

論文

[1145] 内部ひびわれを有するかぶりコンクリートの塩分浸透性に関する研究

正会員○氏家勲 (宇都宮大学建設学科)
 小林清和 (宇都宮大学建設学科)
 正会員 佐藤良一 (宇都宮大学建設学科)
 正会員 長瀧重義 (東京工業大学土木工学科)

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の鋼材腐食による耐久性低下が大きな問題として取り上げられて以来、数多くの実構造物の調査や各種の実験などから、コンクリート中の鋼材の腐食に及ぼす環境条件の影響やその腐食機構などが明らかとなりつつある[1]。これらの研究成果から、鋼材の腐食に関係する主要因としては、鋼材表面の不動態皮膜を破壊する塩素イオン、腐食反応に必要とされる酸素と水の3因子が挙げられており、これら腐食因子の鋼材への供給の程度の相違により腐食形態や腐食速度が異なることが報告されている[2]。従って、鉄筋コンクリート構造物の鋼材腐食による劣化の評価や寿命予測を行う場合に、上記の腐食因子がどのようにして鋼材へ供給されるかを明らかにする必要がある。

腐食因子の一つである塩素イオンの鋼材への供給は構造物が置かれている環境に加えて、構造物の有している品質、すなわち、かぶりコンクリートの密実さ、かぶり、ひびわれや打継目などの欠陥の有無などにも依存する。かぶりコンクリートの密実さに関して、筆者らは引張を受ける異形鉄筋周辺に発生する内部ひびわれによりかぶりコンクリートの密実性が低下することを透気性の観点から既に明らかにしている[3]。塩素イオンがひびわれ部はもとより鋼材全体に浸透する場合、ひびわれ部近傍の鋼材の腐食から鋼材の全面腐食に腐食形態が変化することが指摘されているが[2]、内部ひびわれによるかぶりコンクリートの密実性の低下により腐食形態の変化を促進するものと考えられる。

そこで、本研究では塩素イオンのかぶりコンクリートへの浸透を取り上げ、鉄筋径およびかぶりを変化させ、内部ひびわれを生じさせた供試体の塩分浸透実験を実施し、無筋コンクリートの場合の塩分浸透性の結果との比較を行った。さらに塩素イオンのコンクリート中への浸透の支配方程式である拡散方程式をコントロールボリュームによる方法で数値解析を行いかぶりコンクリートに内部ひびわれが生じている場合の塩素イオンの浸透性について検討した。

2. 実験概要

本実験では普通ポルトランドセメント(比重3.16)を使用し、細骨材には鬼怒川産川砂(比重2.60、吸水率2.56、粗粒率2.95)、粗骨材には鬼怒川産碎石(比重2.65、吸水率1.76、粗粒率6.73)を用いた。本実験で用いたコンクリートの配合およびスランプ、空気量を表-1に示す。ま

表-1 コンクリートの配合およびスランプと空気量の結果

粗骨材 最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)				混和剤(g/m ³)		スランプ (cm)	空気量 (%)
			水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤	AE助剤		
20	60	52	164	273	958	896	682	8	9.7	4.3

た、鋼材にはSD295Aの呼び名D16、D19、D22、D25の横ぶしを有する市販の異形鉄筋を用いた。

内部ひびわれを有する供試体は鉄筋コンクリートの引張部の鉄筋一本当たりの部分を取り出し、両引き供試体を用いた。供試体の塩素イオンの浸透面は15×15cmとし、供試体厚さが3～6cmのかぶりに公称直径を加えた値となるよう作製した。鉄筋は供試体の中央に配置し、横ぶしが浸透面に向くよう型枠に固定した。また、無筋コンクリートの供試体には一辺が15cmの立方体を用いた。供試体の養生は温度20℃で湿布養生を14日間行った。供試体に内部ひびわれを発生させる方法としては、既往の研究を参考にして[4]、鉄筋応力度で3000kgf/cm²の荷重を10回繰り返して与えることとした。繰り返し載荷した後、鉄筋を切断し、塩素イオンが一方向のみから浸透するよう、浸透面を残し他の5面をエポキシ樹脂系接着剤でシールした。塩素イオンの浸透面はコンクリート打設時の底部にあたる面とした。以上の処理を行った後、供試体を9%のNaCl水溶液中に2カ月間浸漬した。浸漬実験は温度20℃の恒温室で行い、2週間おきにNaCl水溶液を取り替えた。

