

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



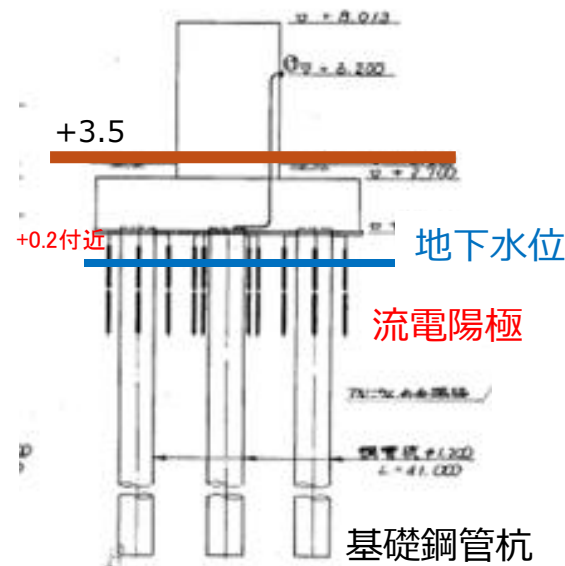
流電陽極の「設計耐用年数（**30年**）」に至り、
防食の更新を検討

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
等を目的として、本検討を開始



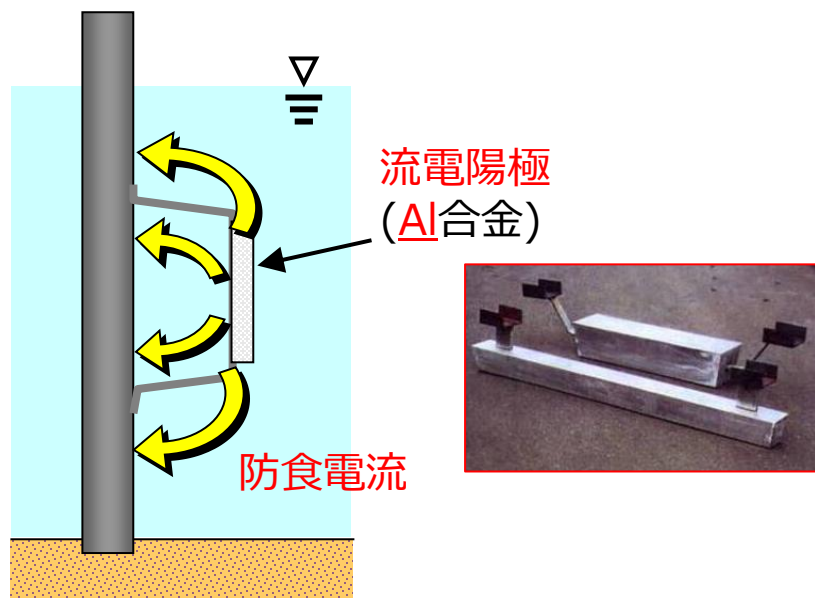


- 電気防食について
 - ・方式（流電陽極方式/外部電源方式）
 - ・特性と設計概要
- 橋脚の基礎鋼管杭に電気防食が適用された経緯
- 本研究での検討内容

電気防食について：流電陽極方式と外部電源方式の比較

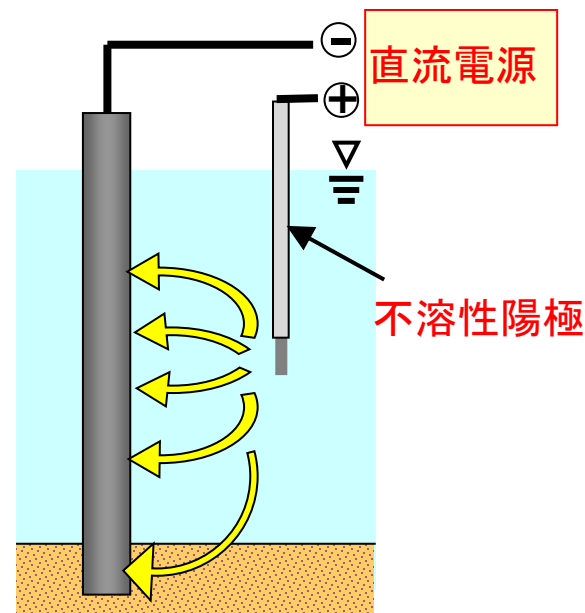


流電陽極方式



- ✓ 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

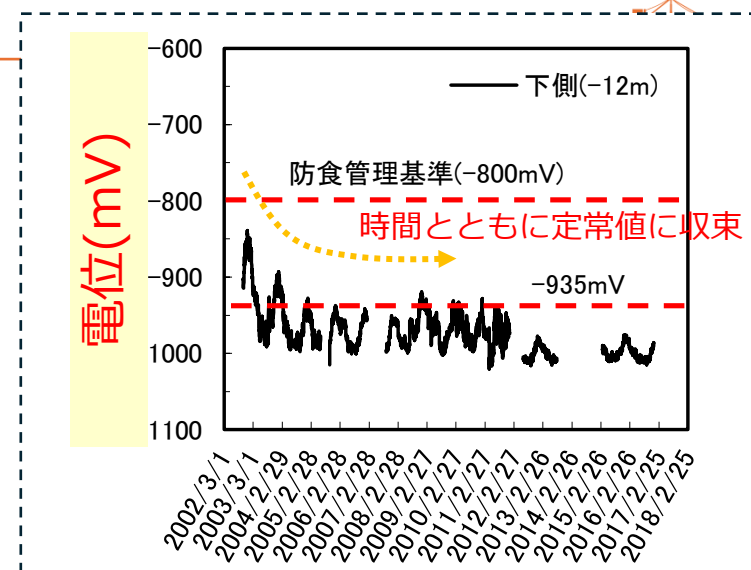
外部電源方式



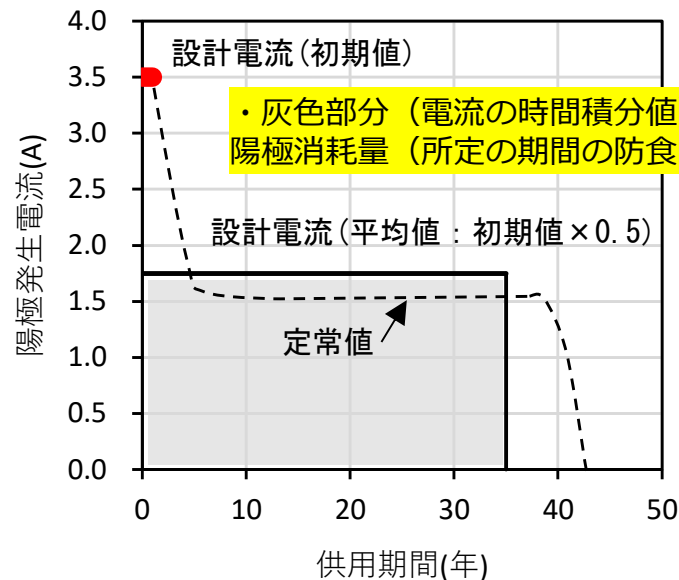
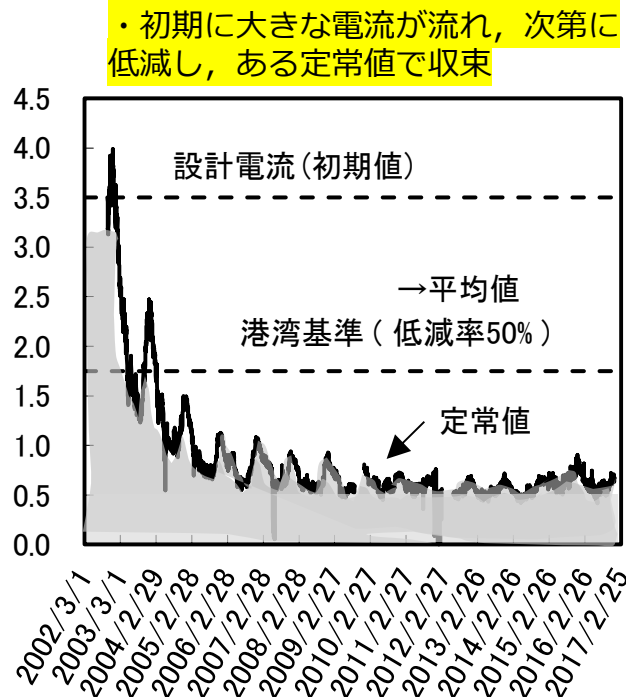
- ✓ 河川域や、環境が一様でない場合
*モノパイルの場合も
- ✓ 既設の土中構造物に適用する場合
(大電流が流せるため、陽極が比較的少数で対応可能)

電気防食について：実際起きていること、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。



陽極からの発生電流(A)



