

論文 接着媒質の影響を考慮した超音波法（表面法）によるポーラスコンクリートの空隙率推定

曹偉*1・エルドンオチル*2・畑中重光*3

要旨: 本研究では、表面法による超音波伝播速度を用い、ポーラスコンクリートの空隙率推定の可能性、および表面法による超音波伝播速度の測定方法に関する検討を行った。その結果、ポーラスコンクリートの超音波伝播速度と空隙率の関係は、対面法を用いた場合と同様に二次関数により近似できることが確認された。また、表面法によるポーラスコンクリートの超音波伝播速度の測定では、発・受振子間距離を補正し、適切な距離および接触媒質を用いることにより、ポーラスコンクリートの空隙率の推定が可能であることが明らかになった。

キーワード: ポーラスコンクリート, 空隙率, 超音波伝播速度, 品質管理, 動弾性係数, 非破壊検査

1. はじめに

ポーラスコンクリート（以下 POC と略記）は、その中の連続した空隙により、普通コンクリートでは得られない多くの機能を持つことができるため、特に環境共生分野などへの適用が注目されている材料である。POC は、せき板による壁効果および実施工における締固め程度などの影響を受け、現場施工された POC 舗装の空隙率、すなわち品質が、調合設計によるものとは異なる可能性がある。したがって、現場での品質管理が非常に重要である。

現場施工された POC 舗装の品質評価方法として、筆者らは既往の研究²⁾で、超音波法による POC の空隙率推定の可能性を検討し、対面法による超音波伝播速度と POC 空隙率の関係は二次関数で近似できることを報告した。また、POC の表面の凹凸による超音波発・受振子と試験体の接触不良の問題は、POC 試験体を水中に入れて測定することにより改善できることを明らかにし、その方法を提案している³⁾。しかし、施工された POC 構造体の品質評価をする場合は、POC の表面法による超音波伝播速度について検討し、現場で適用性のある接触媒質または

測定方法についての検討も必要である。

そこで本研究では、表面法による超音波伝播速度を用いた POC の空隙率推定の可能性、および表面法による超音波伝播速度の測定方法に関する検討を行った。

2. 実験方法

2.1 実験の要因と水準

表-1 に、本実験の要因と水準を示す。本実験では、POC の設計空隙率および超音波試験時の発・受振子と試験体の間に設置する媒質（以下、接触媒質）の種類を挙げた。POC の設計空隙率は 0%, 15%, 25%, 35% の

表-1 実験の要因と水準

要因	水準
設計空隙率 (%)	0, 15, 25, 35
接触媒質	水, グリセリンペースト

表-2 ポーラスコンクリートの使用材料

使用材料	種類	密度 (g/mm ³)
セメント	普通ポルトランドセメント	3.16
水	上水道水	1
粗骨材	南伊勢町産硬質砂岩 6号砕石 (5~13mm)	2.73
混和剤	ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤	1.03~1.13
	セルロース系増粘剤	1.3

*1 三重大学大学院建築学専攻 大学院生 (学生会員)

*2 三重大学大学院システム工学専攻 大学院生・修士 (工学) (学生会員)

*3 三重大学大学院建築学専攻 教授・工博 (正会員)

表-3 ポーラスコンクリートの調合表

設計 V_R (%)	単位量(kg/m ³)			SCA / C (%)	HAE / C (%)	フロー値	
	W	C	G			目標	実測
0	203.9	680	1554	—	0.19	—	—
15	130.9	436.4	1554	0.075	—	140	130
25	82.3	274.1	1554	—	—	190	191
35	33.6	111.9	1554	—	—	190	182

[注] V_R :空隙率, SCA/C:セメント質量に対する増粘剤添加率, HAE / C:セメント質量に対する高性能 AE 減水剤添加率



(a) フロー値 = 130
(設計 V_R = 15%)



(b) フロー値 = 191
(設計 V_R = 25%)



(c) フロー値 = 182
(設計 V_R = 35%)

