

かぶりコンクリートの初期欠陥が鋼材腐食促進物質の侵入に及ぼす影響

コンクリート研究室 藤田 徹
指導教官 下村 匠

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造では、配合において単位水量が比較的大きく設定されたコンクリートを打設するような場合に、ブリーディングの発生方向に対して直交方向に配置されている鉄筋の下部において、ブリーディング水の上昇に起因した連続的な空隙を含む物質透過抵抗性の低い緻密でない層が形成され、鉄筋に沿った腐食促進物質の移動を容易にする可能性があると考えられる。

本研究では、ブリーディングの発生方向に対して直交方向に配置されている鉄筋の下部に形成される恐れがある、ブリーディングに起因した物質透過抵抗性の低い緻密でない鉄筋近傍コンクリートの層が、鉄筋腐食促進物質の侵入および鉄筋腐食に及ぼす影響を検討することを目的とし、実験および数値解析を行った。

2. 促進暴露試験

(1) 実験供試体

図 1 に供試体形状および寸法を示す。配筋方向を、鉄筋がブリーディングの発生方向に対して直交方向に配置されている横打ちと、鉄筋がブリーディングの発生方向に対して平行方向に配置されている縦打ちの 2 種類とした。実験ケースは、水セメント比を 60%、単位水量を 175kg/m^3 とした配合のコンクリートを用いて、縦打ちおよび横打ちで各 1 体ずつとした。養生終了後、

4 本のひび割れを導入した。ひび割れ幅は、中央 2 箇所を許容ひび割れ幅の 0.2mm 以上に、両端 2 箇所を許容ひび割れ幅以下に制御した。塩水がひび割れ開口部のあるかぶり面だけに降りかかるよう、暴露面以外の面を表面塗膜した。

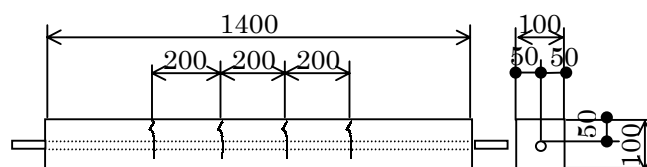


図 1 供試体形状、寸法

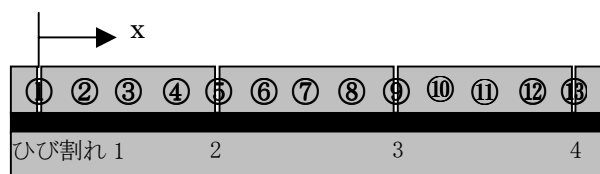


図 2 コンクリート粉末体採取箇所

(2) 実験概要

環境条件として、海塩粒子を含む波しぶきがコンクリート構造物に直接かかるような海岸線を想定し、腐食性環境を模擬的に再現した条件下で屋外促進暴露試験を行なった。海水と同程度の塩分濃度である 3% 食塩水を 3 時間間隔で噴霧することで乾湿繰り返しを再現し、71 日間行なった。

試験終了後、ドリルを用いて供試体をはった。暴露したコンクリート表面から深さ約 3cm のところおよび鉄筋位置について、ひび割れ箇所およびひび割れ間隔を 3 等分する箇所の計 13 箇所ずつ、各 1 体計 26 箇所分のコンクリート粉末体を採取し

た. 図 2 にコンクリート粉末体採取箇所を示す. 図 2 のコンクリート粉末体採取箇所に付けられている番号は, 実験結果で示すグラフの x 軸に対応している.

(3) 実験結果

a) 塩化物イオン濃度の軸方向分布

図 3 はかぶり中間部および鉄筋位置における塩化物イオン濃度の軸方向分布を配筋方向で比較したものである. いずれも塩化物イオン濃度はひび割れ位置で高い. このことから, ひび割れは塩化物イオンの主たる侵入経路と言える.

縦打ちに関しては, かぶり中間部において, ひび割れ位置の塩化物イオン濃度のみが高いのに対し, ひび割れ間箇所の塩化物イオン濃度はいずれも低く, ほとんど差がない. 塩化物イオンはひび割れを浸透しているが, その周囲のコンクリート中にはほとんど浸透していないものと考えられる. しかし, 鉄筋位置では, 塩化物イオン濃度はひび割れ位置から遠ざかるにつれて緩やかに低くなっている. ひび割れを浸透してきた塩化物イオンが, その周囲のコンクリート中に浸透しているものと考えられる. 以上のことをまとめると, ひび割れに侵入してきた塩化物イオンは, 鉄筋表面に到達するまで周囲のコンクリートに浸透することなく, ひび割れの鉄筋位置に集中する. その結果, 許容を超えた塩化物イオンが周囲のコンクリートに浸透する. 故に, 鉄筋がブリーディングの発生方向に配置されている場合は, コンクリートの物質透過抵抗性が比較的優れていると推測される.

