

# 内部ひび割れに起因するかぶりコンクリートの 密実性低下の透気性による検討

氏家 勲<sup>1</sup>・佐藤良一<sup>2</sup>・長瀧重義<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 愛媛大学講師 工学部環境建設工学科 (〒790 愛媛県松山市文京町3)

<sup>2</sup>正会員 工博 宇都宮大学助教授 工学部建設学科 (〒321 栃木県宇都宮市石井町 2753)

<sup>3</sup>正会員 工博 新潟大学教授 工学部建設学科 (〒950-21 新潟県新潟市五十嵐二の町 8050)

引張を受ける異形鉄筋周辺には内部ひび割れが発生することが知られているが、この内部ひび割れによりかぶりコンクリートの密実性が低下することが考えられる。本研究は内部ひび割れ性状に影響を及ぼす鉄筋応力度、鉄筋径、かぶり、荷重履歴を変化させた両引き供試体の透気実験および内部ひび割れゾーンの幅と透気係数の大きさをパラメータとした数値解析により内部ひび割れを有するかぶりコンクリートの透気性状を把握し、内部ひび割れの影響を考慮して有効に働くかぶりについて検討したものである。

**Key Words :** air permeability, deformed bar, internal cracking, cover concrete, bar diameter

## 1. まえがき

鉄筋コンクリート構造物のかぶりコンクリートの重要な役割の一つはコンクリートの高いpHにより鋼材表面に不動態皮膜をつくることおよびコンクリートの密実さにより水分、塩分、酸素などの侵入を抑制することなどによる鋼材防食である。コンクリートのpHの低下はコンクリート中の水酸化カルシウムと二酸化炭素が反応する中性化が主たる原因であることから、コンクリートを密実にするにより二酸化炭素の侵入を抑制し、コンクリートのpHの低下を抑制することができる。従って、かぶりコンクリートを密実にするには鉄筋コンクリート構造物の防食上極めて重要である。

鉄筋コンクリート構造物のかぶりは、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おり<sup>1)</sup>、その際、かぶりコンクリートにはコンクリートの密実さを阻害する施工不良などによる欠陥がないものとしている。ところが、入念に施工された鉄筋コンクリート構造物においては大きな径の鉄筋を使用した場合、鉄筋がコンクリートの乾燥収縮を拘束することにより生じる微細なひび割れやブリージングにより鉄筋下面に生じる空隙の影響により鉄筋が腐食しやすくなることから、これらの影響を考慮してかぶりを定める必要があるとの報告がある<sup>2)</sup>。さらに、これら欠陥に加えて、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割れが発生することが報告されており、この内部ひび割れは

鉄筋応力度が約100MPaに到達する以前にすでにその発生が認められており<sup>3)</sup>、鉄筋コンクリート構造物の使用状態においては避けることのできない現象である。

鉄筋コンクリート構造物の引張部コンクリートを貫通する曲げひび割れなどの主ひび割れはマクロセル成立の原因となり、主ひび割れ部がアノード部、主ひび割れ間がかソード部となるマクロセル腐食を引き起こすことが知られている。コンクリート中での鋼材の腐食速度は一般にかソード部の鋼材表面に拡散到達する酸素の速度や、アノードとかソード間のコンクリートの電気抵抗の大きさに依存し、酸素の拡散やコンクリートの電気抵抗は主としてかぶりコンクリートの密実さに関係する<sup>4)</sup>。従って、主ひび割れと共に内部ひび割れが発生することはかぶりコンクリートの密実性を低下させ、鉄筋腐食因子の侵入を促進すると考えられる。しかしながら、この内部ひび割れにおいて、異形鉄筋とコンクリートとの付着機構や鉄筋の継手などの鉄筋コンクリート部材の力学特性に関する研究は多く報告されているもの<sup>5),6)</sup>、内部ひび割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。

上述したように、かぶりは鉄筋腐食に関係する物質の侵入を抑制する役割があり、鉄筋防食の重要な因子の一つである。従って、内部ひび割れによる密実性低下の影響を考慮して鉄筋腐食因子の侵入に対して有効に働く“有効かぶり”の概念を確立することはコンクリート構造物の耐久性を確保する上で重要であると思われる。

表-1 コンクリートの配合

粗骨材 最大 寸法 (mm)	水セメ ント比 (%)	細骨 材率 (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )			混和剤 (g/m <sup>3</sup> )		スラ ンプ (cm)	空気 量 (%)	
			水	セメ ント	細骨材	粗骨材	A E 減水剤			A E 剤
20	40	44	164	410	762	988	1025	16.4	11.5	4.4

著者らは既にコンクリートの透気係数が内部ひび割れが発生することにより大きくなり、その増加の程度が鉄筋応力度、かぶりおよび鉄筋径に関係することを明らかにしている<sup>7)</sup>。さらに、内部ひび割れを有するコンクリートの透気係数は荷重履歴の影響を受けることを報告している<sup>8)</sup>。一方、鋼材腐食に関係する水分、塩分、酸素などは濃度差による拡散によりかぶりコンクリート内を移動するが、それらの移動割合はコンクリートの空隙構造に依存する。透気は圧力差により移動する現象であるが、拡散と同様にコンクリートの空隙構造に関係し、空隙構造を介して拡散と相関関係にあることを報告している<sup>9)</sup>。また、透気試験は拡散試験に比べて供試体の大きさの制約が少なく、試験時間が短いなどの利点がある。以上のことから、本研究はコンクリートの透気係数が鋼材腐食因子侵入の指標であると考え、曲げあるいは引張部材の引張部のかぶりコンクリートを取り出し模擬した両引き供試体を用いて透気試験を実施し、既往の実験結果および数値解析結果に新たに実験結果を追加し取りまとめ、内部ひび割れの影響を考慮して有効に機能するかぶりについて透気性の観点から検討を加えることを試みた。

