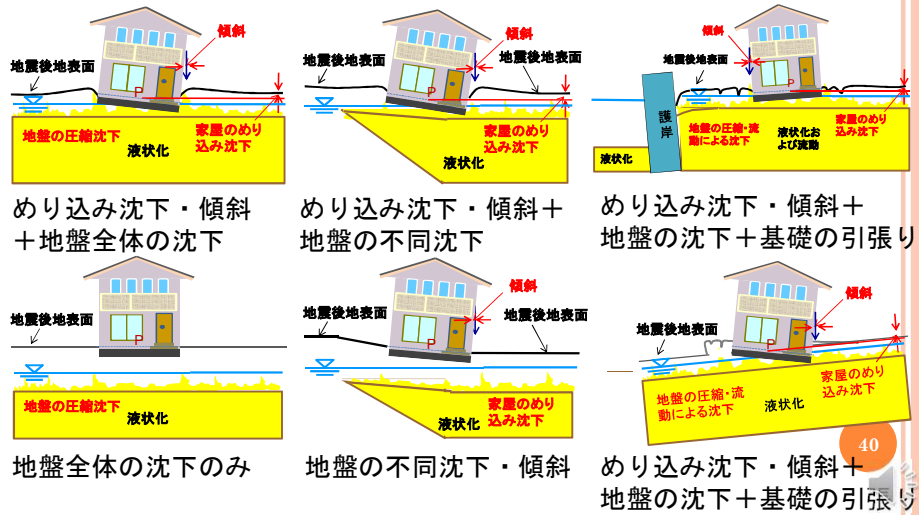


4. 液状化による戸建て住宅のめり込み沈下や傾斜のメカニズム

(1) 液状化による戸建て住宅の被害のパターン



(2) めり込み沈下が生じるメカニズムに関する大型振動台実験例

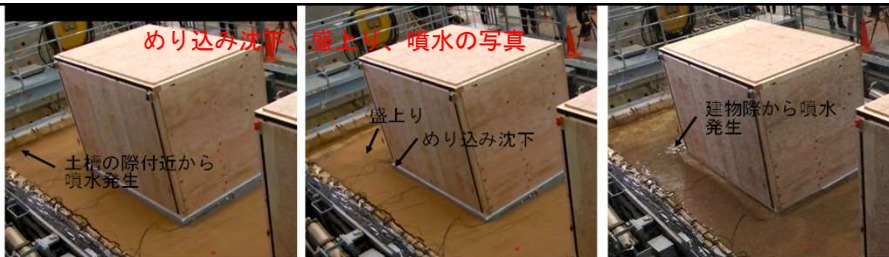
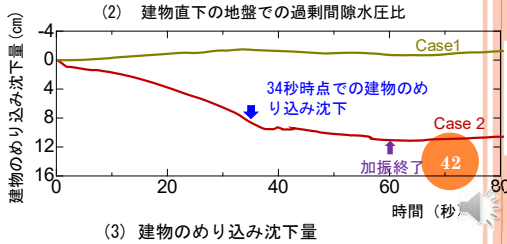
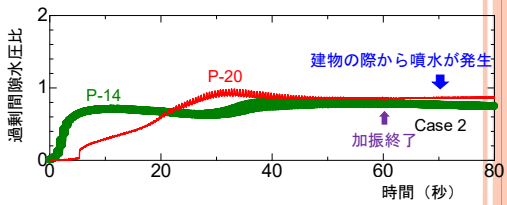
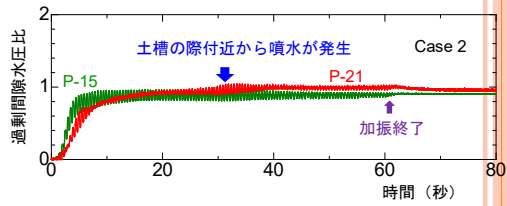
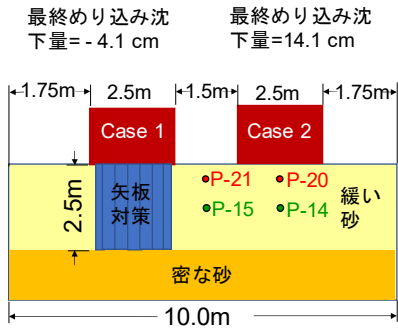
(建築研究所の大型振動台を用いて住友林業で行われた実験)



(住友林業提供)

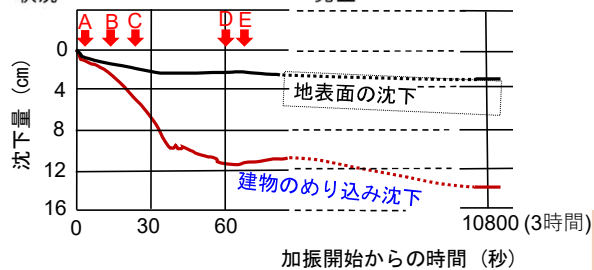
41

建物のめり込み沈下および過剰間隙水圧の時刻歴



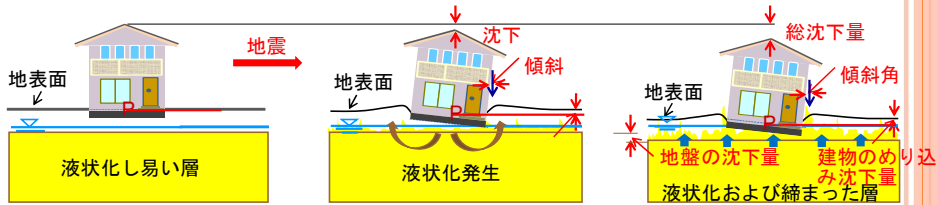
(1) 26秒後に土槽の際付近から噴水発生 (2) 34秒後でのめり込み沈下状況 (3) 70秒後に建物際から噴水発生

