

溶融亜鉛めっきとコンクリートの付着特性について

村上和美*・前川明弘*・湯浅幸久*

Adhesion Characteristics between Hot Dip Galvanized Steel and Concrete.

by Kazumi MURAKAMI*, Akihiro MAEGAWA* and Yukihiisa YUASA*

Hot Dip Galvanizing Steels are applied to road illumination poles, steel rebar for buildings and steel towers, and for the most part, they are fixed to foundations. They require that the steel rebars aren't detached from concrete and bond with each other very strongly. Some researchers have pointed out so far that the bond strength between hot dip galvanized steel parts and concrete would be lower than that between general steel and concrete. Therefore, we measured the bond strength through pull-out test and cleavage tensile test when steel parts were embedded into concrete so that we would get the information for the bond strength well. And we got the result that the bond strength for hot dip galvanized steels are higher than that for general steels.

Key Words: Hot Dip Galvanizing Steels, concrete, bond strength

1. はじめに

これまで、コンクリートは社会基盤整備に重要な役割を果たしてきた。一方、亜鉛めっきは、大気中における耐食性が優れていることから、屋外構造物のほとんどに用いられてきた。そのため、構造物の安全性確保の観点から、この両者の付着力は重要な課題となっている。これまで、亜鉛と水を含むセメントとは、それらの反応により発生する水素ガスによって、亜鉛周辺のセメントペーストが多孔質化するため、亜鉛めっき鋼材とコンクリートとの付着力は低下するのではないかと考えられてきた¹⁾。この対策として、これまで、埋設される亜鉛めっき鋼材の表面をクロム酸塩処理等により不動態化するか、あるいは不めっき処理を行い埋設されてきた。しかしながら、コンクリート構造物の補強用鋼材としての鉄筋の殆どは異形鉄筋であり、多くの研究者は亜鉛めっき鉄筋と同等の被覆なし鉄筋とではその付着力に変化がないことを証明している²⁾。ところが、鉄筋コンクリート用棒鋼・異形棒鋼はその突起によるすべり

に対する機械的な抵抗力を意図的に強化したものであり、溶融亜鉛めっき鉄筋と同等の被覆なし鉄筋との付着強度は、この表面形状の違いが大きな影響を与えている。そのため、亜鉛めっき鉄筋と被覆なし鉄筋との付着強度の違いは、実用上無視しうる程度であると考えられてきた³⁾。しかしながら、鉄筋以外の鋼材の表面形状は平面的であるため、コンクリートペーストと鋼材表面との間の化学的粘着作用およびコンクリートと鋼材表面との摩擦作用による付着力が主な付着要因となる⁴⁾。この検討は、これまで行われていないため、道路照明柱・ビルの鉄骨柱・送電鉄塔などのように表面が平坦な溶融亜鉛めっき鋼材がコンクリートにより固定される場合、現状では前記のような処理がなされている。そのため、本研究では、土木・建築用亜鉛めっき鋼材のコンクリート埋設時における付着強度に関する知見を得るため、引抜き試験および割裂引張試験による付着強度の測定を行い、一般鋼材のコンクリートとの付着強度と溶融亜鉛めっき鋼材の付着強度を検討した。

* 材料技術グループ

2. 実験方法

2. 1 試料

2. 1. 1 埋設用試験片

試験片は一般構造用圧延鋼材 (JIS G 3101 SS400) とし, 形状は平鋼板(引抜き試験用;50mm×4.5mm,割裂引張試験用;30mm×4.5mm), 等辺山形鋼 (50mm×50mm×4mm), H形鋼 (100mm×100mm×6mm×8mm) の4種類とした. 全長は300mmとし, コンクリートへの埋設深さは100mm (引抜き試験), 200mm (割裂引張試験) とした. 無めっき鋼材および溶融亜鉛めっき鋼材の2種類をそれぞれ試験に供した. なお, 引抜き試験用試験片の上部にはロードセルを取付けるための接続穴 (直径8mm)を施した.

2. 1. 2 供試体

引抜き試験用コンクリート供試体は, 300×300×300(mm)の立方体とした. 上部端面は鋼材軸に垂直で平滑な面になるようコテなどを用いて仕上げた. 供試体の数は各鋼材について5個とした. 割裂引張試験及び圧縮強度試験用はJIS A 1132による圧縮強度試験用供試体とした. さらに, 割裂引張試験用供試体の中央には前記の平鋼板のみを埋設した.

