

論文 打音法によるポーラスコンクリートの空隙率推定

エルドンオチル*1・曹偉*2・畑中重光*3

要旨: 本研究では、普通コンクリートの剛性および内部の欠陥などを評価する非破壊試験法である打音法を用い、ポーラスコンクリートの固有振動数を評価し、空隙率推定の可能性を検討した。その結果、卓越周波数と空隙率の関係は、相関性の高い二次関数により近似でき、打音法を用いて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明らかになった。また、ポーラスコンクリートの動弾性係数と空隙率の関係は、その骨材の実積率を用いた相関性の高い線形式により近似可能であることが分かった。

キーワード: ポーラスコンクリート, 打音法, 空隙率, 品質管理, 非破壊試験, 卓越周波数

1. はじめに

ポーラスコンクリート (pervious concrete¹⁾, no-fine concrete²⁾, 以下, POC と略記) は, その中の連続した空隙により, 透水性能, 吸水性能, 水質浄化性能, 緑化性能および昆虫・動物生息性能など多くの性能を持つ生物共生型および環境負荷低減型コンクリートである。空隙の量 (空隙率) は POC の各性能を決定づける最も重要な特性の 1 つである³⁾。一方, POC は, 施工時の締固め程度などの影響を受け, 空隙率が調査設計によるものと異なる可能性が大きい。したがって, 施工された POC の品質管理は非常に重要である。

現状では, 現場施工された POC 舗装の品質管理に用いられる一般的な試験では, 構造体からコア抜きした試験体が用いられる。しかし, この方法には, 作業しにくい, コア抜き後に構造体に傷がつくなど問題がある。この問題を解決するため, 筆者らは, 超音波 (弾性波) を用いた非破壊試験による POC の空隙率推定の可能性を検討し, 空隙率と超音波 (弾性波) 伝播速度の関係は二次関数で近似できることを報告した⁴⁾。また, 物質の固有振動数は, その中を伝播する弾性波の伝播速度と同様に物質の剛性と相関があること⁵⁾, および POC の剛性が空隙率と関係があること⁶⁾から, POC の固有振動数と空隙率にも相関関係があると考えられる。

そこで, 本研究では, 普通コンクリートの固有振動数に着目し, その剛性および内部の欠陥などを評価する非破壊試験法である打音法を用い, POC の固有振動数を評価し, 空隙率推定の可能性に関する検討を行った。

2. 打音法による POC の空隙率推定について

打音法は, 被打撃物の固有振動数に着目した非破壊試験法であり, 魚本ら⁷⁾によれば, 打音法診断において, 打撃に後続する被打撃物の自由振動や内部の共振による

表-1 実験の要因と水準

要因	水準
設計空隙率 (%)	0, 15, 25, 35
振上げ角度 (°)	10, 20

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	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	—

音響放射は, 診断すべき被打撃物の形状, 材質, 支持条件などの物理特性に強く関連する。また, 既往研究⁸⁾によれば, 共振による音響放射では, 記録波形は共振周波数成分 (卓越周波数) が卓越して観測される。したがって, 打音法による POC の空隙率推定時には, この卓越周波数に着目することが重要であろう。

3. 実験方法

3.1 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 の設計空隙率を 0%, 15%, 25%, 35% の 4 水準とした。また, 打音診断棒による打撃力の大きさを管理するため, 打音診断棒の振上げ角度を 10° および 20° とした (3.4(2)参照)。

*1 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)

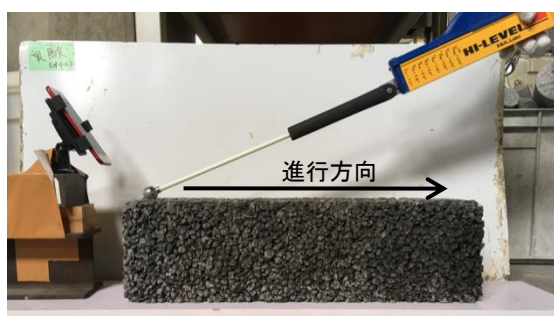
*2 三重大学大学院建築学専攻 大学院生 (学生会員)

