

コンクリート構造物における現場透気試験方法の改善に関する検討

氏家勲^{*1} 岡崎慎一郎^{*1} 中村翼^{*1}^{*1} 愛媛大学 大学院理工学研究科生産環境工学専攻(〒790-8577 愛媛県松山市文京町 3)

要旨：著者らは実際のコンクリート構造物における透気量の計測結果から透気係数を算出することを目的とした現場透気試験方法を提案した。提案した試験方法は、コンクリート表面を円形にシールし、その中心から排気するシール法とさらにその中心を削孔して排気するシール削孔法の2つである。本研究は実際の現場計測を考慮して測定時には所定の気密性を保持し、測定後にコンクリート表面から剥がしやすいコンクリート表面のシール材について検討した。また、シール削孔法では課題であった削孔内の排気方法について検討し、想定どおりの透気量計測が行えるように改善した。

キーワード：コンクリート、透気係数、現場測定、試験方法、維持管理、差分法

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性の低下は種々の劣化現象によって引き起こされるが、多くの場合が劣化因子のコンクリートへの侵入が原因となっている。従って、コンクリート構造物の耐久性を評価する上でかぶりコンクリートの品質、特に密実性の適切な把握は重要である。

コンクリート構造物のかぶりコンクリートの密実性の評価の一つに透気性がある。かぶりコンクリートの透気性の測定に関する研究は古くから行われており、現場で適用可能な様々な透気試験方法が提案されている^{1,2)}。現場透気試験方法は大きく分けて削孔法と表面法に大きく分類されている²⁾。削孔法はかぶりコンクリートに孔を設け、空気を吸入するためのアタッチメントを取り付ける方法であり、表面法はコンクリート表面にチャンパーを取り付ける方法で、どちらも空気を吸引あるいは加圧し所定の圧力に戻るまでの経過時間を計測することで、相対的に透気性を評価する方法である。したがって、相対的な評価であるため、異なる試験条件や試験装置による計測結果を単純に比較することができない。一方、トレント法のように絶対的な指標である透気係数を算出できる試験方法も提案されているが³⁾、かぶりコンクリートのどの範囲を測定しているかが明確にされていないと思われる。

著者らはシール法およびシール削孔法と呼んでいる試験方法を提案した⁴⁾。これらの試験方法の詳細は後述するが、シール法はコンクリート表面を円形状に気密処理して、その中心から吸引して透気量を測定するもので、シール削孔法はさらにその中心に孔を設けて、削孔内から吸引して透気量を測定するものである。既往の研究では計測された透気量に関するコンクリート内部の透

気領域を明確し、それに基づき、透気量から透気係数を算出する方法を示している。しかしながら、既往の研究では試験方法の基礎的な検討に主眼を置いたため、実構造物での現場計測に適用するためには改善すべき点が残された。本研究では一定期間を経て同じ場所で何度も測定するために、コンクリート表面に損傷などの影響を与えず脱着が可能な気密処理材について検討した。また、シール削孔法では削孔内からの排気が不十分であった点について、想定通りの透気量が得られるように検討した。

2. 提案した試験方法の概要

2.1 シール法

本研究でシール法と呼ぶ方法は、Fig.1に示すようにコンクリート表面を円形に気密処理し、その中央から真空ポンプで空気を吸出し、吸い出した流量から透気係数を算出するものである。この場合には、コンクリート内部の透気領域は図に示すように半球状となると考えられる。そこでコンクリートの透気係数 k が一定であると仮定し、ダルシー則を用いて、中心から任意の距離 r での半球面(表面積 $2\pi r^2$)を通る流量を Q_r とすると、以下ようになる。

$$\frac{Q_r}{2\pi r^2} = \frac{k}{\eta} \frac{dP}{dr} \quad [1]$$

ここに P : 圧力(N/m²)

r : 中心からの距離(m)

η : 粘性係数(Ns/m²)

そして、中心から $r=r_1$ での圧力を P_1 、中心から $r=r_2$ での圧力を P_2 、 $r=r_1$ での流量を Q_1 として式[1]を積分すると次式が得られる。

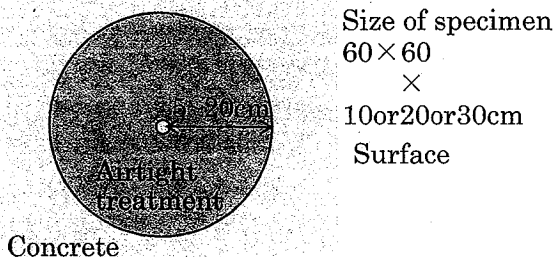
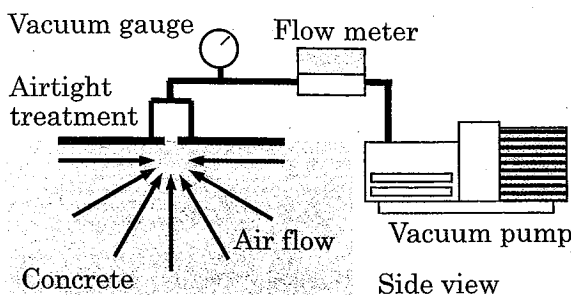


