

## 溶融亜鉛めっきによる 100 年橋梁の達成に向けて

### 要約

9 年ほど前、寿命 100 年以上の耐用年数を持つ橋梁の達成計画の一部として亜鉛めっき鉄筋を利用する調査が発足した。この調査では普通鋼鉄筋、亜鉛めっき鉄筋及び亜鉛-4.9Al-0.1 ミッショメタル鉄筋 'GF' の 3 種類の鉄筋が使用された。後者の 2 種類は亜鉛めっきされた鉄筋である。

鉄筋の順位付け試験用としては ASTM G-109 によった。それ以外の変数としては上部鉄筋の形状がある。いくつかの試験体セットにははじめからシミュレーション用クラックを入れた。亜鉛めっき鉄筋のいくつかのシリーズには、暴露前に故意に傷をつけたものを準備した。約 9 年経過後、選んだ試験体について討議及び金属組織学的検討が行われた。この調査結果を以下に示す。

要約すると多数のデータセットで亜鉛めっき鉄筋は黒鉄筋の性能を超えていたが、ある条件下では性能の差は小さかった。GF 鉄筋は標準の条件及び GF 鉄筋だけでテストした条件下で高い耐食性を示した。

### 序論

亜鉛めっき鉄筋にはふたつの利点がある。第一に亜鉛めっき層には耐食性があり、腐食の始まる限界塩素濃度を高める。第二に腐食が始まつて素地の鋼が局部的に現れた場合でも近傍の残存亜鉛による犠牲防食作用により保護される。亜鉛めっき鋼に関するより詳細な根拠は文献[1 ~ 3]。米国においては約 2% の普通鋼鉄筋が溶融亜鉛めっきされている。最近の調査によれば鉄筋の亜鉛めっきは先ず熱帯地方及び海岸地域の環境における耐用年数を延ばすために使用されたことがわかっている[2]。

鉄筋コンクリート構造物及び、特に鉄筋コンクリート橋梁において、最新の設計では 75 年から 100 年の耐用年数を要求している。黒鉄筋では(フライ・ッシュ、シリカ・ヒュームまたは亜硝酸カルシウムその他の添加物入りの)高性能コンクリート中でもこの耐用年数は達成できないとされている。これに対する手段としては、新しく構造物を建設するときははこれ等のコンクリートに別の種類の鉄筋を用いることである。本研究では可能性のあるものとして亜鉛めっき鉄筋について調査した。調査対象としては ASTM G-109 に記載されている範囲から選択した[4]。鉄筋のタイプ、コンクリート混合物、表面性状及び形状の数種類について調査した。

### 実験

試験を行つた条件を表 1 に示す。これらの条件による試験のために選んだサンプルは G-109 の試験体形状で図 1 及び図 2 の写真に示す配置及び寸法とした。G-109 試験体は室温で室内に設置した。

表 2 に全試験体のリストを示す。頭から二つの文字はコンクリートのタイプである。表 2 で C T = 混合物なしのタイプ ポートランドセメント、F A = フライ・ッシュ混合のタイプ セメント、S F = シリカヒューム混合のタイプ セメント、C N = 亜硝酸カルシウム混合タイプ セメントである。二つの整数(41 または 50)は水 : セメント比 0.41 あるいは 0.50 を示す。三番目の文字ペアは鉄筋のタイプを示す。BL = 無鉄筋セメント；BB = 黒鉄筋；GV = 亜鉛めっき鉄筋；GF = Zn-4.9Al-0.1 被覆鉄筋である。GF は亜鉛ベースの被覆鉄筋で、典型的な浴組成が Zn-4.9wt.%Al-0.1wt%ミッショメタル鉄筋である。

タルからなる亜鉛めっきによるもので、その性質は最近明らかにされた[5]。最後の3文字は鉄筋の形状または状態を示す。STD = ストレート鉄筋；DAM = 亜鉛めっき皮膜を貫通して3つの6mmの穴を開いた鉄筋；BNT = ~57mm半径でU字に曲げた鉄筋；CRK = 最上層のストレート鉄筋のコンクリートにクラックをいたしたもの；CRB = 最上層の曲げた鉄筋のコンクリートにクラックをいたるもの。

本報告ではこれら試験材のサブセットの試験とその結果について検討したものである。暴露試験は1週間の浸漬(15wt%NaCl水溶液)1週間乾燥したとの最上層鉄筋の電位測定およびトップとボトムの二本の鉄筋間に10の抵抗を入れた回路での電圧降下によるマクロ・セル電流の測定である。トップの鉄筋のマクロ・セル腐食速度は電流と直接比例するものである。しかしながらこの方法ではトップの鉄筋で生じると思われるマイクロセル腐食は見られなかった。

現在約9年間の暴露試験を継続している。この期間を通じて、いくつかの試験体を取り出し鉄筋の腐食の状態を観察した。それぞれのシリーズ(表2の太字)は約9年間の暴露試験後、最近試験されたものを示す。試験体は上部鉄筋が接触しないようにわけている平面にそって、鉄筋に触れないように鋸切断した。鉄筋の痕に沿って割れが生じるようにハンマーと鑿を使用した。各試験体が現れると直ちに写真撮影をおこなった。

トップの鉄筋の痕に沿って2.5~3.0mmの深さでコンクリート粉末を採取し、塩素分析を行った。この時、大きい腐食痕が広がっている部分は除いた。選んだ試験体について同様な粉碎手段で塩素分布のプロファイルを作成した。このケースでは粉碎は露出しているコンクリート表面から行った。汚染を防止するために粉碎面積は深さに応じて減少させた。最初の深さは2.5mm、二番目と三番目は5mm、四番目の深さは~6.25mmである。プランク試験体の塩素プロファイルも暴露8年目で得ている。2,740日暴露の後、プランク(鉄筋なし)試験体を4本のコンクリートミックスから採取した。このコンクリートコアを6mm厚にスライスして粉碎し、塩素イオン濃度を測定した。すべての塩素化合物はFDOT酸溶解法により測定した。

試験した中から亜鉛めっき鉄筋とGF鉄筋の二本の鉄筋の光学顕微鏡写真を撮った。これら二本のサンプルを600番グリット・ペーパーで研磨し、オイル・ベースの研磨液で9μmと1μmの粗さとした。光学顕微鏡観察の前に、研磨した表面を1%のナイタル(硝酸-エタノール)液でエッティングした。

亜鉛の腐食生成物がコンクリート中に生成しているかどうかを低真空走査型電子顕微鏡(E-SEM)を用い、エネルギー分散型スペクトル分析(EDS)により検査した。コンクリートの小片試料を薄型ダイヤモンド円盤で切断し、鉄筋直上のコンクリート断面を調べられるようにした。この作業は調査した試験体に対する必要な数だけ実施した。

## 結果と検討

黒鉄筋については実際に腐食が始まる点(参考文献[6]のFig 2 初期状態の終点)は、電位が飽和カロメル電極(SCE)に対して-280mVより更にマイナスになり、マクロ・セル電流が10μA以上に増加した時点と定義した。この電位の値は-230mVに変更する必要があるかも知れない。9年間暴露後の黒鉄筋試験体の大部分は上記判定基準に合格していた。

電位差による判定基準は亜鉛めっき鉄筋には適用せず電流による判定基準のみを採用した。亜鉛めっき鉄筋試験体の一部は、電流による判定基準とともに電位の-600mV(SCE)以下への低下も組み合わせた判定基準とした。当初の意図は、判定基準が2つの連続したデータ採取に適用できたとき、試験体として有効であるとみなすことであった。しかしこれはある期間連続して電流が5-10 μAの範囲にあるときまたは10 μAを超えるがその後、特に亜鉛めっき鉄筋の試験体が再度不動態化して比較的低い値にもどる場合にはミス・リーディングに陥る可能性がある。

### 標準のコンクリート試験体

ストレート鉄筋の場合： 図3に標準の亜鉛めっき(GV)鉄筋、黒およびGF鉄筋試験体の電位とマクロ-セル電流測定結果を示す。黒鉄筋と亜鉛めっき鉄筋の二つのケースにおいて、電位とマクロ-セル電流は逆相関の関係にあるのは明らかである。すなわち通常見られるように電位がマイナス側になれば流れる電流が大きくなる。

これら二つの試験体セットについて、三つの試験体のうち明らかに一つが活性であった。黒鉄筋(C-T-BB-41-S TD3)では1,740日で活性を示したが、亜鉛めっき(CT-GV-41-STD1)では約720日で活性が生じた。しかしデータを見ると、亜鉛めっき鉄筋は活性化ののち電位が高い値に戻り、マクロ・セル電流が減少していることから、その後再び不動態化または部分的に不動態化したことを示している。各タイプの二番目の試験体はGV試験体の腐食が不可逆的に生じているのかどうか明確ではなかったがその後回収し検査した(CT41-BB-STD2およびCT41-GV-STD3、いずれも2,035日後)、残ったBBおよびGVの試験体は3,305日でそれぞれ試験を終了した。

図4にCT-41-BB-STD-1、CT41-GV-STD-2およびCT41-GF-STD-3試験体を開いた時の上部鉄筋とその鉄筋痕を示す。図4のGVおよびGF鉄筋の写真は被覆に穴があいた箇所に孤立したスポットが生じることを示している。図4dはGF鉄筋にはっきり見られる腐食部分のクローズアップである。

コンクリートにクラックを入れたシミュレーション試験体：図5にGV、BBおよびGF鉄筋試験体の電位とマクロ-セル電流の時間変化を示す。これらの試験体は表面に上部鉄筋の深さまでのコンクリートのクラックを横方向に入れている。BBとGV試験体電位の時間的傾向は全体として似ていたが、マクロ-セル電流はBBの方が大きかった。このためBB試験体は比較的早期(約1,000日以内)に試験を終了し分解されたのに対し、二つのGV試験体は報告書に記載する時点でまだ活性を示しており、そのうちの一つは現在でも活性を保持している。

GF鉄筋試験体：表2に示すとおり、二組のGF試験体すなわち標準(STD)とコンクリートに模擬クラックをいたしたもの(CRK)を用意した。図3および図5に現在までの電位とマクロ-セル電流の推移を示す。前者(STD)では電位は時間とともに陽極に近づいて行く傾向にあったが、後者(CRK)の場合電位は比較的一定で最近(3,050日目)まで-400mV(SCE)に近かった。この時点での一つの試験体の電位がさらにマイナス側の-600mVから-500mV(SCE)の範囲に下がりはじめた。CRK試験体のマクロ-セル電流が時に5 μA以上に上昇することはあったが、それはごく限られていた。STD試験体のマクロ-セル電流は2 μA以下を保っていた。電位とマクロ-セル電流の時間変化から見て、二つのGF試験体セットは明らかに他とは異なる性能を示しつつある。

図6は腐食スポットでめっき皮膜が貫通された部分を調査したCT-41-GF-CRK-3試験体のGF鉄筋と

その鉄筋痕である。腐食個所はクラックの一方側に広がっていた。この観察結果および上記図 4 についての視点から、独立した腐食痕は約 3,300 日で GF 鉄筋上に発生していることが推測される。

**曲げ鉄筋試験体：**180 度曲げした上部鉄筋のシリーズ(ZN-CT41-GV-BNT)を準備した。図 7 にその暴露状況を示す。一方、比較のため曲げた BB 試験体も準備したが、これらの試験体のデータは予想できる通り黒のストレート鉄筋とほぼ同様である。曲げた亜鉛めっき鉄筋試験体のデータは、初期には電位がよりマイナス側であり、時間と共にプラス側に移ってくることを除けば、傷をつけた鉄筋試験体とほとんど差はなかった。マクロセル電流は全暴露期間を通じて  $5 \mu\text{A}$  以下であった。DAM と BNT 試験体のデータが類似しているのは、クラック入りコンクリートの亜鉛めっき上部鉄筋による防食作用の結果であろうと思われる。これは暴露されている黒の鉄筋の曲げ範囲内で生じており、傷をつけた鉄筋試験体で生じたと同様の現象である。

図 8 は CT-41-BB-BNT-2 および CT41-GV-BNT 鉄筋およびその痕で、いずれも約 9 年で終了処理されたものである。これらの試験体を開く手順は図 8 に示すとおり、さらに切断するよう変更されている。図 8 の GV 鉄筋および鉄筋痕は、亜鉛皮膜に孔があいている非常に小さいスポットである。一方、BB 鉄筋は少し大きい腐食域も含め腐食個所がいくつか生じている。BB 鉄筋の腐食領域の拡大写真が図 8 に示されている。

### フライ・ッシュを混合した試験体

**ストレート鉄筋試験体：**図 9 にストレートの黒および亜鉛めっきされた鉄筋のフライ・ッシュ混合コンクリート(FA)中の電位およびマクロ・セル電流と時間のプロットを示す。これらのデータは明らかな腐食作用は生じていないことを示しており、比較の混合物なしの組成のものよりもフライ・ッシュ混合コンクリートの方が塩化物の拡散係数が小さいということと符合している。図 10 に FA-41-BB-STD-2 および FA41-GV-STD-2 の約 9 年暴露後開いた上部鉄筋と鉄筋痕の外観を示す。GV 鉄筋には亜鉛皮膜に孔が貫通している個所は見られなかった。BB 鉄筋は収縮帯の近傍およびボンド部分の外側に腐食痕が見られた。

試験体の二つ目のペアは最初のペアの 80 日後に開いた。図 11 に暴露約 9 年で開いた FA-41-BB-STD-1 および FA41-GV-STD-1 の上部鉄筋と鉄筋痕の外観を示す。GV 鉄筋では亜鉛皮膜に孔があいていたところにも腐食個所は見つからなかった。BB 鉄筋には矢印でしめす個所に非常に小さい腐食スポットがあった。

**クラック入りコンクリート中の試験体：**図 12 は模擬の亀裂をいたしたコンクリートに埋設した亜鉛めっき鉄筋と黒鉄筋の電位とマクロ・セル電流を比較したものである。一本の黒鉄筋試験体は約 600 日暴露の後腐食がはじまった時点で終了した。二本目の黒鉄筋試験体は約 1,100 日暴露で腐食がはじまり、本報告のための検査用試験体の一つとした。その後、時折二本の GV 試験体に  $3 \mu\text{A}$  以下の小さいマクロ・セル電流が記録された。さらに 2,500 日後、小さいマクロ・セル電流、-500mV(SCE)のマイナス側への電位の低下が観察された。これら二本の GV 鉄筋のうち一本も本報告用に検査体とした。

