

# 地盤の液状化 soil liquefaction

## 地震災害

地震による死者数: => 津波、建物や斜面の崩壊、火事

## インフラストラクチャー

(道路、橋、ガス、上下水管、港湾構造物)

=> 地振動

地盤の液状化

1995 兵庫県南部地震でも

液状化により多くの施設が被害を受ける

# 液状化による被害

- 液状化: 自然現象(昔から、地震時には発生していた)  
田んぼで発生しても大きな被害なし。
- 1964年、液状化が自然災害として大きく注目された。
  - 新潟地震 **何十分にも及ぶ液状化現象** ▶
  - アラスカ地震
- 多くのインフラ被害
- 液状化に関する研究、日本とアメリカが中心に

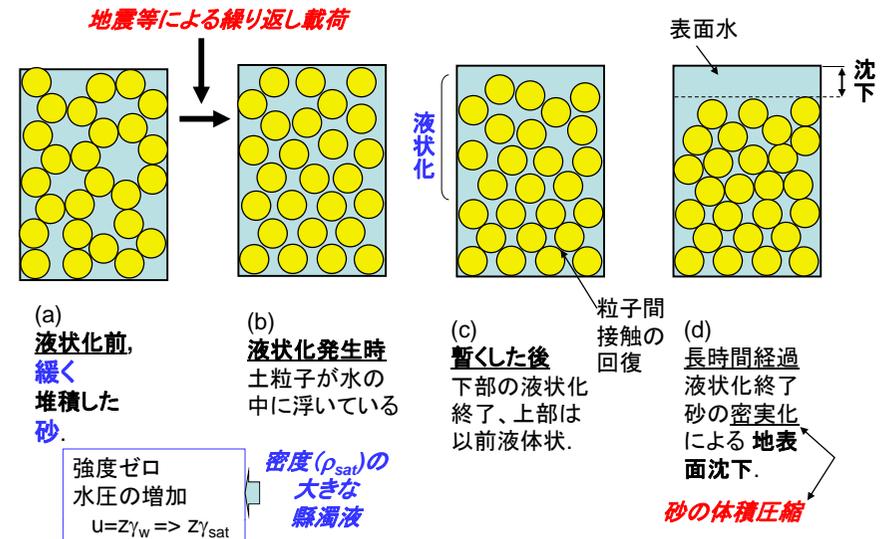
## 液状化の痕跡

「地震考古学」寒川旭(中公新書)

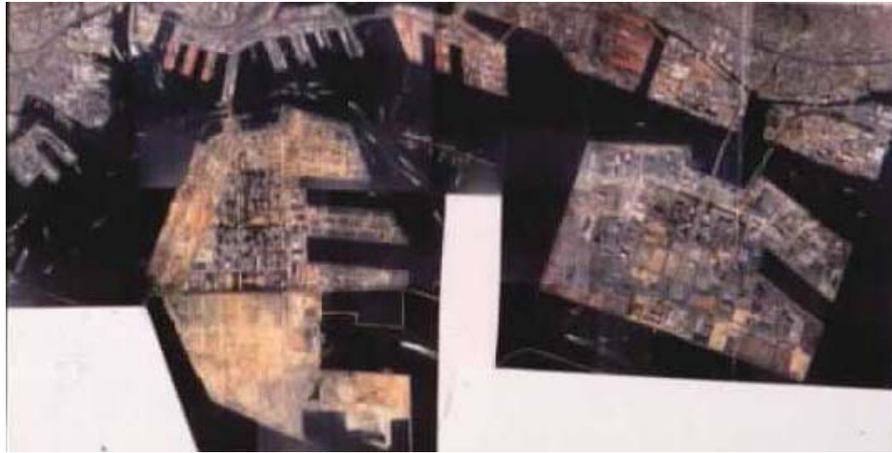


考古学発掘現場  
噴砂(sand boiling)の跡。

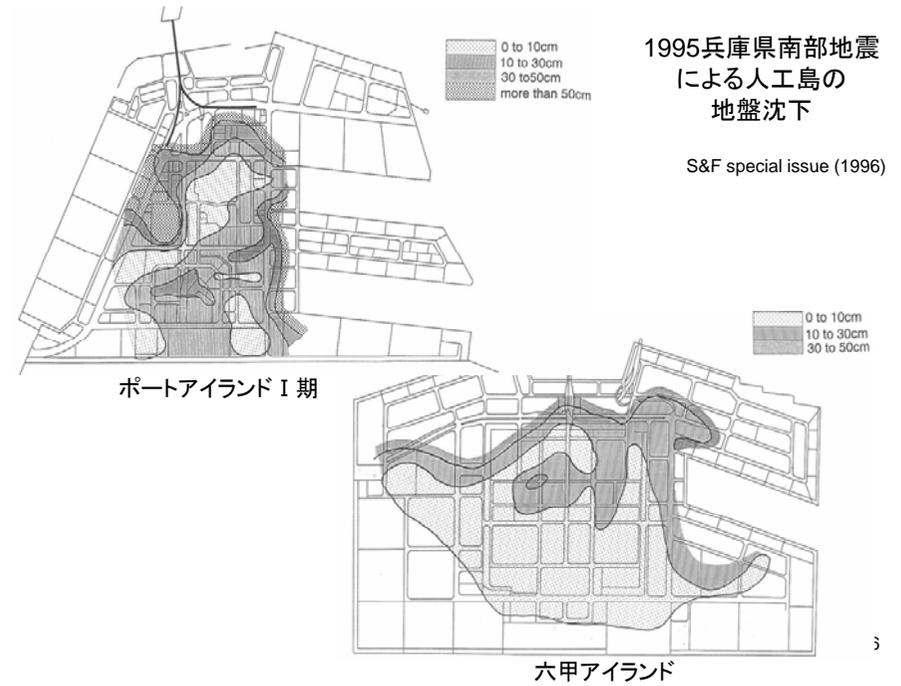
## 液状化の発生から終了まで



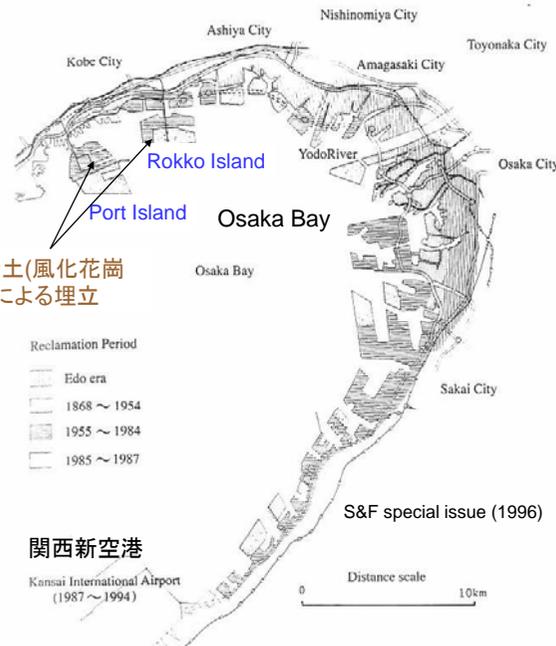
# 1995兵庫県南部地震直後の神戸市フォーターフロント



埋立部において広域にわたり噴砂(液状化)発生



## 大阪湾の埋立地



埋立砂
軟弱な沖積粘土地盤

大阪湾の典型的な埋立地盤

## 液状化のメカニズム

### •砂の液状化のメカニズム

- 砂粒子の再配列
  - 水中での砂の移動(沈降)
  - せん断による体積変化
- 極端に緩い砂  
but  
極端に緩くなくても液状化は起きる

[Dilatancy] 排水条件 緩い体積圧縮:  $\sigma'_v = \sigma'_v - u$  (const)