Fig. 1 Outline of seal method

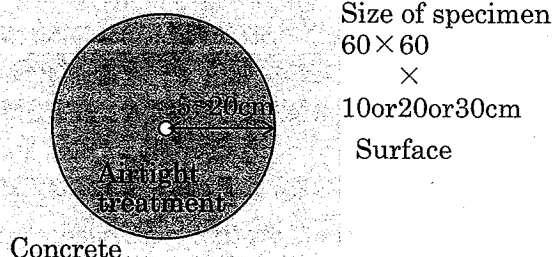
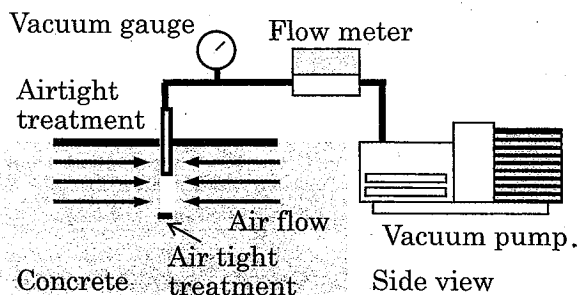


Fig. 2 Outline of seal intrusive method

$$k = \frac{Q_1 P_1 \eta}{2\pi(P_2^2 - P_1^2)} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad [2]$$

式[2]をシール法における透気係数の算出に用いる。

2.2 シール削孔法

本研究でシール削孔法と呼ぶ方法は、Fig. 2 に示すようにシール法と同様にコンクリート表面を円形に気密処理し、さらにその中央に直径 1cm の孔を設けて、その孔の深さの半分の位置までにパイプを挿入し、あとはシール法と同じように真空ポンプで空気を吸出し、吸出した流量から透気係数を算出するものである。削孔部の底面を気密処理し、コンクリート内部の空気の流れが Fig. 2 に示すようであると仮定し、さらにコンクリートの透気係数 k が一定であると仮定する。削孔部の深さを h とし、中心から任意の距離 r での円筒面(表面積 $2\pi rh$)を通る流量を Q_r とすると、次式が得られる。

$$\frac{Q_r}{2\pi rh} = \frac{k}{\eta} \frac{dP}{dr} \quad [3]$$

上式を中心から $r=r_1$ での圧力を P_1 、中心から $r=r_2$ での圧力を P_2 、 $r=r_1$ での流量を Q_1 として積分すると次式となる。

$$k = \frac{Q_1 P_1 \eta}{2\pi h(P_2^2 - P_1^2)} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \quad [4]$$

式[4]をシール削孔法における透気係数の算出に用いる。式[2]、式[4]で計算される透気係数 $k(\text{m}^2)$ は[L²]の次元で、理論上コンクリートの空隙構造のみに依存する固有透気係数である。本研究では空気の粘性係数として $18.2 \times 10^{-6} \text{Ns/m}^2$ を用いた。

Table 1 Mix proportion of concrete

W/C (%)	s/a (%)	Unit weight (kg/m ³)				
		W	C	S	G	Ad
65	45.5	168	258	834	1006	2.71

2.3 試験方法

実験で使用した供試体には、一般に断熱材として用いられる押出法ポリスチレンフォームおよびコンクリートを用いた。押出法ポリスチレンフォームを用いた理由は本研究では試験方法を検討することが主目的であるため、試験条件を変えた時の試験結果や2つの方法の試験結果を比較する場合に供試体の品質の影響を少なくするためである。押出法ポリスチレンフォームは $60 \times 60 \times 10 \text{cm}$ および $60 \times 60 \times 20 \text{cm}$ の大きさである。なお、本実験で使用した押出法ポリスチレンフォームの従来の供試体を用いた方法⁵⁾で測定した透気係数はコンクリートの透気係数と同程度の値であった。

コンクリート供試体は $60 \times 60 \times 30 \text{cm}$ の大きさで、配合は Table 1 に示すとおりである。セメントには普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm^3)を使用し、細骨材には唐津市産海砂(表乾密度 2.58g/cm^3)、西条市産砕砂(表乾密度 2.58g/cm^3)および津久見市産石灰砕砂(表乾密度 2.67g/cm^3)を 1:1:3 で混合したものを、粗骨材には東温市産碎石(表乾密度 2.62g/cm^3)をそれぞれ用いた。混和剤は AE 減水剤を使用した。コンクリート供試体は材齢 28 日までは湿布養生を行い、その後は屋内で気中養生とした。

