

# 論文 吸引法によるポーラスコンクリートの空隙率推定に関する実験的・理論的検討

平岩 陸\*1・山本眞正\*2

**要旨**：本研究では、ポーラスコンクリートの空隙率を推定する方法として提案した吸引法について、円柱状の供試体を用いて実験的、理論的な検討を行った。円柱状の供試体を用いることで透気経路が限定され、ダルシーの法則を適用できるため、圧力とともに風速を測定することで透気係数を算出し、これらの値と空隙率の関係について検討した。その際に、通常の型枠で作製したものと、平板からコアを抜いたものの2種類の円柱状の供試体について検討した。さらにこれら2種類の結果の相違について、型枠近傍部の空隙状態の異なる範囲を仮定して検討し、良好な結果を得た。

**キーワード**：ポーラスコンクリート、空隙率、吸引法、円柱供試体、ダルシーの法則、透気係数

## 1. まえがき

ポーラスコンクリートは、内部に多くの空隙を有するコンクリートである。この内部空隙の存在により、透水性、保水性、植生など、従来のコンクリートでは得られない様々な機能を持つ。このため、環境面に配慮したエココンクリートとして舗装、護岸、緑化、生物共生、浄化・吸着などの多様な用途に使用されている。

現状のポーラスコンクリートの品質管理は、通常のコンクリートと同様に、打込み時に別途管理用供試体を作製して行うのが一般的である。しかし、ポーラスコンクリートは、通常のコンクリートよりも施工方法、特に締固め方法によってその性質が変化しやすい。このことから考えると、別途作製した管理用供試体と現場打込みした構造物のポーラスコンクリートでは締固め方法が同一でないため、管理用供試体では構造物のポーラスコンクリートの性質を適切に再現できていない可能性がある。よって、構造物のポーラスコンクリートを直接測定し、品質管理を行うことが必要と考えられる。もっとも良い方法は、現場で打込んだポーラスコンクリート構造物の一部を採取して測定することであり、これが管理手法として行われている場合もあるが、構造物を傷つけることになり、また手間も多くかかる。このため、打ち込んだポーラスコンクリートに対して破壊を伴わずに適用できる方法が望まれている。

強度の測定を構造物で実施することはさらに困難なため、「性能設計対応型ポーラスコンクリートの施工標準と品質保証体制の確立研究委員会」<sup>1)</sup>では、構造物で測定するのは空隙率とし、一方で強度-空隙率関係をあらかじめ作成し、構造物で測定した空隙率をその関係式に当てはめることで強度を推定する方法が提案されている。この考え方を元に、構造物の空隙率を測定する方法とし

て、超音波速度法による方法<sup>2)</sup>、RIによる方法<sup>3)</sup>、打音法による方法<sup>4)</sup>、衝撃弾性波法による方法<sup>5)</sup>、ディープラーニングによる方法<sup>6)</sup>などが提案されているが、いずれもまだ発展途上である。

筆者らは既報<sup>7)</sup>において、**図-1**に示すような集じん機による吸引による方法（以下、吸引法）を提案した。既報においては、ポーラスコンクリート平板に対して吸引法を適用し、吸引による到達圧力と空隙率の関係を検討し、その関係が良好であることを示した。しかし、その測定値である到達圧力は、ポーラスコンクリートの空隙率の変化に伴う透気性の変化を測定しているとは考えられるものの、透気経路が特定できず、測定範囲やその意味付けが曖昧であった。さらに、平板に吸引法を適用する際には、表面に減圧室を取り付ける必要があり、その際の接触部分の密着度が測定値に影響を与えるものと考えられた。

本研究の最終的な目的は、現場で打込んだポーラスコンクリートの空隙率を、吸引法を用いて推定することである。このため、平板状の供試体に対して適用できる方法である必要があるが、本論文では、吸引法の理論的な裏付けを得るために、円柱状の供試体を用いて検討を行

