

◆ 報 文 ◆

# 鋼杭、鋼矢板の土中腐食性状の統計的検討

守屋 進\* 村瀬正次\*\* 中野啓眞\*\*\*

## 1. 緒言

社会資本整備の達成目標が「事業費」から「達成される成果」に転換され、国民や利用者の望む成果につながる施策・事業を無駄なく「つくる」とともに既存ストックを有効に「使う」施策の推進が急務となっている。このような状況において、埋設環境に使用される鋼管杭・鋼管矢板・鋼矢板など土木用鋼材の腐食性状の把握は、「つくる」際には工事コストの縮減に、「使う」際には施設の長寿命化に係る重要な課題である。

鋼管杭、鋼管矢板、鋼矢板等の埋設環境にある土木用鋼材は、港湾や河川等の特殊な環境条件でない限り、通常、腐食しろによる設計が採用されている。しかしながら、腐食しろの考え方は、各団体毎に個別に整理されており、また、鋼材の品種の違いや土壌条件の違い等により、異なった見解が示されているため、統一的な見解がのぞまれている。

現在までに埋設環境での土木用鋼材の腐食に関する調査<sup>1)~7)</sup>は幅広く実施されている。ただし1箇所だけの調査であったり、経年調査がされていないかったり、これら単独の結果だけではわが国の一般的な土壌における鋼材の腐食傾向を把握することは困難であった。

本報告では、各地で実施された埋設環境での土木用鋼材の腐食に関する調査<sup>1)~7)</sup>結果をもとに、統計的検討を行った。この結果、わが国の埋設環境での鋼材の平均的な腐食性状を把握することができた。

## 2. 埋設鋼構造体の腐食現象

埋設環境における腐食減量については、経年的にその腐食速度が低下する事が多数報告されている。これは、鋼材表面に生成した腐食生成物がは

く落せず表面に残存するため、この腐食生成物が水や酸素などの腐食因子の鋼材表面への到達を抑制するためと説明<sup>1), 8)</sup>されている。この場合の腐食の経年変化は、以下の(1)式<sup>8), 9)</sup>が用いられる。

$$Y = BX^A \quad (1)$$

Y：腐食減量 (mmあるいはg/m<sup>2</sup>)，X：時間，  
A，B：定数

米国のNBS (National Bureau of Standards)の報告<sup>8)</sup>では、長期間の腐食を表す代表値としてA=0.57を示している。(土壌の通気性、抵抗率によっても異なるが、A=0.39~0.61という値を提示している。) Bの値は、Xを年ととれば1年後の腐食減量を示すことになる。

## 3. 腐食調査結果の整理方法

これまでの埋設環境での各腐食調査結果は異なった形状による鋼材の調査結果であるので調査結果に対して以下の処理を行ってから統計的検討を行った。調査場所および試験材料の全国分布を図-1に示す。

### 3.1 鋼管杭形状での調査結果<sup>2)~6)</sup>

(1) 鋼管杭協会の報告している東灘高校での鋼管



図-1 調査場所、材料の分布

The Statistical Investigation into Corrosion Loss of the Steel Pipe Pile and Sheet Pile Under Ground Environment.

杭の腐食調査結果<sup>3)</sup>、塩釜での鋼管杭の腐食調査結果<sup>5)</sup>、および森らの幸谷橋における鋼管杭の腐食調査結果<sup>4)</sup>では、腐食減量は杭の全長に対して平均化し、調査数 (N) についても平均化した腐食減量を平均腐食減量とした。最大腐食減量の値は、測定値で最も大きい腐食減量の値とした。

- (2) 辻らの千葉における鋼管杭の土中腐食調査結果<sup>6)</sup>は、平均腐食減量のみが記載されているので、そのまま統計的検討に用いた。
- (3) (社)日本電気鉄道技術協会では、鋼管杭形状と鋼管杭に絶縁して設置した小型試験材の2形状について、東京近郊(板橋、沼南、辰巳、江東、川島)で、最大約20年間の調査を行っている。統計的検討には、鋼管形状の試験材のデータを使用した。鉛直方向約1m毎に測定された腐食減量を全長で平均し、その場所および経過年数の平均腐食減量とした。最大腐食減量は、鉛直方向および調査数 (N) のデータのうち、最大の値とした。

