



# 沖縄特有の地盤における基礎鋼管杭の 防食設計の高度化に関する検討

港湾空港技術研究所

山路 徹



# 本検討を行うことになった経緯



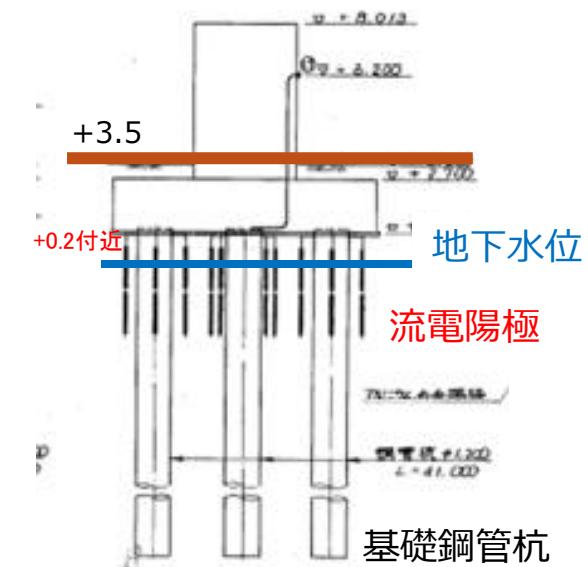
石垣港サザンゲートブリッジ・橋脚基礎鋼管杭に  
電気防食（**流電陽極**方式）が適用（1990～1991に  
施工）※「防食が適用された経緯」は後述



↓  
流電陽極の「設計耐用年数（**30年**）」に至り、  
防食の更新を検討

## 特徴

- ・大規模な掘削が必要となるため、既存の「流電陽極方式」での実施（更新）は困難。→「**外部電源方式**」に変更
- ・橋脚の位置（土中環境の違い）によって、電気防食特性が異なる可能性がある



↓  
特殊な環境（琉球石灰岩、海岸近傍の埋立地盤等）での電気防食設計の高度化等を目的として、本検討を開始



## ●電気防食について

- ・方式 (流電陽極方式/外部電源方式)
- ・特性と設計概要

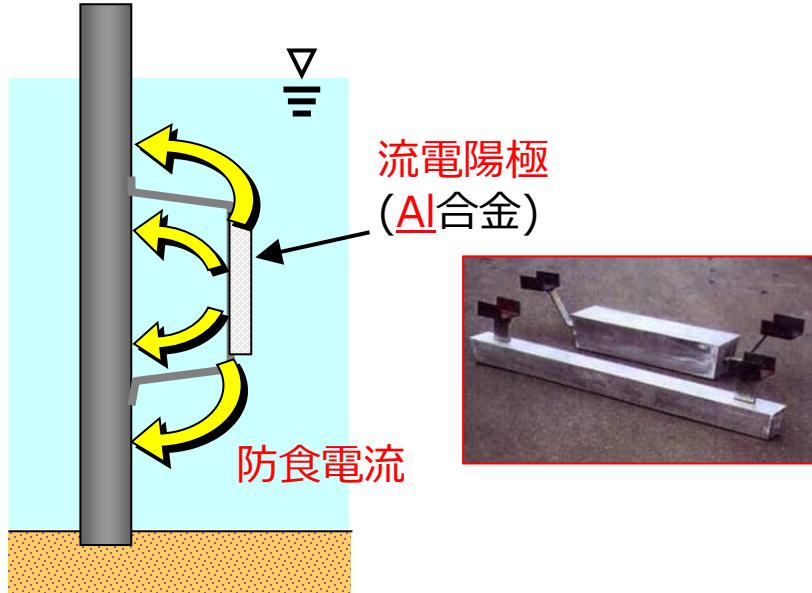
## ●橋脚の基礎鋼管杭に電気防食が適用された経緯

## ●本研究での検討内容

# 電気防食について：流電陽極方式と外部電源方式の比較

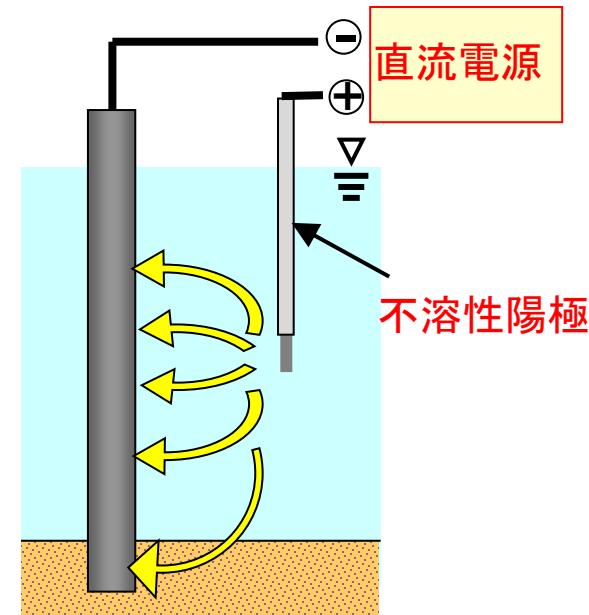


## 流電陽極方式



- ✓ 維持管理が容易。
- ✓ 設置個数が比較的多い。
- ✓ Al陽極の性能は塩分濃度依存性がある（塩分濃度：低→電流：小）。そのため、河川域だとMg陽極が使用

## 外部電源方式

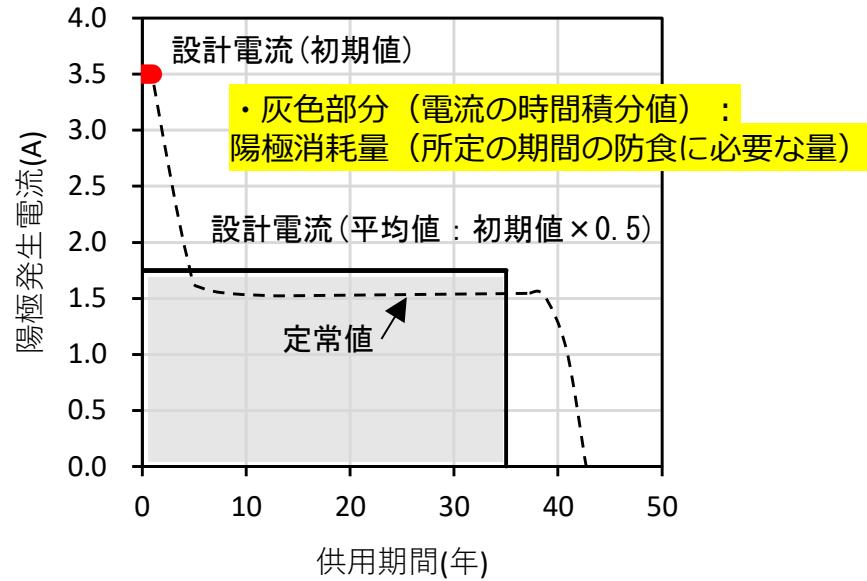
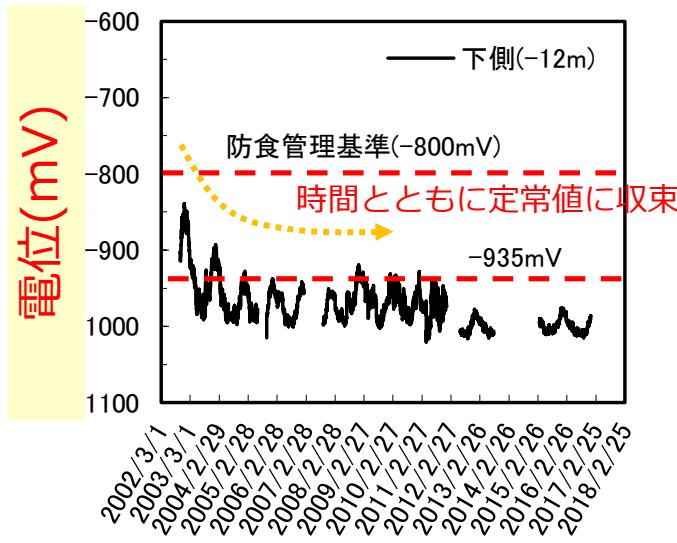
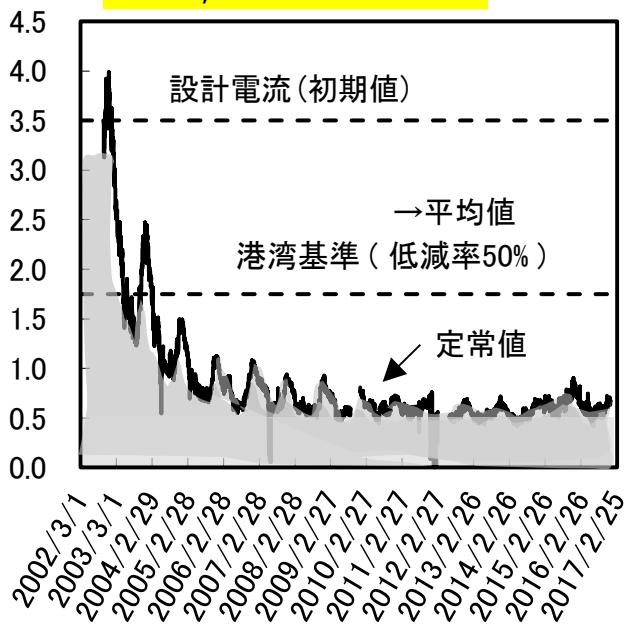


- ✓ 河川域や、環境が一様でない場合  
\*モノパイルの場合も
- ✓ 既設の土中構造物に適用する場合  
(大電流が流せるため、陽極が比較的少数で対応可能)

# 電気防食について：実際起こっていること、設計の考え方

- ・陽極からの発生電流（電位も）は、時間変化し、次第に定常値に収束
- ・一般的な流電陽極方式の設計では、まず防食に必要な総電流を求め、必要な陽極個数を算定している。
- ・流電陽極の必要質量は、初期の0.5倍の電流が供用期間中に流れ続けると仮定して計算している。

