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検討

平岩　陸

要旨：本研究では，構造物のポーラスコンクリートの空隙率を直接測定できる方法として，吸引法を提案し，その適用性を検討した。この方法は，ポーラスコンクリート面に減圧室を設置して吸引し，達する最低圧力から空隙率を推定するものである。実験の結果，空隙率と最低圧力には相関があり，ポーラスコンクリート表面との密着方法などに課題はあるものの，本提案手法でポーラスコンクリートの空隙率を推定可能であることがわかった。

キーワード：ポーラスコンクリート，空隙率，推定方法，吸引法

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ことにより，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・吸着など多様な用途で用いられている。

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によってその性質が変化しやすく，特に締固め方法によって大きな影響を受けると考えられる。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，構造物の一部を採取して測定することであるが，構造物を傷つけることになり，また手間の面からも困難といえる。このため，打ち込んだポーラスコンクリートに対して直接適用できる方法が望まれている。

強度の測定は破壊を伴うことになり構造物での実施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」[1)]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[2~3)]や，RIによる方法[4~6)]が提案されているが，いずれもまだ発展途上である。

本研究も委員会の方法に基づき，ポーラスコンクリートの性質のうち空隙率を測定対象として，現場で打ち込んだポーラスコンクリートに直接適用できる方法として，吸引による方法（以下，吸引法）を提案する。

本研究では，この方法をモデル供試体に対して行い，構造物のポーラスコンクリートに対して直接適用可能か検討した。また，モデル供試体であるため，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）[1)]の容積法により空隙率を実測できる。よってこの実測空隙率と，提案方法による測定結果との比較を行い，測定によって得られる最低圧力によってポーラスコンクリートの空隙率の推定が可能か検討した。

2. 実験方法

2.1 吸引法

吸引法の概念は，**図-1**に示すようなものである。ポーラスコンクリート表面に圧力計を取り付けた減圧室を設置し，吸引によって減圧を行いその際の圧力の変化を測定するものである。このような方法は，古くから通常のコンクリートにおいては透気性を測定するために用いられ[7)]，近年では表層のかぶりコンクリートの緻密性を測定するための検討がある[8)]。通常のコンクリートの場合，その透気性は非常に小さいため，減圧するとコンクリートの性質にかかわらず一時的にほぼ同一の圧力まで低下する。その後，その圧力からの回復に要する時間を計測し，コンクリートの透気性を測定する方法が一般

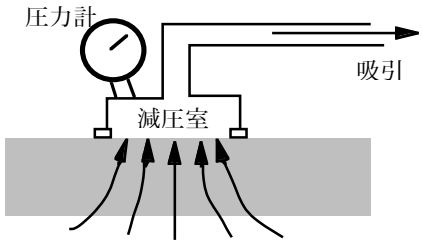


図-1　吸引法の概念図

*1 名城大学理工学部建築学科 准教授　博士（工学）（正会員）

的である。しかし，ポーラスコンクリートの場合，内部に空隙が存在するため透気性は非常に大きく，減圧した場合，通常のコンクリートのようにある一定の圧力まで低下することはなく，ポーラスコンクリートの空隙率などによって，可能な減圧値つまり圧力の最低値が変化することになる。本研究では，この吸引時の圧力の最低値を測定・比較することで，ポーラスコンクリートの空隙率の推定を行うこととした。

このような測定においては，ポーラスコンクリートの表面の凹凸と減圧室との密着度が問題となる。接着による方法も考えられたが，フレッシュ状態での適用と，繰返しの適用を可能とするため，今回は接触面にポリウレタン製低反発クッション材を用いることとした。この材料は，元の厚さは5mmであるが，圧力を加えることで0.3mmまで圧縮されるとともに，低反発性であるため，比較的小さな力でも変形しやすく，凹凸に対して通常のクッション材に比べて比較的容易に追随できるという特徴がある。今回用いた吸引機では，空隙のない鉄板や通常のコンクリートでは−19.0kPaまでの減圧が可能であった。これは，吸引機の能力とともに，密着度によって変化する値と考えられるが，今回はこのような方法で測定を行った。今回は，吸引機として集塵機を用い，吸引面積は25mm×200mmとした。また，この方法で打込み直後のフレッシュ状態でも測定を行うため，吸引部分に5mmピッチの金属金網を取り付けて，吸引により骨材が吸い込まれないようにした。

