

# 液状化のメカニズムとその対策における地下水位低下工法の有用性について

地盤工学会北陸支部第91回土質工学最新情報  
コロキウム、2025年12月19日，NiXホール

山口大学名誉教授  
兵動正幸

## 本日の話題

1. 1964新潟地震による液状化被害
2. 1995年阪神淡路大震災における港湾施設の液状化
3. 2011年東日本大震災における住宅地の液状化被害
4. 2024年能登半島地震における液状化被害
5. 液状化のメカニズムと液状化判定法について
6. 液状化対策工法について
7. 内灘町の復興計画と地下水位低下工法について



1964年新潟地震M=7.6  
液状化による被害が世界に広まる  
きっかけとなった。



昭和大橋の落橋、竣工後わずか2週間



川岸町アパートの倒壊、基礎は杭基礎ではなく直接基礎であった。砂地盤は、粘土地盤と比較して、支持力が高いから杭は不要と考えられていた。

建物が緩慢に転倒したため、住人は窓から出入り。

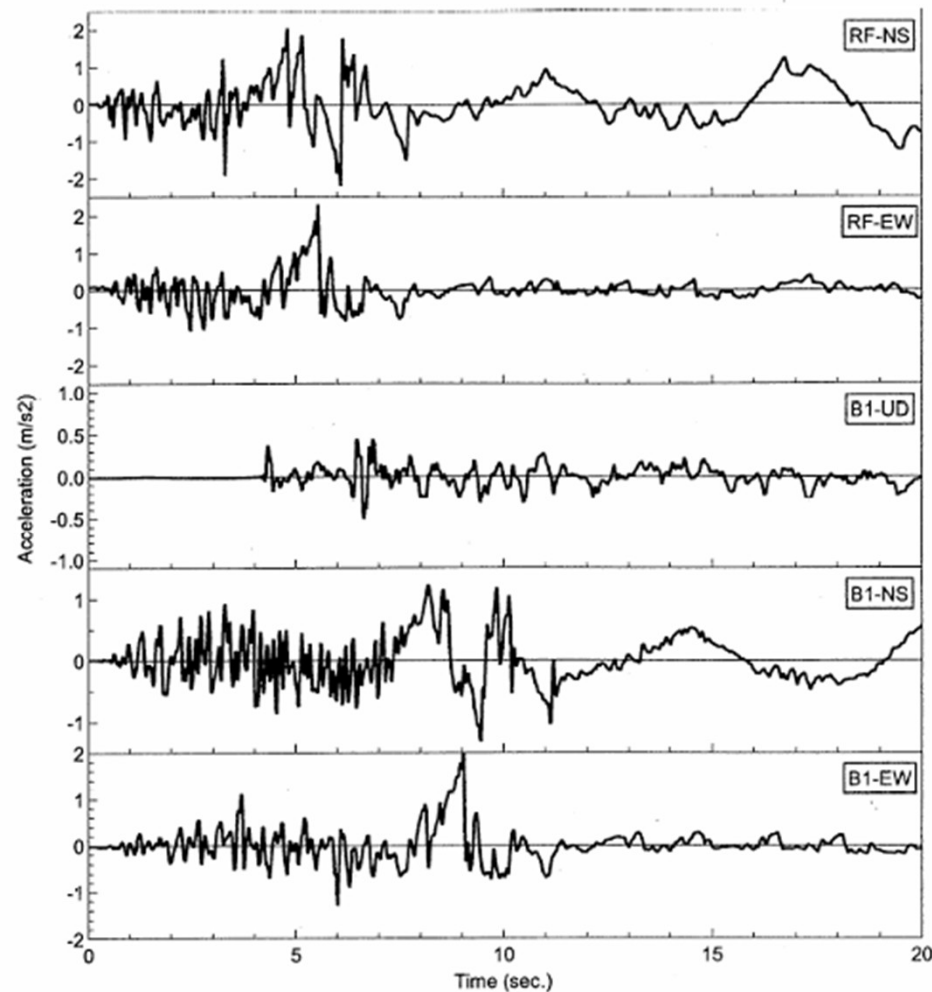


図-5 川岸町アパート記録の NS 成分

## 川岸町アパート地下地震波

液状化した地盤で初めて地震波が得られた。液状化により長周期化している。

近年、液状化を考慮した地震応答解析（有効応力解析）が提案されるに至ったが、この地震波にフィットすることが目標となった。

液状化とともに、波形が長周期化している。

# 1995年 阪神淡路大震災

M=7.3、直下型

埋立て砂礫地盤における液状化、側方流動



ポートアイランドの護岸背後の陥没



コンテナクレーンの倒壊

**側方流動により重力式岸壁が海側に移動し、エプロン部分が陥没した**

(財)沿岸開発技術研究センター、1997

まさ土は盛土材料として用いられてきて、液状化はしないと考えられてきた感があるが、埋立てに用いられた場合は締固め不足で液状化を起こすことが問題となった。また、まさ土は母岩が風化した細粒分を含むが、液状化強度をむしろ低くするものであることが示唆された。



## 二段階耐震設計法

### 兵庫県南部地震を機に二段階設計法が導入された

- **レベル1（L1）地震動**は、多くの土木構造物に対して従来から設定されていた地震外力にあたる。過去の地震発生の時間的経過に基づいて、構造物の使用期間中に1～2回発生すると考えられる強さの地震動である。
- **レベル2（L2）地震動**は、陸地近傍で発生する大規模なプレート境界地震に加えて、兵庫県南部地震のような内陸の直下の地震による地震動も対象とした発生確率の極めて低い地震動である。

# 2013年 東日本大震災における液状化被害 仙台市津波到達前の液状化の様子



# 浦安地区埋立地の液状化（若齢埋立て地盤の液状化）

東京ディズニーランド駐車場（3月12日）



メモ：「3月11日、東京出張中に地下鉄三田駅で地震に遭遇し、当日は大井町のホテルまで約10km歩いた。翌日は電車が動いたので、浦安に液状化の調査に行った。」

## 舞浜駅（3月12日）

---

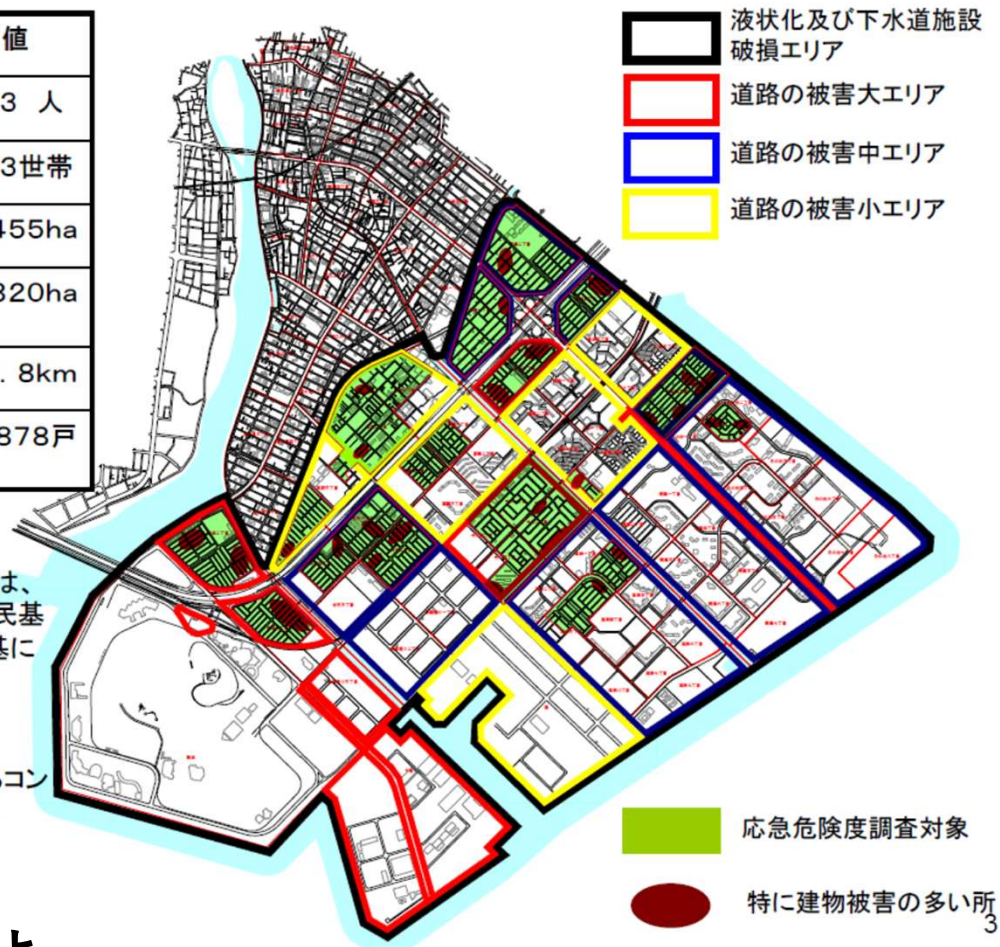


## i 浦安市の被害の概要

主な被害項目	数 値
被災者数※1	96,473 人
被災世帯数 ※1	37,023世帯
液状化面積 ※2	約1,455ha
下水道破損地区面積	約820ha
道路の被害延長	111.8km
応急危険度調査対象	8,878戸

※1  
被災者数及び被災者世帯数は、平成23年2月28日現在の住民基本台帳と外国人登録台帳を基に算出した。

※2  
空中測量で作成した地図からコンピュータ処理により算出した。



※浦安市資料より

## 2011 年東日本大震災による浦安地域の液状化被害調査報告

金 哲鎬<sup>\*1</sup> 藤井 衛<sup>\*2</sup> 小川 正宏<sup>\*3</sup>

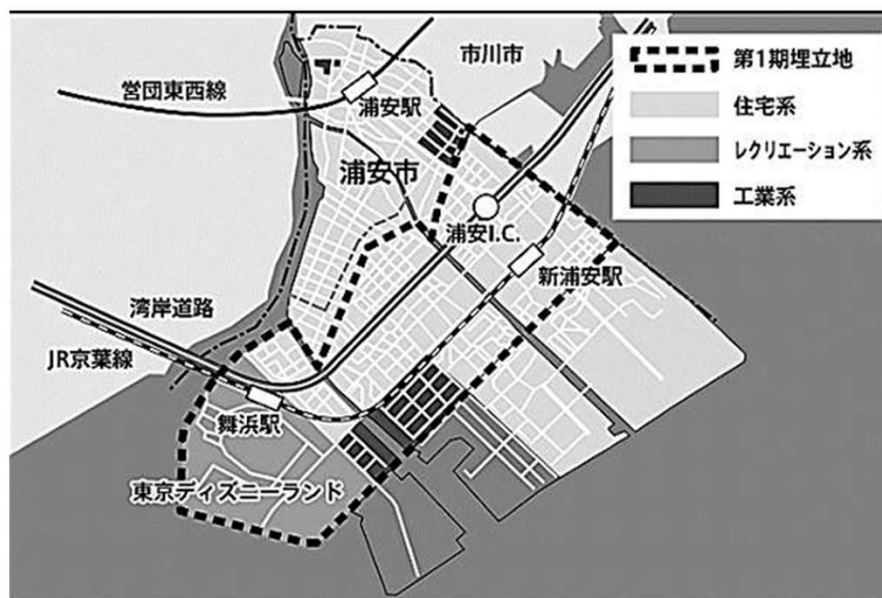


図1 第1期埋立地図

**1970年代に埋め立てられ  
た若齢埋立て地盤**

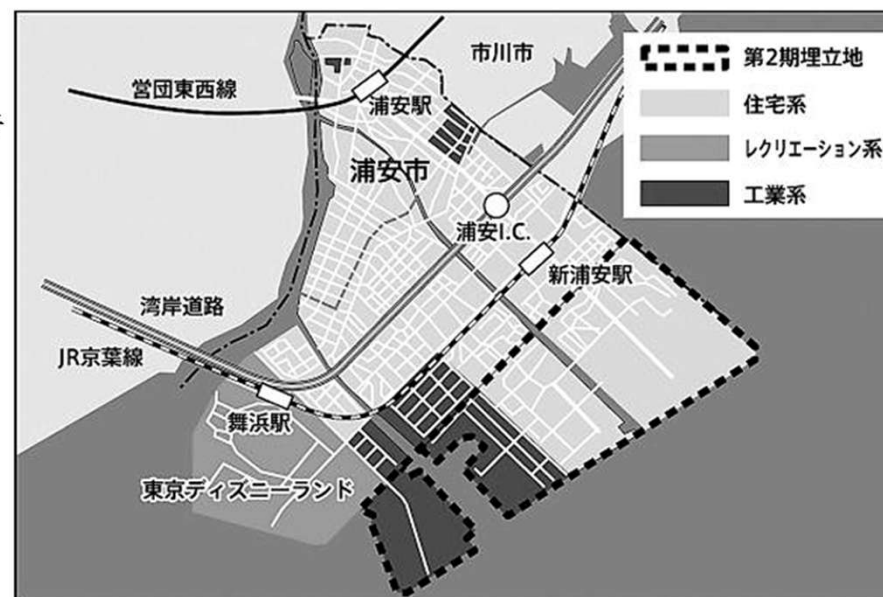
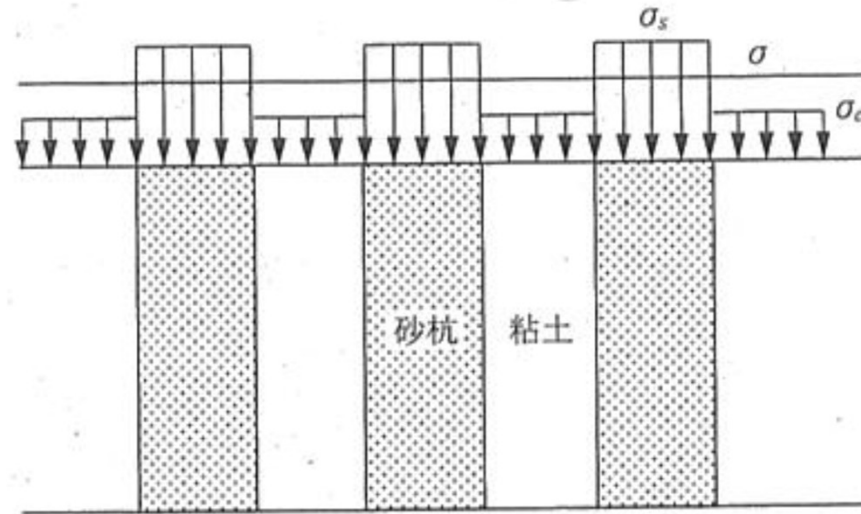


図2 第2期埋立地図

浦安市は、総面積 4.43km<sup>2</sup>であったが、戦後から海面埋立て事業が始まり、現在は総面積 16.98km<sup>2</sup>となっている。浦安市の第1期埋立事業は、千葉県開発庁(現企業庁)が行った事業で、昭和39年に着工、昭和50年に完成し、住宅用地・工業用地・レクリエーション用地の3つから構成されていた。第1期埋立地と土地利用構想は図1の通りである。第2期埋立事業は、昭和47年に着工し、昭和55年に完成している。第2期埋立地と土地利用構想は図2の通りである。このうち、日の出・明海地区については、日本住宅公団(現都市基盤整備公団)が昭和60年に土地区画整理事業認可を受けて住宅地開発を始めた。

若齡埋立て地盤（海浜埋立て地盤）が液状化を起こしやすい理由：

SCPの砂杭と粘土の荷重分担率



海浜埋立には、細粒土を含む浚渫土砂が使われることが多い。若齡埋立地における粘性土混じり砂では砂骨格が主な荷重を受け持ち粘土部分に対する荷重が小さい。その結果粘土は圧密されず、高含水比のままで、粘着力を有しない。緩い砂の中に泥水が存在するような状態。

### iii 被害の状況写真



5

※浦安市資料より

住宅地の被害

# 2024年能登半島地震

## <地震>

発生日時：令和6年1月1日（月・祝）16時10分

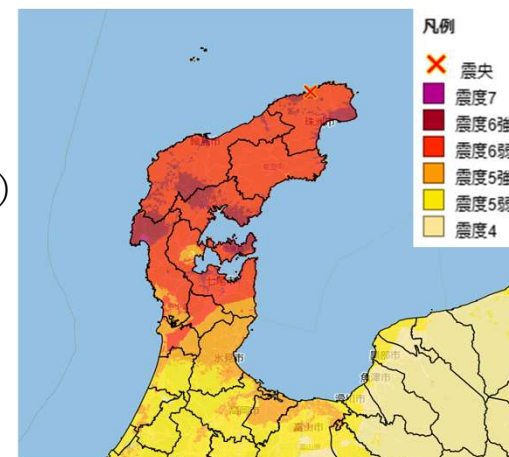
震源の場所：石川県能登地方（北緯37.5度，東経137.3度）

震源の深さ：16km（暫定値）

地震の規模：**マグニチュード7.6**

最大震度：震度7（石川県志賀町，輪島市）

震度6強（七尾市，珠洲市，穴水町，能登町）



## <被害>

死者：489人（うち災害関連死261人）

行方不明者：2人

負傷者：1,379人

住家被害：全壊6,445棟，半壊23,225棟，一部破損 120,029棟

内閣府

令和6年能登半島地震に係る被害状況等について（令和6年12月24日14時00分現在，非常災害対策本部）

[https://www.bousai.go.jp/updates/r60101notojishin/r60101notojishin/pdf/r60101notojishin\\_54.pdf](https://www.bousai.go.jp/updates/r60101notojishin/r60101notojishin/pdf/r60101notojishin_54.pdf)

震源地近くの被害：震度 7 強震、液状化、津波による被害が重なっている



家屋の倒壊と液状化によるマンホールの浮上、  
液状化では家が圧壊する事例は少ない。



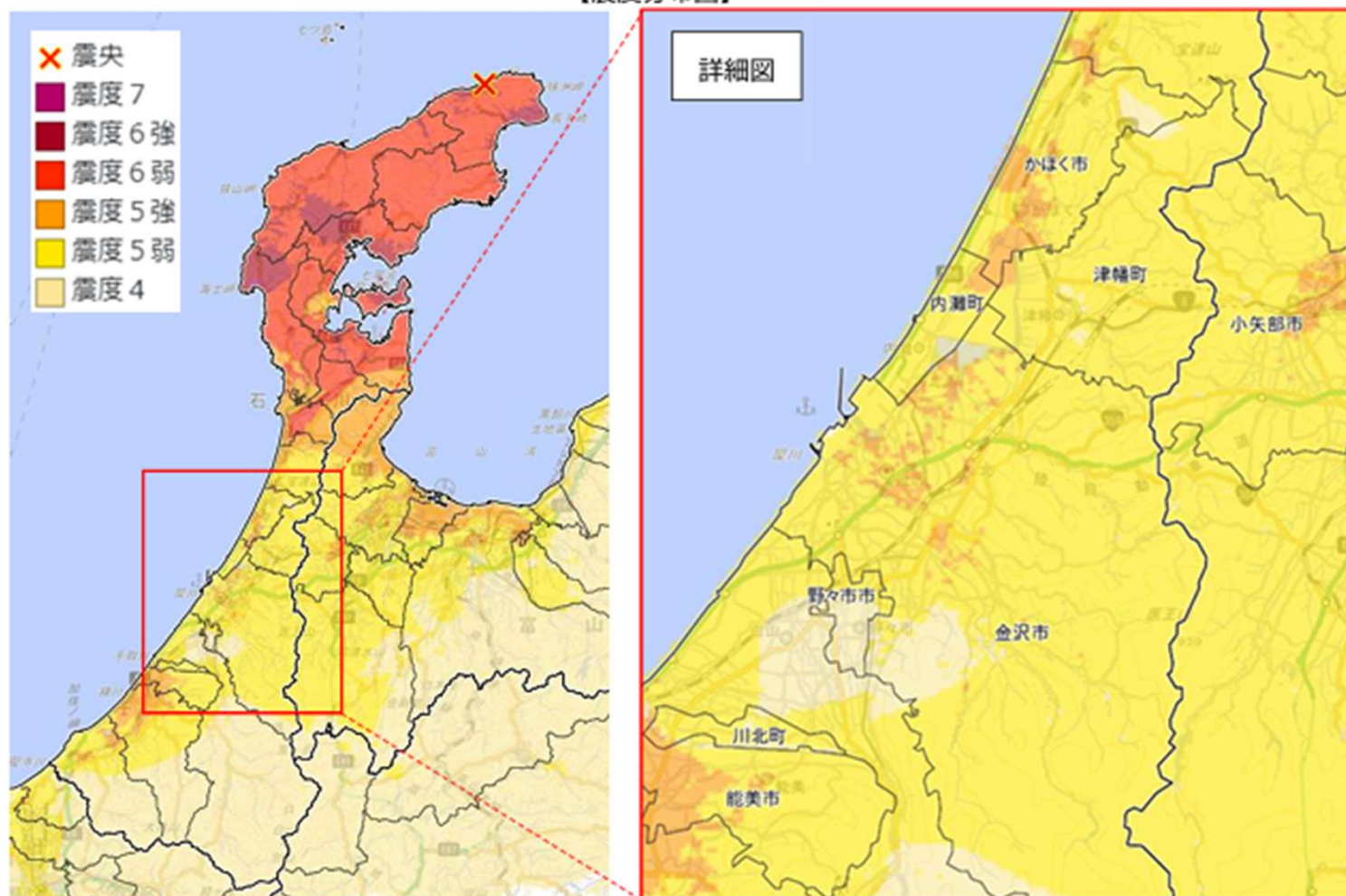
液状化が確認された範囲：震源から離れたところで液状化の被害が甚大、地盤特性、砂丘砂を使つての埋立地



NHK News より引用

## 内灘地区の液状化被害

【震度分布図】



出典：気象庁ホームページ  
([https://www.jma.go.jp/bosai/map.html#6/36.781/137.42/&contents=estimated\\_intensity\\_map&id=202401011610](https://www.jma.go.jp/bosai/map.html#6/36.781/137.42/&contents=estimated_intensity_map&id=202401011610)) 推計震度分布を加工して作成

# 内灘町における被害

【人的・住家・非住家被害状況】

(令和6年11月末時点)

項目	内容	内訳	備考
人的被害	10人	死者 4人 負傷者 6人	死者は災害関連死※のみ 負傷者は重傷者のみ
住家被害	2,688棟	全壊 123棟 半壊 563棟 一部損壊 2,002棟	半壊には大規模半壊・中規模半壊、一部損壊には準半壊を含む
非住家被害	634棟	全壊 120棟 半壊 295棟 一部損壊 219棟	

※災害関連死：当該災害による負傷の悪化又は避難生活等における身体的負担による疾病により死亡し、災害弔慰金の支給等に関する法律（昭和48年法律第82号）に基づき災害が原因で死亡したものと認められたもの

