

溶融亜鉛めっきの機能対応技術調査研究

委員長 名古屋大学（名）沖 猛雄

1. はじめに

溶融亜鉛めっきは、溶融した亜鉛中に被処理物を浸漬することにより金属亜鉛を一様に被覆する防食用表面処理プロセスであり、鉄塔、橋梁、鉄骨等の大型構造物から、コンクリート用鉄筋、ボルト・ナットなど小物に至るまで幅広く用いられている。溶融亜鉛めっきによる防食機構は、単純には亜鉛による鉄鋼の表面被覆により外部環境との直接接触を防ぐことにある。鋼よりも卑な亜鉛であるから犠牲防食作用とよく言われているが、本などでよく示されている図にあるような亜鉛が疵付いて鋼が露出し、鋼と亜鉛が同時に外部環境と接触するような状況はまれである。鋼表面を覆っている亜鉛表面が腐食し、その腐食生成物により亜鉛の腐食が抑制され、最終的に腐食により亜鉛が消滅するまで鋼は防食される。しかしながら、亜鉛めっきプロセスでは、めっき物が融体であるために、亜鉛と被処理物との界面で反応が生じ、鉄-亜鉛合金が生成する。この合金化反応も密着性を向上させるものとなるが、金属間化合物は一般的に

脆く、さらに合金層には鉄成分が含まれているため合金層が腐食し始めると赤錆を誘発する。したがって、合金層は重要な意味合いを持っている。一方、コンクリートは、圧縮応力には強いが引っ張り応力には弱い特徴を持っているため、鉄筋を内部に埋設することにより、構造物としての機能を初めて発揮する。これまで、コンクリート中の鉄筋はセメント成分の影響によりアルカリ性が保たれているため、表面には不働態皮膜が生成し錆びにくいとされてきた。しかし、コンクリート中はアルカリ環境であるというだけの単純なものではなく、コンクリート自体の状態によっても鉄筋の腐食が生じることがわかってきた。その腐食生成物により内部膨張が生じ、亀裂の発生・伝播、コンクリートの崩落へとつながる。したがって、鉄筋の腐食を抑えることがコンクリートの安全性の向上にとって重要となる。コンクリートはセメントペーストと骨材からなる広義の複合材料である。セメントと水を混合することにより、時間の経過とともに硬化し、生成したコンクリートはその内部に隙間を含む



図1 φ13の各種鋼材の曲げ試験試料の外曲げ外観

ポーラスな構造となる。内部の隙間には水、空気（酸素、二酸化炭素）、塩化物などを外部から様々な物質が侵入し、拡散することが可能となり、コンクリートの劣化へとつながる。

コンクリートの作製時には、その時に用いられる砂に含まれる塩素イオン濃度が規定されている。それは、塩素イオンが鉄筋の腐食を促進するからである。時間の経過とともにコンクリートが固まると、モノサルフェート水和物（ $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ）が塩素を含むカルシウムクロロアルミネート（ $11\text{CaO} \cdot 7 \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2$ ）と反応し、フリーデル氏塩（ $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ）を形成し、それにより、セメント量の0.4%の塩化物イオンを固定すると言われている。しかしながら、コンクリート固化時に生成する細孔により外部から二酸化炭素が侵入し、それにより炭酸化・中性化が生じ、フリーデル氏塩が分解して塩素イオンを放出すると言われている。このようなことから砂に含まれる塩素イオンを規定する必要がある。しかしながら、塩素イオンは、経年とともに表層からも進入する。

このような特徴的な環境にあるコンクリート用鉄筋には防食処理が必要となり、溶融亜鉛めっきが施されている。鉄筋は、曲げ加工を伴ってコンクリート中で規則的に組み上げられて機械的強度を保持するため、曲げと表面処理との関係も重要となる。

