

令和 5 年 5 月 23 日現在

機関番号：33803

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04657

研究課題名(和文) 反応/輸送を考慮した土中鋼材の腐食要因抽出とその対応法の提案

研究課題名(英文) Corrosion factors of underground steel considering reaction/transportation of substances and proposal of countermeasure for the corrosion protection

研究代表者

西田 孝弘 (Nishida, Takahiro)

静岡理工科大学・理工学部・教授

研究者番号：10345358

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、土中に埋設した鋼材の分極抵抗、自然電位などの電気化学的パラメータを、曝露試験を通じて計測した。その結果、腐食速度としては、曝露初期に一度上昇し、その後低下する傾向が確認された。ただし、砂の場合で、下部に設置した場合は、大きな腐食速度の上昇は確認されなかった。以上の結果から、土中鋼材の腐食は、酸素の影響を強く受けると考えられ、酸素を低減することにより腐食を抑制できることが考えられた。特に、粘土中の鋼材は、酸素透過性の変化によりマクロセル腐食が発生する傾向があり、本研究では、地下鋼材の局部腐食を防止するための技術を検討し、酸素還元剤の使用が有効であると考えられた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、種々のパラメータを勘案し、カソード反応がアノード反応に及ぼす影響を考慮し、酸素や水の土中での移動速度を関連付けて評価した。また、コンクリート中鋼材を対象として、内部の酸素低減による鉄筋腐食の抑制について検討を進めており、工業副産物や微生物に基づいた技術の特許申請をしている。本研究ではこれらの知見を応用し、酸素低減可能な材料を散布することにより土中の酸素量を低減することを試みた。このような検討はこれまで見当たらず、この点が本研究の獨創性である。

研究成果の概要(英文)：In this study, electrochemical parameters such as polarisation resistance and natural potential of steel buried in soil were measured through exposure tests. As a result, it was confirmed that the corrosion rate increased once in the early stage of exposure and then decreased. However, in the case of sand, no significant increase in corrosion rate was observed when the steel was installed at the bottom. These results suggest that the corrosion of steel in soil is strongly influenced by oxygen and that corrosion can be reduced by reducing oxygen. In particular, steel in clay tends to develop macrocell corrosion due to changes in oxygen permeability, and this study investigated techniques to prevent localised corrosion of underground steel and found the use of oxygen reducing agents to be effective.

研究分野：社会インフラ材料学

キーワード：鋼材腐食 土中 抑制方法 アノード カソード 酸素低減

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

土中での腐食に関しては知見に乏しく、かつ土質分類(砂,シルト,粘度)に依存した土粒子の粒径や粒度,水分量(含水比),間隙水中に溶解した物質(水酸化イオン(OH⁻),塩化物イオン(Cl⁻),溶存酸素(DO)),および土中の温度が複雑に影響しあうことで,土中での腐食現象の評価を難しくしている。また,従来は,上記の複雑な現象を曖昧にとらえたまま,経験的に土中の鋼材の耐久設計が行われてきた。しかし,種々の土中構造物の需要が高まりつつある昨今,図-1(a)に示すような腐食損傷の対策,(b)に示すような総延長が長い新規部材の設置,さらには(c)に示すような数千年にも及び安全性確保が求められる放射性廃棄物処分施設の建設においては,経験的な耐久設計では対応が難しくなっている。

本研究では,これらの鋼材の腐食環境を示すパラメータを,鋼材の腐食現象に影響を及ぼす物理的・化学的要因に分類し,同様の試験条件下で定量的に評価することにより,上記の難題を克服する。特に,既往の土壌腐食性の評価指標においては,水分量やpH,溶存酸素,各種イオン濃度などの化学的要因のみに着目した評価となっており,物理的要因である接触面積や物質の移動係数(透水,拡散)を評価する項目が入っていない。これらは,土木構造物のような長期的な供用が期待される構造物において,将来的な腐食環境予測,より精度の高い耐久設計あるいは効果的な対策方法の確立を実施するために必要不可欠と考え、今回の検討に至っている。

