

かぶりコンクリート中の透気係数分布をシール削孔法により

求める方法の提案

岡崎 慎一郎*1, 氏家勲*2

1. はじめに

本研究は、著者らが独自に開発した透気試験方法であるシール削孔法に基づき、コンクリートの表層から深部に至るまでのコンクリートの透気係数を、かぶりコンクリートの段階的な削孔により求める手法を提案するものである。

現在、表層コンクリートの物質移動抵抗性を評価するための非破壊・微破壊試験方法は多く提案されている。表層の吸水性状から品質を評価するもの、吸引チャンバーを表面に設置し、真空ポンプによる空気吸引によって判明する透気性状から品質を評価するものなどが代表的である。ただし、吸水性状であれば、水の浸潤範囲を、透気性状であれば、真空状態にあるチャンバーとの接地面から、およそ大気圧と等しくなるまでの領域を明確にすることが出来なければ、コンクリート表層からどの程度の範囲の品質を各々の試験結果が反映しているかを定かにすることができない。コンクリートの品質は若材齢時の乾燥の影響を受け、表層から深部に至るまでの空隙構造が連続的に変化していることから、各種試験の影響範囲を把握しなければ、どの範囲まで検出しているか不明であり、コンクリートの品質を適切に評価できないと思われる。

このような背景のもと著者らは、空気吸引チャンバーのまわりに円形の気密処理を施すことによって透気領域を明確化させることに成功した¹⁾²⁾。また透気領域の明確化により透気係数が算出できるようになることで、既存の多くの室内実験結果との対応が可能となり、例えば現場で透気係数を得ることでただちにコンクリートの塩化物イオンの拡散係数などの推定ができるようになった。さらに、空気吸引口を深部の方向に削孔することで、表層から削孔深さに至るまでの領域の平均的な透気係数を得ることを提案している。しかしながら、この手法の場合は常に表層から任意の深さまでの平均的な透気係数の算出しかできず、表層から深部にかけて連続的に向上する品質の部分的な評価を行うことができない。

そこで本研究では、削孔前後の透気量の差を使用することで局所的な透気係数を評価できる差分透気係数を提案し、その妥当性を解析および実験により検証する。

2. シール削孔法による透気係数の算出

2.1 シール削孔法概要

筆者らはこれまで、透気試験において、コンクリート表層の空気吸引口の周囲をラテックス樹脂円形により気密処理することにより、透気領域を明確化し、透気係数を現場で測定できる手法を開発している¹⁾²⁾。さらに、空気吸引口を削孔することにより、表層から削孔深さに至るまでのコンクリートの平均的な透気係数を算出する方法も提案している¹⁾²⁾。シール削孔法は、試験終了後モルタルなどで孔を埋めたのち、後日同じ箇所を再び削孔することで、計時変化をも確認することが可能である。

本研究では、シール削孔法を応用し、削孔を段階的に行い、削孔を進める前後の透気係数の差を分析する

*1 愛媛大学大学院 講師 理工学研究科 生産環境工学専攻 博(工)

*2 愛媛大学大学院 教授 理工学研究科 生産環境工学専攻 博(工)