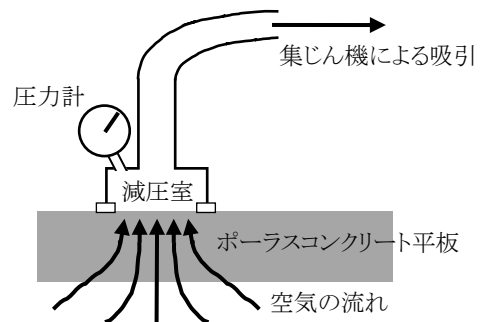


図-1 吸引法の概念図

\*1 名城大学 理工学部建築学科准教授 博士(工学) (正会員)

\*2 愛知工業大学 工学部建築学科准教授 博士(工学) (正会員)

った。円柱状の供試体を用いることにより透気経路が確定できるため、圧力に加えて透気量を測定できれば、ダルシーの法則により透気係数を計算することが可能となる。透気係数であれば、理論的な裏付けがあり、また供試体の断面積、高さ等にとらわれず、この値を用いた統一的な検討ができるものと考え、検討を行った。

## 2. 実験方法

### 2.1 使用供試体

本研究ではまず、φ100×200mmのブリキ製型枠を用いて円柱供試体を作製した(以下、型枠円柱供試体と呼ぶ)。また、300×300×100mmの木製型枠を用いて平板供試体を作製し、硬化後コア抜きを行った円柱供試体を作製した(以下、コア円柱供試体と呼ぶ)。これら2種類の円柱供試体を用いて吸引法による空隙率推定について検討した。

使用材料を表-1に示す。粗骨材にはJIS 5, 6, 7号砕石の3種類を用い、事前に微粒子分を除き、表乾状態として使用した。調査表を表-2に示す。全空隙率を対象として目標空隙率を10, 15, 25%に設定している。水セメント比を25%に統一し、高性能AE減水剤を用いてセメントペーストの流動性を調整した。混練の際には、セメントペーストを先練りし、その後粗骨材を投入した。打込みはいずれの型枠も突き棒による突き固めとした。翌日に脱型して水中養生を行い、28日以降に平板供試体に対してコア抜きを行った。なお、空隙率が大きいものではコア抜き時に衝撃に耐えきれずに壊れてしまったものがいくつか生じ、その分試験体が減少した。その後、型枠円柱供試体およびコア円柱供試体ともに、日本コンクリート工学会のポーラスコンクリートの空隙率試験方法(案)の容積法を用いて、全空隙率を測定し、これを推定対象の空隙率としている。

### 2.2 吸引法および透気係数の計算

今回の円柱供試体における吸引法は、図-2に示すように行った。まず、供試体の上下面の円部分を除く周囲をガムテープでシールした。その後上面に圧力計および風速計を取り付けた減圧室を設置する。それに対して吸引を行うことにより下面から空気を流入させ、その時の到達圧力および風速を測定するものである。実際の測定は、供試体の下部に2本の角棒を置いて、下面を開放状態として行っている。また、吸引には業務用の集じん機(吸込仕事率 350W, 最大風量 3.6m/min, 最大真空度 26kPa)を用いている。吸引口をふさいで吸引すると、到達圧力が-26kPa程度まで可能なものである。

平板でなく円柱供試体を用いることにより、流入経路は円柱供試体の下面からの流入と、上面からの流出に限定される。よって、ダルシー則が適用でき、一般的には、

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント (密度:3.15g/cm <sup>3</sup> )
粗骨材	JIS 5号砕石 (13~20mm) (表乾密度:2.51g/cm <sup>3</sup> , 実積率:60.9%)
	JIS 6号砕石 (5~13mm) (表乾密度:2.51g/cm <sup>3</sup> , 実積率:61.1%)
	JIS 7号砕石 (2.5~5mm) (表乾密度:2.79g/cm <sup>3</sup> , 実積率:54.4%)
混和剤	ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤

