



# 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



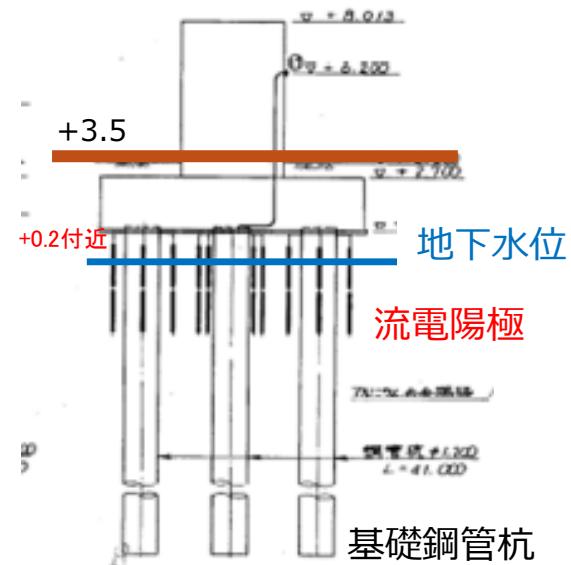
石垣港サザンゲートブリッジ・橋脚基礎鋼管杭に  
電気防食（**流電陽極**方式）が適用（1990～1991に  
施工）※「防食が適用された経緯」は後述



↓  
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

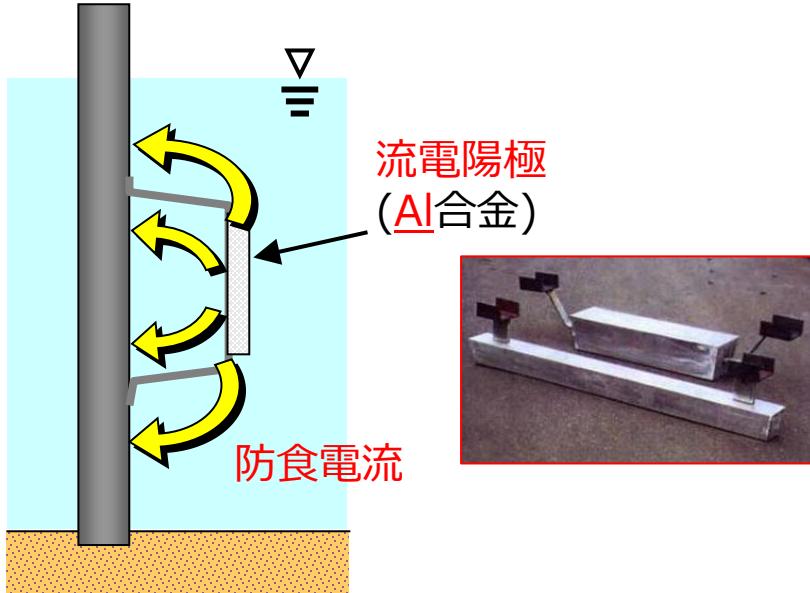
## ●昨年度の主な成果

## ●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

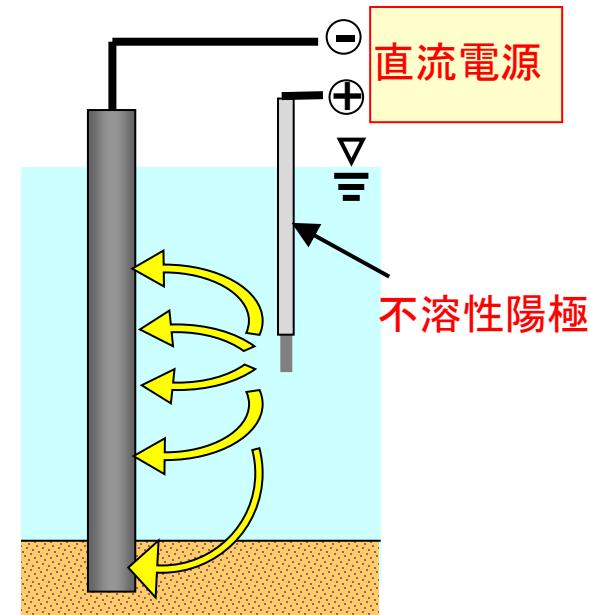


## 流電陽極方式



- ✓ 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

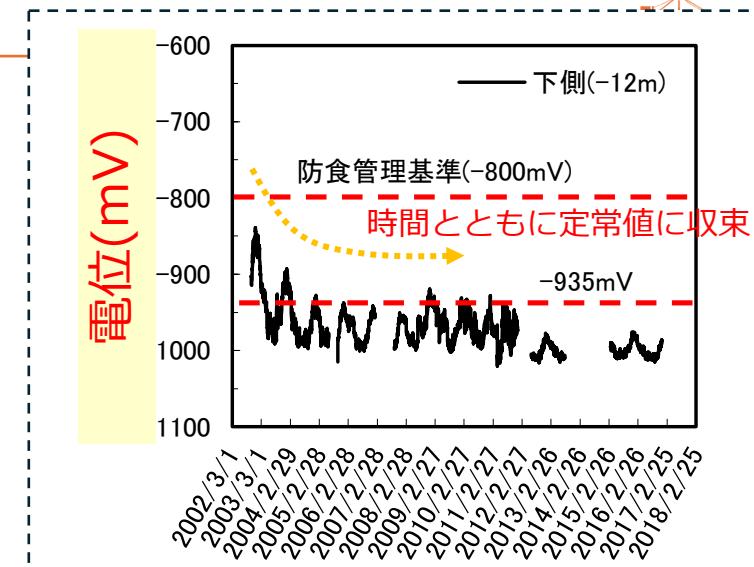
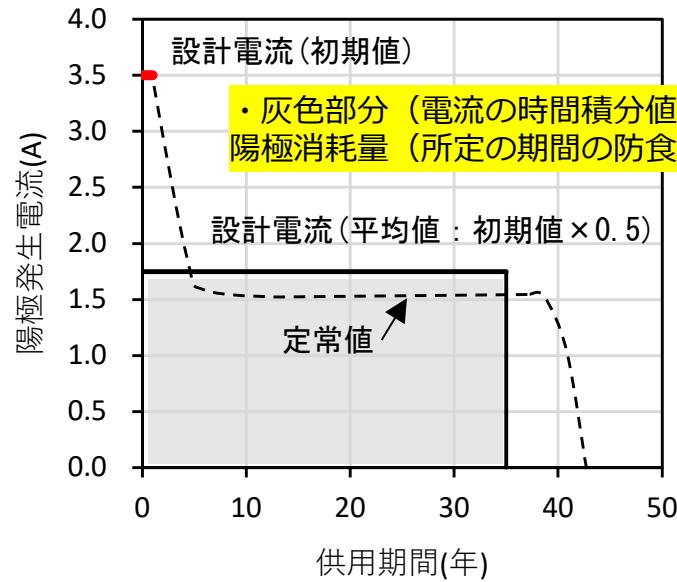
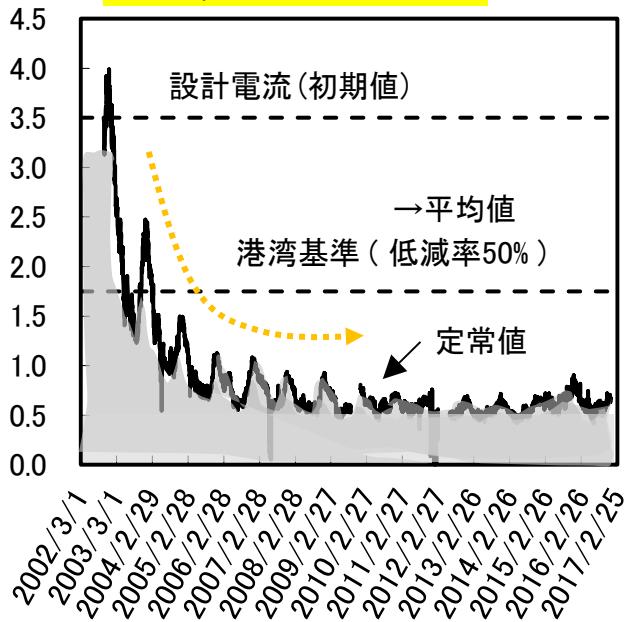


- ✓ 河川域や、環境が一様でない場合  
\*モノパイルの場合も
- ✓ 既設の土中構造物に適用する場合  
(大電流が流せるため、陽極が比較的少数で対応可能)

# 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



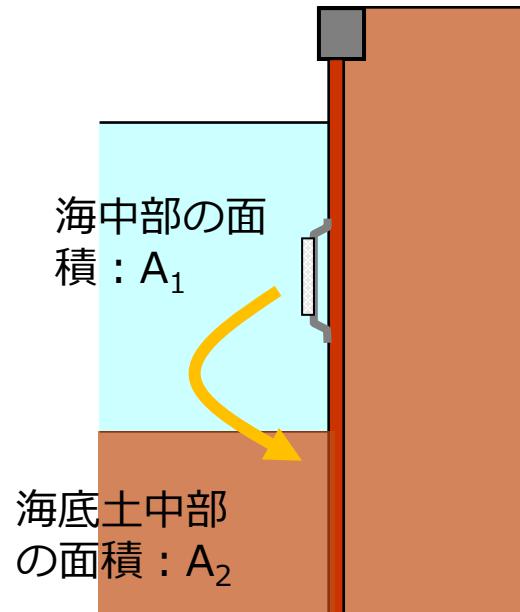
必要な陽極発生電流 (=陽極質量)  $A$   
= 防食電流密度:  $A/m^2 \times$  防食対象面積:  $m^2$

・ **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 (1979～1994)

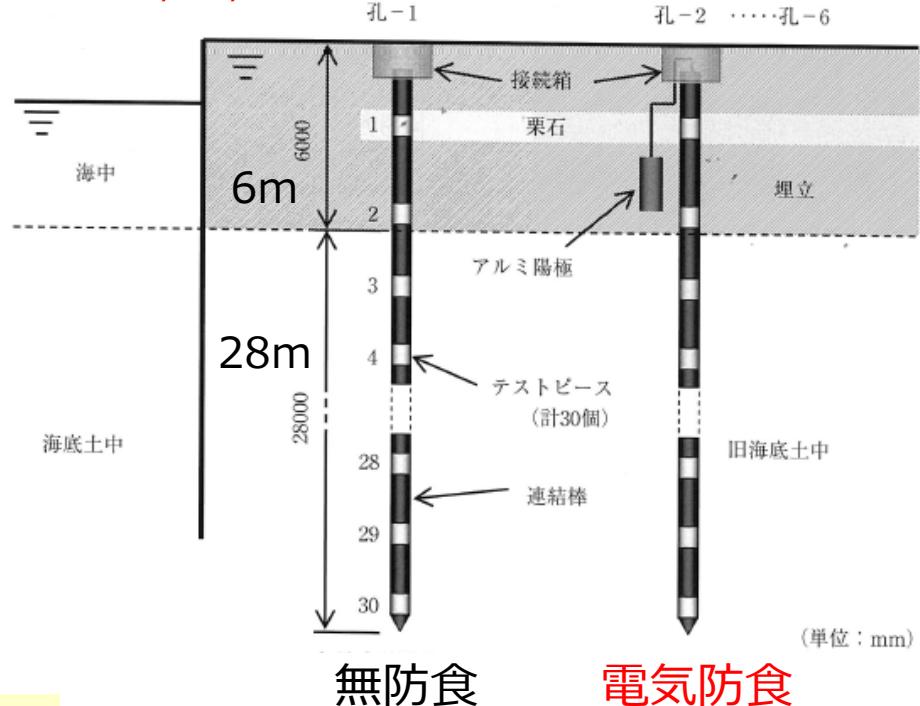
## ●昨年度の主な成果

## ●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

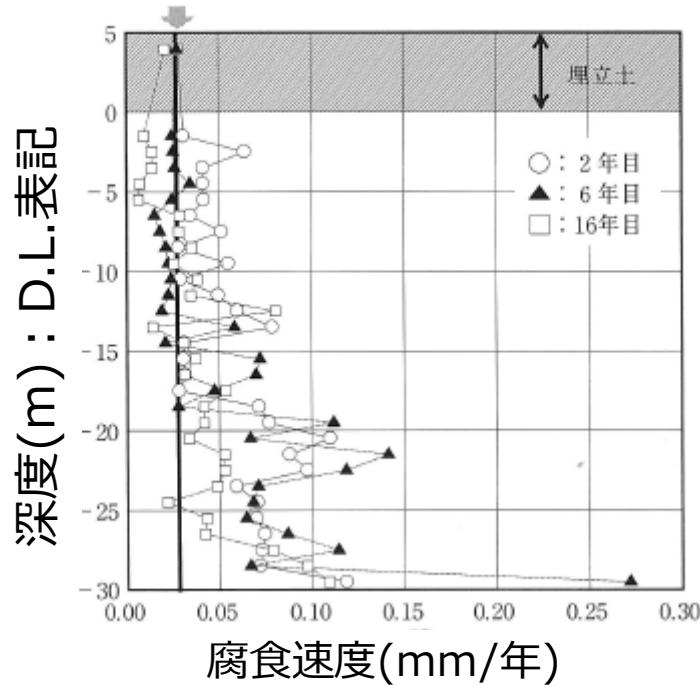
**実施時期**：1979.2～1994.12 (16年間)

