海水環境における各種金属粉末を混合した セメントによる鋼の防食方法

稲木 倫道*, 永井 崇昭*, 宮田 義一*, 朝倉 祝治*

* 横浜国立大学大学院 工学研究院

The Corrosion Protection of Steel Coated with the Cement Containing Metal Powders under Seawater Environment

Norimichi Inagi*, Takaaki Nagai*, Yoshikazu Miyata*, Shukuji Asakura*

* Graduate School of Engineering, Yokohama National University

To protect steels from water-line attack in seawater, we examined to coat steel with cement containing metals powder of different grain sizes. Steel specimens coated with these cements were immersed in 3 mass% sodium chloride solution. The condition to prevent steels from corrosion was determined by measuring potentials and observing the surfaces of specimens.

The potentials of specimens coated with the cement containing aluminum or magnesium powder were about -400 mV *vs.* SHE. The corrosion was observed. The cement containing more than 50 mass% zinc powder kept the potentials less than -700 mV *vs.* SHE when steels were covered fully with the cement. In these conditions, no corrosion appeared, though the potential did not always stay at the immunity domain. The protection ability became less with the increasing grain size.

When the one side of specimen was coated with the cement containing more than 67 mass% zinc powder and the other side and edges were left bare, the potential of specimen stayed at less noble than -750 mV *vs.* SHE for 60 days. In these conditions the uncoated areas of a specimen were protected. We concluded that the application of cement coating containing more than 67 mass% zinc powder would be effective for the prevention of water-line attack in a marine environment.

Key words : steel, zinc, cement, corrosion protection, water-line attack

1. 緒 言

代表的な湿食環境である海水中で特に腐食の激しい部分は、飛沫帯や干満帯および干潮時の水面の下の部分である。カソード防食法は、環境側が常に湿潤環境でないと適用することができないため¹⁾、水面より上の部分を防食することができない。現状では水面の上部はジンクリッチペイントを下地とした重塗装、下部にはカソード防食と使い分けることが一般的である²⁾。ジンクリッチペイントによる防食は、金属の種類や表面処理によって密着性が得られない場合がある。また紫外線や気象条件などによって塗膜が劣化する問題もある。従ってより確実なカソード防食のみで、水面の上部、下部を同時に防食できれば理想的である。

水面より上の部分を湿潤環境にする試みとして、親水性樹脂などを金属表面に被覆してイオン伝導性を与える方法³⁾⁻⁵⁾が検討されている。しかし海水環境で使用可能なほどの完全な防食を達成した例はない。

そこで著者らはイオン伝導体であるセメントに金属粒子を混合して、防食したい金属の表面に塗布する防食方法を考案した。類似の方法は、すでに特許として出願されているが⁶⁾、防食の効果などについての基礎的な研究は行われていない。

本稿では種類および粒径の異なる金属粒子をセメントに混合し、それを塗布した鋼を 3 mass% 塩化ナトリウム

水溶液中に浸漬し、主に電位から防食の効果を検討した。

2. 実 験 方 法

2.1 試験片の作製

実験に用いた鋼板は JIS G 3141 に規定される SPCC 鋼を $50\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 3.2\text{ mm}$ に切り出したものである。鋼板の形状を Fig. 1 に示す。表面は 180 番のエメリー紙で研磨し、蒸留水で洗浄後エタノールおよびアセトンで脱脂をした。反応面は表面、裏面および側面であり、反応面積が合計 $5.48 \times 10^3\text{ mm}^2$ となるように、それ以外は粘着テープで被覆した。

JIS R 5210 に規定された普通ポルトランドセメントに、特級試薬の亜鉛、アルミニウム、マグネシウム粉末、砂状亜鉛および粒状亜鉛を混合し、金属粒子混合セメントを作製した。用いた各金属粒子の平均粒径およびセメン

Fig. 1 Specimen without cement coating.

* 〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5 (79-5, Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama, 240-8501 Japan)

Table 1 The metals and their grain sizes blended with cement.

