報告　RC 構造物の施工継目部における鉄筋の防錆方法に関する基礎検討

佐々木　尚美[*1]・小林　薫[*2]・山下　修史[*3]

要旨：ＲＣ構造物の施工継目部はひび割れが発生しやすく，雨水等が浸透しやすい箇所であり，鉄筋の早期腐食が懸念される箇所である。このような箇所において，鉄筋の腐食を防ぐことができれば，ＲＣ構造物の長期耐久性の問題も軽減できるのではないかと考える。そこで，異形鉄筋と既往の数種類の防錆材を塗布した鉄筋試験体，および施工継目部を模擬して鉄筋をコンクリートに埋め込んだコンクリート試験体を製作し，鉄筋の腐食促進試験を実施した。そして，腐食状況を確認するとともに，既往の指針等に示されている鉄筋の腐食グレード（腐食度）との比較をおこない，腐食レベルを評価した。

キーワード：鉄筋，錆，腐食グレード，腐食促進，防錆材，防せい剤，塩水

1. はじめに

ＲＣ構造物は，供用期間中に十分な耐力および耐久性を有し，要求される性能を満足しなければならない。ＲＣ構造物の施工においては，限られた作業スペース内での施工となる場合，1 つの構造物を分割して施工（施工時期をずらして施工）することが多い。この場合，構造物に施工継目部（**写真－1**）が生じるが，その部分またはその付近にひび割れが発生し，漏水の原因となることがある。このように，施工継目部は，ひび割れが発生すると空気や水が入りやすく，鉄筋が腐食しやすい環境となり，施工継目部の鉄筋が腐食し，ＲＣ構造物の耐力や耐久性に悪影響を与えてしまう可能性がある。

そこで,ひび割れが発生しやすく，雨水等の影響を受けやすい箇所において，鉄筋の腐食を防ぐことができれば，ＲＣ構造物の長期耐久性の問題も軽減できるのではないかと考え，異形鉄筋と既往の数種類の防錆材を塗布した鉄筋試験体を製作し，鉄筋の腐食の経過を確認する腐食促進試験を実施した。また，施工継目部を模擬し，異形鉄筋と既往の数種類の防錆材を塗布した鉄筋をコンクリートに埋め込んだコンクリート試験体を製作し，同様の腐食促進試験を実施したので，その内容を報告する。

2. 試験方法

一般的な鋼材の腐食促進試験として，JIS Z 2371 に基づき，塩分濃度 5±0.5%の塩水を用い，「塩水噴霧 2 時間→乾燥 4 時間→湿潤 2 時間」を 1 サイクルとする塩水噴霧試験が行われている。今回は，より鋼材を腐食させることを目的とし，次のような試験環境条件を 1 サイクルとし，「塩水に浸漬」と「乾燥」をくり返し行う,腐食促進試験を実施した。

写真－1　施工継目部例

＜試験環境条件：1 サイクル＞

60℃の塩水（6.7%程度）に浸漬・・・4 時間
60℃で乾燥　・・・・・・・・・・・・・4 時間
8 時間

試験体は，通常，ＲＣ構造物に用いている異形鉄筋を基本試験体とし，異形鉄筋に数種類の防錆材を塗布した試験体を製作した。そして，試験体を試験装置に入れ，腐食促進試験を実施した。腐食促進試験の計測サイクルは，0，10，50，100，200，525 サイクルとし，計測項目は，試験体の質量および鉄筋径とした。

3. 試験体概要

試験体は，鉄筋単体の鉄筋試験体と，施工継目部を模擬し，コンクリート内部に鉄筋を埋め込んだコンクリート試験体の 2 タイプとした。

3.1 鉄筋試験体

試験体の概要を**表－1** および**写真－2** に示す。試験体は，1)異形鉄筋，2)鉄筋全体に防錆材を塗布したもの，3)鉄筋半分に防錆材を塗布したものとした。1)は，鉄筋

*1　東日本旅客鉄道（株）　ＪＲ東日本研究開発センター　フロンティアサービス研究所　(正会員)
*2　東日本旅客鉄道（株）　ＪＲ東日本研究開発センター　フロンティアサービス研究所　博（工）　(正会員)
*3　ジェイアール東日本コンサルタンツ（株）　新技術推進部　(非会員)