2. 1. 3 型枠

引抜き試験用型枠は木製とし, 寸法の誤差は各辺長の1/100以下とした. 型枠の内面にはコンクリート打設前に離型剤として鉱物油を塗った. また, 埋設用鋼材の位置を統一するため, 中央部にスペーサーとして直径100mm, 高さ200mmの円柱コンクリートを設置した.

2. 1. 4 コンクリートの品質

コンクリートはJIS A 5308に規定された生コンクリートを用いた. コンクリートは, 粗骨材の最大寸法が20mmの普通骨材とし, 目標スランプが8cm, 圧縮強度が21MPaとなるように配合設計した. なお, セメントは高炉セメントB種を用いた. コンクリートの配合を表1に示す. また, 供試体の現場試験, 引抜き試験時における圧縮強度は表2に示すとおりである. なお, 圧縮強度はすべて現場空中養生とした.

2. 2 コンクリート打設

鋼材がコンクリートと付着する面を清掃し, 油類, 汚れなどを取り除いてから試験に供した. ま

表1 コンクリートの配合表

粗骨材 の最大 寸法 (mm)	水セメ ント比 W/C (%)	細骨 材率 s/a (%)	単体量 (kg/m ³)				
			水	セ メ ン ト	細 骨 材	粗 骨 材	混 和 剤
20	57.0	41.3	167	293	758	1088	0.73

表2 現場試験および圧縮強度

スランプ (cm)	空気量 (%)	塩化物量 (kg/m ³)	圧縮強度 (N/mm ²)	
			28 d	91 d
9.5	4.5	0.02	19.5	25.5

た, コンクリートの打設は鋼材軸と同方向になるように鉛直方向に打ち込んだ. コンクリートは, 一層の厚さを約150mmとし, ほぼ相等しい層に分けて (二層) 型枠の軸にほぼ対称となるように詰めた. 締め固めは, 内部振動機(JIS A 8610に規定するもので, 公称棒径28mm)を用いて, 型枠・スペーサー・試験片に接触しない場所で型枠の軸と対称な4箇所に3秒間行った. 打ち込みが終わった後, 上部の余分なコンクリートをかき取り, ほぼ平らに仕上げ, 約2時間後に再仕上げを行い所定の寸法の供試体になるようにした. 型枠は, 材令2日で取り外し, その後, 試験時まで現場空中養生した.

2. 3 付着強度試験

付着強度は多くの因子によって影響を受けるため, 対象に応じて適切な試験方法を採用すべきである. 今回は引抜き試験方法および割裂引張試験方法(JIS A 1113)の2つの試験方法を採用し付着強度の測定を行った. 引抜き試験の方は, これまでASTM型鉄筋付着試験方法の検討がなされている⁵⁾が, 日本においてはJSTM C2101-1999 (建材試験センター規格)のみであるため, 今回はこの規格に準じて行った. 各供試体における付着強度(σ)-すべり量(τ)曲線を作成した. なお, 付着面積は, 試験片のコンクリート埋設面積とした. すべり量の測定は, 載荷端における試験片の変位量とした. 引抜き試験の特性を考慮し, 付着強度-すべり量曲線の勾配が急変するすべり量に対する $\sigma(\tau)$ を σ_{max} とした. 試験中に水平方向からコンクリート供試体に対して拘束が働くと σ_{max} は大きくなることから, 水平方向からの拘束は行わ

なかった。また、鋼材は降伏点以上に達すると伸びて変形能力の限界がおとずれ付着が損なわれが、今回の試験荷重の範囲ではすべての鋼材について降伏点以下であり、影響は少ないと考えている。偏心荷重への対策としては、供試体が大きいため、球座ではなくユニバーサルジョイントで対応した。コンクリート載荷用硬質ゴムの穴は、コンクリート面が反力として圧縮力を受けるため、各試験片とも十分な間隔がとれるようにした。なお、試験片埋設長さが短いため、あえて載荷端における鋼材とコンクリートとの縁を切ることは行わなかった。荷重は、衝撃を与えないよう一様な速度で行い、載荷速度が早すぎると付着強度に大きく影響する⁶⁾ため載荷速度を30N/mm²/minとした。すべり量を検出すると共にひび割れ状況も記録した。図1にH型鋼の無めっき試料(No.3)の付着強度-すべり曲線を示す。すべり量(mm)は、引抜き試験であるため負側に推移する。このときの付着強度は0.889N/mm²であった。

