

## - 港湾の地盤工学 -

### 液状化の被害と対策

#### 本日の内容

1. 被害からみる港の地質リスク
2. 液状化とは
3. 液状化対策
4. まとめ

- 1995年 兵庫県南部地震による港湾被害(1)～(7)
- 兵庫県南部地震による被害の原因(1)～(3)
- 液状化の影響(1)～(4)
- 港湾に最も影響を与えた地質リスク

# 1. 被害からみる港の地質リスク

## 1995年兵庫県南部地震による港湾被害(1)

麻耶埠頭  
第一～第二突堤間



麻耶埠頭  
第一突堤東側



# 1995年兵庫県南部地震による港湾被害(2)

麻耶埠頭  
第一突堤東側基部



麻耶埠頭  
4m物揚場

# 1995年兵庫県南部地震による港湾被害(3)

東神戸港フェリーターミナル



六甲アイランドRC3



# 1995年兵庫県南部地震による港湾被害(4)

## 六甲アイランドマリンパーク



## 六甲アイランド 航空貨物ターミナル



7

# 1995年兵庫県南部地震による港湾被害(5)

## 六甲アイランドRC5



## 六甲アイランド RC5



# 1995年兵庫県南部地震による港湾被害(6)

## 耐震強化岸壁…無被害 麻耶埠頭第一突堤



運輸省第三港湾建設局 震災復興建設部：  
神戸港震災復興誌-1995年 阪神・淡路大震災-港湾施設旧の記録  
平成10年1月

## 耐震強化岸壁へ連絡する高架橋



# 1995年兵庫県南部地震による港湾被害(7)

## ポートアイランド航空写真



運輸省第三港湾建設局 震災復興建設部：  
神戸港震災復興誌-1995年 阪神・淡路大震災-港湾施設旧の記録  
平成10年1月

## ポートアイランド内

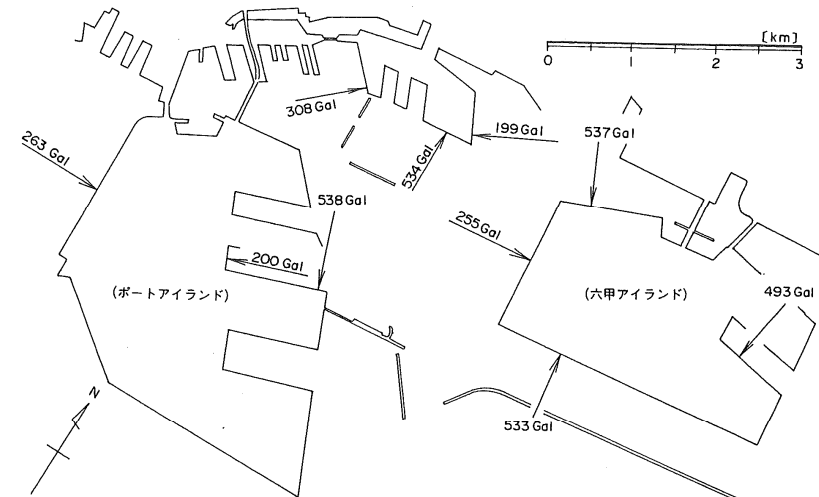


# 1995年兵庫県南部地震による港湾被害の原因(1)

考えてみてください

## ・ ヒント1

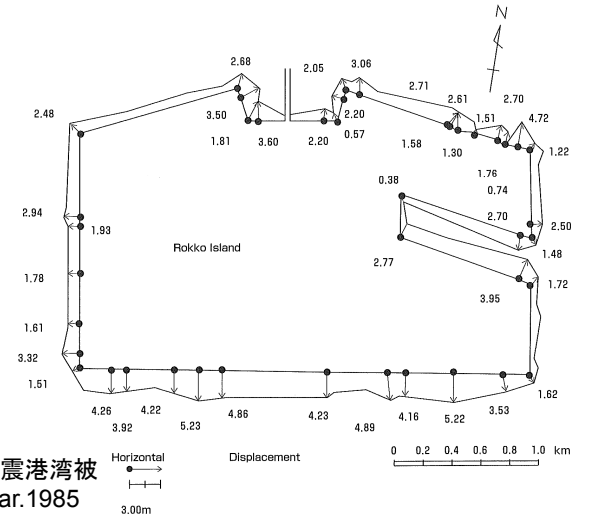
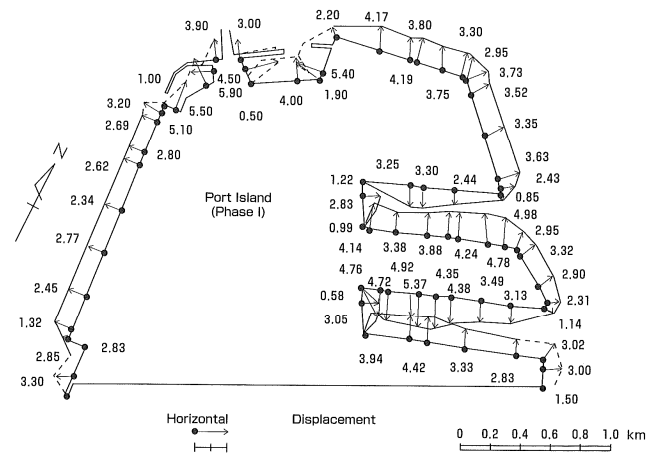
- 岸壁法線方向加速度
- 岸壁及び護岸の水平変位量



岸壁法線直角方向加速度

神戸港工事事務所構内(地表=強震計はSMAC-B2型)において観測された補正加速度記録を用いて描いた水平面内における軌跡図よりそれぞれの岸壁法線の直角方向の加速度を求めたもの。