そのものの発錆状況を確認するため，2)は，防錆材による発錆の違いを確認するため，3)は，防錆材を塗布した箇所と塗布しない箇所との境界における発錆の違いについて確認するためである。また，防錆材については，市販の防錆材料を 4 種類選択して用いた。なお，鉄筋の切断面にはエポキシ樹脂を塗布した。

3.2 コンクリート試験体

コンクリート試験体は，鉄筋コンクリートの施工継目部を模擬した試験体である。試験体概要を**表－2** および**図－1** に示す。**図－1** に示す 2 つのコンクリートブロックの中央の隙間は，厚さ 3.2mm の鋼製プレートを設置し，コンクリート硬化後にプレートを取り除いて設けた。この隙間はコンクリートのひび割れを模しており，通常のひび割れよりも幅の広いものとした。これは，隙間から，より塩水や空気（乾燥時）が入り込む状態が繰り返されることにより，コンクリート内部の鉄筋がより腐食しやすい環境となるようにするためである。また，試験体は，1)鉄筋自体に防錆対策を施した防錆材塗布鉄筋を普通コンクリートに埋め込んだもの，2)コンクリートに防錆機能を持たせた防せい剤混和コンクリートに異形鉄筋を埋め込んだものの 2 タイプとした。

4. 試験結果

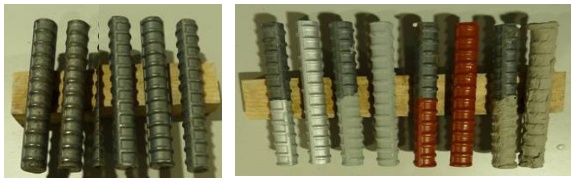
4.1 腐食レベルの評価方法

本試験による鉄筋の腐食状況について比較するためには，各試験体の腐食レベルを一定の基準をもって評価する必要がある。そこで，各試験体の腐食状況について試験結果をまとめるにあたり，日本建築学会の鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断・および補修指針（案）[1] および，国土開発技術センター建築物耐久性向上普及委員会編の鉄筋コンクリート造建築物の耐久性向上技術 [2] を参考にした。これらの参考文献に記載されている記述内容と掲載されている写真を鉄筋の腐食レベルの判断指標として，目視観察による結果をまとめた。それぞれの参考文献に示されている腐食レベル（腐食グレード [1]・腐食度 [2]）の記述内容について，**表－3.1** および**表－3.2** に示す。

表－1　鉄筋試験体の概要

試験体名	内　　容
Ｔ－1～5	SD345　D19 （T-1･2，3～5 は別ロット）
Ａ－1，Ａ－2	防錆材Ａ（亜鉛系： 亜鉛塗膜含有率 77%）塗布
Ｂ－1，Ｂ－2	防錆材Ｂ（亜鉛系： 亜鉛塗膜含有率 96%）塗布
Ｃ－1，Ｃ－2	防錆材Ｃ（亜硝酸リチウム系）
Ｄ－1，Ｄ－2	防錆材Ｄ（エポキシ樹脂系）塗布

ℓ=150mm　　A～D－1：鉄筋の半分に防錆材塗布
A～D－2：鉄筋の全体に防錆材塗布



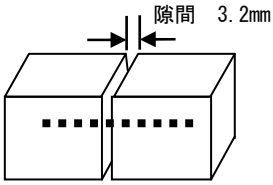
異形鉄筋　　防錆材塗布鉄筋

写真－2　鉄筋試験体

表－2　コンクリート試験体の概要

試験体名	内　　容
ア	異形鉄筋＋普通コンクリート
イ	錆させた異形鉄筋＋普通コンクリート
ウ	防錆材Ａ塗布鉄筋＋普通コンクリート
エ	防錆材Ｂ塗布鉄筋＋普通コンクリート
オ	防錆材Ｃ塗布鉄筋＋普通コンクリート
カ	防錆材Ｄ塗布鉄筋＋普通コンクリート
キ	異形鉄筋＋防錆剤ａ混和コンクリート
ク	異形鉄筋＋防錆剤ｂ混和コンクリート
ケ	異形鉄筋＋防錆剤ｃ混和コンクリート