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

(3) 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

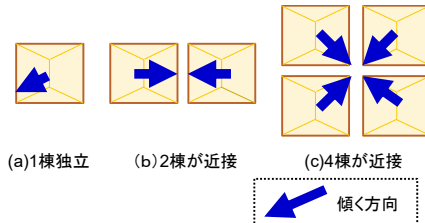


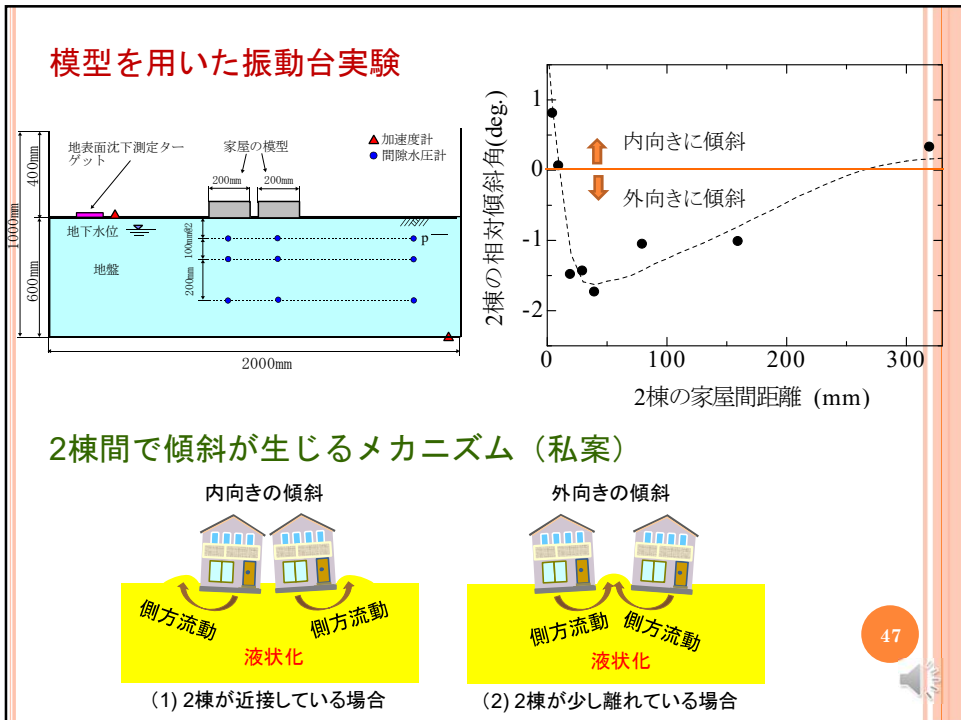
(1) 噴水や噴砂が発生してできた穴に落ち込んで建物がめり込み沈下するのではなく、液状化によって軟化（せん断剛性が急減）した地盤に建物の荷重によりめり込んで沈下する。その際建物下の地盤を横方向に押しつけるため、建物周囲の地表面が少し盛り上がる。

(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。

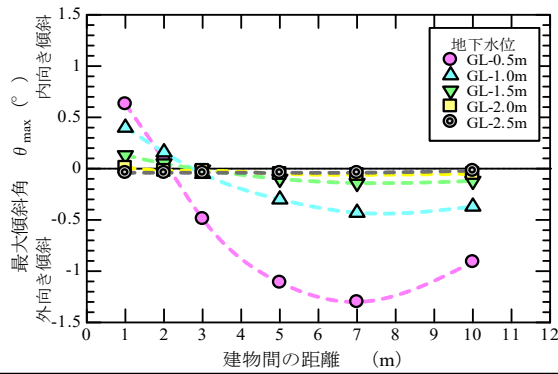
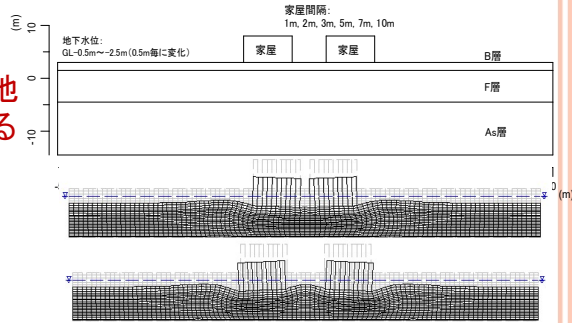
(4) 建物の傾斜が生じる主要なメカニズム

近接している住宅同士が傾斜に与える影響の事例








2棟間距離と2棟間傾斜角の関係に与える地下水位の影響に関する残留変形解析
“ALID”での解析例



(5) 傾斜やめり込み沈下による被害

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	> 50/1000	16.7/1000 ~ 50/1000	10/1000 ~ 16.7/1000	<10/1000
傾斜角				
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、被災後に持ち上げて水平化する沈下修正が必要（沈下修正だけで300万円~400万円程度必要、他に外構などと修復費も必要）。



(6) 杭基礎の集合住宅では

東日本大震災では集合住宅、高架橋などの杭基礎にほとんど被害は生じなかった。



ただし、段差やライフラインの被害は発生して集合住宅内での生活も一時困難になった

阪神・淡路大震災ではビル、タンク、橋脚等の杭基礎が甚大な被害を受けた。

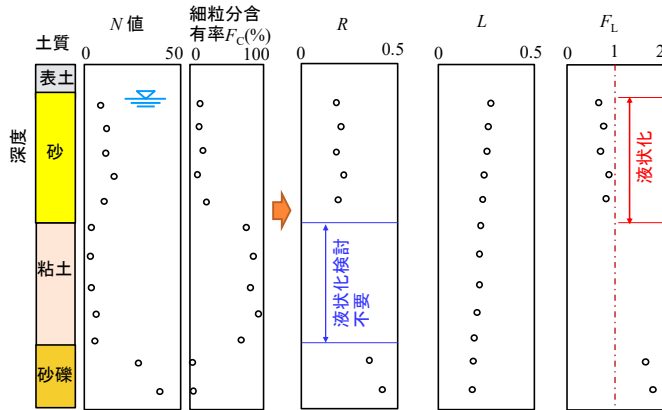


強い地震動では液状化により杭基礎の集合住宅も被災する危険性はあるかも。

5. 液状化により生じる戸建て住宅の沈下量と傾斜角の推定方法

(1) 地盤情報に基づく液状化の液状化危険度マップの作成方法

① 既往のボーリングデータを用い、N値などから液状化判定を行う



F_L : 繰返しせん断抵抗率(液状化に対する安全率) $=R/L$

R : 繰返しせん断強さ比(液状化強度比)

