

# 地盤強化改良工学

## 地盤改良技術とその応用 2009

### 構成:

1. 概論（龍岡）
2. 締固め（石原）
3. 引張り補強の原理と実際（龍岡）
4. セメント混合による改良の原理と実際（龍岡）

## 3.セメント混合による改良の原理と実際

### 3.1 概論

- ・多様なセメント混合土(地盤材料からコンクリートへ)
- ・多様な施工法

### 3.2 東京湾横断道路でのセメント改良

- a)原位置軟弱粘土のセメント改良
- b)セメント混合した締固めない砂の水中盛土
  - ・スラリー式とドライ式
  - ・セメント改良土と堆積軟岩の比較

### 3.3 セメント混合した締固めた砂礫

- ・良配合の礫:  
橋台の建設

### 3.4 超軟弱粘性土のセメント改良

# 多様なセメント混合土

超軟弱粘性土

軟弱粘土

締固めない砂

- 下方ほど、より硬く強くなる！
- しかし、全て同じ地盤材料(土粒子、セメント、水、空気)から出来ている！フランス語では、Geomaterialsは土、岩、コンクリートを意味する。
- コンクリート工学と地盤工学の境界は曖昧！両者を無理やり区別する必要はない！

締固める貧配合砂\*

締固める良配合の礫\*

Roller compacted damコンクリート\*

従来型コンクリート

\*締固めにより、強度が増加する！  
良い締固めは、施工でも重要！

## 3.セメント混合による改良の原理と実際

### 3.1 概論

- ・多様なセメント混合土(地盤材料からコンクリートへ)
- ・多様な施工法

### 3.2 東京湾横断道路でのセメント改良

#### a)原位置軟弱粘土のセメント改良

#### b)セメント混合した締固めない砂の水中盛土

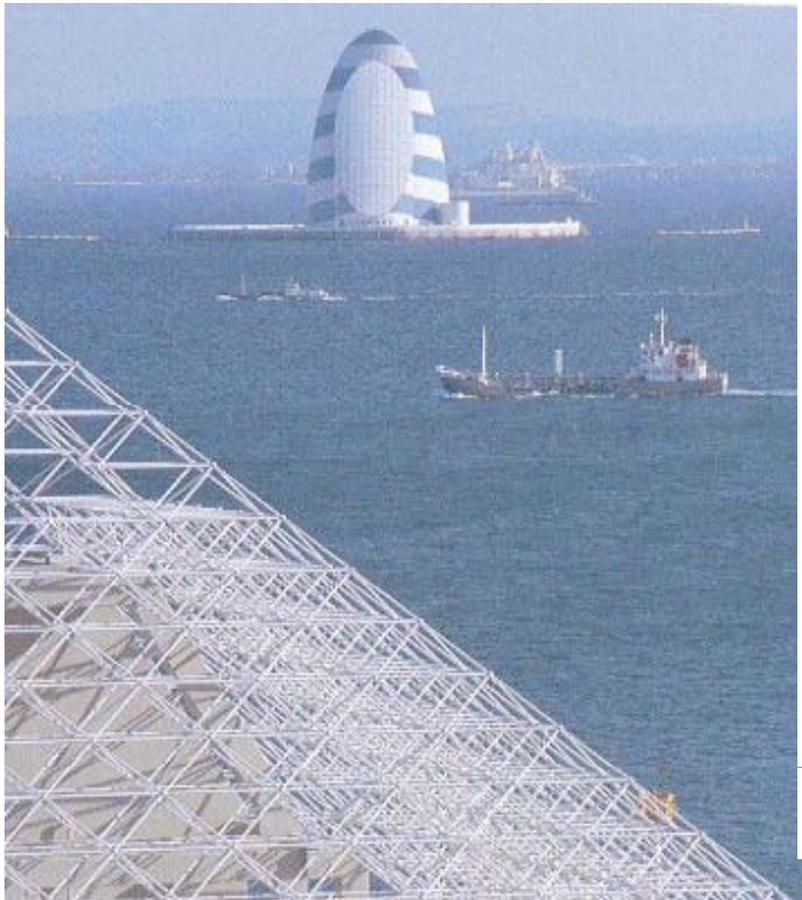
- ・スラリー式とドライ式
- ・セメント改良土と堆積軟岩の比較

### 3.3 セメント混合した締固めた砂礫

- ・良配合の礫:  
橋台の建設

### 3.4 超軟弱粘性土のセメント改良

# 東京湾横断道路プロジェクトにおける セメント混合による地盤改良



長さ 15.1 kmの有料道路

# 東京湾横断道路

浮島取付け部

木更津側人工島

川崎側人工島

橋梁



# 概略の歴史

1971年5月(25):

本格的技術的検討の開始

1983年5月(37):

内閣、建設決定

1986年10月(40):

東京湾横断道路株式会社設立

1989年5月(43):

建設開始

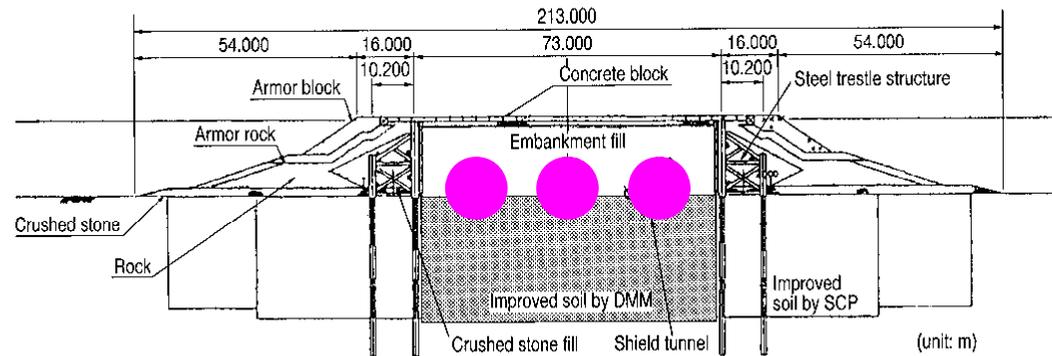
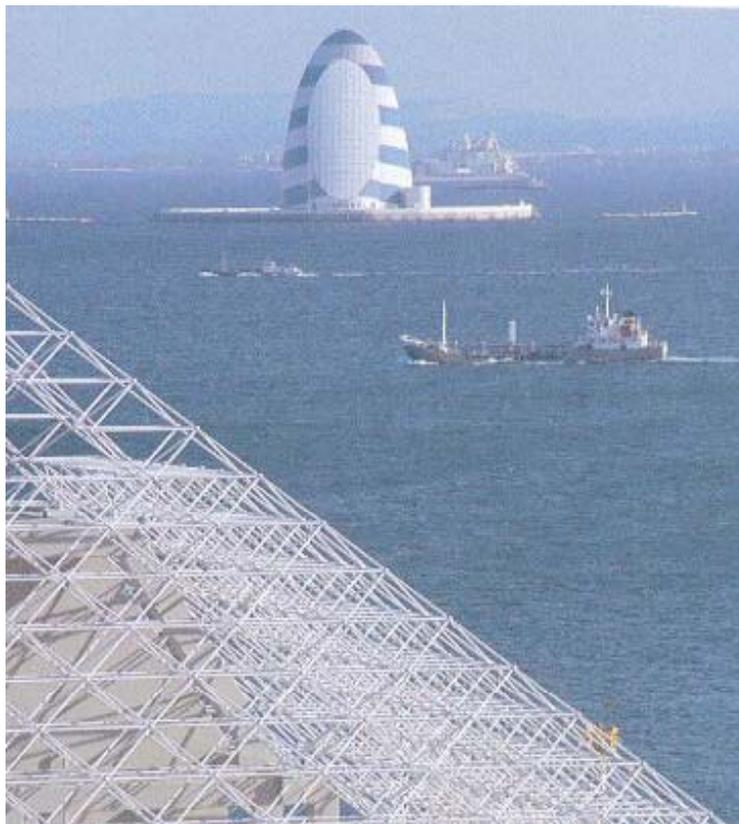
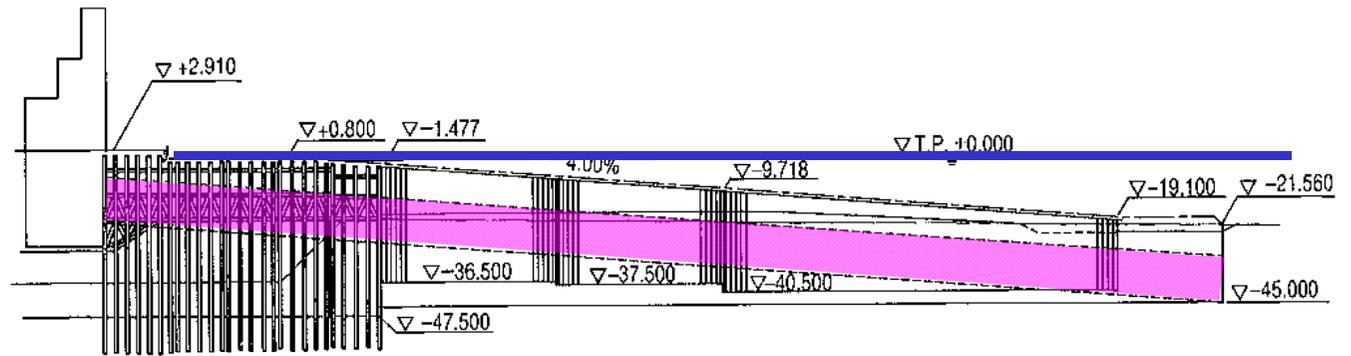
1997年11月(51):

竣工、12月18日開通





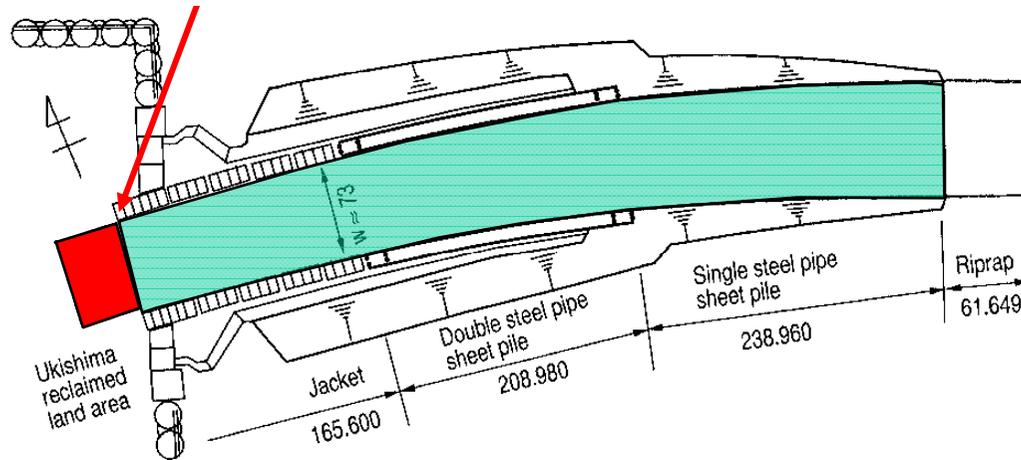
# 浮島取付け部



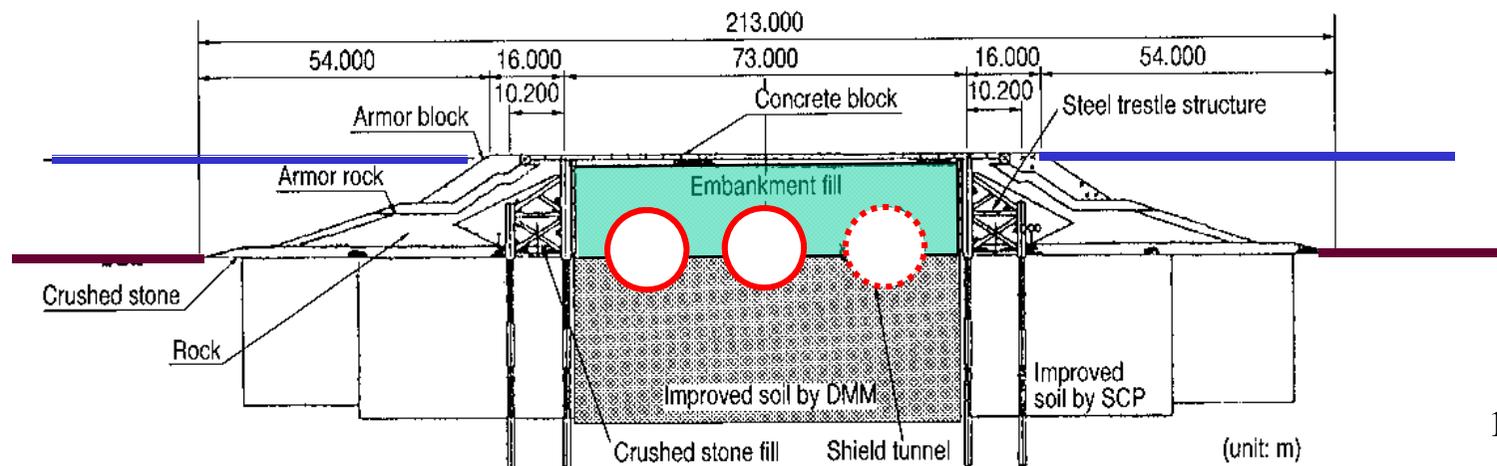
東京湾中央に向かっての  
シールドトンネル発進地点

## 鋼製大型ケーソン:

- 1) シールドトンネル発進のため;
- 2) 完成後は換気塔の基礎



## 斜路部盛土; 内部のシールドトンネルを保護

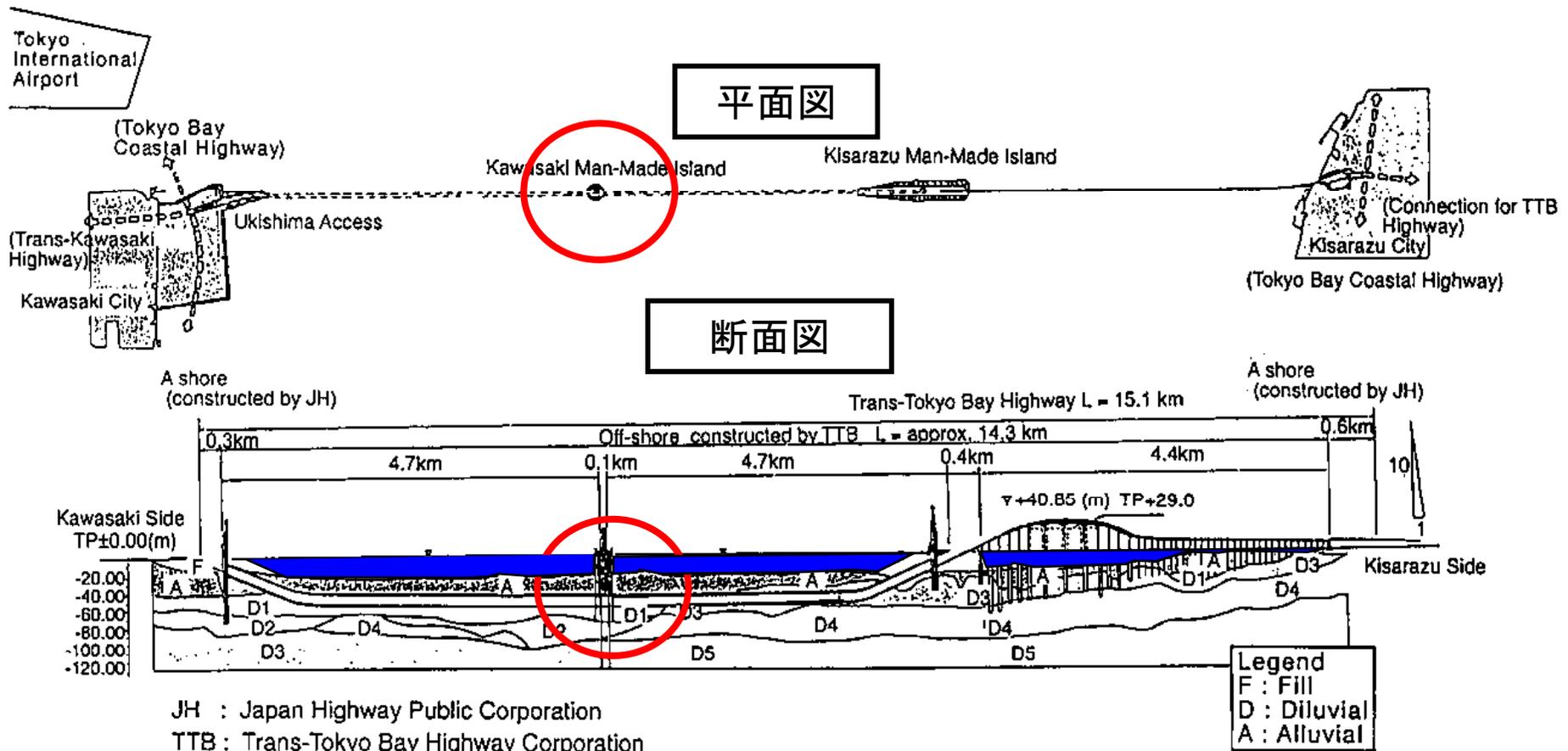


# 浮島取付け部

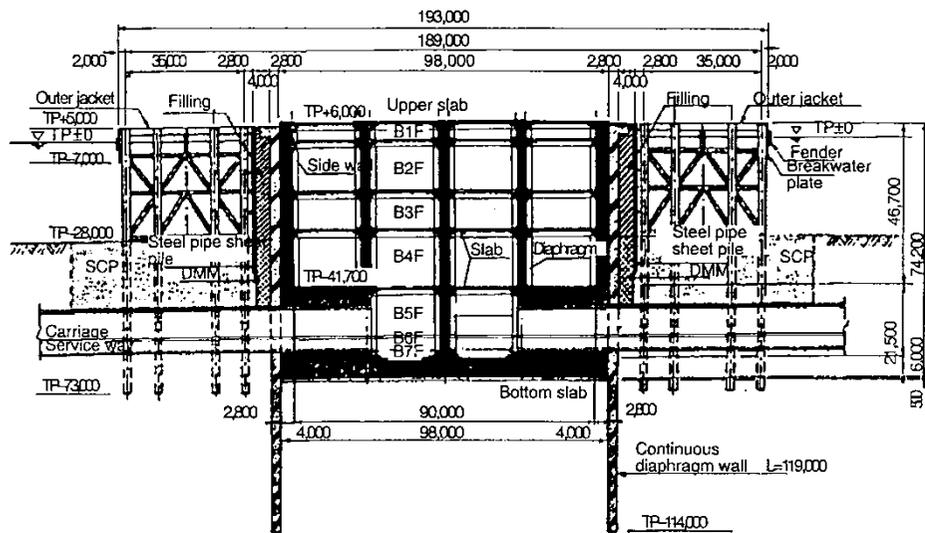


# 東京湾横断道路の構造

- ・浮島取付け部;
- ・川崎側人工島;
- ・橋梁
- ・長さ9.5 km のシールドトンネル;
- ・木更津側人工島;



# 川崎側人工島



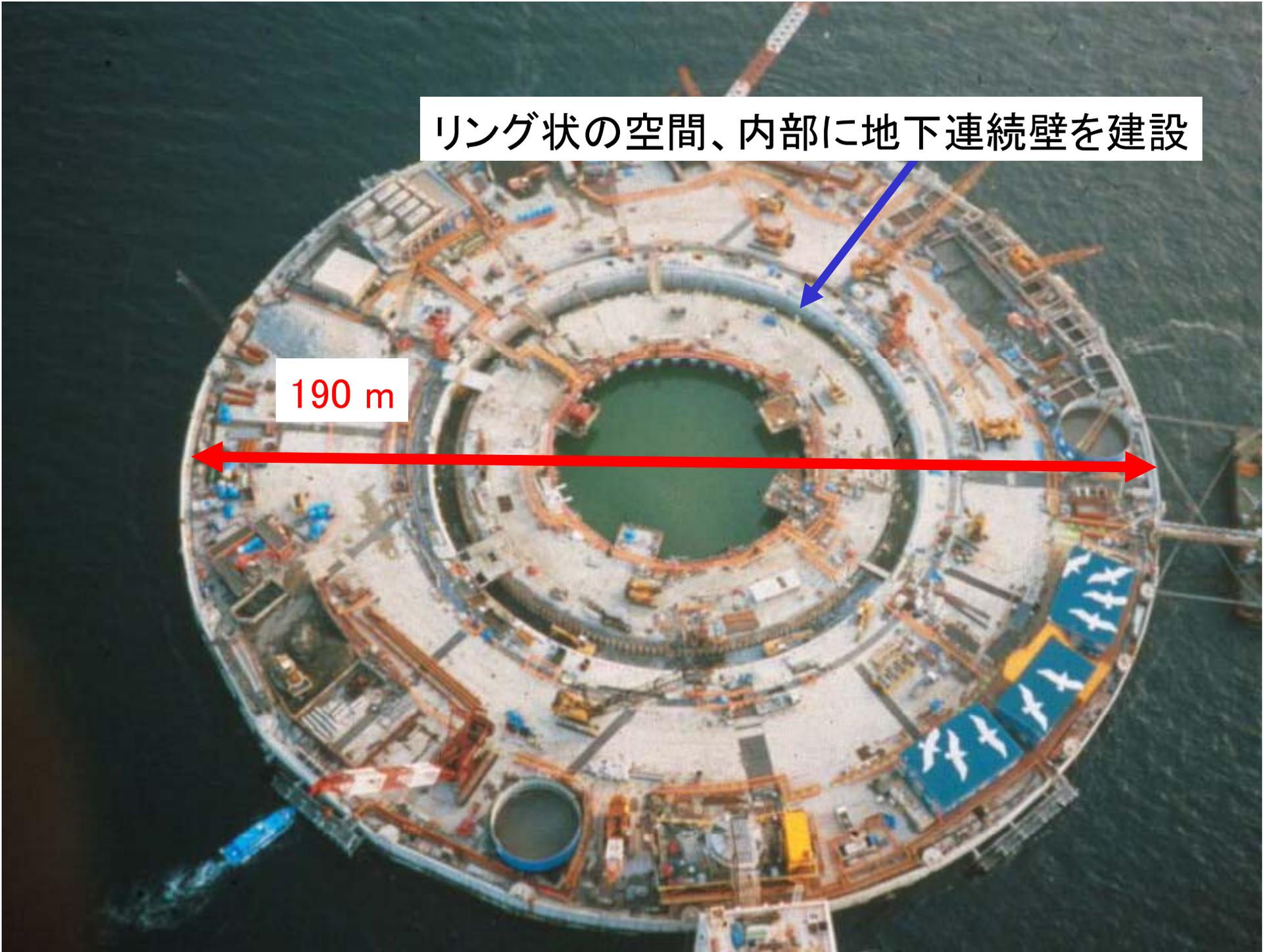
断面



完成図

リング状の空間、内部に地下連続壁を建設

190 m

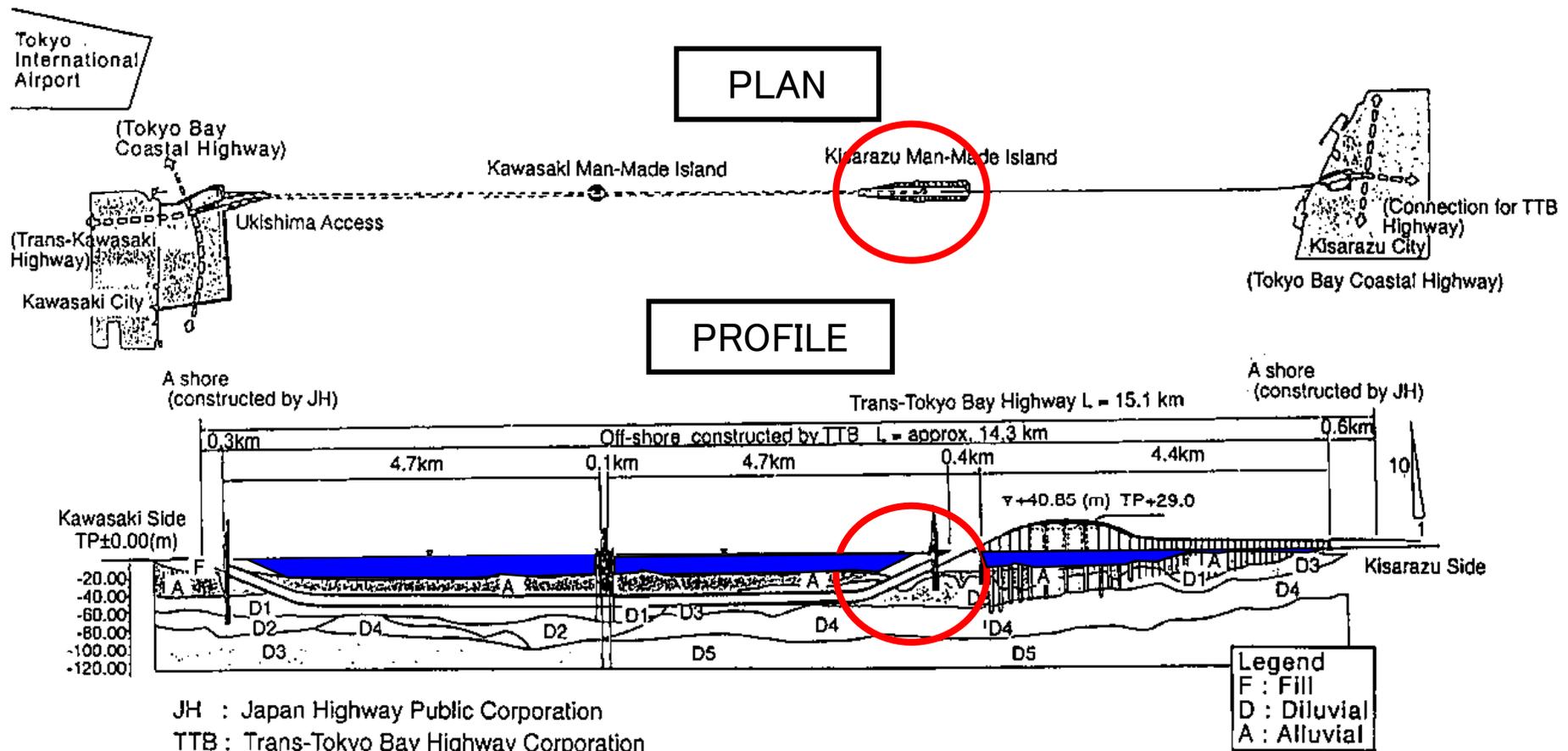


水面と地面の下に重要な技術問題がある

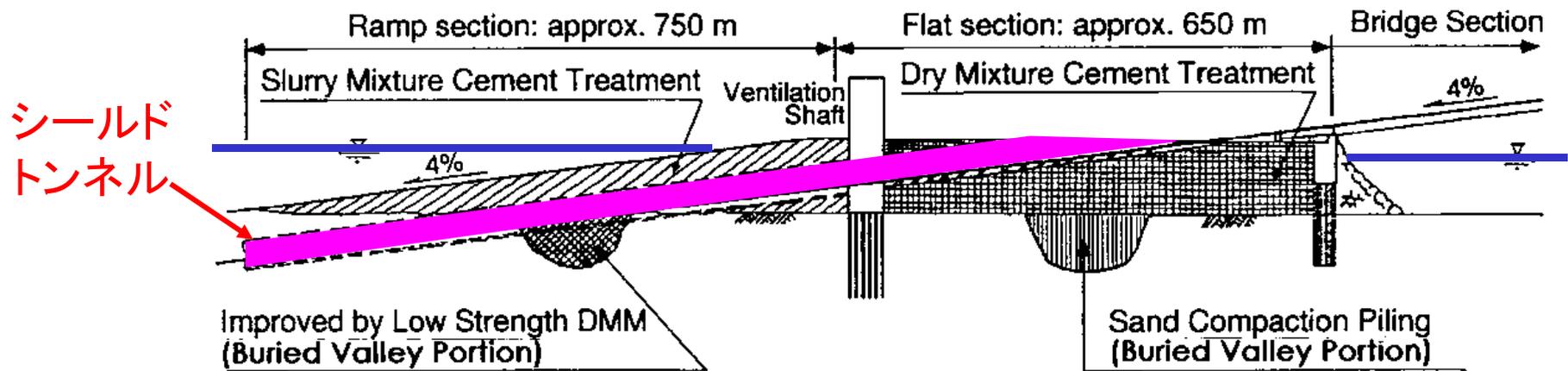


# 東京湾横断道路の構造

- ・浮島取付け部;
- ・川崎側人工島;
- ・橋梁
- ・長さ9.5 km のシールドトンネル;
- ・木更津側人工島;



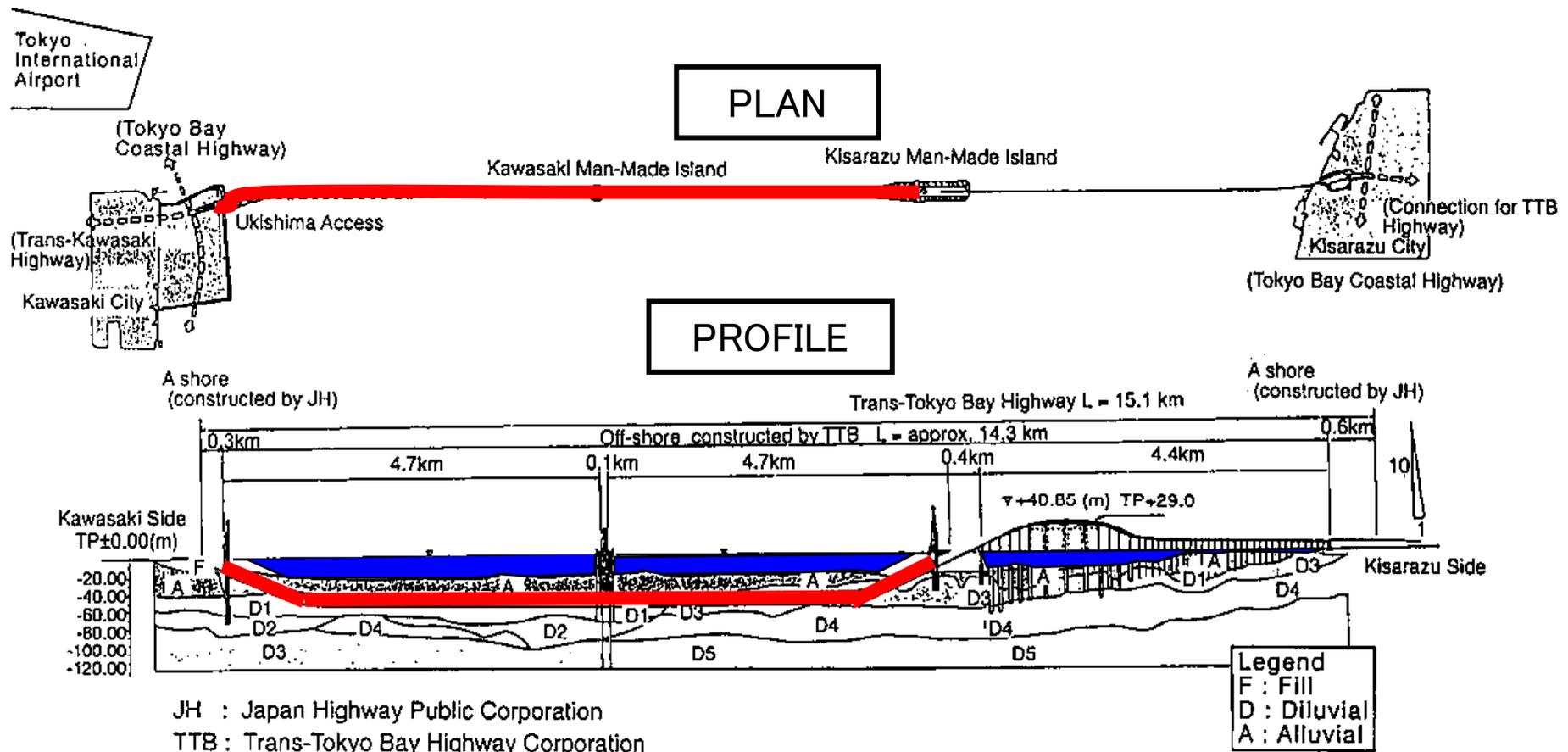
# 木更津側人工島(海ほたる)



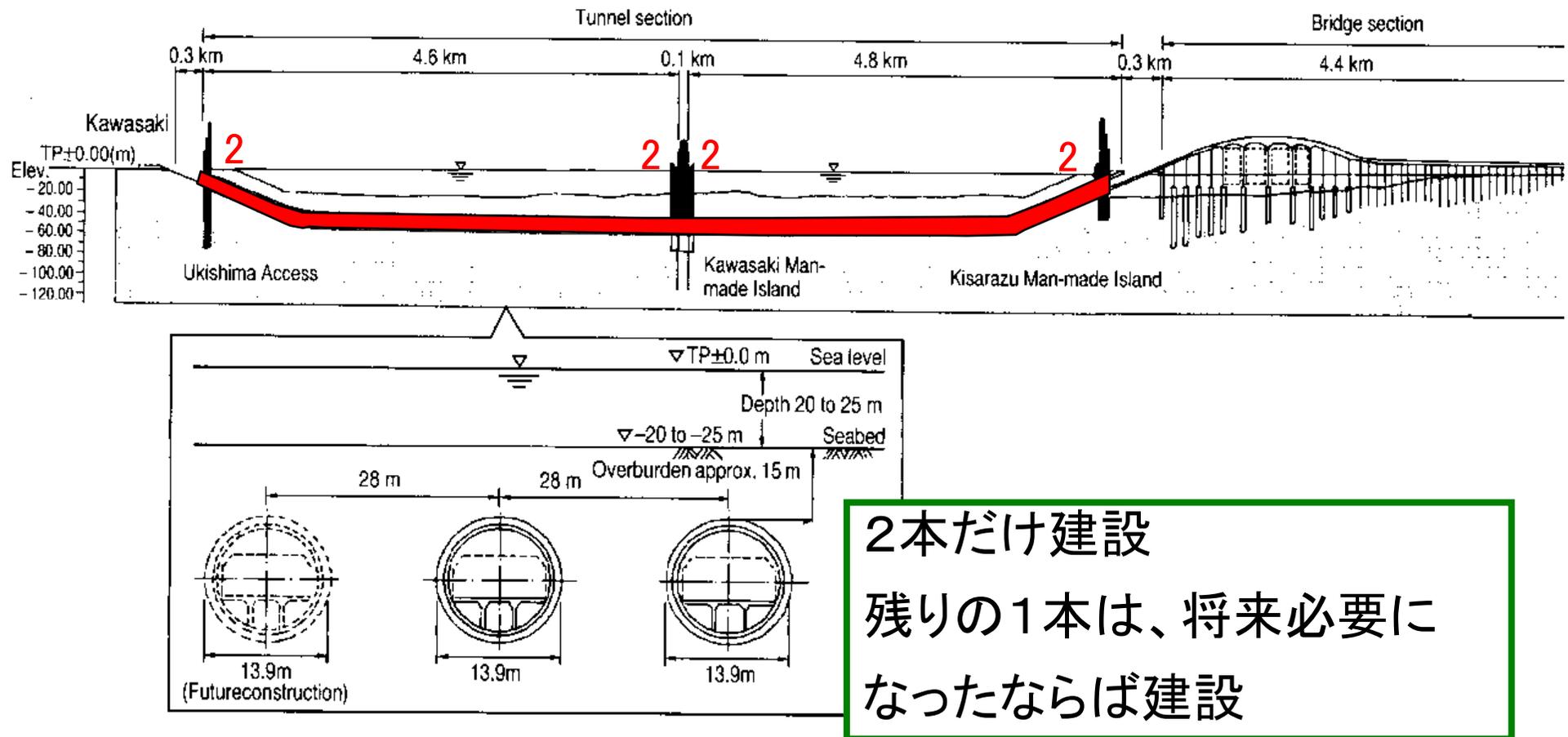
# 東京湾横断道路の構造

- ・浮島取付け部;
- ・川崎側人工島;
- ・橋梁

- ・長さ9.5 km のシールドトンネル;
- ・木更津側人工島;



# 長さ 9.5 km のシールドトンネル

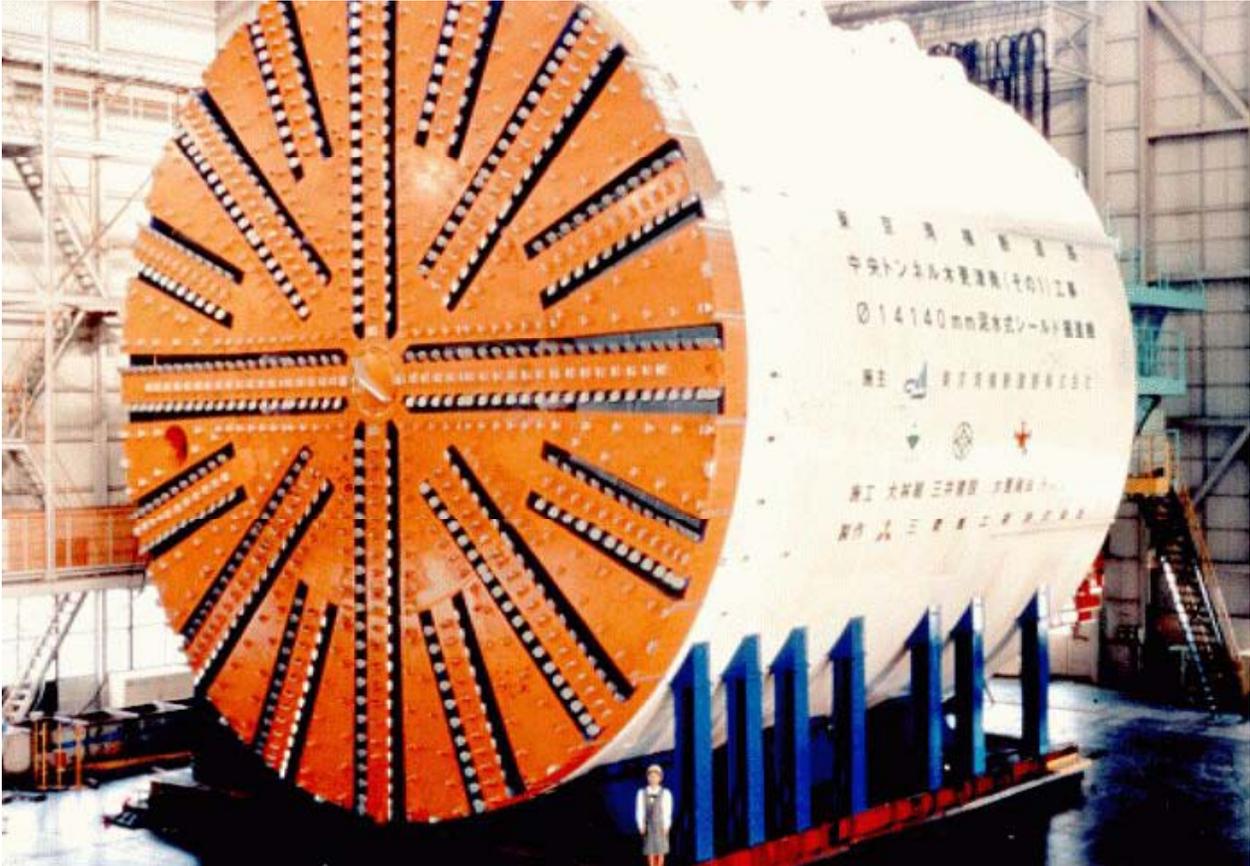


工期短縮のため、8つのシールド掘削機を同時に使用

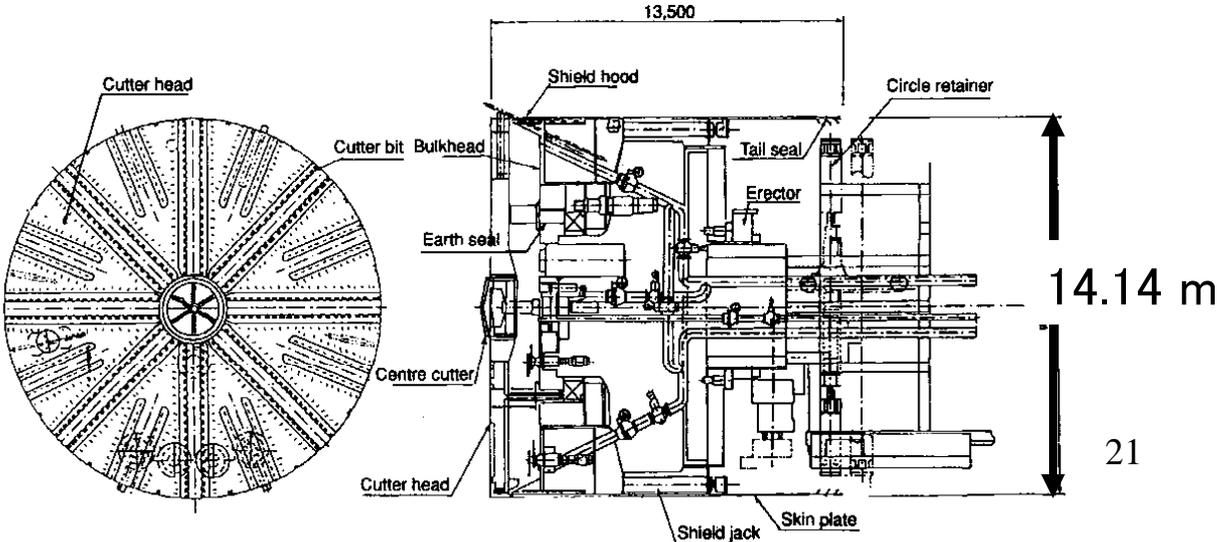


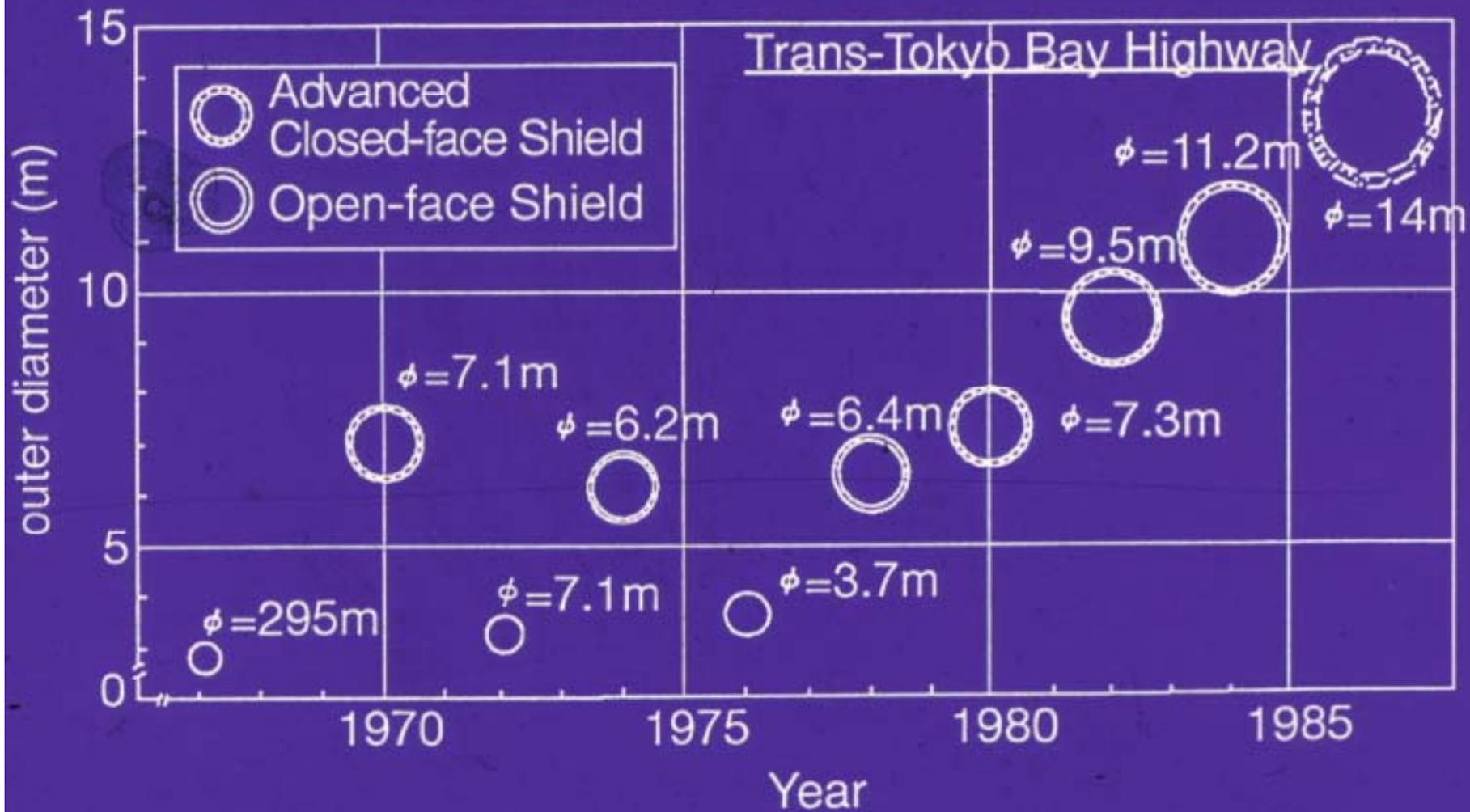
# Blind型(加圧泥水使用)

その原理は？



建設時、世界最大径





**Developments in shield tunnel diameter**

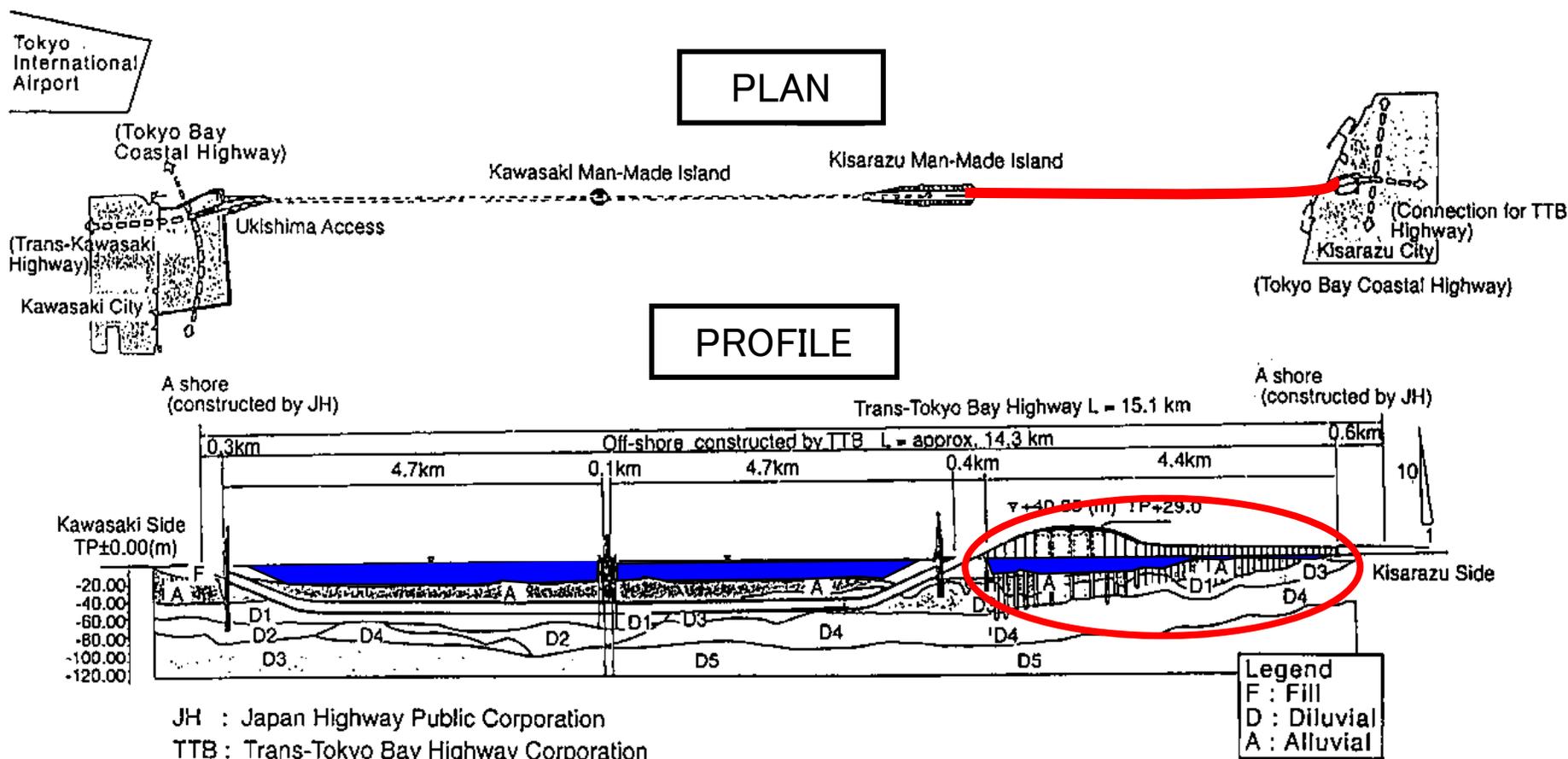
二次RC覆工  
(RCセグメントの内側)

RC セグメント



# 東京湾横断道路の構造

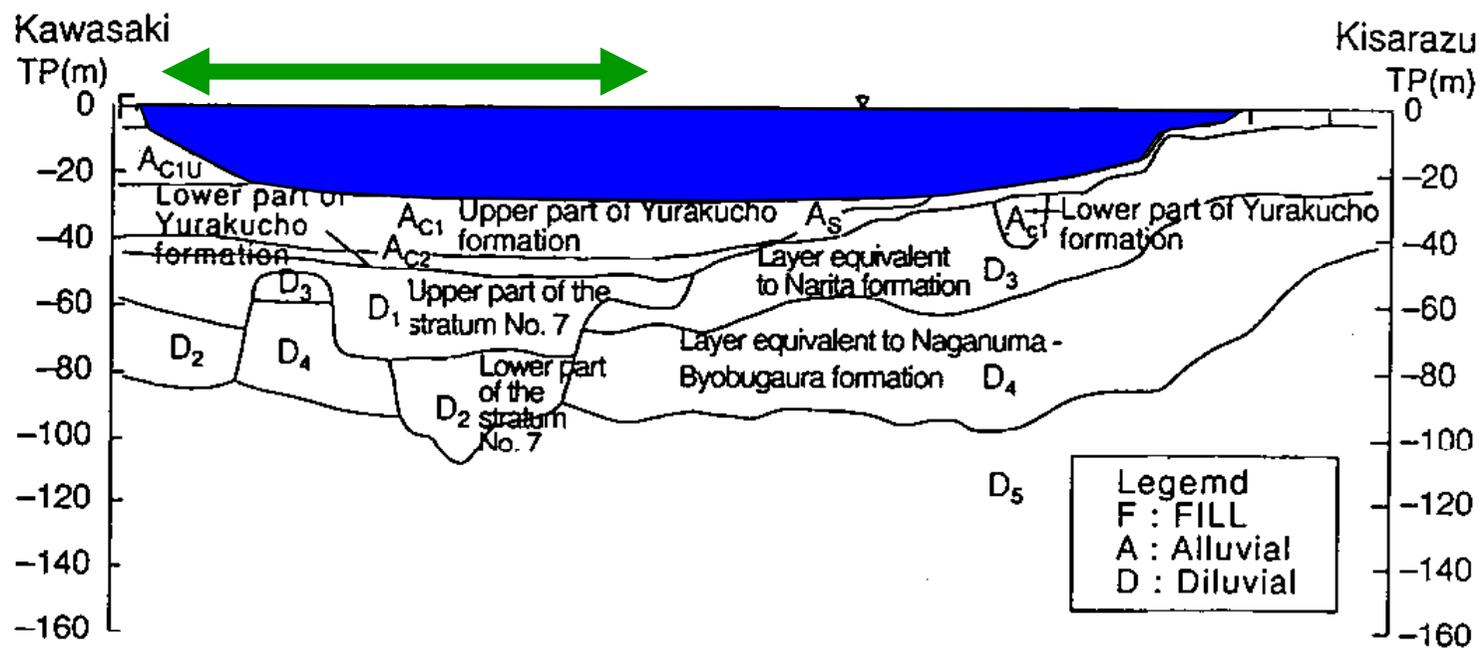
- ・浮島取付け部;
- ・川崎側人工島;
- ・橋梁
- ・長さ9.5 km のシールドトンネル;
- ・木更津側人工島;





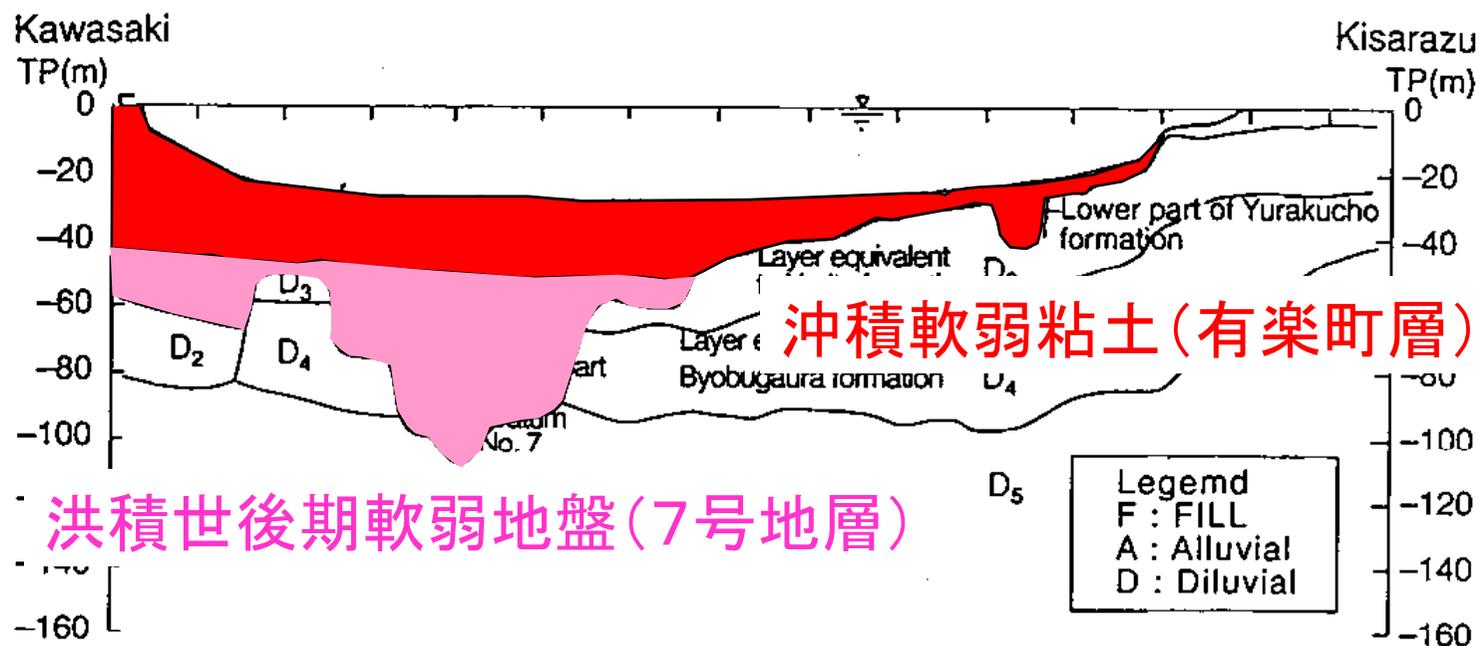
# 構造形式を決定した4つの困難な設計条件

- 比較的深い海;
  - 頻繁な海上交通(東京港);
- 従って、橋梁は受け入れられなかった



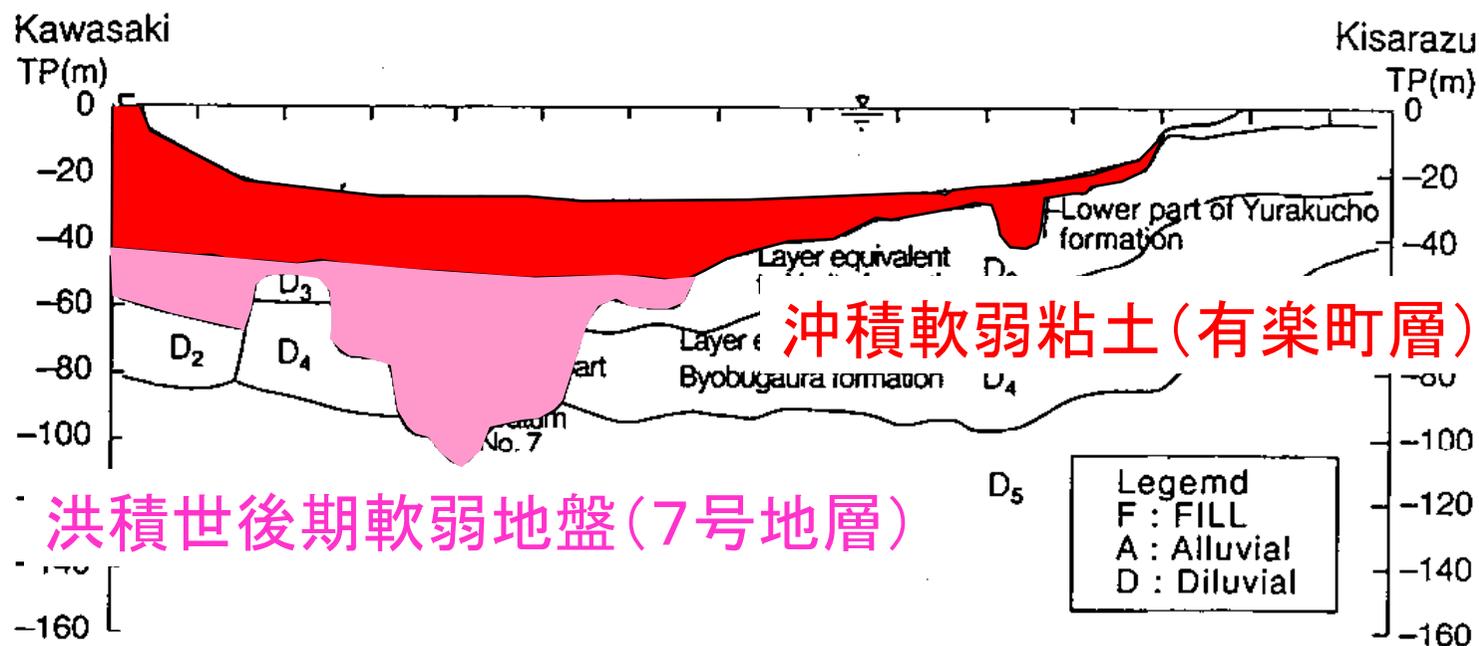
# 構造形式を決定した4つの困難な設計条件

- 比較的深い海;
- 頻繁な海上交通(東京港);
- **軟弱な基礎地盤;**
- 高い地震活動度.



