

論文 既設 RC 柱に鋼板被覆した場合の鉄筋腐食性状

在田浩之^{*1}・鳥取誠一^{*2}・乾 司^{*3}・北後征雄^{*4}

要旨：高架橋の耐震補強工事に鋼板被覆工法があるが、本工法による場合、鋼板を被覆する箇所とそうでない箇所があるため、両箇所間にマクロセルが形成され、鉄筋腐食が進行する可能性も考えられる。そこでこの点を暴露試験により検討することとした。試験開始後これまでに約2年が経過しているが、この間自然電位、鉄筋に流出入する電流を測定するとともに、一部供試体の解体調査を実施した。その結果、解体調査を実施した供試体からは鋼板被覆が鉄筋腐食に支配的な影響を与えていないことが確認されるとともに、自然電位等の非破壊検査の結果からも上記の結果が推測された。

キーワード：鋼板被覆、鉄筋腐食、マクロセル、自然電位

1. はじめに

高架橋の耐震補強工法に、既設鉄筋コンクリート（RC）柱を鋼板で覆い、既設柱と鋼板の隙間に無収縮のセメントモルタルを充填する鋼板被覆工法がある。本工法による場合、鋼板を被覆した箇所とそうでない箇所は水分、酸素等の供給条件が異なるため、上記両箇所間にマクロセルが形成され鉄筋腐食が進行する可能性も考えられる。

そこで、鋼板を被覆したRC柱の暴露試験を行い、鉄筋腐食状況を検討することとした。暴露試験開始後これまでに約2年が経過している。この間自然電位、鉄筋に流出入する電流を測定するとともに、一部の供試体の解体調査を実施した。本論文はこれらの結果を基に、鋼板

被覆が鉄筋腐食に及ぼす影響について検討したものである。

2. 供試体の概要

2.1 供試体製作

供試体に用いたコンクリートの配合を表-1に示す。粗骨材の最大寸法を10mmとし、普通ポルトランドセメントを用いた。

表-2に供試体の種類を示す。既設構造物の状況を考慮して、コンクリート中には塩化物イオン量が3kg/m³になるように塩化ナトリウムを混入するとともに、コンクリート硬化後に供試体を促進中性化させた。

供試体はその大きさおよび促進中性化の有

表-2 供試体一覧

シリーズ	供試体 No.	水セメント比 (%)	塩化物イオン量 (kg/m ³)	促進中性化 深さ (mm)	鉄筋		鋼板被覆材齢 (日)		
					主筋	帯鉄筋	1次	2次	全体
L	L-1	70	3	0	通常 ¹⁾	通常 ¹⁾	190	342	—
	L-2				通常 ¹⁾	通常 ¹⁾	—	—	—
	L-3				一部分割	EP ²⁾	—	—	342
S	S-1	70	3	25	一部分割	EP ²⁾	—	—	342
	S-2			10			190	342	—
	S-3			25			—	—	—

1)通常の構造物と同様の配筋、すべての鉄筋に電気的な導通がある。

2)エポキシ樹脂塗装鉄筋

表-1 コンクリートの配合 (kg/m³)

水	セメント	細骨材	粗骨材
W	C	S	G
178	254	872	963

* 1 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部構造システム技師 (正会員)

* 2 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部構造システム主任技師 (正会員)

* 3 西日本旅客鉄道(株) 施設部土木・防災主幹

* 4 ジェイアール西日本コンサルタンツ(株) 技術部担当部長 (正会員)

無によりL, Sシリーズに区分した。形状・寸法は図-1に示すとおりである。柱の主鉄筋にはSD295AのD25またはD16を用いた。主鉄筋のかぶりはL, Sシリーズそれぞれ22.5mm, 19mmである。帯鉄筋にはSR235のφ9を用いた。なお、本試験では一部供試体において主鉄筋を分割し、この分割した鉄筋に流出入する電流を測定する関係で、帯鉄筋にはエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた。