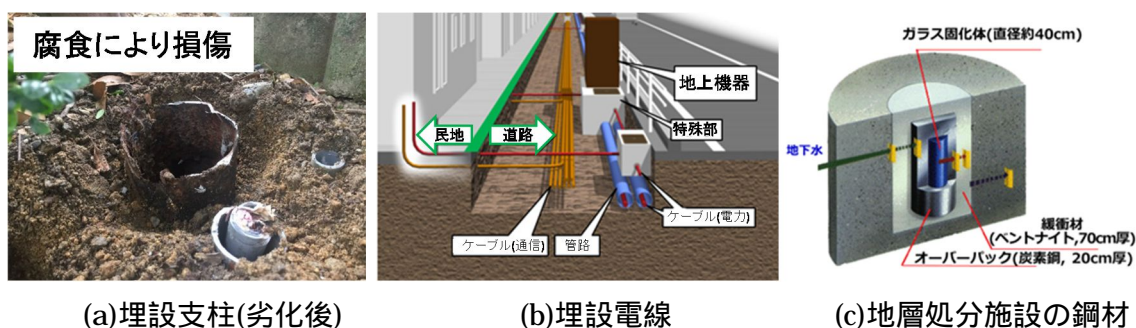


図-1 本研究で対象とする土中鋼材の例

2. 研究の目的

本研究の目的は,土中の鋼材を対象として,(1)鋼材腐食の進行速度に及ぼす要因の抽出,および(2)抽出された要因を踏まえた腐食の対策方法の確立を行うことである。鉄の腐食反応は,アノード反応(鉄の溶解)とカソード反応(酸素と水の消費)に分けられるが,既往の防食方法の基本的考え方は,アノード反応の抑制である。すなわち,(a)アノード反応の活性度を定める不動態皮膜の回復や(b)不動態皮膜を破壊するハロゲン化物(特に塩化物)の抑制,固定化,あるいは(c)電気防食などのアノード反応の停止である。ただし,土中環境において,不動態皮膜を長期間健全に保つことは難しい。一方で,アノード反応とカソード反応はバランスして生じるため,カソード反応を抑制することで腐食速度を極めて遅く制御できると考えられる。

3. 研究の方法

土中での鋼材の腐食現象に関して,基礎的な検討を行う。砂,石に埋設された鋼材を対象とした要素試験(図-2)により,背面土中鋼構造物の腐食過程の基本特性を把握する。試験体は30mm×50mmの鋼板(図-3)に対極(チタンメッシュ,図-4)と参照電極(亜鉛電極,図-5)を設置したものを1組の供試体として設置している。供試体には,砂および小石の異なる層に曝露し,各層に2水準の高さで16組の供試体を設置している。層内の上部では常に久里浜湾から採取した海水を循環させている。海水の物性値を表-1に示す。本検討では,砂(最大寸法5mm),小石(最大寸法20mm)の埋戻し材の種類の違い,および海水と酸素の供給条件の違いをパラメータとして,背面土中の鋼材の腐食特性について2年間の追跡調査を実施した。