電気防食について：一般の場合に必要な電流の求め方



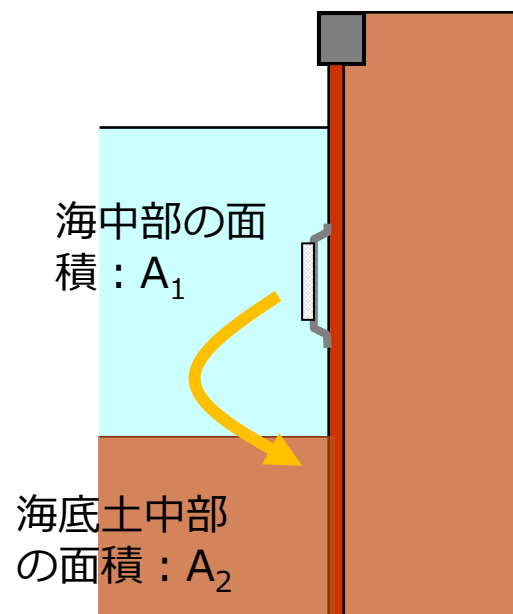
$$\begin{aligned} & \text{必要な陽極発生電流（＝陽極質量）A} \\ & = \text{防食電流密度: A/m}^2 \times \text{防食対象面積: m}^2 \end{aligned}$$

・ **海中**：初期値は100 mA/m²が標準で、定常時は半分の50 mA/m²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20mA/m²，定常時は半分の10 mA/m²。

※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
背面土中部	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

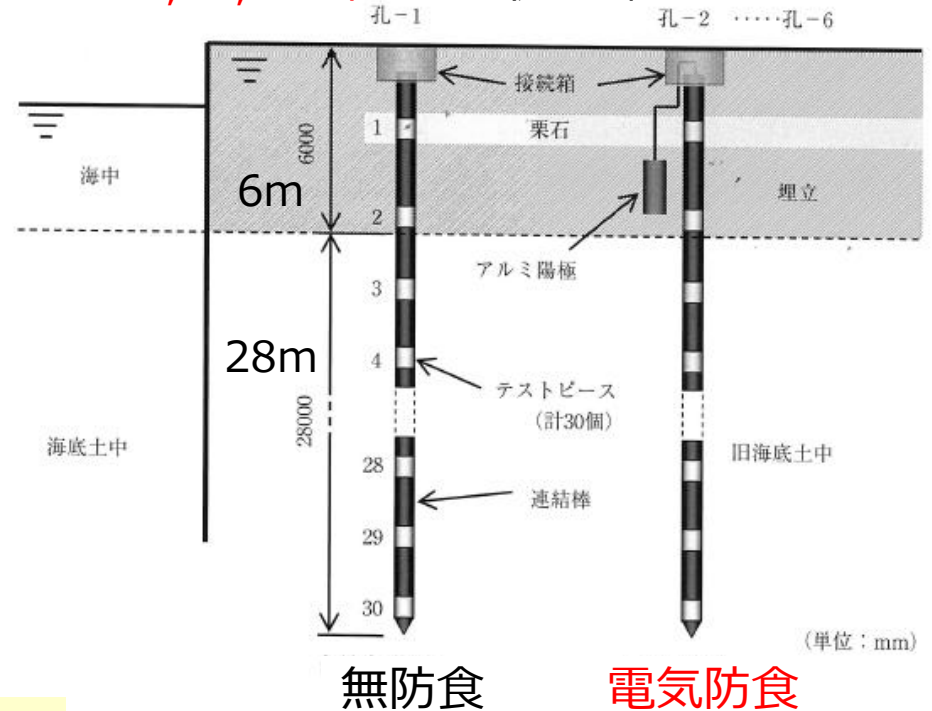
- ・那覇港・土中部での暴露試験

- 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

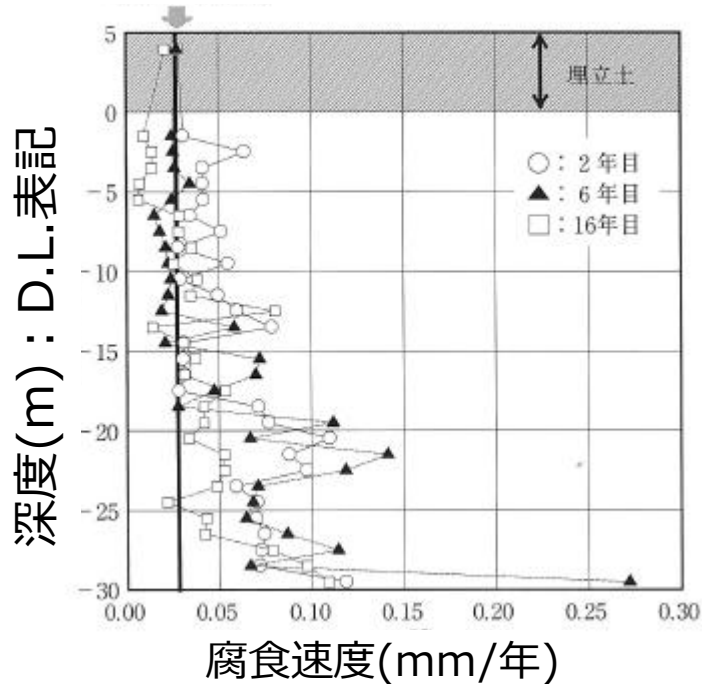
実施時期： 1979.2～1994.12 (16年間)

那覇土中での暴露試験：結果の一例



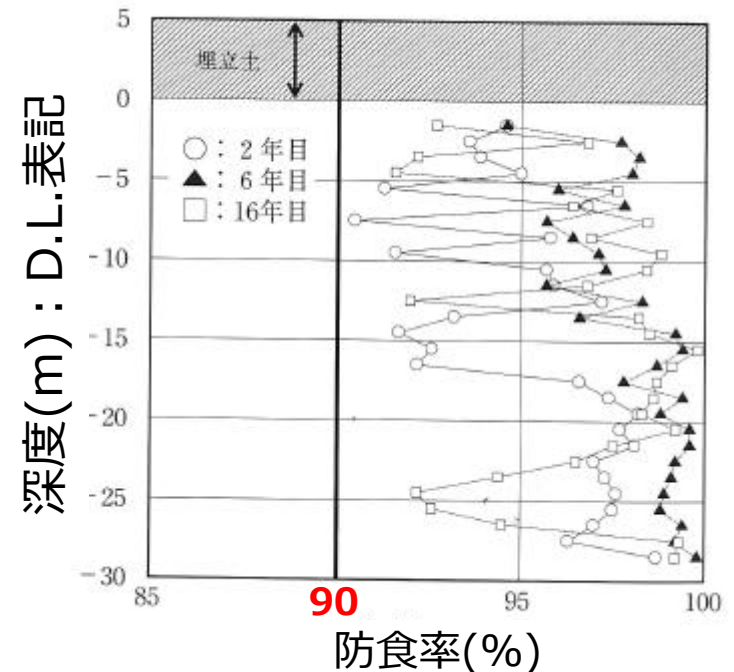
腐食速度（無防食時）

一般的な値(0.02~0.03)



一般的な値よりやや大きい

防食率（電気防食時）



$$= (\text{無防食時の腐食速度} - \text{防食時の腐食速度}) / \text{無防食時の腐食速度} \times 100$$

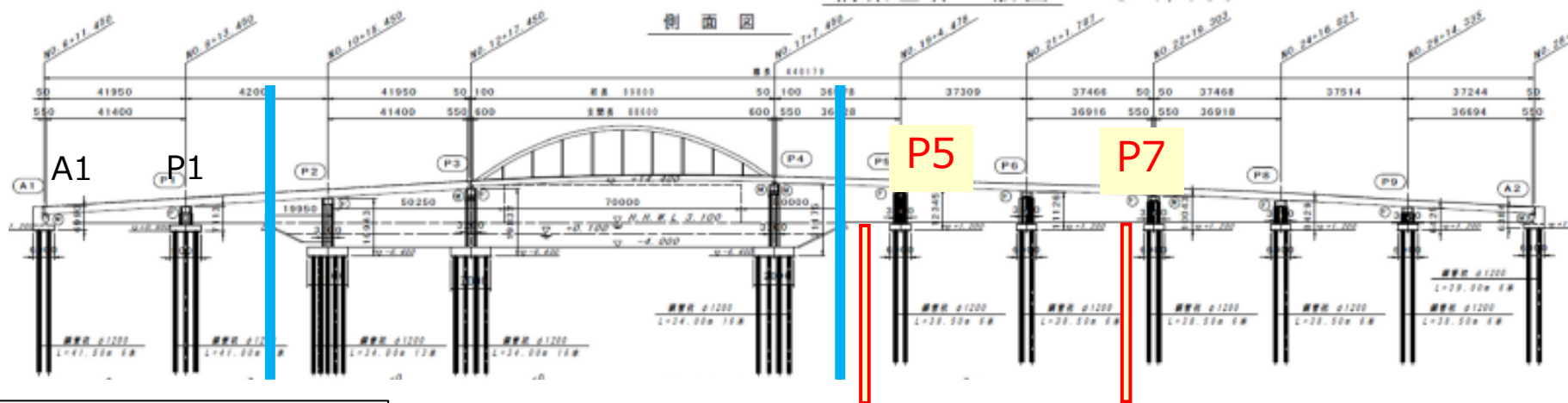
90%以上を確保
→防食出来ている

→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
 - ・土壌抵抗率
 - ・通電試験
 - ・（土壌抵抗率を基にした）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