供試体天端はエポキシ樹脂によりシールし、鉄筋腐食が天端からの水分の供給に影響されないようにした。

供試体は材齢2日までは湿潤養生、その後材齢7日まで気中養生した。促進中性化を施さない供試体は気中養生後、屋外（東京都国分寺市）に暴露した。促進中性化を施す供試体は上記の気中養生後、炭酸ガス濃度10%、温度20°C、湿度70%の試験室に10~30日存置し、所定の中性化深さが得られた後に屋外に暴露した。

2.2 鋼板被覆工

鋼板被覆が鉄筋腐食に及ぼす影響を調べるため、表-2に示すように鋼板被覆のパターンを3種類に設定した。第1の被覆パターンは図-1に示すように被覆作業を1次、2次に区分するものである。この場合、材齢190日において柱高さの約1/2まで、材齢342日で所定の高さまで被覆するものとした。第2

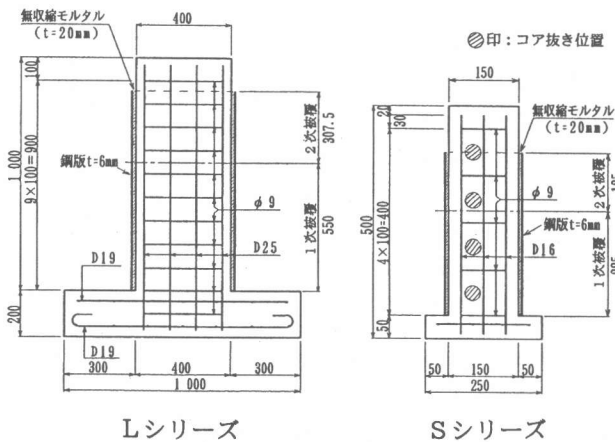


図-1 供試体の形状寸法

の被覆パターンは材齢342日において上記2次被覆の高さまで一度に被覆するものとした。さらに、第3のパターンとして比較用に無被覆供試体も用意した。

3. 測定項目および測定方法

3.1 電気化学的測定

供試体中の鉄筋近傍に参照電極(MnO₂電極)を埋め込み、鋼板被覆後も自然電位が測定できるようにした(図-2参照)。

供試体L-3およびSシリーズ全供試体の主鉄筋のうち4本については、主鉄筋を図-2のように分割後リード線により供試体外部で電氣的に接続し、各分割鉄筋に流出入する電流を測定できるようにした。図-2における各分割鉄筋間の斜線部は分割鉄筋どうしの接続部で、塩ビ管を鞘管として内部にエポキシ樹脂を充填してリード線部以外での電氣的絶縁を確保している。電流測定時には図-2のスイッチ位置に無抵抗電流計を挿入した。

分割鉄筋に流出入する電流を測定する手法として、各分割鉄筋の端面どうしをリード線

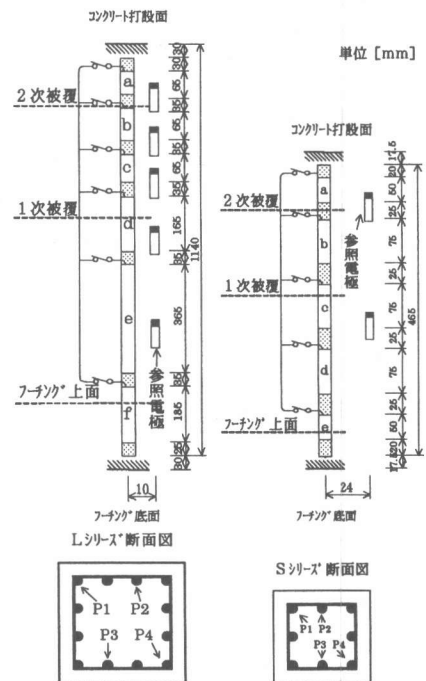


図-2 腐食電流測定位置

で接続する方法¹⁾もあるが、本供試体では鉄筋が輻射しているためリード線本数を極力少なくし、コンクリートが十分に充填されるようにする必要があること、鉄筋腐食状況に関しては後述の解体調査により詳細な評価が可能なこと等から、非破壊試験による評価としては図-2の方法で十分であろうと判断した。

3.2 解体調査

表-2中の供試体S-2およびS-3の解体調査を実施した。測定項目はコンクリートの中性化深さ、塩化物イオン量、鉄筋腐食面積率および腐食量である。中性化深さはフェノールフタレイン法により測定した。

