

二種類の弾性波法を用いたポーラスコンクリートの
品質管理に関する研究

三重大学博士学位論文

2019年9月

ERIDENGAOQIER

—目次—

第1章 序論

1.1 研究の背景	1
1.1.1 地球の環境問題とポーラスコンクリート	1
1.1.2 Society 5.0 と非破壊検査	1
1.1.3 ポーラスコンクリートとは	2
1.1.4 ポーラスコンクリートの研究の現状	3
1.1.5 ポーラスコンクリートの品質管理	4
1.2 本研究の目的	4
1.3 本論文の構成	4
第1章の参考文献	6

第2章 既往の研究

2.1 概説	7
2.2 ポーラスコンクリートの物性	9
2.3 ポーラスコンクリートの空隙特性	10
2.4 ポーラスコンクリートの力学特性	11
2.5 ポーラスコンクリートの弾性特性	13
2.6 ポーラスコンクリート舗装の品質管理	17
2.7 まとめ	19
第2章の参考文献	20

第3章 ポーラスコンクリートの弾性挙動と空隙率の関係に関する理論的検討

3.1 背景と目的	23
3.2 検討III-I ポーラスコンクリートの弾性係数と空隙率の関係	24
3.2.1 普通コンクリートの構造モデル	24
3.2.2 応力分布	24
3.2.3 ポーラスコンクリートの構造モデル	24
3.2.4 ポーラスコンクリートの弾性係数の計算	25
3.2.5 ポーラスコンクリートの弾性係数と空隙率の関係	28
3.3 検討III-II ポーラスコンクリートの圧縮強度と空隙率の関係	32
3.3.1 普通コンクリートの静弾性係数と圧縮強度の関係	32
3.3.2 ポーラスコンクリートの圧縮強度と空隙率の関係式	32
3.3.3 ポーラスコンクリートの圧縮強度と空隙率関係の計算結果および実験結果の比較	33
3.4 検討III-III 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	34
3.4.1 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式	34
3.4.2 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の計算結果 および実験結果の比較	34

3.4.3	ポーラスコンクリート内の超音波の透過および反射	35
3.5	検討III-IV ポーラスコンクリートの固有振動数と空隙率の関係	36
3.5.1	圧縮・引張振動	36
3.5.2	曲げ・せん断振動	38
3.6	まとめ	40
	第3章の参考文献	41

第4章 ポーラスコンクリートの品質管理に関する共通実験

4.1	研究の背景	43
4.2	実験IV-I ポーラスコンクリート試験体の圧縮強度と曲げ強度の関係に関する実験	44
4.2.1	実験方法	44
4.2.2	実験結果とその考察	47
4.2.3	実験IV-Iのまとめ	51
4.3	実験IV-II 現場施工されたポーラスコンクリートの品質管理に関する実験	52
4.3.1	実験方法	52
4.3.2	実験結果とその考察	55
4.3.3	実験IV-IIのまとめ	60
	第4章の参考文献	61

第5章 超音波法によるポーラスコンクリートの品質管理

5.1	研究の背景	62
5.2	実験V-I 超音波法によるポーラスコンクリートの空隙率推定	63
5.2.1	実験方法	63
5.2.2	実験結果とその考察	66
5.2.3	物理モデルによる考察	67
5.2.4	ポーラスコンクリートの切断面における解析	70
5.2.5	実験V-Iのまとめ	74
5.3	実験V-II 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	75
5.3.1	実験方法	75
5.3.2	実験結果とその考察	78
5.3.3	実験V-IIのまとめ	82
5.4	実験V-III 接触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	83
5.4.1	実験方法	83
5.4.2	実験結果とその考察	87
5.4.3	実験V-IIIのまとめ	91
	第5章の参考文献	92

第6章 打音法によるポーラスコンクリートの品質管理

6.1	研究の背景	93
6.2	実験概要	94
6.2.1	打音法によるポーラスコンクリートの空隙率の推定について	94
6.2.2	実験方法	94
6.2.3	実験結果とその考察	97
6.3	まとめ	101
	第6章の参考文献	102

第7章 二種類の弾性波法の適用性に関する検討

7.1	はじめに	103
7.2	超音波のポーラスコンクリート内の伝播経路について	104
7.2.1	ポーラスコンクリートの超音波伝播経路	104
7.2.2	超音波伝播経路の計算	105
7.3	ポーラスコンクリートの超音波伝播経路の解明に関する実験	108
7.3.1	実験概要	108
7.3.2	実験結果とその考察	109
7.4	ポーラスコンクリートの固有振動数に与える各種影響について	113
7.4.1	試験体の寸法の影響	113
7.4.2	試験体の拘束状態の影響 (路床の影響)	115
7.5	第7章のまとめ	116
	第7章の参考文献	117

第8章 新たなポーラスコンクリートの品質管理手法の提案

8.1	はじめに	118
8.2	ポーラスコンクリート舗装の施工手順	118
8.3	共通実験による品質管理試案と新たな品質管理方法の提案	119
8.5	第8章のまとめ	120
	第8章の参考文献	121

第9章 総括および今後の課題

9.1	総括	122
9.2	今後の課題	124

	謝辞	125
--	----	-----

付録

	付録1 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について	126
	付録2 コンクリートにける超音波の伝播経路について	127

第 1 章 序 論

第1章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 地球の環境問題とポーラスコンクリート

私たちの生活を支えている経済活動は、健全な環境があってこそ成り立つものであり、環境問題の悪化により、経済活動が行き詰まる可能性がある。近年、大量生産・大量消費・大量廃棄型の社会経済システムにおける経済活動の拡大は、急速に環境負荷を増大させ、人類の生存地盤である自然環境のバランスを崩しはじめ、さまざまな地球規模の環境問題を起こしている¹⁻¹⁾。その中、建築土木分野の環境問題の例としては、都市の表面がコンクリートで覆われてしまっていることで、自然本来の地下と地上の空気や水の循環ができなくなってしまい、都市部のヒートアイランド現象の顕在化や集中豪雨による都市水害が増加、地下水の枯渇などが生じている。

このように、経済活動は環境問題に関しては人類に悪い影響を及ぼしているが、我々の生活を支えている経済活動は止めるわけにはいかない。経済活動と環境は人類の生活には両方不可欠である。このため、環境負荷を軽減できる方法で、我々の生活を支える経済活動を行うことが、国際社会の今後の発展していく中での注意すべきことになっている。

建築土木の分野でも、環境問題を考慮したグリーン建築の提案、建築構造および設備改良によるエネルギー負荷の軽減方法の提案、環境負荷低減型材料の開発・研究などが進められてきた。環境負荷低減型材料として、透水性、透気性および吸音性に優れ、水質浄化、生物のすみかといった機能も有しているポーラスコンクリート（pervious concrete および porous concrete, 以下 POC と略記）がある。POC は、道路舗装、河川護岸、法面保護および水質浄化などに幅広く使用されて、防災や環境保全に役に立てられている。

1.1.2 Society 5.0 と非破壊検査

日本では、狩猟社会 (Society 1.0)、農耕社会 (Society 2.0)、工業社会 (Society 3.0)、情報社会 (Society 4.0) といった人類がこれまで歩んできた社会に次ぐ第5の新たな社会として、デジタル革新、イノベーションを最大限活用して実現するソサエティ5.0 (Society 5.0) は社会的に注目される話題になっている¹⁻²⁾。図-1.1に、新たな社会“ソサエティ5.0 (Society 5.0)”¹⁻³⁾のイメージを示す。

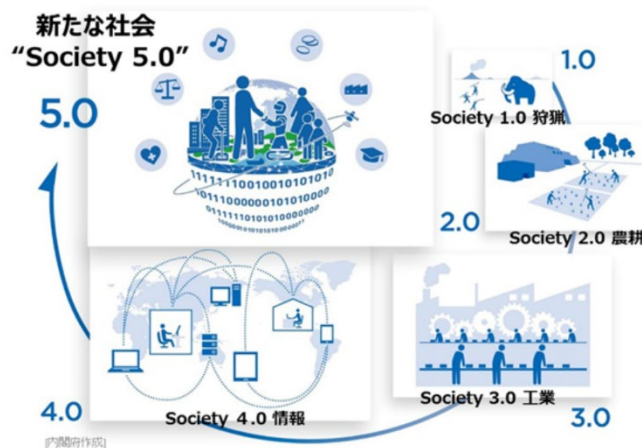


図-1.1 新たな社会“ソサエティ5.0 (Society 5.0)”¹⁻³⁾

また、図-1.1に、ソサエティ5.0 (Society 5.0) で実現する社会¹⁻³⁾のイメージを示す。産業技術総合研究所のレポートでは、ソサエティ5.0 (Society 5.0) を実現するための要素技術として以下の6つのテーマを挙げている¹⁻⁴⁾。

- 1) CPS (Cyber-Physical System) における知覚・制御を可能とする人間拡張技術
- 2) 革新的なAI用ハードウェア技術とAI応用システム
- 3) AI応用の自律進化型セキュリティ技術
- 4) 情報入出力用デバイスおよび高効率のネットワーク技術
- 5) マスカスタマイゼーションに対応できる次世代製造システム技術
- 6) デジタルものづくりに向けた革新的計測技術



図-1.2 ソサエティ5.0 (Society 5.0) で実現する社会¹⁻³⁾

経団連では、ソサエティ5.0 (Society5.0) 実現に向けた行動計画において、インフラを最優先で取り組むべき領域の一つとして設定し、技術開発によるデジタル化の推進によって建設生産システムのスマート化を図る方針がある。また、国土交通省によれば、土工、橋梁、トンネル、舗装、維持管理等の全プロセスでICT (情報通信技術) を活用する方針が提案され、道路舗装および建築物の品質・維持管理の計測・記録の自動化等により点検を支援する非破壊検査技術の開発が推進されている¹⁻⁵⁾。

これら現状によれば、透水性舗装を主な性能とするPOCの品質・維持管理を簡便かつ効果的に行う面では、非破壊検査の研究は重要な課題となることが考えられる。これまではPOCの各特性、施工標準、および品質保証について多くの研究が行われており、以下にはPOCについて簡単に説明する。

1.1.3 POCとは

POCは粗骨材と、粗骨材を連結するためのセメントペースト(または少量の細骨材を含むモルタル)によって構成させるオコシ状のコンクリートである¹⁻⁶⁾。表-1.1に、POCの空隙の分類と名称¹⁻⁷⁾を示す。なお、POCの空隙の分類には、文献¹⁻⁷⁾に定義された連続空隙率、準連続空隙、独立空隙と全空隙がある。連続空隙率は試験体表面からみて連続している、容易に飽水・排水される空隙とし、準連続空隙とは連続した空隙と考えられるが飽水・排水するのに若干時間を要する空隙とし、独立空隙は試験体表面からみて独立した空隙であり、飽水・排水するには困難な空隙とし、全空隙は連続空隙、準連続

空隙と独立空隙の和として計算される空隙とされている。

POC の最大の特徴は比較的大きい空隙率を有することであり、その特徴により透水・排水性、通気性、吸音性、生物・植物許容性、軽量性など、環境面での機能に期待が大きく、その適用範囲は多岐にわたるものである。

表-1.1 空隙の分類と名称¹⁻⁷⁾

空隙のイメージ			
飽水・排水の状況	容易	時間を要する	困難
空隙の名称	連続空隙	準連続空隙	独立空隙
影響する主な特性	<p>← 透水性 → ← 揚水・保水性 →</p> <p>← 強度・力学特性 →</p>		
2003年版報告書における空隙の名称	容積法	連続空隙	独立空隙
	質量法	全空隙	

1.1.4 POC の研究の現状

POC は、19 世紀の半ばに西ヨーロッパに生まれて、アメリカの経由で日本に入ってきた¹⁻¹⁴⁾。日本に入ってきた後に、内部に連続している空隙を利用し、西ヨーロッパおよびアメリカで主に使用された透水・排水・保水性の舗装の用途だけではなく、水の制御、水質浄化、吸音・防音、植生など、環境保全の面ではいろいろな研究がされてきた。図-1.3 に、2003 年から 2013 年の間の POC の用途別論文件数を示す。国内は緑化、生物浄化および舗装について研究がより多くされおり、海外は舗装以外の研究はほとんどされていなく、発表件数は非常に少ないが、図-1.4 に示す Web of Science¹⁻¹⁵⁾による 2013 年から 2018 年の間の論文（英語）発表件数によれば、海外論文は増加する傾向である。

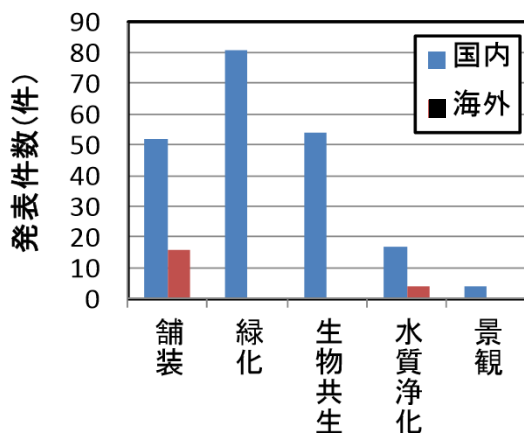


図-1.3 POC の用途別論文件数¹⁻⁷⁾

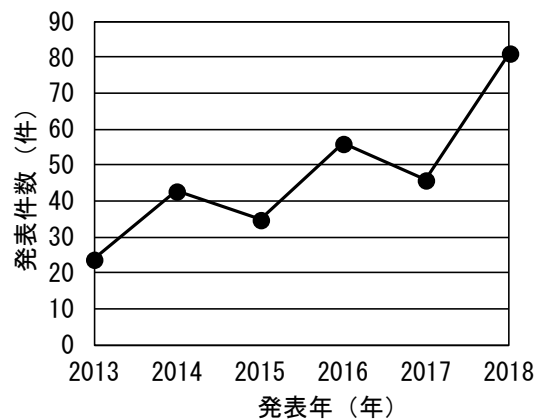


図-1.4 POC の発表年別論文 (英語) 件数¹⁻¹⁵⁾

日本国内では、POCに関する研究は多くの研究者により行われており、その研究成果をとりまとめたものとして、委員会報告^{1-6)~1-10)}およびシンポジウム^{1-11)~1-13)}があり、最新の委員会報告書としては、「性能設計対応型 POC の施工標準と品質保証体制の確立研究委員会」(2015.6, JCI)¹⁻⁷⁾がある。

1.1.5 POCの品質管理

POC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性能を持っているため、POCの性能を発揮するためには設計通りの空隙特性が得られていることが不可欠となる。しかし、POCは施工段階における締固めの程度などにより空隙率に代表される空隙特性が大きく変動するという特徴があり、施工現場における品質管理の重要度は非常に高くなる。

普通コンクリートでは、実構造物のコンクリートの品質評価を、同じコンクリートを用いて作製した別の型枠供試体を用いて行うのが一般的である。しかし、POCでは、実構造物と型枠供試体では、同じフレッシュ POCを用いたとしても、締固めの条件等を一致させることは通常不可能であり、異なる空隙特性を持つと考えられるため型枠供試体の品質評価結果をそのまま用いることができない。

以上のような理由から、現時点での POCの品質評価手法としては、現場で施工された POC からコア採取などを行って品質評価を行う必要があると考えられており、実施工された製品を傷つけることになるため、より簡易かつ正確な品質管理方法が求められている。

1.2 本研究の目的

本研究では、現場に施工された POC を対象として、非破壊検査手法を取り入れてより効率的な品質管理手法を提案することを目的とする。

1.3 本論文の構成

以下に本論文の構成を示す。

第1章 序論では、本研究の背景として、POCの実用化が推進されている現状と品質管理方法の問題点について整理し、本研究の目的を示す。

第2章 既往の研究では、POCの各基本特性、品質管理手法およびコンクリートの弾性波法（超音波および打音法）に関する既往の研究を取りまとめる。

第3章 POCの弾性挙動と空隙率の関係に関する理論的検討では、本論文の実験に関わる理論的な裏付けとして、弾性理論に基づきPOCの力学特性に関する理論的検討を行う。

第4章 POCの品質管理に関する共通実験では、POCの品質管理に関する共通実験の一機関として三重大学で行われた実験IV-IおよびIV-IIについて示す。実験IV-Iでは、空隙率、水セメント比および粗骨材の粒径を変化させたPOCの圧縮および曲げ強度試験を行い、その実験結果から、POCの圧縮強度、曲げ強度および空隙率の関係に関する実験的な検討を行う。実験IV-IIでは、歩道および建物外構を想定したPOC舗装から切り出した試験体（コア試験体）と型枠に打ち込んだ試験体（型枠試験体）による強度（圧縮と曲げ）および空隙率の比較を行い、現場施工されたPOCの現実的な品質管理手法に関して検討を行う。

第5章 超音波法によるPOCの空隙率の推定では、超音波法によるPOCの品質管理について検討するため行った実験V-I、V-IIおよびV-IIIについて示す。実験V-Iでは、POCの空隙率と超音波速度の関係について検討する。実験V-IIでは、POCの超音波伝播速度の測定における接触媒質の影響に関す

る検討を行う。実験V-IIIでは、現場で適用可能である超音波法の表面法に着目し、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う。

第6章 打音法によるPOCの空隙率の推定では、打音法によるPOCの品質管理について実験的検討を行う。実験では、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、POCの固有振動数を評価し、空隙率推定の可能性を検討する。また、打音法を用いたPOCの空隙率の推定において、試験体の表面の粗さ、および打音診断棒の打撃力の影響に関する検討を行う。

第7章 二種類の弾性波法の適用性に関する検討では、実現場での品質管理に向けて、二種類の弾性波法の適用性に関する検討を行う。

第8章 新たなPOCの品質管理手法の提案では、第1章から第7章で得られた研究成果に基づいて、現場に施工されたPOCの品質管理手法の一例として、空隙率および強度の推定手法について検討を行う。

第9章 総括および今後の課題では、本研究の内容をまとめ、今後の課題を述べる。

【第1章の参考文献】

- 1-1) 平成 27 年版 環境・循環型社会・生物多様性白書
- 1-2) ウィキペディアフリー百科事典, ソサエティ-5.0
<https://ja.wikipedia.org/wiki/ソサエティ-5.0>
- 1-3) 内閣府ホームページ
https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/index.html
- 1-4) “「ソサエティ-5.0」の衝撃 第5の新たな社会とは”, 東芝, p.2, 2017.4.19
- 1-5) 国土交通省におけるターゲット領域に係る説明資料, 資料 3-5
<https://www8.cao.go.jp/cstp/tyousakai/target/3kai/siryo3-5-1.pdf>
- 1-6) 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・施工法に関する研究委員会報告書, pp.1-181, 2003.5
- 1-7) 日本コンクリート工学協会, 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, pp.1-157, 2015.7
- 1-8) 日本コンクリート工学協会, エココンクリート委員会報告書, 1995
- 1-9) 先端建設技術センター: ポーラスコンクリート河川護岸工法の手引き, 2001
- 1-10) 土木学会: 水辺のコンクリート構造物ーコンクリートによる豊かな水辺環境の創造, 2002
- 1-11) 日本コンクリート工学協会, 自然環境との調和を考慮したエココンクリートの現状と将来展望に関するシンポジウム論文報告集, 1995
- 1-12) 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・施工法と最近の適用例に関するシンポジウムー委員会中間報告および論文集, 2002
- 1-13) 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・施工法と最近の適用例に関するシンポジウム論文集, 2003
- 1-14) 岡本享久, 中新弥: ポーラスコンクリート, コンクリート工学, Vol.54, No.5, pp.542-577, 2016.5
- 1-15) Web of Science の検索ページ
<http://apps.webofknowledge.com>

第 2 章 既往の研究

第2章 既往の研究

2.1 概説

1852年に英国で家を建てる際に細骨材を手に入れるのは困難となったため、細骨材を除いたコンクリートである No-Fines Concrete が開発されたのが、ポーラスコンクリート (No-Fines Concrete²⁻¹⁾, Pervious Concrete²⁻²⁾および Porous Concrete, 以下 POC と略記) の始まりであるとされている²⁻³⁾。その後、この POC は北欧に渡り、1968年頃にカナダに伝わり、1973年に CANMET において No-Fines Concrete として基準化された。また、POC はアメリカ経由で日本に入ってきて²⁻⁴⁾、日本国内では、1964年に POC 製ヒューム管が開発されており、軟弱地盤や湧水地盤から排水する工夫として利用された実績がある。西欧およびアメリカでは、POC は主な使用先が透水性舗装であったが、日本では、図-2.1のように舗装のみならず、植生・水質浄化、水の抑制、吸音・防音など生物共生および環境志向型として大幅に利用が拡大され、基礎研究から応用研究まで多くの研究が行われてきた。

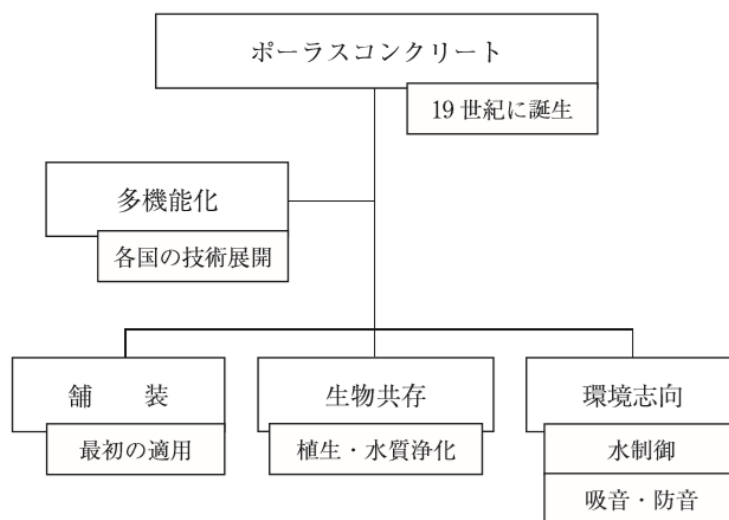


図-2.1 POC の分類²⁻²⁾

2015年に発行された「性能設計対応型 POC の施工標準と品質保証体制の確立研究委員会報告書」²⁻⁵⁾で、2003年から2013年間の海外および国内の POC に関する研究件数をとりまとめており、図-2.2と図-2.3に、上記の報告書に示す国内外で発表された論文件数を示す。図によれば、国内では、POC の基本性質である空隙特性、力学特性、および配（調）合などについての多種類の研究が多く発表されている。

最近の POC に関する研究の動きについて海外の例として、図-2.4に、Web of Science²⁻⁶⁾ および CNKI²⁻⁷⁾による POC の発表年別論文（英語および中国語）数を示す。図によれば、海外では英語の論文数をもっとも多くなっている傾向がある。これは、近年の集中豪雨の増加に伴い透水性の舗装がもっと注目されたのは一つの原因であると考えている。また、中国語の論文数は、2008年においてピークとなり、2014年以後、再び発表数増加する傾向がある。これは、2008年の北京オリンピックにおいて北京市に透水性舗装が設置されたこと、および2014年に中国国務院によって「Sponge City」（中国語：海绵城市）が提唱され、中国住宅建設部によって「Sponge City の建設技術指針—雨水抑制システムの構築（施工）」が提案された²⁻⁸⁾ことが原因であり、中国の各大学および研究機関において、主な使

用先は透水性舗装である POC の研究が近年になって注目されているのが現状である。以上のように、POC は世界中に注目されつつあり、今後は環境面のみならず、豪雨対策などの防災面で重要な役割を果たす社会基盤材料となることが期待されている。

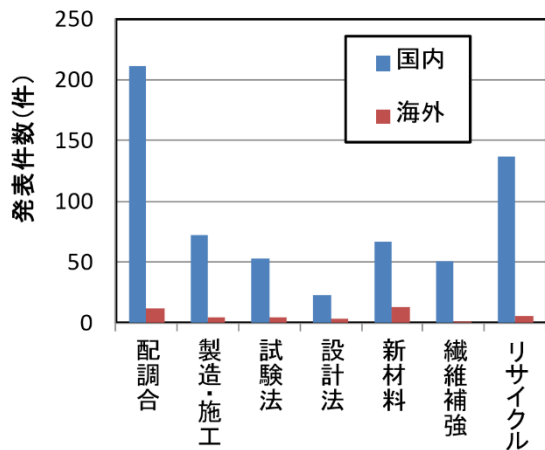


図-2.2 POC の製造方法・使用材料ごとの論文件数²⁻⁵⁾

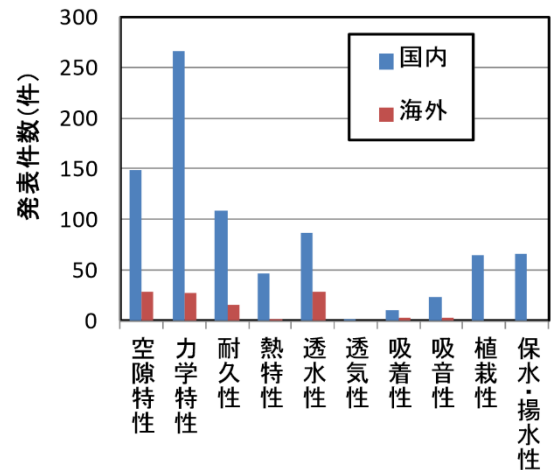


図 2.3 POC の特性ごとの論文件数²⁻⁵⁾

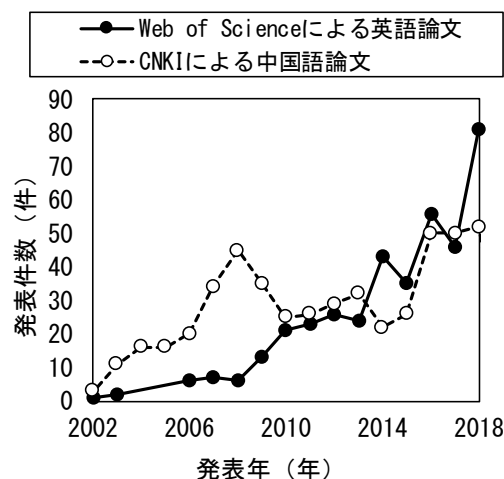


図-2.4 POC の発表年別論文件数

本章では、POC に関する委員会報告書²⁻⁵⁾および既往の研究論文から、本研究の内容とより密接に関わる硬化後の POC の各基本特性、品質管理手法およびコンクリートの弾性波法(超音波および打音法)に関する既往の研究を取りまとめる。

2.2 POCの物性²⁻⁹⁾

POCの物性については、岡本らによりまとめた報告がある。POCは、連続したまたは独立した空隙構造あるいはこれら2種の空隙構造を多く含む多孔質コンクリートである。

図-2.5に、以上のような空隙構造を持ちPOCの物性上の位置付けを設計上の観点から概念化したものを示す。POCは、構造コンクリート、岩盤、地盤の中間的な領域に所属し、生物の生息環境地域にほぼ一致する物性を保有する。また、表-2.1に、POCの各物性の範囲または報告例を示す。POCの各物性値は、その命である空隙の径、形、量に依存する。以下には、POCの空隙特性およびその各物性のうち、本研究に密接に関わるPOCの各物性値について記述する。

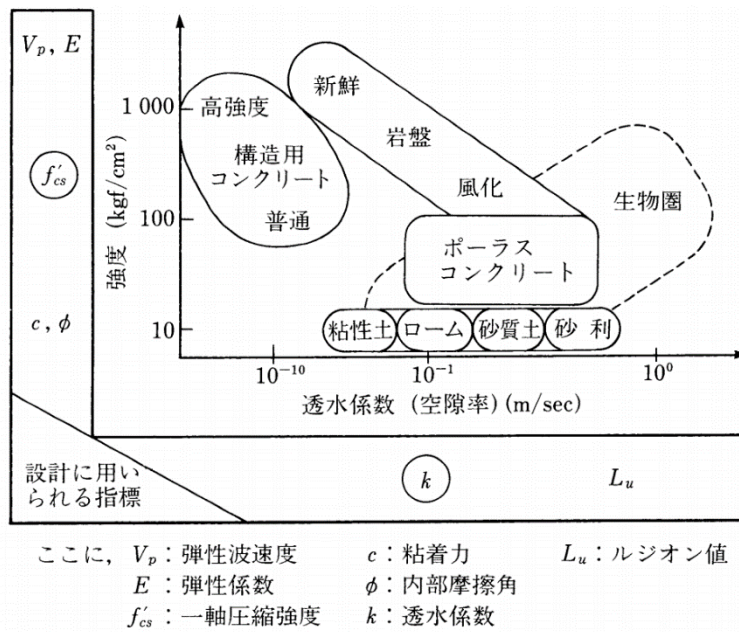


図-2.5 POCの物性上の位置付け²⁻⁹⁾

表-2.1 POCの各物性の範囲または報告例²⁻⁹⁾






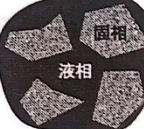
物性項目	物性値の範囲
比重	1.6~2.0 (碎石使用の場合)
空隙率	8%~35%
圧縮強度	5 N/mm ² ~30 N/mm ²
引張強度	圧縮強度の1/7~1/14
曲げ強度	1 N/mm ² ~5 N/mm ²
静弾性係数	0.7~2.0×10 ⁴ N/mm ²
動弾性係数	1.4×4.0 N/mm ²
付着強度	1.5~6.0 N/mm ²
凍結融解抵抗性	数サイクル (水中凍結水中融解) 60~250 サイクル (気中凍結水中融解)
乾燥収縮	200~350×10 ⁻⁶
溶出アルカリ量	流水中でのアルカリ量の低下は、早い。
透水性・遮水性	0.1~5.0 cm/s 程度
吸音性・遮音性	500~1 000 Hz を中心とする幅広いピーク
断熱性	0.3 kg·cal/m ² ·h·°C

2.3 空隙特性

表-2.2 に、粒子間の液体量による 6 種類の存在状態²⁻³⁾を示す。骨材を固相、ペーストを液相、空隙を気相と仮定すると、同表の Slurry 状態は、細骨材がペーストの中に浮遊する注入モルタルの状態であり、Capillary 状態は、一部の骨材が連続するポンピング可能な普通コンクリートである。Capillary 状態からペースト量が減少すると、独立した空隙を持つ Funicular II 状態になり、その次は連続する空隙を持つ Funicular I 状態になる。さらに、ペースト量が減少すると、ペーストが不連続の Pendular 状態になり、最後には、ペーストがない骨材と空気のための Dry 状態になる。POC は、連続空隙を持つ条件から見れば、Funicular I 状態に近いものであるが、独立空隙を持つことまたは骨材の一部を連続していないという特徴によれば、各充填形式が混在すると梶尾ら²⁻³⁾により報告されている。

図-2.6 および図-2.7 に、POC の空隙の状況を示す。微小焦点 X 線 CT スキャンシステムを用いた測定結果によると、空隙はどこかの箇所で連続しており²⁻¹⁰⁾、空隙率を一定とした試験体では、断面における空隙の面積は骨材粒径の影響を受けずほぼ一定であるが、空隙個数は骨材粒径が大きくなるほど少なくなっている。また、文献²⁻¹¹⁾ではと、骨材粒径が小さい場合には、断面における各空隙の面積は小さく、その大きさは一定範囲以内に集中しているが、骨材粒径が大きい場合には各空隙の面積は大きく、その大きさは幅広い範囲で分散すると報告している。

表-2.2 粒子間の液体量による 6 種類の存在状態²⁻³⁾

状態						
	Dry	Pendular	Funicular I	Funicular II	Capillary	Slurry
固相	連続			不連続		
液相	0	不連続	連続			
気相	連続			不連続	0	

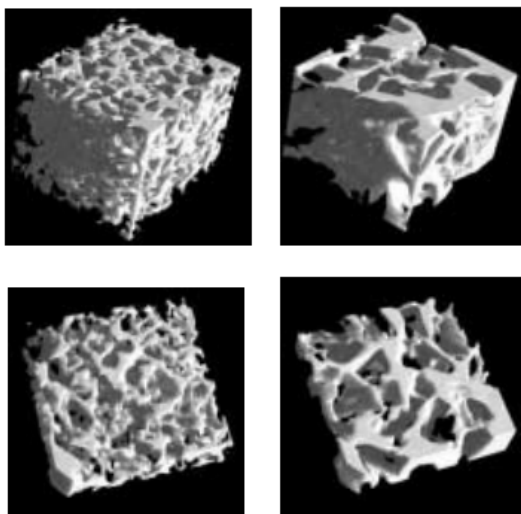


図-2.6 空隙性状²⁻¹⁰⁾

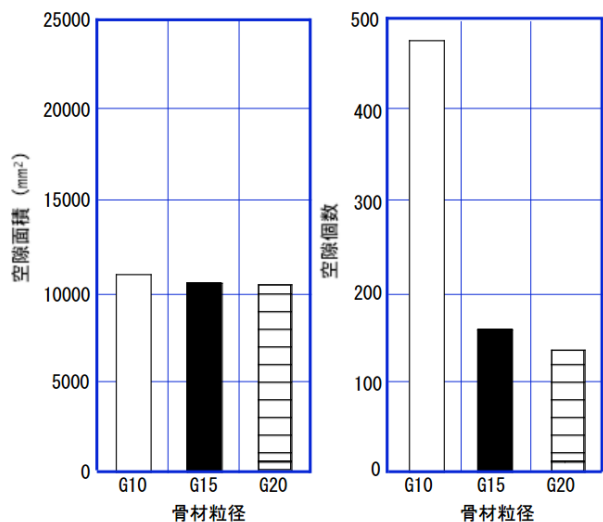


図-2.7 空隙面積および個数²⁻¹¹⁾

2.4 力学特性

(1) 圧縮強度

POC の圧縮強度の位置付けは、運搬・吊り上げ・据え付け等の損傷防止に必要な適切な強度もしくは、供用期間中に作用する外力に対して必要とする最小限の強度である²⁻⁹⁾。図-2.8 および図-2.9 に示すように、POC の圧縮強度は、その空隙率、骨材の粒径および骨材を接合する結合材の強度に依存する。なお、圧縮強度と空隙率の関係に影響を与える結合材強度と粗骨材粒径の影響について概念図を図-2.9 に示す。

POC の圧縮強度と空隙率の関係について、湯浅ら²⁻¹³⁾により式(2.1)に示す関係式が提案された。式(2.1)は、本来セラミックス系脆性多孔材料の空隙率と強度に関する Ryshkewitch²⁻¹⁴⁾と Duckworth²⁻¹⁵⁾により提案された式であるが、湯浅ら²⁻¹³⁾により数 mm 程度の空隙を持ち POC でも適用可能であることを実験的に確認された。

$$y = A \exp(-Bx) \quad (2.1)$$

ここに、 y : 圧縮強度(N/mm²), A : 結合材強度(N/mm²), x : 全空隙率(%),
 B : 実験定数

その後、上記式は日本国内における圧縮強度と空隙率の関係に関する多数の研究^{2-16)~2-21)}など例において適用されてきた。しかしながら、POC は空隙率が大きくなるとともに結合材の量が小さくなり、空隙率が最大の時(約 40%程度)には骨材のみになるため、圧縮強度が 0 になると考えられる。したがって、圧縮強度と空隙率の関係は、 x 切片を持つ関係式となるのではないかと考えている。この点についての展開は、本論文の第 3 章に記述する。

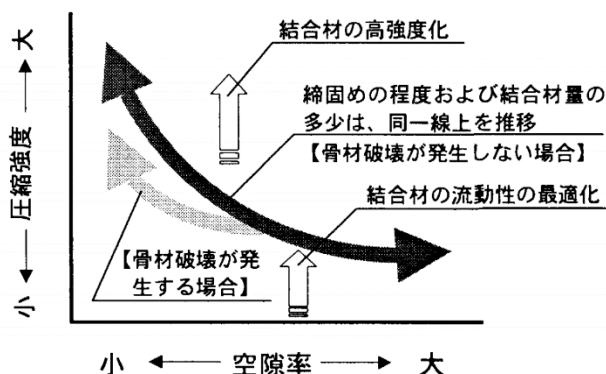


図-2.8 POC の圧縮強度と空隙率の関係に及ぼす諸要因の影響の概念図²⁻¹²⁾

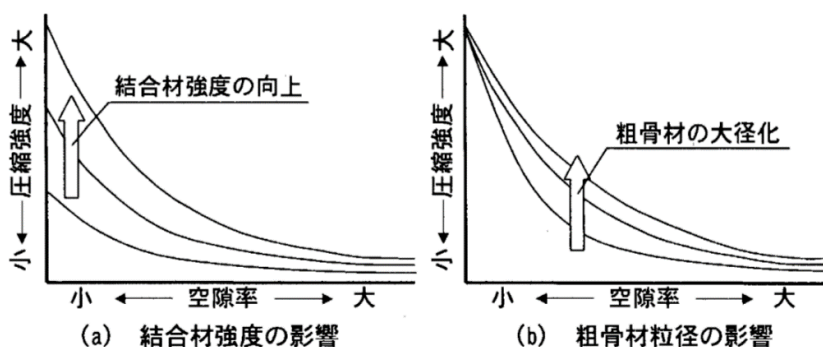


図-2.9 圧縮強度と空隙率関係に及ぼす結合材強度および粗骨材影響の概念図²⁻¹²⁾

(2) 曲げ強度

普通コンクリートにおいて、曲げ強度は圧縮強度のほぼ 1/5 程度であり、これは POC においても同様な傾向であることが筆者らの研究によって実験的に確認された²⁻²²⁾。POC の曲げ強度は、その圧縮強度と同様に、空隙率、骨材の粒径および骨材を接合する結合材の強度に依存し、空隙率との関係は式(2.1)に示す指数関数により表示できる。

図-2.10 に、文献²⁻²⁰⁾ (左) と文献²⁻²¹⁾ (右) の骨材粒径が異なる試験体における POC の曲げ強度と空隙率の関係を示す。いずれの図からも、曲げ強度は空隙率が大きくなるほど小さくなり、骨材粒径が小さくなるほど曲げ強度と空隙率の関係は上方にシフトする傾向があるといえる。

また、POC 道路舗装の耐荷性は、その曲げ強度に大きく依存し、特に高い耐荷性が要求される道路舗装などには、 4.5N/mm^2 以上の曲げ強度が対象となる。POC の強度性状の制限から歩道や駐車場などへの適用に限られてきたが、近年になって曲げ強度が 4.5N/mm^2 以上となる POC を作成でき、高速道路へ適用に関する研究例^{2-23)~2-25)}もある。また、山門ら²⁻²⁶⁾は 1 DAY PAVE をベースとした早期交通開放型 POC 舗装の配合を提案し、図-2.11 に示すように、材齢 1 日で曲げ強度 3.5N/mm^2 の N4 交通（舗装計画交通量：100~250 台/日・方向）を想定した道路用舗装の施工を行った。

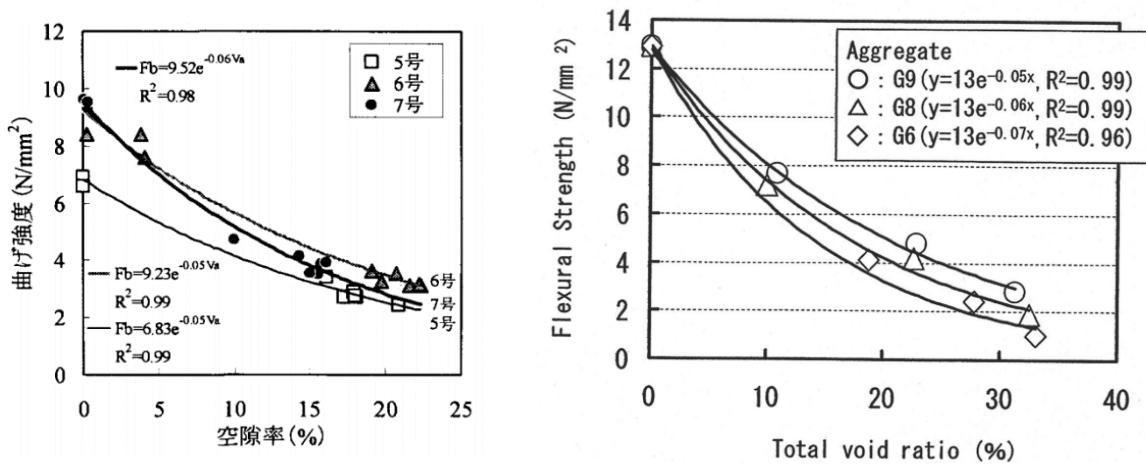


図-2.10 POC の曲げ強度と空隙率の関係^{2-20), 2-21)}

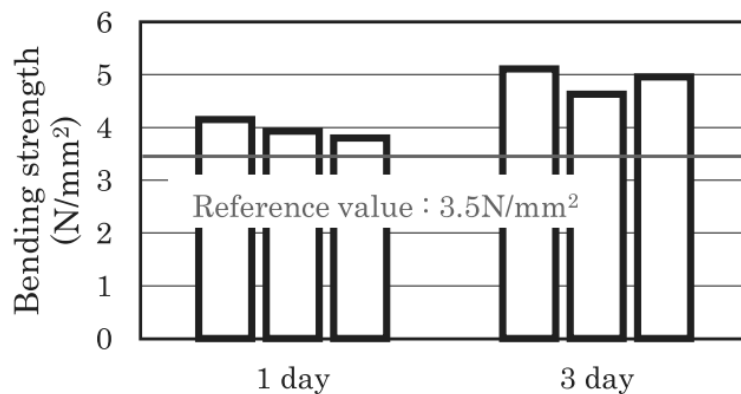


図-2.11 大型車両通行環境下における早期交通開放型 POC 舗装の曲げ強度²⁻²⁶⁾

2.5 弾性特性

弾性波法は、コンクリートの音響特性を利用した非破壊試験として強度推定、品質評価に用いられている。コンクリートは骨材、セメントペーストおよび水から構成される不均一な材料であり、その中を伝播する弾性波の減衰が大きいいため、コンクリートに適用される周波数の範囲は、**図-2.12**に示すように、金属などと比較すると低周波（数 kHz～300kHz）の領域になる。弾性波法を用いたコンクリートの非破壊試験としては、**図-2.13**に示すように、超音波法、打音法、衝撃弾性波法および AE 法などがある。これらの内、本論文では超音波および打音法の POC の品質管理への適用性について検討しており、以下に POC 分野における超音波法および打音法の適用例について記述する。また、弾性波法による品質評価は、いずれも材料の動弾性係数に非常に依存するため、超音波法および打音法を POC に適用する際には、その弾性特性を把握する必要がある。したがって、以下には POC の動弾性係数に関係する既往の研究も記述する。

