

(52) 鋼とコンクリート界面の腐食の発生・進展に関する 基礎的研究

中島章典¹, 倉持弥奈², 出川佑莉³, 磯光夫⁴

¹フェロー会員 宇都宮大学大学院工学研究部 循環生産研究部門 (〒 321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2)

Email: akinorin@cc.utsunomiya-u.ac.jp

²株式会社富貴建設コンサルタンツ 技術第一部設計一課 (〒 321-0934 宇都宮市薬瀬 2-13-26)

³つくば工科高等学校 (〒 305-0861 つくば市谷田部 1818)

⁴正会員 川田工業株式会社 技術研究所 (〒 321-3325 栃木県芳賀郡芳賀町芳賀台 122-1) E-mail: m.iso@kawada.co.jp

本研究では、複合構造内の鋼材とコンクリートの接触面を模擬した要素試験体を用いて、鋼材とコンクリートの接触面（界面）の腐食の発生や進展に関する検討を行った。一般的には腐食が発生しないと考えられている鋼材とコンクリートの付着状態が良好な試験体による設置環境の違いに着目した曝露試験、および、界面の付着状態が異なる試験体を用いた曝露試験を行った。また、試験体の設置環境の湿度が界面のコンクリートの中酸化や鋼板の腐食の進展に及ぼす影響を調べた。その結果、設置環境の違いや鋼材とコンクリートの付着状態が鋼板とコンクリート界面の腐食に及ぼす影響を確認し、また、鋼材とコンクリート界面の腐食進展に関する基礎的考察を行った。

Key Words : *steel-concrete hybrid structure, interface between steel and concrete, corrosion, neutralization, exposure test*

1. はじめに

2007年に国道23号木曾川大橋において、鋼トラス斜材が破断しているのが発見された¹⁾。鋼部材を囲むように打設された床版コンクリートと鋼部材との接触面が激しく腐食したことが原因である。一般に、コンクリートと接触する鋼材はコンクリートの強アルカリ性に接していることから腐食しにくいと考えられていたが、この部分の鋼材とコンクリートの接触面には雨水や酸素などが容易に浸入する腐食環境にあった。

鋼コンクリート複合構造では、鋼材とコンクリートの接触面は必ず存在するが、鋼材とコンクリートの接触面の付着状態は、鋼材とコンクリートの配置やコンクリートの打設状況の影響を受け、接触面には雨水や酸素などが浸入できる隙間が生じている場合もあると考えられる。

このような観点から、貝沼ら²⁾は鋼板の一部をコンクリートで囲んだモデル供試体を用いて、コンクリート境界部における鋼構造部材の腐食挙動を促進試験から検討し、境界部鋼材の腐食挙動の評価、予測法を提案している。一方、小野ら³⁾は波形鋼板ウェブ橋の鋼板ウェブがコンクリート下床版に埋め込まれる部分を模擬した要素試験を行い、シーリング材の有無、鋼板とコンクリートの付着、鋼板の塗装が接合部の腐食耐久性に及ぼす影響を検討している。そして、境界部へのシーリング材設置や接触面内部への塗装の有効性を確

認している。

本研究では、複合構造内の鋼材とコンクリートの接触面を模擬した要素試験体を作製し、鋼材とコンクリートの接触面の腐食の発生や進展に関する基礎的検討を行った。ここでは、要素試験体の設置環境の差異、鋼板とコンクリートの接触面の付着の影響、設置環境の湿度などを変えた曝露試験を行った。そして、これらの結果を踏まえて、鋼材とコンクリートの接触面における鋼材の腐食の発生、進展について考察を行った。

2. 異なる設置環境における曝露試験

(1) 試験概要

まず、複合構造内の鋼材とコンクリートの接触面を模擬した要素試験体を用いて、接触面の錆の発生や進展の状況を確認するために、3種類の異なる環境に一定期間設置した曝露試験を行った。

作製した試験体の平面と側面の状況を図-1に示す。大きさ200×200mm、厚さ3.2mmの鋼板を型枠の底面に敷き、その上から厚さ100mmのコンクリートを打設することで試験体を作製した。コンクリートに接する鋼板表面の黒皮はディスクグラインダ（粒度36番）を用いて除去し、また、鋼板がコンクリートから容易にはずれないようにするために図-1のように鋼板の四方の角に直径5mm、高さ15mmのボルトを取り付け