塩化物イオンは供試体からコアを抜き取り、深さ方向の分布を調べた。分析方法は「硬化コンクリート中に含まれる全塩分の簡易分析方法(JCI-SC5)」によった。

鉄筋腐食面積率は鉄筋を供試体コンクリートからはり出した後、腐食部分をセロファン紙に写し取り、光電管プラニメータにより腐食面積を測定して求めた。鉄筋腐食量は、10%クエン酸二アンモニウム溶液に3日間浸漬処理して求めた。この処理方法等は「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法(JCI-SC1)」によった。鉄筋質量はその質量に応じて、1/1000~1/10gの精度で電子天秤により測定した。

4. 試験結果および考察

4.1 供試体の外観

Lシリーズ供試体のうち、鋼板を被覆していない供試体L-3には柱の各面に主鉄筋に沿った幅0.05mm程度のひび割れが1~2本認められた。また、鋼板を被覆した供試体L-1、L-2においても鋼板上部のコンクリート表面に帯鉄筋に沿って0.1mm程度の幅を有するひび割れが発生していた。

Sシリーズにおける供試体S-2のひび割れ状況は供試体L-3と同程度であった。供試体S-3は上記供試体よりもさらにひび割

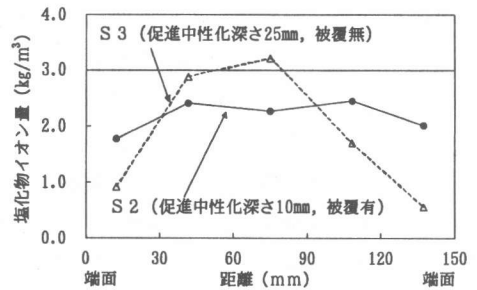


図-3 塩化物イオン量の分布

れ本数が多く、最大ひび割れ幅も0.25~0.3mm程度に達している箇所が見受けられた。

4.2 中性化深さおよび塩化物イオン量

表記については、供試体S-2、S-3それぞれから柱幅方向にコアを4本取り出して測定した(図-1参照)。

中性化深さは供試体S-2で7~11mm、S-3で21~26mmの範囲にあり概ね設定通りであった。

上記のコアを深さ方向にスライスして測定した塩化物イオン量(4本のコアの平均値)の分布は図-3に示す。供試体S-2においては塩化物イオン量がほぼ均等に分布する結果となった。これは中性化深さが10mm程度と比較的小さいこと、鋼板被覆により表面付近の塩化物イオンが洗い流されるのが緩和されたことが理由として考えられる。一方、鋼板を被覆していない供試体S-3の塩化物イオンは、表面付近が少なく、内部において増加する分布となった。これは供試体S-2の場合とは逆に表面付近の塩化物イオンが洗い流されるとともに、中性化深さが25mm程度と比較的大きいために内部において塩化物イオンが濃縮された結果と考えられる²⁾。

4.3 自然電位

図-4にLシリーズ供試体の自然電位の経時変化を示した。図中には平均値および最貴(卑)値を併せて示した。鋼板を被覆した供試体L-1と無被覆の供試体L-2の経時変化はほぼ同様であり、鋼板被覆の影響は見受けられない。供試体L-3においては鋼板被

覆後にやや電位が卑化しているが、最貴値と最卑値の差にはそれほどの変化はない。

図-5にはSシリーズの結果を示した。促進中性化を施しているため、全体的にはLシリーズより卑な電位にあるが³⁾、供試体S-2, S-3には鋼板被覆の明確な影響は認められない。供試体S-1においては鋼板被覆後に電位が卑化し、電位差も拡大している。

