

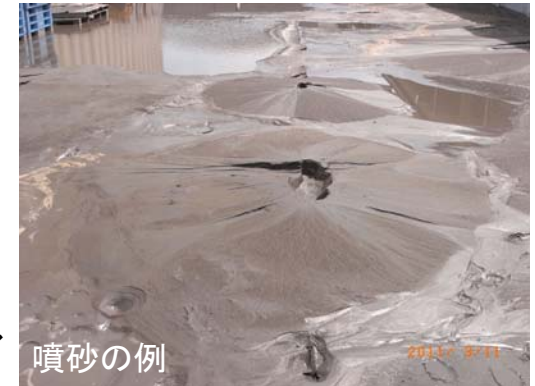
都市防災工学

第5回 液状化予測と対策

1

液状化とは

- 地震などにより、地盤を形成している砂質土層で、間隙水圧の上昇のために有効応力が減少してせん断抵抗を急激に失い、地下水位以深であたかも液体のようになる現象
- 結果として、
 - 地表の噴砂
 - 地下埋設物の浮上
 - 建物の沈下・傾斜
 - 盛土の沈下、斜面崩壊
 - 橋脚の水平移動
 - 護岸・擁壁のはらみ出し



2

液状化発生の3条件

ゆるい飽和砂

- ゆるく堆積した ← 人工の埋立, 沖積
- 水で飽和している ← 地下水位が浅い
- 砂地盤 ← 埋立は一般に砂が主



海や川に沿った埋立地で
液状化の危険性が高い

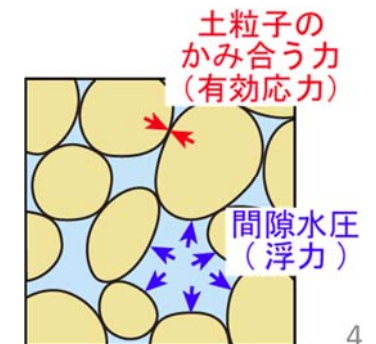
3

砂質土と有効応力

- 液状化は砂に特有の現象、粘土では起こらない。
- 粒径0.075mm以下の細粒分(粘性土)が多く含まれる砂は液状化しづらい。
- 砂の土粒子は、互いに接触した状態で周囲の圧力に抵抗している。