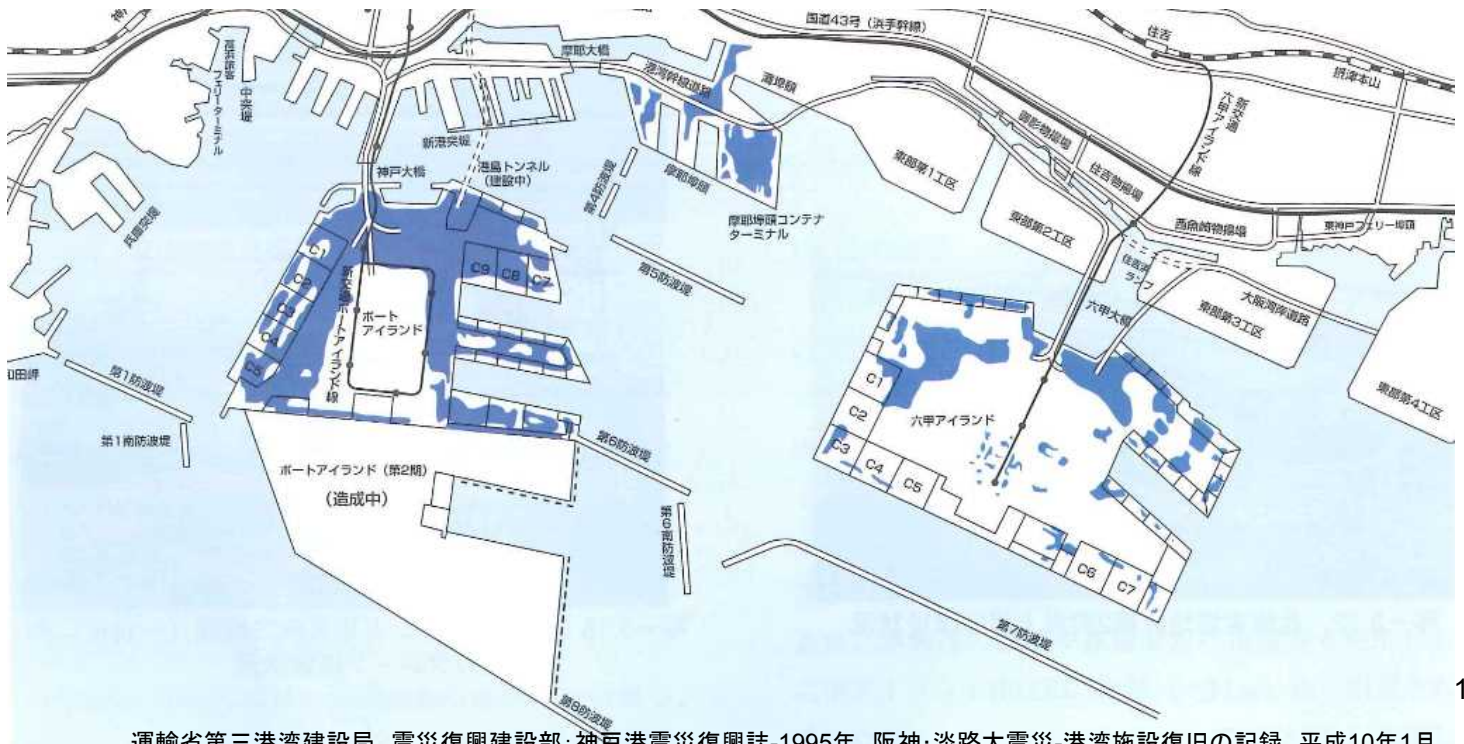
土田 肇 他:1983年日本海中部地震港湾被害報告, 港湾技研資料 No.511 Mar.1985



# 1995年兵庫県南部地震による港湾被害の原因(2)

## ・ ヒント2

- 埋立地の液状化マップ
- 埋め立て材料はまさ土

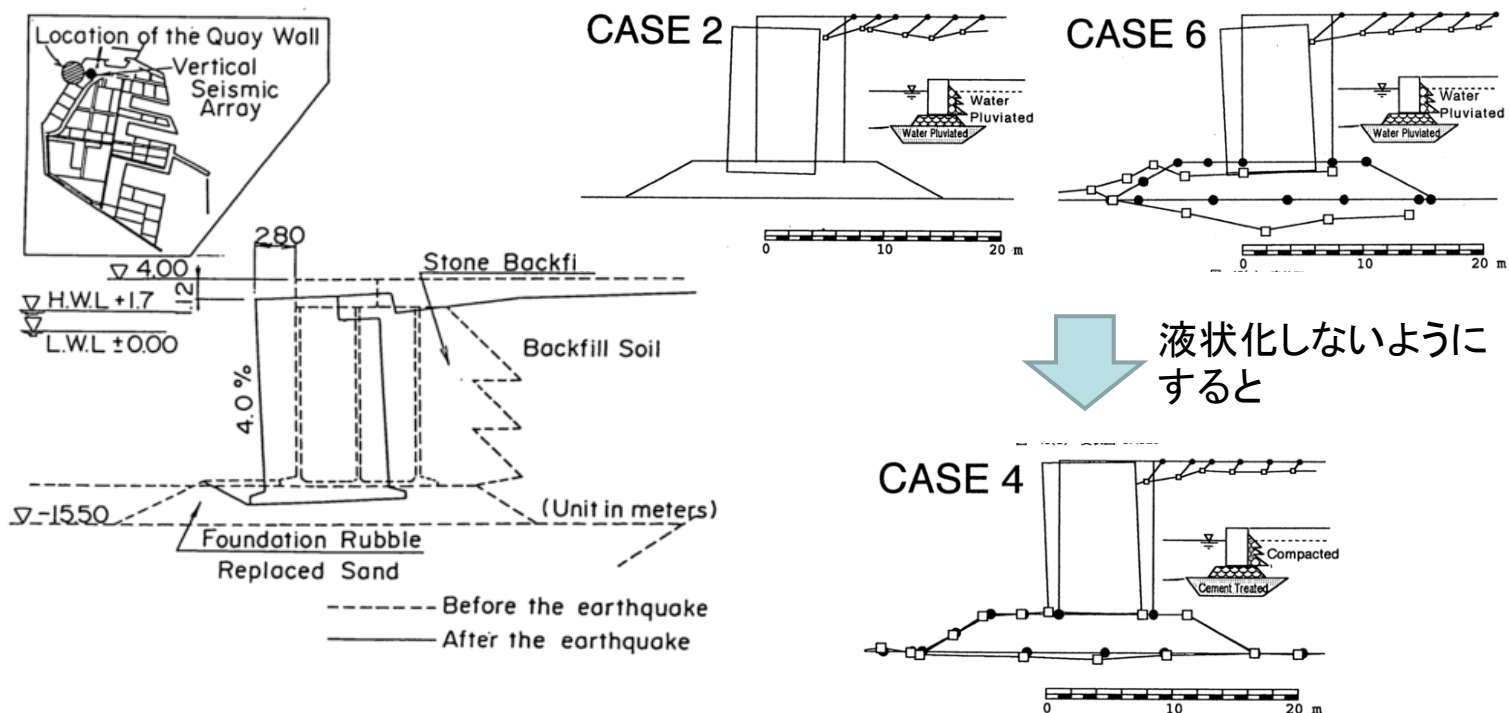


- 加速度は、南北方向が大きい
  - 岸壁、護岸の水平変位は、南北方向が大きい
- 被害の原因は、南北方向に作用した大きな地震動
- 当時の神戸港の港湾施設の設計震度は0.1~0.18
- ポートアイランドは、ほぼ全面的に墳砂の跡
  - 六甲アイランドは、墳砂の跡が見られないところもある
- 液状化の影響も考えられる