一方, 横打ちに関しては, かぶり中間部において, 塩化物イオン濃度が縦打ちのもの

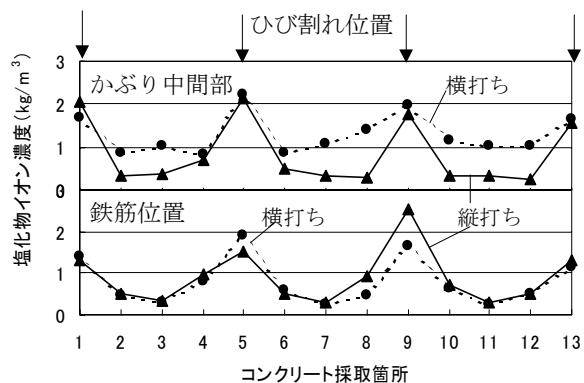


図 3 塩化物イオン濃度の軸方向分布

のより全体的に高くなっており, ひび割れ位置とひび割れ間箇所との塩化物イオン濃度の差も縦打ちの場合ほど大きくない. 塩化物イオンがひび割れ面およびコンクリート表面の両方からコンクリート中に容易に浸透しているものと考えられる. このことから, 横打ちの場合は, ブリーディングがそれほど生じなかったと推測される. ブリーディングの発生規模が小さくなったことにより, コンクリート中の水分があまり抜けずに, コンクリート硬化後に空隙となってしまったのである.

この推測を踏まえると, 鉄筋位置における分布は当然の結果である. ひび割れに侵入した塩化物イオンが, 鉄筋表面に到達する過程において, その多くを周囲のコンクリートへの浸透に費やした結果, 鉄筋位置における塩化物イオン濃度分布は, 縦打ちの分布とあまり変わらなくなった. しかし, より長期にわたって試験を行ったならば, ひび割れ間箇所における塩化物イオン濃度は, コンクリート表面からの塩化物イオンの侵入による影響を受け, 高まると予測される.

以上の結果は, 必ずしも本研究における

仮説と異なっているわけではなく、仮説をある程度実証したものであると言える。ただし、ブリーディングの影響が仮説通りに現れなかったのは、本実験において横打ち供試体の高さが適切に確保されていなかったことが原因と考えられる。

b) 内部鉄筋の腐食状況

腐食はかぶり(暴露)面側で比較的多く発生していた。ひび割れがかぶり(暴露)面に存在していたことからすれば当然の結果であると考えられる。視覚的に確認することのできる鉄筋の腐食状況は、ひび割れ幅が大きい箇所で激しいという傾向が認められたため、ひび割れ幅の影響を受けると言える。しかし、暴露期間が短かったため、ブリーディングによるかぶりコンクリートの不均一性が鉄筋腐食に及ぼす影響を、明確に見出すことはできず、マクロセル腐食ならびにマイクロセル腐食の判定までには至らなかった。

4. インク浸透試験

(1) 実験目的

促進暴露試験から、配筋方向の違いにより、かぶりコンクリートに及ぼすブリーディングの影響が異なることを確認することはできた。しかし、ブリーディングの発生方向に対して直交方向に配置されている鉄筋の下部に、物質透過抵抗性の低い層が形成され、鋼材腐食促進物質の侵入および鉄筋の腐食にどのような影響が及ぶのかについては、明確に見出すことができなかった。そこで続いて、コンクリートの品質や配筋方向に起因して、かぶりコンクリートに不均一性は生ずるのかについて焦点を当てて

検討するために、インク浸透試験を行った。

(2) 実験供試体

図4に供試体形状および寸法を示す。促進暴露試験における供試体形状の問題点を改善すべく、横打ち供試体の高さを大きくした。供試体にはろ紙を5枚重ねたものを、かぶり部に2ヶ所設置し、模擬ひび割れとした。ブリーディングによる影響を検討するために、実験ケースを、水セメント比に関しては40%および60%の2種類、供試体の配筋方向に関しては、鉄筋がブリーディングの発生方向に対して平行方向に配置されている縦打ち、および鉄筋がブリーディングの発生方向に対して直交方向に配置されている横打ちの2種類とし、計4体打設を行った。供試体は、打設後材齢2日で脱型し、14日間湿布養生した。

