

令和元年度

修士論文

超音波法（表面法）による各種ポーラスコンク
リートの品質管理に関する研究

指導教員 畑中重光 教授

三重大学院工学研究科

建築学専攻

曹 偉

—目次—

第一章	序論	
1.1	ポーラスコンクリート (POC) とは	1
1.2	本研究の背景	2
1.3	本研究の目的	3
1.4	本論文の構成	4
第二章	既往の研究	
2.1	概説	6
2.2	ポーラスコンクリート (POC) の特性	
2.2.1	普通 POC	7
2.2.2	高強度 POC	8
2.2.3	ジオポリマーPOC	9
2.3	POC の力学特性	
2.3.1	圧縮強度	10
2.3.2	曲げ強度	11
2.3.3	弾性係数	12
2.3.4	固有振動数	12
2.4	超音波法	
2.4.1	対面法	14
2.4.2	表面法	15
2.5	POC の品質管理	
2.5.1	超音波法による品質管理	16
2.5.2	打音法による品質管理	17
2.6	まとめ	18
2.6	参考文献	19
第三章	各種結合材を用いた POC の超音波速度と空隙率の関係	
3.1	実験 I :各種 (普通、高強度、ジオポリマー) POC の超音波伝播速度と空隙率の関係	
3.1.1	実験概要	23
3.1.2	実験方法	29
3.1.3	実験結果および考察	32
3.1.4	実験 I のまとめ	39
3.2	実験 II : 骨材の粒径とセメントペーストの弾性係数の影響	
3.2.1	実験概要	40
3.2.2	実験方法	40
3.2.3	実験結果および考察	44
3.2.4	実験 II のまとめ	47
3.3	参考文献	48
第四章	超音波法 (表面法) による普通 POC の空隙率推定	
4.1	本実験の背景	50

4.2	実験Ⅰ:接着媒質の影響	
4.2.1	実験概要	51
4.2.2	実験方法	54
4.2.3	実験結果および考察	57
4.2.4	実験Ⅰまとめ	61
4.3	実験Ⅱ:POC中の超音波伝播経路	
4.3.1	実験概要	62
4.3.2	実験方法	64
4.3.3	実験結果および考察	66
4.3.4	実験Ⅱのまとめ	70
4.4	参考文献	71

第五章 現場実施工の普通 POC を用いた超音波法（表面法）の実用性に関する実験

5.1	実験概要	73
5.2	実験方法	73
5.3	実験結果および考察	75
5.4	まとめ	77
5.5	参考文献	78

第六章 総括

6.1	本研究の総括	80
6.2	今後の課題と展望	81

【謝辞】

【付録】

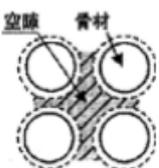
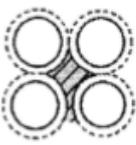
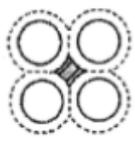
第一章 序論

1.1 ポーラスコンクリート（POC）とは

ポーラスコンクリート（以下 POC と略記）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¹⁻¹⁾。表 1.1 には、POC の空隙の分類と名称¹⁻²⁾を示す。なお、POC の空隙の分類には、文献¹⁻¹⁾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、再生資源利用性など、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¹⁻²⁾

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
	全空隙		
影響する主な特性	← 透水性 → ← 揚水・保水性 → ← 強度・力学特性 →		
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	

1.2 本研究の背景

近年，世界中には，地球規模で人やモノ，資本が移動するグローバル経済の下では，一国の経済危機が瞬時に他国に連鎖するのと同様，気候変動，自然災害，感染症といった地球規模の課題もグローバルに連鎖して発生し，経済成長や，貧困・格差・保健等の社会問題にも波及して深刻な影響を及ぼす時代になってきている。このような状況を踏まえ，国連開発計画（UNDP）により持続可能な開発目標（SDGs）が提案されている。SDGsとは，2015年9月の国連サミットで採択された「持続可能な開発のための2030アジェンダ」にて記載された2030年までに持続可能でよりよい世界を目指す国際目標であり，17のゴール・169のターゲットから構成され，地球上の「誰一人取り残さない（leave no one behind）」ことを誓っている¹⁻³⁾。17のゴール中の11番の「住み続けられるまちづくりを」包摂的で安全かつ強靱（レジリエント）で持続可能な都市及び人間居住を実現すること建築土木の分野でも，環境問題を考慮した持続可能な建築の提案，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，持続可能な材料の開発・研究などが進められてきた。

持続可能な材料としてコンクリート分野では，連続した空隙構造により透水・排水・保水性・吸音性，および緑化性など機能，多様な性質を持つコンクリートとして，ポーラスコンクリート（porous concrete, pervious concrete, 以下POCと略記）が進められている。POCは，内部に粗大な連続空隙を有するコンクリートであり，その空隙構造から道路舗装，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。これまでも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いる。

1.3 本研究の目的

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。このため、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、異なった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、施工者にとっては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。

このような問題に対して本研究では、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たより効率的な品質管理手法について検討する。

また、POC特有の形状の複雑さから、超音波伝播速度と空隙率関係の解析に関しては多くの課題が残されている。既往の研究では超音波速度法の対面法において実験を行い、超音波伝播速度によりPOCの空隙率および他の各性質を評価可能であることを示した。しかし、実施工されたPOCにおいて品質管理を行う際に、対面法の測定は実施できなく、表面法の測定をする必要がある。

したがって、本研究では、実施工されたPOCの超音波による品質管理に向けて、表面法の測定の可能性について検討する。また、各種結合材を用いたPOCの超音波伝播速度と空隙率の関係する実験を行う。

1.4 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の概説および品質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 既往の研究ではでは、POCの結合材の特性、POCの力学特性、超音波法およびPOCの品質管理に関する既往の研究を取りまとめる。

第3章 各種結合材を用いたPOCの超音波速度と空隙率の関係に関する実験では、各種（普通、高強度、ジオポリマー）POCの超音波伝播速度、動弾性係数、固有振動数と空隙率の関係、空隙の量・大きさの影響および骨材の粒径とセメントペーストの弾性係数の影響については、結合材の種類および粗骨材の粒径を変化させたPOCの超音波速度試験を行い、その実験結果から、POCの超音波速度と空隙率の関係の推定の可能性に関する実験的な検討を行う。

第4章 超音波法（表面法）による普通POCの空隙率推定に関する実験では、接着媒質の影響、POC中の超音波伝播経路については、普通POCで超音波法（表面法）を行い、超音波法（表面法）による普通POCの空隙率推定に関して検討を行う。

第5章 現場施工された普通POCスラブにおいて超音波法（表面法）の実用性に関する実験を行う。第4章の超音波法（表面法）による普通POCの空隙率推定方法を用いて、現場施工された普通POCの超音波伝播速度の測定を行い、その結果から、超音波伝播速度による空隙率の推定の可能性を検討する。

第6章では、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) 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，日本コンクリート工学協会，pp1-181，2003.5
- 1-2) 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.1-157，2015.7
- 1-3) 令和元年 外務省 SDGs 実施指針改定版

第二章

既往の研究

2.1 概説

POC とは、内部に多量の連続空隙を有するコンクリートのことで、細骨材を除いたコンクリートである、19 世紀に誕生以来世界中で各国に多機能化な技術展開している。日本国内の POC の研究は、基礎研究から応用研究まで多くの研究が報告されている。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」²⁻¹⁾で、2003 年から 2013 年の間の海外および国内のポーラスコンクリートに関する研究件数を取りまとめている。図 2.1 と図 2.2 は、上記の報告書に示す国内外で発表された論文件数である。国内では、ポーラスコンクリートの基本性質である空隙特性、力学特性、および配（調）合についての研究が多く発表されていることが分かる。

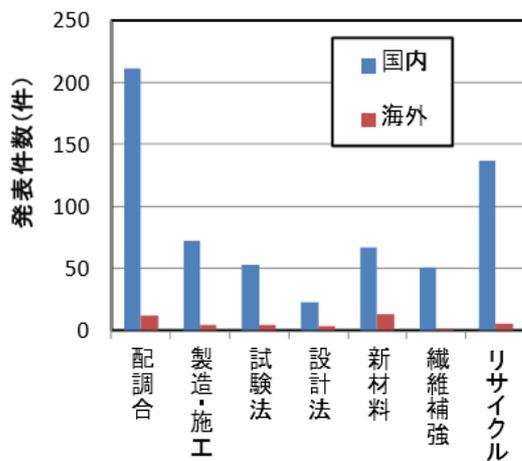


図 2.1 ポーラスコンクリートの製造方法・使用材料ごとの論文件数²⁻¹⁾

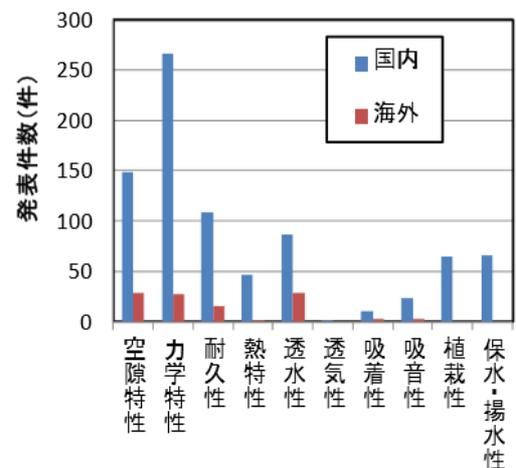


図 2.2 ポーラスコンクリートの特性ごとの論文件数²⁻¹⁾

本章では、上記の報告書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ポーラスコンクリートの特性、力学特性、超音波伝播特性および品質管理手法について既往の研究を取りまとめる。

2.2 ポーラスコンクリート（POC）の特性

2.2.1 普通 POC

POC を構成する材料は，粗骨材とセメントペーストで構成される。また，セメントペーストに対して，ペーストの垂れの防止を施し，乾湿による耐久性の向上を見込んで，少量の細骨材を使用し，モルタルとする場合もある。また，ペーストのフロー値を調整するために，高性能 AE 減水剤や増粘剤といった化学混和剤も使用する。POC の使用材料及び特徴を表-2.1 に示す²⁻¹⁾。

表-2.1 POC の使用材料及び特徴²⁻¹⁾

使用材料	特徴
セメント	普通ポルトランドセメント（OPC）， シリカフェームプレミックスセメント（SFPC）， 高炉セメント， 早強セメント
水	上水道水，回収水，地下水 (JIS A 5308 付属書 C に準拠)
粗骨材	河川護岸用：単粒度砕石 5 号(13-20mm) 車道舗装用：単粒度砕石 6 号(5-13mm) 歩道用：単粒度砕石 7 号(2.5-5mm)
細骨材	最大寸法 5mm 以下，あるいはより最大寸法の小さい細目砂使用する場合と使用しない場合がある。 (使用する場合は，使用量は粗骨材の 1/10 程度であり，粒子径の小さな細目砂を使用する場合もある)
混和剤	AE 減水剤，高性能 AE 減水剤 その他，品質の確認がなされている混和剤
混和材	収縮低減剤，繊維，高炉スラグ微粉末， シリカフェーム及びフライアッシュ等使用目的に応じた材料

普通 POC の研究においては，セメントにポルトランドセメント(以下 OPC と略記)とシリカフェームプレミックスセメント(以下 SFPC と略記)を用いること。

OPC を用いることは、OPC が広く一般的に入手可能なであり、汎用性の高いセメントであるため広く一般的が、それは POC の研究においても同様である。これまで述べてきた既往の研究はその全てにおいて OPC を用いた POC の研究である。先述した既往の研究のように、OPC を用いた POC は強度発現、ワーカビリティ、結合材強度などのあらゆる観点の基準となる。

シリカフェウムプレミックスセメント(以下 SFPC と略記)は、極低水セメント比での高流動・低粘性化、長期強度発現性、自己収縮の低減などの特長を持ったセメントである。SFPC では、非常に低い水セメント比領域での練混ぜが可能であるため、近年の超高層 RC 分野での急速なコンクリートの高強度化に対し、その要求を満たすことができるセメントとして期待されている。

2.2.2 高強度 POC

一般にコンクリートの高強度化は水セメント比を低下させることで実現される。セメントの性状によるが、高強度 POC を設計する場合水セメント比を 22.5~30% の範囲で調合設計を行い、高性能 AE 減水剤や増粘剤等の化学混和剤を用いて流動性・粘性を調節しながら高強度化を図る。湯浅らの研究²⁻²⁾では混和剤の使用条件を変えながら、フロー値と水セメント比の関係を示している(図-2.1 参照)。ここから分かるようにフロー値と水セメント比は高い相関関係にあるため、低水セメント比領域では混和剤の使用条件や練混ぜ時間の管理が重要である。

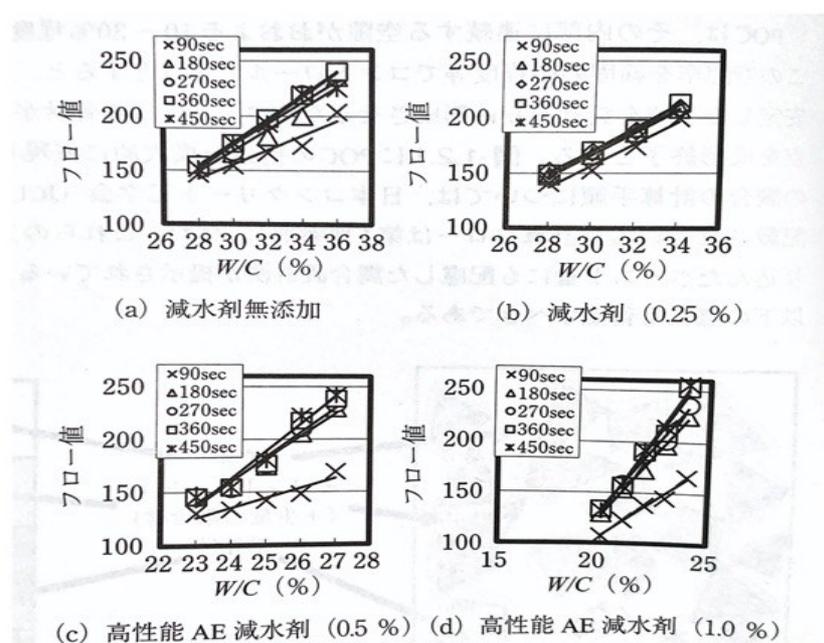


図 2.1 混和剤の使用条件が異なるペーストの水セメント比とフロー値の関係

2.2.3 ジオポリマーPOC

近年、CO₂ガスの排出量を削減するために、セメントの使用量を減らすための検討が積極的に実施されている。ジオポリマーは、セメントの代替材料としての利用が期待できる材料であり、それらをPOCの結合材として使用し、硬化体の基礎物性を検討した既往の研究がある。

前川らの研究²⁻³⁾によると表-2.2に使用材料、表-2.3に調合表に示すようにジオポリマーPOCを作製したところ、図-2.2に示す結果が得られている。この研究では、溶液粉体比（高炉スラグ微粉末の水ガラスに対する割合）が0.6として調合設計しており、OPCを用いたPOCと同等程度の圧縮強度を得られている。

表-2.2 使用材料²⁻³⁾

結合材	高炉スラグ微粉末4000(記号: BS) 密度: 2.91g/cm ³ 水ガラス(記号: WG) JIS K1408 2号 密度: 1.45g/cm ³
細骨材	6号珪砂(記号: S) 粒径: 0.2-0.4mm 表乾密度: 2.68g/cm ³
粗骨材	砕石6号(記号: G) 粒径: 5-13mm 表乾密度: 2.72g/cm ³ 実積率: 56.6%、吸水率: 1.35% 産地: 三重県佐奈山産

表-2.3 調合表²⁻³⁾

結合材	WG/BS (%)	目標空隙率 (%)	単位量 (kg/m ³)			
			BS	WG	S	G
ペースト	60	15	375	225	-	1540
		25	243	146		
		35	111	67		
モルタル	80	15	190	152	305	1540
		25	123	99	197	
		35	56	45	90	

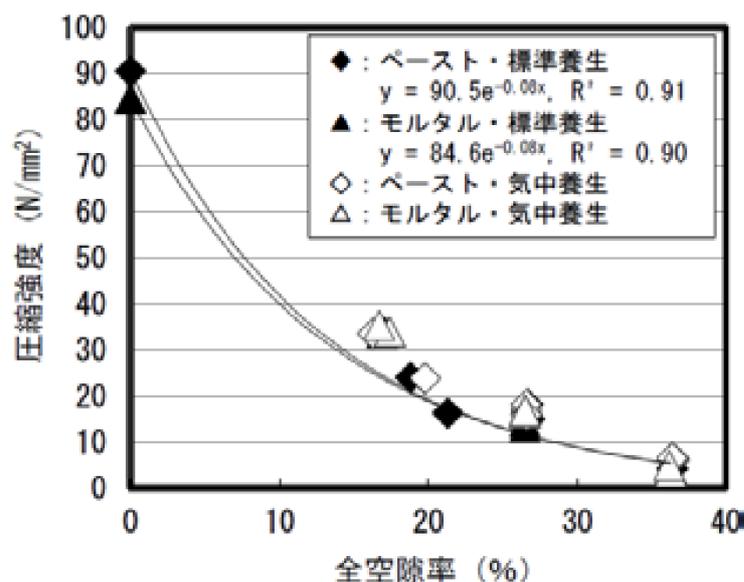


図-2.2 圧縮強度と空隙率の関係 (GP)²⁻³⁾

2.3 POC の力学特性

2.3.1 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²⁻⁴⁾。図-2.3 および図-2.4 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²⁻⁵⁾を図-2.4 に示す。

POC の圧縮強度と空隙率の関係について、湯浅ら²⁻⁶⁾により式(2.1)に示す関係式が提案された。式(2.1)は、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^{2-7) ~2-12)}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。