図 13 は FA41-BB-CRD-3 および FA41-GV-CRK-1 試験体を開いた時の上部鉄筋および鉄筋痕の外観である。GV 鉄筋には比較的小さいスポットが、亜鉛皮膜に孔があいていた箇所と同じところ、すな

わちクラックと接触していた場所に発生していた。BB 鉄筋は顕著に大きい腐食領域がクラックと接觸している部分に、腐食生成物が図 13 で明らかな通り主として右方向に拡がっていた。

図 13 もコンクリートが鉄筋痕側のどこでくずれているかを示している。試験体の二本目のペアは最初のペアの 80 日後を開いた。図 14 は FA41-BB-CRK-2 および FA41-GV-CRK-3 試験体を約 9 年間暴露後に開いた時の上部鉄筋と鉄筋痕の外観である。GV 試験体は小さい腐食痕が、亜鉛皮膜に貫通孔が生じていた個所で FA41-GV-CRK-1 と同様の場所に見られた。一方 FA41-BB-CRK-2 では腐食面積は FA41-BB-CRK-3 より小さいものの、GV 試験体よりは大きかった。

### シリカ・ヒューム混合試験体

ストレート鉄筋試験体：図 15 はシリカ・ヒュームを混合したコンクリート中の、黒と亜鉛めっきのストレート鉄筋の電位とマクロ・セル電流と時間のプロットである。これらのデータから、亜鉛めっき鉄筋試験体の一つが約 2,000 日で活性化したことがわかる。しかしそれに続く電位データは再不動態化が継続したことを示している。ただし最近再び活性化したかも知れない。図 16 に SF-41-BB-STD-2 および SF-41-GV-STD-2 試験体を開いた時の上部鉄筋および鉄筋痕の外観を示す。GV 鉄筋に亜鉛皮膜を貫通した孔は見られなかった。しかし亜鉛皮膜が腐食を受けていることはうかがえた。検査した BB 鉄筋には腐食は見られなかった。

亀裂を入れたコンクリート中の試験体：図 17 は模擬クラックを入れた SF コンクリート中に入れた亜鉛めっきおよび黒鉄筋の電位とマクロ・セル電流を比較したものである。亜鉛めっき鉄筋の一本は約 2,000 日の暴露後で中くらいの( $<5 \mu A$ )マクロ・セル電流を示し、一方、黒鉄筋試験体は同じ暴露期間で二本とも電流は増加していった。これら活性のある BB 試験体と活性を示す GV 試験体は、それぞれ一本を約 3,000 日後検査した。図 18 に SF-41-BB-CRK-1 および SF-41-GV-CRK-3 を開いた外観を示す。GV 鉄筋では若干の腐食スポットが、亜鉛の皮膜がクラックの部分で孔があいていたと同様の個所に生じており、露出した炭素鋼周辺に亜鉛の腐食生成物が付着していた。検査した BB 鉄筋の試験体は、鉄筋がコンクリートの亀裂のある個所でかなり大きく腐食されており、それは片側(BB 鉄筋試験体の右側に)偏って発生していた。

図 18 も鉄筋痕側でコンクリートが碎かれている個所を示している。二番目の試験体のペアは最初のペアを開いた日から 80 日後に開いたものである。図 19 は SF-41-BB-CRK-2 および SF-41-GV-CRK-1 を開いた時の外観である。GV 鉄筋については亜鉛めっきを貫く非常に小さい腐食スポットが見られた。さらに亜鉛は腐食されている徴候が見られた。検査した試験体 BB(SF-41-BB-CRK-2)には SF-41-BB-CRK-1 と同じ程度の腐食の拡がりが見られた。

### 亜硝酸カルシウム混合の試験体

ストレート鉄筋試験体：図 20 は亜硝酸カルシウム混合コンクリート中のストレートの黒および亜鉛めっき鉄筋の電位とマクロ・セル電流の時間変化である。黒鉄筋の電位は亜鉛めっき鉄筋のそれよりも高かったが、約 550 日暴露後の黒鉄筋試験体には明らかにマクロ・セル電流が流れたとみられ、一方亜鉛めっき鉄筋試験体にはこの電流が流れたあとはなかった。これらの中で最大のマクロ・セル電流( $\sim 1 \mu A$ )およびマイナス電位を示した活性 BB 鉄筋試験体および GV 試験体を選んで、約 3,300 日の暴露後検査した。図 21 は CN-41-BB-STD-3 および CN-41-GV-STD-1 試験体の上部鉄筋と鉄筋痕

を開いた外観である。GV 鉄筋については小さなスポットがひとつ、亜鉛皮膜に孔があいている（スポットのクローズアップ参照）のが観察された。この鉄筋と鉄筋痕にはかなりの量の白い腐食生成物が見られ、BB 鉄筋には腐食の生じている個所に無数の腐食スポットが鉄筋のほぼ全長にわたり発生していた。

図 21 は腐食個所のクローズアップである。二番目の試験体のペアは最初のペアの 80 日後に開いた。図 22 に CN-41-BB-STD-2 および CN-41-GV-STD-1 の上部鉄筋と鉄筋痕の外観を示す。GV 鉄筋には亜鉛皮膜を貫通する少数の小さな腐食スポットが見られた。なお亜鉛皮膜には腐食が進行している兆候が見られた。BB 鉄筋試験体(CN-41-BB-CRK-2)には、図 21 に示した CN-41-BB-CRK-2 と同様に拡がった無数の腐食スポットが見られた。

**亀裂入りコンクリート中の試験体：**図 23 にクラックを入れた亜硝酸カルシウム入りコンクリート中の亜鉛めっきおよび黒の鉄筋の電位とマクロ・セル電流データの比較を示す。黒鉄筋試験体は腐食反応が明らかであったため、比較的早期（500-650 日間暴露）に終了して分解した。亜鉛めっき試験体のうち二つはややマイナス側の電位を示しており、最近まで低いマクロ・セル電流を示していた。GV と比較する BB 試験体がなかったので、GV 試験体の検査は行わなかった。

### 顕微鏡写真

図 24 に試験体 CT41-GF-STD-3 からとった GF 鉄筋および試験体 FA41-GV-STD-2 からとった亜鉛めっき鉄筋の金属顕微鏡写真を示す。これらは 9 年間の暴露後、検査をおこなった試験体の一部である。図 24 の左の四つは GF 鉄筋である。四つのうち最も左にあるのが腐食の生じていたところから採取したものである。部分的からほぼ全体にいたる亜鉛皮膜の消失が生じている。すなわち外層の亜鉛のみでなく亜鉛合金層のほぼ全体まで腐食している。中央の二つは GF 鉄筋の無欠陥部分に該当する。図 24 で最も右の欄は、各種の相があらわれている無欠陥の亜鉛めっき層である。腐食している GF 鉄筋試験体の写真は、ひとたび腐食が始まると GF 鉄筋は比較的短時間で GF 層を失うことを示している。しかし他の二つの、欠陥のない GF の写真は GF 層がアルカリ環境で残存することを示している。GV 試験体の写真は、フライ・ッシュが存在するような低アルカリ環境では GV 鉄筋の亜鉛被覆は健全なままで残ることを示している。

### コンクリート中への塩化物の拡散

図 25 に混合のタイプによる塩素イオンのコンクリート中への浸透深さを示す。結果はほぼ予期されたとおりで、CT(混合物なし)は塩素イオンの浸透に対する抵抗力が最小であり、プロファイルからみるとブランクの試験体に比較して、抵抗力は FA が最大で、次いで SF が大きかった。ブランクに対する FA と SF の比較的大きい差はやや驚くべきものであった。SF を含むコンクリート中における塩素イオンの拡散性は FA を含むコンクリート中における拡散性よりも通常は小さかった。しかしながら分析した 4 種類の深さでの試験体で調べた塩化物分布の FA シリーズおよび SF シリーズ間の差はほとんどなかった、という点は重要である。しかし鉄筋痕部分を碎いて採取した部分の塩化物濃度は、SF (三角の塗りつぶし)の方が FA (四角の塗りつぶし)より有意に大きかった。

上部鉄筋(25.4mm)の深さも示されている。鉄筋の深さにおける塩素イオン濃度はブランク試験体から見て FA 混合で約  $2\text{kg}/\text{m}^3$ 、SF で  $5\text{kg}/\text{m}^3$ 、CN で  $9\text{ kg}/\text{m}^3$ 、CT で  $11\text{ kg}/\text{m}^3$  であった。実際に鉄筋痕

にそって 2-3mm 粉碎した試料の塩素イオン濃度は FA 混合で約  $4 \text{ kg/m}^3$ 、SF で  $14 \text{ kg/m}^3$ 、CN で  $20 \text{ kg/m}^3$  そして CT 混合では  $10 \text{ kg/m}^3$  を示した。これらの塩素イオン濃度の値はブランクの試料より得た値より若干高めである。これは鉄筋痕における塩素イオンが、鉄筋の存在によって積算されたことによる影響がでているためと考えられる[7,8]。

### 上部の鉄筋に接触しているコンクリートの塩化物濃度

表 3 に鉄筋痕上のコンクリートを碎いた試料の塩化物濃度を示す。模擬クラックの試料については、表中の塩化物濃度はポンド部分の位置に対応するが、鉄の腐食部分は除いている。鉄筋痕部の濃度は FA41-GV-STD 試験体部の  $0.38 \text{ kg/m}^3$  から CN41-GV-STD の  $19.95 \text{ kg/m}^3$  までの範囲にあった。全体として SF および FA 混合物コンクリートの鉄筋痕中の濃度は  $5 \text{ kg/m}^3$  以下であった。このことから、これ等の混合物は予想通り塩化物の移動を遅らせていた。例外は SF-GV-CRK で、人工的に加えたクラックがどの程度塩素イオンの値に影響を与えたのかが明確でない。亜硝酸カルシウムと GV 鉄筋の組み合せは、9 年以降に相乘的に適切な防食機能を発揮するかも知れない。

### E-SEM および EDS

上記のとおり、鉄筋の上のコンクリート小試片を試験体から切り出し、エネルギー分散型スペクトル分析 (EDS) のため低真空走査型電子顕微鏡 (E-SEM) で、特に鉄筋表面からの亜鉛がコンクリート中に存在するかを調べた。図 26 にクラックの下にあった FA41-GV-CRK コンクリートを示す。EDS 分析により、鉄筋痕からの距離が離れるに従って亜鉛の量が減少することがわかった。その値は鉄筋直近の 21wt.% からコンクリート中へ 2mm の点における 6.25wt.% の範囲にあった。

図 27 は鉄筋長さの中央部に近いところで試験体を切断した FA41-GV-STD コンクリートである。この例では四つの箇所を調べた。鉄筋痕に近い部分は 0.19wt.% から 0.36wt.% の亜鉛量を示したが、他の二箇所では亜鉛は検出されなかった。

図 28 にコンクリート痕の EDS スペクトルと三つの異なる箇所における亜鉛濃度を示す。亜鉛濃度は領域 1 では 1.09wt.% で領域 2 では 0.38we.% であった。領域 3 では亜鉛は検出されなかった。この減少傾向は 2mm の範囲にわたって発生していた。これらの結果から、亜鉛めっき鉄筋が腐食を始めるとコンクリート中に亜鉛が拡散するが、この拡散は亜鉛層とコンクリート混合物との反応速度に依存することが推定された。

### 結論

最近および以前に検査した試験体から、亀裂を入れたコンクリートでは黒鉄筋よりも亜鉛めっき鉄筋が腐食に対する抵抗力が強いことがわかった。同様に最近の調査からは、亜硝酸カルシウムを混合したコンクリート中の抵抗力は黒鉄筋よりも亜鉛めっき鉄筋の方が高いことがわかった。

亜鉛めっき鉄筋と黒鉄筋双方ともにフライ・ッシュまたはシリカ・ヒュームを混合したコンクリート中では抵抗力が強くなる。亀裂がある場合は上述のとおり亜鉛めっき鉄筋は黒鉄筋よりも腐食抵抗力が強い。GF 鉄筋については二つの試験体についての電位とマクロ・セル電流の時間経過を見る限り格段の性能が見られる。この二つの試験体については、独立した腐食スポットが見られるが、腐食のスタートは黒鉄筋および亜鉛めっき鉄筋より遅かった。

## REFERENCES

- [1] Zhang, X G, (1996) Chapter 13 – Corrosion in Concrete in Corrosion and Electrochemistry of Zinc, Plenum Press, New York.
- [2] Fratesi, R, Nurnberger, U, (2002) 'Hot Dip Galvanizing of Reinforcement: Review Report', COST 521 final workshop, February 18-19th, 2002.
- [3] Moreno, E I, Sagüés, A A, (1996) Performance of Alternative Material Rebar, FDOT final Report WPI 0510647.
- [4] ASTM International, in ASTM G 109. 2007, ASTM International: West Conshohocken, PA. p 6.
- [5] Manna, M, Naidu, G, Rani, N and Bandyopadhyay, N, (2008) 'Characterisation of coating on rebar surface using Hot-dip Zn and Zn-4.9Al-0.1 mischmetal bath' *Surface and Coatings Technology* 202 pp 1510–1516.
- [6] Hartt, W H, Powers, R G, Leroux, V and Lysogorski, D K, (2004) 'A Critical Literature Review of High-Performance Corrosion Reinforcements in Concrete Bridge Applications' FHWA Final Report FHWA-RD-04-093.
- [7] Yu, H and Hartt, W H, (2007) 'Effects of Reinforcement and Coarse Aggregates on Chloride Ingress into Concrete and Time-to-Corrosion: Part I – Spatial Chloride Distribution and Implications,' *Corrosion*, Vol 63, p.843.
- [8] Kranc, S C, Sagüés, A A and Presuel, F J (2002) 'Decreased Corrosion Initiation Time of Steel in Concrete Due to Rebar Obstruction of Diffusional Flow', *ACI Materials Journal*, Vol 99 (1) pp 51-53.
- [9] Zhang, X G, Chapter 13 – Corrosion in Concrete in Corrosion and Electrochemistry of Zinc, Plenum Press, New York (1996).
- [10] Fratesi, R and Nurnberger, U, 'Hot Dip Galvanizing of Reinforcement: Review Report', COST 521 final workshop, February 18-19th, 2002 (2002).
- [11] Moreno, E I and Sagüés, A A, Performance of Alternative Material Rebar, FDOT final Report WPI 0510647 (1996).
- [12] ASTM International, in ASTM G 109. 2007, ASTM International: West Conshohocken, PA. p 6.
- [13] Manna, M, Naidu, G, Rani, N and Bandyopadhyay, N, 'Characterisation of coating on rebar surface using Hot-dip Zn and Zn-4.9Al-0.1 mischmetal bath' *Surface and Coatings Technology* 202 pp 1510–1516 (2008).
- [14] Hartt, W H, Powers, R G, Leroux, V and Lysogorski, D K, 'A Critical Literature Review of High-Performance Corrosion Reinforcements in Concrete Bridge Applications' FHWA Final Report FHWA-RD-04-093 (2004).
- [15] Yu, H and Hartt, W H, 'Effects of Reinforcement and Coarse Aggregates on Chloride Ingress into Concrete and Time-to-Corrosion: Part I – Spatial Chloride Distribution and Implications,' *Corrosion*, Vol 63, p 843 (2007).
- [16] Kranc, S C, Sagüés, A A and Presuel, F J, 'Decreased Corrosion Initiation Time of Steel in Concrete Due to Rebar Obstruction of Diffusional Flow', *ACI Materials Journal*, Vol 99 (1) pp 51-53, (2002).