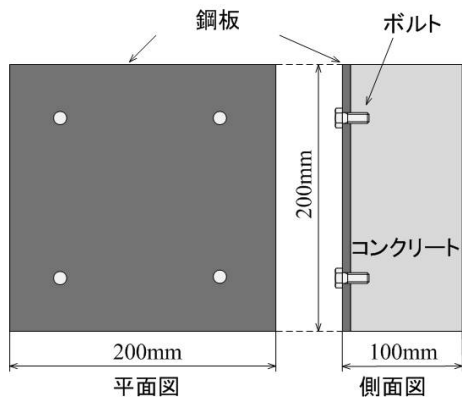


図-1 要素試験体（シリーズ1）

た。この試験体をシリーズ1と呼ぶ。

試験体の設置環境は以下の3つとし、鋼板とコンクリートの接触面が地面と垂直になるように試験体をそれぞれの環境に設置した。

1. 実験室乾燥状態：実験室内で通常の温度、湿度の状態に設置する。
2. 屋外暴露状態：屋外に設置し、天候の影響を受ける。
3. 定期湿潤状態：実験室内に設置し、定期的に（週に1度約3時間）水道水に浸す。

暴露期間は最大2年間とし、それぞれの環境に合計12体の試験体を設置し、コンクリートを打設してから、90日、180日、1年、2年後にそれぞれの設置環境で3体ずつの試験体の鋼板をコンクリートから外して接触面の腐食状況などを確認した。

なお、この試験で用いたコンクリートの材齢28日標準養生の圧縮強度は 23.4N/mm^2 であり、鋼板の材質はSS400である。

(2) 試験結果

写真-1に、コンクリート打設から90日、180日、1年、2年後に、それぞれの環境に設置した試験体から取り外した鋼板のコンクリートとの接触面の腐食状況を示す。それぞれの設置環境において3体ずつの試験体の鋼板とコンクリートを取り外して接触面の状況を確認しているが、写真-1にはその中の典型的な1体の状況を示している。なお、鋼板を取り外す際には、4本のボルトを取り外しても鋼板はコンクリートブロックから離れない状況であり、鋼板の端部をハンマーで打撃することによって取り外すことができた。つまり、鋼板とコンクリートの接触面には付着が働いている状況であった。これらの写真から、屋外暴露状態および定期湿潤状態にあった試験体の鋼板の腐食状況は時間の経過とともに広がっている傾向が見られる。つまり、鋼板とコンクリートの付着が良好であっても試験体の設置環境に腐食因子が存在すれば、両者の接触面の鋼板には腐食が生じ、時間の経過とともに腐食が接触面の