13

## 液状化の影響(1)

- 液状化の影響を検証してみた
- 大型振動台を用いた模型実験(縮尺:1/17)

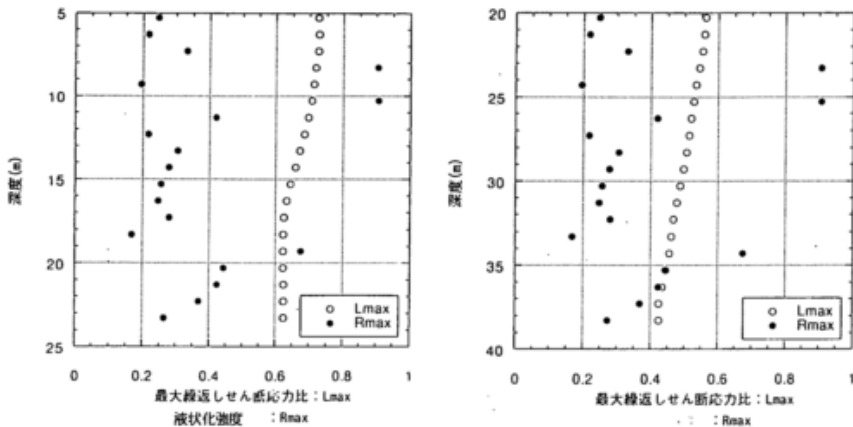


# 液状化の影響(2)

## ・ 検証してみた

－ 現地の砂は液状化するか？

－ 液状化だけだと、どんな変形をするか？

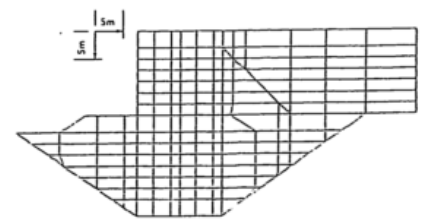


六甲アイランド 置換砂    六甲アイランド埋立地盤

$R_{max}$ は、各1層の凍結サンプリングから得られた液状化強度を震度補正してプロットしたもの

・ 現地の砂は液状化する

山崎浩之 他:兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察(その5)液状化の判定に関する検討, 港湾技研資料 No.813 Sept.1995



液状化後の剛性低下を考慮した  
変形解析  
2次元の弾性FEM

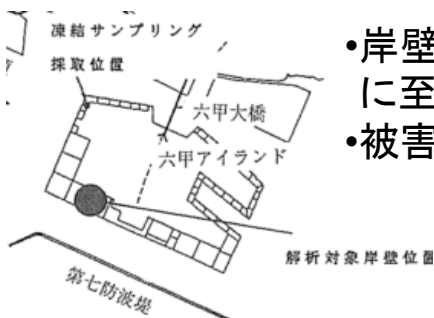


- ・ 変形量は、概ね一致、変形モードは異なる
- ・ 地震動を考慮する必要あり 15

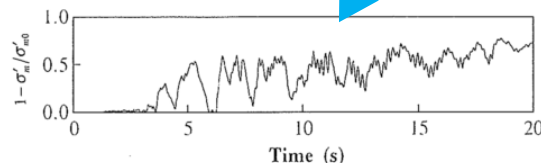
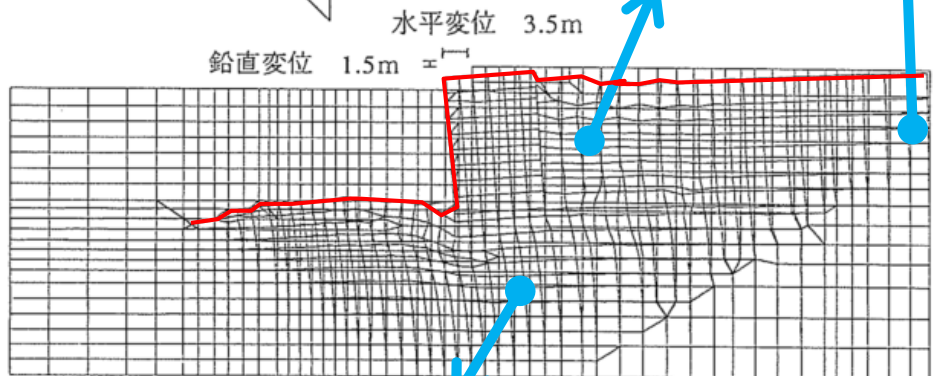
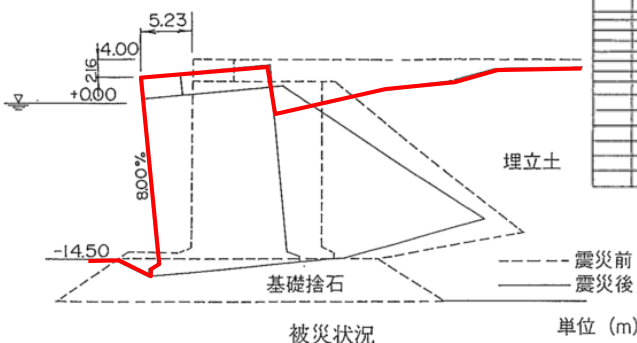
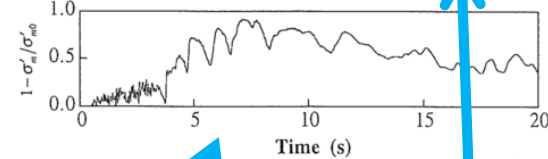
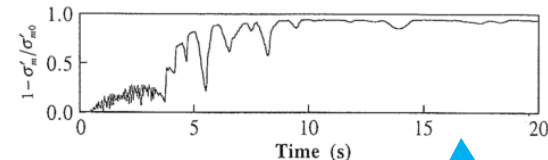
# 液状化の影響(3)

## ・ 検証してみた(2次元有効応力解析…FLIP)

－ 液状化の痕跡が見られない施設



- ・ 岸壁周辺では完全液状化に至らない
- ・ 被害状況に一致 傾斜角 4.1度



・ 間隙水圧の上昇による剛性低下で変形が増加 16

一井康二 他:兵庫県南部地震におけるケーソン式岸壁の挙動の有効応力解析, 港湾技術研究所報告 第36巻第2号(1997.6)