陽極から発生する電流(A)



# 電気防食について：一般の場合の必要な電流の求め方



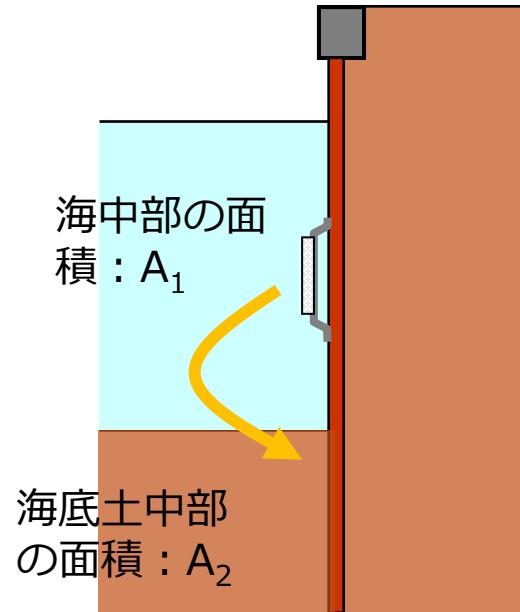
必要な陽極発生電流 (=陽極質量)  $A$   
= 防食電流密度:  $A/m^2 \times$  防食対象面積:  $m^2$

・ **海中**：初期値は  $100 \text{ mA/m}^2$  が標準で、定常時は半分の  $50 \text{ mA/m}^2$  が想定されている。

※ 実際は半分以下まで低減。

・ **海底土中**：初期値は  $20 \text{ mA/m}^2$ ， 定常時は半分の  $10 \text{ mA/m}^2$ 。

※ 石垣・土中の当初設計時も同様



防食電流密度の標準値  
(技術基準)

	清浄海域	汚染海域
海水中	100	130～150
石積中	50	65～75
海底土中	20	26～30
背面土中	10	10



## ●電気防食について

- ・方式
- ・特性と設計概要

## ●橋脚の基礎鋼管杭に電気防食が適用された経緯

※当初設計時

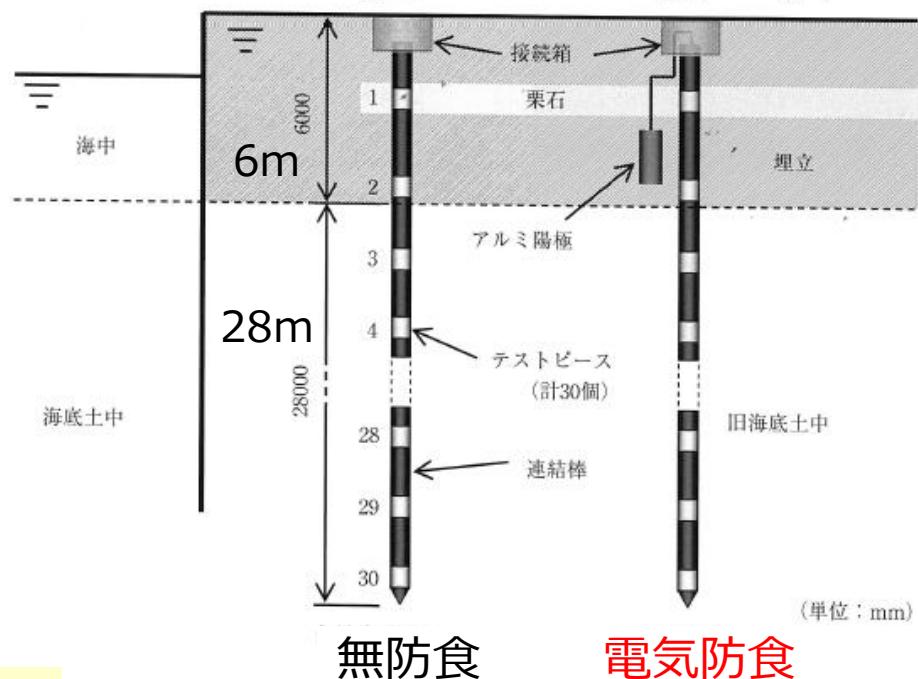
- ・那覇港・土中部での暴露試験

## ●本研究での検討内容

# 那覇港・土中部での暴露試験：概要



- ・深度34mまで計30個のテストピースを埋設
- ・2, 6, 16年後に回収して調査



**目的**：海岸付近の土中部の  
腐食・防食特性の把握

**場所**：波の上橋A2橋台 付近

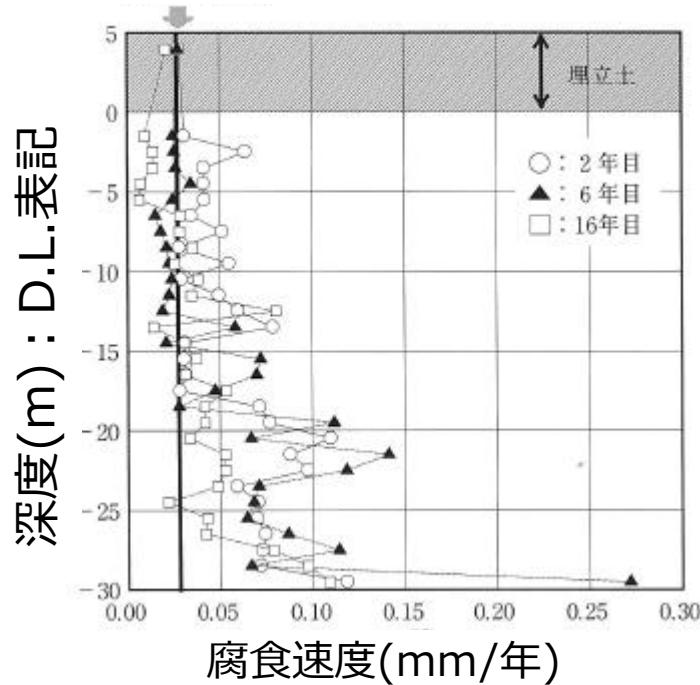
**実施時期**：1979.2～1994.12 (16年間)

# 那覇土中の暴露試験：結果の一例

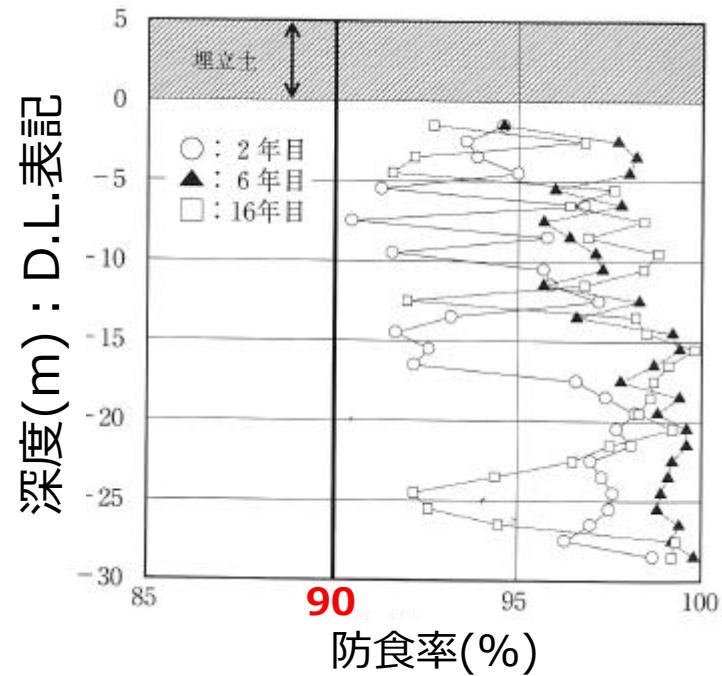


## 腐食速度（無防食時）

一般的な値(0.02~0.03)