R6d ・ 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

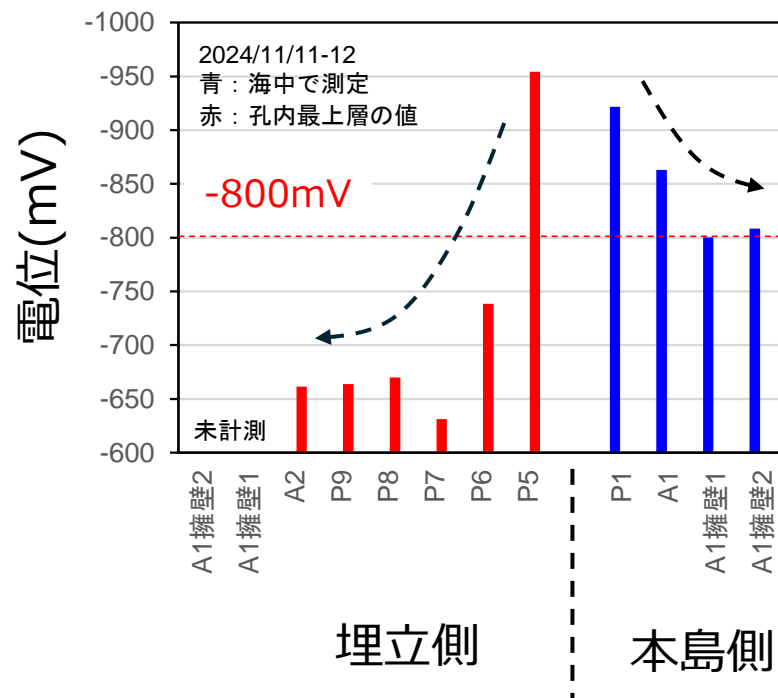
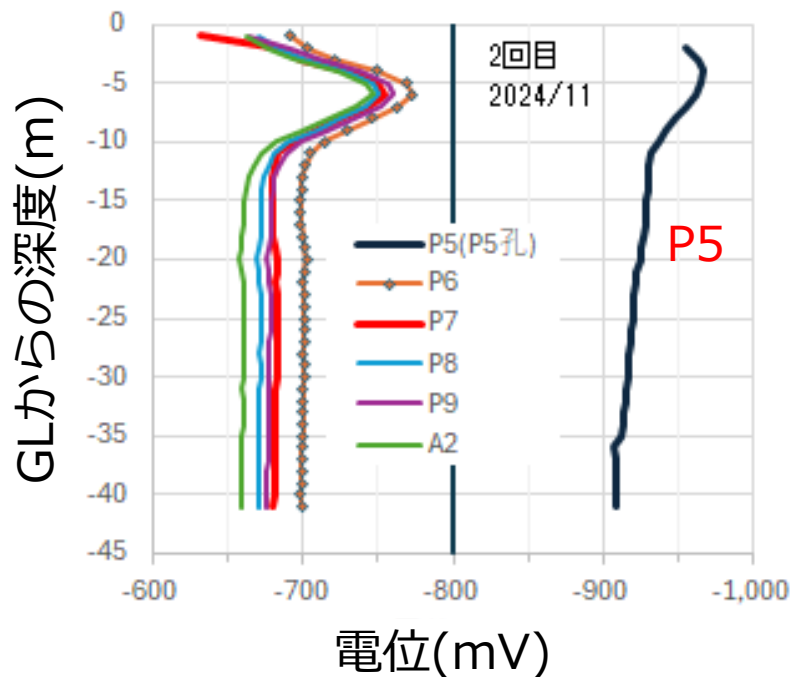
・ 通電試験： 近隣の海中から通電し，孔内/地表面で電位の変化を測定

・ （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



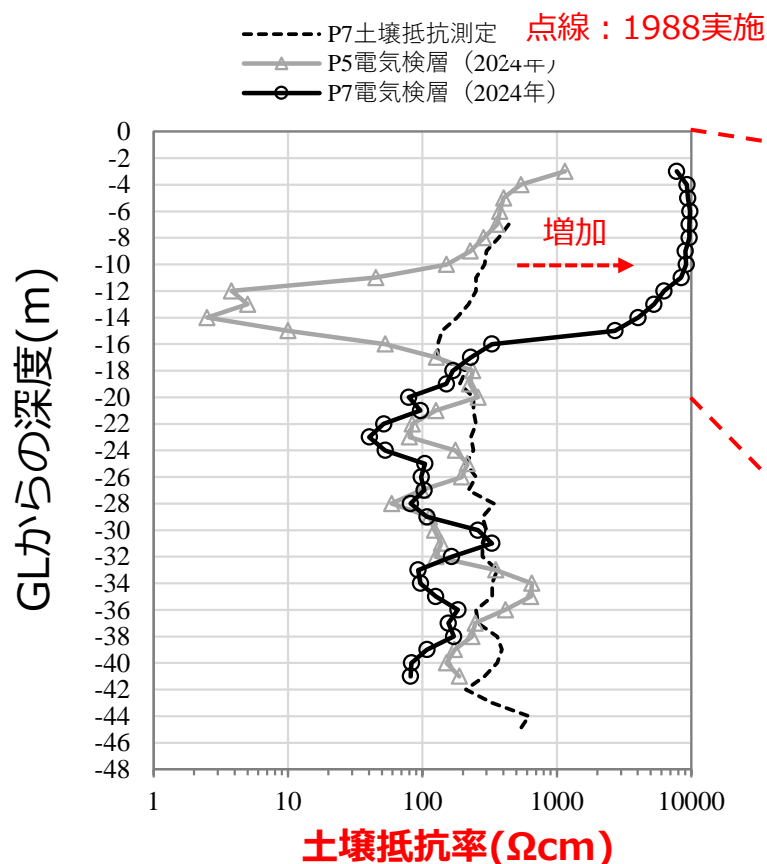
- ・定期点検時に測定。防食管理電位**-800mV**以下だと「防食されている」と判定
- ・孔内にセンサ（**照合電極**）を投入し，深度分布を測定



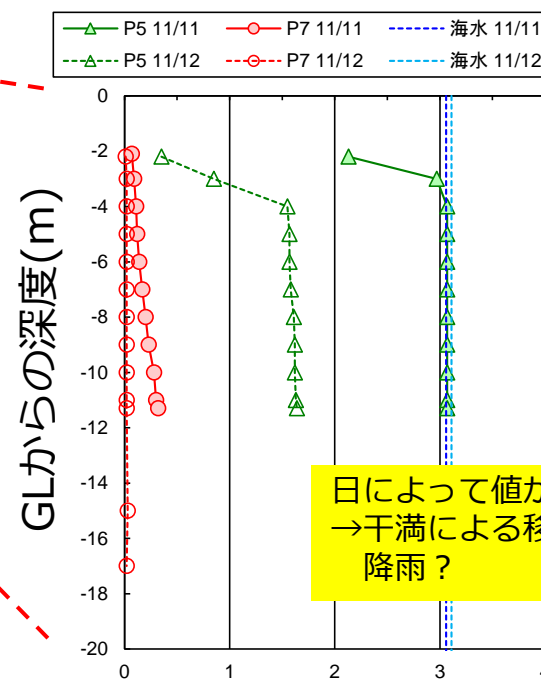
- ・地表面付近（**AI陽極付近**）で小さい値を示した
- ・埋立側では**P5のみ良好**

・汀線（海）から離れると電位が悪化（特に埋立側）
→なぜ？

土壌抵抗率 および 孔内のNaCl濃度 の深度分布



2024/11-12に計測



日によって値が変動
→干満による移動？
降雨？

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

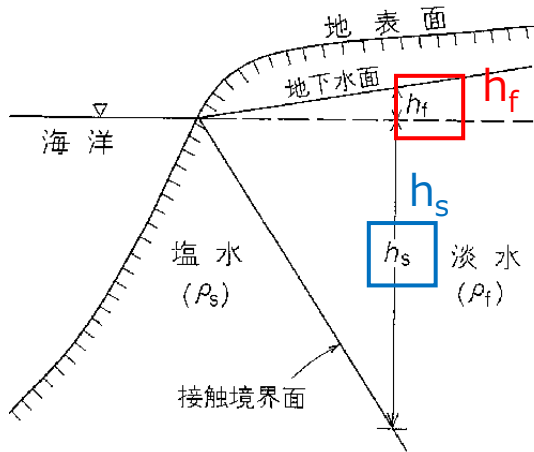
P7孔内 : 「淡水」に近い

→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



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）



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

h_s : 海面から淡水と塩水との接触境界面までの深さ.

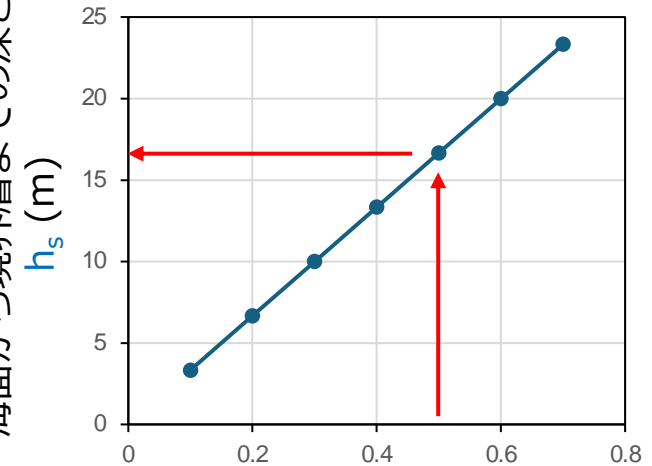
ρ_f : 淡水の密度.