# 構造形式を決定した4つの困難な設計条件

- 比較的深い海;
- 頻繁な海上交通(東京港);
- 軟弱な基礎地盤;
- 高い地震活動度.



# 東京湾地帯の地震活動度は非常に高い

1923  
関東大地震震央

n.b., the 1923 Great Kanto Earthquake with M= 7.9

→ Two design earthquake levels: L1 and L2

TOKYO BAY

Longitude = 139 49 0

Latitude = 35 26 0

From 1885 to 1980

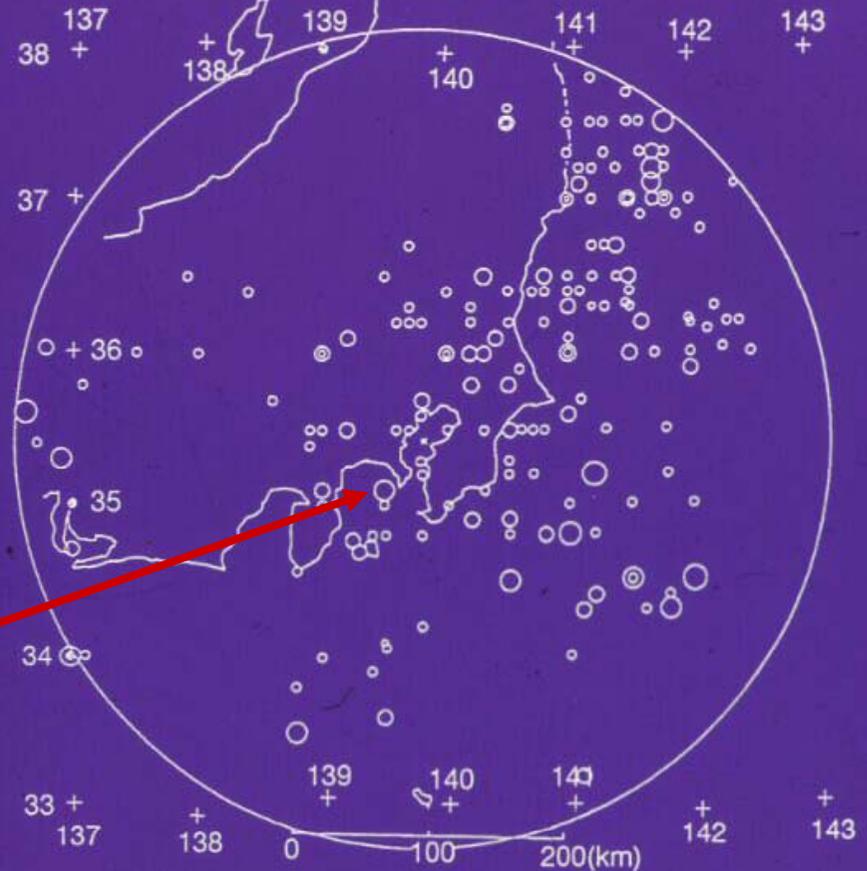
R = 300(Km)

6.5GE•Magnitude•LT•7.0 = °

7.0GE•Magnitude•LT•7.5 = ○

7.5GE•Magnitude•LT•8.0 = ⊙

8.0GE•Magnitude•LT•8.5 = ⊚

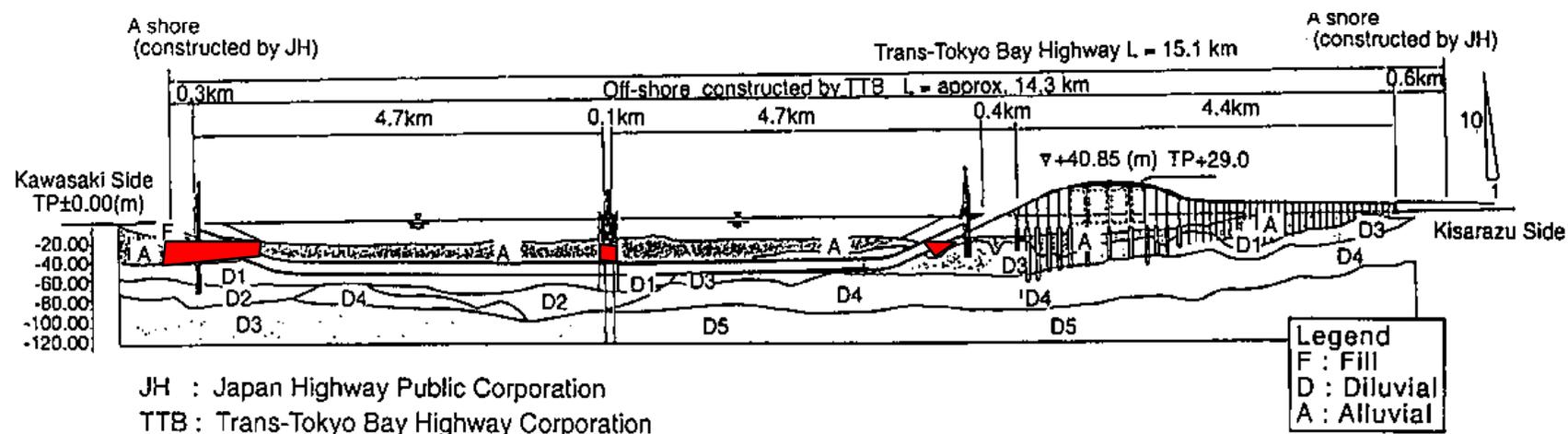


Distribution of earthquakes more than Magnitude 6.5 occurred within 350km diameter centered from the Tokyo Bay between 1885 and 1979

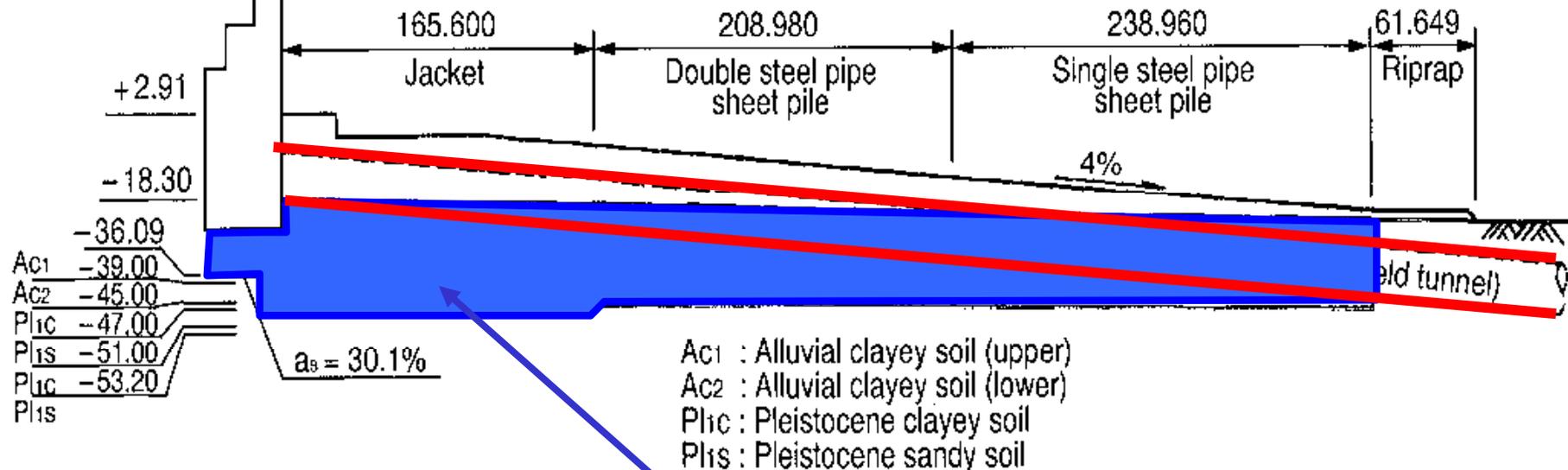
# 地盤工学に関連した重要な設計・施工上の課題:1

軟弱粘土層の大規模な**原位置セメント混合**による地盤改良

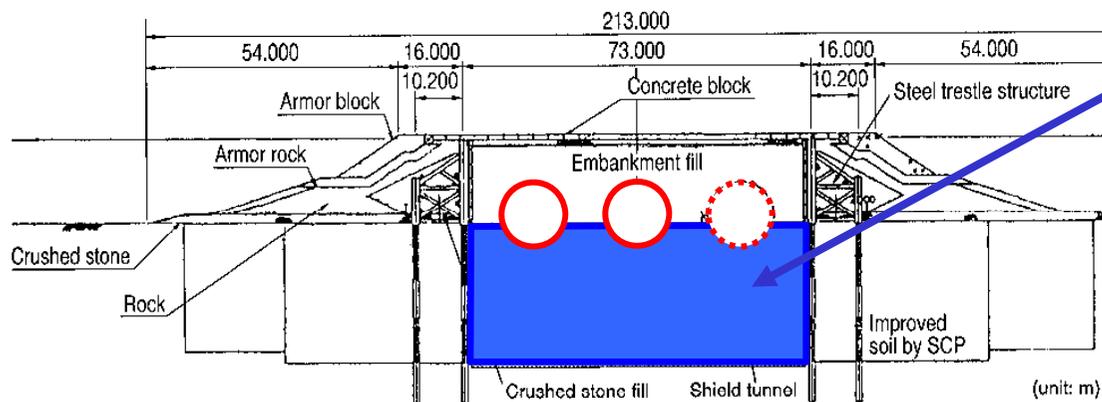
→セメント改良粘土の強度を正確に制御する必要性



# 浮島取付け部斜路部盛土



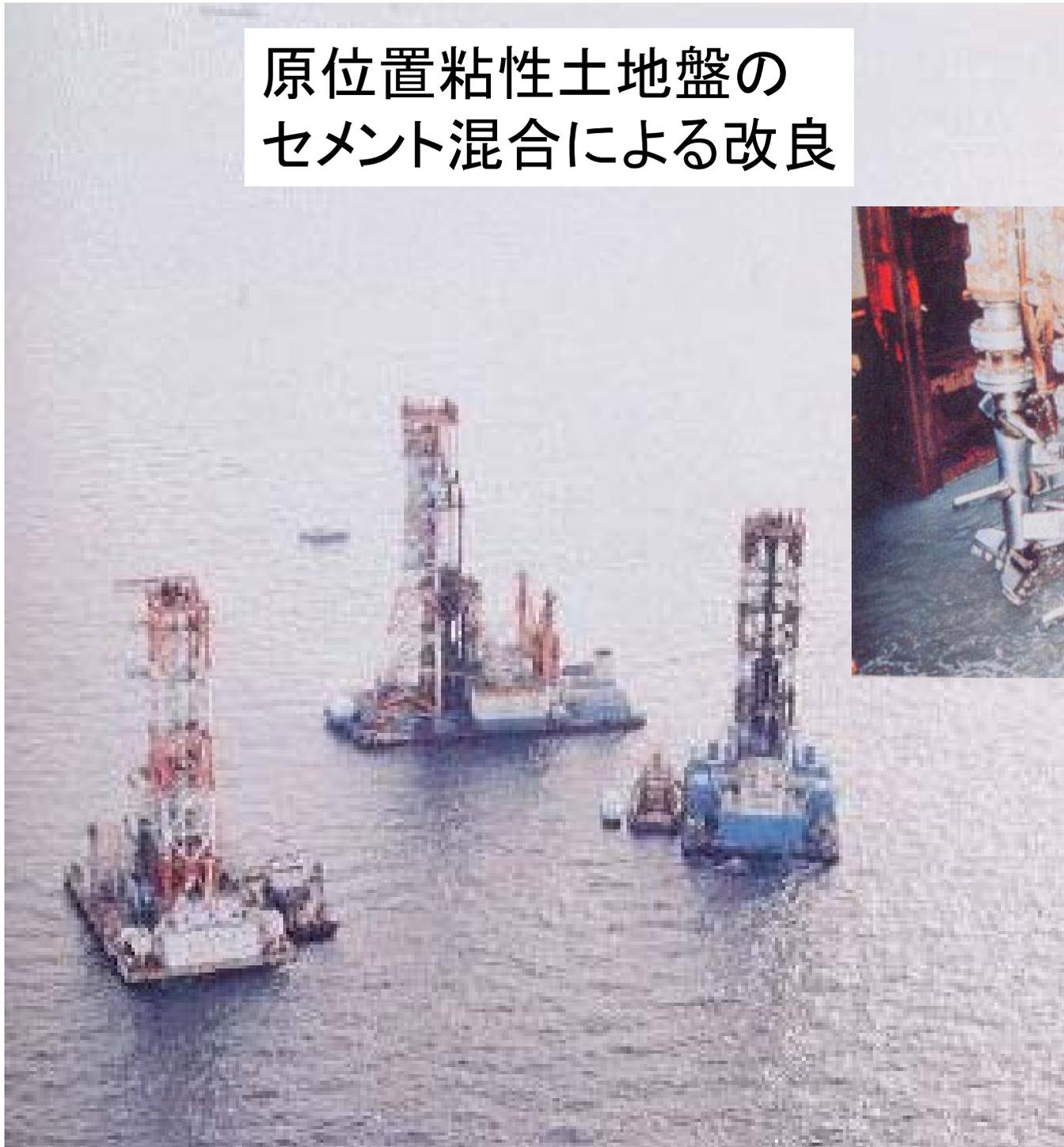
B-B section



超軟弱粘土層を原位置  
セメント混合により改良：  
(制御された強度)

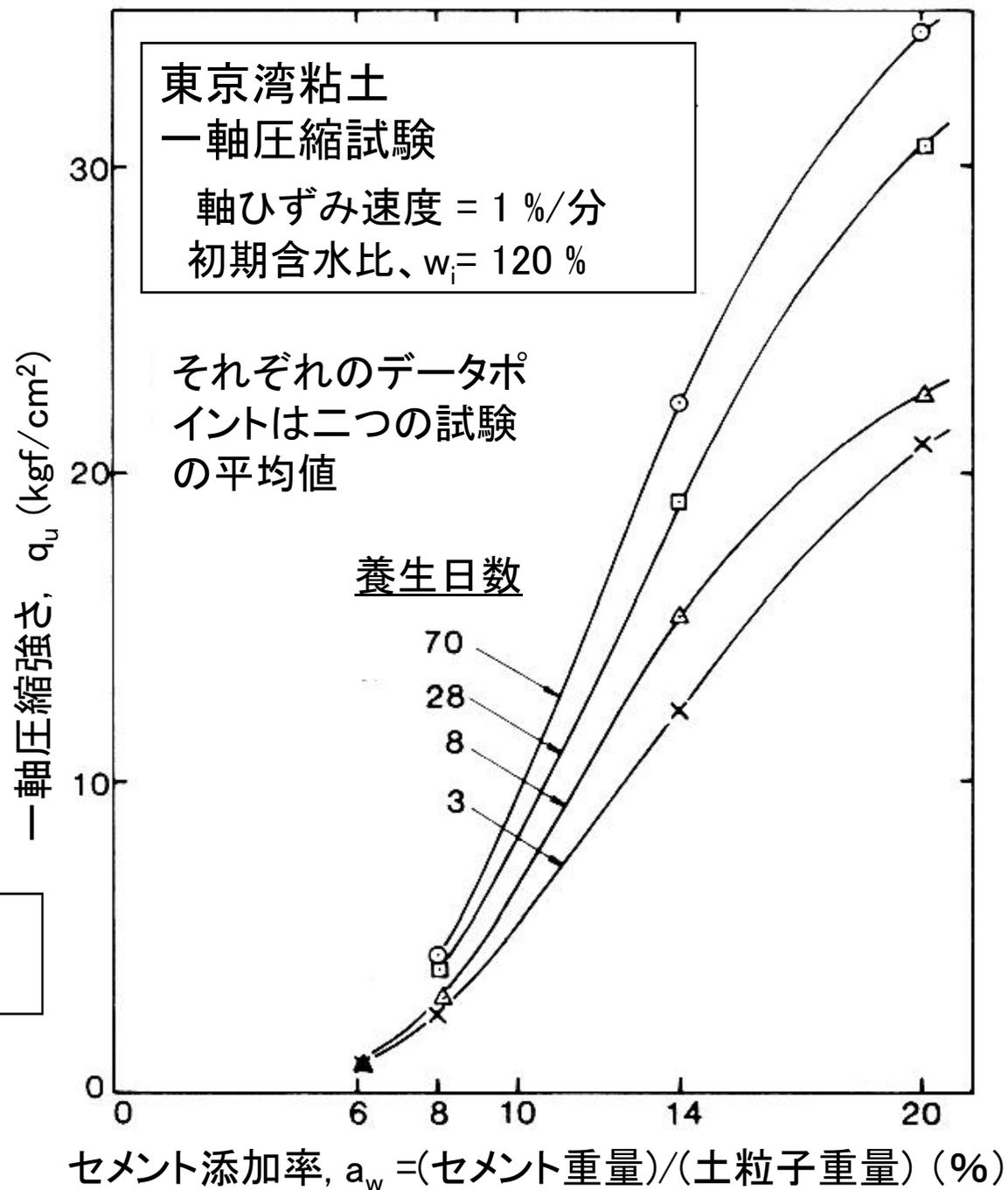
- a) 盛土地盤系の安定性 (特に地震時) が保証できる程度に強く。
- b) スムースなトンネル掘削ができる程度に弱く。

# 原位置粘性土地盤の セメント混合による改良

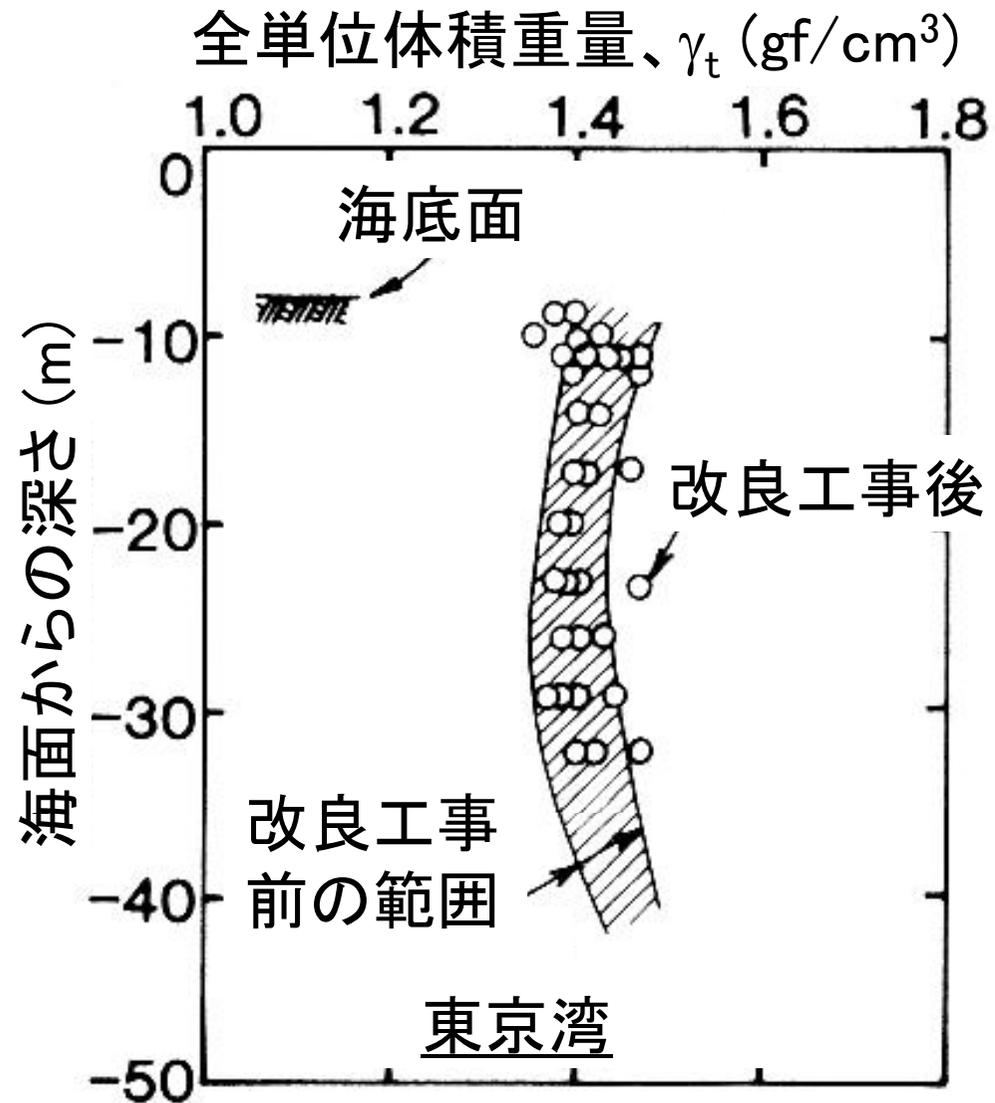


- ・セメント添加率が6%程度以下だと全く改良効果がない。
- ・20%程度以上だと添加率の増加に伴う強度増加が少ない。

異なる養生日数でのセメント添加率と一軸圧縮強さの関係



- ・セメント添加率に伴う地盤の密度増加は、ほとんど無い。



粘土地盤で深層混合工法実施前後の全単位体積重量の比較(菅野)

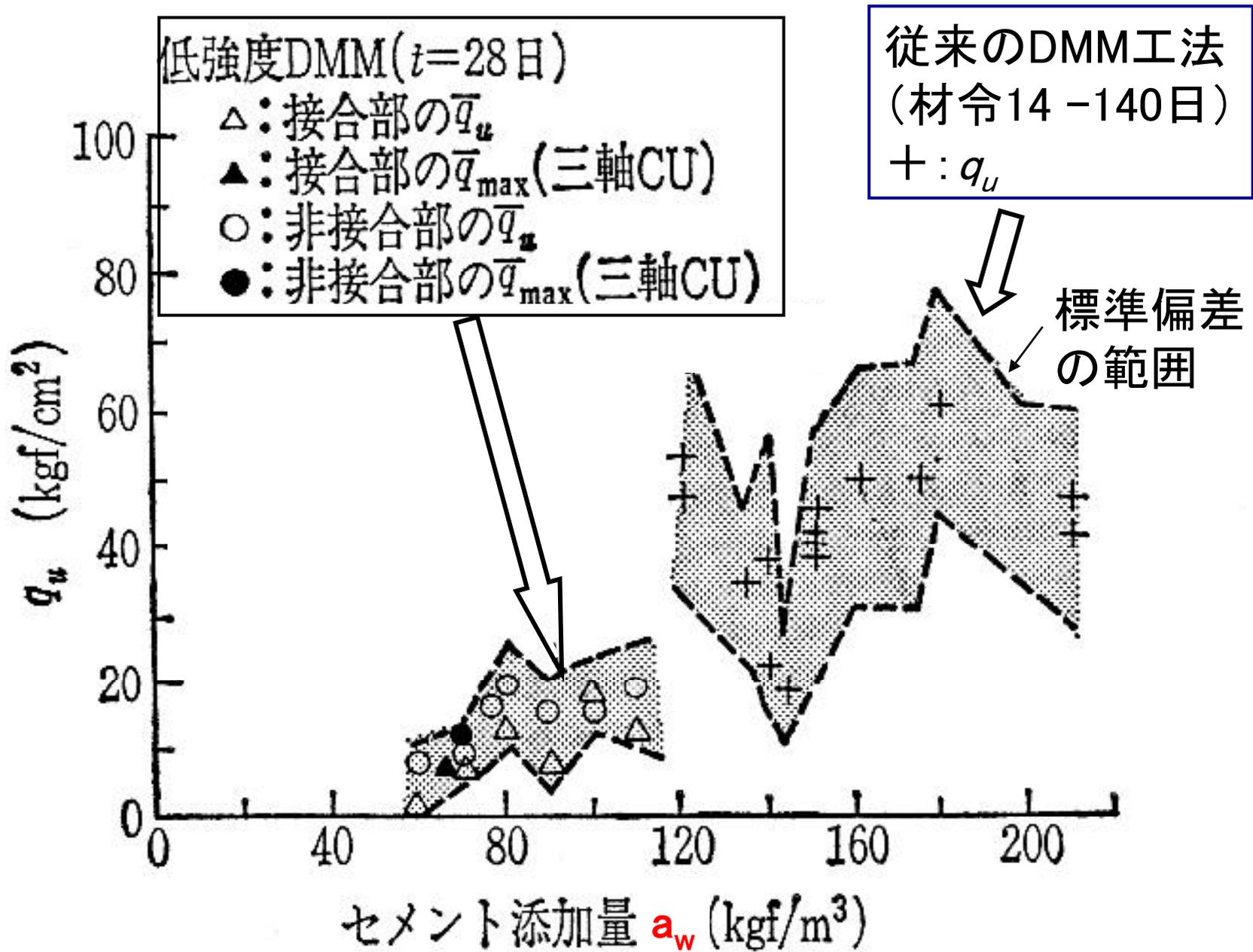
# 東京湾横断道路で用いられたセメント混合による地盤改良 工事と盛土工事の総括表

セメント処理法	混合配合	工事箇所	工事量 ; 1,000 m <sup>3</sup>
従来式セメント 深層混合 (DMM)	セメント量: 140 kg/m <sup>3</sup> W/C 比: 100 %	川崎側人工島	132
低強度DMM	セメント量 : 70 kg/m <sup>3</sup> W/C 比: 100	浮島取付け部 木更津側人工島 川崎側人工島	1,248 289 168
スラリータイプ セメント混合砂 (*: 原設計では 80 kg/m <sup>3</sup> )	砂: 1,177 kg/m <sup>3</sup> セメント量: 100 kg/m <sup>3</sup> * 粘土: 110 kg/m <sup>3</sup> 海水: 505 kg/m <sup>3</sup>	浮島取付け部 木更津側人工島 川崎人工島 (原設計通り)	1,028 351 118
ドライタイプ セメント混合砂	砂: 1,330 kg/m <sup>3</sup> セメント: 100 kg/m <sup>3</sup> 分離防止用高分子材料: 110 g/m <sup>3</sup>	木更津側人工島	435

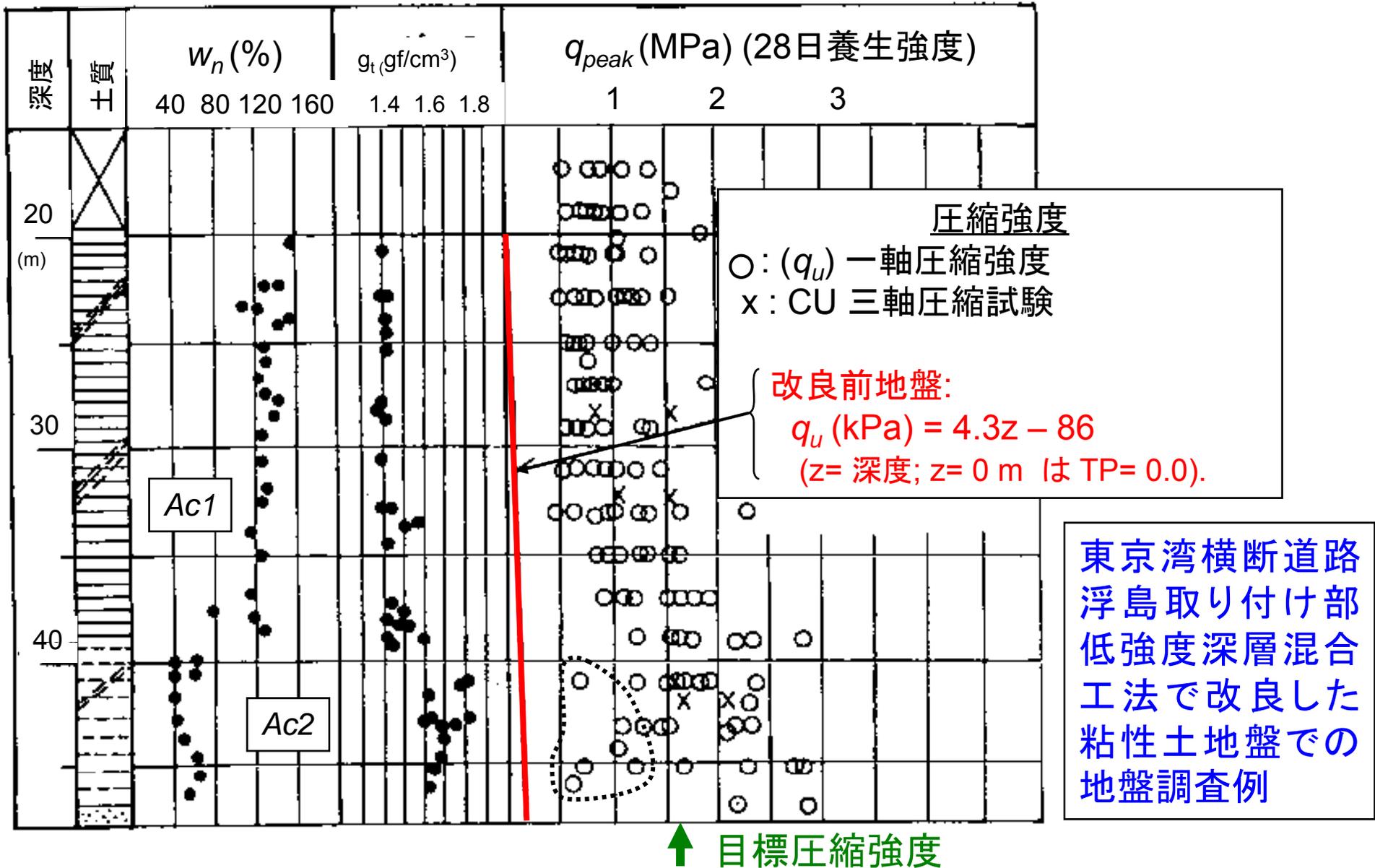
セメント改良工事(盛土と原地盤)の総量; 3.77 百万 m<sup>3</sup>

## 低強度DMMのセメントスラリーの配合設計

- **セメント添加量 $a_w$**  : 70 kg/m<sup>3</sup>  
強すぎず、弱すぎないように決定  
(目標一軸圧縮強度 10 kgf/cm<sup>2</sup> or 1 MPa)。)
- **水セメント(w/c) 比**: 100 %  
高めにした。これは、セメントスラリーの量がある程度多くなり、できるだけ一様に混合できるように決定。



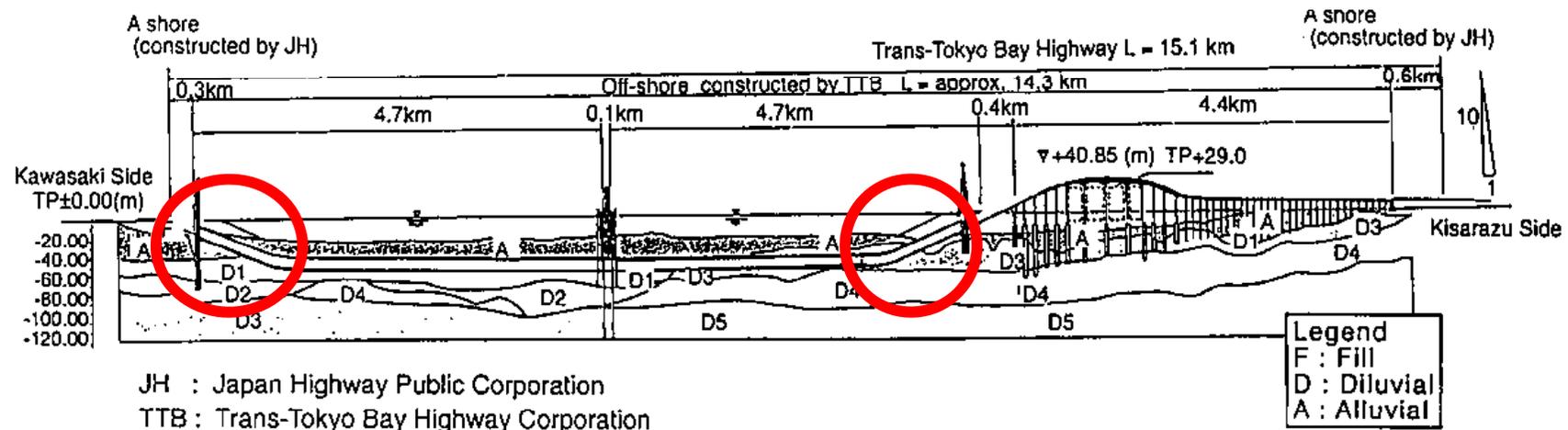
東京湾横断道路、浮島取り付け部、深層混合処理工法(試験工事)における従来工法と低強度工法によるセメント添加量  $\alpha$  と圧縮強度の関係



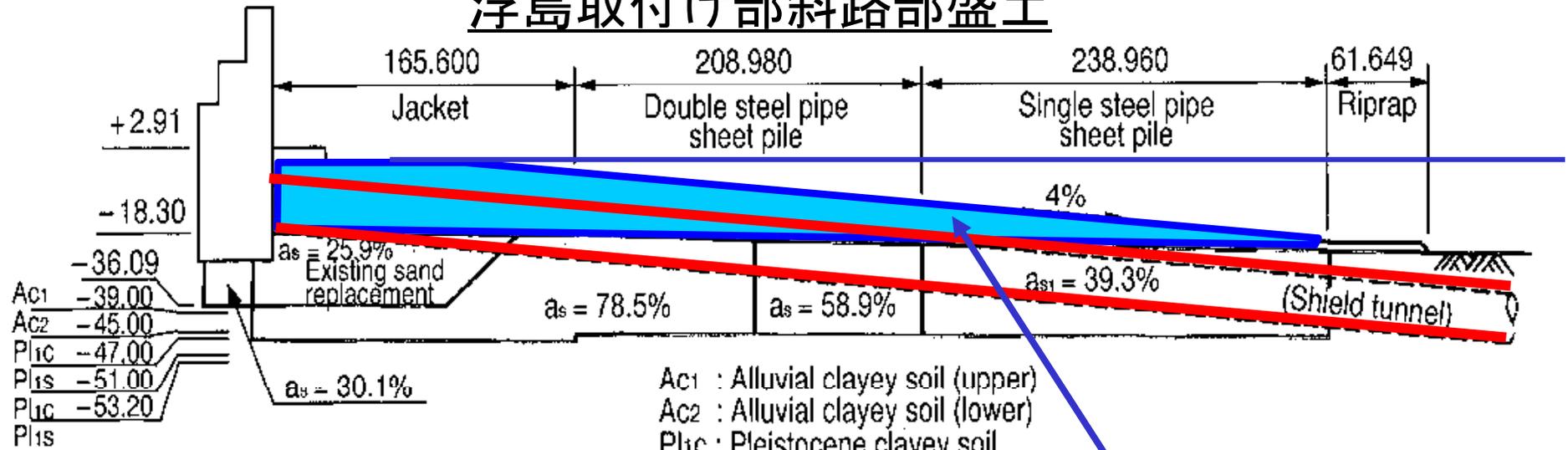
一軸圧縮強度は試料の乱れの影響のためにバラツキが大きすぎて、最終的判断が出来なかった。三軸圧縮強度で最終的判断。

## 地盤工学に関連した重要な設計・施工上の課題 - 2:

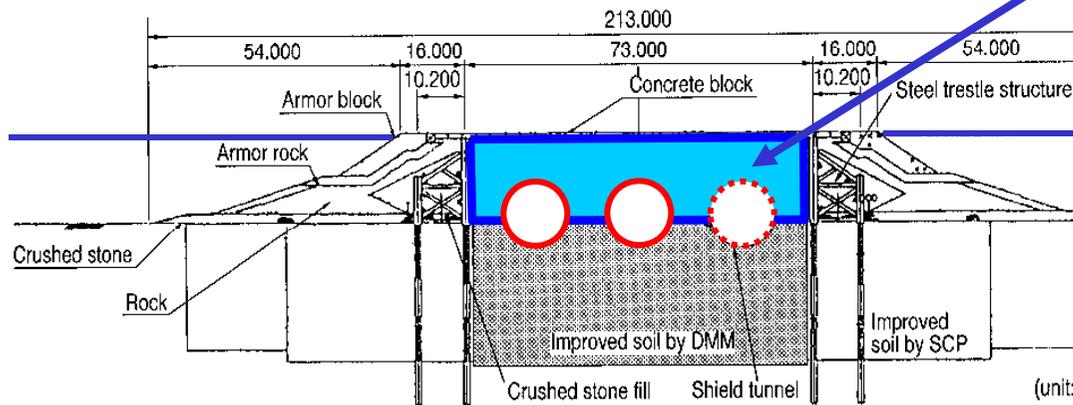
セメント混合した砂のスラリー（低級なコンクリート）を用いた斜路部の水中盛土の建設



# 浮島取付け部斜路部盛土



B-B section



セメント混合砂のスラリーによる水中盛土:

- a) 制御された強度:
- b) トンネルの浮上を防ぐための一定値 ( $1.8 \text{ gf/cm}^3$ ) 以上の全単位体積重量の確保

このようなセメント改良砂の水中盛土工事は、前例がない。

→研究と慎重な技術的判断が必要

→配合設計と施工法がポイント

### a)スラリータイプセメント混合砂の配合設計

砂: 1,177 kg/m<sup>3</sup>

セメント量: 80 kg/m<sup>3</sup>\* (\* 実施工では 100kg/m<sup>3</sup>)

粘土: 110 kg/m<sup>3</sup>(透水性を低下させて、周囲の海水と混合しないようにするため)

海水: 505 kg/m<sup>3</sup>

### b)施工法

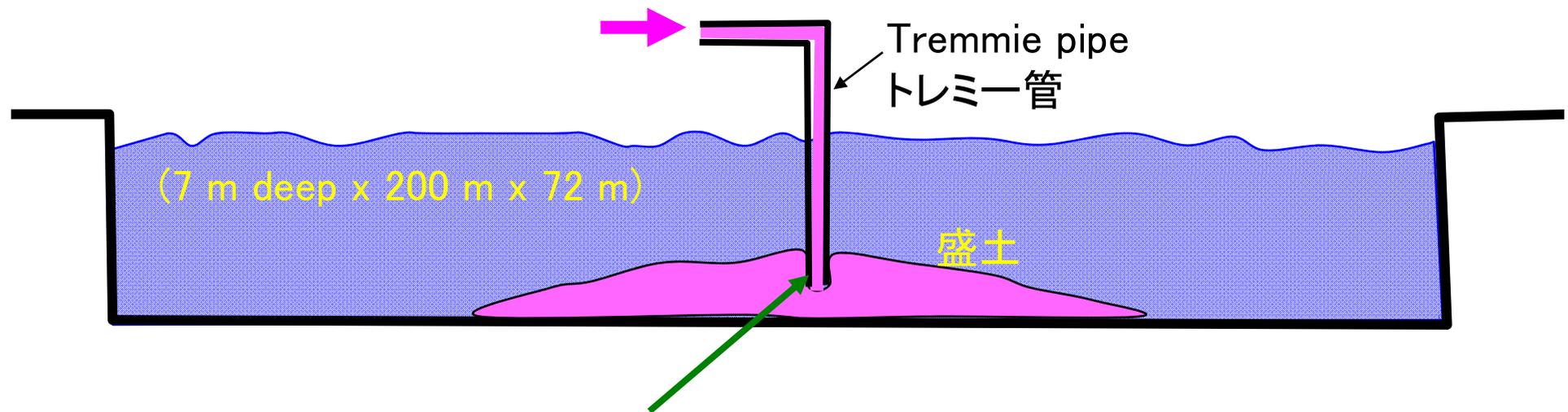
水中での拡散防止がポイント

特に、セメントの流出を防止する必要がある:

→トレミー管で水中盛土工事

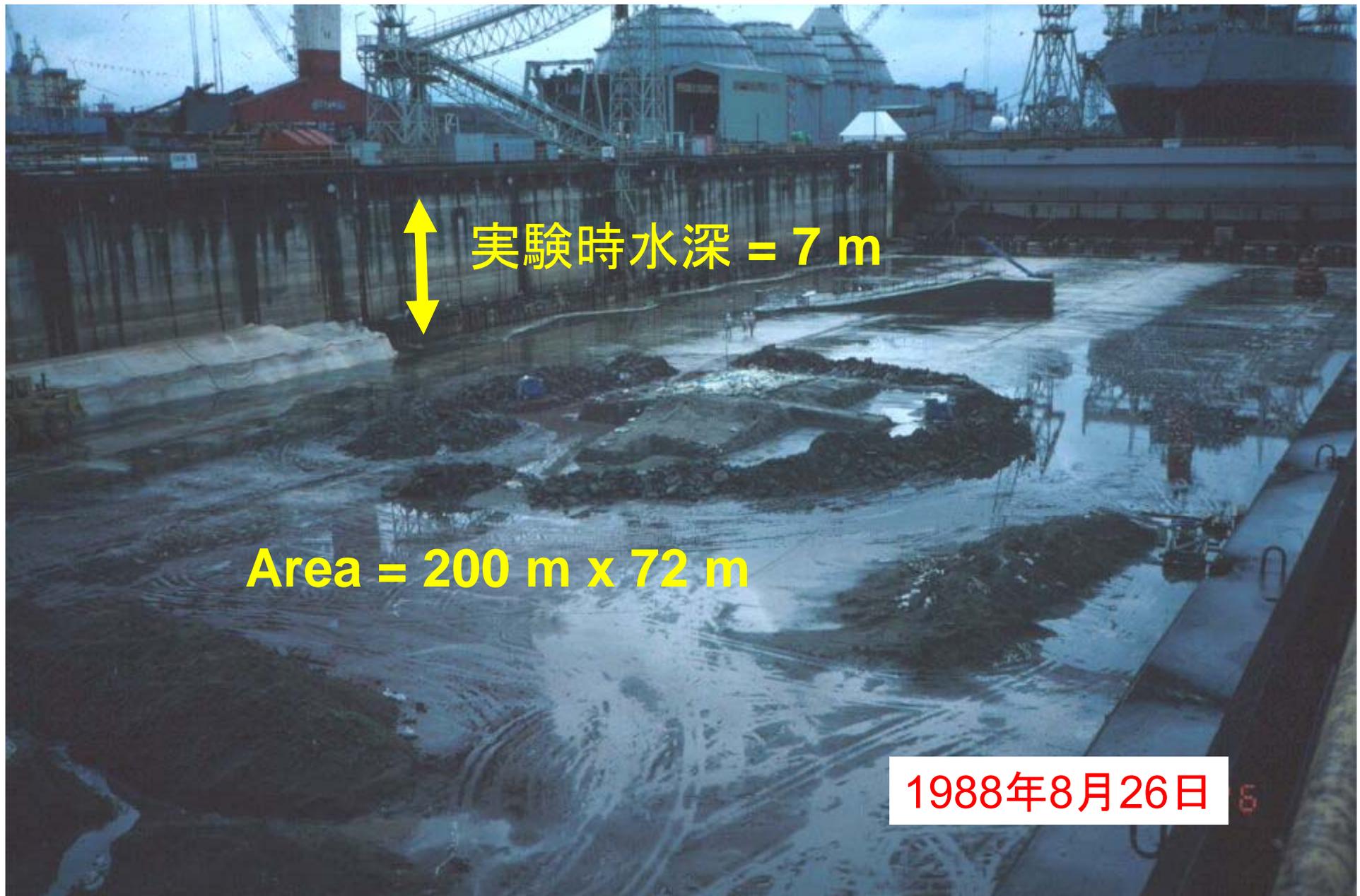
## 造船用ドックでの実大規模施工実験

プラントで製造されたスラリー状のセメント混合砂



トレミー管の先端は、常に盛土内に存在していて、盛土材料の水中自由落下をさける必要が絶対にある

市原市、三井造船のドック....  
造船用ドックでの実大規模施工実験(水抜き後)



