

第22回インターガルバ国際会議論文集(その2)

(2) 鉄筋の脆化に及ぼす曲げ半径の影響

G Wildridge (IMR Test Labs, 米国)

D Rourke (国際亜鉛協会, 米国)

翻訳：鉛亜鉛需要開発センター

(要約)

鉄筋の脆化を引き起こす可能性への曲げ半径および溶融亜鉛めっきプロセスの影響について紹介する。破断面での鋼の引張り強さと伸びの変化、および、破断面の状態を、鋼の脆化が起きているかを判断するために検査した。

溶融亜鉛めっきをせずに曲げたサンプルと比較して、曲げた後に溶融亜鉛めっきしたサンプルは、引張り強さのわずかな増加と対応して伸びが減少する結果となった。しかし、伸び試験のデータ、および、破断面の検査に基づき、すべてのサンプルは延性過負荷破壊であり、鋼は脆化を起こしていないことを示したとはっきり述べることができる。

(序論)

ここ数年間、製造後に溶融亜鉛めっきした鉄筋が脆化の徴候を示すほかに類のない例がいくつかみられた。公表された文献によれば、過酷に冷間加工された鋼の時効ひずみ脆化は、たとえば、溶融亜鉛めっきプロセスのような高温にさらされると加速されることを示唆している。溶融亜鉛めっき前の冷間加工の度合いを制限するため、いろいろな実践がこれまで構築されてきた〔1〕。

鉄筋の曲げ直径（冷間加工の度合い）と鉄筋が

脆化を引き起こす可能性の関係をより良く理解するために、国際亜鉛協会はIMR Test Labsと契約し、時効ひずみ脆化を引き起こしうる鉄筋製造の条件（曲げ半径）を定量化するために研究をおこなった。

異なる5つの鉄筋供給者からの鉄筋サンプルを、異なる5つの曲げ直径に曲げた。破断面の引張り強さと伸び、および、破断面の検査にもとづいて脆化の度合いを評価した。曲げて溶融亜鉛めっきをしないサンプルを、曲げた後に溶融亜鉛めっきしたサンプルと比較し、溶融亜鉛めっきプロセスが鉄筋の特性にどのような影響をもたらすかを判断した。追加として、先に溶融亜鉛めっきした鉄筋のサンプルを試験マトリックスに含め、溶融亜鉛めっき後の曲げが、曲げ後の溶融亜鉛めっきと異なるかどうかを判断した。

(試験手順)

研究には、異なる5つの供給者からの直径25mmのGrade 420の鉄筋を使用した。冷間加工は、鉄筋の直径に応じて、コンクリート強化用の亜鉛被覆（溶融亜鉛めっき）鉄筋のためのASTM A767/A 767M-97によって推薦されている最小値の上下の範囲を考慮した指定の曲げ直径まで、曲げることにより引き起こした。それぞれのひとそろいのサンプルに対して、入荷したまま、冷間加工のみ、および、冷間加工後に溶融亜鉛め

つきした条件のあいだで比較をおこなった。冷間加工を溶融亜鉛めっき後におこなったコントロールしたグループも準備した。脆化の検知は、標準引張り強さ試験で得られた伸びの結果により判定

される延性の減少にもとづいておもに評価した。この解析に使用した方法は、次のようなものである。引張り試験（部分における引張り強さ、降伏強さ、伸び、収縮を得るための ASTM E8に基づく