# 那覇土中の暴露試験：結果の一例

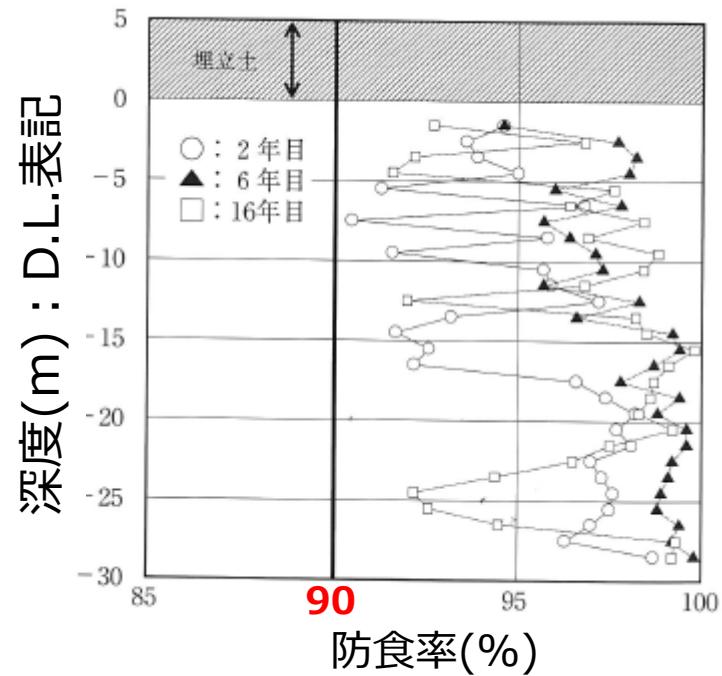


## 腐食速度（無防食時）

一般的な値(0.02~0.03)



## 防食率（電気防食時）



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

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

## ●昨年度の主な成果

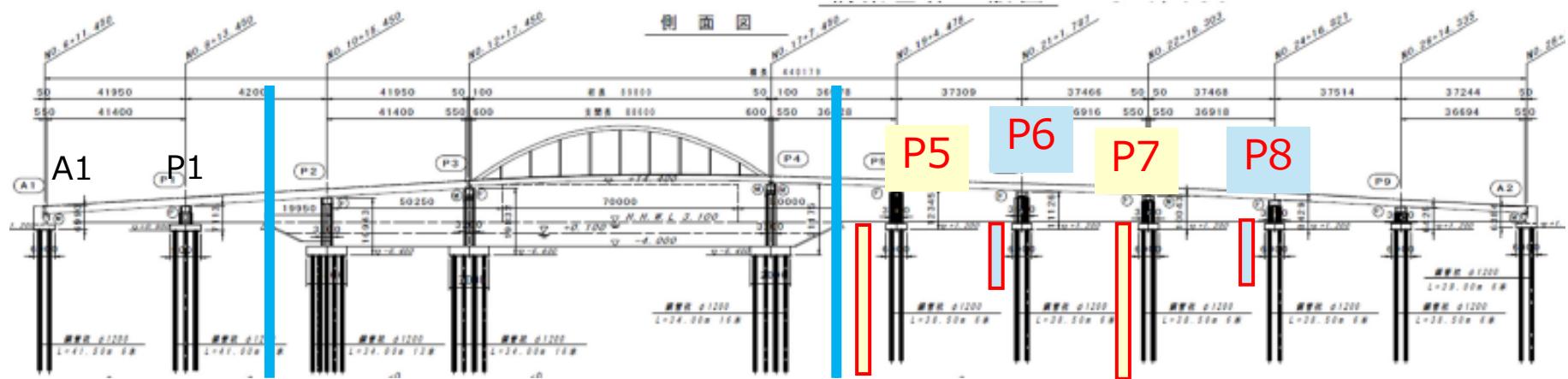
## ●本研究での検討内容

(1) 電位, 水質, 土壌抵抗率の実態

(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： 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

# 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作業

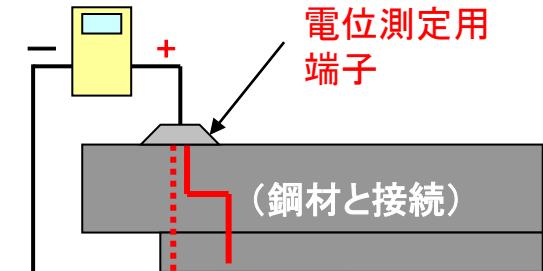


ボックス設置状況

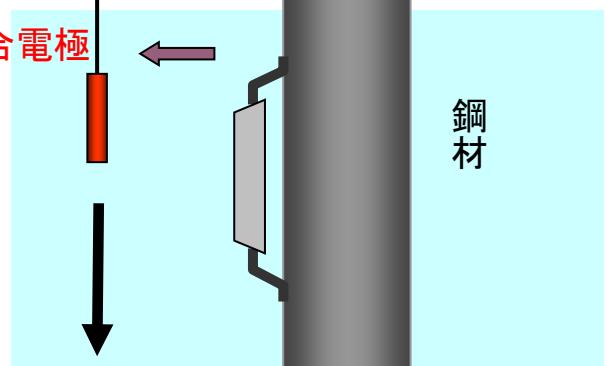


P7のモニタリング孔

高抵抗電圧計



照合電極



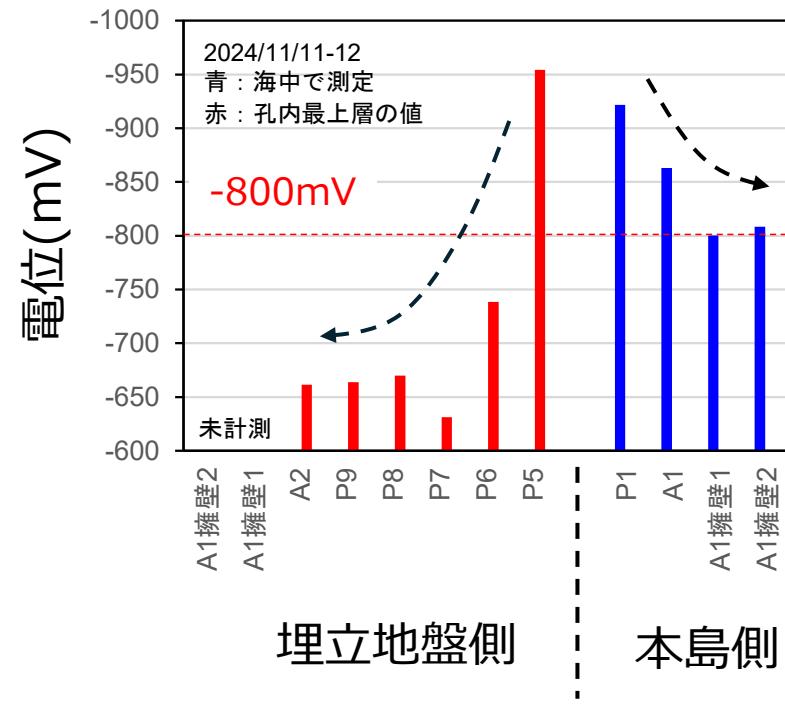
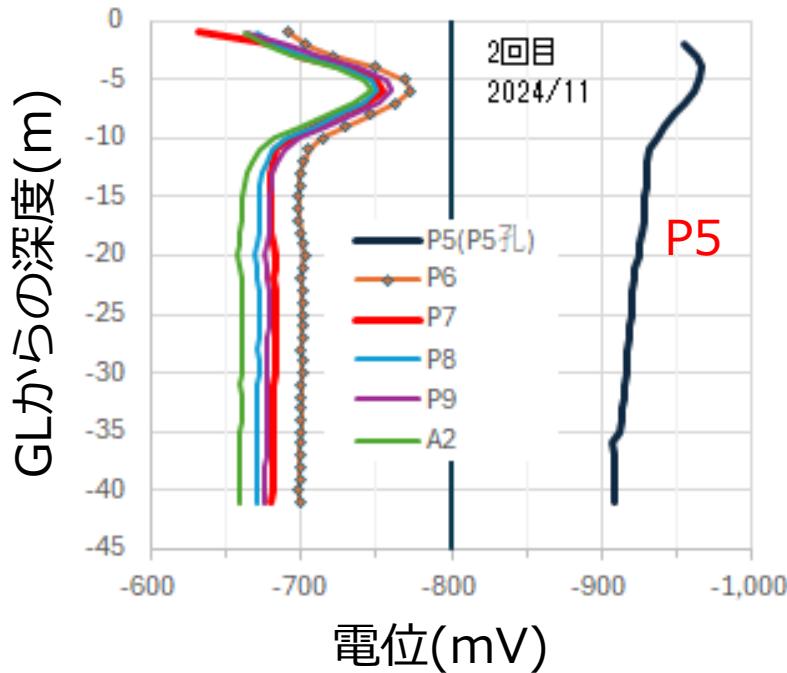
鋼材

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

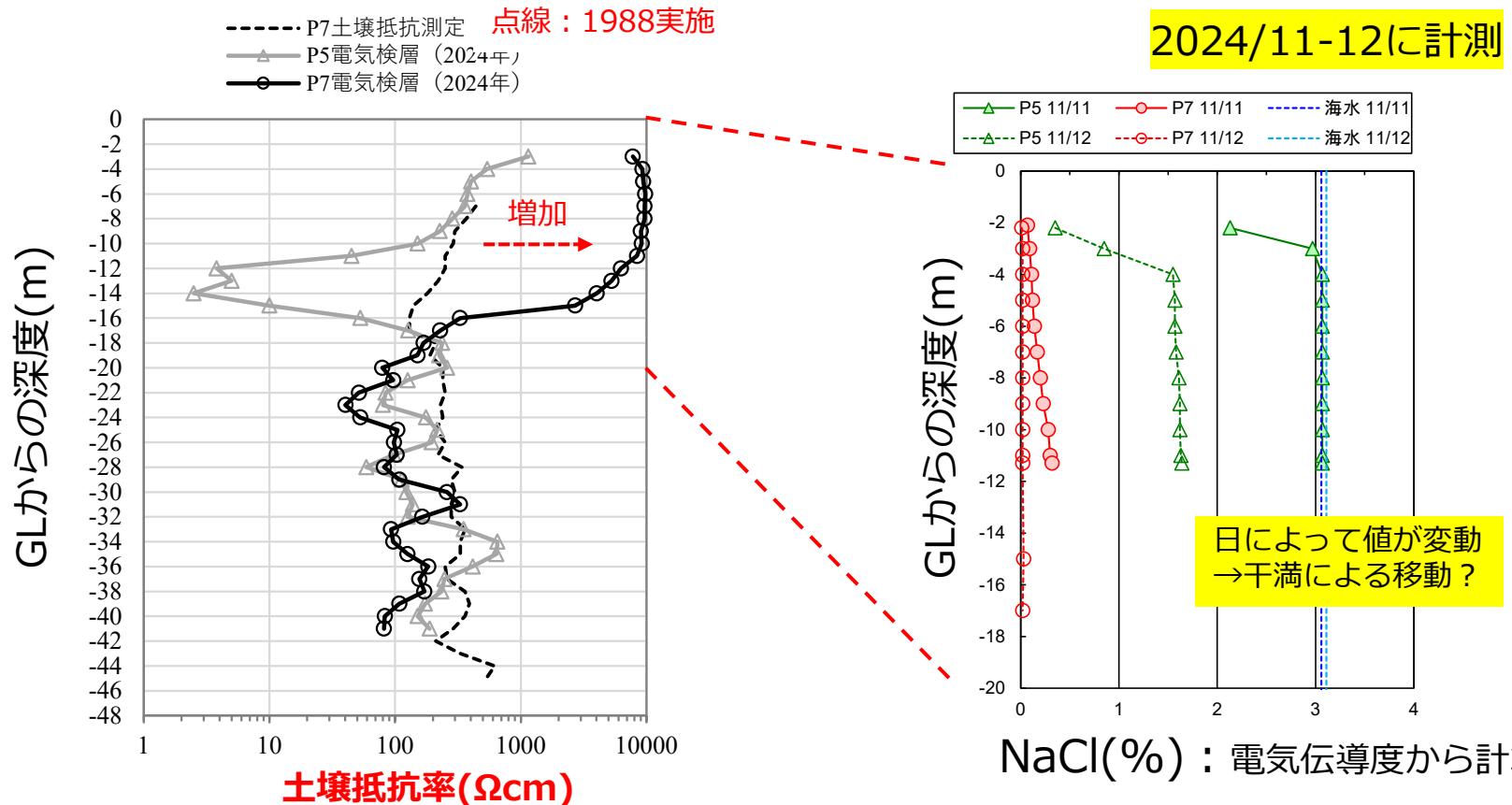


- 地表面付近 (AI陽極付近) で小さい値を示した
- 埋立側ではP5のみ良好  
→元設計でOK

・汀線 (海) から離れると電位が悪化 (特に埋立側)  
→なぜ?