実験時水深 = 7 m

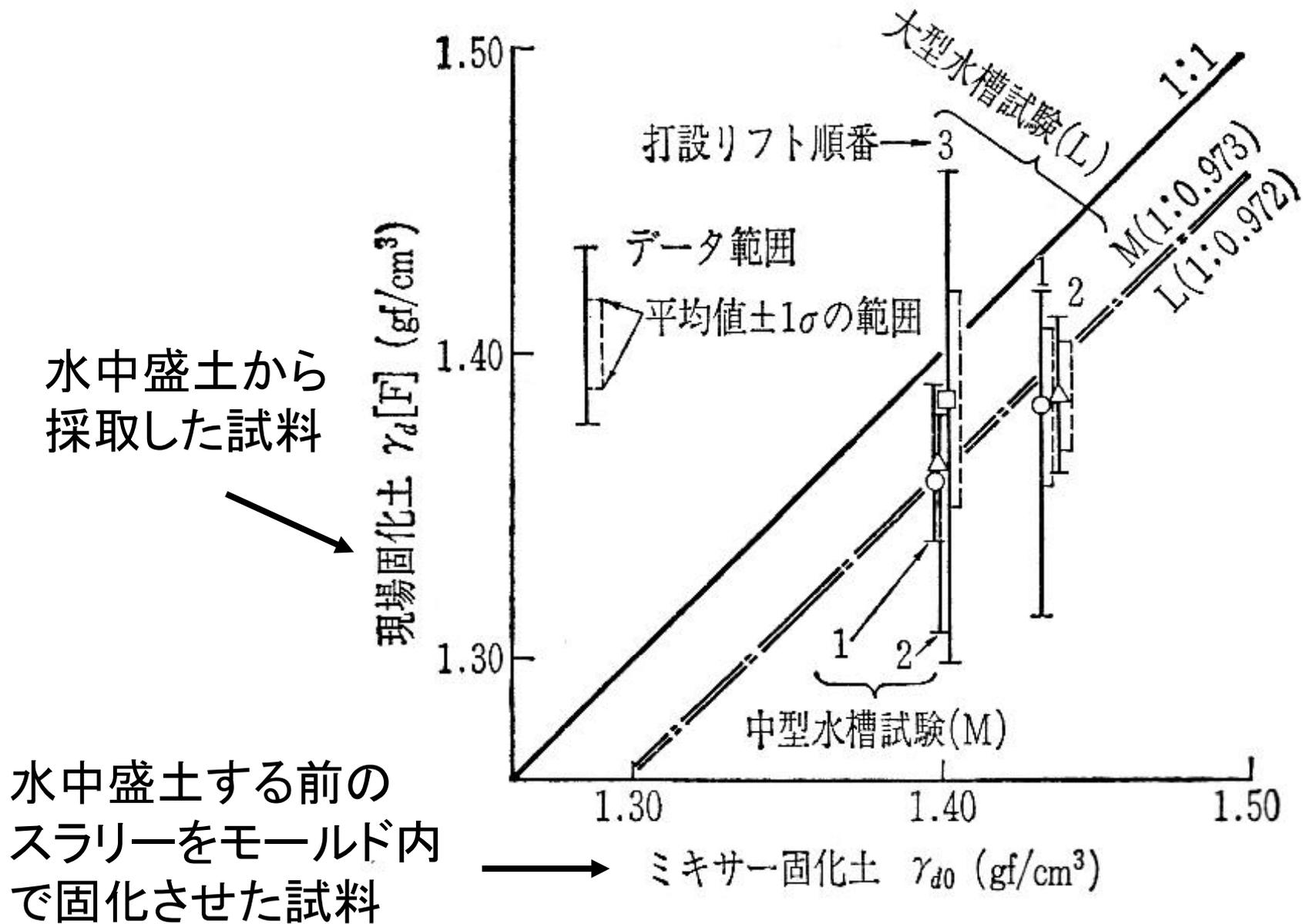
Area = 200 m x 72 m

1988年8月26日

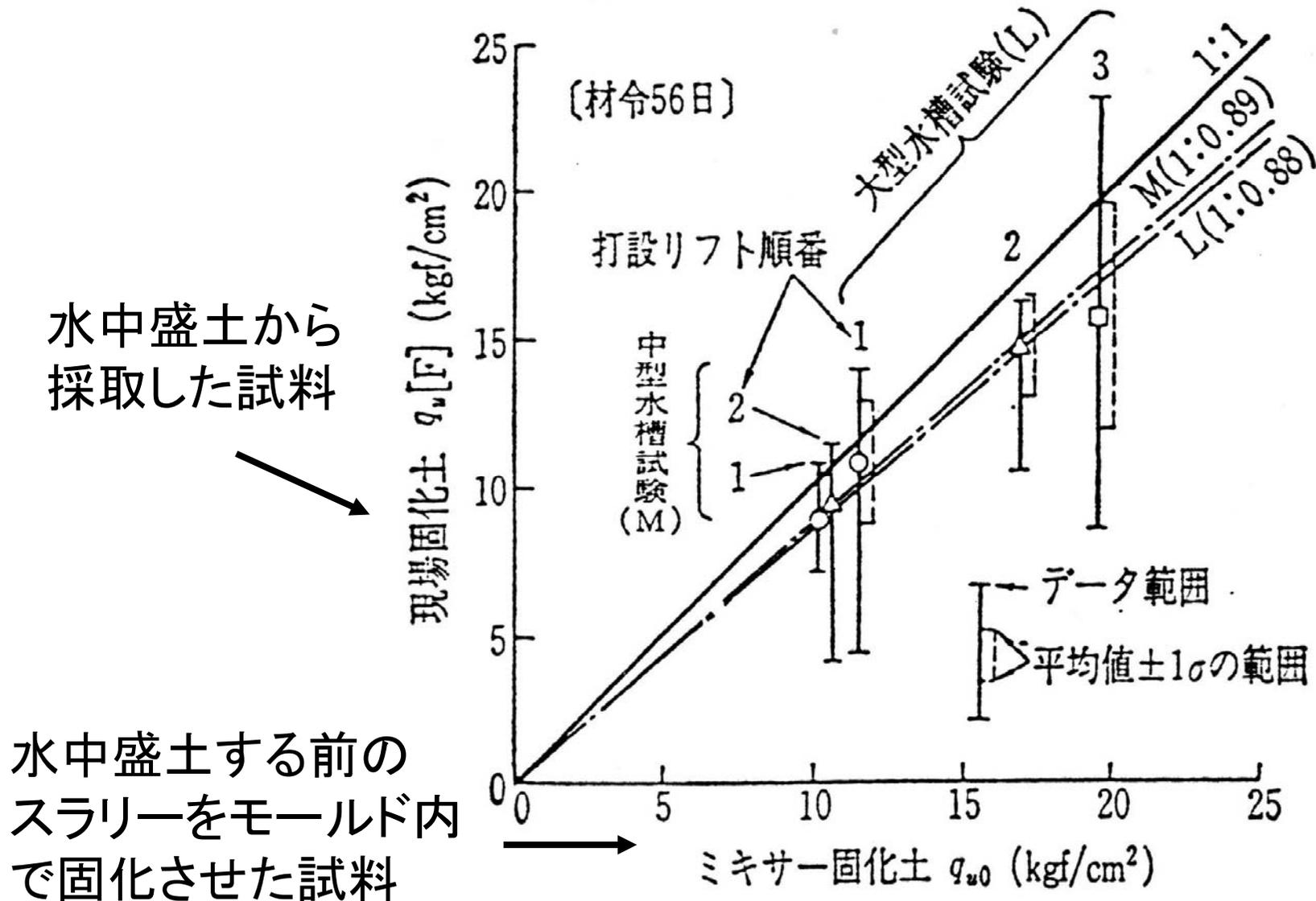


1988年8月26日

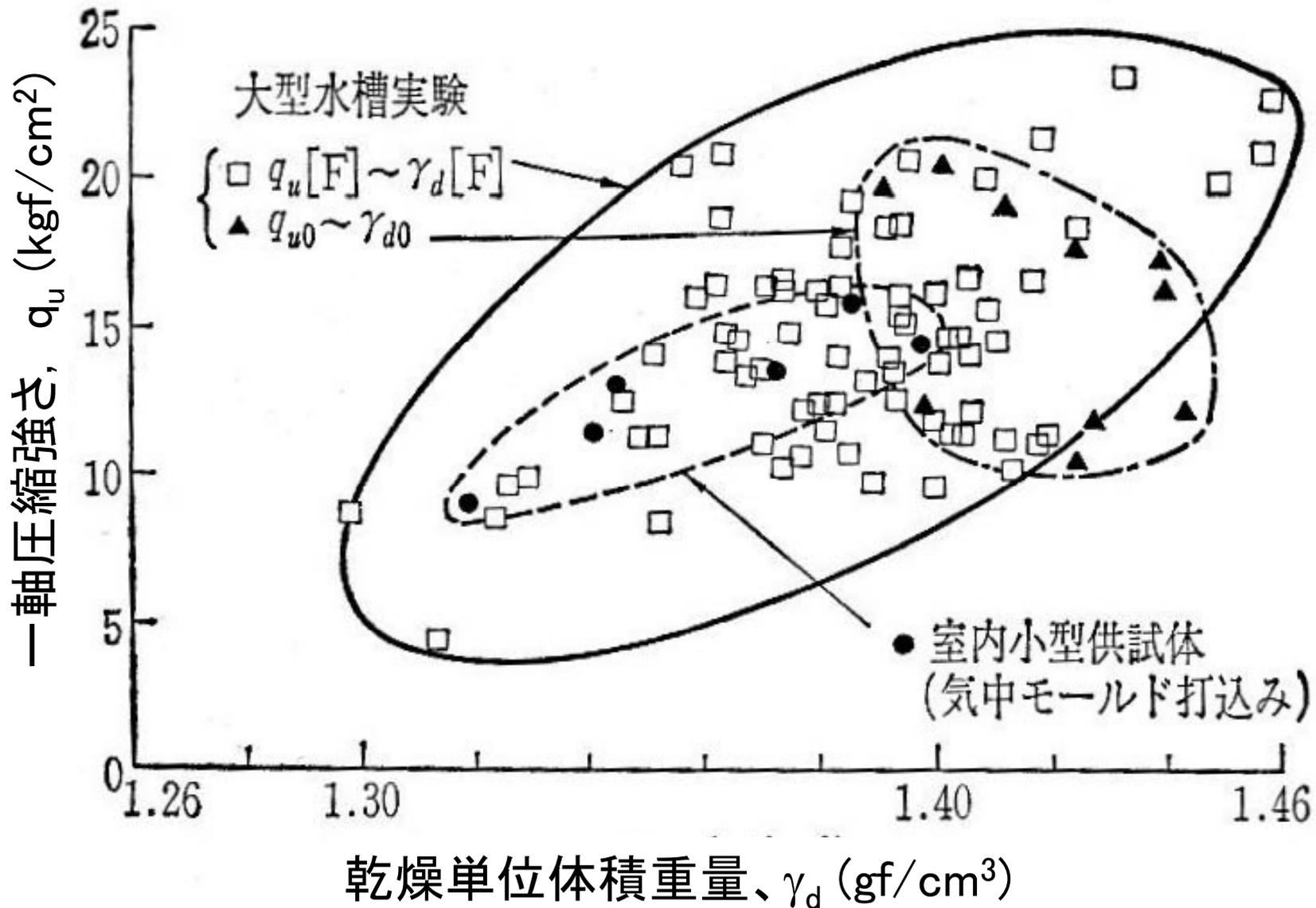
水中盛土施工により周囲の海水を吸収して、  
単位体積乾燥重量 $\gamma_d$ は減少する。



水中盛土施工により周囲の海水を吸収して単位体積乾燥重量 $\gamma_d$ が減少することにより、強度は減少。  
 しかし、著しい減少ではなく、設計で考慮できる程度。



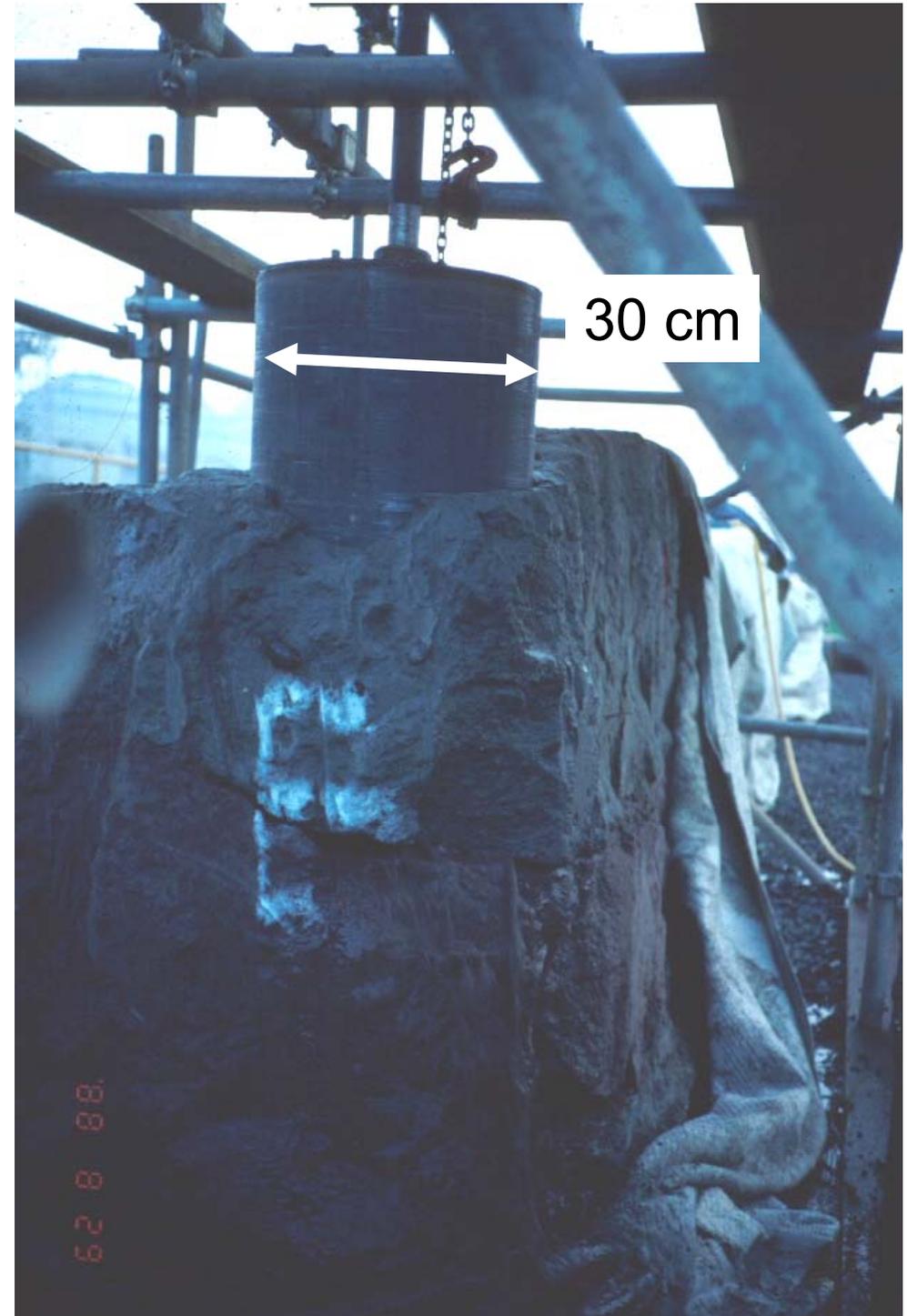
$q_u$ は $\gamma_d$ と相関しているのので、セメントの流出は無いと判断できる。



東京湾横断道路スラリー式事前混合工法に関連したセメント改良土の一軸  
圧縮強度と乾燥単位体積重量の関係

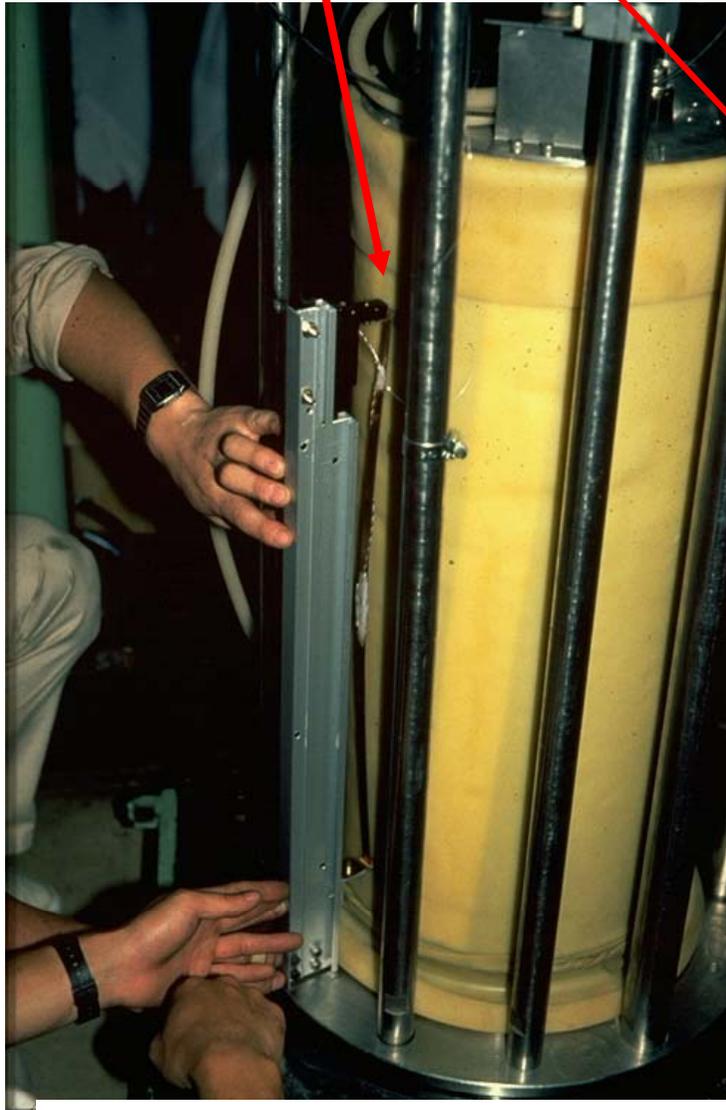
では、水中盛土の変形強度特性は？

寸法効果があることを想定して、直径 5 cm の試料とともに、直径 30 cm の不攪乱試料の採取



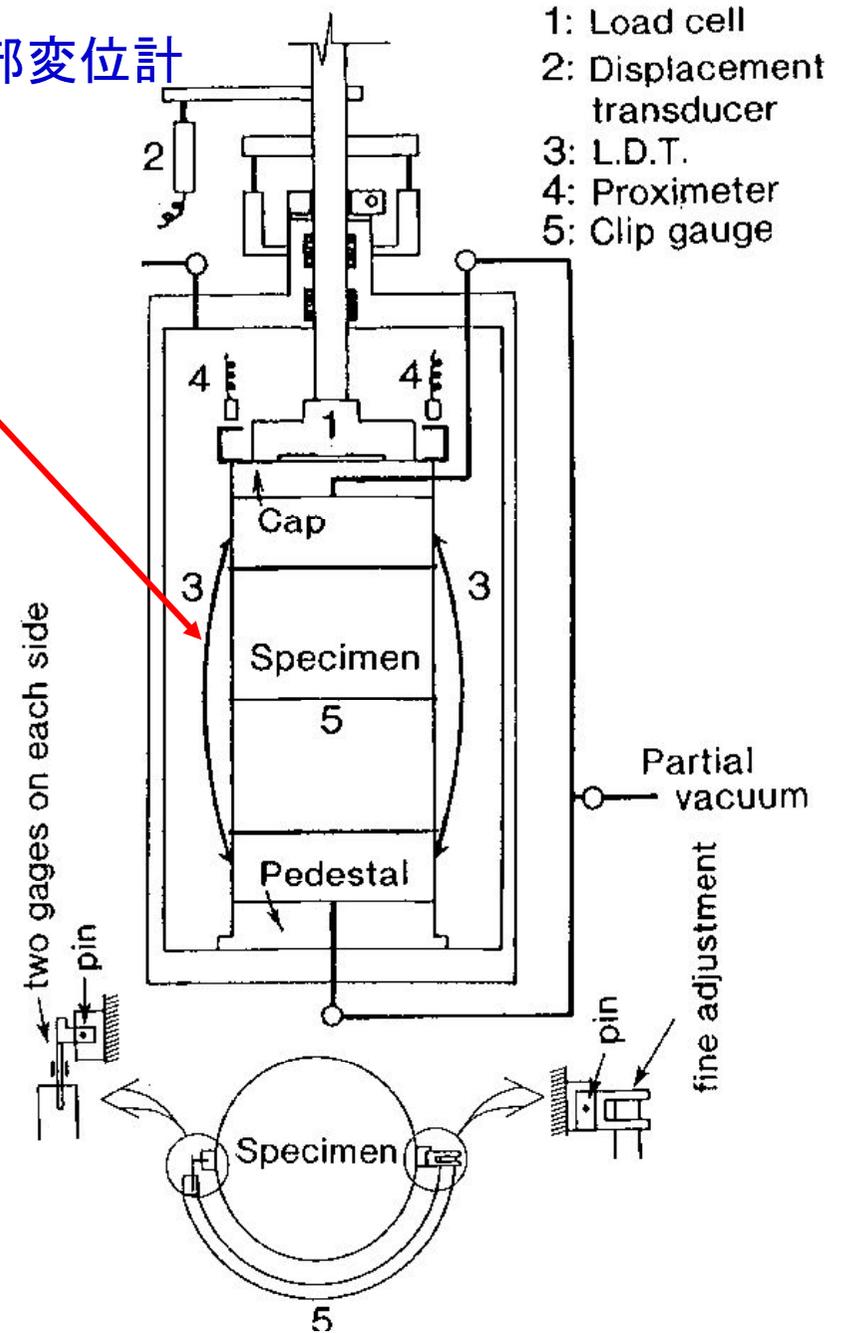


# LDTの使用



東京大学生産技術研究所  
大型三軸試験装置

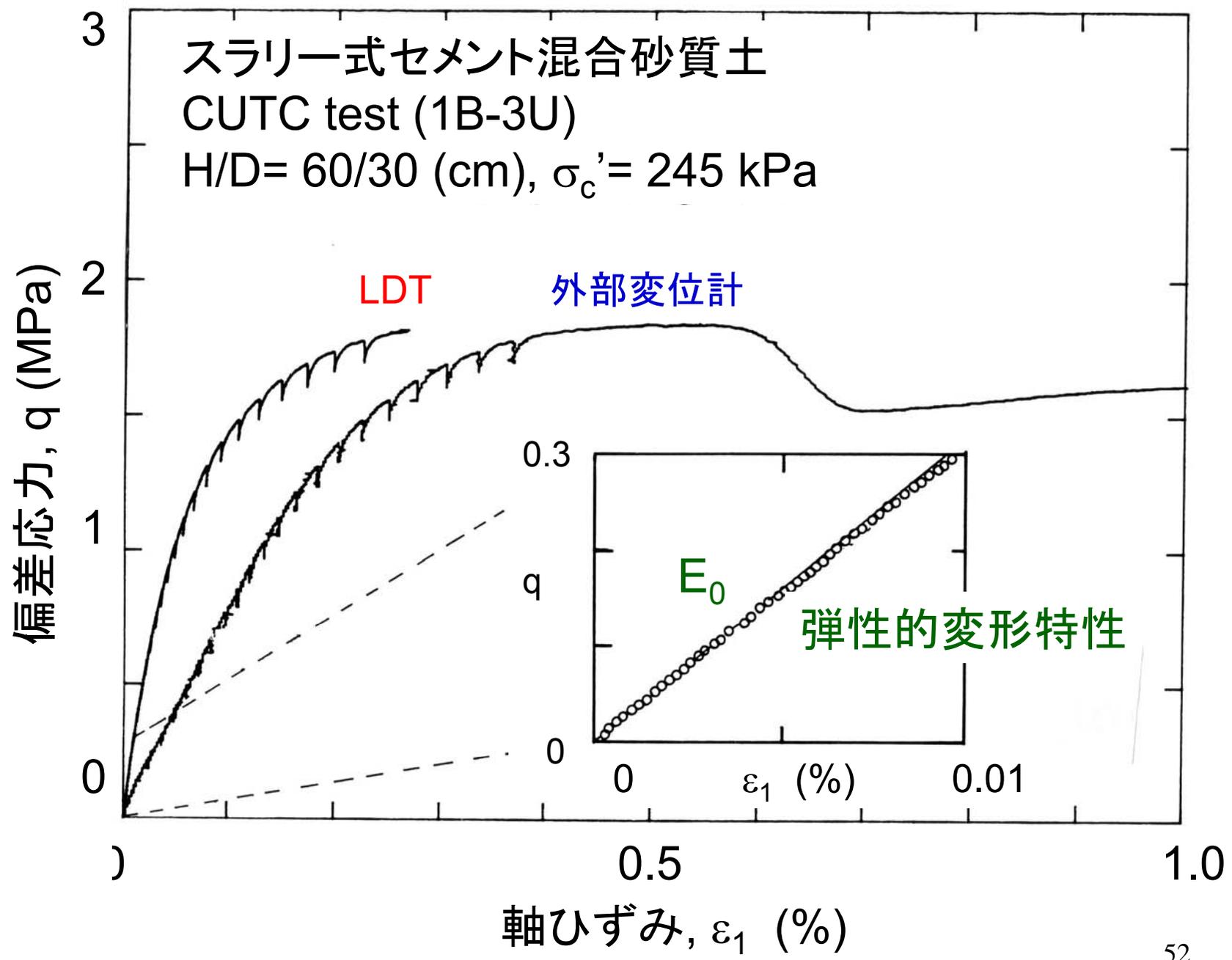
## 外部変位計

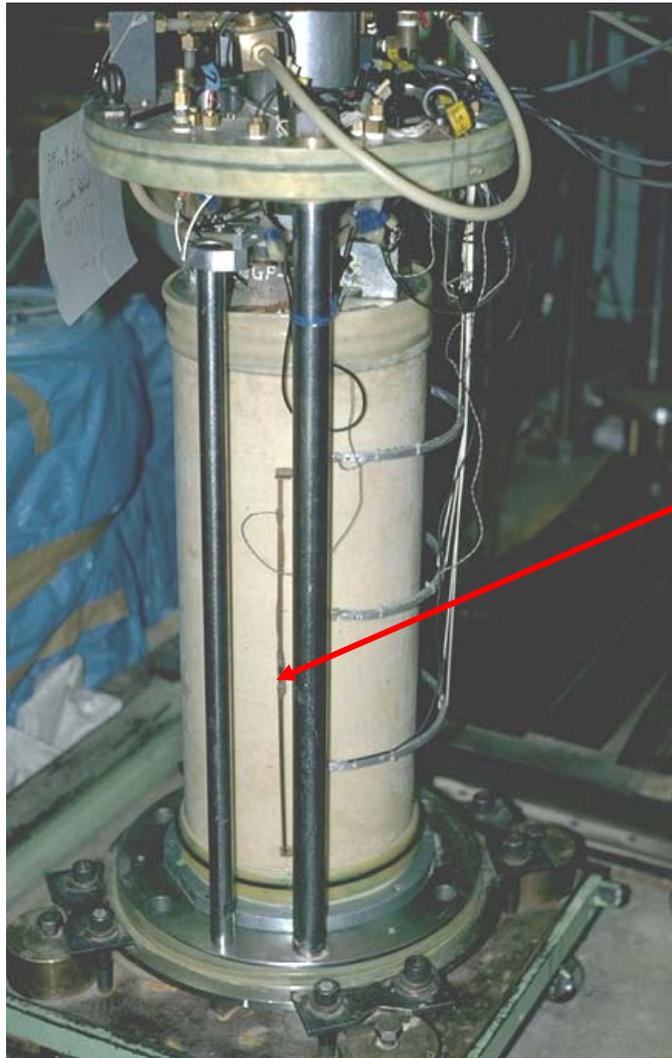


高さ60 cm H x 直径 30 cm

三軸圧縮試験後：  
引張り破壊ではなく、せん断  
面が形成。  
土質力学のせん断破壊理論  
を適用できる



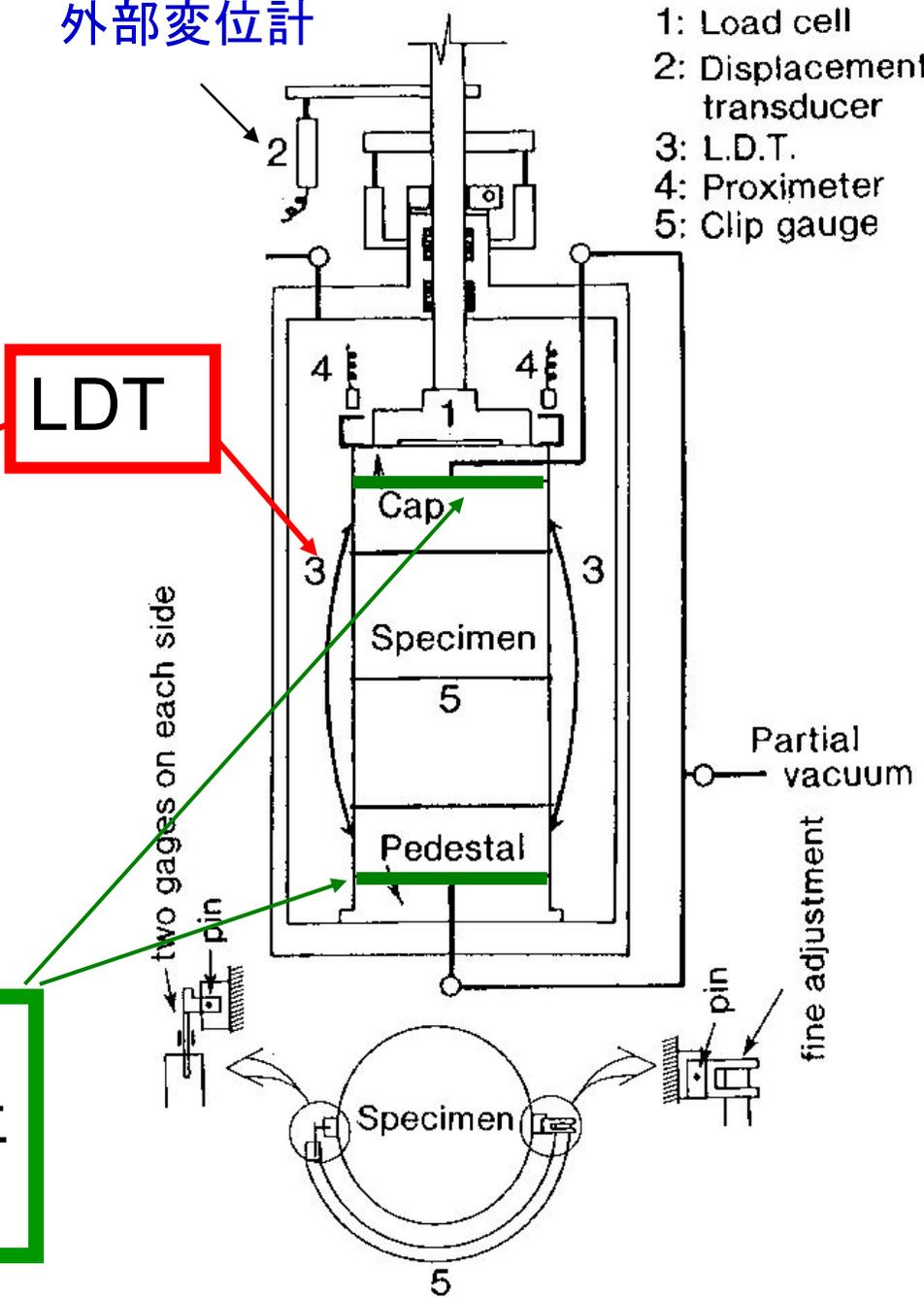




外部変位計

LDT

- 1: Load cell
- 2: Displacement transducer
- 3: L.D.T.
- 4: Proximeter
- 5: Clip gauge



供試体上下端面とキャップ・ペデスタルとの不完全接触による誤差(Bedding error)

two gages on each side

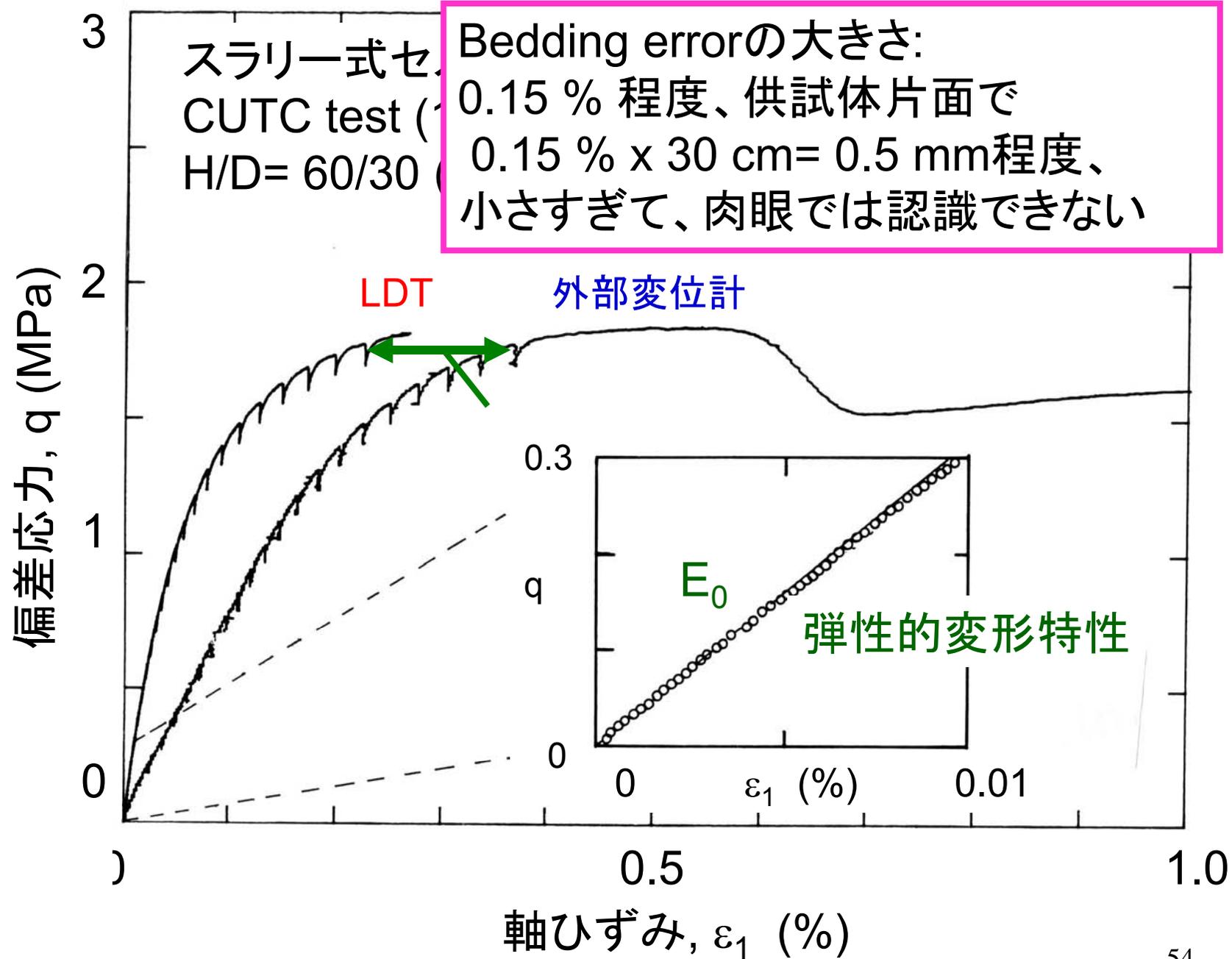
pin

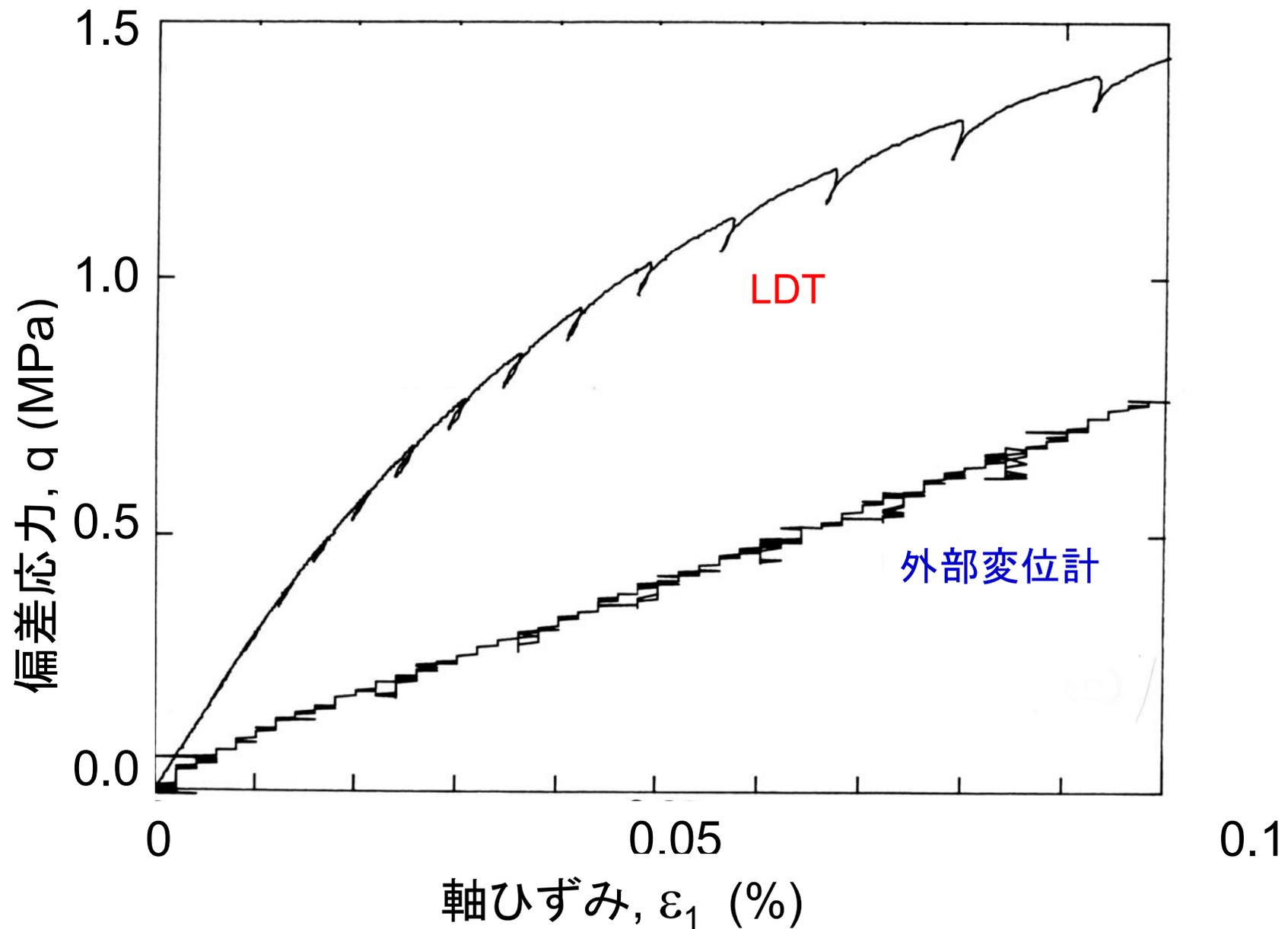
fine adjustment

Partial vacuum

Specimen

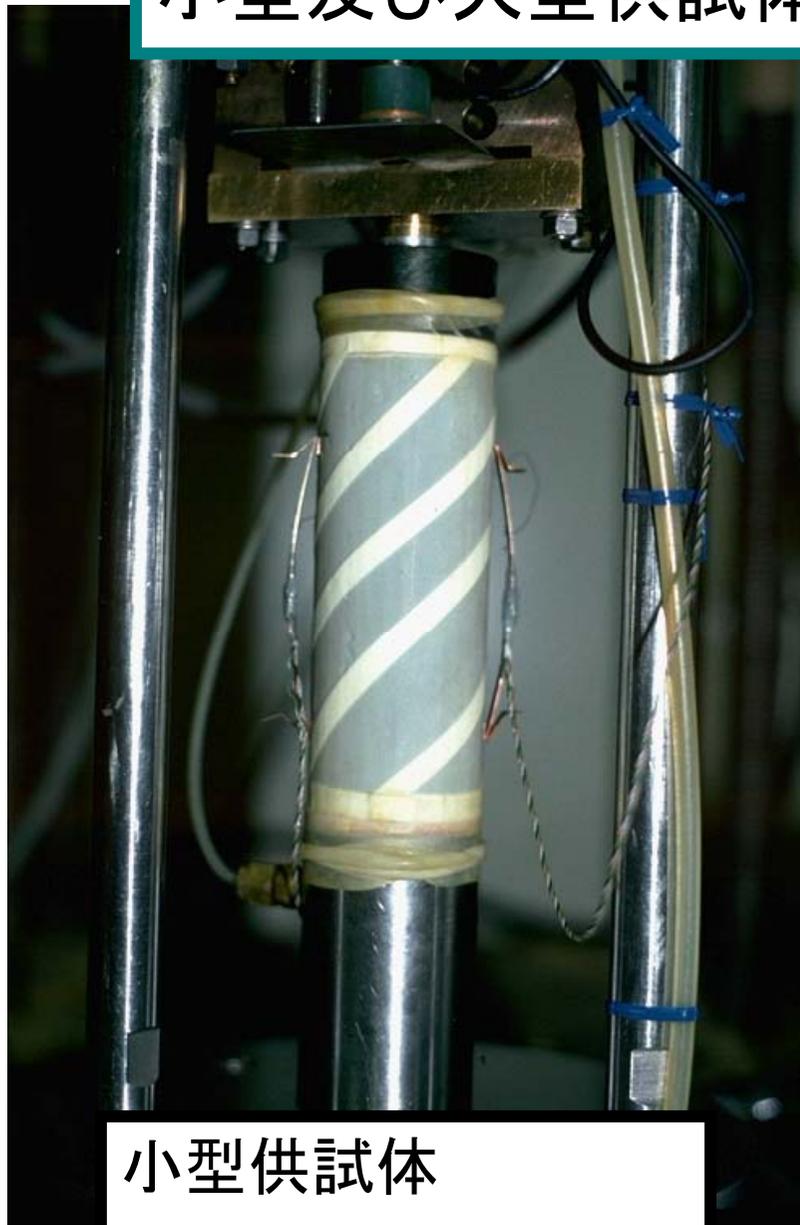
5





外部変位計による従来の測定: 小ひずみレベルでは非常に大きな誤差.

## 小型及び大型供試体での LDT の使用



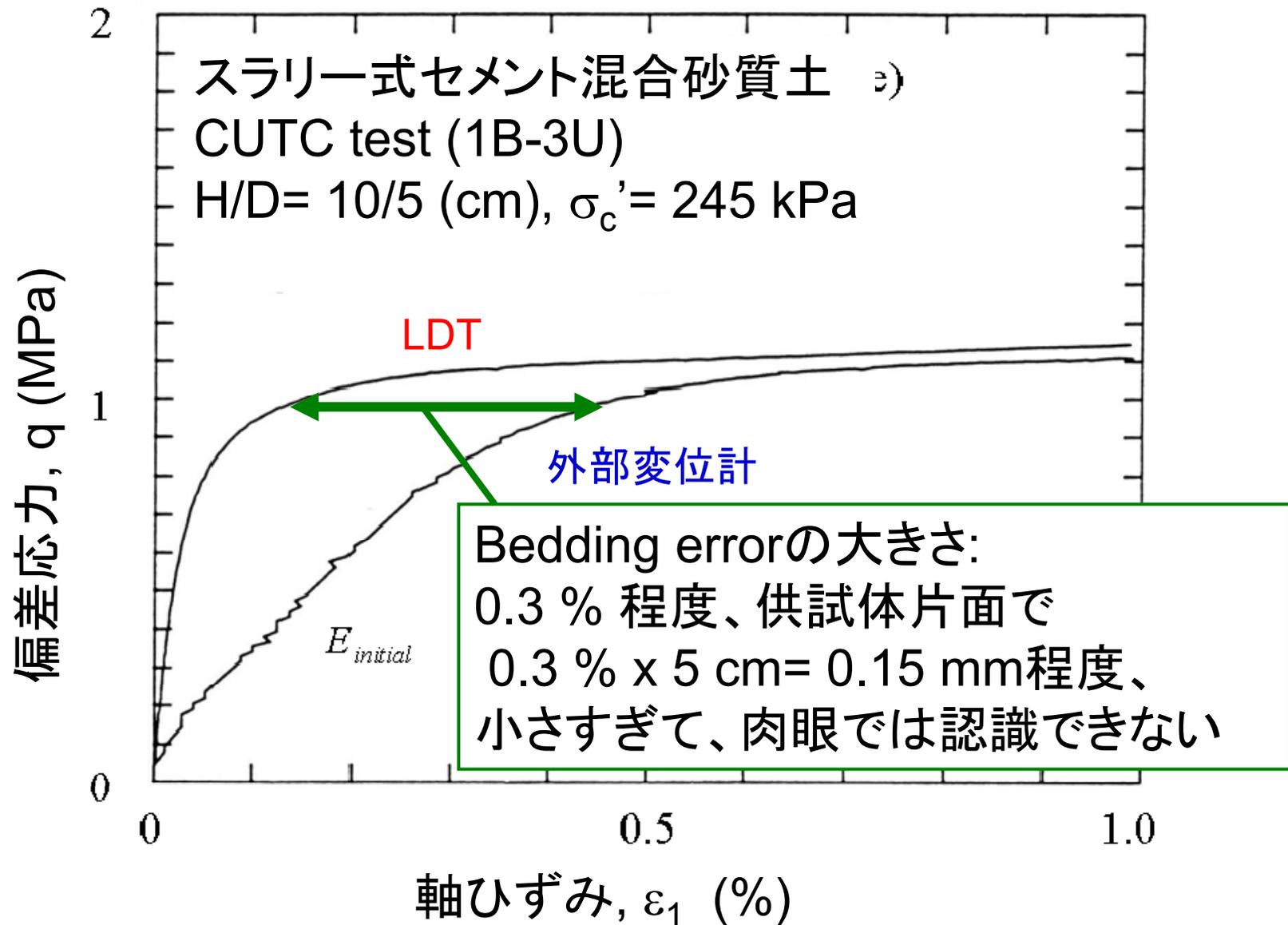
小型供試体

12 cm H x 5 cm D

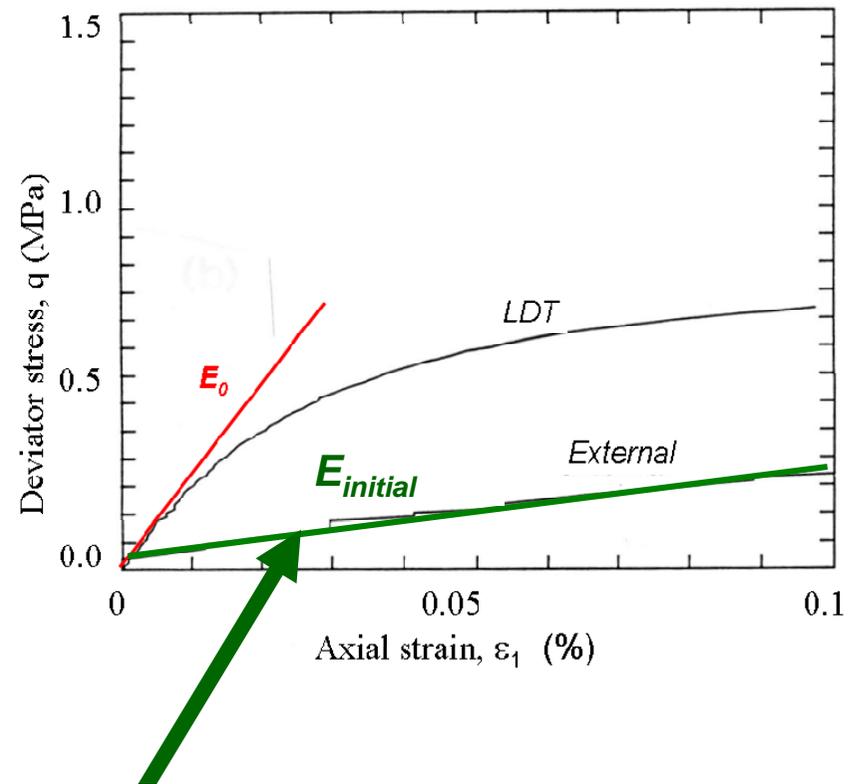
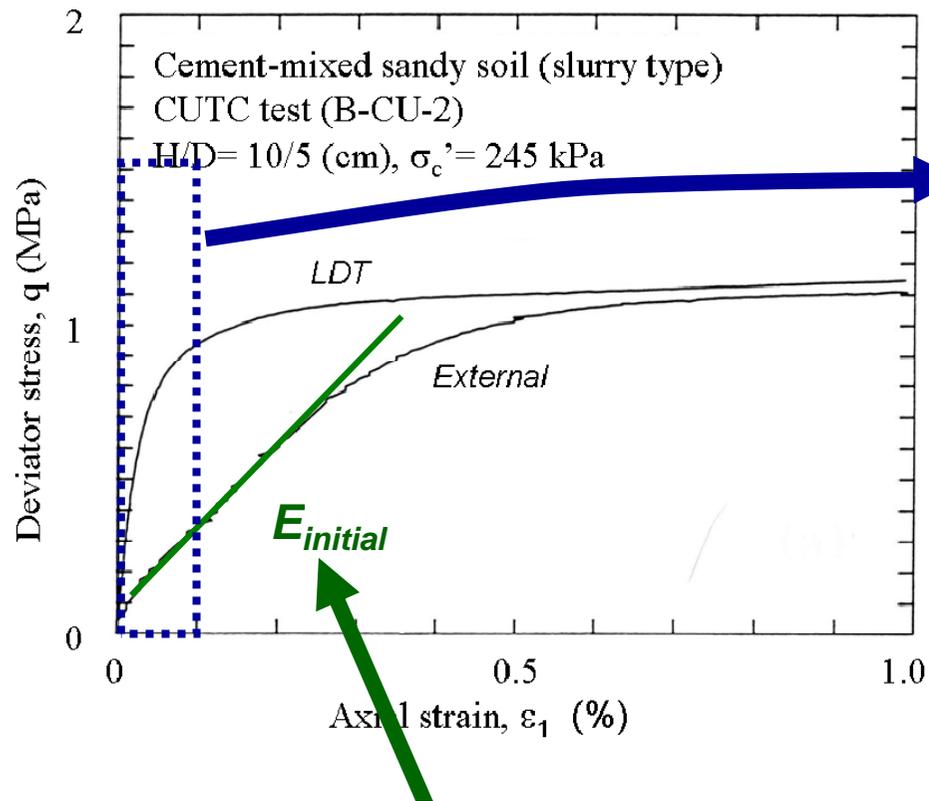


大型供試体

60 cm H x 30 cm D

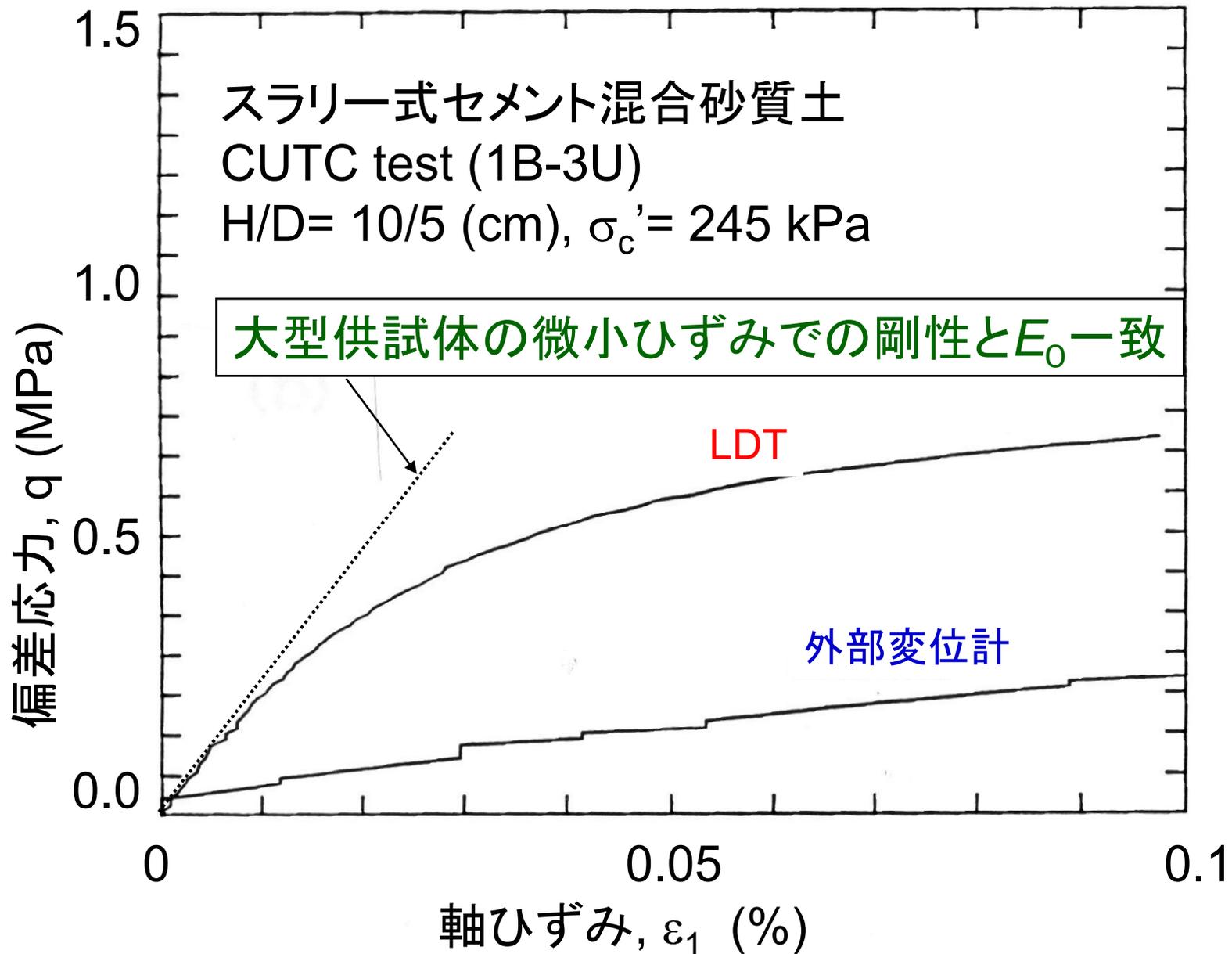


- スラリー式セメント混合砂の不攪乱試料の小型供試体 (5 cm d x 10 cm h)を用いた典型的なCU三軸圧縮試験結果

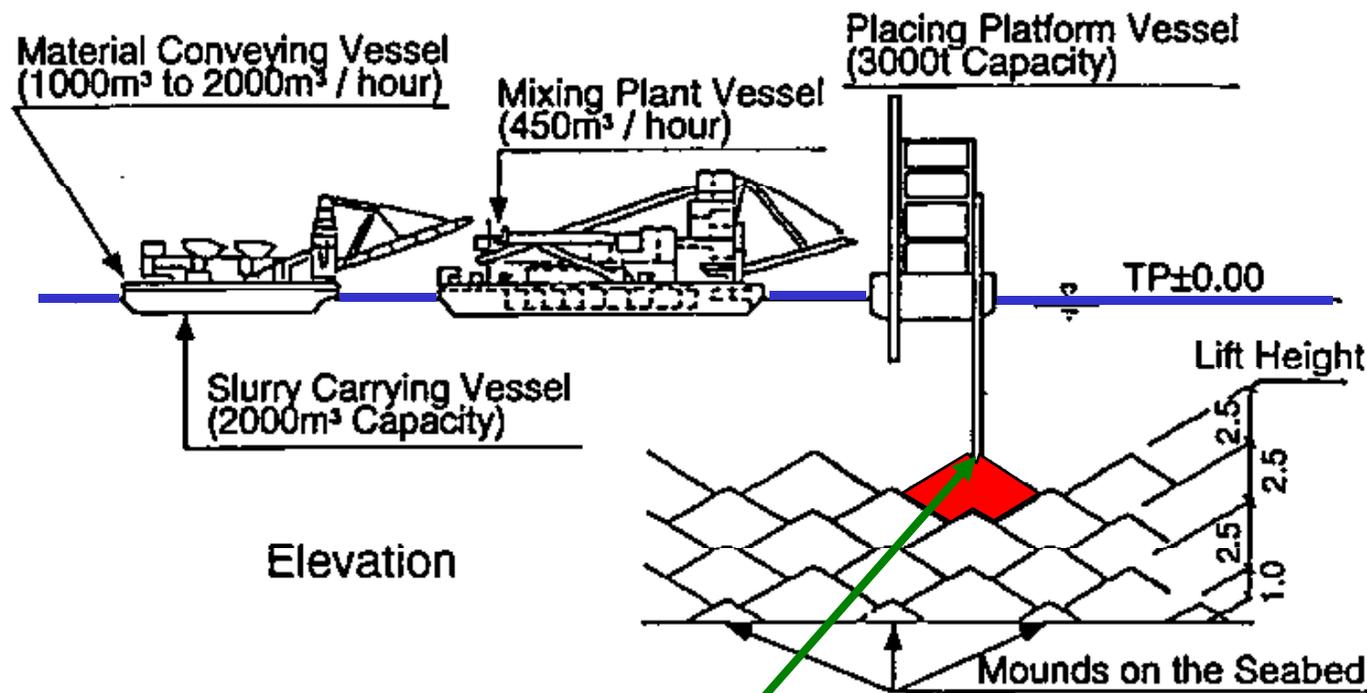


- 軸ひずみを三軸セルの外部で測定する通常の三軸圧縮試験で得られた剛性(ヤング率)  $E_{initial}$  は真のヤング率  $E_0$  の約1/10

$E_{initial}$ : 設計で用いると安全側の値、しかし、あまりも不経済!