→ この接触力(有効応力)が砂の硬さ、強さに大きく影響する。

$$\text{全応力} = \text{有効応力} + \text{間隙水圧}$$



4

ダイレイタンス

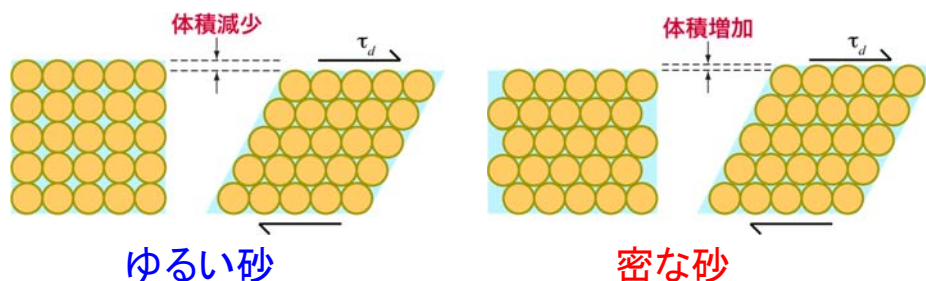
- ゆるい砂が地震時にせん断応力を受けると、体積が減少しようとする。

負のダイレイタンス

Dirate: 膨張する

- 密な砂は逆に体積が増加しようとする。

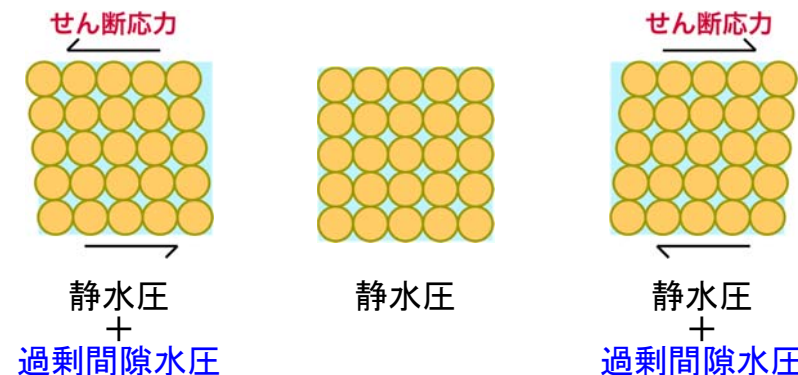
正のダイレイタンス



5

繰返しせん断と過剰間隙水圧

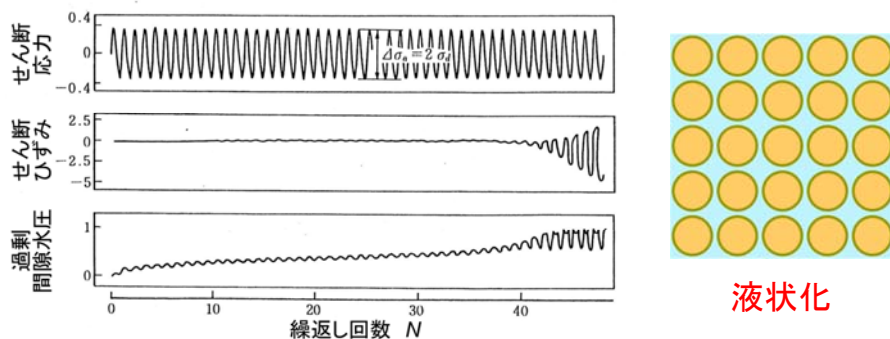
- 地震動のように短い時間では水は排水できない(非排水条件)。
- 負のダイレイタンスによって間隙が狭くなろうとするが、排水できないため、その代わりに間隙水に新たに水圧が発生する(過剰間隙水圧)。
- 繰り返しのせん断応力が砂地盤に作用しているうちに、過剰間隙水圧が蓄積する。



6

過剰間隙水圧の上昇と液状化

- 過剰間隙水圧がどんどん大きくなり、これが初期の有効応力に等しくなってしまうと、有効応力がゼロになる。
- すなわち、土粒子のかみ合いが失われ、土粒子は高压の水中に浮かんだ状態となる。これが液状化である。



7

液状化発生要因

- 液状化する地盤は、ゆるい飽和砂。密な砂、シルト、粘土、不飽和土、洪積層では生じない。(例外あり)
- 微地形としては、埋立地(造成地)、旧河道、砂丘間低地、三角州、後背湿地など。
- 地表から深さ20m程度まで。
- 気象庁震度階で震度5(最大加速度80~250gal)以上の地震動が生じた場合。
- マグニチュードが大きいと地震動の継続時間が長くなり(繰返し回数が多くなり)、液状化し易い。
- 過去の地震で液状化が生じた地点は、再び液状化する可能性がある。

8

液状化の判定基準

- 液状化安全率 F_L
深度ごとに液状化発生の有無を判定
- 動的地盤変位 D_{cy} (m)
液状化の被害の程度(水平変位・沈下量)を判定
(建築基礎構造設計指針)
- 液状化ポテンシャル P_L
液状化の被害の程度を判定
(道路橋示方書)

9

液状化判定に必要な情報

- 密度, 地下水位 → 全応力, 有効応力
- N 値
- 細粒分含有率 F_c (%)
- マグニチュード M
- 地表面最大加速度 a_{max} (m/s²)

10

液状化安全率 F_L

土の液状化強度と地震時の作用加重から液状化安全率を求め、液状化のし易さを判定

液状化安全率 $F_L = R / L$

R : 液状化強度比(抵抗)