2ヶ月間浸漬させた供試体は、塩水中から取り出し表面に付いてる水分を拭き取った後、コンクリートカッター（ドライ方式）で浸透面より順に約9mmの厚さに切断した。この切片を40℃で24時間乾燥した後、金槌で粗粉碎し、さらに粗粉碎した試料をボールミルを用いて0.149mmふるいを通過するまで微粉碎した。

本実験において測定した塩分は鋼材腐食に関与するとされている可溶性塩分である。可溶性塩分の抽出はJCIの方法に準じて行った。上記の方法で採取した微粉末試料20gに50℃の蒸留水を100ml加え、50℃で保温しながら30分間振とう機で振とうした。静置後吸引ろ過し、ろ液を室温まで冷やしてこれを可溶性塩分測定用試料とした。この試料から電量適定法の測定原理による塩分濃度計により可溶性塩分量を求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 塩水浸漬実験結果

図-1はD22の鉄筋を用いて、かぶりを変化させた供試体の可溶性塩分の浸透状況を示す。図中の、塩分量はコンクリート重量に対する塩素イオン量(wt%)で示してある。無筋コンクリートの場合について、正規確率紙を利用する方法により[5]、最小自乗法を用いてコンクリート中の塩分の見掛けの拡散係数および表面塩分量を求めれば、それぞれ $1.565 \times 10^{-7} \text{cm}^2/\text{s}$ 、0.902wt%であった。無筋コンクリートと異形鉄筋を用いて内部ひびわれを発生させたものの塩分浸透性を比較すると、どのかぶりの場合においても塩分浸透性に顕著な