## 2. 実験概要

### (1) 使用材料

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。混和剤にはリグニンスルホン酸塩系のA E減水剤と空気量の調整にアルキルアリルスルホン酸化合物を主成分とするA E助剤を用いた。両引き供試体を用いた鉄筋はSR235φ22の市販の丸鋼およびSD295Aの呼び名D16，D19，D22，D25の横ぶしを有する市販の異形鉄筋である。

### (2) 供試体の作製

本研究において内部ひび割れ性状に影響を及ぼす要因として鉄筋の種類、鉄筋応力度、鉄筋径、かぶり、荷重の繰り返し回数および履歴荷重の大きさを取り上げた。供試体の作製は8回に分けて実施し、各要因について2体ずつ作製した。表-1は本実験で用いたコンクリートの示

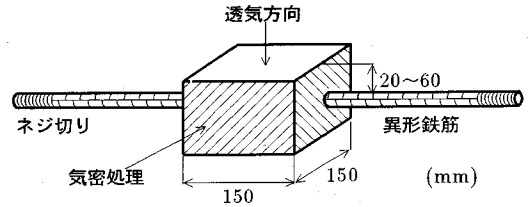


図-1 両引き供試体

方配合およびスランプ、空気量の平均値を示す。水セメント比は40%としたが、これは水セメント比が小さくなれば、相対的に透気性に及ぼす内部ひび割れの影響が強くなり、その影響が把握しやすいためである。また、温度20℃で水中養生したコンクリートの材齢28日における圧縮強度および弾性係数の平均値はそれぞれ57.6MPa，35300MPaであった。

両引き供試体は図-1に示すように透気方向に垂直な面を150×150mmとし、供試体高さを20～60mm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、内部ひび割れは横ぶしから発生することから、内部ひび割れの発生状況を同じとするために縦リブが透気面に直角な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日間行った。その後、飽水状態のコンクリートにおいては透気が観察されないことから、温度20℃湿度60% R.H.の恒温恒湿室で、透気面以外の4側面をビニル系粘着テープでシールして透気面の2方向から水分が逸散するように約14日～21日間乾燥させた。乾燥の程度は空隙率（供試体から逸散した水分の体積／供試体のコンクリートの体積）で約3%とした。3%の空隙率は予備実験より、乾燥期間が比較的短くても、ある程度透気し安定した透気性状が得られることから決定した。3%の空隙率に達した供試体は乾燥が進まないようにするため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の約14日～30日間恒温恒湿室に静置した。なお、静置期間の違いによる透気係数の差はほとんど観られなかった。

### (3) 透気試験方法

載荷および透気試験を行う前に、供試体のすべての面にグラインダーをかけ、アセトンで油、ごみ等を取り除いた後、供試体の透気面以外の4側面をエポキシ樹脂系接

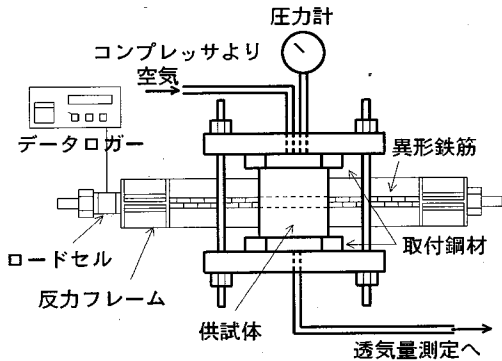


図-2 透気試験装置

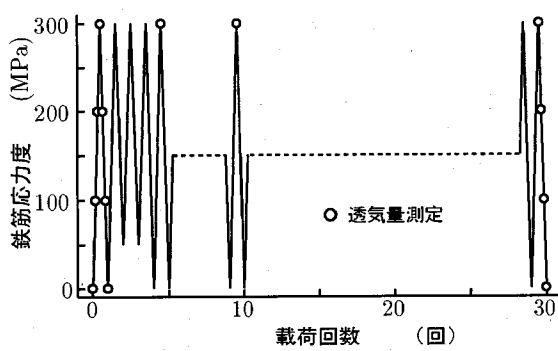


図-3 荷重履歴の一例

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、130×130mmの穴を有する取付鋼材を上下の透気面に接着した。

静的荷重は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行った。載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、鉄筋応力度で100～300MPaとなるように与えた。所定の荷重を与えた後、あらかじめネジ加工してある鉄筋の端部をナットで反力フレームに固定し、供試体をPC鋼棒で締め付けて透気試験装置に取り付けた。なお、与えた鉄筋の引張応力度は透気量測定時において平均で約1.0MPa程度低下した。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。

繰り返し載荷では一般に補修・補強を必要としない、鉄筋の降伏点を越えない程度の中小規模の地震により<sup>10)</sup>、使用状態よりも大きな応力が生じる場合に内部ひび割れがさらに進展すると考え、低サイクルで弾性範囲内の応力履歴を鉄筋に与えた。繰り返し荷重を与える場合は万能試験機を用いて荷重の上昇時および下降時とも鉄筋応力度で毎秒約2.5MPaの載荷速度で行った。繰り返し載荷時の最小鉄筋応力度は50MPaで最大鉄筋応力度は

