

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



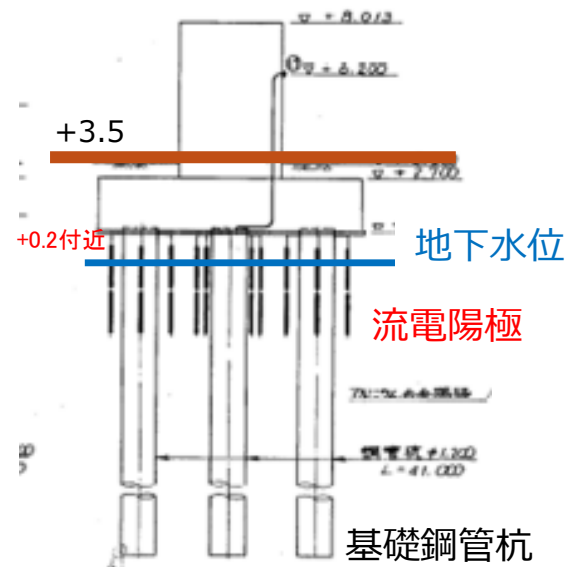
流電陽極の「設計耐用年数（**30年**）」に至り、
防食の更新を検討

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
- ・特殊な地盤環境（琉球石灰岩，海岸近傍の埋立地盤）
- ・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



上述の特殊な条件下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

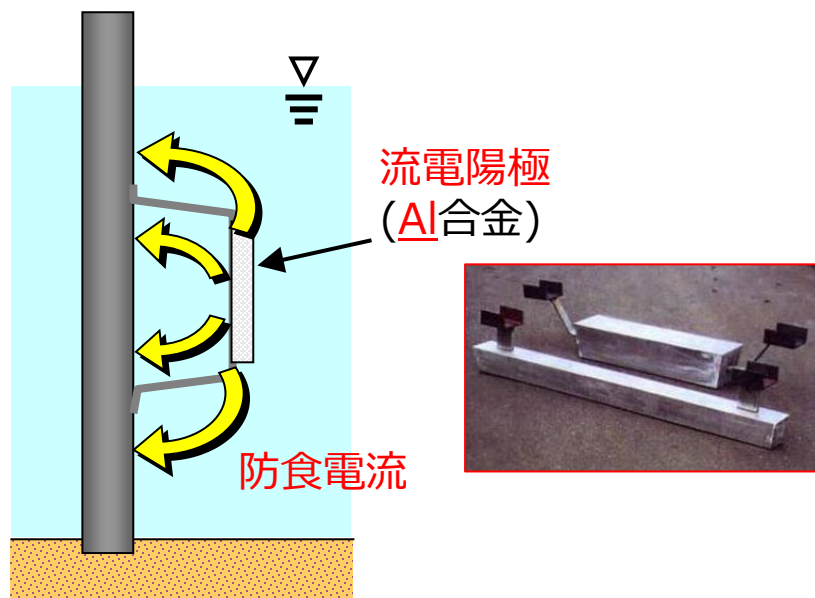
●昨年度の主な成果

●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

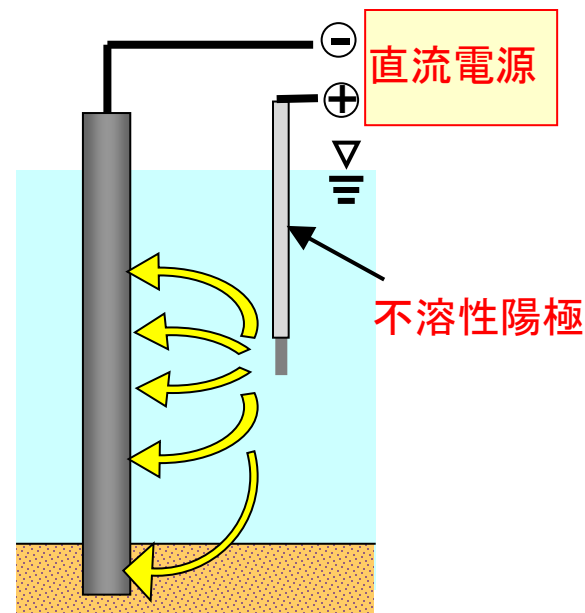


流電陽極方式



- ✓ 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

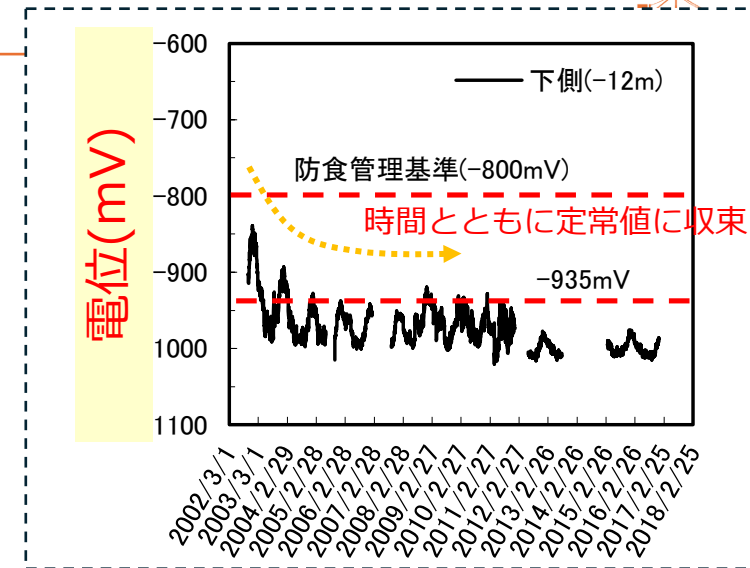
外部電源方式



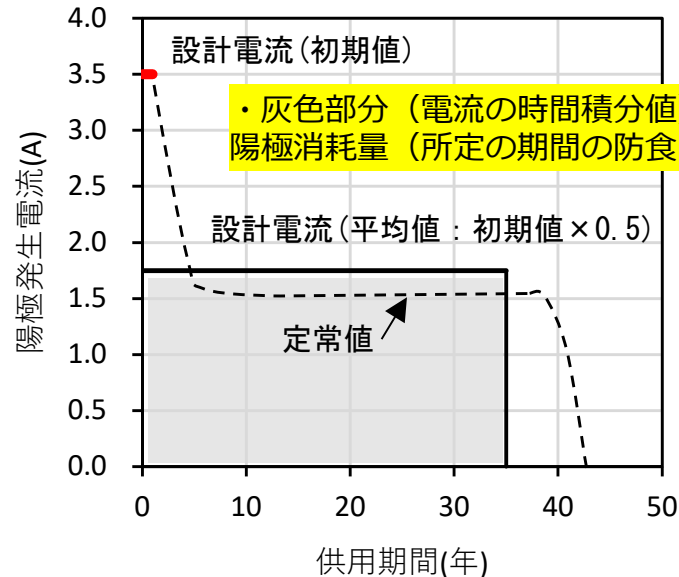
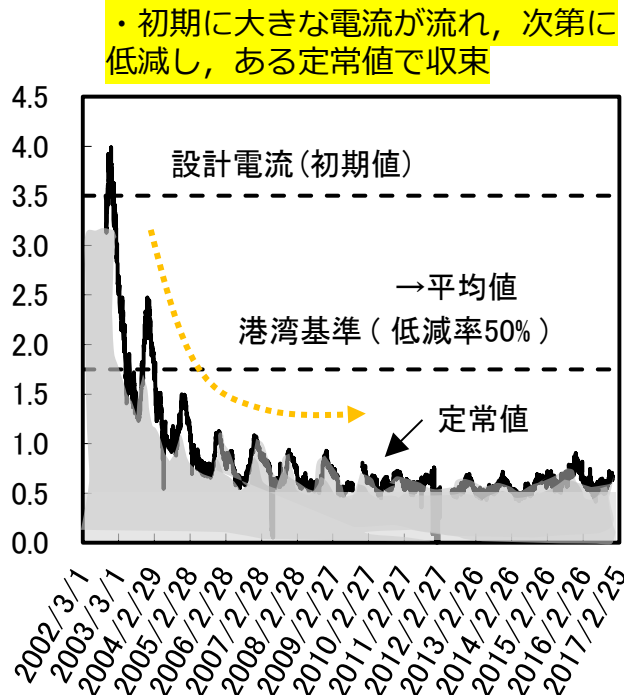
- ✓ 河川域や、環境が一様でない場合
*モノパイルの場合も
- ✓ 既設の土中構造物に適用する場合
（大電流が流せるため、陽極が比較的少数で対応可能）

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



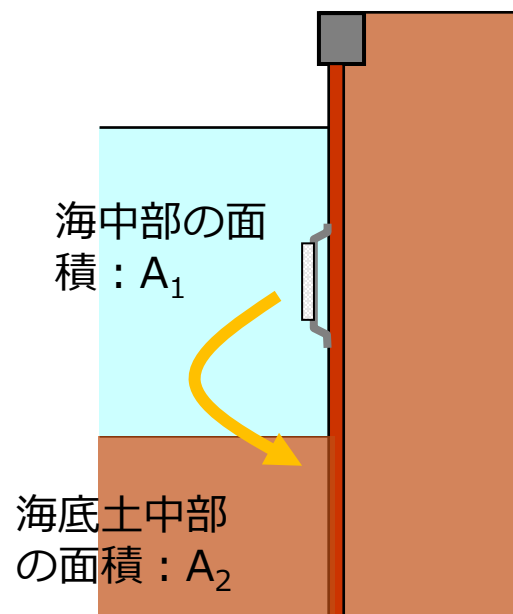
必要な陽極発生電流（＝陽極質量）A
＝防食電流密度： A/m^2 ×防食対象面積： m^2

・ **海中**：初期値は100 mA/m^2 が標準で、定常時は半分の50 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 mA/m^2 ，定常時は半分の10 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

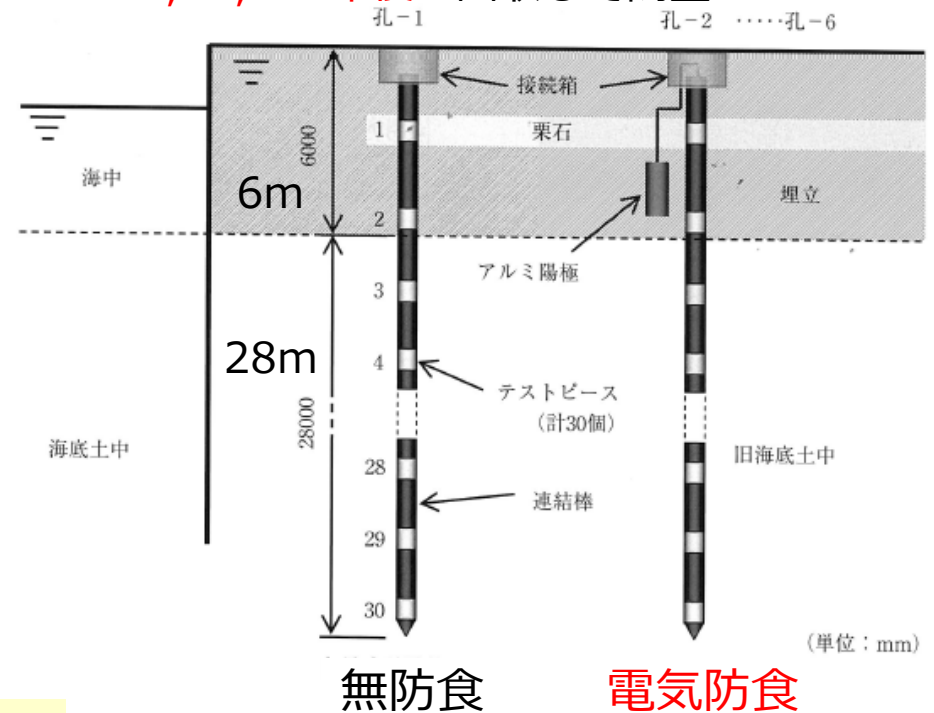


- 電気防食について
 - ・方式
 - ・特性と設計概要
- 橋脚の基礎鋼管杭に電気防食が適用された経緯 ※当初設計時
 - ・那覇港・土中部での暴露試験 (1979～1994)
- 昨年度の主な成果
- 本研究での検討内容

