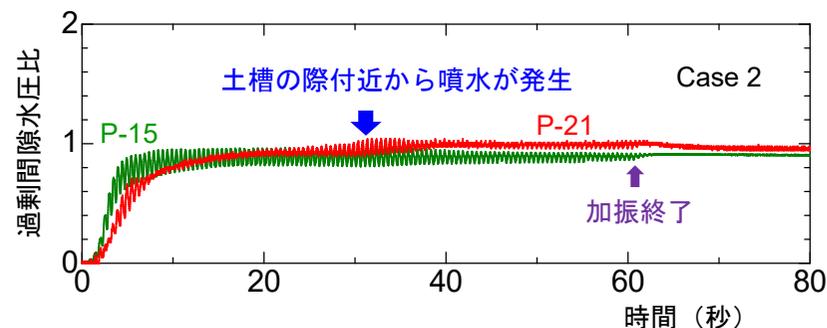
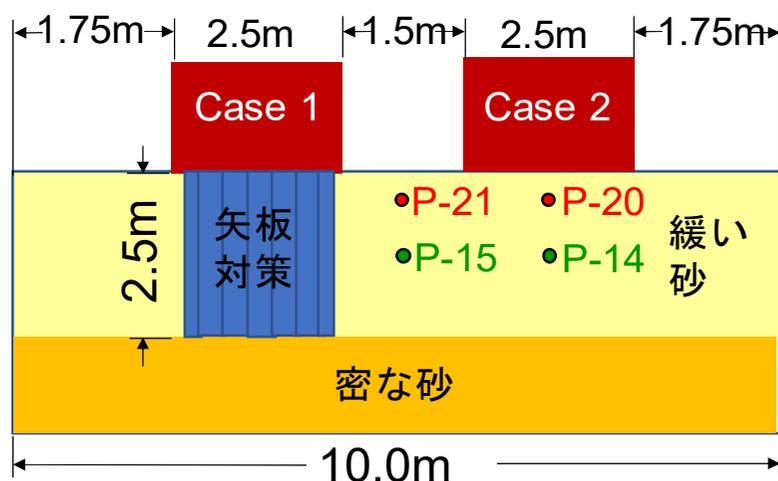
埼玉県の場合、関東大震災、西埼玉地震、東日本大震災で液状化した箇所は、近い将来の地震で再液状化すると考えておいた方が良いでしょう。