以上の結果より、供試体L-3と供試体S-1に鋼板被覆の影響があるように見受けられるが、この点については他の測定項目も踏まえて検討する必要がある。

4.4 分割鉄筋に流入する電流

図-6に供試体L-3の各分割鉄筋に流出する電流密度（電流を各要素鉄筋の表面積で除した値）の分布を示す。横軸のa~fは

図-2の各分割鉄筋に対応している。

図-6の上側は供試体中のP1鉄筋に対する結果で、図中に「被覆前」として示した電流密度は鋼板被覆前に8回測定した電流密度の平均値である。「被覆後」についても同様の平均値を示している。この図から電流密度分布の形状にあまり変化はないが、鋼板被覆後にはcの分割鉄筋の電流密度が増加しているのがわかる。しかしながら、図-6の下側に示したP2鉄筋では鋼板被覆後の電流密度が減少している。このように供試体L-3中の電流密度は、図-6に示した以外のP3, P4鉄筋も含めて一定の傾向を示しておらず、鋼板被覆が支配的な影響を及ぼしているとは考え難い結果となった。

図-7にSシリーズ供試体の材齢335日以

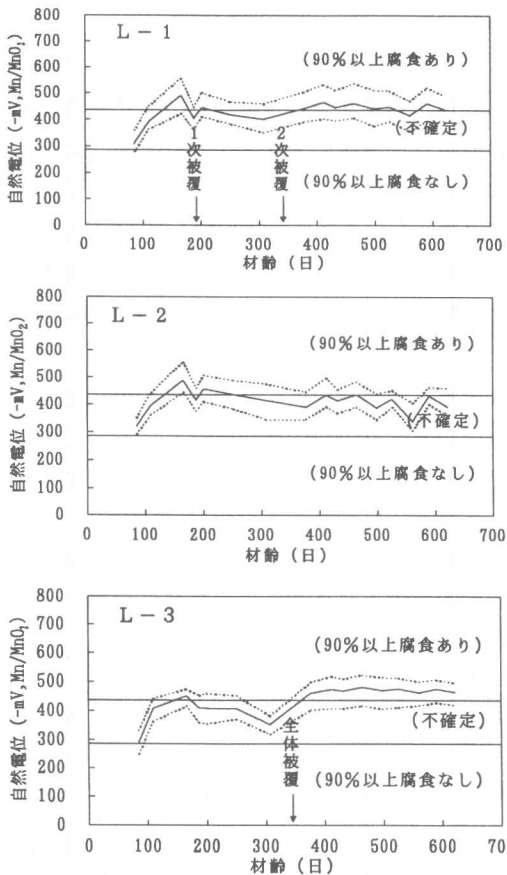


図-4 自然電位の経時変化 (Lシリーズ)

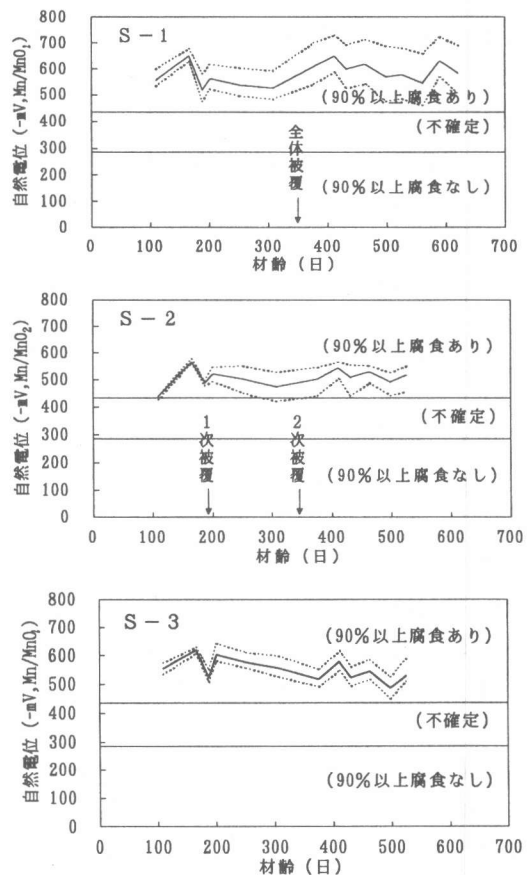


図-5 自然電位の経時変化 (Sシリーズ)