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

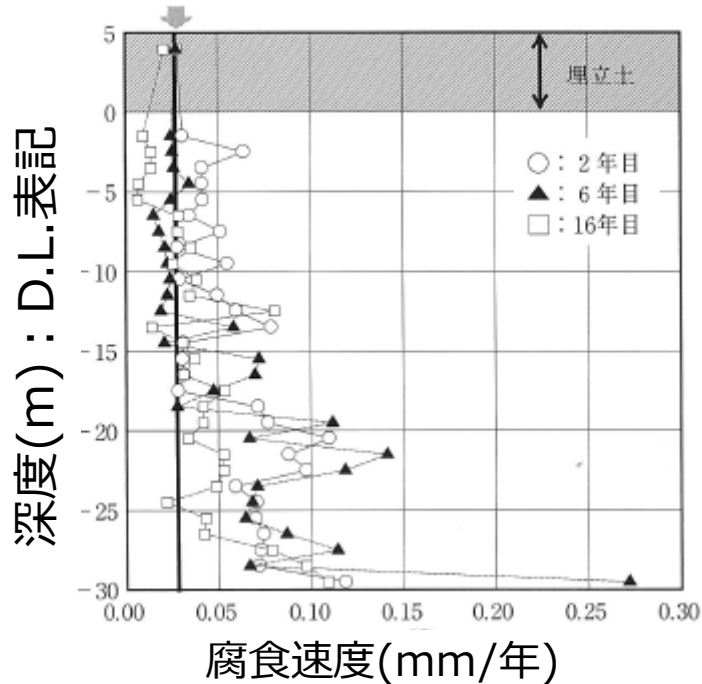
実施時期：1979.2～1994.12 (16年間)

那覇土中での暴露試験：結果の一例



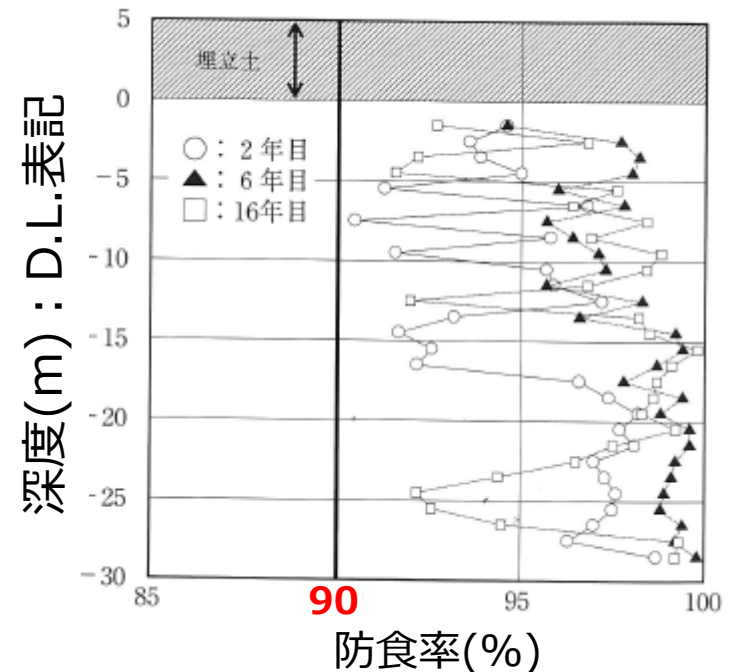
腐食速度（無防食時）

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）



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

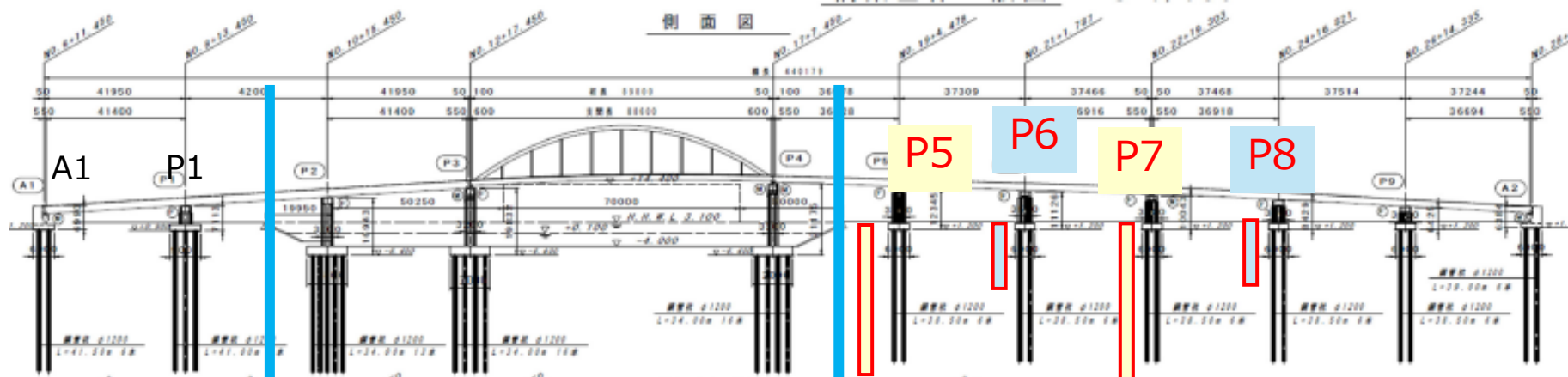
90%以上を確保
→防食出来ている

→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
- 昨年度的主要成果
- 本研究での検討内容
 - (1) 電位, 水質, 土壌抵抗率の実態
 - (2) 暴露試験体を用いた電気防食特性に関する検討
(設計防食電流密度の推定)
 - (3) 暴露試験結果を活用した数値解析の検討
(電極配置の最適化の検討が主)

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. 土壌抵抗率*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

・ 土壌抵抗率： P6, P8の表層部（G.L.から15m程度）で追加実施

・ 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

・ （土壌抵抗率を基にした）数値解析： 各種パラメータを設定して実施

モニタリング孔 および 電位測定



照合電極挿入管



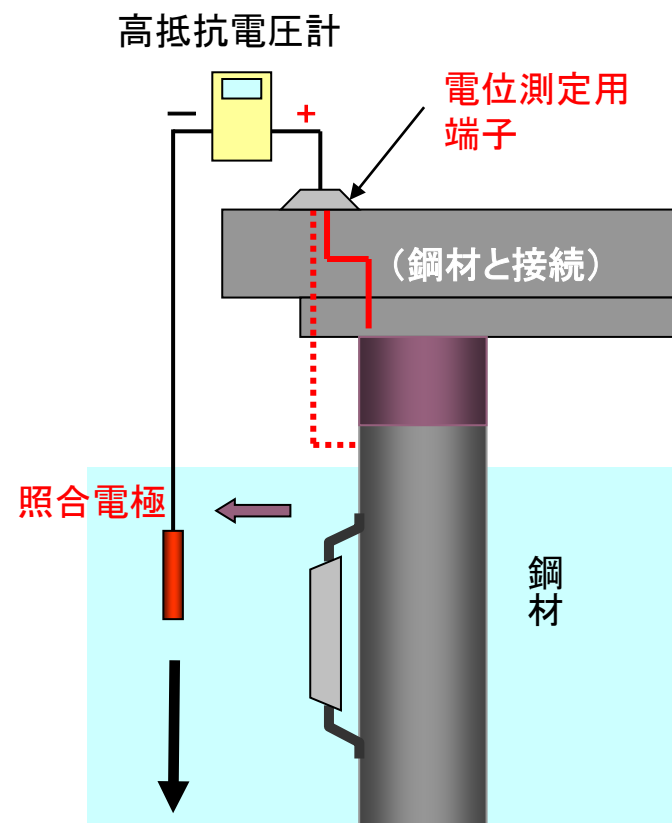
照合電極挿入管設置状況



ボックス設置状況



P7のモニタリング孔

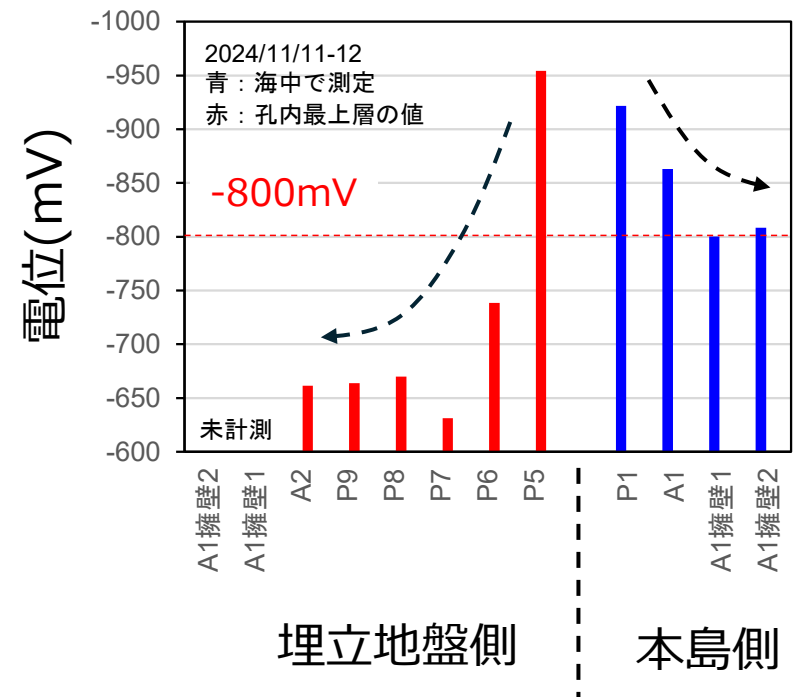
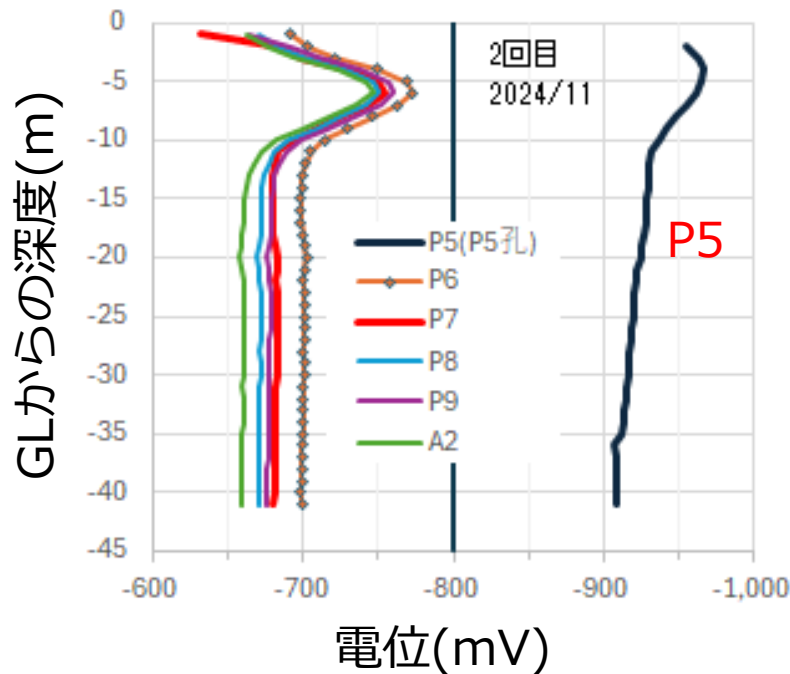


電位測定方法（海中の場合）

鋼材の電位



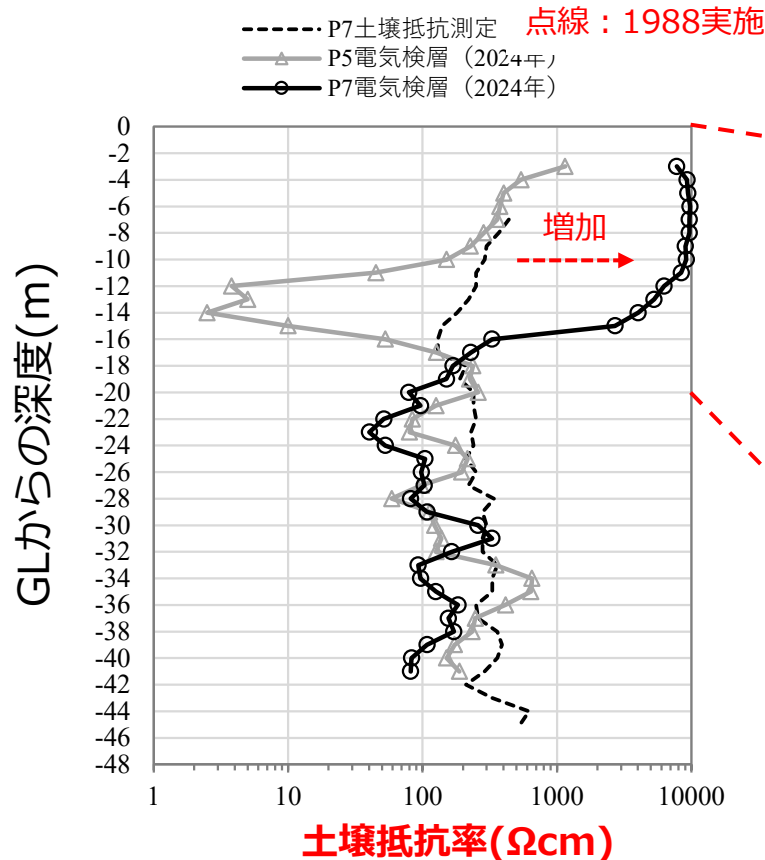
- ・定期点検時に測定。防食管理電位**-800mV**以下だと「防食されている」と判定
- ・孔内にセンサ（**照合電極**）を投入し、深度分布を測定