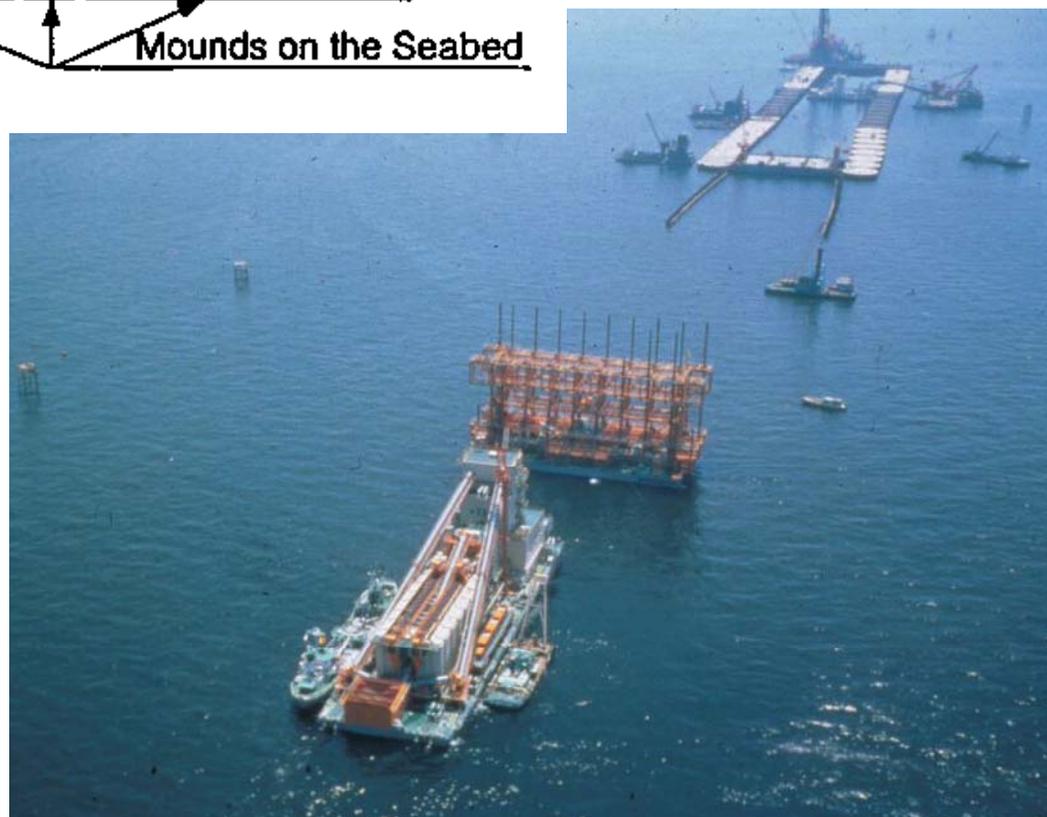


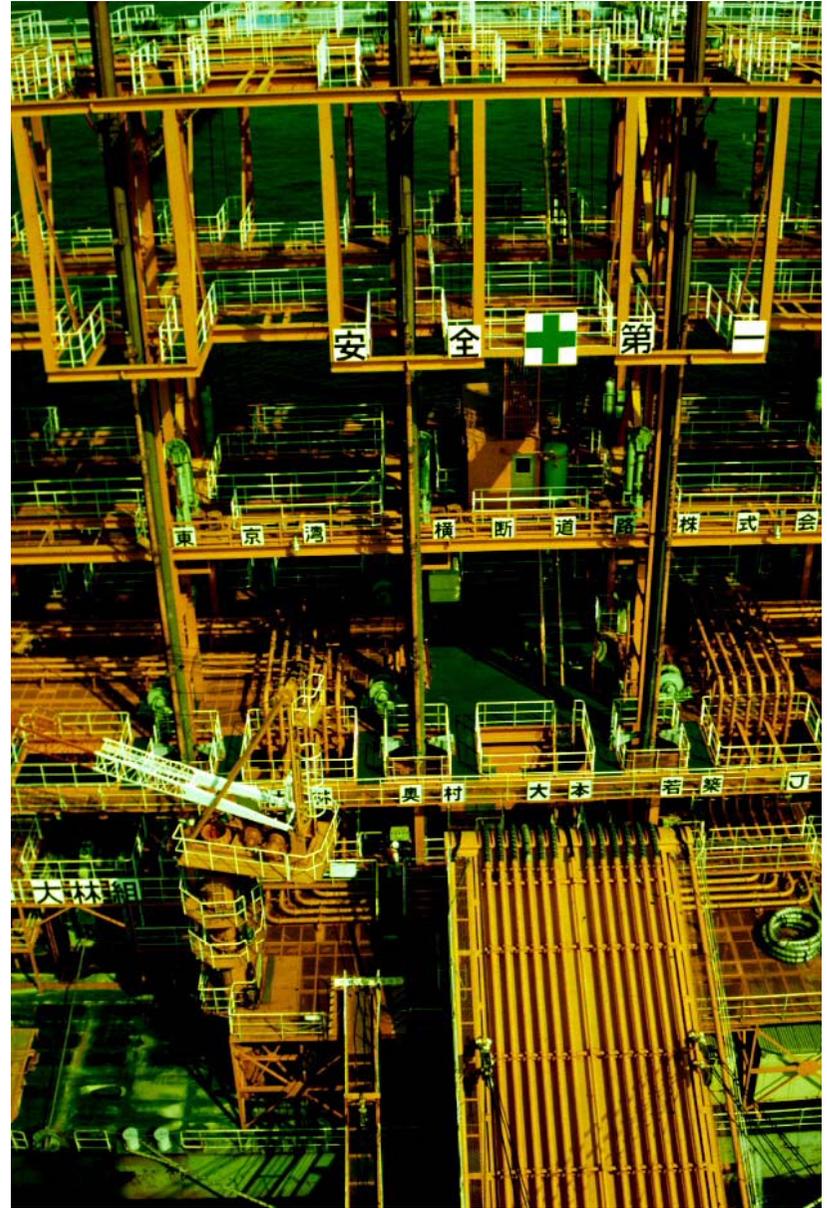
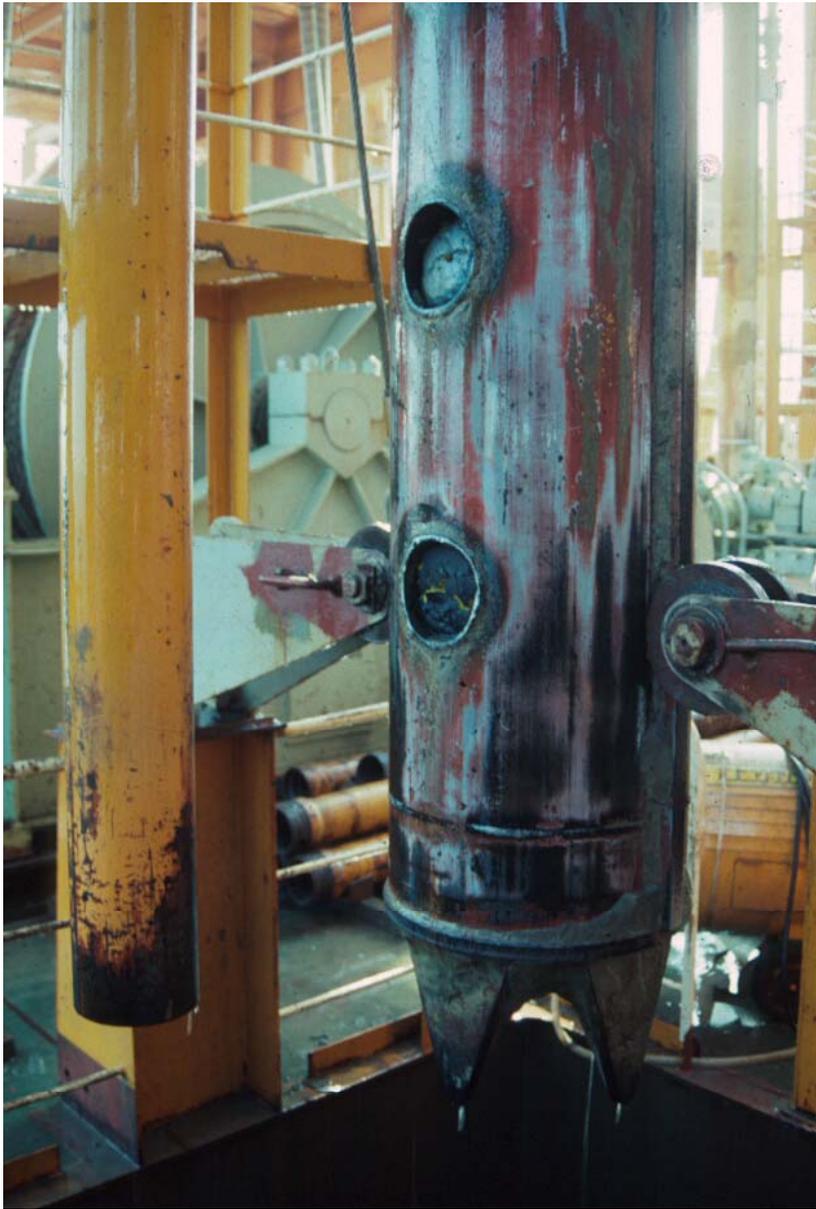
従来の試験法(小型供試体で外部変位計で軸ひずみ測定)は全く信頼が出来ないことが判明。

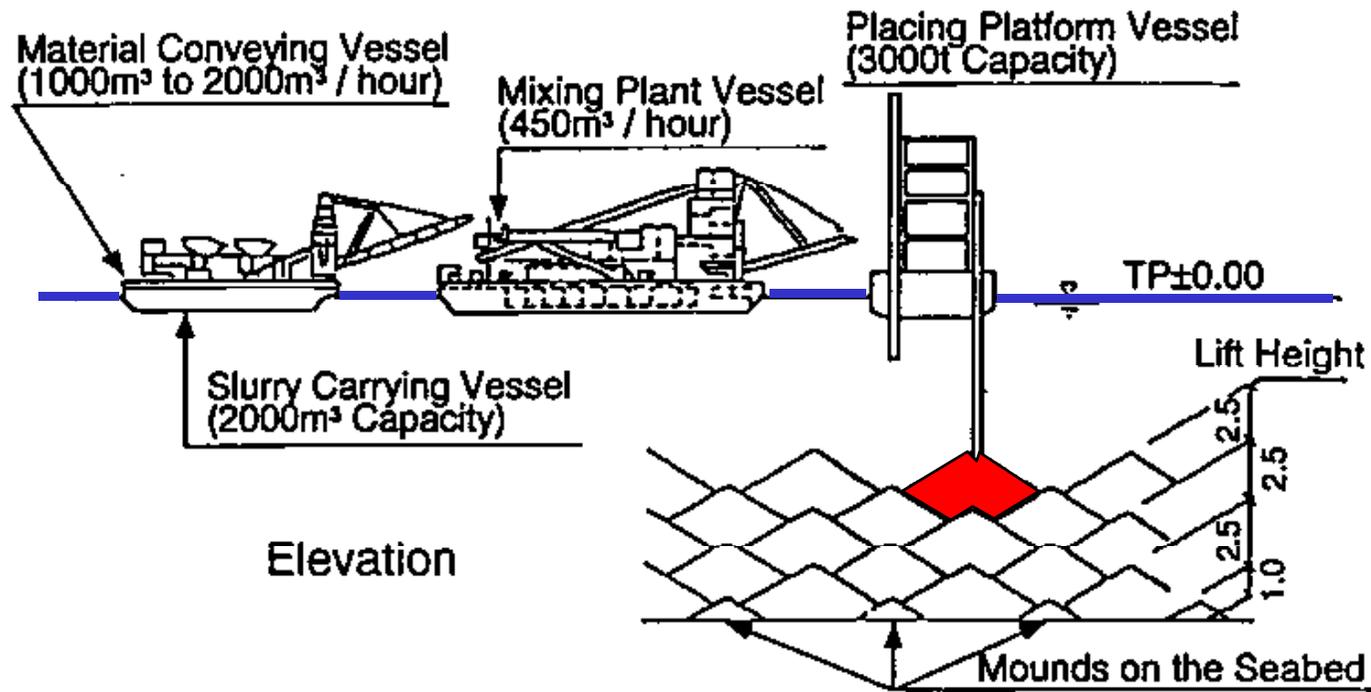


# セメント混合砂 スラリーの水中 盛土工事(実工 事)

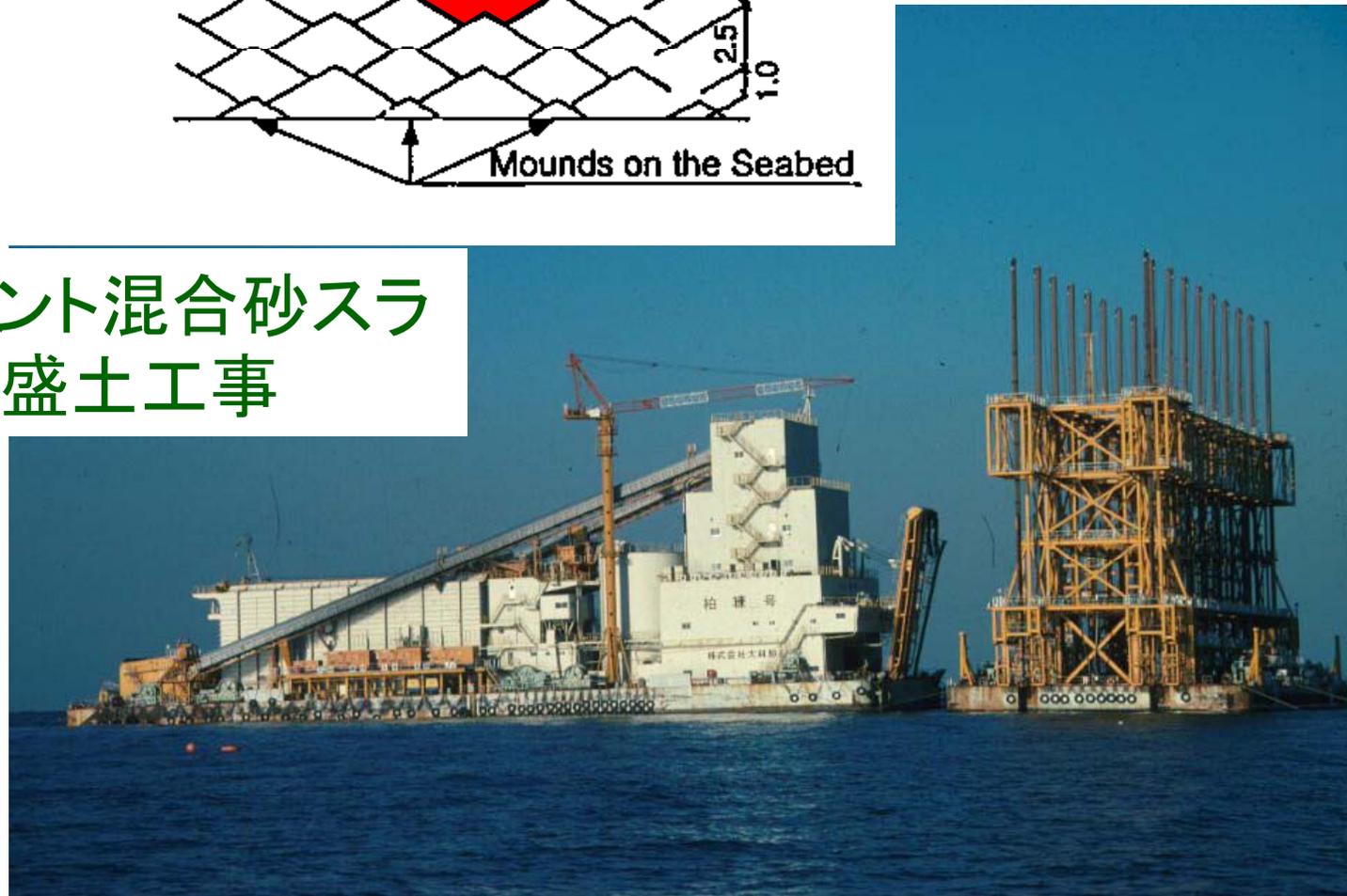
トレミー管の先端は、常に盛土内に存在していて、盛土材料の水中自由落下をさける必要がある







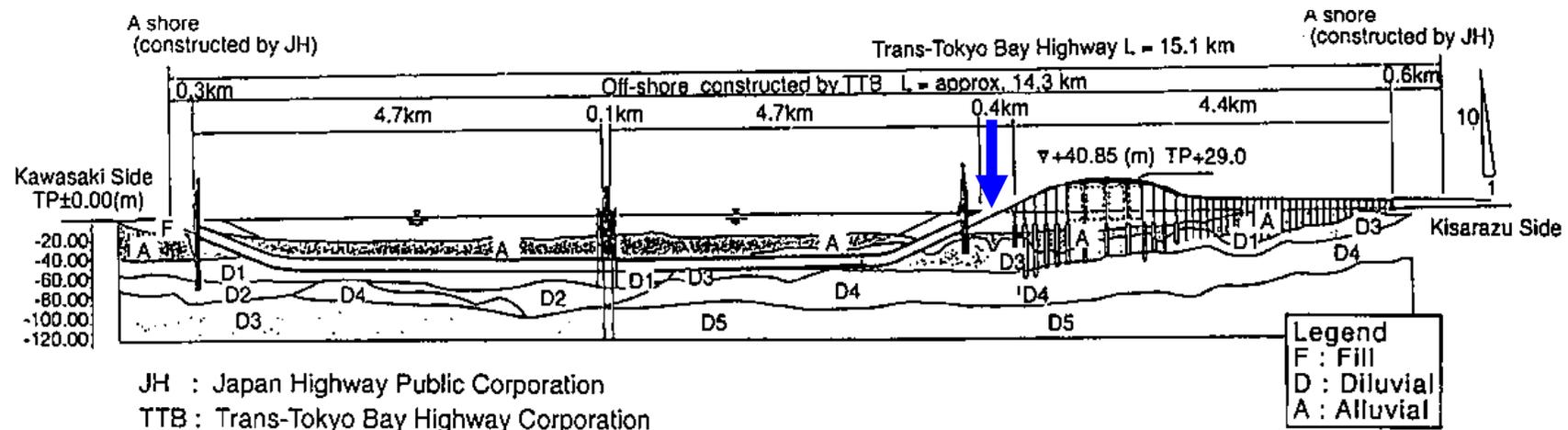
## 実際のセメント混合砂スラリーの水中盛土工事



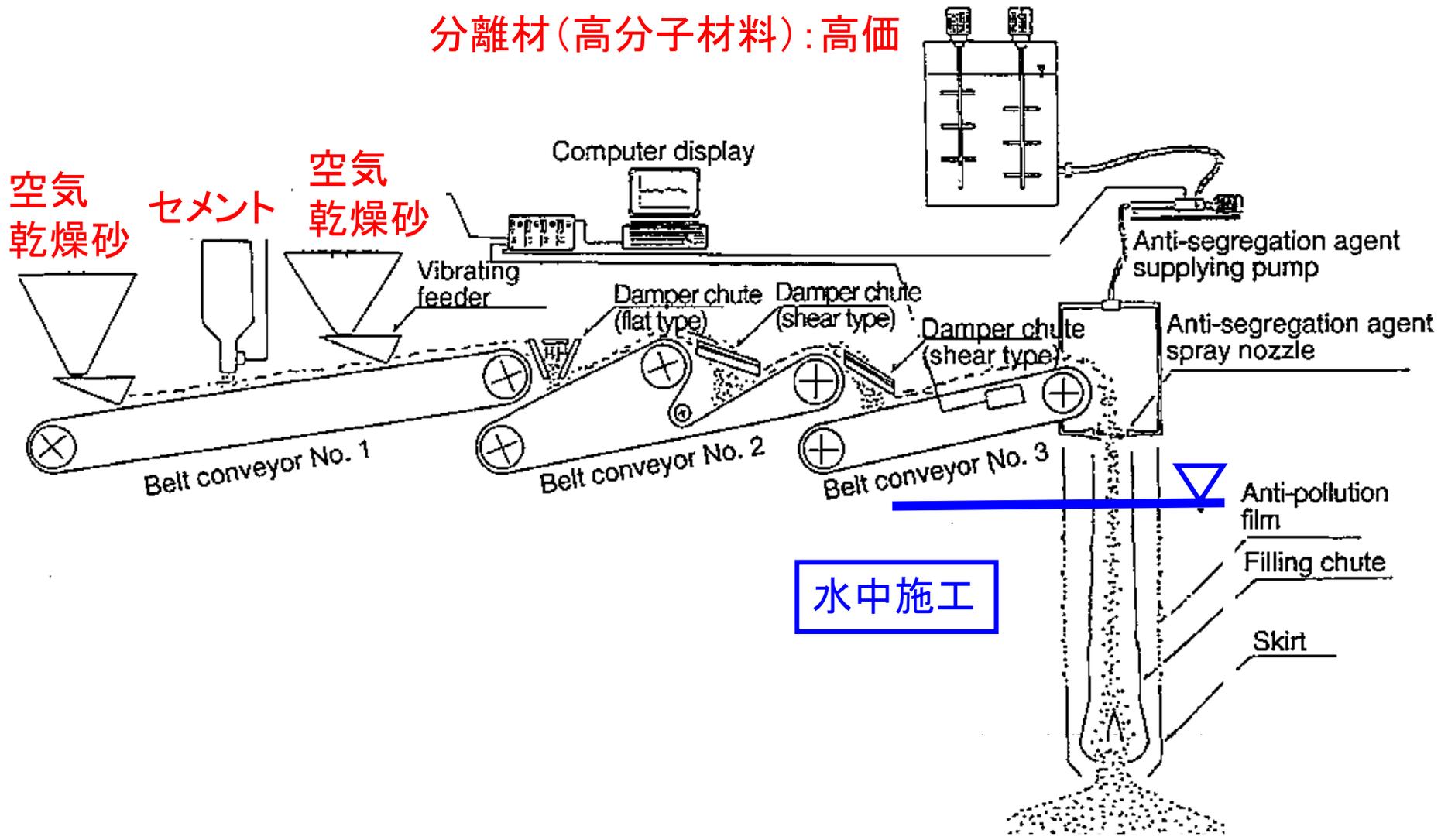
## 地盤工学に関連した重要な設計・施工上の課題 - 3:

### 木更津側人工島の盛土の

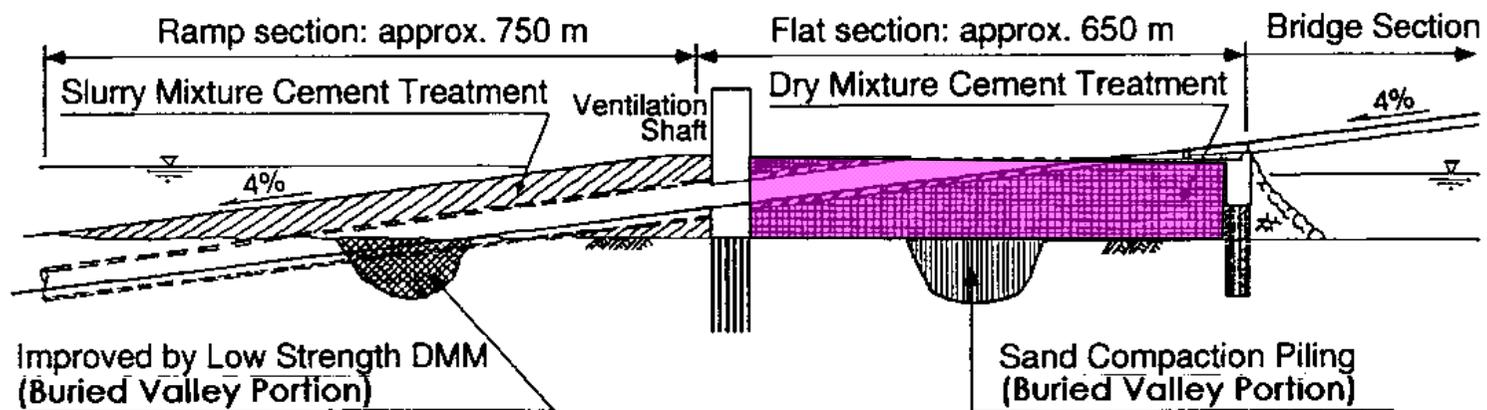
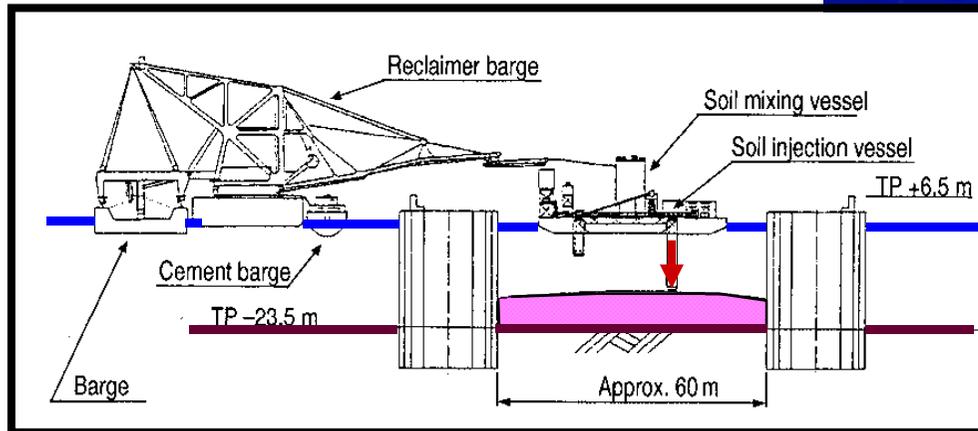
- セメント混合砂のスラリーを用いた斜路部盛土;
- ドライ状態のセメント混合砂の水中盛土(平坦部)



# ドライ式セメント混合砂(実物大施工実験)

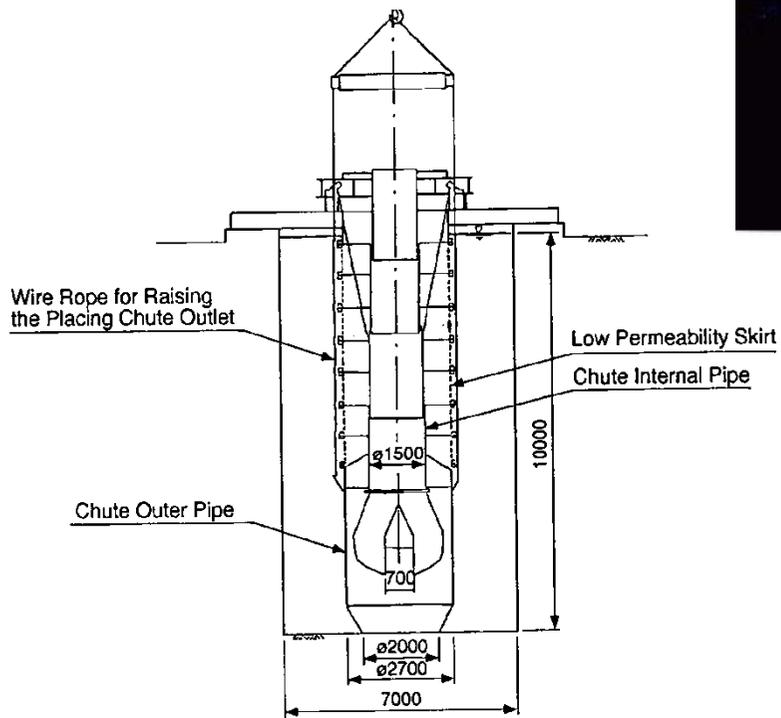


# ドライ状態のセメント混合砂 を用いた水中盛土工事 (木更津側人工島)



Section

# 特別に開発した二重管 水中打設装置



ドライ状態のセメント改良砂  
の水中盛土： 工事中と  
工事完了後  
(木更津側人工島)



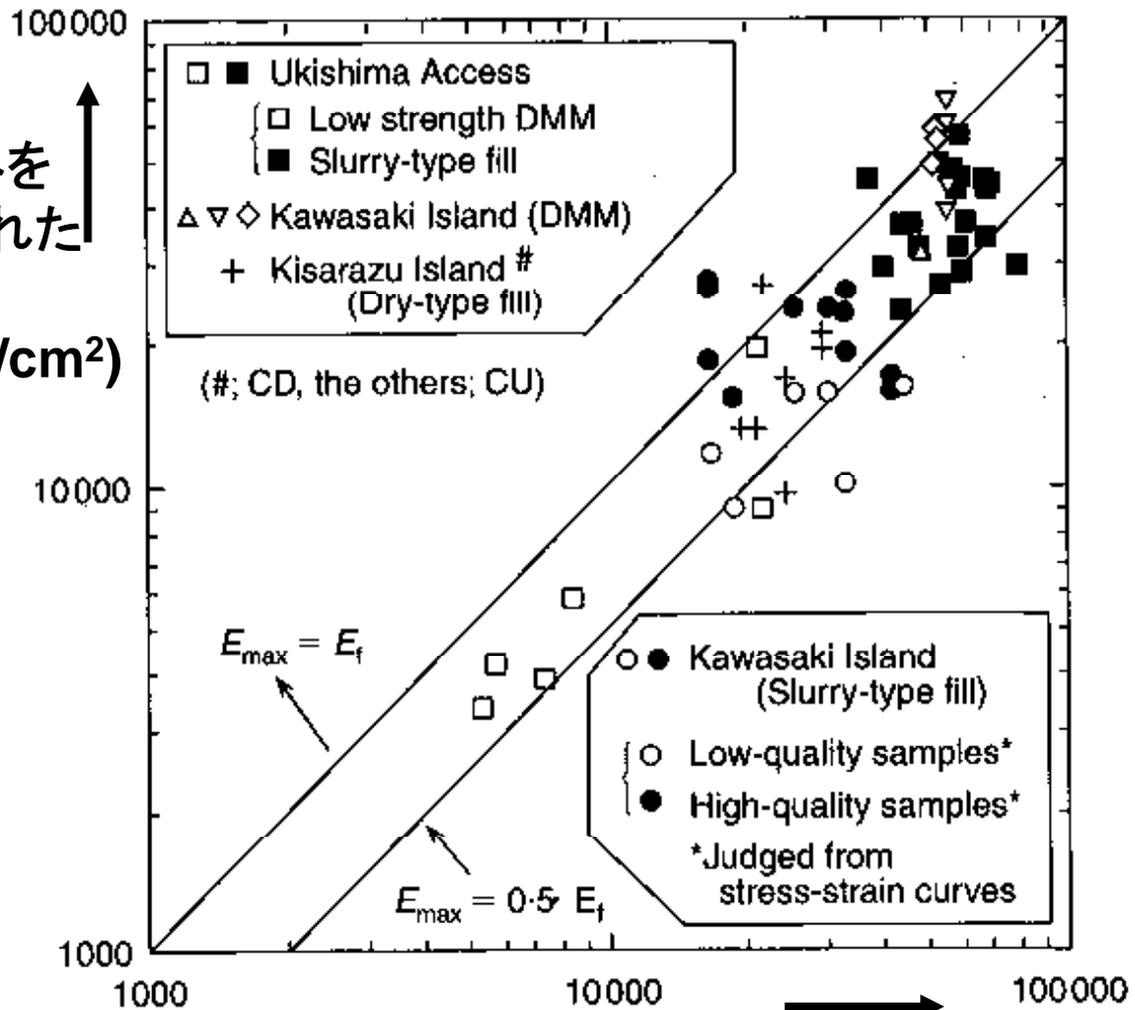
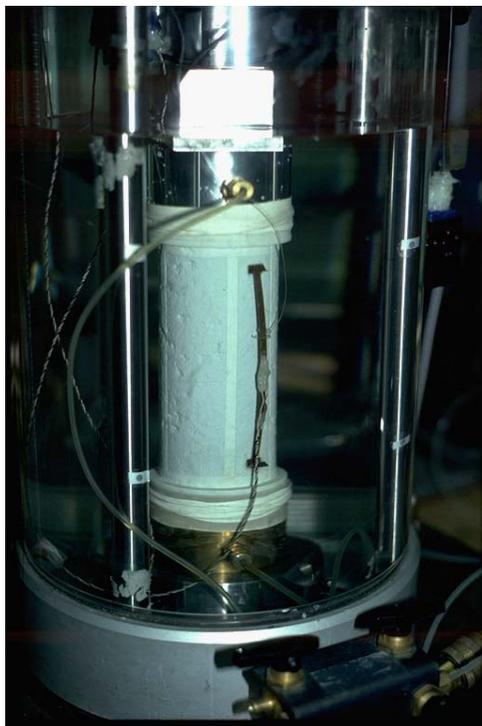
# 東京湾横断道路で用いられたセメント混合による地盤改良 工事と盛土工事の総括表

<u>セメント処理法</u>	<u>混合配合</u>	<u>工事箇所</u>	<u>工事量 ; 1,000 m<sup>3</sup></u>
従来式セメント 深層混合 (DMM)	セメント量: 140 kg/m <sup>3</sup> W/C 比: 100 %	川崎側人工島	132
低強度DMM	セメント量 : 70 kg/m <sup>3</sup> W/C 比: 100	浮島取付け部 木更津側人工島 川崎側人工島	1,248 289 168
スラリータイプ セメント混合砂 (*: 原設計では 80 kg/m <sup>3</sup> )	砂: 1,177 kg/m <sup>3</sup> セメント量: 100 kg/m <sup>3</sup> * 粘土: 110 kg/m <sup>3</sup> 海水: 505 kg/m <sup>3</sup>	浮島取付け部 木更津側人工島 川崎人工島 (原設計通り)	1,028 351 118
ドライタイプ セメント混合砂	砂: 1,330 kg/m <sup>3</sup> セメント: 100 kg/m <sup>3</sup> 分離防止用高分子材料: 110 g/m <sup>3</sup>	木更津側人工島	435

セメント改良工事(盛土と原地盤)の総量; 3.77 百万 m<sup>3</sup>

# 東京湾横断道路建設でのセメント混合土の 弾性ヤング率のまとめ

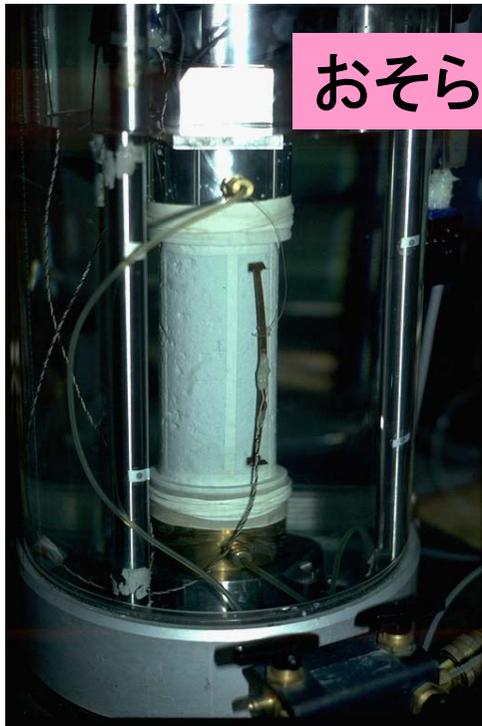
改良盛土から得られた不攪乱  
試料を用いて、LDTで軸ひずみを  
測定した三軸圧縮試験で得られた  
0.001 % 以下の軸ひずみに  
おける弾性ヤング率  $E_{max}$  (kgf/cm<sup>2</sup>)



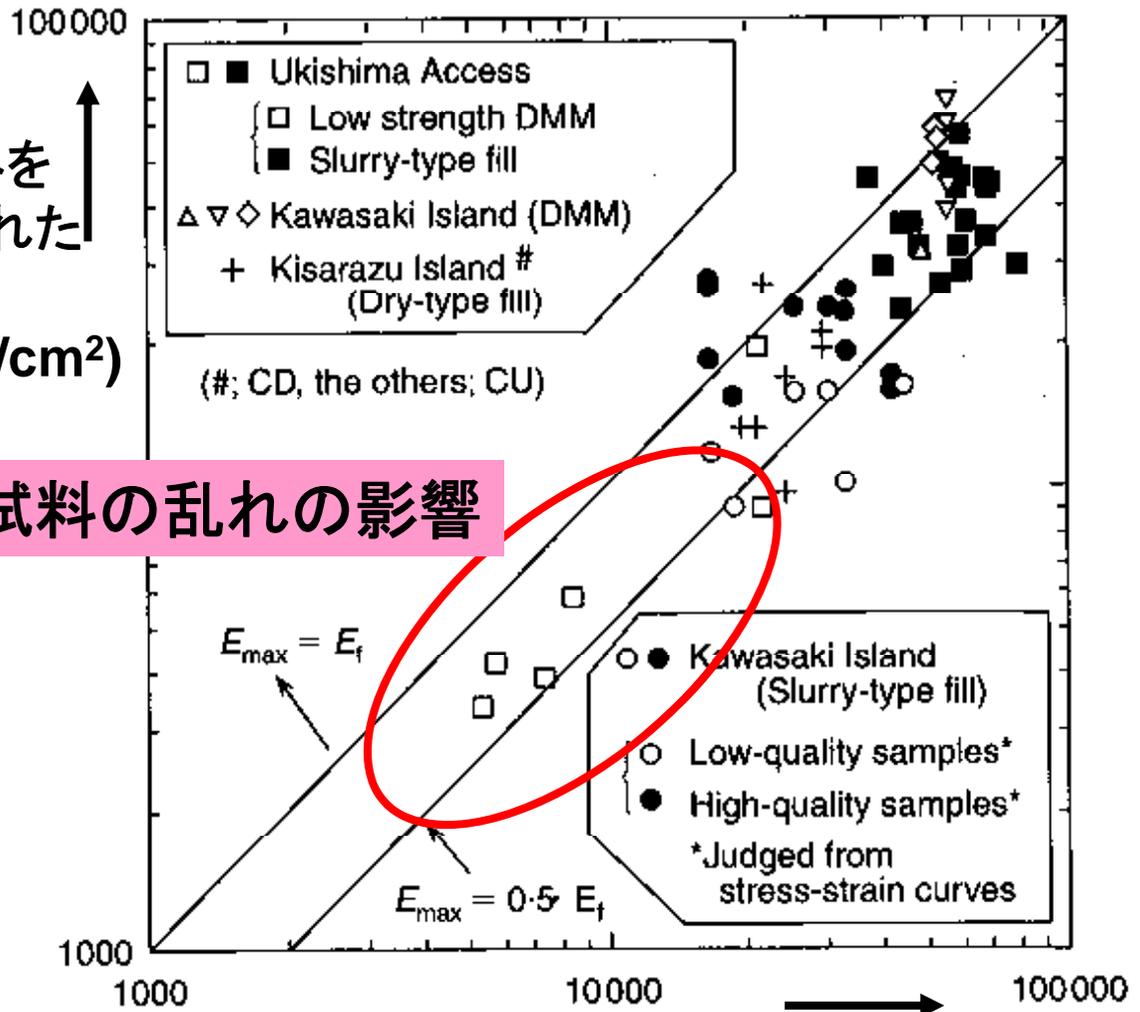
原位置せん断弾性波速度  $V_s$  から求めた  
弾性ヤング率  $E_f$  (kgf/cm<sup>2</sup>)

# 東京湾横断道路建設でのセメント混合土の 弾性ヤング率のまとめ

改良盛土から得られた不攪乱  
試料を用いて、LDTで軸ひずみを  
測定した三軸圧縮試験で得られた  
0.001% 以下の軸ひずみに  
おける弾性ヤング率  $E_{max}$  (kgf/cm<sup>2</sup>)

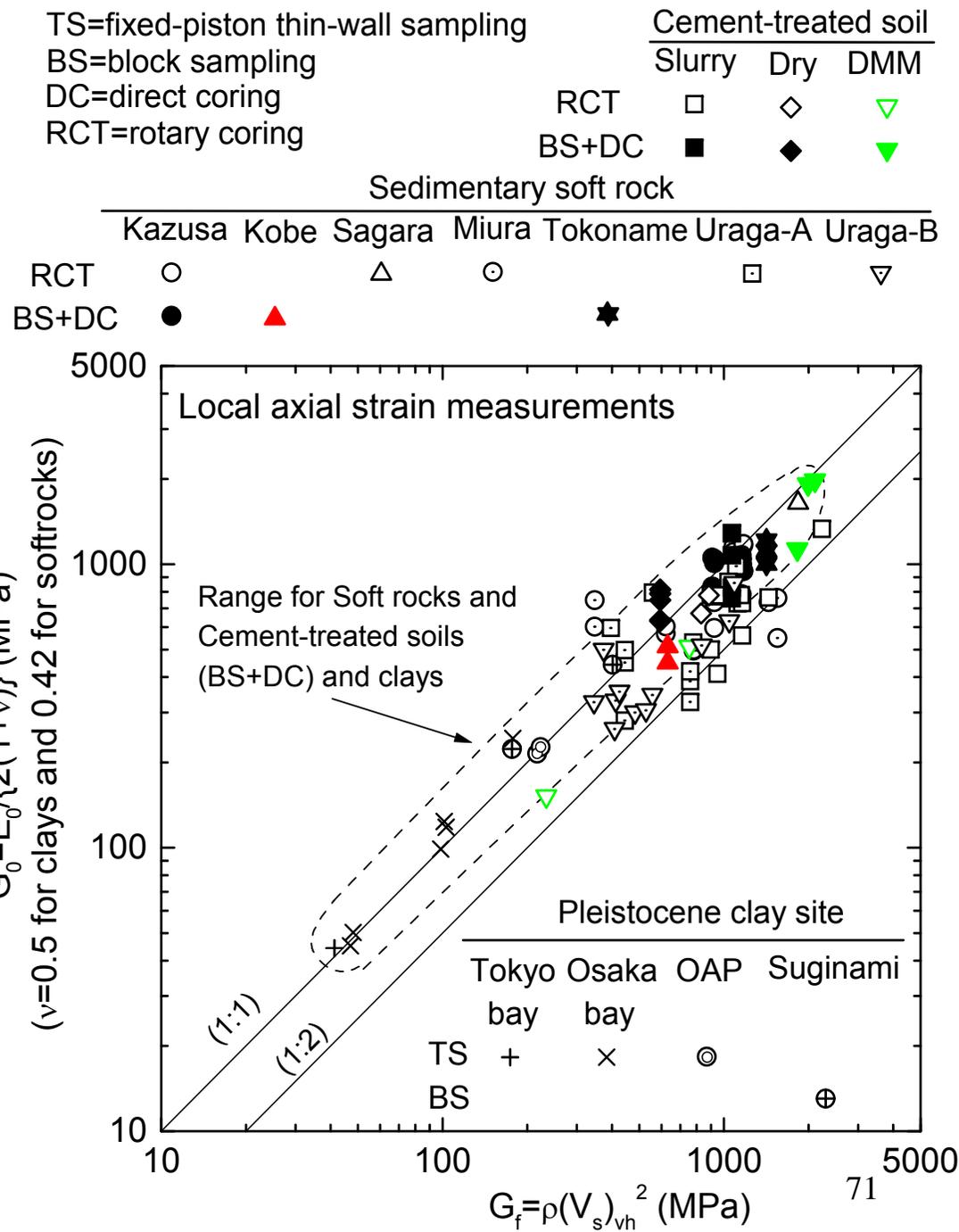


おそらく、試料の乱れの影響

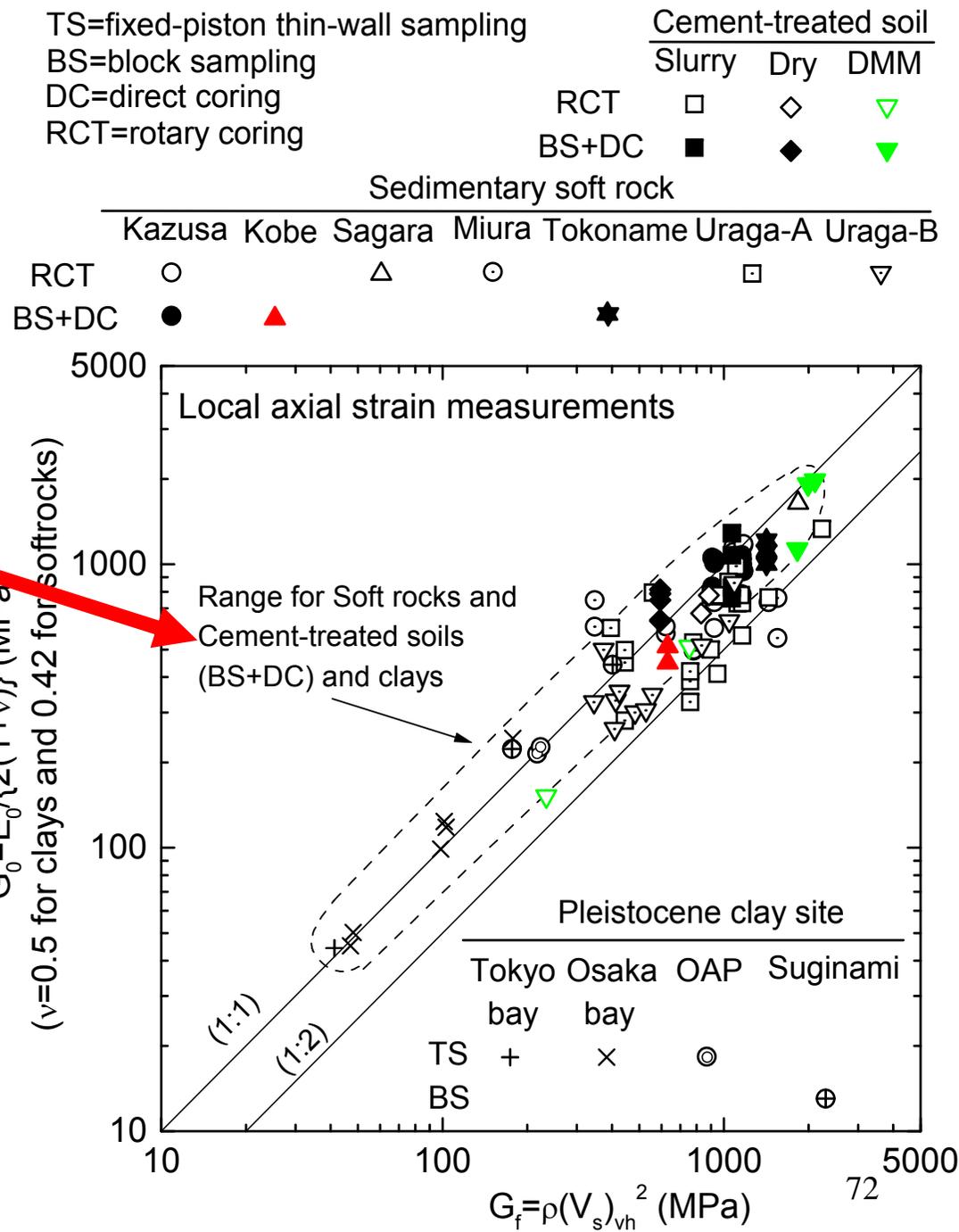


原位置せん断弾性波速度  $V_s$  から求めた  
弾性ヤング率  $E_f$  (kgf/cm<sup>2</sup>)

セメント改良土と自然堆積軟岩の不攪乱試料から求めた  $G_0$  と原位置弾性波速度から求めた  $G_f$  の比較:

