

論文

[1069] 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

正会員○氏家 勳 (宇都宮大学工学部)
 正会員 長瀬重義 (東京工業大学工学部)
 正会員 佐藤良一 (宇都宮大学工学部)
 石川浩三 (宇都宮大学工学部)

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物のかぶりは、コンクリートの密実さを阻害する施工不良などの欠陥がないものとして、コンクリートの品質、鉄筋直径、環境条件、施工誤差、構造物の重要度などを考慮して定める必要があるとされている[1]。しかしながら、引張を受ける異形鉄筋周辺には鉄筋コンクリート部材表面には現れない内部ひびわれが発生することが報告されている[2]。内部ひびわれは鉄筋応力度が1000kgf/cm²に到達する以前にすでにその発生が認められており、使用状態においては避けることのできない現象である。この内部ひびわれは塩素イオン、酸素などの鉄筋腐食因子の侵入を促進すると考えられるが、内部ひびわれによるコンクリートの密実さの低下に関して検討を加えた研究はほとんど行われていない。

そこで本研究は鉄筋コンクリート引張部の鉄筋一本当りの部分を取り出した両引き供試体を用いて、コンクリート中の物質の移動割合の測定方法の一つである透気試験により内部ひびわれによるコンクリートの密実さの低下を評価したものである。本研究では内部ひびわれ性状に影響を及ぼす要因として、鉄筋の種類、鉄筋に作用する引張応力度、鉄筋径、かぶりを取り上げた。そして各要因の異なる供試体の透気性状を把握し、引張力の作用しない供試体の透気係数と比較を行い、内部ひびわれの影響を考慮して有効に機能するかぶりについて検討を加えることを試みた。

2. 実験概要

本実験では普通ポルトランドセメントを使用し、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)、粗骨材には鬼怒川砕石(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。両引き供試体にはSR24φ22の市販の丸鋼およびSD30Aの呼び名D16、D19、D22、D25の横ぶしを有する市販の異形鉄筋を使用した。

図-1に示すように、両引き供試体は透気方向に垂直な面を15×15cmとし、供試体高さを2～6cmのかぶりに公称直径を加えた値となるよう作製した。また鉄筋は供試体の中央に配置し、異形鉄筋の場合、横ぶしが透気面に向くように型枠に固定した。供試体の養生は温度20℃で湿布養生を14日間行い、その後温度20℃湿度60%R.H.の恒温恒湿室で、透気面以外の4側面をビニル系

表-1 コンクリートの配合およびスランプと空気量試験結果

| 最大寸法 (mm) | 水セメント比 (%) | 細骨材率 (%) | 単位量(kg/m ³) | | | | AE減水剤 (Cx%) | AE剤 (Cx%) | スランプ° (cm) | 空気量 (%) |
|--------------|---------------|-------------|-------------------------|-----|-----|-----|----------------|--------------|---------------|------------|
| | | | W | C | S | G | | | | |
| 20 | 40 | 44 | 164 | 410 | 762 | 988 | 0.25 | 0.30 | 12.0 | 4.3 |

粘着テープでシールして透気面の2方向から乾燥するようにした。乾燥により空隙率（供試体から逸散した水分の体積／両引き供試体のコンクリートの体積）が約3%（予備実験より、ある程度透気し、内部ひびわれの影響を顕著に捉えるよう定めた）に達した供試体は塩化ビニルストレッチフィルムでラップし、透気試験を行うまで恒温恒湿室に静置した。

载荷および透気試験を行う前に、供試体の4側面をエポキシ樹脂系接着剤で気密処理を行った。さらに透気試験機に取り付けるため、13×13cmの穴を有する取付鋼材を上下の透気面に取り付けた。载荷試験はPC鋼棒で締め付けて透気試験装置に固定する前に行った。透気試験装置を取り囲むように設置された反力フレームに供試体をセットし、センターホールジャッキにより载荷を行った。