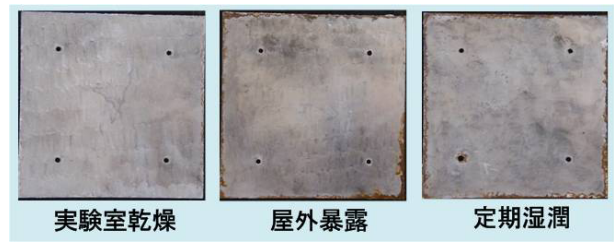


写真-1-a 90日後

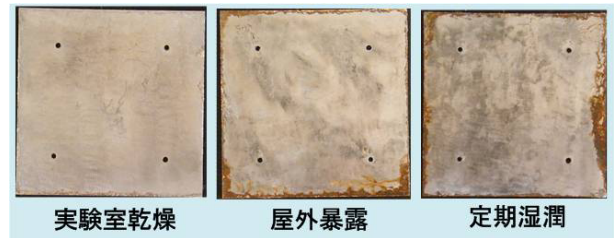


写真-1-b 180日後

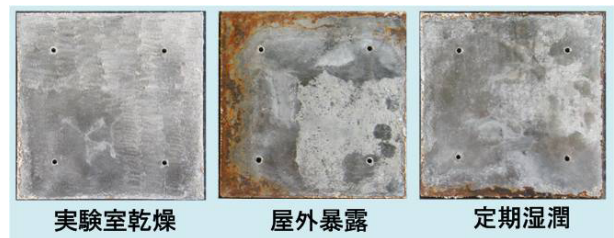


写真-1-c 1年後

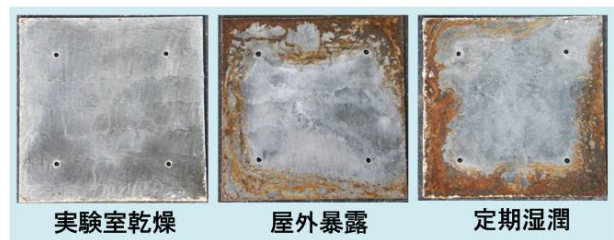


写真-1-d 2年後

写真-1 接触面の鋼板の腐食状況（設置環境の影響）

内部に進展することがわかる。

これに対して、実験室乾燥状態にあった試験体の2年程度の暴露期間では、ほとんど接触面の鋼板の腐食領域が広がっていない。この理由は、実験室乾燥状態では、鋼板とコンクリートの接触面に侵入する腐食因子である水分が鋼板の接触面を腐食させるほど存在しないためと考えられる。

3. 接触面の付着の有無に着目した暴露試験

(1) 試験概要

ここでは、鋼板とコンクリートの接触面の付着の程度が、接触面の鋼板の腐食に及ぼす影響を確認するた

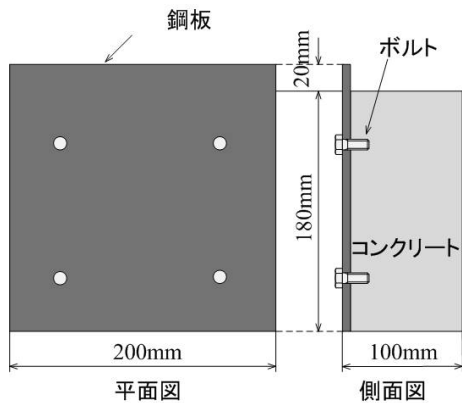


図-2 要素試験体 (シリーズ2)

めに、鋼板とコンクリートの接触面の付着の程度が異なる試験体を作製して暴露試験を行った。この試験に用いた試験体をシリーズ2の試験体と呼ぶ。

シリーズ2の試験体も基本的にシリーズ1の試験体とほぼ同様の方法で作製している。ただし、図-2に示すように鋼板は200×200mmの正方形で、板厚3.2mmでありシリーズ1と同じであるが、コンクリートブロックの1辺を鋼板から20mmだけ小さく作製している。これは、鋼板とコンクリートの接触面の腐食の程度と、外面に露出した鋼板の腐食の程度を比較するためである。また、作製した試験体の半分の試験体では、打設から1ヵ月後に、試験体の鋼板をコンクリートから一度取り外し、再度ボルトを締め付けるあるいは外部から拘束を与えることによって鋼板とコンクリートを接触させた。しかし、この場合、鋼板とコンクリートに付着はない状態になっており、鋼板とコンクリートの隙間は、隙間ゲージで計測したところ0.3~0.5mm程度になっていた。

これらの試験体を実験室乾燥状態および屋外暴露状態に設置し、設置環境および鋼板とコンクリートの付着の程度の違いが接触面の鋼板の腐食の進展状況に及ぼす影響を調べた。また、接触面のコンクリートにフェノールフタレイン液（濃度1%）を散布することによって、接触面コンクリートの中性化の進展状況を確認した。

暴露期間は最大2年間とし、鋼板とコンクリートの接触面に付着のある試験体と付着のない試験体を合計24体ずつを実験室乾燥状態および屋外暴露状態に設置した。これまで、コンクリートを打設してから、90日、180日、1年後に付着の有無およびそれぞれの設置環境で3体ずつの試験体の鋼板をコンクリートから取り外して接触面の腐食状況などを確認した。

