

論文

[1106] 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

正会員○氏家勲 (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)  
 正会員 佐藤良一 (宇都宮大学建設学科)  
 佐藤勝則 (宇都宮大学建設学科)

1. はじめに

コンクリート構造物のかぶり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の低下は二酸化炭素が主因であり、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することができる。したがって、かぶりコンクリートを密実にするのはコンクリート構造物の防食上極めて重要である。しかしながら、引張を受ける異形鉄筋周辺のコンクリートには、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おり[1]、この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し、透気係数が数100倍以上にもなる場合があることを著者らの研究で既に明らかにしている[2]。

一方、地震を受けたコンクリート構造物は構造的には相当な健全性を保つように耐震設計がなされている。ところが、地震荷重により使用状態よりも大きな応力が繰り返して鉄筋に生じれば、内部ひびわれの発生を助長し、かぶりコンクリートの密実性をさらに低下するものと考えられる。

そこで、本研究は鉄筋の降伏点を越えない程度の中小規模の地震を受けたコンクリート構造物を想定し、弾性範囲内での繰り返しの荷重履歴を受けた鉄筋コンクリート部材の引張域のひびわれ間要素の透気試験を行い、かぶりコンクリートの密実性に及ぼす荷重履歴の影響を透気性の観点から検討した。

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

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 (%)	単位置量(kg/m <sup>3</sup> )				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	0.40	11.5	4.2

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。また、鋼材には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用いた。

供試体は鉄筋コンクリート引張部の鉄筋一本当たりの部分を取り出した両引き供試体を用いた。両引き供試体は透気面に垂直な面を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。また、鉄筋は供試体の中央に配置し、異形鉄筋を用いた場合には、横ぶしが透気面に向くよう型枠に固定した。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%に達した供試体はその4側面をエポキシ樹脂系接着剤で気密処理を行い、さらに、透気試験機に取り付けるために13×13cmの穴を有する鋼板を上下の透気面に取り付けた。

本実験で与えた荷重履歴を鉄筋応力度で表すと図-1に示すタイプA、B、Cの3とおりである。透気試験は図-2に示す装置を用いて行った。所定の鉄筋応力度は透気試験機を取り囲むように設置された反力フレームとセンターホールジャッキにより与えた。繰り返し荷重は透気試験機より供試体を取り外し、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2.5N/mm<sup>2</sup>の荷重速度で行った。透気量の測定は反力フレームに鉄筋を固定した後直ちに0.2 N/mm<sup>2</sup>の空気圧を与え、定常状態になった後に開始した。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[cm<sup>2</sup>/(s·N/cm<sup>2</sup>)]、L：供試体厚さ(cm)、P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub>：大気圧および荷重圧(N/cm<sup>2</sup>)、Q：透気量(cm<sup>3</sup>)、A：透気面積(cm<sup>2</sup>)

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 鉄筋の種類、鉄筋径およびかぶりの影響

ここでは、無荷重および静的荷重で鉄筋応力度200N/mm<sup>2</sup>が生じた状態で透気量を測定した後、最大鉄筋応力度で300N/mm<sup>2</sup>の荷重を繰り返して供試体を与えて、再び鉄筋応力度200N/mm<sup>2</sup>で透気量を測定したタイプA(図-1参照)の実験結果について示す。

図-3は異形鉄筋D22と丸鋼φ22を用いて荷重履歴を与えた供試体の透気係数を示す。異形鉄筋を用いた場合、無荷重の状態から荷重を作用させることにより透気係数が大きく増大し、その後の繰り返し回数の増加とともに30回の時点で約2倍程度増加しているが、静的荷重による増加に比べてその程度は小さい。それに対して、丸鋼を用いた供試体の透気係数は、荷重の作用および荷重履歴にかかわらずほぼ一定の値となっている。