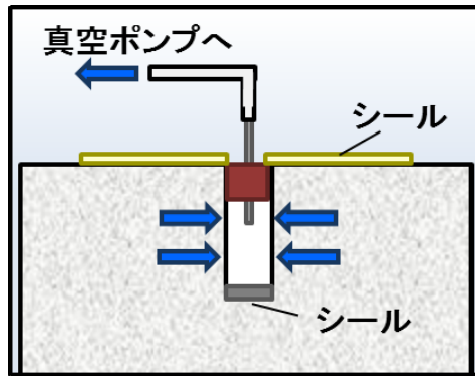


図-1 シール法の概要

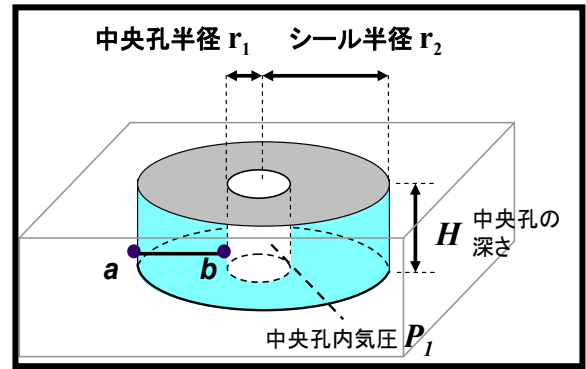


図-2 透気領域

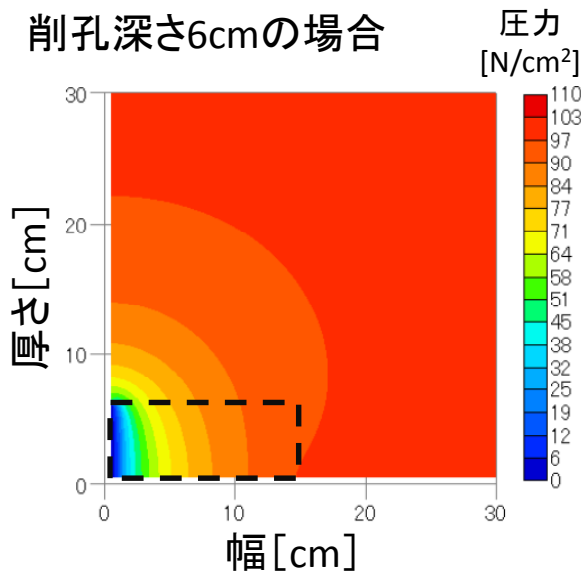


図-3 削孔深さ 6cm の場合の圧力コンター

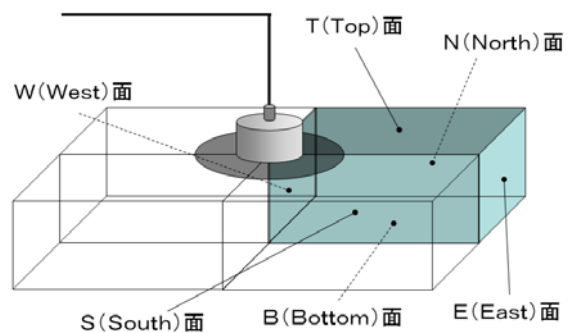


図-4 解析領域

ことよって、削孔した深さ分の平均的なコンクリートの透気係数を算出し、その妥当性を数値解析および実験により検証するものである。

シール削孔法とは、図-1のように、中央の吸引部分に直径1cmの孔を削孔し、孔の底面にエポキシ樹脂を塗布し気密処理を行った上で空気吸引を行う方法である。孔底面からの空気の流入をエポキシ樹脂により遮断しているため、空気の流れが孔の側面に垂直方向に一次元化した流れが達成させることができる。コンクリートを一様な透気係数をもつ均質体とみなすと、透気領域は中央孔を中心とした中空円柱状となる(図-2)。中空円柱上の任意の点 c における半径方向の平均流速を v_r とし、ダルシー則を適用すると式(1)のようになる。ここで、断面積 A_r は図に示すような中空円柱の外周の表面積と考えると $A_r = 2\pi rh$ となり、式(2-2)は次のように表すことができる。

$$v_r = -\frac{k}{\eta\rho} \frac{dP}{dr} \quad (1)$$

ここに、 k : 固有透気係数 (m^2)、 η : 粘性係数 ($Pa \cdot sec$)、 P : 任意の点 r における圧力 (Pa)、 r : 中心から任意の点 r までの半径 (m)、 ρ : 流体の単位体積あたりの重量 (N/m^3) である。また、点 O から点 r を半径とし、高さ h の円筒の側面積を A_r 、円筒側面から流入する透気量を Q とすると、平均流速 v_r は透気量 Q を A_r で除