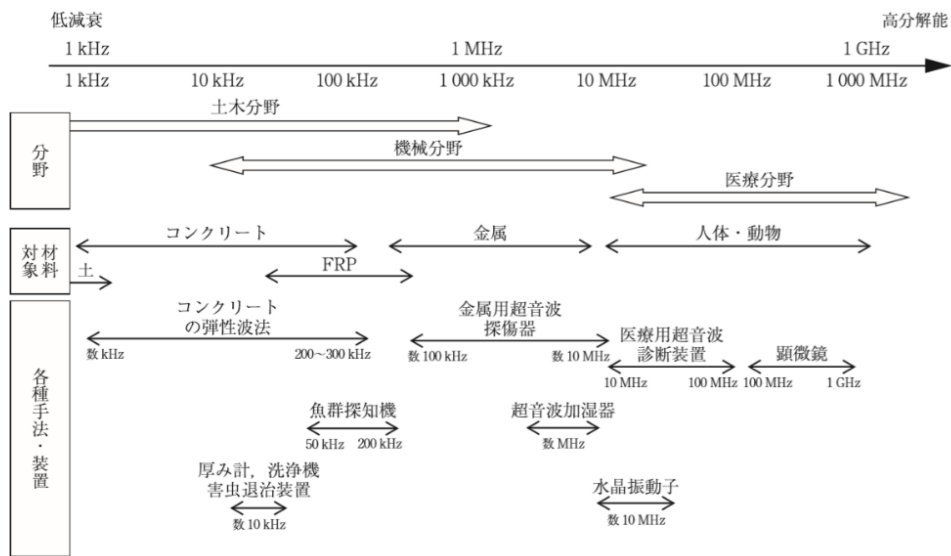


図-2.12 各種弾性波法の分類²⁻²⁷⁾

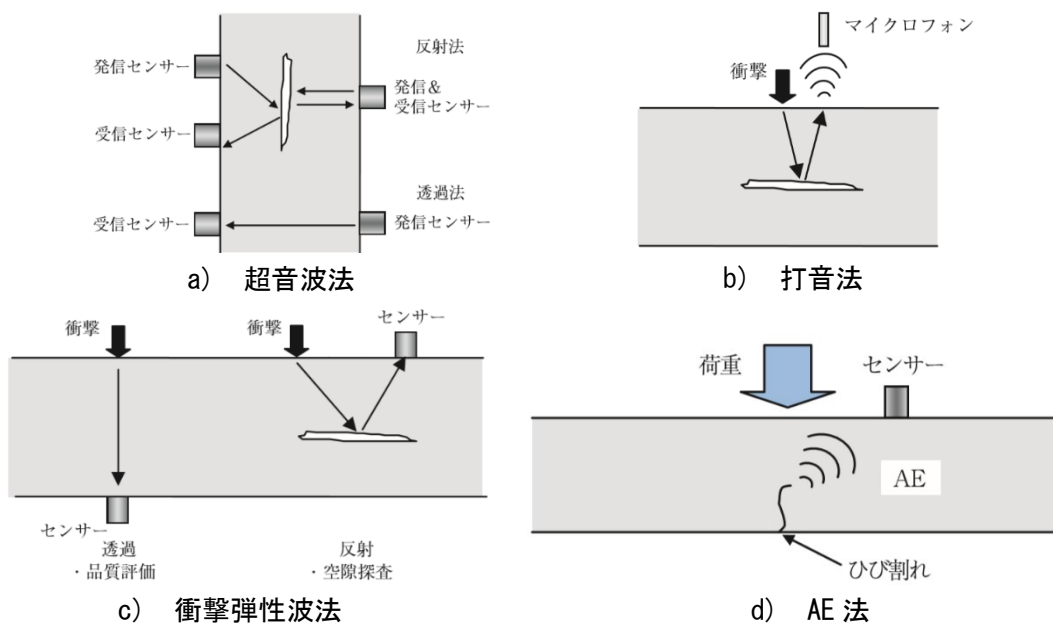


図-2.13 各種弾性波法の分類²⁻²⁸⁾

(1) POC の動弾性係数

齋藤ら²⁻²⁹⁾は、結合材の強さを変更させた POC において、その圧縮強度、静弾性係数および動弾性係数について検討を行った。その結果から、静弾性係数および動弾性係数の空隙率との関係を図-2.14 に示す。同図によれば、POC の静弾性係数および動弾性係数は、圧縮強度と同様に空隙率の増加に伴い減少する傾向にあり、結合材の強さの影響はほぼ見られなかった。しかし、図-2.15 に示す Anush ら²⁻³⁰⁾は結合材にシリカフェームを混入し作成された多種調合の POC においては、動弾性係数と空隙率の関係は相関性が低く、結合材の影響を受けると報告されている。また、図-2.16 に示すように、POC の動弾性係数は静弾性係数の 1.2 倍程度であると齋藤ら²⁻²⁹⁾により報告されている。

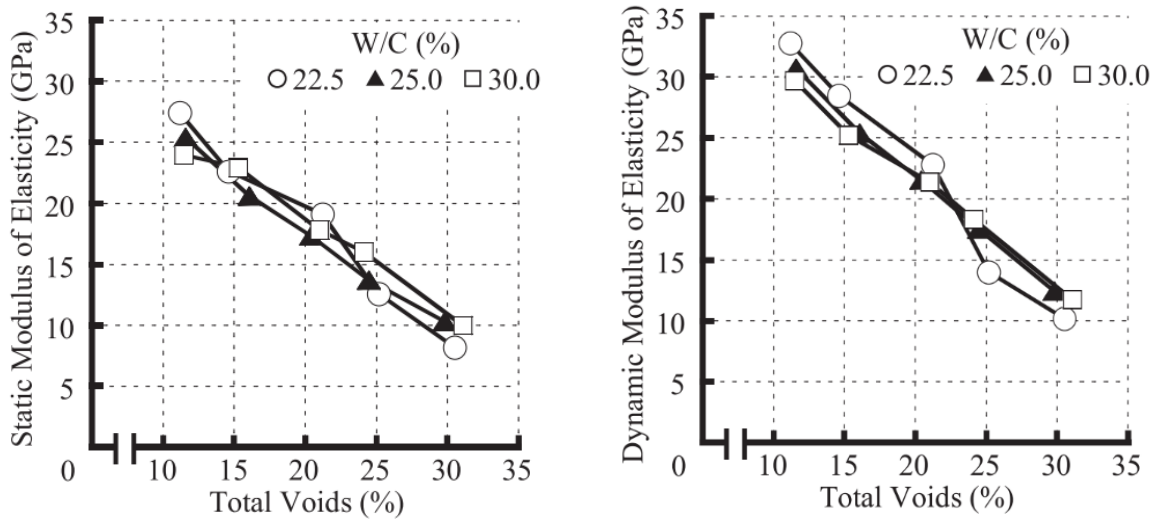


図-2.14 POC の静・動弾性係数と空隙率の関係²⁻²⁹⁾

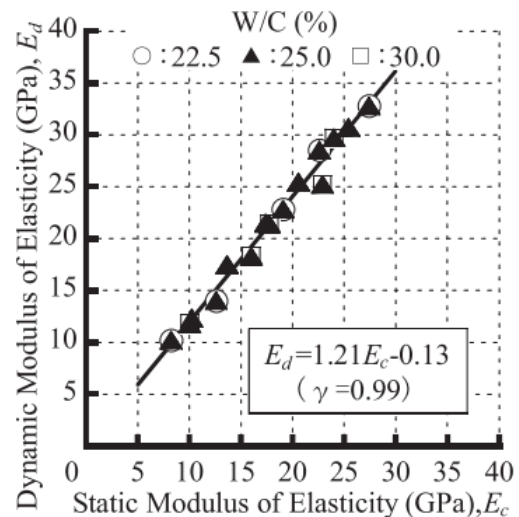
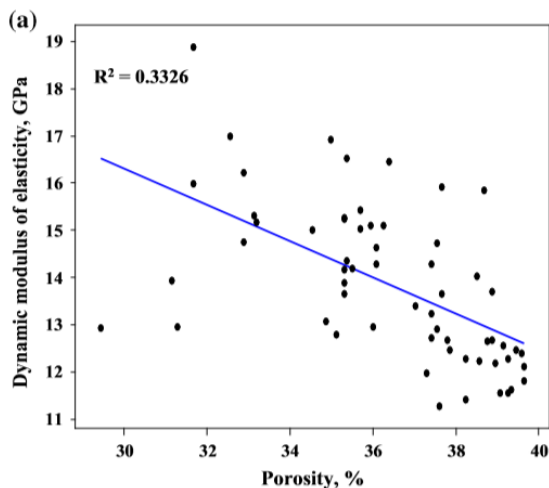


図-2.15 POC の動弾性係数と空隙率の関係²⁻³⁰⁾

図-2.16 POC の静弾性係数と動弾性係数の関係²⁻²⁹⁾

(2) POC の超音波伝播速度

超音波法を POC に適用した最初の例として鎌田らによる文献²⁻³¹⁾があり、超音波法による POC の内部組成を評価できることの可能性を示し、POC の超音波伝播速度はその中を伝播する最短経路により決まると報告されている。

図-2.17 に、POC の超音波伝播速度と空隙率の関係を示す。なお a) 図には、文献²⁻³²⁾の厚さおよび骨材の粒径を変化させた POC の版とそこからコア抜いた試験体を用いた実験の結果を示し、b) 図に、文献²⁻³³⁾の骨材として碎石および川砂を用いて作製されたコア試験体および円柱試験体を用いた実験の結果を示す。a) 図によれば、試験体の骨材粒径が小さく、かつ、厚さ 100mm 以上の場合は、超音波伝播速度と空隙率が相関を示しており、超音波法による空隙評価手法は、骨材径が小さく、POC 版の厚さが 100mm 以上の場合に適用可能であるとしている。b) 図によれば、碎石の方が超音波伝播速度が大きくなっており、碎石と川砂のいずれの場合も、空隙率と超音波伝播速度の関係は二次関数により近似できるとしている。また、図-2.18 に示すように、POC の超音波伝播速度と動弾性係数の間には高い相関性が得られている²⁻³⁰⁾。

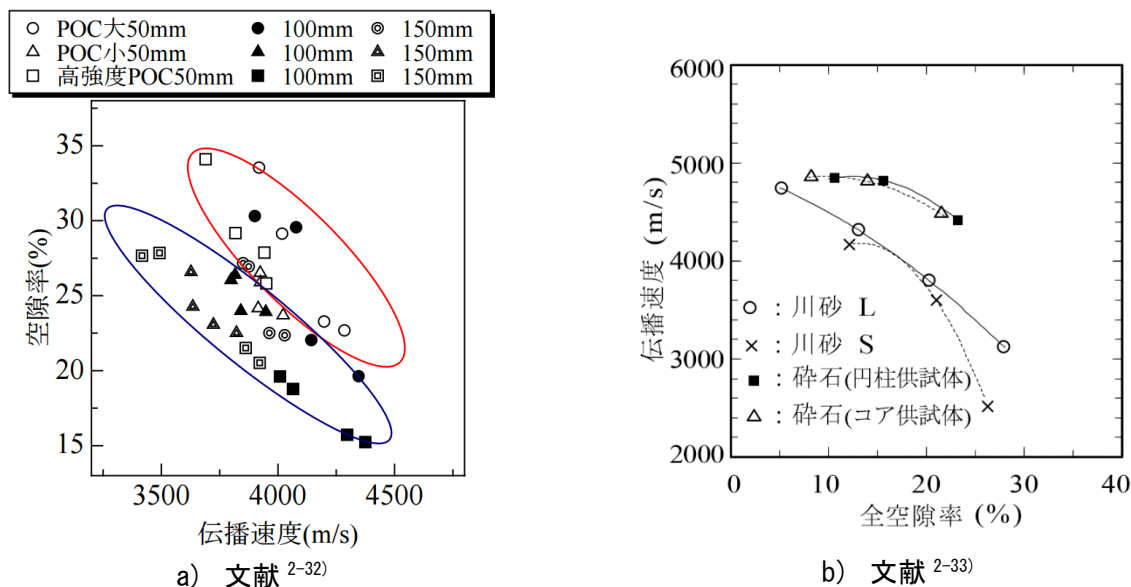


図-2.17 POC の超音波伝播速度と空隙率の関係

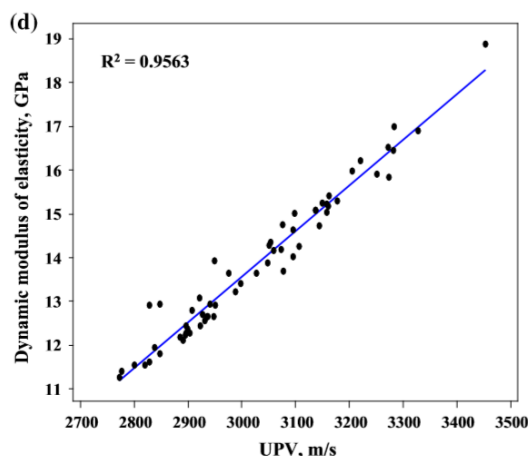


図-2.18 POC の動弾性係数と超音波伝播速度の関係²⁻³⁰⁾

(3) POC の固有振動数

POC の固有振動数については、検討例が少ないのが現状である。弾性振動・波動論によれば、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り²⁻³⁴⁾、コンクリートにおいて、衝撃弾性波法（共鳴振動法）および打音法など非破壊試験法を用いその固有振動数を測定し剛性を評価している^{2-35), 2-36)}。文献²⁻³⁵⁾では、**図-2.19**に示すように、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と報告されている。また、文献²⁻³⁶⁾において、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と報告されている。

JIS 1127 には、共鳴振動法によるコンクリートの動弾性係数、動せん断弾性係数及びポアソン比試験方法が規格されている²⁻³⁷⁾。**図-2.20**に、その装置の配置並びに騒動回路ピックアップ位置の例を示し、測定方法の詳細内容に関しては JIS 1127 に参考されたい。委員会報告書（2016年）の POC の乾燥振り返し試験方法（案）²⁻³⁸⁾において、POC の動弾性係数の測定は、コンクリートと同様に JIS 1127 に準じて測定すると提案されている。しかし、文献²⁻³⁹⁾では、より凹凸する表面を持つ POC においては、振動のピックアップは普通コンクリートのように上手くできないため、共鳴振動法よる POC の固有振動数および弾性係数の測定は困難であると報告されている。

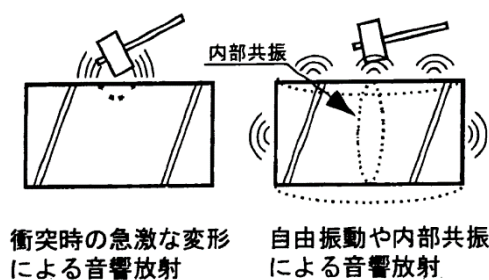


図-2.19 打撃音発生概念図²⁻³⁵⁾

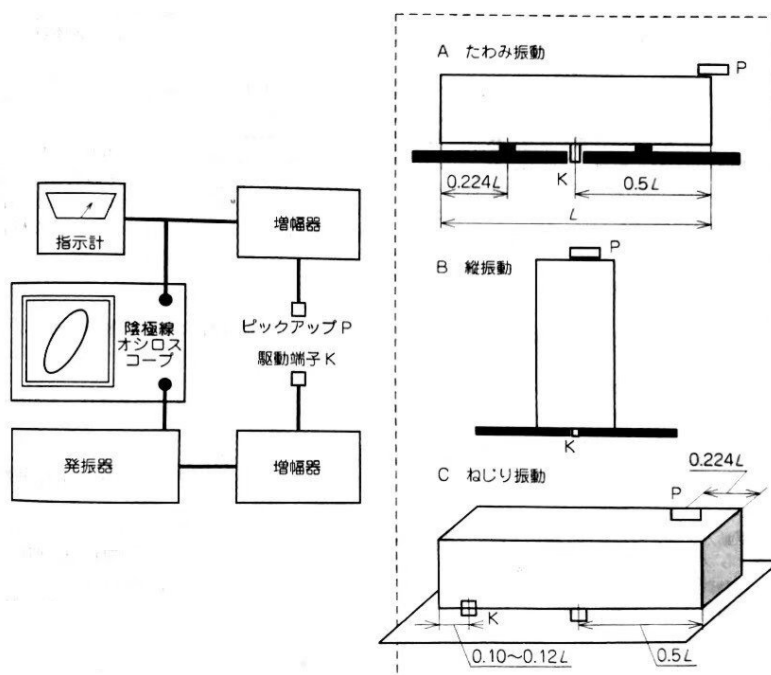


図-2.20 JIS 1127 による装置の配置並びに騒動回路ピックアップ位置の例²⁻³⁷⁾

2.6 POC 舗装の品質管理

POC 舗装の品質評価法について様々な研究が報告されているが、ここでは、委員会報告²⁻⁵⁾による現場施工されたスラブの品質評価に必要なとされる強度管理方法について記述する。現時点では、現場で構造体からコア試験体を採取して POC の空隙および力学特性を評価している。

上記の方法は、構造体の空隙率と、施工時に作製された管理用試験体による圧縮強度—空隙率の関係式、および曲げ強度—空隙率の関係式を用いて、構造体の圧縮強度および曲げ強度を推定する方法である。また、この方法による現場施工された POC の強度評価の適用性に関して、型枠試験体と構造体から採取した試験体（コア・切り出し試験体）の圧縮強度—空隙率、曲げ強度—空隙率の関係について検討した共通実験が行われている^{2-5), 2-40)}。この実験要因を表-2.3 に、結果を図-2.20 および図-2.21 に示す。共通実験は異なる 10 機関により協力して行われている。

表-2.3 各共通実験の参加機関の実験要因²⁻⁵⁾

参加機関	目標空隙率	水セメント比	使用骨材	コア供試体との比較
1	18, 23, 28%	25%	JIS6 号砕石	
2	15, 20, 25%	30%	JIS7 号砕石	
3	15, 20, 25%	25%	砕石 (5~20mm)	○
4	25%	25%	JIS6 号砕石	
5	10, 20, 30%	25%	JIS5, 6 号砕石	○
6	15, 25, 35%	25, 30, 35%	JIS5, 6, 7 号砕石	
7	15, 25, 35%	20, 25, 30%	JIS5, 6, 7 号砕石	○
8	20, 25, 30%	25%	JIS6 号砕石	○
9	15, 20, 30%	20%	JIS6 号砕石	○
10	15, 20, 25%	20, 25, 30%	JIS6, 7 号砕石	○

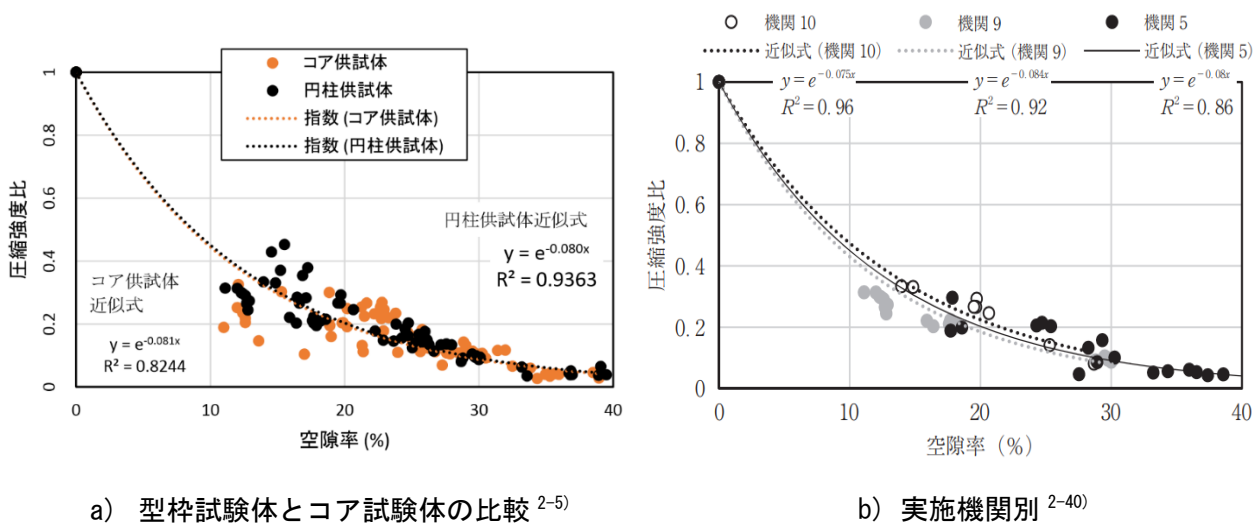
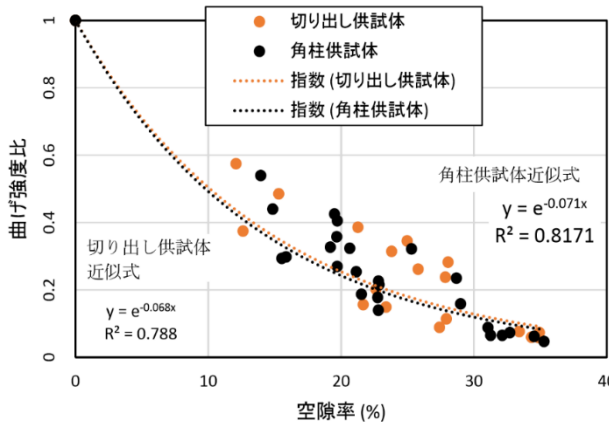
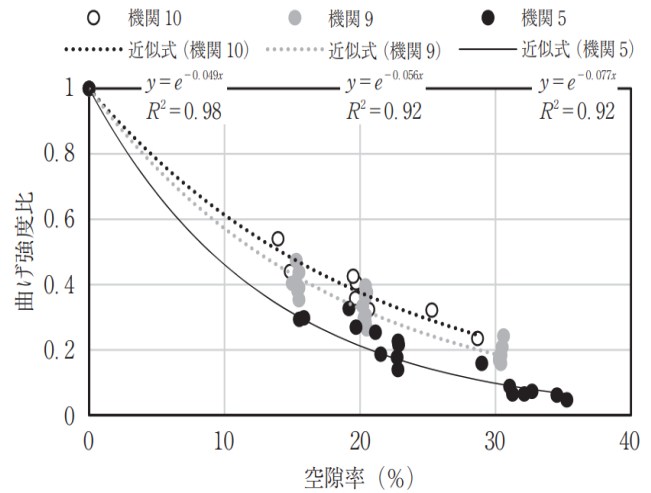


図-2.20 POC の圧縮強度比と空隙率の関係



a) 型枠試験体とコア試験体の比較²⁻⁵⁾



b) 実施機関別²⁻⁴⁰⁾

図-2.21 POCの曲げ強度比と空隙率関係

実験結果によれば、現場施工された構造体 POC の強度は、構造体の空隙率と、型枠試験体による強度比と空隙率の関係式を用いて推定できる可能性が示されている。しかし、機関ごとの施工条件および締固め方法などの違いにより、強度比-空隙率関係がばらつくため、強度比-空隙率関係の設定に当たっては、当該機関ごとに独自の関係式を設定することが必要であるとしている。

2.7 まとめ

本章では、本研究の内容とより密接に関わる硬化後の POC の各基本特性、品質管理手法およびコンクリートの弾性波法（超音波および打音法）に関する既往の研究を取りまとめた。本章から得られた知見を以下に示す。

- 1) POC の物性上の位置付けは、構造コンクリート、岩盤、地盤の中間的な領域に所属し、生物の生息環境地域にほぼ一致する物性を保有する。
- 2) POC の空隙率は、その物性を決定する主な性質であり、圧縮・曲げ強度、静・動弾性係数、超音波伝播速度、固有振動数と相関関係がある。
- 3) POC 舗装の品質管理手法として、構造体の空隙率から、圧縮強度－空隙率、曲げ強度－空隙率関係式を用いて、圧縮強度および曲げ強度を推定する方法がある。現状では、構造体からコア抜き試験体を採取して空隙率のみを測定する方法が一般的に行われているが、この方法は、構造体に欠陥を与えるや試験体の採取に労力を必要するなど欠点も多い。このため、より簡便に現場 POC の空隙率を測定できる方法の開発が望まれている。

【第2章の参考文献】

- 2-1) Malhotra, V.M.: No-Fine Concrete Its Properties and Application, Journal of ACI, Vol.73, No.11, pp.628-65.4, 1976
- 2-2) ACI Committee 522.: 522R-10 report on pervious concrete, pp.2, 2010
- 2-3) 梶尾聡: ポーラスコンクリートの配合設計法と空隙性能に関する研究, 博士論文, 2008
- 2-4) 岡本享久, 中新弥: ポーラスコンクリート, コンクリート工学, Vol.54, No.5, pp.542-577, 2016.5
- 2-5) 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協会, pp.1-157, 2015.6
- 2-6) Web of Science の検索ページ
<http://apps.webofknowledge.com>
- 2-7) CNKI (中国知网) の検索ページ
https://nvs.cnki.net/kns/brief/default_result.aspx
- 2-8) Cheng, X.L., Zhang, R.Z. and Han, Q.Z. : Application and development of permeable material in pavement design of sponge city, Journal of Brick-Tile, No.1, pp.61-63, 2018 (in Chinese)
程晓琳, 张柔祉, 韩清忠 : 浅析透水性材料在海绵城市铺装设计中的应用与发展, 砖瓦, No.1, pp.61-63, 2018
- 2-9) 岡本享久, 安田登, 増井直樹, 佐藤文則: ポーラスコンクリートの製造・物性・試験方法, コンクリート工学, Vol.36, No.3, pp.52-62, 1998.3
- 2-10) 大友鉄平, 大塚浩司, 武田三弘: 緑化ポーラスコンクリートの空隙性状に関する基礎的研究, 土木学会第60回年次学術講演会, 第5部, pp.895-896, 2005
- 2-11) 大友鉄平, 大塚浩司, 北辻政文, 武田三弘: ポーラスコンクリートの空隙性状と植生との関係, 土木学会東北支部研究技術研究発表会 (平成18年度)
- 2-12) 畑中重光, 三島直生, 湯浅幸久: ポーラスコンクリートの圧縮強度-空隙率関係に及ぼす結合材強度および粗骨材粒径の影響に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, No.594, pp.17-23, 2005.8
- 2-13) 湯浅幸久, 畑中重光, 三島直生, 前川明弘, 宮本高秀: ポーラスコンクリートの振動縮間めに関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, No.552, pp.37-44, 2002.2
- 2-14) E. Ryshkewitch : Compression Strength of Porous Sintered Alumina and Zirconia, Jour. of the Amer. Ceramic Society, Vol.36, No.2, 1953
- 2-15) W. Duckwerth : Discussion of Ryshkewitch Paper, Jour. of the Amer. Ceramic Society. Vol.36, No.2, 1953
- 2-16) 大谷俊浩, 村上聖, 佐藤嘉昭, 三井宜之, 平居孝之: ポーラスコンクリートの圧縮強度推定式の構築に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.590, pp.25-30, 2005.4
- 2-17) 大谷俊浩, 村上聖, 佐藤嘉昭, 三井宜之, 平居孝之: ポーラスコンクリートの圧縮強度特性に及ぼす影響因子に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.585, pp.31-37, 2004.11
- 2-18) 山本貴正, 畑中重光, 三島直生, 小池狭千朗, 湯浅 幸久: ポーラスコンクリートの圧縮強度特性の確率変動に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, No.601, pp.9-14, 2006
- 2-19) 前川明弘, 畑中重光, 三島直生, 湯浅幸久: ポーラスコンクリートの圧縮強度-空隙率関係に関

- する実験とそのモデル化, 日本建築学会構造系論文集, No.625, pp.363-368, 2008.3
- 2-20) 大谷俊浩, 藤田純, 村上聖, 清原千鶴, 佐藤嘉昭, 三井宜之: ポーラスコンクリートの力学特性に及ぼす骨材粒径の影響に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.403-404, 2004.8
- 2-21) 前川明弘, 畑中重光, 三島直生, 山本晃: 小粒径ポーラスコンクリートの基礎的特性に関する実験的研究, セメント・コンクリート論文集, No.60, pp.264-270, 2006
- 2-22) 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圧縮強度と曲げ強度の関係に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1345-1350, 2015.7
- 2-23) セメント協会: 車道用ポーラスコンクリート現場試験舗装結果(福井県) - 供用5年 -, 舗装技術専門委員会報告, R-17, 2006
- 2-24) セメント協会: 車道用ポーラスコンクリート試験舗装報告 - 千葉県道 松戸・野田線・供用5年 -, 舗装技術専門委員会報告, R-20, 2006
- 2-25) セメント協会: 車道用ポーラスコンクリート試験舗装報告 - 千葉県道 成田小見川鹿島港線・供用5年 -, 舗装技術専門委員会報告, R-22, 2007
- 2-26) 山門健人, 小島風太, 田村隆弘, 島袋淳: 大型車両通行環境下における早期交通開放型透水性ポーラスコンクリート舗装の性能に関する研究, セメント・コンクリート論文集, Vol.72, pp.211-216, 2018
- 2-27) 土木学会: 弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関する委員会報告書およびシンポジウム論文集, コンクリート技術シリーズ 61, 2004
- 2-28) 鎌田敏郎, 内田慎哉: コンクリートの非破壊試験の理論と実際 ③弾性波法(超音波法・衝撃弾性波法)の理論と実際, コンクリート工学, Vol.51, No.4, pp.340-347, 2013.4
- 2-29) 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
- 2-30) Anush K. C., Krishna P. B.: Influence of mix parameters on pore properties and modulus of pervious concrete: an application of ultrasonic pulse velocity, Materials and Structures, Vol.49, pp. 5255-5271, 2016
- 2-31) 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
- 2-32) 吉田知弘, 音野琢也, 北野嘉乙, 国枝稔, 鎌田敏郎, 六郷恵哲: 超音波によるポーラスコンクリートの空隙評価に関する基本的検討, 土木学会第59回年次学術講演会, pp.339-340, 2004.9
- 2-33) 石黒 覚, 伊藤果穂, 工藤舞子: ポーラスコンクリート供試体の超音波伝播速度, 第5回コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム「非破壊検査が担うコンクリート構造物の調査・点検技術の高度化・効率化」, pp.111-114, 2015.8
- 2-34) 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
- 2-35) 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.143-16.2, 1996
- 2-36) 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
- 2-37) JIS A 1127 共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数, 動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方法, JIS 11 土木I コンクリート製品, 日本規格協会, pp.995-998, 2004

- 2-38) M.S.M. Lund., K.K. Hansen., R. Brincker., A.H. Jensen., S.D.R. Amador.: Evaluation of freeze-thaw durability of pervious concrete by use of operational modal analysis,
- 2-39) 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協会, pp.340-342, 2015.6
- 2-40) 平岩陸, 畑中重光, 岡本享久, 梶尾聡, 国枝稔, 三島直生: ポーラスコンクリートの強度-空隙率関係に関する共通実験報告, コンクリート工学, Vol.54, No.4, pp.375-380, 2016.4

第3章 ポーラスコンクリートの弾性挙動と空隙率 の関係に関する理論的検討

第3章 ポーラスコンクリートの弾性挙動と空隙率の関係に関する理論的検討

3.1 背景と目的

本論文の実験に関わる理論的な裏付けとして、弾性理論に基づき POC の弾性挙動に関する理論的検討を行った。

検討Ⅲ-I では、普通コンクリートの弾性係数の予測モデルを参考にし、POC の動弾性係数の各予測モデルを提案し、POC の空隙率および動（静）弾性係数の関係に関する検討を行う。

検討Ⅲ-II では、普通コンクリートの静弾性係数と圧縮強度に関する関係式を POC に適用し、POC の圧縮強度と空隙率の関係に関する検討を行う。

検討Ⅲ-III では、振動・波動論に基づき POC の超音波伝播速度、固有振動数および空隙率関係に関する理論的検討を行う。

3.2 検討Ⅲ-I ポーラスコンクリートの弾性係数と空隙率の関係

3.2.1 普通コンクリートの構造モデル

普通コンクリートの弾性係数の予測モデルとしては、図-3.2.1に示す各モデルが提案されている³⁻¹⁾。ポーラスコンクリート(POC)は比較的大きな空隙を多く持つことが特徴的あり、その空隙が力学特性に大きく影響を与える。

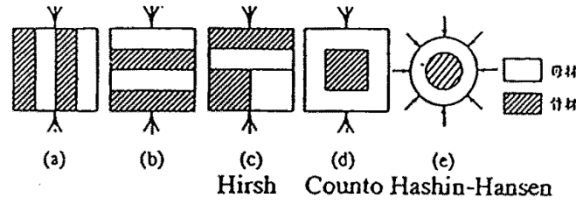


図-3.2.1 普通コンクリートの各構造モデル³⁻¹⁾

3.2.2 応力分布

図-3.2.2に、普通コンクリートとPOCの一次元的縦応力の分布モデルを示す。ここで設定する簡略モデルでは空隙が応力を分担しない。そのため、空隙がある位置の縦方向には応力を伝達せず、応力が横方向の固体部分に集中する。そのため、POCの空隙率が大きくなるほど弾性係数が小さくなり、空隙率が0、ペーストが最大の時に最大となり、ペーストがなくなると0となる特徴がある。

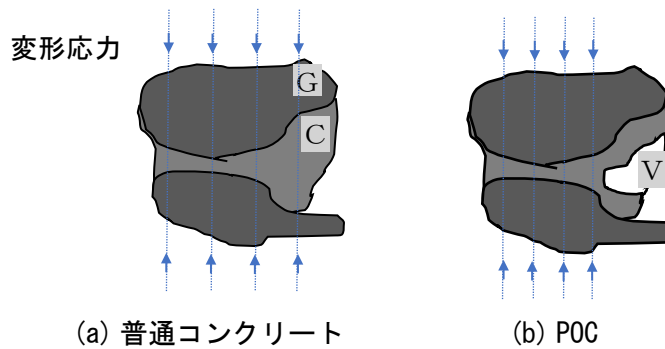


図-3.2.2 一次元応力分布のイメージ図

3.2.3 POCの構造モデル

上記モデルの応力分担の特徴を考慮し、図-3.2.3に示すPOCの各構造モデルを作成した。各モデルは、一次元的縦応力のみ考えたモデルである。モデル(a)は、各要素を並列に複合したモデルである。モデル(b)は、POCの弾性係数とその結合材となるペーストの量によってほぼ決まると考えたものである。モデル(c)は、図-3.2.2(b)のPOCの応力分布をイメージしたモデルであり、超音波など弾性波の伝播では、縦波の伝播が主要であり、弾性波がほぼ固体の縦方向に伝播することを概ね表現できるモデルであると考えている。モデル(d)は、普通コンクリートの骨材とマトリックス部分によって複合されるHashin-HansenモデルをPOCへ応用したものである。空隙要素の影響をマトリックス部分に入れて、マトリックス部分は、ペーストと空隙を並列に複合した。モデル(e)は、モデル(d)に、空隙

がある位置の縦方向には、応力を分担しなくなること、すなわち骨材が応力を分担しない部分の影響を考慮したモデルである。

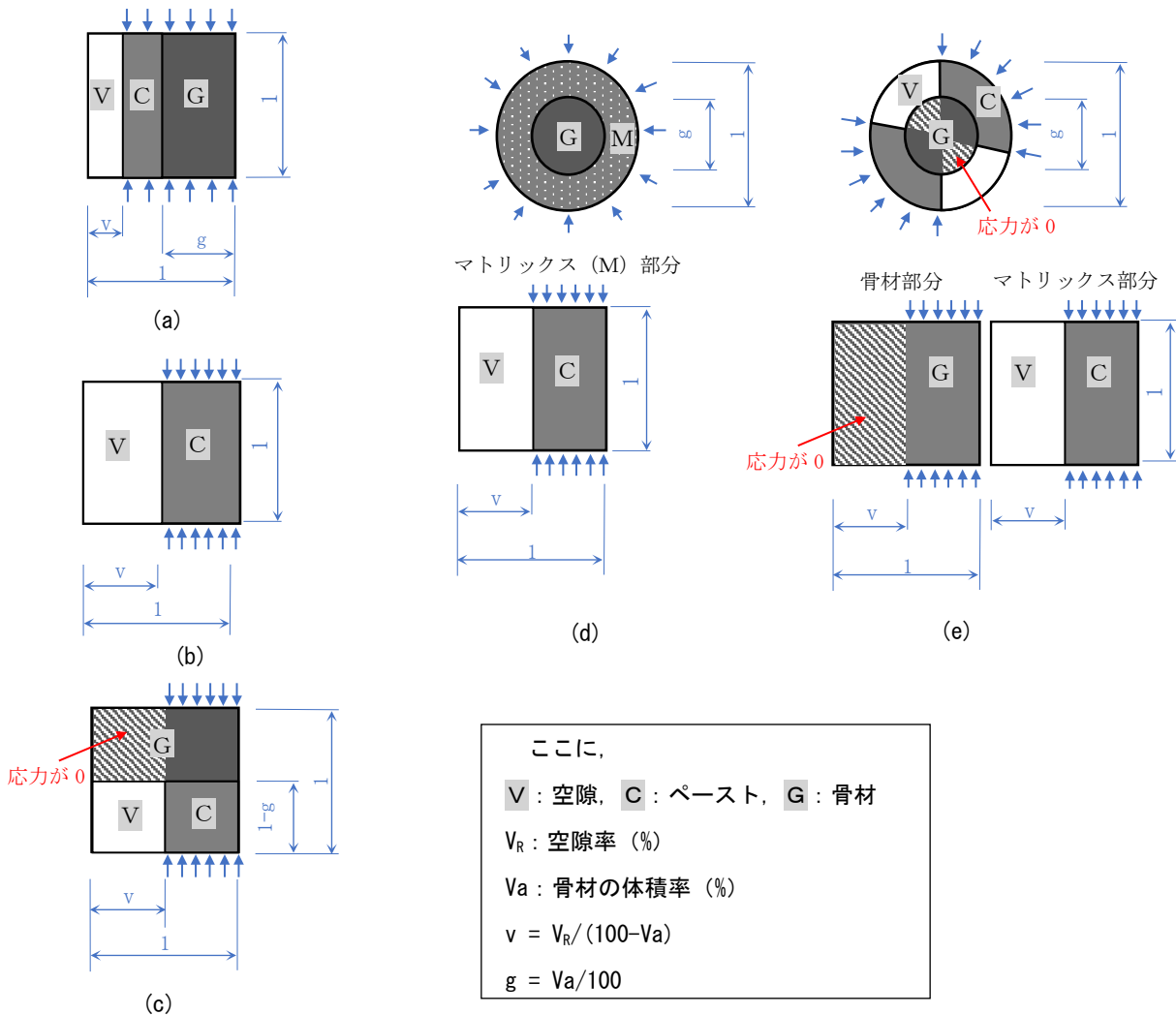


図-3.2.3 POCの各構造モデル

3.2.4 POCの弾性係数の計算

単位体 (1×1×1) における弾性係数は、以下に示す式(3.2.1)によって計算できる。

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F}{\Delta L} \quad (3.2.1)$$

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{F}{1 \times 1} = F$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta L}{1} = \Delta L$$

ここに、 E : 弾性係数 (kN/mm²) , σ : 圧縮応力 (kN/mm²) , ε : 圧縮ひずみ, F : 圧縮力 (kN) , S : 面積 (mm²) , ΔL : 変形量 (mm) , L : 長さ (mm)

以下に、各モデルにおける弾性係数と空隙率の関係式の導出を示す。なお、単位体（1×1×1）において算出した。

(1) モデル(a)

モデル(a)における弾性係数と空隙率の関係は、式(3.2.2)となる。

$$E_{POC} = \frac{F_{POC}}{\Delta L_{POC}} = \frac{E_V \varepsilon_V (1-v) + E_C \varepsilon_C (1-v-g) + E_G \varepsilon_G g}{\varepsilon_C \times 1}$$

ここに、

$$\varepsilon_V = \varepsilon_C = \varepsilon_G$$

$$E_V = 0$$

従って、

$$E_{POC} = E_C (1 - v - g) + E_G g = E_C \left(1 - \frac{V_R}{100 - V_a} - \frac{V_a}{100} \right) + E_G \frac{V_a}{100}$$

$$E_{POC} = -\frac{E_G}{100 - V_a} V_R + E_C \left(1 - \frac{V_a}{100} \right) + E_G \frac{V_a}{100} \quad (3.2.2)$$

ここに、 F_{POC} : POCにかかる圧縮力 (kN) , ΔL_{POC} : POCの変形量 (mm) , E_{POC}, E_G, E_C, E_V : POC, 骨材, ペースト, 空気の弾性係数 (kN/mm²) , $\varepsilon_G, \varepsilon_C, \varepsilon_V$: 骨材, ペースト, 空気のひずみ, V_a : 骨材の実積率 (%) , V_R : 空隙率 (%)

(2) モデル(b)

モデル(b)における弾性係数と空隙率の関係は、式(3.2.3)となる。

$$E_{POC} = \frac{F_{POC}}{\Delta L_{POC}} = \frac{E_C \varepsilon_C (1-v)}{\varepsilon_C \times 1} = E_C \left(1 - \frac{V_R}{100 - V_a} \right)$$

$$E_{POC} = -\frac{E_C}{100 - V_a} V_R + E_C \quad (3.2.3)$$

ここに、 F_{POC} : POCにかかる圧縮力 (kN) , ΔL_{POC} : POCの変形量 (mm) , E_C : ペーストの弾性係数 (kN/mm²) , ε_C : ペーストのひずみ, V_a : 骨材の実積率 (%) , V_R : 空隙率 (%)

(3) モデル(c)

モデル(c)における弾性係数と空隙率の関係は、式(3.2.4)となる。

$$E_{POC} = \frac{F_{POC}}{\Delta L_{POC}} = \frac{E_G \varepsilon_G (1-v)}{\varepsilon_C (1-g) + \varepsilon_G g}$$

ここに、

$$F_C = F_G$$

$$E_C \varepsilon_C (1 - v) = E_G \varepsilon_G (1 - v)$$

$$\varepsilon_C = \frac{E_G}{E_C} \varepsilon_G$$

従って,

$$E_{POC} = \frac{E_G(1-v)}{\frac{E_G}{E_C}(1-g)+g} = \frac{E_C E_G(1-v)}{E_G(1-g)+E_C g} = \frac{E_C E_G \left(1 - \frac{V_R}{100 - V_a}\right)}{E_G \left(1 - \frac{V_a}{100}\right) + E_C \frac{V_a}{100}}$$

$$E_{POC} = -\frac{B}{(100 - V_a)} V_R + B \quad (3.2.4)$$

$$B = \frac{100 E_C E_G}{E_G(100 - V_a) + E_C V_a}$$

ここに, F_{POC} : POC にかかる圧縮力 (kN), ΔL_{POC} : POC の変形量 (mm), E_{POC}, E_G, E_C : POC, 骨材, ペースト, 空気の弾性係数 (kN/mm²), $\varepsilon_G, \varepsilon_C$: 骨材, ペーストのひずみ, V_a : 骨材の実積率 (%), V_R : 空隙率 (%), B : POC の空隙率が 0 時の弾性係数 (kN/mm²)

(4) モデル(d)

モデル(d)における弾性係数と空隙率の関係は, 式(3.2.5)となる。

$$E_{POC} = \frac{(1-g)E_m + (1+g)E_g}{(1+g)E_m + (1-g)E_g} E_m$$

ここに,

$$\text{マトリックス部分の弾性係数は, } E_m = E_C \left(1 - \frac{V_R}{100 - V_a}\right)$$

$$\text{粒子部分の弾性係数は, } E_g = E_G$$

従って,

$$E_{POC} = \frac{(1-g)E_C \left(1 - \frac{V_R}{100 - V_a}\right) + (1+g)E_G}{(1+g)E_C \left(1 - \frac{V_R}{100 - V_a}\right) + (1-g)E_G} E_C \left(1 - \frac{V_R}{100 - V_a}\right) \quad (3.2.5)$$

ここに, F_{POC} : POC にかかる圧縮力 (kN), ΔL_{POC} : POC の変形量 (mm), E_m : マトリックス部分の弾性係数 (kN/mm²), E_m : 粒子部分の弾性係数 (kN/mm²), E_{POC}, E_G, E_C : POC, 骨材, ペースト, 空気の弾性係数 (kN/mm²), V_a : 骨材の実積率 (%), V_R : 空隙率 (%)