図-4は異形鉄筋の直径の違いが荷重履歴を受けた供試体の透気係数に及ぼす影響について示

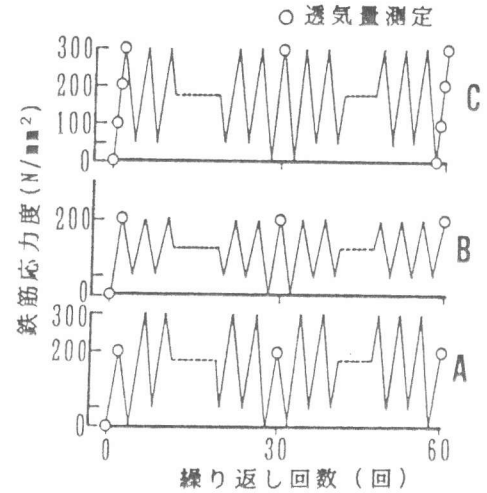


図-1 荷重履歴のタイプ

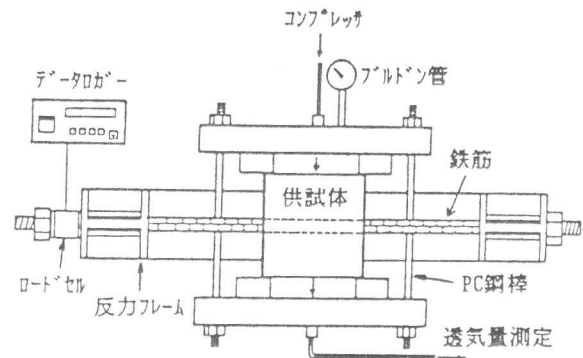


図-2 透気試験装置

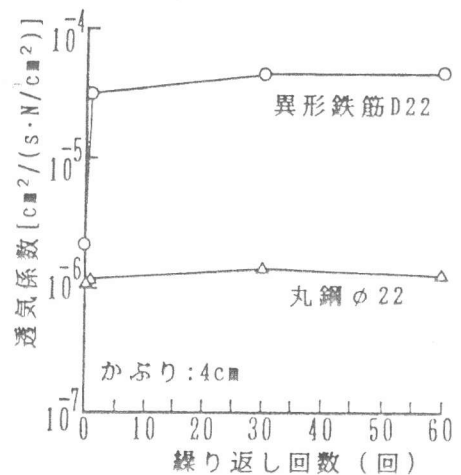


図-3 異形鉄筋と丸鋼を用いた供試体の透気係数

す。荷重が作用することによって供試体の透気係数は鉄筋径が大きいものほど大きくなっている。さらに、鉄筋応力度で $300\text{N}/\text{mm}^2$ の荷重が60回作用したことにより透気係数は、鉄筋径の違い

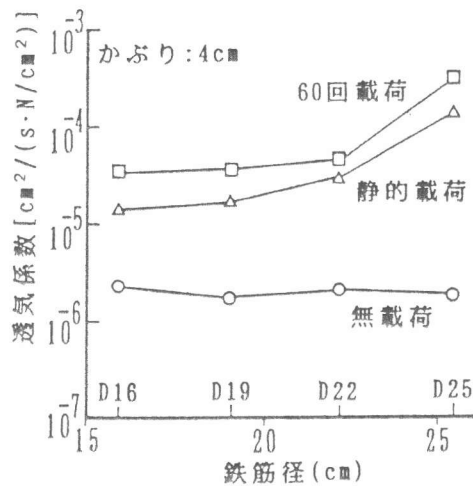


図-4 鉄筋径の異なる供試体の透気係数

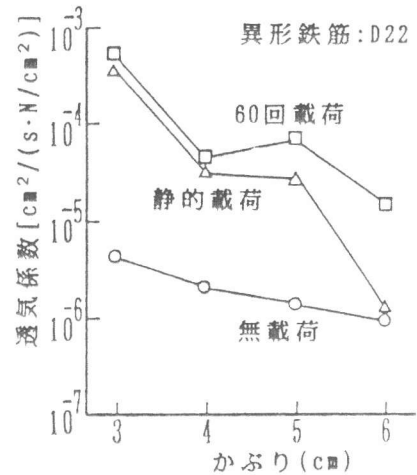


図-5 かぶりの異なる供試体の透気係数

によらずほぼ一定の割合で増加している。

図-5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。静的載荷によって増加する透気係数はかぶりの小さなものほど大きくなっている。しかしながら、60回の繰り返しの荷重履歴が作用したことによって、かぶりの大きなものほどその透気係数の増加割合は大きくなる傾向がみられる。