3. 液状化により戸建て住宅がめり込み沈下し傾くメカニズム

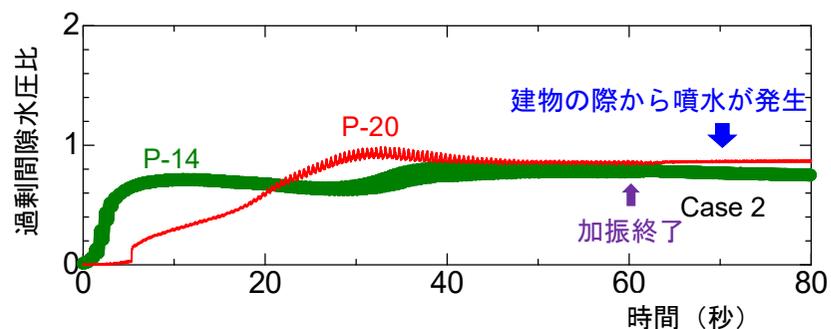
建築研究所の大型振動台を用いた実験

最終めり込み沈下量 = -4.1 cm

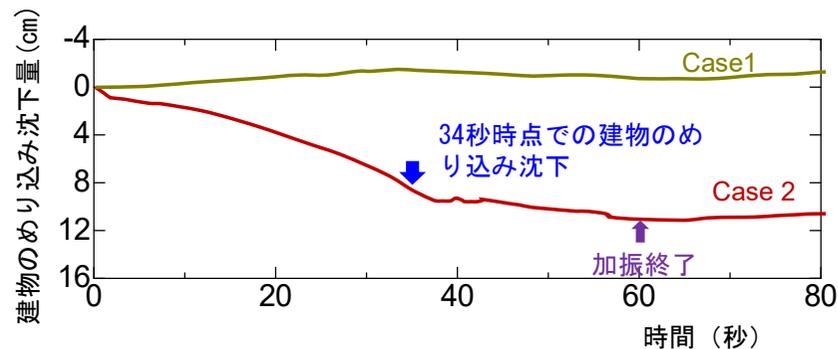
最終めり込み沈下量 = 14.1 cm



(1) 建物から離れた地盤での過剰間隙水圧比

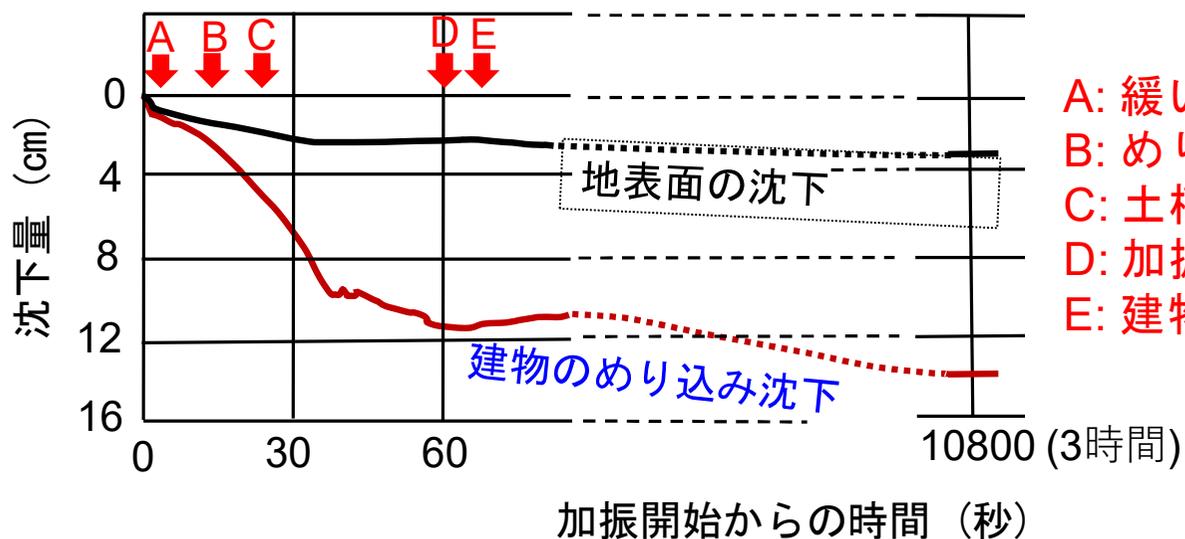


(2) 建物直下の地盤での過剰間隙水圧比



(3) 建物のめり込み沈下量

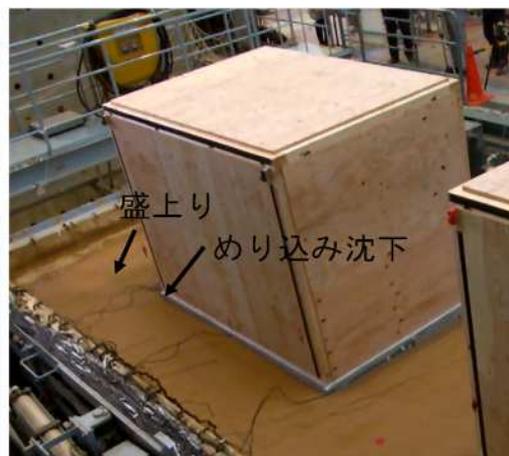
建物のめり込み沈下と地表面の沈下の時間経過



- A: 緩い砂で液状化が発生
- B: めり込み沈下が加速
- C: 土槽の際付近から噴水発生
- D: 加振終了
- E: 建物際から噴水発生



(1) 26秒後に土槽の際付近から噴水発生

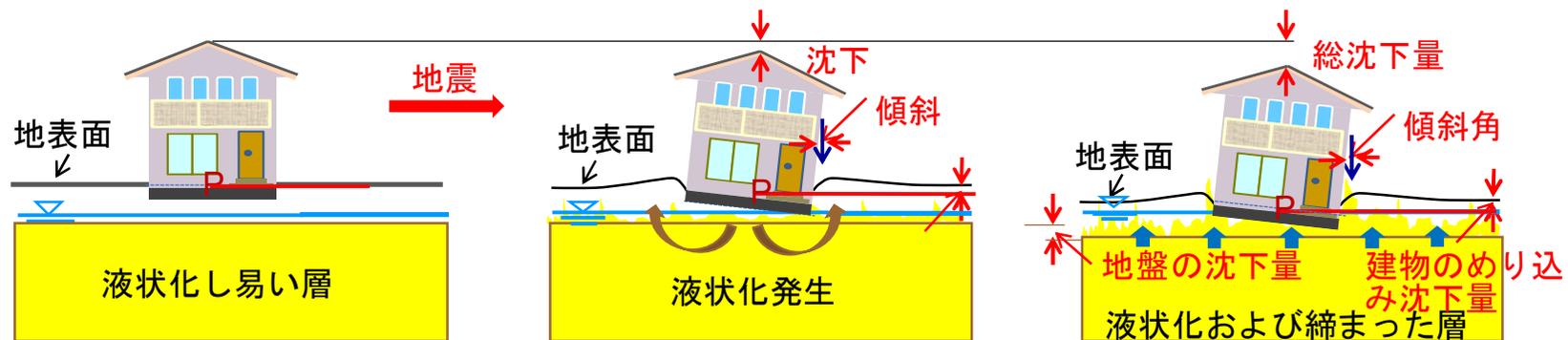


(2) 34秒後でのめり込み沈下状況



(3) 70秒後に建物際から噴水発生