表 1 試験体の種類

鉄筋のタイプ	黒鉄筋
	亜鉛めっき鉄筋
	ガルファンめっき鉄筋
コンクリートの状態	亀裂なしコンクリート
	亀裂入りコンクリート
鉄筋の状態	ストレート、疵なし
	疵あり
	曲げあり
コンクリートへの混合物の種類	添加物なし
	フライ・ッシュ添加
	シリカ・ヒューム添加
	亜硝酸カルシウム添加

表2 全試験体の明細

試験体	鉄筋のタイプ	W/C	混合物	鉄筋形状	コンクリート の亀裂	鉄筋の疵
<b>CT41-GV-STD</b>	亜鉛めっき	0.41	なし	ストレート		
<b>CT41-BB-STD</b>	黒鉄筋	0.41	なし	ストレート		
<b>CT41-GF-STD</b>	ガルファン	0.41	なし	ストレート		
CT41-GV-CRK	亜鉛めっき	0.41	なし	ストレート	X	
CT41-BB-CRK	黒鉄筋	0.41	なし	ストレート	X	
<b>CT41-GF-CRK</b>	GF	0.41	なし	ストレート	X	
CT41-GV-DAM	亜鉛めっき	0.41	なし	ストレート		X
<b>CT41-GV-BNT</b>	亜鉛めっき	0.41	なし	曲げ		
<b>CT41-BB-BNT</b>	黒鉄筋	0.41	なし	曲げ		
CT41-GV-CRB	亜鉛めっき	0.41	なし	曲げ	X	
CT41-BB-CRB	黒鉄筋	0.41	なし	曲げ	X	
CT50-GV-STD	亜鉛めっき	0.5	なし	ストレート		
CT50-GV-CRK	亜鉛めっき	0.5	なし	ストレート	X	
<b>FA41-GV-STD</b>	亜鉛めっき	0.41	フライ・アッシュ	ストレート		
<b>FA41-BB-STD</b>	黒鉄筋	0.41	フライ・アッシュ	ストレート		
<b>FA41-GV-CRK</b>	亜鉛めっき	0.41	フライ・アッシュ	ストレート	X	
<b>FA41-BB-CRK</b>	Black Bar	0.41	フライ・アッシュ	ストレート	X	
FA41-GV-DAM	亜鉛めっき	0.41	フライ・アッシュ	ストレート		X
FA41-GV-BNT	亜鉛めっき	0.41	フライ・アッシュ	曲げ		
FA41-BB-BNT	亜鉛めっき	0.41	フライ・アッシュ	曲げ		
<b>A41-GV-CRB</b>	亜鉛めっき	0.41	フライ・アッシュ	曲げ	X	
<b>FA41-BB-CRB</b>	黒鉄筋	0.41	フライ・アッシュ	曲げ	X	
<b>SF41-GV-STD</b>	亜鉛めっき	0.41	シリカ・ヒューム	ストレート		
<b>SF41-BB-STD</b>	黒鉄筋	0.41	シリカ・ヒューム	ストレート		
<b>SF41-GV-CRK</b>	亜鉛めっき	0.41	シリカ・ヒューム	ストレート	X	
<b>SF41-BB-CRK</b>	黒鉄筋	0.41	シリカ・ヒューム	ストレート	X	
SF41-GV-DAM	亜鉛めっき	0.41	シリカ・ヒューム	ストレート		X
SF41-GV-BNT	亜鉛めっき	0.41	シリカ・ヒューム	曲げ		
SF41-GV-CRB	亜鉛めっき	0.41	シリカ・ヒューム	曲げ	X	
<b>CN41-GV-STD</b>	亜鉛めっき	0.41	亜硝酸カルシウム	ストレート		
<b>CN41-BB-STD</b>	黒鉄筋	0.41	亜硝酸カルシウム	ストレート		
CN41-GV-CRK	亜鉛めっき	0.41	亜硝酸カルシウム	ストレート	X	
CN41-BB-CRK	黒鉄筋	0.41	亜硝酸カルシウム	ストレート	X	
CN41-GV-DAM	亜鉛めっき	0.41	亜硝酸カルシウム	ストレート		X
CN41-GV-BNT	亜鉛めっき	0.41	亜硝酸カルシウム	曲げ		
CN41-GV-CRB	Galvanized	0.41	亜硝酸カルシウム	曲げ	X	
CT41-BL	None	0.41	なし	ブランク		
FA41-BL	None	0.41	フライ・アッシュ	ブランク		
SF41-BL	None	0.41	シリカ・ヒューム	ブランク		
CN41-BL	None	0.41	亜硝酸カルシウム	ブランク		

注：試験体のタイプ別に三つの試験片を準備した。太字はそのグループの試験体を約9年間暴露後に検査したことを示す。

表3 9年間暴露後の試験体の鉄筋痕に沿った個所の塩化物濃度

	kg/m <sup>3</sup>
#4-CT41-BB-STD	10.66
#2-CT41-GV-STD	15.28
井 9-CT41-GF-STD	10.08
#49-FA41-GV-CRK**	3.82
#54-FA41-BB-CRK**	2.71
#44 -FA41-GV-STD	0.38
#47-FA41-BB-STD	2.93
#71-SF41-GV-STD	9.3
#74-SF41-BB-STD	4.9
#76-SF41-GV-CRK**	7.18
#78-SF41-GV-CRK**	14.15
#79-SF41-BB-CRK**	4.85
#80-SF41-BB-CRK**	2.1
#94-CN41-GV-STD	19.95
#96-CN41-GV-STD	15.4
#97-CN41-BB-STD	10.1
#99-CN41-BB-STD	15.8

\*\* 亀裂または腐食個所から離れた位置

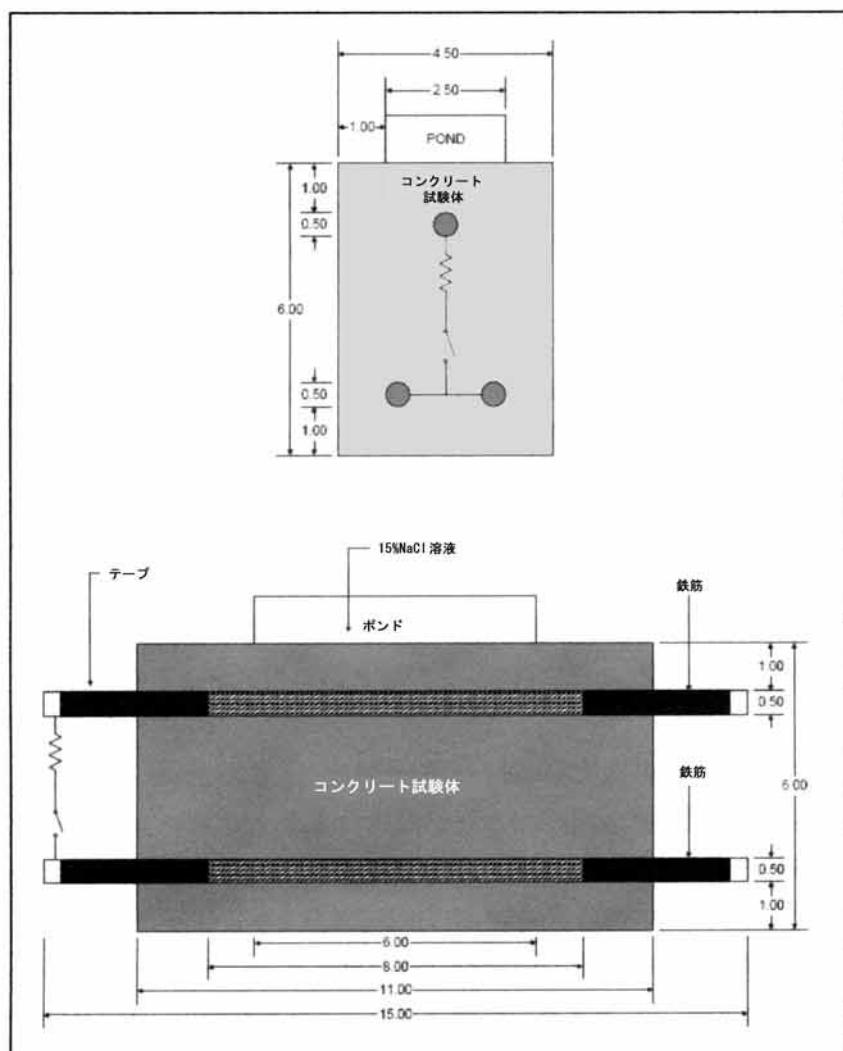


図 1 G-109 試験体の概要

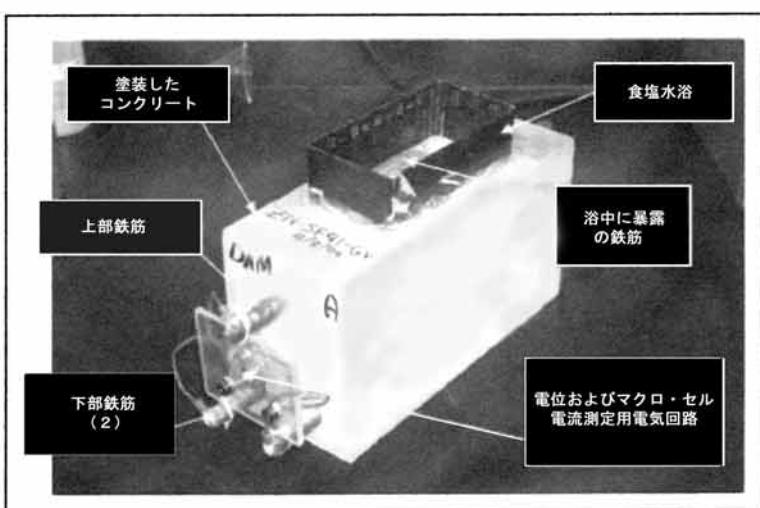


図 2 G -109 試験体の完成図

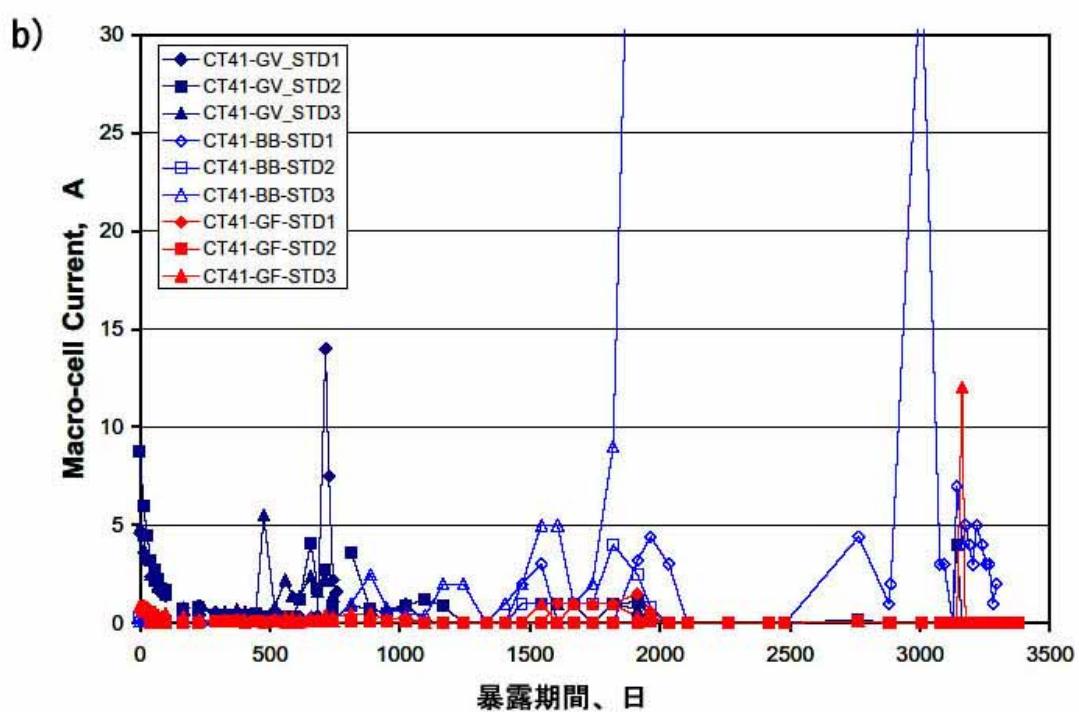
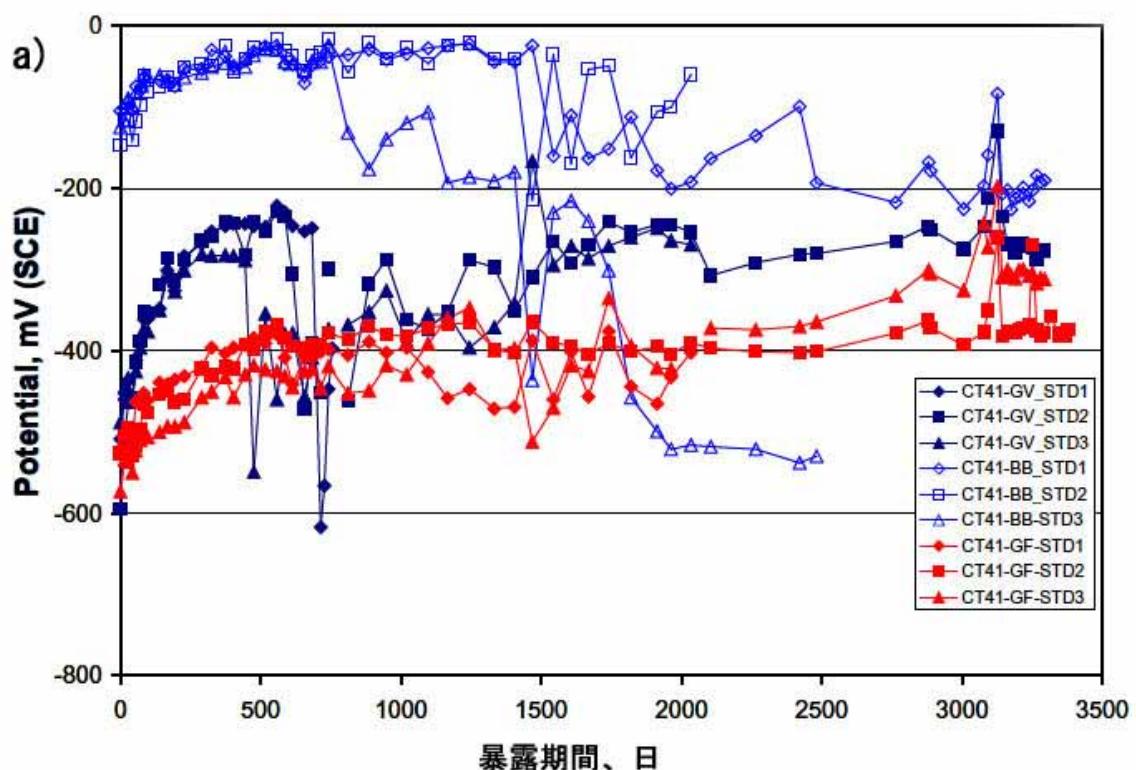