表-2 調査表

	Air(%)	W(kg/m <sup>3</sup> )	C(kg/m <sup>3</sup> )	G(kg/m <sup>3</sup> )	HAE/C(%)
JIS5号	10	126	506	1637	0.35
	15	104	418		
	25	60	241		
JIS6号	10	132	529	1590	0.40
	15	110	441		
	25	66	264		
JIS7号	10	130	522	1601	0.45
	15	108	434		
	25	64	257		

Air:目標空気量, W:水, C:セメント, G:粗骨材, HAE:高性能 AE 減水剤

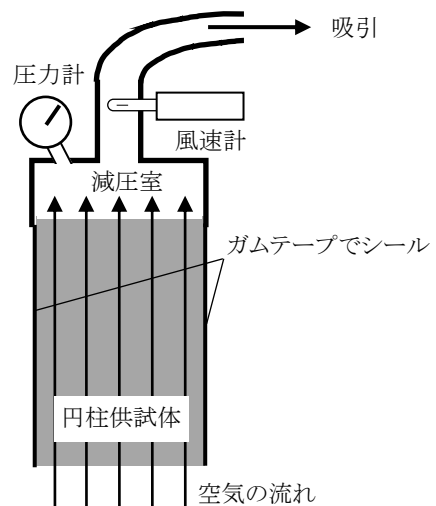


図-2 円柱供試体の吸引法の概念図

空気の圧縮性を考慮した式(1)によって透気係数を計算することができる<sup>8)</sup>。また、これを今回測定する風速にしたものが式(2)であり、これに測定結果である到達圧力および風速を代入することで透気係数を計算した。測定値である到達圧力および風速と空隙率の関係とともに、透気係数との関係も検討した。

$$K = \frac{2LP_2^2 Q}{P_1^2 - P_2^2 A} \quad (1)$$

$$K = \frac{2LP^2}{P_1^2 - P_2^2} v \quad (2)$$

ここに、K:透気係数(cm<sup>4</sup>/Ns), L:供試体高さ(cm),  
P<sub>1</sub>:到達圧力(N/cm<sup>2</sup>), P<sub>2</sub>:大気圧(=10N/cm<sup>2</sup>  
として計算), Q:透気量(cm<sup>3</sup>/sec), A:透気  
面積(cm<sup>2</sup>), v;風速=Q/A(cm/sec)

なお、今回用いた型枠円柱供試体は供試体高さ 200mm、  
コア円柱供試体は 100mm であり、到達圧力および風速  
においては直接の比較ができないが、透気係数において  
は算出式に供試体高さが含まれているため、直接の比較  
ができると考え、透気係数を用いて型枠供試体とコア供  
試体の比較・検討を行っている。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 型枠円柱供試体

図-3 は、型枠供試体を用いた場合の到達圧力と空隙率  
の関係を示したものである。既報<sup>7)</sup>における平板でも  
示した通り、吸引法における到達圧力は、空隙率が大き  
いと吸引しきれずに値が大きいままになり、逆に空隙率  
が小さいと吸引が強く働いたため値が小さくなる。この図  
の結果も全体的に右上がりであり、空隙率が大きいと到達  
圧力が大きく、空隙率が小さいと到達圧力がより小さくな  
る傾向を表している。全データの決定係数も 0.821 と高く、  
まとめて推定することも可能と考えられる。しかし、  
骨材粒径別にみると、上から JIS5 号、6 号、7 号と粒径  
順になっており、決定係数も骨材それぞれの結果の方が  
大きくなっている。骨材粒径は内部の空隙径に影響する  
ため、内部の空隙径によって到達圧力が変化する可能性  
も考えられるが、これについては後ほどコア円柱供試体  
との比較で検討する。

図-4 は、型枠供試体における風速と空隙率の関係を  
示したものである。今回透気係数の算出のために測定項  
目として加えた風速は、吸引法においては、空隙率が大き  
ければ外気が流入しやすくなるため、値が大きくなる  
と考えられる。この図の結果も全体的な傾向として右上  
がりであり、空隙率が大きい場合に風速が大きくなって  
いる。左下に示した全データの決定係数も 0.859 と到達  
圧力よりも高いが、こちらも骨材粒径別にみると、傾向  
として骨材粒径の順になっており、骨材粒径が異なると  
差が生じる結果となった。