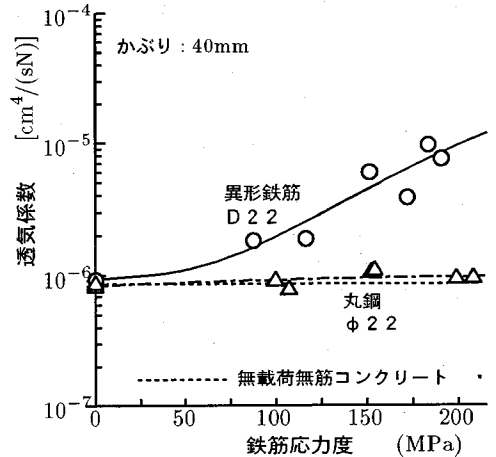


図-4 異形鉄筋および丸鋼を用いた供試体の透気係数

100, 200, 300MPaの3通りとした。透気量の測定は繰り返し回数1回目(静的載荷)、5回目、10回目、30回目に万能試験機から供試体を取り外し透気試験の反力フレームに所定の鉄筋応力度で固定して行った。本研究で与えた繰り返し荷重の一例を図-3に示す。なお、繰り返し回数が30回から60回になっても透気係数はほとんど変化しなかったことから<sup>8)</sup>、本実験では30回までとした。

透気量の測定は載荷試験終了後直ちに0.2MPa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。その際に気密処理を行った面に石鹼水を噴霧して、供試体から空気が漏れていないことを確認した。空気の透過方向は打設方向とは逆方向とした。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。

$$K = \frac{2LP_1}{P_2^2 - P_1^2} \frac{Q}{A} \quad (1)$$

ここで、

- K : 透気係数 [cm<sup>4</sup>/(sN)]
- L : 供試体厚さ (cm)
- P<sub>1</sub> : 大気圧 (N/cm<sup>2</sup>)
- P<sub>2</sub> : 載荷圧 (N/cm<sup>2</sup>)
- Q : 透気量 (cm<sup>3</sup>/s)
- A : 透気面積 (cm<sup>2</sup>)

### 3. 実験結果および考察

#### (1) 鉄筋の種類および鉄筋応力度が透気係数に及ぼす影響

図-4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。図中の破線は引張力が作用していない無筋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

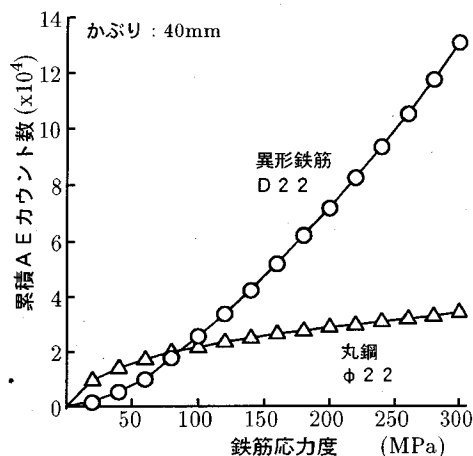


図-5 累積AEカウント数

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あるいは丸鋼の場合とほぼ同じ値であったものが、鉄筋応力度の増加と共に透気係数が増加している。図-4において、異形鉄筋と丸鋼を用いたそれぞれの供試体のコンクリートは同じ条件で作られているにもかかわらず、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割れに起因するものと思われる。そこで内部ひび割れの発生状況を知るためにコンクリートの内部破壊挙動の計測方法の一つであるアコースティックエミッション(AE)法によりAEカウント数を測定した。図-5は載荷試験時に共振周波数140KHzのAEセンサーを用いてAE検出レベルを0.3mVとして測定した累積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100MPaでは丸鋼とほぼ同じ値であったものが200MPaでは2倍以上の値となっている。なお、図-5の載荷実験では貫通ひび割れは観察されなかった。ここで計測されたAEカウント数には摩擦や雑音によるものも含まれており、すべてが内部ひび割れの発生や進展に関係しているとは言えないが、このAEの発生状況は図-4に示す丸鋼と異形鉄筋を用いた供試体の透気係数の相違が内部ひび割れの発生によるものであることを示す一つの結果であると思われる。

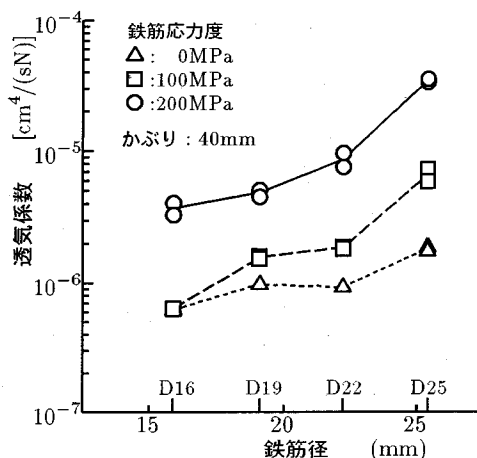


図-6 コンクリートの透気係数に及ぼす鉄筋径の影響

## (2) 鉄筋径およびかぶり径が透気係数に及ぼす影響

図-6はかぶりを40mmで一定として用いた異形鉄筋の直径を変化させた場合の透気係数を示す。鉄筋応力度100MPaではD16を用いた供試体の透気係数はほとんど増加していないが、鉄筋応力度200MPaではどの鉄筋径の供試体においても無載荷の場合の透気係数よりも大きくなっている。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。

既往の内部ひび割れに関する研究によれば、内部ひび割れはふしが高いほど発生しやすいという傾向がみられ、さらに内部ひび割れの長さも長くなるとの報告がある<sup>3)</sup>。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割れゾーンの幅の違いによるものと思われる。

図-7は異形鉄筋D22を用いてかぶりを変化させた供試体の透気係数を示す。引張力の作用していない供試体の透気係数に対して、引張力が作用した供試体はかぶりが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20mmで鉄筋応力度が200MPaの場合に2つの供試体の透気係数の差が他の場合に比べて大きくなっているが、かぶりが20mmの透気係数の大きいものは引張応力度を100MPaから200MPaに増加させた際に供試体の透気面に鉄筋と直角方向に内部ひび割れが表面に達したひび割れが発生したためである。内部ひび割れが供試体表面に達して貫通ひび割れとなると、主として空気がひび割れ部を流れるため、コンクリートの透気係数は大きくなるが、本研究では表面に表れない内部ひび割れ