内灘町西荒屋地区の液状化：震源から100km  
以上離れ、震度5弱、長時間の揺れ。



NHK資料



液状化で住宅が12mほどずれ動く“広域的な  
対策を”石川 内灘町

NHK News より引用

## 液状化側方流動による道路側への傾斜



玄関の階段が手前に立ち上

## 柱状改良からの流動砂のすり抜け



河内氏撮影

写真-3 家屋基礎柱状改良と周辺地盤の側方流動

# 砂丘陸側の液状化と側方流動

被害大は“砂丘の陸側”に集中



国道249号沿いの地滑り、斜面崩壊

NHK Newsより引用

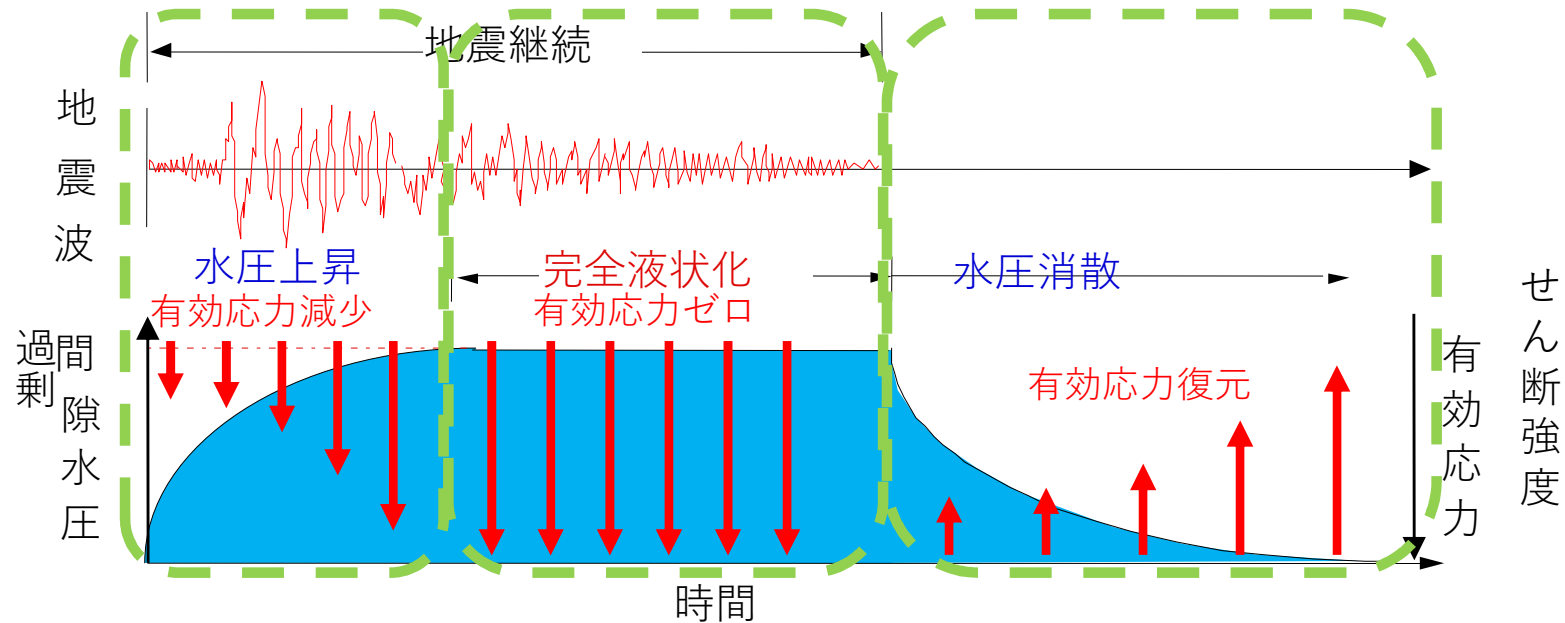
# 液状化現象とは？

静的にある程度のせん断強度をもつ飽和砂が地震による繰返し外力を受けて土中の間隙水圧が上昇し、砂粒子の有効応力が減少して最終的に砂粒子が最初に持っていた拘束圧がすべて間隙水圧に転嫁され、せん断抵抗が失われる現象。

飽和砂地盤は液状化すると、あたかも砂と水から成る液体のような挙動をとるようになる。

# 液状化現象とは

地震の際に地下水位の高い砂地盤が、振動（繰返しせん断）により液体状になる現象。

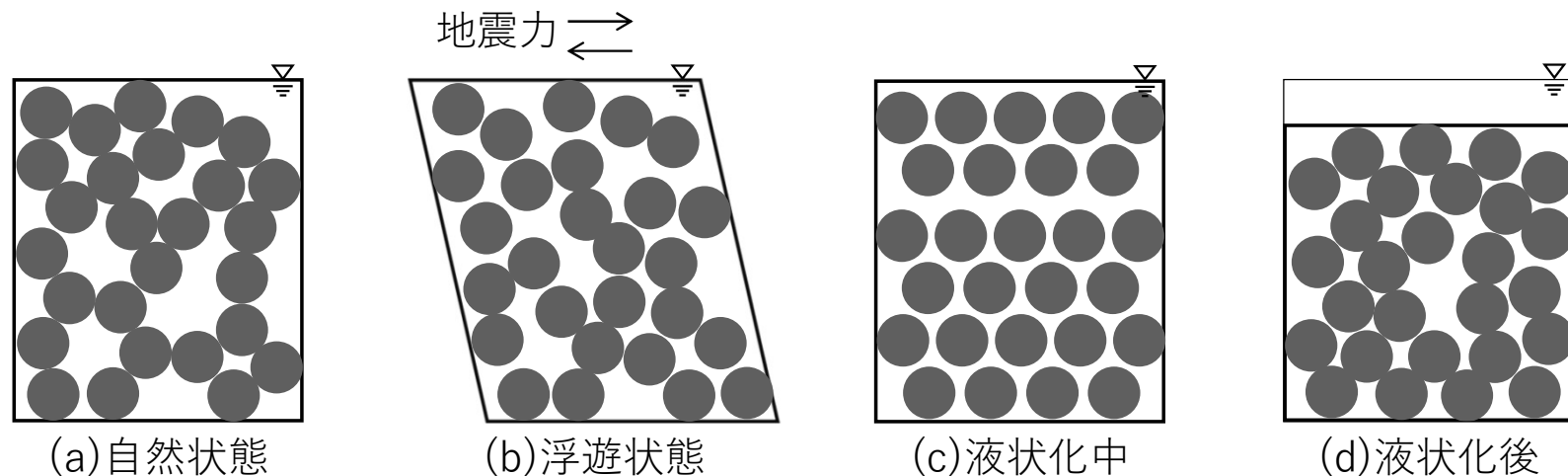


地震継続時間は地震のマグニチュードによるが、数十秒から数分程度

住宅地盤品質協会資料

## 液状化被害地域の復興に液状化対策が必要な理由

土粒子間が水で満たされたゆるい砂地盤が、地震などによって揺すられることで砂粒子間の噛合わせが外れ、間隙水圧が上昇し有効応力が消失して、砂粒子が水中に浮遊した状態になることを、液状化現象という。**地震の継続時間は1分程度、液状化中に地震は終わる。**



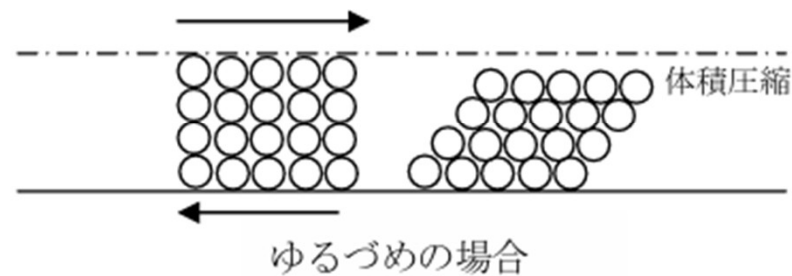
密度は増加せず、弱い構造ができる！

**※液状化後は密になるとは限らない。⇒再液状化の可能性！**

# ダイレイタンシーと間隙水圧発生メカニズム

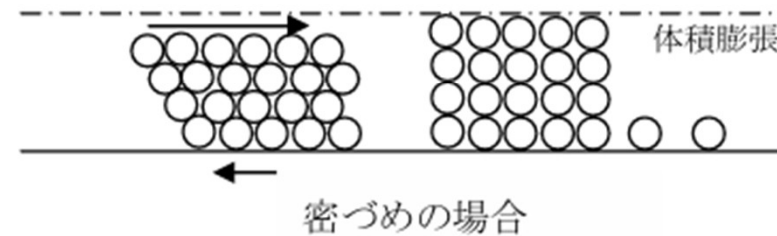
## ダイレイタンシーの発生原因

ダイレイタンシーは粒状体の典型的な挙動である。



【負のダイレイタンシー※】

排水、定圧状態では、せん断により緩い砂は体積収縮し、密な砂では体積膨張する。



【(正の) ダイレイタンシー】

地震の揺れは大体数十秒～数分程度であり、この間の地震動による主要な繰返しせん断は10回～30回程度である。地震時の繰返しせん断中、地盤内の間隙水は排水できず非排水状態となる。**非排水状態では、土の体積は常に一定を保つ。**緩い砂がせん断されると、砂粒子同士の拘束が緩み粒子間力が低下する。その結果、砂粒子は弾性膨張し間隙水は圧縮され弾性収縮し、間隙水圧が上昇する。密な砂の場合では、粒子の接触力が増加し、粒子が弾性収縮することにより、間隙水は弾性膨張し負の間隙水圧が発生する。

# 間隙水圧上昇のメカニズム

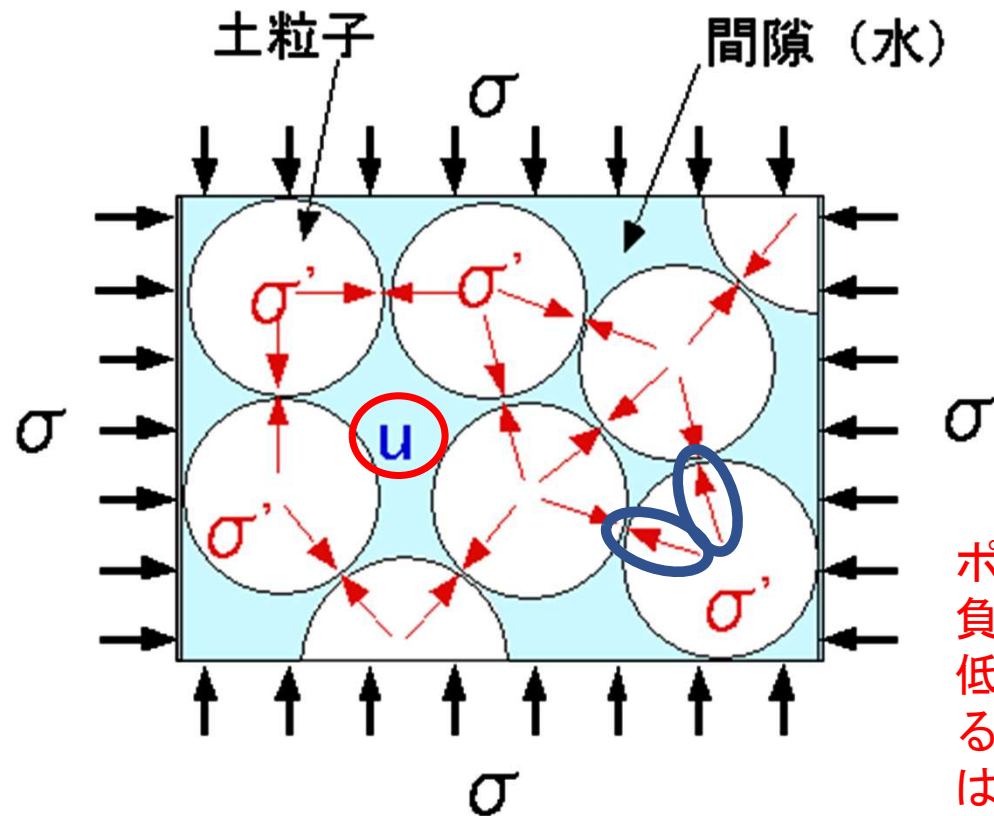
## 体積一定でのせん断

- ・ **マクロには**：緩い飽和砂がせん断により体積収縮しようとするが、急速载荷のため、排水することが出来ず、間隙水圧が発生する。

- ・ **ミクロには**：個々の粒子はいくつかの粒子と接触しており、有効上載圧に応じて接触圧を有している。せん断により、粒子間接触が緩み接触圧が低下することにより、粒子は弾性膨張をする。この弾性膨張分は間隙水の弾性収縮となり、間隙水圧が発生する。繰返しせん断により、土粒子の接触点数は減少していく。

# 液状化の起こるわけ

## 土中の力のバランス（飽和土）



$$\sigma = \sigma' + u$$

$\sigma$  : 全応力

$\sigma'$  : 有効応力

$u$  : 間隙水圧

ポイント：土は、水と土粒子の両方で外力を負担する！間隙水圧が上昇すると有効応力が低下し、液状化状態では、水が外力を負担する。水は、圧縮力は負担できるが、せん断力は負担できない。

## 液状化は同じ場所で何度も起こる 稲敷市六角における再液状化被害



1987年千葉県東方沖地震後



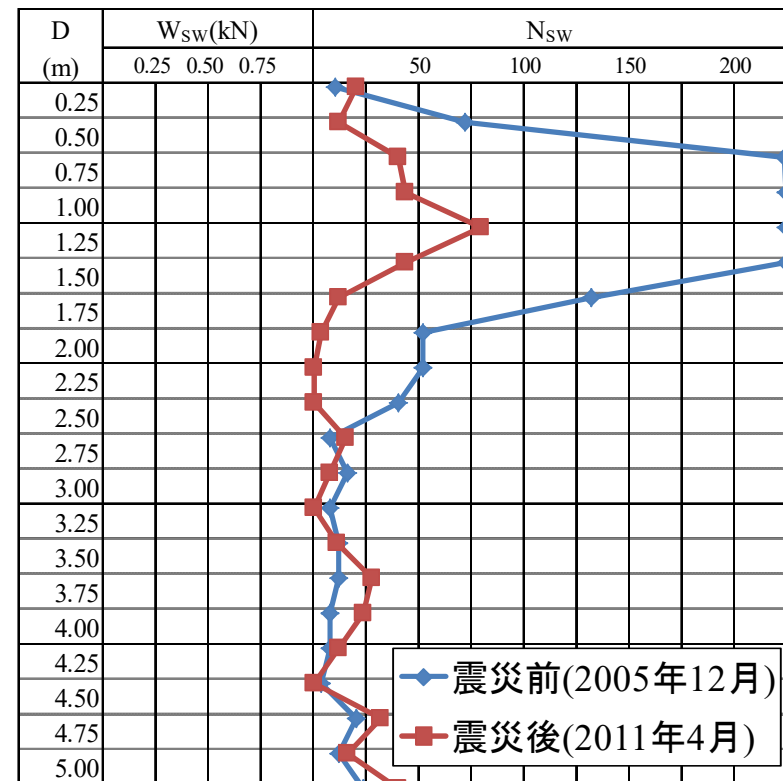
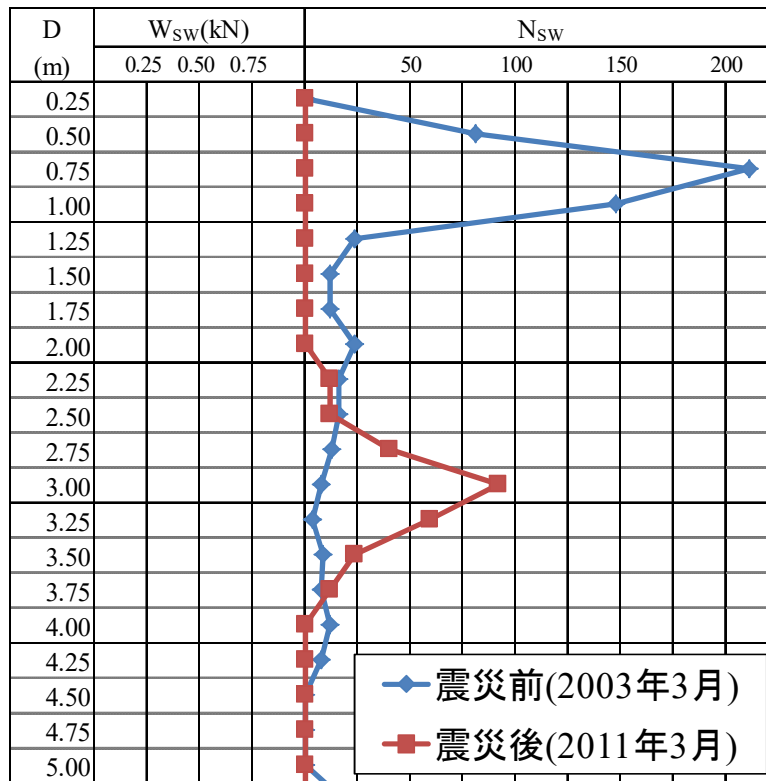
2011年東北地方太平洋沖地震後

## ニュージーランド、クライストチャーチ (2010, 2011カンタベリー地震)での再液状化



甚大な液状化被害を受けたニュージーランドのクライストチャーチでは、**政府が住宅地を買い取り、再開発を実施。**

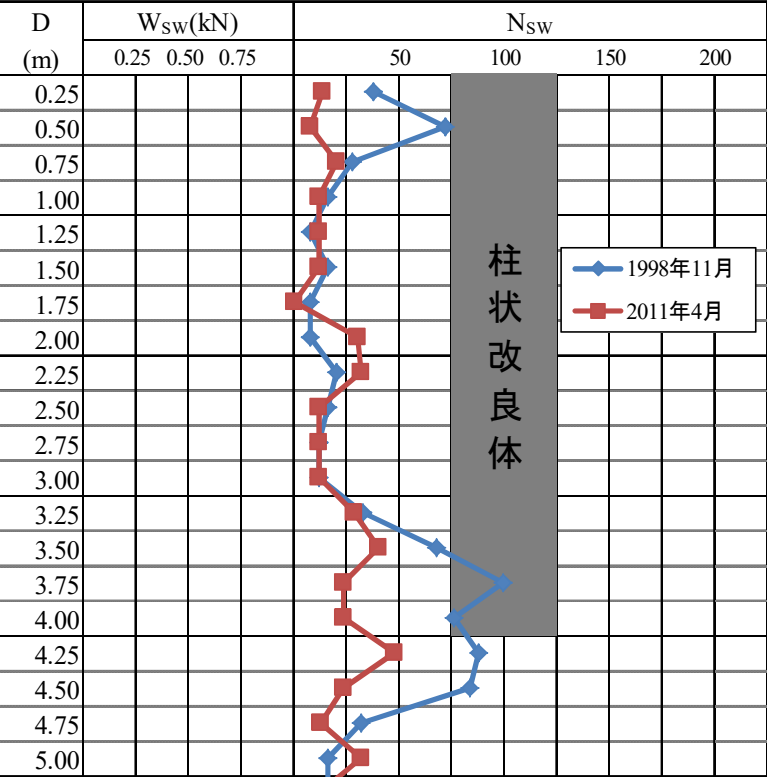
# 液状化前後のSWSの比較 浦安市の液状化被害例



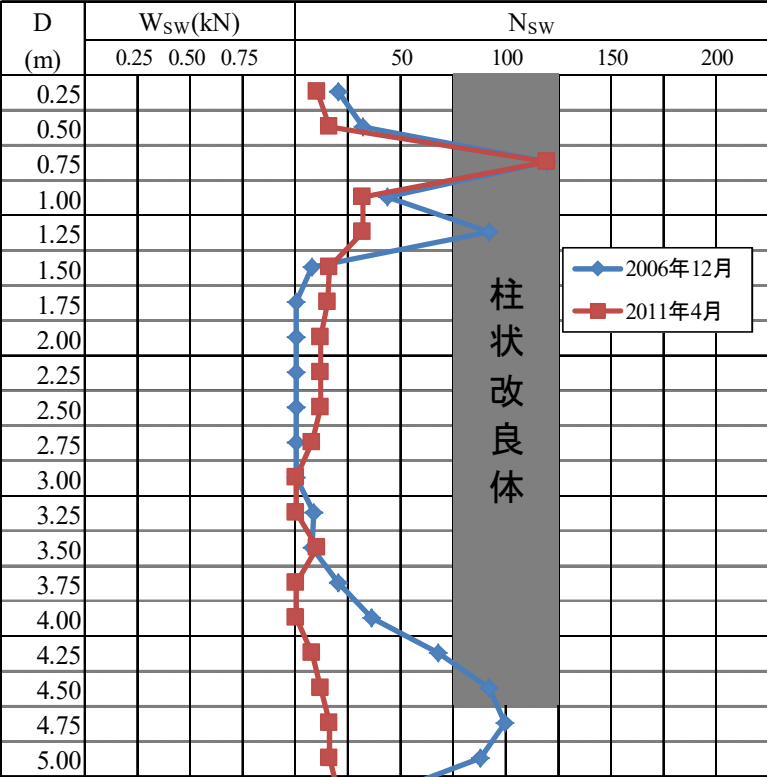
報国エンジニアリング提供

# 地盤改良された箇所の地震前後のSWSの比較 浦安市の液状化被害例

No.22 べた基礎



No.42 べた基礎



# 液状化強度の測定：繰返し三軸圧縮試験機

株式会社セイコー所有、6連



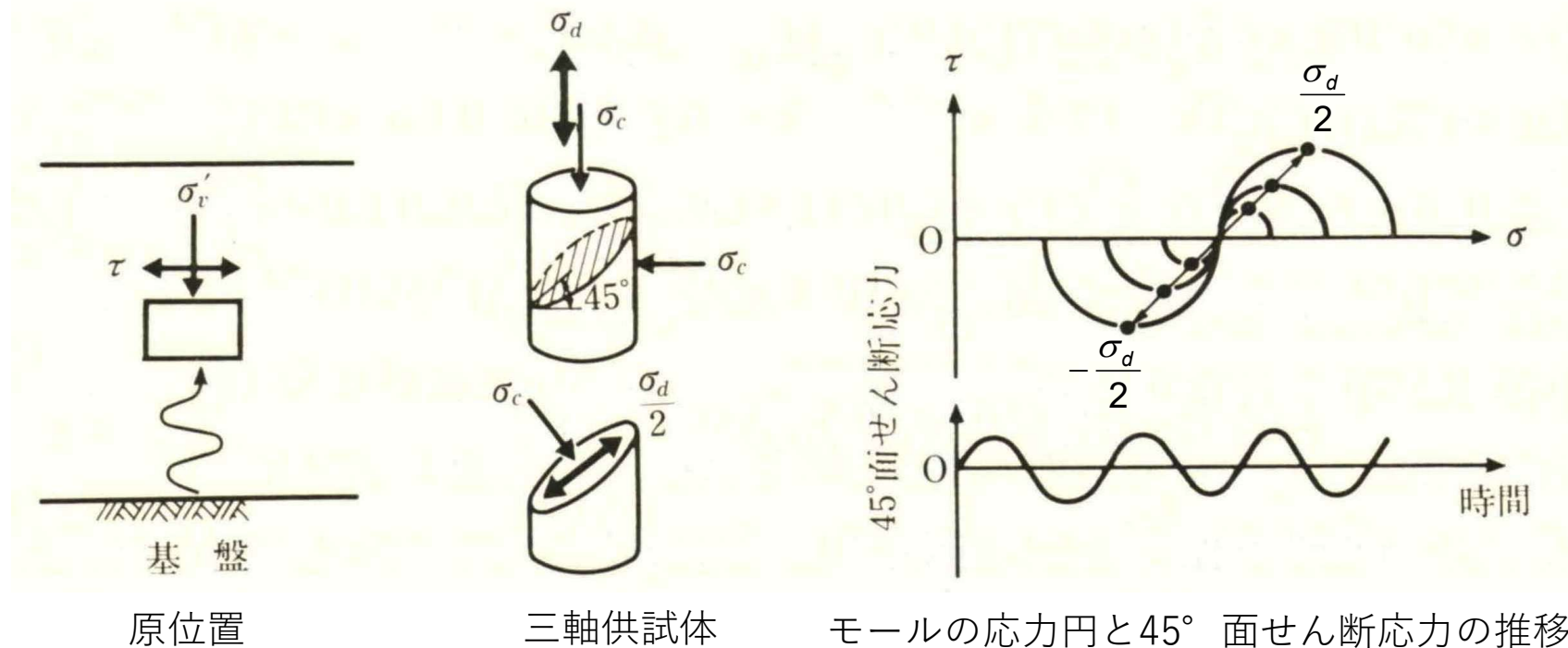
- ・液状化強度試験
- ・繰返しせん断変形試験
- ・ニューマーク法斜面変形解析 対応試験