して求められるので、式(1)は以下のように書き換えられる。

$$\frac{Q}{A_r} = -\frac{k}{\eta\rho} \frac{dP}{dr} \quad (2)$$

さらに、 $A_r=2\pi rh$ を代入し、点 a （透気領域の外）から点 b （中央孔）まで、境界条件 $P=P_1$ at $r=r_1$, $P=P_2$ at $r=r_2$ のもとに両辺を積分すると以下の透気係数算出式が導かれる。

$$k = \frac{\eta P_2 \log_e(r_2/r_1)}{\pi h (P_2^2 - P_1^2)} Q \quad (3)$$

ここに、 P_1 ：中央孔内の空気圧(Pa)、 P_2 ：大気圧(Pa)、 r_1 ：中央孔の半径(m)、 r_2 ：シールの半径(cm)である。シール削孔法における適用条件は透気領域を考慮し、使用する供試体の厚さは20cm以上、シール半径は15cm以上、孔の深さ5cm以上の条件が必要となる。

2.2 シール削孔法による差分透気係数の提案

筆者らの検討により、コンクリートを均質とした場合におけるシール削孔法の適用性を、流体の圧縮性を考慮した差分法に基づく3次元数値計算で検証したところ、設定値として与えた透気係数分布と比較して式(3)に示すシール削孔法によって推定された計算結果は、常に過大評価することが判明している。

これは、円筒状と仮定した透気領域に対して、実際は超過領域が存在することが原因として挙げられる。図-3に削孔深さ6cmのときの圧力コンター図と、点線で囲う部分に式(3)で計算するための円筒状の透気領域を示す。なお本解析においては、対称性を考慮して図-4に示すような1/4領域を対象にしており、圧力コンターは図-4に示すS面の結果を示している。

シール削孔法で仮定した透気領域は実際の透気領域より小さく、実際の透気領域は主に半楕円体状となっている。透気領域が仮定よりも大きいため空気の流れ込みが大きくなり、式(3)によって推定された透気係数は設定値を常に大きく評価していると考えられる。

ここで、削孔深さをパラメータとした解析結果を分析したところ、削孔深さが大きくなるにつれて透気領域は変化するものの、削孔深さが1cm程度の変化であれば、透気領域の超過部分の形状はほとんど変化しないことが判明した。そこで、図-5に示すように、削孔前後の透気量の差分をとると、超過領域からの空気流