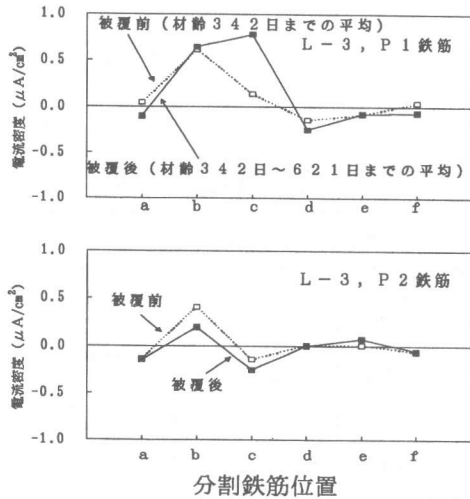


図-6 鋼板被覆前後における分割鉄筋の電流密度分布

降に7~10回電流密度を測定した結果の平均値を示した。供試体S-1においてはP1~P4鉄筋がいずれも類似した分布を示し、鋼板被覆が影響しているようにも想定されるが、電流密度自体は無被覆の供試体S-3と同程度である。また、供試体S-2の各鉄筋ごとにおける電流密度分布の値も無被覆の供試体S-3と同程度である。以上の結果より、SシリーズにおいてもLシリーズと同様に鋼板被覆が支配的な影響を及ぼしているとは考え難い結果となった。

4.5 鉄筋腐食状況

図-8に供試体S-2, S-3の鉄筋腐食面積率を示す。図中には、鉄筋軸方向に分割したP1~P4鉄筋および分割していない鉄筋4本の平均腐食面積率を示した。

S-2, S-3いずれの供試体においても分割鉄筋の腐食面積率は分割していない鉄筋よりも全般的に大きな値を示しているが、理由については判然としない。また、供試体S-3の方がS-2よりも腐食面積率が大きい。これは供試体の促進中性化深さをS-2においては10mm, S-3においては25mmを設定したためと考えられる。

図-9に腐食面積率と同様のパターンにより鉄筋腐食量の分布を示す。分割していない鉄筋の腐食量は供試体S-2で20~

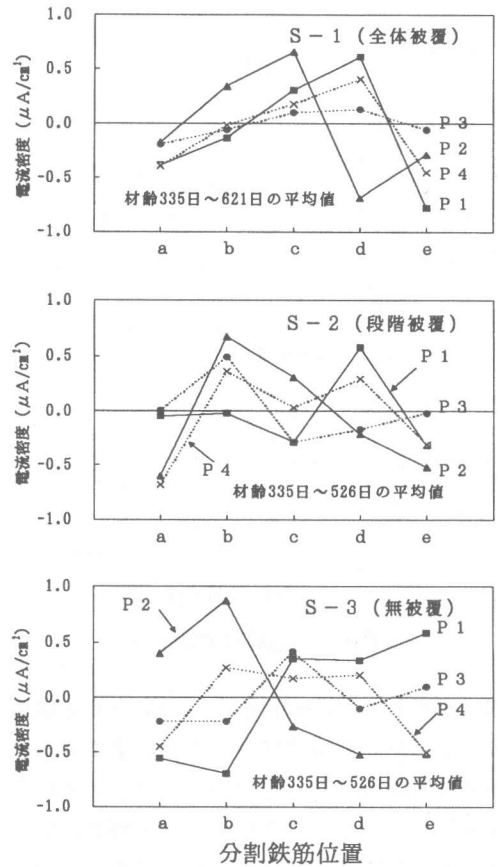


図-7 電流密度分布 (Sシリーズ)

28mg/cm² (平均 24 mg/cm²) , S-3で30~43 mg/cm² (平均 34 mg/cm²) であり、腐食量は分割鉄筋と同程度で、ばらつきも比較的小さい結果となった。なお、腐食量自体は過去に著者らが行った暴露試験(配合, 促進中性化, 塩化物イオン等の条件がほぼ同一の暴露試験)³⁾と同程度であり、概ね妥当な値であると考えられた。

鋼板を被覆した供試体S-2においては、a~eの特定の位置で腐食量が増大する傾向は認められない。また、bあるいはdの位置で腐食量が増大している鉄筋もあるが1本だけであり、無被覆の供試体S-3の結果も参照すればばらつきの範囲と考えられる。以上より、少なくとも供試体S-2に関しては鉄筋腐食量からみても鋼板被覆が鉄筋腐食に支配的な影響を及ぼしていないといえる。