$\Rightarrow$  過剰間隙水圧  $\Delta u$

非排水条件  
地震短時間の現象: 砂でも排水は起きない

有効応力の低下  
強度の低下  
剛性の低下

ex) せん断強度  $\tau_f = c' + \sigma'_v \tan \phi'$

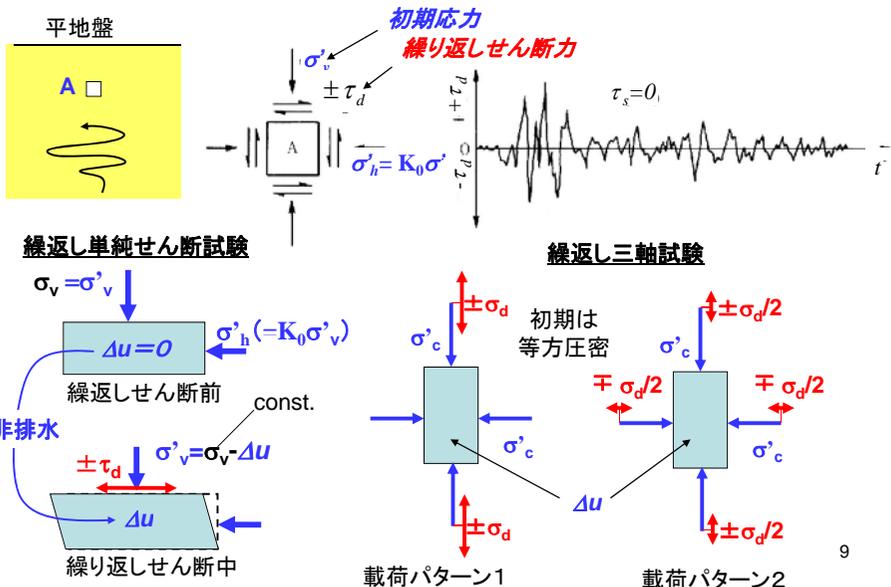
せん断剛性  $G = C \sigma'^{1/2}$

if  $c' = 0$  and  $\sigma'_v$  is 0,  $\tau_f = 0$  and  $G = 0$ .

飽和した砂: 粘着力ゼロ

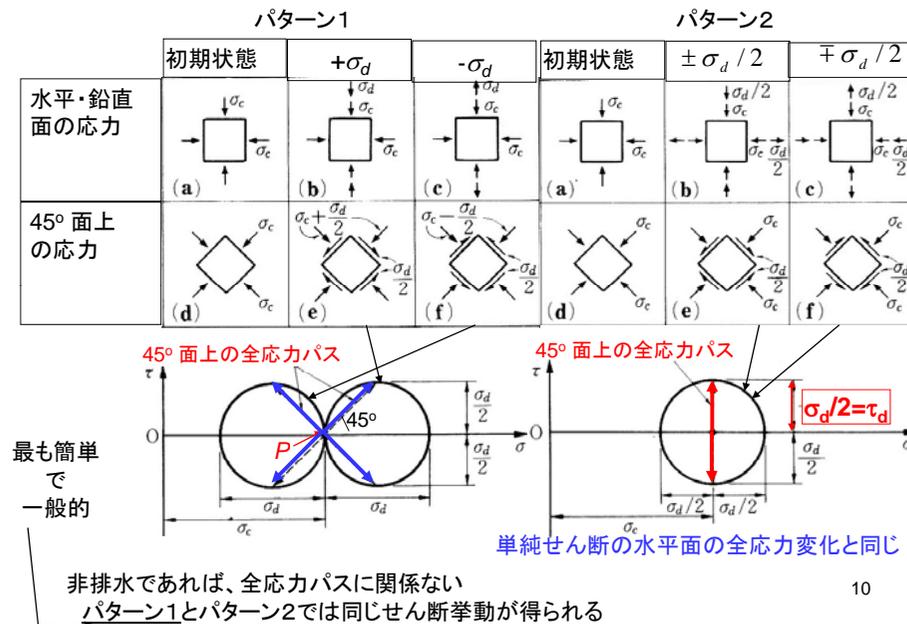
強度・剛性の消失

# 地震時の地盤応力と繰り返しせん断試験



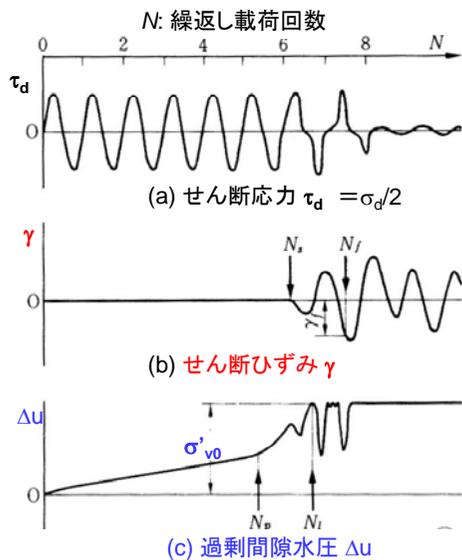
9

# 繰り返し三軸試験の45°面の全応力の変化



10

# 繰り返しせん断時における緩詰め砂の挙動

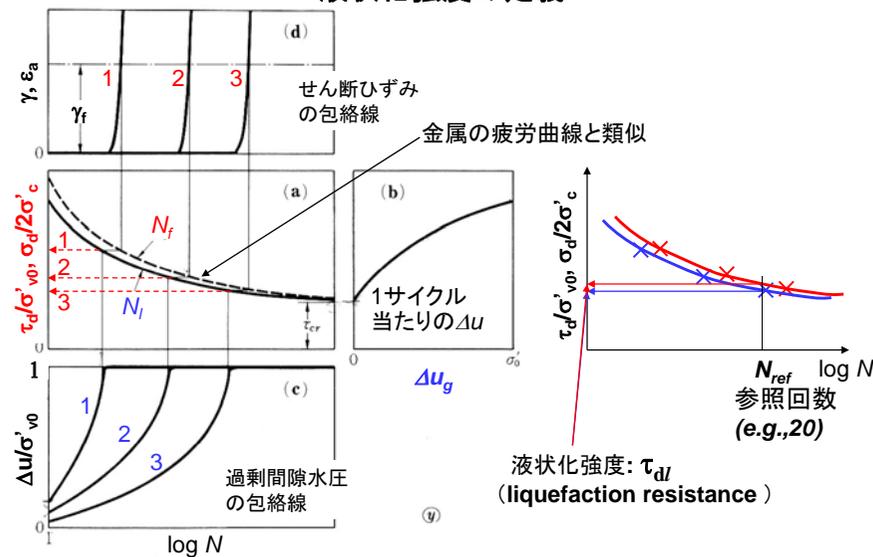


**繰り返し試験における液状化の定義**

$N_p$ : 著しい $\Delta u$ 上昇の開始点 ( $\Delta u \sim 0.5\sigma'_{v0}$ );  
 $N_s$ : 顕著なせん断ひずみの開始点;  
 $N_f$ :  $\Delta u = \sigma'_{v0}$  (有効応力ゼロ)  
**初期液状化 (initial liquefaction):**  
 $N_f$ :  $\gamma_d$  がある値に達した点  
 例: DA (両ひずみ振幅) = 5%