## 防食率（電気防食時）



一般的な値よりやや大きい

90%以上を確保  
→防食出来ている

→本調査結果も踏まえ、まず泊大橋、その後、石垣港にも電気防食が適用



## ●電気防食について

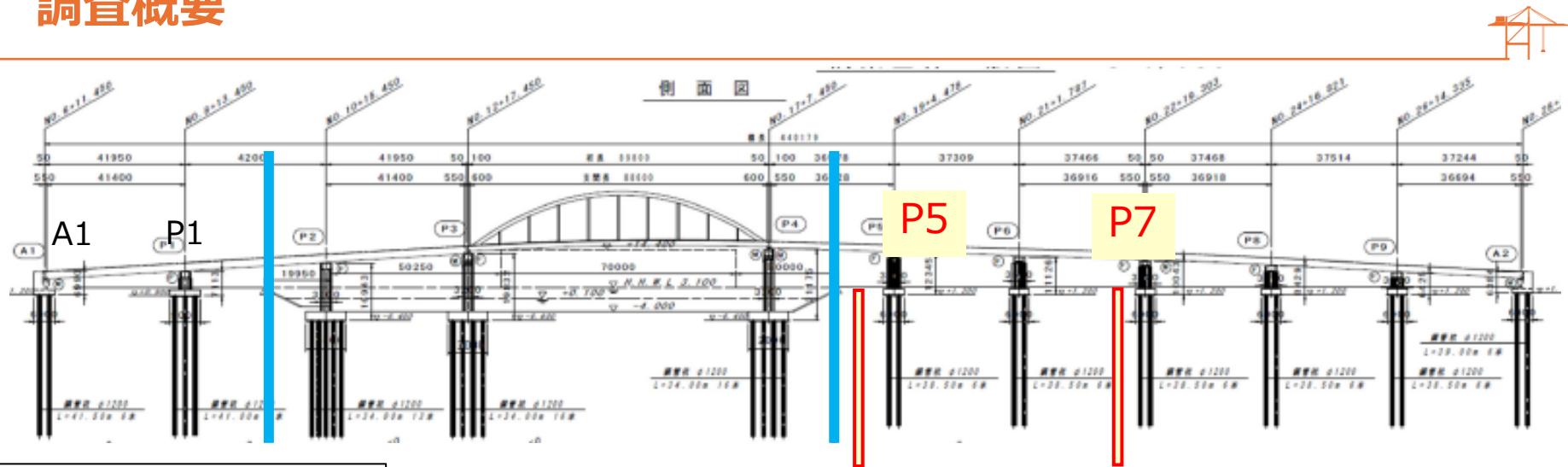
- ・方式
- ・特性と設計概要

## ●橋脚の基礎鋼管杭に電気防食が適用された経緯

## ●本研究での検討内容

- ・電位
- ・土壤抵抗率
- ・通電試験
- ・（土壤抵抗率を基にした）数値解析

# 調査概要



## 沖縄局での実施内容

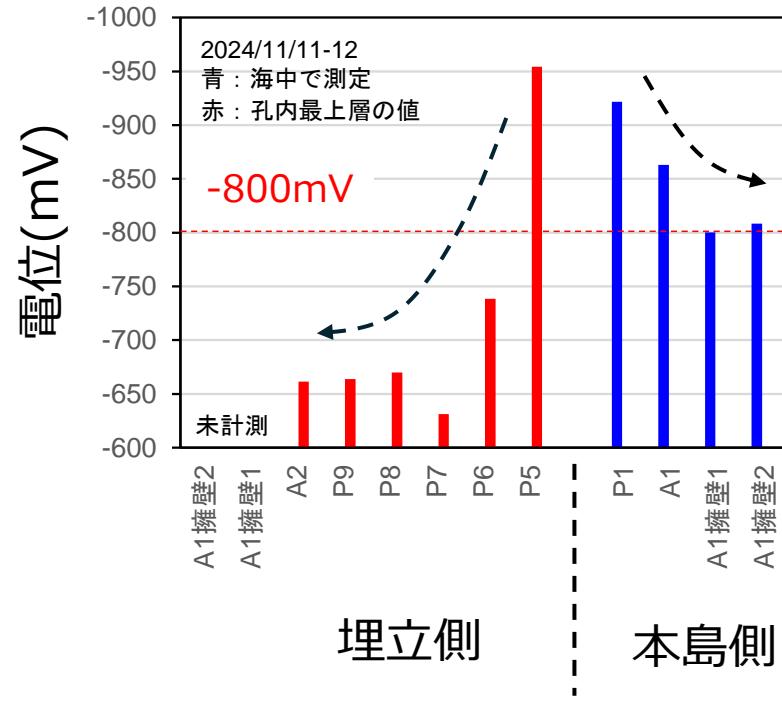
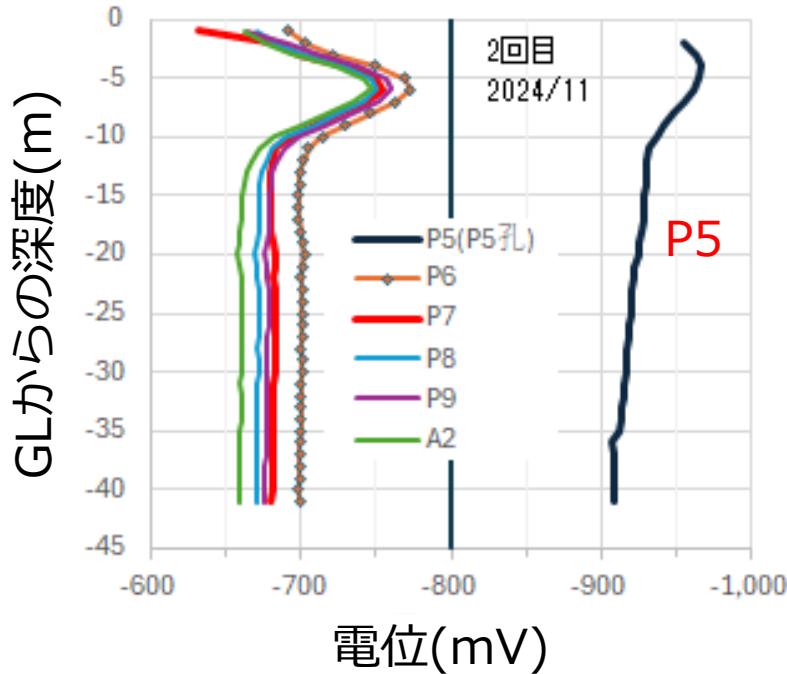
2024.8~9 : P5, P7にモニタリング用の孔を設置. 土壤抵抗率\*の深度分布も測定

- ・電位： 孔内にセンサを投入し、深度分布を測定
  - ・土壤抵抗率\*： モニタリング孔設置後に孔内で測定 ※上記の結果を活用
  - ・通電試験：近隣の海中から通電し、孔内/地表面で電位の変化を測定
  - ・（土壤抵抗率を基にした）数値解析：各種パラメータを設定して実施

# 鋼材の電位



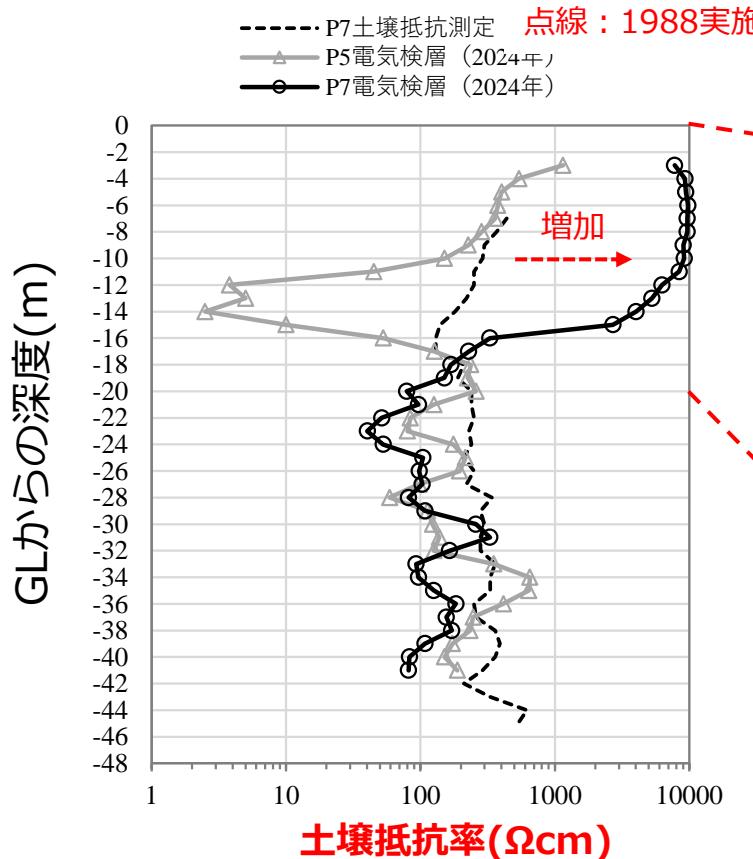
- 定期点検時に測定. 防食管理電位-800mV以下だと「防食されている」と判定
- 孔内にセンサ（照合電極）を投入し, 深度分布を測定



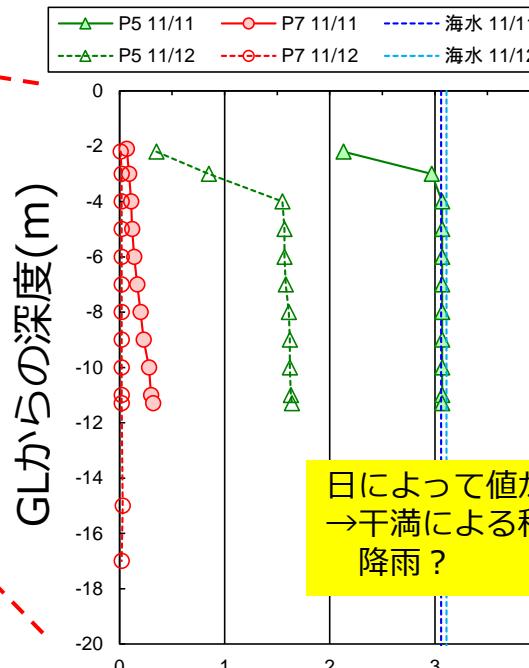
- 地表面付近 (AI陽極付近) で 小さい値を示した
- 埋立側ではP5のみ良好

・汀線（海）から離れると 電位が悪化（特に埋立側）  
→なぜ？

# 土壤抵抗率 および 孔内のNaCl濃度 の深度分布



2024/11-12に計測



NaCl(%) : 電気伝導度から計算

P5(海岸線から約10m程度) : 比較的一様.