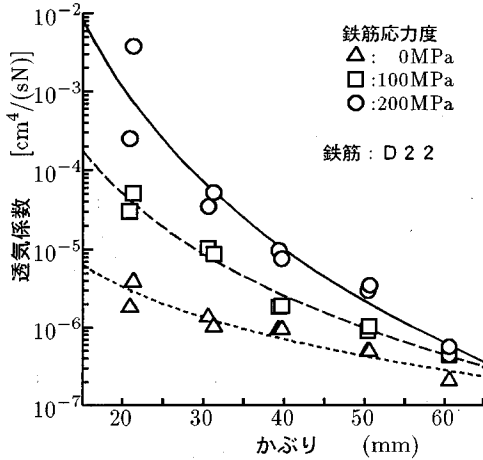


図-7 コンクリートの透気係数に及ぼすかぶりの影響

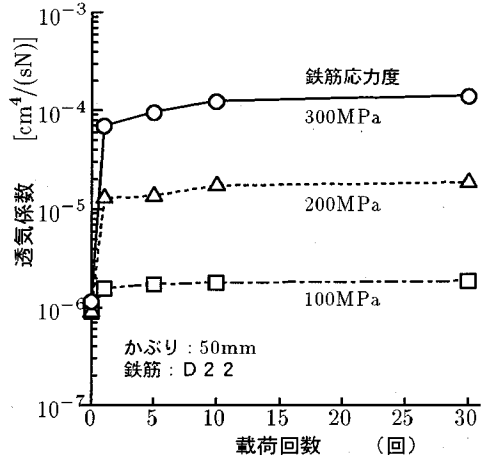


図-9 透気係数に及ぼす荷重の繰返し回数の影響

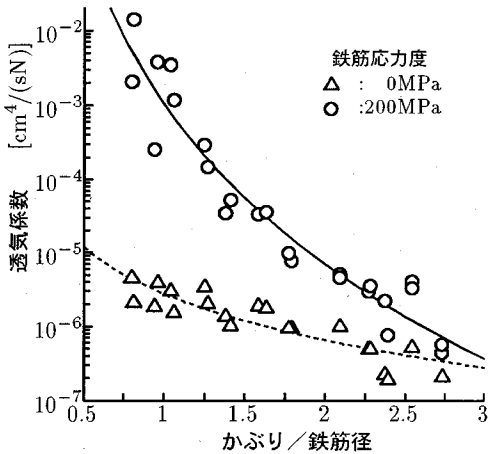


図-8 かぶり/鉄筋径と透気係数との関係

によるコンクリートの密実性の低下を対象としている。

内部ひび割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<sup>3)</sup>、図-7の供試体においては定着長および使用鉄筋が同じであることから、内部ひび割れゾーンはかぶりが異なった供試体においてもほぼ同じ幅を有していると考えられる。従って、かぶりの厚い供試体は内部ひび割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。

以上のように鉄筋応力度が同じであれば両引き供試体の透気係数は鉄筋径が大きくなれば、また、かぶりが小さくなれば小さくなることから、鉄筋径に対するかぶりの比（以下、かぶり/鉄筋径と呼ぶ）を用いて整理した結果を図-8に示す。引張力が作用した両引き供試体の透気係数はかぶり/鉄筋径が大きくなるにつれて小さくなっており、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。また、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はかぶり/鉄筋径の関数となっていることがわかる。

### (3) 荷重の繰返し回数および荷重履歴が透気係数に及ぼす影響

図-9は透気係数に及ぼす荷重の繰返し回数の影響を示す。繰返し載荷時の最大鉄筋応力度はそれぞれ100, 200, 300MPaであり、透気量測定時の鉄筋応力度も最大鉄筋応力度と同じである。静的載荷することにより鉄筋応力度に対応して透気係数は大きくなり、さらにどの鉄筋応力度においても繰返し回数の増加とともに透気係数は増加している。また、静的載荷時から荷重の繰返しによる透気係数の増加は、最大鉄筋応力度が大きいものほどその割合が大きくなっている。しかしながら、最大鉄筋応力度300MPaの場合で、透気係数は静的載荷により約60倍に増加しているが、その後の30回の荷重の繰返しでは約2倍程度しか増加しておらず、無載荷から静的載荷時までの透気係数の増加割合に比べて荷重の繰返しによる透気係数の増加は小さい。

そこで、図-10は鉄筋応力度で300MPaの荷重が繰返し作用した時の繰返し回数1回当たりに発生したA Eカウント数を示す。なお、A Eカウント数を計測する際の載荷は万能試験機から供試体を取り外すことなく荷重の範囲を鉄筋応力度で50～300MPaの範囲で行った。

最初に荷重が作用したときに最大のA Eカウント数が生じ、その後急激に減少し、繰返し回数10回以上になるとA Eカウント数はほぼ一定となり、その数はわずかとなっている。このようにA E発生状況からわかるよう