# 液状化の影響(4)

## 液状化の寄与度

- FLIPは、被災の状況を良く説明する

- 数値実験に使える

- 地盤&埋立土の液状化(間隙水圧の上昇による地盤のせん断剛性の低下)の影響をしてみる

	ケーソン天端の変位	
	水平変位(m)	鉛直変位(m)
被災断面	3.5	1.5
地盤、埋立砂とも <b>非液状化</b> 土とする	1.6	0.6
地盤のみ非液状化土とする	2.1	0.7
埋立土のみ非液状化土とする	2.5	1.1

- 完全に液状化しなかったものの、水平変位は慣性力のみが支配的となった場合の2.4倍

- 地震による慣性力&地震時土圧と液状化の寄与度は、概ね1:1 17

## 港湾に最も影響を与えた地質リスク

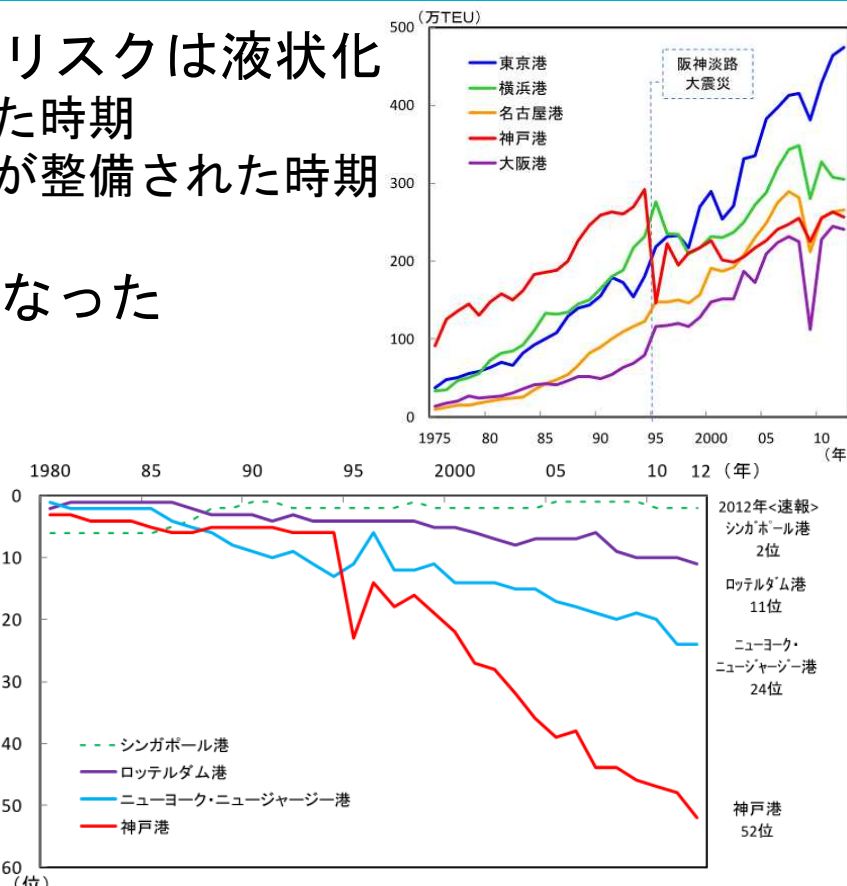
### 港湾に最も影響を与えた地盤リスクは液状化

- 国内産業が海外移転を進めた時期
- 地方の港湾にコンテナ埠頭が整備された時期
- 兵庫県南部地震が発生

### 神戸港が一時期使用不能になった

- この間に、国内貨物が地方の港湾から海外の港湾経由して輸出されるようになった。
- 一旦、海外経由となった貨物の多くは、神戸港には戻らなかった。
- 経済構造の変化が底流にあるものの、神戸港の退潮のきっかけは兵庫県南部地震

### 日本国にとって、大きな損失となった



(出所) CONTAINERISATION INTERNATIONAL YEARBOOK, CONTAINERISATION INTERNATIONAL TOP100 CONTAINER PORTS 2012, CONTAINERISATION INTERNATIONAL TOP100 CONTAINER PORTS 2013

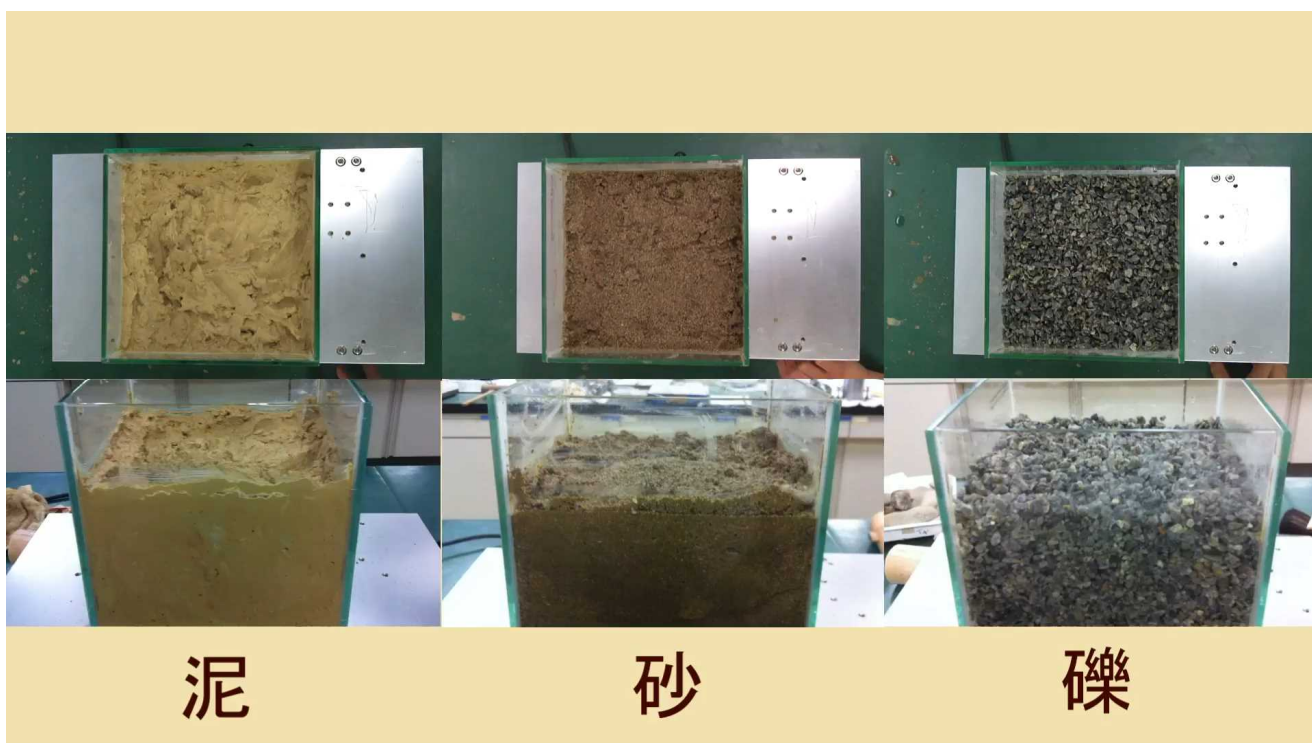
- 液状化実験
- 液状化についてよくある説明
- 土のせん断に伴う体積変化と間隙水圧
- 液状化・・・実は・・・排水過程は圧密
- 液状化の進行