(5) モデル(e)

モデル(e)における弾性係数と空隙率の関係は, 式(3.2.6)となる。

$$E_{POC} = \frac{(1-g)E_m + (1+g)E_g}{(1+g)E_m + (1-g)E_g} E_m$$

ここに,

$$\text{マトリックス部分の弾性係数は, } E_m = E_C \left(1 - \frac{V_R}{100 - V_a}\right)$$

$$\text{粒子部分の弾性係数は, } E_g = E_G \left(1 - \frac{V_R}{100 - V_a}\right)$$

従って、

$$E_{POC} = \frac{(1-g)E_C\left(1-\frac{V_R}{100-V_a}\right)+(1+g)E_G\left(1-\frac{V_R}{100-V_a}\right)}{(1+g)E_C\left(1-\frac{V_R}{100-V_a}\right)+(1-g)E_G\left(1-\frac{V_R}{100-V_a}\right)} E_C \left(1 - \frac{V_R}{100-V_a}\right)$$

$$E_{POC} = -\frac{(1-g)E_C+(1+g)E_G}{(1+g)E_C+(1-g)E_G} \frac{E_C}{100-V_a} V_R + \frac{(1-g)E_C+(1+g)E_G}{(1+g)E_C+(1-g)E_G} \quad (3.2.6)$$

ここに、 F_{POC} : POC にかかる圧縮力 (kN) , ΔL_{POC} : POC の変形量 (mm) , E_m : マトリックス部分の弾性係数 (kN/mm²) , E_m : 粒子部分の弾性係数 (kN/mm²) , E_{POC}, E_G, E_C : POC, 骨材, ペースト, 空気の弾性係数 (kN/mm²) , V_a : 骨材の実積率 (%) , V_R : 空隙率 (%)

3.2.5 POC の弾性係数と空隙率の関係

(1) 動弾性係数と空隙率の関係

図-3.2.4 に、各モデルによる弾性係数の計算結果を示す。各モデルによる弾性係数は、応力とひずみ関係を線形となる仮定で計算したものであり、コンクリートでは、試験体を微小な変形させた状態の動弾性係数を意味する。同図には、動弾性係数と空隙率の関係を示し、図-3.2.4 (a)にはペーストの弾性係数が大きい場合を、図-3.2.4 (b)にはペーストの弾性係数が小さい場合を、それぞれ示す。図-3.2.4 (a) には、JISA1127 に参考し、打音法によって測定した動弾性係数の実験値も示す。同図によれば、動弾性係数と空隙率の関係はほぼ線形の関係式により表示でき、各モデルの内、モデル(b)、(c)および(e)の弾性係数が実験結果と比較的近い値となっている。しかし、図-3.2.4 (b)のような、骨材とペーストの弾性係数が比較的大きな差がある場合は、モデル(b)の方が比較的低い結果となっている。

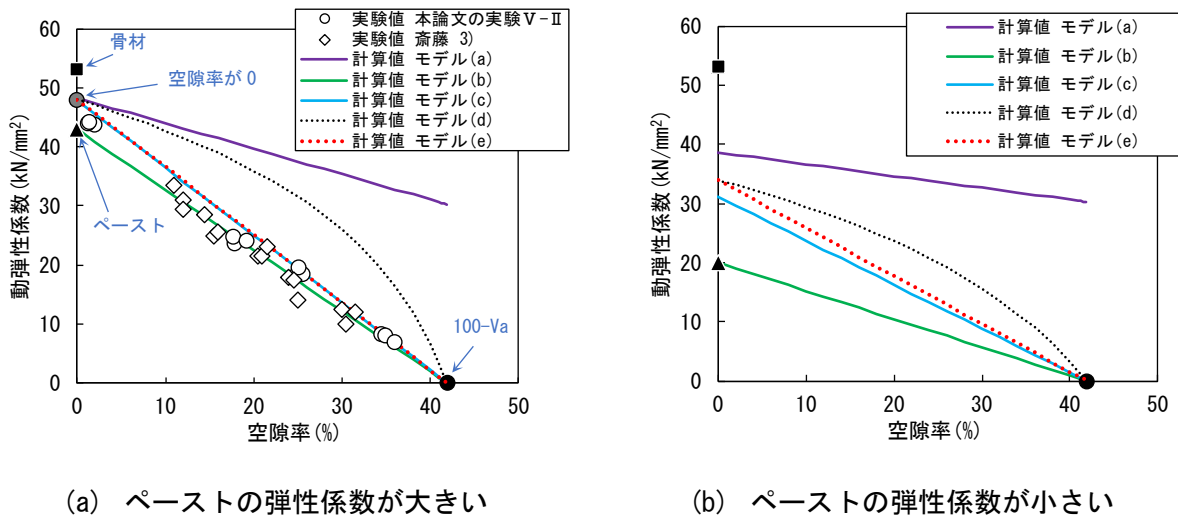


図-3.2.4 POC の動弾性係数と空隙率の関係

図-3.2.4(a)の弾性係数の計算に用いた各要素の弾性係数と実積率（POC では、骨材の体積率がその実積率と同程度）は、表-3.2.1 に示す。骨材とペーストの弾性係数は、同じ材料を用いた既往研究³⁻²⁾の超音波伝播速度から推定した。

表-3.2.1 材料の特性

	超音波伝播速度 (m/s)	弾性係数 (kN/mm ²)	実積率 (V _a , %)
骨材	5420	71.46	58.1
ペースト	4387	37.50	—
空隙	372	0	—

(2) 静弾性係数と空隙率の関係

既往研究³⁻⁴⁾によれば、コンクリートの静弾性係数と動弾性係数の間に相関があり、弾性係数比（動弾性係数／静弾性係数）は、1.04～1.37の範囲にあることが報告されている。したがって、POCの静弾性係数は、上記のモデル(c)による関係式に、弾性係数比 K（動弾性係数／静弾性係数）を入れて式(3.2.7)により表示できる。

$$E_{POC-S} = -\frac{B}{K(100-V_a)}V_R + \frac{B}{K} \tag{3.2.7}$$

$$B = \frac{100E_cE_G}{E_G(100-V_a)+E_cV_a}$$

ここに、 E_{POC-S} ：POCの静弾性係数 (kN/mm²)、 V_a ：骨材の容積率 (%)、 V_R ：空隙率 (%)、 B ：POCの空隙率が0の時の弾性係数 (kN/mm²)、 K ：POCの動弾性係数と静弾性係数の係数

図-3.2.5に、POCの静弾性係数と空隙率の関係を示す。同図には、上記計算式(3.2.7)による計算値および既往研究による実測値も示す。図によれば、モデル計算による静弾性係数は、弾性係数比 K が大きくなるほど、実験結果に同程度の値になっていく傾向を示す。ここで、弾性係数比 K は、図-3.2.6に示す初期弾性係数（動弾性係数）および割線弾性係数（静弾性係数）の比とも一致ものである。また、

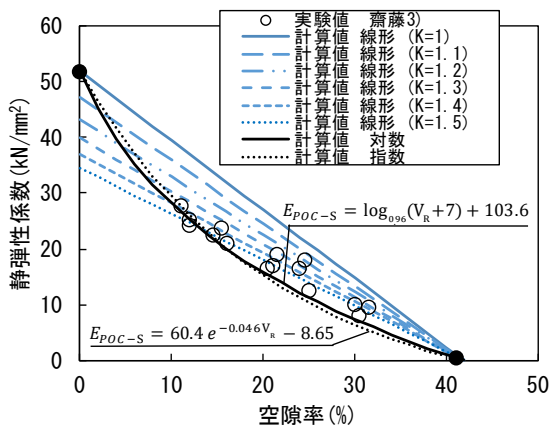


図-3.2.5 POCの静弾性係数と空隙率の関係

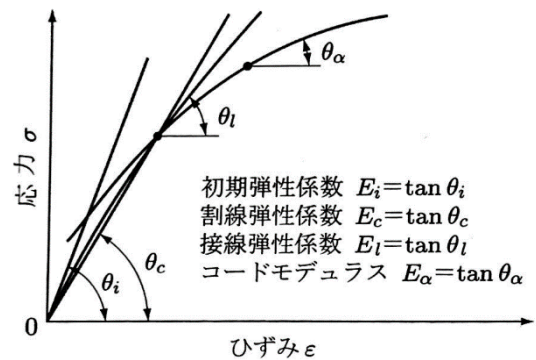


図-3.2.6 弾性係数の定義³⁻⁵⁾

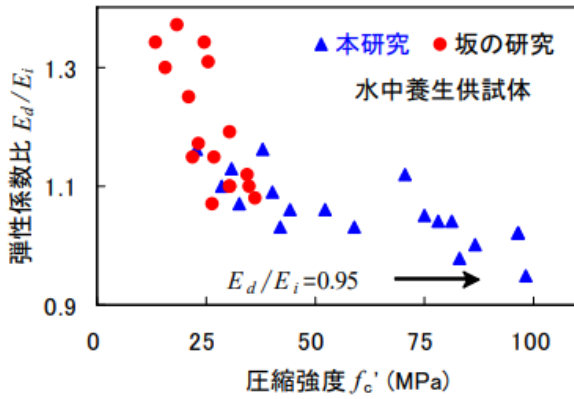


図-3.2.7 弾性係数比と圧縮強度の関係³⁻⁴⁾

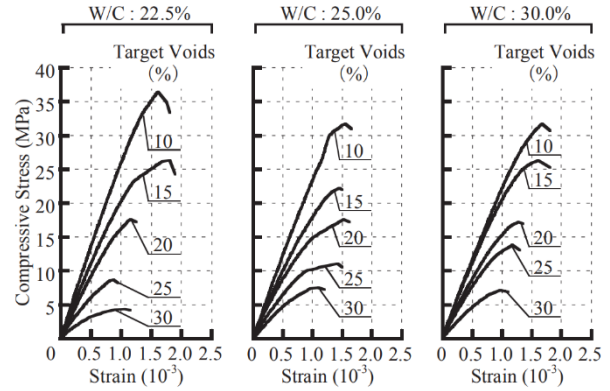


図-3.2.8 POCの圧縮応力-ひずみ曲線³⁻³⁾

図-3.2.7によれば、コンクリートの圧縮強度が大きくなると弾性係数比が小さくなる傾向がある。さらに、図-3.2.8によれば、POCの空隙率が小さくなるほど圧縮強度が大きくなり、その圧縮応力とひずみ曲線は、非線形より線形に近づく傾向がある。したがって、POCの空隙率が小さくなるほど、弾性係数比が小さくなり、空隙率が0の点（W/C=0.3のコンクリートの圧縮強度は約80N/mm²）で、弾性係数比がほぼ1となると考えられる。したがって、POCの静弾性係数と空隙率の関係は、下に凸の傾向を示す対数関数および指数関数による表示できると考えられる。以下の条件において、その対数関数および指数関数の式(3.2.8)および式(3.2.8)をコンクリート（V_R = 0%）の細孔率および細孔による補正弾性係数などパラメータを用いて表示した。

条件：空隙率が0の時に静弾性係数が最大となり、ペーストがなくなる時に静弾性係数が0となる。

$$V_R = 0, \quad E_{POC-S} = B$$

$$V_R = 100 - V_a, \quad E_{POC-S} = 0$$

① 対数関数：

$$E_{POC-S} = \log_a(V_R + \alpha) + A \quad (3.2.8)$$

$$\alpha > P_C + Q_G \frac{V_a}{100}$$

$$a = \left(\frac{\alpha}{100 - V_a + \alpha} \right)^{\frac{1}{B}}$$

$$A = -\log_a(100 - V_a + \alpha)$$

② 指数関数：

$$E_{POC-S} = Ae^{-aV_R} - \beta \quad (3.2.9)$$

$$\beta = \frac{B}{100 - V_a} \alpha$$

$$A = B + \beta$$

$$a = \ln \left(\frac{A}{\alpha(100 - V_a)} \right)$$

ここに、 E_{POC-S} : POC の静弾性係数 (kN/mm²)、 V_a : 骨材の容積率 (%), V_R : 空隙率 (%), B : POC の空隙率が 0 時の弾性係数 (kN/mm²)、 P_C : コンクリート ($V_R = 0$ %) の空気量 (%), Q_G : 骨材 ($V_R = 0$ %) の吸水率 (%), α : コンクリート ($V_R = 0$ %) の細孔率 (%), β : 細孔による補正弾性係数 (kN/mm²), A, a : 係数

コンクリートは、セメントおよび骨材の中、また骨材とセメントの付着層の遷移帯に細孔があり、十数%の空隙を含む多孔体である³⁻⁶⁾。この内、セメントおよび骨材の中を含む細孔率はだまかに計算できる。セメントの中の細孔率およびコンクリートの空気量は、約 5%程度である。岩石の中の細孔率は、その吸水率の 3.5%から計算すれば、コンクリートの約 2%程度である。したがって、式中の α は、7%以上になることが分かる。図-3.2.5 には、 α を 7%とし、その時の β を 8.35 kN/mm²とした時の結果を示す。実験値より少し小さい値となっている。これは、実際には細孔率 (α , %) が入力値より大きいと考えられる。なお、計算には表-3.2.2 のデータを用いた。

表-3.2.2 コンクリート ($V_R = 0$ %) の材料の特性

弾性係数 (kN/mm ²)	細孔率 (α , %)	補正弾性係数 (β , kN/mm ²)	骨材の容積率 (V_a , %)
51.8	7%	8.65	58.1

図-3.2.9 に、コンクリート ($V_R = 0$ %) の細孔率および補正弾性係数が POC の静弾性係数の計算値に与える影響を対数関数および指数関数に分けて示す。図によれば、対数関数および指数関数にかかわらず、細孔率および補正弾性係数が小さく設定した場合は、POC の静弾性係数と空隙率の関係が下の方にシフトし、細孔率を大きく設定した場合は、上にシフトする傾向がある。したがって、細孔率および補正弾性係数を適切に設定すれば、POC の静弾性係数を予測可能であると考えている。

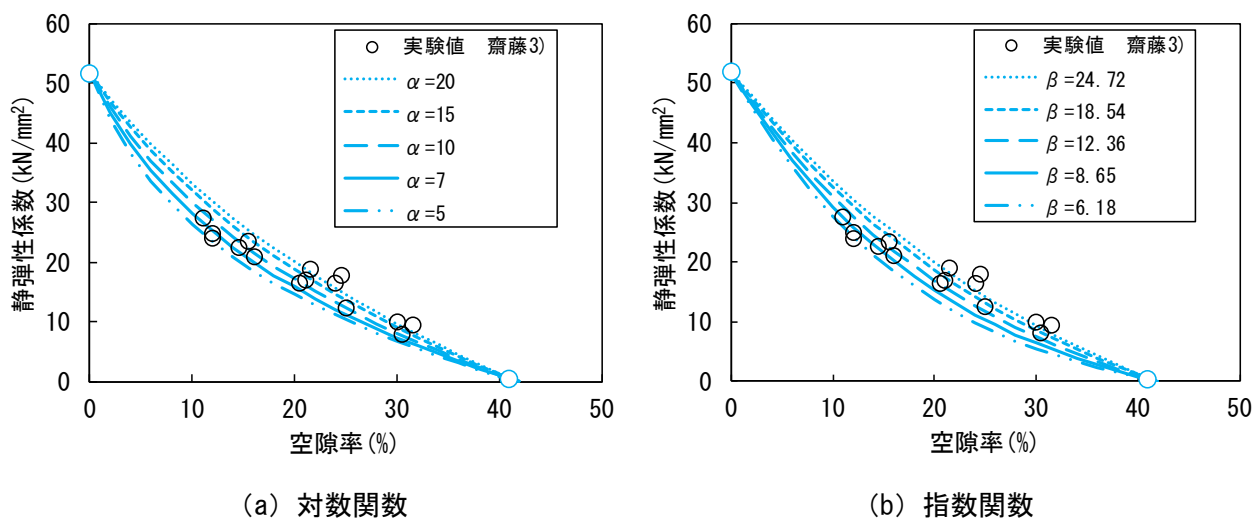


図-3.2.9 細孔率が POC の弾性係数の計算値に与える影響

3.3 検討Ⅲ-Ⅱ ポーラスコンクリートの圧縮強度と空隙率の関係

3.3.1 普通コンクリートの静弾性係数と圧縮強度の関係

普通コンクリートの静弾性係数と圧縮強度の関係においては、表-3.3.1 に示す各関係式が提案されている。これらの内、日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説」の関係式を用いれば、POCの静弾性係数を実測値と比べ10%程度大きいのが、比較的高い精度（相関係数 $r=0.94$ ）で推定可能であることが報告されている³⁻⁷⁾。また、本章の3.2節の結果からは、POCの静弾性係数と空隙率の関係はほぼ線形になった。したがって、これら関係から、POCの圧縮強度と空隙率の関係を導出することが可能であり、本節では、POCの圧縮強度と空隙率を理論的に導出する。

表-3.3.1 普通コンクリートの静弾性係数と圧縮強度の各関係式³⁻⁷⁾

Estimation Formula	Numerical Formula
AIJ-New RC Formula	$E = k_1 \times k_2 \times 3.35 \times 10^4 \times (\gamma / 2.4)^2 \times (f_c / 60)^{(1/3)}$
AIJ-1991 Formula	$E = 21000 \times (\gamma / 2.3)^{1.5} \times \sqrt{f_c / 20}$
ACI-363 Formula	$E = (40000 \times f_c^{0.5} + 1000000) \times (\gamma / 2.346)^{1.5}$
CEB-FIP Formula	$E = \alpha \times 21500 \times (\sigma_{28} / 10)^{(1/3)}$

ここに、 E ：静弾性係数 (MPa)， k_1 ：硬質砂岩：1.0，石灰岩：1.2， k_2 ：混和材を使用しない場合：1.0， α ：硬質砂岩：1.0，石灰岩：1.2， γ ：単位容積質量 (t/m^3)， f_c ：圧縮強度 (MPa)， σ_{28} ：28d 圧縮強度 (MPa)

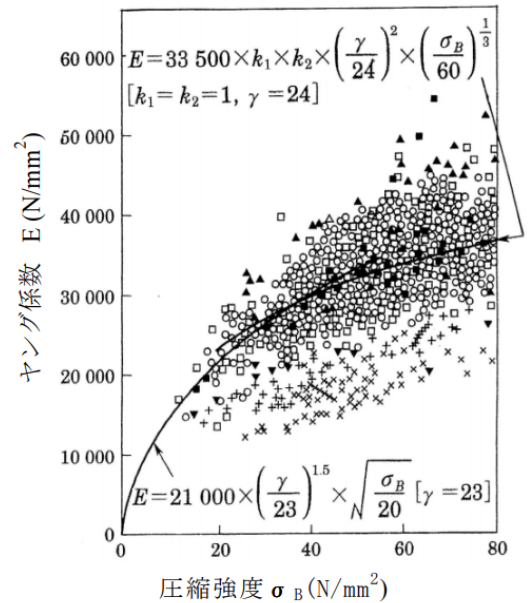


図-3.3.1 静弾性係数（ヤング係数）と圧縮強度の関係³⁻⁸⁾

3.3.2 POCの圧縮強度と空隙率の関係式

図-3.3.1には、上記による静弾性係数と圧縮強度の関係³⁻⁸⁾を示す。同図には、低強度および高強度領域の静弾性係数と圧縮強度の関係式もそれぞれ示す。POCは、圧縮強度が $30N/mm^2$ より低いものであるため、図中の低強度領域の関係式を適用する。その関係式を本論文の単位に換算して式(3.3.1)に示し、式(3.3.1)を圧縮強度の式に変換し、POCの圧縮強度と静弾性係数の関係式として式(3.3.2)に示す。

$$E = 21 \left(\frac{\gamma}{2.3} \right)^{1.5} \sqrt{\frac{F_C}{20}} \quad (3.3.1)$$

ここに、 E ：弾性係数 (kN/mm^2)， γ ：気乾単位質量 (g/cm^3)， F_C ：圧縮強度 (N/mm^2)

$$F_{POC} = \left(4.47 \frac{E_{POC-S}}{21 \left(\frac{\gamma}{23} \right)^{1.5}} \right)^2 = 0.045 \left(\frac{E_{POC-S}}{\left(\frac{\gamma}{23} \right)^{1.5}} \right)^2 \quad (3.3.2)$$

$$E_{POC-S} = Ae^{-aV_R} - \beta$$

$$\beta = \frac{B}{100 - V_a} \alpha$$

$$A = B + \beta$$

$$a = \ln \left(\frac{A}{\alpha(100 - V_a)} \right)$$

$$B = \frac{100E_C E_G}{E_C(100 - V_a) + E_C V_a}$$

$$\gamma = g \rho_{POC}$$

$$\rho_{POC} = -\frac{\rho_C}{100} V_R + \frac{(100 - V_a)\rho_C + V_a\rho_g}{100}$$

ここに、 F_{POC-C} : POC の圧縮強度 (N/mm²)、 E_{POC-S} : POC の静弾性係数 (kN/mm²)、 γ : 気乾単位容積重量 (kN/m³)、 α : コンクリート ($V_R = 0\%$) の細孔率 (%)、 β : 細孔による補正弾性係数 (kN/mm²)、 A 、 a : 係数、 V_a : 骨材の容積率 (%)、 V_R : 空隙率 (%)、 B : POC の空隙率が 0 時の弾性係数 (kN/mm²)、 ρ_{POC} 、 ρ_C 、 ρ_g : POC、ペースト、骨材の密度 (g/cm³)、 g : 重力加速度 (N/kg)、ここで 10 (N/kg) とした。

3.3.3 POC の圧縮強度と空隙率関係の計算結果

図-3.3.2 に、POC の圧縮強度と空隙率の関係を示す。同図には、上記で導出された関係式(3.3.2)による計算結果と共に、実験結果も示している。同図によれば、式(3.3.2)による圧縮強度の空隙率の関係は、下に凸の曲線関係を示し、これは全国共通実験³⁻⁹⁾(JCI 報告書)によりまとめられた指数関数の関係式とほぼ同様であることがわかる。また、各既往研究^{3-10)~3-15)}の実験結果とも一致しているともいえる。なお、計算に用いた材料の特性は、表-3.3.2 に示す。

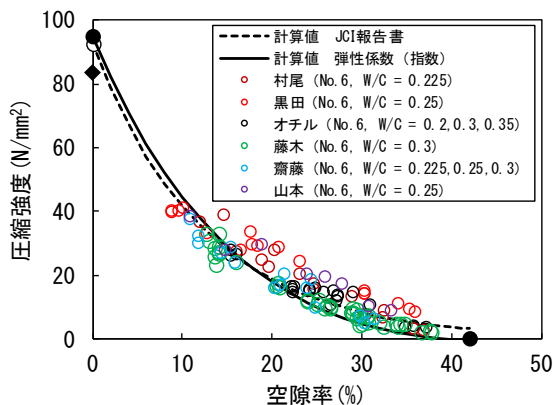


表-3.3.2 材料の特性

	密度 (g/cm ³)	弾性係数 (kN/mm ²)	実積率 (V_a , %)
骨材	2.73	71.46	58.1
ペースト	2.16	37.50	—
空隙	0	0	—

図-3.3.2 POC の圧縮強度と空隙率の関係

3.4 検討Ⅲ-Ⅲ 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

3.4.1 POC の超音波伝播速度と空隙率の関係式

弾性理論によれば、POC の超音波伝播速度の計算式は、式(3.4.1)により表示できる。式(3.4.1)によれば、超音波伝播速度と空隙率の関係は、ほぼ二次関数となることが分かる。

$$v_{POC} = \sqrt{\frac{E_{POC-d}}{\rho_{POC}} \frac{(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \times 1000 \quad (3.4.1)$$

$$E_{POC-d} = -\frac{B}{100-V_a} V_R + B$$

$$B = \frac{100E_cE_G}{E_c(100-V_a)+E_cV_a}$$

$$\rho_{POC} = -\frac{\rho_c}{100} V_R + \frac{(100-V_a)\rho_c+V_a\rho_g}{100}$$

ここに、 v_{POC} : POC の超音波伝播速度 (m/s), E_{POC-d} : POC の静弾性係数 (kN/mm²), $\rho_{POC}, \rho_c, \rho_g$: POC, ペースト, 骨材の密度 (g/cm³), μ はポアソン比, ここでは 0.2 とした。 V_a : 骨材容積率 (%), V_R : 空隙率 (%), B : POC の空隙率が 0 時の弾性係数 (kN/mm²)

3.4.2 POC の超音波伝播速度と空隙率の関係の計算結果および実験結果の比較

図-3.4.1 に、POC の超音波伝播速度と空隙率の関係を示す。なお、同図に、本論文の第 5 章の**実験 V-Ⅲ**の結果と式(3.4.1)による計算結果の比較を示す。図によれば、超音波伝播速度の実験値は、空隙率が小さくなるほど小さくなり、超音波伝播速度-空隙率関係は、ほぼ計算結果による二次関数に合致することが確認された。また、既往研究^{3-16)~3-20)}による実験結果は、**実験 V-Ⅲ**の結果および計算結果より大きくなっており、この原因として、骨材およびセメントペーストの弾性係数、試験体の長さなどの影響が考えられる。詳細な説明は、**付録 1**を参考されたい。ここで、図の x 切片は、ペーストがなくなるときの空隙率であり、この点では、超音波伝播速度が 0 になる。これは、POC 中の骨材の量が実積率まで入っておらず (通常、実積率の 0.98 程度)、ペーストがなくなると、骨材と骨材の間に空気層ができるという仮想状態が考えられる。したがって、この仮想状態においては、固体部分に伝わる

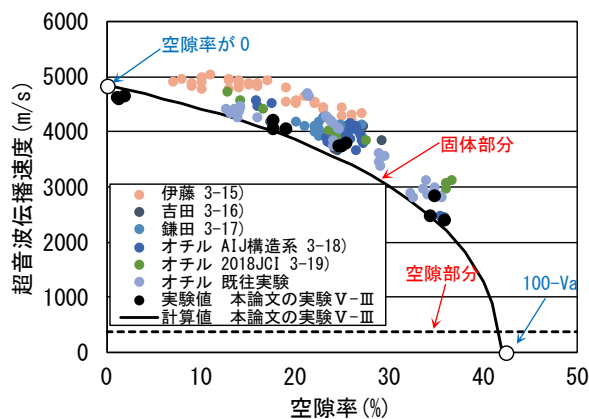


図-3.4.1 POC の超音波伝播速度と空隙率の関係

超音波が、以下(3.4.3節)に記述する波の透過率の問題で、ほぼ伝播できなくなるため、伝播速度が0となる。一方、空隙の部分に伝わる伝播速度は、370m/s程度の一定値であり、POCの弾性挙動の性質は、ほぼ影響を受けないため、本論文では固体部分を伝播する波に注目して検討を行う。

3.4.3 POC内の超音波の透過および反射

弾性波が物質内を伝播する時に、図-3.4.2に示すように、各媒質間の境界面では、透過および反射が生じる³⁻²¹⁾。超音波がPOC内を伝播する時の、セメントペーストおよび空気から骨材に伝播する粒子速度の透過率(T_{vC} および T_{vV})は、それぞれ式(3.3.2)および式(3.3.3)により計算できる。式によれば、ペーストから骨材には、超音波が伝播するが、空気から骨材にはほぼ伝播しないことが分かる。

本節の計算に用いた材料の特性は、表-3.4.1に示す

$$T_{vC} = \frac{2Z_C}{Z_C + Z_G} = 0.78 = 78\% \quad (3.4.2)$$

$$T_{vV} = \frac{2Z_V}{Z_V + Z_G} = 0.62 \times 10^{-5} = 0.00062\% \quad (3.4.3)$$

ここに、 T_{vC} ：超音波がペーストから骨材に伝播する透過率(%), T_{vV} ：超音波が空気から骨材に伝播する透過率(%), Z_V, Z_C, Z_G ：空気, ペースト, 骨材の固有音響インピーダンス ($\text{kg/m}^2\text{s}$)

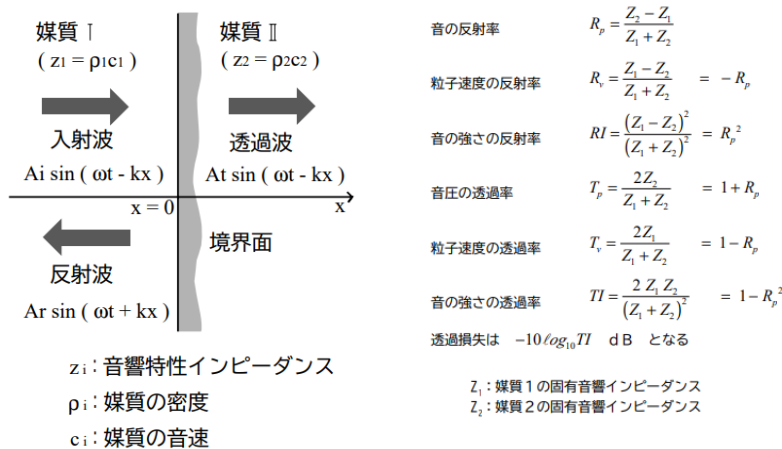


図-3.4.2 音波の透過率の計算³⁻²⁰⁾

表-3.4.1 材料の特性

	弾性係数 (kN/mm ²)	実積率 (Va,%)	音速 (m/s)	密度 (kg/m ³)	インピーダンス Z,(kg/m ² s)
骨材	71.46	58.1	5420	2.7×10^3	1.46×10^7
ペースト	37.50	—	4387	2.16×10^3	9.48×10^6
空気*	3.29×10^{-3}	—	372	1.21	450.12

注：* 気圧 1010 hPa, 気温 18.2°C

3.5 検討Ⅲ-Ⅳ ポーラスコンクリートの固有振動数と空隙率の関係

振動・波動論によれば、弾性体が振動する時に、その固有振動数と波の伝播速度の間には、式(3.5.1)に示す関係がある。したがって、前節に記述したPOCの超音波伝播速度と空隙率の関係と同様に、その固有振動と空隙率の間にも関係があると予想でき、本節ではその関係に関する検討を行う。しかし、式に示す K は、部材の振動モードおよび境界条件によって変わるため、以下には、振動モードが圧縮・引張および曲げ・せん断の状態において検討を行う。

$$f_n = K_n \sqrt{\frac{E}{\rho}} \times 1000 \quad (3.5.1)$$

ここに、 f_n ：固有振動数 (Hz)， n ：振動系の次数， K_n ：振動モードおよび境界条件による係数， E ：弾性係数 (kN/mm²)， ρ ：密度 (g/cm³)

3.5.1 圧縮・引張振動

(1) 棒の縦振動による固有振動数

断面が小さく十分長いまっすぐな棒の縦振動数は、式(3.5.2)のように表示できる。ここでは、POCの棒部材が圧縮・引張振動の場合の固有振動数と超音波伝播速度の関係について示す。

同式の λ_{n-T} は、両端の拘束状況および振動モードによって決まる定数である。表-3.5.1に、その値を示す。

$$f_{n(POC-T)} = \frac{\lambda_{n-T}}{2\pi L} \sqrt{\frac{E_{POC-d}}{\rho_{POC}}} \times 1000 \quad (3.5.2)$$

ここに、 $f_{n(POC-T)}$ ：POCの圧縮・引張振動による固有振動数 (Hz)， n ：振動系の次数， λ_{n-T} ：両端の拘束状況および振動モードによって決まる定数， E_{POC-d} ：POCの動弾性係数 (kN/mm²)， ρ_{POC} ：POCの密度 (g/cm³)

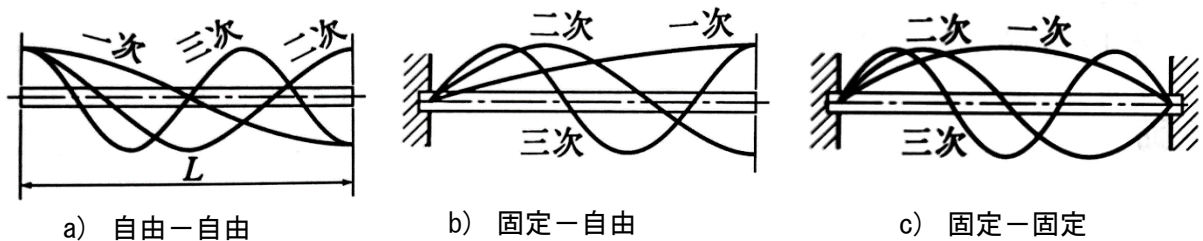


図-3.5.1 棒の縦振動の振動モード形³⁻²²⁾

表-3.5.1 棒の縦振動にける λ_{n-T} ³⁻²²⁾

両端の拘束状況	λ_{n-T}		
	λ_{1-T} (1次)	λ_{2-T} (2次)	λ_{3-T} (3次)
自由-自由	π	2π	3π
固定-自由	$\pi/2$	$3\pi/2$	$5\pi/2$
固定-固定	π	2π	3π

(2) POC 試験体の圧縮・引張振動による固有振動数と空隙率の関係

図-3.5.2 に、POC の圧縮・引張振動の場合の固有振動数と空隙率の関係を示す。図には、式(3.5.3) による計算結果と共に、本論文の第 6 章の実験に用いた試験体における圧縮・引張振動の実験結果も示す。図によれば、両端の拘束状況が [自由-自由] と比べ [固定-自由] の方が小さくなり、モードの次数が高くなるほど固有振動数が大きくなるのがわかる。また、同図には、実験結果は、両端の拘束状況が [固定-自由] の 1 次振動モードの計算結果と一致している。

$$f_{n(POC-T)} = \frac{\lambda_{n-T}}{2\pi L} \sqrt{\frac{E_{POC-d}}{\rho_{POC}}} \times 1000 \quad (3.5.3)$$

$$E_{POC-d} = -\frac{B}{100-V_a} V_R + B$$

$$B = \frac{100E_C E_G}{E_G(100-V_a) + E_C V_a}$$

$$\rho_{POC} = -\frac{\rho_C}{100} V_R + \frac{(100-V_a)\rho_C + V_a\rho_g}{100}$$

ここに、 $f_{n(POC-T)}$: POC の圧縮・引張振動による固有振動数 (Hz)、 n : 振動系の次数、 λ_{n-T} : 両端の拘束状況および振動モードによって決まる定数、 L : 試験体の長さ (m)、 E_{POC-d} : POC の動弾性係数 (kN/mm²)、 ρ_{POC} : POC の密度 (g/cm³)

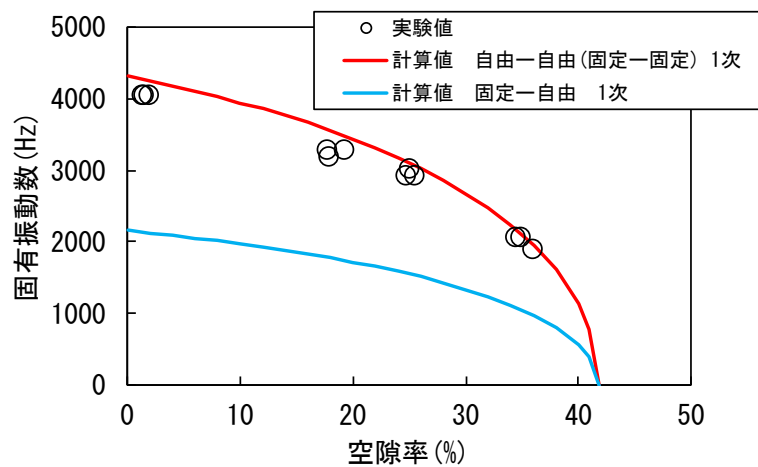


図-3.5.2 POC の固有振動数と空隙率の関係 (圧縮・引張振動)

3.5.2 曲げ・せん断振動

(1) はりの曲げ振動による固有振動数

曲げ・せん断振動では、部材が振動する時の変形と振動の方向が一致しない。式(3.5.4)に、POCの棒部材が曲げ・せん断振動の場合の固有振動数と超音波伝播速度の関係を示す。また、図-3.5.3にはりの曲げ振動の振動モード形を示し、両端の各拘束状況および振動モードにおける λ_{n-M} の値を表-3.5.1に示す。

$$f_{n-M} = \frac{\lambda_{n-M}}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{IE}{A\rho}} \times 1000 \quad (3.5.4)$$

ここに、 f_{n-M} ：曲げ・せん断振動による固有振動数 (Hz)， n ：振動系の次数， λ_{n-M} ：両端の拘束状況および振動モードによって決まる定数， L ：試験体の長さ (m)， I ：試験体の断面2次モーメント (m^4)， A ：試験体の長さの直方向の面積 (m^2)， E ：弾性係数 (kN/mm^2)， ρ ：密度 (g/cm^3)

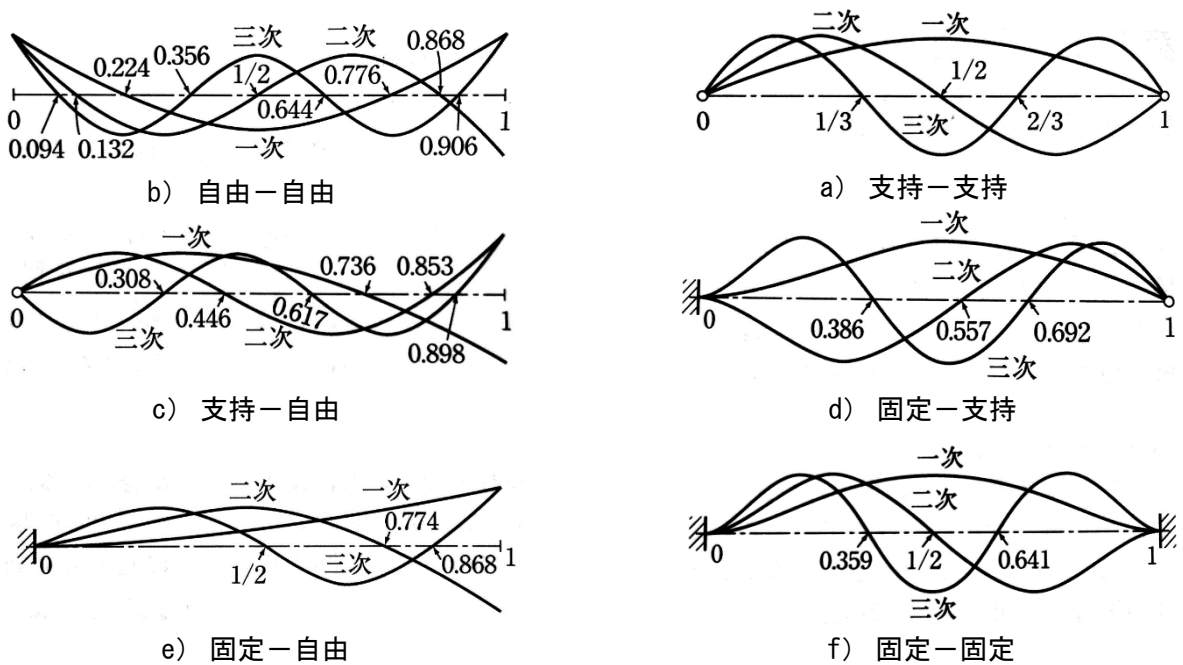


図-3.5.3 はりの曲げ振動の振動モード形³⁻²²⁾

表-3.5.1 はりの曲げ振動による λ_{n-M} ³⁻²²⁾

両端の拘束状況	λ_{n-M}		
	λ_{1-M} (1次)	λ_{2-M} (2次)	λ_{3-M} (3次)
自由-自由	4.730	7.853	10.996
支持-自由	3.927	7.069	10.210
固定-自由	1.875	4.694	7.855
支持-支持	π	2π	3π
固定-支持	3.927	7.069	10.210
固定-固定	4.730	7.853	10.996

(2) POC の曲げ・せん断振動による固有振動数と空隙率の関係

図-3.5.4 に、POC の曲げ・せん断振動による固有振動数と空隙率の関係を示す。同図には、表-3.5.1 に示す各境界条件における計算結果と共に、本論文の第 6 章の実験による曲げ・せん断振動の実験結果も示す。図によれば、上述圧縮・引張振動の場合と同様に、曲げ・せん断振動の場合でも、振動モードが高いほど固有振動数が大きくなり、実験結果は両端の拘束状況が [自由-自由] の 1 次振動モードの計算結果と一致している。

$$f_{n(POC-M)} = K_{n-M} \sqrt{\frac{E_{POC-d}}{\rho_{POC}}} \times 1000 \quad (3.5.5)$$

$$K_{n-M} = \frac{\lambda_{n-M}}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{I}{A}} \sqrt{\frac{I}{T}}$$

$$E_{POC-d} = -\frac{B}{100-V_a} V_R + B$$

$$B = \frac{100E_C E_G}{E_G(100-V_a) + E_C V_a}$$

$$\rho_{POC} = -\frac{\rho_C}{100} V_R + \frac{(100-V_a)\rho_C + V_a\rho_g}{100}$$

ここに、 $f_{n(POC-M)}$: POC の曲げ・せん断振動による固有振動数 (Hz)、 n : 振動系の次数、 K_{n-M} : 試験体の寸法、振動モードおよび境界条件による係数、 λ_{n-M} : 両端の拘束状況および振動モードによって決まる定数、 L : 試験体の長さ (m)、 I : 試験体の断面 2 次モーメント (m⁴)、 A : 試験体の長さの直方向の面積 (m²)、 E : 弾性係数 (kN/mm²)、 ρ : 密度 (g/cm³)、 T : せん断変形および回転慣性の影響による固有振動数の修正係数、計算方法は JIS A 1127 に参考されたい。本論文の第 6 章の実験では 1.49 とした。

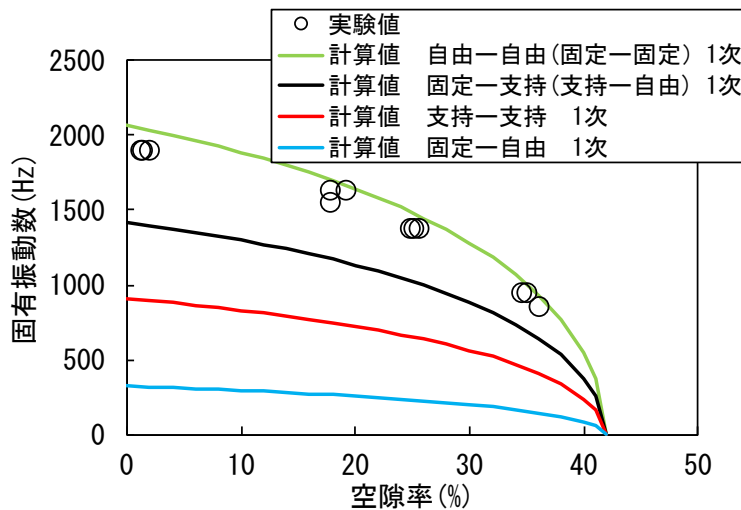


図-3.5.4 POC の固有振動数と空隙率の関係 (曲げ・せん断振動)