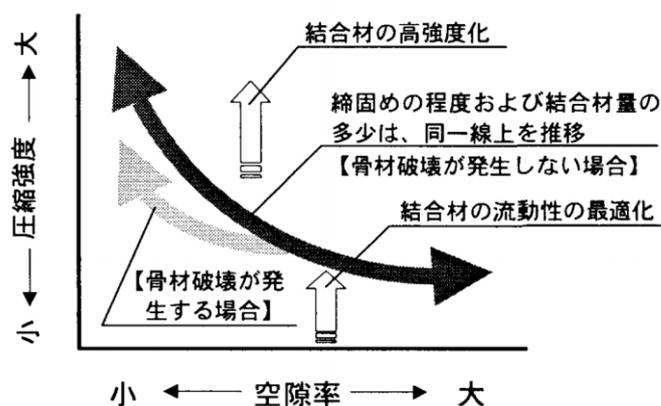


図-2.3 POC の圧縮強度と空隙率の関係に及ぼす諸要因の影響の概念図²⁻⁵⁾

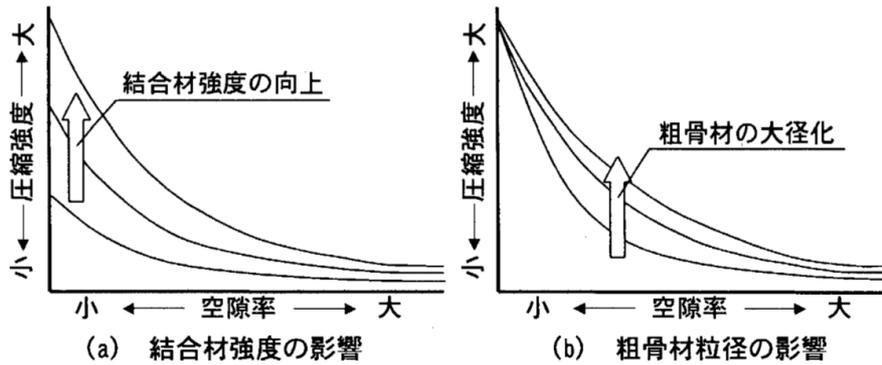


図-2.4 圧縮強度と空隙率の関係及ぼす結合材強度と粗骨材粒径の影響概念図²⁻⁵⁾

2.3.2 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オチルらの研究によって実験的に確認された²⁻¹³⁾。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-2.5 に、文献²⁻¹²⁾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^{2-14)~2-16)}もある。

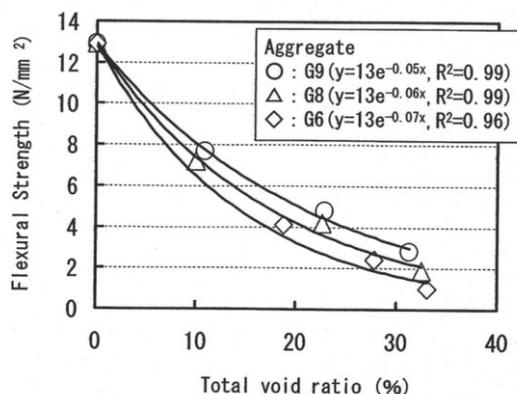


図-2.5 POC の曲げ強度と空隙率の関係²⁻¹²⁾

2.3.3 弾性係数

齋藤ら²⁻¹⁷⁾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-2.6 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-2.7 に示す Anush ら²⁻¹⁸⁾は結合材にシリカフュ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-2.8 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²⁻¹⁷⁾により報告されている。

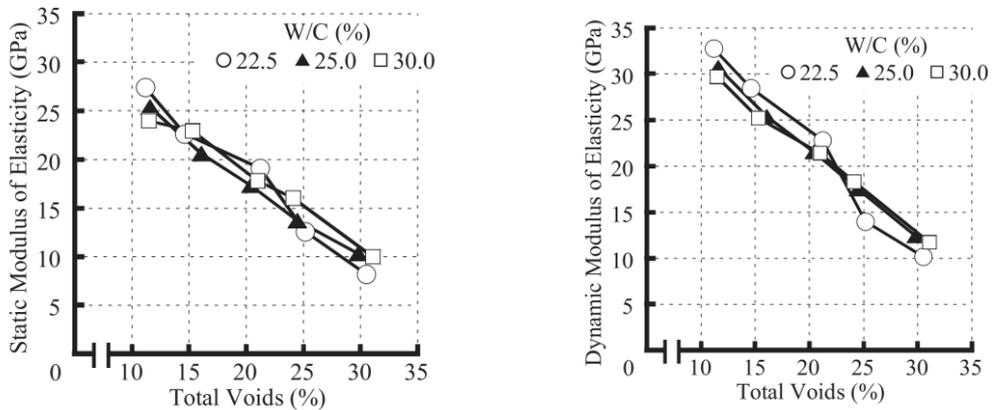


図-2.6 POC の静・動弾性係数と空隙率の関係

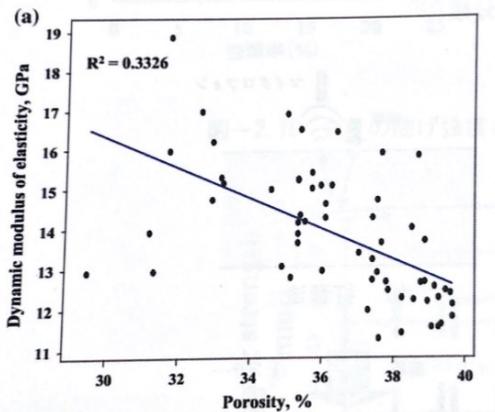


図-2.7 POC の動弾性係数と空隙率の関係

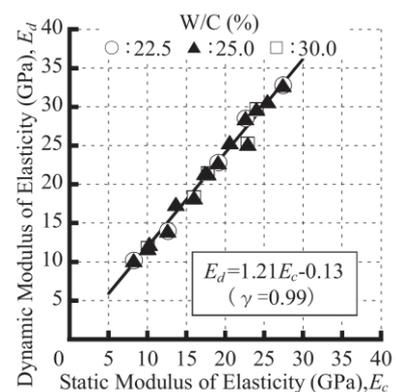


図-2.8 POC の静弾性係数と動弾性係数の関係

2.3.4 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²⁻¹⁹⁾、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^{2-20), 2-21)}。文献²⁻²⁰⁾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²⁻²¹⁾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。

JIS1127 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²⁻²²⁾。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 JIS1127 に参考されたい。委員会報告書(2016 年)の POC の乾燥振り戻り試験方法(案)²⁻²³⁾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 JIS1127 に準じて測定すると提案されている。しかし,文献²⁻²⁴⁾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,共鳴振動法による 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。

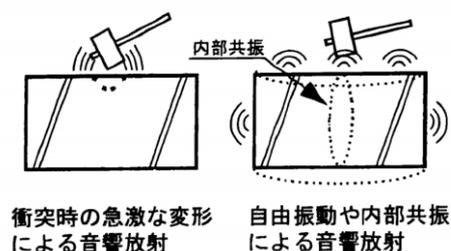


図-2.9 打撃音発生概念

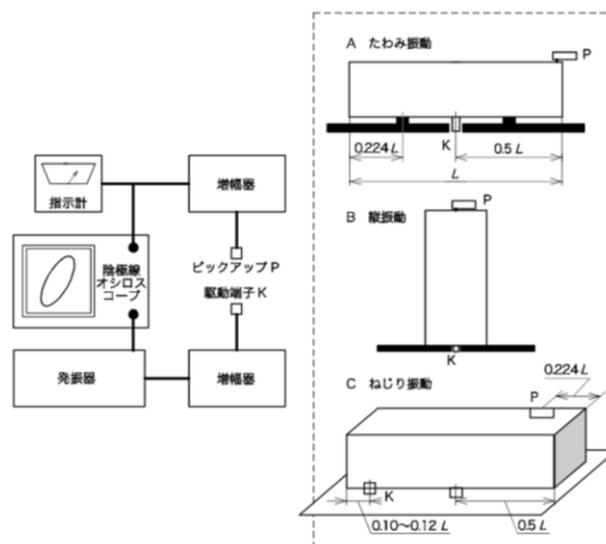


図-2.10 JIS1127 による装置の配置並びに騒動回路ピックアップ位置の例

2.4 超音波法

2.4.1 対面法

既往研究²⁻²⁵⁾によれば、オチルらは図-2.11 様に超音波法—対面法による普通 POC の実験を行う。

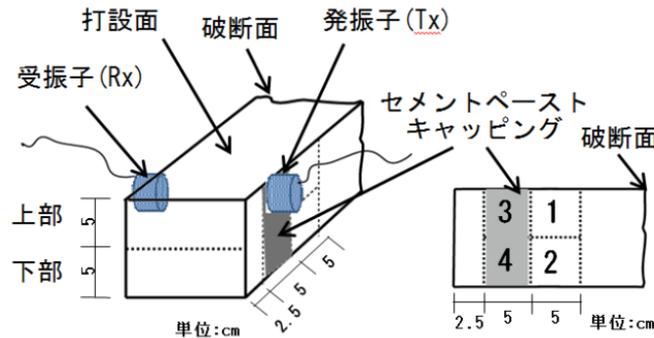


図-2.11 超音波法—対面法による普通 POC の実験

対面法の場合は、試験体の側面において、端面から 2.5~12.5cm の範囲を(5cm×5cm)の正方形で四等分した領域 (1~4) に、それぞれ発振子および受振子を密着させ、測定を行った。表面法の場合は、試験体の打込み面、側面および底面において、発振子および受振子の芯と芯の距離が 10cm になる二つの位置(3-R₁, 4-R₂)で測定を行った。

本論文では図-2.12 ように、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。

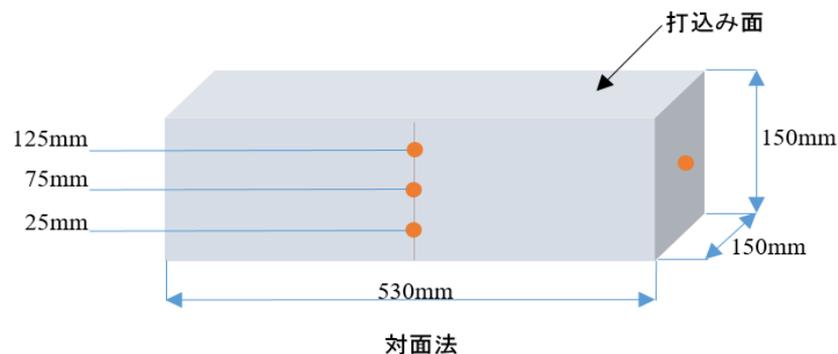


図-2.12 対面法の測定位置

2.4.2 表面法

既往研究²⁻²⁶⁾によれば、超音波表面法の測定では、図-2.13 ように発信子から縦波が部材の上部を伝播し、最初に受振子に到達する。

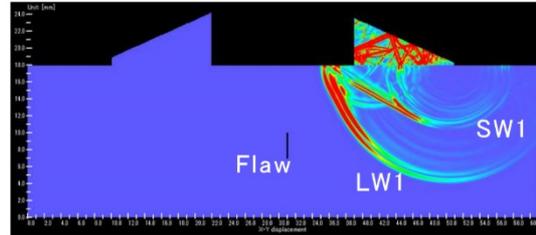


図-2.13 シミュレータによる超音波伝搬

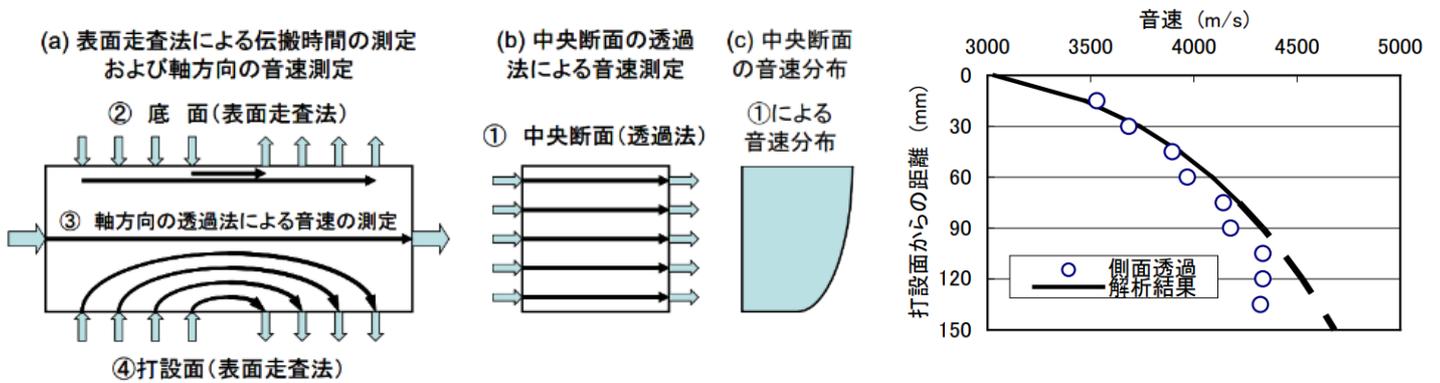


図-2.14 コンクリート内部の音速

図-2.15 打込み面から距離と音速の関係

また、コンクリートの超音波の測定では、図-2.14 に示すような伝播となる。一般的なコンクリートの表面走査法による超音波の伝播では、底面の部分は表面層で伝播する。

本論文では図-2.16 ように、表面法の測定は、角柱試験体の打込み面、側面および底面において、超音波発・受振子（直径 50mm、周波数 50kHz）の中心間距離が 100 mm、200 mm、300 mm、400 mmとなる位置で 5 回行った。

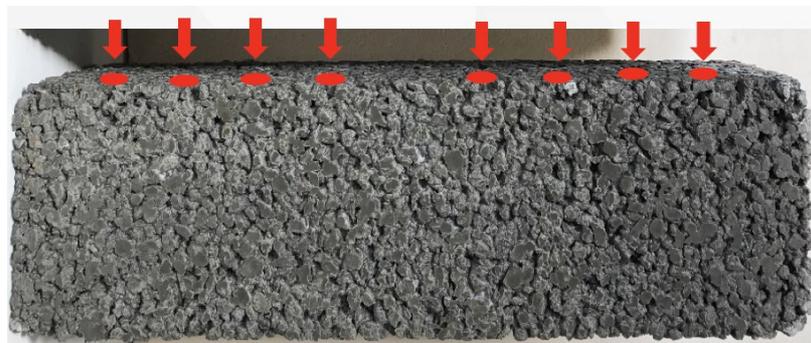


図-2.16 対面法超音波法の測定位置

2.5 POC の品質管理

2.4.1 超音波法による品質管理

POC の超音波法による品質管理については、検討例が少ないのが現状である。図-2.17 に、文献²⁻²⁷⁾の厚さおよび骨材の粒径を変化させたポーラスコンクリートの版とそこからコア抜いた試験体を用いた実験によるポーラスコンクリートの空隙率と超音波伝播速度の関係を示す。同図によると、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、ポーラスコンクリート版の厚さが 100mm 以上の場合に適用可能であるとしている。

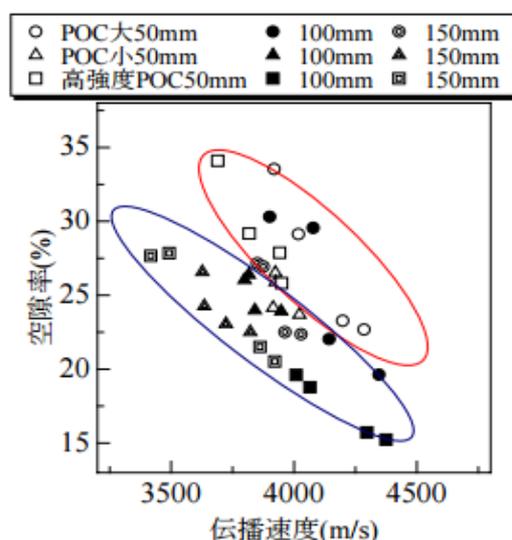


図-2.17 ポーラスコンクリートの超音波伝播速度と空隙率の関係²⁻²⁷⁾

筆者らの研究では、超音波法による品質管理方法としては、超音波法による超音波伝播速度の測定を対面法と表面法の2通りの方法で行っている。対面法は、試験体の表面部と底面部に発受振子を当て超音波伝播速度を測定する方法であるため、実験室実験には向いているが現場での評価は行いにくい。そのため、表面法を用いて超音波伝播速度の測定を行った。表面法では、試験体の表面部から離れた表面部での測定になるため現場での評価に適している。さらに、それら2通りの試験方法について、第四章で詳しく説明している。

2.5.2 打音法による品質管理

オチルらの研究²⁻²⁸⁾では、普通コンクリートの固有振動数に着目し、その剛性および内部の欠陥などを評価する非破壊試験法である打音法を用い、POCの固有振動数を評価し、空隙率推定の可能性に関する検討を行った。図-2.18に動弾性係数と空隙率の関係を示す。同図に示すように、動弾性係数と空隙率の関係は直線的な線形の関係にあることが知られている。

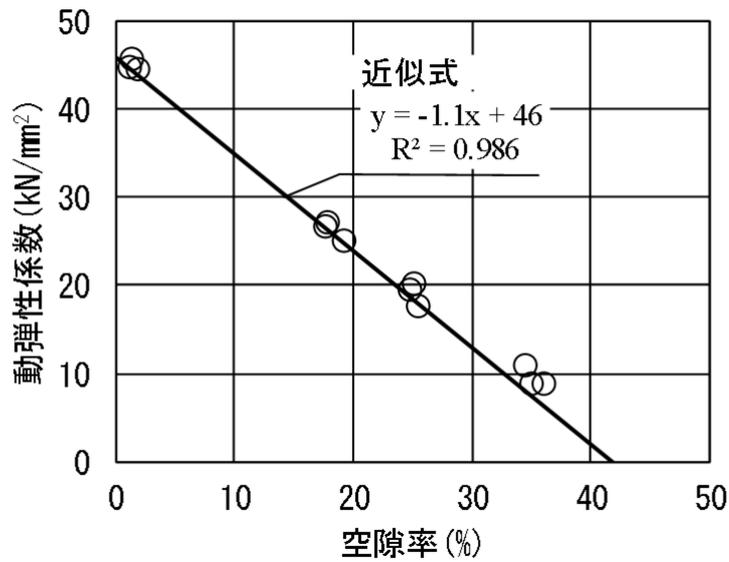


図-2.18 動弾性係数と空隙率の関係

2.6 まとめ

本章では、硬化後のポーラスコンクリートの特性、力学特性、超音波伝播特性および品質管理手法に関する既往の研究成果を紹介して、POC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、より簡便に現場ポーラスコンクリート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) 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, 2015.7
- 2-2) 湯浅幸久, 宮本 高秀, 三島 直生, 畑中 重光: ポーラスコンクリートの内部
構造と強度特性に及ぼす結合材の流動性と振動締固めの影響, コンクリート
工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.895-896, 2002
- 2-3) 前川明弘, 三島直生, 畑中重光: ジオポリマーを結合材として使用したポー
ラスコンクリートの基礎物性に関する研究, コンクリート工学年次論文
集, Vol.36, No.1, 2014
- 2-4) 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
- 2-5) 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
- 2-6) 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
ートの振動締固めに関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, No.52,
pp.37-44, 2002.2
- 2-7) 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
- 2-8) 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
- 2-9) 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