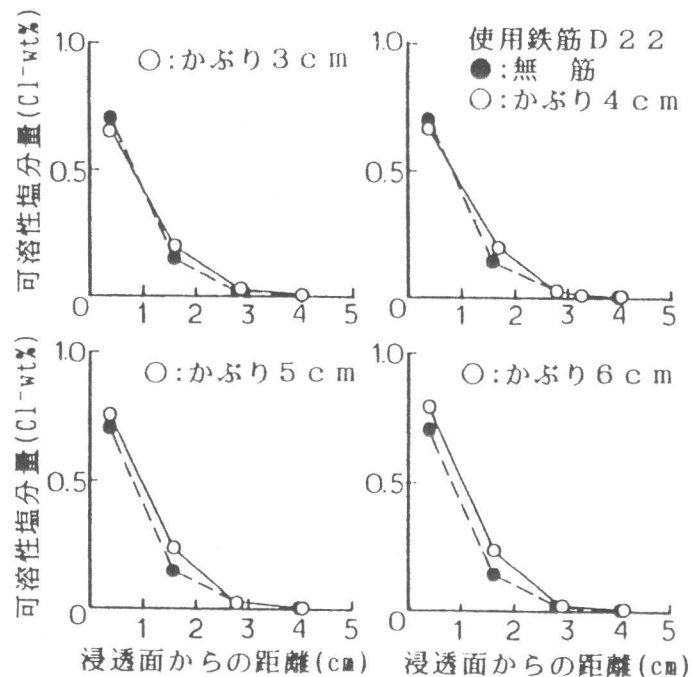


図-1 かぶりの異なる供試体の塩分量分布

差はみられないが、内部ひびわれを有している場合のほうがやや塩分が浸透しやすくなる傾向

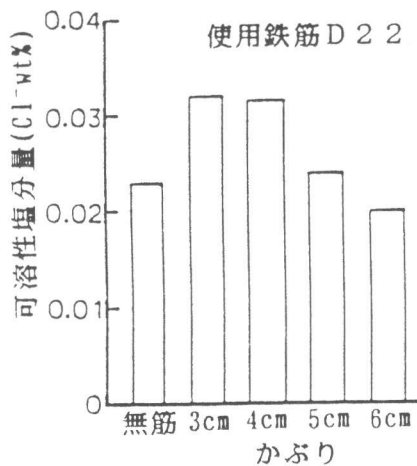


図-2 かぶりの違いによる塩分量の比較

がみられる。そこで、どの供試体においても内部ひびわれが存在していると考えられる供試体表面から約2.4cm~3.3cmの範囲の塩分量を図-2に示す。塩分量の絶対値

としては小さいが、かぶりが5cm以下では無筋コンクリートの塩分量よりも大きくなっており、その程度はかぶりが小さくなるにつれて大きくなっている。

次に図-3はかぶりを4cmとして、鉄筋径を変化させた場合の塩分浸透性状を示す。かぶりを変化させた場合と同様に、無筋コンクリートに比べてわずかではあるが、塩分が浸透しやすくなっている。図-4は鉄筋の表面に最も近い試験片(供試体表面から約2.7cm~3.7cmに位置する)から得られた塩分量を示す。なお、無筋コンクリートの場合は鉄筋を用いた供試体と同じ位置の試験片が得られなかったため、上述した拡散係数と表面塩分量を用いて、既往の研究でコンクリートへの塩分浸透現象で多く用いられている半無限体におけるFickの拡散方程式の解[5]で実験値を回帰して内挿した値を用いている。図からわかるように鉄筋近傍の塩分量は無筋コンクリートの場合より大きく、鉄筋径が大きくなるにつれて塩分量も大きくなっており、これは鉄筋径が大きいものほど内部ひびわれ領域が大きいことによるものと考えられる。

ここで、塩素イオンが不動態を破壊し鉄筋が腐食する可能性のある可溶性塩分量はセメント重量に対して0.15wt%と報告されているので[6]、この値をコンクリート重量に対する値に換算すれば、本実験の場合約0.02wt%となる。本実験はNaClで9%と浸漬した塩水濃度が高い促進試験であり、限られた条件ではあるが、内部ひびわれを有する供試体に置いてはD19以上の場合に鉄筋近傍の塩分濃度が0.02wt%を越えた値となって鉄筋が腐食する可能性のある状態になっている。一方、無筋コンクリートの結果では、かぶり4cmの位置では鉄筋は腐食する可能性の状態に

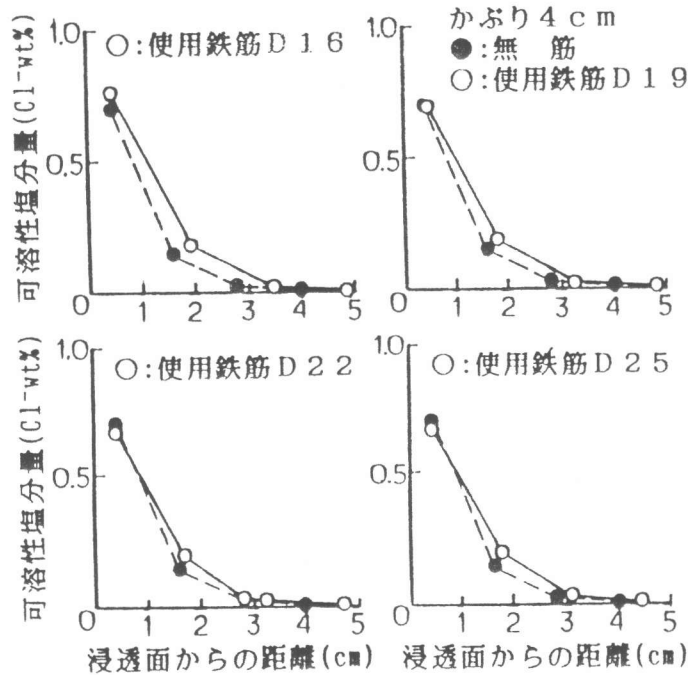


図-3 鉄筋径の異なる供試体の塩分量分布

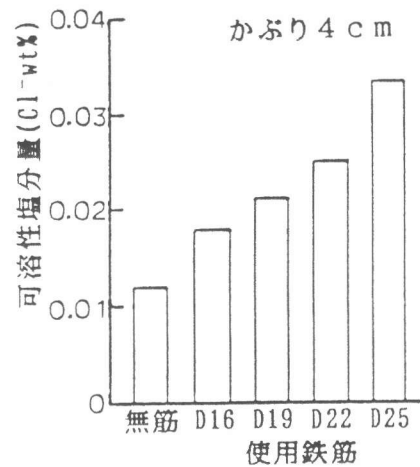


図-4 鉄筋径の違いによる塩分量の比較

はなっていないと判断できる。このことを直ちに実際の場合に置き換えるには問題があるが、内部ひびわれにより鉄筋に供給される塩分量が多くなることを示唆する結果と考えられる。