3.6 まとめ

本章では、本論文の実験に関わる理論的な裏付けとして、弾性理論に基づき POC の弾性挙動に関する理論的検討を行った。各検討により得られた知見を以下に示す。

- 1) POCの動弾性係数－空隙率関係は、x切片に骨材の体積率を用いた線形式により表示できた。また、骨材、ペーストおよび空隙の三要素を直並列に組み合わせた簡単なモデルによる動弾性係数と空隙率の関係式を用い、POCの動弾性係数を推定可能であることが分かった。
- 2) POCの静弾性係数－空隙率関係、および圧縮強度－空隙率関係は、x切片に骨材の体積率を用いた指数関数または対数関数により概ね表示できることが確認された。
- 3) POCの超音波伝播速度－空隙率関係、および固有振動数－空隙率関係は、弾性振動波動論によるほぼ2次の関数で表示できることが確認された。

【第3章の参考文献】

- 3-1) 川上英男：コンクリートの弾性係数と近似複合理論，コンクリート工学年次論文報告集， Vol.17, No.1, pp.497-500, 1995
- 3-2) 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
- 3-3) 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
- 3-4) 尼崎省二：コンクリートの弾性係数と弾性波速度の関係，コンクリート工学年次論文集， Vol.29, No.2, pp.631-636, 2007
- 3-5) 谷川恭雄他：やさしい構造材料実験，森北出版株式会社， p.110, 2010
- 3-6) 羽原俊祐，沢木大介：硬化コンクリートの空隙構造とその物性，Gypsum & Lime, No. 240, pp.28-37, 1992
- 3-7) 武田昌也，齋藤俊克：普通コンクリートの各種弾性係数推定式のポーラスコンクリートへの適用，コンクリート工学年次論文集， Vol.41, No.1, pp.1445-1450, 2019
- 3-8) 川上英男：コンクリートの弾性係数と圧縮強度の関係についての一考察，コンクリート工学年次論文報告集， Vol.28, No.1, pp.449-454, 2006
- 3-9) 性能設計対応型 POC 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， pp.186-190, 2015.7
- 3-10) 村尾健，ポーラスコンクリートの強度－空隙率関係に関する実験的研究，三重大学工学研究科修士論文， pp.25-44, 2003
- 3-11) 黒田萌，再生骨材を用いたポーラスコンクリートの圧縮強度－空隙率関係とそのモデル化に関する研究，三重大学工学研究科修士論文， pp.36-45, 2006
- 3-12) 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圧縮強度と曲げ強度の関係に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集， Vol.37, No.1, pp.1345-1350, 2015
- 3-13) 藤木諒将，ポーラスコンクリートの曲げ強度と圧縮強度の関係及び骨材の影響に関する実験的研究，三重大学工学研究科卒業論文， pp.18-38, 2015
- 3-14) 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
- 3-15) 山本貴正，畑中重光，三島直生，小池狭千朗，湯浅 幸久：ポーラスコンクリートの圧縮強度特性の確率変動に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集， No.601, pp.9-14, 2006
- 3-16) 伊藤果穂，ポーラスコンクリートにおける超音波伝播特性，三重大学生物資源学部卒業論文， pp.51-56, 2014
- 3-17) 吉田知弘，音野琢也，北野嘉乙，国枝稔，鎌田敏郎，六郷恵哲，超音波によるポーラスコンクリートの空隙評価に関する基本的検討，土木学会第 59 回年次学術講演会， pp.339-340, 2004.9
- 3-18) 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
- 3-19) 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

- 3-20) 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, 2018.8
- 3-21) <http://tsujino-www.ee.kanagawa-u.ac.jp/~TSUJINO/print/soundref.pdf>
- 3-22) 機会工学便覧, 基礎編 α 2, 機械力学, 日本機械学会, pp.101-102

第4章 ポーラスコンクリートの品質管理に関する 共通実験

第4章 ポーラスコンクリートの品質管理に関する共通実験

4.1 背景と目的

普通コンクリートと異なり、POCは施工時の締固めの程度により空隙率が変化し、これに準じて品質が大きく変動する。そのため、品質評価には、現場施工されたPOCから採取されたコア試験体を用いることが最も望ましいといえるが、簡便性の点で問題がある。また、文献⁴⁻¹⁾には、POCの強度管理方法試案として、型枠試験体によって強度と空隙率の関係式を求め、現場で実測した空隙率、または設計時点での目標空隙率および締固め度により推定した空隙率を代入して現場のPOCの強度を推定する方法が提案されている。また、POCの圧縮強度と曲げ強度の関係に関する研究はいくつか報告されており、曲げ強度の圧縮強度に対する割合は概ね1/5～1/4であるとする記述⁴⁻²⁾や、透水性舗装コンクリートの曲げ強度と圧縮強度の関係に対してプレキャストコンクリートの関係式が適用できるとの報告⁴⁻³⁾もある。

本章では、実験IV-Iにおいて、空隙率、水セメント比および粗骨材の粒径を変化させたPOCの圧縮および曲げ強度試験を行い、その実験結果から、圧縮強度による曲げ強度の推定の可能性に関する実験的な検討を行う。また、実験IV-IIにおいては、歩道および建物外構を想定したPOC舗装を、実際の施工方法に準じて施工し、そこから得られたコア試験体（円柱体）および切出し試験体（角柱体）と、型枠試験体（円柱体および角柱体）による強度および空隙率の比較を行い、現場施工されたPOCの空隙率に着目した現実的な品質管理手法に関して検討する。

4.2 実験Ⅳ-I ポーラスコンクリート試験体の圧縮強度と曲げ強度の関係に関する実験

4.2.1 実験方法

(1) 実験の要因と水準

表-4.2.1 に、本実験の要因と水準を示す。本実験では、POC の特性に大きく影響すると考えられる、空隙率、水セメント比および粗骨材粒径を要因とし、POC の幅広い調合に対して、強度特性を評価するために取り上げた。

表-4.2.1 実験の要因と水準

要因	水準
設計空隙率(%)	15, <u>25</u> , 35
水セメント比	0.25, <u>0.30</u> , 0.35
粗骨材種類	5号砕石、 <u>6号砕石</u> 、7号砕石

[注] : 基本水準を示す

(2) 使用材料および調合

表-4.2.2 に、POC の使用材料を示す。粗骨材には、粒径の異なる3種類の単粒度砕石を用いた。また、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 減水剤および増粘剤を用いた。

表-4.2.2 POC 使用材料

使用材料	種類	密度 (g/cm ³)	実積率 (%)
セメント	普通ポルトランドセメント	3.16	—
水	上水道水	1.00	—
粗骨材	南伊勢町産 硬質砂岩 砕石	5号砕石 (13~20mm)	58.6
		6号砕石 (5~13mm)	58.1
		7号砕石 (2.5~5mm)	55.3
混和剤	ポリカルボン酸系 高性能 AE 減水剤	1.03~1.13	—
	ゼルローズ系増粘剤	—	—

表-4.2.3 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±10mm 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-4.2.1 に、フロー試験結果の例を示す。また、同表中には、試験体底部のセメント垂れの程度を示す。垂れが大きかったのは6号砕石の W/C が 0.3 で空隙率が 25%の試験体と、6号砕石の W/C が 0.35 で空隙率が 25%の試験体である。

締固め時に行ったジャギング(後述)により、垂れが発生したと考えられる。写真-4.2.2に、試験体の底部のセメントペーストの垂れの状況の例を示す。

表-4.2.3 POCの調合表及びペーストフロー値

粗骨材種類	W/C	設計 V_R (%)	単位量(kg/m ³)			SCA/C (%)	HAE/C (%)	FL(mm)		ペーストの垂れ
			W	C	G			目標	実測	
5号	0.3	25	79.8	266.1	1557	0.02	—	150	156	中
6号	0.25	25	74.6	298.3	1554	—	0.4	190	185	小
	0.3	15	130.9	436.4	1554	0.075	—	150	149	中
		25	82.3	274.1	1554	—	—	190	186	大
		35	33.6	111.9	1554	—	—	190	186	小
	0.35	25	88.8	253.6	1554	0.02	—	200	196	大
7号	0.3	25	95.9	319.6	1469	—	0.1	210	203	小

[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, FL: ペーストフロー値, *: 大は試験体底部面積の70%以上, 中は試験体底部面積の40%~70%, 小は試験体底部面積の40%以下



(a) 目標 FL=150
(6号, W/C=0.30, 設計 V_R =15%)



(b) 目標 FL=190
(6号, W/C=0.30, 設計 V_R =25%)



(c) 目標 FL=210
(7号, W/C=0.30, 設計 V_R =25%)

写真-4.2.1 セメントペーストのフロー試験結果の例

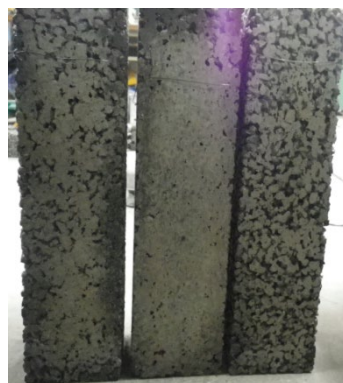


写真-4.2.2 試験体の底部の垂れの状況の例

(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船に排出し、3 本の角柱鋼製型枠 (100×100×400mm) と 3 本のプラスチック製円柱型枠 (φ100×200mm) に打ち込んだ。

型枠への打ち込み際には、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、調査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。ここで、予備試験の結果から、6 号砕石および 5 号砕石を用いた POC では、型枠面の壁効果により設計空隙率まで充填するのが困難であったため、型枠に対する充填質量締固め率を計算値の 97%として打ち込んだ。

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、ジギ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。

打ち込み後は、型枠上面にビニルシートをかけて乾燥を防ぎ、材齢 5 日目に脱型した後に、材齢 28 日まで 20℃の水中養生を行った。ただし、材齢 1 週には、空隙率の測定を 2 日間行い、また材齢 18 日にはキャッピングを行ったため、その間は養生水槽から試験体を出している。

POC 試験体とは別に、POC で用いたものと同じ調合のセメントペースト試験体も作製した。練混ぜには容量 2L のモルタルミキサを用い、3 種類の水セメント比(0.25, 0.30, 0.35)でそれぞれ 3 本の円柱試験体 (φ50×100mm) と 3 本の角柱試験体 (40×40×160mm) を作製した。水セメント比 0.30 の調合では、混和剤は無添加とした。養生は材齢 28 日まで 20℃の水中養生とした。

(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) 44)に準拠して、質量法および容積法の二種類を行った。質量法からは全空隙率を、容積法からは全空隙率および連続空隙率を算出した。ここで、上記の空隙率試験方法 (案) 44)では、角柱試験体は対象としていないが、本実験では角柱試験体に対しても円柱試験体と全く同じ方法を適用している。空隙率の測定は、本実験で作製した全ての POC 試験体 (円柱試験体および角柱試験体の各 3 本ずつ) に対して行った。

2) 圧縮強度試験

POC の圧縮強度試験は、円柱試験体の上下端面に硫黄でキャッピングしたものを使用した。写真-4.2.3(a)に、キャッピングした POC 円柱試験体を示す。試験は、JISA 1108 (コンクリートの圧縮強度試験方法) に準拠して行い、試験材齢は 28 日とした。

POC とは別に、セメントペーストで作製した円柱試験体に対しても、材齢 28 日において圧縮強度試験を行った。試験体の端面は研磨して試験に供した。

3) 曲げ強度試験

POC の曲げ強度の測定は、JISA 1106 (コンクリートの曲げ強度試験方法) に準拠して、打ち込み時の試験体側面を載荷面とした 3 等分点載荷で行った。試験体の支点および載荷点の位置に止水セメントでキャッピングを施して試験を行った。試験材齢は 28 日とした。写真-4.2.3(b)に、試験体のキャッ

ピングの例を示す。

POC とは別に、セメントペーストで作製した角柱試験体に対しても、JIS R 5201（セメントの物理試験方法）に準拠して、材齢 28 日において曲げ強さの測定を行った。



(a) 硫黄で端面をキャッピングした円柱試験体



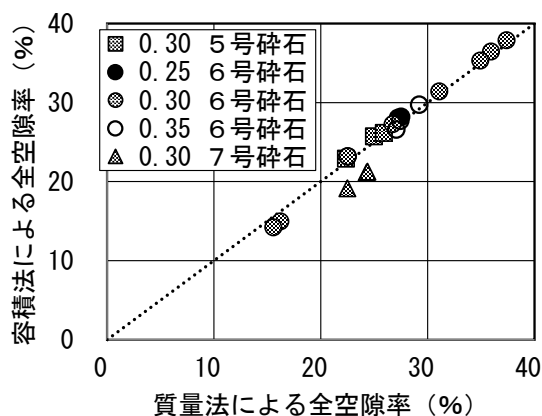
(b) 止水セメントで支点をキャッピングした角柱試験体

写真-4.2.3 キャッピングした試験体の

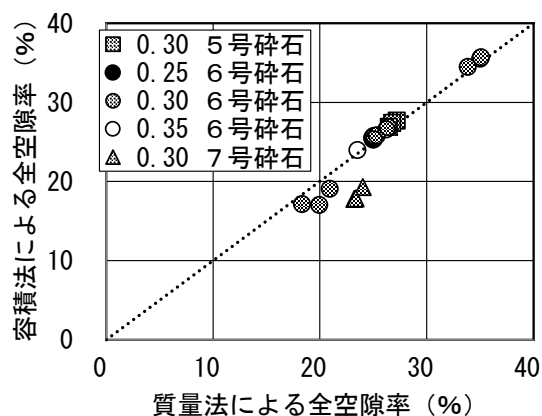
4.2.2 実験結果とその考察

(1) 空隙率試験結果

図-4.2.1 に、質量法と容積法で測定した全空隙率の比較を、円柱試験体と角柱試験体に分けて示す。同図によれば、円柱試験体および角柱試験体のいずれにおいても、7号碎石の空隙率 25%および6号碎石の空隙率 15%の場合に、容積法による測定値が質量法と比べて小さくなっている。これは、容積法の水中重量の測定時に、7号碎石などの細かい粒径の粗骨材を使用した場合や、空隙率が小さい場合には、試験体内部の気泡が抜けづらく、試験体内部に気泡が残ったままとなるために、水中重量が低く測定されたこと、また、空隙率が小さい場合にはこれに加えて、水を満たすタイプの容積法では測定できない外部から完全に独立した空隙が存在したことなどによる誤差と考えられる。



(a) 円柱試験体

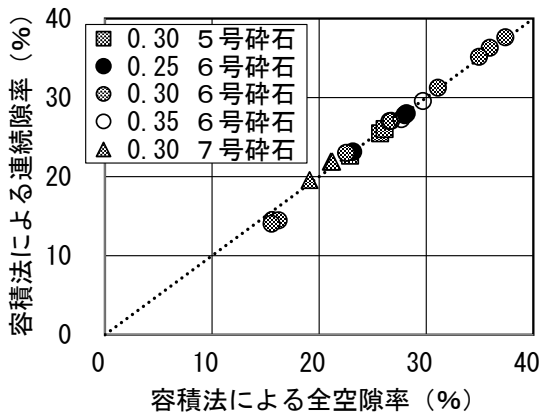


(b) 角柱試験体

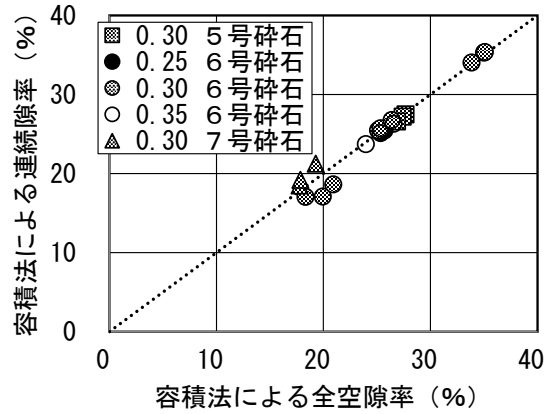
図-4.2.1 質量法と容積法による全空隙率の比較

図-4.2.2 に、容積法による全空隙率と連続空隙率の比較を示す。図によれば、6号碎石の空隙率 15%のみ、全空隙率に対して連続空隙率が小さくなる傾向が見られており、他の試験体は全空隙率と連続

空隙率がほぼ同じ値となった。



(a) 円柱試験体



(b) 角柱試験体

図-4.2.2 容積法による全空隙率と連続空隙率の比較

(2) 圧縮強度試験結果

1) セメントペースト

図-4.2.3 に、セメントペーストの圧縮強度と水セメント比の関係を示す。水セメント比 0.30 の試験体のうち 1 体で極端に低い圧縮強度となっているが、これは脱型の時点で端部に断面欠損が発生した試験体であるため、以後の考察からは除外して考える。その他の試験結果からは、水セメント比 0.30 と 0.35 の圧縮強度が逆転しており、また水セメント比 0.25 も含めても全体としてそれほど大きな圧縮強度の差は現れない結果となった。

2) POC

図-4.2.4 に、POC の圧縮強度と全空隙率の関係を示す。ここで、空隙率の値には質量法による結果を採用した。また、図中には、既報⁴⁻⁵⁾で提案した POC の圧縮強度と空隙率の関係式も併示した。空隙率 0%における圧縮強度は図-4.2.3 に示した実測結果の平均値とした。

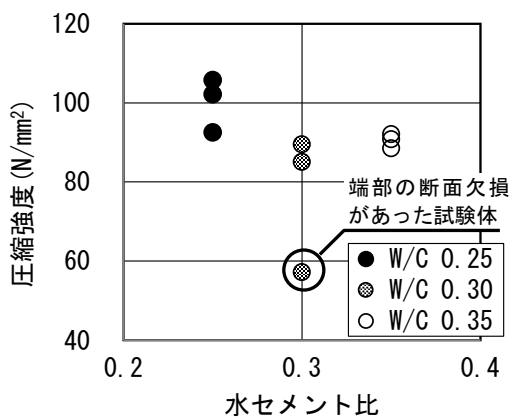


図-4.2.3 セメントペーストの圧縮強度と水セメント比の関係

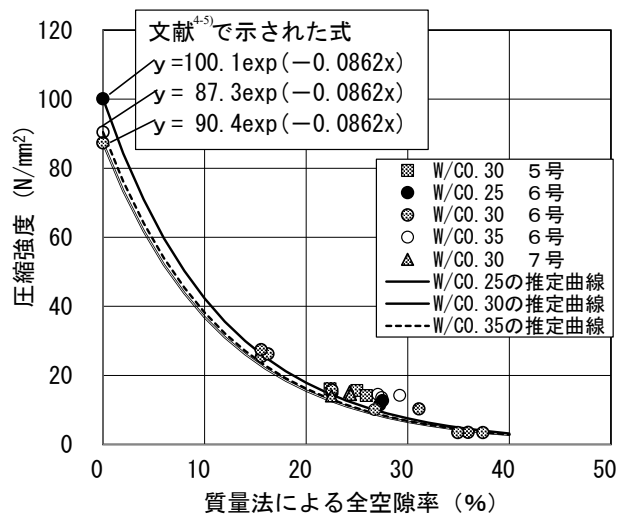


図-4.2.4 POC の圧縮強度と空隙率の関係

実験結果からは、POC の圧縮強度と空隙率の関係は、既報の提案式により概ね近似可能であるが、本実験では、空隙率 25~30%の範囲で、圧縮強度が大きくなる傾向が見られた。また、水セメント比の影響に関しては、セメントペーストの圧縮強度試験結果と同様に、POC の圧縮強度においても、水セメント比による圧縮強度の違いは明確には見られなかった。粗骨材粒径の影響についても、本実験結果からは明確な傾向は見られていない。

(3) 曲げ強度試験結果

1) セメントペースト

図-4.2.5 に、セメントペーストの曲げ強さと水セメント比の関係を示す。ばらつきはあるものの、圧縮強度と異なり、水セメント比が小さくなるほど曲げ強さが大きくなる傾向が得られた。

2) POC

図-4.2.6 に、POC の曲げ強度と全空隙率の関係を示す。ここで、空隙率の値には圧縮強度と同様に質量法による結果を採用した。また図中には、圧縮強度試験結果にならい、空隙率 0%における曲げ強度をセメントペーストの曲げ強さとして、指数関数で近似した曲線も示す。

実験結果からは、POC の曲げ強度と空隙率の関係も、ばらつきは大きいものの、指数関数により概ね近似可能であること⁴⁾がわかった。また、水セメント比および粗骨材粒径の影響についても、圧縮強度試験結果と同様に、本実験結果からは明確な傾向は見られていない。

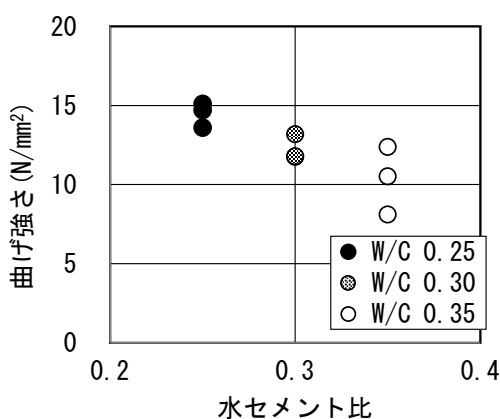


図-4.2.5 セメントペーストの曲げ強さと水セメント比の関係

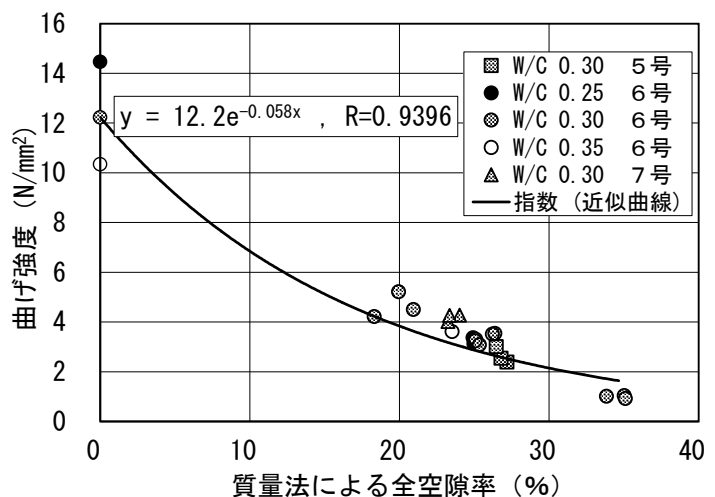


図-4.2.6 POC の曲げ強度と空隙率の関係

(4) 圧縮強度と曲げ強度の関係

1) POC

図-4.2.7 に、POC の曲げ強度と圧縮強度の関係を示す。ここで、実験結果は同一水準の 3 体の平均値で示す。また、各水準ごとに曲げ試験体と圧縮試験体の実測空隙率に差はあるが、ここではその影響は無視している。

図によれば、既往の研究⁴³⁾で提案されている式(4.2.1)でほぼ推定できている。また、同図中には、参考として線形で近似した直線も示すが、この結果からは、曲げ強度が圧縮強度の 1/4.7 となり、既往の研究⁴²⁾にある 1/5~1/4 の範囲にも入っている。

$$F_b = 0.563 F_c^{0.658}$$

(4.2.1)

ここに、 F_b : 曲げ強度(N/mm²), F_c : 圧縮強度(N/mm²)

また、同図中には、参考として線形で近似した直線も示すが、この結果からは、曲げ強度が圧縮強度の1/4.7となり、既往の研究⁴²⁾にある1/5~1/4の範囲にも入っている。

各種要因の影響に関しては、粗骨材粒径が大きいほど、同一圧縮強度レベルにおける曲げ強度が低下する傾向が見られる。これは本実験に使用した試験体が型枠に打ち込まれたものであり、粗骨材の粒径が大きいほど型枠面の壁効果による骨材の充填の不均一性が大きくなり、曲げ試験時の引張縁付近の空隙率が大きくなる、すなわち、断面欠損の影響によりこのような結果になったと考えられる。ただし、本実験では粗骨材粒径の影響に関するデータは不十分なため、今後の検討が必要と考えられる。

水セメント比の影響に関しては、本実験の範囲では、強度の差が大きくなかったこともあり、明確な影響は見られなかった。

2) セメントペースト

図-4.2.8に、セメントペーストの曲げ強さと圧縮強度の関係を示す。同図では、各水準の試験結果の3体の平均値を示す。同図中には、POCで得られた近似曲線も併示した。図によれば、セメントペーストの結果は累乗関数の延長上にあることが分かる。POCの強度範囲とセメントペーストの強度範囲に隔たりがあるため、詳細な検討は今後の課題としたい。

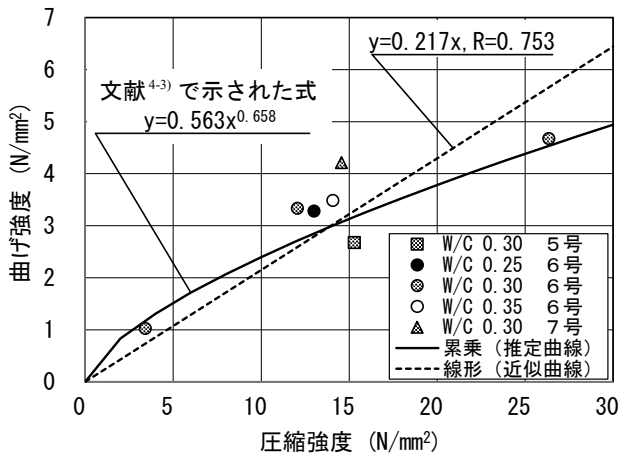


図-4.2.7 POCの曲げ強度と圧縮強度の関係

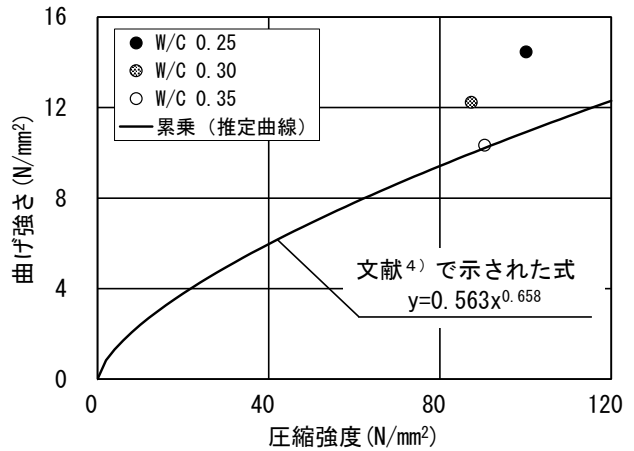


図-4.2.8 セメントペーストの曲げ強さと圧縮強度の関係

4.2.3 実験Ⅳ－Ⅰのまとめ

本研究から得られた知見を以下に示す。

- 1) POC の圧縮強度および曲げ強度と全空隙率の関係は、指数関数により近似することが可能であることを確認した。
- 2) POC の圧縮強度と曲げ強度の関係は、累乗関数または線形関数で近似することが可能である。
- 3) POC の圧縮強度と曲げ強度の関係には、型枠境界の壁効果の影響により、粗骨材粒径が大きくなるほど曲げ強度が低下する傾向が見られた。

以上の結果からは、POC の圧縮強度と曲げ強度の間にはある一定の関係があり、圧縮強度から曲げ強度を推定することは可能と思われるが、推定精度および影響要因に関してさらに検討を進める必要がある。

4.3 実験Ⅳ-Ⅱ 現場施工されたポーラスコンクリートスラブの品質評価に関する実験

4.3.1 実験方法

(1) 実験の要因と水準

表-4.3.1 に、実験の要因と水準を示す。POC の調合上の設計空隙率は 25% で一定とし、締固めの程度を変えることで実際の空隙率を変化させた。締固めは、コテ仕上げのみ、および写真-4.3.1 に示す仕上げ機（市販のタンパーの底板を拡幅したもの、底板 $0.55 \times 0.30 \text{ m}^2$ ）の通過回数（1 回，4 回）の 3 水準とした。

表-4.3.1 実験の要因と水準

要因	水準
W/C(%)	0.30, 0.45
POC の締固め程度	コテ仕上げのみ， 仕上げ機 1 回（締固め小）， 仕上げ機 4 回（締固め大）
路床	改良土，砕石，コンクリート

[注] __：基本水準を示す



重量：43.0 kg
 転圧板面積：
 $0.55 \times 0.30 \text{ m}^2$
 起振力：4.9 kN
 振動数：91.7 Hz

写真-4.3.1 本実験で使用した仕上げ機

セメントペーストの水セメント比 W/C は 0.30 および 0.45 の 2 水準とした。また、締固めの程度に影響を及ぼすと考えられる路床の条件を 3 水準に変化させた。路床のうち改良土とは、まさ土 1 m^3 に対して普通ポルトランドセメント 50kg を混合し、敷均しおよびタンパーでの締固めの後に散水して養生したものを用いた。砕石路床は地盤上に厚さ 100mm の 6 号砕石および 7 号砕石を混合したものを敷き均し、タンパーで締め固めた。コンクリート路床は、W/C=0.62，細骨材率 $s/a=46\%$ ，目標圧縮強度 $=24 \text{ N/mm}^2$ の普通コンクリートを 100mm 厚さで施工した。上部の POC 舗装（厚さ 100mm）の施工は、上記路床の施工の 1 週間後とした。表-4.3.2 および図-4.3.1 に、施工区画と要因・水準の組合せを、写真-4.3.2 に完成した路床の様子を示す。ここで、表-4.3.2 中の目標空隙率とは、締固め方法ごとに異なる空隙率を、文献⁴⁶⁾と文献⁴⁷⁾を参考に予測した概算値である。ここに、仕上げ機を 1 回と 4 回通過させた場合（No.2 から No.7）は、文献³⁾の実測値を参考にして予測した。コテ仕上げの場合（No.1）は、文献⁴⁷⁾の結果から、仕上げ機を 1 回通過した場合と同値になっているため、上記の仕上げ機を 1 回通過した場合と同値と予測した。ただし、本実験の目標空隙率は、締固め前の初期空隙率のバラツキを無視して予測されている。

(2) 使用材料および調合

POC の使用材料として、セメントには普通ポルトランドセメントを、粗骨材には硬質砂岩の砕石 6 号（表乾密度： 2.65 g/cm^3 ，吸水率：1.29%，実積率：58.2%）を用いた。細骨材は使用していない。粗骨材の吸水方法に関しては、24 時間以上吸水させた粗骨材を練混ぜ直前に表面乾燥状態まで乾燥させた。表-4.3.3 に、POC の調合表を示す。ここで、表中の設計空隙率とは、POC 中の粗骨材が実積率相当まで充填された場合の空隙率を指す。

表-4.3.2 施工区画と要因・水準の組合せ

No.	目標空隙率(%)*	W/C	締固め方法	路床
1	30	30	コテ	改良土
2	24		仕上げ機 4回	
3	30		仕上げ機 1回	コンクリート
4				砕石
5		改良土		
6	45		仕上げ機 4回	
7		24		

[注] * : 文献⁴⁻⁶⁾, 文献⁴⁻⁷⁾を参考に算出

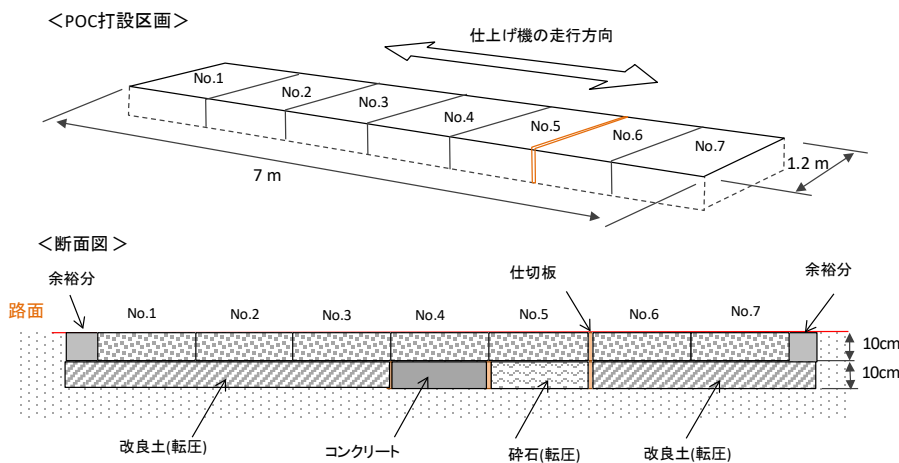


図-4.3.1 施工区画と要因・水準の組合せ



写真-4.3.2 完成した路床の様子 (手前がNo7)

表-4.3.3 POCの調合表

W/C	設計空隙率 (%)	単位量(kg/m ³)		
		W	C	G
0.3	25	81	272	1527
0.45	25	98	218	1527

(3) 試験体の作製方法

POCの練混ぜは、W/C = 0.30の調合については、セメントペーストのみ強制1軸パン型ミキサで先練りし、ペーストフロー値(実測値:179)を計測した後に、大型の鋼製容器に粗骨材と一緒に投入し、油圧ショベルを用いて均質になるまで練り混ぜた。W/C = 0.45については、セメントペーストの流動性が高くなるため、粗骨材およびセメントを大型鋼製容器に投入後に、油圧ショベルを用いて空練りを行い、その後に水を投入して練り混ぜた。写真-4.3.3に、POCの練混ぜの様子を示す。

練り上がったPOCは、レーキで敷き均した後に、所定の締固めおよび仕上げ作業を行った(仕上げ

機による仕上げの様子は**写真-4.3.1**を参照)。

舗装以外に、各 POC の調合に対して、角柱型枠 (100×100×400mm) および円柱型枠 (φ100×200mm) を用いて、各調合につき 6 体ずつ試験体を作成した。同試験体は、設計空隙率 (本実験では 25%) と なるように質量管理を行い、突き棒、ジッキングおよび型枠振動機を用いて打込みおよび締固めを行 った。

POC 以外に、POC で用いたセメントペーストのみを別のバッチで練り混ぜ、角柱体 (40×40×160mm) および円柱体 (φ50×100mm) を各 6 本ずつ作成した。ここで、W/C=0.45 では、セメントペースト試験 体の作成時のみ材料分離を低減するために、セルロース系増粘剤をセメント質量に対して 0.5%添加し ている。

POC 舗装の養生は、材齢 3 日まで 1 日に 1 回の散水を行い、養生シートをかけた状態で初期養生を 行った。その後は屋外暴露養生とした。型枠試験体については、材齢 3 日まで実験室内封緘養生とし、 その後脱型して、各調合の半数の 3 本は標準水中養生、残りの 3 本は POC 舗装の横で屋外暴露養生と した。

POC 舗装からは、材齢 2 週の時点で、コンクリートカッターおよびコアドリルを用いて、切り出し 試験体 (100×100×400mm) およびコア試験体 (φ100×100~120mm) を、各条件に付き 3 本ずつ採取 し、材齢 28 日まで POC 舗装の横で屋外暴露養生した。試験体の採取時には、コテ仕上げの水準 (**表- 4.3.2** 中の No.1) の一部の試験体で、骨材の剥離による試験体の角欠けが確認されたが、他の水準で はほとんど見られなかった。採取された試験体の例を**写真-4.4.3**に示す。



写真-4.3.3 油圧ショベルによる POC の練混ぜの様子



(a) No. 1 (コテ仕上げ) (b) NO. 3 (仕上げ機 1 回)

写真-4.3.4 POC 舗装から採取された試験体の例

(4) 試験方法

1) 空隙率試験

硬化後の POC 試験体については、全ての試験体に対して、日本コンクリート工学会によるポーラスコンクリートの空隙率試験方法 (案) ⁴⁴⁾ に準拠して、質量法および容積法の測定を行った。ここで、上記の空隙率試験方法 (案) ⁴⁴⁾ では角柱試験体は対象としていないが、本実験では角柱試験体に対しても円柱試験体と全く同じ方法を適用している。

また、施工直後の POC 舗装から直接空隙率を測定する新しい方法として、フレッシュ状態の POC 舗装の一部を切り出し、質量法で空隙率を測定する手法を試行した。測定方法は、φ120×140mm および

φ150×140mm の 2 種類の鋼管をフレッシュ POC 舗装に型枠振動機で振動させながら打ち込み、鋼管内部のフレッシュ POC を採取して質量を計測するとともに、鋼管内部の POC のかさ容積（舗装厚さ×鋼管内部断面積）を計測し、質量法で空隙率を算定した。ここで、舗装厚さは、鋼管の高さと埋め込まれた鋼管が周囲の POC から出ている高さの差として計測した。

測定対象は、POC 舗装の No.1, 2, 7 とした。測定数は、舗装の損傷などを考慮し各径の鋼管を 1 本ずつとした。写真-4.3.5 に測定の様子を示す。

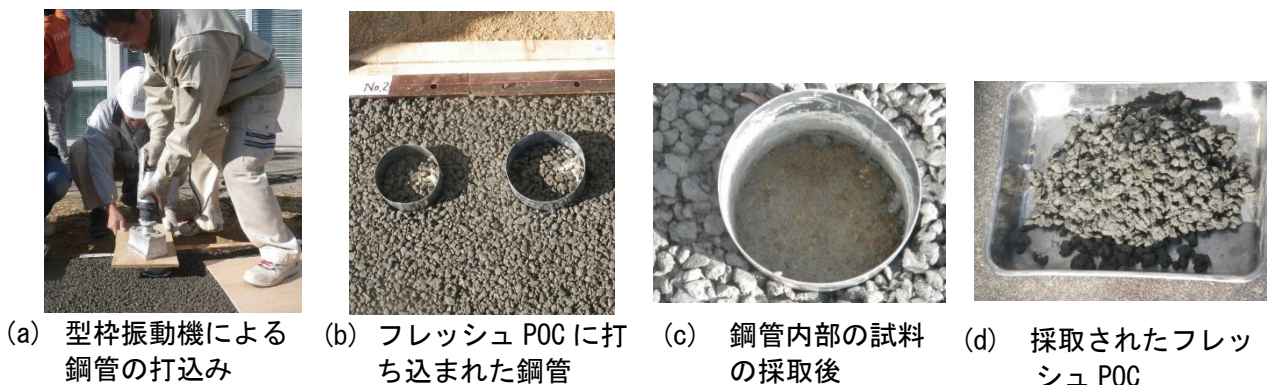


写真-4.3.5 現場施工されたフレッシュ POC の空隙率試験の様子

2) 圧縮強度試験

ポーラスコンクリートの圧縮強度試験には、円柱試験体およびコア試験体の上下端面に硫黄でキャッピングしたものを使用した。試験は、JIS A 1108（コンクリートの圧縮強度試験方法）に準拠して行い、試験材齢は 28 日とした。コア試験体については、試験体の高さと同径の比 (H/D) が 1.0~1.2 程度となったため、文献⁴⁸⁾を参考に補正した値を用いた。ポーラスコンクリートとは別に、セメントペーストで作成した円柱試験体に対しても、材齢 28 日において圧縮強度試験を行った。試験体の端面は研磨して試験に供した。

3) 曲げ強度試験

ポーラスコンクリートの曲げ強度の測定は、JIS A 1106（コンクリートの曲げ強度試験方法）に準拠して、打ち込み時の試験体側面を載荷面とした 3 等分点載荷で行った。試験体の支点および載荷点の位置に止水セメントでキャッピングを施して試験を行った。試験材齢は 28 日とした。

ポーラスコンクリートとは別に、セメントペーストで作成した角柱試験体に対しても、JIS R 5201（セメントの物理試験方法）に準拠して、材齢 28 日において曲げ強さの測定を行った。

4.3.2 実験結果とその考察

(1) 試験体のセメントペーストの垂れの状況

写真-4.3.6 に、角柱型枠試験体の底部のセメントペーストの垂れの状況を示す。W/C=0.45 でセメントペーストの垂れが確認され、その程度は三本の試験体のうち、一本は大きく、二本は小さかった。後述する曲げ強度実験結果によれば、各試験体の曲げ強度が明確な差が見られないため、本実験では、セメントペースト垂れの影響が無視できる範囲以内にあるとして考察を進める。また、POC 舗装から採取した角柱および円柱試験体では、明確なセメントペーストの垂れは確認されなかった。これは、締

固め方法の違いの影響と考えられる。型枠 POC では、所定の質量が打ち込まれるまで型枠振動機を用いて締固めを行っているため、振動が過剰となりがちであること、および鋼製型枠にも振動が伝わり上面以外からも振動が加えられることなどにより、一定の通過回数で上面のみから締固められる POC

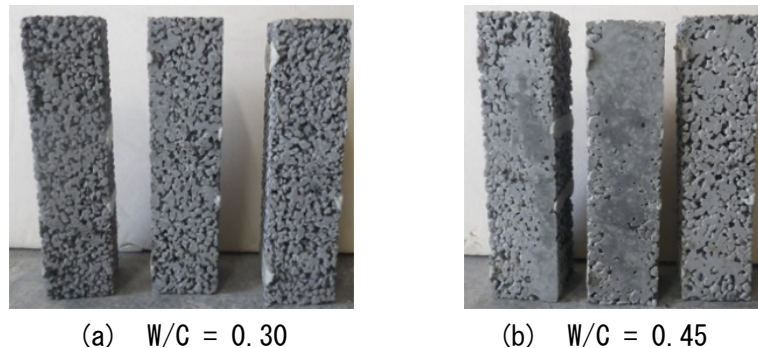


写真-4.3.6 型枠試験体の底部のセメントペーストの垂れの状況

舗装と比べて、セメントペーストの垂れが促進されたものと考えられる。

(2) 空隙率

1) フレッシュ POC の現場空隙率

図-4.3.2 に、フレッシュ POC に対して、鋼管を用いて試行した現場空隙率試験による全空隙率と、コア試験体を用いて質量法で測定した全空隙率の比較を示す。ここに、現場空隙率試験による全空隙率は、鋼管の直径(ϕ 120mm および ϕ 150mm)の違いによる影響がほとんど見られなかったため、直径が 120mm の場合と 150mm の場合の平均値を示す。図によれば、現場空隙率試験の結果が 5%程度大きく測定される傾向がある、これは、鋼管を打ち込む際に振動機を使用したためにセメントペーストの垂れが発生したこと、および鋼管を打ち込む際に周囲の POC 表面が盛り上がりしてしまうため、舗装厚さを過大評価したこと、などの理由によると考えられる。このように、舗装の空隙率の実測方法には問題が残るものの、両者の間には一定の相関関係が見られるため、本方法は施工後の POC の迅速な空隙率測定方法となり得る可能性がある。試験後には、鋼管を抜き POC を再度穴に充填して補修したが、その際、タンパーや仕上げ機などにより、鋼管打ち込み部周囲の盛り上がりも補正する必要がある。

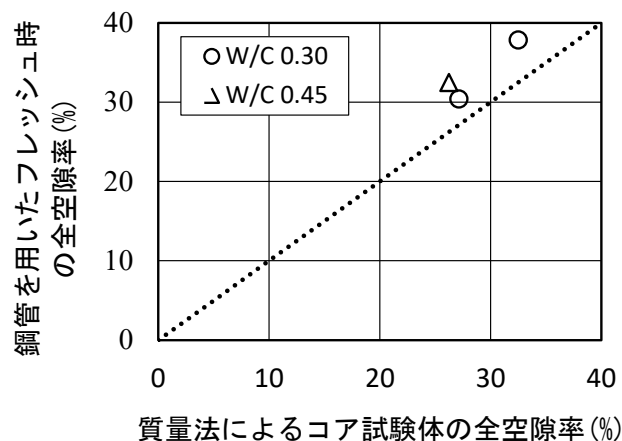


図-4.3.2 フレッシュ時の現場空隙率試験結果とコア試験体の質量法による空隙率試験結果の比較

2) 硬化 POC の空隙率

図-4.3.3 に、硬化 POC 試験体を用いて、質量法により測定した全空隙率の測定結果を示す。同図は、型枠試験体については 6 体、他は 3 体の平均値を示す。図によれば、型枠試験体については、打込み時に質量管理を行って作成しているため、ほぼ設計空隙率の 25%を満足している。