2.2 使用供試体

本研究では，300×300×50mmの平板供試体を各要因ごとに2つ作製した。使用材料を**表−1**に示す。粗骨材にはJIS5号, 6号, 7号砕石の3種類を使用し，事前に微粒子分を除き，表乾状態として使用した。調合表を**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，水セメント比は25％に統一して，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。突き棒により突き固めながら打ち込み，終了後すぐに吸引法による測定を行い，これをフレッシュ時の測定とした。その後，翌日に脱型して水中養生を行い，28日以降に空隙率試験を行うとともに，硬化状態での吸引法の測定を行った。まず，フレッシュ時の結果と比較するため，再度型枠を取り付けて測定した。その後，吸引の測定位置を打設面と底面に変化させての測定，型枠のある場合とない場合の測定，さらに吸引部の周囲を被覆して，その範囲を変化させた測定を行った。実験の状況を**図−2**に示す。吸引は，平板供試体上部で縦と横の2方向を行い，それらを平均して最低圧力とした。

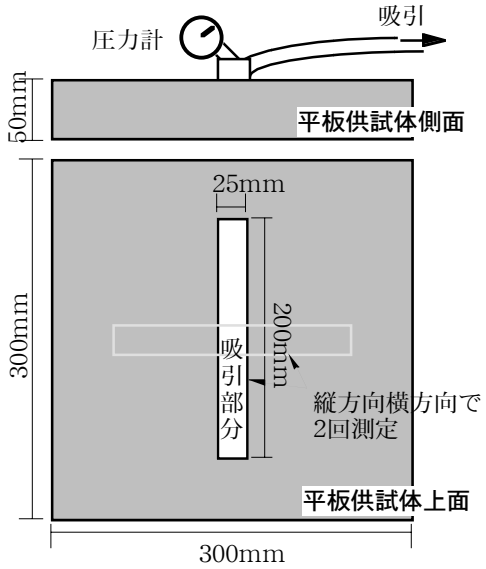
表−1　使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント（比重：3.15）
骨材	JIS 5号砕石（表乾比重：2.51, 実積率60.9%, 粒径：13mm～20mm）
	JIS 6号砕石（表乾比重：2.51, 実積率61.0%, 粒径：5mm～13mm）
	JIS 7号砕石（表乾比重：2.79, 実積率54.4%, 粒径：2.5mm～5mm）
混和剤	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤

表−2　調合表

	Air (%)	W (kg/m³)	C (kg/m³)	G (kg/m³)	HAE/C (%)
JIS5号	15	106	423	1529	0.4
	25	62	248		
JIS6号	15	106	423	1531	
	25	62	247		
JIS7号	15	135	539	1520	
	25	91	363		

[Note]Air:目標空隙率, W:水, C:セメント, G:粗骨材, HAE:高性能AE減水剤



図−2　実験状況

図−3に空隙率試験の結果を2つの供試体それぞれについて示す。この空隙率は，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）[1)]の容積法を用いて測定したものであり，正確には連続空隙率と準連続空隙率の和であるが，ここでは，空隙率として示している。図によれば，締固めが足りなかったためか，いずれの結果も目標空隙率よりも大きくなっており，2つの供試体の差も生じている。また，7号の目標空隙率