写真-1 セメントペーストのフロー試験結果の例

4 水準とした。接触媒質には、水およびグリセリンペースト (SONI COAT-E) を用いた。グリセリンペーストは、従来から用いられる接触媒質であり、本実験に用いたのは水溶性なもので、現場のコンクリート構造物の測定に対応するものである。それに対して、水中の測定は、当然ながら現場では使えないため、従来の接触媒質を用いる方法によって測定する。しかし、コンクリートの超音波伝播速度の測定では、その表面の凹凸さは、測定結果に非常に大きい影響を与える。これは、発受振子と試験体の間に空隙層が入るためであり、実測される超音波伝播速度は材料の本来の速度より遅くなる。表面がより凹凸している POC では、この影響はもっと大きいと考えられる。したがって、本実験では、従来の接触媒質より流動性が高い水によって、発受振子と試験体の間の空気層を十分に埋めるという、より理想に近い状態で、POC における超音波の伝播性質に関して検討することを目的とした。

2.2 使用材料および調合

表-2 に、POC の使用材料を示す。POC の使用材料として、粗骨材には、JIS A 5001 に規定される単粒度砕石のうち、6 号砕石 (5~13mm) を、また、セメントには普通ポルトランドセメントを用いた。セメントペースト



写真-2 試験体の底部の垂れの状況の例
(設計 V_R = 15%)

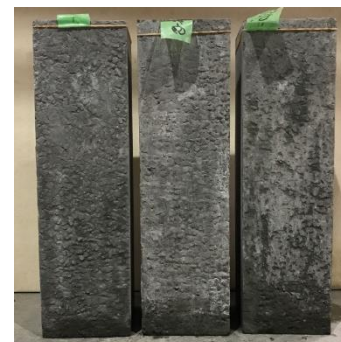


写真-3 試験体の打込み面の状況の例
(設計 V_R = 0%)

のフロー値を調節するために、高性能 AE 減水剤（ポリカボン酸系）および増粘剤（セルロース系）を用いた。

表-3 に、POC の調合表およびペーストフロー値の測定結果を示す。本実験では粗骨材をセメントペーストで結合することとし、細骨材は使用していない。セメントペーストの流動性は、過去の研究実績に基づき、適切と考えられる目標フロー値を設定した。ここで、許容差は $\pm 10\text{mm}$ とした。セメントペーストのフロー値は、JIS R 5201 に準拠して測定した。写真-1 に、フロー試験結果の例を示す。また、設計空隙率が 0% の場合は、練混ぜ中に高性能 AE 減水剤を投入し、流動性を目視により確認した。試験体底面の垂れの状況は、いずれも少なく、比較的均一のものできたといえる。写真-2 に、他試験体より多く垂れが生じた試験体の例を示す。また、写真-3 に、試験体の打込み面の状況の例を示す。空隙率が 0% の場合においては、結合材の水セメント比 ($W/C=0.3$) が非常に低く流動性が得にくい状態であったため、打込み面は若干凹凸した状態で出来上がっている。

2.3 試験体の作製方法

POC の練混ぜには、容量 30L の揺動攪拌型ミキサを用いた。練混ぜ方法は、セメントペースト先練りとし、セメント、水および混和剤をミキサに投入して、低速で 30 秒間練り混ぜた後に、ミキサ内壁に付着したセメントペーストを掻き落とし、高速で 90 秒間練り混ぜた。練り上がったセメントペーストを採取してフロー試験を行い、所定のフロー値が得られたことを確認した後に、フロー試験に供したセメントペーストをミキサに戻し、粗骨材を投入して、高速で 120 秒間練り混ぜた。

練り上がったフレッシュ POC は、プラスチック製の練り舟に排出し、3 本の角柱鋼製型枠 ($150 \times 150 \times 530\text{mm}$) に打ち込んだ。型枠への打込みに際しては、空隙率のばらつきを抑えて設計値に近い試験体を作製するために、調合表から計算した型枠サイズごとの所定の質量を計量しながら打ち込んだ。

締固めは、2 層に分けて打ち込んだ POC に対して、各層を突き棒で突き固め、所定質量を充填した後に、ジッキングおよび型枠振動機による上面からのタンピングを行った。

打込み後は、型枠上面にビニルシートをかけて乾燥を防ぎ、恒温恒湿室 (20°C , 66%) 養生を行った材齢 3 日目試験体を脱型した後に、材齢 28 日まで 20°C の水中養生を行った。

2.4 試験方法

(1) 空隙率試験

POC の円柱試験体に対する空隙率試験は、日本コンクリート工学会による POC の空隙率試験方法 (案) ⁴⁾ に準拠して、質量法により材齢 28 日の試験体の全空隙率を