载荷荷重は鉄筋の端部に取り付けたセンターホール型のロードセルにより検出し、鉄筋応力度が50~200N/mm²となるように与えた。所定の荷重を与えた後、あらかじめ鉄筋に切削してあるネジとナットで反力フレームに固定した。なお、与えた引張応力度は透気量測定時において平均で約1.0N/mm²低下した。持続荷重を与えた両引き供試体の透気試験装置を図-2に示す。透気量の測定は载荷試験終了後直ちに0.2N/mm²の空気圧を与え、空気を流し始めてから12時間後に開始した。供試体を透過した空気は水上置換により集め、得られた透気量から以下の式を用いて透気係数を算出した。

$$K = [2LP_1 / (P_2^2 - P_1^2)] \cdot (Q/A) \quad (1)$$

ここで、K:透気係数[cm²/(s·N/cm²)]、L:供試体厚さ(cm)、P₁, P₂:大気圧および载荷圧(N/cm²)、Q:透気量(cm³)、A:透気面積(cm²)、である。

供試体は各条件につき2体作製し、载荷および透気試験を行ったが、作用応力度を変化させる場合は同じ供試体を用いて低い引張応力度から载荷および透気試験を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 鉄筋の種類および引張応力度

図-3は異形鉄筋D22と丸鋼φ22を用いた両引き供試体の透気係数を示す。図中の破線は無筋

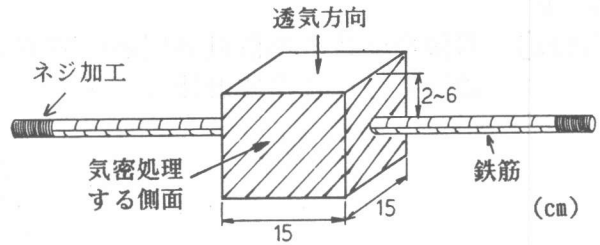


図-1 両引き供試体

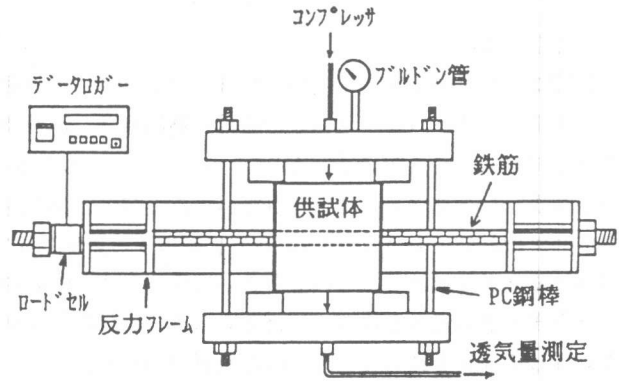


図-2 透気試験装置

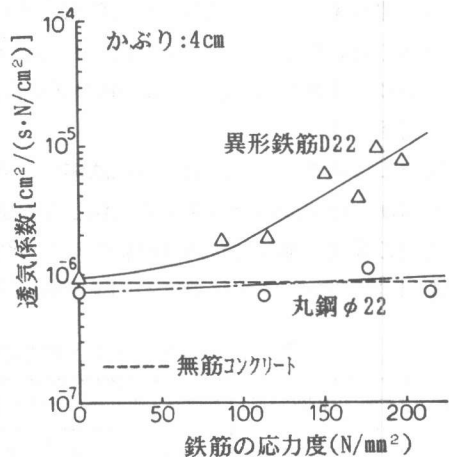


図-3 異形鉄筋と丸鋼を用いた供試体の透気係数と鉄筋の応力度の関係

コンクリートの透気係数を表す。丸鋼を用いた供試体の透気係数は鉄筋の応力度が増加してもほとんど増加しておらず、無筋コンクリートの透気係数とほぼ同じ値となっている。それに対して、異形鉄筋を用いた供試体の透気係数は引張力が作用しない時は無筋コンクリートとほぼ同じ値であったものが、鉄筋の応力度の増加と共に透気係数が増加している。図-3において、使用した鉄筋以外は同じ条件で作られた供試体であるにもかかわらず、引張力が作用することによってその透気係数は異なった値となっている。

