

論文 ポーラスコンクリートの吸音率評価に関する基礎的実験

松尾 圭悟*1・今本 啓一*2・エ ルドンオチル*3・田中 章夫*4

要旨：本研究では、斜め入射法を用いてポーラスコンクリートの吸音率に与える空隙率、骨材粒径および種類の影響について実験的検討を行った。また、測定方法による影響を検討するため、ランダム入射（残響室法）による吸音率との比較も行った。その結果、斜め入射法によるポーラスコンクリートの吸音率は、周波数によっていくつかのピークが確認でき、高周波数帯（本実験では2000Hz以上）では一定の結果となる傾向が見られた。また、高周波数帯において、空隙率が大きいほど吸音率は高くなる傾向が見られたが、骨材粒径・種類による影響がほとんど見られなかった。

キーワード：ポーラスコンクリート、吸音性能、残響室法吸音率、斜め入射吸音率

1. はじめに

建築において防音（遮音性および吸音性）は住環境において非常に重要である。特に吸音性は、室内の音を吸収する能力を示す指標となり、住環境におけるストレス軽減や集中力向上、騒音の低減といった効果をもたらすことが期待される。そのため、吸音材は建築物の音環境を改善するために広く使用されている。ポーラスコンクリート（以下、POC と略記）は吸音性を持つ多孔質コンクリートであり、POC の特徴の一つに、空隙率の変化により吸音性が異なる点が挙げられる。既往研究¹⁾では、1000Hz前後で吸音率のピークが示され、有声音や交通騒音などの周波数帯において、POC が強度のある吸音材として外装材に使用できる可能性が示唆されている。

吸音率を測定する従来の方法として、残響室法（JIS A 1409）や音響管による吸音率およびインピーダンスの測定（JIS A 1405）が広く採用されているが、これらの方法では規定された残響室や音響管が必要となり、測定に手間がかかる。残響室法では、試験体の大きさが10～15m²必要であり、簡単に吸音率を測定することができない。

本論文では、既往研究¹⁾よりも人間が最も敏感に聞こえる2000～5000Hzを含めた500～5000Hzの周波数帯で残響室法や音響管を使用することなく、試験体の大きさに依存せずにPOCの吸音率を簡易的に測定できる方法として、既往研究で提案された斜め入射吸音率法²⁾に着目した。実験1では、実験室内で実施した斜め入射吸音率測定方法を用いてPOCの空隙率および骨材粒径による吸音率への影響を測定し、その結果を検討する。実験2では、POCの表面の違いおよび骨材種類による

表－1 使用材料と物性値

種類	記号	品質
結合材	普通ポルトランドセメント	OPC 密度：3.16g/cm ³ 比表面積：3340cm ² /g
粗骨材	5号砕石	G5 絶乾密度：2.66g/cm ³ 吸水率：1.35% 実積率：59.2%
	6号砕石	G6 絶乾密度：2.63g/cm ³ 吸水率：1.82% 実積率：59.4%
	7号砕石	G7 絶乾密度：2.58g/cm ³ 吸水率：1.93% 実積率：56.7%
混和材	高性能 AE 減水剤（1種）	Ad ポリカルボン酸系化合物 リグニンスルホン酸塩

表－2 POC の配(調)合

試験体名称	V _R (%)	単位量(kg/m ³)			Ad (B×%)
		W	OPC	G	
POC-G5-25	25	77	256	1543	-
POC-G6-0	0	202	674	1548	0.6
POC-G6-15	15	129	431		-
POC-G6-25	25	81	269		-
POC-G6-35	35	32	107		0.1
POC-G7-25	25	94	315	1461	0.1

※V_Rは目標空隙率

吸音率への影響を測定し、その結果を検討する。実験3では、吸音率が既知の市販多孔質材料を用いて、本実験で提案する測定方法の測定精度の検討を行う。

2. 実験 1

2.1 実験概要

(1) 試験体概要

実験1のPOCに使用した材料と物性値を表－1に示す。また、POCの水セメント比(W/C)を30%とし、POCの設計空隙率を0, 15, 25, 35%に設定した。用いた試験体の配(調)合を表－2に示す。本実験では、POC