L : せん断応力比(外力)

$F_L \leq 1$ ……液状化の可能性あり

$F_L > 1$ ……液状化の可能性が少ない

11

液状化強度比 R (建築基礎構造設計指針)

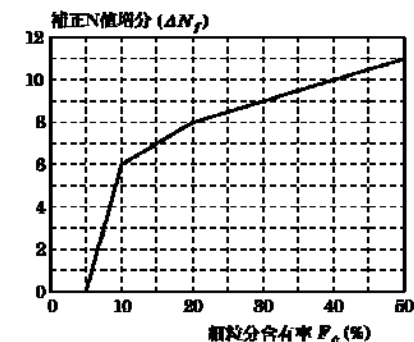
$$R = 0.041 \left\{ \sqrt{N_a} + 0.00903 \left(\frac{N_a}{10} \right)^7 \right\}$$

$$N_a = \sqrt{\frac{98}{\sigma'_z}} \cdot N + \Delta N_f$$

N_a : 補正 N 値

N : N 値

ΔN_f : 細粒分含有率 F_c に応じた補正 N 値増分



12

液状化強度比 R (道路橋示方書)

$$R = C_w \cdot R_L$$

$$C_w = 1.0 \quad (\text{タイプ1地震動})$$

$$C_w = \begin{cases} 1.0 & (R_L \leq 0.1) \\ 3.3R_L + 0.67 & (0.1 < R_L \leq 0.4) \quad (\text{タイプ2地震動}) \\ 2.0 & (0.4 < R_L) \end{cases}$$

$$R_L = \begin{cases} 0.0882 \sqrt{\frac{N_a}{1.7}} & (N_a < 14) \\ 0.0882 \sqrt{\frac{N_a}{1.7}} + 1.6 \times 10^{-6} \cdot (N_a - 14)^{4.5} & (14 \leq N_a) \end{cases}$$

C_w : 地震動特性による補正係数
 R_L : 繰返し三軸強度比
 N_a : 補正N値

13

せん断応力比 L

$$L = k_{hg} \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} r_d \quad (\text{道路橋示方書})$$

$$L = r_n \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_z}{\sigma'_z} r_d \quad (\text{建築基礎構造設計指針})$$

$$r_d = 1.0 - 0.015z$$

$$r_n = 0.1(M - 1)$$

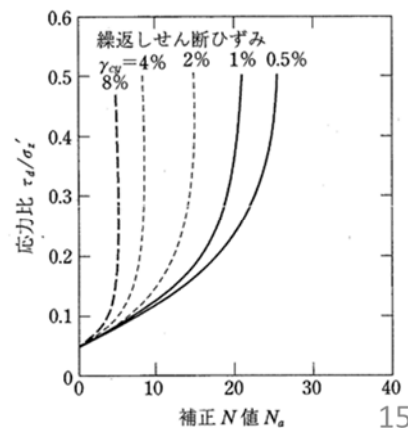
k_{hg} : レベル2地震動の地表面における設計水平震度
 σ_v : 深さ z における全応力
 σ'_v : 深さ z における有効応力
 r_d : 深さ z における低減係数
 a_{max} : 地表面最大加速度
 r_n : 等価の繰返し回数(マグニチュード M) に関する補正係数