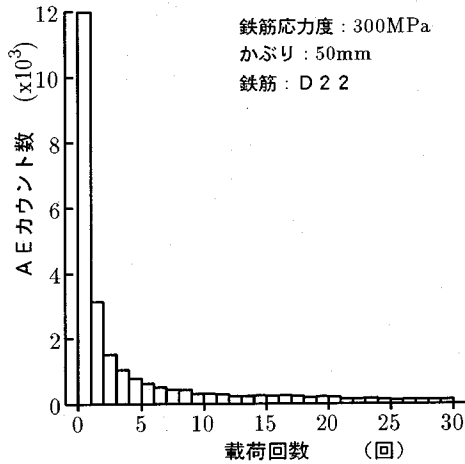


図-10 繰り返し载荷中のAEイベント数

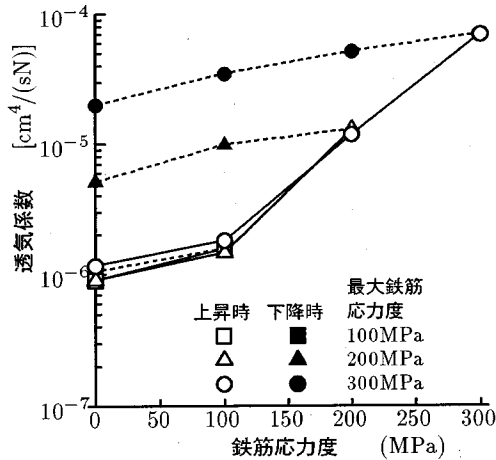


図-11 透気係数に及ぼす荷重履歴の影響

に、本実験のような低サイクルで一定の荷重が同じように作用する繰り返し载荷では繰り返しの初期に発生した内部ひび割れがほとんど変化しないため、透気係数も荷重の繰り返し数が増加してもあまり大きく増加しなかったものと考えられる。

次に図-11は100, 200, 300MPaの最大鉄筋応力度を生じさせた静的载荷時における荷重の上昇時および下降時に計測した透気係数を示す。上昇時は処女载荷であるためどの場合も鉄筋応力度が同じであればその時の透気係数も同じとなっている。しかしながら、下降時では上昇時と同じ鉄筋応力度であっても、透気係数は上昇時よりも大きく、その程度は過去に生じた最大鉄筋応力度が大きいものほど大きくなっている。この透気係数の不可逆的挙動は内部ひび割れが非回復性のものであり、同じ鉄筋応力度であっても、ひび割れが閉じずに開いた状態

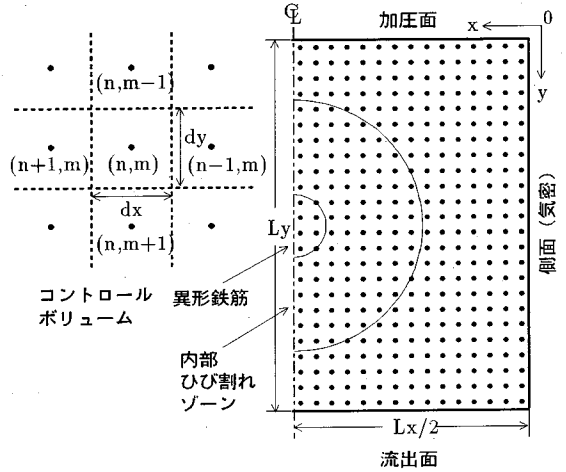


図-12 格子点の配置

になっている部分があるためと考えられる。

#### (4) 数値解析による検討

以上のように、引張を受ける異形鉄筋周辺のコンクリートの透気係数の増加は内部ひび割れの発生と進展により透気係数が大きくなった内部ひび割れゾーンが存在するためと考えられるが、内部ひび割れゾーンの透気係数とその範囲を明確にした供試体を用いて透気試験を行うことは困難であることから、数値解析により内部ひび割れゾーンの透気係数の大きさと内部ひび割れゾーンの幅の違いがかぶりコンクリート全体の平均透気係数に及ぼす影響について検討を加える。

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。

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

ここで  $P$  は圧力、 $\rho$  は密度である。また、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、 $x$  および  $y$  方向とも同じ透気係数  $K$  とした。

次に、供試体内に図-12に示すような2次元配列の格子点  $(n, m)$  を考え、そのまわりの大きさが  $dx \times dy$  のコントロールボリュームについて積分すれば、以下の離散化方程式が得られる<sup>11)</sup>。

$$\begin{aligned} A_p P(n, m) &= A_e P(n+1, m) + A_w P(n-1, m) \\ &\quad + A_n P(n, m+1) + A_s P(n, m-1) \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、

$$A_p = A_e + A_w + A_n + A_s$$

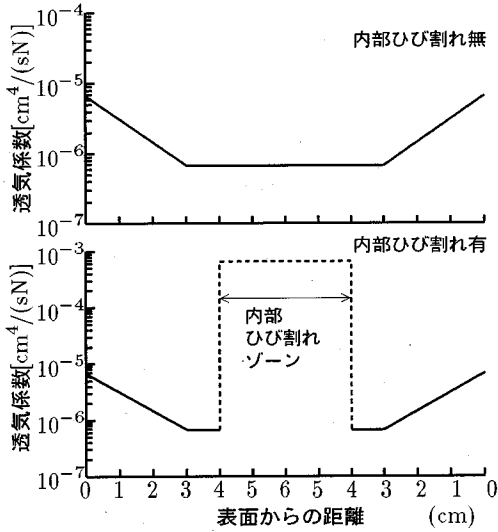


図-13 解析に用いた透気係数の分布

$$A_e = \frac{dy}{dx} \frac{\rho(n, m) + \rho(n+1, m)}{1/K(n, m) + 1/K(n+1, m)}$$

$$A_w = \frac{dy}{dx} \frac{\rho(n, m) + \rho(n-1, m)}{1/K(n, m) + 1/K(n-1, m)}$$

$$A_n = \frac{dx}{dy} \frac{\rho(n, m) + \rho(n, m+1)}{1/K(n, m) + 1/K(n, m+1)}$$

$$A_s = \frac{dx}{dy} \frac{\rho(n, m) + \rho(n, m-1)}{1/K(n, m) + 1/K(n, m-1)}$$

$y$  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 (図-12参照).

$$x = 0 (\text{側面}), L_x/2 (\text{中央}) : \partial P / \partial x = 0$$

$$y = 0 : P = P_2 (\text{載荷圧})$$

$$y = L_y : P = P_1 (\text{大気圧})$$

コントロールボリュームの大きさを  $5 \times 5 \text{mm}$  として, コントロールボリュームで表した鉄筋の直径が  $20 \text{mm}$  (D19 あるいは D22 に対応する), かぶり  $50 \text{mm}$  を有する  $150 \times 120 \text{mm}$  の断面について解析を行った.