P7(海岸線から約70m程度) :

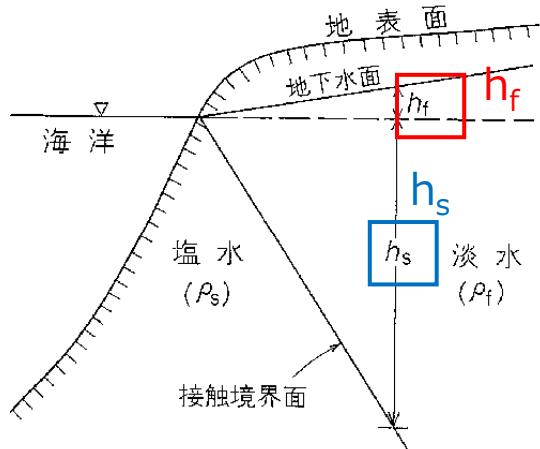
- 上層で抵抗が非常に高い
- 過去(1988)調査時から大幅増加

P5孔内 : 「海水」に近い

P7孔内 : 「淡水」に近い

→AI陽極からの電流が小さい  
→電位の変化(分極)が十分でない

# 海岸付近の「土中」でも「塩水くさび」が生成



$$h_s = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f$$

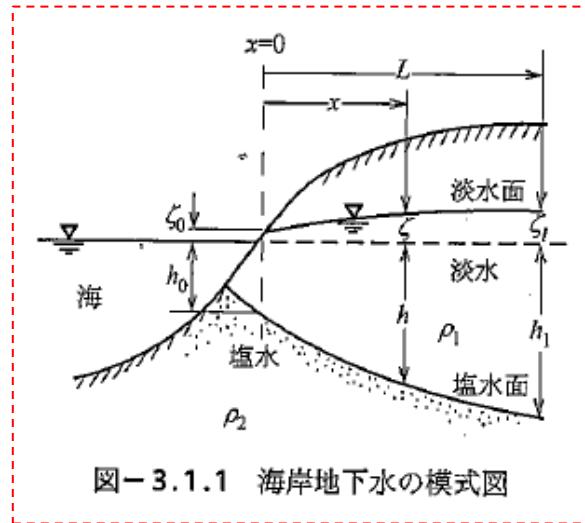
海水と淡水の密度差により、**塩水くさび**が生じる（河口付近の海域と同様）

$h_s$ ：海面から淡水と塩水との接触境界面までの深さ。

$\rho_f$ ：淡水の密度。

$\rho_s$ ：塩(海)水の密度。

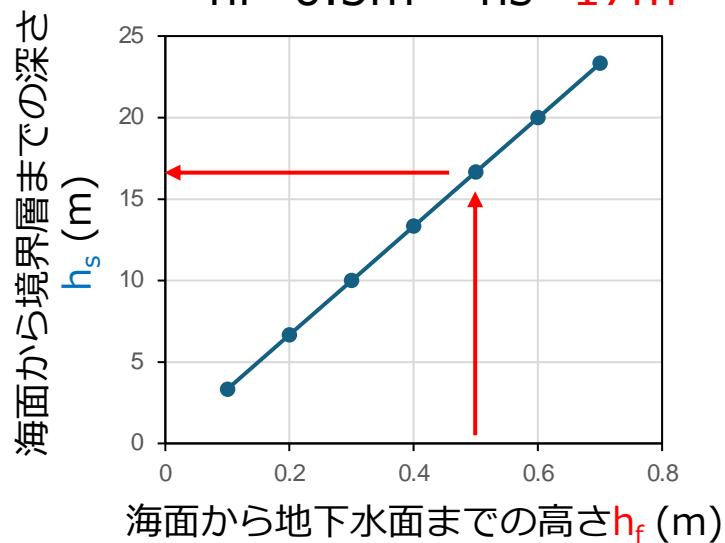
$h_f$ ：海面から地下水面までの高さ。



技術基準  
上巻, p.346

図-3.1.1 海岸地下水の模式図

$$h_f = 0.5\text{m} \rightarrow h_s = 17\text{m}$$



$h_f$ と $h_s$ の関係

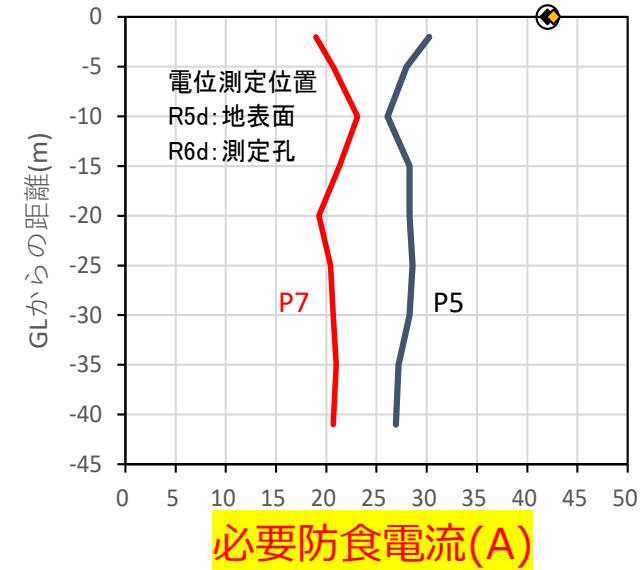
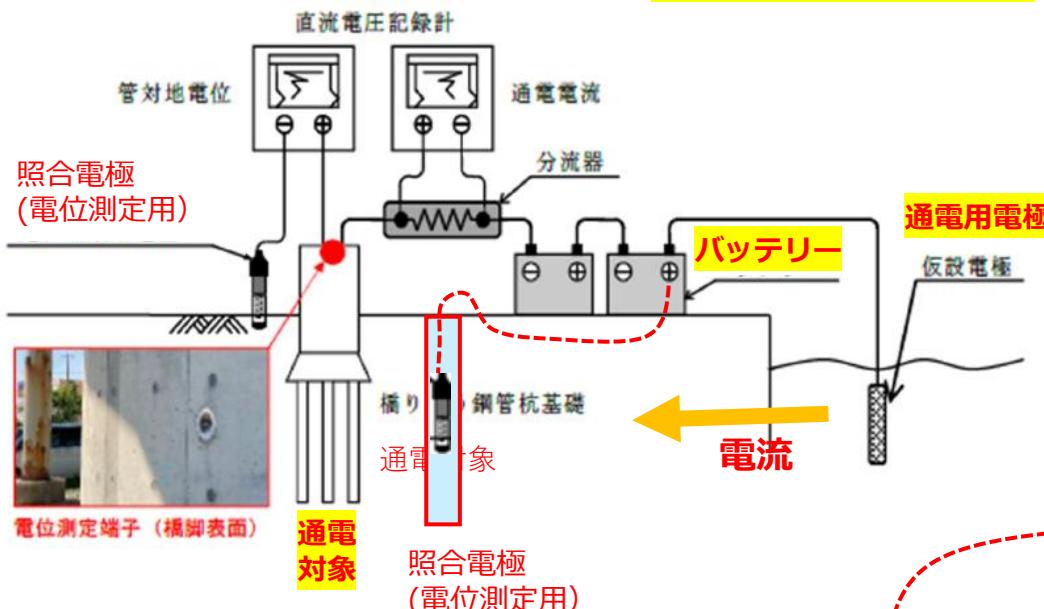
# 通電試験 : パイプライン (被覆防食有) の場合に多く実施\*