- 2-10) 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, 363-368, 2008.3
- 2-11) 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.403-404,2008
- 2-12) 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
- 2-13) 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, 2015
- 2-14) 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)一供用5年, 舗装技術専門委員会報告, R-17, 2006
- 2-15) 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一千葉県道松戸・野田線・供用5年, 舗装技術専門委員会報告, R-20, 2006
- 2-16) 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一千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
- 2-17) 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
- 2-18) AnushK .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
- 2-19) 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
- 2-20) 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,p.143-16.2,1996

- 2-21) 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,p5-11,2008.2
- 2-22) JISA1127 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,JIS11 土木Iコンクリート製品,日本規格協会,pp95-998,2004
- 2-23) M.S.M.Lund .,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 .
- 2-24) 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
- 2-25) エルドンオチル:超音波法による空隙率推定手法を用いたポーラスコンクリートの品質管理手法の提案,三重大学大学院修士論文, pp.52-54, 2017
- 2-26) ジャパンプローブ株式会社:シミュレータによる超音波伝搬の可視化
- 2-27) 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
- 2-28) エルドンオチル, 曹偉, 畑中重光:打音法によるポーラスコンクリートの空隙率推定,コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1439-1444, 2019.7

第三章

各種結合材を用いた POC の超音波速度と空隙率の関係

3.1 実験Ⅰ：各種（普通、高強度、ジオポリマー）POCの超音波伝播速度固有振動数と空隙率の関係

3.1.1 実験概要

POCの練混ぜは、容積30L揺動攪拌型ミキサを用いて行う。練混ぜ方法は、セメントペースト先練りとする。セメント、水及び混和剤をミキサに投入し、低速で60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120秒間練混ぜた。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、骨材を投入してさらに高速で120秒間練混ぜた。

練り上がったPOCの試験体は、プラスチック製円柱試験体(φ100×200mm)と鋼製角柱試験体(100×100×400mm)にそれぞれ打込み作製する。

表-3.1にOPC供試体の要因と水準を示す。水セメント比を25%と設定した上で、設計空隙率を5水準(0%, 15%, 20%, 25%, 30%)とし、打音法の測定する材齢は、7日、14日、21日、28日に行い、超音波法の測定する材齢は、7日、21日、28日とする。

表-3.1 OPC—POCの試験体の要因と水準

要因	水準
空隙率(%)	0, 15, 20, 25, 30
打音法の材齢(日)	7, 14, 21, 28
超音波法の材齢(日)	7, 21, 28

表-3.2にOPC供試体とGP供試体の要因と水準を示す。GPを用いたPOCは、予備実験で練混ぜが可能であるか確認し、溶液粉体比を0.5として設定し、目標空隙率を0%(ペースト)、15%、25%、30%の4水準とした。SFPCを用いたPOCは、水セメント比15%で目標空隙率を0%(ペースト)、15%、25%、30%の4水準と、水セメント比を25%で目標空隙率を0%、15%、20%、25%、30%の5水準でPOCを作製した。

表-3.2 SFPC—POCとGP—POCの試験体の要因と水準

要因	水準
セメントペーストの種類	シリカフェームプレミックスセメント(SFPC) ジオポリマーペースト(GP)
空隙率(%)	0(ペースト), 15, 25, 30(GP, SFPC W/C=0.15) 0, 15, 20, 25, 30(SFPC W/C=0.25)
水セメント比(%)	15%, 25% (SFPCのみ)

3.1.2 使用材料及び調合表

表-3.3 に使用材料の種類と特性値を示す。粗骨材には、南伊勢町産硬質砂岩 6 号砕石を用いた。実積率は 58.2%，表乾密度は 2.73g/mm²である。

表-3.3 使用材料の種類と特性値

	使用材料	種類	密度 (g/cm ³)
POC	セメント	普通ポルトランドセメント (OPC),	3.15
		シリカフェームプレミックスセメント (SFPC)	3.04
	水	上水道水	1
	粗骨材	南伊勢町産硬質砂岩 6 号砕石 (5-13mm)	2.7
	混和剤	ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤	1.03~1.13
GP—POC	粉体	高炉スラグ微粉末 4000 (BS)	2.91
	溶液	水ガラス 2 号原液 (WG)	2.73

表-3.4. a) に OPC の調合表を示す。実際の混和剤添加量は実験当日目標フロー値になるよう調節しながら練り混ぜを行って決定した。そのため調合表と実際の混和剤添加量は異なる。表-3.4. b) に実際の混和剤添加量及び実測フロー値を示す。なお、表 3.3 の調合表には、予め行った予備実験の結果を基に混和剤添加量を決定した。

表-3.4. a OPC-POC の調合表

V _R (%)	W/C (-)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	G (kg/m ³)	HAE/C (%)	目標フロー値(mm)
0	0.25	184	737	1494	1.04	230
15	0.25	118	472	1494	0.514	170
20	0.25	96.0	384	1494	0.689	190
25	0.25	74.0	296	1494	0.865	210
30	0.25	52.0	208	1494	1.04	230

表-3.4. b 実際の混和剤添加量及び実測フロー値

V _R (%)	目標フロー値 (mm)	実測フロー値 (mm)	混和剤添加量 (g)
0	230	197	154
15	170	187	78.9
20	190	184	35.0
25	190	218	35.3
30	230	248	22.8

表-3.5 に SFPC 及び GP を用いた POC の調合表を示す。

SFPC において実際の混和剤添加量は実験当日目標フロー値になるよう調節しながら練り混ぜを行って決定した。そのため調合表と実際の混和剤添加量は異なる。表-3.6

に実際の混和剤添加率及び実測フロー値を示す。なお、表-3.5の調合表には、予め行った予備実験の結果を基に混和剤添加量を決定した。

GPにおいては、フロー値の管理が難しく、練混ぜ時間によってフロー値を管理したが、目標空隙率30%の調合のPOCのみ溶液粉体比0.5での練混ぜが困難であったため、水ガラスを足し、練混ぜを行った。水ガラスを追加した後の溶液粉体比も併せて表-3.7に示す。

表-3.5 SFPC-POCとGP-POCの調合表

a) SFPCを用いた場合

V_R (%)	W/C (-)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	G (kg/m ³)	HAE/C (%)	目標フロー値
0	0.15	131	873	1494	2.20	230
15	0.15	83.9	560	1494	2.00	170
25	0.15	52.6	351	1494	2.10	210
30	0.15	37.0	246	1494	2.20	230

b) GPを用いた場合

V_R (%)	WG/BS (-)	WG (kg/m ³)	BS (kg/m ³)	G (kg/m ³)	目標フロー値
0	0.5	970	1940	0	230
15	0.5	260	520	1494	170
25	0.5	163	326	1494	190
30	0.5	114	229	1494	230

表-3.6 SFPC-POC 実際の混和剤添加率と実測フロー値

	目標フロー値 (mm)	実測フロー値 (mm)	実際の混和剤添加率 (%)
ペースト	230	-	3.00
$V_R=15\%$	170	167	2.02
$V_R=25\%$	190	176	2.96
$V_R=30\%$	230	198	3.00

表-3.7 GP-POC 実際の溶液粉体比と実測フロー値

種類	目標フロー値 (mm)	実測フロー値 (mm)	WG/BS (-)
ペースト	230	-	0.500
$V_R=15\%$	170	154	0.500
$V_R=25\%$	190	161	0.500
$V_R=30\%$	230	165	0.542

ペーストの状態を写真-3.1に示す。既往の研究では、打設終了までの施工性の確保及び試験体底面部のペーストの垂れの管理を行うため溶液粉体比 0.6 で試験体を作製したが、本実験では低溶液粉体比において POC の練混ぜ及び打込みが可能である範囲を知るため予備実験を行い、溶液粉体比を 0.5 に設定した。



a) OPC の場合

b) SFPC の場合

c) GP の場合

写真-3.1 ペーストの状態

3.1.3 試験体の作製・養生方法

写真-3.2に POC の円柱試験体及び角柱試験体の様子を示す。試験体は、圧縮強度試験用に円柱試験体の($\phi 100 \times 200\text{mm}$)を3本、($\phi 50 \times 100\text{mm}$)のペーストを3本作製し、曲げ強度試験用に角柱試験体の($\phi 100 \times 100 \times 400\text{mm}$)を3本、($40 \times 40 \times 160\text{mm}$)のペーストを3本作製する。これらの試験体を設計空隙率ごとに作製する。



a) 円柱試験体 ($V_R=20\%$)



b) 角柱試験体 ($V_R=20\%$)



c) 円柱試験体 (ペースト)



d) 角柱試験体 (ペースト)

写真-3.2 試験体の様子

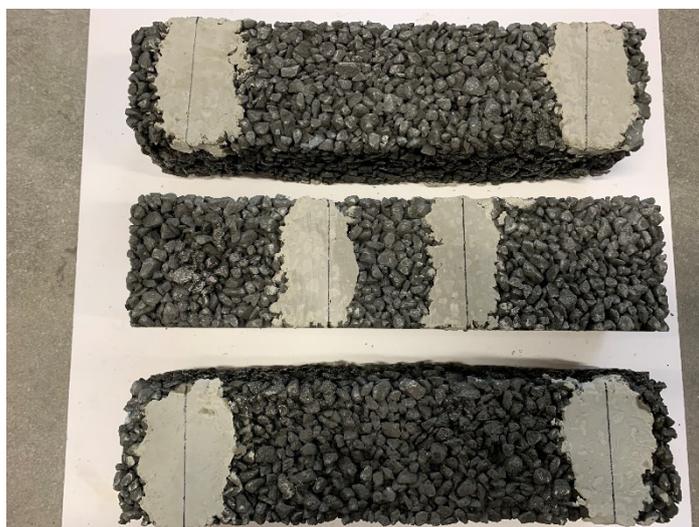
OPC-POC と SFPC-POC の試験体の養生方法は、打込み後翌日に脱型し、材齢 26 日標準水中養生とした。POC の試験体の養生方法は、SFPC の場合、打込み後翌日に脱型し材齢 27 日標準水中養生とした。GP の場合、打込み後材齢 27 日まで型枠封緘養生とした。しかし、打音法の測定と超音波法の測定の際、24 時間乾燥が必要なため材齢 6、13、20、26 日は気中養生とした。

GP は凝結の始発時間(凝結が始まるまでの時間)が非常に早いためその可使時間が OPC や SFPC 等 に比べ非常に短い。そのため、試験体を作製する際、練混ぜから打込みまでの時間をなるべく短くし、品質管理に重視して作製した。

また、作製した試験体は、材齢 27 日でキャッピングを施した。円柱試験体には硫黄キャッピング(写真-3.2 (a)参照)を、角柱試験体には止水セメントを用いたキャッピング(写真-3.3 (b)参照)を施した。



(a) 硫黄キャッピング



(b) 早強セメントによるキャッピング

写真-3.3 キャッピングを施した試験体の様子

3.1.4 試験方法

3.1.4.1 空隙率

POC の空隙率試験は、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)に基づき、各試験体に対して質量法を実施した。

供試体の寸法(長さ、高さ、幅)を、ノギスを用いて測定し、容積 V_1 を算定する。その後、供試体を 24 時間以上水中で飽水させた後に、水中より取り出して、 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 60% の下で 24 時間自然放置し、気中質量 W_2 を測定する。

全空隙率は式(3.1)により算出する。

$$A_t = \left(1 - \frac{W_1/V_1}{W_2/V_2}\right) \times 100 \quad (3.1)$$

ここに、 A_t : ポーラスコンクリートの全空隙率(%)

W_1 : 24 時間自然放置後の気中質量(g)

W_2 : 1m^3 あたりのポーラスコンクリートの各材料の質量和(kg)

V_2 : 1m^3 あたりのポーラスコンクリートの各材料の絶対容積の和(m^3)

3.1.4.2 動弾性係数の測定

動弾性係数の測定を行うために、打音法を行う。POC に対する打音法の測定方法を写真-3.4 に示す。

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、振上げ角度は 30° または 60° から自由落下させ、試験体底面部と側面部の中央をそれぞれ 3 回ずつ打撃して音を発生させる。試験体底面部の打撃音を縦振動の固有振動数とし、試験体側面部の打撃音をたわみ振動の固有振動数とした。打撃音は、試験体端部の鉛直方向に 3 cm の位置に設置した携帯電話により録音し、この録音された音を用いて FFT 分析を行う。

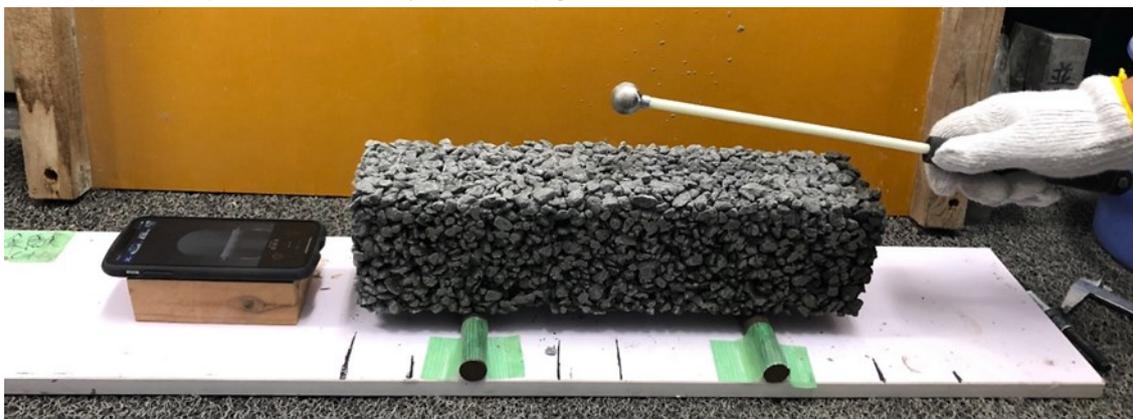


写真- 3.4 打音法の測定方法

POC の試験体に対する動弾性係数は、日本産業標準調査会で定める JIS 規格 (JIS A 1127) に従い、縦振動の場合式 (3.2)、円柱試験体のたわみ振動の場合式 (3.3) 及び角柱試験体のたわみ振動の場合式 (3.4) により算出した。

$$E_{\text{縦}} = 4.00 \times 10^{-4} \frac{L}{A} m f^2 \quad \text{式(3.2)}$$

$$E_{\text{たわみ(円)}} = 1.61 \times 10^{-3} \frac{L^3 T}{d^4} m f^2 \quad \text{式(3.3)}$$

$$E_{\text{たわみ(角)}} = 9.47 \times 10^{-4} \frac{L^3 T}{b t^3} m f^2 \quad \text{式(3.4)}$$

ここに、E：動弾性係数(N/mm²)、f：打音法による卓越周波数(Hz)、b：試験体の幅(mm)、L：試験体の長さ(mm)、t：試験体の高さ(mm)、m：試験体の質量(kg)、A：試験体の断面積(mm²)、T：修正係数(-)、d：試験体の直径(mm)によって求める。

3.1.4.5 超音波伝搬速度の測定

写真-3.5 に超音波法の測定の様子を示す。対面法と表面法の2つの方法で測定し、対面法は、試験体の上面、底面にそれぞれ発振子及び受振子を密着させ測定を行った。表面法は、試験体の表面に300mmの距離をとり発・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5回実施し、それらの平均値により試験体の超音波伝搬速度を評価することとする。試験機の発振子(φ50×50mm)及び受振子(φ50×50mm)と試験体の接着面には、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。

超音波伝搬速度は、発・受振子中心間距離を伝搬時間で割って求めた。



a) 対面法



b) 表面法

写真-3.5 超音波法の測定の様子

3.1.5 実験結果及び考察

3.1.5.1 実測空隙率

図-3.1 に実測空隙率と設計空隙率の関係を示す。図中の破線は実測空隙率と設計空隙率の差が±5%での線である。これに示すように、±5%以内に全ての試験体が収まる結果となった。すなわち、全ての試験体においてほぼ設計通りの POC の試験体が作製できたと考えられる。