## 2. 液状化とは？ ・・・復習してみよう・・・

19

### 液状化実験

- 液状化実験(香川大学 山中研究室)

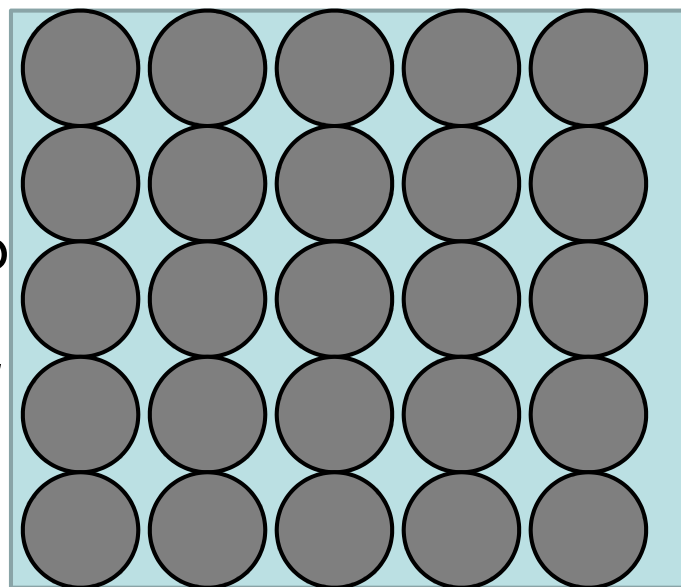


- 東北地方太平洋沖地震の際の液状化の状況はYouTube等で検索可能

20

# 液状化についてよくある説明

- 地下水で飽和された緩い砂質地盤が地震による振動を受けた場合粒子間のかみ合わせが外れる
- この場合は粒子が土中に浮遊した状態になり、地盤が液体状になる
- この現象を液状化という