*3 三重大学大学院建築学専攻 教授・工博 (正会員)

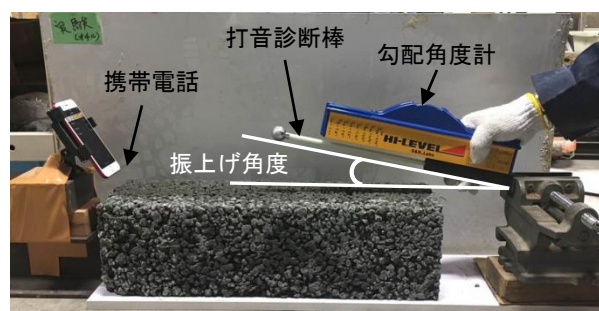
表-3 ポーラスコンクリートの調合表

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



b) 打撃音

写真-1 打音法の測定方法

3.2 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。セメントペーストのフロー値を調節するために、高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系)および増粘剤を用いた。

表-3に、ポーラスコンクリートの調合表を示す。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水セメント比は0.3とし、流動性はフロー値により管理した。また、空隙率0%の場合は、練混ぜ中に高性能AE減水剤を投入し、流動性を目視で確認した。

3.3 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ーを用いた。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ーに投入して、低速で30秒間練り混ぜた後に、ミキサー内壁に付着したセメントを掻き落とし、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ーに戻し、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(150×150×530mm)に打ち込んだ。

締固めは、2層に分けて打ち込んだポーラスコンクリートに対して、各層を突き棒で突き固め、所定質量を充填した後に、ジグギングおよび上面からのタンピングを行った。

打ち込んだ後は、型枠上面にビニルシートをかけて乾燥を防ぎ、材齢3日目に脱型した後、材齢28日まで水中養生を行った。

3.4 試験方法

(1) 空隙率試験

POC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)³⁾に準拠して、質量法による全空隙率の測定を行った。

(2) 打音法試験と音響分析

写真-1に、POCに対する打音法の測定方法を示す。なお、写真-1 a)に擦過音の測定様子を、写真-1 b)に打撃音の測定様子を示す。打撃音の測定では、POC試験体を水平方向に置き、打音診断棒(長さは41cm、重さは144g)の一端を支点とし、振上げ角度30°または60°から自由落下させ、試験体表面の中央を打撃して音を発生させた。打撃音は、試験体端部の鉛直方向に3cmの位置に設置した携帯電話(iPhone 7)により録音し、この録音された音を用いてFFT分析を行った。振上げ角度は、勾配

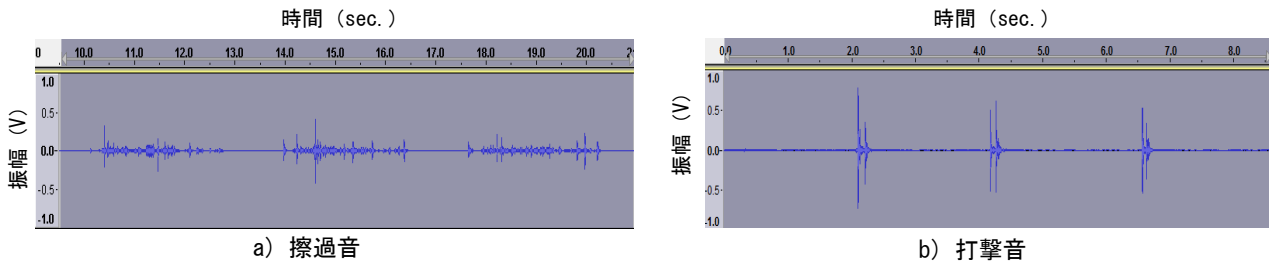


図-1 振幅と時間の関係

角度計を用いて計測した。打撃点は試験体の中心部分とし、打込み面、側面および底面ごとに3回測定した。

また、擦過音の測定は、打音診断棒を試験体の表面の一端から他端まで(距離は約0.51m)移動させ(速度は0.2~0.3m/s)、発生した擦過音を録音して、その音についてFFT分析を行った。打診棒を押し付ける力は、なるべくその自重のみによるものとした。