*1 東京理科大学大学院 工学研究科建築学専攻 修士1年（学生会員）

*2 東京理科大学 工学部建築学科教授 博士（工学）（正会員）

*3 静岡理工科大学 理工学部建築学科講師 博士（工学）（正会員）

*4 日本工業大学 建築学部建築学科准教授 博士（工学）（正会員）

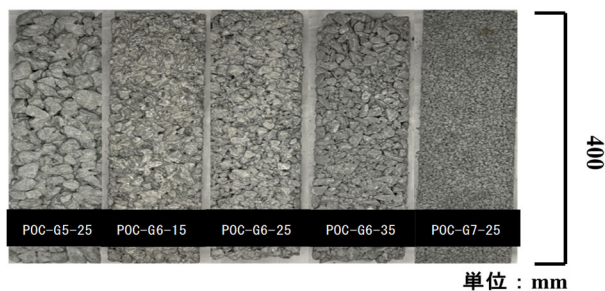


写真-1 試験体測定面（打設面）の様子

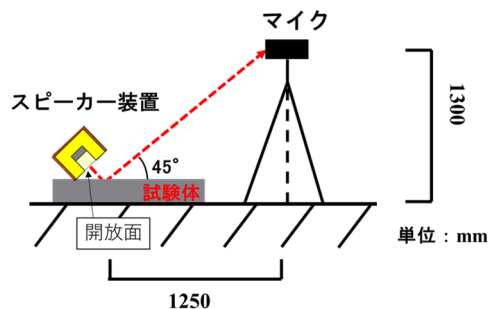


図-1 斜め入射吸音率測定イメージ図

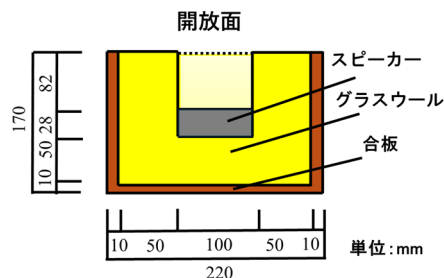
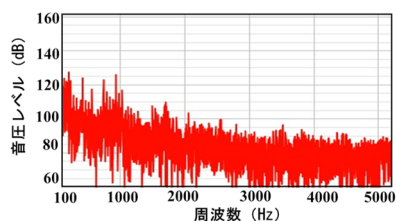


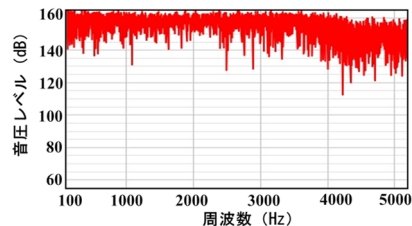
図-2 スピーカー装置のイメージ図（断面）

表-3 測定項目

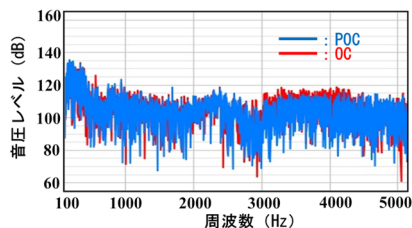
試験体名称	大きさ (mm)	厚さ (mm)	測定体 数	平均測定空隙率 (%)
POC-G5-25	400×100	100	3	17.5
POC-G6-0			3	3.3
POC-G6-15			3	17.8
POC-G6-25			3	28.1
POC-G6-35			3	37.4
POC-G7-25			3	17.8



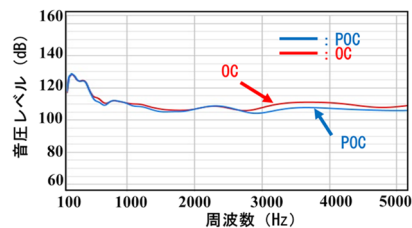
a) 環境音



b) TSP



c) 測定音（補正前）



d) 測定音（補正後）

図-3 音圧レベル

の吸音率に与える空隙率および骨材粒径の影響を検討するために、空隙率を15%、25%および35%に変更し、骨材粒径を2.5～5mm（7号砕石）、5～13mm（6号砕石）および13～20mm（5号砕石）に変更した試験体を用意した。また、吸音率測定では、基準となる完全反射面における測定が必要なため、平滑な表面を持つ空隙率が0%の試験体（以下、OCと略記）も作製した。試験体打設面の様子を写真-1に示す。