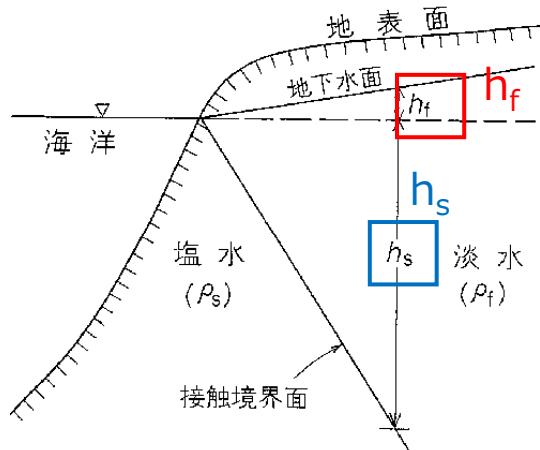


# 土壤抵抗率 および 孔内の塩分(NaCl)濃度 の深度分布



- 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

# 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.

$h_f$  : 海面から地下水位までの高さ.

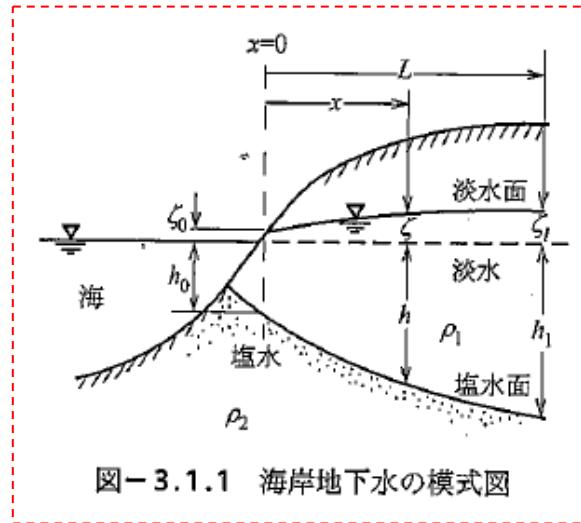
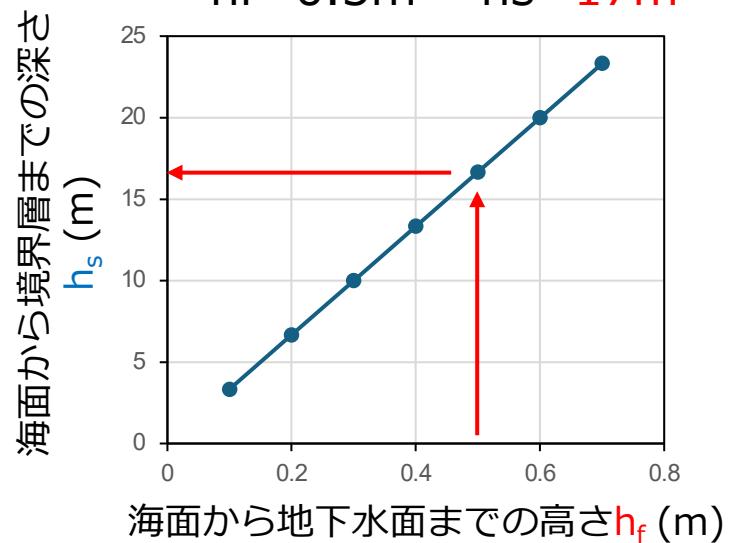


図-3.1.1 海岸地下水の模式図

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



$h_f$ と $h_s$ の関係



## ●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

## ●昨年度の主な成果

## ●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)

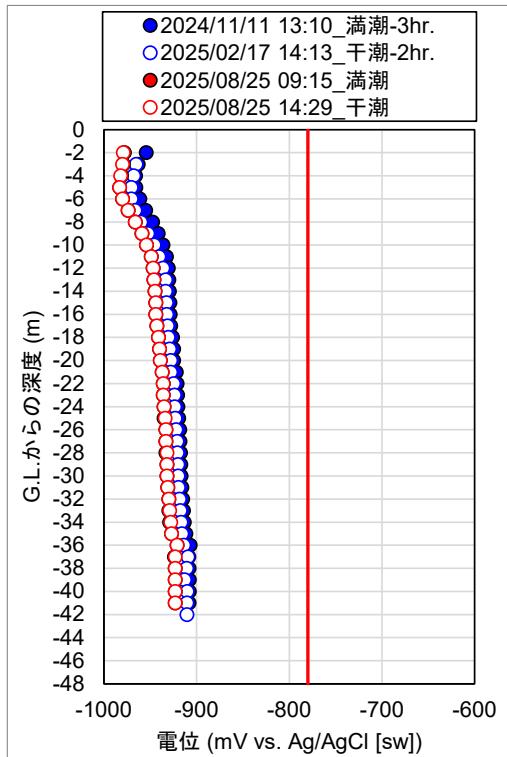
### (3) 暴露試験結果を活用した数値解析の検討

(電極配置の最適化の検討が主)

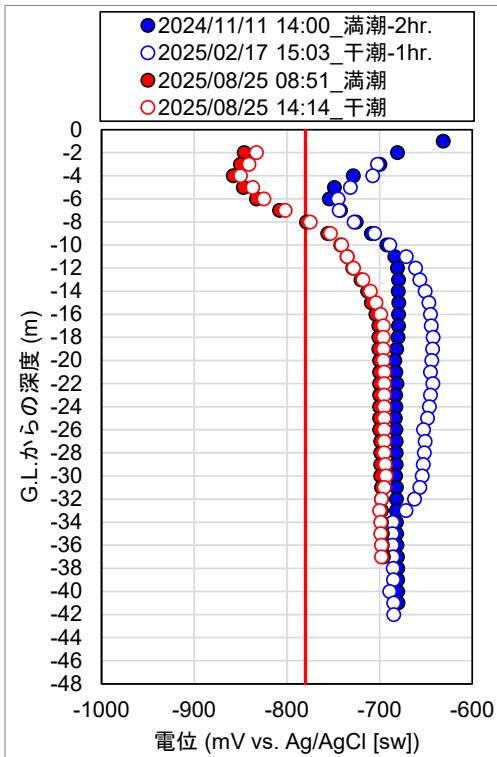
# 鋼材の電位： R7d 成果



P5 (海の近く)



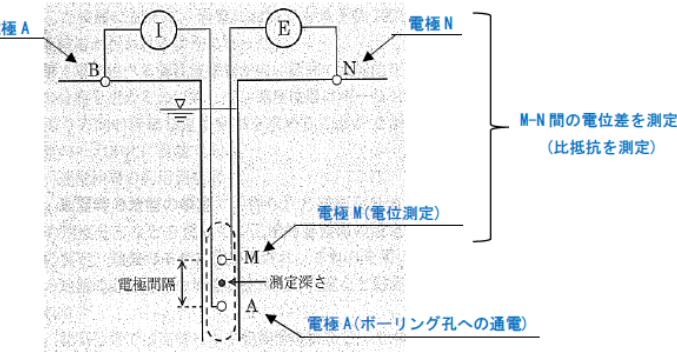
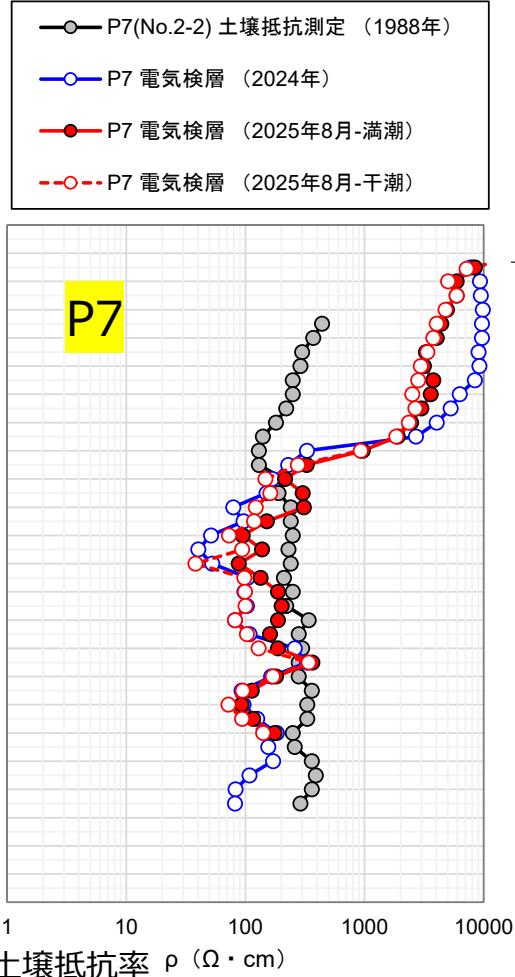
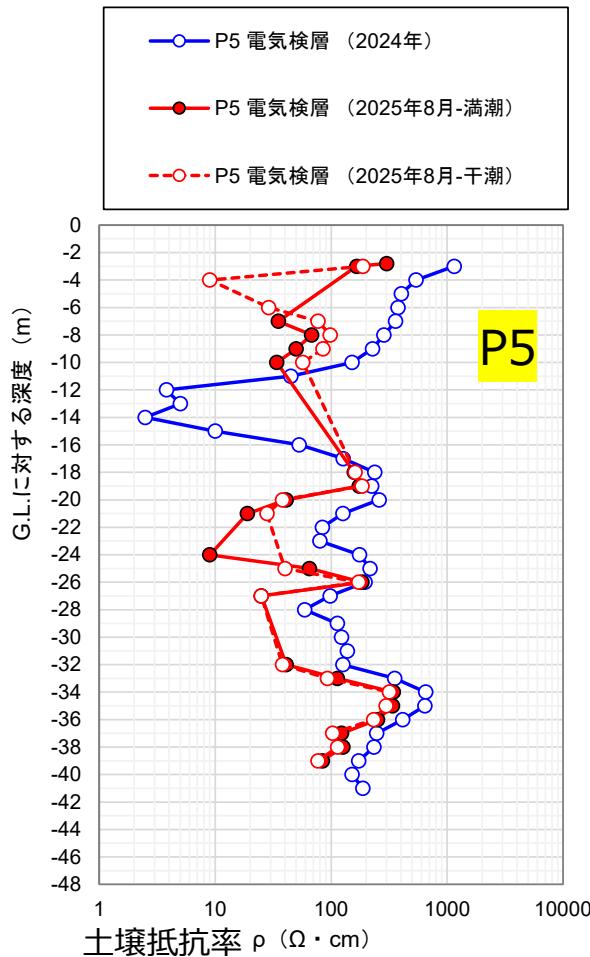
P7 (海から少し離れた位置)



- ・昨年度と同様（防食状態は良好）  
→元設計（防食電流密度20mA/m<sup>2</sup>）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