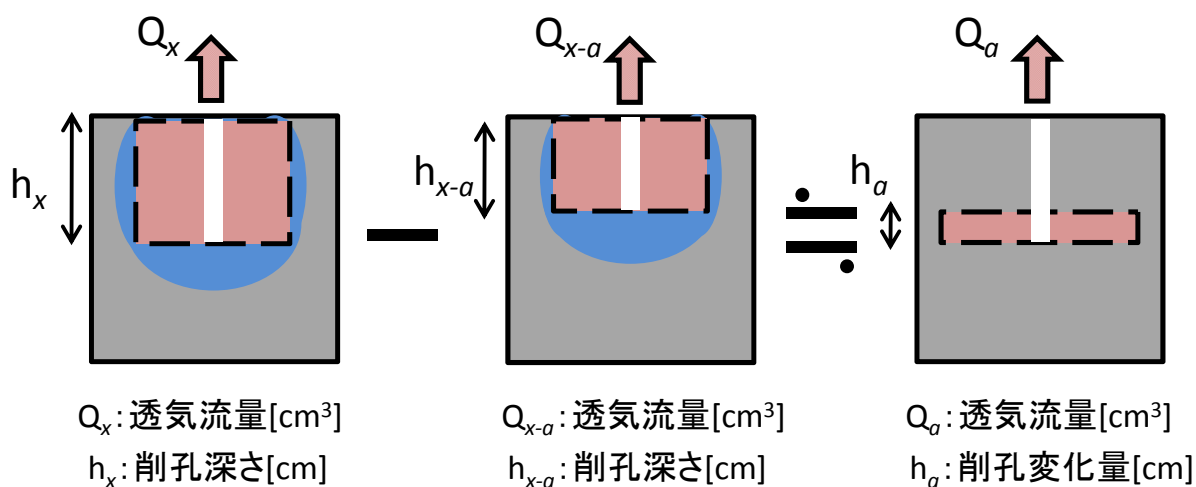


図-5 透気領域の超過部分の排除方法

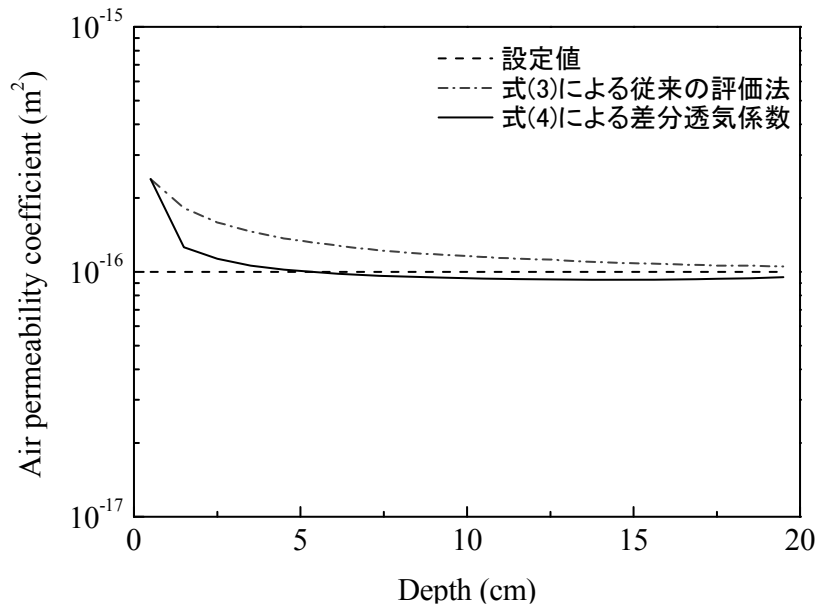


図-6 均質体を対象とした場合の評価結果

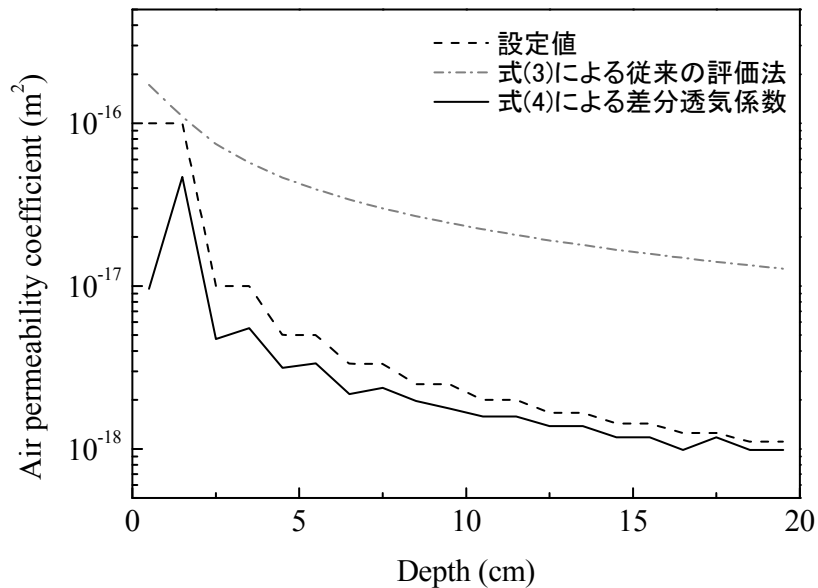


図-7 非均質体を対象とした場合の評価結果

入分の影響を排除することができ、かつ削孔を進めた距離を高さとする円筒状の小領域を透気領域とした場合の透気量が算出することができる。一度の削孔で a cm 掘り進めた場合において、深い方の削孔深さを x cm とすると、浅い方の削孔深さが $x-a$ cm となる。また、削孔深さ x cm の透気領域から流入する透気流量を Q_x 、削孔深さ $x-a$ cm の透気領域から流入する透気流量削孔分の中空円柱上の透気領域を通過する気体の流量となる。削孔深さ $x-a \sim x$ までのコンクリートの透気係数を差分透気係数と定義すると、この値は、シール削孔法による透気係数の算出式(3)に基づいて以下のように表現される。

$$k(x) = \frac{\eta P_2 \log_e (r_2 / r_1)}{\pi a (P_2^2 - P_1^2)} (Q_x - Q_{x-a}) \quad (4)$$

ここに、 $k(x)$ ：差分透気係数(m^2)、 a ：削孔の深さ変化量(m)、 Q_x ：削孔時の透気量(m^3/s)、 Q_{x-a} ：削孔変化前の透気量(m^3/s)である。ここで、透気係数分布推定方法によって得られる透気係数を差分透気係数と呼ぶこととする。なお、削孔深さ 1cm では、差分するデータがないため、透気係数分布推定方法の推定が行えない。本研究においては、透気係数分布推定方法による差分透気係数の推定を、削孔深さ 2cm 以降で行うものとする。

2.2 差分透気係数の検証