### 3.2 等辺山形鋼での調査結果<sup>1)</sup>

大崎らは、等辺山形断面形状の鋼材を使用して、日本各地(厩橋、水島、広島、相模原、尼崎、調布、竹ノ塚、八郎潟、武里)で約10年間(約2年、5年、10年調査)の埋設実験を行っている。測定データに次の処理を行った。(1) 鉛直方向約1m毎に測定された腐食減量を全長で平均するとともに、2~3本の調査N数についても平均し、その場所および経過年数の平均腐食減量とした。最大腐食減量は、鉛直方向および調査数 (N) のデータのうち、最大の値とした。(2) 等辺山形断面形状の試験片の両面腐食減量データであるので、鋼管杭による埋設腐食データの評価と整合を図るため、等辺山形断面鋼の両面腐食はほぼ等しいと考え、腐食減量データの1/2を片面の腐食減量とした。(最大腐食減量も同様である。)

これは、鋼管杭の場合杭頭部が基礎等コンクリートで閉鎖環境にあるため、鋼管杭内面はほとんど腐食<sup>5)</sup>しない。このため鋼管杭の腐食減量は外面のみの片面腐食と考えられる。一方、等辺山形鋼は、板の両面がほぼ同様に腐食するので、腐食減量は両面の値になってしまう。このため、鋼管杭の腐食性状と整合を図るために等辺山形断面形状鋼材の腐食減量は両面腐食減量の1/2を片面

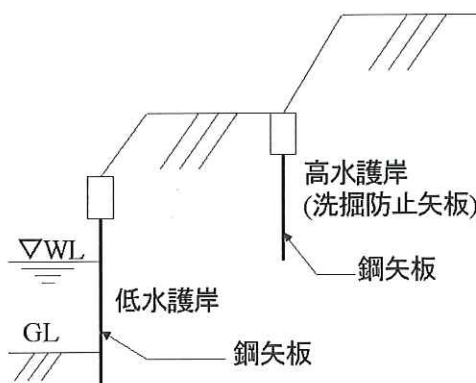


図-2 護岸の分類

腐食減量とした。(3) 耐候性鋼などの低合金鋼は、腐食性状が異なるのでそのデータは除外した。

### 3.3 鋼矢板に関する調査結果<sup>7)</sup>

守屋らは、日本で40箇所以上の河川護岸(低水護岸および高水護岸)の打設後5~35年の鋼矢板の腐食減量を調査している。河川護岸の分類を図2に示す。ここでは測定データに次の処理を行った。(1) 鋼矢板の場合も3.2項の山形断面形状の鋼材と同様に両面腐食が考えられるので報告されている平均腐食量の1/2を平均腐食減量に、最大腐食量の1/2を最大腐食減量とした。(2) 低水護岸は河川水に接しており土壌腐食と異なるので今回の検討から除外し、埋設環境にある高水護岸(14箇所)のデータを処理して用いた。

これら埋設環境における鋼材の腐食減量に関するデータは、以上の処理を行った後、統計的検討に用いた。表-1には整理後の各地の腐食データを示す。なお、経過年数は各報告書に記載されている経過年数および試験年数を示している。

## 4. 腐食調査データの統計的検討

### 4.1 平均腐食減量

図-3に平均腐食減量の経年変化を示す。年数の経過とともに平均腐食減量が増加している傾向が見られる。統計的検討により得られた(1)式の最小二乗法によって得られた回帰式は(2)式である。

$$Y=0.0165X^{0.671} \quad (2)$$

Y: 平均腐食減量 (mm), X: 年数 (年)