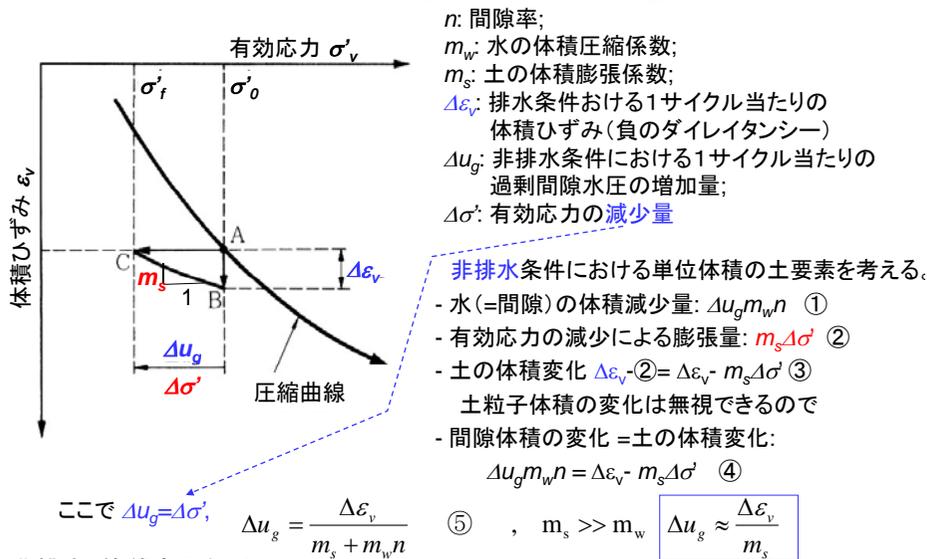
11

# Definition of liquefaction resistance 液状化強度の定義



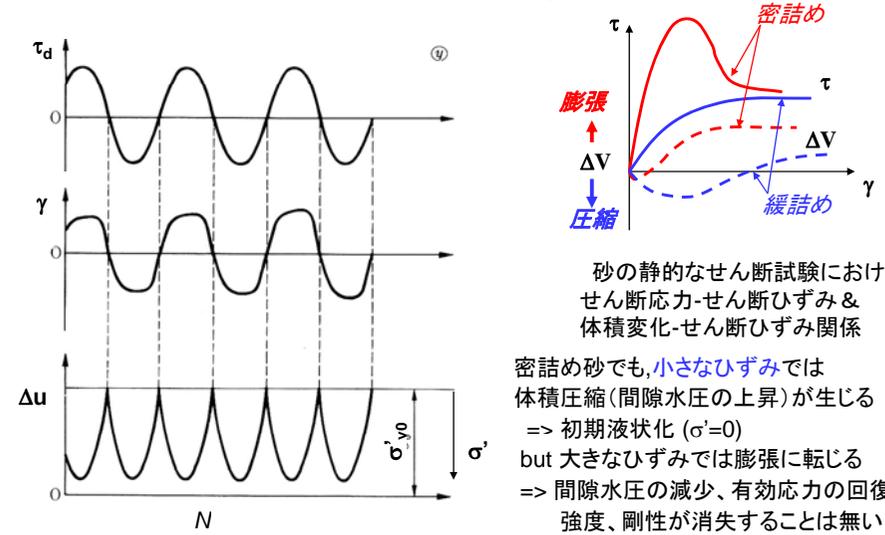
12

# 1サイクル当たりの過剰間隙水圧 $\Delta u$ の蓄積 - Dilatancy and swelling -

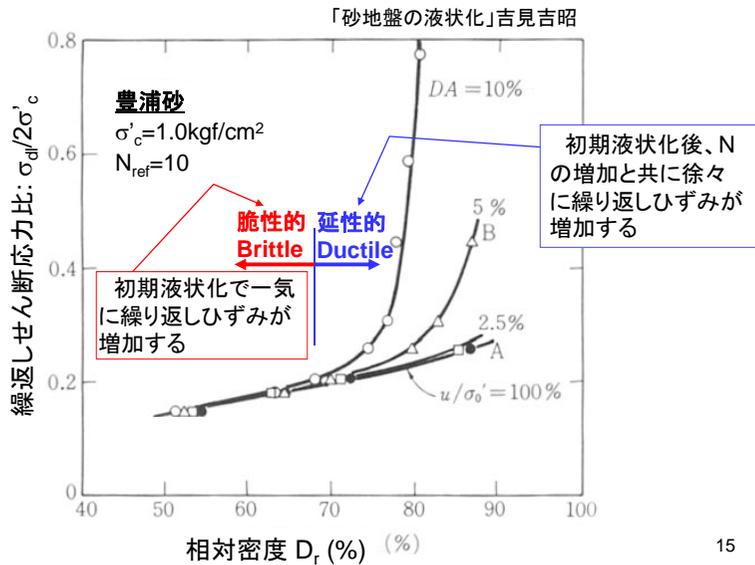


非排水(体積変化なし)  
負のダイレイタンスによる体積圧縮 = 有効応力の減少による体積膨張

# 繰り返しせん断時における密詰め砂の挙動 - サイクリックモビリティ cyclic mobility -



# 密度と液状化強度との関係



# 液状化安全率: $F_L$

液状化抵抗(liquefaction resistance):  $R = \frac{\tau_{max,l}}{\sigma'_v}$

最大応力比(maximum stress ratio):  $L = \frac{\tau_{max}}{\sigma'_v} = \frac{\alpha_{max}}{g} r_d \frac{\sigma'_v}{\sigma'_v}$

液状化強度

最大せん断応力振幅

鉛直全応力

震度

深さ方向の低減係数

繰返しせん断応力

$F_L = \frac{R}{L} = \frac{\tau_{max,l} / \sigma'_v}{\tau_{max} / \sigma'_v}$

この値に応じて、設計で用いる定数を低減させる

液状化指数(liquefaction potential):  $P_L$

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

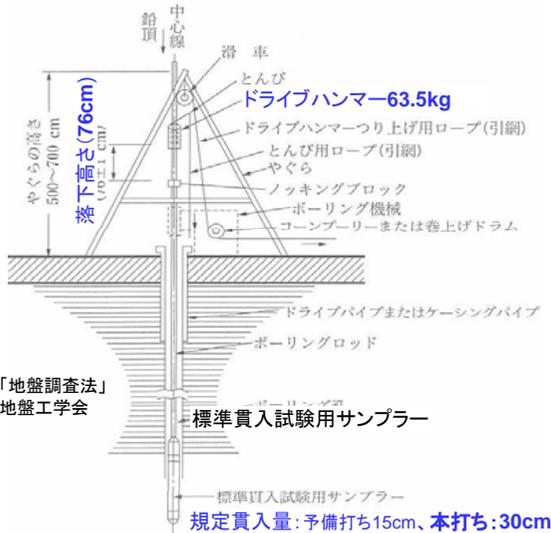
深さに関する重み係数: (20m以深は液状化しない)