\* 「外部電源方式」の通電装置 (所要最大電流量) の推定時に実施



施工費に大きく影響



$P7 < P5$   
→ 土壤抵抗率の関係と逆

電流の流入状況・分布の把握, 防食に必要な通電量の推定のため,  
「**数値解析**」での検証を実施

→他の場所 (羽田空港) での研究事例を紹介

# 羽田空港D滑走路・連絡誘導路における鋼管杭の電気防食試験および数値解析の適用

## 概要



### 試験片の形状および測定項目

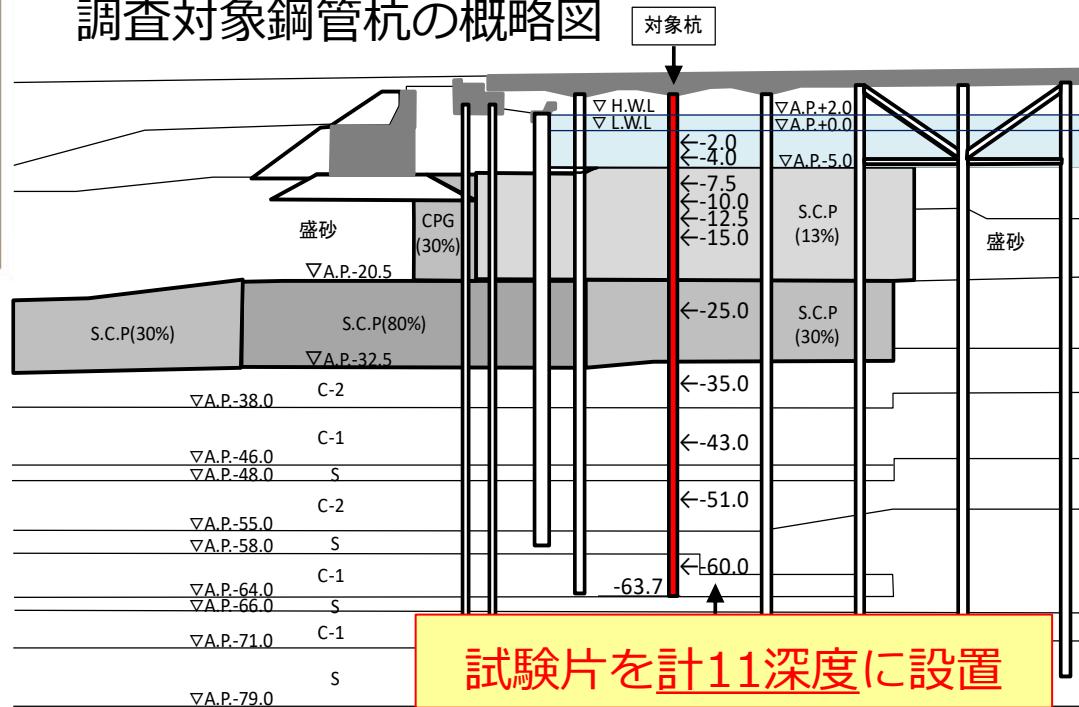


- 試験片の電位
- 試験片への流入電流
- 陽極の発生電流

### 調査杭の外観

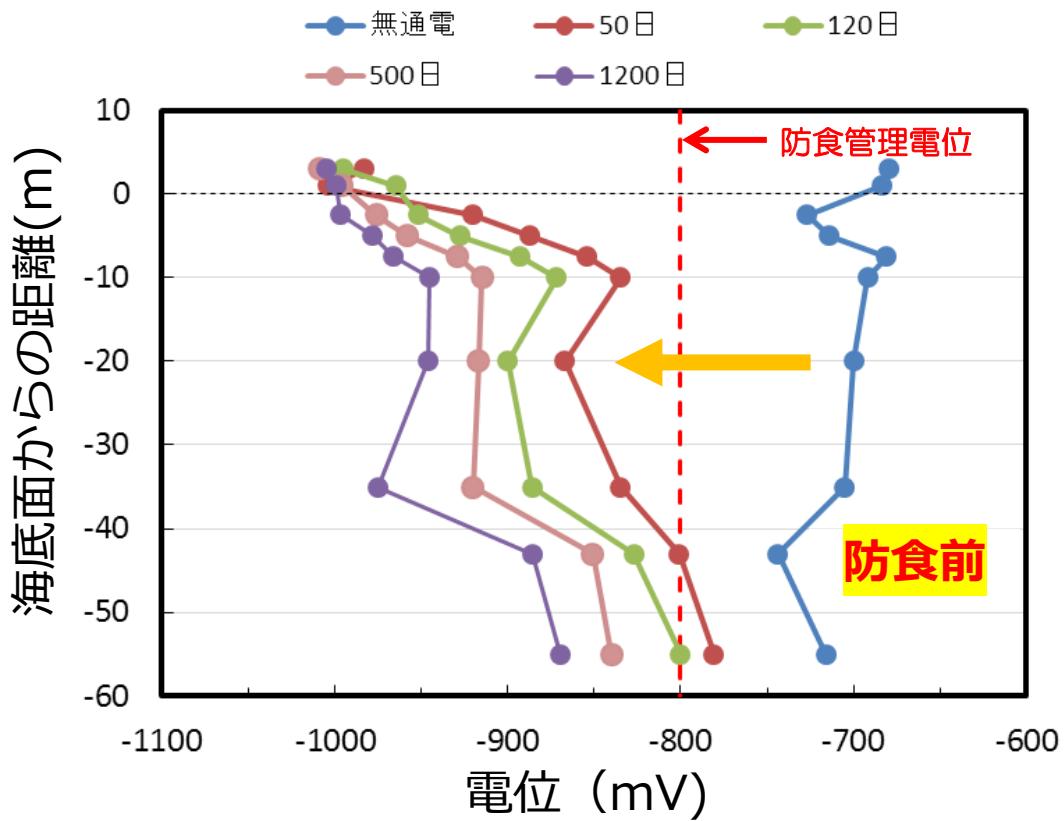


### 調査対象鋼管杭の概略図



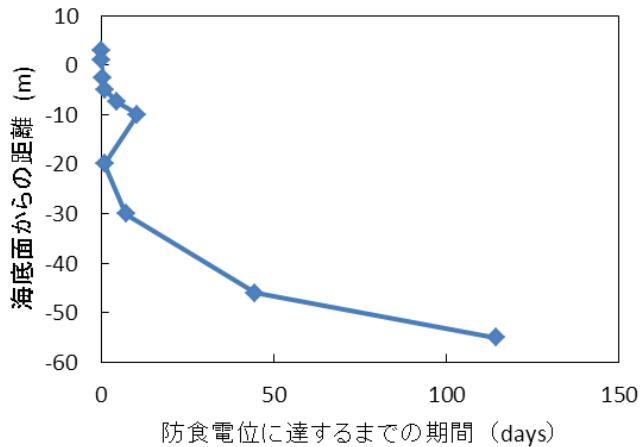
試験片を計11深度に設置

## 海底土中部における電気防食の状態（電位）

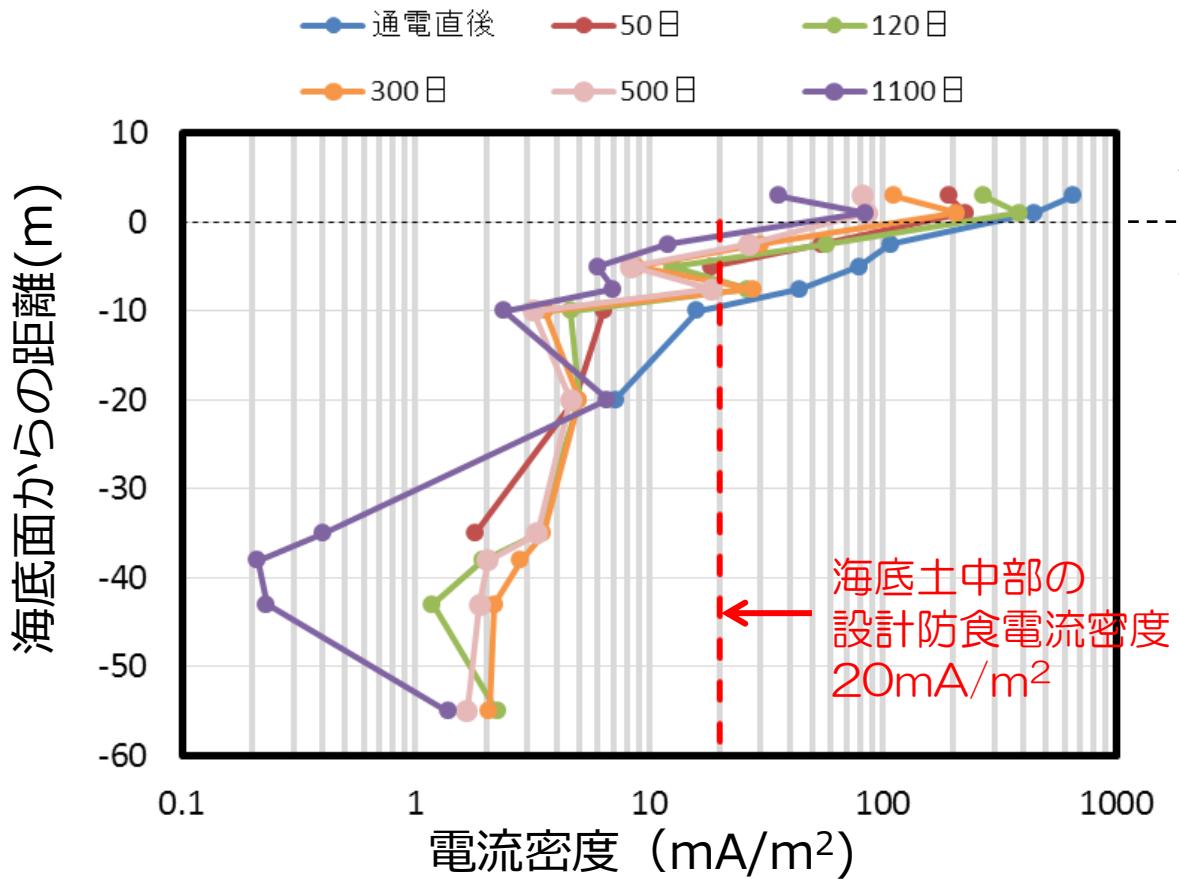


鋼材の電位分布の経時変化

- 防食前の電位は平均-700mV
- 防食後はマイナス方向へ変化
- 120日以降は全深度で  
-800mVに到達（全深度が  
防食状態に到達）



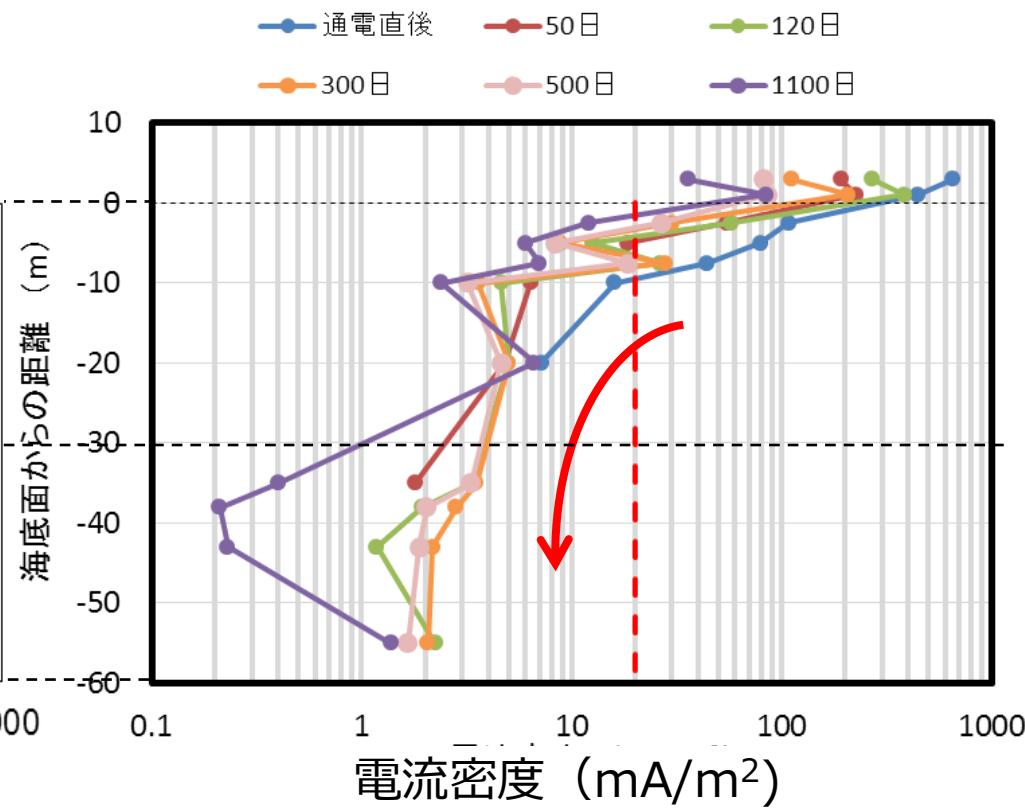
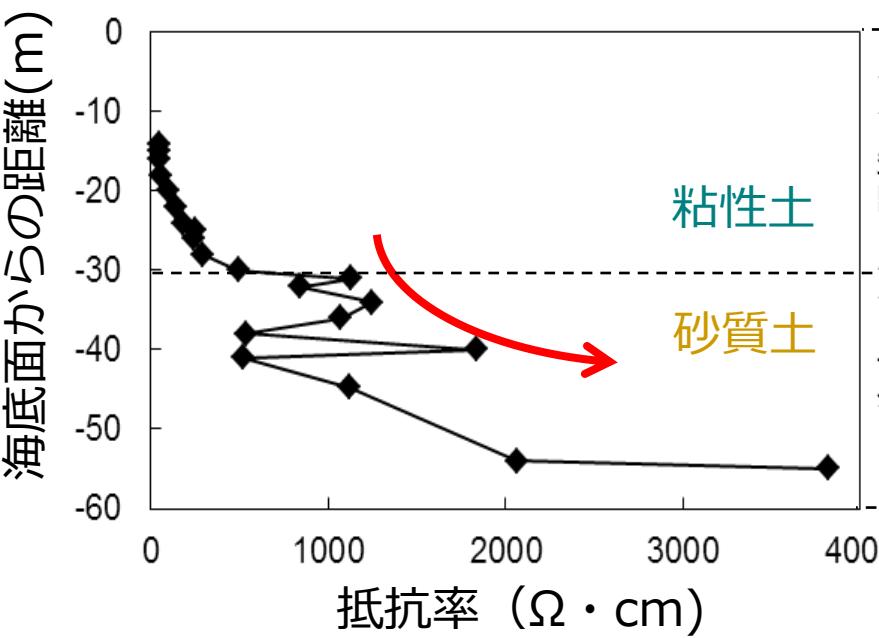
## 試験片に流入する電流密度