このような透気性状の相違は引張を受ける異形鉄筋周辺に生じる内部ひびわれに起因するものと思われる。そこで図-4は載荷試験時に測定した累積AEカウント数を示す。累積AEカウント数は異形鉄筋および丸鋼ともに引張応力度が増加するにつれて増加している。しかしながら、それぞれの鉄筋の累積AEカウント数の増加割合は異なっており、異形鉄筋の場合、引張応力度が高くなるにつれてその増加割合が大きくなっているのに対して、丸鋼の場合には減少している。その結果、異形鉄筋の累積AEカウント数は100N/mm²では丸鋼とほぼ同じ値であったものが200N/mm²では2倍以上の値となっている。

3.2 鉄筋径および引張応力度

次に図5は異形鉄筋の直径が両引き供試体の透気係数に及ぼす影響を示す。どの鉄筋径の供試体においても引張応力度が0N/mm²の時の透気係数よりも引張力が作用することによって透気係数が大きくなっている。その程度は同じ引張応力度で比較すると鉄筋径の大きいものほど大きくなっている。また、鉄筋径の大きいものほど低い引張応力度から透気係数が増加している。既往の内部ひびわれに関する研究によれば、内部ひびわれはふしが高いほど発生しやすいと

いう傾向がみられ、さらに内部ひびわれの長さも長くなるとの報告がある[2]。市販の異形鉄筋のふしの高さは鉄筋径に対する割合で規定されており、その割合は鉄筋径が大きいものほど大きくなっている。従って、市販の異形鉄筋では鉄筋径の大きいものほどふしの高さが高くなることから、かぶり厚さおよび作用する応力度が同じであっても、鉄筋径の違いによって両引き供試体の透気係数が異なっているのは内部ひびわれゾーンの大きさによるものと思われる。