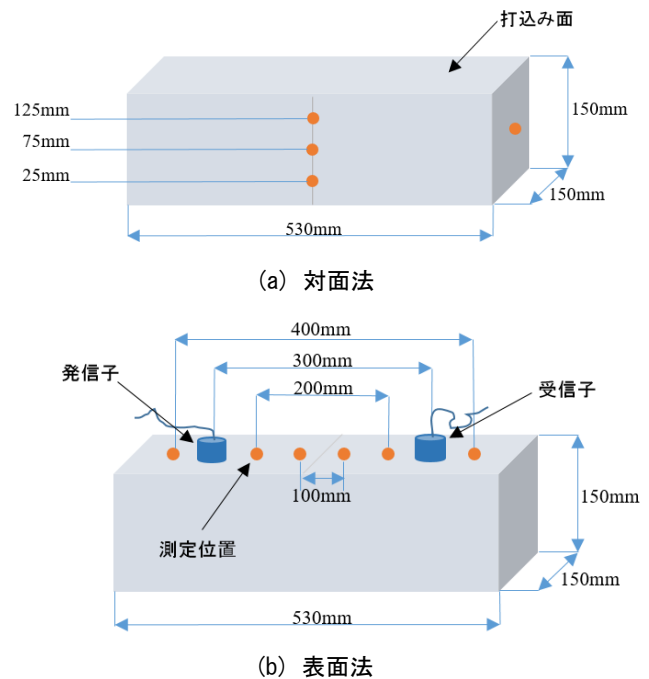
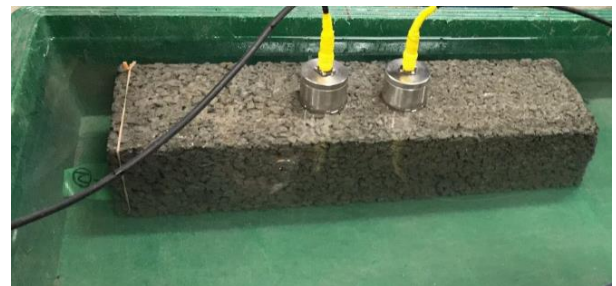


図-1 超音波伝播速度試験の概要



(a) グリセリンペースト (1.5~2g)



(b) 水

写真-4 超音波伝播速度試験に用いた接触媒質の例

算出した。空隙率の測定は、本実験で作製した全ての試験体 (角柱試験体の各 3 本ずつ) に対して行った。

(2) 超音波伝播速度試験

図-1 に、超音波伝播速度試験の概要を示す。超音波

伝播速度は、発・受振子中心間距離を伝播時間で割って式(1)により算出した。なお、超音波伝播速度の測定は、材齢 28 日において、超音波測定法の対面法および表面法の両者について行った。

$$V = L / T \quad (1)$$

ここに、 V ：超音波伝播の見かけ速度(m/s)、 L ：発・受振子中心間距離(m)、 T ：伝播時間(s)

対面法の測定は超音波発・受振子（直径 50mm、周波数 50kHz）を角柱供試体（150×150×530mm）の両側の中央に当て、伝播時間を同図に示す測定位置ごとに 5 回測定した。対面法の測定位置は試験体長さ方向と中央断面において行い、中央断面での測定は、底面から 25mm、75mm、125mm の位置において行った。表面法の測定は、角柱試験体（150×150×530mm）の打込み面、側面および底面において、超音波発・受振子（直径 50mm、周波数 50kHz）の中心間距離が 100 mm、200 mm、300 mm、400 mm となる位置で 5 回行った。また、表面法の測定では、超音波の伝播経路が対面法のように超音波の発・受振子の中心間距離と一致しないため、発・受振子間距離の補正が必要である。発・受振子間距離の補正は、既往研究⁵⁾を参考に、式(2)を用いて行った。

$$L' = (L - x)(1 + \alpha)^2 \quad (2)$$

ここに、 L' ：補正距離、 L ：発・受振子中心間距離(m)、 x ：発・受振子をもっとも近づけた時の補正距離、 α ：補正係数

写真-4 に、超音波伝播速度試験に用いた接触媒質の例を示す。接触媒質として、グリセリンペーストおよび水を用いた。水の場合は、材齢 28 日において、POC 試験体（15×15×53cm）を養生室から取り出し、水中に入れて、日本コンクリート工学会による POC の空隙率試験方法（案）³⁾の容積法を参考にして、試験体の中の気泡を十分に抜き出した後に測定を行った。グリセリンペーストの場合は、水中測定の後に、試験体を実験室（温度 13℃、湿度 43%）において 3 時間ほど水を切った後に測定を行った。なお、発・受振子と試験体との各接触面において、コンクリート専用の接触媒質のグリセリンペースト（SONICOAT-E）約 1.5~2g を使用した。ここで、本実験の超音波伝播速度に与える水の影響に関しては、以下のように考えている。