$F_L > 1$ は $F_L = 1$ とする

杭の設計

石油タンクの液状化に対する安定性の評価

# 標準貫入試験 standard penetration test (SPT)



N値:  
 サンプラーを30cm貫入するの  
 に要する落下回数  
 地盤の固さ、強さ、密度等によ  
 って異なる  
 膨大なデータから経験式  
 $N値 \Rightarrow \phi', D_r, c$

# $F_L$ 値の評価

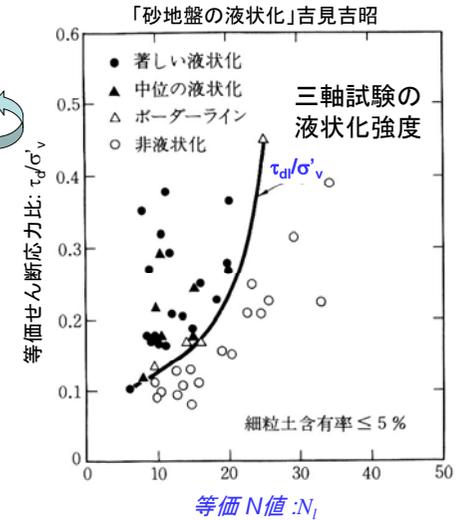
## 簡便法

R:  $\leq$  三軸試験の液状化強度 ( $\tau_{dl}$ )  
 原位置試験 (N値, コーン抵抗)  
 + 補正係数 (細粒分含有率、  
 初期応力、不規則波etc)  
 L: 地表面震度、マグニチュード

- シードの方法
- 道路橋示法書 (神戸地震後改定)
- 限界N値法 (港湾構造物)

## 厳密法

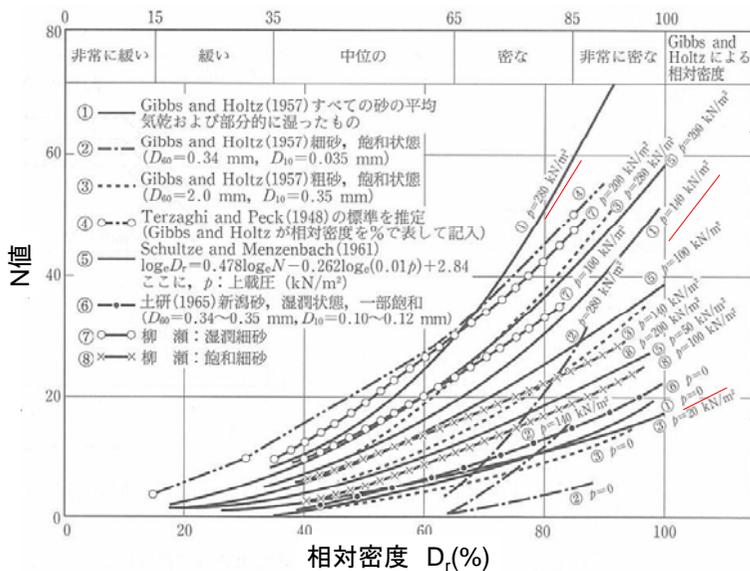
R: サンプリング + 室内試験  
 L: 動的解析



$$N_1 = \frac{1.7N}{0.7 + \sigma'_v} \quad (\sigma'_v: \text{kg/cm}^2)$$

# 相対密度とN値の関係

「地盤調査法」地盤工学会



有効土被り圧  
 $p$  大きければ  
 砂の強度、  
 剛性大  
 N値も大

換算N値  
 $N_1$   
 例えば、  
 $\sigma'_v = 1 \text{kgf/cm}^2$   
 に対応するN

# 地震により発生する地盤内のせん断応力増分

せん断振動の式  $u$ : 水平変位

$$\frac{\gamma}{g} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau}{\partial z}$$

釣合いからの増分  $\delta\tau$

$$\int_0^z \frac{\partial \tau}{\partial z} dz = \tau(z, t) = \int_0^z \frac{\gamma}{g} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} dz$$

ここで  $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \alpha(z, t)$

もし地盤が剛であれば,  $u(z, t) \Rightarrow u(t)$

$$\tau(z, t) = \frac{\alpha(t)}{g} \int_0^z \gamma(z) dz = \frac{\alpha(t)}{g} \sigma_v$$

$$\tau_{\max}^r = \text{Max} \tau(z, t) = \frac{\alpha_{\max}}{g} \sigma_v$$

最大せん断応力比 (Shear stress ratio)

$$\frac{\tau_{\max}}{\sigma'_v} = \frac{\alpha_{\max}}{g} r_d \gamma_1 z$$

$$\frac{\tau_{\max}}{\sigma'_v} = \frac{\alpha_{\max}}{g} r_d \frac{\sigma_v}{\sigma'_v}$$

全応力  $\sigma_v = \rho g z$

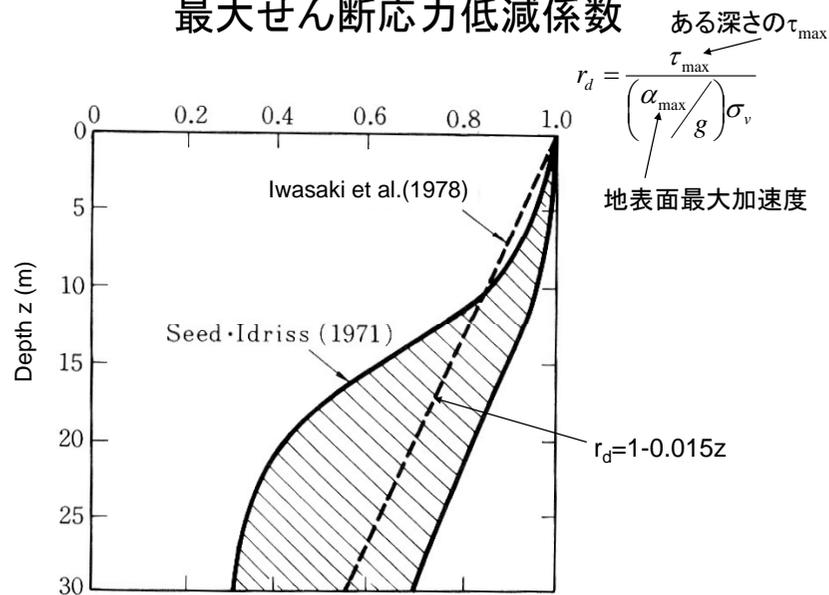
剛体

実地盤

地表最大加速度  $\alpha_{\max}$

深さ方向のせん断力の低減係数

## 最大せん断応力低減係数



21

## 液状化の危険性が高い、地盤や土構造物

- 緩い状態で自然堆積した河川沿い、河口付近の砂地盤(新潟)
- 埋め立て地盤(砂質土を水中落下により埋め立て)
- 緩い盛土、埋め土
  - 道路、鉄道、河川堤防、地中埋設物の埋め土、ダム

22

## 液状化の条件

- 繰り返しせん断(地震)
- 砂質土
  - 粘土(粘着力を持つ)
  - 礫質土(過剰間隙水圧が上昇しても、透水係数が大きく地震時の短時間でも水圧は消散する)

