

臨海部に設置された基礎鋼管杭の 土壌中腐食に関する検討

A Study on Soil Corrosion of Steel Pipe Piles in Coastal Region

山本広祐*, 工藤康二**, 西 好一**

Kousuke Yamamoto, Kouji Kudou and Kouichi Nishi

In-service periods of some among the facilities in coastal region have already passed the years of endurance, so that, especially, the deterioration assessment of foundation structures which bear the upper structures has become an important subject. In case of steel structures, the main evaluation factor is soil corrosion, but the actual state of soil corrosion in coastal region is not confirmed yet.

In this paper, we investigated the corrosion data of steel piles, and conducted a few experiments to obtain the basic data of soil corrosion. As the results of these experiments which were simulated the changing of ground water level, we confirmed that the corrosion rate becomes very high when the soil has good aeration.

Keywords: soil corrosion, steel pile, corrosion simulation test, ground water

1. 緒言

臨海施設の中には、既に設計時に想定した耐用年限を越えるものがでてきている。耐用年限の終了後は、施設の必要性や劣化状態を適切に評価した後に、既設構造物が有効利用できるか否かを判断する必要がある。評価にあたっては、構造物全体を支持する基礎構造物の劣化度判定が特に重要であるが、臨海部における鋼構造物の主たる劣化要因である土壌中腐食の実態は、十分調査・解明されていないのが実状である。

一般に、土壌中における鋼材の腐食速度は小さく、高々0.01~0.03mm/yr程度であるといわれている。しかしながら、ある条件下では局所的に大きな腐食が進行することが確認されており、例えば、酸素濃淡電池、異種金属やコンクリートとの接触、地下水位の変動、嫌気性細菌等による腐食がその代表といえる^{1)~3)}。一方、臨海部に立地する基礎鋼構造物では、海水中の塩分や潮位変動の影響も併せて受けるため一般の土壌中より更に腐食が大きいことが予想される。

本論は、以上のような状況に鑑み、臨海部に立地する基礎鋼構造物（主として鋼管杭）の腐食実態を既往文献から分析し、地下水位の変動が土壌中腐食に及ぼす影響を実験的に検討した結果について述べるものである。

2. 基礎鋼構造物の腐食実態

土壌中に埋設された基礎鋼構造物の腐食実態を調査した事例は少なく、国内地点の調査結果が詳細に公開された事例は数例に過ぎない（例えば、文献7)~9)）。これらの文献に示される腐食調査は、内陸部を含む全国15地点（総計42杭）の事例であり、以下に示す事項に関連してデータを取得している。

- ① 文献7)は、環境調査を事前に実施し、環境因子と鋼管杭の腐食状態の相関を定量的に把握するために行った長期試験（30年）の中間報告である。；鉄道総合技術研究所実施
- ② 文献8)は、コロージョンサウンドによる鋼管杭の腐食推定方法を検証する目的で行った調査結果である。；土質工学会実施
- ③ 文献9)は、幸谷橋の架け替えに際して、17年間供用された橋脚基礎鋼管杭の腐食調査を行った結果である。内陸部の土壌中腐食の把握を主目的にしている。；建設省実施

文献7)~文献9)に示されたデータをもとに、腐食分布にピークが発生する位置と発生頻度及びピーク腐食速度の関係を纏めたものが図-1及び図-2である。文献7)~文献9)より、実態として確認あるいは推察できたことを以下に要約する。

- ① 土壌中は、局所的な腐食を除いて穏やかな腐食環境（腐食速度が0.05mm/yr以下）にある。
- ② 腐食のピークは、地下水位の変動帯またはそれ以上に存在することが多い。この部分は、酸素の供給量

* 正会員 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 FBR部 座屈研究室 (270-11 千葉県我孫子市我孫子1646番地)