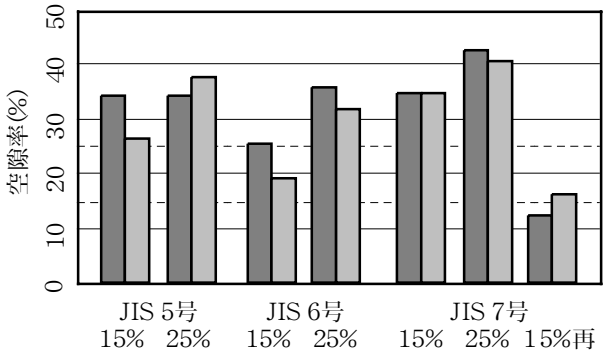


図-3　空隙率測定結果

15%については，目標から大きく離れた結果となったため，再度打込みを行い，その結果も示している。全体として，目標空隙率とは差のある結果となったが，この空隙率の実測値を推定するものとして，これ以降最低圧力との関係を検討していく。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ状態と硬化状態の比較

図-4は，打込み直後のフレッシュ状態と，硬化後脱型し再度型枠に入れた硬化状態で測定を行った結果を示したものである。いずれの結果も，空隙率が大きくなると最低圧力が大きくなる傾向があることがわかる。これは，同一の吸引能力であれば，空隙率が大きい場合，吸引しきれずに圧力が低下せず，逆に空隙率が小さい場合には吸引しやすくなり，圧力が低下しやすくなるためと考えられ，この値を用いて空隙率の推定ができると考えられる。

また，フレッシュ状態と硬化状態の結果は，フレッシュ状態の方が全体的に最低圧力が小さめとなっている。これは，硬化状態の測定は，脱型後に再び型枠を設置しておりそこに隙間が生じ，その部分から空気の流入があるため，フレッシュ状態と比べて圧力が低下しきれなかったと考えられる。しかし，空隙率が大きくなると最低圧力が大きくなる傾向は硬化状態と変わらないため，吸引法は現場で打込み直後のフレッシュ状態にも適用できると考えられる。

ただし，いずれの結果も決定係数は0.66とそれほど高くない。この原因として，特に5号砕石による結果が全体的に近似曲線の上方に外れていると思われたため，この**図-4**から5号砕石を外して，6号砕石，7号砕石のみとした結果を**図-5**に示す。また，5号砕石のみとした結果も**図-6**に示した。

図-5の6,7号砕石のみの場合，決定係数は0.85以上と上昇し，相関が非常に高くなっていることがわかる。また，6号と7号を比較すると，全体的に6号が上方，7号が下方にあるため，これについても粒径別にするとさら