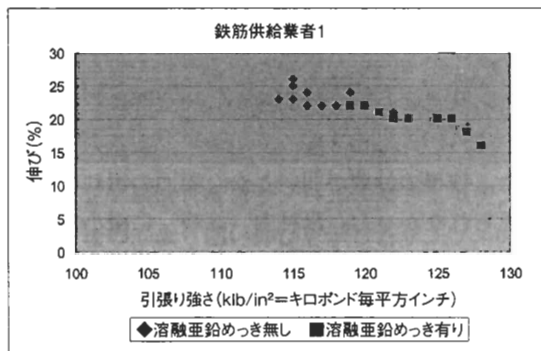


図 1 a 溶融亜鉛めっき有無サンプルでの伸び対引張り強さ。鉄筋供給業者 1。

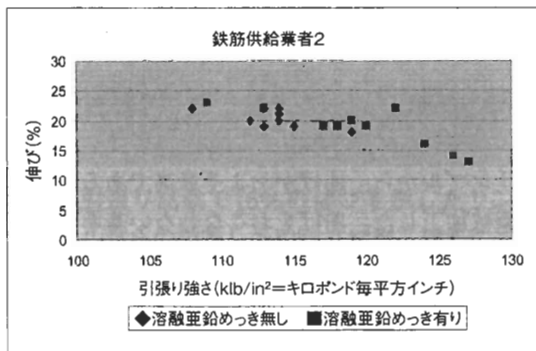


図 1 b 溶融亜鉛めっき有無サンプルでの伸び対引張り強さ。鉄筋供給業者 2。

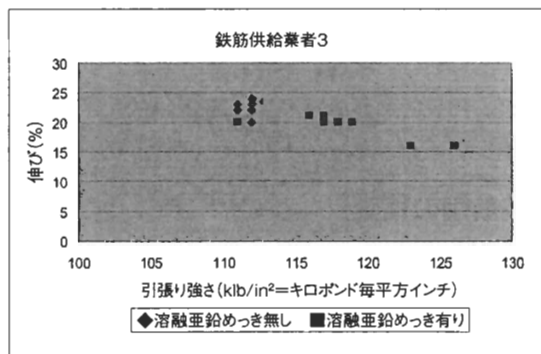


図 1 c 溶融亜鉛めっき有無サンプルでの伸び対引張り強さ。鉄筋供給業者 3。

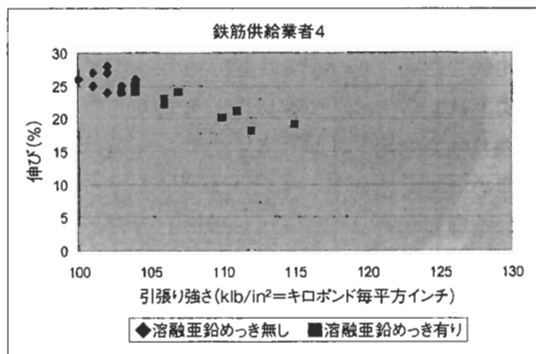


図 1 d 溶融亜鉛めっき有無サンプルでの伸び対引張り強さ。鉄筋供給業者 4。

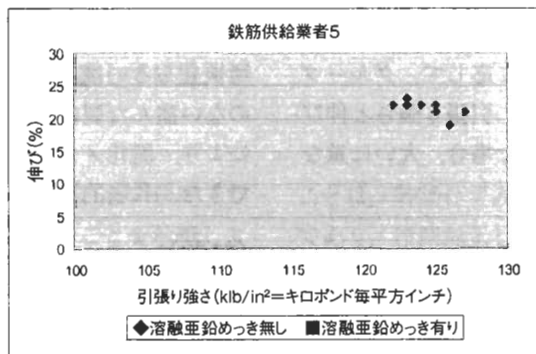


図 1 e 溶融亜鉛めっき有無サンプルでの伸び対引張り強さ。鉄筋供給業者 5。

く方法 (RIA)), ミクロ組織の検査 (引張り試験に基づき選ばれたサンプルに対して曲げが最高である付近のサンプルのミクロ組織の検査), 破断面の検査 (走査電子顕微鏡 (SEM) を使用して破断メカニズムを確認するため選ばれた引張り試験片からの破断面の検査)。

(結果)

(引張り試験)

標準的な、サブサイズの引張り試験片を、各鉄筋サンプルから、曲げがおおよそ最高である部分から機械加工した。曲げをおこなわない基準サンプルの場合、試験片は直線部から機械加工した。次いで、引張り試験を、ASTM E8-08に準拠しておこなった。試験片は、基準径6.25mm、基準長さ25mmに機械加工した。クロスヘッド速度は0.2%オフセットまで0.5mm/min、破断に至るまで5 mm/min であった。

比較のため、データを、図1 a から図1 e に示すように、各グループのサンプルに対して伸び対引張り強さを用いてプロットした。一般に、溶融亜鉛めっきしたサンプルは、同じサンプルグループの溶融亜鉛めっきをしないサンプルと比較して、対応する伸びの減少とともに引張り強さと降伏強さのわずかな増加を示した。伸びが最も小さかったサンプルは、しばしば、最も小さい曲げ直径のもの、たとえば、4d、あるいは、6d のものであった。しかし、6d よりも大きな曲げ直径のサンプルも、最も小さい伸び値で、異なるサンプルグループの中に出現した。平均的な引張り特性は、十中八九は、出発原料の特性に応じて、グループごとに変化した。結果として、引張り強さと伸びの値は、グループ間で比較した場合、大いに重なり合う傾向を示した。