- ・経時的に低減する傾向
- ・海底面付近に比べ、  
深い部分では流入電流密度は小さい

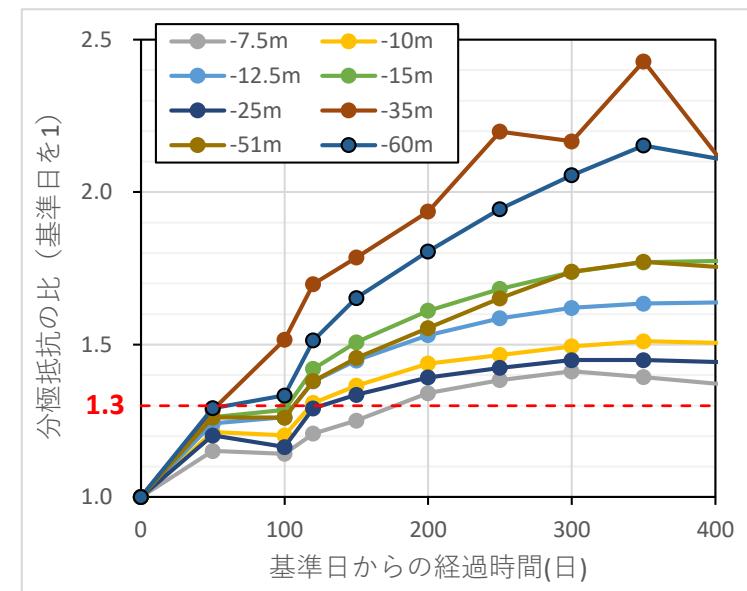
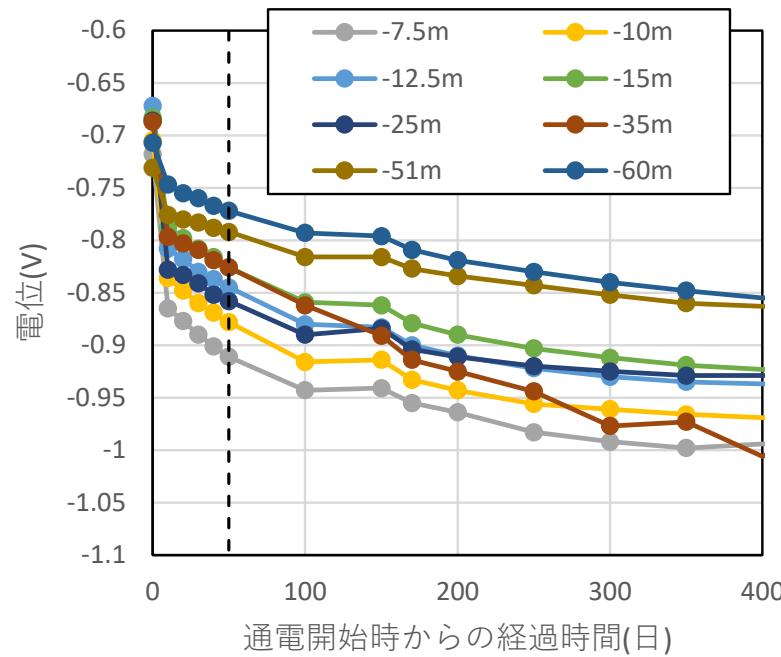
## 流入電流密度の経時変化

## 土質特性（土壤抵抗率）と電気防食の関係



土壤抵抗率が大きい場所では、電流が低減

## 鋼材の電位、分極抵抗の経時変化



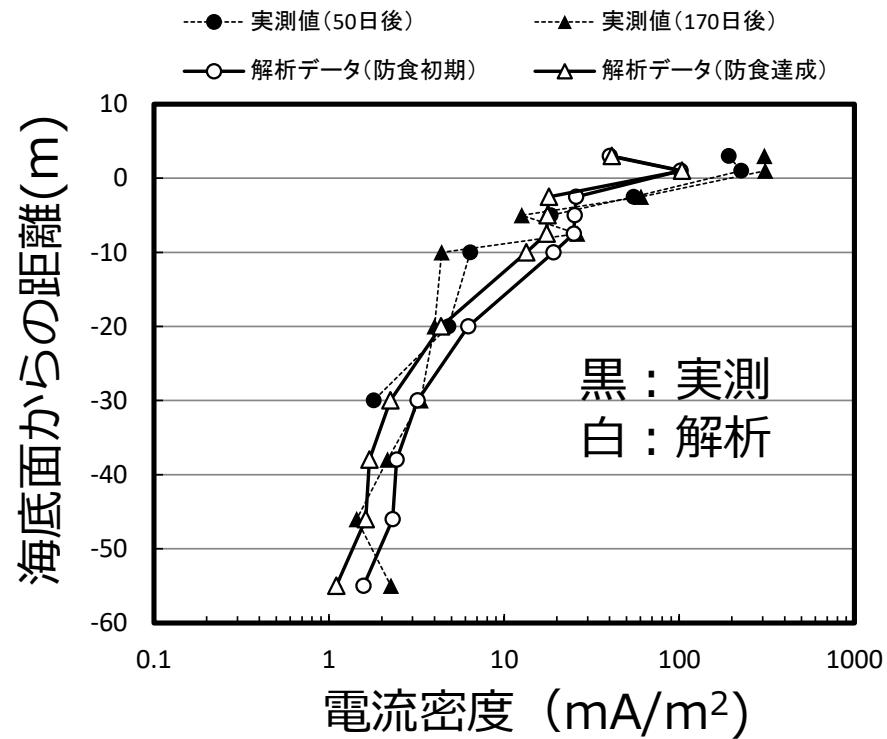
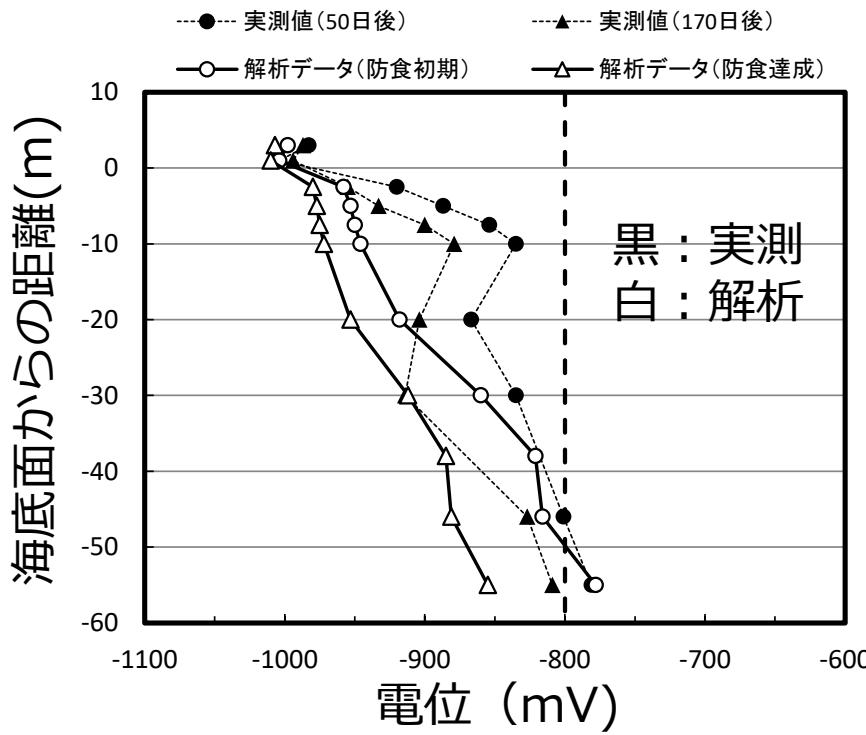
時間とともに増加