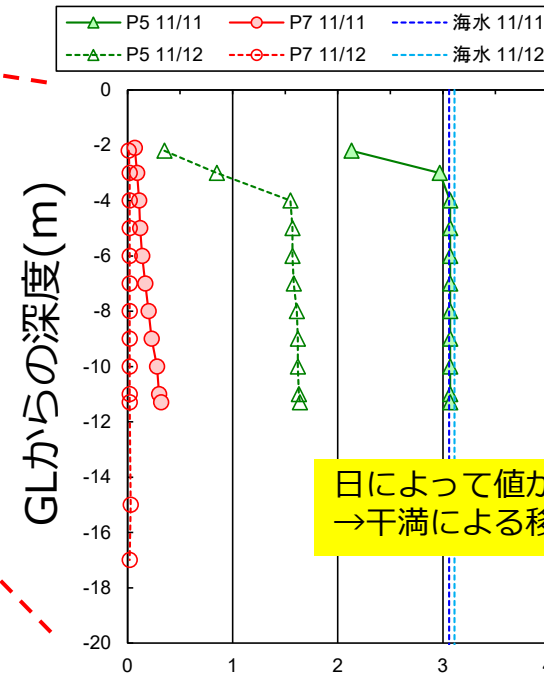
- ・地表面付近（**A1陽極付近**）で小さい値を示した
- ・埋立側では**P5のみ良好**
→元設計でOK

・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 孔内の塩分(NaCl)濃度 の深度分布



2024/11-12に計測



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

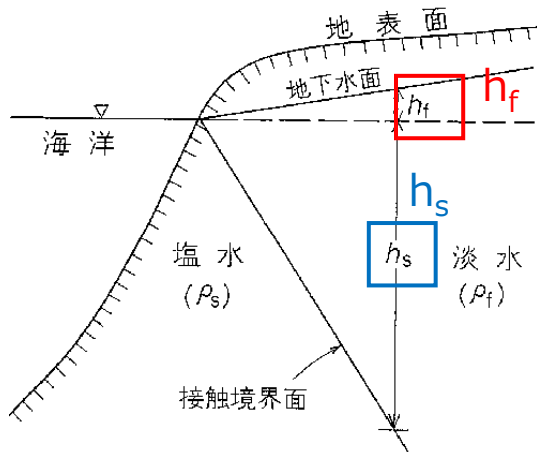
P7孔内 : 「淡水」に近い

→ 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。

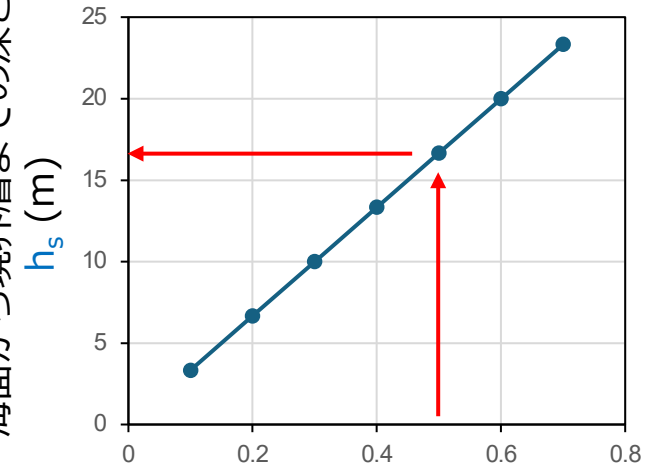
ρ_f : 淡水の密度。

ρ_s : 塩(海)水の密度。

h_f : 海面から地下水面までの高さ。

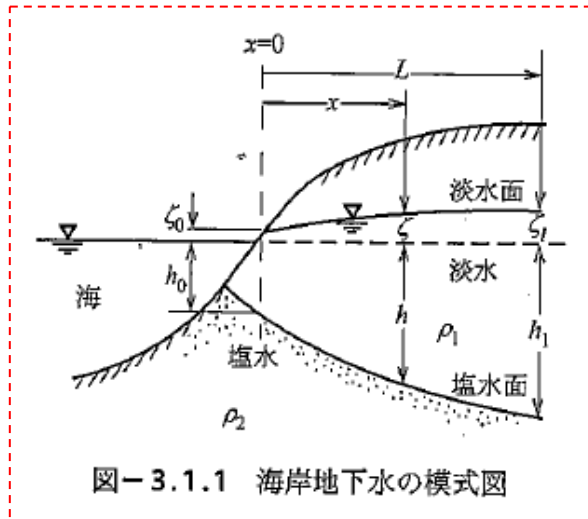
$h_f = 0.5\text{m} \rightarrow h_s = 17\text{m}$

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



技術基準
上巻, p.346

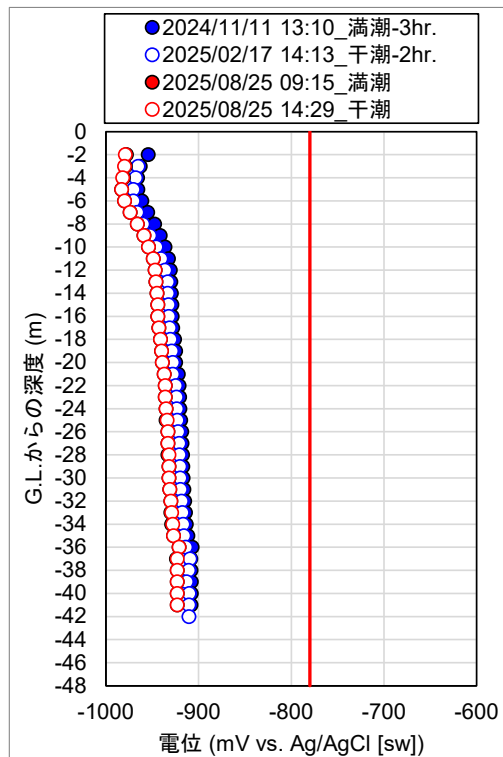


- 電気防食について
 - ・方式
 - ・特性と設計概要
- 橋脚の基礎鋼管杭に電気防食が適用された経緯
- 昨年度的主要な成果
- 本研究での検討内容
 - (1) 電位, 水質, 土壌抵抗率の実態
 - ・干満に伴い変化?
 - ・季節変動?
 - (2) 暴露試験体を用いた電気防食特性に関する検討
(設計防食電流密度の推定)
 - (3) 暴露試験結果を活用した数値解析の検討
(電極配置の最適化の検討が主)

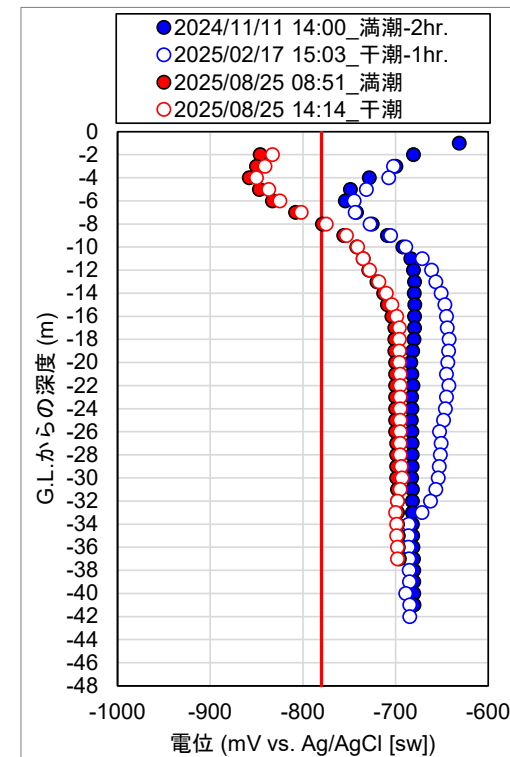
鋼材の電位： R7 d 成果



P5（海の近く）



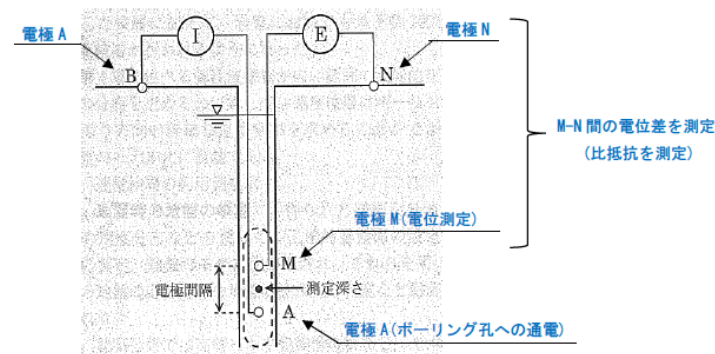
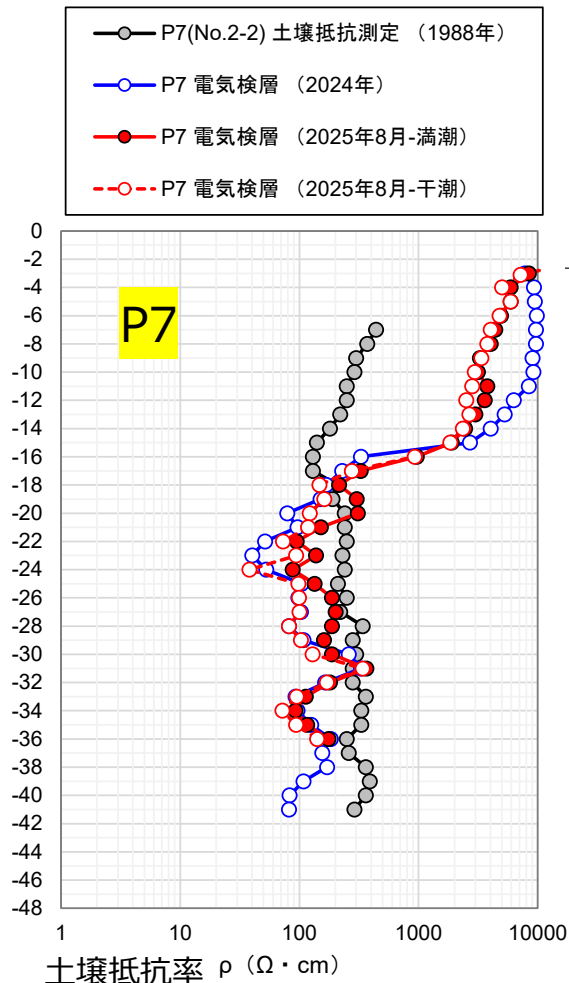
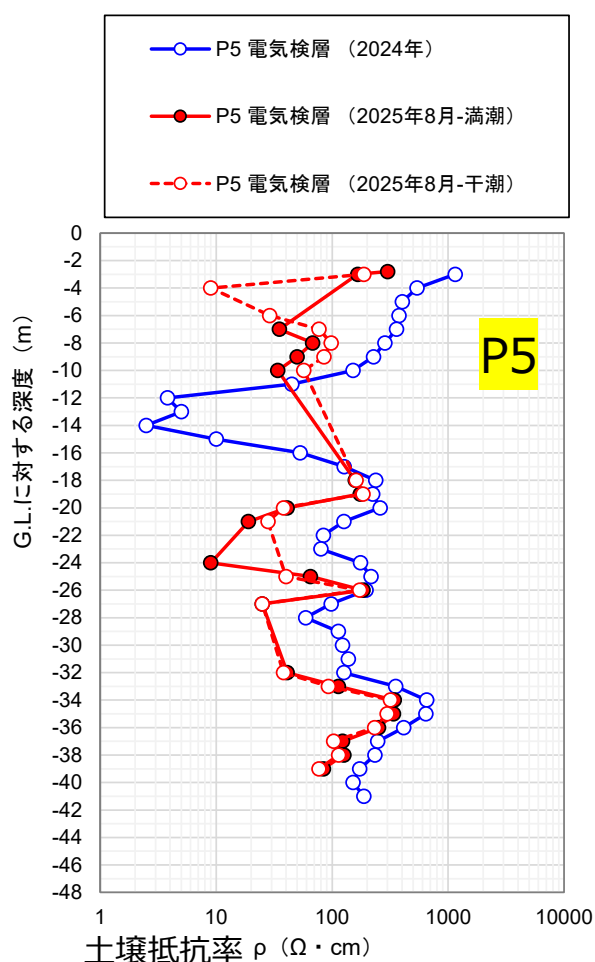
P7（海から少し離れた位置）