さらに、これらの到達圧力と風速の値から式(2)によ  
って透気係数を計算したものが図-5 である。予想される  
ように、空隙率が大きい場合に透気係数も大きい結果と

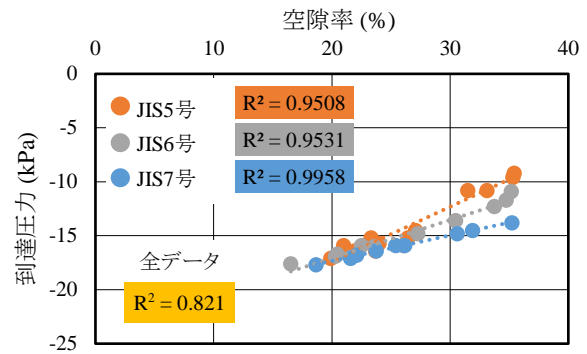


図-3 到達圧力と空隙率の関係(型枠円柱供試体)

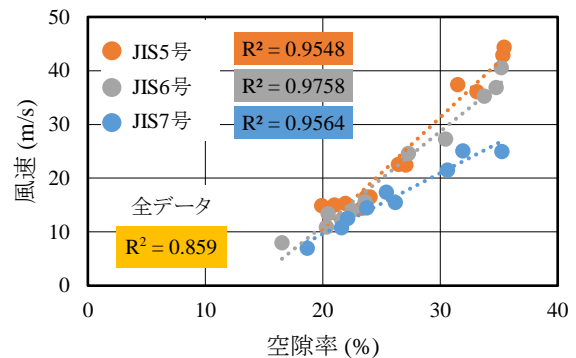


図-4 風速と空隙率の関係(型枠円柱供試体)

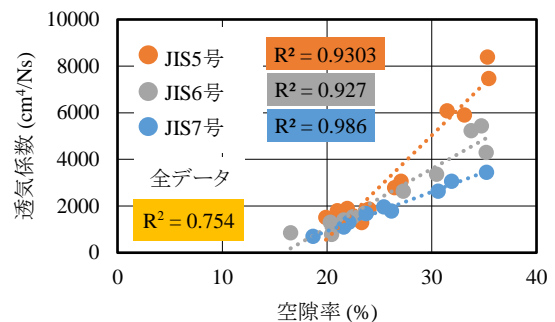


図-5 透気係数と空隙率の関係(型枠円柱供試体)

なっており、物性値としての透気係数と空隙率の関係を  
示すことができました。ただし、全体的な決定係数は低下し  
ており、これは透気係数の計算式上、到達圧力と風速の  
両方の影響が入るため、骨材粒径ごとの差がより出やす  
くなったものと考えられる。一方で、骨材粒径ごとの決  
定係数はそれほど変わらず高くなっており、型枠円柱供  
試体においては、骨材粒径別に透気係数と空隙率の近似  
式を考えた方が空隙率の推定には望ましいと考えられる。

#### 3.2 コア円柱供試体

図-6 は、コア供試体を用いた場合の到達圧力と空隙  
率の関係を示したものである。空隙率が大きくなると到  
達圧力が小さくなっている傾向は、図-3 の型枠円柱供  
試体の結果と同様である。また、全体の決定係数は  
図-3 の型枠円柱供試体の結果とそれほど変わらないも  
の、骨材粒径による傾向は順に並んでおらず重なりも