ρ_s : 塩(海)水の密度.

h_f : 海面から地下水面までの高さ.

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

海面から境界層までの深さ



海面から地下水面までの高さ h_f (m)

h_f と h_s の関係

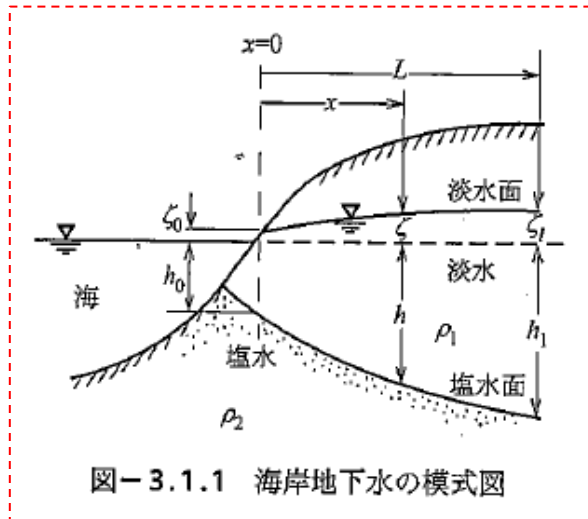


図-3.1.1 海岸地下水の模式図

技術基準
上巻, p.346

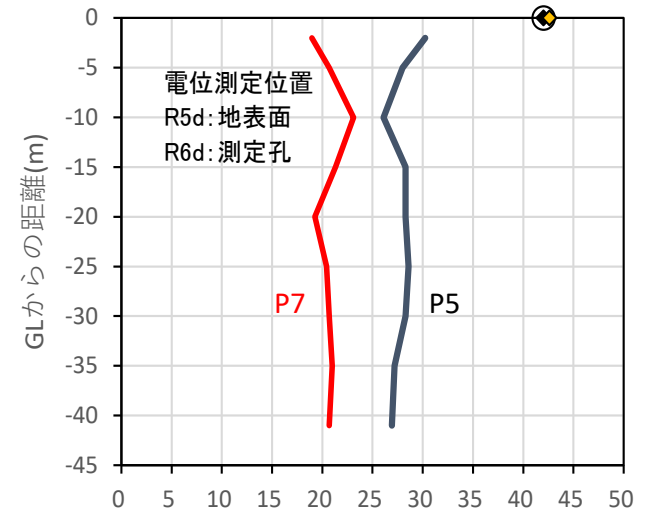
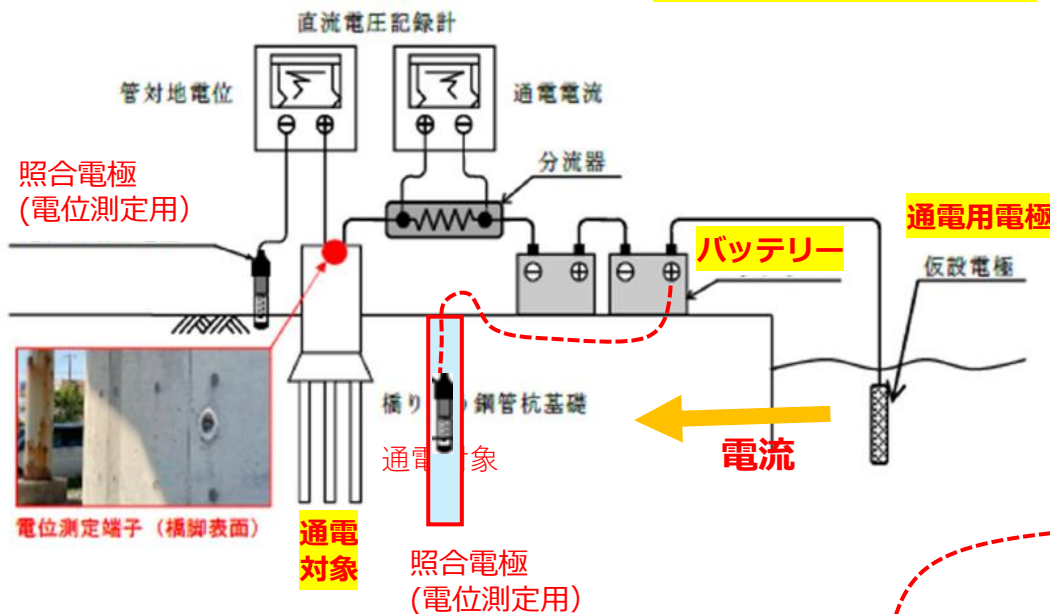
通電試験 : パイプライン (被覆防食有) の場合に多く実施*



* 「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



必要防食電流(A)