- ・ 昨年度と同様（防食状態は良好）
- 元設計（防食電流密度 $20\text{mA}/\text{m}^2$ ）でOK
- ・ 干満の変化はほぼ無し

- ・ 昨年度とやや異なる（特に浅い位置）
- 陽極周辺の環境（塩分濃度）が変化？
- ・ 干満の変化はほぼ無し

土壌抵抗率 の深度分布 : R7d

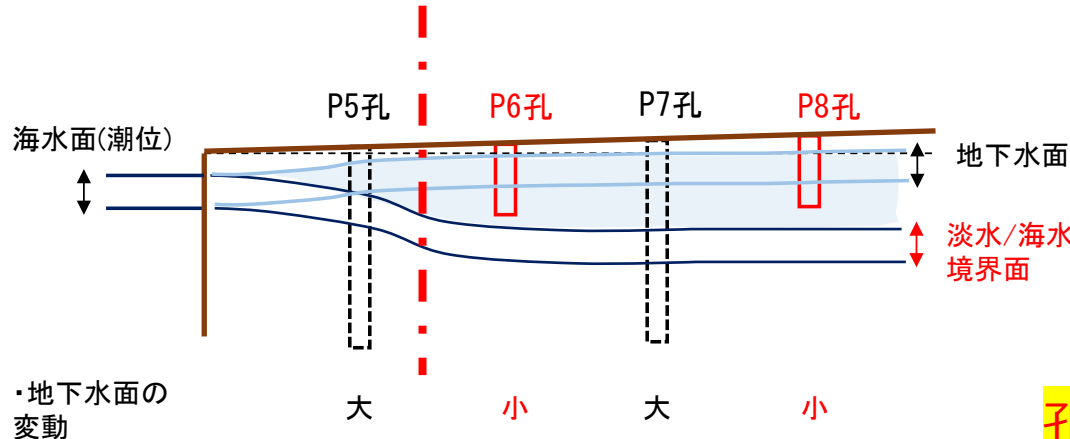
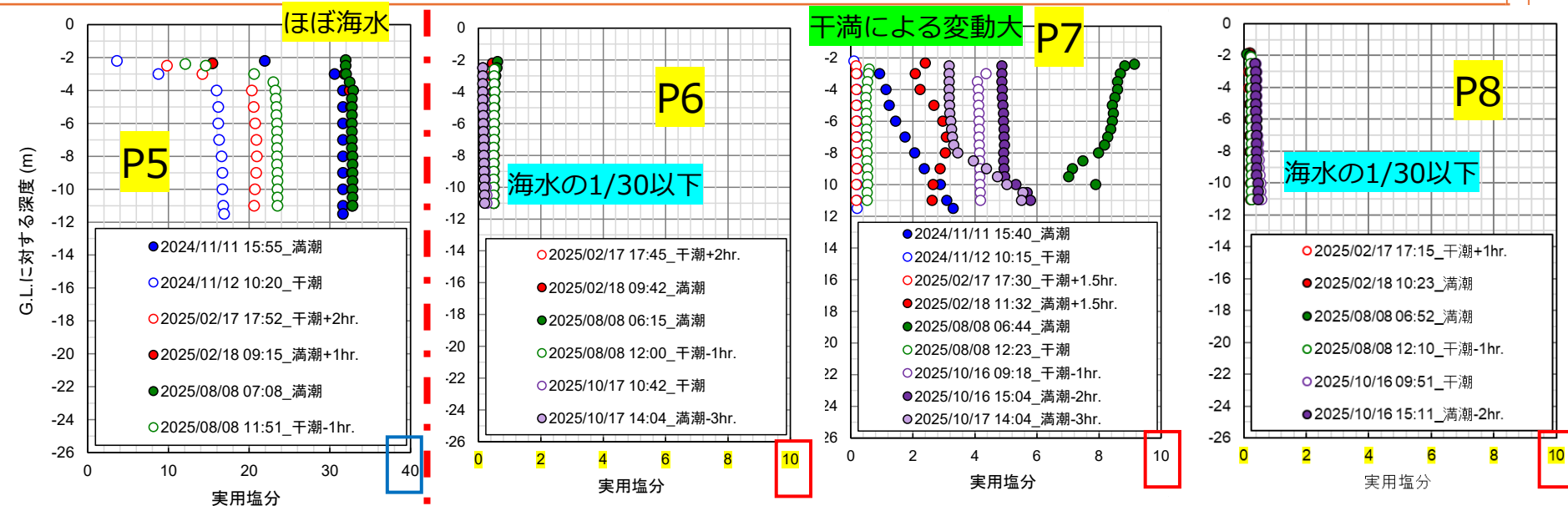


孔内（水内）に
 電極を投入して計測

- ・表層部：昨年度より低下
(深部：変化は少ない.)
- ・干満の変化はほぼ無し

- ・表層部：昨年度より低下
(深部：変化は少ない.)
- ・干満の変化はほぼ無し

孔内の実用塩分濃度の深度分布： R7d



土壌抵抗率の
変動(推測)

無

有or少

無

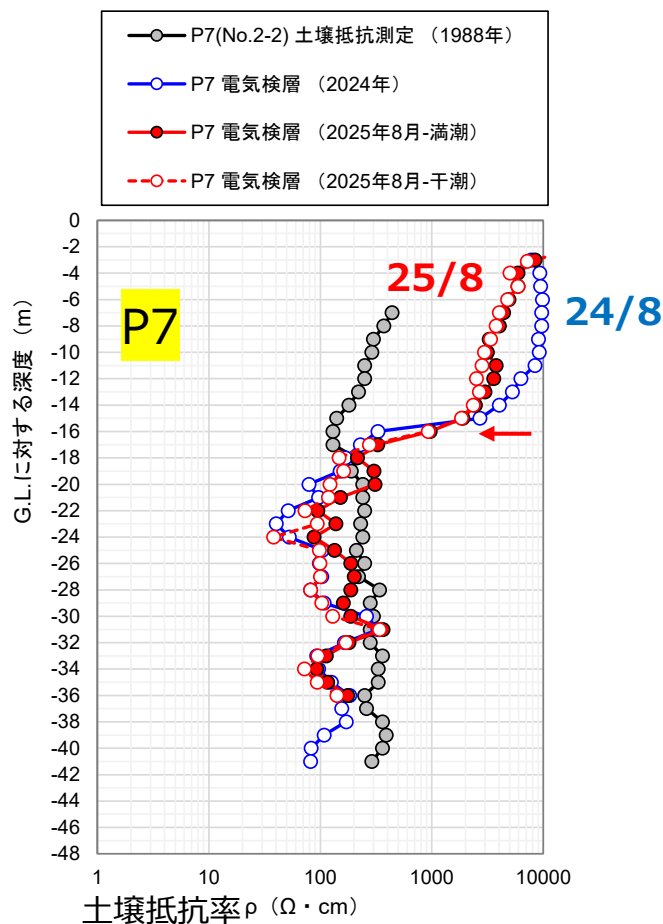
孔内で塩分が混ざっていると推測

・地下水面の
変動

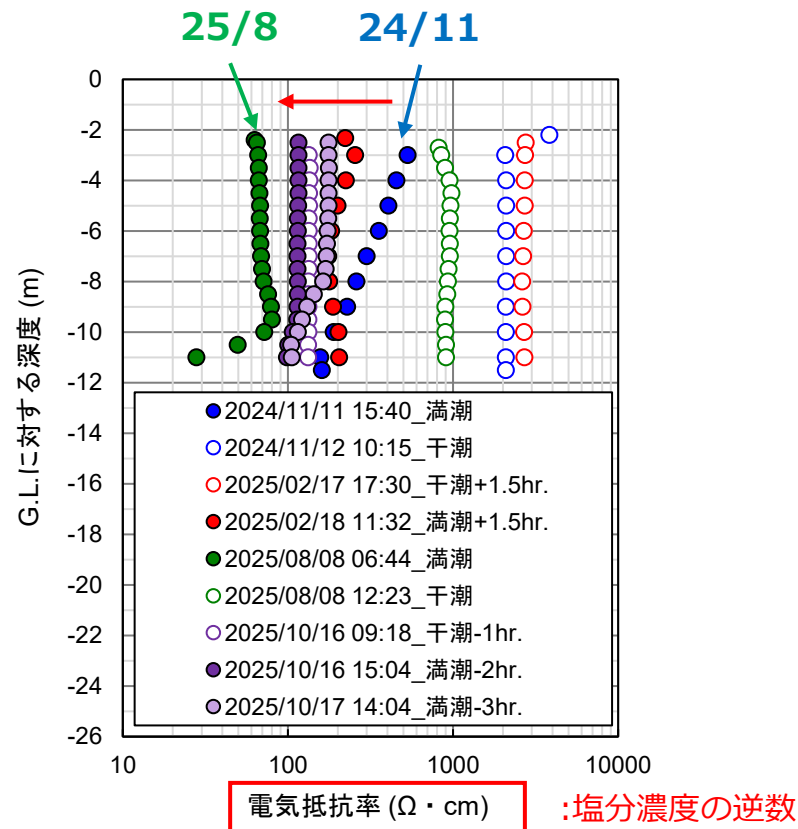
・孔内Cl濃度
・変動



土壌の抵抗率 と 孔内の水の抵抗率（塩分濃度の逆数）の関係



干満の差はない
値は減少（1月にも測定）



- 干満の差はある
- 満潮時の抵抗は減少傾向（濃度は増加傾向）

孔周辺のみが変化？ 地盤全体として変化？



- 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
 - (1) 電位, 水質, 土壌抵抗率の実態
 - (2) 暴露試験体を用いた電気防食特性に関する検討
(設計防食電流密度の推定)
 - ・ 定電位試験
 - (3) 暴露試験結果を活用した数値解析の検討
(電極配置の最適化の検討が主)

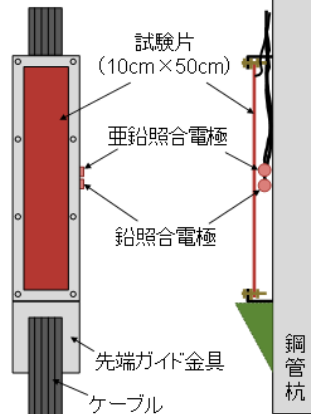
現地暴露試験 : 羽田空港で実施した試験との比較



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。

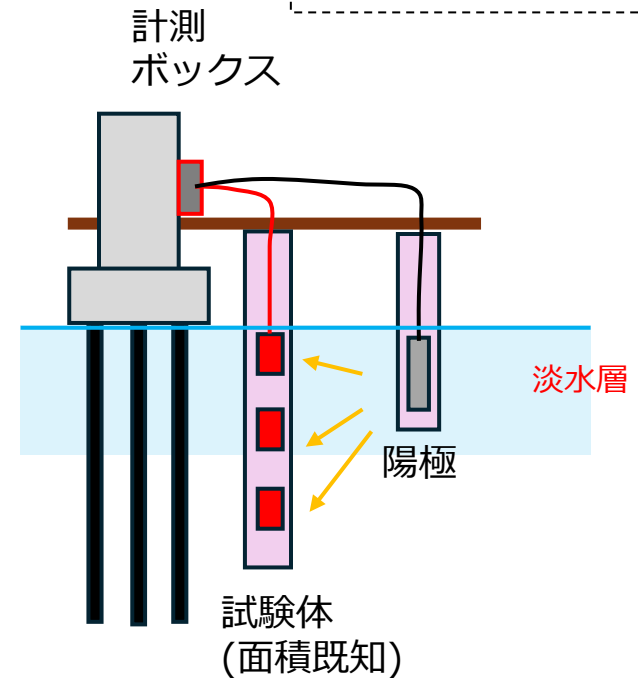
試験片 : □ 10*50cm



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

今回

※P7のモニタリング
孔周辺



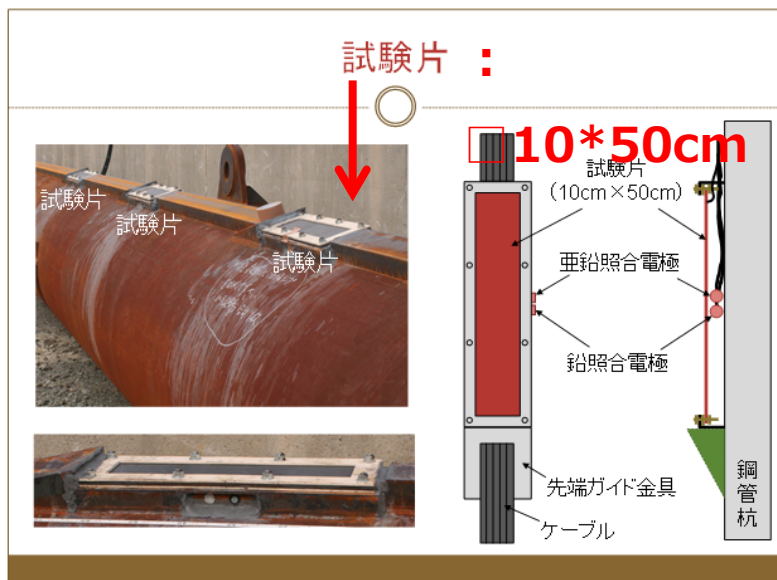
- ・ 削孔後に試験体を埋設
 - ・ 電位, 電流密度を連続計測
 - ・ 計測期間 : 0.5年程度
- ※暴露試験前に「設計値」の参考
になる各種試験を実施