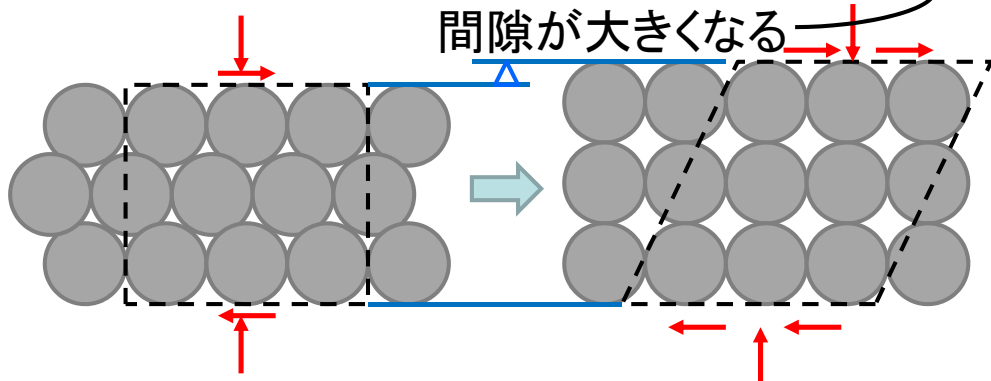


## 土のせん断に伴う体積変化と間隙水圧

### 密な砂

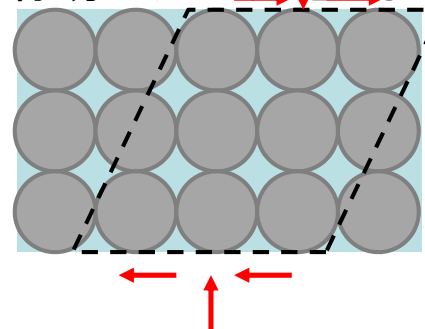
密な状態⇒体積膨張⇒緩い状態

間隙が大きくなる



### 水中で非排水条件

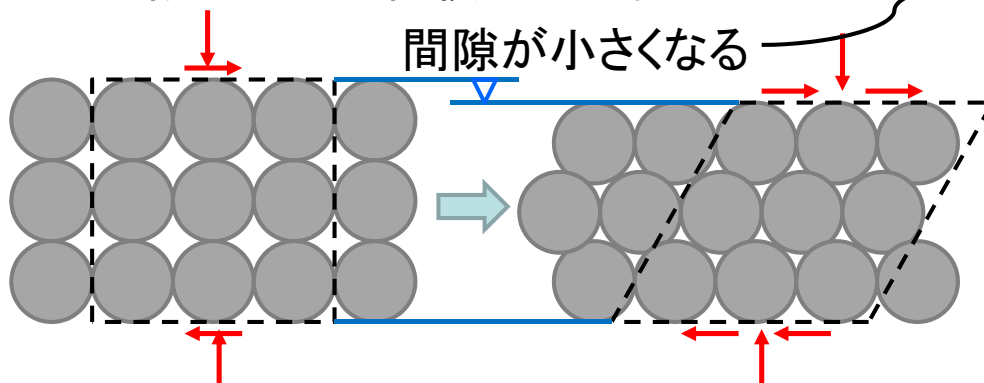
間隙水圧が小さくなる  
有効応力は大きくなる



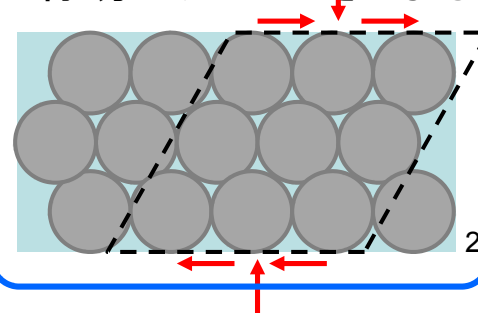
### 緩い砂

緩い状態⇒体積収縮⇒密な状態

間隙が小さくなる

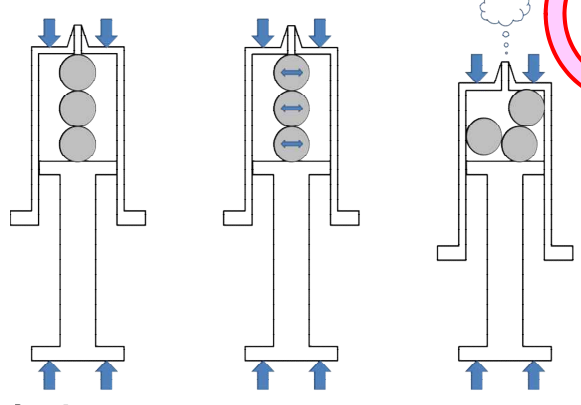


間隙水圧が大きくなる  
有効応力が小さくなる



# 液状化・・・実は・・・排水過程は圧密・・・

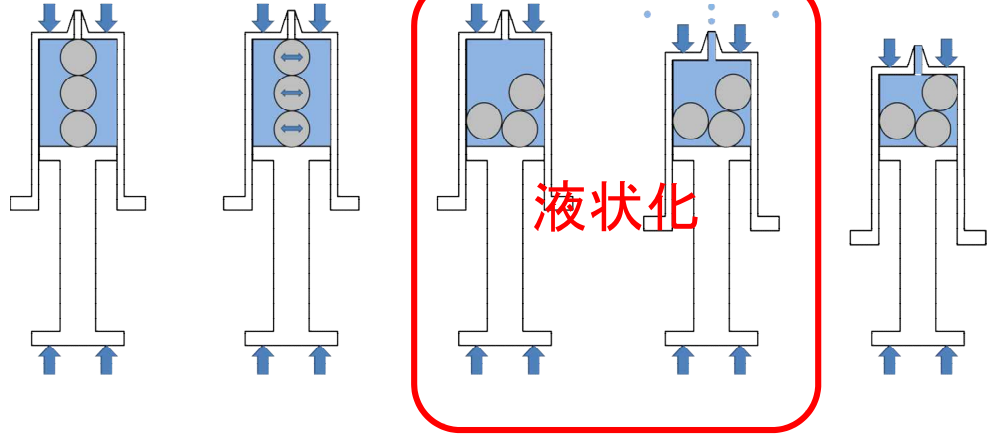
## 空气中



注射器の摩擦は考えない

- せん断力で土粒子の噛み合わせが外れても・・・
- すぐに落下、空気も抜けて、体積変化が起こる
- 注射器を圧縮する力は、土粒子を通じて伝わる

## 水中



せん断力で土粒子の噛み合わせが外れる

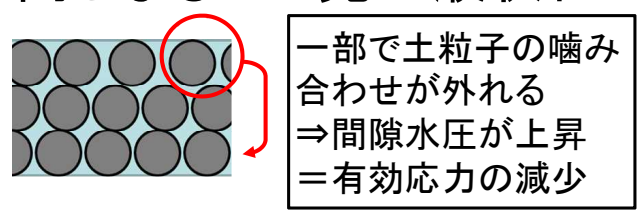
- 水が非圧縮性流体なので、水が排水されなければ、土-水は体積変化できない。
- 水が抜けるまでの間はピストンを圧縮する力は、水圧で伝わる
- 注射器の穴がむちゃくちゃ大きいとどうなる？

## 液状化の進行

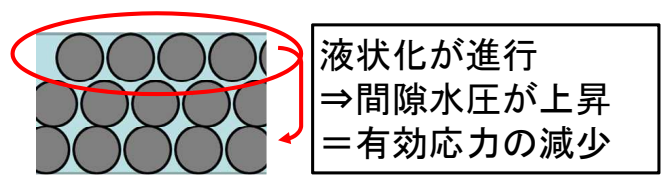
- 有効応力が減少 ⇔ 間隙水圧が上昇
  - 増加した間隙水圧が有効上載圧と同じになると ⇒ 完全液状化

### 実際には

- 全ての土粒子の噛み合わせが一度に外れるわけではない
- 連鎖的に進行する

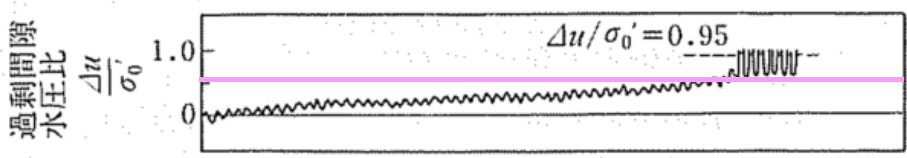


噛み合わせが外れやすく



噛み合わせが外れやすく

過剰間隙水圧比が0.5~0.6を越えると急激に進行



地盤工学会基準 土の繰返し非排水三軸試験方法  
繰返し非排水三軸試験の記録例

- 液状化対策の考え方
- 液状化の発生条件
- ①地下水位の低下
- ②不飽和化
- ③緩い砂質地盤で無くする
- ④地震の影響を小さくする
- ⑤土粒子の噛み合わせを外さない
- ⑥排水を速くする

### 3. 液状化対策

#### 液状化対策の考え方

- 液状化対策は大きく分けて2つ
  - 液状化そのものを防止する
  - 液状化は防がないが、構造物への被害を防ぐ  
構造的対策⇒機能的には、何ら問題にならない  
個々の構造物の設計で対処することとなる。  
例えば、次のようなもの
    - 土木構造物・・・杭基礎
    - 建物・・・・・・・・盤基礎
    - 管構造物・・・・可とう継ぎ手