### 3.2 繰り返し回数の影響

次に、繰り返し回数の影響について検討を加える。図-6は透気量測定時の鉄筋応力度と発生した最大鉄筋応力度が同じである荷重履歴タイプBおよびCの場合の透気係数を示す。鉄筋応力度はそれぞれ $200\text{N}/\text{mm}^2$ と $300\text{N}/\text{mm}^2$ である。繰り返し回数の増加とともにどちらの場合も僅かではあるが増加しており、その程度は繰り返し回数30回目で2倍程度である。その後の60回目までにおいては鉄筋応力度 $200\text{N}/\text{mm}^2$ および $300\text{N}/\text{mm}^2$ どちらの場合ともほとんど増加していない。

そこで、繰り返しの影響をA Eの観点から検討するために、一例にタイプAの荷重履歴を与えた時の繰り返し回数1回当たりに発生したA Eカウント数の結果を図-7に示す。異形鉄筋を用いた供試体において、鉄筋応力度で $300\text{N}/\text{mm}^2$ の荷重が最初に作用する繰り返し回数2回目で最大のA Eカウント数が発生しているが、その後同じ荷重が作用している繰り返し回数3回目以降においては、A Eカウント発生数が急激に減少している。そして、繰り返し回数10回以上になるとA Eカウント数は一定となり、さらにその数はわずかである。A Eカウント数がすべて内部ひびわれの発生や進展に関係しているとはいえないが、このA Eの発生状況は繰り返し回数の増加とともに透気係数の増加割合が減少している図-6の結果と対応していると思われる。一方、丸鋼を用いた供試体においては、A Eカウントの発生数が異形鉄筋の場合に比べて少なく、

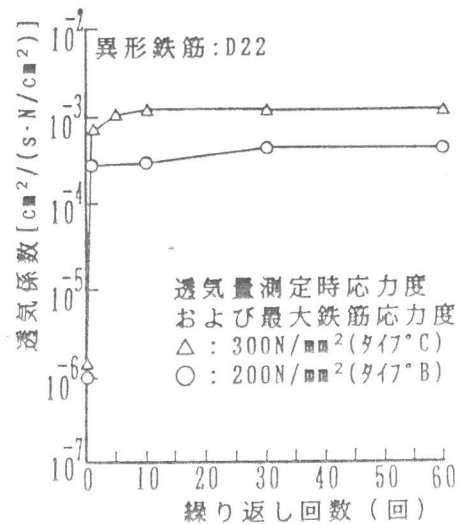


図-6 透気係数に及ぼす繰り返し回数の影響

また最初に鉄筋応力度で $200\text{N}/\text{mm}^2$ の荷重が作用したときに最大のAEカウント発生数となり、その後鉄筋応力度で $300\text{N}/\text{mm}^2$ の荷重が作用してもAEカウント発生数は減少しており、繰り返し回数4回以降においてはほとんど発生していない。このように丸鋼を用いた供試体のAEカウント発生数は異形鉄筋を用いた場合に比べてかなり少なく、図-3の結果ともよく対応している。

このようにAEの発生状況からわかるように、本実験のような低サイクルの繰り返しでは繰り返し初期に発生したひびわれがほとんど変化しないため、透気係数も繰り返し回数の増加によってはあまり大きく増加しなかったと考えられる。

### 3.3 最大鉄筋応力度の影響

図-8は透気係数に及ぼす過去に受けた最大鉄筋応力度の影響について示す。静的荷重を行った場合、コンクリートの透気係数は作用している鉄筋応力度の増加とともに対数グラフ上でほぼ直線的に増加している。また、過去に作用した最大鉄筋応力度と同じ鉄筋応力度であれば透気係数の増加は図-6に示すように約2倍である。しかしながら、60回の繰り返し荷重の後、過去に生じた最大鉄筋応力度よりも小さい鉄筋応力度で得られた透気係数は、特に使用状態で生じる $200\text{N}/\text{mm}^2$ 以下で静的荷重時の透気係数が、各鉄筋応力度において平行に増加するのではなく、荷重履歴の影響によりさらに大きくなっている。また、その程度は鉄筋応力度が小さくなるにつれて大きくなっている。これは、内部ひびわれが非回復性のものであり、鉄筋応力度が小さくなくても、静的荷重時と同じ鉄筋応力度の時のひびわれ幅まで閉じずに、開いた状態となっている部分があるためと考えられる。

### 3.4 数値解析による検討

以上の荷重履歴による透気係数の増加を内部ひびわれ幅の増加と進展によるものと考えて、それらを内部ひびわれゾーンの透気係数の増加と内部ひびわれゾーンの拡大として数値解析を行った。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より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、Y方向ともKとしてある。