L : 地震によって発生する繰返しせん断応力比

51

② その地点で液状化が構造物に与える影響を評価する指標として液状化指数 P_L を求める

$$P_L = \int_0^{20} (1 - F_L)(10 - 0.5z) dz$$

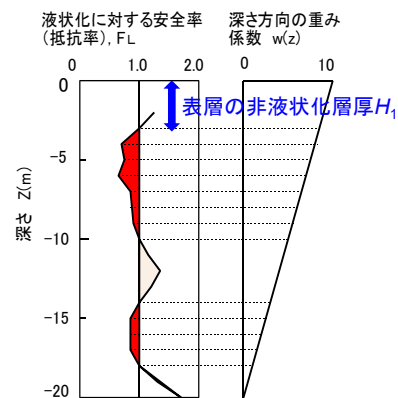
ただし $F_L > 1$ の場合は $(1 - F_L)$ は 0

P_L 値を用いた構造物の被害の判断:

$P_L < 5$: 液状化による被害は受けないと判断

$P_L > 15$: 液状化による甚大な被害を受けると判断

岩崎敏男・龍岡文夫・常田賢一・安田進: 砂質地盤の地震時流動化の簡易判定法と適用例、第5回日本地震工学シンポジウム、pp. 120-126、1978.

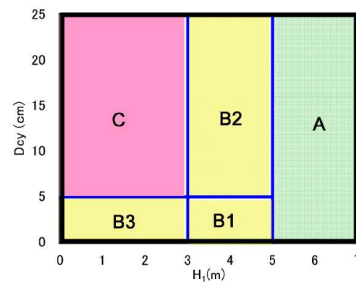
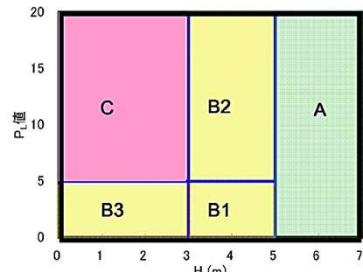


一般の液状化ハザードマップの指標に多く用いられてきた。

52

2011年東日本大震災で多く被災した戸建て住宅で検討したところ、 P_L だけでなく表層の非液状化層厚 H_1 も併せた方が被害を表せることが分かった。

判定結果	液状化被害の可能性
C	顕著な被害の可能性が高い
B3	顕著な被害の可能性が比較的低い
B2	
B1	
A	顕著な被害の可能性が低い



国土交通省で2021年2月に公表された「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」における宅地の危険度マップの作成はこの指標を採用

53

2種類のマップの比較

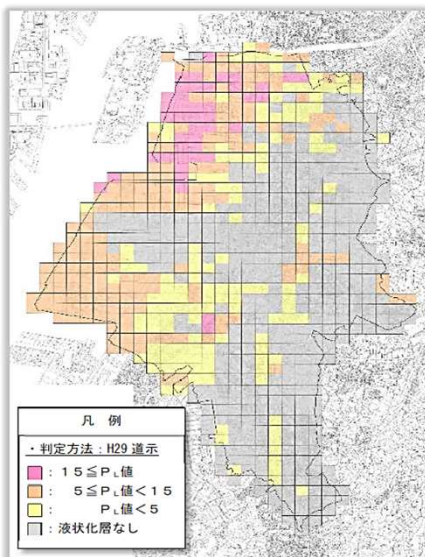


図-4.4.6 P_L分布図 (B市)

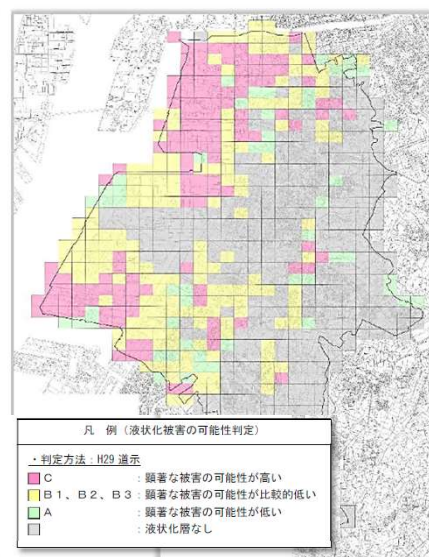


図-4.4.10 H₁-P_L分布図 (B市)
(国土交通省による)

戸建て住宅のめり込み沈下や傾斜の簡易評価方法

「戸建て住宅のめり込み沈下や傾斜の簡易評価」は、地盤を弾性体とみなし、建物荷重が作用している地盤が液状化した時の弾性沈下量を“戸建て住宅のめり込み沈下量”として簡易的に評価するものである。また、めり込み沈下量が大きいほど住宅の傾斜量も大きくなることから、過去の地震における液状化被害調査結果から、地盤が液状化した際の“戸建て住宅の傾斜量”も推定可能となる。なお、本手引きにおける「戸建て住宅のめり込み沈下の簡易評価」に係る基本的な作業は、『日本建築学会：建築基礎構造設計指針（2019 改定）』に示される多層地盤の即時沈下量の算定方法を標準とする。

めり込み沈下量の算定

戸建て住宅のめり込み沈下量は、対象地点における地盤情報や建物情報を基に、液状化安全率（ F_L ）と液状化強度比（ R_L ）に応じたせん断剛性低下率から“液状化後地盤の弾性係数”を求め、『日本建築学会：建築基礎構造設計指針（2019 改定）』に示されている多層地盤の弾性沈下量の算定式に準拠し求める。

（国土交通省による）

57

① 多層地盤の弾性沈下量の算定式

$$S_E = \left\{ \frac{I_s(H_1, \nu_{s1})}{E_{s1}} + \sum_{k=2}^n \frac{I_s(H_k, \nu_{sk}) - I_s(H_{k-1}, \nu_{s(k-1)})}{E_{sk}} \right\} qB$$

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

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

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

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密度 (kN/m²)
- 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)
- ν_s : 地盤のポアソン比
- E_s : 地盤の弾性係数 (kN/m²)

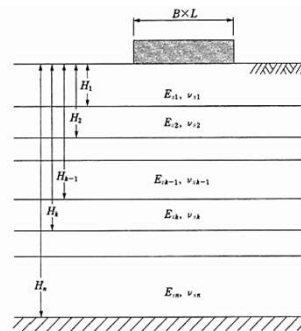
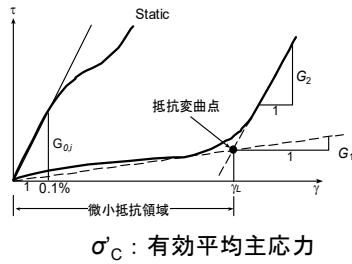