**粒径、粒度**
- 緩詰め
  - 相対密度が小さな緩詰め砂: 大きな負のダイレイタンス
- 飽和: 地下水位が高い
  - 地下水位が浅くは、過剰間隙水圧は発生しない(サクシオン(負圧): 見かけの有効応力)

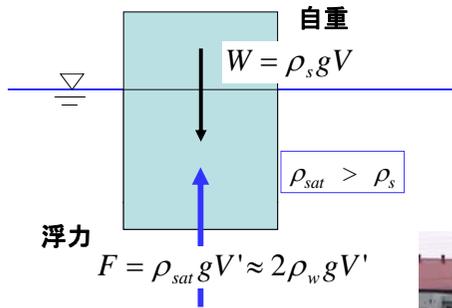
23

## 液状化による被害

- 強度や剛性の喪失
  - 上部構造物の沈下、転倒; 地下構造物の浮き上がり; 擁壁等、坑土圧構造物の水平移動
- 地盤の側方流動
  - 盛土の破壊、杭の破壊

24

# 地中構造物の浮き上がり



新潟地震における浄化槽の浮き上がり

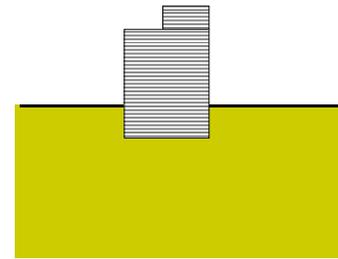


下水マンホールの浮き上がり(新潟県中越地震)

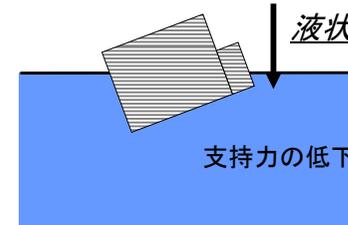
$V$ : 構造物全体積  
 $V'$ : 液状化部の体積  
 $\rho_s$ : 構造物の平均密度  
 $\rho_{sat}$ : 砂の飽和密度

この写真から  
 観察できる液  
 状化による被  
 害例?  
 3つ

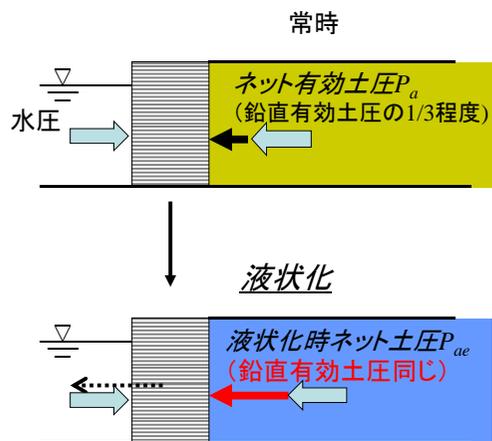
# 上部構造物の傾斜、倒壊



1964新潟地震  
 県営アパートの倒壊

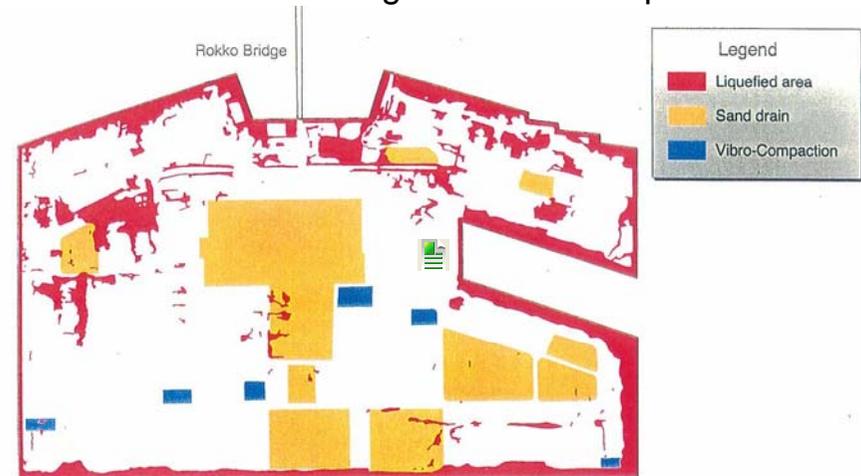


# 坑土圧構造物(擁壁、岸壁)の水平移動



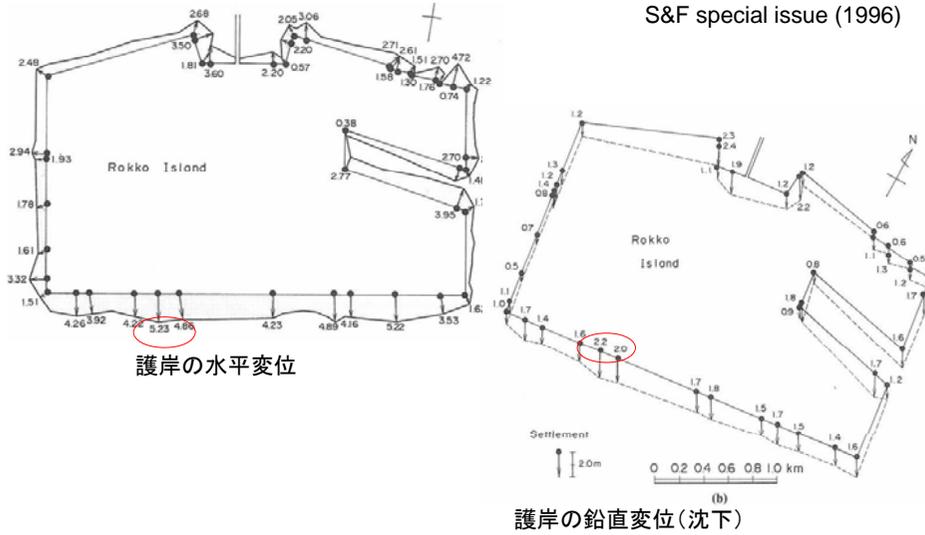
神戸地震における岸壁の被害

# Zone of liquefied area in Rokko Island at 1995 Hoguken-Nanbu Eq.



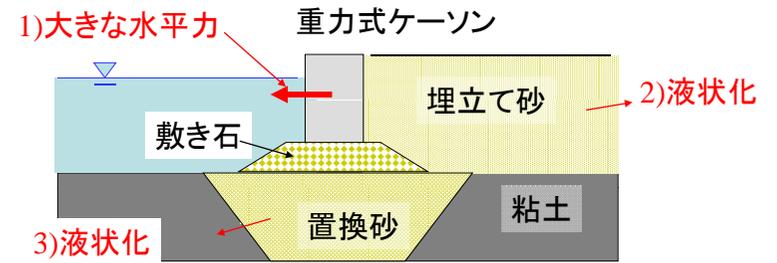
# Displacement of quay wall by Kobe Eq. (Rokko Island)

S&F special issue (1996)



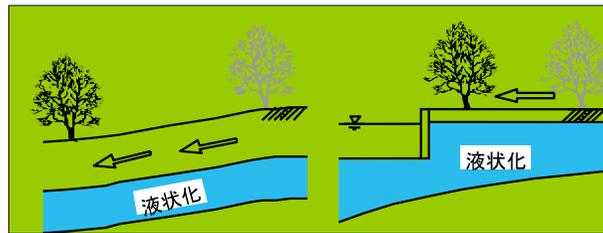
# 神戸港における岸壁被害の典型例

Quay wall: 岸壁



3条件が **5m** にも及ぶ水平変位と**2m**もの沈下の原因

# 液状化地盤の側方流動 (lateral spreading)



1962

1964 (after hrs.)