計算に用いた透気係数に関して, 本実験においてはどの供試体も空隙率が約  $3\%$  となるように乾燥させたが, 相対する透気面の 2 方向から乾燥させたため, コンクリート内部では透気方向に関して空隙率分布が一様とはならず, 供試体中央において空隙率の小さい部分が存在する. また, コンクリート内部の透気係数は空隙率の分布に対応した値となることが明らかとされていることから<sup>11)</sup>, 厳密にはコンクリート内部の空隙率分布を測定して透気係数の分布を決定するべきであるが, ここでは, 既往の研究<sup>12)</sup>を参考にして, 内部ひび割れの無い場合の透気係数は図-13に示すように表面から  $3 \text{cm}$  の位置まで透気係数が  $1/10$  になるよう仮定した. また, 内部ひび割れが発生している場合は, 内部ひび割れゾーンに位置

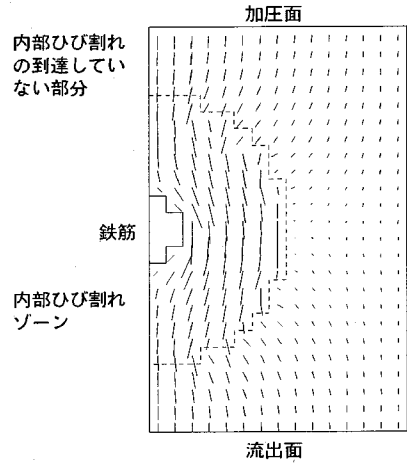


図-14 内部ひび割れを有するコンクリート中の空気の流れ

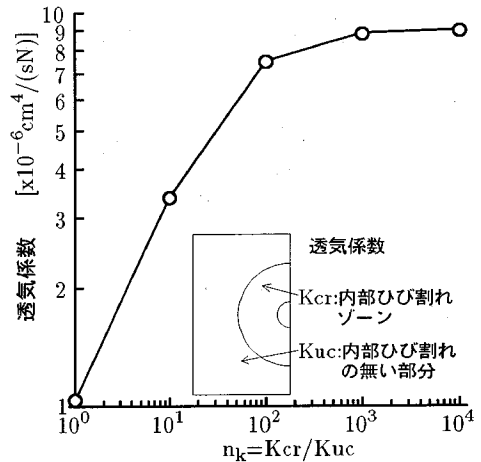


図-15 内部ひび割れゾーンの透気係数の大きさの影響

するコントロールボリュームの透気係数を大きくすることとした.

図-14は内部ひび割れゾーンの幅を鉄筋径の 1.5 倍とし, 内部ひび割れゾーンの透気係数を内部ひび割れの無い場合の 100 倍として求めた各コントロールボリュームを流れる空気の質量流速を示す. 各格子点に示してある直線は質量流速の大きさと方向を表す. 計算結果は内部ひび割れゾーンの透気係数が大きく空気が流れやすいため, 内部ひび割れゾーンに向かう流速成分が生じている. その結果, 内部ひび割れゾーンの流速が大きくなることを示している.

図-15は内部ひび割れゾーンの領域を鉄筋径の 1.5 倍として, 内部ひび割れゾーンの透気係数を変化させたときの解析断面の平均透気係数を示す. 平均透気係数は解析断面の出口 ( $y=L_y$ ) での流量を用いて式 (1) より求

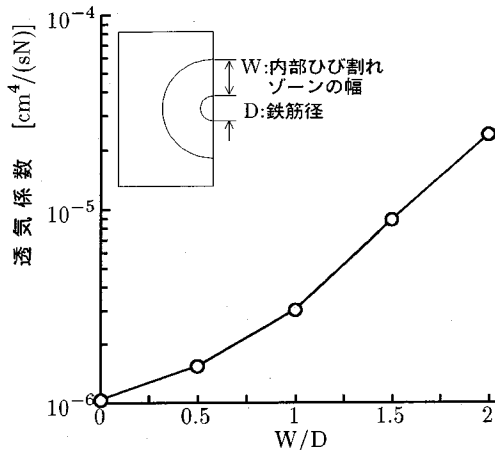


図-16 内部ひび割れゾーンの幅の影響

めた。平均透気係数は内部ひび割れゾーンの透気係数が大きくなるにつれて大きくなっているが、内部ひび割れゾーンの透気係数の増加が100倍以上では平均透気係数の増加の程度が小さくなっている。荷重の作用や荷重履歴により内部ひび割れが発生し、その内部ひび割れの幅が増大することにより内部ひび割れゾーンの透気係数が大きくなることが考えられるが、数値計算から、内部ひび割れゾーンの透気係数がある程度以上大きくなれば、それ以上の内部ひび割れゾーンの透気係数の増加は平均透気係数にほとんど影響しないと考えられる。

次に図-16は内部ひび割れゾーンの透気係数を内部ひび割れの無い場合の1000倍で一定として内部ひび割れゾーンの幅を変化させたときの平均透気係数を示す。平均透気係数は内部ひび割れゾーンの幅の増加とともに大きくなっており、図-15に示されたような平均透気係数の増加が頭打ちになる現象はみられない。この平均透気係数が内部ひび割れゾーンの幅に依存することおよび上述した内部ひび割れゾーンの透気係数が増加しても平均透気係数には上限値があることから、内部ひび割れが生じているかぶりコンクリートの透気係数は主に内部ひび割れの到達していない健全な部分のコンクリートの透気係数とかぶりに対する内部ひび割れゾーンの幅の割合に依存すると考えられる。

### (5) 有効かぶりの透気係数による検討

以上の実験結果および数値計算結果を参考にして、内部ひび割れが生じている場合のかぶりについて内部ひび割れがないものと同じ密実性を有するためにどの程度厚くすればよいか検討する。