** 正会員 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 立地部 土質研究室

が多いこと、乾湿を繰り返す可能性があること、包気帯と飽和水帯の間で濃淡電池が形成されやすいことなどが腐食の加速要因として上げられる。更に、臨海部の埋立地であれば、汚染物質が堆積した旧海底面の底土層などに生育する嫌気性細菌の影響も受ける可能性がある。

- ③ 酸素の供給量が少ないと予想される地表面からかなり深い部分でも腐食が進行することが確認されている。これらの大半は、嫌気性細菌の影響と推察されている。

しかしながら、腐食調査は大半が板厚測定と土質の分析のみであり、地下水やその他の周辺環境に関する情報が明示されていない場合が多いため、十分な考察が行えなかった。また、材質的に変化（不連続）を生じる基礎杭の継ぎ手箇所や、基礎杭と上部構造コンクリートとの接続部分において生じるマクロセル腐食などに関しても殆ど情報が得られず、実態の詳細は不明である。

3. 鋼管部材の腐食試験

前述の通り、地下水位の変動帯付近においては腐食が加速されやすい傾向にある。従って、本論では、臨海部において地下水位が変動する場合を想定（模擬）した土壤中腐食試験を実施した。腐食の状態は、使用鋼材の材質の他、土質、水質、地下水位の変動、温度等、腐食環境の違いにより大きく変化するが、この試験では以下に示す要因の把握を目的とした。

- ① 土壤中における鋼管部材のミクロセル腐食量
- ② 溶接線を有する鋼管部材の腐食量
- ③ 地下水位の変動が腐食に及ぼす影響
- ④ 土の通気性が腐食に及ぼす影響

鋼材の腐食は発生初期に急激に進行し、鋼材表面に腐食生成物が形成されるとそれが保護層となり腐食反応が抑制される場合が多い。従って、本試験では、腐食発生初期の短期的な特性の把握に主眼を置き、試験期間を約90日に設定した。

3.1 試験方法

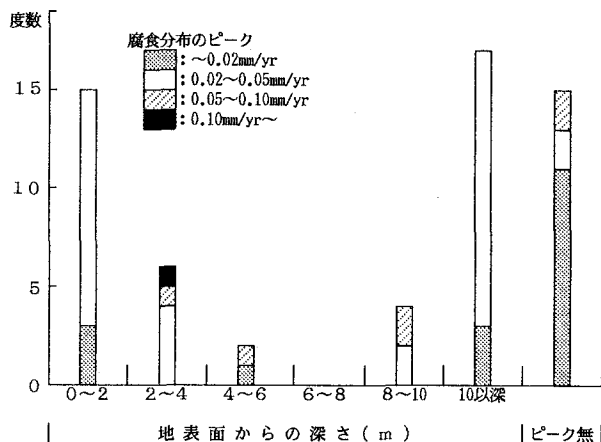
(1) 試験片の作成

試験片は、JIS G3444（強度規格 STK41-EG）の鋼管杭を使用して、次の要領で製作した。

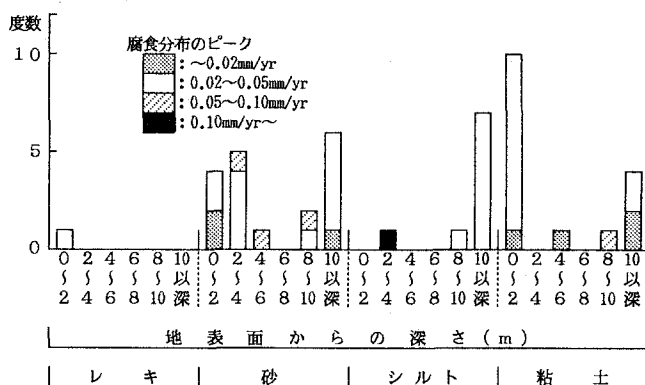
- ① 鋼管杭（母材）からの試験片（「普通試験片」と略称）の切り出し
直径φ300mm、板厚t6mmの鋼管杭から、長さ140mm、幅30mm程度の試験片を切り出す。
- ② 溶接線を有する鋼管杭からの試験片（「溶接試験片」と略称）の切り出し
普通試験片と同一の鋼管杭を周方向に突合せ溶接し、長さ140mm、幅30mm程度の試験片を切り出す。溶接線の位置は、試験片の長手方向の中央付近とした。
- ③ 試験片の表面仕上げ
普通試験片及び溶接試験片とも、鋼管杭の外表面部分のみ研磨し、内面部分は黒皮のままとした。