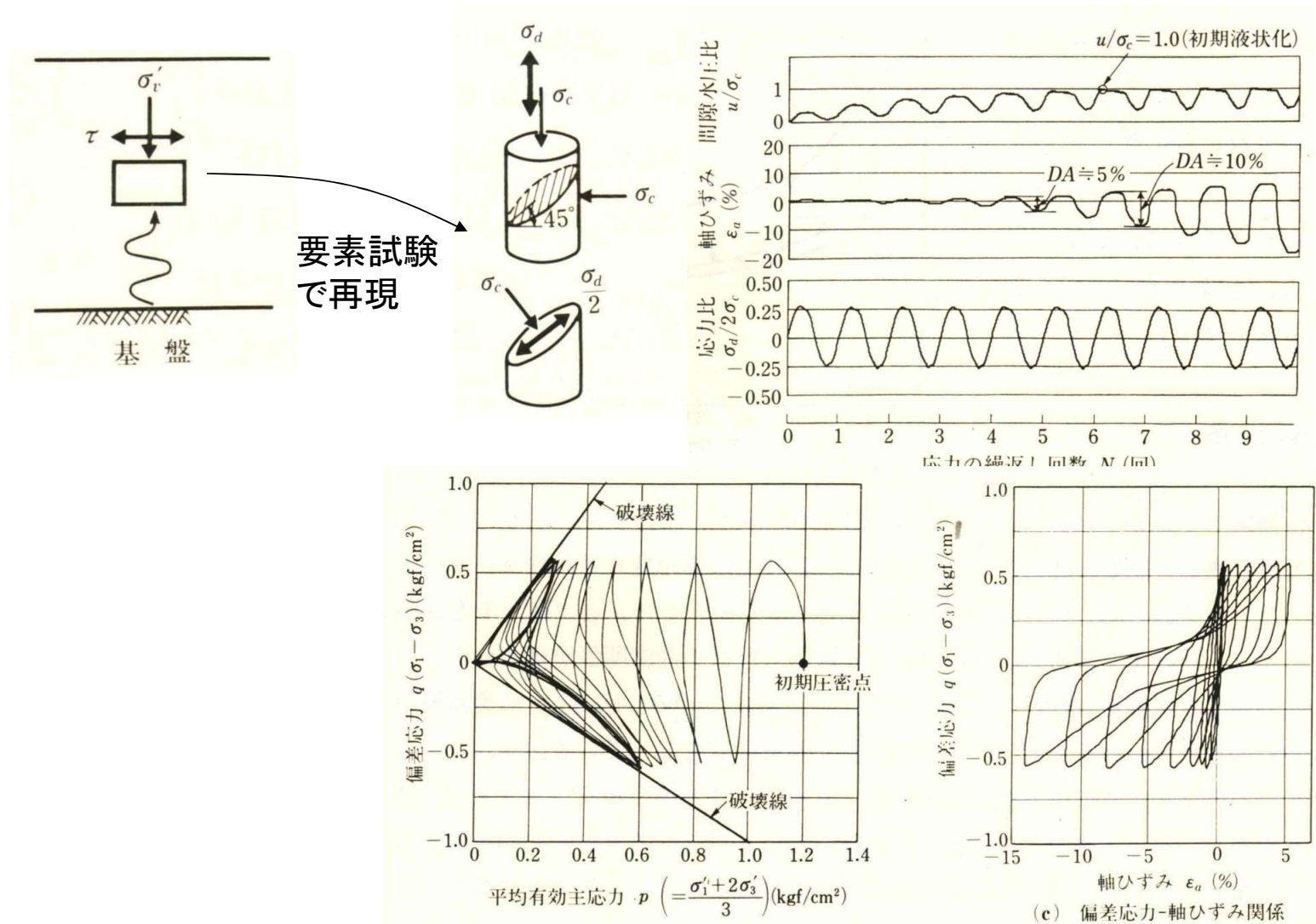
# 液状化強度の測定

## 非排水繰返し三軸圧縮試験

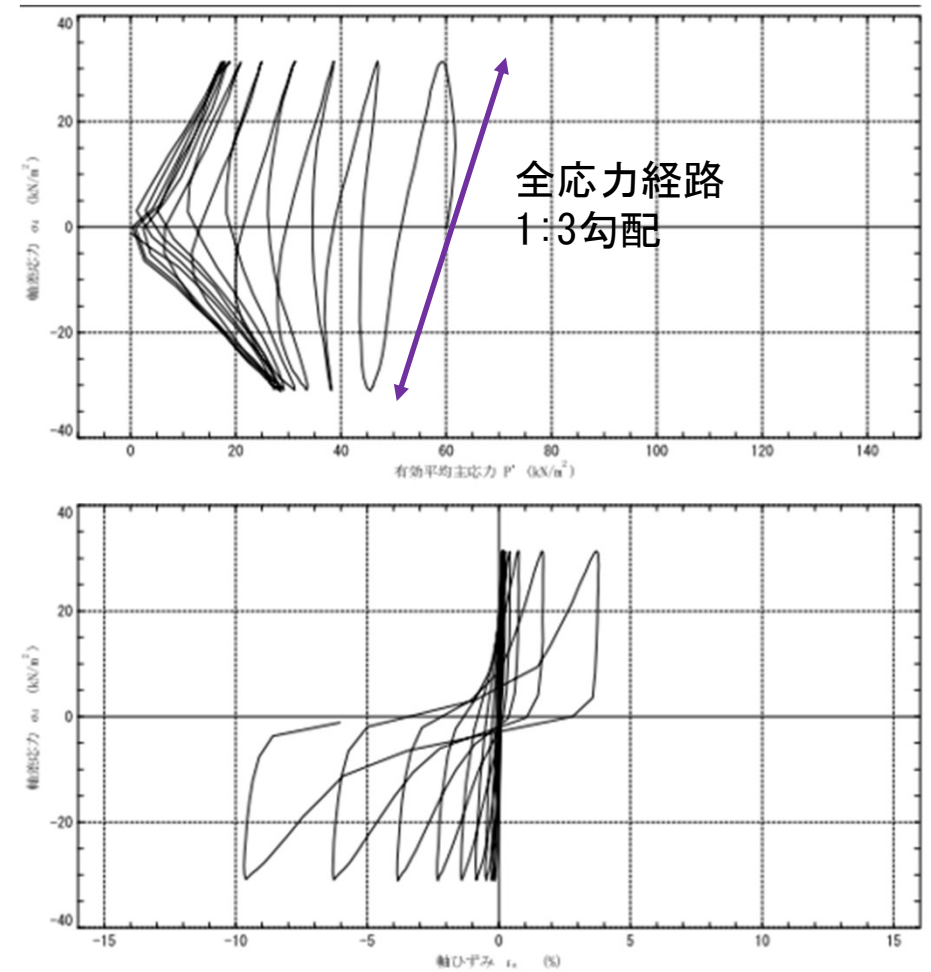
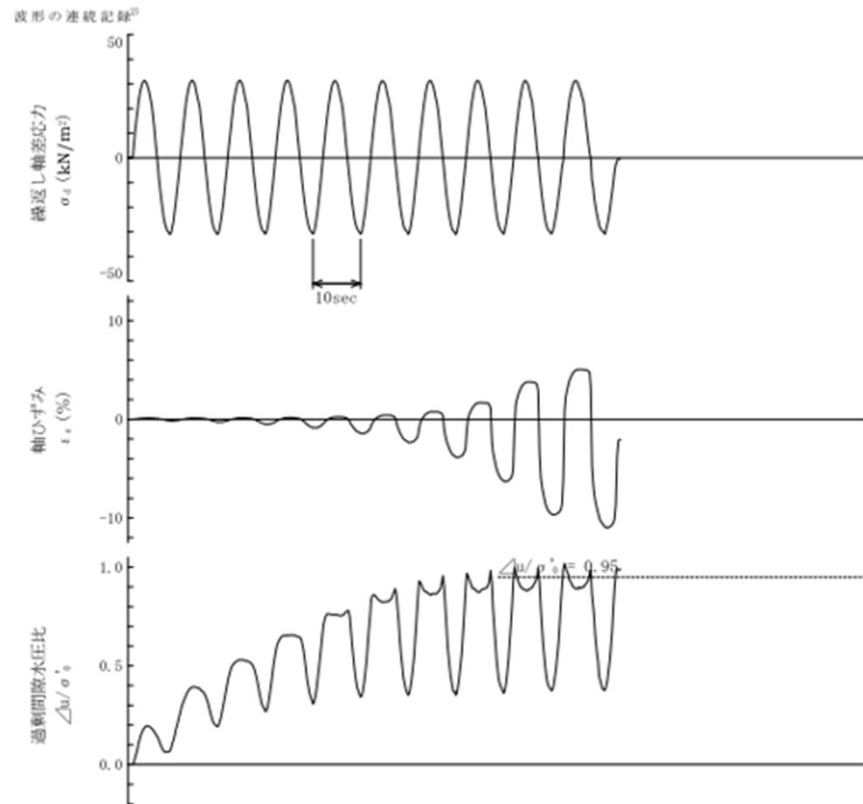
繰返し三軸圧縮試験における応力変化 側圧一定で軸圧変化



# 非排水繰返し三軸圧縮試験（液状化試験）

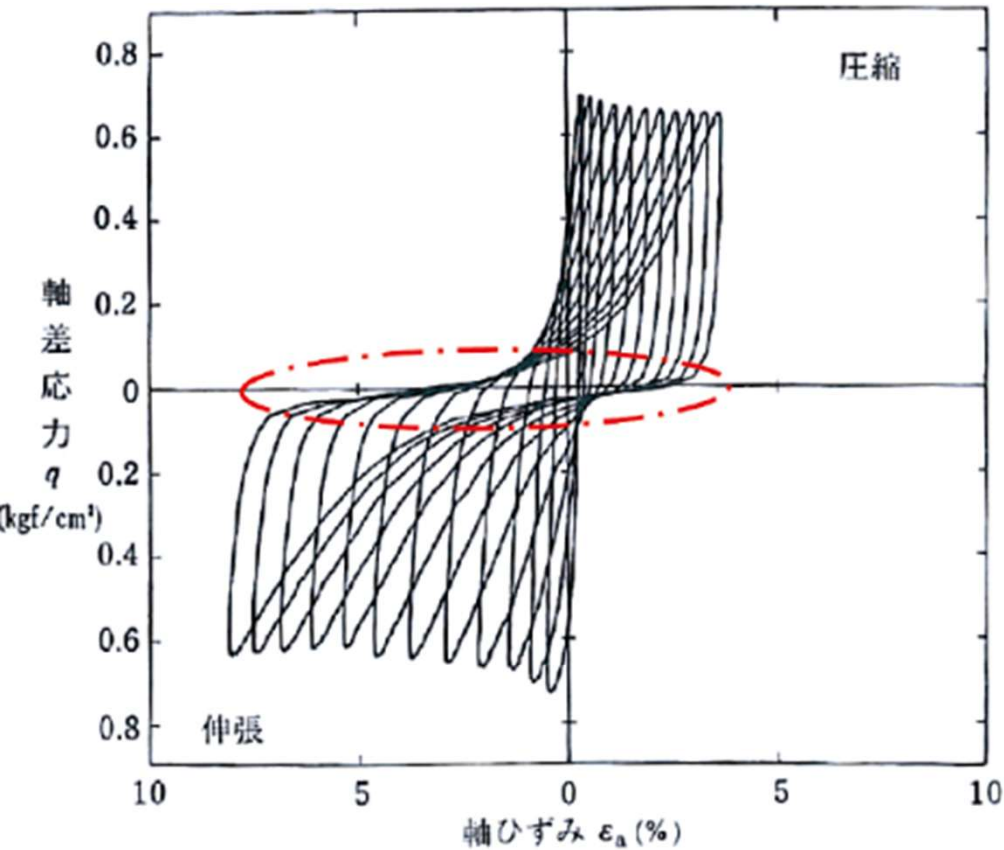


# 非排水繰返し三軸せん断試験

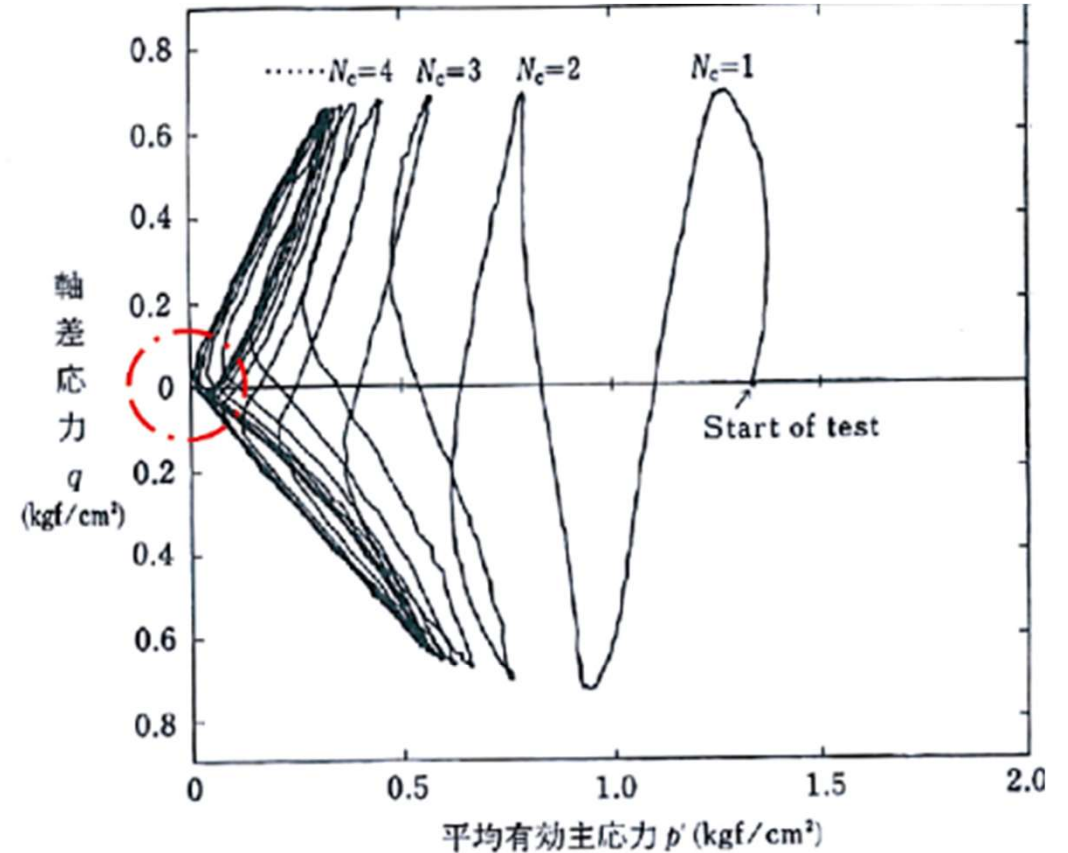


有効平均応力  $p' = p - u$ 、平均応力  $p = (\sigma_a + 2\sigma_r)/3$ 、軸差応力  $q = \sigma_a - \sigma_r$

有効応力0のところで、軸ひずみが急増する



応力～ひずみ曲線の例

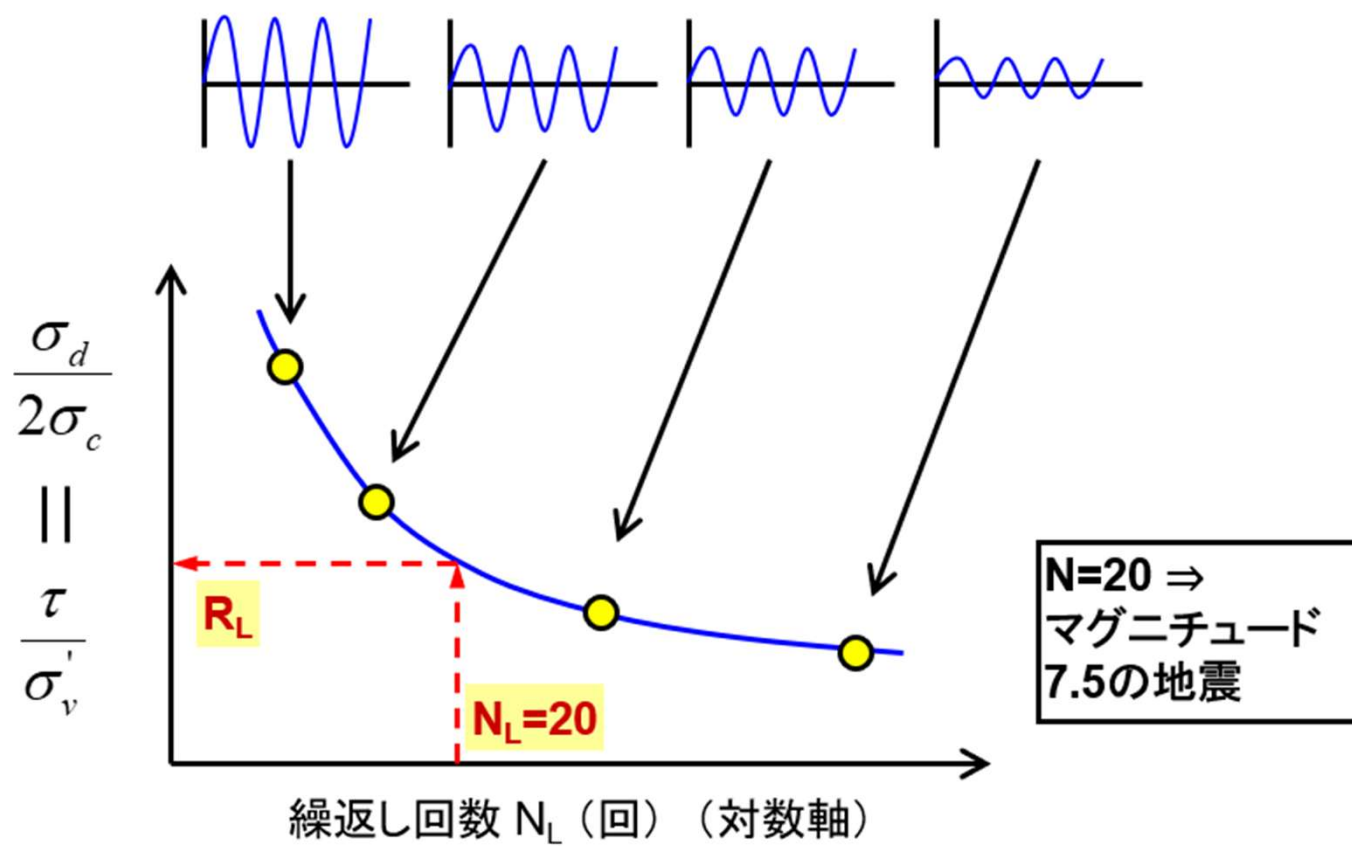


有効応力経路の例

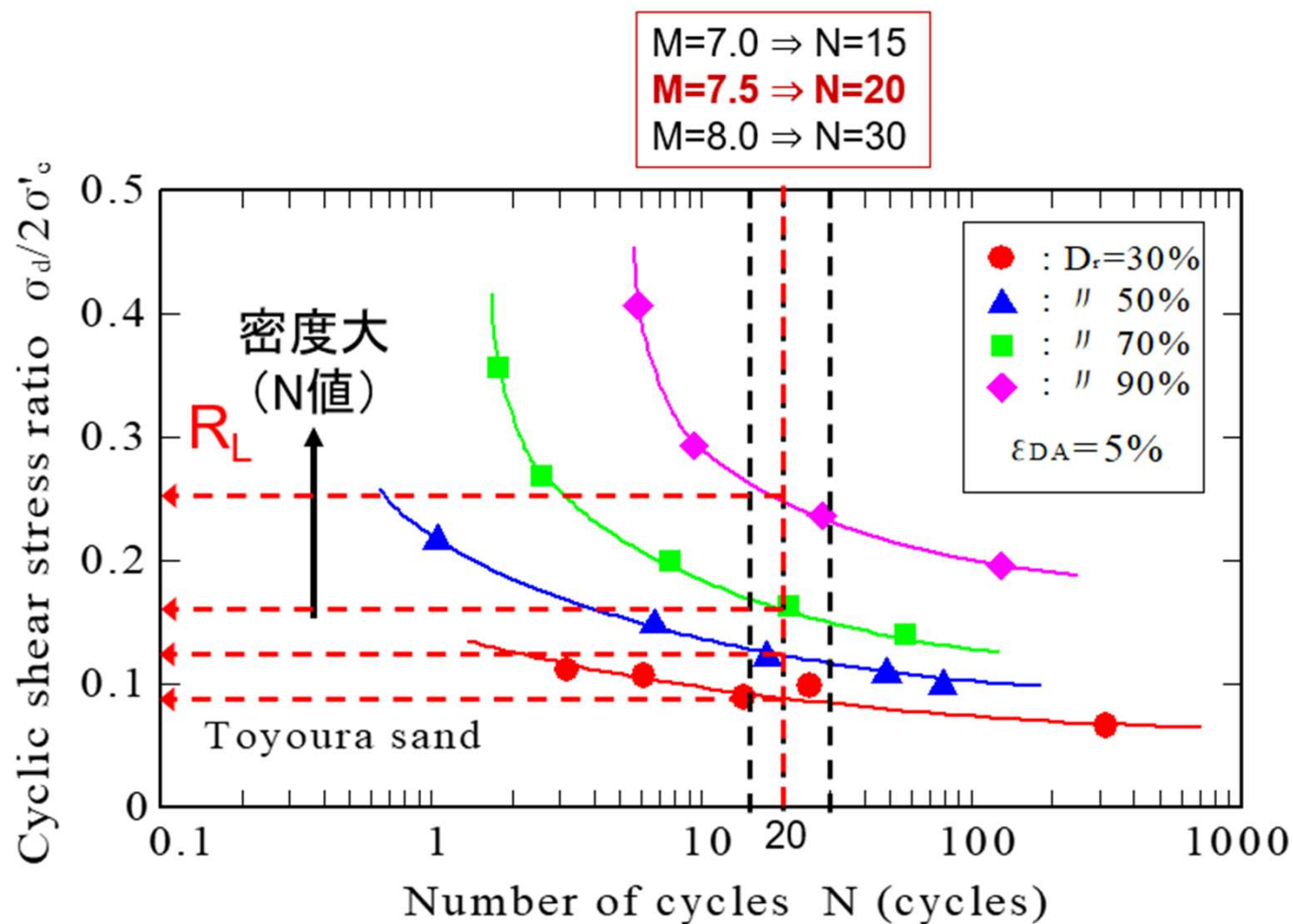
繰返し三軸試験の軸差応力～軸ひずみの関係と有効応力経路の例<sup>2)</sup>

有効平均応力  $p' = p - u$ 、平均応力  $p = (\sigma_a + 2\sigma_r)/3$ 、軸差応力  $q = \sigma_a - \sigma_r$

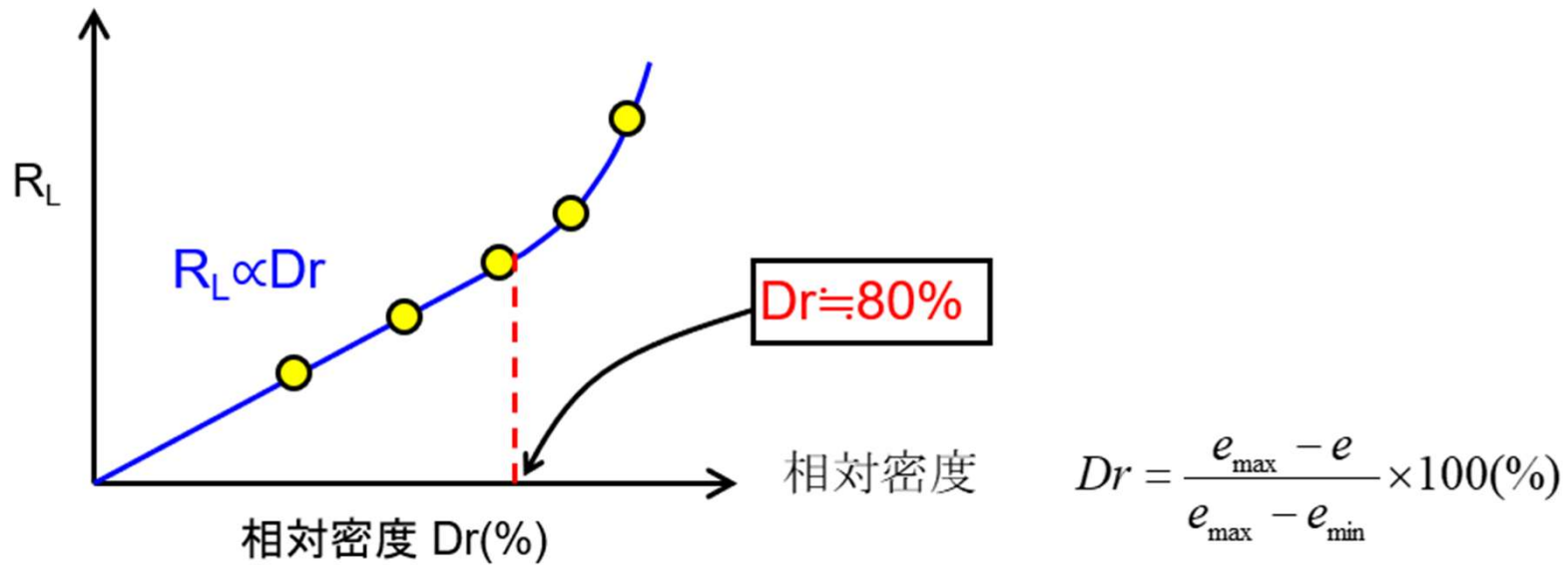
## 液状化強度比 $R_L$



# 液状化強度に及ぼす密度の影響



# 液状化強度比と相対密度の関係



$$R_L \propto Dr \quad (Dr < 80\%)$$

Meyerhofの式

相対密度 $Dr$ と $N$ 値との相関式

$$Dr = 21 \sqrt{\frac{N}{\sigma'_v + 0.7}} \quad (\%)$$

↑  
(kgf/cm<sup>2</sup>)