加えて実際の土中構造物などでの調査や腐食に及ぼす律速条件の影響について検討を行った。

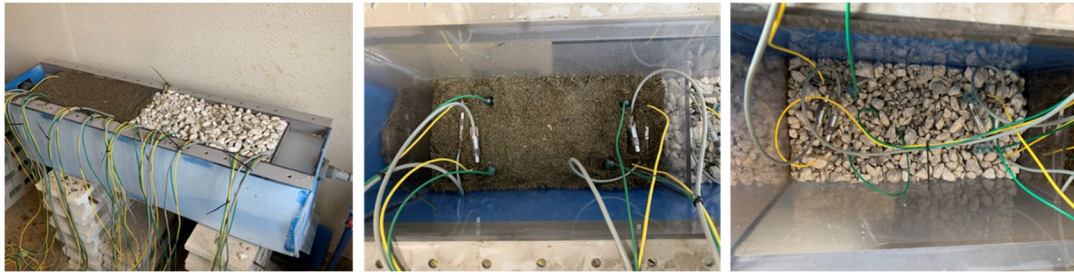


図-2 試験体の設置状況



図-3 鋼材



図-4 参照電極



図-5 対極

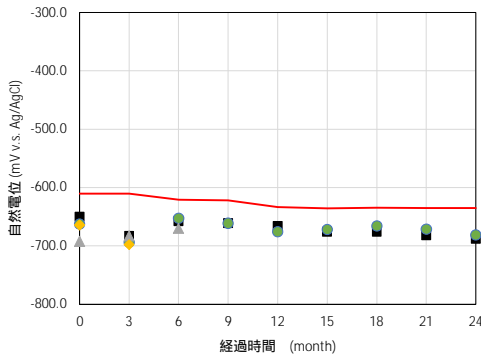
表-1 海水の物性値

項目	値
計測日	2020年3月11日
温度	14.7
溶存酸素量	5.85 mg/L
塩分濃度	3.13 質量%
pH	7.53

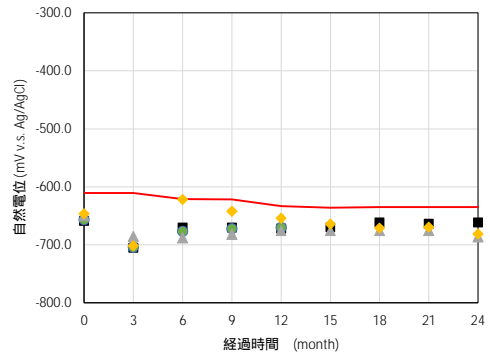
4. 研究成果

鋼材の自然電位の時間変化を図-6に示す。また、鋼材の腐食速度の時間変化を図-7に示す。自然電位としては、経過時間に対する変化は小さく、砂の場合と石の場合での違いは確認されなかった。全体的に海水中より砂および石の場合の方が自然電位は低い結果となった。腐食速度としては、曝露初期に一度上昇し、その後低下する傾向が確認された。ただし、砂の場合で、下部に設置した場合は、大きな腐食速度の上昇は確認されなかった。この原因としては、年度を通じた温度の変化に伴い分極抵抗が変化したこと、砂の場合には下部における酸素量が低下したことなどが想定される。特に、温度の影響に関しては、一般に10の温度上昇で腐食速度は約2倍となることが知られており、9月と12月で約10弱程度異なることを考えると、6か月経過後あたりの腐食速度の上昇は温度の影響が大きいと考えられる。2年目に関しては、周辺の環境が安定し、大きな腐食速度の上昇は確認されなかった。

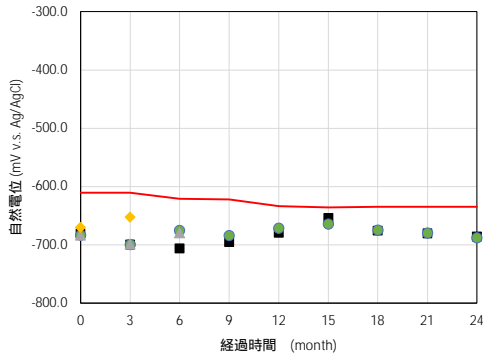
何れの結果（自然電位、腐食速度）に関しても、埋戻し材を砂、あるいは石としても顕著な差異は確認されなかった。一方で、海水中での腐食と比較した場合、酸素の供給や海水の循環がしにくい深部においては、腐食速度が若干低い傾向が確認されたが、上部（表面から5cm程度の位置）では、水中と同程度の腐食速度となる場合もあった。