はじめに、式(4)で示す差分透気係数の妥当性を、透気係数をすべての領域で $1.0 \times 10^{-16} m^2$ とする均質体を対象とした解析により検証した。図-6 にその結果を示す。式(3)による従来の評価法では、前節の検討に示したとおり透気領域の超過のため、透気係数を過大に評価している。さらに、仮定した透気領域に対して、実際の超過分の影響が表層に近くなるほど大きくなるため、表層に至るまでに設定値との乖離が大きくなっている。一方、式(4)により計算される差分透気係数は、ごく表層付近では式(3)の結果と同様であるが、設定値とおよそ近い値を呈していることから、透気領域の超過部分の影響を十分に排除できており、その結果妥当な推定値が得られたと考えられる。

次に、表層から深部に至るまで含水率が大きくなり、透気係数が小さくなるというような実際のコンクリートを模擬するため、設定値を表層付近で $1.0 \times 10^{-16} m^2$ とし、深部に至るにつれてこの透気計数値の 1/10, 1/20, と徐々に透気係数を小さくし、最終的に深さ 20cm の位置で透気計数値の 1/90 まで低減させた場合の評価結果を図-7 に示す。式(3)による評価結果では設定値を大きく過大評価する一方で、式(4)で算出される差分透気係数はごく表層をのぞき、設定値を高精度で推定できている。このように、対象が非均質体であり、透気領域が削孔位置により大きく変化する場合においては、差分透気係数による評価は極めて有効であると考えられる。

3. コンクリートを使用した実験による検証

これまでは、解析により、理想的な材料の場合のシール削孔法および差分透気係数の妥当性を検証した。本章では、コンクリートを使用した実験的検証を行う。コンクリートを使用した場合、本手法の妥当性の検証が困難である。これは、コンクリート中は表層から深部にかけて含水率が連続的に増加しており、これに伴って透気係数も連続的に変化するため、このような連続する値の真の値を求めるのは困難だからである。