1971

1964新潟地震における信濃川護岸の変位

# 液状化地盤の側方流動による構造物の被害例 1964新潟地震

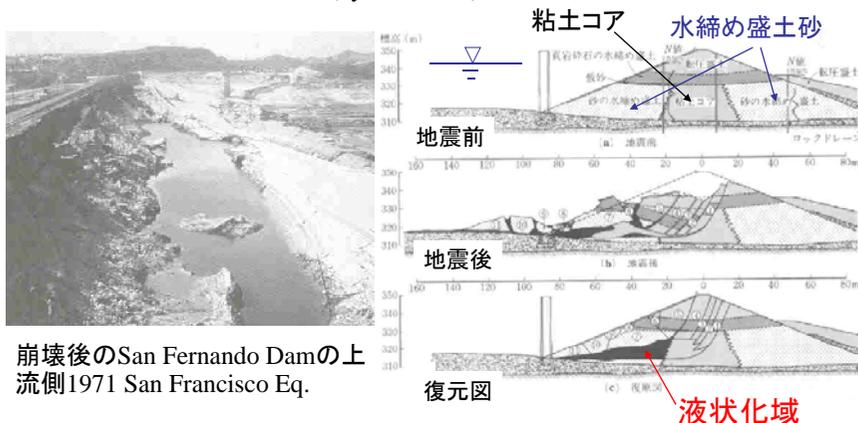


昭和大橋の落橋  
地盤の側方流動における橋脚  
基礎の変位が原因??

杭基礎の破壊

# アースフィルダムの流動化破壊

San Fernando Dam: 水締め盛土で構築 (1930)  
(hydraulic fill)



崩壊後のSan Fernando Damの上流側1971 San Francisco Eq.

「砂地盤の液化化」吉見吉昭

盛土の破壊

# 液状化防止策

-液状化の条件を取り除く-

- 繰り返しせん断変形 <= せん断変形抑制
- 砂地盤
  - 粘着力ゼロ <= 人工的な粘着力(固結力)
  - 透水係数 ( $10^{-5} \sim 10^{-3} \text{m/s}$ ) <= より透水性の高い材料の挿入
- 緩詰め状態 <= 密度の増大(締固め)
- 高い地下水位 <= 地下水位低下

# 液状化対策

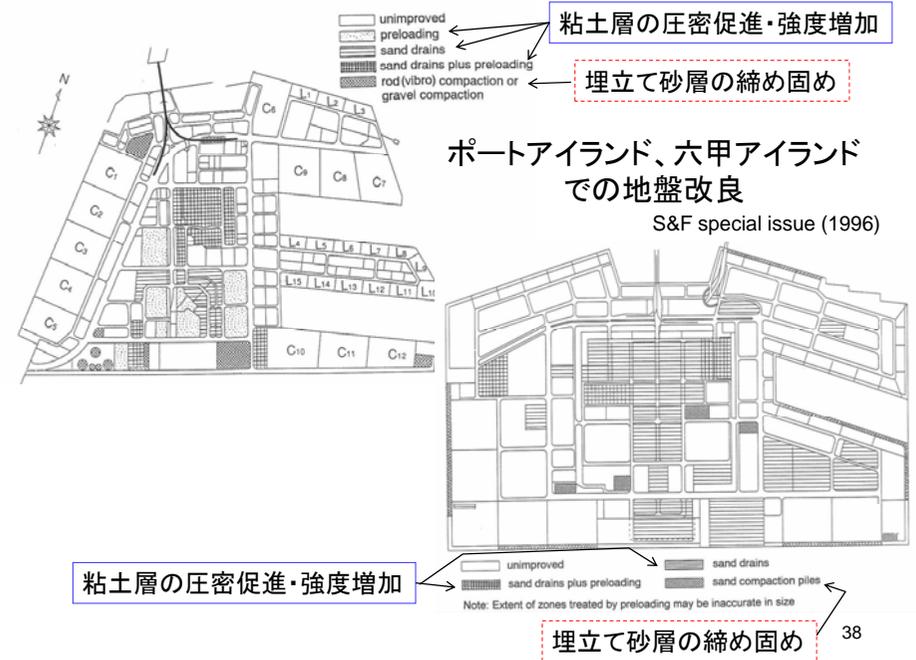
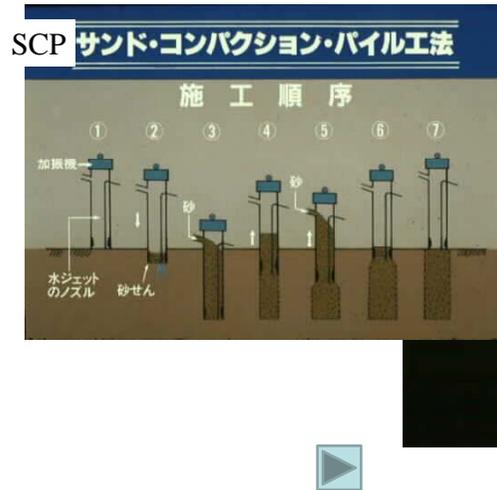
## Remedial Methods against Liquefaction

- 地盤、土構造物の力学特性の改善
  - 置換, 強度増加, 密実化(締固め)
- 排水の促進
  - 地下水位低下
  - 過剰間隙水圧の消散促進
- 地盤一構造物の補強
  - 地盤の補強(せん断変形抑制)
  - 基礎構造物(杭等)の補強

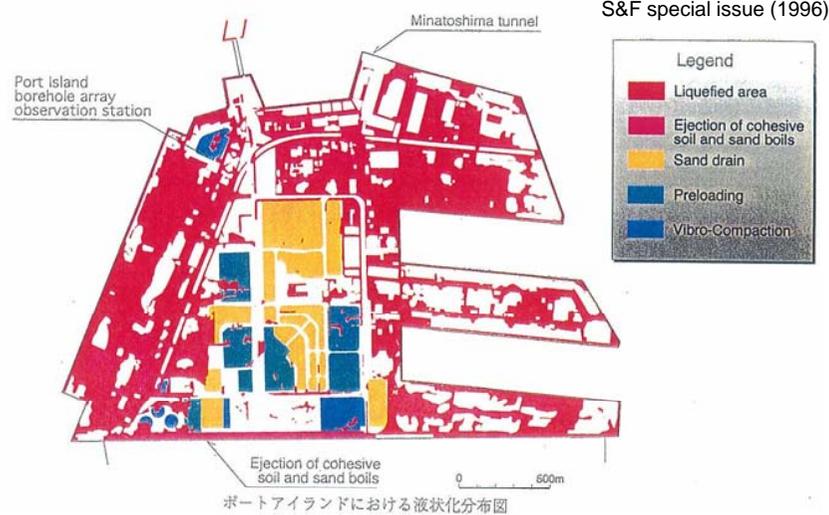
## 地盤改良による力学特性の改善

- 強度増加
  - 科学的結合剤、セメントの注入や攪拌  
DMM(deep mixing method), 薬液注入
- 締め固め (最も一般的で、経済的)
  - サンドコンパクションパイル(SCP)工法  
(締め固め砂杭)
  - バイブロフローテーション
  - 動圧密工法