Blended metal grains	Metal content of cement / mass%
No metal	0
Zinc, powder (6.1 μm)	20
	33
	50
	67
	75
	80
Zinc, sandy (1.6 mm)	67
	75
	80
Zinc, shot (8.0 mm)	67
	75
	80
Aluminum, powder (75 μm)	67
Magnesium, powder (0.50mm)	50

ト中の含有率を Table 1 に示した. Table 1 に示した含有率 R は (1) 式のように金属粒子の質量 M とセメントの質量 C の合計に対する金属粒子の割合である.

$$R = \left(\frac{M}{M+C} \right) \times 100 \quad (1)$$

この金属粒子混合セメントにイオン交換水を 1 回蒸留した水を質量比で $1:0.3 \pm 0.05$ の割合で混合してセメントペーストとした. 金属粉末の含有率が高くなると, セメントの体積に比べ金属の体積の方が大きくなり, セメントが硬化しなくなった. セメントが硬化する各金属粉末の最大含有率は, 亜鉛は 80 mass%, アルミニウムは 67 mass%, マグネシウムは 50 mass% であった.

作製した試験片の概略を Fig. 2 に示す. セメントペーストを Fig. 1 の鋼板の反応面全面に Fig. 2(a) に示すように厚さ 2 mm で塗布し, 大気中で 1 日養生してセメントを硬化させたものを A 型試験片として用いた. また亜鉛粉末を混合した場合は Fig. 2(b) のようにセメントを鋼の片面のみに塗布した試験片も作製した. これを B 型試験片とする. B 型試験片はセメントを塗布しなかった鋼表面の腐食状態を検討するために作製した.

2.2 浸漬試験

実験装置の概略を Fig. 3 に示す. 溶液は 3 mass% の塩化ナトリウム水溶液である. これはイオン交換水を 1 回蒸留した水に, 特級試薬の塩化ナトリウムを加えて作製した. 2.1 で作製した試験片をこの溶液 0.01 m³ 当たり 24 枚の割合で浸漬した. 海水面付近の飛沫帯や干満帯を模擬するために, 水面の位置をセメントの上端から 5 mm 下となるようにした. なお蒸留水を適宜加えることにより, 水面の高さを一定に保った. 試験期間は 60 日である. 溶液は $25 \pm 1^\circ\text{C}$, 大気開放系とした. 実験中は溶液の pH が上昇するので電位測定と同時に溶液の pH を測定し, 適宜塩酸を添加して pH が 8 を越えないようにした. 参照電極として飽和塩化カリウム水溶液を内部液とした銀-塩化銀電極を使用した. なお本文中に示し

Fig. 2 Specimens coated with metal blended cement.

Fig. 3 Experimental cell.

た電位は標準水素電極基準に換算した値である.

3. 実験結果および考察

3.1 セメントに混合した金属の種類と鋼の腐食状態

防食に最適な金属種を明らかにするため, 亜鉛, アルミニウム, マグネシウム粉末を, セメントが硬化する限度まで混合したセメントを鋼に塗布し, 金属の種類と電位の関係を調べた. 2.1 で述べたように, 亜鉛の最大含有率は 80 mass%, アルミニウムは 67 mass%, マグネシウムは 50 mass% である. 比較のため, 金属を含有していないセメントのみを塗布した場合についても電位を測定した.

セメントにアルミニウム粉末を混合した場合,

の反応により水素が発生し⁷⁾, 発泡セメントとなることが知られている. 本研究においてもセメントペーストの作製時に急激な発泡が認められた. この反応によってア

Fig. 4 Steady potentials of specimens type A in Fig. 2 coated with cement containing different metal powders after 60 days immersion. Thermodynamic stabilities are calculated by assuming surface pH = 12.1.

ルミニウムが消費されるので、硬化したセメント中の実際のアルミニウム含有率は Table 1 に示した値に比べかなり小さいと推定される。また亜鉛粉末およびマグネシウム粉末をセメントに混合した際には、アルミニウムのような急激かつ多量の発泡は見られなかった。

セメントのみを塗布した場合は 8 日目に、金属粉末を混合した場合は 4 日目に電位は定常に達した。本稿では電位変化が ± 10 mV 以下になった値を、定常に達した電位とする。この定常に達した後の電位から、各種金属粉末を混合したセメントを塗布した鋼の腐食状態を、電位-pH 平衡図⁹⁾をもとに検討する。なお 2.2 で述べたように、実験中の溶液の pH は 8 程度であったが、これはあくまで溶液沖合の pH の値であり、セメントに覆われた鋼板表面の pH ではない。セメントの化学組成は製品によりばらつきがあるが、硬化したコンクリートの主成分はケイ酸カルシウムおよび水酸化カルシウムである。このうちの水酸化カルシウムが水に溶解し、これでセメント中の pH が決まると考えられる。飽和水酸化カルシウム水溶液の pH を実測したところ 12.1 であったので、本研究ではセメント下の鋼表面の pH は 12.1 であるとした。