振動台実験や地震時の動画などから考察される液状化による建物のめり込み沈下や傾斜発生メカニズム



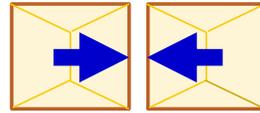
- (1) 噴水や噴砂が発生してできた穴に落ち込んで建物がめり込み沈下するのではなく、液状化によって軟化（せん断剛性が急減）した地盤に建物の荷重によりめり込んで沈下する。その際建物下の地盤を横方向に押しつけるため、建物周囲の地表面が少し盛り上がる。
- (2) 液状化層からの間隙水の絞りだしおよびそれに伴う体積圧縮はゆっくりと生じるため、地表面の沈下もゆっくり生じる。

建物の傾斜が生じる主要なメカニズム

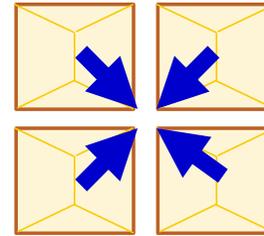
近接している住宅同士が傾斜に与える影響の事例



(a)1棟独立



(b)2棟が近接

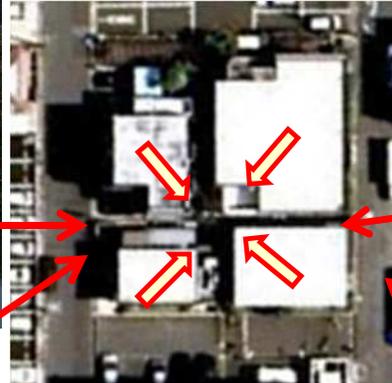


(c)4棟が近接

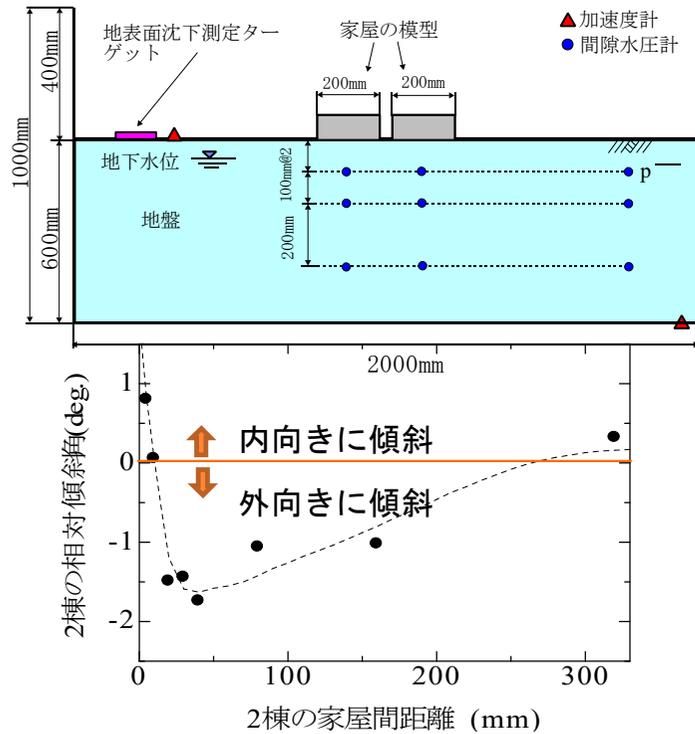




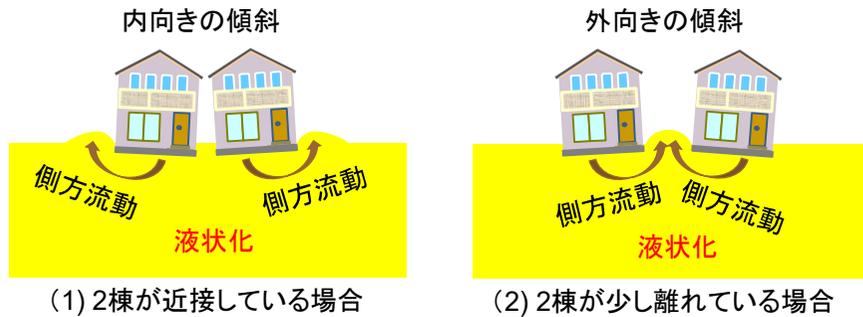
4棟の傾斜例
(浦安)