図-2.2.3 多層地盤における弾性沈下量の算定式（国土交通省による）
（『建築基礎構造設計指針（日本建築学会：2019 改定）』より）

58

② 液状化後地盤のせん断剛性低下率の設定



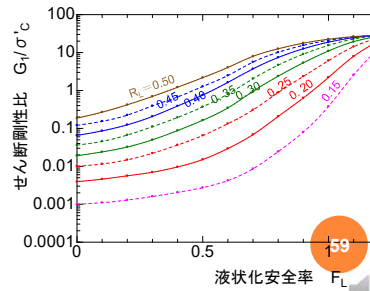
<参考: F_L 、 R_L に応じたせん断剛性比 (G_1/σ_c) の参考値>

	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	0.00698	0.00964	0.01510	0.02944	0.06871
$R_L=0.25$	0.01000	0.01153	0.01486	0.02208	0.03648	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	0.38905	0.75858	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	0.69663	1.21619	2.17771	4.04576	7.94328

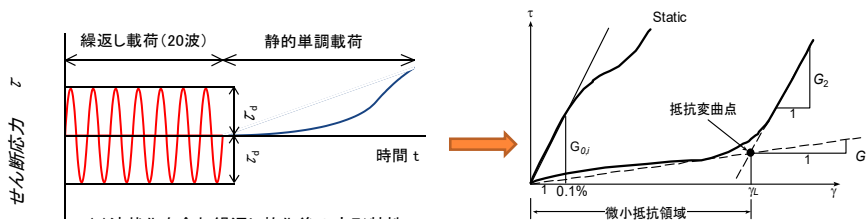
③ せん断剛性低下率の下限値の設定

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。

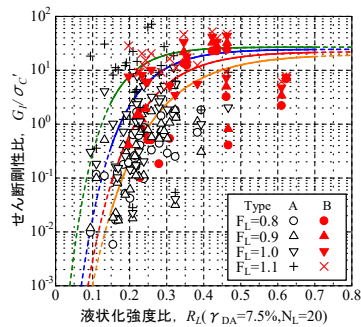
(国土交通省による)



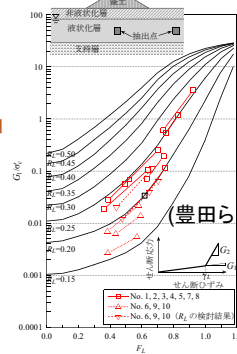
せん断剛性低下率と F_L 、 R_L 関係を導き出した経緯



全国の14地区の土で試験



被災事例から逆算 ($F_L < 0.7$)



安田進、吉田望、安達健司、規矩大義、石川敬祐: 液状化に伴う残留変形の静的評価法、日本地震工学会論文集、第16巻、第10号、pp. 31-50、2016.

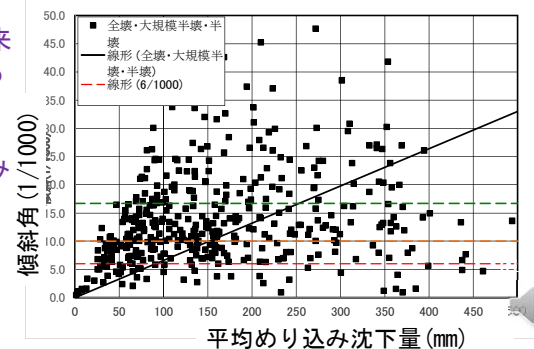
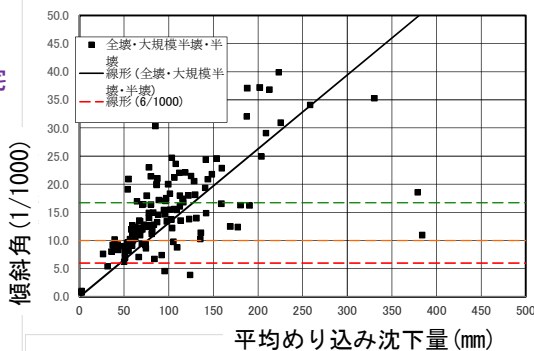
東日本大震災におけるめり込み沈下量と傾斜角の実測例

めり込み沈下量から傾斜角を推定

（「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）

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



傾斜やめり込み沈下量による家屋の被災程度の判断

<被害認定フロー（液状化等の地盤被害による被害）>

【第1次調査】

(1) 外観による判定

- ①一見して住家全部が倒壊
- ②一見して住家の一部の階が全部倒壊
- ③地盤の液状化等により基礎のいずれかの辺が全部破壊かつ基礎直下の地盤が流出

いずれかに該当

いずれにも該当しない

(2) 傾斜による判定

傾斜による判定と住家の潜り込みによる判定の被害程度の大きい方を採用
傾斜が1/100未満である場合、傾斜による判定は行わない

外壁又は柱の傾斜が1/20以上

床上1mまでのすべての部分が地盤面下に潜り込み

不同沈下があり、傾斜が1/60以上1/20未満

床までのすべての部分が地盤面下に潜り込み

不同沈下があり、傾斜が1/100以上1/60未満

基礎の天端下25cmまでのすべての部分が地盤面下に潜り込み

いずれかに該当

いずれかに該当

いずれかに該当

いずれかに該当

いずれかに該当

いずれかに該当

いずれかに該当

いずれかに該当

いずれかに該当

いずれかに該当

いずれかに該当

いずれかに該当

いずれかに該当

いずれかに該当

いずれかに該当

いずれかに該当

いずれかに該当

いずれかに該当

いずれかに該当

いずれかに該当

いずれかに該当

いずれかに該当

いずれかに該当

いずれかに該当

いずれかに該当

いずれかに該当

いずれかに該当

いずれかに該当

全壊

(損害割合50%以上)

大規模半壊

(損害割合40%以上50%未満)

半壊

(損害割合20%以上40%未満)

半壊に至らない

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)