なお、材齢28日標準養生のコンクリートの圧縮強度は29.4N/mm²であり、鋼板の材質はSS400である。

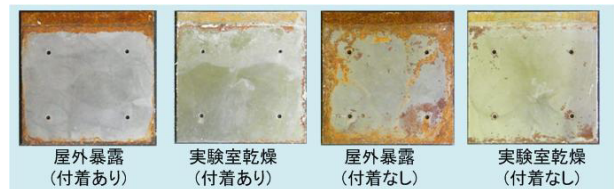


写真-2-a 90日後

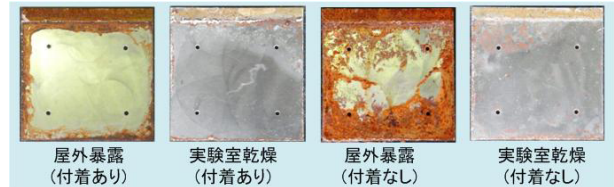


写真-2-b 180日後

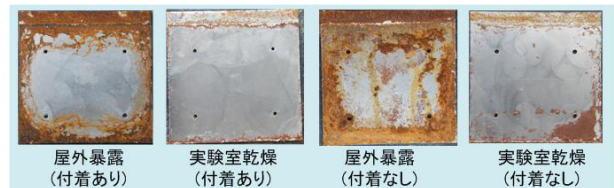


写真-2-c 1年後

写真-2 接触面の鋼板の腐食状況（付着の影響）

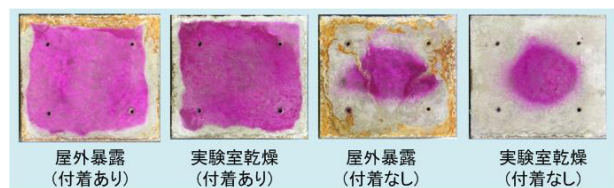


写真-3-a 90日後

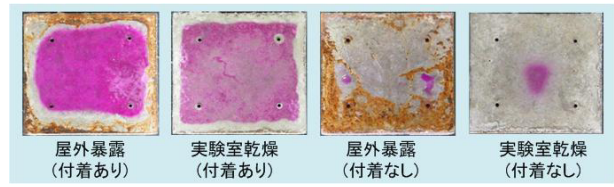


写真-3-b 180日後

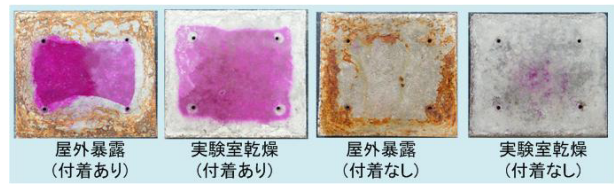


写真-3-c 1年後

写真-3 接触面コンクリートの中性化の状況（付着の影響）

(2) 試験結果

コンクリート打設から90日、180日、1年後のコンクリートとの接触面の鋼板の腐食状況を写真-2に、接触面のコンクリートの中性化の進展状況を写真-3に示す。ここでも、それぞれの設置環境において付着の有

無とも3体ずつの試験体の鋼板をコンクリートから取り外して接触面の状況を確認しているが、写真-2、写真-3にはその中の典型的な1体の鋼板と対応するコンクリートの接触面の状況を示している。

写真-2から、鋼板とコンクリートの接触面に付着がある場合には、シリーズ1と同様に接触面の鋼板の腐食は経過時間とともに各辺の縁から内部に向かって進展している。しかし、鋼板とコンクリートの接触面の付着がない場合には、各辺からの腐食の進展が著しく、180日後には接触面の鋼板の大部分が腐食している状況である。

なお、屋外暴露状態で付着がある場合に着目すると、コンクリートと接していない鋼板上部（上端より2cmまでの部分）とそれより下側のコンクリートに接している部分の鋼板の腐食状態には大きな違いは認められない。つまり、コンクリートに接している鋼板部分がより激しく腐食する隙間腐食⁴⁾の状況は顕著には認められない。

一方、接触面のコンクリートにフェノールフタレイン液を散布した状況の写真-3から、表面の色が赤色に変化しているところはアルカリ性は強いが、表面の色が赤くならないところはアルカリ性が低下していることがわかる。この理由は、接触面の端部から侵入したCO₂によって接触面のコンクリートの表面が中性化したためであると考えられる。

鋼板とコンクリートの接触面に付着がある場合には、時間の経過とともに中性化範囲が広がっており、特に、屋外暴露状態に設置した場合の方が、実験室乾燥状態に設置した場合よりも中性化範囲の広がり大きい。これに対して、鋼板とコンクリートの接触面の付着がない場合には、さらに中性化範囲の広がりが著しく、180日および1年後には接触面のほとんど全面が赤くならず中性化していることがわかる。

写真-3に示した接触面のコンクリートの中性化の状況を、写真-2に示した接触面の鋼板の腐食の状況と対応させて考察すると、鋼板が腐食している範囲に対応するコンクリートの接触面は中性化しており、コンクリートの接触面が中性化していないところの鋼板の接触面は腐食していないことがわかる。つまり、接触面の鋼板に腐食が生じるのは、対応するコンクリートの接触面が中性化したためであり、接触面にCO₂が侵入してコンクリートの接触面を中性化させ、そこに、水や酸素などの腐食因子が侵入したためであると考えられる。ただし、実験室乾燥状態に設置した付着がない試験体では、コンクリートの接触面の中性化は全面的に生じたが、腐食因子である水の侵入が少ないために鋼板の接触面はあまり腐食しなかったものと考えられる。