3. 2 数値解析による検討

次に内部ひびわれを有するコンクリートの塩素イオンの浸透性状を拡散係数の異なった部分からなるコンクリートに置き換えて数値解析により検討する。解析においては鉄筋軸方向に塩素イオンの移動はないとして2次元とした。コンクリート中の塩素イオンの浸透に関する支配方程式は、Fickの第二法則として知られている拡散方程式で以下のように表される。

$$\frac{\partial C(x,y,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(x,y) \frac{\partial C(x,y,t)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D(x,y) \frac{\partial C(x,y,t)}{\partial y} \right) \quad (1)$$

ここで、 $C(x,y,t)$ は時間 t における塩素イオン濃度であり、 $D(x,y)$ はコンクリート中の塩素イオンの見掛けの拡散係数で、場所によっては異なるが、方向には依存しないとし、また時間にも依存しないものとする。

(1)式を図-5に示すように、2次元配列の格子点まわりのコントロールボリュームについて積分し、完全陰解法を用いれば、時間間隔 dt において、次の離散化方程式が得られる[7]。

$$ApC(n,m,t) = AeC(n+1,m,t) + AwC(n-1,m,t) + AnC(n,m+1,t) + AsC(n,m-1) + Ap'C(n,m,t-1) \quad (2)$$

ただし、 $Ap = Ae + Aw + An + As + Ap'$

$$Ae = (2dy/dx) / [1/D(n,m) + 1/D(n+1,m)]$$

$$Aw = (2dy/dx) / [1/D(n,m) + 1/D(n-1,m)]$$

$$An = (2dx/dy) / [1/D(n,m) + 1/D(n,m+1)]$$

$$As = (2dx/dy) / [1/D(n,m) + 1/D(n,m-1)]$$

$$Ap' = (dxdy)/dt$$

(2)式の離散化方程式を以下の境界および初期条件のもとで解くことにより数値計算を行った。

境界条件 $x=0$ (供試体中央)、 $x=L$ (供試体側面) : $\partial C(x,y,t)/\partial X = 0$

$y=0$ (浸透面) : $C(x,0,t) = C_0$ (表面塩分量)

初期条件 $C(x,y,0) = 0$

一般に、コンクリートへの塩素イオンの浸透は半無限体への拡散とみなして理論的な検討が行われている。本解析では有限のコントロールボリュームを用いているが、解析する浸漬時間においてこのことが半無限体の仮定を損なわないよう塩素イオンの浸透方向のコントロールボリュームの数を決定した。

コントロールボリュームの大きさをすべて $2.5 \times 2.5 \text{mm}$ として、コントロールボリュームで表した鉄筋の直径が 20mm (D19ある

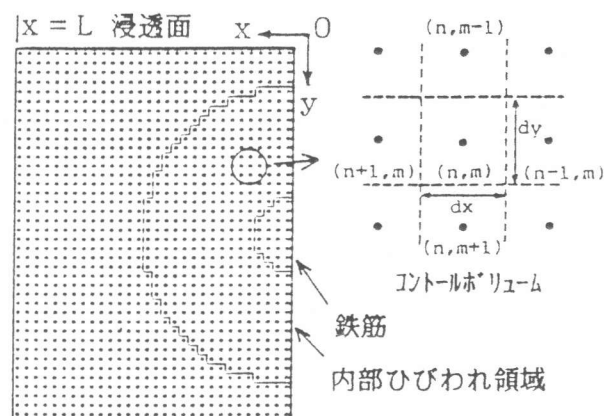


図-5 解析に用いた格子点

いはD22に対応する)で、かぶり40mmを有する場合について解析を行った。解析時間および解析時間間隔はそれぞれ56日と0.5日とした。また、内部ひびわれのない部分の塩素イオンの見掛けの拡散係数および表面塩分量は無筋コンクリートの実験結果を用いた。内部ひびわれの領域は既往の研究を参考にして鉄筋径の1.5倍として[4]、その部分の塩素イオンの見掛けの拡散係数は内部ひびわれのない部分の10倍と仮定した。