## 液状化の判定方法（FL法）

---

液状化に対する抵抗率 $F_L$ を求め、この値が1.0以下の土層については液状化が生じると判定する。

$$F_L = \frac{R}{L}$$

ここに、

R: 動的せん断強度比

L: 地震時せん断応力比

FL法の原著

H. Bolton Seed  
I. M. Idriss

REPORT NO.  
EERC 70-9  
November 1970

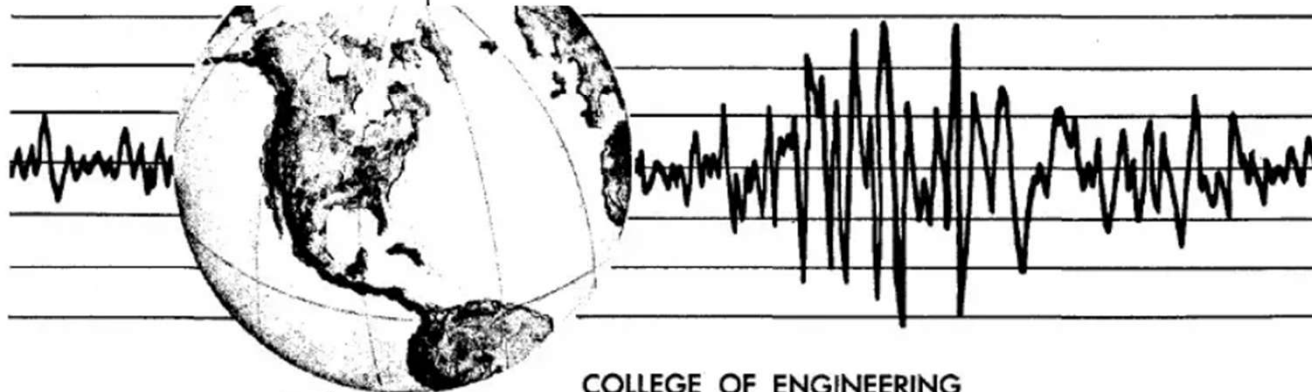
EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH CENTER

**A SIMPLIFIED PROCEDURE  
FOR EVALUATING  
SOIL LIQUEFACTION POTENTIAL**

by

H. BOLTON SEED

I. M. IDRIS



REPRODUCED BY  
NATIONAL TECHNICAL  
INFORMATION SERVICE  
U. S. DEPARTMENT OF COMMERCE  
SPRINGFIELD, VA. 22161

COLLEGE OF ENGINEERING  
UNIVERSITY OF CALIFORNIA • Berkeley, California

# 液状化の予測法 $F_L$ 法

(道路橋示方書、1980～1996)

$$F_L = R/L$$

R : 動的せん断強度比  
L : 地震時せん断応力比

## 液状化判定対象地盤

地下水面が現地盤面から10m以内にある沖積層で、かつ現地盤面から20m以内の範囲における平均粒径 $D_{50}$ が0.02mm以上2.0mm以下の飽和砂質土層

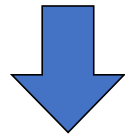
# 道路橋示方書（1996.12改定）

## 液状化判定対象地盤

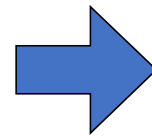
- 地下水位が現地盤面から10m以内にあり、かつ現地盤面から20m以内の深さに存在する飽和地盤
- 細粒分含有率 $F_c$ が35%以下の土層、または $F_c$ が35%を超えても塑性指数 $I_p$ が15以下の土層
- 平均粒径 $D_{50}$ が10mm以下で、かつ $D_{10}$ が1mm以下である土層

# 兵庫県南部地震以降の改訂で問題となった項目

直下型の大規模地震動  
レベル2, 地震波形(タイプ)



- 密な砂質土
  - 細粒土を多く含む土
  - 礫質土
- (液状化強度大)



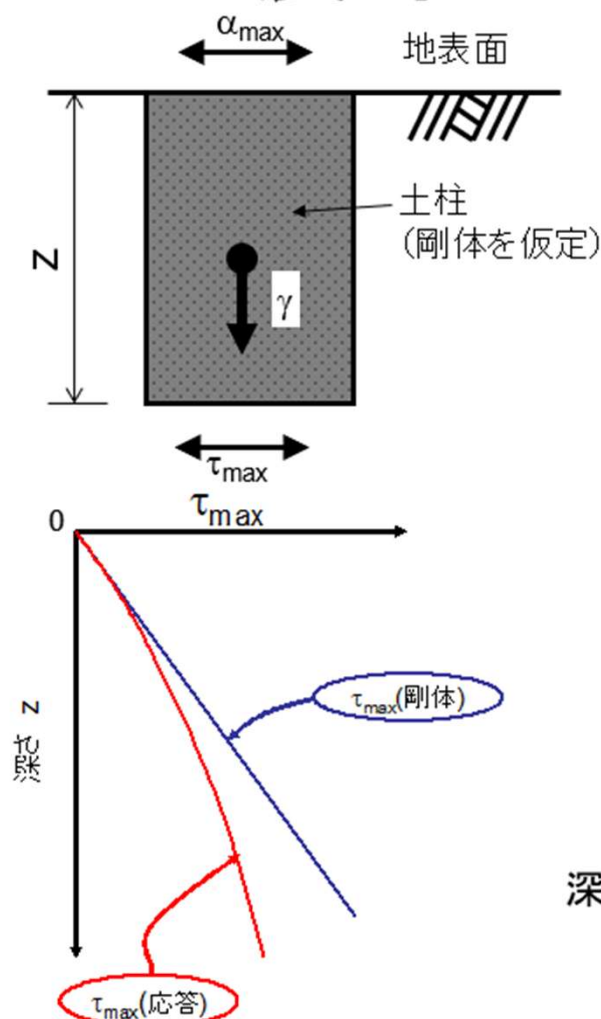
- 規定ひずみ量
  - 繰返し回数
- (液状化強度異なる)

# 道路橋示方書、2012年3月改定

以下の3つの条件のすべてに該当する沖積層の土層は、液状化の判定を行わなければならない。

- ①地下水位が地表面から10m以内にあり、かつ地表面から20m以内の深さに存在する飽和土層
- ②細粒分含有率FCが35%以下の土層またはFCが35%を超えても塑性指数IPが15以下の土層
- ③50%粒径 $D_{50}$  が10mm以下で、かつ10%粒径 $D_{10}$ が1mm以下である土

# 地震時せん断応力比 $L$ の算定



地盤は剛体と仮定

$$\tau_{\max} = \frac{\gamma \cdot Z}{g} \cdot \alpha_{\max} = \frac{\sigma_v}{g} \cdot \alpha_{\max} \leftarrow \text{外力}$$

$$\frac{\tau_{\max}}{\sigma_v} = \frac{\sigma_v}{\sigma_v} \cdot \frac{\alpha_{\max}}{g} \leftarrow \text{剛体の応力比}$$

応答解析の応力比

$$L = \frac{\tau_{\max}}{\sigma_v} = r_d \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma_v} \cdot \frac{\alpha_{\max}}{g} = r_d \cdot k_s \frac{\sigma_v}{\sigma_v}$$

震度:  $k_s = \alpha_{\max} / g$

低減係数:  $r_d = 1.0 - 0.015 z$

深さ方向の低減係数

$$r_d = \frac{\tau_{\max}(\text{応答})}{\tau_{\max}(\text{剛体})}$$

# 地震外力の求め方

地震外力 $L$ は次式によって求める。

$$L = r_d \cdot K_{hgL} \cdot \sigma_v / \sigma'_v$$

ここに、

$r_d$ : 地震時せん断応力比の深さ方向の低減係数( $=1-0.015z$ )

$K_{hgL}$ : 地盤面における設計水平震度

$\sigma_v$  : 地表面からの深度の全上載圧( $\text{kN/m}^2$ )

$\sigma'_v$  : 地表面からの深度の有効上載圧( $\text{kN/m}^2$ )

液状化判定用の設計水平震度は、レベル1およびレベル2地震動の設計震度を用いる。

$$K_{hgL} = C_Z \cdot K_{hgL0}$$

ここに、

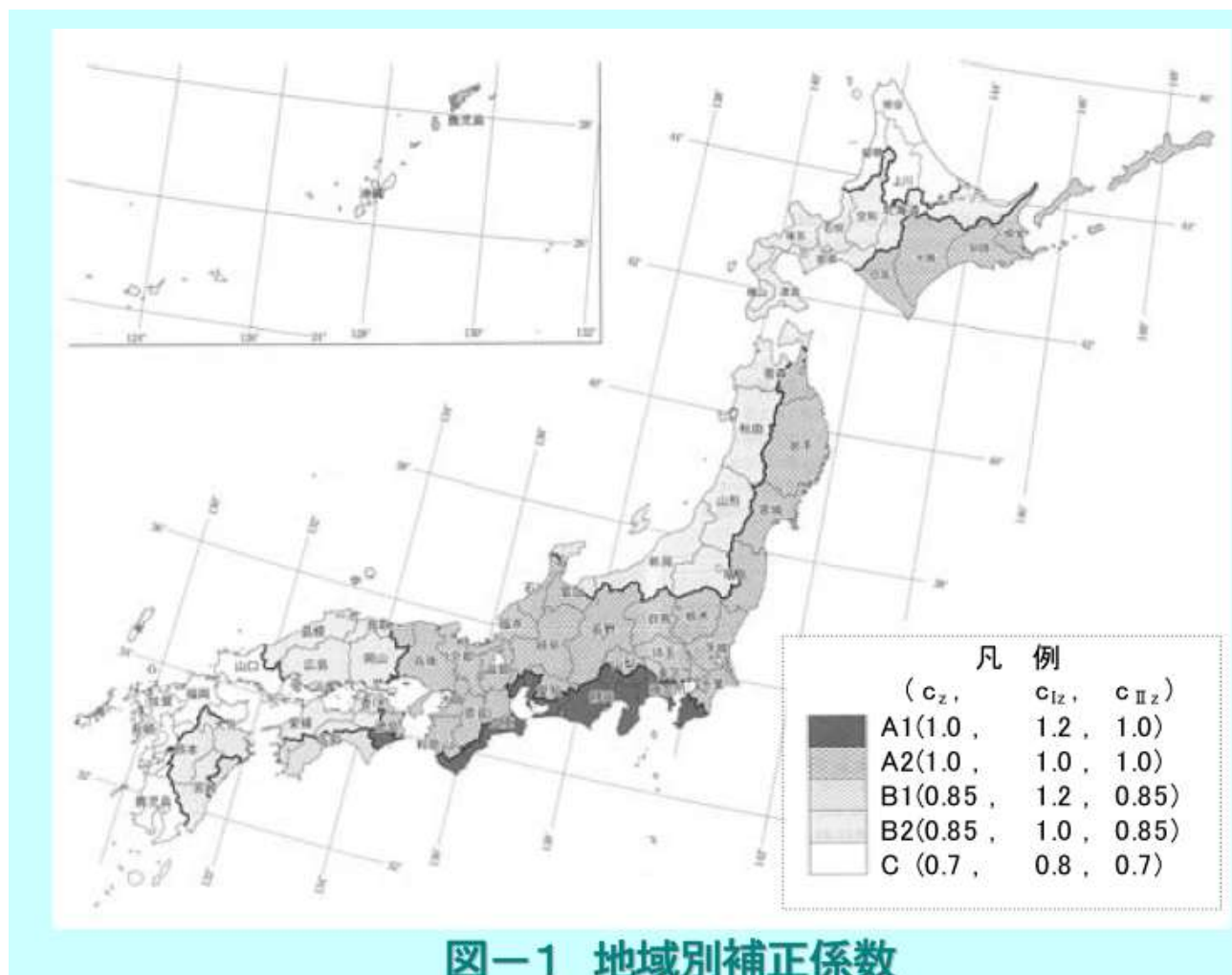
$C_Z$ : 地域別補正係数

$C_Z$ : レベル1地震動の地域別(0.7, 0.85, 1.0)

$C_{IZ}$ : レベル2地震動(タイプ I)の地域別(0.8, 1.0, 1.2)

$C_{IIZ}$ : レベル2地震動(タイプ II)の地域別(0.7, 0.85, 1.0)

# 地震外力の求め方



# 地震外力の求め方

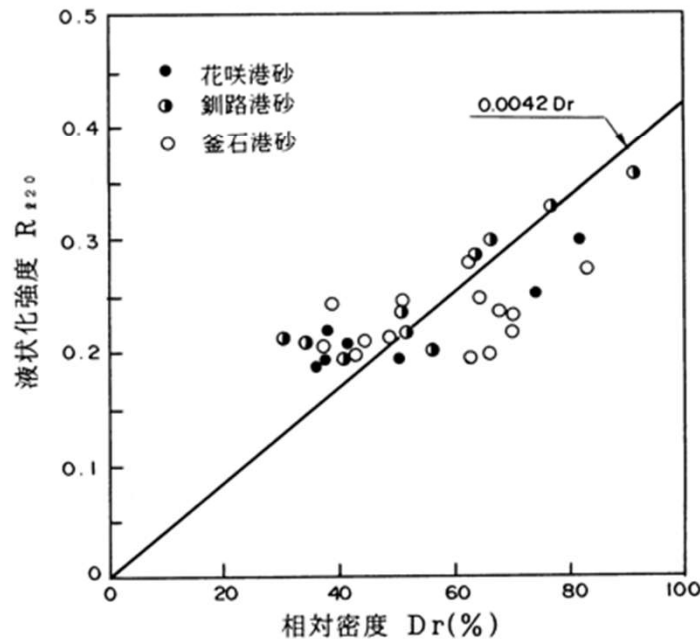
表ー2 液状化判定用設計水平震度の標準値  $K_{hgL0}$

	レベル1 地震動	レベル2地震動	
		タイプ I	タイプ II
I 種地盤	0.12	0.50	0.80
II 種地盤	0.15	0.45	0.70
III 種地盤	0.18	0.40	0.60

地震動		$K_{hgL}$ の範囲
レベル1	－	0.084～0.18
レベル2	タイプ I	0.32～0.60
	タイプ II	0.42～0.80

レベル2 地震動 { タイプ I : プレート境界型巨大地震  
タイプ II : 内陸直下型地震

# Rの算定法 液状化強度と相対密度の関係 (石原、1977)



砂の液状化強度(繰返し回数20回)は砂の相対密度に対して比例関係が成り立つ

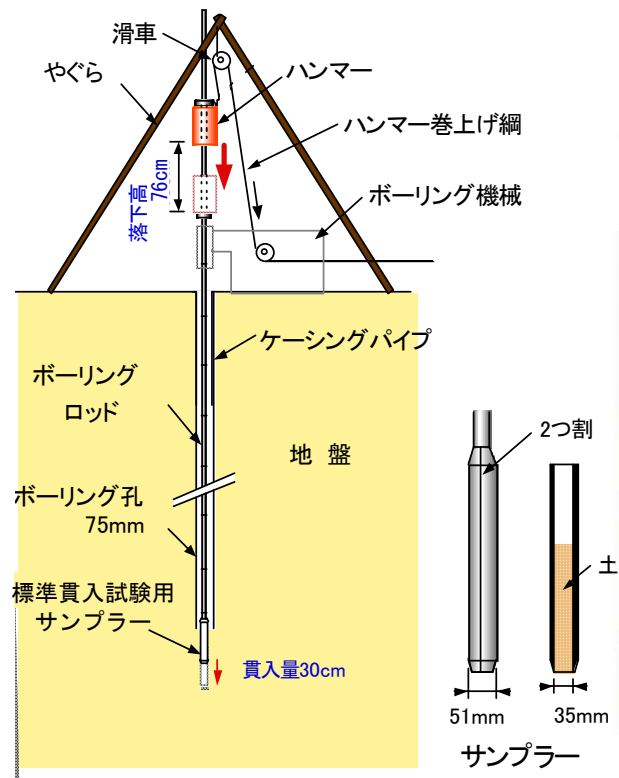
$$\begin{aligned} R1 &= 0.0042 \cdot Dr \\ &= 0.0042 \cdot 21 \sqrt{\frac{N}{0.7 + \sigma'_v}} \\ &= 0.0882 \sqrt{\frac{N}{0.7 + \sigma'_v}} \end{aligned}$$

$$Dr(\%) = 21 \sqrt{\frac{N}{\sigma'_v + 0.7}} \quad (\text{Meyerhofの式})$$

\* $\sigma'_v$ (kgf/cm<sup>2</sup>)

# 標準貫入試験＋粒度試験

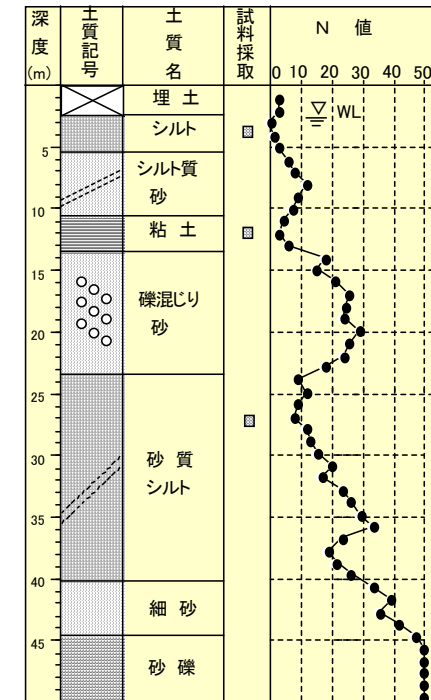
試験装置



試験風景



試験結果



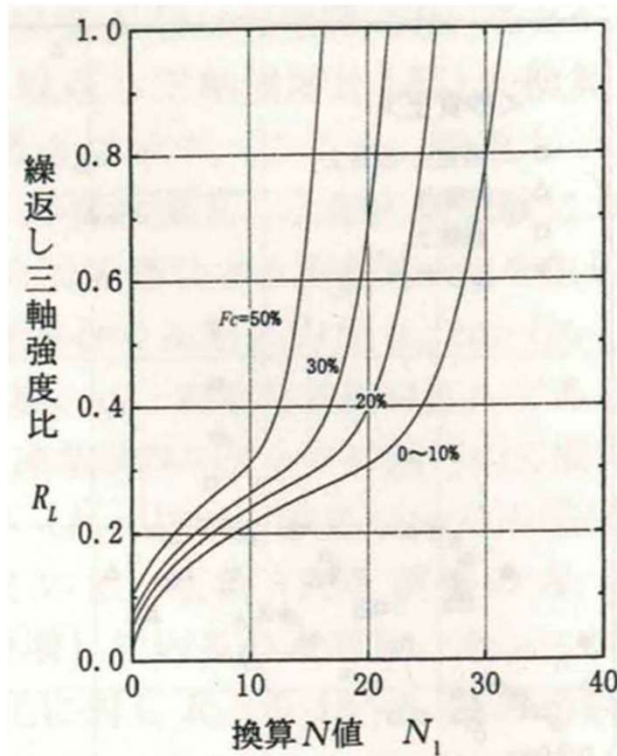
## 粒度特性による砂質土の $R_L$ と $N_1$ 値の関係の補正 (松尾、2004)

$$R_L = R_0 (c_1(Fc) \cdot N_1 + c_2(Fc))$$

$R_0$  : 換算 $N$ 値の関数で表した $R_L$

$$R_L = 0.0882 \sqrt{Na/1.7} \quad (Na \geq 14)$$

$$= 0.882 \sqrt{Na/1.7} + 1.57 \times 10^{-6} \cdot (N_1 - 14)^{4.5} \quad (Na < 14)$$



$Na$  : 粒度特性について補正された $N_1$ 値

$$Na = c_1 \cdot N_1 + c_2$$

$c_1, c_2$  : 粒度特性による $N_1$ 値の補正項

$$c_1 = \begin{cases} 1 & (0\% \leq Fc < 10\%) \\ (Fc + 40)/50 & (10\% \leq Fc < 60\%) \\ Fc/20 - 1 & (60\% \leq Fc) \end{cases}$$

$$c_2 = \begin{cases} 0 & (0\% \leq Fc < 10\%) \\ (Fc - 10)/18 & (10\% \leq Fc) \end{cases}$$

液状化強度は $N$ 値と細粒分含有率が増加するほど増加する。  
ここで、細粒分は塑性を有する粘性土、非塑性シルトには適用できない。

# 液状化強度Rの求め方

基礎地盤コンサルタンツ(株)HP

動的せん断強度比Rは次式によって求める。

$$R = C_W \cdot R_L$$

表-1  $C_W$ :地震動特性による補正係数

地震動		$C_W$	
レベル1	-	1.0	
	タイプ I		
レベル2	タイプ II	1.0	$(R_L \leq 0.1)$
		$3.3 R_L + 0.67$	$(0.1 < R_L \leq 0.4)$
		2.0	$(0.4 < R_L)$

$C_W$ は、K0補正  
と波形補正の  
積

繰返し三軸強度比 $R_L$ は次式で算出する。

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

ここに、 $N_a$ : 粒度の影響を考慮した補正N値

# 液状化強度の求め方

---

## 砂質土の場合

$$N_a = C_1 \cdot N_1 + C_2$$

$$N_1 = 170 \cdot N / (\sigma_{vb}' + 70)$$

$$C_1 = \begin{cases} 1 & (0\% \leq FC < 10\%) \\ (FC + 40)/50 & (10\% \leq FC < 60\%) \\ FC/20 - 1 & (60\% \leq FC) \end{cases}$$

$$C_2 = \begin{cases} 0 & (0\% \leq FC < 10\%) \\ (FC - 10)/18 & (10\% \leq FC) \end{cases}$$