舗装から採取した試験体 (No.1~7) については、表-4.3.2 に示した目標空隙率を±5%の範囲内に納まっている。本調査では仕上げ機を 4 回通過させた場合(No.2,7)に、設計空隙率とほぼ同じ空隙率 25%が得られている。また、コテ仕上げ(No.1)で空隙率が大きくなっているのは予想通りの結果である。路床を変化させた No.3~5 については、No.4 の路床にコンクリートを用いたものが他と比べて空隙率が大きくなる傾向が見られるが、他の結果は空隙率 30%程度でほぼ一定となった。以上の結果からは、路床の種類が締固めの程度に及ぼす影響は小さいと考えられる。また、No.3~5 の場合は No.6 の場合より空隙率が大きくなった。これは、No.3~5 の場合はペーストの W/C が 0.30 で、No.6 の場合は W/C が 0.45 であり、W/C が小さい方は流動性が低く、軽盛り状態 (締固め前の状態) の骨材間の距離が大きくなるため、締固め前の初期空隙率が大きくなったことによると考えられる。

図-4.3.3 に、容積法と質量法による全空隙率の測定結果の比較を示す。図によれば、容積法による空隙率が僅かに大きくなる傾向はみられるものの、ほぼ同じ空隙率が測定されている。また、ここではデータは割愛するが、容積法による全空隙率と連続空隙率の値は、ほぼ同じ結果が得られており、本実験における空隙率のレベル (設計空隙率 25%) では、独立空隙はほぼ存在しないといえる。

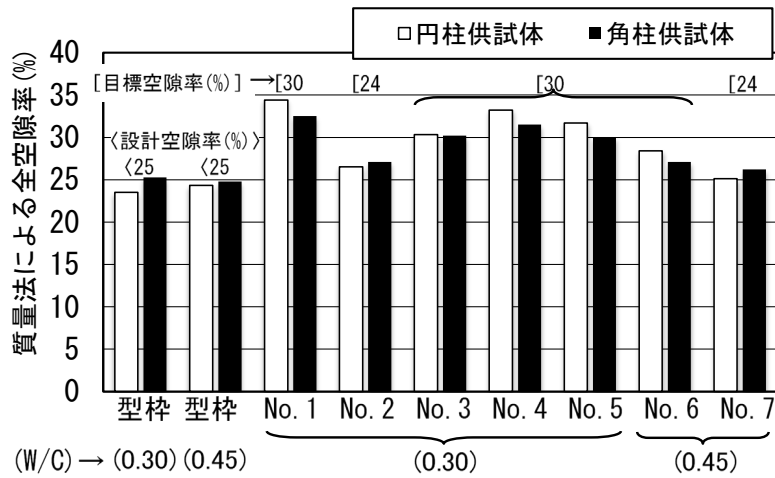


図-4.3.3 質量法による全空隙率の測定結果

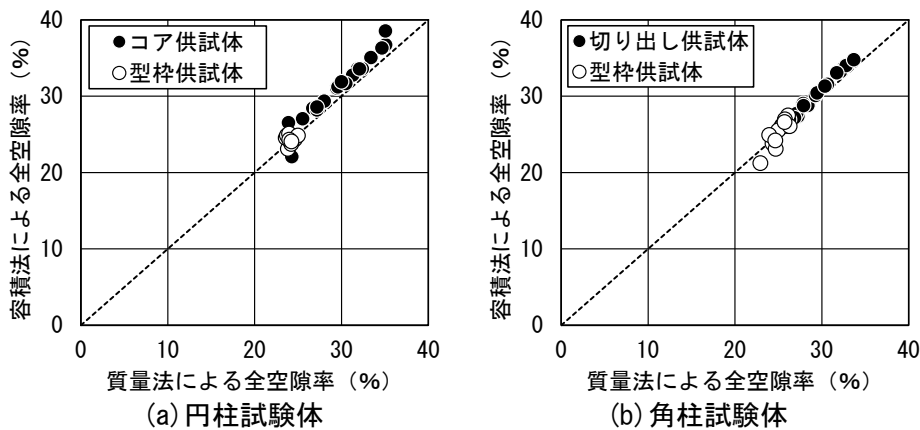


図-4.3.4 容積法と質量法による全空隙率の比較

(3) 圧縮強度

図-4.3.5 にセメントペーストの、図-4.3.6(a), (b)に POC の型枠およびコア試験体の圧縮強度試験結果をそれぞれ示す。図-4.3.6 中には、POC の圧縮強度(y)－空隙率(x)の近似式（累乗指数は W/C ごとに変化）も併示した。ここで、空隙率 0%における圧縮強度には、図-4.3.5 のセメントペースト試験体の圧縮強度がプロットしてある。また、近似曲線の y 切片は水中養生の各 W/C のセメントペーストの圧縮強度を用いた。これらの図によれば、W/C の影響に着目すると、W/C=0.45 と 0.30 の圧縮強度の差は、セメントペーストの場合は明確であるが、POC の場合は空隙率 25～35%の範囲では、ごくわずかであった。

図-4.3.6(a)に示す型枠試験体の結果からは、圧縮強度に及ぼす養生方法の影響について、明確な差は見られない。図-4.3.6(a)と(b)によれば、型枠試験体とコア試験体の空隙率の範囲は異なっているものの、両者のデータはほぼ同じ曲線上にあると見ることができる。

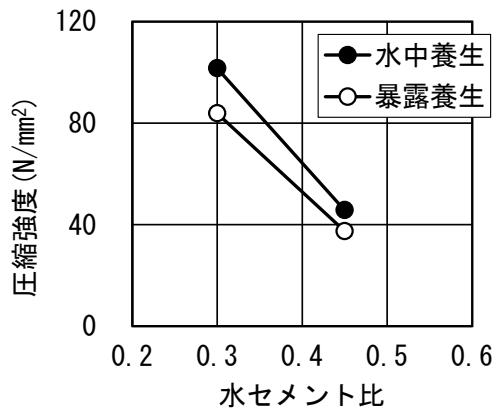


図-4.3.5 セメントペーストの W/C と圧縮強度の関係

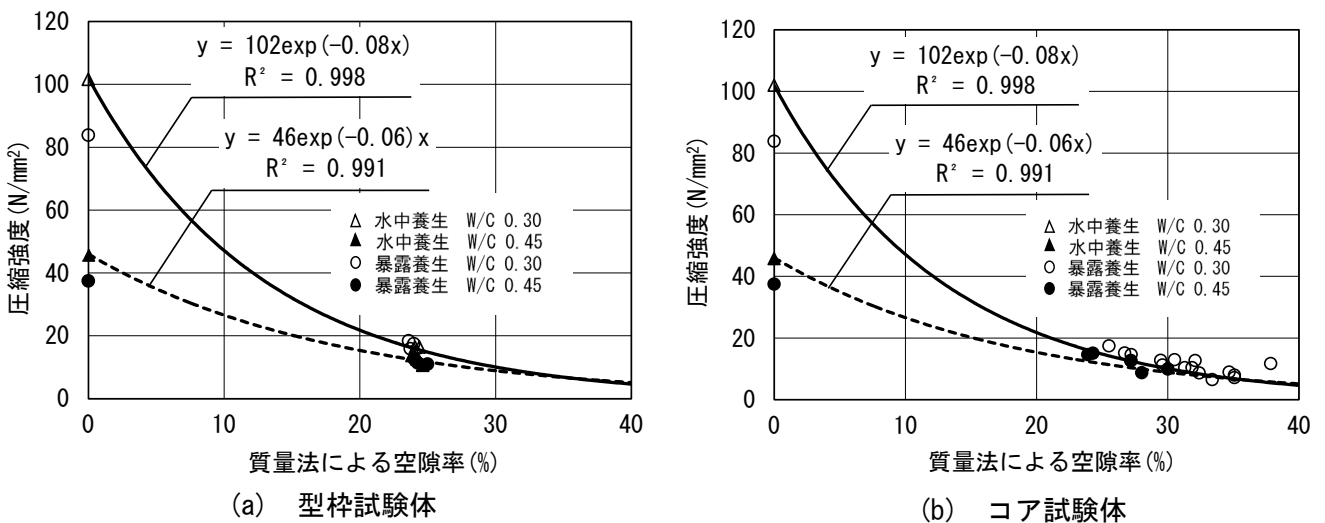


図-4.3.6 POC の質量法による空隙率と圧縮強度の関係

(4) 曲げ強度

図-4.3.7に、セメントペーストの曲げ強度試験結果を示す。本実験の曲げ強度は、セメントペーストの試験結果が非常に小さい値となった。養生段階で収縮によると思われるひび割れが確認されており、これが主な原因と考えられる。

図-4.3.8(a)および(b)に、それぞれ POC の曲げ強度試験結果を示す。同図には、文献⁴⁻⁹⁾で報告された近似曲線も併示してある。ここで、近似曲線の y 切片の値はセメントペースト試験体の曲げ強度とすべきであるが、本実験では過去の実績と比べて非常に小さい値となっており、また、POC の曲げ強度と比べても低い値となっていることから、より信頼性の高いと考えられる同一調合のセメントペーストから得られた前節の実験IV-Iの値を用いた。これらの図によれば、POC の曲げ強度は、型枠試験体および切出し試験体共に、ほぼ同じ曲線により近似できることが確認された。また、先に示した圧縮強度の結果と同様に、養生方法、および型枠とコアの違いによって曲げ強度-空隙率関係に明確な違いは見られない。

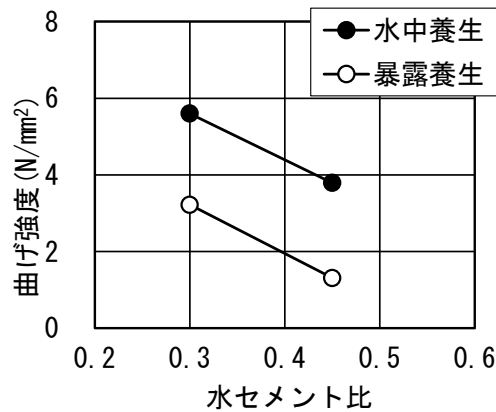


図-4.3.7 セメントペーストの W/C と曲げ強度の関係

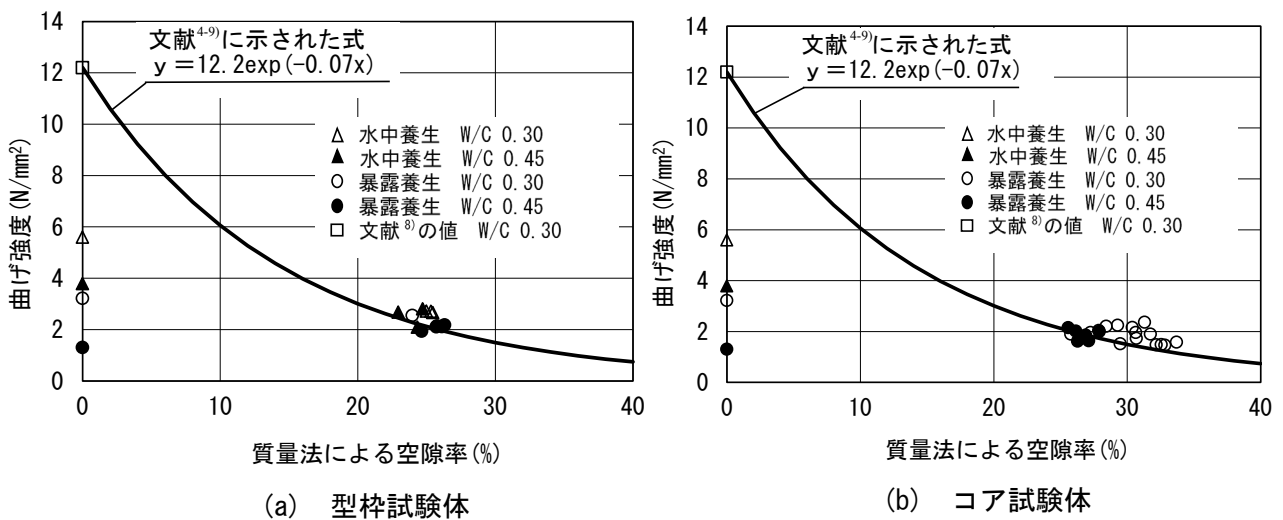


図-4.3.8 POC の質量法による空隙率と曲げ強度の関係

(5) 空隙率と圧縮/曲げ強度の関係

以上より、同一調合、同一養生条件であれば、現場 POC 舗装から採取したコア試験体の圧縮強度および曲げ強度—空隙率関係は、型枠試験体の関係とほぼ同一と見なすことが可能である。すなわち、現場の POC 舗装の空隙率を測定することで、現場 POC 舗装の強度（圧縮、曲げ）をおおむね推定できるといえる。

4.4.3 実験Ⅳ—Ⅱのまとめ

本研究の範囲で得られた知見を以下に示す。

- 1) 調合設計上の空隙率に各締固め方法の影響を考慮して、現場の POC 舗装の空隙率を推定することで、現場 POC 舗装の強度（圧縮、曲げ）をおおむね推定できる。
- 2) 同一調合、同一養生条件であれば、現場 POC 舗装から採取したコア試験体の圧縮強度—空隙率関係および曲げ強度—空隙率関係は、型枠試験体の強度—空隙率関係からとほぼ同一と見なせると考えられる。
- 3) 現場施工された POC スラブ（厚さ 100mm）の締固め程度に路床の種類が及ぼす影響は小さく、仕上げ機の通過回数など、締固め方法を固定し、締固め程度を管理することが重要である。

【第4章の参考文献】

- 4-1) 性能設計対応型ポーラスコンクリートの施工標準と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協会, pp.1-157, 2015.7
- 4-2) 畑中重光, 三島直生, 森鼻泰大, 中川武志: POCの施工標準(案)の作成に向けて, コンクリート工学, Vol.49, No.4, pp.30-37, 2011.4
- 4-3) 梶尾聡, 國府勝郎, 上野敦, 宇治公隆: 舗装用 POCにおける空隙率と強度に関する研究, 第66回セメント技術大会講演要旨, pp.84-85, 2012.5
- 4-4) 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, 日本コンクリート工学協会, pp.179-180, 2003.5
- 4-5) 畑中重光, 三島直生, 湯浅幸久: POCの圧縮強度-空隙率関係に及ぼす結合材強度および粗骨材粒径の影響に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, No.594, pp.17-24.2005
- 4-6) 森鼻泰大, 中川武志, 三島直生, 畑中重光: 実施工における振動締固めがポーラスコンクリートの空隙率および諸特性に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.4.3, No.1, pp.1481-1486, 2011
- 4-7) 森鼻泰大, 中川武志, 三島直生, 畑中重光: ポーラスコンクリートの実施工における敷均しおよび仕上げ方法が空隙率に与える影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), pp.1097-1098, 2010.9
- 4-8) 中川武志, 畑中重光, 三島直生: 試験体の高さ/直径比がポーラスコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集, No.75 (650), pp.695-699, 2010.4
- 4-9) 平岩陸, 畑中重光, 岡本享久, 梶尾聡, 国枝稔, 三島直生: ポーラスコンクリートの強度-空隙率関係に関する共通実験報告, コンクリート工学, Vol.54, No.4, pp.375-380, 2016.4

第5章 超音波法によるポーラスコンクリートの品質管理

第5章 超音波法によるポーラスコンクリートの品質管理

5.1 背景と目的

本論文の第1章にも記述した通り、POC (pervious concrete⁵⁻¹⁾, no-fine concrete⁵⁻²⁾) は、そ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ち、生物共生型 POC および環境負荷低減型 POC として注目されている^{5-3)~5-5)}。空隙率は POC の各性能を決定づける最も重要な性質の1つである。このため、POC の性能を発揮するためには設計通りの空隙率が得られていることが不可欠となる。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、各部の空隙率が調合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 各部の空隙率のバラツキを直接評価する品質管理が非常に重要である。

POC の内部を非破壊で評価する一つの方法として超音波法が提案されており、既往の研究^{5-6), 5-7)}において、POC 内を伝播する超音波の速度と空隙率の間には相関があると報告されている。しかし、POC 自体の内部の不均一性の影響を含め、超音波法を用いて品質管理を行う場合には、超音波伝播速度と空隙率の関係についてさらに定量的な評価と考察が必要である。POC は多孔質材料の一種である。多孔質材料の中を伝播する弾性波は、空隙伝播波または固体伝播波となって伝播するという仮定のもとで多孔質材料の弾性波伝播特性を表現した Biot 理論⁵⁻⁸⁾があり、またこれを基礎して多孔質材料中の伝播音を予測する Johnson-Champoux-Allard モデル⁵⁻⁹⁾が提案されている。また、POC 内部の超音波伝播速度は、POC 内部の空隙以外の部分を伝播する最短経路の長さにより決定されると、鎌田ら⁵⁻¹⁰⁾は報告している。

そこで、本章では、実験 V-I において、第4章の実験 IV-I の試験体において超音波伝播速度の実験を行う。また、その実験結果に加えて各材料の構成比を考慮した簡易な物理モデルを用いて超音波伝播速度と空隙率の関係について検討する。また、POC 試験体の切断面を用い、超音波伝播速度に大きく影響を与えると考えられる超音波の最短伝播経路に関する解析も行い、POC の超音波伝播速度と空隙率の関係について、理論的に議論することを目的とした。POC は、普通コンクリートのような平滑な表面を持たず、より凹凸する表面を持つため、その超音波伝播速度は、試験体と超音波発・受振子の接触面に用いる接触媒質の影響を大きく受ける。したがって、実験 V-II では、接触媒質の影響を検討するため、グリース、シリコンシート、水 (測定は試験体を浸水させた状態で行った)、および水溶性のグリセリンペーストを接触媒質とした実験的検討も行った。また、実験 V-III では、現場で適用可能である超音波法の表面法に着目し、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。

5.2 実験V-I 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

5.2.1 実験方法

(1) 実験の要因と水準

表-5.2.1 に、本実験の要因と水準を示す。本実験では、POC の特性および実験結果に大きく影響すると考えられる、空隙率、水セメント比および粗骨材粒径を調査要因とし、その他の要因としては、発受振子設置時のグリースの使用量および超音波伝播速度の測定時の試験体の含水状態を取り上げた。

(2) 使用材料および調査

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、5号砕石(20~13mm)、6号砕石(13~5mm)、7号砕石(2.5~5mm)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-5.2.2 に、POC の調査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

表-5.2.1 実験の要因と水準

要因	水準
設計空隙率(%)	15, <u>25</u> , 35
水セメント比 (W/C)	0.25, <u>0.30</u> , 0.35
粗骨材粒径	5号砕石 (13~20mm), <u>6号砕石 (5~13mm)</u> , 7号砕石 (2.5~5mm)
グリス量	なし, 少量, 多量
含水状態	乾燥, 湿潤

[注] : 基本水準

表-5.2.2 使用材料および調査

粗骨材粒径	W/C	V _R (%)	単位質量 (kg/m ³)			SCA/C (%)	HAE/C (%)	FL(mm)	
			W	C	G			目標値	測定値
5号砕石 (13~20mm)	0.30	25	79.8	266.1	1557	0.02	—	150	156
6号砕石 (5~13mm)	0.25	25	74.6	298.3	1554	—	0.4	190	185
	0.30	15	130.9	436.4	1554	0.075	—	150	149
		25	82.3	274.1	1554	—	—	190	186
		35	33.6	111.9	1554	—	—	190	186
0.35	25	88.8	253.6	1554	0.02	—	200	196	
7号砕石 (2.5~5mm)	0.30	25	95.9	319.6	1469	—	0.1	210	203

[注] V_R : 設計空隙率, SCA/C : セメント質量に対する増粘剤の添加率, HAE/C : セメント質量に対する高性能 AE 減水剤の添加率, FL : フロー値

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、フロー値の許容差は $\pm 10\text{mm}$ 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。

(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船に排出し、3 本の角柱鋼製型枠 ($100\times 100\times 400\text{mm}$) に打ち込んだ。

型枠への打込みの際は、空隙率のばらつきを抑えて設計空隙率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。ここで、予備試験の結果から、6 号砕石および 5 号砕石を用いた POC では、型枠面の壁効果により設計量まで充填することが困難であったため、型枠への打設量を計算値の 97%として打ち込んだ。すなわち、締固め度は 97%であり、それに応じて空隙率が増加する。

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、ジギングおよび型枠振動機による上面からの振動締固めを行った。

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、材齢 5 日で脱型した後に、材齢 28 日まで 20°C の水中養生を行って、材齢 28 日以後は気中養生とした。ただし、材齢 1 週には、空隙率の測定を 2 日間行い、また材齢 18 日には曲げ強度試験用のキャッピングを行ったため、その間は養生水槽から試験体を出している。

Photo 5.2.1 に、試験体の例を示す。ここで、(a)の POC 試験体の側面に施したセメントキャッピングは曲げ強度試験時の支点用のものである。POC の試験体とは別に、超音波伝播速度試験用に整形した岩石試験体（以下、岩石試験体）とセメントペースト試験体も作製した。岩石試験体は、POC で使用した砕石の岩石（岩類：南伊勢町産硬質砂岩）から取り出したコア試験体 ($\phi 50\times 100\text{mm}$) を 3 本用い、セメントペースト試験体は、水セメント比 0.30 の円柱試験体 ($\phi 50\times 100\text{mm}$) を 3 本用いた。試験体の端面はいずれも研磨仕上げとした。

(4) 測定方法

1) 空隙率試験

POC の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）⁵⁻⁴⁾に準拠して、質量法および容積法の二種類を行った。質量法からは全空隙率、容積法からは全空隙率および連続空隙率を算出した。詳しい内容については文献¹³⁾を参照されたい。また、本報では、比較的精度が高いと考えられる質量法による全空隙率のみを用いることとする。

2) 超音波伝播速度試験

図-5.2.1 に、POC に対する超音波伝播速度の測定方法を示す。同図には、測定位置を示した側面図も示している。超音波伝播速度試験の試験体としては、曲げ試験後の角柱試験体を中央点付近のひび割れ面で二分割した後の長い方を用いた。超音波の測定方法としては、対面法を用い、試験体の側面において、端面から 2.5~12.5cm の範囲を ($5\text{cm}\times 5\text{cm}$) の正方形で四等分した領域(1~4)に、それぞれ発振子

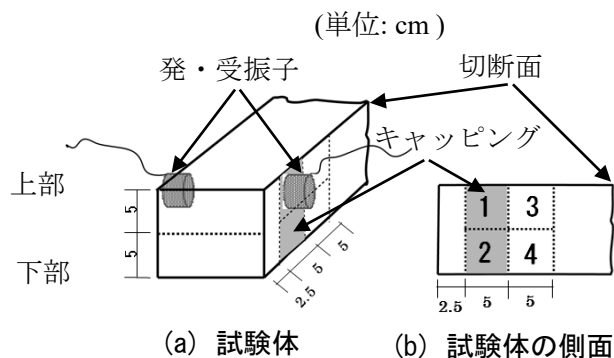


図-5.2.1 超音波伝播速度の測定

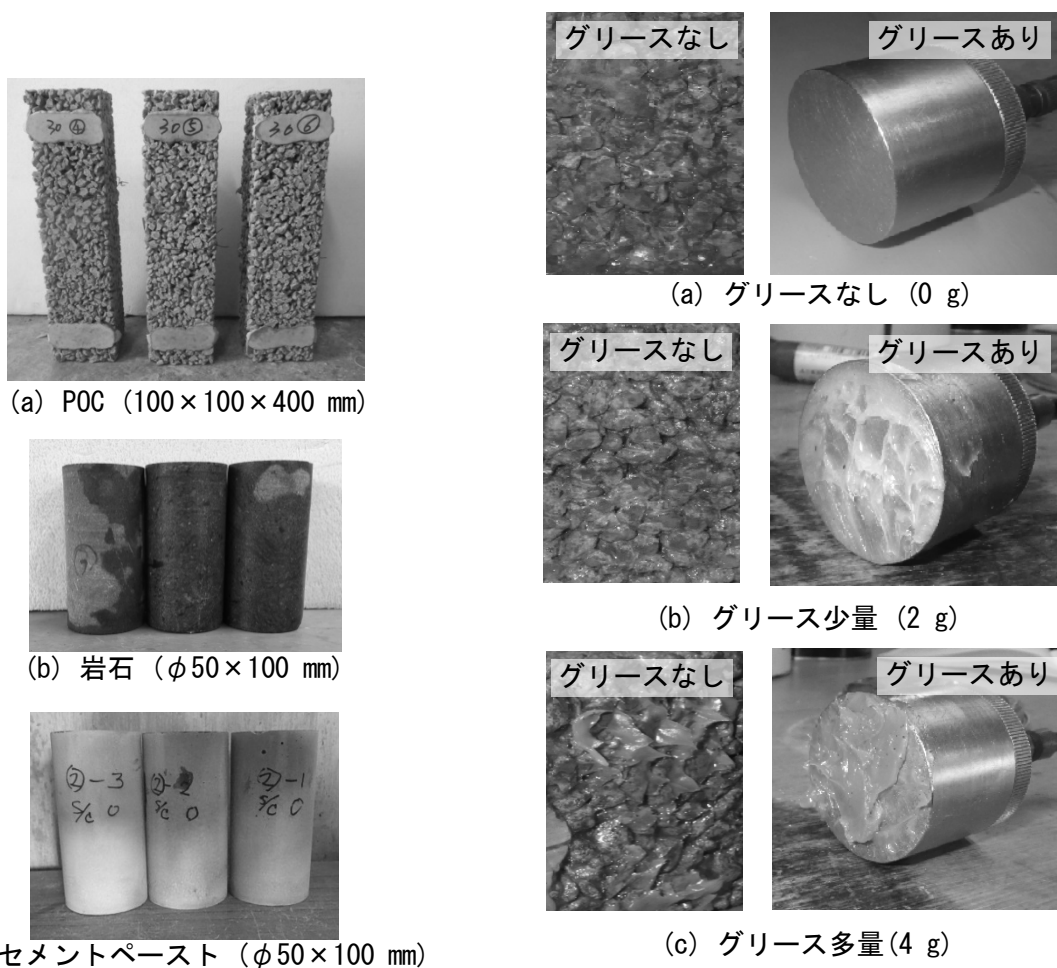


写真-5.2.1 試験体の例

写真-5.2.2 接触面に用いたグリースの量
(左: 試験体, 右: 発・受振子)

および受振子を密着させ、測定を行った。

測定は、同じ位置に対して三回実施し、各測定位置（側面 1~4 の 4 通り）の平均値により試験体における超音波伝播速度を評価することとした。試験機の発振子(φ50×50mm)および受振子(φ50×50mm)と試験体の接触面には、JIS.K-2220 に規定された一般グリースI種 3 号カップグリースを接触媒質として用いた。本実験ではグリースの使用量を要因とした。図-5.2.2 にグリース使用量のイメージを示す。グリースなしとは、発・受振子および試験体接触面の両側に全くグリースを付着させないものとし、グリース少量とは、発・受振子側のみグリースを 2g 程度付着させた状態とし、グリース多量とは、発・

受振子と試験体接触面の両側にグリースを 2g 程度ずつ（合計は 4g 程度）付着させた状態とした。発振子と受振子には同量のグリースを用いた。また、実験要因である含水状態については、湿潤状態の場合は、3 日間の連続した降雨で湿潤となった試験体を実験室に移動し、2 時間ほど水を切った後に測定を行った。乾燥状態の場合は、晴天時に屋外養生を 7 日間行って乾燥させた試験体をそのまま使用した。

POC の試験体とは別に、岩石試験体とセメントペーストの試験体における超音波測定は、ともに $\phi 50$ mm の円柱試験体を用い、端面に発振子および受振子を密着させた対面法により行った。測定回数は各試験体において 3 回実施し、平均値を求めて評価に用いることとした。

5.2.2 実験結果とその考察

(1) 空隙率試験

POC の各試験体の全空隙率は、ほぼ設計空隙率の $\pm 10\%$ となる範囲 ($\pm 10\% \times$ 設計空隙率) 以内に入ることが確認された。詳しい内容について第 4 章に実験IV-Iを参照されたい。

(2) 超音波伝播速度試験

図-5.2.2 に、岩石およびセメントペーストの対面法による超音波伝播速度の測定結果と密度の関係を示す。図によれば、密度が大きい岩石の方がセメントペーストより伝播速度が大きくなる傾向が見られている。

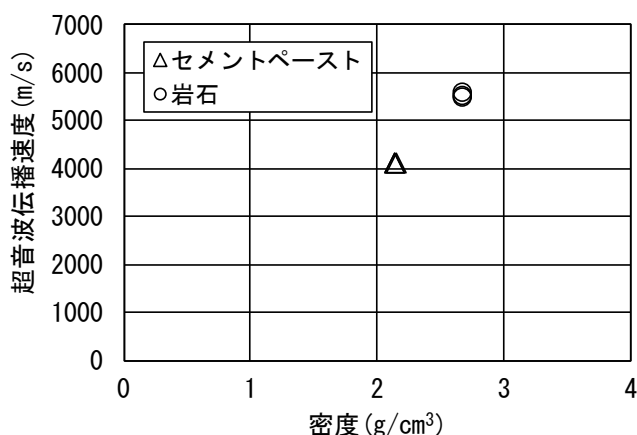


図-5.2.2 岩石およびセメントペーストの超音波伝播速度と密度の関係

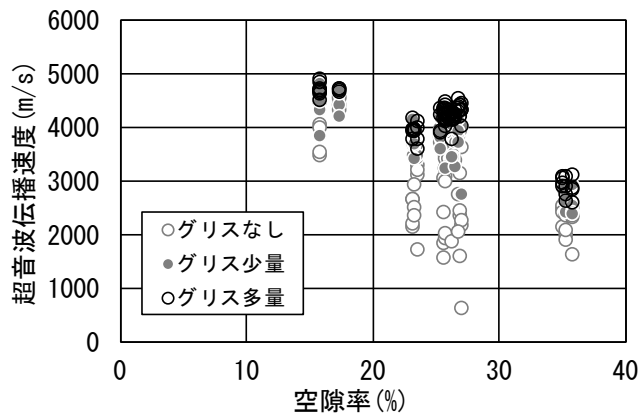
図-5.2.3 に、POC の対面法による超音波伝播速度と全空隙率の関係を示す。

図-5.2.3 (a) に、発振子および受振子と試験体との接触媒質として使用されるグリースの量の影響を調べた実験の全データを示す。図によれば、グリースの量が多くなるほど超音波伝播速度が速くなり、実験のデータのバラツキが小さくなることが分かった。これは、超音波伝播速度の測定では、一般に発振子および受振子と試験体との密着度が影響することが知られており、グリースを多量に使用することにより、大径空隙の多い POC でも適切な密着度を得ることができたと考えられる。以下に示す結果は、全てグリースを多量に使用した場合のデータである。

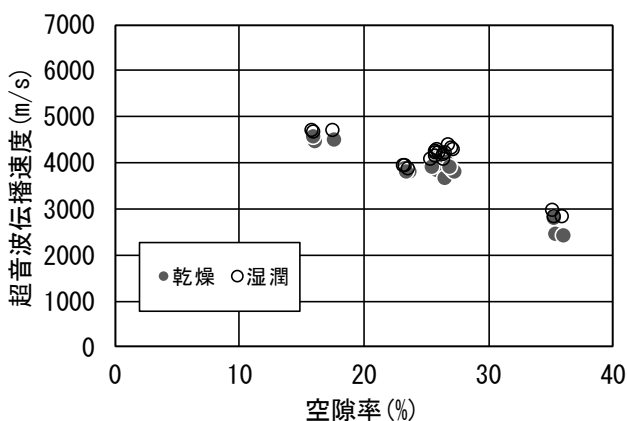
図-5.2.3 (b) に、試験体の含水状態の影響を調べるため、湿潤状態および乾燥状態の比較を示す。図によれば、POC の超音波伝播速度は、湿潤状態の方が乾燥状態より少し大きくなっているが、空隙

率との関係にはほとんど影響ないと見ることができる。これ以後の本実験では、図-5.2.3 (b) に示したデータ以外は全て湿潤状態のものを用いた。

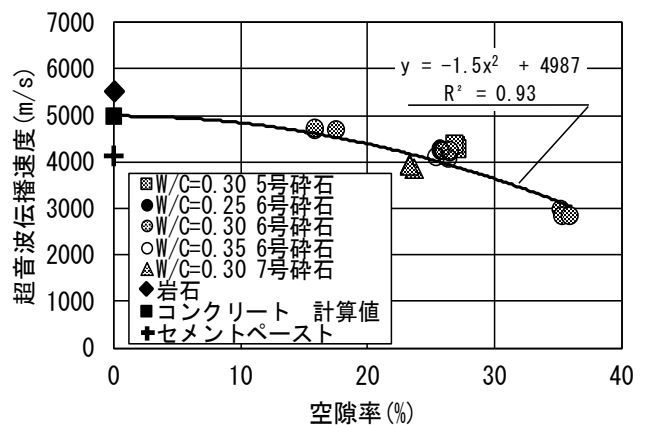
図-5.2.3 (c) に、調合および使用材料の影響を示す。ここに、岩石とセメントペーストの実測結果および次項に説明する直列モデルによるコンクリートの超音波伝播速度の計算値を空隙率 0%の位置（縦軸上）に示した。また、図中には POC の結果を用いた近似曲線も示した。近似曲線の Y 切片は、直列モデルによるコンクリートの超音波伝播速度の計算値を用いた。この理由としては、コンクリート中の骨材の配列によって超音波伝播速度が左右されることが考えられるが、ここでは、骨材の配列によって超音波伝播速度のバラツキは生じないものと仮定した。図によれば、POC では、空隙率が大きくなるほど超音波伝播速度が小さくなっており、空隙率と超音波伝播速度の関係が文献⁵⁻⁶⁾にも示された上に凸の曲線になっている。水セメント比と粗骨材粒径の影響については、本実験結果からは明確な傾向は見られていない。また、空隙率がほぼ 0%における超音波伝播速度は、空隙率が 15%の POC より大きく、骨材より小さくなっていることから、本研究においては、直列モデルによるコンクリートの超音波伝播速度は空隙率 0%の位置に適用できると考えた。



(a) グリース量の影響 (湿潤)



(b) 含水状態の影響 (グリース多量)



(c) 調合および使用材料の影響
(湿潤, グリース多量)

図-5.2.3 POC の対面法による超音波伝播速度と全空隙率の関係

5.2.3 物理モデルによる考察

(1) モデル概要

図-5.2.4 に、単純化した各物理モデルのイメージ図を示す。以下に、材料の構成比から超音波伝播速度を算定する方法を示す。具体的には、各材料の体積比を計算し、その比率で各材料を直列および並列に並べた場合の超音波伝播速度を算定する。式(5.2.1)には、直列モデルによる超音波伝播速度の算定式を示し、式(5.2.2)～(5.2.4)に並列モデルによる超音波伝播速度の算定式を、岩石のみ、セメントペーストのみおよび空隙のみ伝播する条件に分けて示す。

1) 直列モデル

$$U_{POC} = 1 / (V_G / U_G + V_r / U_v + V_C / U_C) \quad (5.2.1)$$

2) 並列モデル

- ・岩石のみ伝播する場合：

$$U_{POC} = U_G \quad (5.2.2)$$

- ・セメントペーストのみ伝播する場合：

$$U_{POC} = U_C \quad (5.2.3)$$

- ・空隙のみ伝播する場合：

$$U_{POC} = U_v \quad (5.2.4)$$

ここに、 U_{POC} ：POCの超音波伝播速度(m/s)，

V_G ：骨材の割合，

V_v ：空隙の割合，

V_C ：セメントペーストの割合，

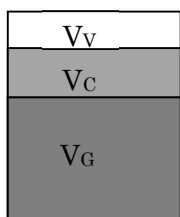
U_G ：岩石の超音波伝播速度(m/s)，

U_C ：セメントペーストの超音波伝播速度(m/s)，

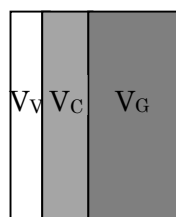
U_v ：空気中の超音波伝播速度(m/s)

各材料の超音波伝播速度には表-5.2.3の値を用いることとする。ここで、碎石およびセメントペーストの値は実験で得られた実測結果であり、空気の伝播速度は文献⁵⁻¹¹⁾に示されている式(5.2.5)に試験時の実験室の平均温度(12.8℃)と相対湿度(52.0%)を代入して算出したものである。

V_v ：空隙の体積率
 V_C ：セメントペーストの体積率
 V_G ：骨材の体積率



(a) 直列モデル



(b) 並列モデル

表-5.2.3 各材料の超音波伝播速度

材料	超音波伝播速度 (m/s)
岩石 (骨材)	5420
セメントペースト (W/C 0.3)	4387
空気	372

図-5.2.4 POCの各物理モデルのイメージ図

$$U_v = (331 + 0.606 t)(1 + 0.00188 \Phi) \quad (5.2.5)$$

ここに、 U_v ：空気中の音速(m/s)， t ：空気の温度(°C)

Φ ：空気の相対湿度(%)

(2) 物理モデルによる超音波伝播速度と空隙率の関係

図-5.2.5に、各物理モデルによる超音波伝播速度と全空隙率の関係の計算結果を示す。直列モデルによる超音波伝播速度は、空隙率が大きくなるほど小さくなるが、その傾向は実測値による結果（上に凸な形状）と一致せず、下に凸な形状になっている。また、並列モデルによる超音波伝播速度は、岩石のみを伝播する場合、セメントペーストのみを伝播する場合および空隙のみを伝播する場合のいずれも、空隙率の変化によらず一定値となる。ここで、空気中の超音波伝播速度は、砕石とセメントペーストと比較して非常に小さい。

以上の各物理モデルを適用した場合には、いずれも実験結果による空隙率と超音波伝播速度の関係が上に凸の曲線になっている傾向を表現できなかつた。これは、POC 内部の構造がそれほど単純な構造ではなく、内部の空隙の量、形、径などの条件により、超音波の伝播経路が変わるためであると予想できる。そこで、この問題を解明するため、試験体を切断して作製された複数の切断面において超音波の伝播経路に関する解析を行った。

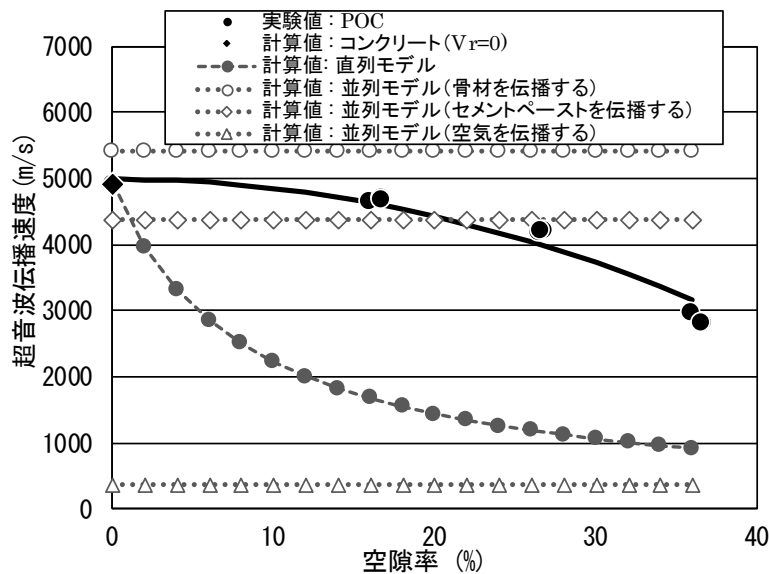


図-5.2.5 各物理モデルによる超音波伝播速度と全空隙率の関係の計算結果

5.2.4 POCの切断面における解析

(1) 解析概要

1) 切断面の作製方法

図-5.2.6 に、POCの切断面の作製方法を示す。超音波伝播試験に用いた100×100×400(mm)の角柱試験体を切断し、1本の試験体ごとに5断面を得た。切断された断面の空隙部分には、 $W/C = 0.30$ のホワイトセメントペーストを充填してペーストが硬化するまで常温養生した。ペーストの硬化後、塗布表面を研磨し空隙面積率の測定断面を仕上げた。ここに、 $V_R = 35\%$ の試験体は切断時に破壊したものを棄却したところ、3本の試験体から計4断面のみが得られた。

2) 画像解析方法

表-5.2.4 に、画像解析の手順を示す。仕上げた切断面の画像をスキャナーで撮影した。画像中央の80×80mmの部分抽出し、これを測定視野として、デジタル画像計測・解析ソフトを用いて2値化した。2値化した測定視野の空隙面積を自動計測し、測定された空隙の面積を用いて各断面の空隙面積率（以下、空隙面積率）を求めた。空隙面積率を切断前の試験体の全空隙率（以下、全空隙率）と比較し、上述した5断面において空隙面積率が全空隙率ともっとも近い1断面を選び、以下に説明する最短経路の探索に用いた。これは、POC中を三次元的に伝播する超音波の経路を二次元で解析するために、三次元（全空隙率）と二次元（空隙面積率）の空隙率がほぼ一致するという条件を仮定したことになる。すな

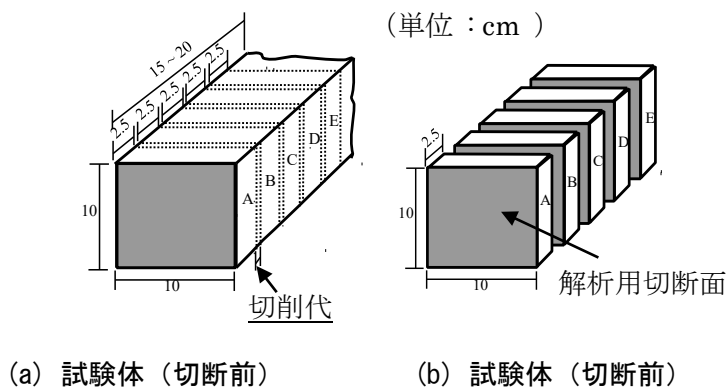


図-5.2.6 POCの切断面の作製方法

表-5.2.4 画像解析の手順

ステップ	ステップ 1	ステップ 2	ステップ 3	ステップ 4
	画像撮影	二値化	空隙面積率の測定	最短経路の探索
画像の例 : 6号碎石 $V_R = 25\%$ $W/C = 0.3$				

わち、試験体を無数な部分に切断し、それらの空隙面積率を求めれば、バラツキがあるものの、平均値は切断する前の試験体の全空隙率とほぼ一致するというを前提とし、本解析では、空隙面積率が全空隙率に近くなる切片を選択することとした。

3) 最短経路の探索と最短経路に基づく超音波伝播速度の計算

断面の空隙面積の計測試験から得られた2値化画像(80×80 mm)を512×512 pixel (1 pixel = 0.16 mm)に分割し、POC内部を伝播する超音波の最短経路探索を行った。なお、2値化画像による解析を実施するに当たって、超音波は骨材およびペースト部分(黒色部分)のみを通ると仮定し、反射および屈折は無視できるものとしている。