図-6は内部ひびわれを含まない供試体端部と内部ひびわれを含む供試体中央部の塩分量分布の解析結果を示す。内部ひびわれを含まない供試体端部の塩分量分布は、内部ひびわれがなく供試体全体が同じ拡散係数である場合の解析結果と同じ塩分量分布となり、供試体端部では内部ひびわれが塩分浸透に影響しない解析結果となった。一方、内部ひびわれを含む供試体中央部(図中に示したA断面では浸透面から1.25cmの位置より拡散係数が大きくなる)の塩分量分布は拡散係数が一様である場合と同じ塩分量分布である端部の解析結果と比較すれば、表面近くの塩分量は少ないが、浸透面から約2cm以上では内部に進むにつれて端部の塩分量より多くなり、その差も大きくなっている。図-1および図-3において塩分量分布に顕著な差がみられなかった理由として、本実験では浸漬時間が短かったことに加えて、供試体中央部だけでなく端部も含めた試験片を切り出して、それを粉砕した試料を用いて塩分量を分析したためと考えられる。

図-7はコンクリートドリルを用いて、内部ひびわれがあると考えられる幅8cmの中央部とそれ以外の端部のそれぞれの部分で塩分の浸透方向に5mmづつ掘進んで採取した試料より得た塩分量分布を示す。内部ひびわれがない端部から採取した試料では無筋コンクリートの場合とほぼ同じで、塩分が浸透面から約3.5cmまで浸透している。それに対して、内部ひびわれを含む部分から採取した塩分量は図-6に示した解析結果のように表面付近において内部ひびわれのない部分の塩分量より小さくなる傾向はみられないが、内部ひびわれのある部分の塩分量は端部の塩分量に比べて多くなっている。また、端部よりも内部まで浸透しており、内部ひびわれが塩分の浸透、特に鋼材周辺での浸透を大きくするものと考えられる。

図-8は浸透面から3.0~3.5cmの位置で測定された塩分量と解析された結果を示す。数値解析結果は、鉄筋に近づくにつれて塩分量が多くなることを示している。これは内部ひびわれゾーン