練混ぜには、強制1軸パン型ミキサ（容量100L）を用いた。粗骨材とセメントを投入して空練りを30秒間行い、水と混和材を投入しさらに60秒間の練混ぜを行った。空隙率を変化させた試験体を作製するため、試験体1体当たりの打ち込み質量を理論的に求め、型枠に所定量を計り取り投入した。吸音率を測定する試験体は1層

打ちとし、締固めは突き棒を使用し棒突きを行った後、コテで表面を叩き、表面に均一な空隙ができるようにした。

(2) 空隙率試験

POCの空隙率は「ポーラスコンクリートの透水試験及び空隙率試験方法に関する研究」³⁾より質量法（JCI-SPO2-1に準拠）で測定した。

(3) 斜め入射吸音率測定

斜め入射吸音率の測定は、既往研究²⁾を参考にし、試験体ごとに3回測定を行った。測定の概要は図-1および図-2に示し、測定を行った試験体を表-3に示す。図-2はスピーカー装置の断面図であり、スピーカー装置の合板で囲われていない開放面を図-1における試験体への入射面とした。使用したマイクはクラス1の

コンデンサマイクを、スピーカーには SN 比 80dB、周波数応答 20kHz の Bluetooth スピーカーを使用した。まず、正弦波の周波数 7.6 秒間で 0Hz から 25600Hz まで連続的にスイープした TSP(Time Stretched Pulse)を用いて、基準となる完全反射面(空隙率が 0%の試験体, OC)の反射音を測定した後、POC の測定を行った。その後、測定した反射音データにおいて、Google Colaboratory による反射音データの前処理、パワースペクトルの計算および吸音率の計算を実施した。音データの前処理では、測定音に逆 TSP フィルタをかけてインパルス応答を得た。また、環境音によるノイズの補正を実施した。パワースペクトルの計算では、インパルス応答にハニング窓を適用し、周波数成分間の干渉を低減させ、高速フーリエ変換 (FFT) を行い、1/3 オクターブでなめらかに補正を掛け、そこから音圧レベル(dB)を抽出した。また、パワースペクトルおよび吸音率の計算は、以下の式(1)および式(2)により算出した。環境音、TSP、補正前後の測定音 (OC (赤色) と POC (青色)) の音圧レベルを図-3 に示す。

$$\text{パワースペクトル} = 10^{\left(\frac{\text{音圧レベル (dB)}}{10}\right)} \quad (1)$$

$$\text{吸音率} = 1 - \frac{\text{試験体のパワースペクトル}}{\text{基準反射面のパワースペクトル}} \quad (2)$$

2.2 実験結果および考察

(1) 質量法による全空隙率

図-4 に、実験 1 の試験体の空隙率を示す。POC 試験体は作製時の締固め程度などによって、その空隙率はばらつきができてやすいものの、実測空隙率が設計空隙率との誤差は 15%になる事例⁴⁾も多くある。したがって、設計空隙率の誤差 5%以内にあることがほぼ設計空隙率通りに作製出来ていると考えられる。また、本論文では 10%刻みを基準として空隙率の影響を評価しているため、空隙率は誤差 5%以内であれば、本実験パラメータにおける空隙率の影響を評価できると考えた。図-4 によると、試験体のほとんどで設計空隙率と測定空隙率の誤差が 5%以内に収まっている。POC-G5-25、POC-G7-25 の 1 体ずつが誤差 5%以上となったが、測定を行った 3 体の平均空隙率は誤差 5%以内である。また、吸音率は、3 体のパワースペクトルの平均値で算出するため、本実験において空隙率のばらつきが吸音率に及ぼす影響は少ないと推測される。

(2) POC の斜め入射吸音率に与える空隙率の影響

図-5 に、空隙率別の吸音率測定結果を示す。2000Hz 以下では空隙率によってピーク周波数(測定周波数前後の吸音率の差が 0.2 以上となる周波数)ずれや吸音率の違いが生じた。吸音率の推移を見ると、500Hz 以降で第 1 ピークが見られるが、ピーク周波数は空隙率によ