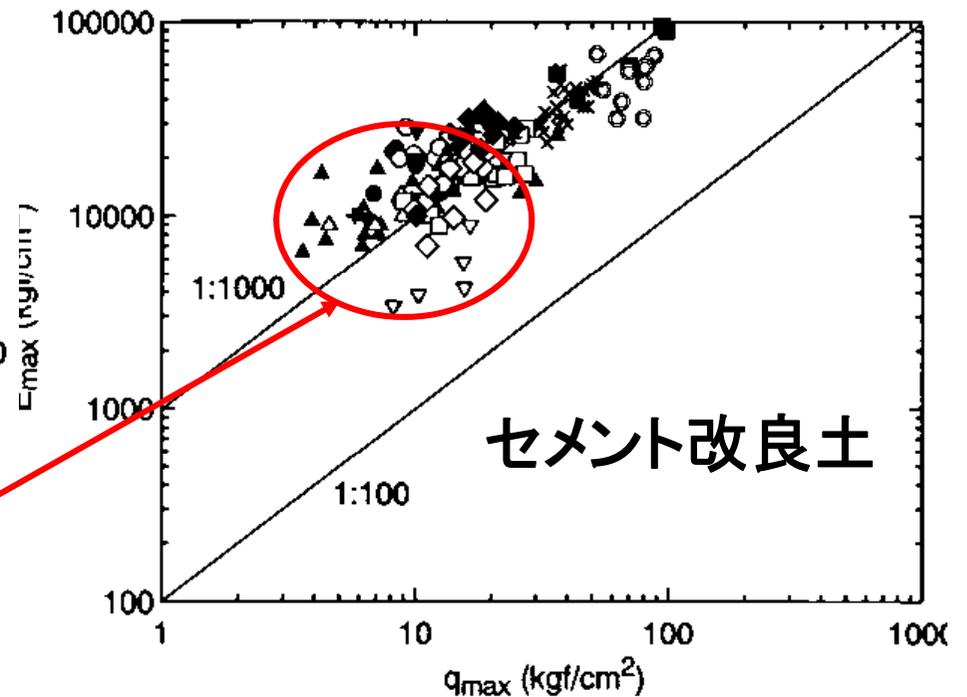
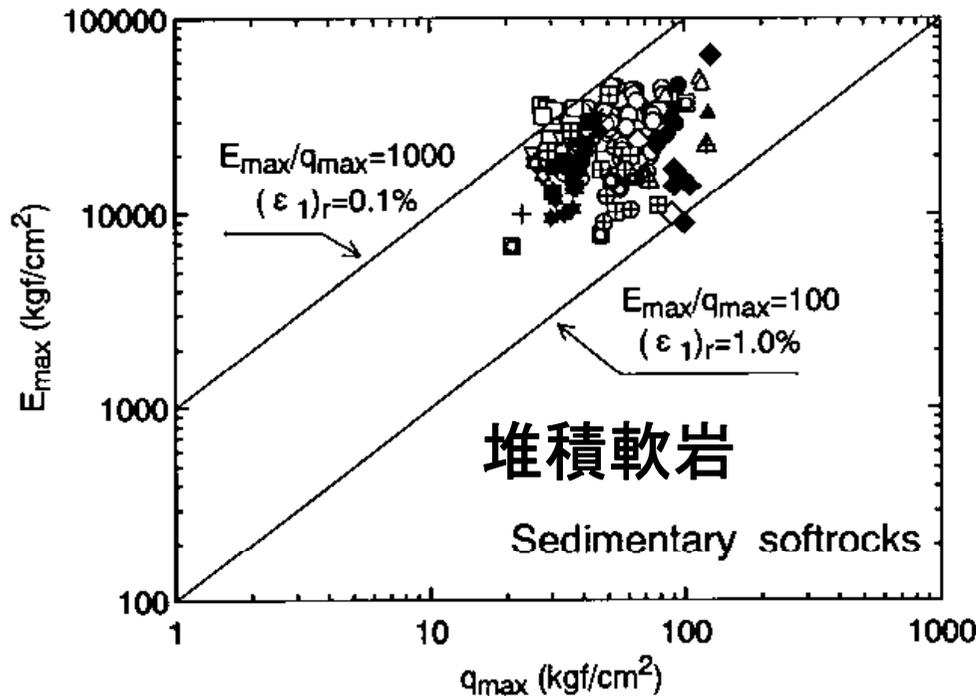


セメント改良土と自然堆積軟岩の不攪乱試料から求めた  $G_0$  と原位置弾性波速度から求めた  $G_f$  の比較：  
 試料の乱れが少ない場合は、良い一致度



# セメント改良土と堆積軟岩の変形強度特性の比較:

軟弱粘性土を原位置セメント混合した改良土は、明石海峡大橋、Rainbow bridgeの支持地盤である堆積軟岩と同様な変形強度

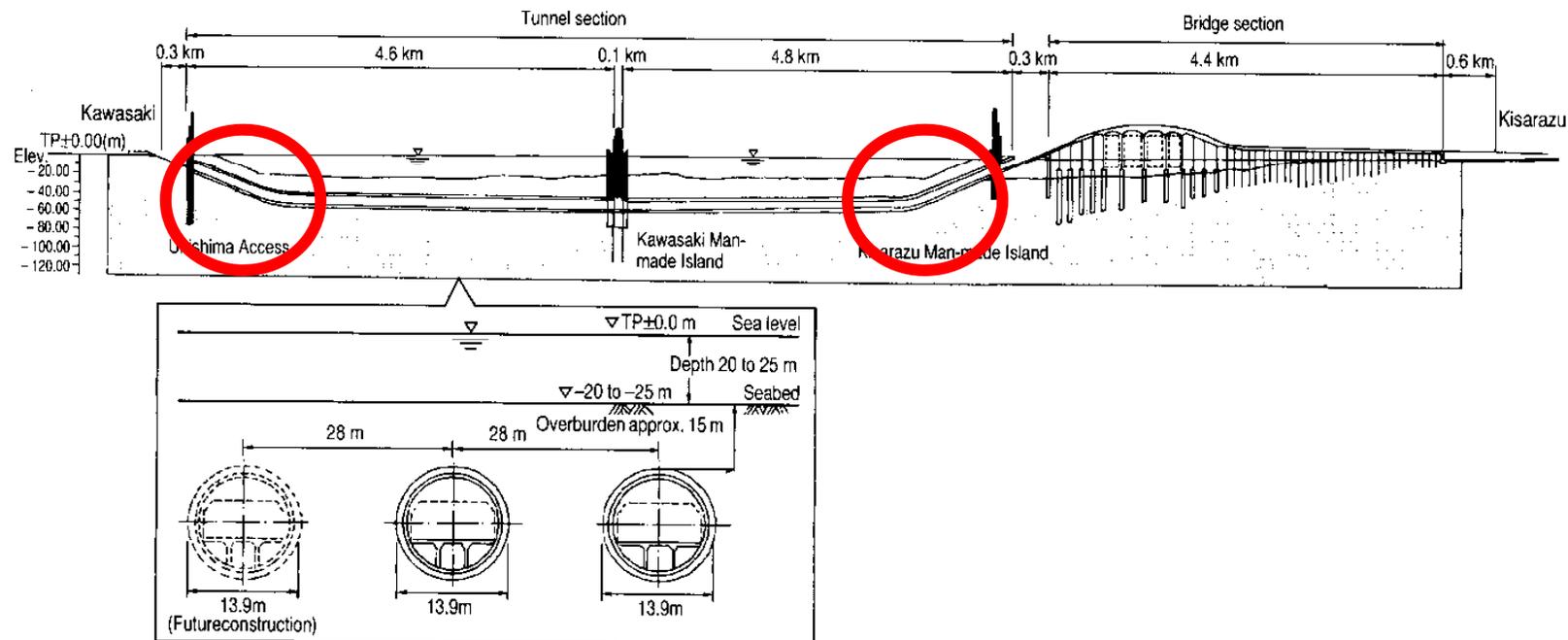


意識的に低強度にしたDMMのデータ

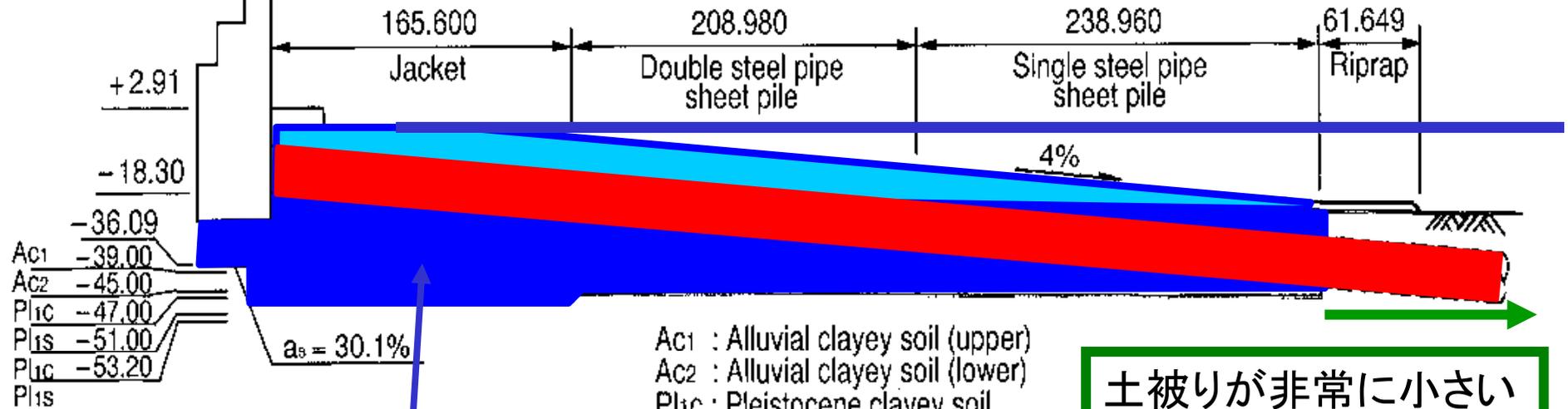
# 地盤工学に関連した重要な設計・施工上の課題 - 4:

世界最大径のシールドトンネル工事;

「非常に強固なセメント改良盛土と粘土地盤内」と「非常に小さな土被りの未改良軟弱粘土地盤内」の連続工事



# 浮島取付け部斜路部

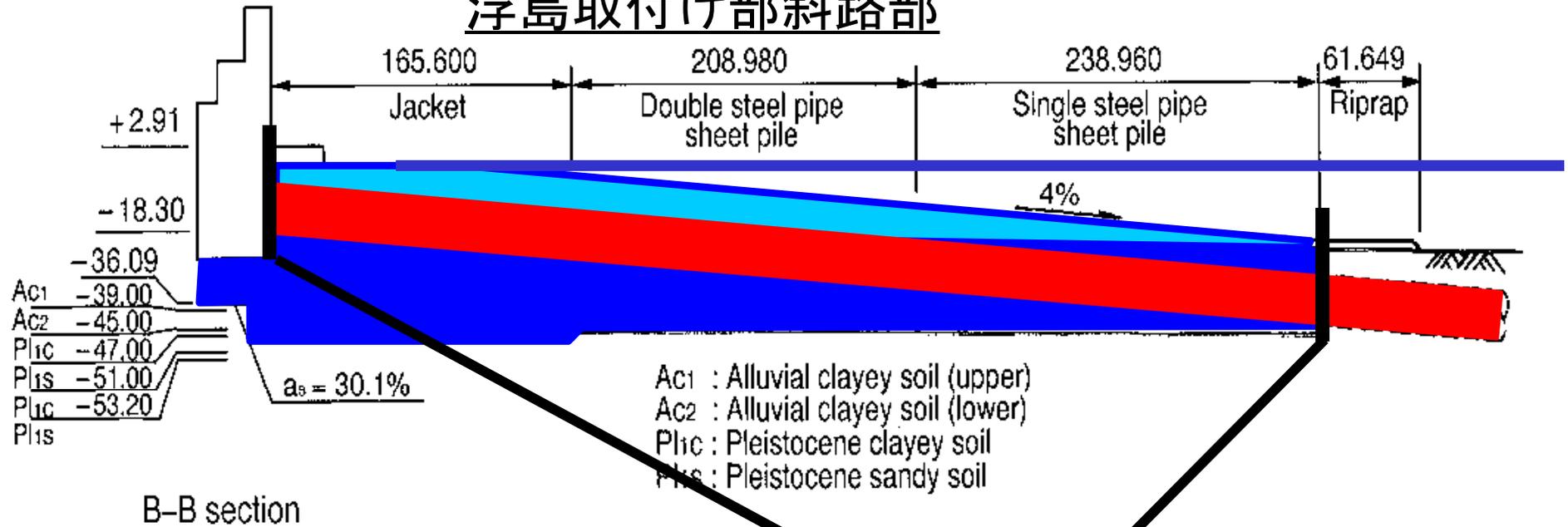


B-B section

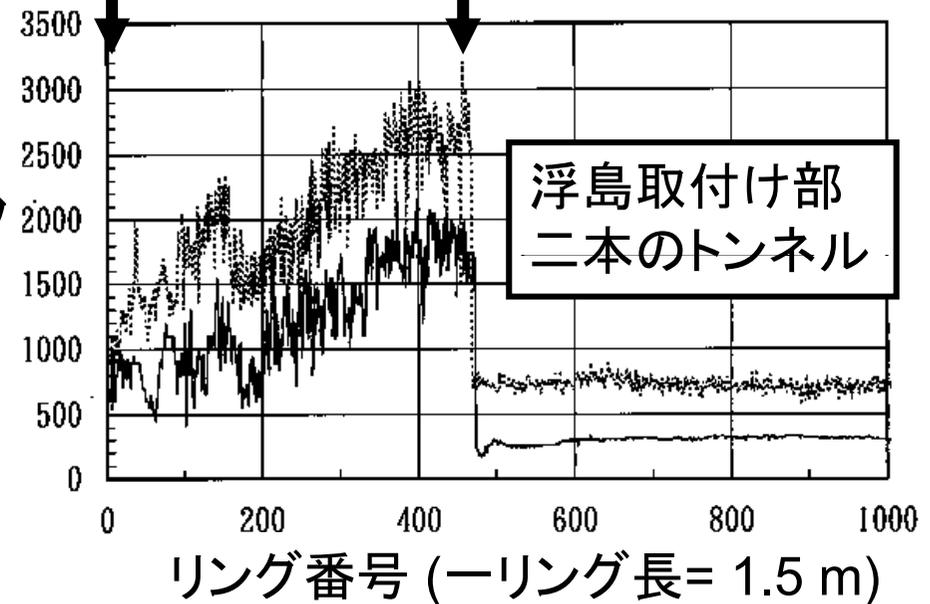
非常に強固なセメント改良粘土地盤

土被りが非常に小さい  
未改良軟弱粘土地盤

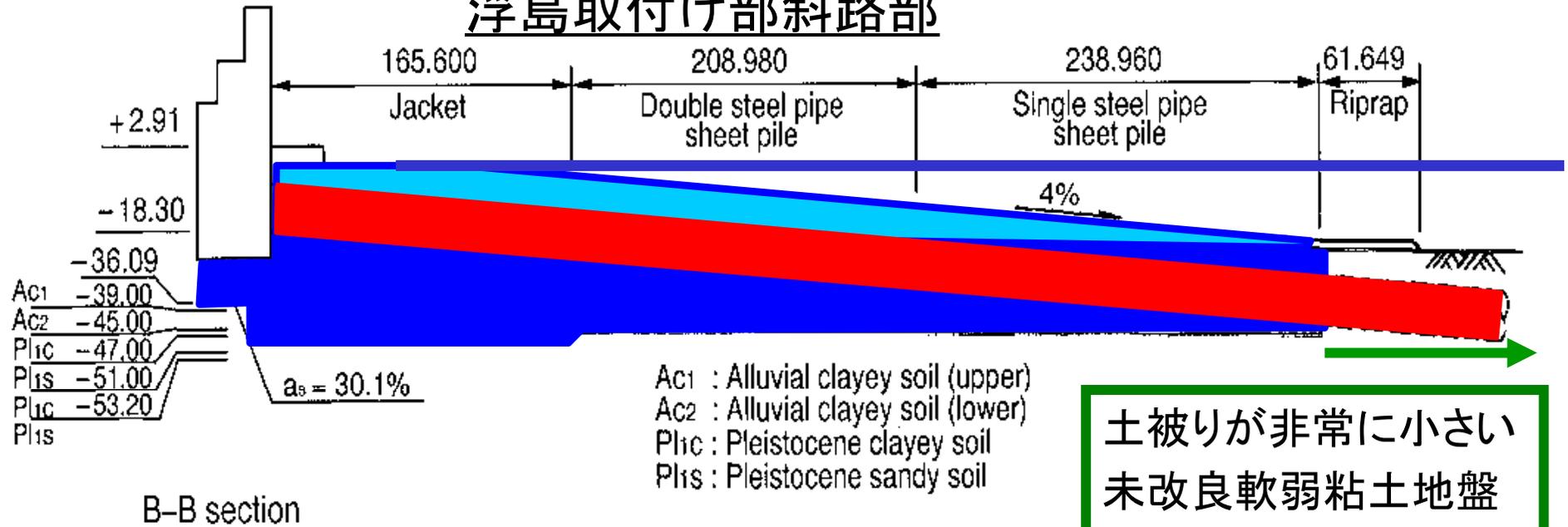
# 浮島取付け部斜路部



シールド機械の掘削トルク (tonf-m) の大きな急変



# 浮島取付け部斜路部



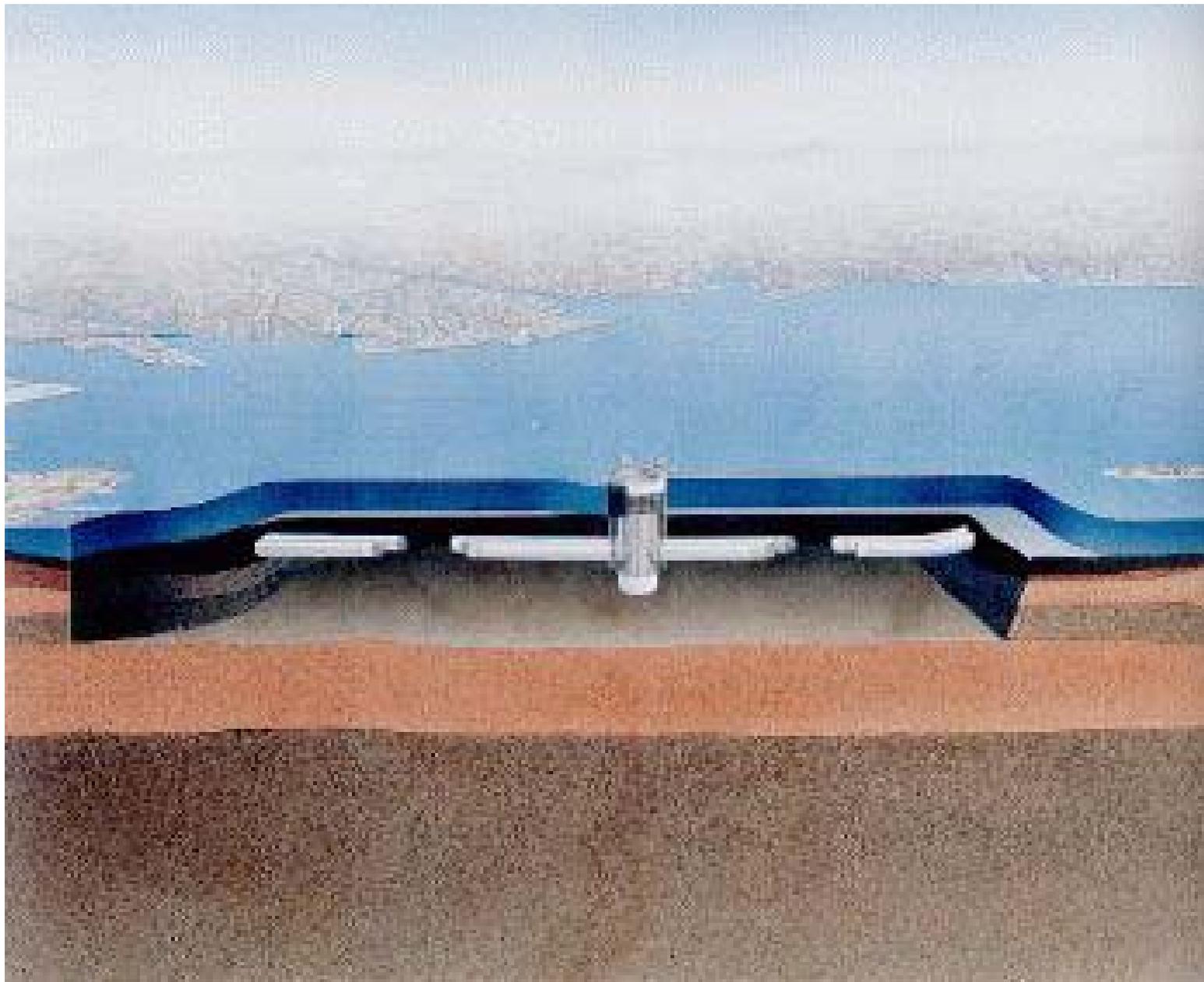
土被りが非常に小さい  
未改良軟弱粘土地盤

盛土・地盤の押さえ荷重と比較すると「大きすぎるシールドトンネルに作用する浮力」による「二次覆工設置前のトンネル」の浮上の危険」;  
 トンネル内にインゴットを配置したり  
 慎重なトンネル掘削工事をする事  
 により防止.



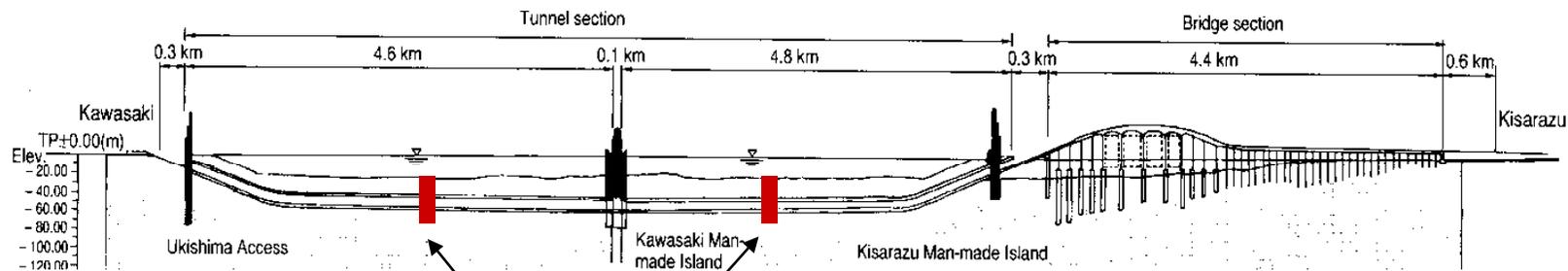
# 二本の長さ 9.5 km のシールドトンネル

---



## 地盤工学に関連した重要な設計・施工上の課題 - 5:

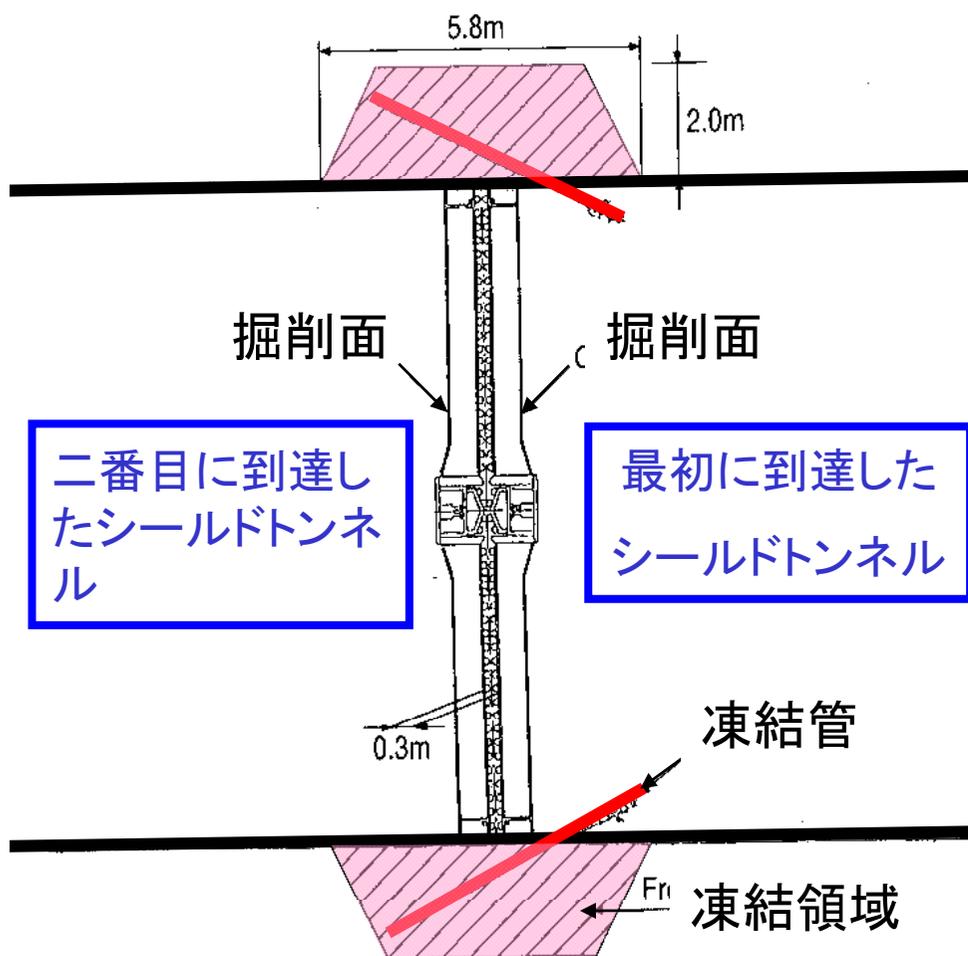
世界最大径のシールドトンネル工事;  
工期短縮のための「地盤凍結工法を用いたトンネルの  
地中接合」



トンネル地中接合箇所

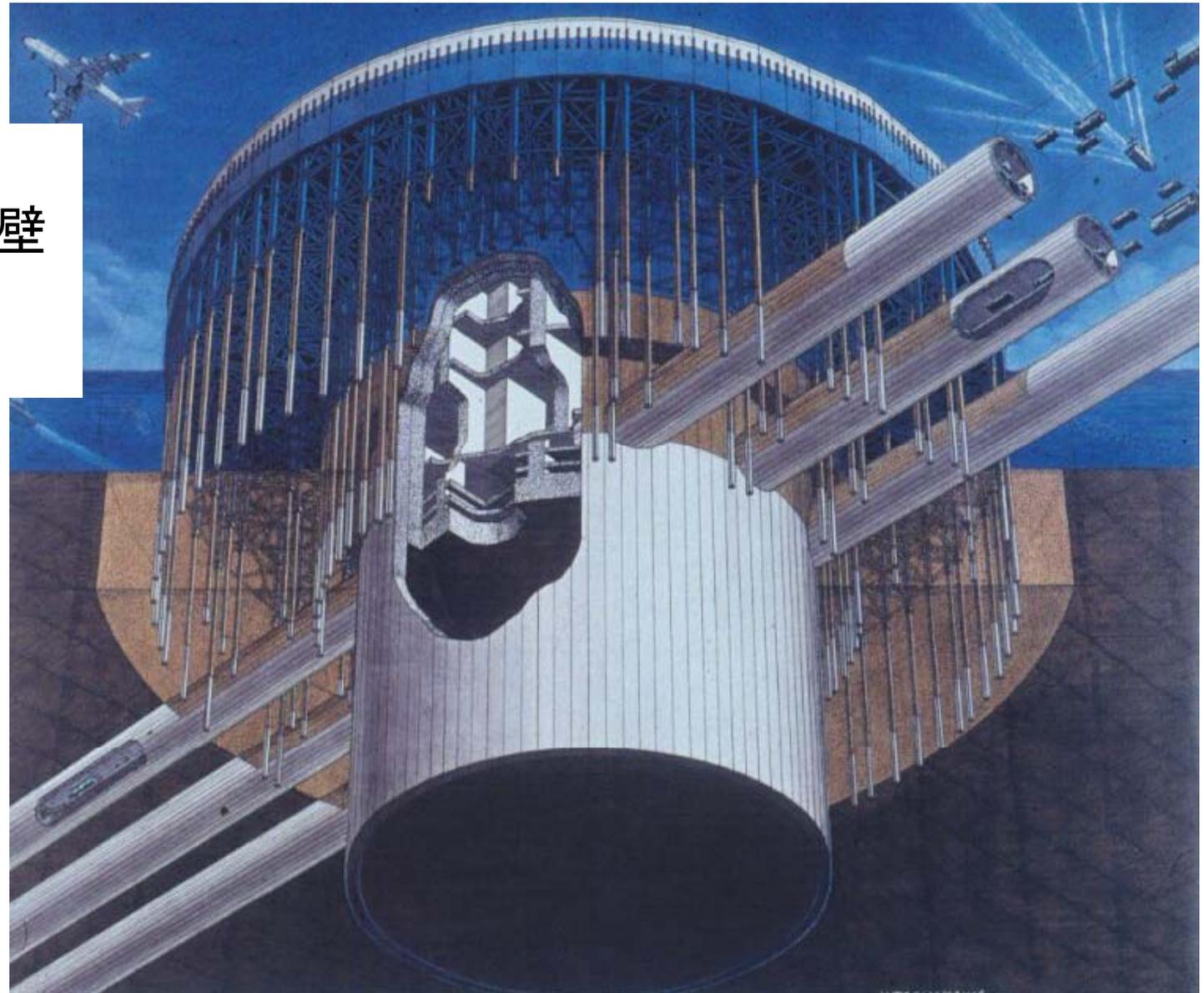
# 工期短縮のための「地盤凍結工法を用いたトンネルの地中接合」

## 長手方向の断面



## 地盤工学に関連した重要な設計・施工上の課題 - 6:

川崎側人工島の  
巨大な地中連続壁  
- 内径 98 m;  
- 高さ 119 m.

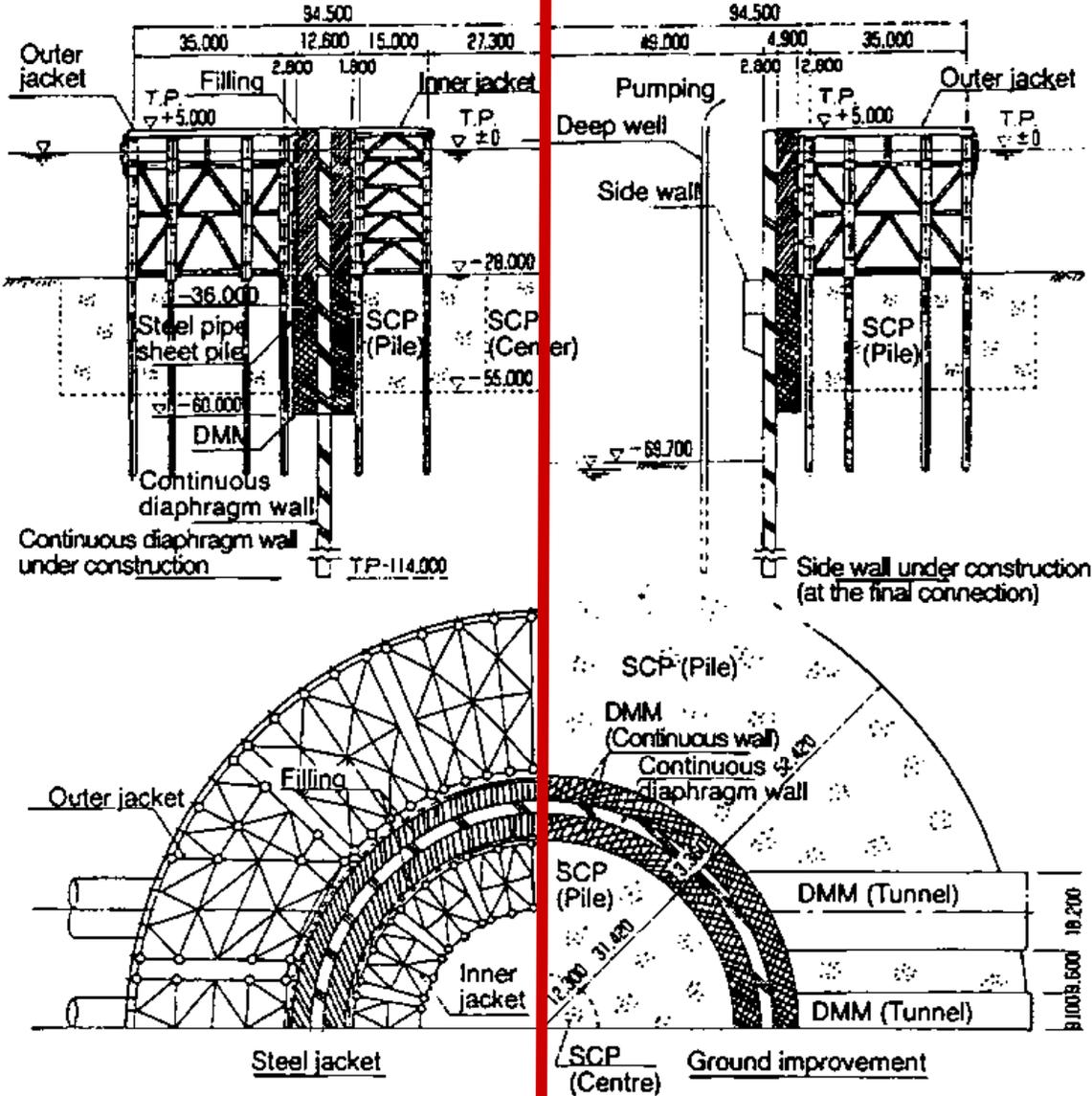


下方から見た  
模式図

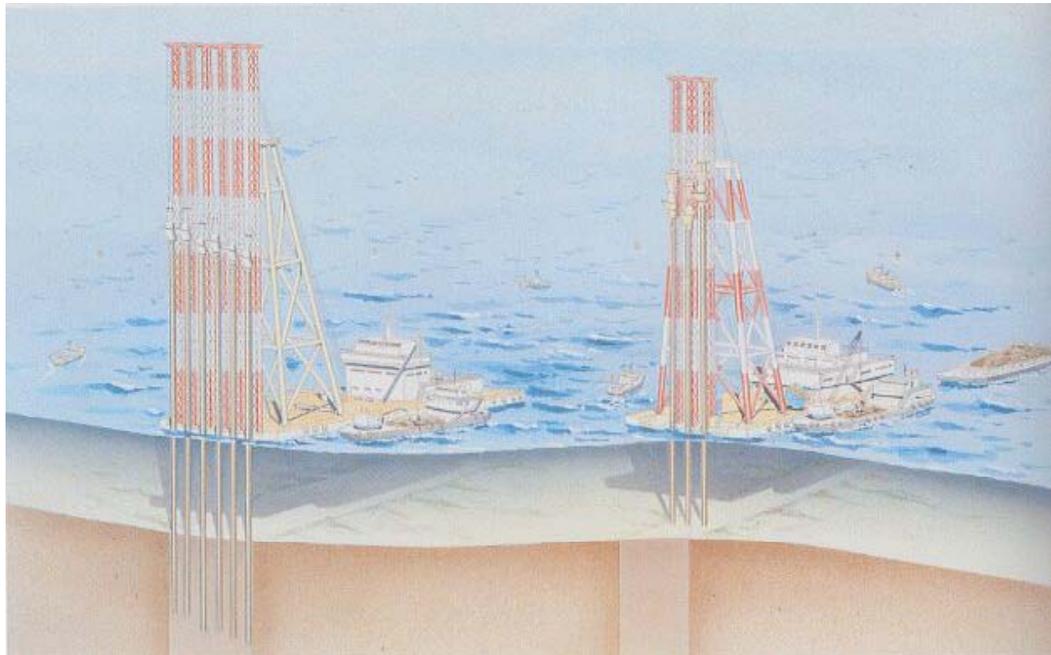
# 川崎側人工島

地盤掘削工事開始直前

地盤掘削工事完了直後



# サンドコンパクションパイル工法による地盤改良工事



# サンドコンパクションパイル工法による地盤改良工事



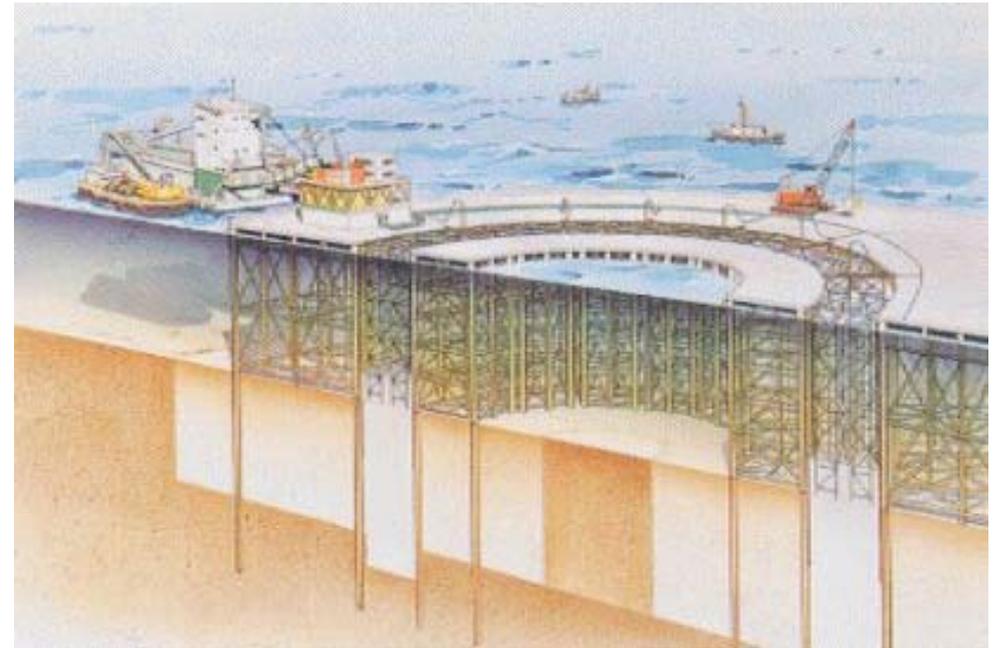
# 地盤改良工事後の外側と内側の鋼製ドーナツ状構造物の建設



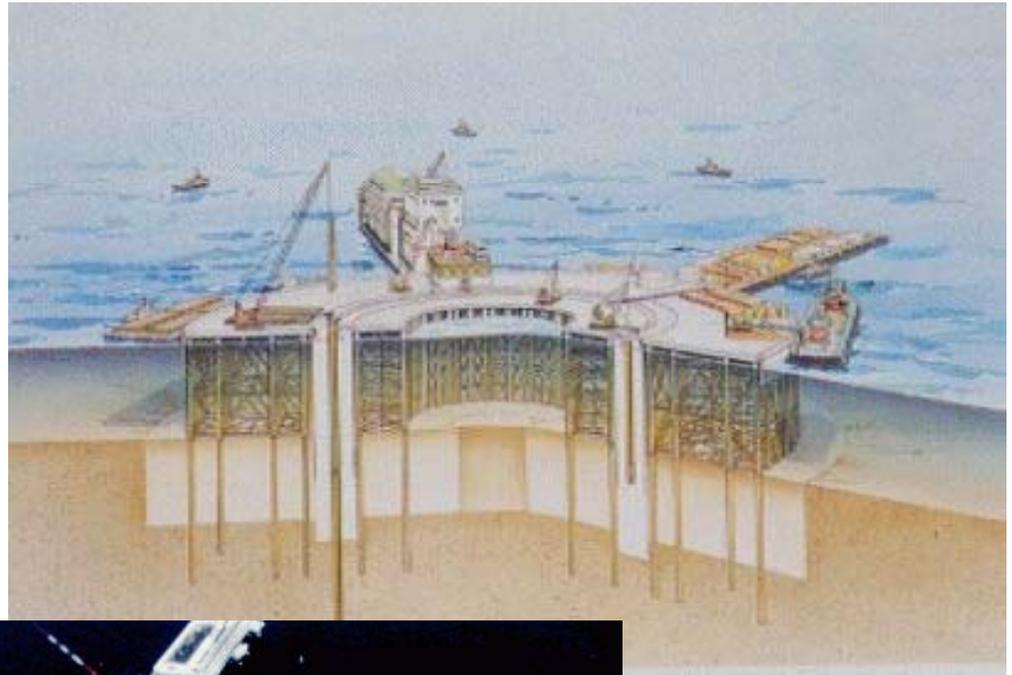


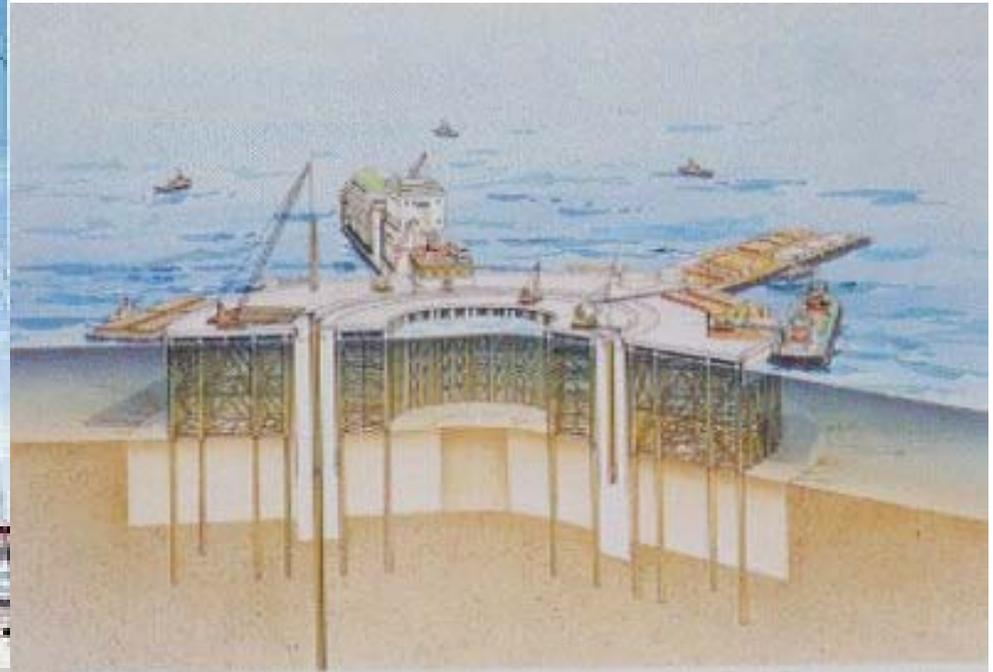


リング状空間のセメント混合砂の  
スラリーによる充填  
(この内部とその下部の原地盤  
内に地下連続壁を建設するため)

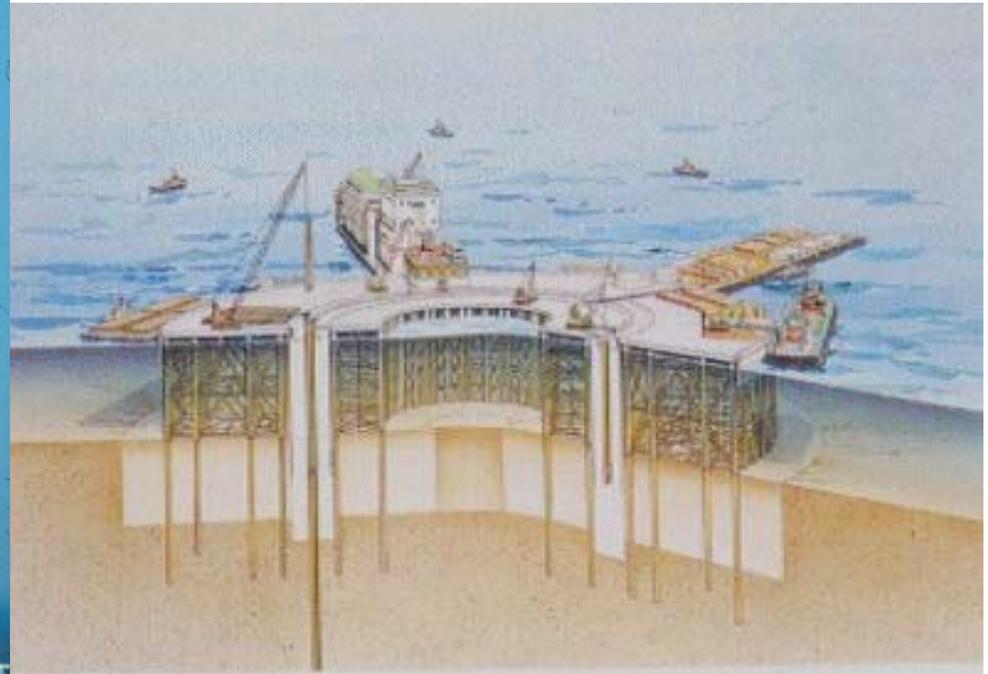


# 円筒状地下連続壁の建設



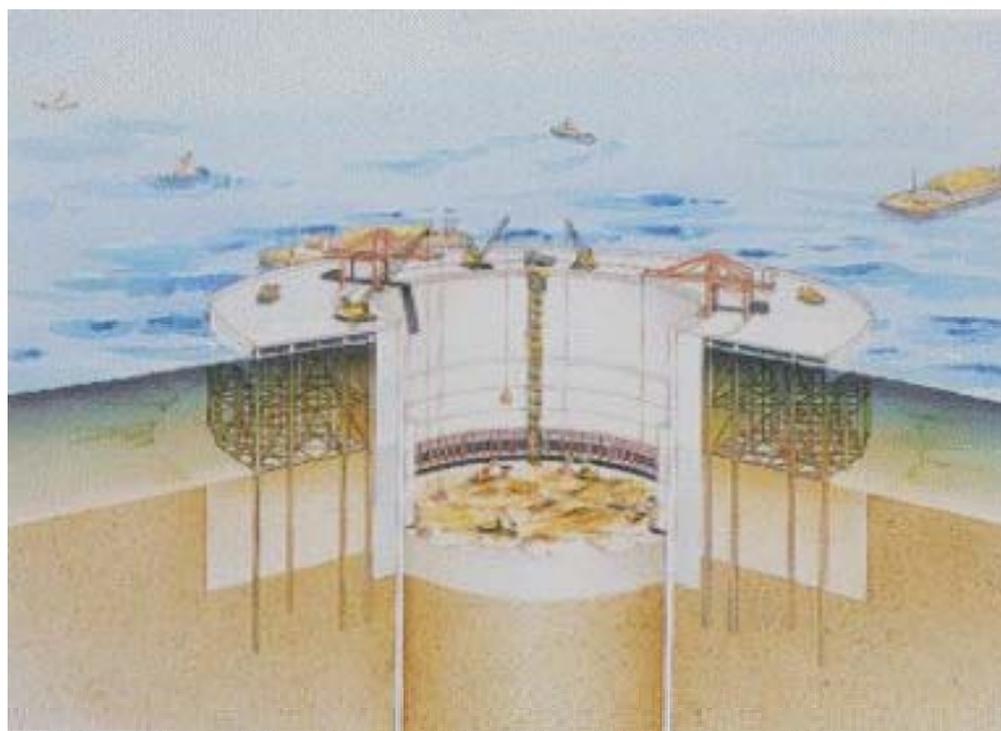


地盤掘削機械



組み立てた鉄筋を挿入  
(次は、コンクリートの打ち込み)

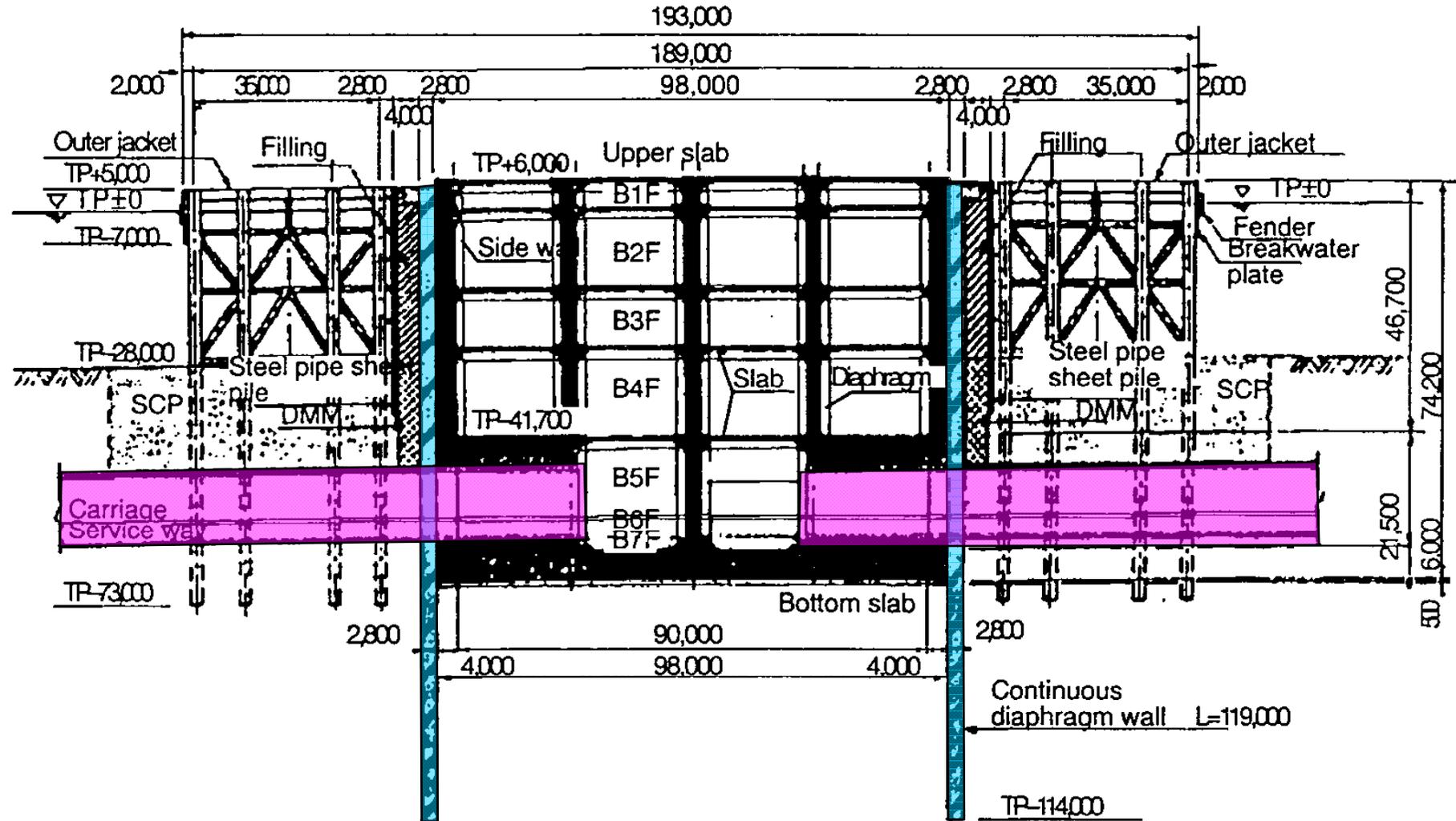
# 円筒状地下連続壁の 内部の地盤掘削

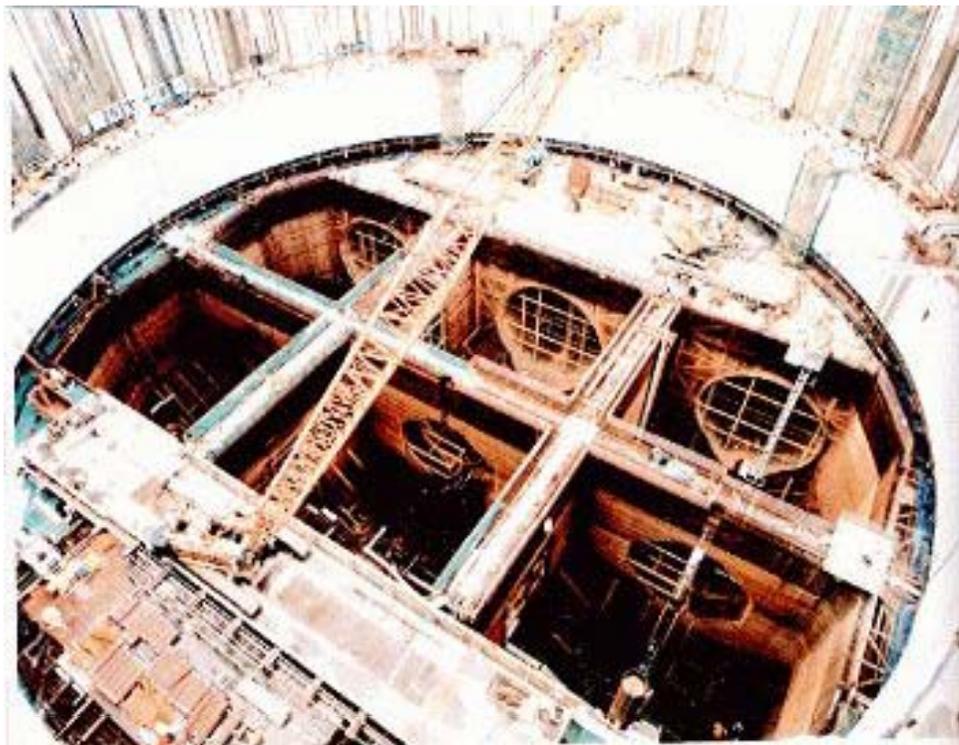


# 円筒状地下連続壁の内部の地盤掘削



# 円筒状地下連続壁の内部でのRC構造物の建設 とシールドトンネルの発進

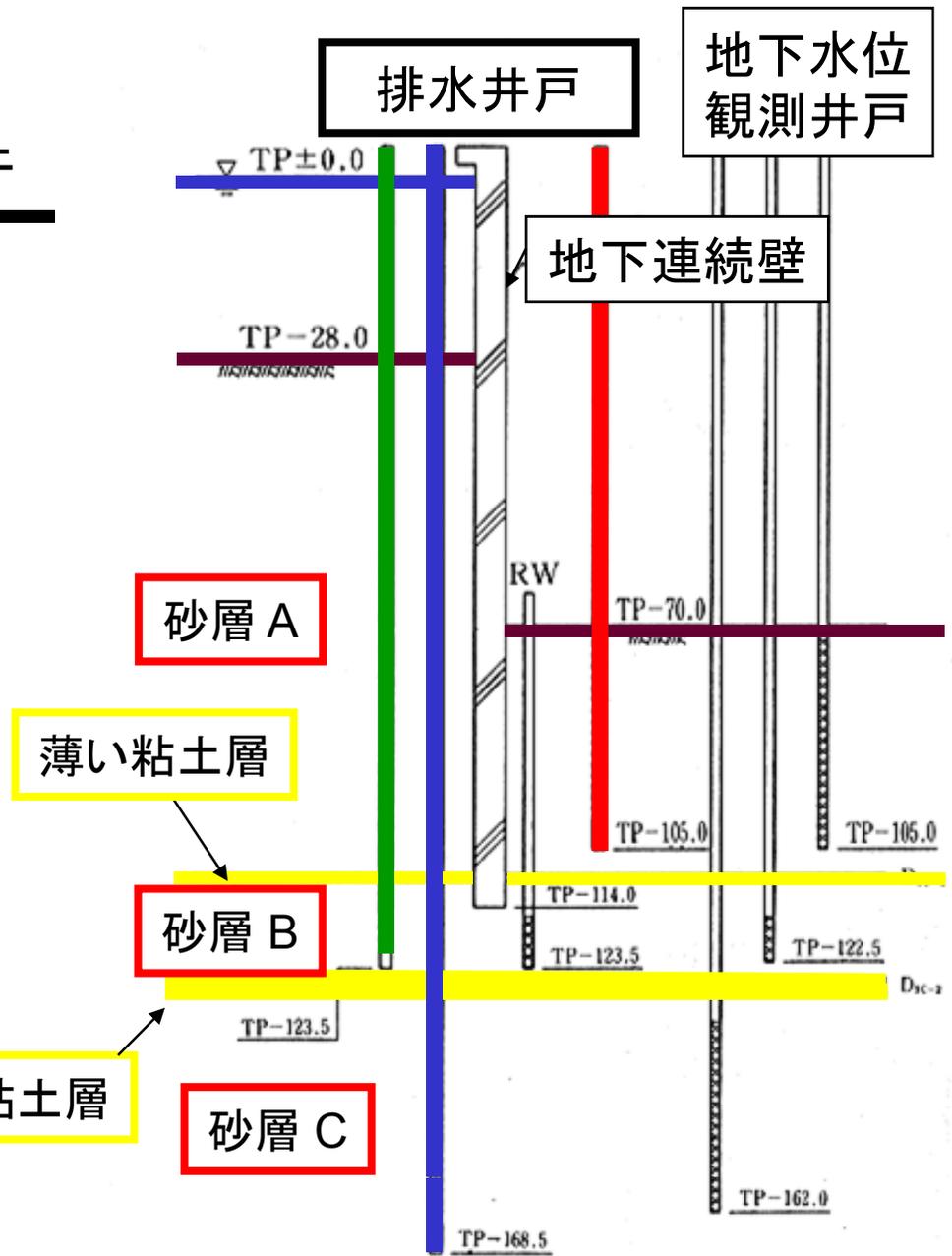
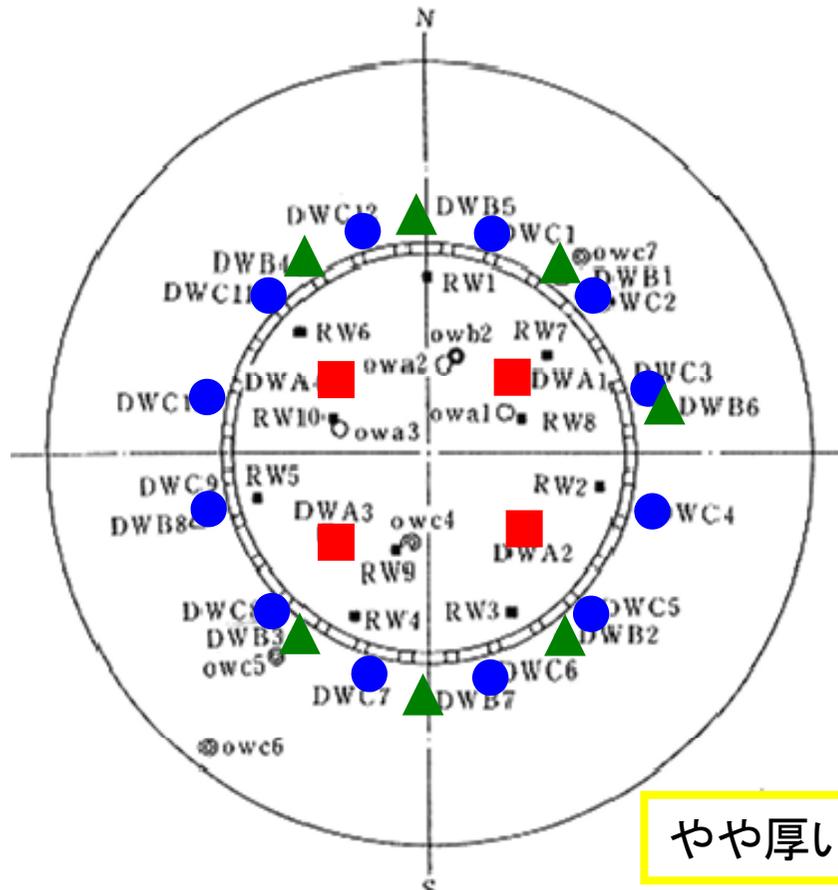