(ミクロ組織の検査)

ミクロ組織検査向けサンプルは、より高い伸び特性を示したもののほかに、より低い伸び特性を示したものからも選択した。引張り試料を採取した部分と隣りあわせて断面検査向けサンプルを採

取した。次いで、これらのサンプルを、エポキシ樹脂中に埋め込み、金属組織学的に1 μm の表面粗さまで最終的に研磨をして調製し、光学顕微鏡を使用して、1,000倍の倍率まで、エッチングをしないもの、および、2%硝酸含有エタノール溶液でエッチングしたものを検査した。

すべての場合において、溶融亜鉛めっき被覆は、与えられたサンプルの明らかに周辺部に被覆厚さのいくつかの変化を伴って、連続であるように見えた。被覆の付着が弱いとか、界面の汚れの徴候は見られなかった。母材中 (鉄筋) に微小割れは観察されず、液体金属による脆化で遭遇するような結晶粒界に沿った被覆層の浸透はなかった。エッチングにより、ミクロ組織は、いくつかの遊離フェライトをともなったパーライトからおもに構成されていることが明らかとなった。フェライトに対するパーライトの比率は、グループ間でわずかに変化した。炭素鋼棒、あるいは、低合金鋼棒、あるいは、棒材料で特有であることが認められた。代表的な顕微鏡写真を図2、および、図3に示す。

(破断面の検査)

ミクロ組織検査に使用したサンプルの引張り試料を、適切な部分について、低倍率光学顕微鏡、および、走査電子顕微鏡を使用して検査した。すべての場合において、塑性変形が破断面付近で明らかであり、それは、引張り試験データから予測できるように延性過負荷破壊を暗示した。破断面のより接近した検査により、粒間破断への遷移の徴候、あるいは、他の脆性破壊の形態を示す徴候のない窪んだ裂け目が明らかになった。この検査により、脆化メカニズムの徴候がないことを確認できた。代表的写真を図4、および、図5に示す。

(結論)

一般に、すべてのサンプルグループは、溶融亜鉛めっき後、対応する伸びの減少を伴って、引張り強さのわずかな増加を示した。しかし、引張り試料からのすべての破断面は、本質的に延性があ

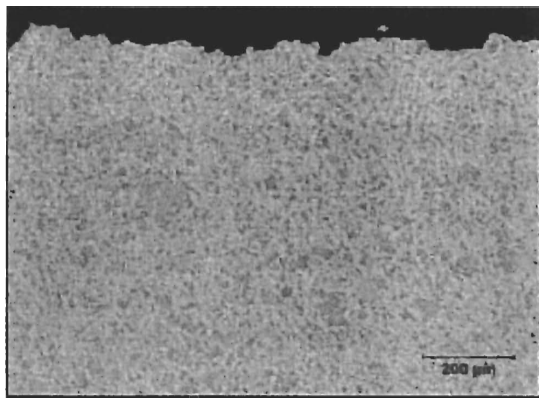


図2 2%硝酸含有エタノール溶液でエッチング後の、より高い伸びを示したサンプルの断面。ミクロ組織はパーライトとフェライトから成る。

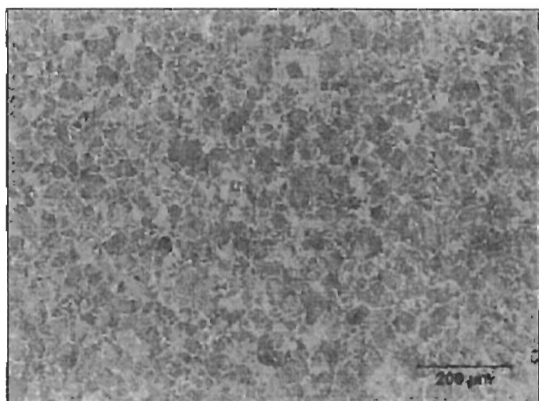


図3 2%硝酸含有エタノール溶液でエッチング後の、より低い伸びを示したサンプルの断面。ミクロ組織は、図2で示したものと類似している。パーライトに対するフェライトの比率はわずかに異なり、結晶粒の形態はわずかに変化している。しかし、溶融亜鉛めっきの影響の可能性に関しては重大な差は認められなかった。