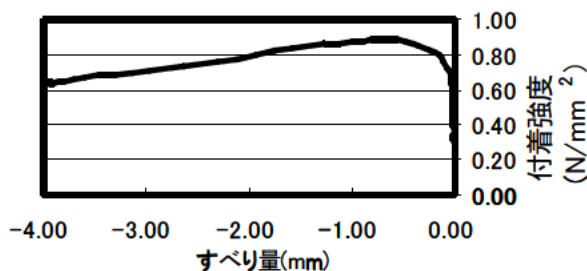


図1 付着強度-すべり量曲線

3. 実験結果と考察

3.1 引抜き試験

図2に材令28日における各試料の付着強度を示す。なお、試料名はFB；平鋼板，L；等辺山形鋼，H；H形鋼とし，N；無めっき，Zn；溶融亜鉛めっきとした。たとえば，FB-Znは一般造用圧延鋼材・平鋼板(溶融亜鉛めっき)となる。これまでにH型鋼の押抜き試験では，圧縮強度，かぶり厚さおよびフランジ長さから，付着強度の推定ができるとの報告がある⁷⁾。その報告にある『 $\sigma_{max}=0.05 \cdot \beta \cdot C/B$ (σ_{max} :付着強度， β :圧縮強度，C:かぶり厚さ，B:フランジ長さ)』の式において，今回の一例をあてはめてみると， $\tau_{H-Zn-28}=0.05 \cdot 19.5$

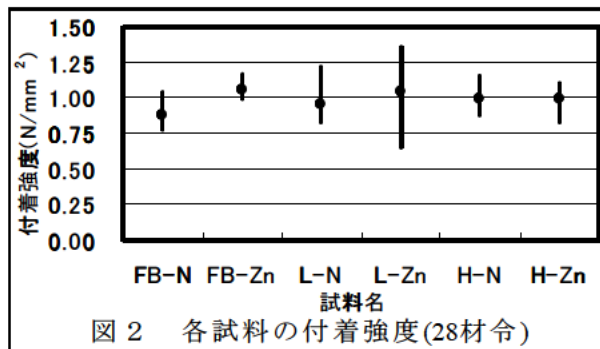


図2 各試料の付着強度(28材令)

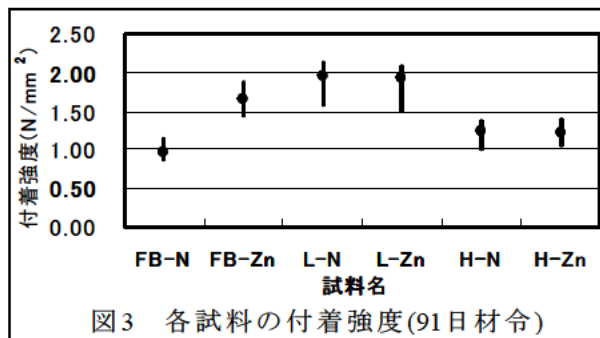


図3 各試料の付着強度(91日材令)

$\cdot 100/100=0.975$ となり概ね引抜き試験の結果と一致することがわかる。最大荷重はおおむね平鋼板は10kN程度，等辺山形鋼は20kN程度，H形鋼は60kN程度となり，単位面積あたりに換算した付着強度は，いずれの試料も1N/mm²程度となった。平鋼板および等辺山形鋼の試料については，溶融亜鉛めっき鋼材の付着強度が大きくなることがわかった。H型鋼については，その違いが確認できなかった。図3に材令91日における各試料の付着強度を示す。なお，試料名は前図と同じである。材令28日の試料と比較するといずれの試料の付着強度も大きな値を示した。このことは材令91日の圧縮強度が増大したことが主な要因だと考えられる。平鋼板においては，溶融亜鉛めっき鋼材の付着強度が無めっき鋼材と比較すると大きな値を示し，材令28日の傾向がさらに顕著になった。しかしながら，平鋼板以外の形状では，この傾向は明確に確認できなかった。これらの傾向は，平均値での比較であり，それぞれのばらつきを考慮すると平鋼板の傾向が優先されるのではないかと考えている。何故なら，L形鋼およびH型鋼では，試験片形状が入り組んでいるため，供試体作製時において，凹部への充填不良および締め固め不良が発生し，その結果として，試験片とコンクリートの界面に不均一な部分が形成され，付着強度の測定に大きな影響を与えているのだと考えられる。