Fig. 4 に各種金属粉末を混合したセメントを塗布した A 型試験片の定常状態に達した後の電位を示す。図中の点線は上から、鉄の酸化物として酸化鉄(III)、酸化鉄(II)二鉄(III)、鉄のイオンとして鉄(II)イオン、鉄(II)酸水素イオンを考え、これらのイオンの濃度を 10^{-9} mol m^{-3} として作製した鉄の電位-pH 平衡図において、pH = 12.1 の時の酸化鉄(III)と酸化鉄(II)二鉄(III)、酸化鉄(II)二鉄(III)と鉄の安定域の境界である。定常状態に達した後の電位は、亜鉛をセメントに混合した場合のみ、鉄の安定域にあった。その他の場合は酸化鉄(III)が安定な領域にあった。この実験では酸化鉄(II)二鉄(III)が安定な電位となる場合はなかった。

鋼の電位が電位-pH 平衡図上で、酸化鉄(III)および酸化鉄(II)二鉄(III)が安定な領域にある場合、通常鋼は不動態で腐食しない。しかし本研究では 3 mass% 塩化ナトリウム水溶液に浸漬されているので、塩化物イオンがセメント中に浸透して、鋼表面に達する可能性がある。その場合不動態が破壊されて鋼は腐食すると予想される。そこで実験開始後 60 日後に試験片を取り出してセ

Fig. 5 Photographs of specimens type A in Fig. 2 after removing the cement containing different metal powder.

メントを割り、鋼の表面観察を行った。Fig. 5 に各試験片の写真を示す。酸化鉄(III)が安定な電位となったセメントのみを塗布した場合およびアルミニウム、マグネシウムを混合したセメントを塗布した場合は、図中に○印で示したように鋼表面に腐食の痕跡が確認された。一方、鉄単体が安定な電位となった亜鉛を混合したセメントを塗布した場合は、確かに鋼表面に腐食は観察されず、防食された。なおこの実験では酸化鉄(II)二鉄(III)が安定となる電位を示した試験片が存在しなかったので、この場合に鋼が腐食するかは不明である。

以上よりセメントにアルミニウムまたはマグネシウム粉末を混合した場合、電位は酸化鉄(III)が安定な値となるが、不動態は破壊されて鋼は腐食する。セメントに亜鉛粉末を混合した時のみ、鋼の電位は鉄単体が安定な領域まで卑化し、鋼の腐食を抑制することができることがわかった。

3.2 セメント中の亜鉛含有率と鋼の腐食状態

鋼を防食できる亜鉛含有率の範囲を調べるため、亜鉛の含有率を 20~80 mass% に調製したセメントを塗布した A 型試験片の電位を測定した。いずれの場合も 1 日後に電位は定常に達した。Fig. 6 に定常に達した後の電位を示す。図中の点線は 3.1 で述べた電位-pH 平衡図において pH = 12.1 の時の酸化鉄(III)と酸化鉄(II)二鉄(III)、酸化鉄(II)二鉄(III)と鉄の安定域の境界である。定常に達した後の鋼の電位は、亜鉛含有率 33 mass% 以下の場合、セメントのみを塗布した場合とほぼ同じ -360~-380 mV であった。この電位は酸化鉄(III)が安定となる値である。亜鉛含有率が 50~67 mass% の場合、電位は -700~-760 mV に卑化した。これは電位-pH 平衡図上で酸化鉄(II)二鉄(III)が安定な領域にある。亜

Fig. 6 The relation between steady potentials of specimens type A in Fig. 2 of longer immersion than 60 days and zinc contents of cement. Thermodynamic stabilities are calculated by assuming surface pH = 12.1.