# 土壤抵抗率 の深度分布 : R7d



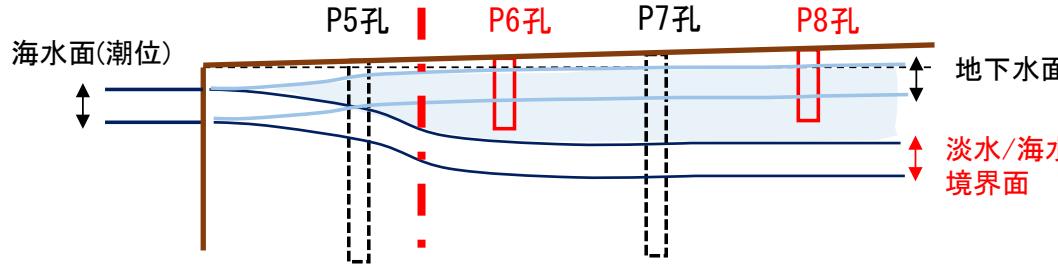
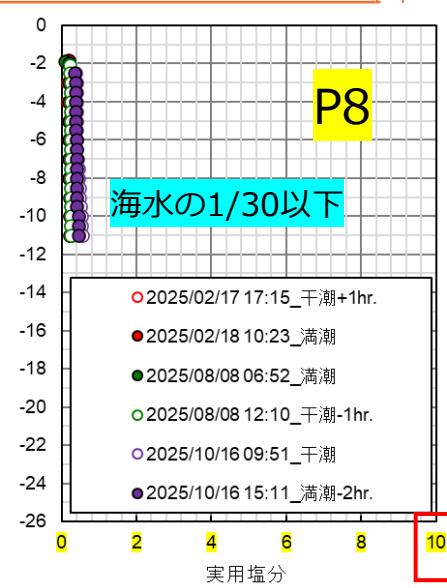
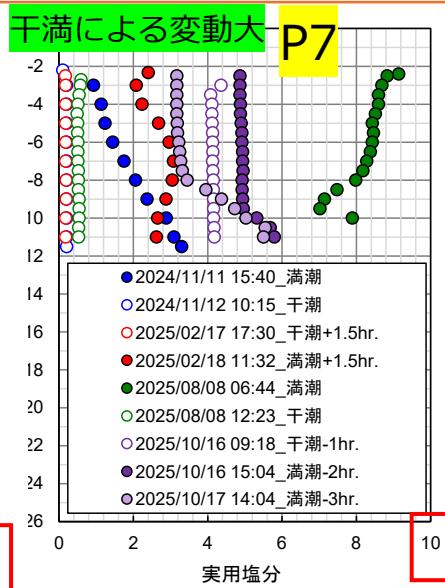
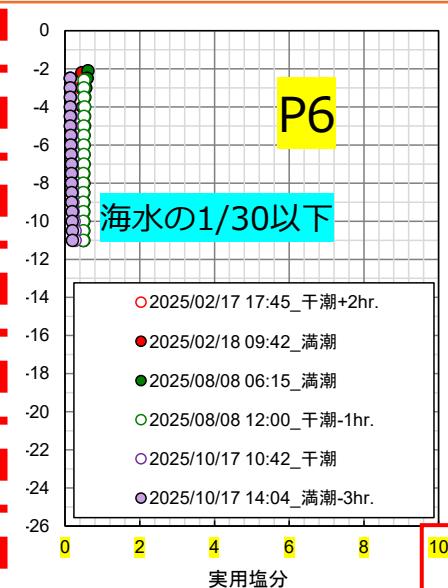
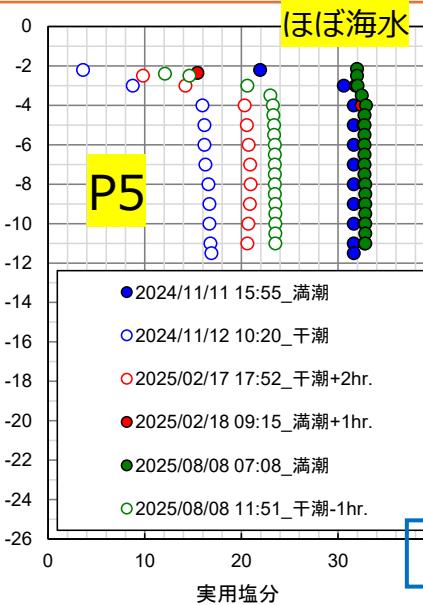
孔内 (水内) に  
電極を投入して計測

- 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



・地下水位の変動

大

小

大

小

・孔内Cl<sup>-</sup>濃度変動

高  
有

ほぼ0  
無

低  
有

ほぼ0  
無

土壤抵抗率の変動(推測)

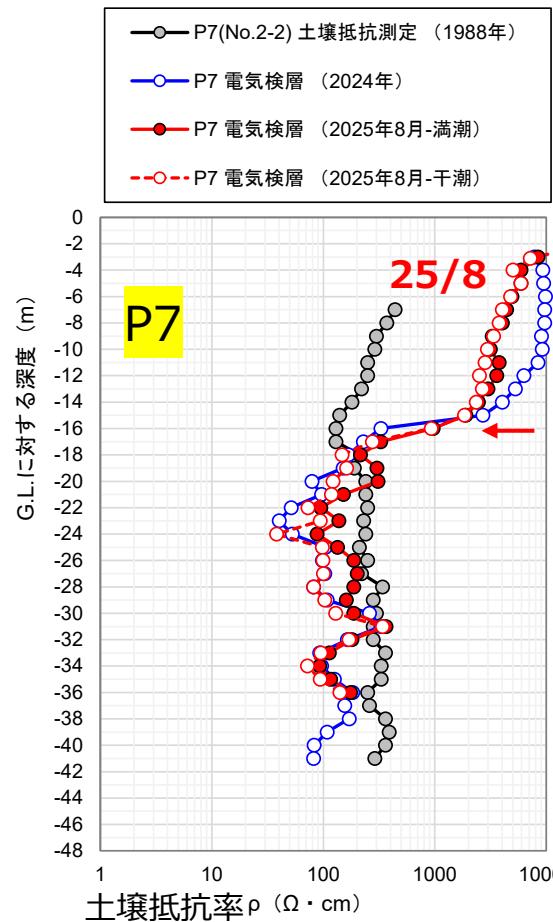
無

有or少

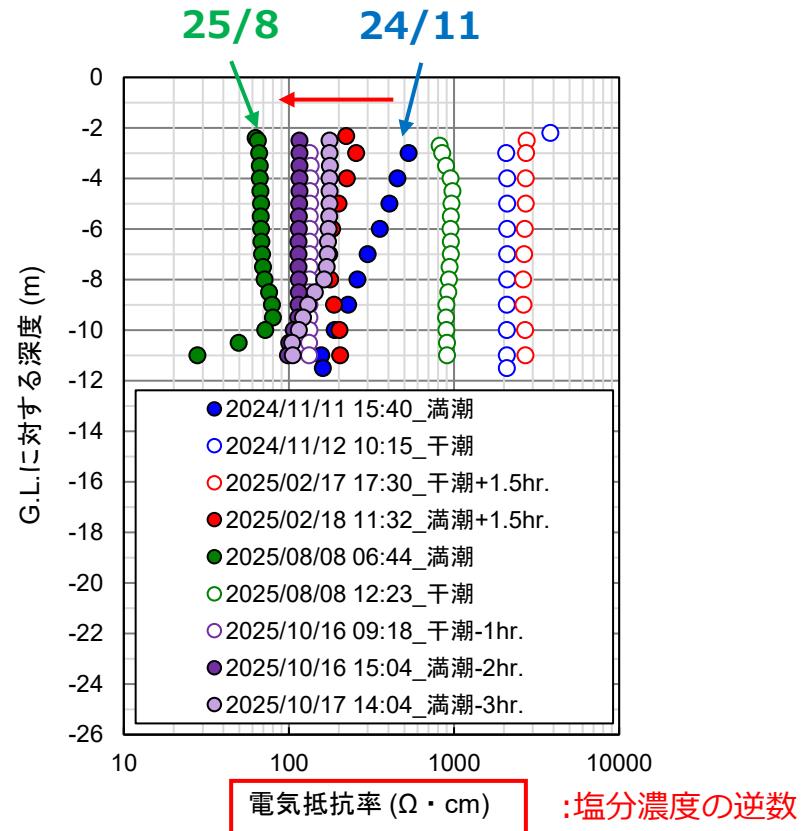
無

孔内で塩分が混ざっていると推測

# 土壤の抵抗率 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

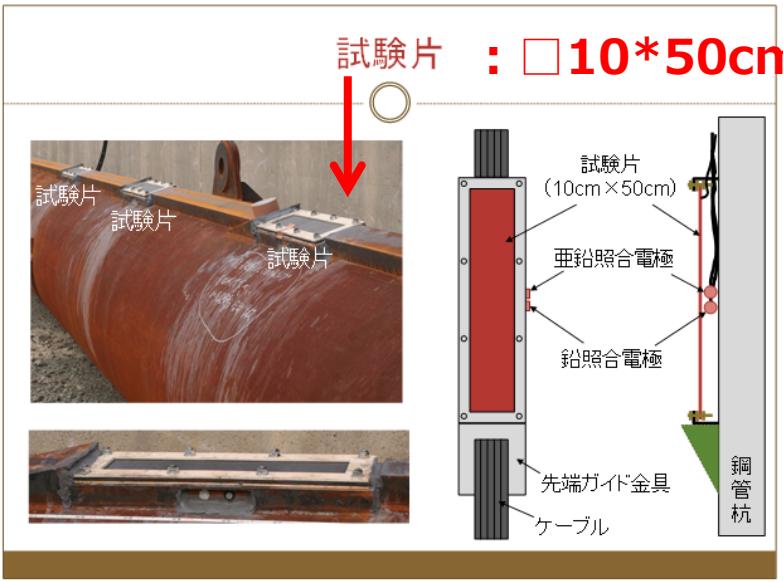
(3) 暴露試験結果を活用した数値解析の検討  
(電極配置の最適化の検討が主)

# 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。

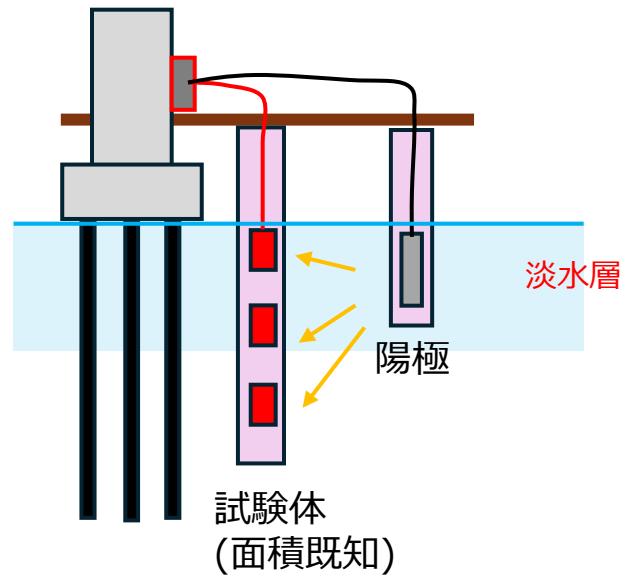


暴露試験による設定値を用いた  
解析値と実測値は概ね一致

## 今回

※P7のモニタリング  
孔周辺

計測  
ボックス

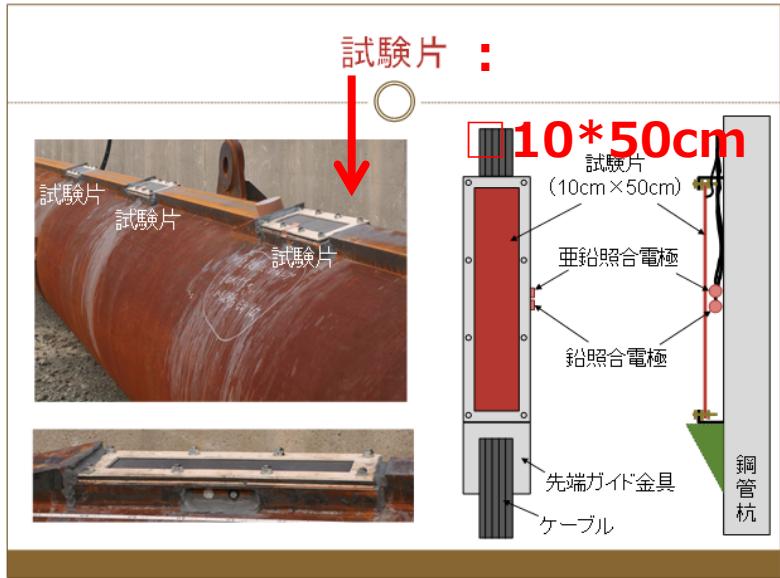


- ・削孔後に試験体を埋設
  - ・電位, 電流密度を連続計測
  - ・計測期間 : 0.5年程度
- ※暴露試験前に「設計値」の参考  
になる各種試験を実施