POC では、超音波伝播速度はほぼ固体部分の性質によって決まると言える²⁾。また、弾性理論によれば、密度によって弾性波の伝播音速も変わるため、試験体の乾湿状態によって密度が影響され、超音波（弾性波の一つ）の伝播速度が変わる場合がある。しかし、本実験ではグリセリンペーストを接触媒質として用いた場合は気中お

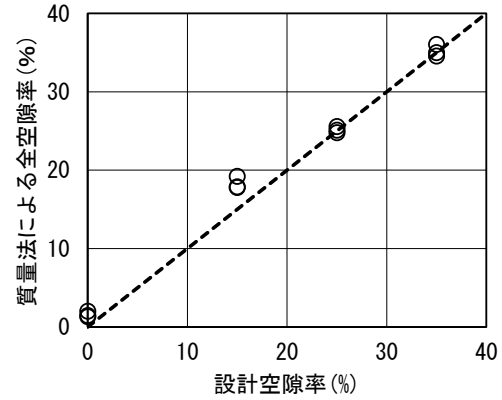


図-2 質量法による全空隙率と設計空隙率の比較

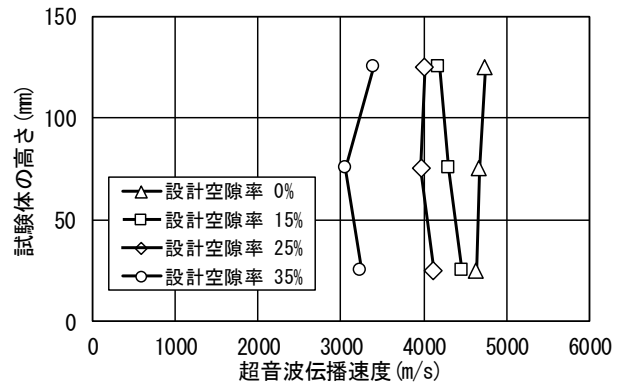
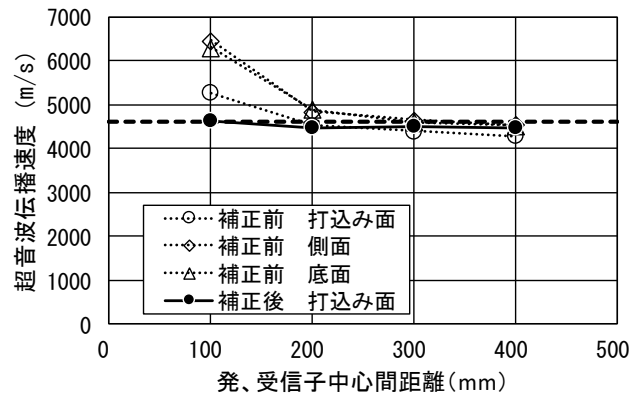
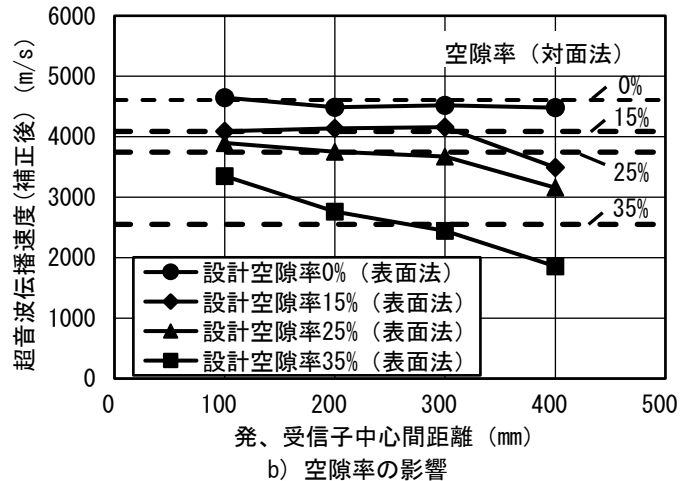