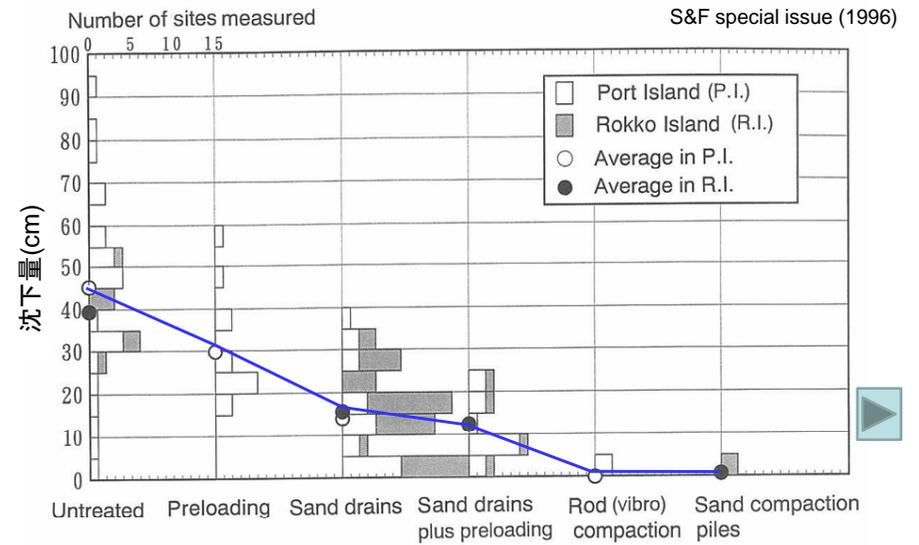
# Sand compaction method (SCP) and dynamic consolidation method (DC)



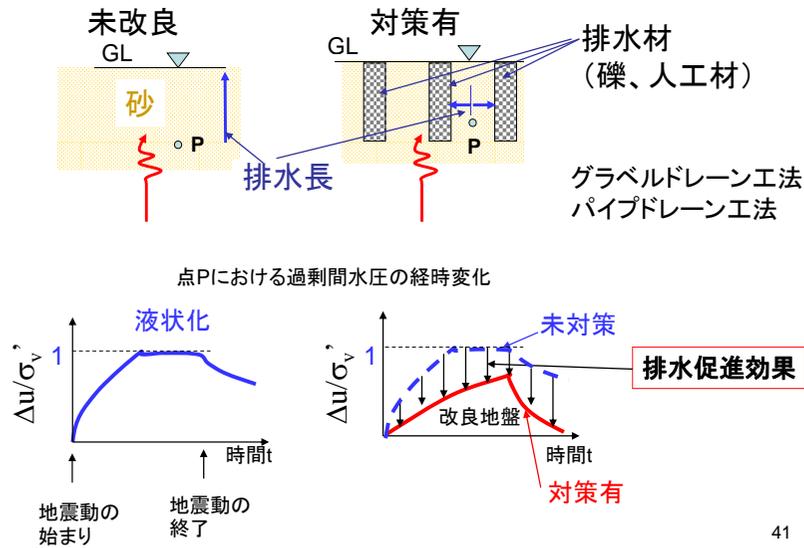
## Zone of liquefied area in Port Island at 1995 Hokuken-Nanbu Eq.