液状化そのものを防ぐ方法を考えてみよう

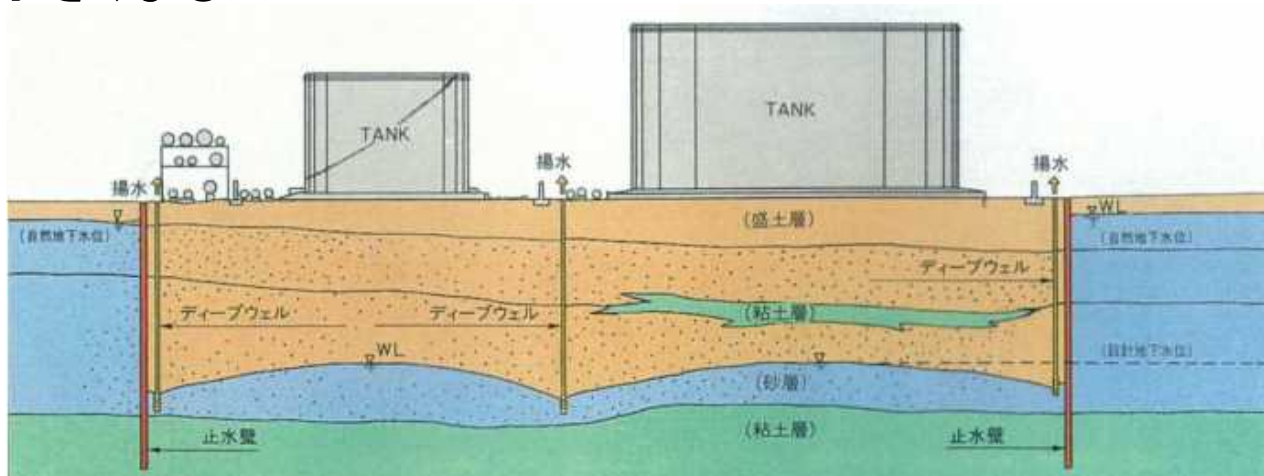
# 液状化の発生条件

- 液状化は色々な条件が重ならないと発生しない
  - ① 水中にある
  - ② 飽和している
  - ③ 緩い砂質地盤(負のダイレイタンスィを持つ)が
  - ④ 地震による振動を受けると
  - ⑤ 土粒子の噛み合わせが外れて、間隙水圧が上昇し、
  - ⑥ 排水が間に合わない  
と液状化が発生する
- 液状化の抑制対策としては、どれか1つを消せばよい
  - ① 水中で無くする
  - ② 不飽和状態にする
  - ③ 緩い砂地盤で無くする
  - ④ 地震による振動の影響を小さくする
  - ⑤ 土粒子の噛みあわせが外れないようにする
  - ⑥ 排水を速くする

27

## ①地下水位の低下

- 排水によって地下水位を低下させる
  - 地下水面より上は液状化しない
  - 地下水面より下は、有効応力が増すことによって液状化しにくくなる。液状化したとしても地表の構造物への影響は小さくなる



地下水位低下工法

大成建設(株)パンフレットより

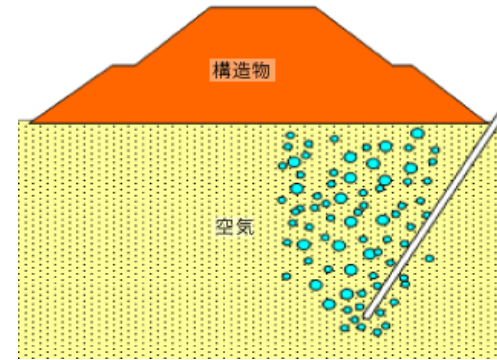
28

## ②不飽和化

### ・ 間隙水に圧縮性を持たせると・・・

排水が起きなくても、有効応力の低下を抑えることが出来る⇒液状化強度が上昇する

- 地下水に圧縮性を持たせるには、
  - ・ 圧縮性を持つ材料を地下水に混ぜてやる
  - ・ 圧縮性を持つ材料とは・・・空気

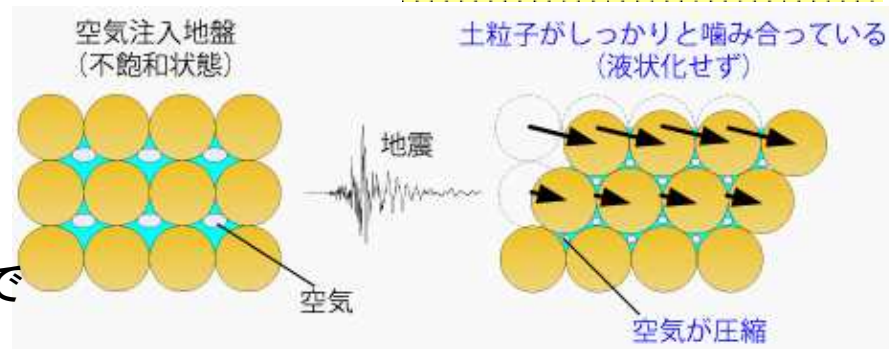


### - 空気注入不飽和化工法 (Air-des工法)

- ・ 空気を地中に直接注入

### - マイクロバブル水 液状化対策工法

- ・ 小さな気泡を混ぜた水で間隙水を置換える



空気注入不飽和化工法 Air-des工法研究会資料より

## ③緩い砂質地盤で無くする

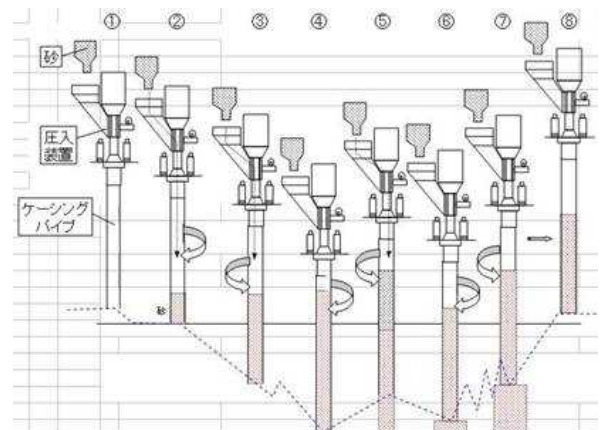
### ・ 正のダイレイタンスを持つ土にする

- 締め固める(密度増大)
  - ・ 動的締め固め
    - サンドコンパクションパイル工法
    - 振動棒工法
    - 等々
  - ・ 静的締め固め
    - 静的サンドコンパクション工法
    - コンパクショングラウチング工法
    - SAVE-SPI工法