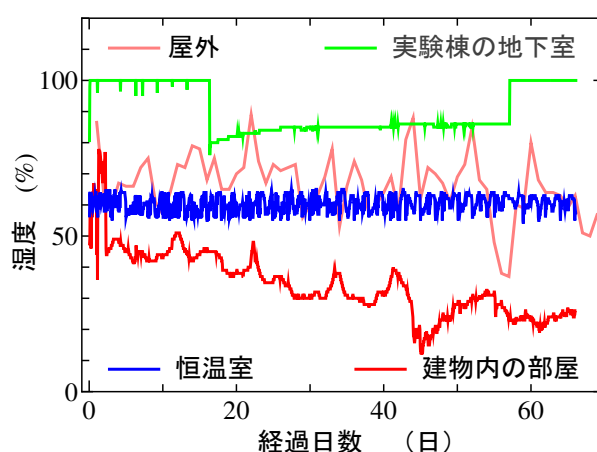


図-3 設置環境の湿度変化

4. 設置環境の湿度の差異に着目した試験

(1) 試験概要

シリーズ2と同形状で付着がある試験体を、湿度が40%（建物内の部屋）、60%（恒温室）、80%（実験棟の地下室）程度の3つの環境と屋外に設置した。そして、設置環境の湿度が鋼板とコンクリートの接触面のコンクリートの中性化に及ぼす影響を確認した。なお、試験体からの鋼板の取り外しは打設から80日後に行い、中性化の進展状況を調べた。コンクリートの打設後から鋼板を取り外した日までの設置環境ごとの湿度と経過日数の関係を図-3に示す。この図から、建物内の部屋では、湿度の変化は大きい、平均湿度は40%を下回っている。恒温室では湿度は安定して60%程度である。また、実験棟の地下室の平均湿度は80%を越えていることがわかる。さらに、この時期の屋外の平均湿度は60-70%程度であり、恒温室と同程度である。

(2) 試験結果

上述のような湿度が異なる環境に設置した試験体および屋外暴露状態の試験体の接触面コンクリートの中性化の進展状況を写真-4に示す。湿度が40%（建物内の部屋）、60%（恒温室）、80%（実験棟の地下室）程度の設置環境では、湿度が高くなるほど中性化範囲が小さくなっており、湿度と中性化範囲は大きく関係していると考えられる。湿度が低いほどコンクリートの乾燥収縮が進行するため、鋼板とコンクリートの接触面端部に有意な隙間が生じ、そこにCO₂が侵入して中性化が進展すると考えられる。これに対して、湿度が高い実験棟の地下室に置いた試験体では、中性化範囲はほとんど見られない。