図3 標準鉄筋 (STD)、亜鉛めっき (GV)、黒 (BB) およびガルファン鉄筋 (GF) の電位 (図3a、上) およびマクロ・セル電流 (図3b、下)

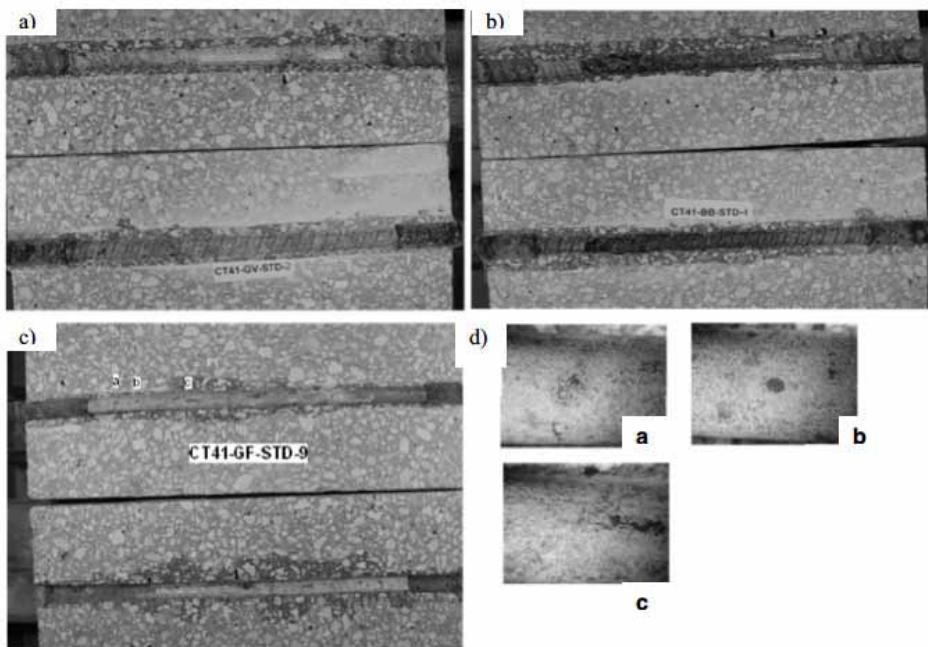


図 4 検査後の CT41-GV-STD-2、CT41-BB-STD-1 および CT41-GF-CRK-3  
a から c の小さい写真は GF 鉄筋の腐食部の拡大

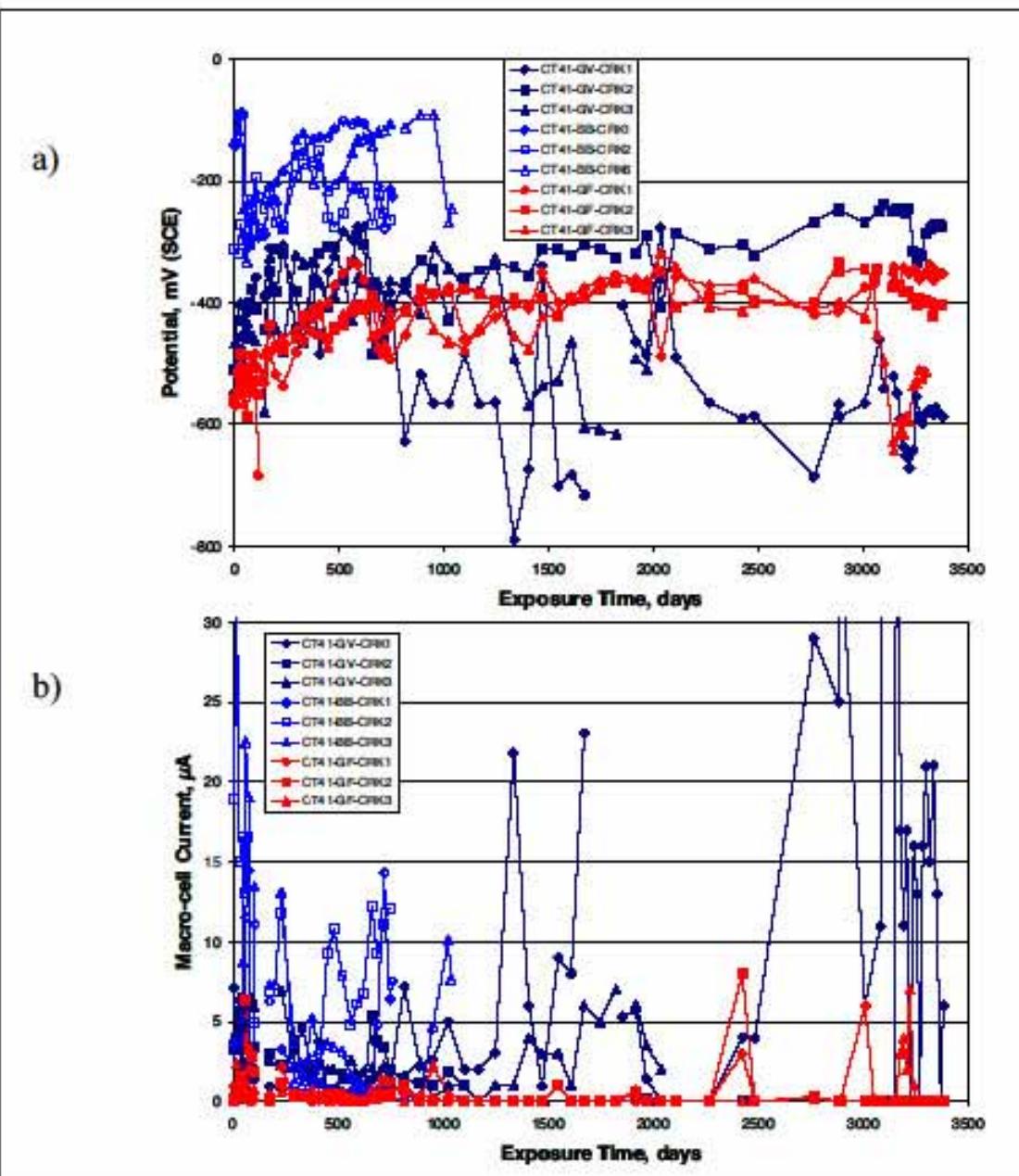


図5 亀裂入り(CT41 CRK)、亜鉛めっき(GV)、黒(BB)およびガルファン(GF) 鉄筋の電位(図5a 上)およびマクロ・セル電流(図5b 下)

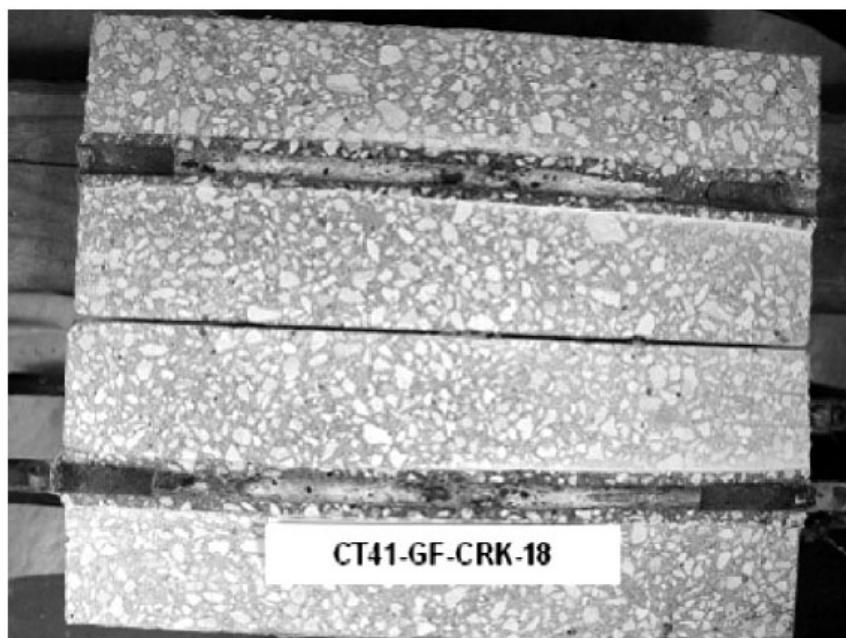


図 6 検査後の試験体 CT41-GF-CRK-3

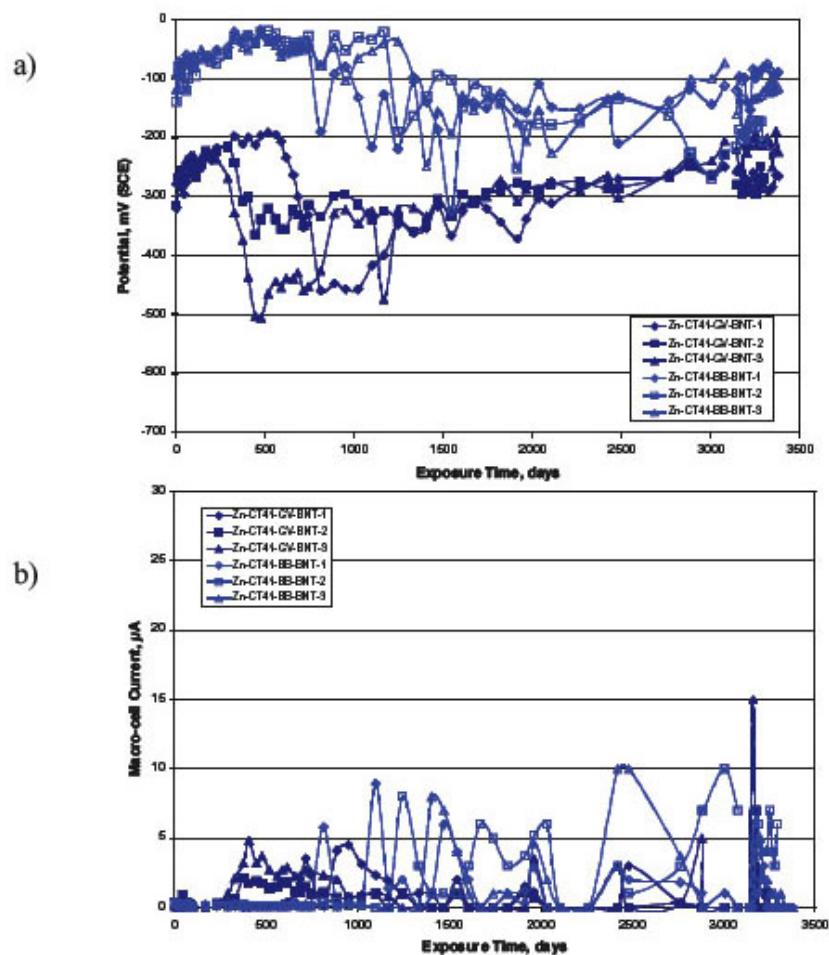


図 7 上部亜鉛めっき鉄筋 (GV) および黒鉄筋 (BB) 曲げ (BNT)  
の電位 (図 7a 上) およびマクロ・セル電流 (図 7b 下)