### ・ 液状化しない材料に変更

- 地盤を液状化しない材料に変更する  
多くの場合、材料の置き換えを行う。
  - ・ 碎石に換えることが多い
  - ・ 極端な話、粘性土に置換えても可



静的サンドコンパクション工法 30

## ④地震の影響を小さくする

### ● 地盤がゆれなくなれば、液状化は起きない

- 地震を止める
- 巨大な免振構造
- － 現実的には不可能
- － しかし、地震動の影響を小さくすることはできる。

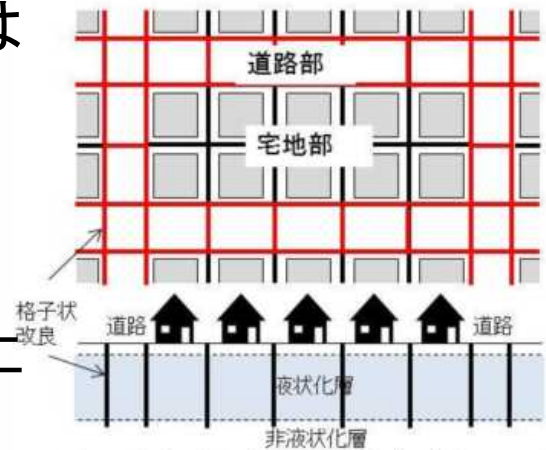
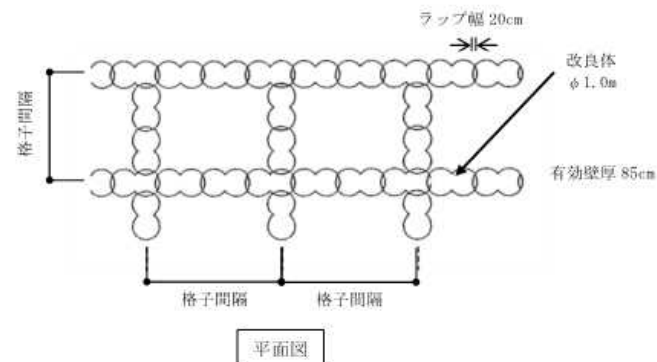


図 5.1 道路・宅地一体への格子状改良の適用イメージ

### ● せん断変形抑制工法

#### － 連続地中壁

- 地中に剛な壁体を構築する
- 壁体によって、地盤のせん断変形を拘束する
- 液状化の抑制効果に期待する
- 地盤の変形を抑制し、被害を軽減する



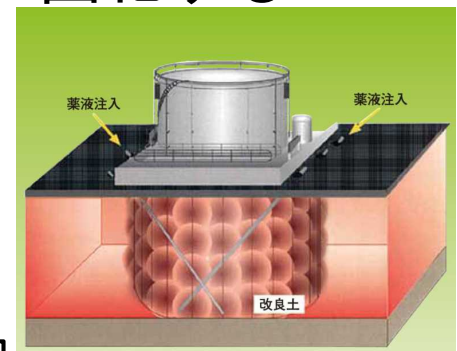
格子状地中壁による宅地地盤の液状化抑制効果に関するFEM解析報告書, 31  
平成24年12月 国土交通省 国土技術政策総合研究所

## ⑤土粒子の噛み合わせを外さない

### ● 土粒子の噛み合わせが外れないように固化する

#### － 浸透系

- 浸透固化処理工法
  - － じんわり、ゆっくり固化材を土中に浸透させる
  - － 間隙水が固化材に置き換わって、固化

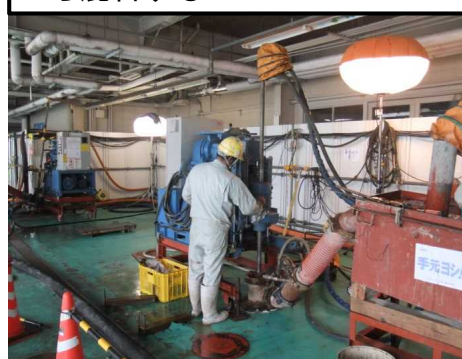


#### － 攪拌混合系

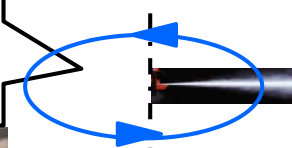
- 高圧噴射攪拌工法
- 深層混合処理工法
- 表層安定処理方向等

- － 固化材と土を強制攪拌する
- － 攪拌方法は、羽根、ジェットなど

- 固化材(セメントスラリー)を土中で噴射
- 噴射させながら、ノズルを回転させる
- 固化材で地盤を切り崩しながら混合する



浸透固化処理協会パンフレットより



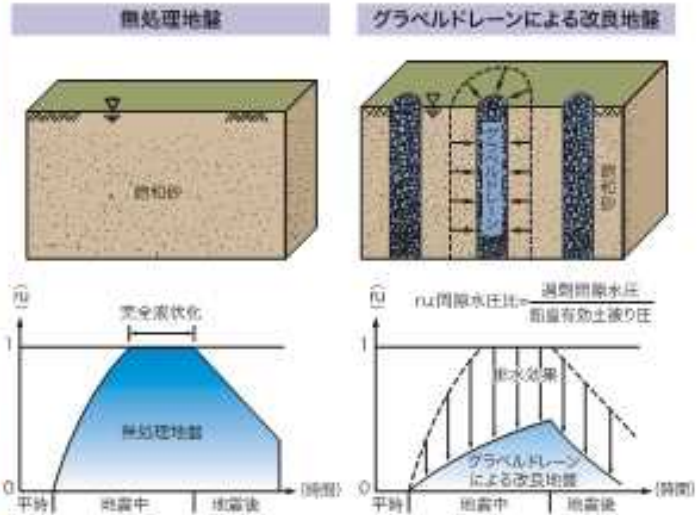
GEPASTAI工法パンフレットより



## ⑥排水を速くする

### 排水を早くするには

- 透水性の高い材料を使って
- 排水距離を短く(排水経路を水平に)
  - グラベルドレーン工法・・・地盤中に碎石の柱を立て、排水を速める
  - 周辺巻き立てドレーン工法・・・透水材料で構造物周囲を巻き立て



グラベルドレーン工法 (株)不動テトラパンフレットより

33

- 港湾の被災事例から港湾の地盤リスクについてみてきました。
- 港湾の地盤リスクとして、最も社会的に影響の大きかったものは液状化でした。  
注意:他の構造物に関しては、必ずしもそうではありません。
- 液状化がどういう風に起こるか、液状化を防止する方法について、考えてきました。  
注意:液状化対策工法の分類には、色々な見方があります。  
地下水位低下工法が飽和度低下に含まれていたり・・・とか。

## まとめ

34

構造物を最終的に支えるのは、  
（宇宙空間でもない限り）  
地盤です。

そのことを考えてみてください。  
ご清聴ありがとうございました。

**おわり**