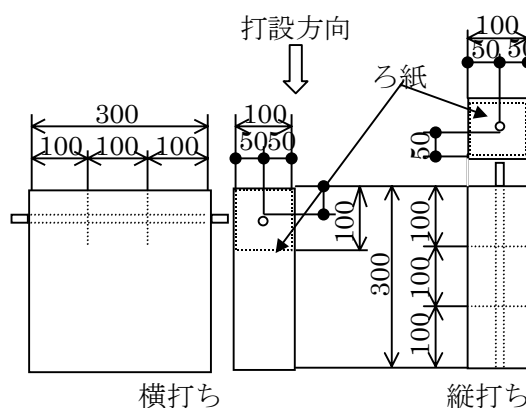


図4 供試体形状、寸法

(3) 実験概要

供試体を7日間原液10倍希釈のインク溶液に浸した。その後、供試体を溶液から取り出し、1日乾燥させた後、圧縮試験機を用いて割裂した。割裂断面を写真で記録した。

(4) 実験結果

配筋方向の違いによるインクの浸透状態の違いは明確であった。

横打ちの場合は、インクが鉄筋に沿って浸透した痕跡が認められた。このことから、鉄筋周囲には物質透過抵抗性の低いコンクリート層が形成され、外部からの侵入物質はそこを浸透経路の一つとする可能性があることが認められた。また、ひび割れ位置から遠ざかるにつれてインクの浸透量が少なくなっていた。これは、促進暴露試験における塩化物イオン濃度の軸方向分布の実験結果および後述する解析結果と同様の傾向であった。

一方、縦打ちの場合は、横打ちの場合のようにインクが鉄筋に沿って浸透した痕跡がないことから、ブリーディングが鉄筋周囲のコンクリート層に及ぼす影響はなく、かぶり全体において均等質なコンクリートが形成されていることが認められた。

以上のことから、ブリーディングの発生方向に対して直交方向に配置されている鉄筋の下部には、ブリーディングによって物質透過抵抗性の低い層が形成されることを確認することができた。

コンクリートの品質によるインクの浸透状況の違いに関しては、横打ちの場合において確認することができた。W/C=40%の場合はひび割れ間の中央までインクが浸透した痕跡がなかったのに対して、W/C=60%の場合は鉄筋の全域にわたってインクが付着していた。このことから、水セメント比が小さいほどコンクリートの物質透過抵抗性が高くなることが認められた。よって、水セメント比や単位水量は、鉄筋近傍のコンクリート層の物質透過抵抗性、外部から

侵入する鋼材腐食物質の量、鉄筋の腐食に影響を及ぼすと言える。

インク浸透試験から、腐食性環境下の実構造物は、鉄筋周囲のコンクリートの品質が悪いと、鉄筋表面が比較的容易に、一様に腐食する可能性が高いと言える。

5. 数値解析

(1) 概要と目的

本研究では、小林が開発したコンクリート中の物質移動と鉄筋の腐食に関する数値解析プログラム¹⁾を、ブリーディングによるかぶりコンクリート中の欠陥を考慮できるように改良し、解析結果を実験結果と比較検討した。

この解析プログラムの特徴は、コンクリートの品質の影響を合理的に考慮するために細孔構造に立脚した物質移動モデルを用いたこと、曲げひび割れの影響を考慮するためにかぶりコンクリート中の物質移動を二次元解析とし、鉄筋の軸方向に沿った腐食分布を計算可能としたこと、電気化学的機構に注意を払い、腐食反応モデルを定式化したことである。

(2) かぶりコンクリートモデル

縦打ちの場合は、ブリーディングによるかぶりコンクリートの不均一性が生じないものと考えられるため、かぶりコンクリートが均等質なコンクリートで形成されている場合を想定し、小林のモデルをそのまま用いた。一方、横打ちの場合は、ブリーディングによって生ずるかぶりコンクリートの不均一性を考慮し、次の2種類のモデルを設定した。ブリーディングにより上昇してきた水分が鉄筋近傍に停まることにより、

鉄筋近傍のコンクリート層の品質が他のかぶりコンクリート層の品質よりも著しく低くなる場合を想定したモデル 1. ブリーディングによる水分の上昇により、表面付近のコンクリートの細孔組織が粗くなる場合を想定し、かぶりコンクリートをかぶり中間位置からコンクリート表面側と鉄筋側の 2 層に分割したモデル 2 である。

表 1 解析条件

	数値
単位水量 W (kg/m ³)	175
単位セメント量 C (kg/m ³)	292
相対湿度 $R.H$ (%)	75.8
平均気温 T (°C)	4.9
pH	12.5
かぶり厚 (mm)	50
解析時間 (年)	1

表 2 材料パラメータ

	1	2
V_0	0.129	0.129
B	25000	10000
C	0.5	0.5
K_V	0.0361	0.0681
K_L	0.000721	0.00136
K_{LP}	0.00130	0.00464
K_{CL}	0.00721	0.0136