2. 溶融亜鉛めっきの曲げ試験

φ13およびφ16の鉄筋コンクリート用棒鋼（SD295A, SD345）に溶融亜鉛めっきを施し、

180度の内曲げ試験（鉄筋の直径の1.5倍の曲率）を行った。溶融亜鉛めっき浴には、Niの添加量として、0, 0.03%, 0.06%, 0.09%の4種類のものを用いた。めっき条件は温度を $460 \pm 5^\circ\text{C}$ 、めっき時間を 90 ± 5 秒とした。

図1にφ13のSD345材の曲げ試験外観を示す。Ni無添加浴を用いた亜鉛めっきの場合には、めっき皮膜に大きな亀裂が存在したり、剥離した部分が認められた。しかしながら、亜鉛めっき浴中Niの添加量とともに亀裂は変化し、Ni添加量が増えるにつれて剥離部が減少し、さらに亀裂は微細化し分散する傾向にあった。φ16の場合も同様な形態を示した。また、図2にφ13の示す曲げ部の断面を示す。これより、鋼材および鋼材の直径によらず、Zn層からZn-Fe合金層を貫く亀裂が、鋼材まで届いていた。さらに、剥離は、ZnとZn-Fe合金の界面ではなく、Zn-Fe合金と鋼材との界面で生じていた。それぞれの鋼材のZn-Fe合金層の厚さを測定したところ、表1に示すように、合金層厚さはおよそ40~80 μmであり、Zn浴中へのNiの添加により、Zn-Fe合金

表1 溶融亜鉛めっき皮膜の合金層の厚さ

鋼種, 直径		Ni 添加量 (%)			
		0.0	0.03	0.06	0.09
φ13	SD295A	56~60	52~56	48~56	40~48
	SD345	40~44	32~40	40~48	40~48
φ16	SD295A	48~80	48~60	40~52	42~56
	SD345	72~80	48~80	60~64	60~68

(μm)



図2 φ13の各種鋼材の曲げ試験断面

2.5 年間曝露試験を行った後に伊良湖で 7 年間曝露試験した試料を A 群試料とし、福井の 140m 地点で 2.5 年間曝露試験を行った後に伊良湖岬で 7 年間曝露試験を行った試料を B 群試料とする。A 群と B 群の違いは、福井での曝露地点のみである。

溶融亜鉛めっき鉄筋は、コンクリートを乾式法により切削加工して取り出し、コンクリートを除去したのち表面状態を観察した。また、暴露試験に供したコンクリートを、図 3 に示すように表層より 10mm ずつ①～④の 4 層を切り出し、0.15mm 以下の粒子に粉碎して 10g 準備した。それぞれの層に含まれる塩化物イオン濃度をチオシアン酸水銀 (II) 吸光光度法により評価した。分析したコンクリート試料は、福井で 70m 地点および 140m 地点で暴露した後に伊良湖に設置した A 群、B 群それぞれの試料である。これらの試料中に測定された塩化物イオン分析結果を表 2 に示す。どちらの暴露試験のコンクリート試料も、表層から内部に向かって塩化物イオン濃度が低くなっていることがわかる。また、A 群、B 群の塩化物イオン濃度の違いは、福井での設置位置の違い (70m と 140m) が表れている。

コンクリート中に黒皮鉄筋を埋設し長期曝露試験を行った後、コンクリート中から取出した鉄筋の表面写真を図4に示す。また、これらの鉄筋試料について画像処理ソフトにより赤錆に対する2値化を行い、赤錆の発生率を求めた結果も併記する。A群とB群のかぶり量1cm