時間依存性に関するA値については0.67とNBSなどで報告されている値よりは大きな値となって

表-1 統計的検討に用いた腐食減少量のデータ

場所	経過年数	平均腐食減量(mm)	最大腐食減量(mm)	平均腐食速度	最大腐食速度	出展	場所	経過年数	平均腐食減量(mm)	最大腐食減量(mm)	平均腐食速度	最大腐食速度	出展	
眠橋	1.95	0.017	0.058	0.009	0.030	参考文獻 <sup>1)</sup>	板橋	5	0.105	0.201	0.021	0.040	参考文獻 <sup>2)</sup>	
	6.13	0.018	0.034	0.003	0.005			15	0.163	0.248	0.011	0.017		
	13.69	0.030	0.065	0.002	0.005			23	0.198	0.610	0.009	0.027		
水島	2.02	0.041	0.082	0.020	0.041	参考文獻 <sup>1)</sup>	沼南	10	0.089	0.192	0.009	0.019	参考文獻 <sup>2)</sup>	
	4.92	0.074	0.145	0.015	0.029			20	0.240	0.356	0.012	0.018		
	12.06	0.074	0.179	0.006	0.015			5	0.092	0.218	0.018	0.044		
広島	2.21	0.063	0.106	0.029	0.048	参考文獻 <sup>1)</sup>	辰巳	15	0.197	0.740	0.013	0.049	参考文獻 <sup>2)</sup>	
	5.17	0.055	0.113	0.011	0.022			5	0.084	0.150	0.017	0.030		
	11.08	0.064	0.117	0.006	0.011			10	0.112	0.380	0.011	0.038		
相模原	2.04	0.015	0.038	0.008	0.019	参考文獻 <sup>1)</sup>	江東	17	0.133	0.340	0.008	0.020	参考文獻 <sup>2)</sup>	
	5.08	0.038	0.089	0.008	0.017			26	0.274	0.870	0.011	0.033		
	9.93	0.050	0.105	0.005	0.011			5	0.029	0.080	0.006	0.016		
尼崎	2.04	0.025	0.096	0.012	0.047	参考文獻 <sup>1)</sup>	川島	10	0.040	0.120	0.004	0.012	参考文獻 <sup>2)</sup>	
	4.99	0.030	0.058	0.006	0.012			23	0.068	0.150	0.003	0.007		
	9.26	0.027	0.075	0.003	0.008			20	0.540	0.640	0.027	0.032		
調布	2	0.018	0.068	0.009	0.034	参考文獻 <sup>1)</sup>	東灘高校	17	0.098	0.400	0.006	0.024	参考文獻 <sup>3)</sup>	
	4.93	0.032	0.102	0.006	0.021			4	0.052	0.200	0.013	0.050	参考文獻 <sup>4)</sup>	
	9.86	0.044	0.137	0.004	0.014			千葉埋立	16	0.150		0.009		参考文獻 <sup>5)</sup>
竹ノ塚	2.54	0.038	0.073	0.015	0.029	参考文獻 <sup>1)</sup>	中部	13	0.195	0.440	0.015	0.034	参考文獻 <sup>6)</sup>	
	4.74	0.042	0.121	0.009	0.026			26	0.060	0.105	0.002	0.004		
	9.59	0.046	0.108	0.005	0.011			11	0.090	0.235	0.008	0.021		
八郎湯	2.47	0.040	0.090	0.016	0.036	参考文獻 <sup>1)</sup>	東北	11	0.080	0.190	0.007	0.017	参考文獻 <sup>7)</sup>	
	4.59	0.088	0.135	0.019	0.029			中国	28.2	0.280	0.710	0.010		0.025
	9.45	0.029	0.063	0.003	0.007			九州	6.3	0.125	0.185	0.020		0.029
武里	2.3	0.031	0.057	0.014	0.025	参考文獻 <sup>1)</sup>	北陸	9.3	0.140	0.285	0.015	0.031	参考文獻 <sup>7)</sup>	
	4.5	0.061	0.133	0.014	0.029			5	0.025	0.065	0.005	0.013		
	9.36	0.024	0.050	0.003	0.005			12	0.110	0.250	0.009	0.021		
水島	2.02	0.016	0.040	0.008	0.020	参考文獻 <sup>1)</sup>	北陸	33	0.040	0.110	0.001	0.003	参考文獻 <sup>7)</sup>	
	5.07	0.103	0.148	0.020	0.029			関東	16	0.122	0.176	0.008		0.031
	9.29	0.075	0.118	0.008	0.013			関東	12.7	0.224	0.388	0.018		0.011
							関東	11	0.040	0.072	0.004	0.007		
							関東	17	0.189	0.332	0.011	0.020		