図-1に、擦過音および打撃音の振幅と時間の関係を示す。また、図-2に、録音された打撃音の分析領域の選択フロー[a]→b)→c)]を示す。分析に用いる打撃音の選択においては、試験体の各面の同じ位置において三回打撃し発生させた音(打撃音の1, 2, 3)による卓越周波数(4.2を参考されたい)は、いずれもほぼ同値であったため、その内の1つ(図には、打撃音1の例を示す)とした。そして、分析領域としては、打撃後の0, 1.5, 3または4.5 sec.時点から時間幅が0.05 sec.の領域を用いた。一方、擦過音の音響分析方法は、打撃音とほぼ同様であるが、分析領域には一回の測定の時間幅が0.1~0.15 sec.となる領域を選択した。なお、図に示す色は、周波数スペクトルの強度を示し、色が白色になるほど、または青から赤色になるほど強度が高いことを意味する。本分析では、白色は最強で、レベルが-20dBと一致し、他はこれより低いものである。

(3) 動弾性係数

POC試験体に対する動弾性係数は、JIS A 1127を参考にし、たわみ振動の式(1)により算出した。ここに、修正係数(T)に用いる動ポアソン比(μ)は、0.25とした。

$$E = 9.47 \times 10^{-4} \frac{L^3 T}{bt^3} m f^2 \quad (1)$$

ここに、 E : 動弾性係数 (N/mm^2)、 f : 打音法による卓越周波数 (Hz)、 L : 試験体の長さ (mm)、 b : 試験体の幅 (mm)、 t : 試験体の厚さ (mm)、 m : 試験体の質量 (kg)、 T : 修正係数、回転半径と長さ (L) 及び動ポアソン比 (μ) によって求める。