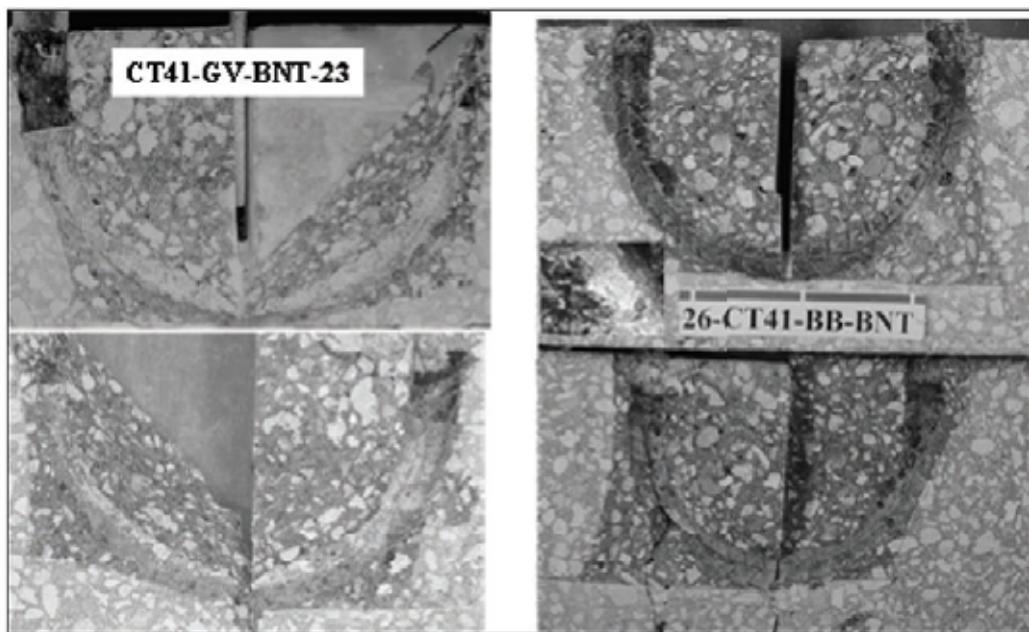
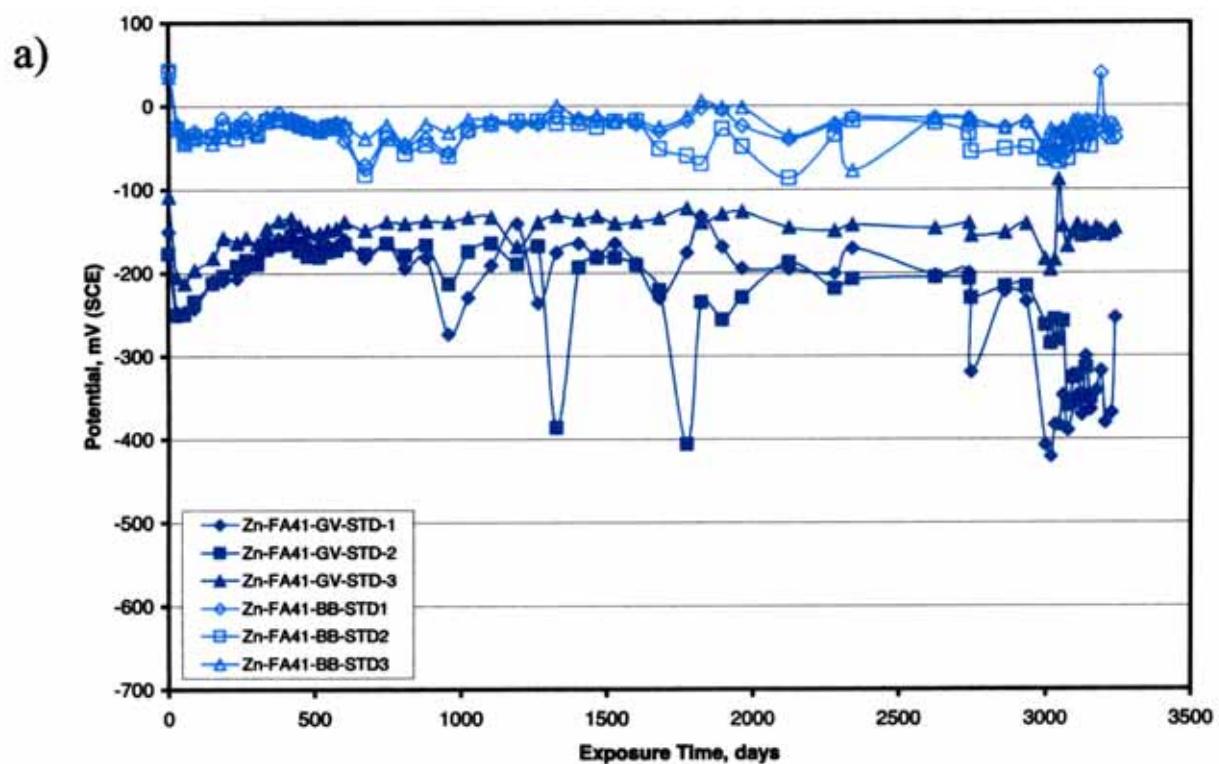
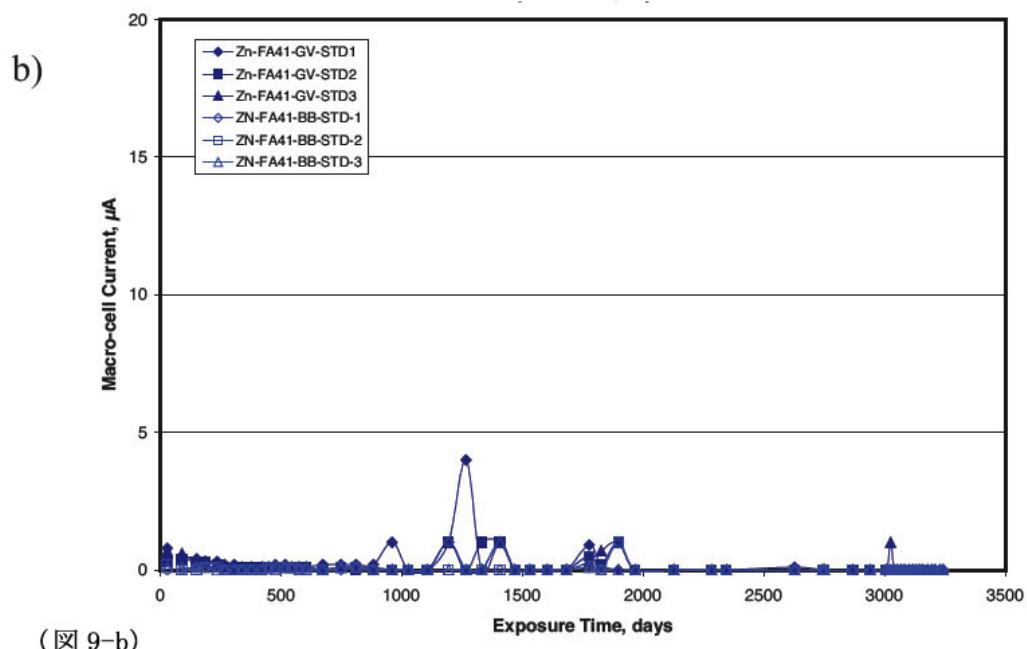


図 8 検査後の試験体 CT41-GV-BNT-2(左) および CT41-BB-BNT-2(右)



(図 9-a)



(図 9-b)

図 9 フライ・アッシュ添加の標準試験体 (FA)、亜鉛めっきおよび黒鉄筋の電位 (図 9a 上) およびマクロ・セル電流 (図 9b 下)

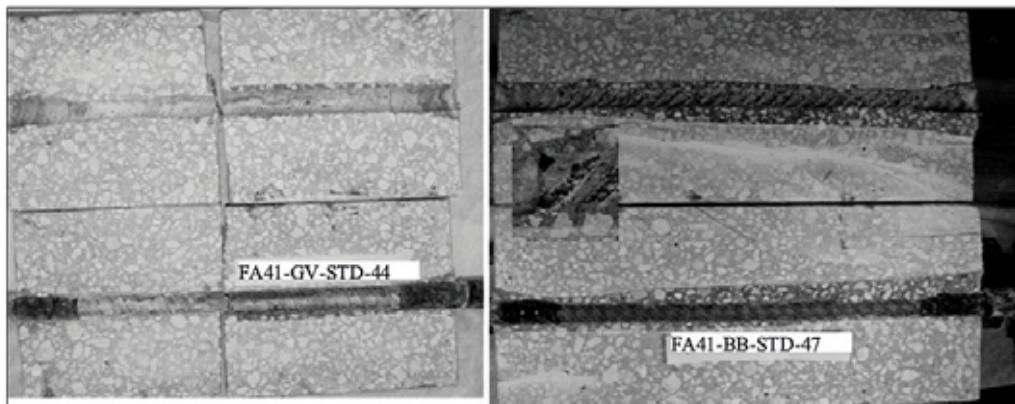


図 10 検査後の試験体 FA41-GV-STD-2(左)および FA41-BB-STD-2

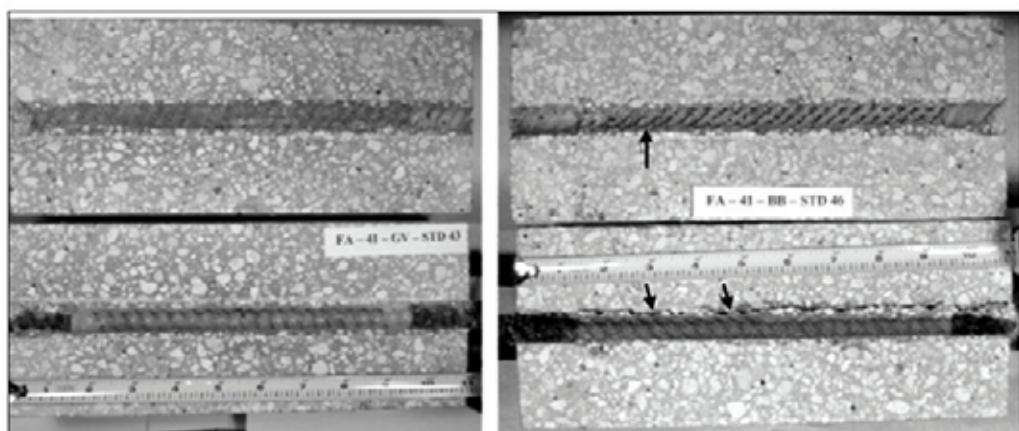


図 11 検査後の試験体 FA41-GV-STD-1(左)および FA41-BB-STD-1(右)

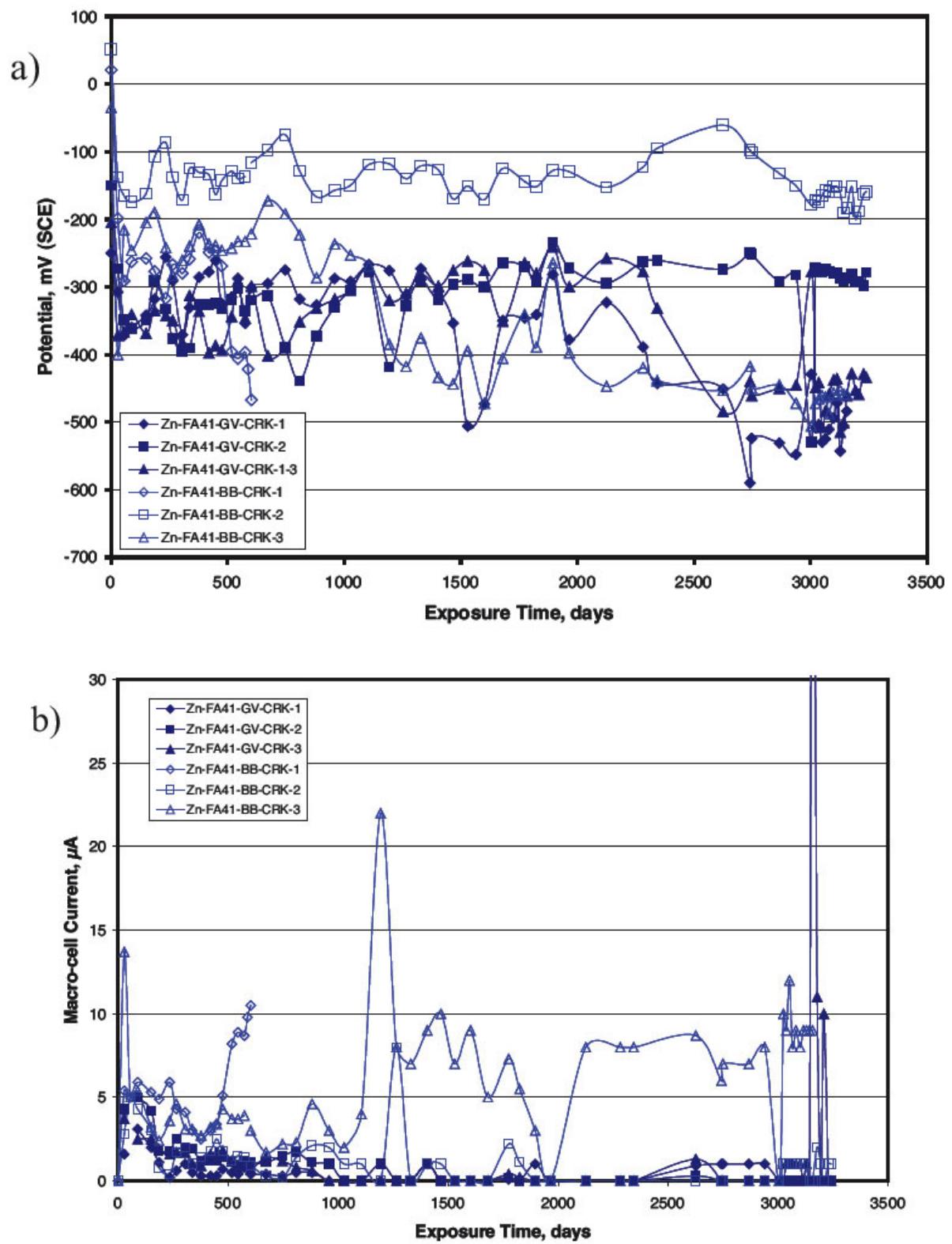


図 12 亀裂をいたしたフライ・ッシュ混合の亜鉛めっき鉄筋および黒鉄筋の電位(図 12a 上)およびマクロ・セル電流(図 12b 下)

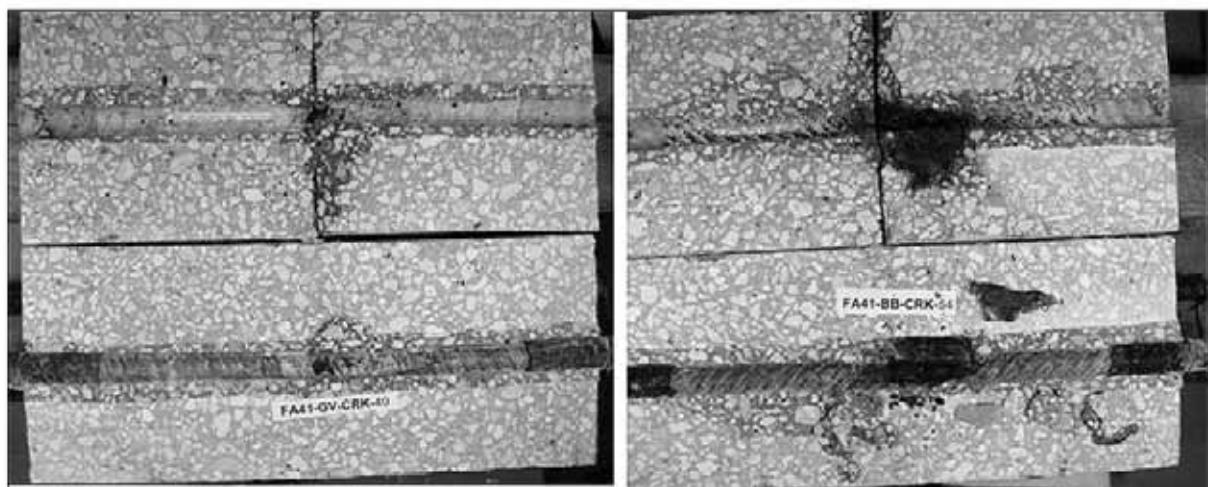


図 13 検査後の試験体 FA41-GV-CRK-1(左)および FA41-BB-CRK-38(右)