鉛含有率 75 mass%以上では電位は -800 mV でほぼ一定となった。この値は鉄の安定領域にある。

先にも述べたように、本研究では溶液に 3 mass% 塩化ナトリウム水溶液を使用したため、電位が不動態域にあっても、セメント中に塩化物イオンが浸透した場合には鋼が腐食する可能性がある。そこで 60 日目に試験片を取り出してセメントを割り、鋼の表面状態を目視で観察した。Fig. 7 に亜鉛含有率 20~75 mass% の場合の鋼の表面写真を示す。電位-pH 平衡図上で酸化鉄(III)が安定となる亜鉛含有率 33 mass% 以下の場合、図中の○印の部分に腐食の痕跡が観察された。しかし酸化鉄(II)二鉄(III)が安定な電位となった亜鉛含有率 50 および 67 mass% の場合、鋼表面に腐食は観察されなかった。つまり酸化鉄(II)二鉄(III)が安定となる電位では、酸化鉄(III)が安定となる場合と異なり、不動態皮膜は破壊されずに安定に存在したと考えられる。鉄単体が安定な電位を示した亜鉛含有率 75 mass% 以上の試験では、鋼表面に腐食は確認されなかった。

亜鉛含有率 50 mass% 以上の場合に電位が卑化する理由を考察する。セメントに混合した亜鉛の一部は鋼と接触し、鋼に対してアノードになると推定される。亜鉛含有率 33 mass% 以下の場合には、鋼と接触している亜鉛の量が少ないため、鋼の電位は卑化せず亜鉛含有率 0 mass% の場合の電位とほぼ同じになる。一方亜鉛含有率 50 mass% を越えると、鋼と接触した亜鉛の量が増加し、鋼の電位は卑化し始める。亜鉛含有率 67 mass% 以上になると鋼と接触した亜鉛の量は十分大きくなったと考えられる。この時鋼の電位は -800 mV 付近まで卑化した。亜鉛の開回路電位を測定するために、亜鉛板にセメントを塗布し、同様に浸漬試験をしたところ、亜鉛の電位は -802 mV であった。これより亜鉛含有率 67 mass% 以上の場合には、鋼は亜鉛の開回路電位付近まで分極していることがわかった。従って亜鉛含有率が増加するにつれて、鋼と接触する亜鉛が増加し、電位が卑化するものと推測される。

以上をまとめると、3 mass% 塩化ナトリウム水溶液中において、亜鉛含有率 50 mass% 以上のセメントを鋼に塗布すると、電位を酸化鉄(II)二鉄(III)または鉄が安定な値に卑化して防食できることがわかった。

Fig. 7 Photographs of specimens type A in Fig. 2 after removing cement with different zinc contents.

3.3 亜鉛粒子の粒径と鋼の電位の関係

前節まではセメントに混合した金属はすべて粉末試薬を用いたが、本節では粉末(平均粒径 $6.1 \mu\text{m}$)、砂状(同 1.6 mm)、粒状(同 8.0 mm)の3種類の亜鉛を用いて、亜鉛粒子の粒径と電位および亜鉛含有率の関係について検討した。

Fig. 8 に粉末亜鉛、砂状亜鉛、粒状亜鉛をセメントに混合した時の、亜鉛含有率と定常に達した時の電位の関係を示す。前節で述べたように、粉末亜鉛の場合、亜鉛含有率 50 mass% 以上において電位は -780 mV 以下に卑化した。砂状亜鉛の場合、亜鉛含有率 80 mass% で電位は -740 mV に卑化した。75 mass% 以下では電位は卑化せず、粒状亜鉛の場合は亜鉛含有率にかかわらず卑化しなかった。つまり亜鉛の粒径が小さいほど、低い亜鉛含有率でも電位は卑化することがわかった。

亜鉛粒子の粒径が小さくなると、粒子の比表面積が大きくなる。これに伴ってセメント中の亜鉛の反応面積が変化して、粒径と電位および亜鉛含有率の関係に影響を及ぼすと推定される。

3.4 セメントが塗布されていない部分の防食

これまで、鋼板の露出面全面にセメントを塗布した場合について考察した。次に鋼の一部にのみセメントを塗

Fig. 8 The relation between steady potentials of specimens type A in Fig. 2 coated with cement containing different sizes of zinc grains after 60 days immersion and zinc contents of cement.

Fig. 9 The relation between potentials of specimens of type B in Fig. 2 and zinc contents of cement. Thermodynamic stabilities are calculated by assuming surface pH=8.0.