(2) 土槽の作成

土槽に使用する土試料は砂及びレキの2種類とした。腐食に関する土側の影響因子としては、土の成分、通気



図－1 腐食速度のピーク発生位置（深さ分析）



図－2 腐食速度のピーク発生位置（土質分析）

性、抵抗、含水比等、様々であるが、特殊な環境を除いては酸素の供給量の差が最も支配的と判断し、通気性の極端に異なる2種類の土試料を選定した。使用した土試料の粒度分布は、図-3に示す通りである。各土槽にはポリエチレンの容器を使用し、側面及び底面には排水（通水）孔を設け、土槽内面には土試料の流失防止のためステンレスネットを張り付けた。各土槽には、土試料を層状に敷き詰めながら締め固め、途中、普通試験片10本、溶接試験片5本を鉛直に埋設した。

（3）水位一定試験の概要

砂土槽、レキ土槽が同時に入る水槽を準備し、水槽内に各土槽を設置した後、NaCl水溶液（食塩水）を満たした。NaCl濃度は、模擬地下水として考慮すべき最も厳しい状況を想定し、3%（海水とほぼ同じ濃度）で一定とした。更に、水槽内には、参考として普通試験片5本、溶接試験片3本を設置し、その内、普通試験片2本は腐食の経時変化を確認するため途中で回収した。なお、試験室内の雰囲気温度及びNaCl-3%水溶液の水温は、ほぼ20℃で一定である。

（4）水位変動試験の概要

2つの水槽間で12時間間隔に給排水を繰り返す水位変動装置を製作し、一方の水槽内に砂土槽、他方にレキ土槽を設置した後、一方の水槽内にNaCl-3%水溶液を満たした。その他の条件は、水位一定試験と同様である。

（5）試験期間中の腐食環境測定

試験期間中、NaCl-3%水溶液のpH及び溶存酸素量を定期的に測定した（図-4及び図-5）。また、試験開始時及び試験終了時にNaCl-3%水溶液で飽和させた土試料の比抵抗を測定した（表-1）。

3.2 水位一定試験の結果

試験結果を表-2に示す。表-2は、溶接線の有無、水位条件、及び周辺環境毎に試験結果を集計したものであり、腐食による重量減が試験片の全表面で一様進んだものと仮定して腐食速度を算出した。なお、腐食速度は慣例に従い、年率で表しており、外挿的な表現をとっている。

（1）砂土槽による試験結果

普通試験片の外観は、鋼管杭の外面側では表面積の約90%が茶緑色に変色し、残りの約10%が光沢を保っていた。鋼管杭の内面側の黒皮は表面積の約95%が残っており、他の約5%が茶緑色に変色していた。また、広範囲に及ぶ変色が確認された外面側には腐食による顕著な凹凸が見られず、表-2から分かる通り、腐食は殆ど進行していないものと考えられる。溶接試験片の腐食は、普通試験片と大差ない結果であった。溶接線付近に腐食の発生・集中が予想されたが、この試験では普