14

動的地盤変位 D_{cy}

$$D_{cy} = \int_0^{20} \gamma_{cy}(z) dz$$

γ_{cy} : 繰返し動的せん断ひずみ



15

D_{cy} (cm)	液状化の程度
0	なし
5以下	軽微
5を超え10以下	小
10を超え20以下	中
20を超え40以下	大
40を超える	甚大

液状化ポテンシャル P_L

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

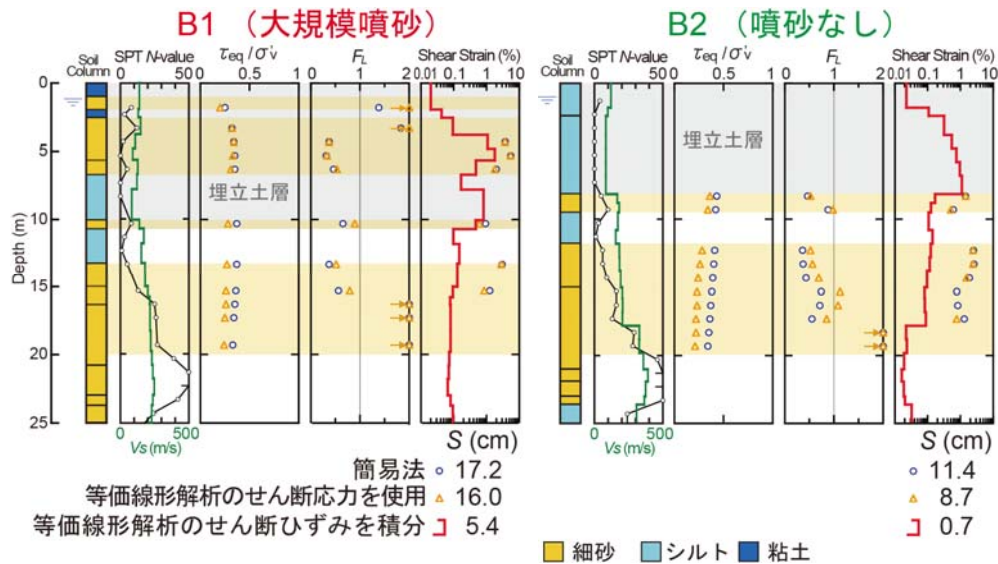
$$\begin{cases} F = 1 - F_L & (F_L < 1) \\ F = 0 & (F_L \geq 1) \end{cases}$$

ボーリング地点の液状化危険度を簡易に予測

- 0~5 液状化はほとんどなし
- 5~10 液状化の程度は小さい。構造物への影響はほぼない
- 10~20 液状化は中程度。構造物によっては影響あり
- 20~35 激しく液状化。噴砂が多く、直接基礎の建物が傾く場合あり
- 35~ 非常に激しい液状化。大規模な噴砂と構造物の被害

16

液状化判定の例



17

液状化を防ぐための対策工法

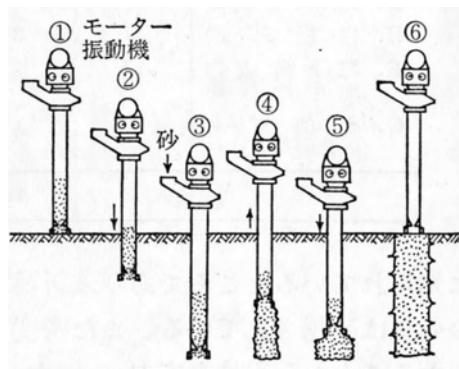
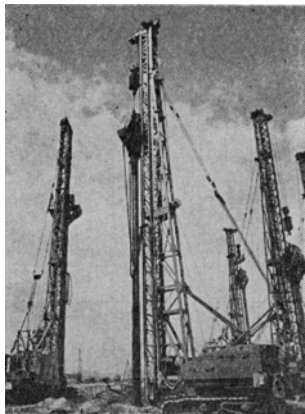
ゆるい飽和砂

- 密度の増大
密な砂では液状化は起こりにくい。
- 固結・固化
石灰やセメントで地盤を固めてしまう。
- 地下水位の低下
不飽和土では液状化は起こらない。
有効応力が大きければ液状化抵抗は大きい。
- 間隙水圧の消散
過剰間隙水圧の早期消散を促し、液状化を起こりにくくする。