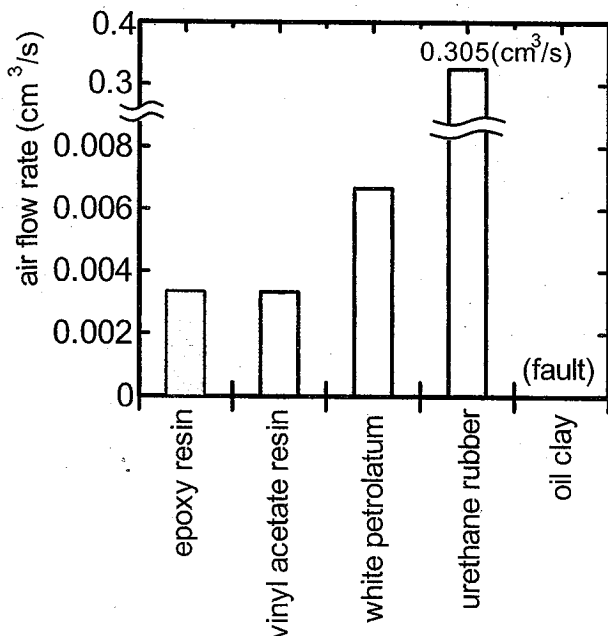


Fig. 3 Effect of seal material on air flow rate by seal method

3. 実験結果および考察

3.1 表面シール材の検討

本研究で提案するシール法およびシール削孔法を実際のコンクリート構造物に対して使用する場合に、既往の研究⁴⁾のようにエポキシ樹脂系接着剤でコンクリート表面をシールすると、試験終了後にそのシールを剥がすのに手間がかかり、かつコンクリート表面に損傷を与える恐れがある。構造物に使用されているコンクリートの品質の経時的な変化を把握することはコンクリート構造物の維持管理技術において重要であると考えられる。本研究では同じ位置で何度も計測することを想定し、コンクリート表面状態に合わせて密着して透気試験時には所定の気密性を確保し、試験終了後には容易にコンクリート表面に損傷を与えることなく剥がせるシール材について検討した。

本研究で検討したシール材は以下の4つである。

- ・ウレタンゴム粘着シート
- ・油粘土
- ・白色ワセリン
- ・酢酸ビニル樹脂

ウレタンゴムは免震用の緩衝材などに用いられているもので、白色ワセリンは軟膏基剤などとして使われている薬品で、酢酸ビニル樹脂はガムの基盤材や入れ歯の安定材に用いられているものである。

Fig. 3は押出法ポリスチレンフォーム(60×60×20cm)に関して、シール材の種類を変えてシール法により測定した透気流量を示す。油粘土は注意深く張り付けてもポリスチレンフォームと油粘土の間に隙間ができ、チャンバー内が安定した所定の気圧にならなかった。ウレタンゴム粘着シートは所定の気圧とはなったが、エポキシ樹脂と比較すると流量が大きく、これも隙間があるもの考

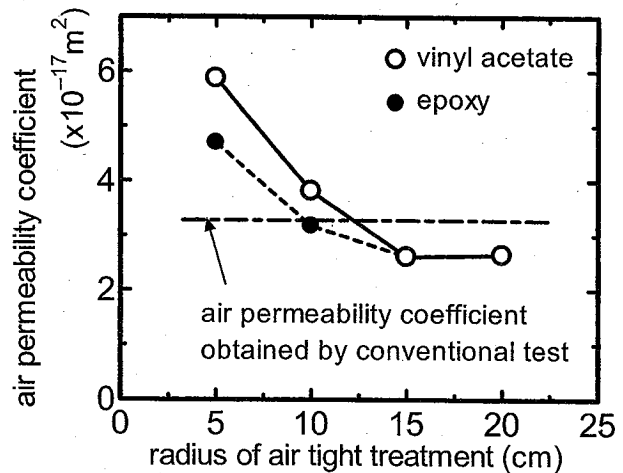


Fig. 4 Air permeability coefficient by seal method using epoxy and vinyl acetate (polystyrene)

えられる。白色ワセリンは塗布後真空ポンプに吸引されないよう塩化ビニル板を重ね、その上にチャンバーを取り付けて吸引した。所定の気密性が確保でき、流量もエポキシ樹脂と近い結果となった。しかしながら、吸引によりポリスチレンフォームの表層部に浸透しており、同じ位置での繰り返しの測定には適していないと考えられる。酢酸ビニル樹脂は表面の微細な凹凸に追従でき、所定の気密性も確保でき、流量もエポキシ樹脂と同じとなっている。また測定対象物の表面に対する影響についても浸透することなく、また、試験終了後乾燥させると固化するため容易にはがすことが可能であった。

そこで、Fig. 4は酢酸ビニル樹脂をシール材に用いたシール法によって得たポリスチレンフォームの透気係数とエポキシ樹脂を用いた場合とを比較したものである。なお、図中の一点鎖線は15×15×10cmの大きさに切り出したポリスチレンフォーム供試体を用いた従来の透気試験方法によって得た透気係数である。酢酸ビニル樹脂を用いたシール法ではシール半径が5cmと10cmの場合にエポキシ樹脂を用いたシール法よりやや透気係数が大きくなっているが、シール材の種類による差はないと考えられる。また、シール法で得られた透気係数は通常透気試験方法で得られた透気係数ともほぼ一致している。