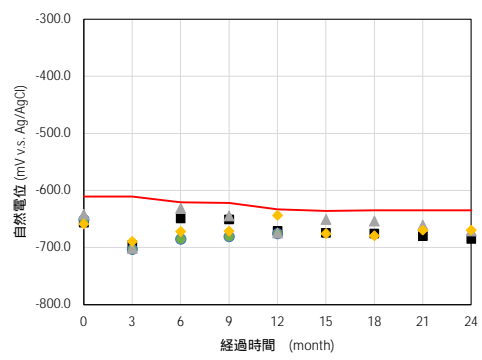
(a)砂 (最大寸法 5mm), 下部



(b)砂 (最大寸法 5mm), 上部

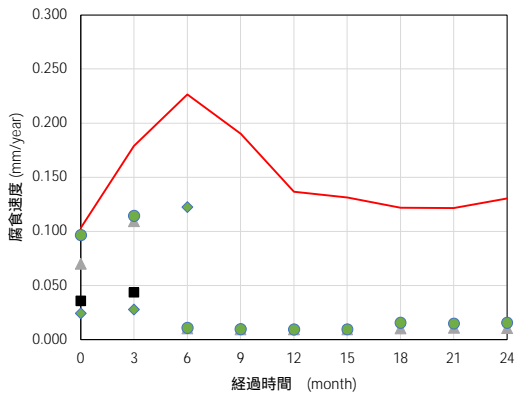


(a)小石 (最大寸法 20mm), 下部

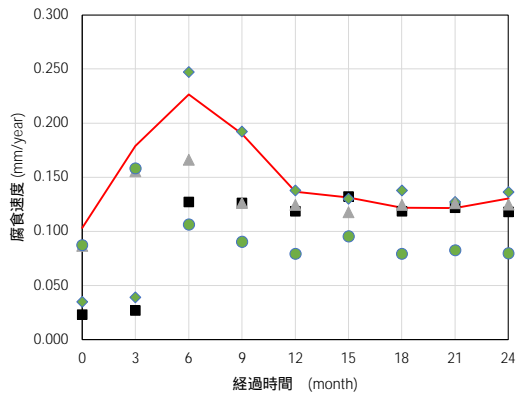


(b)小石 (最大寸法 20mm), 上部

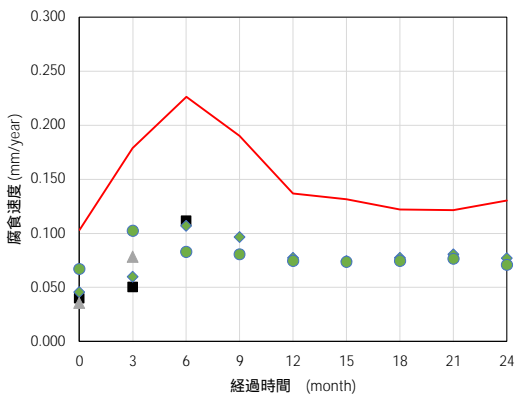
図-6 自然電位の推移 (赤の実線は海水中)



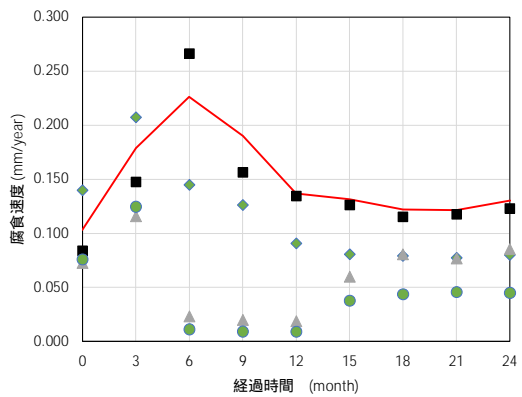
(a)砂 (最大寸法 5mm), 下部



(b)砂 (最大寸法 5mm), 上部



(a)小石 (最大寸法 20mm), 下部



(b)小石 (最大寸法 20mm), 上部

図-7 腐食速度の推移 (赤の実線は海水中)

以上の結果から、自然電位としては、経過時間に対する変化は小さく、曝露条件（砂、石）の違いは確認されなかった。全体的に海水中より砂中および石中の方が自然電位は低い結果となった。分極抵抗から算出した腐食速度としては、曝露初期に一度上昇し、その後低下する傾向が確認された。ただし、砂の場合で、下部に設置した場合は、大きな腐食速度の上昇は確認されなかった。この原因としては、年度を通じた温度の変化に伴い分極抵抗が変化したこと、砂の場合には下部における酸素量が低下したことなどが想定される。何れの結果（自然電位、腐食速度）に関しても、埋戻し材を砂、あるいは石としても顕著な差異は確認されなかった。

一方で、海水中での腐食と比較した場合、酸素の供給や海水の循環がしにくい深部においては、腐食速度が若干低い傾向が確認されたが、上部（表面から5 cm程度の位置）では、水中と同程度の速い腐食速度となる場合もあった。以上の結果から、土中鋼材の腐食は、酸素の影響を強く受けると考えられ、酸素を低減することにより腐食を抑制できることが考えられた。一方で、土と粘土の間に位置するパイプラインなどの地下鋼材の腐食について検討した。粘土中の鋼材は、酸素透過性の変化によりマクロセル腐食が発生する傾向があった。このことは、自然電位や分極抵抗等の電気化学的測定値から説明される。このような土中鋼の腐食を防止するために、土中鋼材管にある抵抗を検討する必要がある。このため、本研究では、地下鋼材の局部腐食を防止するための技術を検討した。その結果、酸素還元剤の使用は、局所的な腐食の防止に有効であると考えられた。