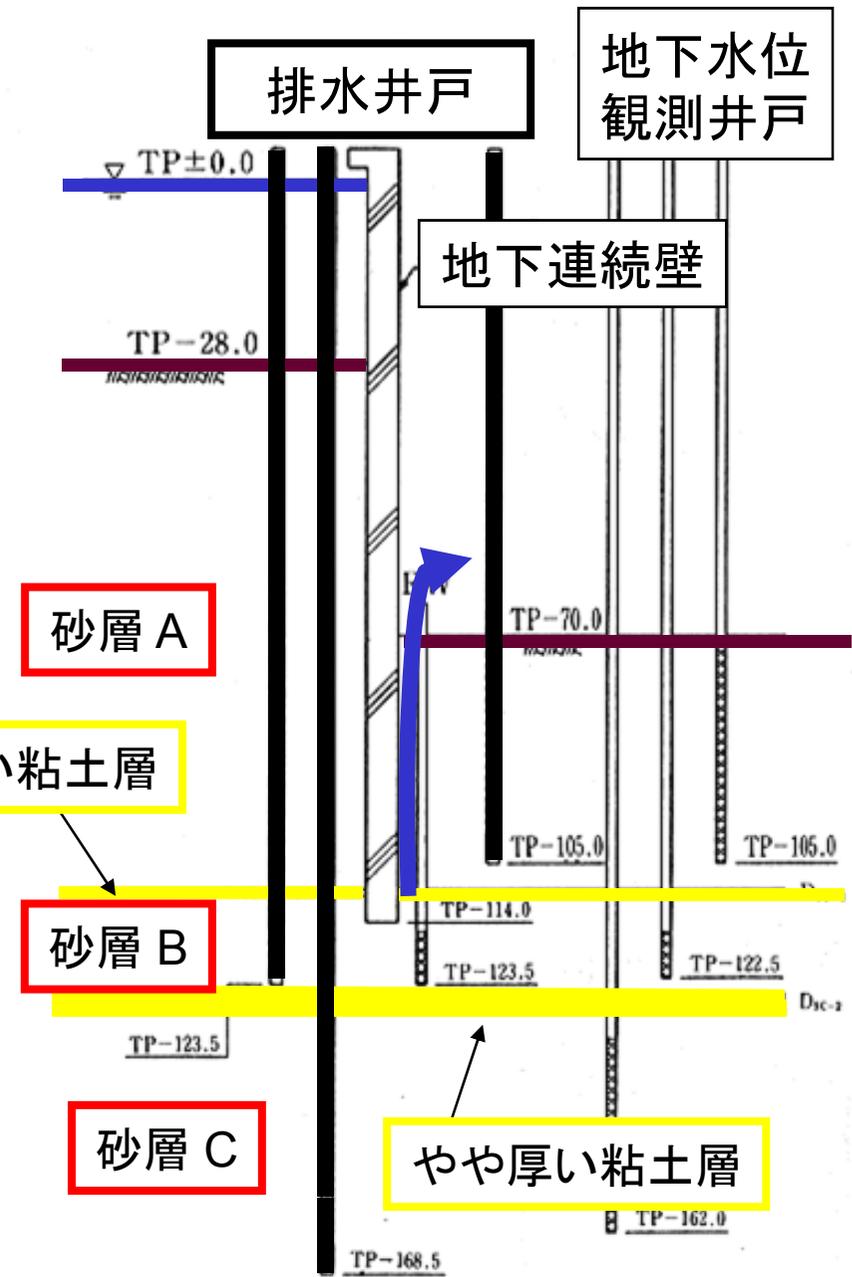


円筒状地下連続壁の内部  
でのRC構造物の建設



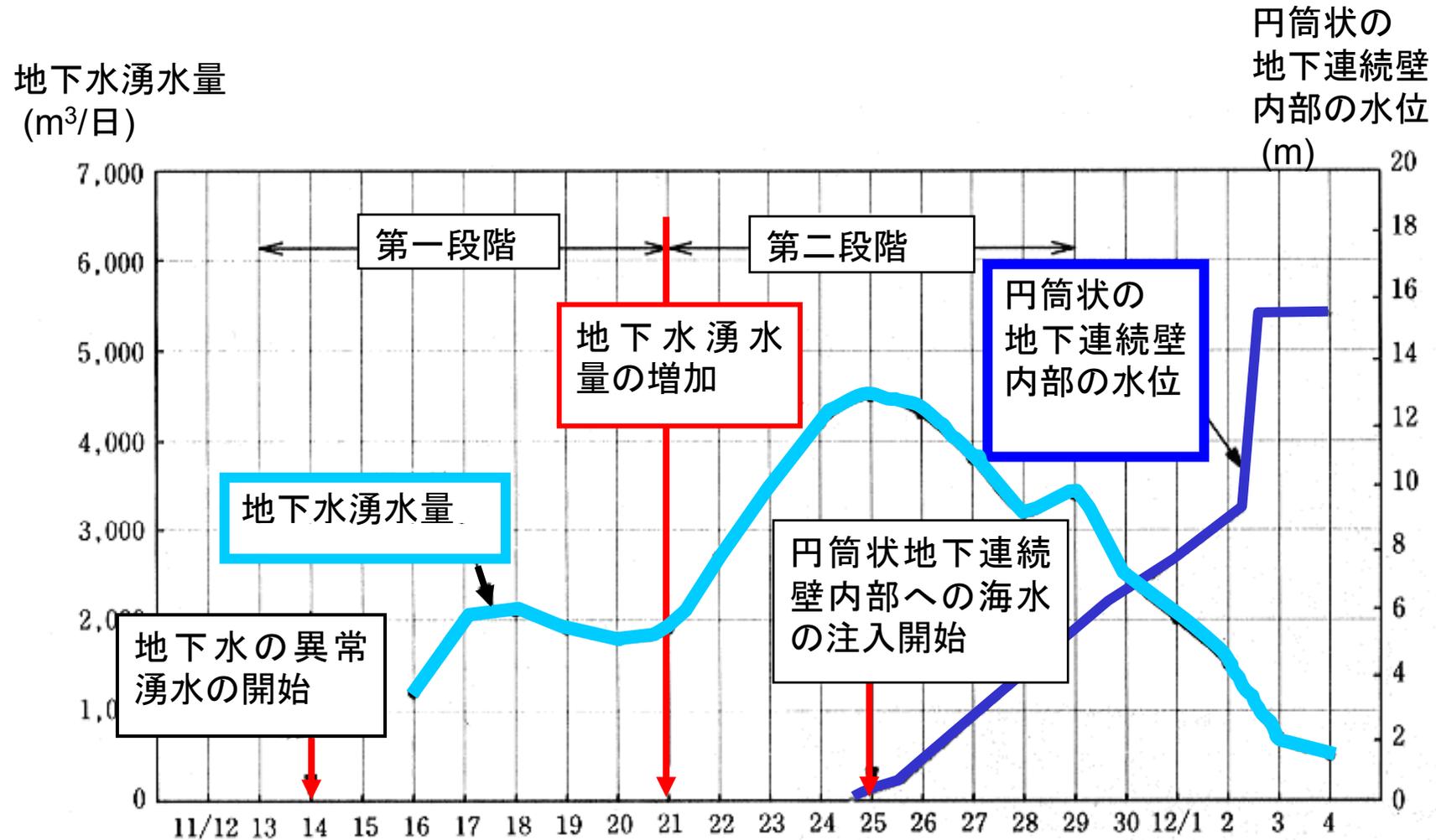
# 円筒状地下連続壁の内部の 地盤内の地下浸透による 破壊を防止するための排水井





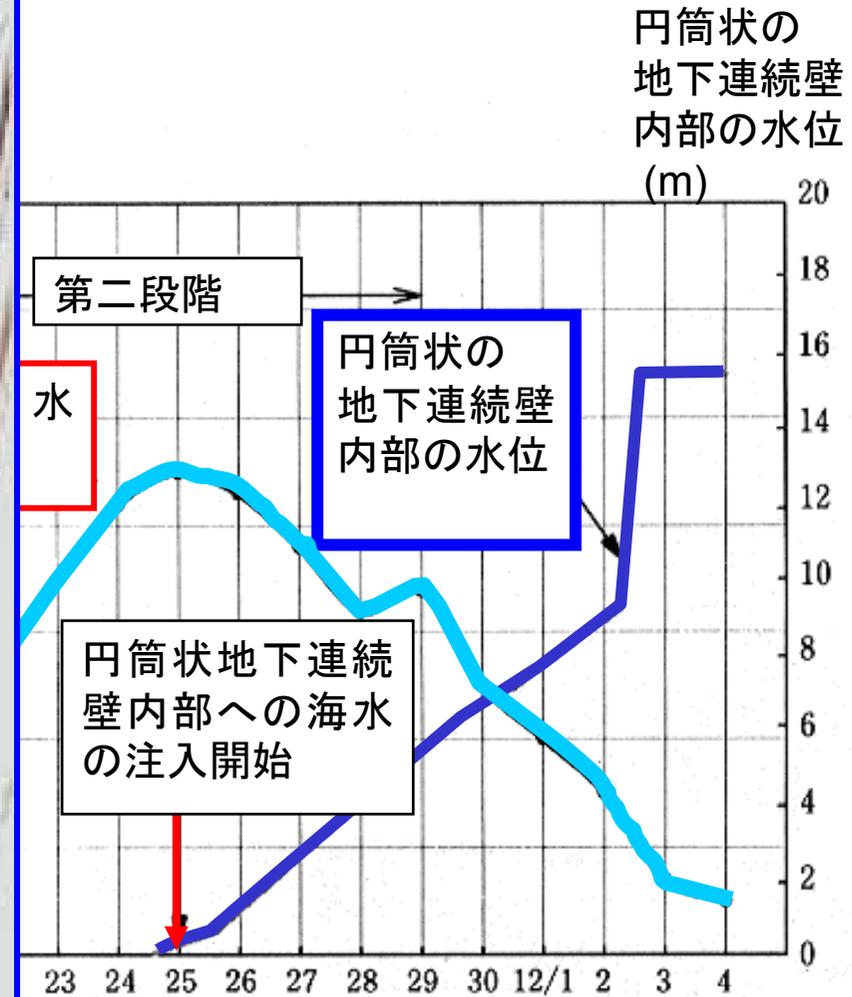
**異常な湧水の発生**  
**1993年11月14日:**  
深刻な地盤の浸透破壊へ発展する可能性

# 地下水湧水量と円筒状地下連続壁内の水位の時刻歴



1993年11月14日からの日付

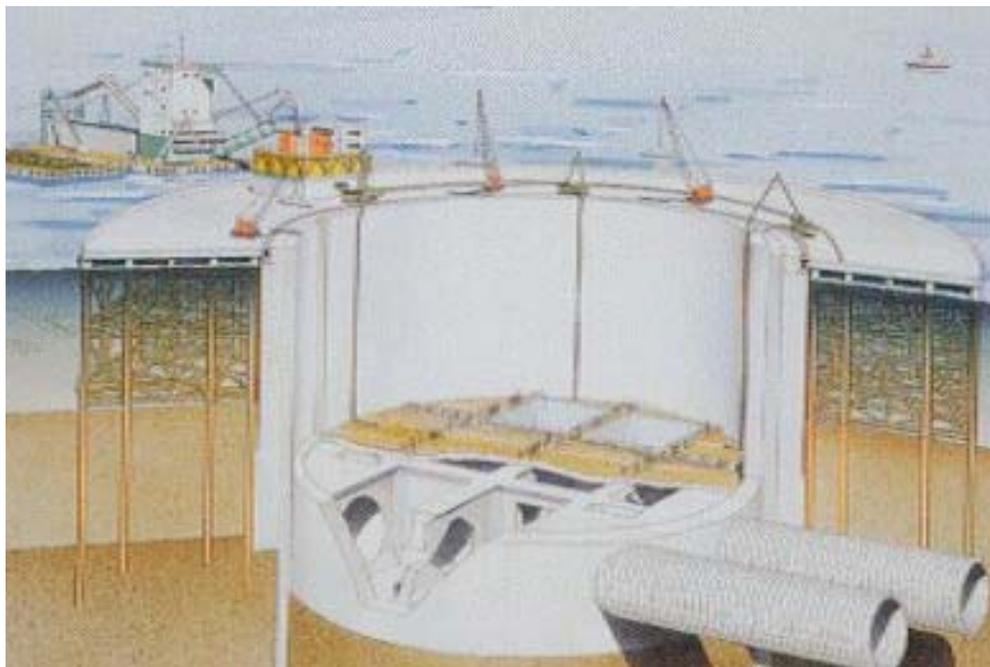
# 地下水湧水量と円筒状地下連続壁内の水位の時刻歴



円筒状の地下連続壁の内部の地盤内の動水勾配を低下させるために注入された海水



セメントミルクや薬液を地盤内に  
注入する止水工事を行い、  
6ヶ月後に工事再開



## まとめ-1

---

**東京湾横断道路**は、以下の困難な条件の下に建設された。

- a) 比較的大きな海深;
- b) 非常に混雑した海上交通路を横断;
- c) 軟弱な地盤
- d) 高い地震活動度。

この建設工事の成功のためのポイントは、**いくつかの地盤工学上の設計・施工問題**を解決すること。

## まとめ-2

---

四種類の**セメント混合工法**による地盤改良・盛土工事により、これらの技術的問題の多くを解決した。

- 1) 軟弱粘土の原位置セメント混合;
  - a) 従来法の深層混合工法 (DMM);
  - b) 低強度 DMM;
- 2) セメント混合砂を用いた盛土工事;
  - a) スラリータイプ;
  - b) ドライタイプ。

## まとめ-3

---

世界最大径のシールドトンネルの建設には、以下の課題の解決が必須であった。

- a) 非常に強固なセメント改良土盛土・地盤と未改良軟弱粘土地盤の連続掘削;
- b) 非常に小さな土被りのためのトンネル浮上の防止;
- c) 工期短縮のための地盤凍結工法を用いたシールドトンネルの地中接合。

## まとめ-4

---

内径 98 m, 高さ 119 m の世界最大規模の円筒型地中連続壁の海中建設工事は、地下連続壁内部の地盤での地下水の異常湧水により、約 6 ヶ月遅延した。

- a) 迅速な処置（円筒状地下連続壁内部への海水の注入）がとられなかったならば、地盤の浸透破壊から人工島全体の破壊へと発展し、東京湾横断道路の完成を不可能にする決定的な事故に至った可能性があった。
- b) この事故は、地下連続壁底部の深さをもっと大きくしてやや厚い粘土層を貫通しておけば動水勾配が小さくなり、生じなかったであろう。

### 3.セメント混合による改良の原理と実際

#### 3.1 概論

- ・多様なセメント混合土(地盤材料からコンクリートへ)
- ・多様な施工法

#### 3.2 東京湾横断道路でのセメント改良

- a)原位置軟弱粘土のセメント改良
- b)セメント混合した締固めない砂の水中盛土
  - ・スラリー式とドライ式
  - ・セメント改良土と堆積軟岩の比較

#### 3.3 セメント混合した締固めた砂礫

- ・良配合の礫:  
橋台の建設

#### 3.4 超軟弱粘性土のセメント改良

# 多様なセメント混合土

超軟弱粘性土

軟弱粘土

締固めない砂

- 下方ほど、より硬く強くなる！
- しかし、全て同じ地盤材料(土粒子、セメント、水、空気)から出来ている！フランス語では、Geomaterialsは土、岩、コンクリートを意味する。
- コンクリート工学と地盤工学の境界は曖昧！両者を無理やり区別する必要はない！

締固めた貧配合砂\*

締固めた良配合の礫\*

Roller compacted damコンクリート\*

従来型コンクリート

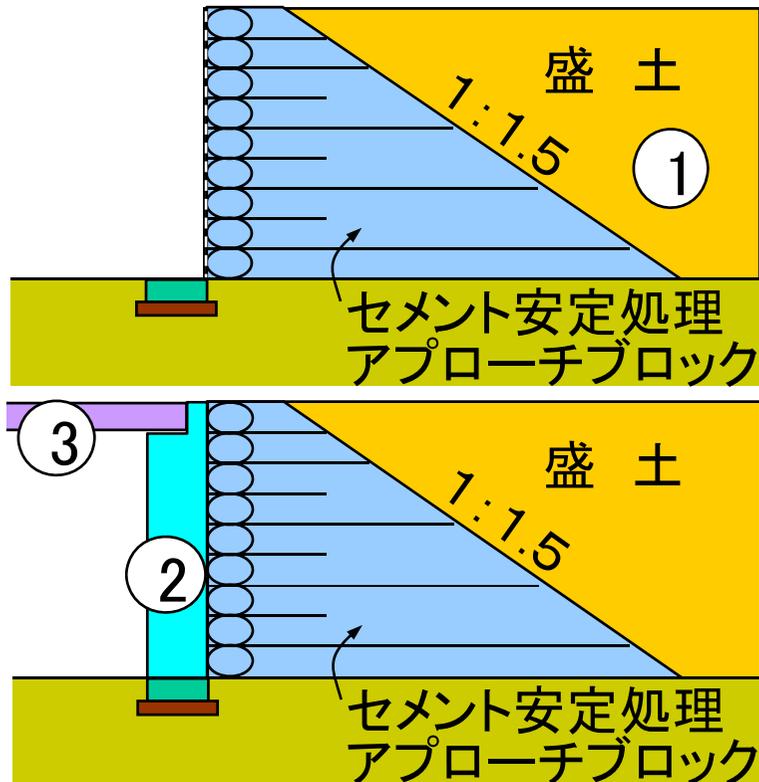
\*締固めにより、強度が増加する！  
良い締固めは、施工でも重要！

# 実現場での適用(鉄道公団, 九州新幹線)



# 施工(九州新幹線, 鉄道公団)

## 施工手順



## 特徴

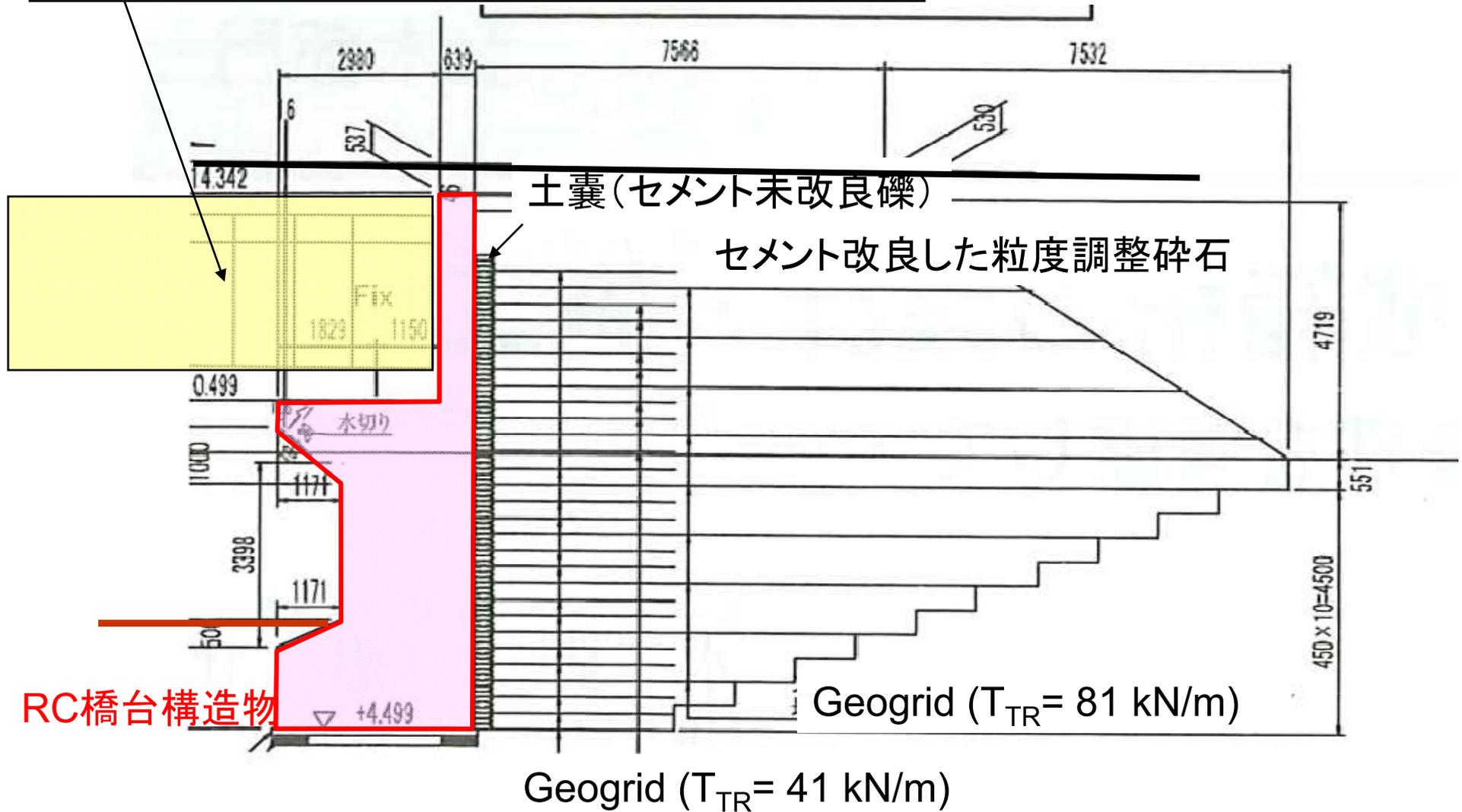
- 段階的に施工を行うため、地盤の沈下等によって生じる、躯体と盛土の相対的変位の問題を回避できる。





# 最近の工事例、兵庫県、JR西日本、姫線

単純桁 (L= 64.3 m, W= 5.5 m)  
工期 2007 - 2008





## 締固めたセメント混合礫:

仮設ではなく、重要な本設構造物に使用

## セメント改良土に要求される性質

1) 十分に高い剛性と強度:

■鉄筋コンクリート構造物である必要無い

■セメント改良土の強度と剛性で十分であること確認する必要

2) 経済性(RC構造物+杭基礎よりも、確実にP/Cが高い必要)

## それを実現するための締固め法:

1) 良く締固まる盛土材(比較的大きな平均粒径 $D_{50}$  と均等係数 $U_c$ )

2) 薄層締固めと高い締固めエネルギー

3) 最適含水比で締固め

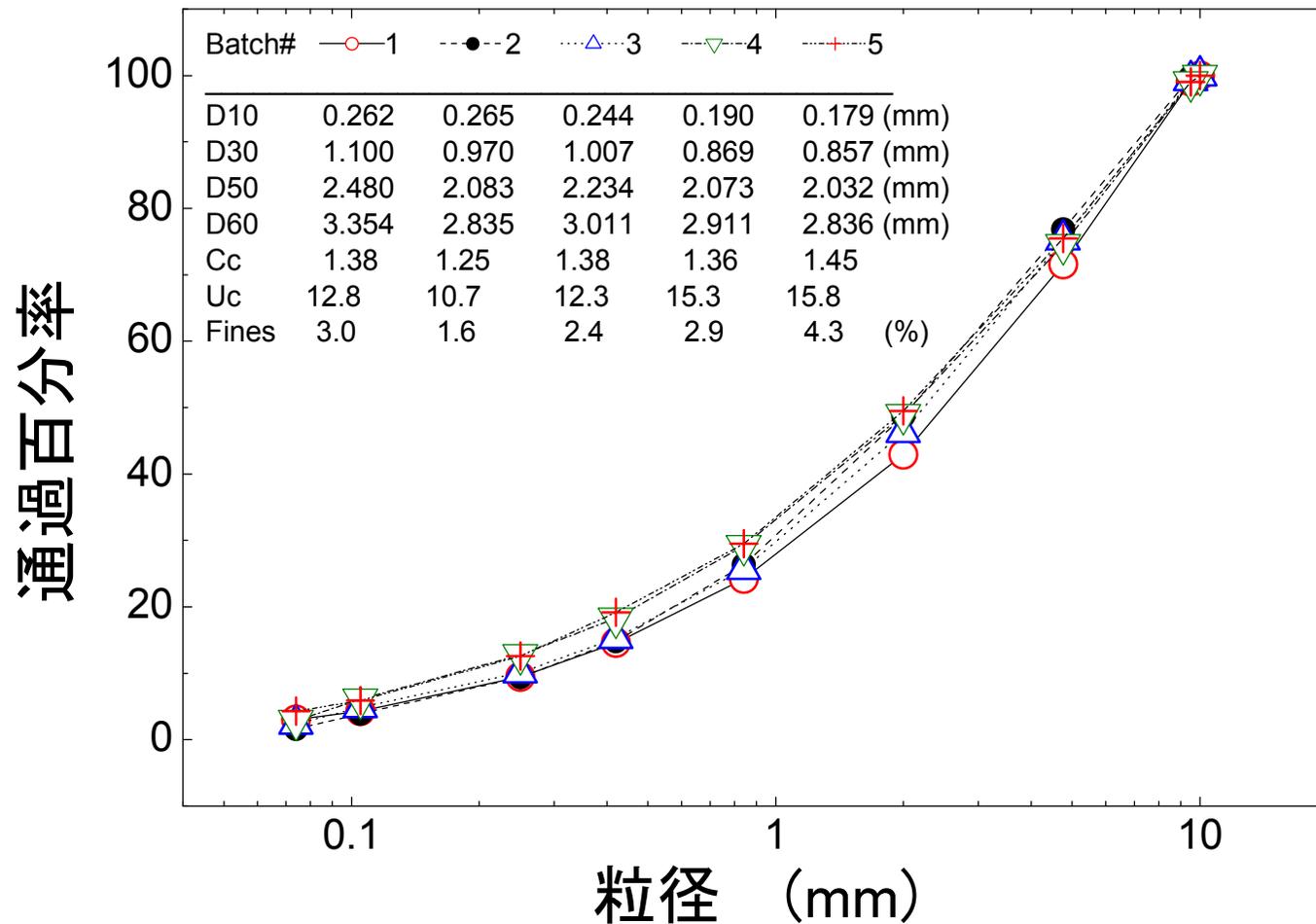
■最適なセメントペースト状態が達成できるから

■高い締固め乾燥密度が達成できるから

⇒できるだけ少ないセメント量で目的の強度と剛性を実現

# 排水三軸圧縮試験による研究:

材料: 碎石(現場粒度:  $D_{max} = 32 - 38 \text{ mm}$ )  
→ 剪頭粒度( $D_{max} = 10 \text{ mm}$ )



材料：セメント混合

(重量比:  $c/s = 2.5\%$ )

→セメント量が少ないから、  
セメント混合による締固め  
特性の変化はない

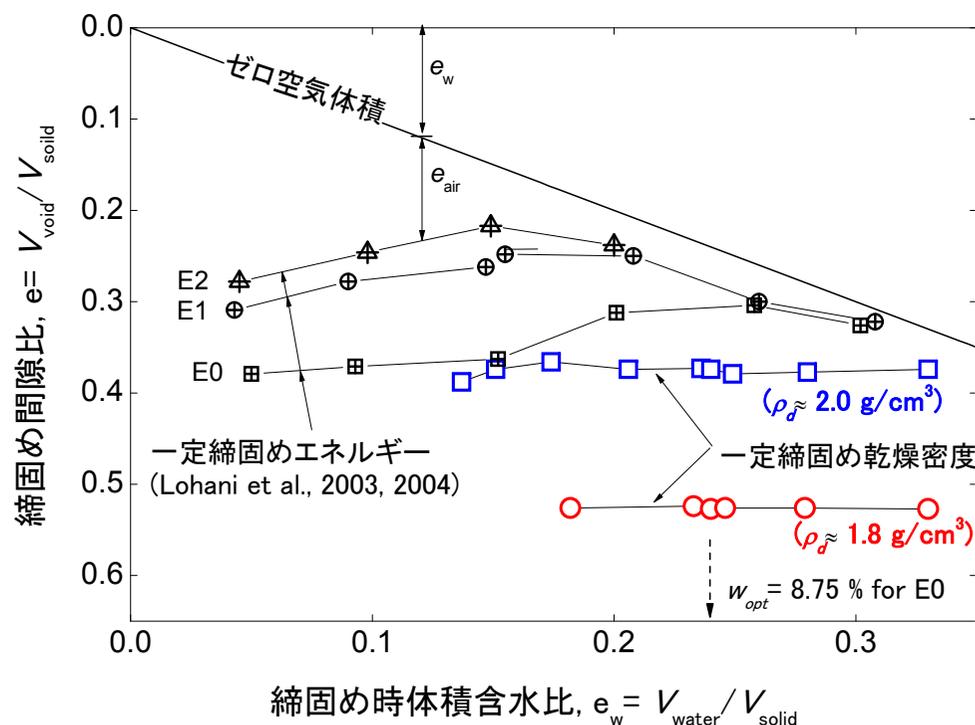
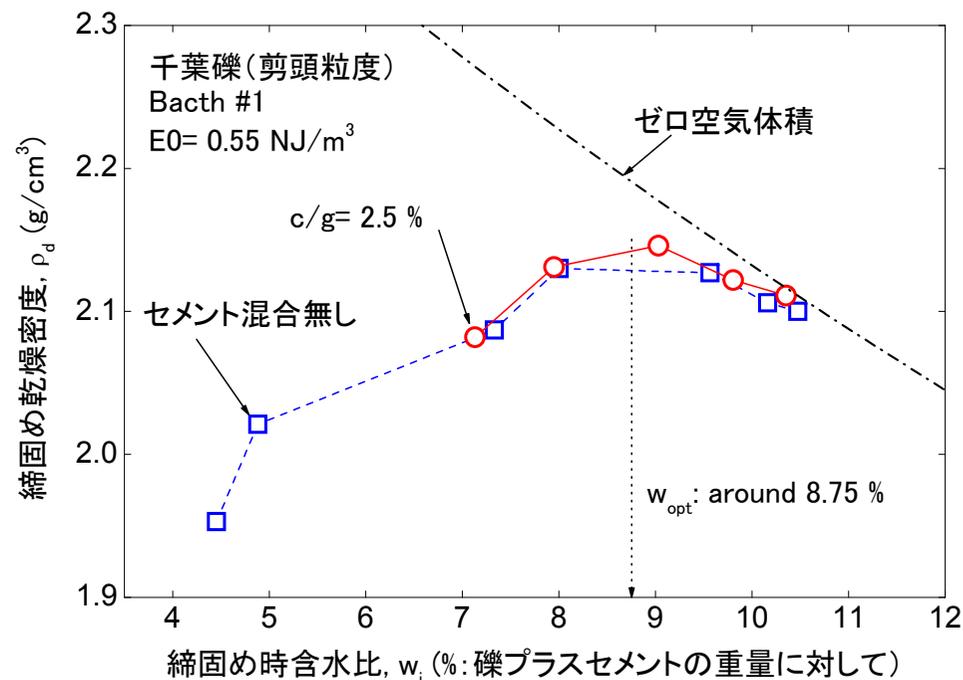
三軸試験供試体：

1)一定の締固めエネルギー  
で異なる含水比

2)一定の締固め密度で異なる  
含水比

$\rho_d = 2.0 \text{ g/cm}^3$

$\rho_d = 1.8 \text{ g/cm}^3$



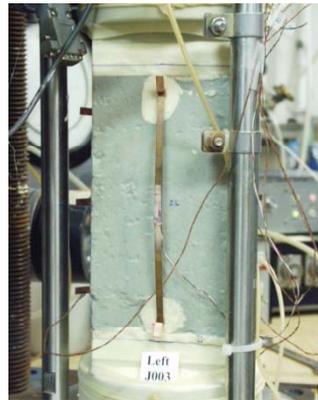
直方体の供試体: 9.5 cm x 9.5 cm x 19 cm

排水三軸圧縮試験(拘束圧= 19.8 kPa)

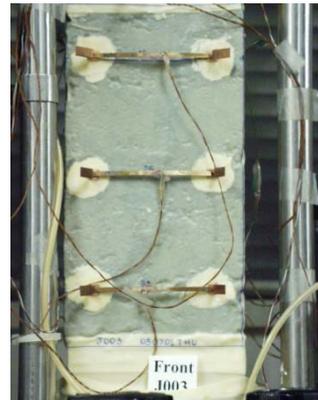
軸ひずみと側方ひずみ、いずれも LDTsで測定.



締固めてモールドから取り出した供試体



Longitudinal LDT (1pair) の設置



Transverse LDT (3pairs) の設置

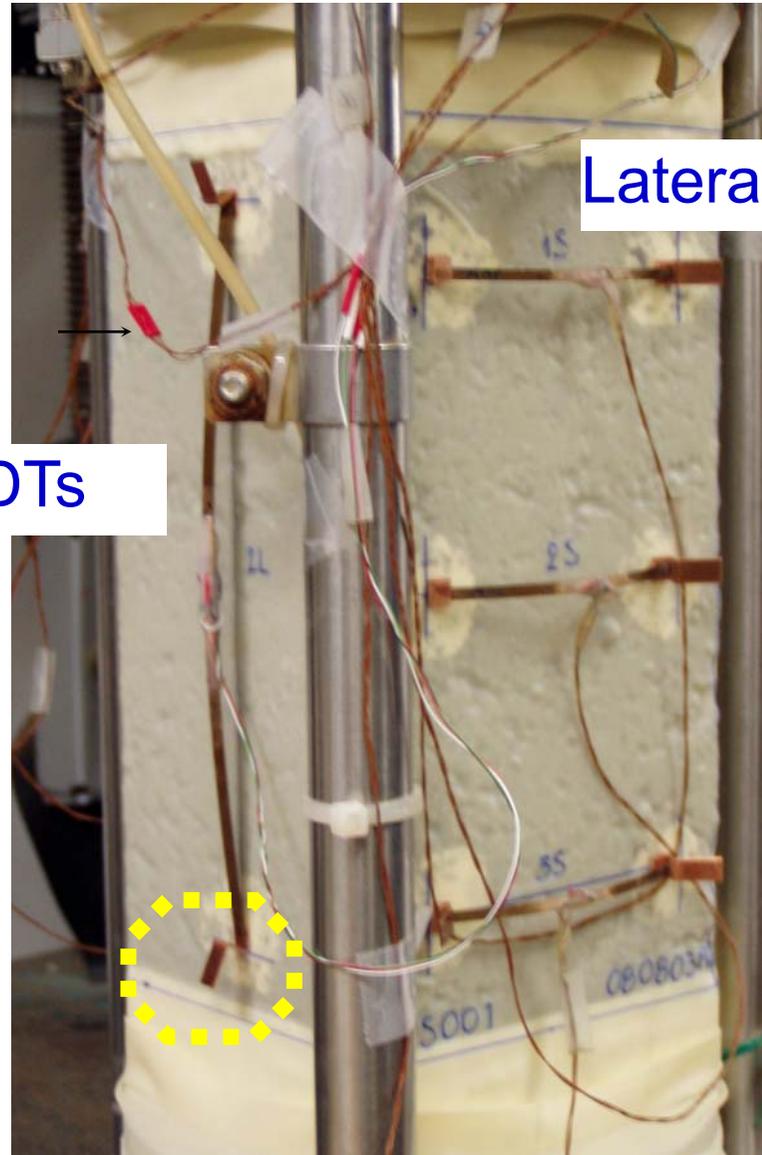


ひずみの局所的測定:

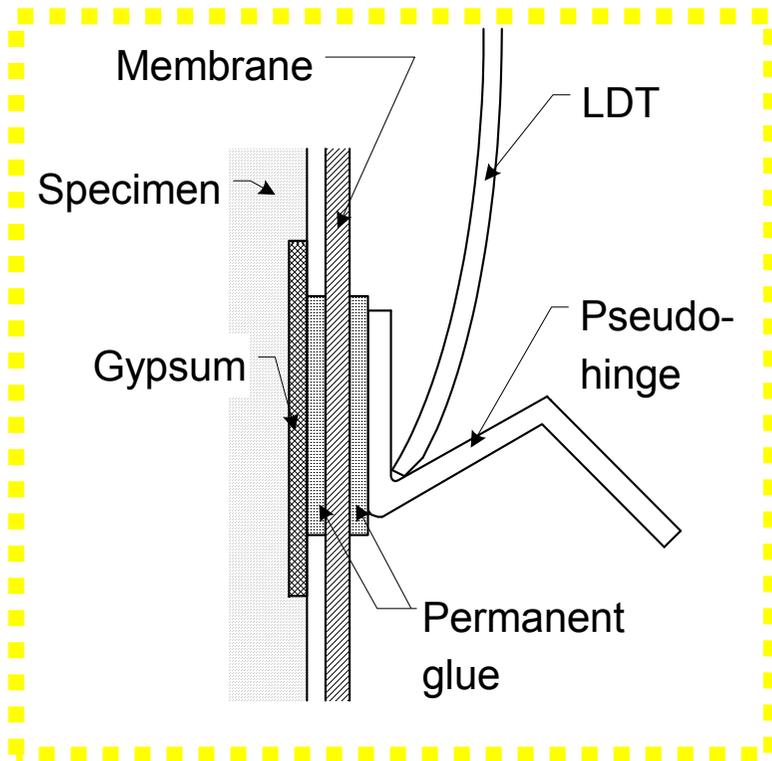
正確

(横LDTは拘束圧が変化する  
場合に威力を発揮)

高感度

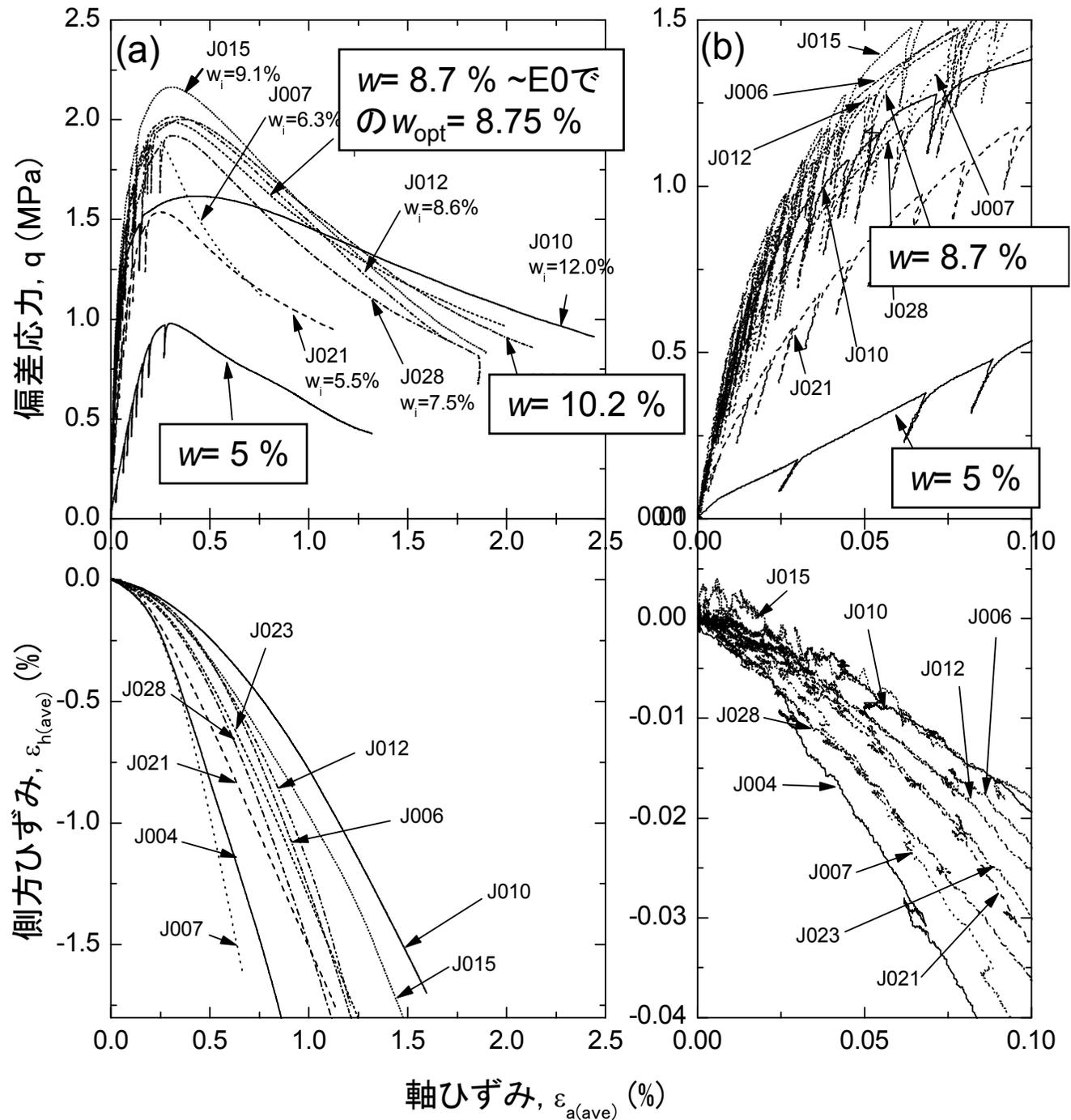


Vertical LDTs



$\rho_d$ が一定でも、締固め時含水比 $w$ の影響は著しい

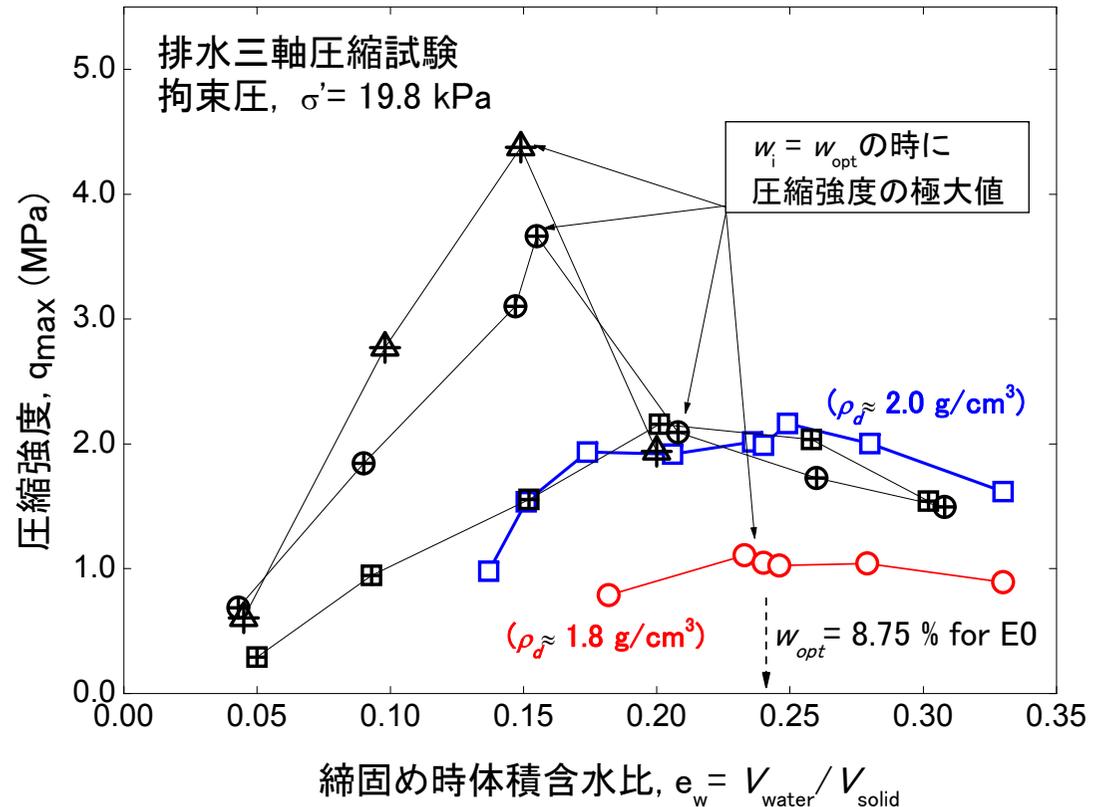
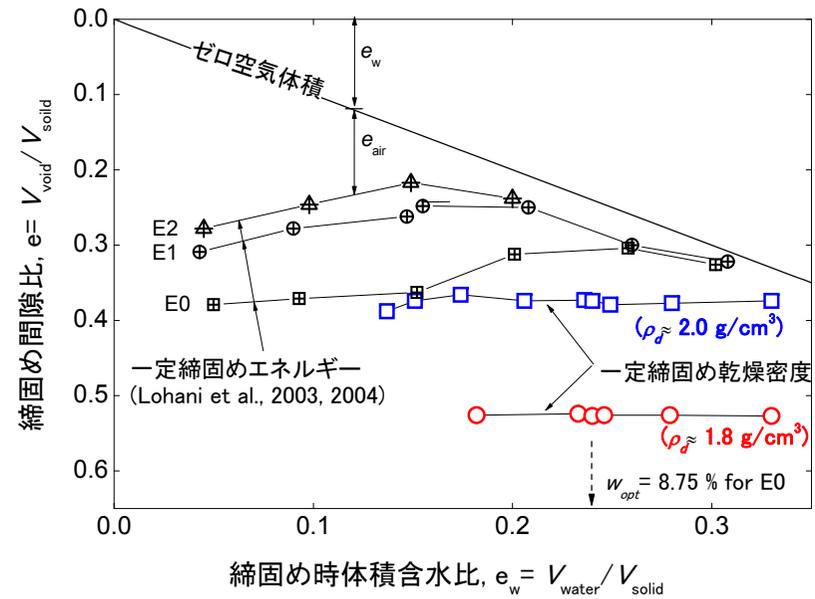
$\rho_d = 2.0 \text{ g/cm}^3$ ,  
 $c/g = 2.5 \%$ ,  
 養生 = 7 日