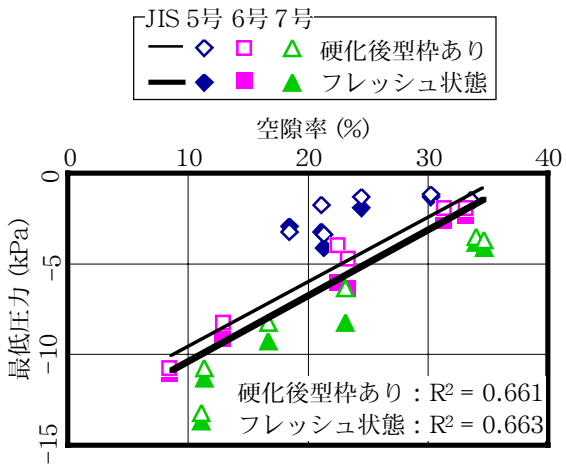


図-4　最低圧力と空隙率の関係
（フレッシュ状態と硬化状態の比較）

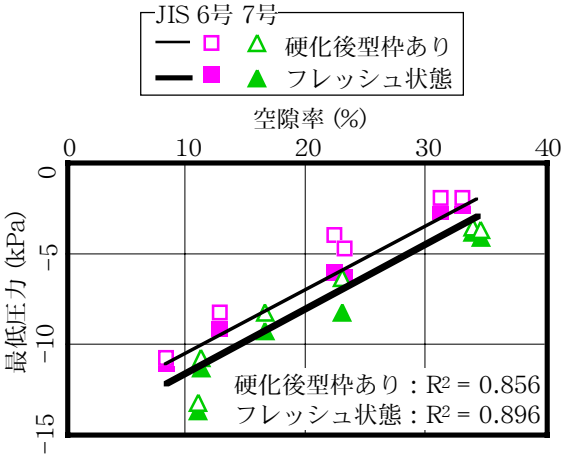


図-5　最低圧力と空隙率の関係
（フレッシュ状態と硬化状態の比較
：JIS6号、7号のみ）

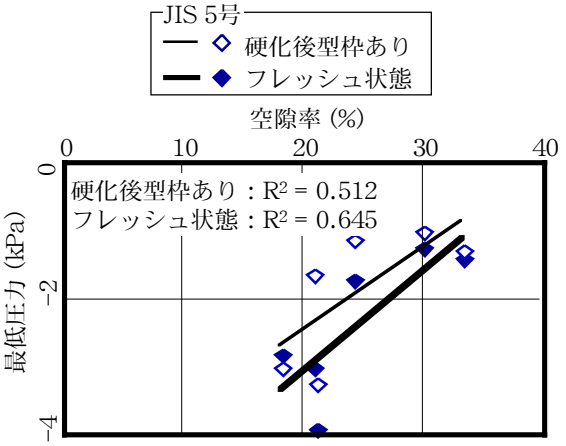


図-6　最低圧力と空隙率の関係
（フレッシュ状態と硬化状態の比較
：JIS5号のみ）

に決定係数が高くなることが予想される。これは透水性と同様，空隙径によって空気の流れが影響を受けていることによるものと考えられる。しかし，透水性と比較すれば，透気性は空隙径の影響が比較的少ないと思われる