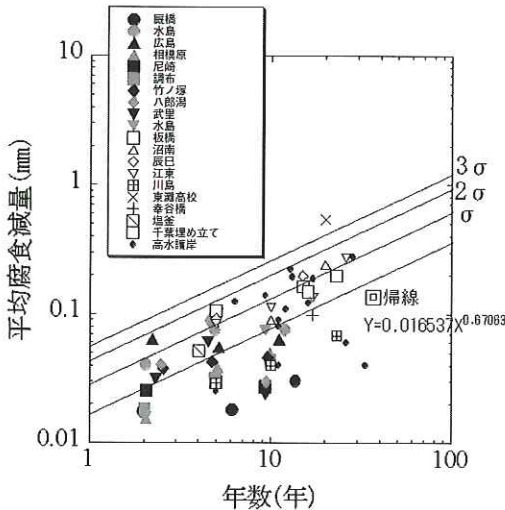


図-3 平均腐食減量の経年変化

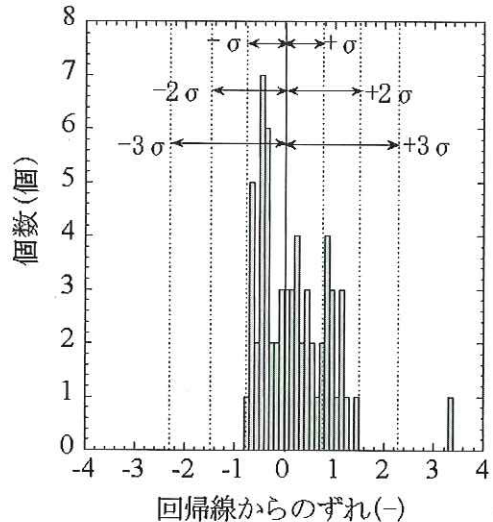


図-4 平均腐食減量の回帰線からのずれ割合

いる。A 値が大きい事は土中における腐食速度の低下度合いがやや小さい事を示している。

次に、(2) 式 of 回帰式を基準として、A 値は不変として、B 値に対する分布を求めた。この偏差は以下の (3) 式で示される。

$$K = (Y_n(X) - Y_{\text{回帰式}}(X)) / Y_{\text{回帰式}}(X) \quad (3)$$

K : 回帰線からのずれ割合,  $Y_n(X)$  : X 年での調査値,  $Y_{\text{回帰式}}(X)$  : 回帰式からの X 年での平均腐食減量

また、以下の (4) 式においてその標準偏差を求めた。

$$\sigma = \sqrt{(\sum K^2 / (n-1))} \quad (4)$$

$\sigma$  : 回帰式からのずれの標準偏差, n : データ数

(3) 式より求めた平均腐食減量の回帰線からのずれ割合のヒストグラムを図-4に示す。回帰線からのずれ量は概ね  $\pm 2\sigma$  内に存在するが、一部の平均腐食減量で大きく回帰線からずれている

ものが見られる。(4)式から計算された、標準偏差は、0.754であった。図-4に示すようにおおよそ全ての平均腐食減量が2σ範囲内に存在することが判る。図3にも同様に、B値についての標準偏差を考慮した回帰線を示している。式は以下の(5)、(6)、(7)となる。