4. 実験結果とその考察

4.1 空隙率

図-3に、POCの質量法による全空隙率と設計空隙率

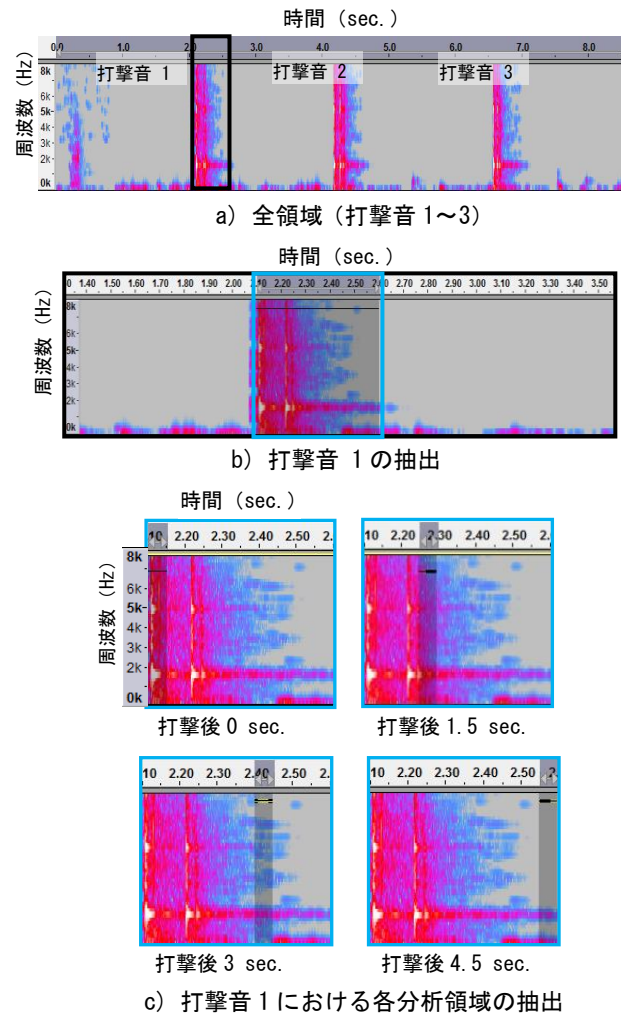


図-2 打撃音の分析領域の選択フロー

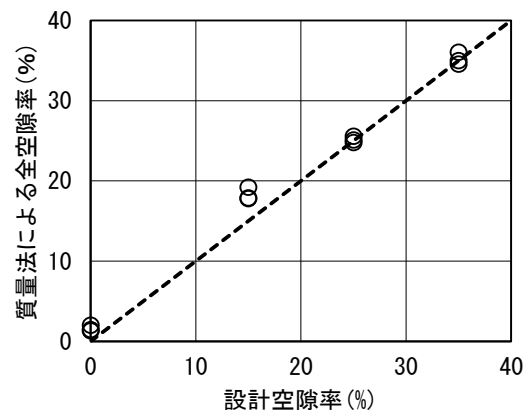


図-3 質量法による全空隙率と設計空隙率の関係

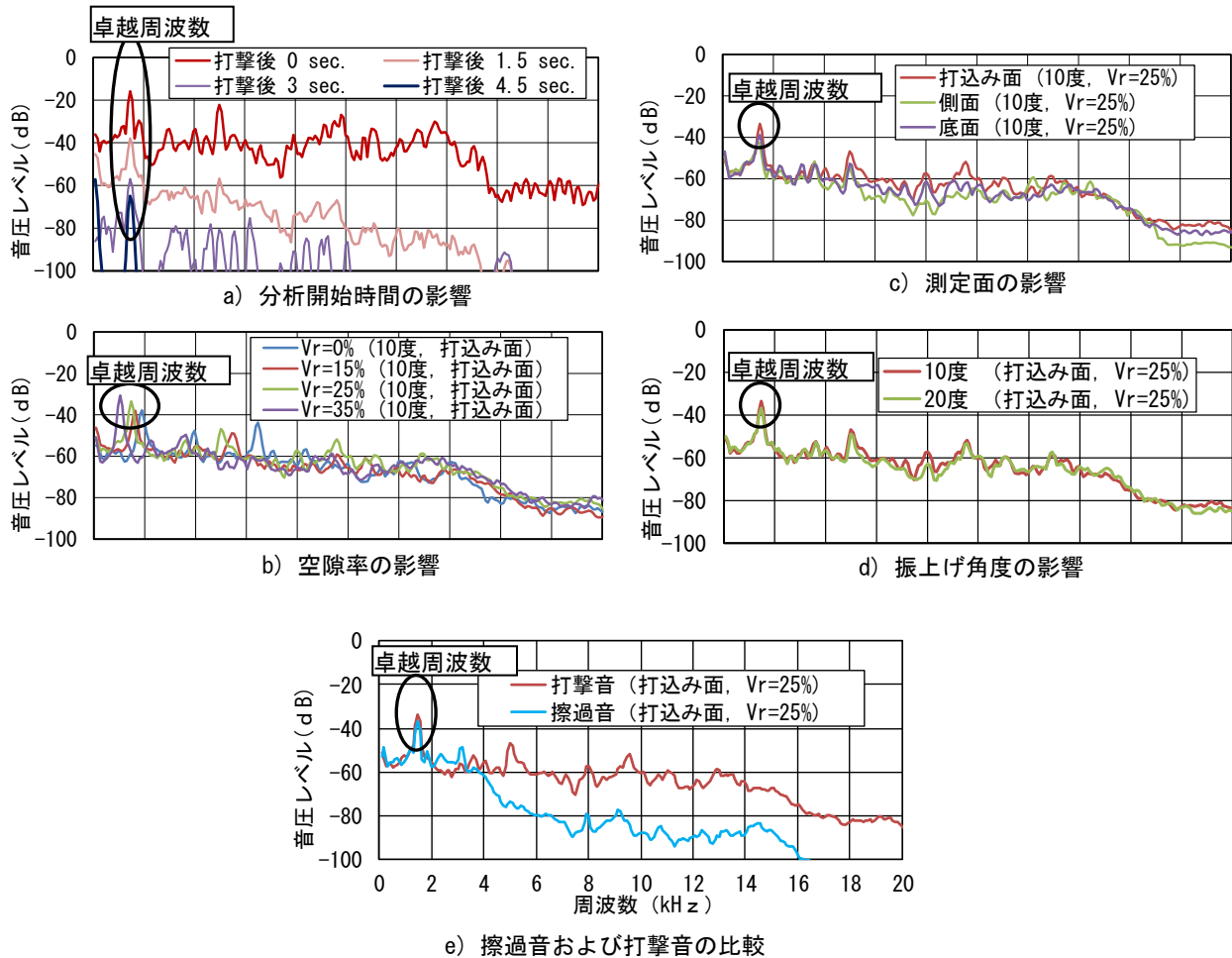


図-4 打音法による音圧レベルと周波数の関係

の関係を示す。設計空隙 15%では、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。

4.2 音圧レベルと周波数の関係

図-4 に、FFT 分析による音圧レベルと周波数の関係を示す。図-4 の a) ~ e) には、それぞれ分析開始時間の影響、空隙率の影響、測定面の影響、振上げ角度の影響、および打撃音と擦過音の比較を示す。

なお、図-4 a) は、空隙率 25% の POC 試験体の表面において、打音診断棒の振上げ角度が 10° で測定した結果である。同図によれば、打撃後の時間が経過して行くことによって、音圧レベルが小さくなり、周波数成分が小さくなる傾向が見られている。打撃後 4.5 sec. の時点では、周波数の 1.5 kHz 付近と 0 kHz に近い周波数域の音のみが残っている。低周波数の音は、図-5 に示す環境音のみを録音した音の周波数スペクトルにより、打撃音と関係なく、常に存在する音であることが確認された。