図-5.2.7に、最短経路の探索方法を示す。最短経路の探索には、A*探索アルゴリズム⁵⁻¹²⁾を用いた。A*探索アルゴリズムは、スタート地点からゴール地点までのグラフ上の最短経路を、式(6)に示す評価値の小さい点から優先的に経路の探索を行うことで、最短と推測される経路を導出するアルゴリズムである。Fig. 5.2.7に示す点nを最短経路の上にある点とし、点nにおける評価値を式(5.2.6)で計算する。

$$f(n) = g(n) + h(n) \tag{5.2.6}$$

ここに、 $f(n)$ ：点nにおける評価値、

$g(n)$ ：スタート点から点nまでの最短経路、

$h(n)$ ：点nからゴール点までの最短経路

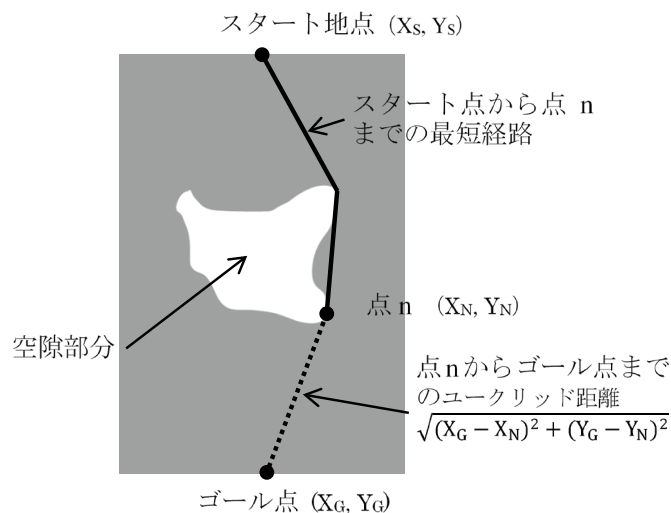


図-5.2.7 最短経路の探索方法

今回の解析においては、スタート点は画像上辺の空隙のない部分の点を確率が一定となる一様乱数によりランダムに選択し、式(6)に示す評価値の小さい点を最短経路の上にある点として選択していき、ゴール点までの最短と推測される経路を導出した。ゴール点はスタート地点の直下にある画像下辺の点を選ぶこととした。ただし、ゴール点が空隙になる場合は、それともっとも近い点を選択することとした。評価値 $h(n)$ は、点n(X_N, Y_N)とゴール点(X_G, Y_G)間のユークリッド距離で算出を行っている。解析で探索する最短経路の数は、1画像につき最大で100本とした。

この解析で得られた最短経路より、POCの超音波伝播速度を算出した。ここでは、「粗骨材およびペースト部分（黒色部分）」、すなわち固体部分を均質であると見なし、その部分の超音波伝播速度として、図-5.2.3中の近似式から求められる空隙率0%の場合の値を用いた。

(2) 解析結果

1) 解析断面の空隙面積率

図-5.2.8に、解析に用いた断面の空隙面積率と全空隙率の比較を示す。解析には、前述の5.2.4(1)の仮定に基づき、断面の空隙面積率が全空隙率の±20%となる範囲(±20%×全空隙率)以内に入る断面を選択した。その結果、7号碎石、W/C=0.3、Vr=25%の場合、および6号碎石、W/C=0.3、Vr=35%場合は、範囲以内のデータが2個ずつ、それ以外は3個ずつ得られた。

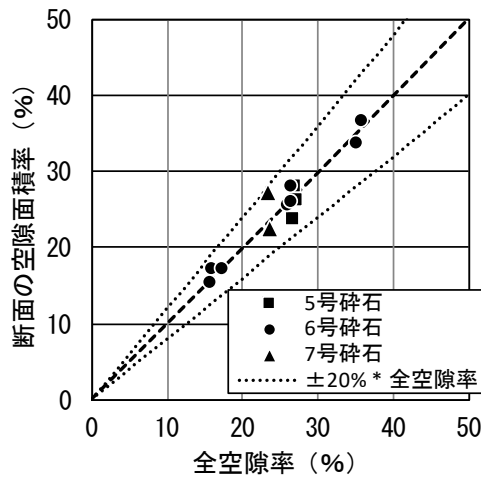


図-5.2.8 解析に用いた断面の空隙面積率と全空隙率の比較

2) 最短経路の探索

表-5.2.5に、最短経路の探索結果を示す。最短経路の探索結果によれば、碎石の粒径による影響はほぼ見られなかった。また、6号碎石の場合は、空隙率が大きくなるほど最短経路が大きくなる傾向が見られ、最短経路の平均値には空隙率の15%と25%の差(2.2mm)より25%と35%の差(13mm)がかなり

表-5.2.5 最短経路の探索結果

試験体 (W/C=0.3)	5号碎石 Vr=25%	6号碎石 Vr=15%	6号碎石 Vr=25%	6号碎石 Vr=35%	7号碎石 Vr=25%
切断面解析 による 最短経路 (80×80mm)					
最短経路の 平均値 (mm)	89.5	86.3	88.5	101.5	87.7

大きく出ている。以上の結果より、空隙率と音速の関係が上に凸の曲線となる主な原因は、空隙率の変化に起因する超音波伝播経路の変化によるものである可能性が示された。

3) 最短経路に基づく超音波伝播速度

図-5.2.9に、探索された最短経路に基づく超音波伝播速度の解析値と全空隙率の関係を示す。超音波測定試験により実測された超音波伝播速度（実験値）もプロットしており、それぞれの近似曲線と相関係数も示してある。図によれば、最短経路に基づく超音波伝播速度は、実測結果と同様に、全空隙率が大きくなるほど小さくなる傾向が見られ、上に凸の曲線により近似されている。骨材粒径の影響については、実験値と同様に明解な差が見られなかった。

また、超音波伝播速度の解析値は、空隙率の大きい範囲で実測結果より大きくなっている。この原因として、POCでは壁効果の影響により型枠との接触面近傍の空隙率が大きくなり、超音波の伝播速度が遅くなることが考えられる。また、本解析ではPOC中を伝播する音の反射および屈折は無視しているため、解析上の超音波伝播速度が測定値に比べて大きくなること、およびこの影響は空隙率が大きくなって、伝播経路が長くなると顕著になることなどが考えられる。

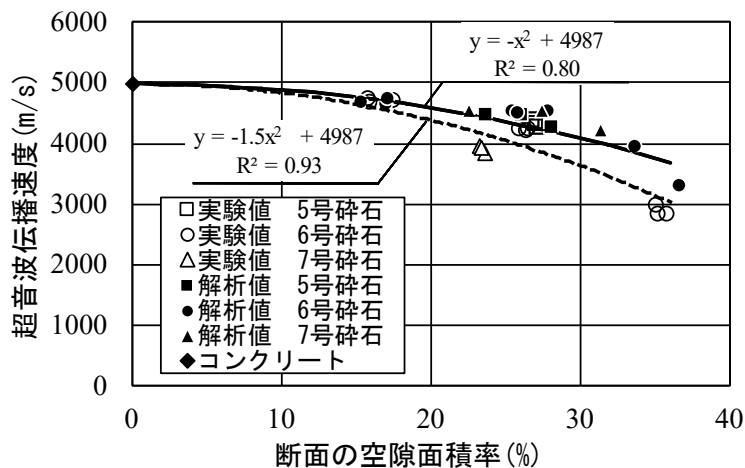


図-5.2.9 POCの超音波伝播速度と全空隙率の関係
(実験値 および解析値)

5.2.5 実験V-Iのまとめ

本研究から得られた知見を以下に示す。

- 1) POCの超音波伝播速度は、試験体の気乾状態および湿潤状態によらず、ほぼ同じであった。
- 2) POCの超音波伝播速度は、接触媒質として使用されるグリース量によって大きな影響を受け、グリースを充分用いた場合に、超音波伝播速度が速くなり、バラツキが小さくなる。
- 3) POCの超音波伝播速度と空隙率の関係は、二次関数により概ね近似することが可能である。
- 4) POC試験体の切断面における超音波伝播の最短経路を探索し、超音波伝播速度と空隙率関係について解析したところ、実験結果とほぼ同様な傾向を得ることができた。

5.3 実験V-II 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

前節 5.2 に記述したように、POC の内部を非破壊で評価する一つの方法として超音波法が提案されており、POC 内を伝播する超音波の速度と空隙率の間には相関がある。筆者らは、超音波伝播速度の測定時に、接触媒質としてグリースより作業性および再利用性のよいシリコンシートの使用も有効なことを報告している⁵⁻¹³⁾。しかし、図-5.3.1(a)に示すように、シリコンシートを適用する際に、シリコンシートと試験体およびシリコンシートと発・受振子の間の空気層の存在により密着度が得にくく、発・受振子を押し付ける力（以下、押付け力と略記）の影響を大きく受ける⁵⁻¹⁴⁾。

このため本節では、上記の問題を改善する方法として、図-5.3.1(b)に示すように、シリコンシートと水を接触媒質として用いることにより、シリコンシートと試験体およびシリコンシートと超音波発・受振子の間の空隙層を埋めることができ、密着度が得られ、より安定した測定ができると考え、この方法の実用性に関する検討を行うことを目的とした。

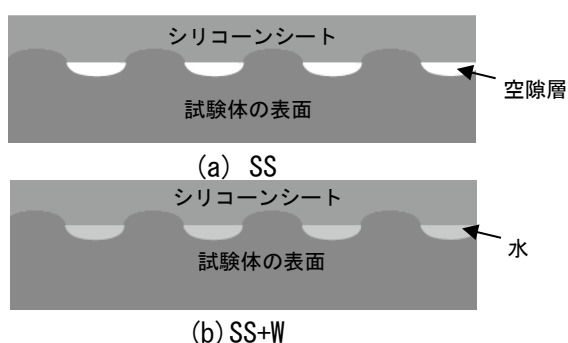


図-5.3.1 超音波伝播速度測定時のシリコンシートと試験体の表面の接触状態のイメージ

5.3.1 実験方法

(1) 実験の要因と水準

表-5.3.1 に、実験の要因と水準を示す。本実験では、POC の空隙率、試験体の含水状態、接触媒質の種類および押付け力を取り上げた。試験体の含水状態は、湿潤状態と気乾状態の 2 水準とした。湿潤状態は超音波伝播速度の測定試験までに 1 週間水中養生して湿潤となった試験体を実験室に移動し、2 時間ほど水を切った試験体を用いた。気乾状態の場合は、湿潤状態の超音波測定が終わった後、実験室に常温で 24 時間乾燥させた試験体を用いた。試験体と超音波の発・受振子の間に設置する接触媒質には、グリースとシリコンシートと水の 3 種類とし、シリコンシートの場合は、乾燥（以下、SS と略記）および+水（以下、SS+W と略記）の 2 種類とした。ここで、SS とはシリコンシートをそのまま用い、SS+W とはシリコンシートを超音波伝播速度の測定前に浸水してから用いたものである。シリコンシートは既往の研究⁷⁾により最適と考えられる硬度 8°、厚さ 1mm、φ50mm のものを用いた。また、押付ける力は、30N、60N、90N とした。

(2) 使用材料および調合

POC の使用材料として、粗骨材には、6 号砕石(13~5mm)を用い、また、セメント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流動性を調節するために、高性能 AE 減水剤を用いた。

表-5.3.2 に、コンクリートの調合表を示す。本実験では、POC は粗骨材をセメントペーストで結

表-5.3.1 実験の要因と水準

要因	水準
設計空隙率(%)*	15, 25, 35
試験体の含水状態	気乾, 湿潤
接触媒質	水, グリス, シリコンシート (乾燥, +水)
押付け力(N)	30, 60, 90

[注] *: 設計空隙率は POC のみの要因である

表-5.3.2 コンクリートの調合表

試験体種類	設計 VR (%)	単位質量(kg/m ³)				HAE/C	AF/C
		W	C	S	G		
POC	15	118.5	474	—	1554	0.03	—
	25	74.5	298	—	1554	0.03	—
	35	30.5	122	—	1554	0.03	—
普通コンクリート	—	160	320	826	997	0.012	0.000015

[注]VR: 空隙率, HAE/C: セメント質量に対する高性能 AE 減水剤添加率,
AF/C: セメントに対する消泡剤添加率

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 0.25 で一定とした。

(3) 試験体の作製方法

本実験では、実験要因以外の影響を減らすために、すべての試験体の接触面は研磨することとした。本実験に用いた試験体の例を写真-5.3.1 に示す。

POC 試験体には、透水試験用に作製された円柱試験体 (φ100×500mm) の打込み面から 20~220mm の部分を切断し、両端面を平滑になるまで研磨した円柱試験体 (φ100×200mm) を用いた。

POC の練混ぜは、セメントと水および混和剤をミキサで 60 秒間練混ぜた後に、粗骨材を投入して高速で 120 秒間練り混ぜた。その後、円柱型枠 (φ100×500 mm) に所定量の試料を入れ、付き棒とコテを使用して締め固めた。

POC の試験体とは別に、超音波伝播速度試験用に岩石から採取されたコア試験体 (φ50×100 mm) (以下、岩石試験体)、型枠に打ち込まれて作製されたセメントペースト試験体 (φ50×100 mm, W/C=0.25) およびコンクリート (φ100×200 mm, W/C=0.5, s/a=0.46) 試験体も用いた。

(4) 試験方法

1) 空隙率試験

POC の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)²⁾の質量法を準拠し、全空隙率を測定した。

2) 超音波伝播速度試験



(a) POC (φ 100 × 200 mm)



(b) 普通コンクリート (φ 100 × 200 mm)



(c) 岩石 (φ 50 × 100 mm)



(d) セメントペースト (φ 50 × 100 mm)

写真-5.3.1 試験体の例

超音波伝播速度試験の概要を図-5.3.2 に示す。超音波発・受振子 (直径 50mm, 周波数 50kHz) を円柱供試体の両接触面の中央に当て、対面法により伝播時間を試験体ごとに 5 回測定した。式(1)により、超音波伝播速度を算出した。

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

ここに、V : 超音波伝播速度(m/s), L : 振動子間隔(m), T : 伝播時間(s)

写真-5.3.2 に、POC の超音波伝播速度の測定の様子を示し、写真-5.3.3 に、試験機の発・受振子と試験体の接触面に用いた接触媒質の例を示す。超音波伝播速度試験では、グリース SS および SS+W を接触媒質として用いた。ここで SS+W を用いた測定は、浸水したシリコンシートを水から出してすぐ試験体の両端面に付け、発・受振子を密着させて測定を行った。SS+W を用いた場合の水の量は、0.3g 程度とした。写真-5.3.3(c)には、本実験に用いた SS+W を水平に置いた時の様子を示す。また、発・受振子の押付け力の大きさは、押しバネの長さの変化量により管理した。ここで、弾性係数が 2.57 N/mm の押しバネを用い、押付け力が 30N, 60N, 90N の場合に対し、押付け変位をそれぞれ 12.8mm, 20.9mm, 31.6mm とした。

写真-5.3.4 に、水中の超音波伝播速度の測定の様子を示す。水中の超音波伝播速度の測定は、超音波発・受振子と試験体の接触面には、水を接触媒質として用いた場合とした方法である。試験体を水中に入れて、日本コンクリート工学会による POC の空隙率試験方法 (案)⁵⁻³⁾の容積法を参考として、試験体の中の気泡を十分に抜き出し、試験体の空隙中の水の動きが安定した後に超音波の測定を行った。これは、試験体の空隙中での水の動きにより超音波伝播速度の結果に及ぼす影響を避けるためである。

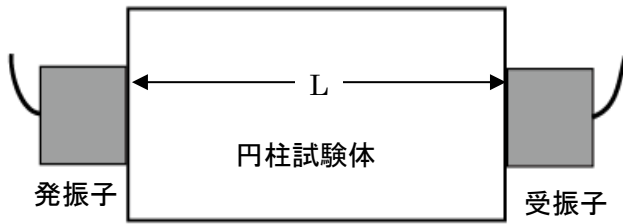


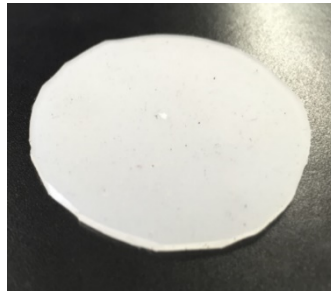
図-4.3.2 超音波伝播速度試験の概要



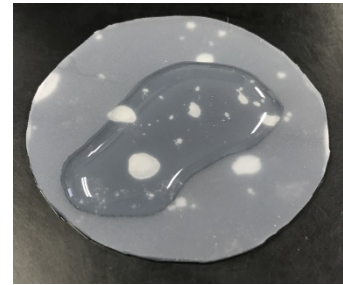
写真-4.3.2 超音波伝播速度の測定の様子



(a) グリス



(b) SS



(c) SS+W (0.3g 水)

写真-5.3.3 超音波伝播速度試験に用いた各媒質の例

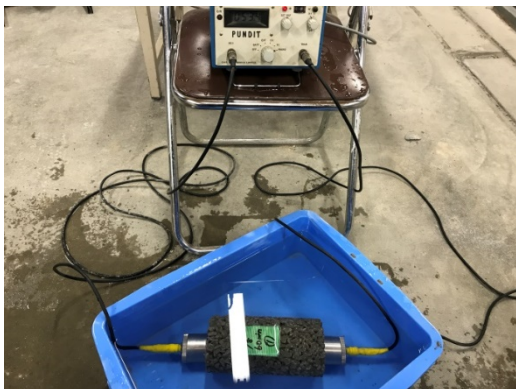


写真-5.3.4 水中の超音波伝播速度の測定の様子

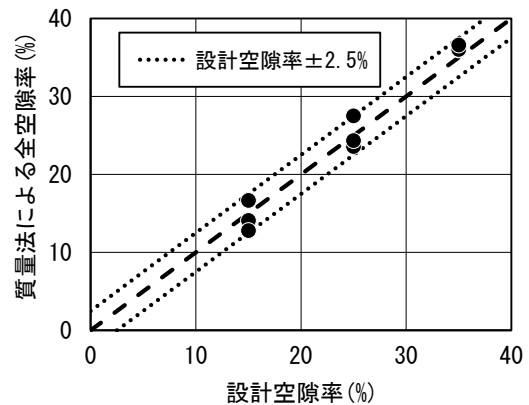


図-5.3.3 質量法による全空隙率と設計空隙率の比較

5.3.2 実験結果とその考察

(1) 空隙率試験

図-5.3.3には、質量法による全空隙率と設計空隙率の比較を示す。図によれば、質量法による全空隙率は、設計空隙率よりほぼ±2.5%以内に納まっており、ほぼ設計空隙率を満足すると言える。

(2) 超音波伝播速度試験

1) 試験体の含水状態の影響

図-5.3.4には、超音波伝播速度における各材料の含水状態の影響を3本の試験の平均値により示す。各材料の超音波伝播速度は、岩石、コンクリート、セメントペーストおよびPOCの順番で小さくなっている。また、含水状態の影響については、各材料において気乾状態の方が湿潤状態より少し小さくなっている。これは、湿潤状態から気乾状態に変わる時、コンクリート中で水であった孔が空隙となることによって、超音波伝播速度は低下すると考えられる。しかし、今回の実験には湿潤状態の試験体

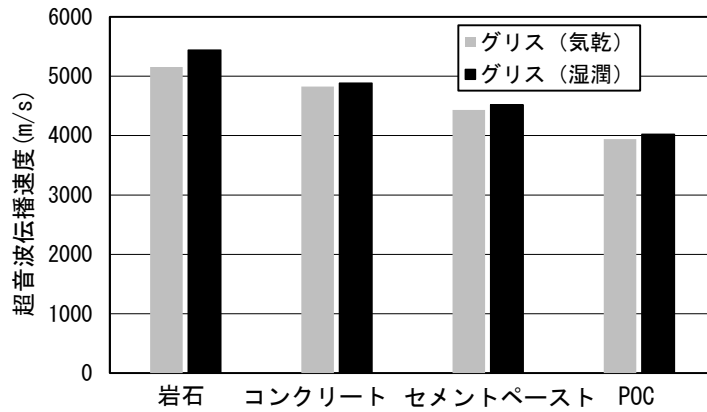


図-5.3.4 超音波伝播速度に及ぼす含水状態の影響

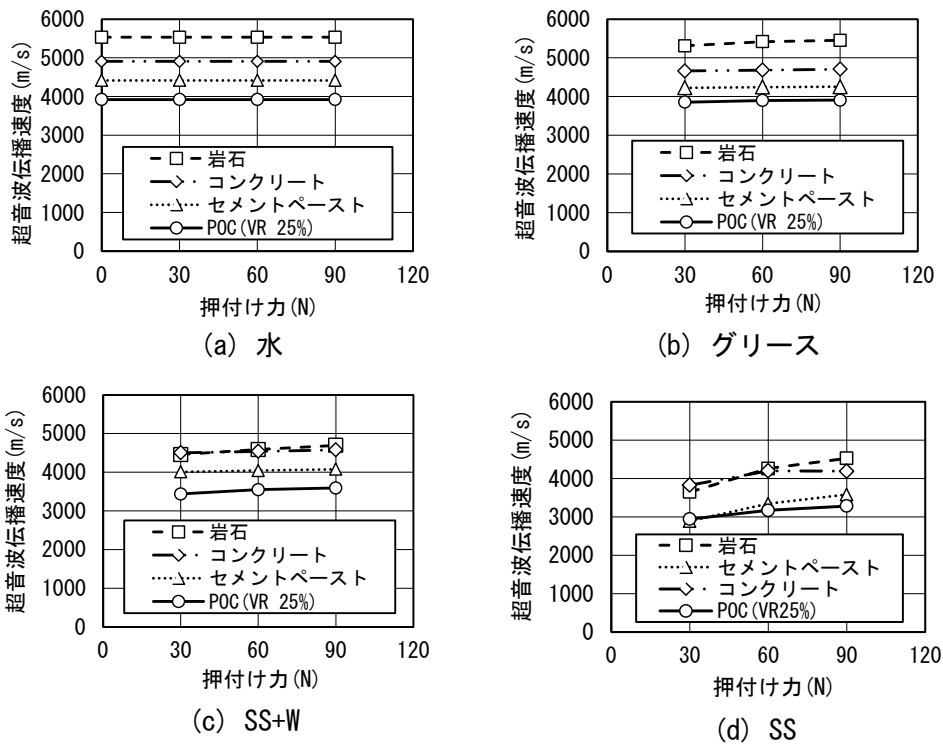
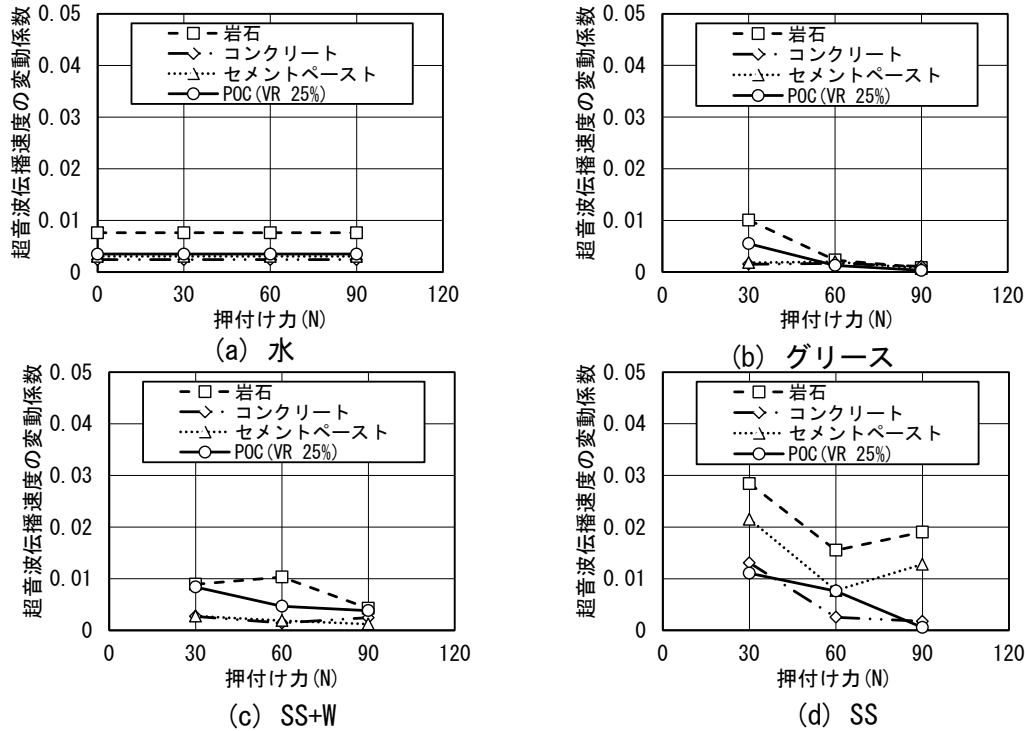


図-5.3.5 超音波伝播速度と押付け力の関係

を実験室に置いて 24 時間乾燥させた状態を気乾状態とし、含水率として正確に把握していないため、今後は含水率を要因とした検討も必要であると考えられる。また、以下に説明する押付け力の影響は、気乾状態の結果により示す。

2) 超音波伝播速度と押付け力の関係

図-5.3.5 には、超音波伝播速度と発・受振子の押付け力の関係を測定結果の平均値により示す。押付け力の影響について、水中測定の場合は、測定時に押付け力をほぼ必要としないことが確認されたため超音波伝播速度を一定値として取り扱えた。その他の実験結果によれば、グリースを接触媒質として用いた場合は明確にも変化がない。また、SS を用いた場合は、押付け力が大きくなるほど大きくなっているが、SS+W を用いた場合は、グリースと同様に押付け力の影響はほぼ見られていない。この理由としては、SS の場合は、試験体との接触面に空隙層（試験体表面の微細な空隙により発生する）



図－5.3.6 超音波伝播速度の変動係数と押付け力の関係

の存在で密着度が押付け力により変化しやすいことと、SS+W を用いた場合は、試験体との接触面の空気層が水で埋められることで、安定した密着度が得られたことなどが考えられる。また、測定後には試験体の表面に水が十分に残ったことが確認されており、本実験に用いた水の量は微細な空隙を埋めるには十分な量であったと言える。

3) 超音波伝播速度の変動係数と押付け力の関係

図－5.3.6 には、超音波伝播速度の変動係数と押付け力の関係を示す。超音波伝播速度の変動係数は、試験体ごとの 5 個データの変動係数である。図によれば、超音波伝播速度の変動係数は、水、グリースおよび SS+W の場合は、押付け力が 30N からほぼ 0.01 以下になっており、押付け力による明解な影響が見られないと言える。また、SS の場合は、押付け力が大きくなると変動係数が小さくなる傾向が見られており、押付け力が 60N から変動係数が 0.02 以下になっている。この理由として、水とグリースは変形抵抗力の小さい媒質であるため、小さい押付け力の場合でも密着度を得ることができ、より安定した結果が得られたと考えられる。SS の場合は、試験体との接触面に空隙層が存在するため、押付け力により接触面積が変動し、超音波伝播速度のバラツキが他と比べて大きく生じるが、SS+W を用いることにより、空隙層を水で埋めることができ、押付け力が小さい場合でも十分な接触面積をえることができたと考えられる。

以上の結果から、作業性を考慮すれば、SS の場合に押付け力が 60N 以上必要であること、グリースおよび SS+W を用いた場合は 30N でも測定できること、および水を用いた場合に押付け力をほとんど必要としないことなどが分かった。

4) POC の超音波伝播速度と空隙率の関係

図－5.3.7 には、POC の超音波伝播速度と質量法による全空隙率の関係を示す。なお、各データ点は湿潤状態、押付け力が 60N で測定した時の 15 個データの平均値である。ここで、空隙率 0%にお

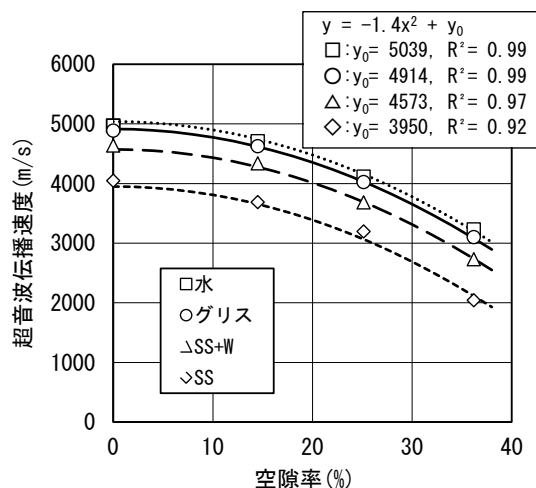


図-5.3.7 POCの超音波伝播速度と質量法による全空隙率の関係

ける超音波伝播速度には、普通コンクリートの超音波伝播速度がプロットしてある。図によれば、超音波伝播速度は、水、グリス、SS+WおよびSSの順番で小さくなっている。この理由としては、超音波伝播速度試験では、接触媒質の接触面積が小さくなった場合は受信波の振幅値が小さくなり、受振波の立上り時間の遅れが生じて超音波伝播速度が小さく測定されることが知られている⁵⁻¹⁵⁾。本実験では、各接触媒質の試験体との接触面での微細な空隙を埋める程度を考えると、接触面積は水、グリス、SS+WおよびSSの順番で小さくなるため、超音波伝播速度が小さくなることが考えられる。

また同図には、POCの超音波伝播速度(y)–空隙率(x)関係の近似式を示す。近似式は、y切片(y_0)を頂点とした二次関数で設定し、POCのデータのみで最小二乗近似を行い導出した。なお、同式に示す係数の-1.4はグリスを用いた場合のデータにより決定した。また、 y_0 および決定係数 R^2 は、係数の-1.4を一定とし、各媒質(水、グリス、SS+WまたはSS)のデータによりそれぞれ決定した。図によれば、上述した各媒質を用いた場合は、POCの超音波伝播速度は、空隙率が大きくなるほど小さくなる傾向が見られており、空隙率と超音波伝播速度の関係は各媒質において切片の値のみ異なる同様な二次関数により近似できた。POCの超音波伝播速度と空隙率の関係は二次関数による近似できることは、石黒らの実験研究⁵⁻⁶⁾からも得られている。

以上の結果に加えて、各接触媒質を用いた超音波伝播速度の測定ごとに要したおおよその時間は、水中、SS+W、SSおよびグリスの順番で、それぞれ13sec、18sec、26secおよび32secとなった。また、水中の場合は測定前に水槽の準備が必要であること、グリスの場合は測定後の試験体の洗浄が必要であることなど、作業性および測定精度などを考慮すれば、本研究の範囲では、接触媒質としてSS+Wを用いる方法が最適であると考えられる。

5.3.3 実験V-IIのまとめ

本研究から得られた知見を以下に示す。

- 1) POC の超音波伝播速度は、試験体の湿潤状態の方が気乾状態より少し大きいですが、空隙率と超音波伝播速度の関係にはほとんど影響しないと考えられる。
- 2) POC の超音波伝播速度は、シリコンシートを用いた場合に押付け力の影響を大きく受けるが、シリコンシートと水を用いることで押付け力の影響は改善できる。
- 3) POC の超音波伝播速度と空隙率の関係は、接触媒質として使用される媒質の種類の影響を受けるが、 y 切片のみが異なる二次関数により概ね近似することが可能である。

5.4 実験V-Ⅲ 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

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。

本節では、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。

5.4.1 実験方法

(1) 実験の要因と水準

表-5.4.1 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）の種類を取り上げた。POC の設計空隙率は 0%、15%、25%、35% の 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ふ、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。

表-5.4.1 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-5.4.2 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

表-5.4.3 POC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



(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-5.4.1 セメントペーストのフロー試験結果

(2) 使用材料および調合

表-4.5.2に、POCの使用材料を示す。POCの使用材料として、粗骨材には、JISA5001に規定される単粒度碎石のうち、6号碎石(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(セルロース系)を用いた。

表-5.4.3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-5.4.1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-4.5.2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-4.5.3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。

(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



写真－5.4.2 試験体の底部の垂れの状況の例
(設計 $V_R = 15\%$)



写真－5.4.3 試験体の打込み面の状況の例
(設計 $V_R = 0\%$)

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 (150×150×530mm) に打ち込んだ。型枠への打込みの際には、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、ジギ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℃, 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℃の水中養生を行った。

(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)⁵⁻³⁾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。

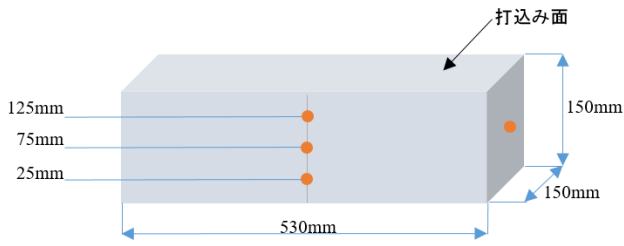
2) 超音波伝播速度試験

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(5.4.1)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。

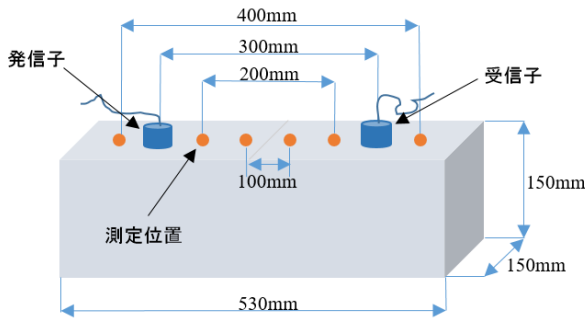
$$V = L / T \quad (5.4.1)$$

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



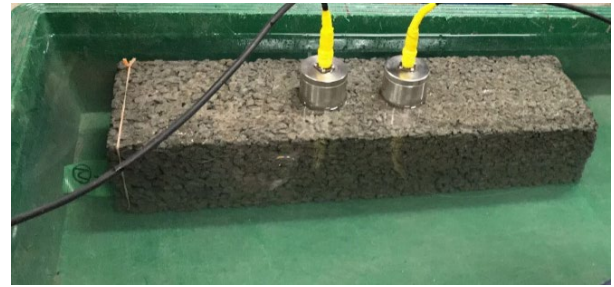
(a) 対面法



(b) 表面法



(a) グリセリンペースト (1.5~2 g)



(b) 水

図-5.4.1 超音波伝播速度試験の概要

写真-5.4.4 超音波伝播速度試験に用いた接触媒質の例

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⁵⁻¹⁶⁾を参考に、式(5.4.2)を用いて行った。

$$L' = (L - x)(1 + \alpha) \quad (5.4.2)$$

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-5.4.4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(寸法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)⁵⁻³⁾の容積法を参考にして、試験体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、水中測定後に、試験体を実験室(温度13℃、湿度5.3%)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(SONI COAT-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。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。

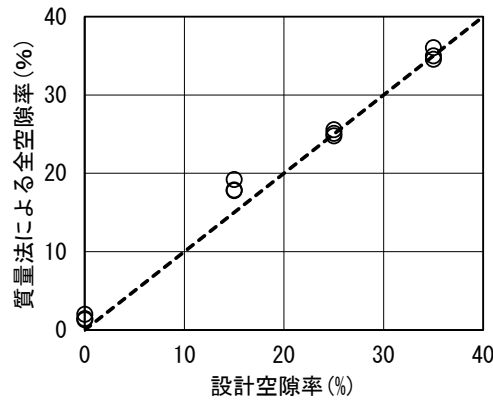


図-5.4.2 質量法による全空隙率と設計空隙率の比較

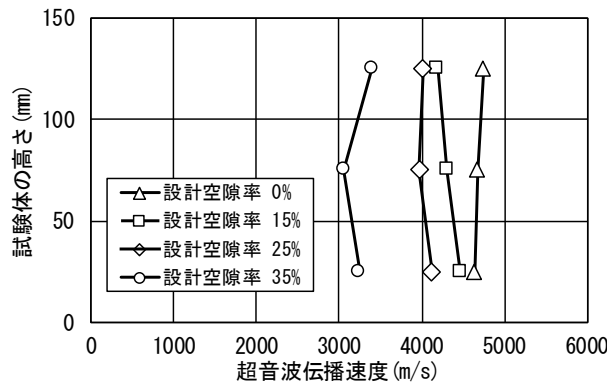


図-5.4.3 超音波伝播速度（対面法）の試験体高さ方向の分布（水中）

5.4.2 実験結果とその考察

(1) 空隙率

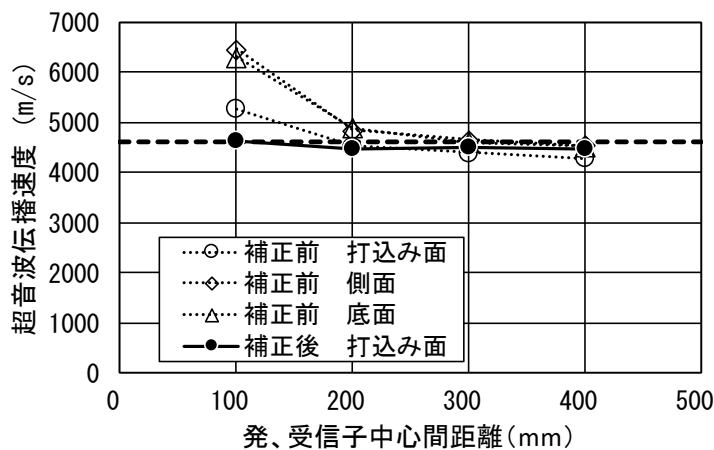
図-4.5.2 に、POC の質量法による全空隙率と設計空隙率の比較を示す。設計空隙率の 15%は、質量法による全空隙率が設計空隙率より少し大きくなっているほかは、ほぼ設計空隙率と等しい。

(2) 超音波伝播速度

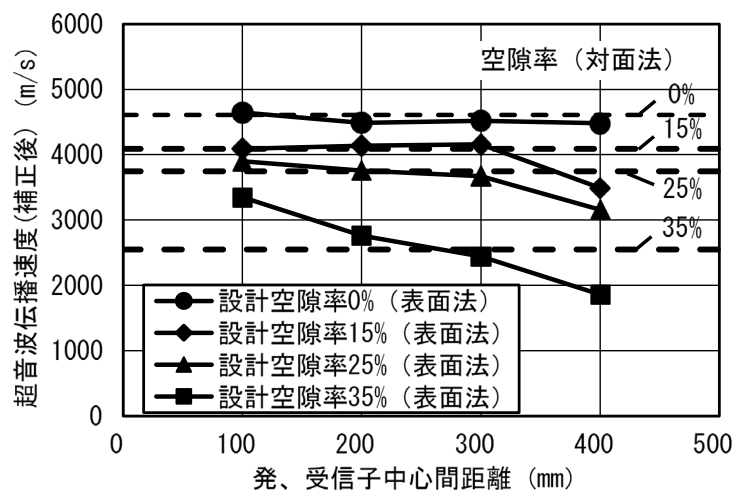
1) 対面法

図-4.5.3 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



a) 測定面の影響 (V_R = 0%)



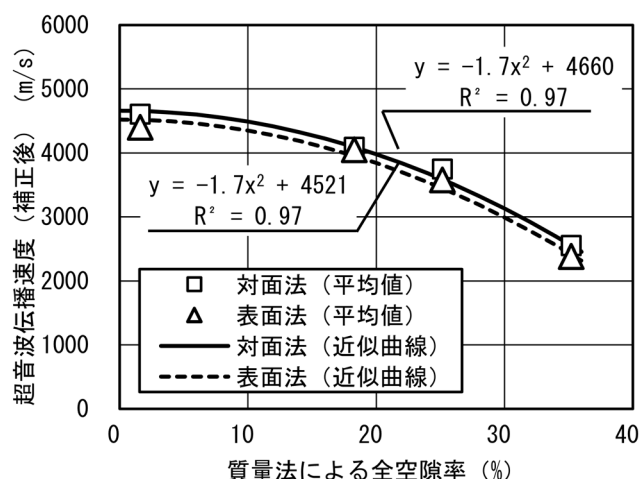
b) 空隙率の影響

図-5.4.4 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)

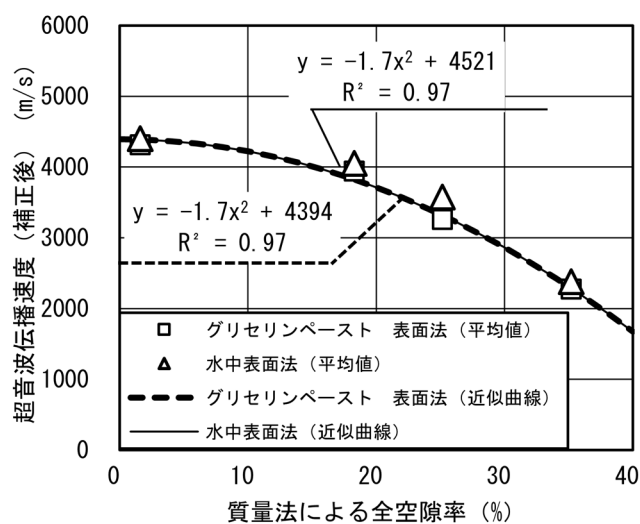
さくなる傾向がある。設計空隙率 35% の場合は、この傾向が明解になるため、より明確であったと考えられる。

2) 表面法

図-5.4.4 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-5.4.4 a) は、空隙率 0% の場合のもので、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、POC 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⁵⁻¹⁶⁾を参考に、式 (5.4.2) 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。



(a) 対面法と表面法の比較 (水中)



(b) 接触媒質の比較

図-5.4.5 超音波伝播速度と空隙率の関係

図-5.4.4 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) 超音波伝播速度と空隙率の関係

図-5.4.5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-5.4.4と同様)である。図-5.4.5 a)は、対面法と表面法の比較、図-5.4.5 b)は、接触媒質の比較を示す。また、同図には、実験結果の全データ(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。

前節5.1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。

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。

5.4.3 実験V-Ⅲのまとめ

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。

【第5章の参考文献】

- 5-1) ACI Committee 522.: 522R-10 report on pervious concrete, pp.2, 2010
- 5-2) Malhotra, V.M.: No-Fine Concrete Its Properties and Application, Journal of ACI, Vol.73, No.11, pp.628-65.4, 1976
- 5-3) 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，日本コンクリート工学会，35.3pp., 2015.6
- 5-4) 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
- 5-5) 吉田知弘，音野琢也，北野嘉乙，国枝稔，鎌田敏郎，六郷恵哲，超音波によるポーラスコンクリートの空隙評価に関する基本的検討，土木学会第59回年次学術講演会，pp.339-340，2004.9
- 5-6) 石黒 覚，伊藤果穂，工藤舞子：ポーラスコンクリート供試体の超音波伝播速度，第5回コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム「非破壊検査が担うコンクリート構造物の調査・点検技術の高度化・効率化」，pp.111-115.2015.8
- 5-7) 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測定に対するシリコーンシートの適用性について基本的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，材料施工，pp.635-636, 2016.8
- 5-8) Biot, M.A.: The theory of propagation of elastic waves in fluid-saturated porous solid.: I. Low frequency range, II. Higher-frequency range, Journal of The Acoustical Society of America, Vol.28, No.2, pp.168-178, 1956.3
- 5-9) Allard, J.F.: Propagation of Sound in Porous Media: Modeling Sound Absorbing Materials, Elsevier Applied Science, London / New York, 1993
- 5-10) 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
- 5-11) 吉田卯三郎：物理学実験，三省堂，1979
- 5-12) Peter, E.H., Nils, J.N. and Bertram, R.: A Formal Basis the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths, IEEE Transactions of System Science and Cybernetics, Vol.4, No.2, 1968.6
- 5-13) 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測定に対するシリコーンシートの適用性について基本的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，2016.8
- 5-14) 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測定へのシリコーンシートの適用性に関する基礎的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，2017.8
- 5-15) 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精度の向上，コンクリート工学年次論文集，Vol.22, No.1, pp.355-360, 2000.7
- 5-16) 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