## 概要



## 試験片の形状および測定項目

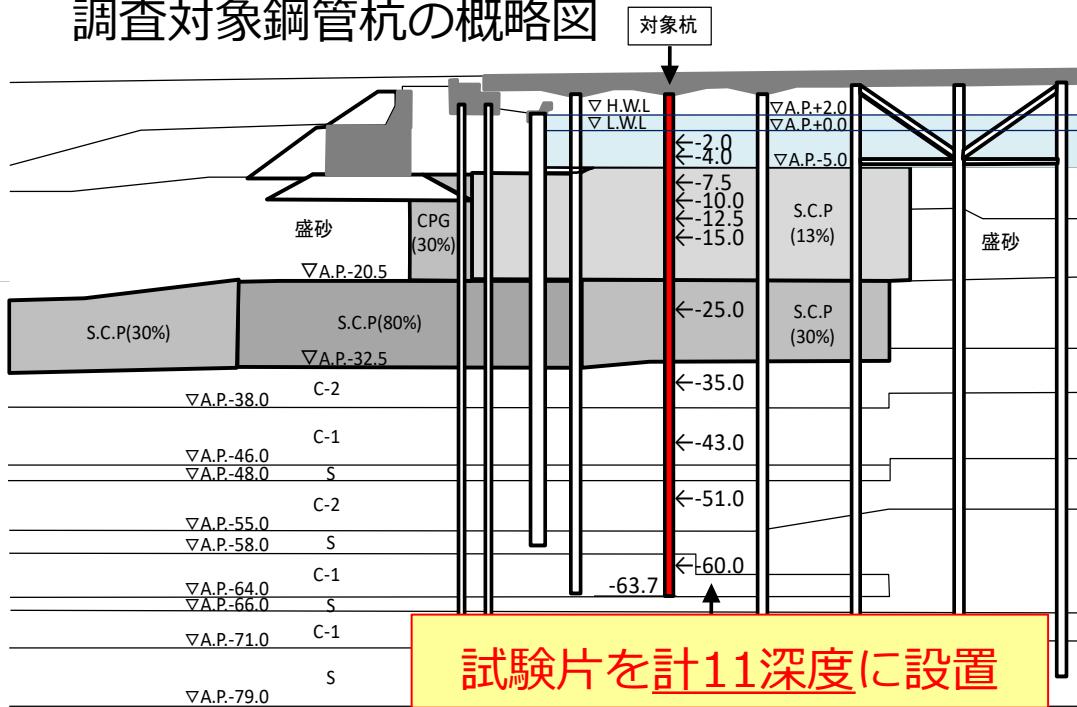


- 試験片の電位
- 試験片への流入電流
- 陽極の発生電流

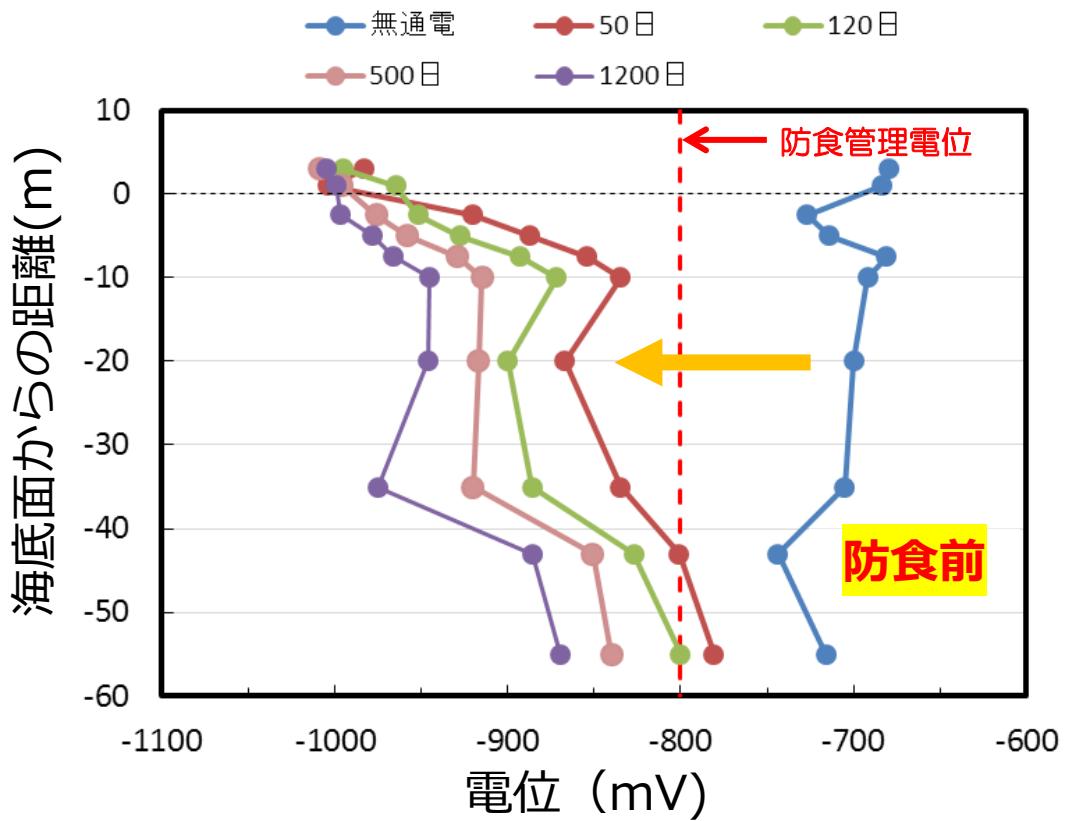
## 調査杭の外観



## 調査対象钢管杭の概略図

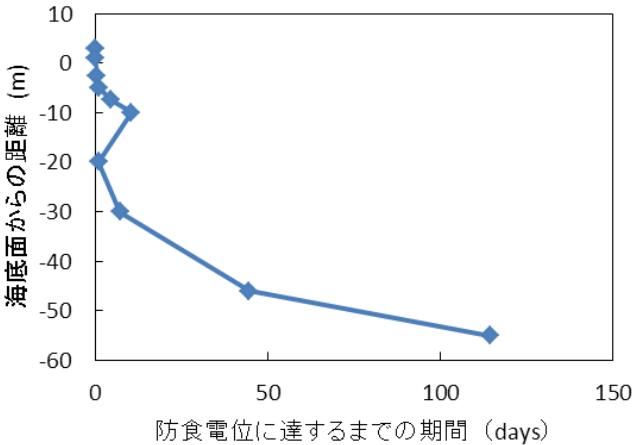


## 海底土中部における電気防食の状態（電位）

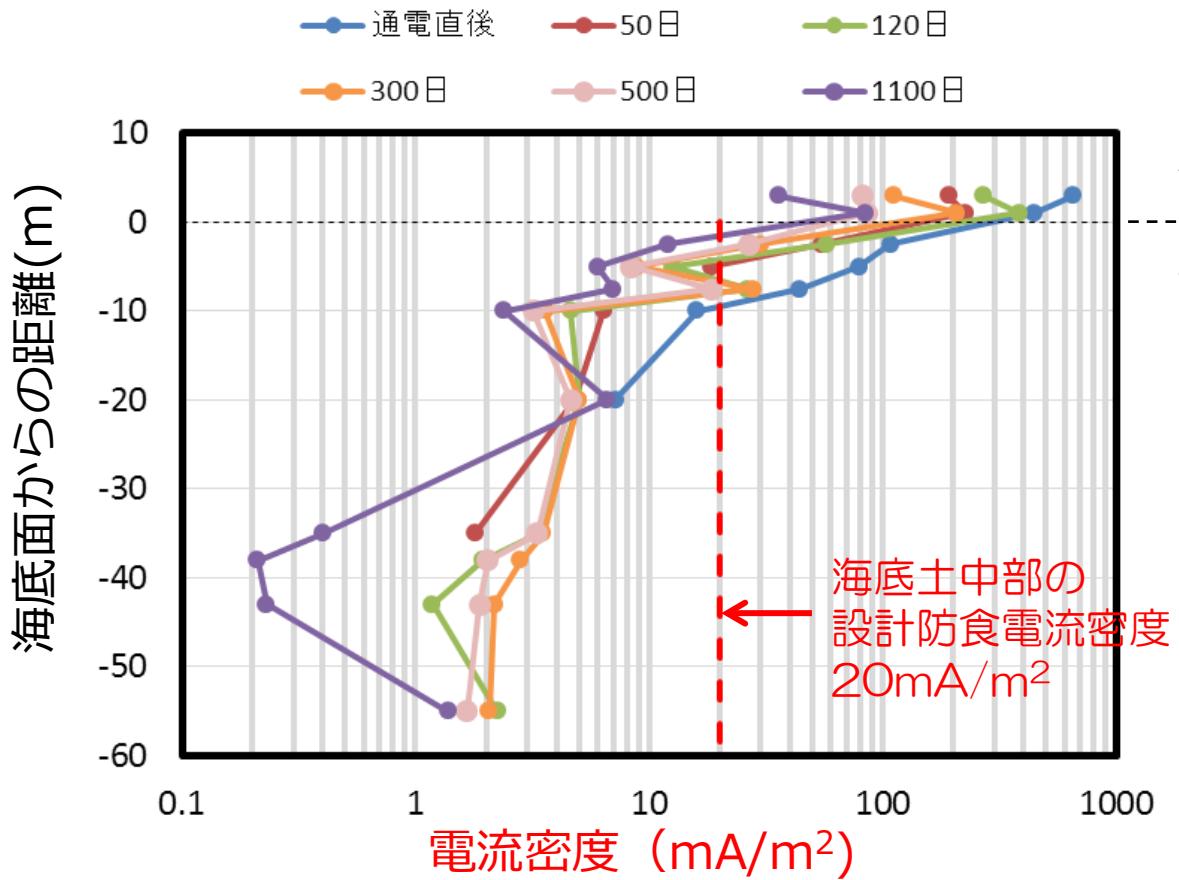


土中部の鋼材の電位分布の経時変化

- 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）



## 試験片に流入する電流密度



海中部

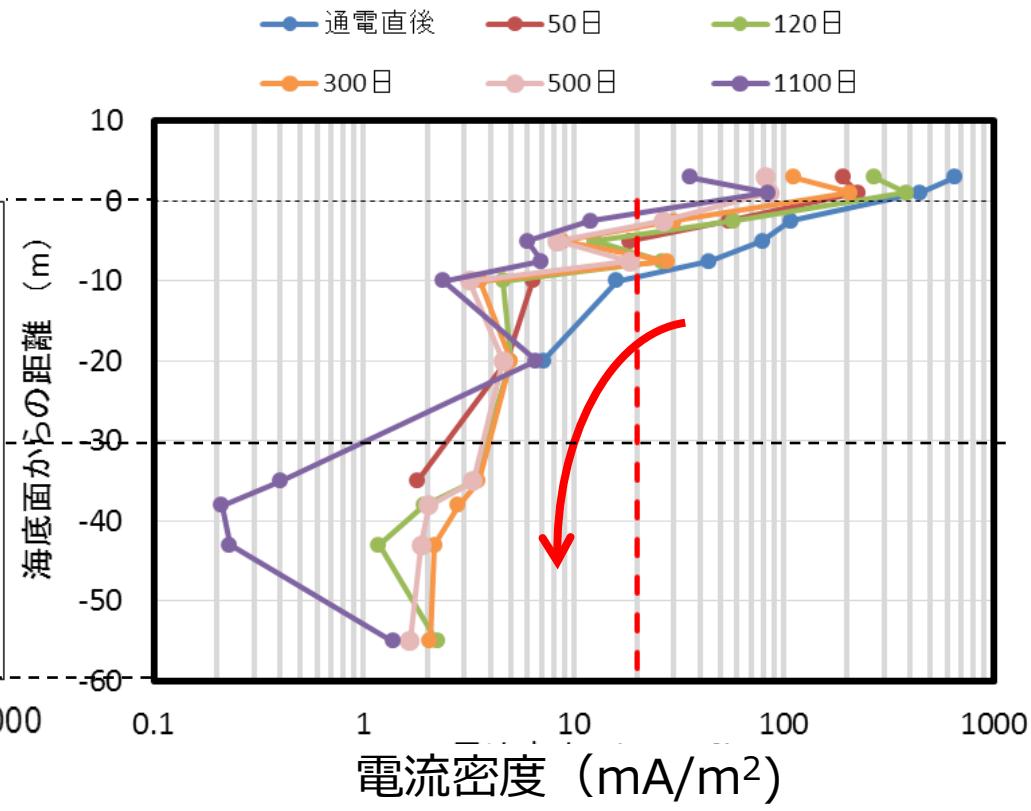
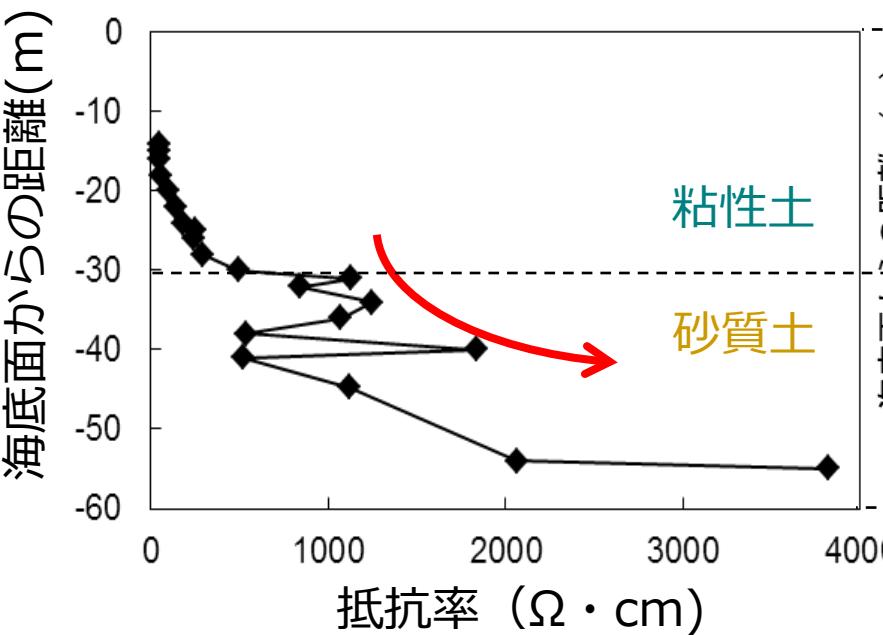
土中部