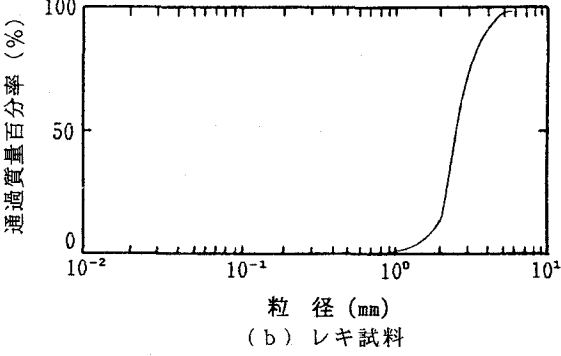
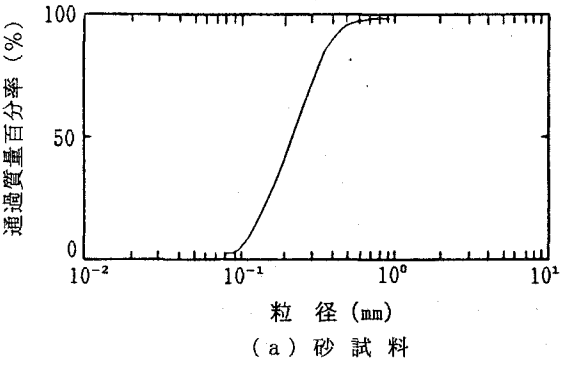


図-3 土試料の粒度分布

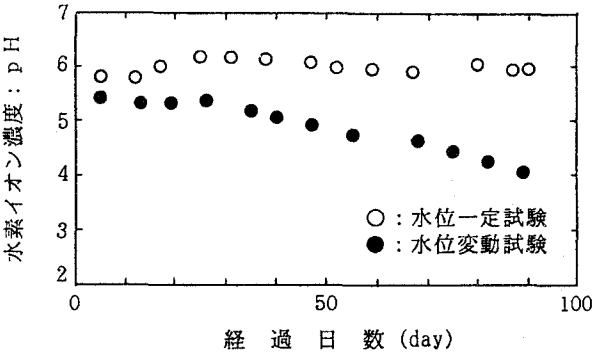


図-4 水素イオン濃度の経時変化

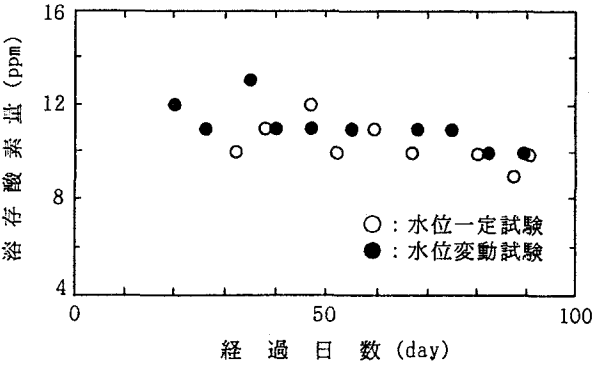


図-5 溶存酸素量の経時変化

表-1 比抵抗の測定結果

測定条件 測定対象	試験前測定 (Ω cm)	試験後測定 (Ω cm)	
		水位一定試験	水位変動試験
飽和砂試料 ^{注)}	81.9	97.7	89.7
飽和レキ試料 ^{注)}	91.3	101.5	99.7
NaCl-3%水溶液	22.4	24.7	23.9

注) 砂及びレキ試料をNaCl-3%水溶液で飽和した状態

通試験片と溶接試験片に顕著な差異が確認されなかった。この理由として、以下に示す事項が考えられる。

- ① 試験期間が短く、まだ局所的な腐食が発生・進行していない。
- ② 試験片レベルでは、局所的な腐食電池が形成されにくい。

(2) レキ土槽による試験結果

普通試験片の外観は、鋼管杭の外面側では表面積の約30%が灰色の斑点状に変色し、残りの約70%が光沢を保っていた。鋼管杭の内面側の黒皮は全て残っており、埋設時と変化が見られなかった。また、若干の変色が確認された外面側には腐食による顕著な凹凸が見られず、表-2から分かる通り、腐食は殆ど進行していないものと考えられる。溶接試験片の腐食は、普通試験片と大差ない結果であった。

