

溶融亜鉛めっき鉄筋とコンクリートの付着性能について

(株)デンロコーポレーション ○今野貴史

那須電機鉄工(株) 盛永康文、森純一郎

横浜ガルバー(株) 渡会竹志、田中剣治

シーケー金属(株) 大橋一善、西田雄治

(株)ガルバ興業 菊川美仁

1. はじめに

我が国の社会資本は今、一斉に更新時期を迎えているが、莫大な更新投資を勘案すると長寿命化が課題の一つであることは明らかである。

欧米諸国では「溶融亜鉛めっき鉄筋（以下、「めっき鉄筋」と略）」に関する各々の国内規格が整備されている上、国際標準化機構による ISO14657「コンクリート補強用めっき鋼材」もあり、世界的にはシドニーオペラハウスやニュージーランド国会議事堂をはじめ、「めっき鉄筋」が建築・土木のさまざまな施設に使用されている。

しかしながら、我が国においては、「めっき鉄筋」は一部の土木分野に限って使用されているに過ぎない。

「めっき鉄筋」はコンクリート中においても恒久性があることは多くの研究でも解明されており⁽²⁾、耐食性に優れ、付着性能もめっき無し異形棒鋼（以下、黒鉄筋と略）に比べても遜色はない。30年前には（一社）日本建築学会の「亜鉛めっき鉄筋を用いた鉄筋コンクリート造の設計施工指針（案）」⁽⁵⁾にも掲載されていた。

社会資本の耐久性向上を高めることを目的に、改めて「めっき鉄筋」に着目し、（一財）日本建築センターの特別評定取得を取得したので評定の内容について報告する。

これまで「めっき鉄筋」は、鉄筋表面に亜鉛系皮膜層が形成され、コンクリートとの付着性能が課題とされてきた。そこで、今回の評定では、（一社）日本溶融亜鉛鍍金協会を中心に、めっき条件を絞り込み、コンクリートとの付着性能が JIS G 3112 に定められた鉄筋と同等となるめっき条件を見出し、各種試験を実施し検証した。

2. 溶融亜鉛めっきとは

溶融亜鉛めっき処理は、前処理した鉄鋼素材を、溶融した液体金属亜鉛（約 450℃*1）のめっき浴へ一定時間浸漬し、その後引き上げ、素材の表面で液体金属を凝固させて金属被覆するめっき方法である。

溶融亜鉛めっきは、簡便な方法により表面処理が可能であり、かつ素材の延命化を考慮した場合、非常にコストメリットが大きい表面処理方法である。

亜鉛めっき浴に黒鉄筋が浸漬されると、鉄筋素材とめっき浴（液体金属亜鉛）との界面で合金化反応（素材中の鉄成分と液体亜鉛の拡散反応）が進み、鉄-亜鉛合金層

部署：東京支店 受託加工技術営業課

住所：〒110-0005 東京都台東区上野 6 丁目 16-17 朝日生命上野昭和通ビル

電話番号：03-3831-5319 メールアドレス：konno@denro.co.jp

が形成され、素材と密着力の高い、また比較的厚いめっき層の形成が可能となる。

*1 建告 2464 号に定められた“鋼材に対する加工制限摂氏 500 度以下の加熱”条件を満たしている。

3. 溶融亜鉛めっき鉄筋の特長

「めっき鉄筋」の有用性は、JIS に規定される機械的性能を保持しつつ、黒鉄筋の耐食性を向上させた点にある。表 1 に各種鉄筋の比較を示す。塗装鉄筋は、塩化物に対する耐食性を有することが知られているが、「めっき鉄筋」も耐食性に優れ、被覆が施されていない通常の黒鉄筋と比べ、塩化物に対する耐食性倍率は 3～4 倍向上すると報告がある⁽¹⁾。また、「めっき鉄筋」は、鉄よりも腐食電位が低い亜鉛金属で覆われているため、犠牲防食作用が働き、塗装鉄筋と異なり、塗装の不具合（エポキシ樹脂鉄筋：アメリカ Florida Keys 波止場支柱、高速道路橋梁で重大な局部腐食）⁽⁷⁾で局部的な腐食が発生することは殆どない。さらに「めっき鉄筋」は耐加熱性にも優れており、鉄筋が加熱されても、塗装鉄筋のように被覆の軟化や炭化がなく、コンクリートとの付着力が低下するといったリスクを低減することができる。コストについても、塗装鉄筋の工程よりも「めっき鉄筋」は容易に表面処理できることから安価である。

表 1 各種鉄筋と「めっき鉄筋」との比較⁽⁵⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾

	黒鉄筋	塗装鉄筋	めっき鉄筋
耐塩化物 (砂の塩分含有量)	× 0.04 %以下	◎ 皮膜損傷ない場合	○ 0.3 %以下
耐熱	○	× 約 300℃で軟化	○ 約 420℃まで可
コスト比	1 倍	× (約 2 倍)	○ (約 1.5 倍)
付着力 (比率)	1.0	0.8 JASS5 による	1.0 今回の評定内容