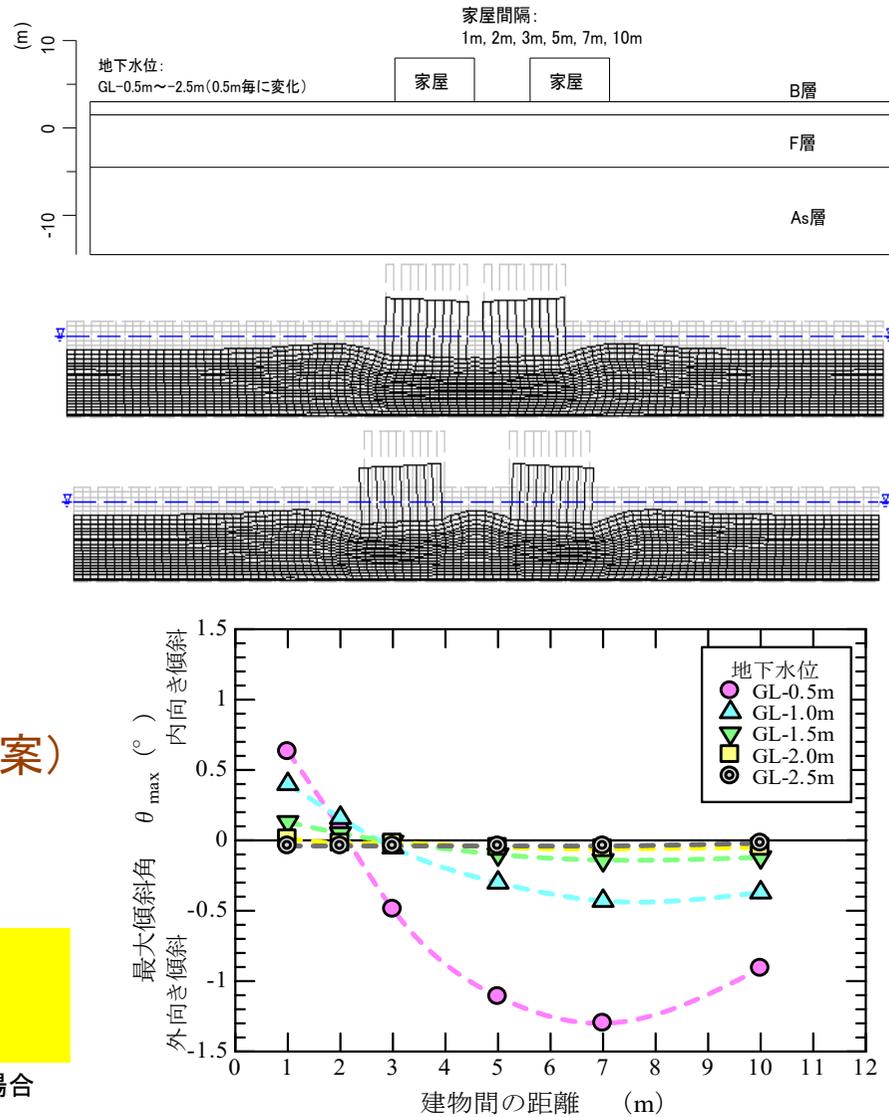
模型を用いた振動台実験



2棟間で傾斜が生じるメカニズム (私案)



地下水位の影響に関する残留変形解析 “ALID” での解析例



- 近接していると内向きの傾斜が大。
- 地下水位が深くなると傾かなくなる。

安田進・石川敬祐：
地下水位低下が戸建て住宅の液状化対策に与える効果，日本地震工学会論文集，第15巻，第7号（特集号），pp.205-219，2015.

東日本大震災からの復旧・復興時に生じた問題

傾いた家の中で生活するとめまいや吐き気などの障害が生じる



東日本大震災の約2か月後に内閣府から出された被害判定基準

分類		全壊	大規模半壊	半壊	一部損壊
判定基準	傾斜角	> 50/1000 	16.7/1000 ~ 50/1000 	10/1000 ~ 16.7/1000 	<10/1000
	沈下量	床上1mまで	床まで	基礎の天端 25cmまで	

- 液状化により少し傾くだけで生活できなくなり、被災後持ち上げて水平化する沈下修正が必要。
- 沈下修正だけ(液状化対策なし)でも300万円~500万円程度必要、他に外構などと修復費も必要。