$P7 < P5$

→ 土壌抵抗率の関係と逆

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



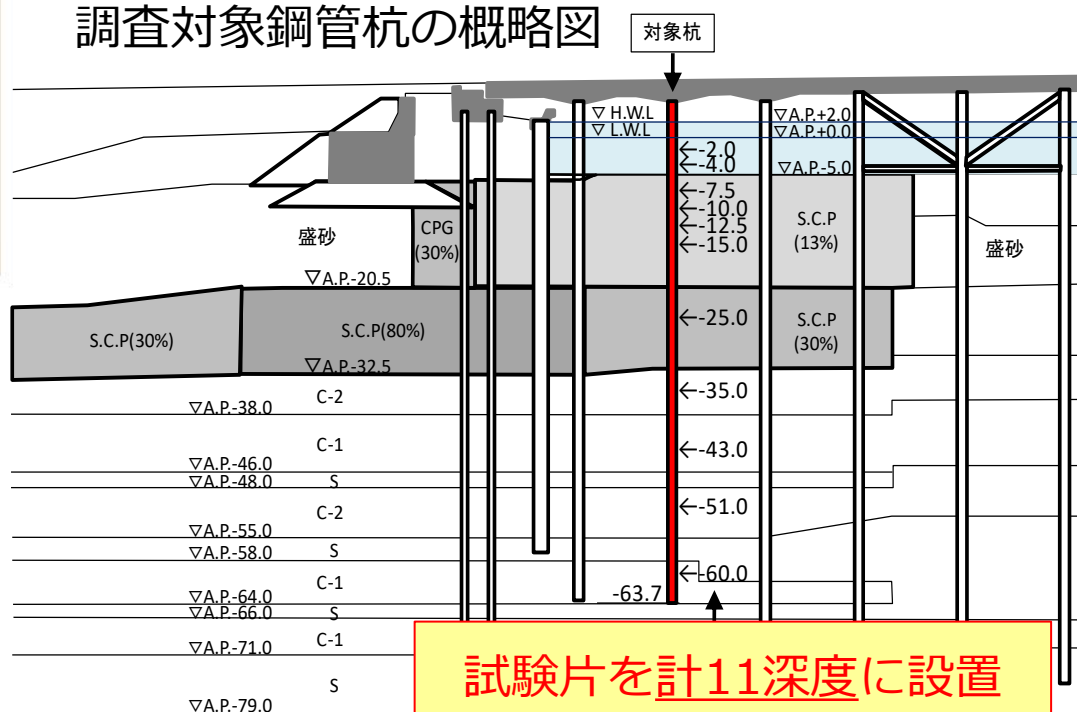
試験片の形状および測定項目



調査杭の外観



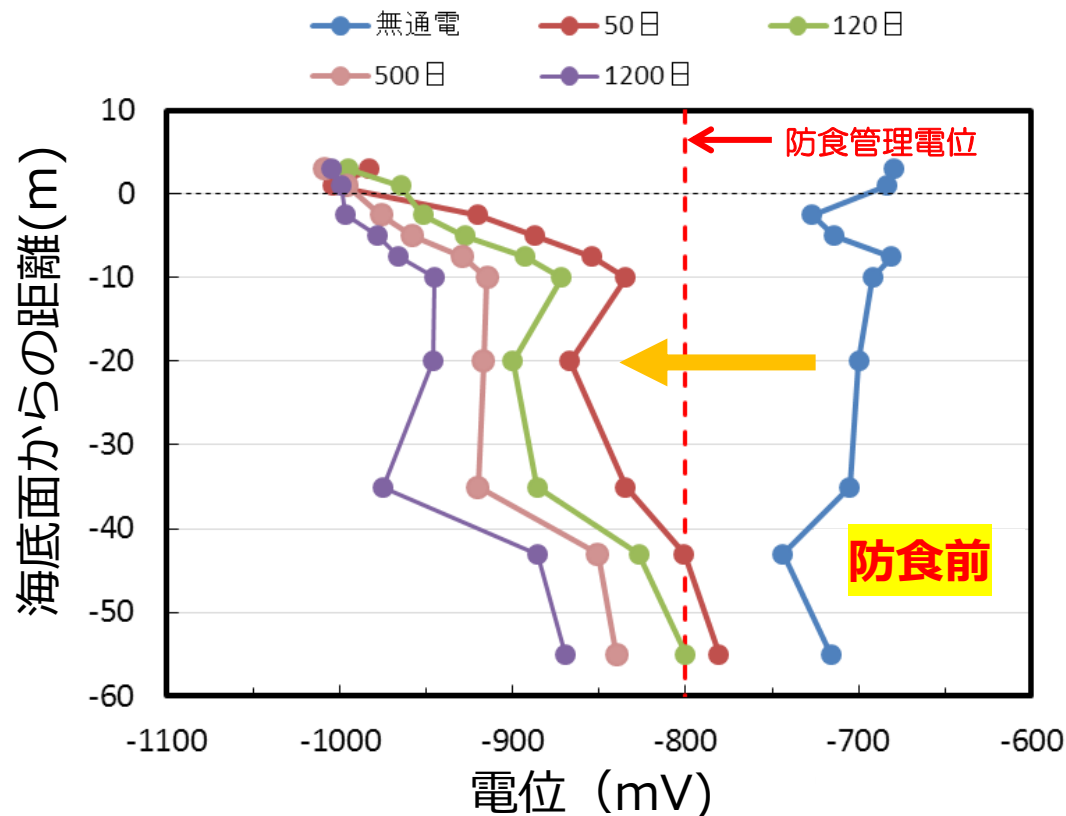
調査対象鋼管杭の概略図



- 試験片の電位
- 試験片への流入電流
- 陽極の発生電流

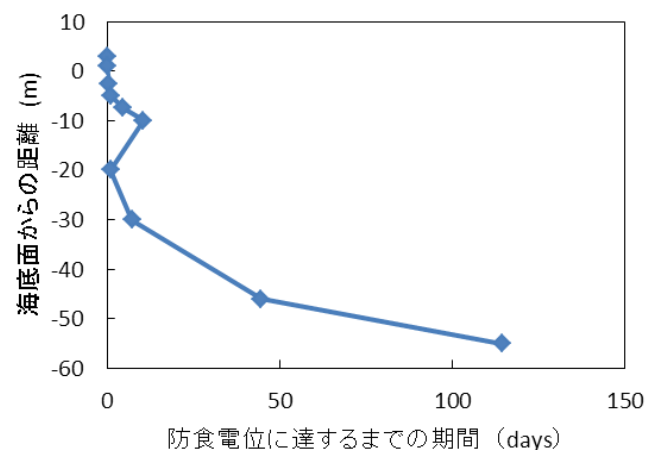
羽田空港D滑走路・連絡誘導路における鋼管杭の電気防食試験および数値解析の適用

海底土中部における電気防食の状態（電位）



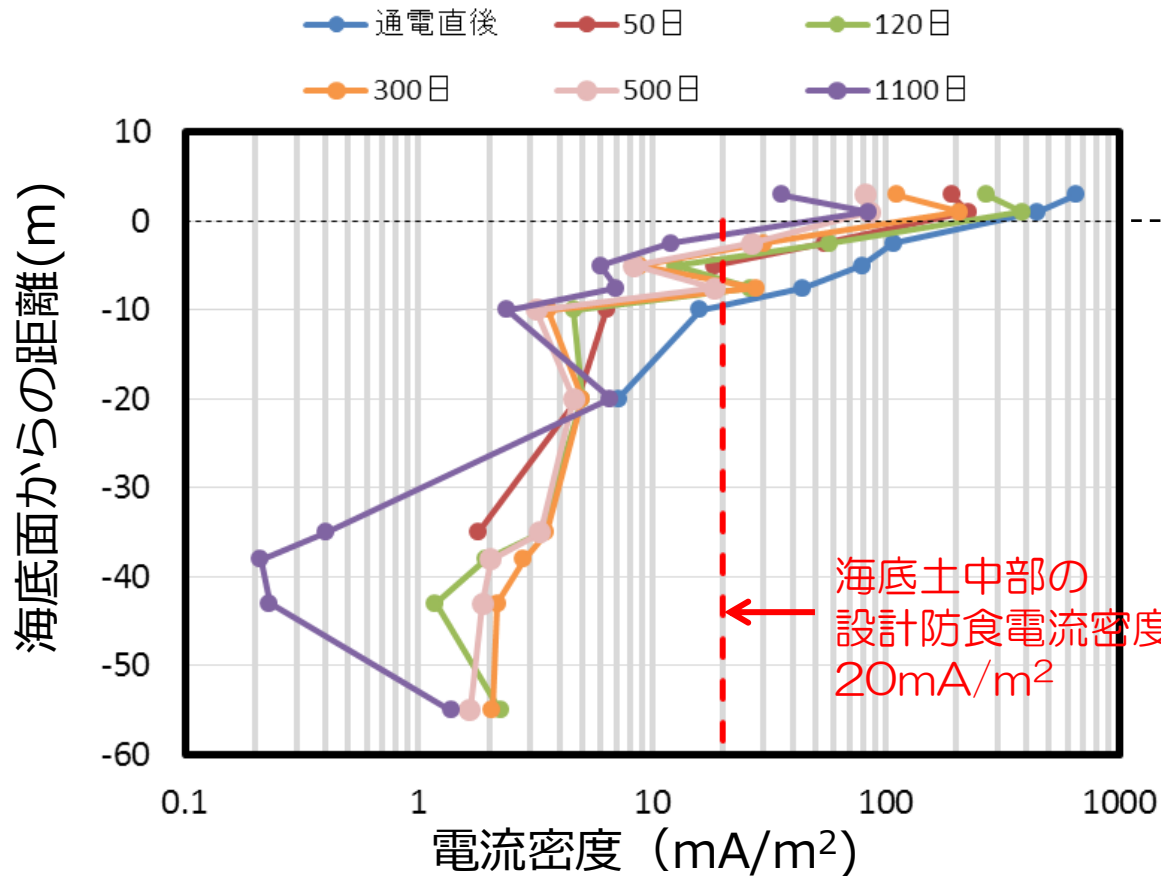
鋼材の電位分布の経時変化

- ・ 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）



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

試験片に流入する電流密度