OPC と GP を用いたペーストに関してはほぼ 0%に近い値であったため、近似直線は、GP を用いた POC とペーストを一緒に近似した。

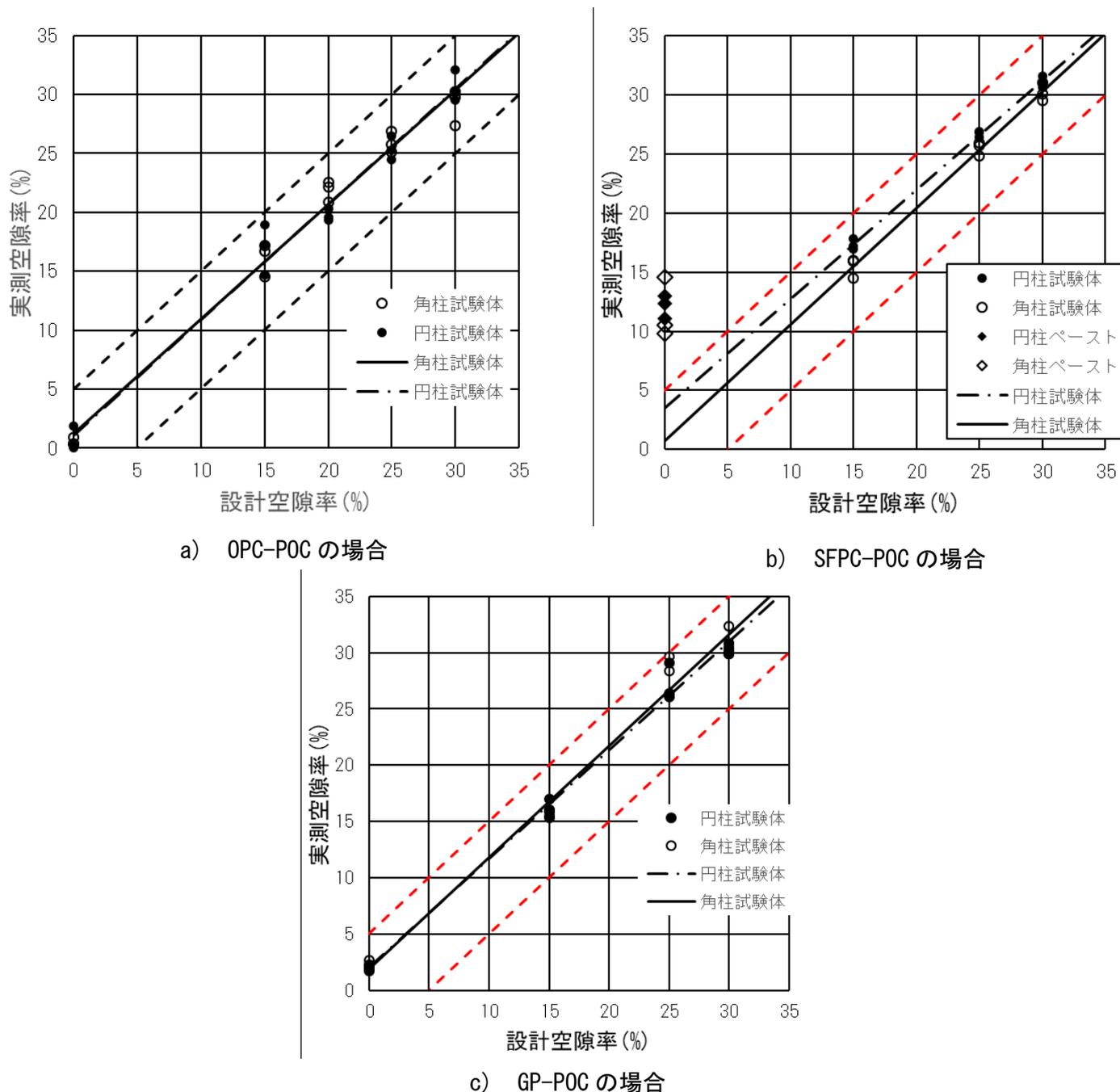


図 3.1 実測空隙率

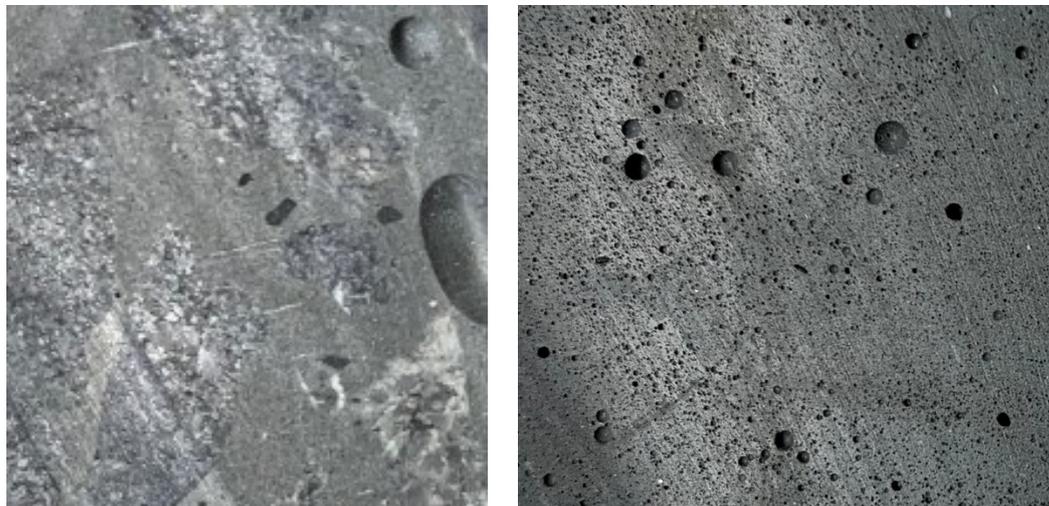
しかし、図 3.1b)において、ペーストの試験体に対して、9～14%の空気量が確認された。ペーストでは質量法により空隙率を評価するのではなく、密度により空気量を評価した。その評価方法を式(3.5)に示す。

ペーストの空気量が設計量より大きくなった原因として、高性能 AE 減水剤を使用したペーストの粘性が高かったため、気泡が締固め時に抜けきらなかったことが考えられる。また、極低水セメント比領域でのペースト(及び POC)の作製にあたり、練混ぜ可能になる範囲まで先述した高性能 AE 減水剤の量を調合した。高性能 AE 減水剤の使用量が大きくなるに連れ連行空気量が直線的に大きくなることが分かっているため、本実験のようにペーストに対し、多量の高性能 AE 減水剤を使用すると空気量が増大してしまう。

一方で POC の場合、ペーストとは異なり内部に粗大な空隙を有している。ペーストは充填しており、かつ粘性が高かったため気泡が内部に残ってしまったが、POC の調合、内部の粗大な空隙にセメントペースト中の気泡が抜けられたことにより、ペースト中の気泡がなかったと考えられる。実際のペースト及び POC の内部の様子を写真-3.6 に示す。

$$V_R = \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho}\right) \times 100 \quad \text{式(3.5)}$$

ここに、 V_R : 空気量(%), ρ : ペーストの設計密度(g/cm^3), ρ_0 : ペーストの実測密度(g/cm^3)



a) POC の調合

b) セメントペーストの場合

写真-3.6 表面の状態

3.1.5.2 動弾性係数

1) OPC-POC の動弾性係数

打音法による OPC-POC の動弾性係数の測定結果(たわみ振動及び縦振動)を図-3.2 に材齢 28 日での動弾性係数と実測空隙率の関係を示す。動弾性係数は線形で近似し、その x 切片は骨材の実積率を 100 から引いた値となる。本実験で用いた骨材の実積率は 58.2%であるので、ほぼ正確な近似直線であることが分かった。図中には、ペーストの結果も併せて示している。これらペーストの結果は既往の研究と同様となった。

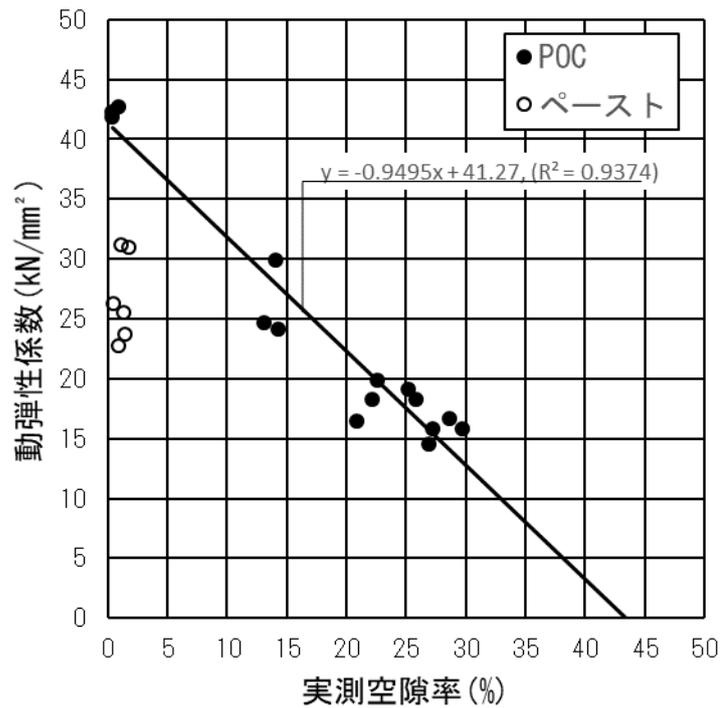


図-3.2 OPC-POC の動弾性係数と実測空隙率の関係(円柱試験体, たわみ振動の場合)

2) SFPC-POC と GP-POC の動弾性係数

SFPC を用いた POC の W/C=0.25 における材齢毎の動弾性係数を、試験体の形状別にそれぞれ円柱は図-3.3a)に、角柱は図-3.3b)に示す。図-3.12 に示すように、W/C=0.15 の SFPC の場合、図-3.4 に示した W/C=0.15 の SFPC に比べ、動弾性係数が全ての空隙率の範囲で高い値となった。目標空隙率 15% の試験体においては、30~40kN/mm² の動弾性係数を得られた。

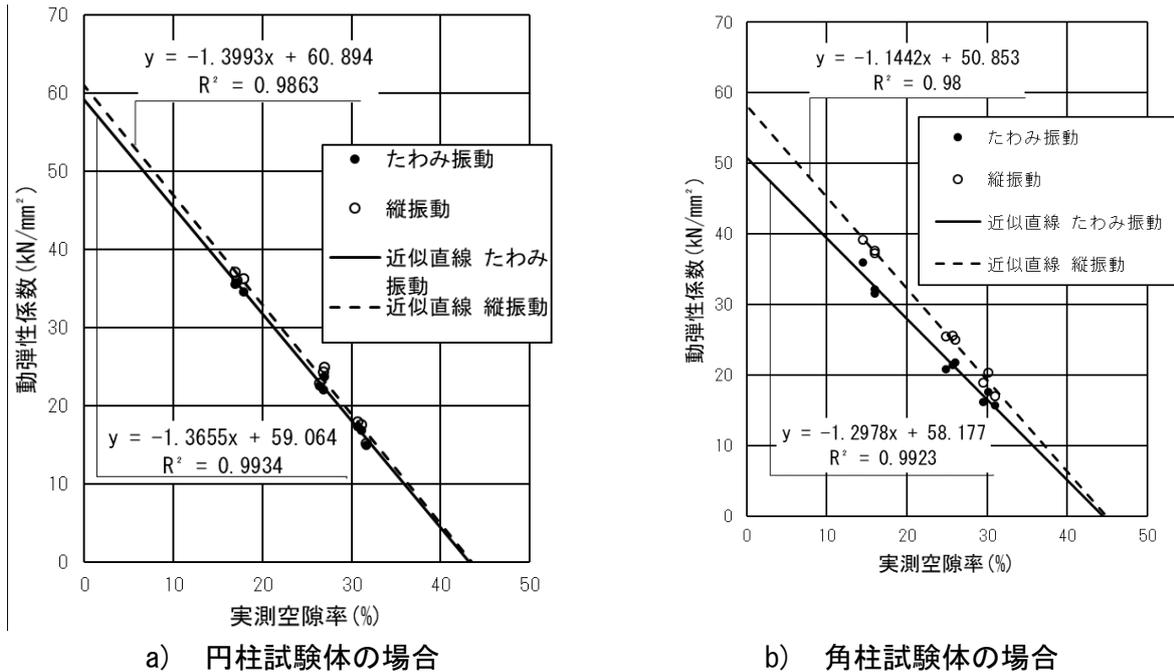


図-3.3 W/C=0.15 の SFPC を用いた POC の弾性係数と実測空隙率

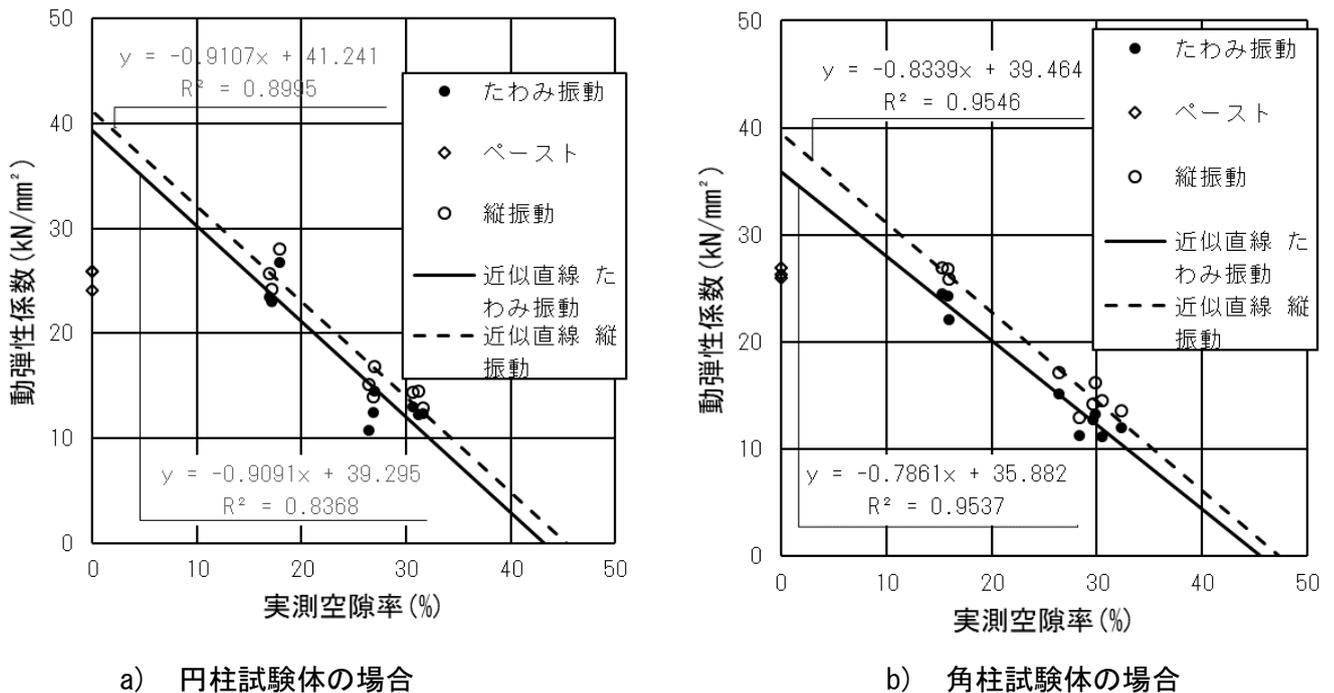


図-3.4 GP を用いた POC の弾性係数と実測空隙率

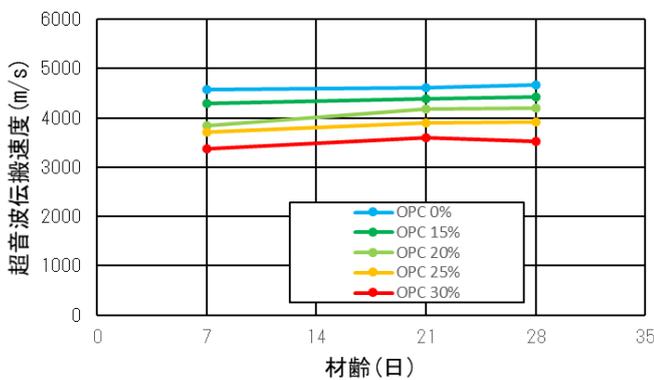
3.1.5.3 超音波伝搬速度

1) OPC-POC

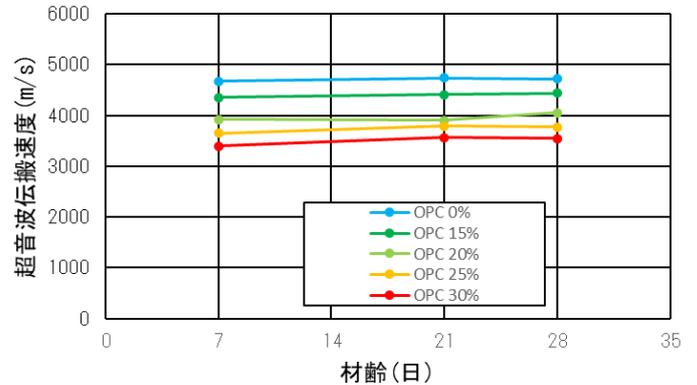
本実験では対面法による測定と、角柱試験体については表面法による測定も併せて行った。OPC を用いた POC の結果を図-3.5 に示す。試験結果から得られた知見を以下に示す。

試験体の形状によらず、またその試験方法によらず、材齢を追う毎に超音波伝搬速度は大きくなる傾向がわかった。

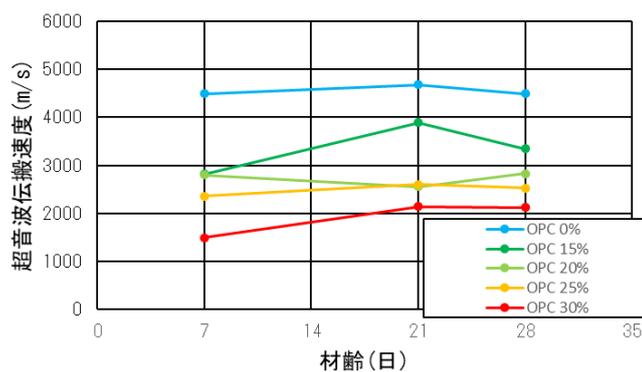
角柱試験体の対面法と表面法の超音波伝搬速度を比較すると、表面法の超音波伝搬速度の方がバラツキが大きく、僅かに低い結果となった。これは、表面法による超音波の伝搬経路が表面付近を通るため、試験体の表面の性状に大きく影響されることが原因だと考えられる。



a) 対面法による円柱試験体



b) 対面法による角柱試験体



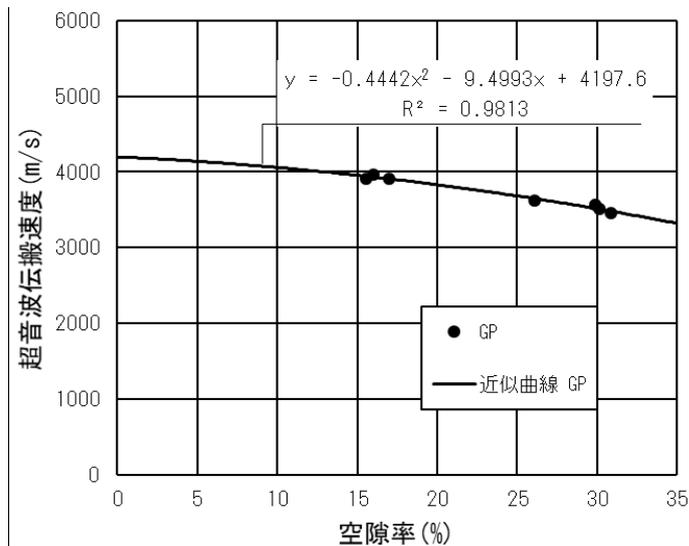
c) 表面法による角柱試験体

図- 3.5 OPC-POC 対面法による円柱試験体の超音波伝搬速度と実測空隙率の関係

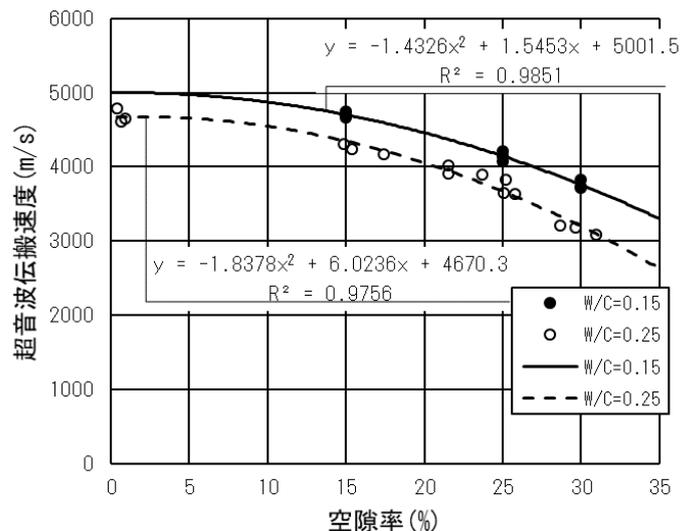
2) SFPC-POC と GP-POC

本実験では対面法による測定と、W/C=0.25の角柱試験体については表面法による測定も併せて行った。W/C=0.15のSFPCを用いたPOC及びGPを用いたPOCの超音波伝搬速度と実測空隙率の関係を試験法及び試験体の形状毎に図-3.6, 図-3.7に示す。