3.2 シール削孔法の検討

Fig. 5は既往の研究においてシール削孔法で実測された透気量とコントロールボリュームを用いた3次元差分解析により計算された透気量を示す。実測の透気量は孔の深さが2cm以上深くなってもほとんど増加せず、削孔深さによらずほぼ一定となった。本来ならば、計算値2(Calc. 2)のように削孔深さが深くなるとともに透気量も増加すると考えられる。この削孔深さが深くなっても透気量が増加しない現象は、Fig. 6に示すよう供試体表面にチャンバーを設置したため、表面近傍のポリスチレンフォームからチャンバー部への空気の流れが形成されたためと考えられる。計算値1は吸引部に接する

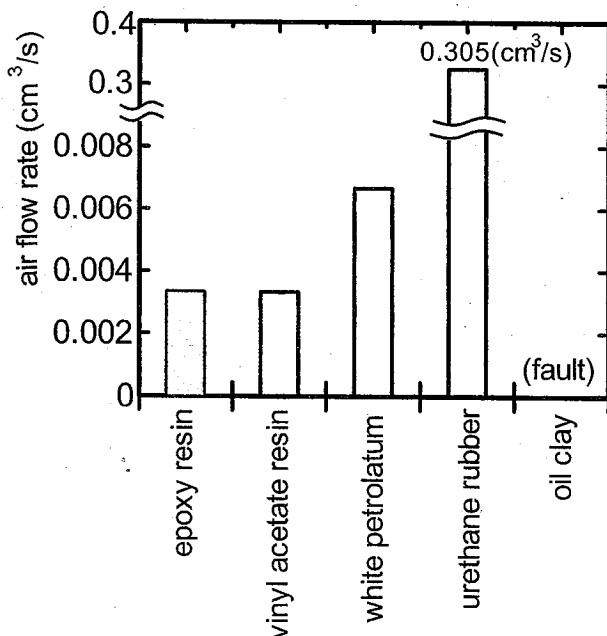


Fig. 3 Effect of seal material on air flow rate by seal method

3. 実験結果および考察

3.1 表面シール材の検討

本研究で提案するシール法およびシール削孔法を実際のコンクリート構造物に対して使用する場合に、既往の研究⁴⁾のようにエポキシ樹脂系接着剤でコンクリート表面をシールすると、試験終了後にそのシールを剥がすのに手間がかかり、かつコンクリート表面に損傷を与える恐れがある。構造物に使用されているコンクリートの品質の経時的な変化を把握することはコンクリート構造物の維持管理技術において重要であると考えられる。本研究では同じ位置で何度も計測することを想定し、コンクリート表面状態に合わせて密着して透気試験時には所定の気密性を確保し、試験終了後には容易にコンクリート表面に損傷を与えることなく剥がせるシール材について検討した。

本研究で検討したシール材は以下の4つである。

- ・ウレタンゴム粘着シート
- ・油粘土
- ・白色ワセリン
- ・酢酸ビニル樹脂

ウレタンゴムは免震用の緩衝材などに用いられているもので、白色ワセリンは軟膏基剤などとして使われている薬品で、酢酸ビニル樹脂はガムの基盤材や入れ歯の安定材に用いられているものである。

Fig. 3は押出法ポリスチレンフォーム(60×60×20cm)に関して、シール材の種類を変えてシール法により測定した透気流量を示す。油粘土は注意深く張り付けてもポリスチレンフォームと油粘土の間に隙間ができ、チャンバー内が安定した所定の気圧にならなかった。ウレタンゴム粘着シートは所定の気圧とはなったが、エポキシ樹脂と比較すると流量が大きく、これも隙間があるもの考

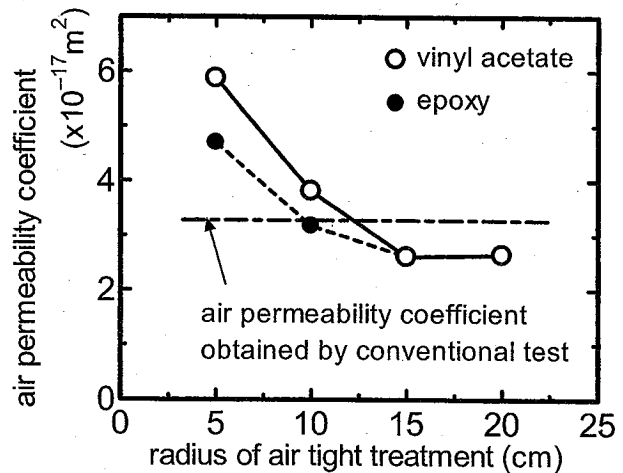


Fig. 4 Air permeability coefficient by seal method using epoxy and vinyl acetate (polystyrene)

えられる。白色ワセリンは塗布後真空ポンプに吸引されないよう塩化ビニル板を重ね、その上にチャンバーを取り付けて吸引した。所定の気密性が確保でき、流量もエポキシ樹脂と近い結果となった。しかしながら、吸引によりポリスチレンフォームの表層部に浸透しており、同じ位置での繰り返しの測定には適していないと考えられる。酢酸ビニル樹脂は表面の微細な凹凸に追従でき、所定の気密性も確保でき、流量もエポキシ樹脂と同じとなっている。また測定対象物の表面に対する影響についても浸透することなく、また、試験終了後乾燥させると固化するため容易にはがすことが可能であった。