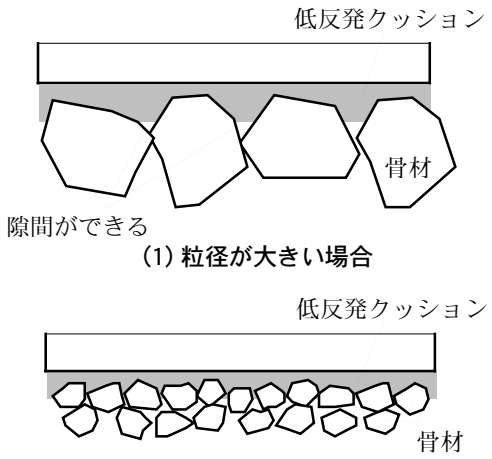


図-7　密着度合いの概念図

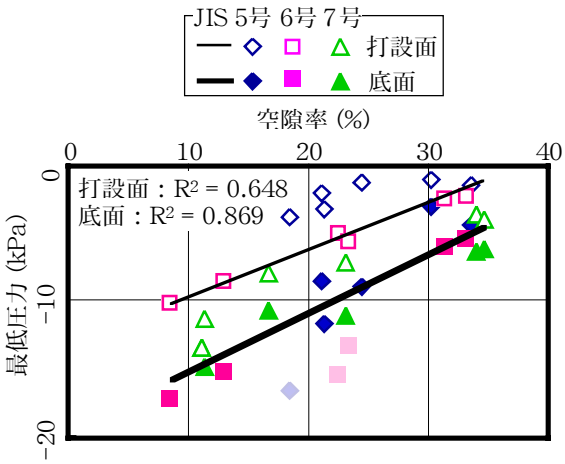


図-8　最低圧力と空隙率の関係
（底面と打設面の比較）

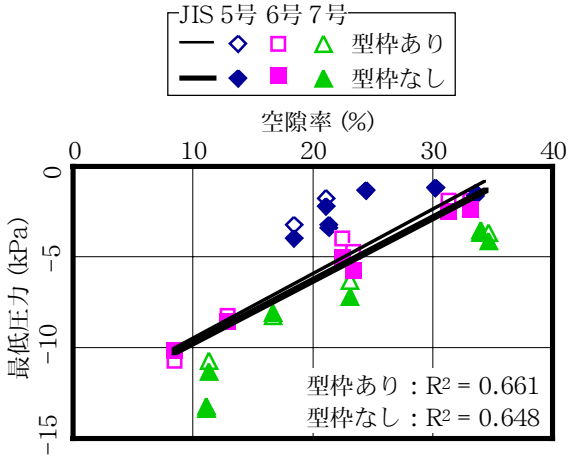


図-9　最低圧力と空隙率の関係
（型枠ありなしの比較）

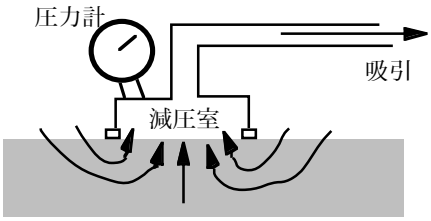


図-10　実際の透気経路

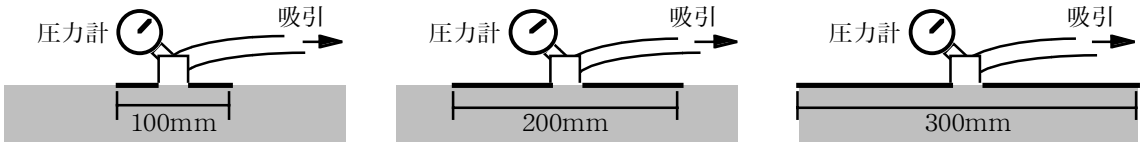
ため，後述するような減圧室との密着度合いの影響によるものとも考えられる。いずれが原因としても，この結果から考えれば，正確に推定するためには粒径別に推定式を作成すると良いと考えられる。

一方で，**図-6**の5号砕石のみの場合，決定係数がかなり低いことがわかる。この理由として，減圧室の接触部分がポーラスコンクリート表面に密着し切れていないことが考えられる。**図-7**にこの概念図を示した。**図-7(1)**に示すように，粒径が大きい5号砕石の場合，空隙が奥深くなり，強く押し付けても低反発クッションの厚さも縮む量にも限度があるため，凹凸を埋めきらず，隙間ができ密着できていないことが考えられる。逆に，粒径が小さい場合には，**図-7(2)**に示すように表面の凹凸に追従できるため，**図-5**に示したように最低圧力と空隙率の相関が高くなると考えられる。このため，表面の凹凸が大きい場合に減圧室を密着させる方法については一考の余地があると考えられる。

3.2 底面と打設面の比較

図-8は，脱型後型枠なしの状態で底面から測定した結果と，打設面から測定した結果を比較したものである。底面は型枠と接しているため比較的平坦であり，減圧室と表面の密着も高くなると考えられる。このため，これらを比較し，密着の度合いがどのように影響するか検討した。ただし，ポーラスコンクリートの打込み時にペーストが底面に垂れた供試体も存在していたため，これらを除いて決定係数を算出している。なお，これらの除いたデータは図中では薄い凡例として示した。これらは測定面がペーストで埋まりかけているため，最低圧力が低く出たものである。

この図によれば，底面の方が全体的に最低圧力は低くなっている。これは，内部の空隙率が均質でなく，下の方が空隙率が実際に低くなっている可能性がある。しかし，決定係数も底面の方が大きく向上しており，これは，型枠近傍で平坦になっているため，粒径にかかわらず密着度が高くなったことも理由として考えられる。前述のように，打設面ではJIS5号砕石で密着度が低いため圧力が低下せず，近似曲線から外れた結果となったが，底面の結果では，JIS5号であっても近似曲線に乗る結果が得られている。これは，密着度を高くできれば，本手法により空隙径によらず統一して空隙率を推定できる可能性があることを示している。