図-9中には、4.4に示した分割鉄筋の

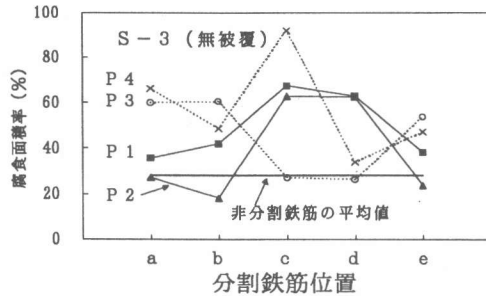
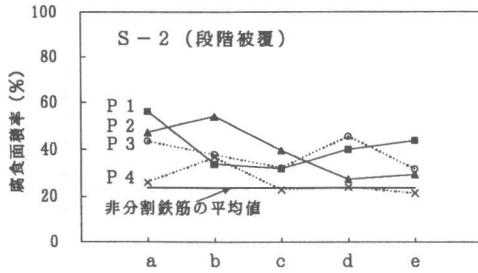


図-8 鉄筋腐食面積率

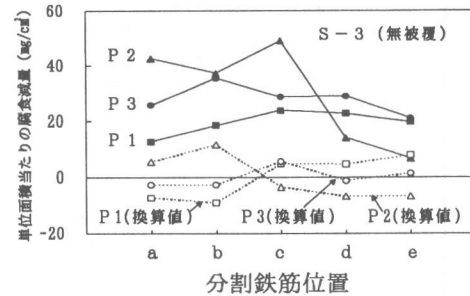
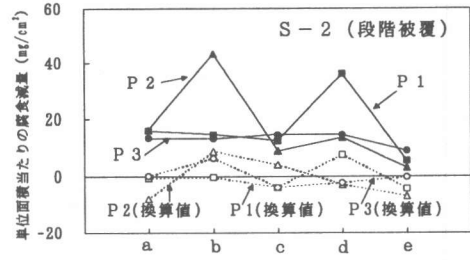


図-9 鉄筋腐食量

電流密度から Farady 則を用いて求めた腐食量も示した。電流密度から求まる腐食量は実測腐食量の 1/5 程度となっている。これは電流密度から求まる腐食量には、各要素内でマイクロセル的に腐食する量が測定結果に反映され難いためである。しかしながら、電流密度から求まる腐食量分布は実測腐食量の分布にある程度類似しており、非破壊試験の評価として用いることが可能であると考えられた。

5. まとめ

上記の試験結果を以下にまとめる。

- ① 促進中性化深さを 10 mm とし、鋼板を被覆した供試体 S-2 における塩化物イオン量の深さ方向の分布は比較的均一であった。一方、促進中性化深さを 25 mm とした無被覆の供試体 S-3 においては、塩化物イオンが表面付近で洗い流されるとともに、中性化により供試体内部で濃縮する傾向がみられた。
- ② 自然電位の経時変化からは、鋼板被覆が影響している傾向を示す供試体 (L-3, S-1) もあったが、分割鉄筋に流入する電流密度の経時変化も併せて検討すると、鋼

板被覆が鉄筋腐食に支配的な影響を及ぼしているとは考え難い結果となった。

- ③ 供試体 S-2, S-3 の鉄筋腐食量を調べた結果、少なくともこの供試体に関しては、鋼板被覆が鉄筋腐食に影響を及ぼしていないことが確認された。

参考文献

- 1) 守分敦郎, 長滝重義, 大即信明, 宮里心一: 断面修復が鉄筋のマクロセル腐食に及ぼす影響, コンクリート構造物の補修工法と電気防食に関するシンポジウム論文報告集, 1994.10
- 2) 小林一輔, 白木亮司, 河合研至: 炭酸化によって引き起こされるコンクリート中の塩化物, 硫黄化合物及びアルカリ化合物の移動と濃縮, コンクリート工学年次論文報告集, 1990.7
- 3) 鳥取誠一, 井上寛美, 神野嘉希, 北後征雄, 宮川豊章: 中性化と内部塩分による鉄筋腐食に対するライニング補修の適用性, コンクリート構造物の補修工法に関するシンポジウム論文報告集, 1996.10