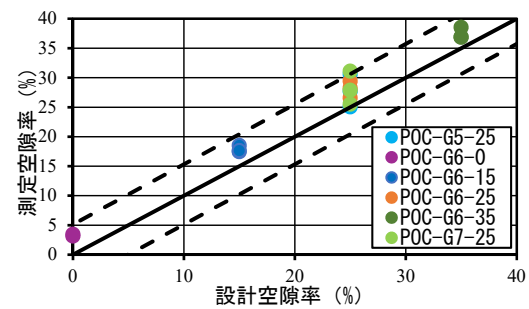


図-4 設計空隙率と測定空隙率

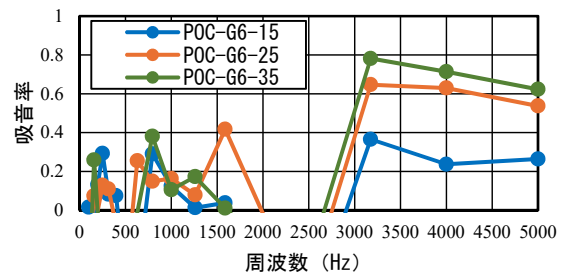


図-5 空隙率別測定結果

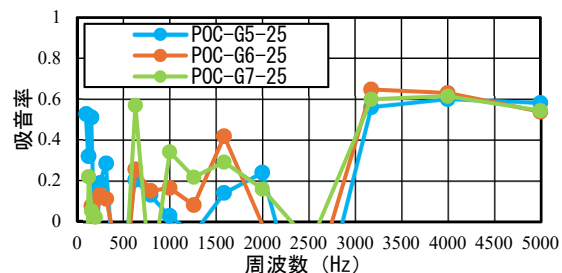


図-6 骨材粒径別測定結果

って異なっている。既往研究¹⁾においても、空隙率によってピーク周波数が異なっており、空隙率によって試験体内部で共鳴する周波数が変化していると考えられる。また、1600Hz で POC-G6-25 のピークが確認できる。他の空隙率ではピークが確認できないことから、1600Hz の波長が空隙率 25%の空隙にのみ試験体内部で共鳴したと考えられる。現時点では現象の詳しい原因を解析できていないため今後の課題としたい。一方、3150Hz 以降では安定的に吸音率の測定ができており、POC-G6-15, 25, 35 の順で吸音率が高いことが確認された。高周波数帯では、空隙率が高くなるほど吸音率の高さに直結する結果となった。このことから本実験が提案する簡便な斜め入射吸音率測定方法は 3000Hz 以上の領域で安定した吸音率が測定可能な試験方法であることが示唆された。

(3) POC の斜め入射吸音率に与える骨材粒径の影響

図-6 に、骨材粒径別の吸音率測定結果を示す。500～2000Hz では骨材粒径による明確な傾向は確認できない。また、3000Hz 以降においても、骨材粒径によって吸音率の差は僅かであった。したがって、高周波数帯で

表－4 使用材料と物性一覧

種類	記号	品質
結合材	普通ポルトランドセメント	OPC
粗骨材	6号碎石	CS
	軽量骨材	LG
混和材	高性能 AE 減水剤 (I 種)	Ad

表－5 試験体配(調)合

試験体名称	V _R	単位量 (kg/m ³)				Ad (B×%)
		W	OPC	CS	LG	
OC	0	193	644	1566	-	-
POC-CS15	15	120	401	1566	-	0.15
POC-LG	15	120	399	-	989	0.15

表－6 測定項目

試験体名称	大きさ (mm)	厚さ (mm)	測定体数	平均測定空隙率 (%)
OC	500×500	50	2	2.0
POC-CS15	500×500	50	4	16.5
POC-LG	500×500	50	2	17.5

は吸音率に及ぼす骨材粒径の影響は小さいことが示された。

3. 実験 2

3.1 実験概要

表－4 に、POC に使用した材料と物性値を示す。また、POC の水セメント比 (W/C) を 30% とし、POC の目標空隙率を 0、15% に設定した。吸音率を測定する試験体の配(調)合を表－5 に示す。POC の空隙率は実験 1 と同様に、質量法で測定した。なお、練混ぜ方法は、実験 1 と同様の方法で行った。