3.3 かぶり

図-6は異形鉄筋D22を用いた供試体のかぶりを変化させたときの透気係数を示す。図中の破

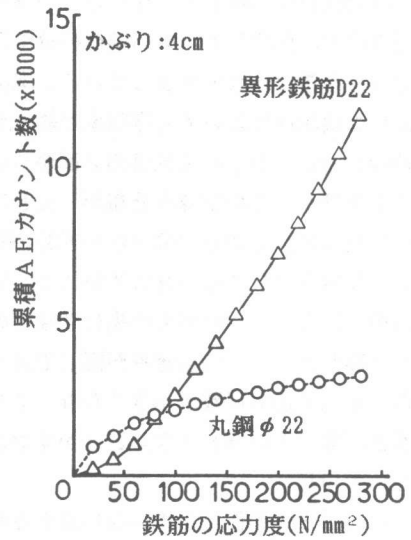


図-4 載荷試験中の累積AEカウント数

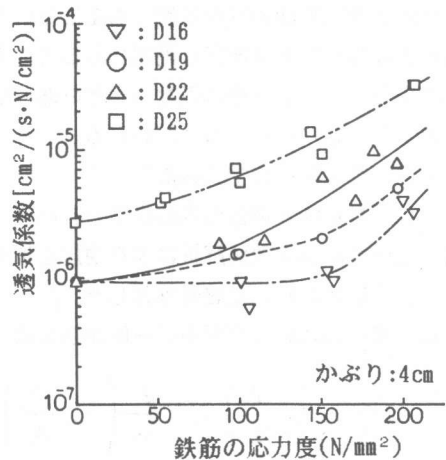


図-5 直径の異なる異形鉄筋を用いた供試体の透気係数

線は引張力が作用していないときの透気係数を表す。引張応力が作用していない場合の透気係数はかぶりが大きくなるにつれて減少している。本実験ではどのかぶりの供試体においても空隙率が約3%となるように乾燥したが、上下の透気面の2面から乾燥させたため、コンクリート内の空隙率分布が様とはならず、供試体中央において空隙率の小さい部分が存在する。このような場合すでに報告されているように、空隙率分布の違いにより、供試体の中央に空隙率の小さい部分がある場合は、平均の空隙率が同じであっても様な場合に比べて透気係数が小さくなり、その程度は供試体厚さが厚いものほど大きいことがすでに明らかとされている[3]。

この引張力の作用していない透気係数に対して、引張力が作用した供試体はかぶり薄いものほど透気係数が大きく増加している。なお、かぶりが2cmで引張応力度150N/mm²以上においては供試体表面に鉄筋と直角方向にひびわれが観察された。内部ひびわれの到達距離は主としてふしの高さおよび間隔によるものと言われており[2]、図-6においては同じ表面形状の異形鉄筋であることから、内部ひびわれゾーンの大きさはかぶりが異なった供試体においてもほぼ同じ範囲にあると考えられる。従って、かぶりの厚い供試体は内部ひびわれが到達していない透気係数の小さい部分が多いことから、引張力が作用しても透気係数が余り大きくならなかったものと思われる。

3.4 供試体中の空気の流れ

次に、異形鉄筋周辺の内部ひびわれにより透気係数が大きくなった部分を有するコンクリート内の空気の流れを数値解析により検討を加えた。解析においては、鉄筋軸方向に空気は流れないとして2次元とし、左右対称とした。コンクリート中の定常状態の空気の流れに関する支配方程式は、連続の式およびダルシー則から2次元の場合以下のように表される。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho K_x \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho K_y \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 0 \quad (2)$$

ここでPは圧力、 ρ は密度である。K_x、K_yはxおよびy方向の透気係数である。透気係数は場所によっては異なるが、方向には依存しないとしてK_x=K_y=Kとする。

次に供試体内に図-7に示す2次元配列の格子点を考え、そのまわりのコントロールボリュームから以下の離散化方程式が得られる[4]。

$$ApP(n, m) = AeP(n+1, m) + AwP(n-1, m) + AnP(n, m+1) + AsP(n, m-1) \quad (3)$$

ただし、 $Ap = Ae + Aw + An + As$

$$Ae = dy / [dx / (\rho(n, m)K(n, m)) + dx / (\rho(n+1, m)K(n+1, m))]$$

$$Aw = dy / [dx / (\rho(n, m)K(n, m)) + dx / (\rho(n-1, m)K(n-1, m))]$$

$$An = dx / [dy / (\rho(n, m)K(n, m)) + dy / (\rho(n, m+1)K(n, m+1))]$$

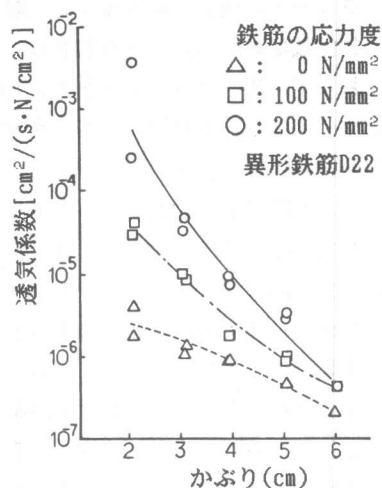


図-6 かぶりの異なる供試体の透気係数

$$\text{As} = dx / [dy / (\rho(n, m)K(n, m)) + dy / (\rho(n, m-1)K(n, m-1))] \\ \rho(n, m) = (\rho_1 / P_1) P(n, m)$$