# 非塑性細粒分を含む砂の例

細粒分有無のしらすと秋穂砂の顕微鏡写真



原粒度しらす



細粒分を除去したしらす

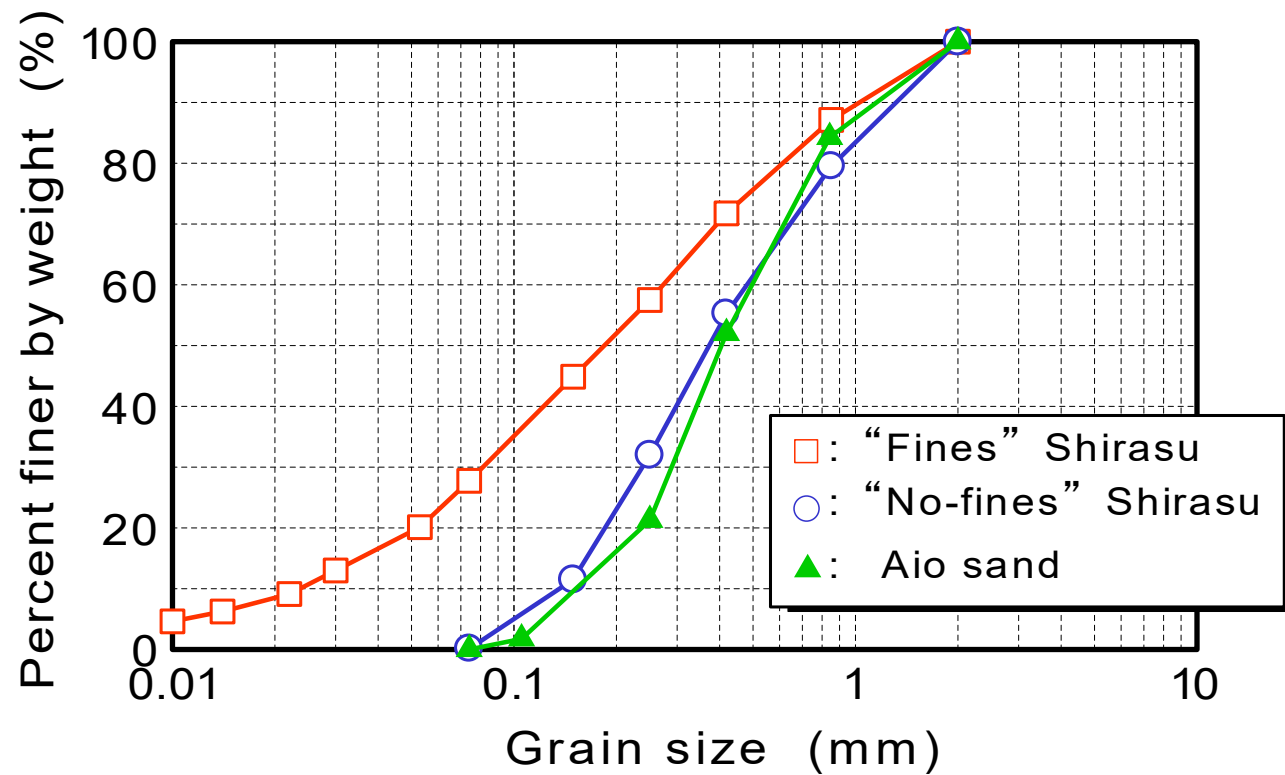
しらすは母岩が  
風化した非塑性  
の細粒分を含ん  
でいる。



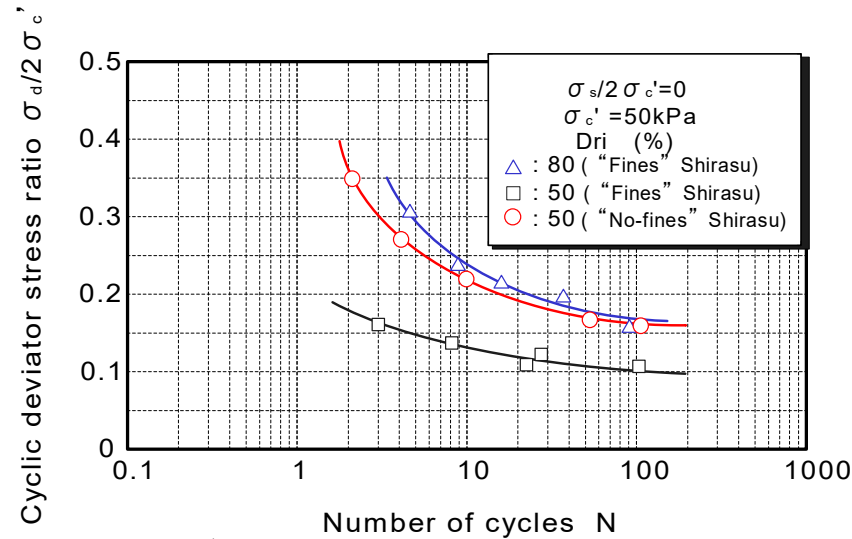
秋穂砂

## 細粒分有無のしらすと秋穂砂の物理的性質

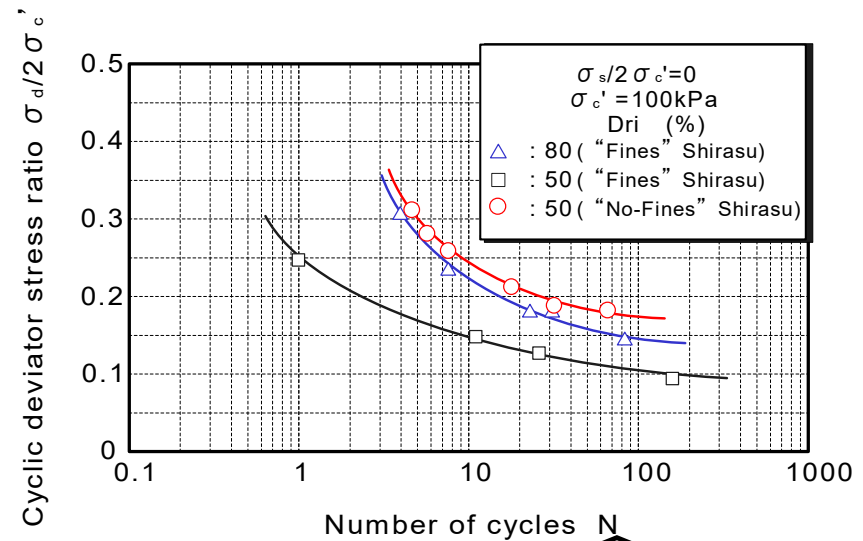
	$\rho_s$	$e_{\max}$	$e_{\min}$	$U_c$
“Fines” Shirasu	2.489	1.494	0.775	11.75
“No-fines” Shirasu	2.307	1.551	1.027	3.35
Aio sand	2.633	0.958	0.582	2.74



細粒分有無のしらすの相対密度 $D_r=50, 80\%$ , 拘束圧 $\sigma_c=50, 100\text{kPa}$ の拘束圧下における液状化強度曲線



$\sigma_c' = 50\text{kPa}$

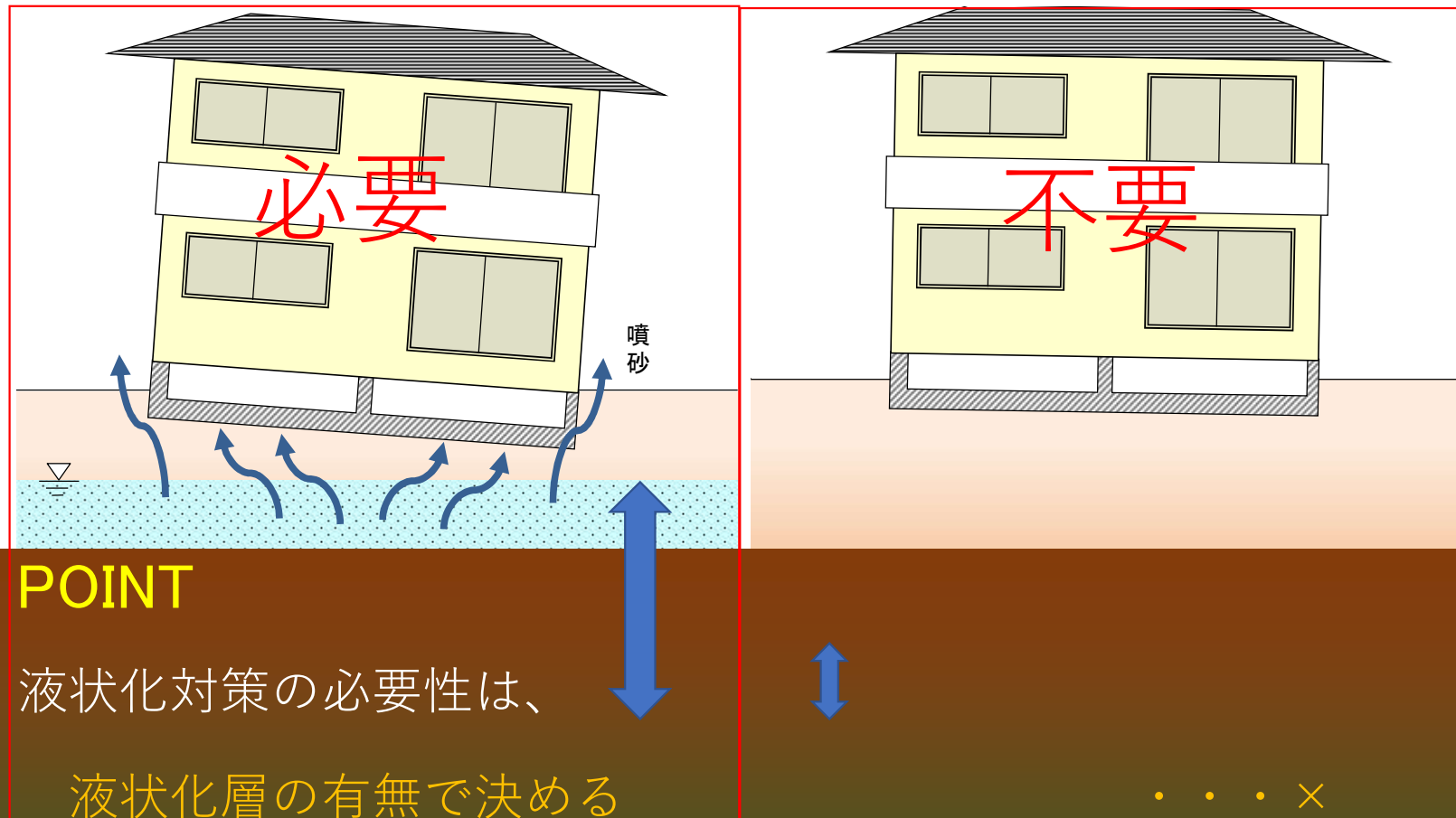


$\sigma_c' = 100\text{kPa}$

しらすは細粒分含有率が高い方が液状化強度は低い。まさ土も同じ傾向。⇒非塑性細粒分は液状化しやすい。

# 戸建て住宅の液状化対策の必要性

63



地表面（建物）への影響度合いで決める ... ○

- 法令、基準類で対象としている液状化地盤

■ 建築基準法施行令第93条（地盤及び基礎ぐい）の  
解説（2007年版建築物の構造関係技術基準解説書）

液状化のおそれのある地盤は、概ね、

- イ. 地表面から20m以内の深さにあること
- ロ. 砂質土で粒径が比較的均一な中粒砂等からなること
- ハ. 地下水で飽和していること
- 二. N値が概ね15以下であること

■ 建築基礎構造設計指針

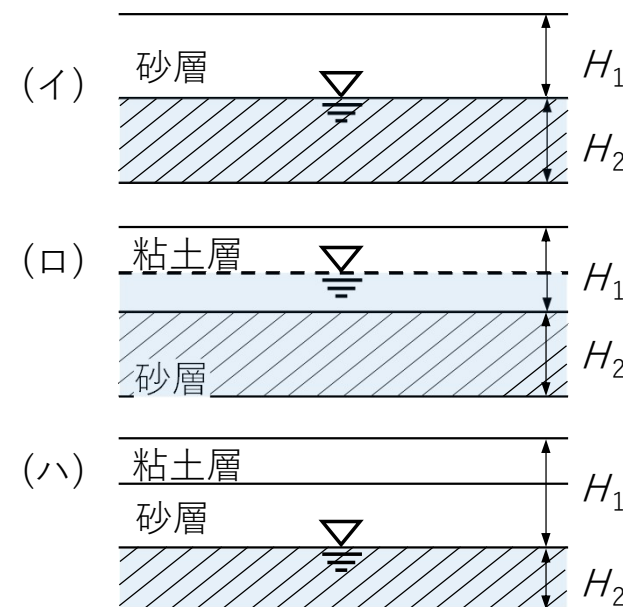
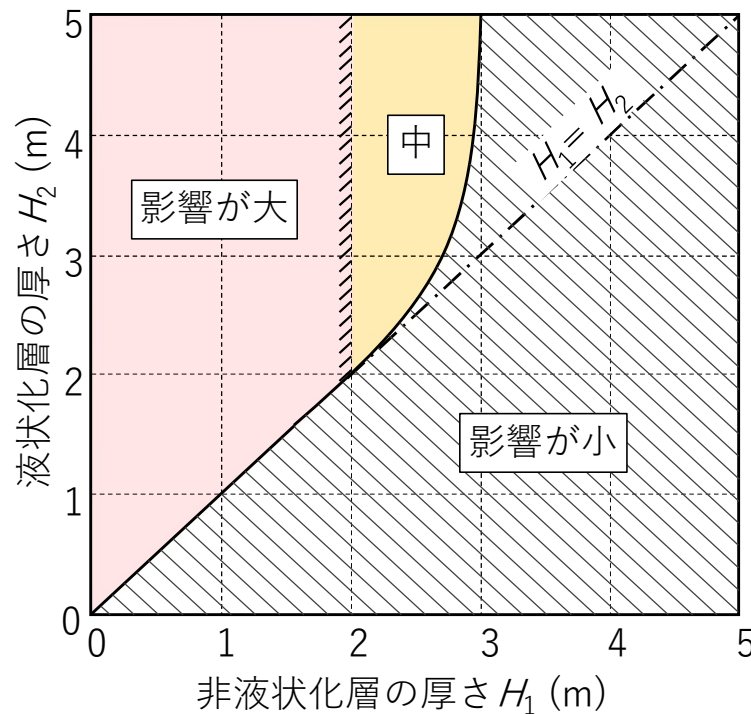
地表面から20m以浅の沖積層で細粒分含有率が35%以下の土。

- ✓ ただし、埋立地盤など人工造成地盤では、粘土分含有率が10%以下または塑性指数が15%以下の土については液状化の検討を行う。

- 現小規模指針の5mはあくまで目安、  
改定版では10mまでになる予定。

- 小規模建築物基礎設計指針の方法

液状化層厚 $H_2$ と非液状化層厚 $H_1$ による  
液状化の影響が地表面に及ぶ程度の判定（※中地震動を対象）



地下水位の情報が非常に重要

➤ 改定版では深度10mまで対象になる予定

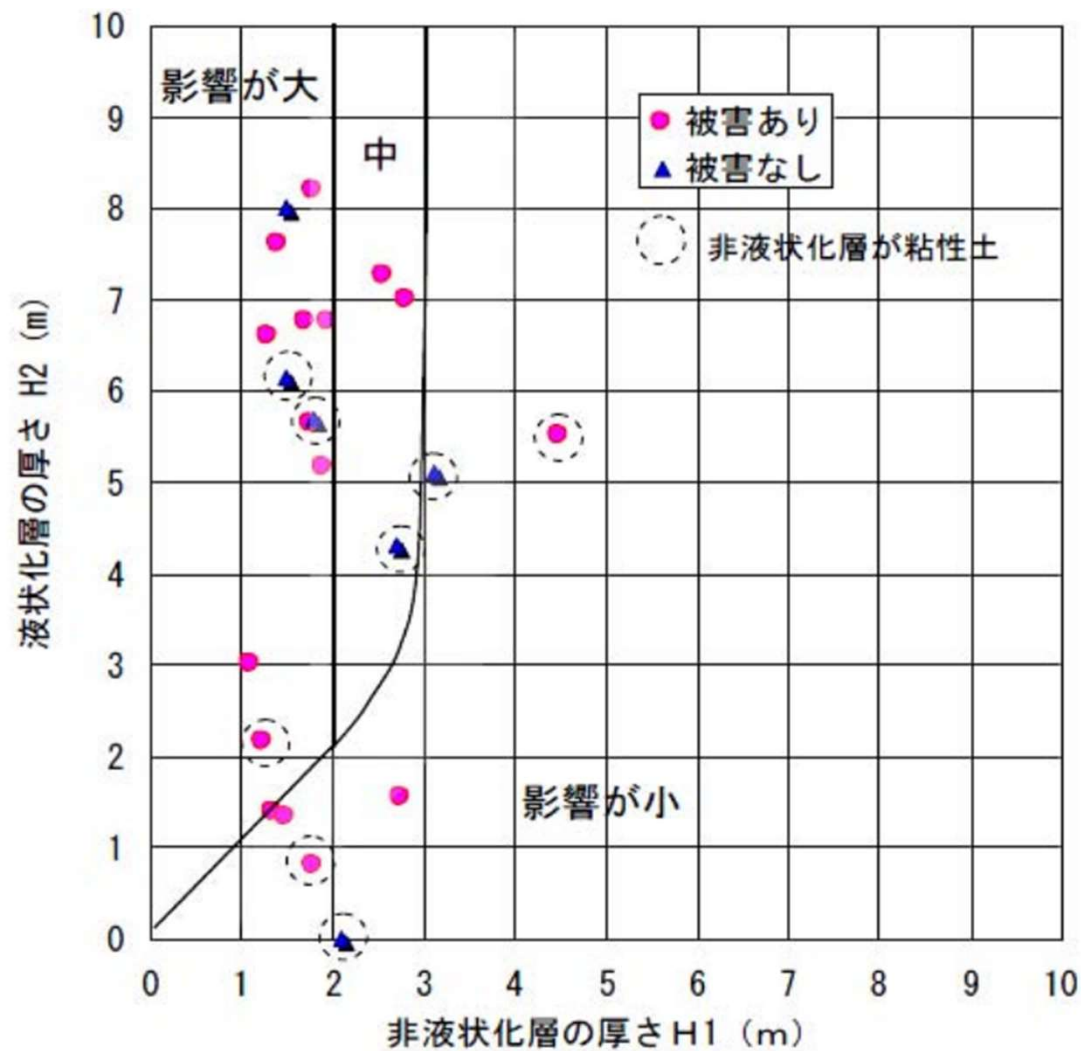


図3 検討深度10mの場合

地下水位が3mより深い砂地盤の住宅は被害が少ない

## 地下水位、非液状化層厚、液状化層厚の影響

- 地下水位が 3 m 以深で非液状化層厚が 3 m 以上の場合は液状化の被害が少ない。
- 地下水位が 5 m 以深で非液状化層厚が 5 m 以上であれば、液状化被害はほとんどない。

# 液状化対策工法

## 液状化対策の基本的な考え方

### 液状化そのものが生じないように地盤を改良する

密度増大(締固め)、置換、**地下水位低下**、間隙水圧消散の原理に基づいた工法

サンドコンパクションパイル工法、ドレーン工法、置換工法 等

### 液状化が生じても変形を何らかの方法で制御する

せん断変形抑制工法(連続地中壁, シートパイル, 深層混合処理工法 等)により、地盤の応力・変形条件を構造的にコントロールして液状化に対処する

### 液状化が生じても、構造物に被害が生じないようにする

構造的対策工法(杭基礎 等)により、液状化による側方流動を許容するが、構造物の被害を軽減する

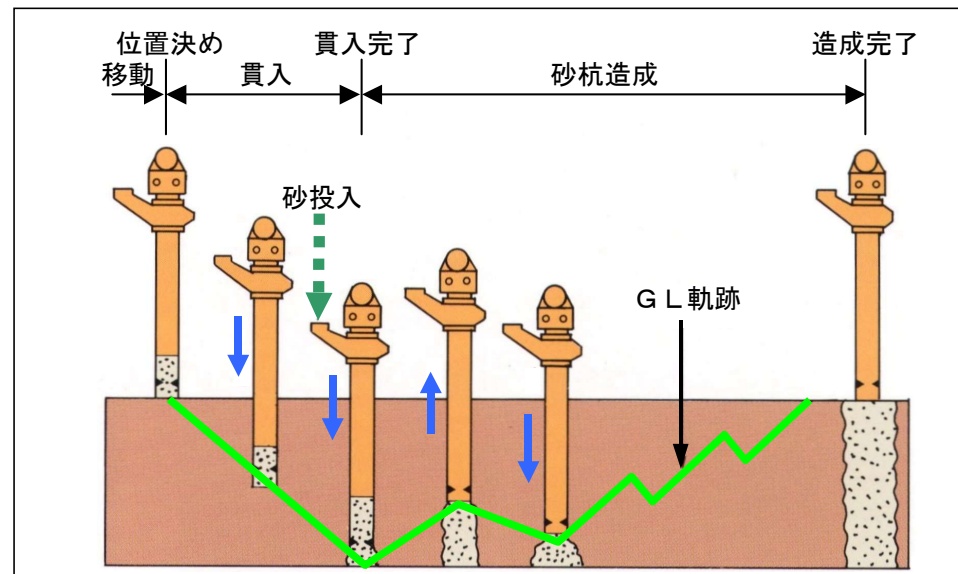
側方流動によって構造物に多少の変形が生じてもよいとする考え方で、構造物そのものに変形を許容した対策を施すものである

# サンドコンパクションパイル工法

## ■ 工法概要

サンドコンパクションパイル工法は、振動荷重などにより地盤中に砂を圧入して良く締まった砂杭を造成する。

砂質系地盤に対しては砂杭の圧入により砂杭間地盤の間隙を締固めることにより、密度の増加、水平応力の増加、構造の安定化を図る。



# 間隙水圧消散工法

## ■ 工法概要

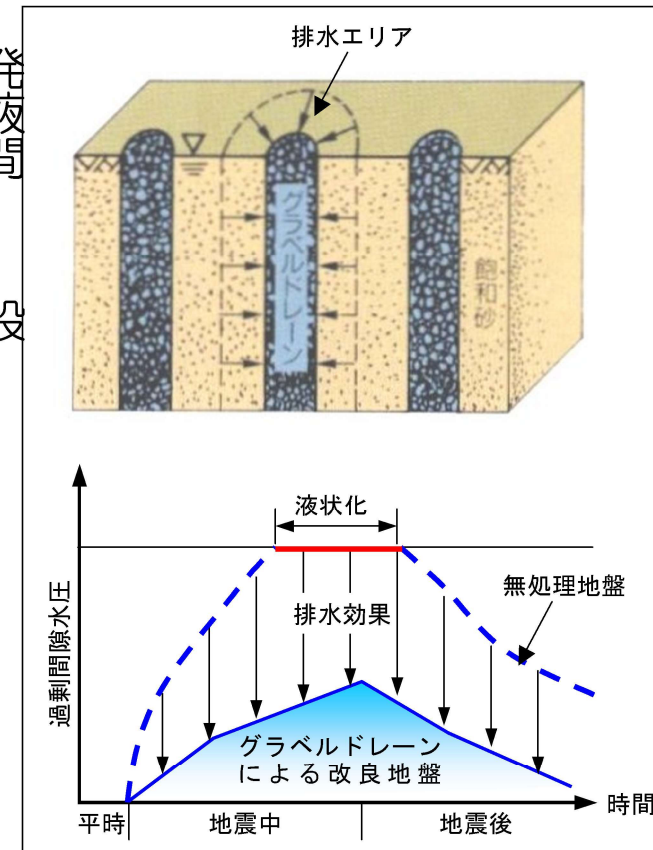
地盤内に透水性の良い砕石などのパイルを打設することにより、地震時の地盤内に発生する過剰間隙水圧を早期に消散させて、液状化の発生を抑制したり、周辺地盤からの間隙水の流入を遮断する。