- ・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

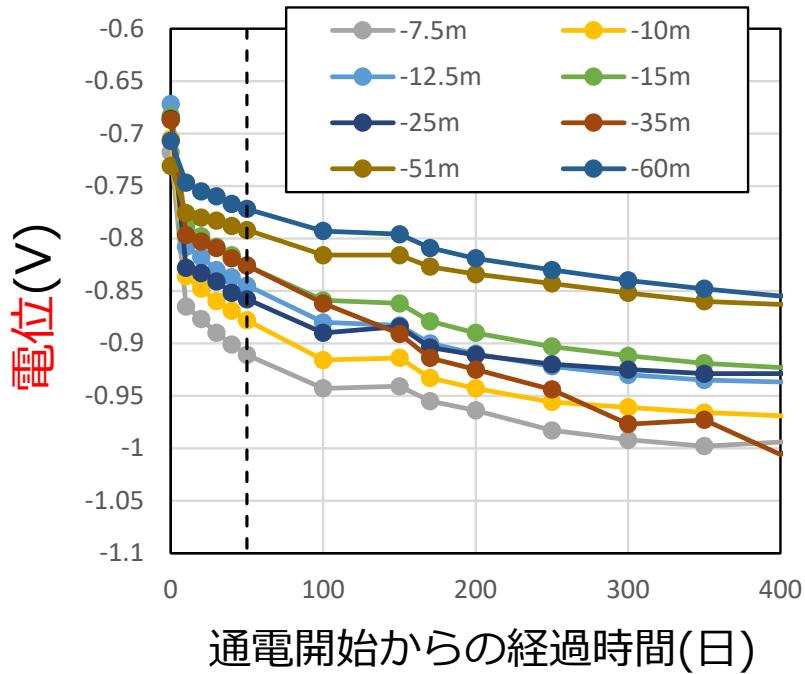


## 土質特性（土壤抵抗率）と電気防食の関係

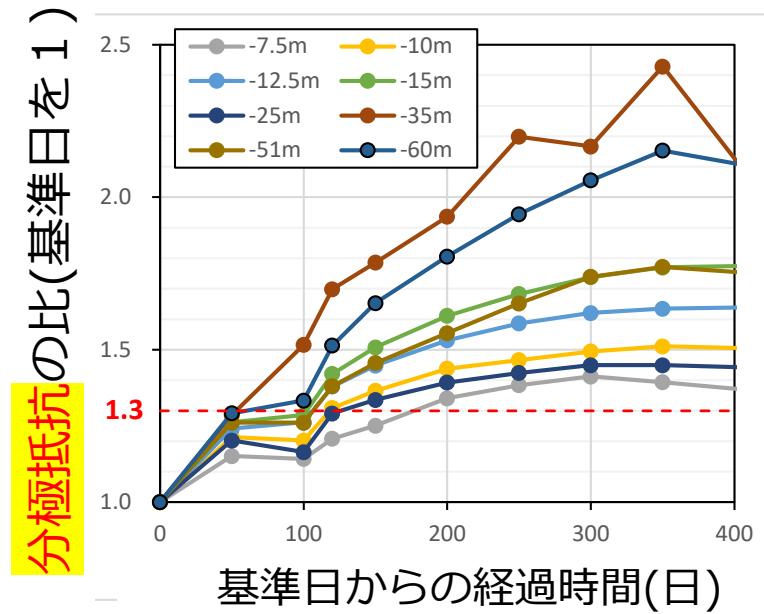


土壤抵抗率が大きい場所では、電流が低減

## 鋼材の電位、分極抵抗の経時変化



時間とともに  
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 = 
$$\frac{\text{電位の変化量 (分極量)}}{\text{電流}}$$

# 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)

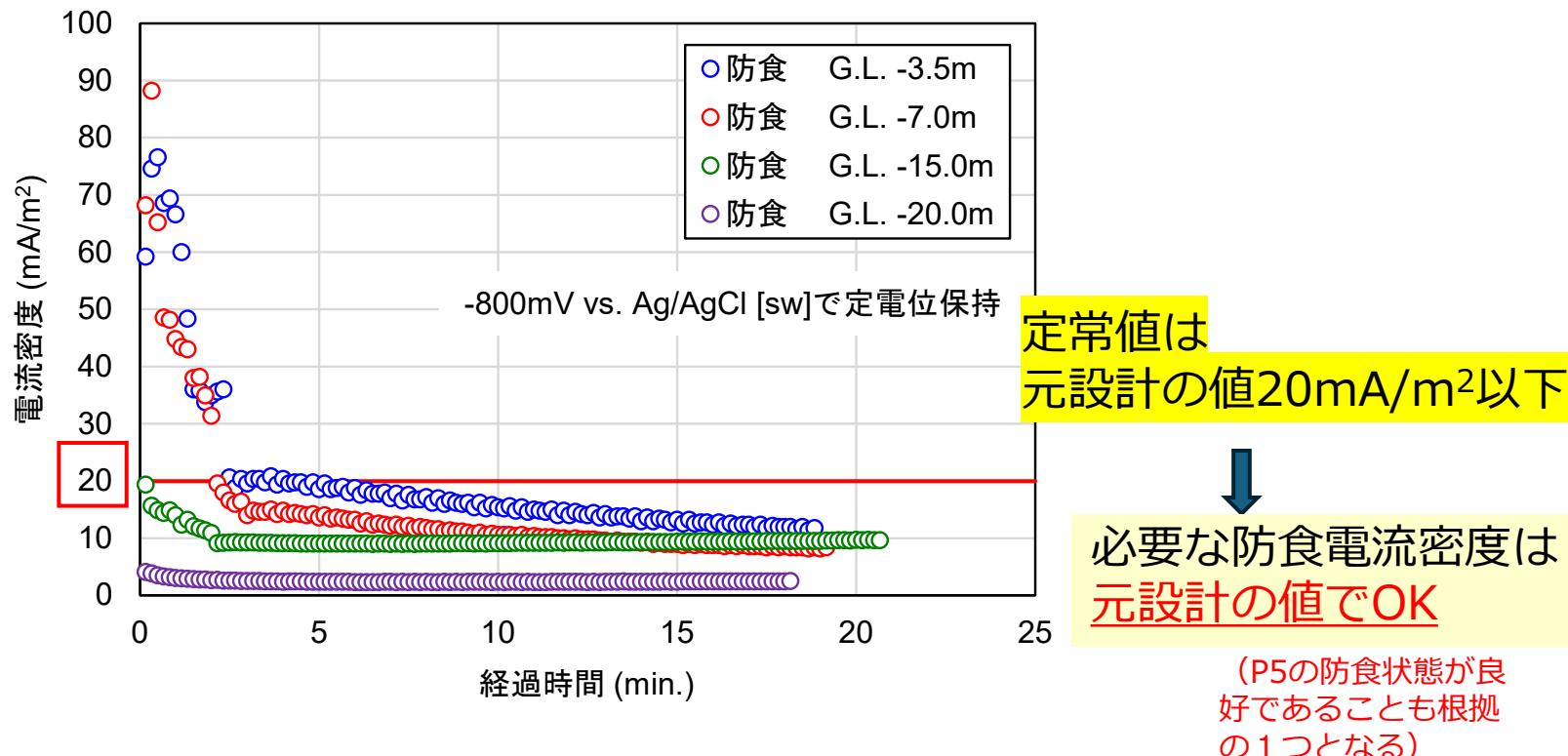


## ●定電位試験

(※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





## ●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，土壤抵抗率の実態

- ・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)

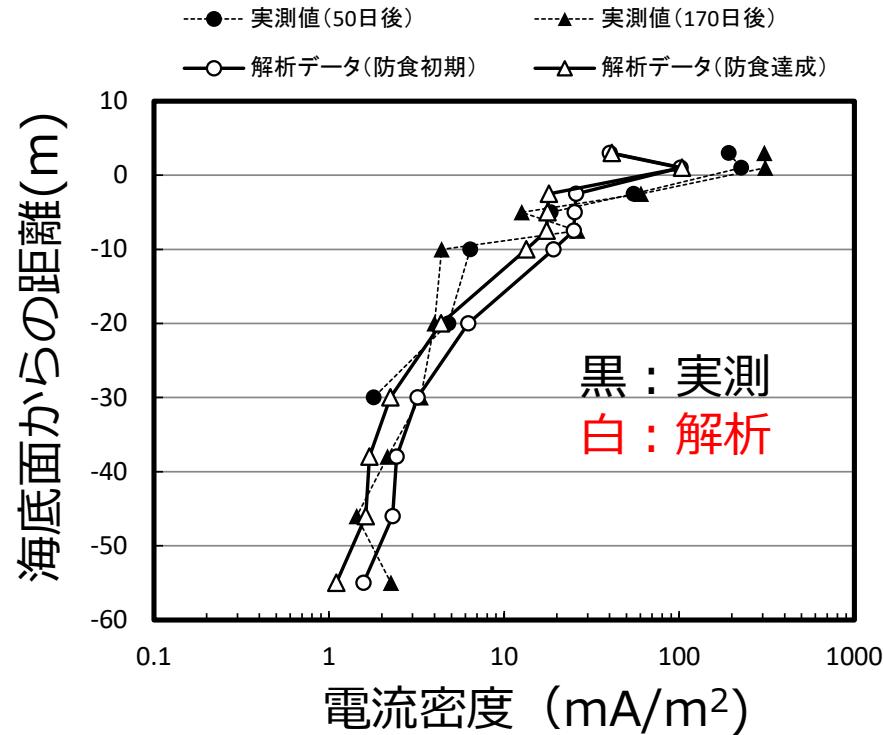
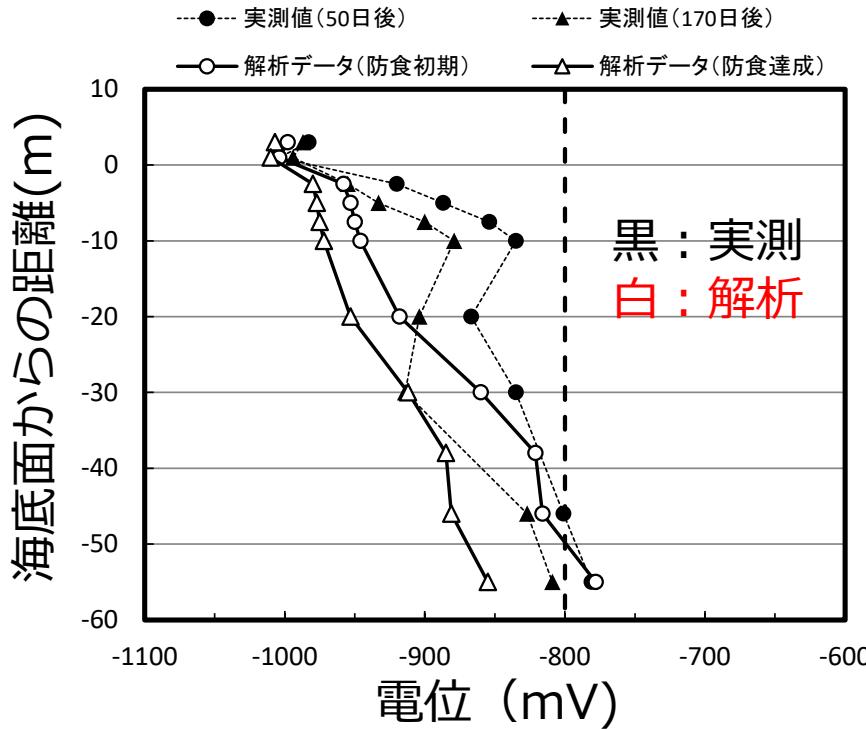
※机上の検討では困難