試験体寸法：100×100×200
D19（コンクリート断面中央に配置）



図－1　コンクリート試験体の概要

表－3.1　腐食グレードの評価指標

腐食グレード*	日本建築学会 [1] による鉄筋腐食評価基準グレード
1	腐食がない状態，または表面にわずかな点錆が生じている状態。
2	表面にさびが広がって生じている状態。
3	点さびがつながって面さびとなり，部分的に浮きさびが生じている状態。
4	浮きさびが広がって生じ，コンクリートにさびが付着し，断面積で 20%以下の欠損を生じている箇所がある状態。
5	厚い層状のさびが広がって生じ，断面積で 20%を超える著しい欠損を生じている箇所がある状態。

＊参考文献に記載されている腐食グレードのローマ数字は，算用数字に置き換えて表記している。

表－3.2　腐食度の評価指標

腐食度*	国土開発技術センター建築物耐久性向上普及委員会[2)]による鉄筋の腐食状況に応じた鉄筋腐食度を分類した例
1	黒皮の状態，または錆は生じていないか全体的に薄い緻密な錆であり，コンクリート面に錆が付着していることはない。
2	部分的に浮き錆があるが，小面積の斑点状態である。
3	断面欠損は目視観察では認められないが，鉄筋の周囲または全長にわたって浮き錆が生じている
4	断面欠損を生じている

＊参考文献に記載されている腐食度のローマ数字は，算用数字に置き換えて表記している。

4.2 鉄筋試験体

4.2.1 防錆材塗布なし鉄筋（試験体Ｔ）

(1) 試験体の腐食状況

試験体の各サイクル時の腐食状況について，**写真－3** に示す。いずれの試験体も 10 サイクル時は，鉄筋ふし部および鉄筋表面にまばらに錆が発生していた。この段階での腐食レベルは，**表－3.1，3.2** の各評価指標と比較すると，腐食グレード 3（腐食度 3）レベルであった。50 サイクル時は，いずれの試験体も黒っぽい錆が多くなり，錆の膨れなどがみられ，鉄筋ふし部の見分けがつきにくくなっていた。この時点で，腐食グレード 5（腐食度 4）をすでに超えていると思われる。100 サイクル時は，鉄筋の表面に黒っぽい錆が増え，錆の膨れやひび割れが発生していた。200 サイクル時は，試験体Ｔ－1･2 は錆の大きな割れが生じ，光沢を帯びた黒色の錆が発生していた。試験体Ｔ－3～5 は，所どころに，表面にいくつもの孔を有する膨れ上がった茶色の錆が発生していた。525 サイクル時は，いずれの試験体も錆が大きく膨張しており，触ると表面の錆がボロボロ落ちた。また，錆には鉄筋軸方向の縦ひび割れが多く発生していた。

(2) 鉄筋の質量変化率

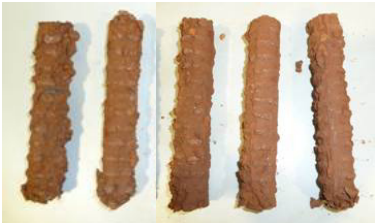
防錆材塗布なし鉄筋を用いた試験体Ｔ－1～5 について，錆を落とさない状態で 60℃乾燥後に測定した各サイクル時の質量から，鉄筋の質量変化率を算出した。質量変化率の算出結果を**図－2** に示す。質量変化率の算出は，0 サイクル時の質量を基準とし，それに対する比率で表している。いずれの試験体もほぼ同じ傾向で質量が増加していることがわかる。また，グラフの傾き（a，b，c）から，初期段階では質量変化率は低く，50→100，100→200，200→525 サイクルの段階で急激に質量が増加していることがわかる。(1)での各サイクル時の腐食レベルの評価を踏まえ，どのサイクルでどの腐食レベル（腐食グレード・腐食度）に達しているかについても合わせて表記した。図に示すように，10 サイクル程度で腐食グレード 3（腐食度 3），50 サイクル程度で腐食グレード 5（腐食度 4）に達している。質量もこれ以降急激に増加している。

