高温埋設管の土壌中における腐食*

福谷 英二** 笥 建彦** 海野 武人**

Corrosion of Underground Hot Water Pipeline

Eiji Fukutani, Takehiko Kakehi and Takehito Umino

An unusually rapid corrosion leakage occurred in an underground hot spring water pipeline in a volcanic area within about half a year after its laying. The field survey and laboratory tests showed that the abnormal corrosion of the hot water pipeline would have been caused from original macrocorrosion cells, large difference in resistivity due to the differ-

ence of moisture contents between upper and lower soil parts round the hot pipe and formation of magnetite on the pipe surface because of the high temperature and the alternative dry and wet condition. As for the protective measures epoxy coating and cathodic protection were studied, and their combination appeared very effective.

1. 緒 言

某火山性温泉地帯で 80°C の高温熱湯を送る内径 350 mm, 肉厚 7.9 mm, 延長 4,200 m の地下埋設管が埋設後約 7 ヶ月間で始点から約 1,600 m の地点で外面腐食による穿孔漏洩を生じた。管にはジンクリッチ塗料を膜厚 10~15 μ に塗装し, 1 mA/m² の電流密度で 2 ヶ所の外部電源防食装置による陰極防食を併用する計画であったが, 実際には約 0.2 mA/m² で管路電位 -900 mV (SCE) より卑な電位であったもので穿孔時には -400 mV 付近になっていた。

この報告は, 本管の異状腐食原因の究明と対策立案のために行われた現地調査と実験室における試験の結果を取りまとめたものである。

2. 実施した調査および試験の内容

2.1 現地調査

- 管路沿い各点における腐食状況調査
掘サク, 超音波厚み計による厚さ測定および腐食ピット深さの測定
- 大地比抵抗および土質分布の測定, 調査
L-10 型大地比抵抗測定器により 50 m 間隔に測定, 深さは -1 m および -3 m
- 電気防食電流の増強試験

図 1 管路の勾配と孔食の深さ

- テストピースによる腐食試験および通電分極試験
- 管周囲の電位変化測定
- 塗覆材料試験—エポキシ樹脂系塗料の経時劣化状況調査

2.2 実験室試験

- 現地土壌および一般土壌における裸鋼板および塗装鋼板の腐食試験—冠水状態と乾燥・湿潤のサイクル繰り返しの場合
- a) の条件下での電位変化
- 陰極防食試験

3. 調査試験結果および考察

さく孔漏洩を生じた点 (以下 F 点と称す) の侵食度は 16 mm/yr で極端に大きい値である。他の部分についても 22 ヶ所で掘サク調査が行なわれたが, 局部的には相当深い孔食 (1.2~4.4 mm/yr) を生じているところがあっ

* 昭和41年11月17日第13回腐食防食討論会 (松山) において発表, 昭和42年6月23日学振第97委員会会議 (東京) において講演

** 中川防蝕工業(株) (東京都千代田区神田鍛冶町 2-1)

図 2 土壌の比抵抗分布

図 3 管の円周方向の電位

図 4 80°C 管路の自然電位

た。管路の勾配および孔食の大きい部分の値を図 1 に示した。この図から山地の谷の部分の大きい孔食を生ずる傾向のあることが観察された。管路沿いの土壌比抵抗は図 2 に示すようにわずか 2m の深度の差で比抵抗が著しく異なる。これは高温環境土壌の特質ともいふべき点であろう。上下の比抵抗差の大きい地点で孔食が大きく現われている。

図 3 は孔食が比較的小さい地点 (ターミナル No. 9) 付近の管周囲の電位状況を示したものであるが、管の頂部と底部では自然電位で約 140 mV の電位差があり、頂部の電位が卑である。この場合管の上面の電位の卑な方に孔食がある。図 4 は管路沿いの自然電位の変化状況を示した。電位の起伏ははなはだしく、電位の貴な部分に大きい孔食を生じている。

図 3 では卑な部分に孔食があり図 4 では電位の貴な部分に孔食が出るが、その意味は次のように解すべきであろう。すなわち、ターミナル No. 9 付近は管の電位が比較的卑で孔食の小さい部分に属するが、その部分を詳細に調査すれば管の上下で局所的なマクロ電池を生じそのマクロ電池内では電位の卑な部分が陽極となって孔食を生ずるのであろう。

実験室および現地で行なった腐食試験結果を表 1 に示した。表 1 には九工試の試験結果¹⁾も同時に示した。

九工試の実験室試験は 75°C で終始湿潤状態を保持したもので、中川防蝕の侵食度は陰分極曲線から求めたものである。これらの数値は同一土壌を用いたものであるが、両者の結果にはかなりの差が見られる。この試験結果から次のようなことが考えられる。

- a) 高温土壌中での侵食度は大きい。
- b) 常時湿潤状態で試験すれば比較的侵食度は小さい。
- c) 現地では乾湿を繰り返すため、

表 1 侵食度 (mm/yr) および最大孔食度 (mm/yr)