回帰線より腐食が多い側にσずれる場合

$$Y=0.0290X^{0.671} \quad (5)$$

同様に2σずれる場合

$$Y=0.0415X^{0.671} \quad (6)$$

同様に3σずれる場合

$$Y=0.0539X^{0.671} \quad (7)$$

図-3に示すように、この結果から、大部分の調査結果が2σ範囲内に入ることが認められ、100年後の平均腐食減量は、約1mmと算出される。鋼管杭のような外面の片面のみの腐食が卓越する材料の場合には、平均腐食減量は1mm程度に、鋼矢板およびH型鋼のような両面腐食が考えられる場合には、2mm程度の平均腐食減量となる。また東灘高校における鋼管杭の腐食量については、3σを超える平均腐食減量を示している。これは、当該地にて地盤物性の調査を実施していないため断言できないが、鋼材の腐食を促進させる工場廃

水や廃棄物の影響を受ける土壤、酸性土壤、干満や海水の影響を受ける護岸背後地などのいずれかの特殊な要因により生じたものと類推される。

すなわち、これら鋼材の腐食を明らかに促進させる腐食性が高い土壤条件としては、埋立地などへドロ状で鉄酸化細菌や硫酸塩還元菌が大量に繁殖しているような場合や、河口など海岸線近傍で土壤に塩化物イオンが含まれる可能性が大きい場合、および火山近くの酸性河川や酸性ガスが噴出している近傍で土壤が酸性になっている可能性がある場合などが考えられる。このような土壤に鋼杭や鋼矢板等を打設する場合には、余裕を持った腐食しろや、電気防食や塗装などの防食対策が別途必要である。

次に平均腐食減量と経過年数から平均腐食速度を求めた。平均腐食速度は以下の(8)式から求めた。

$$Z=Y_n(X)/X \quad (8)$$

Z：平均腐食速度， $Y_n(X)$ ：平均腐食減量，  
X：経過年数

平均腐食減量を経過年数でプロットした結果を図-5に示す。経過年数の増加とともに平均腐食速度が低下する傾向が確認できた。

#### 4.2 最大腐食減量

前項の平均腐食減量にて実施した処理を最大腐

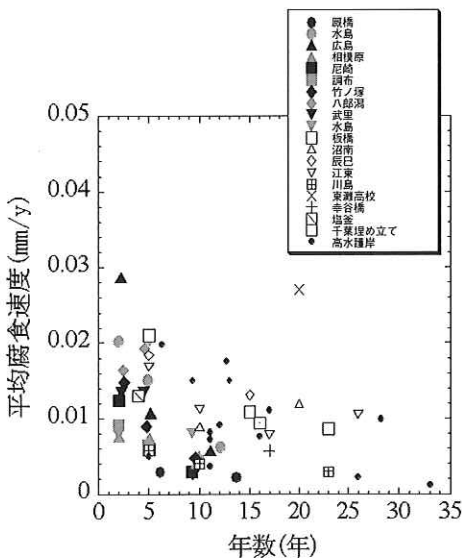


図-5 平均腐食速度と経過年数の関係

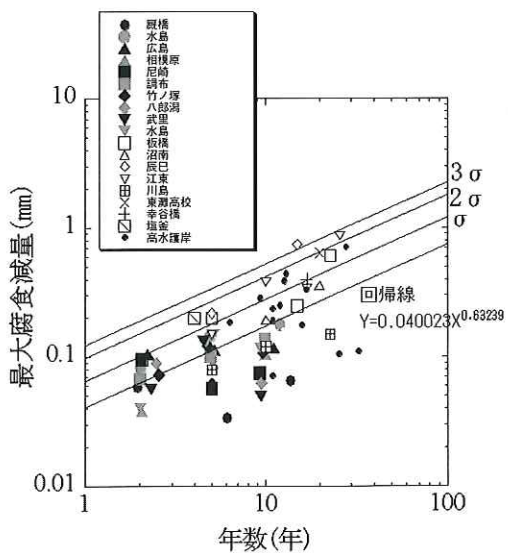


図-6 最大腐食減量の経時変化

食減量についても行った。

図-6に、最大腐食減量の経年変化をプロットした結果を示す。図-6においても最大腐食減量は経過年数とともに増加する傾向が見られる。これらの結果から得られた(1)式による、回帰線は(9)式のようにになった。

$$Y=0.0400X^{0.632} \quad (9)$$

平均腐食減量の場合と比較するとB値は増加しているが、時間依存性に関するA値については、ほぼ同じ値が得られており、最大腐食減量についてもその経時的な進行は、平均腐食減量と相関があると推定される。