# 羽田空港D滑走路・連絡誘導路における鋼管杭の電気防食試験および数値解析の適用 土質特性を考慮した電気防食設計について



防食初期 → 電気防食適用初期を想定

防食達成 → 杭の最下端部まで防食電位に到達したと想定



解析結果は実測値に近い傾向を示した。

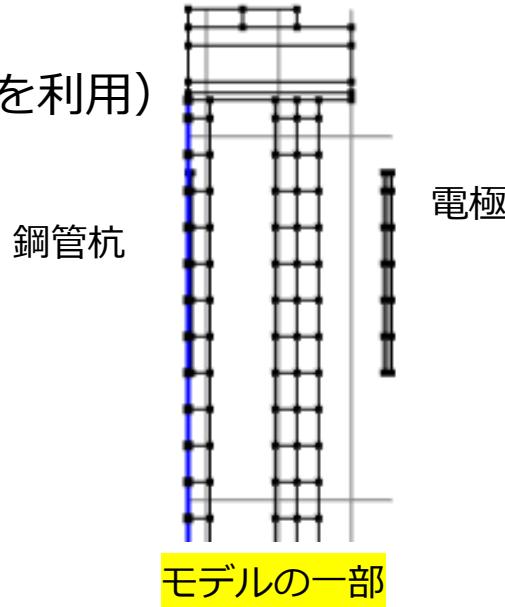


土質特性を考慮した解析手法を防食設計に取り入れることは可能

# 数値解析：解析方法、入力条件（パラメータ）

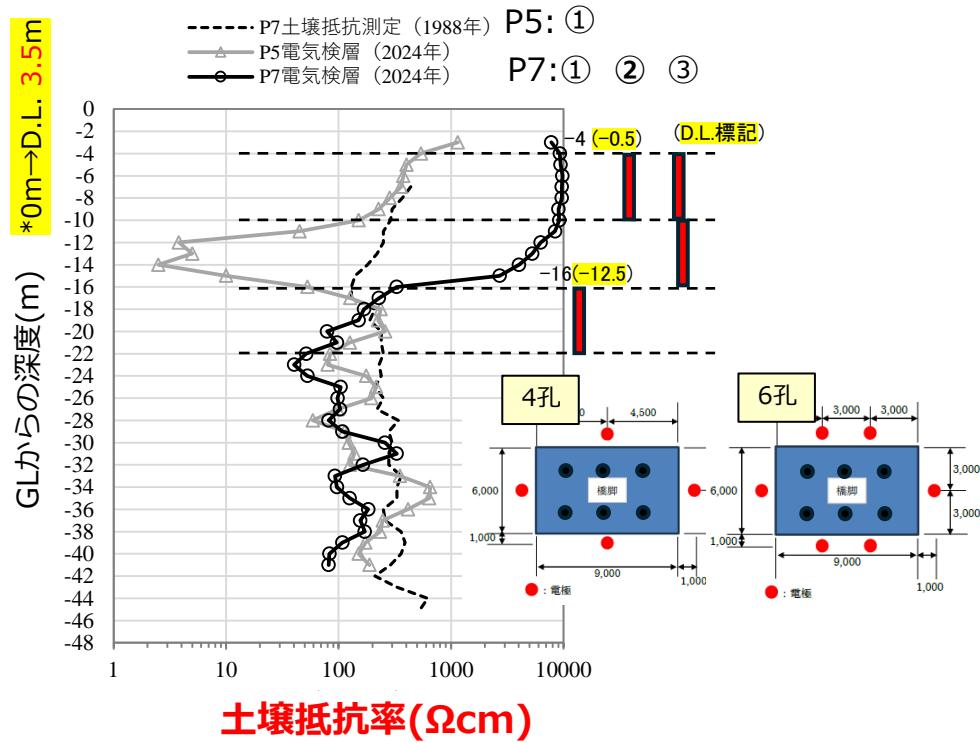


- 有限要素法  
(市販のソフトを利用)



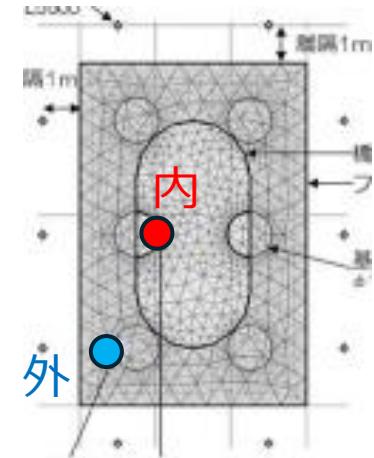
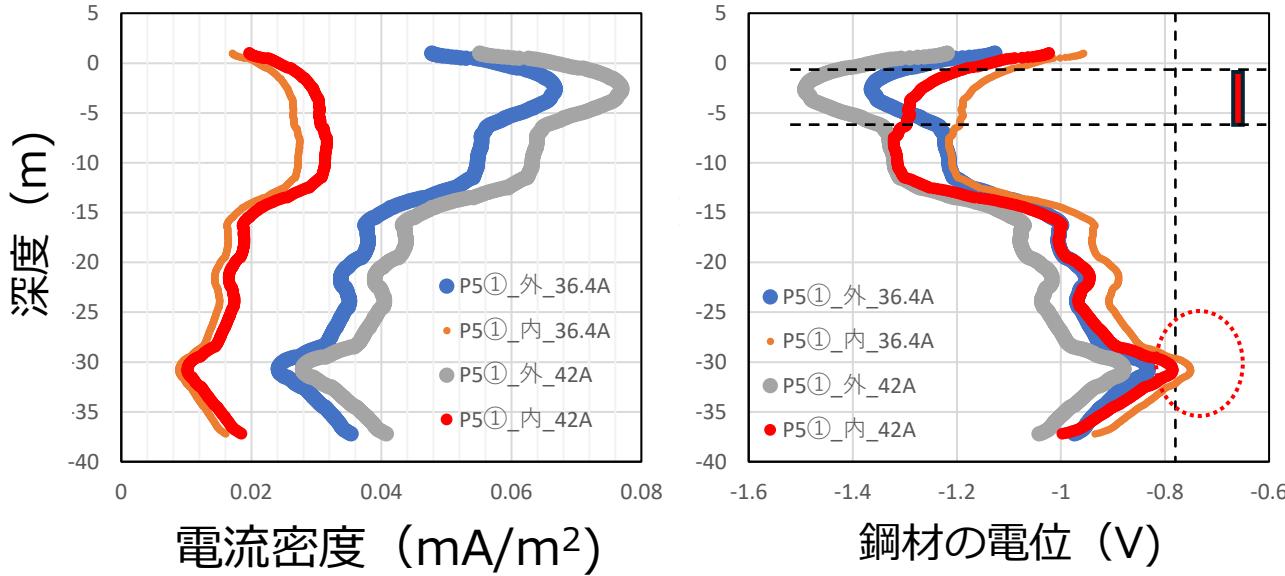
## 入力パラメータ

環境	・ 土壤抵抗率
鋼材	・ 通電前の電位 ・ 分極抵抗（変化のしやすさ）
通電条件	・ 電極配置（右図） ・ 通電量



## 数値解析：P5

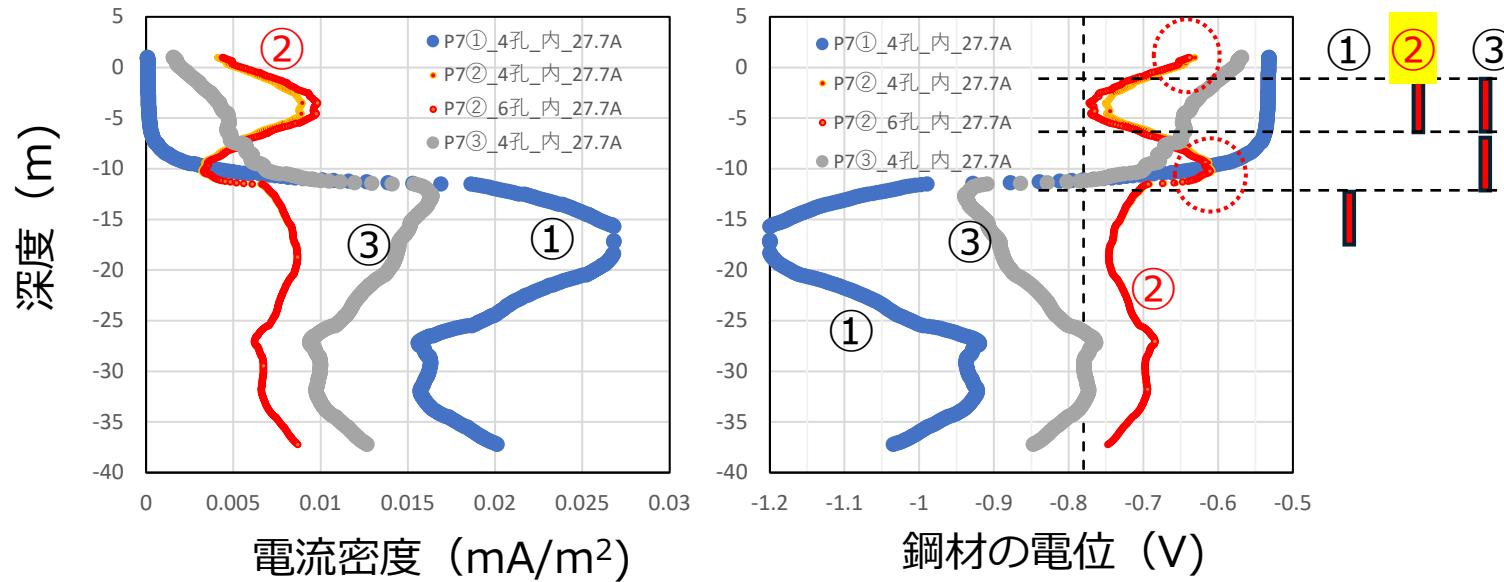
自然電位：-530mV  
分極抵抗：12.5  $\Omega\text{m}^2$



- 杭の場所によって大きく異なる
- 一番厳しい場所（下端付近）が防食電位を満足する電流量は42(A)  
(通電試験より求めた電流量は36.4(A))