(3) NaCl-3%水溶液による試験結果

普通試験片の外観は、鋼管杭の外面側では試験片の上部約10%が茶褐色に変色し、残りの約90%が白色に変色していた。鋼管杭の内面側の黒皮は表面積の約95%が残っており、他の5%は白色に変色していた。また、広範囲に及ぶ変色が確認された外面側には腐食による顕著な凹凸は見られなかったが、表-2から若干腐食が進行しているものと推察される。溶接試験片の腐食は、普通試験片と大差ない結果であった。

(4) 土質区分による腐食の差異

腐食速度は、大きい方から砂土槽、レキ土槽の順となった。両者に差が生じた理由は明かではないが、腐食量が小さいため有意な差か否かは判断できない。

3.3 水位変動試験の結果

(1) 砂土槽による試験結果

普通試験片の外観は、鋼管杭の外面側では試験片の上部約15%が茶褐色に変色し、残りの85%が茶緑色に変色していた。鋼管杭の内面側の黒皮は試験片の上部約30%が残っており、他の約70%は茶緑色に変色していた。また、広範囲に及ぶ変色が確認された内外面には腐食による顕著な凹凸が見られず、表-2から分かる通り、腐食は殆ど進行していないものと考えられる。溶接試験片の腐食は、普通試験片と大差ない結果であった。

(2) レキ土槽による試験結果

普通試験片の外観は、鋼管杭の外面側では表面積の約60%が白色に変色し、残りの約40%が黒色の腐食生成物で被われていた。鋼管杭の内面側の黒皮は表面積の約50%が残っており、他の約50%が白色に変色していた。また、内外面とも腐食による凹凸が発生しており、平面的な段丘が広範囲に及び、所々、深い箇所が散見された。腐食生成物の除去が容易ではなく、約90日の試験期間で5.37~6.11%の重量減という著しい腐食であった。溶接試験片は、鋼管杭の外面側の溶接線が茶緑色に変色していた以外は普通試験片と差異はなかった。

(3) NaCl-3%水溶液による試験結果

普通試験片の外観は、鋼管杭の外面側では表面積の約90%が白色に変色し、残りの約10%が黒色の腐食生成物で被われていた。鋼管杭の内面側の黒皮は表面積の約30%が残っており、他の約70%が白色に変色していた。また、内外面とも腐食による凹凸が発生しており、平面的な段丘が広範囲に及び、所々、深い箇所が散見された。腐食生成物の除去が容易ではなく、約90日の試験期間で4.67~4.81%の重量減という著しい腐食であった。溶接試験片は、鋼管杭の外面側の溶接線が茶緑色に変色し、溶接の肉盛部分が若干低くなっていた。

(4) 土質区分による腐食の差異

腐食速度は、大きい方からレキ土槽、砂土槽の順となり、水位一定試験と逆の傾向が確認された。特に、レキ土槽による試験結果は、NaCl-3%水溶液での試験結果をも上回るものであった。この理由として、

表-2 腐食試験結果

溶接線	試験条件		重量減(%)			腐食速度(mm/yr)			試験片の 数量(本)	経過日数 (day)
	水位	周辺環境	最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値		
無	一定	砂土槽	0.19	0.12	0.16	0.018	0.011	0.015	10	90
		レキ土槽	0.07	0.03	0.05	0.007	0.003	0.004	10	91
		NaCl-3%水溶液	0.55	0.52	0.53	0.052	0.050	0.051	3	90
	変動	砂土槽	0.23	0.08	0.16	0.022	0.007	0.015	10	90
		レキ土槽	6.11	5.37	5.79	0.575	0.507	0.546	10	90
		NaCl-3%水溶液	4.81	4.67	4.73	0.453	0.440	0.446	3	90
有	一定	砂土槽	0.18	0.15	0.17	0.017	0.014	0.016	5	90
		レキ土槽	0.07	0.04	0.05	0.006	0.004	0.005	5	91
		NaCl-3%水溶液	0.51	0.47	0.49	0.048	0.045	0.046	3	90
	変動	砂土槽	0.22	0.11	0.17	0.021	0.010	0.016	5	90
		レキ土槽	6.01	5.58	5.82	0.568	0.528	0.550	5	90
		NaCl-3%水溶液	5.74	5.43	5.61	0.547	0.512	0.531	3	90