また、物質は共振振動する時に、振幅が大きくなり、振動エネルギーが大きくなることが知られている⁹⁾。打音法の測定では、打撃音の周波数成分の内、共振振動による周波数

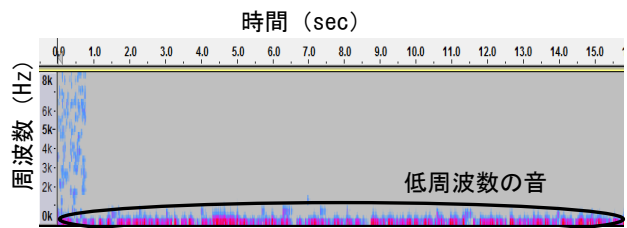


図-5 環境音における周波数スペクトル

成分がほかより振動エネルギーが大きく、長い時間が残存することが考えられる。図-4 a) の周波数が 1.5 kHz の音は、他より長い時間にわたって残存しており、部材の共振による音（固有周波数および卓越周波数成分の音）であると考えている。

以上の結果によれば、打撃の直後には多くの周波数の音が発生しており、時間が経過していくことによって卓越周波数成分の音のみが残るため、分析には、この部分の音を用いるのが望ましい。また、本実験では、分析開始時間によらず、卓越周波数は一定値になっているため、以下の考察では、打撃後 1~3 sec. の領域で、時間幅が約

0.05 sec.の音を分析し、主に POC の固有振動数と一致する卓越周波数について検討する。

図-4 の b), c), d) によれば、卓越周波数は、POC 試験体の測定面または診断棒の振上げ角度の影響をほとんど受けないが、POC の空隙率が大きくなるほど卓越周波数が小さくなる傾向が見られる。これは、POC の空隙率が大きくなると弾性係数が小さくなり、同程度の加振力に対して、変形たわみの振動幅が大きくなるため、固有振動数が小さくなったと考えられる。