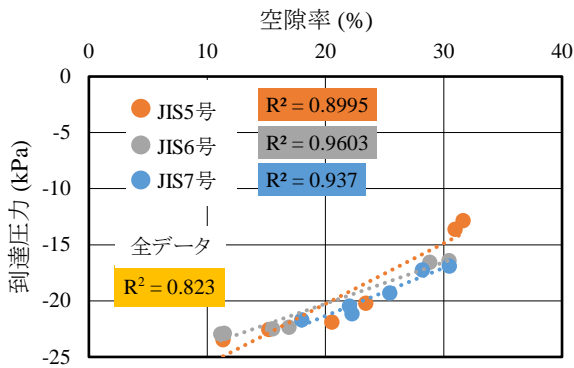


図-6 到達圧力と空隙率の関係（コア円柱供試体）

大きい。骨材粒径による影響が小さくなっているものと考えられる。

図-7 は、コア円柱供試体を用いた場合の風速と空隙率の関係を示したものである。この図においても、図-4 の型枠円柱供試体の結果と同様に、空隙率が大きい場合に風速が大きくなっている。図-4 と異なるのは、骨材粒径による差がほとんど見られず、粒径の順にも並んでいない点である。骨材粒径別に示した決定係数もそれぞれに大きいが、全体の決定係数も 0.966 と大きくなっている。図-6 の到達圧力においてもそうであったように、コア円柱供試体においては、骨材粒径の影響をあまり受けないと考えられる。

これらの到達圧力と風速から透気係数を計算して空隙率との関係を示したものが図-8 である。この図によれば、図-5 の型枠円柱供試体の結果と同様に、骨材粒径が大きい JIS 5 号で透気係数が大きく、骨材粒径が小さくなると透気係数が小さくなる傾向がみられる。ただし、この図の透気係数は図-5 に比べて拡大されており差が目立つが、図-5 に比べて値そのものは小さい。さらに全体の決定係数も 0.828 と高くなっており、透気係数においてもコア円柱供試体における骨材粒径の影響は、型枠円柱供試体に比べて小さくなると考えられる。

### 3.3 型枠円柱供試体とコア円柱供試体の相違に関する検討

3.1 および 3.2 で得られた結果から、型枠円柱供試体とコア円柱供試体の相違が生じる原因について考察する。図-9 は、透気係数と空隙率の関係について、図-5 の型枠円柱供試体の結果は骨材別に、図-8 のコア円柱供試体の結果については、全骨材をまとめて示したものである。この図から透気係数については、コア円柱供試体の値は型枠円柱供試体に比べてかなり小さく、骨材粒径の影響が型枠円柱供試体に比べればほとんどないといえる。一方で、型枠円柱供試体の結果に及ぼす骨材粒径の影響は非常に大きいことがわかる。コア円柱供試体の結果から考えれば、単純に骨材粒径つまり空隙径の大きさが透