超音波伝搬速度について、材齢が経つごとに増加することが分かった。しかしながら、表面法による角柱試験体においては僅かにバラツキが確認できる。これは、表面法の超音波伝搬経路が試験体の表面付近を通過するため、表面の性状に大きく依存することからバラツキが確認されたと考えられる。超音波伝搬速度と実測空隙率について、以下の結果が得られた。既往の研究よりその関係を二次関数により近似した。

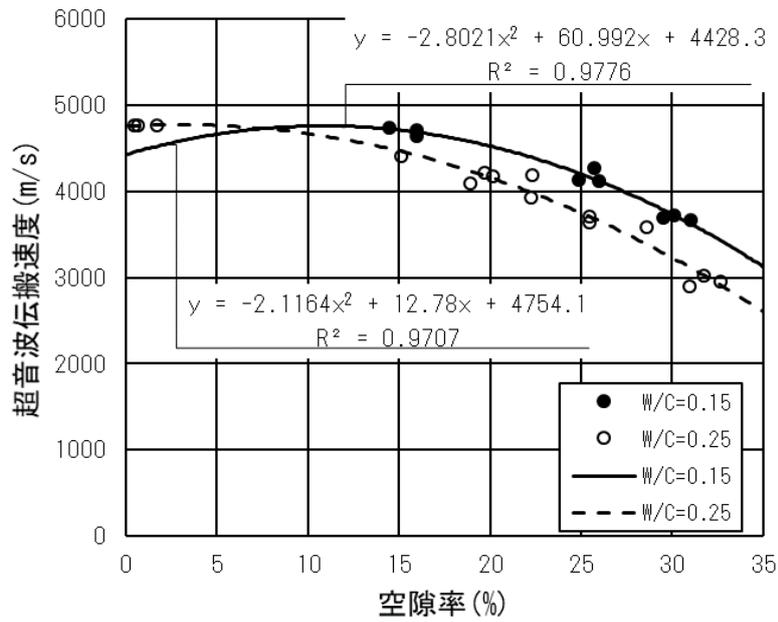


a) SFPC を用いた場合

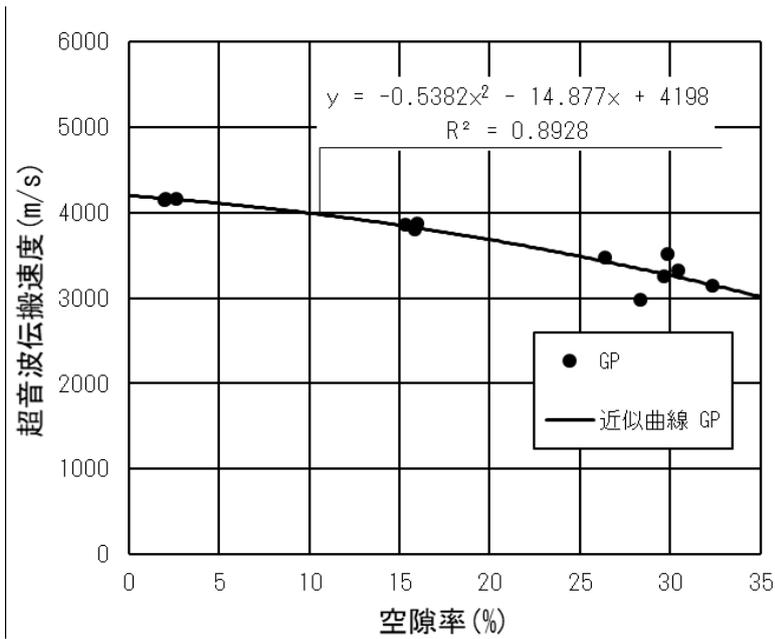


b) GP を用いた場合

図-3.6 対面法による円柱試験体の超音波伝搬速度と実測空隙率の関係



a) SFPC の場合



b) GP の場合

図-3.7 対面法による角柱試験体の超音波伝搬速度と実測空隙率の関係

3.1.6 実験 I のまとめ

本章で得られた知見を以下に示す。

- 1) 表面法による超音波伝搬速度の測定は、超音波伝搬経路である表面の性状に大きく影響されることが確認された。
- 2) 極めて低い W/C で練混ぜを行う際、混和剤を過大に添加すると、ペースト中の気泡を連行し強度低下に繋がる。
- 5) SFPC の W/C 毎の各種力学特性について、W/C=0.15 の場合の POC の方が全ての力学特性において高い値が得られた。
- 3) GP を用いた POC において、圧縮強度に関しては、高強度コンクリート(設計基準強度 36N/mm^2 以上)と呼ぶことが出来る強度を、透水性を重視した領域で十分に確保できた。

本章で得られた知見より、各種結合材を用いた高強度 POC の作製は可能であり、高強度と呼ぶことが出来る強度を様々な力学特性から評価することが出来た。特に SFPC の W/C=0.15 及び GP を用いた POC の打音法による動弾性係数の測定、超音波法による超音波伝搬速度の測定は既往の研究がなく、新たな知見である。

3.2 実験Ⅱ：骨材の粒径とセメントペーストの弾性係数の影響

3.2.1 実験概要

骨材はポーラスコンクリート (POC) の構成材料の一つであり、その粒径 (サイズ) は POC の圧縮強度、曲げ強度、透水性など各性質に影響を与える。これまで、骨材の粒径に関する研究は、様々な報告例がある。大谷ら³⁻¹⁾による POC の圧縮強度特性に及ぼす影響についての報告では、骨材粒径の違いが結合材の形成状況に影響を及ぼし、間接的に圧縮強度に影響を及ぼすことが報告されている。そして、圧縮強度と同様に、POC の弾性係数も骨材粒径の影響を受けると考えられる。オチル³⁻²⁾によれば、POC のモデルを用いた理論式では、動弾性係数—空隙率関係はほぼ線形の関係式により表示できることがわかっている。しかし、骨材粒径が弾性係数—空隙率関係に及ぼす影響については、実験的検討がほとんどなされていない。

そこで、本章では、POC の構成材料である骨材の粒径に着目し、POC の弾性係数—空隙率関係に及ぼす影響について実験的に検討する。本実験では、骨材の粒径範囲を単粒度 5 号砕石 (13~20mm)、6 号砕石 (5~13mm)、7 号砕石 (2.5~5mm) の 3 水準として実験を行った。

3.2.1.1 実験方法

1) 実験要因および水準

表-3.8 に本実験の要因と水準を示す。本実験では、砕石の大きさに応じて設計空隙率を変化させ実験を行った。写真-3.7 に、使用した砕石の様子を示す。5 号砕石では設計空隙率を 0, 15, 25, 30% の 4 水準、6 号砕石では 0, 5, 10, 15, 25, 30% の 6 水準、7 号砕石では 0, 15, 25, 30% の 4 水準とした。

表-3.8 実験の要因と水準

要因	水準
設計空隙率 (%)	0, 5, 10, 15, 25, 30
使用砕石	5 号, 6 号, 7 号



a) 5号砕石(13~20mm)

b) 6号砕石(5~13mm)

c) 7号砕石(2.5~5mm)

写真-3.7 使用砕石の様子

2) 使用材料および調合表

表-3.9 に、POC の使用材料を示す。骨材には JIS A 5001 に規定される単粒度砕石の 5 号砕石(13~20mm)、6 号砕石(5~13mm)、7 号砕石(2.5~5mm)を用い、セメントには普通ポルドラントセメントを用いた。また、セメントペーストのフロー値を調節するため、高性能 AE 減水剤を用いた。

表-3.10 に、POC の調合表を示す。セメントペーストの水セメント比(W/C)は 0.25 とし、流動性はフロー値により管理した。

表-3.9 POC の使用材料

使用材料	種類	密度(g/cm ³)	実積率(%)
セメント	ポルドラントセメント	3.16	-
水	上水道水	1.00	-
骨材	南伊勢町神津佐産5号砕石(13~20mm)	2.75	56.8
	南伊勢町神津佐産6号砕石(5~13mm)	2.62	60.6
	南伊勢町神津佐産7号砕石(2.5~5mm)	2.61	61.8
混和剤	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤	1.03	-

表-3.10 POC の調合表

使用砕石	設計 V_R (%)	単用量(kg/m ³)			HAE/C(%)	実測フロー値 (mm)
		W	C	G		
G5	0	182.7	730.9	1505	0.288	208
	15	116.5	466.1		0.0949	140
	25	72.38	289.5		0.0664	172
	30	50.31	201.3		0.0393	200
G6	0	184.9	739.7	1492	0.292	260
	5	162.9	651.4		0.170	186
	10	140.8	563.2		0.155	177
	15	118.7	474.9		0.137	165
	25	74.59	298.3		0.137	220
	30	52.52	210.1		0.0666	247
G7	0	197.3	789.1	1420	0.312	230
	15	131.1	524.3		0.241	244
	25	86.94	347.8		0.178	268
	30	64.88	259.5		0.0933	258
ペースト	-	441.3	1765	-	0.00762	233

[注] V_R : 空隙率(%), W : 水(kg/m³), C : セメント(kg/m³), G : 骨材(kg/m³), HAE/C : セメント質量に対する高性能 AE 減水剤添加率(%)

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、低速で 60 秒間練混ぜた後に、ミキサー内壁に付着したセメントを掻き落とし、高速で 120 秒間練混ぜた。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、骨材を投入してさらに高速で 120 秒間練混ぜた。

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、プラスチック製の円柱型枠(φ100×200mm)に打ち込んだ。締固めは、3 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掛け乾燥を防ぎ、材齢 3 日目に脱型した後、実験室内の水槽 (20℃) にて水中養生を行った。その後、材齢 7 日、14 日、21 日、27 日に打音法試験、超音波伝播速度試験を行い、材齢 28 日に圧縮強度試験を行った。各試験前には試験体を水槽から取り出し、実験室内に置き 24 時間乾燥させた。実験後は再び水槽内に戻し、水中養生を続けた。

4) 試験方法および測定項目

(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)に準拠して、質量法による全空隙率の測定を行った。

(2) 超音波伝播速度試験

超音波の測定方法としては、対面法を行い、円柱試験体の上面、底面にそれぞれ発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 5 回実施し、それらの平均値により試験体の超音波伝播速度を評価することとする。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、グリセリンペーストを接触媒質として用いた。

3.2.2 実験結果および考察

1) 空隙率

図-3.8 に、質量法による全空隙率と設計空隙率の比較を示す。設計空隙率が 0%のときの 5 号砕石、6 号砕石を用いた POC を除いては、全空隙率は設計空隙率の $\pm 5\%$ 以内にほぼ収まっていることが確認できる。設計空隙率 0%に着目すると、粒径の小さい 7 号砕石を用いた POC の全空隙率は+5%以内に値が収束しているが、粒径の大きい 5 号砕石を用いた POC の全空隙率は+5~8%と、他の砕石と比べて設計空隙率と全空隙率の値に差異が生じていることも確認できた。これは、試験体作製の際に用いた円柱型枠の壁効果により骨材の実積率が低下したことが原因と考えられる。

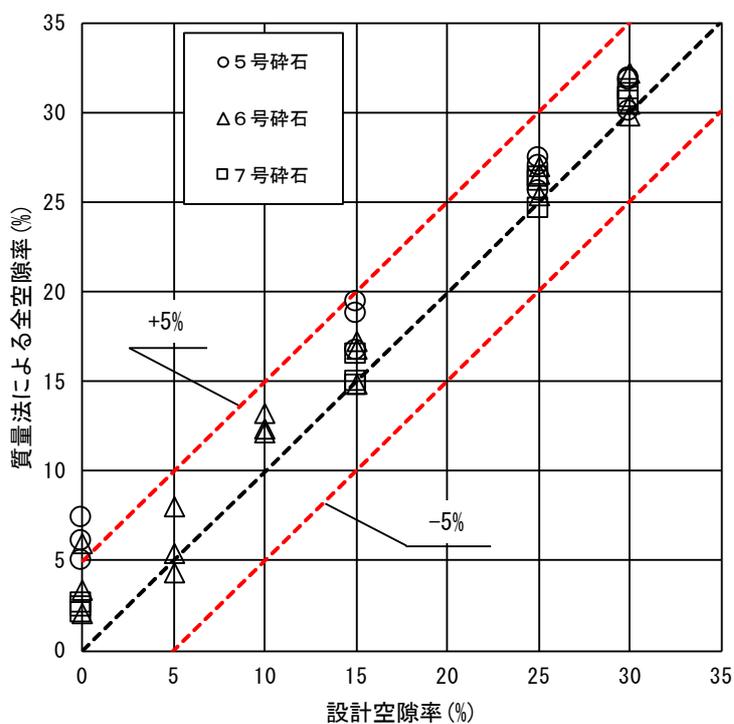
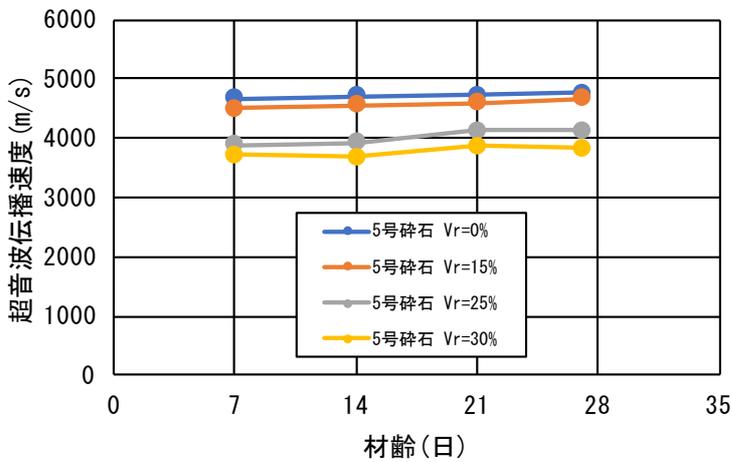


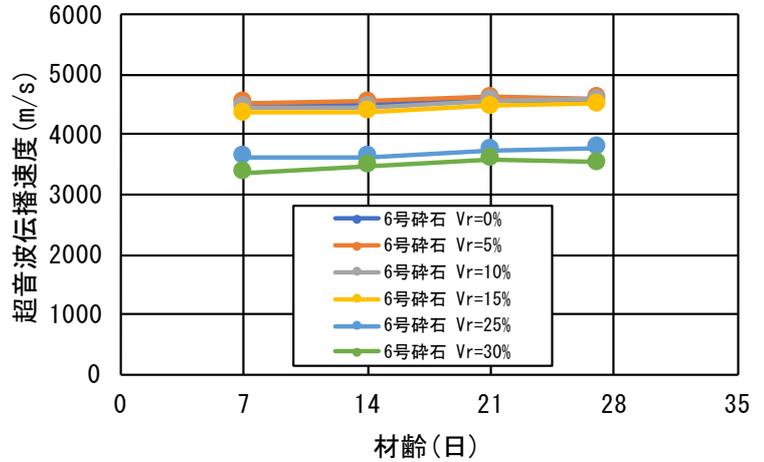
図-3.8 質量法による全空隙率と設計空隙率の比較

2) 超音波伝播速度

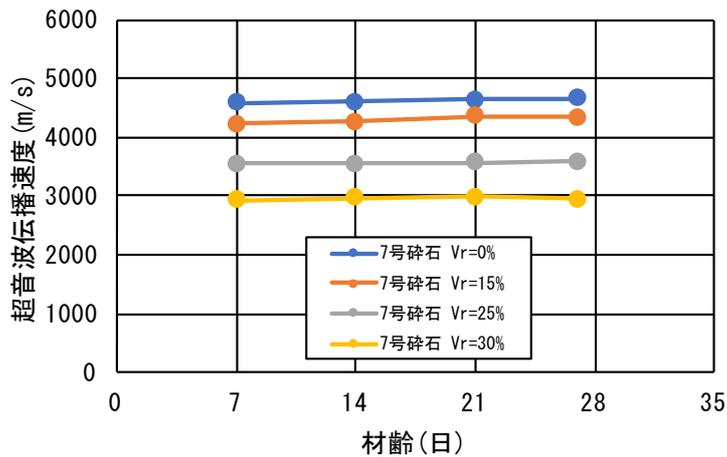
図-3.9に、5号砕石、6号砕石、7号砕石を用いたPOCの超音波伝播速度と材齢の関係を示す。同図によれば、5号砕石、6号砕石を用いた設計空隙率25、30%のPOCは、材齢の経過とともに超音波伝播速度の増加傾向が見られる。しかし、5号砕石、6号砕石を用いた設計空隙率0~15%のPOC、7号砕石のPOCは、材齢が経過しても超音波伝播速度の増加傾向はあまり見られなかった。このことから、空隙率の小さいPOC（空隙率：0~15%）、または7号砕石を用いたPOCの超音波伝播速度は、材齢にあまり影響を受けないことがわかる。



a) 5号砕石



b) 6号砕石



c) 7号砕石

図-3.9 POCの超音波伝播速度と材齢の関係

図-3.10 に、材齢 27 日における超音波伝播速度と全空隙率の関係を示す。同図には、それぞれ 5 号砕石、6 号砕石、7 号砕石を用いた POC の超音波伝播速度と全空隙率関係における理論式も示している。同図によれば、いずれの砕石を用いた POC も、全空隙率が大きくなるほど POC の超音波伝播速度は小さくなる傾向がある。また、同空隙率における POC の超音波伝播速度を比較すると、粒径の小さい 7 号砕石を用いた POC の超音波伝播速度は小さく、粒径の大きい 5 号砕石を用いた POC の超音波伝播速度は大きいことがわかる。この原因として、伝播経路の影響が考えられる。超音波は固体部分（骨材、セメントペースト）を空気中に比べ約 11～14 倍の速度で伝播していき、伝播速度の小さい空気中を迂回して伝播速度の大きい固体部分を優先して伝播する。同空隙率で比較すると、砕石の粒径が小さい POC は空隙一つあたりの大きさは小さくなるが、空隙の数は砕石の粒径が大きい POC に比べて多くなる。超音波は空隙を迂回して伝播するため、砕石の粒径が小さい POC は迂回経路が長くなり、結果として伝播経路は長くなる。このため、粒径の小さい砕石を用いた POC の超音波伝播速度は小さくなると考えられる。