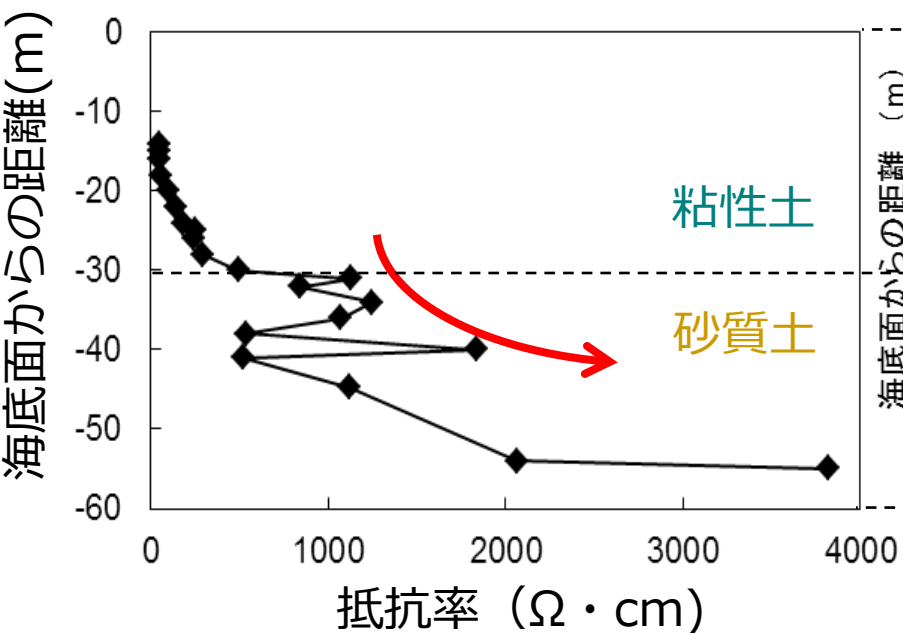


- ・ 経時的に低減する傾向
- ・ 海底面付近に比べ、深い部分では流入電流密度は小さい

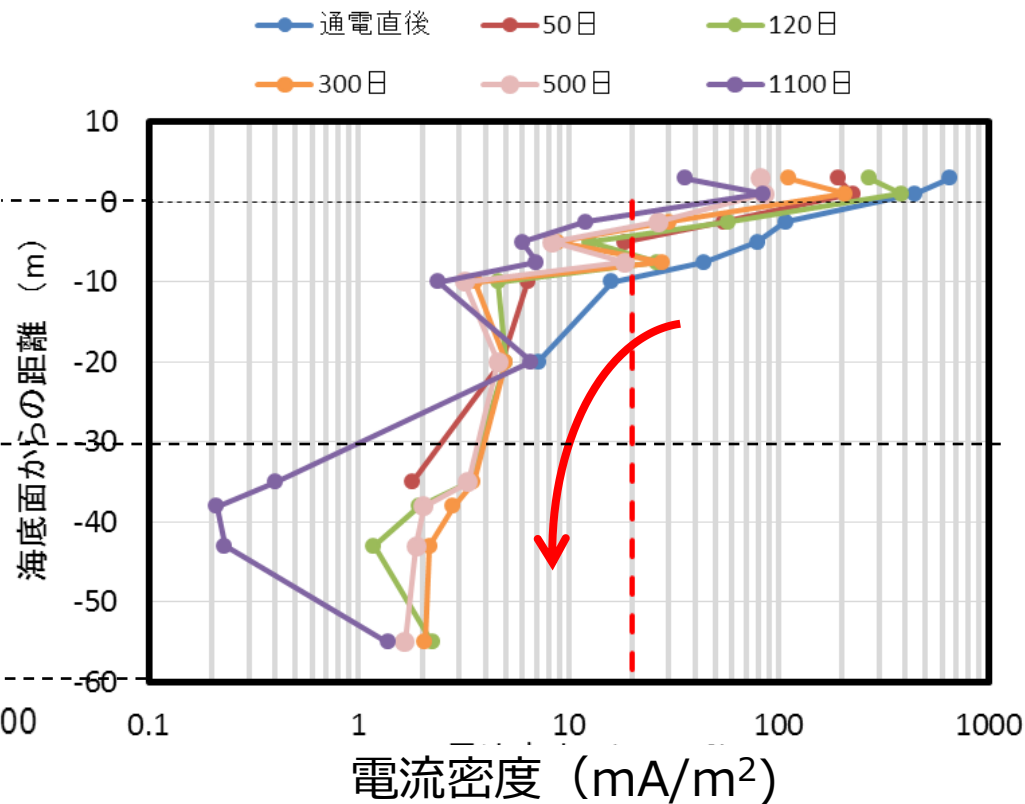
流入電流密度の経時変化

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（土壌抵抗率）と電気防食の関係



土壌抵抗率の深度分布



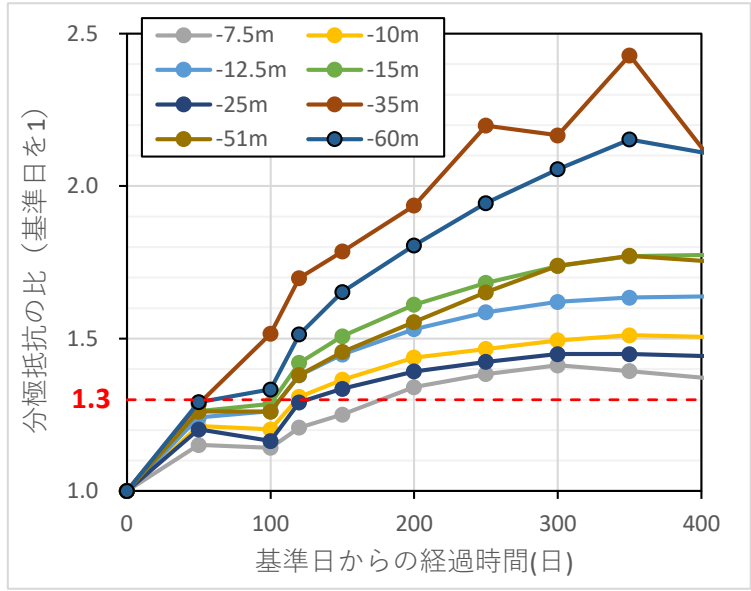
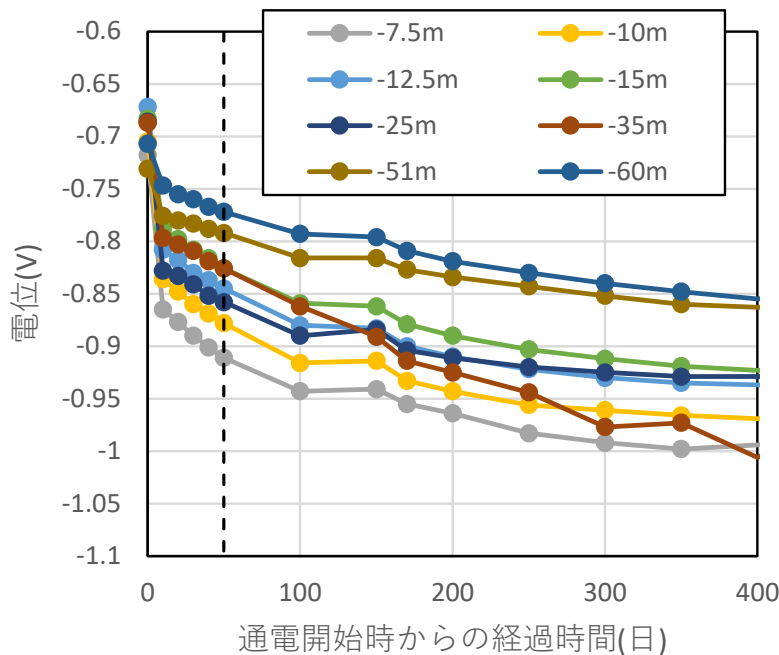
流入電流（防食電流）の深度分布

土壌抵抗率が大きい場所では、電流が低減



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

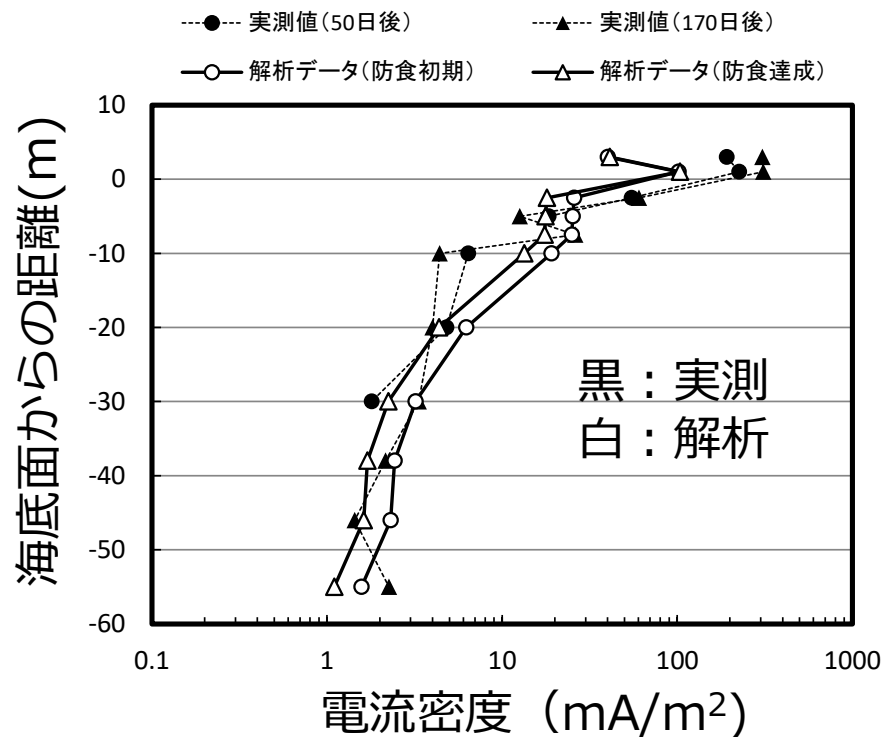
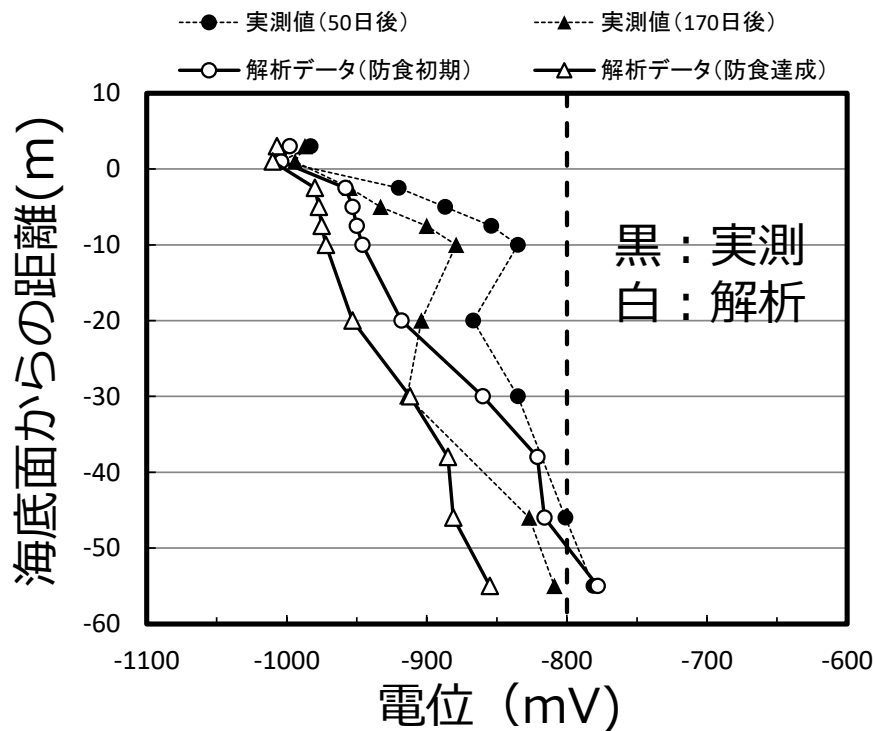
羽田空港D滑走路・連絡誘導路における鋼管杭の電気防食試験および数値解析の適用