試料採取 ターミナル No.	pH	比抵抗 $\Omega\text{-cm}$	実験室試験 (75℃~80℃)					現地埋設試験				
			裸鋼板		ザップコート 塗装鋼板		コボン塗 装鋼板	裸鋼板		ザップコート 塗装鋼板		最大孔 食度
			九工試	中川	九工試	中川	中川	九工試	中川	九工試	中川	九工試
1	(4.28)	(4,050)		0.35								
2	5.6	26,000	0.06		0.08			0.118		0.08		1.20
3	(4.7)	(1,250)		1.05		1.8	0.011	0.317		0.11		5.80
5	5.2	5,500	0.055		0.05			0.144		0.07		1.00
7	(5.55)	(12,500)		0.31								
7~8間	6.4	22,000	0.043		0.01			0.066		0.06		1.20
F 黒	5.2	(1,070) 5,400	0.120		0.11			0.952	0.31	0.33	0.30	>13.60
F 褐	5.9	32,000	0.130	3.01	0.07	2.3						
9	5.3	(22,000) 20,000	0.041	0.27	0.11			0.049		0.06		孔食なし
13	(6.4)	(225,000) 2,000	0.041		0.06			0.075	0.016	0.08	0.013	0.80
16	5.8	(22,000) 12,000	0.067		0.08			0.403	0.27	0.17	0.23	4.40
20 黒	5.1	(33,000) 80,000	0.071	0.22	0.10			0.460		0.27		5.20
20 褐	5.6	25,000	0.060		0.08							
上 尾	(6.85)	(38,000)		0.44		0.32	0.014					

備考：(1) 中川の侵食度は通電試験で求めたものである

(2) pH および比抵抗の () は中川社測定, 他は九工試測定

(3) 黒・褐はそれぞれ黒色土, 褐色土を示す

か侵食度がきわめて大きい。

d) 陰分極曲線から求めた侵食度はかなり現地腐食に近い値を示すようである。

e) 土質によって侵食度, 最大孔食度に著しい差があるが, pH, 比抵抗, 酸化還元電位などによってはその大差を生ずる原因を説明できない。フミン酸などの化学物質の存在や含水量, 透湿度などの物理的要素が関係するものと思われる。

f) ジンクリッチ塗料の塗装によって現地の侵食度は約半減されるが, 常時湿润状態ではやや侵食度を増す傾向にある。

現地試験を通じて得られたこれらの結果を確認するために実験室試験を行なった。

図 5 は実験室のある埼玉県上尾市のローム質土壌を用いて, 冠水状態と冠水状態から 80℃ に保ったまま自然に乾燥させたときの, 侵食度と自然電位との時間による変化を示したもので, 乾燥によって自然電位は貴に移行し, 侵食度は著しく大となる。

図 6 は毎日冠水と乾燥を繰り返して行なった場合の自然電位の変化状況を示すもので, 乾燥で貴になった自然電位は注水によって卑に回復するが回復度は乾燥を繰り返すごとに減じ, 1 週間後にはほとんど回復しなくなる。

図 7 は乾湿の周期をそれぞれいろいろに変えた場合の侵食度に及ぼす影響を調べたもので, 乾湿の周期が頻繁なほど侵食度は大となる。

図 8 は各種の状態における侵食度を比較したもので, 80℃ における乾湿繰り返しのある土壌中ではいかに常温の土壌中より侵食度が大きいかがよくわかる。

乾湿繰り返しを行なって鋼表面の腐食生成物は X 線回

図 5 80℃ 赤褐色ローム質土壌 (上尾)

図 6 80℃ 茶褐色ローム質土壌 (上尾)
乾湿繰り返し自然電位

図 7 乾湿繰り返し方法の影響

折によれば表層は主として赤褐色の $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ と Fe_3O_4 でありその下層に黒色の Fe_3O_4 が生成していた。

表 2 は現地土壌および上尾土壌中における裸鋼の侵食度と塗装による防食効果を調べたものである。裸鋼の腐食はやはり冠水の場合よりも乾湿を繰り返した場合の方が 5~10 倍大きく、現地の火山性土壌の方が上尾の土壌よりやや腐食性大であることがわかる。

ジンクリッチ塗装は冠水状態では裸鋼板より侵食度が大きい乾湿繰り返し状態ではかなりの防食効果を示している。コボン A (エポキシ樹脂塗料) は防食効果が大い。

陰極防食の効果を図 9 および前掲の図 3 に示した。高温管でも陰極防食は可能であるが、電流密度は高く、特に乾湿繰り返しの状態ではかなりの大電流密度でも防食

表 2 腐食試験成績 (80°C)