# 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。

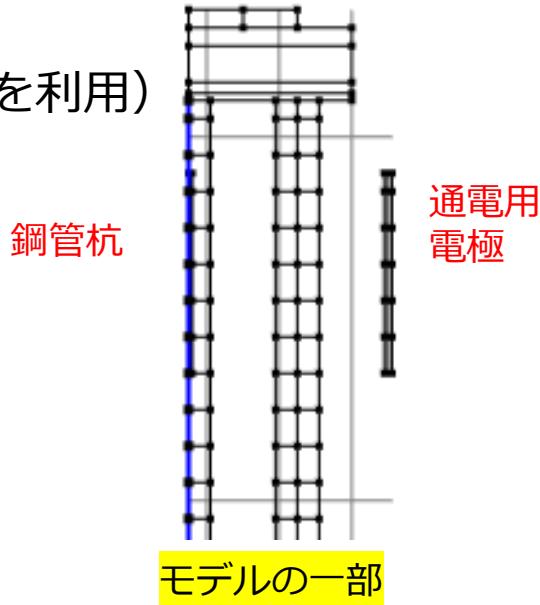


土質特性を考慮した解析手法を防食設計に取り入れることは可能

# 数値解析：解析方法、入力条件（パラメータ）

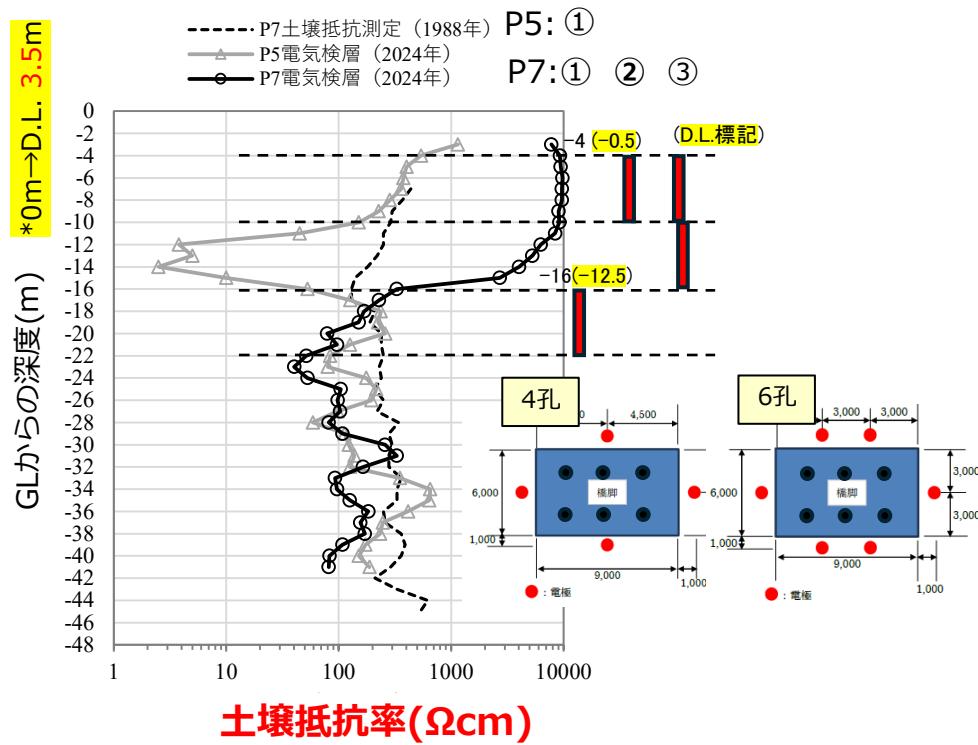


- 有限要素法  
(市販のソフトを利用)



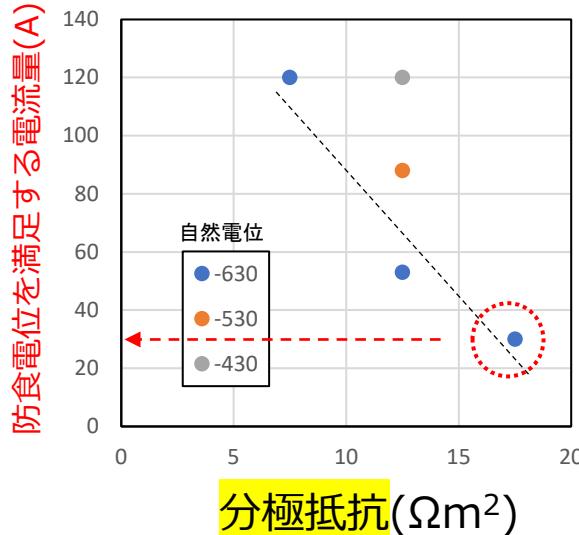
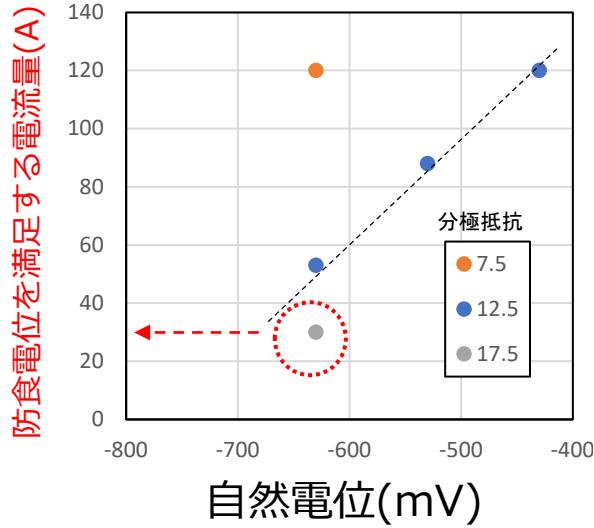
## 入力パラメータ

環境	・ 土壤抵抗率 (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

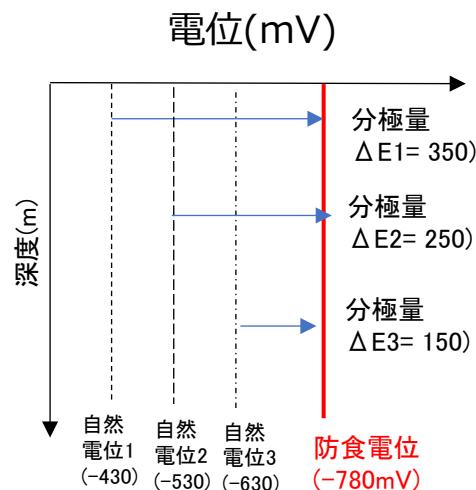




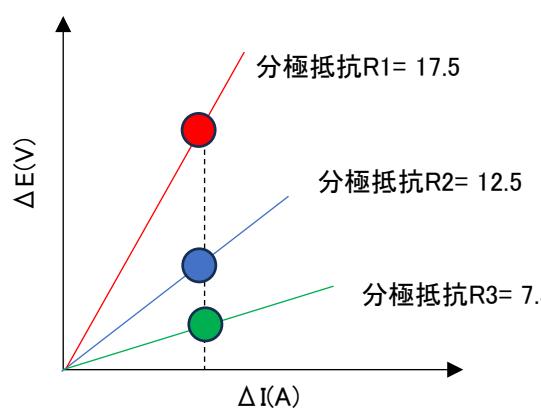
# 数値解析：パラメータ（自然電位，分極抵抗）の感度分析結果



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)

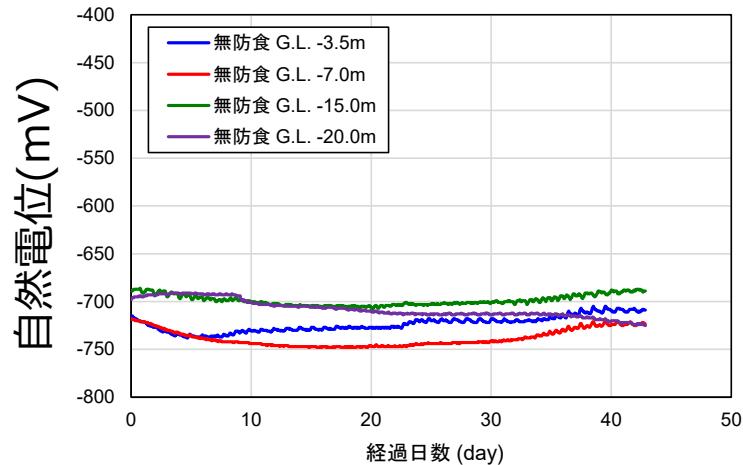
机上、室内試験では  
設定困難  
→現地試験による検証

# 数値解析：パラメータ設定のための現地暴露試験



## (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

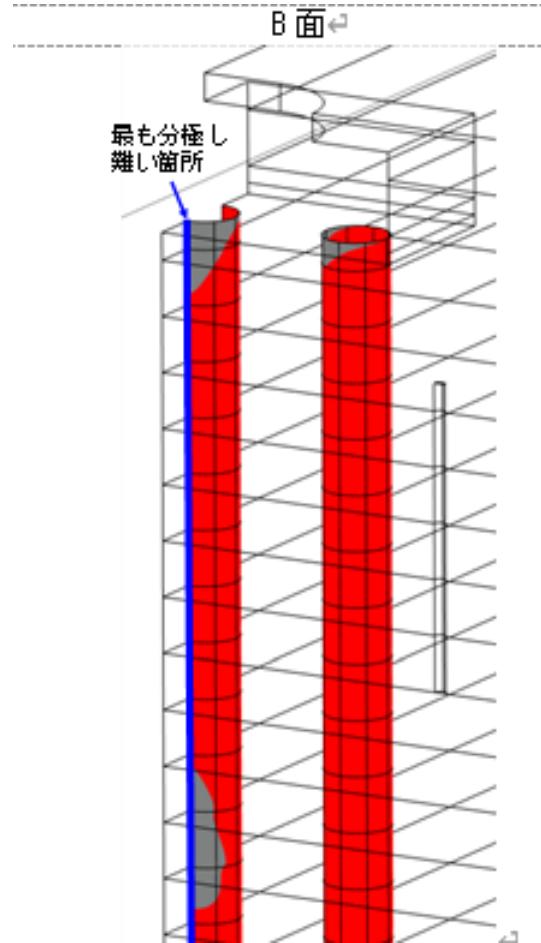
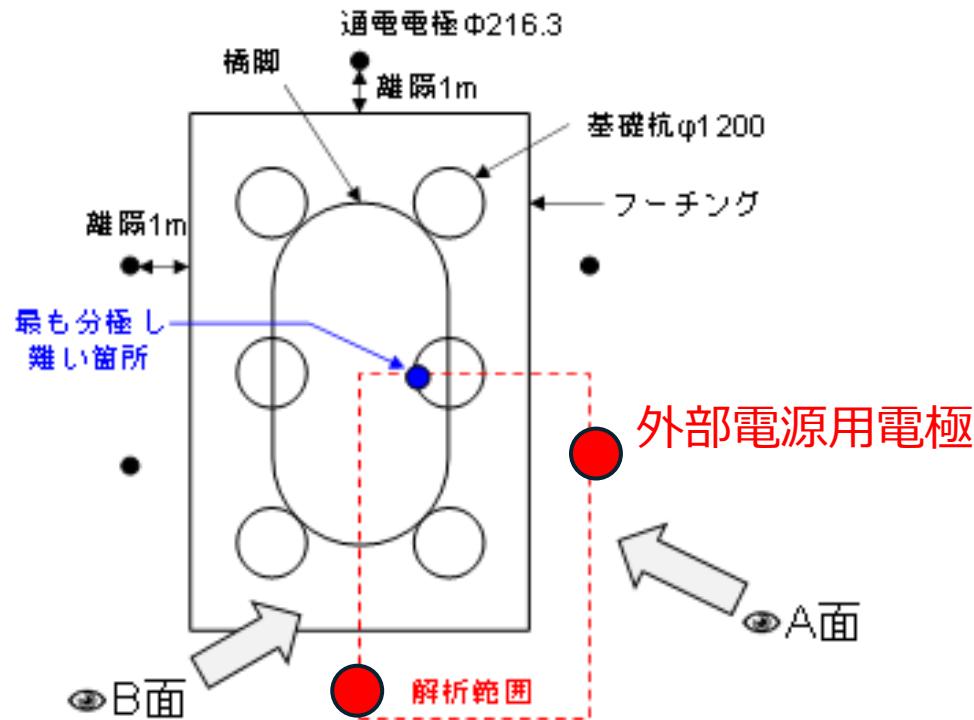
定電位試験で得られた結果より、下記の式を用いて分極抵抗を算出。