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

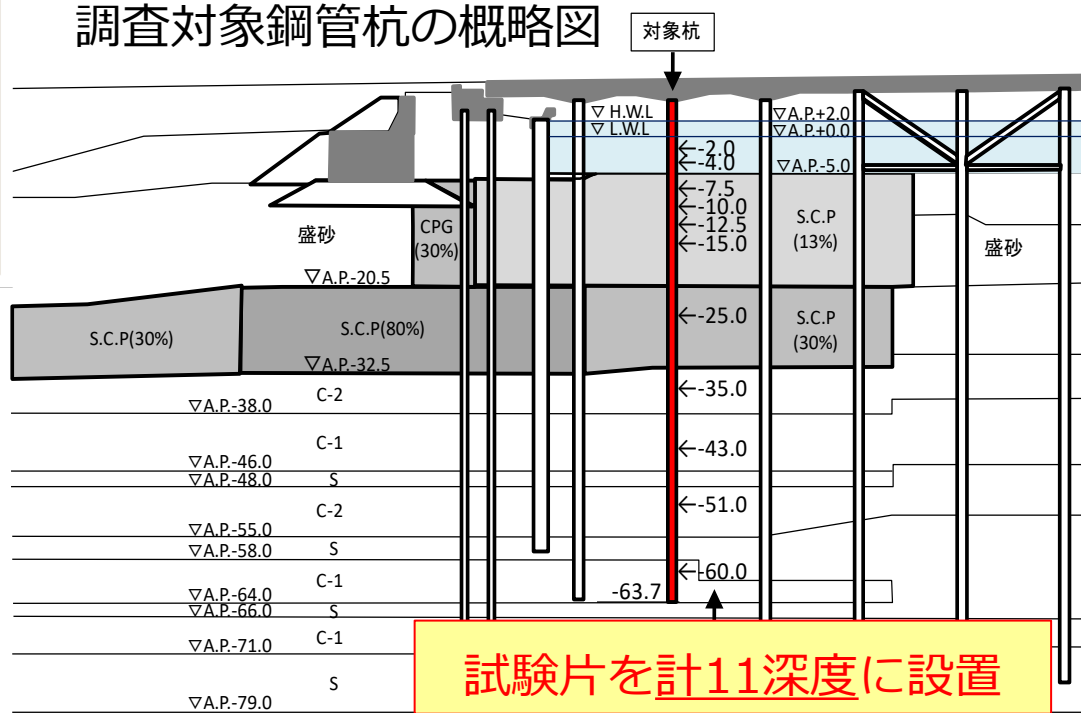
試験片の形状および測定項目



調査杭の外観



調査対象鋼管杭の概略図



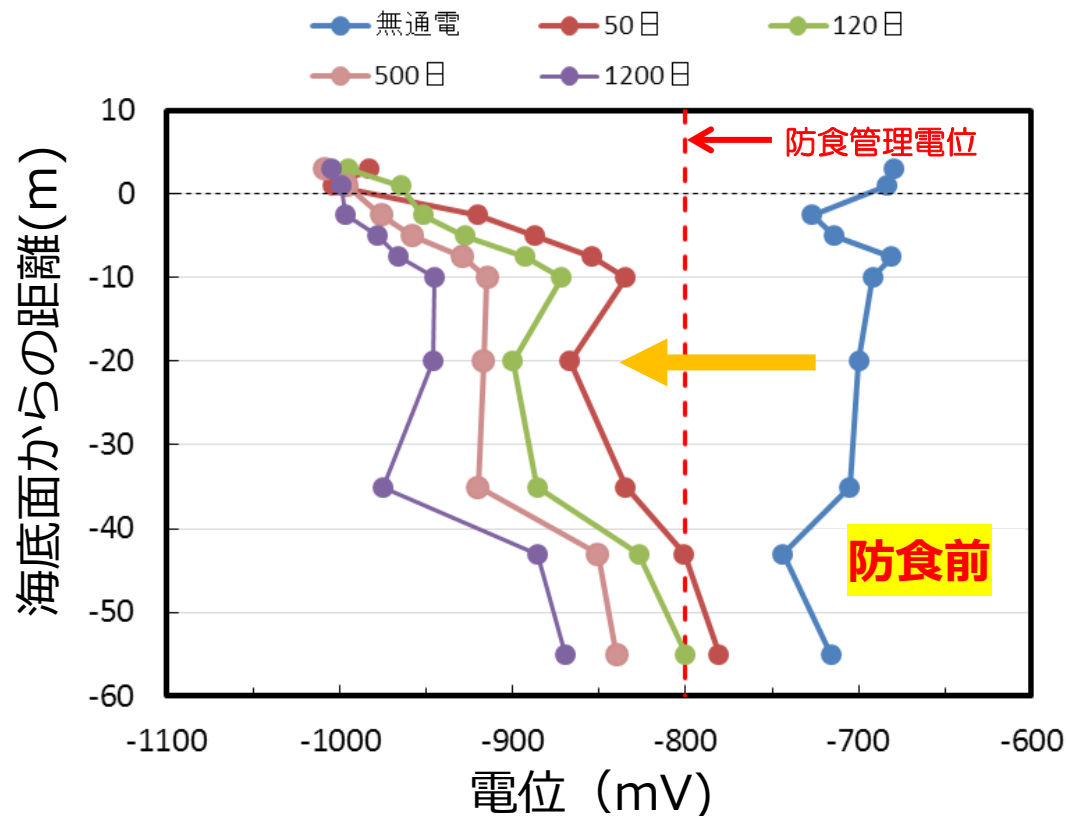
試験片を計11深度に設置

- 試験片の電位
- 試験片への流入電流
- 陽極の発生電流



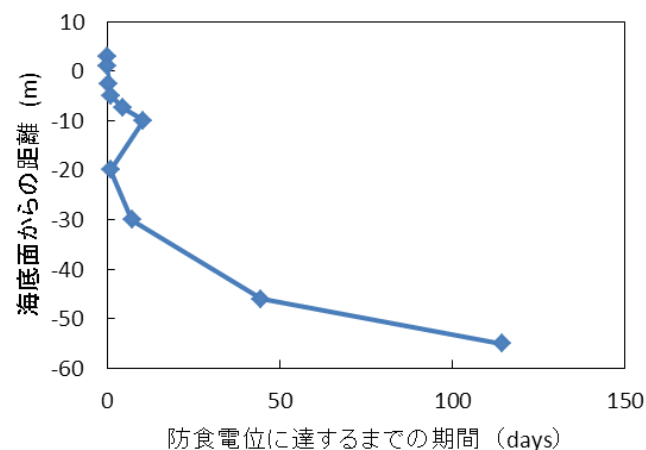
羽田空港D滑走路・連絡誘導路における鋼管杭の電気防食試験および数値解析の適用

海底土中部における電気防食の状態（電位）



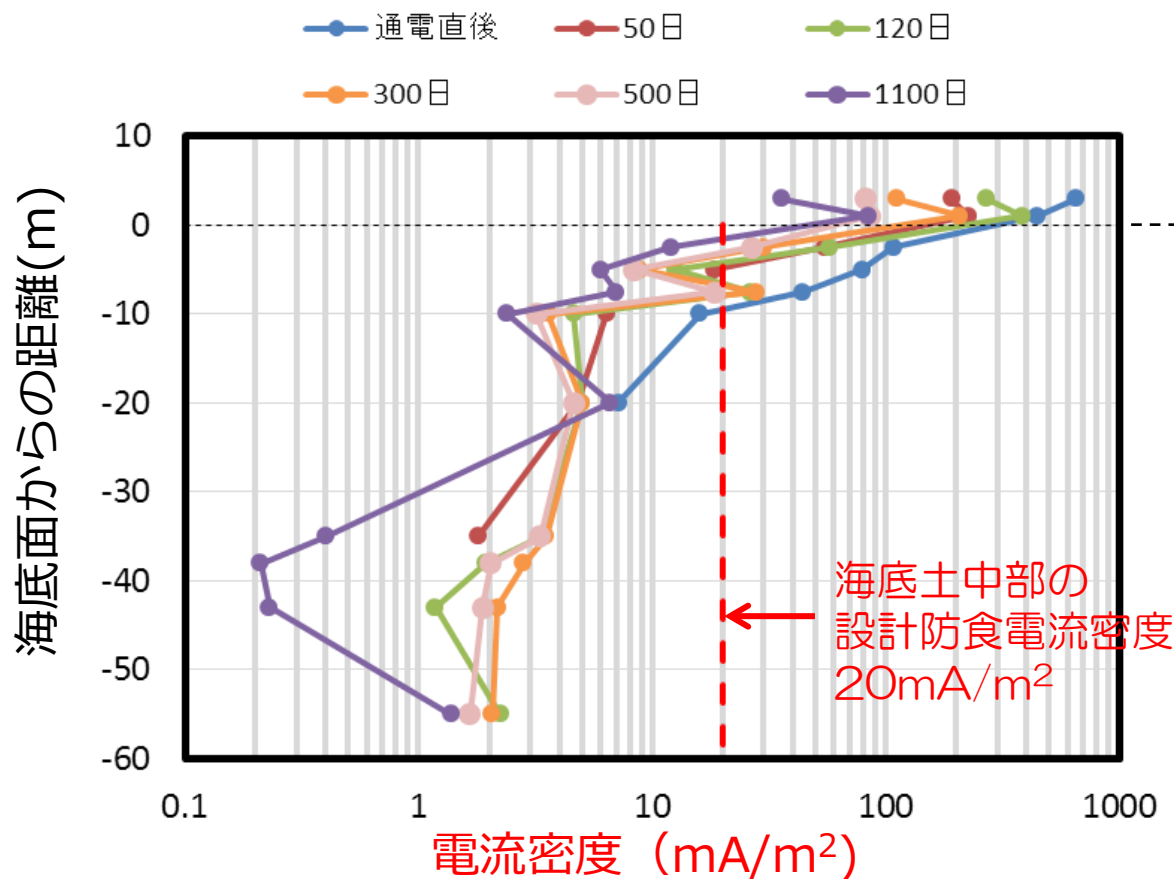
土中部の鋼材の電位分布の経時変化

- ・ 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



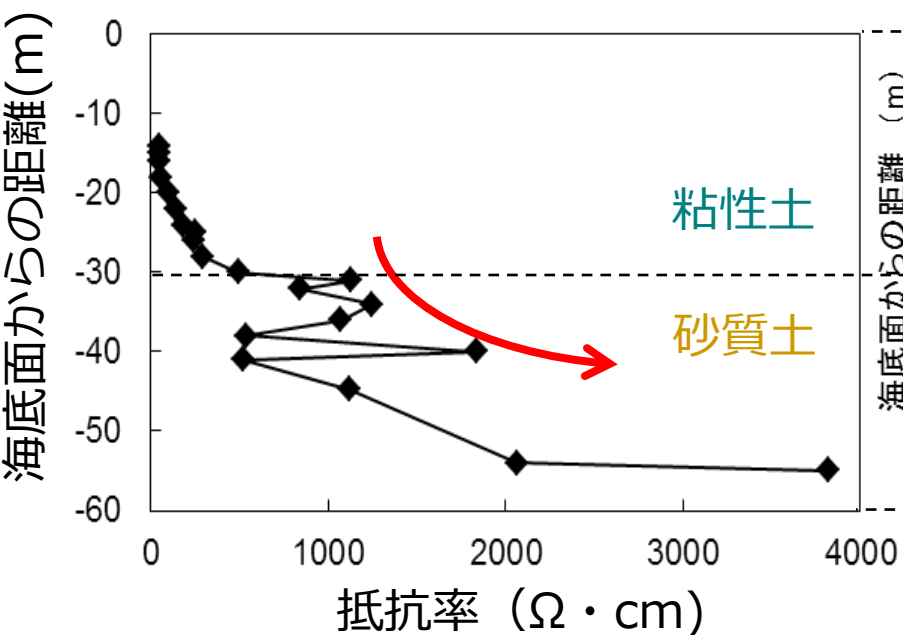
- ・ 経時的に低減・収束する傾向
- ・ 海底面付近に比べ、深い部分では流入電流密度は小さい