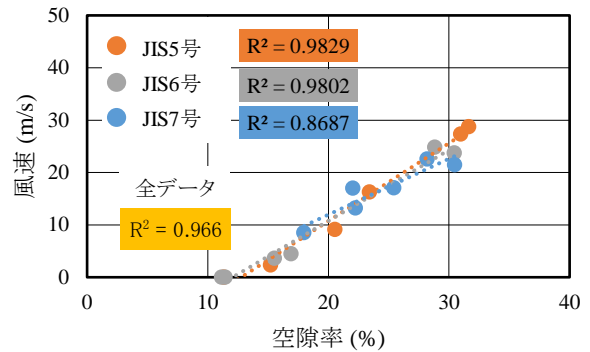


図-7 風速と空隙率の関係（コア円柱供試体）

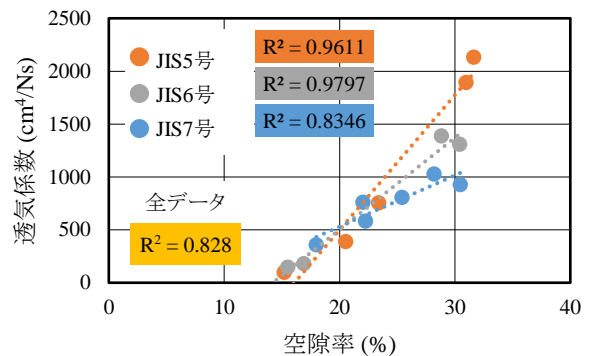


図-8 透気係数と空隙率の関係（コア円柱供試体）

気係数に影響するとは考えにくい。しかし、型枠円柱供試体において骨材粒径が影響しており、この原因については、型枠面と接している面の有無が考えられる。図-10 に示すように型枠近傍部分の型枠と接する面は骨材が型枠面にさえぎられて骨材の配置状況が内部とは異なることになる。この部分には空隙が多くできると考えられ、それによって透気係数が増加することが予想される。さらに、その範囲は骨材粒径によって異なり、骨材粒径が大きい場合にはその範囲が広がるものと考えられる。

ここでは、このような型枠近傍の透気係数の増加を仮定し、円柱供試体の全体の透気係数が、円柱中央部のコアに相当する部分の面積と、型枠近傍部の面積の比率に

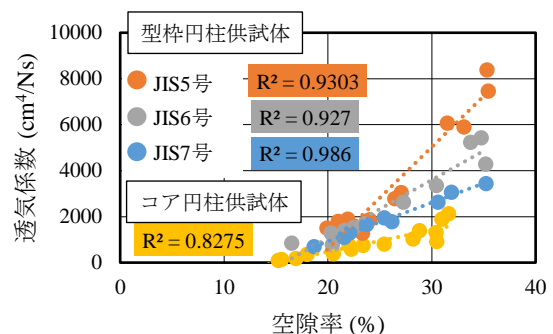


図-9 透気係数と空隙率の関係（型枠およびコア円柱供試体）

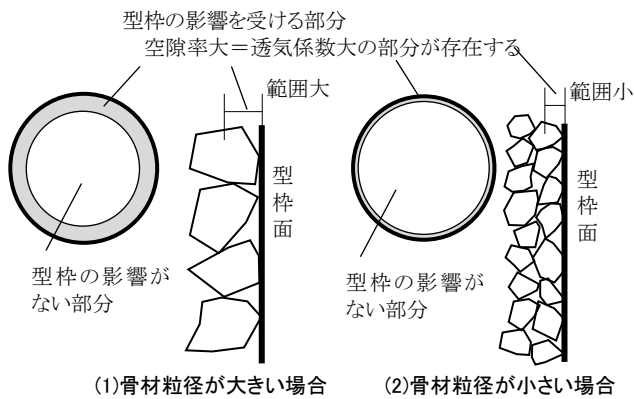


図-10 型枠近傍部分の空隙率変化の考え方

よるものとして計算した。コア円柱供試体の近似曲線を基準として、円柱中央部はそれに従って透気係数を計算し、型枠近傍部については、その倍数とした。さらに、骨材粒径の相違により、型枠近傍部とする型枠面からの距離が変化するものとした。それぞれの骨材粒径の平均を骨材粒径の最小値と最大値の平均とすると、JIS5号では16.5mm、JIS6号では9mm、JIS7号では3.75mmとなるため、この半分の距離を型枠近傍部の透気係数が変わる範囲とした。

以上のような仮定をもとにいくつかの値を用いて計算を行った結果、図-9の型枠円柱供試体の実験結果の値に近い結果を示したのは、型枠近傍部の透気係数を中央部の10倍としたものであったため、この結果を図-11に示す。この図では型枠円柱供試体の透気係数の値は図-9と近いものとなり、さらに図-9の実験結果の傾向である、コア円柱供試体の透気係数に対して型枠円柱供試体の透気係数が増加すること、さらにその増加傾向が骨材粒径の異なるJIS5号、6号、7号によって異なることが再現されている。この結果から、型枠円柱供試体においては型枠近傍の影響が大きいと考えられる。