第6章 打音法によるポーラスコンクリートの品質管理

第6章 打音法によるポーラスコンクリートの品質管理

6.1 背景と目的

前章（第5章）では、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。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⁶⁻¹⁾、および POC の剛性が空隙率と関係があること⁶⁻²⁾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、本章では、超音波法と同様に、打音法はコンクリートの非破壊試験の一つであり、打音法の場合は、試験体を打撃し発生させた音により品質を評価するため、表面がより凹凸する POC の品質管理に有効であると考えられる。

本章では、打音法による POC の品質管理について実験的検討を行う。実験では、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、POC の固有振動数を評価し、空隙率推定の可能性を検討する。また、打音法を用いた POC の空隙率の推定において、試験体の表面の粗さ、および打音診断棒の打撃力の影響に関する検討を行う。

6.2 実験概要（打音法によるポーラスコンクリートの空隙率推定）

6.2.1 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⁶⁻³⁾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⁶⁻⁴⁾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。

6.2.2 実験方法

(1) 実験の要因と水準

表-6.2.1 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)。

(2) 使用材料および調合

表-6.2.2 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-6.2.3 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

表-6.2.1 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

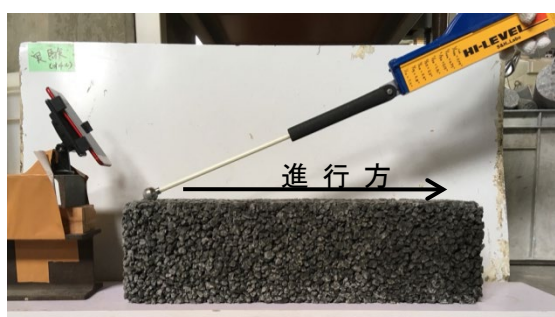
表-6.2.2 ポーラスコンクリートの使用材料

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	—

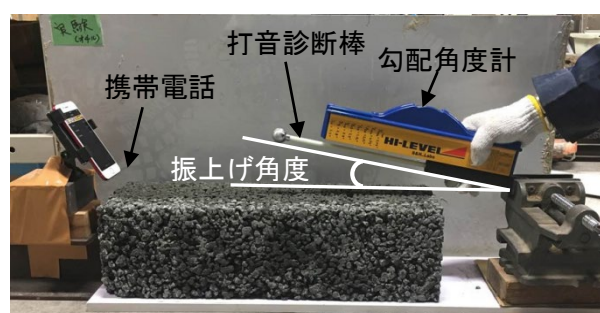
表-6.2.3 ポーラスコンクリートの調合表

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-6.1 打音法の測定方法

視で確認した。

(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 (150×150×530mm) 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。

(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-6.2.1 に、POC に対する打音法の測定方法を示す。なお、写真-6.1 a) に擦過音の測定様子

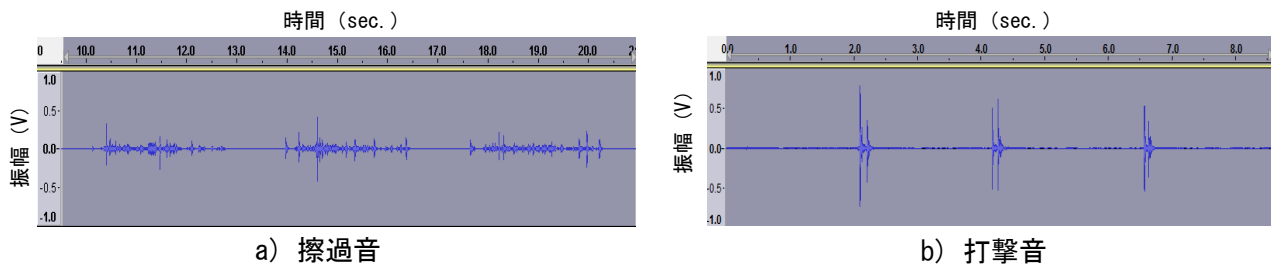


図-6.1 振幅と時間の関係

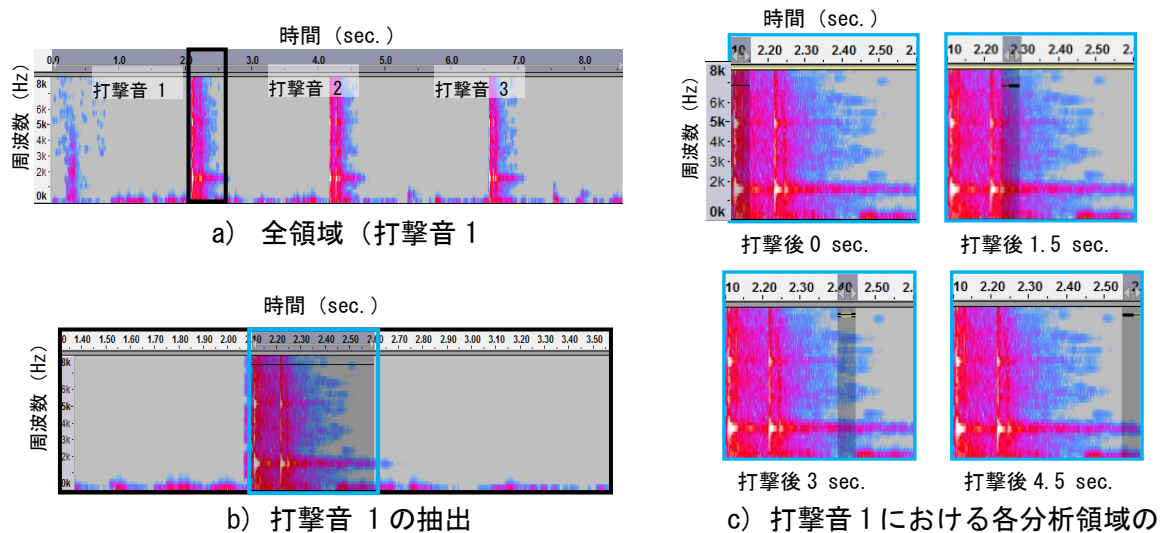


図-6.2 打撃音の分析領域の選択フロー

を、写真-6.1 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-6.1 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-6.2 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

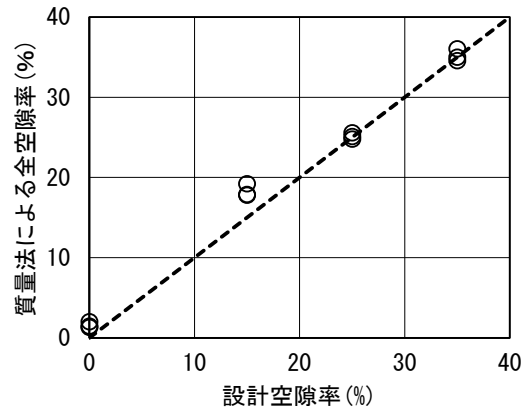


図-6.3 質量法による全空隙率と設計空隙率の関係

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(6.1)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。

$$E = 9.47 \times 10^{-4} \frac{L^3 T}{bt^3} mf^2 \quad (6.1)$$

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。

6.2.3 実験結果とその考察

(1) 空隙率

図-6.3 に、POC の質量法による全空隙率と設計空隙率の関係を示す。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。

(2) 音圧レベルと周波数の関係

図-6.4 に、FFT 分析による音圧レベルと周波数の関係を示す。図-6.4 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-6.4 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-6.5 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⁵⁾。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-6.4 a) の周波数が 1.5 kHz の音は、他より長い

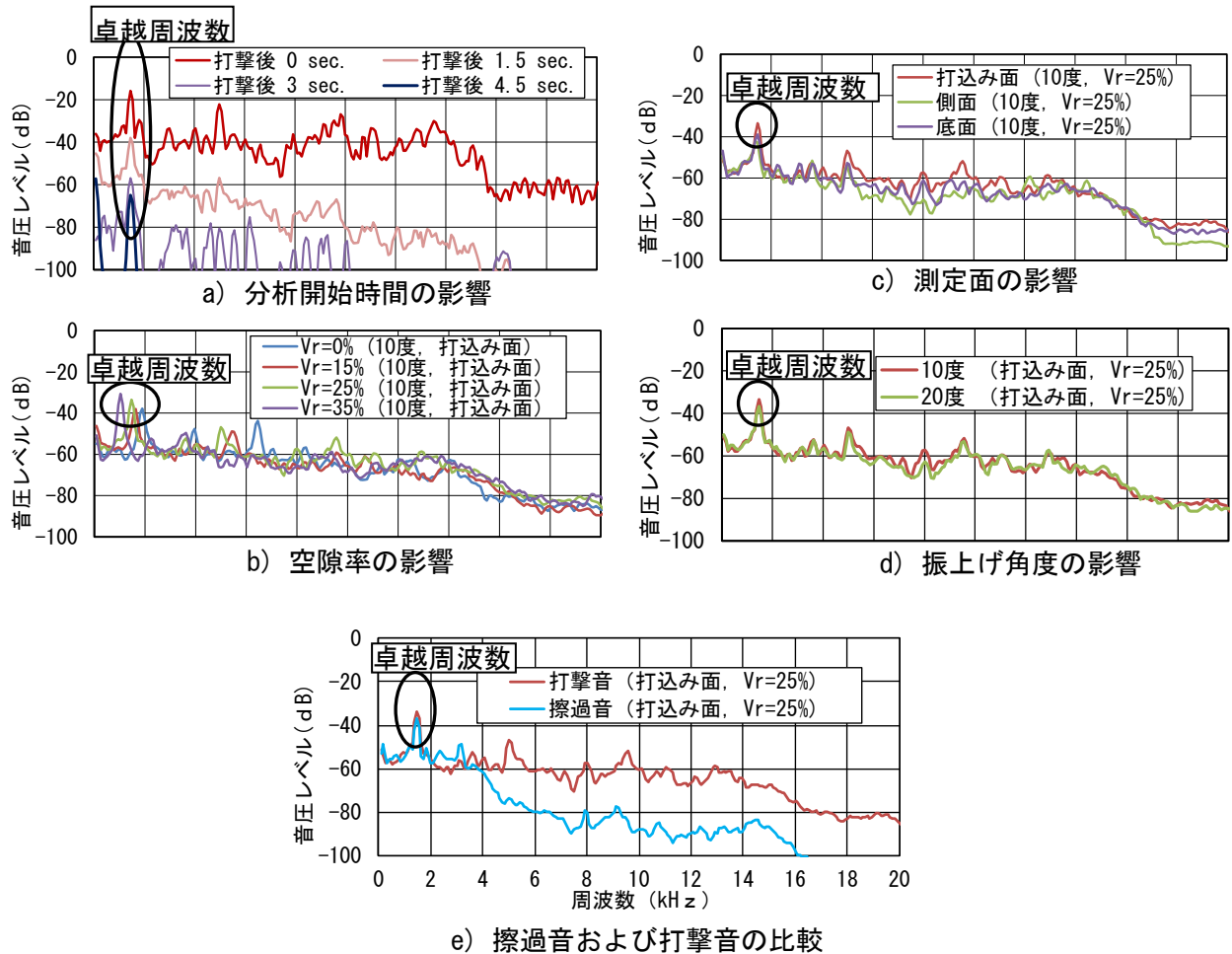


図-6.4 打音法による音圧レベルと周波数の関係

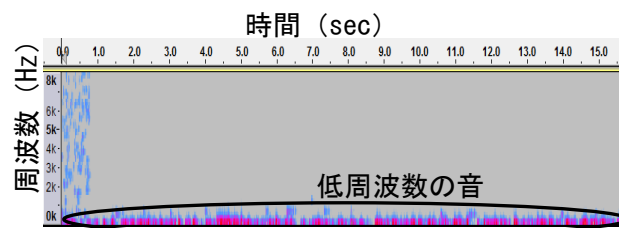


図-6.5 環境音における周波数スペクトル

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-6.4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

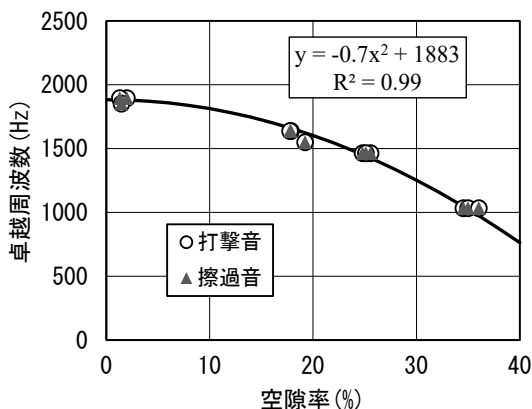


図-6.6 卓越周波数と空隙率の関係

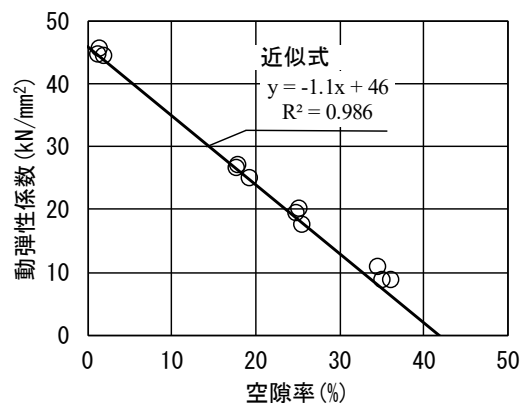


図-6.7 動弾性係数と空隙率の関係

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-6.4 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。

(3) 卓越周波数と空隙率の関係

図-6.6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) 動弾性係数と空隙率の関係

図-6.7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(6.2.2)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(6.2)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。

$$E = -\frac{B}{(100-G)}V_R + B \quad (6.2)$$

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、JISA 1127 による円柱試験体の実験結果でも見られる^{6.5)}。

(5) 卓越周波数と動弾性係数の関係

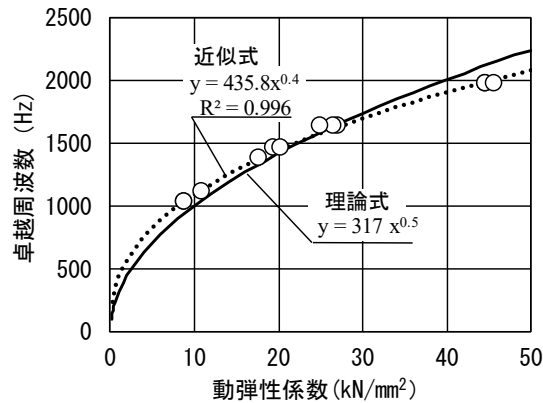


図-6.8 卓越周波数と動弾性係数の関係

図-6.8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、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 ($150 \times 150 \times 530\text{mm}$) および平均質量 (24kg) などにより算出した結果、 $C = 317 (1/\sqrt{\text{kg}/\text{mm}})$ 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ことが分かる。したがって、図-6.6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に変化するためであるといえる。

6.3 まとめ

本章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。

【第6章の参考文献】

- 6-1) 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
- 6-2) 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
- 6-3) 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.143-16.2, 1996
- 6-4) 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
- 6-5) 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

第7章 二種類の弾性波法の適用性に関する検討

第7章 二種類の弾性波法の適用性に関する検討

7.1 はじめに

本章では、POCの実施工現場の品質管理に向けて、二種類の弾性波法の適用性に関する検討を行った。超音波法について、POCの表面法による超音波伝播速度の測定において、超音波のコンクリート中の伝播経路に関する実験を行った。また、打音法について、POCの固有振動数と空隙率の関係を影響する要因と考えられる、部材のサイズ、境界条件などの影響に関する実験的検討を行った。

7.2 超音波の POC 内の伝播経路について

7.2.1 POC の超音波伝播経路

既往研究⁷⁻¹⁾によれば、鋼における超音波伝播速度の測定では、発振子から発生した縦波が部材の上部を伝播し、最初に受振子に到達する（図-7.2.1 に参考）。また、普通コンクリートにおける超音波伝播速度の測定では、図-7.2.2 に示すように⁷⁻²⁾、超音波が底面の部分においてほぼ表層を伝播するが、打込み面（打設面）において表層からある厚みのところを最短経路（伝播時間が最短となる経路）を伝播すると報告している。これは、普通コンクリートの底面の部分がほぼ均一な品質なものであるに対し、その打込み面の部分が施工時のブリーディングなどにより、表層に近いほど品質が悪く、超音波伝播速度が小さくなるためである。

一方、本論文の実験V-IIIの結果によれば、POC の対面法による超音波伝播速度は、図-7.2.3 に示すように、表面から 25mm, 75mm, 125mm の位置でほぼ同じ値となっている。また、POC は普通コンクリートと比べて比較的大きいかつ多い空隙を持つため、超音波伝播経路が非常に長くなる。したがって、これらを考慮すれば、POC における表面法による超音波伝播速度の測定では、超音波がほぼ表層部分を伝播すると考えられる。しかし、これはまだ実験的に検討されていないため、本節では、超音波の POC 内の伝播経路について実験的検討を行う。

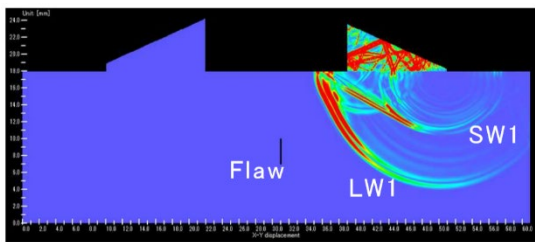


図-7.2.1 シミュレータによる超音波伝播⁷⁻¹⁾

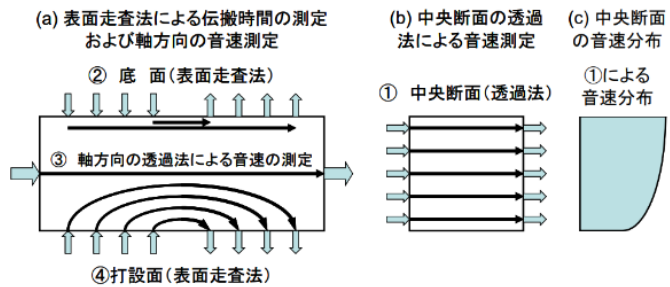
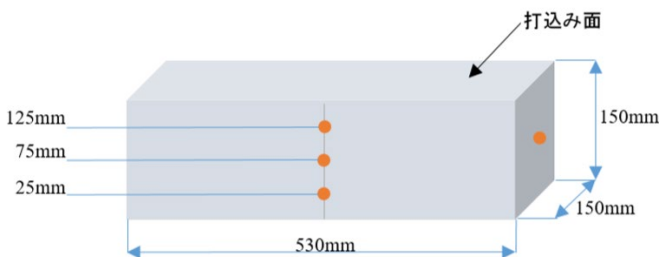
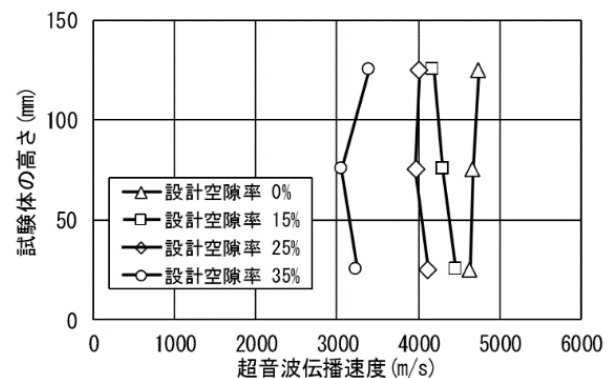


図-7.2.2 コンクリート内部の超音波伝播⁷⁻²⁾



a) 超音波伝播速度の測定位置



b) 超音波伝播速度の測定結果

図-7.2.3 POC の試験体高さ と超音波伝播速度の関係

7.2.2 超音波伝播経路の計算

図-7.2.4に、超音波がコンクリートの中を伝播するイメージを示す。普通コンクリートの表面法による超音波伝播速度の測定では、超音波の伝播経路は、式(7.2.1)を用いて補正することが提案されている^{7.2)}。同式を用いて超音波の伝播経路を計算できる。

$$L' = (L - x)(1 + \alpha) \quad (7.2.1)$$

$$\alpha = \frac{V_{\text{対}}}{V_{\text{見}}} \times \frac{L}{L-x} - 1$$

ここに、 L' ：補正距離 (mm)、 L ：発・受振子中心間距離 (mm)、 x ：発・受振子をもっとも近づけた時の補正距離 (mm)、 α ：コンクリートの表面法による超音波伝播経路の補正係数、 $V_{\text{対}}$ ：対面法による超音波伝播速度 (m/s)、 $V_{\text{見}}$ ：表面法による超音波伝播見かけ速度 (m/s)

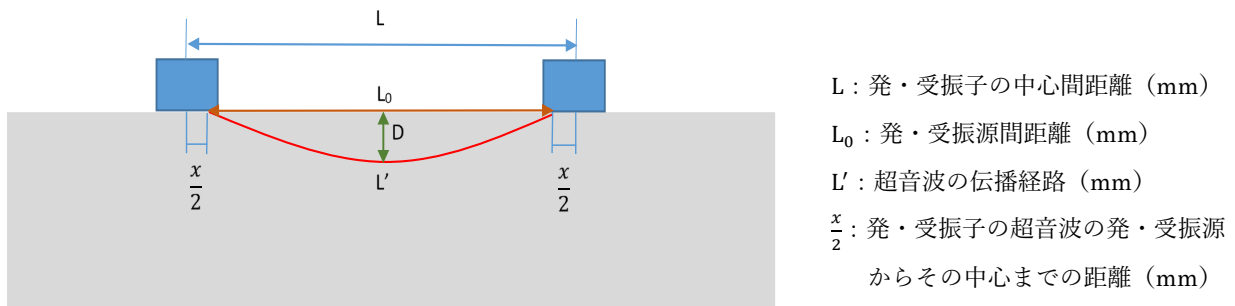


図-7.2.4 コンクリート内部の超音波の伝播経路

(1) 発・受振子間距離の補正

図-7.2.5に、本論文の実験V-IIIの空隙率が0%の場合の発・受振子間中心距離と伝播時間の関係を示す。超音波の伝播時間が0になる時に、その発・受振源間距離は0になるべきである。しかし、発・受振子の中心間距離は0になっていない。この原因として、発・受振源間距離と中心間距離の間の差（補正距離 x ）が考えられる。超音波伝播速度を正確に測定するために、この差を補正する必要がある。また、同図の y 切片は、試験体の側面および底面にかかわらず 33mm 程度になっている。

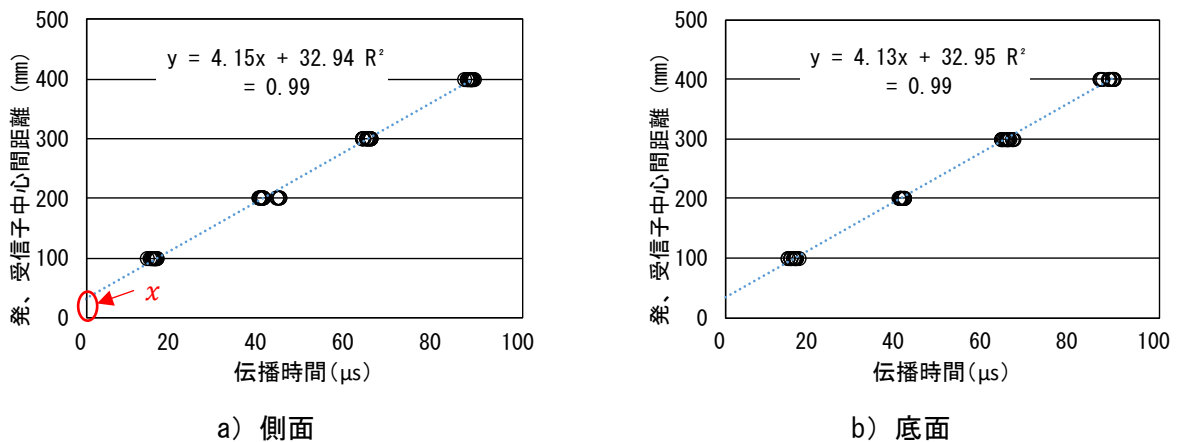


図-7.2.5 発・受振子間距離の補正

(2) 伝播経路の補正係数および伝播経路

表-7.2.1 に、式(7.2.1)を用いて計算した普通コンクリート ($V_R = 0$) の伝播経路を示す。なお、他の各データは本論文の実験V-IIIの結果を用いた。同表によれば、伝播経路の補正係数 α が 0.1 程度になっている。

表-7.2.1 普通コンクリートの超音波伝播経路

	発・受振子の中心間距離 L (mm)			
	100	200	300	400
表面法による見かけ音速 (m/s)	6315	4901	4612	4529
対面法による速度 (m/s)	4607	4607	4607	4607
発・受振子間補正距離 (mm)	33	33	33	33
伝播経路の補正係数 α	0.09	0.13	0.12	0.11
伝播経路 L' (mm)	73.0	188.0	299.7	406.9

また、本論文の実験V-IIIの結果によれば、POCの超音波伝播速度は、固体部分 ($V_R = 0$ 時のコンクリートと同性質) を伝播する経路に依存し、固体部分の速度は、空隙率が 0 時の伝播速度であることが知られている。したがって、以下のように、表面法による POC の超音波伝播速度の測定式 (7.2.2) を導出できる。式(7.2.2)によれば、 $V_R = 0$ 時のコンクリートにおいて C , x , α を決めて、伝播時間を計測することにより、表面法を用いて POC の超音波伝播速度を測定可能であると考えている。

対面法の場合：

$$\frac{L_{POC-T}}{v_{CON-T}} = \frac{L_{CON-T}}{v_{POC-T}}$$

$$L_{POC-T} = \frac{v_{CON-T}}{v_{POC-T}} L_{CON}$$

表面法の場合：

$$\alpha_{POC} = \frac{v_{CON-T}}{v_{CON-H}} \times \frac{L_{POC-T}}{L-x} - 1$$

$$\text{ここに、} \alpha_{POC} = \frac{v_{CON-T}}{v_{CON-H}} \times \frac{L_{POC-T}}{L-x_{POC}} - 1 = \frac{v_{CON-T}}{v_{CON-H}} \times \frac{L \frac{v_{CON-T}}{v_{POC-T}}}{(L-x) \frac{v_{CON-T}}{v_{POC-T}}} - 1$$

$$\text{したがって、} 1 + \alpha_{POC} = (1 + \alpha) \frac{v_{CON-T}}{v_{POC-T}}$$

$$L_{POC} = (L - x)(1 + \alpha) \frac{v_{CON-T}}{v_{POC-T}}$$

$$v_{POC} = \frac{v_{CON-T} L_{CON}}{v_{POC-T} t} = \frac{(L-x)(1+\alpha) v_{CON-T}}{t v_{POC-T}} \quad (7.2.2)$$

$$C = \frac{v_{CON-T}}{v_{POC-T}} \text{ (第 3 章のモデルを用い、} V_R = 0 \text{ 時のコンクリートの伝播速度および設計空隙}$$

率により計算する)

ここに、 L_{POC-T} : POC の対面法による超音波伝播経路 (mm), L_{POC-H} : POC の表面法による超音波伝播経路 (mm), L_{CON-H} : 普通コンクリート ($V_R = 0$) の対面法による超音波伝播経路 (mm), v_{POC-T} : POC の対面法による超音波伝播速度 (m/s), v_{CON-T} : 普通コンクリート ($V_R = 0$) の対面法による超音波伝播速度 (m/s), α_{POC} : POC の表面法の測定における伝播経路の補正係数 (mm), L : 発・受振子中心間距離 (mm), x : 発・受振子をもっとも近づけた時の補正距離 (mm), α : コンクリート ($V_R = 0$) の表面法の測定にける超音波伝播経路の補正係数

(2) 伝播経路の深さ

図-7.2.6 に、超音波の伝播経路の計算を示す。超音波の伝播経路を図に示す二種類と仮定した。a) は、ほぼ扇形の伝播で、概ね三角形モデルにより近似できる。b) は、ほぼ水平で伝播して、発・受振子の近い位置で強く曲げる形で、概ね四角形モデルにより近似できる。各モデルにおいて計算した超音波伝播経路の深さを表-7.2.2 に示す。四角形の方は、深さは、20mm 以下となっている。これは、6号砕石(粒径:5~13mm)を用いたコンクリートでは、約1骨材分の量であり、ほぼ表層部分に伝播すると考えられる。一方、三角形モデルの場合は、伝播経路が比較的大きな深さまで入っている。したがって、深さの影響を明解にするため、次節に記述する実験を行った。

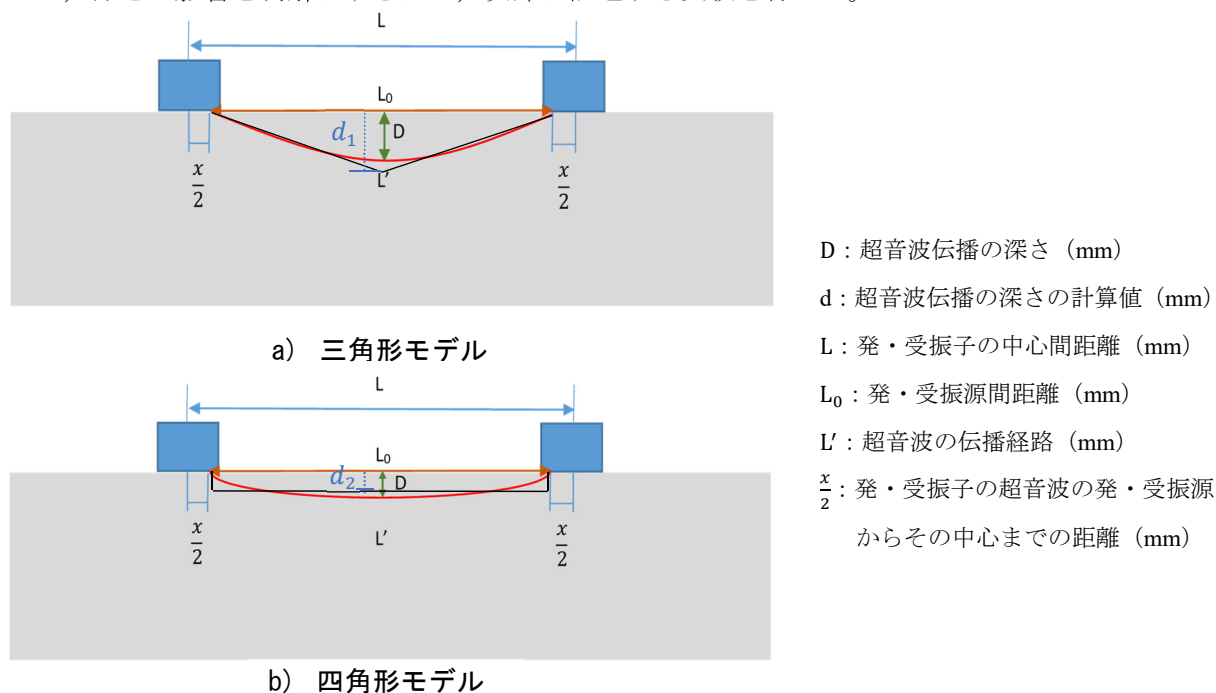


図-7.2.6 超音波伝播経路の深さの計算

表-7.2.2 コンクリートの超音波伝播経路の深さ

	発・受振子の中心間距離 L (mm)			
	100	200	300	400
伝播経路 L' (mm)	73.0	188.0	299.7	406.9
伝播深さ (三角形) d_1 (mm)	14.4	43.2	68.1	87.9
伝播深さ (四角形) d_2 (mm)	3.0	10.5	16.4	19.9

7.3 POCの超音波伝播経路の解明に関する実験

7.3.1 実験概要

(1) 実験の要因と水準

表-7.3.1に、実験の要因と水準を示す。本実験では、試験体の設計空隙率を0%と25%とし、試験体高さを100mm、50mm、25mmとした。骨材は、JISに規定された6号砕石(5~12mm)を用いて、結合材として水セメント比が0.3となるセメントペーストを用いた。セメントは早強セメント、水は上水道水を用いた。

表-7.3.1 実験要因と水準

要因	水準
設計空隙率 (%)	0, 25
試験体高さ (mm)	100, 50, 25

(2) 試験体の作製

図-7.3.1に、試験体の作製モデルを示す。図に示すように、100×100×400mmの鋼製型枠の中に、発泡スチロールの設置により高さを100mm、50mm、25mmとなる試験体を作製した。POCの調合は、本論文の第5章の実験V-IIIと全く同じものとした。

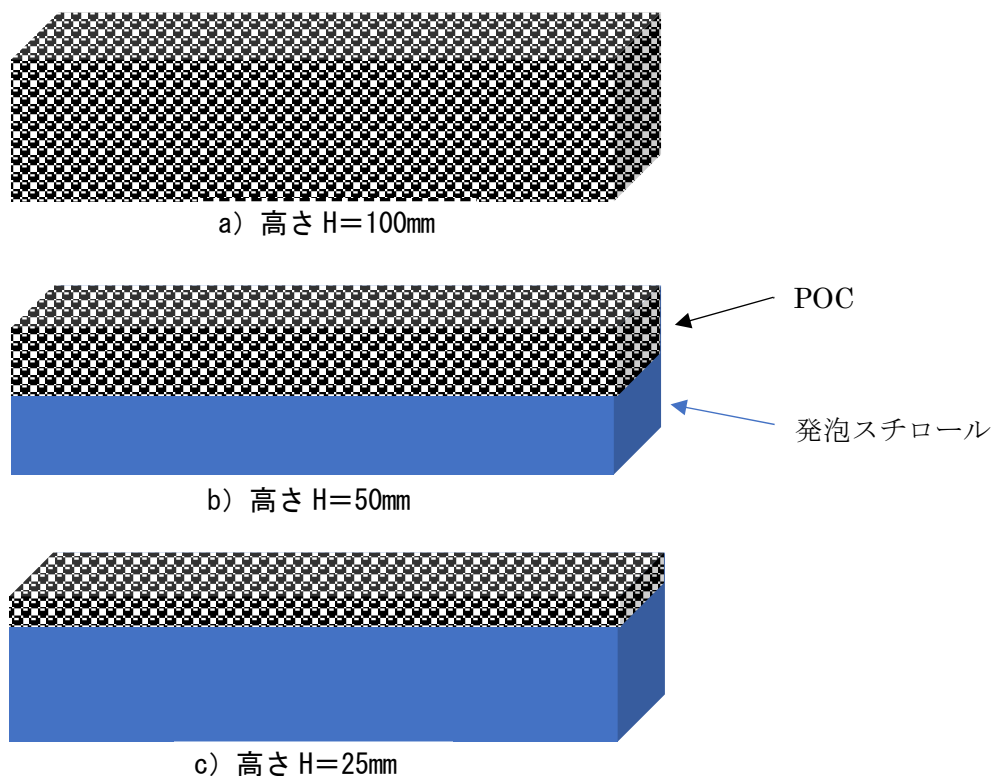


図-7.3.1 試験体の作製モデル

(3) 超音波伝播速度の測定

図-7.3.2 に、超音波伝播速度の測定を示す。各試験体において超音波測定方法に対面法および表面法の測定を行った。対面法の場合は、試験体の長さ方向に測定し、表面法は、試験体の打込み面において発・受信子間距離が 100mm、200mm、300mm、400mm の位置で測定を行った。

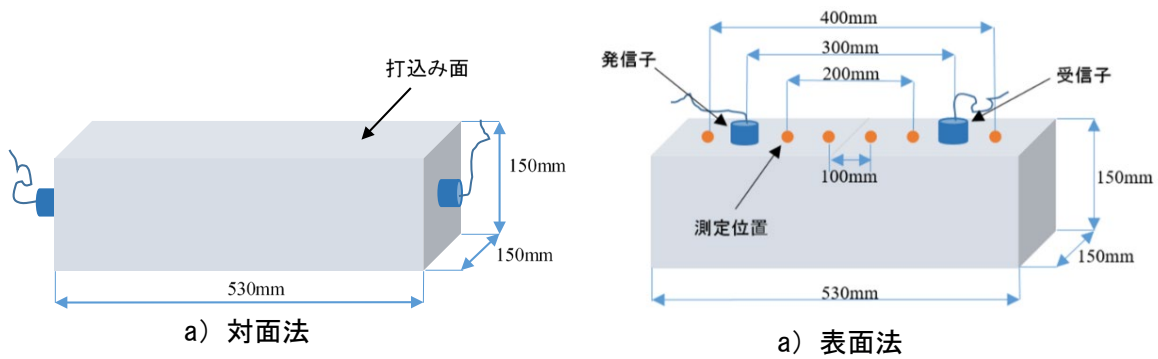


図-7.3.2 超音波伝播速度の測定

7.3.2 実験結果

(1) 空隙率

図-7.3.3 に、実測空隙率（質量法による全空隙率）と設計空隙率の比較を示す。図によれば、試験体の高さが小さくなるほど実測空隙率が大きくなっている。これは、試験体が小さくなるほど単位体積に当たる壁効果に影響が大きくなるためであると考えられる。また、高さ $h=100\text{mm}$ の場合は、設計空隙率と近い値となっている。

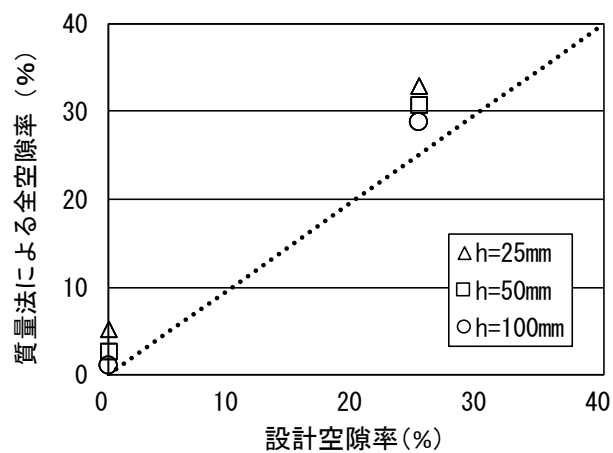


図-7.3.3 実測空隙率と設計空隙率の比較

(2) 超音波伝播距離の補正

図-7.3.4に、発・受振子間距離と伝播時間の関係を示す。なお、高さが100mm、設計空隙率が0%の試験体の測定結果を打込み面、側面および底面に分けて示す。図によれば、側面と底面の場合はほぼ同程度であるが、表面の場合はバラツキが大きくなっている。この原因としては、試験体の打込み面にビニル袋を被って養生したため、表面に凹凸する傷ができたことにより、伝播経路が一定とならず伝播時間のバラツキが生じたと考えている。また、前節に記述した通りに、底面の測定結果による近似線のy切片を発・受振子間距離の補正係数($x=25.6$)とした。表-7.3.2に、超音波伝播の伝播経路の補正係数(α)を示す。測定結果により補正係数(α)を0.06とした。また、伝播経路は式(7.3.1)を用いて補正した。

$$L_{POC} = (L - 25.6)(1 + 0.06)C \quad (7.3.1)$$

$$C = \frac{v_{CON-T}}{v_{POC-T}}$$

$$C_{Vr=0} = 1, C_{POC} = 1.39$$

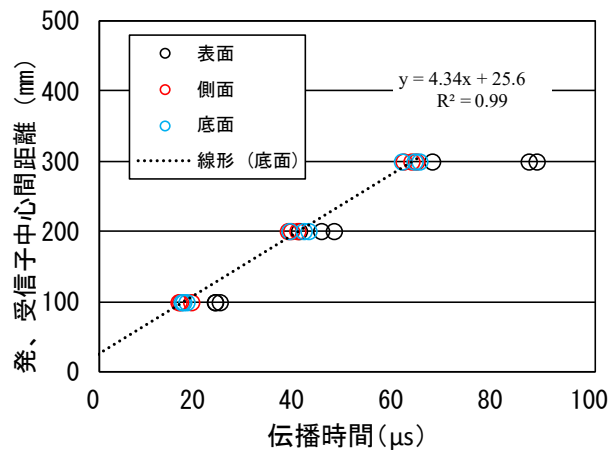


図-7.3.4 発・受振子間距離と伝播時間の関係

表-7.3.2 超音波伝播経路の補正係数

	発・受振子の中心間距離 L (mm)		
	100	200	300
表面法による見かけ音速 (m/s)	5854	4943	4767
対面法による速度 (m/s)	4631	4631	4631
発・受振子間補正距離 (mm)	25.6	25.6	25.6
伝播経路の補正係数 α	0.06	0.07	0.06

(3) 超音波伝播速度と発・受振子間距離の関係

図-7.3.5に、超音波伝播速度と発・受振子間距離の関係を示す。なお、試験体の打込み面において測定した、設計空隙率の0%および25%の結果を、図a)および図b)に伝播距離の補正前と補正後に分けて示す。各図によれば、試験体の高の影響はほぼ見られなかった。設計空隙率の25%の場合、伝播距離を補正後の表面法による超音波伝播速度は、ほぼ対面法の結果と同程度であるに対し、設計空隙率の0%の場合には一致していないことが確認された。これは、前述したように設計空隙率の0%の場合には表面が凸凹な傷があったため、式(7.3.1)の $C_{Vr=0}$ が1より大きいため、1で補正した場合は、超音波伝播速度が小さく測定されたと考えている。