そこで、Fig. 4は酢酸ビニル樹脂をシール材に用いたシール法によって得たポリスチレンフォームの透気係数とエポキシ樹脂を用いた場合とを比較したものである。なお、図中の一点鎖線は15×15×10cmの大きさに切り出したポリスチレンフォーム供試体を用いた従来の透気試験方法によって得た透気係数である。酢酸ビニル樹脂を用いたシール法ではシール半径が5cmと10cmの場合にエポキシ樹脂を用いたシール法よりやや透気係数が大きくなっているが、シール材の種類による差はないと考えられる。また、シール法で得られた透気係数は通常透気試験方法で得られた透気係数ともほぼ一致している。

3.2 シール削孔法の検討

Fig. 5は既往の研究においてシール削孔法で実測された透気量とコントロールボリュームを用いた3次元差分解析により計算された透気量を示す。実測の透気量は孔の深さが2cm以上深くなってもほとんど増加せず、削孔深さによらずほぼ一定となった。本来ならば、計算値2(Calc. 2)のように削孔深さが深くなるとともに透気量も増加すると考えられる。この削孔深さが深くなっても透気量が増加しない現象は、Fig. 6に示すよう供試体表面にチャンバーを設置したため、表面近傍のポリスチレンフォームからチャンバー部への空気の流れが形成されたためと考えられる。計算値1は吸引部に接する

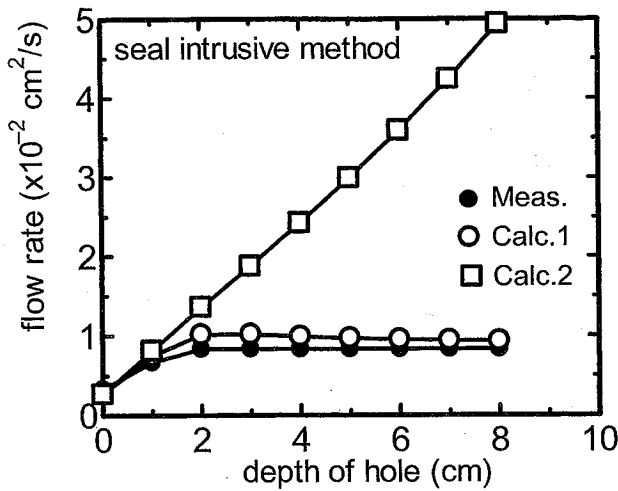


Fig. 5 Comparison of measured and calculated air flow rate by seal intrusive method⁴⁾

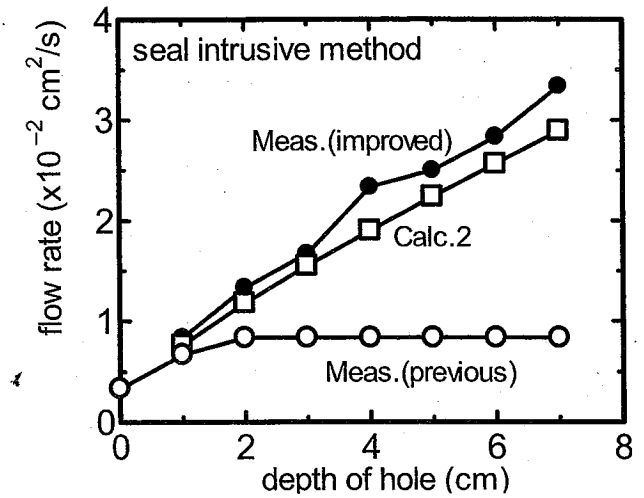


Fig. 7 Comparison of measured and calculated air flow rate by improved seal intrusive method

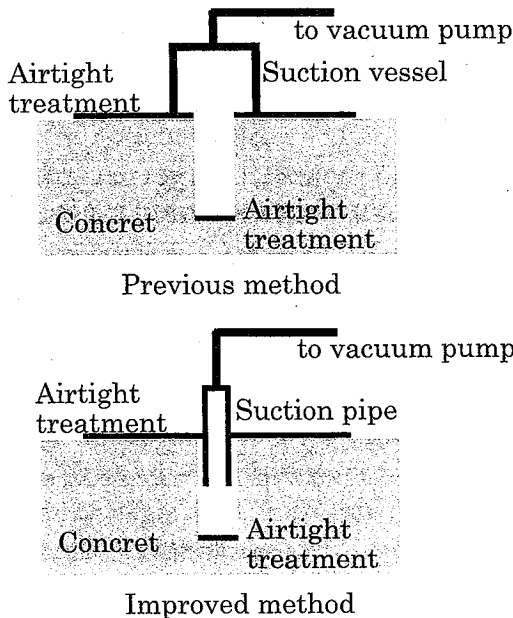


Fig. 6 Improvement of suction part of seal intrusive method

1つのコントロールボリュームの界面からの透気量であり、実測値とよく一致しており、解析結果も吸引部近傍での気途の形成を示唆している。

そこで削孔深さが深くなると透気域が広がり透気量が増加するように、吸引の方法を Fig. 6 のように改善した。改善点は吸引のための容器の代わりに削孔内にポリウレタン製の管を挿入して吸引した。挿入した管の先端は削孔した穴の深さのほぼ中央になるよう長さを調整し、また、管と表面のシール材とは接着して気密性を確保した。