そこで、本研究では品質が極めて大きく異なるコンクリート 3 種類を図-8 のようにそれぞれ 1 層ずつ合計 3 層打設することで、不連続的に透気係数の相違を再現し、比較的、水セメント比が 45% であり細骨材の 20% を体積置換した極めて密なコンクリート、水セメント比 65% のコンクリートおよび、水セメント比 65% で細骨材にペーパースラッジ灰(PS 灰)をセメント利用により造粒した極めて吸水率が高く粗な空隙構造をもつ PS 灰造粒砂を使用した極めて粗なコンクリートを各層ごとに打設しつつ、別個に $15cm \times 15cm \times 7cm$ の板状供試体でそれぞれ 2 枚ずつ打設し、それぞれ 1 枚ずつ個別に乾燥させることにより、各コンクリートの透気係数の上限値をアウトプット法により測定し、もう一枚ずつは 3 層を大型供試体と同様に重ね合わせたものに側面をシールすることで、大型供試体と同じ含水状態を再現し、各供試体に対してアウトプット法により個別に透気係数を求めている。図-9 に板状供試体を使用し、アウトプット法に基づいて行われた透気試験の結果を示す。供試体を個別に乾燥させた供試体は、各供試体を 3 層に重ねて乾燥を施した供試体よりも透気係数が大きい値を示している。個別乾燥させた PS 造粒砂使用供試体と水セメント比 40% の供試体とは、およそ 3 オーダー程度の大きな相違を呈しており、品質の極めて異なるコンクリートの打設を達成したものと考えられる。