透気性の観点から有効に働くかぶりを検討する場合、内部ひび割れを有するかぶりコンクリートの透気係数を知る必要がある。そこで最初に、上述した数値計算を用い

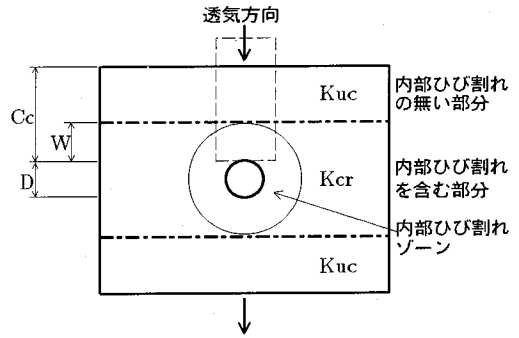


図-17 両引き供試体中の透気係数の分布の仮定

ずに内部ひび割れにより増大する両引き供試体の透気係数を求める。まず、内部ひび割れを有する両引き供試体を図-17に示すように異なる透気係数を有する2つの部分に分ける。すなわち、内部ひび割れゾーンを含む部分と内部ひび割れの無い部分である。このようにモデル化された両引き供試体の透気係数は調和平均の考えに基づき以下のように表される。

$$\begin{aligned}
 K_{sav} &= \frac{2C_c + D}{\frac{2(C_c - W)}{K_{uc}} + \frac{D + 2W}{K_{cr}}} \\
 &= \frac{2(C_c/D) + 1}{2\{(C_c/D) - (W/D)\} + \frac{1 + 2(W/D)}{n_k}} K_{uc}
 \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、

- $K_{sav}$  : 内部ひび割れを有する両引き供試体の平均透気係数
- $K_{cr}$  : 内部ひび割れを含む部分の透気係数
- $K_{uc}$  : 内部ひび割れがない部分の透気係数
- $C_c$  : 内部ひび割れがある場合のかぶり
- $W$  : 内部ひび割れゾーンの幅
- $D$  : 鉄筋径
- $n_k$  :  $= K_{cr}/K_{uc}$

上式を用いて計算される両引き供試体の透気係数と本実験で得られた透気係数を比較するために以下の値を用いた。 $C_c$  および  $D$  には供試体のかぶりと使用した鉄筋の公称直径を用い、内部ひび割れの無い部分の透気係数  $K_{uc}$  には無載荷の時に計測された透気係数を用いた。また、 $n_k$  の値としては本実験において内部ひび割れが透気面に観察されたかぶり20mmで鉄筋応力度が200MPaの場合の透気係数を内部ひび割れを含む部分の透気係数とみなすと  $n_k$  の値は約350となりこの値を用いた。さらに、内部ひび割れゾーンの幅は既往の付着に関する研究<sup>5)</sup>や本実験結果を参考にすれば鉄筋径の約1.0~2.0倍の範囲にあると考えられことから、内部ひび割れゾーンの幅を鉄筋径の1.0倍および1.5倍とした2通りの値を用いた。



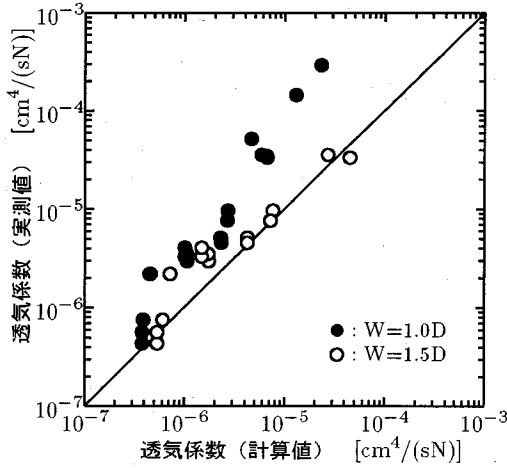


図-18 実験値と計算値の比較

図-18は式(4)を用いて計算された透気係数と実験で得られた鉄筋応力度 200MPa の場合の透気係数を比較したものである。内部ひび割れゾーンの幅を鉄筋径の 1.0 倍としたものは実測された透気係数のほうが計算された透気係数よりも大きくなっているが、内部ひび割れゾーンの幅を鉄筋径の 1.5 倍としたものは実測値と計算値とはよく一致している。なお、上述の差分法による数値計算結果や式(4)の形から明らかなように、 $n_k$  の値がある程度以上大きい場合には計算される透気係数に  $n_k$  はほとんど影響しない。このように内部ひび割れゾーンの幅として適切な値を用いれば、用いたコンクリートの透気係数、かぶりおよび鉄筋径から内部ひび割れを有するコンクリートの透気係数を計算することが出来る。

次に以上のような方法と同様に図-17の破線で囲まれた部分を取り出した鉄筋表面からコンクリート表面までの内部ひび割れゾーンを含んでいるかぶりコンクリートの透気係数を表せば、以下のとおりである。

$$K_{cav} = \frac{C_c}{(C_c - W)/K_{uc} + W/K_{cr}} = \frac{C_c}{C_c - W + W/n_k} K_{uc} \quad (5)$$

ここで、 $K_{cav}$  は内部ひび割れを有するかぶりコンクリートの平均透気係数である。

一方、鋼材腐食因子などの有害物質の侵入に関して、かぶりが  $C_c$  の内部ひび割れのある場合のコンクリートが、かぶりが  $C_o$  である内部ひび割れのない場合と同じ機能を有することは鉄筋に到達するそれら有害物質の量が同じであることから、透気性に置き換えれば鉄筋位置での流速が同じであることと等価である。従って、内部ひび割れのない場合のコンクリートの透気係数を  $K_{uc}$  とすれ