Fig. 7 は改良されたシール削孔法により測定した透気量を示す。比較のために既往の方法による透気量と Fig. 5 に示した 3 次元差分解析で計算された計算値 2 も示す。管を削孔内に挿入して吸引することにより、実測された透気量は削孔の深さの増加とともに増加してい

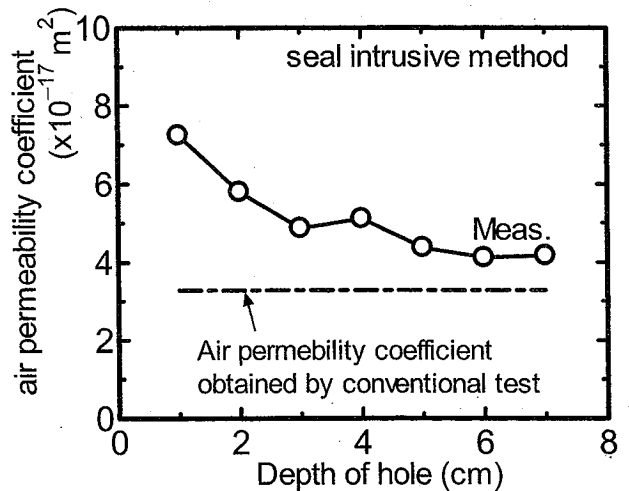


Fig. 8 Air permeability coefficient measured by improved seal intrusive method

る。また、改良された方法による透気量は計算値ともほぼ一致している。Fig. 8 は Fig. 7 に示す改良された方法による透気量から式[4]を用いて求めた透気係数を示す。図から分かるように、削孔深さが深くなるにつれて、小さくなっている。そして、削孔深さが 5、6、7cm ではほぼおなじ透気係数となっている。このように削孔深さが深くなるにつれて透気係数が小さくなり、ある値に収束する傾向にあることは既往の研究で実施した数値計算でも確認されている。削孔深さが 5cm 以上の透気係数は供試体を使用した通常の透気試験結果より得られる値より大きくなっている。式[4]は Fig. 2 に示すように削孔周辺に円筒状の透気領域ができると仮定して誘導された式である。このことも既往の数値計算で確認されており、削孔法では削孔側面に対して垂直な流れに加えて、削孔底面は気密処理しているが、削孔深さより深い位置から削孔へ流入する流れが形成される。そして、それにより透気量が多くなり削孔周辺の円筒状の領域か

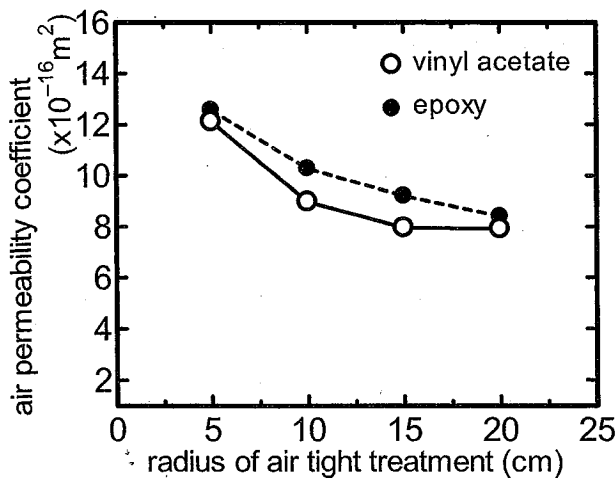


Fig. 9 Air permeability coefficient by seal method using epoxy and vinyl acetate (concrete)

らのみの透気量で計算する式[4]による透気係数はやや大きくなる。

3.3 コンクリートへの適用

押出法ポリスチレンフォームで確認した供試体の表面シール材としての酢酸ビニル樹脂の有用性とシール削孔法での管による改善に関してコンクリート供試体でその有用性を検討した。

Fig. 9はコンクリートにおいて酢酸ビニル樹脂を用いたシール法によって透気係数を求めた結果を示す。Fig. 9には比較のためにエポキシ樹脂を用いたシール法による結果も示している。酢酸ビニル樹脂をコンクリートの表面に用いても所定の気密性が確保され、エポキシ樹脂の場合とほぼ同じ透気係数が得られている。