- ① レキ土槽の方が砂土槽より、排水性、通気性の面でまさっていた。
- ② レキ土槽は、排水時に適度の水分（塩分）環境が維持されていた。
- ③ レキ試料は粒径が大きく、試験片と接触している面積が小さいため腐食生成物が成長しやすかった。

ことなどが考えられる。

3.4 腐食環境の評価

試験期間中、腐食環境としてpH（図－4）、溶存酸素（図－5）、及び比抵抗（表－1）を測定した。測定結果から、環境が腐食に与えた影響を分析することは容易ではないため、測定結果の要点のみを以下に纏める。

- ① pHは、水位一定試験では、6.0程度で変化が小さかった。水位変動試験では、試験開始時には5.5程度であったが、試験中に腐食生成物がNaCl水溶液中に溶出したため、試験終了時で4.0程度まで変化した。
- ② 溶存酸素は10～12ppmの範囲にあったが、測定器の精度に起因してか、測定値のばらつきが大きかった。
- ③ NaCl-3%水溶液で飽和した場合の比抵抗は、いずれの試料でも100Ωcm程度であり、腐食の非常に厳しいといわれる領域にあった。

4. 結言

本論では、臨海部に立地する基礎鋼構造物の腐食実態について検討を行った。特に、地下水位の変動帯に着目して、NaCl濃度3%の地下水が地中で水位変動する場合を想定した鋼管部材の腐食試験を3カ月間行い、初期腐食の状況を検討して以下の知見を得た。

- ① 砂試料を使用した土槽では、水位変動の有無による腐食量の差は殆ど見られなかった。
- ② レキ試料を使用した土槽では、水位変動の有無が腐食に及ぼす影響が顕著であり、排水性、通気性（酸素供給）の良い地盤では、地下水位の変動帯付近において腐食が加速されやすい危険性のあることが確認された。

なお、本腐食試験は、5年間を目途に継続実施中である。

謝 辞

基礎鋼構造物の腐食データの収集・整理、及び腐食試験の実施にあたり、東海大学海洋学部海洋土木工学科の中村隆昭教授及び福西聖文氏にご協力を得ました。また、腐食試験の実施計画の立案にあたり、東京理科大学理工学部工業化学科の関根 功教授及び湯浅 真助手にご助言を戴きました。ここに、謝意を表します。

参考文献

- 1) 山本広祐, 中村秀治, 工藤康二: "火力発電施設における土木鋼構造物の腐食実態調査", 電力中央研究所報告, 調査報告 U89029, 1989
- 2) 電気学会: "電食・土壌腐食ハンドブック", コロナ社, 1977
- 3) 腐食防食協会: "防食技術便覧", 日刊工業新聞社, 1986
- 4) 岡本 剛, 井上勝也(日本化学会編): "腐食と防食", 大日本図書, 1987
- 5) 岡本勝群: "土壌による鉄鋼の腐食とその調査法(1)", 建築技術, No.150, 1964
- 6) 岡本勝群: "土壌による鉄鋼の腐食とその調査法(2)", 建築技術, No.151, 1964
- 7) H.Tanaka: "Long Term Corrosion Tests of Steel Piles Driven in Soil", Proc. of the 11th International Corrosion Congress, Italy, 1990
- 8) 土質工学会: "土質基礎工学ライブラリー 6 鋼グイ", 鋼グイ研究委員会報告, 1969
- 9) 森 芳徳, 片脇 清, 高橋典男, 小野 豊, 窪田昭夫: "幸谷橋において17年間供用された鋼管ぐいの土中腐食", 建設省土木研究所土木技術資料, 23-6, 1981