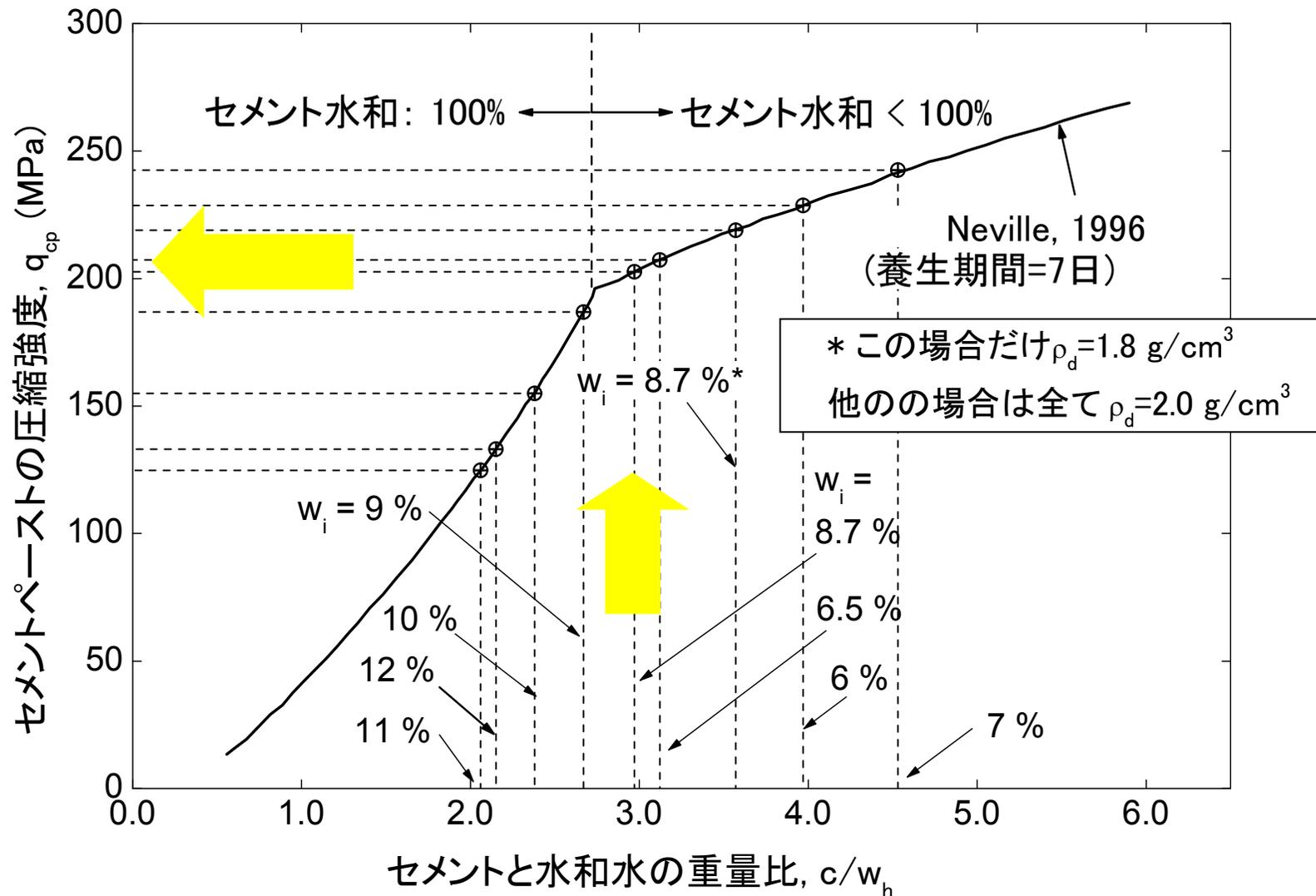
$\rho_d$ が一定でも、 $w \sim w_{opt}$   
で $q_{max}$ は極大値

何故？

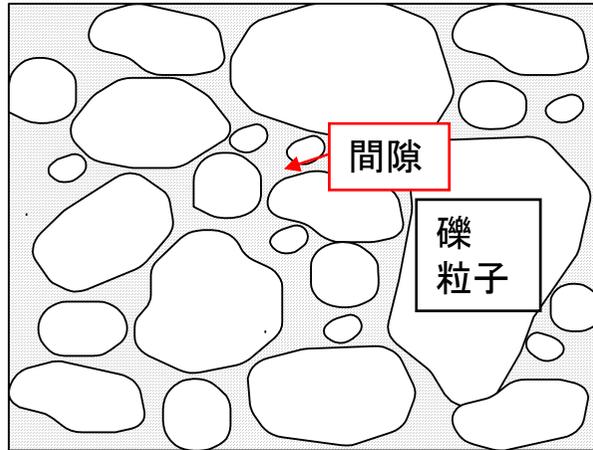
$$e_w = \frac{V_{water}}{V_{soil}} = \frac{e \cdot S_r}{1} = G_s \cdot \frac{w(\%)}{100}$$



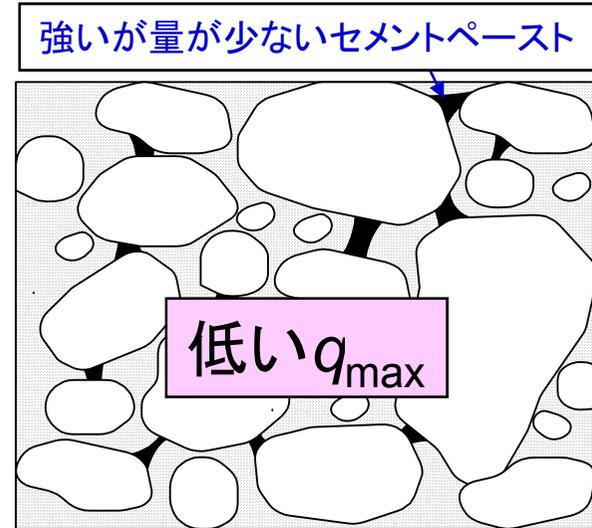
セメントペーストの強度は、含水比の増加(すなわちセメントと水和水の重量比の減少)によって低下



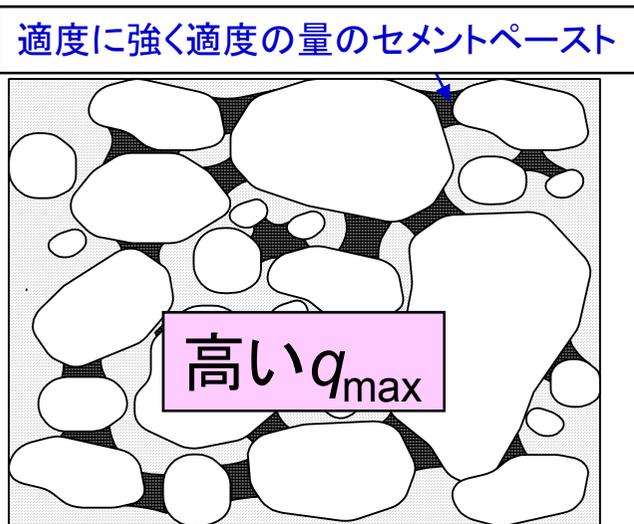
同一の $c/s$ と $\rho_d$ :  
含水比がセメントペーストの状態に与える影響



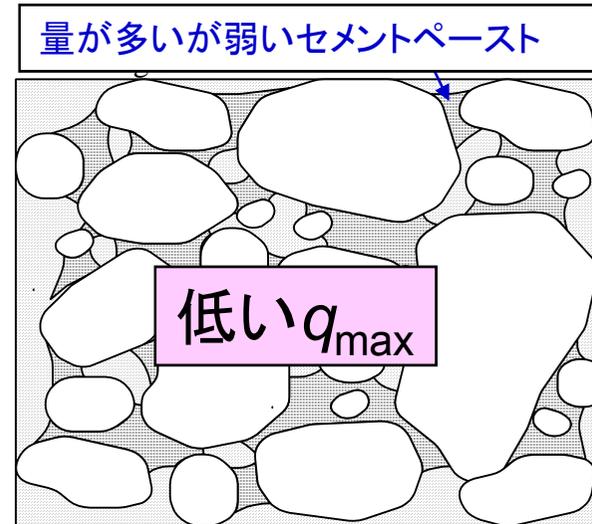
セメント混合無し



セメント混合 (低含水比)



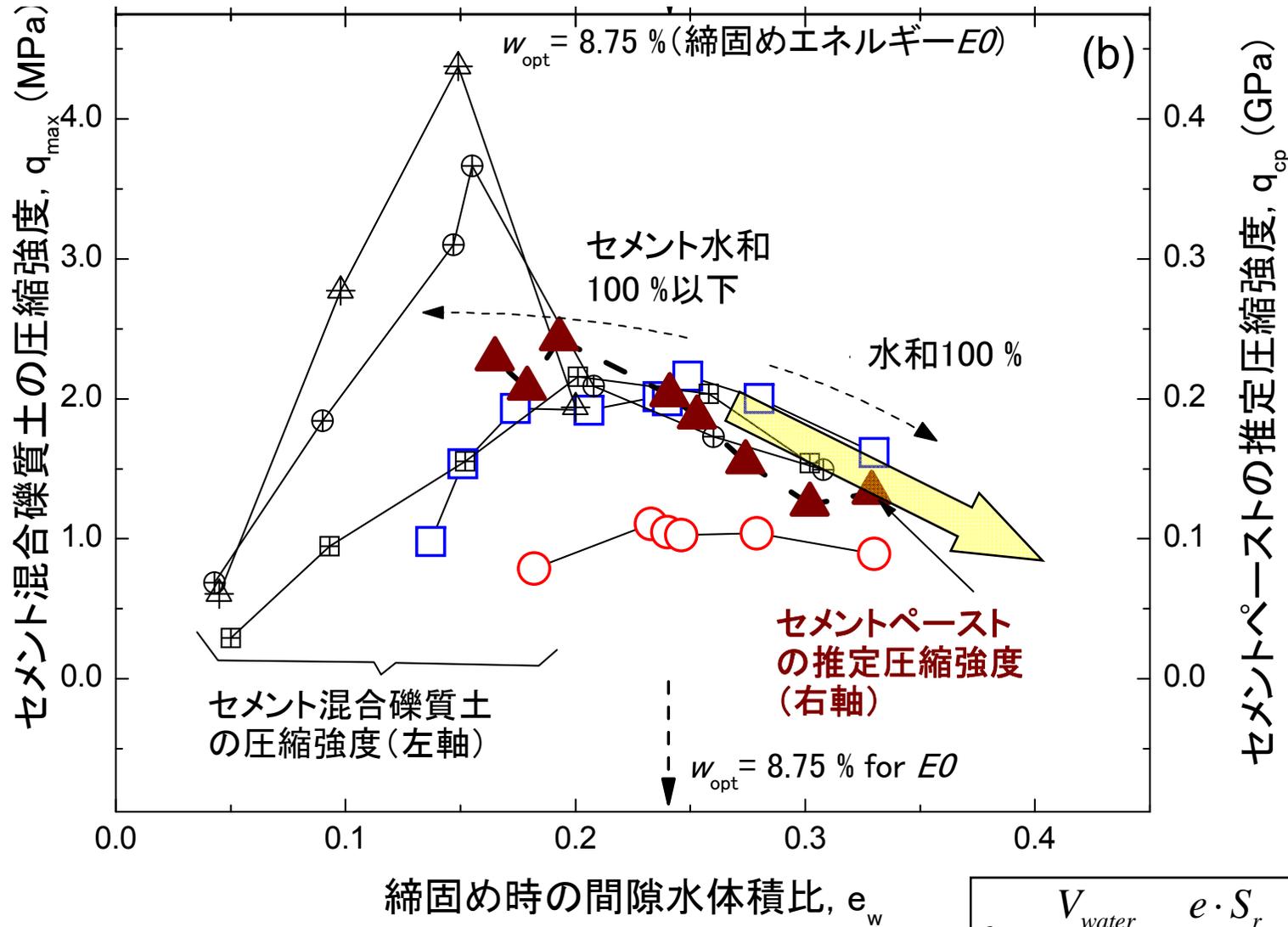
セメント混合 (最適含水比)



セメント混合 (高含水比)

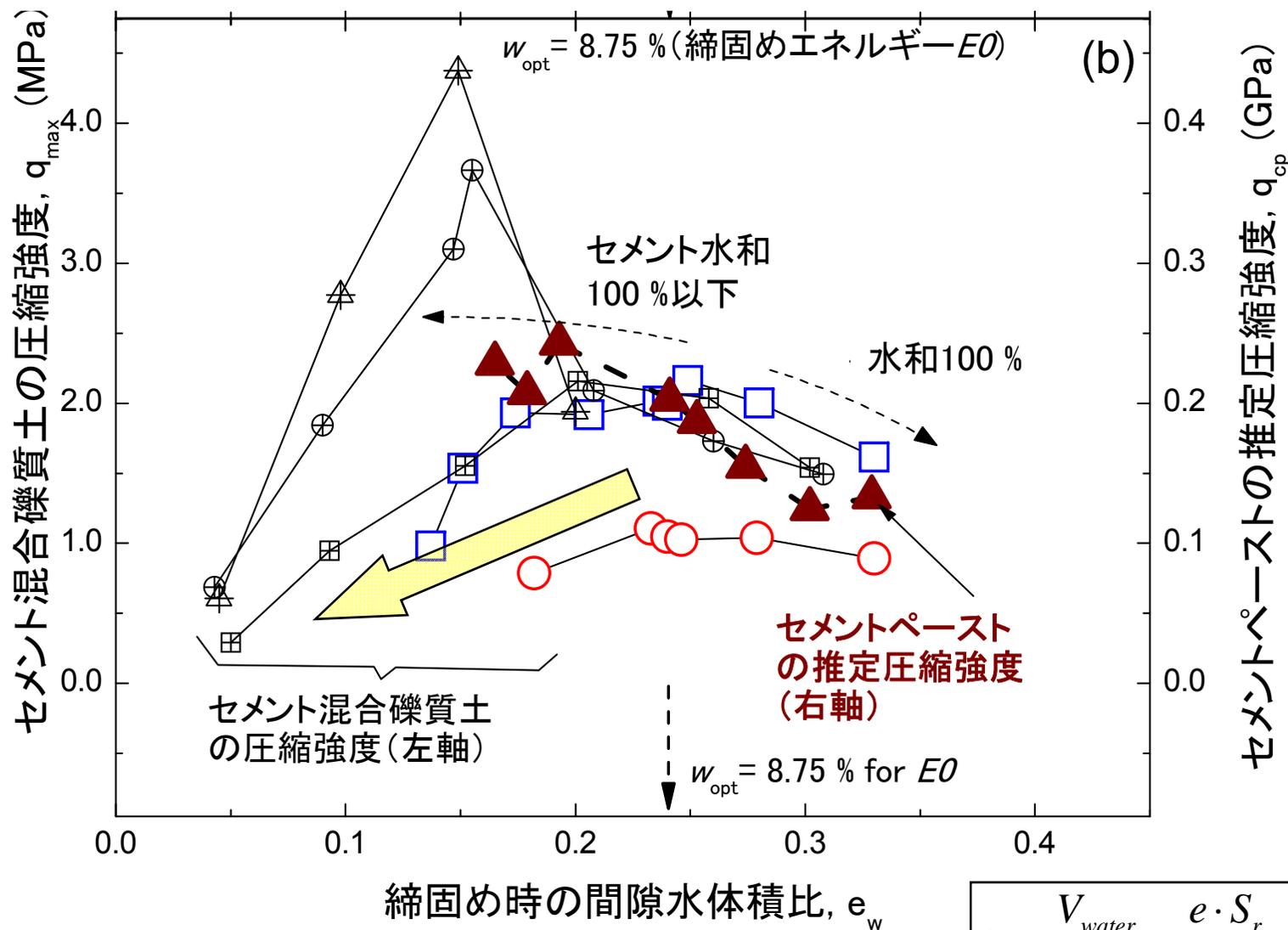
含水比の増加(すなわちセメント/水和水の重量比の減少)

⇒セメントペーストの強度は低下⇒セメント改良土の強度 $q_{max}$ の減少



$$e_w = \frac{V_{water}}{V_{soil}} = \frac{e \cdot S_r}{1} = G_s \cdot \frac{w(\%)}{100}$$

含水比の減少⇒セメントペーストの量が減少⇒セメント改良土の強度 $q_{max}$ の減少



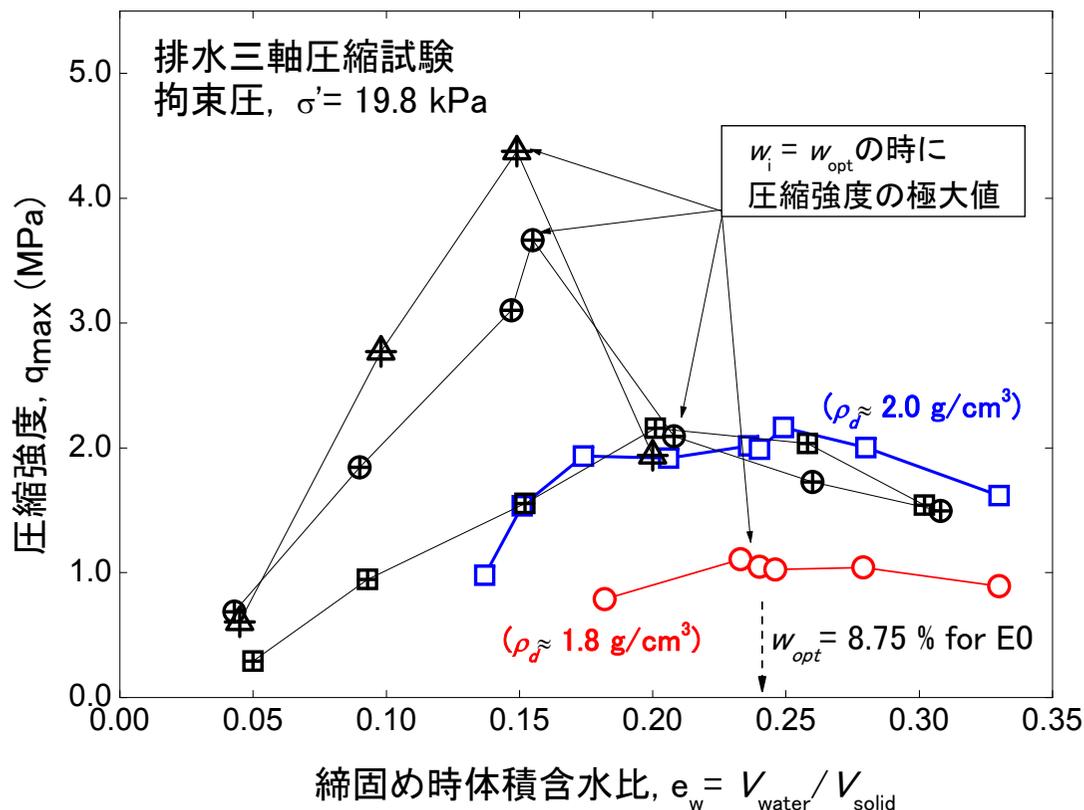
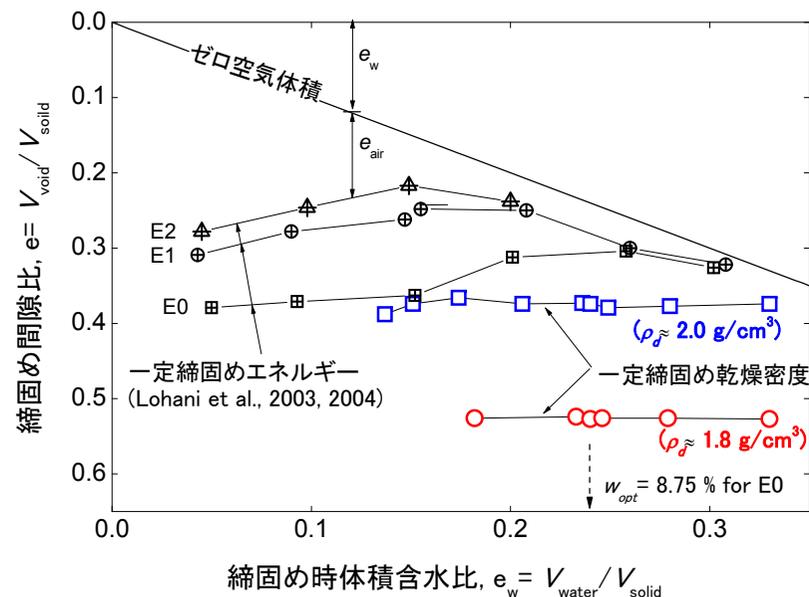
$$e_w = \frac{V_{water}}{V_{soil}} = \frac{e \cdot S_r}{1} = G_s \cdot \frac{w(\%)}{100}$$

同一の締固めエネルギー  
では、 $\rho_d$ の影響が追加:

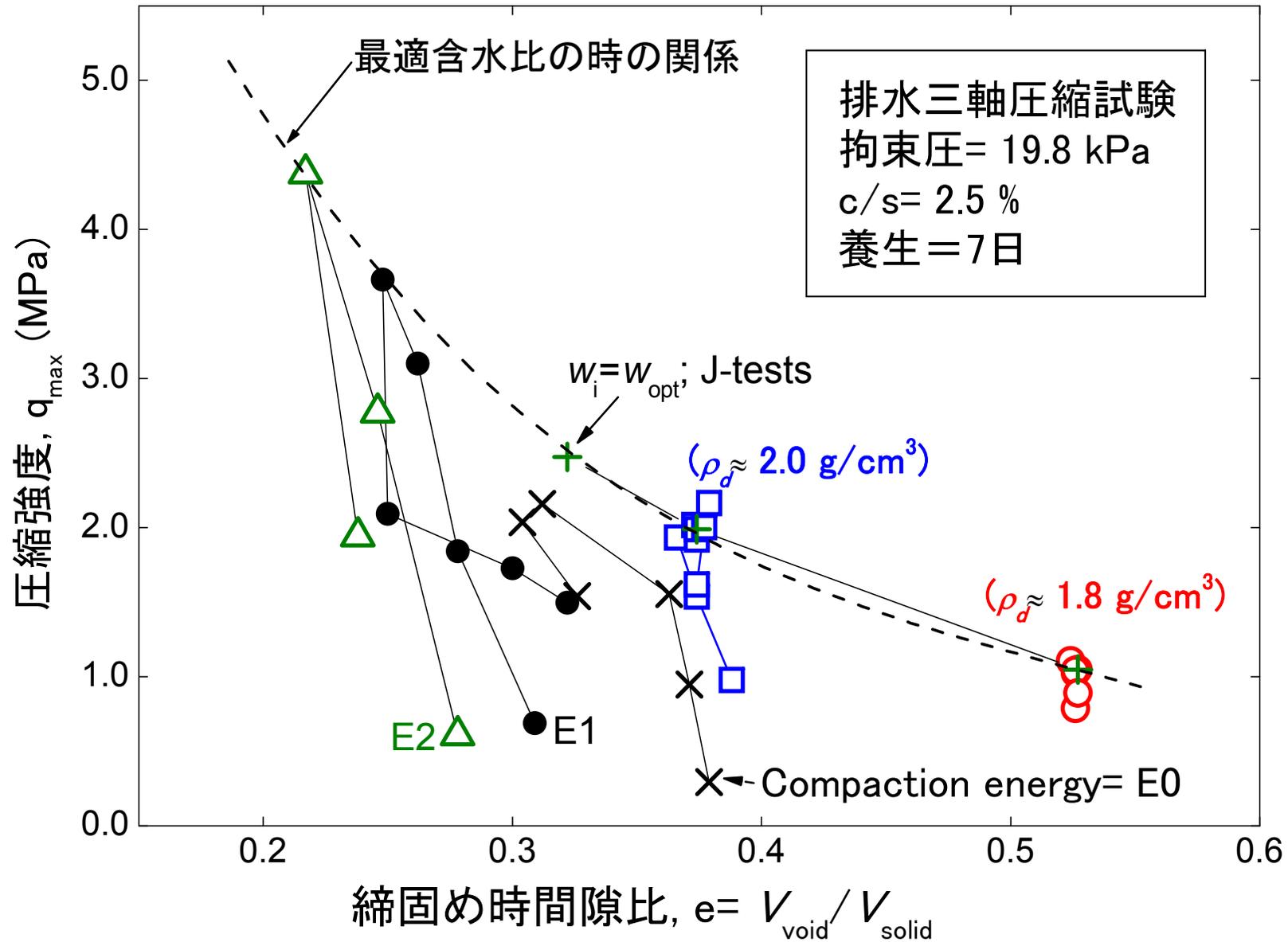
$w \sim w_{opt}$  での  $q_{max}$  の極大値  
は更に明確に!

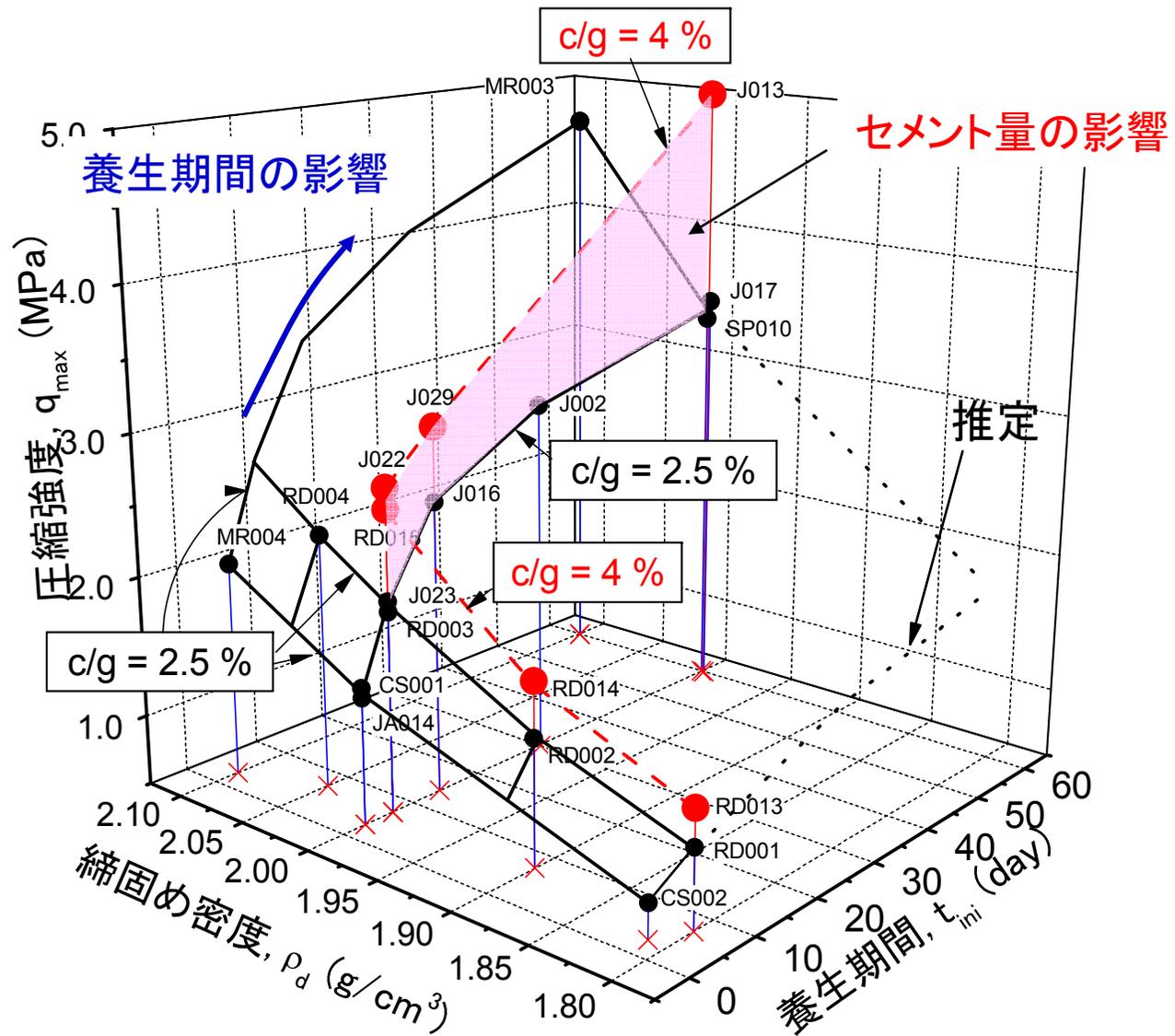
何故?

- 1) 最適なセメントペースト  
状態の達成
- 2) 高い締固め乾燥密度の  
達成



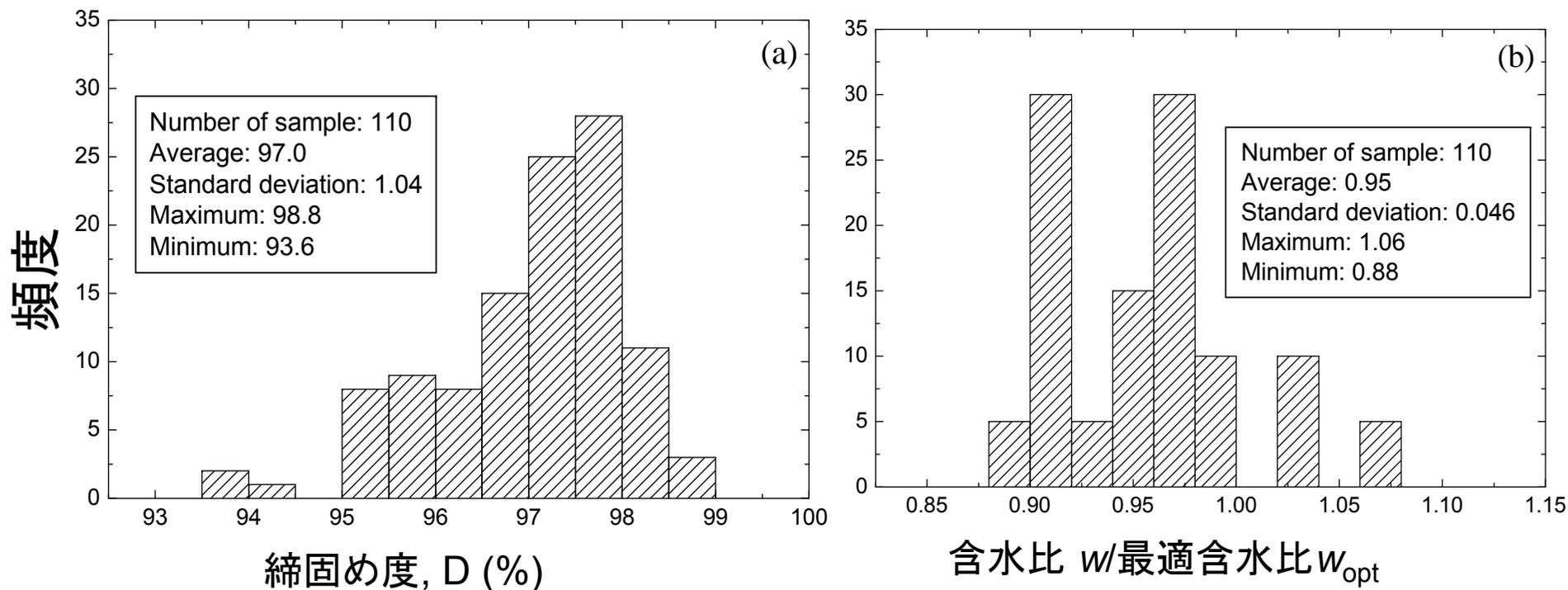
圧縮強度  $q_{\max}$  は、間隙比  $e$  (即ち  $\rho_d$ ) の一義的な関数ではない。





$w \sim w_{opt}$  で締固めた場合、乾燥密度が高いほど、セメント量と養生期間の増加による強度増加が著しい

現場では、出来るだけ最適含水比に近い含水比で、出来るだけ良く締固めることが重要(九州新幹線高田のデータ)



$$(\rho_d)_{\max} = 2.60 \text{ g/cm}^3; w_{\text{opt}} = 4.9 \%. \text{ (E-b法:E1} \sim \text{4E0)}$$

# 結論

## 締固めたセメント混合礫:

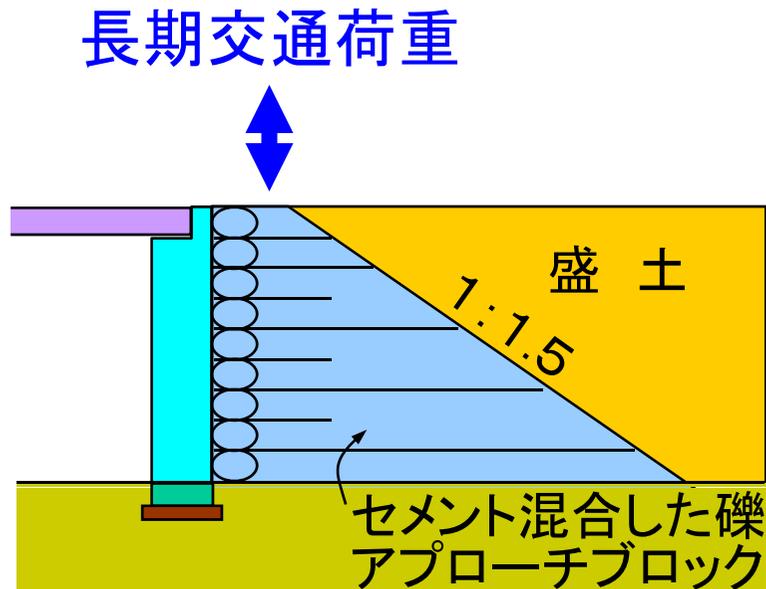
十分大きな強度と剛性を持つことができる  
仮設ではなく、重要な本設構造物に使用できる

## 締固め法:

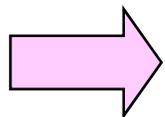
高い締固めエネルギー  
最適含水比

- 高い締固め乾燥密度を得るため
- 最適なセメントペースト状態を得るため

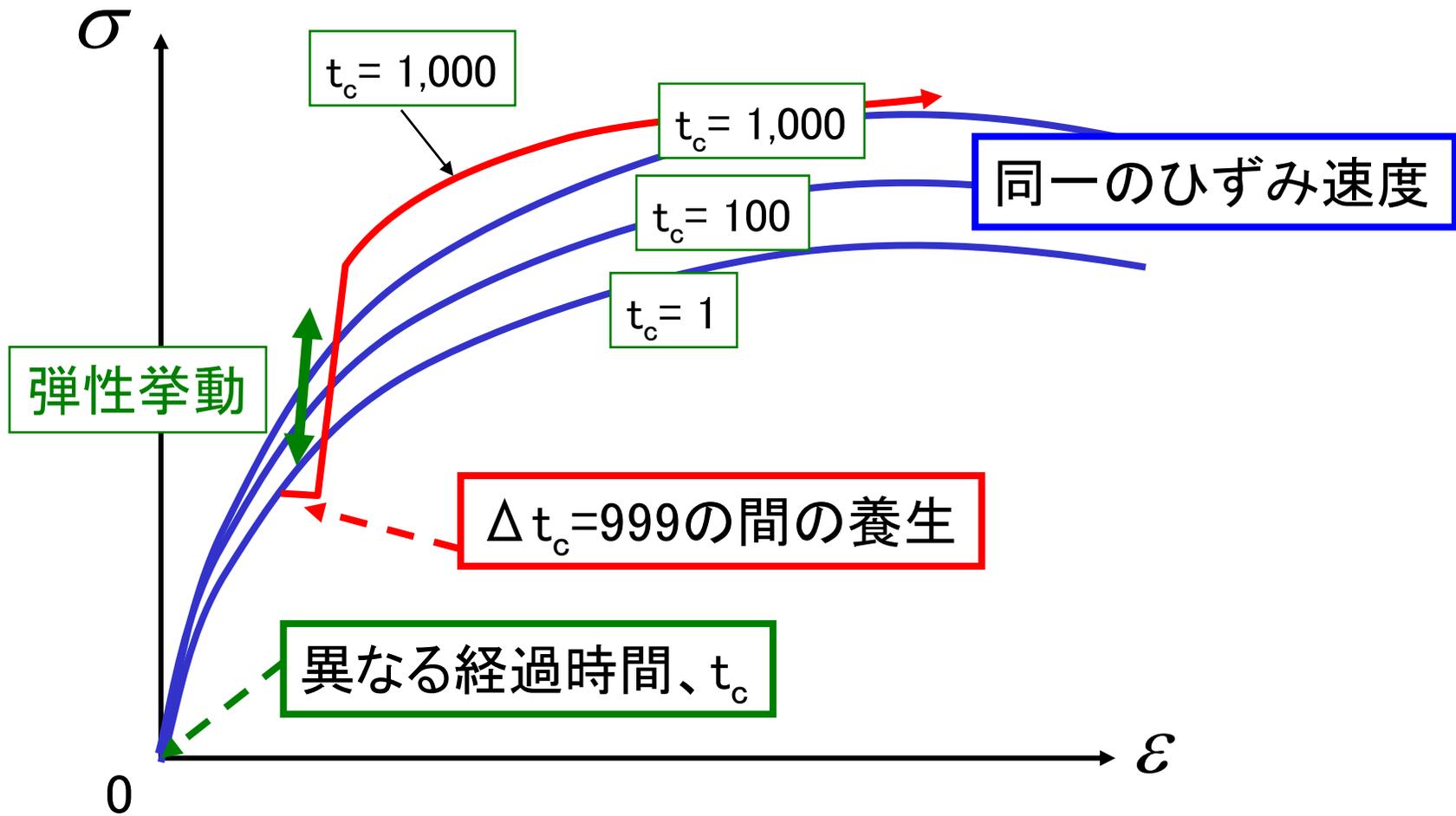
# セメント混合礫の盛土は長期交通荷重に対して、 大きな残留変形？ 弾性挙動？



九州新幹線高田、新しい形式の橋台

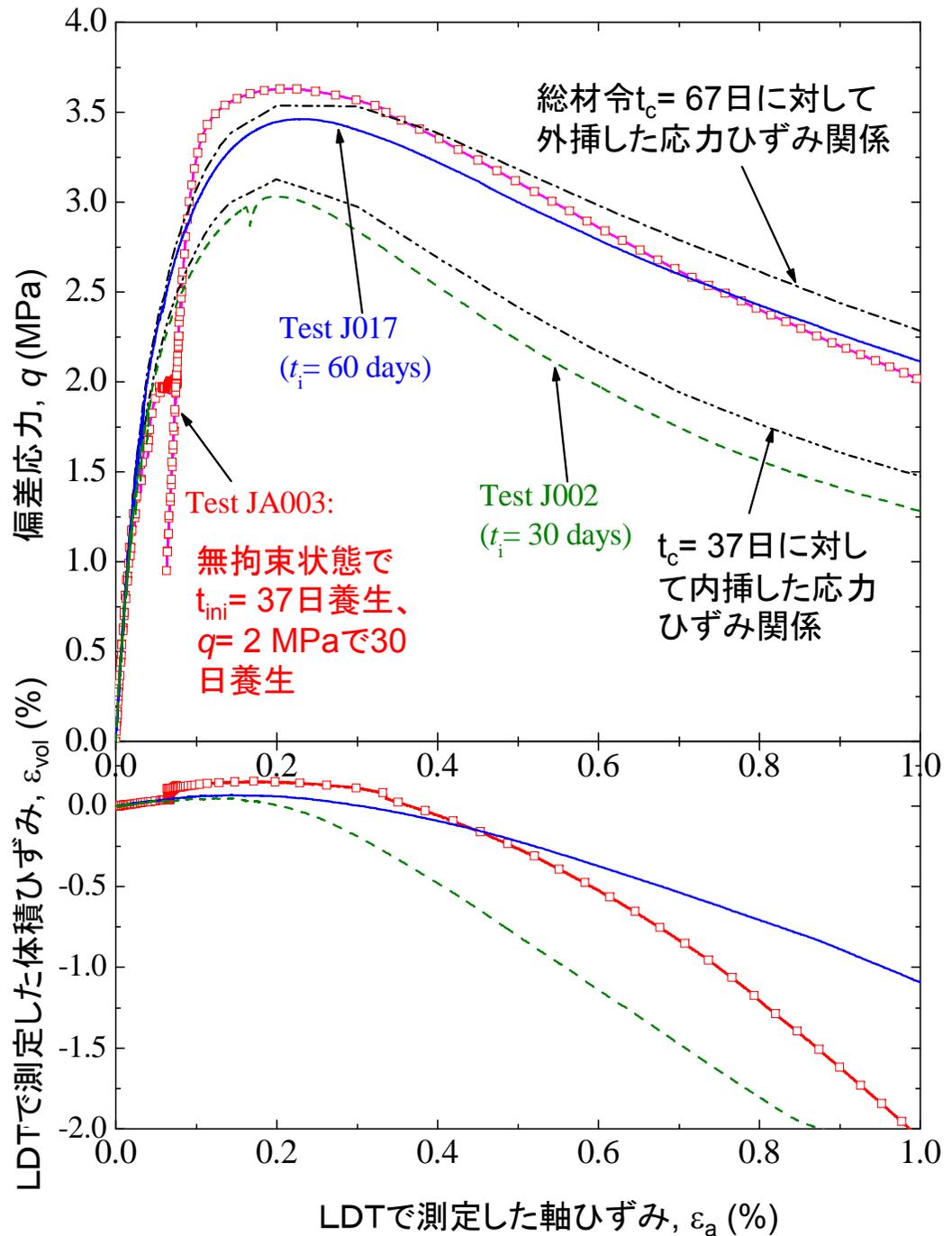


地盤材料の変形強度特性の基本問題に関連

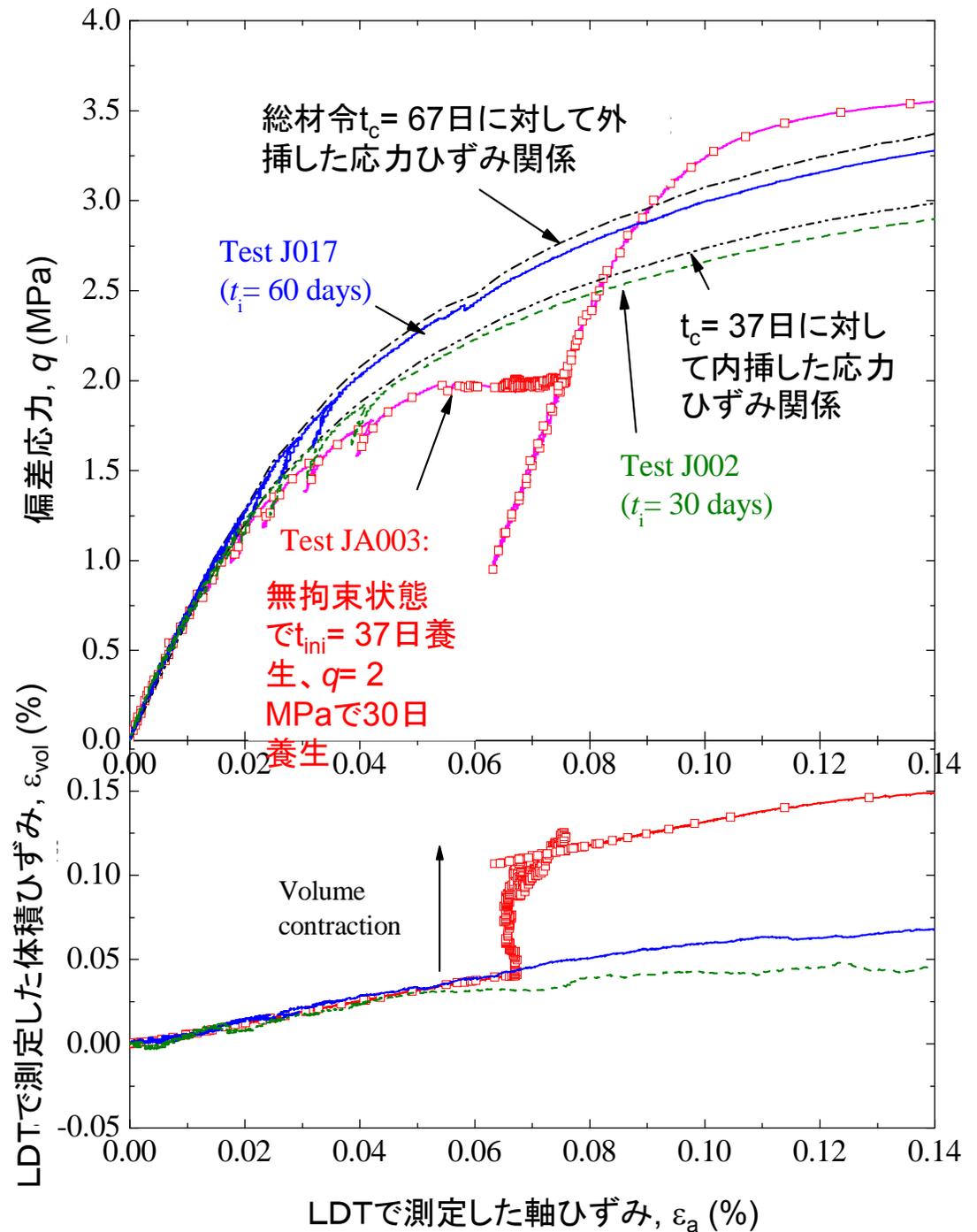


せん断応力がある状態で年代効果が発揮されると、  
大きな応力範囲で高い剛性が発揮される

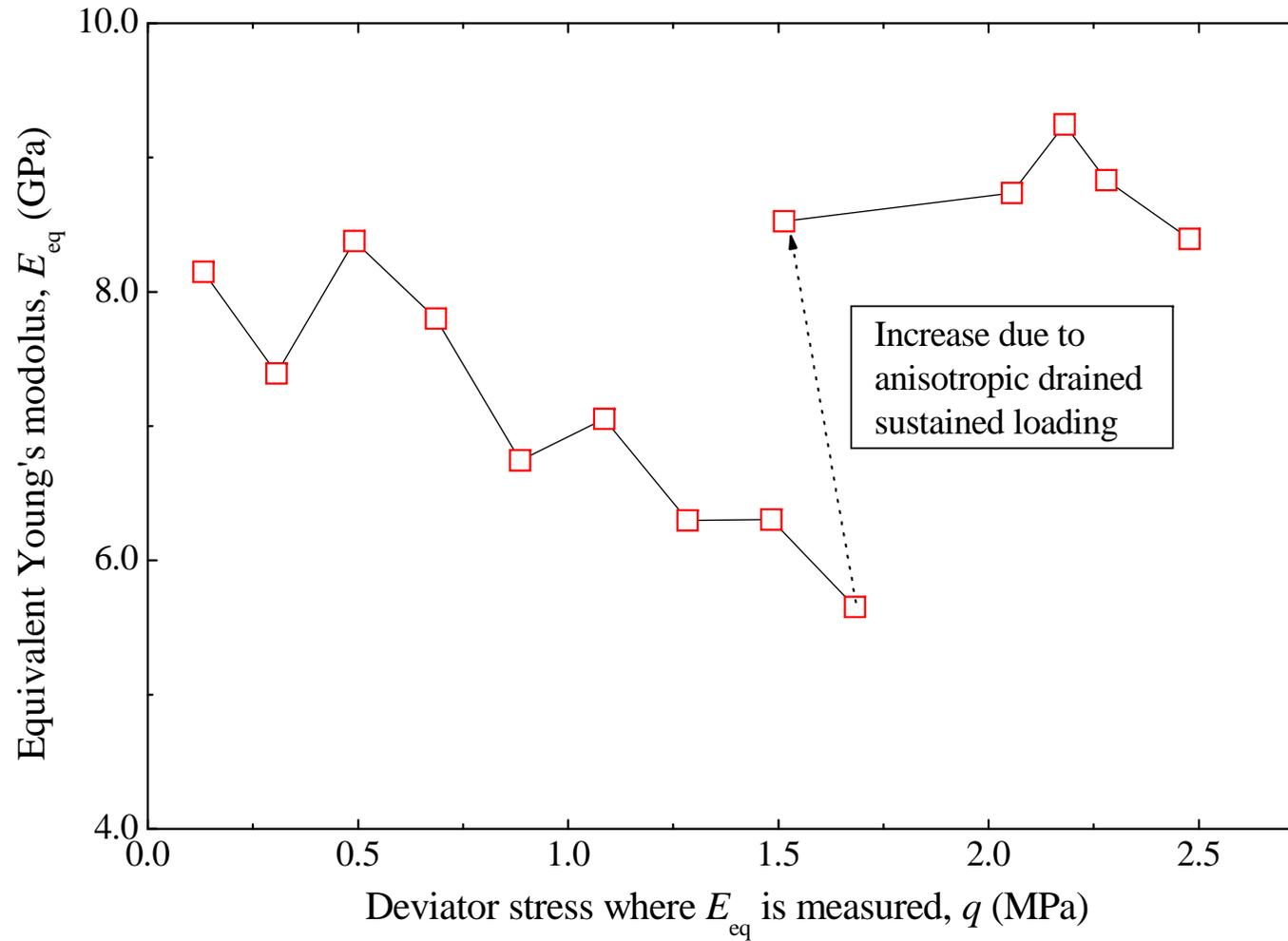
拘束圧  $\sigma'_c = 19.8$  kPaの排水三軸圧縮試験における偏差応力を受けた養生による応力～ひずみ関係の変化



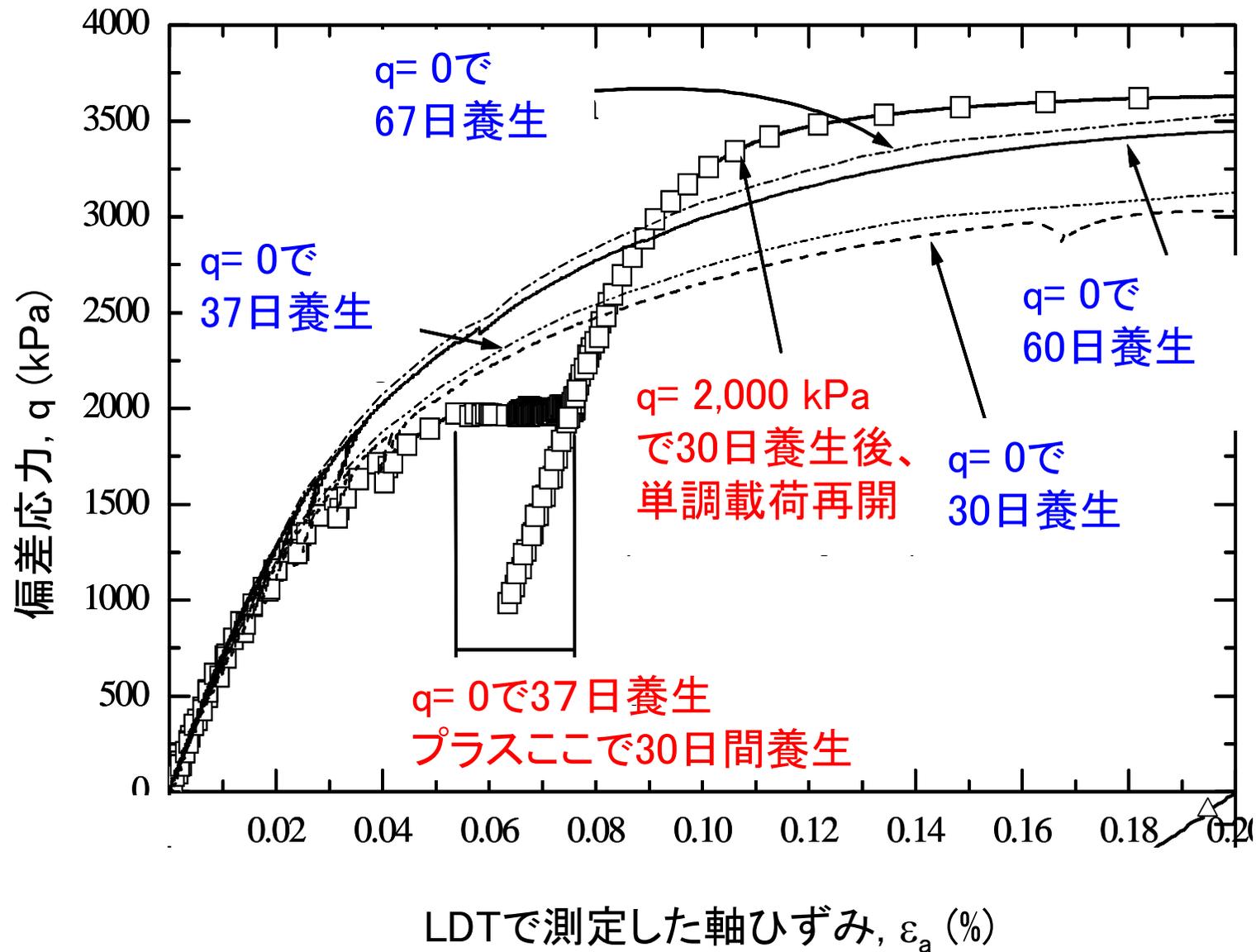
拘束圧  $\sigma'_c = 19.8$  kPaの排水  
三軸圧縮試験における偏差  
応力を受けた養生による応  
力～ひずみ関係の変化