土壌条件	試験片	重量減 (g)	侵食度 (mm/yr)	表面状態
火山地帯 #3	冠裸鋼	0.811	0.263	全面腐食
	ジンクリッチ塗装	1.460	0.543	白さび
	コボン塗装	+0.048	—	ふくれ
	乾裸鋼	4.197	1.369	粗な全面腐食
	ジンクリッチ塗装	0.717	0.267	白さび
	コボン塗装	0.050	—	ふくれ
上尾	冠裸鋼	0.315	0.103	全面腐食
	ジンクリッチ塗装	0.316	0.119	白さび
	コボン塗装	0.022	—	ふくれ
	乾裸鋼	3.667	1.188	粗な全面腐食
	ジンクリッチ塗装	0.019	0.007	白さび
	コボン塗装	0.035	—	ふくれ

記事：腐食期間 308 hr

ジンクリッチ膜厚 20 μ

乾湿はこの期間に 3 サイクルとした

コボン膜厚 60 μ 図 8 各種状態の侵食度
茶褐色ローム質土壌 (上尾)

図 9 陰極防食の効果

80°C, 赤褐色ローム質土壌 (上尾) 80°C 人工海水

率は 70% 程度である。図 3 は通電によってマクロ腐食が軽減される状況を示している。

コボン A を 60 μ の厚さに塗装して管の電位を -850 mV, SCE に保持するに必要な電流密度は $5\sim 10$ mA/m² で裸管の場合よりはるかに小さいが、常温塗覆装管の場合よりはるかに大きいのでエポキシ樹脂コーティングをしても陰極防食の併用は必要と考える。ジンクリッチ塗装をしても所要防食電流密度はあまり大幅に減少しないことがわかった。

図 10 は現地の熱湯管の陰極防食による分極状態を示したものであるが、自然電位から 200 mV 以上陰分極する範囲はグランドベッド (電極点) からその付近全長 250~500 m の範囲にすぎない。その範囲内にも点々と分極の小さい地点が点在している。このときの電流密度は $40\sim 80$ mA/m² である。F 地点における大きな陰分極はこの地点にグランドベッドを新設し、管にはエポキシ

樹脂コーティングを行なったためである。

Sudrabin²⁾は高温管に陰極防食はきかないといっているが、これは常温管に対するような低電流密度ではきかないと解すべきで、絶対にきかないという意味ではないと思う。

Rogers³⁾は冠水状態にある銅と電氣的に接続されているコンクリート中の蒸気管は 25 mA/ft(推定 100mA/m²)で有効に防食されたとしている。

4. 結 論

高温埋設管の腐食および防食について種々調査研究した結果、不明の点もまだ多々あるが、一般に次のことがいえる。

a) 高温土壌中でも常時湿潤状態のときは高温海水中の腐食と大差はない。

b) 高温環境土壌中で管表面が乾燥過程にあるときまたは乾湿繰り返し状態にあるときは侵食度が著しく大となる。

c) 高温管では周囲土壌の温度差や乾燥状態の差により深さ方向の土壌抵抗が著しく異なるため、通常埋設管に起こりやすい延長方向のマクロ腐食だけでなく円周方向にもマクロ電池を生じ管上側に孔食を生じやすい。

d) 高温管では自然電位の貴な部分に深い孔食を生じやすい。これは管の表面にマグネタイトが生成するためであると考えられる。

e) 高温管では布設勾配が大きい部分では孔食が少なく、谷部や平坦部では深い孔食が生じやすい傾向がある。

f) 高温管の腐食は土質に左右されることが大きく、また土質差によるマクロ腐食も大きい、どのような土質成分が腐食に影響を与えるかはつまびらかでない。

g) 管路埋戻しの際、管路と土壌との間に空洞がある場合には空洞の周辺に激しい孔食が起こっていることが

図 10 最終通電時の分極状態

観察された。管路はまず砂または細かく砕いた土で埋戻しを行ない、空洞部分が生じないように注意することが大切である。

h) 80°C 以下の管ではエポキシ系の塗装を 60~100 μ の膜厚で施工し、10 mA/m² 程度の陰極防食を併用することが有効であろうと思う。

5. 謝 辞

この調査ならびに試験に協力された中川防蝕工業(株) 研究開発課 武藤 憲司、福沢 秀刀、阿部 喬、技術サービス課 落合 直隆、河内 進の諸氏ならびに有益なご助言をいただいた九州工業技術試験所長 重野隼太博士に心から謝意を表します。

(昭和 43 年 1 月 8 日受理)

- 1) 火山系土壌による炭素鋼の異常な腐食 重野隼太, 斎藤明夫: 第 13 回腐食防食討論会予稿集(昭和 41 年)
- 2) L.P.Sudrabin: Cathodic Protection is not Always Successful on Ferrous Structures. *Mater. Prot.*, 5, No. 2, 47~50 (1966) Feb.
- 3) P.C.Rogers & E.E.Gross: Cathodic Protection of Underground Heating Lines. *Mater. Prot.*, 1, No. 7, 38~42 (1962) July