

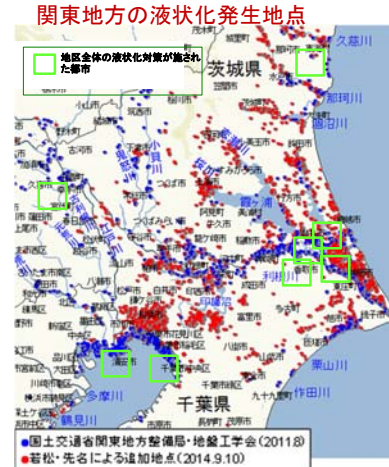
## 液状化に関する最近のトピックス、研究成果など

1. 東日本大震災で生じた液状化被害の特徴
2. 市街地全体の液状化対策の必要性と方法
3. その他、最近の話題

東京電機大学 安田 進

## 1. 東日本大震災で生じた液状化被害の特徴

### (1) 液状化が発生した範囲に関して



(若松・先名による)

- ▶ 震源域が広がったため、青森県から神奈川県南北約650kmの広範囲で液状化が発生。
- ▶ 震央から最も遠い液状化地点の震央距離は440km。
- ▶ 関東地方の低地では1923年関東地震の際に各地の自然堆積地盤で液状化が発生したが、そこが殆ど液状化しなかった。
- ▶ 一方、関東地方では住宅地の開発のために、埋立地などの液状化し易い人工地盤が多く造成されていて、そこで液状化が多く発生。



- ▶ 南海トラフの地震では太平洋・瀬戸内海沿岸のみならず、日本海沿岸まで広範囲に液状化が発生する可能性あり。

### (2) 液状化による建造物の被害に関して

- ▶ 広い範囲で液状化した割には、橋梁や中層建物などの被害は目立たなかった。京葉線の高架橋の基礎は液状化を考慮して設計しており、一面に液状化した浦安でも被害を受けなかった。
- ▶ 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、住宅地を造成した時点では設計に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。

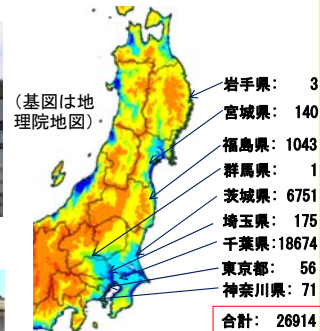
浦安市での被災・無被災事例  
液状化を考慮して設計してあった高架橋は被害なし



戸建て住宅・道路・ライフラインでは甚大な被害発生

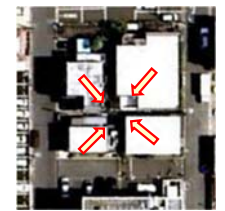


東日本大震災での液状化による戸建て住宅の被害数

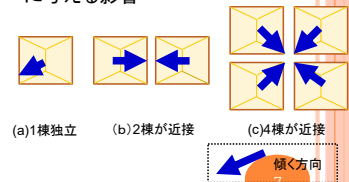


\* 国土交通省都市局調べ(平成23年9月27日調査時点)  
\* 津波により家屋が流出した場合等については、上記被害件数に計上されていない。

東京湾岸の戸建て住宅の被害状況



近接している住宅同士が傾斜に与える影響

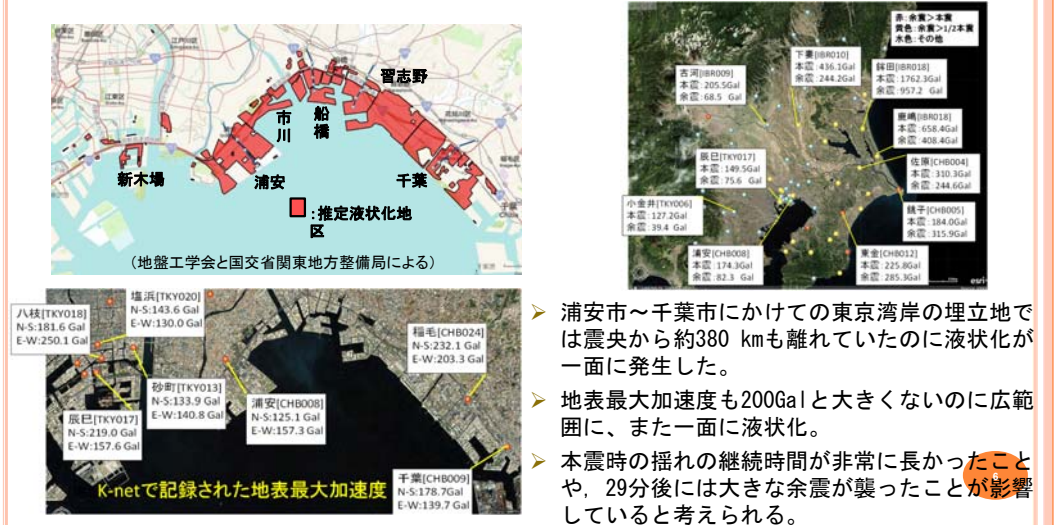




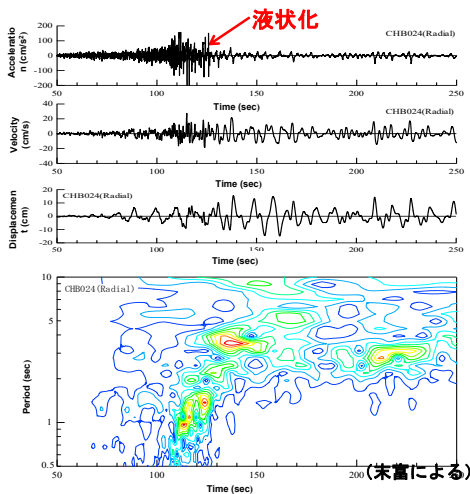
東京湾岸の市街地の平面道路の被害状況



(3) 長い継続時間や余震が液状化の発生や構造物の被害に与えた影響



- 浦安市～千葉市にかけての東京湾岸の埋立地では震央から約380 kmも離れていたのに液状化が一面に発生した。
- 地表最大加速度も200Galと大きくないのに広範囲に、また一面に液状化。
- 本震時の揺れの継続時間が非常に長かったことや、29分後には大きな余震が襲ったことが影響していると考えられる。



- 千葉市に設置されたK-NET稲毛では噴砂が生じており液状化したと判断されている。
- 加速度波形を見ると126、7秒付近から急に振幅が小さくなり周期も長くなっているため、この時点で液状化したと判断できる。
- 加速度記録を積分して変位波形を求めると、液状化発生後に約30cmの変位振幅の波が2分程度も続いていた。



安田進・石川敏祐・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。

(4) 29分後に襲った余震の影響

浦安において本震直後から29分後の余震まで連続して撮影された写真(小川勝徳氏撮影)

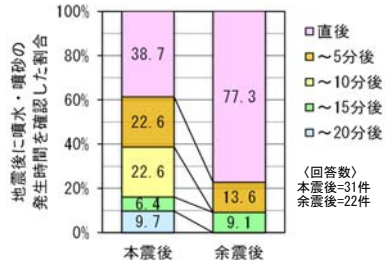
本震で揺れ始めたのは14:47、余震で揺れ始めたのは15:16

Yasuda, S., Harada, K., Ishikawa, K. and Kanemaru, Y.: Characteristics of liquefaction in Tokyo Bay area by the 2011 Great East Japan Earthquake, *Soils and Foundations*, Vol.52, Issue 5, pp.793-810, 2012.

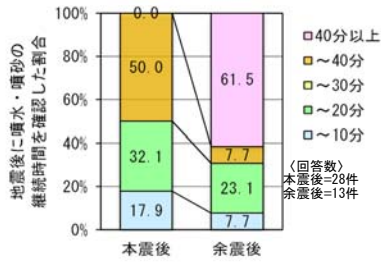


噴水・噴砂の発生に関する住民の方からのアンケート結果

(1) 噴水・噴砂の発生時間



(2) 噴水・噴砂の継続時間

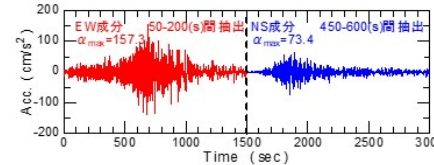


石川敬祐・安田進・萩谷俊吾：千葉県浦安市の液状化現象の発生状況調査，日本地震工学会論文集，Vol.12, No.4, pp.56～64, 2012.

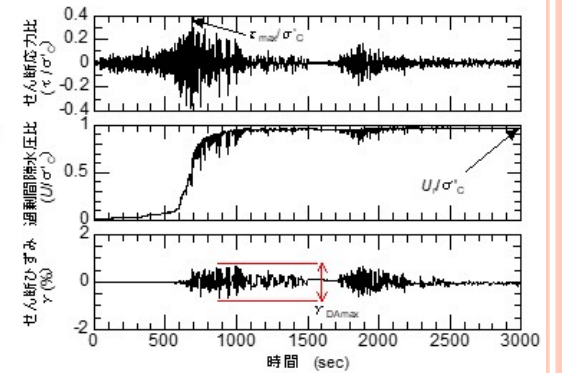
- 連続写真によると本震発生16分時点で水が道路に少し噴出。余震から5分後の同じ道路（反対側から撮影）では厚い泥水で完全に覆われ，家屋が大きく沈下。
- アンケート調査によると本震直後から10分後位までの間に噴水・噴砂が発生し始め，約半分の地点で29分後の余震までに一度噴出が止まったが，残りの地点では余震時まで噴出が継続。
- 本震で噴水や噴砂が発生し一度噴出が止まった地点でも，余震直後に再び噴出が発生。
- 余震が液状化による被害を甚大にした可能性があり，本震の継続時間の長さだけでなく，短時間で続いて発生する余震の影響も頭に入れておく必要がある。

(5) 長時間震動と余震の影響を考慮した波形の補正係数に関する繰返しねじりせん断試験

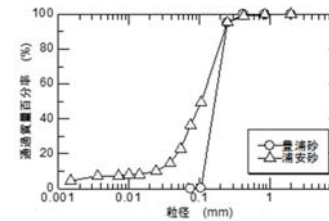
試験に用いた入力地震波形の形状



地震波荷重を用いた試験結果例（浦安砂  $\alpha=96.2\%$ ）



各土質試料の粒径加積曲線



石川敬祐、安田進、青柳貴是：海溝型巨大地震時の合理的な簡易液状化判定手法に関する研究、地盤工学ジャーナル、地盤工学会、Vol.9, No.2, pp.169-183, 2014.

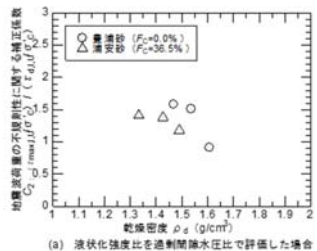
道路橋示方書で用いられている波形の補正方法

$$R_{l,mav} = C_1 \times C_2 \times C_3 \times C_4 \times C_5 \times R_1 = C_w \times R_1$$

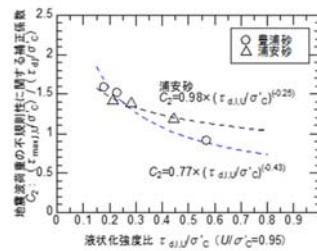
$C_2$ ：地震波荷重のランダム性に関する補正（平均的に1.62程度）

- 南海トラフで巨大地震が発生した場合は地震動の継続時間が長いとか、本心後にすぐ余震に襲われたりすることを考えると波形の補正係数をいくらにするか？
- 本震で地下水位が上がるため、余震時は液状化対象層が厚くなることもある。

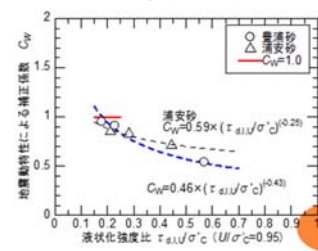
$C_2$ と供試体の乾燥密度の関係



$C_2$ と正弦波荷重による液状化強度比の関係

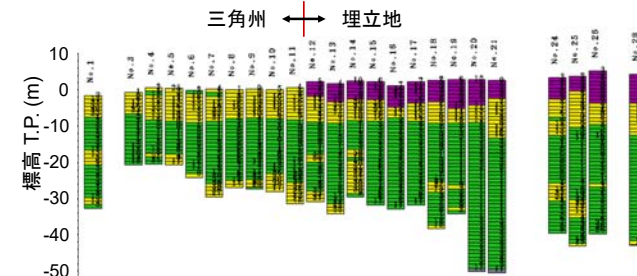
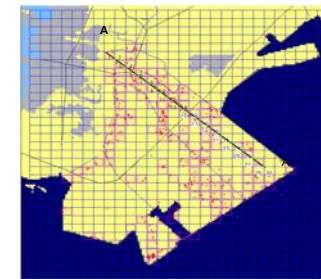


地震動特性による補正係数と液状化強度比の関係



(6) 細粒土やエイジング効果が液状化判定結果に与えている影響

- 浦安市では埋立地が液状化し三角州（干拓地）は液状化しなかった。
- 埋立土のみが液状化したはずだが...

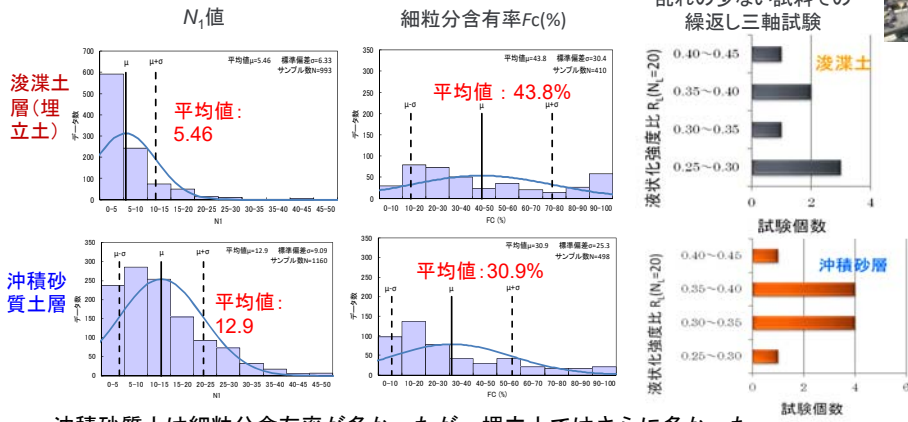


（全国電子地盤図による浦安の地盤モデル）



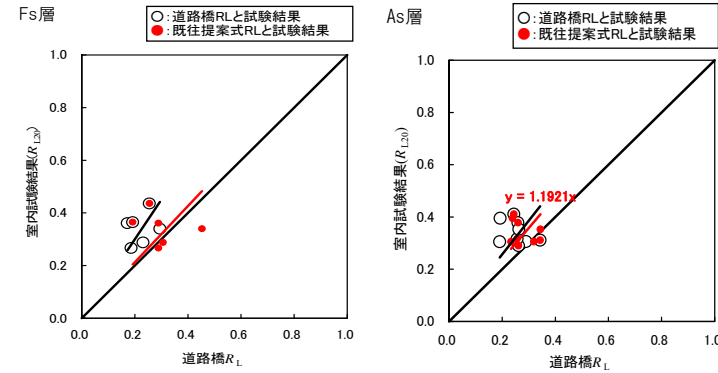
地震後に行われた浦安市の委員会での資料

(浦安市による)



沖積砂質土は細粒分含有率が多かったが、埋立土ではさらに多かった。

N値をもとに道路橋示方書や東京低地の式から推定したR<sub>L</sub>と試験結果の比較

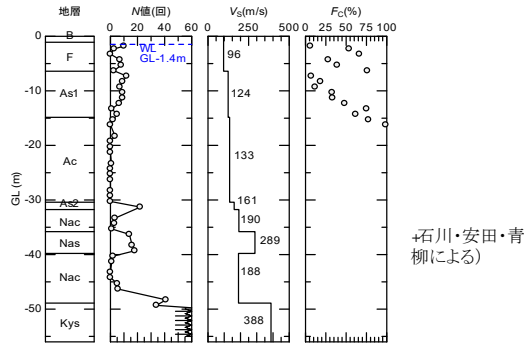


- F<sub>S</sub> (埋土) 層の試験結果は既往提案式(東京低地の式) とよく合い、道路橋示方書の式とより大きかった。
- A<sub>S</sub> (沖積砂) 層の試験結果は道路橋示方書や東京低地の式の1.2倍程度大きかった。エイジング効果の影響?