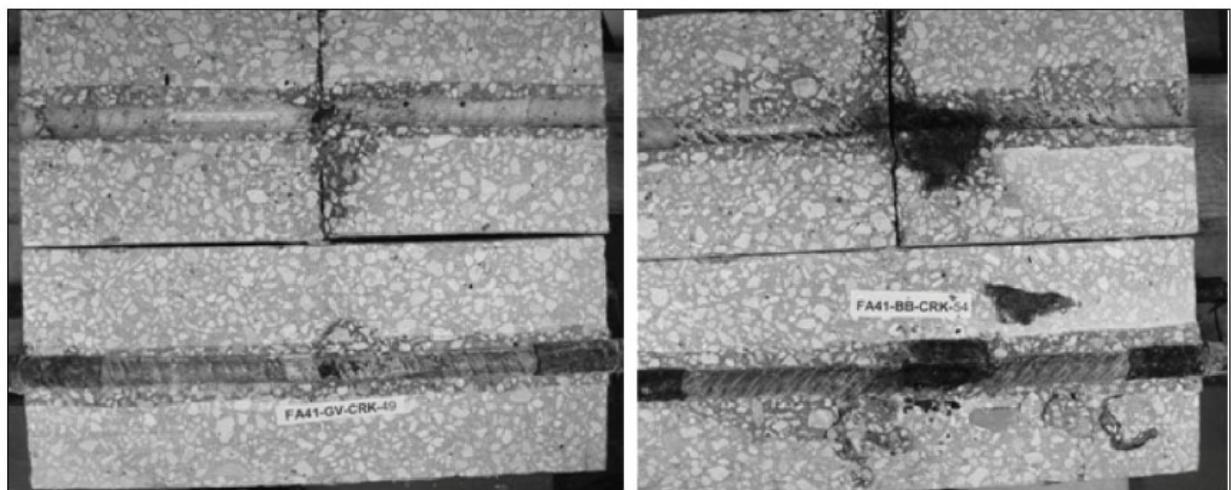


図 14 検査後の試験体 FA41-GV-CRK(左)および FA41-BB-CRK-2(右)

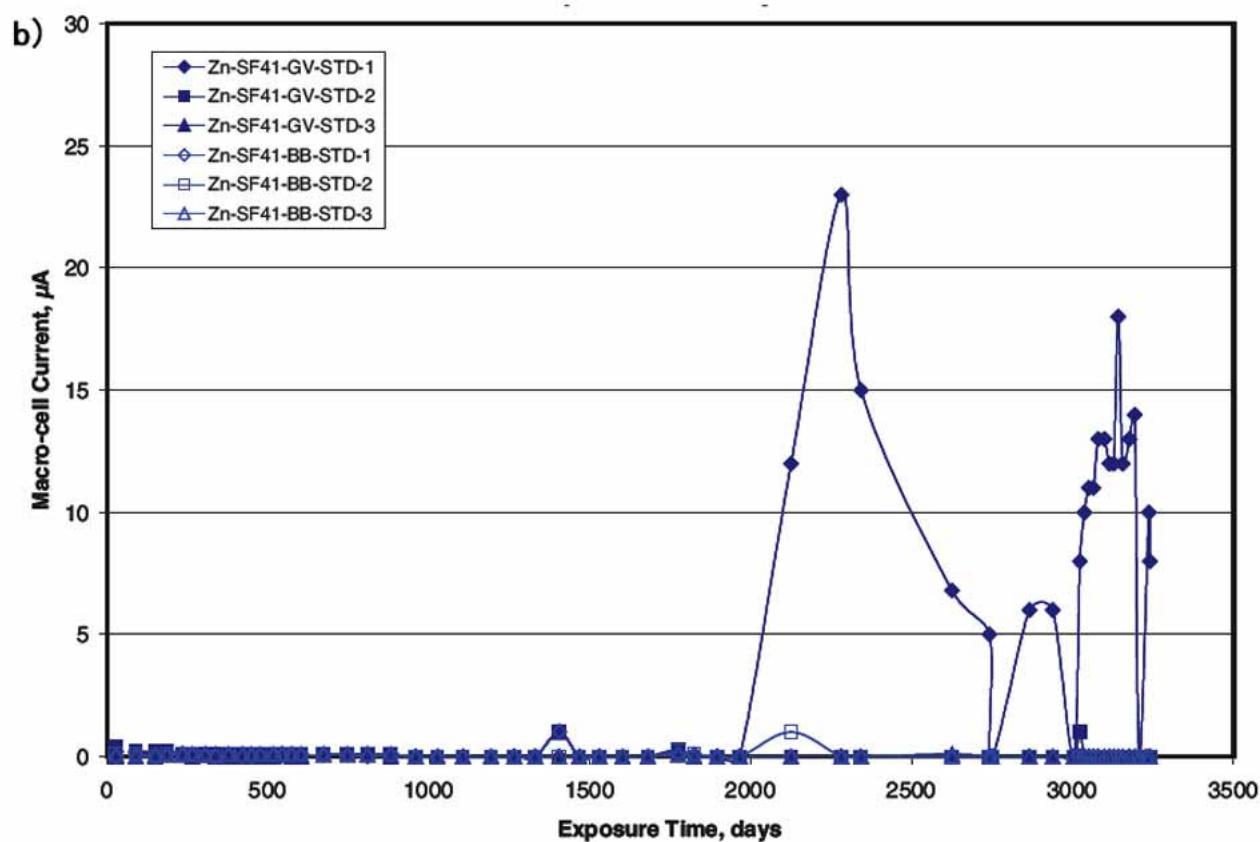
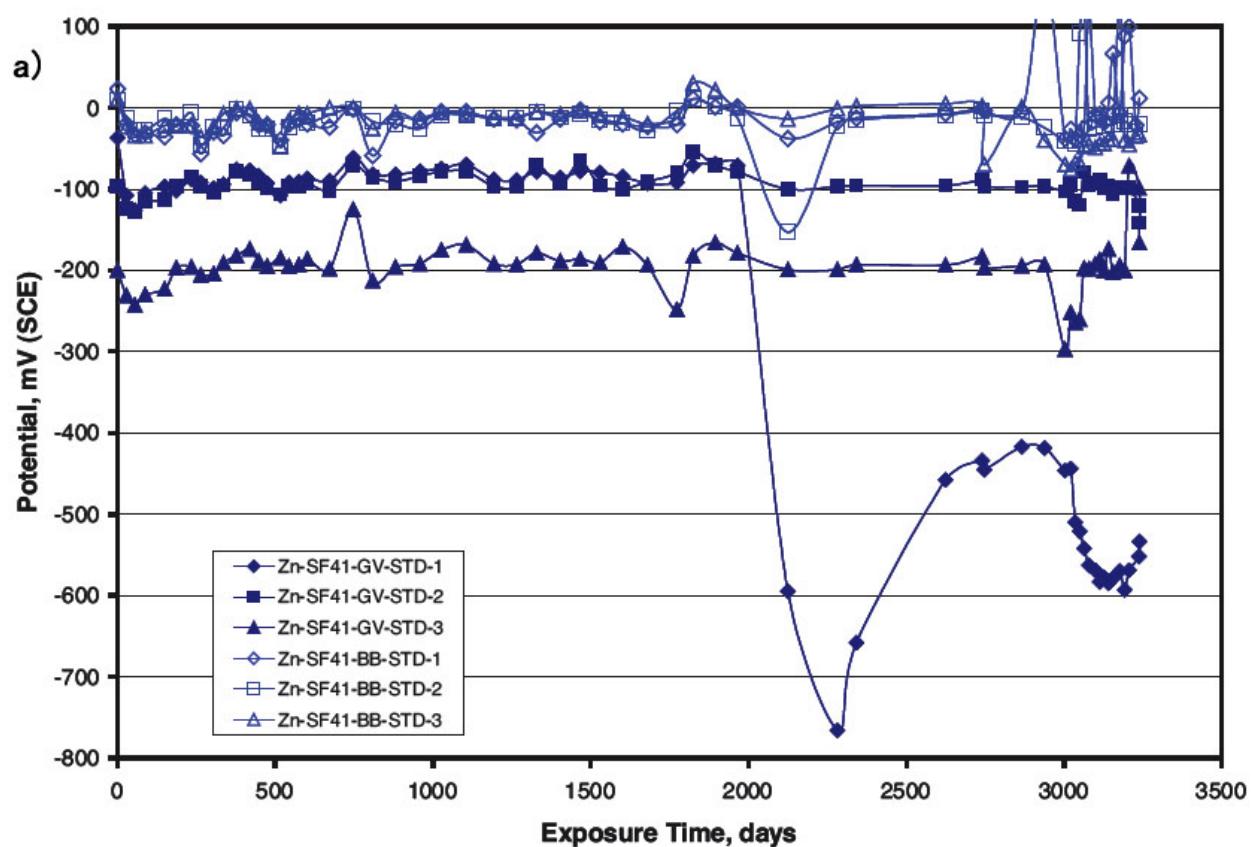


図 15 シリカ・ヒューム (SF) 混合のストレート亜鉛めっき鉄筋と黒鉄筋の電位(図 15a、上)およびマクロ・セル電流(図 15b、下)

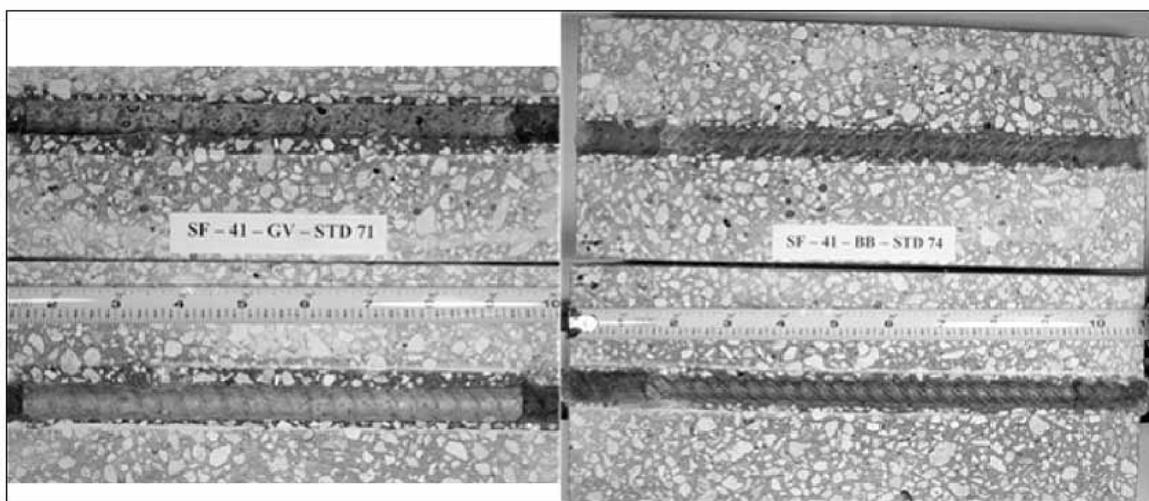


図 16 検査後の試験体 SF41-GV-STD-2(左)および SF41-BB-STD-2(右)

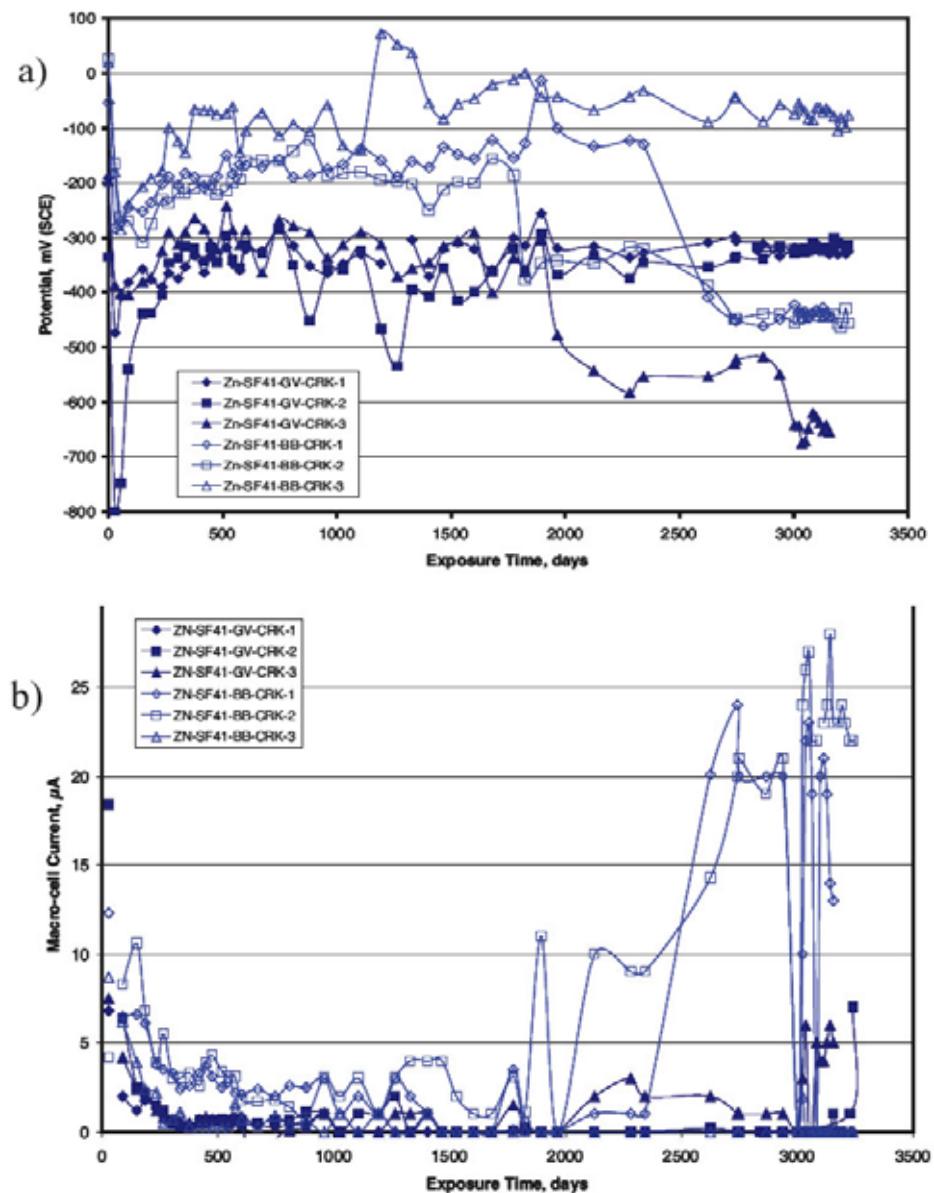


図 17 亀裂入り(CRK)シリカ・ヒューム(SF)混合のストレート亜鉛めっき鉄筋  
および黒鉄筋の電位(図 17a、上)とマクロ・セル電流(図 17b、下)