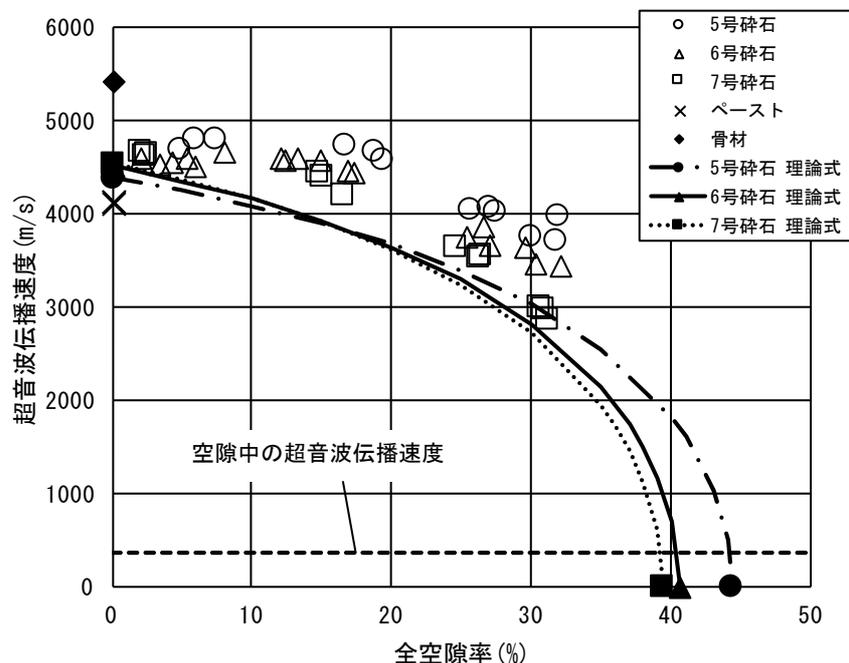


図-3.10 材齢 27 日における POC の超音波伝播速度と全空隙率の関係

3.2.3 実験Ⅱのまとめ

本実験では、砕石の粒径が POC の弾性係数—空隙率関係に及ぼす影響について検討した。以下に得られた知見を示す。

POC の超音波伝播速度は、低空隙率（空隙率 0～15%）の範囲では材齢の影響をほとんど受けず、POC の超音波伝播速度—全空隙率関係においては、全空隙率が大きくなるほど POC の超音波伝播速度は小さくなる傾向がある。また、同空隙率における POC の超音波伝播速度を比較すると、用いた砕石の粒径が大きい POC ほど、超音波伝播速度は大きくなる。

3.3 第3章の参考文献

実験Ⅰの参考文献

- 3-1) ERIDENGAOQIER：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，2019.9
- 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

実験Ⅱの参考文献

- 3-3) 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，第585号，pp.31-37，2004.11
- 3-4) ERIDENGAOQIER：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，三重大学学位論文 pp.28-29，2019.9

第四章

超音波法（表面法）による普通 POC の空隙率推定

4.1 本実験の背景

現場施工された POC 舗装の品質評価方法として、筆者らは既往の研究^{4,2)}で、超音波法による POC の空隙率推定の可能性を検討し、対面法による超音波伝播速度と POC 空隙率の関係は二次関数で近似できることを報告した。また、POC の表面の凹凸による超音波発・受振子と試験体の接触不良の問題は、POC 試験体を水中に入れて測定することにより改善できることを明らかにし、その方法を提案している^{4,3)}。しかし、施工された POC 構造体の品質評価をする場合は、POC の表面法による超音波伝播速度について検討し、現場で適用性のある接触媒質または測定方法についての検討も必要である。

そこで本章では、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い、実験Iにおいて超音波（表面法）の POC 内を伝播する最短経路について検討を行った。

4.2 実験I:接着媒質の影響

4.2.2 実験方法

1) 実験の要因と水準

表-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（SONICOAT-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-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

2) 使用材料および調合

表-4.2 に、POC の使用材料を示す。POC の使用材料として、粗骨材には、JIS A 5001 に規定される単粒度砕石のうち、6号砕石（5～13mm）を、また、セメントには普通ポルトランドセメントを用いた。セメントペーストのフロー値を調節するた

表-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	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-4.3 ポーラスコンクリートの調合表

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

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-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-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、比較的均一のものがあったといえる。写真-4.2 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-4.3 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。

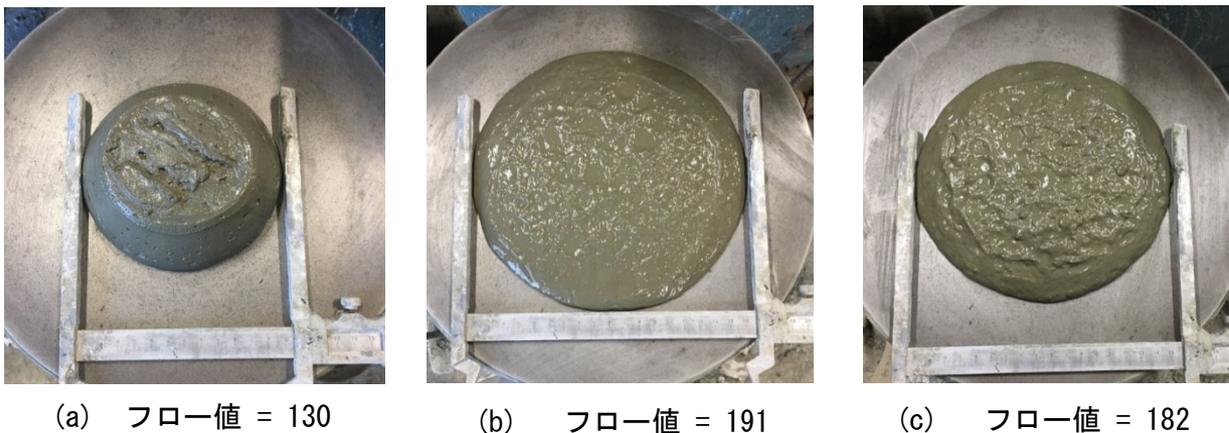


写真-4.1 セメントペーストのフロー試験



写真-4.2 試験体の底部の垂れの



写真-4.3 試験体の打込み面の状

3) 試験体の作製方法

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

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

締固めは、2 層に分けて打ち込んだ POC に対して、各層を突き棒で突き固め、所定質量を充填した後に、ジグ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）⁴³⁾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-4.1 に、超音波伝播速度試験の概要を示す。超音波伝播速度は、発・受振子中心間距離を伝播時間で割って式(1)により算出した。なお、超音波伝播速度の測定は、材齢 28 日において、超音波測定法の対面法および表面法の両者について行った。

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

ここに、 V ：超音波伝播の見かけ速度(m/s)，

L ：発・受振子中心間距離(m)， T ：伝播時間(s)

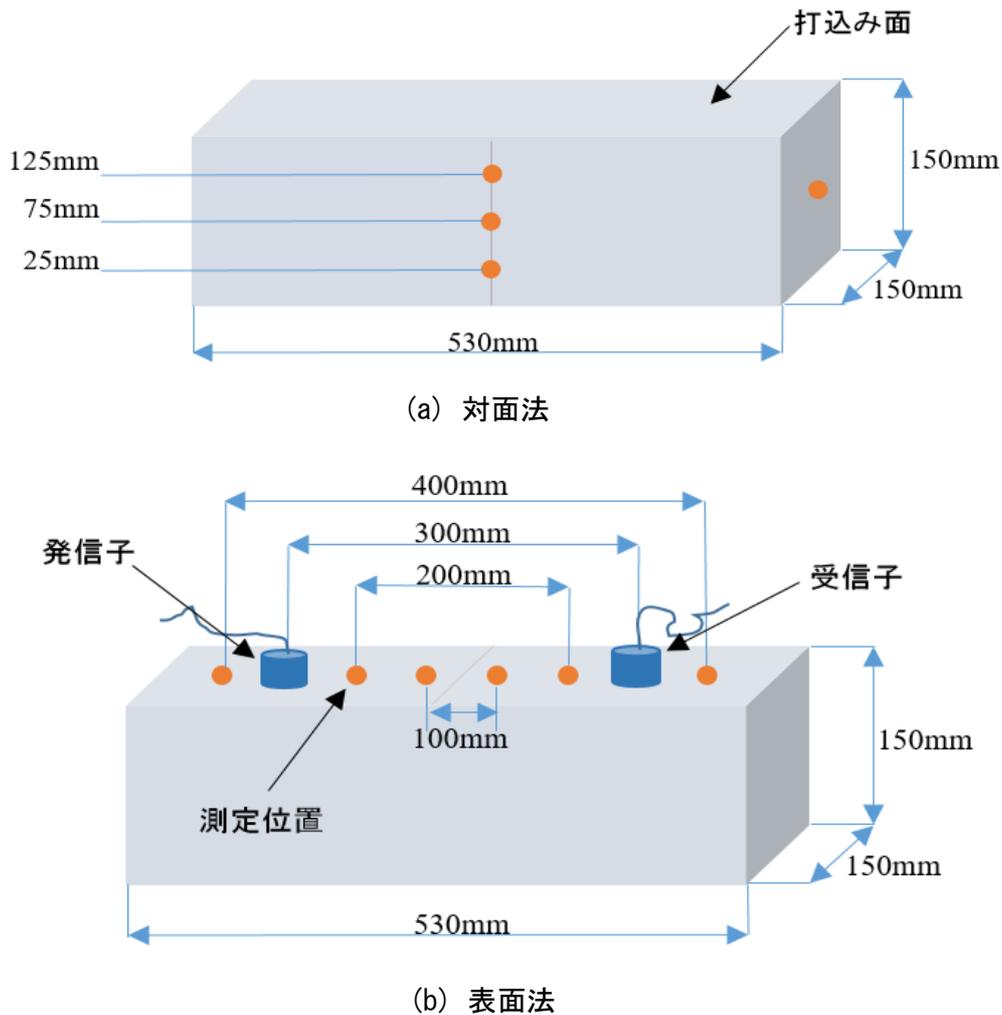


図-4.1 超音波伝播速度試験の概要

対面法の測定は超音波発・受振子（直径 50mm，周波数 50kHz）を角柱供試体（150×150×530mm）の両側の中央に当て，伝播時間を同図に示す測定位置ごとに 5 回測定した。対面法の測定位置は試験体長さ方向と中央断面において行い，中央断面での測定は，底面から 25mm，75mm，125mm の位置において行った。表面法の測定は，角柱試験体（150×150×530mm）の打込み面，側面および底面において，超音波発・受振子（直径 50mm，周波数 50kHz）の中心間距離が 100 mm、200 mm、300 mm、400 mm となる位置で 5 回行った。また，表面法の測定では，超音波の伝播経路が対面法のように超音波の発・受振子の中心間距離と一致しないため，発・受振子間距離の補正が必要である。発・受振子間距離の補正は，既往研究⁴⁴⁾を参考に，式(2)を用いて行った。

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

ここに、 L' ：補正距離， L ：発・受振子中心間距離(m)，

x ：発・受振子をもっとも近づけた時の補正距離，

α ：補正係数

写真-4.4 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 15×15×53 cm）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）⁴³⁾の容積法を参考にして、試験体の中の気泡を十分に抜き出した後に測定を行った。グリセリンペーストの場合は、水中測定の後、試験体を実験室（温度 13℃，湿度 43%）において 3 時間ほど水を切った後に測定を行った。なお、発・受振子と試験体との各接触面において、コンクリート専用の接触媒質のグリセリンペースト（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。



(a) グリセリンペースト (1.5～2 g)



(b) 水

写真-4.4 超音波伝播速度試験に用いた接

4.2.3 実験結果および考察

1) 空隙率

図-4.2 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。

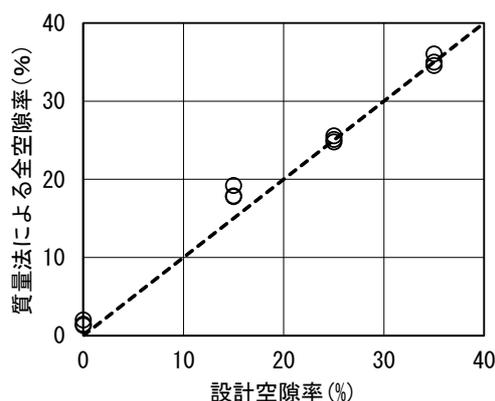


図-4.2 質量法による全空隙率と設計空隙率

2) 超音波伝播速度

(1) 対面法

図-4.3 に、対面法による超音波伝播速度について試験体の高さ方向の分布を示す。なお、データ（各点は三本の試験体で測定位置ごとに 5 回測定した 15 個測定データの平均値、変動係数は 0.004~0.019）は試験体の中央断面での横方向において測定したものである。図によれば、空隙率が大きくなるほど超音波伝播速度は小さくなる。超音波伝播速度は、設計空隙率が 0% の場合は、高さ方向にはほぼ影響が見られなかったが、設計空隙率が 15%、25%、35% の場合は、下部の方が中央部より若干大きい。これは、セメントペーストの垂れの影響により、下部の空隙率が小さくなったためと考えられる。また、設計空隙率が 35% の場合は、上部の超音波伝播速度が他より明確に大きくなっている。この原因としては、以下のように考えている。

POC の締固めでは、締固めに対する抵抗力がほぼと骨材の接触部分によって決まる。この接触部分を通して上層からの締固め力が下層へ伝わっていく。締固めの初

期には、上層の空隙率が下層より小さくなる傾向がある。設計空隙率 35% の場合は、この傾向が明解になるため、より明確であったと考えられる。

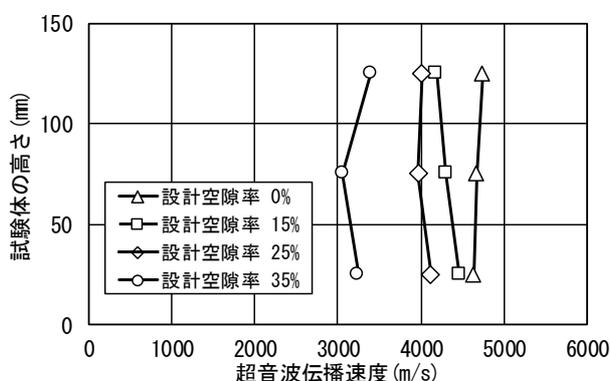
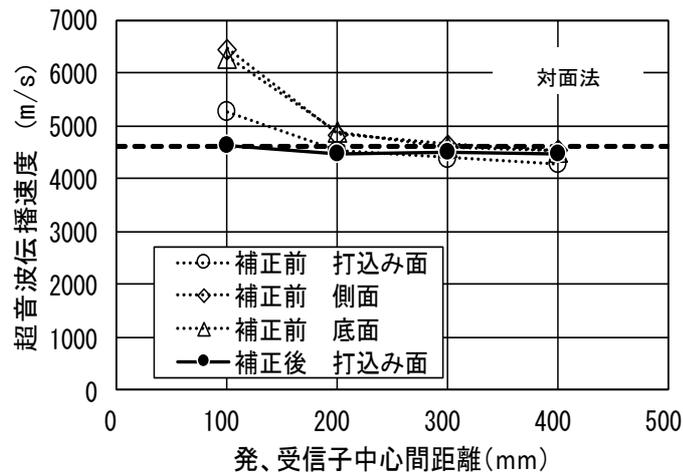


図-4.3 超音波伝播速度（対面法）の試験体高

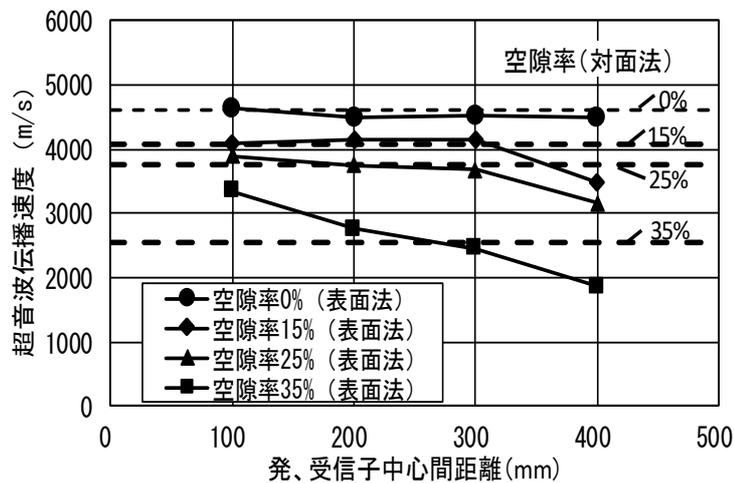
(2) 表面法

図-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-4.4a) 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、写真-4.3 に示したように試験体の打込み面は、比較的凹凸しており、発・受振子および試験体との密着度が得にくいため音速が小さくなったと考えられる。測定面の影響については、他の各空隙率の場合もほぼ同様な傾向であった。また、発・受振子間距離の補正は、既往研究⁵⁾を参考に、式 2) を用いて行った。なお、図に示す打込み面の場合は、 $x=20\text{mm}$ 、 $\alpha=0.1$ とし、以下に示す表面法による音速も、これらの値を用いて補正した。

図-4.4b) 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。



a) 測定面の影響 (V_R = 0%)