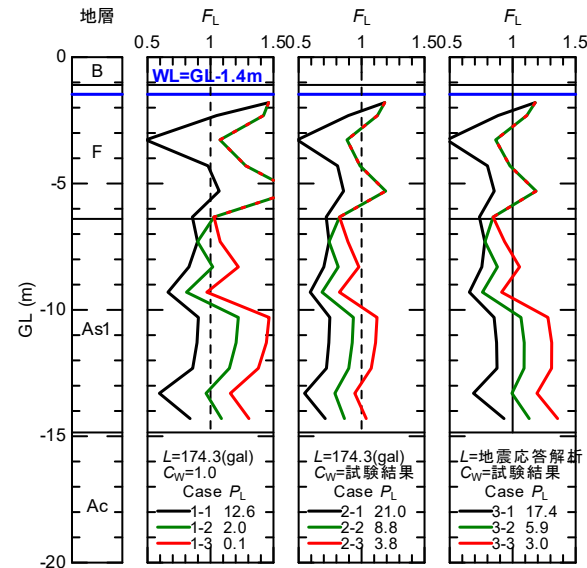
(7)長い継続時間やエイジング効果を考慮した液状化判定結果の比較

浦安市高洲小学校の地盤に適用

(注)道路橋示方書の式は2011年時点



検討内容	液状化強度比の推定式		外力条件	地震動特性に関する補正係数: C <sub>w</sub>
	B, F層: 盛土, 埋土層	As層: 沖積砂層		
1-1	道路橋示方書	道路橋示方書	174.3gal 合成加速度の最大値	1.0 道路橋示方書(タイプ1)
1-2	東京ガス式	東京ガス式		
1-3	東京ガス式	東京ガス式×1.2倍		
2-1	道路橋示方書	道路橋示方書	一次元地震応答解析 各深度の最大せん断応力比	地震波による試験結果 <sup>9)</sup> C <sub>w</sub> =0.59 × R <sub>L20</sub> <sup>(-0.25)</sup>
2-2	東京ガス式	東京ガス式		
2-3	東京ガス式	東京ガス式×1.2倍		
3-1	道路橋示方書	道路橋示方書		
3-2	東京ガス式	東京ガス式		
3-3	東京ガス式	東京ガス式×1.2倍		



- ケース3-3液状化した層の説明がなんとか出来た。
- エイジングが液状化強度やN値の増加に与える影響をしっかりと研究する必要がある。

(8) 液状化発生後も揺すられ続けた揺動による道路とライフラインの被害

- 3~4秒の周期で歩道が突き上げることが繰り返されている。
- K-NET稲毛はここから3kmと近い。加速度波形を積分して推定した変位波形を見ると、液状化した時点あたりから変位振幅が両振幅で30cm程度と急に大きくなり、周期も3~4秒と長くなってこれが1分以上も続いている。



道路の被害

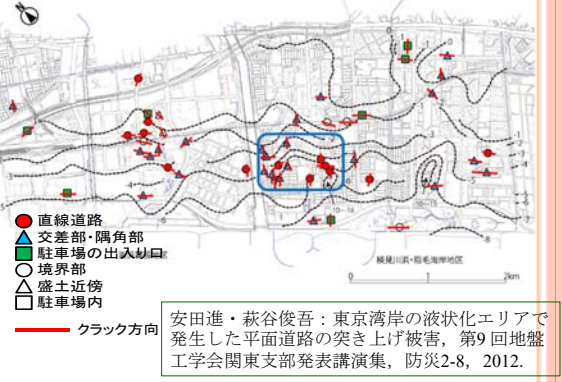


- 幹線道路の歩道や生活道路などでは突上げや迫上がりが各地で発生。
- 幹線道路自体はほとんど無被害。

浦安市内で生活道路や幹線道路が突き上げたと判断される箇所



千葉市における道路の突き上げ地点と浚渫土層下端深度のコンター

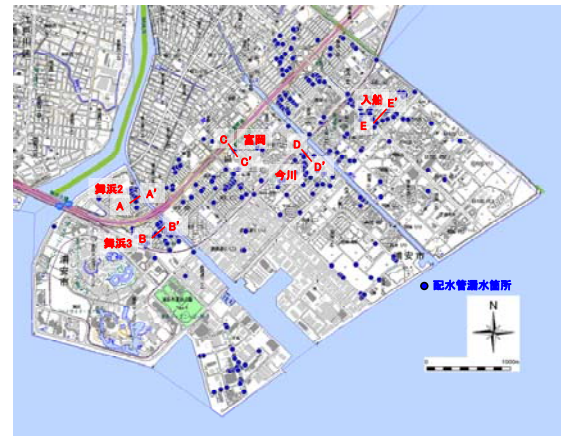


安田進・萩谷俊吾：東京湾岸の液状化エリアで発生した平面道路の突き上げ被害，第9回地盤工学会関東支部発表講演集，防災2-8，2012。

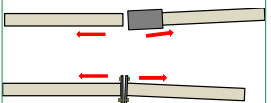
- 東京湾岸の液状化エリア内で路面の突き上げが確認された地点は計98地点。
- 最も発生地点が多いのは一般道路で計74地点、次いで幹線道路で計21地点。
- 幹線道路では車道と歩道の舗装構造物の剛性差が大きく、相対的に剛性の小さい歩道が損傷したと考えられる。一般道路では揺れが集中しやすい交差および隅角部において車道同士の剛性差でも突き上げが多く発生したのではないかと考えられる。

水道管の被害

浦安市内の配水管漏水箇所



継手の被害のイメージ



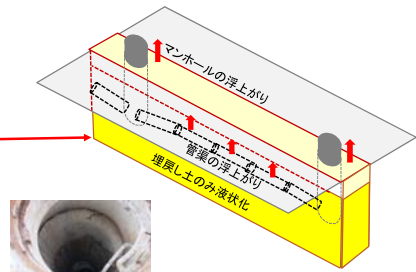
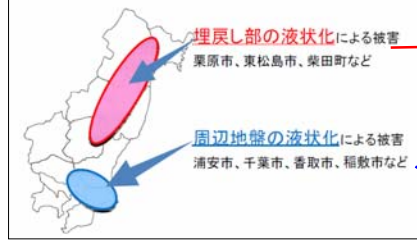
安田進・石川敬祐・五十嵐翔太・田中佑典・畑中哲夫・岩瀬伸朗・並木武史・斉藤尚登：東日本大震災における浦安市の水道管被害メカニズムの解明，日本地震工学会論文集，第16巻，第3号，pp.183-200，2016。

揺動により上下水道管、ガス導管の継手の抜けが生じたのではないかと。

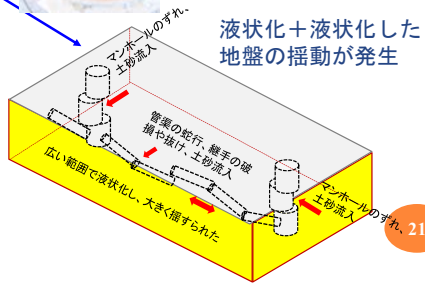


## 下水道管とマンホールの被害

東日本大震災時に下水道管渠・マンホールで生じた2種類の被害



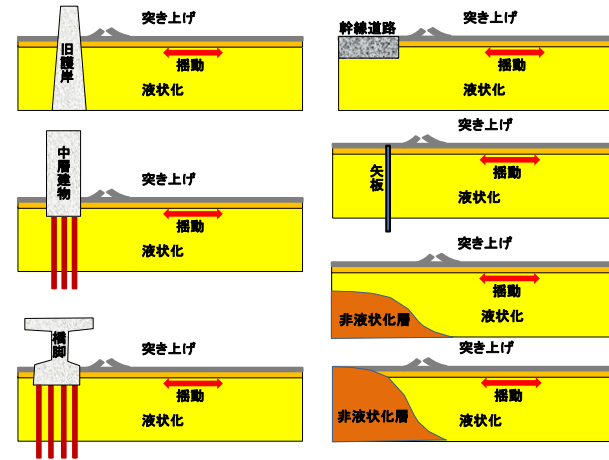
液状化+液状化した地盤の揺動が発生



・下水道地震・津波対策技術検討委員会：東日本大震災における下水道施設被害の総括と耐震・耐津波対策の現状を踏まえた今後の対策のあり方、2012。

下水道のマンホールや管渠は液状化により浮き上がるのが一般的であるが、東京湾岸では揺動によりマンホールのズレや管の継手が外れによって土砂ははいたため、浮き上がらずに土砂で詰まる被害となったと考えられる。

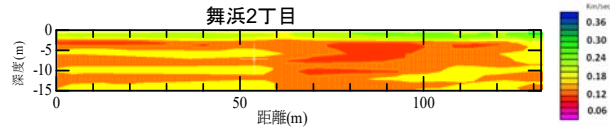
液状化した地盤がさらに揺すられ続けた揺動により、突き上げが生じたと考えられる境界条件のパターン



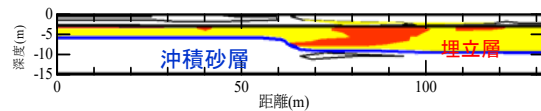
- 液状化して泥水化した地盤が、長時間の震動のためにさらに揺すられ続けたため、3~4秒のゆっくりとした周期で地盤が揺動する現象が発生したのではない。
- 揺動により境界部での突き上げが発生したのではないか。
- このような揺動現象およびそれによる構造物の被害は過去の地震では報告されていない。東日本大震災と同様に長時間の震動が生じる可能性のある南海トラフの地震でも同じような被害が発生するのではないか。
- 揺動を考慮した対策(例えば管路の継手を長くする)対策も必要。

## 地震応答解析結果による揺動被害のメカニズム解明の試み

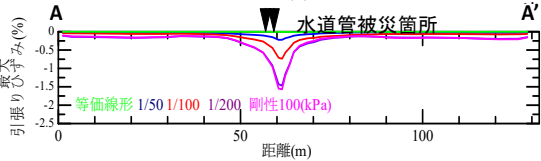
表面波探査で調べた速度分布



埋立資料も含めて設定した解析断面



地盤に生じる水平方向引張りひずみ分布と水道管被災箇所

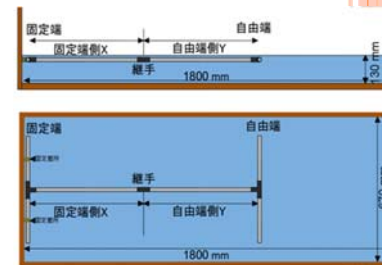


液状化した層のせん断剛性を1/100~1/200程度に低下させて地震応答解析(FLUSH)を行うと、水道管の継手が抜けたことがある程度説明できた。

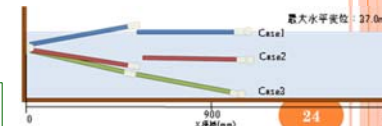
## 揺動による継手の抜けに関する模型実験の試み



実験に用いた土槽と埋設管



加振終了時の埋設管の浮き、沈み状況



安田進・大保直人・石川敬祐・原千明：高吸水ポリマーを用いた揺動による埋設管被害の再現実験，第72回土木学会年次学術講演会講演集，III，pp.457-458,2017。

## 2. 市街地全体の液状化対策の必要性と方法

### (1) 東日本大震災からの復旧・復興時に生じた問題

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	

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

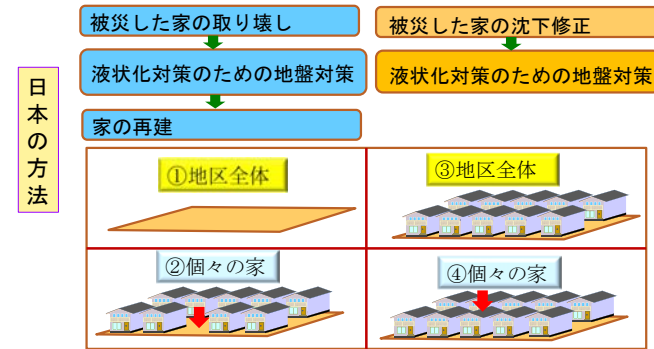


- 液状化により少し傾くだけで生活できなくなり、被災後持ち上げて水平化する沈下修正が必要。
- 沈下修正だけ(液状化対策なし)でも300万円~500万円程度必要、他に外構などと修復費も必要。

58

## 地震後の復旧・復興方法

広範囲に液状化が発生し多くの戸建て住宅が被災したクライストチャーチの復興方法



- 殆どの戸建て住宅では沈下修正を行っただけで液状化対策は行われていない。
- 一度液状化した地盤は再液状化し易いので、将来の地震で再度被災する危険性を有している。
- いくつかの住宅や地区では②、③による対策が施された。
- ほんの一部の住宅で④の対策が行われた。

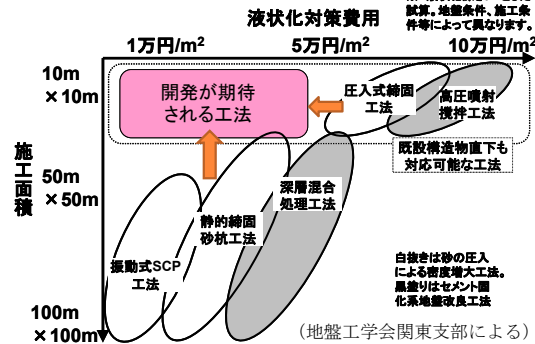
## 戸建て住宅への既往の地盤改良方法の適用性

新設・既設の戸建て住宅に液状化対策を施す場合に制約を受ける特有な条件

- 個々の宅地のスペースが狭いので、狭隘な場所で施工ができる小型の施工機械が必要。
- 家屋が隣接していると隣家に悪影響を与えないように注意する必要がある。
- 個々の財産なので公共構造物に比べて多大な費用をかけるべく、安価な対策しか実施し難い。
- 新設の場合と既設の場合で対策に必要な費用が大幅に異なる。

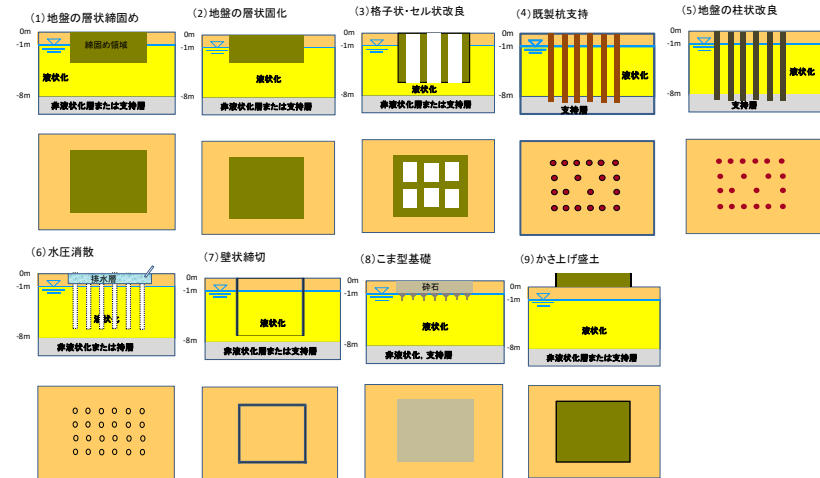
地盤工学会関東支部造成宅地の耐震対策に関する研究委員会:液状化から戸建て住宅を守るための手引き, 53~51, 5346.