Fig. 10は酢酸ビニル樹脂(シール半径 15cm)を用いたシール削孔法によって測定したコンクリートからの透気量を示す。Photo 1はシール削孔法によってコンクリートに対して測定している状況を示す。Fig. 7で示したように、削孔深さが深くなるにつれて直線的に増加すべきところが、削孔深さが深くなるにつれてその増加割合が低下している。さらに、削孔深さが深くなっても透気係数はほぼ一定の値とならず、深くなるにつれて減少している。Fig. 7と Fig. 10では押出法ポリスチレンフォームとコンクリートと測定対象のみが異なっている。コンクリート供試体では表面から水分が逸散することによりコンクリート内部ほど含水率が高い。このことにより、コンクリート供試体の透気係数も一定ではなく、表面から深くなるにつれて透気係数は小さくなる分布を形成する⁵⁾。この透気係数の分布によってコンクリートでの透気量の傾向がポリスチレンフォームと異なると考えられる。

このことを数値計算において検討・確認した。数値計算ではコントロールボリュームの大きさは0.5×0.5×0.5cmとし、解析対象は軸対称であるので、その1/4(30×30×30cm)を取り出し解析した。Fig. 11は計算に用

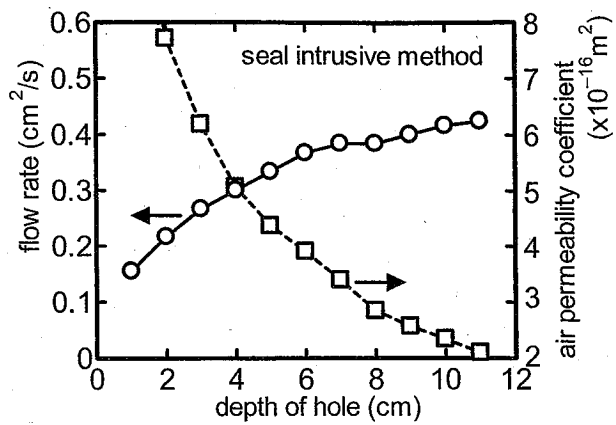


Fig. 10 Air flow rate measured by improved seal intrusive method at concrete

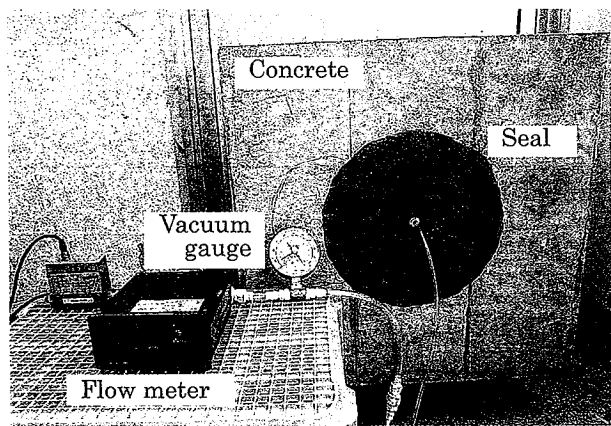


Photo 1 Measurement situation on seal intrusive method (concrete)

いたコントロールボリュームの透気係数の配置の概要を示す。表面から10cmより以下の部分の透気係数の値 k は削孔深さが1cmの場合の実測値の透気量と計算値が一致するよう定めた。さらにコントロールボリュームの透気係数は表面から2cm間隔で5層に分けて、その部分のコントロールボリュームの透気係数を表面から10cmまでの部分の透気係数 k を図に示すように2倍~10倍まで大きくした。これは上述したように、コンクリート表面から内部に向かうにつれて、透気係数が小さくなることを考慮したためである。なお、この解析ではコンクリート内部で透気係数が分布を有することがシール削孔法の測定結果にどのように影響するかを確認するために、透気係数の分布は単純に直線分布とした。

Fig. 12はコンクリート供試体に対して実施したシール削孔法で実測された透気量と数値計算で求めた計算値を比較したものである。数値計算において、実測値の透気量に一致する計算値を与えるためのコントロールボリュームの透気係数の分布は種々に設定できるが、実際のコンクリートで起こりうる透気係数の分布状況を設定した今回の計算値は、削孔深さが深くなるにつれて徐々に増加割合が低下する実測値の傾向をよく表わしてい

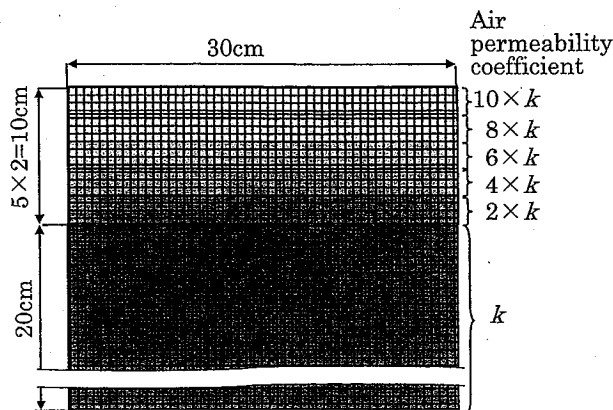


Fig. 11 Distribution of air permeability coefficient in control volume

る。従って、シール削孔法での削孔深さの増加に伴う透気量の挙動は測定方法の不具合ではなく、測定対象物の品質によるものであると考えられる。

シール法では従来の現場透気試験方法と同様に、測定領域に関してある種の平均的なコンクリートの透気係数を求めることになる。一方、シール削孔法では削孔深さごとに測定することにより、透気係数の分布に対応した透気量となることから、コンクリートの含水状態の情報と組み合わせると実構造物のコンクリートの透気係数の分布を評価することができる可能性がある。この点については今後さらに検討する予定である。