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

G.L. -3.5m	G.L. -7.0m	G.L. -15.0m	G.L. -20.0m
$9.60\Omega \cdot \text{m}^2$	$11.0\Omega \cdot \text{m}^2$	$13.2\Omega \cdot \text{m}^2$	$38.7\Omega \cdot \text{m}^2$

平均値: 10.3

# 数値解析：概要



最も分極し難い箇所で比較検討を実施

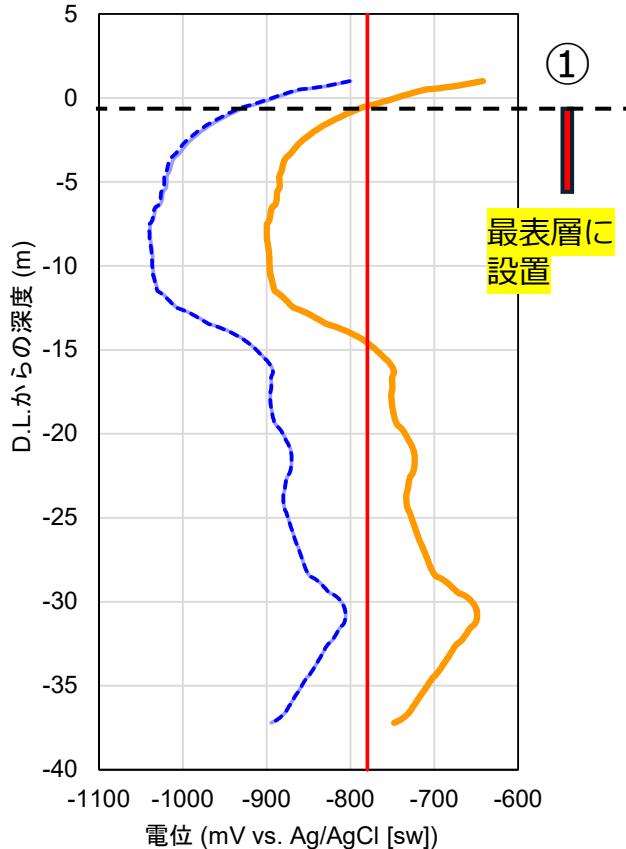


陽極配置案	孔数	自然電位 (mV vs. Ag/AgCl [sw])	カソード分極抵抗 ( $\Omega \cdot \text{m}^2$ )	通電量 (A)	備考
P5①	4	-720	10.3	20.9	
	6	-720	10.3	20.9	
P5①	4	-530	12.5	20.9	昨年度の解析条件

(元設計の値  
17.4\*1.2)

- ✓ 土壤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）

— No.1 : P5①\_4孔\_V=-720,  $R_s=10.3$   
- - - No.2 : P5①\_6孔\_V=-720,  $R_s=10.3$   
— No.1' : P5①\_4孔\_V=-530,  $R_s=12.5$   
— 防食電位 (= -780mV vs. Ag/AgCl [sw])

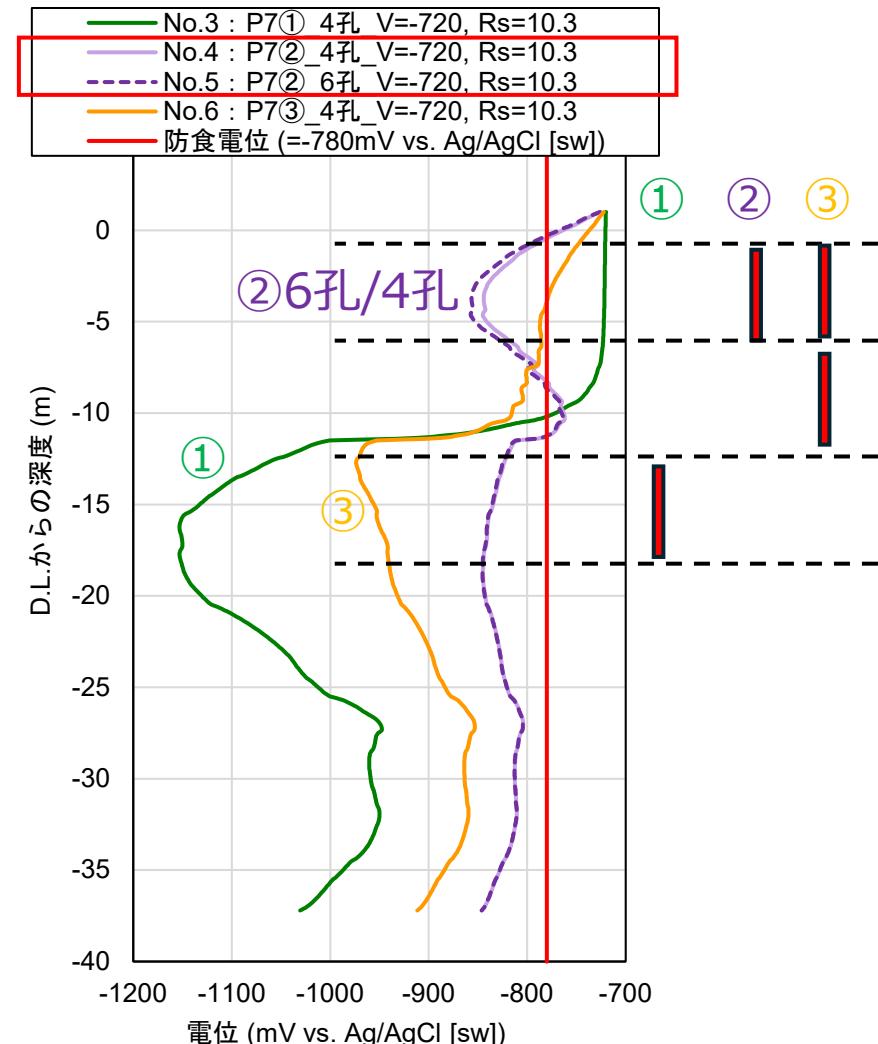




陽極配置案	孔数	自然電位 (mV vs. Ag/AgCl [sw])	カソード分極抵抗 ( $\Omega \cdot m^2$ )	通電量 (A)	備考
P7 ①	4	-720	10.3	20.9	
P7 ②	4	-720	10.3	20.9	
	6	-720	10.3	20.9	
P7 ③	4	-720	10.3	20.9	
P7 ②	6	-530	12.5	20.9	昨年度の解析条件

(元設計の値  
17.4\*1.2)

- ✓ 表層部の土壤抵抗率が非常に大きいため、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



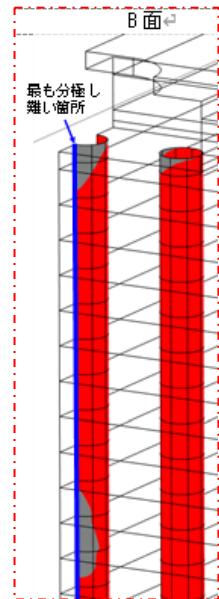
陽極配置案	孔数	自然電位 (mV vs. Ag/AgCl [sw])	カソード分極抵抗 ( $\Omega \cdot m^2$ )	通電量 (A)	備考
P7 ①	4	-720	10.3	20.9	
P7 ②	4	-720	10.3	20.9	
	6	-720	10.3	20.9	
P7 ③	4	-720	10.3	20.9	
P7 ②	6	-530	12.5	20.9	昨年度の解析条件

(元設計の値  
17.4\*1.2)

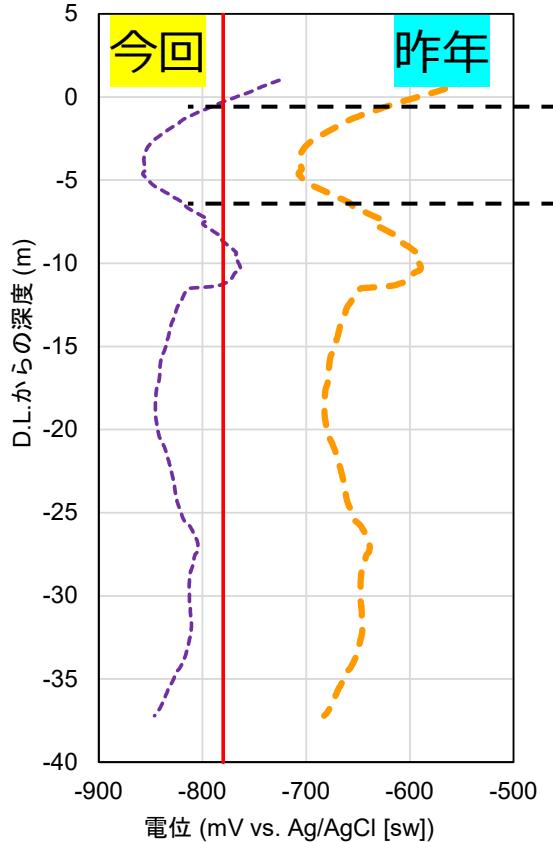
✓ 昨年より良化  
(自然電位の影響)



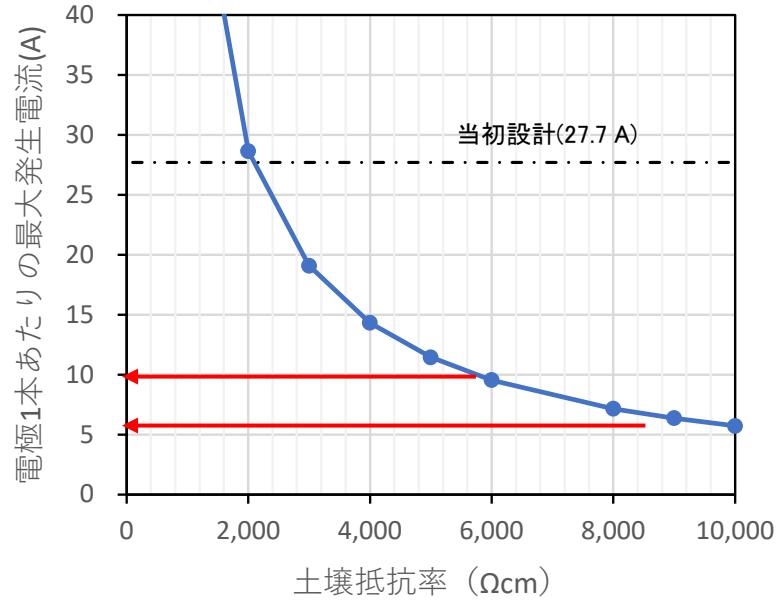
カソード分極抵抗 : 「長期暴露試験結果」を基に再検討



— No.5 : P7②\_6孔\_V=-720, Rs=10.3  
— No.5' : P7②\_6孔\_V=-530, Rs=12.5  
— 防食電位 (= -780mV vs. Ag/AgCl [sw])



# 電極1本当りの最大発生電流は土壤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<sub>a</sub> : 電極1本あたりの接地抵抗 [Ω]  
ρ<sub>1</sub> : 電極埋設部の土壤抵抗率（仮想電試験結果より）[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<sub>a1</sub> : 電極1本あたりの最大発生電流 [A]  
E<sub>DC</sub> : 直流電源装置の定格出力電圧 : 60V

## 土壤抵抗率の設定が重要



## ●(1)電位, 水質, 土壤抵抗率の実態

- ・電位：干満, 季節変動は顕著でない.
- ・土壤抵抗率：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, 土壤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( $20\text{mA/m}^2$ )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.