図-4 e) には、打撃音および擦過音による音圧レベルと卓越周波数の関係を示す。なお、この例は、空隙率 25% の POC 試験体の打込み面において測定した結果である。図によれば、擦過音は打撃音と比べて、音圧レベルが全周波数範囲では小さくなっているが、最大音圧レベルの卓越周波数がほぼ同じであることが分かる。

4.3 卓越周波数と空隙率の関係

図-6 には、打撃音および擦過音による卓越周波数と質量法による全空隙率の関係を示す。同図には、打撃音による卓越周波数と全空隙率関係の近似式も示す。図によれば、空隙率が大きくなるほど卓越周波数小さくなり、その間には強い相関性が見られ、決定係数 (R^2) が 0.99 となる二次関数により近似できた。これは、POC の空隙率が大きくなると剛性が低くなり、試験体の固有振動数が小さくなったことによると考えられる。また、擦過音による卓越周波数は、各空隙率において、打撃音による卓越周波数とほぼ同値になることが確認された。

4.4 動弾性係数と空隙率の関係

図-7 に、POC の動弾性係数と空隙率の関係を示す。同図には、実験結果により近似した POC の弾性係数と空隙率の関係式を示す。なお、関係式は、式(2)に示す実験定数 B を最小二乗近似により決めて得られたものである。式(2)では、POC の弾性係数は、ペーストがなくなると 0 になり、空隙率が 0 になると最大になることを意味する。

$$E = -\frac{B}{(100-G)}V_R + B \quad (2)$$

ここに、 E : 動弾性係数 (N/mm^2)、 G : 骨材の実積率 (%), 本実験では 58.1%, B : 実験による定数

図によれば、POC の動弾性係数は、空隙率が大きくなるほど小さくなり、その関係は相関性の高い線形式により近似できた。POC の動弾性係数と空隙率の関係がほぼ線形になる傾向は、JIS A 1127 による円柱試験体の実験結果でも見られる⁹⁾。

4.5 卓越周波数と動弾性係数の関係

図-8 に、打音法による POC の卓越周波数と動弾性係数の関係を示す。また、同図には、実験結果による近似式および振動理論による理論式(3)も併示する。下式(3)は、