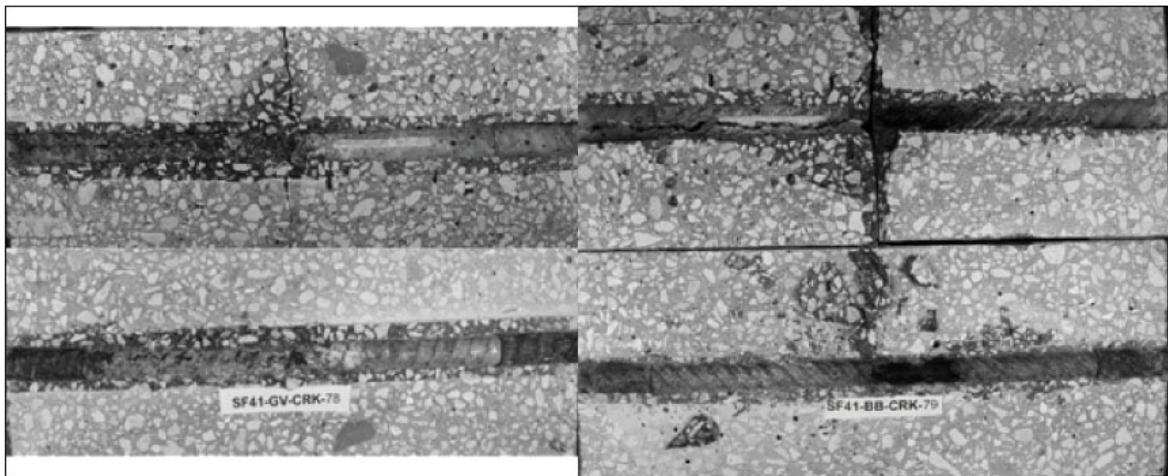


図 18 検査後の試験体 SF41-GV-CRK-3(左)および CN41-BB-CRK-1(右)

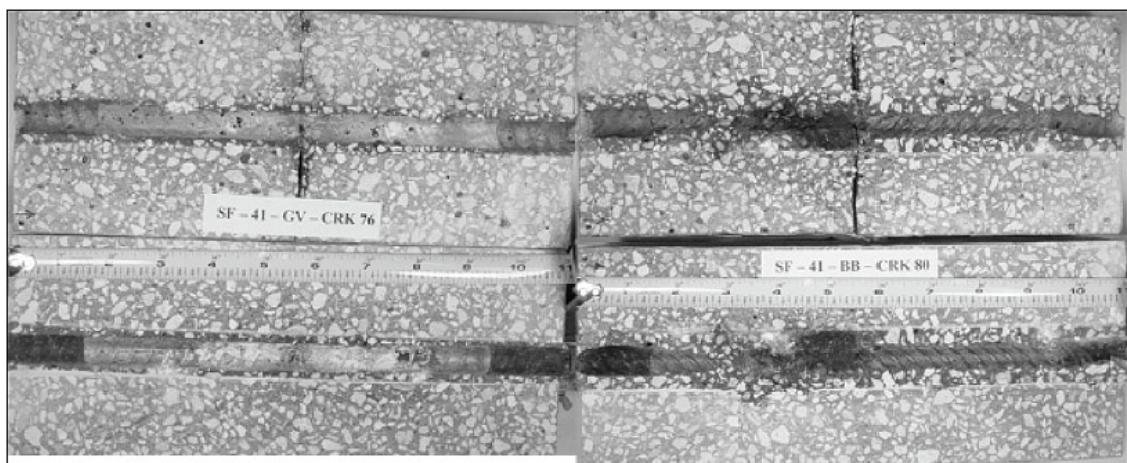


図 19 検査後の試験体 SF41-GV-CRK-3(左)および CN41-BB-CRK-1(右)

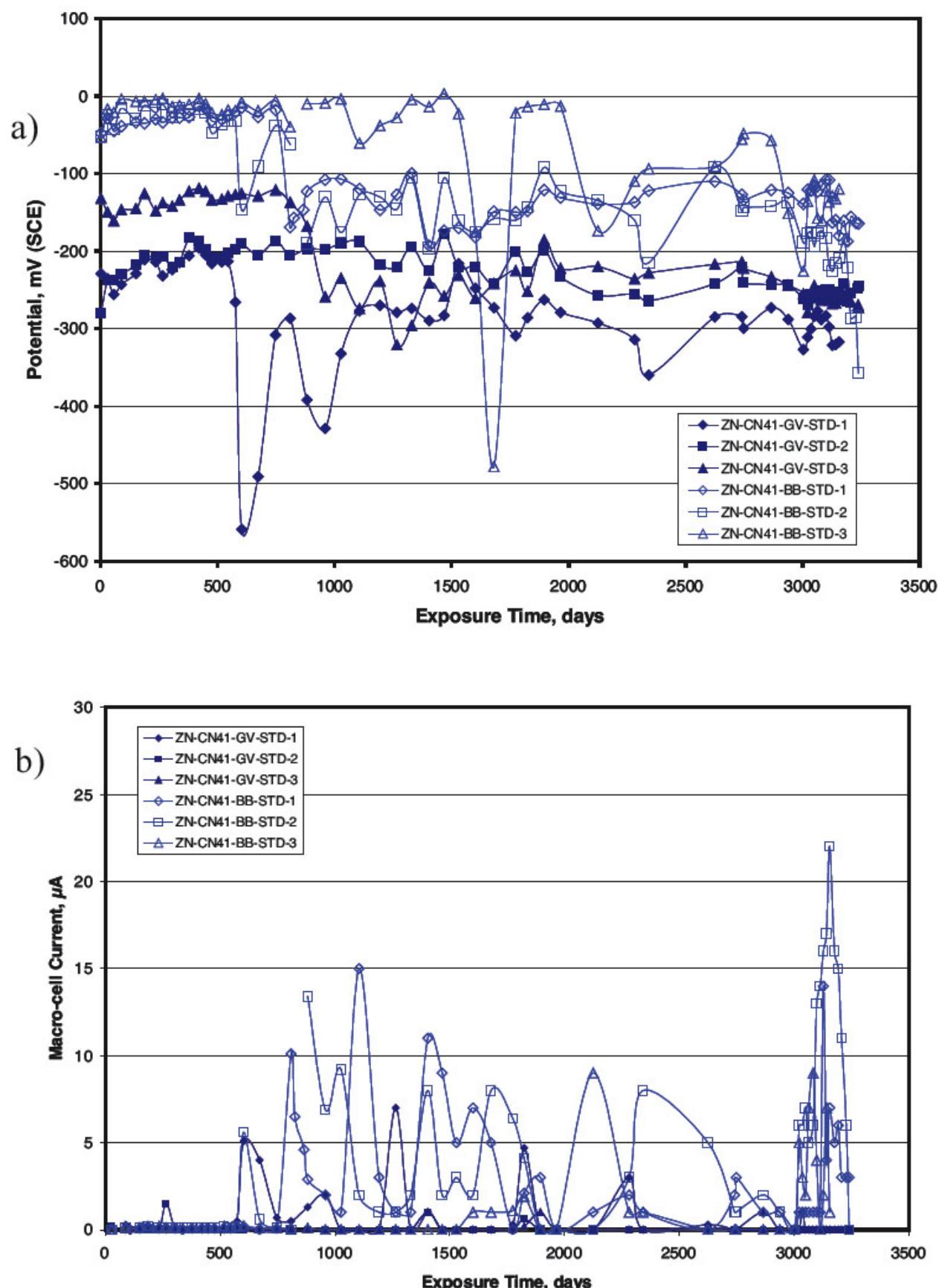


図 20 亜硝酸カルシウム (CN) 混合のストレート鉄筋の電位 (図 20a、上)  
およびマクロ・セル電流 (図 20b、下)

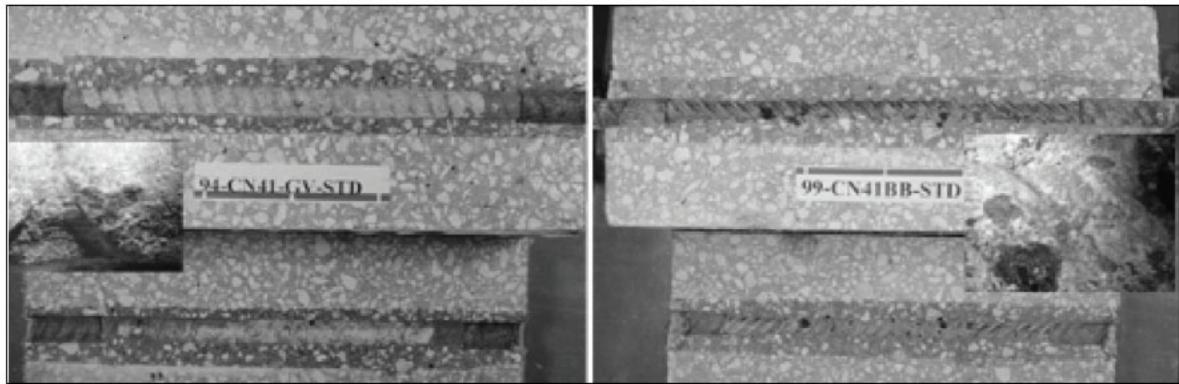


図 21 検査後の試験体 CN41-GV-STD-1(左)および CN-41-BB-STD-3(右)

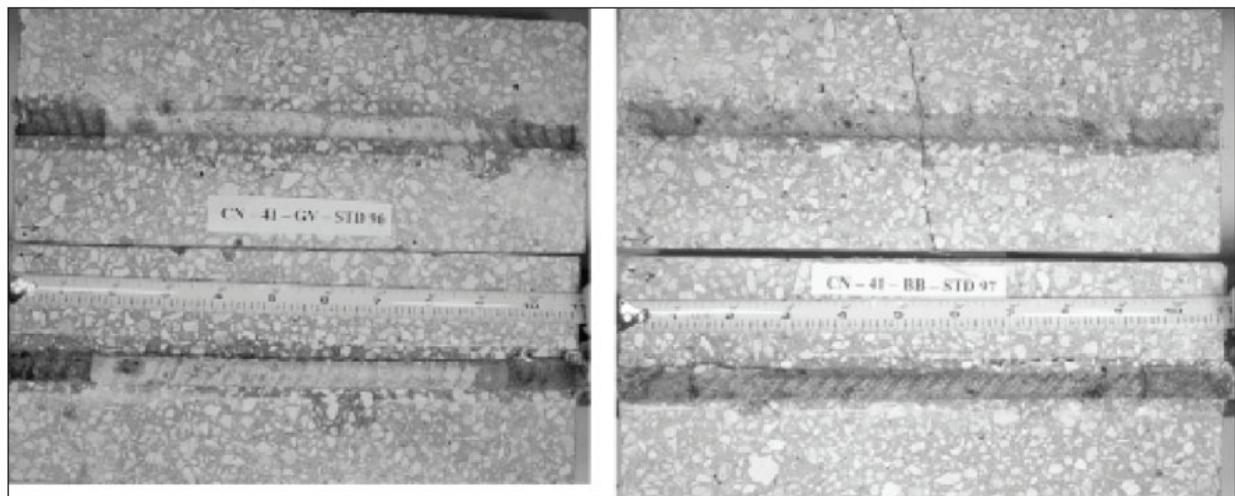


図 22 検査後の試験体 CN41-GV-STD-3(左)および CN41-BB-STD-1(右)

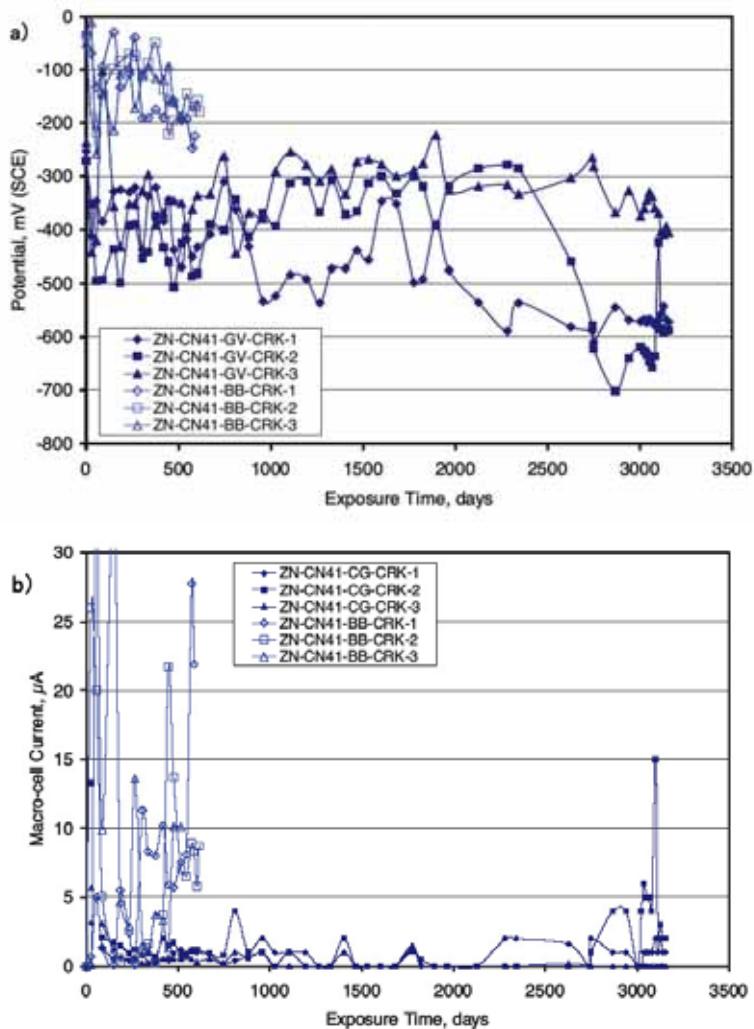


図 23 亀裂入り(CRK)亜硝酸カルシウム(CN)混合のストレート鉄筋試験体電位(図 23a、上)およびマクロ・セル電流(図 23b、下)