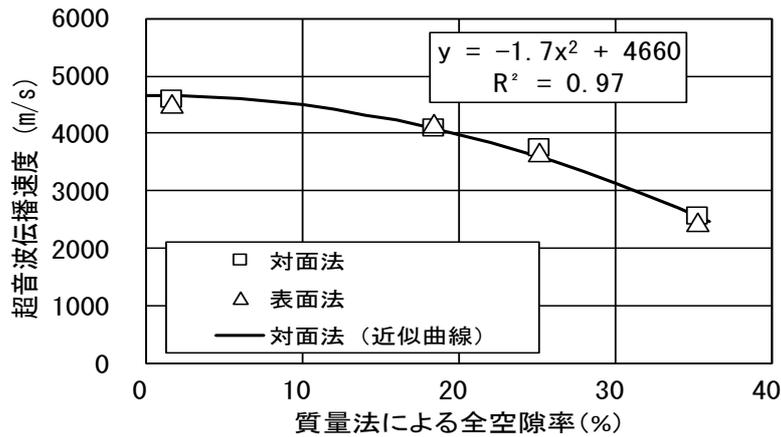
b) 空隙率の影響

図-4.4 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

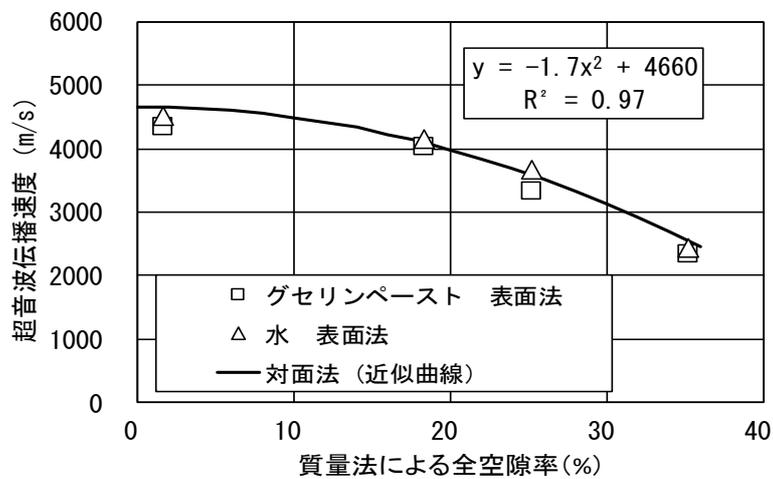
4.2.3 超音波伝播速度と空隙率の関係

図-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-4.4 と同様) である。図-4.5a) は、対面法と表面法の比較、図-4.5b) 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。

これは、既往の研究⁴²⁾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



(a) 対面法と表面法の比較



(b) 接触媒質の比較

図-4.5 超音波伝播速度と空隙率の関係

率が大きくなるほど大きくなるため、超音波伝播速度と空隙率の関係は上に凸の曲線になると考えられる。なお、解析では超音波は POC 中の固体部分を伝播し、空隙を迂回することを前提条件としている。解析についての詳細な内容は既往の研究⁴²⁾に参考にされたい。

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

4.2.4 第四章実験 I まとめ

実験 I 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。

4.3 実験II:POC 中の超音波伝播経路

4.3.1 実験概要

既往の研究によると，**図-4.6**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⁴⁷⁾。表面パルスによる波動は，同心円状に伝わる⁴⁸⁾。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-4.7**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。

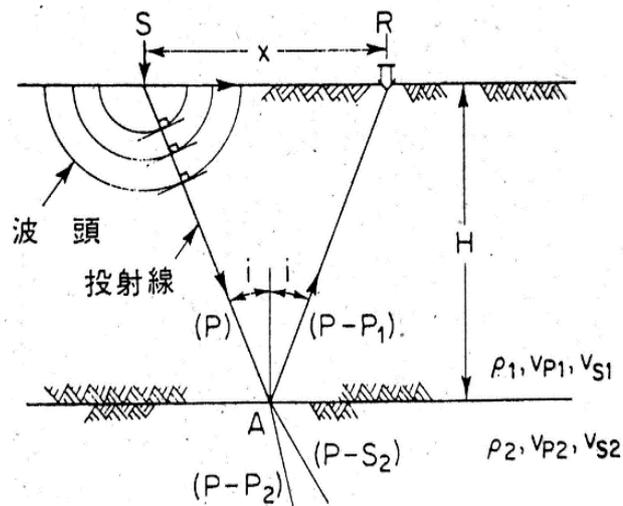


図-4.6 弾性波の伝播経路¹⁾

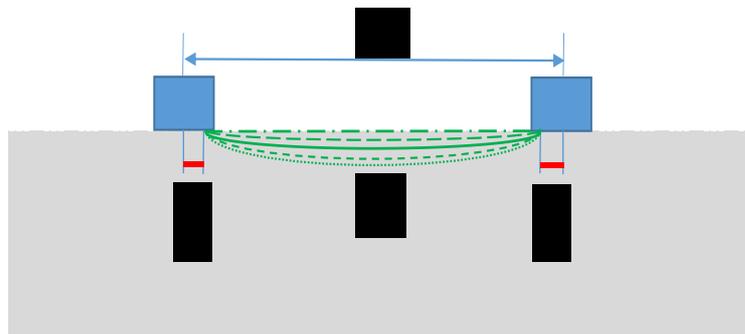


図-4.7 コンクリートにおける超音波の伝播経路

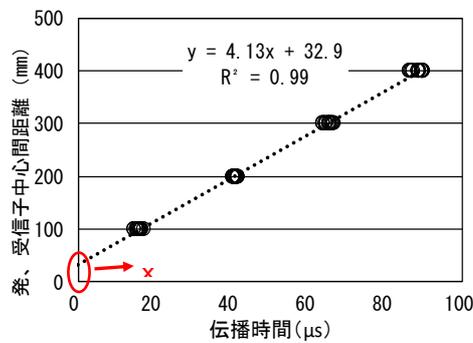
また、オチルらの研究において、図-4.8 のように関係があり、超音波の表面法では発・受振子間距離が式(2)による算出ができることが明らか。

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

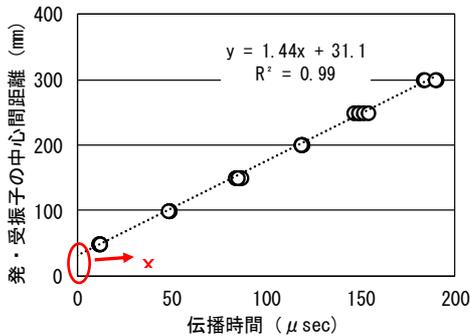
ここに、 L' ：補正距離、 L ：発・受振子中心間距離(m)，

x ：発・受振子をもっとも近づけた時の補正距離、 α ：補正係数

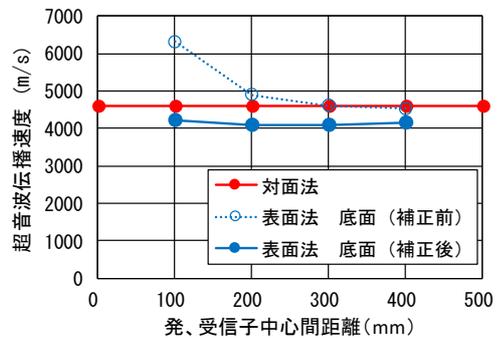
しかし、オチルらの研究には図-4.8 様に、発・受振子中心間距離と伝播時間の関係を示す。図によれば、発・受振子間の補正距離は、コンクリートで 33mm 程度、水で 31mm 程度になり、比較的近い値が得られた。図-4.9 に、オチルらの超音波伝播速度と発・受振子中心間距離の関係を示す。図によれば、コンクリートにおいて、表面法による超音波伝播速度（補正後）は、対面法による伝播速度より小さいに対し、水の場合はほぼ同じであることが確認された。このことから、表面法による測定では、超音波の伝播経路は、水の場合はほぼ距離が $L-x$ の直線となるに対し、コンクリートの場合は直線ではなく、それより長くなることが確認できる。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



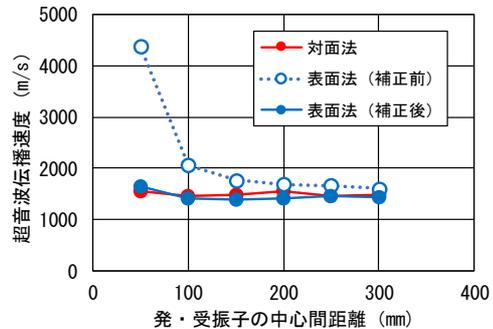
(a) コンクリート



(a) 水



(a) コンクリート



(b) 水

図-4.8 発・受振子中心間距離と伝播時間の関係

図-4.9 超音波伝播速度と発・受振子中心間距離の関係

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た。

4.3.2 実験方法

オチルらの研究には水と普通コンクリートしか検討していないため、本実験は、コンクリート、POC、セメントペーストおよび水において表面法による超音波伝播速度を測定し、最短伝播経路について実験的検討を行った。表-4.4は本実験の要因と水準。また、普通コンクリートとPOCにおいて、骨材粒径の影響についても検討した。表-4.5は本実験の調合表。

表-4.4 要因と水準

要因	水準
試験体の種類	水, セメントペースト, コンクリート, POC
骨材粒径*	G5, G6, G7

注[*]: コンクリートおよびPOCの調合のみ

表-4.5 調合表

	V _R (%)	W/C (-)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	G (kg/m ³)	HAE (kg/m ³)
G5	0	0.25	178	710	1609	7.4
	25	0.25	67.4	270	1609	2.3
G6	0	0.25	184	737	1494	7.7
	25	0.25	74.0	296	1494	2.6
G7	0	0.25	180	719	1514	7.5
	25	0.25	69.6	278	1514	2.4

図-4.10 に、超音波伝播速度の表面法による測定の様子を示す。本実験では、普通コンクリートおよびセメントペースにおける測定は、試験体の底面において行った。また、POC における測定は、試験体の底面が若干垂れが生じていたため、垂れが少ない側面において行った。対面法による測定は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、普通コンクリート、POC およびセメントペースに関わらずと同様に、発・受振子間距離が 100mm, 200mm, 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。なお、水の場合は本実験では既往研究の測定結果を用いることとした。

超音波伝播速度は、式(3)および式(4)による算出した。

$$V_{\text{対}} = \frac{L}{t} \quad (3)$$

$$V_{\text{表}} = \frac{L-x}{t} \quad (4)$$

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)

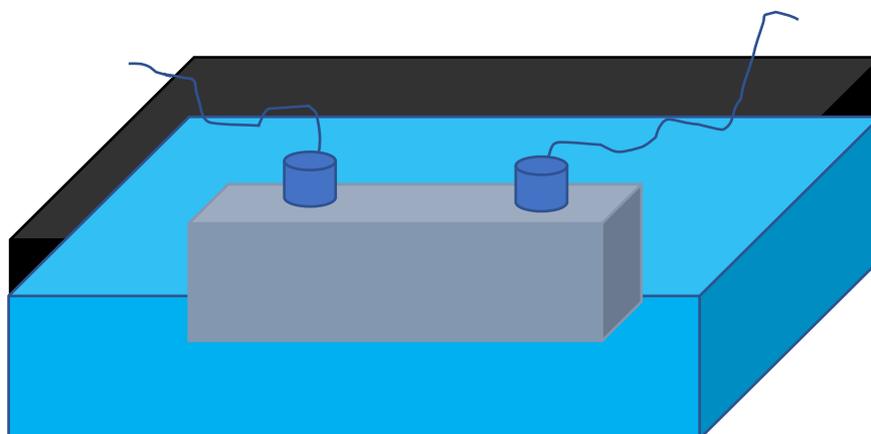
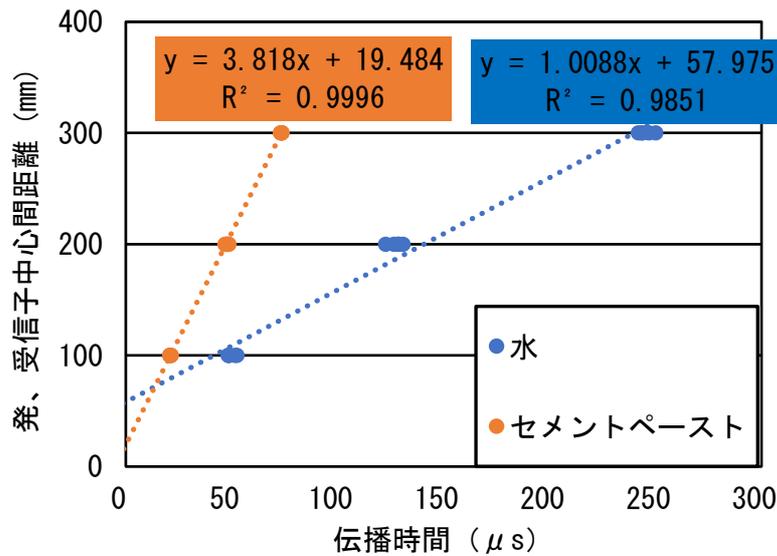


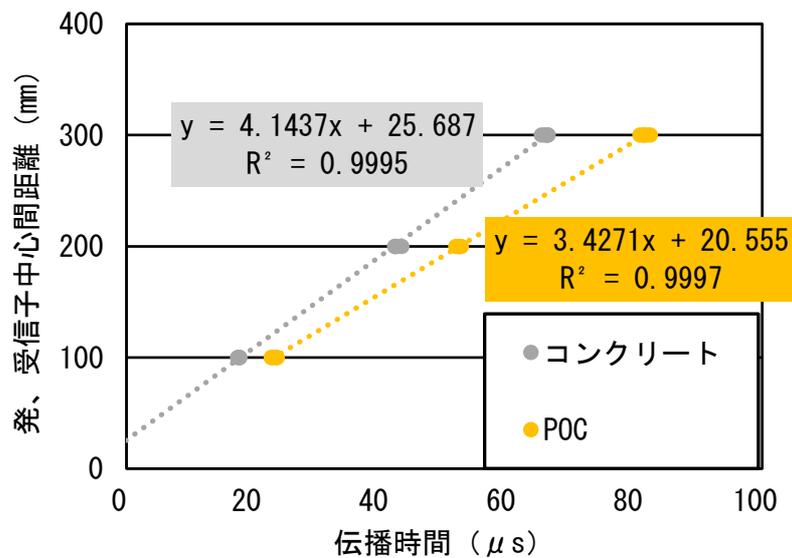
図-4.10 超音波伝播速度の水中測定の様子 (表面法)

4.3.3 実験結果および考察

図-4.11 に、発・受振子中心間距離と伝播時間の関係を示す。なお、(a)図には水とセメントペーストの場合、(b)図にはコンクリートと POC 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、水で 57mm、セメントペーストで 19mm、コンクリートで 25mm 程度、POC で 20mm 程度になり、コンクリートと POC は比較的近い値が得られた。



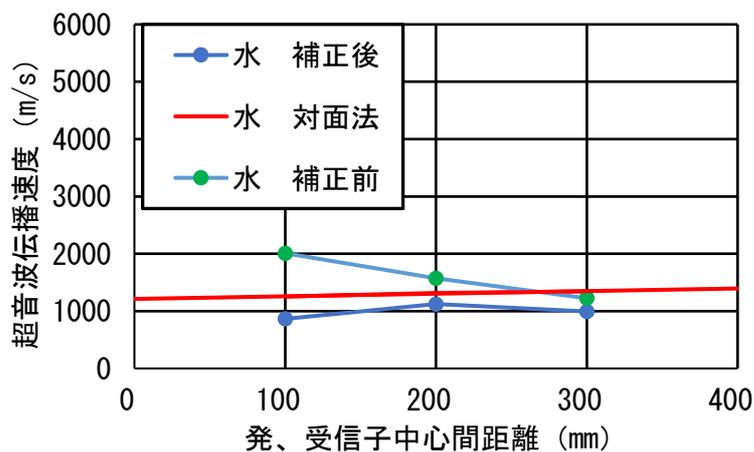
(a) 水とセメントペースト



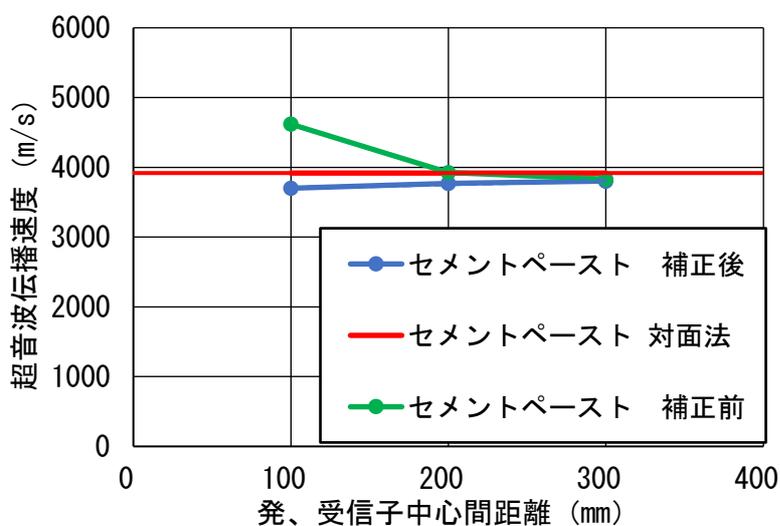
(b) コンクリートと POC

図-4.11 超音波伝播時間と発・受振子中心間距離の関係

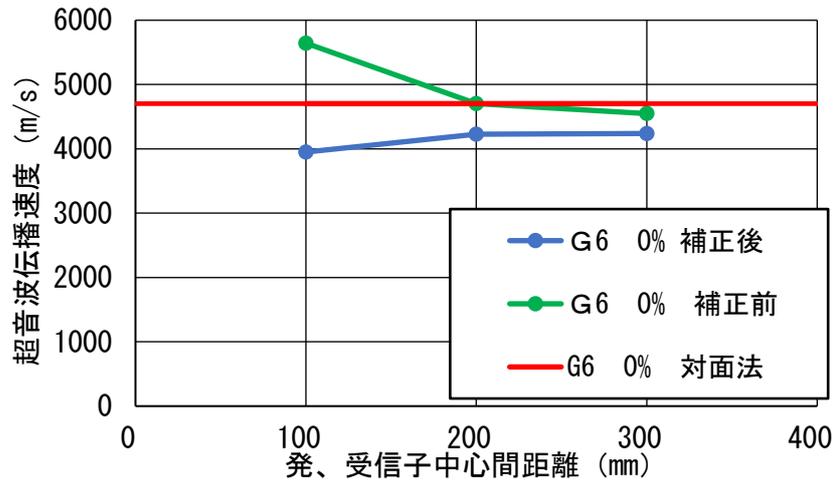
図-4.12に、超音波伝播速度と発・受振子中心間距離の関係に与える材料種類の影響を示す。なお、(a)図には水、(b)図にはセメントペースト、(c)図にはG6コンクリート、(d)図にはPOCの場合における測定結果をそれぞれ示す。図によれば、普通コンクリートとPOCにおいて、表面法による超音波伝播速度(補正後)は、対面法による伝播速度より小さいに對し、水とセメントペーストの場合はほぼ同じであることが確認された。このことから、表面法による測定では、超音波の伝播経路は、水およびセメントペーストの場合はほぼ距離がL-xの直線となるに對し、コンクリートおよびPOCの場合は直線ではなく、それより長くなることを確認できる。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短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。