吸音試験は、実験 1 と同様に実験室内において斜め入射吸音率測定を実施した。測定項目を表－6 に示す。

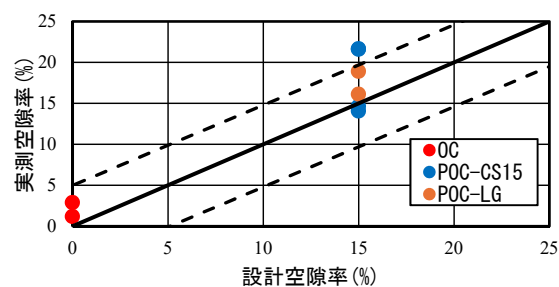
3.2 試験結果および考察

(1) 試験体空隙率

図－7 は吸音試験体の設計空隙率と測定空隙率の関係を示す。ほとんどの試験体で設計空隙率と測定空隙率の誤差が 5% 以内に収まっている。POC-CS15 は 2 体が設計空隙率の 5% を上回ったが、作製した 4 体の空隙率の平均値は設計空隙率の 5% 以内に収まっている。また、実験 1 での結果から空隙率のばらつきによる吸音率への影響が懸念されるが、のちに記述する測定結果において、空隙率のばらつきによる試験体ごとの吸音率のばらつきはほとんど確認されなかったことから、空隙率のばらつきによる測定への影響は小さいと推測される。試験体の様子を写真－2 に示す。

(2) 試験体表面の違いによる影響

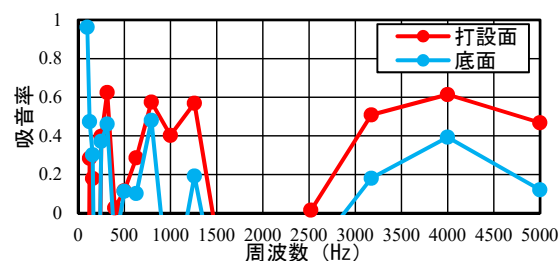
図－8 に POC の表面別の測定結果を、写真－3 には



図－7 設計空隙率と測定空隙率



写真－2 試験体の様子 (測定面)



図－8 測定面別測定結果

写真－3 POC 同一試験体の表面の様子 (V_R=15%)

POC (同一試験体) の打設面と底面の写真を示す。写真－3 より、同一試験体の打設面と底面で表層の空隙率に違いがあることが確認できる。なお、ペーストの垂れは配(調)合などの工夫により改善されと考えられる。空隙量の多い打設面は、底面よりも高い吸音率を示した。このことから、POC の吸音率は、測定面の違いによって影響を受けると考えられる。本測定法を用いた POC の吸音率において、表層空隙率は大きな要因の一つであると推測される。

(3) 使用骨材の違いによる影響

図－9 に、POC の使用骨材別の測定結果を示す。POC-CS15 は実験 1 と同様に 2000Hz 以下では低い吸音率を

示し、2500Hz 以降で高い吸音率を示している。一方で軽量粗骨材を使用した POC-LG の吸音率が低い結果となった。作製した試験体は、本実験の計画段階当初では意図したものではなかったが、写真-2 に示すように打ち込み面にペーストの垂れが見られたため、このようなケースにおいては骨材による吸音率の影響を明確に確認することはできなかったものと考えられる。なおこのことから、実際の製造・施工においては、ペーストの垂れを抑制する必要があると考えられ、この点については配(調)合を見直すなど今後の検討課題と考える。800Hz 付近で POC-LG が吸音率のピークを示し、その値は POC-CS15 の同周波数よりも高かった。このことから、ペーストの垂れがなければ、POC-LG は安定して POC-CS15 よりも高い吸音率を示す可能性も考えられる。

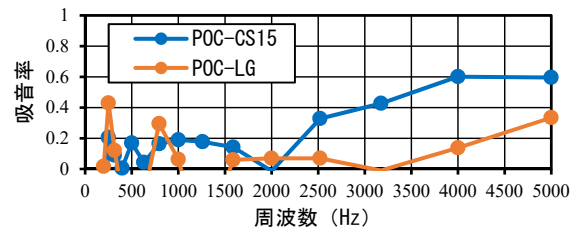


図-9 使用骨材別測定結果



写真-4 試験体



写真-5 測定時の残響室内の様子

4. 実験 3

4.1 実験概要

実験 3 では、本研究で提案する簡便な斜め入射吸音率測定法の測定精度を検証するため、残響室法吸音率 (JIS A 1409 を参考) および無響室での測定を行い比較検討した。使用した試験体は、吸音率が既知な市販多孔質材料と POC-CS15 である。なお、斜め吸音率の算出式である式(2)に示す基準反射面には POC-CS15 の底面を使用した。