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。

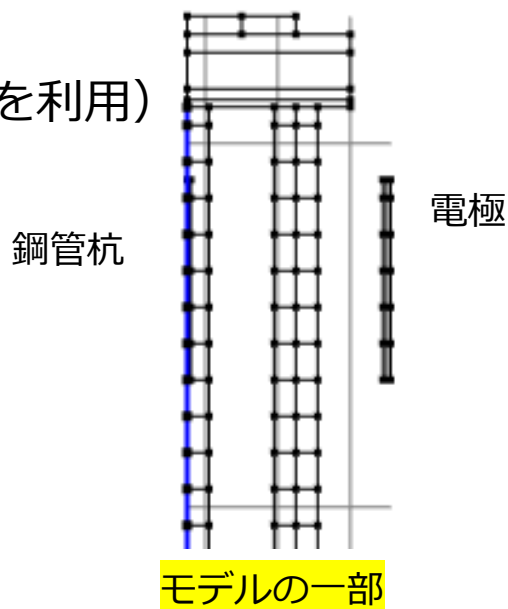


土質特性を考慮した解析手法を防食設計に取り入れることは可能

数値解析：解析方法、入力条件（パラメータ）

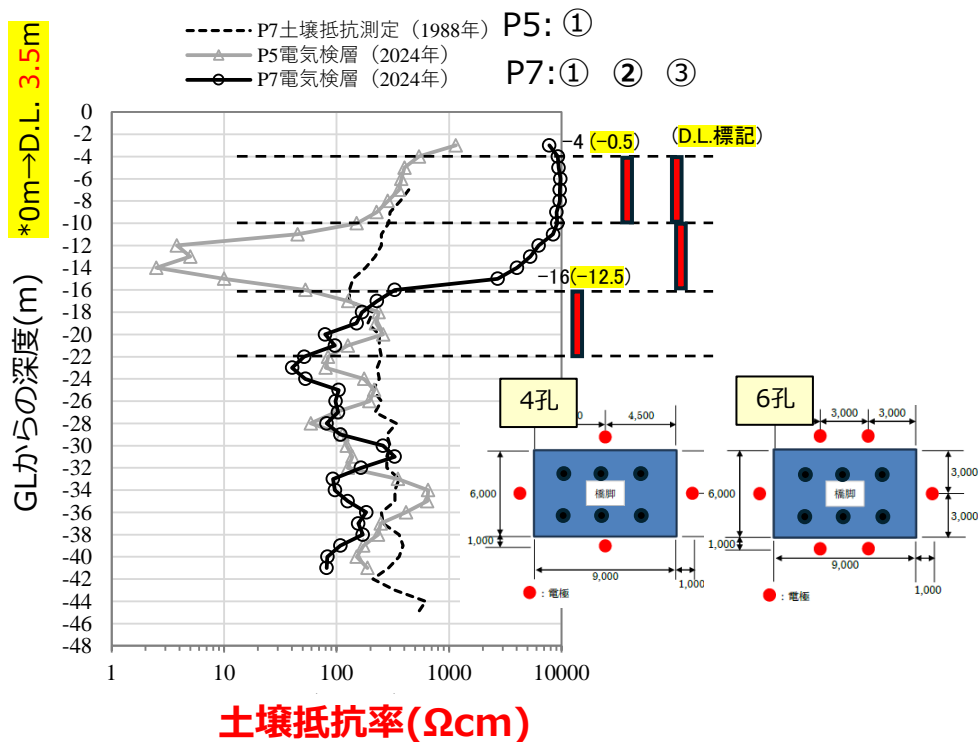


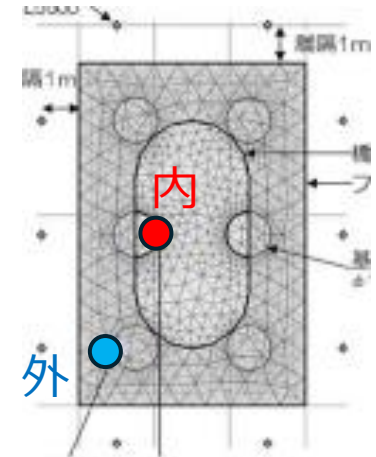
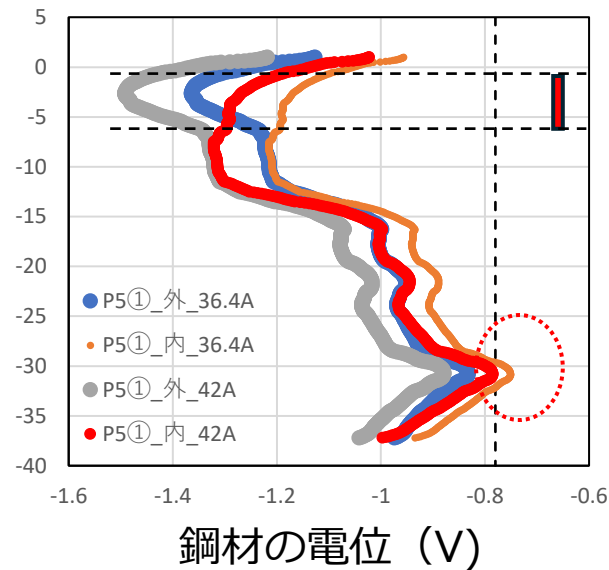
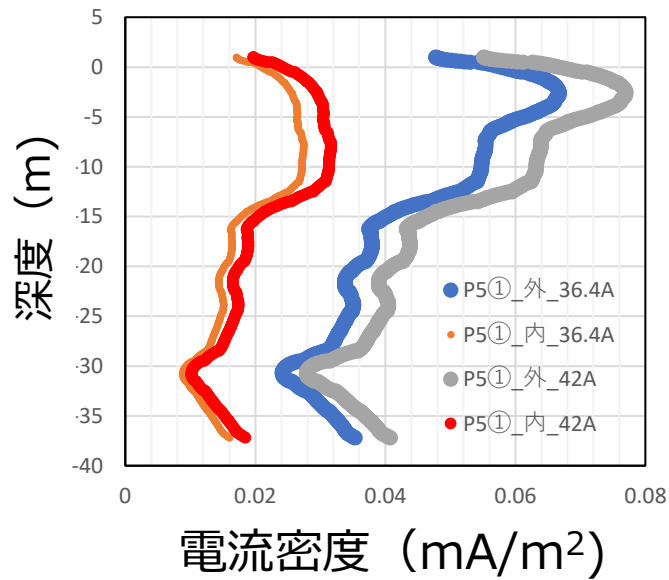
- ・有限要素法
（市販のソフトを利用）



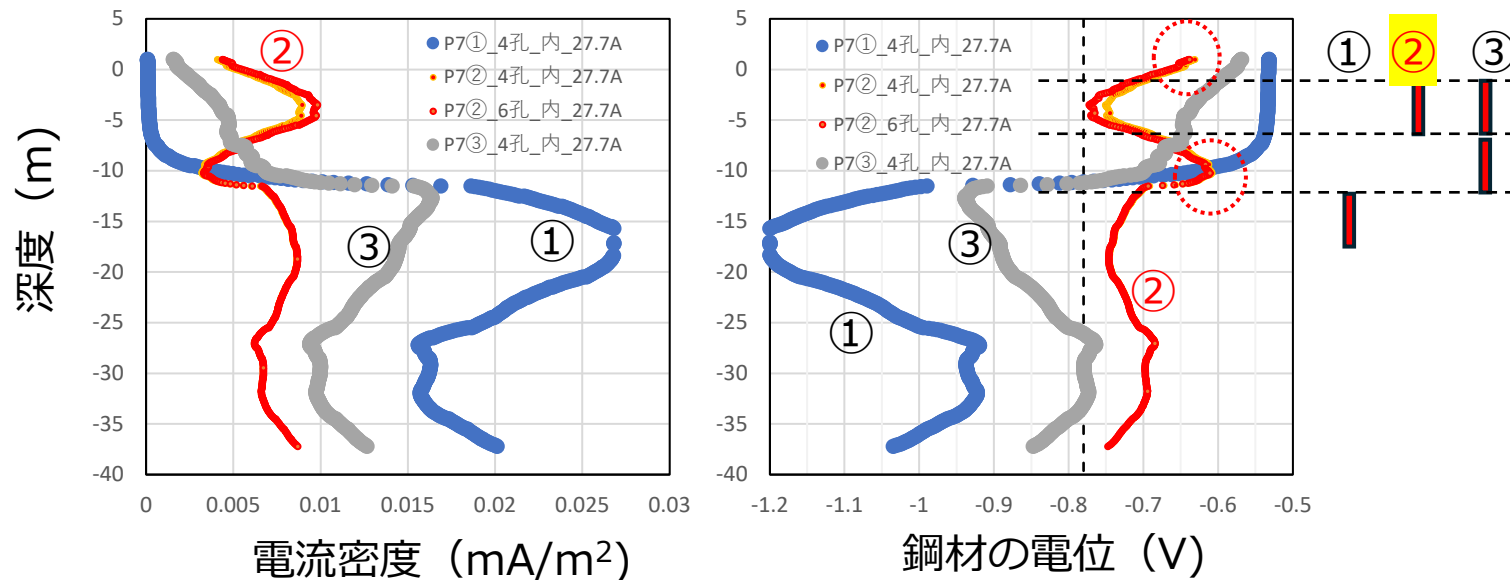
入力パラメータ

環境	・ 土壌抵抗率
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





- ・ 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))