10 サイクル時

50 サイクル時

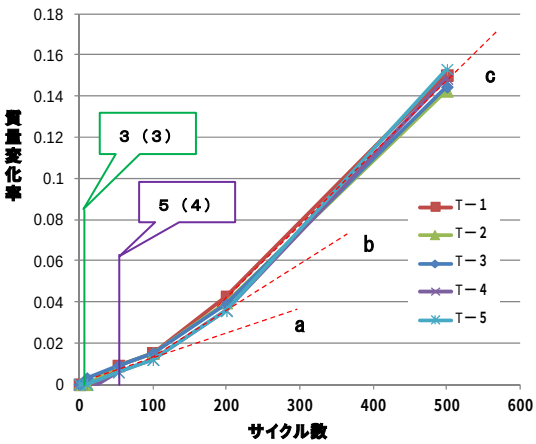
100 サイクル時

200 サイクル時



525 サイクル時

写真－3　試験体Ｔ　各サイクル時の腐食状況



図－2　鉄筋の質量変化率

4.2.2 防錆材塗布あり鉄筋（試験体Ａ～Ｄ）

(1) 試験体の腐食状況

試験体の主なサイクル時の腐食状況について，**写真－4～6** に示す。10 サイクル時では，いずれの試験体も，防錆材を塗布してある箇所は鉄筋ふし部付近に点錆が発生し，防錆材を塗布していない箇所は鉄筋ふし部を中心に錆が発生していた（**写真－4**）。防錆材を塗布した箇所においては，**表－3.1，3.2** の各指標と比較して，腐食グレード 2（腐食度 2）レベルであった。50 サイクル時は，試験体Ａ～Ｃは，鉄筋のふし部を中心に錆が広がっていた（腐食グレード 4（腐食度 3）レベル）。試験体Ｄの塗布側は，他に比べて腐食が小さかった（腐食グレード 2～3（腐食度 2～3）レベル）。また，いずれの試験体も，防錆材塗布側と塗布無し側の境界がはっきり区別できる錆び方だった。防錆材塗布無し側は，試験体Ｔと同様な錆び方だった（**写真－5**，□枠内が塗布側）。 525 サイクル時は，いずれの試験体も錆が膨れて縦ひび割れが発生していた。どの試験体も同じような腐食状態であり，防錆材塗布なし鉄筋試験体Ｔと見た目には大きな違いはなかった。試験体Ｄは錆と一緒に塗料が確認できた（**写真－6**）。

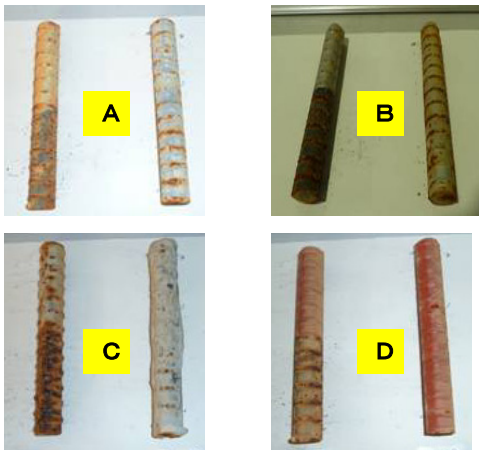
4.2.3 錆落とし後の状況

(1) 錆落とし後の形状

同条件で腐食促進を実施した全鉄筋試験体について，525 サイクル後に約 2 ヶ月気中放置した後，錆を落とした。錆の落とし方（除錆）は，鉄筋表面を鉄ヘラで軽く叩いて落ちる程度の錆を落とし，その後，ワイヤーブラシで軽くこすり，落ちる錆を落とした。除錆後の状況を**写真－7** に示す（後述する鉄筋径残存率を求めるため，鉄筋は切断した状態）。いずれの試験体も，鉄筋のふしは全く無くなっていた。表面はでこぼこしており，鉄筋の軸方向に木の枝のように縦筋が何本も入っているような形状をしていた。いずれの試験体も，見た目には腐食状況に大きな違いは確認できなかった。