残響室法吸音率では、JIS A 1409 に準拠した表面積 10m^2 と、1 試験体あたり $500\times 500\text{mm}$ の試験体を 4 体隙間なく残響室の中央に集中配置した表面積 1.0m^2 の 2 つの表面積の測定結果を比較検討することとした。なお、試験体側面の吸音を防ぐために、試験体の側面には 2mm のアルミニウムフレームを接着し、フレームと試験体の隙間にはシーリング材を塗布して隙間がない状態にした (写真-4)。残響室法吸音率を測定した項目を表-7、測定時の残響室内の様子を写真-5 に示す。

表-7 測定項目

試験体名称	大きさ (mm)	厚さ (mm)	測定 体数	平均測定空疎率 (%)
市販多孔質材料	500×500	50	4	-
POC-CS15				16.5

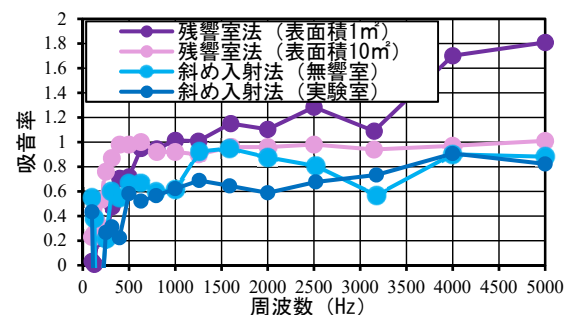


図-10 市販多孔質材料の吸音率と周波数関係

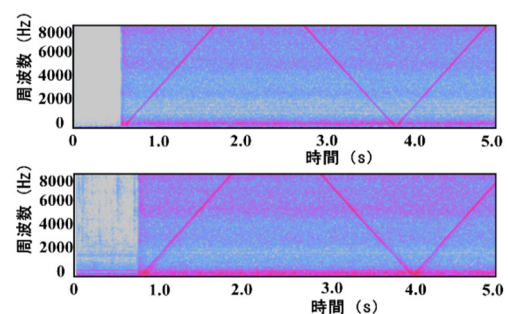


図-11 分析時スペクトログラム画像
(上：無響室，下：実験室)

4.2 実験結果および考察

図-10 には、市販多孔質材料の測定方法別の測定結果、図-11 には分析時のスペクトログラム画像を示す。図-11 は音の中に含まれる周波数の時間的な変化を視覚化したものであり、紫色に色が近い程、その時間の特定の周波数の音量が大きいことを示している。また、灰色の部分には音が測定されていない周波数が示され、色がある部分では音が測定されている周波数を示している。図-10 において吸音率は、残響室法 (表面積 1m^2)、残響室法 (表面積 10m^2)、斜め入射法 (無響室)、斜め入射法 (実験室) の順に高い値を示した。なお、残響室法 (10m^2) は、残響室法吸音率 (JIS A 1409) に準じて行った試験結果である。表面積が小さい残響室法 (1m^2) の吸音率は、既往研究⁵⁾で示されるように 1000Hz を超

える周波数帯で 1.0 を上回る値を示し、JIS に準拠した残響室法 (表面積 10m^2) の結果よりも高い吸音率が確認された。残響室法の試験面積は、残響室法吸音率 (JIS A 1409) で規定される試験面積のおよそ 10 分の 1 であり、この面積効果が測定結果に影響を与えたと考えられる。斜め入射法を見てみると、無響室で行った測定は $1000\sim 2500\text{Hz}$ で残響室法 (表面積 10m^2) に近い吸音率

を示した。一方、実験室で行った測定では残響室法（表面積 10m²）より 0.2～0.4 低い吸音率を示している。2500Hz 以降の高周波数帯では、測定場所によらず斜め入射法は、残響室法（表面積 10m²）に近い吸音率を示した。図-11 から確認できるように、実験室（図下）では無響室（図上）と異なり、背景が灰色の部分でも青色が確認できることから、環境音や雑音、壁や天井からの反射音が測定音に影響している。環境音は低周波数が多いため、高周波数帯では測定音への影響が少なく、無響室での測定結果に近い結果を示したと考えられる。