図-3 超音波伝播速度（対面法）の試験体高さ方向の分布（水中）



a) 測定面の影響 ($V_R = 0\%$)



b) 空隙率の影響

図-4 超音波伝播速度（表面法）と発・受振子中心間距離の関係（水中）

よび水中の測定いずれも湿潤状態であり、超音波速度に対する水の影響はほぼないと考えられる。

3.実験結果とその考察

3.1 空隙率

図-2 に、POC の質量法による全空隙率と設計空隙率の比較を示す。設計空隙率の 15% は、質量法による全空隙率が設計空隙率より少し大きくなっているほかは、ほぼ設計空隙率と等しい。

3.2 超音波伝播速度

(1) 対面法

図-3 に、対面法による超音波伝播速度について試験体の高さ方向の分布を示す。なお、データ（各点は三本の試験体で測定位置ごとに 5 回測定した 15 個測定データの平均値、変動係数は 0.004-0.019）は試験体の中央断面での横方向において測定したものである。図によれば、空隙率が大きくなるほど超音波伝播速度は小さくなる。超音波伝播速度は、設計空隙率が 0% の場合は、高さ方向にはほぼ影響が見られなかったが、設計空隙率が 15%、25%、35% の場合は、下部の方が中央部より若干大きい。これは、セメントペーストの垂れの影響により、下部の空隙率が小さくなったためと考えられる。また、設計空隙率が 35% の場合は、上部の超音波伝播速度が他より明確に大きくなっている。この原因としては、以下のように考えている。

POC の締固めでは、締固めに対する抵抗力がほぼと骨材の接触部分によって決まる。この接触部分を通して上層からの締固め力が下層へ伝わっていく。締固めの初期には、上層の空隙率が下層より小さくなる傾向がある。設計空隙率 35% の場合は、この傾向が明解になるため、より明確であったと考えられる。

(2) 表面法

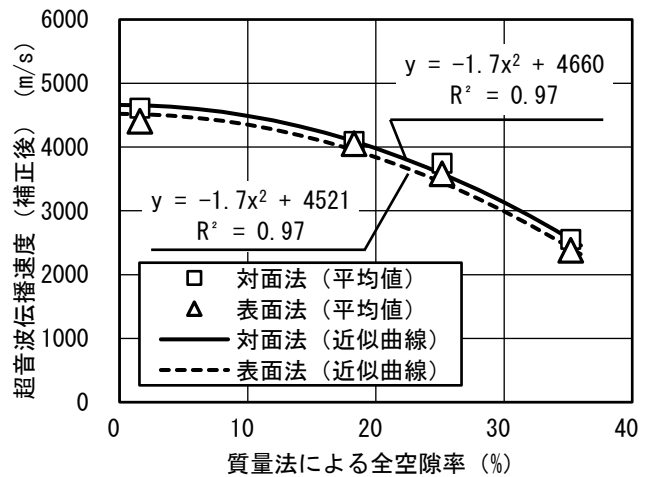
図-4 に、表面法による超音波伝播速度と発・受振子中心間距離の関係を示す。なお、各点は三本の試験体で測定位置ごとに 5 回測定した 15 個の測定データの平均値（変動係数は 0.006-0.037）である。比較のため、試験体長さ方向の対面法による超音波伝播速度も示す。図-4 a) は、空隙率 0% の場合で、発・受振子間距離の補正前後の差異および測定面の影響を示したものである。図によれば、補正前の超音波速度は、発・受振子中心間距離が小さくなるほど大きくなり、打込み面の方が側面および底面より小さい。これは、写真-2 に示したように試験体の打込み面は、比較的凹凸しており、発・受振子および試験体との密着度が得にくいいため音速が小さくなったと考えられる。測定面の影響については、他の各空隙率の場合もほぼ同様な傾向であった。また、発・受振子間距離の補正は、既往研究⁵⁾を参考に、式 2) を用い

て行った。なお、図に示す打込み面の場合は、 $x=20\text{mm}$ 、 $\alpha=0.1$ とし、以下に示す表面法による音速も、これらの値を用いて補正した。