布した場合について、セメントに覆われていない部分の腐食状態を検討する。Fig. 2(b)のように試料の片面のみに亜鉛粉末を混合したセメントを塗布し、残りの片面および側面は鋼表面が露出したままのB型試験片を用いて浸漬実験を行った。

Fig. 9にセメントのみおよび亜鉛含有率20~80 mass%のセメントを用いて作製したB型試験片の、13日目以前および15日目以降の亜鉛含有率と電位の関係を示す。図中の点線は3.1で述べた鉄の電位-pH平衡図において、上からpH=8の時の酸化鉄(III)と酸化鉄(II)二鉄(III)、酸化鉄(II)二鉄(III)と鉄(II)イオン、鉄(II)イオンと鉄の安定域の境界である。電位とセメントが塗布されていない部分の腐食状態の観察結果は、亜鉛含有率によって次の3種に分類できた。

(1) 鋼が浸漬後直ちに腐食する場合

セメントのみを塗布した場合およびセメント中の亜鉛含有率が33 mass%以下の場合がこれに該当する。鋼の電位は浸漬開始直後に-450 mVで定常となった。目視観察では浸漬開始後すぐに水中部分および水線部分に赤さびが発生した。つまり亜鉛含有率33 mass%以下では、セメントが塗布されてい

ない部分は腐食した。

(2) 鋼の腐食が短期間抑制される場合

亜鉛含有率が50 mass%の場合、浸漬直後から13日目までは鋼の電位は-600 mVまで卑化した。この時目視観察では鋼表面に腐食は見られなかった。14日目に電位は貴化し始め、15日目には亜鉛含有率33 mass%以下の場合と同じ-450 mVで定常値となった。その時鋼の水中部分および水線部分に、赤さびが発生したのが目視で観察された。

(3) 鋼の腐食が長期間抑制される場合

亜鉛含有率が67 mass%以上の場合、鋼の電位は-750 mVまで卑化して定常となり、60日後においてもこの電位は保たれた。また目視観察の結果、鋼は水中および水線部分ともに腐食しなかった。すなわち亜鉛含有率が67 mass%以上の場合、鋼の電位は卑化し、セメントが塗布されていない部分も腐食しない。

次に(1)~(3)の各場合においてセメントが塗布されていない鋼表面の腐食状態を、電位-pH平衡図から検討する。実験中、溶液沖合のpHの値は8程度に調整したので、セメントに覆われていない部分の鋼表面のpHも沖合と同じpH=8.0と考える。(1)の場合実際に鋼は腐食し、鋼の電位は確かに鉄(II)イオンが安定な領域にあった。(2)の場合、腐食が観察されなかった13日目までは、鋼の電位は鉄単体が安定な領域にあったが、赤さびが発生した15日目以降の電位は鉄(II)イオンの安定域にあった。さらに(3)の場合、実際には鋼は腐食せず、鋼の電位も鉄単体の安定領域にあった。このように目視による腐食状態と電位-pH平衡図を利用し、電位から判断した腐食状態はよく一致している。

亜鉛含有率67 mass%以上の場合、実験期間中電位は卑化し、セメントに覆われていない部分の腐食は抑制されたが、亜鉛含有率50 mass%の場合には13日間しか電位は卑化せず、セメントに覆われていない部分の腐食も防止できなかった。これは防食に関与した亜鉛が消費され、卑な電位を維持できなくなったためと考えられる。従って長期間の防食効果を期待するためには、亜鉛含有率は67 mass%以上が必要であると言える。

以上より亜鉛含有率67 mass%以上のセメントを鋼の片面のみに塗布すれば、セメントに覆われていない部分を鉄が安定となる電位に保ち、防食できることがわかった。セメントの防食効果は、セメントに覆われていない部分にまで及ぶ。

4. 結 論

セメントに金属粒子を混合して鋼板の全面または片面に塗布し、25℃における電位変化および表面観察から3 mass%塩化ナトリウム水溶液中における鋼の腐食状態を検討した。その結果以下の知見を得た。

(1) セメントに亜鉛を混合すると、鋼の電位を卑化し腐食を防止することが可能であった。アルミニウムやマグネシウムを混合した場合は、セメント下の鋼は腐食した。

(2) 粒径の異なる亜鉛粒子をセメントに混合した場合、粒径が小さいほど、低い亜鉛含有率で電位は卑化し

た。

(3) 亜鉛粉末を混合したセメントを全面に塗布した場合、亜鉛含有率 50 mass%以上で電位は酸化鉄(II)二鉄(III)または鉄単体が安定な値にまで卑化し、鋼は防食された。