この試験では、鋼板を取り外すまでの期間はあまり長くないが、湿度が接触面の中性化に及ぼす影響をある程度把握できたと考えている。

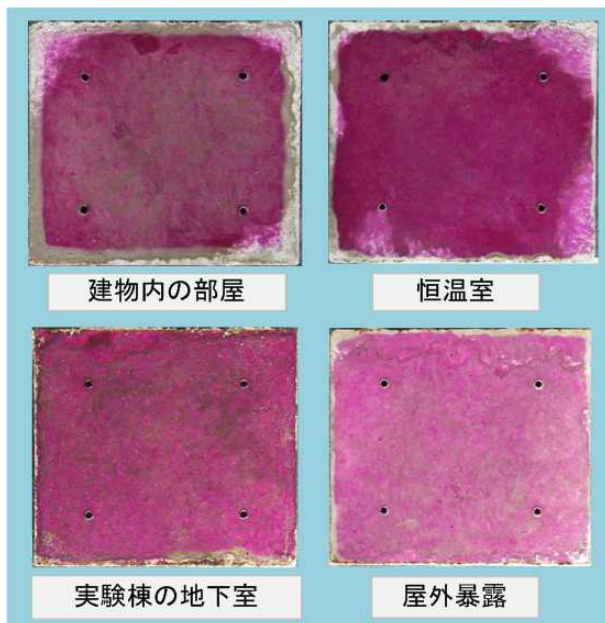


写真-4 接触面コンクリートの中性化の進行状況（湿度の影響）

5. 浸漬試験

(1) 試験概要

鋼板とコンクリートの接触面への水の侵入を確認するために、シリーズ1の試験体と同形状の試験体を用いて、図-4のように鋼板とコンクリートの接触面およびコンクリート内部に2本のリード線の先端を離して吸水紙に包み埋め込んだ試験体を3体作製した。コンクリートを打設してから90日後にこの試験体を水に浸し、電池を介して接触面の電圧の変化を約8日間10分間隔でロガーにより計測した。試験体内に水が侵入し、吸水紙が水を吸い込むと先端を離れたリード線に電気が流れるので、その電圧を計測することで試験体内への水の侵入を検知することができる。

(2) 試験結果

測定した試験体3体の電圧の変化を図-5に示す。なお、1つの試験体ではコンクリート内部の計測に失敗した。横軸は試験体を水に浸してから経過日数、縦軸は測定した電圧の値を表している。また、実線は鋼板とコンクリートの接触面の位置の電圧変化を、破線はコンクリート内部の電圧変化を示している。図-5から、すべての試験体において接触面の電圧の値が水に浸すとともに急激に上昇し、1日後には1V程度の値になっている。これに対して、コンクリート内部の電圧の値は徐々に上昇しており、接触面とは異なった傾向を示している。以上のことから鋼板とコンクリートの接触面には、両者の間に付着があったとしても、コンクリート内部よりも水の侵入が早く起こることがわか

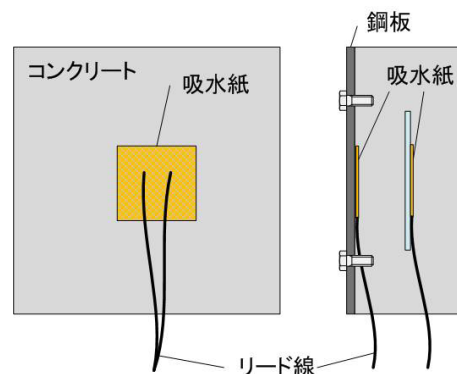


図-4 浸漬試験の要素試験体

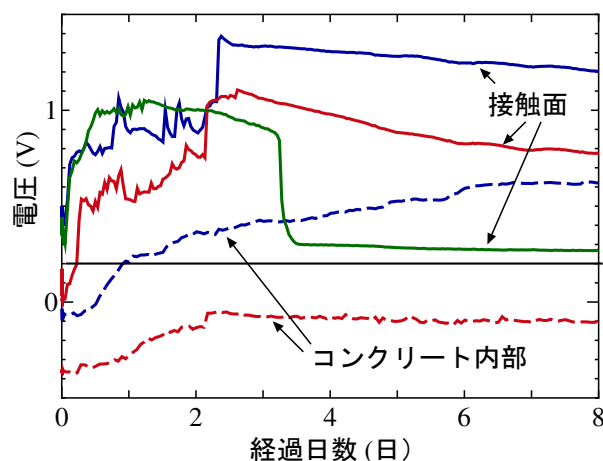


図-5 接触面とコンクリート内部の電圧の変化

る。したがって、接触面がアルカリ性を保持していない場合には、接触面が腐食する可能性があると言える。

6. 腐食の発生、進展過程の推定

以上のような鋼板とコンクリートの接触面の腐食および中性化に関する暴露試験を総合して考察することにより、接触面の鋼板の腐食の発生、進展過程を推定した。

鋼板とコンクリートの接触面の付着状態が良好な試験体においても、コンクリートの乾燥収縮によって鋼板とコンクリートの接触面の端部に CO_2 が侵入するほどの隙間が生じ、その隙間が生じている範囲のコンクリートの接触面は中性化する。そのため、接触面のコンクリートが中性化した範囲に対応する鋼板の表面の不動態皮膜は破壊されやすくなる⁵⁾。さらに、その部分に水や酸素などの腐食因子が侵入することで、接触面の鋼板に腐食が生じる。そして、接触面のコンクリートの中性化範囲の広がりに対応して、接触面の鋼板の腐食が進展するものと考えられる。