スクリ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）による液状化簡易調査方法

試験機（自動式）



試験機（手動式）



試料採取装置例



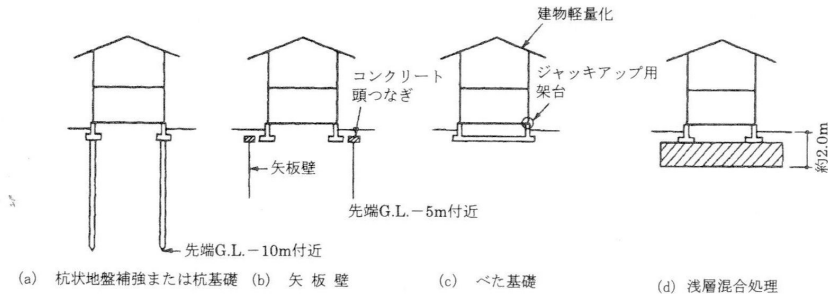
地下水位測定装置例



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（今年度中に公表予定）

6. 戸建て住宅の液状化対策方法

(1) 東日本大震災前に「日本建築学会：小規模建築物基礎設計の手引き（1988）」に示されていた対策方法



注：東日本大震災ではべた基礎の建物で液状化により沈下したものがあつたので、べた基礎は液状化対策として十分ではない場合もある。

64

(2) 戸建て住宅に対する対策の考え方

(1) 対策対象範囲の種類

- ① 個々の住宅で対策を施す。
- ② 市街地全体で対策を施す。

(2) 対策の基本方針の種類

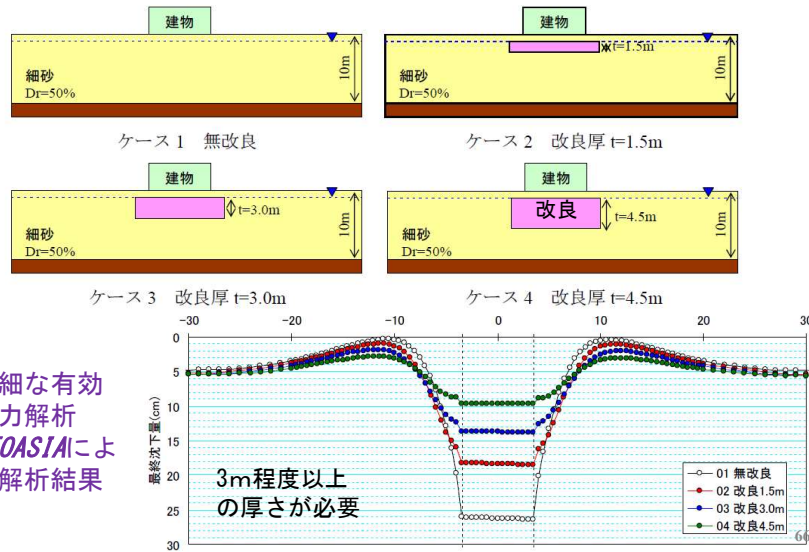
- ① 全層の液状化の発生を防ぐ。
- ② 下層が液状化しても、表層を改良するか地下水位を下げて非液状化層厚を増してめり込み沈下量を軽減する。
- ③ 液状化の発生は許して杭基礎などの構造的な対策を施す。

(3) 留意すべき戸建て住宅での制約条件

- ① 敷地が狭いので大型の機械が用いられない。
- ② 住宅地なので低振動・低騒音の工法しか使えない。
- ③ 費用を多くかけられない。

65

(3) 浅層盤状改良の厚さとめり込み地下量の関係に関する解析例



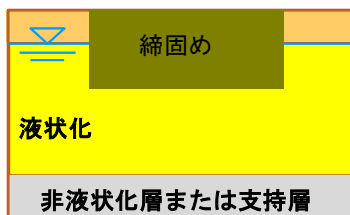
地盤工学会浅層盤状改良による宅地の液状化対策研究委員会：浅層盤状改良による宅地の液状化対策の合理的な設計方法の研究報告書，2012.

(4) 新築の個々の戸建て住宅に対する対策案

(以下は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報告書「液状化から戸建て住宅を守るための手引き」, 2012. より抜粋)