### 施工面積と対策工費の関係



大型の施工機械で大量施工が可能になるほどコストは低い。施工面積が小さいと施工機械が小型化して施工能率が低下したり、運搬費用などの間接的な費用がコストに占める割合が大きくなりコストは高くなる

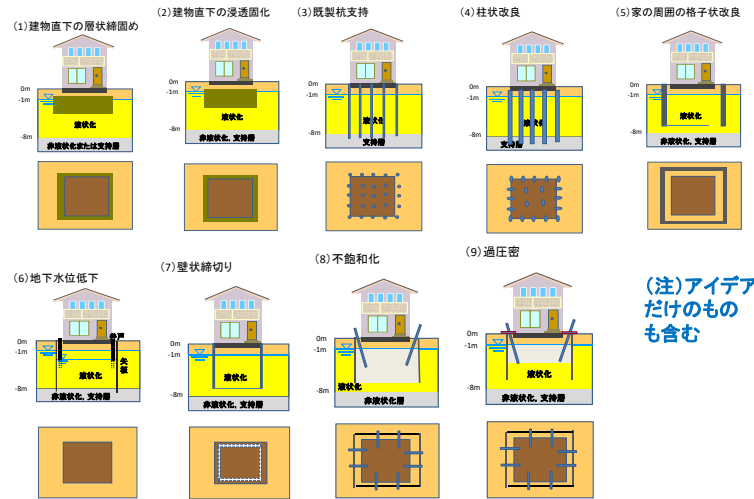
## 狭い土地に個々の家屋を新設する場合の対策案



(注) アイデアだけのものも含む

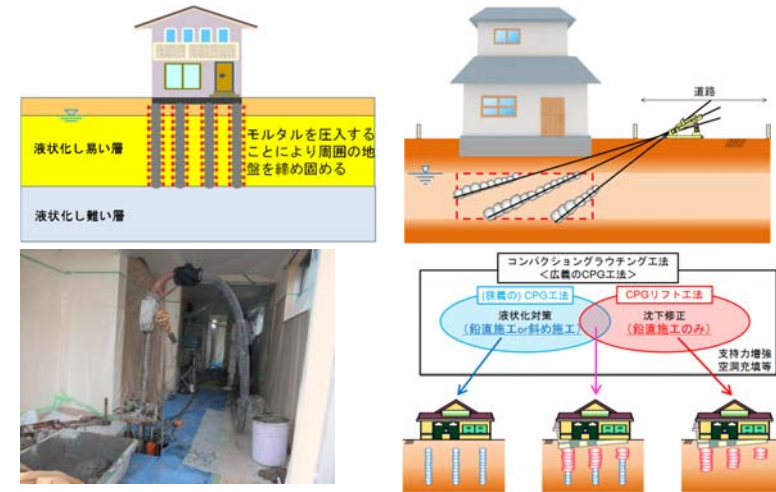
59

## 狭い土地にある既設の住宅での対策案



## (2) 東日本大震災後に検討、開発された個々の宅地の対策方法例

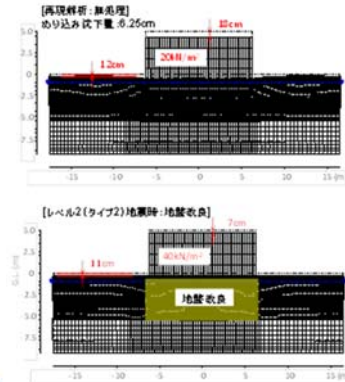
### ① 既設住宅への圧入式締固め工法 三信建設工業㈱



河野聡平・足立雅樹・岡見強・新坂孝志: 静的圧入締固め工法 (CPG工法) による戸建て住宅の液状化対策実証実験, 第48回地盤工学研究発表会, pp.935-940, 2013.

## ② 新築の戸建て住宅用に小型化した砕石締固め・排水工法 新設の住宅に適用した事例

(株)不動産テトラ



戸建て住宅の液状化による変形解析例

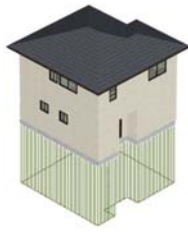
原田健二・大林淳・吉富宏紀: 宅地地盤の液状化対策工法の開発と適用—小型締固め式グラベルドレーン工法—, 地盤工学会誌, Vol.61, No.4, pp.22~25, 2013.





③新築・既設の戸建て住宅への矢板締切工法 住友林業㈱

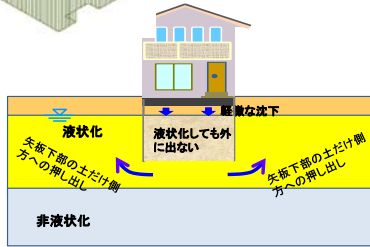
新設の住宅に適用した事例



既設の建物に適用した事例



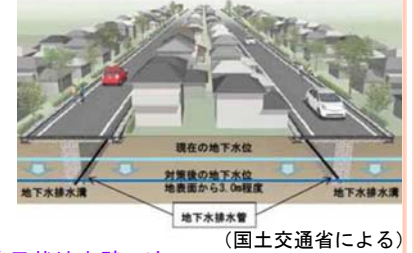
平出務・安田進・藤野一・金子雅文・佐々木修平・三上和久・尾澤知憲：薄鋼矢板を用いた液状化被害軽減工法の開発、地盤工学会特別シンポジウム「東日本大震災を乗り越えて」、pp.454-462, 2014.



(3) 都市における復興で行われた地区全体の液状化対策

- 東日本大震災の8か月後に国土交通省により「市街地液状化対策事業」が創設。ある地区内の道路や下水道などの公共施設と民間の宅地とを、一体化して液状化対策を施そうとするもの。
- この事業に必要な費用は公共施設を公費で賄う一方、宅地内は住民が負担する方式であり、この事業を適用できる条件としては、i) 面積が3,000㎡以上でありかつ区域内の家屋が10戸以上のもの、ii) 土地所有者・借地権者それぞれの2/3以上の同意が得られるもの、iii) 公共施設と宅地との一体的な液状化対策が行われているものと認められるもの、とされた。
- この事業では二つの大きな課題があった。一つは技術的な課題で、既存の住宅地を家が建ったままでどんな方法で対策を施せるかであり、二つ目の課題は住民の合意形成をいかにとるかである。

地下水位低下工法



格子状地中壁工法

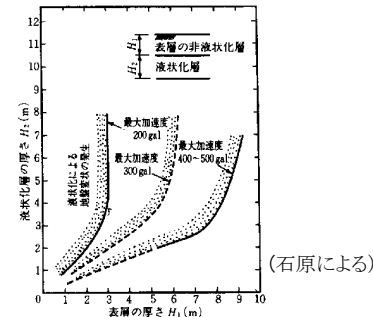
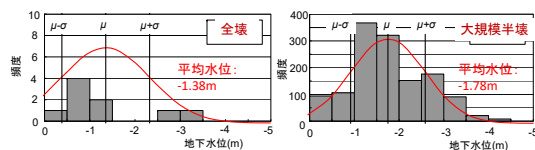


国土交通省都市局都市安全課「市街地液状化対策推進ガイドンス」  
[http://www.mlit.go.jp/toshi/toshi\\_tobou\\_fr\\_000005.html](http://www.mlit.go.jp/toshi/toshi_tobou_fr_000005.html)

地下水位低下工法を実施するために実証実験などで検討された事項

1) 地下水位の低下量の設定方法

地震後に調べられた浦安市の被災程度と地下水位(浦安市による)



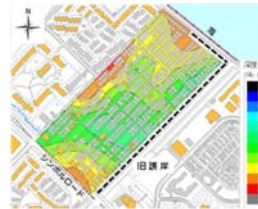
3つの地震で被害を生じた地下水位の境界

地震	住宅地	被害と無被害の境の地下水位
1983年日本海中部地震	秋田市新屋松美町	地震動の推定値によって異なるが、GL-1.5m～-2.5m
2000年鳥取県西部地震	米子市安倍彦名団地	地下水位が深いと傾きが小さくなり、10/1,000の傾きで判断するとGL-1.6m程度
2007年新潟県中越沖地震	柏崎市橋場町	地下水位が深いと被害程度が軽くなる

東日本大震災で被災した浦安の2地区の宅地における地下水位の調査例



入船4丁目の地下水位分布

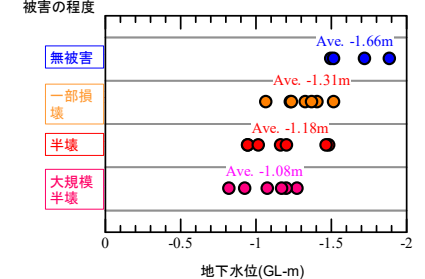


美浜3丁目の地下水位分布

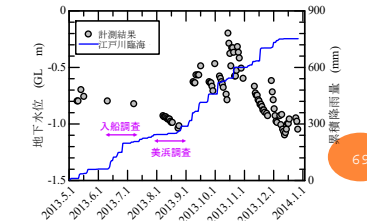


安田進・石川敬祐：地下水位低下が戸建て住宅の液状化対策に与える効果、日本地震工学会論文集、第15巻、第7号(特集号)、pp.205-219, 2015.

地下水位と住宅被害の関係



地下水位の時間変化と累積降雨量



国土交通省で平成26年3月に出された市街地液状化対策推進ガイドンス

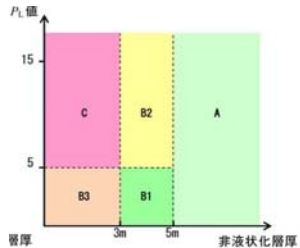
表 4-8 公共施設・宅地一体型液状化対策工法における効果の目標値の設定

判定結果	H <sub>1</sub> の範囲	Dcyの範囲	P <sub>L</sub> 値の範囲	地下水位低下工法	格子状地中壁工法
C	3m 未満	5cm 以上	5 以上	不可	不可
B3	3m 未満	5cm 未満	5 未満	不可 (※)	不可
B2	3m 以上	5cm 以上	5 以上	液状化被害軽減の目標として可	不可
B1	5m 未満	5cm 未満	5 未満	液状化被害抑制の目標として可	不可
A	5m 以上	—	—		

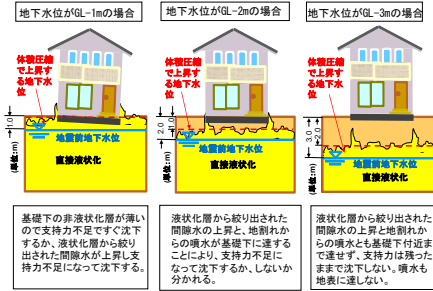
(※) 原則不可であるが、専門家からなる委員会等で詳細、且つ、高度な検討を行った結果の

地下水位を3m程度の深さまで下げておくとめり込み沈下し難いメカニズムとして考えられる一案

判断についてはこの限りではない。



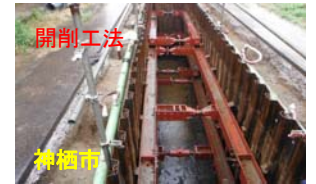
(b) H<sub>1</sub>~P<sub>L</sub>判定図



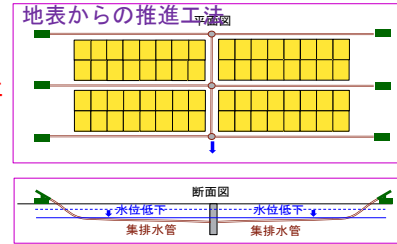
6:

2) 地下水位の低下方法

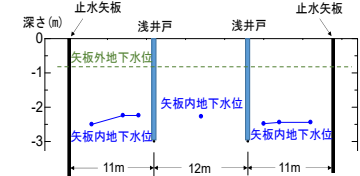
- ① 開削工法で排水管設置
- ② 推進工法で排水管設置
- ③ 浅井戸の設置



今後市街地で対策が施されるためには排水管設置方法の開発が大切



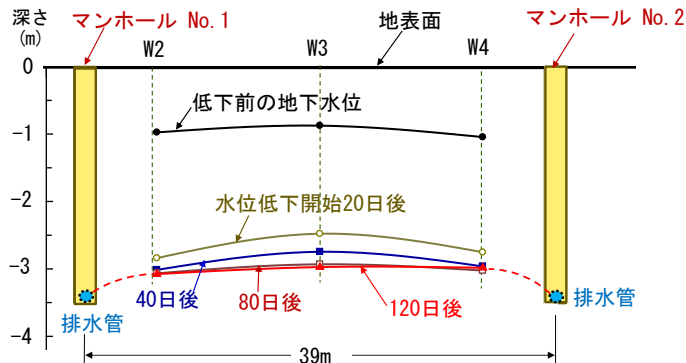
浅井戸方法



6:

3) 水位低下のための排水管や浅井戸の設置間隔

- ① 当初は宅地内へも排水管を設置することを想定
- ② 実証実験結果によると、40m程度離れた道路だけに設置する配置で宅地内の地下水位も下がった。→宅地内への設置は不要になった。

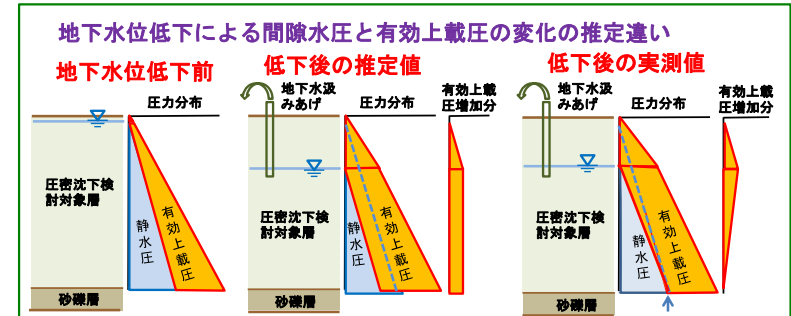


6<

4) 地下水位低下に伴う地盤の沈下量の推定方法

- ① 従来の方法：大きな沈下量
- ② 実証実験や詳細な地盤によって得られた知見：沈下量は少ない
- <理由1> 間隙水圧の低下分布が仮定と異なる
- <理由2> 表層が過圧密になっていることが多い

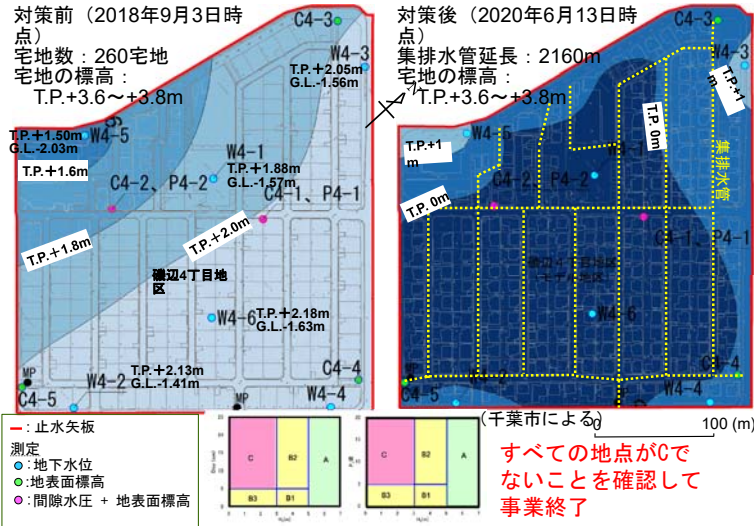
都市名	実験結果	
	期間	地表面沈下量 (cm)
神奈川市	60 日後	0.1 ~ 0.5
我孫子市	最終	約 5
久喜市	30 年後	7.8