(1) 耐食性能

コンクリートが打設された初期段階は、コンクリート内が pH12.5～13 と強アルカリ性を示すため、黒鉄筋の表面には、5 ナノメートル程度と超薄膜の不動態皮膜、即ち保護皮膜が形成される。しかし、長期間に渡り大気環境にさらされることによって、大気中に含まれる炭酸ガス（酸性）により、コンクリート表面から徐々に中性化が進み劣化が始まる。

近年は環境汚染、海洋環境下で使用される重要構造物の増加など、鉄筋の耐食性向上は重要な課題となっている。岸谷、岩崎らの調査⁽²⁾⁽⁷⁾によると、「めっき鉄筋」および黒鉄筋のコンクリート供試体を都市、海洋、臨海工業、寒冷および海浜地区環境へ 1～3 年間放置した後、黒鉄筋の腐食の程度を目視、腐食面積の計測によって「めっき鉄筋」の有用性を調査した結果がある。先にも述べた”ひび割れ”を人工的に入れた（幅 0.2、0.3 mm）供試体についても暴露試験を行っている。試験結果の一部抜粋を表 2 に示す。また、表 2 中の腐食グレードの説明を表 3 に示す。

表 2 の結果から「めっき鉄筋」は、都市、海洋、大気汚染環境である臨海工業地域および寒暖差（気温：夏 30℃、冬－10℃）が激しい岐阜県神岡市においても黒鉄筋よりも耐食性があることがわかる。また、下関市の彦島で 1 年間暴露した ILZRO（国際鉛垂鉛研究機構）の報告では、ひび割れの幅が 0.2 から 0.5 mm と広がるにつれ、劣化の度合いが大きくなっている。その傾向は黒鉄筋の方が「めっき鉄筋」に比べ顕著であった。

表 2 自然暴露試験における鉄筋の耐食性⁽²⁾⁽⁷⁾

供試体	環境	暴露 期間		結果または結果の一部要約													
				岸谷らの報告													
				打上り面積鉄筋（SD40）の腐食面積率%						底面側鉄筋（SD30）の腐食面積率%							
				かぶり 1 cm			かぶり 2 cm			かぶり 1 cm		かぶり 2 cm					
鉄筋コン クリート 10×20× 60 cm ひび割れ 入り	都市地区 （三鷹市）	1 年	黒 鉄 筋 め っ き 鉄 筋	15.8 2.4			21.4 0.6			4.1 1.4		7.3 0.0					
	海洋地区 （下関市）		黒 鉄 筋 め っ き 鉄 筋	21.7 3.3			51.1 0.5			12.2 2.3		24.7 0.6					
	臨海工業地区 （川崎市）		黒 鉄 筋 め っ き 鉄 筋	33.8 7.3			18.0 1.4			7.6 2.3		27.8 0.8					
	寒冷地区 （神岡市）		黒 鉄 筋 め っ き 鉄 筋	14.8 0.4			20.6 0.0			3.8 0.9		12.2 0.2					
ILZRO の報告書																	
鉄 筋 モル タルばり 8 × 4 × 40 cm ひび割 れ入り	海洋地区 （下関市） 大気中に SO ₂ 海塩粒子 含む				ひび割れ幅 0.2 mm の供試体						ひび割れ幅 0.5 mm の供試体						
					ひび割れ部			ひび無し部			ひび割れ部			ひび無し部			
					腐食グレード	2	1	0	2	1	0	2	1	0	2	1	0
					黒 鉄 筋 め っ き 鉄 筋	3箇所 —	14 3	19 33	0 0	0 24	11 0	8 8	17 28	0 0	1 3	23 21	

表 3 腐食グレードの基準⁽²⁾

グレード No	外 観 (劣化状況)	
0	黒鉄筋	赤褐色の粉または小粒径のさびが一部 (約 30%) 見られる。
	めっき鉄筋	白黒色の亜鉛さびが一面に見られる。
1	黒鉄筋	赤褐色のさびが網目状に広がり、鉄筋面上に密着している。(約 30%)
	めっき鉄筋	白黒色に混じり一部黄色の鉄さびが見られ、一部 (20~30%) めっき剥離あり。
2	黒鉄筋	一部剥離できるくらいのさびがあり、厚みを感じとれる。(約 50%)
	めっき鉄筋	めっき部の腐食が完了し、鉄面への進行が認められる。約 50%めっき剥離。