鋼板とコンクリートの接触面に付着のない試験体では、鋼板とコンクリートの接触面には初めから有意な隙間が存在しており、接触面のコンクリートは内部ま

で中性化し、結果的に、腐食因子となる水や酸素が容易に侵入して鋼板が腐食すると考えられる。

したがって、鋼板とコンクリートの接触面の付着が十分でない部位では、接触面の鋼板に塗装などの防食をしておく必要があると考えられる。また、鋼板とコンクリートの接触面の付着が良好である部位においても、接触面端部からある程度の範囲には防食を施すか、接触面端部にシール材を確実に設置することが必要であると考えられる。

7. おわりに

本研究では、複合構造内の鋼材とコンクリートの接触面を模擬した要素試験体を作製し、鋼材とコンクリートの接触面の腐食の発生や進展に関する基礎的検討を行った。ここでは、要素試験体の設置環境の差異、鋼板とコンクリートの接触面の付着の影響、設置環境の湿度などを変えた暴露試験を行った。そして、これらの結果を踏まえて、鋼材とコンクリートの接触面の鋼材の腐食の発生、進展を考察した。

本研究の実験研究を通して得られた知見を以下にまとめると。

1. 鋼板とコンクリートの接触面に付着があっても、コンクリートの打設から 90 日程度で、接触面の鋼板に腐食が生じ、暴露期間が長くなるにつれて腐食範囲は広がる。この場合、屋外暴露状態の試験体の接触面の腐食の広がりが最も大きく、実験室乾燥状態の試験体の接触面の腐食の広がりはあまり大きくない。この理由は、前者では水、酸素などの腐食因子が豊富なものに対して、後者では水の侵入が少ないからであると考えられる。
2. 鋼板とコンクリートの接触面に付着がない場合には、接触面に CO_2 や水、酸素の腐食因子が容易に侵入するため、接触面の鋼板は容易に腐食する。
3. 鋼板とコンクリートの接触面に良好な付着が存在

する試験体を、コンクリート打設から約 80 日間、湿度の異なる環境に設置し、接触面のコンクリートの中性化範囲を調べたところ、湿度が低い環境に設置した場合ほど、中性化範囲は広くなることを確認した。

4. コンクリートの打設から 90 日程度で鋼板とコンクリートの接触面の端部を除いた範囲には、良好な付着があっても接触面には水が侵入する。そして、接触面への水の侵入はコンクリート内部よりも早いことを確認した。
5. 鋼板とコンクリートの接触面の付着状態が良好な試験体においても、コンクリートの乾燥収縮によって鋼板とコンクリートの接触面の端部に CO_2 が侵入するほどの隙間が生じ、その隙間が生じている範囲のコンクリートの接触面は中性化する。そのため、コンクリートの接触面が中性化した範囲に対応する鋼板の表面の不動態皮膜は破壊されやすくなる。さらに、その部分に水や酸素などの腐食因子が侵入することで、接触面の鋼板に腐食が生じ、接触面のコンクリートの中性化範囲の広がりに対応して、接触面の鋼板の腐食が進展するものと考えられる。

参考文献

- 1) 加藤光男：木曾川大橋が破断した理由（維持管理時代への備え方）：日経コンストラクション，2007.7.
- 2) 貝沼重信，細見直史，金仁泰，伊藤義人：鋼構造部材のコンクリート境界部における経時的な腐食挙動に関する研究，土木学会論文集，No.780/I-70，pp.97-114，2005.1.
- 3) 小野聖久，大城壮司，桜田道博，大浦隆：波形鋼板ウェブ橋における埋込み接合部の耐久性の検討，コンクリート工学，テクニカルレポート，Vol.44，No.8，pp.23-29，2006.8.
- 4) 杉本克久：金属腐食工学，材料学シリーズ：内田老鶴圃，2009.3.
- 5) 和泉意登志，喜多達夫，前田照信：中性化，コンクリート構造物の耐久性シリーズ：技報堂出版，1986.8.

Fundamental study on generation and development of interface corrosion between steel and concrete

Akinori Nakajima, Mina Kuramochi, Yuri Degawa and Mitsuo Iso

In this paper, generation and development of the interface corrosion between steel and concrete are investigated using the element test specimen which simulates the actual interface condition of the hybrid structures. The two types of element exposure tests are conducted, that is, the test focusing on the effect of the different environment of corrosion condition, and the test focusing on the effect of the bond between steel and concrete. Moreover, the effect of humidity on the interface neutralization and corrosion is investigated. As a result, the mechanism of generation and development of the interface corrosion between steel and concrete is predicted based on the experimental data.