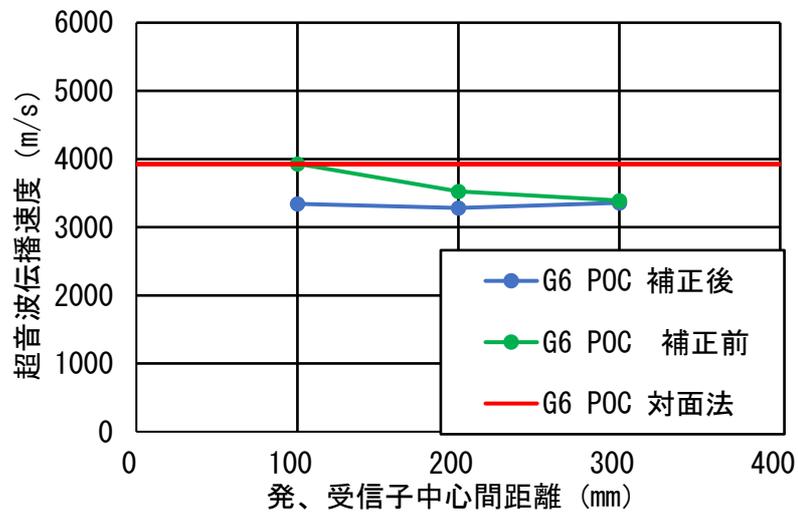
a) 水



b) セメントペースト



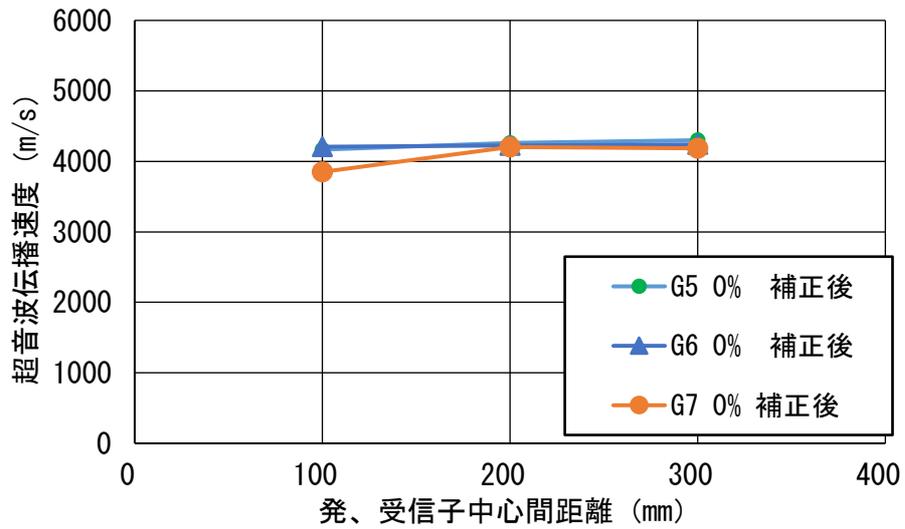
c) コンクリート



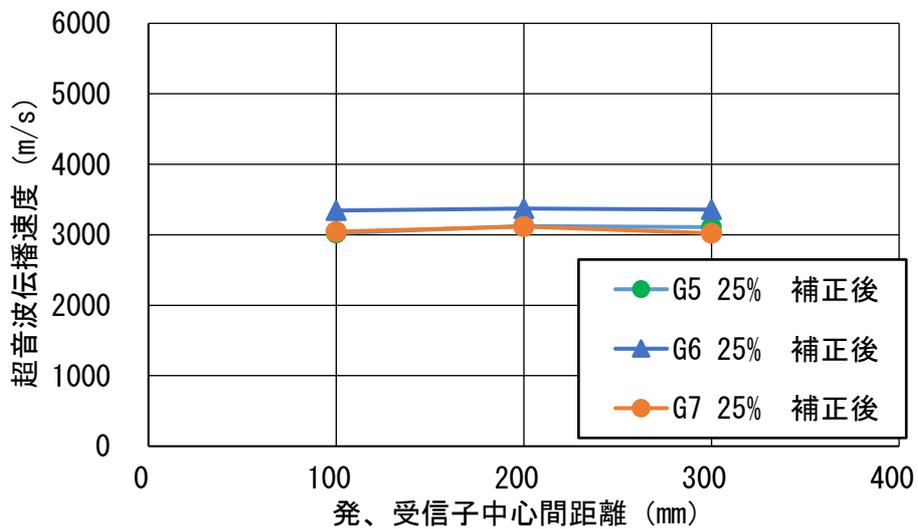
d) POC

図-4.12 発・受振子中心間距離と超音波伝播速度の関係
に与える材料種類の影響

図-4.13によると、コンクリートなどの不均質物中に、超音波の表面法で測定すると、ある深さで伝播するが確認できた。したがって、POC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確認できた。また、コンクリートによる超音波の表面法での測定値とPOCによる超音波の表面法での測定値の差がPOCの表面壁効果と予測できる。



a) コンクリート



b) POC

図-4.13 各種粗骨材の発・受振子中心間距離と超音波伝播速度の関係に与える骨材粒径の影響

4.3.4 実験IIのまとめ

実験IIから得られた知見を以下に示す。

- 1) 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。
- 2) 超音波の表面法で測定すると、セメントペースや水のような均質物中は表層で直線的な伝播するが明らかになった。コンクリートと POC 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。したがって、超音波の表面法で測定すると材料種類の影響があることが確認された。
- 3) POC 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確認できた。また、コンクリートおよび POC、各種粗骨材の発・受振子中心間距離と超音波伝播速度の関係に与える骨材粒径の影響ないと考えられた。

4.4 第4章参考文献

実験Iの参考文献

- 4-1) 日本コンクリート工学会：性能設計対応型ポーラスコンクリートの施工標準と品質保証体制の確立研究委員会報告書，日本コンクリート工学会，pp. 343，2015.6
- 4-2) エルドンオチル，三島直生，畑中重光：超音波法による POC の空隙率推定手法に関する研究，日本建築学会構造系論文集， Vol.83, No.749， pp.943-951，2018.7
- 4-3) エルドンオチル，三島直生，畑中重光：ポーラスコンクリートの超音波伝播速度に及ぼす接触媒質の影響に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集， Vol.50, No.1， pp.1365-1370， 2018
- 4-4) 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
- 4-5) 平田隆祥，魚本健人：超音波法によるコンクリートのひび割れ深さ測定における探触子の影響，第 54 回セメント技術大会講演要旨・コンクリート論文集， pp.160-161， 2000.
- 4-6) 鎌田敏郎，国枝稔，島崎磐，六郷恵哲：超音波によるポーラスコンクリートの内部組成の評価，コンクリート工学年次論文報告集， Vol.20, No.2， pp.733-738，1998

実験IIの参考文献

- 4-7) F.E.リチャート, 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
- 4-8) 大津政康：コンクリート非破壊評価のための弾性波法の理論と適用，コンクリート工学， Vol.46, No.2， pp.5~11， 2008.2
- 4-9) 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

第五章

現場実施工の普通 POC を用いた超音波法（表面法） の実用性に関する実験

5.1 実験概要

本章では、暑中期(35°C)条件で、アジテータ車によるフレッシュ POC の運搬および締固めに POC 仕上げ機を用いる実施工条件で POC スラブを作成し、実施工された POC スラブの超音波表面法の実用性について検討する。

5.2 実験方法

1) 要因と水準

表-5.1 に要因と水準を示す。日本コンクリート工学会(JCI)によるポーラスコンクリートの製造・施工指針(試案)⁵⁻¹⁾によると、練混ぜから打ち終わりまでの時間は、普通コンクリートと同様(25°C超:90分,25°C以下:120分)を標準と定められている。そこで、本実験では、POC スラブは 90 分まで打込みを行う。また、運搬時間の経過による影響を検討するため、30 分ごとに円柱供試体の作成、運搬時間 30 分、60 分、90 分でスラブへの打込みを行った。

表-5.1 要因と水準

要因	水準
運搬時間(min)	30, 60, 90
仕上げ機通過回数(回)	1, 2

2) 使用材料および調合

表-5.2 に調合表を示す。本実験では、目標フロー値を 215mm に設定し、HAE/C=0.38、実測フロー値は 206mm となった。また、POC の材料として、6 号砕石(実積率：58.6%、密度：2.685g/cm³)、普通ポルトランドセメント(密度:3.16g/cm³)および上水道水(密度：1.00g/cm³)を用いた。また、混和剤として、ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤遅延型(密度：1.04~1.22/m³)を用いた。

表-5.2 調合表

V _R (%)	W/C (-)	単位質量 kg/m ³)			HAE/C (%)
		W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	G (kg/m ³)	
25	0.3	79.8	266	1558	0.38

3) 試験体の作製方法

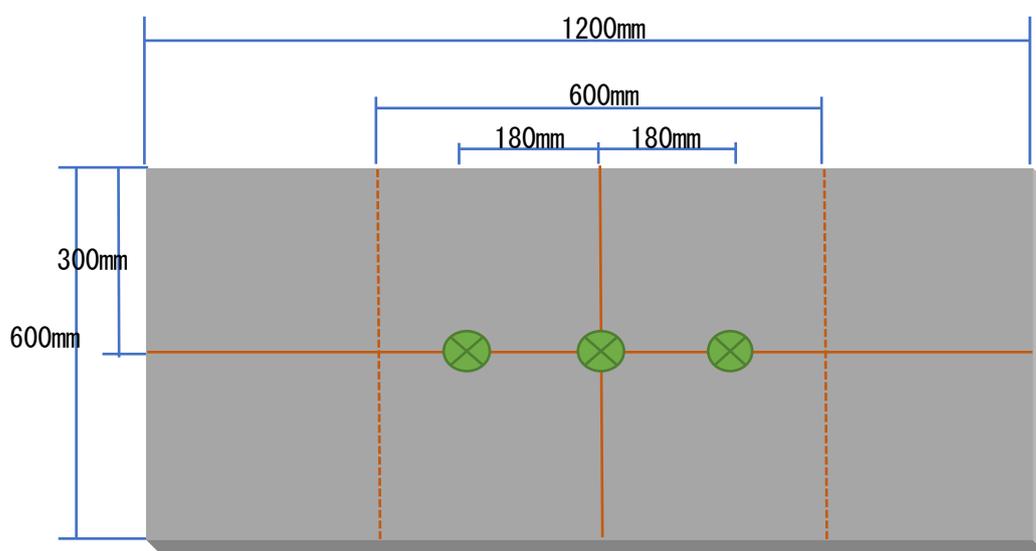
本実験では、ペースト先練り方式で練混ぜを行った。所定のセメントと水の練混ぜを行い、鋼製容器とバックホウを用いて、セメントペーストと粗骨材を練混ぜた。分に混ざったことを確認した後、アジテータ車に投入した。

POC 試験体は運搬時間 30 分毎にミキサから所定量を採取し、プラスチック製円柱供試体(φ100×200mm)に打ち込んだ。この際、所定の目標空隙率に近い試験体を作成するため、調合表より型枠の容積に応じた POC の質量を算出し、所定量を計量しながら打込みを行った。

POC スラブは施工区画を改良土とし、プレートコンパクタで振動締固めを行った。また、施工区画(1200×3600×100mm)にフレッシュ POC を投入後レーキで敷均しを行い、POC 仕上げ機の通過により締固めを行った。POC 仕上げ機の形状から敷き均し幅を 1.2m とし、要因の敷均し長さは POC 仕上げ機の形状から 0.6m とし、安定した締固めが行えるようにした。図-5.1 には、実施工された POC スラブのコア抜き位置を示す。コアの採取する際は、各仕上げ条件の施工範囲の中央付近から採取した。コアおよび円柱試験体は各 3 本作成した。



a) コア抜き場所



b) 試験体の寸法

図-5.1 コア抜き位置

4) 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)⁵⁻¹⁾に準拠して、コア試験体で、打設後から13日目抜き出したコア供試体で、コア供試体の超音波法-対面法を5回行い、円柱供試体は材齢16日、17日に空隙率を5回測定した。

表面法の測定は、打設後から3日と13日目、POCスラブ試験体の打込み面において、超音波発・受振子(直径50mm、周波数50kHz)の中心間距離が300mmとなるコア抜き位置で横と縦両方5回行った。また、コア抜き試験体に対面法で5回行った。

5) 超音波伝播速度の測定

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(5-1)により算出した。なお、超音波伝播速度の測定は、材齢14日において、超音波測定法の対面法を行った。

$$V = L / T \quad (5-1)$$

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)

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⁴⁾を参考に、式(5-2)を用いて行った。

$$L' = (L - x)(1 + \alpha) \quad (5-2)$$

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

なお、表面法による超音波伝播速度の測定は、材齢14日において、現場施工されたPOCスラブのコア抜き位置に発・受振子の中心間距離300mmの所で縦と横を二つ方向で超音波測定法を行った。

6) 超音波法による空隙率の推定

超音波法による空隙率の推定は、式(5-3)を用いて超音波法による空隙率の推定した。

$$V_R = \sqrt{\frac{B - V_{POC}}{1.7}} \quad (5-3)$$

ここに, V_{POC} : 超音波伝播速度,

B : $V_R=0\%$ の超音波伝播速度

5.2 実験結果および考察

図-5.2に通過回数と実測空隙率（質量法）の関係を示す。ず図によれば、実測空隙率はバラツキがあるものの運搬時間と通過回数に関わらず、設計空隙率の $\pm 5\%$ の範囲内に収まっている。

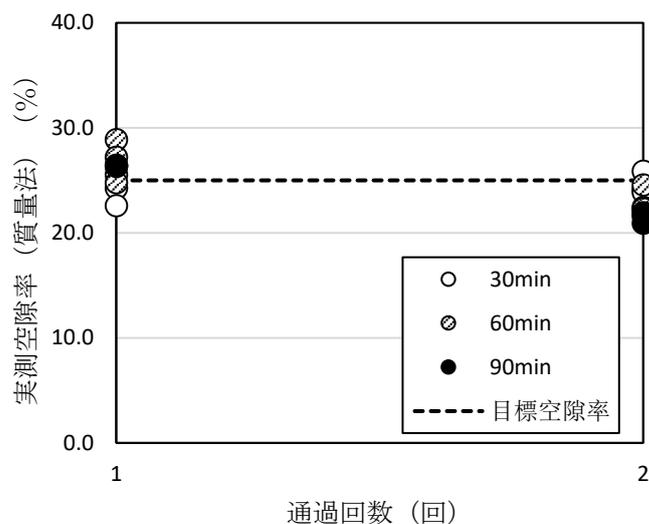


図-5.2 通過回数と実測空隙率（質量法）の関係

図-5.3には、質量法による全空隙率と超音波法による推定空隙率の比較を示す、推定空隙率と質量法による全空隙率がほぼ同じになる。この結果によれば、本実験で提案された超音波法を用い、現場施工 POC の空隙率を推定可能であることが確認された。

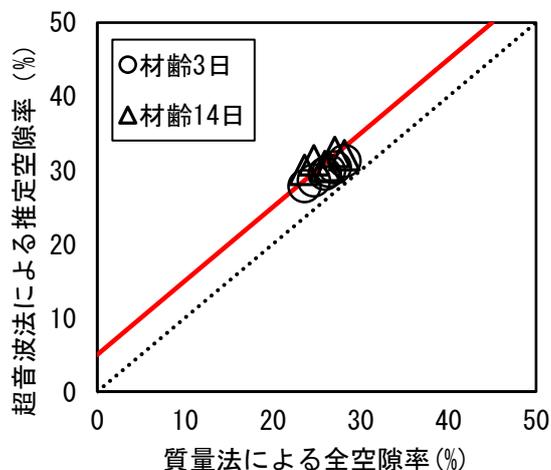


図-5.3 質量法による全空隙率と超音波法による推定空隙率の比較

5.3 まとめ

本章では、現場施工された POC スラブに超音波を用い、現場施工 POC の空隙率を推定可能であることが確認された。

したがって、POC の舗装現場には、POC の超音波伝播時間を測定していれば、超音波伝播経路の長さを推定することができる。また、超音波伝播時間および超音波伝播経路の長さを得られたら、引き続き超音波伝播速度と空隙率関係から現場施工 POC の空隙率を推定が可能になった。

第5章の参考文献

- 5-1) 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, 2015.7

第六章 総括

6.1 本研究の総括

第1章 序論では、本研究の背景として、POCの概説および品質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の結合材の特性、POCの力学特性、超音波法およびPOCの品質管理に関する既往の研究を取りまとめた。

第3章 各種結合材を用いたPOCの超音波速度と空隙率の関係に関する実験では、各種結合材（普通、高強度、ジオポリマー）および各種骨材（5号、6号、7号）をもちいたPOCの超音波伝播速度と空隙率の関係について検討した。その結果、POCの超音波伝播速度と空隙率の関係は、各種結合材および骨材の影響を受けるものの、相関係数の高い二次関数で表示できた。

第4章 超音波法（表面法）による普通POCの空隙率推定に関する実験では、接着媒質の影響、POC中の超音波伝播経路については、普通POCで超音波法（表面法）を行い、超音波法（表面法）による普通POCの空隙率推定に関して検討を行った。その結果、POCの超音波法（表面法）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。

第5章 現場施工された普通POCスラブにおいて超音波法（表面法）の実用性に関する実験では、第4章の超音波法（表面法）による普通POCの空隙率推定方法を用い、現場施工されたPOCスラブの空隙率の推定の可能性を検討した。その結果、超音波法（表面法）による実施工されたPOCスラブの空隙率を概ね推定可能であることが確認された。

第6章では、本研究の内容をまとめ、今後の課題を述べた。

6.2 今後の課題と展望

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 の超音波伝播速度と空隙率関係に関する実験については、今後超音波速度に大きく影響を与ると考えられる超音波測定機の発振子および受振子のパルス発生面積の大きさなど、要因を増やしたより広範囲な測定を行い、精度を高めたい。
- 2) POC 特有の形状の複雑さから、超音波伝播速度と空隙率関係の解析に関しては多くの課題が残されている。より現実的かつ高精度な結果を得るために、今後は三次元化した検討が望まれる。また、今後は表面法に関する三次元化検討も必要である。

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）に心からの感を申し上げます。

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）川口淳先生（三重大学大学院准教授）に深く感謝いたします。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山本貴正先生（愛知工業大学准教授）、川崎佑磨（立命館大学准教授）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E RIDENGAOQIER氏、五百蔵沙耶氏、森下拓海氏（いずれも三重大学大学院生）の助力を得ました。

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）の助力をいただきました。

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（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。

工学部研究生、大学院博士前期を含め3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、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家族と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。