また、海外の報告では、「めっき鉄筋」は古くから用いられていたことから、年数を経た建築物の調査結果が報告されている。特にバミューダ諸島の Longbird 橋は四方を海に囲まれ、塩分 (Cl⁻濃度⁽³⁾ : 1.0 kg/m³) が含まれている材料を使用し建設されている。建設 21 年経過後に「めっき鉄筋」の腐食調査が行われたが、めっき皮膜は初期値の 60~70%残存していた。初期のめっき厚さは、かなり厚いものであったことを考慮する必要はあるものの、めっき皮膜の残存率が 10%となった時点で亜鉛めっきの防錆効果が失われると考えると、Longbird 橋の測定結果から耐用年数は 47~76 年と推定される⁽¹⁾。なお、鉄筋のかぶり厚は 60 mm であった⁽³⁾。その後 42 年経過した 1995 年の調査においても初期仕様の厚さを下回るめっき皮膜はなく、「めっき鉄筋」の有効性が改めて確認された。この耐食性の発現理由は、①節形状に影響を与えない適切なめっき膜厚、②一定期間外部環境と鉄筋の接触を遮断するコンクリートのかぶり厚、③コンクリート中に含まれる水酸化カルシウムと亜鉛が反応し、ヒドロキシ亜鉛酸カルシウムが生成し⁽⁴⁾、その化合物が保護皮膜として作用したことによるものと考えら

れている。

(2) 機械的性能

「めっき鉄筋」は、溶融亜鉛めっき加工により降伏点や引張強度がやや増加し、伸びがやや減少する傾向があると言われている⁽⁵⁾。そこで、めっき加工条件に対する「めっき鉄筋」の降伏点および引張強度の影響を実験により確認した。表 4 に SD295A、表 5 には SD345 の金属材料の引張試験結果を示す。なお、試験方法は JIS Z 2241 に準拠した。

黒鉄筋にめっき加工を施すと SD295A および SD345 共に降伏点および引張強さは、原材料の値よりも増加傾向を示し、伸びは殆ど変化しなかった。またヤング率の値は、めっき加工を施しても殆ど変らない値を示した。

表 4 SD295A の引張試験結果

めっき加工条件 () 内供試体数	めっき条件 (規格値) →	引張試験結果		
		降伏点 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	伸び %
		295 以上	400～600	16 以上
440℃×120 秒 (n=5)	平均値	363	520	26
	標準偏差	3	2	1
460℃×90 秒 (n=5)	平均値	365	522	27
	標準偏差	2	1	0
470℃×240 秒 (n=5)	平均値	369	523	25
	標準偏差	2	3	2

表 5 SD345 の引張試験結果

めっき加工条件 () 内供試体数	めっき条件 (規格値) →	引張試験結果		
		降伏点 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	伸び %
		345～440	490 以上	18 以上
440℃×120 秒 (n=5)	平均値	418	611	22
	標準偏差	4	1	2
460℃×90 秒 (n=3)	平均値	425	611	22
	標準偏差	4	3	2
470℃×240 秒 (n=7)	平均値	430	617	20
	標準偏差	5	2	2

(3) コンクリートとの付着性能

「めっき鉄筋」の付着強度測定に係わる規定は、2 種類が公表されている。一つは、(一財) 建材試験センターによる JSTM C 2101 「引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強さ試験方法」であり、他方は(公社) 土木学会による JSCE-G 503-2010 「引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強度試験方法 (案)」である。JSTM C 2101 と JSCE-G 503 は、ほぼ同一内容である。しかし、試験結果の判定基準に着目すると、JSTM C 2101 は「すべり量が 0.002D の 3 N/mm² 以上」と明記されていることから、JSTM C 2101 に準拠して実施することとした。

なお、コンクリートの圧縮強度は 30±3 N/mm² の規格内であった。

図 1 に「めっき鉄筋」の付着応力度を示す。コンクリートと「めっき鉄筋」とのすべり量 0.002D 時の付着応力度は、最低でも 4.5 N/mm² であり、SD295A、SD345 の平均付着応力度は共に 8.8 N/mm² と全ての「めっき鉄筋」において JSTM C 2101 の付着判定基準 3 N/mm² 以上の付着応力度を満足した。また、付着応力度と節間隔 / 節高さの比率との関係も黒鉄筋と同様の傾向であった。