ρ_1 は大気圧 P_1 における密度である。y方向を空気の透過方向とし、x方向をそれと直角方向とすると、境界条件は次のように定まる。

$$y=0 : P=P_2 \quad (\text{載荷圧}) \quad y=L_y : P=P_1 \quad (\text{大気圧}) \\ x=L_x/2 \quad (\text{供試体中央}) : \partial P / \partial x = 0$$

数値計算は最初に $P(n, m)$ を与えて、各コントロールボリュームについて式(3)を解き、圧力がそれぞれ一定の値になるまで繰り返し行う。さらにD22の供試体において引張応力度 $150\text{N}/\text{mm}^2$ が作用したとき、かぶり 2cm の供試体表面にはひびわれが観察され、かぶり 3cm の供試体には観察されなかったことから、内部ひびわれゾーンは鉄筋周辺の鉄筋表面から鉄筋径に等しい範囲にあると仮定した。また、その部分の透気係数はかぶり 2cm で引張応力度 $200\text{N}/\text{mm}^2$ の場合の値を用い、内部ひびわれのない部分の透気係数は引張力が作用していない場合の値を用いた。

図-8はかぶり 4cm の場合についての計算結果を示してある。コントロールボリュームの大きさは $0.5 \times 0.5\text{cm}$ であり、各格子点に示してある直線は流速(質量流速)の大きさと方向を表す。計算結果は内部ひびわれによって透気係数が大きく空気が流れやすいため、内部ひびわれゾーンに向かう流速成分が生じ、その結果内部ひびわれゾーンの流速が速くなっていることを示している。

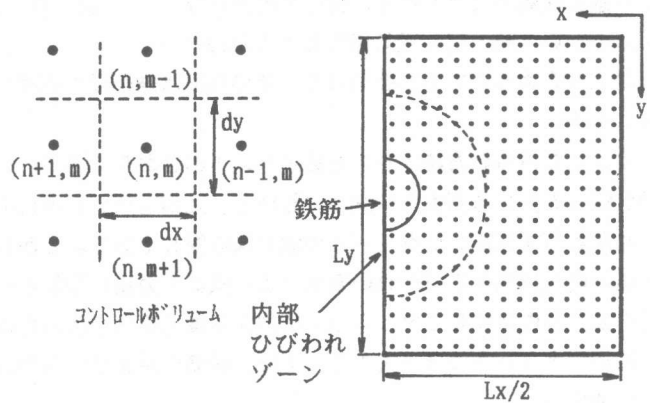


図-7 解析に用いた格子点

3.5 かぶりと鉄筋径

以上のように、両引き供試体に引張力が作用することにより供試体の透気係数は増大するがその程度は作用する引張応力度が同じであれば、鉄筋径とかぶりに関係する。図-9は引張応力度 $200\text{N}/\text{mm}^2$ が作用した両引き供試体と鉄筋径に対するかぶりの比(以下、かぶり/鉄筋径と呼ぶ)の関係を示す。図中の破線は引張力が作用していないときの透気係数を示す。かぶり/鉄筋径が1以上では、引張力が作用した両引き供試体の透気係数とかぶり/鉄筋径との間にはよい相関関係がみられ、引張力を受ける両引き供試体の透気係数をかぶり/鉄筋径の関数として表すことができる。