図-7には、最大腐食減量の回帰線からのずれ割合のヒストグラムを示す。最大腐食減量も平均腐食減量と同様に大部分の結果は2σ範囲内に入っている。図-6には、同様にこの標準偏差σについて上方に分布した場合の結果を示しており、式は以下の(10)、(11)、(12)となる。

回帰線より腐食が多い側にσずれる場合

$$Y=0.0673X^{0.632} \quad (10)$$

同様に2σずれる場合

$$Y=0.0946X^{0.632} \quad (11)$$

同様に3σずれる場合

$$Y=0.122X^{0.632} \quad (12)$$

図-6に示すように、最大腐食減量で見た場合平均的な回帰線レベルでは、100年後には約0.8mm程度、1σの場合1.2mm程度、2σの場合2mmと算出される。

平均腐食減量が大きかった東灘高校の最大腐食減量は、今回の結果では2σ範囲内に入っており、代わりに江東や辰巳で2σを上回っていた。これは、腐食調査結果を処理する際に、平均腐食減量は試験材の全長で平均化した、最大腐食減量の場合は全長における最大値を採用したためである。すなわち、東灘高校は杭全長の腐食減量が大きく、江東や辰巳などでは杭の局所的な腐食減量が大きかったためである。江東や辰巳でも地盤調査をしていないため原因は断言できないが、鋼材の腐食を促進させる土壌の厚みや堆積状況によりこのよ

うな腐食状況の違いが生じたものと考えられる。

図-8には、(8)式を適用して求めた最大腐食速度と経過年数の関係を示す。最大腐食速度も同様に経年的に低下する傾向が確認できる。

図-9には、最大腐食減量と平均腐食減量の関係を示す。図-9より、両者の関係は以下の(13)式となり、最大腐食速度は平均腐食速度に対して1.5倍から4倍の値となった。