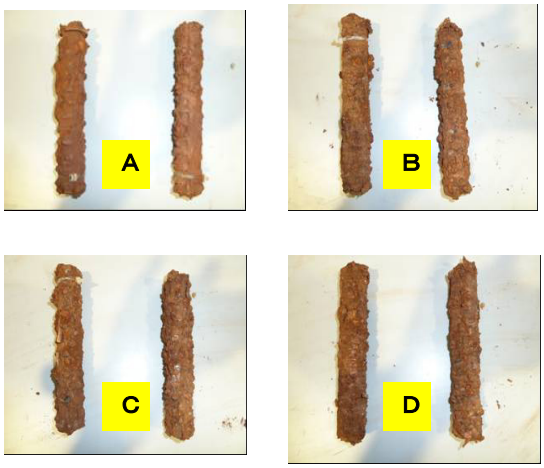
(2) 鉄筋質量残存率

(1)の方法で除錆した鉄筋試験体について，鉄筋質量残存率を求めた。算出方法は，同ロットである試験体Ｔ－1･2 の 0 サイクル時の平均質量を腐食前鉄筋質量（基準）とし，錆を落とした後の鉄筋質量との比率により，鉄筋質量の残存率として算出した。



写真－4　試験体Ａ～Ｄ　10 サイクル時

写真－5　試験体Ａ～Ｄ　50 サイクル時



写真－6　試験体Ａ～Ｄ　525 サイクル時

写真－7　除錆後の鉄筋の状況（左から，「Ｔ，Ａ，Ｂ，Ｃ，Ｄ」－1･2 の順

鉄筋質量残存率の算出結果を**図－3** に示す。防錆材を塗布した試験体は，防錆材を塗布していない試験体に比べ，鉄筋質量残存率が 5～10%程度高くなっている。また，試験体CおよびDでは，防錆材を全体塗布した試験体の方が半分塗布した試験体よりも防錆効果が高くなるという結果を得られた訳ではなかった。

(3) 鉄筋径残存率

鉄筋径についても質量と同様に鉄筋径残存率を算出した。算出にあたり，試験体に用いた SD345 の公称径＝19.1mm[3] を腐食前鉄筋径（基準）とし，除錆後の鉄筋径から，鉄筋径残存率を算出した。鉄筋径残存率の算出結果を**図－4** に，鉄筋の切断面の状況を**写真－8** に示す。鉄筋径の計測値は，錆を落とした鉄筋をカッターで切断し，その切断面において直交する 2 ヶ所で計測した平均値とした。**図－3，4** より，鉄筋の質量と径の残存率は，一部に違いはあるものの，ほぼ同じ傾向であることがわかる。また，**写真-8** より，鉄筋の切断は，カッターでおこなったため一部めくれあがった状態となったが，鉄筋断面の錆び方は均一ではないことがわかる。

4.3 コンクリート試験体

コンクリート試験体の腐食状況について以下に示す。

(1) 0～200 サイクルまで

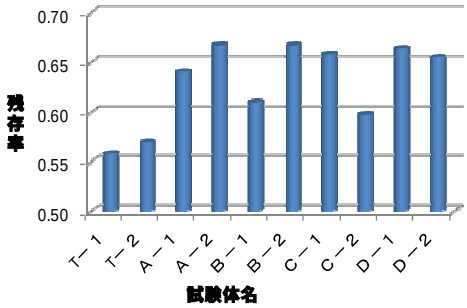
0 サイクルから 525 サイクルまでは，コンクリート試験体の質量の計測と外観変状の目視確認をおこなった。その結果，200 サイクル時までは，外観上，いずれも大きな変化は見られず，錆粉の付着はあるものの，コンクリート自体にひび割れは発生していなかった。