## 数値解析：P7

自然電位：-530mV  
分極抵抗：12.5  $\Omega\text{m}^2$



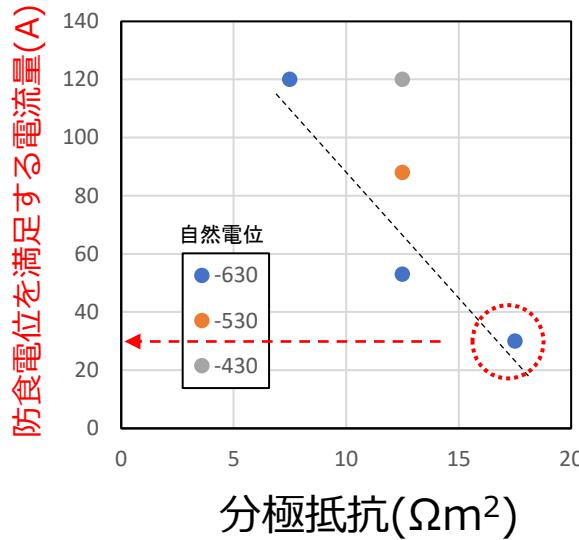
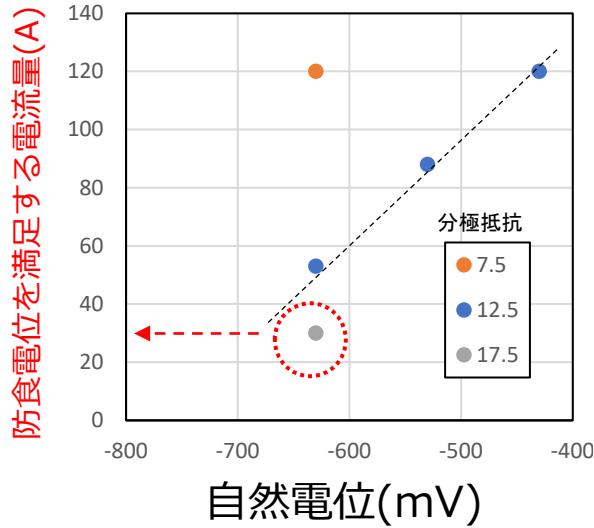
- ①上端に全く流れていない
- ②設置位置に十分流れ、下方にも流れている
- ③上端にあまり流れていない（抵抗が小さいから流出）

- ・一番厳しい場所（上端や-10m付近）が防食電位を満足する電流量  
 →②で88(A)とかなり過大 (通電試験：27.7A)

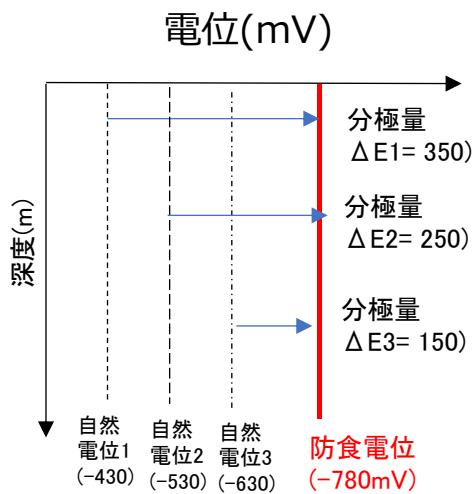


パラメータ（自然電位、分極抵抗）の設定が課題

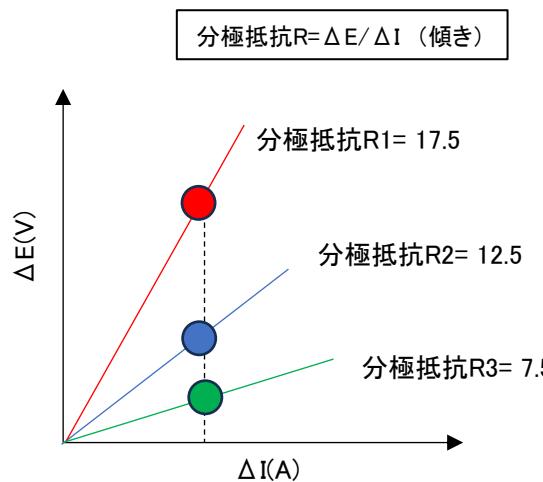
# 数値解析：パラメータの感度分析結果



自然電位が防食電位に  
近いほど、  
分極抵抗が大きいほど、  
必要電流量は少なくて  
済む



自然電位(無通電時の電位)が大  
→防食電位までの分極量 $\Delta E$ 大



ある同じ $\Delta I$ に対し、  
R小(大)→ $\Delta E$ 小(大)

机上、室内試験では  
設定困難  
→現地試験による検証

# 数値解析：パラメータ設定のための現地暴露試験



## 羽田土中での事例

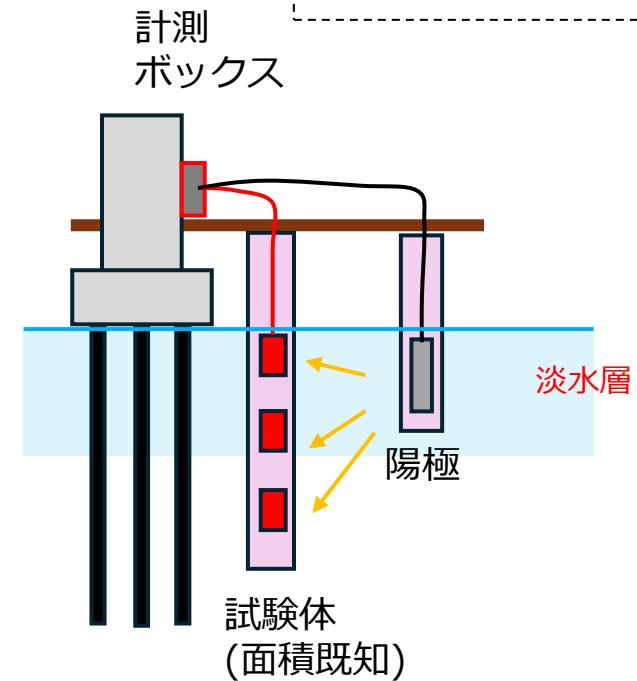
※竣工後に検討しており、実際の設計には反映されていない。



暴露試験による設定値を用いた  
解析値と実測値は概ね一致  
(p.21参照)

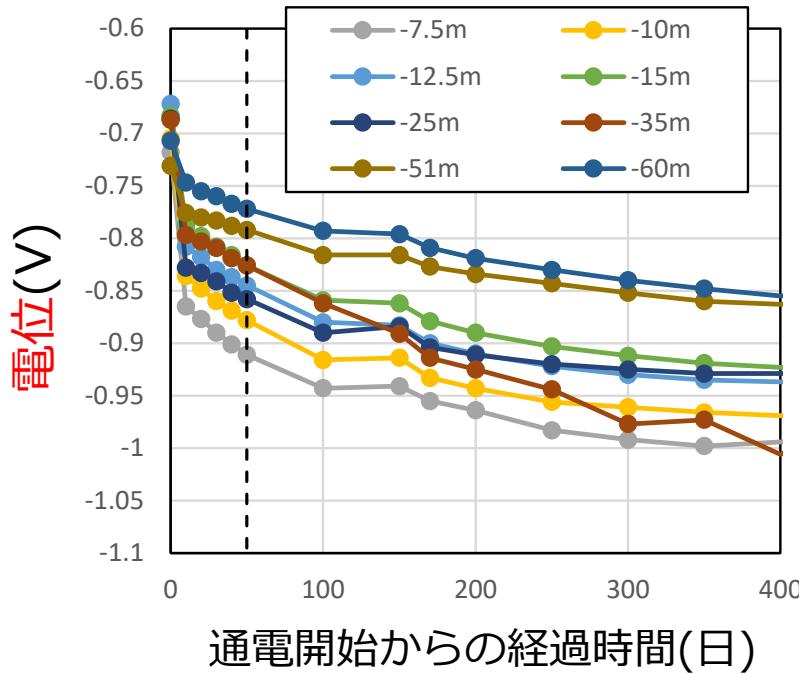
## 石垣での案

※P7のモニタリング  
孔周辺を想定  
(磁気探査済)

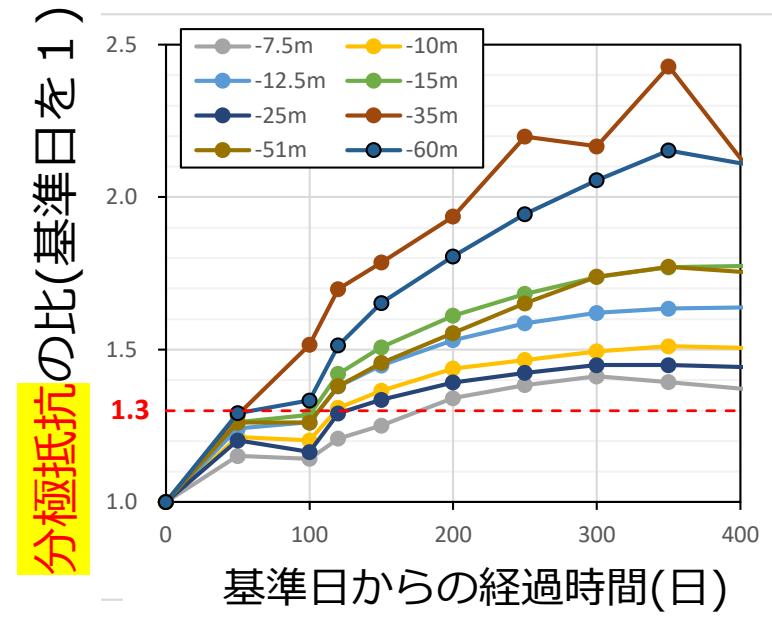


- ・削孔後に試験体を埋設
- ・電位、電流密度を連続計測
- ・計測期間：0.5年程度

# 羽田空港D滑走路・連絡誘導路における鋼管杭の電気防食試験および数値解析の適用 鋼材の電位、分極抵抗の経時変化



時間とともに  
マイナス側へシフト  
(分極量が増加)



時間とともに増加

$$\text{※分極抵抗} = \frac{\text{電位の変化量 (分極量)}}{\text{電流}}$$



## 電位

- ・汀線（海）から離れると電位が悪化（特に埋立側）

## 土壤抵抗率

- ・淡水の混入程度（地盤内の塩分濃度）によって大きく異なる
- 課題：水質の変動によって、土質抵抗率も変動？  
設計への反映は？

→孔内の電気検層（土壤抵抗率）や水質を再度測定

## 通電試験

- ・想定と異なる結果も

## 数値解析

- ・土壤抵抗率の影響が大きく現れる。土壤抵抗率が大きい場合、電流が流しにくくなる。
- ・鋼材のパラメータ（自然電位、分極抵抗）の影響が相当大きい。

課題：パラメータの設定（鋼材の自然電位・分極抵抗）  
設計の考え方の整理



「暴露試験」により取得