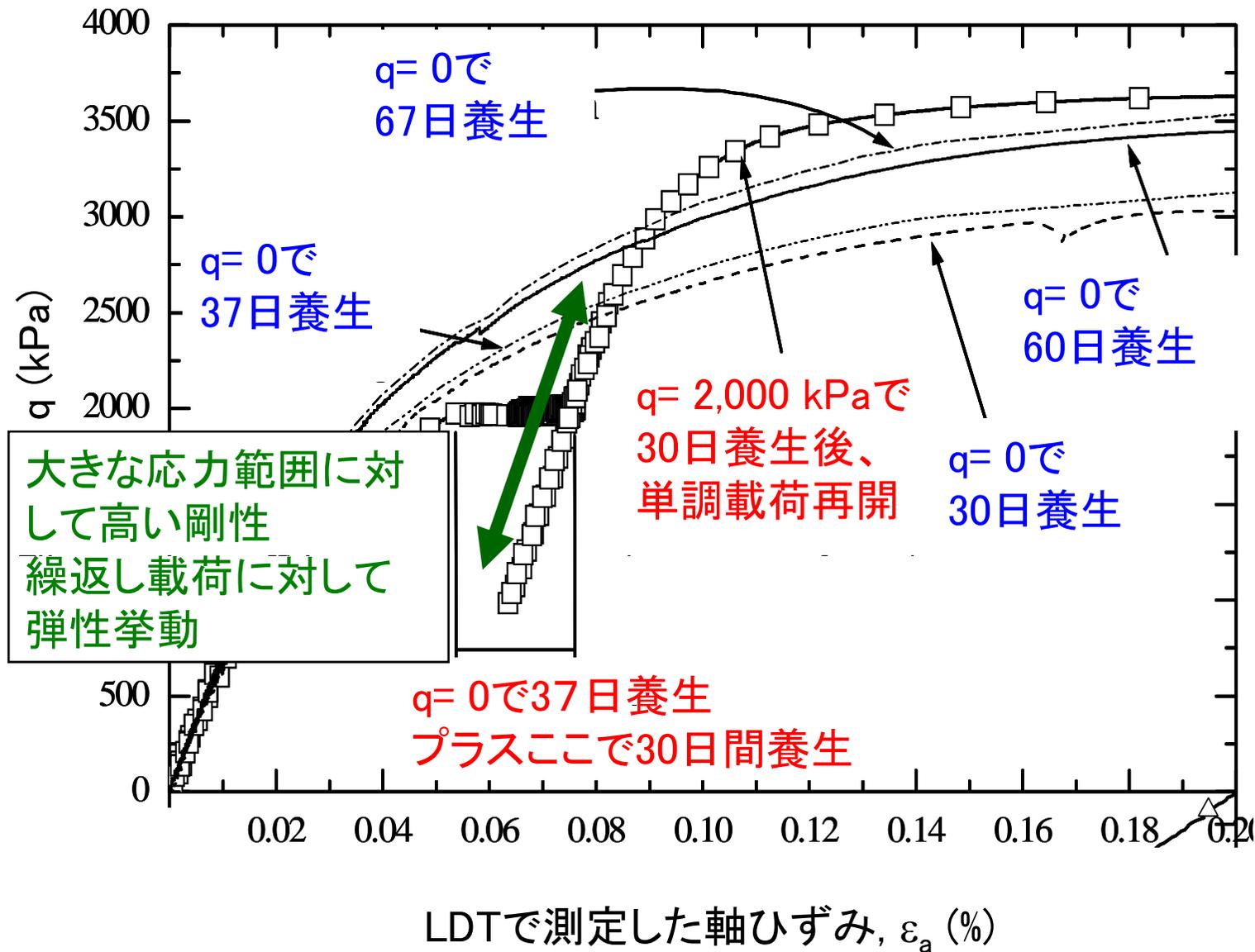
拘束圧  $\sigma_c' = 19.8$  kPaの排水三軸圧縮試験における偏差応力を受けた養生による: 微小ひずみヤング率の変化



# セメントを混合して締固めた礫の排水三軸圧縮試験 ( $\sigma_c' = 19.8 \text{ kPa}$ )



# セメントを混合して締固めた礫の排水三軸圧縮試験 ( $\sigma_c' = 19.8 \text{ kPa}$ )



# 多様なセメント混合土

超軟弱粘性土

軟弱粘土

締固めない砂

締固める貧配合砂

締固める良配合の礫

Roller compacted damコンクリート

従来型コンクリート

下方ほど、より硬く強くなる！  
しかし、全て同じ地盤材料（土粒子、セメント、  
水、空気）から出来ている！  
コンクリート工学と地盤工学の境界領域！  
両者を無理やり区別する必要はない！

締固めにより、強度が増加する！  
良い締固めは、施工でも重要！

## 3.セメント混合による改良の原理と実際

### 3.1 概論

- ・多様なセメント混合土(地盤材料からコンクリートへ)
- ・多様な施工法

### 3.2 東京湾横断道路でのセメント改良

a)原位置軟弱粘土のセメント改良

b)セメント混合した締固めない砂の水中盛土

- ・スラリー式とドライ式
- ・セメント改良土と堆積軟岩の比較

### 3.3 セメント混合した締固めた砂礫

- ・良配合の礫:  
橋台の建設

### 3.4 超軟弱粘性土のセメント改良

# 多様なセメント混合土

超軟弱粘性土

軟弱粘土

締固めない砂

- 下方ほど、より硬く強くなる！
- しかし、全て同じ地盤材料(土粒子、セメント、水、空気)から出来ている！フランス語では、Geomaterialsは土、岩、コンクリートを意味する。
- コンクリート工学と地盤工学の境界は曖昧！両者を無理やり区別する必要はない！

締固めた貧配合砂\*

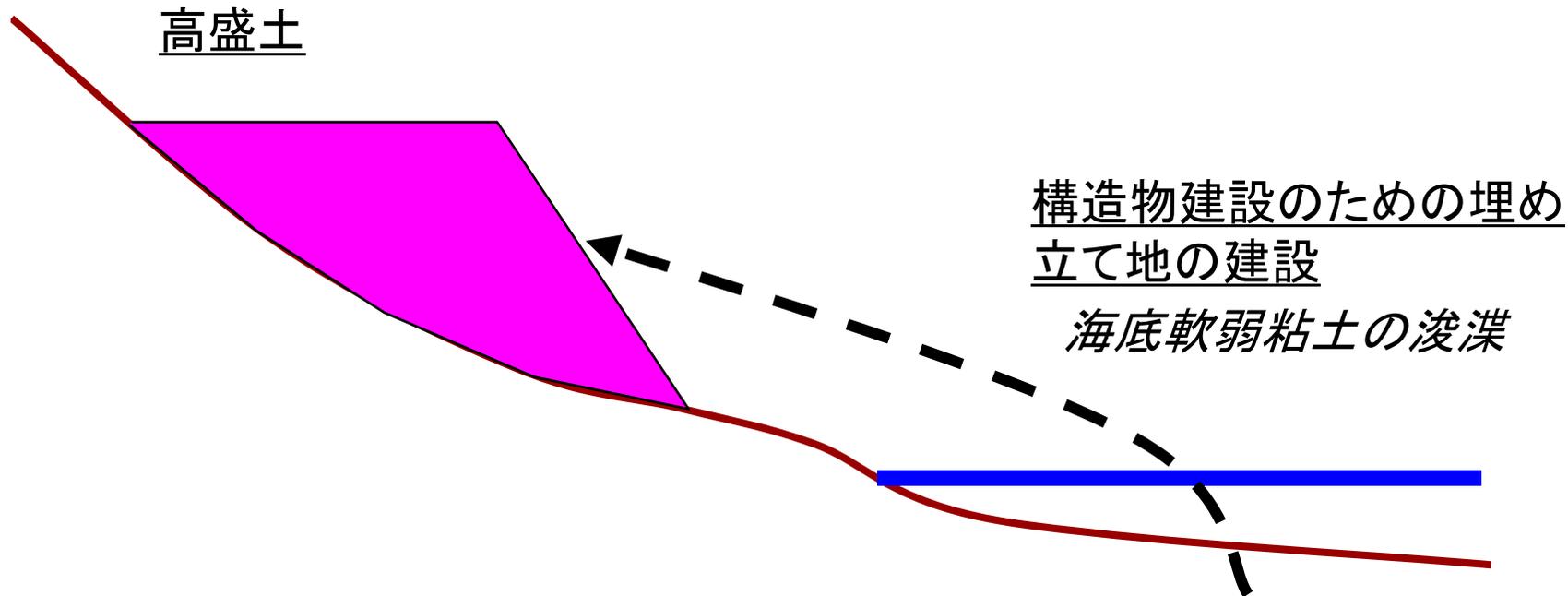
締固めた良配合の礫\*

Roller compacted damコンクリート\*

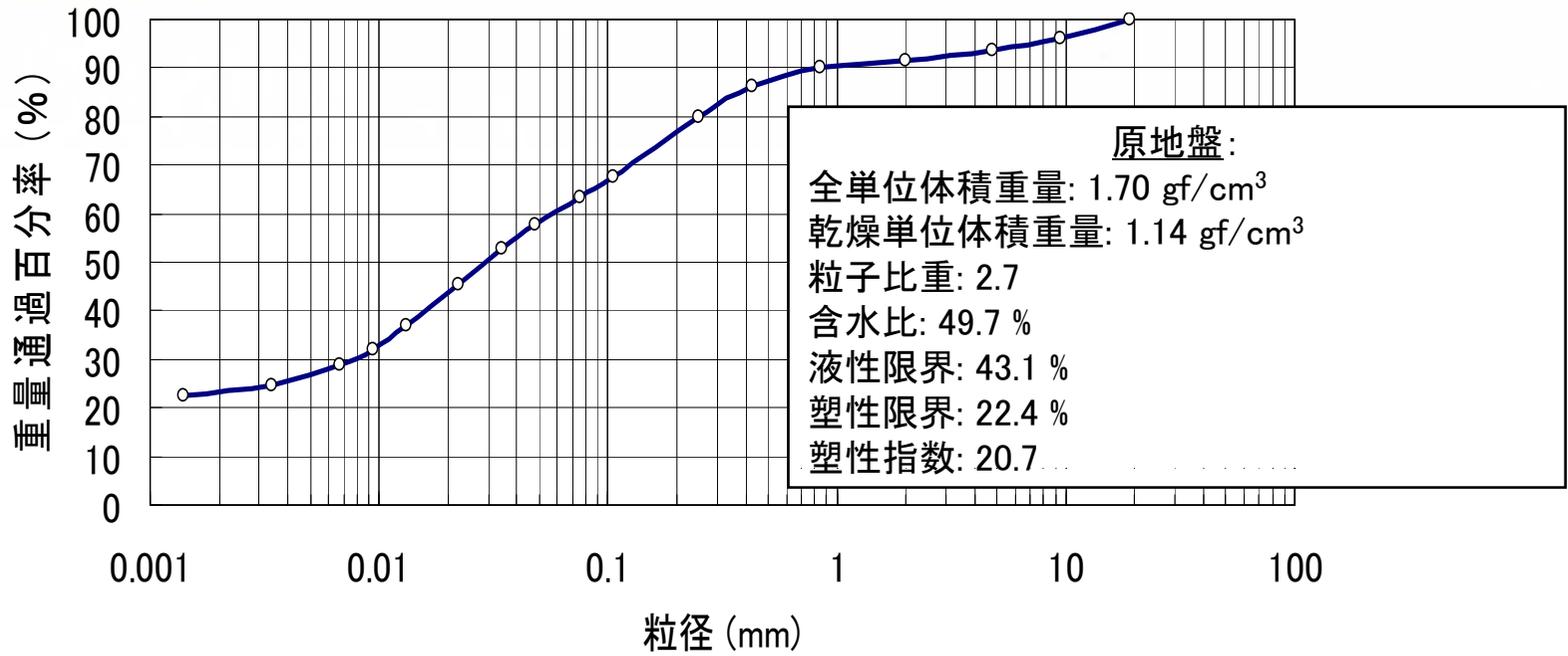
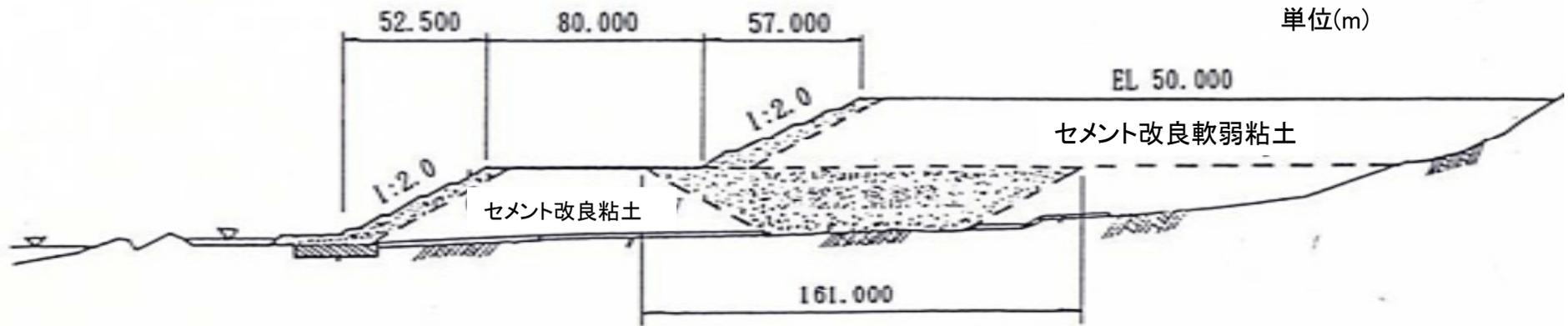
従来型コンクリート

\*締固めにより、強度が増加する！  
良い締固めは、施工でも重要！

- セメント混合土がせん断応力を受けている状態で養生されると、大きな弾性応力域\*が発達する(\*その内部で応力が変化しても、弾性的な変形しか生じないような応力の領域)。
- 軟弱粘土でも、セメント改良すると、変形の少ない安定な高い盛土を建設できる。



セメント混合した浚渫軟弱海底粘土を用いた高盛土建設の模式図



徳島県橘湾におけるセメント混合した浚渫軟弱海底粘土を用いた高盛土の建設









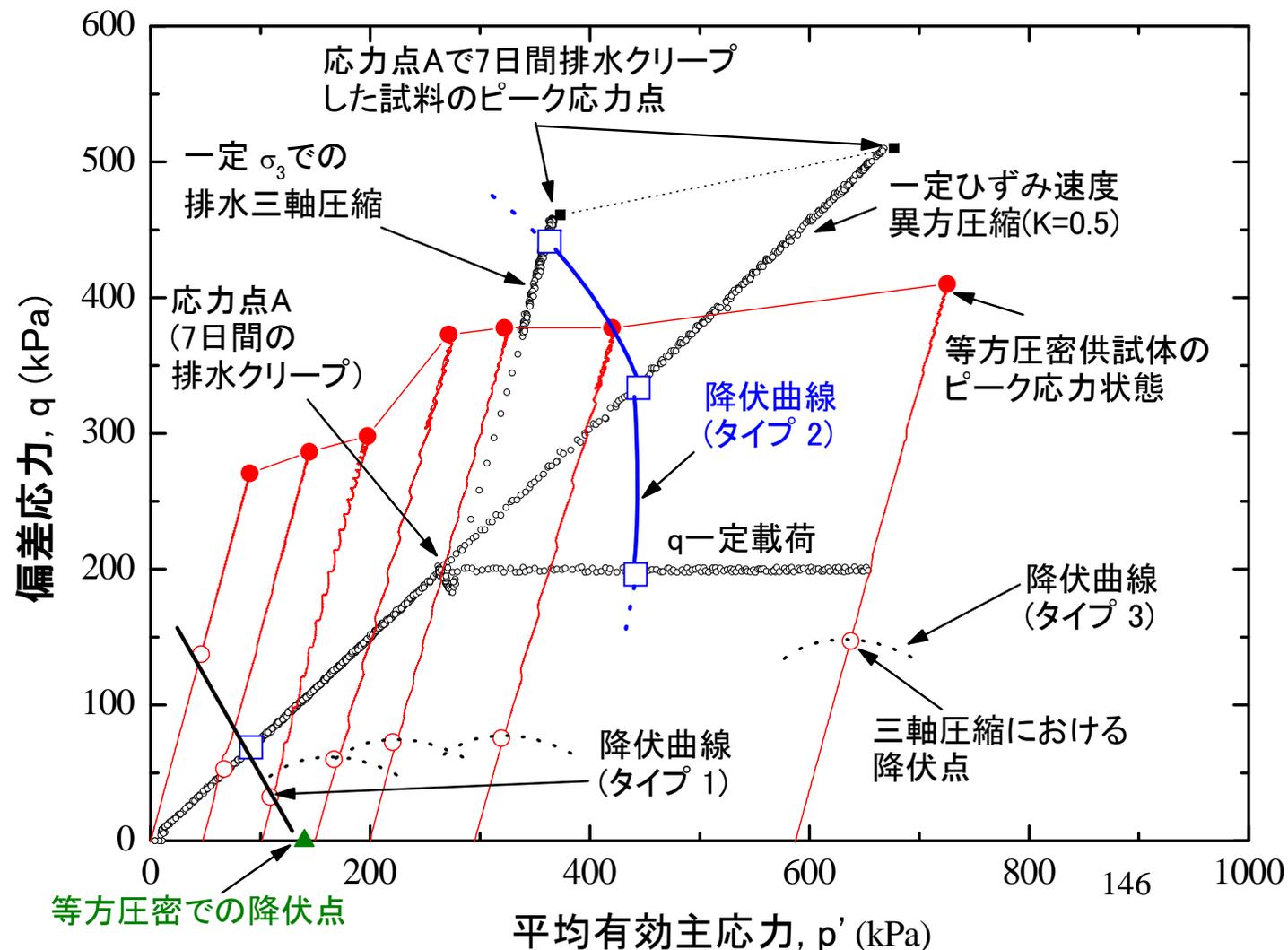


## セメント改良粘土の試験法(応力経路):

*Test a:* 等方圧密後、一定の拘束圧で排水三軸圧縮試験

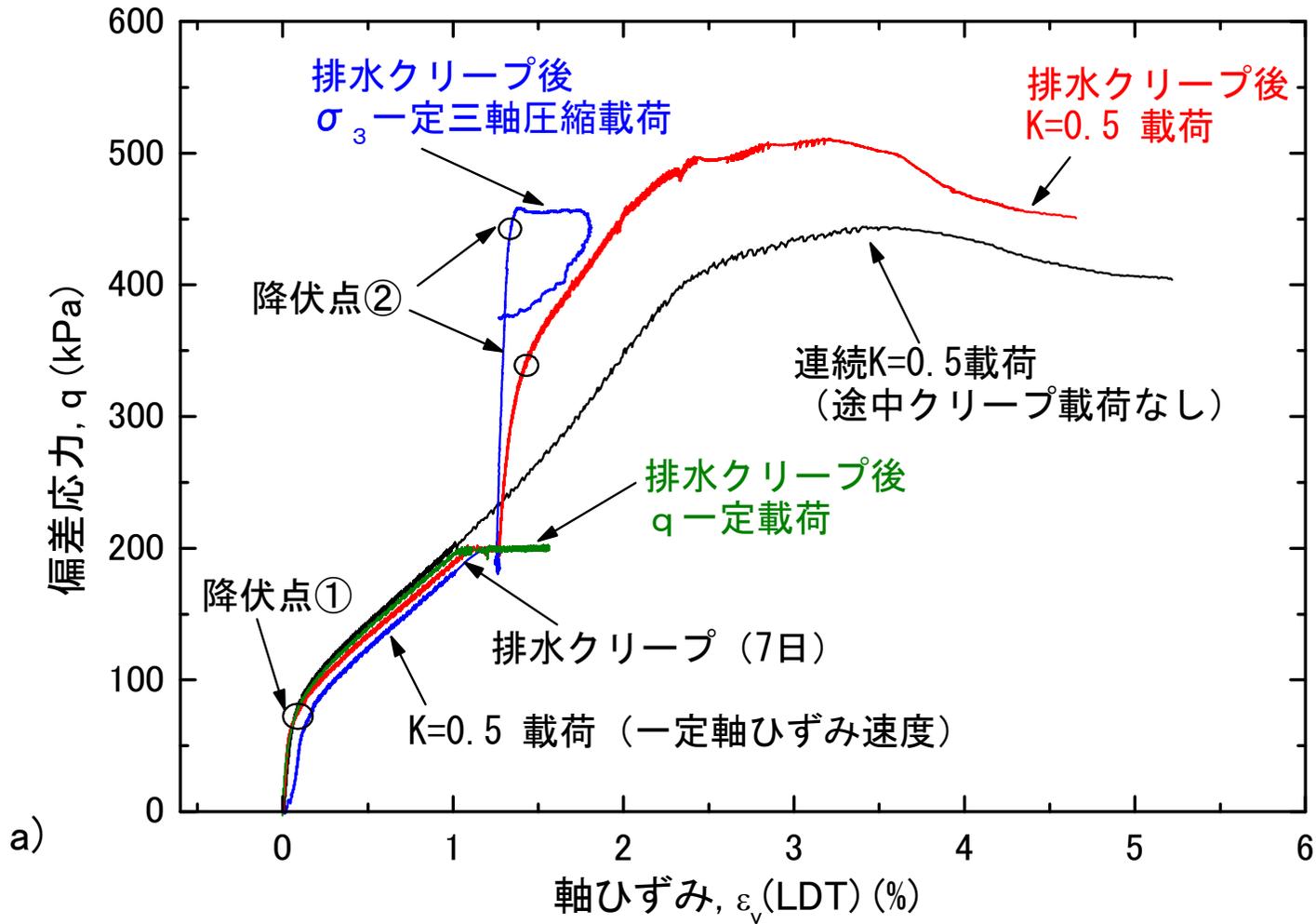
*Test b:* 1)異方圧密: 2)異方応力状態で7日間養生:

3) 載荷を再開(  $K = \sigma'_h / \sigma'_v = 0.5$  で異方圧密、一定の拘束圧で排水三軸圧縮試験、一定の偏差応力で圧縮)、いずれも軸ひずみ速度は一定。

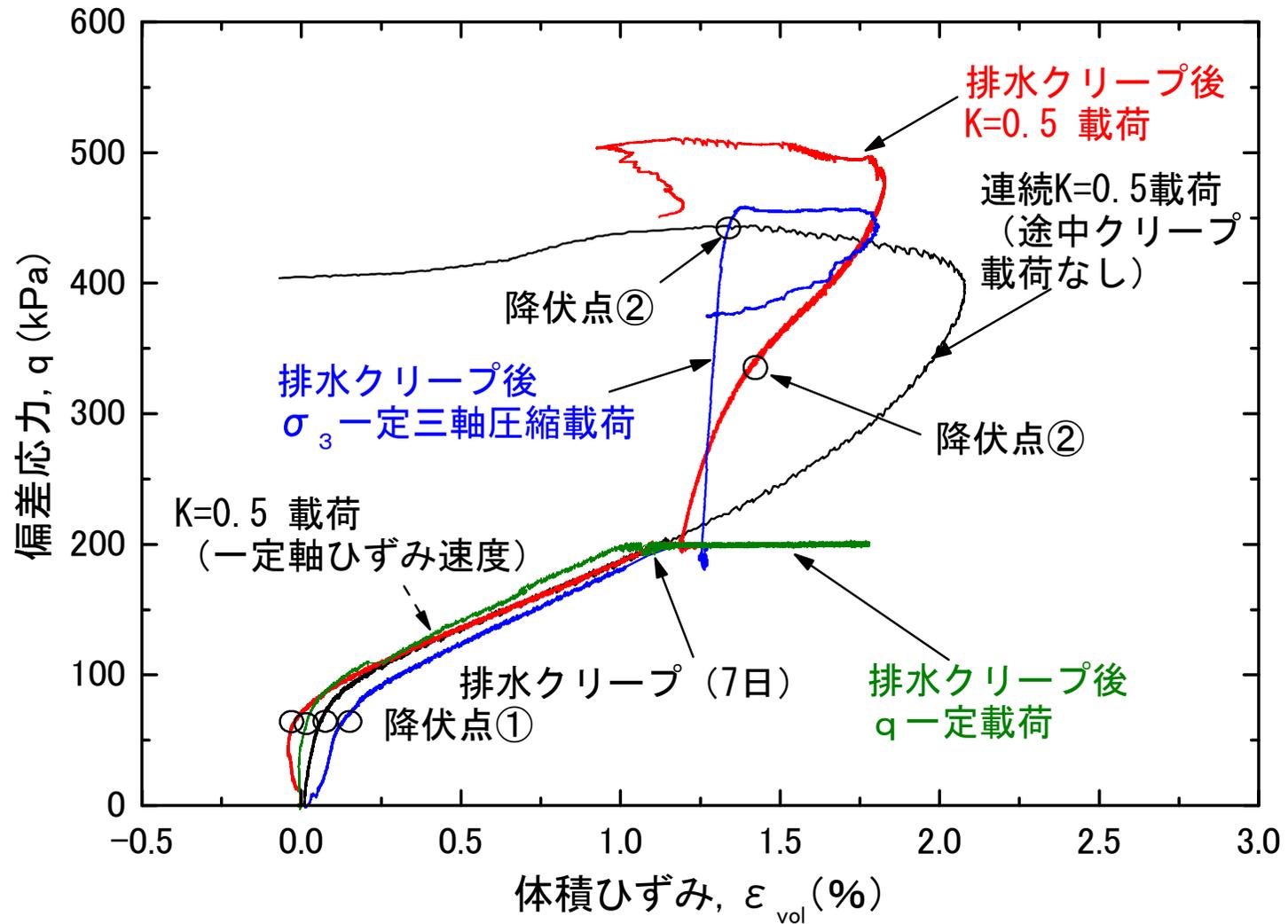


セメント改良粘性土の低圧での降伏特性

# 高剛性応力域の発達



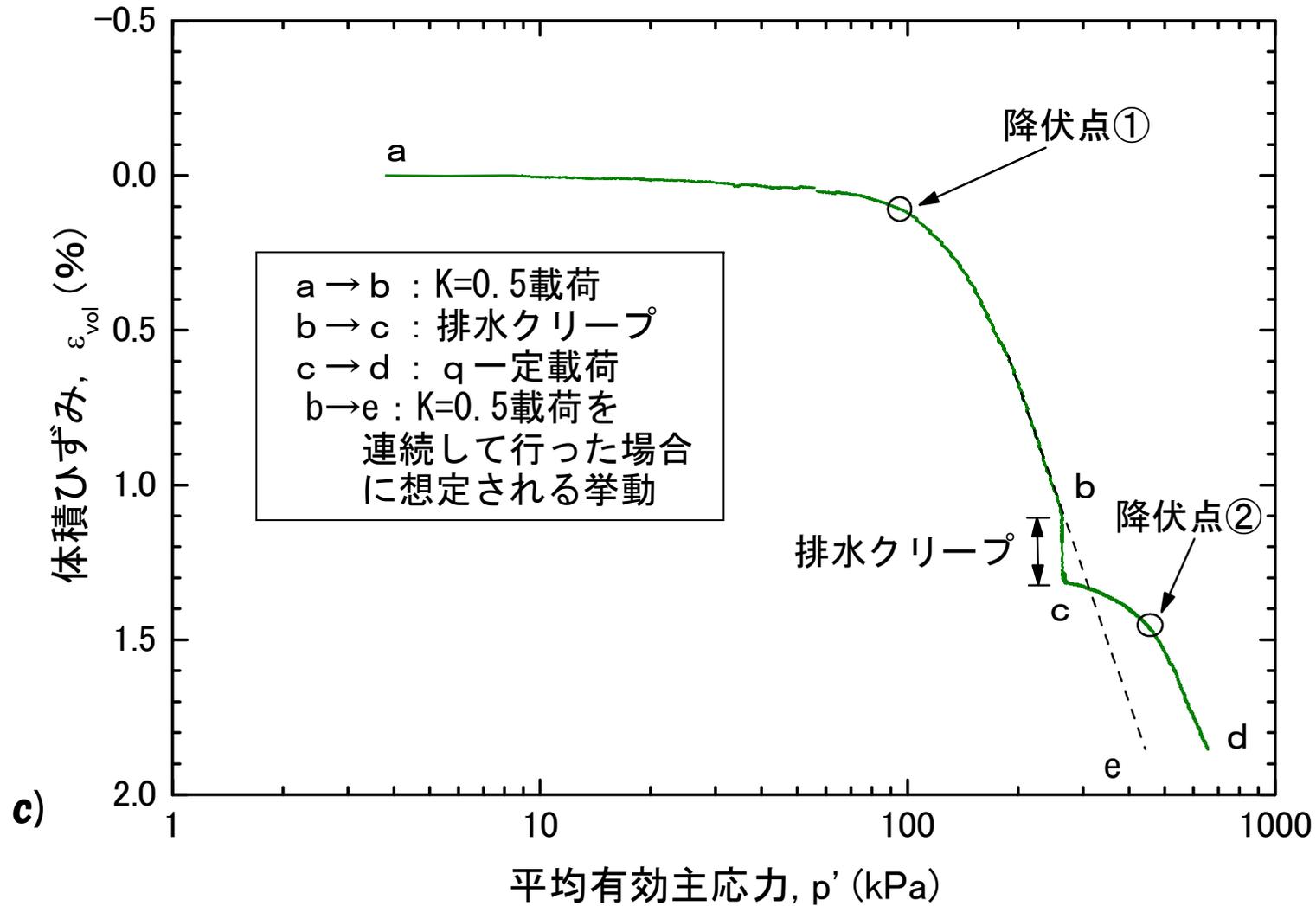
セメント改良粘性土の異方応力状態で7日間養生した場合の降伏特性:



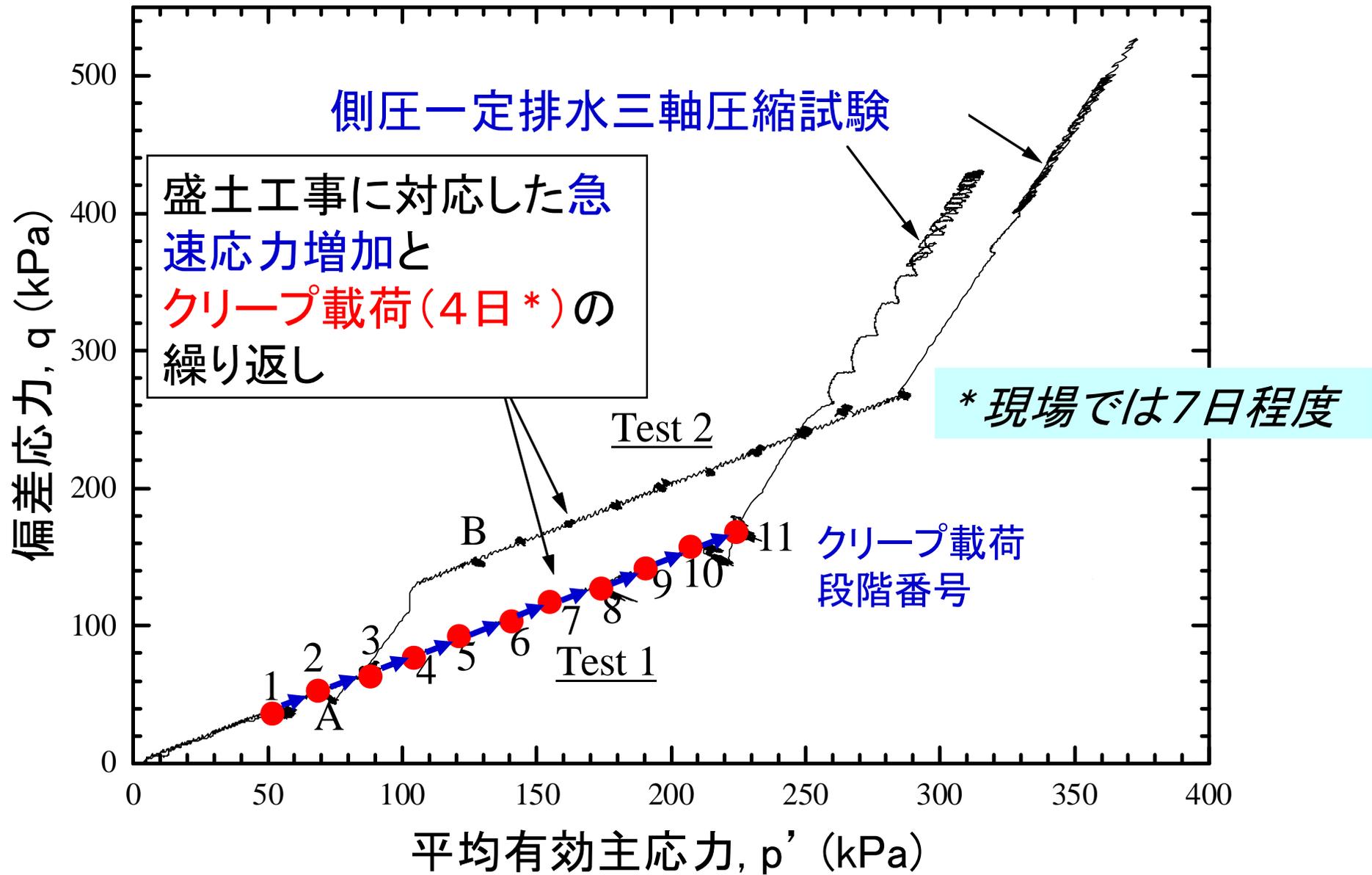
b)

セメント改良粘性土の異方応力状態で7日間養生した場合の降伏特性:

## 高剛性応力域の発達

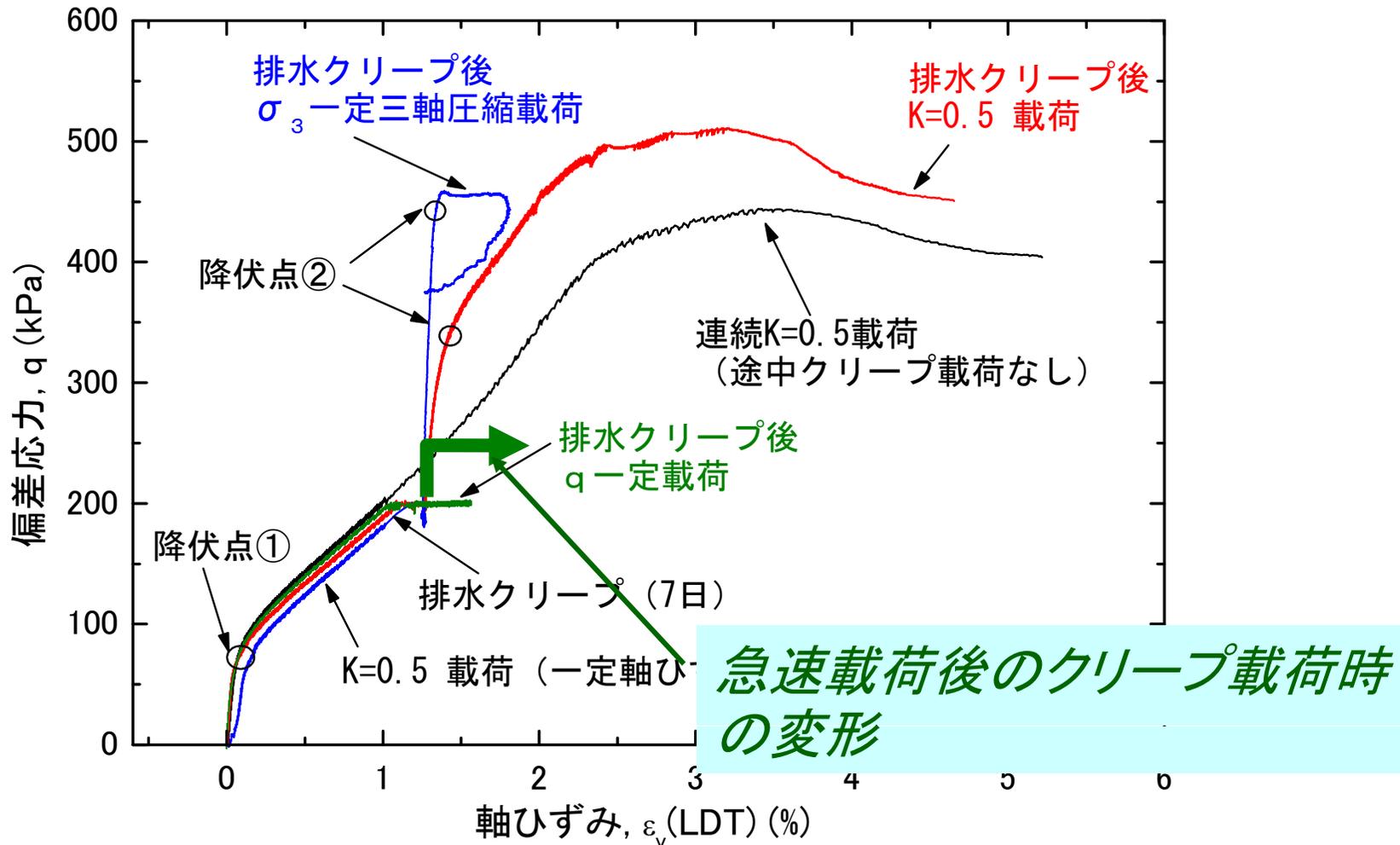


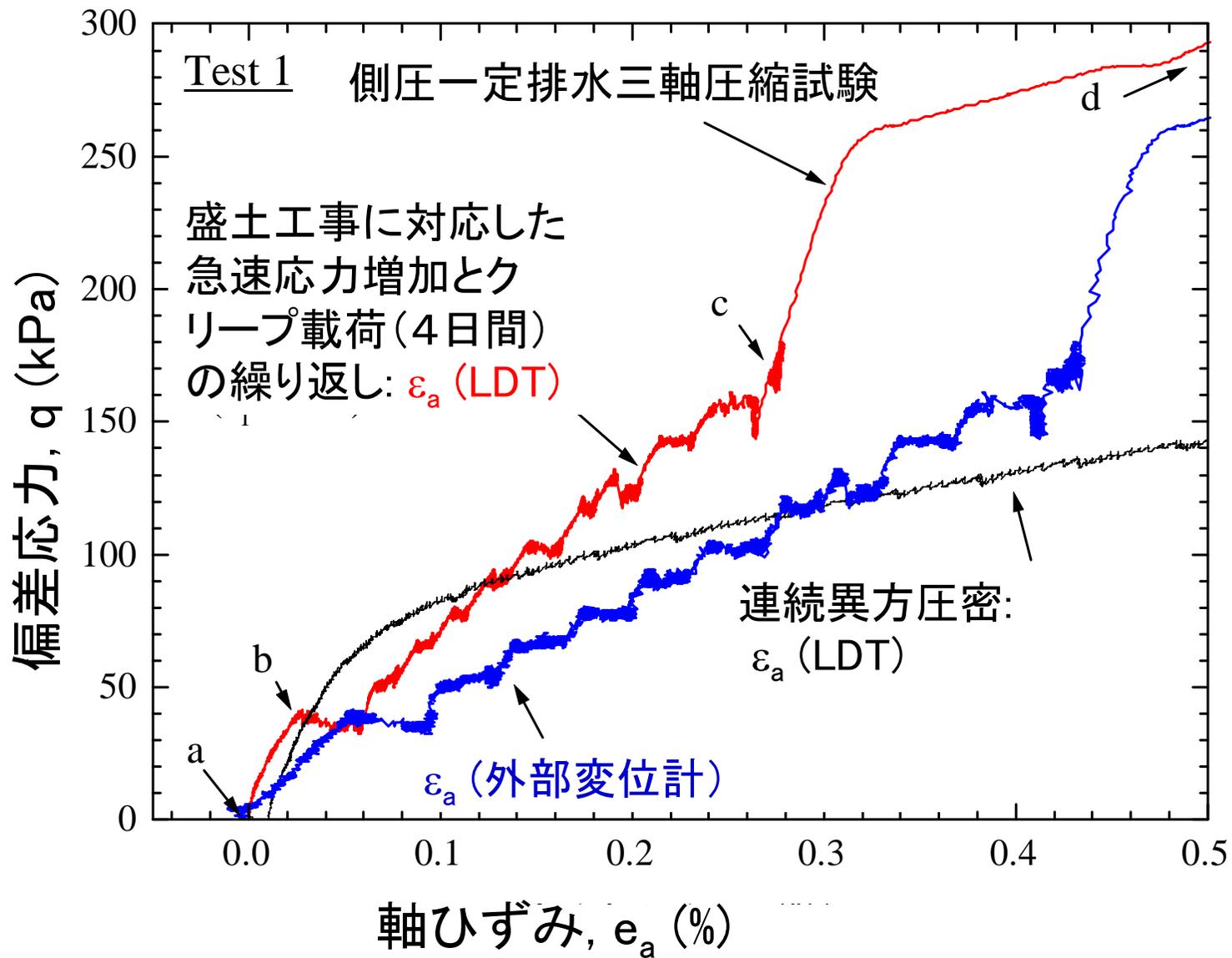
セメント改良粘性土の異方応力状態で7日間養生した場合の降伏特性:



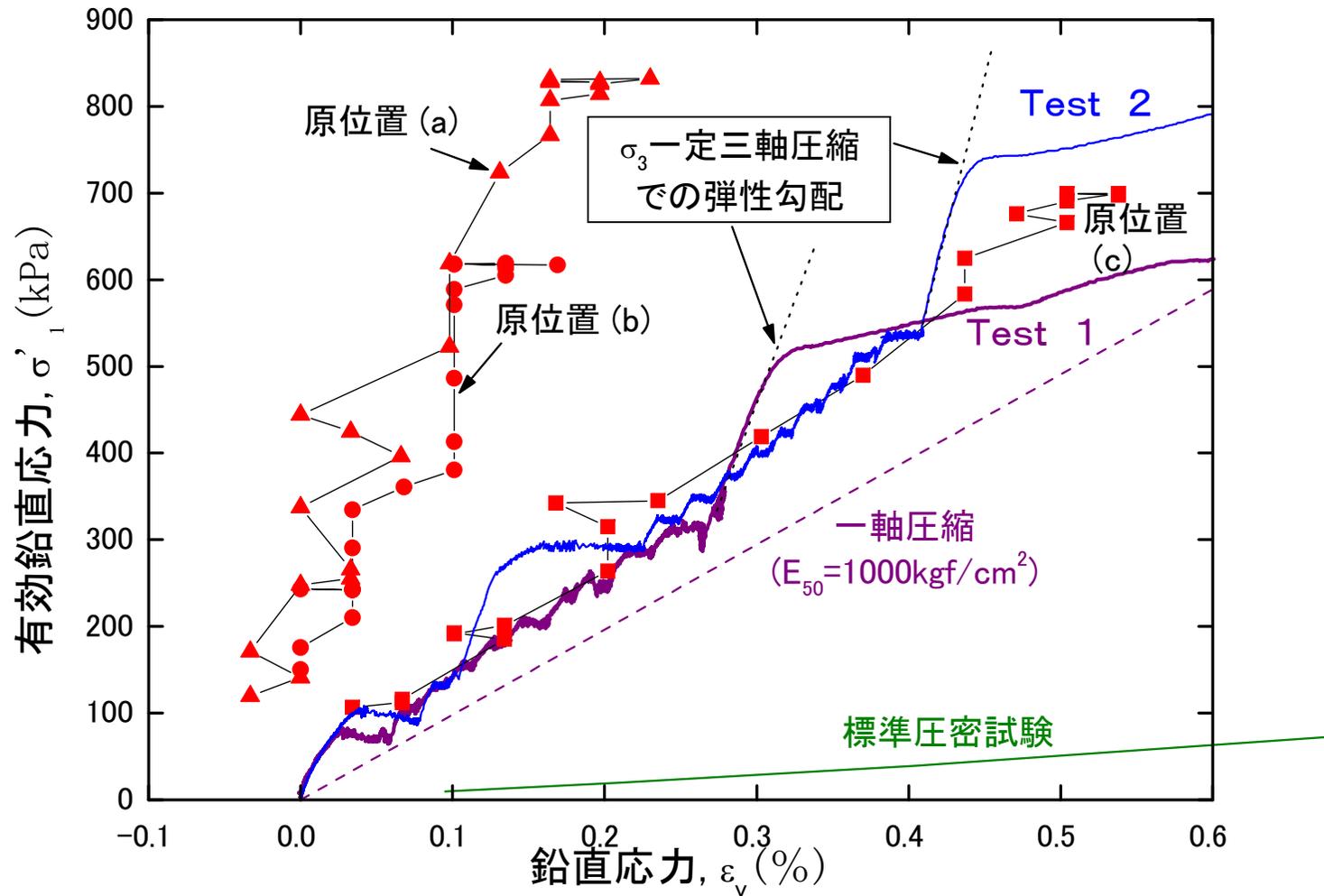
盛土工事を再現しようとした三軸圧縮試験

一定のひずみ速度では高い剛性を示す応力範囲でも、荷重保持をするとクリープ変形が生じる。



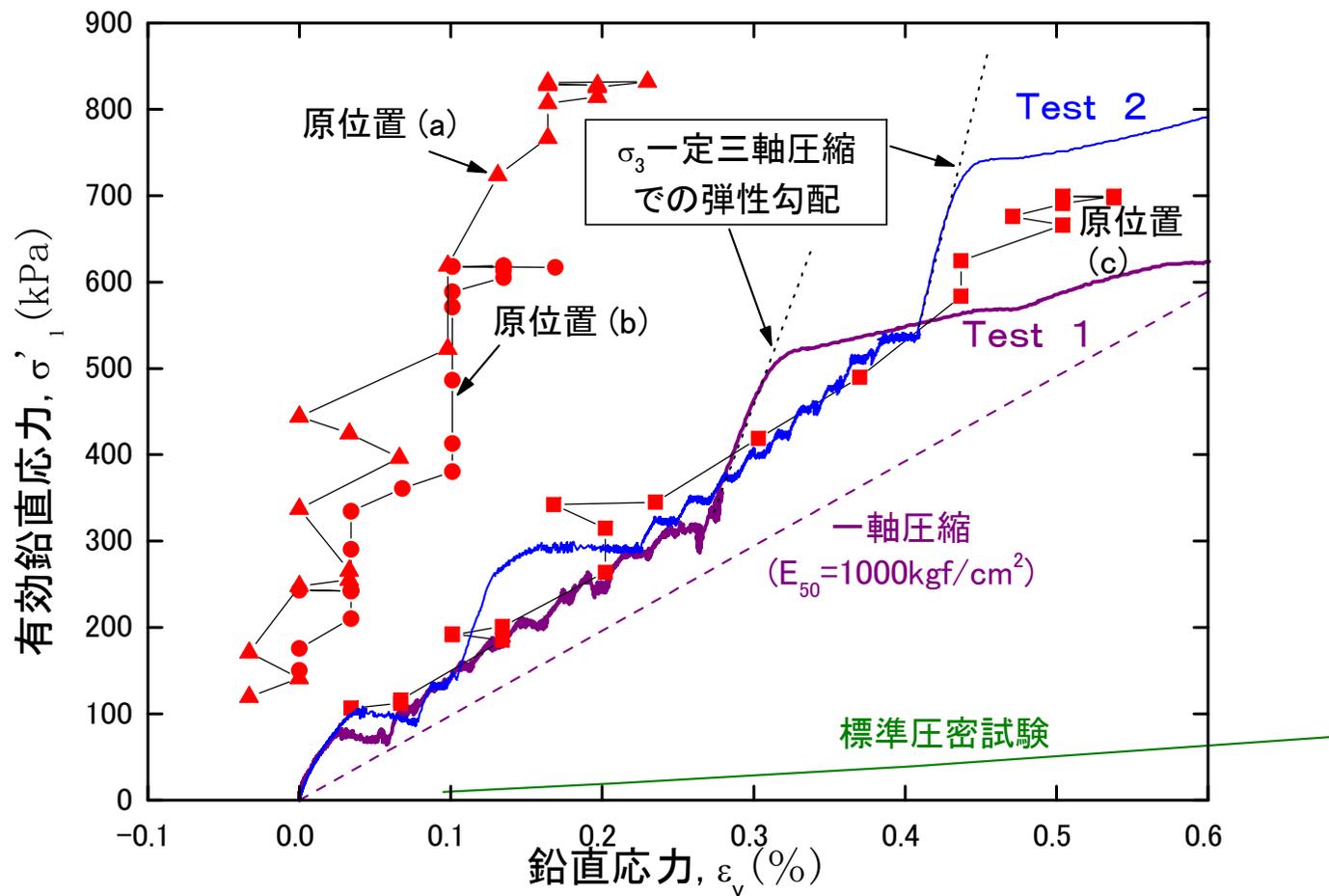


1. 外部変位計はひずみ過大評価
2. 連続载荷では、ひずみを過大評価
3. a→b→cでの変形は、原位置での盛土変形と良く対応

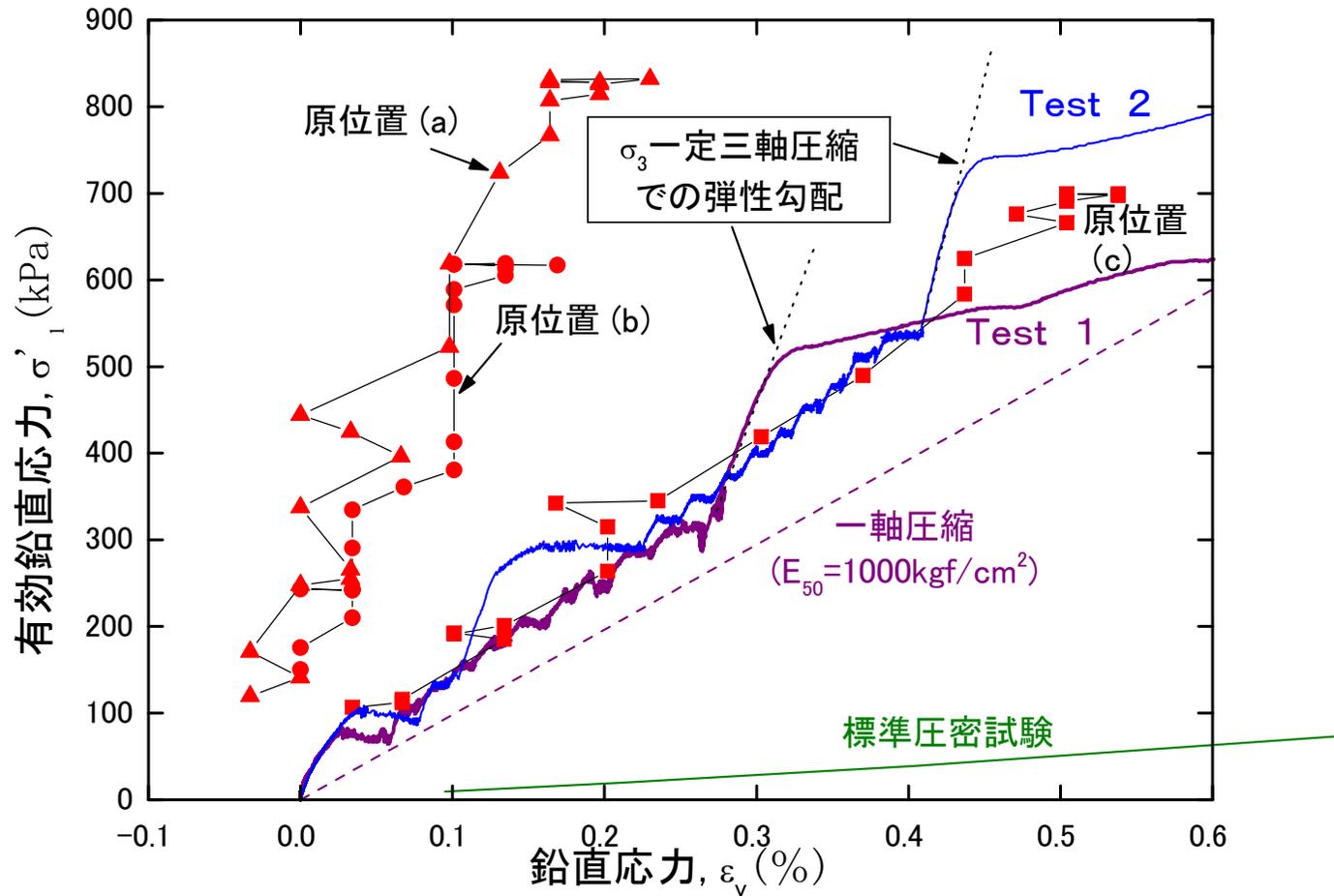


室内実験と原位置測定結果の比較:

**標準圧密試験:** 供試体の厚さが2cmであるためBedding errorの影響が非常に大きく、現場のひずみを著しく過大評価



**一軸圧縮試験:** Bedding errorのためのひずみの過大評価と急速载荷によるひずみ過小評価が打ち消しあっている。現場のひずみをやや過大評価。



**三軸圧縮試験:** Bedding errorはなく、クリープ<sup>o</sup>载荷も行っている。現場測定と対応が最も良い。

しかし、クリープ<sup>o</sup>载荷がやや短すぎて、現場のひずみをやや過大評価している傾向