(1) 100mm覆い　(2) 200mm覆い　(3) 300mm覆い

図−11　被覆範囲

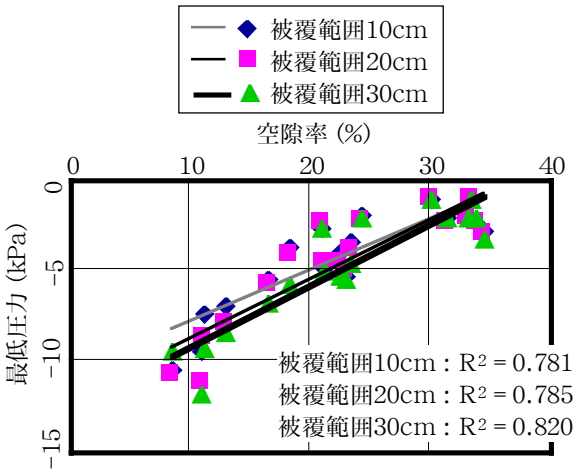
3.3 流入経路に関する検討

(1) 型枠の有無の影響

図−9は，脱型後型枠を外した状態で測定した結果と，その後型枠を取り付けて測定した結果を示したものである。この図によれば，型枠の有無については，ほとんど影響がないことがわかる。このことは，図−1に示したような底面からの流入ではなく，実際には図−10に示すように表面から流入していることを示していると考えられる。

(2) 被覆範囲の影響

表面からの流入範囲について検討するため，図−11に示すように，100, 200, 300mmと3段階に変化させて低反発クッションで被覆し，その上から吸引して検討した。図−12にその結果を示す。なお，この図では，粒径によらず流入範囲の変化のみで図を作成している。この図によれば，被覆範囲が大きくなると，空隙率が小さい場合に最低圧力が低下するものの，空隙率が大きい場合にはほとんど差が生じていない。空隙率が小さい場合にはもともと密着度が大きいため，供試体層深くからの流入も多いと考えられる。それが被覆範囲の増大によって流入範囲が深いまま広くなるため，最低圧力が低下するものと考えられる。一方，空隙率が大きい場合，密着度が低いため供試体表面近傍の浅い部分での流入が多くなると考えられる。この場合，供試体表面の被覆範囲を広げても表面のみを流入するため，最低圧力にはそれほど影響がないと考えられる。また，今回の結果では，被覆範囲が大きくなると決定係数もわずかに大きくなっている。これは被覆範囲を大きくすると，特に空隙率の低い範囲での測定において広範囲での測定を行っていることになり，よりばらつきが少なく安定した値が得られたためと考えられる。



図−12　最低圧力と空隙率の関係
（被覆範囲の影響）

4. まとめ

本研究では，ポーラスコンクリートの品質評価の方法として空隙率を吸引法によって測定する方法を提案し，その適用性を検討した。本研究で得られた知見は以下の通りである。

1)吸引法で得られる最低圧力は，フレッシュ状態と硬化状態を問わず空隙率と相関がある。

2)打設面では凹凸が大きく密着度が低くなるため相関が低くなるが，底面では型枠面に接しているため密着度が高く，相関が高くなる。

3)型枠の有無で相関がほとんど変化しなかったことから，ポーラスコンクリート層を貫く流入よりも，表面からの流入が多いと考えられる。

4)被覆範囲を増大させることにより相関を向上させられる可能性がある。

本手法をポーラスコンクリートの品質管理手法として考えた場合，打込み直後のフレッシュ状態で測定できるのか理想であるため，今後は打設面において減圧室とポーラスコンクリート表面の密着度をより高める方法を検討していく必要がある。

【謝辞】

本研究の実施に際しては，小川剛志君（平成29年度修論生）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)エルドンオチル・三島直生・畑中重光：ポーラスコンクリートの超音波伝播速度に及ぼす接触媒質の影響に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.40, No.1, pp.1365-1370, 2018.7
4)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定方法の提案，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.1731-1736, 2016.7
5)王子哲・安部良介・川崎佑磨・岡本享久：RI計器によるポーラスコンクリートの品質評価手法の提案に関する研究，コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1471-1476, 2017.7
6)王子哲・安部良介・岡本享久・川崎佑磨：RI法を援用したポーラスコンクリートの品質評価手法の現場施工への適用と有効測定範囲に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，pp.1359-1364，2018.7
7)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
8)今本啓一・山崎順二・下澤和幸・永山勝・二村誠二：構造体コンクリートの表層透気性評価におけるシングルチャンバー法の適用性の検討，日本建築学会構造系論文集, No.607, pp.31-38, 2006.7