締固め工法と比較して振動・騒音や近接構造物への影響が少ないのが特徴。一方で設計震度以上で液状化する可能性があるため、締固めを併用する場合もある。

設計には多くのパラメータが必要となり複雑。

## ■ 工法の種類

- ・グラベルドレーン工法
- ・パイプドレーン工法
- ・排水機能付鋼矢板工法 等



# 固結工法

---

## ■ 工法概要

砂質土にセメントなどの安定材を添加，混合，あるいは注入して液状化強度を増加させる化学安定処理工法。

土質性状に応じて安定材の添加量を設定することで任意の強度が得られるので，適用土質を選ばないという特徴があり，非常に高い強度を与えることも可能である。

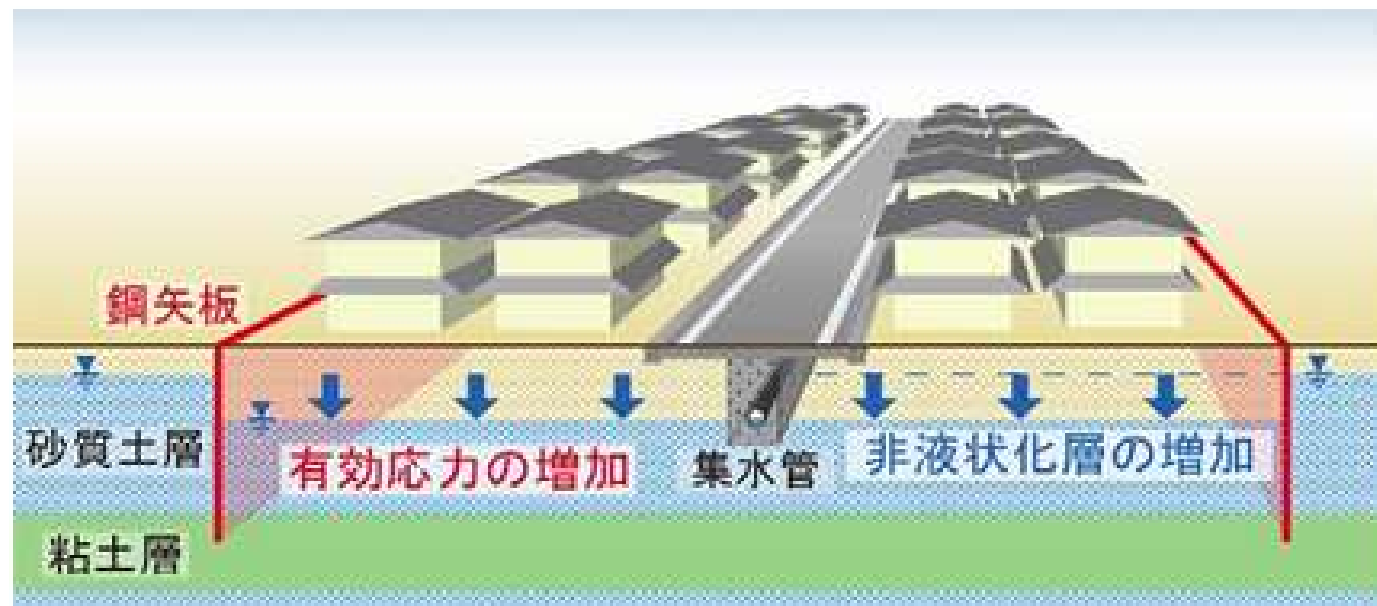
## ■ 工法の種類

- 深層混合処理工法
- 事前混合処理工法
- 注入固化工法

## 地下水位低下工法

## 広域な対策

- 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。



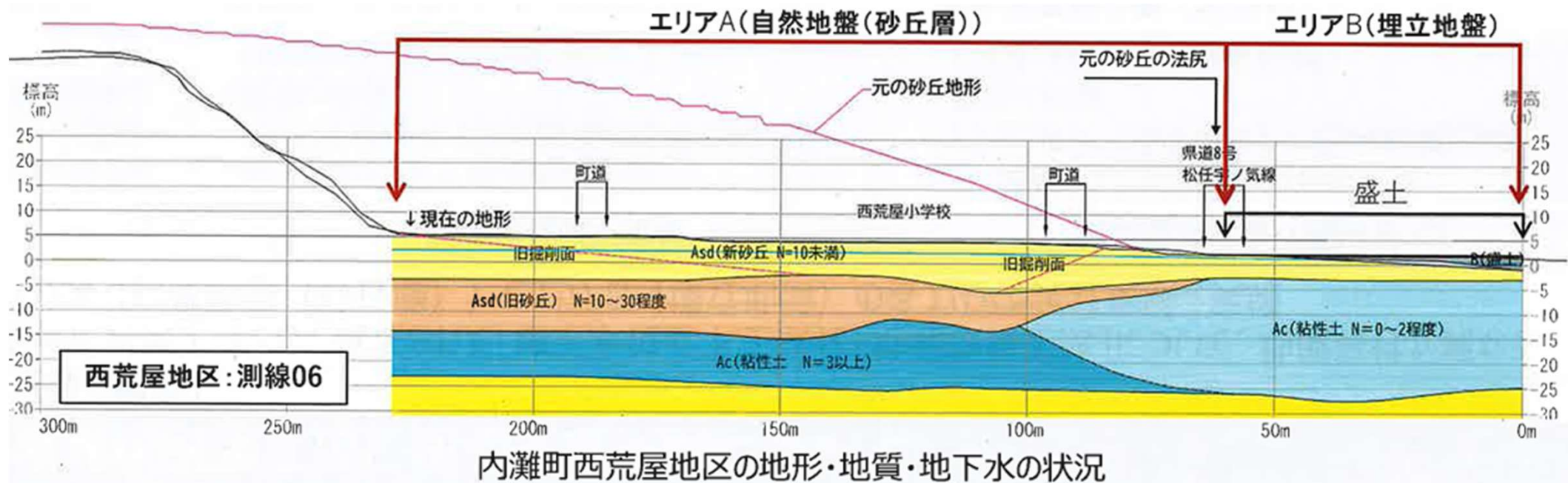
# 液状化被害の範囲

河内氏他



写真2 河北潟干拓による1963年（左）1975年（右）の地形変化

## 内灘町西荒屋地区の地形・地質の状況



砂丘砂の下は粘性土層

# 1. 液状化対策について



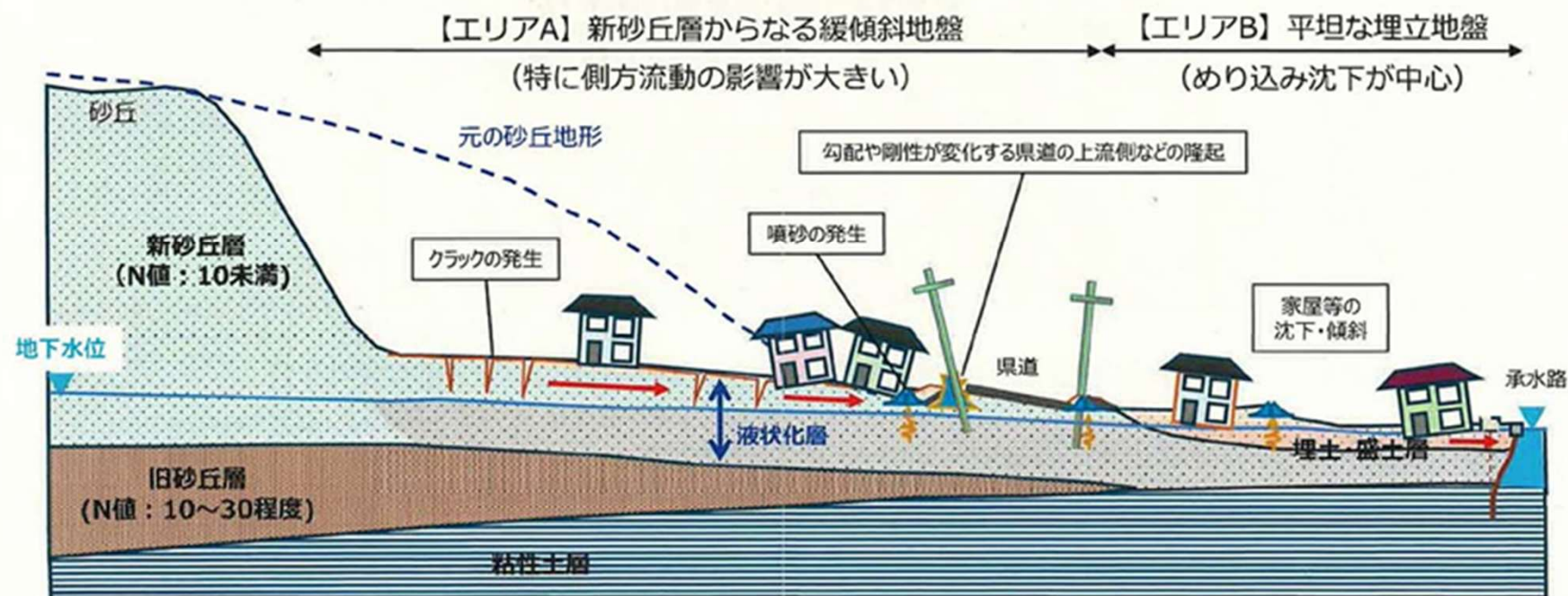
内 瀬 町

## 【被害発生メカニズム】

- 既存の地質調査・今回実施した地質調査について各地点の変状の有無と地盤状況等の関係を分析した結果
- ・ エリアA（新砂丘層からなる緩傾斜地盤）は地下水位がGL-3mより浅く、地表面傾斜角が概ね1°以上の箇所
  - ・ エリアB（平坦な埋立地盤）は地下水位がGL-2mより浅く、平均N値が概ね10未満の箇所
- で変状が多くみられます。

→ 上記の分析や地質調査の結果等を踏まえて、今回の被害発生メカニズムは以下の通りと推定されます。

- ① 震度5弱～5強の継続時間が比較的長い地震動が発生
- ② 新砂丘層と人工的に埋立てた埋土・盛土層を中心に液状化し、めり込み沈下が発生
- ③ さらに砂丘側から干拓地側への緩勾配により、側方流動が生じたことで水平変位および沈下・隆起が発生

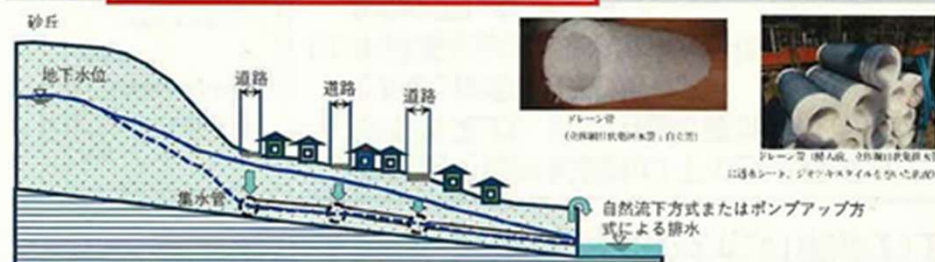


# 1. 液状化対策について

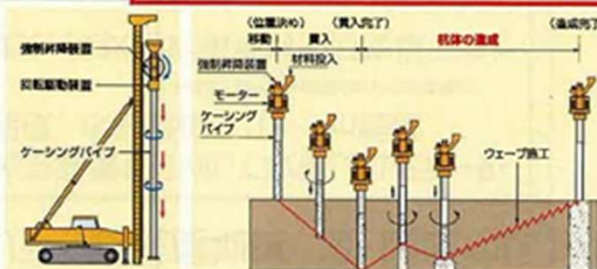
## 【適用可能な液状化対策工法の選定】

- 公共施設と宅地の一体的な液状化対策工法の中から、当該地区の特性を踏まえ、「地下水位低下工法」と「地盤改良工法」を選定しました。

	地下水位低下工法	格子状地中壁工法	地盤改良工法
工法概念			
概要	宅地や道路の地下水位の高さを強制的に低下し、地表面下に非液状化層厚を確保し、その下の液状化層の厚さや液状化の程度を軽減する。	原地盤とセメントなどの改良材を強制的に混合攪拌して、地中に柱列状の固化壁を造成し、これらを格子状に配置して囲込むことで、液状化を抑制する。	原地盤に圧入・振動等により砂杭等を造成し、杭間原地盤の密度を増大させて、地盤強度（N値等）を高めることで、液状化を抑制する。
適用可否	○	× (当該地では地下水阻害により周辺の液状化リスクを高める可能性があるため)	○

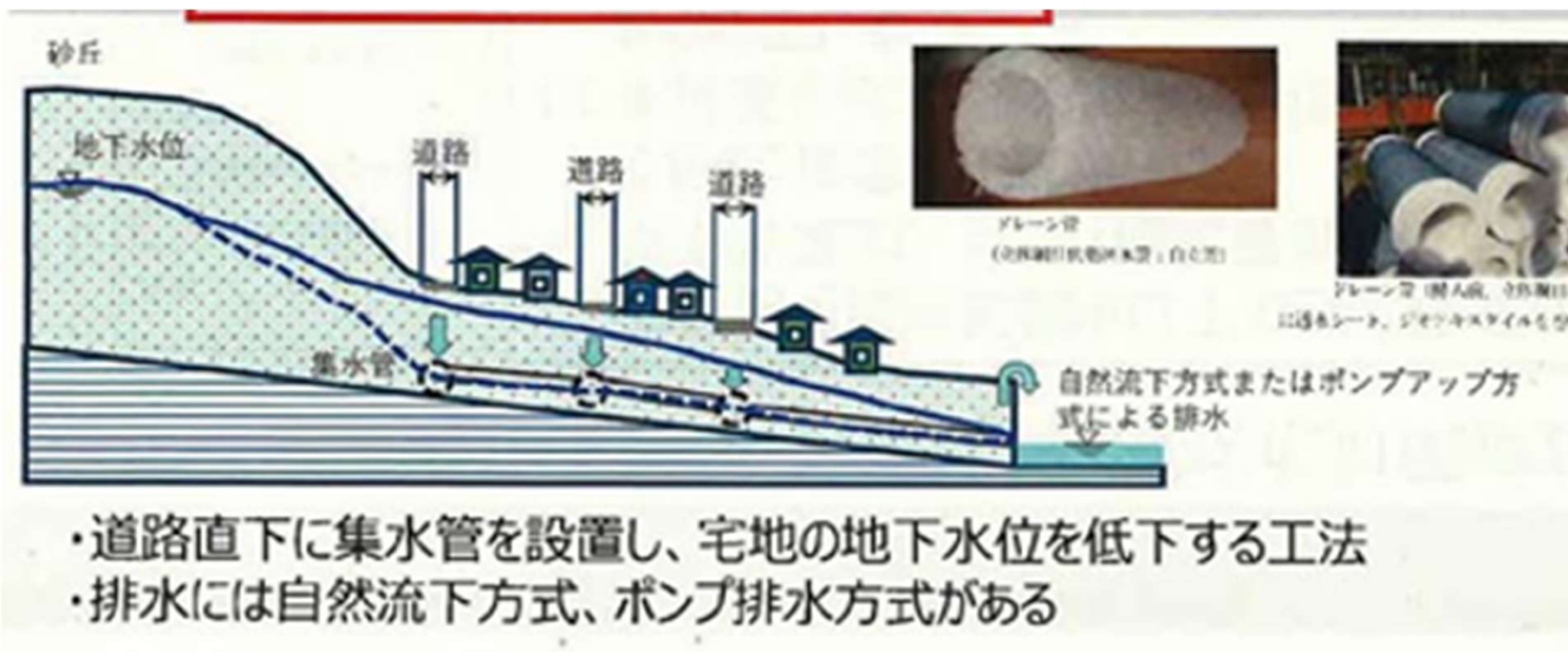


- ・道路直下に集水管を設置し、宅地の地下水位を低下する工法
- ・排水には自然流下方式、ポンプ排水方式がある



- ・砂等を圧入するなどして地盤のN値を上げる工法
- ・砕石杭などによる間隙水圧消散工法なども選択肢となる

## 内瀬町住民 説明資料



集水管

## 復興事業計画 内灘町資料令和7年3月資料

### (1) 地下水位低下工法

道路直下に集水管を設置し、宅地や道路下の地下水位の高さを強制的に低下させ、地表面下に非液状化層厚を確保し、液状化の程度を低減する工法です。地形を利用して排水する自然流下方式と強制的に排水させるポンプ排水方式があります。

既存建物がある場合でも宅地を含めた一体的な液状化の抑制効果が期待できるため、工事と並行して住宅再建を進めることができる一方、地盤沈下のリスクがあり、ポンプ排水方式ではランニングコストが発生します。

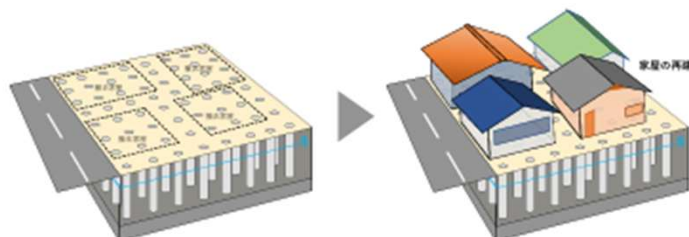


出典：国土交通省都市局 (R6. 10)  
「国直轄調査成果報告資料  
(石川県内灘町)」

### (2) 地盤改良工法

原地盤に圧入・振動等により砂杭等を造成し、杭間原地盤の密度を増大させて、地盤強度（N値等）を高めることで、液状化を抑制する工法です。

原則、更地の土地に対しての工法であり、建築物がある場合は個別対応を検討することとなるほか、重機を用いて土地に多くの杭を打設する必要があることから、重機が通行できない場合は実施が難しい工法となります。



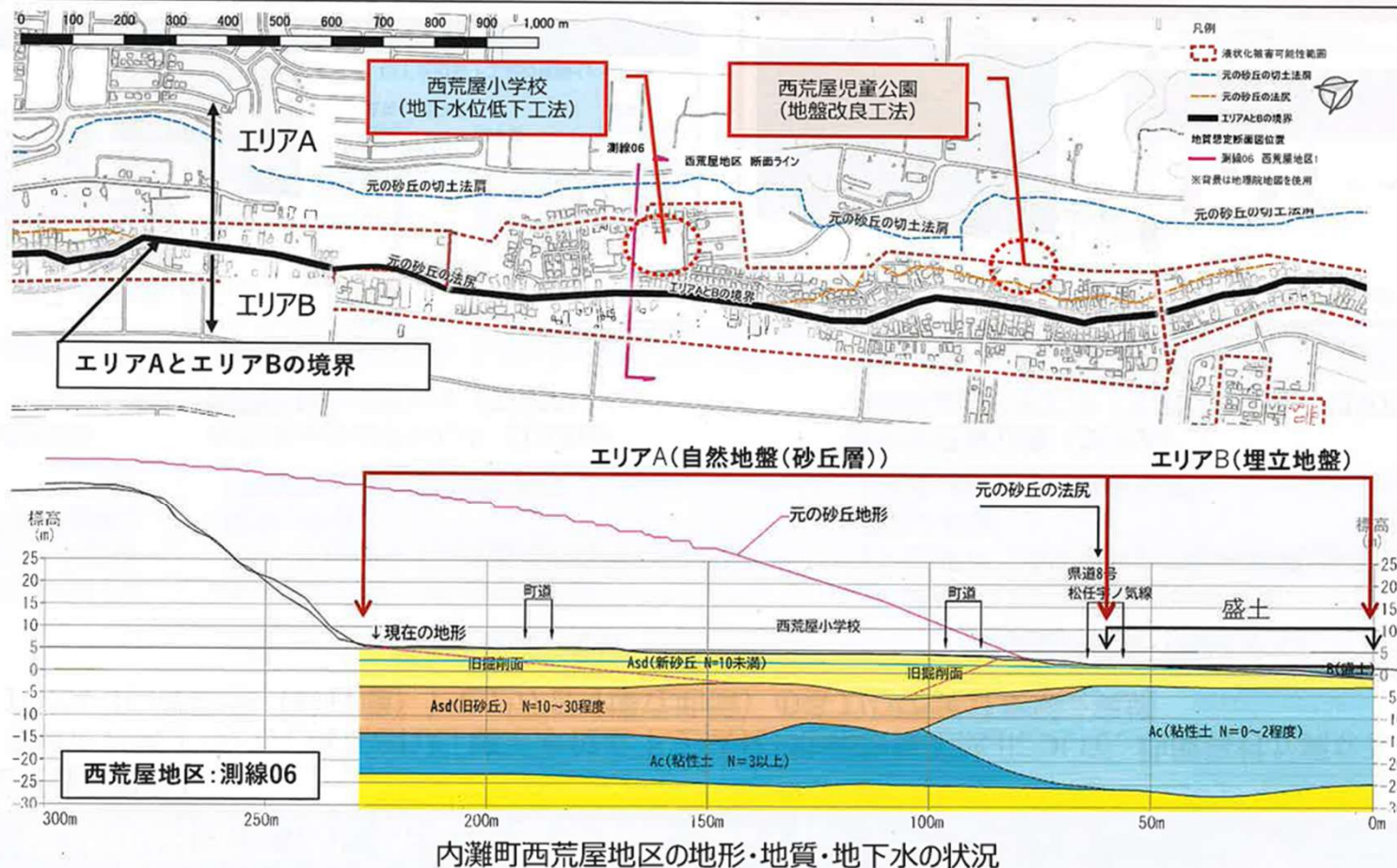
出典：国土交通省都市局 (R6. 10)  
「国直轄調査成果報告資料  
(石川県内灘町)」

## 2. 液状化対策工法に係る実証実験について

### 【実証実験箇所（エリアA）】

内灘町2025年5月住民説明資料

- エリアAの実証実験箇所は、地表面標高が概ねT.P.+6m以下で地下水位がGL-0.5~-2.5mと浅い位置にある液状化被害可能性範囲が分布している「西荒屋小学校」（地下水位低下工法）と「西荒屋児童公園」（地盤改良工法）を選定。

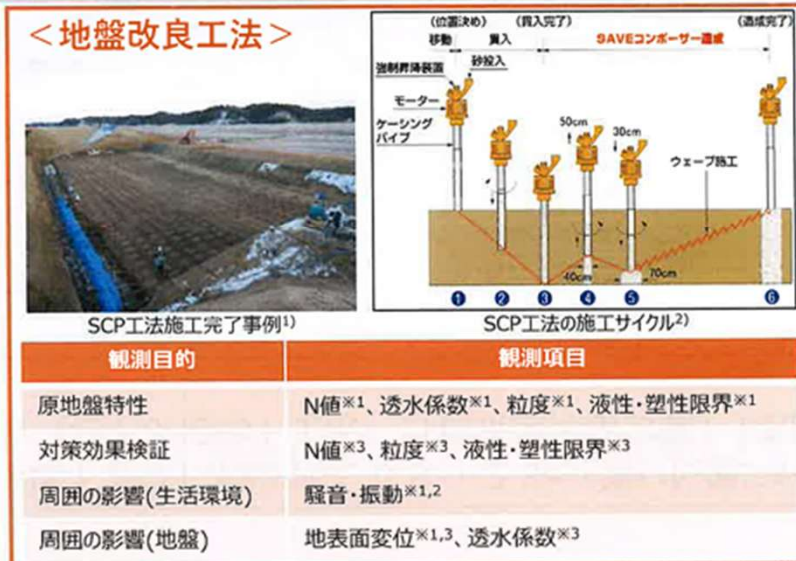


## 2. 液状化対策工法に係る実証実験について

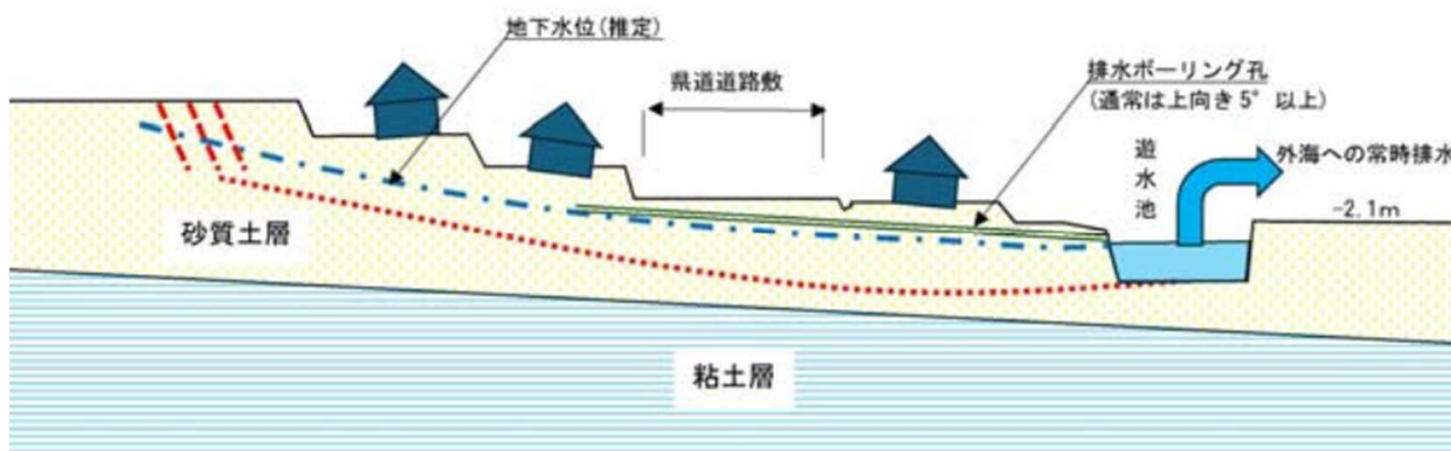
### 【実証実験の概要】

- 液状化対策工法として選定された「地下水位低下工法」と「地盤改良工法」について、地盤特性が異なるエリアA（自然地盤（砂丘層））とエリアB（埋立地盤）の各エリアで実証実験を実施

	地下水位低下工法	地盤改良工法（密度増大）
実証実験で確認したい事項（実験目的）	<ul style="list-style-type: none"> <li>地下水位低下工法の対策効果（地下水位低下工法が現地に適用できるか）</li> <li>周囲の影響（地盤沈下量、井戸の影響など）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>砂・礫杭による地盤改良の対策効果（N値増大（密度増大）の改良効果を検証）</li> <li>周囲の影響（騒音・振動・地表面変位等）</li> </ul>
実験箇所	西荒屋小学校グラウンド（エリアA） 内灘町総合グラウンド（エリアB）	西荒屋児童公園（エリアA） 内灘町総合グラウンド（サブグラウンド）（エリアB）
観測目的・項目	下図参照	