ば、ダルシー則より以下の関係が得られる。

$$K_{cav}/K_{uc} = C_c/C_o \quad (6)$$

従って、式(5)と式(6)より内部ひび割れのある場合とない場合のかぶりの関係は以下ようになる。

$$C_c = C_o + W - W/n_k \quad (7)$$

上式の右辺の第3項において、分母の  $n_k$  の値として両引き供試体の場合と同様に約 350 とすれば、右辺第3項目は第1および第2項目に比べて小さく無視できる。従って、内部ひび割れのあるコンクリートのかぶりは内部ひび割れのない場合のかぶりに内部ひび割れゾーンの幅を加えたものと等しいことから、有害物質の侵入の制御に有効に働いているかぶりは内部ひび割れの到達していない部分であると考えられる。内部ひび割れの進展は鉄筋応力度やひび割れ間隔などに依存するが、本実験の範囲では内部ひび割れゾーンは図-18の結果を参考にすれば鉄筋径の 1.5 倍の範囲にあると考えられる。従って、鉄筋コンクリート構造物のかぶりは耐久性からのみ決定されるものではないが、鋼材腐食の観点からかぶりを定める場合には、内部ひび割れによるかぶりコンクリートの密実性の低下を考慮して内部ひび割れのないものと同じ機能を有するためにはかぶりを内部ひび割れゾーンの幅すなわち鉄筋径の 1.5 倍厚くする必要がある。

#### 4. 結論

引張を受ける異形鉄筋周辺に発生する内部ひび割れによるかぶりコンクリートの密実性の低下について実験および数値解析により検討を加えた。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割れの発生により鉄筋応力度の増加と共に大きくなる。

(2) かぶりが同じであれば、鉄筋径が大きいものほど低い鉄筋応力度から透気係数は増加し、その増加割合も大きい。また、鉄筋径が同じであれば、供試体のかぶりが薄くなるにつれて透気係数の増加割合は大きくなる。

(3) 作用する鉄筋応力度が同じ場合、内部ひび割れによって増大したコンクリートの透気係数は鉄筋径に対するかぶりの比とよい相関関係にあり、鉄筋径に対するかぶりの比が大きくなるにつれて内部ひび割れのないコンクリートの透気係数からの増加が小さくなる。

(4) 荷重が繰り返し作用する場合、その作用回数の増加によって透気係数は増加するが、荷重の繰り返しによる透気係数の増加は1回目の載荷による透気係数の増加に比べて小さい。また、透気試験時の鉄筋応力度が同

じであっても過去に生じた最大鉄筋応力度が大きいものほど内部ひび割れを有するコンクリートの透気係数は大きくなる。

(5) 両引き供試体中の空気の流れに関する計算結果から、内部ひび割れを有するコンクリートの透気係数の大きさは内部ひび割れない部分の透気係数と内部ひび割れゾーンの幅に依存することが明らかとなった。

(6) 内部ひび割れを有するかぶりコンクリートが内部ひび割れないものと有害物質の侵入に対して同じ機能を有する為には透気性の観点からかぶりを内部ひび割れゾーンの幅だけ厚くする必要がある。

謝辞： 本研究を遂行するにあたり、当時宇都宮大学卒論生であった石川浩三（住友大阪セメント（株））、佐藤勝則（仙台市）両氏に多大な協力を頂いた。ここに謹んで感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書（平成8年制定）設計編，1996。
- 2) 小林和夫，宮川豊章，本田哲，富山春男：かぶりコンクリートが鉄筋腐食に与える影響，セメント技術年報，36，pp.497-501，1982。
- 3) 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割れに関する実験的研究，土木学会論文報告集，第294号，pp.85-100，1980。
- 4) 大即信明，櫻野紀元，片脇清士，小林明夫，宮川豊章：コンクリート構造物の耐久性シリーズ塩害（I），技報堂出版，

pp.23-43，1986。

- 5) 野口博：有限要素法による鉄筋コンクリートの非線形解析（第2報：異形鉄筋とコンクリートの付着—その1）（第3報：異形鉄筋とコンクリートの付着—その2），日本建築学会論文報告集，第258号，pp.27-37，1977.，第261号，pp.49-58，1977。
- 6) 大塚浩司：繰返し引張荷重をうける重ね継手部の性状について，コンクリート工学年次講演会講演論文集，第3回，pp.261-264，1981。
- 7) 氏家勲，長瀧重義，佐藤良一，石川浩三：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。
- 8) 氏家勲，長瀧重義，佐藤良一，佐藤勝則：かぶりコンクリートの透気性に及ぼす繰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。
- 9) 氏家勲，檜崎正尚，長瀧重義：コンクリートの透気性状と酸素および塩素イオンの拡散性状に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，第15巻，第1号，pp.519-524，1993。
- 10) 土木学会：コンクリート標準示方書（平成8年制定）耐震設計編，1996。
- 11) Suhas V. Patankar（水谷，香月共訳）：コンピュータによる熱移動と流れの数値解析，森北出版，pp.11-78，1988。
- 12) 氏家勲，長瀧重義：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，pp.496-497，1988。

(1996. 2. 21 受付)

## A STUDY ON DETERIORATION OF TIGHTNESS OF COVER CONCRETE DUE TO INTERNAL CRACKING BASED ON AIR PERMEABILITY

Isao UJIKE, Ryoichi SATO and Shigeyoshi NAGATAKI

The internal crackings deteriorate the tightness of cover concrete and must promote the ingress of materials corroding steel bar. In this study, air permeability tests as well as numerical analysis based on the finite difference method are conducted for estimating the deterioration of tightness of cover concrete due to the internal cracking. It has been cleared that the air permeability coefficient of concrete with internal cracking depends on the stress of reinforcing bar and ratio of cover to bar diameter. In order to keep the function of cover concrete with internal cracking at the same level as that of concrete without internal cracking, it is necessary to make cover thick as much as width of internally cracked zone.