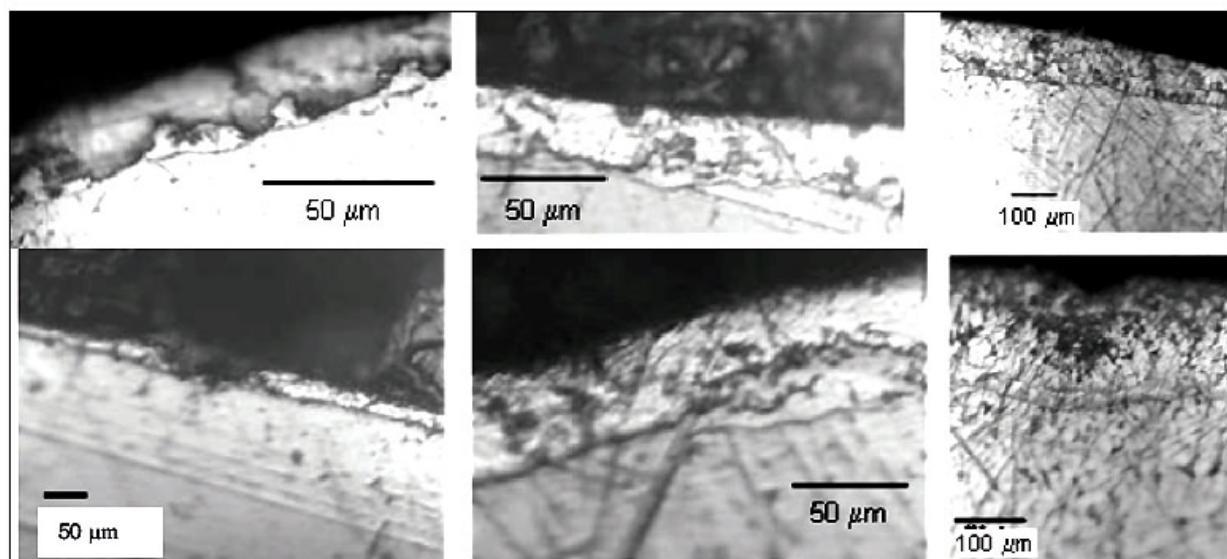


図 24 ガルファン(左側 2列)および亜鉛めつき鉄筋(右側)の顕微鏡写真。試験片は検査した試験体 CT41-GF-STD-3 および FA41-GV-STD-2 からとった。

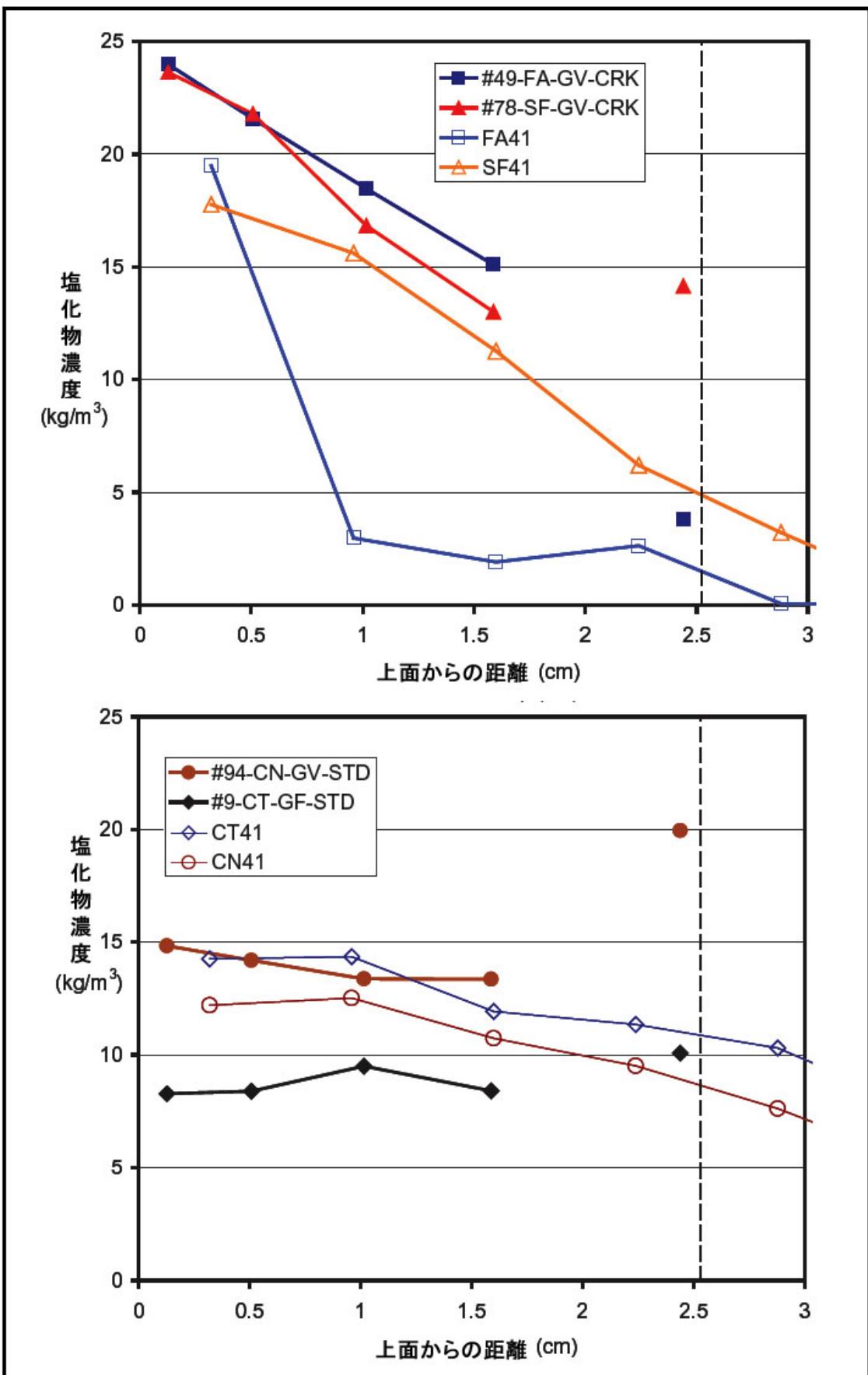
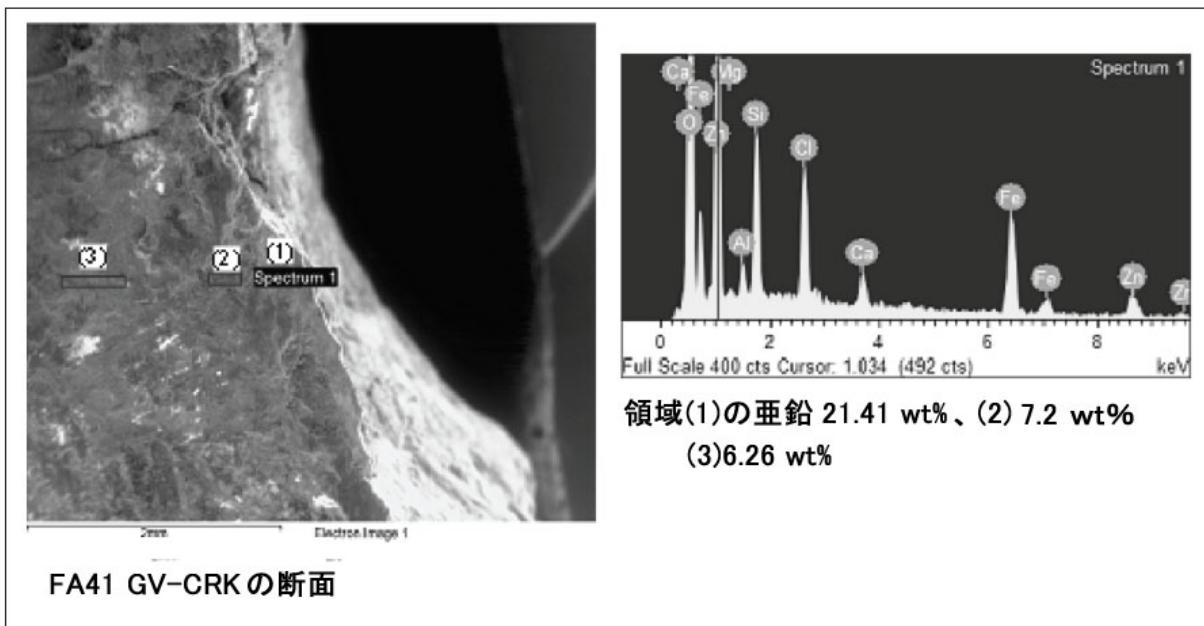


図 25 コンクリート中での深さと塩化物濃度との関係。ブランク(鉄筋なし)のコア・サンプルおよび選択した試験体のサンプルの分析値による。



FA41 GV-CRK の断面

図 26 低真空走査電子顕微鏡(ESEM)写真およびエネルギー分散X線分光法(EDS)による FA-41-GV-CRK-1 の鉄筋痕近傍の分析

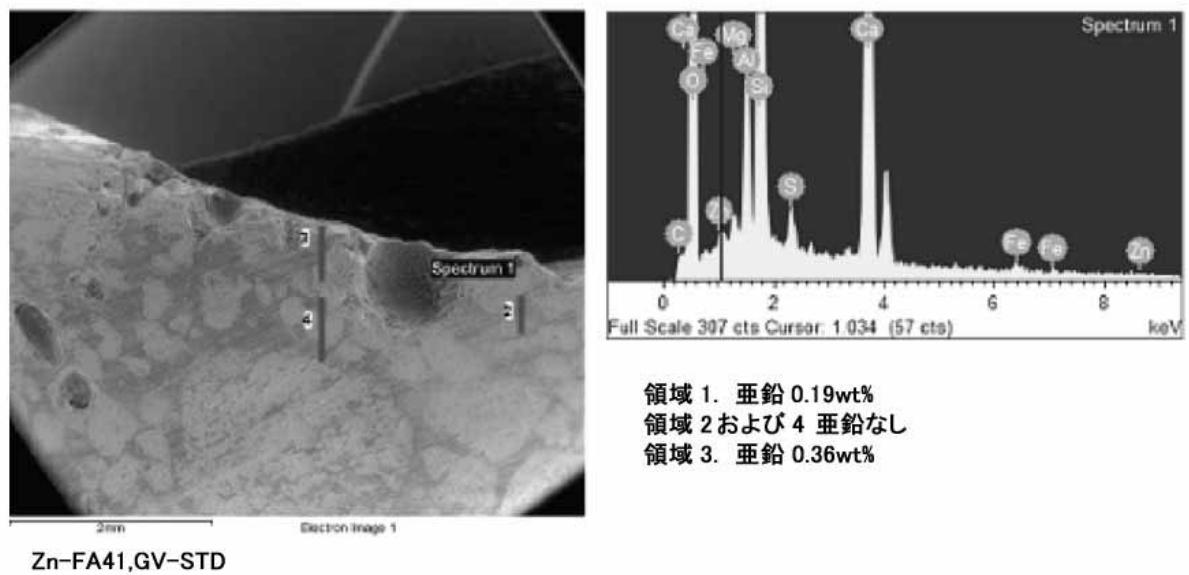


図 27 FA-41-GV-STD-2 試験体の鉄筋痕近傍の E-SEM 写真および EDS 分析

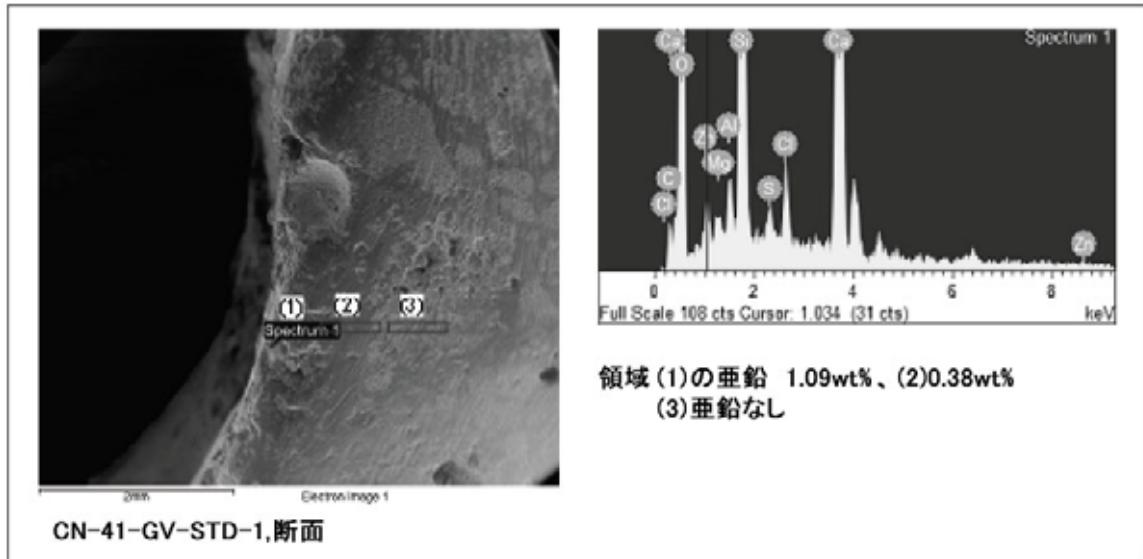


図 28 試験体 CN-41-GV-STD-1 の鉄筋痕近傍の E-SEM 写真および EDS 分析