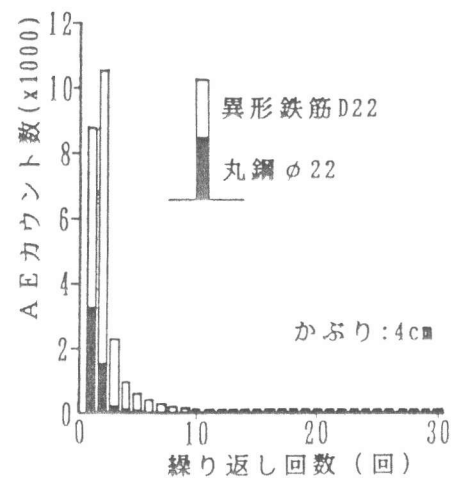


図-7 繰り返し荷重中のAEカウント数

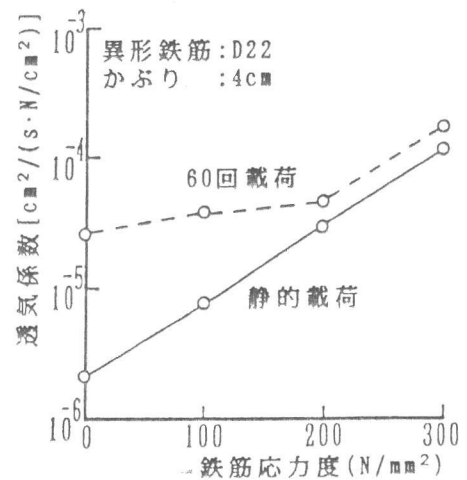


図-8 透気係数に及ぼす最大鉄筋応力度の影響

(2)式を図-9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について積分すれば、次の離散化方程式が得られる[3]。

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

ただし、  $Ap = Ae + Aw + An + As$

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

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

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

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

Y方向を空気の透過方向、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表される。

$$x=0 \text{ (供試体側面)} \quad x=Lx/2 \text{ (供試体中央)} : \partial P / \partial X = 0$$

$$y=0 : P=P2 \text{ (載荷圧)} \quad y=Ly : P=P1 \text{ (大気圧)}$$

解析の対象とした断面は鉄筋径20mm、かぶり50mmを有する150×120mmの断面である。コントロールボリュームの大きさは5×5mmとした。また、内部ひびわれのない場合の透気係数は図-10に示すように表面から3cmの位置までで透気係数が1/10になるよう仮定した。これは既往の研究で明らかかなように本実験のように上下の透気面の2方向から乾燥させた場合、コンクリート内の空隙率分布が一樣とならず、コンクリート表面部において空隙率の大きな部分が生じ、その部分の透気係数が大きくなることに基づいている[4]。厳密には、コンクリート内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、既往の研究を参考にして、内部ひびわれのない場合の透気係数の分布を図-10のように仮定した。

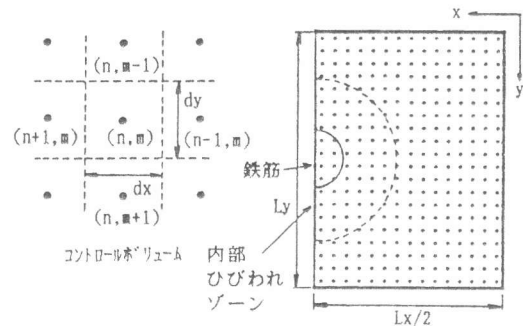


図-9 解析に用いた格子点

図-11は内部ひびわれゾーンの領域を鉄筋径の1.5倍として、

その部分の透気係数を変化させたときの透気量から求めた平均透気係数の結果を示す。平均透気係数は内部ひびわ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、内部ひびわれゾーンの透