この型枠円柱供試体における型枠近傍のように内部と透気係数が異なる部分は、平板に吸引法を適用する際にも生じると考えられる。それは、吸引法の減圧室を表面に接触させる部分であり、この部分の影響については既報<sup>7)</sup>においても指摘している。今回の型枠円柱供試体とコア円柱供試体の比較によってその影響を確認することができ、この部分の考慮が平板供試体への適用において重要になると考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、既報においてポーラスコンクリートの空隙率を推定するための方法として提案した吸引法について、理論的な裏付けを得るために、円柱状の供試体を用いた検討を行った。到達圧力とともに風速を測定することで透気係数を計算し、これらの値と空隙率との関係を

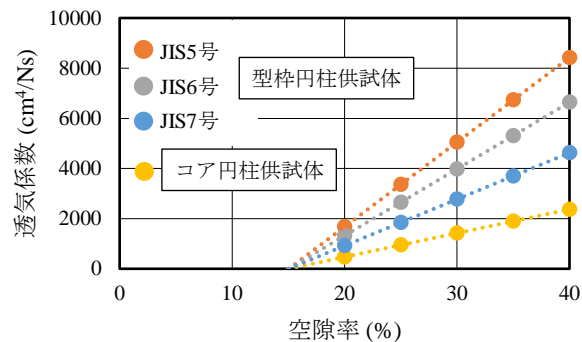


図-11 透気係数と空隙率の関係  
(型枠近傍部分を考慮した計算結果)

検討した。また、型枠円柱供試体とコア円柱供試体の比較とその相違の原因についての考察を行った。本研究で得られた知見は以下の通りである。

- 1) 型枠円柱供試体においては、到達圧力、風速、透気係数ともに空隙率との関係が高い結果が得られたが、骨材粒径の影響も大きかった。
- 2) コア円柱供試体においても、到達圧力、風速、透気係数ともに空隙率との関係が高い結果が得られ、骨材粒径の影響は型枠円柱供試体に比較して小さかった。
- 3) 型枠円柱供試体とコア円柱供試体の透気係数の相違および骨材粒径の影響の相違について、型枠近傍部の空隙率が大きくなりそれに伴って透気係数が大きくなる部分を仮定して計算したところ、これらの相違について実験結果と適合する結果が得られた。

本手法をポーラスコンクリート平板に適用する際には、ここで検討した型枠近傍部のように、内部と異なる配置状況を持つ部分として減圧室とポーラスコンクリート平板の表面との接触部分があるため、それを適切に考慮することが重要になると言える。ただし、これは理論値である透気係数で様々な条件を含めて統一的に評価する場合である。既報<sup>7)</sup>や本論文で示したように、骨材粒径別、供試体の条件別であれば、吸引法による到達圧力や風速と空隙率との相関は高いため、それらの関係式を用いて空隙率を推定できる可能性は高いと考えられる。

#### 謝辞

本研究の実施に際しては、前田飛葵君(令和5年度名城大学大学院修論生)によるところが大きい。付記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：性能設計対応型ポーラスコンクリートの施工標準と品質保証体制の確立研究委員会報告書，2015.6
- 2) エルドンオチル・藤木諒将・三島直生・畑中重光：超

- 音波によるポーラスコンクリートの空隙率および曲げ強度の推定に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1725-1730, 2016.7
- 3) 安部良介・中新弥・川崎佑磨・岡本享久: RI 法を援用したポーラスコンクリートの空隙率算出方法の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1731-1736, 2016.7
  - 4) エルドンオチル・曹偉・畑中重光: 打音法によるポーラスコンクリートの空隙率推定, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1439-1444, 2019.7
  - 5) 野内彩可・渡辺健・圓藤将司・橋本親典: 衝撃弾性波法を用いたポーラスコンクリートの空隙率推定に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1757-1762, 2019.7
  - 6) エルドンオチル・栗田哲: ディープラーニングによるポーラスコンクリートの空隙率推定に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.1150-1155, 2023.7
  - 7) 平岩陸: 吸引法によるポーラスコンクリートの空隙率推定に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1421-1426, 2019.7
  - 8) 笠井芳夫・池田尚治編著: コンクリートの試験方法, 技術書院, 1993