73



### 千葉市美浜区磯辺4丁目の集排水管位置と地下水位低下結果

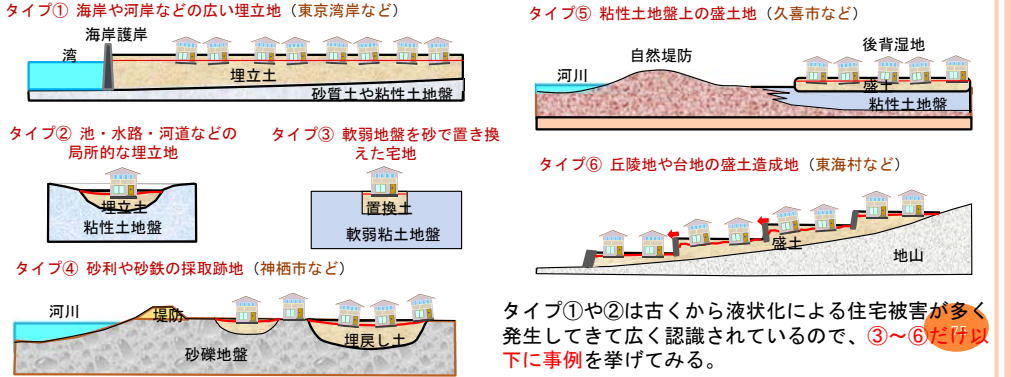


- ▶ 地下水位低下工法で6都市、格子状地中壁工法で1都市、側方流動対策で1都市が対策された。
- ▶ 2016年熊本地震の復旧にあっても地下水位低下工法が適用されている。
- ▶ コンビナートでは大型のタンクや建物は液状化対策を施すようになっているが、道路や倉庫などの小規模構造物では対策が施されていないので、このような敷地全体の対策を施すと良い。

### (4) 浮き彫りになってきた人工改変地の住宅地のリスク

#### 2011年東日本大震災で液状化した地点の大半は人工改変地

- ▶ 人工改変地の多くは戦後の核家族化や人口増加に伴って住宅地用に造成されたものであり、特に締固めて造成しなかった地盤に対策を施さずまま戸建て住宅が建てられていたため、無数の戸建て住宅に被害を与えた。
- ▶ 造成後に一般に地盤調査は行なわれないので、液状化ハザードマップに危険性が表示されていない。



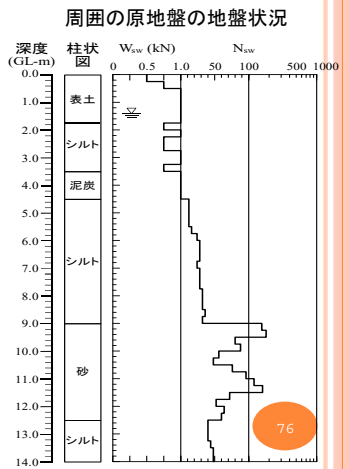
タイプ①や②は古くから液状化による住宅被害が多く発生してきて広く認識されているので、③～⑥だけに事例を挙げてみる。

### タイプ③ 軟弱地盤を砂で置き換えた宅地の被災事例

5336年十勝沖地震の際に生じた掘削し埋め戻した土の液状化による被害

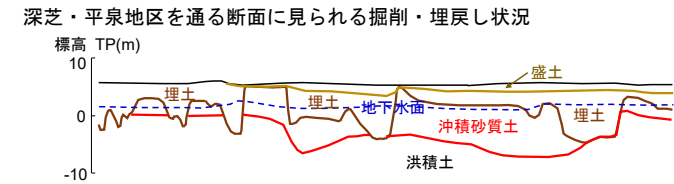
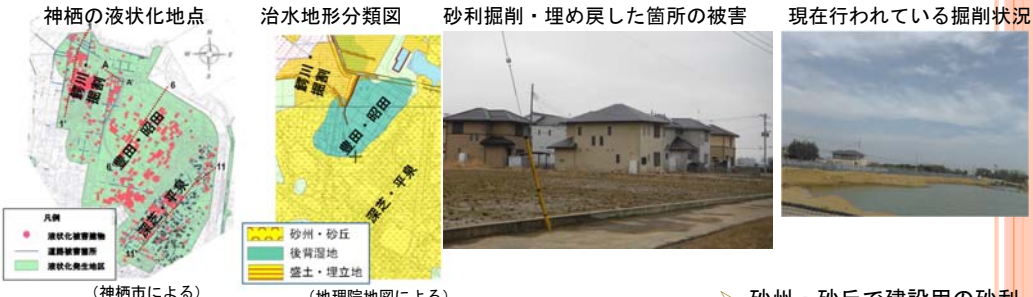


- ☆ 軟弱地盤であったため、この住宅では地盤を強固にするよう特別にGL -3 m程度まで掘削し、礫混じり砂質土で埋め戻して、その上に家を建てられていた。
- ☆ このような局所的な液状化はハザードマップには当然示されない。



### タイプ④ 砂利や砂鉄の採取跡地

東日本大震災時の神栖市での液状化被害発生事例



- ▶ 砂州・砂丘で建設用の砂利を採取し、埋め戻した箇所が液状化。
- ▶ 掘削後の埋土ではボーリングが行われていない!
- ▶ 地震後に行った表面波探査で断面が推定できた。

## タイプ⑤ 粘性土地盤上の盛土地

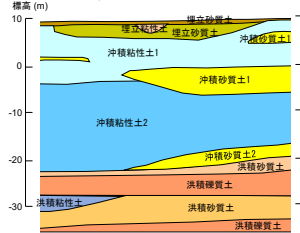
水田の上に盛土して造成した宅地における東日本大震災時の液状化被害発生事例

南栗橋の造成範囲と液状化被害箇所



(地盤工学会の東日本大震災合同報告をもとに作成)

土質断面(地震後の調査による)



(1か月後に撮影)

- ☆土地区画整理事業において、近くの調整池から浚渫した川砂で水田を盛り立てて造成が行われた。
- ☆液状化した層の厚さは2~3m程度と薄かったが戸建て住宅が沈下、傾斜した。
- ☆このような造成地では造成後に地盤調査は実施されていない。戸建て住宅の地耐力の調査程度は実施。

## タイプ⑥ 丘陵地や台地の盛土造成地

丘陵地や台地の谷埋め盛土における東日本大震災時の液状化被害発生事例

東海村南台の盛土被害箇所と写真撮影箇所

液状化による被害状況



(大山らに加筆)

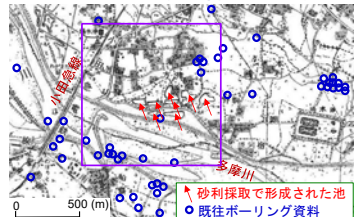


- ☆地震後の地盤調査によると盛土の上流側では地下水位はGL-1m程度と浅かった。
- ☆盛土造成後建設後山からの浸透水が多いとか、暗渠排水管が老朽化したといったことにより発生しているのではないかと考えられる。
- ☆盛土造成宅地では造成後戸建て住宅が建てられる前に地盤調査は無し。

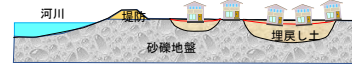
## 人工改変地における既往ボーリングの不足とハザードマップでの見落とし

### タイプ④ 砂利や砂鉄の採取跡地に関して

多摩川沿いの砂利採取地の事例



(国土地理院1/25000、1955年測量旧版地形図に加筆)



(東京都による)

掘削跡の埋土はハザードマップに考慮されていない

- 掘削跡地を住宅地にする際にボーリングが行われていないので、 $F_L$ 値などによる液状化の定量的な判定は行えず、液状化ハザードマップに考慮されていない。
- 微地形による液状化ハザードマップにおいても、掘削作業は一時期だけなので旧版地形図で調べる場合でも昔の地形図だけでなく、時系列で調べていく必要がある。

## 多摩川17km~35kmの間における砂利採取で形成したと考えられる池



(現在の国土地理院2万5千分の1地形図に追記)

砂利採取池が示されている旧版地形図の測量年

図幅	地区番号	1920	1940	1960	1980(年)
武蔵府中	F1			×	○+
	F2			×	○+
	M1, M2		×	○	○+
溝口	M3, M4, M5, M6		×	○	○+
	M7		×	○	○+
	T1, T3		×	○	○+
東京西南部	T2	×	○	○	○+
	T4		×	○	○+
	K1, K5	×	○	○	○+
川崎	K2, K4	×	○	○	○+
	K3		×	○	○+

×:砂利採取池なし ○:砂利採取池表示有 +:砂利採取跡地利用済

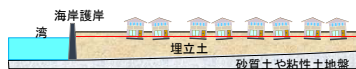
- 多摩川は急流河川で砂利が豊富にあり都心に近いため、明治時代から河川敷の砂利の採取が行われてきた。
- さらに1923年関東地震後や第2次世界大戦の復興にあたって多く採取されてきた。
- 河川内の土砂を採取し過ぎて橋脚の洗掘被害が発生したり堰からの取水が困難になったため、河川内の土砂採取が禁止されるようになり、堤内地の田畑を掘削して砂利を採取するようになってきた。
- 住宅地化にともなって掘削池は残土などで埋められて、現在は住宅地やグラウンドとして使用されている。

➢ 砂利の採取は一時期だけなので、古すぎる旧版地形図だけを参考にはいけない。

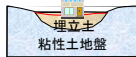
(第78回土木学会年次学術講演会で発表予定)



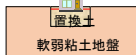
タイプ① 海岸や河岸などの広い埋立地



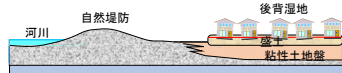
タイプ② 池・水路・河道などの局所的な埋立地



タイプ③ 軟弱地盤を砂で置き換えた宅地



タイプ⑤ 粘性土地盤上の盛土



タイプ⑥ 丘陵地や台地の盛土造成地



- 人工改変地を住宅地として利用する場合、**造成後の地盤状況を把握するボーリングは一般に行われない**。中・高層建物の場合は個々の建物の建設の際に地盤調査が行われるが、戸建て住宅には支持力確認のためのスクリーウエイト貫入試験が行われる程度である。
- したがって、既往の**タイプ②～⑥の人工改変地では液状化の判定を行える既往ボーリングがないのが一般的である**。
- タイプ①は広いのでその中に中・高層建物などがあってボーリングがある可能性があるが、これも公開されないものが多い**。
- 人工改変で造られた宅地には既往ボーリングがないので、地盤データをもとにした液状化ハザードマップでは、例えばその周囲の**液状化し難い自然地盤などのデータを用いて液状化判定を行っているのが現状と思われる**。
- 微地形をもとにした液状化ハザードマップでも**タイプ④や⑤は見落とし**たり、**⑥は丘陵・台地のため対象外**にされていることが多いと考えられる。ましてや**タイプ③は把握が不可能**である。したがって、**タイプ①以外は液状化ハザードマップ作成の際に見落とし**ている箇所が多いと考えられるので**留意が必要**である。

(5) 戸建て住宅が立ち並ぶ市街地を対象にした液状化ハザードマップ作成の必要性

国土交通省で2021年2月に「リスクコミュニケーションを取るための液状化ハザードマップ作成の手引き」を公表

[https://www.mlit.go.jp/toshi/toshi\\_tobou\\_tk\\_000044.html](https://www.mlit.go.jp/toshi/toshi_tobou_tk_000044.html)

手引きが作成された背景

戸建て住宅の液状化対策の現状

- 東日本大震災で約27000棟の被害が生じたにもかかわらず、その後に建てられている戸建て住宅でもほとんど**液状化を考慮した対策が施されていない**。
- 既設はもとより新築の戸建て住宅に対する**安価で有効な液状化対策工法の開発が遅れている**。

戸建て住宅の液状化対策が進まない理由

- 液状化による**被害**（少しでも傾斜するとめまいや吐き気がして生活できないや、避難路が通れないなど）が**認識されていない**。
- 現行の液状化ハザードマップではどんな被害が発生するか**実感がわからない**。戸建て住宅に特化した**液状化ハザードマップが必要**である。
- 液状化に対する行政、住宅メーカー、住民間の**リスクコミュニケーションがとれていない**。

液状化ハザードマップの作成手順

(国土交通省による)

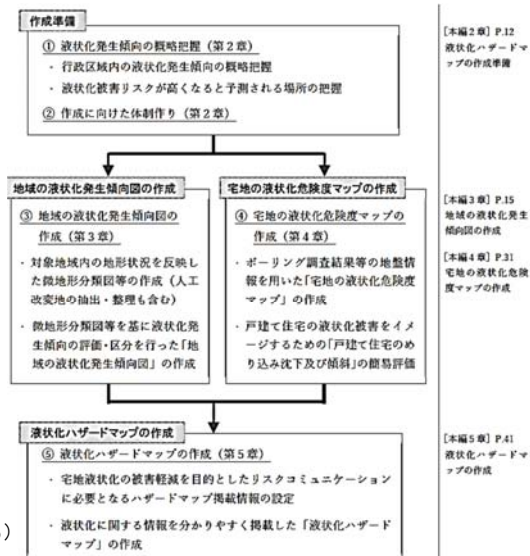


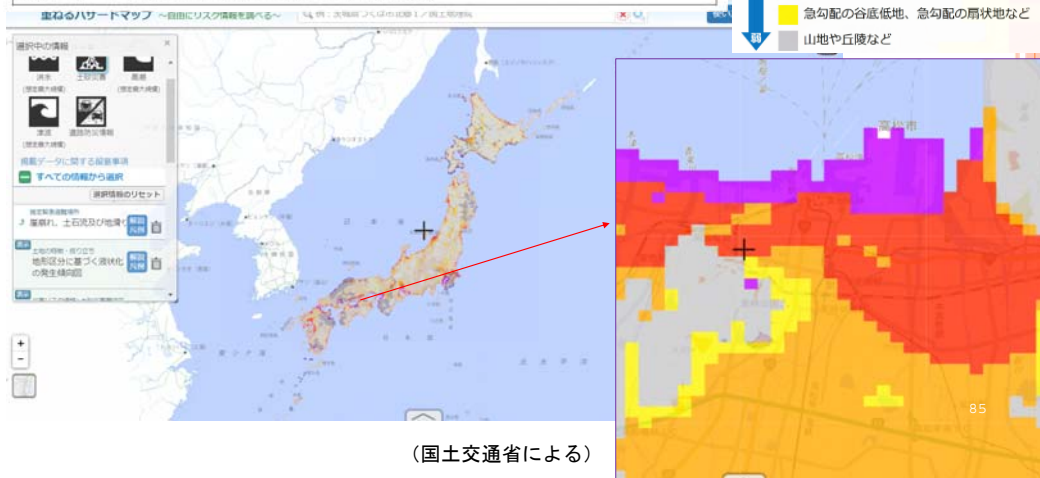
図-2.1 液状化ハザードマップの作成手順

2-2. 液状化発生傾向の概略把握

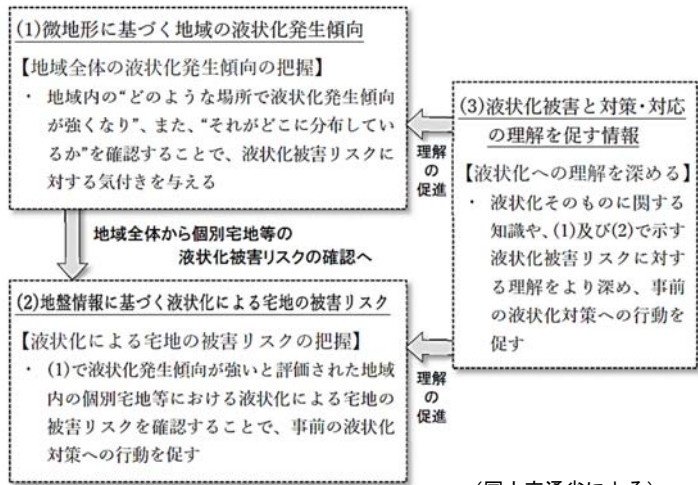
液状化ハザードマップの作成準備として、国土交通省による「地形区分に基づく液状化の発生傾向図」等の資料を収集・確認し、行政区域内の液状化発生傾向を概略的に把握し、液状化ハザードマップを作成するための計画を立案する。