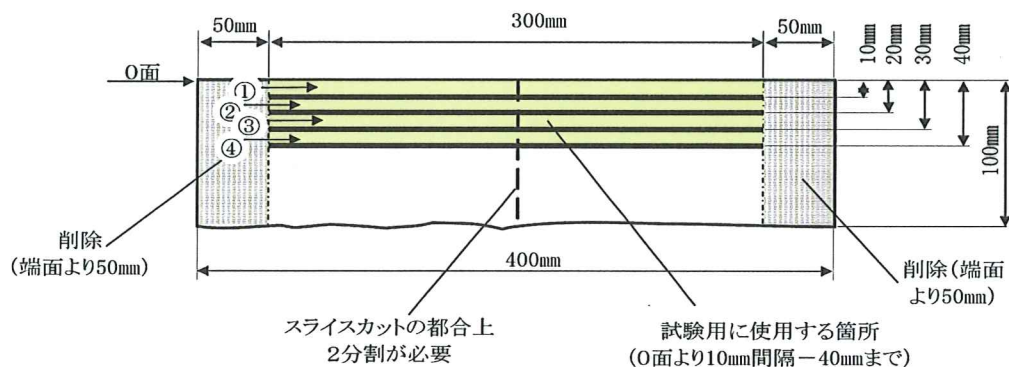


図3 塩化物イオン濃度分析切り出し部

表 2 塩化物イオン分析結果

試料	①	②	③	④
A 群	0.19%	0.18%	0.15%	0.10%
B 群	0.17%	0.16%	0.12%	0.11%

で比べると、A 群の福井で 70m 地点に設置した試料の錆発生率が高いことがわかる。伊良湖での条件が同じであることを考えると、福井での暴露試験における腐食性の違い、あるいは、福井で受けた塩化物イオンがコンクリート内部に多く蓄積したため赤錆発生率が高くなったものと推察される。また、B 群のかぶり量について比較すると、かぶり量 2cm の試料は、かぶり量が 1cm の試料と同等の赤錆が発生しているものもあれば、赤錆の発生率が 0.1% や、さらにここでは示していないが全く錆の認められなかった試料もあり、かぶり量が 2cm となると腐食率は低下するものとみなすことができる。さらに、かぶり量が 3cm の場合には腐食は全くみられなかった。

表 2 のコンクリート中の塩素イオン濃度の測定結果と併せて考えると、コンクリート表層ほど塩化物イオン濃度が高いことから、かぶり量が少ないほど腐食しやすいかった。これらのことから考えると、黒皮鉄筋の場合③（表層から 20～30mm）の 0.12% の塩化物濃度であれ

ば赤錆が少ないと推察される。

一方、溶融亜鉛めっき鉄筋については、かぶり量 1～3cm の試料について調べたところ、どの鉄筋からも赤錆の発生は認められず、②の 0.18% の濃度であっても溶融亜鉛めっきによる耐食性が保たれることがわかる。

4. まとめ

溶融亜鉛めっき鉄筋の亜鉛層ならびに合金層厚さの正確な評価は赤錆の発生時期、曲げ加工性に重要な指針を与え、溶融亜鉛めっき浴に Ni を微量に添加すると、鋼種によっては Zn-Fe 合金層は薄くなり、180 度曲げ試験において亀裂や剥離が減少し加工性が向上する。また、コンクリート中に埋設した黒皮鉄筋の曝露試験結果より、コンクリートのかぶり量により腐食の程度が異なり、かぶり量が多い方が腐食しにくく、さらに、溶融亜鉛めっきを施すと耐食性は一段と向上することがわかる。さらに詳細にデータを集めることにより、鉄筋の寿命予測に役立つものと考えられる。

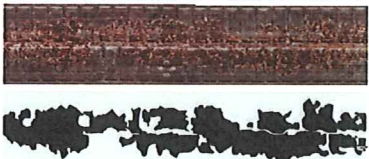
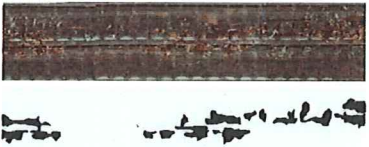
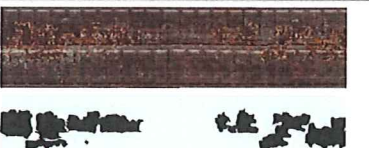
群-かぶり	外 観（上）／ 2 値化（下）	錆発生率
A-1cm		41.0%
B-1cm(1)		18.7%
B-1cm(2)		10.0%
B-2cm(1)		11.6%
B-2cm(2)		0.1%

図 4 コンクリート中に埋設した黒皮鉄筋の表面状態