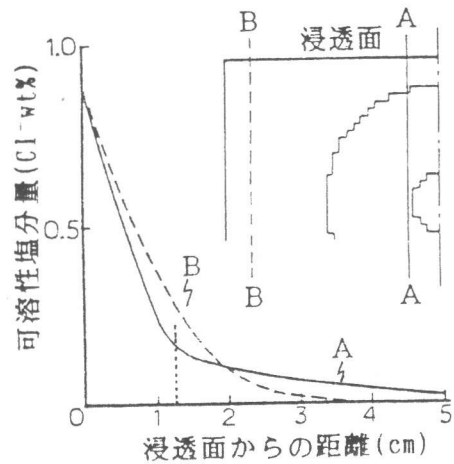


図-6 塩分量の解析結果

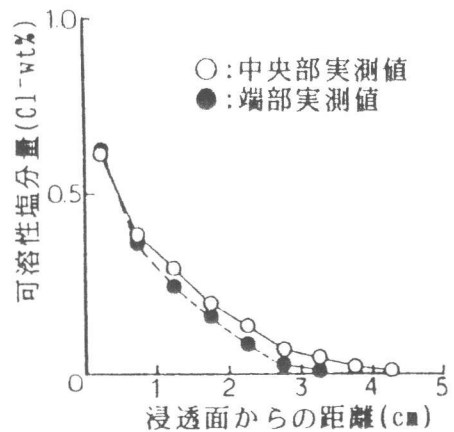


図-7 供試体中央部と端部の塩分量分布

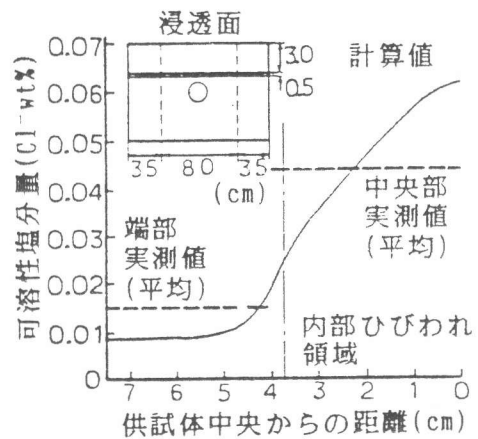


図-8 浸透面から3.0~3.5cmの位置の塩分量

の拡散係数を大きくしているため鉄筋に向かう塩素イオンの流束成分が生じるためである。また、実験結果はそれぞれ中央部8cmとそれ以外の端部3.5cmにおける平均的な値ではあるが、解析結果と同様な傾向を示しており、このことは内部ひびわれにより鋼材に供給される塩分量が多くなること意味すると思われる。

ここで大即らによる塩素イオン、酸素、水分の供給条件によって鋼材の腐食形態が変化する考え方を参考にすれば[2]、内部ひびわれはコンクリート部材表面に現れる主ひびわれと共に存在することにより、腐食初期の段階においては主ひびわれ部がアノード、主ひびわれ間がカソードとなるマクロセル腐食の形態となると考えられる。しかし、その後、内部ひびわれが存在する場合には主ひびわれ間の鋼材にまで十分塩素イオンが浸透し易くなることが考えられ、酸素が主ひびわれ部とそれ以外の部分に同程度供給される場合やひびわれ部に多く供給される場合などでは全面腐食あるいは主ひびわれ部がカソードとなりそれ以外が腐食する形態に変化し易くなることが考えられる。

4. まとめ

本研究は引張を受ける異形鉄筋周辺のかぶりコンクリートが内部ひびわれによりその密実性が低下することに着目して、鋼材の腐食因子の一つである塩素イオンの浸透性について実験を行った。塩水浸漬実験が促進試験であり、その期間が2カ月と短期間であるが、本実験の範囲では、内部ひびわれにより鋼材周辺のコンクリートに塩素イオンが供給され易くなり、無筋コンクリートあるいは引張力が作用しない場合に比べて早く鋼材が腐食する可能性の高い塩分量になることが明らかとなった。しかしながら、実構造物の置かれる環境条件下で、塩分が鋼材へ到達する時間や、浸透する量が内部ひびわれの有無によりどの程度変化するのか定量的に評価することや、また、酸素や水分の鋼材への供給のされ方などを含めて内部ひびわれが鋼材の腐食に及ぼす影響について今後検討する必要があると思われる。

[謝辞] 本研究において東京工業大学大即助教授より有益な助言を得た。また、本研究は平成3年度文部省科学研究費補助金(奨励研究(A))を受けて行った研究の一部である。付記し、感謝の意を表します。

<参考文献>

- [1]大即信明ほか：塩害(I)、技報堂出版、pp.3-74、1986
- [2]大即信明、久田真：RCの打継目およびひびわれが鉄筋のマクロセルにおよぼす影響に関する考察、セメント・コンクリート研究討論会論文報告集、第18回、pp.77-84、1991
- [3]氏家勲他：引張を受ける異形鉄筋周辺の内部ひびわれがかぶりコンクリートの透気性に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集、第12巻、第1号、pp.407-412、1990
- [4]氏家勲ほか：かぶりコンクリートの透気性に及ぼす繰り返し荷重と荷重履歴の影響、コンクリート工学年次論文報告集、第13巻、第1号、pp.623-628、1991
- [5]永野宏雄：塩分汚染コンクリート構造物の診断手法の提案、大成建設技術研究所報、第18号、pp.69-73、1986
- [6]大即信明ほか：硬化したコンクリート中における塩素イオン量の測定に関する研究、セメント・コンクリート論文集、No.43、pp.156-161、1989
- [7]Patankar S. V. : コンピュータによる熱移動と流れの数値解析、水谷・香月共訳、森北出版、1988