凡例<詳しい解説>

- 埋立地や旧河道など
- 干拓地や自然堤防など
- 緩勾配の谷底低地、緩勾配の扇状地など
- 急勾配の谷底低地、急勾配の扇状地など
- 山地や丘陵など



## 手引きで重視する情報



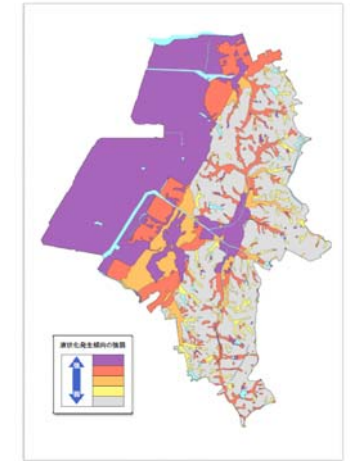
(国土交通省による)

## 微地形に基づく地域の液状化発生傾向図の作成方法

表-3.4 手引きで標準とする微地形の「液状化発生傾向の評価区分」

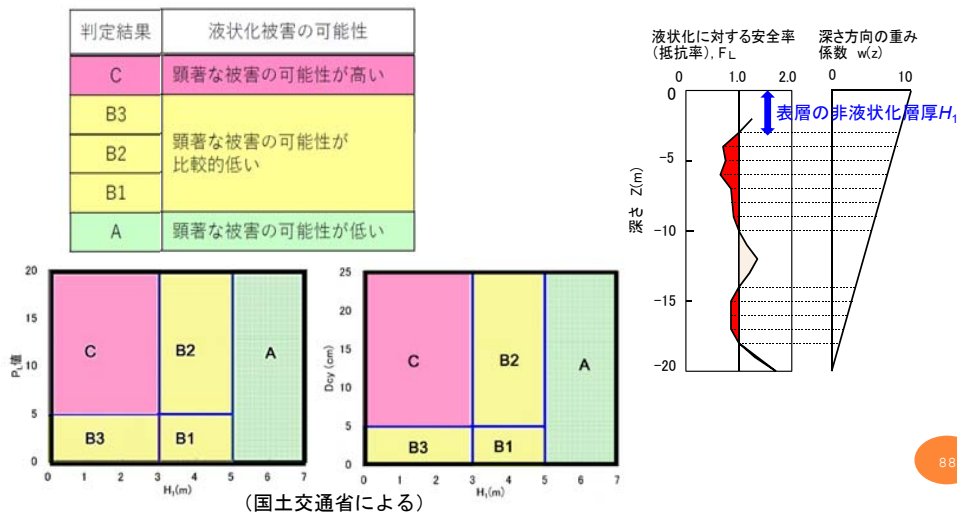
液状化発生傾向の評価区分	微地形（自然地形）及び人工改変地	
強	微地形(自然地形)	旧河道、砂丘縁辺部、砂丘間低地・砂州間低地
	人工改変地	埋立地 <sup>※1</sup> 、砂利(砂状)採取後の埋戻し地、低地(湿地)上の盛土造成地 <sup>※2</sup>
中	微地形(自然地形)	三角州・海岸低地、自然堤防、砂州上・砂丘上の凹地
	人工改変地	干拓地 <sup>※3</sup> 、浅い谷や凹地の盛土地、谷埋め盛土造成地
弱	微地形(自然地形)	砂州・砂礫洲、氾濫低地、後背低地
	微地形(自然地形)	砂丘(砂丘縁辺部、砂丘間低地を除く)、扇状地 <sup>※4</sup> 、谷底低地
	微地形(自然地形)	山地・丘陵、山麓堆積地形、台地 <sup>※5</sup>

※1 微地形分類（自然地形）における「旧水部（埋立地）」を含む。  
 ※2 谷底低地を除く、後背低地や氾濫低地、三角州・海岸低地、砂丘間低地・砂州間低地の低地面や干拓地上に盛土した造成地。  
 ※3 微地形分類（自然地形）における「旧水部（干拓地）」を含む。  
 ※4 盛土造成されていない「扇状地上の旧河道」を含む。  
 ※5 盛土造成されていない「台地上の浅い谷・凹地」を含む。



(国土交通省による)

## 地盤情報に基づく液状化による宅地の被害リスクの検討方法



## 2種類のマップの比較例

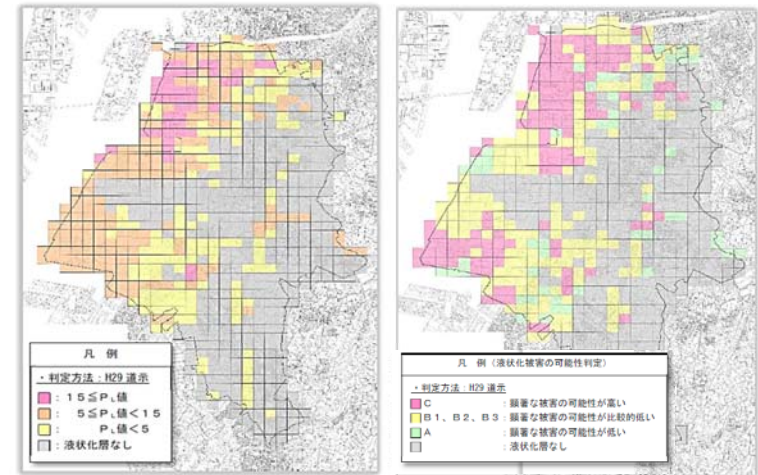


図-4.4.6  $P_L$  分布図 (B市)

図-4.4.10  $H_1$ - $P_L$  分布図 (B市)  
 (国土交通省による)



市街地の液状化は火災や津波からの避難行動に障害を与えることなど、実際に生じる種々被害のリスクも明記

2011年東日本大震災の際に液状化が自動車の走行に影響を与えた例

①東京湾岸埋立地で多くの自動車が動けなくなった。



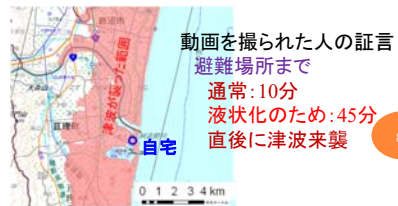
地震翌日に駐車場で撮影

②太平洋岸の埋立地で、構内道路が液状化で突上げて車両通行困難になった火力発電所もあった。

③宮城県の大川町で津波からの避難に影響を与えた。



<http://www.youtube.com/watch?v=Baw7Pe6uEdg> (講演集に記載)



動画を撮られた人の証言  
避難場所まで  
通常:10分  
液状化のため:45分  
直後に津波来襲

簡易地盤調査による戸建て住宅のめり込み沈下量・傾斜角の推定方法の提案

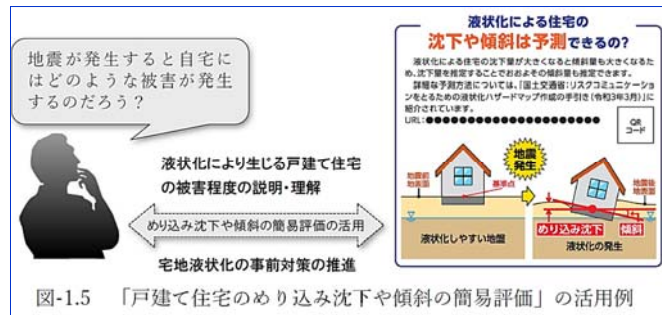


図-1.5 「戸建て住宅のめり込み沈下や傾斜の簡易評価」の活用例

表-4.4 戸建て住宅のめり込み沈下量と被害程度の関係

めり込み沈下量	被害程度
5cm未満	半壊に至らない
5cm ~ 7.5cm	半壊に至らない ~ 半壊
7.5cm以上	半壊以上

液状化による地盤の軟化を考慮した簡易沈下量推定方法を提案 (具体的な方法は詳細資料編)

(国土交通省による)

手順1: スクリューウエイト貫入試験 (SWS試験、旧名称はスウェーデン式貫入試験) によって簡易調査を行って液状化判定を行う。

試料採取装置例



地下水位測定装置例



試験機 (自動式)



試験機 (手動式)

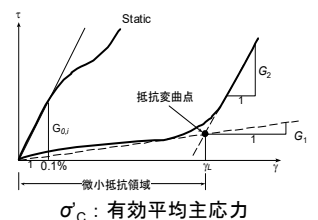


- SWS試験により液状化簡易調査を行う方法に関する手引きを地盤工学会関東支部で作成中 (今月から来月に公表予定)
- SWSで貫入抵抗を測るだけでなく、地下水位測定および試料採取を行う。
- 採取して試料から粒度試験を行う。試料が少量なのでAIによる電腦粒度も有効。

<https://www.kiso.co.jp/>

手順2: 液状化する層のせん断剛性の低下率を求める

液状化後地盤のせん断剛性低下率の設定

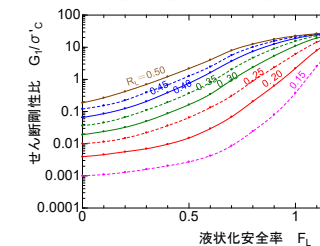


<参考:  $F_L$ 、 $R_L$  に応じたせん断剛性比 ( $G_0/\sigma'_v$ ) の参考値 >

$G_0/\sigma'_v$	$F_L$							
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
$R_L=0.15$	0.00100	0.00110	0.00129	0.00160	0.00205	0.00274	0.00422	0.00861
$R_L=0.20$	0.00393	0.00459	0.00562	0.00696	0.00964	0.01510	0.02944	0.06871
$R_L=0.25$	0.01000	0.01153	0.01486	0.02208	0.03848	0.06486	0.13335	0.30761
$R_L=0.30$	0.01905	0.02399	0.03236	0.05012	0.08770	0.16368	0.34754	0.95060
$R_L=0.35$	0.03631	0.04539	0.06683	0.11092	0.19409	0.37154	0.80538	2.04174
$R_L=0.40$	0.06531	0.08610	0.12445	0.20654	0.39905	0.75958	1.63305	3.71535
$R_L=0.45$	0.12023	0.15382	0.22387	0.39355	0.67608	1.27350	2.48313	5.62341
$R_L=0.50$	0.18621	0.26792	0.41976	0.69683	1.21619	2.17771	4.04576	7.94328

せん断剛性低下率の下限値の設定

住民や事業者の宅地液状化に対する危機意識を高めるためにも、本手引きでは、沈下量がやや大きく算定される『せん断剛性低下率の下限値: 1/300』により、戸建て住宅のめり込み沈下量を算定することを標準とする。



ALIDで用いている方法を利用

手順3：多層地盤の弾性沈下量の算定式を利用してめり込み沈下量を求める

$$S_e = \left\{ \frac{I_s(H_{1s}, \nu_{1s})}{E_{s1}} + \sum_{k=2}^n \frac{I_s(H_k, \nu_{sk}) - I_s(H_{k-1}, \nu_{sk-1})}{E_{sk}} \right\} qB$$

$$I_s = (1 - \nu_s^2)F_1 + (1 - \nu_s - 2\nu_s^2)F_2$$

$$F_1 = \frac{1}{\pi} \left[ l \cdot \log_e \frac{(1 + \sqrt{l^2 + 1})\sqrt{l^2 + d^2}}{l(1 + \sqrt{l^2 + d^2 + 1})} + \log_e \frac{(l + \sqrt{l^2 + 1})\sqrt{1 + d^2}}{l + \sqrt{l^2 + d^2 + 1}} \right]$$

$$F_2 = \frac{d}{2\pi} \tan^{-1} \frac{l}{d\sqrt{l^2 + d^2 + 1}}$$

ここで、

- $S_e$  : 弾性沈下量 (m)
- $I_s$  : 係数
- $q$  : 基礎に作用する荷重 (kN/m<sup>2</sup>)
- $B$  : 基礎の短辺長さ (m)
- $L$  : 基礎の長辺長さ (m)
- $l$  :  $L/B$
- $d$  :  $H/B$
- $H$  : 地表面から対象層下端までの距離 (m)
- $\nu_s$  : 地盤のポアソン比
- $E_s$  : 地盤の弾性係数 (kN/m<sup>2</sup>)

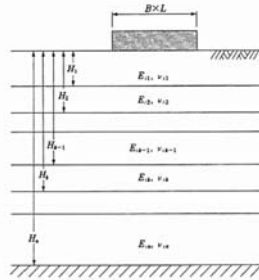
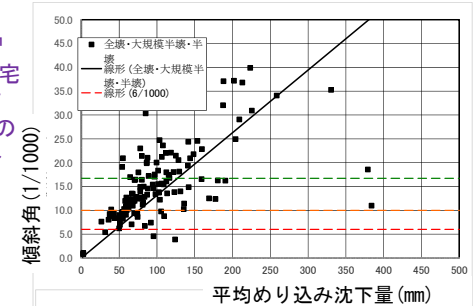


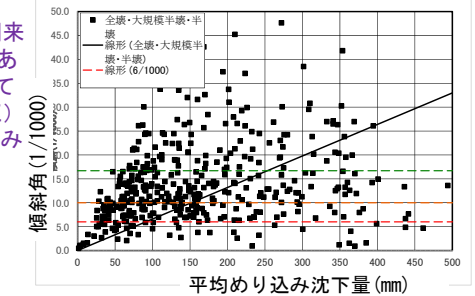
図-2.2.3 多層地盤における弾性沈下量の算定式  
〔建築基礎構造設計指針（日本建築学会：2019改定）より〕（国土交通省による）

手順3：東日本大震災におけるめり込み沈下量と傾斜角の実測の関係をを用いてめり込み沈下量から傾斜角を推定する

千葉市と習志野市(住宅が密集している地区)のデータのみ



神栖市と潮来市(住宅があまり密集していない地区)のデータのみ



〔「造成宅地の耐震対策に関する研究委員会報告書—液状化から戸建て住宅を守るための手引き—（公社）地盤工学会関東支部」より〕

手順4：傾斜角やめり込み沈下量によって家屋の被災程度を判断する  
＜被害認定フロー（液状化等の地盤被害による被害）＞

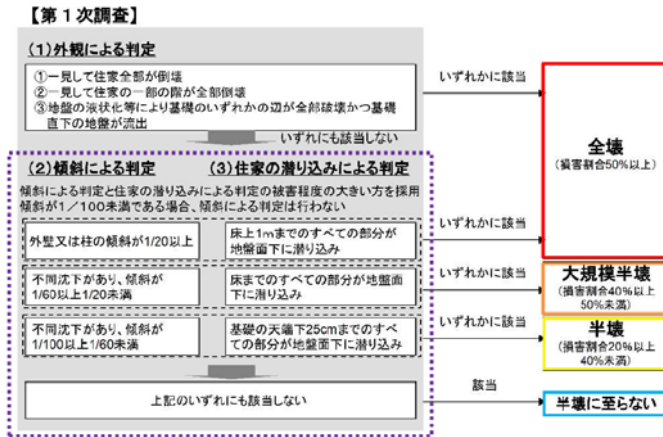


図-4.5 液状化等の地盤災害による被害認定フロー  
〔内閣府（防災担当）：災害に係る住家の被害認定基準運用指針（平成30年3月）〕に一部加筆  
（国土交通省による）