4. まとめ

本研究は既往の研究で提案した実構造物でのコンクリートの透気係数を測定する試験方法に関して問題点の改善を行った。本研究の範囲で得られた結果をまとめると以下の通りである。

- (1) シール法およびシール削孔法において、コンクリート表面のシール材に酢酸ビニル樹脂を用いることによって、エポキシ樹脂系接着材と同等の気密性が確保でき、さらにコンクリートに損傷を与えることなく容易に除去できる。
- (2) シール削孔法において、測定対象物の表面に吸引容器を取り付けるのではなく、削孔内部に吸引パイプを挿入して排気するように改良した。これにより、均質な材料であるポリスチレンフォームに用いた場

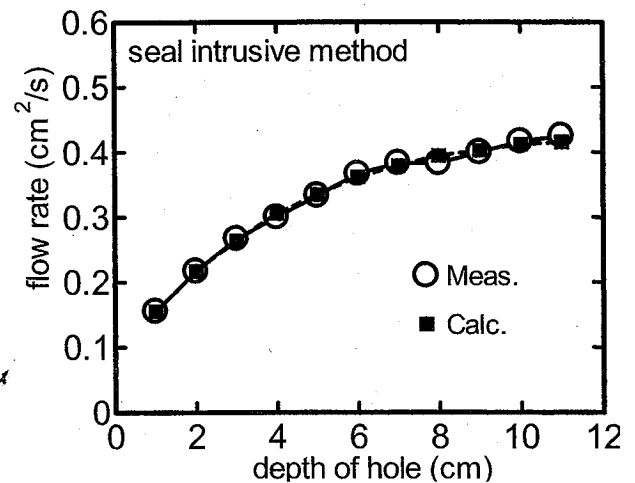


Fig. 12 Comparison of measured and calculated air flow rate by improved seal intrusive method (concrete)

合、削孔が深くなるにつれて透気量は直線的に増加し、数値計算とほぼ一致した。

- (3) 改良したシール削孔法をコンクリートに適用した場合、コンクリート内部の透気係数に対応して、削孔が深くなるにつれて、直線的ではなく増加割合が徐々に低下する透気量の傾向を測定することができた。

参考文献：

- 1) 氏家勲：実構造物におけるかぶりコンクリートの吸水性、透水性、透気性の測定方法、コンクリート工学、Vol.32、No.12、pp.43-47 (1994)
- 2) 今本啓一ほか：実構造物の表層透気性の非・微破壊試験方法に関する研究の現状、コンクリート工学、Vol.44、No.2、pp.31-38 (2006)
- 3) R. J. Torrent：A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, Materials and Structures, 25, pp. 358-365 (1992)
- 4) 氏家勲、土屋崇、岡崎慎一郎：実構造物でのコンクリートの透気係数の測定方法に関する検討、セメント・コンクリート論文集、No. 62、pp.197-204 (2008)
- 5) 氏家勲、長瀧重義：コンクリートの透気性の定量的評価に関する研究、土木学会論文集、No. 396/V-9、pp.79-87 (1988)

A STUDY ON IMPROVEMENT OF IN-SITE AIR PERMEABILITY TEST FOR CONCRETE STRUCTURE

Isao UJIKE^{*1}, Shin-ichiro OKAZAKI^{*1} and Tsubasa NAKAMURA^{*1}

^{*1} EHIME UNIVERSITY, Graduate School of Science and Engineering, Dept. of Engineering for Production and Environment (3, Bunkyo-cho, Matuyama-shi, Ehime 790-8577, Japan)

ABSTRACT : The in-situ air permeability test method has been proposed by authors. The method can obtain an air permeability coefficient from measurement of air flow rate at a concrete structure. The proposed test methods are called the seal method and the seal intrusive method. On the seal method, air is exhausted from the center of circular airtight treatment on concrete surface. On the seal intrusive method, further a hole is made in center of circular airtight treatment and air is exhausted from the hole. In this study, the seal material that maintains airtight at the measurement and peels off easily from surface of concrete after the measurement was investigated. Polyvinyl acetate is suitable for the seal material from the viewpoint of the keeping of airtight at the measurement and easiness of seal material to remove after the measurement. Furthermore, the exhausted method for the seal intrusive method was improved to measure the supposed air flow rate. The proper air flow rate is obtained by inserting the pipe in the center of the hole and exhausting it in the seal intrusive method. The seal intrusive method has the possibility of evaluating the distribution of the air permeability coefficient in concrete by the measurement that gradually makes the hole deeper.

KEY WORDS : Concrete, Air Permeability Coefficient, In-situ Measurement, Test Method, Maintenance, Finite Difference Method