一方、低周波数帯では環境音の影響が大きく、本来の吸音率よりも低い吸音率を示したと考えられる。実験室での測定においても、吸音率を現在の結果より製品データに近づけるために、環境音の影響を低周波数帯で排除することが今後の課題である。

図-12 には、POC の測定方法別の測定結果を示す。図-12 において 3000Hz 以上の平均吸音率は、残響室法（表面積 1m²）、斜め入射法（無響室）、斜め入射法（実験室）の順で高くなっている。残響室法（表面積 1m²）では吸音率が安定しており、0.4～0.6 である。本測定法では、無響室では吸音率のピークが 1600Hz で確認され、実験室では明確なピークは確認できない。吸音材の市販多孔質材の結果を示した図-10 では無響室が実験室よりも高い吸音率を安定して示していたが、POC の測定では周波数ごとに違いが見られた。特に 1000Hz と 1600Hz で吸音率に差異が生じた原因として、POC 表面の空隙の影響が考えられる。図-8 に示すように本測定法は POC の表層の空隙の影響を受けることが確認されており、同一試験体を使用しても斜め入射した位置がずれたため、波長と空隙が一致する周波数が変化し、吸音率の推移形状は同じだがピーク位置に違いが生じたと推測される。また、2000Hz では、雑音の影響を受けない無響室では低い吸音率が観測され、一方で雑音の影響が大きい実験室では吸音率が 0 を示した。3000Hz 以上の高周波数域においては、本測定法は実施する部屋によらずほぼ同程度の値を示した。残響室法（表面積 1m²）で測定した吸音率は実際の POC の吸音率よりも高くなる傾向をふまえると、高周波数域においては雑音の影響を受けず、波長が短くなるため、POC 表面の空隙の違いによらず波長と空隙が一致しやすい。よって、本測定法では POC の実際の吸音率に近い値を得られると考えられる。

5. まとめ

本研究により得られた知見を以下に示す。

- 1) 高周波数帯において、POC の空隙率は高いほど吸音率は高くなる。

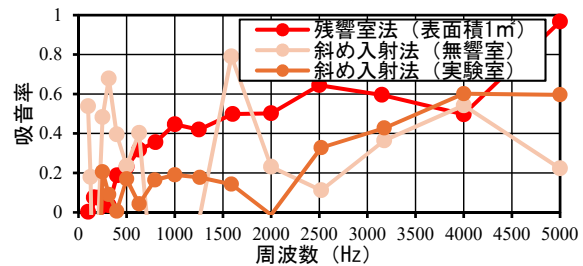


図-12 POC 測定方法別測定結果

- 2) POC の骨材粒径による吸音率の違いは確認できず、低周波数帯でも明確な傾向は確認できない。
- 3) 本測定法を用いた POC の吸音率測定では、測定面の空隙が吸音率に大きな影響を与える。
- 4) 斜め入射法では、本来の吸音率より低くなるが、特に高周波数域における吸音率を安定的に測定することは可能であることが示唆された。このことから簡便な方法にて、使用材料や配（調）合条件の違いが吸音率に及ぼす影響について相対的に比較検討できることが考えられる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、市販多孔質材料を日本コンクリート工業株式会社に提供していただいた。吸音率測定を行うにあたり、株式会社飛鳥建設 兵藤伸也氏にご助力を得た。斜め入射吸音率の測定方法に関して、近畿大学建築学部建築学科 菅原彬子助教にご助言を得た。また、本研究費の一部は 2022 年度科学研究費若手研究（代表者：エルドンオチル、課題番号：22K14366）によった。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 張雪梅ほか：ポーラスコンクリートの吸音特性に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.24, No.1, pp.1161-1166, 2002
- 2) 杉江聡：様々な吸音率測定方法—垂直入射吸音率，斜め入射吸音率，残響室法吸音率の違い—，日本音響学会誌 Vol.66, No.6, pp.270-275, 2010
- 3) 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
- 4) 中川武志ほか：空気室圧力法を応用したポーラスコンクリートの空隙率測定方法，日本建築学会構造系論文集，Vol.73, No.629, pp.1043-1050, 2008
- 5) 宮野秋彦ほか：吸音率の面積効果について，日本建築学会論文報告集，号外，p.588, 1967.10