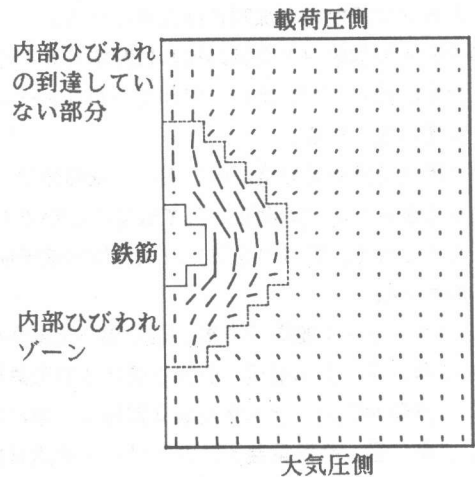


図-8 コンクリート内の空気の流れ

また、かぶり／鉄筋径が大きくなるにつれて、引張力を受けた供試体の透気係数は引張力を受けていない場合の透気係数に近づいている。本研究の範囲では、図中に示すように、引張力が作用しない時 2×10^{-6} [$\text{cm}^2/(\text{S} \cdot \text{N}/\text{cm}^2)$] の透気係数をもつ供試体と引張力が作用している供試体と同じ透気係数を得るためには、かぶり／鉄筋径は約2.3となる。これをD25およびD19に用いれば、かぶりをそれぞれ1.3cmと1.0cm厚くする必要がある。このように透気性の観点から、異形鉄筋を用いた鉄筋コンクリート構造物において、引張力の作用によって生じる内部ひびわれのため空気が流れやすくなり透気係数が大きくなる。従って内部ひびわれのない状態と同じ透気係数とするためにはかぶりを大きくする必要がある、その程度は鉄筋径に依存することが明らかとなった。

4. 結論

本研究で得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) 引張力を受ける両引き供試体において、丸鋼を用いた場合の透気係数は作用応力度の大きさにかわらず無筋コンクリートの値とほぼ同じである。しかしながら、異形鉄筋を用いた場合の透気係数は内部ひびわれの発生により鉄筋応力度の増加と共に大きくなる。
- 2) 引張力が作用することによって増加する異形鉄筋を用いた供試体の透気係数の増加の程度は鉄筋径が大きいものほど大きく、また、鉄筋径が大きいものほど低い鉄筋応力度から透気係数が増加する。
- 3) 内部ひびわれゾーンの範囲は鉄筋の引張応力度が同じであれば、主にふしの高さおよび間隔に依存するため、同じ鉄筋を用いた場合、供試体のかぶりが薄くなるにつれて、引張力の作用による透気係数の増加割合は大きくなる。
- 4) 両引き供試体中の空気の流れに関する計算結果から、透気係数の大きい内部ひびわれゾーンは空気が流れやすいため、内部ひびわれゾーンに向かう流速成分が生じ、内部ひびわれゾーンの流速は速くなる。
- 5) 作用する鉄筋応力度が同じ場合、鉄筋径およびかぶりの異なる供試体の透気係数は鉄筋径に対するかぶりの比の関数として表すことができる。また、鉄筋径に対するかぶりの比が大きくなるにつれて、引張力を受けた供試体の透気係数は引張力を受けていない場合の値に近づく。

<参考文献>

- [1] コンクリート標準示方書、設計編、土木学会、1986
- [2] 後藤幸正、大塚浩司：引張を受ける異形鉄筋周辺のコンクリートに発生するひびわれに関する実験的研究、土木学会論文報告集、第294号、1980、pp.85-100
- [3] 氏家 勳、長瀬重義：コンクリートの透気係数に及ぼす水分分布の影響に関する研究、土木学会年次学術講演会講演概要集 第5部、第43回、1988、pp.496-497
- [4] Suhas V. Patankar: 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

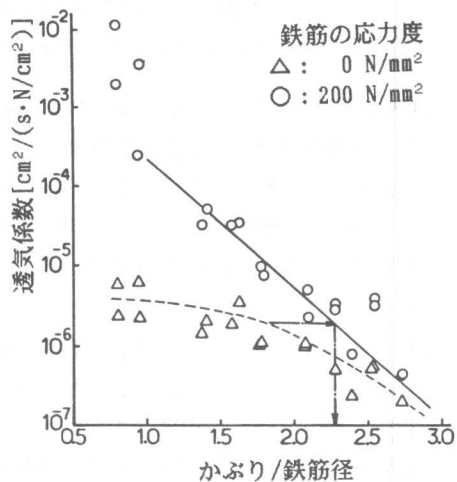


図-9 透気係数とかぶり／鉄筋径の関係