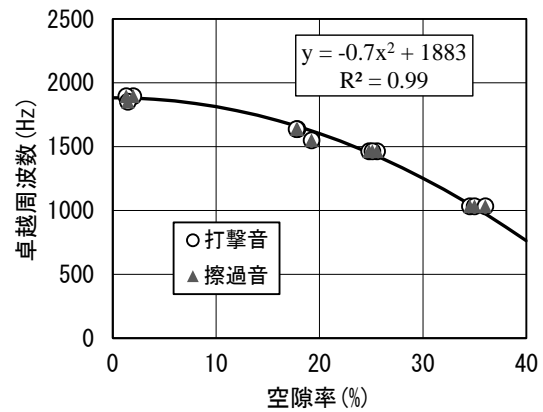


図-6 卓越周波数と空隙率の関係

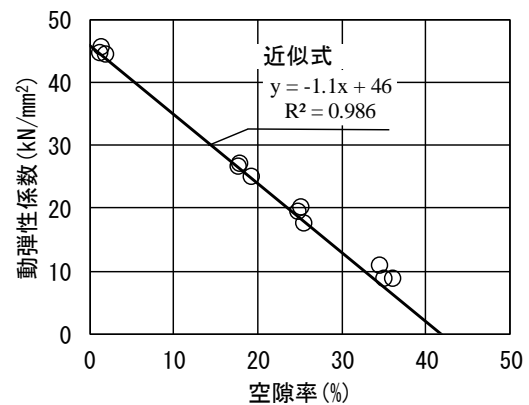


図-7 動弾性係数と空隙率の関係

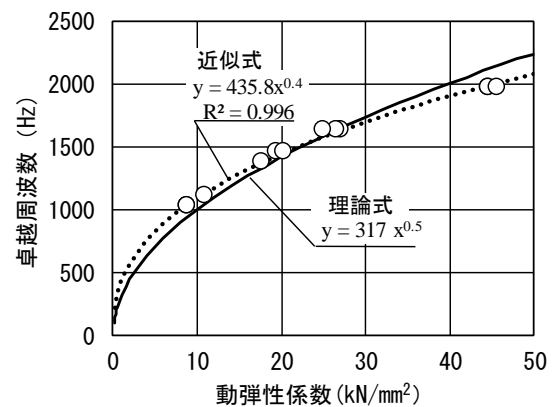


図-8 卓越周波数と動弾性係数の関係

3.4 (3) に示した式(1)を変換し得られたものであり、質量の影響を無視した条件で算出した。

$$f = C \cdot \sqrt{E} \quad (3)$$

ここに、 f : 打音法による卓越周波数 (Hz)、 E : 動弾性係数 (N/mm^2)、 C : たわみ振動の式(1)を変化して得られる定数、(本実験では、POC の試験体のサイズ ($150 \times 150 \times 530mm$) および平均質量 (24kg) などにより算出した結果、 $C = 317 (1/\sqrt{kg/mm})$ となった。)

同図によれば、打音法による POC の卓越周波数は、弾

性係数が小さくなるほど小さくなり、その関係は、振動論による理論式とほぼ同程度の値となる累乗式により近似できた。この結果により、弾性係数が小さくなれば、非線形の関係で卓越周波数が小さくなる事が分かる。したがって、図-6 に示す卓越周波数と空隙率の関係がほぼ二次関数になる理由は、POC の空隙率の変化に伴い弾性係数が変化するためであるといえる。

5. まとめ

本研究から得られた知見を以下に示す。

- 1) 打撃音による卓越周波数は、測定面および打音診断棒の打撃力の影響をほとんど受けず、主に POC の空隙率の影響を受けることが明らかになった。
- 2) 打撃音による卓越周波数と POC の空隙率の関係は、相関性の高い二次関数により近似でき、打音法を用い、POC の空隙率を推定することが可能であることが確認された。
- 3) POC の打音法測定において、本研究で行ったたわみ振動の場合、擦過音による卓越周波数と打撃音による卓越周波数がほぼ同じであることが明らかとなった。
- 4) POC の動弾性係数と空隙率の関係は、その骨材の実績率を用いた相関性の高い線形式により近似できた。

謝辞

本研究を実施するにあたり、寺島貴根先生（三重大学大学院准教授）にご指導をいただきました。本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) ACI Committee 522.: 522R-10 report on pervious concrete, pp.2, 2010
- 2) Malhotra, V.M.: No-Fine Concrete Its Properties and Application, Journal of ACI, Vol.73, No.11, pp.628-644, 1976
- 3) 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
- 4) エルドンオチル, 三島直生, 畑中重光: 超音波法によるポーラスコンクリート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
- 5) 長谷川修司 (著): 振動・波動 (講談社基礎物理学シリーズ 2), 講談社, 2009
- 6) 齋藤敏克, 出村克宣: 複合則を適用したポーラスコンクリートの静弾性係数推定式の提案, 日本建築学会構造系論文集, Vol.81, No.723, pp.825-832, 2016.5
- 7) 魚本健人, 伊東良浩: 打音法によるコンクリートの非破壊検査, コンクリート工学論文集, 日本コンクリート工学協会, Vol.7, No.1, pp.143-152, 1996
- 8) 大津政康: コンクリート非破壊評価のための弾性波法の理論と適用, コンクリート工学論文集, 日本コンクリート工学協会, Vol.46, No.2, pp.5-11, 2008. 2
- 9) 齋藤俊克, 出村克宣: ポーラスコンクリートの圧縮強度, 静弾性係数及び動弾性係数の関係, セメント・コンクリート論文集, Vol.69, pp.251-256, 2015