(2) 525 サイクル時

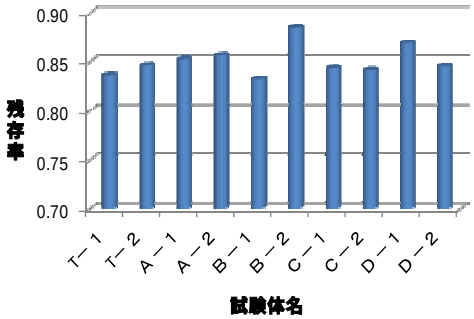
コンクリートに防せい剤を混和したコンクリート試験体は，ひび割れの幅や長さの違いはあるものの，すべてひび割れが発生していた（**写真－9**）。また，コンクリート内部の鉄筋の腐食状況を確認するために，コンクリートを割って，内部の鉄筋を取り出した。取り出した鉄筋の状況について，**写真－10** に示す。コンクリートを割ってみた結果，中央の隙間にはコンクリート打設時のペーストが入り込み，鉄筋部が完全に露出した状態になっていなかったと思われる試験体もあった。隙間の中央部とコンクリート内部での鉄筋の錆び方はそれほど大きな違いは確認できなかった。

(3) 腐食レベルの評価

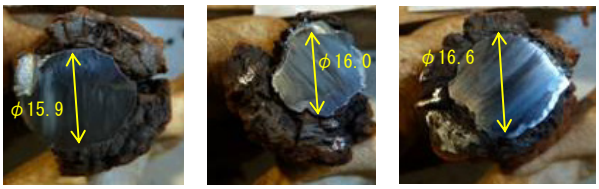
鉄筋試験体と同様に，コンクリート内部に埋め込んだ鉄筋についても，腐食レベルの評価をおこなった。評価の指標は，鉄筋試験体と同じである。コンクリート試験体を割った状態のコンクリート割裂面を**写真－11** に示す。評価は指標とした**表－3.1，3.2** に記載されている記述内容および文献に掲載されている写真 [1)2)]をもとに判定した。**表－3.1** による判定結果は，記述内容との比較