流入電流密度の経時変化

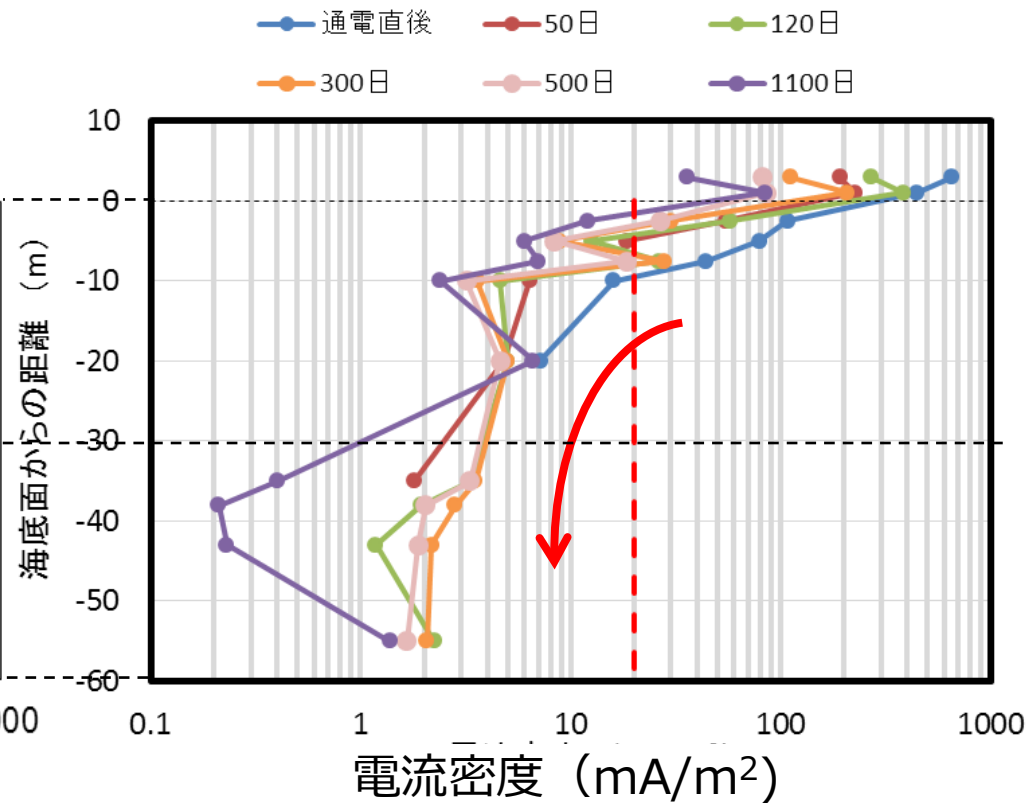


羽田空港D滑走路・連絡誘導路における鋼管杭の電気防食試験および数値解析の適用

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



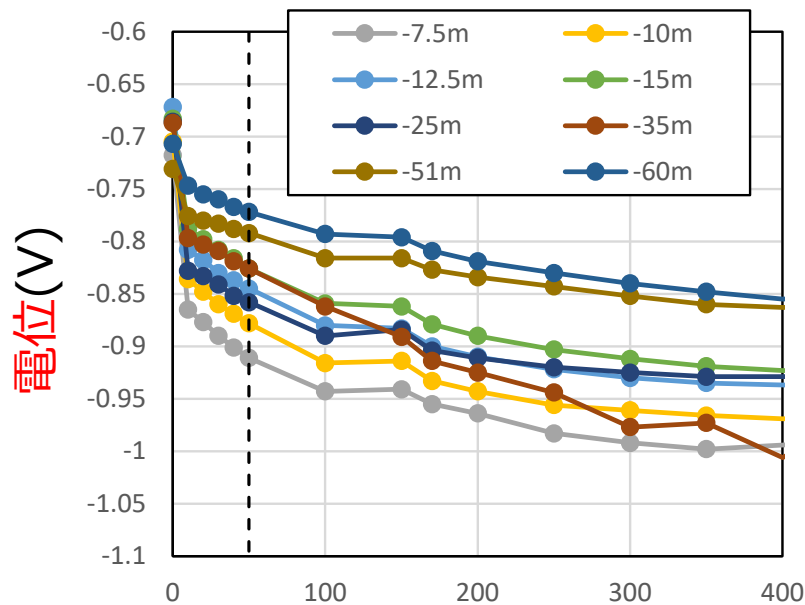
流入電流（防食電流）の深度分布

土壌抵抗率が大きい場所では、電流が低減



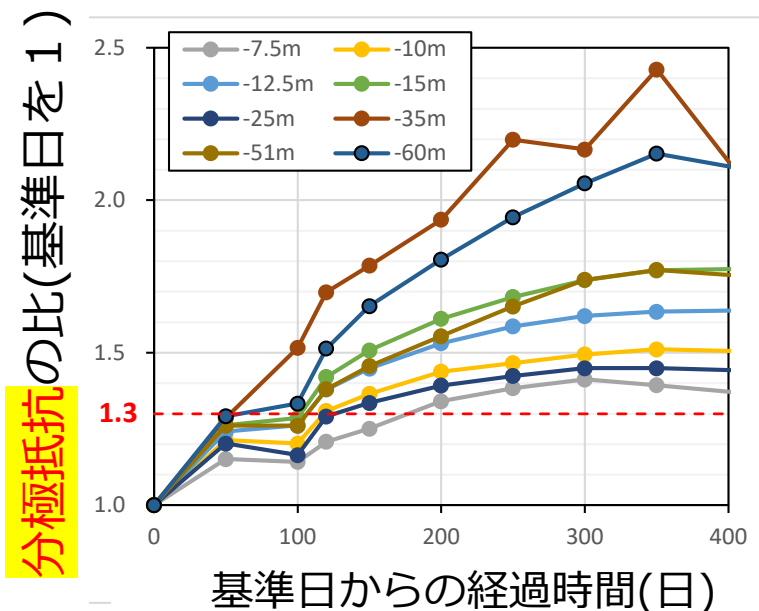
羽田空港D滑走路・連絡誘導路における鋼管杭の電気防食試験および数値解析の適用

鋼材の電位，分極抵抗の経時変化



通電開始からの経過時間(日)

時間とともに
マイナス側へシフト
(分極量が増加)



基準日からの経過時間(日)

時間とともに増加

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

暴露試験体を用いた電気防食特性に関する検討（設計防食電流密度の推定）

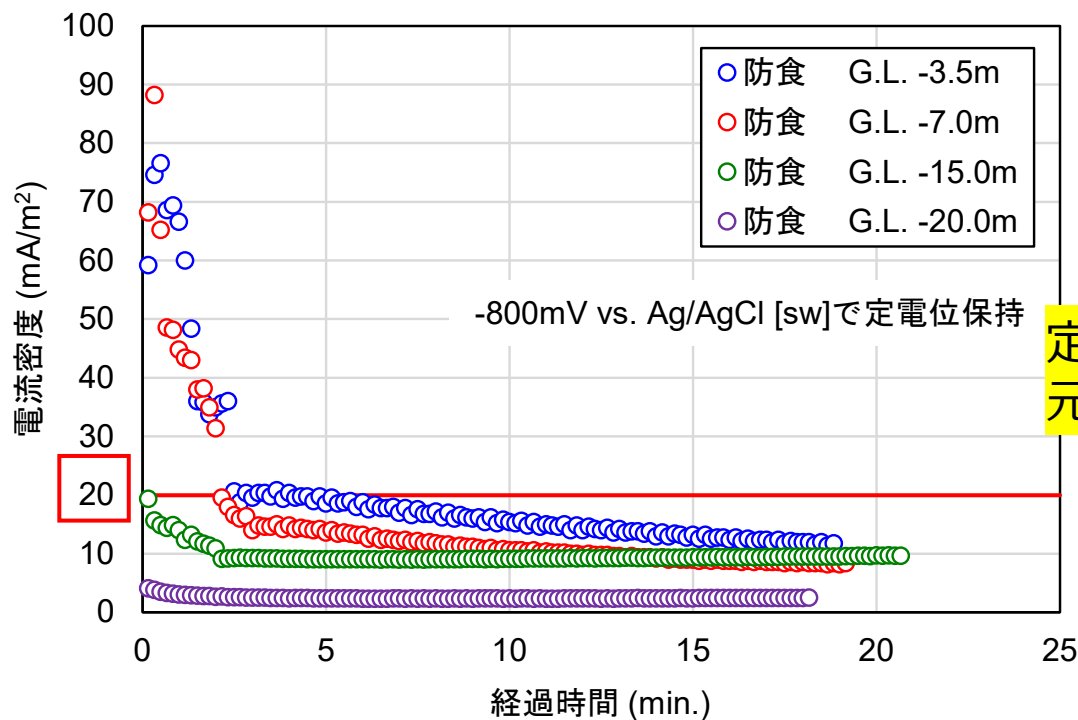


● 定電位試験

（※基準化されている方法ではない）

暴露試験前に実施

「防食管理電位（-800mV）付近で保持した際の電流密度の定常値」は
「防食初期に必要とされる電流密度（≒設計防食電流密度）」と同程度



定常値は
元設計の値20mA/m²以下

必要な防食電流密度は
元設計の値でOK

（P5の防食状態が良好であることも根拠の1つとなる）



●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

(1) 電位, 水質, 土壌抵抗率の実態

- ・干満に伴い変化?
- ・季節変動?

(2) 暴露試験体を用いた電気防食特性に関する検討
(設計防食電流密度の推定)

(3) 暴露試験結果を活用した**数値解析**の検討
(**最適な電極配置**の検討)

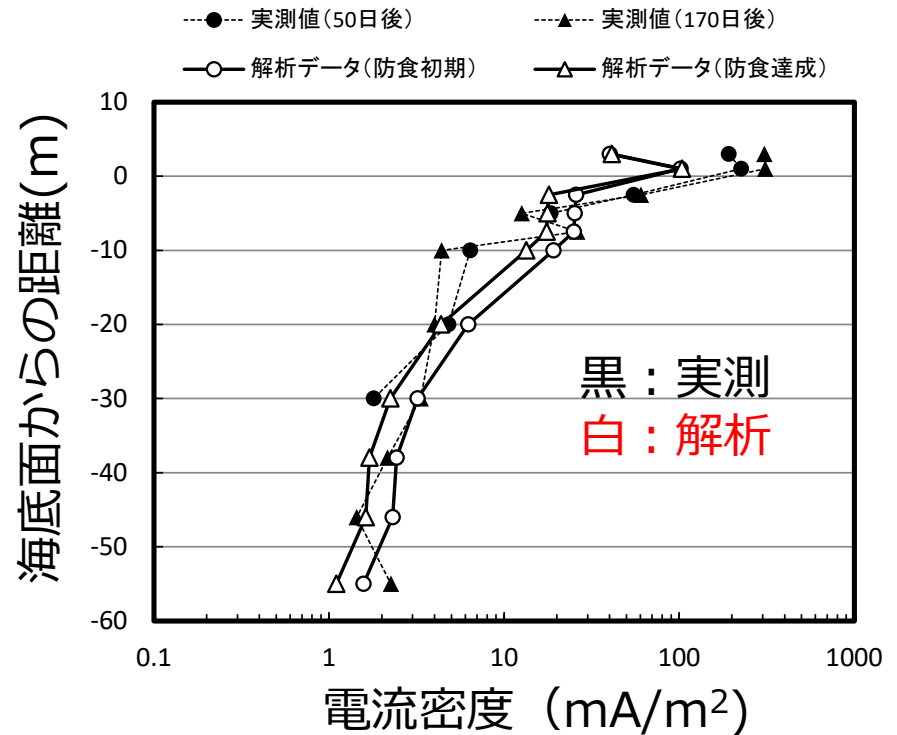
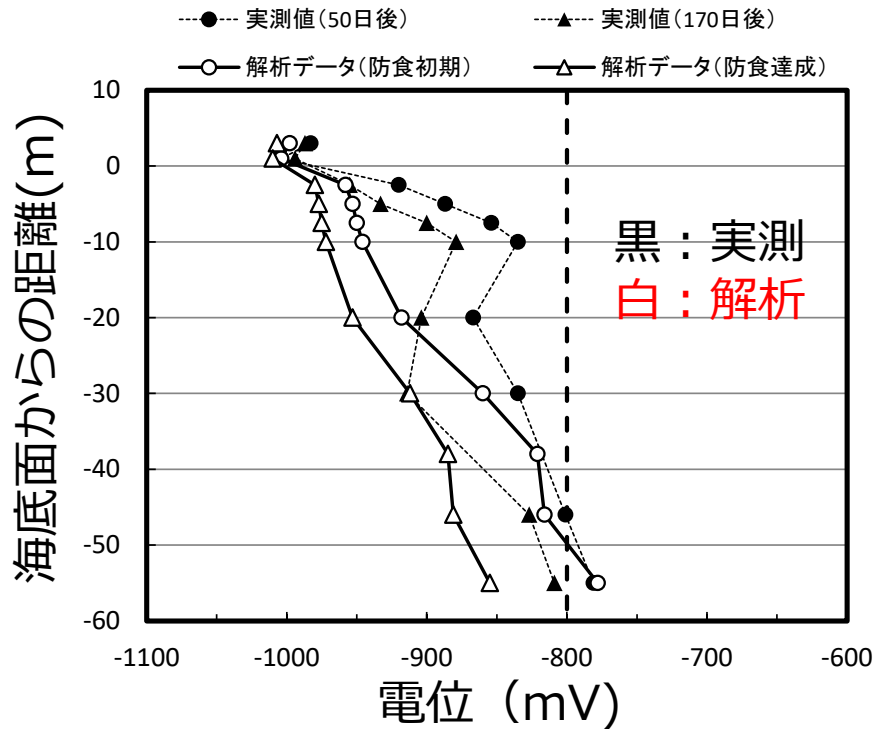
※机上の検討では困難