出典1) 渡辺敏彦・泉秀之(2023)：サンドコンパクションパイル施工にあたっての河道堆積砂の有効利用について，平成25年度東北地方整備局管内業務発表会  
2) 内田 正・畠山 徹(2025)：周辺環境に配慮した地盤改良工法 ～静的サンドコンパクションパイル工法～，平成27年度東北地方整備局管内業務発表会



河内他

図-1 排水ボーリング工を液状化対策に供する場合の阻害要因説明図

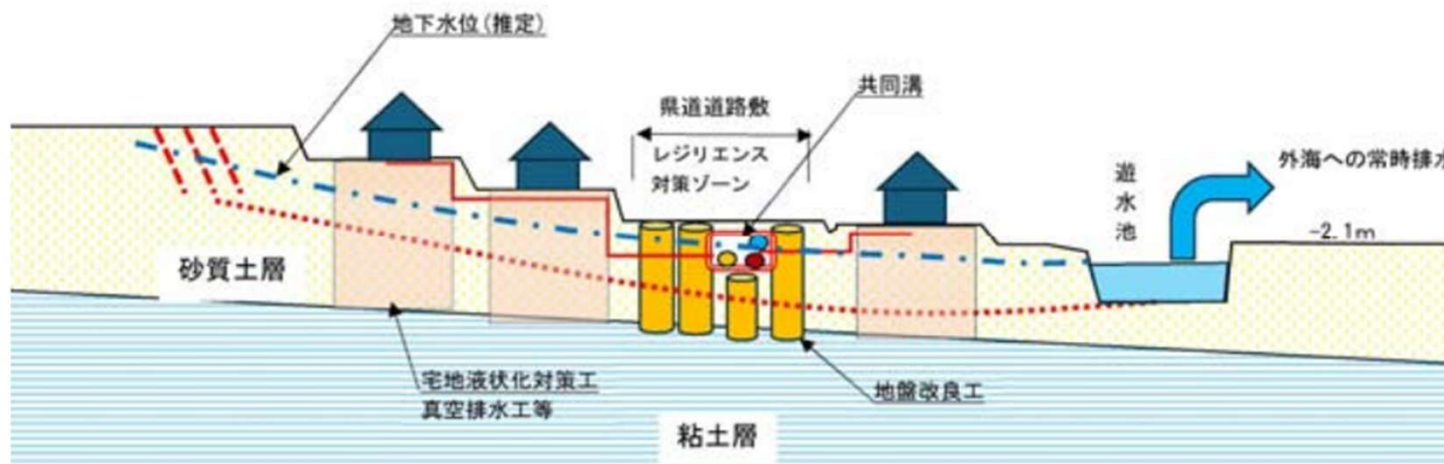
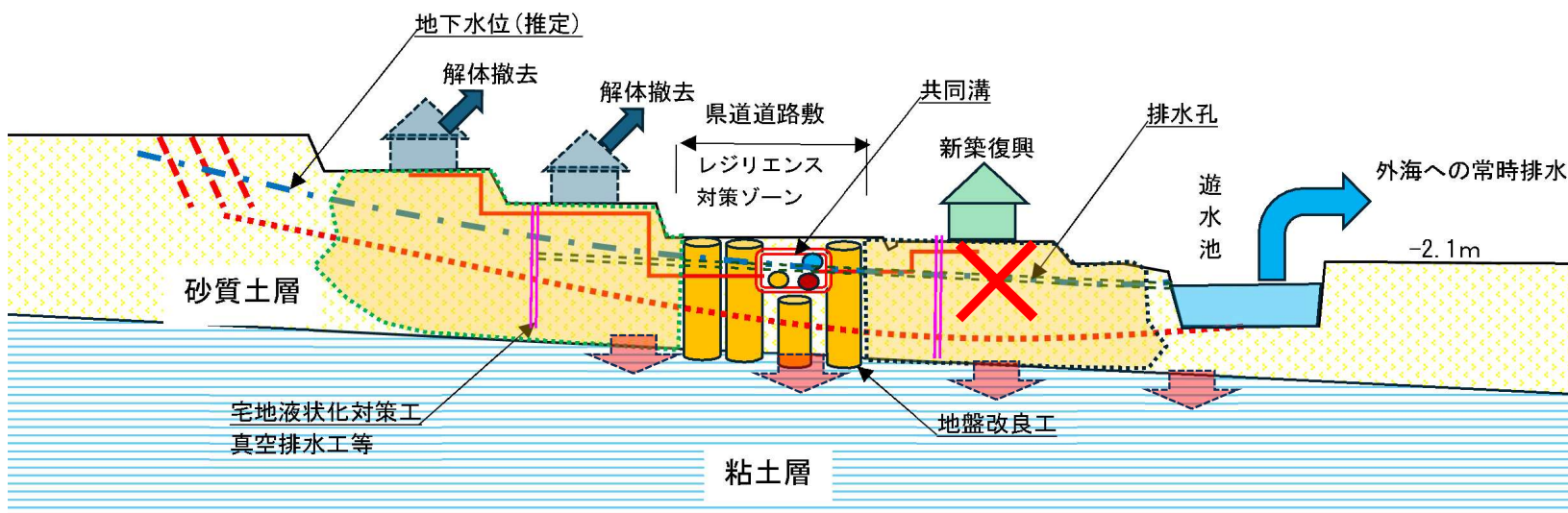


図-2 地盤改良などによる液状化対策概念図

## 下水管の復旧工事を計画：住民からの要望、宅地を沈下させぬよう



## 地下水位低下工法

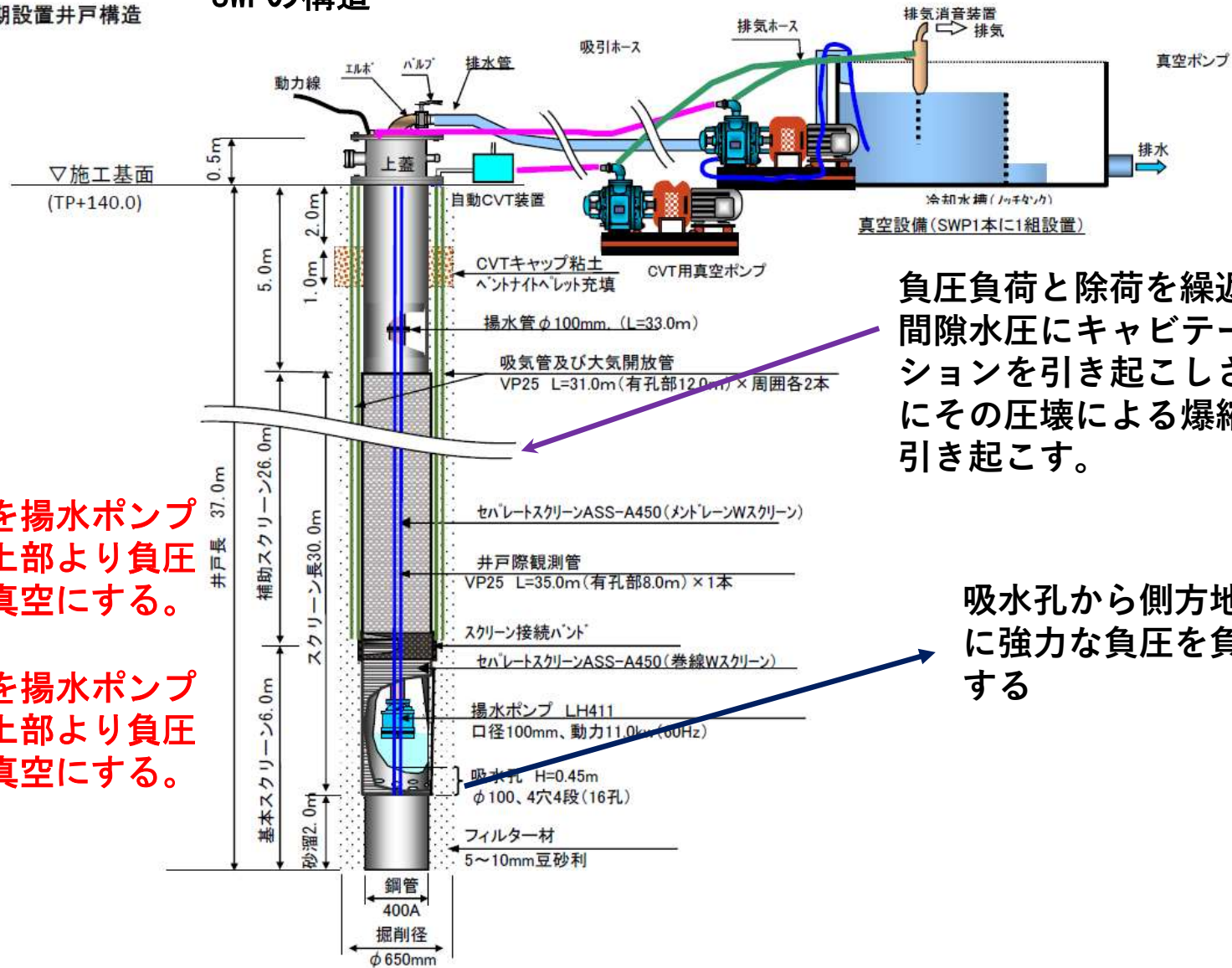
スーパーウェルポイント工法（キャビテーション工法）  
を用いた地下水位低下による飽和砂地盤の液状化対策の  
提案

（株）アサヒテクノ 高橋 茂吉  
山口大学名誉教授 兵動正幸

## SWP構造図

初期設置井戸構造

## SWPの構造



負圧負荷と除荷を繰返し、間隙水圧にキャビテーションを引き起こしさらにその圧壊による爆縮を引き起こす。

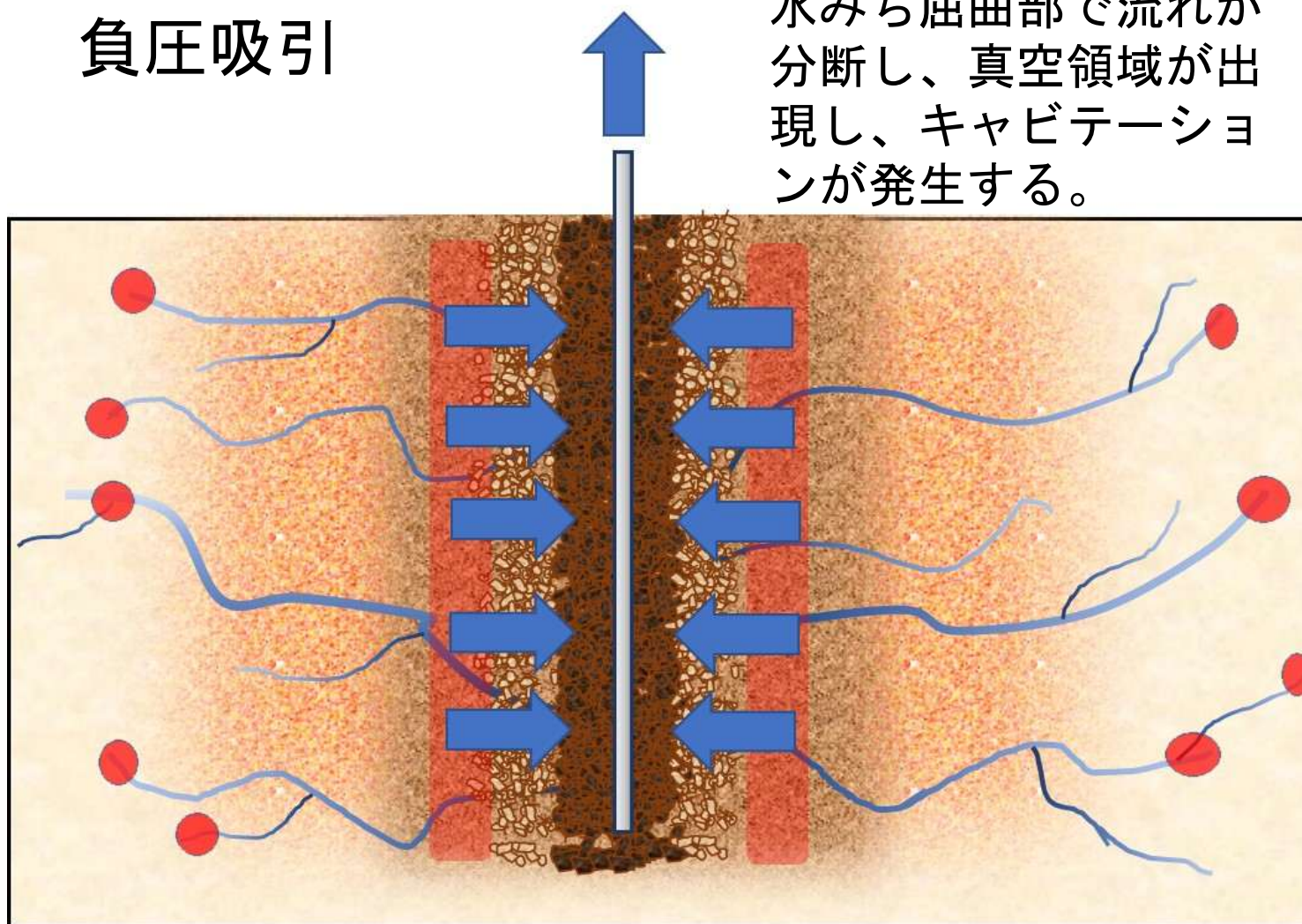
吸水孔から側方地盤に強力な負圧を負荷する

井戸管内の地下水を揚水ポンプでくみ上げ、井戸上部より負圧をかけ、井戸内を真空にする。

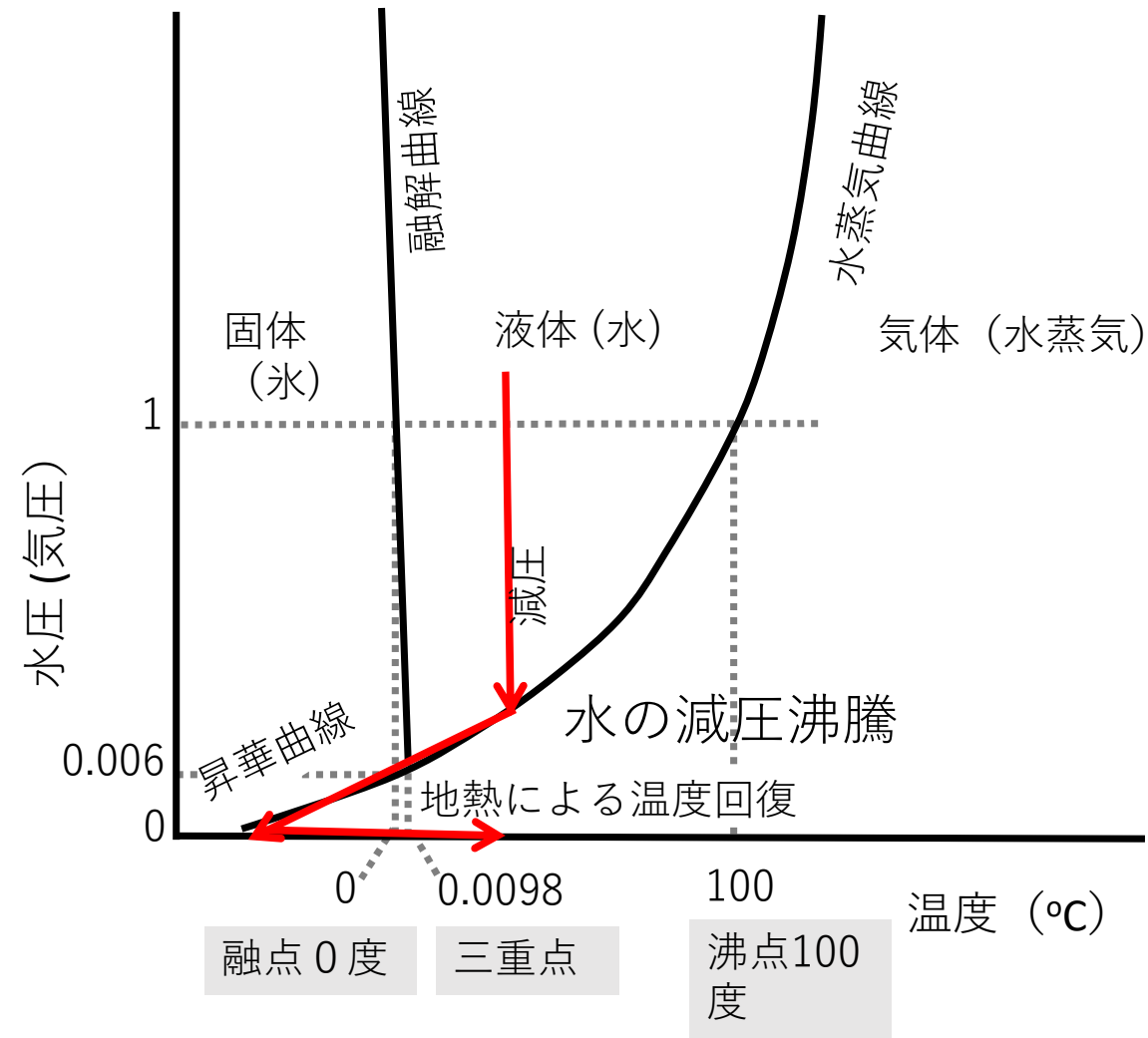
井戸管内の地下水を揚水ポンプでくみ上げ、井戸上部より負圧をかけ、井戸内を真空にする。

## 負圧吸引

水みち屈曲部で流れが  
分断し、真空領域が出  
現し、キャビテーショ  
ンが発生する。

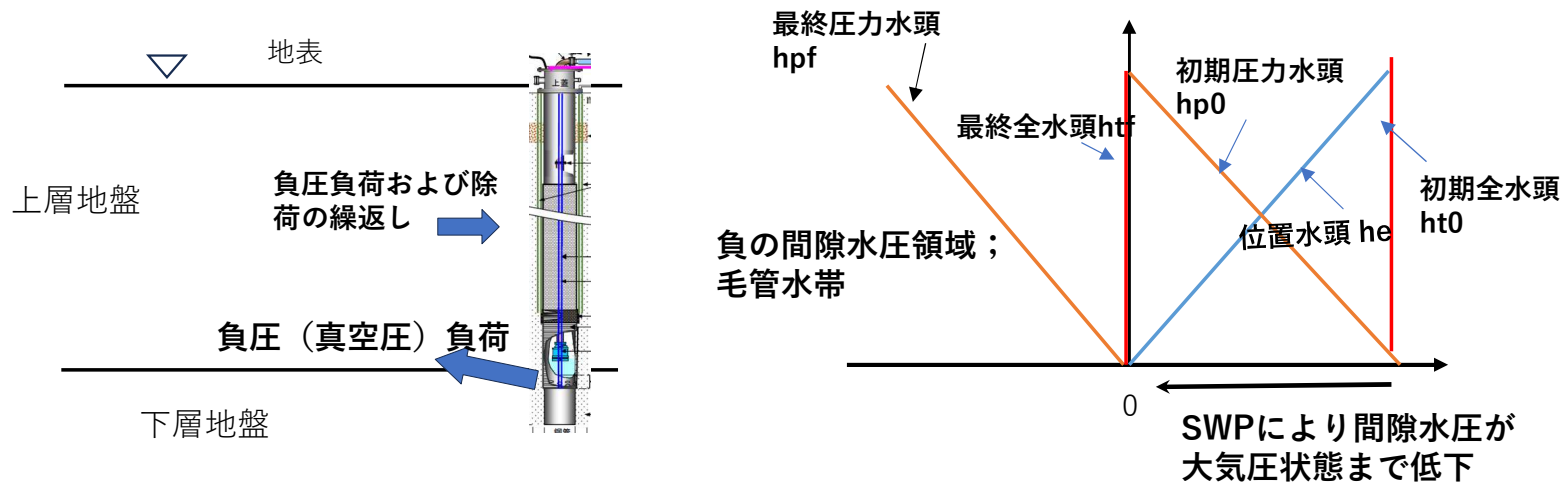


# 真空圧による水の気化（水蒸気曲線）



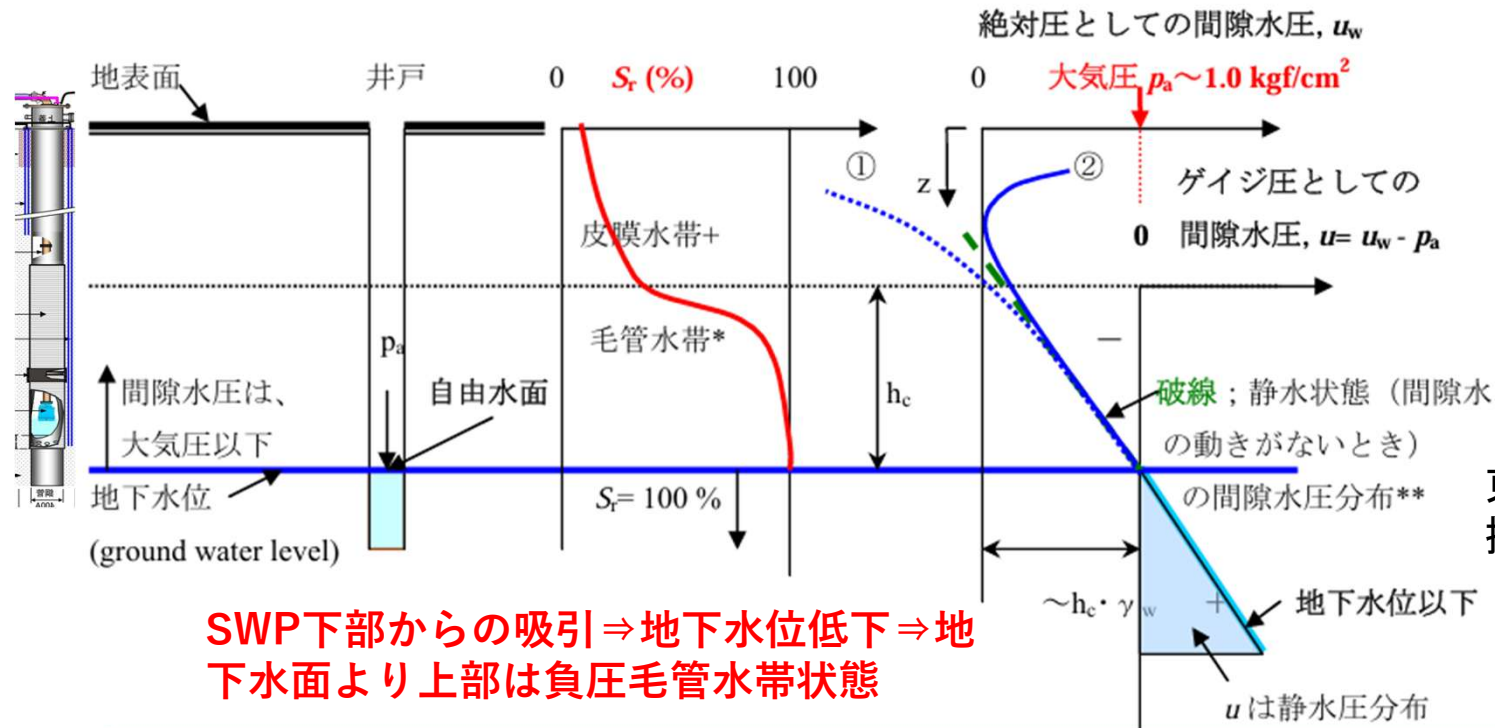
# 地盤下部からの負圧負荷を行うことのメカニズム

$$\text{全水頭 } h_t = \text{圧力水頭 } h_p + \text{位置水頭 } h_e$$



SWPにより下層地盤または地盤下層の間隙水圧が大気圧状態まで減圧されると上層地盤の間隙水圧は徐々に負圧になり、毛管水帯となっていく。これにより、透水性の良い地盤は不飽和状態になっていく。その過渡的状态で地盤が飽和状態のとき間隙水圧が-95kPa程度以下になるところではキャビテーションが起こり間隙水は水蒸気化していく。下部から水圧を低下するメリットは、位置水頭を利用して間隙水の下部への移動を容易にして地下水位を低下させ地盤を乾燥させることである。