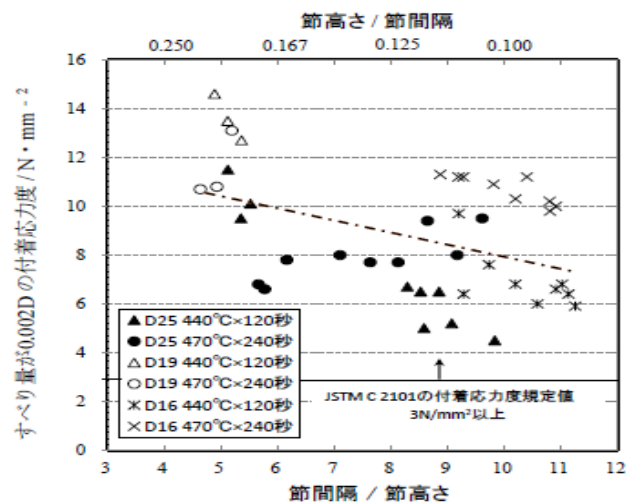


図1 めっき条件および鉄筋種別の付着応力度

既往の海外文献では、耐食性能の項でも述べたが、コンクリート中に含まれる水酸化カルシウムと亜鉛の化合物（ヒドロキシ亜鉛酸カルシウム）がコンクリート中に浸透し、めっき鉄筋とコンクリートとの付着力を黒鉄筋よりも増加させることが知られている⁽¹⁾。

4. めっき鉄筋の使用材料および品質

定められた品質管理規定（JIS H 8641「溶融亜鉛めっき」による規定を含む。）に従った「めっき鉄筋」のコンクリートとの付着性能は、JIS G 3112 で定められた鉄筋の当該性能と同等であることの評価を受けた。

対象となる鉄筋の種類は、表6による。

表6 鉄筋の種類

鋼種	種類の記号	節形状	呼び名
鉄筋コンクリート用棒鋼	SD295A	竹／横	D10～D16
	SD345	竹／横、ねじ	D16～D25

なお、鉄筋製造会社およびめっき加工会社は、その製造に係る日本工業規格適合性認証取得工場であることが前提となる。

(3) 溶融亜鉛めっきの種類と付着量

表7に溶融亜鉛めっきの種類、付着量および密着性を示す。

表7 溶融亜鉛めっきの種類、付着量および密着性

種類	記号	付着量	密着性
2種55	HDZ55	550 g/m ² 以上 1,200g/m ² 以下	内側直径：6D、角度：180°の曲げで「めっき皮膜が素材から離れた状態：はがれ」なし

(4) 熔融亜鉛めっきの規定付着量

素材への熔融亜鉛めっき付着量は、下限値を 550 g/m^2 とし、節形状に影響を与えないように上限値 ($1,200 \text{ g/m}^2$ 以下) についても規定した。

平均膜厚値は、下限値 $77 \text{ }\mu\text{m}$ 以上 ～ 上限値 $166 \text{ }\mu\text{m}$ 以下とした。

付着量と平均膜厚の関係は次式による。

$$\text{付着量 (g/m}^2\text{)} = \text{平均膜厚 (}\mu\text{m)} \times 7.2 \text{ (密度: g/cm}^3\text{)}$$

(5) 熔融亜鉛めっきの加工条件

めっき加工条件 (めっき浴温度、浸漬時間) と付着量の関係についても検証し、今回の評定申込者 4 社は以下の加工条件を選定した。

- ・めっき浴温度: $445 \pm 5^\circ\text{C}$ および $450 \pm 5^\circ\text{C}$
- ・めっき浴浸漬時間: 120 秒

5. 結論

結論として「めっき鉄筋」は下記の性能を有する。

- 1) 付着応力度は、JSTM C 2101「引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強さ試験方法」の判定基準により黒鉄筋と同等の性能を満足した。
- 2) 降伏点・引張強さ、伸びおよび曲げ性などの機械的性質は、JIS G 3112「鉄筋コンクリート用棒鋼」の規定を満足した。
- 3) 寸法・形状・質量は、JIS G 3112「鉄筋コンクリート用棒鋼」の規定を満足した。

以上により評定取得会社は、「めっき鉄筋」が通常の黒鉄筋と同様に (一社) 日本建築学会の“鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説”に準拠して使用できると考えている。

6. 参考文献

- (1) Romeo Fratesi : 鉛と亜鉛, **214**, pp27-37 (2000).
- (2) 岩崎訓明 : コンクリート工学, **19**, pp3-11 (1981).
- (3) X. G. Zhang : “Corrosion and Electrochemistry of Zinc”, Plenum Press, New York, p363 (1996).
- (4) 村上和美, 兼松秀行, 市野良一, 沖猛雄 : 表面技術, **57**, No. 4, pp277-282 (2006).
- (5) 日本建築学会編 : “亜鉛めっき鉄筋を用いた鉄筋コンクリート造の設計施工指針 (案)”, p20 (1979).
- (6) 上村和美, 湯浅幸久, 前川明弘 : 三重県科学技術振興センター研究報告書, **26**, pp29-32 (2002).
- (7) 岸谷孝一, 樫野紀元, 飛坂基夫 : 日本コンクリート会議シンポジウム発表報文集, pp53-56 (1975).
- (8) 日本規格協会 : “コンクリートのはなし”, p58 (2002).
- (9) Frank E. Goodwin : 日本鋳業協会 鉛亜鉛需要開発センター 2014 年 IZA 市場連絡会講演会資料 (2014).