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）

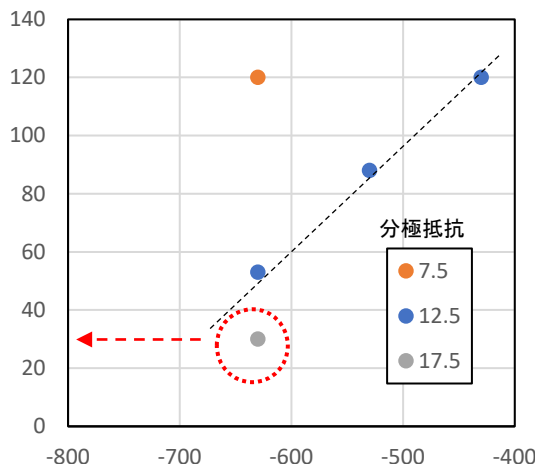


パラメータ（自然電位、分極抵抗）の設定が課題

数値解析：パラメータの感度分析結果

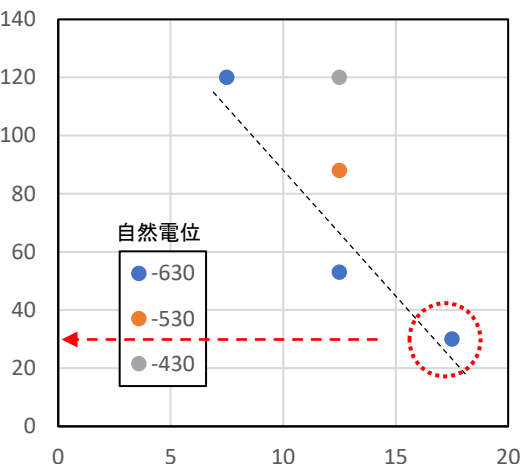


防食電位を満足する電流量(A)



自然電位(mV)

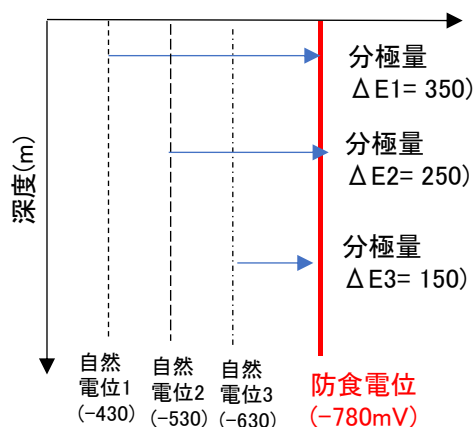
防食電位を満足する電流量(A)



分極抵抗(Ωm²)

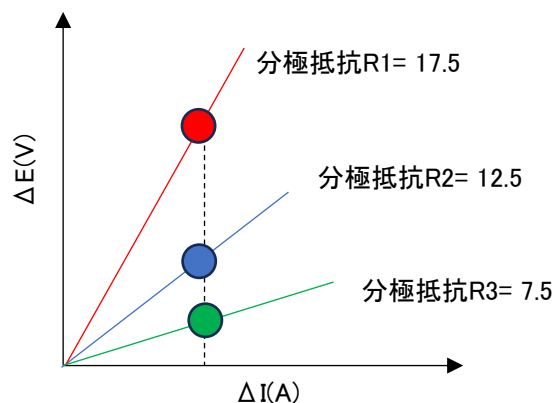
自然電位が防食電位に近いほど、
分極抵抗が大きいほど、
必要電流量は少なくて済む

電位(mV)



自然電位(無通電時の電位)が大
→防食電位までの分極量 ΔE 大

分極抵抗 $R = \Delta E / \Delta I$ (傾き)



ある同じ ΔI に対し、
 R 小(大)→ ΔE 小(大)

机上、室内試験では
設定困難
→**現地試験**による検証

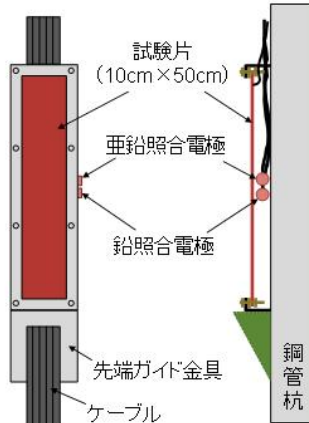
数値解析：パラメータ設定のための現地暴露試験



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。

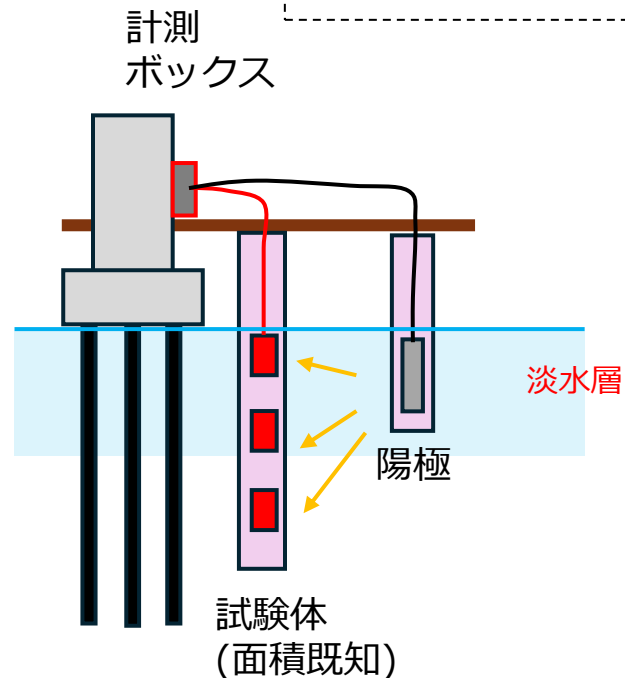
試験片 : □ 10*50cm



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

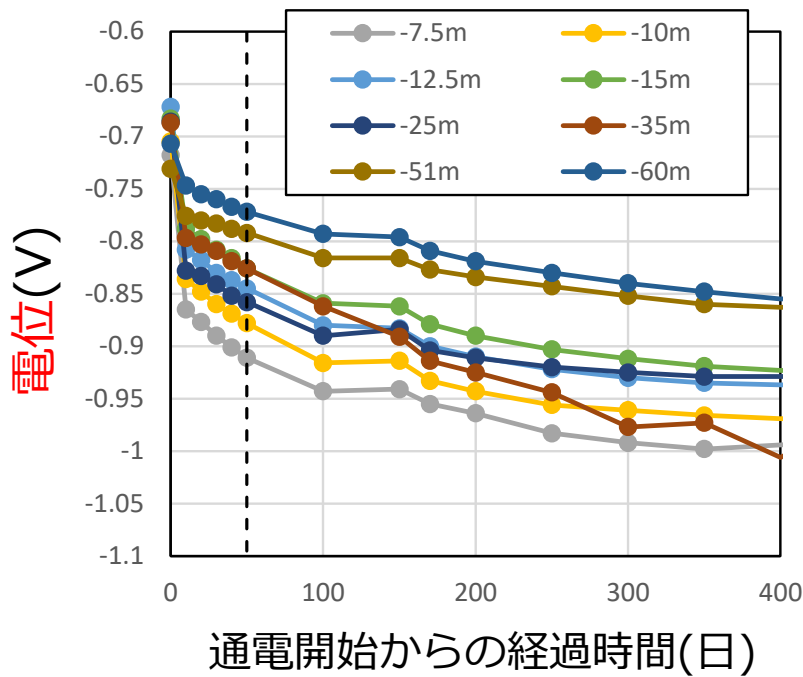
※P7のモニタリング
孔周辺を想定
(磁気探査済)



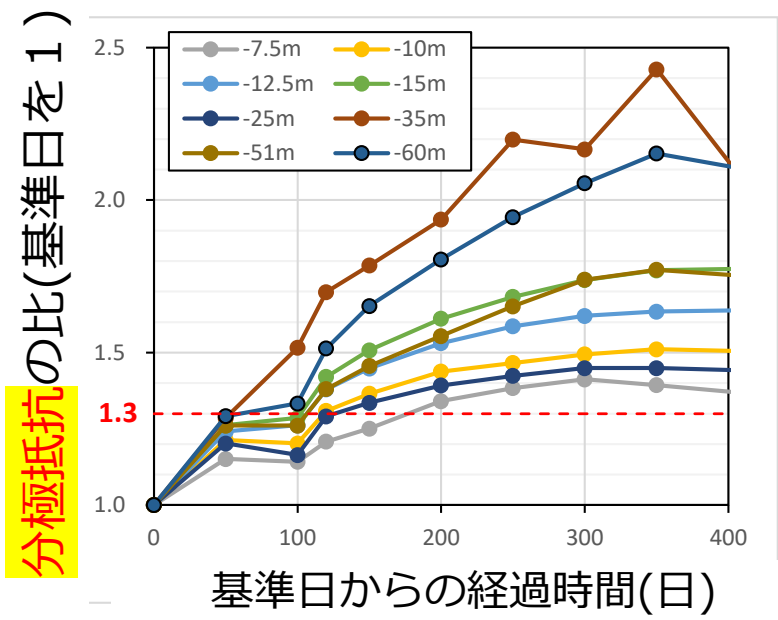
- ・ 削孔後に試験体を埋設
- ・ 電位，電流密度を連続計測
- ・ 計測期間：0.5年程度

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

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

R6成果まとめ, 今後の課題



電位

- ・汀線（海）から離れると電位が悪化（特に埋立側）

土壌抵抗率

- ・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（土壌抵抗率）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

- ・土壌抵抗率の影響が大きく現れる．土壌抵抗率が高い場合，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