論文リスト

1. 西田孝弘, 河合慶有, 齋藤淳, 大即信明: 鋼材腐食抑制のための酸素低減型混和材の開発, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol. 21, pp.41-46, 2021.10.
2. Mary Grace Ventanilla, Jason Ongpeng, Takahiro Nishida, Keiyu Kawaai: Reduction of Dissolved Oxygen in Minimizing Corrosion, Acta Polytechnica CTU Proceedings Vol.33, pp.624-630, 2022.03.
3. 西田孝弘, 山路徹, 加藤絵万, 佐々木秀郎: 約25年供用された鋼管杭の重防食端部における腐食性状の調査, 土木学会念学術講演会概要集, Vol.76, V-77, 2021.09
4. 西田孝弘, 山路徹: 54年間供用された土中鋼構造物の腐食性状の調査, 第41回防錆防食技術発表大会講演予稿集, Vol.41, pp.151-152, 2021.07.
5. 平城清志, 河合慶有, 西田孝弘, 氏家勲: カソード分極試験における鋼材周囲の酸素濃度の変動と律速条件の関係, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.22, pp.25-28, 2022/10
6. Keiyu Kawaai, Takahiro Nishida: Corrosion of underground Steel between Soil and Clay and Its Prevention, Proceedings of GEOMATE 2022, Vol. 12, p.276-279, 2022.11.
7. Takahiro Nishida, Keiyu Kawaai, Nobuaki Otsuki: Activation Energies of Chloride Induced Corrosion of Steel in Concrete, Proceedings of GEOMATE 2022, Vol. 12, p.378-383, 2022.11.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 西田孝弘, 河合慶有, 齋藤淳, 大即信明	4. 巻 21
2. 論文標題 鋼材腐食抑制のための酸素低減型混和材の開発	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集	6. 最初と最後の頁 41-46
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mary Grace Ventanilla, Jason Ongpeng, Takahiro Nishida, Keiyu Kawaai	4. 巻 33
2. 論文標題 Reduction of Dissolved Oxygen in Minimizing Corrosion	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Acta Polytechnica CTU Proceedings	6. 最初と最後の頁 624-630
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 西田孝弘, 山路徹, 加藤絵万, 佐々木秀郎	4. 巻 76
2. 論文標題 約25年供用された鋼管杭の重防食端部における腐食性状の調査	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会念学術講演会概要集	6. 最初と最後の頁 V-77
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 西田孝弘, 山路徹	4. 巻 41
2. 論文標題 54年間供用された土中鋼構造物の腐食性状の調査	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 第41回防錆防食技術発表大会講演予稿集	6. 最初と最後の頁 151-152
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 平城清志, 河合慶有, 西田孝弘, 氏家勲	4. 巻 22
2. 論文標題 カソード分極試験における鋼材周囲の酸素濃度の変動と律速条件の関係	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集	6. 最初と最後の頁 25-28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Keiyu Kawaai, Takahiro Nishida	4. 巻 12
2. 論文標題 Corrosion of underground Steel between Soil and Clay and Its Prevention	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of GEOMATE 2022	6. 最初と最後の頁 276-279
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Takahiro Nishida, Keiyu Kawaai, Nobuaki Otsuki	4. 巻 12
2. 論文標題 Activation Energies of Chloride Induced Corrosion of Steel in Concrete	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of GEOMATE 2022	6. 最初と最後の頁 378-383
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計2件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 西田孝弘
2. 発表標題 約25年供用された鋼管杭の重防食端部における腐食性状の調査
3. 学会等名 土木学会念学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西田孝弘
2. 発表標題 54年間供用された土中鋼構造物の腐食性状の調査
3. 学会等名 第41回防錆防食技術発表大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	河合 慶有 (Kawaai Keiyu) (90725631)	愛媛大学・理工学研究科(工学系)・准教授 (16301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------