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。

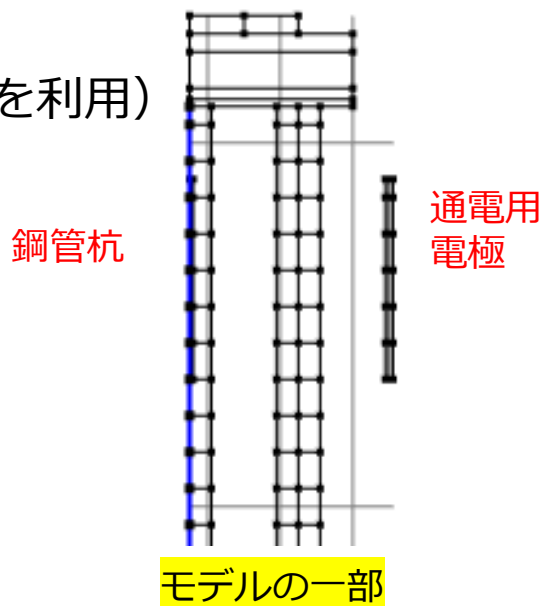


土質特性を考慮した解析手法を防食設計に取り入れることは可能

数値解析：解析方法、入力条件（パラメータ）

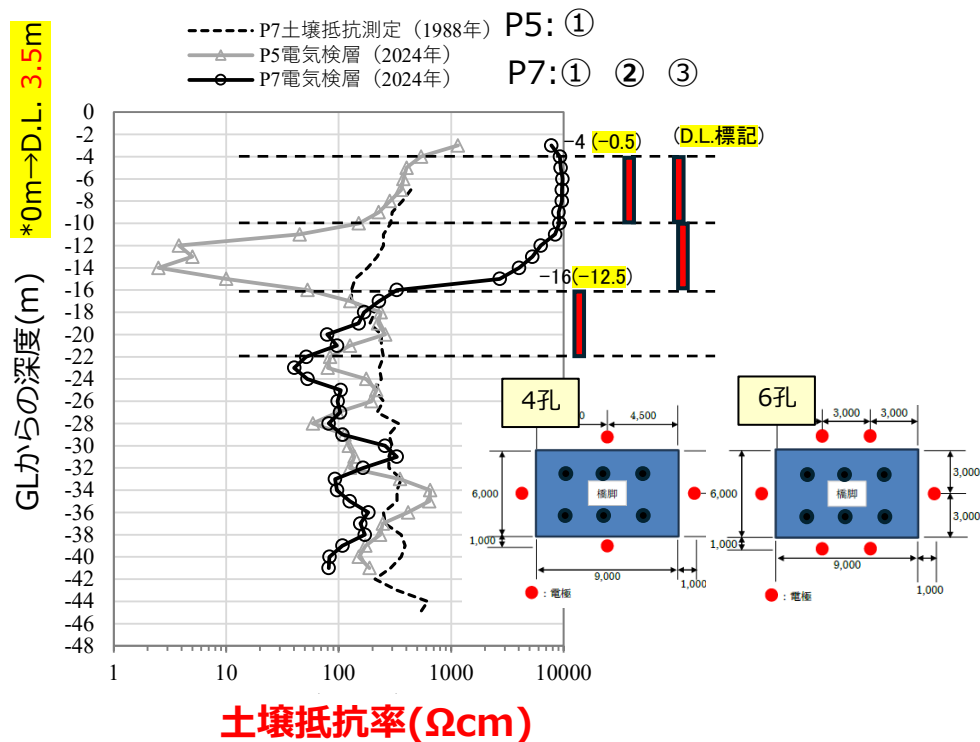


- ・有限要素法
(市販のソフトを利用)



入力パラメータ

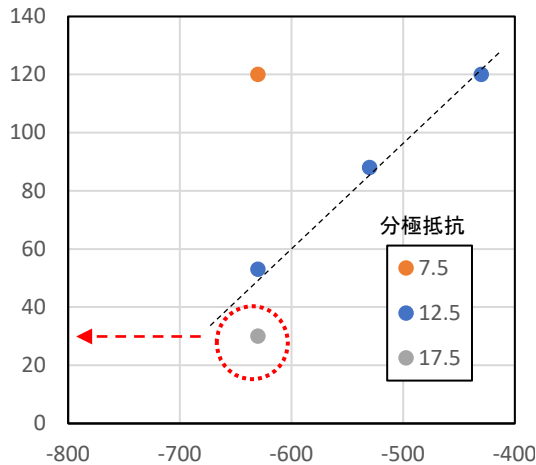
環境	・ 土壌抵抗率 (R6d測定値)
鋼材	・ 通電前の電位 (自然電位) ・ 分極抵抗 (変化のしやすさ)
通電条件	・ 電極配置 (右図) ・ 通電量



数値解析：パラメータ（自然電位，分極抵抗）の感度分析結果

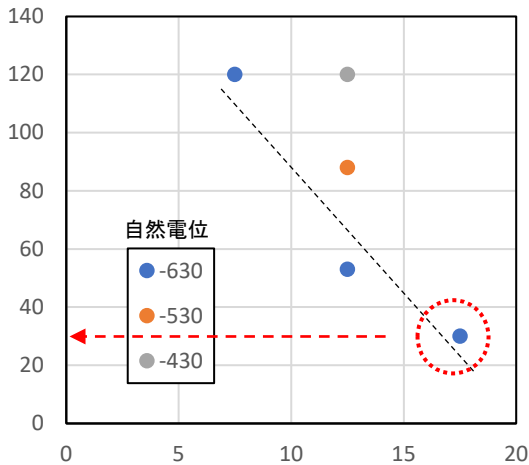


防食電位を満足する電流量(A)



自然電位(mV)

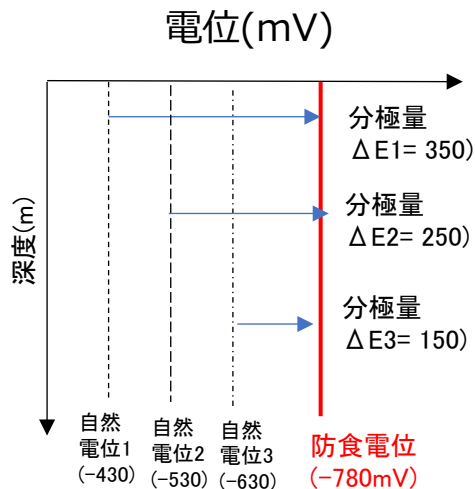
防食電位を満足する電流量(A)



分極抵抗(Ωm²)

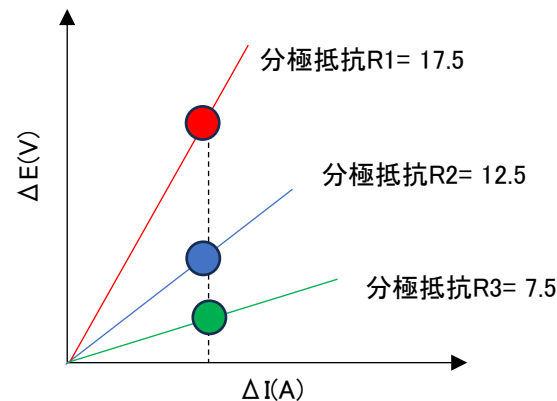
自然電位が防食電位に近いほど，分極抵抗が大きいほど，必要電流量は少なくて済む

=ある通電量の場合の電位の変化量



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)

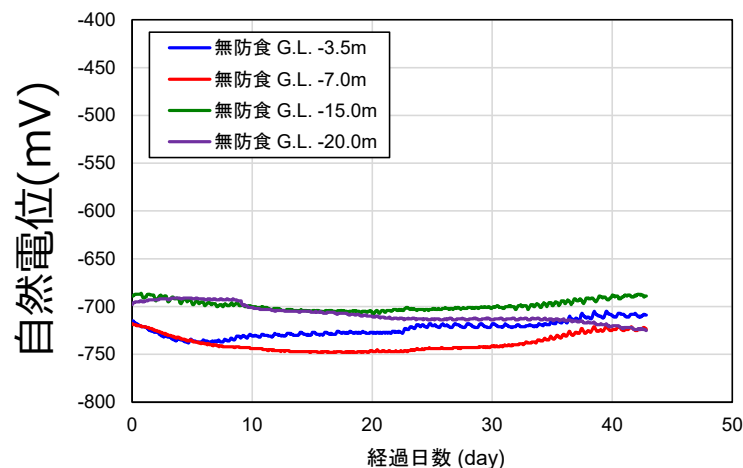
机上，室内試験では
設定困難
→ 現地試験による検証

数値解析：パラメータ設定のための現地暴露試験



(1) 自然電位

無防食鋼材の自然電位の全データの平均値： $-720\text{mV Ag/AgCl[sw]}$ を採用



② カソード（鋼材）の分極抵抗

定電位試験で得られた結果より，下記の式を用いて分極抵抗を算出．

$$\begin{aligned} \text{カソード分極抵抗 } R_c &= \left| \frac{\Delta V}{\Delta I} \right| \\ &= \left| \frac{[\text{通電前の自然電位}] - [\text{設定電位}]}{\text{定電位保持後の電流密度の定常値}} \right| \end{aligned}$$

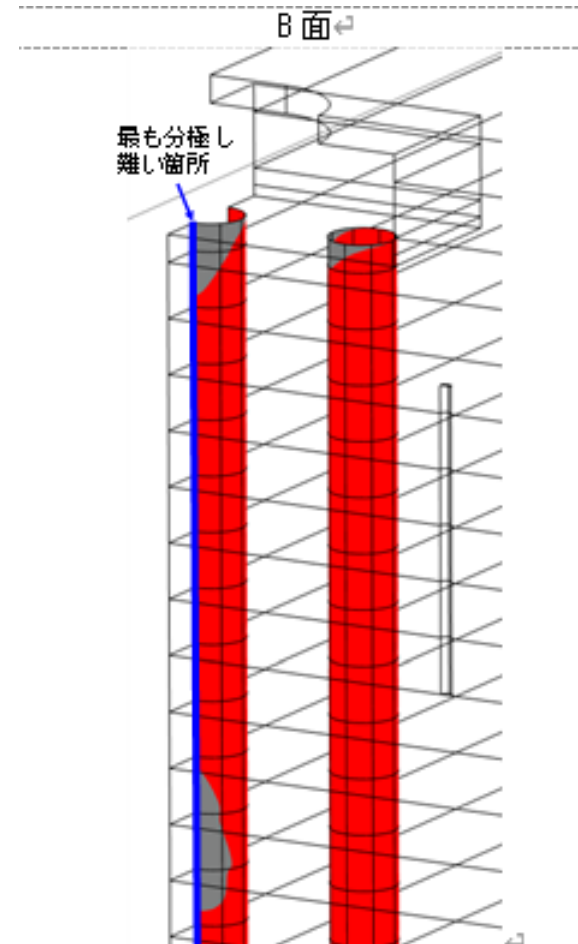
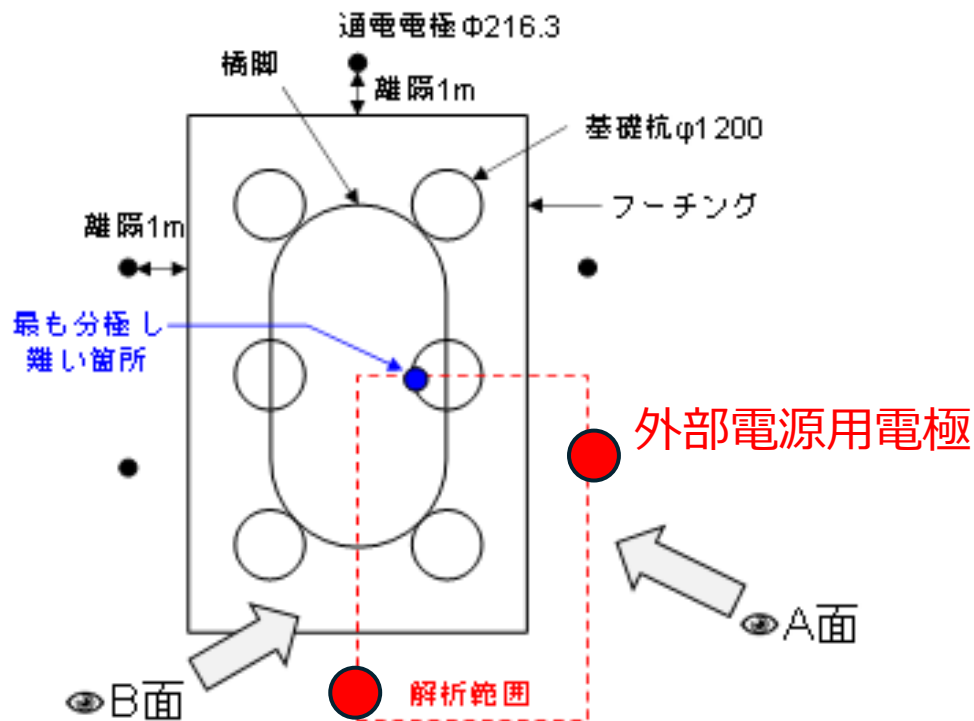
G.L. -3.5m	G.L. -7.0m	G.L. -15.0m	G.L. -20.0m
9.60Ω・m ²	11.0Ω・m ²	13.2Ω・m ²	38.7Ω・m ²