### 3. その他、最近の話題

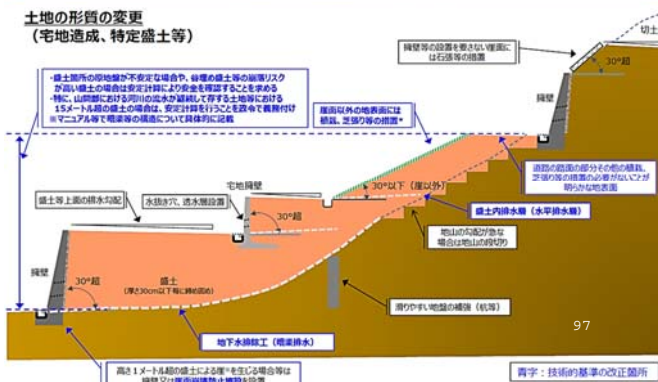
#### (1) 本年5月に施行開始された盛土規制法での液状化の扱い

##### A. 盛土等防災マニュアル（新設の盛土用）

〔5月26日に公表された「その他参考資料」に載せられてものからコピー〕

- ▶ 改正の位置付け：宅地防災マニュアル（令和元年6月28日版）を改正し盛土等防災マニュアルを策定
- ▶ 改正の視点：
  - ・規制区域の拡大：山地・森林、溪流
  - ・規制対象の拡大：残土処分場や太陽光発電施設等の多様な開発形態、土石の堆積
  - ・盛土等の安全性の確保：地下水、盛土本体の性能、周辺への影響
- ▶ 改正方針：
  - ・山地・森林の場が有する複雑性・脆弱性の特性に対する配慮
  - ・溪流等における盛土では通常の規定に加え、必要な措置を規定（液状化判定の実施等）
  - ・完了検査に加え施工時の中間検査及び定期報告についての基準を規定
  - ・土石の堆積に係る基準を規定

#### 〔参考〕土地の形質の変更に係る技術的基準（政令）全般の概念図





# 盛土規制法の対象となる盛土

## 盛土等防災マニュアルの主な改正概要と考え方

分類	定義	対象	用途例
盛土規制法の対象	宅地造成	① 盛土であって、当該盛土をした土地の部分に高さ2メートルを超える崖を生ずることとなるもの ② 切土であって、当該切土をした土地の部分に高さ2メートルを超える崖を生ずることとなるもの ③ 盛土と切土を同時にする場合において、当該盛土及び切土をした土地の部分に高さ2メートルを超える崖を生ずることとなるときにおける当該盛土及び切土（①又は②に該当する盛土又は切土を除く。） ④ ①又は②に該当しない盛土であって、高さが2メートルを超えるもの ⑤ ①から④のいずれにも該当しない盛土又は切土であって、当該盛土又は切土をする土地の面積が500平方メートルを超えるもの	住宅団地、ショッピングモール、工業団地、スキー場、ゴルフ場、キャンプ場、残土処分場、発電施設（太陽光・風力等）農地、採炭放牧地、森林等
	特定盛土等	宅地又は農地等において行う盛土その他の土地の形質の変更で、当該宅地又は農地等に隣接し、又は近接する宅地において災害が発生させるおそれ大きいものとして法令で定めるもの	
	土石の堆積	宅地又は農地等において行う土石の堆積で法令で定めるもの（一定期間の経過後に当該土石を除去するものに限る。）	① 高さが2メートル超かつ当該土石の堆積を行う土地の面積が300平方メートルを超えるもの ② ①に該当しない土石の堆積であって、当該土石の堆積を行う土地の面積が500平方メートルを超えるもの
盛土規制法上の許可不要	災害の発生するおそれがないと認められる工事	○ 鉱山保安法の基準で行われる鉱業上使用する特定施設の設置の工事等における鉱物の採取 ○ 工事の施行に付随して行われるものであって、当該工事に使用する土石又は当該工事で発生した土石を当該工事の現場又はその付近に堆積するもの ○ 高さ2メートル以下かつ面積500平方メートル超の盛土等で、盛土等する標高差が30センチメートル（都道府県等が定める場合はその値）を超えないもの ○ 営農行為（耕耘、整地、畝立、けいり・畔補修等）等	鉱物の採取、土石の採取、土地改良事業、工事現場内における仮置き、不陸整正 等
その他盛土規制法の対象外となる行為	—	—	—

※鉱山保安法第13条第1項の規定による届出をした者が行う当該届出に係る工事又は同法第36条、第37条、第39条第1項若しくは第48条第1項若しくは第2項の規定による産業保安監督部長若しくは総務監督官の命令を受けた者が行う当該命令の実施に係る工事（国土交通省による）

# 盛土

## 改正概要

- 盛土内に十分な地下排水工を設置して、基礎地盤からの湧水や地下水の上昇を防ぐ。
- 間げき水圧の上昇や液状化当の発生が想定される場合は、それらの影響を考慮した上で安定性を検討する。
- 排水施設の降雨強度は5～10年確率を基本とする。

## 盛土等防災マニュアルの主な改正概要と考え方

V 盛土			
【改正概要】 ○ 規制区域の拡大に伴い、盛土の調査・計画に当たっては、これまでに加えて山地・森林の場が有する特性に十分な配慮が必要である。 ○ 盛土内に十分な地下排水工を設置して、基礎地盤からの湧水や地下水の上昇を防ぐ。 ○ 間げき水圧の上昇や液状化等の発生が想定される場合は、それらの影響を考慮した上で安定性を検討する。 ○ 通常の盛土に比べて雨水や地下水が集中しやすい深流等における盛土は、高度な安定性の検討を行う等の措置を講ずる必要がある。 ○ 土地の所有者等は日常点検等の適切な維持管理により土地の保全に努める必要がある。			
【考え方】 1. 原形地盤及び周辺地盤の把握 ● 規制区域の拡大に伴い、山地・森林の場においては、基礎地盤の複雑性や脆弱性、深流・集水地形等における流水、湧水及び地下水が集中する特性を踏まえ、盛土の周辺地盤も含めた地盤特性を把握するよう留意する。 2. 排水施設等 ● 盛土内に浸透した雨水・地下水は、地下排水工（暗渠排水工、基礎排水層、暗渠流末の処理、施工時の仮設排水対策等）及び盛土内排水層（水平排水層）により速やかに排水する。排水施設等の標準的な仕様を下表に示す。 ● 流域等が大規模な場合、暗渠排水工は流域面積を考慮し適切な仕様を検討する。 ● 排水施設の降雨強度は、接続する施設（下水道等）の計画降雨強度等を考慮して5～10年確率を基本とし、集水性が高い場合や盛土規模等が大きい場合には総合的に判断する。 <判断例>・深流等における盛土や広範囲に及ぶ開発事業等のうち集水性が高い場合は20～30年確率とする。 ・さらに、特に大きな影響が見込まれる深流等における高さ15メートルを超える盛土等は100年確率とする。			
表 排水施設等の標準的な仕様			
①暗渠排水工	②基礎排水層	③水平排水層	④仮設排水工
本管：管径300φ以上（流域等が大規模なものは流量計算にて規格検討） 補助管：管径200φ以上 補助管間隔：40φ以内を標準（深流等をはじめとする地下水が多いと想定される場合は20φ以内）	厚さ：0.5φ以上を標準（深流等をはじめとする地下水が多いと想定される場合は1.0φ以上） 範囲：のり床からの厚さの水平距離の1/2の範囲及び地表面勾配<1:4の谷底部を包括して設置	厚さ：0.3φ以上（砕石や砂の場合） 配置：小段ごとに設置 範囲：小段高の1/2以上	中央縦排水は雨水排水管による排水とし、暗渠排水工とは別の排水システムが入れない場合は、土砂が入らないように十分保護
※1 液状化等：液状化現象に加えて、火山灰質細粒土等を材料とした盛土に地震によるせん断応力が繰り返し作用することによって、盛土の強度や剛性が低下する現象のことをいう。 ※2 土地の所有者等：土地の所有者、管理者、占有者、工事主又は工事施行者をいう。（国土交通省による）			

# 盛土のり面の検討

- 盛土の締固め度は90%以上を基本。
- 湧水等で間げき水圧の上昇が懸念される盛土ではこれを考慮した安定計算を実施することが望ましく、渓流等における高さ15m超の盛土はこれを標準とし、地下水水位は盛土高の1/3とすることを基本。
- 地震時安定計算は震度法を標準とし、基礎地盤の液状化が懸念される場合は過剰間げき水圧の発生を考慮した安定解析も合わせて行うことが望ましい。

## 盛土等防災マニュアルの主な改正概要と考え方

V 盛土	
【考え方】 3. 盛土のり面の検討 3.1 盛土のり面の勾配 ● 盛土のり面の勾配は30度以下を原則とし、り面の安定性の検討が必要な条件として、「のり高が特に大きい場合」や「腹付け盛土となる場合」等のこれまでに規定に加え、「締固め難い材料を盛土に用いる場合」を追加する。	
3.2 盛土のり面の安定性の検討 ● 盛土のり面の安定性は、次回に示す安定検討フローを一般とし、常時と地震時の安定計算を全応力法で行うことを標準とする。このとき、豪雨による水位上昇の影響は、規定の安全率（常時1.5・地震時1.0）を満足することで、考慮されていると考える。 ● 間げき水圧には、盛土内への浸透水等により形成される静水圧、液状化等により発生する過剰間げき水圧等がある。 ● 盛土の締固め度は90%以上を基本とすること、また、浸透水等の地下水により崩壊が懸念される盛土においては、適切に地下排水工及び盛土内排水層を設置することにより、盛土内の間げき水圧や、地震時において盛土の強度に影響を及ぼすような過剰間げき水圧を発生させないようにすることが原則である。 ● ただし、湧水や常時流水等が認められる傾斜地盤（深流等を含む）等、間げき水圧が上昇することが懸念される盛土は、盛土内等の間げき水圧を考慮した安定計算を実施することが望ましい。特に、深流等における高さ15メートル超の盛土は、間げき水圧を考慮した安定計算を実施することを標準とする。 ● この場合、間げき水圧は静水圧を見込むものとし、宅地防災マニュアル策定後に造成された盛土で確認された地下水水位は、おおむね盛土高の3分の1以下であることを踏まえ、設定水位は盛土高の3分の1とすることを基本とする。なお、現場条件等により間げき水圧の上昇が大きいと想定される場合の設定水位は、盛土高の2分の1とすることも考えられる。 ● 盛土の安定計算はフェニクス式を標準とするが、間げき水圧（静水圧）を考慮した安定計算を行う場合、摩擦抵抗力が負にならない修正フェニクス式を適用する。 ● 地震時の安定計算は、水平震度として震度法を標準とする。また、平地部等の盛土で、基礎地盤の液状化が懸念される場合は、基礎地盤の液状化による過剰間げき水圧の発生を考慮した安定計算もあわせて行うことが望ましい。（「道路土工—軟弱地盤対策工指針」を参照し、水平震度は作用させず、基礎地盤内において地震時に発生する過剰間げき水圧を考慮する）。 ● 安定計算に用いる強度定数は、盛土材料の透水性等による排水条件の違いを考慮したせん断試験により求める。これらの強度定数、間げき水圧、水平震度の考え方等を次表に示す。（国土交通省による）	

# 安定計算を行うための土質試験

- 全応力法を基本（せん断）にともなう間隙水圧の変化を考える有効応力法ではない）

（国土交通省による）

## 盛土等防災マニュアルの主な改正概要と考え方

V 盛土					
【考え方】 <地震時の液状化等による盛土の強度低下を考慮する必要がない場合>					
表 常時及び地震時（震度法）の安定計算に用いる盛土の強度定数及び間げき水圧（盛土の強度低下を考慮しない）					
盛土材料	透水性	全応力法		有効応力法	
		土質試験・強度定数	間げき水圧	土質試験・強度定数	間げき水圧
常時・地震時	低	・圧密非排水（CU）試験 ・非排水せん断の強度定数（ $c_{cu}$ , $\phi_{cu}$ ）	- 静水圧： $U_v$	-	-
	高	・圧密排水（CD）試験 ・排水せん断の強度定数（ $c_v$ , $\phi_v$ ）			
高含水比な火山灰質細粒土等	低	・非圧密非排水試験（UU）試験 ・含水比等の変化に応じて複数の非排水せん断強度定数（ $c_u$ , $\phi_u$ ）	・静水圧： $U_v$	・圧密非排水（CU）試験 （間げき水圧測定） ・有効応力強度定数（ $c'$ , $\phi'$ ）	● 施工中・施工直後の過剰間げき水圧： $U_v$ ● 施工含水比で締固められた盛土材料の標準圧縮試験を行い、非排水条件下の過剰間げき水圧（過剰間げき水圧）を求める。 ● 圧密度より施工期間中における間げき水圧の減少割合を推定。 ● 静水圧： $U_v$
	※地震時検討時の水平震度は、標準0.25とする。 ※盛土材料が高含水比な火山灰質細粒土の場合の考え方は、「道路土工—盛土工指針」を参照。				
表 盛土下位の基礎地盤の液状化が懸念される場合：基礎地盤の強度定数・間げき水圧・水平震度					
基礎地盤	土質試験・強度定数		全応力法		
	透水性	土質試験・強度定数	間げき水圧	水平震度	
低～高	・圧密非排水（CU）試験 ・非排水せん断の強度定数（ $c_{cu}$ , $\phi_{cu}$ ） ※液状化が懸念される際、地震時であるため、透水性にかかわらず、試験条件は非排水条件で実施する。	・静水圧： $U_v$ ・地震時に発生する過剰間げき水圧： $U_v$ ※1：液状化に対する安全率 $F_s$ 等より推定。（道路土工—軟弱地盤対策工指針）	次のケースで計算する。 ・考慮しない（ $U_v$ を考慮する場合） ・考慮する（標準0.25、 $U_v$ を考慮しない） 9		
※基礎地盤の液状化が懸念される場合の考え方は、「道路土工—軟弱地盤対策工指針」を参照。					



## 安定性の検討

- ▶ 溪流等における高さ15m超の盛土や締固め難い材料を用いる大規模な盛土では地震時の液状化等による盛土の強度低下の有無を判定する。
- ▶ 地震時の強度低下を考慮した安定計算
  - ・盛土材料が粗粒土：安定計算①
  - ・盛土材料が細粒土：安定計算②