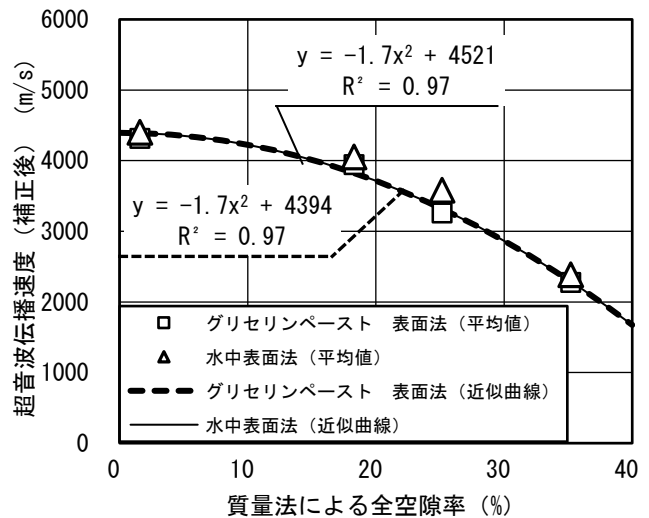
図-4 b) は、空隙率の影響を示す。同図によれば、設計空隙率が 0%、15%、25% において、表面法による音速は発・受振子中心間距離が 300mm までは対面法による音速と同程度の値に収まるが、300mm を超えると低下する傾向が見られる。また、設計空隙率が 35% の場合は、発・受振子中心間距離が大きくなるほど小さくなる傾向が見られる。これは、表面法による超音波の測定では、距離が長くなるほど、空隙率が大きくなるほど音波の減衰が激しくなるためであると考えている。

3.3 超音波伝播速度と空隙率の関係

図-5 に、POC の超音波伝播速度と空隙率の関係を示す。なお、各点は 15 個のデータの平均値（図-4 と同様）である。図-5 a) は、対面法と表面法の比較、図-5 b) は、接触媒質の比較を示す。また、同図には、実験結果



(a) 対面法と表面法の比較（水中）



(b) 接触媒質の比較

図-5 超音波伝播速度と空隙率の関係

の全データ（データ数は、図の各点×15 個）による近似曲線と共に相関係数も示す。図によれば、空隙率が大きくなるほど超音波伝播速度が小さくなり、その関係は相関性が高い二次関数で近似できた。

これは、既往の研究²⁾で報告したように POC を空隙部分と固体部分からできる均一な弾性体として仮定し、二値化した断面において行った超音波の最短経路の解析結果によれば、空隙率が大きくなるほど最短経路が長くなり、超音波伝播速度が小さくなると考えられる。また、同幅の空隙率の増大において、最短経路の増大量は、空隙率が大きくなるほど大きくなるため、超音波伝播速度と空隙率の関係は上に凸の曲線になると考えられる。なお、解析では超音波は POC の中の固体部分を伝播し、空隙を迂回することを前提条件としている。解析についての詳細な内容は既往の研究²⁾に参考にされたい。

また、対面法と表面法による超音波伝播速度と空隙率の関係、および水とグリセリンペーストによる超音波伝播速度と空隙率の関係は、いずれも係数がほぼ同じ二次関数で近似できた。この結果から、発・受振子の中心間距離を補正し、適切な中心間距離および接触媒質を選ぶことにより、超音波の表面法を用いて POC の空隙率を推定可能であることが確認された。

4.まとめ

本研究から得られた知見を以下に示す。

- 1) POC の超音波伝播速度と空隙率の関係は、二次関数により近似できることが確認された。
- 2) 表面法による POC の超音波伝播速度の測定では、超音波発・受振子間距離を補正し、適切な中心間距離において測定すれば、ほぼ対面法と同程度の音速の測定値が得られることが明らかになった。
- 3) POC の超音波伝播速度と空隙率関係の測定値は、グリセリンペーストを接触媒質として用いても、水を

用いる場合とほぼ同様なことが明らかになった。

謝辞

本研究を実施するにあたり、研究費の一部は平成 29 年度科学研究費基盤研究 B（研究代表者：畑中重光）および公益財団法人大林財団 2018 年度奨励研究助成（代表者：ERIDENGAOQIER）によった。ここに付記して感謝申し上げます。

【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，日本コンクリート工学会，343pp.，2015.6
- 2) エルドンオチル，三島直生，畑中重光：超音波法による POC の空隙率推定手法に関する研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.83, No.749, pp.943-951, 2018.7
- 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.50, No.1, pp.1365-1370, 2018
- 4) 日本コンクリート工学協会：ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会報告書，231pp.，2003.5
- 5) 平田隆祥，魚本健人：超音波法によるコンクリートのひび割れ深さ測定における探触子の影響，第 54 回セメント技術大会講演要旨・コンクリート論文集，pp.160-161, (2000).
- 6) 鎌田敏郎，国枝稔，島崎磐，六郷恵哲：超音波によるポーラスコンクリートの内部組成の評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20, No.2, pp.733-738, 1998