平均値:10.3

→現状で，表層2点の平均値（比較的安全側の値）を杭全面に採用

※「長期暴露試験結果」を基に再検討

数値解析：概要



最も分極し難い箇所で比較検討を実施

数値解析 : P5

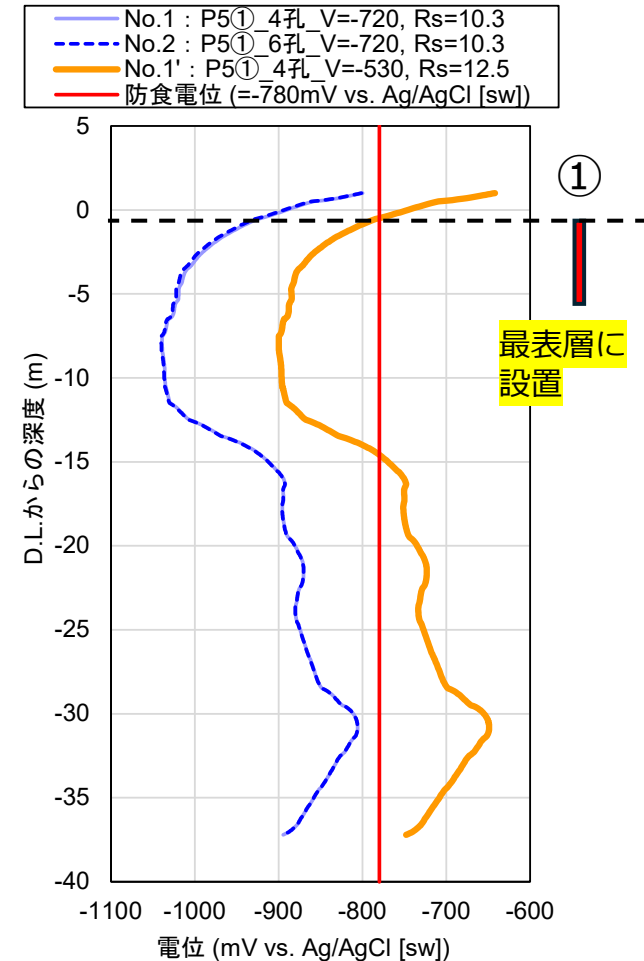
R7 d



陽極 配置 案	孔 数	自然電位 (mV vs. Ag/AgCl [sw])	カソード 分極抵抗 ($\Omega \cdot m^2$)	通電量 (A)	備考
P5①	4	-720	10.3	20.9	
	6	-720	10.3	20.9	
P5①	4	-530	12.5	20.9	昨年度 の 解析条 件

(元設計の値
17.4*1.2)

- ✓ 土壌抵抗率が比較的小さいため、電流が流れやすく、電位の変化が良好
- ✓ 全深度で防食電位に到達 (満足)



数値解析 : P7

R7 d



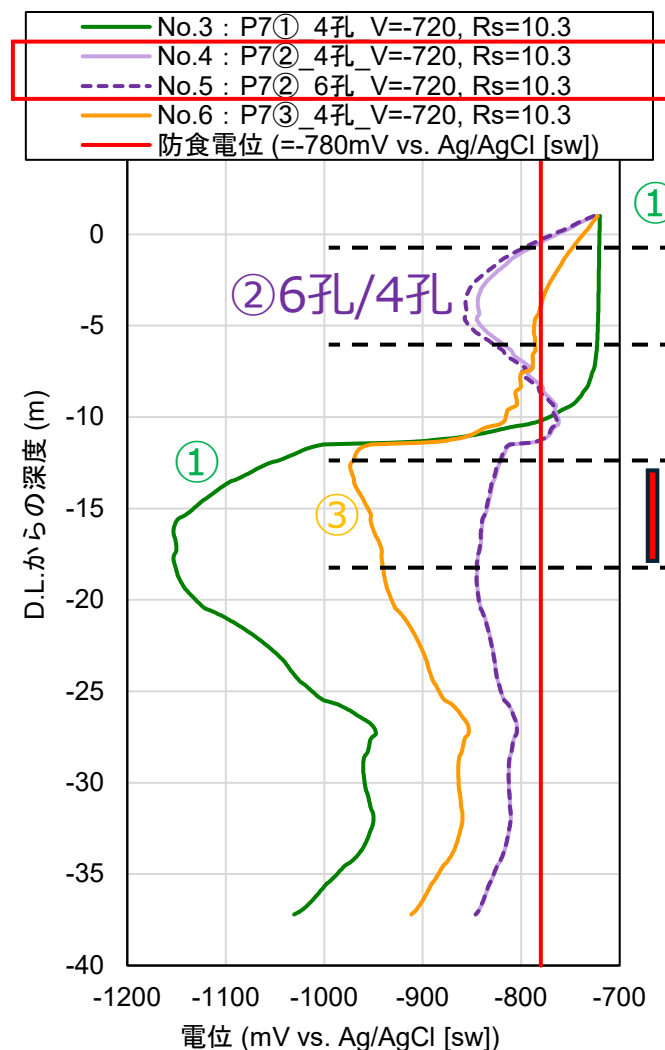
陽極 配置 案	孔 数	自然電位 (mV vs. Ag/AgCl [sw])	カソード分極 抵抗 ($\Omega \cdot m^2$)	通電量 (A)	備考
P7 ①	4	-720	10.3	20.9	
P7 ②	4	-720	10.3	20.9	
	6	-720	10.3	20.9	
P7 ③	4	-720	10.3	20.9	
P7 ②	6	-530	12.5	20.9	昨年度 の 解析条 件

(元設計の値
17.4*1.2)

✓表層部の土壌抵抗率が非常に大きいいため、電流が流れにくく、電位の変化が良好でない。

✓②の電位分布が比較的良好（上部にも下部にも均等に流れている）。

✓孔の数（4/6孔）の違いはほとんど無し。



数値解析：P7

R7 d 昨年度との比較



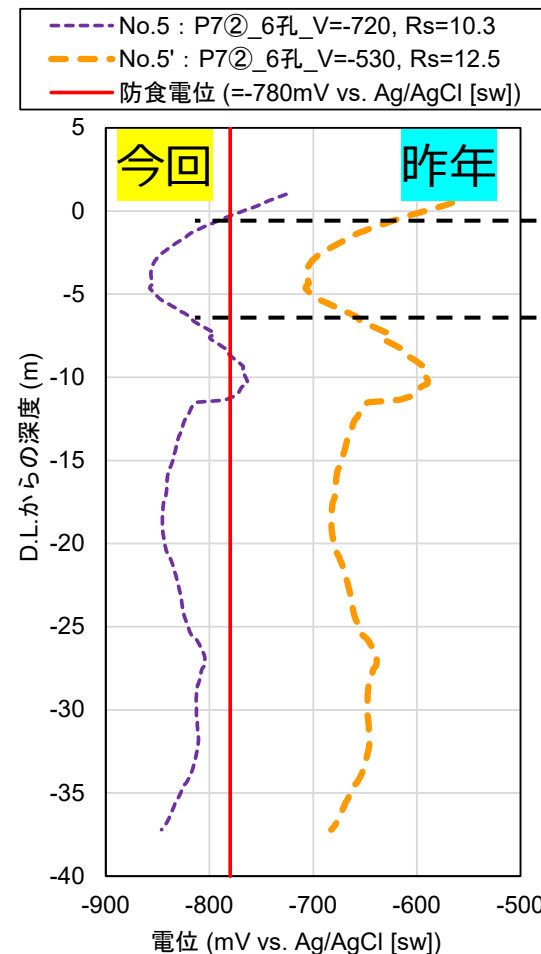
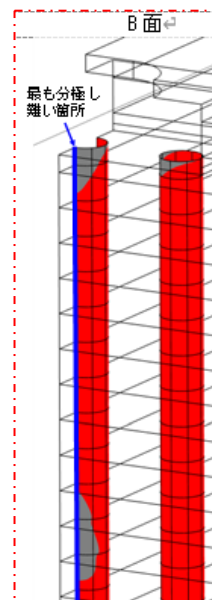
陽極配置案	孔数	自然電位 (mV vs. Ag/AgCl [sw])	カソード分極 抵抗 ($\Omega \cdot \text{m}^2$)	通電量 (A)	備考
P7 ①	4	-720	10.3	20.9	
P7 ②	4	-720	10.3	20.9	
	6	-720	10.3	20.9	
P7 ③	4	-720	10.3	20.9	
P7 ②	6	-530	12.5	20.9	昨年度の 解析条件

(元設計の値
17.4*1.2)

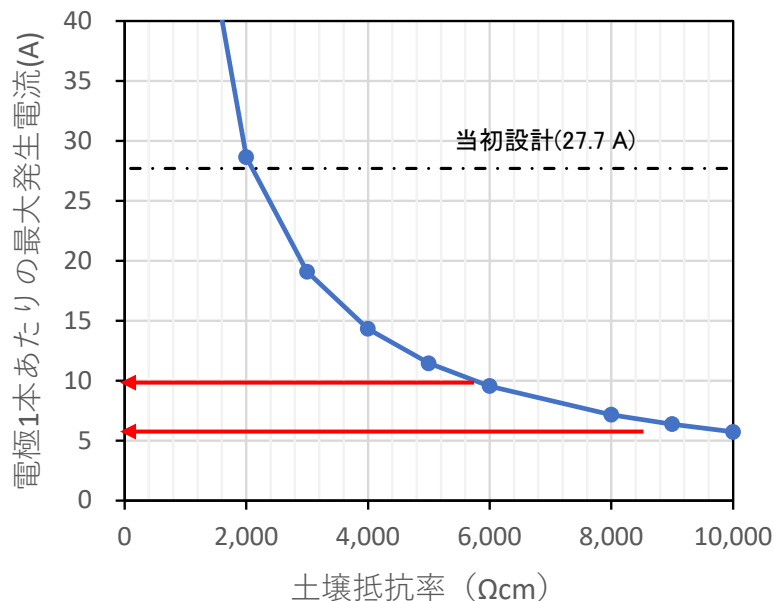
✓昨年より良化
(自然電位の影響)



カソード分極抵抗：「長期暴露試験結果」を基に再検討



電極1本当たりの最大発生電流は土壌抵抗率の影響を受ける



P7 :

GL-4mの値 (Ωcm)

R6 : 9294 →6.2(A)

R7 : 5904 →9.7(A)

$$R_a = \frac{\rho_1}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{D} - 1 \right)$$

$$I_{a1} = \frac{E_{DC}}{R_a}$$

R_a : 電極1本あたりの接地抵抗 [Ω]
 ρ_1 : 電極埋設部の土壌抵抗率 (仮通電試験結果より) [Ω・m]
 L : 電極の長さ: 5.5 m (P7③のみ 11.0m)
 D : 電極の直径: 0.2163 m
 I_{a1} : 電極1本あたりの最大発生電流 [A]
 E_{DC} : 直流電源装置の定格出力電圧: 60V

土壌抵抗率の設定が重要



●(1)電位，水質，土壌抵抗率の実態

- ・電位：干満，季節変動は顕著でない.
- ・土壌抵抗率：干満に伴い変動しない. 昨年より低下.
- ・水質：干満に伴い変化. 昨年より増加傾向

→孔内で塩分が移動し，その結果として，土壌抵抗率の測定値が変化？

●(2)暴露試験体を用いた電気防食特性に関する検討（設計防食電流密度の推定）

- ・暴露直前に実施した「定電位試験」において，定常値は元設計の防食電流密($20\text{mA}/\text{m}^2$)以下で収束した. →設定値は元設計と同様でよい可能性が示唆された.

●(3)暴露試験結果を活用した数値解析の検討（電極配置の最適化）

- ・最適な電極位置・数の比較検討を行った.
- 長期暴露試験の結果を踏まえ，パラメータ（分極抵抗）を再設定し，再度解析を行う.