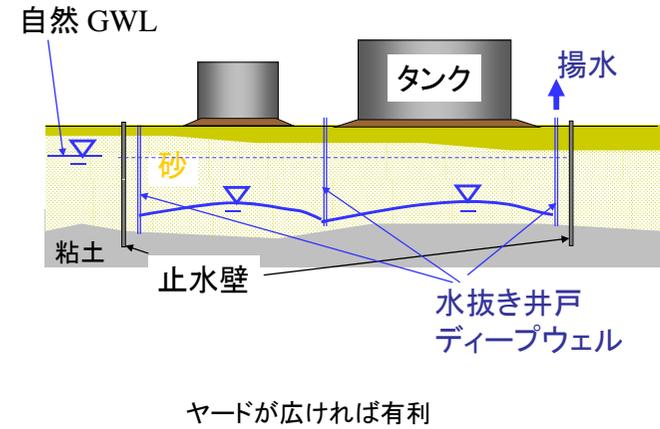
## 地盤改良による地震時の地盤沈下量の差



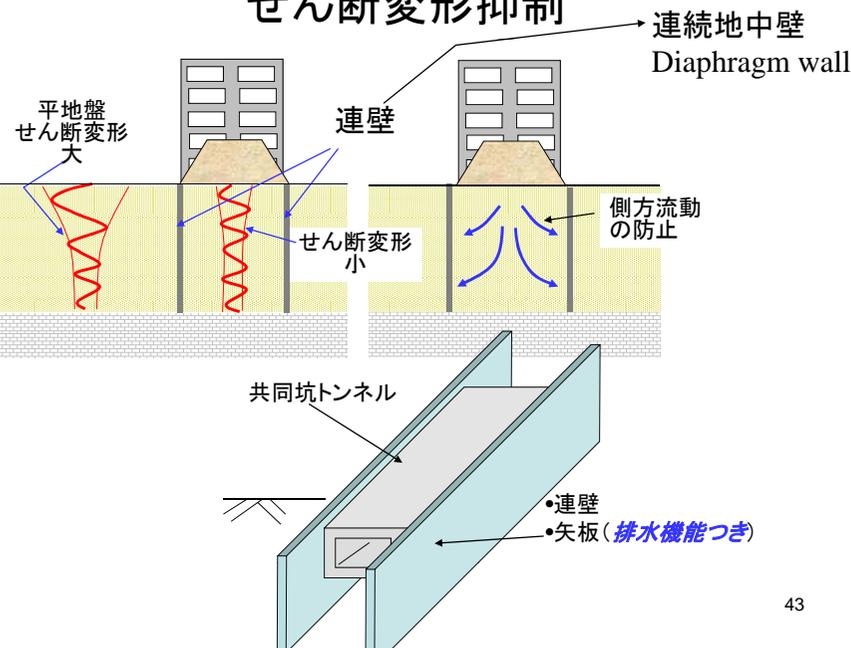
## 排水の促進(I) 過剰間隙水圧消散促進工法



## ディープウェルによる地下水位低下工法



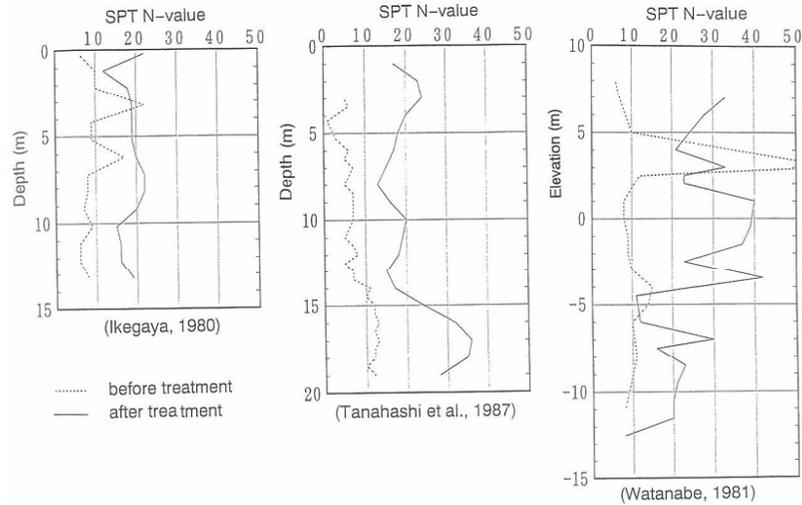
## せん断変形抑制



## 本日のkey words

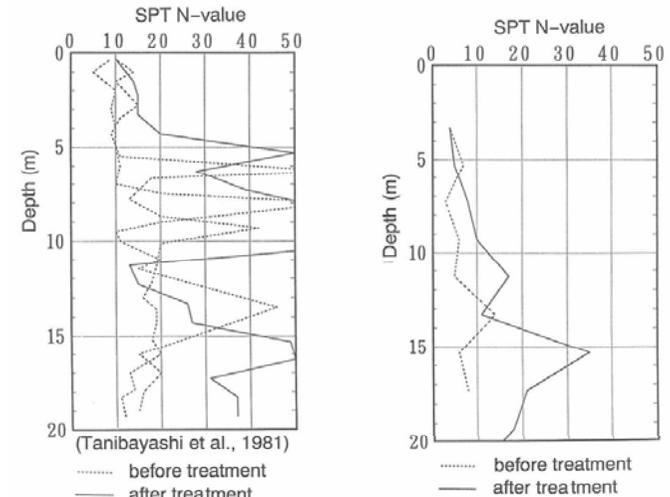
- ・地盤の液状化: soil liquefaction
  - ・砂の液状化メカニズム
  - ・液状化強度: liquefaction resistance:  $\tau_{dl}$ ,  $\tau_{max,l}$
  - ・初期液状化: initial liquefaction
  - ・ダイレイタンスーと過剰間隙水圧
  - ・サイクリックモビリティ: cyclic mobility
  - ・ $F_L$  値 (液状化安全率)
  - ・ $P_L$  値 (液状化指数): liquefaction potential
  - ・標準貫入試験: standard penetration test (SPT); N値: N-value
  - ・液状化による構造物の被害
  - ・岸壁: quay wall
  - ・側方流動: lateral spreading
  - ・液状化対策: remedial methods, countermeasures against liquefaction
  - ・密実化: densification
  - ・固化: solidification
  - ・間隙水圧の消散促進: acceleration of excess pore pressure dissipation
  - ・せん断変形の抑制: constraint of shear deformation
  - ・締め固め砂杭: sand compaction pile
  - ・連続地中壁 (連壁): diaphragm wall
- 44

### 地盤改良によるN値の増加



パイプロフローテーション

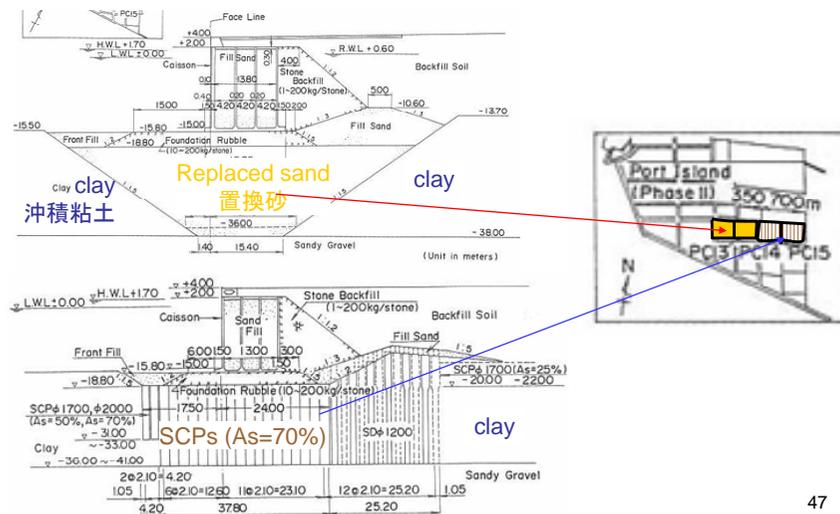
### 地盤改良によるN値の増加



サンドドレーン+プレロード

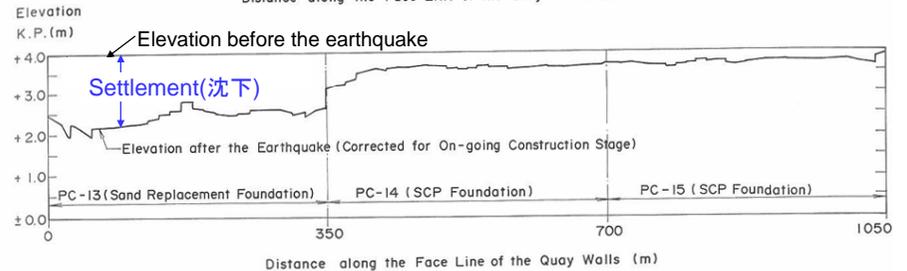
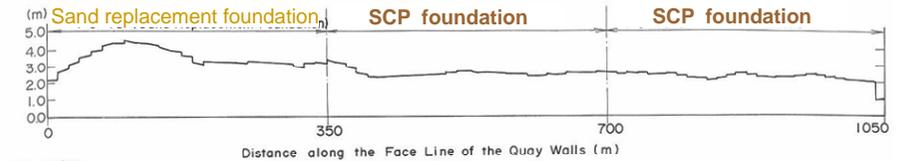
サンドドレーン

### ポートアイランド第2期の重力式岸壁基礎のための2種類の地盤改良



### 2種類の改良地盤上の岸壁の地震による変位 砂置換とSCPs

Horizontal displacement (岸壁の水平変位)



# 道路盛土の破壊 (1993釧路沖地震)

## Collapsed road fill embankment



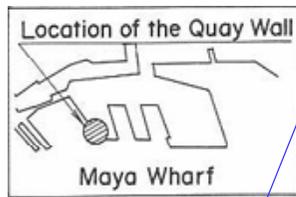
a part of road embankment constructed curved slope was slid away, in 1993 Kushiro-oki Earthquake.

# 盛土の陥没破壊(1993釧路沖地震)

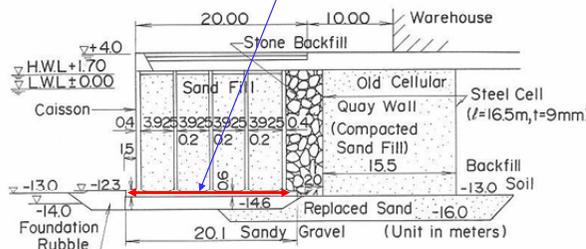
## Slumped embankments in 1993 Kushiro-oki Earthquake



# High seismic resistant quay walls at Maya Wharf 神戸麻耶埠頭の耐震強化岸壁



Seismicity:0.25  
設計震度  
No liquefiable sand  
beneath and behind  
quay wall  
背面、下部に液状化  
層なし



HSRQW performed very well against strong motion. 神戸地震でも殆ど被害なし。

# 地盤側方流動(1964新潟地震)

## Lateral flow of river side



river sides slid toward river with many parallel cracks, in 1964 Niigata Earthquake  
河川護岸の側方流動