(4) 亜鉛粉末を混合したセメントを鋼の片面のみに塗布した場合、亜鉛含有率が 67 mass%以上であれば、鋼の電位は鉄単体が安定な電位に保たれ、セメントの非被覆面は防食された。つまりセメントの防食効果はセメントの非被覆面にまで及んだ。

以上の結果から本手法の海洋環境の鋼構造物の防食への適用として、亜鉛含有率 67 mass%以上のセメントを防食したい鋼全面に塗布する方法が考えられる。この際セメントが部分的に破壊、損傷して鋼が露出しても、セメントの防食効果が露出部分まで及ぶと考えられる。さらに比較的作業のしやすい飛沫帯や干満帯部分にのみセメントを塗布し、水中部分には塗布しないという方法も可能性がある。飛沫帯や干満帯では当然その部分の鋼を防食でき、一方水中部分も飛沫帯および干満帯部分のセメントの防食効果が及び、腐食を抑制できると考えられる。ただし、本手法でも半永久的に腐食を防止できるわけではなく、亜鉛がある程度消費されてしまうと防食効

果は失われてしまうものと推定される。また水中部分の面積がセメント塗布面に比べてはるかに大きい場合は、防食効果が及ばない部分が生じるであろう。防食が維持される期間および塗布したセメントの防食効果の及ぶ範囲については今後検討したい。

参 考 文 献

- 1) M.Pourbaix, "Lectures on electrochemical corrosion", p.281, Plenum Press (1973).
- 2) H. Kasamatsu, M. Tobayama, H. Kiryu, T. Tanaka and Y. Hagino, "Tokushukinotoryo no Kaihatsu", p.205, CMC (1987).
- 3) K.Kitao, S.Asanaga, T.Shinohara and S.Tsujikawa, Proc. 43rd Jpn. Conf. Materials and Environments, p.383, JSCE (1996).
- 4) G. Doufu, Z. Z. Wang, Z. Chengdian and X. Naixin, *British Corrosion Journal*, **24** [4] 265 (1989).
- 5) J.Bennett and C.Firlotte, *Materials Performance*, **36** [3] 14 (1997).
- 6) T. Uchibori, T. Hongo and M. Akutsu, Jpn. Kokai Tokkyo Koho, JP 1994 345, 512.
- 7) Y. Kasai and M. Kobayashi, "Cement, Concrete yo Konwazairyo", p.347, Gijutsu Shoin (1986).
- 8) M. Pourbaix, "Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions", p.309, NACE (1974).

(Manuscript received July 28, 2003;
in final form November 10, 2003)

要 旨

海水中における鋼材の水線腐食を防止するために、各種金属粒子を混合したセメントを鋼に塗布する防食方法を検討した。種類および粒径の異なる金属粒子をセメントに混合して鋼に塗布し、これを 3 mass% 塩化ナトリウム水溶液中に浸漬した。電位測定及び表面観察から鋼の防食が可能となる条件を見出した。アルミニウムまたはマグネシウム粉末を混合したセメントを塗布した場合、電位は -400 mV vs. SHE で鋼は腐食した。セメントに亜鉛粉末を 50 mass%以上混合すると腐食は起こらず、電位は -700 mV vs. SHE より卑な値に保たれた。この値は電位-pH平衡図上において、鉄単体または酸化鉄(II)二鉄(III)が安定な領域にあった。また亜鉛粒子の粒径が大きいほど、電位を卑に保つためには高い亜鉛含有率が必要であった。亜鉛粉末を 67 mass%以上混合したセメントを、鋼の片面のみに塗布すると、電位を -750 mV vs. SHE より卑に 60日間保つことができた。この時セメントを塗布していない面は防食され、セメントを塗布していない面まで防食効果が及ぶことがわかった。以上より亜鉛粉末を 67 mass%以上混合したセメントを海洋鋼構造物の水線部分に塗布すれば、水線腐食の防止に有効であると考えられる。

キーワード 鋼, 亜鉛, セメント, 防食, 水線腐食