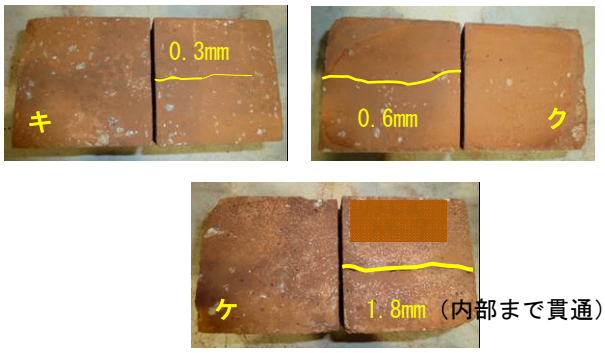
図－3　鉄筋質量の残存率



図－4　鉄筋径の残存率



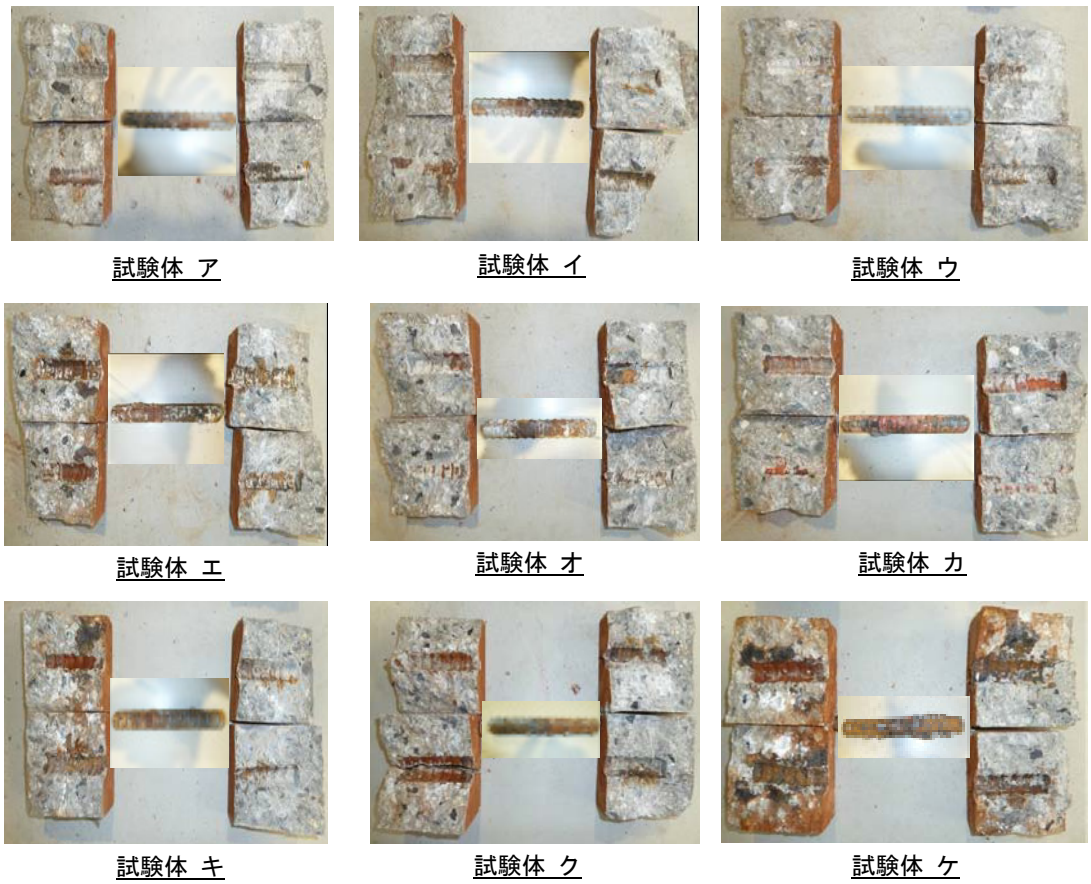
写真－8　鉄筋の切断面



写真－9　ひび割れの発生状況

ア　→　ケ　の順

写真－10　鉄筋コンクリート内部の鉄筋



写真－11　コンクリート試験体の割裂断面

では, 試験体カが腐食グレード 3～4, 写真との比較では, 試験体ア・カ・キが腐食グレード 2 となった。それ以外は記述内容による判定でグレード 4，写真による判定でグレード 3 となった。表－3. 2 による判定結果は，記述内容および写真との比較では，試験体カがともに腐食度 2～3，それ以外は記述内容および写真による判定とも腐食度 3 であった。以上より，コンクリートに埋め込んだ鉄筋については，525 サイクルまで腐食促進を実施した場合，腐食レベルは記述内容比較では 3～4，写真比較では 2～3 レベルであった。今回の試験および腐食レベルの評価方法では，エポキシ樹脂系の防錆材を用いた試験体カのみ，他試験体よりも防錆効果があるという結果となった。

5. まとめ

(1) 鉄筋試験体の防錆材を塗布した試験体は，防錆材を塗布していない試験体に比べ，鉄筋質量残存率が 5～10%程度高くなった。また，試験体CおよびDでは，防錆材を全体塗布した試験体の方が半分塗布した試験体よりも防錆効果が高くなるという結果を得られた訳ではなかった。今回の腐食促進試験の環境条件では，サイクルの早い段階から腐食のレベルが高く，防錆材塗布の有無および塗布境界による錆び方は, 200 サイクル程度までは違いがあったが, 525 サイクル程度では差がなくなっていた。

(2) コンクリート試験体の鉄筋については，525 サイクルまで腐食促進を実施した場合，腐食レベルは記述内容比較では 3～4，写真比較では 2～3 レベルであった。今回の試験および腐食レベルの評価方法では，エポキシ樹脂系の防錆材を用いた試験体カのみ，他試験体よりも防錆効果があるという結果となった。

参考文献

1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針（案）・同解説，2000.12
2) 国土開発技術センター建築物耐久性向上普及委員会編，建築物の耐久性向上シリーズ－建築物構造変Ⅰ－鉄筋コンクリート造建築物の耐久性向上技術，技報堂出版，1986.6
3) 鉄道構造物等設計標準・同解説　コンクリート構造物，2004.4
4) 宇野祐司，高谷哲，中村士郎，山本貴士，宮川豊章：環境の違いが鉄さびの生成プロセスに与える影響に関する一考察，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第 11 巻，pp.105-110，2011.10