V 盛土		国土等防災マニュアル 3～7ページ
【考え方】 3.2 盛土のり面の安定性の検討		
● 次の条件に該当する盛土については、地震時において液状化等による盛土の強度低下の有無を判定する。 ・ 溪流等における高さ15メートル超の盛土 ・ 火山灰質土等の締固め難い材料を用いる大規模な盛土*		
● 判定の結果、液状化等による盛土の強度低下が見込まれる場合は、設計条件（盛土形状、盛土材料等）の変更を行い、液状化等による強度低下を発生させない設計とすることを基本とする。ただし、設計条件の変更がええいやむを得ない事情がある場合に限り、盛土の強度低下を考慮した安定計算を行うものとする。		
● 地震時における盛土の強度低下の判定にかかわる土質試験には、液状化判定に要する液状化強度比を求める試験（試験①）、繰り返し載荷の影響を受けた強度定数を求める試験（試験②）等がある。		
● 地震時の強度低下を考慮した安定計算は、各種技術指針に示される同様の安定計算方法を参考とする。 ・ 安定計算①：盛土材料が粗粒土で、液状化判定結果より、地震時に発生する過剰間隙水圧を考慮する場合「道路土工—軟弱地盤対策工指針」に示される方法を参考にして、次の2ケースが規定の安全率を満足することを確認する。 A) 水平震度は作用させず静水圧と地震時に発生する過剰間隙水圧を考慮した安定計算 B) 震度法による安定計算（水平震度を作用させず静水圧のみ考慮） ・ 安定計算②：盛土材料が細粒土で、繰り返し載荷の影響によって強度定数が低下する場合「土地改良事業整備指針」に示される、繰り返し載荷による堤体土の強度低下（非排水せん断強度の低下）を考慮した安定計算方法（滑り円弧の残留変形法等）を参考にして、震度法による安定計算を実施する。		
● 試験①②及び安定計算①②の考え方（強度定数・間隙水圧・水平震度の考え方等）を次表に示す。		
3.3 盛土のり面の形状		
● 盛土のり面は、二つの小段にはさまれた部分は単一勾配とし、地表水が集中しないように適切に小段に排水勾配を設ける必要がある。		
4. 盛土全体の安定性の検討		
● 盛土全体の安定性の検討の手法は、「V-3-2 盛土のり面の安定性の検討」に準じて行う。		
※ 大規模な盛土：変動が生じた場合に大きな被害が発生する可能性が高い、谷埋め型大規模盛土造成地（溪流等における高さ15メートル以下の盛土を含む）、腹付型大規模盛土造成地、平地部における高さ15メートル超の盛土を標準とする。 （本定義は「V-3-2 盛土のり面の安定性の検討」に限る。）（国土交通省による）		

## 液状化等による盛土の強度低下を考慮する場合の土質試験と水平震度

- ▶ 液状化の判定時の液状化強度比は液状化試験、せん断応力比は地震応答解析（大規模地震動）等により算出
- ▶ 過剰間隙水圧～ $F_L$ 関係は液状化試験結果から求める。
- ▶ 水平震度の標準は0.25（レベル2地震動）

V 盛土				国土等防災マニュアル 3～7ページ
【考え方】 ＜地震時の液状化等による盛土の強度低下を考慮する場合＞ 表 地震時の液状化等による盛土の強度低下の判定にかかわる土質試験				
試験	盛土材料	試験方法・特徴等	試験結果の適用	
試験①	粗粒土	・繰り返し非排水三軸試験 ・地盤工学会で規格化されている一般的な試験方法である。 ・盛土材料の液状化強度比を求める。 ※液状化強度比は、液状化判定に用いる。	・液状化強度比と地震時せん断応力比より、液状化判定（安全率 $F_L$ の算出）を行う。 ※せん断力比は、地震応答解析（大規模地震動）等により算出 ・ $F_L$ より、地震時に発生する過剰間隙水圧 $U$ を推定する。 ※ $U$ は試験結果より求めた $F_L$ との関係だけではなく、「道路土工—軟弱地盤対策工指針」等を参考に推定してもよい。	
試験②	細粒土 (粗粒土)	・繰り返し載荷後の単調載荷試験（繰り返し非排水三軸試験後に圧非排水三軸試験を実施する試験） ・土地改良事業整備指針「ため池整備」に示される試験方法であるが、規格化されていない特殊な試験である。 ・繰り返し載荷の影響を受けた盛土材料の強度定数を求める。	・繰り返し載荷の影響を受けた強度定数と、圧非排水三軸試験の強度定数を比較する。 ・強度低下する場合は、繰り返し載荷過程で生じたひずみと、低下した強度定数（ $c_u$ 、 $q_u$ ）の関係を整理。	
*試験②は粗粒土と細粒土の両方に適用できるが、特殊な試験であるため、盛土材料が粗粒土の場合は試験①で行い、細粒土の場合は試験②で行うことを基本とする。				
表 地震時における盛土の強度低下を考慮した安定計算に用いる盛土の強度定数・間隙水圧・水平震度				
安定計算	盛土材料	土質試験・強度定数	全応力法	水平震度
安定計算①	粗粒土	・圧密非排水（CU）試験 ・非排水せん断の強度定数（ $c_{cu}$ 、 $q_{cu}$ ）	・静水圧： $U$ 、 ・地震時に発生する過剰間隙水圧： $U$ 。 ※ $F_L$ 等より $U$ を推定	次の2ケースで計算する。 ・考慮しない（ $U$ を考慮する場合） ・考慮する（標準0.25、 $U$ は考慮しない）
安定計算②	細粒土	・繰り返し載荷後の単調載荷試験 ・繰り返し載荷過程で生じたひずみと、低下した強度定数（ $c_u$ 、 $q_u$ ）の関係を整理。 ・地震応答解析等により、盛土内の発生ひずみと算出し、ひずみの分布等に応じた強度定数（ $c_u$ 、 $q_u$ ）を設定。	・静水圧： $U$ 、	・考慮する（標準0.25）
:3 （国土交通省による）				

## 溪流等における盛土に講ずる追加措置

- ▶ 盛土高さ15m超で盛土量5万 $m^3$ 以下：間隙水圧を考慮した安定計算の実施を標準とする。
- ▶ 盛土高さ15m超で盛土量5万 $m^3$ 超：三次元解析（変形解析や浸透流解析等）により二次元の安定計算モデルや計算結果の妥当性について検証する。

V 盛土		国土等防災マニュアル 3～7ページ
表 溪流等における盛土に講ずる追加措置		
措置の対象	措置の内容	
盛土の安定性の検討方法	盛土高さ15メートル以下 盛土高さ15メートル超で盛土量5万 $m^3$ 以下 盛土高さ15メートル超で盛土量5万 $m^3$ 超	「V-3-2 盛土のり面の安定性の検討」に示す安定計算方法に準じて盛土の安定性を検討する。また、大規模盛土造成地に該当する場合は「V-4 盛土全体の安定性の検討」に示す安定計算方法に準じて安定性を検討する。 盛土高さ15メートル以下の盛土と同様の方法で安定性を検討するが、間隙水圧を考慮した安定計算を実施することを標準とする。 ・地震時の間隙水圧の上昇及び繰り返し載荷による盛土の強度低下の有無を判定し、強度低下が生じると判定された場合は、盛土の強度低下を考慮した安定計算を行う。 盛土基礎地盤及び周辺斜面を対象とした一般的な調査（地質調査、盛土材料調査、土質試験等）に加え、盛土の上下流域を含めた詳細な地質調査・盛土材料調査等の実施が望ましい。
り面処理	標準的なり面保護工に加え、周辺の湧水等の影響を検討し、必要に応じて護壁等の構造物による保護を検討する。 ・豪雨等に伴いり面の末端に流水が存在する場合は、想定される水位高とまで構造物で保護する等の処理をしなければならない。	上記に示した安定性の検討を基本とするが、盛土規模が大きく数多くのリスク要因（地盤・地下水・地震動等）が盛土の安定性に大きな影響を与えることとなるため、三次元解析（変形解析や浸透流解析等）により二次元の安定計算モデルや計算結果（滑り面の発生位置等）の妥当性について検証する。 ・三次元解析のための詳細な地質調査及び水文調査を追加で実施する。 ・三次元解析結果について、許可権者は専門家に諮ることとなるため、二次元解析（変形解析や浸透流解析等）での評価が妥当な場合には、二次元解析を適用する。 ※二次元解析（変形解析や浸透流解析等）での評価が妥当な場合には、二次元解析を適用する。
排水施設	・溪流等の流水は地表水排水路及び排水路により処理することを原則とし、地山からの伏流水が盛土の地表面に現れることが懸念されるため、盛土と地山の境界にも地表水排水路を設ける。 ・湧水は暗渠排水工（本川、支川を問わず在来の深床には必ず設置）にて処理する。	
工事中及び工完了後の防災	・工事中には、用地外への土砂の流出を防止するために防災ダムを、河川汚濁を防止するために沈泥池をそれぞれ先行して設置する等、防災対策に十分留意しなければならない。 ・防災ダムは、工事中に土砂の流出がなく、開発後の沈泥池の容量等の基準を満たす場合は、防災ダムを工事後の沈泥池として利用することが可能である。	
:4 （国土交通省による）		

## B. 盛土等の安全対策推進ガイドライン及び同解説（既存の盛土用）



図 1.1 既存盛土等への対応の全体像



参考7.11 盛土や基礎地盤が液状化する可能性がある場合の安定計算方法

盛土や基礎地盤が液状化する可能性がある場合、地震動の作用による土の強度低下が著しい場合等は、水平震度は作用させず、液状化による過剰間隙水圧を考慮した安定計算方法が、「社団法人 日本道路協会：道路土工 軟弱地盤対策工指針, pp.172-173, 2012.8.」に紹介されている(参7.11.1)。

ただし、(参7.11.1)は初期せん断応力の影響、せん断変形に伴う過剰間隙水圧の変化の影響を無視しているなど、多くの簡略化を含んだ簡易式による安定計算である。

$$F_s = \frac{\Sigma\{c \cdot l + (W - U_s \cdot b - U_L \cdot b) \cos \alpha \cdot \tan \phi\}}{\Sigma W \sin \alpha} \quad (\text{参7.11.1})$$

$U_s$ ：常時の地下水による間隙水圧 (単位  $\text{kN/m}^2$ )

$U_L$ ：地震時の液状化により発生する過剰間隙水圧 (単位  $\text{kN/m}^2$ )

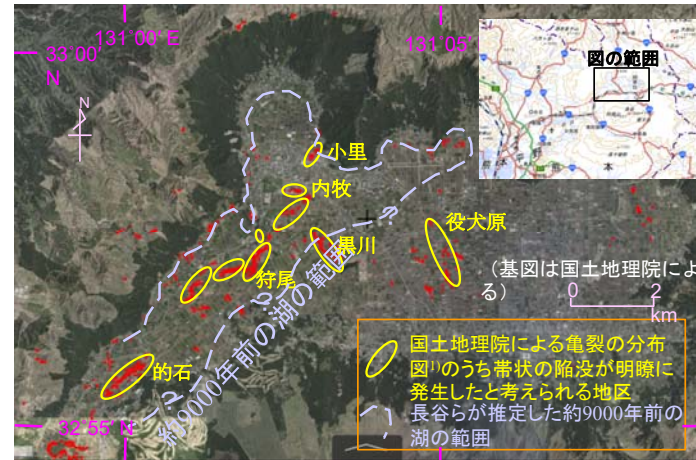
$U_L$ は液状化判定の結果(液状化に対する安全率 $F_L$ )等より推定する。

盛土や基礎地盤の液状化が懸念される場合は、前述「7.2 安定計算」の水平震度を作用させる方法に加えて、これらの方法による検討もあわせて実施することが望ましい。

ただし、斜面の液状化については、初期せん断応力の影響が複雑であるため、これに注意する必要がある。(国土交通省による)

(2) 2016年熊本地震により阿蘇カルデラで発生した帯状陥没被害  
(液状化と紛らわしい被害)

阿蘇谷で帯状陥没が発生したと考えられる地区



(阿蘇市：平成28年熊本地震「阿蘇市震災記録誌」による)

安田進・大保直人・島田政信・千葉達朗・永瀬英生・村上哲・先名重樹・北田奈緒子・石川敬祐：2016年熊本地震により阿蘇カルデラで発生した帯状陥没のメカニズム、日本地震工学会論文集、Vol.21、No.1、pp.135-158、2021.

過去の類似被害で説明できるか？

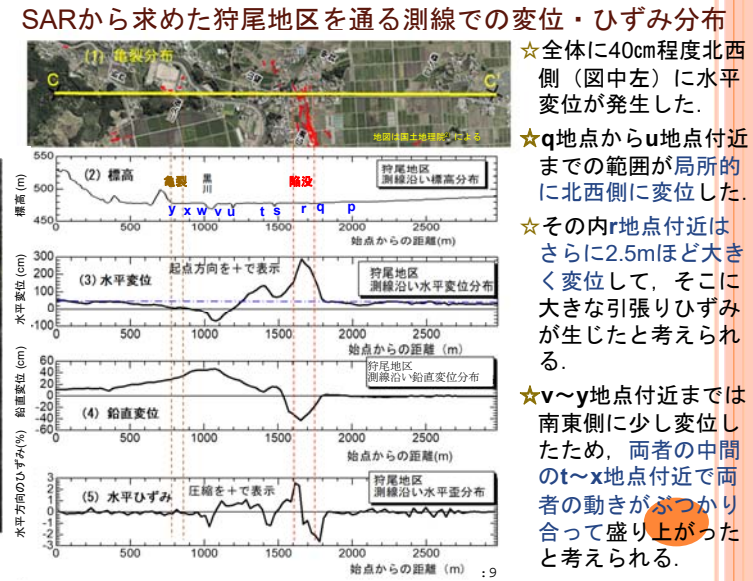
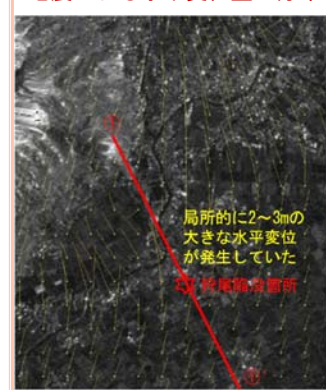
- ①別府-島原地溝帯に  
関係した南北方向  
の引張り力による  
正断層型の落ち込み  
で発生した可能性
- ②布田川断層に続く横  
ずれ雁行断層により  
発生した可能性
- ③液状化により発生し  
た可能性
- ④カルデラの縁の特異  
な地層構成に起因  
して発生した可能性



帯状陥没で生じた被害

- ☆陥没区域内の家屋の沈下
- ☆陥没境界上に位置した家屋の傾斜・変形
- ☆農地の被害
- ☆道路の通行障害
- ☆上・下水道の寸断・破損
- ☆黒川のコンクリートブロック護岸のクラック
- ☆送電用鉄塔の傾斜

合成開口レーダー (SAR)による変動量の測定  
地震による水平変位量の分布



- ☆全体に40cm程度北西側(図中左)に水平変位が発生した。
- ☆q地点からu地点付近までの範囲が局所的に北西側に変位した。
- ☆その内r地点付近はさらに2.5mほど大きく変位して、そこに大きな引張りひずみが生じたと考えられる。
- ☆v~y地点付近までは南東側に少し変位したため、両者の中間のt~x地点付近で両者の動きがぶつかり合っただと考えられる。