図4に材令28および91日における各試料の付着強度の結果をまとめて示す。なお、試料名は前図と同じである。この図からも溶融亜鉛めっき鋼材

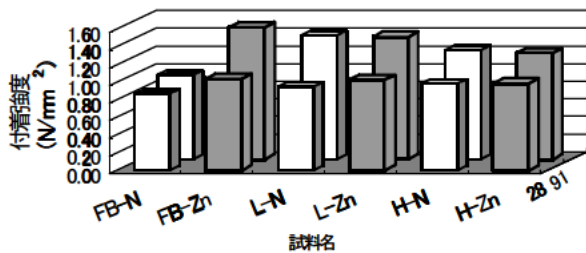


図4 各試料の付着強度(材令28,91日)

は、無めっき鋼材と比較して付着強度が向上していることがわかる。等辺山形鋼およびH型鋼に関しては、この傾向は明確にできないが、その原因は前述のとおりである。これらの結果から、付着強度の評価方法としては、平鋼板で行った結果の方が複合的な他要因を含むことなく評価でき、その特性を顕著に表しているのではないかと考えられる。

ところで、材令91日の試料は付着強度が相当大的な値を示し、単に圧縮強度が高くなること以外に、付着強度を向上させる他の要因があるのではないかとと思われる。

3. 2 割裂引張試験

割裂引張試験方法はコンクリートの引張強度を

測定する手法であり、直接的に付着強度を推定するのもではない。しかしながら、中央に鋼板を埋設することで、結果的に割裂引張強度の低下が起きることが予想され、その低下率が小さい試料ほど付着力が大きいと考えることができる。材令28日および材令91日の圧縮強度から推定される引張強度は、概ね 2.0N/mm^2 および 2.5N/mm^2 程度だと考えることができる。そのため、いずれの試料も割裂引張強度の低下率は概ね50%程度であった。必ずしも、割裂引張強度と付着強度との値は一致することはないが、割裂引張強度が高い試料ほど付着力は大きいと考えることができる。図5

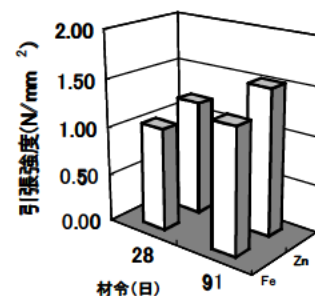


図5 各試料の割裂引張強度

に材令28および91日における各試料の割裂引張強度の結果を示す。材令28日および材令91日も亜鉛めっき鋼材の試料の引張強度が高くなった。このことから、付着強度としては、相対的ではあるが、亜鉛めっき鋼材が高いと結論づける