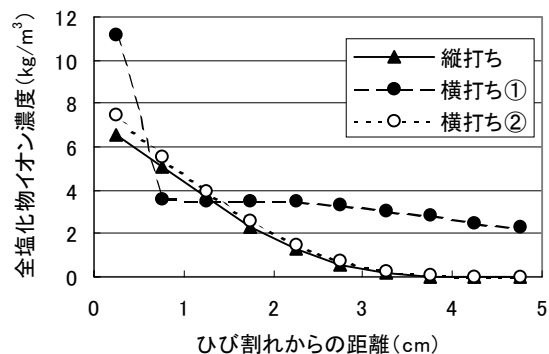


図 5 鉄筋位置における全塩化物イオン濃度の軸方向分布

(3) 解析条件

表 1 に解析条件を示す. 単位水量, 単位セメント量, 相対湿度, 平均気温, かぶり厚に関しては, 促進暴露試験における配合, 寸法, 測定結果を用い, pH に関しては, 既往の研究から得られた数値を用いた. 表 2 に細孔組織の特徴を表す材料パラメータを示す. 材料パラメータ V_01 と V_02 が同値となっているのは, V_01 と V_02 を変えて計算したところ, 不都合が生じたためである.

(4) 解析結果

a) 全塩化物イオン濃度の軸方向分布

図 5 に鉄筋位置における全塩化物イオン濃度の軸方向分布を示す. 凡例中の横打ち①は, 鉄筋近傍のコンクリート層の品質が著しく低くなっている場合を想定したモデル 1 を指している. 一方, 横打ち②は, コンクリート表面付近のコンクリートの品質が低くなっている場合を想定したモデル 2 を指している.

全塩化物イオン濃度は, いずれもひび割れ面で最も高くなり, ひび割れ面から遠ざかるにつれ, 減少していく傾向にあることが認められた. この傾向は促進暴露試験で得られた結果と一致した. かぶり中間位置からコンクリート表面側にかけてコンクリートの品質が悪くなっていると想定した場合に関しては, 全塩化物イオン量が, 縦打ちを想定した場合の水準より少々高いだけで, 傾向もほとんど変わらない. コンクリート表面側から侵入してくる塩化物イオン量による影響が現れた結果と言える. 一方, 鉄筋近傍のコンクリート層の品質がブリーディングの影響によって著しく低くなっていると想定した場合に関しては, 全塩化物

イオン量が、ひび割れ位置で多くなり、次の要素で急激に減少するものの、それ以降、その水準を保ったまま推移している。ひび割れ面から侵入してくる塩化物イオンの影響が現れた結果と言える。

以上の結果から、鉄筋近傍のコンクリート層の品質が悪い（物質透過抵抗性が低い）場合は、塩化物イオンが鉄筋に沿って一様に多く浸透することが認められた。また、鉄筋位置における塩化物イオン濃度は鉄筋近傍におけるコンクリートの物質透過抵抗性が影響すると言える。

b) 鉄筋腐食量の軸方向分布

図 6 に鉄筋腐食量の軸方向分布を示す。鉄筋腐食量の軸方向分布が、鉄筋位置における全塩化物イオン濃度の軸方向分布に非常に類似していることから、コンクリート中の鉄筋腐食量は鉄筋位置における全塩化物イオン濃度との相関が強いと言える。

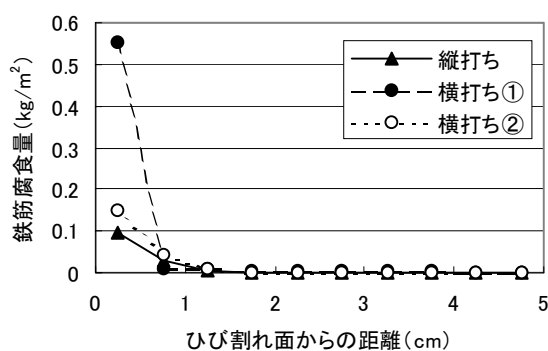


図 6 鉄筋腐食量の軸方向分布

6. 結論

(i) 実験より、ブリーディングの発生方向に対して直交方向に配置されている鉄筋の下部には、ブリーディングによって連続的な空隙を含む物質透過抵抗性の低いコンクリート層が形成され、鉄筋に沿った鋼材腐食促進物質の侵入が容易となることが明らかとなった。

(ii) 解析より、連続的な空隙を含む物質透過抵抗性の低いコンクリート層が、ブリーディングによって鉄筋近傍に形成された場合の塩化物イオンの移動をシミュレーションできた。

参考文献

- 1) 小林 悟志：コンクリート中の物質移動と鉄筋の腐食に関する数値解析，長岡技術科学大学修士論文，2002. 2