対策のメカニズム：改良部分の剛性により家のめり込み沈下を軽減する。

①地盤の盤状締固め

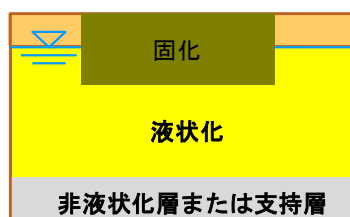


戸建て住宅に適用できる具体的な工法

- ・静的締固め工法
- ・圧入締固め工法
- ・締固め用の既製杭

留意事項：盤状に改良する必要がある。

②地盤の盤状固化



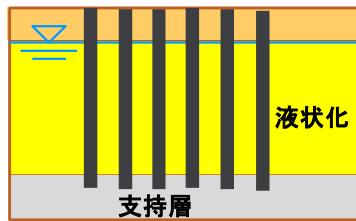
戸建て住宅に適用できる具体的な工法

- ・セメント混合処理（表層改良）

留意事項：盤状に改良する必要がある。

対策のメカニズム：支持層の支持力で支持する。

③既製杭支持

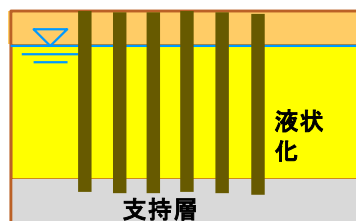


戸建て住宅に適用できる具体的な工法

- ・鋼管杭
- ・木杭

留意事項：地盤は沈下するので杭の抜けあがりに注意

④地盤の柱状改良



戸建て住宅に適用できる具体的な工法

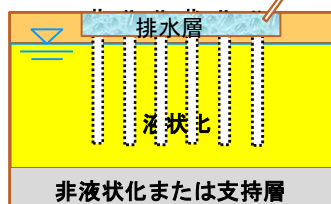
- ・セメント混合処理

留意事項：支持層まで到達しないと対策効果はない。

68

対策のメカニズム：液状化層からの過剰間隙水圧をドレーンで消散して液状化発生を防ぐ。

⑤過剰間隙水圧消散



戸建て住宅に適用できる具体的な工法

- ・グラベルドレーン
- ・人工材料ドレーン

留意事項：過剰間隙水圧比が0.4程度以下におさまるように、打設深さ・打設ピッチを適切に設計する必要がある。

対策のメカニズム：矢板などの壁を周囲の基礎に結合して締め切ることによって、壁内部が液状化してもその部分が外に流動しないようにして、めり込み沈下を軽減する。

⑥壁状締め切り



戸建て住宅に適用できる具体的な工法

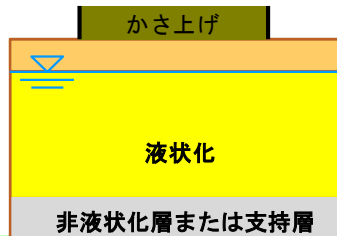
- ・矢板締め切り
- ・ソイルセメント壁

留意事項：壁の深さの設計方法

69

対策のメカニズム：基礎下の不飽和の非液状化層を厚くすることにより、下部が液状化しても剛性が保てるようにして沈下の軽減をはかる。

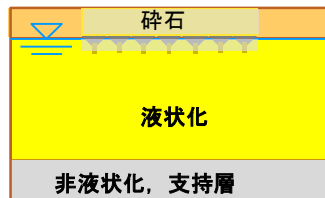
⑦かさ上げ盛土



戸建て住宅に適用できる具体的な工法
 ・盛土
 留意事項：盛土は良く締め固めて支持層になるようにする必要がある。

対策のメカニズム：表層を層状に改良した効果と先端の応力分散効果、碎石によりめり込み沈下を軽減する。

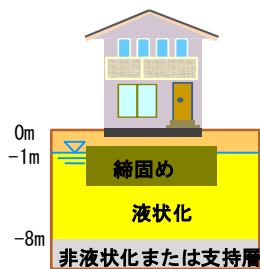
⑧こま型基礎



戸建て住宅に適用できる具体的な工法
 ・こま型基礎
 留意事項：阪神・淡路大震災や新潟県中越沖地震、熊本地震では沈下しなかったが、東日本大震災では少し沈下したため、効果をさらに検討中。

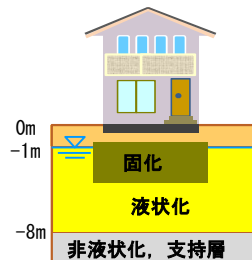
(5) 既存の個々の住宅に対する対策案

①建物直下の層状締め



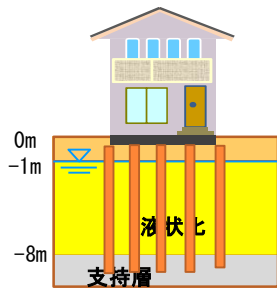
戸建て住宅に適用できる具体的な工法
 ・圧入締め工法
 留意事項：盤状に改良する必要がある。

②建物直下の浸透固化



戸建て住宅に適用できる具体的な工法
 ・薬液浸透固化処理工法
 留意事項：盤状に改良する必要がある。また、沈下修正の割裂注入の場合には部分的に改良されるだけなので対策に
 71
 ならず、浸透固化が良い

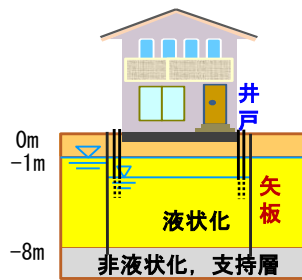
③柱状改良



戸建て住宅に適用できる具体的な工法
・ 高圧噴射攪拌工法

留意事項：支持層まで到達しないと対策効果はない。

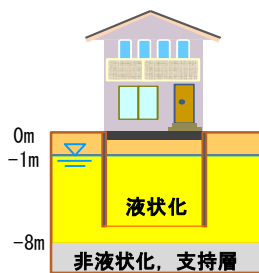
④地下水水位低下



戸建て住宅に適用できる具体的な工法
・ 井戸による汲みあげ

留意事項：周囲への影響を防止するため矢板が必要な場合がある。また、下層に軟弱な粘土層がある場合には地盤沈下を検討する必要がある。

⑤壁状締切り



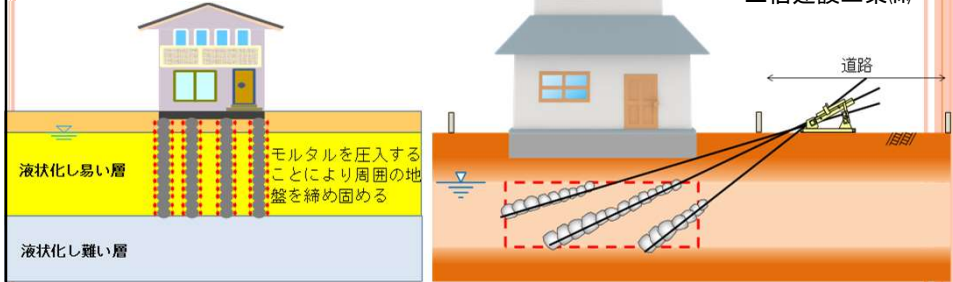
戸建て住宅に適用できる具体的な工法
・ 矢板締切り
・ ソイルセメント壁
・ 高圧噴射攪拌

留意事項：壁の深さの設計方法

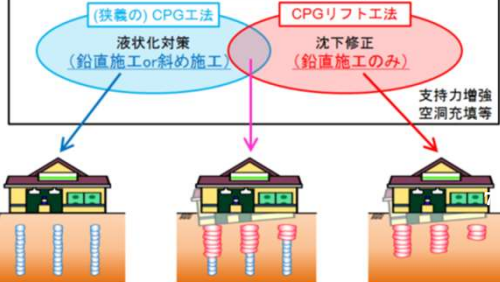
(6) 東日本大震災後に検討、開発された個々の宅地の対策方法例

① 既設住宅への圧入式締固め工法

三信建設工業(株)



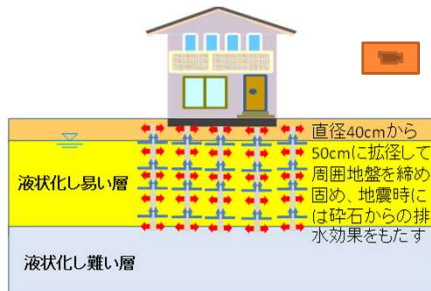
コンパクショングラウチング工法 <広義のCPG工法> (河野ら)