$$Y_{max} = (1.5 \sim 4) Y_{mean} \quad (13)$$

$Y_{max}$  : 最大腐食減量,  $Y_{mean}$  : 平均腐食減量

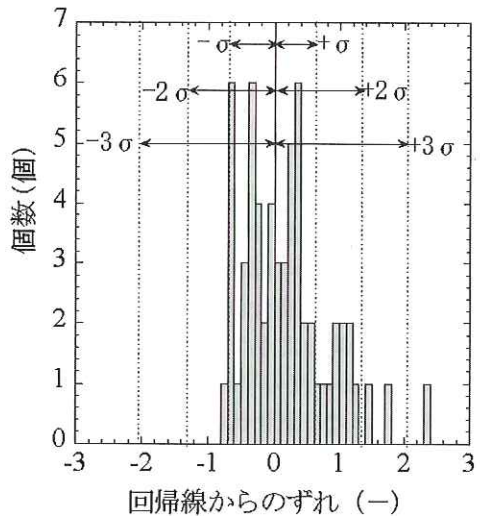


図-7 最大腐食減量の回帰線からのずれ割合

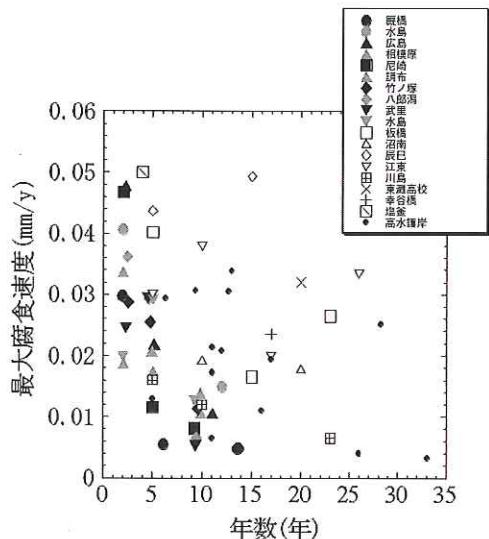


図-8 最大腐食速度と経過年数の関係

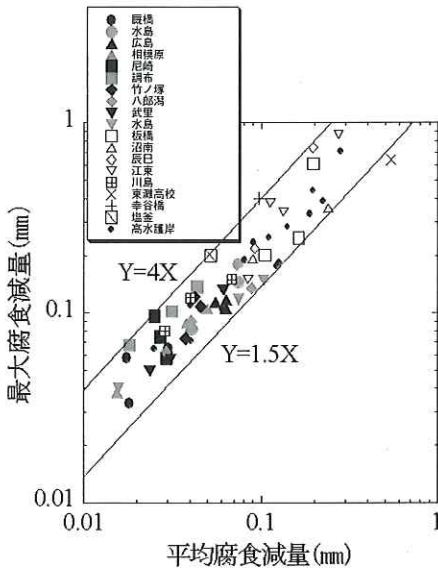


図-9 平均腐食減量と最大腐食減量の関係

5. 結言

過去に調査された各種土木用鋼材の埋設環境における腐食減量について、統計的検討を行った。その結果以下のことが判明した。

- (1) 埋設された土木用鋼材の平均腐食速度、最大腐食速度とも経年的に低下する傾向が認められた。
- (2) (1)の結果より腐食速度が経年的に低下することから、 $Y=BXA$ で整理することが妥当と考えられた。処理された腐食減量データの最小二乗法による回帰式として以下の式を得た。

平均腐食減量の場合

$$Y=0.0165X^{0.671}$$

最大腐食減量の場合

$$Y=0.0400X^{0.632}$$

- (3) A値は、NBSが提示している  $A=0.39\sim 0.61$

より、やや大きめの値であった。ただし平均腐食減量と最大腐食減量から得られたA値はほぼ同程度の値を示した。

- (4) わが国の一般的な土壌における埋設された鋼材の平均腐食減量は、調査データのほとんどが2σ範囲内に収まり、100年後の片面の腐食減量は約1mmと算出された。
- (5) 土壌条件によっては、2σを超えることがあるので、このような土壌では、鋼材に適切な防食対策が必要である。
- (6) 腐食性が大きい土壌中で鋼材の防食を腐食しろで対応する場合には、最大腐食減量による腐食しろを考慮することが望ましい。

参考文献

- 1) 大崎 順彦：鋼杭の腐食、鋼材倶楽部、1980
- 2) (社)日本鉄道電気技術協会編：土壌中の鉄鋼材の長期腐食に関する調査研究（第13,14報）、1995、1999
- 3) 鋼管杭協会編：兵庫県南部地震鋼管杭基礎調査報告書（第2次）、1996
- 4) 森 芳徳、片脇 清、高橋典夫、小野 豊、窪田昭夫：幸谷橋において17年間共用された鋼管杭橋脚の土中腐食、土木技術資、Vol.23, No.6, 1981
- 5) 鋼管杭協会編：鋼管杭～その設計と施工、2004
- 6) 辻 定利：海岸埋立地盤に打設された鋼管杭の腐食調査、23回土質工学研究発表会予稿集、No.22, p1519-1520, 1988
- 7) 守屋 進：河川鋼矢板護岸の腐食調査結果、第22回鉄構塗装技術討論会発表予稿集、p89-93, 1999
- 8) 防錆防食技術総覧編集委員会編：防錆防食技術総覧、p135-138, 2000
- 9) 玉田明弘：埋設土中鋼材の腐食調査、腐食防食講演会予稿集、D-103, p397-398, 1993

守屋 進\*



独立行政法人土木研究所材料地盤研究グループ（新材料）主任  
研究員  
Susumu MORIYA

村瀬正次\*\*



鋼管杭協会、技術委員  
Masatsugu MURASE

中野啓真\*\*\*



鋼管杭協会、技術委員  
Hiromasa NAKANO