## 2. 1 毛細管作用とサクション(suction)



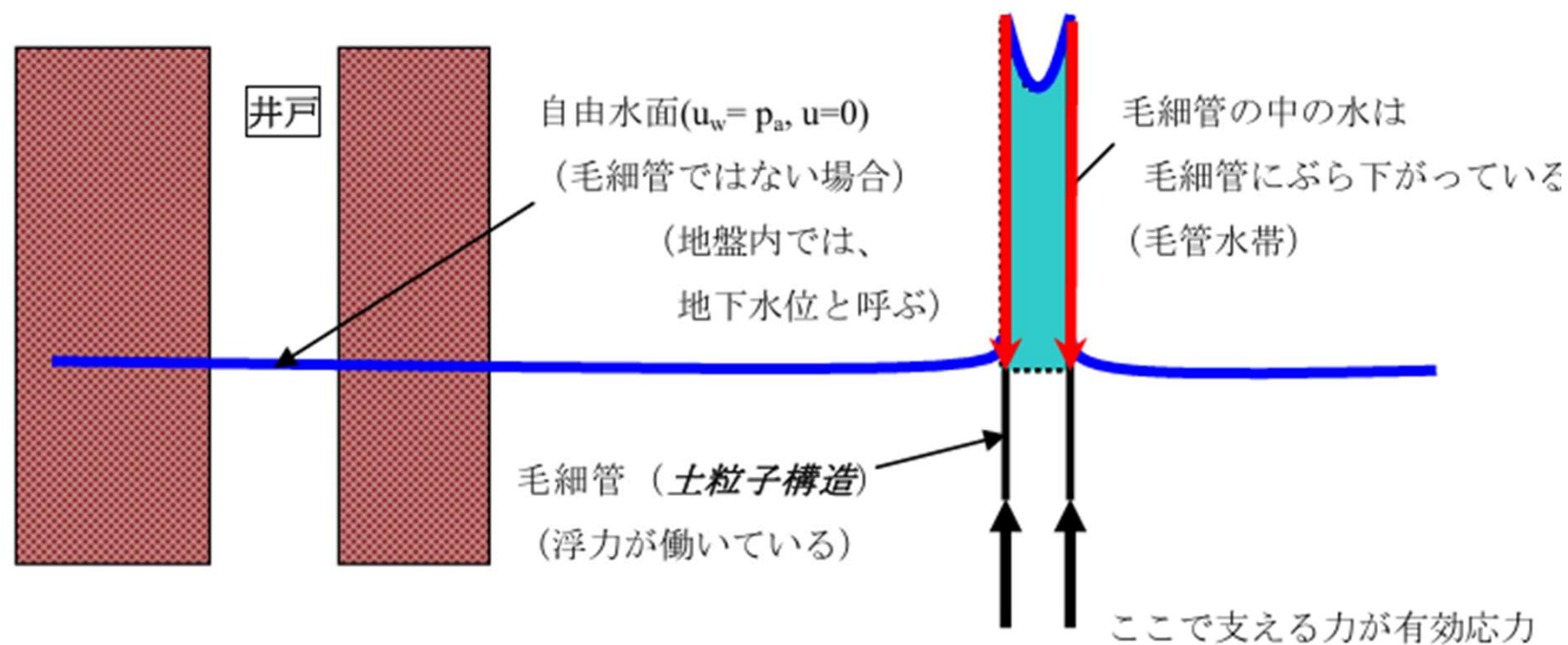
東京理科大龍岡教授資料

**SWP下部からの吸引⇒地下水位低下⇒地下水面より上部は負圧毛管水帯状態**

注) 地下水位は、土粒子の間隙に水が存在するの、しないの境界ではない。地下水位よりも上にも、土粒子間の空隙に水は存在する。

地下水位よりも上に位置する間隙水は、周囲の土粒子構造にぶら下がっていて、それより下に位置する土粒子構造にとっての荷重となっている (有効応力を増加させている)。

地下水位以下に位置する間隙水は、周囲の土粒子に浮力が作用させている。

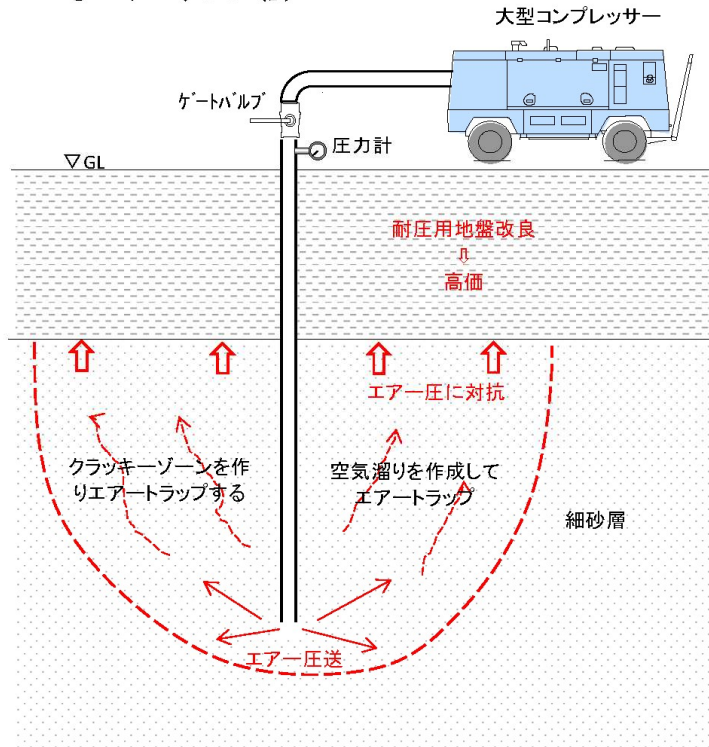


\*毛管水帯： 地下水位以下の間隙水と連続していて、間隙水は毛管水現象によって吸い上げられてる状態にある。地下水位に近いほど、飽和度は 100 % に近い。  
通常は、非定常状態の間隙水圧分布となっている。

## 2. 工法比較

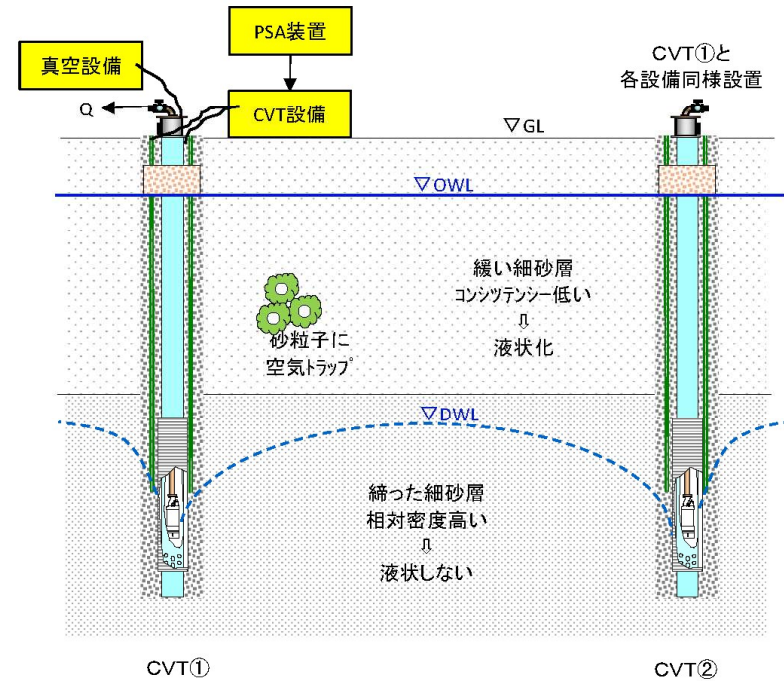
### 2-1) エアートラップ関係

#### ① エアーダス工法



## スーパーウェルポイント工法 (キャビテーション工法)

### ② CVT工法



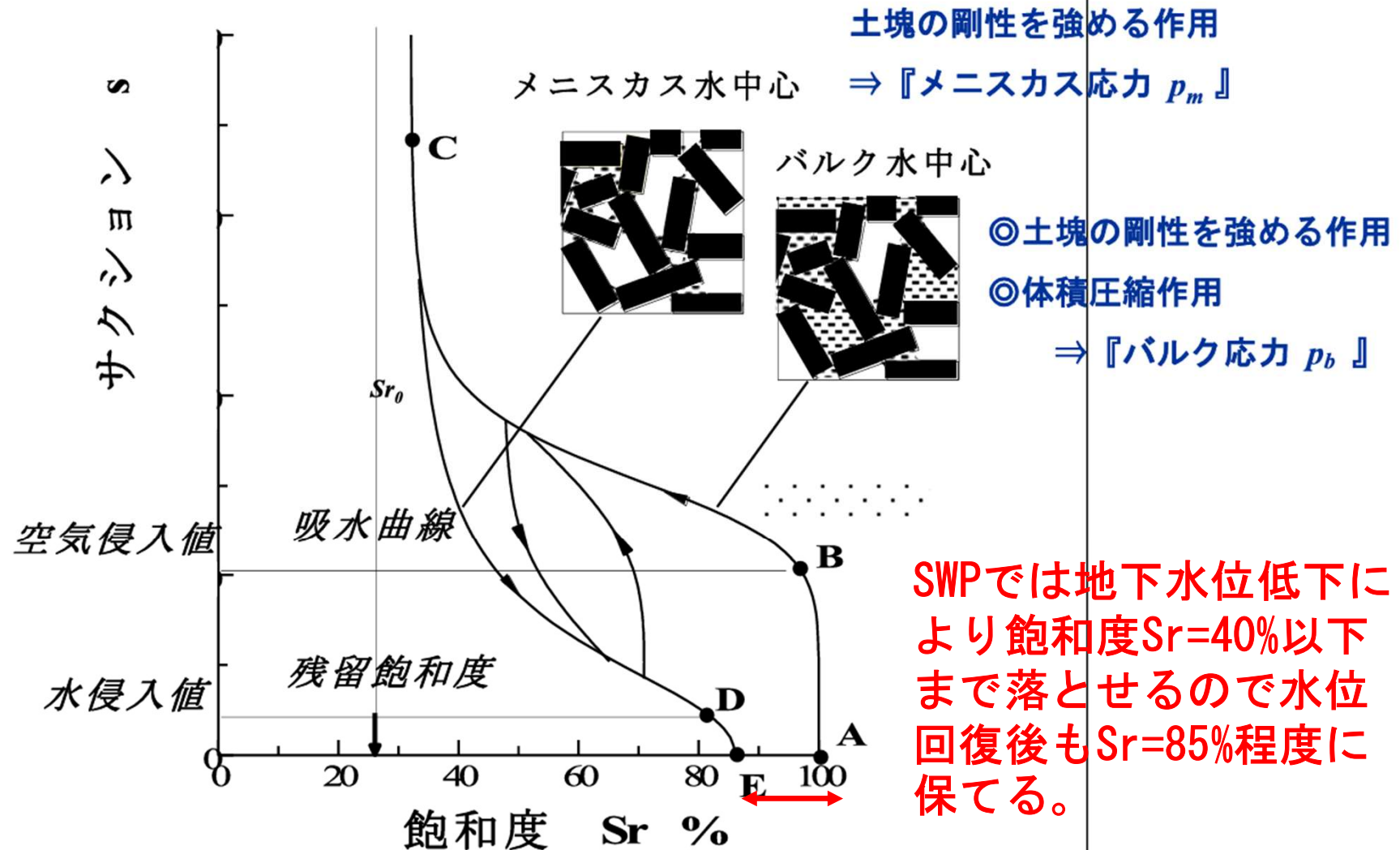
※運転期間は2～3ヶ月位

- ③ 空気トラップ完了後にPSAマシンを用いて窒素ガスを注入してトラップさせる。  
※CVTのコストはライフライン用で特別エアートラップさせるには、大型コンプレッサーやPSAの運転のみ

地下水位を低下して飽和砂地盤の水を脱水し不飽和化する。



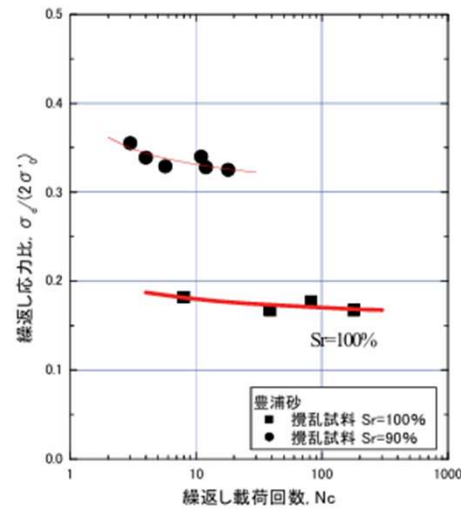
## 水分特性曲線と不飽和土の間隙水の分布状態



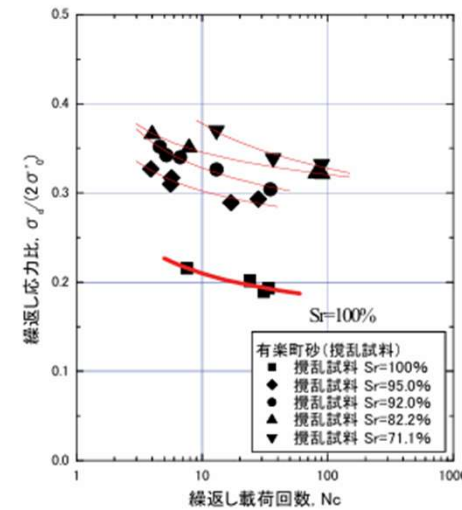
# 液状化強度に及ぼす飽和度の影響

藤井・西垣他

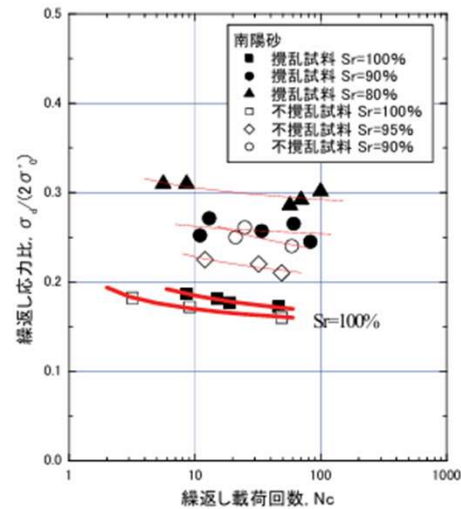
飽和度95%で液状化強度が倍增



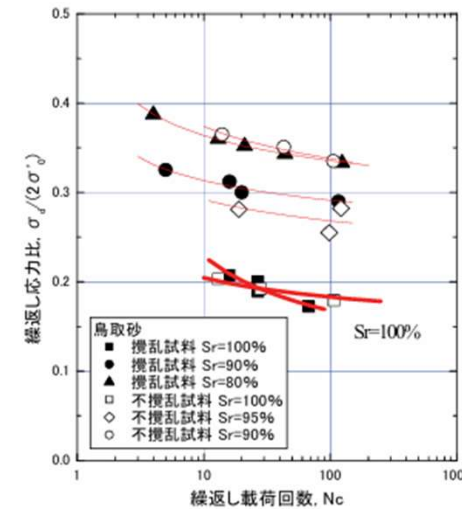
(a) 豊浦砂



(b) 有楽町砂



(c) 南陽砂



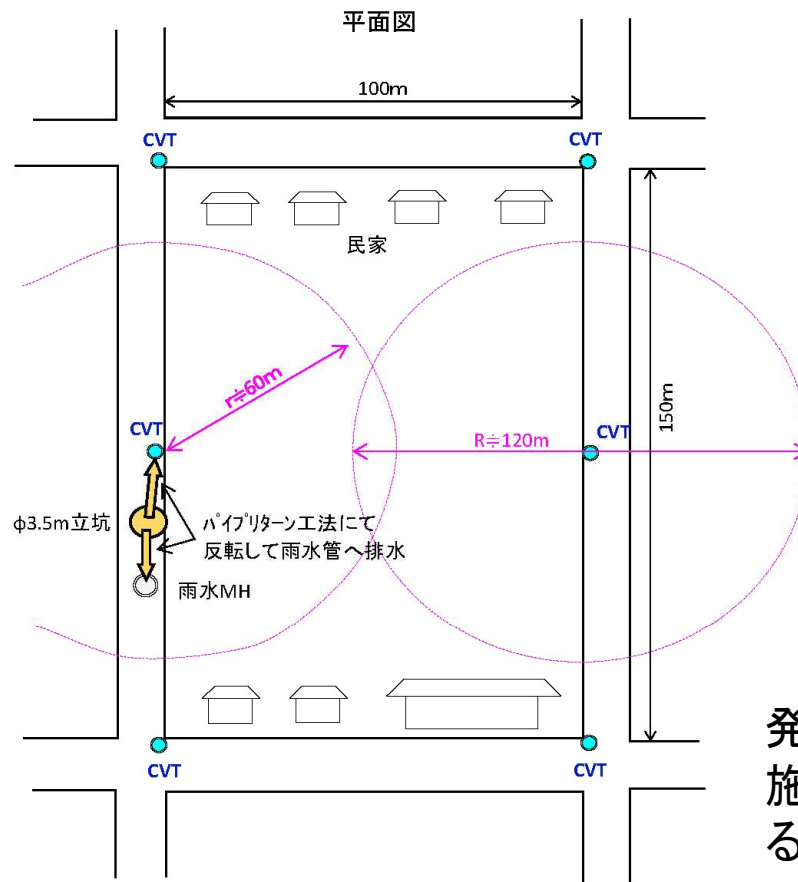
(d) 鳥取砂

図-11 繰返し応力比と繰返し载荷回数との関係

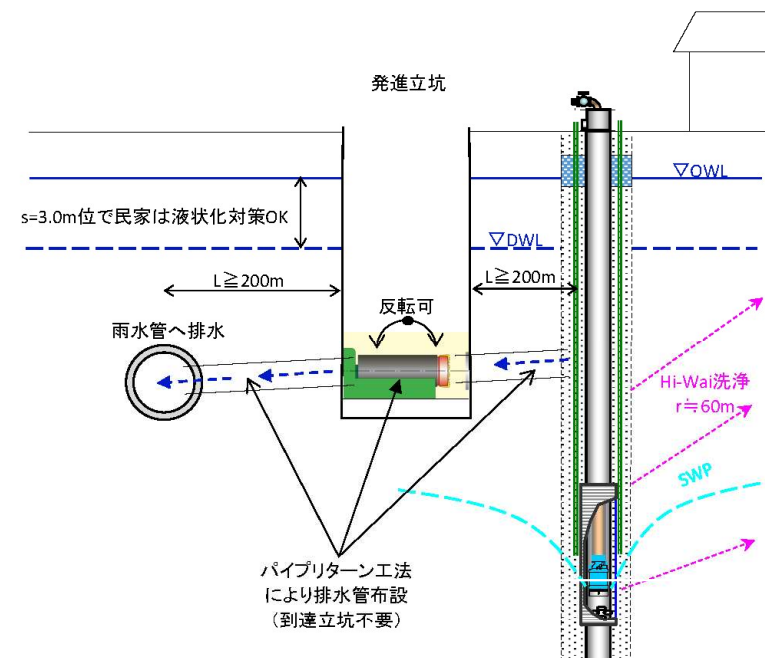
# 下水管、雨水管復旧工事のために道路で施工→民地の地下水位も低下、コントロールすることが可能

## 3. 地下水位低下と空気トラップ後の長期地下水位低下方法

イメージ図



断面図



発注者の工事負担で個人負担は発生しない。  
施工場所も道路上で行なう為、民地を利用する事もない。

SWP設置平面図



- 飽和砂地盤の不飽和化による液状化抵抗の増大、地下水位が回復しても5%の空気トラップにより液状化リスクが低減→10%以上の空気トラップを実現。砂粒子間にメニスカス形成；見かけの粘着力の発現
- スーパーウェルポイントと雨水管との間に水平水抜き管の設置により長期にわたり安定して下水位を低下できる



## 住宅の広域な液状化対策には地下水位低下工法が有効

- 公共工事として行える。
- 維持費がかからない。
- 個人負担の大幅な軽減ができる。

## 6-1)パイプリターン工法

### 夢の工法を実現。

自走式リターン装置搭載により、  
先導体を発進立坑に引きもどして回収。  
カッター交換後再挿入。

掘進機引抜動作

土質の変化に応じた掘削途中のビット交換、  
既設管への直接接続など。  
従来工法では不可能な工事にも、  
広範囲に対応できます。

あらゆる土質、施工条件がクリアでき、自動運転可能な  
掘削ロボット開発が夢でした。パイプリターン工法で、その  
夢に向かって一歩前進いたしました。このマシンの特  
徴は全土質・長距離・全方向の掘削に加え、地中での障害  
物などにも対応が可能で、自動制御システムにより運転  
操作も簡単な掘削ロボットという点です。これにより、  
掘削工事はもちろんのこと基礎工事、法面工事、パイプ  
ループ工事など広範囲な施工が可能となりました。当工  
法は、21世紀の生活圏のさらなる発展を自覚し、  
施工技術・品質の向上を志し、関係各位のご指導を賜りま  
がら、たゆまない努力を積み重ねてまいります。

# 不可能を 可能に変えた!!

## パイプリターン工法

### パイプリターン工法の特長

- 推進管はそのまま、掘削機が縮小・自走後退し、再挿入が可能。
- 土質に対応したビット交換が選択できます。
- 地盤改良が先導体内部より行えます。
- トラブル時、管を抜かなくても良いので、環境に与える影響が少なく済むようになりました。
- 小スペースの発進基地。到達立坑は不同。
- 最小寸法φ2000mmの発進立坑 (PR450)。(水平方向推進時)
- 到達立坑は不要。既設管、既設人孔等への接続が可能。
- 全方向掘削が可能。
- 下向き、水平方向、真上、斜め、360°OK!
- 長距離掘削最大300mが可能。
- 電子機器の高機能化により、高精度な測量管理システムを実現。
- リアルタイムに方向修正、精度管理が可能。

### 【先導体概要】

標準施工能力

- 掘削深度 一般正掘深度 300N/mm<sup>2</sup> (3000kgf/cm<sup>2</sup>)
- 許容掘削径 10×10<sup>2</sup>mm (10kg/cm<sup>2</sup>)
- 掘削距離 300m (1スパン)
- 掘削角度 360° (全方向)
- 土質 全土質 (ビット交換・掘削方法調整の上)

### 施工用途

- 上・下水管・ガス・電力管のパイプライン工事
- 地下管線との接続工事
- 法面などの水浸せ工事及び掘削
- 地下、土質・構造物等の調査

### 先導体を引きもどして回収

### 再掘削

カッター部 先導体部 分機部 リターン装置部

## まとめ

1. 1964年新潟地震では、世界で初めて、都市部で液状化が起こり、鉄筋コンクリート造建物の転倒、橋梁基礎の液状化による落橋、マンホールの浮き上がりなど過去に例のない被害を受けた。この地震を機に緩い砂地盤の液状化に関する研究が活発に行われるようになった。
2. 1995年兵庫県南部地震（阪神淡路大震災）においては、都市直下の活断層が動き、多くの人命を失い、構造物の構造物やインフラに大きな被害を及ぼした。液状化の被害は、神戸港の埋立地や人工島に集中し、六甲山から搬送した埋め立てまさ土が液状化を起こし、重力式岸壁が大きな移動して、埋め立て地内で側方流動が起こった。この地震を契機にレベル1地震、レベル2地震の呼称で2段階耐震設計法が導入された。
3. 2011年東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）においては、震源地から遠く離れた浦安など埋立地の戸建て住宅の液状化被害が顕在化し、特に戸建て住宅の液状化に関する対策法が検討されるようになった。

4. 2024年能登半島地震における震源地および震源から100km離れた砂丘砂による埋立て地域の住宅地における液状化被害が起こり、その復旧、対策について現在も検討中である。

5. FL法による液状化判定法は、カリフォルニア大学のSeedの教授らによって導入されたが、その後道路橋仕法書に導入され、改定を重ね、阪神淡路大震災を契機にレベル2対応の改定がなされ、さらに東日本大震災を契機に改定された。

6. 液状化対策工法として、締め固め工法、間隙水圧消散工法、固化工法などがあるが、特に住宅地の広域対策としての地下水位低下工法が有効であることを示した。

7. 地下水位低下工法として、スーパーウェルポイント（SWP）工法が有効であることを示した。同工法は、負圧を下部から負荷し、地下水位を低下させ、砂地場を不飽和化する。いったん不飽和になった地盤は地下水位が回復しても地盤中に空気が残存し、液状化強度が高くなる。またSWPと雨水管の間に水平間を敷設することにより、地下水位を一定以上上昇させない工法について示した。

ご清聴有難うございました。