## 狩尾地区の地盤特性の詳細調査

### (1) 既往の地盤データの収集

#### (2) 探査

- ・表面波探査
- ・反射法探査
- ・微動アレイ観測

#### (3) 地盤調査

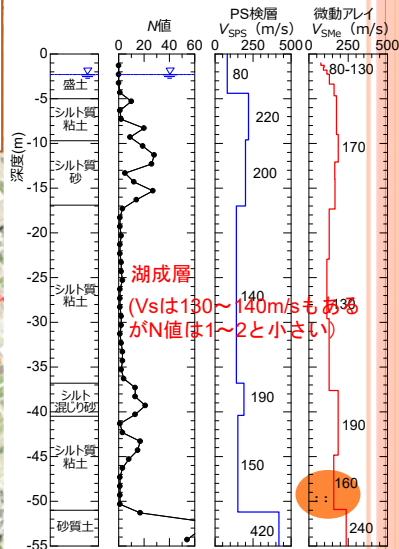
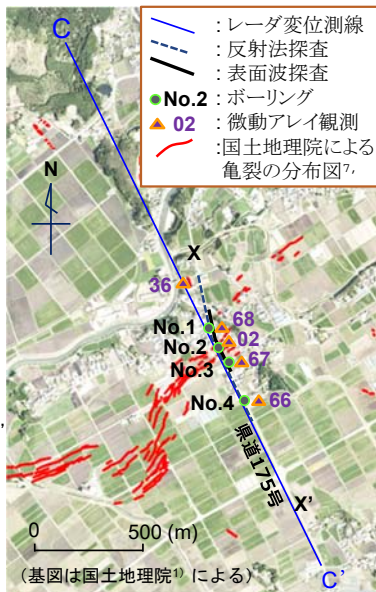
- ・ボーリング
- ・乱れの少ない試料採取
- ・コア観察
- ・PS検層

#### (4) 土質試験

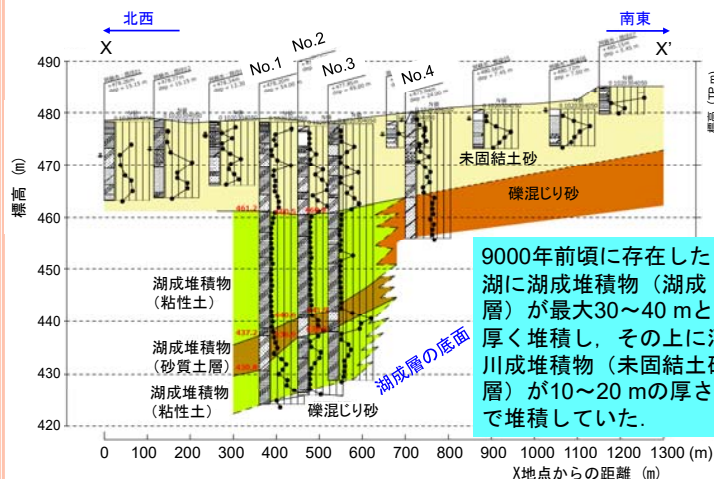
- ・物理試験（密度、含水比、粒度、液性・塑性限界）
- ・一軸・三軸圧縮試験
- ・圧密試験
- ・繰返しねじりせん断試験

#### (5) 地割れの深さの調査

- ・SWS

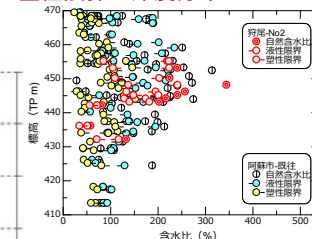


## 狩尾地区の推定土層断面図



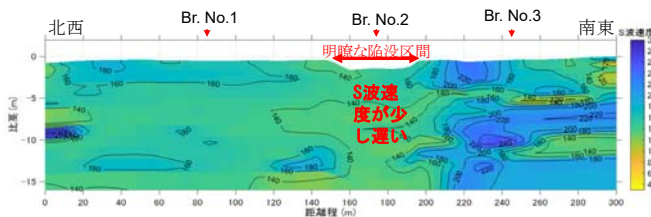
9000年前頃に存在した湖に湖成堆積物（湖成層）が最大30~40mと厚く堆積し、その上に河川成堆積物（未固結土砂層）が10~20mの厚さで堆積していた。

## 湖成層の自然含水比、液性・塑性限界の深度分布



- ☆ 湖成層は珪藻と軽石を含む粘性土で、自然含水比は200~300%と非常に高い（液性限界より高い）。
- ☆ 三軸圧縮試験の強度はある程度高いが、一旦繰返すとドロドロの状態になる鋭敏な粘性土である。

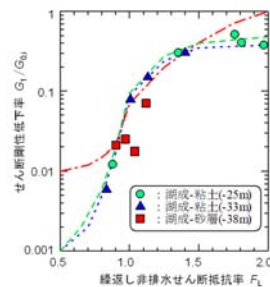
## 狩尾地区の表面波探査結果



局所的な水平変位により水平方向の土圧が減少し、未固結土砂が落ち込むように陥没が発生したのではないかと考えられた。

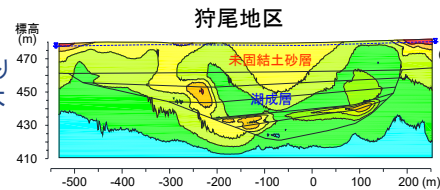
## 湖成層のFLとせん断剛性G1の低下率との関係

静的強度はかなり強いしっかりしたシルトであるが、標準貫入試験時の衝撃や強震動による繰返しせん断力を受けると、途端にせん断強度やせん断剛性が急減する、崩壊性土の特性を持っていた。



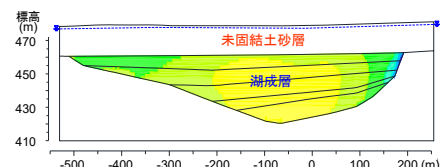
## 狩尾地区の地震応答解析および残留変形解析による帯状陥没の再現

FLUSHにより解析した最大加速度分布

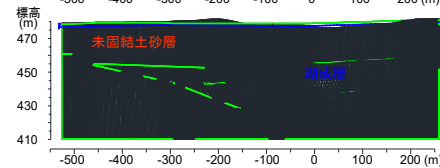


入力波：K-NET一の宮での観測波を一次元地震応答解析により工学的基盤まで引き戻した波を調整して使用

FL分布



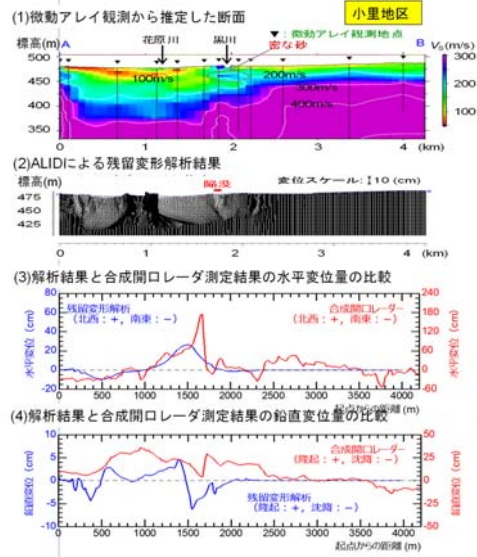
残留変形解析 (ALID) により求めた変形図



陥没が発生した箇所付近で地表面が少し沈下し、それより左側（北東側）では盛り上がる結果となった。

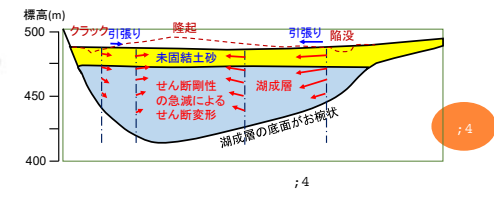


他の3地区における地層構成の把握と解析



帯状陥没が発生したメカニズムの結論

- ①9,000年前頃に形成されていた湖に、珪藻や軽石を含む間隙比の大きい火山成粘性土の湖成層が堆積していた。
- ②湖成層の底面はお椀状になり、さらに地表面も中央に向かってわずかに傾斜している地区もあった。
- ③地震動によって湖成粘性土のせん断剛性が急減し、下面傾斜に沿って中央部に回り込むようにせん断変形し、中央は盛り上がった。
- ④この変形によりかつての湖の両側の縁付近に局所的な水平変位が生じ、表層の未固結土層が水平に引っ張られ、陥没やクラックが発生した。

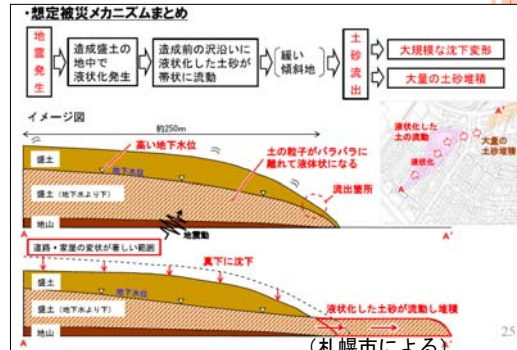
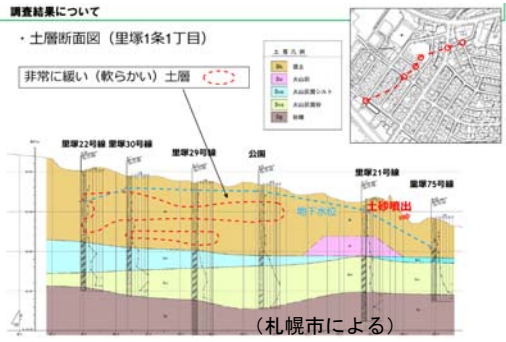


(3) 2018年北海道胆振東部により里塚地区で発生した陥没被害 (原因は液状化でないと個人的に考えている被害)



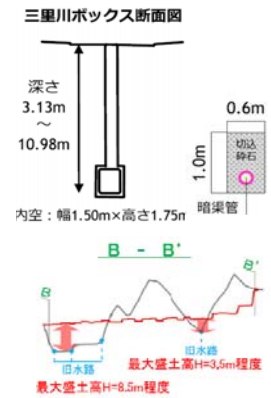
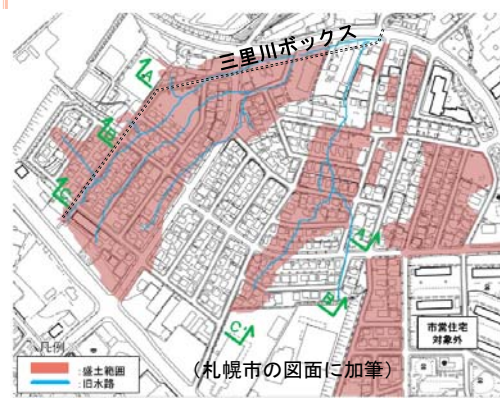
安田進：地震による盛土造成地の被害に経年変化を与える影響の考察、日本地震工学会、第15回年次大会梗概集、B-3-1、2020。

札幌市により推定されている被災メカニズム



- 疑問点：
- ①液状化した土が水平に流動したら、その上の層も水平方向に引っ張られて地表面に横断クラックがはいるはずであるが、引張クラックは生じていないのはなぜか？
  - ②勾配は1~3%程度と緩いが、それでもこのような流動は発生するのか？
- 地震前から地下に空洞が形成されており、空洞の上部の土が地震動によって落ちて、地表面が陥没したのではないかと。

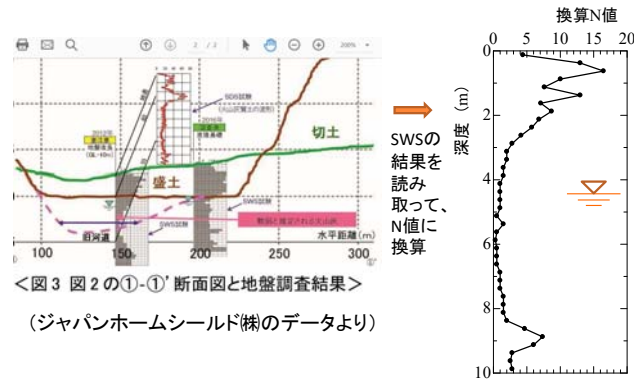
盛土範囲、暗渠排水管および三里川ボックスの位置



三里川ボックスに接続している暗渠排水管の出口の写真をみると、暗渠排水管から地震前に土が流出したような跡が見られる。

## 地震の数年前の地盤調査結果

- 数年前に家を建てられた時のスウェーデン式サウンディングの結果をN値に換算してみると、表層のN値は5程度以上あるのに対し、GL-4m~GL-8m付近は換算N値がほとんどゼロとなっている。
- 地下水位はGL-3.5mと深い。
- 盛土内でN値はほぼ一定か深くなるにつれて少し大きくなるはずなのに不自然→空洞があいていたのではないかと考えられる。

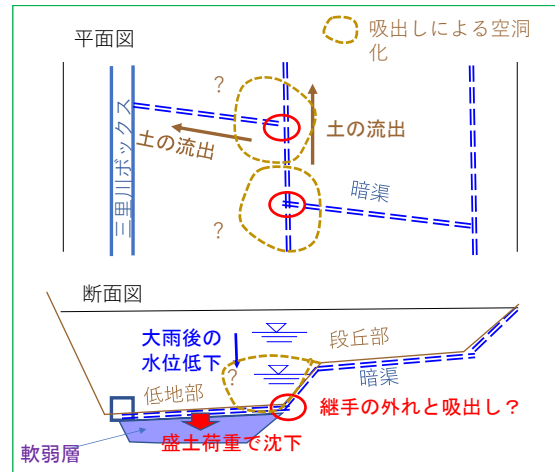


## 地震前からの変状発生状況



- 地震前のGoogleのストリートビューには今回の地震で陥没や洗堀を生じた箇所には、擁壁の変状や路面に横断クラックがはいり補修した跡が見られる。
- 住民の方で陥没した箇所は地震前から何かふわふわとした感じであったとか、路面にクラックがはいったので役所に言って直してもらった、と言われた方がおられた。

## 暗渠排水管周囲に暗渠排水管の経年劣化で空洞が形成されたと考えられるメカニズム



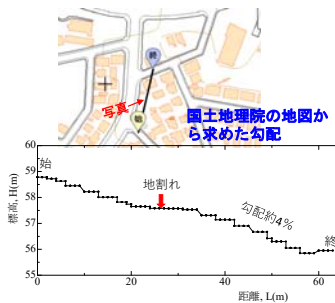
## 地震時に洗堀区間が形成されたメカニズムに関する考え

液状化した土が流出したのではなく、水道管が破損し流れ出した水で土砂を流したのではないかと考えられる。

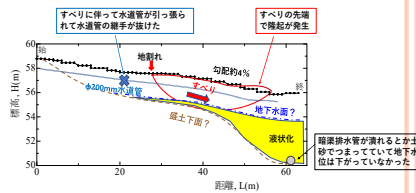
- 地震後に現地を巡回された方によると、1時間後の午前4時頃里塚付近を調査した際は大きな被害はなかったが、再度、午前5時頃調査したところ大きな被害が生じていたとのこと。
- 200 mmの水道管は配送塔からの自然流下で流出しており地震で被災してすぐ水が流出しはじめ、500 mmの水道管は上流の配水塔に水を送る送水管で、4時前頃に配水塔の貯水量低下のため、送水を開始。
- 最初水道水が流れ出した時はあまり洗堀していなく、その後500mmの水道管からの流出とともに洗堀が進んだのではないかと考えられる。

## 地震時に水道管が壊れた原因の考察

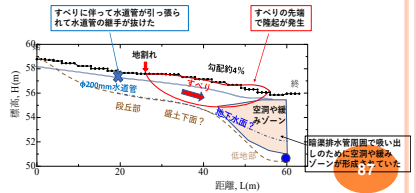
- 200mmの水道管の被災箇所中間の広場で、地盤がすべって発生したような地割れが発生し、そこから洗堀区間に下がるのり面の下で地盤の隆起も発生したので、この間ですべりかけたのではないかと。
- 地盤のすべりにもよって水道管に引張力が働いて被災したのではないかと。



### ①洗堀区間の地下水位が浅くて液状化した場合



### ②洗堀区間に地震前から空洞や緩みゾーンが形成されていた場合



ご清聴有難う  
ございました