次に、大型供試体を対象に、シール削孔法による透気試験を実施した。実コンクリートと同様に、表層が



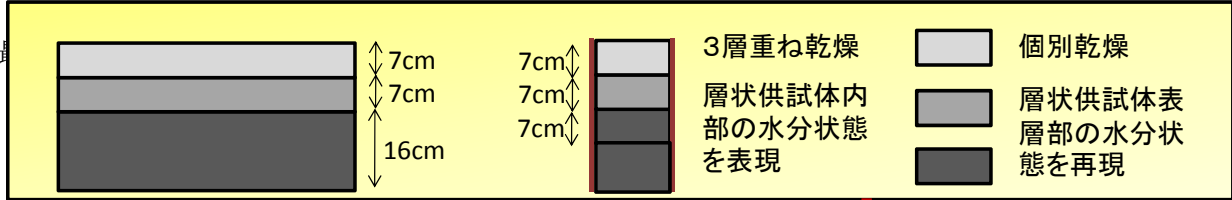
3層コンクリート供試体

深さ方向に透気係数分布が変化するコンクリートの特徴を再現

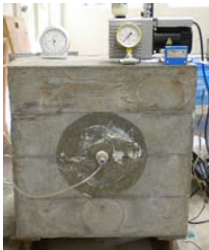


アウトプット試験用供試体

3層コンクリート供試体の各層における透気係数の参考値を測定



シール削孔法透気試験



アウトプット法による透気試験



- W/C65%+PS灰造粒砂
- W/C65%
- W/C40%+FA20%外割置換

図-8 実験的検討の概要

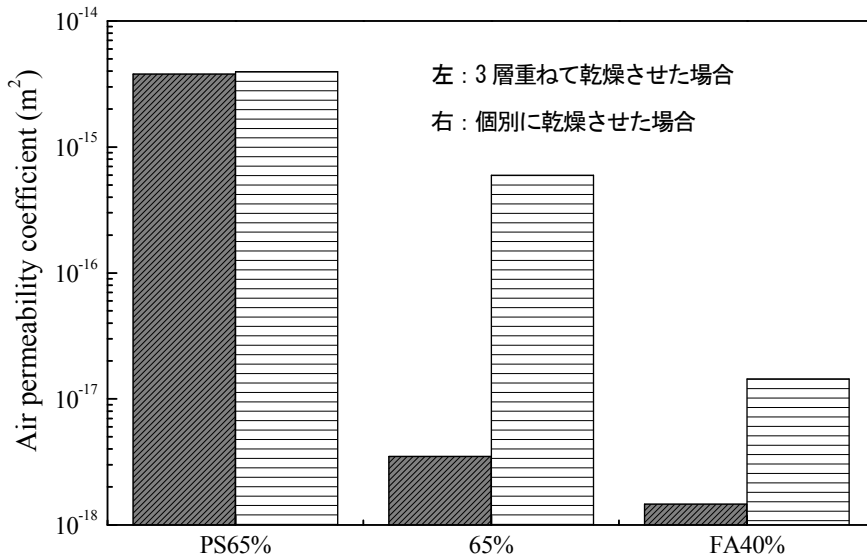


図-9 アウトプット法による各供試体の個別の透気係数

用部分より削孔を進めたものの、透気係数が大きい場合に使用する大容量の流量計の精度では、2層目以降に到達後の、削孔を進める前後の密なコンクリートな部分の僅かな透気量の相違を検知することができなかった。一般の実コンクリートにおいては、表層と深部の透気性能の相違が3オーダー程度も異なることはな

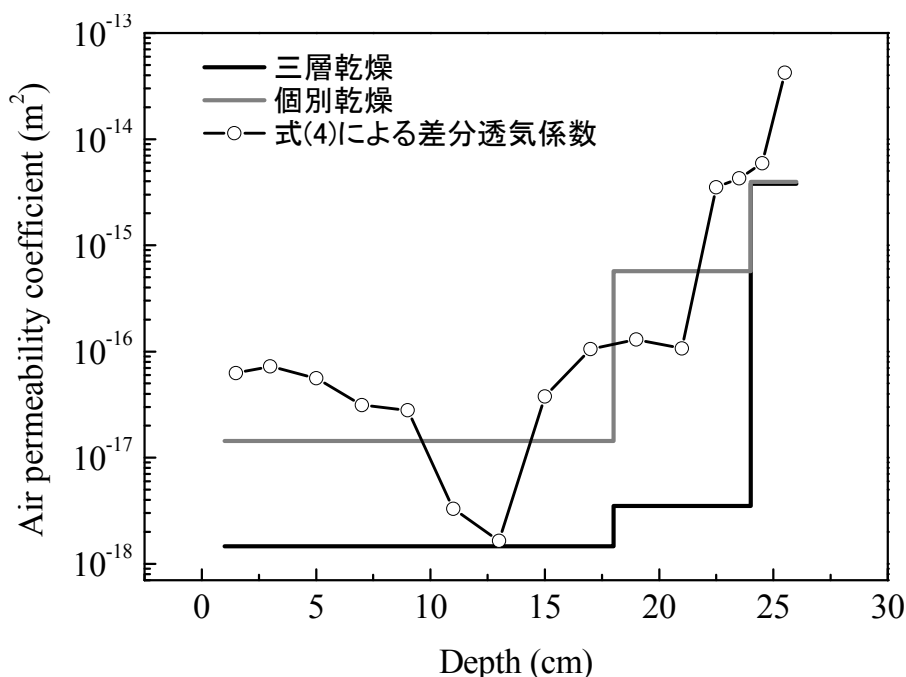


図-10 大型供試体を対象としたシール削孔法によって得られた差分透気係数分布

いため、このような問題は現場での適用に考慮する必要はない。本研究では水セメント比 45%の部分から削孔を進めることとし、実コンクリートにおける透気係数分布とは逆の傾向があるものの、シール削孔法による差分透気係数の妥当性検証を上述の方法で実施した。

図-10 に差分透気係数の結果を、図-9 で提示した各層個別の透気係数の値とともに示す。はじめに、1 層目の削孔深さ 2cm~16cm の範囲について検討を行う。削孔深さ 2cm~10cm までは、差分透気係数は緩やかに減少しているが、10cm 以降急激に減少し、14cm で最も落ち込んでいる。これは、同一層であっても含水状態が均一ではなく、表層から深部にかけて含水率が上昇していることから、コンクリート供試体の透気係数が深部にかけて減少している傾向を反映していると考えられる。削孔深さ 16cm 以降は、削孔深さ 14cm に比べて差分透気係数は約 200 倍まで増加している。これは、打設時において打継目を極力排除するためのバイブレータ使用の影響か 1 層目と 2 層目のコンクリートが混ざり合い、2 層目の比較的粗なコンクリートの影響が打継部付近に強く表れたと推測できる。