18

サンドコンパクションパイル工法

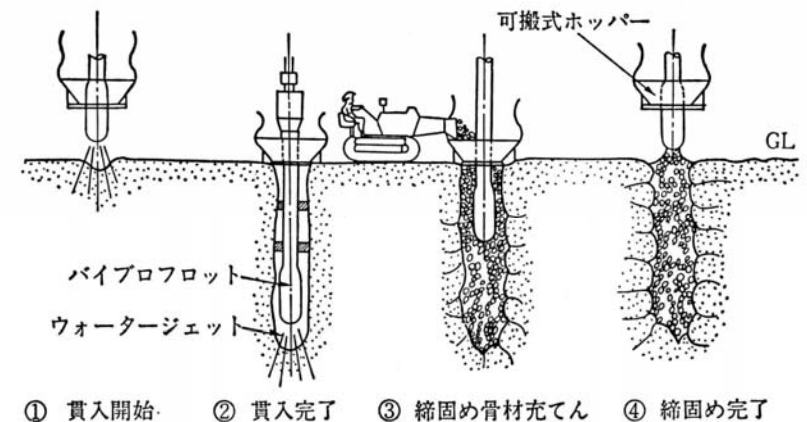
- 振動するケーシングを砂層に圧入して締め固められた砂杭を形成するとともに、周辺地盤の密度を増大させる。
- 適用深度35m程度。使用実績が多い。



19

バイブロフローテーション工法

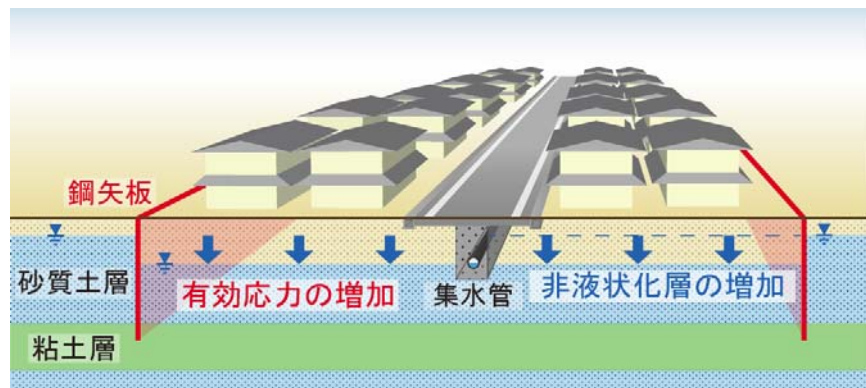
- バイブロフロットと呼ばれる棒状起振機の水平振動とウォータージェットとを併用して砂層を締め固める。
- 適用深度20m程度。



20

地下水位低下工法

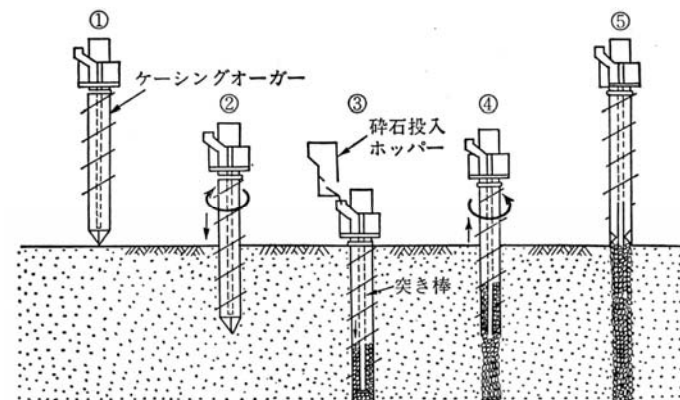
- 地下水位を低下させることにより、飽和した液状化層が減り、逆に不飽和の非液状化層が上部に増加し、地表での被害を低減する。
- 地下水位を下げることにより下部の有効応力が増加し、液状化抵抗も増加する。



21

グラベルドレーン工法

- 礫や碎石などからなる鉛直の柱を砂質地盤中に多数設置し、水平方向の排水経路を短縮することにより上昇した過剰間隙水圧の消散効果を図る。
- 適用深度20m程度。



22