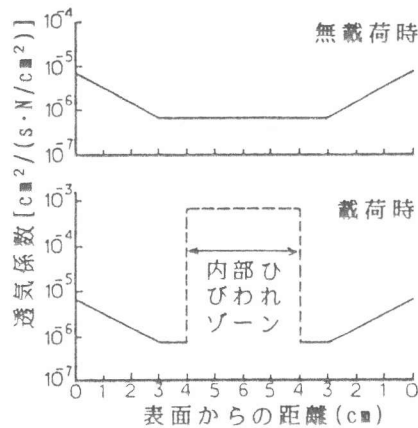


図-10 計算に用いた透気係数の分布

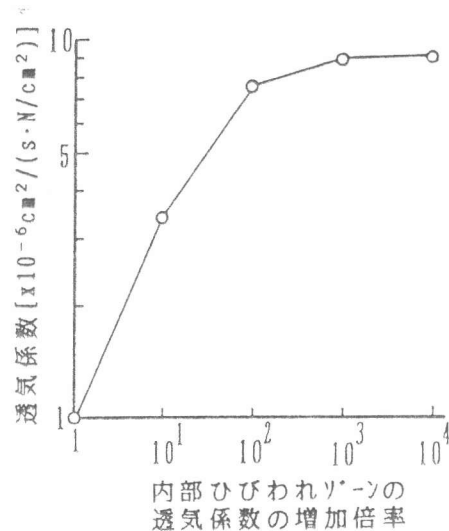


図-11 内部ひびわれゾーンの透気係数の影響

気係数の増加が100倍以上では平均透気係数ほとんど増加していない。荷重の作用や荷重履歴により内部ひびわれの幅が増大することにより内部ひびわれゾーンの透気係数が大きくなることが考えられが、実験結果および数値解析から、荷重履歴による内部ひびわれ幅の増大が透気係数の増加に及ぼす影響は少ないと考えられる。ただし、かぶりの厚い場合は荷重履歴により透気係数が増大しており、この点についてはさらに検討する必要がある。

次に図-12は内部ひびわれゾーンの透気係数を内部ひびわれのない場合の1000倍で一定として内部ひびわれゾーンの領域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われゾーンの領域の増加とともに大きくなっており、平均透気係数の増加に及ぼす影響は図-11で示した内部ひびわれゾーンの透気係数の増加の場合よりも大きい。以上の数値解析の結果から、静的載荷による透気係数の増加や常時に作用している荷重より大きな荷重の履歴を受けたコンクリートの透気係数の増加は最大鉄筋応力度の時に生じた内部ひびわれが達した領域に依存することが明らかとなった。また、このことは荷重履歴の影響により、内部ひびわれに起因する欠陥のない密実なかぶりコンクリートがより少なくなることを意味するものと思われる。

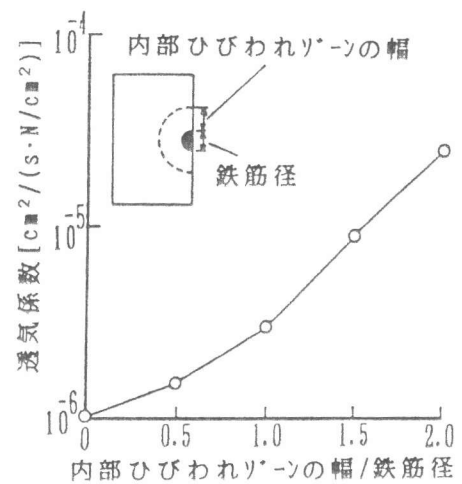


図-12 内部ひびわれゾーンの範囲の影響

#### 4. まとめ

- 1) 常時鉄筋に生じている応力度より大きな応力度が生じる繰り返しの荷重履歴を受けた両引き供試体の透気係数は鉄筋径の違いによらずほぼ一定の割合で静的載荷時の透気係数から増加する。
- 2) 丸鋼を用いた供試体の透気係数は繰り返しの荷重履歴が作用してもほとんど変化しない。
- 3) かぶりの大きい供試体は静的載荷による透気係数の増加は小さいが、繰り返しの荷重履歴による透気係数の増加割合は大きくなっている。
- 4) 繰り返し荷重が透気係数に及ぼす影響はさほど大きくないが、過去に生じた最大鉄筋応力度の影響は、常時生じている鉄筋応力度が小さくなるにつれて大きくなる。
- 5) 数値解析の結果から、繰り返しの荷重履歴による透気係数の増加は主として過去の最大荷重によって生じた内部ひびわれゾーンの大きさの拡大よることが明らかとなった。

[謝辞]本研究は平成2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ことを付記し、感謝の意を表します。

#### <参考文献>

- [1]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
- [2]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、1990、pp.407-412
- [3]S. 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
- [4]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、1988、pp.496-497