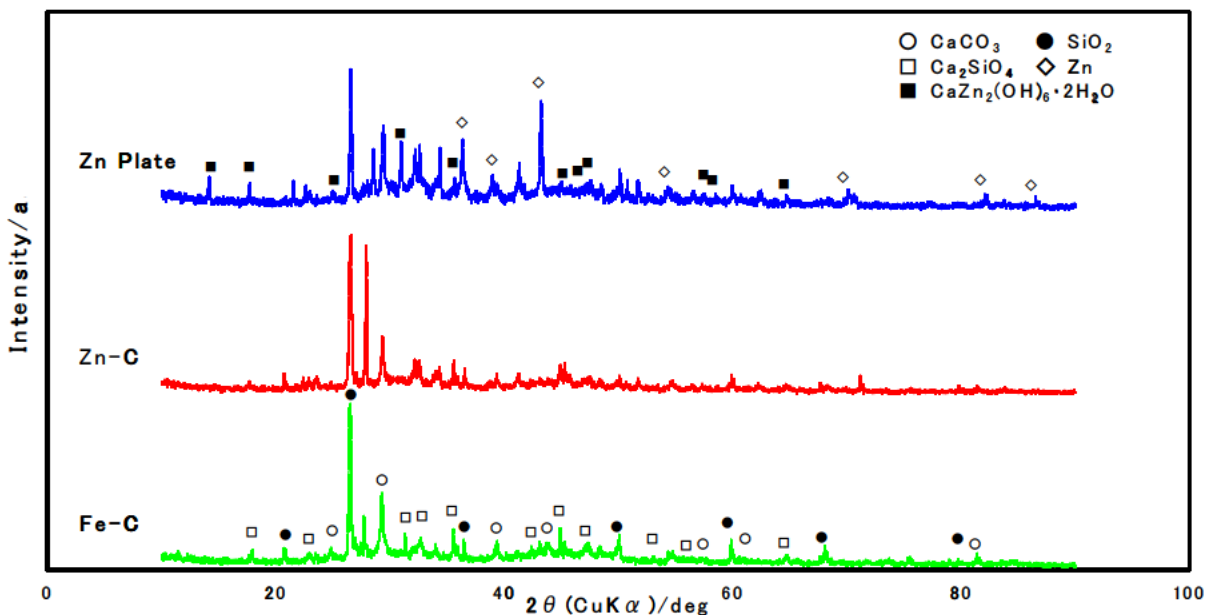


図6 割裂引張試験後の各試料のX線回折結果

ことができる。さらに、試験後の割裂面を観察すると溶融亜鉛めっき鋼材が埋設されていた供試体の付着部分が、黒く変色していることがわかった。溶融亜鉛めっき鋼材の付着強度が無めっき鋼材と比較して大きくなることとあわせて考えると、溶融亜鉛めっき-コンクリート界面では何らかの反応が起こっているのではないかと推定できる。

3. 3 界面の分析

図6に割裂引張試験後の各試料のX線回折結果を示す。図中でのZnPlateはコンクリートに埋設されていた亜鉛めっき鋼材の表面、Zn-Cは亜鉛めっき鋼材が埋設されていたコンクリート表面、Fe-Cは無めっき鋼材が埋設されていたコンクリート表面である。いずれの試料も試験片表面より掻き取った粉末を測定している。この結果から、Zn-C, Fe-Cの試料にはコンクリートからのCaCO₃, SiO₂, Ca₂SiO₄(2CaO・SiO₂:C₂S^β-ライト)成分が確認できた。さらに、埋設された亜鉛めっき鋼材表面には、Zn₂CaZn₂(OH)₆・2H₂O成分を確認することができた。なお、この生成物は、コンクリート中における溶融亜鉛めっき材料の耐食性を向上させる一つの生成物として、すでに報告されている^{8)~11)}。今後の検討も必要ではあるが、この化合物の生成が付着強度にも影響を与えているのではないかと考えている。

4. まとめ

引抜き試験による付着強度および割裂引張試験による付着強度の測定から、コンクリートと亜鉛めっき鋼材の付着強度が無めっき鋼材の付着強度より大きな値を示すことがわかった。さらに、その要因の一つとして、亜鉛めっき鋼材とコンクリートとの界面にはCaZn₂(OH)₆・2H₂Oが生成されることがわかった。

参考文献

1) Hosfory, A. E. et al. : "Bond Studies on Hot Dipped Galvanized Reinforcement in Concrete

" . Journal of ACI arch, p147-184(1969)

2) Bresler B et al. : "Galvanized Steel Reinforcement in Concrete" . 7th Congress International Association of Bridge and Structural Engineers, Rio de Janeiro Brazil, p50-51 (1964)

3) 建材試験センター構造用鋼材溶融亜鉛鍍金研究委員会 : "構造用鋼材の溶融亜鉛めっきに関する調査研究報告書" . p78-80(1972)

4) 笠井芳夫編 : "コンクリート総覧" . 技術書院, p392-393 (1998)

5) 大井孝和ほか : "ASTM型鉄筋付着試験方法の再検討" . コンクリート工学年次講演会論文集, p581-584(1986)

6) 石本陽一ほか : "鉄筋とコンクリートの付着応力-すべり関係に及ぼす荷重速度の影響" コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 15, No. 2, p129-134(1993)

7) 佐藤政勝ほか : "鋼管, H形鋼の付着強度に及ぼすコンクリートの拘束効果について" . コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 15, No. 2, p183-186(1993)

8) T. Oki : "Application of hot dip galvanized steels to concrete rebars and it's future trend" . 5th Asia-Pacific General Galvanizing Conference Abstracts (Busan), p20-31(2001)

9) K. Murakami : "Hot dip galvanized steel coated by calcium compounds and it's corrosion characteristics in concrete environment" . 5th Asia-Pacific General Galvanizing Conference Abstracts (Busan), p209-221(2001)

10) 沖 猛雄 : "コンクリートへの溶融亜鉛めっき鉄筋の適用とその将来展望" . 鉛と亜鉛, Vol139, No. 3, p2-9(2002)

11) 村上和美ほか : "カルシウム粉末を被覆した溶融亜鉛めっきのコンクリート中における腐食挙動" 鉛と亜鉛, Vol139, No. 4, p6-p11(2002)