② 新築の戸建て住宅用に小型化した碎石締固め・排水工法

新設の住宅に適用した事例

(株)不動テトラ



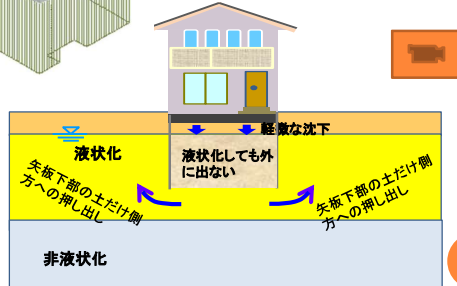
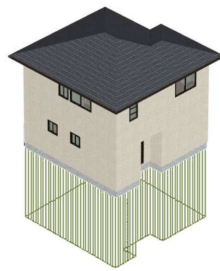


③新築・既設の戸建て住宅への矢板締切工法

住友林業(株)

新設の住宅に適用した事例

既設の建物に適用した事例



7. 地区内の住宅・ライフライン・道路の全体を対策する方法

(1) 東日本大震災で液状化した都市における復旧・復興で行われた地区全体の対策

東日本大震災の半年後に創設された市街地液状化対策事業

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

地下水位低下工法



格子状地中壁工法 (国土交通省による)

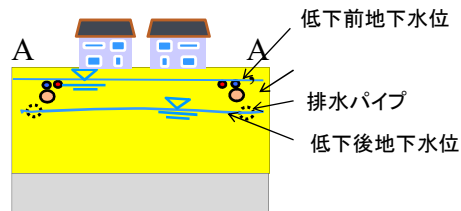


78



(液状化地点図は国土交省と地盤工学会による)

- : 市街地液状化対策事業および造成宅地滑動崩落緊急対策事業で液状化対策の適用が検討されてきた都市
- : 地下水位低下による対策が行われてきた都市



事業を適用するにあたって実証実験などで検討されてきた事項

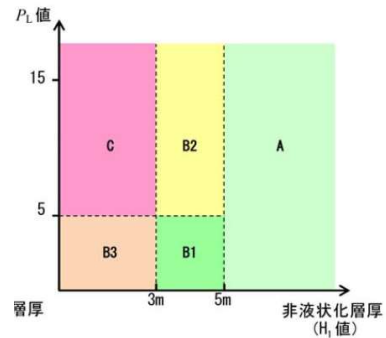
1. 地下水位の低下量の設定方法
2. 地下水位の低下方法
3. 水位低下のための排水管や浅井戸の設置間隔
4. 地下水位低下に伴う地盤の沈下量の推定方法
5. 稼働中の排水量と維持管理方法

79

(2) 事業を実施するために検討されてきた方法

1) 地下水位の低下量の設定方法

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ダンスに基づいて設定



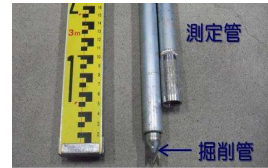
(国土交通省都市局都市安全課による)

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 ₁ の範囲	D _{eq} の範囲	P _L 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		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		
A	5m 以上	—	—	液状化被害抑制の目標として可	

(※) 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判断についてはこの限りではない。

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

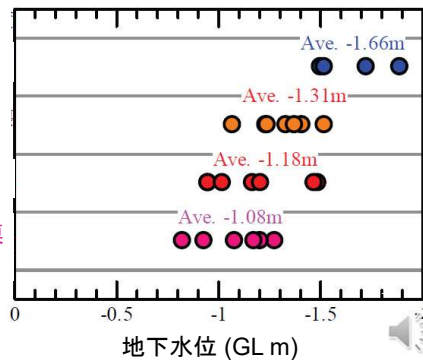


浦安市入船4丁目の地下水位分布



地下水位と住宅被害の関係

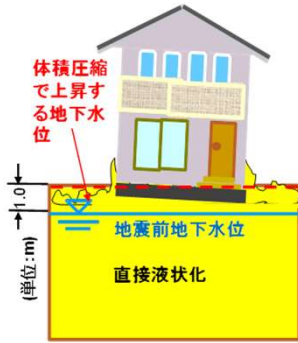
- 無被害
- 一部損壊
- 半壊
- 大規模半壊



③建物の沈下量や傾斜角を直接推定できる必要がある。

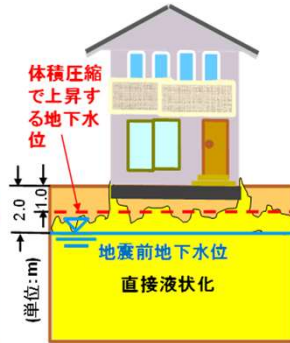
地下水位を3m程度の深さまで下げておくためり込み沈下し難いメカニズムの概念図

地下水位がGL-1mの場合



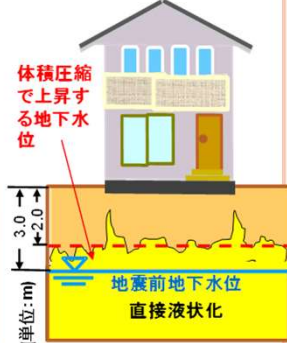
基礎下の非液状化層が薄いので支持力不足ですぐ沈下するか、液状化層から絞り出された間隙水が上昇し支持力不足になって沈下する。