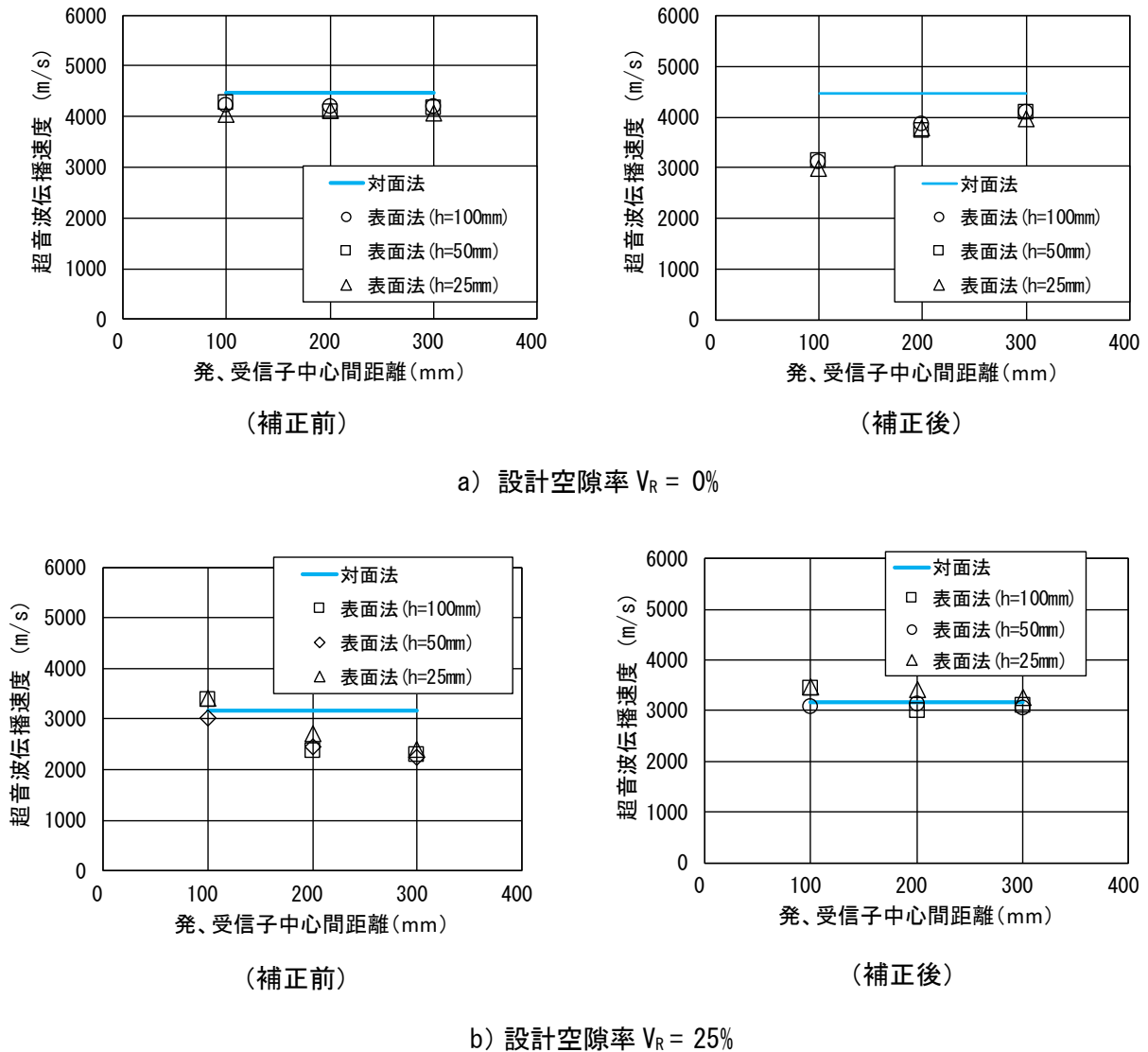


図-7.3.5 超音波伝播速度と発・受振間距離の関係（打込み面）

(3) 超音波伝播速度と設計空隙率の関係

図-7.3.6 に、超音波伝播速度と設計空隙率の関係を示す。図によれば、設計空隙率の 25% の場合において、対面法および表面法による超音波伝播速度はほぼ一致し、超音波伝播速度と空隙率の関係は、本論の第三章から導出した計算式にほぼ合致することが確認された。このことより、現場測定では、施工時に型枠に打ち込んで作製した普通コンクリート（空隙率が 0%）の試験体を用いて伝播距離の補正を行い、POC の打込み面で超音波伝播の時間を測定すれば、その空隙率を測定できると考えている。

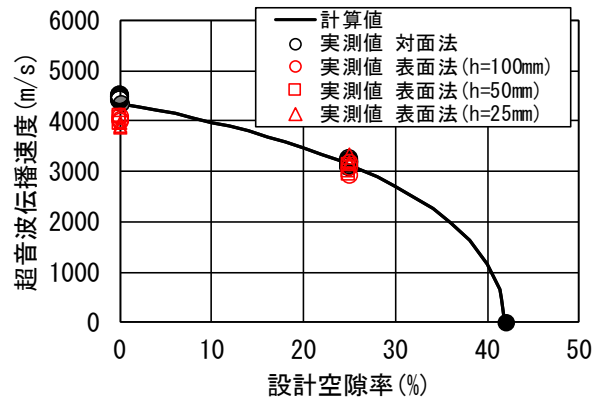


図-7.3.6 超音波伝播速度と設計空隙率の関係

7.4 試験体の寸法が POC の固有振動数に与える影響

第3章に記述した通り、POC 部材の曲げ・せん断振動における固有振動数と空隙率の関係は式(7.4.1)により表示できる。同式によれば、固有振動数は試験体の両端の拘束状況、振動モードおよび寸法の影響を受けることがわかる。本節では、これらの影響を実験的および解析的に検討することを目的とした。

$$f_{n(POC-M)} = K_{n-M} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (7.4.1)$$

$$K_{n-M} = \frac{\lambda_{n-M}}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{I}{A}}$$

ここに、 $f_{n(POC-M)}$: POC の曲げ・せん断振動による固有振動数 (Hz)、 n : 振動系の次数、 K_{n-M} : 試験体の寸法、振動モードおよび境界条件による係数、 E : 弾性係数 (kN/mm²)、 ρ : 密度 (g/cm³)、 λ_{n-M} : 両端の拘束状況および振動モードによって決まる定数、 L : 試験体の長さ (m)、 I : 試験体の断面 2 次モーメント (m⁴)、 A : 試験体の長さの直方向の面積 (m²)

7.4.1 試験体の寸法の影響

図-7.4.1 に、POC の固有振動数および設計空隙率の関係を示す。同図には、前節の試験体を用いて、打音法により測定した固有振動数の実験値と共に、式(7.4.1)による計算値および Femap による解析値も示す。ここに、解析値は実験と同様な試験体 (100×100×400mm) を用いて、Femap による固有値の解析を行いました。図-7.4.2 に、解析に用いたモデルの例を示す。計算値は、両端の拘束状況は自由-自由として、一次振動モードの式(7.4.2)により算出した。ここに、試験体長さは、0.4m とし、厚さはそれぞれ 0.1m, 0.05m, 0.025m とした。

$$K_{1-M} = \frac{3.927}{2\pi \cdot 0.4^2} \sqrt{\frac{1}{12}} h \quad (7.4.2)$$

ここに、 K_{1-M} : 一次の曲げ・せん断振動における係数、 h : 試験体の高さ (m)

図-7.4.1 によれば、POC の固有振動数と空隙率の関係は、計算値と解析値はほぼ一致し、実験値の方が少し小さく測定されている。これは、実験では、完全に拘束されない条件を作ることは困難であるため、固有振動数が小さく測定されたと考えている。また、試験体の高さが 25mm の場合は、固有振動数の測定は、容易ではないことが分かった。

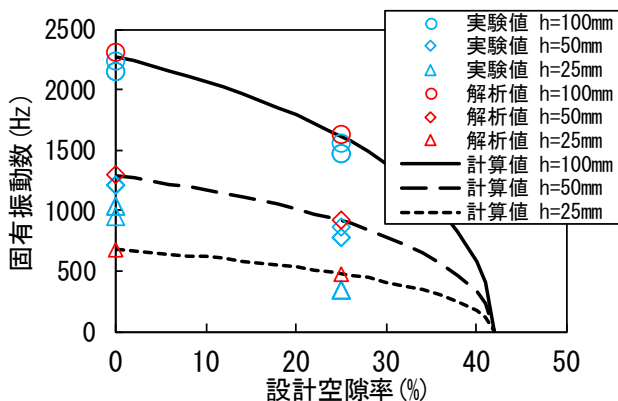


図-7.4.1 固有振動数と設計空隙率の関係

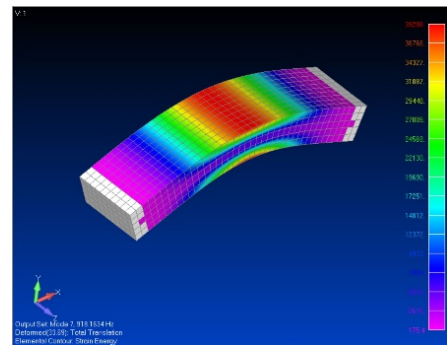


図-7.4.2 Femap 解析に用いたモデル

また、Femap 解析による固有振動数は、振動波動論による計算値および実験値とほぼ同程度であることが確認された。したがって、POC 構造の固有振動数と空隙率の関係は、その拘束条件および寸法が分かれば、振動波動論による計算式および femap 解析で概ね予測できると考えている。

図-7.4.3 に、固有振動数と設計空隙率の関係に及ぼす試験体の寸法の影響を示す。同図には、本論文の第六章の試験体 (150×150×530mm) を標準とし、その高さ、幅および長さをそれぞれ変化させ、固有振動数-設計空隙率関係に及ぼす影響について検討した。計算値は振動波動論により算出した結果であり、解析値は femap による固有値解析の結果である。図によれば、POC の固有振動数-設計空隙率関係は、試験体の高さおよび長さの影響を大きく受け、幅の影響をほぼ受けないことが確認された。また、計算値と解析値は図-7.4.1 の結果と同様にほぼ一致している。

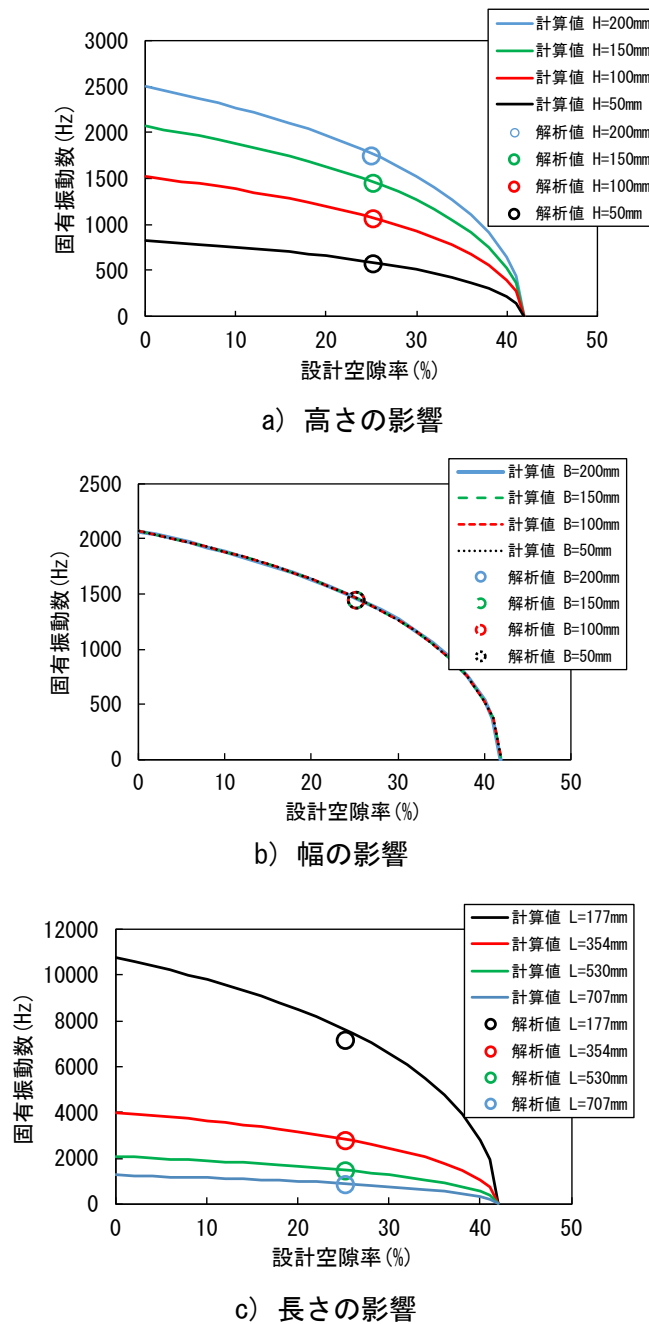


図-7.4.3 固有振動数と設計空隙率の関係に及ぼす試験体寸法の影響

7.4.2 試験体の拘束状態の影響

打音法による POC 舗装の品質管理では、路床の影響を検討する必要がある。したがって、写真-7.4.1 示すように、試験体の下に、木板、砂、碎石およびコンクリートがある場合において、曲げ・せん断振動の打音法による固有振動数の測定を行った。その結果を、表-7.4.1 に示す。表によれば、木板、砂および碎石の場合は、固有振動数はほぼ同じであるが、コンクリートの場合は、若干大きくなっている。この結果から、打音法による POC の舗装に品質管理では、路床には砂、碎石など柔らかいものであれば、影響をほぼ受けないが、普通コンクリートのような固いものであれば、影響を受けるため、測定時にその影響を考慮する必要があることが分かった。



写真-7.4.1 路床の種類

表-7.4.1 曲げ・せん断振動による固有振動数

路床の種類	固有振動数 (Hz)
木板	1378
砂	1378
碎石	1378
普通コンクリート	1464

7.5 まとめ

本章から得られた知見を以下に示す。

- 1) 表面法による超音波伝播速度の測定では、POC の中を伝播する超音波の経路を補正することによって、振動波動論による超音波伝播速度－空隙率関係の理論式を用いることができ、超音波による POC 構造体の品質管理は可能であることが明らかとなった。
- 2) 表面法による超音波伝播速度の測定における、コンクリート中の超音波伝播経路は、四角モデルにより概ね算出可能であり、伝播経路の深さは、本実験では発・受振子間距離の 0.05 倍程度であり、骨材粒径 (5~13mm) 以内にあることが確認された。
- 3) 打音法では、部材のサイズ、境界条件など影響を大きく受けるため、現時点では現場の品質管理への適用が困難であることを示した。

【第7章の参考文献】

- 7-1) 田中雄介, 大平克己, 小倉幸夫: シミュレータによる超音波伝搬の可視化, http://www.jp-probe.com/ch/news/up_img/1406620516-216560_f4.pdf
- 7-2) 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).

第8章 ポーラスコンクリートの品質管理手法

第8章 ポーラスコンクリートの品質管理手法

8.1 はじめに

本章では、第1.から7.章で得られた研究成果に基づいて、現場に施工された POC の品質管理手法の一例として、文献⁸⁻¹⁾に示された POC の舗装の施工手順およびその強度管理方法試案を概説し、現場施工された POC の空隙率および強度の管理手法に関する検討を行う。

8.2 POC 舗装の施工手順

POC の施工は、図-8.1 に示すような流れとなる。同図中には各段階における品質管理項目の例を示す。この中で、施工された POC の品質管理は締固め後の養生期間および完成した後に行われるのが一般的であり、適切な品質管理のもとに、安定した POC の生産は可能となってきた。

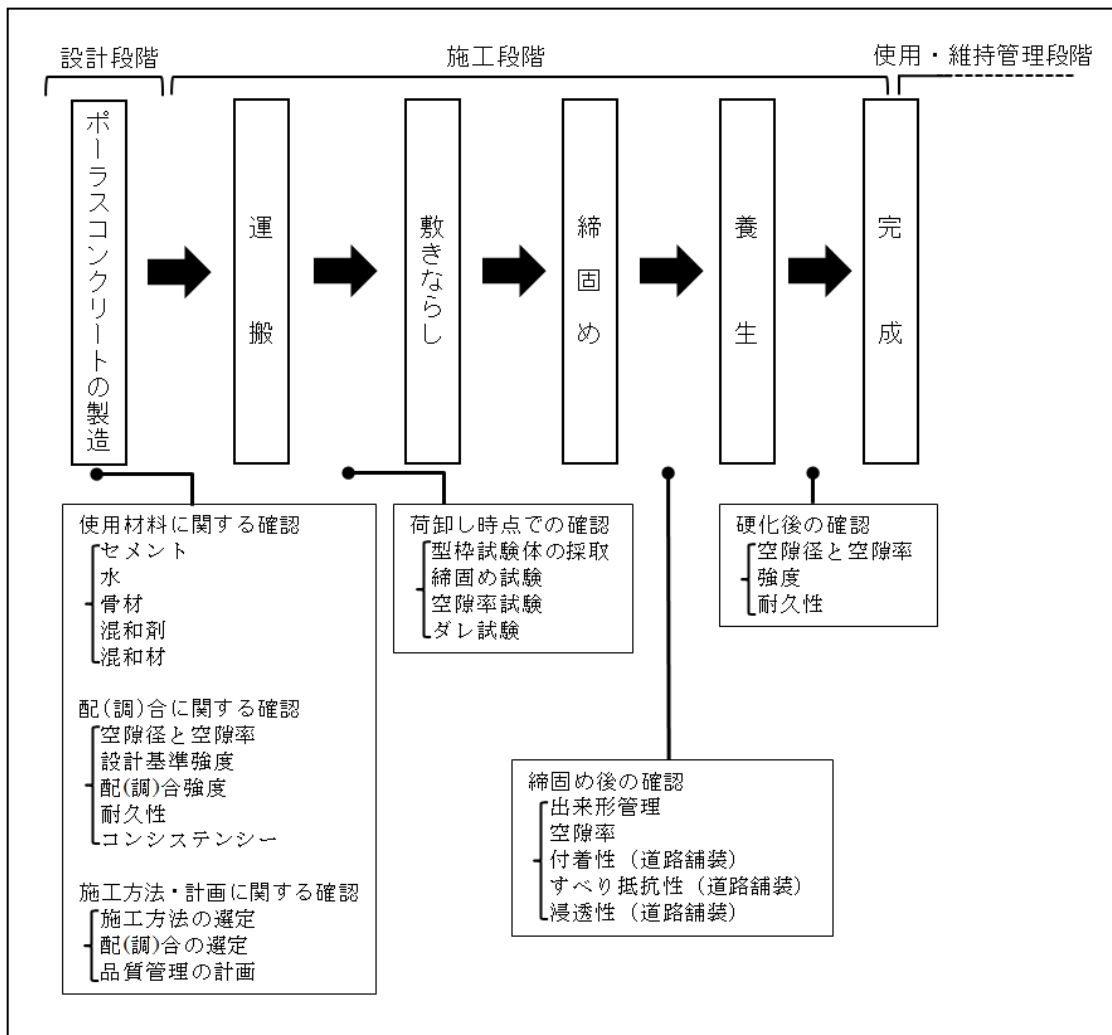


図-8.1 POCの施工フローおよび品質管理項目⁸⁻¹⁾

しかし、現時点ではここで示した各種の品質管理項目のうち実施された構造体 POC の空隙率および強度の評価に関して問題点が指摘されている。すなわち、普通コンクリートでは施工同時に作製された型枠試験体で強度の評価が行われているが、POC では施工時の締固めの程度により空隙率が大幅に変化するため、型枠試験体の空隙率および強度をそのまま用いることができず、構造体の空隙率の評

価は不可欠となる点がある。本研究から提案される品質管理方法は施工が完成した後のものである。

8.3 強度管理方法試案と新方法の提案

POCの強度管理方法に関する問題点について、文献⁸⁻¹⁾には以下に示すような試案が提案されている。

ポーラスコンクリートの強度管理方法は、下記のいずれかによる。

- 1) 構造体から採取した供試体による。
- 2) 構造体の実測空隙率および自社で作成した強度－空隙率関係からの推定による。
- 3) 目標空隙率および締固め度により推定した空隙率および自社で作成した強度－空隙率関係からの推定による。
- 4) 各社で定める方法による。

上記の四つの方法は、1) は現場、または製品の構造体 POC からコア抜きおよび切り出して採取された試験体により強度を直接測定する方法であり、現状で一般的に行われる構造体 POC の品質がより適切に評価される方法である。

2) は厚さが薄いなどによる現場、または製品から強度用試験体が採取できない場合に、空隙率用の試験体を採取し、実測された空隙率および強度と空隙率関係式を用いて強度を推定する方法である。

3) は調合上の目標空隙率とともに締固め度によって推定された空隙率および強度と空隙率関係式を用いて強度を推定する方法である。

4) は上記の三つの方法が採用できない場合などに、各社独自の方法を用いて品質管理をすることである。

この中で、1) と 2) はいずれも構造体から採取された試験体による方法であり、構造に傷が付き、作業量が多いなど問題点があるため、実務の現場においては、敬遠される傾向にある。3) は実測された空隙率を用いていないことで精度において問題がある。この問題に対して、本研究では、構造体に傷が付かない、精度的には 2) と 3) 間に位置付けられるような、非破壊試験による POC 舗装の空隙率および強度管理方法として以下の方法を提案する。

提案手法：

非破壊検査（超音波法など）により構造体の空隙率を推定し、自社で作成した関係から強度を推定する。

上記は現場、または製品などの構造体 POC から超音波伝播速度測定し、事前の作製された空隙率－超音波伝播速度、空隙率－強度関係式を用いて強度を推定する方法を示した内容である。

8.4 まとめ

本章では、現場施工された POC の空隙率および強度管理手法に関する検討を行った結果、超音波法による POC の空隙率および強度推定の可能性を示し、超音波法による簡易かつ実用的な強度管理方法試案を提案した。

【第 8 章の参考文献】

- 8-1) 性能設計対応型 POC 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協会, pp.1-157, 2015.7

第9章 総括および今後の課題

第9章 総括および今後の課題

9.1 総括

本研究の各章で行われた研究内容の相互関係を、図-9.1に示す。

各章ごとに得られたまとめを以下に示す。

第1章 序論では、本研究の背景として、POCの実用化が推進されている現状と品質管理方法の問題点について整理し、本研究の目的を示した。

第2章 既往の研究では、POCの各基本特性、品質管理手法およびコンクリートの弾性波法（超音波および打音法）に関する既往の研究を取りまとめた。

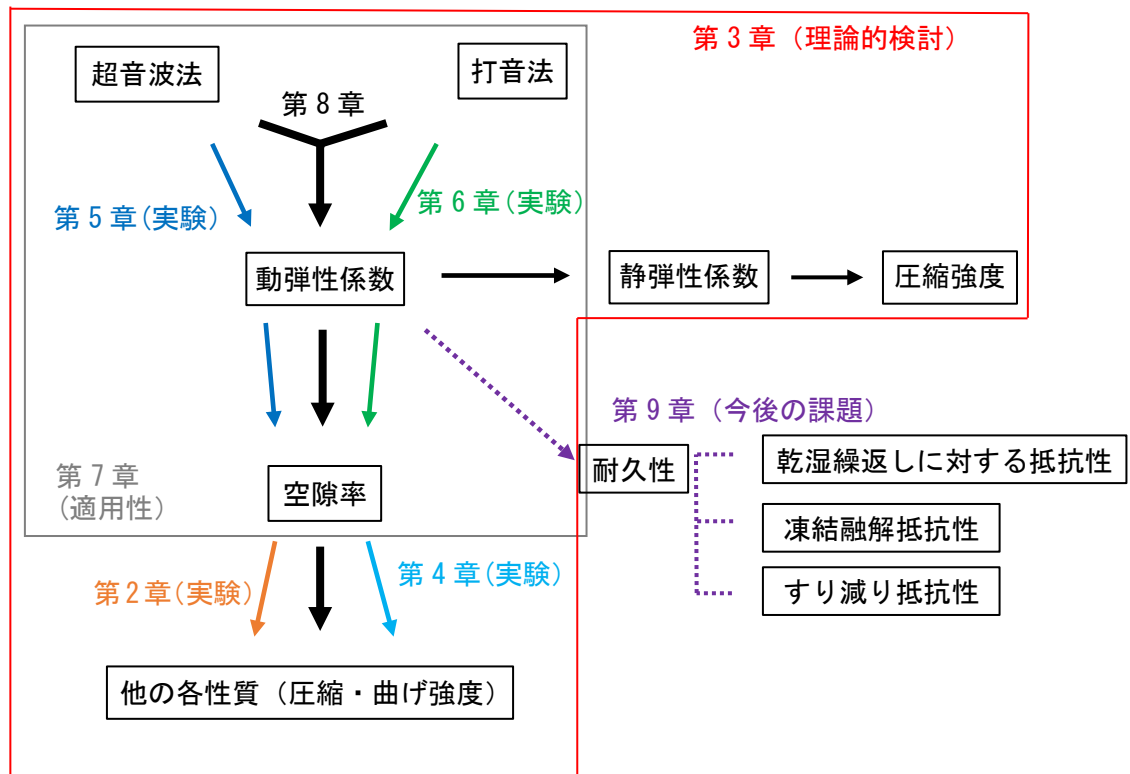


図-9.1 各章内容の関係

第3章 POCの弾性挙動と空隙率の関係に関する理論的検討では、本論文の実験に関わる理論的な裏付けとして、弾性論に基づきPOCの力学特性に関する理論的検討を行った。その結果、POCの弾性係数と空隙率の関係は、 x 切片に骨材の容積率を用いた線形式により表示でき、POCの超音波伝播速度と空隙率の関係、および固有振動数と空隙率関係は、ほぼ2次の関係で表示できることが確認された。

第4章 POCの品質管理に関する共通実験では、POCの品質管理に関する全国共通実験の一機関として三重大学で行われた実験について報告した。その結果、POCの圧縮強度および曲げ強度は共に空隙率を変数とした指数関数として表すことができ、その関係は現場施工されたPOCの構造体にも適用可能であることが明らかとなった。

第5章 超音波法によるPOCの空隙率の推定では、非破壊でコンクリートの品質を評価する方法

の一つである超音波法を用い、POCの空隙率の推定について検討した。その結果、POCの空隙率と超音波速度の関係は相関性の高い二次関数で近似できることが確認され、その関係においては、超音波がPOC内の固体部分を伝搬する最短経路が支配的な要因であることが確認された。また、POCの超音波伝播速度と空隙率の関係は、接触媒質として適用される媒質の種類の影響を受けるが、y切片のみが異なる二次関数により概ね近似することが可能であることなどが明らかとなった。また、現場で適用可能である超音波法の表面法によるPOC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、POCの空隙率の推定が可能であることが明らかになった。

第6章 打音法によるPOCの空隙率の推定では、超音波法と同様に、打音法はコンクリートの非破壊試験の一つであり、試験体を打撃し発生させた音により品質を評価するため、表面がより凹凸しているPOCの品質管理に有効であると考えられる。したがって、第6章では、打音法によるPOCの品質管理について検討した。その結果、打音法によるPOCの固有振動数（卓越周波数）は、試験体の表面の凹凸の程度および打音診断棒の打撃力の影響をほぼ受けなく、空隙率の影響を大きく受けることが確認され、POCの固有振動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POCの空隙率を推定可能であることが明らかになった。また、POC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。

第7章 二種類の弾性波法の適用性に関する検討では、実施工現場での品質管理に向けて、二種類の弾性波法の適用性に関する検討を行った。その結果、超音波法では、超音波の伝播経路を補正することにより、POCの空隙率を推定可能であることが分かった。打音法では、部材のサイズ、境界条件などの影響を大きく受けるため、現時点では現場の品質管理への適用が難しいであることを示した。

第8章 新たなPOCの品質管理手法の提案では、第1.～7.章で得られた研究成果に基づいて、現場に施工されたPOCの品質管理手法の一例として、空隙率および強度の推定手法について検討を行った。POCの打音法および超音波法により推定した空隙率と、施工時に作製した型枠試験体により得られた強度と空隙率の関係式を用いることで、非破壊で強度を推定する手法を示し、より現実的な実施工における品質管理手法を提案した。

9.2 今後の課題

本研究をまとめたうえで、筆者が考えた今後の課題を以下に示す。

- 1) POC の動弾性係数および空隙率の関係について、本論文の第 3 章において理論的検討を行ったが、実験的検討を行った例は非常に少ない。今後は、弾性波法を用いて POC の品質管理を行うためには、POC の動弾性係数と空隙率の関係に与える主な要因と考えられる骨材、結合材の弾性係数、および骨材の実績率、粒径の影響について実験的検討を行う必要である。
- 2) 超音波法による POC の品質管理は可能であることが、本研究の成果により確認されたが、施工時に構造体と同様な材料を持つ、空隙率が 0%となるコンクリートの型枠試験体を作成し、超音波の POC 内部を伝播する最短経路の補正を行う必要である。しかし、現場で型枠試験体を作製するには手間がかかるため、より簡便化できればいいと考えている。
- 3) 現時点で、打音法は POC 構造体の品質管理に適用することが困難であるが、今後は、POC 試験体(実験室レベル)の動弾性係数を評価し、その耐久性に関する実験(乾湿繰返しに対する抵抗性、凍結融解抵抗性およびすり減り抵抗性の評価)に適用できると考えている。

謝辭

謝辞

本研究を進めるにあたり、充実した研究環境を与えて頂くとともに、多大なるご指導を賜りました畑中重光先生（三重大学大学院教授）、三島直生先生（国土交通省国土技術政策総合研究所）に心からの感謝を申し上げます。

また、本論文の審査に際して、有益なご助言、ご指導をいただきました花里利一先生（三重大学大学院教授）、永井久也先生（三重大学大学院教授）に深く感謝いたします。

打音法による POC の固有振動数の評価する方法について、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。

現場施工された POC スラブの品質管理に関する実験に際しては、中川武志氏（株式会社ファイナルマーケット）、内田寿久氏（株式会社安芸砂利）、前川明弘氏（三重県工業研究）のご助力をいただきました。また、学会発表など研究活動において、貴重なご指摘をくださった湯浅幸久氏（三重県生コンクリート工業組合）、山本貴正先生（愛知工業大学准教授）、平岩陸先生（名城大学准教授）、坂本英輔先生（広島工業大学准教授）に感謝申し上げます。

POC の超音波伝播速度と空隙率の関係に関する実験に際しては、石黒覚先生（三重大学大学院教授）には実験結果の情報をご提供頂きました。また、実験の実施に際しては、夏目実穂氏、藤木諒将氏（いずれも三重大学大学院修了生）、曹偉氏、森下拓海氏（いずれも三重大学大学院生）のご助力を得ました。

また、実験を行うにあたり、和藤浩氏（三重大学技術職員）、ポンマーハサイパラミ氏、五百蔵沙耶氏（いずれも三重大学大学院生）をはじめ、畑中研究室の方々にたびたびご助力をいただきました。改めてお礼申し上げます。

特別聴講生、大学院博士前期を含め 6 年間ご指導をいただきました建築学科の教職員の方々に御礼を申し上げます。また、日本語を教えていただいた松岡知津子先生（三重大学大学院准教授）、太田慶子先生（三重大学非常勤講師）をはじめ、三重大学国際交流センターの先生たちに感謝いたします。

日本に来て三重大学に通っていた間、留学生生活を支えてくださった本田弁二郎留学生技術者育成奨学基金に心から感謝申し上げます。また、本研究の一部は、公益財団法人大林財団 2018 年度奨励研究助成金（研究代表者：E RIDENGAOQIER）によった。付記して謝意を表します。

今まで長い間、私の学業を支えてくれた両親と妹、そして彼女に心から感謝いたします。

最後に、私を守って下さったこの国の神様、先生がた、多くの人々に、感謝を申し上げます。



2019.9

付録

付録1 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について

図-1に、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を示す。図によれば、既往の研究による実験結果が本論の実験結果および計算結果より大きくなっている。この影響要因として、骨材およびセメントペーストの弾性係数、試験体の長さ、円柱(10×φ20cm)および角柱試験体(10×10×40cmおよび15×15×53cm)の違いなどが考えられる。円柱試験体を用いた場合に、試験体を作成時に型枠効果の影響により中心部分の空隙率が小さくなり、超音波の測定では、一般的には試験体の上下端の中心において測定するため、超音波伝播速度が高くなる。この影響が試験体のサイズが大きくなるほど小さくなる。また、試験体が長くなるとペーストと骨材接触面では遷移帯という比較的弱い層が増えるため、超音波伝播速度が小さくなる。図-1に示した本論文の実験では、角柱試験体(15×15×53cm)において長さ方向に超音波伝播速度を測定したため、測定結果が小さく値となったと考えられる。

図-2に、超音波伝播速度と空隙率関係におけるセメントペーストおよび骨材の弾性係数の影響を示す。図によれば、セメントペーストおよび骨材の弾性係数が大きくなるほど、超音波伝播速度が大きくなる。既往の研究では水セメント比が0.2, 0.25, 0.3のセメントペーストが用いられており、本実験では水セメント比が0.3のものを用いたため、セメントペーストの弾性係数が低くて、超音波伝播速度が小さくなったと考えられる。一方、骨材はほぼ同様なものを用いているため、骨材の影響は少ないと考えている。表-1に計算に用いた材料の基準特性を示す。

表-1 材料の基準特性

	密度 (g/cm ³)	弾性係数 (Gpa)	実積率 (Va, %)
骨材	2.73	80	58.1
セメントペースト	2.16	50	—

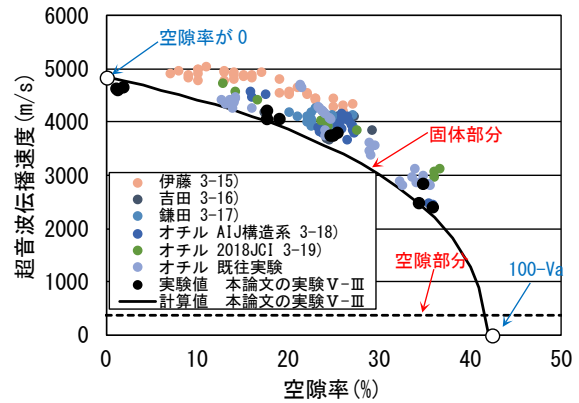
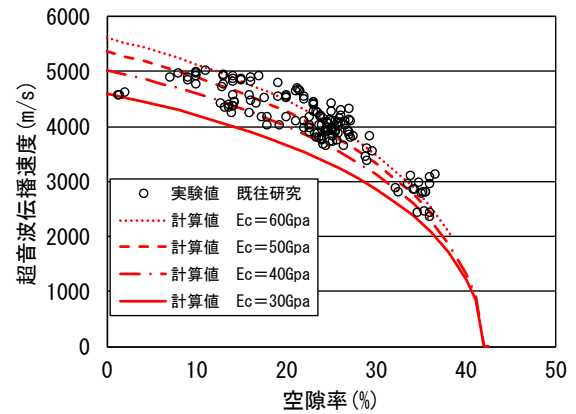
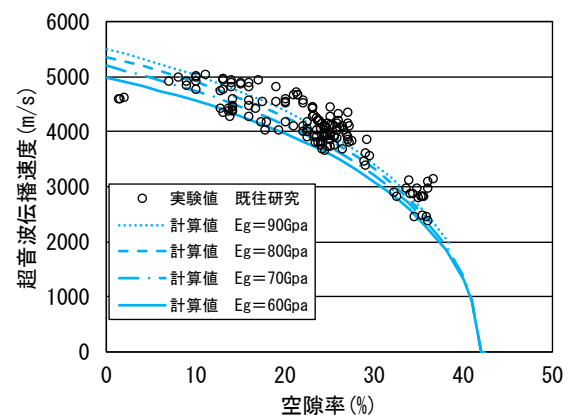


図-1 ポーラスコンクリート超音波伝播速度と空隙率の関係



(a) セメントペースト



(b) 骨材

図-2 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における構成材料の弾性係数の影響

付録2 コンクリートにける超音波の伝播経路について

1. はじめに

図-1に、層状構造の表面に衝撃を受けた後の弾性波の伝播経路を示す¹⁾。表面パルスによる波動は、同心円状に伝わる²⁾。したがって、超音波の測定では、発振子から受振子まで弾性波の伝播経路は図-2に示すようになる。これらのうち、一番速く伝播する経路(最適伝播経路)による伝播時間を計測し、超音波伝播速度は測定される。また、コンクリート表面の骨材の配列が、その内部と比較してより少ない(締固め時の壁効果の影響による)ため、骨材の配列が多いところを通る超音波の伝播速度が一番速くなる。したがって、最適伝播経路は試験体の中を伝播するものとなると考えられる。また、均質なものになるほど、その影響は小さくなると考えられる。

そこで、本報告では、コンクリート(骨材配列の影響により均質ではないもの)および水(均質なもの)において表面法による超音波伝播速度を測定し、最適伝播経路について実験的検討を行った。

2. 実験概要

図-3に、超音波伝播速度の表面法による測定の様子を示す。コンクリートにおける測定は、試験体の底面において行った。対面法による測定について図中に示していないが、測定は試験体の長さ方向に行った。また、水の超音波伝播速度は、コンクリートと同様に、発・受振子間距離が50mm, 100mm, 150mm, 200mm, 250mm, 300mmの位置において表面法および対面法による測定をそれぞれ行った。測定は、各位置において5回行った。

超音波伝播速度は、式(1)および式(2)による算出した。

$$V_{\text{対}} = \frac{L}{t} \quad (1)$$

$$V_{\text{表}} = \frac{L-x}{t} \quad (2)$$

ここに、 $V_{\text{対}}$ ：対面法による超音波伝播速度 (m/s), $V_{\text{表}}$ ：表面法による超音波伝播速度 (m/s), L ：発・受振子の中心間距離 (mm), x ：発受振子間の補正距離 (mm)

3. 実験結果

図-4に、発・受振子中心間距離と伝播時間の関係を示す。なお、(a)図にはコンクリートの場合、(b)図には水の場合における測定結果をそれぞれ示す。図によれば、発・受振子間の補正距離は、コンクリートで33mm程度、水で31mm

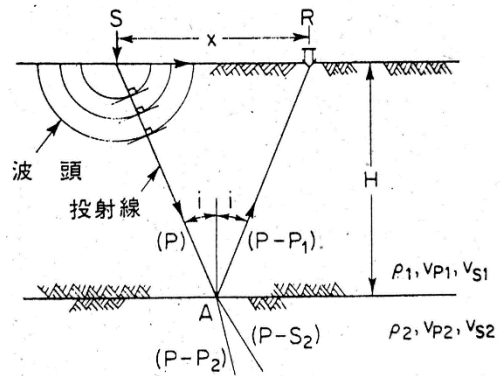


図-1 弾性波の伝播経路¹⁾

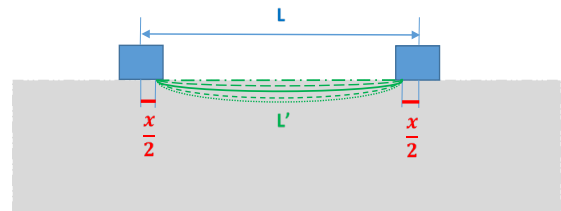
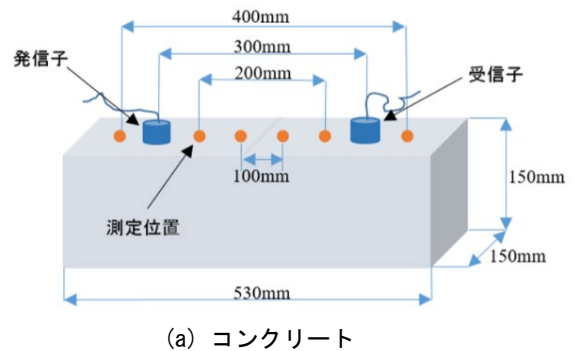
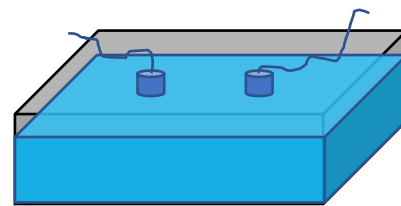


図-2 コンクリートにおける超音波の伝播経路



(a) コンクリート



(a) 水

図-3 超音波伝播速度の測定の様子(表面法)

程度になり、比較的近い値が得られた。

図-5に、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、(a)図にはコンクリート、(b)図には水の場合における測定結果をそれぞれ示す。図によれば、コンクリートにおいて、表面法による超音波伝播速度（補正後）は、対面法による伝播速度より小さいに対し、水の場合はほぼ同じであることが確認された。このことから、表面法による測定では、超音波の伝播経路は、水の場合はほぼ距離がL-xの直線となるに対し、コンクリートの場合は直線ではなく、それより長くなることを確認できる。したがって、コンクリートにおける表面法による超音波伝播速度の測定では、試験体の中を伝播する超音波の最適伝播経路が表層からある厚みの深さにあると確認できる。また、図-6に示すように、ポーラスコンクリートの場合は、表層に空隙があるため、超音波が試験体の中の一番速いところを伝播することが予測できる。

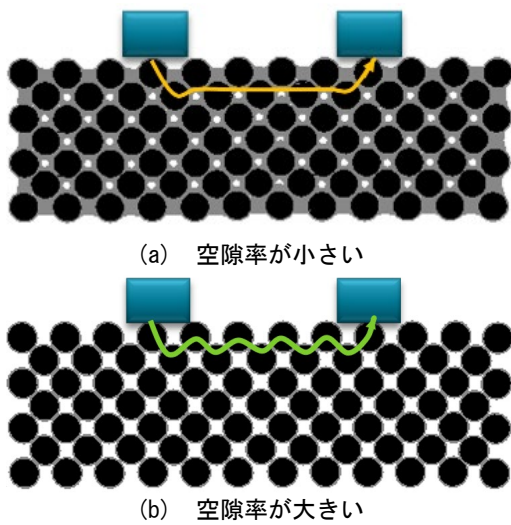


図-6 ポーラスコンクリート中の超音波の伝播経路

参考文献

- 1) F.E.リチャード, Jr., J.R.ホール, Jr., R.D.ウッズ (共著) : 土と基礎の振動 (地盤振動の基本的知識), 鹿島出版会, p.107
- 2) 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, Vol.46, No.2, pp.5~11, 2008.2

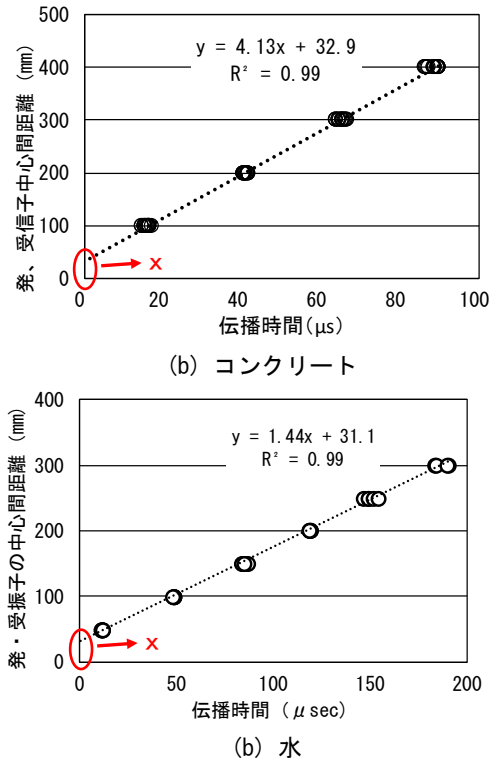


図-4 発・受振子中心間距離と伝播時間の関係

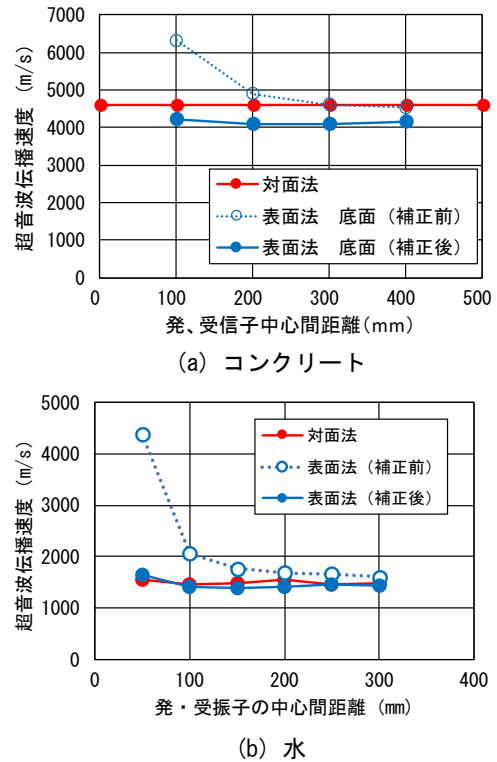


図-5 超音波伝播速度と発・受振子中心間距離の関係