次に、削孔が 2 層目以降に至る削孔深さ 18cm~23cm について検討を行う。削孔深さ 18cm~22cm までの差分透気係数は、削孔深さに対しほぼ横ばいに推移し、深さ方向に含水率もほとんど一定である。ここで、削孔深さ 18cm~22cm の差分透気係数と削孔深さ 2cm~6cm の差分透気係数を比較する。削孔深さ 18cm~22cm の差分透気係数と削孔深さ 2cm~6cm の差分透気係数は同じであるため、1 層目と 2 層目の品質が一見同じであるように評価される。しかし、削孔深さ 18cm~22cm は、削孔深さ 2cm~6cm と比較して深部にあるために、高含水率であると考えられる。したがって、差分透気係数は同等であっても、削孔位置が深部にあるため含水率が高ければ、それだけ低品質であるといえるため、削孔深さ 18cm~22cm よりも削孔深さ 2cm~6cm の方が品質の高いコンクリートであると評価され、事前に把握しているコンクリートの性能通りの推定ができていないと考えられる。

次に、2 層目と 3 層目の間である削孔深さ 23cm の位置に着目する。削孔深さ 23cm も削孔深さ 16cm と同じく打設時のバイブレータの影響で 2 層目と 3 層目のコンクリートが混ざり、3 層目のコンクリートの影響が強く表れたと推測できる。これは、削孔深さ 23cm の差分透気係数が 3 層目である削孔深さ 24cm, 25cm

に極めて近い事からも確認できる。

最後に、3層目の削孔深さ24cm～26cmにおける検討を行う。削孔深さ24cm、25cmの差分透気係数は、アウトプット法に基づいて個別に計測された透気係数に極めて近いことより、精度よく透気係数分布の推定が出来ているといえる。最後に、削孔深さ26cm付近では、差分透気係数が急激に増加していることが分かる。3層目は極めて透気係数が大きく、削孔26cmの時点で供試体背面からの過剰な空気流入が生じ、急激に透気流量が増加し、その結果差分透気係数が大きくなったことが原因であると考えられる。

以上の検討により、透気係数分布推定法は、層ごとに異なる品質のコンクリートの特徴を捉える事が可能である事を確認できた。しかし、考察における品質評価は、コンクリートの配合から想定できる評価とアウトプット法による供試体の参考値、差分透気係数の増減で判断を行っている。実際には、層状コンクリート内部の含水率分布を踏まえた上で、正確な品質評価は行わなければならない。今後、実構造物においても適用可能かを実証していくためには、コンクリート内部の含水率分布を踏まえた上で、透気係数分布推定法によって得られた透気係数分布から品質評価を行う必要があると考える。

4. 結論

シール削孔法により、表層から深部に至るまでの透気係数の変化を追跡できる枠組みを提示した。段階的に削孔し、削孔を進める前後の透気量の差から算出される差分透気係数を用いることにより、コンクリート中の局所的な品質を精度よく推定できる可能性がある。

5. 参考文献

- 1) 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，Vol.62，pp.197-204，セメント協会，2008.
- 2) 氏家勲，岡崎慎一郎，中村翼：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，セメント・コンクリート論文集，Vol.63，pp.189-195，セメント協会，2009.
- 3) 岡崎慎一郎，氏家勲，中村翼：深さ方向に含水率および品質が変化する構造体コンクリートへのシール法の適用と透気係数の算出について，歴代構造物品質評価／品質検査制度研究小委員会（216委員会）成果報告書およびシンポジウム講演概要集，土木学会，2009