地下水位がGL-2mの場合



液状化層から絞り出された間隙水の上昇と、地割れからの噴水が基礎下に達することにより、支持力不足になって沈下するか、しないか分かれる。

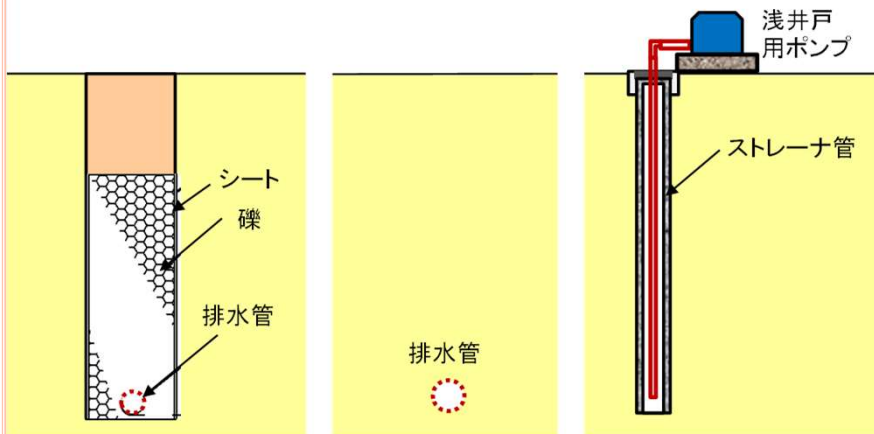
地下水位がGL-3mの場合



液状化層から絞り出された間隙水の上昇と地割れからの噴水とも基礎下付近まで達せず、支持力は残ったままで沈下しない。噴水も地表に達しない。

2) 地下水位の低下方法

現場での実証実験方法および実施工での水位低下方法



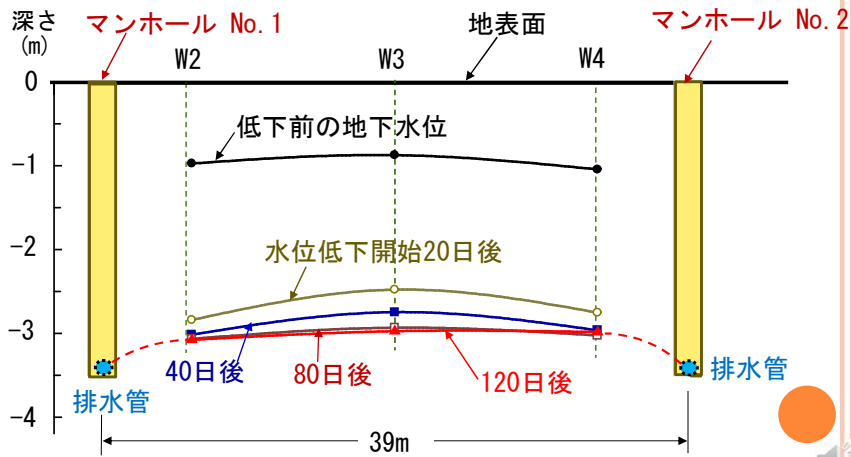
① 開削工法で排水
管設置

② 推進工法で
排水管設置

③ 浅井戸の設置

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。

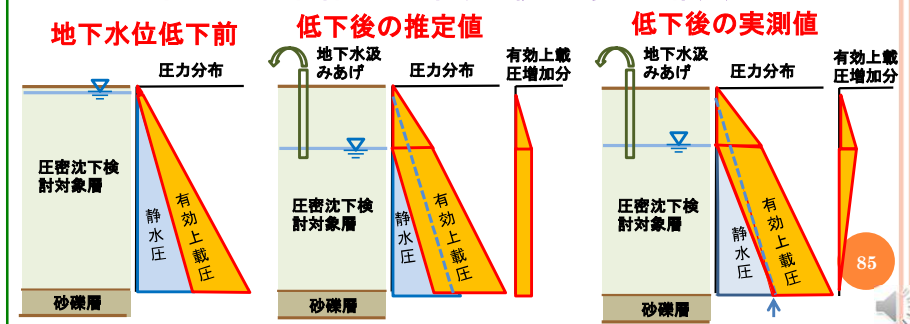


4) 地下水位低下に伴う地盤の沈下量の推定方法

- 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)
神栖市	60 日後	0.1 ~ 0.5
我孫子市	最終	約 5
久喜市	30 年後	7.8

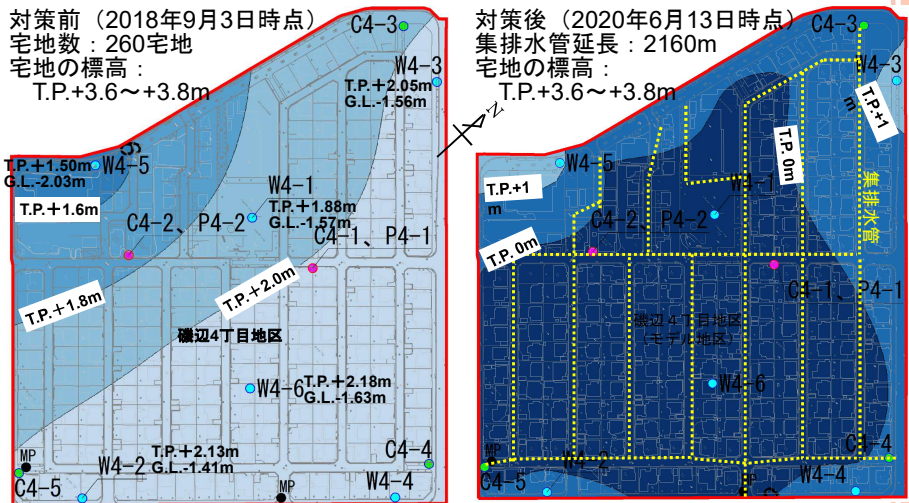
地下水位低下による間隙水圧と有効上載圧の変化の推定違い



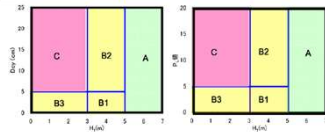
千葉市美浜区磯辺4丁目の集排水管位置と地下水位低下結果

対策前（2018年9月3日時点）
 宅地数：260宅地
 宅地の標高：
 T.P.+3.6~+3.8m

対策後（2020年6月13日時点）
 集排水管延長：2160m
 宅地の標高：
 T.P.+3.6~+3.8m



- : 止水矢板
- 測定
- : 地下水位
- : 地表面標高
- : 間隙水圧 + 地表面標高



すべての地点がCで
 ないことを確認して
 事業終了

86

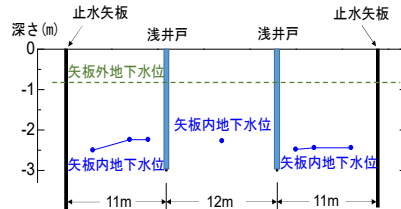
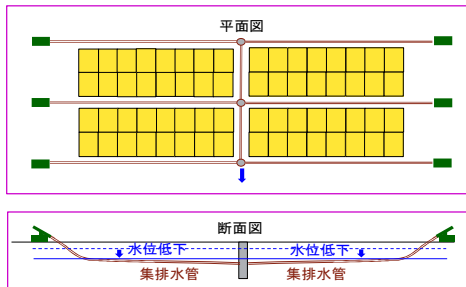
千葉市と神栖市における排水管設置状況



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

地表からの推進工法

浅井戸方法



87

ご清聴ありがとうございました。