った。このことは、脆化とみなされない程度まで、時効ひずみが起きた可能性があることを示唆している。

溶融亜鉛めっき後に冷間加工したコントロールグループは、溶融亜鉛めっきの前に冷間加工した他のグループと同等の引張り特性を示した。この

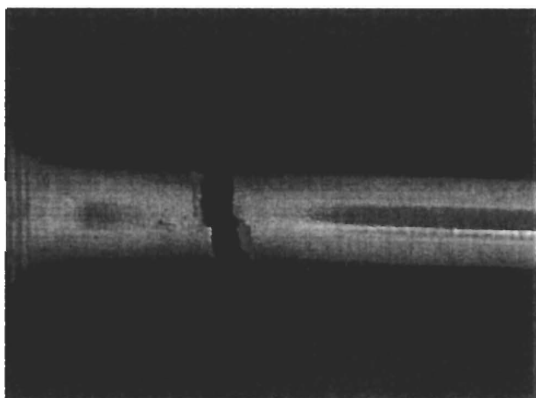


図4 引張り試験で16%の伸びを示したサンプルからの破断した引張り試料。破断の近接部に塑性変形の徴候が見られることに注目。

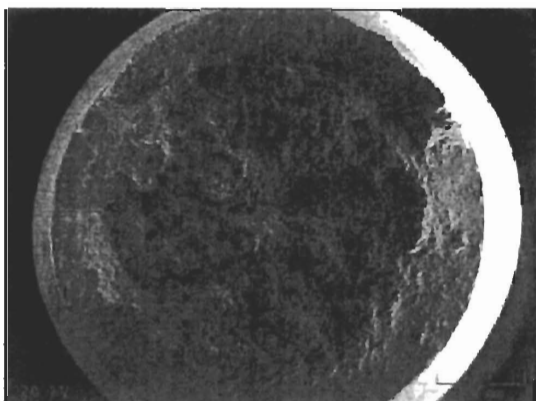


図5 図4で示したサンプルについてSEMを使用しての検査。破断面の全域でくぼんでいる裂け目が見られる。

ことは、時効ひずみは小さいが、評価しうるものであり、冷間加工し溶融亜鉛めっきした鋼の機械的特性に影響することを示唆している。

各グループ内の溶融亜鉛めっき後の機械的特性における変化の大きさは、大きくないと考えられる。どのグループ内においても、溶融亜鉛めっき有無のあいだで、かなりの値の重なり合いがみら

れた。

最も低い延性（パーセント伸び値に応じて）を示したサンプルは、曲げ直径が4dと6dであり、設定した最大の冷間加工を施したものである傾向が見られた。しかし、この傾向はグループごとに一貫していなかった。180度と対比して90度までの曲げが延性の損失へかなり影響するという徴候は見られなかった。

現時点では、どのていどの冷間加工が時効脆化をもたらすものであるという提言はできない。曲げ直径が小さい（直径25mmの鉄筋では4d、あるいは、6d）、つまり、より大きい程度の冷間加工は、溶融亜鉛めっき後、延性のより大きな損失につながる傾向があることを示唆するいくつかの徴候がある。しかし、この傾向は、試験したサンプルグループ内で普遍ではなかった。

実際の操業を介して確立された最善の実践が、今もなお、時効脆化に対する最も効果的な対策を提供しそうである。

REFERENCES

- [1] ASTM A 767/A 767M-97 for Zinc-Coated (Galvanized) Steel Bars for Concrete Reinforcement.

(著者略歴)

George Wildridge は、ニューヨーク州、Lansing 市に所在の IMR Test Labs 社の冶金部門取締役であり、冶金試験および故障解析グループを担当している。7 年間、IMR Test Labs に在籍し、宇宙、自動車、発電、建設、医療機器、エレクトロニクスその他の多くの産業向けに故障解析および材料解析をおこなってきた。IMR Test Labs の前は、自動車産業界で10年以上、メーカー向けの試験研究所を統括してきた。Penn 州立大学卒の金属科学および工学における理学士の称号を持つ。

Doug Rourke は、国際亜鉛協会（IZA）向けに、製品リサーチおよび市場開発を監督している。また、IZA 本部および世界中の会員会社向けに技術およびマーケティング援助をおこなっている。2004年に IZA に加わる前は、Noranda 社に勤務し、そこでは亜鉛の市場開発を指揮し、欧州マグネシウム販売・市場開発担当取締役であった。Doug は、カナダ、オンタリオ州においてプロフェッショナルエンジニアであり、冶金工学理学士および経営管理学修士の称号を持つ。